

79

國立宜蘭大學

農業推廣季刊

國立宜蘭大學農業推廣委員會 農業推廣(季刊)

通訊總號第 079 號 中華民國 106 年 03 月 出刊

發行人/邱奕志 主編/蔡呈奇

地址：260 宜蘭市神農路 1 段 1 號

E-Mail：acc@niu.edu.tw

中華民國 86 年 3 月 創刊

行政院農業委員會補助編印

編輯/林怡慧

電話：03-9357400#7613

傳真：03-9354152

什麼是生物炭(Biochar)？

蔡呈奇

國立宜蘭大學 森林暨自然資源學系

摘要

生物炭是一種木炭的形式，藉由森林和農業廢棄物、城市垃圾或禽畜糞便等天然有機燃料透過低氧或缺氧下不完全燃燒的過程(熱裂解(pyrolysis))而來。已有文獻證實生物炭可以提供相當大比例的土壤有機碳(soil organic carbon, SOC)，可有效的改良劣化的土地，且能減少土壤重金屬(銅、鋅)、有機汙染物及農藥的施用量。生物炭本身除了作為一種可再生能源外，其生產過程所產生的合成氣體(synthetic gas)亦可轉換成熱能及能量使用。前人研究已表明生物炭結合在土壤中可以促進植物生長，提高農作物產量，生物炭所提供的優點包括：(1)增加土壤有益的生物量、(2)提高植物對土壤磷(P)利用的有效性、(3)加強陽離子交換能力(cation exchangeable capacity, CEC)、(4)提供長時間穩定的碳吸存、(5)改善植物根系穿透力的限制、(6)減少氧化亞氮(N₂O)的排放量、(7)促進植物固氮作用、(8)降低農藥的施用量以及(9)調節土壤酸鹼度。

生物炭除了提高土地利用效率外，對於減緩溫室氣體排放的影響也是備受關注。為了減少燃燒石化燃料所造成的二氧化碳排放量，造林復育為主要碳補償(Carbon offset)的手段之一，但據前人研究所提出有關造林碳補償有兩個主要的問題：(1)造林的碳補償持續時間；(2)造林項目發生洩漏性(Leakage)，基於洩漏性的來源及有限的時間內，學者推斷其不足以補償燃燒化石燃料所產生的二氧化碳排放量；反觀生物炭，為一種含有多環芳香族碳氫化合物(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs)，其特性較頑強(recalcitrant)，結構穩定不易腐爛，因此能更有效的長期吸存碳於土壤中，這就是負碳(carbon negative)，即可不斷增加碳匯(carbon sink)於土壤中。對改善土壤及環境而言，生物炭為一種較低廉且低技術的有益工具，但現今研究報告主要源於熱帶地區，對實際應用在非熱帶氣候土壤尚有許多不明確的變數，特別是在不同的氣候條件，其中溫度因素可能影響生物炭的元素組成、表面化學和吸附特性，進而影響到生物炭的效用，因此瞭解不同氣候條件下土壤與生物炭之間的關係與交互作用，為目前生物炭的研究中相當受到重視的部份。

關鍵詞：生物炭、氣候變遷、土壤碳吸存、土壤品質

生物炭(Biochar)簡介

生物炭(biochar)為一種富含碳(carbon-rich)的固體物質，在限制氧氣供應(即裂解)的環境下加熱生物質(biomass)後所產生的產物，可加到土壤中當做吸存碳的方法與維持或改善土壤的功能。天然有機生物質燃燒產生的黑碳(black carbon)會形成相當大比例的土壤有機碳。由於黑碳的芳香族結構(aromatic structure)的頑抗特性，使得黑碳有將碳長時間封存在土壤中的潛能。學者估計每年土壤儲存黑碳及木炭(charcoal)的量大約為 $0.05-0.2 \text{ Pg} (10^{15} \text{ g}) \text{ C yr}^{-1}$ 。



土壤中添加不同比例的生物炭後土壤顏色的變化(由左而右分別添加0、2、4與8%)

傳統的木炭(charcoal)的生產是經過熱裂解(pyrolysis)的過程(傳統的或緩慢的熱裂解)將CO₂封存在木材生質組中。當熱裂解發生在是在無氧或低氧時的燃燒(或燒焦)源自生物的組織時就會產生'生物炭'。生物炭的生產是藉由在低氧下”烘烤”有機物質(熱裂解(pyrolysis))。熱裂解後約50%的生物質碳可以被保留在生物炭中，但是回收率與熱裂解過程有高度的相關。這些生物炭中所包含的主要礦物元素的含量，與燃燒前原料(feedstock)中所包含礦物元素的含量間有直接的相關。生物炭合併入土壤中會影響土壤的構造、質地、孔隙度、粒徑大小的分布與密度。生物炭的分子結構顯示出高度的化學及微生物的穩定性。大部分生物炭的主要物理性特徵為高度多孔結構和大表面積，這種結構可以提供有益土壤微生物的避難所(refugia)，例如如菌根(mycorrhizae)及細菌(bacteria)，並影響重要的養份陽離子和陰離子的結合，這種結合可以提高巨量營養素的可利用性，例如N和P。生物炭對土壤其它的改變包括土壤pH值的鹼化、增加電導度(EC)及陽離子交換容量(CEC)，氮的淋洗作用會伴隨著土壤的一氧化二氮(N₂O)的排放而減少，也可能會減少土壤的機械阻抗(mechanical impedance)。施用生物炭對土壤田間容水量(soil field capacity)的改善也有所記錄。有證據表明，施用生物炭可以增加主要養分的生物有效性(bioavailability)與植物吸收(plant uptake)，尤其是添加的養分存在的情況下。已經有研究指出，生物炭添加入土壤中顯著改善植物生產力的程度與添加量有關，但這些研究主要來自熱帶地區的研究報告。



不同溫度處理下的雞糞生物炭[CMP為肉雞糞(含墊料)造粒後燒製；A為肉雞糞(含墊料)不造粒後燒製；C為蛋雞糞(不含墊料)]

1. 生物炭的物理和化學性質

生物炭的物理性質的是瞭解土壤中生物炭的功能與做為吸存大氣中CO₂的潛在途徑的關鍵。施用生物炭可以影響土壤結構，質地，孔隙度，粒徑分佈和密度，從

而有可能改變在植物根域附近土壤空氣的氧含量，土壤水分儲存容量以及微生物與營養的狀況。當然土壤的水分境況也會影響生物炭的穩定性，影響程度依所使用燃料(feedstock)的原始特性而異，在低溫所產生的與源自不穩定燃料的生物炭更容易被改變。生物炭本身顆粒大小的不同似乎對於作物產量有顯著的影響，但是在一些研究中顆粒大小在2-20 mm之間沒有影響。生物炭是一種含有多環芳香族碳氫化合物與一大群其它官能基的碳質的材料。一些生物炭的高度多孔結構含有大量可萃取的腐質酸(humic acid)及黃酸(fulvic acid)，它們的分子結構呈現出高度的化學/微生物的穩定性，依賴環境轉化(turnover)需耗費千年的時間。生物炭的異質性組成意味著它們的表面能夠表現出親水性、疏水性、酸性和鹼性的性質，這些都有助於生物炭與土壤溶液中的物質互相反應。生物炭的物理及化學特性的變化是取決於生產原料的物質，以及在熱裂解過程中氧氣和溫度的可得性。描述生物炭的主要特性是很重要的，有助於我們了解生物炭利用對於農業的影響，其中關於礦物質有效性的資訊更是特別有意義，有助於我們瞭解生物炭施用對於植物生長的潛能。

(1) 養分

來自糞肥(manure)與堆肥(compost)的有機生物質都包含有大量的碳及巨量、微量營養素，雖然生物炭的來源燃料會改變這些主要的巨量元素(如N與P)以及一些金屬元素(如Ca與Mg)的有效性，我們仍然可以施用以這些有機質為來源的生物炭到土壤中。由於生物炭中主要元素的出現與否與一開始所使用的燃料中該元素的含量有直接的關係，因此燃料與熱裂解的狀況會影響礦物質元素能否轉移到生物炭中。即使在不同的熱裂解環境下生產，燃料中的養分值仍然可以以相對不同程度被保存下來。在生物炭中，養分的含量與有效性可能很低，例如氮與磷。生物炭中碳與氮的比值因為燃料與熱裂解環境不同而有許多的變異。這個比值不僅會影響生物炭頑抗的特性，也會影響礦質化作用(mineralization)過程中C和N釋放的類型。其次，碳的頑抗性質會限制N的固定化反應。在很多研究中發現，有些間接性的施用生物炭會引起土壤鹼化作用(alkalization)，進而增加土壤的硝化作用(nitrification)。

(2) 化學性質

生物炭添加到土壤中會導致土壤pH值、電導度(EC)、陽離子交換容量(CEC)和養分濃度的變化。生物炭的添加會造成土壤pH值的提高，並不令人意外，因為已有充分的證據可以證明，利用像是木材灰分(wood ash)的物質可以改變土壤pH與養分的有效性，特別是P和K。CEC的提高主要由於有機質表面每單位面積的電荷密度提高所致，相當於有較高程度的氧化作用，或吸附陽離子的表面積增加，或包含兩者。儘管只是溫室的生物炭試驗，氮的淋洗作用都會減少(60%)，而在某些情況下可以減少N₂O的排放。在亞馬遜河的田間土壤試驗中的其他的研究已經證實，生物炭確實可以作為吸附劑(adsorber)以降低N的淋洗作用及增加氮素的利用效率。為維持未來人口的成長，氮的利用效率是絕對需要的。為了實現這個目標是需要更瞭解關於生物炭對於硝化作用及氮有效性的(直接與間接)影響。有些生物炭可以減少重金屬(Cu和Zn)和其他有機土壤污染物(如殺蟲劑)的移動性。施用生物炭可以減少在低pH值時會對植物生長產生毒害的元素的有效性，例如Al、Cu及Mn，而其他元素的有效可能會增加，因為施用生物炭導致土壤pH值的提高，進而促進例如N, P, Ca, Mg與Mo的可溶性。

2. 生物炭造成作物生產的變化

研究報告中經常提出生物炭應用於土壤中可以提高農業生產力。90%以上的研究學者都指出，作物產量因生物炭誘導而提高是顯而易見的，而學者認為依據生物炭添加量的不同，植物生產力的顯著增加量在20%至220%之間。施用生物炭會提高農業產量的重要性與施用的程度有關，而且對於任何嘗試去發展實惠地利用熱裂解產物於土壤中的系統而言，這也是一個重要的趨動力。提高農業產量並不是唯一的考量(碳吸存也是非常重要的)，但它需要在農業試驗長期的投資。

(1) 水分關係

土壤含水量是主要取決於土壤質地和降水率。土壤水有效性是決定全球農業生產力的關鍵因素，但是會因為氣候變遷而惡化。增加土壤有機質可能會增加水的有效性。已有研究指出生物炭的添加會改善土壤之田間含水量。在砂質地土壤中添加生物炭來提高土壤水分含量(soil water content)或土壤水分容量(soil water holding

capacity)似乎能得到更大的益處，亦即在高黏粒含量土壤中所得到的效果會低於施用生物炭於砂質地土壤中。在有些研究中生物炭施用可以提高土壤水的滲透性，但是在高黏粒含量的土壤中卻是一種挑戰，這些作者還也表明，生物炭的施用會提高土壤水分容量。生物炭施用土壤中對於土壤水分保存的潛在可能性相當大，也需要更多適當的試驗來評估，當進一步的氣候變化影響更廣大的農業區域，使得新鮮的水分開始枯竭時，施用生物炭的重要性更不可被忽視。在永續農業的生產上，保護土壤的含水量與提高植物可吸收的有效性水分量的機會是個關鍵因素。

(2)作物營養

氮是限制作物最大產量的限制因子中，最重要的限制因素。生物炭的研究中表明儘管在燃燒中會大量揮發損失不穩定的氮(70-90%)，木炭殘留物可能含有相當數量的元素，這些作者也指出生物炭中氮的含量在21-370 mg kg dw⁻¹之間。在有些研究中，木炭(charcoal)的添加會提高磷的養分生物有效性與植物的吸收，鉀、鈣、鋅和銅也會如此，而氮的淋洗作用會下降。在不考慮生產的溫度下以土壤孵育試驗的結果，生物炭的添加一般具有提高土壤溶液中可抽出性磷(extractable P)(PO₄³⁻)的潛能。最近的研究強調，對於不同的生物炭在不同的土壤與氣候中所扮演的養分角色，需要更多批判性的理解。

結語

化學肥料的施用在台灣農地土壤管理系統中已行之有年，在合理化施肥尚未落實之前，也有不少過度施用化學肥料的情形。隨著永續農業的發展，土壤資源的永續性管理也漸受重視。有機質在耕作的環境下會加速礦化，被作物吸收或是流失，若只施用化學肥料而沒有有機質的補充，有機質含量將日漸下降。施用豬糞堆肥於台灣農田土壤中，可增加作物產量及品質，亦可減少化學肥料施用過度造成的土壤品質之劣化及有機質含量偏低的問題。但是施用豬糞堆肥時可能的環境風險包括過多的硝酸態氮與磷進入地下水，長期施用可能造成重金屬在土壤中的累積，重金屬可能被作物吸收累積造成產量降低或是進入食物鏈。身處在熱帶與亞熱帶氣候帶交界處的台灣，具有多變的氣候條件與土壤類型，但是針對生物炭目前並沒有系統性

與科學性的研究在進行。從促進土壤釋放養分、增進作物生長、減少豬糞堆肥的施用量，以及節能減碳與碳封存的角度來看，生物炭在臺灣地區應有很大的應用潛力。