生物炭——淨零排放的最後一哩路

文／吳耿東

前言

為避免因氣候變遷對我們所居住的地球造成嚴重影響，逐漸上升的全球氣溫需限制在比工業化前高 1.5oC 的範圍內，但因溫室氣體的排放持續增加，目前地球溫度已比 1800 年代末期高出約 1.1oC。因此，2015 年 12 月 12 日在法國巴黎舉行的第廿一屆聯合國氣候變遷大會（COP21）上，196 個締約國通過了《巴黎協定》（Paris Agreement），亦即要將全球暖化控制在 1.5oC 以內，則全球溫室氣體的排放量需要在 2030 年前減少 45%，而在 2050 年前達到「淨零排放」（Net Zero）。淨零排放也就成了近十年來全球重要的氣候行動，2021 年在英國格拉斯哥（Glasgow）舉辦的第廿六屆聯合國氣候變遷大會（COP26）上，140 多個國家已承諾要在 2050 年達成淨零排放的目標；我國亦在 2021 年 4 月 22 日世界地球日宣示，2050 淨零轉型是全世界的目標，也是臺灣的目標。

在眾多削減溫室氣體的方法中，英國皇家學會（Royal Society）和皇家工程學會（Royal Academy of Engineering）在 2018 年發表「移除溫室氣體」（Greenhouse Gas Removal）報告（Royal Society and Royal Academy of Engineering, 2018），在 12 項去除溫室氣體的技術中，具碳捕獲與儲存之生質能源（bioenergy with carbon capture and storage，BECCS）及生物炭（biochar）是眾所矚目的負碳排（carbon negative）技術，特別是生物炭的應用已被公認為淨零排放的最後一哩路。

生物炭可與土壤摻配，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，且讓我們來看看，生物炭有何神奇之處，為何是負碳排的技術？

生物炭的定義與起源

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、樹葉等有機的農業剩餘資材或農業廢棄物，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；蔡佳儒、吳耿東，2016）。

很難想像，生物炭可能已有千年的歷史了。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，而早在一個世紀約 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，如圖 1 所示。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性較好，所以使得 Terra Preta 具有相當高的穩定性可以留存到現在。

另一方面，就減碳而言，生質能的基本觀念來自利用反應過程的二氧化碳淨排放被視為零；當植物行光合作用，吸收陽光、二氧化碳及水分後，產生氧氣，並促進了植物的生長；而後再將植物取之作為燃料，在產生能源利用的過程中，其所釋放之二氧化碳再回到大氣中，形成一沒有增加二氧化碳淨排放的循環，也因此生質能被列為再生能源的一種（吳耿東，2008）；另一方面，若循環中的二氧化碳可以被抓下來，以氣體、液體或固體形式被封存（如把二氧化碳打入地底儲存，即 BECCS 程序）或固定於土壤（如固體生物炭），而不回到大氣中，這就從零碳變成了負碳，如圖 2 所示。當然，生物炭埋入土裡而形成負碳機制，也要有其特別的效用，才值得埋炭入土；能促進植物的生長，就讓生物炭值得埋入土中，成為淨零排放的最後一哩路。

圖 1、亞馬遜河雨林區土壤使用生物炭種植玉米之情形（右圖施用生物炭，左圖沒有施用）圖片來源：國際生物炭倡議組織（IBI）

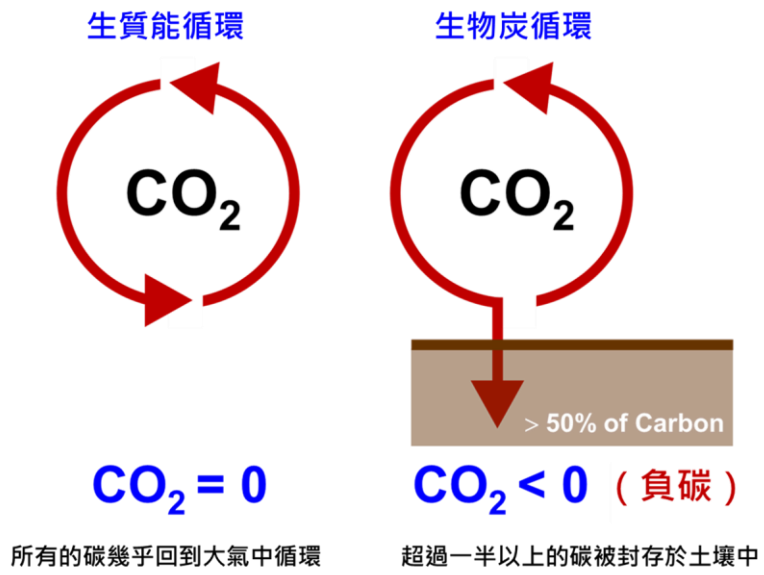

圖 2、生物炭的負碳機制

生物炭如何促進植物的生長

一般而言，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（mycorrhiza）共生的環境中，也會使得養分的生物可利用性與菌根菌（mycorrhiza fungi）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，也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）。

Warnock et al.（2007）曾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。在這些機制中，第四個機制特別有意思，生物炭提供微生物作為棲息地及避難所（Swift et al., 1979; Kawamato et al., 2005; Glaser, 2007; Hockaday et al., 2007; Warnock et al., 2007）正是生物炭的「孔洞」，這些孔洞也形成了可貯積養份及水份的儲藏室。也就是說，這些孔洞好比是為微生物所建造的房子，讓這些微生物可以「安居樂業」，圖 3 是生物炭孔洞的照片（Lehmann and Joseph, 2009），表 1

則為生物炭孔徑與不同微生物尺寸比較表（Lehmann and Joseph, 2009）。

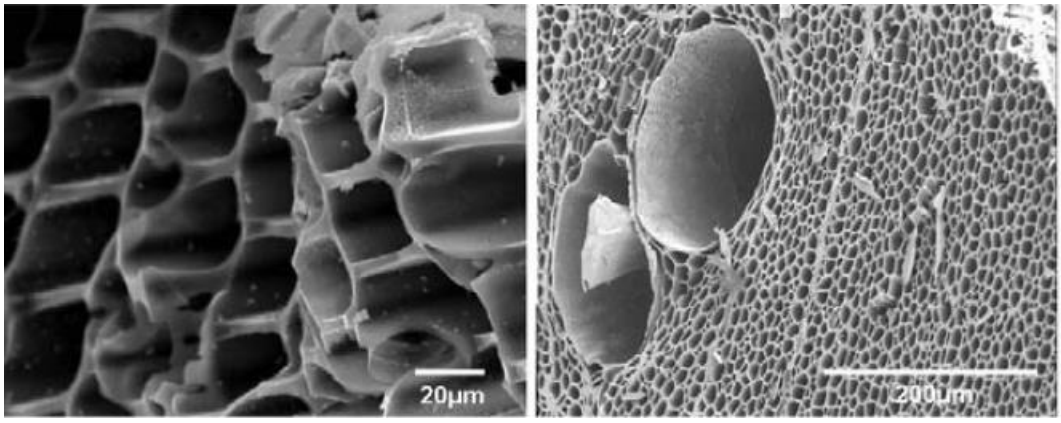

圖 3、生物炭的孔洞

圖片來源：Lehmann and Joseph, 2009

表 1. 生物炭孔徑與微生物尺寸比較表（Lehmann and Joseph, 2009)

	直徑範圍 (Diameter Range) (μm)	眾數 (Mode) (μm)
竹炭	0.001–1000	0.1
木質生物炭	10–3000	1,495
細菌	0.3–3	0.5
真菌	2–80	8.0
原生動物	7– 30	20.0
線蟲	3– 30	16.0

生物炭的特性

僅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 4 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 5 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 4 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，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低溫炭化的焙燒物(torrified materials)(即生質煤)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，不適合作為生物炭。另外，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（即只吸不放），僅可作為污染防治的用途（吳耿東，2013）。根據研究顯示，較佳的生物炭製備溫度在 500˚C 至 600˚C 之間（吳耿東，2013），圖 6 即是製備生物炭的炭化操作溫度與炭品孔徑之關係（吳耿東，2023）。

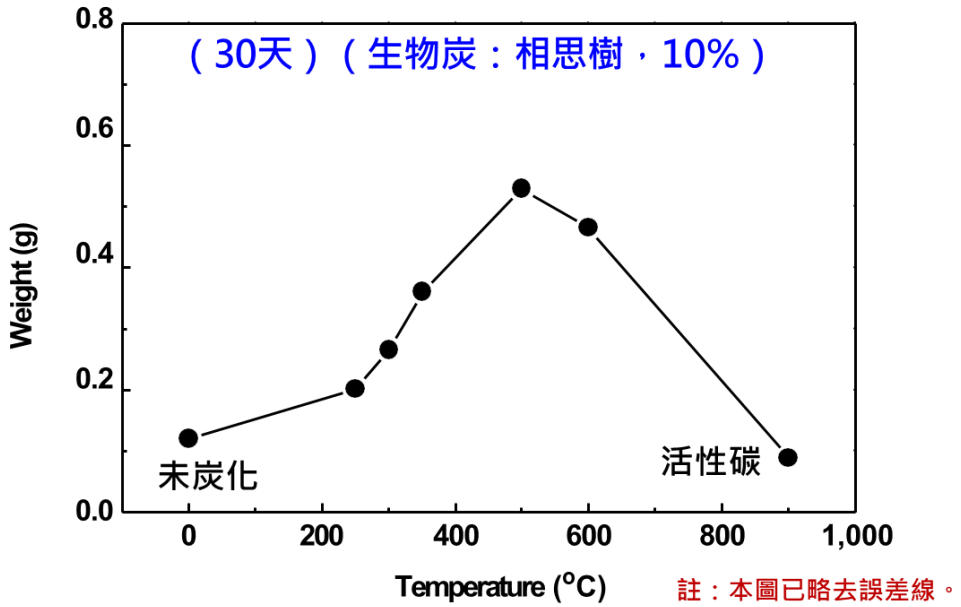

圖 4、生物炭對小白菜生長全株乾重之影響（吳耿東，2013）

圖 5、添加不同燒製溫度生物炭進行小白菜種植 （吳耿東，2013）

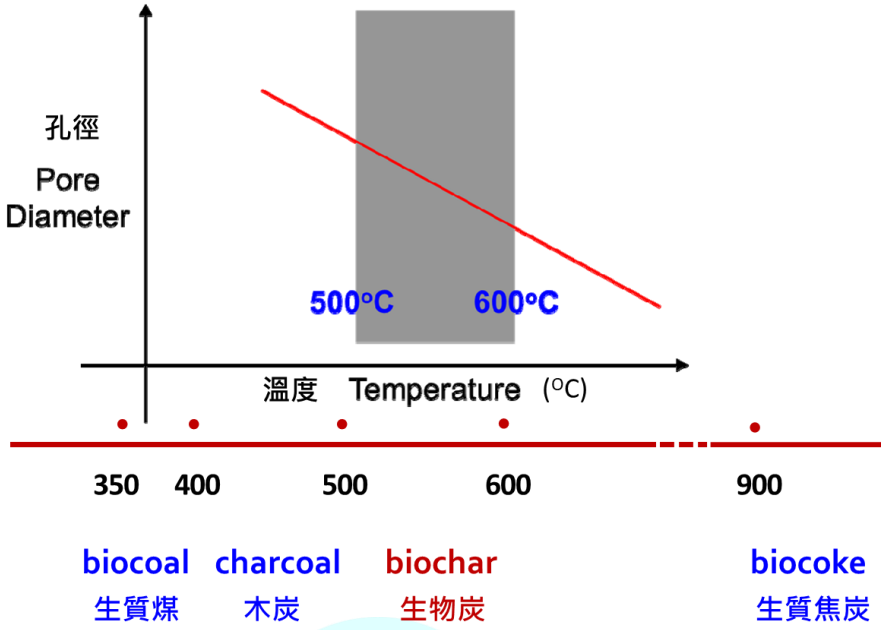

圖 6、炭化操作溫度與炭品孔徑關係（吳耿東，2023）

生物炭的製備

目前國際間並未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多都由生質物的熱化學能源轉換設備取得，且國外大部分用於農田或進行研究之生物炭大多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（torrefication）技術，雖可作為木質材料利用之前處理技術，提供生質物的能源利用效益，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（蔡佳儒、吳耿東，2013；2016）。

因此，要作為一個商業化的生物炭生產設備，即開發專供土壤添加用生物炭的生產設備（專燒爐），必須具備幾個條件，包括可大量生產生物炭、可回收液態副產品（即酢液）以供農業利用、可控制炭化溫度以產製品質良好之生物炭、煙道氣（flue gas）排放需符合環保法規之固定污染源排放標準等。目前常有對施放生物炭有所疑慮者，主要在於部分生物炭會含有多環芳香烴（polycyclic aromatic hydrocarbons，PAH），施於土壤中會產生危害，這是由於在生物炭製造過程中未能有效去除含有多環芳香烴（polycyclic aromatic hydrocarbons，PAH）的氣態產物，而因冷凝後形成液體沾附於生物炭上，多發生於一些簡易的製造設備。

基於上述的設計概念，我們在 2017 年接受農業部林業試驗所的委託，進行「先導

型連續進料多膛爐製備大量生物炭技術開發計畫」（吳耿東，2017；2018），建立一 100 kg/hr 先導型連續進料生物炭製備多膛爐系統，以作為未來生物炭量產設備商業化，以及建立生物炭產銷之商業營運模式之參考。圖 7 及圖 8 為此一連續進料多膛爐（multiple hearth furnace with a continuous feeding system）之流程圖及實體圖（吳耿東，2020），可生產符合國際生物炭產品標準之高品質生物炭。

此外，目前國內尚未有訂定生物炭的品質標準，但仍可依據國際生物炭倡議或歐洲生物炭認證系統（European Biochar Certificate，EBC）（屬自願性的歐盟工業標準）所列之指引（Guidelines）標準（Foundation Ithaka Insitute, 2019）進行檢測。目前幾個重要檢測項目，以 EBC 為例，包括碳含量>50%、H/Corg < 0.7、O/Corg< 0.4，其中 Corg 為有機碳；比表面積（Specific surface area, SSA）> 150，pH> 7.5；另有重金屬的檢測。

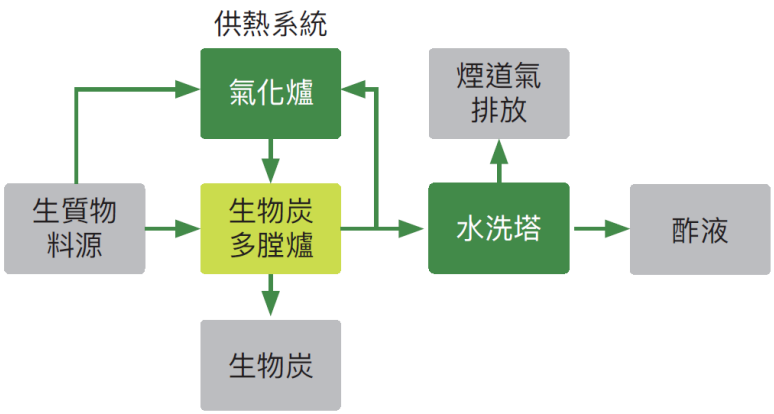

圖 7、國立中興大學連續進料量產生物炭多膛爐系統流程圖（吳耿東，2020）

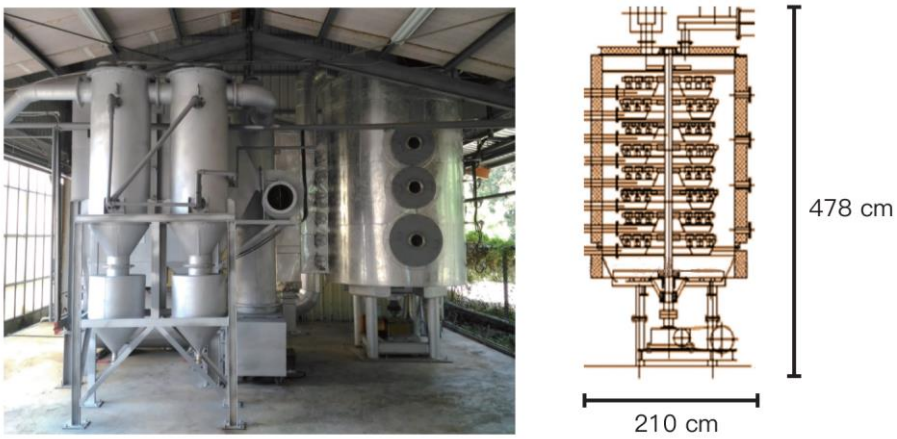

圖 8、國立中興大學 100 kg/hr 連續進料量產生物炭多膛爐實體圖（吳耿東，2020）

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，形成負碳機制，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，同時也可促進植物生長，增加糧食產量。

吳耿東

國立中興大學森林學系

參考資料

[1] 吳耿東（2008）認識生質能源。物理雙月刊，30(4): 377-388。

[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（2017）先導型連續進料多膛爐製備大量生物炭技術開發。行政院農業委員會林業試驗所 106 年度科技計畫研究報告，臺北。

[4] 吳耿東（2018）先導型連續進料多膛爐製備大量生物炭技術開發。行政院農業委員會林業試驗所 107 年度科技計畫研究報告，臺北。

[5] 吳耿東（2020）製炭設備。第二章 製炭技術設備（第一節），臺灣生物炭產製與農業應用指南，農委會林試所、臺灣農業科技資源運籌管理學會，臺北，頁 16-22。

[6] 吳耿東（2023）生物炭燒製技術：多膛爐。生物資材循環利用與 ESG 淨零策略研討會，臺北。

[7] 蔡佳儒、吳耿東(2013)木質材料製備之生物炭應用對植物生長機制之探討。林產工業 32(3): 169-178。

[8] 蔡佳儒、吳耿東（2016）臺灣農業廢棄物製備生物炭之未來與展望。農業生技產業季刊 46: 25-28。

[9] Glaser, B. (2007) Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. Philosophical Transactions of the Royal Society B 362: 187-196.

[10] 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.

[11] Hockaday, W. C., Grannas, A. M., Kim, S. & Hatcher, P. G. (2007) The transformation and mobility of charcoal in a fire-impacted watershed. Cosmochimica Acta 71: 3432-3445.

[12] 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.

[13] Kawamoto, K., Ishimaru, K. & Imamura, Y. (2005) Reactivity of wood charcoal with ozone. Wood Science 51: 66-72.

[14] 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.

[15] 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.

[16] Marris, E. (2006) Black is the new green. Nature 442: 624-626.

[17] Royal Society and Royal Academy of Engineering (2018) Greenhouse Gas Removal, Royal Society, London and Royal Academy of Engineering, London.

[18] Swift, M. J., Heal, O. W. and Anderson, J. W. (1979) Decomposition in

[19] terrestrial ecosystems. University of California Press, Berkeley, USA.

[20] Warnock, D. D., Lehmann, J., Kuyper, T. W. & Rilling, M. C. (2007) Mycorrhizal responses to biochar in soil – concepts and mechanisms. Plant Soil 300: 9-20.

[21] 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.