



由國際生物炭產業趨勢 看臺灣農業應用發展之新契機（上）

李宜映¹·陳韋辰¹·邱祈榮²·林俊成³

一、前言

面對日益受到資源限制與氣候變遷的農業生產環境，各地都在尋求解決的策略，近年來生物炭（biochar）被認為具有改善土壤、促進作物生長及固碳之效果，可減少溫室氣體排放，作為減緩氣候變遷程度的手段。單看每種用途，均可以開發現具備相當經濟和環境機會的多元產品（Groot, *et al.*, 2016）。雖然生物炭是近期才被重視的產業，但使用生物炭來改善土壤作為土壤管理策略手段，已是發展數世紀之久的文化。長期施用生物炭的土壤含有高濃度的氮、磷、鉀、鈣等養分且富含有機質，與相鄰土壤相比有明顯差異，具有較高的生產力和含碳量，許多文獻證實生物炭長期在土壤中能穩定存在，作為固碳之工具。生物炭的潛力被認為是正面的，然而，生物炭廣泛使用的真正潛力尚未開發。從市場角度來看，生物炭的經濟狀況不明朗，因為供需雙方仍在發展，需要進行大量研究，經過科學證明，以瞭解生物炭在大規模應用中的最佳工作方式以及生物炭生產技術的進一步發展（Groot, *et al.*, 2016）。目前生物炭產業正處於起步的階段，但其市場成長卻呈現穩定上升的趨勢。而產業未來的成功與否，將取決於後續投入的研

註 1：臺灣農業科技資源運籌管理學會。

註 2：臺灣大學森林環境暨資源學系。

註 3：行政院農業委員會林業試驗所。

究、資源、政策和公共教育等相關因素。本文由國際生物炭產業現況與趨勢研析，可供後續在國內農業應用上參考。

二、生物炭系統關鍵要素

原則上生物炭可以由任何類型的生物質製成，瞭解不同生產條件如何產生不同類型的生物炭，以及這些生物炭與不同類型土壤如何相互作用，是非常重要的。生物炭系統關鍵的 3 個要素是生物質來源、生產技術以及如何應用於土壤（圖 1）。對於每項要素都有各式各樣的選擇。

（一）生物質來源

生物炭可以由幾乎任何類型的生物質生產，包括農業廢棄物、稻殼、甘蔗渣、紙製品及動物糞便，甚至都市綠色垃圾（行道樹修枝及巨大廢棄物等），原料類型是生物炭類型及其性質的影響因素。如玉米桿與稻殼所產生的生物炭相比，玉米桿生物炭具有相對高的灰分含量（Raveendran *et al.*, 1995）。由於許多不同的生物質類型可用於熱解，所以在選擇生物質原料來源時必須小心，關鍵因素包括其初始水分含量、運輸距離等。然而，重點在於使用「真正的廢棄物」，以盡量減少對當地碳和營養物循環的破壞。

（二）生產技術

生物炭生產系統通常分類為氣化爐或熱解爐，實質上生產 3 種不同的產品，這些產品取決於所使用的技術，即生物炭（固體），合成氣（氣體）和生物油（液體副產品）。熱解系統使用窯爐或蒸餾器，排除氧氣，同時允許熱解氣體或「合成氣」竄出並被捕捉以進行燃燒。熱解系統分為慢速、快速和閃速熱解，快速熱解產生更多的油和液體，而慢速熱解傾向於產生更多的合成氣，且閃速熱解主要產生生物炭。氣化系統通常以氣體生產為中心而不是生物炭或石油生產，並且通常比熱解產生更少的生物炭，這是因為系統刻意引入一些氧氣；存在的氧越少，產生的生物炭越多。

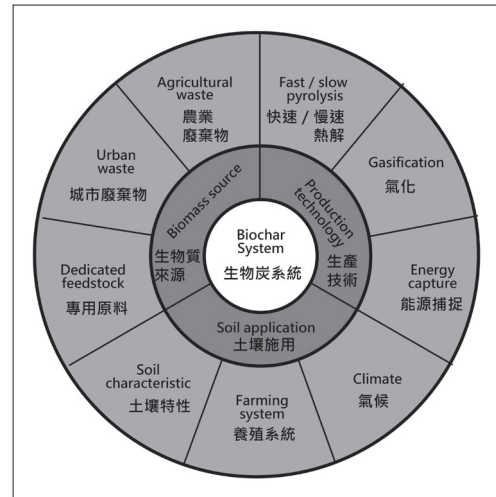


圖 1. 生物炭系統定義的概念。(Scholz *et al.*, 2014)

（三）土壤施用

生物炭的最終用途涉及其對土壤的最終應用。然而，來自熱解或氣化的固體殘餘物也可透過完全燃燒，作為能量或廢棄物處理，或用於各種醫藥、工業或家庭處理。最佳最終用途選擇取決於生物炭生產商的價值和目標，如氣候變化影響、能源生產、土壤肥沃和經濟。

三、生物炭料源與應用領域

任何的有機生物質皆能炭化製成生物炭，但在產業的角度是傾向具大量、連續供應且低成本（包括集貨和運輸成本）的穩定料源，作為生產生物炭的材料，根據目前 100 家業者提供的訊息調查分析，結果顯示生物炭原料的主要為林產業資材（圖 2）。此外，為獲得最大化的環境效益，生物炭的原料來源與產品應用需具有永續發展性，得以實踐永續環境之概念（IBI, 2013）。

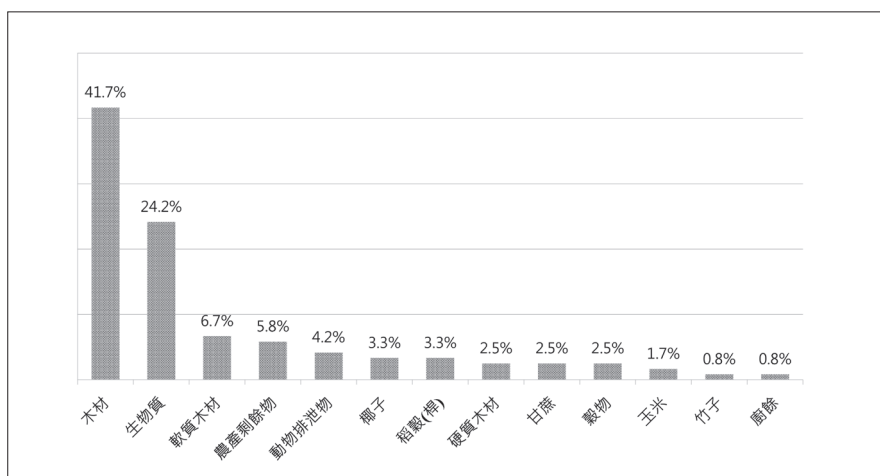


圖 2. 生物炭原料來源比例分析圖。（資料來源：IBI, 2013 State of the Biochar Industry, 2014）

木質生物質包含木材、軟質木材及硬質木材就占了原料總量的 50 % 以上，其次 20 % 為農產生產剩餘資材。整體來看，植物纖維性原料的占比超過 70 %，相比之下動物性來源的畜禽排泄物只有 4 % 左右，可能是排泄物的含水率較高與組成複雜，造成加工上的技術限制與成本考量。此外，林業料源的回收集中程度比農業高出許多，集中在各地區的大型木材工廠，且其料質的高均一性（相較於農產的多樣化）與低含水率，而成為料源首選目標。

生物炭最常作為農業上土壤改良之應用，依目前研究結果其對貧瘠土壤改善的功效彙整如下：（一）增強土壤對碳的封存力；（二）增加土壤保水、保肥力和陽離子交換能力；

(三) 增強作物對肥份的可利用性；(四) 減少土壤中營養的流失；(五) 增加土壤微生物活性；(六) 改善(提高)土壤 pH 值；(七) 增強土壤通氣性、團粒結構、孔隙度及可耕作深度。

一般而言，生物炭對於農耕普遍都是有所助益，但需注意並不是每種生物炭在任何土壤與耕作環境條件下，皆會有正面效益。因生物炭的物化性質不盡相同，如 pH 值、營養元素含量、灰分含量、顆粒大小和表面積等，在某些情況下可能會對土壤與作物健康造成不利影響。因此，建立生物炭品質檢驗的標準規範，及如何施用在適合的土壤性質與種植模式，是國際間未來重要的研究方向。

四、生物炭產業市場發展概況

生物炭的產業型態大致可分為 3 種：(一) 從事生物炭產品的生產與銷售；(二) 從事生物炭生產設備的製造；(三) 從事生物炭諮詢服務及教育訓練等周邊相關事業(圖 3)。目前這些企業主要登記於已開發國家中，有超過一半是在美國，約 1/4 在歐洲。其中生物炭供應業者數約占產業的 46%，設備製造業約為 37%，而周邊服務業約為 17% (IBI, 2013)。

生物炭相關的服務產業其項目是相當多元化的，目前以永續農業發展與生產生質能源為主。在永續農業部分，企業通過分析土壤類型、作物種類、氣候條件、農民能力與可投入資源等因素，提出合適的生物炭生產技術與應用策略，並提供教育訓練和建立周邊設施，以求提高農業生產力。這些顧問團隊多數會與當地社區農民團體、生產合作社或農業發展機構合作，進行生物炭的推廣與應用。

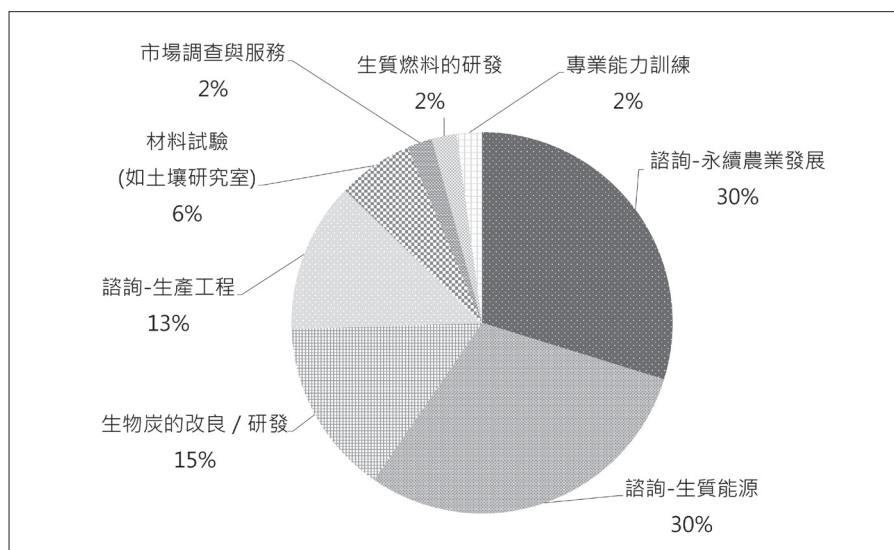


圖 3. 生物炭服務產業的類型與比例。(資料來源：IBI, 2013 State of the Biochar Industry, 2014)

表 1. 農業技能評鑑測驗（初級）前 10 名縣市受測者數量

生物炭價格（\$US/kg），更新至 2013 年 11 月						
國家	數量	平均（純）	平均（複合）	最小值	最大值	標準差
澳洲	1	3.44	—	—	—	—
奧地利	1	0.68	—	—	—	—
加拿大	2	3.47	—	1.50	5.45	2.79
德國	2	3.40	1.85	1.85	3.40	1.10
迦納	1	0.35	—	—	—	—
印度	1	—	0.08	—	—	—
愛爾蘭	1	—	3.40	—	—	—
肯亞	1	—	1.00	—	—	—
菲律賓	2	0.09	0.10	0.09	0.10	0.01
南非	1	—	0.30	—	—	—
西班牙	1	1.83	—	—	—	—
斯里蘭卡	1	0.32	—	—	—	—
瑞士	1	0.66	—	—	—	—
英國	4	5.06	0.41	0.41	8.85	3.55
美國	23	2.74	5.94	0.27	13.48	2.87
合計	43	2.65	3.29	0.08	13.48	2.68

資料來源：IBI, 2013 State of the Biochar Industry, 2014

調查過程中也發現，生物炭的改良與研發是企業間相當重視的課題，這涉及到配方與製程的調整，透過改變生物炭原有特性，可針對特殊用途進行強化與改善。根據超過 45% 受調者表示，研究機關是開發和實施生物炭計畫中很重要的關鍵角色，由於生物炭的特性相當多元，因此將特定原料以特定製程參數，生產出具一致性的生物炭，並進一步開發適合的應用領域，是未來產業發展所需要的關鍵資料（IBI, 2013）。

在生物炭市售產品價格方面，根據國際生物炭組織（International Biochar Initiative, IBI）的 2013 State of the Biochar Industry 報告中，市場調查結果顯示，生物炭未有一致的售價，由於多數企業為小規格的零售經營模式，傾向鎖定銷售小眾利基市場，所以生物炭的售價在各國間存在著巨大差異。相比之下，只有不到 10% 的生產業者為量產規模，供土地整治或大規模農園生產之用。

目前市場的部分生物炭產品都有混入其他原料，包括（按比例排序）堆肥產物、微生物、海藻粉、黏土（礦物質）、動物排泄物及泥炭土。在調查的 43 家企業中，有 26 家只販售純生物炭商品，17 家販售複合性商品，而售價取決於混和成分的價值與比例（表 1）。

由於生物炭目前屬於發展階段的小規模產業，仍持續成長中，根據 16 家企業的調查結果顯示其生物炭年銷售量合計超過 800 公噸，絕大部分（91%）集中在北美與歐洲地區，但全球至少有 62 家企業從事生物炭製造，因此實際生產總量將比統計值高出許多，統計結果亦顯示生物炭作為土壤改良材料具有重要的市場地位。

生物炭供應鏈模型

生物炭供應鏈可分為 5 個部分：生物質生產、原料物流、轉換、配送物流和最終用途（圖 4）。在製造供應鏈中，每個細分市場都包含與物料生產、物流、轉換和最終使用功能相關的各種活動。物料從收穫地點下游沿著供應鏈流向最終用戶，每個活動都會增加價值。物料採購併轉化為中間產品和成品，透過包括搬運、運輸和儲存在內的物流系統向下移動，除物流外，另外 2 個流程對於高效和有效的供應鏈極為重要。訊息沿著供應鏈最終用戶回流向上游，可用於協調活動、改進產品及推進技術，提高生產力並降低成本。參與這些活動的組織之間的金融交易支撐了商業供應鏈中的物質和訊息流動。無論最終產品如何，材料、訊息和資金流量的組織和管理均可滿足最終用戶的需求（Anderson *et al.*, 2017）。

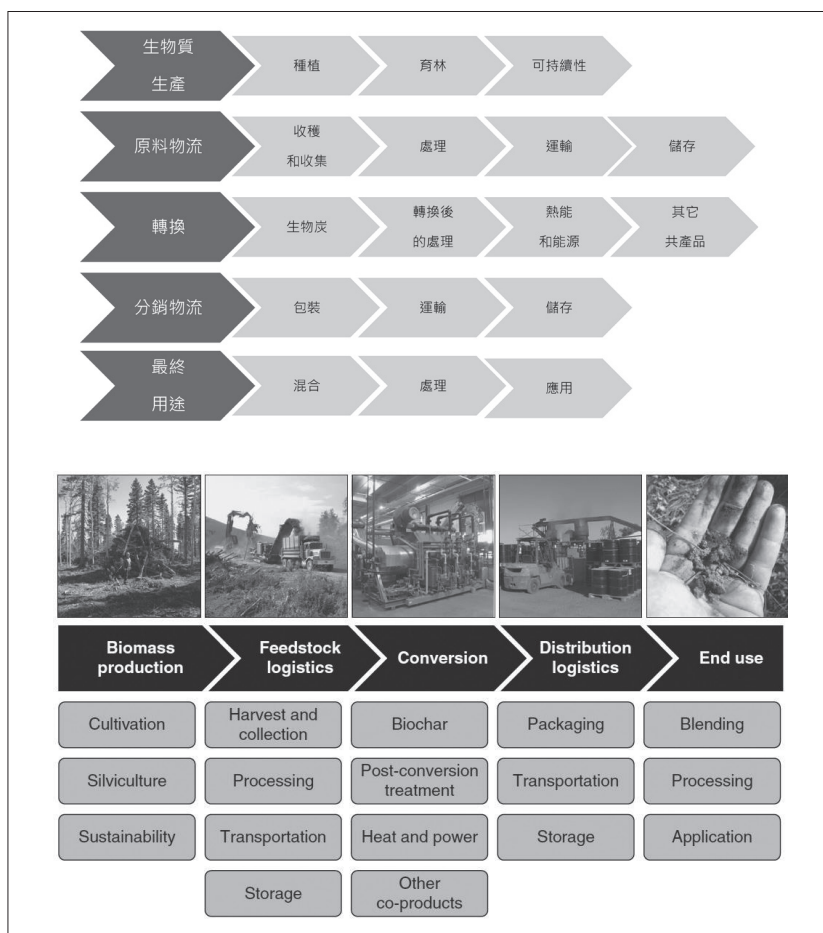


圖 4. 生物炭供應鏈的主要部分以及與物料生產、物流、轉換和最終用途相關的活動。（Anderson *et al.*, 2017）。

（參考文獻逕洽作者）