



## 農業剩餘資材活化再利用 生物炭的安全評估指引

張敬宜<sup>1</sup> 羅紹榮<sup>1</sup> 莊伊靜<sup>1</sup> 蔡躋任<sup>1</sup>

### 一、前言

臺灣年平均產生 475 萬公噸農業廢棄物，其中以畜產廢棄物（禽畜糞）占 49% 及農產廢棄物占 43% 為大宗（行政院農業委員會（簡稱農委會）94～

104 年統計資料）。這些廢棄物富含有機碳、氮、磷、鈣及微量礦物質等。過去農民多隨意處置，致農業資材約有 30% 就地掩埋、燃燒，未有效再利用，並造成污染。此外，約有半數農業資材以堆肥方

式再利用，面臨臭味、高成本、低價值等問題（農委會－臺灣故事館專題故事）。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（pyrolysis）而成之固態物質，為一種纖細且

註 1：行政院農業委員會農業藥物毒物試驗所。

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，當這些物質有目的地應用在農業土壤以及環境保護上稱為生物炭（biochar），其在農業領域方面常見應用於改善土壤的物理化學特性（如 pH 值）、提升土壤的保水力與肥力、減少養分流失、增加作物產量等功用，同時它還能降低土壤中溫室氣體（如一氧化二氮、甲烷）之排放。因此，生物炭的利用不僅兼具環境與資源的雙重「減碳」效益，更有助於減少溫室效應氣體的排放，延緩地球溫暖化的趨勢，達「固碳」之效果。然而，當生物炭與土壤參配時，造成土壤物理化學特性改變，是否同時亦改變土壤周遭環境，進而影響作物、土壤微生物、蚯蚓、甚至水生生物等物種之安全；且農業廢棄物經精煉後其重金屬含量是否被提升，進而引起農作物傷害甚至對人畜健康安全影響之疑慮；或是不同廢棄物種類經不同熱裂解條件下，燒製過程中是否產生具毒性且具致癌性的有害污染物如多環芳香烴（polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs）、戴奧辛（dioxins）等，均是研發生物炭產品過程中不容忽視的一環。

由於生物炭應用在我國尚未有安全管理措施，本文主要說明如何建構本土生物炭品之環境毒理安全性評估模式，藉由蒐集各國對生物炭料源或

產品管理之規範，以協助料源盤點及研擬國內炭品安全檢驗備查資料及相關規定之建議，進而補強我國生物炭安全管理缺口，訂定安全管理規範或指引供權責單位參考與讓業者有所遵循，並針對本土的不同料源或不同燒製溫度之生物炭產品進行環境毒理安全評估，以確保其產品之安全性，同時可提高國內農業廢棄物之利用效率。

## 二、安全評估指引之研擬架構

評估指引方面，由於國際上針對生物炭管理相關的組織或機構，最具規模且成立最早的為國際生物炭倡議組織（International Biochar Initiative, IBI），其於 2006 年 7 月在美國費城成立，2009 年開始研擬生物炭管理準則，至 2012 年始發布第一版準則，爾後陸續改版，期間歐洲、日本、中國、澳洲、紐西蘭、英國等亦成立相關組織，當中類似 IBI 且較有完善評估管理模式為歐洲生物炭認證機構（European Biochar Certificate, EBC）。因此，我們主要參考 IBI 與 EBC 生物炭應用之準則或管理模式，建議分為料源與炭品作為前端與終端 2 方面管理。

料源管理方面，建議只要無污染疑慮環境下的農業剩餘資材均可作為生物炭產製之料源，如木材、樹葉及稻殼等，且不需設定料源查驗項目，但某些料源為了確保後續燒製品質，

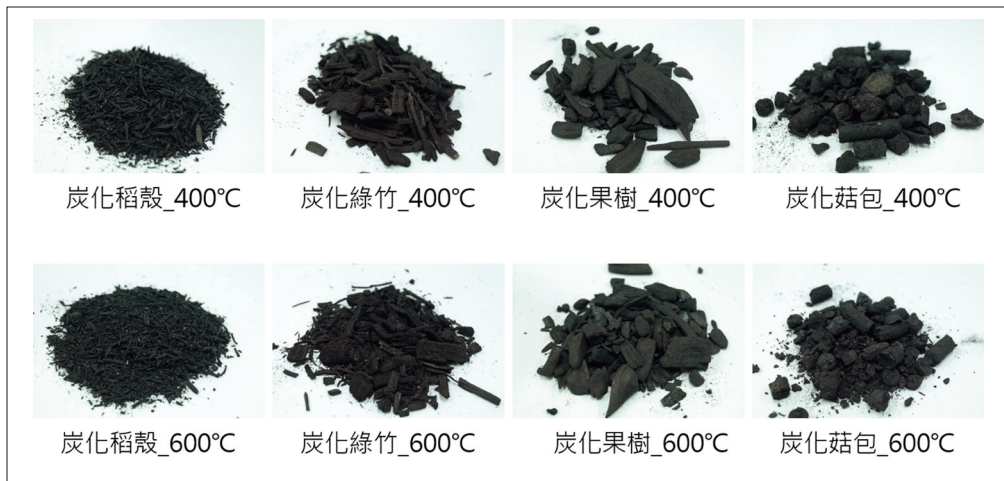


圖 1. 現有炭品之樣態。(圖片提供 / 中興大學)

需設有前處理步驟，如樹木枝條需事先裁切，菇包顆粒太細需事先造棒等，另外，料源運送至燒製場地因運輸成本考量，應仿照 EBC 侷限於 80 公里內。再者當料源有污染疑慮或改變原來本質，如動物排遺等，則可能需先檢測戴奧辛或重金屬，確認合乎標準後，才可作為料源。

炭品管理方面，建議參考 IBI 炭品之檢測流程，首先進行炭品基本特性分析，如 pH 值、含水量、碳 / 氫比、氮含量、表面積等，對炭品品質作把關，建議初次與每年定期檢驗，之後再進行有害物檢測，確認炭品之安全性，檢測項目包括鉛、鉻、銅、鎳、汞、鋅、鎘、砷等重金屬與有機揮發物質 (VOCs)、多環芳香烴 (PAHs)、多氯聯苯 (PCBs) 及戴奧辛 / 呔喃 (Dioxins, PCDD/Fs) 等有機污染物，而上述檢驗項目在 EBC、IBI 及我國肥料管理法之檢測

閾值 (限量) 比較表如表 1，最後建議本國炭品必備檢驗項目之閾值如表 2，並建議以上必備項目於初次生產炭品時必須檢驗，用以建立屬於臺灣地區的檢驗背景值，爾後如製程等燒製條件或料源無重大變動或污染，則可採 3 年定期檢驗，甚至未來可依臺灣地區的炭品有害物安全檢測資料，修改閾值或刪減檢測項目。另外，亦可視情況進行非目標生物毒性之影響評估，以瞭解是否有未知的毒性物質存於本土的生物炭品進而影響土壤的環境品質。

### 三、安全評估指引之驗證案例

本土設備燒製的炭品，包括 400 °C 與 600 °C 之炭化稻殼、炭化果樹枝條混合 (柑桔、芒果、棗子、文旦柚、番荔枝及番石榴等枝條依等比例混合)、炭化綠竹及炭化菇包，其

表 1. 有害檢測之閾值比較表

檢測項目 (毫克/公斤)	EBC <sup>1</sup>		IBI <sup>2</sup>	臺灣 <sup>3</sup>
	基本 (basic)	特級 (premium)		
鉛 (Pb)	< 150	< 120	121 ~ 300	< 150
鉻 (Cr)	< 90	< 80	93 ~ 1200	< 150
銅 (Cu)	< 100	< 100	143 ~ 6000	< 100
鎳 (Ni)	< 50	< 30	47 ~ 420	< 25
汞 (Hg)	< 1	< 1	1 ~ 17	< 1
鋅 (Zn)	< 400	< 400	416 ~ 7400	< 250 (500)
鎘 (Cd)	< 1.5	< 1	1.4 ~ 39	< 2
砷 (As)	< 13	< 13	13 ~ 100	< 25
揮發性物質 (VOCs)	含量%	含量%	含量%	未制訂
多環芳香烴 <sup>4</sup> (PAHs)	< 12	< 4	6 ~ 300	未制訂
多氯聯苯 (PCBs)	< 0.2	< 0.2	0.2 ~ 0.5	未制訂
戴奧辛/呔喃 (Dioxins/Fs)	< 20 奈克/公斤 I-TQE	< 20 奈克/公斤 I-TQE	< 17 奈克/公斤 WHO-TQE	未制訂

<sup>1</sup> European Biochar Certificate (EBC) (2018). Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. Version 6.5E.

<sup>2</sup> International Biochar Initiative (IBI) (2015). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for the Biochar. Version 2.1.

<sup>3</sup> 行政院農業委員會 (2013)。肥料管理法—各類肥料品目及規格。行政院農業委員會農糧字第 1021052625 號。

<sup>4</sup> 美國環保署 (USEPA) 所公告之多環芳香烴中 16 種優先列管物質 (priority pollutants, 包含萘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘、芘) 之總合。

表 2. 臺灣地區炭品有害物檢測之建議閾值

檢測項目	建議值
鉛	< 150 毫克 / 公斤 <sup>1</sup>
鉻	< 150 毫克 / 公斤 <sup>1</sup>
銅	< 100 毫克 / 公斤 <sup>1</sup>
鎳	< 25 毫克 / 公斤 <sup>1</sup>
汞	< 1 毫克 / 公斤 <sup>1</sup>
鋅	< 500 毫克 / 公斤 <sup>1</sup>
鎘	< 2 毫克 / 公斤 <sup>1</sup>
砷	< 25 毫克 / 公斤 <sup>1</sup>
揮發性物質—苯	< 5 毫克 / 公斤 <sup>2</sup>
揮發性物質—甲苯	< 500 毫克 / 公斤 <sup>2</sup>
揮發性物質—乙苯	< 250 毫克 / 公斤 <sup>2</sup>
揮發性物質—二甲苯	< 500 毫克 / 公斤 <sup>2</sup>
多環芳香烴	< 12 毫克 / 公斤 <sup>3</sup>
多氯聯苯	< 0.2 毫克 / 公斤 <sup>3</sup>
戴奧辛/呔喃	< 20 奈克 / 公斤 kg (I-TEQ) <sup>3</sup>

<sup>1</sup> 行政院農業委員會 (2013)。肥料管理法—各類肥料品目及規格。行政院農業委員會農糧字第 1021052625 號。

<sup>2</sup> 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。政院環境保護署環署土字第 1000008495 號。

<sup>3</sup> European Biochar Certificate (EBC) (2018). Guidelines for a sustainable production of biochar. Version 6.5E.

燒製後之樣態如圖 1，分別進行有機污染物檢測，發現雖有多環芳香烴與戴奧辛等檢出，但其含量仍在建議的閾值內 (表 3)，顯示該等炭品符合目前規劃的建議值，同時此暫訂之閾值應可適用於本國炭品。另一方面，這些炭品並未檢出揮發性物質與多氯聯苯，因此未來若累積更多的檢測數據，則可採抽驗方式或甚至免測此項目，僅需檢測多環芳香烴與戴奧辛。

本團隊謝玉貞博士分別以 500℃ 炭化稻殼 (田間施用濃度 2%、4%、6%、8%、10%)、400℃ 及 600℃ 炭化果樹枝條混合

及炭化綠竹（田間施用濃度 5 %、10 %、15 %、20 %）對蚯蚓進行濾紙接觸急毒性試驗，結果 5 種測試之炭品對蚯蚓在 48 小時內不會造成任何急毒性反應（試驗情形如圖 2）。另外，陳綵慈博士以 500 ℃ 炭化稻殼、400 ℃ 與 600 ℃ 炭化果樹枝條混合及 400 ℃ 炭化綠竹投予田間施用濃度 1 %（10 公克

／公升）對斑馬魚進行急毒性試驗（試驗情形如圖 3），結果顯示所有炭品投予後會造成水質較混濁與 pH 值上升的情形，但隨著時間增加炭品沉降後，使水質回復澄清。投予後 96 小時觀察發現，除 400 ℃ 與 600 ℃ 炭化綠竹試驗出現魚隻死亡情形（死亡率為 30 %），其餘炭品之死亡率均為 0 %，最終判斷所有測試炭品之半數致死濃

表 3. 現有炭品之有害物檢測結果

料源 & 燒製條件 檢測項目	炭化稻殼		炭化果樹枝條混合		炭化綠竹		炭化菇包	
	400 ℃	600 ℃	400 ℃	600 ℃	400 ℃	600 ℃	400 ℃	600 ℃
苯 (毫克/公斤)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
甲苯 (毫克/公斤)	ND	< 0.01 <sup>1</sup>	ND	ND	ND	ND	ND	ND
乙苯 (毫克/公斤)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
二甲苯 (毫克/公斤)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
多環芳香烴 (毫克/公斤)	< 0.61	< 0.136	< 0.136	< 1.168	< 2.568	< 1.459	< 0.527	< 0.476
多氯聯苯 (毫克/公斤)	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
戴奧辛/呔喃 (奈克/公斤) (I-TEQ)	10.1	2.20	2.20	1.35	ND	ND	ND	0.832

<sup>1</sup>檢測值低於檢量線最低濃度但高於試驗方法可檢測之極限值 (MDL) 時以「<」檢量線最低濃度表示之。

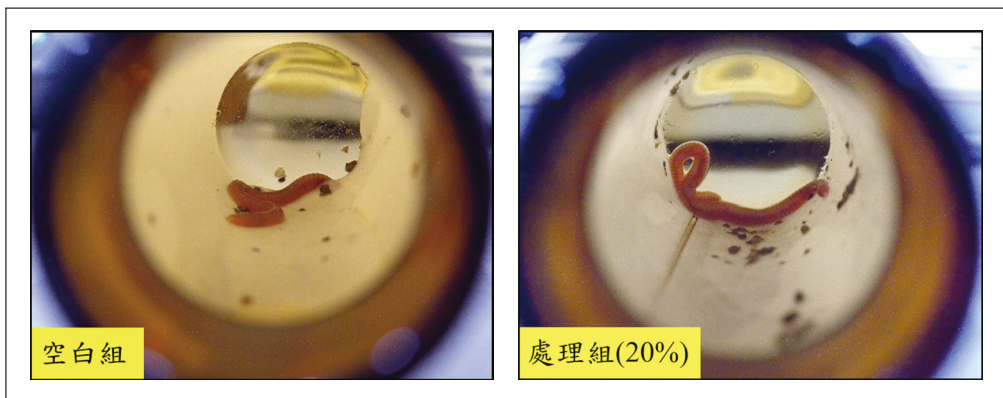


圖 2. 400 ℃ 炭化綠竹對蚯蚓急毒性試驗之情形。

度 (LC<sub>50</sub>) 值均大於 10 公克 / 公升，且該劑量已遠高於水生物急毒性最低毒性等級 (100 公克 / 公升之 100 倍)。綜合以上試驗結果，顯示該等料源之炭品可能對環境生物影響風險較低，但仍需進一步測試，甚至評估對其他物種之影響。未來管理時，若累積足夠本土性炭品對非目標生物的數據，足以顯示其風險低時，則僅需檢測安全性必備之檢驗項目。

#### 四、未來展望

參考國際生物炭管理情形而研擬之本土生物炭品安全評估準則，可協助炭品燒製者自主安全管理，未來仍須累積本土炭品之安全檢驗資料，以佐證研擬之安全性必備檢驗項目與閾值之可行性，及探討不同料源、不同燒製溫度或不同燒製設備下，生物炭產品之安全性差異，以供主管機關未來管理之參考，如最適化燒製溫度等。另外，生物炭生產過程需藉由燃燒後取得固體部分，若燒製爐設計不良或燃燒過程的管控不當使得燃燒後所產生的氣體隨意排放，除可能造成空氣污染外，亦可能沉積到炭品中，造成炭品無法通過安全性檢驗。因此田間使用之簡易爐燒製的炭品，應提早規劃列入監控與檢測，以提供安全佐證資料進而推廣應用，最後達到有效提升剩餘資材加值再利用之目標。

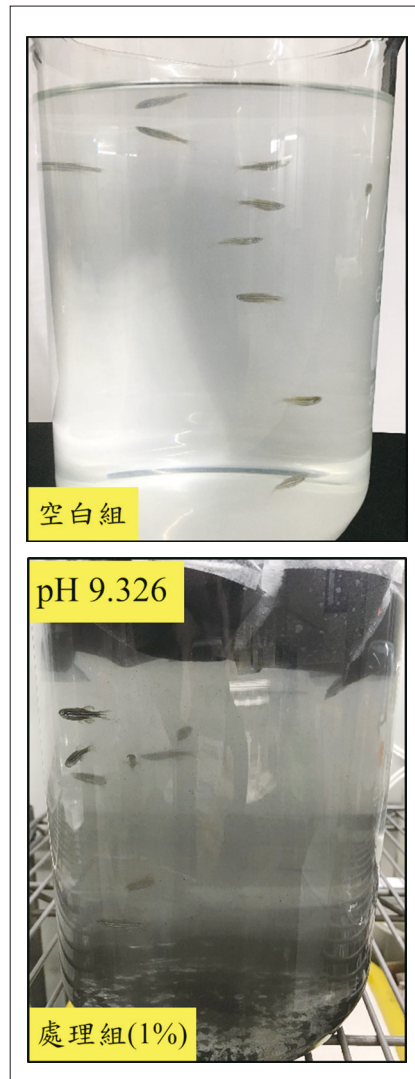


圖 3. 500℃ 炭化稻殼對斑馬魚急毒性試驗之情形。

