

第二節

生物炭之安全性

梁瑩如 張敬宜

一、前言

世界各國科學家發現若將農業廢棄物在低氧或限氧的密閉空間下進行熱裂解而成之固態物質，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，當這些物質應用於農業土壤改良以及環境保護目的時可稱為生物炭。生物炭除可單獨利用外，亦可與其他介質混合成複合產品，在農業應用上可改善土壤的物理化學特性（如酸鹼值 pH）、提升土壤的保水力與肥力、減少養份流失、增加作物產量等作為土壤改良劑之用，同時它還能吸附有害物質以及作為延緩溫室氣體釋放的介質，亦即降低土壤中溫室氣體（一氧化二氮或甲烷）之排放。然而當生物炭與土壤摻配時，造成土壤物理化學特性改變，是否同時亦改變土壤周遭之環境，影響作物、土壤微生物、蚯蚓、甚至水生生物等物種；且農業廢棄物經精煉後其重金屬含量是否被濃縮，導致對農作物的傷害，甚至對人畜產生安全之疑慮；或是不同廢棄物種類在不同熱裂解條件下，燒製過程中是否排放具毒性且具致癌性的有害污染物如多環芳香烴 (Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 或戴奧辛 (Dioxins, PCDD/Fs) 等，均是生物炭開發與應用過程中不容忽視的一環。

五、結語

生物炭高鹼性及穩定、不易分解的特性，對改善酸性土壤、質地與孔隙率而言是一項有益的資材，間接影響土壤中水分、氣體、養份的循環、作物的生長及碳匯效益。但生物炭施用於土壤中為不可逆的農業操作，使用前必須確定生物炭合乎標準及安全性，再透過生物炭炭品分級，選擇最適用的炭品種類，建立永續經營環境的農業環境，確保糧食安全。

①

因此，應訂定適合我國的生物炭安全管理規範，供權責單位參考使燒製業者有所遵循，以確保炭品安全無污染疑慮，才可加值應用以達到環境永續的目標。

二、生物炭之安全管理規範

本節主要參考國際生物炭倡議組織 (IBI) 與歐洲生物炭認證機構 (EBC) 對生物炭應用之指引或管理模式，並累積多筆本土炭品的檢測數據，包括稻殼、柑桔、芒果、棗子、文旦柚、番荔枝、番石榴、綠竹及菇包等，訂定我國的生物炭管理規範標準。相關安全管理規範係針對生物炭燒製業者區分為料源（前端）與炭品（後端）等兩方面管控。

料源管理方面，不同料源對其燒製之生物炭的性質和品質有直接影響。雖本節的重點在於生物炭產品本身，但對料源的類別與品質管理亦提供建議。燒製業者應以無污染疑慮環境下的農業剩餘資材作為生物炭產製之料源，如木材、樹葉或稻殼等，但某些料源為了確保後續燒製品質，應設有前處理步驟，如樹木枝條應事先破碎或裁切或菇包顆粒太細需事先造棒等。此外，料源運送至燒製場地因運輸成本考量，可侷限於 80 km 內。就經濟效益而言，簡易爐就地燒製也是一種方式；再者當料源有污染疑慮（如動物排遺等），則燒製前應先完成戴奧辛或重金屬含量檢測，確認合乎標準後才可作為料源。未來若以廣義規範料源種類，可用原來本質是否改變分為一未處理（指料源保有天然型態）與經處理（泛指經化學或生物作用後之產物，已非天然型態）類別，如稻殼、稻草桿、玉米芯、

玉米桿、甘蔗渣、柳枝、芒草、竹子、油料作物殘渣、豆科作物殘渣、麻的殘渣、軟木材（針葉木）、硬木材（闊葉木）等屬未處理類別；糞便（如牛、豬、家禽、羊、馬糞）、造紙污泥、污水道污泥、酒糟、厭氧消化後之污泥、固體生質廢棄物（如木材廢料、建築飾品廢料、廚餘）、食品加工後之廢料等屬經處理類別，若燒製業者使用經處理類別的料源，有責任確保該料源中不得含有害物質，應提出適當的毒性評估資料。然而臺灣地區對生物炭之研究尚在研發中，現階段應以未處理類別的農業剩餘資材為優先，作後續料源燒製條件研究與推廣應用，以確保資源循環的永續性。

炭品管理方面，燒製業者應遵循圖 5-1 之檢測流程。首先進行炭品基本特性之品質分析（分析要項參照章節 5-1），對炭品品質作把關，分析態樣應分為初次檢測與年度檢測。當該批次炭品符合生物炭品質標準後，再進行有害物檢測，以確保炭品之安全性。檢測要項應包括鉛、鉻、銅、鎳、汞、鋅、鎘、砷等重金屬與多環芳香烴 (PAHs)、多氯聯苯 (Polychlorinated biphenyls, PCBs)、戴奧辛 / 呔喃及有機揮發物質 (Volatile organic compounds, VOCs) 等有機污染物，上述檢測要項的閾值建議如表 5-3 所示，其中有機發物質（苯、甲苯、乙苯、二甲苯）得當燒製量大於每年 50 公噸以上者才須檢測。

有害物檢測應於同型燒製設備初次生產炭品時作檢測，用以瞭解該燒製設備所得的炭品是否符合安全閾值，如圖 5-1 的初次檢測流程，不同料源燒製的炭品亦應分別檢測，爾後如燒製過程等燒製條件或料源無重大變動或污染，則同種料源得採 3 年定期檢測，如圖 5-1 的例行檢測流程，但若使用經處理類別料源則有害物檢測亦應年度檢測。

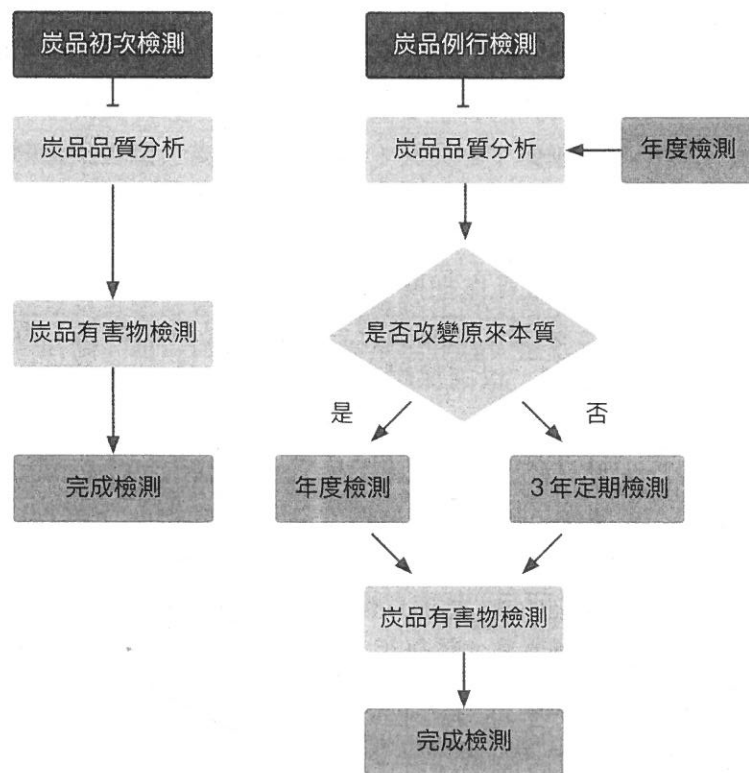


圖 5-1 炭品管理之檢測流程

資料來源：International Biochar Initiative (IBI) (2015). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for the Biochar. Version 2.1.

表 5-3 臺灣地區炭品有害物檢測之建議閾值

檢測項目	閾值	備註
鉛	<150 mg/kg ¹⁾	
鉻	<90 mg/kg ¹⁾	
銅	<100 mg/kg ¹⁾	
鎳	<50 mg/kg ¹⁾	
汞	<1 mg/kg ¹⁾	
鋅	<400 mg/kg ¹⁾	
鎘	<1.5 mg/kg ¹⁾	
砷	<13 mg/kg ¹⁾	
多環芳香烴	<12 mg/kg ¹⁾	
多氯聯苯	<0.2 mg/kg ¹⁾	
戴奧辛 / 呔喃	<20 ng/kg (I-TEQ) ¹⁾	
揮發性物質 - 苯	<5 mg/kg ²⁾	>50 噸 / 年
揮發性物質 - 甲苯	<500 mg/kg ²⁾	>50 噸 / 年
揮發性物質 - 乙苯	<250 mg/kg ²⁾	>50 噸 / 年
揮發性物質 - 二甲苯	<500 mg/kg ²⁾	>50 噸 / 年

資料來源：

- (1) European Biochar Certificate (EBC) (2018). Guidelines for a sustainable production of biochar. Version 6.5E.
- (2) 行政院環境保護署 (2011)。土壤及地下水污染整治法 - 土壤污染管制標準。行政院環境保護署環署土字第 100008495 號。

三、生物炭環境毒理檢測與評估

由於生物炭為具有特殊性質的資材，其物理化學特性取決於料源種類與燒製的製程參數，不同類別的炭品可能對於土壤、作物甚至環境中的生物有潛藏的危害。藥毒所團隊亦已測試多種類型炭品（包括稻殼、綠竹、菇包、果樹枝條等）對環境非目標生物急毒性之影響，顯示前述炭品對蚯蚓與斑馬魚均不會造成任何急毒性反應。另外，少部分炭品（包括稻殼、綠竹、果樹枝條等）亦進行細菌基因逆向變異試驗，利用沙門菌 (*Salmonella typhimurium*) TA98、TA100、TA1535、TA1537 及 TA102 等五種菌株，經由平板培養試驗法 (Plate incorporation method)，

檢測試驗物對沙門菌菌種之組胺酸基因是否能由組胺酸需求型經逆向變異 (Reverse mutation)，回復為能自行合成組胺酸之原養型 (Prototroph)，以評估試驗物對菌種的致基因變異性之潛力，結果確認測試炭品無潛在致變異性反應。綜合以上，已累積多筆本土性炭品對環境生物的數據，足以顯示其風險低，目前在生物炭管理上，藥毒所建議檢測上一章節之安全性必備之檢測項目，惟對炭品料源來源有疑慮時，可能仍需進一步測試，甚至評估對其他物種之影響。

依藥毒所目前監控炭品有害物含量與炭品對環境非目標生物毒性影響較低，確認現有炭品未見明顯安全的疑慮，但生物炭混拌於土壤中為不可逆行為，可能永久存於土壤中，除非經由雨水沖刷才可能減少，實有必要針對各類不同料源、炭品、作物、土壤類型及相關地理位置，進行長期田間試驗與安全性監控，以掌握生物炭在各種不同條件下所產生的影響，同時可藉由施用後長期的監測數據的蒐集與累積，用於生物炭對環境與生物的風險評估，俾利未來增修生物炭的應用準則。

四、複合性微生物炭品的安全管理

複合性微生物炭品主要成份包括了生物炭與微生物，由於生物炭提供多孔隙的空間容納微生物，因此經燒製後的炭品能為適當的微生物載體。為使產品能合乎安全性的要求，管理上建議個別檢視其安全性。在生物炭部分，應符合前述安全管理規範之要求；微生物部分則應視該微生物的應用範圍或宣稱功效，符合該項相關管理法規要求，

例如微生物肥料應符合肥料管理法。

在微生物肥料登記方面，該菌種需經安全性評估，審查原則主要有三項，包括：

1. 菌種係存在於國內自然環境者。
2. 菌種與人類健康之疾病無關。
3. 菌種對植物無病原性。若非屬已被鑑定為安全之微生物肥料菌種，應檢具對生物毒性及環境生態試驗報告，或符合微生物肥料菌種安全性評估審查原則等相關資料，送經農委會審查核可後，依規定可公告為已被鑑定為安全之微生物肥料菌種。目前已被鑑定為安全之微生物肥料菌種中，包含細菌、真菌與酵母菌等三類：

- (1) 細菌類包括凝結芽孢桿菌 (*Bacillus coagulans*)、地衣桿菌 (*B. licheniformis*)、豆科根瘤菌類的 *Bradyrhizobium japonicum* (*Rhizobium japonicum*)、*Mesorhizobium loti* (*R. loti*) 與 *R. leguminosarum*、沼澤紅假單孢菌 (*Rhodopseudomonas palustris*)、*Sinorhizobium fredii* (*Ensifer fredii*, *R. fredii*)、嗜熱鏈球菌 (*Streptococcus thermophiles*)。
- (2) 真菌類包括米麴菌 (*Aspergillus oryzae*)、*Glomus fasciculatum* (*Endogone arenacea*, *E. fasciculate*, *Palaeomyces butleri*, *Rhizophagites butleri*)、*Glomus mosseae* (*E. mosseae*)、魯毛黴菌 (*Mucor rouxii*)。

(3) 酵母菌類則包括季也蒙假絲酵母菌 (*Candida guilliermondii*)、季也蒙比齊酵母菌 (*Pichia guilliermondii*)、啤酒釀酒酵母菌 (*Saccharomyces cerevisiae*)、肋狀擬內孢黴菌 (*Saccharomycopsis fibuliger*, *Endomycopsis fibuliger*)。

其中，各微生物肥料品項應檢測項目說明如後：豆科根瘤菌肥料中，應檢測根瘤菌有效活菌數及共生固氮活性；溶磷菌肥料中，應檢測溶磷菌有效菌數及溶磷活性；溶鉀菌肥料中，應檢測溶鉀菌有效活菌數及溶鉀活性；叢枝菌根菌肥料中，應檢測叢枝菌根菌繁殖體與植物根系形成菌根，以染色法觀測及叢枝菌根菌孢子數；此外，複合微生物肥料，則根據所複合的微生物種類測定當中的菌數及相對應之活性，然而根據目前的「肥料種類品目與規格」之內容，尚無複合性微生物炭品之品項。

五、 結語

近年來生物炭相關產業蓬勃發展，且國際上亦有相對完善的規範及管理制，相較下我國雖已有相關產品利用於農業上，然在管理上仍有相當的進步空間，因此參考國際生物炭管理情形及藥毒所累積的多筆檢測數據，進而制訂適合本土生物炭品安全之管理規範，期能協助炭品燒製者自主安全管理，提供使用者有較完善的產品資訊，進而提升對炭品之信賴度及加值應用。此外，生物炭是在低氧或限氧條件下，透過生物質的燃燒後所獲得的固體材料，若燒製設備設計不完善或以露天簡易方式進行燃燒，面對日益嚴重的空汙問題，將是嚴峻的挑戰，因此在設備改良與燃燒方式改善，除可減少燃燒氣體的排放外，亦有助於危害物質的回收以增加炭品的安全性。綜合以上，生物炭具資源循環利用及對環境的減碳效果，可用於栽培介質、土壤改良、除臭等農業及生活應用等用途，因此若能結合各領域，充份利用國內農業廢棄物資源，將之轉換為可用之生物炭資材，將有助於達成資源、環保與經濟永續經營的目標。