

臺灣農業廢棄物製備 生物炭之未來與展望

撰文/蔡佳儒·吳耿東

生物炭的定義與起源

生物炭 (biochar) 可作為固態燃料，或與土壤摻配，作為土壤改良材料，具有復育土壤、促進作物生長及固碳之效果。根據國際生物炭倡議組織 (International Biochar Initiative, IBI) 所採用的定義中，作為農業資材之生物炭為一種纖細且具有多孔性結構的顆粒，外觀與一般燃燒所產生之焦炭 (charcoal) 類似，並且由生質物如木材、樹葉等有機物質，在反應溫度小於 700°C 並於密閉空間中，限制氧氣的狀況下加熱分解所產生的固態物質，而這些物質必需要有目的地應用在農業土壤以及環境保護上，即可稱為生物炭；而農業領域方面常見應用於改善土壤性質、增加作物產量等功用 (Lehmann and Joseph, 2009)。

Marris (2006) 在《自然》期刊 (Nature) 中提到，將木炭置於土壤中，可用來改善土壤的性質，而早一個世紀約 1879 年左右，美國自然學家 Herbert Huntingdon Smith (1851-1919) 就注意到在巴西的亞馬遜河雨林區域附近的土壤，所種植出來的作物產量高、品質好，例如甘蔗可高達 3 公尺以上，且莖桿有手腕粗的情形，較普遍的甘蔗種植情況好很多，此種土壤在當地被稱為 « Terra Preta »，在葡萄牙語中即「肥沃的黑色土壤」之意，近來的研究已顯示，Terra Preta 土壤是添加了由有機物，像是烹煮食物時利用木材當燃料，燃燒不完全後所產生的炭黑 (black carbon)，在此炭黑的影響下，Terra Preta

具有高濃度的氮、磷、鉀及鈣等營養成分，另外也含有相當多穩定的多環芳香結構有機物 (Glaser *et al.*, 2001)，在化學以及生物上的抵抗力較好，所以使得 Terra Preta 具有相當高的穩定性可以留存到現在。

在農業應用領域上，添加了生物炭的土壤，在 pH 值、陽離子交換能力 (cation exchange capacity, CEC)、保水能力 (water holding capacity, WHC) 等性質均有提升的現象。在與菌根共生的環境中，也會使得養分的生物可利用性與菌根菌群棲化的能力增加 (Lehmann *et al.*, 2003)，另外，生物炭的應用也改善了水分及礦物質成份在作物生長時的可利用性，在適當生物炭添加下，土壤中的養份含量增加，作物吸收後使得產量得到了提升 (Hidetoshi *et al.*, 2009)，而生物炭在裂解 (pyrolysis) 後所得到的多孔性結構，使得內部孔隙的表面積較其他材料大，因此具備良好的吸附效果，能夠吸附土壤中的有機污染物，並且減少作物對污染物的吸收 (Yu *et al.*, 2009)。在目前溫室氣體過度排放所導致的氣候變遷現象日趨嚴重的狀況下，將大氣中之二氧化碳藉由光合作用與熱裂解的方式，被轉換為固定之生物炭的形式，透過碳吸存 (carbon sequestration) 的概念來達到二氧化碳減量的目的，對於環境保護上亦存在一定的價值。

生物炭對植物生長之影響

將木炭應用於農作土壤改良材料的行為，在目前的農業社會中是相當的廣泛，當生物炭摻混於

土壤中時，由於自身的結構、組織、多孔性等，改變了土壤中的孔隙及粒徑大小分布、密度等條件，造成直接或間接的影響到土壤的性質，例如水或空氣在作物根部區域的滲透性、保留陽離子的能力、調節周遭環境溫度等。植物可利用的礦物質及有機物的部分，主要是藉由吸附作用留存在土壤中，我們無法改變特定土壤中的礦物質，但是卻可以去改變其在土壤中的含量。當增加土壤中的有機物含量時，土壤的陽離子交換容量會提升。由於生物炭具有高比表面積、高表面陰電荷 (negative surface charge) 以及高電荷密度，所以使得生物炭在每單位碳中所吸收的陽離子量較其他的土壤有機物高 (Lehmann *et al.*, 2004)，且添加了生物炭的土壤，在磷酸鹽的吸收能力上也較好 (Lehmann, 2007)。

Glaser *et al.* (2002) 也指出，將炭應用於農作物生長時，除增加土壤本身的 pH 與能夠利用的養分含量，另外也可以藉由增加陽離子交換能力來改善養分的留存，以及提升了一些土壤的物理性質，像是土壤水分的留存與聚集等。Asai *et al.* (2009) 則在調查添加生物炭在土壤中做復育時，發現寮國北方高地所種植的稻米，在使用生物炭後，會改善了土壤表層的飽和水力傳導度 (saturated hydraulic conductivity, SHC) 以及稻米木質部運輸水分的流動速度 (xylem sap flow, XSF)。Yamato *et al.* (2006) 的研究顯示，利用印尼製漿產業中所產生的大葉相思樹樹皮廢棄物，燒製成樹皮木炭 (bark charcoal)，當作土壤改良材料應用於農作物玉米、花生以及四季豆的生長，對於作物的產量上都有大幅上升的趨勢，並且在土壤中叢枝菌根菌的群棲化速率上，也有增加的情況，土壤的化學性質在經過檢測後也有所改善。

生物炭的添加，也會影響土壤的生物地質化學 (biogeochemistry) 以及微生物族群間的關係，自從菌根菌 (mycorrhizal fungi) 被廣泛的應用在土壤接種方面，對於其添加生物炭的相互關係，便開始有大量的研究與探討出現。生物炭與菌根群叢普遍是

以共生的關係存在於土壤的生態系統中，並且存在著許多重要且多樣、提供生態系統的服務，例如維持植物的生長、生態系統的修復等，更甚至是彼此之間所潛在的連合作用，對土壤的品質也造成正面的影響。Warnock *et al.* (2007) 則統整過去生物炭及菌根菌群叢之間相關的實驗結果，提出四種生物炭有可能去影響到菌根菌的反應機制，包括 (1) 生物炭的添加導致土壤中養分的可利用性以及土壤的物化性質改變，影響到植物與菌根菌之間的交互作用；(2) 生物炭的添加改變了土壤中其他微生物的活性進而影響菌根；(3) 生物炭的添加改變了植物與菌根菌之間的訊號傳遞；以及 (4) 生物炭提供微生物棲息地，並做為防止食用菌絲的動物侵犯的避難所。

在這些機制之間，由眾多的實驗數據與結果來看，大多傾向第一種機制較為可靠，但是在機制方面，並不會只有特定專一的現象出現，有可能會同時存在，而這樣的構想也為未來的研究提供了指引的方向。實驗的結果也顯示出，生物炭與菌根菌共生關係上的連合作用，使植物生長的幅度較一般狀況下生長的還要大，所以我們可以利用機制探討作為出發點，在未來的研究中，實際去驗證這些機制所代表的重要性與可信度。

生物炭的特性

儘管生物炭的利用已獲得各國的重視，但是除了上述所言之生物機制外，生物炭本身的物性與化性，如生物炭孔隙度、製備溫度等，則缺乏研究，使得因各研究使用生物炭的條件差異甚大，在植物生長與土壤的研究上亦有諸多差異。圖一為添加 10% 相思樹木材焙燒 (250-350°C) 與炭化 (500-600°C) 生物炭對小白菜作物種植後 30 天全株乾重之影響 (吳耿東, 2013)，圖二為添加 10% 柳杉生物炭的小白菜作物種植 30 天後的實物圖 (吳耿東, 2013)。由圖中可知，隨著製備溫度的升高，小白菜乾重亦有增加之趨勢，但過高製備溫度的生物炭，特別是添加活性碳 (900°C 製備)，並未有較佳之表現，亦即添加過高溫度製備的生物炭，作物乾重逐漸下降，顯

示其不太適合作為土壤添加材料。此外，圖一亦顯示，使用 500°C 製備的生物炭可達 5 倍之多的最佳作物產量，(吳耿東, 2013)。

此一現象與生物炭之孔隙性質有關，與焙燒物比較起來，炭化後之固體產物具高孔隙性質，其比表面積及孔洞數量高出焙燒物許多，孔洞也較小，對於土壤內養分的留存、釋放與分佈可以較為均勻，有助於作物的生長。但是過於高溫製備之生物炭雖具更小的微孔，反而造成養份被吸附留存後不易釋放，如活性碳並不適合作為促進作物生長之利用，因為其大量的微孔具有強大的吸附能力，且無法釋放已吸入之土壤營養，僅可作為污染防治的用途(吳耿東, 2013)。

因此，生物炭的物性與化性對植物生長的影響有可能是第五個反應機制，仍有待進一步進行更多的探討。

生物炭的製備

生物炭的性質會因原物料、製程反應條件的不同(如溫度範圍、升溫速度、反應時間等)而有所差異，並會影響到生物炭的產量、物理及化學性質與組成。生物炭的原料範圍分布相當的廣泛，例如木

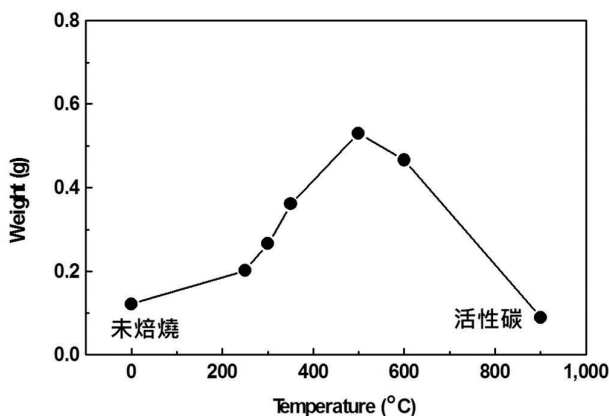
材碎屑、稻桿、椰子殼、稻殼等生質物，目前大多利用農業廢棄物作為原料以降低成本。

目前國際間未並開發專門生產生物炭之商業化設備，現階段生物炭的來源大都由生質物的熱化學能源轉換設備取得，但這些設備在不同操作程序，以及不同的反應溫度及持溫時間下，其所得之固態生物炭、液態焦油及氣態合成氣(syngas)產物之比例均有很大的差異(吳耿東等, 2011)。目前大部分用於農田或進行研究之生物炭大都來自生質物裂解設備的副產物，主要原因係其操作溫度較高，生物炭的產量較多、品質佳，且屬粉末狀，較易利用；而經炭化(carbonization)製程所生產的木炭，要添加於土壤前需先行破碎，且木炭是炭化程序的主要產品，供作燃料之用(烹煮用居多)，價格較貴，用於土壤會增加種植成本。此外，新近發展的生質物焙燒技術(torrefaction)，雖可作為農業廢棄物之前處理技術，以供能源利用，但其操作溫度較低，生物炭的品質較差，並不太適合供土壤添加使用。

因此，若能開發專供土壤添加用生物炭的生產設備，則除可生產生物炭為其主產品外，液體副產物則可經精煉，作為綠色化學品，所產出之氣體副產物也可回收作為能源之用。

臺灣農業廢棄物製備生物炭之潛力

根據調查，國內具潛力之生質料源種類可分為生質廢棄物、農林剩餘資材、禽畜糞尿三大類，其中生質廢棄物(乾料源)包括一般廢棄物及一般事業廢棄物；農產剩餘資材(乾料源)共 49 類，包括稻草及稻殼 2 類、雜用作物 12 類、果樹剪定枝 35 類；林產剩餘資材共 3 類，包括林木伐區剩餘、竹子，及漂流木等乾料源資材；家禽及家畜(共 6 類)，含雞、鴨、鵝、豬、牛、羊之糞尿濕料源，其中乾料源如表一所示，高達 1,275,777 公噸(錢建嵩, 2011)。若不計林木和竹林剩餘資材，以及漂流雜木，僅僅在稻草、稻殼、果樹剪定枝，以及雜糧作物剩餘資材等，國內每年未經利用之農業剩餘資材，亦即乾料農業廢棄物，亦達 1,211,579 公噸。上述乾料農業廢棄物



註：添加10%相思樹生物炭，種植30天。
資料來源：吳耿東(2013)。

圖一 添加生物炭對小白菜全株乾重之影響



註：添加10%柳杉生物炭，種植 30天。
資料來源：吳耿東（2013）。

圖二 添加不同製溫度生物炭進行小白菜種植

表一 國內農林剩餘資材潛勢分析

料源	剩餘量 (公噸)	水分 (%)	占比 (%)
稻草稻殼	695,256	7-10.6	60.5
雜糧作物剩餘資材	259,591	8.0-60.0	13.1
果樹剪定枝	256,732	7.1-40.0	21.6
林木剩餘資材	312	30.0	0.0
竹林剩餘資材	53,198	43.0	3.8
漂流雜木	10,688	40.0	0.9
合計	1,275,777	--	100.0

資料來源:錢建嵩（2011）。

若利用 10% 作為生物炭之利用，在 500°C 製程、50% 產率下，每年可生產 6 萬多公噸的生物炭供農作生產使用。

依據 2014 年的統計資料顯示，目前我國耕作地面積達 748,613 公頃，長期休閒地亦有 50,999 公頃（農委會，2015），若以添加 0.5% 生物炭（土深 30 公分）計算，則每年每公頃土地約需 20 公噸生物炭，則前述 6 萬多公噸的生物炭可供 3,000 公頃農地使用，雖僅占 0.4% 耕作土地總量，但以作物產

量 5 倍計算，則已相當於 2% 的耕作土地。假設將乾料農業廢棄物全數作為生物炭利用，則可供 3 萬公頃土地利用，作物產量相當於 15 萬公頃的耕作土地，占我國耕作地面積的兩成。生物炭的利用不僅可提高物產量，亦可改善長期休閒地的土壤性質，可增加耕作地面積，創造出無限商機。

儘管目前國內農林剩餘資材豐富，但因料源分散，導致收運困難，因此，唯有就地利用進行分散式資源化或能源化，不僅可解決廢棄物處理的環保問題，亦可具能源與資源回收之雙重貢獻。

結語

生物炭的利用不僅兼具環境與資源的雙重的「減碳」效益，當其埋入土壤中時，亦有助於減少溫室效應氣體的排放，達到「固碳」效果，延緩地球溫暖化的趨勢。因此，目前溫室氣體過度排放所導致的氣候變遷現象日趨嚴重的狀況下，若能將大氣中之二氧化碳藉由植物行光合作用與熱化學轉換技術的方式，轉換為固定之生物炭的形式隔離，必可改善溫室效應所導致之全球暖化、氣候變遷現象等急迫的環境問題。

同時，若能充份利用國內農業廢棄物資源，轉

換為可用之生物炭農業資材，可使國內農業廢棄物更有效達成多目標用途，並可藉以提高國內農業廢棄物之利用效率；生物炭的利用不僅可復育荒廢休耕之土地，也可增加單位土地面積的作物產量，兼具資源、環保與經濟三重貢獻，達到永續經營之目標，為臺灣建立永續發展的良好基礎。

誌謝

承行政院農業委員會林務局提供相關經費，進行「木質材料焙燒與炭化應用於農業資材之開發」研究，使得生物炭之相關研究得以順利進行，謹此誌謝。

AgBIO

蔡佳儒 國立中興大學 森林學系研究助理
吳耿東 國立中興大學 森林學系副教授
兼環安中心環保組組長

參考文獻

1. 行政院農委會 (2015) 103年農業統計年報。行政院農委會。
2. 吳耿東 (2013) 木質材料焙燒與炭化應用於農業資材之開發(3)。行政院農業委員會林務局101年度科技計畫期末報告，臺北。
3. 吳耿東、楊凱成、胡博誠 (2011) 流體化床氣化技術。化工技術，221：126-137。
4. 錢建嵩 (2011) 我國農林廢棄物料源潛力。我國垃圾焚化爐轉型為地區生質能源中心之生質物能源及資源應用發展專家諮詢研討會，臺北。
5. Asai, H., Samson, B. K., Stephan, H. M., Songyikhangsuthor, K., Homma K., Kiyono, Y., Inoue, Y., Shiraiwa, T. and Horie, T. (2009) *Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield*. Field Crops Research 111:81-84.
6. Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G. And Zech, W. (2001) The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88:37-41.
7. Glaser, B., Lehmann, J. And Zech, W. (2002) *Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review*. Biol Fert Soils 35:219-30.
8. Hidetoshi, A., Samson, B. K., Stephan, H. M., Songyikhangsuthor, K., Koki, H., Yoshiyuki, K., Yoshio, I., Tatsuhiko, S. and Takeshi, H. (2009) *Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos. 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield*. Field Crops Research 111:81-84.
9. Lehmann, J. (2007) *Bio-energy in the black*. Front Ecol Environ 5:381-387.
10. Lehmann, J. and Joseph, S. (2009) *Chapter 1: Biochar for environmental management: An Introduction*. In: Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan Publications Ltd., UK. pp.1-9.
11. Lehmann, J., Kern, D. C., Glaser, B. and Woods, W. I. (2004) *Amazonian Dark Earths: origin, properties, management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherland, pp.125-137.
12. Lehmann, J., da Silva Jr., J. P., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W. and Glaser, B. (2003) *Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments*. Plant and Soil 249:343-357.
13. Marris, E. (2006) Black is the new green. *Nature* 442:624-626.
14. Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuypere T. W. And Rilling, M. C. (2007) *Mycorrhizal responses to biochar in soil - concepts and mechanisms*. Plant Soil 300:9-20.
15. Yamato, M., Okimori, Y., Wibowo, I. F., Anshori, S. and Ogawa, M. (2006) *Effect of the application of charred bark of Acacia mangium on the yield of maize, cowpea and peanut, and soil chemical properties in South Sumatra, Indonesia*. J Soil Sci Plant Nutr 52:489-495.
16. Yu, X. Y., Ying, G. G. and Kookana, R. S. (2009) *Reduced plant uptake of pesticides with biochar additions to soil*. Chemosphere 76:665-671.