

生物炭之物理化學性質分析及其混合介質 栽培芹菜之情形

朱 德 苓¹⁾ 宋 好²⁾

關鍵字：生物炭、物理性質、化學性質、芹菜

摘要：本試驗利用戴壟科技以闊葉木於 1200°C 製成的大道寶粉生物炭及將葫蘆科和番茄莖葉殘株分別以 350 和 550°C 熱裂解而成生物炭，測定五者之物理化學性質，結果顯示其物理化學性質和營養元素含量因材料和製作溫度而有差異，pH 值介於 8-10，葫蘆科和番茄生物炭 EC 值較高，當中 350°C 生物炭其孔隙度低不利於保水，且總酚類化合物極高，不適合添加於介質。將大道寶粉 (B)、葫蘆科 (C550) 和番茄 (T550) 550°C 製成之生物炭以 3、6 或 9% (w/W) 添加至泥炭土中，9% 的大道寶粉生物炭可以提高芹菜植株葉綠素含量，三種生物炭之添加可顯著增加芹菜株高，當中以 6% 的 C550 處理生長最佳，達到增加產量的效益。本試驗研發農業廢棄物以生物炭的循環再利用，研究其應用於芹菜栽培土壤改良之方法，推廣兼顧環境和經濟效益的永續農業產業模式。

前 言

生物炭 (bichar) 是生物有機物質在高溫無氧的環境下製成的熱降解產物，與木炭的區別在於其對土壤的改善作用 (Lehmann and Joseph, 2009)，被認為擁有增進土壤肥力、大量且長期地將大氣中的二氧化碳固定於陸地生態圈中以改善氣候變遷的能力 (Lehmann *et al.*, 2006)。其主要成分為碳，並由穩定的芳香族有機碳所組成，與一般的碳熱解原料相比，即使在有利的環境以及生物象中皆難以快速地被轉化為二氧化碳 (Sohi *et al.*, 2010)。影響生物炭性質之因素之一為原料 (Jindo *et al.*, 2014) 或原料熱裂解過程的溫度所影響 (Enders *et al.*, 2012)。

1) 國立中興大學園藝學系碩士班研究生。

2) 國立中興大學園藝學系教授，通訊作者。

生物炭的研究中以其對土壤的改良特性引起諸多科學家的興趣 (Lehmann and Joseph, 2009; Sohi *et al.*, 2010)，每公頃添加十噸的廢紙製成的生物炭可增加土壤之 pH 值、CEC、可交換性 Ca 和鉀以及總碳量 (Zwieten *et al.*, 2010)。生物炭混入黏壤土中可增加有機質和土壤中部分種類的元素含量並提高作物產量 (Akca, 2015)，然而生物炭對作物影響效益可能因添加比例不同而有差異 (Graber *et al.*, 2010; Petruccelli *et al.*, 2015)。

本研究目的為了解不同溫度下葫蘆科和番茄莖葉製成之生物炭性質，挑選出適合於芹菜栽培之生物炭材料，達到永續且環保的耕作模式。

材料與方法

一、試驗材料

- (一) 泥炭土 (peat moss)：採用 Jiffy 公司生產的泥炭土 (Bio-Mix Potting substratum 003B, Tref, Norway)，商用栽培介質。
- (二) 真珠石 (perlite)：購自振詠興業有限公司，商用栽培介質。
- (三) 蛭石 (vermiculite)：購自振詠興業有限公司，用來調整介質物理性質。
- (四) 大道寶粉 (DaDau Vita Powder)：購自戴壟科技股份有限公司，以天然闊葉木材經 1200 °C 無氧高溫裂解製成之生物炭粉末。
- (五) 葫蘆科及茄科作物殘株：葫蘆科材料收集自中興大學蔬菜實習試驗之南瓜、甜瓜和胡瓜植株，茄科材料為台中市清水區沐光農場提供汁番茄植株。收集後的材料陽光曝曬充分乾燥後，以碎枝機打碎至粒徑小於 5 mm 風乾備用。
- (六) 生物炭 (biochar)：於中興大學森林學系吳耿東的生質能源研究室以小型培燒爐進行燒製，燒製溫度分別有 350°C 和 550°C，燒製過程分為五階段 (培燒爐溫度會高於燒製溫度，且部分溫度會因培燒爐的差異而有所調整)：
 1. 135°C 燒製 20 分鐘，消除材料水氣。
 2. 116°C 燒製 40 分鐘，使材料完全乾燥。
 3. 400°C 或 600°C 燒製 20 分鐘，使材料於高溫無氧還境下熱裂解。
 4. 380°C 或 585°C 燒製 63 分鐘，使材料徹底熱裂解。

待培燒爐冷卻取出材料攤平降溫，即可於塑膠袋中保存。

二、試驗時間

於 2016 年 9 月進行介質分析，2017 年 10 月至 2018 年 3 月間進行芹菜栽培試驗。

三、試驗處理

大道寶粉以及兩種溫度的葫蘆科和茄科生物炭分別以重量比 3%、6% 及 9% 與已混有真珠石和蛭石的泥炭土充分混合均勻，進行物理化學測定，根據其混合後之特性挑選大道寶粉、550°C 製成的葫蘆科和番茄生物炭以 3%、6% 及 9% 進行芹菜種子發芽、育苗以及植株栽培試驗。各項處理代號見表一。

表 1. 試驗中各介質與處理代號說明。

Table 1. Types and volume ratios of the different treatments.

處理代號	說明
P	泥炭土：真珠石：蛭石 = 8：1：1 (對照組)
B	闊葉林攝氏 1200 度下所燒成之生物炭(大道寶粉)
B3	B：P = 3：100 (w：w)
B6	B：P = 6：100 (w：w)
B9	B：P = 9：100 (w：w)
C350	葫蘆科莖葉攝氏 350 度下所燒成之生物炭
T350	茄科莖葉攝氏 350 度下所燒成之生物炭
C550	葫蘆科莖葉攝氏 550 度下所燒成之生物炭
C5503	C550：P = 3：100 (w：w)
C5506	C550：P = 6：100 (w：w)
C5509	C550：P = 9：100 (w：w)
T550	茄科莖葉攝氏 550 度下所燒成之生物炭
T5503	T550：P = 3：100 (w：w)
T5506	T550：P = 6：100 (w：w)
T5509	T550：P = 9：100 (w：w)

四、介質物理化學性質測定

(一) 介質物理特性：

參考 Fonteno 與 Bilderback (1993)及許 (2011)之測定方法並加以修改。測定容器使用直徑 4.8 cm、高 5 cm、體積約為 90 mL 的不鏽鋼環，其底部以 150 目平絹網封住，使填裝的介質不會散落且水分可滲出。首先測定鋼環重量 (W_r)，再使用聚氯乙稀膜及橡皮筋將鋼環底部密封，使鋼環底部不透水而環中水分無法滲出，將水倒入鋼環中直到鋼環頂部與水面切齊，鋼環體積 (V_r)即為倒入之水量。將欲測定之介質以不外加壓力的方式填入鋼環當中直到與鋼環頂部切齊，此時介質體積相當於鋼環體積 ($V_m = V_r$)，秤重 (W_1)。將填滿介質的鋼環放置於試管架上下面再墊塑膠淺盤，鋼環中加水使其吸水 8 小時，確認介質充分吸水後再將水注滿鋼環，水分不溢出且介質不因浮起而流出，水面與鋼環切齊，秤重 (W_2)並記錄加入水的重量 ($W_{add} = W_2 - W_1$)。將聚氯乙稀膜去除，令水可以從鋼環底部流出至不再滴水，秤重(W_3)並記錄流出水之重量 ($W_{drop} = W_2 - W_3$)與潮溼介質重量 ($W_{wm} = W_3 - W_r$)。最後將鋼環放進烘箱，以 70°C 烘乾 36 小時以上，秤重 (W_{dry})並記錄乾燥介質重量 ($W_{dm} = W_{dry} - W_r$)。每處理三重複，一重複 2 個樣品。

計算物理性質公式如下：

1. 總孔隙度 (total porosity, TP) = $[(W_{add} + W_1 - W_{dry})/V_m] \times 100\%$
2. 容器含水量 (container capacity, CC) = $[(W_{wm} - W_{dm})/V_m] \times 100\%$
3. 空氣孔隙度 (air space, AS) = $(W_{drop}/V_m) \times 100\%$
4. 介質總孔隙度 (bulk density, BD) = W_{dm}/V_m

(二) EC 與 pH 值：

將取樣之介質取 5g 至於燒杯中，加入 25 mL 去離子水(1:5)。令其在 150 rpm 下震盪 1 小時，靜置 30 分鐘。使用濾紙(ADVANTEC NO.1)過濾後取得濾液，分別以 EC meter (WTW Conductivity meter LF538)與 pH meter (Suntex-sp-23)測定，每處理 3 重複，一重複兩個樣品。

(三) 總酚含量：

稱取風乾介質 5 公克於燒杯中加入 25 mL 去離子水，於 25°C 震盪 1 小時，靜置 30 分鐘，以 ADVANTEC NO.1 濾紙過濾，取 1 mL 萃取液於試管中，加入 4 mL 去離子水，再取 1mL 稀釋液依序加入飽和 Na₂CO₃ 水溶液 1 mL 及 Folin-Ciocalteu reagent (FERAK) 0.5 mL 震盪均勻，靜置 30 分鐘後以分光光度計 (U-2900 Hitachi)測 750 nm 之吸光值，總酚標準品以沒食子酸配製，每處理 3 重複。

(四) 總碳含量：

修改自 Nelson(1982)之分析方法，打開高溫爐電源升溫至 950°C，將氣閥開通，抬高硫酸瓶使 0.1N H₂SO₄ 流入量桶中，待液面升至毛細管記號 1183 mL 時關閉氣閥，待液面穩定打開流速閥調整流速至 40~60 mL/min，以瓷舟稱取催化劑 MnO₂，以長勺送入高溫爐的石英管內，再分批推入標準品、空白組之瓷舟，樣品以精秤乾燥介質 0.01 g 於瓷舟中分析，推入後將石英管口以橡皮塞塞緊，並將氣閥開通，使燃燒後之二氧化碳進入量筒，並計時 10 分鐘後關閉氣閥，紀錄液面刻度後以 CO₂ 樣針抽取量筒內氣體。以紅外線二氧化碳偵測器 (Maihak UNOP 610, Germany)檢測 CO₂ 濃度後進行計算。單位為%，每一處理三重複，每重複 2 個樣品。

(五) 總氮含量：

參考 Micro-Kjeldahl 法 (Cunniff, 1995)，精秤乾燥樣品 0.2 g 並用濾紙(ADVANTEC NO.1)包覆放入分解管底部，添加 1 g 催化劑 (Selenium reagent mixture, Merck 8030)，再加入 4.5 mL 濃硫酸後馬上放入高溫分解爐中以 410°C 進行分解，分解期間每小時轉動一次分解管以管中液體將管壁殘留物洗去，待管中液體呈現澄清之綠色且無白煙冒出時視為分解完畢。取出分解管放入抽風櫃冷卻，加入 40 mL 去離子水及 20 mL 的 12N NaOH，以 Micro-Kjeldahl 裝置通蒸氣使之氨化，氨氣以承裝 20 mL 燒氣指示劑 (含 Bromocresol green 19 μM 及 Methyl red 25 μM 之 2% 硼酸溶液)之塑膠量杯收集，當液體體積達 50 mL，再以 1/14 N 之硫酸進行滴定，計算氮於燒杯中之百分比回推氮的含量。單位為%，每一處理三重複，每重複 2 個樣品。

(六) 有效性鈣、鉀、鎂、磷與微量元素測量：

依據孟立克氏法 (Mehlich's method) 進行，取風乾之介直樣品 2.5 g 於燒杯中，加入 50 mL 之酸淬液 (0.05 N HCl 與 0.025 N H₂SO₄)。震盪 1 小時後以濾紙 (ADVANTEC NO.42) 過濾後將濾液以 PE 瓶保存。

(七) 磷：使用鉬黃法 (Vanadate-Molybdate Yellow method)，取 1 mL 濾液於試管中，加入 3 mL 去離子水以及 1 mL 鉬黃試劑 [1000 mL 試劑中含有 (NH₄)₆Mo₇O₂₄ · 4H₂O 22.5 g 及 NH₄VO₃ 1.25 g 溶於 25% HNO₃] 均勻混合後靜置 30 分鐘。使用分光光度計 (U-2900, Hitachi) 測量樣品於 470 nm 的吸光值，標準液以 KH₂PO₄ 進行配置，單位為 % (Horwitz, 1970)。

(八) 有效性鉀、鎂：取 0.1 mL 濾液加入 4.9 mL 去離子水稀釋 50 倍，均勻震盪後使用原子吸收光譜儀 (Hitachi Z-2300) 測定濃度，再計算原樣品元素濃度，單位為 %。

(九) 有效性鈣：取 0.1 mL 濾液加入 3.9 mL 去離子水和 1 mL 5% 氧化鑷 (LaO₃, Lanthanum oxide，溶於 25% 硫酸溶液)，均勻震盪後使用原子吸收光譜儀 (Hitachi Z-2300) 測定濃度，再計算原樣品元素濃度，單位為 %。

(十) 鐵、錳、鋅及鈣：直接取濾液，均勻震盪後使用原子吸收光譜儀 (Hitachi Z-2300) 測定濃度，再計算原樣品元素濃度，單位為 mg/kg。

五、芹菜栽培試驗

農友種苗公司之'艷琴'芹菜為試驗材料，每個五吋盆填裝 1500 g 泥炭土，大道寶粉、550°C 葫蘆科和番茄生物炭分別以重量比 3% (45 g)、6% (90 g) 和 9% (135 g) 添加在泥炭土中混合均勻，芹菜苗於播種後第六週進行定植，每週以 1000 倍尿素施肥。於芹菜定植後兩個月調查以下性狀：

(一) 株高：為植株基部至全株最長葉片尖端的長度，單位為公分(cm)。

(二) 葉柄徑：使用游標尺測量植株莖基部離土面 1 公分之葉柄總寬，單位為公厘(mm)。

(三) 葉柄數：為單棵植株葉片之葉柄數加總，單位為隻。

(四) 地上部鮮重：植株清洗後用紙巾將殘留之水分吸乾，秤植株之地上部重量，單位為公克(g)。

(五) 地上部乾重：將植株地上部放入紙袋中，放入 70°C 烘箱中 72 小時秤重，單位為公克 (g)。

(六) 葉綠素含量：

參考 Wintermans 和 De Mots (1965) 之測定方法，取新鮮葉片 0.1 g 加入 5 mL 無水酒精 (95.5%) 以 70°C 熱水中分解至葉片完全退綠白化。使用分光光度計 (U-2900, Hitachi) 測量液體於 665 nm、649 nm 之吸光值，計算公式如下：

$$1. \text{Chlorophyll a (mg g}^{-1}\text{)} = (13.7 \times A_{665}) - (5.76 \times A_{649}) / 1000 / W$$

$$2. \text{Chlorophyll b (mg g}^{-1}\text{)} = (25.8 \times A_{649}) - (7.6 \times A_{665}) / 1000 / W$$

$$3. \text{Total chlorophyll (mg g}^{-1}\text{)} = (6.1 \times A_{665}) - (20.4 \times A_{649}) / 1000 / W$$

(七) 碳水化合物含量：

參考 Yoshida 等人 (1976) 之方法，精秤乾燥磨粉之樣品 0.1 g 於離心管中，加入 10 mL 去離子水於 30°C 水浴震盪 3 小時後以 4000 rpm 在室溫下離心 10 分鐘。取上層液 0.2 mL 加入 4.8 mL 去離子水震盪均勻，取出 0.2 mL 混合液加入 0.1 mL liquid phenol 及 6 mL 濃硫酸，震盪均勻靜置 30 分鐘後使用分光光度計 (U-2900, Hitachi) 測定 490 nm 吸光值並計算全可溶性糖含量。每一處理三重複。

樣品之澱粉含量測定以上述離心且抽取完上清液之底部殘渣於 70°C 烘箱烘乾 24 小時以上，加入 2 mL 去離子水放入沸水中煮 15 分鐘，取出後迅速冷卻，再加入 2 mL 9.2 N HClO₄ 震盪 15 分鐘，再加入 6 mL 去離子水以 4000 rpm 在室溫下離心 10 分鐘，取離心後之上清液 0.1 mL 加入 1.9 mL 去離子水、0.1 mL liquid phenol 及 6 mL 濃硫酸，震盪均勻靜置 30 分鐘後使用分光光度計 (U-2900, Hitachi) 測定 490 nm 吸光值並計算澱粉含量。每一處理三重複。

六、統計分析

試驗皆採完全逢機設計，調查所得數據以 SAS 套裝軟體 9.4 版 (SAS Institute, Cary, NC) 中 ANOVA (Analysis of Variance) 進行變方分析 ($\alpha = 0.05$)，以 Fisher's LSD 進行試驗間各處理平均值的比較。

結 果

一、生物炭介質物理化學性質測定

介質物理性質之測定項目為總孔隙度、容器含水量、空氣孔隙度和總體密度。表 2 比較純質之泥炭土 (P)、大道寶粉 (B)、350°C 燒製的葫蘆科生物炭 (C350)、550°C 燒製的葫蘆科生物炭 (C550)、350°C 燒製的番茄生物炭 (T350) 和 550°C 燒製的番茄生物炭 (T550) 的物理性質。總孔隙度以 B 60.32% 最低，C550 和 T550 分別為 89.75% 和 86.82% 最高且與同材料較低溫度的 C350 和 T350 有顯著差異。容器含水量 P 為 62.75%，與 C550 62.52% 並列最高，41.11% 的 B 和 36.30% 的 T550 最低，同材料間 C550 與 T550 皆分別顯著高於 C350 和 T350。空氣孔隙度番茄生物炭 T350 為 44.80% 而 T550 為 39.78%，兩者顯著高於其他材料並且彼此間無顯著差異。總體密度 B 為 0.46 g/cm³ 最高，番茄生物炭 T350 和 T550 間無顯著差異且並列最低，葫蘆科生物炭 C550 為 0.10 g/cm³，顯著低於 0.12 g/cm³ 的 C350。

化學性質測定項目為 pH 值、EC 值和總酚類化合物含量，結果顯示於表 3，pH 值以 P 為 6.02 最低、B 為 8.30 次之，C550 和 T550 分別為 9.95 和 10.05，相較於 C350 為 8.52 和 T350 為 9.19 顯著較高。EC 值以 P 0.79 dS/m 最低且與 B 無顯著差異，C550 和 T550 分別顯著高於同材料的 C350 和 T350，當中又以 58.70 dS/m 的 C550 擁有較高的 EC 值。B

的總酚類化合物最低，其含量為 20.68 mg/kg，泥炭土為 118.15 mg/kg 次之，且與 C550 無顯著差異，C350 和 T350 總酚類化合物含量皆顯著高於 C550 及 T550，當中又以 T350 顯著較高，其含量高達 1498.81 mg/kg。

表 2. 泥炭土及不同生物炭之物理特性。

Table 2. Physical properties of peat moss and different biochars.

處理	總孔隙度 (%)	容器含水量 (%)	空氣孔隙度 (%)	總體密度 (g/cm ³)
P	86.08 ab ^z	62.75 a	23.33 b	0.14 b
B	60.32 d	41.11 c	19.21 b	0.46 a
C350	72.37 c	46.56 b	25.81 b	0.12 c
C550	89.75 a	62.52 a	27.23 b	0.10 d
T350	81.09 b	36.30 c	44.80 a	0.07 e
T550	86.82 a	47.03 b	39.78 a	0.06 e

^z : Means in a column with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level.

表 3. 泥炭土及不同生物炭酸鹼度、電導度及總酚含量。

Table 3. The pH value, electrical conductivity (EC), and total phenolic acid content of peat moss and different biochars.

處理	總酚 (mg/kg)	pH	EC (dS/m)
P	118.15 c ^z	6.02 e	0.79 d
B	20.68 d	8.30 d	2.83 d
C350	639.33 b	8.52 c	32.77 c
C550	71.44 cd	9.95 a	50.57 b
T350	1498.81 a	9.19 b	47.17 b
T550	42.62 d	10.05 a	58.70 a

^z : Means in a column with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level.

介質大量元素顯示於表 4，碳元素含量以 B 最高，含量高達 81.91%，P 為 47.71 居中與 T350 46.14 相近，並顯著高於 C350，C550 和 T550 並列最高，碳含量分別為 58.37% 和 58.26。C550 的氮元素為 2.81% 而 C350 為 2.91%，兩者間無顯著差異，T550 則為 1.59%，顯著低於含量 1.96 的 T350。碳氮比以 B 281.82 最高，其餘生物炭種類皆與 P 無顯著差異。鈣元素 C350 含量 0.92% 為最高，C550 含量 0.76% 次之，後依序是 P 和 B，T350 和 T550 皆為 0.08% 並且顯著低於其他介質。鉀含量於 T350 和 T550 分別為 3.53% 和 4.30% 並且顯著高於其他處理，P、B、C350 和 C550 間則無顯著差異。鎂元素含量 B 最高，含量高達 0.19%，P、C350、C550 和 T350 間無顯著差異，T550 含量為 0.08% 最低。磷元素於 C550 和 T550 皆為 0，T350 磷含量 0.27% 為最高，C350 為 0.15% 次之，P 和 B 無顯著差異。

微量元素含量顯示於表 5，鐵含量以 B 132.17 mg/kg 顯著最高，P 和 C350 次之，C550、T350 和 T550 皆低於 1 mg/kg。錳元素以 C350 含量 68.57 mg/kg 最高，依次為 P、B、T350，C550 和 T550 錳含量無顯著差異。鋅元素含量 P 和 C350 併列最高，銅元素含量則以 T550 0.87 mg/kg 最高。

表 4. 泥炭土及不同生物炭碳氮比及大量元素含量。

Table 4. The carbon nitrogen ratio (C/N) and macronutrients contents of peat moss and different biochars.

處理	C (%)	N (%)	C/N	Ca (%)	K (%)	Mg (%)	P (%)
P	47.71 c ^z	1.20 d	40.82 b	0.43 c	0.15 b	0.14 b	0.03 c
B	81.91 a	0.31 e	281.82 a	0.36 d	0.11 b	0.19 a	0.04 c
C350	31.13 d	2.91 a	10.98 b	0.92 a	0.72 b	0.14 b	0.15 b
C550	58.37 b	2.81 a	20.96 b	0.76 b	1.02 b	0.12 bc	0.00 d
T350	46.14 c	1.96 b	23.63 b	0.08 e	3.53 a	0.15 b	0.27 a
T550	58.26 b	1.59 c	36.58 b	0.08 e	4.30 a	0.08 c	0.00 d

^z : Means in a column with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level.

表 5. 泥炭土及不同材料和溫度之生物炭微量元素含量。

Table 5. The micronutrients contents of peat moss and different biochars.

處理	Fe (mg/kg)	Mn (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
P	117.40 b ^z	23.40 b	19.87 a	0.13 b
B	132.17 a	15.70 c	0.43 b	0.03 bc
C350	122.00 b	68.57 a	19.87 a	0.03 bc
C550	0.37 c	0.30 e	0.00 c	0.00 c
T350	0.60 c	9.27 d	0.60 b	0.03 cb
T550	0.07 c	0.17 e	0.33 bc	0.87 a

^z : Means in a column with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level.

葫蘆科及番茄作物莖葉生物炭與不同比例泥炭土混合介質之物理特性顯示於表 6，介質分別以 B、C550、T550 3%、6% 以及 9% 混合而成。B 於不同比例混合泥炭土在總孔隙度、容器含水量、空氣孔隙度、總體密度和土壤含水量無顯著差異，C550 中 C5509 總孔隙度 87.86% 顯著高於其他處理，並隨著比例添加降低，T5509 總孔隙度為 87.61%，顯著高於 T5506 和 T5503，並且後兩者間無顯著差異。容器含水量在 C5503、C5506、C5509 間無顯著差異，於番茄材料中 T550 隨著比例增高而些微降低。空氣孔隙度 C5506 與 C5503 以及 T5506 和 T5503 彼此間無顯著差異，C5509 為 13.13%、T5509 為 18.71% 分別為同材料處理組中最高者。總體密度隨著生物炭添加比例增高而降低。

葫蘆科和番茄莖葉生物炭以不同比例與泥炭土混合介質之 pH 值、EC 值和總酚類化合物含量見表 7。B 的 pH 值隨著添加比例的增加而略微提高，EC 值在處理間則無顯著差異。C550 和 T550 的 pH 值和 EC 值隨著添加比例的提高而增加，當中以 T5509 的 pH 為 7.98 顯著高於其他處理，EC 值除了 C5509 和 T5509 無顯著差異，C5503、C5506 普遍低於 T5503 和 T5506。總酚類化合物於不同處理間無顯著差異。

表 6. 生物炭與不同比例與泥炭土混合介質之物理特性。

Table 6. Physical properties of peat moss with both different kind and volume ratios of biochars.

處理	總孔隙度 (%)	容器含水量 (%)	空氣孔隙度 (%)	總體密度 (g/cm ³)
B3	88.87 a ^z	71.48 cd	17.39 a	0.20 bc
B6	87.19 abc	69.48 d	17.71 a	0.21 ab
B9	87.07 abc	69.74 cd	17.33 a	0.21 ab
C5503	85.61 bcd	78.07 a	9.25 c	0.19 cd
C5506	85.48 cd	76.24 a	9.24 c	0.18 de
C5509	87.86 a	74.73 ab	13.13 b	0.16 e
T5503	84.86 d	72.76 bc	12.10 b	0.22 a
T5506	84.61 d	71.32 cd	13.29 b	0.22 a
T5509	87.61 ab	68.91 d	18.71 a	0.18 cd

^z : Means in a column with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level.

表 7. 生物炭不同比例與泥炭土混合介質之酸鹼度、電導度及總酚含量。

Table 7. The pH value, electrical conductivity (EC), and total phenolic acid content of peat moss with both different kind and volume ratios of biochars.

處理	總酚 (mg/kg)	pH	EC (dS/m)
B3	119.67 ab ^z	6.29 e	0.89 d
B6	100.32 c	6.94 cd	0.86 d
B9	113.19 abc	6.70 d	1.17 d
C5503	106.40 bc	6.58 df	2.47 c
C5506	112.88 abc	6.94 cd	3.31 bc
C5509	124.99 a	7.49 b	4.73 a
T5503	113.89 abc	7.38 b	0.92 d
T5506	116.58 ab	7.12 bc	3.87ab
T5509	120.43 ab	7.98 a	4.61 a

^z : Means in a column with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level.

二、介質添加生物炭之芹菜栽培試驗

栽培試驗為六週大的芹菜苗定植於生物炭介質配方進行，表 8 中顯示不同介質配方對植株生育狀況之影響，株高、莖徑和葉柄數在各處理間與 P 幾無差異，唯 B3、B6 和 B9 處理之株高顯著較高，但彼此間配方比例並無差異。B 和 C550 所有配方下皆可顯著提高芹菜植株鮮重和乾重，T550 之地上部鮮重於 T5509 時與 P 無顯著差異，地上部乾重在 T5506、T5509 與 P 無顯著差異，碳水化合物和葉綠素亦未因生物炭的添加而有所影響(表 9)。

表 8. 生物炭不同比例與泥炭土混合對芹菜植株生長之影響。

Table 8. The plant height, petiole diameter, petiole number, and fresh or dry weight of aboveground of celery plants cultivated by mixed peat moss with different kind and volume ratios of biochars.

處理	株高 (cm)	葉柄徑 (mm)	葉柄數 (隻)	地上部鮮重 (g)	地上部乾重 (g)
P	29.33 c ^z	13.06 c	5.33 a	23.64 c	2.26 e
B3	38.67 ab	14.15 ab	7.33 a	44.33 b	4.68 bc
B6	44.00 a	12.43 bc	7.00 a	52.37 ab	5.12 ab
B9	40.67 ab	14.67 abc	7.33 a	46.32 b	4.23 c
C5503	40.50 ab	17.46 abc	7.00 a	50.30 ab	4.94 bc
C5506	44.17 ab	14.88 abc	7.33 a	58.68 a	5.85 a
C5509	36.83 b	14.79 a	6.00 a	52.77 ab	5.00 bc
T5503	36.67 b	16.62 a	7.00 a	30.35 c	3.15 d
T5506	38.00 ab	13.84 abc	6.00 a	30.08 c	3.44 d
T5509	36.00 b	15.02 abc	7.00 a	29.28 c	3.04 d

^z : Means in a column with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level.

表 9. 生物炭不同比例與泥炭土混合對芹菜植株碳水化合物及葉綠素含量之影響。

Table 9. The carbohydrate and chlorophyll content of celery plants cultivated by mixed peat moss with different kind and volume ratios of biochars.

處理	可溶性糖 (%)	澱粉 (%)	Chl a (mg /g)	Chl b (mg /g)	Total Chl (mg /g)
P	8.61 b ^z	25.98 ab	1.47 bc	0.61 ab	2.08 bc
B3	10.58 ab	24.68 abc	1.59 abc	0.52 b	2.11 bc
B6	11.36 a	22.79 abc	1.55 abc	0.52 b	2.08 bc
B9	11.88 a	20.71 bc	1.84 a	0.71 a	2.55 a
C5503	10.71 ab	20.62 abc	1.41 bc	0.60 ab	2.01 bc
C5506	8.79 b	25.69 ab	1.45 bc	0.63 ab	2.18 abc
C5509	9.74 ab	24.96 abc	1.69 ab	0.65 ab	2.31 ab
T5503	8.77 b	18.23 c	1.41 bc	0.56 ab	1.97 bc
T5506	8.76 b	26.19 abc	1.55 abc	0.61 ab	2.16 abc
T5509	8.81 b	27.60 a	1.63 abc	0.65 ab	2.28 ab

^z : Means in a column with the same letter are not significantly different by Fisher's LSD test at 5% level.

討 論

一、生物炭介質物理化學性質測定

目前生物炭在農業的應用主要是添加於介質以進行土壤改良 (Sohi *et al.*, 2010)，生物炭是生物有機物在高溫無氧的環境下熱裂解而成，此一過程造成其物理及化學性質與原材料產生變化，成品特性受到原材料及熱裂解溫度的影響 (Enders *et al.*, 2012)。物理特性包含了密度和孔隙度，此性質會影響介質外觀、土壤水分以及植物有效可利用水容量 (Brockhoff *et al.*, 2010)。本試驗進行的物理特性分析指標為總孔隙度、容器含水量、空氣孔隙度、總體密度和土壤容水量，總孔隙度為容器含水量和空氣孔隙度的總和，當中容器含水量表示介質的保水能力，總體密度則受到總孔隙度和壓實程度的影響。表 2 中 C550 之物理性質與泥炭土 (P) 最接近，大道寶粉生物炭 (B)、C550 和 550°C 製成的番茄生物炭 (T550) 分別以 3、6 和 9% 與 P 混合後與 P 之總孔隙度無顯著差異，而容器含水量和總體密度提高、空氣孔隙度降低 (表 6)。

pH 值表示介質的酸鹼程度，介質中的酸鹼程度會影響營養元素的有效性，所有生物

炭之 pH 值皆顯著高於 P，同材料下 550°C 生物炭 pH 值高於 350°C 製成者，同溫度下番茄生物炭 pH 值高於葫蘆科生物炭 (表 3)。污水淤泥生物炭在 400、450、500、550 和 600°C 下之 pH 值分別為 8.46、8.60、8.76、9.48 和 11.37 (Jin *et al.*, 2016)，因此可了解到生物質製成生物炭後為鹼性，其鹼性程度與熱裂解溫度成正比。將生物炭以不同比例添加至泥炭土中，其 pH 值會隨著生物炭比例越高而提高 (表 7)，芹菜栽培介質最適合的 pH 值為 6 至 7，9% 的 C550 處理以及所有的番茄生物炭處理皆高於此範圍。總酚類化合物含量以 B 和 T550 最低，350°C 之葫蘆科和番茄生物炭總酚類化合物濃度分別為 639.33 和 1498.81 mg/kg，在 550°C 下熱裂解之葫蘆科生物炭總酚濃度與 P 相當 (表 3)，因未收集製作過程中的煙和焦油進行測定，無法確定酚類化合物是隨煙物飄散至空氣中或流出至焦油當中，但可知溫度越高生物炭中的總酚類化合物濃度越低，且以不同比例混拌生物炭至泥炭土中其總酚類化合物含量與 P 並無顯著差異 (表 7)。

大量元素為碳、氮、鈣、鉀、鎂和磷，同材料間以溫度較高的生物炭碳含量較高，表 5 顯示氮含量部分 C350 和 C550 沒有顯著差異，T550 氮含量則顯著低於 T350 (表 4)，Herath 等人 (2013) 以玉米秸稈碳元素含量在不同溫度 350°C 及 550°C 下製成後分別為 63.5% 和 71.8%，氮元素則為 0.71% 和 0.76%，其碳元素含量隨著生物炭製作溫度的提高而比例增加與本實驗結果相符。氮元素於葫蘆科生物炭在不同溫度下並無顯著差異，番茄則以高溫者顯著降低 (表 4)，推斷氮元素比例之變化受到植株材料影響較大。鈣在葫蘆科生物炭之含量較高，C350 又顯著高於 C550，B 次之，番茄生物炭兩中溫度下鈣含量並列最低，因此鈣含量之多寡以及是否因熱裂解溫度而異會受到作物材料影響。鉀元素含量以番茄生物炭兩中溫度並列最高，且其餘材料無顯著差異 (表 4)，可知鉀元素主要受到作物材料影響，溫度之影響不顯著。鎂和磷元素含量都會受到溫度和作物材料影響，除了葫蘆科鎂含量未受到溫度之影響，其餘皆以溫度較高者會提高含量 (表 4)。微量元素包含鐵、錳、鋅和銅，表 5 顯示鐵含量在番茄生物炭並不會受到溫度影響，葫蘆科生物炭在 350°C 下擁有較高的鐵含量，並且 B 是所有處理鐵含量最高的生物炭。錳元素在葫蘆科和番茄生物炭可明顯見到因熱裂解溫度較高而含量顯著降低。鋅元素含量以 C350 和 P 最接近，以較高溫度 550°C 製成後幾乎含無鋅元素，番茄生物炭之鋅元素含量並未因溫度不同而受到影響。銅含量在番茄生物炭以較高溫度處理可顯著提高其含量，在葫蘆科作物材料則無影響 (表 5)。Vaccar 等人 (2015) 以小麥麩為材料製成 800 和 1200°C 的生物炭，其營養元素含量氮、鉀和磷也隨著製成溫度提高而增加比例，因此可知生物炭之元素含量普遍受到溫度和作物材料之影響，但還是會因元素種類而有例外。

二、介質添加生物炭之芹菜栽培試驗

農民對芹菜之採收表準普遍以株高為準、栽培時間為輔，表 8 之植株性狀當中葉柄數並無差異的情況下表示芹菜之生長階段並未因生物炭之添加而縮短，但株高因生物炭之添加而顯著提高的情況下表示處理後能使芹菜植株更為健壯，可以縮短栽培期提高生產效率。地上部之鮮重僅 T550 的所有處理與 P 無顯著差異，地上部乾重雖高於 P 但低於其他處理，

因此 T550 對於芹菜栽培之產量影響並無顯著效益，B 和 C550 皆以 6% 比例之地上部鮮乾重狀態最佳。

芹菜植株之生長過程中以光合作用將二氧化碳固定並以碳水化合物型態利用和貯存於體內，植株生育狀態越佳其植株體內含有的碳水化合物便越多。試驗中僅 6% 的 B 處理和 9% 的 B 處理處理可以增加芹菜植體可溶性糖含量，澱粉含量除了 3% 的 T550 處理會降低外其於與 P 無差異（表 9），整體而言生物炭之添加對碳水化合物含量無明顯影響。葉綠素含量反映了植株養分的吸收情形，表 9 顯示除 9% 的 B 處理在葉綠素 a 和總葉綠素含量可顯著高於 P 以外其於處理相較 P 並不會有顯著影響，B 的鎂含量顯著高於其他生物炭，可能因此補足鎂元素養分導致葉綠素含量之增加。生物炭對作物於正常栽培情形下之促進因作物種類、生物炭材料、溫度及比例而有所影響 (Graber *et al.*, 2010; Vaccar *et al.*, 2015)。

參 考 文 獻

- Akca, M. O. and A. Namli. 2015. Effects of poultry litter biochar on soil enzyme activities and tomato, pepper and lettuce plants growth. *Eurasian J. Soil Sci.* 4(3): 161-168.
- Brockhoff, S. R., N. E. Christians, R. J. Killorn, R. Horton, and D. D. Davis. 2010. Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar. *Agron J.* 102(6): 1627-1631.
- Enders, A., K. Hanley, T. Whitman, and J. Lehman. 2012. Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresour. Technol.* 114: 644-53.
- Graber, E. R., Y. M. Harel, M. Kolton, E. Cytryn, A. Sillber, D. R. David, L. Tsechansky, M. Borenshtein, and Y. Elad. 2010. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant Soil* 337: 481-496.
- Herath, H. M. S. K., M. Camps-Arbestain, and M. Hedley. 2013. Effect of biochar on soil physical properties in two contrasting soils: An alfisol and an andisol. *Geoderma* 209: 188-197.
- Jin, J., Y. Li, J. Zhang, S. Wu, Y. Cao, P. Liang, J. Zhang, M. H. Wong, S. Shan, and P. Christie. 2016. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. *J. Hazard. Mater.* 320: 417-426.
- Jindo, K., H. Mizumoto, Y. Sawada, M. A. Sanchez-Monedero, and T. Sonoki. 2014. Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences* 11: 6613-6621.
- Lehmann, J. and S. Joseph. 2009. Biochar for environmental management: an introduction. In: Lehmann, J., Joseph, S. (Eds.), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London. pp. 1-12.

- Lehmann, J., J. Gaunt, and M. Rondon. 2006. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems: a review. *Mitig. Adapt. Strat. Gl.* 11: 403-427.
- Petrucelli, R., A. Bonetti, M. L. Traversi, C. Faraloni, M. Valagussa, and A. Pozzi. 2015. Influence of biochar application on nutritional quality of tomato (*Lycopersicon esculentum*). *Crop Pasture Sci.* 66: 747-755.
- Sohi, S. P., E. Krull, E. Lopez-Capel, and R. Bol. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. *Adv. Agron.* 105: 47-82.
- Vaccari, F. P., A. Maienza, F. Miglietta, S. Baronti, S. D. Lonardo, L. Giagnoni, A. Lagomarsino, A. Pozzi, E. Pusceddu, R. Ranieri, G. Valboa, and L. Genesio. 2015. Biochar stimulates plant growth but not fruit yield of processing tomato in a fertile soil. *Agr. Ecosyst. Environ.* 207: 163-170.
- Zwieten, L. V., S. Kimber, S. Morris, K. Y. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph, and A. Cowie. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 327: 235-246.

The Physical and Chemical Characteristics Analyses of Biochar and Celery Cultivation by Its Mixed Medium

Te-Ling Chu¹⁾ Yu Sung²⁾

Key word: Biochar, Physical characteristics, Chemical characteristics, Celery,

Summary

In this study, biochar made from broadleaf wood at 1200 °C , produced by Dazzeon Technology and the biochar obtained by pyrolysis of stem and leaf residues of ground (Cucurbitaceae) or tomato plants at 350 °C and 550 °C were used. The physical, chemical properties and nutrient content of these biochar products were mainly dependent on the production temperature. The pH values of the biochar were between 8 and 10. The Cucurbitaceae and tomato biochar had higher EC values. Biochar prepare at 350 °C had a low porosity and extremely high phenolic compounds, which is not suitable for addition to a growth medium. Dazzeon biochar (B) or biochar products made by pyrolysis of Cucurbitaceae (C550) or tomato plants (T550) at 550 °C, were added to peat soil at 3, 6 or 9% (w/w). The 9% B biochar increased chlorophyll content of celery plants. The addition of biochar could increase the height of celery plants, and the growth of celery plants under C550 treatment were the best, which could increase the yield. The aim of this study is to research the agricultural recycle, which made into biochar, and its improvement of soil in celery cultivation. Wish to create a sustainable agricultural industry model which is compatible with both the environment and economic benefits.

1) Graduate student, Department of Horticulture, National Chung Hsing University.

2) Professor, Department of Horticulture, National Chung Hsing University. Corresponding author.