

# 千分之四倡議—健康的土壤是氣候變遷及糧食危機的救贖金鑰

◎國立臺灣大學森林環境暨資源學系·邱祈榮

◎林業試驗所福山研究中心·李俊佑 (myco2324@tfri.gov.tw)

## 一、人類的末日前夕—氣候變遷、人口爆炸及糧食危機

2015年「聯合國氣候變化綱要公約第21屆締約國大會」(COP21)通過了巴黎協議(Paris agreement)，為人類樹立未來數十年對抗氣候變遷的方略，惟人類存續的危機並未就此消失。當2050年叩關，人類面對的將不只是可預見的極端氣候，還有屆時全球超過96億人口所形成的巨大糧食需求。或許，還想寄望再次的綠色革命，自土壤壓榨出更多產能？殊不知，養育人類的土壤亦病入膏肓。

## 二、千分之四倡議—讓我們「還碳於土」

面對氣候變遷、人口爆炸及土壤劣化的多重困境，法國農業生產暨林業部(Ministry of Agriculture, Agrifood and Forestry)部長Stephane Le Foll，在COP21的周邊會議(side event)，高聲提倡「千分之四倡議(four per thousand or four per mil initiative)」，其主張由病徵處著手—自供應糧食、卻又貧瘠不堪的農業土壤切入，藉適當的農業經營增加土壤有機物(soil organic matter, SOM)，進而促進土壤碳吸存，並改善劣化的土壤。

## 三、土壤有機物—急遽流逝的土壤生命泉源

土壤有機物(SOM)是由土壤各分解階段、不同分子量大小的有機聚合物及有機單體所組成<sup>1</sup>，其源自輸入土壤的生物殘體(如枯落物、死亡的細根及死亡的生物軀體)、根系分泌物等(圖1)。SOM對於土壤性質有多方面的益處，如：提高土壤保水力、提升陽離子交換容量、減緩土壤沖蝕、提供生物能量來源及增加土壤生物多樣性，富含SOM的土壤，將能驅動物質循環，使植物茁壯，動物繁衍，人類得以存續。另一方面，SOM富含碳(平均占58%)，全球儲存在SOM中的碳—即土壤有機碳(soil organic carbon, SOC)，約在1500 Gt<sup>2</sup> C及2400 Gt C (分別為1 m深及2 m深土壤的有機碳庫)(IPCC, 2013)，為陸域生態系最大的碳庫(carbon pool)，賦予SOC在碳循環舉足輕重的角色。

然人類文明初萌至今，人們周而復始耕作，經濟發展及生產不斷榨取土壤資源。頻繁的耕犁、表面壓實及接踵而來的侵蝕，使全球流失133 Gt的土壤有機碳(Sanderman et al. 2016)，更致全球約40%面積的耕地土壤嚴重劣化(Oldmen 1992)。

<sup>1</sup> 圖1有關SOM形成概念，採Johannes Lehmann及Markus Kleber (2015)提出的土壤連續體模型(soil continuum model)，而不採傳統土壤學以腐植質(humus)為中心的論述架構。此因現今的科學證據，已證實自然界的土壤並無傳統鹼萃取(alkali extraction)定義的「腐植質」，不宜再以腐植質模型說明SOM形成過程。

<sup>2</sup> Gt即為Giga tons = billion tons = Pg = 10<sup>15</sup> grams; C=carbon。

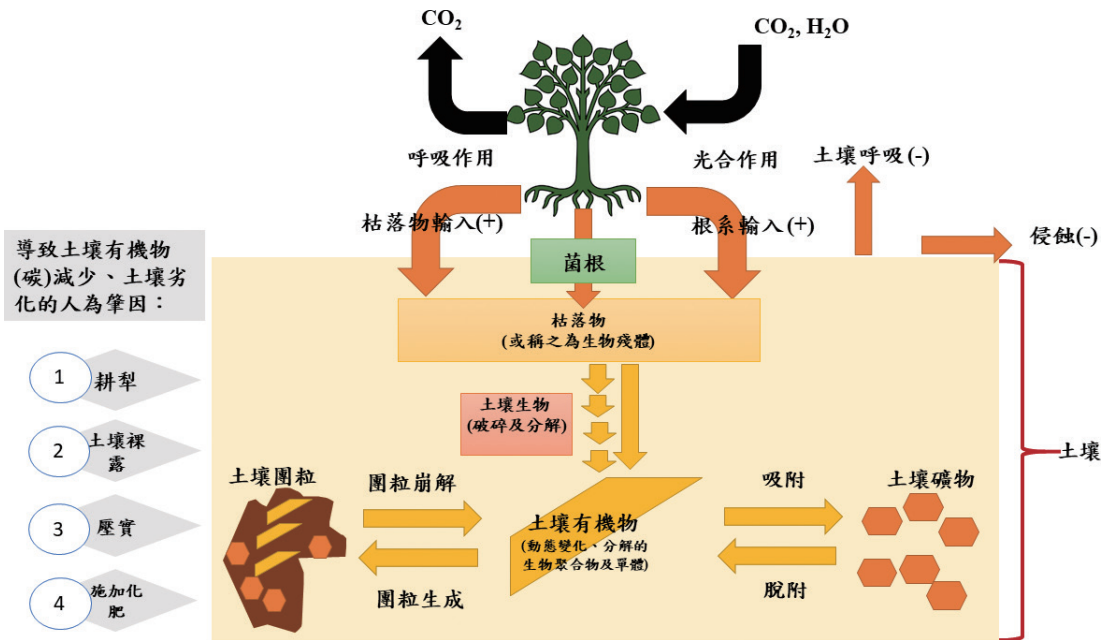


圖1 土壤有機物的動態與生成機制，其中SOM的形成過程採取土壤連續體模型(soil continuum model)的概念。

#### 四、倡議的內容——一個願景、三個議題、四個需求及十二項聲明

千分之四倡議指出，若以適宜的管理方式微幅提高土壤有機碳庫—不多，只要增加原碳庫的「4%」，即能吸存高達6 Gt C的SOC。此吸存量已足夠抵銷導致氣候變遷的主要溫室氣體— $CO_2$  (carbon dioxide)的淨增加量<sup>3</sup> (2000至2009年間，平均年碳淨增加量為4.3 Gt C yr<sup>-1</sup>)；另一方面，吸存的SOC亦能改善土壤性質，促使貧瘠的土壤恢復產能(圖2)。

綜觀倡議的宗旨，在以適宜當地經濟、環

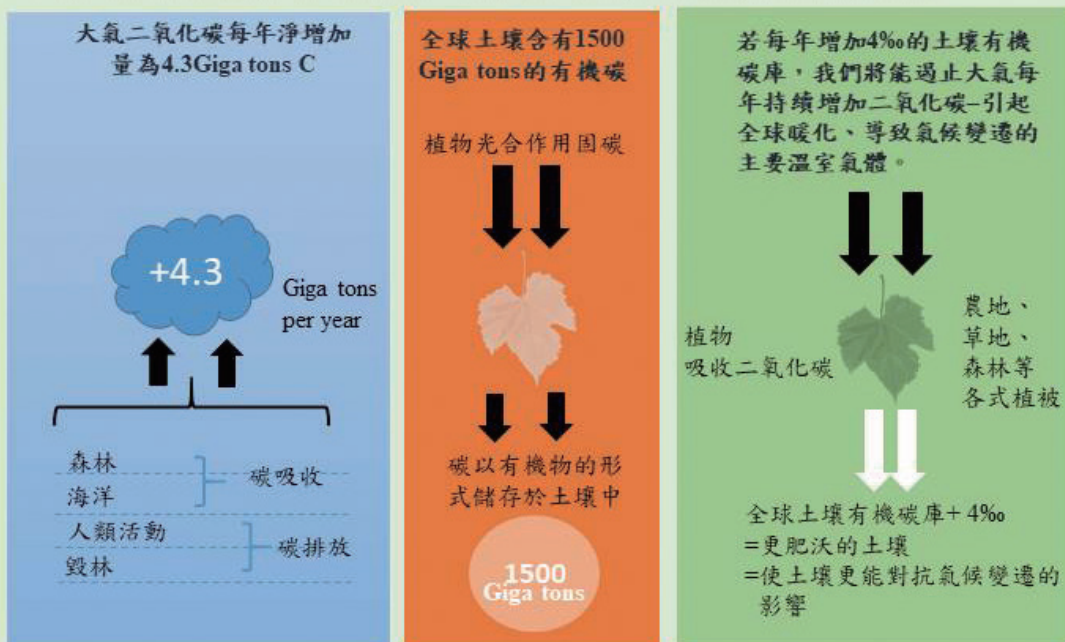
境及社會條件的農業施作方法，改善土壤(尤其是農地土壤)有機物並促進土壤吸存碳。按倡議公開的意向聲明書(Declaration of intent)、宣傳摺頁及官網，內容可歸納如表1。

簽署倡議的利益關係人，如貿易機構、非政府組織、研究機構、政府、贊助者及私人公司承諾遵循上開聲明，致力於促進土壤碳吸存(尤其是與糧食生產相關的農業土壤)，採用適當的土地及土壤管理方法，將現有農業轉型為具產能、高恢復能力的新型農業，因此產生更多工作機會及收益，而促進人類永續發展。

<sup>3</sup> 有關「千分之四」數字的源頭，含本文所採，共有三說。第一說，則指出人類活動的二氧化碳排放量估計為8.9 Gt C year<sup>-1</sup>，陸地生態系的土壤碳庫(表土以下2m)為2400 Gt C，若每年能增加4%的土壤碳庫，則足以抵銷人類活動所放的二氧化碳(Adame 2015)。第二說，論理基礎為，土壤表層土壤(表土以下40 cm)土壤有機碳庫為860 Gt C，若每年增加4%的土壤碳，則足以平衡人類活動之碳排放，然此二說與IPCC(2013)的資料略有出入，故本文不採上述兩說。其實，縱千分之四倡議官網亦有兼論上述諸說的情形。

## 千分之四倡議的理論及原則簡介：

千分之四的土壤碳吸存量-確保糧食安全及減緩氣候變遷



### 土壤如何吸存更多碳？

- 避免土壤裸露，則土壤有機物將更豐富，土壤有機碳含量亦隨之增加。
- 迄今保護森林及復育森林是主要對抗氣候變遷的方法，但我們也可以從以下五項原則促使土壤有機碳含量增加，以減緩氣候變遷：



「此國際倡議可調和糧食安全及對抗氣候變遷兩項目標，因而吸引COP21中關注此類議題的成員。」  
法國農業生產暨林業部部長Stepane Le Foll 表示。

圖2 千分之四倡議的理論及原則簡介(翻繪自原圖，千分之四倡議官網：<https://www.4p1000.org/>。所使用圖片符合公眾領域貢獻宣告 (CCO Creative Common) 規定)

表1 千分之四倡議的內容 (內容歸納並翻譯自<https://www.4p1000.org/join-initiative>)

<input type="checkbox"/>	<b>願景</b>
◆	以千分之四的土壤碳吸存量減緩氣候變遷並確保糧食安全。
<input type="checkbox"/>	<b>議題</b>
◆	土壤劣化及糧食安全問題。
◆	氣候變遷。
◆	促使農業適應氣候變遷。
<input type="checkbox"/>	<b>需求</b>
◆	促進農業及鄉村永續發展，並推廣採用維持或增加農業土壤碳儲存的措施。
◆	鼓勵各界進行研究計畫，以增進有關土壤碳儲存的相關知識，並獲取相關農業科技改善土壤碳儲存的成果及復育土壤的方法。
◆	支持參與式經營並加強教育訓練，輔導農民及一般民眾採用倡議提倡的施作方式。
◆	分享與倡議相關領域的專案、行動、經驗及成果，尤其是科學研究成果。
<input type="checkbox"/>	<b>聲明</b>
◆	強調確保糧食安全、農業的氣候變遷適應力、確保糧食品質與數量、自然資源永續經營、經濟、社會發展及物質遺產的保護是迫切必要的。
◆	關注全球約33%的土壤正遭受劣化威脅，而氣候變遷加劇土壤劣化。提升土壤碳庫，將能扭轉土壤劣化，並且能提高土壤因應氣候變遷的適應能力。
◆	認知森林、混農林業及樹木在地景尺度扮演保育土壤碳的角色。
◆	希望在農業徹底發揮生產潛力以保障糧食供應無虞時，亦貢獻於 室氣體減量貢獻己力。
◆	重申維持富含碳的土壤並復育改善劣化農業土壤。健康的土壤是食物生產及其他生態系服務之必需。
◆	重申可提升土壤碳的農耕方式、土壤健康管理系統及地景經營方法（如：生態農業），有益於自然資源及生物多樣性的保存。
◆	認知維持或增加土壤有機碳是農業及永續發展政策的難題。
◆	強調具科學基礎的嚴謹監測及評估系統，並適當地投資於建構正確的行動指導方針。
◆	期望能促成農民、土地所有權人及鄉村地區協力合作，採用因地制宜的耕作方法及地景管理，以增加土壤有機碳含量。
◆	重申以融資及分配計畫促使人們採用符合倡議的施作方法，並結合現行對抗土壤劣化、氣候變遷的融資機制。
◆	重申保障現有土地使用權人的權益，包含非正式權力及其所有權，以符合土地權屬負責任治理自願性方針、以確保漁業及林業符合國際糧食安全準則及國際農業及糧食系統負責投資原則。
◆	深信農業及土地管理部門夥伴的行動及承諾，將能促進頒行合宜的政策，並將適宜的資金挹注給倡議不同部門的成員。

## 五、如何達到「千分之四」？

究竟，有哪些農業實行措施(practice)可以達成「千分之四」願景及目標呢？茲謹自倡議所推薦、目前學說肯認或自倡議原則歸納出的實行措施中，擇定較可能於我國實行者，分項概述如下：

### (一) 混農林業 (agroforestry)

混農林業是有目的地將林木、作物及(或)動物形成交互作用組合的實行措施，以獲取多樣的利益及服務，如：增加作物產量、減低糧食危機、增強環境服務及農業生態系的恢復力，其可概分為林木間植系統 (tree intercropping)、複層營造系統 (multistrata system)、混林牧作業 (silvopasture) 等不同類型 (Lorenz and Lal 2014)。

在混農林業框架內，農業與林業不再是涇渭分明的兩種經營方式。林木從礙眼的雜木搖身一變，成為工作木(working tree)或施肥木(fertilizer tree)，發揮驅動養分循環及保護土壤的功能，而使土壤吸存更多的碳。然，混農林業的土壤碳吸存量尚會因植物特性、農業生態環境、土壤性質、混農林業類型等因素，而有很大的變異 (Nair et al. 2009)。

### (二) 保育型農業 (conservation agriculture)

保育型農業是強調整體性的保護土壤健康的農地管理辦法，它包含四個基本原則：植株殘體覆蓋(residue mulch)、覆蓋性作物或輪作(cover cropping or rotation)、整合式養分管理(integrated nutrient management)及無耕型農法(no-till system)。保育型農業的經營模式，除

能減少破壞土壤結構，避免水及風對土壤的物理侵蝕，減少土壤有機碳的流失及分解，尚可挹注無機養分及有機物，因而促使地力恢復。

### (三) 生物炭施加(biochar application)

生物炭是指有機物在低氧及相對低溫(通常燒製溫度<700 °C)的環境下，經熱裂解製造之富含碳的產物(Lehmann and Joseph 2009)。生物炭具高孔隙率、高比表面積、高表面電荷及難分解的特性，可提升土壤的保水能力、提升土壤通氣性、提高養分吸附能力，並可改善酸性土壤養分缺乏的情況。另一方面，原先易分解的有機物，經熱分解作用轉變為穩定的結構，可於土壤保存很長的時間，大幅延長生物質碳回歸大氣的時間，進而減少大氣的二氧化碳濃度。惟生物炭的應用仍存許多不確定因素，應經更為審慎的田間試驗評估後，方宜推行。

### (四) 劣化地復育造林

造林的減碳功能，自京都議定書時期(Kyoto Protocol)便已受公眾肯認，惟除林木的碳吸存效果外，其根系及枯落物輸入土壤，亦能將有機碳儲存在土壤中。本法雖無直接紓解糧食問題，惟在劣化地或農地邊際土地的復育造林，亦能間接幫助糧食生產，例如以地景尺度觀之，海岸防風可庇護毗鄰農地，免受鹽沫傷害，因而維持農地生產力。

## 六、臺灣可能達成千分之四的目標嗎？

迄2016年11月16日止已有超過200個團體(共33國)簽署千分之四倡議巴黎聯合聲明，而成為締約團體論壇的成員，另有80個團體簽署了倡議意向聲明 (declaration of intention)，

成為倡議協會的一員。我國亦不落人於後，業於2016年11月14日由行政院農業委員會農業試驗所代表我國簽署，成為締約團體論壇及倡議協會的成員

評估「千分之四」在臺灣的可行性，首先需著眼臺灣土壤有機碳庫及土壤碳吸存潛力。研究報告指出，臺灣森林的現存的有機碳庫推估為114 Mt<sup>4</sup> C (表土下30 cm)及160 Mt C (表土下1 m) (Tsai et al. 2010)，現存耕地土壤的有機碳庫則分別為38.2 Mt (表土下30 cm) 76.4<sup>5</sup> Mt (表土下1 m)，土壤有機碳庫總計為152.2 Mt及236.4 Mt (Minasny et al. 2010)。

然而，估算SOC吸存量在臺灣是個艱鉅難題。由於調查方法不同、時間間隔長短、土地使用歷史的差異及樣本數不足等因素，難以精確地評估臺灣的SOC吸存量。目前有限的資料顯示，有機耕作經營的耕地土壤表土下30 cm的碳吸存量達0.74~1.33 Mt C year<sup>-1</sup> (Minasny et al. 2010)，廢耕土地的新植造林地則為0.51 Mt C ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> (Lin et al. 2011)，其碳吸存潛力介於臺灣的千分之四SOC吸存量0.61 Mt C year<sup>-1</sup>間，暗示如採用適宜的經營方式，臺灣的土壤碳吸存量或有潛力達成千分之四的目標。

## 七、結語及林業展望

千分之四倡議給予了人們舒緩糧食供應壓力、減緩氣候變遷的美麗願景，人類彷彿終於在社會、經濟及生態的多重壓力間隙

中，找到了一線曙光。但千分之四倡議並非毫無缺陷，已有學者批評該倡議過於樂觀地估計土壤有機碳庫量、忽略碳飽和 (carbon saturation)、土壤氮養分限制、全球暖化對土壤呼吸量的影響，並且未考量SOM後續分解的問題 (Baveye et al. 2017)，然而這些批評與質疑，似仍不宜抹煞千分之四倡議向世人揭櫫土壤之於人類永續發展的重要價值。千分之四與其說是一個特定的數值，不如說是一個概念，一個歷史性的典範轉移，即土壤及農業將是全球重大議題—氣候變遷、糧食危機及環境污染的解決辦法(Lal 2016)。

對於臺灣的林業而言，除應責無旁貸地承擔保護森林、劣化地復育造林及海岸林造林的責任之外，似也可從混農林業及生物炭兩處貢獻己力。林業主管機關或可作為引領先鋒，自法規面及試驗面與農業連結，於山村地區著手，如：輔導慣行農業轉作混農林業、鼓勵非環境敏感區位內的私有林地地主採用混農經營模式及建立良好標準化的生物炭供農林業使用。在下一個堪比「黑色風暴」、抑或更劇烈全球變遷災難襲來之前，林業或應跳脫自我侷限，與農業適當結合奉行千分之四倡議，協力維護土壤的健康，為人類爭取永續發展的金鑰。♻️

<sup>4</sup> Mt (Mega tons) = 10<sup>6</sup> tons = Tg (Tera grams) = 10<sup>12</sup> grams

<sup>5</sup> Minasny et al. (2017) 原文係引述Jien et al (2010)的資料，推估耕地土壤碳庫為38.5 Tg及77.0 Tg。惟經比對兩文獻，其耕地面積並不相符，經核算後推測Minasny et al. (2010) 是採較近期的臺灣耕地面積資料，經換算得到之數值，故筆者採我國105年度耕地面積資料調整其推估數值。