

## 土壤碳庫與淨零排放 降低氣候變遷衝擊最有潛力的方式

### 豐年雜誌

世界正面臨著多重挑戰，包括糧食安全、環境永續、土壤保護和氣候變化。聯合國政府間氣候變遷小組報告指出：農業是當前具有很大緩解氣候變遷能力和潛力的重要陸地生態系統，若能透過適宜的農業生產行為，將有效增加農地土壤碳儲存量。農業肩負糧食安全的責任，但是畜牧養豬、牛和雞，或是農耕種水稻的過程都會產生碳排，所以必須透過森林、土壤、海洋來增匯抵消排放。土壤一直默默地在進行「匯碳」工作，儲碳量甚至比動植物、森林所組成的生物碳庫高 4 倍，是陸地上最大的碳庫。全球溫室氣體逐年增加，加速氣候的異常變遷，臺灣想跟上國際的腳步，並減少二氧化碳對環境的衝擊，了解土壤碳匯及如何減少碳排放勢在必行。

1935 年美國總統羅斯福曾說，國家若毀滅它所擁有的土壤就等於毀滅自己。而聯合國糧農組織認為，健康土壤是健康糧食生產的基礎，也是各類飼料、燃料、醫藥等用途的作物管理、培養基礎，且支持了地球約 25% 的生物多樣性，並在碳循環中扮演了關鍵的角色，有助於氣候變遷問題的應變措施。土壤非可再生的資源，因此對土壤的保護無論是糧食安全與人類的永續未來都至為重要。

有機碳是土壤品質指標 攸關人類生存與發展

土壤是陸地上最大的碳庫，約是植被碳庫的 2~3 倍，而土壤有機碳是達到確保糧食安全及滿足全球化多樣需求的重要自然資源，是土壤品質的關鍵指標。土壤有機碳含量與土壤有機質有直接的相關性，其約占土壤有機質的一半。土壤有機質是富含碳的有機分子，因為土壤有機質由土壤微生物、動植物殘體、糞便及這些物質分解或再聚合的產物所組成，包含新鮮的植物殘體到難被分解的腐植質。

有機質是土壤一個重要且關鍵的組成，因為它影響著土壤理化及生物特性，而這些決定作物的生長及生態多樣性，與人類生存與發展有密切的相關性。土壤有機質的存在不僅提供作物養分，促進土壤結構的穩定增加土壤肥力，還可提供作物良好的生長環境，它也有助於土壤成為良好的濾床，提供乾淨的用水。

雖然氣候變遷對土壤的衝擊會因地區及土壤形態而異，但全球溫度上升與極端乾旱頻率之增加所造成土壤有機碳的損失已成常態，土壤有機碳的動態受環境變遷的影響非常顯著，所以要以國家、甚至全球的角度保護及監測土壤有機碳匯，尤其是驗證土壤碳匯仍然充滿了相當大的挑戰。

## 碳循環中的土壤碳庫及土壤有機碳庫

碳的循環是指碳以不同的形式在大氣、生物圈及土壤圈間的傳遞，大氣二氧化碳是通過植物光合作用固定碳，以及通過呼吸作用損失碳之間的動態平衡。人類活動透過化石燃料燃燒和工業活動，釋放大量二氧化碳，顯著改變了全球碳循環。大約 90 億噸的碳由人類活動添加到大氣中，其中 70~80 億噸來自化石燃料燃燒，10~20 億噸來自主要通過森林砍伐的土地利用變化。由於人類排放到大氣中的二氧化碳量高於土壤和植被中的碳匯，因此大氣每年約增加 30~40 億噸的碳。

土壤碳吸存過程為植物進行光合作用，將二氧化碳轉換成植物生物量，植物殘體及分泌物在土壤中與土壤微生物、黏土礦物聚集成土壤有機質即為土壤碳庫。土壤碳庫成分中，90%以上為有機碳庫，如動、植物之殘骸或排泄物之分解、分解物質經過微生物性或化學性之降解所產生之產物，剩餘 10%則為無機碳庫，包含母岩風化之礦石，以及岩層中之鈣及鎂元素與二氧化碳礦化所形成之礦石。

除了土壤的物理性質，如團粒構造、微生物的組成與活性外，土壤碳匯亦會因其他環境條件及人為活動而釋放至其他碳庫中。因此除了一味地增加土壤碳的總量外，延長碳被保留在土壤中的時間，避免土壤有機質被降解成二氧化碳排回大氣中，也是增碳的關鍵。

土壤有機質可進一步分類，其中由生物或非生物性腐植化作用形成的腐植物質，較能抵抗降解，這些較穩定的有機碳可儲存在土壤中，短則數年，多則數百萬年。土壤也可提供物理或是化學性保護避免有機質被降解，土壤有機質可停留在土壤結構孔隙之中（間），避免與能分解土壤碳的微生物或酵素接觸，此為物理性保護作用。土壤中常見的礦物也被發現可以緊密附著在土壤有機質上，兩者間的交互作用則為化學性保護的關鍵。

### 土地利用形態影響大 土壤退化使碳儲量大減

聯合國「泥土固碳技術前瞻報告」指出，自農業出現以來，估計約有 1,330 億噸碳因土壤有機物流失和土壤侵蝕而釋放到大氣中；約有 3,790 億噸碳因砍伐和焚毀森林而釋放。土壤碳匯對氣候的變化非常敏感，全球的土壤碳匯正受到土地利用及氣候變化的影響，逐漸失去它的功能、增加溫室氣體的排放以及加速全球暖化。

目前因為土地利用的改變（如森林砍伐）或相關的土地活動（如耕犁、植物體燃燒、殘株移除、過度施肥、沖蝕及溼地排水等），每年約造成 7~21 億噸的土壤碳損失，而目前有大約 33%的土地因沖蝕、鹽化、壓實、酸化及汙染而出現中到高度的退化問題，導致大量土壤有機碳流失，進而引發土壤生物多樣性的減少或經濟生產力和土壤的複雜性下降。土壤退化是永續發展、生物多樣性保護、緩解和適應氣候變化的主要挑戰之一。

當土壤退化時，土壤中的碳會隨著氧化亞氮排放到大氣中，這使土地退化成為影響氣候變化的因素之一。自 19 世紀以來，估計有三分之二的土壤和植被碳儲量已經因土壤退化而喪失。

### 護土固碳抵消人類排碳 有利達淨零排放目標

隨著氣候暖化，世界各國開始思考如何減緩氣候對農業、人類及生態功能的傷害，國際氣候變遷委員會第 26 次會議希望各國在 2050 年前達淨零排放的目標。法國於 2015 年聯合國「氣候變遷綱要公約」締約國大會提出「千分之四倡議」，認為利用土壤固碳，全球透過減少森林砍伐並調整農業耕作的方法，改變農業生產的方式，增加土壤碳庫的碳封存，並期望於表土 30~40 公分中每年提高土壤有機碳含量 0.4%，這些增加的土壤碳匯剛好可以抵銷人類每年排放的二氧化碳量，進而停止大氣碳庫中碳素的增加，減緩氣候變遷的威脅。

環保署 2021 年《國家溫室氣體排放清冊報告》指出臺灣每年每個人平均碳排放量約 10.96 公噸，若依花蓮大農大富的平地森林（占地約 1,250 公頃）每年每公頃碳吸存約 10.9 公噸估算，想以造林達成 2,300 萬人民的碳中和的話，約需要 2,300 萬公頃的森林，這等於要 6 個臺灣大小的土地種滿樹。地球土壤所含的碳是陸地生態系統中最大的，幾乎是大氣中的 3 倍，是陸地植被碳庫的 2~3 倍，每年吸收的二氧化碳約占人類排放總量的 25%，因此土壤碳匯才是我們需要努力的目標。

### 土壤保育措施 優先改善農耕模式

氣候變遷嚴重的影響到農業生產，而現今農業耕作模式，過度翻土和整地，使土壤中的有機碳大量被微生物分解形成二氧化碳逸散回大氣，則加速土壤劣化及二氧化碳排放。因此減少耕犁、直接播種、種植覆蓋作物，以及增加有機栽培都可護土固碳。

護土固碳是國際趨勢，包括臺灣的各國紛紛推動相關政策。歐盟制訂 2020~2030 年的氣候和能源計畫，串聯土壤保護的潛在效益與溫室氣體減排的目標，

計畫內容主要為保護與管理土壤有機物質及永續利用無機肥料（尤其是氮肥）與糞肥。農委會在 2021 年訂出減排、增匯、循環及綠趨勢為農業部門執行淨零排放的四大主軸，目標是負碳農耕模式與土壤碳匯，推出土壤保育措施包含平地造林、果園草栽培、添加生物炭、糞肥再利用、綠肥與有機農業。

以自然為本增加土壤功能 降低氣候變遷衝擊最有潛力

良善的管理土壤有機碳不僅可避免對全球環境不利的結果，更可增強土壤功能及其對生態系統的服務，減緩有機碳損失最便宜有效的方式不外乎造林、永續森林管理、減少林木濫伐。農業上則減少在農耕地上的耕犁、輪作、整合營養鹽的管理，在休耕時期栽種覆蓋作物（特別是豆科作物）、栽種多年生作物及添加有機質肥料或資材，都有助於增加土壤功能，甚至增加土壤碳及作物產量。增加土壤碳匯抵消溫室氣體排放，這種以自然為本的方式，可能是目前降低氣候變遷衝擊最有潛力的方式，並帶來更多附加價值：健康的土壤可維持生物多樣性、涵養水源、確保糧食安全等，在在都是永續發展目標中不可或缺的重要關鍵。