



聯合國糧食
及農業組織



正瀚生技
股份有限公司

翻譯與印贈

非賣品

全球土壤再固碳

推薦管理措施之技術手冊

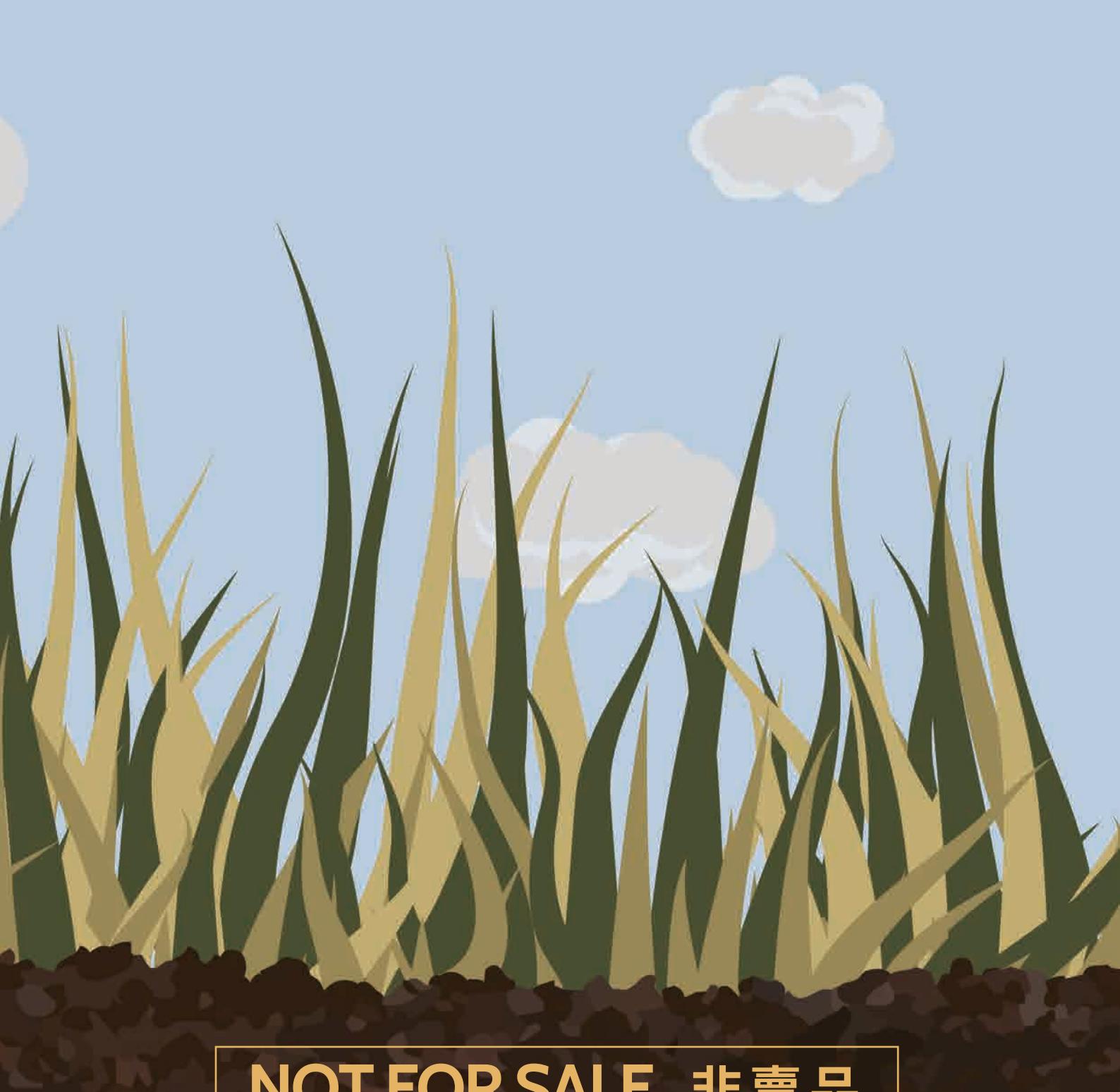


第 2 冊

土壤有機碳的 熱點與亮點

itps
政府間土壤技術委員會





NOT FOR SALE 非賣品

聯合國糧食及農業組織2021年9月出版
正瀚生技股份有限公司2022年3月翻譯與印刷

本中文譯本非由聯合國糧食及農業組織（FAO）所製作，乃由正瀚生技負責翻譯
製作，FAO 對此譯本中文表達的準確性不具責任，準確性以 FAO 英文原版為主。



正瀚生技股份有限公司
CH Biotech R&D Co., LTD.

540 南投縣南投市文獻路89號

No. 89, Wenxian Rd., Nantou City, Nantou County 540, Taiwan (R.O.C.)

TEL: +886-49-7009198 E-mail: info@chbio.com.tw <https://www.chbio.com.tw>

第 2 冊

全球土壤再固碳 推薦管理措施之技術手冊

土壤有機碳的熱點與亮點

聯合國糧食及農業組織
羅馬，2021 年

引用出處：

聯合國糧食及農業組織（FAO）及政府間土壤技術委員會（ITPS），2021。《全球土壤再固碳 - 推薦管理措施之技術手冊》。第2冊：土壤有機碳的熱點與亮點。羅馬，FAO。<https://doi.org/10.4060/cb6378en>

本資訊產出所使用的名稱及材料的呈現，並不代表聯合國糧食及農業組織（FAO）對任何國家、領土、城市、地區或其當局的邊界或界線劃定之法律或發展狀況，表示任何意見。具體提及的公司或製造商的產品，無論是否已取得專利，都不代表這些是FAO認可或推薦的產品，或優先於未提及的其他類似性質的產品。

本資訊產出所陳述的觀點為作者的觀點，並不全然反映FAO的觀點或政策。

ISBN 978-92-5-134837-6
© FAO, 2021



保留部分權利。本著作採用創用（Creative Commons）姓名標示 - 非商業性 - 相同方式共用 3.0 IGO 許可（CC BY-NC-SA 3.0 IGO；<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/legalcode>）。

根據本許可條款，本著作可為非商業目的進行複製、再散佈和改編，但須適當註明出處。使用本著作時，不應暗示FAO支持任何特定的組織、產品或服務，亦不允許使用FAO的標誌。若改編本著作，必須採取相同或同等的創用授權條款。若翻譯本著作，必須包括以下免責聲明以及引用出處：「本譯本非由聯合國糧食及農業組織（FAO）所製作，FAO對此譯本的內容或準確性不具責任，以原文版本為主版本。」

除了此處的規範，若本條款項下產生的爭議無法以友好的方式解決，將透過本條款第8條所述的調解和仲裁方式解決。適用的調解規則為世界智慧財產權組織（World Intellectual Property Organization）的調解規則 <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>，任何仲裁將按照聯合國國際貿易法委員會（UNCITRAL）的仲裁規則進行。

第三方材料。使用者希望重新使用本著作中屬於第三方的材料，例如表格、圖樣或照片，應自行負責確定是否需要獲得許可，並從獲得版權所有者許可後才能重新使用本著作。因侵犯本著作中任何屬於第三方的材料而產生的索賠風險，由使用者完全承擔。

銷售、權利和許可。FAO相關資訊產品可在FAO網站（www.fao.org/publications）或透過publications-sales@fao.org購買取得。進行商業目的使用請來信至：www.fao.org/contact-us/licence-request。有關權利和許可的問題請來信至：copyright@fao.org。

中文版序

為了促成全球永續發展，減緩與調適氣候變遷所帶來的影響，全球經濟大國紛紛加速推動 2050 年「淨零碳排」，台灣亦已於 2021 年加入淨零碳排的行列。有了方向與目標，各國陸續提出具體執行方案，企圖減少各領域與各類別的溫室氣體排放。

土地具備關鍵的固碳功能，土壤有機碳管理已是多項聯合國永續發展目標（SDGs）的關鍵組成。然而，為了推動永續土壤管理，必須提供公認且可行的土壤管理措施，讓土壤「固碳」及衍生的「碳匯」，能順利接軌未來的「碳權」交易市場。

聯合國糧食及農業組織（FAO）歷經了四年多的醞釀與發展，號召世界各地 400 多位土壤管理專家參與編撰，於 2021 年 9 月出版《全球土壤再固碳：推薦管理措施之技術手冊》。這套技術手冊全套共六冊，FAO 首度以標準化形式，蒐集各種環境（耕地、草原、森林、濕地及城市土壤等）的主要土壤管理措施對於土壤有機碳的影響，並且透過實際案例分析這些措施的優點、缺點與可行性，是一套全方面的工具書，非常值得參考與借鏡。

正瀚生技在去年 9 月這套書一發表時，就決定印製中、英文版各 3,000 套，全力推廣這套國際認可的土壤固碳工具書，免費致贈給關心台灣永續發展與土地健康的人士。我們於今年 1 月完成英文版套書的印製，並陸續進行推廣中。

為了消除語言隔閡、讓這套工具書的效應擴散至農業各領域與各階層的相關從業人員，正瀚生技戮力投入全套書籍的中文化，由 10 位碩、博士級研發人員組成團隊，歷經三個多月、超過 3,000 個小時，完成中英校對、中文潤稿、專有名詞審閱、版面編排等工作。

由於本套書內容涉及科學專業，為了讓讀者易於查詢，我們特別羅列與編排了 2,300 多字的「中英詞彙對照」，涵蓋學術詞彙、生物物種名稱、土壤專有名詞等。此外，我們也將免費開放線上資源、提供中文版電子書下載。中文化過程中，感謝各界專家學者給予我們建議，全套書籍原文將近 45 萬字，中譯本可能有疏漏不足之處，敬請不吝指教。

正瀚生技身為農業新藥研發公司，希望藉由印贈 FAO 這套書籍的中、英文版，讓台灣各界明白國際認可的操作方法、共同促進台灣邁向淨零碳排。正瀚生技也將根據全球永續發展目標以及農產業的轉型趨勢，以國際認可的減碳知識與技能，精準設計及開發創新產品，瞄準提升作物利用效率、提高作物品質與產量，並且減少田間溫室氣體排放、增加土壤有機碳固存。

我們希冀一步步將台灣農業生技的研發能量導入國際市場，提高台灣在全球農業的影響力以及促成全球農業的永續發展，保障人們有優質高質的糧食安全，落實正瀚生技「生根台灣，走向世界」的使命。

正瀚生技股份有限公司
董事長

A handwritten signature in black ink, reading '吳正鄉' (Wu Zheng), positioned to the right of the company's name.

目錄

1. 森林	1
1. 定義與說明	2
2. 全球熱點分布	3
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	3
4. 森林保育對提供特定生態系統服務的重要性	6
5. 挑戰和趨勢概況	10
參考文獻	16
2. 热帶潤濕森林	19
1. 定義與說明	19
2. 全球熱點分布	20
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	20
4. 热帶潤濕森林保育對提供特定生態系統服務的重要性	24
5. 挑戰和趨勢概況	27
參考文獻	30
3. 濕地	37
1. 定義與說明	37
2. 全球熱點分布	38
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	39
4. 濕地保育對提供特定生態系統服務的重要性	41

5. 挑戰和趨勢概況	44
參考文獻	47
4. 泥炭地	56
1. 定義與說明	56
2. 全球熱點分布	57
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	58
4. 泥炭地保育對提供特定生態系統服務的重要性	59
5. 挑戰和趨勢概況	60
6. 一般建議	62
參考文獻	63
5. 紅樹林	67
1. 定義與說明	67
2. 全球熱點分布	68
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	68
4. 紅樹林保育對提供特定生態系統服務的重要性	71
5. 挑戰和趨勢概況	72
參考文獻	74
6. 黑土	79
1. 定義與說明	79
2. 全球熱點分布	80
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	81
4. 黑土保育對提供特定生態系統服務的重要性	81
5. 黑土的挑戰和趨勢概況	85
參考文獻	90

7. 草原	94
1. 定義與說明	94
2. 全球熱點分布	95
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	96
4. 草原保育對提供特定生態系統服務的重要性	98
5. 挑戰和趨勢概況	100
參考文獻	103
8. 山地土壤	107
1. 定義與說明	107
2. 全球熱點分布	108
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	109
4. 山地土壤保育對提供特定生態系統服務的重要性	112
5. 挑戰和趨勢概況	115
6. 對熱點地區的一般建議	116
參考文獻	119
9. 永凍土	130
1. 定義與說明	130
2. 全球熱點分布	132
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	133
4. 永凍土保育對提供特定生態系統服務的重要性	140
5. 挑戰和趨勢概況	143
6. 相關專有名詞	145
參考文獻	146

10. 旱地	151
1. 定義與說明	151
2. 全球熱點分布	152
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	154
4. 旱地保育對提供特定生態系統服務的重要性	169
5. 挑戰和趨勢概況	170
參考文獻	173
11. 科技土和都市土壤	182
1. 定義與說明	182
2. 全球熱點分布	183
3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力	183
4. 都市土壤保育對提供特定生態系統服務的重要性	187
5. 挑戰和趨勢概況	190
參考文獻	194
附錄	197
附錄 1. 热帶潤濕森林 – 補充文件	197
附錄 2. 山地土壤 – 補充文件	230
附錄 3. 旱地 – 補充文件	244

表目錄

表1. 土壤威脅	7
表2. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	15
表3. 非洲、美洲和亞太地區未受干擾的成熟熱帶潤濕森林之土壤有機碳庫存 (噸碳 / 公頃) 估計值 (平均值 + 標準差)	22
表4. 未受干擾的森林轉換為耕地、牧場和植栽用途後的土壤碳庫存變化	23
表5. 熱帶地區土地利用類型中土壤碳庫存的變化	24
表6. 濕地土壤有機碳庫存 (質量或單位面積質量) 和碳固存率 (每年質量或每年單位面積質量)	39
表7. 土壤威脅	42
表8. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	46
表9. 泥炭地土壤有機碳庫存報告	58
表10. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	62
表11. 紅樹林的土壤有機碳庫存和年度碳累積或排放量報告	69
表12. 土壤威脅	71
表13. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	73
表14. 世界土壤參比分類系統中黑鈣土、栗鈣土和黑土 (Phaeozems) 等級的黑土 · 在 30 公分土層的土壤有機碳總庫存和平均庫存	81
表15. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	89
表16. 牧草地和放牧地的土壤碳固存潛力	97
表17. 土壤威脅	98
表18. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	102
表19. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	118
表20. 永凍土的土壤有機碳庫存報告	134
表21. 按照乾燥指數定義的全球旱地面積 (依不同地圖來源)	154
表22. 依照乾燥程度、溫度狀況 (temperature regime) 與地貌劃分旱地的總面積和土壤有機碳含量	155
表23. 各土地利用類別的旱地總面積與土壤有機碳庫存 (依照乾燥指數與溫度等級來劃定)	158

表24. 依照乾燥指數和退化係數劃分的退化旱地面積	163
表25. 按照乾燥指數劃分，在非慣行農業和畜牧業系統下，全球潛在復育土壤有機碳量（深度 30 公分），以每年與實行 20 年後來計算	166
表26. 每年和實行後 20 年後的全球旱地潛在復育土壤有機碳量（深度 30 公分）	167
表27. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	172
表28. 採樣美國紐約市深度 0~100 公分細質土部分的燃燒灰土和人工土之土壤有機碳庫存	184
表29. 採樣於美國紐約市深度 0~100 公分工程廢棄土的土壤有機碳庫存	185
表30. 採樣於美國紐約市深度 0~100 公分人工土的土壤無機碳庫存	186
表31. 土壤威脅	187
表32. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究	193
表33. 擬定的山脈和山塊 (massifs) 中土壤有機碳庫存資料，與相對應的文 數量、研究的土壤深度，以及碳庫存計算時是否有考慮土壤有機層等	230
表34. 根據 IPCC (2019) 的公式 2.24，在世界不同的旱地中，透過慣行和 非慣行措施 (h)，在代表性的參照情況 (HA \gg F) 下的耕地 (C)、 草原 (G) 和森林 (F) 中，所造成的壤有機碳變化率 (ΔSOC) 與土壤有機碳增加係數 (ΔF)	244

圖目錄

圖1. 2020 年依照氣候帶區分的全球森林面積比例和分布 (FAO, 2020b)	3
圖2. 2020 年森林碳庫中的碳庫存比例 (FAO, 2020b)	4
圖3. 在 20 條減緩氣候變化的自然途徑中，森林途徑提供了在 2030 年前， 將暖化控制在 2°C 以下所需之 2/3 以上的具有成本效益之減緩 (改編自 Griscom et al., 2017)	5
圖4. 林業最具成本效益的溫室氣體減排方法摘要 (改編自 IPCC, 2014)	9
圖5. 1992~2015 年間全球樹木覆蓋面積趨勢 (FAO and UNEP, 2020)	11
圖6. 依地區劃分的 1990~2020 年間之森林面積淨變化 (FAO and UNEP, 2020)	11
圖7. 1990~2020 年間每年的森林擴展率和砍伐森林率 (FAO, 2020)	12
圖8. 2000~2012 年間依氣候區劃分的部分冠層覆蓋損失之估計面積 (FAO, 2015)	13
圖9. 熱帶潤濕森林的分布位置 (黃色標示區域) [國家地理 (National Geographic) / 世界野生動物基金會 (World Wildlife Fund)]	20
圖10. 全球湖泊與濕地的分布	38
圖11. 天然健康泥炭地所提供之生態系統服務 (FAO, 2020)	57
圖12. 來自 PEATMAP 的全球泥炭地分布圖 (Xu et al., 2018)	57
圖13. 為進行農業、種植或其他開採活動而用運河疏通泥炭地因而產生的影響 (FAO, 2020)	61
圖14. 紅樹林的全球分布 (沿海地區的深綠色陰影) (Giri et al., 2011)	68
圖15. 黑土帶來的多種好處	84
圖16. 黑土面臨的主要挑戰	87
圖17. 2010 年全球作物種植和放牧之分布 (A) 和模擬土壤有機碳在頂部兩公 尺的變化 (B)	96
圖18. 草原固存潛力的限制因素 (Adapted from Sanderman, Farquharson and Baldock, 2010)	101
圖19. 表 33 中所列文獻資料的樣區位置之地圖 (附錄 2)	109

圖20. 永凍土的垂直結構圖，由活凍層、永凍土〔包括地面冰，如冰楔（ice wedges）〕，以及非冰凍部分（稱為不凍層）所構成	131
圖21. 北半球永凍土的範圍	132
圖22. 陸地碳庫存和大氣碳與永凍土區儲存碳之關係	136
圖23. 至 2100 年前最上層 3 公尺的永凍土面積變化之預測（X 軸）	138
圖24. 永凍土對例如氣候暖化、人類干擾或更多的野火的反應，即是隨地面冰的融化而退化	
圖25. 根據乾燥程度和其他標準（由資訊來源所使用）所製成的世界旱地分布圖	144
圖26. 全球旱地土壤有機碳儲存的規模和分布概況（至深度 30 公分）	153
圖27. IPCC (2019) 方法的概念框架	157
圖28. 在非慣行措施處理的土壤，以及經過慣行措施處理的土壤（即參照土壤），在 20 年內的土壤有機碳絕對增加量（噸 / 公頃），根據附錄 1 中的相關資料所估算	161
圖29. 經在非慣行措施處理的土壤，以及經慣行措施處理的土壤（即參照土壤），在 20 年內的土壤有機碳的相對增加量（基準係數），根據附錄 1 中的相關資料所估算	164
圖30. 在全球排放的背景下，旱地的土壤有機碳固存情況	
圖31. 從太空中所見的地球夜景，燈光亮點顯示城市的範圍，美國國家航空暨太空總署地球觀測站（NASA Earth Observatory）（NASA, 2012）	183

照片目錄

照片1.	加拿大卑詩省 (British Columbia) Dakota Bowl 之原始山地溫帶雨林 (montane temperate rainforest)	14
照片2.	迦納的潤濕森林。上圖：Bobiri 保護區；下圖：Birim 森林保護區	29
照片3.	迦納 Ankasa 保護區的雨林	29
照片4.	北美洲中部的草原壺穴地區 (Prairie Pothole Region) (鍋穴) 的天然草原 (左) 和耕地 (右) 中的濕地。天然濕地比起受人類活動 (如排水和耕犁) 影響的濕地，儲存了更多的土壤有機碳。	45
照片5.	北美洲中部的草原壺穴地區之牲畜的水源為濕地，同時濕地用於放牧	45
照片6.	美國佛羅里達州薩尼貝爾島 (Sanibel Island) 丁達林國家野生動物保護區 (Ding Darling National Wildlife Refuge) 潮間帶的黑皮紅樹 (<i>Avicennia germinans</i>) 和美國紅樹 (<i>Rhizophora mangle</i>)	73
照片7.	巴西南部彭巴草原生物群落中黑鈣土 (Chernossolo) (A) 、變性土 (Vertissolo) (B) 和新成土 (Neossolo) (C) 的概況及相關地景	88
照片8.	勃朗峰 (海拔 4810 公尺，義大利西北部阿爾卑斯山脈) 南坡海拔 2600 公尺處的新成黑瘠灰壤 (Entic Umbric Podzol)	110
照片9.	位於義大利中部亞平寧山脈高山海拔帶，淺層、多石但富含有機碳的黑色石灰岩薄層土 (Rendzic Leptosol)	110
照片10.	沿著坤布山谷 (Khumbu Valley) 的一個緩坡 (海拔 5065 公尺，尼泊爾)，其特點是富含碳的變育低鹽基砂質土 (Brunic Dystric Arenosol) [風成的 (Aeolic)，不連續的 (Raptic)]	111
照片11.	烏干達西南部布恩迪國家公園 (Bwindi National Park) 中被熱帶山地雨林覆蓋的陡坡以及附近的耕地	112
照片12.	上圖：烏干達西南部基索羅區 (Kisoro District) 森林砍伐後之脆弱的與受侵蝕的山坡 [布恩迪山脈 (Bwindi mountains)，背景是維龍加火山群 (Virunga Volcanoes)]。下圖：肯亞埃爾格約馬拉奎特郡 (Elgeyo-Marakwet County) 大裂谷懸崖 (Rift Valley escarpment) 沿線最近被砍伐的山坡遭受擴散式侵蝕 (Diffused erosion)	114
照片13.	坦尚尼亞東北部位於東部弧形山脈 (Eastern Arc mountains) 之帕雷山脈 (Pare Mountains) 的混農林業	117
照片14.	Kisimiri Chini [坦尚尼亞阿魯沙區 (Arusha District) 梅魯火山 (Mount Meru)] 當地過度放牧造成的侵蝕	117
照片15.	墨西哥夸特羅謝內加斯 (Cuatro Ciénegas) 的紫花苜蓿灌溉，其不佳的水份管理導致土壤失水或鹽化	171
照片16.	玻利維亞奧魯羅 (Oruro) 之安第斯山脈中部的乾冷高原 (Central Andean Dry Puna)，利用原生草原餵養綿羊和駱駝科動物	171

照片17. 人類改變和人類運輸材料類別之燃燒灰土的土壤剖面。美國紐約市布朗克斯區

範可蘭公園 (Van Cortlandt Park) 的莫紹魯土系 (Moshulu soil series) ·

其內含有 508.93 噸土壤有機碳 / 公頃

191

照片18. 人類運輸材料類別之人工土的土壤剖面。美國紐約市皇后區法拉盛草原

(Flushing Meadows) 的拉瓜地亞土系 (Laguardia soil series) · 其內含

有 612.2 噸土壤有機碳 / 公頃和 32.05 噸土壤無機碳 / 公頃

191

照片19. 人類運輸材料類別之產業廢物土的土壤剖面。美國紐約市中央公園的北草原土

系 (North Meadow soil series) · 其內含有 364.91 噸土壤有機碳 / 公頃

192





森林

1. 森林

Cindy Prescott, Sue J. Grayston

Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver, Canada

加拿大英屬哥倫比亞大學森林學院

1. 定義與說明

森林 (forest) 是指面積超過 0.5 公頃、樹木高於五公尺且冠層覆蓋度 (canopy cover) 超過 10% 的土地，或者在這些地方有潛力達到上述標準的樹林 (FAO, 2020a)。因砍伐、收穫或干擾而暫時無樹木的林地，以及人工植栽樹木 (tree plantation) 也屬於森林的一種，除非樹木是植栽在以農業為主的系統中，否則不算森林 (FAO, 2020a)。另外，以農業或城市土地利用 (land use) 為主的土地，即便可能有一些樹木覆蓋，仍不屬於森林。

全球森林面積為 40.6 億公頃，佔土地總面積的 31% (FAO, 2020b)，其中仍至少有 11.1 億公頃的原始森林 (primary forest) –由本地物種組成的森林，其中沒有明顯的人類活動跡象，生態過程 (ecological process) 也沒有受到嚴重干擾 (FAO, 2020b)。全球有超過 20.5 億公頃 (大於 50%) 森林被納入長期管理計畫中 (FAO, 2020b)。

大約有 11.5 億公頃的森林主要為生產木材和非木材森林產物 (Non-Wood Forest Products, NWFP) 而受到管理，其中 7.49 億公頃被指定為多用途，通常用於生產目的 (FAO, 2020b)。人工造林 (plantation forest) 比例佔比最高的是南美洲 (佔森林總面積的 2%)，最低的則是歐洲 (佔森林總面積的 0.4%)，幾乎一半 (44%) 的人工造林是由引進的物種 (introduced species) 所組成。但全球的情況不盡相同，南美洲的人工林幾乎完全由外來種所組成，而北美洲與中美洲的人工林則以本地種為主 (FAO, 2020b)。

2. 熱點的全球分布

森林覆蓋全球 40.6 億公頃的土地，佔土地總面積的 31%；世界森林大部分屬於熱帶 (tropical) 地區 (45%)，其次是寒帶 (boreal) (27%)、溫帶 (temperate) (16%) 和亞熱帶 (subtropical) 地區 (11%) (FAO, 2020b)。



圖 1. 2020 年依照氣候帶區分的全球森林面積比例和分布 (FAO, 2020b)

熱帶森林有最高的可用材積 (available timber volume) (121 立方公尺 / 公頃)、最高的碳儲量 (carbon storage) (91 噸 / 公頃) 以及最高的物種多樣性 (species diversity)；而寒帶森林在上述三種指標皆最低 (Kappen et al., 2020)。溫帶森林則擁有最小的生物群系 (biome) (佔森林總面積的 15%)，但在全球的林產品 (forest product) 收穫中有很龐大的比例 (29%) 是來自溫帶森林 (Kappen et al., 2020)。

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

世界森林的總碳庫存 (carbon stock) 為 6620 億噸 (662 gigatonnes, Gt)，森林的平均碳密度 (carbon density) 為 163 噸 / 公頃 (FAO, 2020b)。全球森林的平均碳密度為 74 噸 / 公頃，其中熱帶森林的平均碳密度最高 (91 噸 / 公頃)，溫帶森林居中 (53 噸 / 公頃)，寒帶森林則最低 (41 噸 / 公頃) (Kappen et al., 2020)。南美洲、西非與中非擁有碳密度最高的森林，僅就活體生物量 (biomass) 而言，每公頃的活體生物量就儲存了約 120 噸的碳。一般而言，44% 的森林碳存在於活體生物量中 (地上部與地下部生物量的碳含量為 2960 億噸)，土壤有機質 (soil organic matter) 中則有最高比例的森林碳 (45%)，枯木 (dead wood) 與枯枝落葉 (litter) 中有 10% 的森林碳 (圖 2)。土壤碳庫存 (包括枯枝落葉) 在寒帶森林 (2020 億噸，佔生態系統碳庫存的 70%) 和溫帶森林 (690 億噸，60%) 的生態系統碳庫存中所佔比例最高，但僅有 30% 的生態系統碳庫存在熱帶森林中 (1550 億噸) (Pan et al., 2011)。

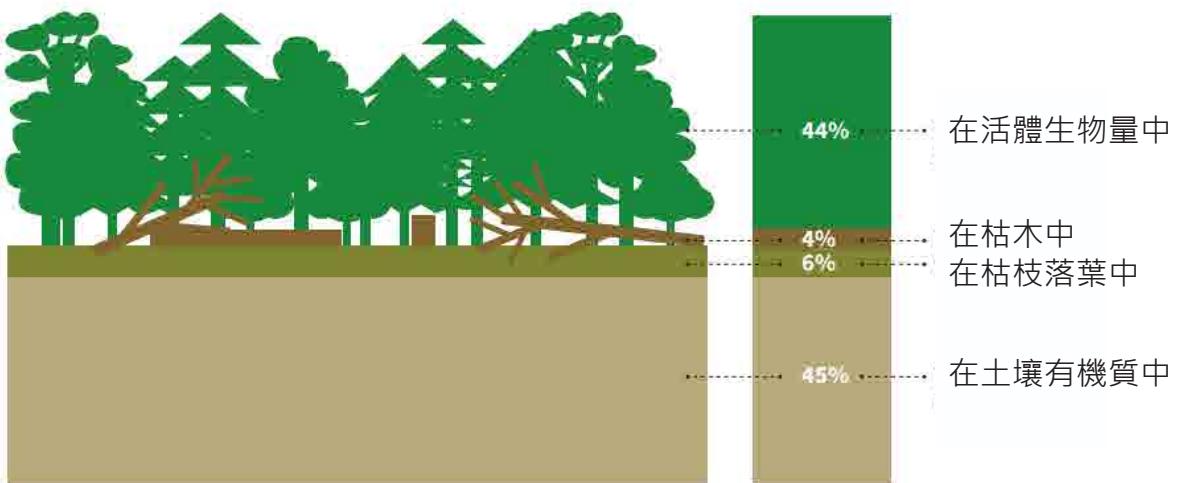


圖 2. 2020 年森林碳庫中的碳庫存比例 (FAO, 2020b)

全球森林的總碳庫存從 1990 年的 6680 億噸下降到 2020 年的 6620 億噸；與此同時，碳密度則從 159 噸 / 公頃增加到 163 噸 / 公頃 (FAO, 2020b)。

全球的植被 (vegetation) 目前儲存了約 4500 億噸的碳，但如果土地利用中沒有非林地 (non-forest land)，便可以儲存約 9160 億噸 (Erb et al., 2018)。砍伐森林 (deforestation) 和其他形式的地表覆蓋轉換 (land-cover conversion) 造成現存及潛在的生物量存在約 55% 的庫存差異，剩下的 45% 來自於被管理的生態系統，其中實際生物量只佔每單位面積潛在生物量的 60~69%。在管理引起的生物量庫存差異中，森林管理佔 2/3，放牧佔 1/3，這些被管理的生態系統的額外碳儲量潛力約為 3960 億噸。

透過減少砍伐森林、在被砍伐的森林中再造林 (reforest)、將被砍伐的林地植樹造林 (afforest)、恢復退化的土地，以及透過森林管理增加現有森林的碳庫存，都可以增加森林的碳儲量。在全球範圍內，減少砍伐森林、植樹造林和改善森林管理，每年可額外固存 (sequester) 38 億噸的碳，其中約 16 億噸碳是由於減少砍伐森林而封存 (Nabuurs et al., 2007)。在 20 條緩解 (mitigate) 氣候變化的自然途徑中，森林途徑提供了將暖化控制在 2°C 以下所需之 2 / 3 以上的具有成本效益之減緩 (Griscom et al., 2017 · 圖 3)。以 2030 年為參考年，所有 20 條自然途徑的最大額外減緩潛力為 238 億噸二氧化碳當量 / 年，而具有成本效益之氣候減緩潛力為 113 億噸二氧化碳當量 / 年。再造林、避免森林轉換以及改善林業，提供了大量且有成本效益的減緩機會，充分體現的共同效益，包含生物多樣性棲地 (biodiversity habitat)、空氣過濾 (air filtration)、水質過濾 (water filtration)、洪水控制和增強土壤肥力 (soil fertility) (Griscom et al., 2017)。透過減少砍伐森林和森林退化 (forest degradation) 可以減少溫室氣體排放量，據估計，技術減排潛力為 4~58 億噸二氧化碳 / 年 (IPCC, 2020)。

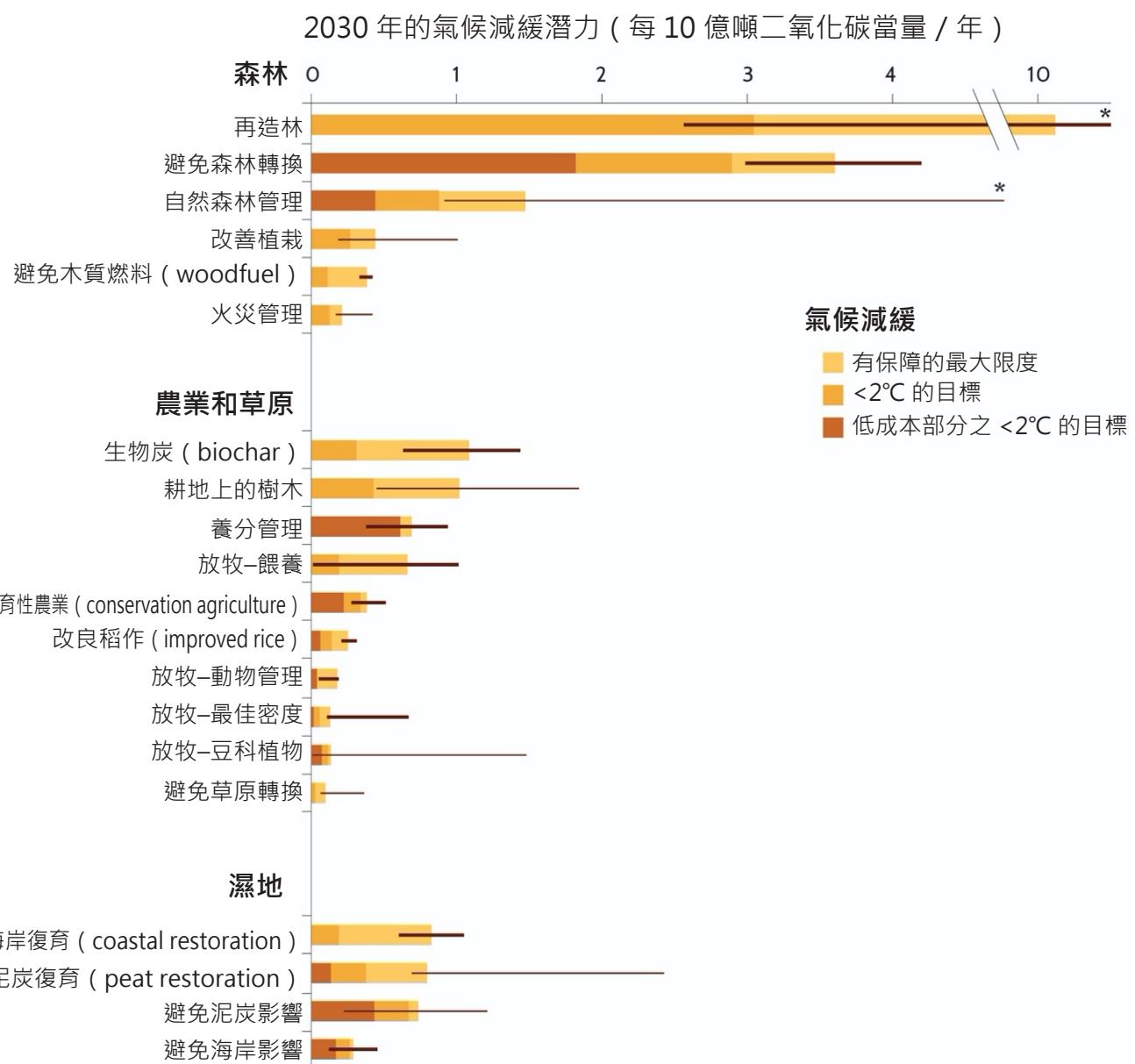


圖 3. 在 20 條減緩氣候變化的自然途徑中，森林途徑提供了在 2030 年前，將暖化控制在 2°C 以下所需之 2 / 3 以上的具有成本效益之減緩 (改編自 Griscom et al., 2017)

Bastin 等人 (2019) 根據氣候繪製出全球潛在樹木覆蓋圖而得出結論：在自然支持下的林地和森林地區，有潛力多出九億公頃的冠層覆蓋度（森林面積增加 25% ；在成熟期，這些樹木能儲存 2050 億噸的碳。在經濟、政治和技術上可行的大規模植樹造林計畫之碳儲量潛力要低的更多 (Nilsson and Schopfhauser, 1995) 。

4. 森林保育對提供特定生態系統服務的重要性

森林提供關鍵的生態系統服務，包括水份調節（water regulation）、溫度控制、授粉（pollination）和生物多樣性。

森林可以調節溪流、支持地下水補給（groundwater recharge）、過濾水質、強化土壤滲透（infiltration）和土壤水分儲存（soil water storage），並減少水體的土壤侵蝕和沉澱。世界上超過 75% 的可利用淡水來自森林流域，超過一半的人口仰賴這些地區的水（FAO, 2019）。森林和樹木的蒸發散作用（evapotranspiration）可能會減少集水區範圍內的逕流，但會增加下風處的降水和水的可用性（Ellison, Futter and Bishop, 2012）。一般而言，陸地上 40% 的降水是由陸地表面的蒸發散作用所回收。熱帶和亞熱帶森林作為大氣濕度（atmospheric moisture）的大型輸送器，提供了一個影響區域雲量（cloud cover）和降水的全球循環系統（Ellison et al., 2017）。這些遼闊且綿密連續的熱帶森林大規模消失與區域降水的減少有密切關係（Ellison et al., 2017）。

森林覆蓋（forest cover）透過水和能量的交換直接影響到區域地表溫度。熱帶地區森林覆蓋的增加提高了蒸發散率，使生長季節更涼爽，並減少了熱相關事件的振幅（amplitude）。樹木和灌木覆蓋率的增加，在有季節性積雪的地區，如寒帶與部分溫帶森林，由於表面反照率（surface albedo）降低，也會受到冬季暖化的影響（Shukla et al., 2019）。

許多野生傳播授粉生物（pollinator）依賴森林築巢和覓食，地景中的森林和其他自然棲地的範圍會影響傳粉者的物種組成（Krishnan et al., 2020）。坦尚尼亞的一項國家評估報告顯示（Tibesigwa et al., 2019），作物生產力（crop productivity）在靠近森林的地方得到改善，而森林覆蓋率與農作物收入（crop revenue）之間的關係為正相關。傳粉者對用於木材和非木材森林產品的樹木和植物的再生（regeneration）也至關重要，野生與被管理的傳粉者族群數量下降也會阻礙森林的自然更新（natural regeneration）（FAO, 2020b）。

森林還蘊藏著地球上大部分的陸地生物多樣性，為80%的兩棲動物（amphibian）物種、75% 的鳥類物種和 68% 的哺乳動物（mammal）物種提供生存棲息地（FAO and UNEP, 2020），僅熱帶森林就擁有至少 2 / 3 的陸生物種。而全球有 4.24 億公頃的森林範圍被指定主要用於生物多樣性保育（FAO, 2020b）。

森林提供的環境服務，例如吸收空氣中的有害粒子（harmful particles）、過濾水質，以及當發生土壤侵蝕、落石、漲潮和海嘯時提供保護，森林提供的環境服務之估計價值約為其總價值的 2~7%（50~150 兆美元，Kappen et al., 2020）。

4.1. 最小化對土壤功能的威脅

表 1. 土壤威脅

土壤威脅	
土壤侵蝕	樹冠 (tree canopy) 和枯枝落葉層 (litter layer) 減少了雨水的影響；樹根系 (root system) 抓住了土壤顆粒 (soil particle)；木質殘體 (woody debris) 減緩斜坡上的地面溢流 (overland flow)。
養分的失衡和循環	建立森林產生了枯枝落葉和土壤有機質；樹冠層攔截氣體、微粒和溶解的養分，根系獲得土壤深處的養分並強化土壤風化作用 (soil weathering)。
土壤鹽化和鹼化	樹木覆蓋可以減少蒸發損失，但如果樹木種植在非常乾燥的地區，就會造成問題。
土壤沾染 / 污染	對汙染物具有耐受性 (tolerance) 的植物物種，可以透過植生復育 (phytoremediation) 降低土壤濃度。
土壤酸化	取決於不同物種，部分物種增加酸鹼值和鹼基飽和度 (base saturation)；另一些物種酸化土壤。有些樹種能溶解氧化鐵 (Fe oxides)，否則氧化鐵會固定在風化的土壤中。
土壤生物多樣性損失	樹根根系分泌物 (exudate) 支持多樣的根圈群落 (rhizosphere community)；樹根和枯枝落葉支持多樣的分解者 (decomposer) 群落；木材支持腐木食性生物 (saprophytic organisms)。
土壤壓實	樹根能穿透土壤，減少壓實；樹根還能增加土壤團粒形成 (soil aggregation)，改善土壤結構。
積水	水透過樹根的通道滲透；樹冠層的蒸散作用能使水循環回到大氣中。

4.2. 增加生產與糧食安全

森林提供了營養豐富的糧食、收入、就業、能源和生態系統服務，有助於糧食安全 (food security) (FAO and UNEP, 2020)。約莫十億人在某種程度上仰賴野生糧食，例如野生肉、食用昆蟲、食用植物產品、蕈菇類和魚肉，森林也供給了人類飲食的多樣化 (FAO and UNEP, 2020)。森林還能替農業提供飼料 (fodder)、綠肥 (green manure) 和堆肥 (compost) (FAO and UNEP, 2020)。森林生態系統能夠透過水份調節、土壤形成、保護、養分循環、生物多樣性保育、農業生態系統

(agroecosystem) 的穩定、病蟲害控制和授粉來提高農業和漁業生產，進而促進糧食安全 (FAO and UNEP, 2020)。由於樹木通常比農作物更能抵禦惡劣的氣候條件，以森林為基礎的食品在緊急情況下，如農作物歉收時可充當為重要的安全網，有助於提高家庭抵禦惡劣情況的能力 (FAO and UNEP, 2020)。

據估計，全球的正規林業部門提供了約 4500 萬個工作機會，每年的勞動收入超過 5800 億美元〔包括直接、間接和衍生就業 (induced employment , FAO and UNEP, 2020)〕，而中小型森林企業提供的工作機會約佔其中的 2000 萬個，每年創造 1300 億美元的價值。2015 年公告的全球非木材森林產物之移除量 (removals) 價值幾近 80 億美元 (FAO and UNEP, 2020)，全球約有 11.5 億公頃的森林，主要因為生產木材和非木材森林產品而受到管理；另外還有 7.49 億公頃的森林具有多用途目的，其中往往用於生產。森林和樹木也是許多人重要的生活來源，據估計有 25 億人從事小農農業 (smallholder agriculture) (FAO and UNEP, 2020)。

木質燃料可為全世界約 24 億人口 (即 1 / 3 的世界人口) 提供基本的能源服務，在確保取得的可負擔性、可靠的現代能源方面發揮著關鍵作用 (FAO and UNEP, 2020)。全球約有一半的總移除量是用於木材燃料；高收入國家佔 17%，而在低收入國家約佔 90% 以上 (FAO and UNEP, 2020)。

4.3. 改善人類福祉

森林提供了一系列益於人類健康的產品和服務，包括醫藥、潔淨的水和空氣、樹蔭，以及能讓人運動和放鬆的綠化空間 (FAO and UNEP, 2020)。超過 2.8 萬種植物物種被人類作為藥品使用，其中許多是在森林生態系統中被發現 (Willis, 2017)。傳統醫藥系統有助於提高世界各地以森林為生之人類韌性，通常是最容易獲得、最方便取得、最經濟實惠、有時在文化上最可以被接受的醫療保健 (health care) 來源。森林同時能透過過濾水質，以及為烹飪食物和消毒用水提供木質燃料，間接地減少藉由食物和水傳播的疾病發生 (FAO and UNEP, 2020)。

對城市地區特別而言，接觸森林對人類健康有正面影響 (FAO and UNEP, 2020)。森林可以改善城市空氣品質、減少城市熱島效應 (heat island effect) 以及緩衝噪音。森林和綠地具有正面的生理影響，可以改善心理健康，並促進體育運動 (physical exercise)，進而改善健康。

森林和樹木是農村人口 (特別是原住民、小農與生活在森林周邊的人) 的收入、生計和福祉的重要來源，據估計，森林在全球提供了 4515 萬個就業機會，每年的勞動收入超過 5800 億美元 (FAO and UNEP, 2020)。娛樂和旅遊業也促進了農村經濟，每年約有 80 億人次造訪保護區，貢獻約 6000 億美元。世界有 1.86 億公頃的森林被保留用於娛樂、旅遊、教育研究，以及保護文化和宗教場所，自 2010 年以來，全球指定用於上述用途的森林面積，以每年 18.6 萬公頃的速度增長 (FAO, 2020b)。

Kappen 等人 (2020) 根據下列三點，估計森林的社會價值：(1) 近 2 億仰賴森林為生的人口，如果不得不生活在無森林的農村社區，他們須負擔居住和飲食的成本；(2) 全球 1260 萬從事林業工作的人之個人收入；(3) 人們願意至森林旅遊所支付的旅行費用。社會價值佔森林總價值的 2~7% (50~150 兆)，主要來自對森林的生存使用和林業就業。截至目前為止，全球社會價值最大佔比來自亞洲和非洲的熱帶森林，這兩個地方的森林產物行業是主要的雇主，也有大量的人口生活在森林裡，並依靠森林為生。

4.4. 緩解和適應氣候變遷

森林在決定大氣層中溫室氣體的累積方面扮演重要的作用，因為森林每年吸收大約 20 億公噸的二氧化碳當量，並將固定碳 (fixed C) 儲存在長壽的組織和土壤中，而砍伐森林名列二氧化碳的最大來源。

政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第五次評估報告認為，林業最具成本效益的溫室氣體減排方法是減少砍伐森林、植樹造林 / 再造林、永續森林管理 (sustainable forest management) 和森林復育 (IPCC, 2014)；以下是前述方法的定義以及減排潛力（圖 4）。

種類	措施和影響
林業	
減少砍伐森林	碳 (C)：透過控制砍伐森林、保護保護區內的森林，以及控制其他人為干擾（如火災和蟲害爆發）來保育森林植被和土壤中現有的碳庫。減少刀耕火種 (slash and burn agriculture)，減少森林火災。 甲烷 (CH_4)、氧化亞氮 (N_2O)：保護泥炭地 (peatland) 森林，減少野火。
植樹造林 / 再造林	碳：通過在無林農地上植樹，改善生物量庫存。 這可以包括單作栽培 (monocultures) 或混合品種的種植，這些活動還可以提供一系列其他的社會、經濟和環境效益。
森林管理	碳：管理森林以實現永續木材生產，包含延長輪伐週期 (rotation cycle)、減少對剩餘樹木的損害、減少伐木廢料、實施土壤保育措施、施肥，並以更有效的方式使用木材，永續利用木材。 甲烷、氧化亞氮：修正野火行為。
森林復育	碳：保護生物質和土壤碳密度低於最大值的次生林 (secondary forest) 和其他退化的森林，讓其透過自然或人工再生、修復 (rehabilitation) 退化的土地、長期休耕 (fallows) 來封存碳。 甲烷、氧化亞氮：修正野火行為。

圖 4. 林業最具成本效益的溫室氣體減排方法摘要（改編自 IPCC, 2014）

保護現有森林（減少砍伐森林和森林退化）可以保育現有的碳庫存，並減少生物群（biota）和土壤的碳損失（carbon loss）。減少砍伐森林和森林退化可降低溫室氣體排放量，估計減排潛力為4~58億噸二氧化碳／年（IPCC, 2019）。

植樹造林和再造林（在無森林地上植樹）可以增加森林的林分密度（stocking density）、增加土壤中的碳固存（carbon sequestration），以及增加建築活動中的木材使用，進而減緩氣候變化。植樹造林和再造林也會產生因土地利用和土地覆蓋變化而導致的反照率變化，進而增加可見光的反射（IPCC, 2019）。關於植樹造林，[第5冊第6章資料表單（本手冊）](#)中會談及在規劃和實施植樹造林計畫時必須考慮的諸多因素。

永續森林管理措施旨在提供木材、纖維、生物量、非木材資源以及其他生態系統功能和服務，可以降低溫室氣體排放量，並有助於適應溫室氣體。透過為社區提供長期生計來源，永續森林管理可以減少森林轉換為非森林用途〔如耕地（cropland）或定居地（settlement）〕的程度。提供享有低溫室氣體排放的產品，以取代提供相同服務但是有高溫室氣體排放的產品〔例如：用木材取代建築物中的混凝土和鋼、一些生質能源（bioenergy）的選擇〕，是減少氣候變化的其他方法。據估計，森林管理具有中度的緩解氣候變化之價值（3~30億噸二氧化碳當量／年，IPCC, 2019）。

森林透過碳捕獲與儲量（carbon capture and storage）來調節氣候的能力佔森林總價值的65~90%（50~150兆美元）；至於熱帶森林，由於其面積（佔森林總面積的58%）、高碳密度和高樹木生物量，則佔森林總價值的四分之三（Kappen et al., 2020）。

5. 挑戰和趨勢概況

森林消失

森林轉換為其他土地用途而發生森林消失，如農業耕地（cropping）和牧場（pasture）或都市化（urbanization）。自1990年以來，世界已經消失了1.78億公頃的森林（FAO, 2020b）；1990~2020年間，由於一些國家減少砍伐森林，加上其他國家植樹造林以及森林自然擴展（expansion），森林面積因而增加，森林淨消失率（rate of net forest loss）大幅下降；1990~2000年間，每年的森林淨消失率為780萬公頃；到了2000~2010年間，下降至每年520萬公頃；接著2010~2020年間，下降至每年470萬公頃；自1990年以來，原始森林面積已經減少了8100萬公頃，但與前10年相比，2010~2020年的消失率減少了一半以上（FAO, 2020b）。

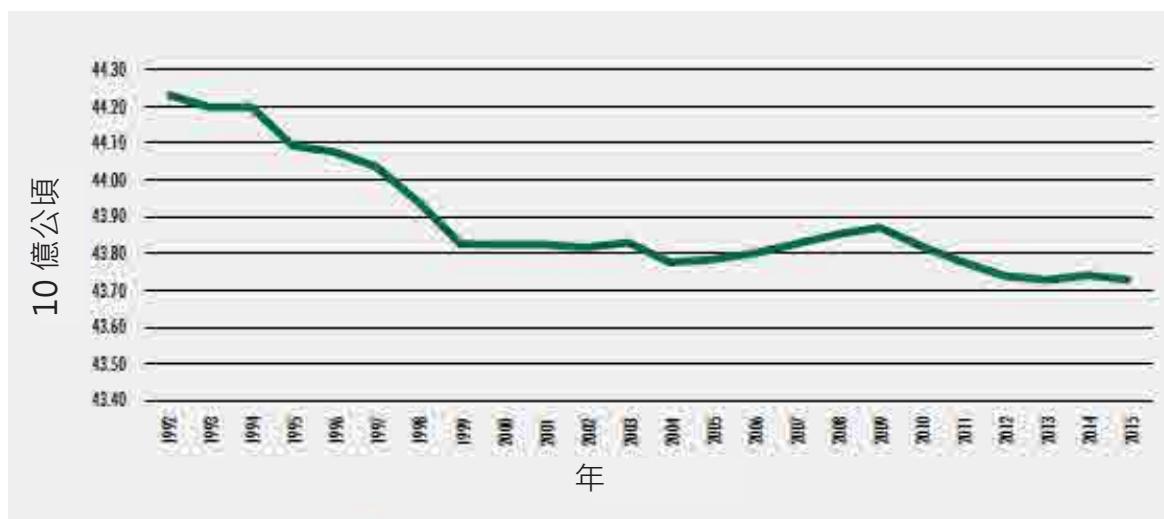


圖 5. 1992~2015 年間全球樹木覆蓋面積趨勢 (FAO and UNEP, 2020)

2010~2020 年，非洲每年的森林淨消失率最高 (390 萬公頃)，其次是南美洲 (260 萬公頃)；自 1990 年以來的 30 年裡，非洲的森林淨消失率逐年增加，然而，南美洲的損失率大幅下降，與 2000~2010 年間相比，南美洲 2010~2020 年間的消失率約為前 10 年的一半；2010~2020 年間，亞洲的森林面積淨增量 (net gain of forest area) 最高，其次是大洋洲和歐洲，儘管如此，歐洲和亞洲在 2010~2020 年間的森林面積淨增量遠遠低於 2000~2010 年間之淨增量；大洋洲在 1990~2000 年間與 2000~2010 年間，則經歷了森林面積的淨消失 (FAO and UNEP, 2020 , 圖 6)。



圖 6. 依地區劃分的 1990~2020 年間之森林面積淨變化 (FAO and UNEP, 2020)

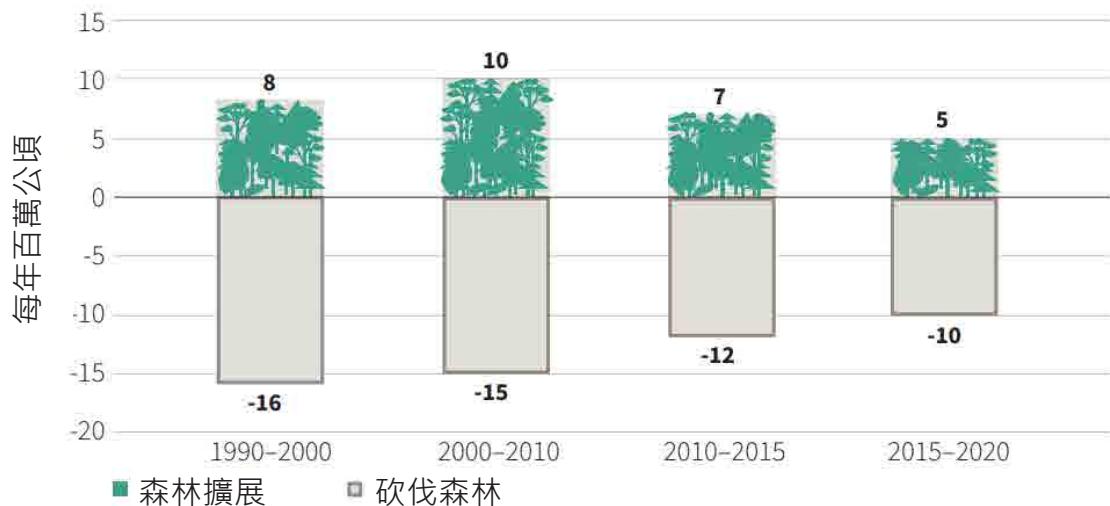


圖 7. 1990~2020 年間每年的森林擴展率和砍伐森林率 (FAO, 2020)

就土壤有機碳庫存而言，需特別關注某些森林如紅樹林 (mangroves) 和濕潤的熱帶雨林的損失。紅樹林可以在土壤中儲存的碳是其他種森林的 3~4 倍，多達 15% 的海洋有機碳 (marine organic carbon) 可能埋藏在紅樹林中。由於城市發展，以及木材與魚類、甲殼類和貝類等食物來源過度開發，紅樹林正面臨消失與退化的危機。1980~2005 年間，全球紅樹林面積消失高達 20%，每年消失率約為 0.2~0.4% (見本冊第 5 章紅樹林的熱點)。熱帶潮濕雨林 (tropical moist forest) 儲存了約 6.5 億噸的碳，約佔陸地生態系統碳總量的 30%，而平均土壤有機碳庫存大於 100 噸碳 / 公頃 (見本冊第 2 章熱帶潤濕森林的熱點)。熱帶潤濕森林正在因非永續的伐木 (logging)、轉換為農業以及火災而消失，佔全球森林覆蓋消失的 32%。

森林破碎化

森林破碎化 (forest fragmentation) 是將連續的棲地分割成更小和更孤立的碎片所引起剩餘的森林碎片 (forest fragments) 之結構與功能的長期變化 (FAO and UNEP, 2020)。森林斑塊 (forest patch) 面積變小和間隔距離增加，使鳥類、哺乳動物、昆蟲和植物的豐富度 (abundance) 減少 20~75%，進而影響生態功能，如種子傳播和生態系統服務 [如碳固存、侵蝕控制、授粉和養分循環 (nutrient cycling)] (Haddad et al., 2015)。世界上大約 80% 的森林區域是在大於 100 萬公頃的斑塊中發現的，這一規模等級佔所有森林類型的森林面積之 25% 以上。熱帶雨林 (tropical rainforest) 和寒帶針葉林 (boreal coniferous forest) 是破碎化程度最低的森林生態系統，這些地區 90% 以上的森林面積都是大於 100 萬公頃的斑塊。有將近 3500 萬座森林 (佔全球森林面積的 7%) 出現在小於 1000 公頃的斑塊中 (FAO and UNEP, 2020)。全球有 70% 的森林區域在森林 / 非森林邊界的一公里範圍內，因此未來可能會面臨破碎化的危機，而一些目前被認為是原始森林的地區同樣也可能遭遇破碎化的危機 (Haddad et al., 2015)。

森林退化

森林退化是指森林提供商品和服務的能力下降 (FAO, 2020a)。退化的森林已經失去了通常與該地預期的自然森林類型相關之結構、功能、物種組成和 / 或生產力。森林會因為人類活動 (如非永續的採伐) 和自然干擾而退化。此外，自然干擾可能會因氣候變遷而加劇。

監測和測量森林退化，可以使用部分冠層覆蓋損失作為替代物 (proxy) 來進行 (FAO, 2015)。森林退化的其他判定指標或影響包括立木蓄積 (growing stock) 、生物量、生物多樣性和森林產品生產的減少，以及土壤侵蝕的增加等。2000~2012 年間，全球的部分冠層覆蓋損失的面積為 1.85 億公頃，其中大部分 (超過 1.56 億公頃) 發生在熱帶氣候區 (FAO, 2015 , 圖 8)。

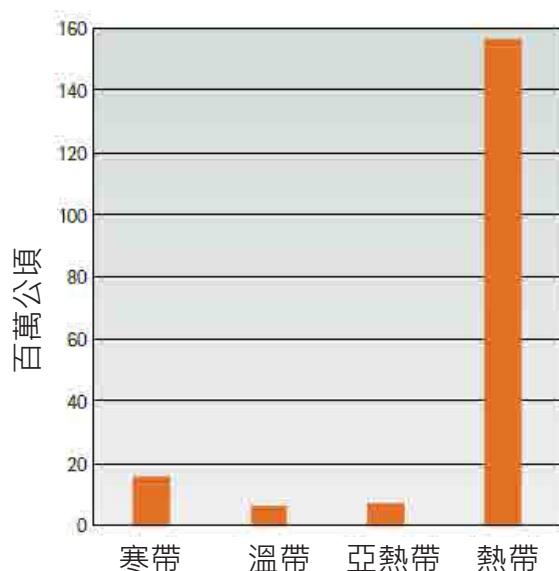


圖 8. 2000~2012 年間依氣候區劃分的部分冠層覆蓋損失之估計面積 (FAO, 2015)

森林會受到一些自然干擾 (如野火、病蟲害、惡劣天氣事件)，而這些干擾會降低森林提供各式產品和服務的能力。2015 年，約有 9800 萬公頃的森林受到火災的影響 (FAO, 2020b)，這些火災主要發生在熱帶地區，影響遍及熱帶地區大約 4% 的森林面積；大多數的火災容易控制，但有 10% 的火災難以控制，遭到燒毀的森林約有 90% 的面積是難以控制的火災所造成的。

2003~2012 年間，火災以外的干擾影響了 1.42 億公頃的森林 (FAO and UNEP, 2020)。2015 年，約有 4000 萬公頃的森林受到此類干擾的影響，主要是發生在溫帶和寒帶 (FAO, 2020b)。僅僅森林蟲害的爆發每年就損害了約 3500 萬公頃的森林。外來入侵的植物和動物物種是造成現在生物多樣性損失的最重要原因之一，對許多島國而言更是如此。異常高溫、嚴重和極端的天氣事件，以及乾旱逆境導致樹木的活力下降，使樹木更容易受到本地和外來病蟲害爆發的影響。最後，在 1996~2015 年間，有超過 8 億公頃的森林面積被摧毀或是受到天氣災害影響 (FAO and UNEP, 2020)。

自然過程的發生可能導致森林面積增加，例如廢棄農田上的森林再生、再造林或植樹造林〔包含輔助自然更新（assisted natural regeneration）〕等自然過程都有可能增加森林面積（FAO and UNEP, 2020）。舉例來說，中國在 1999 年啟動「退耕還林」（Grain for Green）計畫，為了緩解並防止洪水與水土流失，中國在 2013~2018 年間，種植了 33.8 萬平方公里的森林（Sheng, 2019）。森林地景復育（Forest and Landscape Restoration, FLR）是扭轉土壤、農業區、森林和流域退化的過程，從而恢復森林景觀的生態功能，提高其生產力和能力，以滿足社會各式各樣日新月異的需求（Besseau et al., 2018）。已經有 57 個國家、國家以下各級政府與私人組織響應參加波昂挑戰（Bonne Challenge），他們已經承諾復育超過 1.7 億公頃的土地。非洲森林地景復育計畫（African Forest Landscape Restoration Initiative, AFR100）在 2030 年以前，復育一億公頃的退化土地；2021~2030 年為聯合國生態系統復育 10 年¹，旨在這段期間將會加強復育森林景觀。



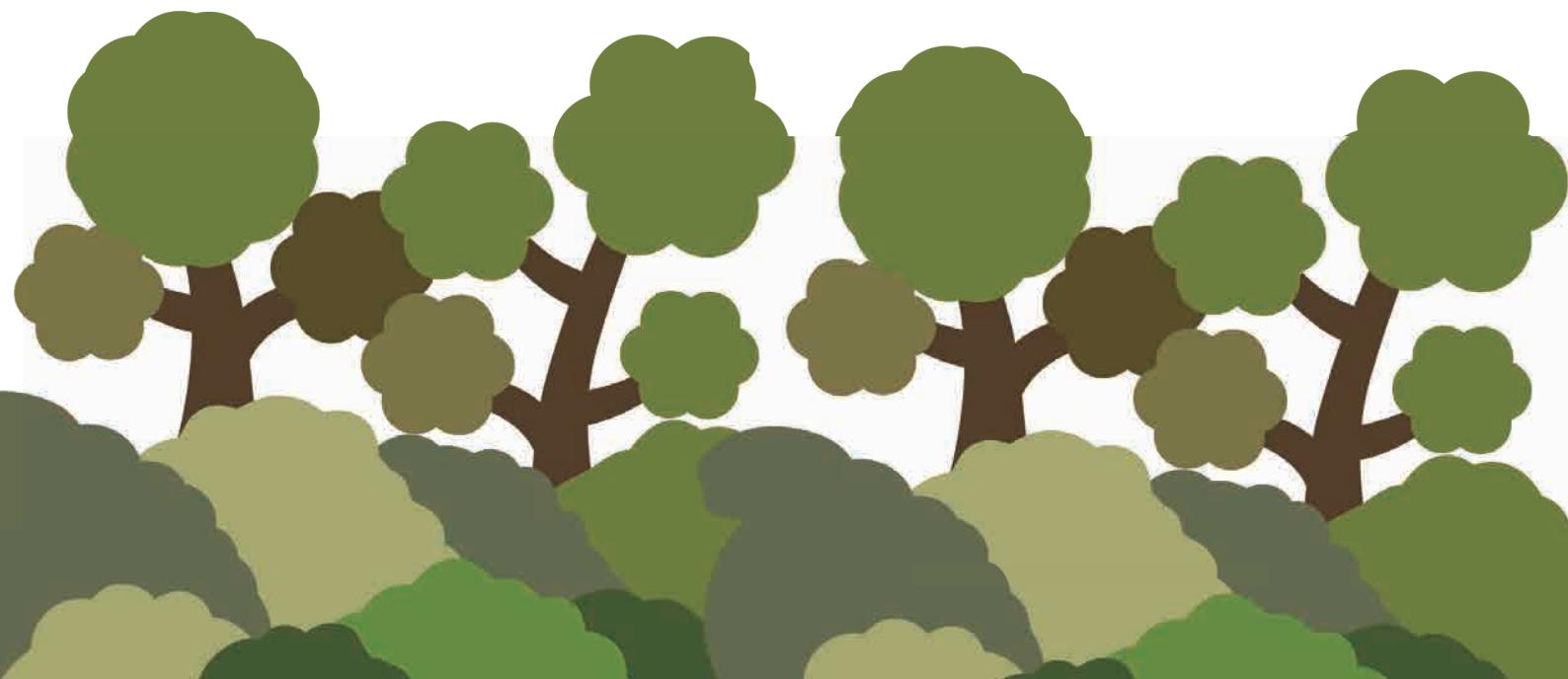
© Cindy Prescott

照片 1. 加拿大卑詩省 (British Columbia) Dakota Bowl 之原始山地溫帶雨林 (montane temperate rainforest)

¹<https://www.unwater.org/the-united-nations-general-assembly-declare-2021-2030-the-un-decade-on- ecosystem-restoration/>

表 2. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研究編號
剛果沿海平原貧瘠砂土的土壤肥力改善	非洲	7	6	1
新加坡森林的土壤有機碳庫存	亞洲	多個時段	6	4
波士尼亞與赫塞哥維納位於塞族共和國亞沃爾山的高地更新造林	歐洲	15	6	5
義大利半島沿岸廢棄山區草原的天然新植造林	歐洲	23~72	6	6
西班牙中部和西部退化森林的保育	歐洲	22~80	6	9
葡萄牙阿爾加維和西班牙安達盧西亞在近期燒毀地區應用秸稈敷蓋和生物炭	歐洲	1	6	10



參考文獻

- Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C.M. & Crowther, T.W.** 2019. The global tree restoration potential. *Science*, 365(6448): 76–79.
<https://doi.org/10.1126/science.aax0848>
- Besseau, P., Graham, S. & Christophersen, T.** (Eds.). 2018. *Restoring forests and landscapes: the key to a sustainable future. Global Partnership on Forest and Landscape Restoration*. Vienna, Austria.
<https://www.forestlandscaperestoration.org/restoring-forests-and-landscapes-key-sustainable-future.html>
- Ellison, D., Futter, M.N. & Bishop, K.** 2012. On the forest cover–water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology*, 18(3): 806–820. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02589.x>
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarso, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M. van, Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D.V., Tobella, A.B., Ilstedt, U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y. & Sullivan, C.A.** 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43: 51–61.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Erb, K., Kastner, T., Plutzar, C. Bais, A.L.S., Carvalhais, N., Fetzel, T., Gingrich, S., Haberl, H., Lauk, C., Niedertscheider, M., Pongratz, J., Thurner, M. & Luyssaert, S.** 2018. Unexpectedly large impact of forest management and grazing on global vegetation biomass. *Nature*, 553: 73–76.
<https://doi.org/10.1038/nature25138>
- FAO.** 2015. *Global Forest Resources Assessment 2015*. Rome. <http://www.fao.org/3/a-i4808e.pdf>
- FAO.** 2019. *Forests: nature-based solutions for water*. Unasylva 251. FAO, Rome.
<http://www.fao.org/documents/card/en/c/ca6842en>
- FAO.** 2020a. *FRA 2020 Terms and Definitions*. FAO, Rome.
<http://www.fao.org/3/I8661EN/i8661en.pdf>
- FAO.** 2020b. *Global Forest Resources Assessment 2020*. Rome. <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020>
- FAO & UNEP.** 2020. *The State of the World's Forests 2020*. Forests, biodiversity and people. Rome.
<https://doi.org/10.4060/ca8642en>
- Haddad, N.M., Brudvig, L.A., Clobert, J., Davies, K.F., Gonzalez, A., Holt, R.D., Lovejoy, T.E., Sexton, J.O., Austin, M.P., Collins, C.D., Cook, W.M., Damschen, E.I., Ewers, R.M., Foster, B.L., Jenkins, C.N., King, A.J., Laurance, W.F., Levey, D.J., Margules, C.R., Melbourne, B.A., Nicholls, A.O., Orrock, J.L., Song, D.-X. & Townshend, J.R.** 2015. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. *Science Advances*, 1(2): e1500052. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500052>

IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp

IPCC. 2019. Summary for Policymakers. In P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (Eds.) *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In press.

Kappen, G., Kastner, E., Kurth, T., Puetz, J., Reinhardt, A. & Soininen, J. 2020. *The Staggering Value of Forests—and How to Save Them*. Boston Consulting Group. (also available at: <https://www.bgc.com/publications/2020/the-staggering-value-of-forests-and-how-to-save-them>)

Krishnan, S., Wiederkehr Guerra, G., Bertrand, D., Wertz-Kanounnikoff, S. & Kettle, C.J. 2020. *The pollination services of forests – A review of forest and landscape interventions to enhance their cross-sectoral benefits*. Forestry Working Paper No. 15. Rome, FAO & Biodiversity International. (also available at: <http://www.fao.org/3/ca9433en/CA9433EN.pdf>)

Nabuurs, G.J. Masera, O., Andrasko, K., Benitez-Ponce, P., Boer, R., Dutschke, M., Elsiddig, E., et al. 2007: Forestry. In B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (Eds.) *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Nilsson, S. & Schopfhauser, W. 1995. The carbon-sequestration potential of a global afforestation program. *Climatic Change*, 30: 267–293. <https://doi.org/10.1007/BF01091928>

Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L., Canadell, J.G., Ciais, P., Jackson, R.B., Pacala, S.W., McGuire, A.D., Piao, S., Rautiainen, A., Sitch, S. & Hayes, D. 2011. A Large and Persistent Carbon Sink in the World's Forests. *Science*, 333(6045): 988–993. <https://doi.org/10.1126/science.1201609>

Sheng, Y. 2019. Extensive reforestation in China makes Earth greener [Online]. [Cited 17 December 2020] <http://www.globaltimes.cn/content/1139006.shtml>

Shukla, P.R. Skea, J., Slade, R., van Diemen, R., Haughey, E., Malley, J., Pathak, M. & Portugal Pereira, J. 2019. Technical Summary. In P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley (Eds.) *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. In press.

Tibesigwa, B., Siikamäki, J., Lokina R. & Alvsilver J. 2019. Naturally available wild pollination services have economic value for nature dependent smallholder crop farms in Tanzania. *Scientific Reports*, 9: 3434. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39745-7>



熱帶潤濕森林

2. 热帶潤濕森林

Shalom D. Addo-Danso¹, Lucy Amissah², Akwasi Duah-Gyamfi²,
Stephen Adu-Bredou²

¹ Forest and Climate Change Division, Council for Scientific and Industrial Research, Forestry Research Institute of Ghana, Kumasi, Ghana

迦納林業研究所科學與工業研究委員會森林與氣候變化部

² Biodiversity Conservation and Ecosystem Services Division, Council for Scientific and Industrial Research, Forestry Research Institute of Ghana, Kumasi, Ghana

迦納林業研究所科學與工業研究委員會生物多樣性保育與生態系統服務部

1. 定義與說明

研究人員和研究機構對熱帶潤濕森林 (Tropical Moist Forests, TMF) 提出了不同的定義，然而 Myers (1980) 指出熱帶潤濕森林沒有一個舉世公認的定義。Myers (1980) 將熱帶潤濕森林定義為「常綠或部分常綠森林 (evergreen forests) · 三年中有兩年 · 任何一個月的降水量 (precipitation) 不少於 100 毫米 · 而年平均溫度為 24°C 以上 · 且基本上沒有霜 (frost) ；在這些森林中 · 一些樹木可能是落葉性 (deciduous) 的」。其他研究學者 (如 Raich et al., 2006 ; Staal et al., 2016) 將熱帶潤濕森林定義為乾季 (dry season) 長度小於等於 3~5 個月的森林。還有一些學者認為潤濕森林和雨林不同 · 然而有其他學者認為是相同的 · 將兩個名詞交替使用；雨林和潤濕森林是共同分布的 · 並且經常參雜在一起 · 沒有明顯的邊界將其區分 (Staal et al., 2016 ; Nave et al., 2019) 。

許多類型的土壤上都能發現熱帶潤濕森林的蹤跡 · 但其主要生長於高度風化 · 高黏土含量 (clay content) 和低磷 (phosphorus) 的土壤上 · 這種土壤類型主要為東南亞的極育土 (Ultisols) 以及新熱帶 (neotropics) (美洲) 和非洲的氧化土 (Oxisols) (Fujii et al., 2018) 。許多熱帶潤濕森林生長於海平面高度 · 但也有一些生長在高海拔地區 · 如山地森林 (montane forests) 和雲霧森林 (cloud forests) (Holl, 2002) 。熱帶潤濕森林是最多樣化的生態系統 · 而世界上有 500~1000 萬個物種 · 其中超過 50% 物種都棲息在熱帶潤濕森林 (Sommer, 1980; Holl, 2002; Thomas and Baltzer, 2002) 。全球最重要的熱帶潤濕森林類型包括低地常綠雨林 (lowland evergreen rain forests) 、高高山雨林 (upper montane rain forests) 和低高山雨林 (lower montane rain forests) 、荒原森林 (heath forests) 、泥炭沼澤森林 (peat swamp forests) 、淡水沼澤森林 (freshwater swamp forests) 以及紅樹林 (Thomas and Baltzer, 2002) 。

2. 全球熱點分布

熱帶潤濕森林分布於北緯 23.5 度（北回歸線）到南緯 23.5 度（南回歸線）間的赤道周圍地帶，範圍擴及非洲、美洲和亞太地區的赤道地帶。2010 年，熱帶潤濕森林的面積據估為 9.72 億公頃，約佔熱帶森林總面積的 64% (Achard et al., 2014) 。



圖 9. 热帶潤濕森林的分布位置 (黃色標示區域) [國家地理 (National Geographic) / 世界野生動物基金會 (World Wildlife Fund)]

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

熱帶潤濕森林的土壤提供與人類福祉、生態系統的穩定性和全球氣候有關的重要產品和服務，例如，土壤承載著無數的微生物 (micro-organisms) 與動植物 (flora and fauna)，是地球生物多樣性的重要部分 (FAO, 2017)。土壤有機質及其最大的組成成分—土壤有機碳—在全球碳循環 (carbon cycle) 中發揮著關鍵作用 (FAO and ITPS, 2015)。熱帶潤濕森林在土壤中儲存了大量的碳 (約佔森林總碳量的 30~60%)，這佔比甚至可能超過儲存在植被中的碳含量 (Dixon et al., 1994; Lal, 2005)。事實上，這些森林的土壤碳含量比世界上任何其他森林類型的土壤都要多 (Jobbágy and Jackson, 2000)。

透過分析現有之成熟且未受干擾的熱帶潤濕森林的土壤有機碳庫存資料，觀察了橫跨非洲、亞太地區、加勒比海地區、中南美洲和北美洲國家的 67 個網站，估計土壤深度在 5~800 公分的地方，平均碳庫存為 109.2 ± 10.19 噸碳 / 公頃。土壤有機碳的估計值 (estimate) 範圍為 9.9~349.4 噸碳 / 公頃，其相差 35 倍 (附錄 1)。在過去 40 年，研究人員透過綜合 (synthesis)、文獻回顧 (reviews) 和統合分析 (meta-analysis)，針對熱帶潤濕森林的土壤有機碳庫存進行了區域性的估算，例如，熱帶潤濕森林和熱帶潮濕雨林 (tropical wet forests) 的平均土壤碳儲量估計分別為 85 和 115 噸碳 / 公頃 (Brown and Lugo, 1982)，上述的土壤碳值與本綜合報告的平均值相近。在海拔高於 500 公尺的地區中，完整且成熟的熱帶潤濕常綠森林在 100 公分土壤深度所儲存的土壤有機碳估計為 166 噸碳 / 公頃 (Raich et al., 2006)，這比本綜合報告紀錄的平均值多出 1.5 倍。Raich 還指出，他們考察的熱帶森林中之土壤有機碳庫存差異約為 10 倍，從 31~300 噸碳 / 公頃不等。熱帶雨林生態系統主要土壤的土壤有機碳庫，包括氧化土、極育土、淋溶土 (Alfisols) 和弱育土 (Inceptisols)，在 100 公分的土壤深度範圍內為 120~123 噸碳 / 公頃 (Lal, 2005)。同一研究估計熱帶森林土壤的有機碳固存率為 0.1~1 噸碳 / 公頃 / 年，有機碳固存總潛力則為 2~5 億噸碳 / 年。在 81 項研究中，熱帶次生林土壤碳資料的綜合估計顯示，土壤深度 0~100 公分的地方，平均土壤有機碳為 164 噸碳 / 公頃 (Marín-Spiotta and Sharma, 2013)。另一項文獻回顧 17 種主要土壤類型〔國際土壤科學聯合會的世界土壤參比分類系統之土壤分類 (International Union of Soil Sciences World Reference Base for Soil Resources Reference Soil Group, IUSS WRB Reference Soil Groups)〕的土壤碳資料，研究結果顯示熱帶雨林中主要土壤類型〔強淋溶土 (Acrisols)、鐵鋁土 (Ferralsols)、低活性淋溶土 (Lixisols) 和強風化黏磐土 (Nitisiols)〕，在深度 100 公分的地方之平均土壤有機碳庫為 193.3 噸碳 / 公頃 (Nave et al., 2019)。其他綜合了土壤有機碳資料的全球研究顯示，熱帶潤濕森林和熱帶潮濕雨林之土壤有機碳庫存量為 115~210 噸碳 / 公頃 (Post et al., 1982; Dixon et al., 1994; Jobbágy and Jackson, 2000)。

綜合所述，研究人員報告的熱帶潤濕森林的土壤有機碳值不盡相同，受諸多因素所致，其中最主要的原因如下：

- ◆ 「熱帶潤濕森林」的定義不一致；如本章第一節所述，各學者對該術語的定義沒有達成共識。
- ◆ 研究人員使用不同的土壤深度門檻來評估土壤有機碳（見表 3）；在敘述土壤碳方面，沒有統一使用的標準土壤深度，在許多研究中，最常見的深度 0~30 公分 (Raich et al., 2006)，不過，研究人員試圖透過將資料標準化，把深度定為 100 公分來規避此一問題（如 Raich et al., 2006）。然而，近來有人呼籲使用標準化的方法，來評估所有相關範圍之土壤碳庫存的垂直分布，並完善了敘述土壤碳的方法 (Bispo et al., 2017; Smith et al., 2020)；以及
- ◆ 資料覆蓋面擴大，涵蓋了迄今為止在這種泛熱帶 (pantropic) 研究中代表性不足的熱帶地區（如非洲）；例如，目前的綜合資料庫包括 31 個來自非洲的觀察資料，其資料量佔資料庫的 46%。

當目前的資料庫被分成不同的熱帶地區時（非洲、美洲和亞太地區），一個地區內的土壤有機質估計值有很大的差異，但各地區之間的有機碳存量差異並沒有那麼大（表 3）。非洲、美洲和亞太地區的平均土壤有機碳分別為 114.9 噸碳 / 公頃、116.5 噸碳 / 公頃和 87.1 噸碳 / 公頃（表 3）。當區域的土壤有機碳值與其他研究的估計值比較時，非洲的平均有機碳估計值高於 Henry 及其同事研究的非洲熱帶和亞熱帶潤濕闊葉林（broadleaf forests）土壤深度 30 公分之處的估計值（57 噸碳 / 公頃）（Henry et al., 2009）。亞太地區的平均土壤有機碳估計值略高於 Abu Bakar (2000) 紀錄的馬來西亞熱帶龍腦香森林（dipterocarp forests）的數值（50 噸碳 / 公頃）。

表 3. 非洲、美洲和亞太地區未受干擾的成熟熱帶潤濕森林之土壤有機碳庫存（噸碳 / 公頃）估計值（平均值+標準差）

熱帶地區	土壤有機碳範圍 (噸碳 / 公頃)	土壤有機碳平均值 (噸碳 / 公頃)	N	土壤深度範圍 (公分)
非洲	9.9~349.4	114.9 ± 15.9	31	10~100
美洲	20.2~330	116.5 ± 18.4	21	5~800
亞太地區	27.5~300	87.1 ± 18.5	15	30~300

N= 觀察的地點數量；非洲的觀察地點都在馬達加斯加，美洲的觀察地點橫跨加勒比海地區、中美洲、夏威夷和南美洲，而太平洋的觀察地點則位於巴布亞紐幾內亞內

熱帶潤濕森林的土地利用變化可以改變土壤碳庫存，這可能會影響大氣中二氧化碳的濃度。為了瞭解將熱帶潤濕森林轉換為其他土地用途對土壤有機碳的影響，自非洲、亞太地區、加勒比海地區、中南美洲和北美洲國家等 54 份出版物中，整理出將未受干擾的成熟熱帶潤濕森林轉換為耕地、牧場和植栽之用後，土壤有機碳庫存變化的資料（附錄 2）。平均而言，土地利用變化使得土壤碳庫存減少約 9%，當資料被分成不同的土地利用類別研究時，顯示轉換為牧場用途後，土壤碳存量有所增加；轉為耕地和植栽用途後，土壤碳存量則減少。森林轉換為牧場後，土壤有機碳增加了 8.1%（表 4），而從天然林（natural forest）轉為植栽用途後（包括樹木植栽和棕櫚油植栽），土壤有機碳下降了 12.9%；所有轉換中森林轉換為耕地時損失最大（土壤有機碳減少 22.2%）。

表 4. 未受干擾的森林轉換為耕地、牧場和植栽用途後的土壤碳庫存變化

土地利用類型	土壤有機碳庫存變化 (%)
森林轉換到耕地	-22.3 ±6.55
森林轉換到牧場	8.1 ±3.21
森林轉換到植栽之用	-12.9 ±9.67

註：平均值後面括號內的數值是自助法 (bootstrapped) 的 95% 信賴區間。

所列之土壤有機碳變化與未受干擾的森林轉換到不同土地利用類型後，土壤碳損失的文獻回顧和綜合報告中的數值接近。Guo 和 Gifford (2002) 整理 72 份文獻資料評估土地利用變化對土壤有機碳的影響，顯示當森林轉換為植栽用途後，土壤有機碳下降了 13%，而森林轉換為耕地後土壤有機碳則下降了 42%，與本報告評估之結果相比，轉為耕地的平均值相差約 2 倍。此外，作者還點出牧場土壤碳庫存的增加 (8.1%)。一份關於全球熱帶地區所有主要土地利用類型的土壤有機碳變化研究，自 385 項研究中估計出造成土壤有機碳損失最大的是當原始森林轉換為耕地 (25%) 和多年生作物 (perennial crops) 耕地 (30%) (Don, Schumacher and Freibauer, 2011)。另一項關於森林轉換為農業用地 (agricultural land) 後土壤碳損失的全球研究報告顯示，與寒帶地區 (31%) 相比，熱帶地區 (41%) 與溫帶地區 (52%) 的損失更大 (Wei et al., 2014)。Powers 等人 (2011) 文獻回顧熱帶地區 14 種土地利用轉型中的土壤碳變化，發現雖然森林轉換到游耕 (shifting cultivation) 和永久性耕地後，分別減少了 15.4% 和 18.5% 的土壤碳，但當森林轉換到牧場，以及牧場轉換到次生林後，卻會使土壤碳庫存增加。不過，另有其他研究報告表示，當牧場轉換成次生林時，碳庫存會下降 (Guo and Gifford, 2002)。

一般而言，成熟的森林轉換成耕地所造成的碳庫存下降，儘管在變化的幅度上存在差異，似乎與其他研究人員觀察整個熱帶地區的結果一致。然而，對耕地來說，這種趨勢是很有可能被反轉，例如，在一項關於植樹造林對耕地影響的統合分析中，Laganière、Angers 和 Pare (2010) 表示，在耕地植樹造林之後，土壤有機碳庫存增加 26%，但與耕地不同的是，其他土地利用轉型 (如牧場轉換到次生林) 顯現出的碳庫存的變化是多變的。這種變化可能是由於取樣程序和方法的不同，以及一些熱帶地區土地利用類型的代表性不足。例如，在目前的資料庫中，森林轉為牧場後的碳庫存變化在美洲最突出，而在非洲則最不具代表性 (表 5)。這種代表性不足的情況，無法適切地將土地利用對土壤碳庫存的影響變化推斷到其他區域或全球。Powers 等人 (2011) 在整個熱帶地區 80 項研究中，文獻回顧關於土地利用轉換後有碳庫存變化的 837 項觀察資料，發現年均降水量和黏土礦化度 (clay soil mineralogy) 是關鍵的影響因素，但他們也提醒讀者，不要因為地域偏見 (geographic bias) 去推斷出土壤有機碳變化的平均值，除非實地觀察 (field observations) 的分布與生物物理條件 (biophysical conditions) 的分布一致。

表 5. 热帶地區土地利用類型中土壤碳庫存的變化

土地利用	非洲	美洲	亞太地區
森林轉換耕地	-33.7 ±10.95	-18.5 ±7.64	-35.2 ±7.67
森林轉換牧場	-	7 ±3.37	14.9 ±9.44
森林轉換植栽用途	-17.7 ±17.90	-10.4 ±19.64	-7.2 ±12.53

注：平均值後面括號內的數值是自助法的 95% 信賴區間。

4. 热帶潤濕森林保育對提供特定生態系統服務的重要性

4.1. 最小化對土壤功能的威脅

热帶森林是全球最大的生物多樣性和碳庫宿主，對於調節動態的生物地球化學 (bio-geochemical) 過程和溫室氣體與大氣間的交換相當重要 (Smith et al., 2016; Eiserhardt, Couvreur and Baker, 2017)。热帶森林在當地提供服務（例如：為當地社會提供潔淨的水、住所、食物和燃料），對土壤保育也非常重要；土壤是透過防止土壤侵蝕、土壤鹽化和鹼化、土壤汙染、土壤酸化、土壤生物多樣性喪失、土壤壓實和土壤水分管理來保育。热帶潤濕森林保育可以防止陸塊 (land mass) 移動，因為樹根將土壤固定在一起，穩定山丘和山坡，提供機械性結構來支持土壤，防止陸塊淺層移動 (shallow movement)。透過良好的森林管理維持森林覆蓋，將能減少地面逕流 (surface run-off)，降低水土流失的風險。

土壤提供如氮 (N)、磷 (P) 和鉀 (K) 等養分，支持對人類和動物的食物供應以及能源和纖維不可或缺的生物量生產 (biomass production) (Smith et al., 2016)。热帶潤濕森林透過不同的自然過程，在這些養分循環中發揮重要作用，例如在植被的多年生組織中之養分吸收和儲存、產生枯枝落葉、分解枯枝落葉、土壤動植物的養分轉化、從大氣輸入養分，以及風化原生礦物 (primary mineral) (Foster and Bhatti, 2006)。作為其他土地利用而開墾的森林，會對這些過程產生負面影響，並減少根部吸收之養分的效力 (Foster and Bhatti, 2006)。蒸發散和降水之間的平衡對於避免森林地景的季節性缺水非常重要，這種平衡可以確保土壤中有足夠的淋洗作用 (leaching)，能將鹽分從土壤剖面 (soil profile) 淋出 (Schofield and Kirkby, 2003)。砍伐樹木會破壞水平衡 (hydrological balance) 並導致鹽分在底土 (subsoil) 堆積 (Schofield and Kirkby, 2003)。

「Soil pollution」和「soil contamination」兩個英文名詞通常可以互換使用，中文皆可翻成「土壤汙染」，或將後者翻為「土壤沾染」。FAO 和 ITPS (2015) 將土壤汙染 (soil pollution) 定義為「土壤中存在的化學物質或其他物質不符合要求，並且 / 或者濃度高於正常標準，對任何非目標生物 (non-targeted organism) 產生不利影響」。相反地，「土壤沾染 (soil contamination) 發生在化學物質或其他物質的濃度高於自然產生的濃度，但是不一定會造成傷害」 (FAO and ITPS, 2015)。熱帶森林活動造成的土壤汙染 (soil pollution)，如採礦、林區小農過度使用農用化學品 (agrochemicals) [如農藥 (pesticides) 和肥料]，會導致土壤被砷、鉛和鎘等元素汙染 (Rodríguez-Eugenio et al., 2018)。汙染物有可能影響土壤的生物多樣性 [土壤微生物和較大的土壤生物 (soil-dwelling organisms)]，並影響這些生物提供的服務 (FAO, 2017)。因農業開墾而失去的森林覆蓋，對 60% 的土壤大型動物 (macrofauna) 以及 51% 的土壤微生物質 (soil microbial) 群落屬性 (即豐富度、生物質、豐富度和多樣性指數) 的反應有負面影響 (Franco et al., 2019)。

熱帶潤濕森林土壤透過調節水循環，增強水淨化 (water purification) 和保水力 (water holding capacity)，以及減少逕流造成的土壤侵蝕風險，為人類提供重要的生態系統服務。土壤所能儲存的水量取決於許多因素，包括土壤層的厚度及其孔隙度 (porosity)，而這些因素受到土壤有機質數量，以及生物活動形成的大孔隙 (macropores) 之影響 (Kirkham, 2014)。在森林覆蓋較低的地區，由於雨季和大雨過後的尖峰流量 (peak flows) 較大，溪流和河流的總體水量可能會增加。此外，水質也會受到流域內森林覆蓋的影響。巴西東南部的一項研究 (De Mello et al., 2018)，比較森林覆蓋為 55% 和 35% 之流域的水質，結果顯示森林覆蓋較低的流域水質較差 [固體濁度 (solid turbidity)、養分和大腸桿菌 (coliform) 數值較高]。因此，將森林轉換為其他土地利用類型會造成水、可用水 (water availability) 和品質的潛在變化 (Smith et al., 2016)。

4.2. 增加生產與糧食安全

熱帶潤濕森林及其相關的高生物多樣性和其支持的生態系統服務，對於實踐永續農業相當重要。農業仰賴大量的生態系統服務，例如授粉、維護土壤結構和肥力、生物害蟲控制、養分循環和維護水文系統 (hydrological systems) (Power, 2010)。根據估計，世界 75% 的主要糧食作物 (food crops) 都受益於動物授粉，以便生產水果、種子和蔬菜 (FAO and UNEP, 2020)。森林為特定的糧食和經濟作物 (cash crop) 生產提供合適的微氣候 (microclimate)，間接促進糧食生產 (Jamnadass et al., 2015)。此外，多數人，特別是貧瘠區域的人，仰賴熱帶潤濕森林獲得糧食安全、生存和普遍的利益。對於大多數依賴森林的在地族群而言，森林是非木材森林產物的重要來源，據估計，全世界約有 10~15 億人依賴野生食物維生，其中包括野生肉、可食用植物產品、可食用昆蟲、魚和蕈菇類 (Vira, Wildburger and Mansourian, 2015; FAO, 2020)。

事實上，熱帶潤濕森林中的植物物種提供了重要的食物和營養來源，並幫助以森林為生的在地族群糧食安全的四個要素，即糧食安全的可用性、可得性、利用性和穩定性（FAO, 2020）。在大多數邊緣地帶，森林中的樹木提供一系列的食物，如水果、葉菜類蔬菜（leafy vegetables）、堅果、種子和食用油，幫助實現飲食多樣化，強化食品的持續流動（Jamnadass et al., 2015）。這在農民面臨食物供應和獲取不足的時期（如乾旱年）特別有用，增加了實現營養安全的風險（Jamnadass et al., 2015; Amissah and Aflakpui, 2020）。

4.3. 改善人類福祉

從經濟和生態的觀點來看，對熱帶潤濕森林都非常重要。其為數百萬人提供了無數的生態系統服務，增進人類福祉（MEA, 2005）。這些服務包括從調節氣溫和淨化空氣到提供食物和藥用植物。此外，熱帶潤濕森林還是人們（尤其是居住在城市地區的人們）進行娛樂、遊覽賞析和緩解壓力的重要場所，能促進日益都市化之人口的健康。很少有研究能釐清自然環境（如潤濕森林）和人類福祉之間的關係；視覺上有吸引力且人們較偏好的環境被認為能夠促進良好的心理健康，因為其可以增進人們面對不確定性的能力（Ivarsson and Hagerhall, 2008）。而攜帶疾病之動物（如哺乳動物、鳥類和昆蟲）會居住在熱帶潤濕森林的範圍內，因此其有助於防止動物傳染疾病給人類（Zell, 2004）。

4.4. 緩解和適應氣候變遷

熱帶潤濕森林是一個儲存碳的重要地方（Sullivan et al., 2017），全球森林碳密度最高的地方是南美洲、西非和中非的森林，僅活體生物量就儲存了每公頃約 120 噸的碳，高於每公頃 75 噸的全球平均值（FAO, 2020）。熱帶森林土壤也儲存了與活體生物量大約同等數量（30%）的碳（詳見本章第3節）。森林枯木和枯枝落葉也儲存了 10% 的陸地碳，其對於透過光合作用和呼吸作用穩定及減少大氣中的二氧化碳濃度相當重要（Houghton et al., 2015）。有鑑於森林對全球有重要意義而且其為碳匯（carbon sink），因此減少砍伐森林以及減少森林退化將是緩解和適應氣候變化影響的有效方法。

5. 挑戰和趨勢概況

熱帶潤濕森林的消失佔全球森林覆蓋損失的 32%，其中幾乎一半發生在南美洲的雨林 (Hansen et al., 2013)。過去關於熱帶森林砍伐率的統計資料在許多研究中不盡相同，部分原因是不同國家評估砍伐森林的方法不同，以及各國為進行此類評估提供的資料品質不同 (Dupuis et al., 2020)。熱帶森林持續以驚人的速度被砍伐，特別發生在熱帶潤濕森林 (Giam, 2017)。據估計，土地利用變化導致的森林退化和砍伐森林佔全球人類造成之溫室氣體排放的 12~20% (Harris et al., 2012)。砍伐森林的原因眾多，人們特別會因為土地利用轉換到農業、採礦、基礎設施擴展和城市擴張等原因砍伐森林 (Malhi et al., 2013; Putz and Romero, 2015; Garcin et al., 2018)，而森林退化則是由火災和非永續的森林產品採伐等因素造成的。

在全球間，農業向新的森林邊界擴張已被認定為森林消失的主因之一 (Curtis et al., 2018; FAO and UNEP, 2020)。據估計，2000~2010 年間，大規模的商業農業佔熱帶砍伐森林的 40%，當地自給自足式農業 (subsistence agriculture) 也佔了同期砍伐森林的 33% (FAO and UNEP, 2020)。在熱帶潤濕森林地區中，特別是在非洲熱帶地區，農業生產是當地經濟的主要來源，在大多數情況下，刀耕火種是農民最常用的耕作措施。此方法是透過清除森林區域來準備土地以種植作物，但是由於作物產量低以及雜草入侵，幾年後（區域不同，時間長短因此不同，但大部分為兩到四年）這些土地就會被遺棄了 (Pedroso-Junior, Adams and Murrieta, 2009)。全球估計有 3500 萬到 10 億人依靠刀耕火種這種耕作系統維持生計 (Filho, Adams and Murrieta, 2013)。刀耕火種是傳統游耕的轉換階段，已經實行了數千年之久 (Garcia et al., 2018)。對於刀耕火種和一般游耕的永續性，以及兩者對熱帶森林生態系統保育的影響方面，一直有著截然不同的觀點 (Pedroso-Junior, Adams and Murrieta, 2009; Filho, Adams and Murrieta, 2013)。在某些情況下，刀耕火種被認為是沒有永續性的，是砍伐森林的主因，特別是在人口增加和休耕期大幅減少的地區 (Mertz et al., 2009)。

採礦業威脅了全世界熱帶森林保育，在一些國家中，包括採礦在內的資源開採被許多政治菁英 (political elite) 視為是邁向發展的途徑 (Bebbington et al., 2018)。非洲、拉丁美洲和亞洲等發展中國家採礦業興盛，其有大量的熱帶森林覆蓋，但這些國家的礦產治理系統薄弱，能夠執行控制採礦活動的法規能力較不足 (Sonter et al., 2017; Sonter, Ali and Watson, 2018; Hund, Schure and van der Goes, 2017)。露天採礦 (surface mining) 是發展中國家最主要的採礦形式，採礦作業分成不同的階段，其中包含勘探、開採、加工和關閉，都會造成森林消失 (Hosonuma et al., 2012; Hund, Schure and van der Goes, 2017; Sonter, Ali and Watson, 2018)；其他的基礎設施發展（如建築物、城市擴張）也會對森林產生間接影響，以支持與採礦作業有關且不斷增長的勞動力，這些基礎設施的發展都會進一步增加砍伐森林的機會 (Bebbington et al., 2018)。例如，在亞馬遜河的巴西一帶，2005~2015 年間，10% (1 萬 1670 平方公里) 的砍伐森林歸因於採礦 (Sonter et al., 2017)。

熱帶潤濕森林天生就不適應火災，傳統上不會經歷頻繁和強烈的年度火災，因為熱帶潤濕森林的特點是年降水量高。然而，近幾十年來，由於與氣候變遷相關的聖嬰現象（El Niño）等氣候極端事件加上人類活動，熱帶潤濕森林變得更容易發生火災，而火災事件也不斷增加（Cochrane, 2003; Dwomoh et al., 2019）。火災破壞了林區、造成森林退化，並減少生物多樣性、土壤微生物和生態系統服務的提供，從而影響人類福祉和生計（Bonan, 2008）。2015年，估計有9800萬公頃的森林遭受火災影響，主要發生在熱帶地區，大約有4%的森林總面積被燒毀（FAO, 2020），被火燒毀的森林總面積中有很高的比例（超過2/3）是在非洲和南美洲（FAO, 2020）。火災後立即導致的微生物活動，減少了土壤孔隙率和酸鹼值，進而影響了植物生長（IUFRO, 2018），此外森林的碳儲量和氣候調節潛力則面臨減少或損失的情形發生（Bonan, 2008）。

工業伐木（industrial logging）是熱帶地區森林管理的一個主要工作，在2000~2005年間，全球約有20%（390萬平方公里）的熱帶森林用於擇伐（selective logging）（Asner et al., 2009），而用於擇伐的森林面積在所有熱帶地區中持續擴大，特別是在迦納和加彭等非洲國家，將近半數的森林資源用於木材租賃（timber leases）（Hawthorne and Abu-Jam, 1995; Asner et al., 2005）。此外，非法砍伐（illegal logging）活動在許多熱帶地區已經十分普遍（Hansen and Treue, 2008; de Lima et al., 2018）。在全球，伐木佔熱帶森林退化的50%以上（Hosonuma et al., 2012），伐木透過修築通道開闢了森林，為農民和獵人提供擴大活動範圍的機會。而在某些熱帶地區，因伐木而退化的森林，由於燃料堆積和修建通道（透過道路建設）變得更容易發生火災，最終在反覆地發生意外火災後被摧毀。

儘管伐木常常導致熱帶森林退化，但永續的森林採伐可以為農村社區創造就業機會，並為維持森林的土地利用和防止砍伐森林提供獎勵措施。被砍伐的森林有能力維持保育價值，並提供關鍵的環境服務和功能，包括生物多樣性、水調節和碳庫存（Putz et al., 2012）。多年來，許多熱帶國家在應用永續森林管理原則和加強採伐及其他育林（silvicultural）技術方面有所改善（Rutishauser and Herold, 2017; FAO, 2020）。事實上，最近對森林資源的全球評估和對永續發展目標的監測明確，在永續森林管理方面取得了重大進展，也就是森林損失率持續下降，更多的林區受到保護以及被納入長期管理計畫，另外，更多的生產林（production forests）也得到國際標準的認證（FAO, 2020）。



© Shalom D'Addo-Danso



© Shalom D'Addo-Danso

照片 2. 迦納的潤濕森林。上圖：Bobiri 保護區；下圖：Birim 森林保護區



© Shalom D'Addo-Danso

照片 3. 迦納 Ankasa 保護區的雨林

參考文獻

- Abu Bakar, R.** 2000. Carbon economy of Malaysian jungle/forest and oil palm plantation. Paper presented at the Workshop on LUCC and Greenhouse Gas Emissions Biophysical Data. December 16, 2000. Institute Pertanian Bogor, Indonesia.
- Achard, F., Beuchle, R., Mayaux, P., Stibig, H-J., Bodart, C., Brink, A., Carboni, S., Desclée, B., Donnay, F., Eva, H.D., Lupi, A., Ras̄i, R.V., Seliger, R. & Simonetti, D.** 2014. Determination of tropical deforestation rates and related carbon losses from 1990 to 2010. *Global Change Biology*, 20: 2540-2554. <https://doi.org/10.1111/gcb.12605>
- Amissah L. & Aflakpui, G.K.S.** 2020. Achieving Food and Nutrition Security: The Role of Agroecology. In Filho, W.L., Azul, A.M., Brandli, L, Özuyar, P.G., Wall, T. (Eds.) *Zero Hunger*. Encyclopedia of the UN Sustainable Development Goals. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95675-6_58
- Asner, G.P., Rudel, T.K., Aide, T.M., De Fries, R. & Emerson, R.** 2009. A contemporary assessment of change in humid tropics. *Conservation Biology*, 23: 1386-1395. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01333.x>
- Asner, G.P., Knapp, D.E., Broadbent, E.N., Oliveira, P.J.C., Keller, M. & Silva, J.N.M.** 2005. Selective logging in the Brazilian Amazon. *Science*, 310: 480-482. <https://doi.org/10.1126/science.1118051>
- Bebbington, A.J., Bebbington, D.H., Sauls, L.A., Rogan, J., Agrawal, S., Gamboa, C., Imhof, A., Johnson, K., Rosa, H., Royo, A., Toumbourou, T. & Verdum, R.** 2018. Resource extraction and infrastructure threaten forest cover and community rights. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(52): 13164–13173. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812505115>
- Bispo, A., Andersen, L., Angers, D.A., Bernoux, M., Brossard, M., Cécillon, L., Comans, R.N.J., Harmsen, J., Jonassen, K., Lamé, F., Lhuillery, C., Maly, S., Martin, E., McElnea, A.E., Sakai, H., Watabe, Y. & Eglin, T.K.** 2017. Accounting for Carbon Stocks in Soils and Measuring GHGs Emission Fluxes from Soils: Do We Have the Necessary Standards? *Frontiers in Environmental Science*, 5. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00041>
- Bonan, G.B.** 2008. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320(5882): 1444–1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Brown, S. & Lugo, A.E.** 1982. The Storage and Production of Organic Matter in Tropical Forests and Their Role in the Global Carbon Cycle. *Biotropica*, 14(3): 161–187. <https://doi.org/10.2307/2388024>
- Cochrane, M.A.** 2003. Fire science for rainforests. *Nature*, 421(6926): 913–919. <https://doi.org/10.1038/nature01437>
- Curtis, P.G., Slay, C.M., Harris, N.L., Tyukavina, A. & Hansen, M.C.** 2018. Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 361: 1108-1111. <https://doi.org/10.1126/science.aau3445>
- de Lima, L.S., Merry, F., Soares-Filho, B., Oliverira, H., dos Santos Damaceno, C. & Bauch, M.A.** 2018. Illegal logging as a disincentive to the establishment of a sustainable forest sector in the Amazon. *PLoS ONE*, 13: e0207855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0207855>.

de Mello, K., Valente, R.A., Randhir, T.O. & Vettorazzi, C.A. 2018. Impacts of tropical forest cover on water quality in agricultural watersheds in southeastern Brazil. *Ecological Indicators*, 93: 1293-1301.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.030>

Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C. & Wisniewski, J. 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263: 185-190.
<https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>

Don, A., Schumacher, J. & Freibauer, A. 2011. Impact of tropical land-use change on soil organic carbon stocks – a meta-analysis. *Global Change Biology*, 17: 1658–1670. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>

Dupuis, C., Lejeune, P., Michez, A. & Fayolle, A. 2020. How can remote sensing help monitor tropical moist forest degradation? –A systematic review. *Remote Sensing*, 12: 1087.
<https://doi.org/10.3390/rs1271087>

Dwomoh, F.K., Wimberly, M.C., Cochrame, M.A. & Numata, I. 2019. Forest degradation promotes fire during drought in moist tropical forests of Ghana. *Forest Ecology and Management*, 440: 150-168.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.014>

Eiserhardt, W.L., Couvreur, T.L.P. & Baker, W.J. 2017. Plant phylogeny as a window on the evolution of hyperdiversity in the tropical rainforest biome. *New Phytologist*, 214: 1408-1422.
<https://doi.org/10.1111/nph.14516>

FAO. 2017. *Soil organic carbon: the hidden potential*. FAO, Rome, Italy. (also available at:
<http://www.fao.org/3/I6937EN/i6937en.pdf>)

FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020: Main report*. Food and agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. <https://doi.org/10.4060/ca9825en>

FAO & UNEP. 2020. *The State of the World's Forests 2020*. Forests, biodiversity and people. Rome.
<https://doi.org/10.4060/ca8642en>

FAO & ITPS. 2015. *Status of the World's Soil Resources*. FAO, Rome, Italy.
<http://www.fao.org/3/i5199e/I5199E.pdf>

Foster, N.W. & Bhatti, J.S. 2006. Forest ecosystems: nutrient cycling. *Encyclopedia of Soil Science*, 1: 718-721. <https://doi.org/10.1081/E-ESS-120001709>

Filho, A.A.R., Adams, C. & Murrieta, R.S.S. 2013. The impacts of shifting cultivation on tropical forest soil: a review. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Humanas*, 8: 693-727.

Franco, A.L.C., Bruno, S., Silva, A.L.C. & Wall, D.H. 2019. Amazonian deforestation and soil biodiversity. *Conservation Biology*, 33: 590-600. <https://doi.org/10.1111/cobi.13234>

Fujii, K., Shibata, M., Kitajima, K., Ichie, T., Kitayama, K. & Turner, B.L. 2018. Plant–soil interactions maintain biodiversity and functions of tropical forest ecosystems. *Ecological Research*, 33: 149-160.
<https://doi.org/10.1007/s11284-017-1511-y>

Garcin, Y., Deschamps, P., Ménot, G., de Saulieu, G., Schefub, E., Sebag, D., Dupont, L.M., Oslishy, R., Brademann, B., Mbusnum, K.G., Onana, J-M., Ako, A.A., Epp, L.S., Tjallingii, R., Strecker, M.R., Brauer, A. & Sachse, D. 2018. Early anthropogenic impact on western Central African rainforests 2,600 y ago. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115: 3261-3266.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1715336115>

Giam, X. 2017. Global biodiversity loss from tropical deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114: 5775-5777. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706264114>

Guo, L.B. & Gifford, R.M. 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. *Global Change Biology*, 8: 345–360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>

Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A. & Townshend, J.R. 2013. High-resolution Global Maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342: 850–853.
<https://doi.org/10.1126/science.1244693>

Hansen, C.P. & Treue, T. 2008. Assessing illegal logging in Ghana. *International Forestry Review*, 10: 573-590.

Harris, N.L., Brown, S., Hagen, S.C., Saatchi, S.S., Petrova, S., Salas, W., Hansen, M.C., Potapov, P.V. & Lotsch, A. 2012. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. *Science*, 336:1573-1576.

Hawthorne, W.D. & Abu-Jam, M. 1995. Forest protection in Ghana (with particular reference to vegetation and plant species). IUCN, Gland, CH. (also available at:
<https://portals.iucn.org/library/node/6950>)

Henry, M., Valentini, R. & Bernoux, M. 2009. Soil carbon stocks in ecoregions of Africa. *Biogeosciences Discussions*, 6: 797-823. <https://doi.org/10.1505/ifor.10.4.573>

Holl, K.D. 2002. Restoration of tropical forests. In J. van Andel, J. Aronson (Eds.) *Restoration Ecology: The new frontier*. Blackwell Publishing Ltd.

Hosonuma, N., Herold, M., De Sy, V., De Fries, R.S., Brockhaus, M., Verchot, L., Angelsen, A. & Romijn, E. 2012. An assessment of deforestation and forest degradation drivers in developing countries. *Environmental Research Letters*, 4: 044009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044009>

Houghton, R.A., Byers, B. & Nassikas, A.A. 2015. A role for tropical forests in stabilizing atmospheric CO₂. *Nature Climate Change*, 5:1022–1023.

Hund, K., Schure, J. & van der Goes, A. 2017. Extractive industries in forest landscapes: options for synergy with REDD+ and development of standards in the Democratic Republic of Congo. *Resources Policy*, 54: 97-108.

Ivarsson, C.T. & Hagerhall, C.M. 2008. The perceived restorativeness of gardens—Assessing the restorativeness of a mixed built and natural scene type. *Urban Forestry and Urban Greening*, 7: 107-118.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2008.01.001>

Jammadass, R.H., McMullin, S., Iiyama, M., Dawson, I.K., Powell, B., Termote, C., Ickowitz, A., Kehlenbeck, K., Vinceti, B., Vliet, N.V. & Keding, G.B. 2015. Understanding the roles of forests and tree-based systems in food provision. In V. Bhaskar, C. Wildburger, S. Mansourian (Eds.) *Forests, Trees and Landscapes for Food Security and Nutrition. A Global Assessment Report*. International Union of Forest Research Organizations (IUFRO), 25-50p.

Jobbágy, E.G. & Jackson, R.B. 2000. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 10: 423-436. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)

Kirkham, M.H. 2014. Field capacity, wilting point, available water, and the nonlimiting water range. In M.B. Kirkham (Ed.) *Principles of Soil and Plant Water Relations. Second Edition*, Academic Press, Boston.

Laganière, J., Angers, D.A. & Paré, D. 2010. Carbon accumulation in agricultural soils affect afforestation: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 16: 439–453. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01930.x>

Lal, R. 2005. Soil carbon sequestration in natural and managed tropical forest ecosystems. *Journal of Sustainable Forestry*, 21: 1-30. https://doi.org/10.1300/J091v21n01_01

Malhi, Y., Adu-Bredu, S., Asare, R.A., Lewis, S.L. & Mayaux, P. 2013. African rainforests: past, present and future. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1625): 20120312. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0312>

Marín-Spiotta, E. & Sharma, S. 2013. Carbon storage in successional and plantation forest soils: a tropical analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 22: 105-117. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2012.00788.x>

Millennium Ecosystem Assessment (MEA). 2005. Ecosystems and human wellbeing. *Synthesis*. (also available at: <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>)

Myers, N. 1980. Conversion of Tropical Moist Forests. National Academy of Sciences, Washington, DC. <https://doi.org/10.17226/19767>

Mertz, O., Padoch, C., Fox, J., Cramb, R.A., Leisz, S.J., Lam, N.T. & Vien, T.D. 2009. Swidden change in Southeast Asia: understanding causes and consequences. *Human Ecology*, 37: 259-264. <https://doi.org/10.1007/s10745-009-9245-2>

Nave, L., Marín-Spiotta, E., Ontl, T., Peters, M. & Swanston, C. 2019. Soil carbon management. In M. Busse, C.P. Giardina, D.M. Morris, D.S. Page-Dumroese (Eds.) *Global Change and Forest Soils: Cultivating stewardship of a finite natural resource*, Vol. 36. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63998-1.00011-2>.

Pedroso-Junior, N.N., Adams, C. & Murrieta, R.S. 2009. Slash-and-burn agriculture: a system in transformation. In P. Lopes, A. Begossi (Eds.) *Current Trends in Human Ecology*. Cambridge Scholars Publishing in association with GSE Research.

Post, W.M., Emanuel, W.R., Zinke, P.J. & Stangenberger, A.G. 1982. Soil carbon pools and world life zones. *Nature*, 298: 156-159. <https://doi.org/10.1038/298156a0>

Power, A.G. 2010. Ecosystem services and agriculture: trade-offs and synergies. *Philosophical Transactions of Royal Society of London. Series: Biological Sciences*, 365: 2959–2971.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0143>

Powers, J.S., Corre, M.D., Twine, T.E. & Veldkamp, E. 2011. Geographic bias of field observations of soil carbon stocks with tropical land-use changes precludes spatial extrapolation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108: 6318-6322. <https://doi.org/10.1073/pnas.1016774108>

Putz, F.E. & Romero, C. 2015. Futures of tropical forests (*sensu lato*). *Biotropica*, 46: 495-505.
<https://doi.org/10.1111/btp.12124>

Putz, F.E., Zuidema, P.A., Synnott, T., Peña-Claros, M., Pinard, M.A., Sheil, D., Vanclay, J.K., Sist, P., Gourlet-Fleury, S., Griscom, B., Palmer, J. & Zagt, R. 2012. Sustainable conservation values in selectively logged tropical forests: the attained and the attainable. *Conservation Letters*, 5: 296-303.
<https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2012.00242.x>

Raich, J.W., Russell, A.E., Kitayama, K., Parton, W.J. & Vitousek, P.M. 2006. Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. *Ecology*, 87: 76-87. <https://doi.org/10.1890/05-0023>

Rodríguez-Eugenio, N., McLaughlin, M. & Pennock, D. 2018. Soil pollution: a hidden reality. FAO, Rome. (also available at: <http://www.fao.org/3/i9183en/I9183EN.pdf>)

Rutishauser, E. & Herold, M. 2017. *Sustainable forest management in the tropics: between myth and opportunities*. (also available at: http://redd-monitor.org/wp-content/uploads/2018/01/SFM_myth_opportunity_Nov.17-003.pdf)

Schofield, R.V. & Kirkby, M.J. 2003. Application of salinization indicators and initial development of potential global soil salinization scenario under climatic change. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(3).
<https://doi.org/10.1029/2002GB001935>

Sommer, A. 1976. Attempt at an assessment of the world's tropical moist forests. *Unasylva*, 28: 5-25.

Sontner, L.J., Ali, S.H. & Watson, J.E.M. 2018. Mining and biodiversity: key issues and research needs in conservation science. *Proceedings of the Royal Society B*, 285: 20181926.
<https://dx.doi.org/10.1098/rspb.2018.1926>

Sontner, L.J., Herrera, D., Barrett, D.J., Galford, G.L., Moran, C.J. & Soares-Filho, B.S. 2017. Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 8:1-7.
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-00557-w>

Smith, P., House, J.I., Bustamante, M., Sobocká, J., Harper, R., Pan, G., West, P.C., Clark, J.M., Adhya, T., Rumpel, C., Paustian, K., Kuikman, P., Cotrufo, M.F., Elliott, J.A., McDowell, R., Griffiths, R.I., Asakawa, S., Bondeau, A., Jain, A.K., Meersmans, J. & Pugh, T.A.M. 2016. Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 22(3): 1008–1028.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13068>

Smith, P., Soussana, J.-F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D.P., Batjes, N.H., Egmond, F. van, McNeill, S., Kuhnert, M., Arias-Navarro, C., Olesen, J.E., Chirinda, N., Fornara, D., Wollenberg, E., Álvaro-Fuentes, J., Sanz-Cobena, A. & Klumpp, K. 2020. How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26(1): 219–241. <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>

Staal, A., Dekker, S.C., Xu, C. & van Nes, E.H. 2016. Bistability, spatial interaction, and the distribution of tropical forests and savannas. *Ecosystems*, 19: 1080-1091. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-0011-1>

Sullivan, M.J., Talbot, J., Lewis, S.L., Phillips, O.L., Qie, L., Begne, S.K., Chave, J., Cuni-Sanchez, A., Hubau, W., Lopez-Gonzalez, G. & Miles, L. 2017. Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. *Scientific Reports*, 7:1-12. <https://doi.org/10.1038/srep39102>

Thomas, S.C. & Baltzer, J.L. 2002. Tropical forests *In Encyclopedia of Life Sciences*. London: Macmillan Publishers Ltd.

Vira, B., Wildburger, C., & Mansourian, S. 2015. *Forests, Trees and Landscapes for Food Security and Nutrition. A global assessment report*. IUFRO World Series 33, Vienna, pp. 159. (also available at: <https://www.cifor.org/knowledge/publication/5592/#>)

Wei, X., R., Shao, M. G., Gale, W. & Li, L.H. 2014. Global pattern of soil carbon losses due to the conversion of forests to agricultural land. *Scientific Reports*, 4: 4062. <https://doi.org/10.1038/srep04062>

Zell, R. 2004. Global climate change and the emergence/re-emergence of infectious diseases. *International Journal of Medical Microbiology Supplements*, 293:16-26. [https://doi.org/10.1016/s1433-1128\(04\)80005-6](https://doi.org/10.1016/s1433-1128(04)80005-6)





濕地

3. 濕地

Brian Tangen, Sheel Bansal

U.S. Geological Survey, Northern Prairie Wildlife Research Center, Jamestown, North Dakota,
United States of America

美國地質調查局北美草原野生生物研究中心

1. 定義與說明

濕地由高度多樣化的生態系統所組成，其特點是擁有一段時間的靜水（standing water）、季節性或永久性的飽和土壤（saturated soils），以及適應在飽和或淹水條件下生長的植被（Mitsch and Gosselink, 2007）。全球有許多濕地分類系統描述了無數的濕地類型，例如泥炭地、紅樹林、草本沼澤（marshes）、木本沼澤（swamp）、酸性泥炭沼澤（bogs）、礦質泥炭沼澤（fens）、鍋穴（keetles）〔壺穴（potholes）〕和嵌入高地的濕地（Finlayson and van der Valk, 1995; Tiner, 2003; Mahdavi et al., 2018）。濕地整體通常被劃分為兩個類別：（1）沿海／潮汐和（2）陸地／內陸／非潮汐，第二類還可進一步細分為有機和礦質土（mineral-soil）濕地，以及分為不同鹽度等級〔如淡水、半鹹水（brackish）、鹽水（saline）〕（如 Cowardin et al., 1979; Hiraishi et al., 2014）。

雖然濕地約佔全球陸地面積的 5~8%，其代表陸地土壤中儲存之有機碳約 20~30%（Mitsch and Gosselink, 2007; Lal, 2008; Mitsch et al., 2013; Amendola et al., 2018）。在各種濕地類型中，泥炭地是全球最大的土壤有機碳庫（見本手冊的第 5 冊第 11、12 和 13 章資料表單），而紅樹林是重要的藍碳（blue carbon）系統，其中包含內部產生的碳，以及透過沉積作用（sedimentation）從系統外部沉積的碳（見 Middleton 和 Ward，本手冊）。這種不成比例的土壤有機碳儲量主要是由於淹水和低氧條件導致的，而上述條件促進了與陸地生態系統相比較慢的分解速率（decomposition rates）。然而，當濕地被抽乾時，使其土壤變得通風（aerated），土壤有機碳庫存會被迅速分解並以二氧化碳的形式釋放到大氣中。

除了現有的大量土壤有機碳庫存外，濕地還被認為有相當大的潛力，可以透過高水準的初級生產力（primary productivity）從大氣中清除二氧化碳，從而為其土壤有機碳庫存累積額外的碳，促成長期的碳固存（例如 Euliss et al., 2006; Lal, 2008; Mitsch et al., 2013）。碳固存的過程發生在自然且完整的濕地中，但也與已復育或已復濕的濕地（restored and rewetting wetlands）非常相關，這些濕地的土壤有機碳庫存因人為的改變〔如排水（drainage）或土壤耕犁（tillage）〕而減少（照片 4，另見本手冊第 5 冊第 9 章資料表單的「濕地保育」和第 10 章「濕地復育」）。

儘管在一些濕地系統中土壤有機碳的累積速率 (accumulation rates) 可能需要幾 10 年的時間，但是著重於復育退化濕地的政策和管理行動有可能緩解人類溫室氣體 (greenhouse gas) 的排放速度。此外，保護現有且未受干擾的濕地之土壤有機碳庫存是限制二氧化碳排放到大氣中之有效的管理策略 (Tangen and Bansal, 2020) 。

儘管濕地是全球重要的土壤有機碳儲存地，但一些濕地 (即非鹽水) 的淹水和低氧環境有利於產生和排放甲烷，此種氣體為一種導致氣候變化之強大的溫室氣體 (Saunois et al., 2020) 。雖然濕地在全球自然產生的甲烷排放中佔很大的比例 (Whiting and Chanton, 2001; Bridgham et al., 2006; Mitsch et al., 2013; Saunois et al., 2020) ，但甲烷僅短暫存在，最終甲烷仍會與大氣達到平衡 (即濕地的甲烷排放量等於甲烷破壞 / 消耗量) 。因此，濕地通常是長期碳匯 (Mitsch et al., 2013) 。

2. 全球熱點分布

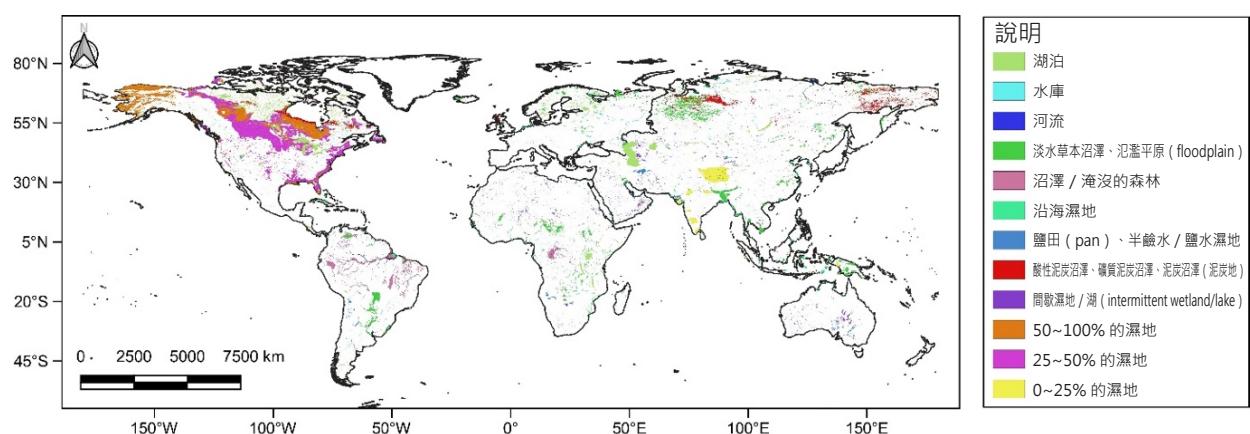


圖 10. 全球湖泊與濕地的分布

不同顏色代表不同類型的湖泊和濕地，以及代表 Lehner 和 Doll (2004) 定義及提出的濕地密度分類。

用於繪製本地圖的全球湖泊和濕地資料庫是從世界野生動物基金會網站上取得的 (<https://www.worldwildlife.org/pages/global-lakes-and-wetlands-database>)

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

表 6. 濕地土壤有機碳庫存(質量或單位面積質量)和碳固存率(每年質量或每年單位面積質量)

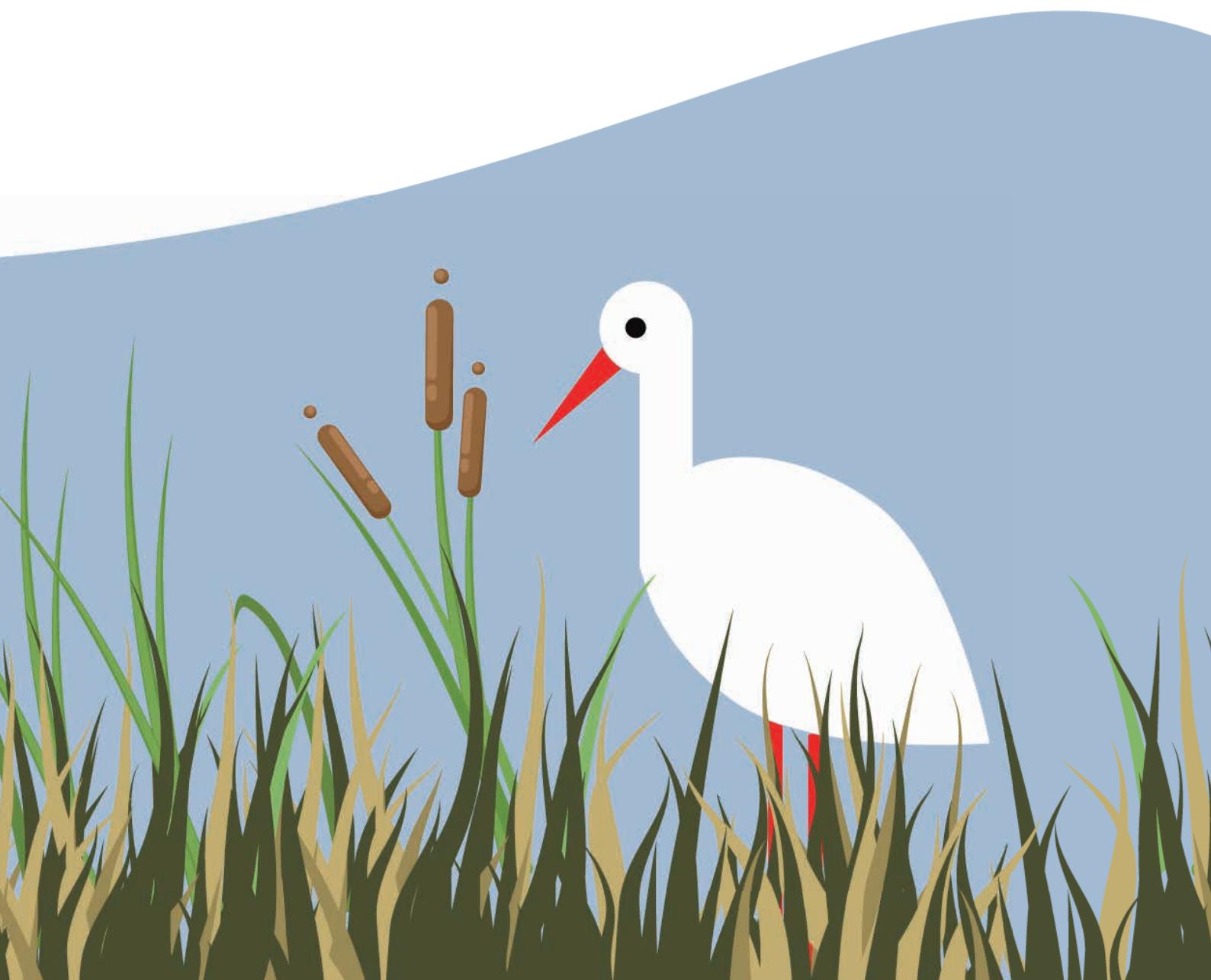
地區	方法	土壤有機 碳庫存 (10 億 噸碳)	土壤有機 碳庫存 (噸碳 / 公頃)	碳固存潛 力 (百萬 噸碳 / 年)	碳固存潛 力 (噸碳 公頃 / 年)	更多資訊	參考文獻
全球	庫存 / 固存	120~646		137	0.3~1.8	各種濕地類型。 根據文獻回顧和 建模估算。	Scharpenseel (1993); Mitra et al. (2005); Bridgham et al. (2006); Kochy et al. (2015); Villa and Bernal (2018)
	庫存		340~471			海岸有機土 (organic soil) 濕地。 根據文獻回顧估 算。	Hiraishi et al. (2014)
			108~286			海岸礦質土濕 地。根據文獻回 顧估算。	
			22~135			內陸礦質土濕 地。根據文獻回 顧估算。	
	固存		237.4	42.6	2.1	潮汐濕地。根據 文獻回顧和建模 估算。	Chmura et al. (2003); Ouyang and Lee (2020)
	庫存 / 固存	6.4		18.4~24	1.3~6.5	紅樹林。根據文 獻回顧估算。	Middleton and Ward, this man ual; Chmura et al. (2003); Bouil lon et al. (2008); Breithaupt et al. (2012); Alongi (2014); Hutchi son et al. (2014); Hamilton and Friess (2018)

地區	方法	土壤有機 碳庫存 (10 億 噸碳)	土壤有機 碳庫存 (噸碳 / 公頃)	碳固存潛 力 (百萬 噸碳 / 年)	碳固存潛 力 (噸碳 公頃 / 年)	更多資訊	參考文獻
	庫存	600~ 644				泥炭地。 根據文獻回顧估 算。	Beer et al., this manual; Yu et al. (2010); Leifeld and Menichetti (2018)
熱帶地 區	庫存	200				熱帶濕地。根據 文獻回顧估算。	Neue et al. (1997)
北美洲	庫存 / 固存	161.0~ 215.0		57.2		數種濕地類型。根 據文獻回顧估算。	Bridgham et al. (2006); Kolka et al. (2018)
			48~82		0.8~3.1	礦質土濕地〔草 原壺穴地區 (Prairie Pothole Region) 〕。根 據測量結果估算。	Euliss et al. (2006); Badiou et al. (2011)
		1.9				潮汐濕地。根據 文獻回顧估算。	Windham-Myers et al. (2018)
美國	庫存	1.2~1.4				潮汐濕地。根據 建模估算。	Hinson et al. (2017)
中國	庫存	5~16.7	41.7			數種濕地類型。根 據文獻回顧、建模 和測量結果估算。	Zheng et al. (2013); Wang et al. (2014); Xiao et al. (2019); Han et al. (2020)

此表中我們提出了一般濕地和特定濕地種類的全球土壤有機碳估計值（估計範圍見「地區」欄位），我們還提出了區域性的土壤有機碳估計值，以展示濕地土壤有機碳的特定熱點。以下的土壤有機碳估計值是來自各式已發表文獻的例子，代表了各種濕地類型和土壤深度增量(increments) (如 0~30 公分、0~100 公分)，但僅節錄部分內容。

4. 濕地保育對提供特定生態系統服務的重要性

濕地保育十分重要，因為人類活動會對濕地的過程、功能和提供給社會的生態系統服務產生負面影響。例如，為了要促進都市化、農業、林業、放牧和泥炭萃取（ peat extraction ），濕地的水經常會排掉之外，綜合產生的影響後，還會消除濕地提供的標準生態系統服務（如水分和養分保留、野生動物棲地、生物多樣性和娛樂）（如 Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Zedler and Kercher, 2005; Brinson and Eckles, 2011; Russi et al., 2013 ）。濕地所提供的生態系統服務也會因為抽取地表水（ surface water ）或地下水供人類使用（如灌溉），而造成相關的水文減少。除了排水和移水之外，濕地還可能受到堤防（ levees ）和水壩（ dams ）、疏浚（ dredging ）和渠化（ channelization ）以及水位操控（ water-level manipulation ）的影響，現有的濕地也可能因與水產養殖或能源生產有關的活動而退化。因此，保護現有的濕地，以及復育退化的濕地，對於維護和加強濕地生態系統服務非常重要。



4.1. 最小化對土壤功能的威脅

表 7. 土壤威脅

土壤威脅	
土壤侵蝕	上游或流域內的人類活動（如排水、農業、城市發展）會導致侵蝕或沉積（如 Luo et al., 1997; Gleason and Euliss, 1998; Craft and Casey, 2000; Gell et al., 2009）。保持或重建自然水文和植被（包括緩衝帶）可以減緩這些威脅。此外，保育海岸或河岸濕地（riverine wetlands）有助於防止海岸線和河岸的侵蝕以及坍塌（Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Gedan et al., 2011）。
養分的失衡和循環	濕地的天然微生物、植物和動物群落以及濕地土壤負責循環和儲存養分（如氮和磷）。濕地處理養分的能力，透過改善水質而為下游帶來好處（Howard-Williams, 1985; Bowden, 1987; Red-dy et al., 1999; Faulwetter et al., 2009）。
土壤沾染 / 汚染	天然與人為的濕地可以透過攔截、處理 / 循環〔如脫氮作用（denitrification）〕，以及在土壤和生物質中儲存養分和汙染物，作為受汙染水域的地景過濾器。
土壤生物多樣性損失	濕地通過支持不同於陸地和退化系統的微生物群落，來維持整個地景的土壤生物多樣性。
積水	濕地可以作為地下水補給地。

4.2. 增加生產與糧食安全

濕地提供人類和牲畜水源（照片 4、5）及灌溉之用。濕地同時還提供魚類和野生動物食物資源（如 Batt et al., 1989），並促進生產穀物和其他糧食。例如，世界水稻田（rice paddies）面積超過 150 萬平方公里，為全球大部分人口提供糧食（Van Nguyen and Ferrero, 2006），而海岸濕地則是支撐全球的漁業（Barbier, 2019; Middleton and Ward, 本手冊）。此外，許多發展中國家的人口依靠濕地來維持自給自足式農業以及其他生態系統服務（Silvius et al., 2000; Irfanullah et al., 2008; González-Marín et al., 2017）。

4.3. 改善人類福祉

濕地提供大量的生態系統服務，使社會獲益良多（Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Zedler and Kercher, 2005; Brinson and Eckles, 2011; Russi et al., 2013）。濕地還可以透過儲存和阻擋洪水以降低洪水帶來的影響，也能透過去除多餘的養分和汙染物來改善水質，並補充地下水。此外，濕地提供了淡水的來源，以及食物、纖維和植物生產的商品（如 Bansal et al., 2019）。再者，濕地除了支持觀光業和娛樂活動之外，還有助於維持生物多樣性以及提供野生動物棲息地居住（Batt et al., 1989; Szabo and Mundkur, 2017）。

4.4. 緩解和適應氣候變遷

濕地儲存了大量的碳，通常被視為大氣中的碳匯。儘管大部分的甲烷都源於濕地，但近期有項研究分析甲烷在大氣中的短生命週期，分析結果指出甲烷在大氣和土壤中的氧化速度與甲烷的產生速度不相上下，因此，濕地甲烷在濕地形成／復育後足夠長的時間內（久於 50 年，Neubauer and Megonigal, 2015）不會造成氣候暖化。濕地排水導致二氧化碳和氧化亞氮（N₂O）排放到大氣中，此舉會加劇全球氣候變化（Tangen et al., 2015）。相反地，保育濕地可以避免二氧化碳的排放，而復育濕地則可去除大氣中的二氧化碳。

5. 挑戰和趨勢概況

人類活動（如排水、水產養殖、都市化）對濕地和提供其生態系統服務的影響十分廣泛。濕地排水、土地使用以及汙染，會影響濕地微生物和野生動物群落、植被、土壤與碳和養分循環（Holden et al., 2004; Blann et al., 2009; Kayranli et al., 2010; Gleason et al., 2011; Islam et al., 2016; Zhang et al., 2016; McGonigle and Turner, 2017; Minick et al., 2019）。全球濕地的主要威脅是人工排水，而人工排水是為了提供土地給城市和農業使用（如 Reis et al., 2017）。據估計，全球濕地面積已損失超過 50%，各地區自行研究顯示的百分比與此數據相比還要高更多（Junk et al., 2013; Dahl, 2014; Davidson, 2014; Hu et al., 2017; Li et al., 2018）。在世界七大洲中，亞洲和北美洲的濕地面積最大（Reis et al., 2017），雖然北美的濕地消失受政策和管理因素而大大減緩，但是亞洲擁有不斷成長的人口壓力，因此亞洲濕地消失率仍然很高（Reis et al., 2017）。濕地排水降低了地下水位（water table）並使土壤乾燥，透過刺激微生物呼吸，造成土壤有機碳以二氧化碳的形式流失到大氣中（Armentano and Menges, 1986；Maltby and Immirzi, 1993），而排水也可以將濕地從甲烷的來源轉變為匯（sinks），並可以改變非生物條件和調節氮和磷循環的微生物群落（Howard-Williams, 1985; Bowden, 1987; Reddy et al., 1999; Bridgham et al., 2006; Faulwetter et al., 2009）。

在土地利用變化中，與人工排水有關的人類活動往往會增加土壤容積密度（soil bulk density）和土壤壓實，隨之而來的是逕流和養分循環的變化（如 Fenstermacher et al., 2016; Tangen and Bansal, 2020）。人類活動還可能導致城市逕流、農業化學品和能源生產的副產品對濕地之汙染（Pascual-Aguilar et al., 2015; Post van der Burg and Tangen, 2015; McMurry et al., 2016; Schade-Poole and Möller, 2016）。水產養殖中，特別是水稻耕作，可以從濕地土壤中去除大量的鉀（Islam et al., 2016）。淡水的水流改變、土地開墾、灌溉、汙水處理（disposal of wastewater effluent）、海平面上升、風暴潮（storm surges）以及道路除冰和石油鑽探（oil drilling）活動產生的鹽分，都會造成濕地土壤的鹽化（Herbert et al., 2015; Post van der Burg and Tangen, 2015）。而鹽化會導致水質下降，碳儲量減少，並增加濕地生物族群的壓力（Herbert et al., 2015）。此外，旨在促進農業活動的水文改變之後，伴隨而來的是濕地的 pH 值 (>8.5) 鹼化，而鹼化會減少受損植物生長時吸收的碳，並會增加因淋洗作用和呼吸作用引起的碳損失（Jobbágy et al., 2017）。另外，濕地土壤酸化可能發生自硫沉降增加、排水或改道水乾燥、地下水酸化增加以及農業和採礦逕流輸入，這可能對濕地動物和植物群產生負面影響（Lamers et al., 1998）。濕地遭受的其他威脅包括養分和化學汙染（Lee et al., 2006; Verhoeven et al., 2006; Post van der Burg and Tangen, 2015; McMurry et al., 2016），以及外來物種入侵（例如 Zedler and Kercher, 2004; Lavergne and Molofsky, 2006; Bansal et al., 2019）。濕地還可能受到與氣候變遷有關的降水和溫度制度改變以及海平面上升的影響（如 Cahoon et al., 2006; Johnson and Poiani, 2016; Osland et al., 2016; Gabler et al., 2017; Chen et al., 2018; Leng et al., 2019）。



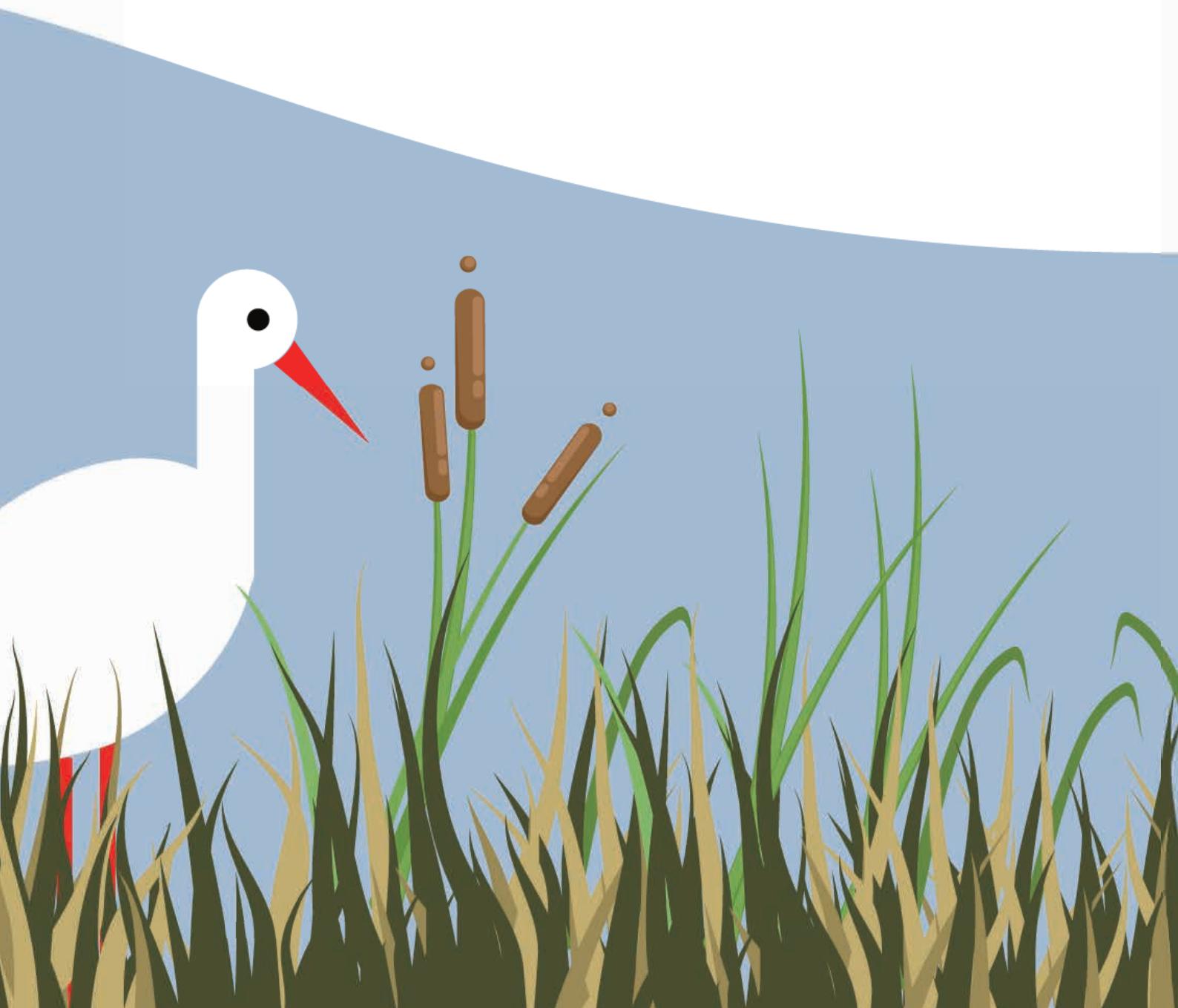
照片 4. 北美洲中部的草原壺穴地區 (Prairie Pothole Region) (鍋穴) 的天然草原 (左) 和耕地 (右) 中的濕地。天然濕地比起受人類活動 (如排水和耕犁) 影響的濕地，儲存了更多的土壤有機碳。



照片 5. 北美洲中部的草原壺穴地區之牲畜的水源為濕地，同時濕地用於放牧。

表 8. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研 究編號
西班牙地中海濕地蘆葦草的管理	歐洲	不詳	6	18
北美洲中部草原濕地的土壤有機碳保存	北美洲	多個時段	6	19
美國紐約市都市潮汐濕地的沼澤地維護	北美洲	100	6	31



參考文獻

- Alongi, D.M.** 2014. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, 6(1): 195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Amendola, D., Mutema, M., Rosolen, V. & Chaplot, V.** 2018. Soil hydromorphy and soil carbon: A global data analysis. *Geoderma*, 324(15 August): 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.005>
- Armentano, T.V. & Menges, E.S.** 1986. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone. *Journal of Ecology*, 74(3): 755–774. <https://doi.org/10.2307/2260396>
- Badiou, P., McDougal, R., Pennock, D. & Clark, B.** 2011. Greenhouse gas emissions and carbon sequestration potential in restored wetlands of the Canadian Prairie Pothole Region. *Wetlands Ecology and Management*, 19(3): 237–256. <https://doi.org/10.1007/s11273-011-9214-6>
- Bansal, S., Lishawa, S.C., Newman, S., Tangen, B.A., Wilcox, D., Albert, D., Anteau, M.J., Chimney, M.J., Cressey, R.L., DeKeyser, E., Elgersma, K.J., Finkelstein, S.A., Freeland, J., Grosshans, R., Klug, P.E., Larkin, D.J., Lawrence, B.A., Linz, G., Marburger, J., Noe, G., Otto, C., Reo, N., Richards, J., Richardson, C., Rodgers, L., Schrank, A.J., Svedarsky, D., Travis, S., Tuchman, N. & Windham-Myers, L.** 2019. *Typha* (cattail) invasion in North American wetlands: Biology, regional problems, impacts, ecosystem services, and management. *Wetlands*, 39(4): 645–684. <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01174-7>
- Barbier, E.B.** 2019. Chapter 27 - The Value of Coastal Wetland Ecosystem Services. In Perillo, G.M.E., Wolanski, E., Cahoon, D.R. & Hopkinson, C.S. (Eds.) *Coastal Wetlands*. pp. 947–964. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63893-9.00027-7>
- Batt, B.D.J., Anderson, M.G., Anderson, C.D. & Caswell, F.D.** 1989. The use of prairie potholes by North American ducks. In van der Valk, A.G. (Ed.) *Northern Prairie Wetlands*. pp. 204–227. Ames, Iowa State University Press.
- Beer, F., Villegas, L., Nuutinen, M., Wichtmann, W. & Milliken, K.** This Manual. Peatlands. In FAO (Ed.) *Recarbonizing global soils: a technical manual of best management practices*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy
- Blann, K.L., Anderson, J.L., Sands, G.R. & Vondracek, B.** 2009. Effects of agricultural drainage on aquatic ecosystems: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 39(11): 909–1001. <https://doi.org/10.1080/10643380801977966>
- Bouillon, S., Borges, A.V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N.C., Kristensen, E., Lee, S.Y., Marchand, C., Middelburg, J.J., Rivera-Monroy, V.H., Smith III, T.J. & Twilley, R.R.** 2008. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2): GB2013. <https://doi.org/10.1029/2007GB003052>
- Bowden, W.B.** 1987. The biogeochemistry of nitrogen in freshwater wetlands. *Biogeochemistry*, 4(3): 313–348. <https://doi.org/10.1007/BF02187373>
- Breithaupt, J.L., Smoak, J.M., Smith III, T.J., Sanders, C.J. & Hoare, A.** 2012. Organic carbon burial rates in mangrove sediments: Strengthening the global budget. *Global Biogeochemical Cycles*, 26(3): GB3011. <https://doi.org/10.1029/2012GB004375>

- Bridgham, S.D., Megonigal, J.P., Keller, J.K., Bliss, N.B. & Trettin, C.** 2006. The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands*, 26(4): 889–916. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2006\)26\[889:TCBONA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2006)26[889:TCBONA]2.0.CO;2)
- Brinson, M.M. & Eckles, S.D.** 2011. U.S. Department of Agriculture conservation program and practice effects on wetland ecosystem services: A synthesis. *Ecological Applications*, 21(sp1): S116–S127. <https://doi.org/10.1890/09-0627.1>
- Cahoon, D.R., Hensel, P.F., Spencer, T., Reed, D.J., McKee, K.L. & Saintilan, N.** 2006. Coastal wetland vulnerability to relative sea-level rise: Wetland elevation trends and process controls. In Verhoeven, J.T.A., Beltman, B., Bobbink, R. & Whigham, D.F. (Eds.) *Wetlands and Natural Resource Management (Analysis and Synthesis)*. pp. 271–292. Berlin, Heidelberg, Springer.
- Chen, H., Zou, J., Cui, J., Nie, M. & Fang, C.** 2018. Wetland drying increases the temperature sensitivity of soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 120: 24–27. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.035>
- Chmura, G.L., Anisfeld, S.C., Cahoon, D.R. & Lynch, J.C.** 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(4): 1111. <https://doi.org/10.1029/2002GB001917>
- Cowardin, L.M., Carter, V., Golet, F.C. & LaRoe, E.T.** 1979. *Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States*. FWS/OBS-79/31. Washington, D.C., USA, U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service. (also available at: <https://www.fws.gov/wetlands/documents/Classification-of-Wetlands-and-Deepwater-Habitats-of-the-United-States.pdf>)
- Craft, C.B. & Casey, W.P.** 2000. Sediment and nutrient accumulation in floodplain and depressional freshwater wetlands of Georgia, USA. *Wetlands*, 20(2): 323–332. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2000\)020\[0323:SANAIF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2000)020[0323:SANAIF]2.0.CO;2)
- Dahl, T.E.** 2014. Status and trends of prairie wetlands in the United States 1997 to 2009. U.S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, D.C., USA. (also available at: <https://www.fws.gov/wetlands/documents/Status-and-Trends-of-Prairie-Wetlands-in-the-United-States-1997-to-2009.pdf>)
- Davidson, N.C.** 2014. How much wetland has the world lost? Long-term and recent trends in global wetland area. *Marine and Freshwater Research*, 65(10): 934–941. <https://doi.org/10.1071/MF14173>
- Euliss, N.H., Jr., Gleason, R.A., Olness, A., McDougal, R.L., Murkin, H.R., Robarts, R.D., Bourbonniere, R.A. & Warner, B.G.** 2006. North American prairie wetlands are important nonforested land-based carbon storage sites. *Science of the Total Environment*, 361(1-3): 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.06.007>
- Faulwetter, J.L., Gagnon, V., Sundberg, C., Chazarenc, F., Burr, M.D., Brisson, J., Camper, A.K. & Stein, O.R.** 2009. Microbial processes influencing performance of treatment wetlands: A review. *Ecological Engineering*, 35(6): 987–1004. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.030>
- Fenstermacher, D.E., Rabenhorst, M.C., Lang, M.W., McCarty, G.W. & Needelman, B.A.** 2016. Carbon in natural, cultivated, and restored depressional wetlands in the mid-Atlantic coastal plain. *Journal of Environmental Quality*, 45(2): 743–750. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.04.0186>

- Finlayson, C.M. & van der Valk, A.G.** 1995. Wetland classification and inventory: A summary. *Vegetatio*, 118(1): 185–192. <https://doi.org/10.1007/BF00045199>
- Gabler, C.A., Osland, M.J., Grace, J.B., Stagg, C.L., Day, R.H., Hartley, S.B., Enwright, N.M., From, A.S., McCoy, M.L. & McLeod, J.L.** 2017. Macroclimatic change expected to transform coastal wetland ecosystems this century. *Nature Climate Change*, 7(2): 142–147. <https://doi.org/10.1038/nclimate3203>
- Gedan, K.B., Kirwan, M.L., Wolanski, E., Barbier, E.B. & Silliman, B.R.** 2011. The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: Answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change*, 106(1): 7–29. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-0003-7>
- Gell, P., Fluin, J., Tibby, J., Hancock, G., Harrison, J., Zawadzki, A., Haynes, D., Khanum, S., Little, F. & Walsh, B.** 2009. Anthropogenic acceleration of sediment accretion in lowland floodplain wetlands, Murray–Darling Basin, Australia. *Geomorphology*, 108(1): 122–126. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.12.020>
- Gleason, R.A. & Euliss, N.H., Jr.** 1998. Sedimentation of prairie wetlands. *Great Plains Research*, 8: 97–112.
- Gleason, R.A., Euliss, N.H., Jr., Tangen, B.A., Laubhan, M.K. & Browne, B.A.** 2011. USDA conservation program and practice effects on wetland ecosystem services in the Prairie Pothole Region. *Ecological Applications*, 21(Suppl 1): S65–S81. <https://doi.org/10.1890/09-0216.1>
- González-Marín, R.M., Moreno-Casasola, P., Castro-Luna, A.A. & Castillo, A.** 2017. Regaining the traditional use of wildlife in wetlands on the coastal plain of Veracruz, Mexico: ensuring food security in the face of global climate change. *Regional Environmental Change*, 17(5): 1343–1354. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0955-x>
- Hamilton, S.E. & Friess, D.A.** 2018. Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change*, 8(3): 240–244. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0090-4>
- Han, L., Wan, Z., Guo, Y., Song, C., Jin, S. & Zuo, Y.** 2020. Estimation of soil organic carbon storage in palustrine wetlands, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(13): 4646. <https://doi.org/10.3390/ijerph17134646>
- Herbert, E.R., Boon, P., Burgin, A.J., Neubauer, S.C., Franklin, R.B., Ardón, M., Hopfensperger, K.N., Lamers, L.P.M. & Gell, P.** 2015. A global perspective on wetland salinization: ecological consequences of a growing threat to freshwater wetlands. *Ecosphere*, 6(10): art206. <https://doi.org/10.1890/ES14-00534.1>
- Hinson, A.L., Feagin, R.A., Eriksson, M., Najjar, R.G., Herrmann, M., Bianchi, T.S., Kemp, M., Hutchings, J.A., Crooks, S. & Boutton, T.** 2017. The spatial distribution of soil organic carbon in tidal wetland soils of the continental United States. *Global Change Biology*, 23(12): 5468–5480. <https://doi.org/10.1111/gcb.13811>
- Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Jamsranjav, B., Fukuda, M. & Troxler, T.** (Eds.) 2014. *2013 supplement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: Wetlands*. Switzerland. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Holden, J., Chapman, P.J. & Labadz, J.C.** 2004. Artificial drainage of peatlands: hydrological and hydrochemical process and wetland restoration. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 28(1): 95–123. <https://doi.org/10.1191/0309133304pp403ra>
- Howard-Williams, C.** 1985. Cycling and retention of nitrogen and phosphorus in wetlands: a theoretical and applied perspective. *Freshwater Biology*, 15(4): 391–431. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1985.tb00212.x>
- Hu, S., Niu, Z., Chen, Y., Li, L. & Zhang, H.** 2017. Global wetlands: Potential distribution, wetland loss, and status. *Science of The Total Environment*, 586: 319–327. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.02.001>
- Hutchison, J., Manica, A., Swetnam, R., Balmford, A. & Spalding, M.** 2014. Predicting global patterns in mangrove forest biomass. *Conservation Letters*, 7(3): 233–240. <https://doi.org/10.1111/conl.12060>
- Irfanullah, H.M., Adrika, A., Ghani, A., Khan, Z.A. & Rashid, M.A.** 2008. Introduction of floating gardening in the north-eastern wetlands of Bangladesh for nutritional security and sustainable livelihood. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 23(2): 89–96. <https://doi.org/10.1017/S1742170507002074>
- Islam, A., Saha, P.K., Biswas, J.C. & Saleque, M.A.** 2016. Potassium fertilization in intensive wetland rice system: Yield, potassium use efficiency and soil potassium status. *International Journal of Agricultural Papers*, 1(2): 7–21.
- Jobbág, E.G., Tóth, T., Nosetto, M.D. & Earman, S.** 2017. On the fundamental causes of high environmental alkalinity ($\text{pH} \geq 9$): An assessment of its drivers and global distribution. *Land Degradation and Development*, 28(7): 1973–1981. <https://doi.org/10.1002/lde.2718>
- Johnson, W.C. & Poiani, K.A.** 2016. Climate change effects on prairie pothole wetlands: Findings from a twenty-five year numerical modeling project. *Wetlands*, 36: S273–S285. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0790-3>
- Junk, W.J., An, S., Finlayson, C.M., Gopal, B., Květ, J., Mitchell, S.A., Mitsch, W.J. & Robarts, R.D.** 2013. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: A synthesis. *Aquatic Sciences*, 75(1): 151–167. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0278-z>
- Kayranli, B., Scholz, M., Mustafa, A. & Hedmark, Å.** 2010. Carbon storage and fluxes within freshwater wetlands: A critical review. *Wetlands*, 30(1): 111–124. <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0003-4>
- Köchy, M., Hiederer, R. & Freibauer, A.** 2015. Global distribution of soil organic carbon – Part 1: Masses and frequency distributions of SOC stocks for the tropics, permafrost regions, wetlands, and the world. *SOIL*, 1(1): 351–365. <https://doi.org/10.5194/soil-1-351-2015>
- Kolka, R., Trettin, C., Tang, W., Krauss, K., Bansal, S., Drexler, J., Wickland, K., Chimner, R., Hogan, D., Pindilli, E.J., Benscoter, B., Tangen, B., Kane, E., Bridgman, S. & Richardson, C.** 2018. Terrestrial Wetlands. In Cavallaro, N., Shrestha, G., Birdsey, R., Mayes, M.A., Najjar, R.G., Reed, S.C., Romero-Lankao, P. & Zhu, Z. (Eds.) *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*. pp. 507–567. Washington, D.C., U.S. Global Change Research Program.
- Lal, R.** 2008. Carbon sequestration. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 363(1492): 815–830. <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2185>

Lamers, L.P.M., Van Roozendaal, S.M.E. & Roelofs, J.G.M. 1998. Acidification of freshwater wetlands: Combined effects of non-airborne sulfur pollution and desiccation. *Water, Air, and Soil Pollution*, 105(1): 95–106. <https://doi.org/10.1023/A:1005083526455>

Lavergne, S. & Molofsky, J. 2006. Control Strategies for the invasive reed canarygrass (*Phalaris arundinacea* L.) in North American wetlands: The need for an integrated management plan. *Natural Areas Journal*, 26(2): 208–214. [https://doi.org/10.3375/0885-8608\(2006\)26\[208:CSFTIR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3375/0885-8608(2006)26[208:CSFTIR]2.0.CO;2)

Lee, S.Y., Dunn, R.J.K., Young, R.A., Connolly, R.M., Dale, P.E.R., Dehayr, R., Lemckert, C.J., McKinnon, S., Powell, B., Teasdale, P.R. & Welsh, D.T. 2006. Impact of urbanization on coastal wetland structure and function. *Austral Ecology*, 31(2): 149–163. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2006.01581.x>

Lehner, B. & Döll, P. 2004. Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands. *Journal of Hydrology*, 296(1): 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.03.028>

Leifeld, J. & Menichetti, L. 2018. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications*, 9(1): 1071. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>

Leng, L.Y., Ahmed, O.H. & Jalloh, M.B. 2019. Brief review on climate change and tropical peatlands. *Geoscience Frontiers*, 10(2): 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2017.12.018>

Li, X., Bellerby, R., Craft, C. & Widney, S.E. 2018. Coastal wetland loss, consequences, and challenges for restoration. *Anthropocene Coasts*, 1(1): 1–15. <https://doi.org/10.1139/anc-2017-0001>

Luo, H.-R., Smith, L.M., Allen, B.L. & Haukos, D.A. 1997. Effects of sedimentation on playa wetland volume. *Ecological Applications*, 7(1): 247–252. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[0247:EOSOPW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0247:EOSOPW]2.0.CO;2)

Mahdavi, S., Salehi, B., Granger, J., Amani, M., Brisco, B. & Huang, W. 2018. Remote sensing for wetland classification: A comprehensive review. *GIScience & Remote Sensing*, 55(5): 623–658. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1419602>

Maltby, E. & Immirzi, P. 1993. Carbon dynamics in peatlands and other wetland soils regional and global perspectives. *Chemosphere*, 27(6): 999–1023. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(93\)90065-D](https://doi.org/10.1016/0045-6535(93)90065-D)

McGonigle, T.P. & Turner, W.G. 2017. Grasslands and croplands have different microbial biomass carbon levels per unit of soil organic carbon. *Agriculture*, 7(7): 57. <https://doi.org/10.3390/agriculture7070057>

McMurry, S.T., Belden, J.B., Smith, L.M., Morrison, S.A., Daniel, D.W., Euliss, B.R., Euliss, N.H., Jr., Kensinger, B.J. & Tangen, B.A. 2016. Land use effects on pesticides in sediments of prairie pothole wetlands in North and South Dakota. *Science of the Total Environment*, 565(682–689). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.209>

Middleton, B.A. & Ward, E.J. This Manual. Mangroves. In FAO (Ed.) *Recarbonizing global soils: a technical manual of best management practices*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy

Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: Wetlands and water synthesis. Washington, D.C., USA. (also available at: <http://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/8735>)

- Minick, K.J., Mitra, B., Li, X., Noormets, A. & King, J.S.** 2019. Water table drawdown alters soil and microbial carbon pool size and isotope composition in coastal freshwater forested wetlands. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2(7): 1–19. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2019.00007>
- Mitra, S., Wassmann, R. & Vlek, P.L.G.** 2005. An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Current Science*, 88(1): 25–35.
- Mitsch, W.J., Bernal, B., Nahlik, A.M., Mander, Ü., Zhang, L., Anderson, C.J., Jørgensen, S.E. & Brix, H.** 2013. Wetlands, carbon, and climate change. *Landscape Ecology*, 28(4): 583–597. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9758-8>
- Mitsch, W.J. & Gosselink, J.G.** 2007. *Wetlands*, Hoboken, Wiley.
- Neubauer, S.C. & Megonigal, J.P.** 2015. Moving beyond global warming potentials to quantify the climatic role of ecosystems. *Ecosystems*, 18(6): 1000–1013. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9879-4>
- Neue, H.U., Gaunt, J.L., Wang, Z.P., Becker-Heidmann, P. & Quijano, C.** 1997. Carbon in tropical wetlands. *Geoderma*, 79(1): 163–185. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00041-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00041-4)
- Osland, M.J., Enwright, N.M., Day, R.H., Gabler, C.A., Stagg, C.L. & Grace, J.B.** 2016. Beyond just sea-level rise: considering macroclimatic drivers within coastal wetland vulnerability assessments to climate change. *Global Change Biology*, 22(1): 1–11. <https://doi.org/10.1111/gcb.13084>
- Ouyang, X. & Lee, S.Y.** 2020. Improved estimates on global carbon stock and carbon pools in tidal wetlands. *Nature Communications*, 11(1): 317. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-14120-2>
- Pascual-Aguilar, J., Andreu, V., Gimeno-García, E. & Picó, Y.** 2015. Current anthropogenic pressures on agro-ecological protected coastal wetlands. *Science of The Total Environment*, 503–504(15 January): 190–199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.007>
- Post van der Burg, M. & Tangen, B.A.** 2015. Monitoring and modeling wetland chloride concentrations in relationship to oil and gas development. *Journal of Environmental Management*, 150(1 March 2015): 120–127. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.028>
- Reddy, K.R., Kadlec, R.H., Flaig, E. & Gale, P.M.** 1999. Phosphorus retention in streams and wetlands: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 29(1): 83–146. <https://doi.org/10.1080/1064338991259182>
- Reis, V., Hermoso, V., Hamilton, S.K., Ward, D., Fluet-Chouinard, E., Lehner, B. & Linke, S.** 2017. A global assessment of inland wetland conservation status. *BioScience*, 67(6): 523–533. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix045>
- Russi, D., ten Brink, P., Farmer, A., Badura, T., Coates, D., Förster, J., Kumar, R. & Davidson, N.** 2013. The Economics of Ecosystems and Biodiversity for Water and Wetlands. London, UK: IEEP.
- Saunois, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond, P.A., Dlugokencky, E.J., et al.** 2020. The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3): 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Schade-Poole, K. & Möller, G.** 2016. Impact and mitigation of nutrient pollution and overland water flow change on the Florida Everglades, USA. *Sustainability*, 8(9): 940. <https://doi.org/10.3390/su8090940>

Scharpenseel, H.W. 1993. Major carbon reservoirs of the pedosphere; source - sink relations; potential of D¹⁴C and δ¹³C as supporting methodologies. *Water, Air, and Soil Pollution*, 70(1): 431–442.
<https://doi.org/10.1007/BF01105014>

Silvius, M.J., Oneka, M. & Verhagen, A. 2000. Wetlands: Lifeline for people at the edge. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(7): 645–652.
[https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00079-4)

Szabo, J.K. & Mundkur, T. 2017. Conserving wetlands for migratory waterbirds in South Asia. In Prusty, B.A.K., Chandra, R. & Azeez, P.A. (Eds.) *Wetland Science : Perspectives From South Asia*. pp. 105–127. New Delhi, Springer India.

Tangen, B.A. & Bansal, S. 2020. Soil organic carbon stocks and sequestration rates of inland, freshwater wetlands: Sources of variability and uncertainty. *Science of The Total Environment*, 749: 141444.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141444>

Tangen, B.A., Finocchiaro, R.G. & Gleason, R.A. 2015. Effects of land use on greenhouse gas fluxes and soil properties of wetland catchments in the Prairie Pothole Region of North America. *Science of the Total Environment*, 533(15 November 2015): 391–409. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.148>

Tiner, R.W. 2003. Geographically isolated wetlands of the United States. *Wetlands*, 23(3): 494–516.
[https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0494:GIWOTU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2003)023[0494:GIWOTU]2.0.CO;2)

Van Nguyen, N. & Ferrero, A. 2006. Meeting the challenges of global rice production. *Paddy and Water Environment*, 4(1): 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10333-005-0031-5>

Verhoeven, J.T.A., Arheimer, B., Yin, C. & Hefting, M.M. 2006. Regional and global concerns over wetlands and water quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 21(2): 96–103.
<https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.11.015>

Villa, J.A. & Bernal, B. 2018. Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: An overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework. *Ecological Engineering*, 114(15 April): 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.037>

Wang, H., Guan, D., Zhang, R., Chen, Y., Hu, Y. & Xiao, L. 2014. Soil aggregates and organic carbon affected by the land use change from rice paddy to vegetable field. *Ecological Engineering*, 70: 206–211.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.05.027>

Whiting, G.J. & Chanton, J.P. 2001. Greenhouse carbon balance of wetlands: methane emission versus carbon sequestration. *Tellus B*, 53(5): 521–528. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v53i5.16628>

Windham-Myers, L., Cai, W.-J., Alin, S.R., Andersson, A., Crosswell, J., Dunton, K.H., Hernandez-Ayon, J.M., Herrmann, M., Hinson, A.L., Hopkinson, C.S., Howard, J., Hu, X., Knox, S.H., Kroeger, K., Lagomasino, D., Megonigal, P., Najjar, R.G., Paulsen, M.-L., Peteet, D., Pidgeon, E., Schäfer, K.V.R., Tzortziou, M., Wang, Z.A. & Watson, E.B. 2018. Tidal wetlands and estuaries. In Cavallaro, N., Shrestha, G., Birdsey, R., Mayes, M.A., Najjar, R.G., Reed, S.C., Romero-Lankao, P. & Zhu, Z. (Eds.) *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*. pp. 596–648. Washington, D.C., U.S. Global Change Research Program.

Xiao, D., Deng, L., Kim, D.-G., Huang, C. & Tian, K. 2019. Carbon budgets of wetland ecosystems in China. *Global Change Biology*, 25(6): 2061–2076. <https://doi.org/10.1111/gcb.14621>

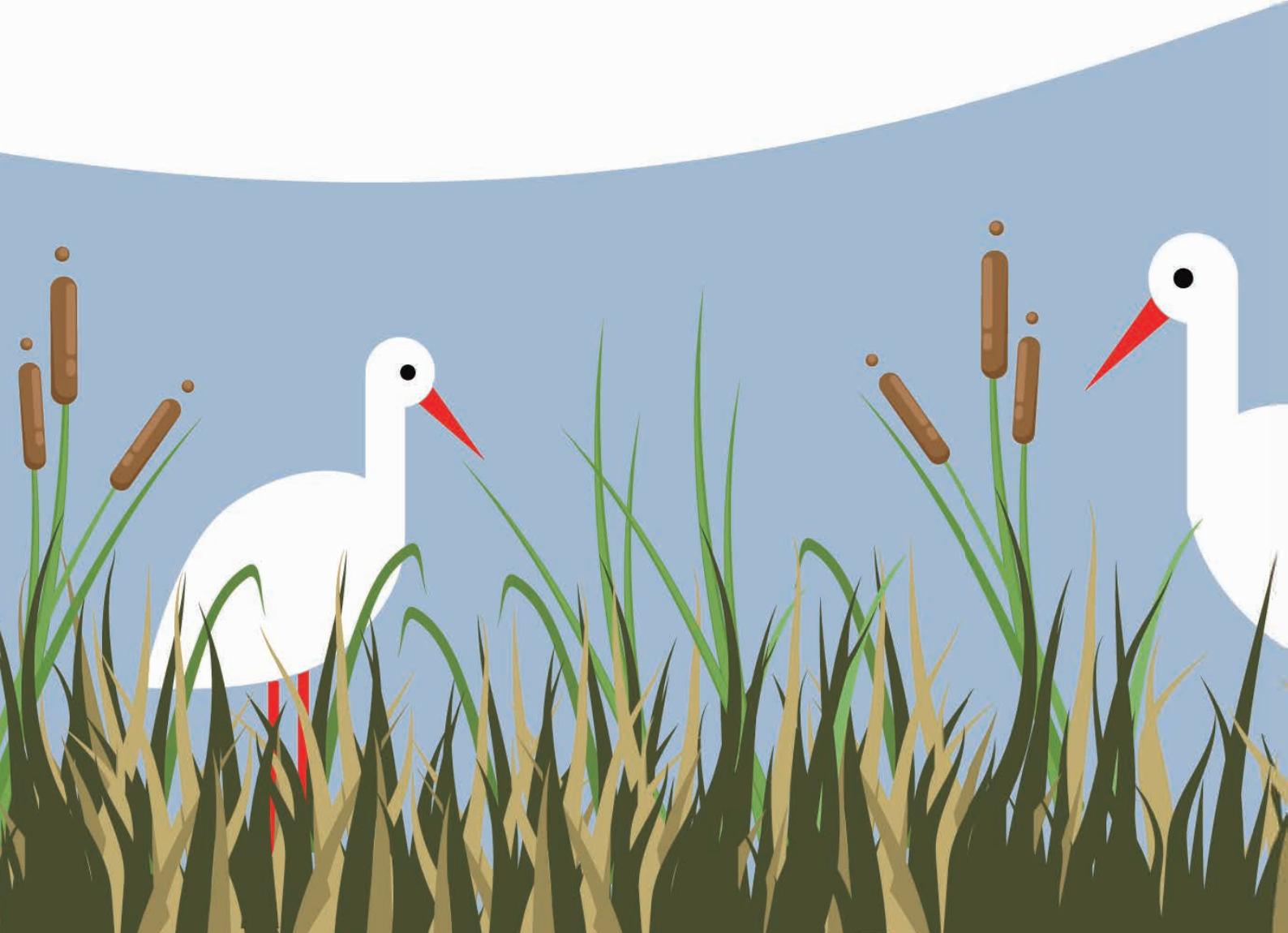
Yu, Z., Loisel, J., Brosseau, D.P., Beilman, D.W. & Hunt, S.J. 2010. Global peatland dynamics since the last glacial maximum. *Geophysical Research Letters*, 37(13): L13402.
<https://doi.org/10.1029/2010GL043584>

Zedler, J.B. & Kercher, S. 2004. Causes and consequences of invasive plants in wetlands: Opportunities, opportunists, and outcomes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 23(5): 431–452.
<https://doi.org/10.1080/07352680490514673>

Zedler, J.B. & Kercher, S. 2005. Wetland Resources: Status, trends, ecosystem services, and restorability. *Annual Review of Environment and Resources*, 30(1): 39–74.
<https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144248>

Zhang, C., Nie, S., Liang, J., Zeng, G., Wu, H., Hua, S., Liu, J., Yuan, Y., Xiao, H., Deng, L. & Xiang, H. 2016. Effects of heavy metals and soil physicochemical properties on wetland soil microbial biomass and bacterial community structure. *Science of The Total Environment*, 557-558: 785–790.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.170>

Zheng, Y., Niu, Z., Gong, P., Dai, Y. & Shangguan, W. 2013. Preliminary estimation of the organic carbon pool in China's wetlands. *Chinese Science Bulletin*, 58(6): 662–670. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5529-9>





泥炭地

4. 泥炭地

Felix Beer¹, Laura Villegas², Maria Nuutinen², Wendelin Wichtmann¹, Kai Milliken²

¹University of Greifswald, partner in the Greifswald Mire Centre, Germany

德國格賴夫斯瓦爾德大學，與格賴夫斯瓦爾德沼澤研究中心合作

²Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy

聯合國糧食及農業組織 (FAO)

1. 定義與說明

泥炭地，也被稱為有機土（organic soils）、酸性泥炭沼澤（bogs）、礦質泥炭沼澤（fens）、木本沼澤（swamps）或泥炭沼澤（mires），是世界上碳密度最高的陸地生態系統，並將大部分碳儲存於土壤（亦稱為泥炭，peat）（FAO, 2014）。泥炭土（peat soil），在土壤分類系統中被稱為有機質土（Histosol）（IUSS WRB, 2015）或存在於有機土中（IPCC, 2014），主要由部分分解的死亡植物之有機質組成；而這些材料在高地下水位造成的潮濕和缺氧的土壤條件下，進行累積。在其自然且水飽和的狀態下，大多數泥炭地是緩慢的碳匯（carbon sink），可以固存土壤有機碳，提供許多生態系統服務（圖 11），是緩解和適應氣候變遷的關鍵。

維持泥炭地的高地下水位是避免碳耗損和降低火災風險的關鍵。世界各地的泥炭地已被排乾和退化，以供作農業、林業、種植業和開採泥炭獲取能源等相關的應用。排水或人工去除一個地區的地表水和地下水（sub-surface water），導致地下水位下降，也造成泥炭土的乾燥。排水會導致土壤有機質暴露在氧氣中，而當土壤有機質被微生物活動氧化時，原儲存的碳會以二氧化碳和氧化亞氮（N₂O）的形式釋放出來，而甲烷（CH₄）則從排水溝渠釋放，排水溝渠也將溶解出的有機碳（dissolved organic carbon）送出泥炭地。

泥炭地退化導致生物多樣性喪失、下陷（subsidence）、侵蝕、養分流失和水文特性（hydrological properties）的喪失（Joosten and Clarke, 2002; Silvius et al., 2008）（圖 13）。越深層的泥炭土被排乾，則其排放量就越大（Couwenberg et al., 2011），而泥炭地排水的負面影響，會因為累積泥炭的天然濕地植被之變化而放大。被排水的泥炭地容易發生燃燒許久的火災，因而加劇泥炭地退化並造成高度的碳損失。

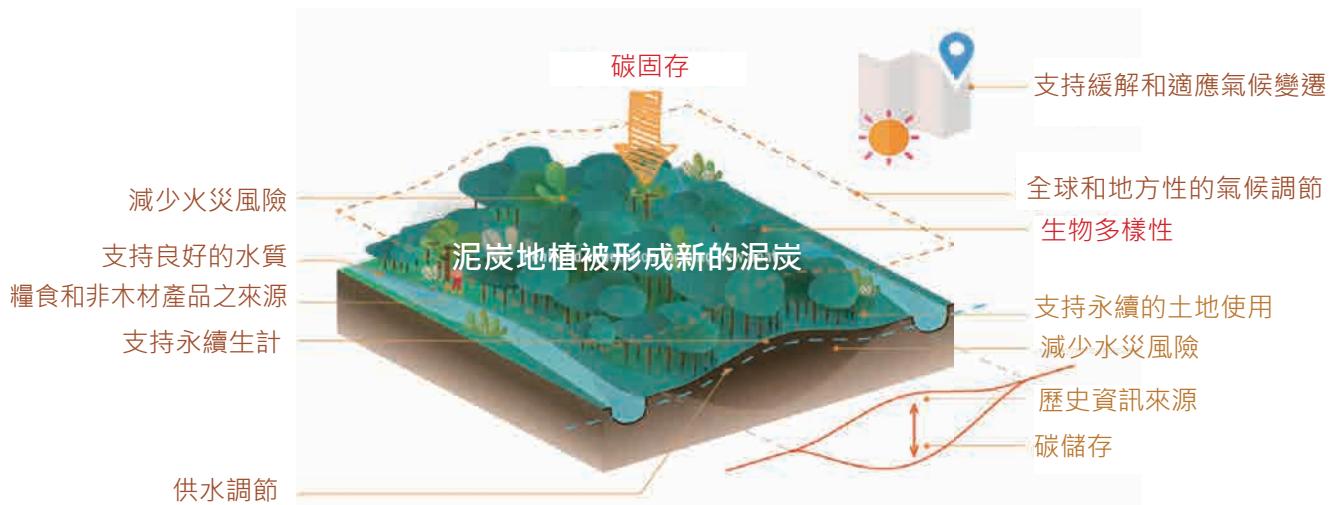


圖 11. 天然健康泥炭地所提供之生態系統服務 (FAO, 2020)

2. 全球熱點分布

世界上至少有 180 個國家擁有泥炭地 (Parish et al., 2008)，其存在於各種的氣候區、不同海拔高度和所有大陸區域，熱帶、寒帶和溫帶地區，以及沿海、內陸和高山地區。泥炭地覆蓋僅占陸地表面的 3%，約 423~463 萬平方公里 (圖 12) (Leifeld and Menichetti, 2018; Xu et al., 2018)。

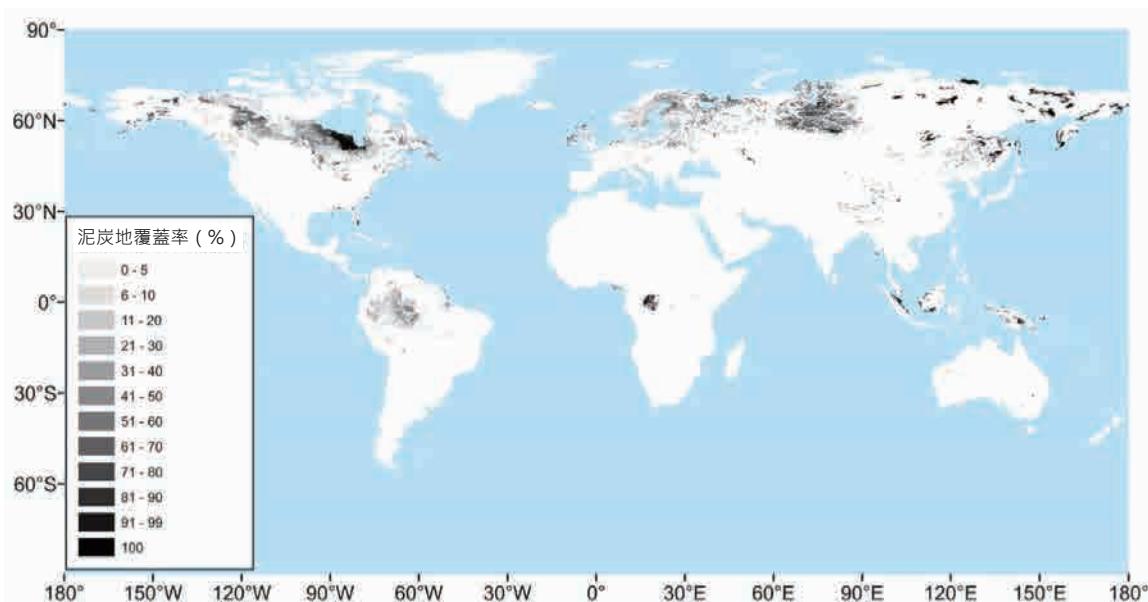


圖 12. 來自 PEATMAP 的全球泥炭地分布圖 (Xu et al., 2018)

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

泥炭地僅占全球土地的 3% , 却儲存了全球土壤有機碳總存量的 1 / 5 : 6000~6440 億噸碳 (Leifeld and Menichetti, 2018; Yu et al., 2010) 。此碳庫存超過地球植被中所儲存的碳 , 可能與大氣中的碳量相當 (Turetsky et al., 2015) 。以下對每公頃碳庫存的估計值僅為例子 (表 9) 。

表 9. 泥炭地土壤有機碳庫存報告

地區	每單位面積的 碳庫存 (噸碳 / 公頃)	總碳庫存 (在 總泥炭深度 上) (10 億 噸碳)	更多資訊	參考文獻
全球		600~644		
極北方和副北 極 (Northern boreal sub-arctic) 地區	1120	427~547	包括泥炭地森林 , 此預估值是根 據泥炭體積、碳密度和時間歷程 (time history) 方法所算出	Yu et al. (2010); Leifeld and Menichetti (2018)
溫帶地區	1182	21.9	時間歷程方法	Leifeld and Menichetti (2018)
熱帶地區	2850	104.7	此預估值是由不同來源所計算 出 , 此碳庫存值包括 124~194 噸碳 / 公頃的生物量 (Dixon et al., 1994; IPCC, 2001)	Dargie et al. (2017); Diemont et al. (1997); Immirzi et al. (1992)



4. 泥炭地保育對提供特定生態系統服務的重要性

泥炭地提供各種生態系統服務，包括調節和生產功能，並庇護著獨特的生物多樣性（圖 11）。泥炭地是大氣中主要的碳匯，有助於全球氣候調節，並在炎熱時期降低溫度，有助於地方氣候調節（Hooijer, 2005; Silvius et al., 2008）。泥炭地調節集水層上的供水，確保飲用水和灌溉用水，並緩解水災和乾旱。

4.1. 增加生產與糧食安全

泥炭地由於其地下水位非常高、體積密度和承載力低、酸度高，以及沼澤內的養分可用性低，因而具有邊際農業潛力（marginal agricultural capability）。然而，原始泥炭地擁有許多植物物種，可用於糧食與飼料（Wichtmann et al., 2016; Giesen and Sari, 2018）。泥炭地通常是採集漿果、蜂蜜和蕈菇類、狩獵和捕魚的重要場所，是社區的重要蛋白質來源。濕潤泥炭地管理措施（見下文 4.3 緩解和適應氣候變化，以及本手冊第 5 冊第 11、12、13 章資料表單的「泥炭地管理措施」）可以減少和避免二氧化碳的排放，維護土壤有機碳，並支持糧食安全（Surahman et al., 2018）。

4.2. 改善人類福祉

原始泥炭地能夠降低火災風險、調節水供應和提供生計，進而促進人類福祉。在泥炭地被廣泛排水的地區，火災頻繁並威脅著公共健康和經濟（Marlier et al., 2019; The World Bank, 2016）。以泥炭地為主的集水區，其飲用水的供應取決於生態系統的管理（如 Hooijer, 2005; Silvius et al., 1984）。泥炭地和相關濕地的遊覽和娛樂價值，可用做生態旅遊，提供獲取收入的良機（Silvius et al., 2008）。



4.3. 緩解和適應氣候變遷

經保育、復育和適當管理的潮濕泥炭地具有強大緩解和適應氣候變遷的潛力。根據 IPCC (2014)，與慣行以排水為基礎的泥炭地使用相比，受保育和濕地管理狀態的泥炭地可以避免 0~20 噸二氧化碳當量 / 公頃 / 年的排放量。Couwenberg 等人 (2011) 估計，中歐的泥炭地保育和濕地種植 (paludiculture)² 可以避免 25~60 噸二氧化碳當量 / 公頃 / 年的排放量，而東南亞不排水的泥炭地可以避免 70~117 噸二氧化碳當量 / 公頃 / 年的排放量 (Cooper et al., 2020)。

泥炭地的保育、濕地種植和濕地管理提高了適應能力，有助於減緩極端氣候事件的風險，如洪水、乾旱和風暴，特別是在海岸泥炭地。避免排水可以部分阻止河岸泥炭地的土地流失，而濕地種植和管理措施可協助實現生計多樣化並加強適應能力 (FAO, 2014)。以維持泥炭地潮濕狀態的基礎下，來採伐搬運木材和採集非木材產品—確保高地下水位—是正在發展的方法，以避免排水和隨之而來的碳耗損 (Wichtmann et al., 2016)。

5. 挑戰和趨勢概況

完整的泥炭地生態系統可作為碳匯，但當排水和退化時，它們會變成長期的溫室氣體排放源 (FAO, 2014)，這種情況一直持續到泥炭被完全氧化，或者因為下沉使泥炭表面降低到地下水位而不能再被排水為止 (圖 13)。實施以排水為基礎的土地利用系統，通常會造成生態系統服務的長期耗損和鄰近社區的風險增加，以此換取短期利潤 (Sumarga et al., 2016)

排水、清除泥炭林、使用肥料的種植及透過燃燒清除土地等，會導致土壤有機碳耗損加劇 (Silvius et al., 2008) 和一系列其他問題，見圖 13。目前已排水的泥炭地只佔陸地表面的 0.45%，但卻造成至少有 5% 的全球溫室氣體排放 (IPCC, 2014)。退化還導致泥炭向水中釋放之營養物質的增加，以及泥炭地滯洪能力的下降。此外，排水系統需要不斷維護，泥炭上的生產也需要大量施肥 (Hooijer, 2005)。另外，由於持續的地層下沉和海平面的上升，在未來幾十年內，越來越多的沿海泥炭地區容易遭受定期和部分永久性的淹水 (Sumarga et al., 2016; Hooijer et al., 2015)。

² 濕地種植在保持泥炭完整性的條件下，從潮濕或復濕的泥炭地上產出生物量，能促進泥炭累積及確保提供泥炭地生態系統服務。另見第 5 冊第 13 章資料表單

據估計，全球 11~15% 的泥炭地被排乾，主要做為種植、林業、放牧或能源使用 (FAO, 2020)。其中歐洲和東南亞的泥炭地被排乾的面積最大 (Crump, 2017)。自 2011 年以來，科學界、民間社會和國際組織的努力提升 (如聯合國糧食及農業組織、聯合國環境署) 對泥炭地重要性的認識。儘管還需要進一步採取行動來阻止更大規模的土壤有機碳和其他泥炭地服務的耗損，國家元首、決策者和農業生產者已關注到此議題。

一些全球架構、公約和多邊環境協議都鼓勵保育泥炭地和避免排水，而這些皆與實現巴黎協定 (Paris Agreement) 和永續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) 的第 6、12、13 和 15 項、拉姆薩爾濕地公約 (Ramsar Convention on Wetlands) 、聯合國氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) 、聯合國生物多樣性公約 (The United Nations Convention of Biological Diversity, CBD) 、2015~2030 仙台減災綱領 (The Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015~2030, SDFRR)³ 以及其他區域倡議有關 (FAO, 2020)。這些公約指出，泥炭地保護是和維持重要的生態系統服務以及支持人類福祉息息相關，強調了優先考慮這此措施的重要性。

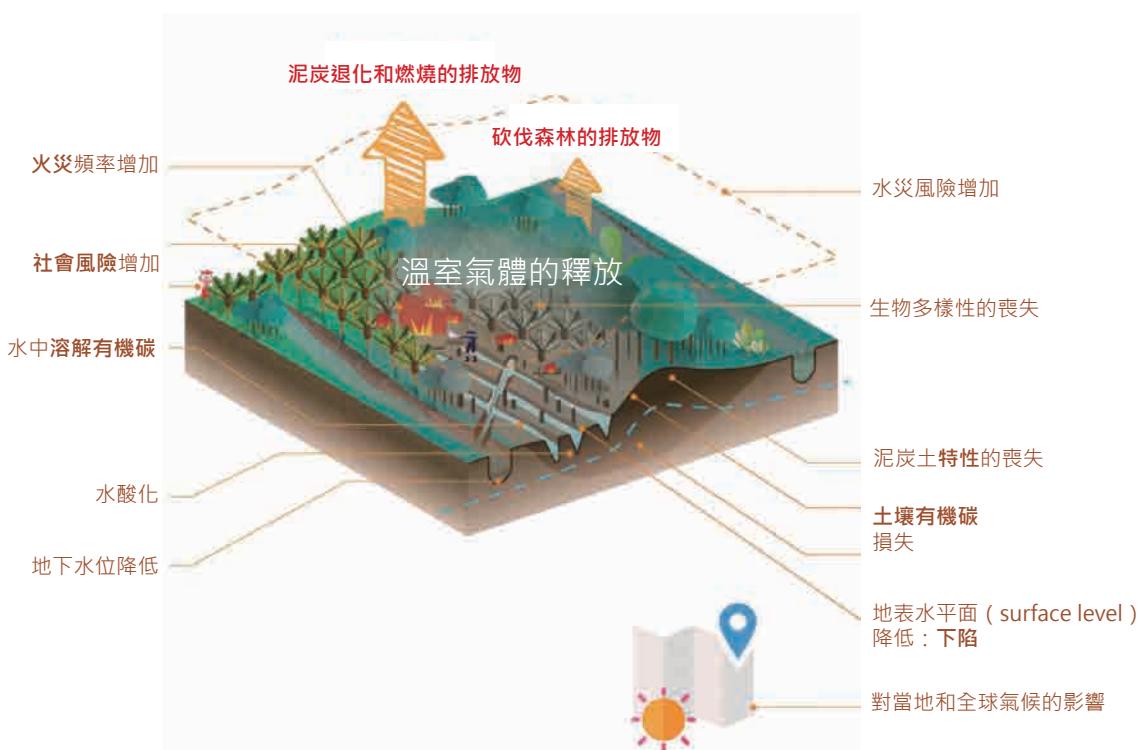


圖 13. 為進行農業、種植或其他開採活動而用運河疏通泥炭地因而產生的影響
(FAO, 2020)

³ <https://www.undrr.org/implementing-sendai-framework/what-sf>

6. 一般建議

針對與泥炭地相關的具體措施之建議可參考本手冊的第 5 冊第 11~13 章資料表單。全世界的專家都認同以下幾點的重要性：

- ◆ 將泥炭地納入國家政策和國際監測與回報體系，以支持地景層次的泥炭地保育、復育和氣候中立的永續利用（本手冊的第 5 冊第 11 章資料表單的「有關保育原始泥炭地和避免泥炭地排水」）；
- ◆ 優先採用有社區和利益相關者參與的泥炭地保育策略（本手冊的第 5 冊第 11 章資料表單的「有關保育原始泥炭地和避免泥炭地排水」），並由政策、財政和法律機制加以支持，以保障天然泥炭地不退化；
- ◆ 在不可能保育的情況下，為社區和利益相關者創造條件，使其從以排水為基礎的管理方式轉向永續管理的措施，包括知識和諮詢網路、獎勵措施、投資和以共識為基礎的管理方法（本手冊的第 5 冊有關復育泥炭地「復濕和植被復原（revegetation）」的第 12 章資料表單，以及有關濕地種植的第 13 章資料表單）；
- ◆ 儘量減少土壤有機碳的耗損，使泥炭地再次成為碳匯，而地下水位應在接近土壤表面的位置（即地表下 10~20 公分之間），以及應重新建立和散佈耐水植被；
- ◆ 解決研究和知識差距，以產生關於泥炭地的範圍、造成土壤有機碳耗損的原因、泥炭地的復育、管理和濕地種植之有效性、成本和效益等等相關資料，並探索有競爭力的替代作物以改善決策過程。

表 10. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研 究編號
白俄羅斯格羅德諾州利達地區的蘆葦生物質替代泥炭用於能源生產	歐亞大陸	不詳	6	20
德國下薩克森州用泥炭蘚種植替換泥炭作為園藝種植介質	歐洲	10	6	21

參考文獻

- Cooper, H.V., Evers, S., Aplin, P., Crout, N., Dahalan, M.P.B. & Sjogersten, S.** 2020. Greenhouse gas emissions resulting from conversion of peat swamp forest to oil palm plantation. *Nature Communications*, 11(1): 407. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14298-w>
- Couwenberg, J., Thiele, A., Tanneberger, F., Augustin, J., Bärisch, S., Dubovik, D., Liashchynskaya, N., Michaelis, D., Minke, M., Skuratovich, A. & Joosten, H.** 2011. Assessing greenhouse gas emissions from peatlands using vegetation as a proxy. *Hydrobiologia*, 674(1): 67–89.
<https://doi.org/10.1007/s10750-011-0729-x>
- Crump, J.** 2017. *Smoke on water – Countering global threats from peatland loss and degradation*. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal. Nairobi and Arendal. (also available at:
<https://www.grida.no/publications/355>)
- Dargie, G.C., Lewis, S.L., Lawson, I.T., Mitchard, E.T.A., Page, S.E., Bocko, Y.E. & Ifo, S.A.** 2017. Age, extent and carbon storage of the central Congo Basin peatland complex. *Nature*, 542(7639): 86–90.
<https://doi.org/10.1038/nature21048>
- Diemont, W.H., Nabuurs, G.J., Rieley, J.O. & Rijksen, H.D.** 1997. Climate change and management of tropical peatlands as a carbon reservoir. In J.O. Rieley & S.E. Page (Eds.) *Biodiversity and Sustainability of Tropical Peatlands*. pp. 363–368. Samara Publishing. Cardigan, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.
- Dixon, R.K., Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C. & Wisniewski, J.** 1994. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 263: 185–190.
<https://doi.org/10.1126/science.263.5144.185>
- FAO.** 2014. *Towards climate-responsible peatland management*. Rome, Italy. (also available at:
<http://www.fao.org/3/a-i4029e.pdf>)
- FAO.** 2020. *Peatland mapping and monitoring – Recommendations and technical overview*. Rome, Italy. (also available at: <http://www.fao.org/3/CA8200EN/CA8200EN.pdf>)
- Giesen, W. & Sari, E.N.** 2018. Tropical peatland restoration report: The Indonesian case. Jakarta, Indonesia.
- Hooijer, A.** 2005. Hydrology of tropical wetland forests: recent research results from Sarawak peat swamps. In M. Bonell & L.A. Bruijnzeel (Eds.) *Forests, water and people in the humid tropics*. pp. 447–461.
- Hooijer, A., Vernimmen, R., Visser, M. & Mawdsley, N.** 2015. Flooding projections from elevation and subsidence models for oil palm plantations in the Rajang Delta peatlands, Sarawak, Malaysia. Deltas report 1207384. (also available at:
https://www.preventionweb.net/files/45060_45060rajangdeltapeatlandsubsidencf.pdf)

Immirzi, C.P., Maltby, E. & Clymo, R.S. 1992. *The global status of peatlands and their role in carbon cycling: A report for the Friends of the Earth*. Wetland Ecosystems Research Group, Department of Geology. University of Exeter, London, United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland.

IPCC. 2001. *Climate Change 2001: Working Group I: The Scientific Basis*. (also available at: www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/index.htm)

IPCC. 2014. *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. T. Hiraishi, T. Krug, K. Tanabe, N. Srivastava, B. Jamsranjav, M. Fukuda & T. Troxler (Eds.) Switzerland.

Joosten, H. & Clarke, D. 2002. *Wise use of mires and peatlands*. International Mire Conservation Group and International Peat Society. Saarijärvi, Finland.

Leifeld, J. & Menichetti, L. 2018. The underappreciated potential of peatlands in global climate change mitigation strategies. *Nature Communications*, 9(1): 1071. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03406-6>

Marlier, M.E., Liu, T., Yu, K., Buonocore, J.J., Koplitz, S.N., DeFries, R.S., Mickley, L.J., Jacob, D.J., Schwartz, J., Wardhana, B.S. & Myers, S.S. 2019. Fires, smoke exposure, and public health: an integrative framework to maximize health benefits from peatland restoration. *GeoHealth*, 3: 178–189.
<https://doi.org/10.1029/2019GH000191>

Parish, F., Sirin, A., Charman, D., Joosten, H., Minayeva, T., Silvius, M. & Stringer, L. 2008. *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change. Main Report*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International, Wageningen. (also available at: http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf)

Silvius, M.J., Simons, H.W. & Verheugt, W.J.M. 1984. Soils, vegetation, fauna and nature conservation of the Berbak Game Reserve, Sumatra, Indonesia. RIN contributions to research on management of natural resources, 1984-3. Report/Nature Conservation Department: Agricultural University Wageningen, 758. (also available at: <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/392197>)

Silvius, M.J., Joosten, H. & Opdam, S. 2008. Peatlands and people. In F. Parish, A. Sirin, D. Charman, H. Joosten, T. Minayeva, M.J. Silvius & L. Stringer (Eds.) *Assessment on Peatlands, Biodiversity and Climate Change: Main Report*. pp. 20–28. Global Environment Centre and Wetlands International. Wageningen, the Netherlands. (also available at: http://www.imcg.net/media/download_gallery/books/assessment_peatland.pdf)

Sumarga, E., Hein, L., Hooijer, A. & Vernimmen, R. 2016. Hydrological and economic effects of oil palm cultivation in Indonesian peatlands. *Ecology and Society*, 21(2): 52. <http://dx.doi.org/10.5751/ES-08490-210252>

Surahman, A., Soni, P. & Shivakoti, G. 2018. Reducing CO₂ emissions and supporting food security in Central Kalimantan, Indonesia, with improved peatland management. *Land Use Policy*, 72: 325–332.
<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.12.050>

The World Bank. 2016. The costs of Fire: an economic analysis of Indonesia's 2015 fire crisis. Indonesia Sustainable Landscapes Knowledge Note, 1. Jakarta, Indonesia. (also available at: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/23840/Forest%20Fire%20Notes%20FINAL%20APRIL%202018.pdf?sequence=5&isAllowed=y>)

Turetsky, M.R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., van der Werf, G.R. & Watts, A. 2015. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8(1): 11–14. <https://doi.org/10.1038/ngeo2325>

Wichtmann, W., Schröder, C. & Joosten, H. 2016. *Paludiculture – productive use of wet peatlands*. Schweizerbart Science Publishers. Stuttgart, Germany.

IUSS Working Group WRB. 2015. *World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015*. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome.

Xu, J., Morris, P., Liu, J. & Holden, J. 2018. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *Catena*, 160: 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.010>

Yu, Z.C., Loisel, J., Brosseau, D.P., Beilman, D.W. & Hunt, S.J. 2010. Global peatland dynamics since the Last Glacial Maximum. *Geophys. Res. Lett.*, 37: L13402. <https://doi.org/10.1029/2010GL043584>





紅樹林

5. 紅樹林

Beth A. Middleton, Eric J. Ward

U.S. Geological Survey, Wetland and Aquatic Research Center, Lafayette, U.S.A.

美國地質調查局濕地與水生研究中心

1. 定義與說明

紅樹林是一種由特殊的鹽生樹種 (halophytic tree) 組成的森林，存在於亞熱帶和熱帶之海岸沿線的潮間帶 (intertidal zone)、河口和島嶼上 (圖 14 · Middleton and McKee, 2001)。紅樹林在碳固存方面的重要性，以及紅樹林的許多其他生態系統服務（如漁業生產、魚類育苗棲地 (nursery habitat)、水淨化 / 解毒、人類生計、保護野生動物、暴風防護、木材、薪材 (fuelwood) 和糧食安全 (Barbier et al., 2011) 都使紅樹林成為優先保育和復育的區域 (McLeod et al., 2011)。紅樹林可以非常有效地累積泥炭，而紅樹林未分解的根部碎屑 (detritus) 可構成某些島嶼的根基，如貝里斯堡礁群 (Belizean Barrier Reef Complex) (Middleton and McKee, 2001)。

紅樹林透過初級生產力，以及有時從其周圍環境外的沉積物捕獲碳，因此紅樹林是世界上最重要的藍碳生態系統 (blue carbon ecosystem) 之一 (McLeod et al., 2011)。高達 8~15% 的海洋有機碳埋藏在紅樹林中 (Breithaupt et al., 2012)。相較於其他森林種類，紅樹林能夠在土壤中儲存 3~4 倍的碳 (Sanderman et al., 2018)。

紅樹林生態系統中大部分的碳被保存在有機土壤頂部數公尺處 (Donato et al., 2011)。雖然生物量中的碳含量很高 (Hutchinson et al., 2014)，但最近的研究指出，在有碳酸鈣 (calcium carbonate) 的土壤中，土壤有機碳庫存被低估了 50% 之多，而在三角洲的 (deltaic) 沿海環境中則被高估了 86% 之多 (Rovai et al., 2018)。2000~2005 年間，紅樹林面積每年約減少 0.2~2.1% (Friess et al., 2019)，每年釋放 0.2~1.2 億噸的碳 (Giri et al., 2011)。因此，砍伐紅樹林可能佔全球森林消失導致的碳排放總量之 10% (Donato et al., 2011)。

藉由氣根 (aerial roots) 和胎生胚胎 (viviparous embryos) 等方式，紅樹林生態系統的樹木有適應鹽水和洪水的能力 (Alongi, 2012)。然而，相較於淡水物種〔包含河岸、邊緣、盆地和矮樹 (dwarf) (或灌木叢) 等森林類型〕，紅樹林的複雜性較低 (Lugo and Snedaker, 1974)。新世界的紅樹林物種，與印度西太平洋地區的紅樹林物種則有明顯不同 (Lugo and Snedaker, 1974; Duke et al., 2008)。

2. 全球熱點分布

紅樹林是存在於亞熱帶和熱帶海洋之海岸沿線的森林 (Middleton and McKee, 2001)

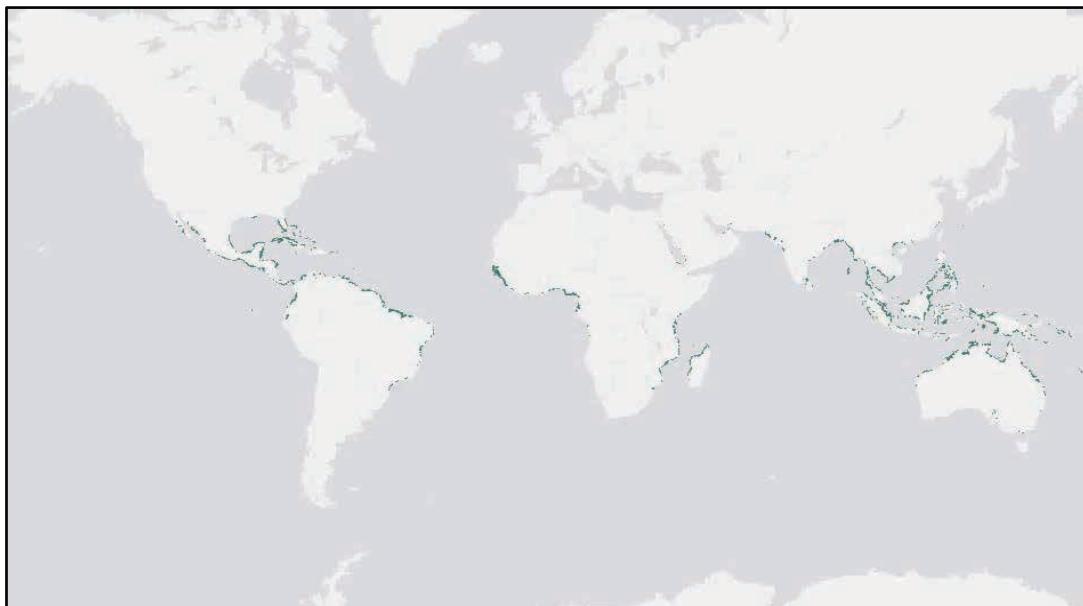


圖 14. 紅樹林的全球分布 (沿海地區的深綠色陰影) (Giri et al., 2011)

聯合國環境規劃署世界保護監測中心的一般資料授權 (General data license from UN WCMC Environment Program) (https://www.unep-wcmc.org/policies/general-data-license-excluding-wdpa#data_policy; <https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?useExisting=1&layers=62b6797f5091428fa89e10f7b3a1f73c>)

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

全球與紅樹林有關的碳其量可觀，大量儲存於土壤和植物的生物量中 (Hutchison et al., 2014)。由於硫酸鹽 (sulfate) 的減少，碳排放 (特別是甲烷) 往往比淡水濕地類型還低 (Windham-Meyers et al., 2018)，但紅樹林仍被視為碳熱點 (Kolka et al., 2018; Al-Haj and Fulweiler, 2020)。不同的土地利用 / 覆蓋物對紅樹林生態系統的「藍碳」⁴ 庫存有不同的含意，但在規定和評估中往往缺乏這種細微的差別 (Friess et al., 2020)。紅樹林的復育可以成為增加碳儲量的重要途徑 (另見「復育紅樹林」一章)。表 11 提供了一些最近對全球紅樹林中碳庫存的估計值。

⁴ 藍碳是儲存在海岸與海洋生態系統中的碳。海岸生態系統，包括紅樹林、鹽水沼澤 (salt marsh) 與海草草甸 (seagrass meadows) 等，固存並儲存大量的藍碳在植物和沈積物中。

表 11. 紅樹林的土壤有機碳庫存和年度碳累積或排放量報告

地區 *	每單位面積的碳庫存 (噸碳 / 公頃)	總碳庫存 (10 億噸碳)	年度碳累積或排放量	深度	更多資訊	參考文獻
全球	-	6.4	-	地表一公尺的土壤	全球製圖 · 解析度 30 公尺的資料。 土壤中的碳總儲量	Sanderman et al. (2018)
	土壤： 446.9 ± 175.4	-	-	各種深度	文獻回顧；誤差值是標準差； 土壤和生物質中的碳儲量	Hutchison et al. (2014)
	生物質： 244.2 ± 215.9	-	-			
	平均值： 515.9	-	-	土壤庫存至一公尺；30 公尺畫素；五個生物質當量	土壤和生物質中的碳儲量。 生物質方程式因緯度而異 地圖： https://dataverse.harvard.edu/dataverse/GMCSD	Hamilton and Friess (2018)
	-	-	2400 萬噸碳 / 年	各種深度	文獻回顧： 土壤中碳的總累積量	Alongi (2014)
	-	-	1840 萬噸碳 / 年			Bouillon et al. (2008)
	-	-	1.74 噸碳 / 公頃 / 年			Alongi (2012)
	-	-	2.04 ± 1.53 噸碳 / 公頃 / 年			Hutchison et al. (2014)
	-	-	1.3~2.0 噸碳 / 公頃 / 年		文獻回顧；信賴區間範圍是 95% ； 土壤中碳的總累積量	Breithaupt et al. (2012)
	-	-	2.1 噸碳 / 公頃 / 年		全球文獻回顧： 土壤中碳的總累積量	Chmura et al. (2003)

地區 *	每單位面積的碳庫存 (噸碳 / 公頃)	總碳庫存 (10 億噸碳)	年度碳累積或排放量	深度	更多資訊	參考文獻
美國墨西哥灣	-	-	2.0~6.5 噸碳 / 公頃 / 年		文獻回顧，因燃燒而耗損 (大部分) ；土壤中碳的總累積量	
太平洋和印度洋	-	-	2.6~3.4 噸碳 / 公頃 / 年			
澳洲赫伯特河之河口 (Herbert River Estuary)	於個別樣區為 0.3~6.5	-	1.8 噸碳 / 公頃 / 年 (平均值)	0.8~1.6 公尺	土壤有機碳累積 (不包括碳酸鈣) ；田野調查，取得樣品和沉積物岩芯 (sediment cores)	Brunskill et al. (2002)
全球	-	-	90~970 噸碳 / 年	各種深度	文獻回顧；可能避免的損失 (伐林所造成)	Alongi (2014)
	-	-	0.01~0.02 噸碳 / 公頃 / 年		文獻回顧；非常態分布，甲烷排放	Al-Haj and Fulweiler (2020)

融合多種方法來審查，包括土壤有機碳的燃燒耗損 (loss on ignition) 、乾式燃燒 (dry combustion) 和使用集氣室技術 (chamber collection techniques) 收集的甲烷排放。

* 這些紅樹林系統沿著海岸與島嶼形成，其分布緯度限制在亞熱帶與熱帶區域 (20°C 等溫線)，而該區域的波浪能 (wave energy) (Alongi, 2002) 和冷凍傷害 / 死亡率 (Osland et al., 2017) 較低。特定地點的紅樹林棲地之範圍取決於當地相對海平面上升率、地形坡度 (landform slope) 、潮汐力 (tidal forcing) 、沉降率以及海岸下陷程度 (Feller et al., 2017)。在降水和淡水輸入很少的乾旱海岸沒有紅樹林，當地的生態系統被高鹽度鹽灘 (hypersaline salt flat) 所取代 (Osland et al., 2018)。

4. 紅樹林保育對提供特定生態系統服務的重要性

4.1. 最小化對土壤功能的威脅

表 12. 土壤威脅

土壤威脅	
土壤侵蝕	保護海岸免受海嘯和風暴潮的影響 (Alongi, 2012 ; Hutchison et al., 2014) ；沉積物攔集 (trapping) (Kamal et al., 2017)
土壤沾染 / 污染	水質淨化 (Hutchison et al., 2014) ；蝦類養殖因農藥與抗生素的使用 (Braun et al., 2019) 和優養化 (nitrogen eutrophication) 的問題 (Burford and Longmore, 2001) ，對池塘造成污染。
土壤酸化	池塘水產養殖可能導致酸性硫酸鹽土 (acid sulfate soil) (Alongi, 2002) 。
土壤生物多樣性損失	有關植物、土壤與微生物三者關係的研究不足 (Alongi, 2002) 。

4.2. 增加生產與糧食安全

紅樹林支持木材和其他有價值的產品，也支撐著漁業和生物多樣性 (Gunawardena and Rowan, 2005; Sathirathai and Barbier, 2001; Hutchison et al., 2013) 。此外，紅樹林提供食物和燃料，並做為半陸生和水生動物的育苗處 (nursery) (Alongi, 2012) 。人類開採各種森林產物，包括用於燃料、建築、紙張和漁具的木材；而其他非木材產物被收集用於動物飼料、天然產品（如魚、甲殼類動物、蜂蜜、飲料、其他食物、藥物）和家庭用品（如服裝纖維、染料、香料）(FAO, 2007) 。

4.3. 改善人類福祉

紅樹林透過提供人類必需品，如食物、遮蔽處和生計，支持人類福祉，同時促進當地社區的恢復力 (Barbier et al., 2011) 。

4.4. 緩解和適應氣候變遷

復育後的紅樹林在 25~30 年後所擁有的碳量會與原來完整的紅樹林相當（如柬埔寨 · Sharma et al., 2020），因此，復育計畫在碳固存方面具有很大的潛力（Hutchison et al., 2014）（另見本手冊的第 5 冊第 14 章資料表單的「復育紅樹林」）。紅樹林透過其高生產力在沿海地貌中發揮作用，有助於形成泥炭和沉積物（Barbier et al., 2011）。由於社會經濟的限制，許多紅樹林復育計畫因物種或選址不當而失敗，但近年來大規模的成功案例越來越多（Feller et al., 2017; Friess et al., 2020）。全球在 20~100 年的時間中，甲烷排放可能會抵消紅樹林 8~20% 的碳固存和緩解全球暖化的潛力（Rosentreter et al., 2018）。然而，在計算全球暖化潛在值時，還必須考量被避免掉的碳排放，例如在經水文復育後，因泥炭火災（peat fires）而釋放碳的風險（Turetsky et al., 2015）將會有所降低。

5. 挑戰和趨勢概況

由於土地轉換為農業、城市發展、木材和食物來源（魚類、甲殼類、貝類）的過度開採，紅樹林正在消失和退化（Alongi, 2012）。在 20 世紀末，全球紅樹林砍伐率為每年 0.7~2.1%，而在 21 世紀初已下降到每年 0.2~0.4%（Friess et al., 2019）。據估計，1980~2005 年間，紅樹林的總體耗損高達 20%，每年下降 1~2%（FAO, 2003）〔另參閱全球紅樹林監測觀察報告（Global Mangrove Watch, GMW），瞭解具體的年度耗損細節（Global Mangrove Alliance, 2020）〕。從區域來看，2000~2016 年期間，全球紅樹林耗損將近 80% 集中在東南亞，轉換成農業和水產養殖是摧毀紅樹林的最主要因素（Goldberg et al., 2020）。

雖然從 20 世紀末至 21 世紀初，森林砍伐率有所下降，但由於水文改變、都市汙染、食物和木材資源的過度採伐，一些紅樹林區域因而受到破壞（Friess et al., 2019）。

轉作其他土地用途的紅樹林，若其未分解的材質部分不再保持超過有機物分解的速度，可能就會失去其增加地表提升的能力（McKee et al., 2007）。轉換成農業和水產養殖時，則會伴隨著生物量和土壤碳儲存的耗損（Friess et al., 2020），而養蝦業則導致池塘的優養化（Burford and Longmore, 2001）。

雖然不同的土地用途對「藍碳」庫存有著非常不同的含意，但規定和評估中往往缺乏這種細微的差別（Friess et al., 2020）。保護紅樹林不被轉換為農業使用（包括種植水稻、養殖蝦類和種植油棕櫚），並在生物物理和社會經濟可行的地方復育紅樹林，可有助於減少土地利用而產生的全球二氧化碳排放（Lovelock et al., 2011）。



© U.S. Geological Survey/Eric Ward

照片 6. 美國佛羅里達州薩尼貝爾島 (Sanibel Island) 丁達林國家野生動物保護區 (Ding Darling National Wildlife Refuge) 潮間帶的黑皮紅樹 (*Avicennia germinans*) 和美國紅樹 (*Rhizophora mangle*)

表 13. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研究編號
印尼峇里廢棄池塘中紅樹林的復育工作	亞洲	10	6	17

參考文獻

- Al-Haj, A.N. & Fulweiler, R.W.** 2020. A synthesis of methane emissions from shallow vegetated coastal ecosystems. *Global Change Biology*, 26(5): 2988–3005. <https://doi.org/10.1111/gcb.15046>
- Alongi, D.M.** 2002. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29: 331–349.
- Alongi, D.M.** 2012. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, 3: 313–322. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.20>
- Alongi, D.M.** 2014. Carbon cycling and storage in mangroves. *Annual Review of Marine Science*, 6: 195–219. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010213-135020>
- Barbier, E.B., Hacker, S.D., Kennedy, C., Koch, E.W., Stier, A.C. & Silliman, B.R.** 2011. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81: 169–193.
<https://doi.org/10.1890/10-1510.1>
- Bouillon, S., Borges, A.V., Castañeda-Moya, E., Diele, K., Dittmar, T., Duke, N.C., Kristensen, E., Lee, S.Y., Marchand, C., Middelburg, J.J., Rivera-Monroy, V.H., Smith III, T.J. & Twilley, R.R.** 2008. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, 22: GB2013. <https://doi.org/10.1029/2007GB003052>
- Braun, G., Braun, M., Kruse, J., Amelung, W., Renaud, F.G., Khoi, C.M., Duong, M.V. & Sebesvari, Z.** 2019. Pesticides and antibiotics in permanent rice, alternating rice-shrimp and permanent shrimp systems of the coastal Mekong Delta, Vietnam. *Environment International*, 127: 442–451.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.03.038>
- Breithaupt, J.L., Smoak, J.M., Smith, T.J., Sanders, C.J. & Hoare, A.** 2012. Organic carbon burial rates in mangrove sediments: strengthening the global budget. *Global Biogeochemical Cycles*, 26: GB3011.
<https://doi.org/10.1029/2012GB004375>
- Brunskill, G.J., Zagorskis, I. & Pfitzner, J.** 2002. Carbon burial rates in sediments and a balance for the Herbert River Region of the Great Barrier Reef Continental Shelf, North Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 54: 677–700. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0852>
- Burford, M. & Longmore, A.R.** 2001. High ammonium production from sediments in hypereutrophic shrimp ponds. *Marine Ecology Progress Series*, 224: 187–195.
- Chmura, G.L., Anisfeld, S.C., Cahoon, D.R. & Lynch, J.C.** 2003. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 17: 22–33. <https://doi.org/10.1029/2002GB001917>
- Donato, D.C., Kauffman, J.B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. & Kanninen, M.** 2011. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4: 293–297.
<https://doi.org/10.1038/ngeo1123>

- Duke, N., Ball, M. & Ellison, J.** 2008. Factors influencing biodiversity and distribution of mangroves. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7: 27–47. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.1998.00269.x>
- FAO.** 2003. *Status and trends in mangrove area extent world-wide*. Forest Resources Assessment Working Paper Number 63. Forest Resources Division of the Food and Agricultural Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/j1533e/J1533E00.htm>
- FAO.** 2007. *The world's mangroves, 1980-2005*. FAO Forestry Paper, 153. Rome, Italy. (also available at: <http://www.fao.org/3/a1427e/a1427e00.pdf>)
- Feller, I.C., Friess, D.A., Krauss, K.W. & Lewis, R.R.** 2017. The state of the world's mangroves in the 21st century under climate change. *Hydrobiologia*, 803(1): 1–12. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3331-z>
- Friess, D.A., Rogers, K., Lovelock, C.E., Krauss, K.W., Hamilton, S.E., Lee, S.Y., Lucas, R., Primavera, J., Rajkaran, A. & Shi, S.** 2019. The state of the world's mangrove forests: past, present, and future. *Annual Review of Environment and Resources*, 44: 89–115. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033302>
- Friess, D.A., Krauss, K.W., Taillardat, P., Adame, M.F., Yando, E.S., Cameron, C., Sasmito, S.D. & Sillanpää, M.** 2020. Mangrove blue carbon in the face of deforestation, climate change, and restoration. *Annual Plant Reviews*, 3: 1–30. <https://doi.org/10.1002/9781119312994.apr0752>
- Giri, C., Ochieng, E., Tieszen, L.L., Zhu, Z., Singh, A., Loveland, T., Masek, J. & Duke, N.** 2011. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data (version 1.3, updated by UNEP-WCMC). *Global Ecology and Biogeography*, 20: 154–159. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00584.x>
- Global Mangrove Alliance.** 2020. *Global Mangrove Watch Viewer*. [online]. [Accessed 2 December 2020]. <https://www.globalmangrovewatch.org/>
- Gunawardena, M. & Rowan, J.S.** 2005. Economic valuation of a mangrove ecosystem threatened by shrimp aquaculture in Sri Lanka. *Environmental Management*, 36: 535–550. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0286-9>
- Goldberg, L., Lagomasino, D., Thomas, N. & Fatoyinbo, T.** 2020. Global declines in human-driven mangrove loss. *Global Change Biology*, 1–12. <https://doi.org/10.1111/gcb.15275>
- Hamilton, S.E. & Friess, D.A.** 2018. Global carbon stocks and potential emissions due to mangrove deforestation from 2000 to 2012. *Nature Climate Change*, 8(3): 240–244. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0090-4>
- Hutchison, J., Manica, A., Swetnam, R., Balmford A. & Spalding, M.** 2014. Predicting global patterns in mangrove forest biomass. *Conservation Letters*, 7: 233–240. <https://doi.org/10.1111/conl.12060>

- Kamal, S., Warnken, J., Bakhtiyari, M. & Lee, S.Y.** 2017. Sediment distribution in shallow estuaries at fine scale: in situ evidence of the effects of three-dimensional structural complexity of mangrove pneumatophores. *Hydrobiologia*, 803(1): 121–132. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3178-3>
- Kolka, R., Trettin, C., Tang, W., Krauss, K.W., Bansal, S., Drexler, J.Z., Wickland, K.P., et al.** 2018. Chapter 13: Terrestrial wetlands. In *Second State of the Carbon Cycle Report (SOCCR2): A Sustained Assessment Report*. pp. 507–567. U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/SOCCR2.2018.Ch13>
- Lovelock, C.E., Ruess, R.W. & Feller, I.C.** 2011. CO₂ efflux from cleared mangrove peat. *PLoS ONE*, 6: e21279. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021279>
- Lugo, A.E. & Snedaker, S.C.** 1974. The ecology of mangroves. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 5:39–64. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.05.110174.000351>
- Lugo, A.E., Brown, S. & Brinson, M.M.** 1988. Forested wetlands in freshwater and salt-water environments. *Limnology and Oceanography*, 33: 894–909. <https://doi.org/10.4319/lo.1988.33.4part2.0894>
- McKee, K.L., Cahoon, D. & Feller, I.C.** 2007. Caribbean mangroves adjust to rising sea level through biotic controls on soil elevation change. *Global Ecology and Biogeography*, 16(5): 545–556. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00317.x>
- McLeod, E., Chmura, G.L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C.M., Lovelock, C.E., Schlesinger, W.H. & Silliman, B.R.** 2011. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and Environment*, 9: 552–560. <https://doi.org/10.1890/110004>
- Middleton, B.A. & McKee, K.L.** 2001. Degradation of mangrove tissues and implications for peat formation in Belizean island forests. *Journal of Ecology*, 89:818–828. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00602.x>
- Osland, M.J., Day, R.H., Hall, C.T., Brumfield, M.D., Dugas, J.L. & Jones, W.R.** 2017. Mangrove expansion and contraction at a poleward range limit: climate extremes and land-ocean temperature gradients. *Ecology*, 98(1): 125–137. <https://doi.org/10.1002/ecy.1625>
- Osland, M.J., Gabler, C.A., Grace, J.B., Day, R.H., McCoy, M.L., McLeod, J.L., From, A.S., Enwright, N.M., Feher, L.C., Stagg, C.L. & Hartley, S.B.** 2018. Climate and plant controls on soil organic matter in coastal wetlands. *Global Change Biology*, 24(11): 5361–5379. <https://doi.org/10.1111/gcb.14376>
- Rosentreter, J.A., Maher, D.T., Erler, D.V., Murray, R.H., & Eyre, B.D.** 2018. Methane emissions partially offset “blue carbon” burial in mangroves. *Science Advances*, 4(6): eaao4985. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao4985>
- Rovai, A.S., Twilley, R.R., Castañeda-Moya, E., Riul, P., Cifuentes-Jara, M., Manrow-Villalobos, M., Horta, P.A., Simonassi, J.C., Fonseca, A.L. & Pagliosa, P.R.** 2018. Global controls on carbon storage in mangroves. *Nature Climate Change*, 8: 534–538. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0162-5>

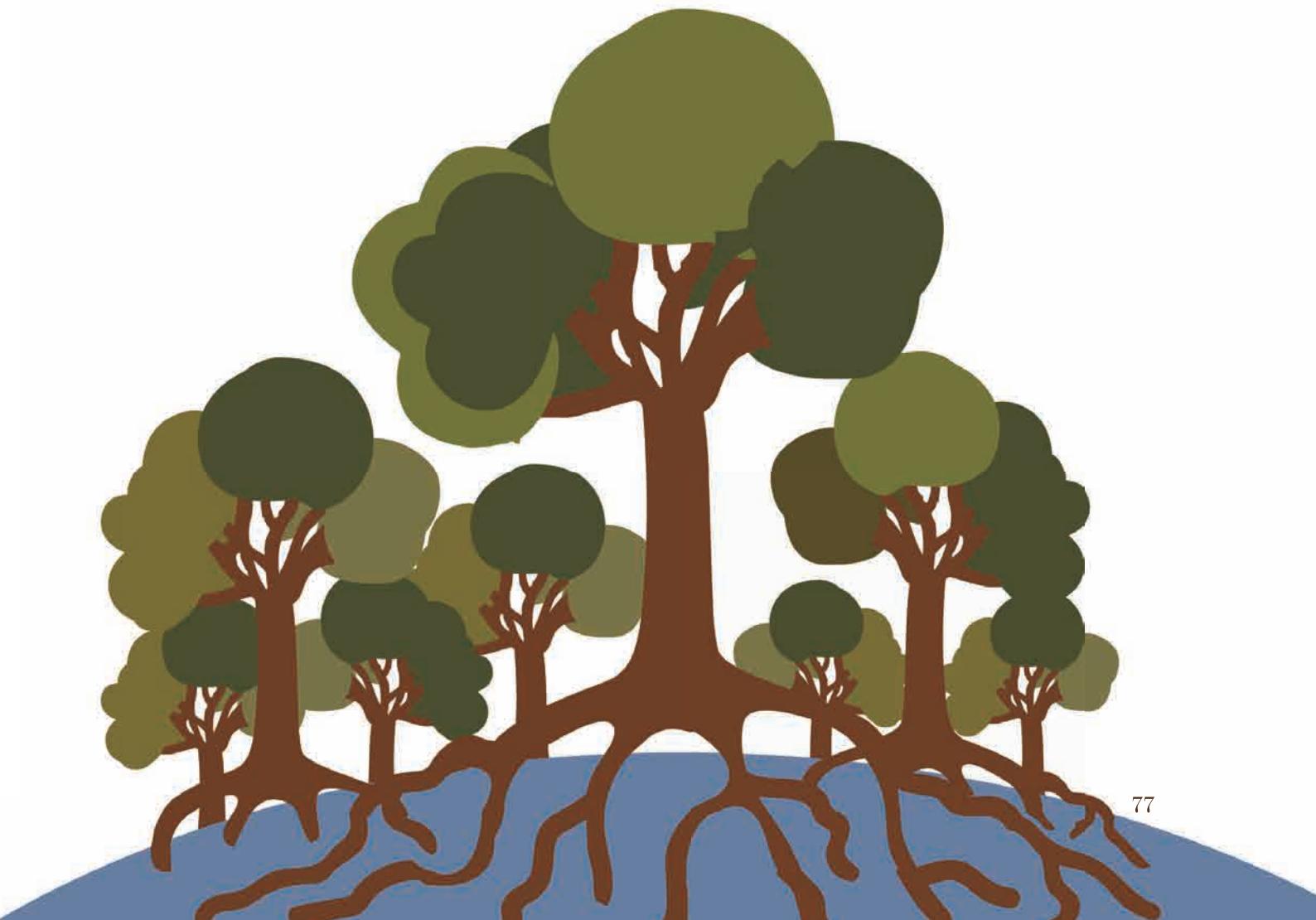
Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G., Solvik, K., Adame, M.F., Benson, L., Bukoski, J.J., et al. 2018. A global map of mangrove forest soil carbon at 30 m spatial resolution. *Environmental Research Letters*, 13: 055002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aabe1c>

Sathirathai, S. & Barbier, E. 2001. Valuing mangrove conservation in Southern Thailand. *Contemporary Economic Policy*, 19: 109–122. <https://doi.org/10.1111/j.1465-7287.2001.tb00054.x>

Sharma, S., MacKenzie, R.A., Tieng, T., Soben, K., Tulyasuwon, N., Resanond, A., Blate, G. & Litton, C.M. 2020. The impacts of degradation, deforestation and restoration on mangrove ecosystem carbon stock across Cambodia. *Science of the Total Environment*, 706. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135416>

Turetsky, M.R., Benscoter, B., Page, S., Rein, G., Van Der Werf, G.R. & Watts, A. 2015. Global vulnerability of peatlands to fire and carbon loss. *Nature Geoscience*, 8(1): 11–14. <https://doi.org/10.1038/ngeo2325>

Windham-Myers, L., Cai, W.-J., Alin, S.R., Andersson, A., Crosswell, J., Dunton, K.H., Hernandez-Ayon J.M., Herrmann, M., Hinson, A.L., Hopkinson, C.S., Howard, J., Hu, X., Knox, S.H., Kroeger, K., Lagomasino, D., Megonigal, P., Najjar, R.G., Paulsen, M.-L., Petet, D., Pidgeon, E., Schäfer, K.V.R., Tzortziou, M., Wang, Z.A., & Watson, E.B. 2018. Chapter 15: Tidal wetlands and estuaries. In N. Cavallaro, G. Shrestha, R. Birdsey, M.A. Mayes, R.G. Najjar, S.C. Reed, Romero-Lankao & Z. Zhu (Eds.) *Second state of the carbon cycle report (SOCCR2): a sustained assessment report*, pp. 596–641. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA, 878 pp. <https://doi.org/10.7930/SOCCR2.2018>.





黑 土

6. 黑土

Yuxin Tong^{1,2}, Martin Saksa³, Ademir Fontana⁴,

Lúcia Helena Cunha dos Anjos^{5,6}, Ricardo Simão Diniz Dalmoim⁷

¹ Global Soil Partnership Secretariat, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy

聯合國糧食及農業組織全球土壤合作計畫秘書處

² Institute of Soil fertility and Environment Resources, Heilongjiang Academy of Agriculture Sciences

中國黑龍江省農業科學院土壤肥料與環境資源研究所

³ National Agricultural and Food Centre, Soil Science and Conservation Research Institute, the Slovak Republic

斯洛伐克國家農業和糧食中心土壤科學與保育研究所

⁴ Embrapa Solos, Brazil

巴西農業研究公司Embrapa土壤研究中心

⁵ Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS), Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy

聯合國糧食及農業組織政府間土壤技術委員會 (ITPS)

⁶ Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brazil

巴西里約熱內盧聯邦農村大學

⁷ Universidade Federal de Santa Maria, Brazil

巴西聖馬利亞聯邦大學

1. 定義與說明

黑土 (black soils) 是天然的高產和肥沃的土壤，對全球糧食生產相當重要。在有利的氣候條件下，這些土壤可以提高作物生產力；然而，不適當的黑土管理措施會造成土壤有機碳大量耗損、土壤品質下降，並導致碳排放到大氣中。黑土的永續利用和管理可以保持或增加土壤有機碳的庫存，對確保全球糧食安全和緩解氣候變遷相當重要。

黑土是一種礦質土，富含有機碳的黑色表土層 (surface horizon)，且其深度至少 25 公分。黑土被認為有兩類 (第一類和第二類)：這兩個類別的區分是為了識別某些土壤具更高價值，因此更需要保護 (類別一)，而同時在總體的黑土定義中，仍包含更多樣的土壤類型 (類別二) (FAO, 2019)。

第一類黑土 (最易受傷害且最瀕危，需要全球性最高級別的保護) 具有以下五種性質：

- ◆ 存在黑色或非常暗的表土層，基本上擁有 ≤ 3 的彩度 (chroma) (表示濕潤狀態)，彩度 ≤ 3 表示濕潤而 ≤ 5 則為乾燥〔根據孟塞爾表色系 (Munsell colours)〕；
- ◆ 黑色表土層的總厚度 ≥ 25 公分；
- ◆ 黑色土層上部 25 公分的有機碳含量在 $\geq 1.2\%$ (或在熱帶地區 $\geq 0.6\%$) 和 $\leq 20\%$ 之間；
- ◆ 黑色表土層的陽離子交換能力 (cation exchange capacity) 為 ≥ 25 厘莫耳 / 公斤 (cmol / kg)，以及
- ◆ 黑色表土層的鹼基飽和度 (base saturation) $\geq 50\%$ 。

大多數但不是所有的第一類黑土都有發展良好的團粒狀 (granular) 或細小的亞稜角 (sub-angular) 結構，而在未退化或輕微退化的黑色表土層中，或是在未受到退化影響之富含腐殖質 (humus-rich) 的深層土層中，則有很高的團粒穩定性 (aggregate stability)。

第二類黑土 (大多為國家性的瀕危等級) 具有以下三種性質：

- ◆ 存在黑色或非常暗的表土層，基本上擁有 ≤ 3 的彩度 (表示濕潤狀態)，彩度 ≤ 3 表示濕潤而 ≤ 5 則為乾燥 (根據孟塞爾表色系)；
- ◆ 黑色表土層的總厚度 ≥ 25 公分；以及
- ◆ 黑色土層上部 25 公分的有機碳含量在 $\geq 1.2\%$ (或在熱帶地區 $\geq 0.6\%$) 和 $\leq 20\%$ 之間。

第二類黑土的辨別標準不包含第一類黑土的陽離子交換容量和鹼基飽和度。

2. 全球熱點分布

土壤科學家通常將世界上的黑鈣土 (Chernozems)、栗鈣土 (Kastanozems) 和黑土 (Phaeozems) (World Reference Base, WRB，世界土壤參比分類系統)、中國土壤分類中的均腐土 (Isohumosols)，以及土壤分類學 (soil taxonomy) 中的黑沃土 (Mollisols)，作為黑土的類型 (Liu, 2012)。雖然這些是主要的類別，但其他類別也包含在黑土的概念中，例如具有暗黑 (Chernic)、黑沃 (Mollic)、黑瘠 (Umbric)、厚熟 (Hortic) 和普雷塔 (Pretic) 土層的土壤。

當提到主要的土壤類型時，全球有四處須著重討論：黑鈣土 (黑沃土) 大範圍地出現在北美中部地區，橫跨美國中部平原和加拿大南部地區；栗鈣土和黑土 (Phaeozems) 則以不連續的帶狀出現，綿延至歐洲東南部和亞洲中部；西部黑土帶始於歐洲中南部的半濕潤乾草原 (sub-humid steppes)，並延伸橫跨俄羅斯到東部黑土帶，此為位在中國東北最具有代表性的黑土區 (均腐土)；第四個主要地點為南美洲的彭巴草原 (Pampas)，其範圍擴及阿根廷中東部的大部分地區、烏拉圭的大部分領土，以及巴西南部地區的一部分。因此，世界上 9.16 億公頃的黑土分佈在北半球的三個地區和赤道以南的一個地區，即南美洲的拉布拉他平原 (La Plata basin)。當考慮到黑土的自

然肥力和土地利用時，有鑑於此四個地區共同構成世界上主要的天然糧倉，因此對於這種分布以及此種土壤的成因、用途、管理和威脅的瞭解是至關重要 (Liu et al., 2010) 。

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

在世界土壤參比分類系統中，被歸為黑鈣土、栗鈣土和黑土 (Phaeozems) 的土壤被納入黑土的概念。雖然在自然情況下，這些土壤的有機碳含量很高，但實際上擁有這些土壤的大部分地區現在已退化危害。

透過使用全球土壤有機碳地圖 (Global Soil Organic Carbon map, GSOCmap) 和世界土壤參比分類系統來評估土壤有機碳庫存；分析指出全球黑土的一般碳庫存，只包含以下土壤類型：黑鈣土、栗鈣土和黑土 (Phaeozems) (FAO, 2019; FAO, 2009) 。結果顯示，黑土的土壤有機碳總庫存為 548 億噸，而土壤有機碳庫存的平均值為 66.4 噸 / 公頃 (表 14) 。

表 14. 世界土壤參比分類系統中黑鈣土、栗鈣土和黑土 (Phaeozems) 等級的黑土，在 30 公分土層的土壤有機碳總庫存和平均庫存

土壤參考組 (Soil Reference Group)	土壤有機碳庫存 (10 億噸)	平均土壤有機碳 (噸 / 公頃)
黑鈣土	19.7	89.6
黑土	18.2	62.2
栗鈣土	16.9	47.5
全部黑土	54.8	66.4

4. 黑土保育對提供特定生態系統服務的重要性

黑土是生產力最高的富碳土壤，提供多種益處，包括生態系統服務、糧食生產和安全、人類福祉以及氣候變遷的緩解和適應 (圖 15) 。

4.1. 最小化對土壤功能的威脅

黑土包含充足的養分，可供農作物生長所需，也含大量有機碳，同時具有良好物理性質。第一類黑土的明顯特徵是顏色深，表面富含腐植質，鹼基飽和度高 (Eckmeier et al., 2007)。此外，在實行永續管理措施時，因有適當的 pH 值、充足的有機氮、鉀，並含大多數的微量營養素 (micro-nutrient) 且程度適當等相關特徵，使得黑土能夠保持或改善土壤養分平衡和循環 (Balashov and Buchkina, 2011; Zhang et al., 2013)。黑土在土壤容積密度 (bulk density)、土壤團粒形成 (aggregation)、濕潤團粒穩定性 (wet-aggregate stability) 和水滲透率 (water infiltration rate) 方面具有良好的土壤物理性質。這些性質使得土壤能夠在調節田間的供水，緩解洪水和乾旱，並改善水質 (Balashov and Buchkina, 2011; Chen et al., 2014)。富含碳的土壤是糖、胺基酸 (amino acids) 和羧酸 (carboxylic acids) 等成分的儲備庫，是土壤微生物群落生長的天然資源 (Zhang and Han, 2015)。黑土中的養分，如氮和磷，也有助於豐富土壤的生物多樣性 (Galloway, 2004)。

4.2. 增加生產與糧食安全

黑土的土壤有機質含量高、土壤肥力好，且其物理結構佳，是自然條件下最肥沃、最多產的土壤；因此，黑土被密集、廣泛地耕作。全球分析指出，在專門用於種植農作物的總土地中，目前有 19% 的農田是由黑土組成的，而在黑土覆蓋的總面積中，則有 62% 被用作耕地 (USGS, 2015; HWSD, 2009)。

在俄羅斯 2.21 億公頃的農田中，60~70% 的土壤為黑鈣土層 (Avetov et al., 2011)。在斯洛伐克，黑土地面積為 47 萬 4885 公頃 (Kobza and Pálka, 2017)，約占該國農業土壤總面積的 20%。在中國，黑土的總面積為 3500 萬公頃 (Liu et al., 2012)，而黑土自 20 世紀 50 年代以來一直是該國的重要產糧區；2014 年黑土生產了全中國 15.9% 的水稻、33.6% 的玉米和 33.9% 的大豆 (中國國家統計局；Bureau of statistics of China, 2015)。在美國，黑土 (黑沃土) 覆蓋約 1.96 億公頃，其中 36.9% 用於畜牧業和作物生產 (Wickham et al., 2014)。南美洲的大多數的黑沃土用於穀物和油料作物、果園、草料作物和生產纖維作物，亦被用於生產穀物和飼料作物，或培植天然牧草地，以供肉牛和酪農業用 (Durán et al., 2011)。

4.3. 改善人類福祉

黑土透過提供有營養的食物、豐富人們的民俗文化和提供替代性的生計，來促進人類福祉。全球黑土地區生產多種營養糧食，包括穀物、豆類、肉類等等。在巴西，前哥倫布時期的原住民群體，已在亞馬遜地區的低地耕種數百年，在農地中加入了木炭、魚骨等材料和有機物，形成現在被稱為亞馬遜黑土（Amazonian Dark Earths）的肥沃土壤（Schmidt et al., 2014; Anne, 2015; Kern et al., 2019）。而在中國東北地區，人們將黑土與健康和積極的人物象徵聯繫在一起，以提高其人格、產品和文化的價值（Cui et al., 2017），黑土的賞析和娛樂價值也為農民提供增加收入的機會。

4.4. 緩解和適應氣候變遷

因黑土固有的高土壤有機碳含量，使其在緩解氣候變遷方面具很大的潛力。例如，根據全球土壤有機碳地圖顯示，黑土頂部 30 公分的平均土壤有機碳庫存為 66.4 噸 / 公頃，高於所有土壤類型的平均土壤有機碳庫存（57.34 噸 / 公頃）（FAO and ITPS, 2019）。迄今，儘管全球關於黑土潛在溫室氣體排放的資訊很少，但眾所周知，黑土廣泛且密集地耕種（穀物、牧草、放牧和飼料系統）會導致有機碳大量損失。根據不同的估計顯示，黑土從自然系統轉換為集約式農業（intensive farming）系統後，在 50~100 年內耗損了 20~50% 的土壤有機碳；例如，在美國密集的連續玉米種植系統中，土壤有機碳在 100 年內減少了 50% 以上（Gollany et al., 2011）。黑土中土壤有機碳的大量耗損，通常是由於土地使用不當和管理措施不善所造成，引起土壤品質和土壤結構衰弱，增加土壤侵蝕，進而導致碳被排放到大氣中。另一方面，適當的土地利用和土壤管理可以增加土壤有機碳和改善土壤品質，從而獲得多種效益（圖 15），還能部分緩解黑土區域中的二氧化碳增加（Liu et al., 2012）。總而言之，永續利用並妥善管理黑土，能保持或增加其土壤有機碳庫存，對緩解和適應氣候變化是相當重要。



圖 15. 黑土帶來的多種好處

5. 黑土的挑戰和趨勢概況

5.1. 土壤的有機碳損失

土地使用的改變和土壤不當的使用與管理，導致世界上黑土的土壤有機碳明顯減少。在俄羅斯，輕微、中等和嚴重侵蝕的黑土，其土壤有機質含量分別下降了 15%、25% 和 40% (Iutynskaya and Patyka, 2010)。另一項研究表明，烏克蘭的黑土有機物已經損失 30% (Balyuk and Medvedev, 2012)。摩爾多瓦 (Moldova) 的黑土在 100~125 年期間裡，0~25 公分層的碳已耗損約 30~45% (Krupenikov, 1992; Ciolacu, 2017)。中國黑土在玉米、大豆和小麥的單一作物連作 (monocropping) 系統下，0~90 公分土層的土壤碳平均年下降率分別為 0.91%、0.97% 和 0.48% (Liu et al., 2005)。過度的耕種和夏季休耕已經造成加拿大草原土壤有機物下降了 50% (Agriculture and Agri-Food Canada, 2003 · 加拿大農業及農業食品部)。砍伐森林和隨後的耕種導致巴西黑土地區的有機碳值明顯下降 (60~85%) (Rezapour and Alipour, 2017)。而在阿根廷的黑土中，經長時間的種植，土壤有機質減少 5.6~52.5%；這些都需要建立相關的保育措施，以減少土壤有機碳的損失和土壤品質的惡化 (Durán, 2010)。在烏拉圭，僅經過 50 年的時間，土壤有機碳就減少了 50% 以上 (Baethgen and Morón, 2000)。

5.2. 土壤侵蝕

由降雨和風化所引起的侵蝕使黑土的品質下降。一項研究表明，烏克蘭的黑土約有 1 / 3 可耕地被侵蝕 (Balyuk and Medvedev, 2012)。從 1979~2014 年間，在中國東北的黑土地區，土地使用從林業轉換到旱地的種植系統，讓土壤侵蝕從 204.4 噸 / 平方公里 / 年加劇至 420.9 噸 / 平方公里 / 年 (Ouyang et al., 2018)。巴西的土壤調查研究指出，由於森林砍伐引起土壤顆粒大小分布和主要有機物的變化，導致土壤可蝕性因數的數值顯著增加 (上升 10~270%) (Rezapour and Alipour, 2017)。在奧地利東部，觀察到黑土低地土壤因風化而流失，透過每年種植新的防風林，保護區域面積逐年增加幾千公頃 (Strauss and Klaghofer, 2006)。

5.3. 土壤養分失衡

隨著黑土過度使用，若沒有適當的肥培管理，養分水準會明顯的下降；已從在俄羅斯的黑土中觀察到易流失的養分，特別是氮（從 2001 年的 -41.4 公斤 / 公頃下降到 2009 年的 -56.4 公斤 / 公頃）和鉀（2001~2009 年期間從 -32.9 公斤 / 公頃下降到 -64.2 公斤 / 公頃），變得越來越貧瘠（Grekov et al., 2011; Medvedev, 2012）。烏克蘭黑土的養分庫存明顯減少（Balyuk and Medvedev, 2012），過度耕作和夏季休耕降低了加拿大草原土壤的養分（Agriculture and Agri-Food Canada, 2003）。巴西的黑土森林被砍伐後，觀察到總氮（67~88%）、陽離子交換能力（9~18%）和可交換性陽離子（exchangeable cations）（4~60%）的數值有明顯的損耗（Rezapour and Alipour, 2017）。

5.4. 土壤壓實

土壤壓實是黑土退化的常見原因。經過 75 年的耕作，俄羅斯黑土中所含的水穩定團粒（water-stable aggregates）總量下降了 $26.9 \pm 1.0\%$ ，而其黏土含量亦下降 $26.9 \pm 1.0\%$ （Balashov and Buchkina, 2011）。烏克蘭的一項研究顯示，大約 40% 的黑土有一個壓實層（Balyuk and Medvedev, 2012）。過度耕種和夏季休耕使加拿大草原土壤退化，導致表面結構不良（Agriculture and Agri-Food Canada, 2003）。在沒有明顯變化的情況下，受耕種過的黑土與巴西的林地相比，其土壤容積密度高出 14~20%，而孔隙度值低了 10~22%（Rezapour and Alipour, 2017）。

5.5. 鹽化和酸化

鹽化和酸化是自然（初級）和人為（次級）過程的結果；但在黑土地區，人類引起土壤和肥料管理不當的鹽化和酸化是主要的挑戰。根據在俄羅斯的研究指出，受灌溉土壤的二次鹽化會伴隨著富含腐植質層深度的減少（Grekov et al., 2011; Medvedev, 2012）。黑土的酸化，尤其在烏克蘭的切爾卡瑟（Cherkassy）和蘇梅（Sumy）地區，在經歷 40~50 年的耕種後，pH 值下降 0.3~0.5 個單位（Grekov et al., 2011; Medvedev, 2012）。在中國東北黑土地區，從 2005~2014 年間，土壤 pH 值下降了 0.27 倍，顯示集約種植系統中過度使用氮肥會導致酸化的趨勢（Tong, 2018）。

總而言之，黑土正面臨著土壤有機碳耗損、土壤養分失衡、土壤壓實、鹽化和酸化等相關威脅，需要採取行動對黑土進行永續管理，以確保這些富含碳的土壤之生產力和生態服務（圖 16）。

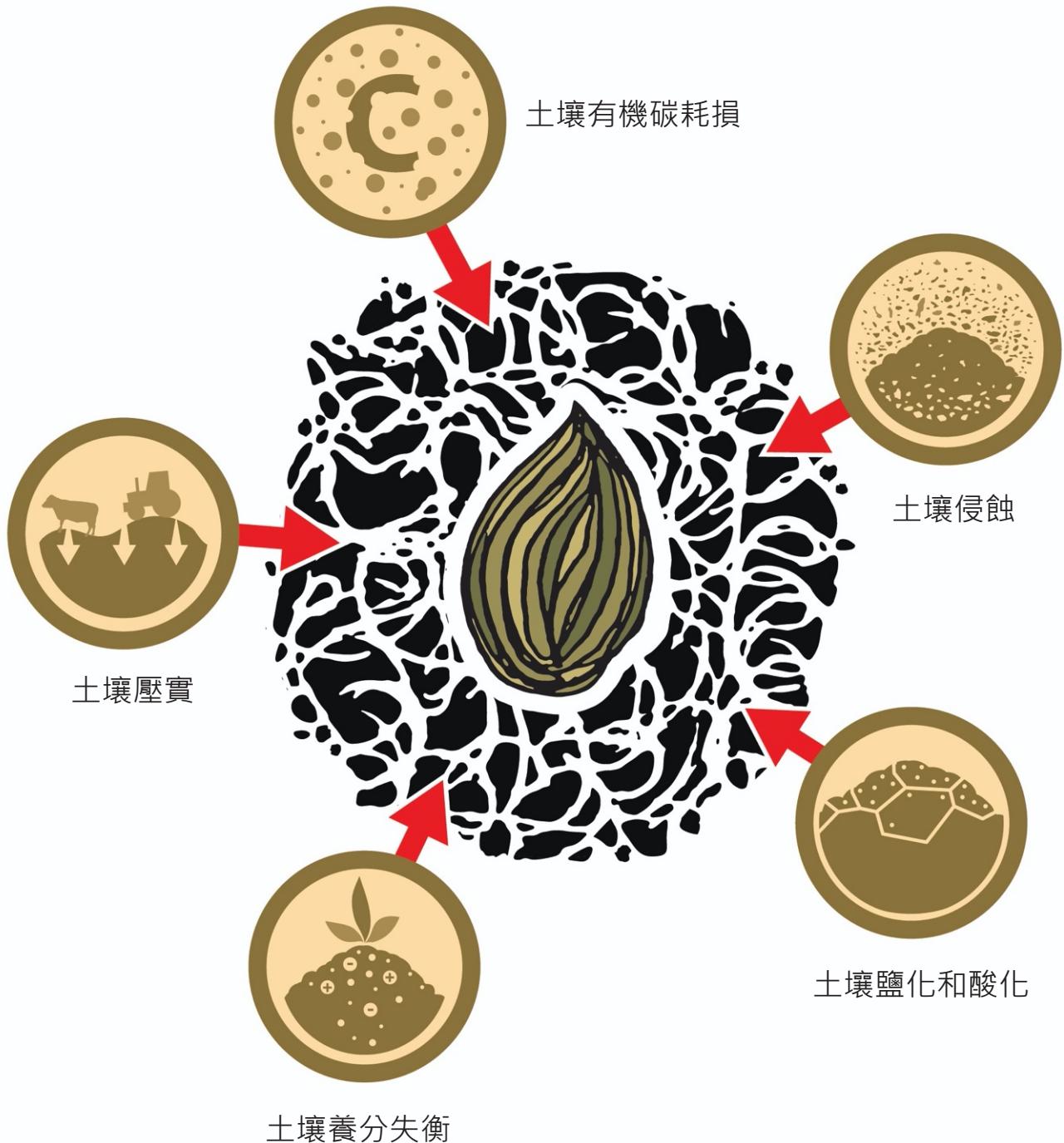


圖 16. 黑土面臨的主要挑戰



A

© Ricardo Simão Diniz Dalmolin



B

© Ricardo Simão Diniz Dalmolin



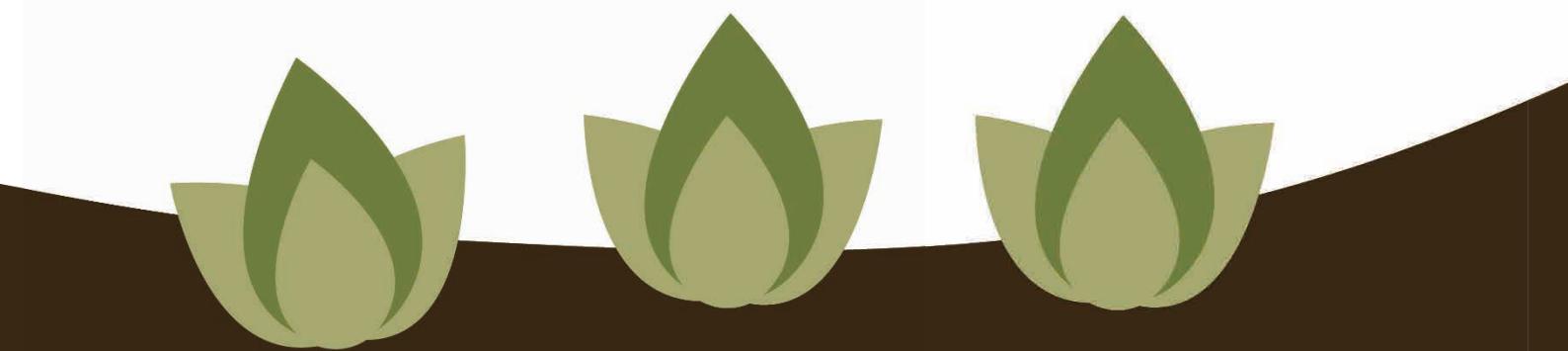
C

© Ricardo Simão Diniz Dalmolin

照片 7. 巴西南部彭巴草原生物群落中黑鈣土 (Chernossolo) (A)、變性土 (Vertissolo) (B) 和新成土 (Neossolo) (C) 的概況及相關地景

表 15. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研 究編號
中國黑土地區 16 年的免耕和殘體 覆蓋對連作玉米的影響	亞洲	16	4	10
烏克蘭黑土有機礦物質肥料施用	歐洲	5	4	26
阿根廷彭巴黑土地區藉灌注和播撒 系統施用豬和牛的糞肥	拉丁美洲和 加勒比海地 區	1	4	30
阿根廷彭巴地區的免耕和覆蓋作物	拉丁美洲和 加勒比海地 區	2~8	4	31
烏拉圭和阿根廷黑土上的作物與牧 草輪作	拉丁美洲和 加勒比海地 區	10~48	4	39
加拿大馬尼托巴省埃利區用於黑土 生物量生產的柳樹河岸緩衝系統	北美洲	6	4	42



參考文獻

- Agriculture and Agri-Food Canada.** 2003. *Prairie soils: The case for conservation*. [Online]. [Cited 15 September 2020]. <http://www.rural.gc.ca/pfra/soil/prairiesoils.htm>
- Anne, S.B.** 2015. *The secret of black soil*. DW, 20 January 2015. (also available at <https://www.dw.com/en/the-secret-of-black-soil/a-18199797>)
- Avetov, N.A., Alexandrovskii, A.L., Alyabina, I.O., Dobrovolskii, G.V. & Shoba, S.A.** 2011. *National Atlas of Russian Federation's soils*. Astrel, Moscow.
- Baethgen, W.E. & Morón, A.** 2000. Carbon Sequestration in Agricultural Production Systems of Uruguay: Observed Data and CENTURY Model Simulation Runs. In *Analés de la V Reunión de la Red Latinoamericana de Agricultura Conservacionista*. Florianópolis, Brasil.
- Balashov, E. & Buchkina, N.** 2011. Impact of short-and long-term agricultural use of chernozem on its quality indicators. *Int. Agrophys*, 25(1): 1-5.
- Balyuk S.A. & Medvedev, V.V.** 2012. *Strategy of balanced use, reproduction and management of soil resources of Ukraine* [in Ukrainian]. Kiev, Agrarian science. 240 pp.
- Chen, X.W., Liang, A.Z., Jia, S.X., Zhang, X.P. & Wei, S.C.** 2014. Impact of tillage on physical characteristics in a Mollisol of Northeast China. *Plant, Soil and Environment*, 60(7): 309-313. <https://doi.org/10.17221/245/2014-PSE>
- National Bureau of Statistics of China.** 2015. *China Statistical Yearbook*. (also available at: <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2015/indexeh.htm>)
- Ciolacu, T.** 2017. Current state of humus in Arable Chernozems of Moldova. *Scientific Papers-Series A, Agronomy*, 60: 57-60.
- Cui, W.L., Wang, J.J., Zhu, J. & Kong, F.Z.** 2017. “Lishu black land culture” continues to heat up. *Jilin Daily*. (also available at: http://jiuban.moa.gov.cn/fwllm/qgxxlb/qg/201709/t20170914_5815758.htm)
- Durán, A.** 2010. An overview of South American Mollisols: Soil formation, classification, suitability and environmental challenges. In *Proceedings of the International Symposium on Soil Quality and Management of World Mollisols*.
- Durán, A., Morrás, H., Studdert, G. & Liu, X.** 2011. Distribution, properties, land use and management of Mollisols in South America. *Chinese Geographical Science*, 21(5): 511. <https://doi.org/10.1007/s11769-011-0491-z>
- Eckmeier, E., Gerlach, R., Gehrt, E. & Schmidt, M.W.** 2007. Pedogenesis of chernozems in Central Europe—a review. *Geoderma*, 139(3-4): 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.01.009>

- Galloway, J.N., Dentener, F.J., Capone, D.G., Boyer, E.W., Howarth, R.W., Seitzinger, S.P., Asner, G.P., Cleveland, C.C., Green, P.A., Holland, E.A., Karl, D.M., Michaels, A.F., Porter, J.H., Townsend, A.R. & Vöosmarty, C.J.** 2004. Nitrogen Cycles: Past, Present, and Future. *Biogeochemistry*, 70(2): 153–226. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0370-0>
- Gollany, H.T., Rickman, R.W., Liang, Y., Albrecht, S.L., Machado, S. & Kang, S.** 2011. Predicting agricultural management influence on long-term soil organic carbon dynamics: Implications for biofuel production. *Agronomy journal*, 103(1): 234-246. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0203s>
- Grekov, Datsko, L.V., Zhilkin, V.A., Maistrenko, M.I. & Datsko, M.O.** 2011. *Methodical instructions for soil protection* [in Ukrainian]. Kyiv, The State Center of Soil Fertility Protection. 108 pp.
- FAO.** 2009. *HWS classification*. [online]. [Cited 20 October 2020]. <http://www.fao.org/land-water/databases-and-software/hwsd/en/>.
- FAO.** 2019. *Black Soils definition*. [online]. [Cited 20 October 2020]. <http://www.fao.org/global-soil-partnership/intergovernmental-technical-panel-soils/gsoc17-implementation/internationalnetworkblacksoils/more-on-black-soils/definition-what-is-a-black-soil/en/>
- FAO & ITPS.** 2019. *Global Soil Organic Carbon (GSOC) Map* [online]. [Cited 7 September 2020]. <http://www.fao.org/global-soil-partnership/pillars-action/4-information-and-data-new/global-soil-organic-carbon-gsoc-map>
- Kern, J., Giani, L., Teixeira, W., Lanza, G. & Glaser, B.** 2019. What can we learn from ancient fertile anthropic soil (Amazonian Dark Earths, shell mounds, Plaggé soil) for soil carbon sequestration? *Catena*, 172: 104–112. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.08.008>
- Kobza, J. & Pálka, B.** 2017. Contribution to black soils in Slovakia according to INBS criteria. [In Slovak: Príspevok k tmavým pôdam na Slovensku podľa kritérií INBS]. *Proceedings of Soil Science and Conservation Research Institute*, 29: 34–42.
- Kogan, F., Adamenko, T. & Kulbida, M.** 2011. Satellite-based crop production monitoring in Ukraine and regional food security. In *Use of satellite and in-situ data to improve sustainability*. pp. 99-104. Springer, Dordrecht.
- Krupenikov, I.A.** 1992. *The soil layer of Moldova: past, present, management, forecast* [In Slovak: Moldovy: Proshloe, nastoyashchee, upravlenie, prognoz].
- Liu, X.B., Zhang, X.Y., Wang, Y.X., Sui, Y.Y., Zhang, S.L., Herbert, S.J., & Ding, G.** 2010. Soil degradation: a problem threatening the sustainable development of agriculture in Northeast China. *Plant, Soil and Environment*, 56(2): 87-97. <https://doi.org/10.17221/155/2009-PSE>
- Liu, X., Burras, C.L., Kravchenko, Y., Duran, A., Huffman, T., Morras, H., Studdert, G., Zhang, X., Cruse, R. & Yuan, X.** 2012. Overview of Mollisols in the world: Distribution, land use and management. *Canadian Journal of Soil Science*, 92(3): 383–402. <https://doi.org/10.4141/cjss2010-058>

Liu, X., Liu, J., Xing, B., Herbert, S.J., Meng, K., Han, X. & Zhang, X. 2005. Effects of long-term continuous cropping, tillage, and fertilization on soil organic carbon and nitrogen of black soils in China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36(9-10): 1229-1239.
<https://doi.org/10.1081/CSS-200056917>

Medvedev, V.V. 2012. *Soil monitoring of the Ukraine. The concept. Results. Tasks.* (2-nd reconsidered and added edition) [in Russian]. Kharkiv, The City printing house. 536 pp.

Ouyang, W., Wu, Y., Hao, Z., Zhang, Q., Bu, Q. & Gao, X. 2018. Combined impacts of land use and soil property changes on soil erosion in a mollisol area under long-term agricultural development. *Science of the total environment*, 613: 798-809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.173>

Rezapour, S. & Alipour, O. 2017. Degradation of Mollisols quality after deforestation and cultivation on a transect with Mediterranean condition. *Environmental Earth Sciences*, 76(22): 755.
<https://doi.org/10.1007/s12665-017-7099-2>

Schmidt, M.J., Rapp Py-Daniel, A., de Paula Moraes, C., Valle, R.B.M., Caromano, C.F., Texeira, W.G., Barbosa, C.A., Fonseca, J.A., Magalhães, M.P., Silva do Carmo Santos, D., da Silva e Silva, R., Guapindaia, V.L., Moraes, B., Lima, H.P., Neves, E.G. & Heckenberger, M.J. 2014. Dark earths and the human built landscape in Amazonia: a widespread pattern of anthrosol formation. *Journal of Archaeological Science*, 42: 152–165. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2013.11.002>

Tong Y.X. 2018. Influence of crop conversion on SOC, soil pH and soil Erosion in mollisols region of Songnen Plain. China Agricultural University. (PhD dissertation)

USGS. 2015. *Global Food Security-Support Analysis Data at 30 m (GFSAD)* [online]. [Cited 20 October 2020]. https://www.usgs.gov/centers/wgsc/science/global-food-security-support-analysis-data-30-m-gfsad?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects

Wickham, J., Homer, C., Vogelmann, J., McKerrow, A., Mueller, R., Herold, N. & Coulston, J. 2014. The multi-resolution land characteristics (MRLC) consortium—20 years of development and integration of USA national land cover data. *Remote Sensing*, 6(8): 7424-7441. <https://doi.org/10.3390/rs6087424>

Zhang, X.Y., Sui, Y.Y. & Song, C.Y. 2013. Degradation process of arable mollisols. *Soil and Crop*, 1: 1-6.

Zhang, Z.M. & Han, X.Z. 2015. Microbial metabolic characteristics of carbon in the black soil parent material maturation process [In Chinese]. *Acta Ecologica Sinica*.
<https://doi.org/10.5846/stxb201312313078>



草原

7. 草原

Mohammad I. Khalil¹, Cláudia M.d.S. Cordovil², Rosa Francaviglia³,
Beverley Henry⁴, Katja Klumpp⁵, Peter Koncz⁶, Mireia Llorente⁷, Beata
E.Madari⁸, Muñoz-Rojas Miriam^{9,10}, Nerger Rainer¹¹

(共同作者按字母順序排列)

¹School of Applied Sciences & Technology, Prudence College Dublin, Dublin 22 and School of Biology & Environmental Science, University College Dublin, Dublin 4, Ireland

愛爾蘭都柏林普魯登斯學院應用科學與技術學院、都柏林大學生物與環境科學學院

²University of Lisbon, School of Agriculture, Forest Research Center, Lisboa, Portugal
葡萄牙里斯本大學農學院森林研究中心

³Council for Agricultural Research and Economics, Research Centre for Agriculture and Environment (CREA-AA), Rome, Italy.

義大利農業研究與經濟委員會農業與環境研究中心 (CREA-AA)

⁴Science and Engineering Faculty, Queensland University of Technology, Brisbane, Australia
澳洲昆士蘭科技大學科學與工程學院

⁵Grassland Ecosystem Research, INRA, Clermont-Ferrand, France
法國國家農業研究院草原生態系統研究中心

⁶Duna-Ipoly National Park Directorate, Budapest, Hungary and MTA-SZIE Plant Ecology Research Group, Gödöllő, Hungary

匈牙利多瑙河-伊波利國家公園管理局 · 以及匈牙利科學院-聖伊斯特萬大學 (MTA-SZIE) 植物生態學研究團隊

⁷Forest Department, University of Extremadura, Plasencia Campus, Spain
西班牙埃斯特雷馬杜拉大學普拉森西亞校區森林系

⁸Embrapa Rice and Beans, Santo Antônio de Goiás, GO, Brazil
巴西農業研究公司Embrapa稻米和豆類研究中心

⁹UNSW Sydney, School of Biological, Earth and Environmental Sciences, Sydney NSW, Australia
澳洲新南威爾斯大學生物、地球與環境科學學院

¹⁰The University of Western Australia, School of Biological Sciences, Crawley, WA, Australia
澳洲西澳洲大學生物科學學院

¹¹Soil & More Impacts GmbH, German office, Hamburg, Germany
德國土壤與更多影響公司德國辦事處

1. 定義與說明

這裡的「草原」 (grassland) 一詞是指廣義的放牧地，與聯合國教科文組織的定義一致，即「被草本植物 (herbaceous) 覆蓋的土地，樹木和灌木覆蓋率低於 10%，樹木和灌木覆蓋率為 10~40% 草木並茂的草原」。草原的特點是，草和草本植物通常出現在有足夠水分供草生長，但是環境條件不支持樹木生長的地方。不同區域中使用不同的

名稱描述草原系統，包括北美的大草原（prairies）、亞洲的乾草原（steppes）、非洲的稀樹草原（veldts）、澳洲和非洲的疏林草原（savannahs），以及南美的彭巴草原（pampas）、拉諾斯草原（llanos）和賽拉多草原（cerrados）。

就氣候和自然地景特徵、土地利用和管理及土壤碳的水平和穩定性而言，草原具有高度的多樣性。與其他管理的生態系統相比，草原含有較高的土壤有機碳密度 / 庫存，但在集約管理和不當的畜牧生產措施的牧場中，其放養率（stocking density·Viglizzo et al., 2019）與土壤和氣候因子（Smith et al., 2019; Xu et al., 2017）都出現淨損失。已確定的管理熱點包含：（1）高土壤有機碳庫存地區是處於或接近自然平衡水準，因此增加土壤有機碳的潛力較小，但若土地利用變化（land use change），則可能會有土壤有機碳損失的風險；（2）土壤有機碳含量低至中等的地區，其過去的管理方式已造成部分損耗，故增加庫存的可能性較大；（3）因自然或人為因素而造成有機物大量流失的退化地區，恢復土壤健康和土壤碳含量的可能性，非常不確定。本文熱點分析的重點是辨別出具有高碳固存潛力的草原區域。一般來說，影響放牧地土壤的有機碳固存熱點空間分布之變數包括植物類型（生命形式）、植被覆蓋和土壤黏土含量。

一般來說，除了轉換後短期內有相對較小的損耗，從森林轉換到草原的土地利用變化，可能不會減少土壤有機碳程度（Guo and Gifford, 2002），然而森林或草原轉換為耕地後卻會有高損耗率。耕地轉為永久草原有可能成為土壤碳固存的熱點（Sanderman, Hengl and Fiske, 2017）。此外，改善管理措施可以增加密集放牧的牧草地的有機物質投入，進而增加草類青貯料（grass silage）和乾草的生產（Khalil et al., 2020）。同樣地，特別是在半乾旱地區，採用作物、畜牧業和林業整合系統以及復育退化的草原和疏林草原（savanna）畜牧業系統管理系統，意味著有成為土壤有機碳固存熱點的機會。

2. 全球熱點分布

熱點辨識方法和製圖技術的很多變。例如，Khosravi 等人（2015）使用直接抽樣方法和空間統計來評估伊朗克爾曼省半乾旱放牧地碳固存熱點的驅動因素，而 Sanderman、Hengl 和 Fiske（2017）則透過評估因歷史土地利用與地表覆蓋變遷（land use and land cover change）而造成的土壤有機碳耗損量和空間分布，來辨識出全球潛在的土壤有機碳固存熱點（圖 17）。相對於歷史當地水平（有些耗損大於 50%），土壤有機碳的高度流失為土壤碳固存提供了最大的潛力，包括透過將耕地轉換為永久草原。

根據模擬的碳債（carbon debt）分析，全球土壤頂部 2 公尺處潛在的土壤碳固存量為 1330 億噸碳，其中 480 億噸碳位在草原和疏林草原（Sanderman, Hengl and Fiske, 2017）。阿根廷、非洲南部和澳洲的放牧地是土壤有機碳耗損的熱點地區（圖 17），也是可透過改進管理措施使成為潛在土壤碳固存熱點的地區。

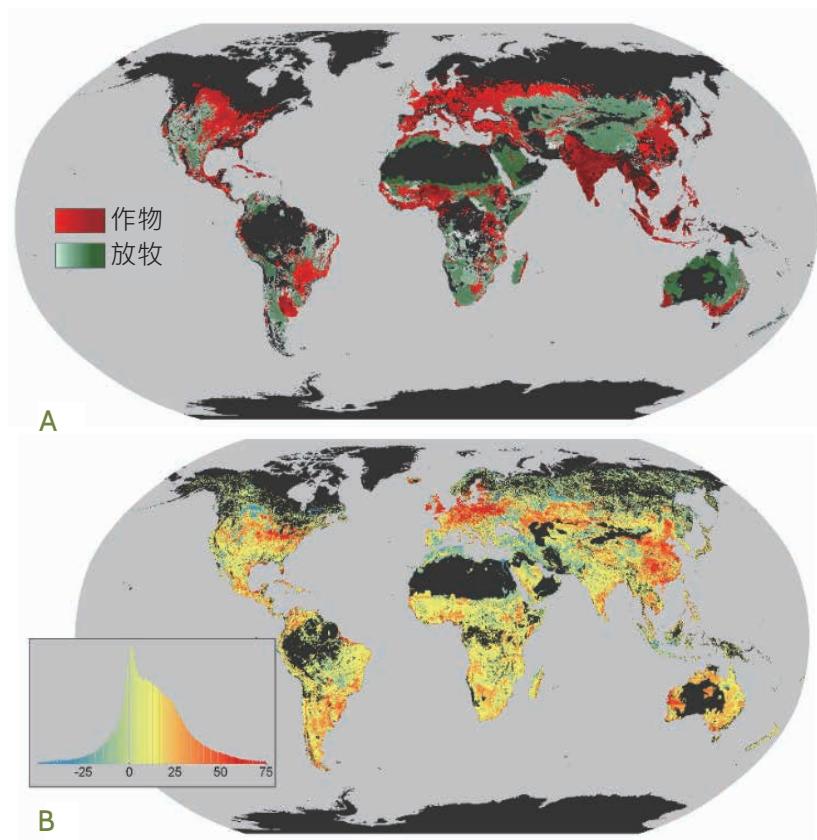


圖 17. 2010 年全球作物種植和放牧之分布 (A) 和模擬土壤有機碳在頂部兩公尺的變化 (B)

在 A 中，顏色梯度表示特定土地利用所占網格單元的比例。在 B 中，土壤有機碳耗損 (噸碳 / 公頃) 以圖例中的柱狀圖來表示，正值表示耗損，負值表示土壤有機碳的淨增加。

(Adopted from Sanderman, Hengl and Fiske, 2017) 2020 年 3 月 25 日給予許可

注：實事求是地說，潛在的碳匯並不是 100% 的土壤有機碳債，充其量只可能是長期耗損的 10~30% (Sanderman, Hengl and Fiske, 2017) (圖 18) 。

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

量化土壤有機碳固存潛力和界定草原熱點邊界可能是一個挑戰，而主要影響因素是數據的侷限性和複雜的相互作用，決定了不同草原管理系統的植被生產力和土壤碳反應。雖然受管理的草原生態系統可做為碳匯，平均儲存 0.7 ± 0.16 噸碳 / 公頃 / 年 [EFDC, 2018，環境流動力學模型 (Environmental Fluid Dynamics code)]，但實際比率變化很大且不確定 (表 16) 。

圖 17B 與 Sanderman、Hengl 和 Fiske (2017) 的補充資料顯示，放牧地〔即國際地圈生物圈計劃 (International Geosphere-Biosphere Program, IGBP) 土地分類類別的草原和疏林草原〕全體損失的土壤有機碳比任何其他土地利用類型都來的多，其中乾旱和半乾旱地區的貢獻最大。如果以歷史土壤有機碳的百分比來估計，阿根廷、非洲南部和澳洲的牧場為土壤有機碳耗損的熱點。

表 16. 牧草地和放牧地的土壤碳固存潛力

地區	方法	深度 (公分)	碳固存潛力 (噸碳 / 公頃 / 年)	更多資訊	參考文獻
全球 (放牧地)	使用 Century 、 Daycent 、 GLEAM* 進行模擬	未說明	0.23 (平均) 0.13~0.32 (範圍)	改善放牧管理後的 碳固存潛力模擬	Hender- son et al. (2015)
全球 (牧草地)			0.16 (平均) 0.05~0.32 (範圍)		
阿根廷 (半 乾旱疏林草 原)	測量土壤有機 碳		1.9~2.75	恢復高度退化的地 點。潛在總獲得為 58 噸碳 / 公頃， 等於因牛群過度放 牧而造成的耗損	Abril and Bucher (2001)
澳洲 (溫帶 牧草地)	在 15~25 年間 所進行的三個 長期試驗之測 量	0~30	0.5~0.7	改善永久牧草地的 養分、放牧管理	Chan et al. (2011)
歐洲 (溫帶)	基於 24 項研 究中的 89 個 觀察點之模擬 估計值	0~23.5 (平均)	1.05 (100 年) 3.23 (20 年)	耕地轉換為草原。 (使用土壤有機碳 的百分比變化來計 算比率)	Poeplau et al. (2011)
美國 (東南部)	35 項關於一年 生耕地轉為草 原的長期研究 之平均結果	0~25	0.84 ± 0.11	試驗平均時間為 17 年	Poeplau et al. (2010)
英國北愛爾 蘭 [唐郡 (County Down)]	測量比率與 DNDC** 模擬 比率，為各實 驗的平均值	0~15	0.46 ± 0.06 (測量) 0.37 ± 0.01 (DNDC 模 型)	在有草料管理 (青 貯料 / 乾草) 的草 原上之長期施肥試 驗 (42 年)	Khalil et al. (2020)
紐西蘭 (行 放牧的山 村)	測量 23 個地 點的土壤有機 碳，使用歸檔 樣本	0~30 0~90	0.60 ± 0.16 0.9	平均時期為 23 年 · 氮獲得為 0.07 噸 氮 / 公頃 / 年	Schipper et al. (2014)

地區	方法	深度(公分)	碳固存潛力 (噸碳 / 公頃 / 年)	更多資訊	參考文獻
巴西 (亞馬遜南部)	在黏土氧化土 (clay oxisol) 上植樹12年後的測量結果	0~100	1.47	種植在牧場上的桉樹 (12年)。養分不受限制。	Oliveira et al. (2018)

由於各研究的方法、深度和時間長度有所差異，因而所獲得的有意義比較結果有限。對於管理措施或土地利用的任何改變，其中的土壤有機碳庫存變化皆取決於土壤和氣候因素、土壤有機碳庫存基準線（退化的土壤有更大的潛力獲得土壤有機碳）以及研究的時間範圍。

*GLEAM—全球畜牧業環境評估模型 (Gerber et al., 2013)；

**DNDC-The Denitrification-Decomposition (脫氮作用-分解，DNDC95 版)

4. 草原保育對提供特定生態系統服務的重要性

4.1. 最小化對土壤功能的威脅

表 17. 土壤威脅

土壤威脅	
土壤侵蝕	土壤碳固存透過改善土壤結構，使土壤不容易受到水和風的侵蝕；諸如增加覆蓋物等的相關措施，可以增加土壤保護服務 (soil conservation service)，進而降低坍方的易受害程度 (Keesstra et al., 2016)。
養分失衡和循環	土壤有機物的增加有助於養分的儲存、循環和轉化 (Smith et al., 2019)。
土壤鹽化和鹼化	避免在地下水含鹽的草原上過度放牧，有助於管理鹽度風險 (Lavado and Taboada, 1987)。 在半乾旱地區，從種植作物轉換為草原，可以增加土壤有機碳，降低土壤鹽度和鹼度 (sodicity) (Yu et al., 2018)。
土壤沾染 / 污染	土壤碳固存可以增強土壤健康、緩衝汙染物，還可以保護水質 (Smith et al., 2019)。

土壤威脅

土壤酸化	草原轉換為森林會導致土壤酸化 (Jobbágy and Jackson, 2003)
土壤生物多樣性損失	土壤碳固存可以改善土壤健康，強化土壤生物群的棲地 (Keesstra et al., 2016)。
土壤壓實	低牲畜放養率的永久草原，其土壤容積密度通常會比重度放牧地區較低 (Miao et al., 2015)。
土壤水分管理	土壤碳固存的相關措施可以協助調節高峰水流的時機和流量 (Smith et al., 2019)。

4.2. 增加生產與糧食安全

土壤有機物是良好土壤品質、功能和健康的基本要素；透過提供大量營養素 (macronutrients) 和微量營養素 (micronutrients)，土壤有機碳的水準是決定全球糧食和營養安全的有力因素 (Lal, 2016)。固存土壤有機碳的相關措施也傾向於改善糧食安全和適應氣候變遷。在熱帶環境下，隨著土壤有機碳增加，每年可以獲得產量的共同效益（約 0.07 噸乾物質 / 噸土壤有機碳固存）(Soussana et al., 2019)。全世界估計有 26 億公頃牧地用於生產反芻動物 (Henderson et al., 2015)，為靠畜牧業賴以維生的數以億計人，對其生計做出貢獻 (Herrero et al., 2009)。

4.3. 改善人類福祉

草原的土壤有機碳固存對人類的物理和文化環境產生正面的影響 (Smith et al., 2019)。健康的土壤定義大面積草原很重要，因這些草原為世界上一些最貧窮的人提供生態系統服務。而在這些草原地景裡的土壤健康能對營養和水質產生影響，也提供某些植物類的藥物和美學效益，進而決定人類的福祉。

4.4. 緩解和適應氣候變遷

土壤碳固存相當於大氣所含二氧化碳的潛在大碳匯，支持對氣候變遷的恢復力，來應變氣候變遷，鞏固糧食生產（如 Lal, 2016; Soussana et al., 2019）。研究對草原潛在氣候變遷緩解作用之估計，不盡相同。Henderson 等人（2015）估計，隨著管理的改善和豆科植物的播種，放牧地每年可固存約 8000 萬噸碳，同時增加超過 9 億噸的乾物質草料生產，從而帶來經濟和糧食安全效益。然而，產量的增加涉及到和溫室氣體排放間的權衡取捨，其以反芻牲畜腸道的甲烷增加之形式來呈現。

5. 挑戰和趨勢概況

雖然過去的草原管理方式已消耗其土壤有機物的天然水準，但一般來說草原土壤有機碳的生物物理潛力仍是最大，然而往往存在社會經濟的障礙，阻擋最佳放牧管理措施的大規模採用（圖 18）。對動物蛋白（肉和奶）的需求預計將繼續增長（Herrero et al., 2009）。雖然歷史上生產的擴大通常是透過土地利用變化而增加放牧範圍來推動，但目前的趨勢更多是集約化現有草原的生產。較高的放牧壓力與氣候變遷相結合，如溫度升高和降水的不穩定性，將增加過度放牧的風險，導致草皮覆蓋喪失和土壤侵蝕，因而更加劇了增加或維持土壤有機碳庫存的挑戰。具體挑戰的例子有：

森林

歷史上在溫帶和熱帶地區的草原上為畜牧業生產而砍伐森林（圖 17），將有助於形成土壤有機碳固存的熱點（Sanderman, Hengl and Fiske, 2017）。相反地，在熱帶和新熱帶地區，用火來管理森林侵入和疏林草地的放牧生產力（如 Burrows et al., 2002），則會導致非二氧化碳的溫室氣體排放，也會造成儲存於土壤中氮和碳的流失。與 64 年後未燒毀的地塊相比，在 64 年內經常燃燒的地塊之表面土壤有機碳，預估會下降 $36 \pm 13\%$ （Pellegrini et al., 2018）。

泥炭地和濕地

有機土壤，例如為草原畜牧業生產而排乾的有機浸水灰化土（histic Gleysols），可能是二氧化碳損失的熱點（Leiber-Sauheitl et al., 2014），如在德國北部的土壤，其溫室氣體淨平衡達到 7~9 噸碳 / 公頃 / 年。

氣候變遷

人類活動引起的暖化增加了草原固存的挑戰，因為土壤溫度升高會啟動一個正向反饋循環 (positive feedback loop)，而土壤微生物會將更多的土壤有機碳轉化為二氧化碳 (Amundson et al., 2015)。此外，可推斷未來將出現更嚴重的乾旱，將讓增加有機物投入的範圍受到限制，進而加劇因過度放牧而引起的土地退化。

全部

一個 2001~2019 年的土壤有機碳改變的統合分析，對在土壤有機碳的效應與 33 個影響因素的基本機制進行研究調查，其中包含對牲畜放牧的土地利用變化和土地利用的觀察 (Xu et al., 2020)。此分析推斷增加碳投入是固存土壤有機碳的最佳方法之一，這與圖 17 中的熱點識別相一致。

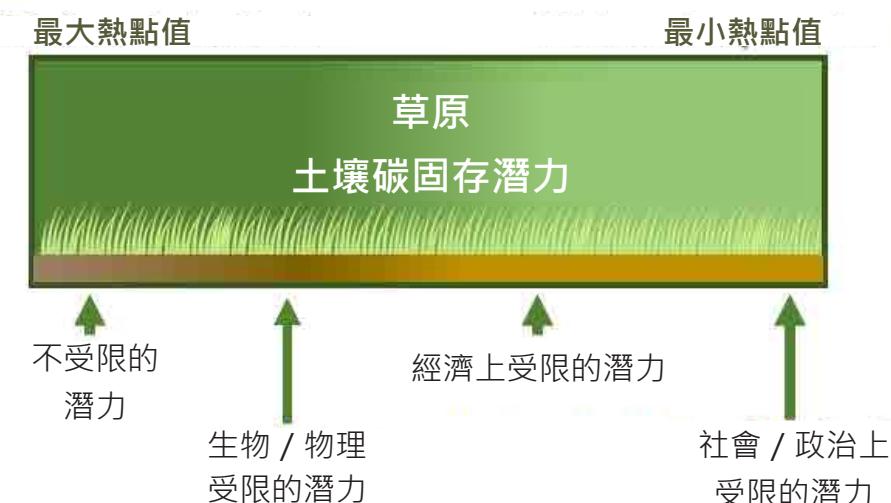


圖18. 草原固存潛力的限制因素 (Adapted from Sanderman, Farquharson and Baldock, 2010)

在任何地點，草原上最大的可行固存潛力，以及畜牧業熱點地區的絕對和相對重要性，都取決於土壤和氣候條件以及經濟、社會和政治限制。這些限制因素可能會隨著時間的推移而改變，例如，隨著當地氣候變化的影響而有所變動。

表 18. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研 究編號
澳洲南部和東部牧地草原系統的放牧管理	東南太平洋	4~10	4	9
西班牙、義大利和葡萄牙的地中海類稀樹草原的混農林牧草原系統	歐洲	4、22 和 37	4	17
巴西聖保羅聖喀洛斯施用石灰和肥料來提高巴拉草牧草地的產量和碳固存	拉丁美洲和加勒比海地區	6	4	32
巴西熱帶農業生態系統的整合農業	拉丁美洲和加勒比海地區	4~12	4	34
北美委內瑞拉平原區緩解因旱林轉為牧草地而造成的土壤有機碳流失	拉丁美洲和加勒比海地區	5 和 18	4	40

參考文獻

- Abril, A. & Bucher, E.H.** 2001. Overgrazing and soil carbon dynamics in the western Chaco of Argentina. *Applied Soil Ecology*, 16(3): 243-249. [https://doi.org/10.1016/S0929-1393\(00\)00122-0](https://doi.org/10.1016/S0929-1393(00)00122-0)
- Burrows, W.H., Henry, B.K., Back, P.V., Hoffmann, M.B., Tait, L.J., Anderson, E.R., Menke, N., Danaher, T., Carter, J.O. & McKeon, G.M.** 2002. Growth and carbon stock change in eucalypt woodlands in northeast Australia: ecological and greenhouse sink implications. *Global Change Biology*, 8: 769-784. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2002.00515.x>
- Chan, K.Y., Conyers, M.K., Li, G.D., Helyar, K.R., Poile, G., Oates, A. & Barchia, I.M.** 2011. Soil carbon dynamics under different cropping and pasture management in temperate Australia: Results of three long-term experiments. *Soil Research*, 49(4): 320-328. <https://doi.org/10.1071/SR10185>
- EFDC (European Fluxes Database Cluster).** 2018. European Fluxes Database Cluster [online]. [Cited 06 January 2021]. <http://www.europe-fluxdata.eu/> (Source: Katja Klumpp, INRA, France).
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G.** 2013. *Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities*. FAO, Rome. (also available at: <http://www.fao.org/3/i3437e/i3437e.pdf>)
- Franzluebbers, A.J.** 2010. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern United States. *Soil Science Society of America Journal*, 74(2): 347-357. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0079>
- Guo, L.B. & Gifford, R.M.** 2002. Soil carbon stocks and land use change: a meta-analysis. *Global change biology*, 8(4): 345-360. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00486.x>
- Henderson, B.B., Gerber, P. J., Hilinski, T. E., Falcucci, A., Ojima, D. S., Salvatore, M. & Conant, R. T.** 2015. Greenhouse gas mitigation potential of the world's grazing lands: Modeling soil carbon and nitrogen fluxes of mitigation practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 207: 91-100. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.03.029>
- Herrero, M., Thornton, P.K., Gerber, P. & Reid, R.S.** 2009. Livestock, livelihoods and the environment: understanding the trade-offs. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(2): 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2009.10.003>
- Jobbágy, E.G. & Jackson, R.B.** 2003. Patterns and mechanisms of soil acidification in the conversion of grasslands to forests. *Biogeochemistry*, 64: 205–229. <https://doi.org/10.1023/A:1024985629259>
- Keesstra, S.D., Bouma, J., Wallinga, J., Tittonell, P., Smith, P., Cerdà, A., Montanarella, L., Quinton, J.N., Pachepsky, Y., van der Putten, W.H., Bardgett, R.D., Moolenaar, S., Mol, G., Jansen, B. & Fresco, L.O.** 2016. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. *SOIL*, 2(2): 111–128. <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>

Khalil, M.I., Fornara, D.A. & Osborne, B. 2020. Simulation and validation of long-term changes in soil organic carbon under permanent grassland using the DNDC model. *Geoderma*, 361: 114014.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114014>

Khosravi, M.A., Heshmati, G.A. & Salman, M.A.R. 2015. Identifying carbon sequestration hotspots in semiarid rangelands (Case study: Baghbazm region of Bardsir city, Kerman province). *Journal of Rangeland Science*, 5(4): 325-335

Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. *Food and Energy Security*, 5: 212–22.
<https://doi.org/10.1002/fes3.96>

Lavado, R.S. & Taboada, M.A. 1987. Soil salinization as an effect of grazing in a native grassland soil in the Flooding Pampa of Argentina. *Soil Use and Management*, 3(4): 143-148. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.1987.tb00724.x>

Leiber-Sauheitl, K., Fuß, R., Voigt, C. & Freibauer, A. 2014. High CO₂ fluxes from grassland on histic Gleysol along soil carbon and drainage gradients. *Biogeosciences*, 11: 749. <https://doi.org/10.5194/bg-11-749-2014>

Oliveira, J. de M., Madari, B.E., Carvalho, M.T. de M., Assis, P.C.R., Silveira, A.L.R., de Leles Lima, M., Wruck, F.J., Medeiros, J.C. & Machado, P.L.O. de A. 2018. Integrated farming systems for improving soil carbon balance in the southern Amazon of Brazil. *Regional Environmental Change*, 18(1): 105–116.
<https://doi.org/10.1007/s10113-017-1146-0>

Pellegrini, A.F.A., Ahlström, A., Hobbie, S.E., Reich, P.B., Nieradzik, L.P., Staver, A.C., Scharenbroch, B.C., Jumpponen, A., Anderegg, W.R.L., Randerson, J.T. & Jackson, R.B. 2018. Fire frequency drives decadal changes in soil carbon and nitrogen and ecosystem productivity. *Nature*, 553(7687): 194–198. <https://doi.org/10.1038/nature24668>

Poeplau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Van Wesemael, B.A.S., Schumacher, J. & Gensior, A. 2011. Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone—carbon response functions as a model approach. *Global Change Biol.*, 17(7): 2415–2427.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>

Sanderman, J., Farquharson, R. & Baldock, J. 2010. Soil carbon sequestration potential: a review for Australian agriculture. A report prepared for the Department of Climate Change and Energy Efficiency. CSIRO National Research Flagships. (also available at:
<https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP10121&dsid=DS8>)

Sanderman, J., Hengl, T. & Fiske, G.J. 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36): 9575–9580.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>

Schipper, L.A., Parfitt, R.L., Fraser, S., Littler, R.A., Baisden, W.T. & Ross, C. 2014. Soil order and grazing management effects on changes in soil C and N in New Zealand pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 184: 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.012>

Smith, P., Adams, J., Beerling, D.J., Beringer, T., Calvin, K.V., Fuss, S., Griscom, B., Hagemann, N., Kammann, C., Kraxner, F., Minx, J.C., Popp, A., Renforth, P., Vicente Vicente, J.L. & Keesstra, S.
2019. Land-Management Options for Greenhouse Gas Removal and Their Impacts on Ecosystem Services and the Sustainable Development Goals. *Annual Review of Environment and Resources*, 44(1): 255–286.
<https://doi.org/10.1146/annurev-environ-101718-033129>

Soussana, J.-F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richards, M., Wollenberg, E. (Lini), Chotte, J.-L., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P. & Lal, R. 2019. Matching policy and science: Rationale for the ‘4 per 1000 - soils for food security and climate’ initiative. *Soil and Tillage Research*, 188: 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002>

Viglizzo, E.F., Ricard, M.F., Taboada, M.A. & Vázquez-Amábile, G. 2019. Reassessing the role of grazing lands in carbon-balance estimations: Meta-analysis and review. *Science of the Total Environment*, 661: 531–542. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.130>

Xu, S., Sheng, C. & Tian, C. 2020. Changing soil carbon: influencing factors, sequestration strategy and research direction. *Carbon Balance and Management*, 15(1): 2. <https://doi.org/10.1186/s13021-020-0137-5>

Yu, P., Liu, S., Han, K., Guan, S. & Zhou, D. 2017. Conversion of cropland to forage land and grassland increases soil labile carbon and enzyme activities in northeastern China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 245: 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.05.013>





山地土壤

8. 山地土壤

Silvia Stanchi^{1,4}, Michele Eugenio D' Amico¹, Emanuele Pintaldi¹,
Nicola Colombo^{1,2,4}, Rosalaura Romeo³, Michele Freppaz^{1,4}

¹University of Turin, Department of Agricultural, Forest and Food Sciences, Grugliasco, Italy
義大利杜林大學農業、森林與食品科學系

²University of Turin, Department of Earth Sciences, Torino, Italy
義大利杜林大學地球科學系

³Mountain Partnership Secretariat, Food and Agriculture Organization of the United Nations,
Rome, Italy

聯合國糧食及農業組織山區合作計畫秘書處

⁴University of Turin, Natrisk, Grugliasco, Italy
義大利杜林大學山區與丘陵環境自然風險研究中心 (Natrisk)

1. 定義與說明

土壤可以作為相關的碳庫和 / 或碳匯，因其可在不同的時間點儲存碳，將碳從大氣中移除，進而減少溫室氣體的排放，對地球的氣候調節有所貢獻。尤其山地土壤可以儲存大量的有機碳（土壤有機碳）。儲存在土壤中的有機碳不僅在數量很重要，品質也很重要，會影響到有機碳的持久性（如 Cotrufo et al., 2019）。特別是土壤有機碳可以被保留在不同的庫（pool）中，例如顆粒狀有機物質（particulate organic matter）以及與礦物質相關的有機物；而根據其土壤類型與管理方式，土壤有機碳會在土壤中表現出不同的轉換率（turnover rate）。這些一般考量適用所有土壤，但在論及山區環境時，則更顯重要，因其自然植被常被保留，而土壤也較不被翻擾，且密封（都市化）的情況亦較不明顯。在這樣的條件下，有機殘留物（枯枝落葉、死亡的生物體）不會從系統中清除，可以透過礦化（mineralization）和腐植化（humification）進入碳循環，並長期儲存在土壤中（主要以土壤有機碳形式）。

土壤有機碳庫存一般被定義為儲存在固定土地表面（如一公頃）的有機碳數量；而這個土壤有機碳的數量是指在特定的土壤深度（如 30 公分、1 公尺）或整個土壤剖面，計算此範圍內的相關輸入資料，即土壤容積密度（實地測量或估計）、石塊含量（測量或估計）和土壤有機碳含量。

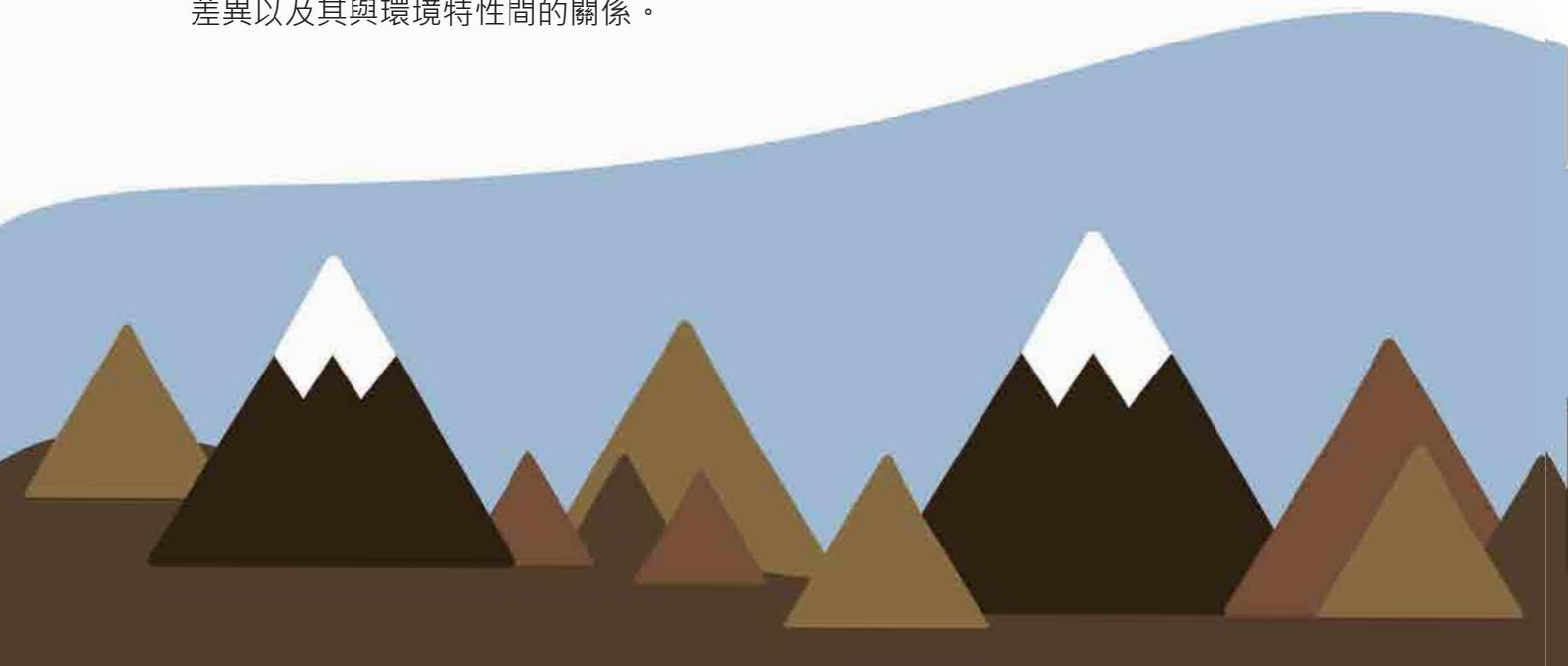
此碳儲量功能的能夠達到哪種程度取決於土壤類型（進而取決於土壤性質，如總深度、有機物含量、質地、團粒形成和孔隙度、腐植質類型），但其也受到環境和場域條件（如氣候和坡度）、土地使用和管理歷史的影響（Wiesmeier et al., 2019）。特別是土地利用變化和土壤管理措施（如砍伐森林、過度放牧、加強侵蝕的耕犁做法）會影響土壤儲存碳的能力，以及碳在土壤中的停留時間。

在這項研究中，採用聯合國環境規劃署世界保護監測中心（UNEP-WCMC）對山地的定義，即山地是由數值高程模型（digital elevation model）僅基於高度（當海拔 > 2500 公尺時），或是結合高度、坡度和當地高度範圍（當海拔 < 2500 公尺時），而估算出來（Kapos, 2000; UNEP-WCMC, 2002）。全球山地面積為 3930 萬平方公里，占地球陸地面積的 27%（FAO, 2020 即將發表）；其中很大一部分被森林覆蓋。根據山地綠色覆蓋指數資料（Mountain Green Cover Index Data）（永續發展目標指標 15.4.2），截至 2015 年，山地森林覆蓋約 1292 萬 4600 平方公里。

鑑於世界上山地森林的範圍及其生物量生產的潛力，山地顯然是土壤有機碳存量的潛在活躍熱點，甚至可以庫存更多的碳。正如 Lehmann 等人（2020）所強調的，為了緩解氣候變遷，需要深入瞭解土壤中的碳動態，但更要持續注意從前的活動，來防止碳排放到大氣。山地和山地土壤也非常容易受到氣候變化的影響，而由於溫度升高和降水境況的改變，增加侵蝕或加強有機物的快速礦化（Hock et al., 2019）。詳細的土壤有機碳庫存明細資料有助於模擬氣候和土地利用的變化，以及其對土壤的影響（如 Shi et al., 2020）。因此，山區土地和土壤的管理是緩解氣候變化策略中的關鍵議題。

2. 全球熱點分布

在表 33（附件 2）中，我們收集相關文獻，主要是關於世界各地山區的土壤有機碳庫存（圖 19）。在比較不同山脈的平均土壤有機碳庫存量估計時，有一相關的缺點是，各研究作者使用的方法過於多樣（表 33）。舉例來說，土壤容積密度可從特定的樣本中被測得，亦可用土壤轉換公式（pedotransfer function）來估算（此法通常會高估土壤容積密度值，進而高估土壤有機碳庫存）。此外，每項研究考量不同的土壤深度來計算碳庫存：一些研究人員只測量表土（topsoil，一般為 0~10 公分或 0~30 公分），而其他研究人員則採樣不同的深度（0~40、0~50、0~60 公分等）；一些研究人員將表土和底土（subsoil）的土壤有機碳庫存分開，而其他研究人員將所有土壤有機碳庫存皆測量到一公尺的深度，另有一些研究人員則根據整個土壤剖面（soil profile）來計算（表 33）。在處理森林土壤時，一些研究人員計算有機土層的土壤有機碳庫存量，而其他研究人員則忽略了這一數量。因此，依據氣候和植被或土地利用的差異，精確比較不同山脈之間的土壤有機碳庫存是不可能的，只能粗估山脈之間的差異以及其與環境特性間的關係。



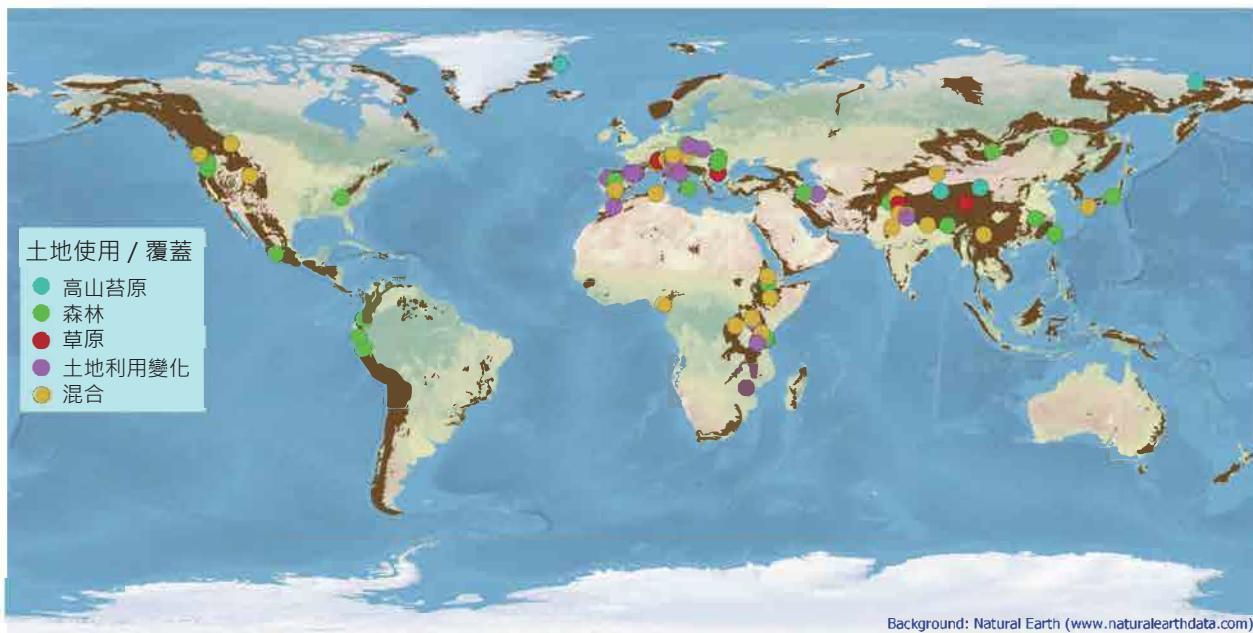
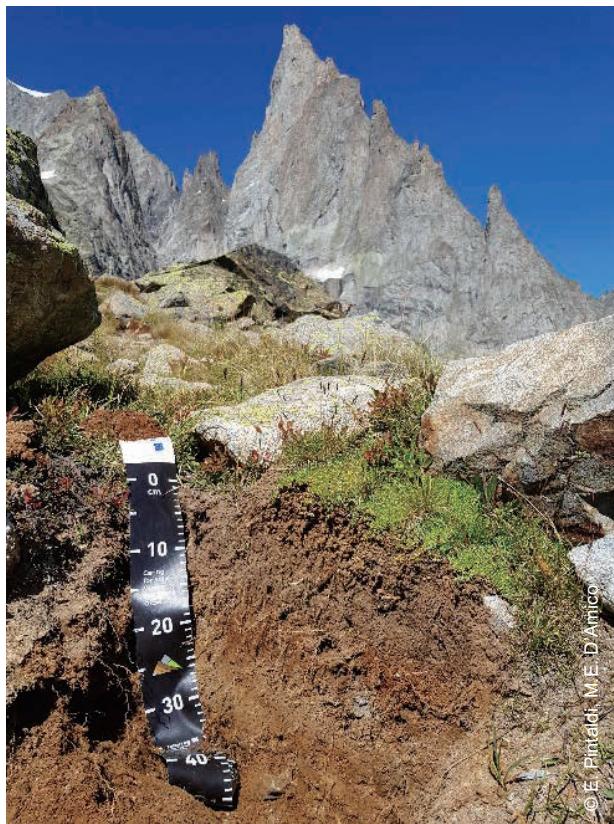


圖 19.表 33 中所列文獻資料的樣區位置之地圖（附錄 2）

Shapefiles 格式檔案由全球山區生物多樣性評估 (Global Mountain Biodiversity Assessment, GMBA) 為製作，供 Mountain Portal 線上軟體使用，來描繪山脈 (University of Bern, 2020)。「混合」類別指的是存在一種以上的土地利用 / 覆蓋。

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

如附錄 2 所示，單一山脈（和單一研究地點）內有機碳存量即有巨大差異，往往會掩蓋與環境因素（如土地利用和氣候）有關的更廣泛趨勢。例如，表 33 的資料指出，在歐洲阿爾卑斯山，森林土壤有機碳庫存在 61~278 噸 / 公頃之間，而草原（照片 8）的礦物質土層的有機碳則平均庫存低於 100 噸 / 公頃。地中海地區的山地（如義大利的亞平寧山脈，照片 9）、法國和西班牙之間的庇里牛斯山脈以及西班牙的許多山脈，其有機碳庫存介在 38~165 噸 / 公頃之間，其中可發現森林和草原土壤之間的差異微小。



照片 8. 勃朗峰（海拔 4810 公尺，義大利西北部阿爾卑斯山脈）南坡海拔 2600 公尺處的新成黑瘠灰壤（Entic Umbric Podzol）



照片 9. 位於義大利中部亞平寧山脈高山海拔帶，淺層、多石但富含有機碳的黑色石灰岩薄層土（Rendzic Leptosol）

在各項研究所指出的土壤有機碳庫存範圍有時甚至更大。所有這些資料都不包括有機質土 (Histosols ; 泥炭地土壤)，其已於專門章節探討 (見本冊第 4 章的「泥炭地」熱點)。在喜馬拉雅山 (九篇文章)，土壤剖面平均儲存高達約 400 噸 / 公頃的土壤有機碳 (照片 10)；然而，極大的高度與氣候梯度，使這些資料的代表性極差。熱帶地區山地往往會有更多的土壤有機碳庫存：如喀麥隆火山 (Mount Cameroon) 地趨前 70 公分的土壤儲存 150~300 噸 / 公頃 (雨林中的最大值，Tsozue et al., 2019)，而烏干達西南部的陡坡 (Twongyirwe et al., 2013) 則在頂部 30 公分儲存高達 170 噸 / 公頃 (照片 11)。烏桑巴拉山脈 (Usambara Mountains) [坦尚尼亞東部弧形山脈 (Eastern Arc Mountains)] 的土壤在頂部 100 公分處，其土壤有機碳存量高達 270 噸 / 公頃。

當土地使用從原生林變為耕種時，通常會觀察到有機碳的損失，特別是在熱帶地區。例如，在吉力馬札羅山 (Mt. Kilimanjaro) 的山坡區，當移除自然植被以騰出空間用於種植 (玉米或咖啡，Pabst et al., 2016) 時，土壤有機碳庫存減少約 23~38%。然而，與退化森林和原始森林相比，茶園有時幫助土壤儲存更多的土壤有機碳 (Chiti et al., 2018)。Dinakaran 等人 (2018) 表示，相較於森林或草原土壤，喜馬拉雅山脈的農業土壤之特點就是極其枯竭的有機碳庫。

土地棄耕後的灌木侵入或林地復育是目前歐洲山地的主導進程，特別是在溫帶地區，而此進程能夠帶來的影響尚未明朗 (如 Campo et al., 2019)。



照片 10. 沿著坤布山谷 (Khumbu Valley) 的一個緩坡 (海拔 5065 公尺，尼泊爾)，其特點是富含碳的變育低鹽基砂質土 (Brunic Dystric Arenosol) [風成的 (Aeolic)，不連續的 (Raptic)]



照片 11. 烏干達西南部布恩迪國家公園 (Bwindi National Park) 中被熱帶山地雨林覆蓋的陡坡以及附近的耕地

4. 山地土壤保育對提供特定生態系統服務的重要性

山地土壤能夠控制進入大氣碳排放，進而提供許多生態系統服務，從初級生產到全球氣候調節。山地土壤還提供為多項與水分供應、過濾和調節有關的服務，而這些服務可以管控純淨水源的獲得利用與地下水補給。Geitner 等人 (2019) 文獻回顧在山地 (在阿爾卑斯地區) 土壤做出的主要生態系統服務，是環境條件與土壤性質的獨特組合產物，並將其列出如下：

- ◆ 農業和森林生物量生產；
- ◆ 保水性 (water retention) ；
- ◆ 地面逕流調節；
- ◆ 地方氣候調節；
- ◆ 全球氣候調節；
- ◆ 水分過濾和淨化；

- ◆ 養分循環調節；
- ◆ 土壤棲地與生物多樣性；
- ◆ 文化與自然的檔案館；
- ◆ 娛樂與心靈的服務。

聯合國糧食及農業組織 (FAO, 2019) 估計，截至 2017 年，世界上約有 15% 的人口（約 11 億人）以山地為家。山地土壤以許多方式來，不僅嘉惠生活在世界上山地的人們，而且還使在山地下游生活的數十億人受益。山地提供食物、飼料、藥用植物和其他木材和非木材森林產物，並且更是含水層 (aquifer) 的補充區，持續供水給世界人口使用。然而，山地人民仍然在經濟上被邊緣化，並深受到貧困影響，多有糧食不安全的問題。根據聯合國糧食及農業組織最近的資料顯示，截至 2017 年，生活在發展中國家的每兩個農村山區居民中，就有一個容易受到糧食不安全的影響 (FAO, 2020) 。自 2000 年（此類資料開始監測的第一年）以來，農村山區對遭受糧食不安全的狀況日益增加；發展中國家所有地區弱勢民眾的數量越來越多，然而有些地區比其他地區所受影響更大。事實上，在過去五年中，非洲農村山區居民的糧食不安全狀況增加最多；在 2012~2017 年期間，超過 2500 萬農村山區居民已經變得容易受到糧食不安全的危害。因此，投資山區和保護山地土壤以達成零飢餓 (zero-hunger) 的永續發展目標的相關性變得顯而易見。

各種各樣的土壤生態系統服務是與水的循環有關，包括保留植物和土壤生物群可用的水，調節逕流從而透過滲透平衡減少洪水和侵蝕風險，水質過濾（即土壤過濾水的能力，可中和或降解潛在的有害物質），以及對地下水補給的貢獻。山坡區域的土壤形成率會受惡劣氣候的影響而降低，而逕流調節將特別能夠限制山坡的侵蝕率與隨之而來的養分喪失。

山地土壤在地方範圍內（透過蒸發散作用，降低大氣溫度，在都市化地區尤其重要）以及全球範圍內（透過儲存有機碳，阻止其以溫室氣體形式，排放至大氣），都有發揮氣候調節的作用。此外，森林也是眾所周知的甲烷匯 (sinks of methane)，而甲烷是一種具有高暖化能力的溫室氣體（如 Delmas et al., 1992; Zhao et al., 2019b ）。

山地土壤的其他調節功能包括儲存、循環以及與其他生態系統組成要素交換養分的能力，從而能保持土壤肥力，並為維持土壤健康，以供糧食生產之用。土壤管理在很大程度上有助於提高有機碳的儲量和停留時間（有機碳匯功能）。

山地土壤亦大大地促進生物多樣性，接納種類繁多的生物讓其居住與生長。土壤的生物多樣性不僅表現在物種和個體的數量及種類上，更表現在基因庫 (gene pool) 上；據估計，土壤生物多樣性超過地面上的生物多樣性。

最後，土壤還提供與美學感知和地景品質有關的服務；雖然這些服務不太明顯，但是對人類福祉卻很重要。由於山區的發展有限，山區因而可以承載既往的遺跡，讓科學家對過去的氣候、植被等等有許多瞭解。

有鑑於山的土壤所提供的各種生態系統服務，若我們想保持山地土壤健康，並使其能充分發揮潛力，達成永續土壤管理的目標是極為重要。



© M.E. D'Amico



© M.E. D'Amico

照片 12. 上圖：烏干達西南部基索羅區 (Kisoro District) 森林砍伐後之脆弱的與受侵蝕的山坡〔布恩迪山脈 (Bwindi mountains) 〕，背景是維龍加火山群 (Virunga Volcanoes) 〕。下圖：肯亞埃爾格約馬拉奎特郡 (Elgeyo-Marakwet County) 大裂谷懸崖 (Rift Valley escarpment) 沿線最近被砍伐的山坡遭受擴散式侵蝕 (Diffused erosion)

5. 挑戰和趨勢概況

除了土壤生態系統服務之外，Geitner 等人（2019）還列出可能使山地土壤陷入危機的主要土壤威脅。由於土壤生態系統服務受到其質地、有機物含量、滲透性和結構等化學與物理性質的影響，因而在自然或人為的干擾後，這些性質的變化會對山地土壤產生負面的衝擊。在危害山地土壤功能的主要威脅中，侵蝕和養分流失在山區甚是關鍵；在山區因為坡度的影響，加上緩慢的土壤形成率，將限制土壤發育。同樣地，壓實（即因不當的土壤管理措施，如木材採伐技術、過度放牧等等因素，造成土壤孔隙度顯著降低）也會嚴重影響山地土壤，損害滲透能力和地面逕流的調節，進而加速侵蝕的發生。其他威脅則與有機物的流失有關，可能影響到有機質土與礦物質土，並可導致溫室氣體釋放到大氣中。生物多樣性的喪失也會改變山地土壤，並影響其他對健康土壤至關重要的服務。很多時候，土壤的威脅（如侵蝕和壓實）是因為土地使用的變化而引發的，例如砍伐森林和過度放牧（照片 12 和照片 14）、都市化、基礎設施建設，或其他干擾（例如野火）。土壤密封（soil sealing）也會對土壤生態系統服務產生負面影響，如逕流調節和生物多樣性。特別是在如阿爾卑斯山旅遊勝地等人口密集的地區尤為如此；在那裡，可用於服務和基礎設施的地面，自然受到土地結構的限制。旅遊業的成長（例如建造滑雪道、纜車和旅館）、交通的擴展、能源計畫（包括輸電線路、水壩、水力發電廠和水庫）、農業過度使用、鄉村發展以及人類引起的氣候變遷，對環境的衝擊日益增多。而阿爾卑斯山的土壤也不能倖免於上述這些發展。土地使用的變化和人為的氣候變遷導致嚴重的密封、侵蝕和退化。

有鑑於此，阿爾卑斯山公約（Alpine Convention, AC）的成員國在 1998 年第五屆阿爾卑斯山會議上通過了土壤保育議定書（Soil Conservation Protocol）；這是一份具國際法地位的法律文件，專門且直接處理特定地區的土壤保育議題（Markus, 2017）。該議定書特別關注帶有具體典型特徵土壤的保護，如濕地和泥炭沼地（moor）的土壤，並指定與管理瀕危地區與受侵蝕威脅的地區。

科學界、民間社團和國際組織的關注和努力，使民眾對山地土壤重要性的意識有所增強（例如，聯合國糧食及農業組織、各國和國際間的土壤科學學會）。2015 年（此年為聯合國國際土壤年，UN International Year of Soils），聯合國糧食及農業組織與山區夥伴關係秘書處（Mountain Partnership Secretariat）⁵、全球土壤夥伴關係（Global Soil Partnership）⁶ 和義大利都靈大學（University of Turin）合作，推動以山地土壤為重點的意識提升運動（awareness-raising campaign），並且出版名為《瞭解山地土壤》（Understanding Mountain Soils）的書，共計 100 多位作者促成此書出版；在書內作者描述山地土壤性質相關的全球案例研究，其中包含山地土壤緩解氣候變遷的潛力。

案例研究的範圍從蘇格蘭的海洋和高山地景（Britton et al., 2015），包括歐洲西北邊緣許多山區有代表性的生態系統，到賴索托的山區濕地（Mapeshoane, 2015）。

⁵ https://alpinesoils.eu/gspesp/mountain_p_secretariat/

⁶ <http://www.fao.org/global-soil-partnership/en/>

從這些研究中可以看出，我們急需更好的瞭解，去明白土壤碳庫存與通量 (fluxes) 的空間變化機制，以預測在氣候變遷和土地利用下山地土壤碳的命運。

6. 對熱點地區的一般建議

為增加山地土壤有機碳固存的有效性，我們可以經由幾種方式來促進土壤有機碳累積，增加其在土壤中的停留時間，也就是推遲其返回大氣中的時間。我們提出幾個相關指導方案，而這些方案都與下列一個或多個過程有關 (Post and Kwon, 2000)：

- ◆ 增加有機物的投入（放牧、覆蓋作物、植樹造林...）
- ◆ 在山區氣候較惡劣，有機物的可分解性通常很低。改變有機物的可分解性，將可使其較容易融入土壤（例如，透過加強與生物的混合，或直接投入地面下）。
- ◆ 偏好有機物和土壤礦物質相 (soil mineral phase) 之間的交互作用，也就是說，促進可保護有機物不被快速礦化的團粒形成類型
- ◆ 制定有效指導方案，以保持和提升山地土壤的有機碳固存潛力 (Links4Soils, 2020)
- ◆ 避免過度灌溉而導致養分流失和土壤侵蝕。就用水效率而言，滴灌 (drip irrigation) 或地下灌溉 (subirrigation) 是最佳系統，同時還能最小化養分淋溶和水造成的侵蝕。
- ◆ 透過適當的施肥來增加農業土壤中的有機質含量。施用動物糞肥和 / 或堆肥，來輸入有機質，進而改善土壤的團粒形成。如果可以，則用糞肥覆蓋土表，來限制土壤肥力衰退〔即透過氨揮發 (ammonia volatilization) 〕與因降雨和灌溉所導致的稀釋效應 (dilution effect)
- ◆ 只要有可能，鼓勵整合種植系統（如作物-畜牧系統或作物-畜牧-森林系統，照片 13），以及減緩土壤有機質礦化速率 (mineralization rate) 的少耕或免耕措施
- ◆ 保護富含碳的地區，如泥炭地和森林等，而這些地區不僅是有機碳儲藏庫，也是生物多樣性的獨特來源
- ◆ 避免或限制農業焚燒，特別是在受侵蝕影響的地區
- ◆ 避免過度放牧；過度放牧會導致山坡的土壤侵蝕和低地的淹水。如果可能，組織牧草地輪作和製備乾草的措施。



© M.E. D'Amico

照片 13. 坦尚尼亞東北部位於東部弧形山脈 (Eastern Arc mountains) 之帕雷山脈 (Pare Mountains) 的混農林業



© M.E. D'Amico

照片 14. Kisimiri Chini [坦尚尼亞阿魯沙區 (Arusha District) 梅魯火山 (Mount Meru)] 當地過度放牧造成的侵蝕

表 19. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研 究編號
波士尼亞與赫塞哥維納位於塞族共和國亞沃爾山的高地更新造林	歐洲	15	6	5
義大利半島沿岸廢棄山區草原的天然新植造林	歐洲	23~72	6	6

研究時間
(年)

案例研
究編號

參考文獻

- Ali, S., Begum, F., Hayat, R. & Bohannan, B.J.M.** 2017. Variation in soil organic carbon stock in different land uses and altitudes in Bagrot Valley, Northern Karakoram. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 67(6): 551–561. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1317829>
- Bangroo, S.A., Najar, G.R. & Rasool, A.** 2017. Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range. *Catena*, 158: 63–68.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.017>
- Baritz, R., Seufert, G., Montanarella, L. & Van Ranst, E.** 2010. Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. *Forest Ecology and Management*, 260(3): 262–277.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.025>
- Bečvářová, P., Horváth, M., Sarapatka, B. & Zouhar, V.** 2018. Dynamics of soil organic carbon (SOC) content in stands of Norway spruce (*Picea abies*) in central Europe. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 11(6): 734–742. <https://doi.org/10.3832/ifor2521-011>
- Bhat, J.A., Kumar, M., Negi, A.K., Pala, N.A. & Todaria, N.P.** 2012. Soil organic carbon stock and sink potential in high mountain temperate Himalayan forests of India. *Int. J. Curr. Res*, 4(12): 206–209.
- Bockheim, J.G. & Munroe, J.S.** 2014. Organic Carbon Pools and Genesis of Alpine Soils with Permafrost: A Review. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4): 987–1006. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.987>
- Bojko, O. & Kabala, C.** 2017. Organic carbon pools in mountain soils – Sources of variability and predicted changes in relation to climate and land use changes. *Catena*, 149: 209–220.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.09.022>
- Bonifacio, E., Falsone, G. & Petrillo, M.** 2011. Humus forms, organic matter stocks and carbon fractions in forest soils of northwestern Italy. *Biology and Fertility of Soils*, 47(5): 555–566.
<https://doi.org/10.1007/s00374-011-0568-y>
- Bounouara, Z., Chevallier, T., Balesdent, J., Toucet, J., Sbih, M., Bernoux, M., Belaissaoui, N., Bouneb, O. & Bensaid, R.** 2017. Variation in soil carbon stocks with depth along a toposequence in a sub-humid climate in North Africa (Skikda, Algeria). *Journal of Arid Environments*, 141: 25–33.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.02.001>
- Britton, A.J., Helliwell, R.C., Lilly, A. & Dawson L.A.** 2015. Carbon stocks in oceanic alpine landscapes. In *Understanding Mountain Soils: A contribution from mountain areas to the International Year of Soils 2015*. FAO, Rome, pp. 110-112.
- Budge, K., Leifeld, J., Hiltbrunner, E. & Fuhrer, J.** 2010. Litter quality and pH are strong drivers of carbon turnover and distribution in alpine grassland soils. *Biogeosciences Discussions*, 7(4).
<https://doi.org/10.5194/bgd-7-6207-2010>

Campo, J., Stijsiger, R.J., Nadal-Romero, E. & Cammeraat, E.L. 2019. The effects of land abandonment and long-term afforestation practices on the organic carbon stock and lignin content of Mediterranean humid mountain soils. *European Journal of Soil Science*, 70(5): 947–959. <https://doi.org/10.1111/ejss.12799>

Canedoli, C., Ferrè, C., El Khair, D.A., Comolli, R., Liga, C., Mazzucchelli, F., Proietto, A., Rota, N., Colombo, G. & Bassano, B. 2020. Evaluation of ecosystem services in a protected mountain area: Soil organic carbon stock and biodiversity in alpine forests and grasslands. *Ecosystem Services*, 44: 101135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101135>

Chen, L.-F., He, Z.-B., Du, J., Yang, J.-J. & Zhu, X. 2016. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. *Catena*, 137: 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.017>

Chiti, T., Certini, G., Puglisi, A., Sanesi, G., Capperucci, A. & Forte, C. 2007. Effects of associating a N-fixer species to monotypic oak plantations on the quantity and quality of organic matter in minesoils. *Geoderma*, 138(1–2): 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.004>

Chiti, T., Díaz-Pinés, E. & Rubio, A. 2012. Soil organic carbon stocks of conifers, broadleaf and evergreen broadleaf forests of Spain. *Biology and Fertility of Soils*, 48(7): 817–826. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0676-3>

Chiti, T., Díaz-Pinés, E., Butterbach-Bahl, K., Marzaioli, F. & Valentini, R. 2018. Soil organic carbon changes following degradation and conversion to cypress and tea plantations in a tropical mountain forest in Kenya. *Plant and Soil*, 422(1–2): 527–539. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3489-1>

Links4Soils. 2020: Guidelines for sustainable soil management Digest: Agriculture. Links4Soils project publications. EU Interreg Alpine Space; Links4Soils project. ISBN 978-88-99108-19-9

Conforti, M., Lucà, F., Scarciglia, F., Matteucci, G. & Buttafuoco, G. 2016. Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *Catena*, 144: 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.023>

Conforti, M., Longobucco, T., Scarciglia, F., Niciforo, G., Matteucci, G. & Buttafuoco, G. 2020. Interplay between soil formation and geomorphic processes along a soil catena in a Mediterranean mountain landscape: an integrated pedological and geophysical approach. *Environmental Earth Sciences*, 79(2): 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8802-2>

Cotrufo, M.F., Ranalli, M.G., Haddix, M.L., Six, J. & Lugato, M. 2019. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nat. Geosci.* 12: 989–994. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0484-6>

De la Cruz-Amo, L., Bañares-de-Dios, G., Cala, V., Granzow-de la Cerda, I., Espinosa, C.I., Ledo, A., Salinas, N., Macía, M.J. & Cayuela, L. 2020. Trade-Offs Among Aboveground, Belowground, and Soil Organic Carbon Stocks Along Altitudinal Gradients in Andean Tropical Montane Forests. *Frontiers in Plant Science*, 11: 106. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00106>

- Dad, J.M.** 2019. Organic carbon stocks in mountain grassland soils of northwestern Kashmir Himalaya: spatial distribution and effects of altitude, plant diversity and land use. *Carbon Management*, 10(2): 149–162. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1568137>
- Delmas R.A., Servant J., Tathy J.P., Cros B. & Labat M.** 1992. Sources and sinks of methane and carbon dioxide exchanges in mountain forest in equatorial Africa. *JGR Atmospheres*: 97: 6169-6179. <https://doi.org/10.1029/90JD02575>
- De Feudis, M., Falsone, G., Vianello, G. & Vittori Antisari, L.** 2020. Stable organic carbon pool rises in soil under chestnut (*Castanea sativa* Mill.) forest for timber production after 15 years since grafting onto satin-cut stumps. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, 1-10. <https://doi.org/10.6092/ISSN.2281-4485/10731>
- De Vos, B., Cools, N., Ilvesniemi, H., Vesterdal, L., Vanguelova, E. & Carnicelli, S.** 2015. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large scale forest soil survey. *Geoderma*, 251–252: 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>
- Díaz-Pinés, E., Rubio, A., Van Miegroet, H., Montes, F. & Benito, M.** 2011. Does tree species composition control soil organic carbon pools in Mediterranean mountain forests? *Forest Ecology and Management*, 262(10): 1895–1904. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.004>
- Dinakaran, J., Chandra, A., Chamoli, K.P., Deka, J. & Rao, K.S.** 2018. Soil organic carbon stabilization changes with an altitude gradient of land cover types in central Himalaya, India. *Catena*, 170: 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.039>
- Dincă, L.C., Dincă, M., Vasile, D., Spârchez, G. & Holonec, L.** 2015. Calculating Organic Carbon Stock from Forest Soils.: Not Bot Horti Agrobo, 2015, 4:568-575. <https://doi.org/10.15835/nbha43210141>
- Djukic, I., Zehetner, F., Tatzber, M. & Gerzabek, M.H.** 2010. Soil organic-matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(1): 30–38. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900027>
- Du, B., Kang, H., Pumpanen, J., Zhu, P., Yin, S., Zou, Q., Wang, Z., Kong, F. & Liu, C.** 2014. Soil organic carbon stock and chemical composition along an altitude gradient in the Lushan Mountain, subtropical China. *Ecological Research*, 29(3): 433–439. <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1135-4>
- Duan, X., Rong, L., Hu, J. & Zhang, G.** 2014. Soil organic carbon stocks in the Yunnan Plateau, southwest China: spatial variations and environmental controls. *Journal of soils and sediments*, 14(10): 1643–1658. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0917-1>
- Egli, M., Favilli, F., Krebs, R., Pichler, B. & Dahms, D.** 2012. Soil organic carbon and nitrogen accumulation rates in cold and alpine environments over 1Ma. *Geoderma*, 183–184: 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.017>
- Eshetu, E.Y. & Hailu, T.A.** 2020. Carbon sequestration and elevational gradient: The case of Yegof mountain natural vegetation in North East, Ethiopia, implications for sustainable management. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1733331>

FAO. 2019. Mountain agriculture: Opportunities for harnessing Zero Hunger in Asia. Bangkok

FAO. 2020. *Key Drivers of Mountain People's Vulnerability to Food Insecurity*. Romeo, R., Grita, F., Russo, L., Parisi, F. (Eds.) (forthcoming)

Fonseca, F., de Figueiredo, T., Vilela, Â., Santos, R., de Carvalho, A.L., Almeida, E. & Nunes, L. 2019. Impact of tree species replacement on carbon stocks in a Mediterranean mountain area, NE Portugal. *Forest Ecology and Management*, 439: 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.002>

Freppaz, M., Filippa, G., Caimi, A., Buffa, G. & Zanini, E. 2010. Soil and plant characteristics in the alpine tundra (NW Italy). In *Tundras: Vegetation, Wildlife and Climate Trends*. Nova Publishers, 81-110. ISBN: 9781608765881

Galka, B., Labaz, B., Bogacz, A., Bojko, O. & Kabala, C. 2014. Conversion of Norway spruce forests will reduce organic carbon pools in the mountain soils of SW Poland. *Geoderma*, 213: 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.029>

Garcia-Pausas, J., Casals, P., Camarero, L., Huguet, C., Sebastià, M.-T., Thompson, R. & Romanyà, J. 2007. Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography. *Biogeochemistry*, 82(3): 279–289. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9071-9>

Garlato, A., Obber, S., Vinci, I., Mancabelli, A., Parisi, A. & Sartori, G. 2009a. La determinazione dello stock di carbonio nei suoli del Trentino a partire dalla banca dati della carta dei suoli alla scala 1: 250.000. *Studi Trentini di Scienze Naturali. Suoli degli ambienti alpini*, 85: 157–160. ISSN 2035-7699

Garlato, A., Obber, S., Vinci, I., Sartori, G. & Manni, G. 2009b. Stock attuale di carbonio organico nei suoli di montagna del Veneto. *Studi Trentini di Scienze Naturali. Suoli degli ambienti alpini*, 85: 69–82. ISSN 2035-7699

Garten, C.T. & Hanson, P.J. 2006. Measured forest soil C stocks and estimated turnover times along an elevation gradient. *Geoderma*, 136(1–2): 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.049>

Geitner C., Freppaz M., Lesjak J., Schaber E., Stanchi S., D'Amico M. & Vrscaj B. 2019. *Soil Ecosystem Services in the Alps - An introduction for decision-makers*. Agricultural Institute of Slovenia, 78 pp. ISBN: 978-961-6998-35-2

Girmay, G. & Singh, B.R. 2012. Changes in soil organic carbon stocks and soil quality: land-use system effects in northern Ethiopia. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 62(6): 519–530.

Gruba, P. & Socha, J. 2019. Exploring the effects of dominant forest tree species, soil texture, altitude, and pH_{H2O} on soil carbon stocks using generalized additive models. *Forest Ecology and Management*, 447: 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.061>

Guedes, B.S., Olsson, B.A., Egnell, G., Sitoe, A.A. & Karlton, E. 2018. Plantations of Pinus and Eucalyptus replacing degraded mountain miombo woodlands in Mozambique significantly increase carbon sequestration. *Global Ecology and Conservation*, 14: e00401. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00401>

Hock, C., Rasul, G., Adler, C., Cáceres, B., Gruber, S., Hirabayashi, Y., Jackson, M., Kääb, A., Kang, S., Kutuzov, S., Milner, A., Molau, U., Morin, S., Orlove, B. & Steltzer, H. 2019. High Mountain Areas. In H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, et al. (Eds.). *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, pp. 131–202. (also available at https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/3/2019/11/06_SROCC_Ch02_FINAL.pdf)

Hoffmann, U., Hoffmann, T., Jurasiczki, G., Glatzel, S. & Kuhn, N.J. 2014a. Assessing the spatial variability of soil organic carbon stocks in an alpine setting (Grindelwald, Swiss Alps). *Geoderma*, 232–234: 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.038>

Hoffmann, U., Hoffmann, T., Johnson, E.A. & Kuhn, N.J. 2014b. Assessment of variability and uncertainty of soil organic carbon in a mountainous boreal forest (Canadian Rocky Mountains, Alberta). *Catena*, 113: 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.009>

Kapos, V., Rhind, J., Edwards, M.F. & Ravilius, C., 2000. Developing a map of the world's mountain forests. In Price, M.F. & Butt, N. (Eds.). *Forests in Suitable Mountain Development: A State-of-Knowledge Report for 2000*. CAB International, Wallingford: 4–9.

Karatoteva, D. & Malinova, L. 2017. Organic carbon stock in pasture landscapes on the territory of the Central Balkan National. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 23(5): 787–792.

Kirsten, M., Kaaya, A., Klinger, T. & Feger, K.-H. 2016. Stocks of soil organic carbon in forest ecosystems of the Eastern Usambara Mountains, Tanzania. *Catena*, 137: 651–659.

<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.027>

Kirsten, M., Kimaro, D.N., Feger, K.-H. & Kalbitz, K. 2019. Impact of land use on soil organic carbon stocks in the humid tropics of NE Tanzania. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(4): 625–636. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800595>

Kooch, Y., Hosseini, S.M., Zaccione, C., Jalilvand, H. & Hojjati, S.M. 2012. Soil organic carbon sequestration as affected by afforestation: the Darab Kola forest (north of Iran) case study. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(9): 2438. <https://doi.org/10.1039/c2em30410d>

Kumar, J.N., Patel, K., Kumar, R.N. & Bhoi, R. 2010. An assessment of carbon stock for various land use system in Aravally mountains, Western India. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 15(8): 811–824. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9240-3>

Lal, R. 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management*, 220(1–3): 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>

Lehmann, J., Hansel, C.M., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzoni, S., Nunan, N., Reichstein, M., Schimel, J.P., Torn, M.S., Wieder, W.R. & Kögel-Knabner, I. 2020. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience*, 13(8): 529–534. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0612-3>

Leifeld, J., Zimmermann, M., Fuhrer, J. & Conen, F. 2009. Storage and turnover of carbon in grassland soils along an elevation gradient in the Swiss Alps. *Global Change Biology*, 15(3): 668–679.

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01782.x>

Li, P., Wang, Q., Endo, T., Zhao, X. & Kakubari, Y. 2010. Soil organic carbon stock is closely related to aboveground vegetation properties in cold-temperate mountainous forests. *Geoderma*, 154(3–4): 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.023>

Ließ, M., Schmidt, J. & Glaser, B. 2016. Improving the spatial prediction of soil organic carbon stocks in a complex tropical mountain landscape by methodological specifications in machine learning approaches. *PLoS One*, 11(4): e0153673. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153673>

Liu, S., Zhang, F., Du, Y., Guo, X., Lin, L., Li, Y., Li, Q. & Cao, G. 2016. Ecosystem Carbon Storage in Alpine Grassland on the Qinghai Plateau. *PLOS ONE*, 11(8): e0160420. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160420>

Mapeshoane, B.E. 2015. Lesotho mountain wetlands potential for carbon storage. In Understanding Mountain Soils: A contribution from mountain areas to the International Year of Soils 2015. FAO, Rome, pp. 113–115.

Markus, T. 2017 The Alpine Convention's Soil Conservation Protocol: A Model Regime? In Ginzky H., Heuser I., Qin T., Ruppel O., Wegerdt P. (Eds) *International Yearbook of Soil Law and Policy 2016*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42508-5_12

Martin, D., Lal, T., Sachdev, C.B. & Sharma, J.P. 2010. Soil organic carbon storage changes with climate change, landform and land use conditions in Garhwal hills of the Indian Himalayan mountains. *Agriculture, ecosystems & environment*, 138(1–2): 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.001>

Montané, F., Rovira, P. & Casals, P. 2007. Shrub encroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: effects of plant quality and temperature on soil C and N stocks. *Global biogeochemical cycles*, 21(4). <https://doi.org/10.1029/2006GB002853>

Motagh, M.G., Kafaky, S.B., Mataji, A., Akhavan, R. & Amraei, B. 2020. An introduction to the distribution of carbon stocks in temperate broadleaf forests of northern Iran. *Journal of Forest Science*, 66(2): 70–79. <https://doi.org/10.17221/149/2019-JFS>

Mugagga, F., Nagasha, B., Barasa, B. & Buyinza, M. 2015. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. *International Journal of Regional Development*, 2: 58–75

Nadal-Romero, E., Cammeraat, E., Pérez-Cardiel, E. & Lasanta, T. 2016. How do soil organic carbon stocks change after cropland abandonment in Mediterranean humid mountain areas? *Science of the Total Environment*, 566: 741–752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.031>

Nadal-Romero, E., Otal-Laín, I., Lasanta, T., Sánchez-Navarrete, P., Errea, P. & Cammeraat, E. 2018. Woody encroachment and soil carbon stocks in subalpine areas in the Central Spanish Pyrenees. *Science of the Total Environment*, 636: 727–736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.324>

Ohtsuka, T., Hirota, M., Zhang, X., Shimono, A., Senga, Y., Du, M., Yonemura, S., Kawashima, S. & Tang, Y. 2008. Soil organic carbon pools in alpine to nival zones along an altitudinal gradient (4400–5300m) on the Tibetan Plateau. *Polar Science*, 2(4): 277–285.

<https://doi.org/10.1016/j.polar.2008.08.003>

Pabst, H., Gerschlauer, F., Kiese, R. & Kuzyakov, Y. 2016. Land use and precipitation affect organic and microbial carbon stocks and the specific metabolic quotient in soils of eleven ecosystems of Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Land degradation & development*, 27(3): 592–602. <https://doi.org/10.1002/lde.2406>

Palmitag, J., Hugelius, G., Lashchinskiy, N., Tamstorf, M.P., Richter, A., Elberling, B. & Kuhry, P. 2015. Storage, Landscape Distribution, and Burial History of Soil Organic Matter in Contrasting Areas of Continuous Permafrost. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47(1): 71–88.
<https://doi.org/10.1657/AAAR0014-027>

Pellis, G., Chiti, T., Rey, A., Curiel Yuste, J., Trotta, C. & Papale, D. 2019. The ecosystem carbon sink implications of mountain forest expansion into abandoned grazing land: The role of subsoil and climatic factors. *Science of The Total Environment*, 672: 106–120.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.329>

Perruchoud, D., Walther, L., Zimmermann, S. & Lüscher, P. 2000. Contemporary carbon stocks of mineral forest soils in the Swiss Alps. *Biogeochemistry*, 50(2): 111–136.
<https://doi.org/10.1023/A:1006320129112>

Phillips, J., Ramirez, S., Wayson, C. & Duque, A. 2019. Differences in carbon stocks along an elevational gradient in tropical mountain forests of Colombia. *Biotropica*, 51(4): 490–499.
<https://doi.org/10.1111/btp.12675>

Poeplau, C. & Don, A. 2013. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*, 192: 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003>

Post, W.M. & Kwon, K.C. 2000. Soil Carbon Sequestration and Land-Use Change: Processes and Potential. *Global Change Biology*, 6: 317–327. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2000.00308.x>

Prietzl, J. & Christophel, D. 2014. Organic carbon stocks in forest soils of the German Alps. *Geoderma*, 221–222: 28–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.021>

Prietzl, J. & Wiesmeier, M. 2019. A concept to optimize the accuracy of soil surface area and SOC stock quantification in mountainous landscapes. *Geoderma*, 356: 113922.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113922>

Reyna-Bowen, L., Lasota, J., Vera-Montenegro, L., Vera-Montenegro, B. & Błońska, E. 2019. Distribution and Factors Influencing Organic Carbon Stock in Mountain Soils in Babia Góra National Park, Poland. *Applied Sciences*, 9(15): 3070. <https://doi.org/10.3390/app9153070>

Román-Sánchez, A., Vanwalleghem, T., Peña, A., Laguna, A. & Giráldez, J.V. 2018. Controls on soil carbon storage from topography and vegetation in a rocky, semi-arid landscapes. *Geoderma*, 311: 159–166.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.013>

Santini, N.S., Adame, M.F., Nolan, R.H., Miquelajáuregui, Y., Piñero, D., Mastretta-Yanes, A., Cuervo-Robayo, Á.P. & Eamus, D. 2019. Storage of organic carbon in the soils of Mexican temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 446: 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.029>

Scott, D.N. & Wohl, E. 2020. Geomorphology and climate interact to control organic carbon stock and age in mountain river valley bottoms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1911–1925.
<https://doi.org/10.1002/esp.4855>

Shaw, C.H., Boyle, J.R. & Omule, A.Y. 2008. Estimating forest soil carbon and nitrogen stocks with double sampling for stratification. *Soil Science Society of America Journal*, 72(6): 1611–1620.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0219>

Shi, Z., Allison, S.D., He, Y., Levine, P.A., Hoyt, A.M., Beem-Miller, J., Zhu, Q., Wieder, W.R., Trumbore, S. & Randerson, J.T. 2020. The age distribution of global soil carbon inferred from radiocarbon measurements. *Nature Geoscience*, 13(8): 555–559. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0596-z>

Shrestha, B.M. & Singh, B.R. 2008. Soil and vegetation carbon pools in a mountainous watershed of Nepal. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(2): 179–191. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9148-9>

Shrestha, B.M., Williams, S., Easter, M., Paustian, K. & Singh, B.R. 2009. Modeling soil organic carbon stocks and changes in a Nepalese watershed. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 132(1–2): 91–97.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.03.003>

Simon, A., Dhendup, K., Rai, P.B. & Gratzer, G. 2018. Soil carbon stocks along elevational gradients in Eastern Himalayan mountain forests. *Geoderma Regional*, 12: 28–38.
<https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.11.004>

Singh, S.K., Pandey, C.B., Sidhu, G.S., Sarkar, D. & Sagar, R. 2011. Concentration and stock of carbon in the soils affected by land uses and climates in the western Himalaya, India. *Catena*, 87(1): 78–89.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.008>

Sokolowska, J., Józefowska, A., Woźnica, K. & Zaleski, T. 2020. Succession from meadow to mature forest: Impacts on soil biological, chemical and physical properties—Evidence from the Pieniny Mountains, Poland. *Catena*, 189: 104503. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104503>

Sun, O.J., Campbell, J., Law, B.E. & Wolf, V. 2004. Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest, USA. *Global Change Biology*, 10(9): 1470–1481. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00829.x>

Szopka, K., Kabala, C., Karczewska, A., Jezierski, P., Bogacz, A. & Waroszewski, J. 2016. The pools of soil organic carbon accumulated in the surface layers of forest soils in the Karkonosze Mountains, SW Poland. *Soil Science Annual*, 67(2): 46–56. <https://doi.org/10.1515/ssa-2016-0007>

Thuille, A., Buchmann, N. & Schulze, E.-D. 2000. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy. *Tree physiology*, 20(13): 849–857. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.13.849>

Toma, Y., Clifton-Brown, J., Sugiyama, S., Nakaboh, M., Hatano, R., Fernández, F.G., Ryan Stewart, J., Nishiaki, A. & Yamada, T. 2013. Soil carbon stocks and carbon sequestration rates in seminatural grassland in Aso region, Kumamoto, Southern Japan. *Global Change Biology*, 19(6): 1676–1687.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12189>

Tsozué, D., Nghonda, J.P., Tematio, P. & Basga, S.D. 2019. Changes in soil properties and soil organic carbon stocks along an elevation gradient at Mount Bambouto, Central Africa. *Catena*, 175: 251–262.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.028>

Tsui, C.-C., Tsai, C.-C. & Chen, Z.-S. 2013. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. *Geoderma*, 209–210: 119–127.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.013>

Tungalag, M., Gerelbaatar, S. & Lobanov, A.I. 2020. Organic carbon stocks in the forest soils of Northern Mongolia. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 2(374).
<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-169-176>

Twongyirwe, R., Sheil, D., Majaliwa, J.G.M., Ebanyat, P., Tenywa, M.M., van Heist, M. & Kumar, L. 2013. Variability of Soil Organic Carbon stocks under different land uses: A study in an afro-montane landscape in southwestern Uganda. *Geoderma*, 193–194: 282–289.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.09.005>

UNEP & World Conservation Monitoring Centre. 2002. *Mountain Watch: environmental change and sustainable development in mountains*. UNEP-WCMC Biodiversity Series 12. UNEP-WCMC. 88 pp. (also available at <http://archive.org/details/mountainwatchenv02blyt>)

University of Bern. 2020. Mountain Portal. In: *Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA)* [online]. [Cited 31 July 2020]. https://www.gmba.unibe.ch/services/mountain_portal/

Urbina, I., Grau, O., Sardans, J., Ninot, J.M. & Peñuelas, J. 2020. Encroachment of shrubs into subalpine grasslands in the Pyrenees changes the plant-soil stoichiometry spectrum. *Plant and Soil*, 1–17.
<https://doi.org/10.1007/s11104-019-04420-3>

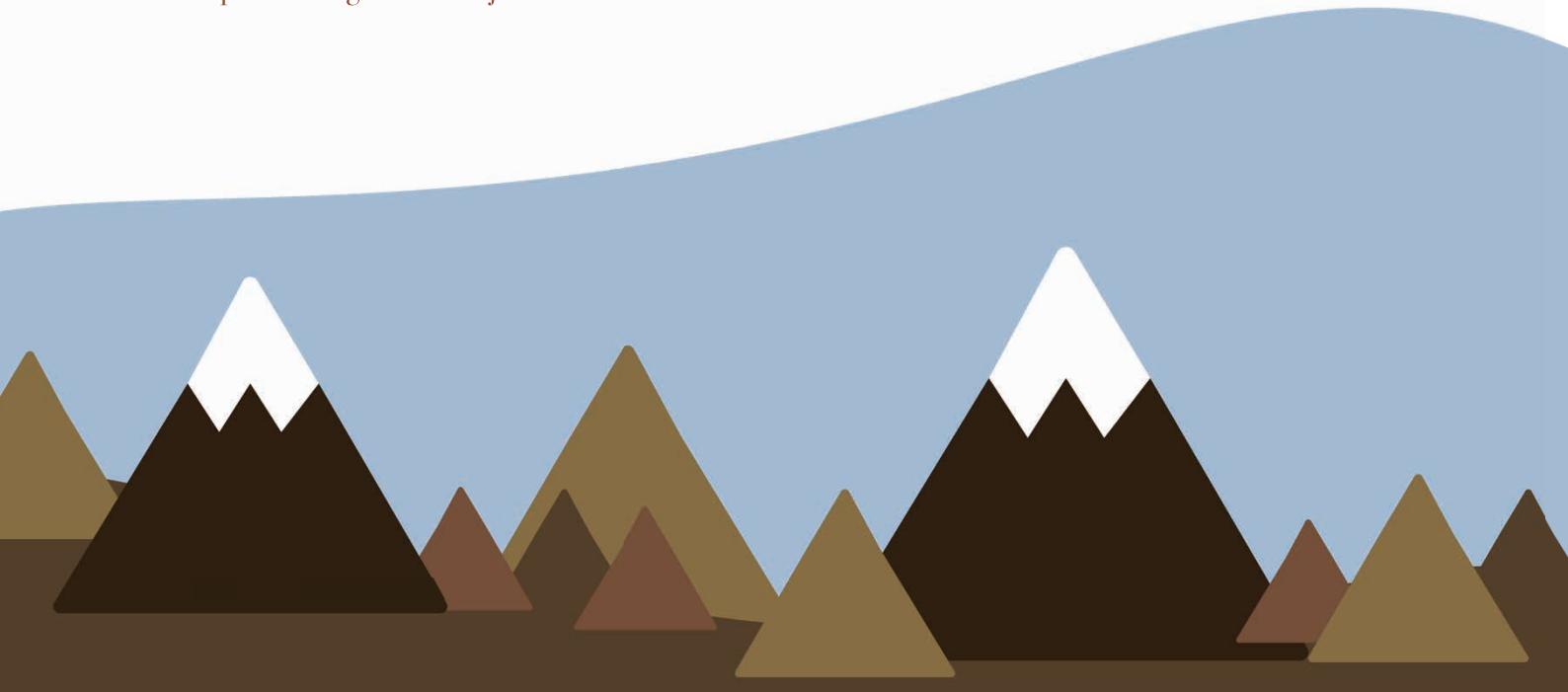
Valterá, M. & Šamoník, P. 2018. Soil organic carbon stocks and related soil properties in a primary *Picea abies* (L.) Karst. volcanic-mountain forest. *Catena*, 165: 217–227.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.034>

Vanguelova, E.I., Bonifacio, E., De Vos, B., Hoosbeek, M.R., Berger, T.W., Vesterdal, L., Armolaitis, K., Celi, L., Dinca, L., Kjønaas, O.J., Pavlenda, P., Pumpanen, J., Püttsepp, Ü., Reidy, B., Simončič, P., Tobin, B. & Zhiyanski, M. 2016. Sources of errors and uncertainties in the assessment of forest soil carbon stocks at different scales—review and recommendations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11): 630. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5608-5>

Wiesmeier, M., Schad, P., von Lützow, M., Poeplau, C., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B. & Kögel-Knabner, I. 2014. Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in southeast Germany (Bavaria). *Agriculture, ecosystems & environment*, 185: 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.028>

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, E., Wollschläger, U., Vogel, H. & Kögel-Knabner, I. 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils—a review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333: 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

- Willaarts, B.A., Oyonarte, C., Muñoz-Rojas, M., Ibáñez, J.J. & Aguilera, P.A.** 2016. Environmental Factors Controlling Soil Organic Carbon Stocks in Two Contrasting Mediterranean Climatic Areas of Southern Spain. *Land Degradation & Development*, 27(3): 603–611. <https://doi.org/10.1002/lde.2417>
- Xiao, R., Man, X. & Duan, B.** 2020. Carbon and Nitrogen Stocks in Three Types of Larix gmelinii Forests in Daxing'an Mountains, Northeast China. *Forests*, 11(3): 305. <https://doi.org/10.3390/f11030305>
- Yan, A., Li, B., Huang, F., Zhang, W., Jiang, P. & Sheng, J.** 2019. Distribution and storage of soil organic and inorganic carbon under different ecological zones in Xinjiang, China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(1): 116–125.
- Yang, Y., Fang, J., Tang, Y., Ji, C., Zheng, C., He, J. & Zhu, B.** 2008. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 14(7): 1592–1599. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01591.x>
- Yimer, F., Ledin, S. & Abdelkadir, A.** 2006. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 135: 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.01.005>
- Zaher, H., Sabir, M., Benjelloun, H. & Paul-Igor, H.** 2020. Effect of forest land use change on carbohydrates, physical soil quality and carbon stocks in Moroccan cedar area. *Journal of Environmental Management*, 254: 109544. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109544>
- Zhao, Z., Zhang, X., Dong, S., Wu, Y., Liu, S., Su, X., Wang, X., Zhang, Y. & Tang, L.** 2019a. Soil organic carbon and total nitrogen stocks in alpine ecosystems of Altun Mountain National Nature Reserve in dry China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(1): 40. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7138-9>
- Zhao, J., Peng, S., Chen, M., Wang G., Cui Y., Liao L., Feng J., Zhu B., Liu W., Yang L. & Tan Z.** 2019b. Tropical forest soils serve as substantial and persistent methane sinks. *Sci Rep*, 9: 16799. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51515-z>
- Zollinger, B., Alewell, C., Kneisel, C., Meusburger, K., Gärtner, H., Brandová, D., Ivy-Ochs, S., Schmidt, M.W.I. & Egli, M.** 2013. Effect of permafrost on the formation of soil organic carbon pools and their physical–chemical properties in the Eastern Swiss Alps. *Catena*, 110: 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013>





永凍土

9. 永凍土

Jens Strauss¹, Benjamin W. Abbott², Gustaf Hugelius^{3,4}, Edward Schuur⁵, Claire Treat¹, Matthias Fuchs¹, Christina Schädel⁵, Mathias Ulrich⁶, Merritt Turetsky⁷, Markus Keuschnig⁸, Christina Biasi⁹, Yuanhe Yang¹⁰, Guido Grosse^{1,11}

¹ Permafrost Research Section, Alfred Wegener Institute Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Potsdam, Germany

德國阿爾弗雷德韋格納研究所赫姆霍茲極地與海洋研究中心永凍土研究部門

² Department of Plant and Wildlife Sciences, Brigham Young University, Provo, United States of America

美國楊百翰大學植物與野生動物科學系

³ Department of Physical Geography, Stockholm University, Stockholm, Sweden
瑞典斯德哥爾摩大學自然地理系

⁴ Bolin Centre for Climate Research, Stockholm University, Stockholm, Sweden
瑞典斯德哥爾摩大學柏林氣候研究中心

⁵ Center for Ecosystem Science and Society, Northern Arizona University, Flagstaff, United States of America

美國北亞利桑那大學生態系統科學與社會研究中心

⁶ Institute for Geography, University of Leipzig, Leipzig, Germany
德國萊比錫大學地理學研究所

⁷ Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado Boulder, Boulder, United States of America

美國科羅拉多大學波爾德分校北極和高山研究所

⁸ GEORESEARCH Research Institute, Puch bei Hallein, Austria
奧地利地理學研究機構

⁹ Department of Environmental and Biological Sciences, University of Eastern Finland, Kuopio, Finland

芬蘭東芬蘭大學環境與生物科學系

¹⁰ Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China
中國科學院植物研究所

¹¹ Institute of Geosciences, University of Potsdam, Potsdam, Germany
德國波茨坦大學地球科學研究所

1. 措施說明

永凍土 (Permafrost) 是常年凍結的地面，如土壤、岩石和冰。在永凍土地區，植物和微生物生命主要存在於每年夏天解凍的近地表土壤，稱為「活凍層 (active layer) 」（圖 20）。許多永凍土區的冰冷和潮濕狀態限制有機物分解，再加上反覆結凍與解凍所造成的土壤混合過程，導致永凍土區在數千年內累積大量的土壤有機碳庫存。隨著氣候暖化，永凍土碳可能非常容易受到氣候暖化帶來的傷害。

永凍土主要出現在高緯度地區（如北極和南極）和高海拔地區（如青藏高原，圖 21）。永凍土的厚度從不到一公尺（在寒帶泥炭地）到超過 1500 尺〔在雅庫特（Yakutia）〕不等。最冷的永凍土在南極洲的橫貫南極山脈（Transantarctic Mountains， -36°C ）和北半球的加拿大北部（ -15°C ，Obu et al., 2019, 2020）。相較之下，一些最溫暖的永凍土存在於平均氣溫高於 0°C 之地區的泥炭地；永凍土可存在於這些地方，是因為夏季時厚厚的泥炭層可使地面隔熱。大部分現存至今的永凍土是形成於寒冷的冰川期（如 1 萬 2000 年前），並在較溫暖的間冰期（interglacials）持續存在。一些淺層永凍土（最大深度為 30~70 公尺）形成於全新世（Holocene，5000 年前），有些甚至形成於 400~150 年前的小冰河期（Little Ice Age）。

在永凍土區，很少有大面積的地區適合行栽作物（row crop）農業。此外，在已實施大規模農業的地區，其地面不穩定的情況普遍。地表的干擾，如犁掘或踩踏植被等行為，會改變土壤的熱動態（thermal regime），有可能引發地表下陷或突然崩塌；如此可能會影響土壤的水文、養分循環和有機質儲量。而這些變化往往對此種地景的持續農業使用，產生嚴重且負面後果。因此，行栽作物的農業可能對永凍土產生負面衝擊（如 Grunzweig et al., 2014）；相反地，畜牧業在永凍土區很普遍，包括馬、牛和馴鹿。

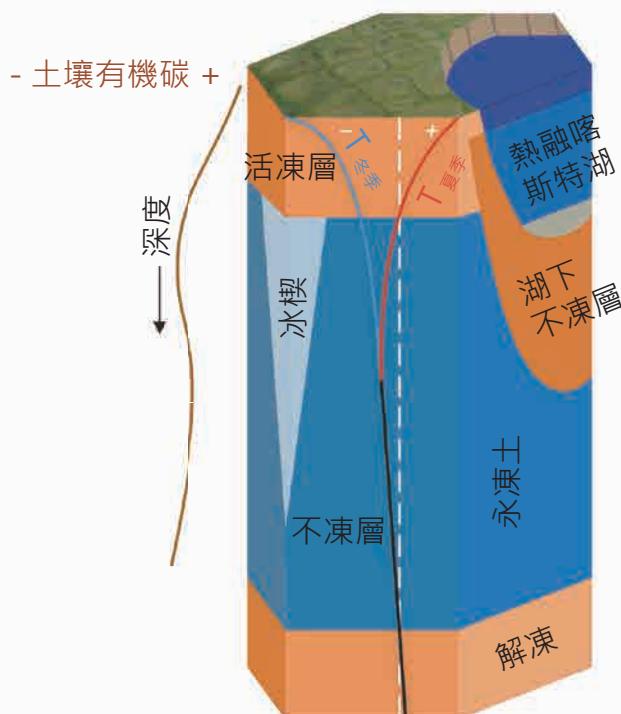


圖 20. 永凍土的垂直結構圖，由活凍層、永凍土〔包括地表冰，如冰楔（ice wedges）〕，以及非冰凍部分（稱為不凍層）所構成

圖中央的紅色和藍色弧線顯示典型的地面熱動態，指出最高溫度（ $T_{\text{夏季}}$ ）和最低溫度（ $T_{\text{冬季}}$ ）、年振幅為零的點（ $T_{\text{冬季}}$ 和 $T_{\text{夏季}}$ 的交叉點）、溫度隨深度增加〔地熱梯度（geothermal gradient）〕以及季節性融化深度（活凍層）而增加。不凍層是冰凍物質層內的非冰凍區域。土壤有機碳的密度隨深度而有變化，以圖中左側的棕色線條顯示，根據 Harden 等人，2012（頂部三公尺）和 Strauss 等人，2015、2017（更深處土壤有機碳的沉積）相關研究所繪製。

2. 全球熱點分布

全球永凍土的分布受長期平均氣溫的控制。就局部地方性而言，永凍土的分布也受到地表性質和各種生態系統因素所影響。永凍土很可能出現在低雪覆蓋率、有絕緣性土 (insulative soil, 如泥炭) 或植被，以及沒有地表水的區域。永凍土區通常依照有冰凍物質在其下的陸地面積比例，來加以細分（圖21）：覆蓋率大於 90% 的連續性永凍土 (continuous permafrost)、覆蓋率為 50~90% 的不連續永凍土 (discontinuous permafrost)、覆蓋率為 10~50% 的零散永凍土 (sporadic permafrost)，以及覆蓋率小於 10% 的孤立永凍土 (isolated permafrost, 未列入圖 21)。

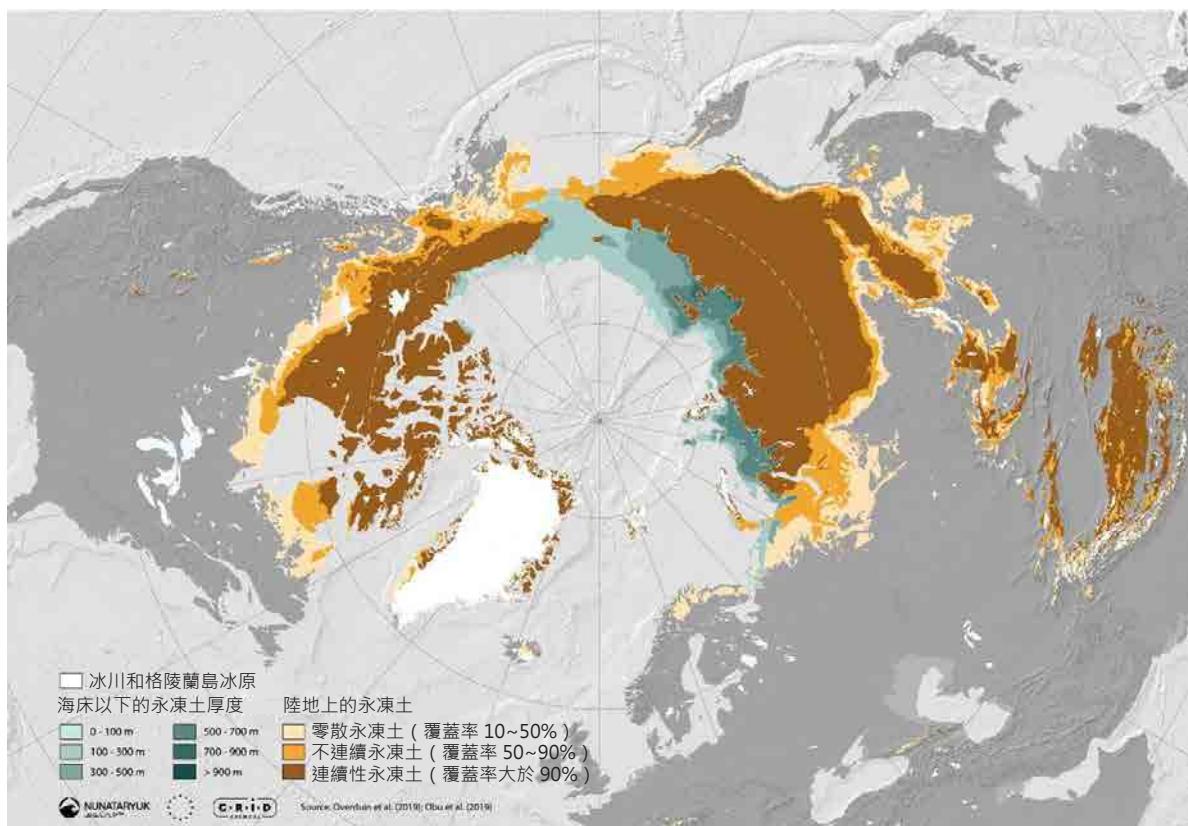


圖 21. 北半球永凍土的範圍

本地圖由 GRID Arendal 的 G. Fylakis 根據 Overduin 等人 (2019) 和 Obu 等人 (2019) 的資料所精心改繪，是 NUNATARYUK 計畫與 GRID Arendal 合作的產物。

永凍土出現在極地和高山地區的陸地上，而存在於極地海洋淺水陸棚區 (shelf regions) 的底部沉積物中時，則稱作海底永凍土 (submarine permafrost)（圖 21）。估算永凍土的總覆蓋面積是極具挑戰性；永凍土會在空間上非均質的 (spatially heterogeneous) 出現，而且難以遠端測量。例如，北半球的永凍土區（包括無永凍土的區塊）估計有 2100 萬平方公里（佔露出陸地面積的 22%，圖 21 中的褐色部分），但模擬研究顯示，此區域實際只有 1390 萬平方公里有永凍土位在其下 (Obu et al., 2019)。低地 (非高山) 永凍土占 1010~1960 萬平方公里，山地 (高山) 永凍土則占 360~520 萬平方公里，海底永凍土則約有 250 萬平方公里 (Obu et al., 2019; Overduin et al., 2019)。南半球的永凍土比北半球少 1000 倍，且大部分都位在南極

洲，約有 2 萬 1700 平方公里 (IPCC, 2019)。青藏高原則是極地以外最大的高山永凍土區，永凍土覆蓋約 110 萬平方公里 (IPCC, 2019)。而 250 萬平方公里的海底永凍土，在過去的冰河時期海平面低過 100 多公尺時形成；雖然海底永凍土自被淹沒以來一直在退化，但海底永凍土仍然存在於北極大陸棚的一些地區（圖 21 藍綠色，Overduin et al., 2019）。

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

永凍土的低溫和獨特的土壤過程已讓富含有機物的深層沉積物，得以累積（圖 20 和圖 22、表 20，Hugelius et al., 2014）。北方高緯度地區現因溫度上升導致永凍土地融化和損失，故瞭解儲存在永凍土中的土壤有機質之數量和可降解性是至關重要（圖 23 和圖 24）。此永凍土的退化會加速分解先前儲存於永凍土中的有機物；而微生物分解將產生二氧化碳、甲烷和氧化亞氮，這是三種最具影響力的長期存在溫室氣體（Schuur et al., 2015; Voigt et al., 2020）。

全球的永凍土區儲存約 1.46~1.6 兆噸⁷的土壤有機碳（Hugelius et al., 2014; IPCC, 2013, 2019; Schuur et al., 2015，圖 22、表 20），這大約是目前大氣碳含量的兩倍（圖 22）。地球上的其他生物群落，不包括北極和寒帶地區，估計在頂部 3 公尺的土壤中，含有 2.05~2.8 兆噸土壤有機碳（Schuur et al., 2015, Jackson et al., 2017）。這意味著，儘管北方地區只佔全球土壤面積的 15%，但卻包含約 42% 的全球土壤碳（2 兆 500 億噸，數值來自 Schuur et al. 2015）。最近的研究表明，全球土壤碳庫的一半（估計為 2 兆 8000 億噸碳，深度為 3 公尺；Jackson et al., 2017）儲存在永凍土區（圖 22），除了這些相對良好受限的土壤有機碳庫存之外，可能還有一個含 3500~4650 億噸碳的深層永凍土碳庫（平均約 4000 億噸，圖 22）；此為已包含的更新世富含有機質永凍土（yedoma）（Strauss et al., 2017）和北極三角洲深層的土壤有機碳估計之額外補充。而這個額外的碳庫是用 3~10 公尺的深度間隔和 11~14 公斤碳 / 立方公尺含量來估算（Schuur et al., 2015）。

永凍土區的大部分土壤有機碳都在環北極生態系統中（圖 21）。然而，我們估計環北極地區以外的高山永凍土區含有 832 億噸土壤有機碳（表 20）。此估計值包括全球山地永凍土中的土壤有機碳（IPCC, 2019）和青藏高原頂部三公尺土壤有機碳的更新估計值（366 億噸碳，Ding et al., 2019）；而我們注意到，據估計，46% 的西藏碳都在永凍土中。因其面積較小，且碳密度較低，相較於環北極永凍土，高山永凍土的土壤有機碳較少（IPCC, 2019; Hugelius et al., 2014）。此外，環北極地區也有同樣的海拔模式，其山區的碳密度與其苔原低地相比，少 50%（Schuur et al., 2015; Strauss et al., 2017）。

⁷ 1 Gt = 10 億噸

永凍土覆蓋可能是零散的、不連續的，特別是在永凍土區的南界邊緣地區和 / 或較低海拔度地區。正因如此，全球永凍土區碳庫存中只有約一兆噸碳（來自 Hugelius et al., 2014, Strauss et al., 2017，以及 IPCC, 2019 的山區永凍土估計）儲存在永凍土中，而高達約 6000 億噸碳儲存在該區域內的無永凍土的土壤或沉積物中（表 20）。

除碳之外，永凍土的氮庫存估計在 220~1060 億噸氮之間，最佳估計為 660 億噸氮（Harden et al., 2012）。此種氮十分重要，因其可限制碳的耗損和吸收，可能會透過氧化亞氮而造成氣候回饋。若這些土壤中的氮，僅一小部分在硝化和脫氮作用中以氧化亞氮的形式釋放出來，那麼來自永凍土融化的氣候回饋迴圈和由此產生的溫室氣體，將會更大。

表 20. 永凍土的土壤有機碳庫存報告

單元	深度（公分）	地區	土壤有機 碳庫存 (10 億噸 碳)	庫存的不 確定度範 圍 (10 億 噸碳)	參考文獻
冰擾凍土 (Turbels)	0~300	低地永凍 土層	476	359~593	Hugelius et al. (2014)
正常凍土 (Orthels)	0~300	低地永凍 土層	98	61~135	Hugelius et al. (2014)
有機質凍土 (Histels)	0~300	低地永凍 土層	153	139~167	Hugelius et al. (2014)
有機質土 (Histosols)	0~300	低地永凍 土層	149	130~167	Hugelius et al. (2014)
非冰凍土 (Non- Gelisols) · 矿 物質	0~300	低地永凍 土層	158	131~185	Hugelius et al. (2014)
永凍土深層泥炭 地	>300	低地永凍 土層	32	21~43	Hugelius et al. (2020)
三角洲沖積 層 (Deltaic alluvium)	>300~5400	低地永凍 土層	91	39~143	Hugelius et al. (2014)

單元	深度 (公分)	地區	土壤有機碳庫存 (10 億噸碳)	庫存的不確定度範圍 (10 億噸碳)	參考文獻
更新世富含有機質永凍土 (yedoma) 地區*	>300~5000	低地永凍土	297	297~436	Strauss et al. (2017)
山區永凍土，不包括青藏高原	0~300	高海拔地區	47	不適用	IPCC (2019)
青藏高原	0~300	高海拔地區	37	34~39	Ding et al. (2019)
凍結在永凍土中**		全球	1024	920~1132	由 Hugelius et al. (2014) 所綜合
總永凍土區		全球	約 1538	1460~1600	此表綜合 ; IPCC (2019), Schuur et al. (2015)
其他深層沉積 ***	300~1000	低地永凍土	400	未知	Schuur et al. (2015)

* 範圍為更新世富含有機質永凍土 (yedoma) 地區的下邊界減去最上面 3 公尺，與 Strauss 等人 (2017) 對 0~50 公尺全部的更新世多年凍土庫之估計值 (3270 億噸碳) 有所差別。

** 假設所有冰凍土 / 北極極地 (High Arctic) 土壤的活凍層深度為 30 公分或以上，以及 46% 的青藏高原碳常年凍結的情況下估算的。

*** 粗略估計在有額外厚沉積覆蓋層的地區之潛在永凍土碳。由於不確定性非常高，尚未包括在任何計算中。

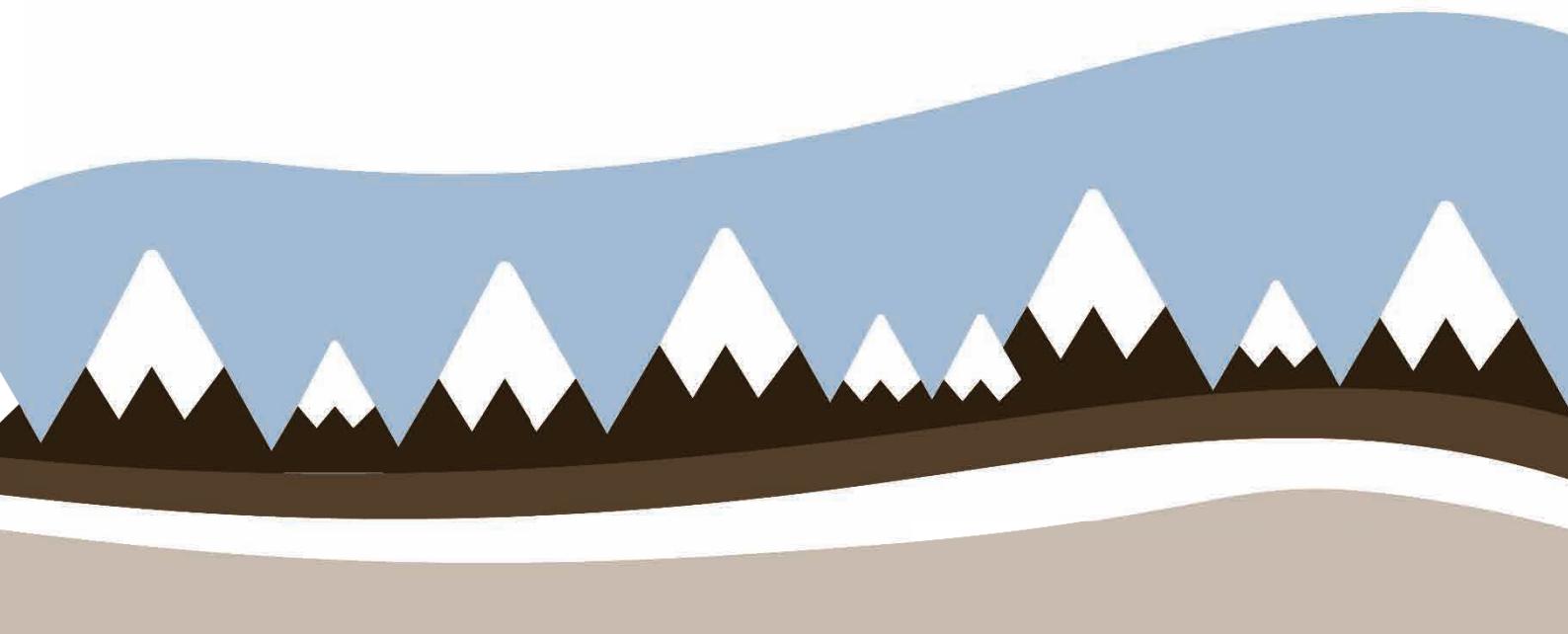




圖 22. 陸地碳庫存和大氣碳與永凍土區儲存碳之關係

圓圈的大小與碳庫存的大小成正比。碳庫存的單位是 10 億噸。

全球土壤估計值 (3 兆 3500 億噸碳) 是基於 3 公尺以下的土壤 (2 兆 8000 億噸碳) 以及深層永凍土 (5000 億噸碳) 與熱帶泥炭地 (500 億噸碳 · Jackson et al., 2017) 中的庫存

此圖改編並更新自 Strauss et al., 2017 之研究，以及根據 IPCC 不同報告的資料 (如 IPCC, 2019) 和 Hugelius 等人 (2014, 2020)

根據 IPCC2013，海洋碳庫存 (未顯示) 在表層海洋中有 9000 億噸碳，在中層和深海中有 37 兆 1000 億噸碳，在海洋生物群中有 30 億噸碳，而在溶解有機碳中則有 7000 億噸碳。另在洋底沉積物中亦有 1 兆 7500 億噸碳。

3.1. 額外碳儲量的潛在機制

與溫帶和熱帶生態系統比較，永凍土生態系統通常支持相對較低的淨初級生產力和總生物量 (Abbott et al., 2016)，但永凍土透過不同的自然機制在數萬年中固存碳。永凍土層的活凍層暴露在季節性的冰凍和融化週期中，引起了複雜的土壤混合過程，稱為冰擾作用 (cryoturbation)。隨著時間推移，冰擾作用將土壤有機碳從地表納入

更深的土壤中，在那裡土壤有機碳被保護起來而不會被分解，最終成為永凍土的一部分。這是一個關鍵機制，可致使大量土壤有機碳庫存於土壤亞綱之冰擾凍土 (the soil sub-order Turbels) 中（表 20）。泥炭的累積在有永凍土或沒有永凍土形況下，也會造成有機質凍土 (Histels) 與有機質土 (Hilosols) 中的大量碳庫存（表 20）。雖然永凍土泥炭地在解凍時會流失碳到大氣中，但現有泥炭地中的碳累積率也有可能隨著植被變化和新泥炭地的形成而有所增加。後者需要更多具有合適條件的地區，如排掉水的熱融喀斯特地形湖 (thermokarst lake) (Walter Anthony et al., 2014) 或新暴露且排水不佳的地面，如冰川退縮 (glacial recession) 後的海岸隆起處 (Treat et al., 2019)，或可促進廣布泥炭形成的環境條件改變。然而，鑑於泥炭的形成是一個緩慢的過程，目前的預測顯示，在幾個世紀內，因解凍和排乾泥炭地而導致的碳耗損可能會大於碳獲得 (Hugelius et al., 2020)。

除了冰擾作用和泥炭形成外，在更新世 (Pleistocene) 和全新世期 (Holocene) 間，由於風、水和崩積物 (colluvial) 搬運，出現了大量的土壤有機碳累積。這些過程將土壤有機碳埋藏在深層沉積物中，如晚更新世的富含有機質永凍土 (yedoma) 沉積 (Strauss et al., 2017; Treat et al., 2019)。融凍泥流 (Solifluction)（土壤下坡的流動，圖 24）會埋藏且持續埋藏在谷底的地表碳。然而，因為融凍泥流最常發生在中度陡坡上，而那裡的土壤有機碳密度通常較低，因此目前尚不清楚此機制對有機物保存的重要性。永凍土中的碳也會被侵蝕、搬運和固存在河流、三角洲與海洋的沉積物中（圖 24），然而這種碳的相對穩定性和停留時間無法被充分限制著。

由於氣溫升高和二氧化碳肥力效應 (CO_2 fertilization)，永凍土區的植被生長增加，或能增加生態系統的碳儲量，但這種潛在碳匯的不確定性很大。經由觀察碳庫存得知，西藏高山永凍土的上活凍層目前正當作一個區域性的巨大碳匯，這意味著較深且較老的永凍土碳損失，或許能被上活凍層土壤有機碳庫存的增加所抵消。在阿拉斯加的其他研究發現，儘管永凍土融化後植被生長增強，但深層土壤的耗損仍造成了碳的淨損失，這亦表示北極和北方地區 (Arctic and Boreal regions) 的植被碳吸收可能是有限的（如 Schuur et al., 2009）。依據完全生物群系變換的簡單碳預算 (carbon budget) 指出，假設所有極地苔原 (Arctic Tundra) 完全轉變為北方森林 (Boreal Forest)，以及所有北方森林完全轉變為溫帶森林 (Temperate Forest)，植被可能可以吸收總共 110 億噸的碳 (Abbott et al., 2016)，而這遠遠低於目前模型的預測。總而言之，植被生長的增加是否足以彌補土壤暖化和永凍土融化帶來的潛在碳損失，仍是一個開放式問題。永凍土碳庫的絕對規模與目前全球植被碳庫的規模相比（圖 21）顯示，植被碳匯對抗永凍土碳損失的能力可能有限。

3.2. 土壤有機碳損失潛力

特別自 1980 年代初期，所有永凍土區的地面溫度都在迅速上升。在無季節性溫度波動的深度下，全球溫度業已每 10 年平均增加 $0.3 \pm 0.1^\circ\text{C}$ （圖 20）(Biskaborn et al., 2019; IPCC, 2019)。自 2007 年以來，根據全球永凍土鑽孔網絡 (global network of permafrost boreholes) 調查，全球永凍土的平均暖化也約每 10 年升高 0.3°C ，而其速度因地區有異 (IPCC, 2019)。預計在本世紀永凍土的暖化和融化，將導致北方地帶、近極地帶 (Subarctic) 和高山區永凍土的廣泛擾動和消失，而北極地區近地表的永凍土也可能會大量減少（圖 23）；而這些將可能對全球氣候產生重大影響。在

2100 年之前，依據政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的緩解情境 (mitigation scenario) 下評估代表碳路徑 RCP2.6 (Representative Carbon Pathways)，近地表 (0~3 公尺) 的永凍土面積可能減少 2~66%；而在高排放情境 (high emission scenario) RCP8.5 下，則減少 30~99% (IPCC, 2019)。在 2010~2300 年期間，模擬結果表明，在高排放情境 (RCP8.5) 下，永凍土面積將減少 600~1600 萬平方公里。

土壤有機碳穩定性的預測遠比永凍土退化的預測更不確定。在高暖化情境 (high warming scenario, RCP8.5)，預測的土壤有機碳損失在 740~6520 億噸碳之間變動 (平均損失為 3410 億噸碳，McGuire et al., 2018)。在此情境下，植被碳的吸收量可能不足以補償永凍土碳的損失，而生態系統碳的淨變化則從損失 6410 億噸碳到增加 1670 億噸碳 (平均損失 2080 億噸碳) (McGuire et al., 2018)。在中度暖化 (moderate warming) 的情境下 (RCP4.5)，橫跨環北極地區的植被碳獲得，在 2300 年前，可能會導致生態系統碳的總體淨增加 (-80~2440 億噸碳獲得，RCP4.5 情境，McGuire et al., 2018)。值得注意的是，模擬結果間的差異非常大，而且目前許多模擬僅能對永凍土的碳及其在不同深度的移動機制，做初步的表述；這帶來了對土壤有機碳礦化的不確定性和以及低估的可能。

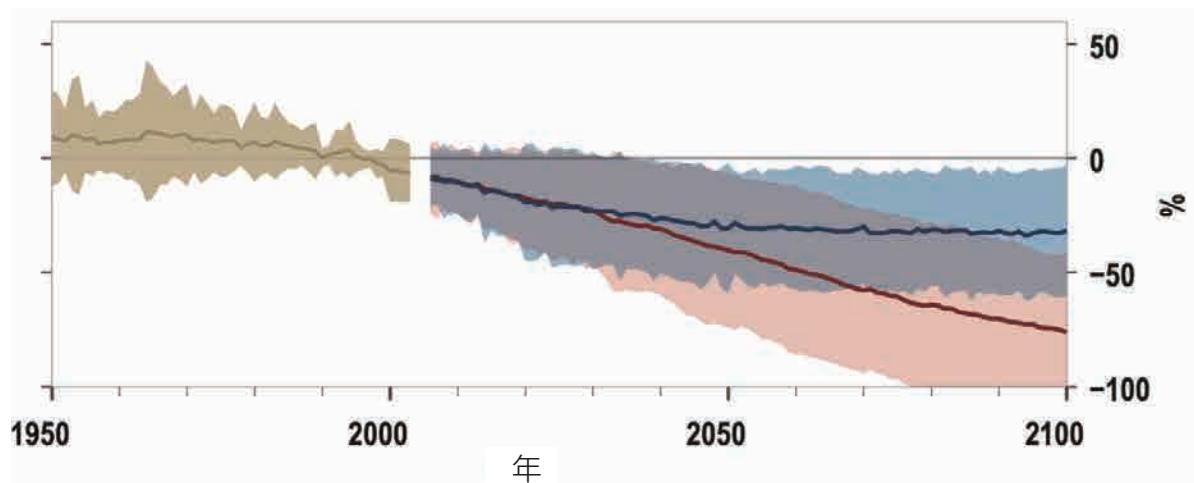


圖 23. 至 2100 年前最上層三公尺的永凍土面積變化之預測 (X 軸)

高排放情境用紅色表示 (RCP8.5)，低排放情境 (RCP2.5) 用藍色表示，灰色區域代表情境重疊範圍

永凍土面積減少高達 75% 是可能的，這意味著超過 1000 萬平方公里的永凍土喪失。
(改編自 IPCC, 2019)

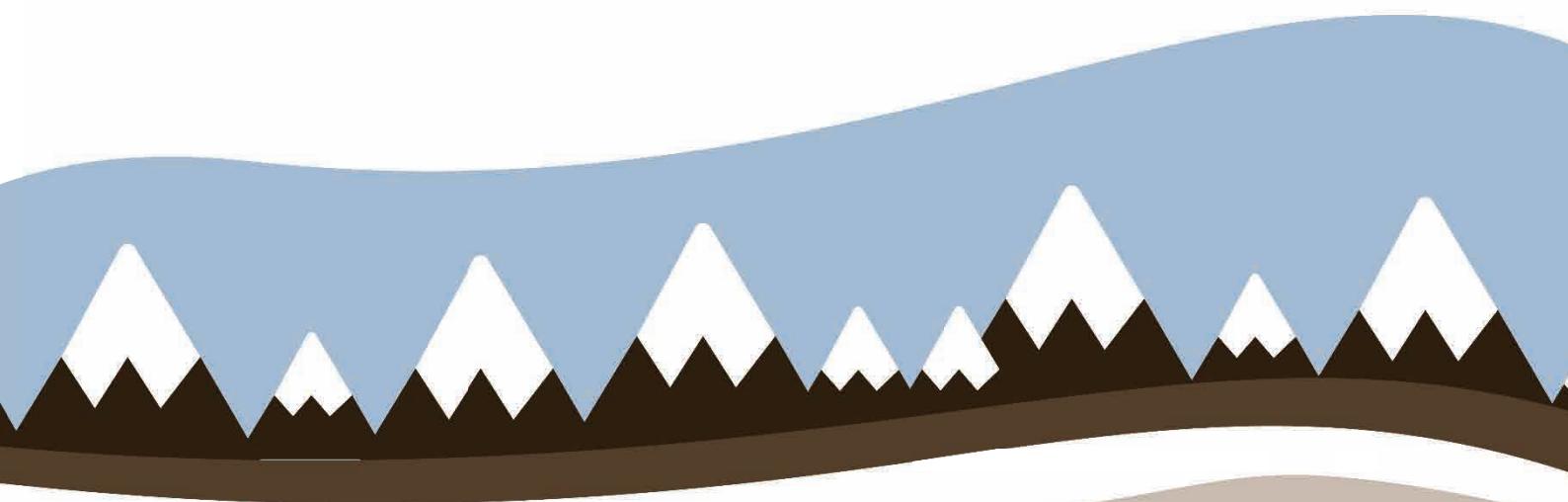
目前模擬方法的特定局限之一是，其模型是經活凍層由地表向下加深，僅模擬漸增、自上而下的融化情況。目前觀察顯示，含大量和中數量地表冰的永凍土會受到突發性解凍事件的影響，例如熱融喀斯特過程 (thermokarst) 和熱侵蝕 (thermo-erosion)；這些事件可能由逐漸暖化、野火、過量降雨、海濱和山坡侵蝕、人類干擾或其他因素所觸發 (Grosse et al., 2011; Turetsky et al., 2020)。突發性永凍土擾動廣泛存在各永凍土分布類別 (即連續、不連續等，圖 21) 中，包含相對溫暖和非常寒冷的永凍土地區 (Nitze et al., 2018)。熱融喀斯特地形和熱侵蝕過程改變地表的

地形、水文、植被、土壤和碳循環。熱融喀斯特地形的形成可創造出湖泊（圖 20，左側），使先前儲存在周圍與地面下的土壤有機碳流通起來，同時熱融喀斯特地形也是百年至千年時標上的碳匯（Turetsky et al., 2020）。水文重組可能導致地表土壤被淹沒，而釋放出甲烷和二氧化碳。易受突然解凍影響的區域，包括苔原低地的冰楔多邊形（ice-wedge polygons）（IPCC, 2019）、富含冰的更新世含有機質永凍土（yedoma）地區（Strauss et al., 2017）以及北方泥炭地（Hugelius et al., 2020）。永凍土和融化後的永凍土之碳損失也可能發生在河流和沿海地區；而在那些地方，每年可多達 20 公尺的側向侵蝕（lateral erosion），而溶解碳與微粒碳的搬運也隨之發生（Fuchs et al., 2020）。受熱融喀斯特過程影響的泥炭地也有很高的氧化亞氮的排放潛力（Voigt et al., 2020）。

假如永凍土退化在 21 世紀時將日趨惡化，可預期到，凍封土壤有機碳也會隨之相應損失，同時溫室氣體的排放也會增加（Schuur et al., 2015; McGuire et al., 2018; Hugelius et al., 2020）。觀察顯示碳耗損的多寡和途徑（好氧和厭氧）與水文密切相關，也與永凍土融解後，所在地點是否變濕或變乾有關（Schuur et al., 2015）。預測解凍後的水分境況（moisture regime）相當複雜，需在地面冰測繪與央關模型開發方面取得更多進展，以便更好預測未來的變化。

永凍土地區的土地利用變化和人類影響也可能改變土壤的碳庫存。由於野火或土地利用，可能會直接造成永凍土的退化，而此處的上層永凍土層則會被擾動。建築物、交通路線和管線等建設以及農業活動，可以引發漸進式和突發性的永凍土退化。正如 Iwasaki 等人（2018）的觀察顯示，在雅庫特中部（Central Yakutia），當森林被轉化為耕地時，土壤的總碳含量顯著下降，起因主要為機械破壞、分解和植物殘留物的移除。因此，與原始森林相比，耕地土壤中的土壤有機碳含量只有 41%。而在農業活動停止後，植被的恢復逐漸復原部分的土壤有機碳；草和灌木等先驅物種則在 20 年的時間裡，重新建立土壤有機碳。然而，在一些廢棄的耕地上，由於生產力水準低，且對草類植被有抑制作用，新的森林生長的總碳含量有下降的趨勢。目前尚未有關於土地利用變化以及人類，對永凍土地區土壤氮庫存影響的資料。

若能更好整合人類的直接干擾相關資料，例如土地利用的變化，才可改善對永久凍土氣候回饋的模型估計。在預測土壤有機碳反應時，很少考慮到分布廣的人類活動區域，如西伯利亞的北方地區（Crate et al., 2017）。人類活動透過以下方式來減少土壤有機碳：（1）將熱融喀斯特地形的盆地用作牧草地和生產乾草的區域、（2）在炎熱夏季，中度濕潤和濕潤草原的二氣化碳排放增加、（3）暫時淹沒的草原和熱融喀斯特地形湖與池塘下的解凍過程，會排放大量甲烷；而這些湖泊和池塘是在富冰永凍土地區的森林被砍伐或實行集約農業後所形成的。



4. 永凍土保育對提供特定生態系統服務的重要性

北極可能看起來很遙遠，與目前發生的事件毫無關聯，但在北極正發生著前所未有的環境變化，這將對全球社會有重要影響。永凍土的消失與相關的溫室氣體排放可能會削弱永凍土區作為長期碳儲量和碳匯的服務 (Schuur and Mack, 2018; IPCC, 2019)。解凍並以溫室氣體的形式向大氣中釋放一小部分原本受凍結的碳，將會加速和放大全球氣候暖化，這種破壞穩定的回饋可能導致極地和山區永凍土的進一步退化 (Schuur et al., 2015)。而此大規模解凍所引起的損失，不太可能藉由植物生長的增加或生物群系的北移來得以補償。由於這些永凍土回饋仍未被納入政府間氣候變化專門委員會的預測中，因而目前的氣候政策可能無法達成預期的目標。

除了溫室氣體排放所帶來的全球性後果外，永凍土的融化和退化也會影響當地的棲息地，使地球上一些碩果僅存的原始地區發生退化。這些地方性動態透過水質和水量、自然災害以及基礎設施的穩定性和土地損失，來影響生活在永凍土上的人類社群。地表穩定性和天氣模式的變化正在改變行進的路線，阻礙人類進入具重要文化意義的狩獵區和採集區及前往其他社群；然而穩定可靠的交通運輸和時間資源是北方原住民生計的基礎。

另一個可能受到氣候變遷威脅的生態系統服務是淡水儲存。永凍土區的地表冰 (ground ice) 容納全球大量的淡水：2.2~30 萬立方公里，這相當於可讓海平面上升高達 90 公分 (Abbott et al., 2019)。雖然地表冰在 21 世紀完全融化是有些不切實際，但近地表永凍土（即大部分地表冰所在之地）大範圍的流失是可預測的，而完全融化將是接下來的世紀需要納入考慮的因素。

總言之，永凍土不再是永久性的，氣候變遷和人類對土壤的破壞正帶給環極圈和高山的永凍土區域帶來不可逆的變化。

4.1. 最小化對土壤功能的威脅

減少永凍土層土壤威脅的唯一可行方法就是減少人為的氣候變遷。顯而易見，若積極減少人為的排放，永凍土區大部分的土壤有機碳可以得到保護。具體來說，當人為排放迅速減少時，溫室氣體釋放、橫向的碳輸出以及如野火和熱融喀斯特過程等干擾都會減少 (Abbott et al., 2016; Turetsky et al., 2020)。除此之外，由於其龐大的規模和偏遠的位置，對大多數永凍土區進行實地干預是不可行的。富冰永凍土區（像更新世富含有機質永凍土 yedoma ）和陡峭山區的永凍土區特別容易發生危害，因為永凍土和地表冰對地面穩定性有很強的控制作用 (Krautblatte et al., 2013; IPCC, 2019; Straus et al., 2017; Turetsky et al., 2020)。可預測得到永凍土融化將影響北極的水文和野火，對植被和土壤產生衝擊。約 20% 的北極陸地永凍土容易受到永凍土突然融化和地層下陷影響，在 RCP8.5 情境下，預計到 2100 年的時候，小湖面積將增加 50% 以上 (Turetsky et al., 2020)。即使當整個區域的水循環加強，包括降水、

蒸發散和河川向北冰洋的流量等增加，然而永凍土的減少仍可能導致土壤乾燥IPCC, 2019），因為地景失去了冰凍的托底支撐。在山區永凍土區，永凍土的退化透過改變土壤溫度和滲透性已改變一些高山生態系統，降低大片地區的氣候調節服務，導致青藏高原的地下水位降低及新且萎縮的湖泊。盡量減少這些威脅需要採取協調一致的全球行動，盡可能地限制人為暖化（IPCC, 2019）。

4.2. 增加生產與糧食安全

在許多北極地區，糧食和用水安全一直受到積雪、湖冰和河冰及永凍土等因素所影響，而這些因素的變化將會對其產生負面的衝擊，同時也打斷進入放牧區、狩獵區和漁場的通道，並造成農業用地的不穩定（IPCC, 2019）。

低地永凍土估計含有大量的天然汞，解凍後可能釋放到環境中，影響飲用水和生態系統食物網（IPCC, 2019）。在一些高山地區，水質已經受到汙染物的影響，是冰川融化和永凍土解凍所釋出的汞（IPCC, 2019）。若目前儲存在冰川和永凍土中特別的重金屬和其他遺留汙染物被釋放出來，預計將會降低水質，影響淡水生物群及人類家戶與農業使用。此外，永凍土退化會增加其他元素（如鋁、錳和鎳）的釋出（IPCC, 2019）。永凍土退化也是生物有效的溶解性有機碳之主要來源，並不斷增加中，其可退化飲用水並影響水生和海洋生態系統的食物網。而金屬、碳與養分的釋出可能因此影響生活在永凍土區的人類之糧食安全。

4.3. 改善人類福祉

永凍土融化、海冰消失、極端天氣事件和海平面上升等結合一起，對北極的生計產生多重負面衝擊，而氣候驅使的環境變化也損害所有北極居民的生計、福祉和文化認同〔北極監測和評估計畫（Arctic Monitoring and Assessment Programme, 2017; IPCC, 2019〕。在部分北極地區，或已達到臨界點，以至於可調應措施已不再能使在地居民遠離氣候變化的最壞影響。因永凍土區的地面塌陷和海岸線侵蝕而流離失所的人們是第一批氣候難民；海岸侵蝕和永凍土融化迫使整個村莊搬遷，因而付出龐大的經濟和文化代價（Welch, 2019）。

解凍的永凍土有另一個風險，即是從其土壤中釋放出古老的病原體（Legendre et al., 2015，在此案例中是非致病性的）。2016年爆發的炭疽病（anthrax）可能來自西伯利亞之亞馬爾半島（Yamal Peninsul）的永凍土，導致20多萬頭馴鹿被宰殺以及一個人的死亡（Hueffer et al., 2020）。在全球暖化的背景下，病毒和疾病從永凍土中復甦的可能性應該受到關注，儘管這類事件的廣泛性和普遍性目前仍不清楚。

大多數苔原和寒帶地區的野火頻率和強度，被預期在本世紀將會增加（Abbott et al., 2016），而在一些山區亦是如此。氣候和植被變化之間的交互作用將影響未來的火災強度和頻率（Schuur and Mack, 2018; IPCC, 2019; Holloway et al., 2020）。2019年和2020年，西伯利亞的野火季節異常劇烈（NASA, 2020），同時北部高緯度地區也出現極端熱浪。在位於薩哈共和國（Republic of Sakha）（雅庫特）北部的維科揚斯克（Verkhoyansk），2020年6月測得38°C的創紀錄溫度〔世界氣象組織（World Meteorological Organization, 2020）〕。火災會危害基礎設施，也會降低空氣品質而危及人類福祉；而火災也會燒毀地表的土壤有機物，導致土壤中的碳立即釋放到大氣中。從較長的時間幅度來看，野火會除去永凍土頂部的絕緣層，使永凍土退化並增劇土壤有機碳的分解（Holloway et al., 2020）。

另一項挑戰是，永凍土的減少改變大多數自然災害的頻率、規模和位置。由於人口、旅遊業和社會經濟的發展，人們和基礎設施暴露在自然危害的機會增多。到2050年前，70%的北極基礎設施是位於面臨永凍土融化和下陷風險的區域（IPCC 2019）。即使是西伯利亞北部的寒冷北極永凍土，預估到21世紀末亦會受到融化下陷的影響（Nitzbon et al., 2020）。2020年5月，在諾里爾斯克（Norilsk）發電廠的油罐設施發生北極地區有史以來最大的柴油洩漏，此可能與因人類干擾而造成的永凍土融化進一步破壞基礎設施有關。

永凍土融化對高山地區的基礎設施也有負面影響（IPCC, 2019）。在歐洲阿爾卑斯山的永凍土上建造的纜車、山間小屋、輸電線路以及落石或雪崩防護設施，大多位於2500公尺以上的高山地區，已因永凍土融化而變得不穩定（Krautblatter et al., 2013）。在青藏高原，道路、輸電線路和一條石油管線皆被發現有變形或損壞的現象，而旅遊和娛樂活動，如徒步旅行、滑雪和登山等，都受到永凍土融化的負面影響。在一些地區，不斷惡化的山路安全已降低登山的機會，並將進一步危及山區的生存和娛樂活動。

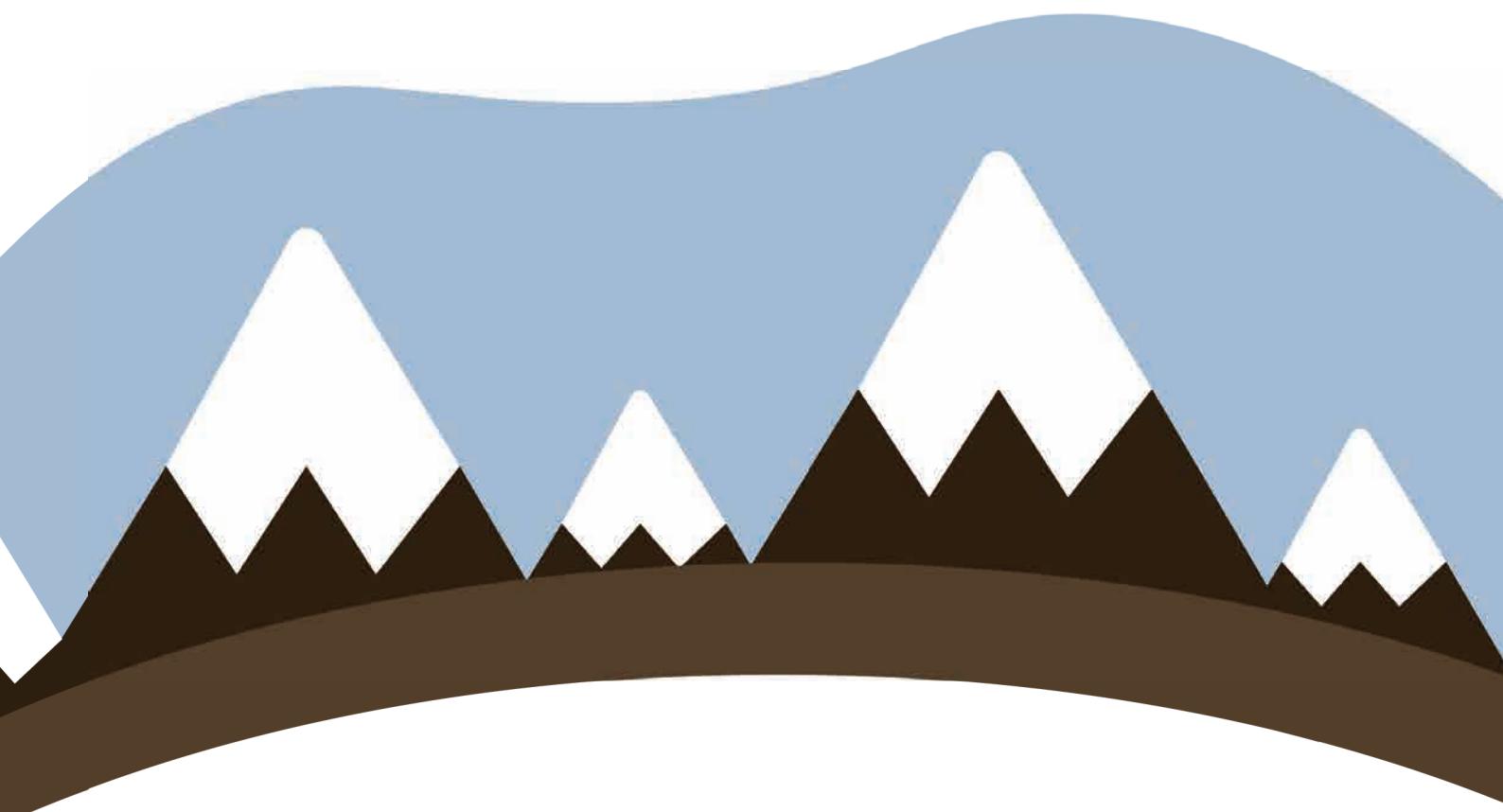
4.4. 緩解和適應氣候變遷

北極居民，特別是原住民，已經調整重要活動及措施的時間安排，以應對季節性變化與地面、冰雪行進條件的安全性。市政當局和業界正開始解決與洪水和永凍土融化有關的基礎設施故障，而一些沿海社區正計畫搬遷村莊。基礎設施的升級改造和重新設計，有可能在2100年前，將可能使永凍土融化及相關的氣候變化影響所引起的支出減半。此外，對於永凍土上的基礎設施，適用於極地和高山環境的工程措施也已經開發（Dore et al., 2016）。在本世紀剩下的時間裡，應致力於有效的緩解，才可以減輕永凍土氣候反饋的負面後果。

5. 挑戰和趨勢概況

在人類社會和當前生態系統相關的時間軸上，預估永凍土的融化是不可逆的。幾十年到幾千年的漫長反應時間意味著，即使在人為溫室氣體和輻射作用穩定之後，永凍土區也會有長期的變化。永凍土的解凍是有門檻，對正在發生的氣候暖化做出突然的反應；而這些特點給適應帶來了風險和挑戰。冰凍圈（cryosphere）還透過雪、冰和永凍土的回饋放大了氣候變遷。永凍土層的碳回饋是一個自我強化的回饋（Schuur et al., 2015）。

由於地表氣溫上升、海洋水溫上升和無冰期延長，全球規模的永凍土融化預計將在近期（2031~2050年）持續發生，而對河川逕流和地表下陷或海岸侵蝕等局部危害，造成無法避免的後果。這引起了土壤穩定性的喪失，威脅到生計，並可能向大氣中釋放更多的碳。在2100年前，預測近地表（3~4公尺內）的永凍土面積在緩解情境（RCP2.5）下減少 $24 \pm 16\%$ ，在更高排放（RCP8.5）情境下減少 $69 \pm 20\%$ （IPCC, 2019）。最終的情況將導致在2100年前，大量的永凍土碳以二氧化碳和甲烷的形式，釋放到大氣中，有可能加劇氣候變化。甚至某些尚未納入預測模型裡的過程，將產生更大的排放量，如突然解凍（Nitzbon et al., 2020; Turetsky et al., 2020）和極小尺度的生態交互作用（Keuper et al., 2020）。較低的排放情況減輕永凍土區碳排放的反應。甲烷貢獻一小部分的額外的碳釋放總量，然而甲烷有更高的暖化潛值（與二氧化碳相比，100年內的暖化潛力為28~36倍，Schuur et al., 2015），故其釋放更顯堪慮。植物生長的增加被預期能在短期內補充或部分抵消土壤中的碳耗損，但在長期或高碳耗損率的情況下，將無法與碳釋放相匹敵。現今永凍土的氧化亞氮排放量預估約佔天然土壤氧化亞氮總排放量的7%（Voigt, 2020），但未來的釋放量仍很難受到限制。然而，氣候變遷相關的干擾有利於產生和釋放氧化亞氮（Elberling et al., 2010; Voigt et al., 2017）。



未來氣候引起的永凍土變化將驅動棲息地和生物群落的轉變 (Schuur and Mack, 2018)，而許多物種的範圍和豐富度也會隨之發生相關改變。即使整個區域的水循環預估將更增強，包括降水、蒸發散和河川向北冰洋流量等增加，永凍土的減少可能導致土壤乾燥，對生態系統的生產力產生不利後果。

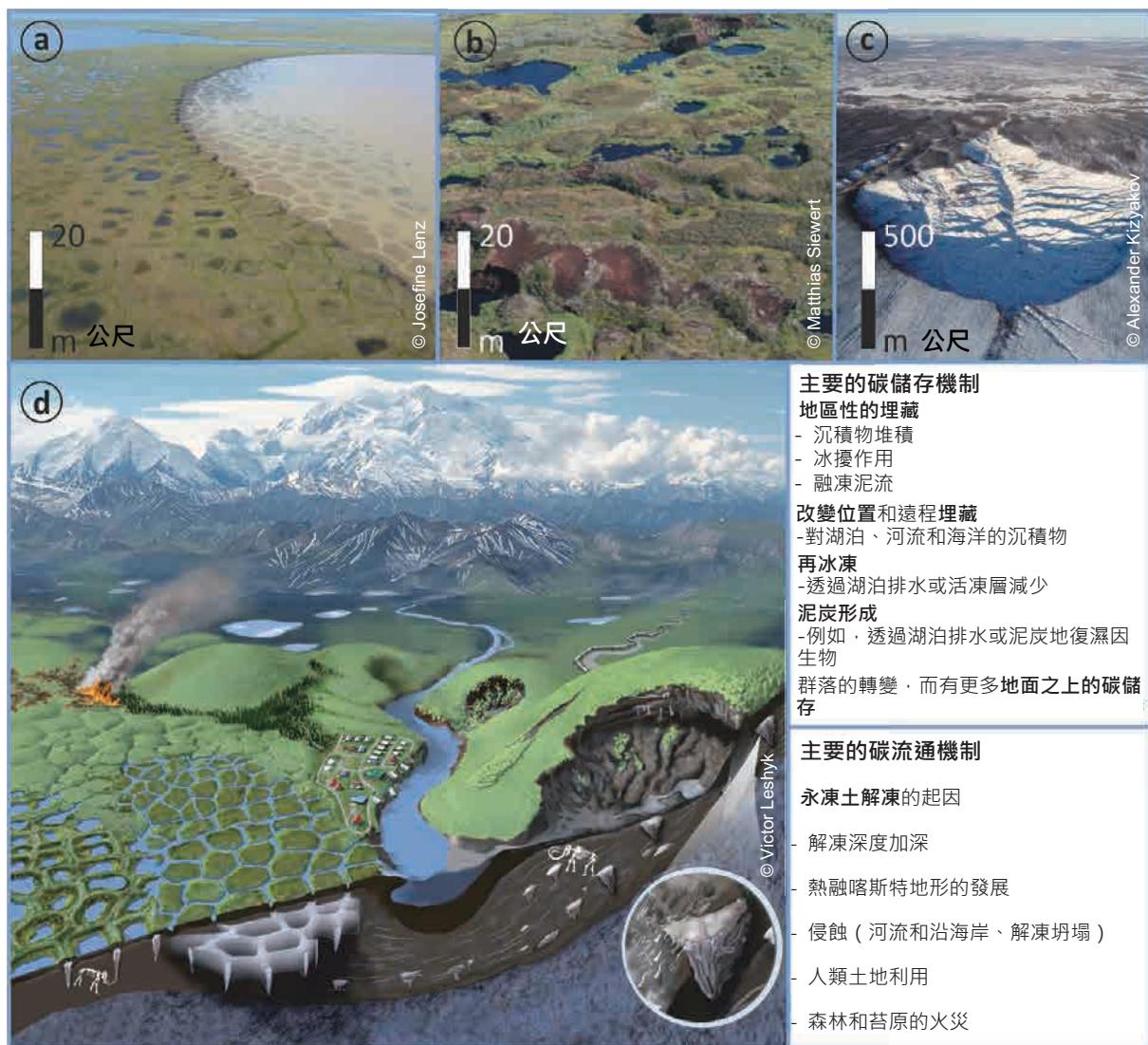


圖 24. 永凍土對例如氣候暖化、人類干擾或更多的野火的反應，即是隨地面冰的融化而退化。

由此產生的地面塌陷將導致永凍土生態系統下沉和侵蝕。先前凍結於永凍土的土壤碳可透過微生物作用而逃脫至大氣中，或被水帶走。這張圖片以北半球的低地永凍土為例，描繪永凍土地景的特徵

- (a) 阿拉斯加北部湖泊擴張造成的熱融喀斯特地形
- (b) 瑞典 Tavavuoma 的 Palsa 泥炭地綜合體
- (c) 位於俄羅斯雅庫特極北區的 Batagai 解凍坍塌，該坍塌體的寬度超過 900 公尺
- (d) Schuur 和 Mack (2018) 中永凍土主要退化過程和相關地景特徵的卡通畫

6. 相關專有名詞

6.1. 土壤相關專有名詞

冰擾凍土 (*turbels*) : 受冰擾作用影響的永凍土

正常凍土 (*orthels*) : 無冰擾作用影響的永凍礦質土

有機質凍土 (*histels*) : 富含有機質的永凍土

6.2. 永凍土特別專用名詞

簡化自 van Everdingen et al., 2005

活凍層 (*active layer*) : 有永凍土位於其下的地區，受季節性融化和凍結影響的地表頂層。

冰擾作用 (*cryoturbation*) : 凍融循環引起的土壤活動，包括溫度變化引起的膨脹和收縮以及地面冰體的生長和消失。

冰楔 (*ice wedge*) : 一個巨大的，通常是楔形的物體，其尖端朝下。春天融化的雪水會滲入熱收縮的裂縫中，在其內可以發現冰楔。冰楔中的冰每年重複收縮開裂，然後裂縫中的水凍結，逐漸增加冰楔的寬度和深度。

低地永凍土 (*lowland permafrost*) : 存在高海拔地區但在高山地區以外的永凍土。

山地永凍土 [*mountain permafrost*，也稱作高山永凍土 (*alpine permafrost*)] : 在高海拔地區的永凍土，也出現在中、低緯度地區。

永凍土 (*permafrost*) : 地面 (包括土壤或岩石) 至少在連續兩年內保持在 0°C 或以下的溫度。

(冰楔) 多邊形 [(*ice wedge*) *polygons*] : 一種由封閉的、大致等長的圖形組成的圖案化地面，其邊界是或多或少的直邊。由土壤收縮、水滲透和地面上厚厚的楔形冰體 (冰楔) 造成。

融凍泥流 [*solifluction*，也稱作凍土潛移 (*frost creep*)] : 飽和未結凍土壤物質的緩慢下坡流動。

不凍層 (*talik*) : 在永凍土層內或穿過永凍土層的未結凍地面層或體。

解凍下陷 (*thaw subsidence*) : 由於解凍造成的冰量損失，因而導致地表高度下降。

熱侵蝕 (*thermo-erosion*) : 透過流動水的熱和機械作用，侵蝕富含冰的永凍土。

熱融喀斯特 (*thermokarst*) : 一種過程：多餘的地面冰融化而隨後的解凍下陷，通常由水體 (热融喀斯特湖) 引起；一種地貌 (*landform*) : 因多餘的地面冰融化而隨後的解凍下陷，所導致的地形。熱融喀斯特地形是因為其表面上與石灰岩地區的典型喀斯特石灰岩溶地形 (*karst topography*) 相似而得名。

永凍土 (*yedoma*) : 更新世富含冰的永凍土層，有同生的 (*syngenetic*) 冰楔，廣泛分布於西伯利亞、阿拉斯加和加拿大育空地區 (Yukon)，容易發生快速融化過程。

參考文獻

- Abbott, B.W., Bishop, K., Zarnetske, J.P., Minaudo, C., Chapin, F.S., Krause, S., Hannah, D.M., Conner, L., Ellison, D., Godsey, S.E., Plont, S., Marçais, J., Kolbe, T., Huebner, A., Frei, R.J., Hampton, T., Gu, S., Buhman, M., Sara Sayedi, S., Ursache, O., Chapin, M., Henderson, K.D. & Pinay, G.** 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12(7): 533–540. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0374-y>
- Abbott, B.W., Jones, J.B., Schuur, E.A., Chapin III, F.S., Bowden, W.B., Bret-Harte, M.S., Epstein, H.E., Flannigan, M.D., Harms, T.K. & Hollingsworth, T.N.** 2016. Biomass offsets little or none of permafrost carbon release from soils, streams, and wildfire: an expert assessment. *Environmental Research Letters*, 11(3): 034014. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/3/034014>
- AMAP.** 2017. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). Oslo, Norway, Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP).
- Crate, S., Ulrich, M., Habeck, J.O., Desyatkin, A.R., Desyatkin, R.V., Fedorov, A.N., Hiyama, T., Iijima, Y., Ksenofontov, S., Mészáros, C. & Takakura, H.** 2017. Permafrost livelihoods: A transdisciplinary review and analysis of thermokarst-based systems of indigenous land use. *Anthropocene*, 18: 89–104. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2017.06.001>
- Ding, J., Wang, T., Piao, S., Smith, P., Zhang, G., Yan, Z., Ren, S., Liu, D., Wang, S., Chen, S., Dai, F., He, J., Li, Y., Liu, Y., Mao, J., Arain, A., Tian, H., Shi, X., Yang, Y., Zeng, N. & Zhao, L.** 2019. The paleoclimatic footprint in the soil carbon stock of the Tibetan permafrost region. *Nature Communications*, 10(1): 4195. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12214-5>
- Doré, G., Niu, F. & Brooks, H.** 2016. Adaptation Methods for Transportation Infrastructure Built on Degrading Permafrost. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27(4): 352–364. <https://doi.org/10.1002/ppp.1919>
- Elberling, B., Christiansen, H.H. & Hansen, B.U.** 2010. High nitrous oxide production from thawing permafrost. *Nature Geoscience*, 3(5): 332–335. <https://doi.org/10.1038/ngeo803>
- Fuchs, M., Nitze, I., Strauss, J., Günther, F., Wetterich, S., Kizyakov, A., Opel, T., Grigoriev, M.N., Maximov, G.M. & Grosse, G.** 2020. Rapid fluvio-thermal erosion of a yedoma permafrost cliff in the Lena River Delta. *Frontiers in Earth Science*. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00336>
- Grosse, G., Harden, J., Turetsky, M.R., McGuire, A.D., Camill, P., Tarnocai, C., Frolking, S., Schuur, E.A.G., Jorgenson, T., Marchenko, S., Romanovsky, V., Wickland, K.P., French, N., Waldrop, M.P., Bourgeau-Chavez, L. & Striegl, R.G.** 2011. Vulnerability of high-latitude soil organic carbon in North America to disturbance. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 116: G00K06. <https://doi.org/10.1029/2010JG001507>
- Grünzweig, J.M., Valentine, D.W. & Chapin, F.S.** 2015. Successional Changes in Carbon Stocks After Logging and Deforestation for Agriculture in Interior Alaska: Implications for Boreal Climate Feedbacks. *Ecosystems*, 18(1): 132–145. <https://doi.org/10.1007/s10021-014-9817-x>

Harden, J.W., Koven, C.D., Ping, C.-L., Hugelius, G., McGuire, A.D., Camill, P., Jorgenson, T., Kuhry, P., Michaelson, G.J., O'Donnell, J.A., Schuur, E.A.G., Tarnocai, C., Johnson, K. & Grosse, G. 2012. Field information links permafrost carbon to physical vulnerabilities of thawing. *Geophysical Research Letters*, 39(15). <https://doi.org/10.1029/2012GL051958>

Holloway, J.E., Lewkowicz, A.G., Douglas, T.A., Li, X., Turetsky, M.R., Baltzer, J.L. & Jin, H. 2020. Impact of wildfire on permafrost landscapes: A review of recent advances and future prospects. *Permafrost and Periglacial Processes*, 31(3): 371–382. <https://doi.org/10.1002/ppp.2048>

Hueffer, K., Drown, D., Romanovsky, V. & Hennessy, T. 2020. Factors Contributing to Anthrax Outbreaks in the Circumpolar North. *EcoHealth*, 17(1): 174–180. <https://doi.org/10.1007/s10393-020-01474-z>

Hugelius, G., Loisel, J., Chadburn, S., Jackson, R.B., Jones, M., MacDonald, G., Marushchak, M., Olefeldt, D., Packalen, M., Siewert, M.B., Treat, C., Turetsky, M., Voigt, C. & Yu, Z. 2020. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to permafrost thaw. *Proceedings of the National Academy of Sciences*: 201916387. <https://doi.org/10.1073/pnas.1916387117>

Hugelius, G., Strauss, J., Zubrzycki, S., Harden, J., Schuur, E.A.G., Ping, C.-L., Schirrmeyer, L., Grosse, G., Michaelson, G., Koven, C., O'Donnell, J., Elberling, B., Mishra, U., Camill, P., Yu, Z., Palmtag, J. & Kuhry, P. 2014. Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps. *Biogeosciences*, 11: 6573–6593. <https://doi.org/10.5194/bg-11-6573-2014>

IPCC. 2019. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. H.-O. Pörtner, ed. Monaco, Intergovernmental Panel on Climate Change.

Iwasaki, S., Desyatkin, A.R., Filippov, N.V., Desyatkin, R.V. & Hatano, R. 2018. Carbon stock estimation and changes associated with thermokarst activity, forest disturbance, and land use changes in Eastern Siberia. *Geoderma Regional*, 14: e00171. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.e00171>

Jackson, R.B., Lajtha, K., Crow, S.E., Hugelius, G., Kramer, M.G. & Piñeiro, G. 2017. The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48(1): 419–445. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234>

Keuper, F., Wild, B., Kummu, M., Beer, C., Blume-Werry, G., Fontaine, S., Gavazov, K., Gentsch, N., Guggenberger, G., Hugelius, G., Jalava, M., Koven, C., Krab, E.J., Kuhry, P., Monteux, S., Richter, A., Shahzad, T., Weedon, J.T. & Dorrepaal, E. 2020. Carbon loss from northern circumpolar permafrost soils amplified by rhizosphere priming. *Nature Geoscience*, 13(8): 560–565. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0607-0>

Krautblatter, M., Funk, D. & Günzel, F.K. 2013. Why permafrost rocks become unstable: a rock–ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8): 876–887. <https://doi.org/10.1002/esp.3374>

Legendre, M., Lartigue, A., Bertaux, L., Jeudy, S., Bartoli, J., Lescot, M., Alempic, J.-M., Ramus, C., Bruley, C., Labadie, K., Shmakova, L., Rivkina, E., Couté, Y., Abergel, C. & Claverie, J.-M. 2015. In-depth study of Mollivirus sibericum, a new 30,000-y-old giant virus infecting Acanthamoeba. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(38): E5327–E5335. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510795112>

McGuire, A.D., Lawrence, D.M., Koven, C., Clein, J.S., Burke, E., Chen, G., Jafarov, E., MacDougall, A.H., Marchenko, S., Nicolsky, D., Peng, S., Rinke, A., Ciais, P., Gouttevin, I., Hayes, D.J., Ji, D., Krinner, G., Moore, J.C., Romanovsky, V., Schädel, C., Schaefer, K., Schuur, E.A.G. & Zhuang, Q. 2018. Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(15): 3882–3887. <https://doi.org/10.1073/pnas.1719903115>

NASA. 2020. *Another Intense Summer of Fires in Siberia* [online]. [Cited 1 August 8AD]. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/147083/another-intense-summer-of-fires-in-siberia>

Nitzbon, J., Westermann, S., Langer, M., Martin, L.C.P., Strauss, J., Laboor, S. & Boike, J. 2020. Fast response of cold ice-rich permafrost in northeast Siberia to a warming climate. *Nature Communications*, 11(1): 2201. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15725-8>

Nitze, I., Grosse, G., Jones, B.M., Romanovsky, V.E. & Boike, J. 2018. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic. *Nature Communications*, 9(1): 5423. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07663-3>

Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Kääb, A., Leibman, M.O., Lewkowicz, A.G., Panda, S.K., Romanovsky, V., Way, R.G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J. & Zou, D. 2019. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*, 193: 299–316. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>

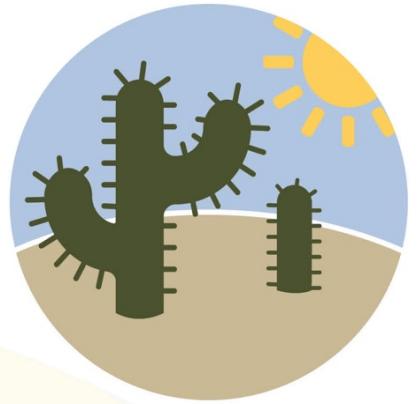
Obu, J., Westermann, S., Vieira, G., Abramov, A., Balks, M.R., Bartsch, A., Hrbáček, F., Kääb, A. & Ramos, M. 2020. Pan-Antarctic map of near-surface permafrost temperatures at 1 km² scale. *The Cryosphere*, 14(2): 497–519. <https://doi.org/10.5194/tc-14-497-2020>

Overduin, P.P., Schneider von Deimling, T., Miesner, F., Grigoriev, M.N., Ruppel, C., Vasiliev, A., Lantuit, H., Juhls, B. & Westermann, S. 2019. Submarine Permafrost Map in the Arctic Modeled Using 1-D Transient Heat Flux (SuPerMAP). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(6): 3490–3507. <https://doi.org/10.1029/2018jc014675>

Schuur, E.A.G. & Mack, M.C. 2018. Ecological Response to Permafrost Thaw and Consequences for Local and Global Ecosystem Services. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 49(1): 279–301. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-121415-032349>

Schuur, E.A.G., McGuire, A.D., Schadel, C., Grosse, G., Harden, J.W., Hayes, D.J., Hugelius, G., Koven, C.D., Kuhry, P., Lawrence, D.M., Natali, S.M., Olefeldt, D., Romanovsky, V.E., Schaefer, K., Turetsky, M.R., Treat, C.C. & Vonk, J.E. 2015. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*, 520(7546): 171–179. <https://doi.org/10.1038/nature14338>

- Schuur, E.A.G., Vogel, J.G., Crummer, K.G., Lee, H., Sickman, J.O. & Osterkamp, T.E.** 2009. The effect of permafrost thaw on old carbon release and net carbon exchange from tundra. *Nature*, 459(7246): 556–559. <https://doi.org/10.1038/nature08031>
- Strauss, J., Schirrmeister, L., Grosse, G., Fortier, D., Hugelius, G., Knoblauch, C., Romanovsky, V., Schädel, C., Schneider von Deimling, T., Schuur, E.A.G., Shmelyov, D., Ulrich, M. & Veremeeva, A.** 2017. Deep Yedoma permafrost: A synthesis of depositional characteristics and carbon vulnerability. *Earth-Science Reviews*, 172: 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.07.007>
- Treat, C.C., Kleinen, T., Broothaerts, N., Dalton, A.S., Dommain, R., Douglas, T.A., Drexler, J.Z. et al.** 2019. Widespread global peatland establishment and persistence over the last 130,000 y. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(11): 4822–4827. <https://doi.org/10.1073/pnas.1813305116>
- Turetsky, M.R., Abbott, B.W., Jones, M.C., Anthony, K.W., Olefeldt, D., Schuur, E.A.G., Grosse, G., Kuhry, P., Hugelius, G., Koven, C., Lawrence, D.M., Gibson, C., Sannel, A.B.K. & McGuire, A.D.** 2020. Carbon release through abrupt permafrost thaw. *Nature Geoscience*, 13(2): 138–143. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0526-0>
- van Everdingen, R.O.** 2005. *Multi-language glossary of permafrost and related ground-ice terms*. National Snow and Ice Data Center, Boulder, USA. (also available at: https://globalcryospherewatch.org/reference/glossary_docs/Glossary_of_Permafrost_and_Ground-Ice_IPA_2005.pdf)
- Voigt, C., Marushchak, M.E., Abbott, B.W., Biasi, C., Elberling, B., Siciliano, S.D., Sonnenntag, O., Stewart, K.J., Yang, Y. & Martikainen, P.J.** 2020. Nitrous oxide emissions from permafrost-affected soils. *Nature Reviews Earth & Environment*. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0063-9>
- Voigt, C., Marushchak, M.E., Lamprecht, R.E., Jackowicz-Korczyński, M., Lindgren, A., Mastepanov, M., Granlund, L., Christensen, T.R., Tahvanainen, T., Martikainen, P.J. & Biasi, C.** 2017. Increased nitrous oxide emissions from Arctic peatlands after permafrost thaw. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(24): 6238–6243. <https://doi.org/10.1073/pnas.1702902114>
- Walter Anthony, K.M., Zimov, S.A., Grosse, G., Jones, M.C., Anthony, P.M., Chapin III, F.S., Finlay, J.C., Mack, M.C., Davydov, S., Frenzel, P. & Frolking, S.** 2014. A shift of thermokarst lakes from carbon sources to sinks during the Holocene epoch. *Nature*, 511: 452–456. <https://doi.org/10.1038/nature13560>
- Welch, C.** 2019. Climate change has finally caught up to this Alaska village. *National Geographic*. (also available at <https://www.nationalgeographic.com/science/2019/10/climate-change-finally-caught-up-to-this-alaska-village/>).
- WMO.** 2020. *Reported new record temperature of 38 °C north of Arctic Circle* [online]. [Cited 1 August 8AD]. <https://public.wmo.int/en/media/news/reported-new-record-temperature-of-38%C2%B0c-north-of-arctic-circle>



旱地

10. 旱地

Carlos O. Cruz-Gaistardo¹, Juan F. Gallardo-Lancho²,
Marijana Kapović Solomun³, Darya Vasilieva⁴, Juan C. Rey-Brina⁵,
Claudia Marques-dos-Santos Cordovil⁶, Peter Koncz⁷,
Ana F. González-Pedraza⁸, Skye Wills⁹, Juan J. Ibáñez-Martí¹⁰, Silvia
Chersich¹¹, Jesús G. Pimentel-Coello¹², Miriam Muñoz-Rojas¹³

¹ National Institute of Statistics and Geography (Retired), Mexico

墨西哥國家統計和地理研究所（已退休）

² Superior Council of Scientific Investigations, IRNASa. (Retired), Spain

西班牙薩拉曼卡自然資源與農業生物研究所科學研究高級委員會（已退休）

³ University of Banja Luka, Faculty of Forestry, Republic of Srpska, Bosnia-Herzegovina

波士尼亞與赫塞哥維納塞族共和國巴尼亞盧卡大學森林學院

⁴ Samara State Technical University, Russia

俄羅斯薩馬拉國立技術大學

⁵ National Institute of Agricultural Research, Venezuela

委內瑞拉國家農業研究院

⁶ University of Lisbon, School of Agriculture, Forest Research Center, Lisboa, Portugal

葡萄牙里斯本大學農學院森林研究中心

⁷ Duna-Ipoly National Park Directorate, Hungary

匈牙利多瑙河-伊波利國家公園管理局

⁸ Universidad de Pamplona, Faculty of Agricultural Sciences, Colombia

哥倫比亞潘普羅納大學農業科學學院

⁹ Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, United States

美國自然資源保育局國家土壤調查中心

¹⁰ Superior Council of Scientific Investigations, National Museum of Natural Sciences, Spain

西班牙國家自然科學博物館科學研究高級委員會

¹¹ University of Milano-Bicocca, Italy

義大利米蘭比科卡大學

¹² Atlantic Coast and Pacific Fertilizers, Mexico

墨西哥大西洋沿岸與太平洋肥料中心

¹³ University of New South Wales, Centre for Ecosystem Science, Australia

澳洲新南威爾士大學生態系統科學研究中心

1. 定義與說明

人們期望土壤中的碳固存能夠做為一座可減低碳排放增加衝擊的過渡橋梁，直到我們能獲得足夠乾淨和高效的技術來取代燃燒化石燃料（Lal, 2004; Smith, 2004）。

針對土壤復育和植被覆蓋管理措施可以對土壤有機碳（soil organic carbon）固存和提供生態系統服務產生正面影響，尤其是對於生活在旱地的人們以及特別易受到退化

影響的小農生產者，已有提出相關建議（Thomas, 2008）。藉由復育退化的旱地來捕獲土壤有機碳是至關重要的，特別是對於相關措施在技術和社會經濟上可實行的地區而言（FAO, 2002）。由於旱地因退化而造成的歷史損失遠遠超過復育可達的最大點，因此旱地的碳固存潛能力相當高（United Nations, 2011）。

為確定旱地能土壤有機碳固存潛力的貢獻，根據 33 項地方研究和九項區域研究的資訊，提出了一個由下而上的統合分析，其測量期或預測期足夠久（ 34 ± 23 年），得以反映土壤有機碳儲存的年度變化，並回應不同管理措施和不同環境條件下的土地利用情況。在本研究中，根據 UNEP-WCMC (United Nations Environment Programme-World Conservation Monitoring Centre; Sørensen, 2007) 的旱地表面，比較其他具有高度一致性（有交集的地理區域）但具有不同劃定方法的可用來源（Trabucco and Zomer, 2019; Sayre et al., 2020），量化土壤有機碳的固存潛力。這些方法使用（不同的精度和廣度）由聯合國環境規劃署（United Nations Environment Program）制定的乾燥指數（Aridity Index, AI）多種間距；而此指數間距表示年降水量（annual precipitation）和潛在蒸發散量（Potential EvapoTranspiration, PET）之間的無因次（dimensionless）關係（Trabucco and Zomer, 2019）。AI=0.65 是將地球上的土地分為兩類：乾燥（dry）與潮濕（humid），即被稱為乾域（dry domain）和濕域（humid domain）。乾域有四個亞類：超乾旱（hyper-arid）、乾旱、半乾旱（semi-arid）和次濕（sub-humid），分別對應於 AI=0.05、0.2、0.5 和 0.65 的上限間距（Cherlet et al., 2018）。

2. 全球熱點分布

全球各地對旱地的分布沒有絕對的共識，而旱地面積可以從 Köppen (1931) 指出的 26.3%，到聯合國生物多樣性公約〔The United Nations Convention of Biological Diversity, UNCBD (2007)〕指出的 52.3% 不等。旱地分布的差異是由於負責促進旱地知識與保育的組織有不同的概念和目標，因而有所分歧。聯合國防治荒漠化公約（The United Nations Convention to Combat Desertification, UNCCD）排除超乾旱地區（AI<0.05），因為超乾旱地區是不易發生沙漠化（desertification）的地區（Zdruli, Kapur and Celik, 2010）。同時，聯合國生物多樣性公約則不僅考慮超乾旱生態系統，還考慮其他濕度較高的生態系統（AI>0.65），而這些系統在功能上是相互關聯，在某些情況下也很難與旱地分開（Sørensen, 2007）。

1977 年，聯合國防治荒漠化會議（United Nations Conference on Desertification, UNCOD）通過了防治荒漠化行動方案（Plan of Action to Combat Desertification, PACD）。儘管已有這樣和其他的努力，聯合國環境規劃署仍促成各種世界乾旱地圖的製作。首批乾旱地圖的其中之一是第一版世界荒漠化地圖集（World Desertification Atlas），由東安格里亞大學（University of East Anglia）的氣候研究單位（Climate Research Unit, CRU）和聯合國開發計畫署（United Nations Development Program, UNDP）的全球資源資訊資料庫（Global Resource Information Database, GRID）共同創製（Harris et al., 2014）。基於此地圖集的資訊，2000 年的千禧年生態系統評估（Millennium Ecosystem Assessment）定義旱地的範圍界限；隨後，一些作者則更新此資訊，以提高熱帶乾旱和次濕森林及沙漠定義界限的精確性（Miles et al., 2006），或在生態區方法下納入關於旱地的額外資訊（Sørensen, 2007）。

現有三張地圖在關於全球旱地分布上是相類似的：第一張地圖是由世界保護監測中心 (World Conservation Monitoring Center)，根據乾燥指數和生態區之間的功能標準所更新的地圖 (UNEP-WCMC 地圖，由 Sørensen 於 2007 年製作)；第二張是由國際農業研究諮詢組織的空間資訊協會 (Consultative Group on International Agricultural Research-Consortium for Spatial Information, CGIAR-CSI) 完全根據乾燥指數製作而成的地圖 (由 Trabucco 和 Zomer 在 2009 年製作，並於 2019 年更新)，此地圖有被收錄於第三版的世界荒漠化地圖集中 (2018 年的 UNEP-EC 地圖；European Commission, EC 歐盟執行委員會)；第三張全球旱地地圖 (USGS-ESRI 地圖) 是美國環境系統研究所公司 (Environmental Systems Research Institute, ESRI)、大自然保護協會 (Nature Conservancy) 和美國地質調查局 (United States Geological Survey, USGS) 所建構的世界陸地生態系統平臺 (World Terrestrial Ecosystems platform) 之一部分 (Sayre et al., 2020)，但這張乾旱地圖只根據乾燥指數的兩個主要間距製成 (0.2 及 0.65 上限間距) (圖 25)。

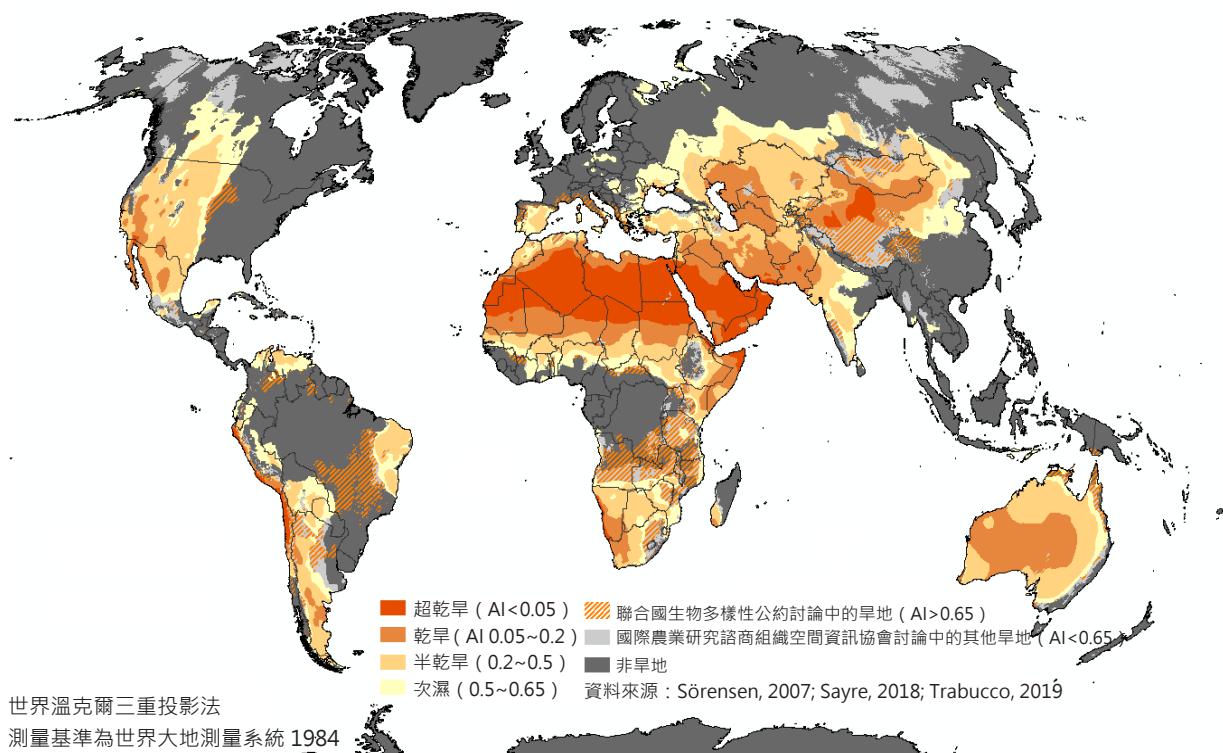


圖 25. 根據乾燥程度和其他標準 (由資訊來源所使用) 所製成的世界旱地分布圖

根據 UNEP-WCMC 全球乾旱地圖 (Sørensen, 2007)，旱地面積為 6120 萬平方公里，佔陸地表面的 41.7%，而根據其他資料來源，全球旱地面積則為 6550 萬平方公里 (Sayre et al., 2020, USGS-ESRI 地圖) 或 6640 萬平方公里 (Trabucco and Zomer, 2019, CGIAR-CSI 地圖) (表 21)。

表 21. 按照乾燥指數定義的全球旱地面積 (依不同地圖來源)

乾旱度	AI	Sorensen, 2007 (UN-EP-WCMC)		Sayre, 2018 (USGS-ESRI)		Trabucco, 2019 (CGIAR-CSI)	
		百萬平方公里	% 面積	百萬平方公里	% 面積	百萬平方公里	% 面積
超乾旱	<0.05	9.8	6.7			11.0	7.5
乾旱	0.05 ~0.2	15.7	10.7	11.6	7.9	18.0	12.3
半乾旱	0.2~0.5	22.7	15.4			24.2	16.5
乾燥次濕	0.5 ~0.65	13.1	8.9	53.9	36.7	13.2	9.0
總計 旱地		61.2	41.7	65.5	44.6	66.4	45.3

資料來源：Sorensen (2007), Sayre et al. (2020) and Trabucco and Zomer (2019)

注：面積比例是根據世界陸地總面積（1 億 4670 萬平方公里）所計算。

3. 全球碳庫存和額外碳儲量的潛力

3.1. 全球土壤有機碳庫存

旱地具有難以置信的多樣性。即使在最不適居住的沙漠，如阿他加馬 (Atacama) 或納米比亞 (Namibia)，土壤中的呼吸和蒸散過程，在河岸帶、泉水、海灘和裸露土壤區域間不同的，而這種多樣性使估計土壤有機碳存量的大小以及損失率或吸收率變得複雜 (Goudie, 2013)。決定土壤有機碳累積程度的一些因素取決於當前的土地利用〔如微起伏 (micro-relief) 和植物結構〕，相照之下，其他因素則取決於地質歷史 (例如：黏土的質地或礦物質成分) (Hong et al., 2020) (表 22)。根據世界旱地地圖 (UNEP-WSCS) 與土壤有機碳世界地圖 (FAO and ITPS, 2020)，旱地在前 30 公分深度的碳儲存量為 2161 億噸碳 (世界平均為 35.3 ± 18.3 噸碳 / 公頃)，此一儲存量佔同一深度之世界土壤有機碳存量 (7550 億噸碳) 的 28.6% (Batjes, 2016)。而在累積總量中，熱帶旱地為 388 億噸碳，亞熱帶旱地為 319 億噸碳，暖溫帶 (warm temperate) 旱地為 271 億噸碳，冷溫帶 (cool temperate) 旱地為 839 億噸碳，寒帶旱地為 314 億噸碳，極地旱地為 31 億噸碳 (表22)。

表 22. 依照乾燥程度、溫度狀況 (temperature regime) 與地貌劃分旱地的總面積和土壤有機碳含量

乾燥度	氣候區	百萬平方公里	土壤有機碳			地貌 (噸土壤有機碳 / 公頃)			
			噸 / 公頃	標準差	10 億噸	平原	丘陵	山地	臺地
超乾旱	熱帶	5.0	13.1	4.1	6.6	3.4	1.0	0.5	0.1
	亞熱帶	3.9	13.5	5.2	5.3	2.3	0.9	0.5	0.3
	暖溫帶	0.5	22.9	6.8	1.1	0.2	0.1	0.2	0.0
	冷溫帶	0.3	29.0	8.1	0.9	0.1	0.1	0.1	0.0
	寒帶	0.0	46.0	7.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	極地	0.0	53.3	21.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
小計		9.8	14.2			5.9	2.1	1.3	0.5
乾旱	熱帶	4.5	17.6	8.6	7.9	3.6	0.5	0.4	0.1
	亞熱帶	5.5	17.4	8.1	9.6	3.5	0.8	1.0	0.2
	暖溫帶	2.8	18.6	11.3	5.3	1.5	0.4	0.9	0.1
	冷溫帶	2.7	32.3	12.6	8.7	1.3	0.7	0.5	0.1
	寒帶	0.1	51.5	14.9	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0
	極地	0.1	68.4	28.4	0.6	0.0	0.0	0.1	0.0
小計		15.7	32.5			9.9	2.4	2.9	0.5

乾燥度	氣候區	百萬平方公里	土壤有機碳			地貌 (噸土壤有機碳 / 公頃)			
			噸 / 公頃	標準差	10 億噸	平原	丘陵	山地	臺地
半乾旱	熱帶	5.1	25.0	12.3	12.8	3.6	0.9	0.4	0.2
	亞熱帶	3.8	26.9	14.1	10.3	2.1	0.7	0.8	0.2
	暖溫帶	4.7	29.6	18.3	14.0	1.6	0.9	1.9	0.3
	冷溫帶	7.6	53.6	34.2	41.0	3.3	1.7	2.2	0.5
	寒帶	1.2	68.9	31.5	8.1	0.1	0.3	0.6	0.1
	極地	0.1	95.8	50.2	1.3	0.0	0.0	0.1	0.0
	小計	22.7			87.5	10.8	4.6	6.0	1.3
乾燥次濕	熱帶	3.1	37.3	19.7	11.5	1.6	0.9	0.4	0.1
	亞熱帶	1.7	40.6	19.9	6.7	0.6	0.3	0.6	0.1
	暖溫帶	1.7	40.2	18.7	6.7	0.7	0.2	0.6	0.1
	冷溫帶	4.3	78.0	42.8	33.3	2.0	0.9	0.9	0.4
	寒帶	2.3	99.4	50.2	22.6	1.2	0.5	0.4	0.2
	極地	0.1	88.4	73.0	1.1	0.0	0.0	0.1	0.0
	小計	13.1			81.9	6.2	2.9	3.0	1.0
所有旱地		61.2	35.3		216.1	32.8	11.9	13.2	3.3

資料來源：Sorensen (2007), Sayre et al. (2020) and Trabucco and Zomer (2019)

氣候、海拔、土地坡度和土壤類型是決定旱地土壤有機碳存量大小和分布的一些因素。通常，在海拔和坡度百分比較高的地景中，土壤有機碳密度較高。而當土壤的水分可用性較高，且人類和牛群較難接近時，土壤有機碳的增加會更為顯著。沙質土壤〔如砂質土（Arenosols）〕、未開發的土壤〔如乾燥風積土（Aridic Regosols）〕和嚴重退化的土壤〔如一些致密黏盤土（Densic Planosols）或有鈉表層的鹼土（Nudi-natric Solonetz）〕的土壤有機碳密度較低。高有機質土〔如腐植灰燼土（Humic Andosols）〕，即由重新沖洗的風積物（aeolian sediments）〔黃土（loess）〕或是由平坦或輕微起伏草原的淋積黏土堆積所形成的土壤，其在冬冷夏熱的環境中〔如淋溶黑鈣土（Luvic Chernzems）〕構成最密集的土壤有機碳儲備（圖 26）。

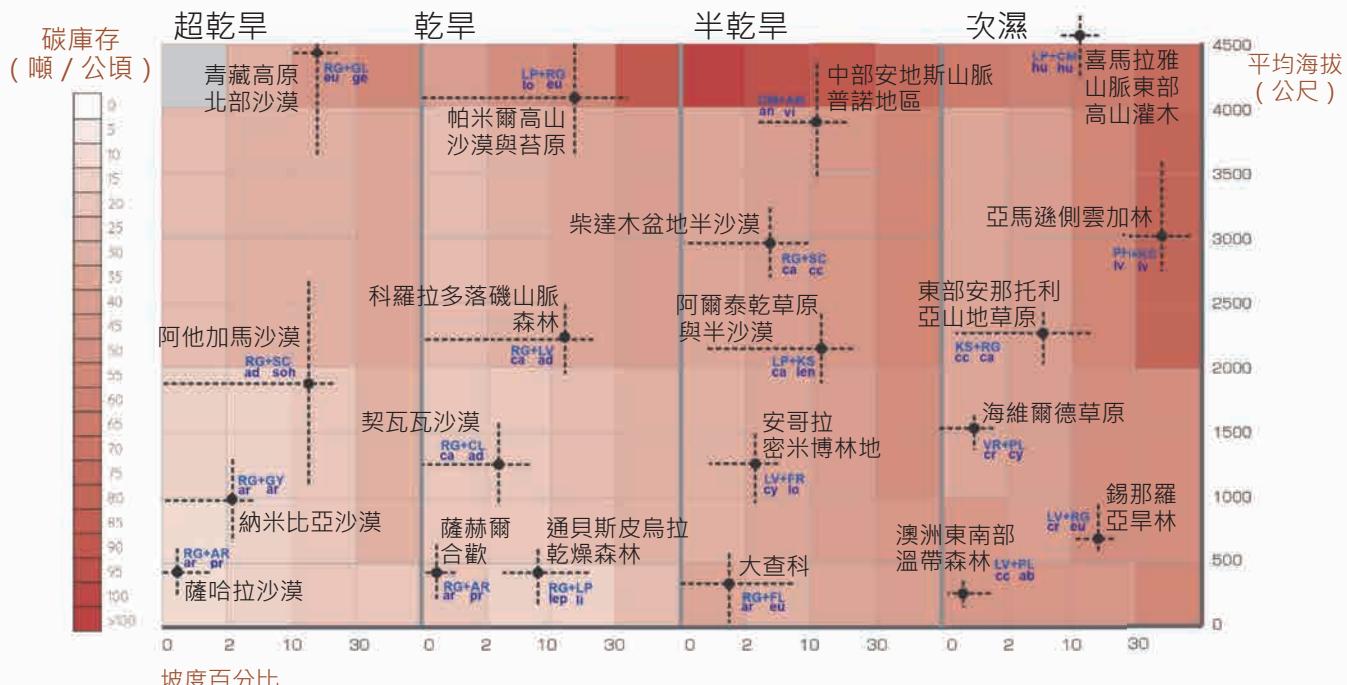


圖 26. 全球旱地土壤有機碳儲存的規模和分布概況 (至深度 30 公分)

本圖依照乾燥程度劃分，顯示一些代表性生態區的地形（海拔、坡度）和主要土組及土壤限定詞（根據 World Reference Base, 2014）。（資料來源：Sørensen, 2007; FAO and ITPS, 2020）

西藏乾草原有機土壤的土壤有機碳強度（194 克碳 / 公斤土壤）是巴西大西洋沿岸森林（Atlantic Forest）富含鐵的礦質土（16 克碳 / 公斤土壤）之 12 倍。然而，大西洋沿岸森林的土壤容積密度（1.65 噸 / 平方公尺）比西藏的土壤（0.14 噸 / 平方公尺）高 12 倍，這表示兩者土壤有機碳儲存是相等的，而西藏的土壤與數百萬年前形成的巴西土壤有完全不同的累積過程（Driessen et al., 2001; FAO and ITPS, 2020）。

另一方面，由於次級碳酸鹽位移作用 (secondary carbonate translocation) 的系統過程，最大面積的土壤無機碳沉積是在旱地 (Sombroek, Nachtergaele and Hebel, 1993; Batjes, 1999)。而無機碳的固定是透過重碳酸鹽 (HCO_3^-) 進入地下水和封閉系統而發生 (Driessens et al., 2001)。一些作者指出，碳酸鹽 (carbonate) 結合潛力有助於捕獲旱地區域的碳，可高達 2.6 億噸碳 / 年 (Dumanski et al., 2006)。

表 23. 各土地利用類別的旱地總面積與土壤有機碳庫存 (依照乾燥指數與溫度等級來劃定)

乾燥度	氣候區	共計		森林		耕地		草原		灌木叢		稀疏 / 無		雪-冰		定居地	
		百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃
超乾旱	熱帶	500.5	13.1	0.5	21.6	4.8	16.9	1.0	25.3	4.0	25.1	489.5	12.9	0.0	ns	0.8	13.9
	亞熱帶	393.9	13.5	0.5	37.2	5.5	20.2	0.7	37.3	3.9	20.2	382.3	13.3	0.0	ns	1.1	22.3
	暖溫帶	49.8	22.9	0.1	16.4	0.4	35.0	1.8	28.1	2.2	17.7	45.1	22.8	0.0	ns	0.1	19.3
	冷溫帶	32.6	29.0	0.0	ns	0.2	41.7	2.9	35.6	0.3	26.2	29.2	28.3	0.0	ns	0.1	37.6
	寒帶	2.2	46.0	0.0	ns	0.0	ns	0.7	50.2	0.0	ns	1.5	44.0	0.0	ns	0.0	ns
	極地	1.6	53.3	0.0	ns	0.0	ns	0.4	57.9	0.1	28.8	1.1	53.1	0.0	ns	0.0	ns
	平均值	14.4		28.5		19.7		35.2		21.8		14.1		ns		19.4	
乾旱	熱帶	448.6	17.6	10.0	26.5	47.1	21.5	61.8	17.2	60.6	24.2	268.7	15.1	0.0	ns	0.3	23.3
	亞熱帶	548.3	17.4	11.2	34.8	18.0	24.9	82.4	20.5	62.8	15.6	373.3	16.2	0.0	ns	0.6	18.9
	暖溫帶	283.9	18.6	5.1	38.3	24.2	26.0	22.5	24.0	63.2	18.4	168.5	16.3	0.0	ns	0.4	18.2
	冷溫帶	268.1	32.3	1.8	28.2	14.2	46.1	55.4	38.1	15.8	24.3	180.7	30.1	0.0	ns	0.2	49.1
	寒帶	11.2	51.5	0.3	78.2	0.5	72.2	3.3	56.0	0.7	62.4	6.6	45.5	0.0	ns	0.0	ns
	極地	8.8	68.4	0.2	106.7	0.1	78.0	2.7	58.6	1.5	76.1	4.0	66.7	0.3	117.9	0.0	ns
	平均值	20.7		33.0		26.8		25.2		20.3		18.8		117.9		23.6	
半乾旱	熱帶	514.6	25.0	52.0	37.1	195.3	21.8	47.6	21.0	137.0	29.0	81.6	20.3	0.0	ns	1.2	24.8
	亞熱帶	382.0	26.9	53.7	37.8	67.1	28.4	48.9	24.6	153.4	25.7	57.4	20.4	0.0	ns	1.4	25.0
	暖溫帶	474.5	29.6	47.2	42.9	139.3	34.1	54.8	29.6	145.6	24.9	83.4	22.4	0.0	ns	4.3	32.7
	冷溫帶	764.4	53.6	82.2	64.7	249.2	70.5	216.9	47.0	85.3	29.9	128.6	40.4	0.0	ns	2.2	75.4

乾燥度	氣候區	共計		森林		耕地		草原		灌木叢		稀疏 / 無		雪-冰		定居地	
		百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃	百萬公頃	噸 / 公頃
乾燥的次濕	寒帶	117.6	68.9	50.7	73.8	14.1	73.6	28.4	68.5	2.3	71.1	22.0	54.9	0.0	ns	0.1	103.0
	極地	13.4	95.8	2.2	158.5	1.0	87.5	4.9	84.2	1.5	77.8	2.8	84.7	1.0	81.5	0.0	ns
	平均值		38.6		53.4		44.5		40.9		27.4		30.2		81.5		41.3
	小計	2266.5		287.9		666.1		401.5		525.0		375.7		1.0		9.1	
乾燥的次濕	熱帶	308.0	37.3	118.0	46.4	115.9	30.9	10.4	32.5	61.3	33.0	1.4	35.6	0.0	ns	1.1	30.7
	亞熱帶	166.2	40.6	59.7	47.1	39.4	36.8	14.8	33.8	50.5	38.0	1.1	33.9	0.0	ns	0.8	36.1
	暖溫帶	165.6	40.2	22.3	49.3	100.1	39.4	15.5	39.8	16.5	37.8	7.0	28.7	0.0	ns	4.2	38.2
	冷溫帶	427.0	78.0	127.6	78.9	225.6	82.1	46.1	62.8	11.8	77.8	10.7	50.9	0.1	122.4	5.0	70.1
	寒帶	226.9	99.4	182.1	95.9	12.3	94.6	5.4	102.5	21.2	131.3	5.7	102.8	0.1	42.6	0.2	54.3
	極地	12.3	88.4	1.0	191.4	0.1	15.0	3.0	85.6	1.1	117.5	6.0	38.9	1.1	160.8	0.0	ns
	平均值		62.7		72.7		58.1		54.2		51.7		51.7		147.2		51.8
	小計	1306.0		510.8		493.3		95.0		162.4		31.9		1.4		11.2	
平均值			35.3		48.3		38.9		38.8		29.9		29.3		91.8		35.5
共計		6122.0		828.4		1274.5		732.0		902.5		2358.1		2.7		23.9	

資料來源：Sorensen (2017), Sayre et al. (2020), FAO and ITPS (2020), Trabucco and Zomer (2019)

NS= 無顯著差異

3.2. 額外的土壤有機碳儲量潛力

土壤有機碳庫存的耗盡已造成世界歷史性的虧損 (780 ±120 億噸碳) ，然而自相矛盾地是，目前正是一個復原的良機 (Lemus and Lal, 2005) 。而此土壤有機碳儲量的減少主要是由於土壤退化和管理不當所造成。

哥白尼全球土地服務 (Copernicus Global Land Spot) 衛星於 1999~2013 年期間，以每 10 天的間隔和 1 公里的解析度，監測各種植被指數〔標準化植被指數 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 〕，所獲得的資訊證實 14.8% 的

旱地表面生產力正持續下降中，也就是說，旱地維持穩定生產力的能力呈現嚴重的停滯（Cherlet et al., 2018）。

扭轉這一負面趨勢的策略可以是全球每年在土壤的碳固存，約 8 ± 4 億噸碳（Lal, 2004），這等同於 2007~2016 年期間化石總排放量（ 94.6 ± 5 億噸碳 / 年）的 8.5%，或超過土地利用變化和森林砍伐排放量（ 15 ± 7.1 億噸碳 / 年）的一半（World Meteorological Organization, 2020）。

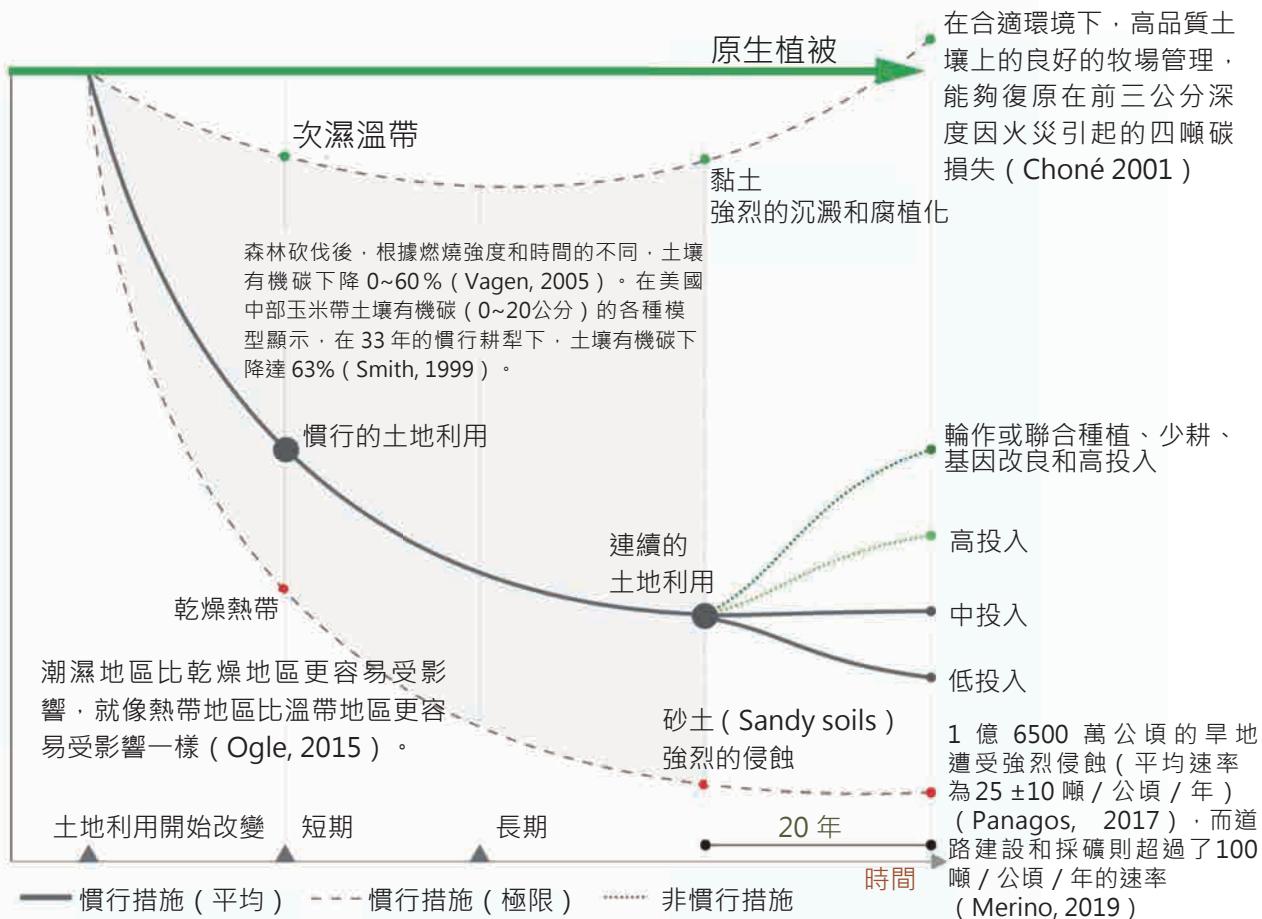
只有透過更好的生產系統來管理土壤，才有可能扭轉旱地表面生產力下降的趨勢：優化耕犁和休耕時間、負責任且有道德地使用灌溉和肥料、使用作物殘餘物和覆蓋作物、對水文氣象和市場風險採取更好的預防措施，同時要不斷修復樹木和灌木的地面覆蓋。因最退化的土壤有高復育門檻（退化造成 $58 \pm 8\%$ 的土壤有機碳歷史損失），當為其實行上述這些保育和復育措施時，作用將會特別明顯（Lal, 2004），另外，依據導致現有退化的情況來看，復育的有效性來自於各種措施的結合應用（Carvalho and Lourengo, 2014）。

最大的農用旱地面積是在半乾旱地區；然而，次濕地區的退化農業用地具有最顯著的捕獲潛力。而原因之一是，由於次濕地區土壤有更多的微生物活動和大量的土壤動物以及其他有利的非生物因素（García-Oliva et al., 2006），如平均林冠覆蓋率，所以次濕地區土壤的枯枝落葉分解率（ $0.45 \sim 2.00$ 克碳 / 年）高於旱地（ $0.001 \sim 0.44$ 克碳 / 年），幾乎比半乾旱地區高四倍。

另一個原因是，次濕地區的離復育門檻距離遠多過半乾旱地區。而這樣的差距是由於次濕地區的火災強度和頻率都較大，且該地區的森林砍伐和侵蝕率亦較高（表 24）。

短期和長期的固存潛力會受到各種因素影響：退化基準線（到復育門檻的距離）、氣候變化的強度和方向（Pataki et al., 2003）、複雜的土地管理（Zdruli et al., 2017），以及生態系統的自然異質性（海拔和緯度、形狀、地勢的崎嶇不平）（Thompson and Kolka, 2005），包括發生在土壤深度一公尺的物理和生物化學過程（Driessen et al., 2001）（圖 27）。

土壤有機碳儲量的變化



資料來源：IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change，政府間氣候變化專門委員會) 方法的概念框架，使用下列資料：Althof, 2015; Alvarez et al., 1998; Ardo, 2004; Baez et al., 2017; Bessam Mrabet, 2003; Chan, 1992; Dalal et al., 1995; FAO, 2004; FAO, 2020; Farage et al., 2007; Gomez et al., 1995; Gonzalez, 2020; Helyar et al., 1997; Hong, 2020; Horner et al., 1960; Madeira et al., 2012; Merino, 2019; Pinter, 2008; Reeder and Shuman, 2002; Shuman, 2009; Singh et al., 1998; Tarre et al., 2001; Tschakert, 2004

圖 27. IPCC (2019) 方法的概念框架

長期耕作通常會使原生植被下的土壤有機碳量有很可觀的流失。非慣行措施和高投入可以改變旱地土壤有機碳的長期損失。此圖解顯示，在潮濕、黏質和健康的土壤中，土壤有機碳的穩定性高於乾燥、砂質和受侵蝕的土壤 (McSherry and Ritchie, 2013)

估算法

為進行土壤有機碳全球性的評估，透過估算法人為干預最少的條件下之歷史土壤有機碳庫存 (SOC_0)，以及估算在不同參照情況 (H) 下，因土地管理或土地利用變化而導致的目前土壤有機碳庫存 (SOC_{0-T})，進而獲得土壤有機碳固存潛量 (ΔC) (根據 IPCC, 2019 公式 2.24)。

$$\Delta C = \sum H_{A \gg F} [(SOC_0(h_n) - SOC_{0-T}(h_1)) / D]$$

其中 SOC_0 值代表，從引入非慣行措施開始 ($h=1 \gg n$)，在最後一年測量的有機碳儲存，而 SOC_{0-T} 值是在第一年測量的土壤有機碳儲量 (Ogle, Breidt and Paustian, 2005)。D 是時間相依 (time dependence) 的礦質土壤有機碳庫存變化因子，是各平衡土壤有機碳值間的預設時間長，通常為 20 年。

H 值代表參照情況：海拔、地貌、乾燥指數和土壤類型 (Eve et al., 2002) ，而各參照情況對非慣行土地管理皆有相應的修正因數 (correction factors) (Ogle, Breid and Paustian, 2005)。H值包括四種乾燥指數 (H_A) 、10 種海拔範圍 (H_B) 、五種溫度區 (H_C) 和四種等級的地形 (H_D) (表21)；另外還包括七種土地覆蓋類型 (H_E) (表22) 和 21 種主要的土類 (H_F)。在此評估中，所有光柵格式 (raster format) 的資料集皆按其原始空間解析度 (30~1000 公尺) 進行向量化 (vectorized)。表格式的結果是透過簡單的相交和使用提取子集 (34.2 萬個系統點) 「向上」縮放來產生。

大規模的證據

實施國家與跨國特大生態復育計畫 (面積超過 100 萬公頃)，常伴隨一系列旨在固存土壤有機碳的管理措施，而改善生態系統服務，諸如防治土壤侵蝕、保留水分、緩解乾旱和保護生物多樣性 (Wang et al., 2016; Xu et al., 2017)。

最早的成功經驗之一是在前蘇聯實行的植樹、草–田間作物輪作和無結構鹼土 (alkaline structureless soils) 修復計畫 (1949~1965)；此計畫在受乾旱影響的地區種植約 400 萬公頃的森林 [綿延 5300 公里的森林防風林 (windbreaks)]，有助於改善 1.2 億公頃土地上的氣候和土壤形成條件，促進農業發展 (Kovda, 1952)。據專家估計，此計畫幫助在木本生物量和土壤中，儲存約 1000 億噸的碳，其效果在前蘇聯共和國的南部地區 (烏克蘭、摩爾多瓦、俄羅斯、哈薩克和中亞) 仍然相當明顯。

目前，中國正在其 16% 的領土上正展開六個超大型復育計畫，可促成全國 56% 的碳匯 (1 億 3200 萬噸碳 / 年) 產生 (Lu et al., 2018)，而其中一個計畫幾乎完全在旱地上進行：三北防護林工程 (全名為 Three-North Shelter Forest Program，簡稱 North Shelter Forest) (從 1978~2050 年)，更為人熟知的名稱為「中國北方的綠色長城」 (Green Wall of North China)，其目標是遏制戈壁沙漠 (Gobi desert) 擴張，以及遏止沙塵暴逐漸侵入可耕地與該地區的城市地區 (Gelken, 2009)。直到 2010 年種植了 540 萬公頃的本地樹木，而在過去 10 年中，生物量增加 19.3 噸碳 / 公頃 / 年，礦質土則增加 3.2 噸碳 / 公頃 / 年 (Lu et al., 2018)。

另一個例子是非洲綠色長城計畫 (Great Wall African initiative)，本計畫已經復育 2000 萬公頃的土地，並創造 200 萬個綠色就業機會，而計畫範圍主要擴及衣索比亞、奈及利亞、塞內加爾和蘇丹。如果參與該計畫的國家保持目前的復育速度，截至 2030 年之前，木本生物量中的有機碳固存量可增加至七萬噸碳，而土壤中的有機碳固存量可增加至 1 萬 5000 噸碳 (UNCCD, 2020)。

在合適的溫度和濕度條件下，源自乾旱地區經濟或社會衝突的大型人為現象，可以產生大量的土壤有機碳。在 1993~2010 年間的蘇聯經濟崩潰中，高達 6000 萬公頃 (± 1420 萬公頃) 的次濕和半乾旱農田被廢棄 (Lesiv et al., 2018)，而根據 Orchidee-Stics-C-N 循環模擬模型 (Orchidee-Stics-C-N Cycle simulation model)，其間接促成超過一億公噸土壤有機碳的復育 (2.9 ± 1.7 噸 / 公頃 / 年) (Vuichard et al., 2008)。

表 24. 依照乾燥指數和退化係數劃分的退化旱地面積

乾燥度	面積 百萬平方公里	2000~2019 年的樹木覆蓋			2018~2019 年的火災 面積 (%)	水逆境 (water stress)		肥力損失 面積 (%)	侵蝕 噸 / 公頃 / 年	強烈的侵蝕性 ^{/1} 面積 (百萬公頃)
		林冠 (%)	面積 (百萬公頃)	森林損失 (%)		面積 (%)	面積 (百萬公頃)			
超乾旱	9.8	0.0	0.0	0.0	1.1	44.8	21.9	2.2	nd ^{/2}	6.1
旱地	15.7	0.4	1.8	0.1	6.0	29.1	301.3	19.2	1.7	25.7
半乾旱	22.7	6.9	27.5	1.2	20.1	34.6	523.5	23.1	1.9	65.0
乾燥的次濕	13.1	25.8	43.7	3.3	32.9	23.0	240.2	18.4	2.6	66.1

資料來源：Hansen et al. (2013), NASA (2020), Cherlet et al. (2018), Sorensen (2007), JRC (2019)

^{/1} 強烈的侵蝕表示侵蝕速率大於 10 噸 / 公頃 / 年；

^{/2} 非決定性的。

具體證據

附錄 1 列出了目前在 33 本科學出版物中獲得的測量結果呈現，有足夠長的測量期或預測期 (34 ±23 年) 之土壤有機碳變化研究，而其變化是因採用或轉換非慣行措施所造成。當土壤有機碳變化是從 0~20% (全部的 1 / 5) 變成 60~80% (全部的 4 / 5) (固存率低於 2.0 噸碳 / 公頃 / 年)，才會被視為土壤有機碳有改變的證據。

為完善計算過程，將 54 種非慣行措施的資料做編碼處理，產生 10 種農牧業管理類別：耕作系統 (h_1)、休耕 (h_2)、耕犁 (h_3)、施用有機肥料 (h_4)、施用無機肥料 (h_5)、作物殘餘物 (h_6)、灌溉管理 (h_7)、風險防治 (h_8)、放牧管理 (h_9) 以及喬木 (arboreal) 和灌木覆蓋的修復 (h_{10})。

分析報告

有兩種方法用於比較土壤有機碳儲存含量的變化：第一種方法是比較交換率 (以噸碳 / 公頃 / 年表示)，這可以量化土壤有機碳固存的總潛力 (ΔC)，並可以辨認出最有利的環境措施和土壤有機碳固存條件 (圖 28)；第二種方法是比較每年的土壤有機碳增加係數 (無因次值)，如此便可以在不考慮初始儲存規模的情況下，比較非慣行措施的有效性 (圖 29)。

環境措施和條件對土壤有機碳庫存的影響

根據現有資料並考慮到環境條件和農業管理形式的巨大差異，「非慣行」措施的土壤有機碳固存潛力在 0.04~0.59 噸碳 / 公頃 / 年之間。而無機質肥料使用則能為土壤有機碳，組成最多變的管理策略，使其潛力達 0.21 ± 0.33 噸碳 / 公頃 / 年。

根據本次分析所獲資料，農業中最大有可為的土壤有機碳固存措施是有機糞肥、植物殘留物管理和休耕。在畜牧業中，最有效的措施則是放牧管理和改善牧草地 (Gallardo, 2016)。透過混合多物種的使用來增強生物多樣性是牧場改善的例子之一 (Sebastia et al., 2018)，在某些情況下，草原和耕地中土壤有機碳的累積會超過初始水準。

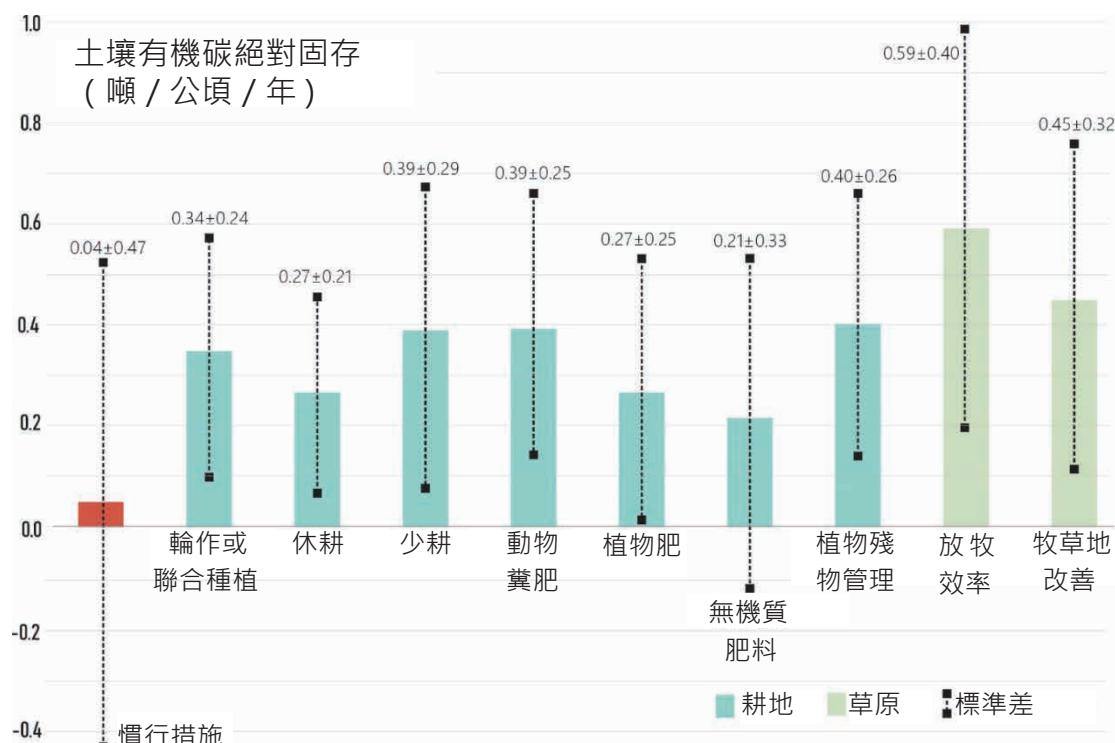


圖 28. 在非慣行措施處理的土壤，以及經過慣行措施處理的土壤（即參照土壤），在20年內的土壤有機碳絕對增加量（噸 / 公頃），根據附錄 1 中的相關資料所估算



圖 29. 經在非慣行措施處理的土壤，以及經慣行措施處理的土壤（即參照土壤），在 20 年內的土壤有機碳的相對增加量（基準係數），根據附錄 1 中的相關資料所估算
基準係數係指與原生或傳統系統相比的相對土壤碳儲量 (Ogle, Breidt and Paustian, 2005)，用於計算長期耕作（即 20 年）後，與原生參照條件間的相對儲量變化

旱地的全球潛力

土壤有機碳的恢復通常是一個緩慢的過程，依其系統的碳平衡，可能持續數十年至數百年之久 (Bai et al., 2008)。考慮到 1 / 5 的旱地在過去 20 年中，已保持、採用或改進其土壤管理措施 (FAO, 2002 引用 IPCC, 2000)，全球固存量或能達到 52 億噸碳 (2020~2040 年，在前 30 公分深度)。如果我們考量現有的資料集和所有速率低於 2 噸碳 / 公頃 / 年的報告之平均值，可以推算出全球旱地的平均潛力為 0.26 噸碳 / 公頃 / 年 (表 25 、表 26 和圖 30)。

表 25. 按照乾燥指數劃分，在非慣行農業和畜牧業系統下，全球潛在復育土壤有機碳量（深度 30 公分），以每年與實行 20 年後來計算

土地利用	乾燥指數	面積	土壤有機 碳平均值	係數變化	觀察值	潛在固存 ^{/1}	採用 - 轉換 ^{/2}	全球潛在固存	
	降水量 / 蒸散量	百萬公頃	噸 / 公頃		n	噸 / 公頃 / 年	%估計面積	百萬公頃	20 年 (10 億 噸碳)
耕地	小於 0.05	10.	19.7	1.001	0	0.02	20	2.2	0.0
(C,CG)	0.05~0.2	104.1	26.8	1.008	8	0.21	20	20.8	0.1
	0.2~0.5	666.1	44.5	1.013	34	0.58	20	133.2	1.5
	0.5~0.65	493.3	58.1	1.016	1	0.93	20	98.7	1.8
	小計	1274.5						254.9	3.4
草原	小於 0.05	7.4	35.2	1.001	0	0.04	10	0.7	0.0
(G,CG,GC)	0.05~0.2	228.0	25.2	1.003	1	0.08	10	22.8	0.1
	0.2~0.5	401.5	40.9	1.012	18	0.49	10	40.2	0.4
	0.5~0.65	95.0	54.2	1.010	10	0.54	10	9.5	0.1
	小計	732.0						73.2	0.6
總計		2006.5						328.1	4.0

^{/1}係數來源來自附錄 1。

^{/2}IPCC (2000) 提出的估計值 (FAO, 2002) 。

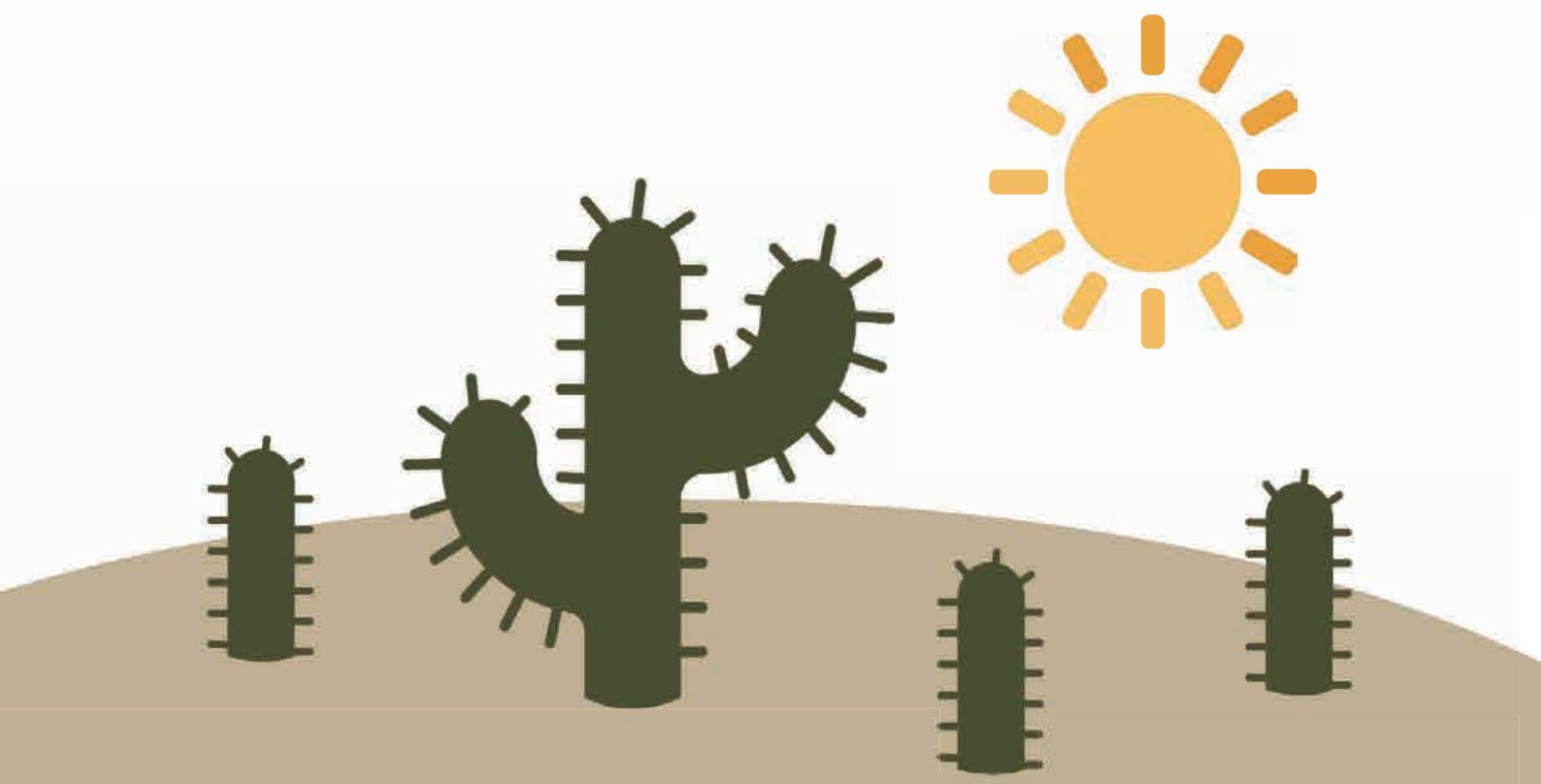


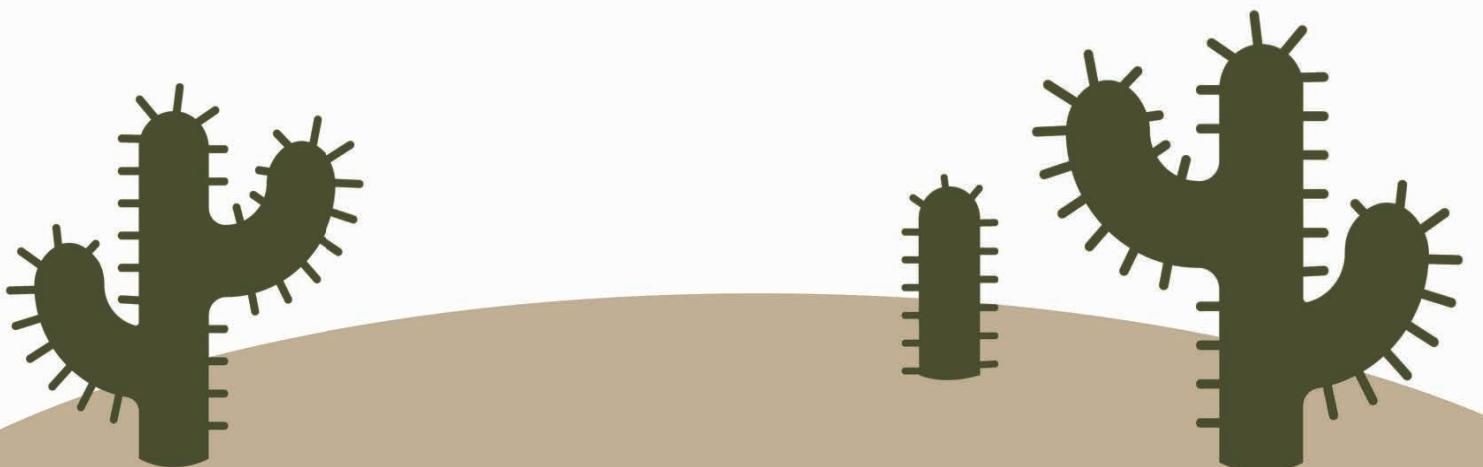
表 26. 每年和實行後 20 年後的全球旱地潛在復育土壤有機碳量 (深度 30 公分)

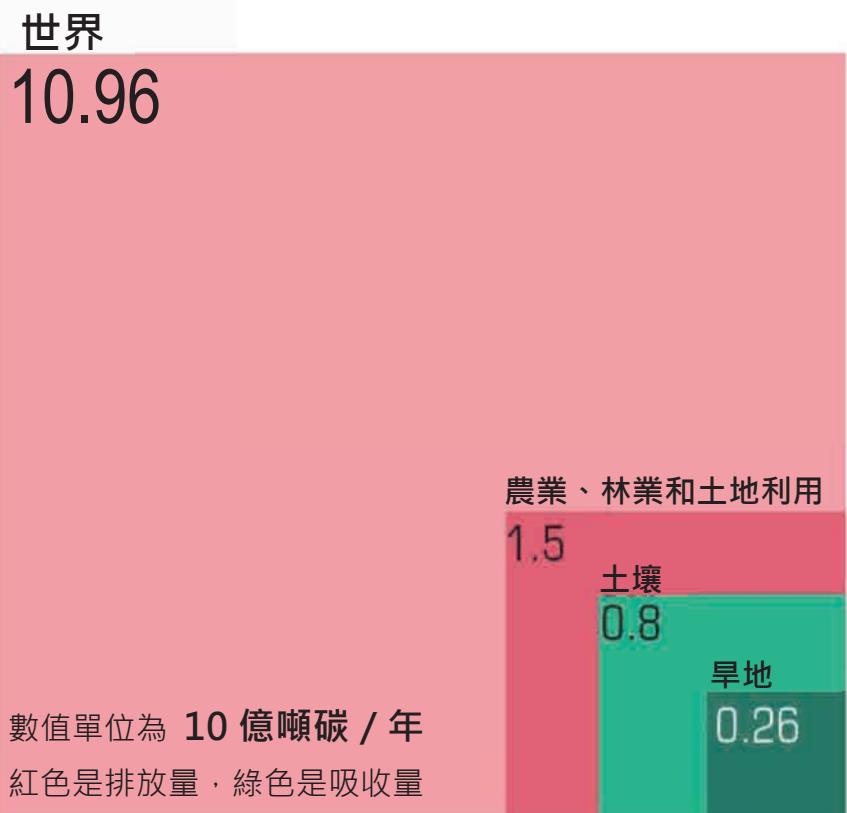
土地利用	面積	土壤有機碳 平均值	係數變化	潛在固存	採用 - 轉換 ^{/2}	全球潛在固存	
	百萬公頃	噸 / 公頃		噸 / 公頃 / 年		% 面積	百萬公頃
耕地	1274.5	38.9	1.014	0.68 ^{/1}	20	254.9	0.17
草原	732.0	38.8	1.009	0.36 ^{/1}	10	73.2	0.03
森林	828.4	32.8	1.010	0.25 ^{/2}	10	82.8	0.02
灌木叢	902.5	29.9	1.010	0.25 ^{/2}	5	45.1	0.01
稀疏 / 無植被 的	2358.1	29.3	1.010	0.25 ^{/2}	5	117.9	0.03
雪和冰	2.7	91.8	1.000	0.00 ^{/2}	0	0.0	0.00
定居地	23.9	35.5	1.010	0.30 ^{/2}	2	0.5	0.00
總計	6122.0					574.4	0.26

資料來源：Sayre et al. (2020), FAO and ITPS (2020), Cherlet et al. (2018), Trabucco and Zomer (2009) 和附錄 3 中列舉的研究

^{/1} 耕地和草原的係數來源來自附錄 1。

^{/2} IPCC (2000) 提出的建議與估計值 (FAO, 2002) 。





資料來源：World Meteorological Organization, 2020;
Smith, 2003; Lal, 2004 and own results.

圖 30. 在全球排放的背景下，旱地的土壤有機碳固存情況

估算中需考慮的因素

估算固存量應納入製造過程（肥料、除草劑、抽水）或運輸（飼料、牛、投入）過程中所包含的排放量（Schuma, Janzen and Herrick, 2002; IPCC, 2006）。透過糞肥和肥料等養分的管理可以增進土壤有機碳儲量；然而，一項研究表明，除施肥和其他相關措施的排放量之外，還考量到每製造一公斤的氮也會排放 1.4 公斤碳，因而土壤有機碳的固存率便會從 0.16 降到 0.06 噸碳 / 公頃 / 年（Lee and Dotson, 1996）。

對生態系統中土壤有機碳的吸收潛力 (ΔC) 的估計，尤其是在乾旱地區，有很高的不確定性（Schrumpf et al., 2011）；會發生此種情況是因為土壤有機質（soil organic matter）擁有複雜的組成、關聯和分布，因而對自然或人為的變化非常敏感。所以，光合作用、分解和土壤呼吸過程之間存在多重相互作用，決定每個儲存過程的潛力（Hungate et al., 1997）。最終，人口的快速增長以及對食物和能源需求的增加，將在接下來的數十年對土地利用產生巨大壓力，隨之而來的是難以量化的土壤有機碳儲存損失（Cruz et al., 2017）。

此項研究顯示，只要採取最適當的管理措施，並進行精確和縝密的監測及評估以達到預期目標，旱地就有很高的潛力來固存土壤有機碳。

4. 旱地保育對提供特定生態系統服務的重要性

4.1. 最小化對土壤功能的威脅

侵蝕

水侵蝕模型 (RevisedUniversal Soil Loss Equation, RUSLE · 修正版通用土壤流失公式) 的基準線顯示 2001~2012 年間的平均侵蝕量有增加的情況 (在全球侵蝕量中佔 2.5%) · 而這個增加是人類對土壤施加更顯著的壓力，以及歷史上不規則的降雨強度和持續長度所造成的後果 (Borrellietal.,2017;Panagosetal.,2017) 。

根據全球土壤侵蝕模擬平臺 (Global Soil Erosion Modelling platform, GloSEM) · 共有 1.65 億公頃的旱地有可觀的侵蝕率，損失量在 24~31 噸土壤 / 公頃 / 年 (Joint Research Centre, 2019) 。維持或保護土壤來固存土壤有機碳的措施，例如施用敷蓋覆蓋，有助於減少或反轉侵蝕的影響，在嚴重侵蝕的農業地區尤為如此 (Faroda, 1998; Li, Yu and Geng, 2011) 。使用作物殘餘物敷蓋或種植覆蓋作物，對於減少土壤侵蝕和改善土壤水分與溫度狀況是必不可少的 (Carvalho and Lourengo, 2014) 。

提高肥力

土壤有機碳的固存通常意味著土壤肥力的改善 (Gallardo, 2016) 。旱地肥力下降的面積一般為 14.8% · 乾旱地區為 19.2% · 半乾旱地區為 23.1% · 而在次濕地區則為 18.4% (Cherlet et al., 2018) 。在乾燥、淺層和低肥力的土地上，使用具良好適應性物種，諸如牧豆樹 (*Prosopis juliflora*) 、芥末樹 (*Salvadora persica*) 、傘刺金合歡 (*Acacia tortilis*) 或阿拉瑪合歡 (*Albizia amara*) · 進行造林和林地復育，可以用為改善肥力的中期可行策略 (Saxena, Sharma and Sharma, 1997) 。

施用無機肥可能會是個較快速的方法，需提供配套的綜合管理計畫來加以進行。施用氮肥 (90 公斤尿素 / 公頃 / 年) 可以增加高莖草 (tall grass) 的生物量生產，有助於增加土壤中的土壤有機碳含量 (將近 1.6 噸 / 公頃 / 年) (Rice, 2000 in Schuma, Janzen and Herrick, 2002) 。在退化的牧草地上種植豆科植物可改善產量和地底的固氮作用，從而增進土壤肥力 (Conant, Paustian and Elliott, 2001) 。可造成有機物礦化率下降的措施將有助於土壤中有機碳的固存。土壤中較高量的土壤有機碳亦能改善土壤結構，促進根部生長；而較高的土壤有機碳含量還會使水有更好地滲透和保留，並增加陽離子交換能力。上述所言都與提高土壤肥力有關，而一些保育措施，如零耕犁 (zero-tillage) · 可以減少土壤壓實和作物生產成本，有助於提高旱地的糧食生產潛力。

改善鹽化

雨養農業 (rainfed agriculture) 的滲透和地下水的抽取灌溉方式，大致決定了地下水的品質和水量 (Mortimore et al., 2009)。鹽度會影響土壤有機碳庫存和生物多樣性 (Lal, 2003)。然而，灌溉可以改善土壤中水和氮的平衡，因而改善植物生產力和土壤中的碳投入 (Ghosh and Mahanta, 2014)。當灌溉不當時，會增加土壤中的鹽度，特別是在蒸發散量較高的地區（一般乾燥指數較低），而在印度東北部受鹽度影響的土壤中引入牧豆樹等物種，可讓土壤有機碳數量在五年間增加 10 噸 / 公頃 (Garg, 1998)。

4.2. 增加生產與糧食安全

頻繁的氣候變化對預期的生產系統影響很大，特別是那些自產自銷 (self-consumption) 系統，使得旱地的糧食安全具有很高的風險（照片 16）。若能將退化農田的土壤有機碳庫增加一公噸，便可使小麥的產量從 20 噸 / 公頃增加到 40 噸 / 公頃，玉米的產量從 10 噸 / 公頃增加到 20 噸 / 公頃，而豇豆 (cowpea) 的產量可從 0.5 噸 / 公頃增加至 1 噸 / 公頃 (Lal, 2004)。

4.3. 緩解和適應氣候變遷

科學家和政治家曾經警告，環境退化和氣候變遷每天都會造成大量人口的流離失所 (Cruz et al., 2017)，同時也影響土壤為人類及其他生物生產健康和營養豐富的食物之能力 (Parr et al., 1992)。土壤有機碳固存可以減輕氣候變遷的衝擊。由於全球暖化，巴西半乾旱地區〔卡廷加 (Caatinga)〕預計將從 5000 萬公頃的地表上，經受 6 億 5000 萬噸碳的長期損失 (80 年) (Althoff et al., 2015)，而這個損害能透過將土壤休眠期從 20 年增加到 50 年，同時將卡廷加的砍伐間隔從 10 年延長到 20 年，獲得減輕。如此一來，卡廷加地區便能實現木柴與碳的永續生產 (Chone et al., 1991; Araujo-Filho et al., 2013)。

5. 挑戰和趨勢概況

在瞭解環境在空間和時間上的維度之前，沒有一個環境問題可以被合理地解決。雖然瞭解土壤及其生產者的盈虧歷史確實需要可觀的經濟成本，然而，這將反映出更加公開透明且一貫的策略，以達到土壤和其他我們仍能使用的自然資源的保育工作 (Trimble and Crosson, 2000)。



© Carlos Cruz

照片 15. 墨西哥夸特羅謝內加斯 (Cuatro Ciénegas) 的紫花苜蓿灌溉，其不佳的水份管理導致土壤失水或鹽化



© Carlos Cruz

照片 16. 玻利維亞奧魯羅 (Oruro) 之安第斯山脈中部的乾冷高原 (Central Andean Dry Puna) · 利用原生草原餵養綿羊和駱駝科動物

表 27. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研 究編號
黎巴嫩橄欖園免耕的短時效應	近東與北非 地區	5	4	1
西班牙納瓦拉地區的灌溉和土壤有機碳固存	歐洲	6~20	4	19
西班牙格拉納達亞熱帶果園中敷蓋的應用	歐洲	5	4	20
西班牙少耕和免耕讓雨養杏仁田有地被植物 並可播植覆蓋作物	歐洲	10	4	21
西班牙橄欖園裡的生物炭和堆肥應用	歐洲	4	4	22
地中海環境下的趨合農業	歐洲	2	4	23
土耳其中部卡拉珀納爾醃製用甜瓜的生產情況	歐亞大陸	60	4	24
土耳其東南部哈蘭平原上灌溉的小麥 - 玉米 - 棉花輪作	歐亞大陸	30	4	25
美國加州觀賞性草坪和運動場地的管理	北美洲	2、10、 20 和 33	6	29

參考文獻

- Althoff, T., Menezes, R., Carvalho, A., Pinto, A., Santiago, G., Ometto, J., Von Randow, C. & Sampaio, E.** 2015. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, 360: 367-375. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.001>
- Araújo-Filho, J.A.** 2013. *Manejo pastoril sustentável da caatinga*. Recife, Projeto Dom Helder Camara. 200.
- Ardö, J., & Olsson, L.** 2004. Soil Carbon Sequestration in Traditional Farming in Sudanese Dry Lands. *Environmental Management*, 33: 318-329. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-9141-2>. 33
- Báez Pérez, A., Etchevers Barra, J.D., Hidalgo Moreno, C.I., Prat, C., Cruz, A.B. & Gallardo Lancho J.F. 2021. Rehabilitation of hardened neo-volcanic soils in Mexico. Unpublished.
- Bai, Z.G., Dent, D.L., Olsson, L. & Schaepman, M.E.** 2008. Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use and Management*, 24: 233–234. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>
- Batjes, N.H.** 1999. Management options for reducing CO₂-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Wageningen, the Netherlands, International Soil Reference and Information Centre. (also available at: <https://www.isric.org/sites/default/files/NRP410200031.pdf>)
- Batjes, N.H.** 2016. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks. *Geoderma*, 269: 61–68. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.034>
- Bessam, F. & Mrabet, R.** 2003. Long-term changes in soil organic matter under conventional and no-tillage systems in semi-arid Morocco. *Soil Use and Management*, 19: 139–143. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00294.x>
- Bhojvaid, P.P. & Timmer, V.R.** 1998. Soil Dynamics in an Age Sequence of Prosopis juliflora Planted for Sodic Soil Restoration in India. *Forest Ecology and Management*, 106(2-3): 181–193. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00310-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00310-1)
- Borrelli, P., Robinson, D.A., Fleischer, L.R., Lugato, E., Ballabio, C., Alewell, C., Meusburger, K., Modugno, S., Schutt, B., Ferro, V., Bagarello, V., Van Oost, K., Montanarella, L. & Panagos P.** 2017. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. *Nature Communications*, 8: 2013–2017. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7>
- Brown, T.T. & Huggins, D.R.** 2012. Soil carbon sequestration in the dryland cropping region of the Pacific Northwest. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(5): 406–415. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.406>

Carvalho, M., Basch, G., Calado, J. & Barros, J. 2012. Long term effect of tillage system and crop residues management on soil carbon content of a Luvisol under rainfed Mediterranean conditions. In O. Ernest, M. Bidegain, J. Terra & M. Barbazan (Eds.) *Agrociencia Special Issue – Striving for Sustainable High Productivity Through Improved Soil and Crop Management*, pp. 183–187. Facultad de Agronomía, Universidad de la Republica, y Instituto Nacional de Investigación Agropecuária del Uruguay, Montevideo, Uruguay. ISSN 1510-0839.

Carvalho, M. & Lourenço, E. 2014. Conservation agriculture – a Portuguese case study. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2005: 317–324. <https://doi.org/10.1111/jac.12065>

Chan, K.Y., Roberts, W.P. & Heenan, D.P. 1992. Organic carbon and associated soil properties of a red earth after 10 years of rotation under different stubble and tillage practices. *Soil Research*, 30(1): 71–83. <https://doi.org/10.1071/sr9920071>

Cherlet, M., Hutchinson, C., Reynolds, J., Hill, J., Sommer, S. & von Maltitz, G. (Eds). 2018. *World Atlas of Desertification*. Publication Office of the European Union, Luxembourg.

Choné, T., Andreux, F., Correa, J.C., Volkoff, B. & Cerri, C.C. 1991. Changes in organic matter in an Oxisol from the Central Amazonian forest during eight years as pasture determined by ^{13}C isotopic composition. In Berthelin, J. (Ed.) *Diversity of environmental biogeochemistry*. Elsevier, Amsterdam, pp. 397–405.

Conant, R.T., Paustian, K. & Elliot, E.T. 2001. Grassland management and conversion into grasslands: effects on soil carbon. *Ecological Applications*, 11(2): 343–355. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2001\)011\[0343:GMACIG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2001)011[0343:GMACIG]2.0.CO;2)

Cruz, C.O., Siachoque, R.F., Lobo, D., Guevara, M., Castellanos, S.G., Maya, A.L., Villegas, J., Rosas, J.N. & Barbosa, H.A. 2017. *Environmental migration. Effect of the drought and desertification of land in the displacement of rural communities in Latin America and the Caribbean*. Case study of Euroclima. Ispra, Italy (unpublished).

Delgado-Balbuena, J., Arredondo, J. T., Loescher, H. W., Huber-Sannwald, E., Chávez-Aguilar, G., Luna, M. & Barretero-Hernández, R. 2013. Differences in plant cover and species composition of semiarid grassland communities of central Mexico and its effects on net ecosystem exchange. *Biogeosciences*, 10: 4673–4690. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4673-2013>

Driessen, P., Deckers, J., Spaargaren, O. & Nachtergael, F. 2001. *Lecture Notes on the Major Soils of the World*. Rome. FAO.

Dumanski, J., Peiretti, R., Benites, J.R., McGarry, D. & Pieri, C., 2006. The paradigm of conservation agriculture. *Proc. World Assoc. Soil Water Conserv.* P1: 58–64. (also available at: <http://www.unapcaem.org/publication/ConservationAgri/ParaOfCA.pdf>)

Eve, M.D., Sperow, M., Paustian, K. & Follett, R.F. 2002. National-scale estimation of changes in soil carbon stocks on agricultural lands. *Environmental Pollution (Barking, Essex: 1987)*, 116(3): 431–438. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(01\)00220-2](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(01)00220-2)

FAO. 2002. *Captura de carbono en los suelos para un mejor manejo de la tierra*. ISBN 92-5-304690-2. (also available at: <http://www.fao.org/3/a-bl001s.pdf>)

FAO. 2004. Carbon sequestration in dryland soils. *World Soil Resource Reports, 102*.

FAO & ITPS. 2020. Global Soil Organic Carbon Map V1.5: *Technical report*. Rome, FAO.

Farage, P.K., Ardö, J., Olsson, L., Rienzi, E.A., Ball, A.S. & Pretty, J.N. 2007. The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modeling approach, *Soil and Tillage Research*, 94(2): 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.09.006>

Faroda, A.S. 1998. Desertification Control: Recent Technologies in the Indian [online]. *Proceedings of the International Symposium*, in Tehran, Iran. [Cited 5 February 2021].

<https://archive.unu.edu/env/workshops/iran-1/05-Faroda%20Paper.doc>

Gallardo, J.F. 2016. La materia orgánica del suelo: Residuos orgánicos, humus, compostaje, captura de carbono. S.i.F.y Q.A., Salamanca, Spain. ISBN: 978-84-937437-7-2. 392 pp.

García-Oliva, F., Lancho, J.F.G., Montaño, N.M. & Islas, P. 2006. Soil Carbon and Nitrogen Dynamics Followed by a Forest-to-pasture Conversion in Western Mexico. *Agroforestry Systems*, 66(2): 93–100. <https://doi.org/10.1007/s10457-005-2917-z>

Garg, V.K. 1998. Interaction of tree crops with a sodic soil environment: Potential for rehabilitation of degraded environments. *Land Degradation and Development*, 9: 81–93.

[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(199801/02\)9:1<81::AID-LDR267>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(199801/02)9:1<81::AID-LDR267>3.0.CO;2-R)

Gelken, C. 2009. Taming the Yellow Dragon. The Korean Herald [online]. [Cited 5 February 2021]. <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20090826000073>

Goudie, A. 2013. *Arid and Semi-Arid Geomorphology*. United Kingdom: Cambridge University Press.

Ghosh, P.K. & Mahanta, S.K. 2014. Carbon sequestration in grassland systems. *Range Mgmt. & Agroforestry*, 35(2): 173-181. ISSN 0971-2070.

Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S.V., Goetz, S.J., Loveland, T.R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C.O. & Townshend, J.R.G. 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160): 850–853. [https://doi.org/10.1126/science.1244693⁸](https://doi.org/10.1126/science.1244693).

Harris, I., Jones, P.D., Osborn, T.J. & Lister, D.H. 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34: 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>

⁸ In this document, updated data from 2000-2019 used with regards to this reference. Data available on-line from: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>.

- Hong, S., Yin, G., Piao, S., Dybzinski, R., Cong, N., Li, X., Wang, K., Peñuelas, J., Zeng, H. & Chen, A.** 2020. Divergent responses of soil organic carbon to afforestation. *Nature Sustainability*, 3(9): 694–700. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0557-y>
- Hungate, B., Holland, E., Jackson, R., Chapin III, F.S., Mooney H.A. & Field C.B.** 1997. The fate of carbon in grasslands under carbon dioxide enrichment. *Nature*, 388: 576–579. <https://doi.org/10.1038/41550>
- IPCC.** 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. y Tanabe K. (Eds). Publicado por: IGES, Japan.
- IPCC.** 2019. Change in carbon stocks in soils. Chapter 2 Generic Methodologies applicable to multiple land-use categories. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines*. Prepared by Ogle *et al.*
- IUSS Working Group WRB.** 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports* No. 106. FAO, Rome.
- Jiang, H.** 2016. Taking Down the “Great Green Wall”: The Science and Policy Discourse of Desertification and Its Control in China. In R. Behnke & M. Mortimore (Eds.) *The End of Desertification?: Disputing Environmental Change in the Drylands*, pp. 513–536. Springer Earth System Sciences. Berlin, Heidelberg, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16014-1_19
- Joint Research Centre,** 2019. Global Soil Erosion Modelling platform (GloSEM) [online]. Re-sampled dataset (2001, 2012) [Cited 5 February 2021]. <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-soil-erosion>
- Kovda, V.A.** 1952. *The Great Plan for Transforming Nature*. House of the Academy of Sciences of the USSR. Moscow.
- Lal, R.** 2003. Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29: 437-50. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00192-7](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00192-7)
- Lal, R.** 2004. Carbon sequestration in dryland ecosystems. *Environ. Manag.*, 33(4): 528–544. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-9110-9>
- Lee, J.J. & Dodson, R.** 1996. Potential Carbon Sequestration by Afforestation of Pasture in the South-Central United States. *Agronomy Journal*, 88(3): 381–384. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800030004x>
- Lemus, R. & Lal, R.** 2005. Bioenergy Crops and Carbon Sequestration. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(1): 1–21. <https://doi.org/10.1080/07352680590910393>

Lesiv, M., Schepaschenko, D., Moltchanova, E., Bun, R., Dürauer, M., Prishchepov, A.V., Schierhorn, F., Estel, S., Kuemmerle, T., Alcántara, C., Kussul, N., Shchepashchenko, M., Kutowaya, O., Martynenko, O., Karminov, V., Shvidenko, A., Havlik, P., Kraxner, F., See, L. & Fritz, S. 2018. Spatial distribution of arable and abandoned land across former Soviet Union countries. *Scientific Data*, 5(1): 180056. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.56>

Li, Y., Yu, H.Q. & Geng X.C. 2011. Assessment of effectiveness of soil conservation measures in reducing soil erosion and improving soil quality in China using fallout radionuclide techniques. In *Impact of Soil Conservation Measures on Erosion Control and Soil Quality*. IAEA-TECDOC-1665, International Atomic Energy Agency, Vienna. (also available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1665_web.pdf)

Lu, F., Hu, H., Sun, W., Zhu, J., Liu, G., Zhou, W., Zhang, Q., Shi, P., Liu, X., Wu, X., Zhang, L., Wei, X., Dai, L., Zhang, K., Sun, Y., Xue, S., Zhang, W., Xiong, D., Deng, L., Liu, B., Zhou, L., Zhang, C., Zheng, X., Cao, J., Huang, Y., He, N., Zhou, G., Bai, Y., Xie, Z., Tang, Z., Wu, B., Fang, J., Liu, G. & Yu, G. 2018. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(16): 4039–4044. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700294115>

Madeira, M., Alexandre, C., Simões, P., Gazarini L. & Nunes J. 2012. Improvement functions of degraded soils by application of organic amendments. In *Best practices on land degradation and restoration in Mediterranean environments*. Portugal.

McSherry, M.E. & Ritchie, M.E. 2013. Effects of grazing on grassland soil carbon: a global review. *Global Change Biology*, 19(5): 1347-1357. <https://doi.org/10.1111/gcb.12144>

Merino, A., García-Oliva, F., Omil, B., Campo, J., Etchevers, J.D. & Gallardo, J.F. 2019. *Land use and agricultural practices in Best Practices in Evaluation and Restoration of Degraded Mediterranean Environments*. IBADER, Lugo, Spain. pp. 16-49. ISSN: 1988-8341.

Miles, L., Newton, A.C., DeFries, R.S., Ravilious, C., May, I., Blyth, S., Kapos, V. & Gordon, J.E. 2006. A global overview of the conservation status of tropical dry forests. *Journal of Biogeography*, 33: 491-505. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2005.01424.x>

Mortimore M., Anderson S., Cotula Lorenzo, Davies J., Facer K., Hesse C., Morton J., Nyangena W., Skinner J. & Wolfangel C. 2020. *Dryland Opportunities. A new paradigm for people, ecosystems and development*. International Union for Conservation of Nature. (also available at: <http://lib.riskreductionafrica.org/bitstream/handle/123456789/457/dryland%20opportunities.%20a%20new%20paradigm%20for%20people,%20ecosystems%20and%20development.pdf?sequence=1>)

NASA. 2020. Fire Information for Resource Management System [online]. MODIS Collection 6. Coverage 2000-2020 [Accessed 5 February 2021]. <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>

Ogle, S.M., Breidt, F.J. & Paustian, K. 2005. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 72: 87-121. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0360-2>.

Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., Yu, B., Klik, A., Lim, K.J., Yang, J.E., Ni, J., Miao, C., Chattopadhyay, N., Sadeghi, S.H., Hazbavi, Z., Zabihi, M., Larionov, G.A., Krasnov, S.F., Garobets, A., Levi, Y., Erpul, G., Birkel, C., Hoyos, N., Naipal, V., Oliveira, P.T.S., Bonilla, C.A., Meddi, M., Nel, W., Dashti, H., Boni, M., Diodato, N., Van Oost, K., Nearing, M.A. & Ballabio, C. 2017. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. *Scientific Reports*, 7: 4175. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>.

Parr, J.F., Papendick, R.I., Hornick, S.B. & Meyer, R.E. 1992. Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1–2): 5–11. <https://doi.org/10.1017/S0889189300004367>

Pataki, D.E., Ellsworth, D.S., Evans, R.D., Gonzalez-Meler, M., King, J., Leavitt, S.W., Lin, G., Matamala, R., Pendall, E., Siegwolf, R., Van Kessel, C. & Ehleringer, J.R. 2003. Tracing Changes in Ecosystem Function under Elevated Carbon Dioxide Conditions. *BioScience*, 53(9): 805–818. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[0805:TCIEFU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[0805:TCIEFU]2.0.CO;2)

Pinter, K., Barczan, Z., Balogh, J., & Nagy, Z. 2008. Continuous Eddy covariance Measurements of Grasslands Carbon Balance in Hungary. *Cereal Research Communications*, 36: 563-66. <http://www.jstor.org/stable/90002766>.

Reeder, J.D. & Schuman, G.E. 2002. Influence of livestock grazing on C sequestration in semiarid and mixed-grass and short-grass rangelands. *Environ. Pollut.*, 116: 457–463. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00223-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00223-8)

Sayre, R., Martin, M., Karagulle, D., Frye, C., Breyer, S., Wright, D., Butler, K., VanGraafeiland, K., Boucher, T., McGowan, J., Touval, J., Wolff, N.H., Sotomayor, L., Game, E.T. & Possingham, H. 2020. World Terrestrial Ecosystems. In M.I. Goldstein & D.A. DellaSala (Eds.) *Encyclopedia of the World's Biomes*, pp. 31–34. Oxford, Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12474-1>

Saxena, S.K., Sharma, K.D. & Sharma, B.K. 1997. Rehabilitation of mined wastelands in Indian arid ecosystem. In S. Singh & A. Kar (Eds.) *Desertification Control in the Arid Ecosystem of India for Sustainable Development*. pp. 334-341. Bikaner, India, Agro Botanical Publishers.

Schrumpf, M., Schulze E.D., Kaiser, K., & Schumacher, J. 2011. How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences*, 8: 1193-1212. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1193-2011>

Schuma, G.E., Janzen, H.H. & Herrick, J.E. 2002. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands. *Environ Pollut.*, 116(3):391-6. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(01\)00215-9](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(01)00215-9)

Sebastia, M.-T., Chabbi A., Cordovil, C.M.d.S., De Vliegher, A., Hennessy, D., Kramberger, B., Newell Price, P., Richmond, R. & van Rijn, C. 2018. Mixtures of species. *EIP-AGRI Focus Group – Grazing for carbon*. (also available at: https://ec.europa.eu/eip/agriculture/sites/agri-eip/files/fg25_02_minipaper_mixtures_of_species_0.pdf)

- Smith, P.** 2004. Soils as carbon sinks: The global context. *Soil Use and Management*, 20: 212-218.
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2004.tb00361.x>
- Sombroek, W.G., Nachtergael, F.O. & Hebel, A.** 1993. Amounts, dynamics, and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. *Ambio*, 22: 417-426.
- Sørensen** (United Nations Environment Programme-World Conservation Monitoring Centre). 2007. A special analysis approach to the global delineation of drylands areas of relevance to the CBD Programme of Work on Drylands and Subhumid Lands. UNEP-WCMC. (also available at: https://www.unep-wcmc.org/system/dataset_file_fields/files/000/000/323/original/dryland_report_final_HR.pdf?1439378321)
- Thomas, R.J.** 2008. Opportunities to reduce the vulnerability of dryland farmers in Central and West Asia and North Africa to climate change. *Agriculture, Ecosystems, and Environment*, 126: 36-45.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.01.011>
- Thompson, J.A. & Kolka, R.K.** 2005. Soil carbon storage estimation in a central hardwood forest watershed using quantitative soil-landscape modeling. *Soil Science Society of America*, 69: 1086-1093.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0322>
- Trabucco, A. & Zomer, R.J.** 2009. Global Aridity Index (Global-Aridity) and Global Potential Evapo-Transpiration (Global-PET) Geospatial Database. CGIAR Consortium for Spatial Information. (also available at: <http://www.cgiar.org>)
- Trabucco, A. & Zomer, R.** 2019. Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET₀) Climate Database v2. figshare. Fileset. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.7504448.v3>. CGIAR Consortium for Spatial Information. Published online, available from the CGIAR-CSI GeoPortal at:
<https://cgiarcsi.community/2019/01/24/global-aridity-index-and-potential-evapotranspiration-climate-database-v2/>
- Trimble, S. & Crosson, P.** 2000. U.S. Soil Erosion Rates – Myth and Reality. *Science*. 289: 248-250.
<https://doi.org/10.1126/science.289.5477.248>
- United Nations Convention to Combat Desertification.** 2020. *The Great Green Wall implementation status and way ahead to 2030*. Advanced Version. (also available at:
https://catalogue.unccd.int/1551_GCW_Report_ENG_Final_040920.pdf)
- United Nations.** 2011. *Global drylands: A UN system-wide response*. United Nations Environment Management Group. (also available at: https://www.unep-wcmc.org/system/dataset_file_fields/files/000/000/091/original/Global-Drylands-FINAL-LR.pdf?1398440625)
- Vuichard, N., Ciais, P., Belelli Marchesini, L., Smith, P. & Valentini, R.** 2008. Carbon sequestration due to the abandonment of agriculture in the former USSR since 1990. *Global Biogeochemical Cycles*, 22.
<https://doi.org/10.1029/2008GB003212>

Wang, S., Fu, B., Piao, S., Lü, Y., Ciais, P., Feng, X. & Wang, Y. 2016. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes. *Nature Geoscience*, 9(1): 38–41.
<https://doi.org/10.1038/ngeo2602>

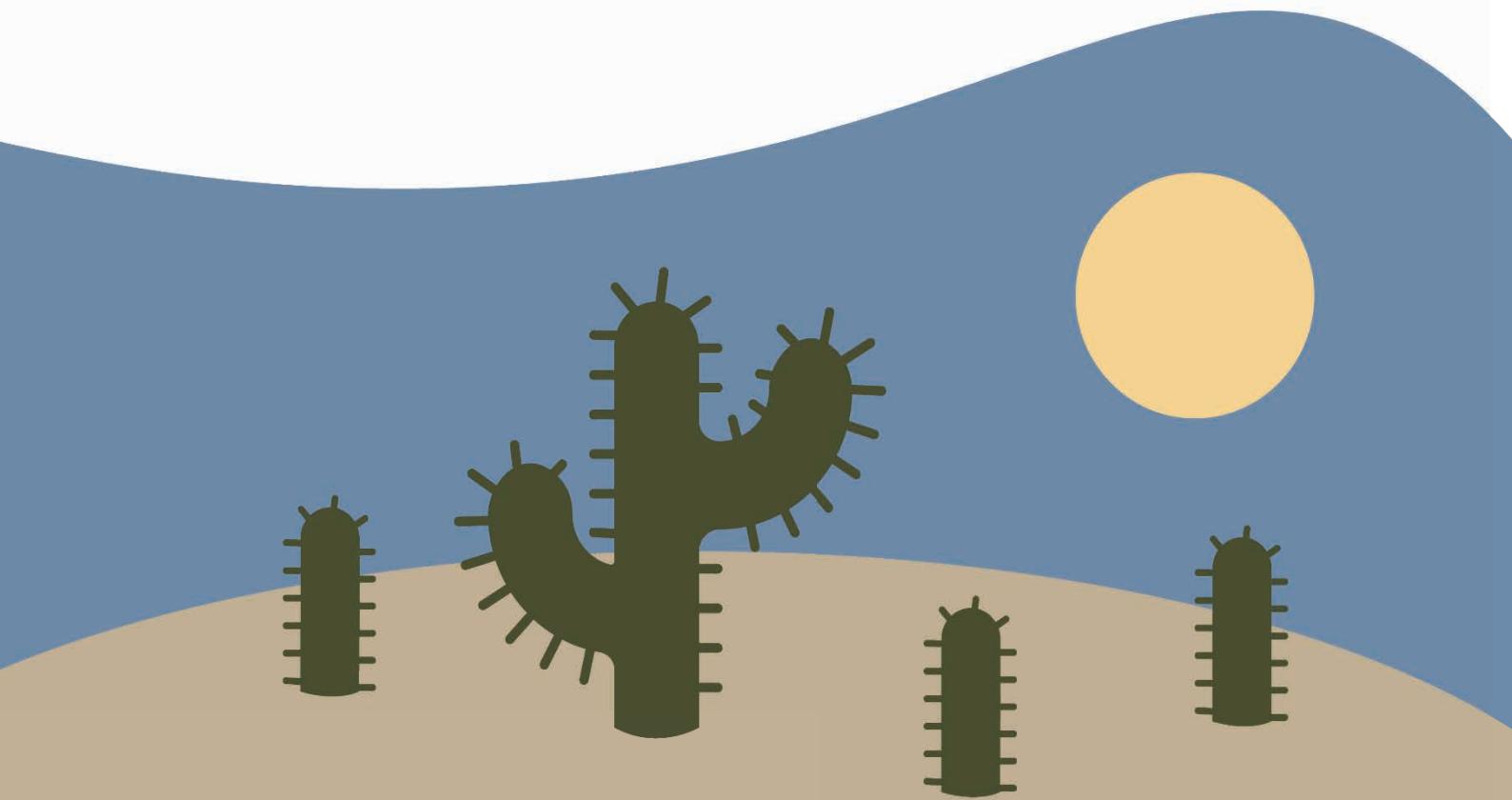
World Meteorological Organization. 2020. *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019*.
(also available at:
<https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/WMO%20Statement%20on%20the%20State%20of%20the%20Global%20Climate%20in%202019.pdf>)

Xu, W., Xiao, Y., Zhang, J., Yang, W., Zhang, L., Hull, V., Wang, Z., Zheng, H., Liu, J., Polasky, S., Jiang, L., Xiao, Y., Shi, X., Rao, E., Lu, F., Wang, X., Daily, G.C. & Ouyang, Z. 2017. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(7): 1601–1606. <https://doi.org/10.1073/pnas.1620503114>

Young, R.R., Wilson, B., Harden, S. & Bernardi, A. 2009. Accumulation of soil carbon under zero tillage cropping and perennial vegetation on the Liverpool Plains, eastern Australia. *Soil Research*, 47(3): 273–285.
<https://doi.org/10.1071/SR08104>

Zdruli P., Kapur S. & Celik I. 2010. Soils of the Mediterranean Region, Their Characteristics, Management and Sustainable Use. In Kapur, H. Eswaran, W. Blum (Eds.) *Sustainable Land Use: Learning from the past for the future*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14782-1_4

Zdruli P., Lal R., Cherlet M. & Kapur S. 2017. New World Atlas of Desertification and Issues of Carbon Sequestration, Organic Carbon Stocks, Nutrient Depletion, and Implications for Food Security. In S. Erşahin, S. Kapur, E. Akça, A. Namlı, H. Erdogan (Eds.) *Carbon Management, Technologies, and Trends in Mediterranean Ecosystems*. pp. 13–25. The Anthropocene: Politik–Economics–Society–Science. vol. 15. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45035-3_2





科技土 和都市土壤

11. 科技土和都市土壤

Randy L. Riddle¹, Richard K. Shaw², Zhongqi Cheng³, Ralph Tucker¹, Kristine A. Ryan¹, Olga M. Vargas¹, Cornelia Rumpel⁴

¹United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service, United States of America

美國農業部自然資源保育局

²United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Service (Retired), United States of America

美國農業部自然資源保育局（已退休）

³Brooklyn College of The City University of New York, United States of America

美國紐約市立大學布魯克林學院

⁴CNRS, Institute of Ecology and Environmental sciences, Paris, France

法國國家科學研究院生態與環境科學研究所

1. 定義與說明

城市地區佔世界土地面積不到 2% (Yang and Zhang, 2015)，但被發現含有比自然土壤平均多 1.5~3 倍的碳。都市土壤 (urban soils) 有作為碳封存「熱點」或作為碳儲量集中媒介的功用 (Edmondson et al., 2012)。都市土壤通常是人為製造的，包括用各種有機和無機材料製成的科技土 (Technosols)。因為碳可能會在其中快速增加或損失，故城市地區是全球碳庫存熱點。構成土 (constructed soils) 會被良好管理，所以通常含有大量的有機材料，因而其土壤含有的土壤有機碳比鄉村的土壤有機碳含量還要高。土壤有機碳和土壤無機碳 (soil inorganic carbon) 在城市裡的差異很大，而其含量主要由過去和目前的土地利用所控制。掩埋的填土材料 (fill materials) [如飛灰 (fly ash)] 或文化層 (cultural layer · 如碳酸鹽材料) 可能含有極高量的黑碳 (black carbon) 或無機碳，而長期以來的碳損失極小。混凝土材料 [(硅酸鈣 (Ca-silicate)) 的快速風化也有助於快速土壤無機碳含量於土壤中的增加。積極的管理方式大多會帶來較高的土壤有機碳含量，而高土壤有機碳含量則能將大量的碳和氮引入土壤之中，並隨時間而累積生物質；此過程在生物生產力極低的乾燥氣候中特別重要。由於呼吸活動和礦化率低的關係，在埋藏土 (buried soils) 中的土壤有機碳含量會被大量地被保存下來。

2. 全球熱點分布

下圖從空間上顯示全球城市燈光的分佈，同時也顯示城市地區土壤碳的潛在熱點位置。隨著世界人口增長以及城市地區擴大，全球城市地區土壤碳儲存的重要性增加（圖 31）。

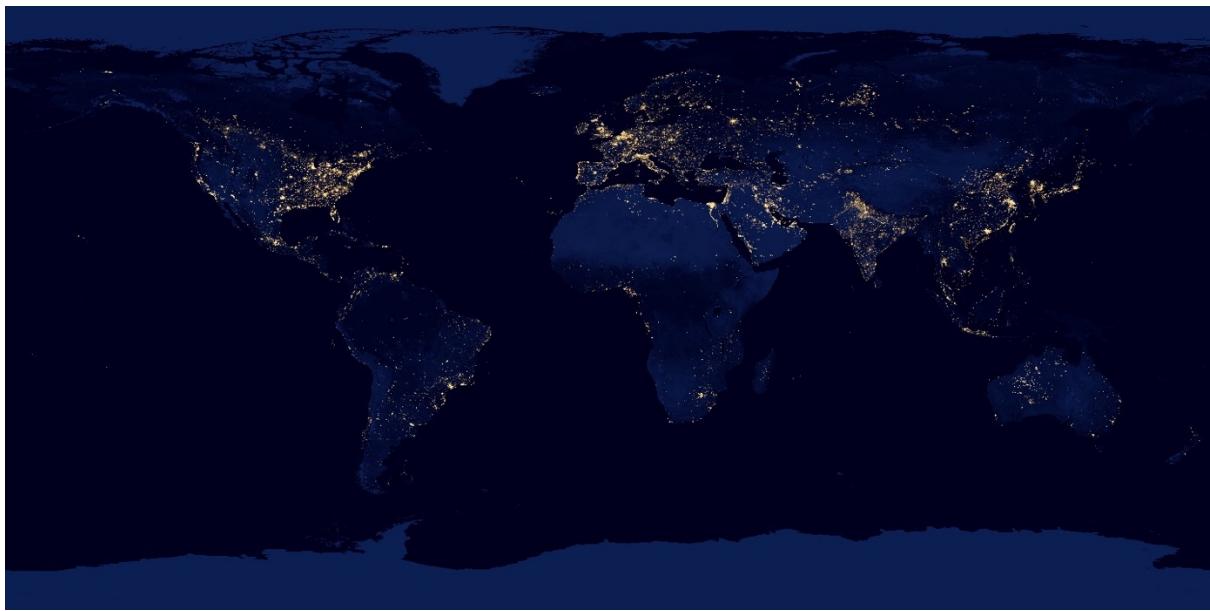


圖 31. 從太空中所見的地球夜景，燈光亮點顯示城市的範圍，美國國家航空暨太空總署地球觀測站（NASA Earth Observatory）（NASA, 2012）

3. 城市碳庫存熱點地區（以紐約市為例）

3.1. 燃燒灰土與人工土

美國農藥部自然資源保護局（USDA-NRCS）進行紐約市土壤調查（Soil Survey of New York City），把由人類運輸材料（human-transported materials）所形成的土壤類型，做區分鑑別並在地圖上表示出。在這些土壤類型中，一部分是形成於煤炭燃燒和飛灰中〔燃燒材料類（Combustic material class）〕，另一部分是建築廢棄物所形成的〔人工材料類（Artifactic material class）〕；這兩類土壤中皆含有相當多的人工製品（體積佔比大於 10%），並富含黑碳（black carbon），而黑碳是植物材料與化石燃料不完全燃燒下的副產物。這些土壤的黑碳包括煙粒（soot）、木炭（charcoal）、各種類型的灰和瀝青（asphalt）。下表有關碳的數字只代表細質土（fine-earth）的部分（表 28），而大於兩公厘的人工製品在分析前就被篩除，但其內可能含有黑碳。

表 28. 採樣美國紐約市深度 0~100 公分細質土部分的燃燒灰土和人工土之土壤有機碳庫存

地區	土壤類型 (美國土壤分類法)	碳固存 (噸碳 / 公頃)	材料類別	土體識別碼 (Pedon ID)
史泰登島 (Staten Island)	燃燒型、混合型、中濕型 (mestic) 的典型濕潤砂質新成土 (Typic Udicamments)	3781.46	煤炭燃燒的 底灰 (bottom ash)	S1995NY085007
		2860.56		S2009085002
		1180.60		S2010NJ007001
布朗克斯 (Bronx)	沙質、燃燒型、混合型、中濕型的人為濕潤正常新土 (Anthropic Udorthents)	508.93 ⁹		S2011NY005001
皇后區 (Queens)	壤質 - 粗骨 (loamy-skeletal) 、人工型、混合型、超活性 (superactive) 、非酸性 (nonacid) 、中濕型的人為濕潤正常新土 (Anthropic Udorthents)	612.22 ¹⁰	城市建築廢 棄物 (construction debris)	S2011NY081001
布朗克斯		364.04		S2009NY005001
		292.22		S2009NY005002
皇后區		286.44		S2011NY081002

資料來源：美國國家合作土壤調查特徵資料庫

燃燒灰土 (Combustic Soils) 只占紐約市地圖土地面積的 0.1% ，而其深度 100 公分的土壤有機碳庫存平均為 2207.36 噸碳 / 公頃。人工土 (Artifatic soil) 占紐約市土地面積的近 6% ，而其深度 100 公分的土壤有機碳庫存平均則為 306.22 噸 / 公頃。考慮到到林地區域原生土壤之土壤有機碳庫存平均為 109.65 噸 / 公頃，燃燒灰土與人工土的碳固存可稱得上是顯著的增加。在土壤密封或鋪設過程中，大量的灰、木炭、瀝青碎片、生物炭和類似的材料皆被埋在不透水的表面下，進而提供一個良好方法來固存碳 (Lorenz and Lal, 2015) 。

相較於熱度未改的有機碳 (thermally unaltered organic carbon , 來自植物和動物殘餘物) ，黑碳更耐降解。以下方式可提升土壤中黑碳的穩定性：(1)結合生物或物理方法，移除土壤表面的黑碳，並將其重新分配至地下土層 (subsurface horizons) ；(2)形成有機物與礦物質和鐵鋁氧化物及其他黏土礦物結合；和

⁹ 照片 17

¹⁰ 照片 18

¹¹ <https://ncslabdatamart.sc.egov.usda.gov>

(3) 大量的鈣、火、臭氧和紫外線輻射能使黑碳降解 (Czimczik and Masiello, 2007)。煤灰和建築廢棄物 (construction debris) 會提高微量金屬和多環芳香烴 (polycyclic aromatic hydrocarbon) 的含量。黑碳對持久性有機汙染物 (persistent organic pollutants) · 例如多環芳香烴和多氯聯苯 (polychlorinated biphenyl) · 有很高的親和性；而黑碳對這些化合物的強大吸附力可以降低接觸的可能性和毒理風險 (toxicological risks) (Koelmans et al., 2006)。

3.2. 工程廢棄土

工程廢棄土 (spolic soil) 由人類運輸材料所形成，其中人工製品的數量很低（低於 10%）。在紐約市的土壤調查中，此種土壤被歸類於工程廢棄材料類 (spolic material class)，存在於鋪設完善的草皮覆蓋區中，且該種土壤有相當多的土壤有機碳（表 29）。

表 29. 採樣於美國紐約市深度 0~100 公分工程廢棄土的土壤有機碳庫存

地區	土壤類型 (美國土壤分類法)	碳固存 (噸碳 / 公頃)	材料類別	識別碼
紐約	粗質 - 壤質 (coarse-loamy)、工程廢棄型、混合型、活性 (active)、酸性 (acid)、中濕型的人為濕潤正常新土	364.91 ¹²	人類運輸材料；<10%的人工製品	S1998NY061010
布朗克斯		205.54		S2000NY005006
皇后區	沙地上的粗質 - 壽質 (coarse-loamy over sandy)、工程廢棄型、混合型、超活性、非酸性、中濕型的人為濕潤正常新土	204.58		S1998NY081001
布魯克林 (Brooklyn)	粗質 - 壽質、工程廢棄型、混合型、活性、酸性、中濕型的人為濕潤正常新土	191.69		S2011NY047001

資料來源：美國國家合作土壤調查特徵資料庫¹³

由人類運輸材料所形成的工程廢棄土，約占紐約市地圖土地面積的 16%，而其深度 100 公分的土壤有機碳庫存平均為 151.51 噸碳 / 公頃。此數據略高於該市林地地區的原生土壤之平均 (109.65 噸 / 公頃)。Pouyat 等人 (2009) 提出，巴爾的摩的草坪草 (turfgrass) 土壤會在 40 年內達到最大的土壤有機碳水準。

¹² 照片 19

¹³ <http://ncslabdatamart.sc.egov.usda.gov/>

並提到需考慮相關的維護預算，即修剪和施用石灰與肥料的碳成本。在紐約市的大部分地區，修剪下來的草（grass clippings）會被送回土壤表面，而石灰和肥料的使用並不頻繁。在紐約市至少有一個墓地〔即布魯克林的綠蔭公墓（Green-Wood）〕正在進行相關替代選擇方案的調查，研究較低維護成本的地面覆蓋物及其相關的土壤生態系統服務，包含碳固存率。

3.3. 無機碳

人工土中也富含土壤無機碳。混凝土的碎片在這些建築廢棄物土壤中很常見，而來自混凝土中矽酸鹽（silicate）和氫氧化物（hydroxide）礦物裡的鈣，經風化後，會與大氣中的二氧化碳重新沉澱，形成碳酸鈣（表 30）。

表 30. 採樣於美國紐約市深度 0~100 公分人工土的土壤無機碳庫存

地區	土壤類型（美國土壤分類法）	碳固存 (噸碳 /公頃)	材料類別	識別碼
布朗克斯	壤質-粗骨土、人工型、混合型、超活性、非酸性、中濕型的人為濕潤正常新土	66.15	城市建築廢棄物	S2009NY005002
皇后區		32.05 ¹⁴		S2011NY081001
紐約		30.18		S2011NY061001
布朗克斯		29.43		S2009NY005001
皇后區		11.29		S2011NY081002

資料來源：美國國家合作土壤調查特徵資料庫¹⁵

與濕溫帶的大多數土壤一樣，紐約市的原生土壤在土壤剖面中有極少或幾乎沒有碳酸鈣，代表這些是都市土壤是一種新穎的方法來固存碳。由於水泥製造目前占全球二氧化碳排放量的 5% 左右，因此這種方式的碳固存並不是真正的淨收益。儘管如此，其仍是去除一些大氣中二氧化碳之快速又有效的方法。

¹⁴ 照片 18

¹⁵ <http://ncsslabdatamart.sc.egov.usda.gov/>

Washbourne 等人 (2015) 估計，一個英格蘭新堡 (Newcastle) 的建築物的拆除現場，僅在 18 個月內，透過土壤頂部 100 公厘的碳酸鈣沉澱，每公頃的面積就有 85 噸的二氧化碳被移除；而在該場地，會從現場產出二級混凝土粒料 (secondary concrete aggregates)，而其中所含的細微材料會被混入土壤中。

4. 都市土壤保育對提供特定生態系統服務的重要性

4.1. 最小化對土壤功能的威脅

表 31. 土壤威脅

土壤威脅	
土壤侵蝕	維持地表覆蓋物、在建築活動完成後建立植被 (Lorenz and Lal, 2015)、整地，以及為住宅或商業開發的斜坡修築階地，可以減少土壤侵蝕 (Vasenev and Kuzyakov, 2018)。土壤有機碳可以改善團粒形成、結構穩定性和滲透性。
養分的失衡和循環	土壤有機質改善養分循環。添加土壤有機質，如堆肥，是城市中園丁所使用的有效且普遍措施 (Brown et al., 2016)，其益處包括能增加有機物、養分緩釋 (slow-release)、增加陽離子交換能力、增加保水力，以及稀釋土壤中的微量元素或其他汙染物 (NRCS Urban Technical Note 4)。
土壤鹽化和鹼化	都市土壤的 pH 值高於原生地區的土壤 (Craul, 1999)，此現象與建築廢棄物混合 (Morel, Chenu and Lorenz, 2014) 和人工製品的風化有關。較高的 pH 值會影響養分和微量金屬在土壤中的溶解度，甚至在一些地區可以減少對石灰的需求。
土壤沾染 / 污染	添加土壤有機碳，如堆肥，可以稀釋土壤中的汙染物濃度，而土壤有機碳還可以固定並降低幾種汙染物的生物有效性 (bioavailability) (NRCS Urban Technical Note 4; Ge et al., 2000)，例如與土壤顆粒表面 (交換位置) 強鍵結有關的土壤鉛。然而，其可能會增加砷的生物有效性 (Fleming et al., 2013)。

土壤威脅

土壤生物多樣性損失	綠色空間和基礎設施改善了城市的生物多樣性，並可能為原生、稀有或受保護的物種提供重要的棲地（Morel, Chenu and Lorenz, 2014）。健康的都市土壤透過為動物（Joimel et al., 2018）、微生物和植物群落提供棲地，以及提供各種生態服務，包含養分循環、土壤水文功能和固定土壤汙染物，在不同層面上支持這些物種。
土壤密封	透過限制礦化作用（Wei et al., 2014）和相關的微生物呼吸作用，包封（encapsulation）可促進土壤有機碳的保留；然而，Lu 等人（2020）描述在密封之前的施工過程中，會移除和重新分配富含土壤有機碳的表土（top soil），而這種移除可能會在密封其間減少碳庫存。此外，現有的研究顯示，在密封區域土壤有機碳和氮的含量皆低於鄰近的未密封土壤（Raciti et al., 2012; Piotrowska-Dlugosz and Charzynski, 2015）。
土壤壓實	增加都市土壤中的土壤有機碳含量之好處是降低土壤容積密度。雖然壓實很常見於城市地區，但 Scharenbroch 等人（2005）觀察到，隨著時間推移，有植被的城市地區之土壤容積密度有所下降。一些管理措施隨著時間推移可以減輕表面壓實；例如開始的耕犁能鬆動壓實的土壤，而隨後再種植強壯或深根性的植被，並添加有機殘留物（Lorenz and Lal, 2015）。
土壤水分管理	增加都市土壤中的土壤有機碳含量可以大大改善土壤結構，進而增加水的滲透力（Beniston, Lal and Mercer, 2014），並減少雨天的逕流。此外，添加有機物也能減少科技土的蒸散率（Robin et al., 2018）。
土壤溫度	土壤有機質能改善都市土壤上的植物生產力，進而帶來城市綠化的生態效益。生產力的增加帶來當地氣候、碳儲量和土壤溫度等調節服務的改善（Morel, Chenu and Lorenz, 2014）。

4.2. 增加生產與糧食安全

土壤有機碳透過增強土壤功能（如養分循環），同時改善土壤性質（如陽離子交換能力和保水力），並降低容積密度等，來支持都市土壤的糧食生產。在情況允許時，支持植被的都市土壤可以用來生產糧食，例如地裡種植（*in-ground planting*）、構成土種植（*constructed planting*）、高架苗床（*raised bed*）和屋頂花園（*rooftop garden*）（Grard et al., 2018, 2020）。在都市土壤和構成土（*constructed soil*）中所生產的食物，可以幫助緩解城市社區的糧食安全問題，在這些社區中要取得新鮮農產品較為困難。

4.3. 改善人類福祉

富含有機碳的健康都市土壤為城市居民提供各種社會、環境和經濟效益，而效益與綠地和其他透水區域（*pervious area*）有關。Zhou 和 Parves Rana (2012) 描述了與城市綠地（*green space*）相關的社會效益，包括娛樂機會、美學欣賞、身體健康、心理健康、增強社會聯繫（*social tie*）和教育機會（Sanyé-Mengual et al., 2018）。

其他由都市土壤和構成土提供的生態系統服務包括食物生產、暴雨管理（*stormwater management*）、地下水補給和緩解城市熱島效應。植被也是調節氣候和空氣品質的重要因素（Morel, Chenu and Lorenz, 2014）。居民福利的改善，以及從社區支持農業（*community supported agriculture*）、都市耕作、園地栽種（*gardening*）和園藝植物的收入，帶來相關經濟效益。城市花園、城市農場和綠屋頂（*green roof*）也支持糧食生產（Morel, Chenu and Lorenz, 2014）。都市土壤也提供一個生活環境來創造授粉者的棲地，增加蝴蝶和蜜蜂的數量；授粉物種對糧食生產相當重要，因此創造出適合棲地，讓其順利繁衍是極為重要的。

4.4. 緩解和適應氣候變遷

都市土壤中的土壤碳庫存和固存有緩解氣候變遷的潛力（Morel, Chenu and Lorenz, 2014）。土壤可提供多種生態服務，包括那些受到城市活動嚴重影響的土壤。例如構成科技土（*constructed Technosol*）和其他由人類運輸材料所形成的土壤。土壤提供可當作碳匯的潛力，可以做為支持未來抵消大氣碳增加的力量。都市土壤碳庫存在場地建立後會隨時間逐漸累積，例如在法國，測量構成科技土在 10 年內的碳庫存，其上 30 公分深度的總碳量高出參考地點有 50% 之多，而上 100 公分深度的總碳量則高出五倍（Rees et al., 2019）。都市土壤中的土壤碳儲量還包括土壤無機碳，如碳酸鹽和黑碳（包括生物炭）。碳酸鈣礦物質也可能從運輸材料的源頭保留下來（Lorenz and Lal, 2015），或透過人為過程添加。其他來源則包含外源碳（*xenobiotic carbon*），例如人造聚合物（*artificial polymers*）、多環芳香烴和其他有機汙染物，而這些有機汙染物會在在都市土壤中聚集，固存其中的碳（Vasenev and Kuzyakov, 2018）。

都市土壤除了擁有固有的性質外，還能夠藉由矽酸鹽礦物的礦物風化作用，來補集和封存大氣中的碳。而這些礦物來自粉碎的混凝土，並造成碳酸鹽的二次沉澱，成為都市土壤的土壤無機碳來源 (Washbourne et al., 2015)。

土壤有機碳在都市土壤中的累積也增加土壤有機碳對氣候變遷的適應力，特別是對於像乾旱和高降水的大雷雨 (thunderstorms) 此類極端事件 (Robin et al., 2018)。

5. 挑戰和趨勢概況

創造構成科技土（人類運輸材料）

土壤構成的過程會在底土層 (subsoil layer) 內創造更多的碳儲量 (Rees et al., 2019)。由於材料來源和開發措施，土壤碳含量可能在地下土層 (subsurface horizon) 中出現較高的濃度，而一些人類運輸 (human-transported) 和人類改變 (human-altered) 的材料可能有較高的汙染物含量。

可能的溫室氣體排放

草坪和綠地的持續維護需要使用有助於二氧化碳排放的設備 (Selhorst and Lal, 2013)。

土壤密封

密封促進在包封時土壤碳庫存的保留；然而，由於移除具高土壤有機碳含量的表土，被不透水地表所包封的土壤可能會有較低的土壤碳庫存。表土會在施工活動中被移除，而密封面以下的土壤，其累積更多土壤碳的能力有限 (Lu et al., 2020)。

濕地

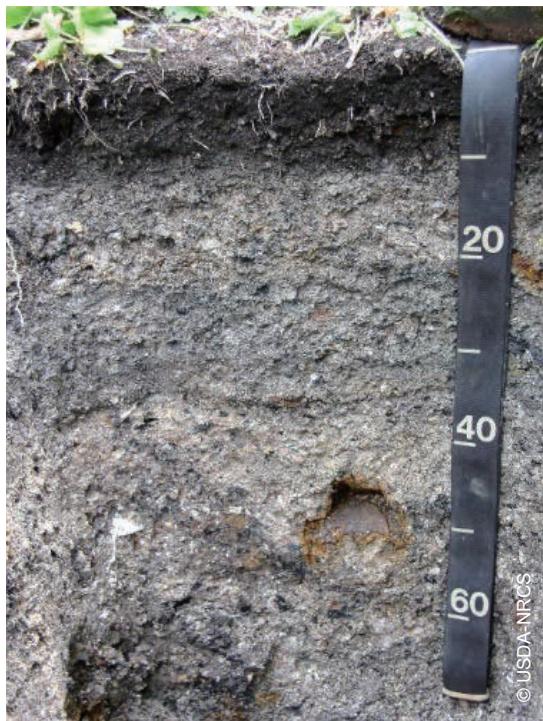
由於施工活動，排水或填土的作業造成濕地喪失，降低濕地固存土壤有機碳的能力。天然的初級碳收集環境因而被削弱，而現存於濕地系統的碳庫存也會揮發掉。

土壤壓實

基地開發過程中的施工活動所造成的壓實，會延遲植物成功定著，限制根的生長和深度，並增加土壤侵蝕和逕流。

綠色基礎設施

城市的樹木和草坪有助於提高都市土壤的土壤有機碳庫存 (Nowak and Crane, 2002; Zirkle, Lal and Augustin, 2011)。有機土壤改良劑，如堆肥和各種敷蓋，也增加了城市綠色基礎設施內的土壤有機碳庫存。此外，行道樹可以在遍布的不透水地區和其他高密度發展的城市地區提供土壤有機碳；然而，行道樹的設置和管理需很高的成本 (Kovacs et al., 2013)。綠屋頂是具有高土壤有機碳含量的構成土，在城市地區的重要性日益增加，而分布範圍也越來越廣 (Oberndorfer et al., 2007)。



照片 17. 人類改變和人類運輸材料類別之燃燒灰土的土壤剖面。美國紐約市布朗克斯區範可蘭公園 (Van Cortlandt Park) 的莫紹魯土系 (Moshulu soil series) · 其內含有 508.93 噸土壤有機碳 / 公頃



照片 18. 人類運輸材料類別之人工土的土壤剖面。美國紐約市皇后區法拉盛草原 (Flushing Meadows) 的拉瓜地亞土系 (Laguardia soil series) · 其內含有 612.2 噸土壤有機碳 / 公頃和 32.05 噸土壤無機碳 / 公頃



照片 19. 人類運輸材料類別之產業廢物土的土壤剖面。美國紐約市中央公園的北草原土系 (North Meadow soil series)，其內含有 364.91 噸土壤有機碳 / 公頃



表 32. 第 4 冊和第 6 冊中的相關案例研究

標題	地區	研究時間 (年)	冊數	案例研 究編號
法國昂熱在種樹木時使用廢棄物做為土壤碳儲存的來源	歐洲	3	6	22
法國巴黎屋頂的都市農業—T4P研究專案 (巴黎生產性屋頂的前導試驗專案)	歐洲	5	6	23
西班牙用於露天礦山土壤修復的有機改良劑	歐洲	6、10 和 18	6	24
英國萊斯特的都市森林對土壤碳的影響	歐洲	20~100	6	25
美國華盛頓州塔科馬市的都市農業	北美洲	1	6	26
美國芝加哥地區有林與無林都市樣區的土壤 有機碳	北美洲	多個時段	6	27
在美國維吉尼亞州蒙哥馬利縣施用堆肥以復 育干擾後土壤的健康	北美洲	4	6	28
美國加州觀賞性草坪和運動場地的管理	北美洲	2、10、 20 和 33	6	29
美國內布拉斯加州高爾夫球場的水分和殘體 管理	北美洲	4	6	30
美國紐約市都市潮汐濕地的沼澤地維護	北美洲	100	6	31

參考文獻

- Beniston, J.W., Lal, R. & Mercer, K.L.** 2014. Assessing and Managing Soil Quality for Urban Agriculture in a Degraded Vacant Lot Soil. *Land Degradation and Development*, 27: 4.
<https://doi.org/10.1002/ldr.2342>
- Brown, S.L., Chaney, R.L. & Hettiarachchi, G.M.** 2016. Lead in urban soils: A real or perceived concern for urban agriculture? *Journal of Environmental Quality*, 45: 26-36.
<https://doi.org/10.2134/jeq2015.07.0376>
- Craul, P.J.** 1999. *Urban Soils: Application and Practices*. New York, New York. John Wiley & Sons, Inc.
- Czimezik, C.I. & Masiello, C.A.** 2007. Controls on black carbon storage in soils. *Global Biogeochem. Cycles*, 21: 1-8. <https://doi.org/10.1029/2006GB002798>
- Edmondson, J.L., Davies, Z.G., McHugh, N., Gaston, K.J. & Leake, J.R.** 2012. Organic carbon hidden in urban ecosystems. *Scientific Reports*, 2(1): 963. <https://doi.org/10.1038/srep00963>
- Fleming, M., Tai, Y., Zhuang, P. & McBride, M.B.** 2013. Extractability and bioavailability of Pb and As in historically contaminated orchard soil: Effects of compost amendments. *Environmental Pollution*, 177: 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.02.013>
- Ge, Y., Murray, P. & Hendershot, W.H.** 2000. Trace metal speciation and bioavailability in urban soils. *Environmental Pollution*, 107(1): 137-144. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00119-0](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00119-0)
- Grard, B.J.-P., Chenu, C., Manouchehri, N., Houot, S., Frascaria-Lacoste, N. & Aubry, C.** 2017. Rooftop farming on urban waste provides many ecosystem services. *Agronomy for Sustainable Development*, 38(1): 2. <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0474-2>
- Grard, B.J.-P., Manouchehri, N., Aubry, C., Frascaria-Lacoste, N. & Chenu, C.** 2020. Potential of Technosols Created with Urban By-Products for Rooftop Edible Production. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph17093210>
- Joimel, S., Grard, B., Auclerc, A., Hedde, M., Le Doaré, N., Salmon, S. & Chenu, C.** 2018. Are Collembola “flying” onto green roofs? *Ecological Engineering*, 111: 117-124.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.12.002>
- Koelmans, A.A., Jonker, M.T.O., Cornelissen, G., Bucheli, T.D., Van Noort, P.C.M. & Gustafsson, Ö.** 2006. Black carbon: The reverse of its dark side. *Chemosphere*, 63(3): 365-377.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.08.034>
- Kovacs, K.F., Haight, R.G., Jung, S., Locke, D.H. & O’Neil-Dunne, J.** 2013. The marginal cost of carbon abatement from planting street trees in New York City. *Ecological Economics*, 95: 1-10.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.08.012>

- Lorenz, K. & Lal, R.** 2015. Managing soil carbon stocks to enhance the resilience of urban ecosystems. *Carbon Management*, 6(1–2): 35–50. <https://doi.org/10.1080/17583004.2015.1071182>
- Lu, C., Kotze, J. & Setälä, H.M.** 2020. Soil sealing causes substantial losses in C and N storage in urban soils under cool climate. *Science of the Total Environment*, 725. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138369>
- Morel, J.L., Chenu, C. & Lorenz, K.** 2015. Ecosystem services provided by soils of urban, industrial, traffic, mining, and military areas (SUITMAs). *Journal of Soils and Sediments*, 15(8): 1659–1666. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0926-0>
- NASA Image Gallery.** 2012. *Night Lights 2012 Map*. [online]. [Accessed 20 August 2020]. https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/79000/79765/dnb_land_ocean_icc.2012.3600x1800.jpg
- National Cooperative Soil Survey.** *National Cooperative Soil Survey Characterization Database*. [online]. [Accessed 17 July 2020]. <https://ncsslabdatamart.sc.egov.usda.gov/>
- Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture.** *Urban Soil Quality – Urban Technical Note 4. Urban Agriculture*. [online]. [Accessed 17 July 2020]. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcseprd1375814.pdf
- Nowak, D.J. & Crane, D.E.** 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116(3): 381–389. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R.R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K.K.Y. & Rowe, B.** 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *Bioscience*, 57: 823–833. <https://doi.org/10.1641/B571005>
- Piotrowska-Dlugosz, A. & Charzynski, P.** 2015. The impact of the soil sealing degree on microbial biomass, enzymatic activity, and physiochemical properties in the Ekranic Technosols of Torun (Poland). *J. Soils Sediments*, 15: 47-59. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0963-8>
- Pouyat, R.V., Yesilonis, I.D & Golubiewski, N.E.** 2009. A comparison of soil organic carbon stocks between residential turf grass and native soil. *Urban Ecosystems*, 12: 45-62. <https://doi.org/10.1007/s11252-008-0059-6>
- Raciti, S.M., Hutyra, L.R. & Finzi, A.C.** 2012. Depleted soil carbon and nitrogen pools beneath impervious surfaces. *Environ. Poll.*, 164: 248-251. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.046>
- Rees, F., Dagois, R., Derrien, D., Fiorelli, J., Watteau, F., Morel, J., Schwartz, C., Simonnot, M. & Sere, G.** 2019. Storage of carbon in constructed technosols: *in situ* monitoring over a decade. *Geoderma*, 337: 641-648. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.009>
- Robin, P., Morel, C., Vial, F., Landrain, B., Toudic, A., Li, Y. & Akkal-Corfini, N.** 2018. Effect of Three Types of Exogenous Organic Carbon on Soil Organic Matter and Physical Properties of a Sandy Technosol. *Sustainability*, 10(4): 1146. <https://doi.org/10.3390/su10041146>

Sanyé-Mengual, E., Specht, K., Krikser, T., Vanni, C., Pennisi, G., Orsini, F. & Gianquinto, G.P.
2018. Social acceptance and perceived ecosystem services of urban agriculture in Southern Europe: The case of Bologna, Italy. *PLOS ONE*, 13(9): e0200993. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0200993>

Scharenbroch, B., Lloyd, J. & Johnson-Maynard, J. 2005. Distinguishing urban soils with physical, chemical, and biological properties. *Pedobiologia*, 49(4): 283–296.
<https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2004.12.002>

Selhorst, A. & Lal, R. 2013. Net carbon sequestration potential and emissions in home lawn turfgrasses of the United States. *Environmental Management*, 51(1): 198–208. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9967-6>

Vasenev, V. & Kuzyakov, Y. 2018. Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors. *Land Degradation and Development*, 29(6): 1607–1622.
<https://doi.org/10.1002/ldr.2944>

Washbourne, C.-L., Lopez-Capel, E., Renforth, P., Ascough, P.L. & Manning, D.A.C. 2015. Rapid removal of atmospheric CO₂ by urban soils. *Environmental Science & Technology*, 49(9): 5434–5440.
<https://doi.org/10.1021/es505476d>

Wei, Z., Wu, S., Yan, X. & Zhou, S. 2014. Density and Stability of Soil Organic Carbon beneath Impervious Surfaces in Urban Areas. *PLOS ONE*, 9(10): e109380. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0109380>

Yang, J.L. & Zhang, G.L. 2015. Formation, characteristics and eco-environmental implications of urban soils – A review. *Soil Science and Plant Nutrition*, 61: 30–46.
<https://doi.org/10.1080/00380768.2015.1035622>

Zirkle, G., Lal, R. & Augustin, B. 2011. Modeling Carbon Sequestration in Home Lawns. *HortScience*, 46(5): 808–814. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.46.5.808>

Zhou, X. & Parves Rana, M. 2012. Social benefits of urban green space: A conceptual framework of valuation and accessibility measurements. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 23(2): 173–189. <https://doi.org/10.1108/14777831211204921>



附錄

附錄 1. 热帶潤濕森林 – 補充文件

附錄 1A. 热帶潤濕森林的土壤有機碳資料與參考文獻

地點	國家	洲別	土壤有機 碳 (噸碳 / 公頃)	土壤深度 (公分)	參考文獻
賓比亞 (Bimbia) - Bonadikombo 社區森林	喀麥隆 (Cameroon)	非洲	17.7	30	Longonje et al. (2018)
杜美公有林 (Doume Communal Forest)	喀麥隆	非洲	39.39	20	Zekeng et al. (2020)
喀麥隆東部 (古森林)	喀麥隆	非洲	106.4	100	Sugihara et al. (2019)
喀麥隆火山	喀麥隆	非洲	65.4	30	Tegha et al. (2016)
坎普馬安 (Campo-Ma'an) 技術營運單位 (Technical Operational Unit)	喀麥隆	非洲	78.5	50	Lontsi et al. (2019)
基桑加尼的 Yoko 生物圈保護區 (Kisangani- Yoko Biosphere Reserve)	剛果民主共和國 (Democratic Republic of the Congo)	非洲	44.2	90	Doetterl et al. (2015)
基桑加尼楊甘比生物圈保護區 (Kisangani-Yangambi Biosphere Reserve)	剛果民主共和國	非洲	109.5	90	Doetterl et al. (2015)
貝利特森林 (Belete Forest)	衣索比亞 (Ethiopia)	非洲	88.3	50	Lemma et al. (2006)
格拉 (Gera)	衣索比亞	非洲	47.88	30	Mohammed et al. (2006)
沙沙梅恩森林 (Shashamane Forest)	衣索比亞	非洲	89.13	80	Lemenih et al. (2005)
上加切布流域 (Upper Gacheb Catchment)	衣索比亞	非洲	183.5	80	Kasa et al. (2017)
舞什舞什 (Wushwush)	衣索比亞	非洲	9.9	10	Solomon et al. (2002)
比魯古國家公園 (Mount. Birougou National Park)	加蓬 (Gabon)	非洲	93	100	Guatam et al. (2018)

地點	國家	洲別	土壤有機碳（噸碳/公頃）	土壤深度（公分）	參考文獻
安卡沙森林 (Ankasa Forest)	迦納 (Ghana)	非洲	82.95	100	Chiti et al. (2010)
約莫羅區 (Jomoro District) 原始林 (Primary Forest)	迦納	非洲	168.87	100	Chiti et al. (2013)
約莫羅區次生林 (Secondary Forest)	迦納	非洲	137.2	100	Chiti et al. (2013)
卡庫姆國家公園 (Kakum National Park)	迦納	非洲	349.38	40	Adu-Bredou et al. (未發表的資料)*
Bobiri 森林保護區老生林 (Old-growth forest)	迦納	非洲	259	100	Addo-Danso et al. (未發表的資料)*
半落葉林 (Semi-deciduous Forest) 阿特威瑪恩瓦比亞吉亞 (Atwima Nwabiagya)	迦納	非洲	45.6	20	Dawoe et al. (2014)
邦科高原 (Banco plateau)	象牙海岸 (Ivory Coast)	非洲	107.5	50	Reversat et al. (1978)
東茅森林保護區 (Eastern Mau Forest Reserve)	肯亞 (Kenya)	非洲	110	30	Wereet al. (2016)
卡卡梅加國家森林 (Kakamega National Forest) 老樹 (Old trees)	肯亞	非洲	100	60	Glenday (2006)
卡卡梅加國家森林幼樹 (Young trees)	肯亞	非洲	63	60	Glenday (2006)
茅森林綜合保護區 (Mau Forest Complex) 山地森林	肯亞	非洲	185	100	Chiti et al. (2017)
泰塔山 (Taita Hills) 殘留原生林 (Remnant Indigenous forest)	肯亞	非洲	305	50	Omoro et al. (2013)
Ankeniheny-Zahamena 廊道	馬達加斯加 (Madagascar)	非洲	136.2	100	Andriamananjara et al. (2016)
熱帶潤濕森林	奈及利亞 (Nigeria)	非洲	117.6	100	Akpa et al. (2016)
魯卡拉拉河流域 (Rukarara catchment)	盧安達 (Rwanda)	非洲	310	50	Wasige et al. (2014)
東烏桑巴拉山脈 (Eastern Usambara Mountain) 原始林	坦尚尼亞 (United Republic of Tanzania)	非洲	97.5	100	Kirsten et al. (2016)
東烏桑巴拉山脈次生林	坦尚尼亞	非洲	101.5	100	Kirsten et al. (2016)
哈南森林保護區 (Hanang Forest Reserve)	坦尚尼亞	非洲	22.85	45	Swai et al. (2014)
布恩迪難以穿越的國家公園 (Bwindi Impenetrable National Park)	烏干達 (Uganda)	非洲	34.2	30	Twongyirwe et al. (2013)
Burahya 郡	烏干達	非洲	20.36	15	Majaliwa et al. (2010)
雲南省西雙版納	中國	亞洲	50	100	Tang et al. (2016)
潮濕的落葉林	印度	亞洲	85.52	100	Chhabra et al. (2003)

地點	國家	洲別	土壤有機碳 (噸碳 / 公頃)	土壤深度 (公分)	參考文獻
西高止山脈 (Western Ghats) 的常綠森林	印度	亞洲	75.1	30	Subashree et al. (2019)
西高止山脈的半常綠森林 (Semi-evergreen Forest)	印度	亞洲	68.9	30	Subashree et al. (2019)
低地熱帶雨林	印尼	亞洲	27.5	100	Yonekura et al. (2010)
帕索 (Pasoh)	馬來西亞	亞洲	70	100	DeAngelis et al. (2003)
沙巴 (Sabah) 京那巴魯山 (Mount. Kinabalu)	馬來西亞	亞洲	54.83	100	Kitayama and Aiba (2020)
Berembun 森林保護區未伐林 (Unlogged Forest)	馬來西亞	亞洲	87.86	100	Abdulahi et al. (2018)
Berembun 森林保護區已伐林 (Logged Forest)	馬來西亞	亞洲	65.66	100	Abdulahi et al. (2018)
婆羅洲島 (Borneo Island)	馬來西亞	亞洲	39.6	100	Saner et al. (2012)
砂拉越 (Sarawaka)	馬來西亞	亞洲	39.5	70	Rahman et al. (2018)
武吉知馬 (Bukit Timah) 自然保護區原始林	新加坡	亞洲	110.8	300	Ngo et al. (2013)
Khao Chong	泰國	亞洲	37.5	100	Yoda and Kira (1969)
Mor Ridge	牙買加 (Jamaica)	加勒比海地區	125	45	Tanner (1985)
綠里 (El Verde) 墾基約實驗林 (Luquillo Experimental Forest)	波多黎各 (Puerto Rico)	加勒比海地區	57	100	Brown et al. (1983)
科羅拉多森林 (Colorado)	波多黎各	加勒比海地區	95	50	Weaver and Murphy (1990)
巴羅科羅拉多島 (Barro Colorado Island)	巴拿馬 (Panama)	中美洲	22.4	5	Shwendemann et al, (2007)
巴拿馬地峽 (Isthmus) 的低地森林	巴拿馬	中美洲	133	100	Cusack et al. (2018)
洛帕霍霍 (Laupo-hoehoe) 森林保護區	夏威夷	北美洲	76.8	20	Townsend et al. (1995)
薩魯瓦吉德嶺 (Saruwaged Mountain Range)	巴布亞紐幾內亞 (Papua New Guinea)	太平洋地區	194	100	Dieleman et al, (2013)
山地雨林	巴布亞紐幾內亞	太平洋地區	300	100	Edwards and Grubb (1977)
伊加拉佩阿蘇和佩謝博伊 (Igarape-Acu and Peix-Boi)	巴西 (Brazil)	南美洲	186	600	Sommer et al. (2000)
馬瑙斯 (Manaus) 鐵拉菲爾梅森林 (Terra Firme Forest)	巴西	南美洲	20.16	30	Santos et al. (2016)

地點	國家	洲別	土壤有機 碳 (噸碳 / 公頃)	土壤深度 (公分)	參考文獻
帕拉州 (Pará State) 亞馬遜東部的原始林	巴西	南美洲	280	800	Trumbore et al. (1995)
馬托格羅索州和帕拉州 (Mato Grosso and Pará State)	巴西	南美洲	52.05	100	Strey et al. (2016)
河二號水力發電站 (Porce II)	哥倫比亞 (Colombia)	南美洲	48.3	30	Sierra et al. (2007)
中部山脈 (Central Cordillera) 原始林	哥倫比亞	南美洲	114	40	Moreno and Oberbauer (2008)
拉塞爾 (La Selva)	哥斯大黎加 (Costa Rica)	南美洲	330	300	VeldKamp et al. (2003)
東安地斯山脈 (Eastern Andes)	厄瓜多 (Ecuador)	南美洲	219.33	50	Leuschner et al. (2013)
低山地森林	厄瓜多	南美洲	23.88	100	Rhoades et al. (2000)
薩莫拉欽奇佩和洛哈 (Zamora-chinchipe and Loja) 的山地森林	厄瓜多	南美洲	70.3	30	Moser et al. (2011)
馬努國家公園 (Manu National Park)	秘魯 (Peru)	南美洲	118	90	Zimmermann et al. (2010)
馬努國家公園–山地森林 (原始林)	秘魯	南美洲	158.65	90	Oliveras et al. (2017)
馬努國家公園–山地森林 (燃燒過的森林)	秘魯	南美洲	99.1	90	Oliveras et al. (2017)
熱帶雨林 (中海拔地區)	秘魯	南美洲	41.5	30	Segnini et al. (2011)
蒙塔諾森林 (Montano Forest) 韋奇查生物站 (Wayqecha Biological Station)	秘魯	南美洲	182.5	30	Segnini et al. (2011)
低地潤濕森林	委內瑞拉	南美洲	111.67	100	Delaney et al. (1997; 1998)

* 需要時可提供資料

附錄 1B：由於熱帶濕潤森林轉化為其他土地用途而導致的土壤有機碳變化資料與參考文獻

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳變化 (%)	參考文獻
從森林轉為種植園 (Forest to plantation)	迦納	非洲	-27.8	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-20.7	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-9.2	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-61.0	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-57.0	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-56.1	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-35.8	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-34.5	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-32.6	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-55.8	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-60.0	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-59.3	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-23.5	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-28.6	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	迦納	非洲	-30.0	Chiti et al. (2014)
從森林轉為種植園	奈及利亞	非洲	-0.7	Aborisade and Aweto (1990)
從森林轉為種植園	奈及利亞	非洲	19.4	Aborisade and Aweto (1990)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-45.1	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-37.9	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-62.5	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-54.5	Saha et al. (2010)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-43.1	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-41.4	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-41.7	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-22.7	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-31.4	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-34.5	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-39.6	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-22.7	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-25.5	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-37.9	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-39.6	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印度	亞洲	-27.3	Saha et al. (2010)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-33.9	Hertl et al. (2009)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-14.0	Hertl et al. (2009)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-6.1	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-10.9	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-13.9	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-7.6	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	28.3	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-0.7	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-49.4	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-60.7	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-22.3	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	17.6	Ishizuka et al. (2005)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	2.0	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	68.4	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-35.2	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	47.0	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	23.3	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	10.9	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	158.5	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	208.0	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	14.2	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	6.9	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	155.7	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-53.6	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-26.4	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	6.7	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	20.7	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	1.2	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-34.0	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-2.3	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-6.3	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-3.9	Smiley and Kroschel (2008)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-24.3	Guillaume et al. (2015)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-13.4	Guillaume et al. (2015)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-39.7	Guillaume et al. (2015)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-18.2	Guillaume et al. (2015)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化(%)	參考文獻
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-42.2	Guillaume et al. (2015)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-23.9	Guillaume et al. (2015)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	18.4	Frazao et al. (2013)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-13.8	Guillaume et al. (2018)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	7.3	Guillaume et al. (2018)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-10.0	Guillaume et al. (2018)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	8.3	Guillaume et al. (2018)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-31.2	Guillaume et al. (2018)
從森林轉為種植園	印尼	亞洲	-14.2	Guillaume et al. (2018)
從森林轉為種植園	阿根廷	南美洲	-42.3	Piccolo et al. (2008)
從森林轉為種植園	巴西	南美洲	-26.0	Smith et al. (2002)
從森林轉為種植園	巴西	南美洲	-18.8	Smith et al. (2002)
從森林轉為種植園	巴西	南美洲	-12.5	Smith et al. (2002)
從森林轉為種植園	巴西	南美洲	18.8	Smith et al. (2002)
從森林轉為牧草地 (Forest to pasture)	孟加拉	亞洲	52.3	Islam et al. (2000)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	-33.8	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	-18.1	Ishizuka et al. (2005)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	-0.9	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	17.5	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	23.9	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	22.1	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	20.7	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	22.0	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	22.9	Yonekura et al. (2010)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化(%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	-15.9	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	5.0	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	20.6	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	23.4	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	24.8	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	26.7	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	印尼	亞洲	27.5	Yonekura et al. (2010)
從森林轉為牧草地	多明尼加	加勒比海地區	-36.4	Templer et al. (2005)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	12.7	Brown and Lugo (1990)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	-71.3	Brown and Lugo (1990)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	56.8	Brown and Lugo (1990)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	-53.4	Brown and Lugo (1990)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	64.0	Brown and Lugo (1990)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	2.9	Marin-Spiotta et al. (2009)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	-6.1	Marin-Spiotta et al. (2009)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	1.2	Marin-Spiotta et al. (2009)
從森林轉為牧草地	波多黎各	加勒比海地區	-2.2	Marin-Spiotta et al. (2009)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	22.2	Cleveland et al. (2003)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	8.8	Cleveland et al. (2003)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-19.4	Guggenberger and Zech (1999)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-20.1	Krishnaswamy and Richter (2002)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-4.8	Powers and Veldkamp (2005)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-19.9	Reiners et al. (1994)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-21.2	Reiners et al. (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-24.5	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-31.7	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-10.3	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	11.7	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-17.1	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	14.8	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	56.2	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	31.8	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-19.9	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	10.0	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	19.6	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	19.9	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	4.5	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	15.6	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	11.0	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	24.7	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	22.8	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	32.3	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-21.5	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-19.7	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-19.2	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-18.3	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-12.9	Van Dam et al. (1997)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-1.1	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-4.9	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	7.2	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	13.6	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-10.5	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-17.2	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-31.0	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-24.8	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-28.1	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-13.7	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	10.1	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-15.6	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-28.3	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-36.4	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-28.9	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-28.4	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-13.5	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	8.0	Van Dam et al. (1997)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	35.5	Veldkamp et al. (2003)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-24.1	Veldkamp et al. (2003)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-24.2	Veldkamp et al. (2003)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	56.6	Veldkamp et al. (2003)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	14.0	Veldkamp et al. (2003)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-5.9	Veldkamp et al. (2003)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-29.2	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-3.7	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-4.5	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-25.9	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-26.7	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-30.0	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	11.1	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-20.0	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-10.0	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	7.4	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-13.3	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-30.0	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-40.0	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-30.0	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	14.8	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	6.7	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	20.0	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	61.5	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	20.0	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-7.7	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	7.7	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	哥斯大黎加	中美洲	-7.7	Veldkamp (1994)
從森林轉為牧草地	墨西哥	中美洲	55.2	Campos et al. (2007)
從森林轉為牧草地	墨西哥	中美洲	12.7	Garcia-Oliva et al. (1994)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化(%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	墨西哥	中美洲	31.6	Garcia-Oliva et al. (1994)
從森林轉為牧草地	墨西哥	中美洲	-12.7	Garcia-Oliva et al. (1994)
從森林轉為牧草地	墨西哥	中美洲	-6.6	Garcia-Oliva et al. (1994)
從森林轉為牧草地	墨西哥	中美洲	-24.6	Hughes et al. (2000)
從森林轉為牧草地	墨西哥	中美洲	23.1	Jaramillo et al. (2003)
從森林轉為牧草地	墨西哥	中美洲	29.9	Jaramillo et al. (2003)
從森林轉為牧草地	巴拿馬	中美洲	-31.7	Schwendemann and Pendall (2006)
從森林轉為牧草地	巴拿馬	中美洲	-14.4	Schwendemann and Pendall (2006)
從森林轉為牧草地	巴拿馬	中美洲	-25.2	Schwendemann and Pendall (2006)
從森林轉為牧草地	巴拿馬	中美洲	-27.9	Schwendemann and Pendall (2006)
從森林轉為牧草地	巴拿馬	中美洲	-18.8	Schwendemann and Pendall (2006)
從森林轉為牧草地	巴拿馬	中美洲	-25.3	Schwendemann and Pendall (2006)
從森林轉為牧草地	巴拿馬	中美洲	-16.7	Schwendemann and Pendall (2006)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	-21.4	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	20.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	27.4	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	0.3	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	21.1	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	33.8	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	33.3	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	22.8	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	16.4	Osher et al. (2003)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	-5.2	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	-5.9	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	1.1	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	26.4	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	61.8	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	38.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	-4.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	6.1	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	-0.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	-0.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	-11.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	19.6	Townsend et al. (1995)
從森林轉為牧草地	夏威夷	北美洲	-7.7	Townsend et al. (1995)
從森林轉為牧草地	澳洲	大洋洲	27.0	Mendham et al. (2003)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	26.0	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	50.0	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	60.0	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	10.3	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	32.0	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	33.0	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-3.2	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	4.8	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	11.7	da Silva et al. (2009)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	17.7	Desjardins et al. (1994)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-4.0	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-10.1	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	38.8	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-3.8	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-8.8	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	45.2	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	1.7	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-10.8	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	22.9	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	11.1	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	3.5	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	37.2	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	11.3	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	3.5	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	64.9	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	4.7	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-6.3	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-2.7	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-12.5	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-5.7	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-4.7	Desjardins et al. (1994)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	34.6	Fernandes et al. (2002)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	40.0	Fernandes et al. (2002)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	92.3	Fernandes et al. (2002)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	30.0	Fernandes et al. (2002)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	23.1	Fernandes et al. (2002)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	56.3	Kainer et al. (1998)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	5.5	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-7.3	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-20.2	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	31.0	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	22.6	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	9.8	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	9.9	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-11.1	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-20.0	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	6.9	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	5.9	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	8.1	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	30.2	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-4.4	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-13.2	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	10.4	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	20.7	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	23.7	Koutika et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-8.3	Luizao et al. (1992)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-10.8	Luizao et al. (1992)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-40.8	Macedo et al. (2008)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-33.9	Macedo et al. (2008)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-38.7	Macedo et al. (2008)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-34.5	Macedo et al. (2008)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-43.6	Macedo et al. (2008)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-41.9	Macedo et al. (2008)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	7.7	Markewitz et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	6.1	Markewitz et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-24.8	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-5.2	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	2.0	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	6.2	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	22.7	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-1.6	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-1.8	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-18.3	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	9.0	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	7.1	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	52.9	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	35.6	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	49.1	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	23.2	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	32.3	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	9.9	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	37.8	Neill et al. (1997)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	20.1	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	59.2	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	45.2	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	79.1	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	54.8	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	37.6	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	44.9	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	60.6	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	33.2	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	64.6	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	43.1	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	64.1	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	29.6	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	54.4	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	50.2	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	24.2	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-5.6	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	50.6	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	7.7	Neill et al. (1997)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	70.8	Salimon et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	28.4	Salimon et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	27.1	Salimon et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	23.8	Salimon et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	44.4	Salimon et al. (2004)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	59.7	Salimon et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	47.2	Salimon et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	48.1	Salimon et al. (2004)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	11.9	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	25.0	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	62.9	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	11.4	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	13.9	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	38.1	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	11.6	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-1.8	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-6.8	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	13.6	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	-23.2	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	9.3	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	巴西	南美洲	3.4	Wick et al. (2005)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	38.0	Paul et al. (2008)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	0.7	Paul et al. (2008)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-14.8	Paul et al. (2008)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-14.8	Paul et al. (2008)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-11.2	Paul et al. (2008)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	9.3	Paul et al. (2008)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-1.8	Paul et al. (2008)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-3.2	Paul et al. (2008)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-17.2	Rhoades et al. (2000)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-9.8	Rhoades et al. (2000)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-22.9	Rhoades et al. (2000)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-15.1	Rhoades et al. (2000)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	2.3	Rhoades et al. (2000)
從森林轉為牧草地	厄瓜多	南美洲	-2.7	Rhoades et al. (2000)
從森林轉為作物 (Forest to crop)	衣索比亞	非洲	-16.6	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	96.3	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-34.0	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	85.5	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-37.0	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	78.7	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-46.6	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	58.1	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-50.4	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	35.5	Lemenih et al. (2005)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-76.6	Lemma et al. (2006)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-56.2	Lemma et al. (2006)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-33.4	Lemma et al. (2006)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-22.2	Lemma et al. (2006)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-29.1	Lemma et al. (2006)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-54.9	Solomon et al. (2002)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	-63.1	Solomon et al. (2002)
從森林轉為作物	衣索比亞	非洲	45.0	Yimer et al. (2007)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化(%)	參考文獻
從森林轉為作物	馬達加斯加	非洲	-42.9	Vågen et al. (2006)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-75.0	Aina (1979)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-14.6	Ghuman and Lal (1991)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-41.6	Ghuman and Lal (1991)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-24.2	Ghuman and Lal (1991)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-37.6	Ghuman and Lal (1991)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-27.0	Ghuman and Lal (1991)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-40.4	Ghuman and Lal (1991)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-28.7	Ghuman and Lal (1991)
從森林轉為作物	奈及利亞	非洲	-42.7	Ghuman and Lal (1991)
從森林轉為作物	印度	亞洲	-57.8	Chandran et al. (2009)
從森林轉為作物	印度	亞洲	-58.4	Chandran et al. (2009)
從森林轉為作物	印度	亞洲	-58.3	Chandran et al. (2009)
從森林轉為作物	印度	亞洲	-62.8	Chandran et al. (2009)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-32.9	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-28.2	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-40.5	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-32.5	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-21.0	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-42.6	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-25.0	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-28.5	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-5.7	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-14.3	Dechert et al. (2004)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化(%)	參考文獻
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-8.3	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-9.4	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-38.1	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	印尼	亞洲	-34.8	Dechert et al. (2004)
從森林轉為作物	泰國	亞洲	-28.4	Jaiarree et al. (2011)
從森林轉為作物	泰國	亞洲	-52.3	Jaiarree et al. (2011)
從森林轉為作物	泰國	亞洲	-58.6	Jaiarree et al. (2011)
從森林轉為作物	馬丁尼克	加勒比海	-27.8	Feller et al. (2001)
從森林轉為作物	馬丁尼克	加勒比海	-42.7	Feller et al. (2001)
從森林轉為作物	馬丁尼克	加勒比海	-33.9	Feller et al. (2001)
從森林轉為作物	馬丁尼克	加勒比海	-54.8	Feller et al. (2001)
從森林轉為作物	馬丁尼克	加勒比海	-60.3	Feller et al. (2001)
從森林轉為作物	馬丁尼克	加勒比海	-16.7	Feller et al. (2001)
從森林轉為作物	波多黎各	加勒比海	-34.5	Brown and Lugo (1990)
從森林轉為作物	波多黎各	加勒比海	-70.4	Brown and Lugo (1990)
從森林轉為作物	波多黎各	加勒比海	1.1	Brown and Lugo (1990)
從森林轉為作物	哥斯大黎加	中美洲	-15.1	Powers (2004)
從森林轉為作物	哥斯大黎加	中美洲	-4.2	Powers (2004)
從森林轉為作物	哥斯大黎加	中美洲	28.4	Powers (2004)
從森林轉為作物	墨西哥	中美洲	-38.2	Hughes et al. (2000)
從森林轉為作物	墨西哥	中美洲	38.4	Hughes et al. (2000)
從森林轉為作物	墨西哥	中美洲	-14.4	Hughes et al. (2000)
從森林轉為作物	墨西哥	中美洲	-38.2	Hughes et al. (2000)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-37.0	Bashkin and Binkley (1998)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化(%)	參考文獻
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-48.9	Bashkin and Binkley (1998)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-26.8	Bashkin and Binkley (1998)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-44.2	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-31.1	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-35.7	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-43.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-27.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-4.6	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-22.8	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-25.2	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-13.2	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-32.6	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-23.5	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	6.1	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	65.0	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	31.0	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-10.0	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-13.9	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-30.8	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-13.0	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	夏威夷	北美洲	-30.0	Osher et al. (2003)
從森林轉為作物	索羅門群島	大洋洲	-59.3	Wairu et al. (2003)
從森林轉為作物	索羅門群島	大洋洲	-26.8	Wairu et al. (2003)
從森林轉為作物	巴西	南美洲	-20.3	Denef et al. (2007)

土地利用轉型	國家	地區	土壤有機碳 變化 (%)	參考文獻
從森林轉為作物	巴西	南美洲	1.5	Denef et al. (2007)
從森林轉為作物	巴西	南美洲	-39.2	Denef et al. (2007)
從森林轉為作物	巴西	南美洲	-6.5	Denef et al. (2007)
從森林轉為作物	巴西	南美洲	-34.9	Denef et al. (2007)
從森林轉為作物	巴西	南美洲	-0.2	Denef et al. (2007)
從森林轉為作物	巴西	南美洲	-38.6	Denef et al. (2007)
從森林轉為作物	巴西	南美洲	-5.0	Denef et al. (2007)
從森林轉為作物	巴西	南美洲	65.0	Eden et al. (1990)
從森林轉為作物	厄瓜多	南美洲	-28.7	Rhoades et al. (2000)
從森林轉為作物	厄瓜多	南美洲	-14.7	Rhoades et al. (2000)
從森林轉為作物	厄瓜多	南美洲	-7.6	Rhoades et al. (2000)

附錄 1. 參考文獻

- Abdullai, A.C., Siwar, C., Shaharudin, M.I. & Anizan, I.** 2018. The effect of forest types and land use on soil carbon stock in Malaysian dipterocarps forest. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5: 11-17.
- Aina, P.O.** 1979. Soil changes resulting from long-term management-practices in Western Nigeria. *Soil Science Society of America Journal*, 43: 173-177.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1979.03615995004300010033x>
- Akpa, S.I.C., Odeh, I.O.A., Bishop, T.F.A., Hartemink, A.E. & Amapu, I.Y.** 2016. Total soil organic carbon and carbon sequestration potential in Nigeria. *Geoderma*, 271: 202-215.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.021>
- Andriamananjara, A., Hewson, J., Razakamanarivo, H., Razakamanarivo, H., Andrisoa, R.H., Ranaivoson, N., Ramboatiana, N., Razafindrakoto, M., Ramifehiarivo, N., Razafimanantsoa, M-P., Rabeharisoa, L., Ramananantoandro, T., Rasolohery, A., Rabetokotany, N. & Razafimbelo, T.** 2016. Land cover impacts on aboveground and soil carbon stocks in Malagasy rainforest. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 233: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.030>
- Bashkin, M.A. & Binkley, D.** 1998. Changes in soil carbon following afforestation in Hawaii. *Ecology*, 79: 828-838. <https://doi.org/10.2307/176582>
- Bernhard-Reversat, F., Huttel, C. & Lemee, G.** 1978. Structure and functioning of evergreen rainforest ecosystems of the Ivory Coast. In *Tropical Forest Ecosystems: A state of the knowledge report*. Pp. 557-574 UNESCO, Paris, France.
- Brown, S. & Lugo, A.E.** 1990. Effects of forest clearing and succession on the carbon and nitrogen-content of soils in Puerto-Rico and US Virgin Islands. *Plant and Soil*, 124: 53-64.
<https://doi.org/10.1007/BF00010931>
- Brown, S., Lugo, A.E., Silander, S. & Liegel, L.** 1983. Research history and opportunities in the Luquillo Experimental Forest. General Technical Report SO-44, USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, New Orleans, Louisiana, USA. <https://doi.org/10.2737/SO-GTR-44>
- Campos, A.C., Oleschko, K.L., Etchevers, J.B. & Hidalgo, C.M.** 2007. Exploring the effect of changes in land use on soil quality on the eastern slope of the Cofre de Perote Volcano (Mexico). *Forest Ecology and Management*, 248: 174-182. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.05.004>
- Chandran, P., Ray, S.K., Durge, S.L., Raja, P., Nimkar, A.M., Bhattacharyya, T. & Pal, D.K.** 2009. Scope of horticultural land-use system in enhancing carbon sequestration in ferruginous soils of the semi-arid tropics. *Current Science*, 97(7): 1039–1046.
- Chhabra, A., Palria, S. & Dadhwal, V.K.** 2003. Soil organic carbon pool in India forests. *Forest ecology and Management*, 173: 187-199. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00016-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00016-6)

- Chiti, T., Certini, G., Grieco, E. & Valentini, R.** 2010. The role of soil in storing carbon in tropical rainforests: the case of Ankasa Park, Ghana. *Plant and Soil*, 331: 453-461.
<https://doi.org/10.1007/s11104-009-0265-x>
- Chiti, T., Diaz-Pines, E., Butterbach-Bahl, K., Marzaioli, F. & Valentini, R.** 2017. Soil organic carbon changes following degradation and conversion to cypress and tea plantations in a tropical mountain forest in Kenya. *Plant and Soil*, 422: 527-539. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3489-1>
- Chiti, T., Grieco, E., Perugini, L., Rey, A. & Valentini, R.** 2014. Effect of the replacement of tropical forests with tree plantations on soil organic carbon levels in the Jomoro district, Ghana. *Plant and Soil*, 375: 47-59. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1928-1>
- Cleveland, C.C., Townsend, A.R., Schmidt, S.K. & Constance, B.C.** 2003. Soil microbial dynamics and biogeochemistry in tropical forests and pastures, Southwestern Costa Rica. *Ecological Applications*, 13: 314-326. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2003\)013\[0314:SMDABI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2003)013[0314:SMDABI]2.0.CO;2)
- da Silva Junior, M.L., Desjardins, T., Sarrazin, M., Silva de Melo, da Silva Martins, V., Rodrigues Santos, E. & Reis de Carvalho, C.J.** 2009. Carbon content in Amazonian Oxisols after forest conversion to pasture. *Revista Brasileira de Ciéncia do Solo*, 33: 1603-1611. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600009>
- Dawoe, E.K., Quarshie-Sam, J.S. & Oppong, S.K.** 2014. Effect of land-use conversion from forest to cocoa agroforest on soil characteristics and quality of a Ferric Lixisol in lowland humid Ghana. *Agroforestry Systems*, 88: 87-99. <https://doi.org/10.1007/s10457-013-9658-1>
- DeAngelis, D.L., Gardner, R.H. & Shugart, H.H.** 2013. NPP Multi-Biome: Global IBP Woodlands Data, 1955-1975, R1. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, USA.
<https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/198>.
- Dechert, D., Veldkamp, E. & Anas, I.** 2004. Is soil degradation unrelated to deforestation? Examining soil parameters of land use systems in upland Central Sulawesi, Indonesia. *Plant and Soil*, 265:197-209.
<https://doi.org/10.1007/s11104-005-0885-8>
- Delaney, M., Brown, S., Lugo, A.E., Torres-Lezama, A. & Quintero, N.B.** 1997. The distribution of organic carbon in major components of forests located in five life zones of Venezuela. *Journal of Tropical Ecology*, 13(5): 697-708. <https://doi.org/10.1017/S0266467400010877>
- Delaney M., Brown, S., Lugo, A.E., Torres-Lezama, A. & Bello Quitero, N.** 1998. The quantity and turnover of dead wood in permanent forest plots in six life zones of Venezuela. *Biotropica*, 30: 2-11.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7429.1998.tb00364.x>
- Denef, K., Zotarelli, L., Boddey, R.M. & Six, J.** 2007. Microaggregated-associated carbon as a diagnostic fraction for management-induced changes in soil organic carbon in two Oxisols. *Soil Biology and Biochemistry*, 39: 1165-1172. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.12.024>

Desjardins, T., Andreux, F., Volkoff, B. & Cerri, C.C. 1994. Organic carbon and ^{13}C contents in soils and soil size-fractions, and their changes due to deforestation and pasture installation in eastern Amazonia. *Geoderma*, 61: 103-118. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90013-2](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90013-2)

Doetterl, S., Kearsley, E., Bauters, M., Hufkens, K., Lisingo, J., Baert, G., Verbeeck, H. & Boeckx, P. 2015. Aboveground vs. Belowground carbon stocks in African tropical lowland rainforest: Drivers and Implications. *PLoS ONE*, 10: e0143209. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143209>

dos Santos, L. T., Marra, D.M., Trumbore, S., Camargo, P.B., Chambers, J.Q., Negrón-Juárez, R.I., Lima, A.J.N., Ribeiro, G.H.P.M., dos Santos, J. & Higuchi, N. 2016. Windthrows increase soil carbon stocks in a Central Amazon forest. *Biogeosciences*, 13: 1299-1308. <https://doi.org/10.5194/bg-13-1299-2016>

Eden, M.J., McGregor, D.F.M. & Vieira, N.A.G. 1990. Pasture development on cleared forest land in northern Amazonia. *The Geographical Journal*, 156: 283-296. <https://doi.org/10.2307/635529>

Edwards, P.J. & Grubb, P.J. 1977. Studies on mineral rain forest in New Guinea I: the distribution of organic matter in the vegetation and soil. *The Journal of Ecology*, 65: 943-969.
<https://doi.org/10.2307/2259387>

Feller, C., Albrecht, A., Blanchart, E., Cabidoche, Y.M., Chevallier, T., Hartmann, C., Eschenbrenner, V., Larre-Larrouy, M.C. & Ndandou, J.F. 2001. Soil organic carbon sequestration in tropical areas. General considerations and analysis of some edaphic determinants for Lesser Antilles soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 61: 19-31. <https://doi.org/10.1023/A:1013359319380>

Fernandes, S.A.P., Bernoux, M., Cerri, C.C., Feigl, B.J. & Piccolo, M.C. 2002. Seasonal variation of soil chemical properties and CO_2 and CH_4 fluxes in unfertilized and P-fertilized pastures in an Ultisol of the Brazilian Amazon. *Geoderma*, 107: 221-241. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00150-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00150-1)

Frazão, L.A., Paustian, K., Pellegrino, C.C.E. & Cerri, C.C. 2013. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. *GCB Bioenergy*, 5: 384-390.
<https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2012.01196.x>

Garcia-Oliva, F., Casar, I., Morales, P. & Maass, J.M. 1994. Forest-to-pasture conversion influences on soil organic carbon dynamics in a tropical deciduous forest. *Oecologia*, 99: 392-396.
<https://doi.org/10.1007/BF00627754>

Gautam, S. & Pietsch, S.A. 2018. Carbon pools of an intact forest in Gabon. *African Journal of Ecology*, 50: 414-427. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2012.01337.x>

Ghuman, B.C. & Lal, R. 1991. Land clearing and use in the humid Nigerian tropics II. Soil chemical properties. *Soil Science Society of America Journal*, 55: 184-188.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500010032x>

Glenday, J. 2006. Carbon storage and emissions offset potential in East African tropical rainforest. *Forest Ecology and Management*, 235: 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.014>

- Guggenberger, G. & Zech, W.** 1999. Soil organic matter composition under primary forest, pasture, and secondary forest succession, Region Huetar Norte, Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 124: 93-104. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00055-9)
- Guillaume, T., Kotowska, M.M., Hertel, D., Knohl, A., Krashevská, V., Murtilaksono, K., Scheu, S. & Kuzyakov, Y.** 2018. Carbon costs and benefits of Indonesian rainforest conversion to plantations. *Nature Communications*, 9: 2388. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04755-y>
- Guillaume, T., Damris, M. & Kuzyakov, Y.** 2015. Losses of soil carbon by converting tropical forest to plantations: erosion and decomposition estimated by δ13 C. *Global Change Biology*, 21: 3548–3560. <https://doi.org/10.1111/gcb.12907>
- Hertel, D., Harteveld, M.A. & Leuschner, C.** 2009. Conversion of tropical forest into agroforest alters the fine root-related carbon flux to the soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 41: 481-490. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.11.020>
- Hughes, F.R., Kauffman, J.B. & Jaramillo, V.J.** 2000. Ecosystem-scale impacts of deforestation and land use in a humid tropical region of Mexico. *Ecological Applications*, 10: 515-527. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0515:ESIODA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0515:ESIODA]2.0.CO;2)
- Ishizuka, S., Iswandi, A., Nakajima, Y., Yonemura, S., Sudo, S., Tsurata, H. & Murdiyaso, D.** 2005. The variation of greenhouse gas from soils of various land-use/cover types in Jambi province, Indonesia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 71: 17-32. <https://doi.org/10.1007/s10705-004-0382-0>
- Islam, K.R. & Weil R.R.** 2000. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 79: 9-16. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(99\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(99)00145-0)
- Jaiarree, S., Chidthaisong, A., Tangtham, N., Polprasert, C., Sarabol, E. & Tyler, S.C.** 2011. Soil organic carbon loss and turnover resulting from forest conversion to maize fields in Eastern Thailand. *Pedosphere*, 21: 581-590. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60160-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60160-4)
- Kitayama, K. & Aiba, S.I.** 2002. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forest along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pool on Mt. Kinabalu Borneo. *Journal of Ecology*, 90: 37-51. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00634.x>
- Kirsten, M., Kaaya, A., Klinger, T. & Feger, K-H.** 2016. Stocks of soil organic carbon in forest ecosystems of the Eastern Usambara Mountains, Tanzania. *Catena*, 137: 651-659. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.027>
- Krishnaswamy, J. & Richter, D.D.** 2002. Properties of advanced weathering-stage soils in tropical forests and pastures. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 244-253. <https://doi.org/10.2136/sssaj2002.2440>
- Lemenih, M., Karlton, E. & Olsson, M.** 2005. Assessing soil chemical and physical property responses to deforestation and subsequent cultivation in smallholders farming system in Ethiopia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 105: 373-386. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.046>

Lemma, B., Kleja, D.B., Nilson, I. & Olsson, M. 2006. Soil carbon sequestration under different exotic tree species in the southwestern highlands of Ethiopia. *Geoderma*, 136: 886-898.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.06.008>

Leuschner, C., Zach, A., Moser, G., Homeier, J., Graefe, S., Hertel, D., Wittich, B., Soethe, N., Iost, S., Röderstein, M., Horna, V. & Wolf, K. 2013. The Carbon Balance of Tropical Mountain Forests Along an Altitudinal Transect. In J. Bendix, E. Beck, A. Bräuning, F. Makeschin, R. Mosandl, S. Scheu & W. Wilcke, (Eds.) *Ecosystem Services, Biodiversity and Environmental Change in a Tropical Mountain Ecosystem of South Ecuador*, pp. 117–139. Ecological Studies. Berlin, Heidelberg, Springer. (also available at https://doi.org/10.1007/978-3-642-38137-9_10)

Longonje, N.S., Mbua, R.L. & Roger, E. 2018. Estimation of carbon stock in Bimbia Bonadikombo Coastal Community Forest, South West Region, Cameroon: An implication for climate change mitigation. *International Journal of Scientific Research and Management*, FE-2018-99-110.
<https://doi.org/10.18535/ijsrn/v6i10.fe02>

Lontsi, R.T., Corre, M.D., van Straaten, O. & Veldkamp, E. 2019. Change in soil organic carbon and nutrient stocks in conventional selective logging versus reduced-impact logging in rainforests on highly weathered soils in Southern Cameroon. *Forest Ecology and Management*, 451: 117722.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117522>

Macedo, M.O., Resende, A.S., Garcia, P.C., Boddy, R.M., Jantalia, C.P., Urquiaga, S., Campello, E.F.C. & Franco, A.A. 2008. Changes in soil C and N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. *Forest Ecology and Management*, 255: 1516-1524.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.11.007>

Majaliwa, J.G.M., Twongyirwe, R., Nyenje, R., Oluka, M., Ongom, B., Sirike, J., Mfitumukiza, D., Azanga, E., Natumnya, R., Mwerera, R. & Barasa, B. 2010. The effect of land cover change on soil properties around Kibale National Park in South Western Uganda. *Applied and Environmental Soil Science*, 2010, 185689. <http://dx.doi.org/10.1155/2010/185689>

Marin-Spiotta, E., Silver, W.L., Swanston, C.W. & Ostertag, R. 2009. Soil organic matter dynamics during 80 years of reforestation of tropical pastures. *Global Change Biology*, 15: 1584-1597.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01805.x>

Markewitz, D., Davidson, E., Moutinho, P. & Nepstad, D. 2004. Nutrient loss and redistribution after forest clearing on a highly weathered soil in Amazonia. *Ecological Applications*, 14: S177-S199.
<https://doi.org/10.1890/01-6016>

Moser, G., Leuschner, C., Hertel, D., Graefe, S., Soethes, N. & Iost, S. 2011. Elevation effects on the carbon budget of tropical mountain forests (S Ecuador): the role of the belowground compartment. *Global Change Biology*, 17: 2211-2226. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02367.X>

Neill, C., Melillo, J.M., Steudler, P.A., Cerri, C.C., de Morales, J.F.L., Piccolo, M.C. & Brito, M. 1997. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern Brazilian Amazon. *Ecological Applications*, 7: 1216-1225. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1997\)007\[1216:SCANSF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[1216:SCANSF]2.0.CO;2)

Ngo, K.M., Turner, B.L., Muller-Landau, H.C., Davies, S.J., Larjavaara, M., Bin Nik Hassan, N.F. & Lum, S. 2013. Carbon stocks in primary and secondary tropical forests in Singapore. *Forest Ecology and Management*, 296: 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.004>

Oliveras, I., Roman-Cuesta, R. M., Urquiaga-Flores, E., Loayza, J. A. Q., Kala, J., Huaman, V., Lizarraga, N., Sans, G., Quispe, K., Lopez, E., Lopez, D., Torres, I.C., Enquist, B.J. & Malhi, Y. 2018. Fire effects and ecological recovery pathways of tropical montane cloud forests along a time chronosequence. *Global Change Biology*, 24: 758-772. <https://doi.org/10.1111/gcb.13951>

Omoro, L.M.A., Starr, M. & Pellikka, P.K.E. 2013. Tree biomass and soil carbon stocks in indigenous forest in comparison to plantations of exotic species in the Taita Hills of Kenya. *Silva Fennica*, 47: 1-18. <http://www.silvafennicafi/article/935>

Oscher, L.J., Matson, P.A. & Amundson, R. 2003. Effect of land use change on soil carbon in Hawaii. *Biogeochemistry*, 65: 213-232. <https://doi.org/10.1023/A:1026048612540>

Piccolo, G.A., Andriulo, A.E. & Bruno, M. 2008. Changes in soil organic matter under different land management in Misiones province (Argentina). *Scientia Agricola (Piracicaba, Braz.)*, 65: 290-297. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000300009>

Powers, J.S. & Veldkamp, E. 2005. Regional variation in soil carbon and $\delta^{13}\text{C}$ in forests and pastures of northeastern Costa Rica. *Biogeochemistry*, 72: 315-336. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-0368-7>

Powers, J.S. 2004. Changes in soil carbon and nitrogen after contrasting land-use transitions in northeastern Costa Rica. *Ecosystems*, 7: 134-136. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0123-2>

Rahman, N., de Neergaard, A., Magid, J., Van de Ven, G.W.J., Giller, K.E. & Bruun, T.B. 2018. Changes in soil organic carbon stocks after conversion from forest to oil palm plantations in Malaysia Borneo. *Environmental Research Letters*, 13: 105001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aade0f>

Reiners, W.A., Bouwman, A.F., Parsons, W.F.J. & Keller, M. 1994. Tropical rainforest conversion to pasture: changes in vegetation and soil properties. *Ecological Applications*, 4: 363-377. <https://doi.org/10.2307/1941940>

Rhoades, C.C., Eckert, G.E. & Coleman, D.C. 2000. Soil carbon differences among forest, agriculture, and secondary vegetation in lower montane Ecuador. *Ecological Applications*, 10: 497-505. <https://doi.org/10.2307/2641109>

Saha, S.K., Nair, P.R., Nair, V. & Kumar, B.M. 2010. Carbon storage in relation to soil size-fractions under tropical tree-based land-use systems. *Plant and Soil*, 328: 433-446. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0123-x>

Salimon, C.I., Davidson, E.A., Victoria, R.L. & Melo, A.W.F. 2004. CO₂ flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia. *Global Change Biology*, 10: 833-843. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00776.x>

Saner, P., Loh, Y.Y., Ong, R.C. & Hector, A. 2012. Carbon Stocks and Fluxes in Tropical Lowland Dipterocarp Rainforests in Sabah, Malaysian Borneo. *PLoS ONE*, 7: e29642.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029642>

Schwendenmann, L., Pendall E. & Potvin C. 2007. Surface soil organic carbon pools, mineralization and CO₂ efflux rates under different land-use types in Central Panama. In T. Tscharntke, C. Leuschner, M. Zeller, E. Guhardja, A. Bidin (Eds.) *The stability of tropical rainforest margins, linking ecological economic and social constraints of land use and conservation*, Springer Verlag Berlin 2007, 109-131p.

Schwendenmann, L. & Pendall, E. 2006. Effects of forest conversion into grassland on soil aggregate structure and carbon storage in Panama: evidence from soil carbon fractionation and stable isotopes. *Plant and Soil*, 288: 217-232. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9109-0>

Segnini, A., Posadas, A., Quiroz, R., Milori, D.M.B.P., Vaz, C.M.P. & Martin-Neto, L. 2011. Soil carbon stock and stability across an altitudinal gradient in southern Peru. *Journal of Soil and Water Conservation*, 66: 213-220. <https://doi.org/10.2489/jswc.66.4.213>

Sierra, C.A., del Valle, J.I. Orrego, S.A., Moreno, F.H., Harmon, M.E., Zapata, M., Colorado, G.J., Herrera, M.A., Lara, W., Restrepo, D.E., Berrouet, L.M., Loaiza, L.M. & Benjumea, J.F. 2007. Total carbon stocks in a tropical forest landscape of the Porce region, Colombia. *Forest Ecology and Management*, 243: 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.03.026>

Smiley, G.L. & Kroschel, J. 2008. Temporal change in carbon stocks of cocoa–gliricidia agroforests in Central Sulawesi, Indonesia. *Agroforestry Systems*, 73: 219-231. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9144-3>

Smith, C.K., Oliveira, F.A., Ghilz, H.L. & Baima, A. 2002. Soil carbon stocks after forest conversion to tree plantations in lowland Amazonia, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 164: 257-263.
[https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00599-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00599-0)

Solomon, D., Fritzche, F., Lehmann, J., Tekalign, M. & Zech, W. 2002. Soil organic matter dynamics in the sub humid agroecosystems of the Ethiopian highlands: Evidence from natural ¹³C abundance and particle-size fractionation. *Soil Science Society of America Journal*, 66: 969-978.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2002.9690>

Sommer, R., Denich, M. & Vlek, P.L.G. 2000. Carbon storage and root penetration in deep soils under small farmer land use systems in the Eastern Amazon region, Brazil. *Plant and Soil*, 219: 231-241.
<https://doi.org/10.1023/A:1004772301158>

Strey, S., Boy, J., Weber, O. & Guggenberger, G. 2016. Response of soil organic carbon to land-use change in central Brazil: a large- scale comparison of Ferralsols and Acrisols. *Plant Soil*, 408: 327-342.
<https://doi.org/10.1007/s11104-016-2901-6>

Subashree, K., Dar Ahmad. & Sundarapandian, S. 2019. Variation in soil organic carbon stock with forest type in tropical forests of Kanyakumari Wildlife Sanctuary, Western Ghats, India. *Environment Monitoring and Assessment*, 191: 690. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7881-6>

- Sugihara, S., Shibata, M., Mvondo Ze, A.D., Tanaka, H., Kosaki, T. & Funakawa, S.** 2019. Forest understories controlled the soil organic carbon stock during the fallow period in African tropical forest: a ^{13}C analysis. *Scientific Reports*, 9: 9835. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46406-2>
- Swai, G., Ndangalasi, H.J., Munishi, P.K.T. & Shirma, D.D.** 2014. Carbon stocks of Hanang forest, Tanzania: An implication for climate mitigation. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 6: 90-98. <https://doi.org/10.5897/JENE2013.0418>
- Tang, J.W., Yin, J.X., Qi, J.F., Jepsen, M.R. & Lu, X.T.** 2012. Ecosystem Carbon Storage of Tropical Forests over Limestone in Xishuangbanna, SW China. *Journal of Tropical Forest Science*, 24: 399-407
- Tanner, E.V.J.** 1997. Four montane rain forests of Jamaica: A quantitative characterization of the floristics, the soils and foliar mineral levels, and a discussion of the interrelations. *Journal of Ecology* 65: 883-918. <https://doi.org/10.2307/2259385>
- Tegha, K.C. & Sendze, Y.G.** 2016. Soil organic carbon stocks in Mount Cameroon National Park under different land uses. *Journal of Ecology and Natural Environment*, 8: 20-30. <https://doi.org/10.5897/JENE2015.0553>
- Townsend, A.R., Vitousek, P.M. & Trumbore, S.E.** 1995. Soil Organic Matter Dynamics along gradients in temperature and land use on the Island of Hawaii. *Ecology*, 76: 721-733. <https://doi.org/10.2307/1939339>
- Trumbore, S.E., Davidson, E.A., de Camargo, P.B., Nepstad, D.C. & Martinelli, L.A.** 1995. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of Eastern Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, 9: 515-528. <https://doi.org/10.1029/95GB02148>
- Twongyirwe, R., Sheil, D., Majaliwa, J.G.M. Ebanyat, P., Tenywa, M.M. van Heist, M. & Kumar, L.** 2013. Variability of soil organic carbon stocks under different land uses: A study in an Afro-Montane landscape in southwestern Uganda. *Geoderma*, 192-194: 282-289. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.09.005>
- Vågen, T, Andrianorofanomezana, M.A. & Andrianorofanomezana, S.** 2006. Deforestation and cultivation effects on characteristics of oxisols in the highlands of Madagascar. *Geoderma*, 131: 190-200. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.026>
- Van Dam, D., van Breeman, N. & Veldkamp, E.** 1997. Soil organic carbon dynamics: variability with depth in forested and deforested soils under pasture in Costa Rica. *Biogeochemistry*, 39: 342-375. <https://doi.org/10.1023/A:1005880031579>
- Veldkamp, E., Becker, A., Schwendenmann, L., Clark, D.A. & Schulte-Bisping, H.** 2003. Substantial labile carbon stocks and microbial activity in deeply weathered tropical wet forest soils. *Global Change Biology*, 9: 1171-1184. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00656.x>
- Veldkamp, E.** 1994. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 175-180. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x>

Wasige, J.E., Groen, T.A., Rwamukwaya, B.M., Tuweisgye, W., Smaling, E.M.A. & Jetten, V. 2014. Contemporary land use/land cover types determine soil organic carbon stocks in South-West Rwanda. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 100: 19-33. <https://doi.org/10.1007/s10705-014-9623-z>

Wairu, M. & Lal, R. 2003. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands. *Soil and Tillage Research*, 70: 19-27. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00116-2)

Weaver, P.L. & Murphy, P.G. 1990. Forest structure and productivity in Puerto Rico's Luquillo Mountains. *Biotropica*, 22: 69-82. <https://doi.org/10.2307/2388721>

Wick, B., Veldkamp, E., de Mello, W.Z., Keller, M. & Crill, P. 2005. Nitrous oxide fluxes and nitrogen cycling along a pasture chronosequence in Central Amazonia, Brazil. *Biogeosciences*, 2: 175-187. <https://doi.org/10.5194/bg-2-175-2005>

Yimer, F., Ledin, S. & Abdelkadir, A. 2007. Changes in soil organic carbon and total nitrogen contents in three adjacent land use types in the Bale Mountains, south-eastern highlands of Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 242: 337-342. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.087>

Yoda, K. & Kira, T. 1969. Comparative ecological studies on three main types of forest vegetation in Thailand. Accumulation and turnover of soil organic matter, with notes on the altitudinal soil sequence on Khao (Mt.) Luang Peninsular Thailand. *Nature and Life in Southeast Asia*, 6: 83-109

Yonekura, Y., Ohta, S., Kiyono, Y., Aksa, D., Morisad, K., Tanaka, N. & Kanzaki, M. 2010. Changes in soil carbon stock after deforestation and subsequent establishment of “*Imperata*” grassland in Asian humid tropics. *Plant and Soil*, 329:495-507. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-075-y>

Zekeng, J.C., van der Sande, M.T., Fobane, J.L., Mphinyane, W.N., Sebego, R. & Mbolo, M.M.A. 2020. Partitioning main carbon pools in a semi-deciduous rainforest in Eastern Cameroon. *Forest Ecology and Management*, 457: 117686. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117686>

Zimmermann, M., Meir, P., Silman, M.R., Fedders, A., Gibbon, A., Malhi, Y., Urrego, D.H., Bush, M.B., Feeley, K.J., Garcia, K.C., Dargie, G.C., Farfan, W.R., Goetz, B.P., Johnson, W.T., Kline, K.M., Modi, A.T., Rurau, N.M.Q., Staudt, B.T. & Zamora, F. 2010. *Ecosystems*, 13: 62-74. <https://doi.org/10.1007/s10021-009-9300-2>

附錄 2. 山地土壤 – 補充文件

表 33. 擬定的山脈和山塊 (massifs) 中土壤有機碳庫存資料，與相對應的文章數量、研究的土壤深度，以及碳庫存計算時是否有考慮土壤有機層等

山脈	文章 數量	國家	土地利用 / 覆蓋	參考文獻	碳庫存 (噸 / 公頃)	深度 (公分)	土壤 有機層	土地 利用 變更	
阿爾卑斯山脈 (Alps)	16	奧地利	混合 (森林、草原)	Djukic et al. (2010)	130~380	剖面	是	否	
			德國	Prietzl and Christophel (2014)	63~190	剖面	是	否	
				Prietzl and Wiesmeier (2019)	63~190	剖面	是	否	
				Wiesmeier et al. (2014)	92	剖面	是	否	
		義大利	混合 (森林、草原、高山苔原)	Canedoli et al. (2020)	38~79	0~40	是	否	
			高山苔原	Freppaz et al. (2010)	27~132	剖面	否	否	
			混合 (森林、草原)	Garlato et al. (2009a)	88~102	0~30	是	否	
			混合 (森林、草原)	Garlato et al. (2009b)	50~165	0~30 ; 0~100	是	否	
			森林	Bonifacio, Falsone and Petrillo (2011)	70~150	剖面	是	否	
			森林	Pellis et al. (2019)	153~228	剖面	是	是	
			森林、草原	Thuille, Buchmann and Schulze (2000)	20~50	A 土層	否	是	
			瑞士	混合 (森林、草原、高山苔原)	Hoffman et al. (2014a)	86*	0~10 ; 0~30	是	否
				草原	Leifeld et al. (2009)	53~116	0~30	否	否
				高山苔原	Budge et al. (2010)	55~102	0~30	否	否
				森林	Perruchoud et al. (2000)	62~98	剖面		否
				混合 (森林、高山苔原)	Zollinger et al. (2013)	100~150	剖面	是	否
阿爾金山脈 (Altun)	2	中國	混合 (森林、草原)	Yan et al. (2019)	~0~60	深度區間	否	否	

山脈	文章數量	國家	土地利用 / 覆蓋	參考文獻	碳庫存 (噸 / 公頃)	深度 (公分)	土壤 有機層	土地 利用 變更
			混合 (草原、高山苔原)	Zhao et al. (2019a)	26~80	0~15	否	否
安地斯山脈 (Andes)	3	哥倫比亞	森林 (熱帶山地雨林)	De la Cruz-Amo et al. (2020)	31~170	剖面	是	否
		厄瓜多	森林 (熱帶山地雨林)	Ließ, Schmidt and Glaser (2016)	10~250	0~50	是	否
		哥倫比亞	森林 (熱帶山地雨林)	Phillips et al. (2019)	50~260	0~100	是	否
阿帕拉契山脈 (Appalachians)	1	美國	森林	Garten and Hanson (2006)	44~122	0~30	是	否
亞平寧山脈 (Apennines)	5	義大利	森林	Chiti et al. (2007)	34~43	0~20	否	是
			森林	Conforti et al. (2016)	132*	剖面	是	否
			森林	Conforti et al. (2020)	12~137	剖面	否	否
			森林	De Feudis et al. (2020)	15~25	剖面	是	是
			森林	Pellis et al. (2019)	135~279	剖面	是	是
阿拉瓦利嶺 (Aravally)	1	印度	森林	Kumar et al. (2010)	108~173	0~30	否	否
阿特拉斯山脈 (Atlas)	2	阿爾及利亞 (Algeria)	混合 (森林、農作物)	Bounouara et al. (2017)	100~170	剖面	否	否
		摩洛哥 (Morocco)	森林	Zaher et al. (2020)	71~213	0~30	否	是
巴爾幹山脈 (Balkan)	1	保加利亞 (Bulgaria)	草原	Karatoteva and Malinova (2017)	70~340	剖面	否	否
喀爾巴阡山脈 (Carpathian)	8	波蘭	森林、草原	Bojko and Kabala (2017)	107.4	剖面	是	是
			森林	Galka et al. (2014)	152~202	0~100	是	是
			森林	Gruba et al. (2019)	84~110	剖面	是	否
			森林	Reyna-Bowen et al. (2019)	50~905	0~100	是	否
			森林、草原	Sokolowska et al. (2020)	17.1~36	0~20	否	是
			森林	Szopka (2016)	100~120	0~20	否	否
		羅馬尼亞 (Romania)	森林	Dinca et al. (2015)	111~253	0~100	否	否
			森林	Valterea and Samoni (2018)	182~320	0~20	否	否
喀麥隆火山 (Cameroon)	1	喀麥隆 (Cameroon)	混合 (森林、混農林業)	Tsozue et al. (2019)	150~300	0~75	否	否

山脈	文章數量	國家	土地利用 / 覆蓋	參考文獻	碳庫存 (噸 / 公頃)	深度 (公分)	土壤有機層	土地利用變更
喀斯喀特山脈 (Cascades)	2	美國	森林	Shaw, Boyle and Omule (2008)	23~114	0~5	否	否
			森林	Sun et al. (2004)	70~360	0~100	是	否
中央山脈 (Central Chain)	3	西班牙	森林	Chiti, Díaz-Pinés and Rubio (2012)	34~59	0~30 ; 0~100	否	否
			森林	Díaz-Pinés et al. (2011)	40~140	0~50	是	否
			草原、灌木	Montane, Rovira and Casals (2007)	45~321	剖面	是	是
大屯山	1	臺灣	森林	Tsui, Tsai, and Chen (2013)	60~360	0~100	否	否
大興安嶺	1	中國	森林	Xiao, Man and Duan (2020)	99~239	0~100	否	否
東部弧形山脈 (Eastern Arc)	4	肯亞	森林、茶園 (tea plantation)	Chiti et al. (2018)	350~400	0~100	是	是
		莫三比克	森林	Guedes et al. (2018)	87~139	0~50	是	是
		坦尚尼亞	混合 (森林、混農林業)	Kirsten et al. (2016)	169~224	0~100	否	否
			森林	Kirsten et al. (2019)	168~200	0~100	否	是
Elbutz (厄爾布爾士山脈)	2	伊朗	森林	Kooch et al. (2012)	102~163	0~40	否	是
			森林	Motlagh et al. (2020)	54~90	0~30	是	否
埃爾貢山 (Mt. Elgon)	1	烏干達	混農林業	Mugagga et al. (2015)	17~121	0~30	否	否
衣索比亞谷地塊 (Ethiopia Massif)	3	衣索比亞	森林	Eshetu and Hailu (2020)	195~266	0~30	是	否
			混合 (森林、草原、農作物)	Girmay and Singh (2012)	159~516	0~80	否	否
			高山苔原	Yimer, Ledin and Abdelkadir (2006)	350~450	0~100	否	否
喜馬拉雅山脈	9	印度	森林	Bangroo, Najar and Rasool (2017)	202~272	剖面	否	否
			森林	Bhat et al. (2012)	19.2~35.4	0~30	否	否
			草原	Dad (2019)	29~95	0~50		否
			混合 (森林、草原、農作物)	Dinakaran et al. (2018)	70~281	0~100		否
			森林、草原、農作物	Martin et al. (2010)	135~424	0~150	否	是
			混合 (森林、草原、農作物)	Singh et al. (2011)	107~227	0~100	否	否
		尼泊爾 (Nepal)	混合 (森林、農作物)	Shrestha and Singh (2008)	62~157	0~70		否

山脈	文章數量	國家	土地利用 / 覆蓋	參考文獻	碳庫存 (噸 / 公頃)	深度 (公分)	土壤有機層	土地利用變更
			森林、農作物	Shrestha et al. (2009)	30~50	0~30	否	是
			不丹 (Bhutan)	森林	Simon et al. (2018)	57~338	剖面	否
日本阿爾卑斯山脈 (Japanese Alps)	2	日本	森林	Li et al. (2010)	120~200	0~30	是	否
			草原	Toma et al. (2013)	21~416	0~100	否	否
喀喇崑崙山脈 (Karakoram)	1	巴基斯坦	混合型 (森林、草原、農作物)	Ali et al. (2017)	40~140	0~60	否	否
吉力馬札羅山 (Kilimanjaro)	1	坦尚尼亞	混合型 (森林、草原、農作物)	Pabst et al. (2016)	30~80	剖面	是	否
廬山	1	中國	森林	Du et al. (2014)	70~150	0~60	是	否
庇里牛斯山脈 (Pyrenees)	6	西班牙	森林	Campo et al. (2019)	15~125	0~50	是	是
			草原	Garcia-Pausas et al. (2007)	59~300	剖面	否	否
			草原、灌木	Montane, Rovira and Casals (2007)	45~321	剖面	是	是
			森林、草原	Nadal-Romero et al. (2016)	13~137	剖面	是	是
			森林、草原、灌木	Nadal-Romero et al. (2018)	91~148	0~50		是
			森林、草原、灌木	Urbina et al. (2020)	36~90	0~10	是	是
青藏高原 (Qinhai Plateau - Tibet)	3	中國	草原	Liu et al. (2016)	164	0~100	否	否
			高山苔原	Ohtsuka et al. (2008)	10~137	0~30	否	否
			草原	Yang et al. (2008)	44~91	0~100	否	否
洛磯山脈 (Rocky Mountains)	2	加拿大	森林	Hoffmann et al. (2014b)	10~45	0~30	否	否
		美國	混合型 (森林、高山苔原)	Scott and Wohl (2020)	50~200	剖面	否	否
薩彥嶺 (Sayan)	1	蒙古	森林	Tungalag, Gerelbaatar and Lobanov (2020)	94	0~30	否	否
馬德雷山脈 (Sierra Madre)	1	墨西哥	森林	Santini et al. (2019)	78~109	0~100	否	否
內華達山脈 (Sierra Nevada)	2	西班牙	混合 (乾燥棲地)	Román-Sánchez et al. (2018)	17~94.1	0~30	否	否
			混合 (森林、草原)	Willaarts et al. (2016)	9~66	剖面	否	否

山脈	文章數量	國家	土地利用 / 覆蓋	參考文獻	碳庫存 (噸 / 公頃)	深度 (公分)	土壤有機層	土地利用變更
烏干達西南部 (SW Uganda)	1	烏干達	混合 (森林、農林業、農作物)	Twongyirwe et al. (2013)	69~80	0~30	否	否
雲南	1	中國	混合 (森林、草原、農作物)	Duan et al. (2014)	40~760	剖面	否	否
其他	1	北極地區	高山苔原	Palmtag et al. (2015)	83~300	0~100	是	否
其他	1	葡萄牙	森林	Fonseca et al. (2019)	140~200	0~30	是	是
其他	5	歐洲	森林	Baritz et al. (2010)	11~126	0~20	是	否
			森林	Becvarova e tal. (2018)	6~58	A 土層	是	否
			森林	De Vos et al. (2015)	<50~400	剖面	是	否
			森林、草原、農作物	Poeplau and Don (2013)	10~24	0~30	是	是
			森林	Vanguelova et al. (2016)				否
其他	1	歐洲、美國	混合 (森林、高山苔原)	Egli et al. (2012)	約 10~250	剖面	否	否
其他	2	世界	高山苔原	Bockheim and Munroe (2014)	152	0~30	否	否
			森林	Lal et al. (2005)	96~723			否
其他	1	中國	高山苔原	Chen et al. (2016)	95~311	0~50	否	否

在第一欄中，「其他」包括涉及許多山脈、整個國家或大陸的碳庫存研究工作。

「土地利用 / 覆蓋」一欄中的「混合」是指存在一種以上的土地利用 / 覆蓋。

*：中位數。

「土地利用變化」(LUC) 表示文獻中有探討此議題，如內文中圖 19 所述。

附錄 2. 參考文獻

- Ali, S., Begum, F., Hayat, R. & Bohannan, B.J.M.** 2017. Variation in soil organic carbon stock in different land uses and altitudes in Bagrot Valley, Northern Karakoram. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science*, 67(6): 551–561. <https://doi.org/10.1080/09064710.2017.1317829>
- Bangroo, S.A., Najar, G.R. & Rasool, A.** 2017. Effect of altitude and aspect on soil organic carbon and nitrogen stocks in the Himalayan Mawer Forest Range. *Catena*, 158: 63–68.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.017>
- Baritz, R., Seufert, G., Montanarella, L. & Van Ranst, E.** 2010. Carbon concentrations and stocks in forest soils of Europe. *Forest Ecology and Management*, 260(3): 262–277.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.03.025>
- Bečvářová, P., Horváth, M., Sarapatka, B. & Zouhar, V.** 2018. Dynamics of soil organic carbon (SOC) content in stands of Norway spruce (*Picea abies*) in central Europe. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 11(6): 734–742. <https://doi.org/10.3832/ifor2521-011>
- Bhat, J.A., Kumar, M., Negi, A.K., Pala, N.A. & Todaria, N.P.** 2012. Soil organic carbon stock and sink potential in high mountain temperate Himalayan forests of India. *Int. J. Curr. Res*, 4(12): 206–209.
- Bockheim, J.G. & Munroe, J.S.** 2014. Organic Carbon Pools and Genesis of Alpine Soils with Permafrost: A Review. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(4): 987–1006. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.4.987>
- Bojko, O. & Kabala, C.** 2017. Organic carbon pools in mountain soils – Sources of variability and predicted changes in relation to climate and land use changes. *Catena*, 149: 209–220.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.09.022>
- Bonifacio, E., Falsone, G. & Petrillo, M.** 2011. Humus forms, organic matter stocks and carbon fractions in forest soils of northwestern Italy. *Biology and Fertility of Soils*, 47(5): 555–566.
<https://doi.org/10.1007/s00374-011-0568-y>
- Bounouara, Z., Chevallier, T., Balesdent, J., Toucet, J., Sbih, M., Bernoux, M., Belaissaoui, N., Bouneb, O. & Bensaid, R.** 2017. Variation in soil carbon stocks with depth along a toposequence in a sub-humid climate in North Africa (Skikda, Algeria). *Journal of Arid Environments*, 141: 25–33.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.02.001>
- Budge, K., Leifeld, J., Hiltbrunner, E. & Fuhrer, J.** 2010. Litter quality and pH are strong drivers of carbon turnover and distribution in alpine grassland soils. *Biogeosciences Discussions*, 7(4).
<https://doi.org/10.5194/bgd-7-6207-2010>
- Campo, J., Stijsiger, R.J., Nadal-Romero, E. & Cammeraat, E.L.** 2019. The effects of land abandonment and long-term afforestation practices on the organic carbon stock and lignin content of Mediterranean humid mountain soils. *European Journal of Soil Science*, 70(5): 947–959. <https://doi.org/10.1111/ejss.12799>

- Canedoli, C., Ferrè, C., El Khair, D.A., Comolli, R., Liga, C., Mazzucchelli, F., Proietto, A., et al.** 2020. Evaluation of ecosystem services in a protected mountain area: Soil organic carbon stock and biodiversity in alpine forests and grasslands. *Ecosystem Services*, 44: 101135.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101135>
- Chen, L.-F., He, Z.-B., Du, J., Yang, J.-J. & Zhu, X.** 2016. Patterns and environmental controls of soil organic carbon and total nitrogen in alpine ecosystems of northwestern China. *Catena*, 137: 37–43.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.08.017>
- Chiti, T., Certini, G., Puglisi, A., Sanesi, G., Capperucci, A. & Forte, C.** 2007. Effects of associating a N-fixing species to monotypic oak plantations on the quantity and quality of organic matter in minesoils. *Geoderma*, 138(1–2): 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.11.004>
- Chiti, T., Díaz-Pinés, E. & Rubio, A.** 2012. Soil organic carbon stocks of conifers, broadleaf and evergreen broadleaf forests of Spain. *Biology and Fertility of Soils*, 48(7): 817–826.
<https://doi.org/10.1007/s00374-012-0676-3>
- Chiti, T., Díaz-Pinés, E., Butterbach-Bahl, K., Marzaioli, F. & Valentini, R.** 2018. Soil organic carbon changes following degradation and conversion to cypress and tea plantations in a tropical mountain forest in Kenya. *Plant and Soil*, 422(1–2): 527–539. <https://doi.org/10.1007/s11104-017-3489-1>
- Conforti, M., Lucà, F., Scarciglia, F., Matteucci, G. & Buttafuoco, G.** 2016. Soil carbon stock in relation to soil properties and landscape position in a forest ecosystem of southern Italy (Calabria region). *Catena*, 144: 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.04.023>
- Conforti, M., Longobucco, T., Scarciglia, F., Niciforo, G., Matteucci, G. & Buttafuoco, G.** 2020. Interplay between soil formation and geomorphic processes along a soil catena in a Mediterranean mountain landscape: an integrated pedological and geophysical approach. *Environmental Earth Sciences*, 79(2): 1–16. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8802-2>
- De la Cruz-Amo, L., Bañares-de-Dios, G., Cala, V., Granzow-de la Cerda, I., Espinosa, C.I., Ledo, A., Salinas, N., Macía, M.J. & Cayuela, L.** 2020. Trade-Offs Among Aboveground, Belowground, and Soil Organic Carbon Stocks Along Altitudinal Gradients in Andean Tropical Montane Forests. *Frontiers in Plant Science*, 11: 106. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00106>
- Dad, J.M.** 2019. Organic carbon stocks in mountain grassland soils of northwestern Kashmir Himalaya: spatial distribution and effects of altitude, plant diversity and land use. *Carbon Management*, 10(2): 149–162. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1568137>
- De Feudis, M., Falsone, G., Vianello, G. & Vittori Antisari, L.** 2020. Stable organic carbon pool rises in soil under chestnut (*Castanea sativa* Mill.) forest for timber production after 15 years since grafting onto satin-cut stumps. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, 1–10.
<https://doi.org/10.6092/ISSN.2281-4485/10731>
- De Vos, B., Cools, N., Ilvesniemi, H., Vesterdal, L., Vanguelova, E. & Carnicelli, S.** 2015. Benchmark values for forest soil carbon stocks in Europe: Results from a large-scale forest soil survey. *Geoderma*, 251–252: 33–46. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.008>

- Díaz-Pinés, E., Rubio, A., Van Miegroet, H., Montes, F. & Benito, M.** 2011. Does tree species composition control soil organic carbon pools in Mediterranean mountain forests? *Forest Ecology and Management*, 262(10): 1895–1904. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.02.004>
- Dinakaran, J., Chandra, A., Chamoli, K.P., Deka, J. & Rao, K.S.** 2018. Soil organic carbon stabilization changes with an altitude gradient of land cover types in central Himalaya, India. *Catena*, 170: 374–385. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.06.039>
- Dincă, L.C., Dincă, M., Vasile, D., Spărchez, G. & Holonec, L.** 2015. Calculating Organic Carbon Stock from Forest Soils: Not Bot Horti Agrobo, 2015, 4:568-575. <https://doi.org/10.15835/nbha43210141>
- Djukic, I., Zehetner, F., Tatzber, M. & Gerzabek, M.H.** 2010. Soil organic-matter stocks and characteristics along an Alpine elevation gradient. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173(1): 30–38. <https://doi.org/10.1002/jpln.200900027>
- Du, B., Kang, H., Pumpanen, J., Zhu, P., Yin, S., Zou, Q., Wang, Z., Kong, F. & Liu, C.** 2014. Soil organic carbon stock and chemical composition along an altitude gradient in the Lushan Mountain, subtropical China. *Ecological Research*, 29(3): 433–439. <https://doi.org/10.1007/s11284-014-1135-4>
- Duan, X., Rong, L., Hu, J. & Zhang, G.** 2014. Soil organic carbon stocks in the Yunnan Plateau, southwest China: spatial variations and environmental controls. *Journal of soils and sediments*, 14(10): 1643–1658. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0917-1>
- Egli, M., Favilli, F., Krebs, R., Pichler, B. & Dahms, D.** 2012. Soil organic carbon and nitrogen accumulation rates in cold and alpine environments over 1 Ma. *Geoderma*, 183–184: 109–123. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.03.017>
- Eshetu, E.Y. & Hailu, T.A.** 2020. Carbon sequestration and elevational gradient: The case of Yegof mountain natural vegetation in North East, Ethiopia, implications for sustainable management. *Cogent Food & Agriculture*, 6(1). <https://doi.org/10.1080/23311932.2020.1733331>
- Fonseca, F., de Figueiredo, T., Vilela, Â., Santos, R., de Carvalho, A.L., Almeida, E. & Nunes, L.** 2019. Impact of tree species replacement on carbon stocks in a Mediterranean mountain area, NE Portugal. *Forest Ecology and Management*, 439: 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.03.002>
- Freppaz, M., Filippa, G., Caimi, A., Buffa, G. & Zanini, E.** 2010. Soil and plant characteristics in the alpine tundra (NW Italy). In *Tundras: Vegetation, Wildlife and Climate Trends*. Nova Publishers, 81–110. ISBN: 9781608765881
- Galka, B., Labaz, B., Bogacz, A., Bojko, O. & Kabala, C.** 2014. Conversion of Norway spruce forests will reduce organic carbon pools in the mountain soils of SW Poland. *Geoderma*, 213: 287–295. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.029>
- Garcia-Pausas, J., Casals, P., Camarero, L., Huguet, C., Sebastià, M.-T., Thompson, R. & Romanyà, J.** 2007. Soil organic carbon storage in mountain grasslands of the Pyrenees: effects of climate and topography. *Biogeochemistry*, 82(3): 279–289. <https://doi.org/10.1007/s10533-007-9071-9>

- Garlato, A., Obber, S., Vinci, I., Mancabelli, A., Parisi, A. & Sartori, G.** 2009a. La determinazione dello stock di carbonio nei suoli del Trentino a partire dalla banca dati della carta dei suoli alla scala 1: 250.000. *Studi Trentini di Scienze Naturali. Suoli degli ambienti alpini*, 85: 157–160. ISSN 2035-7699
- Garlato, A., Obber, S., Vinci, I., Sartori, G. & Manni, G.** 2009b. Stock attuale di carbonio organico nei suoli di montagna del Veneto. *Studi Trentini di Scienze Naturali. Suoli degli ambienti alpini*, 85: 69–82. ISSN 2035-7699
- Garten, C.T. & Hanson, P.J.** 2006. Measured forest soil C stocks and estimated turnover times along an elevation gradient. *Geoderma*, 136(1–2): 342–352. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.049>
- Girmay, G. & Singh, B.R.** 2012. Changes in soil organic carbon stocks and soil quality: land-use system effects in northern Ethiopia. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 62(6): 519–530.
- Gruba, P. & Socha, J.** 2019. Exploring the effects of dominant forest tree species, soil texture, altitude, and pH_{H2O} on soil carbon stocks using generalized additive models. *Forest Ecology and Management*, 447: 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.061>
- Guedes, B.S., Olsson, B.A., Egnell, G., Sitoe, A.A. & Karlton, E.** 2018. Plantations of Pinus and Eucalyptus replacing degraded mountain miombo woodlands in Mozambique significantly increase carbon sequestration. *Global Ecology and Conservation*, 14: e00401.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2018.e00401>
- Hoffmann, U., Hoffmann, T., Jurasinski, G., Glatzel, S. & Kuhn, N.J.** 2014a. Assessing the spatial variability of soil organic carbon stocks in an alpine setting (Grindelwald, Swiss Alps). *Geoderma*, 232–234: 270–283. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.038>
- Hoffmann, U., Hoffmann, T., Johnson, E.A. & Kuhn, N.J.** 2014b. Assessment of variability and uncertainty of soil organic carbon in a mountainous boreal forest (Canadian Rocky Mountains, Alberta). *Catena*, 113: 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.009>
- Karatoteva, D. & Malinova, L.** 2017. Organic carbon stock in pasture landscapes on the territory of the Central Balkan National. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 23(5): 787–792.
- Kirsten, M., Kaaya, A., Klinger, T. & Feger, K.-H.** 2016. Stocks of soil organic carbon in forest ecosystems of the Eastern Usambara Mountains, Tanzania. *Catena*, 137: 651–659.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.027>
- Kirsten, M., Kimaro, D.N., Feger, K.-H. & Kalbitz, K.** 2019. Impact of land use on soil organic carbon stocks in the humid tropics of NE Tanzania. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 182(4): 625–636. <https://doi.org/10.1002/jpln.201800595>
- Kooch, Y., Hosseini, S.M., Zaccione, C., Jalilvand, H. & Hojjati, S.M.** 2012. Soil organic carbon sequestration as affected by afforestation: the Darab Kola forest (north of Iran) case study. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(9): 2438. <https://doi.org/10.1039/c2em30410d>

- Kumar, J.N., Patel, K., Kumar, R.N. & Bhoi, R.** 2010. An assessment of carbon stock for various land use system in Aravally mountains, Western India. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 15(8): 811–824. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9240-3>
- Lal, R.** 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest ecology and management*, 220(1–3): 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.015>
- Leifeld, J., Zimmermann, M., Fuhrer, J. & Conen, F.** 2009. Storage and turnover of carbon in grassland soils along an elevation gradient in the Swiss Alps. *Global Change Biology*, 15(3): 668–679. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01782.x>
- Li, P., Wang, Q., Endo, T., Zhao, X. & Kakubari, Y.** 2010. Soil organic carbon stock is closely related to aboveground vegetation properties in cold-temperate mountainous forests. *Geoderma*, 154(3–4): 407–415. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.023>
- Ließ, M., Schmidt, J. & Glaser, B.** 2016. Improving the spatial prediction of soil organic carbon stocks in a complex tropical mountain landscape by methodological specifications in machine learning approaches. *PLoS One*, 11(4): e0153673. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153673>
- Liu, S., Zhang, F., Du, Y., Guo, X., Lin, L., Li, Y., Li, Q. & Cao, G.** 2016. Ecosystem Carbon Storage in Alpine Grassland on the Qinghai Plateau. *PLOS ONE*, 11(8): e0160420. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160420>
- Martin, D., Lal, T., Sachdev, C.B. & Sharma, J.P.** 2010. Soil organic carbon storage changes with climate change, landform and land use conditions in Garhwal hills of the Indian Himalayan mountains. *Agriculture, ecosystems & environment*, 138(1–2): 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.04.001>
- Montané, F., Rovira, P. & Casals, P.** 2007. Shrub encroachment into mesic mountain grasslands in the Iberian peninsula: effects of plant quality and temperature on soil C and N stocks. *Global biogeochemical cycles*, 21(4). <https://doi.org/10.1029/2006GB002853>
- Mugagga, F., Nagasha, B., Barasa, B. & Buyinza, M.** 2015. The Effect of Land Use on Carbon Stocks and Implications for Climate Variability on the Slopes of Mount Elgon, Eastern Uganda. *International Journal of Regional Development*, 2: 58–75
- Nadal-Romero, E., Cammeraat, E., Pérez-Cardiel, E. & Lasanta, T.** 2016. How do soil organic carbon stocks change after cropland abandonment in Mediterranean humid mountain areas? *Science of the Total Environment*, 566: 741–752. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.031>
- Nadal-Romero, E., Otal-Laín, I., Lasanta, T., Sánchez-Navarrete, P., Errea, P. & Cammeraat, E.** 2018. Woody encroachment and soil carbon stocks in subalpine areas in the Central Spanish Pyrenees. *Science of the Total Environment*, 636: 727–736. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.324>
- Ohtsuka, T., Hirota, M., Zhang, X., Shimono, A., Senga, Y., Du, M., Yonemura, S., Kawashima, S. & Tang, Y.** 2008. Soil organic carbon pools in alpine to nival zones along an altitudinal gradient (4400–5300m) on the Tibetan Plateau. *Polar Science*, 2(4): 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2008.08.003>

Pabst, H., Gerschlauer, F., Kiese, R. & Kuzyakov, Y. 2016. Land use and precipitation affect organic and microbial carbon stocks and the specific metabolic quotient in soils of eleven ecosystems of Mt. Kilimanjaro, Tanzania. *Land degradation & development*, 27(3): 592–602. <https://doi.org/10.1002/lde.2406>

Palmitag, J., Hugelius, G., Lashchinskiy, N., Tamstorf, M.P., Richter, A., Elberling, B. & Kuhry, P. 2015. Storage, Landscape Distribution, and Burial History of Soil Organic Matter in Contrasting Areas of Continuous Permafrost. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 47(1): 71–88.
<https://doi.org/10.1657/AAAR0014-027>

Pellis, G., Chiti, T., Rey, A., Curiel Yuste, J., Trotta, C. & Papale, D. 2019. The ecosystem carbon sink implications of mountain forest expansion into abandoned grazing land: The role of subsoil and climatic factors. *Science of The Total Environment*, 672: 106–120.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.329>

Perruchoud, D., Walther, L., Zimmermann, S. & Lüscher, P. 2000. Contemporary carbon stocks of mineral forest soils in the Swiss Alps. *Biogeochemistry*, 50(2): 111–136.
<https://doi.org/10.1023/A:1006320129112>

Phillips, J., Ramirez, S., Wayson, C. & Duque, A. 2019. Differences in carbon stocks along an elevational gradient in tropical mountain forests of Colombia. *Biotropica*, 51(4): 490–499.
<https://doi.org/10.1111/btp.12675>

Poeplau, C. & Don, A. 2013. Sensitivity of soil organic carbon stocks and fractions to different land-use changes across Europe. *Geoderma*, 192: 189–201. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.003>

Prietzl, J. & Wiesmeier, M. 2019. A concept to optimize the accuracy of soil surface area and SOC stock quantification in mountainous landscapes. *Geoderma*, 356: 113922.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113922>

Reyna-Bowen, L., Lasota, J., Vera-Montenegro, L., Vera-Montenegro, B. & Błońska, E. 2019. Distribution and Factors Influencing Organic Carbon Stock in Mountain Soils in Babia Góra National Park, Poland. *Applied Sciences*, 9(15): 3070. <https://doi.org/10.3390/app9153070>

Román-Sánchez, A., Vanwalleghem, T., Peña, A., Laguna, A. & Giráldez, J.V. 2018. Controls on soil carbon storage from topography and vegetation in a rocky, semi-arid landscapes. *Geoderma*, 311: 159–166.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.10.013>

Santini, N.S., Adame, M.F., Nolan, R.H., Miquelajáuregui, Y., Piñero, D., Mastretta-Yanes, A., Cuervo-Robayo, Á.P. & Eamus, D. 2019. Storage of organic carbon in the soils of Mexican temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 446: 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.029>

Scott, D.N. & Wohl, E. 2020. Geomorphology and climate interact to control organic carbon stock and age in mountain river valley bottoms. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1911–1925.
<https://doi.org/10.1002/esp.4855>

Shaw, C.H., Boyle, J.R. & Omule, A.Y. 2008. Estimating forest soil carbon and nitrogen stocks with double sampling for stratification. *Soil Science Society of America Journal*, 72(6): 1611–1620.
<https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0219>

Shrestha, B.M. & Singh, B.R. 2008. Soil and vegetation carbon pools in a mountainous watershed of Nepal. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(2): 179–191. <https://doi.org/10.1007/s10705-007-9148-9>

Shrestha, B.M., Williams, S., Easter, M., Paustian, K. & Singh, B.R. 2009. Modeling soil organic carbon stocks and changes in a Nepalese watershed. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 132(1–2): 91–97. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.03.003>

Simon, A., Dhendup, K., Rai, P.B. & Gratzer, G. 2018. Soil carbon stocks along elevational gradients in Eastern Himalayan mountain forests. *Geoderma Regional*, 12: 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.11.004>

Singh, S.K., Pandey, C.B., Sidhu, G.S., Sarkar, D. & Sagar, R. 2011. Concentration and stock of carbon in the soils affected by land uses and climates in the western Himalaya, India. *Catena*, 87(1): 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.008>

Sokolowska, J., Józefowska, A., Woźnica, K. & Zaleski, T. 2020. Succession from meadow to mature forest: Impacts on soil biological, chemical and physical properties—Evidence from the Pieniny Mountains, Poland. *Catena*, 189: 104503. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104503>

Sun, O.J., Campbell, J., Law, B.E. & Wolf, V. 2004. Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest, USA. *Global Change Biology*, 10(9): 1470–1481. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2004.00829.x>

Szopka, K., Kabala, C., Karczewska, A., Jezierski, P., Bogacz, A. & Waroszewski, J. 2016. The pools of soil organic carbon accumulated in the surface layers of forest soils in the Karkonosze Mountains, SW Poland. *Soil Science Annual*, 67(2): 46–56. <https://doi.org/10.1515/ssa-2016-0007>

Thuille, A., Buchmann, N. & Schulze, E.-D. 2000. Carbon stocks and soil respiration rates during deforestation, grassland use and subsequent Norway spruce afforestation in the Southern Alps, Italy. *Tree physiology*, 20(13): 849–857. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.13.849>

Toma, Y., Clifton-Brown, J., Sugiyama, S., Nakaboh, M., Hatano, R., Fernández, F.G., Ryan Stewart, J., Nishiwaki, A. & Yamada, T. 2013. Soil carbon stocks and carbon sequestration rates in seminatural grassland in Aso region, Kumamoto, Southern Japan. *Global Change Biology*, 19(6): 1676–1687. <https://doi.org/10.1111/gcb.12189>

Tsozué, D., Nghonda, J.P., Tematio, P. & Basga, S.D. 2019. Changes in soil properties and soil organic carbon stocks along an elevation gradient at Mount Bambouto, Central Africa. *Catena*, 175: 251–262. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.12.028>

Tsui, C.-C., Tsai, C.-C. & Chen, Z.-S. 2013. Soil organic carbon stocks in relation to elevation gradients in volcanic ash soils of Taiwan. *Geoderma*, 209–210: 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.013>

Tungalag, M., Gerelbaatar, S. & Lobanov, A.I. 2020. Organic carbon stocks in the forest soils of Northern Mongolia. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*, 2(374). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2020-2-169-176>

Twongyirwe, R., Sheil, D., Majaliwa, J.G.M., Ebanyat, P., Tenywa, M.M., van Heist, M. & Kumar, L.
2013. Variability of Soil Organic Carbon stocks under different land uses: A study in an afro-montane landscape in southwestern Uganda. *Geoderma*, 193–194: 282–289.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.09.005>

Urbina, I., Grau, O., Sardans, J., Ninot, J.M. & Peñuelas, J. 2020. Encroachment of shrubs into subalpine grasslands in the Pyrenees changes the plant-soil stoichiometry spectrum. *Plant and Soil*, 1–17.
<https://doi.org/10.1007/s11104-019-04420-3>

Valterá, M. & Šamoník, P. 2018. Soil organic carbon stocks and related soil properties in a primary *Picea abies* (L.) Karst. volcanic-mountain forest. *Catena*, 165: 217–227.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.01.034>

Vanguelova, E.I., Bonifacio, E., De Vos, B., Hoosbeek, M.R., Berger, T.W., Vesterdal, L., Armolaitis, K., et al. 2016. Sources of errors and uncertainties in the assessment of forest soil carbon stocks at different scales—review and recommendations. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(11): 630.
<https://doi.org/10.1007/s10661-016-5608-5>

Wiesmeier, M., Schad, P., von Lützow, M., Poeplau, C., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., et al.
2014. Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in southeast Germany (Bavaria). *Agriculture, ecosystems & environment*, 185: 208–220.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.12.028>

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobley, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., et al. 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils—a review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma*, 333: 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

Willaarts, B.A., Oyonarte, C., Muñoz-Rojas, M., Ibáñez, J.J. & Aguilera, P.A. 2016. Environmental Factors Controlling Soil Organic Carbon Stocks in Two Contrasting Mediterranean Climatic Areas of Southern Spain. *Land Degradation & Development*, 27(3): 603–611. <https://doi.org/10.1002/ldr.2417>

Xiao, R., Man, X. & Duan, B. 2020. Carbon and Nitrogen Stocks in Three Types of *Larix gmelinii* Forests in Daxing'an Mountains, Northeast China. *Forests*, 11(3): 305. <https://doi.org/10.3390/f11030305>

Yan, A., Li, B., Huang, F., Zhang, W., Jiang, P. & Sheng, J. 2019. Distribution and storage of soil organic and inorganic carbon under different ecological zones in Xinjiang, China. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(1): 116–125.

Yang, Y., Fang, J., Tang, Y., Ji, C., Zheng, C., He, J. & Zhu, B. 2008. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 14(7): 1592–1599.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01591.x>

Yimer, F., Ledin, S. & Abdelkadir, A. 2006. Soil organic carbon and total nitrogen stocks as affected by topographic aspect and vegetation in the Bale Mountains, Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, 135: 335–344. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.01.005>

- Zaher, H., Sabir, M., Benjelloun, H. & Paul-Igor, H.** 2020. Effect of forest land use change on carbohydrates, physical soil quality and carbon stocks in Moroccan cedar area. *Journal of Environmental Management*, 254: 109544. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109544>
- Zhao, Z., Zhang, X., Dong, S., Wu, Y., Liu, S., Su, X., Wang, X., Zhang, Y. & Tang, L.** 2019a. Soil organic carbon and total nitrogen stocks in alpine ecosystems of Altun Mountain National Nature Reserve in dry China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(1): 40. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7138-9>
- Zhao, J., Peng, S., Chen, M., Wang G., Cui Y., Liao L., Feng J., Zhu B., Liu W., Yang L. & Tan Z.** 2019b. Tropical forest soils serve as substantial and persistent methane sinks. *Sci Rep*, 9: 16799. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51515-z>
- Zollinger, B., Alewell, C., Kneisel, C., Meusburger, K., Gärtner, H., Brandová, D., Ivy-Ochs, et al.** 2013. Effect of permafrost on the formation of soil organic carbon pools and their physical–chemical properties in the Eastern Swiss Alps. *Catena*, 110: 70–85. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013>

附錄 3. 旱地 – 補充文件

表 34. 根據 IPCC (2019) 的公式 2.24，在世界不同的旱地中，透過慣行和非慣行措施 (h)，在代表性的參照情況 (HA ≫ F) 下的耕地 (C) 、草原 (G) 和森林 (F) 中，所造成的壤有機碳變化率 (ΔSOC) 與土壤有機碳增加係數 (ΔF)

地點	H _{A>F}	H _F	SOC ₀ t/ha	SOC _{0-T} t/ha	0-T年	ΔSOC t/ha/yr	ΔF	h (未編碼) 措施	參考文獻
阿根廷聖瑪莉亞 (Santa Maria, Argentina)	AI 0.2、平均海拔1916公尺、溫帶、山區、乾燥沖積土、深度0.3	C	36.4	32.1	50	-0.08	0.998	慣行耕犁+使用有機肥料	FAO (2004)
		G	36.4	36.9	50	0.01	1.000	草地維護	
		C	36.4	56.6	50	0.40	1.011	免耕+動物糞肥 1.5 噸 / 公頃 / 年 · 及施用有機肥	
阿根廷圖庫曼 (Tucuman)	AI 0.5、平均海拔360~420公尺、亞熱帶、平原、栗鈣土、深度0.3	C	65.0	67.6	3	0.04	1.013	免耕 + 使用無機肥料	Farage et al. (2007); FAO (2004)
		C	65.0	77.4	3	0.19	1.063	綠肥 + 堆肥	
		C	43.3	39.4	50	0.73	0.998	連續耕作	
		C	43.3	41.5	50	0.73	0.999	免耕	
		C	43.3	48.3	50	0.73	1.002	免耕、不施用無機肥料、糞肥3.3噸 / 公頃 / 年	
		G	43.3	42.6	50	0.73	1.000	草地維護	
澳洲大傑克 (Big Jacks, Australia)	AI 0.65、平均海拔446公尺、溫帶、山丘、黑土、深度0.3	G	47.4	45.7	8	-0.22	0.995	連續扦插 (cutting) 及施用無機肥料 · 115 公斤氮 / 公頃 / 年	Young et al. (2009)
		G	73.6	79.9	8	0.79	1.011	本地植被	
澳洲 Book Book	AI 0.65、平均海拔336公尺、溫帶、山丘、鈉質黃底土層 (Subnatric yellow Sodosol) 、深度0.3	G	41.0	41.0	13	0.00	1.000	定期施用磷、鉀、鋁； 一年生牧草不施用石灰	Chan Roberts, and Heenan (1992)
		G	41.0	42.4	13	0.11	1.003	定期施用磷、鉀、鋁。	

地點	$H_{A\gg F}$	H_F	SOC_0 t/ha	SOC_{0-T} t/ha	0-T年	ΔSOC t/ha/yr	ΔF	h (未編碼) 措施	參考文獻
		G	41.0	44.1	13	0.24	1.006	轉為多年生草地，不施用石灰	Young et al. (2009)
								定期施用磷、鉀、鋁。轉為多年生草地，並施用石灰	
澳洲哈德遜 (Hudson)	AI 0.65、平均海拔 411 公尺、溫帶、山丘、淋溶森林草原土 (Luvic Phaozem) 、深度 0.3	G	38.6	39.6	8	0.12	1.003	連續扦插及施用無機肥，90 公斤氮 / 公頃 / 年	Young et al. (2009)
		G	38.2	42.3	8	0.52	1.014	轉換為多年生草地。牧草地 C3-C4 施用無機肥 50 公斤 / 公頃 / 年	
澳洲沃加沃加 (Wagga Wagga)	AI 0.65、平均海拔 198 公尺、溫帶、山丘、康狄土 (Kandosol) 、深度 0.2	CG	43.0 0	33.6	25	-0.38	0.991	三次耕犁，焚燒殘桿、小麥 / 小麥	Chan Roberts, and Heenan (1992)
		C	43.0 0	48.0	25	0.20	1.005	免耕，保留殘桿、小麥 / 三葉草輪作，保持刈草	
澳洲 Yarraman bah	AI 0.65、平均海拔 147 公尺、溫帶、平原、淋溶森林草原土、深度 0.3	G	27.8	29.3	8	0.19	1.007	連續扦插及施用無機肥，100 公斤 / 公頃 / 年	Young et al. (2009)
巴西聖特雷西尼亞 (Santa Teresinha, Brazil)	AI 0.5、飽和磚紅土 (Eutric Leptosol) 、平均海拔 281 公尺、熱帶、山丘、深度 0.5	F	32.5	26.0	100	-0.07	0.998	每 20 年火耨 (可控制的火耕) 一次	Althof et al. (2015)
		F	32.5	28.3	100	-0.04	0.999	每 10 年火耨一次	
		F	32.5	32.5	100	0.00	1.000	只有卡廷加草場處，沒有火耨	
匈牙利布高茨普斯陶 (Bugacpuszta, Hungary)	AI 0.65、平均海拔 109 公尺、溫帶、平原、飽和風積土 (Eutric Regosol) 、深度 0.3	G	20.4	22.2	1	1.86	1.091	最高降水量和最低溫正面極端案例 (正常值) 。個案研究中的最高捕集	Pinter et al. (2008)

地點	$H_{A\gg F}$	H_F	SOC_0 t/ha	SOC_{0-T} t/ha	0-T年	ΔSOC t/ha/yr	ΔF	h (未編碼) 措施	參考文獻
匈牙利蘇爾多 克皮什珀基 (Szurdokpó- spoki)	AI 0.65、平均 海拔 205 公 尺、溫帶、山 區、簡育型濕潤 黑土 (Haplic Phaeozem) 、深度 0.3	F	38.9	38.2	1	-0.73	0.981	最低降水量和最高 溫。極端負面案例	
印度 Gawalpahari	AI 0.5、平均海 拔 259 公尺、 熱帶、山丘、 乾燥淋溶土 (Aridic Luvisol) 、深 度 0.6	SC	16.6	18.3	2	0.81	1.049		Bhojvaid and Timmer (1998)
印度塞里林格 阿姆帕爾萊 (Lingampa- lly)	AI 0.5、平均海 拔 568 公尺、 熱帶、平原、 深色淋溶土 (Chromic Luvisol) 、深 度 0.3	C	19.3	18.4	50	-0.02	0.999	慣行措施	FAO (2004)
		C	19.3	30.9	50	0.23	1.012	將植物廢棄物納入土壤	
		C	19.3	35.6	50	0.33	1.017	糞肥3噸 / 公頃 / 年。 植物殘留物、綠肥、 蠶蟲堆肥	
印度 Malligere	AI 0.5、平均 海拔 756 公 尺、亞熱帶、 山丘、深色淋 溶土、深度 0.3	C	18.5	22.4	50	0.73	1.004	現行措施。廢棄物放 牧 (Waste grazing) 。無機肥尿 素和磷酸氫二銨 (diammonium phosphate) (75 公 斤 / 公頃 / 年)	FAO (2004)
		C	18.5	29.8	50	0.73	1.012	糞肥。廢棄物放牧。 無機肥料含 磷酸氫二 銨 75 公斤 / 公頃 / 年 和尿素 75 公斤 / 公 頃 / 年	
印度 Metalkunta	AI 0.65、平均 海拔 619 公 尺、熱帶、平 原、網紋淋溶 土 (Plinthic Luvisol) 、深 度 0.3	C	25.0	27.7	50	0.73	1.002	慣行措施	FAO (2004)
		C	25.0	45.2	50	0.73	1.016	納入植物殘體	
墨西哥 Ojuelos	AI 0.5、平均海 拔 2219 公 尺、溫帶、山 丘、Epileptic 變性土、深度 0.3	G	44.0	44.1	28	0.00	1.000	適度放牧的牧草地	Delgado Balbuena et al. (2013)
		G	44.0	51.2	28	0.26	1.006	草地有灌木侵入 (scrubbing)	

地點	$H_{A\gg F}$	H_F	SOC_0 t/ha	SOC_{0-T} t/ha	0-T年	ΔSOC t/ha/yr	ΔF	h (未編碼) 措施	參考文獻
肯亞 Athi Kamunyuni	AI 0.5、平均海拔 900 公尺、亞熱帶、山區、Epileptic 風積土、深度 0.3	C	26.7	25.90	50	-0.02	0.999	慣行措施	FAO (2004)
		G	26.7	30.48	50	0.08	1.003	慣行放牧	
		C	26.7	35.96	50	0.19	1.007	糞肥 1.25 噸 / 公頃 / 年	
肯亞達拉賈尼 (Darajani)	AI 0.5、平均海拔 656 公尺、熱帶、臺地飽和風積土、深度 0.3	CG	33.7	32.55	50	-0.02	0.999	玉米與小米間作 (intercropping)	FAO (2004)
		CG	33.7	61.15	50	0.55	1.016	糞肥 4.5 噸 / 公頃 / 年，焚燒殘留物和休耕。玉米與小米間作	
		CG	33.7	67.53	50	0.68	1.020	糞肥 4.5 噸 / 公頃 / 年，不焚燒殘留物，不休耕。玉米與小米間作	
肯亞 Kaiani	AI 0.5、平均海拔 1039 公尺、亞熱帶、山區、乾燥風積土、深度 0.3	C	35.2	35.09	50	0.00	1.000	慣行措施	FAO (2004)
		C	35.2	52.15	50	0.34	1.010	糞肥 2 噸 / 公頃 / 年，小米與豇豆間作	
		C	35.2	53.94	50	0.37	1.011	糞肥 2 噸 / 公頃 / 年，小米與豇豆間作。蔬菜廢棄物 0.3 噸 / 公頃 / 年	
肯亞 Kymausoi	AI 0.5、平均海拔 894 公尺、亞熱帶、山區、鐵質淋溶土 (Ferric Luvisol)、深度 0.3	F	38.4	38.4	50	-0.02	1.000	原生植被	FAO (2004)
		CG	33.5	32.2	50	0.10	0.999	慣行措施	
		CG	33.5	39.4	50	0.33	1.004	蔬菜廢棄物 0.3 噸 / 公頃 / 年	
		CG	33.5	53.8	50	0.73	1.012	糞肥 1.5 噸 / 公頃 / 年；植物廢棄物 3 噸 / 公頃 / 年	
墨西哥卡爾普拉爾潘 (Calpulapan)	AI 0.5、平均海拔 2648 公尺、溫帶、	C	0.1	11.1	50	0.22	3.200	單一種植玉米和移除收穫後的殘留物	Baez Perez et al. (2021)

地點	$H_{A\gg F}$	H_F	SOC_0 t/ha	SOC_{0-T} t/ha	0-T年	ΔSOC t/ha/yr	ΔF	h (未編碼) 措施	參考文獻
	山區、火山灰變性土 (Andic Cambisol) 、深度 0.3	C	0.1	24.1	50	0.48	5.800	玉米與其他作物輪作，長期施用糞肥	
摩洛哥西迪厄爾尼諾愛迪 (Sidi El Aidi)	AI 0.5、平均海拔 269 公尺、溫帶、平原、vertic calcixeroll 黏土、深度 0.5	C	41.1	45.6	11	0.41	1.010	零耕犁 (zero tillage)	Bessam and Mrabet (2003)
		C	41.1	48.3	11	0.66	1.016	慣行耕犁	
奈及利亞 Dagaceri	AI 0.5、平均海拔 399 公尺、熱帶、平原、淋溶紅砂土 (Luvic Arenosol) 、深度 0.3	CG	13.6	17.67	50	0.08	1.006	慣行措施	FAO (2004)
		CG	13.6	25.84	50	0.24	1.018	糞肥 1.29 噸 / 公頃 / 年，短期休耕，廢棄物放牧	
奈及利亞 Futchimiram	AI 0.2、平均海拔 318 公尺、熱帶、平原、深色紅砂土 (Chromic Arenosol) 、深度 0.3	C	5.5	3.85	50	-0.03	0.994	連續耕作	FAO (2004)
		C	5.5	5.10	50	-0.01	0.999	慣行措施	
		C	5.5	5.90	50	0.01	1.001	植物廢棄物 0.5 噸 / 公頃 / 年	
		C	5.5	11.61	50	0.12	1.022	五年休耕，五年耕作，兩次施用 3 噸 / 公頃 / 年的有機肥料，並進行廢棄物放牧	
奈及利亞卡莎 (Kasha)	AI 0.2、平均海拔 243 公尺、熱帶、平原、飽和浸水灰化土 (Eutric Gleysol) 、深度 0.3	C	7.5	7.7	50	0.00	1.001	慣行措施	FAO (2004)
		C	7.5	16.2	50	0.17	1.023	休耕，糞肥 3 噸 / 公頃	
奈及利亞 Tumbau	AI 0.2、平均海拔 420~460 公尺、熱帶、平原、飽和風積土、深度 0.3	C	14.5	12.0	50	-0.05	0.997	慣行耕犁	Farage et al. (2007); FAO (2004)
		C	14.5	12.3	50	-0.05	0.997	僅限無機肥料	
		C	14.5	18.5	50	0.08	1.006	堆肥、豆科植物、保留的植物殘體	
		C	14.5	19.5	50	0.10	1.007	額外的植樹造林	

地點	$H_{A\gg F}$	H_F	SOC_0 t/ha	SOC_{0-T} t/ha	0-T年	ΔSOC t/ha/yr	ΔF	h (未編碼) 措施	參考文獻
		C	14.5	15.7	50	0.73	1.002	慣行措施。廢棄物放牧	
		C	14.5	38.0	50	0.73	1.032	糞肥 6.75 噸 / 公頃 / 年。植物廢棄物 2 噸 / 公頃 / 年	
		C	14.5	18.1	50	0.73	1.005	糞肥 3.75 噸 / 公頃 / 年。廢棄物放牧	
葡萄牙 Aldeia di Biscaia	AI 0.65、平均海拔 265 公尺、溫帶、山丘、乾燥風積土 (Aridic Regosol) 、深度 0.05	FG	35.1	35.9	5	0.19	1.005	持續兩年納入灌木殘體 23.4 噸 / 公頃，並補充施用氮 (80 公斤 / 公頃) 和磷 (35 公斤 / 公頃)	Madeira et al. (2012); Merino et al. (2019)
葡萄牙埃武拉 (Évora)	AI 0.5、地中海平原、淋溶土、深度 0.3 、 38° 28'N 、 7°28'W 輪作羽扇豆 (lupin) 、小麥、飼料、燕麥與大麥	C	61.0	61.0	11	0.00	1.000	慣行耕犁	Carvalho et al. (2012)
		C	65.0	75.0	11	10.00	1.153	少耕	
		C	66.0	82.0	11	16.00	1.242	免耕 + 清除穀物秸稈	
		C	66.0	120.0	11	54.00	1.818	不清除秸稈的免耕	
塞內加爾 Old Peanut	AI 0.5、平均海拔 9 公尺、熱帶、平原、 Sandy Dior and Hydromorphic Deck 、深度 0.3	C	11.9	12.4	25	0.02	1.002	堆肥 2 噸 / 公頃 / 年	Tschakert, Khouma and Sene (2004); FAO (2004)
		G	11.9	13.4	25	0.06	1.005	從作物種植轉為草地放牧	
		C	11.9	14.4	25	0.1	1.008	糞肥 4 噸 / 公頃 / 年	
		C	11.9	15.4	25	0.14	1.012	休耕三年。糞肥 2 噸 / 公頃 / 年。輪作四年	
		G	11.9	16.2	25	0.17	1.014	在不放牧的情況下，從作物轉為牧草。	

地點	$H_{A\gg F}$	H_F	SOC_0 t/ha	SOC_{0-T} t/ha	0-T年	ΔSOC t/ha/yr	ΔF	h (未編碼) 措施	參考文獻
塞內加爾 Kordofan-Kaba	AI 0.2、平均海拔 580~640 公尺、熱帶、平原、深色變性土 (Chromic Vertisol)、深度 0.2	C	11.9	16.4	25	0.18	1.015	休耕三年，2 噸銀合歡，每四年輪耕一次	Ardö and Olsson (2004); Farage <i>et al.</i> (2007)
		G	11.9	17.7	25	0.23	1.019	從作物種植轉為不放牧的草地，使用白相思樹 (<i>Faidherbia albida</i>) 植樹造林	
		C	11.9	18.2	25	0.25	1.021	休耕 10 年，糞肥 2 噸 / 公頃 / 年，與六年耕地輪作	
		C	11.9	22.7	25	0.43	1.036	改良後的小米、糞肥、混入銀合歡、無機肥、動物牽引 (animal traction) 和休耕一年	
塞內加爾 Kordofan-UmmHiglig	AI 0.2、平均海拔 559 公尺、熱帶、平原、砂性變育土 (Arenic Cambisol 土)、深度 0.3	C	8.5	7.1	27	-0.17	0.994	長期連作高粱	Ardö and Olsson (2004)
		C	8.5	8.9	27	0.04	1.001	從僅耕種轉為耕種：休耕 (5 : 20)	
		C	4	4.6	27	0.15	1.006	樹木播種。 從耕種轉為耕種：休耕 (5 : 20)	
美國薛安 (Cheyenne)	AI 0.5、平均海拔 1917 公尺、溫帶、平原、乾燥黏化乾軟土 (Aridic	G	47.9	58	12	0.84	1.018	連續輕度放牧	Schuman (2009)

地點	$H_{A\gg F}$	H_F	SOC_0 t/ha	SOC_{0-T} t/ha	0-T年	ΔSOC t/ha/yr	ΔF	h (未編碼) 措施	參考文獻
	(Argiustolls) 、深度 0.3	G	47.9	58.3	12	0.86	1.018	連續重度放牧	
美國柯林斯堡 (Fort Collins)	AI 0.5、平均海拔 1930 公尺、溫帶、平原、細壤質、混合型、中型、Ustollic Haplargid、深度 0.3	G	37.4	38.2	55	0.01	1	短莖草	Reeder and Shuman (2002)
		G	37.3	42.3	55	0.09	1.002	短莖草	
		G	58.3	66.5	12	0.68	1.012	混合草種	
		G	58.3	67.4	12	0.76	1.013	混合草種	
美國太平洋西北地區 (Pacific Northwest)	AI 0.5、平均海拔 795 公尺、溫帶、山丘、淋溶黑土 (Luvic Phaeozem) 、深度 0.3	C	61	41.8	55	-0.35	0.994	原生植被轉為連續耕作	Brown and Huggins (2012)
		C	61	60.6	12	-0.03	1	焚燒廢棄物	Horner et al. (1960)
		C	61.0	63.1	10	0.21	1.003	免耕	Brown and Huggins (2012)
		C	61.0	69.3	12	0.69	1.011	多年生混合作物 + 輪作	

附錄 3. 參考文獻

- Althoff, T., Menezes, R., Carvalho, A., Pinto, A., Santiago, G., Ometto, J., Von Randow, C. & Sampaio, E.** 2015. Climate change impacts on the sustainability of the firewood harvest and vegetation and soil carbon stocks in a tropical dry forest in Santa Teresinha Municipality, Northeast Brazil. *Forest Ecology and Management*, 360: 367-375. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.10.001>
- Ardö, J., & Olsson, L.** 2004. Soil Carbon Sequestration in Traditional Farming in Sudanese Dry Lands. *Environmental Management*, 33: 318-329. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-9141-2> 33
- Báez Pérez, A., Etchevers Barra, J.D., Hidalgo Moreno, C.I., Prat, C., Cruz, A.B. & Gallardo Lancho J.F.** 2021. Rehabilitation of hardened neo-volcanic soils in Mexico. Unpublished.
- Bessam, F. & Mrabet, R.** 2003. Long-term changes in soil organic matter under conventional and no-tillage systems in semi-arid Morocco. *Soil Use and Management*, 19: 139–143. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00294.x>
- Bhojvaid, P.P. & Timmer, V.R.** 1998. Soil Dynamics in an Age Sequence of Prosopis juliflora Planted for Sodic Soil Restoration in India. *Forest Ecology and Management*, 106(2-3): 181–193. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00310-1](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00310-1)
- Brown, T.T. & Huggins, D.R.** 2012. Soil carbon sequestration in the dryland cropping region of the Pacific Northwest. *Journal of Soil and Water Conservation*, 67(5): 406-415. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.5.406>
- Carvalho, M., Basch, G., Calado, J. & Barros, J.** 2012. Long term effect of tillage system and crop residues management on soil carbon content of a Luvisol under rainfed Mediterranean conditions. In O. Ernest, M. Bidegain, J. Terra & M. Barbazan (Eds.) *Agrociencia Special Issue – Striving for Sustainable High Productivity Through Improved Soil and Crop Management*, pp. 183–187. Facultad de Agronomía, Universidad de la República, y Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria del Uruguay, Montevideo, Uruguay. ISSN 1510-0839.
- Chan, K.Y., Roberts, W.P. & Heenan, D.P.** 1992. Organic carbon and associated soil properties of a red earth after 10 years of rotation under different stubble and tillage practices. *Soil Research*, 30(1): 71–83. <https://doi.org/10.1071/sr9920071>
- Delgado-Balbuena, J., Arredondo, J. T., Loescher, H. W., Huber-Sannwald, E., Chávez-Aguilar, G., Luna, M. & Barretero-Hernández, R.** 2013. Differences in plant cover and species composition of semiarid grassland communities of central Mexico and its effects on net ecosystem exchange. *Biogeosciences*, 10: 4673-4690. <https://doi.org/10.5194/bg-10-4673-2013>
- FAO.** 2004. Carbon sequestration in dryland soils. *World Soil Resource Reports*, 102.
- Farage, P.K., Ardö, J., Olsson, L., Rienzi, E.A., Ball, A.S. & Pretty, J.N.** 2007. The potential for soil carbon sequestration in three tropical dryland farming systems of Africa and Latin America: A modeling approach, *Soil and Tillage Research*, 94(2): 457-472. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.09.006>

Madeira, M., Alexandre, C., Simões, P., Gazarini L. & Nunes J. 2012. Improvement functions of degraded soils by application of organic amendments. In *Best practices on land degradation and restoration in Mediterranean environments*. Portugal.

Merino, A., García-Oliva, F., Omil, B., Campo, J., Etchevers, J.D. & Gallardo, J.F. 2019. *Land use and agricultural practices in Best Practices in Evaluation and Restoration of Degraded Mediterranean Environments*. IBADER, Lugo, Spain. pp. 16-49. ISSN: 1988-8341.

Pinter, K., Barczan, Z., Balogh, J., & Nagy, Z. 2008. Continuous Eddy covariance Measurements of Grasslands Carbon Balance in Hungary. *Cereal Research Communications*, 36: 563-66.
<http://www.jstor.org/stable/90002766>.

Reeder, J.D. & Schuman, G.E. 2002. Influence of livestock grazing on C sequestration in semiarid and mixed-grass and short-grass rangelands. *Environ. Pollut.*, 116: 457–463. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00223-8](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00223-8)

Tschakert, P., Khouma, M. & Sène, M. 2004. Biophysical potential for soil carbon sequestration in agricultural systems of the Old Peanut Basin of Senegal. *J. Arid Env.*, 59: 511–533.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2004.03.026>

Young, R.R., Wilson, B., Harden, S. & Bernardi, A. 2009. Accumulation of soil carbon under zero tillage cropping and perennial vegetation on the Liverpool Plains, eastern Australia. *Soil Research*, 47(3): 273–285.
<https://doi.org/10.1071/SR08104>



中英詞彙對照

A

A horizon A土層
abiotic 非生物性
aboveground biomass 地上部生物量
aboveground net primary productivity, ANPP 地上淨初級生產力
accidental sampling 偶遇抽樣
accretion model 堆積模型
acetanilide 乙醯苯胺
acid 酸
acid phosphatase 酸性磷酸酶
actinorhizal species 放線菌根樹種
active layer 活凍層
adapted irrigation 適應性灌溉
adaptive response 適應性反應
aeolian sediments 風積物
aeration 通氣
aerial roots 氣根
aerobic composting 好氧堆肥
aerobic degradation 有氧降解
aerobic rice 好氧性水稻
aerosols 氣懸膠體
affinity 親和性
afforestation/afforest 新植造林
aggregate stability 團粒穩定性
aggregation 團粒形成
agricultural intensification 農業集約化
agrisilvicultural systems 混農林系統
agrisylviculture 混農林業
agroecological farming 生態農業
agroecosystem 農業生態系統
agroforestry 混農林業
agroforestry for conservation, A4C 混農林業保育
agronomy 農藝學
agrosilvopastoral system 混農林牧系統
agrosylvopastoralism 混農林牧業
air capacity 空氣容量
air filtration 空氣過濾
air-filled porosity 充氣孔隙度
algal bloom 藻華
alkaline phosphatase 鹼性磷酸酶
alkaline structureless soils 無結構鹼土
alkalinization 鹼化
allelochemical 植物化感物質

allelopathic effects 植物化感作用
allelopathic substances 植物化感物質
alley cropping 田籬間作
allotment gardens 分配區域花園
alluvial platforms 沖積台地
alpine tundra 高山苔原
alternate wetting and drying, AWD 乾溼交替
alternative wetting, AW 交替溼潤
altitude tropical climate 高海拔熱帶氣候
ambient temperature 環境溫度
ameliorant 改良劑
amendment 改良劑
amino acids 肽基酸
ammonia, NH₃ 氨
ammonia monooxygenase 氨氧化酶
ammoniacal fertilizers 氨態肥料
ammonia-N, NH₃-N 氨態氮
ammonifying bacteria 氨化細菌
ammonium, NH₄⁺ 銨
ammonium bicarbonate 碳酸氫銨
ammonium nitrate 硝酸銨
ammonium sulfate 硫酸銨
ammonium-N, NH₄-N 銨態氮
amphi 粗腐植質
amphibian 兩棲動物
anaerobic composting 厥氧堆肥
anaerobic digestion 厥氧消化
anaerobic process 厥氧過程
anhydrous ammonia 無水氨
animal husbandry 動物飼養
animal manure 動物糞肥
animal skidding 畜力牽引
anthrax 炭疽病
apron 機坪
aquaculture pond 水產養殖池
aquatic biomass 水生生物量
aquatic habitats 水生棲息地
arable crop 可耕種作物
arable land 可耕地
arboreal 喬木的
arboreous 喬木
arbuscular mycorrhizae fungi 組枝菌根菌
archaea 古菌
arctic ocean 北冰洋

area-based 生產面積為基礎
area-weighted mean 面積加權平均數
aridity index, AI 乾燥指數
aromaticity 芳香性
arthropod 節肢動物
articulated 聯結式的
artificial polymers 人造聚合物
Ascalon 艾斯卡隆土系
aspect 坡向
asphalt 潘青
assemblage 類聚
assimilate 同化
assisted natural regeneration, ANR 輔助自然更新
atmospheric deposition 大氣沉降
atmospheric moisture 大氣濕度
Atrazine 草脫淨
autecology 個體生態學
autochthonic 原生
autotrophic nitrification 自營性硝化作用
available 有效的、可用的
available N 有效氮
available P 有效磷
available timber volume 可用材積
available water capacity 有效水容量
axenic cultures 純種

B

backhoe delving 反鏟挖掘
badland 惡地
bank cutting 河岸侵蝕
bare soil 裸露土壤
barrier effect 屏障效應
base cations 鹼基陽離子
base saturation 鹼基飽和度
basic 鹼性
bed planting 床植
beje 一種傳統捕魚方法
belowground net primary productivity, BNPP 地下淨初級生產力
bench terraces 階式梯田
benches 臺地
beneficial Insects 有益昆蟲
benthic fauna 底棲動物
 β -glucosidase β -葡萄糖苷酶
bicarbonate 碳酸氫鹽

bioavailability 生物有效性	briquettes 煤球	carbon capture and storage 碳捕獲與儲量
biochar 生物炭	broadcast 播撒	carbon credits 碳權
bioclimatic 生物氣候	broadleaf forest 閑葉林	carbon cycle 碳循環
biodiversity habitat 生物多樣性棲地	browse 嫩枝葉	carbon dating 碳定年
biodynamic agriculture 生物動力農業	browsing 摘食嫩葉	carbon debt 碳債
bioenergy, biomass energy 生質能源	bryophytes 苔蘚植物	carbon decomposition 碳分解
biofertilizer 生物肥料	Buffalo mozzarella 水牛乳製奶酪	carbon density 碳密度
biofiltration 生物過濾	buffer strips 緩衝帶	carbon dioxide equivalent, CO ₂ eq, CO ₂ e 二氣化碳當量
biogas 生質氣體	bulk density 土壤容積密度	carbon equivalent, Ceq. 碳當量
biogeochemical cycles 生物地球化學循環	bulk soil 總體土壤	carbon farming 碳農業
biological control 生物防治	bulldozer 推土機	carbon loss 碳損失
biological filter 生物過濾器	bund 堤岸	carbon neutral 碳中和
biological fixation 生物固定	bush fire 野火	carbon offsets 碳補償
biological nitrogen fixation 生物固氮作用	business as usual, BAU 一如往常，不採取任何溫室氣體排放減量要求的措施，在此往常措施下測定的溫室氣體排放量被設定為「二氣化碳排放基線」	carbon pool 碳庫
biological weathering 生物風化	butane gas 丁烷	carbon sequestration 碳固存
biomacrostructured 生物巨結構	by-product 副產品	carbon sink 碳匯
biomass 生物質、生物量		carbon standard project 碳標準計畫
biomass burning 生物質燃燒		carbon stock 碳庫存
biomass production 生物量生產		carbon storage 碳儲量
biomass removals 生物量去除		carbonate rock 碳酸鹽岩
biome 生物群系	C budget 碳預算	carbonates 碳酸鹽
biophysical conditions 生物物理條件	C fluxes 碳通量	carboxylic acids 羥酸
biopore 生物孔	C isotope 碳同位素	carcass gain 屍體增重
bioretention systems 生物滯留系統	C sequestration 碳固存	carrying capacity 載牧力
bioslurry 生物泥漿	C stock 碳庫存	carryover 殘留性
biosolids 生物固形物	C storage 碳儲量	case study 案例研究
biostimulant 生物刺激素	C/N Ratio 碳氮比	cash crop 經濟作物
bioswales 生態截流系統	CA-based 以保育性農業為基礎	catalyst 催化劑
biota 生物相	cable yard logging 架線集材採伐	catch crop 增益作物
biotic stress 生物逆境	cable yard system 架線集材系統	catchment 集水區
bioturbation 生物擾動	cadmium, Cd 鎘	caterpillar tractor 履帶式牽引車
biowaste 生物廢棄物	calcareous 鈣質	cation 陽離子
black carbon, BC 黑碳	calcareous parent material 石灰母質	cation exchange capacity, CEC 陽離子交換能力
black soil 黑土	calcaric 鈣質	cation retention 陽離子吸持
blocky structure 塊狀構造	calcium carbonate 碳酸鈣	cattle manure, CM 牛糞肥
blue carbon 藍碳	calcium nitrate 硝酸鈣	causeways 堤道
blue C benefits 藍碳效益	calcium phosphate 磷酸鈣	cellulose 纖維素
blue water 藍水，農作物水足跡以藍水指灌溉用水、綠水指雨水，而灰水是稀釋汙染水至可用水質所需要的水	calcium salt 鈣鹽	cellulosic-based fuels 纖維素燃料
bogs 酸性泥炭沼澤	Ca-silicate 硅酸鈣板	cement 膠結
bone meal 骨粉	canopy 林冠、樹冠	cementing material 膠結物
bootstrapped 自助法（統計）	canopy closing 林冠鬱閉	center pivot (irrigation system) 中樞灌溉系統
boreal coniferous forest 寒帶針葉林	canopy cover 林冠覆蓋	CH ₄ 甲烷
boreal zone 極北區	canopy opening 開放式林冠	CH ₄ sink 甲烷匯
boric acid 硼酸	CaO 氧化鈣	chalcedony 玉髓
boron, B 硼	capacity building 能力建構	chamber collection techniques 集氣室技術
brackish water 半鹹水	cap-and-trade 總量管制和交易	
break crop 中斷作物	capillary rise 毛細上升	
	carbon, C 碳	
	carbon accumulation rate 土壤碳累積速率	

channel 渠道	community farm 社區農場	corer 岩芯採取器
channelization 條化	community forest, CF 社區林業	cores 岩芯
charcoal 木炭	community garden 社區花園	corn stover 玉米蒿桿
check dam 擋沙壩	community supported agriculture, CSA 社區支持農業	correction factors 修正因數
chisel plow tiller 鑿犁耕耘機	companion planting 共生植物	cotton gin trash 軋棉渣
chloroform fumigation 氯仿熏蒸萃取法	complexation 錯合作用	coupling 耦合
extraction method 氯仿熏蒸萃取法	compliance market Standards 履約市場標準	cover biomass incorporation, CB 覆蓋生物量的摻入
chroma 彩度	compost 堆肥	cover crop, CC 覆蓋作物
chronosequence 時間序列	compost pile or windrow 堆肥樁和堆垛	chromium, Cr 鉻
circular economy 循環經濟	composting 堆肥法	creep grazing 潛欄放牧
clay content 黏土含量	compressive stress 壓應力	crop productivity 作物生產力
clay fraction 黏土部份	concentrated feed 濃縮飼料	crop residues 作物殘體
clay pebble 黏土卵石	concrete materials 混凝土材料	crop rotation 作物輪作
clay soil mineralogy 黏土礦化度	condensed tannins 縮合單寧	crop sequence 作物輪作順序
clay-humus complex 黏土-腐植質複合體	cone penetration 圓錐穿刺	cropland 耕地
clean-tilled crop 淨耕作物	confidence intervals 信賴區間(統計)	crop-pasture rotations, CPR 作物與牧草輪作
CleanCookingAlliance 乾淨烹飪聯盟	Conservation Agriculture, CA 保育性農業	crust 結皮
clear cutting, clearcutting 皆伐	Conservation Reserve Program, CRP 長期休耕保育計畫	cryosphere 冰凍圈
clear felling, clearfelling 皆伐	conservation tillage 保育耕犁	cryoturbation 冰擾作用
climate-neutral 氣候中和	consortia, consortium 共同體	copper, Cu 銅
climate-resilience 氣候韌性	constructed planting 構成土種植	cultivar 栽培品種
Climate-Smart Agriculture, CSA 氣候智慧型農業	constructed soil 構成土	cultivated land 耕地
climax 安定期	continuous cover forestry, CCF 連續覆蓋林業	cultivated variety 栽培品種
climax forest 極相林	continuous cropping, CC 連續耕作	cultural layer 文化層
climax vegetation 極相群落	continuous flooding 連續浸水	cut-off drain 截水溝
climber cutting 砍伐攀緣植物	continuous grazing 連續放牧	
climbing plant 攀緣植物	continuous irrigation 連續灌溉	
clod 土塊	continuous waterlogging, CW 連續浸水	
cloud cover 雲量	contour line 等高線	
cloud forests 雲霧森林	contributing area 集水面積	
CO ₂ fertilization 二氣化碳肥力效應	controlled irrigation, CI 控制灌溉	
CO ₂ flux 二氣化碳通量	Controlled Traffic Farming, CTF 固定道耕作	
coastal plain 沿海平原	conventional agriculture 慣行農業	
coastal restoration 海岸復育	conventional farming 慣行農業	
coastal wetland 沿海濕地	conventional logging 慣行採伐	
coefficient of variation 變異係數	conventional tillage, CT 慣行耕犁	
cogeneration plant 热電共生廠	conversion 轉作	
coliform 大腸桿菌	cooling island 冷卻島	
colluvial 崩積物	cooling phase 降溫階段	
colonization 定植	cooperatives 農業合作社	
combine harvester 聯合收割機	coppicing 矮林作業	
combustion factor 燃燒係數		
commercial farming 商業性農業		
commodity crop 經濟作物		
Common Agricultural Policy, CAP 共同農業政策		
communal grazing 公共的放牧場		
communities 群落		

D

dairy farm 乳牛養殖場
dairy farming 酪農業
dams 水壩
datum 基準
day after broadcasting, DAB 播種後的天數
days after planting, DAP 種植後的天數
dead wood 枯木
decadal increase 年代際增長
deciduous 落葉的
deciduous hardwood 落葉闊葉樹
decompaction 去壓實
decomposer 分解者
decomposition rate 分解率
deep frost 厚霜
deep inversion tillage 深層反轉耕作
deep ploughing 深耕
deep root 深根
deep-tunnelling dung beetle 深掘甬道型糞金龜
deferred grazing 延遲放牧

deficit drip 缺水滴灌	distillation 蒸餾	enchytraeids 鍋蟲
deficit irrigation 缺水灌溉	diversity index 多樣性指數	encroachment 侵入
defoliation 去葉	dolomite 白雲石	endemism 特有性
deforestation 森林砍伐	donor 供體	endocoprid species 糞居型物種
degrade 降解	dossal 林冠	energy compound 能量化合物
degraded forest 退化森林	double crop 雙作物	enrichment planting 補植
dehesa 德埃薩土壤系統	double rice, DR 雙季稻	enteric fermentation 腸道發酵
dehydrogenase 脫氫酶	drainage 排水	environmental tax 環境稅
deltaic alluvium 三角洲沖積層	dredge 疏浚	enzyme activity, enzymatic activity 酶素活性
demonstration site 示範地	drip irrigation 滴灌	Eocene basalt 始新世玄武岩
denitrification 脫氮作用	drought stress 乾旱逆境	epipetric 表面膠結的
DeNitrification-DeComposition, DNDC 脫氮作用-分解	dry combustion 乾式燃燒	equivalent mass 等效質量
denitrifying bacteria 脫氮細菌	dry domain 乾域	erodibility 可蝕性
denitrifying enzyme activity, DEA 脫氮酵素活性	dry matter 乾物質	erosion modulus 侵蝕模數
densified layer 繖密層	dry metric tons, dmt 乾公噸	estuaries 河口
depolymerization 解聚合作用	dry mulching, DM 乾敷蓋	ethylene-propylene-diene monomer, EPDM 三元乙丙單體橡膠
depressional wetland 窪地濕地	dry season, DS 旱季	Eumacroamphi 五種腐植質型態之一
desalination effect 脫鹽作用	dry sieving 乾篩法	eutrophication 優養化
desertification 沙漠化	drylands 旱地	evaporative cooling 蒸發冷卻
detritus 碎屑	duplex soil 雙相土	evapotranspiration 蒸發散 (量)
diameter at breast height 胸高直徑	duripan 硬盤	evergreen forests 常綠森林
diammonium phosphate 磷酸氫二銨	dwarf 矮樹	exchangeable base 交換性鹼基
dichromate 重鉻酸鹽	dwarf shrub 矮生灌木	exchangeable cations (可) 交換性陽離子
diffuse pollution 擴散汙染	dynamic analysis 動態分析	exchangeable sodium percentage, ESP 交換性鈉百分比
diffused erosion 擴散式侵蝕	Dysmull 五種腐植質型態之一	excretion 排泄物
digestate 厥氧消化物	E	exoenzymes 胞外酶
digester 消化槽	earth movement (for soil preparation) 翻土 (用於土壤準備)	exogenous C 外源碳
digestibility 消化率	earthwork 土方工程	experimental forest 實驗林
digital elevation model, DEM 數值高程模型	earthworm inoculation 蚯蚓接種	extensive agriculture 粗放農業
dilution 稀釋	eco-gentrification 綠色高檔化	extensive grazing 粗放式放牧
dioxins 戴奧辛	ecological complexes 生態複合體	extensive green roof 粗放型綠屋頂
dipterocarp forest 龍腦香森林	ecological process 生態過程	extracellular polymeric substance, EPS 胞外聚合物
direct payments 直接給付	ecological succession 生態演替	extractable bases 萃取性鹼基
disaggregation 解團粒作用	Ecoplates 微生物群落分析	extractive industries 採礦業
disk harrow 圓盤耙	ecoregion 生態區	extreme rainfall 極端降雨
disk plow 圓盤犁	ecosystem respiration 生態系統呼吸量	exudates 根系分泌物
disposal of wastewater effluent 污水處理	ecosystem restoration 生態系統恢復	exudation 分泌作用、分泌物
dissected plains 切割平原	ecosystem service 生態系服務	
dissolved inorganic nitrogen, DIN 溶解無機氮	ecosystem-based adaptation, EbA 以生態系為基礎的氣候變化調適	
dissolved organic carbon, DOC 溶解有機碳	eco-tourism 生態旅遊	
dissolved organic nitrogen, DON 溶解有機氮	edapho-climatic condition 風土條件	
dissolved oxygen 溶氧	eddy covariance 渦流協方差	

farmyard manure, FYM 廢肥
Fe oxides 氧化鐵
Fe-accumulating 鐵累積
feedlot 飼養場
Fe-leaching 鐵淋溶型
fens 矿質泥炭沼澤
fertigation 肥灌
fertilization 施肥
fertilizer 肥料
field 田間、田地
field capacity 田間容水量
field crop 田間作物
field data 田間實驗數據
field observations 田間觀察
field pea 糧用豌豆
fixed carbon 固定碳
flood irrigation, flooding
irrigation 淹灌
flood pulsing, flood pulsed
洪水沖刷
floodplain 沼澤平原
floods 洪水
flora and fauna 動植物
fluctuations 波動
fluoranthene 螢蒽
flux 通量
fly ash 飛灰
foliage burn 葉燒
folk culture 民俗文化
food crop 糧食作物
food insecurity 糧食不安全
food organism 飼料生物
food security 糧食安全
food-producing trees 產糧樹木
foothill 山麓
forage 草料
forage crops 草料作物
forage maize 青割玉米
forb 閩葉草本
forest cooperative 森林合作社
forest cover 森林覆蓋
forest degradation 森林退化
forest expansion 森林擴展
forest fragment 森林碎片
forest garden 森林花園
forest inventory 森林普查
forest landscape restoration,
FLR 森林地景復育
forest patch 森林斑塊

forest plantation / plantation
forest 人工林
forest product 森林產物
forest restoration 森林復育
four tine cultivator frame 四齒耙
fractionation 分餾
fragipan 脆盤
fragmentation 破碎化
fresh organic carbon 新鮮有機碳
freshwater swamp forests 淡水
沼澤森林
frontal grazing 趨前放牧
frost 霜
frost creep 凍土潛移
fuel wood, fuelwood 薪材
full inversion tillage, FIT 全反轉
耕犁
furrow irrigation 溝灌

G

gas chromatography 氣相層析
genetic horizon 化育層
geochemical 地質化學
geographic bias 地域偏見
geotextile 土工布
germination 萌芽、發芽
Glacialou twash sandplain
gibbsite 三水鋁石
global warming potential, GWP
全球暖化潛勢
glomalin 球囊黴素
glycoproteins 醣蛋白
glyphosate 嘉磷塞
gradone afforestation method
梯田新植造林法
grain legume 糧豆類
granular structure 團粒狀構造
granulometry 顆粒度
grass clippings 草屑
grass waterway 草地水路
grass-covered (lawn site) 草生地
grass-fed 草飼
Grazing exclusion 禁止放牧、禁牧
green fodder 青飼料
green infrastructure 綠色基礎設施
green manure, GM 綠肥
green roof 綠屋頂
greenhouse gas, GHG 溫室氣體
greywacke 雜砂岩
grey literature 灰色文獻
grey water 灰水

groins 突堤群
ground cover 地面覆蓋
ground ice 地表冰
ground skidding forwarder 地面
集材貨車
ground truth 地面實況
groundwater recharge 地下水補給
growing material, GM 生長材料
growing stock 立木蓄積
growth substrate 生長基質
Guano 鳥糞石
guild 同功群
gullied slope 雛谷斜坡
gully erosion 溝壑侵蝕

H

H/Corg Molar Ratio 碳氫莫耳比
habitat 樓息地
habitat enhancement 樓息地改善
habitat fragmentation 樓息地破壞
halophytic vegetation 鹽生植被
halophytic tree 鹽生樹種
hand hoes 手鋤頭
Hanford 漢福德土系
happy seeder 快樂播種機
hard plough pan 硬犁底層
hardpan, hard Pan 硬盤
hardscapes 硬質地殼
hardwood dry forest 閩葉乾燥林
hardwood forest 閩葉樹林
harmful particle 有害粒子
harvesting 採收、採伐
haying practices 乾草敷蓋的做法
haylage 半乾青貯草
 HCO_3^- 重碳酸鹽
health care 醫療保健
heat island effect 熱島效應
heat stress 热逆境
heath forests 荒原森林
hedges, hedgerow 樹籬
herbaceous crops 草本作物
herbaceous stratum 草本層
herbivore 草食動物
heterogeneity 異質性
heterogeneous soil 異質土
heterotrophic respiration 異營呼吸
high wind 大風
high yielding crop 高產作物
high yielding variety 高產品種
highveld grassland 海維爾德草原
Holocene 全新世

homeowners associations 業主協會	integrated crop-livestock systems, ICLS 農牧業整合系統	land suitability 土地適宜性
horizons 土壤層位	integrated crop-livestock-forestry systems, ICLF 農牧林業整合系統	land tenure 土地租佃
hot steppe 热帶草原	integrated farming 整合農業	land use and land cover 土地利用與地表覆蓋
hot water extractable carbon 热水可提取之碳	integrated nutrient management 整合養分管理	land use change, LUC 土地利用變更
human-altered 人類改變	integrated soil fertility management 土壤肥力整合管理	land-cover conversion 地表覆蓋轉換
human-transported 人類運輸	intensive 集約式	landform slope 地形坡度
humification 腐植化	intensive agriculture 集約農業	landscape 地景
humus 腐植質	intensive farming 集約農業	landslide 崩塌、坍塌、滑坡
hydraulic conductivity 導水度	intensive green roof 集約型綠屋頂	lasagna beds 千層床
hydraulic lift 液壓升降	interaction 交互作用、互動	layer hen 蛋雞
hydraulic permeability 水力滲透係數	interactive effect 互動性效應	leachate 淋洗液
hydric soil 水成土壤	intercropping 間作	leaching 淋洗
hydroelectric plants 水力發電廠	interglacials 間冰期	ead, Pb 鉛
hydrogen sulphide, H ₂ S 硫化氫	intermittent irrigation 間歇灌溉	leaf area index, LAI 葉面積指數
hydrographic network 水系	intertidal zones 潮間帶	leafy vegetables 葉菜類
hydrological balance 水平衡	introduced species 引進的物種	leaf water potential 葉片水勢
hydrological properties 水文特性	inundated soil 浸水的土壤	Leptoamphi 五種腐植質型態之一
hydrological regime 水文狀況	inventory 普查	levees 堤防
hydrological systems 水文系統	irrigation 灌溉	ley 牧草地
hydrology 水文	isohyet 等雨量線	lichen 地衣
hydromorphic 水層型態	isotherm 等溫線	life cycle analysis, LCA 生命週期分析
hydrophobicity 疏水性		life-cycle assessment, LCA 生命週期評估
hydroxide minerals 氢氧化物礦物		lignin 木質素
hypersaline salt flats 高鹽度鹽灘		Limberjim Series Limberjim 土系
I		
igneous rock 火成岩	jetties 防波堤	lime 石灰
illegal logging 非法砍伐		lime saturation 石灰飽和度
illuviation 淋積作用		limestone 石灰石
immobilization 固定化		limestone quarries 石灰石採礦場
improved rice 改良稻作		liming effect 石灰效應
incentives 獎勵措施		limiting nutrient 養分有限
income generating activities 創收活動		liquid dairy manure, LDM 液態乳牛糞肥
incorporation 摻入、加入		litter 枯枝落葉、墊料
increments 增量		litter depth 落葉深度
induced employment 衍生就業		litter fall; litterfall 枯枝落葉
Industrial logging 工業伐木		litter layer 枯枝落葉層
infiltration 滲透		livestock breeding 家畜繁殖
in-ground planting 地裡種植		livestock grazing 牲畜放牧
inherent stability 固有穩定性		lixivation 淋溶
inhibitor 抑制劑		local extinction 局部地區滅絕
innovative crop 創新型作物		logarithmic 對數
insect herbivores 食草性昆蟲		logged forest 已砍伐的森林
in-situ stubble retention 原地保留殘茬		logging 採伐
insolation rate 日照率		long-lived GHGs 長生命週期溫室氣體
insulation 絶緣材料		

loss on ignition 燃燒耗損
lower montane rain forest 低高
山雨林
lowland evergreen rain forest 低
地常綠雨林
lowland rice 低地水稻
lysimeters 滲漏計

M

machinery rings 農機械的互助圈
macro-aggregate, macro-
aggregation 粗團粒
macrocosm study 整體性研究
macrofauna 大型動物
macronutrients 大量營養素
macrophyte 岩漿岩
macropore 大孔隙
macroporosity 大孔率型
magmatic rock 岩漿岩
magnesium, Mg 鎂
main cutting 主伐
mangrove restoration 紅樹林復育
mangroves 紅樹林
manure 糞肥
manure spreader 堆肥撒佈機
marginal agricultural capability
邊際農業潛力
marginal land 邊緣土地
marine organic carbon 海洋有機碳
marshes 草本沼澤
mass movement 塊體運動
mass slide 大規模崩塌
massifs 山塊
mast 栢實堆
maturation phase 腐熟保肥階段
mean annual precipitation, MAP
年平均降水量
mean annual temperatures,
MAT 年平均溫度
mean weight diameter 平均重量
直徑
mechanical composition 機械組成
mechanical impedance 土壤的力
學阻抗
medical plants 藥用植物
Mediterranean basin 地中海盆地
Mesic Aridic 中溫乾燥
meso pores 介孔

mesoclimate, meso-climate 中
氣候
mesofauna 中型動物
Mesomull 五種腐植質型態之一
mesophilic anaerobic digestion
中溫厭氧消化
mesophilic phase 中溫階段
meta-analysis 統合分析
metabolite 代謝物
metal chelate 金屬螯合物
meters above sea level 海拔以上
公尺
methane, CH₄ 甲烷
methane monooxygenase
enzyme 甲烷氧化酶
methanogenesis 甲烷生成
methanogenic archaea 甲烷菌
methanotrophic bacteria 甲烷
氧化菌
metric ton of carbon, mtC 公噸碳
MgO 氧化鎂
micro-aggregate,
microaggregate 小團粒
microalgae 微藻
microbial activity 微生物活動
microbial biomass carbon,
MBCar 微生物生物量碳
microbial community activity 微
生物群落活動
microbial inoculant 微生物接種劑
microbial population 微生物族群
microbial respiration 微生物呼
吸作用
microclimate 微氣候
microfauna 微動物相
micronutrients 微量營養素
micro-organisms 微生物
microporosity 微孔隙度
micro-relief 微起伏
microtopography 微地形
mid-season drainage, MSD 季
中排水
milk stage 乳熟期
millimeter, mm 毫米 (降雨量單
位)、公厘 (長度單位)
Moshulu soil series 莫紹魯土壤
系列
mouldboard plough 板犁
mountain grasslands 山地草原
mountain soil 山地土壤

mulch, mulching 敷蓋
mull 腐植質
multiple cropping 複作
municipal biosolids 都市生物固形物
municipal waste 都市廢物
Munsell colours (system) 孟塞爾表色系
mycoremediation 真菌復育
mycorrhizae 菌根
mycorrhizal 菌根
mycorrhizal fungi 菌根菌

N

N fixing species 固氮物種
N soil status 土壤含氮狀況
N₂ fixation 固氮作用
Na₂O 氧化鈉
N-acetylglucosaminidase N-乙醯葡
萄糖胺酶
naphthalene 蒽
nationally determined contribution,
NDC 國家自定貢獻
mine debris 礦屑
mined lands 礦區土壤
mineral fertilizer 礦物肥料
mineral soil 礦質土
mineralization 礦化作用
mineralization rate 礦化速率
minimum tillage 最少耕犁
mires 泥炭沼澤
mitigation, mitigate 緩解
mixed intercropping 混合間作
Mixed Sal Forest 娑羅樹混合林
moisture regime 水分境況
molar ratio 莫耳比
moldboard plow 板犁
molybdenum, Mo 鈿
monocropping 單一作物連作
monoculture 單一作物連作
Montado 蒙塔多土壤系統
montane 山地
montane forests 山地森林
montane temperate rainforest 山地
溫帶雨林
Morris soils 莫里斯土系
mosaic 鑲嵌
mosaic landscape 鑲嵌地景
natural afforestation 天然新植造林
natural degradation 自然退化
natural forest 天然林

natural forest regeneration 天然林更新
natural recruitment 自然吸收
natural regeneration 自然更新
negative slope 負坡度
neglected crops 被忽視作物
Nelore cattle 尼洛牛
nematodes 線蟲
Neotropics 新熱帶
Neovolcanic Axis 新火山岩軸帶
net absorption 淨吸收
net balance 淨平衡
net effect 淨效應・淨影響
net gain of forest area 森林面積淨增量
net primary production 淨初級生產量
net primary productivity 淨初級生產力
Never Ending Food, NEF 永不斷糧
niche 生態棲位
nitrate ion, NO_3^- 硝酸根離子
nitrate nitroge, Nitrate-N, $\text{NO}_3\text{-N}$ 硝酸態氮
nitrate, NO_3^- 硝酸鹽
nitric oxide, NO 一氧化氮
nitrification 硝化作用
nitrifying bacteria 硝化細菌
nitrogen, N 氮
nitrogen enrichment 豐富的氮
nitrogen eutrophication 優養化
nitrogen fertilizer 氮肥
nitrogenase 固氮酶
nitrogen-fixing tree species 固氮樹種
nitrous oxide, N_2O 氧化亞氮
 N-NH_3 氨態氮
nodule 根瘤
nomadic 游牧
nomadic pastoralism 游牧業
non-forested 無森林
non-inversion seed bed
preparation 非反轉苗床準備
non-inversion tillage 非反轉耕犁
non-paddy 旱田
non-point source pollution 非點源污染
non-probability sampling 非機率抽樣
non-targeted organism 非目標生物

non-wood (timber) forest products 非木材森林產物
Nor' easter 東北大風
nordic 北方性
Normalized Difference Vegetation Index, NDVI 標準化植被指數
North Meadow soil series 北草原土系
platy structure 板狀構造
no-till, no-tillage, NT 免耕
no-tillage permanent bed
planting 免耕永久床植
 NO_x 氮氧化物
N-phosphonomethyl glycine N-磷醯甲基甘氨酸
nudi-natric Solonetz 有鈉表層的鹼土
nursery flat field 苗圃平地
nutrient 養分
nutrient availability 養分有效性
nutrient balance 養分均衡
nutrient cycling (cycle) 養分循環
nutrient loading 養分負荷

O

oil crop 油料作物
oil drilling 石油鑽探
oilseeds 油籽
old-growth forest 老生林
Oligomull 五種腐植質型態之一
Olney 歐尼土系
Olsen P 有效磷
ombrotrophic peatlands 雨養泥炭地
one way analysis of variance, ANOVA 單因子變異數分析
one-wheeled tramline, OWTL 單輪軌道
on-puddled transplanting 非泥漿移栽
open forest 疏林
open patch 空斑塊
open-pit mines 露天礦山
Orchidee-Stics-C-N Cycle simulation model Orchidee-Stics-C-N 循環模擬模型
orest conservation 森林保育
organic amendment 有機改良劑
organic farming 有機農業

organic fertilizer 有機肥
organic matter, OM 有機質/有機物
organic matter input 有機物投入
organic micro-pollutants 有機微汙染物
organic mulch 有機敷蓋
organic soil 有機土
organo-mineral fertilizers, OMFs 有機礦物質肥料
ornamental lawns 觀賞草坪
overland flow 溢流

P

paddock 圍場
paddy field 水稻田
paddy soil 水稻土
paleobotanical 古植物學
paludiculture 濕地種植
panicle 稻穗
pantropic 泛熱帶的
paradigm shift 典範轉移
parent material 母質
parkland 溫帶疏樹草原
particle size 粒徑
particulate organic matter, POM 顆粒狀有機物質
parts per thousand, ppt 鹽度單位・意指每公斤水含有鹽的克數
passive movement 被動運動
pastoralism 游畜牧業
pasture 牧場
pasture-raised 放牧飼養
pathogen 病原體
pathogenic bacteria 病原細菌
pavements 鋪砌道路
peak flows 尖峰流量
peat accretion 泥炭聚積
peat extraction 泥炭萃取
peat fire 泥炭火患
peat layer 泥炭層
peat moss, peatmoss 泥炭苔
peat restoration 泥炭復育
peat swamp forests 泥炭沼澤森林
peatland 泥炭地
pedoclimatic 土壤氣候
pedo-climatic zone 土壤氣候帶
pedogenesis 成土作用
pedon 土體識別碼

pellets 顆粒
pellic-mazic 低色度堅硬表層
penetrometer resistance, PR 穿刺阻力
perceived value 知覺價值
percolation 滲漏
peregrine species 廣布種
perennial 多年生
peri-urban agriculture 城郊農業
permaculture 永續栽培
permanent grassland 永久草原
permanganate oxidizable
carbonpe 高錳酸鹽可氧化碳
permeability 滲透性
pervious areas 透水區域
pesticides 農藥
pH value pH值
phosphorus, P 磷
phosphorus solubilizer 磷溶菌
photointerpretation 影像判釋
photosynthesis 光合作用
physical exercise 體育運動
physiognomy 地貌
phytohormone 植物激素
phytoremediation 植生復育
phytosanitary effect 動植物防疫效果
phytostabilization 植物穩定化
piezometer 水壓計
pilot scales 實驗性規模
pilot test 前導測試
pine forest 松樹林
pioneer species 先趨物種
piston corer 活塞式岩芯採取器
placentaco 胎座 (期、物種)
planetary boundaries 地球限度理論
plant available water 植物有效水分
plant growth-promoting
bacteria, PGPB 促進植物生長細菌
plant growth-promoting
rhizobacteria, PGPR 植物促生根圈細菌
plant residue 植物殘體
plantationpl 人工種植園
planting density 栽植密度
planting pit 植栽穴
playa wetlands 乾鹽湖濕地
Pleistocene 更新世
plot 樣區

plough layer 耕作層
plough pan 犁底層
plough、ploughing 耕犁
plow layer 耕犁層
plow pan 犁底層
pocosin wetland 淺灘沼澤濕地
polder 坮田
political elite 政治菁英
pollination 授粉
pollinator 授粉者
polonium, Po 釙
polychlorinated biphenyl, PCB
多氯聯苯
polyculture 混養
polycyclic aromatic
hydrocarbon, PAH 多環芳香烴
polynomial 多項式
polyphenol 多酚
pond-dike farming systems
基塘農業系統
porewater salinity 孔隙水鹽度
porosity 孔隙度
positive feedback loop 正向反饋循環
potassium, K 鉀
popotential
evapotranspiration, PET 潛在蒸發散量
power lines 輸電線路
pozzolan 火山灰
practices 措施、做法
prairie dog 草原土撥鼠
Prairie Pothole Region, PPR
草原壺穴地區
prairie wetland 草原濕地
prairies 大草原
precipitation 降水 (量)
precision agriculture 精準農業
precision tillage 精準耕犁
prescribed fire 策略燃火
prevailing wind 盛行風
primary forest 原始森林
primary mineral 原生礦物
primary nutrient 初級營養素
primary tillage 主犁耕
priming effect 激發效應
production forests 生產林
profile rebuilding 剖面重建
profitability 收益
propagules 繁殖體
protease 蛋白酶

provisioning service 提供服務
proxy 替代物
pulses 豆類
pyrolysis 熱裂解

R

radiative forcing, RF 射頻
rain garden 雨水花園
rainfed (farming/agriculture)
雨養 (農業)
rainwater harvesting 雨水收集
raised beds 高架植床
raking 耙地
random grid system 隨機網格系統
random traffic farming, RTF 隨機運輸耕作
rapeseed 油菜籽
rate of net forest loss 森林淨消失率
raw manure 生糞
reactive nitrogen, reactive N
活性氮
rebound effect 反彈效應
recalcitrance 難分解性
recalcitrant carbon 難以分解的碳
recolonization 重新定殖
redox potentials 氧化還原電位
reduced tillage, RT 少耕
reductionist 還原主義
reedbeds 蘆原
reference state 參考狀態
reflooding 再浸水
reforestation 更新造林
refractory carbon 耐火碳
refractory organic matter 難分解的有機質
refuse pond 廢棄物池塘
regeneration 再生
regenerative agriculture 再生農業
regreening 綠化 (水稻種子)
rehabilitation 修復
relay intercrops 接替間作
remnant indigenous forest 殘留原生林
remote sensing 遙測技術
removals 移除量
representative carbon
pathway, RCP 代表碳路徑

- reseeding 追播
resettlement of village 遷村
residue retention 殘體保留
respiration 呼吸作用
response function 反應函數
response ratio, RR 反應比
restored or rewetted wetland 已復育或已復濕的濕地
retention effect 滯留效應
retention pond 滯留池
return of surplus 歸還剩餘物資
revegetation 植被復原
revegetation of peatland 泥炭地的植被復原
review 文獻回顧
Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE 修正版通用土壤流失公式
rewetting 復濕
rhizobia 根瘤菌
rhizodeposition 根圈沉降
rhizomes 根莖
rhizosphere 根圈
rhizosphere community 根圈群落
rice 水稻
rice bran 米糠
rice husk charcoal 炭化稻殼
rice-based intergrated field system, RIFS 稻米整合耕作系統
rice straw extraction 稻稈萃取
rice-wheat cropping 稻麥輪作
ridge till 脊作
ridge-and-furrow, ridge and furrow 脊溝
Rift Valley escarpment 大裂谷懸崖
rill erosion 紋溝侵蝕
riparian buffer strip 河岸緩衝帶
ripper 破土犁
ripping 碎土
riser 梯壁
river ice 河冰
Riverain forest 瑞芬芮恩森林
riverine marshes 河岸沼澤
riverine wetlands 河岸濕地
robustness 穩健性
rock outcrops 岩石露出
rock phosphate 磷礦石
rocky bed 岩床
- rod surface elevation table, RSET 固定桿地表海拔表
roller crimper 滾輪捲壓機
rooftop gardens 屋頂花園
root barrier 根障
root biomass 根生物量
root collar 根領
root exudate 根系分泌物
root nodule 根瘤
root penetration 根(系)穿刺
root system 根系
root vegetable 根菜類蔬菜
root zone 根域
rotary tillage 迴轉耕犁
rotational grazing 分區輪牧
rototilling 旋耕
Roundup Ready 抗嘉磷塞的基因改種子
row crop 行栽作物
row intercropping 條狀間作
ruminant 反芻動物
runoff 遷流
rural economy 農村經濟
- S**
- salinas 鹽沼
saline 鹽(水)
salinization 鹽化
salt hay grass 鹽草
salt marsh 鹽水沼澤
salt pan 鹽田
salt spray 鹽霧
salt tolerance 耐鹽性
saltwater intrusion 鹽水入侵
sampled value 抽樣值
sand plain 沙原
saprophytes 腐生菌
saproxyllic (saproxylophagous) organisms 腐木食性生物
Satellite-based Wetland Observation Service, SWOS 衛星濕地觀測服務
saturated hydraulic conductivity 飽和導水度
savanna forest 草原疏林
savanna(s) 稀樹草原
savannahs 疏林草原
sawdust 木屑
scalping 剝除
scrub 灌木叢
scrubbing 草地有灌木侵入
- sea ice 海冰
seagrass meadows 海草床
seasonal grazing 季節性放牧
seawalls 海堤
secondary carbonate
translocation 次級碳酸鹽位移作用
secondary concrete aggregate 二級混凝土粒料
secondary forest 次生林
Secondary Forest Regeneration 次生林再生
secondary growth 次級生長
secondary material 二次材料
secondary metabolites 二次代謝物
secondary nutrients 次量營養素
secondary salinization 二次鹽化
sectoralist 部門主義
sediment 沉積物
sediment cores 沉積物岩芯
sediment supply 沉積物供應
sediment trapping 沉積物攔集
sedimentary limestone 沉積石灰岩
sedimentary phosphate 沉積磷礦石
sedimentary regimes 沉積體系
sedimentary rock 沉積岩
sedimentation 沉積作用
sedimentation rates 沉積率
seedbank 種子庫
seedbed, seed bed 苗床
seedling emergence 萌發出土
seedling zone 育苗區
selection felling 擇伐
selective logging 擇伐
self-thinning 天然疏伐
semi-deciduous forest, semideciduous forest 半落葉林
semi-evergreen forests 半常綠森林
semi-labile 半不穩定
semi-natural grassland 半天然草原
senescence 衰老
sense of identity 身份認同
sequence grazing 循序放牧
Serrano Ham 塞拉諾火腿
set-aside 休耕
settlement 定居地
sewage sludge 汗水淤泥
shade-grown cacao 遮蔭栽種的可可樹林

shale 貢岩	slash, logging residue 採運殘材
shallow movement 淺層移動	slash and burn agriculture 刀耕火種
shallow root 淺根	slash-and-mulch 刀耕覆蓋
shallow-burying tunnellers 淺埋	slasher 拖曳式割草機
甬道型糞金龜	slope gradient 斜坡梯度
shallow-tunnelling species 淺掘	slope stability 斜坡穩定性
甬道型物種	slow-release fertilizer 緩釋性肥料
Shannon's diversity index 香農多樣性指數	slurry (manure) 泥漿 (糞肥)
Shannon-Weiner diversity index 夏儂-威納多樣性指數	smallholder agriculture 小農農業
shear strength 抗剪強度	sod-forming 可形成草皮的
shelf 梯面	sodicity 鹼度
shelterbelts 防護林	sodium adsorption ratio 鈉吸附比
shifting cultivation 游耕	soil acidification 土壤酸化
short-lived GHGs 短生命週期溫室氣體	soil active herbicides 土壤活性除草劑
Shottower load 製彈塔壤土系	soil aeration 土壤通氣
shrublands 灌木叢	soil aggregate stability 土壤團粒穩定性
side slope 邊坡	soil amendment 土壤改良劑
side-opening corer 側開式岩芯採取器	soil and water conservation 水土保持
siderophore 蟹鐵蛋白	soil biodiversity loss 土壤生物多樣性損失
sidewalks 人行道	soil biota 土壤生物相
sienite 正長岩	soil buffer capacity 土壤緩衝能力
Signalgrass Pasture 巴拉草牧草地	soil carbon sequestration 土壤碳固存
silage 青貯料	soil compaction 土壤壓實
silica sand 矽砂	soil conservation service 土壤保育服務
silicate minerals 矽酸鹽礦物	soil contamination / pollution 土壤沾染 / 汚染
siliceous rock 矽質岩	soil core sampler 土壤核心採樣器
Silurian shale 志留紀貢岩	soil core(s) 土心
silviculture 造林	soil corer 土壤採樣器
silvicultural system 造林系統	soil cover 土壤覆蓋
silvoarable 耕地混植	soil crust, soil crusting 土壤結皮
silvofishery 混林魚 (業)	soil degradation 土壤退化
silvopasture, silvopastoral	soil densification 土壤緻密化
systems, silvopastoralism 混林牧系統	soil dispersion 土壤分散作用
Simpson's index, Simpson's diversity index 辛普森 (多樣性) 指數	soil disturbance 土壤擾動
simultaneous intercrops 同步間作	soil drainage 土壤排水
Sinaloan dry forests 錫那羅亞旱林	soil electrical conductivity, EC 土壤電導度
sink of GHG 溫室氣體匯	soil erosion 土壤侵蝕
sinkhole 滲穴	soil fauna 土壤動物相
site preparation 整地	soil fertility 土壤肥力
site-specific agriculture 定點農業	
skidders 集材機	
skidding trails 集材路線	
slag 礦渣	
soil flora 土壤植物相	
soil function restoration, SFR 土壤功能復育	
soil group 土類	
soil hammer probe 土壤採樣管	
Soil Health Index 土壤健康指數	
soil horizons 土壤層位	
soil humus 土壤腐植質	
soil inorganic carbon, SIC 土壤無機碳	
soil mass 土壤質量	
soil mesofauna 土壤中型動物	
soil microbial biomass C 土壤微生物量碳	
soil moisture 土壤濕度	
soil order 土綱	
soil organic carbon, SOC 土壤有機碳	
soil organic matter, SOM 土壤有機質	
soil particle 土壤顆粒	
soil penetration resistance 土壤穿刺阻力	
soil process 土壤過程	
soil profile 土壤剖面	
soil properties 土壤性質	
soil quality index 土壤品質指標	
soil reaction 土壤反應	
Soil Reference Group 土壤參考組	
soil respiration 土壤呼吸	
soil salinity 土壤鹽度	
soil salinization 土壤鹽化	
soil salinization and alkalinization 土壤鹽化和鹼化	
soil saturation 土壤飽和度	
soil sealing 土壤密封	
soil series 土系	
soil solution 土壤溶液	
soil sub-order 土壤亞綱	
soil subsidence 土壤下陷	
soil substrate 土壤基質	
Soil Survey Staff 美國新土壤分類系統	
soil taxonomy 土壤分類	
soil texture 土壤質地	
soil water content 土壤含水量	
soil water management 土壤水分管理	
soil water movement 土壤水分移動	

soil water potential 土壤水勢	strata 層	susceptibility 易感性
soil water regime 土壤水分境況	straw mulch 稻稈敷蓋	suspended solid 懸浮固體
soil water repellency 土壤斥水性	stream bank erosion 河岸侵蝕	sustainability 永續性
soil water storage 土壤儲水量	strip cropping 帶狀耕作	Sustainable Cattle Ranching, SCR 永續畜牛業
soil weathering 土壤風化作用	strip intercropping 帶狀間作	Sustainable Development Goals, SDGs 永續發展目標
soil zone 土壤帶	strip planting 帶狀種植	sustainable food 永續飲食
soil-borne diseases 土傳性病害	strip tillage 帶狀耕犁	Sustainable Forest Management 永續森林管理
soil-dwelling organisms 土壤生物	structural material 結構材料	sustainable soil management 永續土壤管理
solid turbidity 固體濁度	stubble 殘茬	swamp 木本沼澤
solifluction 融凍泥流	stump 殘幹	swine manure, SM 豬糞肥
soot 煙粒	sub-angular 亞稜角	sylvopastoral system 混林牧系統
sparse 稀疏	subgrade reaction, Ks 地基反力	sylvopastoralism 混林牧業
spatial heterogeneity 空間異質性	subirrigation 地下灌溉	symbiosis, symbiotic 共生
spatial pattern 空間格局	submerged vegetation 沉水植被	synergy, synergism, synergistic effect 協同效應
Special Protection Areas 特別保護區	submergence 淹水	synthetic fertilizer 合成肥料
species diversity 物種多樣性	Subnartic yellow Sodosol 鈉質黃底土層	Syntropic Agriculture, SA 趨合農業
species richness 物種豐富度	sub-arctic region 副北極地區	syntropy 負熵
specific surface area, SSA 比表面積	sub-humid steppes 半濕潤乾草原	System of Rice Intensification 水道強化系統
Spent mushroom substrate 廢棄的菇類基質	sub-optimal 不是最佳的	
Sphagnum farming 泥炭蘚種植 (業)	subplot, sub-plot 副樣區	
spikelet 小穗	subsidence 下陷	
spillway 溢洪道	subsistence agriculture 自給自足式農業	
splining function 樣條函數	subsoil 底土	
spontaneous vegetation 自生植被	subsoiler 心土犁	
spreader 撒佈機	sub-soiling 裏土耕犁	
sprinkler irrigation 噴灌	substratum 裏土層	
stand 林分	subsurface drainage 地下排水	
stand structure 林分結構	subsurface horizon 地下土層	
standard deviation, SD 標準差	subsurface irrigation 地下灌溉	
standard error, SE 標準誤差	subsurface soil 裏土	
standing crop 生物現存量	sub-surface water 地下水	
standing water 靜水	successional agroforestry 演替的混農林業	
state-factor model 狀態因子模型	successive rotations 連續輪作	
stem volume 材積	sulfate 硫酸鹽	
sterility ratio 不稔率	sulfur-coated urea 含硫尿素	
stocking density (density of stocking) 林分密度 (指樹木) / 放養密度 (指牲畜)	super seeder 超級播種機	
stocking rate 放養率	superactive 超活性	
stoniness 含石率	superficial tillage 淺層耕犁	
stool 根株	superphosphate 過磷酸鈣	
storage 儲存	surface albedo 表面反照率	
storm surges 風暴潮	surface drainage (water) 地表排水	
stormwater 暴雨	surface horizon 表面的土壤層位	
	surface irrigation 地面灌溉	
	surface level 表面水平面	
	surface mining 露天採礦	
	surface run-off 地面逕流	
	surface soil layer 表土層	
	surface water 地表水	

tillage 耕犁
tillage erosion 耕犁侵蝕
tillering 分蘖
timber leases 木材租賃
time history 時間歷程
tolerance 耐受性
top-dressing 追肥
topsoil 表土
torrential stream 急流河
total mixed ration 全混合日糧
toxicological risks 毒理風險
trace element 微量元素
trace gas 微量氣體
trace organic contaminant 微量有機污染物
track ballast 道碴
trafficability 通行性
transect 穿越線取樣調查
transhumance 季節移牧
transition town 轉型城鎮
transpiration 蒸散作用
transplanting 移植
tree canopy 樹冠
tree circumference 樹周長
tree line 樹線
tree plantation 樹木植栽
tropical dry forest 热帶乾燥林
tropical moist forest, TMF;
tropical humid forest 热帶濕潤雨林
tropical rainforest, tropical wet forest 热帶雨林
tuber crop 塊莖作物
tunnelling species 通道型物种
turnover rate 轉換率
Tyurin's method 丘林滴定法

U
undergrazing 放牧不足
understory 林下
undisturbed soil 未擾動土
Universal Soil Loss Equation, USLE 通用土壤流失公式
unlogged forest 未伐林
upper leaves 上位葉
urban agriculture 都市農業
urban forestry 都市林業
urban green infrastructure 城市綠色基礎建設

urban heat island effect / phenomenon 都市熱島效應
urban soil 都市土壤、城市土壤
urbanization 都市化
urea ammonium nitrate 尿素硝酸銨
urease 尿素酶
urease inhibitor 尿素酶抑制劑
usufruct right 使用權

V

vegetated swales 植被窪地
vegetation 植被
vegetative growth 營養生長
veldts 稀樹草原
vermicompost 蚝糞堆肥
vernal pool 季節性池塘
versatile multi-crop planter 多功能播種機
viticulture 葡萄種植
viviparous embryos 胎生胚胎
volatilization 揮發
volcanic tuff 火山凝灰岩
volumetric water content 體積含水量
voluntary market Standards 自願市場標準

W

water availability 可用水
water body 水體
water content 水含量
water conveyance 水道
water course 水道
water extraction 取水量
water filled-pore space, WFPS 充水孔隙
water filtration 水質過濾
water fluxes 水通量
water-holding capacity 保水力
water logging, waterlogging 積水(土)・浸水(種植)
water purification 水淨化
water recharge 水補給
water redistribution 水分重新分布
water regulation 水份調節
water retention 保水性
water soluble nitrogen, WSN 水溶性氮
water stable aggregate 水穩定團粒
water stress 水逆境

water table 地下水位
water-level manipulation 水位操控
watershed 流域
watershed scale 集水區
water-soluble carbon content, SCW 水溶性碳含量
wave action 波浪作用
wave energy 波浪能
weather window 氣候窗
weathered schist 風化片岩
weed control 雜草防治
weeding 除草
wet combustion 濕式燃燒
wet season, WS 雨季
wetland 濕地
wheel rut 輪轍
wheel track 輪距
whips 長柳條
White pekin 白羽北京鴨
whole orchard recycling, WOR 全果園循環
whole-tree harvesting 全樹採伐
wildlife reserve 野生動物保護區

Willow Riparian Buffer System 柳樹河岸緩衝系統
wind damage 風害
windbreaks 防風林
windrow 乾草堆
wood biomass 林木生物量
woodfuel 木質燃料
woody debris 木質殘體
woody plant 木本植物

X

xenobiotic carbon 外源碳
xerothermic 乾熱的
xylanase 木聚醣酶

Y

yard waste 庭院廢棄物
young trees 幼樹

Z

zeolites 沸石
zero grazing 零放牧
zero tillage 零耕犁
zero-hunger 零飢餓
zone tillage 分區耕犁

動物、植物、微生物名稱

<i>Abies alba</i> 銀冷杉	<i>Azobacter</i> sp. 游離固氮菌	collembolans 彈尾蟲
<i>Acacia</i> 相思樹屬	<i>Azolla</i> 滿江紅屬	common bean 長豇豆
<i>Acacia auriculiformis</i> 耳莢相思樹	<i>bahiagrass</i> (<i>Paspalum notatum</i>)	common laburnum 毒豆
<i>Acacia koa</i> 夏威夷相思樹	百喜草	common reed 蘆葦
<i>Acacia mangium</i> 直幹相思	<i>Balanites aegyptiaca</i> 埃及香脂樹	<i>Copris</i> 蜣螂屬甲蟲
<i>Acacia mearnsii</i> 黑荊	<i>bald cypress</i> (<i>Taxodium distichum</i>) 落羽松	cork oak 桸皮櫟
<i>Acacia tortilis</i> 奎刺金合歡	beech 山毛櫟	<i>Corylus avellana</i> 歐榛
<i>Acanthus ilicifolius</i> 老鼠簕	berseem 埃及車軸草	cowpea 疙豆
<i>Acer</i> 楝屬	<i>Bidens pilosa</i> 鬼針草	<i>Crataegus monogyna</i> 單子山楂
<i>Acer campestre</i> 田槭	black locust 刺槐	creeping bentgrass 匍匐性小糠草
<i>Acer monspessulanum</i> 蒙彼利埃楓樹	black pine (<i>Pinus nigra</i>) 黑松	<i>Cryptomeria japonica</i> (Japanese cedar) 日本柳杉
<i>Acer platanoides</i> 挪威楓樹	black spruce 黑雲杉	<i>Cucumis melo</i> (Pickle Melon) 甜瓜
<i>Acer pseudoplantanus</i> 岩槭	boro rice 冬稻 (乾季收成)	cv. <i>Gayatri</i> 水稻栽培種
<i>Achillea millefolium</i> 薔	<i>Bos indicus</i> 肩峰牛	cv. <i>Wuyunjing 7</i> 水稻栽培種
<i>Actinomycete</i> 放線菌門	<i>Brachiaria</i> 巴拉草	cyanobacteria 藍綠菌
<i>Adina cardifolia</i> 心葉木	<i>Brachypodium distachyon</i> (purple false brome) 二穗短柄草	<i>Cynodon</i> 狗牙根屬
<i>Agrostis palustris</i> Huds. 翠股穎	<i>Brassica napus</i> 西洋油菜	<i>Daphne gnidium</i> 亞麻葉瑞香
air potatoes (<i>Dioscorea</i> spp.) 山藥	<i>Bruguiera gymnorhiza</i> 木欖	<i>Dendrocalamus</i> spp. 牡竹屬
<i>Albizia</i> 合歡屬	<i>Bubas bison</i> 野牛糞金龜	<i>dhaincha</i> (<i>Sesbania aculeata</i>) 刺田菁
<i>Albizia amara</i> 阿拉瑪合歡	<i>Bubas bubalus</i> 水牛糞金龜	<i>Distichlis spicata</i> 拉美海濱鹽草
<i>Albizia julibrissin</i> 合歡樹	<i>Buchanania</i> 山樣子屬	<i>Douglas-fir</i> 花旗松
Aleppo pine 地中海松	<i>Buchanania latifolia</i> 豆腐果	<i>Drosera</i> sp. 毛氈苔屬
alfalfa 紫花苜蓿	Buprestidae 吉丁蟲科	dung beetle 糞金龜
<i>Alnus</i> 赤楊屬	<i>Calicotome villosa</i> 刺金雀花	durum wheat 杜蘭小麥
<i>Alnus glutinosa</i> 赤楊	<i>Calliandra</i> 朱纓花屬	<i>Dyera polyphylla</i> (Jelutong) 南洋桐
<i>Alnus nepalensis</i> 尼泊爾赤楊	camelids 駱駝	<i>Eleagnus</i> 胡頹子屬
<i>Alnus viridis</i> 赤楊	<i>Caragana</i> 金雀花屬	<i>Empoasca flavesrens</i> (leafhopper) 小綠葉蟬 (葉蟬)
<i>Alopecurus aequalis</i> (foxtail 看麥娘	<i>Carex</i> 薩草屬	<i>Enterolobium</i> 象耳豆屬
aman rice 秋稻 (雨季收成)	<i>Carica papaya</i> 木瓜	<i>Erythrina</i> spp. 刺桐屬
<i>Amaranthus</i> spp. 莧菜	<i>Carisa edulis</i> 假虎刺	<i>Erythrophleum fordii</i> 格木
ambrosia beetle 菌蠹蟲	<i>Castanea sativa</i> 歐洲栗	eucalypt 桉樹
Angus 安格斯牛	<i>Castanopsis indica</i> 印度苦櫟	<i>Eucalyptus</i> 桉樹屬
<i>Arachis pintoi</i> 蔓花生	<i>Casuarina</i> 木麻黃屬	<i>Eucalyptus benthamii</i> 本沁桉
arbuscular mycorrhizal fungi	<i>Casuarina equisetifolia</i> 木麻黃	<i>Eucalyptus camaldulensis</i> 赤桉
叢枝菌根菌	cattail 香蒲	<i>Eucalyptus dunnii</i> 大桉
<i>Arbutus unedo</i> 草莓樹	<i>Cedrus deodara</i> 喜瑪拉雅雪松	<i>Eucalyptus globulus</i> 藍桉
Ash tree 光蠟樹	<i>Cenchrus ciliaris</i> 水牛草	<i>Eucalyptus urophylla grandis</i> 尾葉桉x玫瑰桉雜交種桉樹
<i>Aspergillus</i> sp. 曲黴菌屬	<i>Ceratonia siliqua</i> 角豆樹	faba beans 豆
<i>Asperula odorata</i> 香豬殃殃	<i>Ceriops decandra</i> 細蕊紅樹	<i>Fagus sylvatica</i> 歐洲山毛櫟
<i>Astragalus sinicus</i> (milk vetch) 紫雲英	<i>Chamaecyparis obtusa</i> (Hinoki cypress) 日本扁柏	<i>Faidherbia albida</i> 白相思樹
Aus 夏稻	<i>Chamaerops humilis</i> 叢欒	<i>Falcataria</i> 南洋楹屬
<i>Avicennia</i> sp. 海茄苳屬	Charolais 夏洛萊牛	<i>Falcataria moluccana</i> 南洋楹
	cherimoya 冷子番荔枝	fescue 狐草
	<i>Cistus ladanifer</i> 膠薑樹	<i>Festuca arundinacea</i> 莖狀羊茅
	clover 三葉草	<i>Festuca</i> spp. 羊茅屬
	Coleoptera 鞘翅目	<i>Ficinia</i> 球莎屬
	collembola 彈尾蟲	

fine fescue 細羊茅	<i>Metasequoia glyptostroboides</i> 水杉	<i>Prunus avium</i> 歐洲甜櫻桃
Firmicutes 厚壁菌門	<i>Metroxylon sagu</i> 西穀椰子	<i>Pseudotsuga menziesii</i> 花旗松
foxtail millet (<i>Setaria italica</i>) 小米	milk vetch (<i>Astragalus sinicus</i>)	<i>Psoralea bituminosa</i> 松豆
<i>Fragaria vesca</i> 野草莓	紫雲英	purple false brome
<i>Fraxinus</i> 桤屬	millipede 馬陸	(<i>Brachypodium distachyon</i>) 二穗短柄草
<i>Fraxinus angustifolia</i> 白蠟樹	<i>Morus</i> spp. 桑葚	<i>Quercus pubescens</i> 柔毛櫟
<i>Fraxinus excelsior</i> 歐洲欒	<i>Myrica esculenta</i> 毛楊梅	<i>Quercus</i> 櫟屬
<i>Fraxinus floribunda</i> 多花欒	nutsedge 香附子	<i>Quercus bicolor</i> 黃背櫟
<i>Fraxinus ornus</i> 花白蠟樹	<i>Nypha frutica</i> 水榔	<i>Quercus cerris</i> 土耳其櫟
Gatton panic 大黍	<i>Olea europaea</i> 油橄欖	<i>Quercus ilex</i> subsp.
<i>Geotrupes spiniger</i> 脊糞金龜	<i>Onthophagus vacca</i> 牛糞金龜	<i>rotundifolia</i> 冬青櫟
<i>Gliricidia</i> 格力豆屬	Oomycete 卵菌類	<i>Quercus macrocarpa</i> 大果櫟
<i>Glycine max</i> 大豆	oribatid mite 甲蟣	<i>Quercus pyrenaica</i> 比利牛斯櫟
gram 鷺嘴豆	Oribatida 甲蟣	<i>Quercus robur</i> 夏櫟
gramineous 禾本科的	<i>Oribatida acari</i> 螳蟲	<i>Quercus rotundifolia</i> 冬青櫟
grand fir 大冷杉	<i>Oryza</i> spp. 稻屬	<i>Quercus suber</i> 西班牙栓皮櫟
grass pea 家山黧豆	palisade grass 信號草	red clover 紅花三葉草
<i>Helichrysum stoechas</i> 法國蠟菊	<i>Panicum maximum</i> 大黍	reed canary grass (<i>Phalaris arundinacea</i>) 鶴草
Hinoki cypress (<i>Chamaecyparis obtusa</i>) 日本扁柏	<i>Paspalum Peronospora</i> 霜霉屬	<i>Rhizophora mangle</i> 美國紅樹
holm oak 冬青櫟	<i>Phalaris arundinacea</i> (reed canary grass) 鶴草	<i>Rhizophora</i> spp. 紅樹屬
Holstein 霍爾斯坦牛	<i>Phaseolus lunatus</i> (lima bean)	<i>Rhododendron arboreum</i> 樹形杜鵑
<i>Hypericum perforatum</i> 貢葉連翹	<i>Phleum pratense</i> (timothy) 貓尾草	<i>Rubia peregrina</i> 茜草藤
illipe nut 婆羅樹果	<i>Phlomis purpurea</i> 紫花糙蘇	<i>Rubus hirtus</i> 黑梅
<i>Inga edulis</i> 印加毛竹	<i>Phragmites</i> 蘆葦屬	rye 黑麥
Japanese cedar (<i>Cryptomeria japonica</i>) 日本柳杉	<i>Phragmites australis</i> 蘆葦	ryegrass 黑麥草
Japonica Shennong 265 水稻栽培種	<i>Picea abies</i> 歐洲雲杉	<i>Saccharum</i> spp. 甘蔗屬
<i>Jatropha curcas</i> 桐油樹	Pickle Melon (<i>Cucumis melo</i>) 越瓜	sago 西谷米
Jelutong (<i>Dyera polyphylla</i>) 南洋桐	<i>Pinus elliottii</i> (slash pine) 濕地松	<i>Salix caprea</i> 黃花柳
<i>Juglans regia</i> 胡桃樹	<i>Pinus halepensis</i> 地中海松	<i>Salix dasyclados</i> 毛枝柳
jute 黃麻	<i>Pinus nigra</i> (black pine) 歐洲黑松	<i>Salvadora persica</i> 芥末樹
Kentucky bluegrass (<i>Poa pratensis</i>) 肯塔基藍草	<i>Pinus pinaster</i> 海岸松	<i>Sangiovese</i> 山吉歐維樹葡萄
<i>Laucaena leucocephala</i> 銀合歡	<i>Pinus roxburghii</i> 西藏長葉松	<i>Santolina chamaecyparissus</i> 棉杉菊
leafhopper (<i>Empoasca flavesrens</i>) 小綠葉蟬 (葉蟬)	<i>Pinus sylvestris</i> 歐洲赤松	<i>Schima wallichii</i> 西南木荷
legume 豆類	<i>Pinus taeda</i> 火炬松	Scotch pine 歐洲赤松
lentil 小扁豆	<i>Pistacia lentiscus</i> 乳香黃連木	sedge 莎草
<i>Leucaena</i> 銀合歡屬	<i>Platypus cylindrus</i> 柱體長小蠹	sedge peat 蘆葦泥炭
<i>Leucaena diversifolia</i> 異葉銀合歡	<i>Pleurotus ostreatus</i> 秀珍菇	<i>Sedum</i> 景天屬
lima bean (<i>Phaseolus lunatus</i>) 皇帝豆	<i>Poa pratensis</i> (Kentucky bluegrass) 草地早熟禾	<i>Senna siamea</i> 鐵刀木
<i>Lolium multiflorum</i> 多花黑麥草	poplar 白楊樹	<i>Sesbania</i> 田菁屬
<i>Lolium perenne</i> 黑麥草	<i>Populus deltoides</i> 美洲黑楊	<i>Sesbania acculeata</i> (dhaincha) 刺田菁
<i>Lomandra</i> 多鬚草屬	<i>Populus nigra</i> 黑楊	<i>Sesbania sesban</i> 印度田菁
lucerne 紫花苜蓿	<i>Populus trichocarpa</i> 灰楊樹	<i>Setaria italica</i> (foxtail millet) 小米
lupin 羽扇豆	<i>Populus x canadensis</i> 加楊	<i>Shorea robusta</i> 婆羅樹
<i>Medhuka indica</i> 紫荊木	<i>Prosopis juliflora</i> 牧豆樹	<i>Shorea</i> spp. 婆羅屬
<i>Melilotus officinalis</i> 甜苜蓿	Proteobacteria 變形菌門	signalgrass 信號草
	<i>Prunus africana</i> 非洲臀果木	

silver carp 白鰱
 silver lime 銀毛檸
 slash pine (*Pinus elliottii*) 濕地松
Sonneratia alba 杯萼海桑
Sonneratia caseolaris 海桑
Spartina patens 鹽草甸米草
Sphagnum sp. 泥炭蘚
 spike grass 北美穗草屬
 spring wheat 春小麥
 spruce 雲杉
Stachys officinalis 藥水蘇
Striga 獨腳金屬草
 subclover 地果三葉草
 sugar beet 甜菜
 sugar maple 糖楓
 switchgrass 柳枝稷
 Syrah 西拉葡萄品種
Syzygium cumini 閻浮樹
 tall grass 高莖草
Taxodium distichum (bald cypress) 落羽松
 teff 畫眉草
Terminalia alata 檳仁樹
 thorn apple 曼陀羅花
Tilia x europaea 西洋椴
 timothy (*Phleum pratense*) 提摩西草
Trichoderma 木黴菌
Triticum aestivum 小麥
 turfgrass 草坪草
 turmeric (*Curcuma longa*) 薑黃
Typha 香蒲屬
Typha angustifolia 狹葉香蒲
Typha latifolia 寬葉香蒲
Ud. nippensis (*Unio douglasiae nippensis*) 圓頂珠蚌
Urochloa 尾稃草屬
v. Japonica 水稻栽培種
 vetch 野豌豆
Vicia villosa 長柔毛野豌豆
Vitellaria paradoxa 乳油木
Wabugia ugandensis 烏干達十數樟
 western hemlock 加州鐵杉
 western red cedar 美西側柏
 wild cherry 野櫻桃
 winter wheat 冬小麥
 yellow birch 黃樺
Zea mays 玉米

土壤名稱

Abruptic 質地突變
 Abruptic Argiudoll 質地突變黏聚濕潤黑沃土
 Abruptic Clayic Luvisol 質地突變黏質黏移土
 acid sulfate soils 酸性硫酸鹽土
 Acidic Red lateritic 酸性紅色磚紅壤
 Acrisol 強淋溶土
 Acruoxic 終育濕潤氧化型
 Acrustox 終育暫乾氧化土
 Aquertic Argiudoll 漫水膨轉黏聚濕潤黑沃土
 aeolian soil 風積土
 Aeric Albaquept 通氣漂白浸水弱育土
 Aeric Endoaquepts 通氣飽和浸水弱育土
 Aeric Eutrochrept 通氣高鹽基淡色弱育土
 Aeric Haplaquept 通氣簡育浸水弱育土
 Albic Luvisol 漂白黏移土
 Albic Podzol 漂白灰壤
 Alfic Udivitrand 淋溶濕潤玻璃質灰燼土
 Alfisol 淋溶土 Alisol 高活性聚鋁土
 alluvial soil 沖積土
 Andic Cambisol 火山灰變育土
 Andic Haplumbrepts 火山灰簡育黑瘠弱育土
 Andisol 灰燼土
 Andosol 灰燼土
 Anthroportic Udorthents
 (Anthropic Udorthents) 人為濕潤正常新成土
 Anthrosols 人為土
 Aqualfs 漫水淋溶土
 Aquept 漫水弱育土
 Aquic Argiudoll 漫水黏聚濕潤黑沃土
 Aquic Paleudalf 漫水老育濕潤淋溶土
 Aquolls 漫水黑沃土
 arenic 砂質型
 Arenic Cambisol 砂質變育土
 arenic Kandiudults 砂質高嶺濕潤極育土
 Arenosol 砂質土
 Argic Chromudert 黏聚高色度濕潤膨轉土
 Argic Haplustalfs 黏聚簡育暫乾淋溶土
 Argic Pelludert 黏聚低色度濕潤膨轉土
 Argiudoll 黏聚濕潤黑沃土
 Argiustoll 黏聚暫乾黑沃土
 Aridic Argiustolls 乾旱黏聚暫乾黑沃土
 Aridic Luvisol 乾燥黏移土
 Aridic Regosol 乾燥風積土
 Aridisol 幾境土
 Artifactic soils 人工土
 Ashy silt loam 火山灰坋質壤土
 Brunic Arenols Tephric 變育灰燼砂質土
 Brunic Dystric Arenosol 變育低鹽基砂質土
 Brunisols 棕壤
 Calcaric Cambisol 聚鈣變育土
 Calcaric Fluvisol 聚鈣沖積土
 Calcaric Technosol 聚鈣科技土
 Calcic Gleysol 聚鈣灰黏土
 Calcic Vertisols 聚鈣膨轉土
 Calcisol 鈣積土
 Calcisol Hypercalcic 高鈣鈣積土
 Calcisol Hypocalcic 低鈣鈣積土
 Cambic 變育型
 Cambic Calcisol 變育鈣積土
 Cambic Umbrisol 變育黑瘠土
 Cambisols 變育土
 cement 膠結
 Chernic horizon 暗黑土層
 Chernozem, Chernossolo 黑鈣土
 Chromic 高色度
 Chromic Arenosol 高色度砂質土
 Chromic Luvisol 高色度黏移土
 Chromic Vertisol 高色度膨轉土
 Chromustert 高色度暫乾膨轉土
 Clay loam 黏質壤土
 coarse textured soil 粗質地土壤
 coarse-loamy 粗質-壤質
 coarse-loamy over sandy 砂土上粗質-壤質
 Combustic soils 燃燒灰土
 Crimson soil 紋紅土
 Cryogenic soil 低溫土壤
 dammed soil 壩塞土土壤
 Dark Grey Cherno-zemic 深灰色黑鈣土

Densic Planosols	壓實黏盤土	Gleyed Solonetzic Black	Hydrudands 多水濕潤灰燼土
Dermosol	脆軟土 Durisol 硬盤土	Chernozemic soils 潛育鹼性黑鈣土	hyperdistic Luvisols 低鹽基黏移土
Durudands	硬磐濕潤灰燼土	Gleysols 灰黏土	hypersodic 高鹼基
Dystranddept	低鹽基灰燼弱育土	Gray Luvisol 灰色黏移土	Hyperthermic Endoaquept 高溫飽和浸水弱育土
Dystric Cambisol	低鹽基變育土	Grey Terrace soil 灰色階地土	Haploixeroll 簡育夏旱黑沃土
dystric nitosols	低鹽基黏亮土	gypsiferous soil 石膏質土壤	Inceptisol Aeris Haplaquept 通氣簡育浸水弱育土
Dystrochrepts	低鹽基淡色弱育土	Haplaquolss 簡育浸水黑沃土	Inceptisols 弱育土
Dystropepts	低鹽基弱育土	Haplic 簡育型	Isohumosols 均腐土
Dystroxerept	低鹽基夏旱弱育土	Typic Haplustalf 典型簡育暫乾淋溶土	Kandic Rhodustalfs 高嶺暗紅暫乾淋溶土
Endoaquept	飽和浸水弱育土	Typic Haplustept 典型簡育暫乾弱育土	Kandiudults 高嶺濕潤極育土
Entic	新成	Typic Haplustoll 典型簡育暫乾黑沃土	Kandosol 康狄土
Entic Hapludept	新成簡育濕潤弱育土	Typic Hydraquent 典型多水浸水新成土	Kanhapludult 高嶺簡育濕潤極育土
Entic Hapludoll	新成簡育濕潤黑沃土	Haplic Calcisol 簡育鈣積土	kaolinitc 高嶺型
Entic Haplustoll	新成簡育暫乾黑沃土	Haplic Gypsisol 簡育石膏土	Kaolinitic oxisol 高嶺石氧化土
Entic Umbritic Podzol	普通黑瘠灰壤	Haplic Kastanozem 簡育栗鈣土	Kastanozem 栗鈣土
Entisol, Neossolo	新成土	Haplic Phaeozem 簡育灰鈣土	Kurosol 庫魯土
eloian-loessic	風成黃土	Haplic planosol 簡育黏盤土	Latosol, Oxisols (USDA),
epileptic	連續岩層	Haplocalcid 簡育聚鈣旱境土	Ferralsols (WRB) 磚紅土
Epileptic Cambisol	表連續岩層變育土	Haplorthod 簡育正常淋灑土	Leptosol 磚紅土
Epileptic Phaeozem	表連續岩層灰鈣土	Haploixeralf 簡育夏旱淋溶土	lithic 石質
Epileptic Regosol	表連續岩層風積土	Hapludalf 簡育濕潤淋溶土	Lithic Dystrochrepts 石質低鹽基淡色弱育土
Eutric	高鹽基	Hapludands 簡育濕潤灰燼土	Lixisol 淋餘土
Eutric Cambisols	高鹽基變育土	Hapludoll 簡育濕潤黑沃土	Loam 壤土
Eutric Escalic Anthrosol	高鹽基階地人為土	Hapludox 簡育濕潤氧化土	Loamic 壤質
Eutric Gleysol	高鹽基灰黏土	Haplumbrept 簡育黑瘠弱育土	Loamy 壤質
Eutric Leptosol	高鹽基磚紅土	Haplustept 簡育暫乾弱育土	Loamy sand 壤質砂土
Eutric Regosol	高鹽基風積土	Haplusters 簡育暫乾膨轉土	Loamy silty clay 壤質坋黏土
Eutrudox	高鹽基濕潤氧化土	Haplustoll 簡育暫乾黑沃土	loamy soil 壤土
expanding clay	膨脹性黏土	Haplustoll 簡育暫乾黑沃土	loamy texture 壤質質地
felsic	長英質	heavy clay soils 重黏土	loamy-skeletal 壤質-石礫質
Ferralic Arenosols	鐵鋁砂質土	heavy loam 重壤土	loess 黃土
Ferralsol	鐵鋁土	hiperhumics Leptosols 高腐殖質磚紅土	loess loam 黃壤
Ferric	鐵質	Histels 有機永凍土	Luvic arenosols 淋溶砂質土
Ferric Lixisols	鐵質淋餘土	histic 有機質	Luvic Chernozems 淋溶黑鈣土
Ferric Luvisol	鐵質黏移土	histic Gleysol 有機浸水灰化土	Luvic Phaeozem 淋溶灰鈣土
fine earth	細質土	histic epipedons 有機表育土	Luvisol 黏移土
Flinty clay loam	細質黏壤土	Histosols 有機質土	Mollisols 黑沃土層
Fluventic	沖積	Hortic horizon 厚熟土層	Nitisol 黲亮土
Fluventic Dystropepts	沖積低鹽基弱育土	Hortic Gleysol 久耕灰黏土	Nitisols 黲亮土
Fluvents	沖積新成土	Humic Andosols 腐植質灰燼土	ochric 淡色的
Fluvi-Aquic	沖積-浸水的	Humic clayic Phaeozem 腐植質黏質灰鈣土	Ordinary chernozem 普通黑鈣土
Fluvisol	沖積土	Humic Gleysol 腐植質灰黏土	Orthels 正常永凍土
Fulvi-Calcaric Cambisol	沖積聚鈣變育土	Humic substance 腐植質	Orthic Ferralsol 正常鐵鋁土
fulvudands	沖積濕潤灰燼土	Hydrandepts 多水灰燼弱育土	Orthic Luvisol 正常黏移土
Gelisols	冰凍土	Hydromorphic Soil 水成土	Oxisols 氧化土
gley	潛育土		

Paleudol petrocálcico	石化聚 鈣老育濕潤黑沃土	silty clay loam	坋質黏壤土	Typic Udipsamments	典型濕潤砂質 新成土
Paleudult	老育濕潤極育土	Silty loam	坋質壤土	Typic Xeropsamments	典型夏旱砂 質新成土
Peat soil	泥炭土	Skeletal	石礫質	Typical Hapludalfs	典型簡育濕潤淋 溶土
pellic-mazic	低色度堅硬表層	Skeletal Technosol	石礫質科技土	Typical Hapludox	典型簡育濕潤氧 化土
PellicVertisol	低色度膨轉土	smectitic	膨潤的	Udolls	濕潤黑沃土
Permafrost	永凍土	Sodic	鹼化	Udorthent	濕潤正常新成土
Petric Calcisols	膠結聚鈣土	Sodic Soil	鹼土	Ultisol	極育土
Petrocalcic Paleudoll	石化聚鈣 老育濕潤黑沃土	Sodosol	鈉質土	Umbric horizon	黑瘠土層
Petrocalcic Paleustoll	石化聚 鈣老育暫乾黑沃土	Solonchaks	鹽土	umbric Lithosol	黑瘠石質土
Phaeozem	灰鈣土	Solonetz Black		Umbrisol	黑瘠土
Planosols	黏盤土	Castanozem	鹼性黑鈣土	Ustipsamments	暫乾砂質新成土
Plinthic Luvisol	鐵網紋黏移土	Spodosol	淋澱土	Ustochrepts	暫乾淺色弱育土
Plinthic Paleudult	鐵網紋老育 濕潤極育土	Spolic soils	工程廢棄土	Ustollic Haplargid	暫乾黑沃簡育黏 聚旱境土
Podzol	灰壤	Stagnosol	淹水土	Ustolls	暫乾黑沃土
podzolic	灰化	Subnartic yellow Sodosol	鈉質黃 底土層	Vertic	膨轉
Pretic horizon	普雷塔土層	Sulfaquents	含硫浸水新成土	Vertic Argiudolls	膨轉黏聚濕潤黑沃土
Pretrocalcic Argiudoll	石化聚 鈣黏聚濕潤黑沃土	Technosol	科技土	Vertic Calcixeroll Clay	膨轉聚鈣夏 旱黑沃黏土
Pretrocalcic Paleudoll	石化聚 鈣老育濕潤黑沃土	Tenosol	脆軟土	Vertic Cambisol	膨轉變育土
Profondic Stagnic Luvisols	強 發育滯水黏移土	Thapto-Histic Hydquent	下層 有機質多水浸水新成土	Vertic Endoaquepts	膨轉飽和浸水 弱育土
Quaternary red clay	第四紀紅 色黏土	Troposamment	熱帶砂質新成土	Vertic Haploixeroll	膨轉簡育夏旱黑 沃土
Red soil	紅土	Turbels	擾動凍土	Vertisols, Vertissolo	膨轉土
Red Yellow Latosol	紅黃色磚紅土	typic	典型	virgin soil	處女土
Regosol	風積土	Typic Aquisalid	典型浸水鹽聚旱境土	Vitrixerands	玻璃質夏旱灰燼土
Rendzic Clayic Phaeozem	黑色 石灰黏質灰鈣土	Typic Argiaquoll	典型黏聚浸水黑 沃土	volcanic soils	火山灰土
Rendzic Leptosol	黑色石灰磚紅土	Typic Argiudoll	典型黏聚濕潤黑沃土	xeralfs	夏旱淋溶土
Rhodic	暗紅	Typic Calcixerupt	典型聚鈣夏旱 弱育土	Xeric Calcigypsid	夏旱聚鈣石膏旱 境土
Rhodic Eutrudox	暗紅高鹽基濕 潤氧化土	Typic Chromustert	典型高色度暫 乾膨轉土	Xerocrept	夏旱淡色弱育土
Rhodic Hapludox	暗紅簡育濕 潤氧化土	Typic Dystrudepts	典型低鹽基濕 潤弱育土	Xerofluvents	夏旱沖積新成土
Rhodic Kandiudox	暗紅高嶺濕 潤氧化土	Typic Fluaquent	典型沖積浸水新 成土	Yedoma	更新世多年凍土
Rhodic Nitisol	暗紅黏亮土	Typic Haplorthod	典型簡育正常 淋澱土		
Rhodoxeralfs	暗紅夏旱淋溶土	Typic Haploxeralf	典型簡育夏旱 淋溶土		
Rudosol	初育土	Typic Hapludalf	典型簡育濕潤淋 溶土		
Saline soil	鹽土	Typic Hapludert	典型簡育濕潤膨 轉土		
sandy clay loam	砂質黏壤土	Typic Hapludoll	典型簡育濕潤黑 沃土		
sandy loam	砂質壤土	Typic Kandiudults	典型高嶺 濕潤極育土		
sandy soil	砂土	Typic Kanhapludults	典型高嶺簡 育濕潤極育土		
Silanic	火山灰質	Typic Paleudalf	典型老育濕潤淋溶土		
Silanic Andosol	火山灰質灰燼土	Typic Paleudult	典型老育濕潤極育土		
Silt loam	坋質壤土	Typic Tropudults	典型熱帶濕潤極育土		
Silty clay	坋質黏土				

主要參考資料

1. 「雙語詞彙、學術名詞暨辭書資訊網」，國家教育研究院 (<https://terms.naer.edu.tw>)。
 2. 《普通土壤學》(1987)，國立臺灣大學農業化學系張仲民編著。
 3. 《土壤學名詞辭典》(1982)，許勝貞主編。
 4. 《英漢園藝學辭典》(1995)，國立臺灣大學園藝學系康有德主編。
 5. 「植物檢疫詞彙中英對照表 - 檢疫篇」(2005)，農業委員會動植物防疫檢疫局。







NOT FOR SALE 非賣品

聯合國糧食及農業組織2021年9月出版
正瀚生技股份有限公司2022年3月翻譯與印刷

本中文譯本非由聯合國糧食及農業組織（FAO）所製作，乃由正瀚生技負責翻譯
製作，FAO 對此譯本中文表達的準確性不具責任，準確性以 FAO 英文原版為主。



正瀚生技股份有限公司
CH Biotech R&D Co., LTD.

540 南投縣南投市文獻路89號

No. 89, Wenxian Rd., Nantou City, Nantou County 540, Taiwan (R.O.C.)

TEL: +886-49-7009198 E-mail: info@chbio.com.tw <https://www.chbio.com.tw>



全球土壤合作計畫(GSP)成立於2012年，是全球公認的體制。我們的使命是透過集體行動，將土壤納入全球議程。我們的主要目標是推廣永續土壤管理(SSM)和改善土壤治理，以確保土壤的健康和生產力，我們也支援提供必要的生態系統服務，以實現糧食安全和改善營養、調適和減緩氣候變遷，以及永續發展。



Thanks to the financial support of



European
Commission |



Ministry of Finance of the
Russian Federation