

低耗能上方點火法量產菱殼炭

官田烏金

成大化學系特聘教授 林弘萍

循環經濟是現今全世界重視的經濟發展模式，將廢棄資材轉換為再生資源是走向循環經濟的時代重要的一環。臺灣有非常豐富的農產品，而在產出農產品的同時，也伴隨著製造出大量農業廢棄資材。臺灣每年的農業生產會產生大量的農業廢棄資材約有幾十萬噸以上之規模。對於不易處理的農業廢棄資材的再利用，一直是國內農業及能源單位長期關注的議題，目的就是希望能將農業廢棄資材轉換成為高循環經濟的產品或能源，大量在現地的農業廢棄資材，一直都是農民非常困擾的問題。由化學組成而言，植物中含有纖維素、半纖維素、木質素及灰份，其中木質素成碳率較高，碳的品質近似石墨。就生物炭料源的選擇既是以木質素含量高的農業資材（例如：木頭、菱角殼、蓮子殼、花生殼、竹子…），而農業廢棄資材當中以木質素含量之資材量佔最大宗，卻因為木質素高的廢棄資材因分解速率慢，不易成為堆肥的原料，也因此後續的處理上只能成為燃料。但是直接燃燒這類農業廢棄資材往往會造成空氣污染，及PM 2.5濃度的增加，發展出一套有效的處理方法及價值提昇的程序，才能建立起農業廢棄物的循環經濟。

近年來將農業廢棄資材經過高溫處理轉成生物炭(Biochar)的研究和應用相當受到重視，主要是生物炭大多是穩定的碳石墨結構，可達到固碳的效果。生物炭的製造原理其實相當簡單，只要在氧氣缺乏的高溫狀態下，含有木質素的生物資材即可被轉成生物炭。從化學的結構而言，生物炭是具有高含量的芳香族結構(aromatic structure)，以及低的氫/碳比(H/C)和大比表面積(surface area)。為了達到生物資材的碳化效果，高溫加熱是必須的過程，由於高溫反應會引起許多的化學反應發生，因此生物炭的生成也伴隨著其它副產物(例如：醋液和可燃氣體)的產出，而如何建構一套適合的生物炭製造系統，有許多因素需要考量。生物炭的設備建構有幾項重要的準則值得討論。(1)能量的來源；(2)原料組成；(3)副產物的生成量與處理方式；(4)設備機動性；(5)操作安全性；(6)建構成本及生物炭製造成本。從環境保護的觀點，生物炭的製作是基於能在“負碳”的條件下達成，因此都需在愈低電能和石化燃料使用量，且不產生有毒的化學物質的條件下，才能真正建構出更具有永續發展的潛力的生物炭量產設備。



圖 1. (A)菱殼炭碳化爐照片 (B)上方點火法原理示意圖。

臺南市官田區為臺灣最大菱角產地，年產量6,800公噸，為地方重要經濟作物，但每年亦同時產出大於3,700公噸之菱角殼。菱角殼因木質素成分高不易分解，通常分解需要(1-2)年的時間，難用一般堆肥方式處理。當地農民常用露天燃燒的不適當方法將殼角殼去化，過程中產生了嚴重的空氣汙染，也容易造成公共危險。但是從科學的角度來看，菱角殼的木質素成分高，反而是一適合做為生物炭(Biochar)的農業廢棄資材。在2015年底，官田區公所顏能通區長結合區公所員工，開始從事菱殼生物炭(簡稱：菱殼炭)的製造研發。個人在五年多前亦

投入協助官田區處理菱角殼的事務，與官田區區長及職員共同研發出一套製造菱殼炭的碳化系統(圖 1A)。此套碳化系統是“上方點火”的方式，高溫低氧的上方點火法(Top Lit Updraft, TLUD)可將菱角殼製成菱殼炭，此製程的產率約為20 wt.% (相對於乾燥後的菱角殼)(圖 1B))。

而菱殼炭的製造過程中，空氣汙染的問題是最需要重視，燃燒碳化菱角殼過程中一氧化碳(CO)排放量是燃燒完全與否的重要指標，為了要達到符合環保排放標準的燃燒狀況，在煙囪半徑與管長，及燃燒桶底部和上緣部打的

洞數以及大小，都需要仔細調整最佳參數，研究團隊花了相當長的時間，才找到最佳化的燃燒設備，目前已申請專利保護中。從一氧化碳偵測器量測數值顯示，除了在初期點火及最後灑水滅火的階段，一氧化碳濃度有超高的現象發生之外，在燃燒過程中其濃度皆只有在數十ppm範圍內，此低濃度的一氧化碳排放量是合乎環保標準，再者為避免所衍生空氣汙染的問題發生，此套碳化設備結合抽氣過濾系統，可將產生的碳粒粉塵吸附並排掉污染氣體，以達到安全環保的菱殼炭生產程序。

使用“上方點火”的燃燒方式除了可以製作菱殼炭以外，其它農業廢棄資材(例如：雜木，竹子)的生物炭也可以在適當的設備改良下，就個人的研究經驗，製作過程中會產生的懸浮微粒（PM2.5），而生成的懸浮微粒濃度會受到三個主要因素影響：

1. 廢棄資材中的水份，水份高會降低燃燒溫度並且亦損耗燃燒的熱質，而導致燃燒不完全，造成懸浮微粒濃度的提升。農業廢棄資材中皆含有水分，水分含量愈高在燃燒過程中愈會造成燃燒不完全，並且產生煙霧。因此適當的乾燥程序將資材的水分降低到適當的程度是必要的。（水的蒸發熱及比熱皆大，需要大量熱源將其揮發）
2. 廢棄資材中的灰份（無機物），灰份組成當中又以不具助燃效果的氧化矽成份，最易造成燃燒不完全的現象。而禾本科植物（稻米）中氧化矽含量偏高，因此這類的廢棄資材燃燒較為不易，使用燃燒法製作生物炭過程易產生懸浮微粒。
3. 碳化爐系統設計不良。由於不同農業廢棄資材的組成、尺寸、形狀皆不相同，使用燃燒法製作生物炭時，調整進氧量及排氣量是必要的，才

能達到完美的燃燒製生物炭的條件。最佳化的碳化系統的建立，則需要經驗的累積。

經過了近一年半的研發和改良，官田區菱殼炭碳化系統燒製試驗成果為：每桶碳化爐可裝入約18公斤的曬乾菱角殼，碳化時間僅需35分鐘可製成3~3.5公斤菱殼炭。菱殼炭成品基本性質檢測結果為：比表面積約250~400 m^2g^{-1} 、含碳量達70-80 wt.%，符合歐盟EBC生物炭在這兩項基本性質的要求，並依IBI、EBC及重金屬及戴奧辛成分送驗，以評估推廣菱角殼炭化之可行性及安全性。控制碳化系統燃燒溫度在600-700℃，在燃燒接近完全的條件下，以及使用水霧快速滅火的程序，即可大幅下降戴奧辛與多環芳香烴(PAH，俗稱低耗能上方點火法量產菱殼炭—官田烏金焦油)的生成量。為確保所生產的菱殼炭是否合乎使用安全標準，每年會不定期抽測一次菱殼炭的戴奧辛和多環芳香烴。委託臺中市上準公司分析的結果顯示，菱殼炭戴奧辛含量僅有0.001 ng/g(IBI標準：0.020 ng/g)，PAH含量0.90 mg/kg(IBI標準：6.0 mg /kg)。這些檢驗的結果證明了，官田自行開發的碳化爐是一非常優秀的碳化系統，所製成的菱殼炭品質高，安全無虞，才能安心使用在農業及民生用品上。目前在官田鄉的碳化設

備已能在不消耗能源的條件下，生產出符合國際生物炭標準之生物炭，此套設備具有造價低，耐用及可移動之優點，非常適合發展成在地化的生物炭生產中心，解決在地化的農業廢棄資材之問題，在單人操作的狀況下，每日可生產出至少50公斤的生物炭，因此是一非常大量且穩定的生物炭來源。

目前官田區公所的碳化系統能將菱角殼、雜木、竹子等農業廢棄資材，製成比表面積大(>200 m^2g^{-1})、穩定高、孔隙率大的高品質生物炭，並應用在民生及農業上。由於此設備簡易、便宜，較能讓農民接受，而且設備不需維修，目前已能處理大部分官田區的菱角殼，也協助環保局處理雜木。雖然設備簡易，生產出來的菱殼炭及雜木炭都有非常好的品質，產品再現性高。雖然“生物炭”在農業應用上有其效果，仍待長時間的種植才能更確認其在農業使用的安全性及功能。生物炭的高附加價值也應該是值得發展的一種固碳方式。

藉由官田生物炭生產系統所製得的菱殼炭和雜木炭之孔洞結構如圖2，由掃描式電子顯微鏡圖，可清楚地看出菱殼炭是由許多似泡泡狀的孔洞相互堆積而成，呈現不規則的排列方式，其孔洞的大小約為50微米；而雜木炭則是由許多長條形的通道結構所組

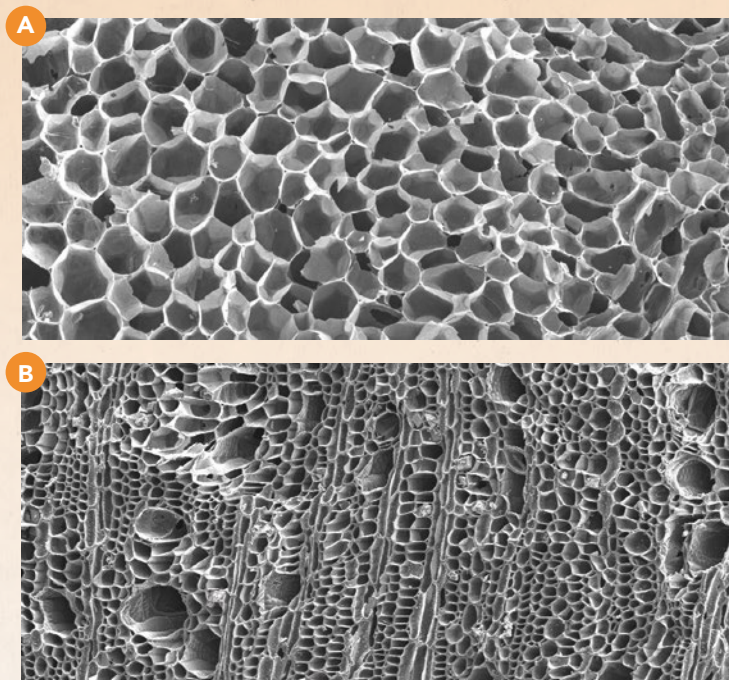


圖2. 菱殼炭(A)與雜木炭(B)之掃描式電子顯微鏡圖

成，較具有排列整齊度，通道的尺寸大小約在 20-30微米。此外由氮氣吸附-脫附曲線分析的結果，菱殼炭具有的比表面積值約 $250\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ，而微孔比表面積的貢獻約為95 %；雜木炭比表面積約有 $200\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ，而其中微孔比表面積約佔有95 %。由孔洞分布曲線圖可略知其微孔尺度大小是分佈於 1.0 - 2.0 nm範圍。菱殼炭和雜木炭在應用上可用以吸附小分子的有機物，相對地，對大的有機分子則無法有效地吸附。

生物炭已被世界碳組織認同具有固碳功能，但是如何生產合乎標準和安全的生物炭確實是需要

仔細評估，才能避免另一問題產生。整體而言，生物炭是具有土壤整治的功能，可從幾個主因來探討。生物炭的製程大多採用高溫裂解，具有酸性的有機質已揮發，而生質有機物中常見有鉀離子，燃燒後會轉為 K_2O 或 KOH ，因此生物炭大多具鹼性，可用來提高酸性土壤pH值，藉以改善土壤的狀況，成為植物喜好的生長條件。由於生物炭具有大量微孔與高比表面積，表面亦含有含氧官能基，可做為有毒之過渡金屬離子(Pb^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} ……等)之吸附材料。透過生物炭的添加應有機會將土壤中

的有毒金屬離子固定化，達到土壤整治的效果。

根據國內外文獻報導顯示，生物炭施用，對於土壤環境與農產品產量大都具有正面的結果，因此藉由菱殼炭保水試驗、小型盆栽試驗、水質淨化，以及田野實驗等多種試驗，獲得土壤混用菱殼炭能夠有效保水、保肥於土壤，以及具有淨化水質之功能。官田區公所開始進行菱角殼炭小型田野試驗，以評估其在農業可行性。而盆栽試驗，藉不同操作條件，確認各種植栽適合之最佳菱殼炭添加條件，收集各操作數據，做為資料庫以提供農友參

考；另獲得官田國中、友善大地，以及當地農友支持與合作，提供之私有農地，做為田間實驗場域，進行大面積農地施用試驗，目前已有5處合作場域，總試驗面積目前為8400m²，試驗栽種作物包括稻米、菱角、花生、芭樂等，依105年收穫成果，吊掛使用菱殼炭之有機菱角田收成，總重量為未添加約1.2倍；有機稻米田收穫量，施用菱殼炭之田地之5m²乾穀重為未添加之1.25倍、平均株高及平均穗長為未添加之1.2倍。菱殼炭的添加量對花生的成長及結果量，也有顯著的改善和提升。另外，目前另有官田區4處、屏東縣2兩處農友自願參與菱角殼炭施用之田間試驗，並定期由官田區公所辦理農友及專家學者諮詢會議，互相交流分享試驗執行情形及成果。這些初步的田間試驗結果表示：生物炭確實有提升農作物產量的功效，但是這些試種的面積仍是不夠具代表性，而且也只是先施種於有機農地，對一般慣型農地的效果仍待探討。在適當的施用量，菱殼炭對於農作物是沒有負面影響，並且可達到固碳的正向效果。生物炭在農業應用的研究是需要再進行更長的時間，才能更客觀地了解正確的使用方法，以及評估生物炭的功能。

就目前本研究團隊初步的田間試驗結果而言，生物炭對農作物的效果在使用得當的狀況下，是有良好的效果。不過生物炭的使用上仍有風險，大部分的生物炭呈鹼性，pH值在(11.0 -9.5)之間是常有的，因此在使用上需要注意到土壤pH的面向，多數植物適合的pH值條件在6.5-6.5之間，如果添加過多生物炭，反而造成土壤過度鹼)，農作物成長不良的情況也會發生。因此添加生物炭的量及方法都應建立好標準操作程序(Standard Operation Process)，才能讓農民對生物炭有信心，若非如此，當有負面的使用效果出現時，則會造成無法挽回信任的局面，生物炭反而會被汙名化，失去它可能具有改善土壤的應用潛力。

另一更重要的經濟問題是生物炭的製造成本不低，品質佳的生物炭的製造費用接近百元每公斤，因此生物炭的應用不能只侷限在農業方面，因為農業資材的價格是低的，使用高單價的生物炭對農業發展上是有困難的。基於此考量，將生物炭應用在高價值的元件或系統是應再努力拓展，使農業廢棄資材提升價值，而不會被任意棄置及燃燒，也才能創造出真正的農業廢棄資材的循環經濟。

生物炭的利用雖然已經獲得重視，生物炭本身的物性與化性，如生物炭孔隙度、比表面積、pH值，炭化程度，和製備溫度等因素，仍然缺乏仔細研究，使得因各研究使用生物炭的性質差異甚大，在植物生長與土壤的研究上亦有諸多差異。若能充份利用國內農業廢棄物資源，建立是合的處理程序，將農業廢棄物轉換為可用之生物炭農業資材，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農業基礎。