

邁向淨零目標中 土壤碳匯所扮演的角色

文·圖/許正一

人類緩解氣候變遷與對抗暖化的策略之一，是提高自然碳匯，包括水體、植物與土壤，一般人分別稱為藍碳、綠碳、黃碳。土壤中的碳，之所以被稱為黃碳，那是因為生活在臺灣的我們，所接觸到的土壤以黃色的色調居多（圖1），因此用黃碳來形容，便於呼應藍碳與綠碳等自然碳匯。不過，土壤的形成是受錯綜複雜的成土因子所影響，世界各地的土壤顏色變化多端，在

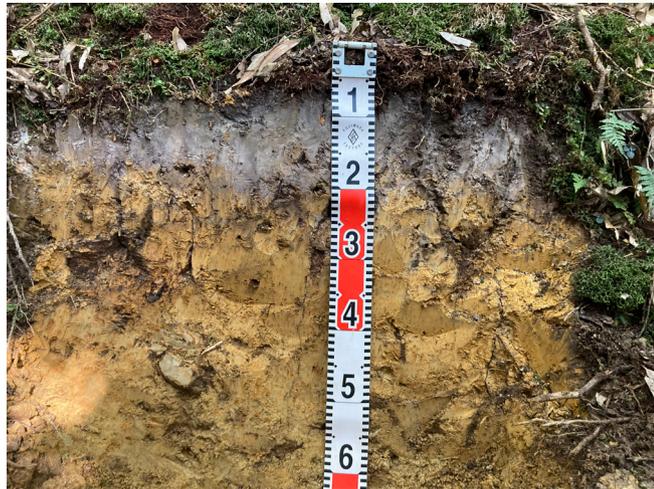


圖1：土壤成色的原因很多，除了染成黃色，灰色與黑色也是常見的。

科學文章與學術研究裡，黃碳的稱呼，甚為少見，筆者也較不建議。話雖如此，本文重點乃在於，邁向淨零目標中，土壤碳匯的意義何在、國際上主要的研究趨勢與目的、以及筆者個人的經驗與感想等。

土壤中的碳在那裡？

土壤碳包括有機質中的碳與碳酸鹽裡的碳，分屬有機碳及無機碳，目前國際上所致力推動各種土壤管理而可增加的碳，以有機碳的型式為主。就整個地球來說，土壤碳約有 4.0×10^{12} 公噸，分別是大氣中的碳與植物碳的5-7倍之多，所以土壤是地球很重要的碳源（carbon source）與碳匯（carbon sink），對氣候變遷的影響舉足輕重，因此2015年在巴黎所舉行的氣候變遷會議（COP 21）中，大會提出千分之四倡議（4 per 1000 Initiative），意指全球土壤每年增加0.4%的有機碳，即可抵消所有人為排放的二氧化碳。另外，由於土壤碳匯規模龐大，因而自然碳匯便成了臺灣邁向2050淨零路徑的十二大戰略之一。

碳是維持生命最重要的元素之一，以綠色植物來說，大氣中的二氧化碳經光合作用進入植物體後，轉換為各種含碳物質，當植物凋亡成為枯落物，有機碳便累積在土壤中。除

此之外，土壤有機碳來源尚有微生物、動物排洩物與殘體，而部分土壤會殘留著經地質作用或焚燒後的含碳物質，即碳黑（char），可保存在土壤中長達百年或千年以上而不被分解，其來源仍是生物，所以也是一種有機碳。近二十年各種生質材料經高溫裂解後所產製的生物碳（biochar），即因其構造穩定並可改善土壤肥力，而被視為一種土壤增加碳匯的方法。另外，將農業副產物再利用製成有機肥料，透過適當的肥培管理，不僅可提高土壤碳含量，也可因為增加作物生長量。因此，就增加土壤碳匯來說，不僅可提高農業部門的碳匯，更是可以達到跨足各項產業的所謂「生物能源與碳捕捉及儲存」（bioenergy with carbon capture and storage, BECCS）的目標，即透過生產生質能源，捕捉二氧化碳以降低大氣中的二氧化碳。

增加土壤碳匯的策略

土壤中的有機質經微生物分解後，大部分的碳以二氧化碳的型式逸散到大氣中，少數成為微生物體的一部分，屬易分解性且低分子量的碳化合物為數也不多，而轉變為腐植質的碳則大約佔了10-30%。腐植質是個性質穩定的大分子，顏色黝黑、具有極強的保水力與保肥力，不易被微生物所分解，如果在團粒構造與礦物的包裹保護下，在土壤中可維持數十年到數千年不等。農業生產上使用的腐熟堆肥，即是腐植質比例高，是最能提高穩定型土壤碳匯的資材。腐熟堆肥的碳/氮比約在10-25左右，這個比值過高或過低，都不利於土壤品質，甚至會加速二氧化碳的排放。因此，在了解作物特性、氣候、土壤性質的前提下，透過適當的耕作管理方式，設法提高這類穩定型態的有機碳，才能降低二氧化碳的排放，達到碳匯持續增加之目的，取得有效的碳權，這是土壤碳增匯的最高指導原則。

各種農業活動影響土壤碳匯甚巨，而農田土壤即佔了全球土壤面積約60%，因此投注增加碳匯在農田土壤裡，被認為是各種類型土壤中，最具效益的。根據大多數的文獻報導指出，農田土壤施以各種增匯措施，每年可增加的土壤有機碳約為0.2-0.8公噸/公頃，是否仍有再增加的空間，有待研究與觀察。但不管如何，在不影響農作物生產的前提下，維持原有農田土壤品質，然後提高有機碳含量，就是農田土壤增加碳匯的策略原則，本文僅提出建議如下：

1. 持續性的在土壤中添加有機資材，即使休耕仍應種植覆蓋作物，避免土壤裸露而加速有機碳分解。

2. 各種土壤能吸存碳的飽和度均不同，故在適地適栽前提下，以維持足夠的土壤有機質供作物生長為原則，一旦超過土壤飽和能力，有機碳反而會加速分解，尤其是砂質地的土壤。
3. 除了碳，氮是植物賴以維生最主要的養分，因此合理施用氮肥，並透過輪作與綠肥的管理，維持土壤的碳、氮平衡。
4. 適度施用改良劑及肥料使作物生長良好，並將作物收穫後的殘體回歸到土壤中。
5. 降低耕犁強度，實施保育式耕犁或免耕法，減少土壤裸露與團粒被破壞，降低有機碳的分解速率。
6. 農田應適度保留多年生草木，以維持生態系的原有自然循環運作。
7. 推廣再生農法，這是有機農法的新型態，減少耕犁、提高生物多樣性，施用堆肥或生物碳與覆蓋表土等措施，在不影響作物產量與品質下，達到提高土壤的健康以及增加碳匯，減少外部資源投入，維持高的生物多樣性、土壤生產力、改善水的循環及極大化生態系統服務價值。

土壤碳匯在方法學上的挑戰

把碳放進土壤裡，是很直觀的土壤增匯想法，而土壤能夠長期吸存這些碳的同時，扣除碳排放量後，所得到的才是淨的土壤碳增匯量，才是實質的減碳效益。就碳權來說，整個土壤增匯行動要有能夠確效的方法學，即透過可以量測（measurement, M）、報告（reporting, R）與驗證（verification, V）的機制。國際上雖已陸續有一些MRV認證機構提出與土壤碳匯相關的方法學，不過土壤是一個極不均質的自然體，增匯措施是在開放的農田生態系所進行的，物質與能量的流動路徑非常複雜，空間與時間變異大（圖2），因此目前黃碳要取得碳權的方法學仍是不足的。

聯合國糧農組織（UN FAO）在2020年針對農業系統出版了全球土壤有機碳MRV技術手冊（<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/e8781eb7-83c2-4ade-980b-f5872603bcb1/content>），提供了土壤碳增匯與溫室氣體排放的參考，該手冊是目前在土壤碳匯工作中，最被廣為接受的，內容中建



圖2：土壤的不均質性高，但透過野外調查，仍可建立系統性的知識。



圖3：土壤碳匯方法學，需要專業與標準化的土壤採樣方法。



圖4：筆者研究團隊於田間監測土壤二氧化碳排放量的研究，背景試驗作物為狼尾草。



圖5：筆者研究團隊透過可見-近紅外光譜儀開發快速進行非破壞性的土壤有機碳檢測技術。

議MRV分6個階段執行，主要內容為基線調查、監測、報告與查證。總計在各階段的MRV過程，建議共需5次採樣、3個一年2次的報告，然後在第8年提出最終報告。因此，這些涉及許多新知識與技術，仍有待開發，例如土壤繪圖與遙測等空間資訊、土壤採樣方法的建立與有機碳分析的精進、土壤有機碳預測模式的運用等（圖3）。

礙於篇幅，筆者在此簡短分享土壤碳匯方法學有關的經驗。建立土壤碳匯MRV，需要具有土壤學背景知識，目前在臺大開授土壤學與實驗課程等相關的課程，僅有農化系，因此未來在人才培育上可再提升（圖4）。另外，目前國際上常用的土壤有機碳測定方法，多為破壞性的濕式化學分析法，耗時又會產生廢液，有違環保與減碳趨勢。相較之下，可見-近紅外光譜儀（visible and near infrared spectrometer, vis-NIR）等近地感測法（proximal sensing），可藉由測量土壤光譜而反映特定土壤性質，在機器學習協助下，數秒內即達成非破壞性的有機碳檢測（圖5），可做為一個低成本且快速量測的方法，提高未來土壤碳匯交易市場的及時性需求。

土壤碳匯與永續發展

在農田土壤中每年一公頃要增加1公噸以上的碳，已經算是件不容易的事，而以目前碳交易的市場來說，1公噸的碳價保守估計可能還不到新臺幣1千元，誘因不高。在農業操作下的土壤系統，透過生物反應與養分管理，達到提高土壤有機碳含量，不僅是對氣候變遷調適的作為，也因為土壤健康議題而基於養分效率，考慮到環境品質、糧食安全與循環經濟，所以附加了許多對永續發展的促進、生態系統服務價值的提高，這些是金融以外，人類可以追求的共同福祉，如此宏觀看待推動土壤碳增匯，將變得較有意義。（本專題策畫／生農學院王淑珍副院長&法律學院陳韻如教授）

參考文獻：

- [1] 許正一、蔡呈奇、陳尊賢。2017。土壤：在腳底下的科學。五南圖書出版股份有限公司，臺北市。
- [2] 許正一。2022。第三章 土壤碳匯，碳匯之發展趨勢及國內策略研析。財團法人中技社，臺北市。
- [3] Bastida, F., C. García, N. Fierer, D.J. Eldridge, M.A. Bowker, Sebastián Abades, F.D. Alfaro, A.A. Berhe, N.A. Cutler, A. Gallardo, L. García-Velázquez, S.C. Hart, P.E. Hayes, T. Hernández, Z.Y. Hseu, N. Jehmlich, M. Kirchmair, H. Lambers, S. Neuhauser, V.M. Peña-Ramírez, C.A. Pérez, S.C. Reed, F. Santos, C. Siebe, B.W. Sullivan, P. Trivedi, A. Vera, M.A. Williams, J. L. Moreno., and M. Delgado-Baquerizo. 2019. Global ecological predictors of the soil priming effect. *Nature Communications* 10, Article number: 3481. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11472-7>
- [4] Chen, Z.S. and Z.Y. Hseu. 1997. Total organic carbon pool in soils of Taiwan. *Proc. National Sci. Council ROC . Part B: Life Sci.* 21: 120-127.
- [5] Huang, Y.C., C.Y. Huang, B. Minasny, Z.S. Chen, and Z.Y. Hseu. 2023. Using pXRF and Vis-NIR for characterizing diagnostic horizons of fine-textured podzolic soils in subtropical forests. *Geoderma*, 437, 116582. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116582>



許正一 小檔案

許正一博士為臺灣大學農業化學系特聘教授兼系主任，在 1992 年與 1997 年分別自本校農業化學系學士班與博士班畢業。曾為國科會生科處生農環境與多樣性學門召集人及自然處永續發展研究學門共同召集人、東亞及東南亞土壤學會聯盟主席、日本京都大學與明治大學客座教授、香港理工大學訪問學人。現為 Elsevier 旗下 *Environmental Pollution* 及日本土壤與植物營養學會

所屬 *Soil Science and Plant Nutrition* 等兩個期刊之編輯委員，研究興趣為土壤化育與分類、土壤生態與土壤污染等，開授課程有土壤學、土壤學實驗、土壤形態與分類、污染土壤調查與整治技術。近年研究主題為高背景值微量元素對土壤品質與作物安全的影響、稀土元素在土壤 - 植物系統的遷移、以及近端感測結合演算法快速測定土壤有機碳與其他理化性質。