

# 土壤大解密! 以自然為本的 負碳技術—土壤碳匯

劉雨庭<sup>1</sup> / 許良境<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 中興大學土壤環境科學系

<sup>2</sup> 國家同步輻射研究中心 X 光吸收小組



中興大學土壤環境科學系劉雨庭教授 (左四) 及其研究團隊

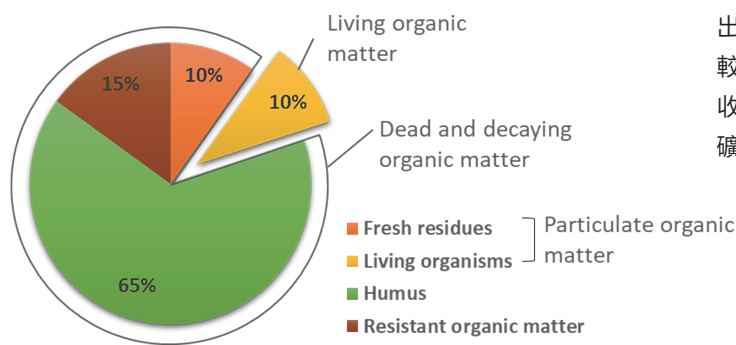
地球在燃燒! 地獄熱浪襲擊歐美, 多處森林野火肆虐是近期氣候的寫照, 在台灣的我們雖然少見森林火災, 但夏天多日高溫飆破 40 °C, 也深深的感受到極端氣候的威力。政府間氣候變化專門委員會 (IPCC) 氣候變遷第六次評估報告證實人類活動確實造成地球暖化, 並且無論何種情境下都將於近 20 年超過升溫 1.5 - 2 °C。全球須在 2050 年左右達到淨零排放, 才有可能減緩暖化速度 [1]。在第 26 屆聯合國締約方氣候峰會 (COP26) 中, 各國領導人宣示: 達到 2050 淨零排放之前, 要先在 2030 年、較 2010 年減少 45% 的碳排。至此之後, 淨零排放不再是道德行動, 我們該如何立即行動與因應? 淨零排放是指努力讓人為造成的溫室氣體排放極小化, 再用負碳技術、森林碳匯等方法抵消, 使大氣中溫室氣體總量不上升。COP26 所產出的《格拉斯哥氣候盟約》(Glasgow Climate Pact) 中可發現, 許多國家不斷的強調自然為本的解方 (Nature-based Solution, NbS) 對淨零排放的重要性, 通過森林、土壤、濕地、生態、海洋產生的碳權作為抵換達到淨零排放的工具。聯合國環境署和世界自然保育聯盟 (IUCN) 的共同報告指出, NbS 可在 2030 年削減 50 億噸二氧化碳, 2050 年更可能達到 100 億噸的減量 [2]。在減碳的同時, NbS 提供的高品質碳權更可提升環境永續發展, 是共創、雙贏的策略。

淨零排放中最為人熟知的 NbS 方案為森林碳匯, 樹木透過光合作用, 吸收二氧化碳將其轉換成碳水化合物並固定在生質量中。然而, 以台灣人年均碳排 10.96 公噸來說,

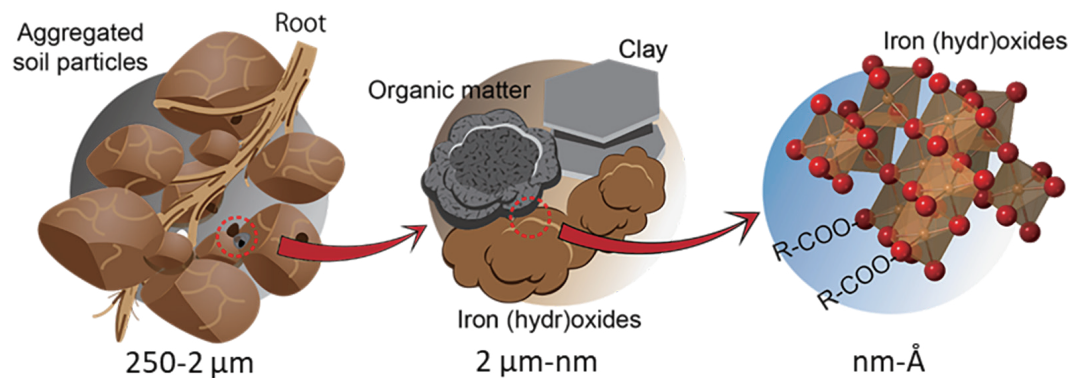
每年每公頃森林碳吸收量 9.76 公噸則代表我們需要六個種滿樹的台灣 (約 2300 萬公頃森林), 才能抵銷 2300 萬人每年的碳排放量 [3], 明顯可見, 單靠森林碳匯並不足以達成台灣的淨零排放目標。事實上, 雖然全球森林碳貯存約 662 Gt (1 GT = 10 億噸), 但其中的 56% 是存在於森林土壤與枯枝落葉層中 [4]。對於其他的生態系統, 例如濕地、草原、凍原、耕地等, 地下土壤的碳存量更是比地上部植物的碳存量高上數倍至數十倍之多 [1], 由此可知, 土壤在地球碳庫扮演極重要的角色。根據估計, 陸地生態系統中的總碳含量約為 3170 GT, 而土壤碳佔了約 80% (約 2500 GT)[5], 其中有機碳約佔 1550 GT、無機碳佔 950 GT, 換言之, 土壤貢獻了陸地生態系統中最高的的碳存量。在全球急於達到淨零碳排的現在, 土壤顯現了它長久以來被忽視的價值, 就如同美國總統羅斯福在 1935 年所說: 「A nation that destroys its soils destroys itself」。

土壤中的碳多是以土壤有機質的形式存在。除了固碳之外, 土壤有機質更具有提供作物養分、增加土壤結構穩定性、增進生物多樣性、淨化水源等功能, 是土壤品質的關鍵指標、達到糧食安全及土壤碳匯的決定性因子。土壤微生物 (包括細菌及真菌) 會分解土壤中的植物和動物殘體, 不同分解階段的含碳有機物, 與土壤生物細胞、組織、分泌物組成或再聚合的產物即為土壤有機質。由此可知, 土壤有機質為一複雜的組成, 大致上可分為新鮮殘體、生物活體 (上述兩者歸納為顆粒有機物質, particulate organic matter)、

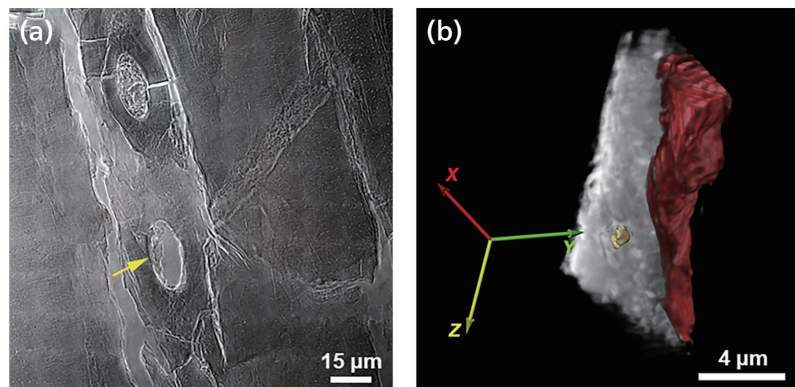
腐植質 (humus) 以及非常穩定難分解的有機物質 (resistant organic matter)，例如黑炭 (Black Carbon, BC) (圖一)。然而土壤有機質的存量是動態的，其要扮演存碳的碳匯 (sink) 或是排碳的碳源 (source)，則取決於人類的活動方式。根據統計，自工業革命以來，因人為活動及自然生態環境改變，使植物根及殘體回歸土壤的量降低、土壤沖蝕增加，且因慣行農法施行的土壤耕犁使得土壤有機質分解，已導致 50 - 100 GT 的土壤碳釋放至大氣中 [6]。因此，將碳種回去土壤裡是刻不容緩的任務！國際上的協定已逐漸認可增加農地土壤碳匯對淨零排放與環境永續的貢獻，這種綠色且便宜的存碳的方式，可創造美金 4800 億的價值 [7]。



圖一 常見土壤有機質之組成與比例 [8]。



圖二 不同尺度下土壤團粒結構與有機質與黏土、礦物的交互作用之示意圖。



圖三 (a) 黑炭之穿透式 X 光顯微影像，在放大的圖 (b) 中可看出含鐵礦物 (紅色) 與黑炭 (灰色) 的緊密接觸面 [12]。

雖然土壤碳是動態的，但可經由與土壤的交互作用增加其穩定性，增加土壤碳的週轉 (turnover) 時間。土壤碳的物理性保護作用可依土壤結構尺度分成兩大類：當土壤結構介於 10 - 1000  $\mu\text{m}$  時，土壤結構孔隙的多寡、大小、分布為主要影響因子，土壤有機質可停留在這些空隙之間，避免與能分解土壤碳的微生物或酵素接觸 [9]；然而就  $< 10\mu\text{m}$  的土壤結構來說，土壤有機質與黏土、礦物的交互作用則為穩定土壤碳的關鍵 [10] (圖二)。2007 年 Solomon 等人對亞馬遜流域土壤進行研究 [11]，在歷經長期人為擾動的成土過程中，這些富含有機碳土壤上的官能基與鄰近土壤上的官能基組顯著不同，推測此區土壤有機碳上累積的芳基結構，其不易被分解的特性是導致亞馬遜土壤中有機碳穩定的主要因素。成功大學地球科學系梁碧清教授團隊進一步指出，亞馬遜流域土壤中的低晶性 (poorly crystalline) 礦物較鄰近土壤多出近一倍，使用國輻中心 (NSRRC) 的 X 光吸收光譜分析發現，這些低晶性礦物中，高達 81% 為水合鐵礦 (ferrihydrite) [12]。鐵為地殼中含量第四多的元素，因此由岩石風化而成的土壤中富含含鐵礦物。由於鐵具有氧化還原活性，在氧化環境下以沉澱礦物存在，但也可在還原環境下轉變成溶解態的二價鐵，當二價鐵再遇到氧化環境而快速轉變成沉澱態的過程中，即會形成低晶性或是無晶性的水合鐵礦，因此水合鐵礦普遍存在於土壤及自然水體中。由於水合鐵礦的結晶性差、顆粒極小 (奈米顆粒等級)、比表面積極大，其表面的鐵原子非常容易與土壤有機碳形成化學鍵結，產生錯合。利用 NSRRC 中的穿透式 X 光顯微分析即可看出，在亞馬遜流域土壤中的黑炭表面緊密的附著了一層土壤礦物，這一層水合鐵礦即是保護黑炭避免有機碳分解的關鍵 [12]。

由於土壤有機質的異質甚高，對於難分解的黑炭，其與水合鐵礦的錯合可提供物理性保護，使之穩定存在土壤之中。相較之下，對於穩定性次於黑炭的腐植質甚至可溶性有機碳，水合鐵礦是否也可提供物理性保護力？為了解答這個問題，我們團隊採集彰化及陽明山的土壤，萃取出其中的腐植酸 (Humic Acid, HA)，加入不同比例的三價鐵離子，調控實驗的酸鹼值並使三價鐵離子沉澱，藉此模擬自然環境土壤中腐植質與水合鐵礦之間的交互作用。利用 NSRRC 的 X 光繞射及 X 光吸收光譜分析發現，對於陽明山土壤萃取出來富含極性官能基的腐植酸來說，水合鐵礦會與這些有機質分子均勻

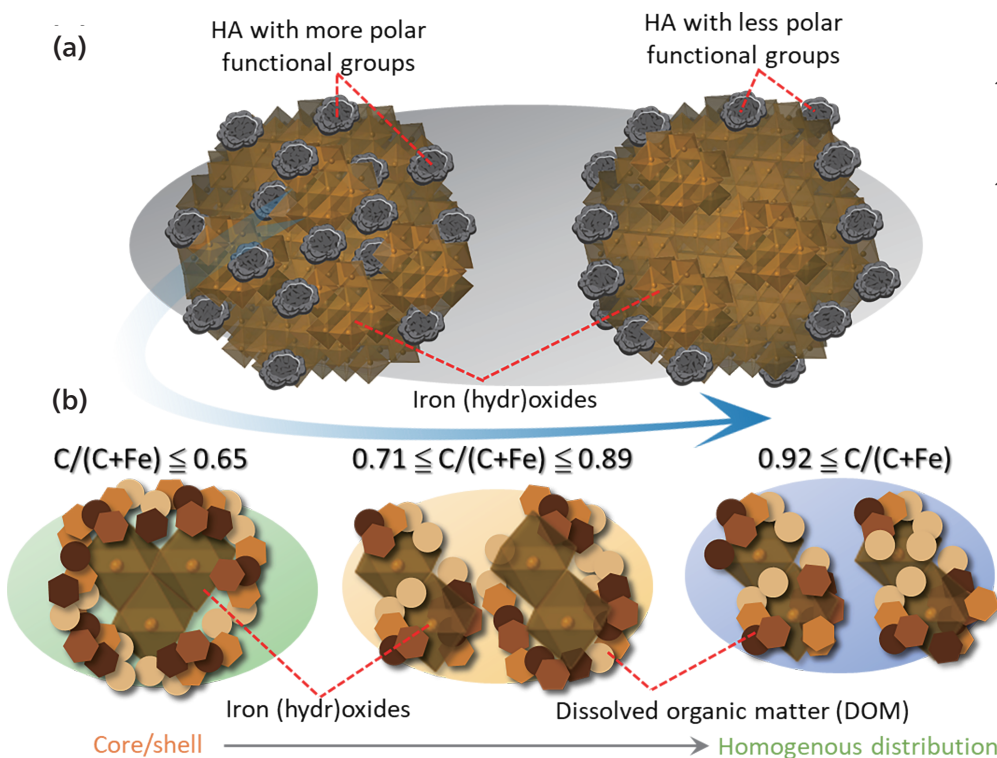
的混合，然而，此種有機質 - 水合鐵礦的交互作用並沒有發生在彰化土壤萃取出之腐植酸上。這是因為彰化土壤腐植酸的組成大部分為脂肪族，缺乏大量的極性官能基與鐵原子鍵結，這時水合鐵礦就會聚集、形成較大的團粒結構，腐植酸僅能附著在此團粒結構的外圍 (圖四 (a))[13]，因此相較於陽明山土壤的腐植酸，彰化土壤腐植酸的穩定性較差，容易從土壤中流失。我們進一步研究分子更小、更不穩定的可溶性有機碳與水合鐵礦的結構組成對土壤有機碳固存的影響。實驗結果顯示，可溶性有機碳與水合鐵礦的共沉澱結構會隨著碳/鐵比例而改變。當碳/鐵比例低時，共沉澱結構是以水合鐵礦為核心，可溶性有機碳鍵結在外圍；隨著碳/鐵比例增加，兩者之間的化學鍵結開始產生，同時也開始破壞水合鐵礦的結構組成，雖然此時可溶性有機碳與鐵氫氧化物分子為均勻混和的結構組成，但因鐵氫氧化物的單體或是二聚體無法為有機碳提供物理性保護，導致碳的溶出量大幅增加，降低土壤有機質的穩定度 (圖四 (b))[14]。由此可知，奈米級鐵氫氧化物/水合鐵礦可透過與有機碳產生鍵結，穩定土壤有機碳進而增加土壤碳固存的能力。不論是不易分解的可溶性有機碳大分子 (黑炭) 或是易移動的可溶性有機碳小分子，透過物理或化學的方式與土壤 (含鐵) 礦物交互作用，都可增加有機碳在土壤中的穩定性，從而成為土壤碳蓄存的關鍵之一。然而土壤是個非常複雜的系統，有機質 - 鐵之間的交互作用隨著環境因子與有機質特性千變萬化，還有許多反應機制與秘密等待我們去更深一步的探索。而身為土壤科學家的我們會繼續努力，以自然為本的解方將碳種回土壤之中，對淨零排放做出更多貢獻！

### 致謝：

感謝國家同步輻射研究中心 TLS 01B、01C、14A、16A、17C、20A 光束線實驗站長期支持環境科學研究，也由衷感謝實驗站的發言人及相關研究人員對於技術指導、數據分析等工作的協助。

### 參考文獻：

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (2021).
2. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi and International Union for Conservation of Nature (IUCN), Gland, Nature-based solutions for climate change mitigation, Nairobi and Gland (2021).
3. 行政院環境保護署，我國國家溫室氣體排放清冊報告，台灣 (2021).
4. FAO, Global Forest Resources Assessment 2020: Main report, Rome (2020).
5. R. Lal, Science **304**, 1623 (2004).
6. R. Lal, Crit. Rev. Plant Sci. **28**, 90 (2009).
7. E. C. Kelly, M. B. Schmitz, Geoforum **75**, 99 (2016).
8. What is soil organic carbon?, Department of Primary Industries and Regional Development (2022).
9. I. M. Young, J. W. Crawford, Science **304**, 1634 (2004).
10. C. Vogel, C. W. Mueller, C. Höschel, F. Buegger, K. Heister, S. Schulz, M. Schloter, I. Kögel-Knabner, Nat. Commun. **5**, 1 (2014).
11. D. Solomon, J. Lehmann, J. Thies, T. Schäfer, B. Liang, J. Kinyangi, E. Neves, J. Petersen, F. Luizao, J. Skjemstad, Geochim. Cosmochim. Acta **71**, 2285 (2007).
12. Y. T. Weng, J. Rathod, B. Liang, C. C. Wang, Y. Iizuka, N. Tamura, C. L. Chen, Y. C. Lee, Sci. Total Environ. **725**, 138195 (2020).
13. K. Y. Chen, L. C. Hsu, Y. T. Chan, Y. L. Cho, F. Y. Tsao, Y. M. Tzou, Y. C. Hsieh, Y. T. Liu, Sci. Rep. **8**, 1 (2018).
14. K. Y. Chen, T. Y. Chen, Y. T. Chan, C. Y. Cheng, Y. M. Tzou, Y. T. Liu, H. Y. Teah, Environ. Sci. Technol. **50**, 12612 (2016).



圖四 (a) 鐵氫氧化物與富含 / 缺乏極性官能基土壤萃取出之腐植酸共沉澱物 [13]。

(b) 不同碳鐵比之可溶性有機碳與水合鐵礦共沉澱物之結構示意圖 [14]。