

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高中組 農業與食品學科

第三名

052204

生物炭原料與裂解溫度對作物生長與土壤性質
的影響

學校名稱：復旦學校財團法人桃園市復旦高級中等學
校

作者： 高二 許穎蓁 高二 吳堉綸	指導老師： 吳棟良
-------------------------	--------------

關鍵詞：生物炭、生物毒性、土壤碳匯

摘要

本研究探討生物炭是否具有生物毒性(抑制發芽)與不同生物炭對短期葉菜類生長與土壤性質的影響。發芽試驗結果指出，8 種生物炭對種子發芽不具有明顯的毒性，但是具有較高 pH 與 EC 值的特性(特別是 EC 值)的生物炭，對於根系的伸長有些微至明顯的抑制現象(鹽害作用)

盆栽試驗中，相較於對照組，強酸性 Ce 土壤中生物炭的共同添加處理在株長與鮮重方面平均各增加 2.8 倍與 16.9 倍，生物炭效應平均增益 1.2 倍(株長)與 1.6 倍(鮮重)，在弱鹼性 Eh 土壤中的效果較低，只有 1.2 倍(株長)與 3.5 倍(鮮重)。鹼性生物炭的石灰效應有助於改良強酸性土壤的 pH 值，使其適於植物生長；在鹼性土壤中，利用微酸性的生物炭可有效降低土壤 pH 值，增進作物生長。

壹、前言

一、研究動機

21 世紀最大的挑戰之一是需要到 2050 年將糧食產量增加近一倍，減少持續的能源貧困，同時減少大氣中溫室氣體的排放，並建立對氣候變化的適應能力(IPCC, 2014)。

「生物炭」在國際間的發展與重視已有將近 20 年的時間，但是近幾年來才在台灣受到政府及農民的注意與重視。台灣主要的有機廢棄物全年約 3000 萬公噸以上，其中約 2825 萬多公噸的有機廢棄物未能妥善處理與再生利用。目前國內生物炭因原料來源與製程技術種類眾多，製成之生物炭特性與效果不一，在缺乏深入的了解之下，陸續有農民直接採用其來改變土壤環境。但是在燒製過程中或燒製後是否產生有毒物及其含量從未被仔細評估，貿然利用則使用者與土壤安全皆甚堪慮。因此我們想找到合適的解決方法。

二、文獻回顧

生物炭是一種富含碳的木炭形式，通過在 300-700°C 之間於無氧室中燃燒有機廢物產生，具有多種用途(Lehmann et al., 2006)。熱裂解將有機物質轉化為更頑固的形式，使生物炭中的碳更能抵抗生物降解作用(Lehmann et al., 2009)。因此，生物炭施用在土壤中可以用來吸存碳和抵消碳排放(Lehmann et al., 2009)。使用有機廢物作為熱裂解原料可以幫助減少廢棄物流量並回收部分釋放的能源，進一步降低廢棄物處理和生物炭生產的整體運營成本。如果添加到土壤中，它可以增強土壤保留養分的能力，減少農田流失化學物質，提高土壤的持水能力並降低土地的 CH₄ 和 N₂O 排放(Feng et al., 2012)。

碳匯(Carbon sink)即碳吸儲庫，是儲存二氧化碳和累積碳化合物之天然或人工「倉庫」，能作為溫室氣體增加之緩衝區，例如森林、土壤及海洋等。而土壤碳吸儲庫則稱作「土壤碳匯」，土壤碳匯具備良好的減碳能力，若能提高土壤碳匯能力儲存大氣中之碳，例如全世界土壤碳含量每年增加 0.4%，則可減少大氣中 3,036~4,048 tCO₂e，等於歐盟每年燃油排放量，也就是所謂的「千分之四倡議」，故土壤碳匯近年來開始受到世界各國矚目。

三、研究目的

本研究假設添加適當量的生物炭與複合化學肥料混合物可以藉由生物炭穩定複合化學肥料有機質，增進作物生長、改善土壤品質與增進土壤有機碳(碳匯)等三贏的策略，並在農業廢棄物資源再利用(減廢)、降低肥料的使用(合理化施肥)與減少環境污染等三方面有更實質的幫助。農民可以在未來逐步減少複合化學肥料的添加量，並通過混合添加生物炭來保持適當的土壤有機碳、減少養分流失與對環境污染的影響。

選用稻殼、竹炭、光臘樹、柑橘枝條、番石榴枝條五種台灣常見的農業廢棄資材，在低氧下(<5~10%)燒製成生物炭(300°C~700°C)，以及選擇酸性紅壤(陳厝寮土系土壤)與石灰性黏板岩沖積土(二林土系土壤)作為試驗土壤，研究計畫的目的旨在探討：

- (一) 生物炭對於作物種子發芽是否具有生物毒性?
- (二) 酸性紅壤與石灰性土壤中添加生物炭對土壤與作物生長的影響?
- (三) 最適合的生物炭種類?

貳、研究設備及器材

一、試驗土壤

依據前人研究的結果(蔡呈奇等人，1998)，本研究選用兩種試驗土壤，台中陳厝寮土系土壤(Chentsoliao Series, C_{Ce}, C_e)及彰化二林土系土壤(Erhlin Series, E_h)

(一) 陳厝寮土系(C_e)

由洪積層發育而成之紅棕色至棕色土壤，主要分佈於洪積臺地上，排水良好，質地剖面上部底土為坩質粘壤土或粘質壤土，下部底土為粘質壤土，坩質粘壤土至坩質粘土，一般呈強酸性至中度酸性反應。

(二) 彰化二林土系(E_h)

橄欖色至淡橄欖棕色，微鹼性粘板岩老沖積物沉積而成之含石灰結核，排水不完全沖積土。其質地剖面全層均以坩質壤土為主。

本研究採集表層 0~15 公分的土壤(現地隨機採集 10 個位置點，混合成一包)約 100

公斤，攜回實驗室風乾、磨碎與過篩(<2 mm)，儲存在大型 PE 塑膠桶中。於現地採集大型土環(直徑 8 公分，高 10 公分的圓筒)，3 重複，攜回實驗室測定土壤總體密度)。兩種土壤的基本性質如表一(土壤性質分析由國立宜蘭大學土壤分析與調查實驗室提供)所示，Ce 土系的主要特性為強酸性(pH 4.44)、低土壤肥力與具高黏粒含量的黏質壤土(clay loam, CL)，Eh 土系則為弱鹼性(pH 7.82)、較高土壤肥力與高粉質含量的粉質黏壤土(silty clay loam, SiCL)。

【表一、試驗土壤的基本理化性質】

土壤性質	Ce	Eh
總體密度(Bulk density, Bd) (Mg/m ³)	1.13	1.31
風乾土水分含量(%)	1.19	1.11
砂粒(Sand) (%)	36.04	18.06
黏粒(Clay) (%)	35.43	27.62
粉粒(Silt) (%)	28.53	54.32
土壤質地級(Soil Texture Class)	黏質壤土	粉質黏壤土
水分吸持容量(Water Holding Capacity, WHC) (%)	43.4	64.0
酸鹼度(pH)	4.44	7.82
電導度(Electrical Conductivity, EC) (dS/m)	1.17	1.39
有機碳 (Organic Carbon, OC) (g/kg)	5.60	14.4
可交換性鉀(Exchangeable Potassium, Ex. K) (cmol(+)/kg soil)	0.69	0.81
可交換性鈉(Exchangeable Sodium, Ex. Na) (cmol(+)/kg soil)	3.55	3.32
可交換性鈣(Exchangeable Calcium, Ex. Ca) (cmol(+)/kg soil)	0.63	21.3
可交換性鎂(Exchangeable Magnesium, Ex. Mg) (cmol(+)/kg soil)	0.76	2.93
陽離子交換容量(Cation Exchange Capacity, CEC) (cmol(+)/kg soil)	5.65	9.10
鹽基飽和度(Base Saturation, BS) (%)	99.6	100
銨態氮(NH ₄ -N) (mg/kg)	8.45	3.59
硝酸態氮(NO ₃ -N) (mg/kg)	2.33	18.0
有效性磷(Available Phosphorus, Av. P) (mg/kg)	5.39	35.3
有效性鉀(Available Potassium, Av. K) (mg/kg)	0.21	0.21
水團粒穩定度(Water Aggregate Stability, WAS) (%)	27.7	10.6
全氮量(Total Nitrogen, TN) (g/kg)	1.35	2.62
全磷量(Total Phosphorus, TP) (g/kg)	0.25	0.85

二、複合(化學)肥料

為了與一般田間耕作時施用複合(化學)肥料的效果做比較，本研究選用台灣農民常用的長岡化工鐵牛牌特 1 號複合有機肥料(11% N、11% P₂O₅、11% K₂O)。(以 CF 為代號)

三、供試生物炭

稻穀 D(300°C):市售的稻穀炭。

稻穀 F(500°C):台東農家所提供。

竹炭 WB(700°C)、光臘樹 WA(700°C):林業試驗所森林利用組所提供。

柑橘 4B(400°C)、柑橘 6B(600°C)、番石榴 4E(400°C)、番石榴 6E(600°C):農業試驗所農業化學組所提供。

8 種生物炭基本性質經分析後如表二(生物炭性質分析由國立宜蘭大學土壤分析與調查實驗室提供)所示。

【表二、8種試驗生物炭的基本性質】

性質(Properties)		D	F	WB	WA	4B	6B	4E	6E	
pH		6.34	7.73	10.6	10.5	10.2	11.1	10.5	10.4	
EC (dS/m)	30min	0.58	0.50	0.94	0.73	1.53	6.83	3.56	5.89	
	24hr	0.84	0.85	1.10	1.08	1.89	7.18	4.37	7.00	
Mehilch3- extractable (g/kg)	P	0.52	0.53	0.67	0.83	0.69	0.99	0.49	0.41	
	K	6.57	5.33	7.76	5.85	16.4	34.0	16.6	27.3	
	Ca	0.51	0.80	0.55	4.31	20.2	19.3	10.4	9.41	
Available (g/kg)	Mg	0.30	0.24	0.27	0.44	1.43	4.64	0.98	0.94	
	N	0.09	0.07	0.05	0.05	0.10	0.14	0.24	0.09	
Cation Exchange Capacity (cmol+)/kg soil)		20.7	17.7	8.20	6.43	33.4	15.4	13.3	10.4	
Total (g/kg)	N	6.63	6.98	6.17	5.56	15.6	8.13	13.8	10.7	
	P	1.15	1.12	1.40	1.83	5.31	8.74	4.93	6.66	
	K	7.80	10.8	13.0	8.31	17.3	33.2	28.8	44.6	
	Ca	1.78	2.26	1.14	7.39	66.5	103	46.8	54.2	
	Mg	1.03	0.86	0.85	1.10	6.63	9.10	8.27	8.91	
	Cd	0.03	0.11	0.04	ND	ND	ND	ND	ND	
	Cr	1.56	3.51	1.20	1.41	320	11214	583	122	
	Cu	4.26	4.42	4.85	23.5	59.3	176	70.1	55.6	
	Ni	0.82	4.46	1.17	0.77	78.9	129	67.2	18.7	
	Pb	ND	0.18	0.43	ND	2.18	0.45	ND	ND	
	Zn	1.76	8.89	25.2	ND	93.7	449	54.4	124	
	Total element (%)	C	42.3	52.2	81.8	83.0	38.2	30.9	51.4	47.6
		N	0.54	0.65	0.64	0.54	1.03	0.49	0.85	0.89
H		2.89	2.35	1.60	1.49	2.36	1.08	2.21	1.72	
O		22.0	14.7	13.3	12.6	16.8	17.5	13.9	15.0	
C/N		79	81	128	154	37	63	60	53	
O/C(molar ratio)		0.35	0.19	0.11	0.10	0.29	0.38	0.18	0.21	
H/C(molar ratio)		0.82	0.54	0.23	0.22	0.74	0.42	0.52	0.43	

四、實驗藥品

pH 電極標準液(pH4.0, pH 7.0)-測量 pH 前校正 pH 電極

EC 電極標準液-測量 EC 前校正電極

六偏磷酸鈉(2 g sodium hexametaphosphate/L)及氫氧化鈉(2 g NaOH/L)-水團粒穩定度試驗

五、實驗器材

皺葉白菜種子-種子發芽試驗

篩網(10 mesh, 2mm)-盆栽試驗後土壤風乾、磨碎與過篩

玻棒、燒杯、培養皿、量筒、玻璃吸管、濾紙、洗瓶、塑膠栽培盆、塑膠皿、秤量皿、

Whatman No.42 濾紙、電子天平-試驗常用器材

球磨機-土壤有機碳分析

往復式震盪機-測量土壤 EC 值

恆溫水浴槽-恆溫加熱用

高溫烘箱-土壤水分含量與水團粒穩定度試驗

pH 計(含玻璃電極)-測量 pH

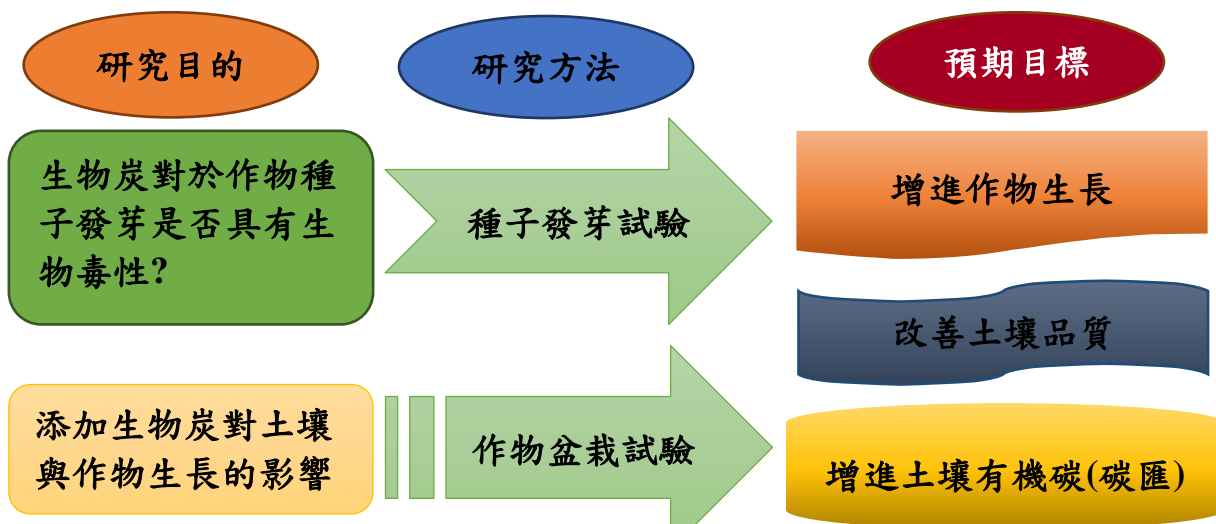
電導度計-測量電導度

濕篩機-水團粒穩定度試驗

固體總有機碳分析儀(OIA Solid TOC)-土壤有機碳分析

參、研究過程與方法

一、實驗架構圖



二、研究方法

(一) 種子發芽測定(生物毒性)

為了解生物炭是否具有生物毒性(會抑制作物發芽與根系生長)，先行利用測定複合化學肥料腐熟度的方法-種子發芽測定法-來評估八種生物炭。方法如下(簡宣裕等人，2005)：5g 風乾資材(生物炭)加 100 ml 之 60°C 溫水，置於 200 ml 燒杯中，於 60°C 水浴中 3 小時後，以細紗布過濾；將 2 張濾紙置於培養皿中，加入 10 ml 濾液，再將 25 粒白菜種子放在濾紙上面，培養皿置於 25°C 恆溫箱內，3 天後，觀察種子發芽率以及根生長情形。另外以超純水作為對照組，若試驗組的發芽率為對照組發芽率的 90% 以上，且根的伸長不受抑制，則該資材可視為不具生物毒性。本項測試並非用於探討八種資材在養分提供方面之重要性，測試的目的旨在證明八種資材是否會抑制作物發芽與根系生長，並非以其結果作為後續不同添加量之設計基礎。

(二) 盆栽試驗

1. 葉菜類作物選擇

依據短期葉菜類[十字花科非結球葉菜(小白菜、青江白菜、芥藍、油菜、小芥菜、葉用蘿蔔、甘藍芽)、蕓菜、茼蒿、萵菜、莧菜]良好農業規範(台中區農業改良場，2018)的說明，非設施栽培化學肥料三要素(氮 N—磷酐 P_2O_5 —氧化鉀 K_2O) 小白菜、青江白菜、芥藍、油菜及小芥菜、萵菜、甘藍芽及莧菜為 150~250—50~75—100~150 kg/ha。本研究將選用皺葉白菜(pak choi)(*Brassica rapa chinensis*)進行盆栽試驗。依據皺葉白菜-農業知識入口網的說明，小型山東菜又稱為皺葉白菜、蚵仔白菜，為早生品種，適溫下播種後 25~35 日即可採收。耐暑性佳，平暖地幾乎一年四季皆可播種，周年採收。植株直立性，株高約 18~20 公分，葉柄肉厚呈半圓形，白色具有光澤，葉緣呈波浪狀，淺綠色。

2. 添加量

考量實際可行性、研究的需求與探討過量施用下對種子發芽是否具有抑制性(高鹽類濃度或重金屬毒性等)，生物炭與複合化學肥料的添加率設定為 2% 與 0.5%，另外有一對照組(Control, C, 皆不添加)與添加 0.5% 化肥(長岡化工鐵牛牌特 1 號複合有機肥料)(CF)。

3. 試驗樣本的處理方式

一個批次的樣本包括 2 種土壤(Ce 及 Eh)、8 種添加材料(2% 生物炭+0.5% 複合化學肥料)、0.5% 複合化學肥料與對照組，3 重覆樣本，共計 60 個。每種土壤之處

理組代號包括 Control、CF、D、F、WB、WA、4B、6B、4E、6E，計 10 種。

4.盆栽試驗方式

將上述混合好的土壤樣本約裝填於塑膠栽培盆中(共 60 盆)，在溫室(23~26°C)種植期間每週控制水分在 60%~80%田間容水量孵育兩周。將小白菜種子直接撥種於裝填栽培介質的塑膠皿中，待發芽後移植至栽培盆中控制為每盆 1 棵。在小白菜生長期間均密切注意其生長情形(每 2 週量測株高)，並注意蟲害和病害等。28 天後進行小白菜採收，植體分地上部與根後，小心將小白菜上之土屑清除並紀錄鮮重與葉長，將植體以去離子水洗滌後，放入紙袋並置於烘箱中，以 65°C 烘乾 72 小時後取出紀錄乾重。烘乾之植體以不鏽鋼磨碎機磨碎並過篩(1-mm)後，儲存於封口袋中備用。盆栽試驗的生長條件皆為在室內(26~28°C，濕度 70-80%)下進行。

5.試驗後土壤樣品性質分析土壤風乾、磨碎與過篩(2 mm)，分析包括水分含量、水團粒穩定度、pH 值、電導度(EC)與有機碳。

水團粒穩定度(濕篩法)分析方法:將秤重過的空金屬罐放至濕篩器上，把篩子放至篩子支撐架中，將支撐架降低，使篩子沒入金屬罐內。秤取 4.0 g (1-2 mm) 的風乾團粒土壤，置入篩子中，將土壤稍微潤濕後，由篩子支撐架上的小孔，注入蒸餾水，並加至蒸餾水超過土壤。將電源撥至 3 min 的位置，篩子支撐架會上下振盪 3 min \pm 5s (stroke = 1.3 cm, 約 34 times/min)。3 min 後會自動停止，將篩子支撐架升高，等篩子上的水滴完後，移去金屬罐，再將另一個秤重過的空金屬罐放至濕篩器上，接著如步驟 2，但所加入溶液改為分散溶液，若土壤 pH>7，分散溶液為每升中含 2 g 的六偏磷酸鈉(2 g sodium hexametaphosphate/L)，若土壤 pH<7，分散溶液為每升中含 2 g 的氫氧化鈉(2 g NaOH/L)。將電源撥至 Continue 的位置，並持續過篩至篩子中只剩砂粒，若在 5-8 min 後，一些團粒仍保持穩定的話，停止振盪，利用玻棒摩擦直到團粒碎裂，再持續震盪過篩，直到小於篩孔的顆粒通過篩子後，停止過篩，將篩子支撐架升高，等篩子的水滴完後，移去金屬罐放在另一個盤子上。除了留在篩子上較大的砂粒外，金屬罐內所含顆粒即為水穩定的團粒。將此兩個金屬罐，放入烘箱中以 110°C 烘乾，烘完後，將金屬罐秤重(金屬罐重+土重)，秤重後減去空金屬罐重。*以分散溶液注入的金屬罐內之土壤，會含有約 0.2 g 的分散溶液之溶質，所以減去空金屬罐重後，土壤重需再減去 0.2 g 的溶質重。水團粒穩定度的計算則為:含分散溶液之金屬罐內的土重/(含

分散溶液之金屬罐內的土重+含蒸餾水之金屬罐內的土重)

(三)統計分析

本研究的統計分析為利用「統計分析系統軟體(Statistical Analysis System (SAS) 9.4 package, SAS Institute Inc., SAS Campus Drive, Cary, NC, USA)」進行分析(計算平均值、標準偏差及平均值的差異)。試驗結果(包括種子發芽試驗與種子直播試驗)利用單因子變異數分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)比較處理之間的平均數差異，以鄧肯氏新多變域分析法(Duncan's new multiple analysis method)分析處理間的顯著差異(顯著相關水準訂為*: $p < 0.05$ ，**: $p < 0.01$ 及***: $p < 0.001$)。圖表中的數據以平均值 ± 1 標準偏差(means ± 1 standard deviation (SD))來表示。另外，為了瞭解共同添加的效應與添加生物炭的效應，本研究分別計算處理組效應(%)與生物炭效應(%)如下：

$$\text{處理組效應(\%)} = [(\text{處理組}-\text{對照組})/\text{對照組}]*100 \quad (1)$$










$$\text{生物炭效應(\%)} = \{[(\text{CF}+\text{生物炭})\text{處理組}-(\text{CF組})-(\text{對照組})]/(\text{對照組})\}*100 \quad (2)$$

肆、研究結果

一、種子發芽測定-生物炭毒性試驗

由下表三可知，除了 4E 生物炭的發芽率(84%)略低於對照組發芽率的 90% ($96\%*0.9=86.4\%$)，其他 7 種生物炭的發芽率皆高於 86%，而生物炭 D、WA、4B 及 6B 達到 100% 發芽率。相較於對照組根系的伸長，抽出液(試驗前)有較高 pH 與 EC 值的 6B (pH 10.3 及 EC 4.47 dS/m)、4E (pH 10.2 及 EC 2.79 dS/m)與 6E (pH 10.2 及 EC 4.96 dS/m)生物炭處理組之根伸長，有受到些微的抑制，包括根系較短與根尖有枯黑的情形。包括 WB、WA 與 4B 生物炭之抽出液 pH 值也偏高($9 < \text{pH} < 10$)，但是 EC 值較低，對於根系伸長沒有明顯抑制。由試驗結果可以得知，D、F、WB、WA 及 4B 生物炭不會抑制種子發芽與根系生長，但是 6B、4E 與 6E 生物炭則有減低發芽率與抑制根系生長的情況，特別是 4E 與 6E 生物炭，主要是因為生物炭本身的 pH 值與 EC 值都較高(表二)。

【表三、生物炭毒性試驗(種子發芽率)的結果】

生物炭	種子發芽數	發芽率(%)	pH ¹	EC ¹ (dS/m)	種子發芽照片
D	25	100	6.29	0.648	
F	24	96	7.60	0.631	
WB	24	96	9.76		
WA	25	100	9.42	0.565	
4B	25	100	9.60	1.04	
6B	25	100	10.3	4.47	
4E	21	84	10.2	2.79	
6E	23	92	10.2	4.96	
對照組	24	96	6.30	0.006	

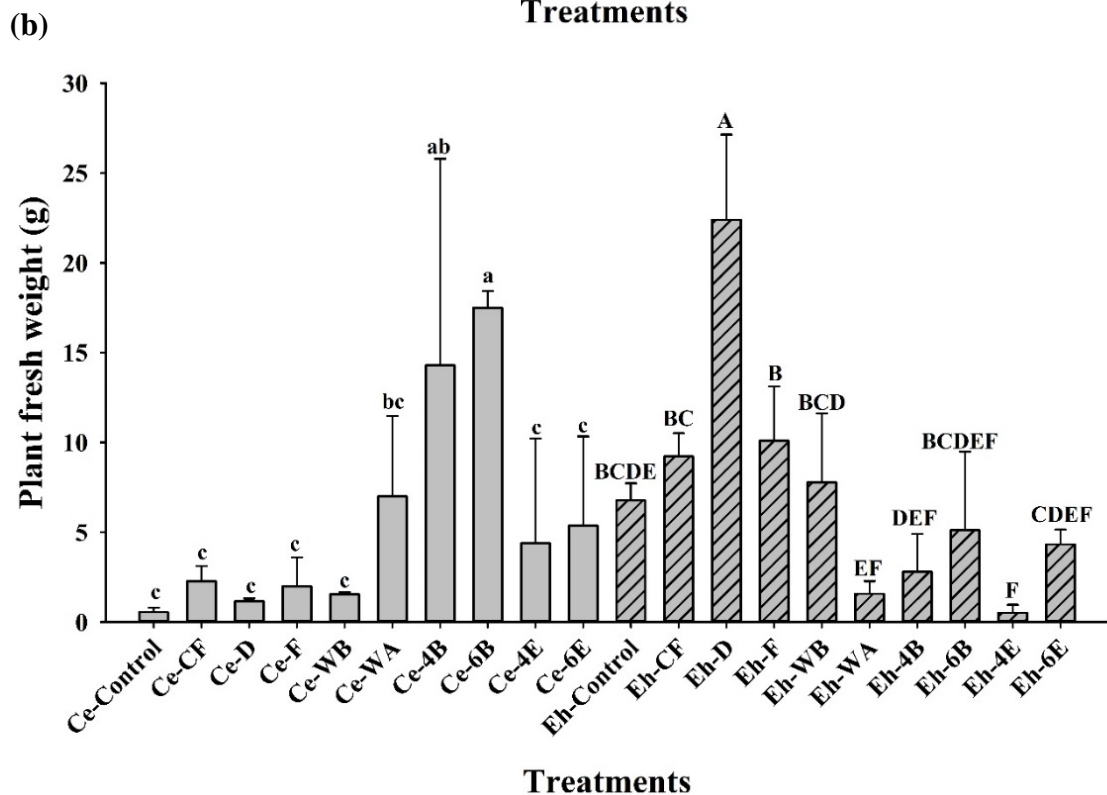
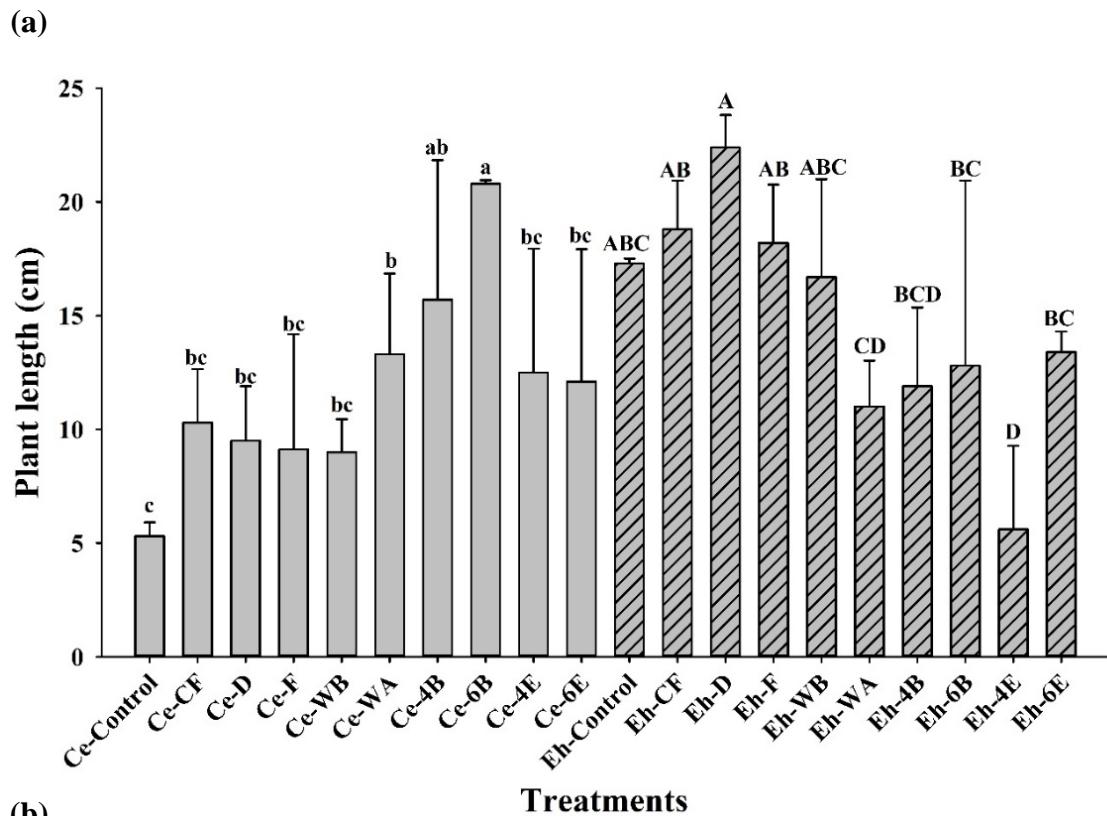
¹抽出液土/水=1/20，pH 值與 EC (electrical conductivity)值為發芽試驗前抽出液的測值。

二、盆栽試驗

(一)植體生長分析

在強酸性 Ce 土壤中，相較於對照組的生長，各處理之植體株長與鮮重皆有明顯至顯著的提高(圖一)，與對照組相比，株長增加 1.7~3.9 倍，鮮重增加 2.1~31.7 倍，包括 WA、4B 及 6B 的添加處理最為顯著，而 6B 生物炭處理組有最大株長與鮮重，由圖二的植體生長照片也可看到 6B 處理組的植株生長狀態最佳。各處理組的效應(與對照組比較)(表四)，株長提高 70%(WB)~293%(6B)，鮮重提高 12%(D)~319%(6B)，除了 D、F 與 WB 處理組較低於 CF 處理組，其他生物炭處理皆高於 CF 組，表示這些生物炭(WA、與 4B、6B、4E 與 6E)與 CF 的共同添加，可增益與促進植體生長，由生物炭效應中可知增益效應為株長增益 34%~199%與鮮重增益 40%~286%(表四)。

在弱鹼性 Eh 土壤中，生物炭處理影響植體生長，造成植體生長較矮小與降低鮮重，包括 WA、4B、6B、4E 與 6E 處理有明顯至顯著的下降(株長只有對照組的 0.3~0.7 倍，鮮重只有 0.1~0.8 倍)，而 CF、D、F 與 WB 則與對照組沒有顯著差異與明顯減少(株長為對照組的 0.9~1.2 倍，鮮重為 1.1~3.5 倍)，其中只有 D 處理組之株長有明顯增加，而鮮重有顯著提高。植體生長狀況(圖二)也可看到生長明顯不佳的情形，只有 D 處理組生長良好。各處理組的效應(與對照組比較)(表四)，除 CF、D 及 F 之株長有提高(分別為 8%、29%及 5%)，其他處理則為減少 4%(WB)~68%(4E)；鮮重的部分則包括 CF、D、F 與 WB 有提高(分別為 36、232、50 及 15%)，其他為減少 24%(6B)~93%(4E)，在 Eh 土壤中，只有 D 生物炭與 CF 的共同添加，有增益與促進植體生長的效益，D 生物炭效應之增益效應為株長增益 21%與鮮重增益 195%(表四)。



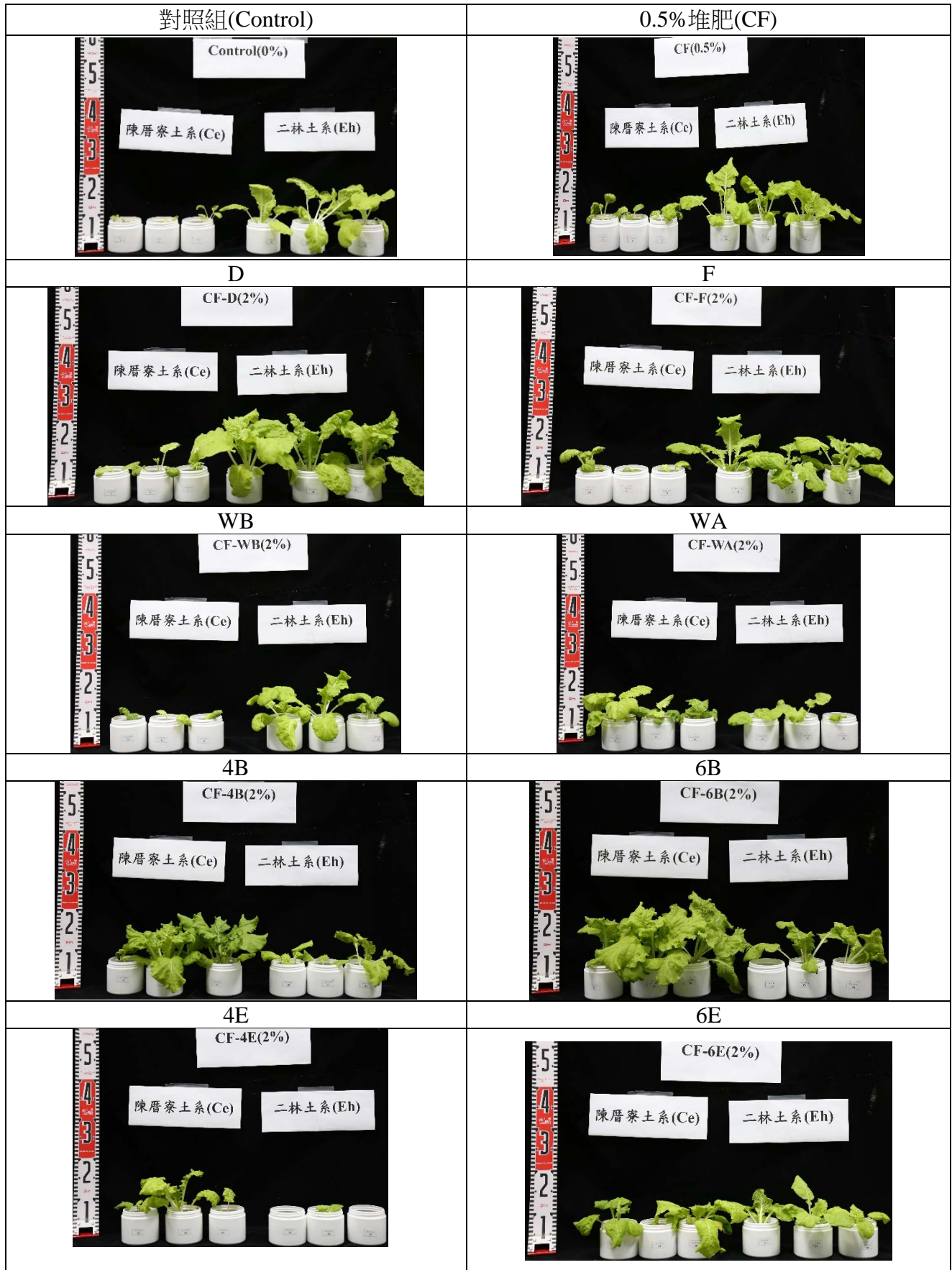
圖一、生物炭盆栽試驗的結果(a)植株長度與(b)植體鮮重。圖中小寫英文字母為 Ce 土壤不同處理組之間的顯著差異分析結果，大寫的英文字母為 Eh 土壤不同處理組之間的顯著差異分析結果，有相同的小寫(大寫)英文字母表示處理間沒有顯著差異($p > 0.05$)。

【表四、盆栽試驗中不同處理對作物生長與土壤性質的影響效應(%)*】

處理	株長		地上部鮮重		pH (第 14 天)		EC (第 14 天)	
	處理組效 應(%)	生物炭效 應(%)	處理組效 應(%)	生物炭效 應(%)	處理組效 應(%)	生物炭效 應(%)	處理組效 應(%)	生物炭效 應(%)
Ce soil								
CF	94		32		-2		14	
CF-D	79	-14	12	-21	4	5	18	4
CF-F	72	-21	27	-5	4	6	20	6
CF-WB	70	-24	19	-13	14	15	19	5
CF-WA	151	57	122	89	17	19	24	11
CF-4B	197	103	259	227	17	19	8	-5
CF-6B	293	199	319	286	25	27	14	1
CF-4E	135	42	72	40	24	26	17	3
CF-6E	128	34	91	59	35	37	30	16
Eh soil								
CF	8		36		-4		84	
CF-D	29	21	232	195	-9	-5	-1	-85
CF-F	5	-3	50	13	0	3	141	57
CF-WB	-4	-12	15	-21	-5	-1	175	91
CF-WA	-37	-45	-77	-113	17	21	154	70
CF-4B	-31	-40	-59	-95	9	13	133	49
CF-6B	-26	-34	-24	-60	13	17	231	147
CF-4E	-68	-76	-93	-129	7	11	211	127
CF-6E	-23	-31	-36	-72	11	15	159	74
處理	pH (收穫後)		EC(收穫後)		土壤有機碳		水團粒穩定度	
	處理組效 應(%)	生物炭效 應(%)	處理組效 應(%)	生物炭效 應(%)	處理組效 應(%)	生物炭效 應(%)	處理組效 應(%)	生物炭效 應(%)
Ce soil								
CF	6		273		22		-14	
CF-D	5	-1	311	38	191	169	-12	2
CF-F	8	2	302	29	210	188	-13	1
CF-WB	12	6	285	12	308	286	-31	-17
CF-WA	9	2	177	-97	378	356	-26	-12
CF-4B	41	35	233	-40	165	143	-20	-6
CF-6B	64	58	268	-5	129	107	-9	5
CF-4E	47	40	377	104	203	181	-16	-2
CF-6E	49	43	365	92	165	143	-20	-6
Eh soil								
CF	-16		494		13		14	
CF-D	-15	1	147	-347	48	35	1	-13
CF-F	-18	-2	715	222	41	28	6	-8
CF-WB	-12	4	794	301	69	56	33	19
CF-WA	-16	0	1065	571	71	57	30	17
CF-4B	-5	11	1179	685	38	25	14	0
CF-6B	5	21	1144	651	14	1	32	19
CF-4E	-4	12	1342	848	38	25	44	31
CF-6E	1	17	1063	570	39	26	61	47

*處理組效應(%) = (處理組-對照組)/對照組*100; 生物炭效應(%) = [(CF+生物炭)處理組-(CF組)-(對照組)]/(對照組)*100

【圖二、生物炭盆栽試驗的結果】



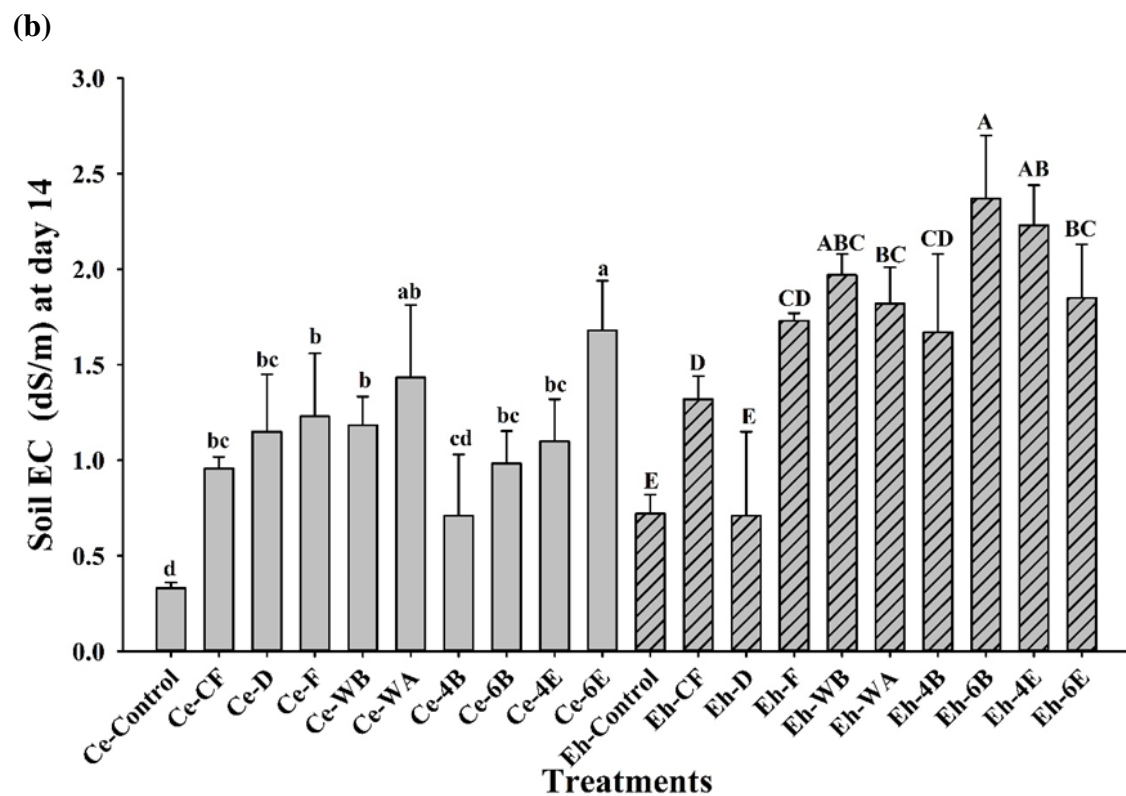
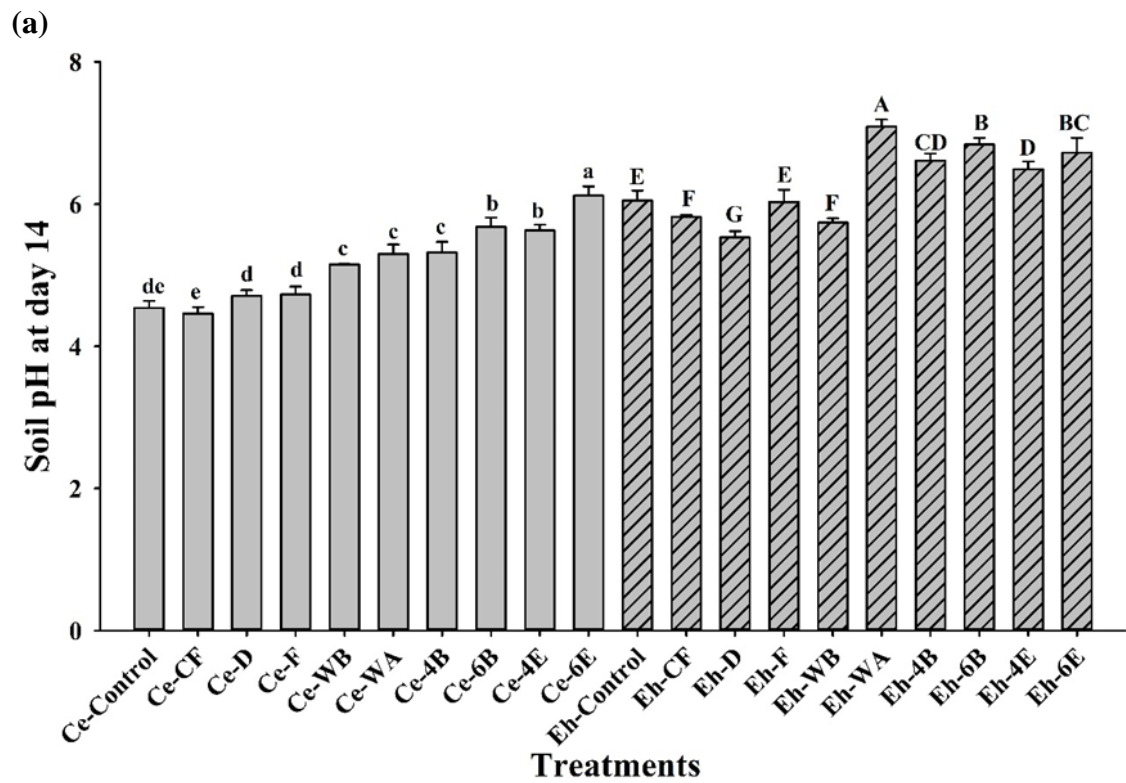
生物炭具有石灰效應，可改良酸性土壤的 pH 值，這可以說明在強酸性 Ce 土壤中，添加強鹼性(pH 11.1)的 6B 生物炭(表二)，對於植體生長有增益的效果，而其他包括 WA(pH 10.5)、4B (pH 10.2)、4E (pH 10.5)與 6E(pH 10.4)也有較佳的石灰效應，而 WB 雖然 pH 也高(pH 10.6)，但是鈣含量較低，表示石灰性較差，改善酸性土壤的效果較差，因此對植體生長的增益較低。在 Eh 土壤中則相反，添加鹼性的生物炭反而提高土壤的 pH，使得土壤的鹼性更強，養分的溶解度降低，反而影響植體生長，而弱酸性的 D 生物炭(pH 6.34)反而有降低土壤 pH 的效應，進而促進植體生長。

(二)土壤性質分析

1. 生長第 14 天的土壤 pH 值與電導度(EC)值

生長第 14 天時，盆栽土壤利用 pH 計與電導度計量測鮮土的結果(圖三)，在 Ce 土壤中 CF、D 與 F 處理組之 pH 值與對照組之間沒有顯著差異(與對照組相比，CF 組減少 0.1 pH 單位，D 及 F 組增加 0.2 pH 單位)(圖三 a)，其他 6 種生物炭皆顯著高於對照組(增加 0.6~1.6 pH 單位)，6E 處理組顯著最高(圖三 a)；Eh 土壤中，CF、D 與 WB 處理之 pH 值顯著低於對照組(減少 0.2~0.5 pH 單位)，F 處理組沒有顯著差異，其他五種生物炭皆顯著高於對照組(提高 0.4~1.0 pH 單位)，WA 顯著最高。

在 EC 的變化方面(圖三 b)，酸性紅壤 Ce 的 EC 值很低，對照組只有 0.33 dS/m，因此添加處理都顯著提高土壤的 EC 值(EC 值介於 0.96~1.68 dS/m 之間，約為對照組的 3~5 倍)，即便沒有顯著差異的 4B 處理組之 EC 值也是對照組的 2.2 倍(沒有顯著差異可能是重複樣品在測量時變異較大)，而 6E 處理組顯著最高。石灰性 Eh 土壤之對照組 EC 值(平均 0.72 dS/m)約為 Ce 土壤對照組的 2.2 倍，添加處理中除了 D 處理組與對照組間沒有顯著差異(0.71 dS/m)，其他添加處理之 EC 值均顯著高於對照組(EC 值介於 1.32~2.37 dS/m 之間，約為對照組的 1.8~3.3 倍)，6B 處理組顯著最高。



圖三、植株生長第 14 天盆栽土壤(a)pH 值與(b)電導度(EC)值。圖中小寫英文字母為 Ce 土壤不同處理組之間的顯著差異分析結果，大寫的英文字母為 Eh 土壤不同處理組之間的顯著差異分析結果，有相同的小寫(大寫)英文字母表示處理間沒有顯著差異($p > 0.05$)。

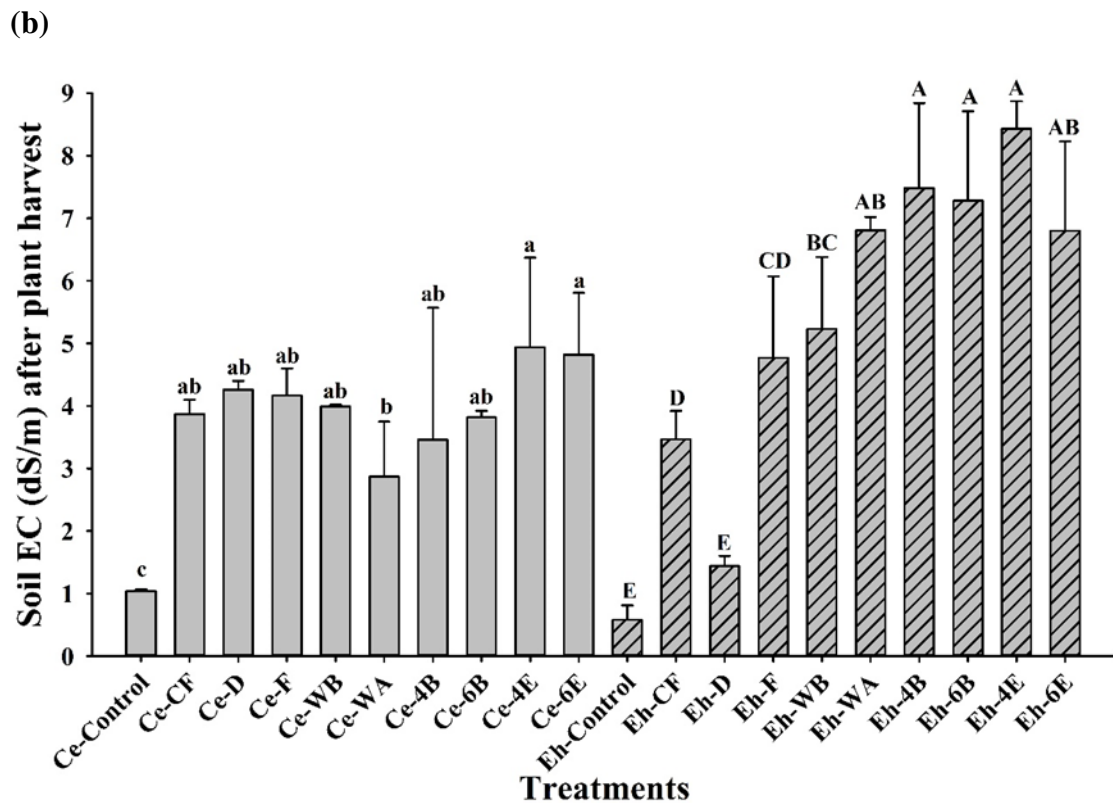
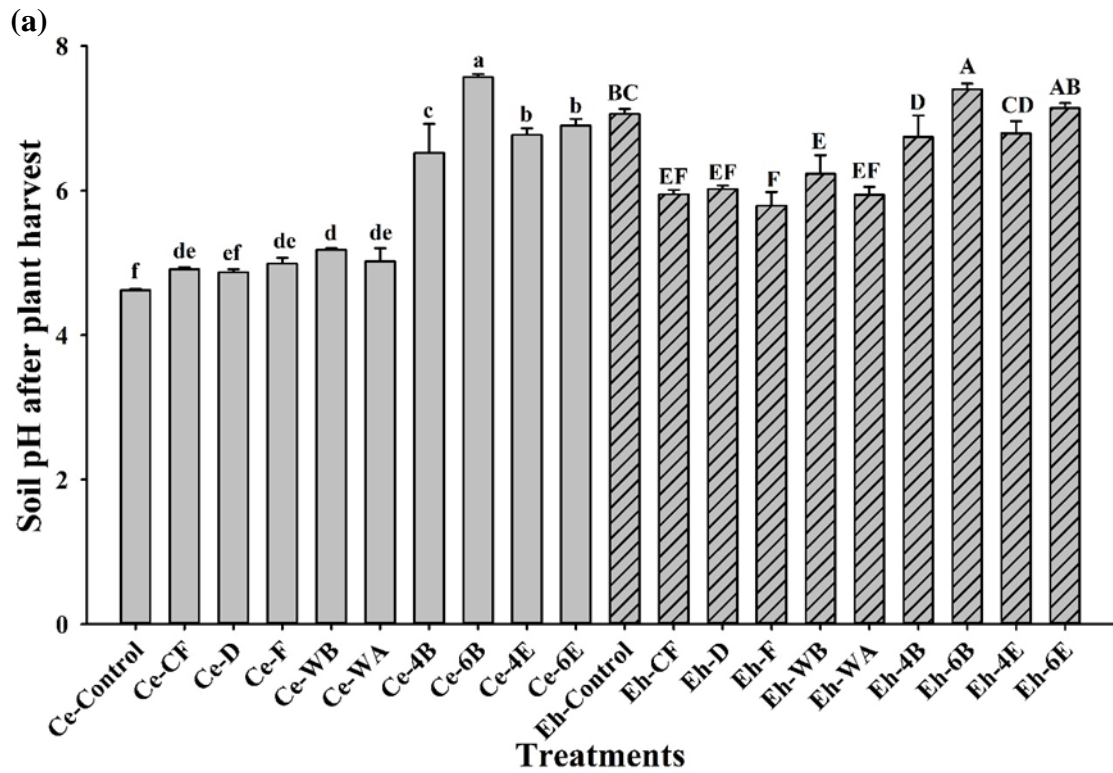
pH 值不同處理間的效應(表四),在 Ce 土壤中,除了 CF 組為降低效應(減少 2%),其他生物炭處理為提高的影響,從提高 4%(D 及 F)至 35%(6E),而生物炭的效應為提高 5%(D)至 37%(6E);EC 值之處理組效應皆為提高的效應,從 8%(4B)至 30%(6E),但在生物炭效應中 4B 生物炭為降低效應(-5%),其他為提高效率(1%~16%)。Eh 土壤中,CF、D 與 WB 表現出降低 pH 的處理效應,F 處理組沒有影響,其他為提高 pH 的效應(7%~17%),而生物炭效應中僅 D(-5%)及 WB(-1%)為降低效應;另外,EC 值僅 D 處理組與 D 生物炭表現出降低效應(分別為-1%處理組效應及-85%生物炭效應),其他處理組效應介於 84%(CF)~231%(6B),生物炭效應介於 49%(4B)~147%(6B)。即使在共同添加複合肥情況下,生物炭本身高 pH 與高 EC 的特性,顯著的影響土壤的 pH 與 EC 值,對於酸性的 Ce 土壤而言,土壤 pH 與 EC 值在短時間內有明顯變化,對於鹼性的 Eh 土壤來說,EC 值的變化更明顯。

2. 植體收穫後的土壤 pH 值與電導度(EC)值

植體收穫後,將土壤風乾、磨碎與過篩後,取樣測量土壤 pH 的結果(圖四 a),Ce 土壤中 6B 處理組有顯著最高的 pH 值(pH 7.6,高於對照組 2.7 pH 單位),添加處理(包括 CF 組)後的土壤 pH 顯著高於對照組(除了 D)(增加 0.3~3.0 pH 單位),處理組皆顯示提高 pH 的效應(5%~64%)(表四),生物炭效應也大都為提高效率(2%~58%),只有生物炭 D 為降低效應(-1%)。Eh 土壤中,6B 處理組有顯著最高的 pH 值(pH 7.40,高於對照組 0.3 pH 單位),而包括 CF、D、F、WB、WA、4B 及 4E 處理組 pH 值皆顯著低於對照組(減少 0.3~1.3 pH 單位),6E 沒有顯著差異;除了 6B 及 6E 為提高 pH 的處理組效應(5%及 1%)(表四),其他處理組效應皆為負的(降低)效應(-4%~-18%),而生物炭效應中,僅 D 為降低效應(-2%)與 WA 為沒有影響,其他生物炭皆為提高效率(1%~21%)。短期種植試驗的結果顯示,在酸性、低肥力、低緩衝容量的土壤中添加鹼性生物炭,對於提高土壤 pH 值有明顯的影響,即使在共同添加有機肥料的情況下,生物炭仍具有提高土壤 pH 的能力;在弱鹼性、高緩衝容量的土壤中,添加生物炭的效應可能因為有機肥料與/或生物炭被分解,而降低土壤的 pH 值。

EC 值的變化(圖四 b),Ce 土壤中所有處理的 EC 值皆顯著高於對照組(EC 值介於 2.87~4.94 dS/m 之間,約為對照組的 2.8~4.8 倍),而添加處理組之間沒有顯著差異,4E 及 6E 處理組之 EC 值明顯最高;處理組效應高於 177%,生物炭效應中

包括 WA、4B 與 6B 為負的效應(-97%、-40%與-5%)，其他皆為正效應(12%~104%)，我們推測生物炭的負效應可能是生物炭吸附了土壤中易移動性的鹽類離子(來自於肥料分解或生物炭本身的陽離子或陰離子)，這個現象對於施肥的效益有正面的影響，可以增加保肥性。Eh 土壤中，除了 D 處理組與對照組之間沒有顯著差異，其他生物炭處理組皆顯著高於對照組(6~14 倍)，4B、6B 與 4E 顯著最高，處理組效應高於 147%(最高為 1342%)(表四)，生物炭效應中僅 D 生物炭為負的效應(-347%)，其他皆為正效應(222%~848%)，D 生物炭的負效應可能是影響植體生長很重要的因素之一。



圖四、植株收穫後盆栽土壤(a)pH 值與(b)電導度(EC)值。圖中小寫英文字母為 Ce 土壤不同處理組之間的顯著差異分析結果，大寫的英文字母為 Eh 土壤不同處理組之間的顯著差異分析結果，有相同的小寫(大寫)英文字母表示處理間沒有顯著差異($p > 0.05$)。

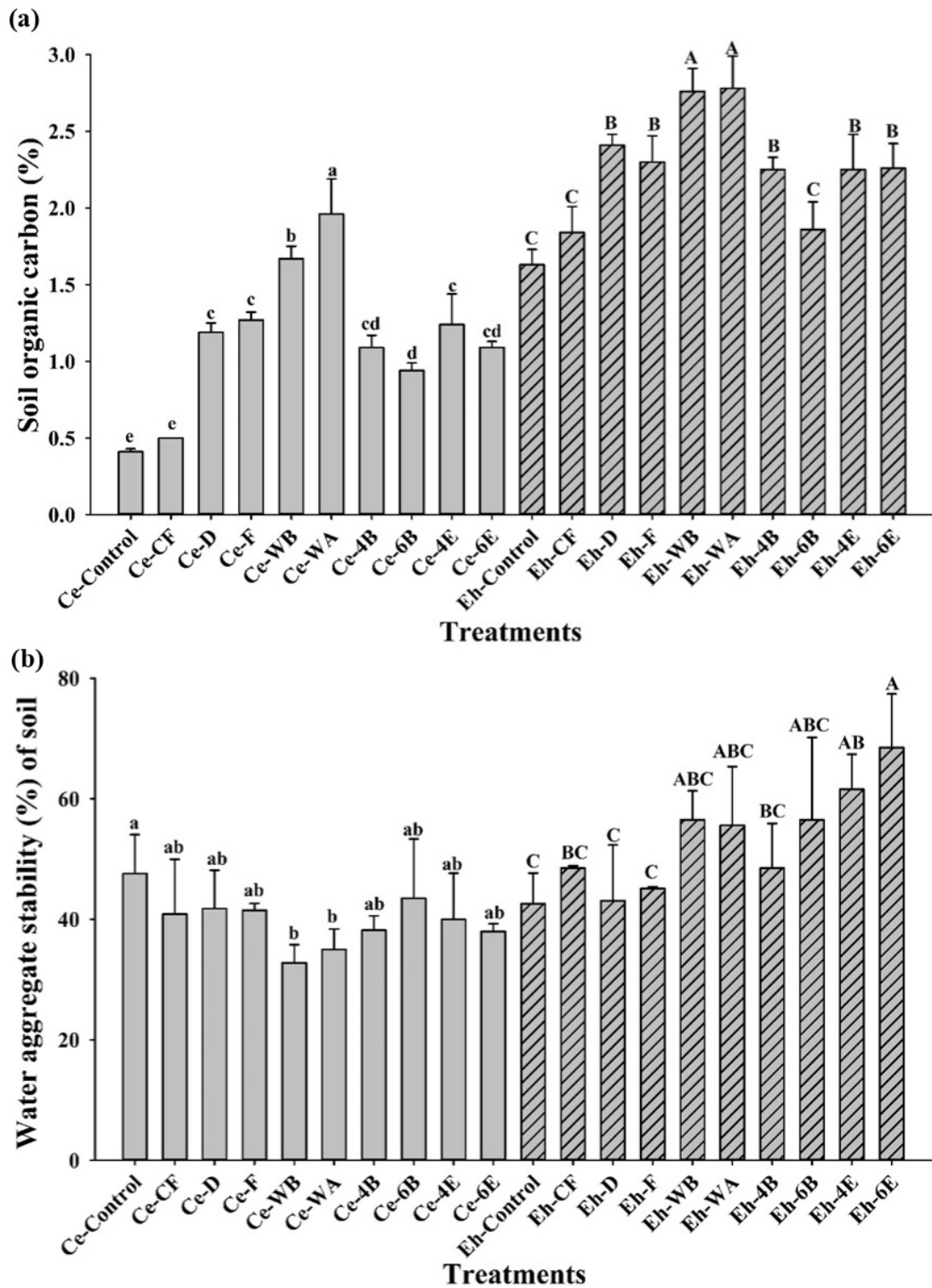
3. 土壤有機碳(SOC)與水團粒穩定度(WAS%)

由圖五(a)可知，與對照組相比添加生物炭顯著提升 Ce 土壤有機碳的含量，約增加 2 倍(6B)至 5 倍(WA)，只添加肥料(CF)則與對照組之間沒有顯著差異；對 Eh 土壤而言也有類似的情形，但約只增加 1.4 倍至 1.7 倍，CF 與 6B 皆與對照組之間沒有顯著差異。在處理組效應中(表四)，Ce 土壤中添加生物炭之處理組有很高的增加效應，介於 129%(6B)與 378%(WA)之間，而生物炭效應介於 107%與 356%之間，顯示於肥料中共同添加生物炭及顯著的提高土壤的有機碳含量，這有助於增加土壤碳匯(碳儲存量)。在 Eh 土壤中的效應相對較低，生物炭處理組效應介於 14%(6B)與 71%(WA)之間，生物炭效應介於 1%(6B)與 57%(WA)之間，然而雖然明顯低於酸性土壤，本研究也證實共同添加生物炭於堆肥中並施用於弱鹼性土壤，仍然能有助於增進土壤碳匯。後續需要長期試驗來證明生物炭增進土壤碳匯的持續性。

水團粒穩定度(WAS%)為判斷土壤團粒的膠結程度，當土壤中有機質愈高，WAS%愈高，表示土壤團粒愈穩定，反之 WAS%數值愈低代表土壤團粒愈不穩定。圖五(b)中顯示，Ce 土壤中添加 WB 與 WA 兩種生物炭顯著降低 WAS%(與對照組比較)，其他處理則沒有顯著差異，但在數值上低於對照組 4%(6B)~15%(WB)，而處理組效應皆為負(降低)效應(-9%~-26%)(表四)，但在生物炭效應上包括 D、F 與 6B 為正(提高)效應(分別為 2%、1%與 5%)，其他生物炭為負效應(-2%~-17%)。研究顯示在酸性土壤中只添加複合肥料或添加(複合肥料+生物炭)皆可能造成土壤團粒穩定度降低，推測可能是肥料或生物炭中易分解性或易移動性的有機碳，在植體生長過程中被微生物作為重要的碳源而消耗，因而減低有機碳的膠結作用，降低土壤團粒的穩定性，但是生物炭 D、F 與 6B 有抵抗或減少易分解性或易移動性的有機碳被消耗的能力，雖然正效應並不高。

Eh 土壤中只有 4E 與 6E 處理組織 WAS%顯著高於對照組(分別提高 19%與 25.8%)，其他處理組與對照組間沒有顯著差異，但數值上高於對照組 0.5%(D)~13.9%(WB 及 6B)，顯示處理組有提高 Eh 土壤之團粒穩定度，進一步由處理組效應與生物炭效應(表四)中可以證實，處理組效應提高 1%~61%，生物炭效應提高 17%~47%，但 D 與 F 生物炭之生物炭效應為負效應(-13%與-8%)。含石灰結核、排水不完全之沖積土經常其頻繁耕作，表土多呈現大塊狀硬實的構造，缺乏土壤構造，本研究證實添加複合肥料或添加(複合肥料+生物炭)皆可能提高土壤團粒穩定度，添

加(複合肥料+生物炭)又更優於只添加複合肥料，而 WB、WA、6B、4E 與 6E 生物炭的提高效應更佳，特別是 4E 與 6E 生物炭。



圖五、植株收穫後盆栽土壤(a)有機碳(SOC)含量與(b)水團粒穩定度(WAS)。圖中小寫英文字母為 Ce 土壤不同處理組之間的顯著差異分析結果，大寫的英文字母為 Eh 土壤不同處理組之間的顯著差異分析結果，有相同的小寫(大寫)英文字母表示處理間沒有顯著差異($p > 0.05$)。

伍、討論

不論在植體生長第 14 天或 28 天收穫後，土壤 pH 值受到共同添加生物炭的影響，顯著的提高土壤的 pH 值(圖三 a 與圖四 a)。土壤 pH 值的增加取決於生物炭和土壤的緩衝能力(即土壤抵抗 pH 值變化的能力)，土壤緩衝能力取決於幾個因素，包括土壤的有機物和礦物質含量及其物理特性(Streubel et al., 2011)。因此，土壤 pH 值已被證明會隨著生物炭的添加而發生變化(Van Zwieten et al., 2010; Streubel et al., 2011)。由於其固有的鹼性，生物炭可能會增加土壤 pH 值，因此它已成為酸性土壤的一種有前途的改良劑(Luo et al., 2016)。此外，土壤緩衝能力阻止了土壤 pH 值的重大變化(Ippolito et al., 2014)。弱鹼性 Eh 土壤由於鈣離子(Ca^{2+})含量高因而具有的緩衝能力較高，隨時間的下降不太明顯。收穫後生物炭處理的土壤 pH 值明顯高於對照，表明生物炭固有鹼度的影響能夠持續隨著時間的推移。

EC 值的時間變化在 Eh 土壤中非常顯著，其次是 Ce 土壤。添加生物炭和/或堆肥可以增加土壤 EC (Berek et al., 2018)，這種 EC 增加可歸因於從生物炭和堆肥中釋放鹼性陽離子(Chintala et al., 2013)。Berek et al. (2018)表明生物炭(2%)和堆肥(2%)的組合添加顯著增加了 pH 值和 EC。Lentz and Ippolito (2012)表明在田間條件下對照和 22.4 Mg 生物炭/ha 之間的 EC 沒有差異。增加生物炭施用量會導致土壤 EC 降低(Ippolito et al., 2014)，其結果可歸因於生物炭對鹽分的吸附作用(Thomas et al., 2013)。我們的研究結果表明(生物炭效應，表四)，在 Ce 土壤中添加 WA 生物炭與在 Eh 土壤中添加 D 生物炭中發生相對明顯的鹽分吸附現象。

在土壤有機碳的效應上，Ce 土壤中共同添加的效應顯著高於對照組與只添加肥料的處理組(CF)(圖五 a，表四)，生物炭的效應更是如此，8 種生物炭的效應遞減順序 WA > WB > F > 4E > D > 4B, 6E > 6B。在 Eh 土壤中，共同添加的效應也是顯著高於對照組與只添加肥料的處理組(CF)，但效應明顯低於 Ce 土壤，8 種生物炭的效應遞減順序 WA > WB > D > F > 6E > 4B, 4E > 6B。芳香族 C (aromatic C)是生物炭的頑固成分，主要負責生物炭在土壤中的穩定性；然而，生物炭還含有相對不穩定的成分，包括脂肪族 C (aliphatic C)、羧基(carboxyl groups)和碳水化合物(carbohydrates)，這些成分很容易礦化(Purakayastha et al., 2015)。作為極性官能基(polar functional groups)存在的指標，O/C 比可以提供有關炭化物質表面親水性(hydrophilicity)和疏水性(hydrophobicity)的資訊(Schimmelpfennig et al., 2012)。此外，H/C 的比值可以提供有關熱感應產生的廣泛碳化所導致的脫氫(dehydrogenation)的資訊(Harvey et al., 2011)。由於揮發性有機物脫水，發現 H、N 和 O 含量隨著生產溫度的升高而降低(Zhao et al., 2018)。相應地，由於脫水(dehydration)和脫羧(decarboxylation)反應，O/C(極性)、(O+N)/C(極性)和 H/C(芳香性)值隨著熱解溫度的升高而降低(Pariyar et al., 2020)，在較高的溫度下，具有較低的 O/C 比，形成芳

香環結構並描繪出穩定的晶體，即類石墨結構。低的 O/C 比表示相對較高的芳香度和較低的親水性(Zhao et al., 2017)，這可能是由於從原始原料中去除含 H-和 O-的官能團而引起的更大程度的碳化(Kim et al., 2013)。由表二可知，8 種生物炭的 O/C molar ratio 由低至高為 WA、WB、4E、F、6E、D、6B，H/C molar ratio 由低至高為 WA、WB、6B、6E、4E、F、4B、D，依據前人研究的結果，WA 與 WB 為相對非常穩定的生物炭(O/C 與 H/C 皆非常低)，其他 6 種生物炭因為 H/C 比值相對較高，表示生物炭中可能含有較多未聚合的芳香結構(noncondensed aromatic structures)，例如木質素，添加在土壤中比較不穩定(容易被微生物分解或崩解)。

8 種生物炭在土壤水團粒穩定度的表現上，Ce 土壤中包括 D、F 與 6B 有些微提高的生物炭效應(圖五 b，表四)，其他 5 種皆為降低的影響，以 WB 與 WA 最明顯。Eh 土壤中，只有 D 與 F 生物炭具有降低的影響。酸性紅壤的土壤構造本來就很明顯，細至中等發育的稜塊狀或亞稜塊狀構造，添加生物炭後可能因為生物炭的分解也造成土壤構造被破壞(水團粒穩定度%降低)，但因為添加量不高(2%)與添加滯留時間不長(28 天)，並不會對高黏粒含量的紅壤之土壤構造造成明顯的破壞；WB 及 WA 生物炭因為高度的聚合作用而非常穩定，在酸性紅壤中無法被分解釋放出有機碳與土壤粒子膠結形成穩定的構造，因此降低土壤構造的穩定性(水團粒穩定度%降低)。而在石灰性 Eh 土壤中，因為鈣離子含量高造成土壤粒子的蓄聚現象，土壤呈現大塊狀構造，密實與不易通透水分，添加生物炭後希望藉以分散土壤粒子，然而鹼性的生物炭無法有效達成此項目的，只有弱酸性的 D 生物炭與弱鹼性的 F 生物炭有較明顯的效果。

陸、結論

在生物炭毒性試驗(種子發芽測定)的結果，除了 4E 生物炭未能達到發芽率的標準，其他 7 種生物炭對種子發芽皆不具有明顯的毒性。然而包括 6B、4E 與 6E 生物炭本身高 pH 與 EC 值的特性(特別是 EC 值)，對於根系的伸長有些微至明顯的抑制現象(鹽害作用)。在植體生長的部份，相較於對照組，強酸性 Ce 土壤中生物炭的共同添加處理在株長與鮮重方面平均各增加 2.8 倍與 16.9 倍，生物炭效應平均增益 117%(株長)與 163%(鮮重)，以 6B 生物炭最佳；弱鹼性 Eh 土壤中，只有 D 處理組之株長與鮮重有顯著提高，其他生物炭處理則多為負面的效應。在土壤性質方面，即使在共同添加複合肥情況下，生物炭本身高 pH 與高 EC 的特性，顯著的影響土壤的 pH 與 EC 值，對於酸性的 Ce 土壤而言，土壤 pH 與 EC 值在短時間內(種植後第 14 天)有明顯變化，對於鹼性的 Eh 土壤來說，EC 值的變化更明顯。短期種植試驗的結

果顯示，在酸性、低肥力、低緩衝容量的土壤中添加鹼性生物炭，對於提高土壤 pH 值有明顯的影響，即使在共同添加有機肥料的情況下，生物炭仍具有提高土壤 pH 的能力；在弱鹼性、高緩衝容量的土壤中，添加生物炭的效應可能因為有機肥料與/或生物炭被分解，而降低土壤的 pH 值。Ce 土壤中包括 WA 與 4B 有明顯的負生物炭效應(-97%與-40%)，以及 Eh 土壤中 D 生物炭為負的效應(-347%)，我們推測生物炭的負效應可能是生物炭吸附了土壤中易移動性的鹽類離子(來自於肥料分解或生物炭本身的陽離子或陰離子)，這個現象對於施肥的效益有正面的影響，可以增加保肥性。另外，與對照組相比，添加生物炭顯著提升 Ce 土壤有機碳的含量，平均約增加 3.5 倍，對 Eh 土壤而言也有類似的情形，平均約增加 1.6 倍，這有助於增加土壤碳匯(碳儲存量)。包括 D、F 與 6B 生物炭有助於些微提高強酸性紅壤的團粒穩定性，而 WB、WA、6B、4E 與 6E 生物炭有助於改善石灰性沖積土的土壤構造，特別是 4E 與 6E 生物炭。

綜合而言，生物炭本身所具有的高 pH 與 EC 的特性，對於種子發芽不具有強烈的毒性與抑制伸長的作用，但選用時仍應預先了解生物炭之 pH 與 EC 值。鹼性生物炭的石灰效應有助於改良強酸性土壤的 pH 值，使其適於植物生長，而共同添加肥料與生物炭是必要，因為源自植物植基質的生物炭經高溫熱裂解之後，所含有的有效養分並不高與不足以供應作物所需，必須添加適當量肥料來補足，而藉由生物炭的改良作用可進一步減少肥料的使用量，達到合理化施肥的目標，並有助於達到多個 SDGs 的目標。在鹼性土壤中，利用微酸性的生物炭可有效降低土壤 pH 值，增進作物生長。在提高土壤碳匯的部份，本研究短期試驗中土壤有機碳含量平均提高 2.6 倍，證明生物炭的增匯效益是存在的。綜合短期試驗結果，本研究建議在強酸性 Ce 土壤中添加 4B 生物炭與微鹼性 Eh 土壤中添加 D 生物炭，對於提高作物生長、改良土壤與增進土壤碳匯，可以達到三贏(win-win-win)的效益。未來仍然需要長期的現地試驗，以進一步探究生物炭對作物與土壤的長期影響與效益。另外，2022 年 8 月份國際驗證機構「經查證碳標準」(Verified Carbon Standard, VCS) 公告「生物炭在土壤和非土壤應用中的利用方法學」(VM 0044 METHODOLOGY FOR BIOCHAR UTILIZATION IN SOIL AND NON-SOIL APPLICATIONS)，這是第一個公告並以生物炭為名的方法學，這使生物炭也可能成為「碳權」的工具，引起國際上的重視。在公告的方法學中，不僅包含碳匯量的計算，也參考歐盟與國際生物炭倡議組織的安全規範，詳細規範生物炭的安全性，並使其能夠應用在土壤與非土壤(例如作為混凝土和瀝青等長效產品的添加劑)中。我國未來在利用生物炭於土壤和非土壤中，亦應謹慎與遵守國際上的規範。

柒、參考資料

- 蔡呈奇、陳尊賢、許正一、郭鴻裕。1998。臺灣地區農地與坡地代表土壤的選定與其相關資料庫的建立。土壤與環境 1(1): 73-88。
- 簡宣裕、張明輝、劉禎祺。2005。複合化學肥料品質的判斷。農業試驗所特刊第 121 號-合理化施肥專刊。279-288 頁。
- Agegehu, G., A. K. Srivastava, and M. I. Bird. 2017. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology* 119:156-170.
- Aller, M.F. Biochar properties: Transport, fate, and impact. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 2016, 46, 1183–1296.
- Berek, A.K.; Hue, N.V.; Radovich, T.J.K.; Ahmad, A.A. Biochars improve nutrient phyto-availability of Hawaii's highly weathered soils. *Agronomy* 2018, 8, 203.
- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., de Deyn, G., de Goede, R., Fleskens, L., Geissen, V., Kuyper, T.W., Mäder, P., Pulleman, M., Sukkel, W., van Groeningen, J. W. and Brussaard, L. 2018. Soil quality –A criticalreview. *Soil Biology and Biochemistry.* 120. pp. 105-125.
- Chintala, R.; Mollinedo, J.; Schumacher, T.; Malo, D.D.; Julson, J.L. Effect of biochar on chemical properties of acidic soil. *Arch. Agron. Soil Sci.* 2013, 60, 393–404.
- Demirbas, A. Combustion characteristics of different biomass fuels. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2004, 30, 219–230.
- FAO and ITPS. 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) –Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.
- Feng Y, Xu Y, Yu Y, Xie Z, Lin X (2012) Mechanisms of Biochar Decreasing Methane Emission from Chinese Paddy Soils. *Soil Biology and Biochemistry* 46: 80-88.
- Hammes, K.; Smernik, R.J.; Skjemstad, J.O.; Herzog, A.; Vogt, U.F.; Schmidt, M.W.I. Synthesis and characterisation of laboratory charred grass straw (*Oryza sativa*) and chestnut wood (*Castanea sativa*) as reference materials for black carbon quantification. *Org. Geochem.* 2006, 37, 1629–1633.
- Harvey, O.R.; Herbert, B.E.; Rhue, R.D.; Kuo, L.-J. Metal interactions at the biochar-water interface: Energetics and structuresorption relationships elucidated by flow adsorption microcalorimetry. *Environ. Sci. Technol.* 2011, 45, 5550–5556.

IPCC (2014) Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

Ippolito, J.A.; Stromberger, M.E.; Lentz, R.D.; Dungan, R.S. Hardwood biochar influences calcareous soil physicochemical and microbiological status. *J. Environ. Qual.* 2014, 43, 681–689.

Kim, W.-K.; Shim, T.; Kim, Y.-S.; Hyun, S.; Ryu, C.; Park, Y.-K.; Jung, J. Characterization of cadmium removal from aqueous solution by biochar produced from a giant *Miscanthus* at different pyrolytic temperatures. *Bioresour. Technol.* 2013, 138, 266–270.

Kim, W.K.; Shim, T.; Kim, Y.S.; Hyun, S.; Ryu, C.; Park, Y.K.; Jung, J. Characterization of cadmium removal from aqueous solution by biochar produced from a giant *Miscanthus* at different pyrolytic temperatures. *Bioresour. Technol.* 2013, 138, 266–270.

Kumar, A.; Bhattacharya, T. Biochar: a sustainable solution. *Environ. Dev. Sustain.* 2021, 23, 6642–6680, <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00970-0>.

Lal, R., 2015. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *J. Soil Water Conserv.* 70, 55A–62A.

Leach M, Fairhead J, Fraser J, Lehner E (2010) *Biocharred Pathways to Sustainability? Triple Wins, Livelihoods and the Politics of Technological Promise*, STEPS Working Paper 41, Brighton: STEPS Centre.

Lehmann J, Gaunt J, Rondon M (2006) Bio-Char Sequestration in Terrestrial Ecosystems—A Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 395-419.

Lehmann, J., C. Czimczik, D. Laird, and S. Sohi. 2009. Stability of biochar in soil. In: J. Lehmann and J. Stephen, editors, *Biochar for environmental management*. Earthscan, London. p. 193–206.

Lentz, R.D.; Ippolito, J.A. Biochar and manure affects calcareous soil and corn silage nutrient concentrations and uptake. *J. Environ. Qual.* 2012, 41, 1033–1043.

Luo, X.X.; Chen, L.; Zheng, H.; Chang, J.J.; Wang, H.F.; Wang, Z.Y.; Xing, B.S. Biochar addition reduced net N mineralization of a coastal wetland soil in the Yellow River Delta, China. *Geoderma* 2016, 282, 120–128.

Mirabella, N., Castellani, V., Sala, S., 2014. Current options for the valorization of food

manufacturing waste: a review. *J. Clean. Prod.* 65, 28e41. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.10.051>.

Oldfield, T. L. N. Sikirica, C. Mondini, G. López, P. J. Kuikman, N. M. Holden. 2018. Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. *Journal of Environmental Management* 218:465-476.

Pariyar, P.; Kumari, K.; Jain, M.K.; Jadhao, P.S. Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. *Sci. Total Environ.* 2020, 713, 136433.

Purakayastha, T.; Kumari, S.; Pathak, H. Characterisation, stability, and microbial effects of four biochars produced from crop residues. *Geoderma* 2015, 239-240, 293–303

Raich, J.W., Potter, C.S., Bhagawati, D., 2002. Interannual variability in global soil respiration, 1980–94. *Global Change Biol.* 8, 800–812.

Schimmelpfennig, S.; Glaser, B. One step forward toward characterization: Some important material properties to distinguish biochars. *J. Environ. Qual.* 2012, 41, 1001–1013. [CrossRef]

Schimmelpfennig, S.; Glaser, B. One step forward toward characterization: Some important material properties to distinguish biochars. *J. Environ. Qual.* 2012, 41, 1001–1013.

Soil Survey Staff. (2014). *Keys to Soil taxonomy*. 12th Edition. Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture Handbook 436. Washington, DC, USA.

Spokas, K.A. Review of the stability of biochar in soils: Predictability of O:C molar ratios. *Carbon Manag.* 2010, 1, 289–303.

Streubel, J.D.; Collins, H.P.; Garcia-Perez, M.; Tarara, J.; Granatstein, D.; Kruger, C.E. Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2011, 75, 1402–1413.

Thomas, S.C.; Frye, S.; Gale, N.; Garmon, M.; Launchbury, R.; Machado, N.; Melamed, S.; Murray, J.; Petroff, A.; Winsborough, C. Biochar mitigates negative effects of salt additions on two herbaceous plant species. *J. Environ. Manag.* 2013, 129, 62–68.

Van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K.Y.; Downie, A.; Rust, J.; Joseph, S.; Cowie, A. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 2010, 327, 235–246.

Vanlauwe, B., Bationo, A., Chianu, J., Giller, K.E., Merckx, R., Mkwunye, U., Ohiokpehai, O.,

Pypers, P., Tabo, R., Shepherd, K.D., Smaling, E.M.A., Woomer, P.L., Sanginga, N., 2010. Integrated soil fertility management: operational definition and consequences for implementation and dissemination. *Outlook Agric.* 39, 17–24.

Weng Z, Van Zwieten L, Singh BP, Tavakkoli E, Joseph S, et al. (2017) Biochar built soil carbon over a decade by stabilizing rhizodeposits. *Nature Climate Change* 7(5): 371-376.

Zhao, B.; O'Connor, D.; Zhang, J.; Peng, T.; Shen, Z.; Tsang, D.; Hou, D. Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. *J. Clean. Prod.* 2018, 174, 977–987.

Zhao, S.-X.; Ta, N.; Wang, X.-D. Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. *Energies* 2017, 10, 1293.

Zhao, S.X.; Ta, N.; Wang, X.D. Effect of temperature on the structural and physicochemical properties of biochar with apple tree branches as feedstock material. *Energies* 2017, 10, 1293.

【評語】 052204

本研究利用市售或是公家單位取得的生物碳進行皺葉白菜之種子發芽與生長試驗，以及對土壤的影響。審查建議如下：

1. 表一與表二由其他單位提供的結果，應列附參考來源。
2. 同一材料不同鍛燒/裂解溫度對生物碳之綜合影響效益應討論。
3. 不同的生物炭原料，對土壤性質和植物生長的影響建議加強討論。
4. 本研究如果可以增加蔬菜植物測試的種類，所製作之生物碳的效益評估與應用性可以更廣泛與全面。

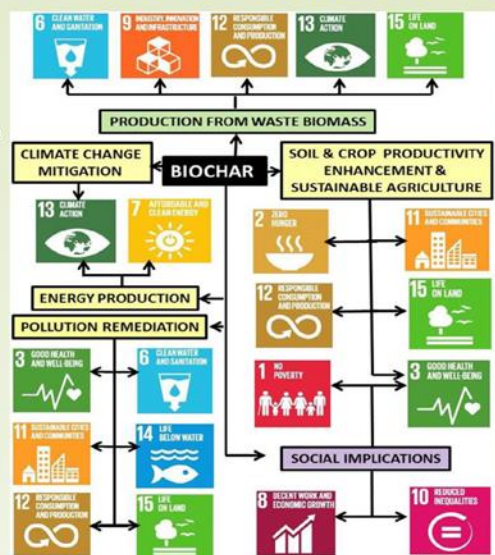
作品海報

摘要

本研究探討生物炭是否具有生物毒性(抑制發芽)與不同生物炭對短期葉菜類生長與土壤性質的影響。發芽試驗結果指出，8種生物炭對種子發芽不具有明顯的毒性，但是具有較高pH與EC值的特性(特別是EC值)的生物炭，對於根系的伸長有些微至明顯的抑制現象(鹽害作用)。盆栽試驗中，相較於對照組，強酸性Ce土壤中生物炭的共同添加處理在株長與鮮重方面平均各增加2.8倍與16.9倍，生物炭效應平均增益1.2倍(株長)與1.6倍(鮮重)，在弱鹼性Eh土壤中的效果較低，只有1.2倍(株長)與3.5倍(鮮重)。鹼性生物炭的石灰效應有助於改良強酸性土壤的pH值，使其適於植物生長；在鹼性土壤中，利用微酸性的生物炭可有效降低土壤pH值，增進作物生長。

研究動機

- 21世紀最大的挑戰之一是需要到2050年將糧食產量增加近一倍，減少持續的能源貧困，同時減少大氣中溫室氣體的排放，並建立對氣候變化的適應能力(IPCC, 2014)。專注於解決這些挑戰的強烈需求激發了全球對生物炭的大規模生產和使用的興趣。生物炭領域發展迅速，為實現多個聯合國永續發展目標(SDG)的途徑提供了獨特而有力的案例(圖一)(Kumar and Bhattacharya, 2021)。
- 「生物炭」在國際間的發展與重視已有將近20年的時間，但是近幾年來才在台灣受到政府及農民的注意與重視。台灣主要的有機廢棄物全年約3000萬公噸以上，其中約2825萬多公噸的有機廢棄物未能妥善處理與再生利用。目前國內生物炭因原料來源與製程技術種類眾多，製成之生物炭特性與效果不一，在缺乏深入的了解之下，陸續有農民直接採用其來改變土壤環境。貿然利用則使用者與土壤安全皆堪慮。因此我們想找到合適的解決方法。



圖一、通過生物炭的生產和應用可能部分實現永續發展目標(SDGs)(Kumar and Bhattacharya, 2021)

研究目的與架構



- 本研究假設添加適當量的生物炭與複合化學肥料混合物可以藉由生物炭穩定複合化學肥料有機質，增進作物生長、改善土壤品質與增進土壤有機碳(碳匯)等三贏的策略，並在農業廢棄物資源再利用(減廢)、降低肥料的使用(合理化施肥)與減少環境污染等三方面有更實質的幫助。農民可以在未來逐步減少複合化學肥料的添加量，並通過混合添加生物炭來保持適當的土壤有機碳、減少養分流失與對環境污染的影響。
- 本研究選用稻殼、竹炭、光臘樹、柑橘枝條、番石榴枝條五種台灣常見的農業廢棄資材，在低氧下(<5~10%)燒製成生物炭(300°C~700°C)，以及選擇酸性紅壤(陳厝寮土系土壤)與石灰性黏板岩沖積土(二林土系土壤)作為試驗土壤，研究計畫的目的旨在探討：
 - 生物炭對於作物種子發芽是否具有生物毒性？
 - 酸性紅壤與石灰性土壤中添加生物炭對土壤與作物生長的影響？
 - 最適合的生物炭種類？

試驗材料

- 陳厝寮土系(Ce)-由洪積層發育而成之紅棕色至棕色土壤，主要分佈於洪積臺地上，排水良好，質地剖面上部底土為坩質粘壤土或粘質壤土，下部底土為粘質壤土，坩質粘壤土至坩質粘土，一般呈強酸性至中度酸性反應。
- 彰化二林土系(Eh)-橄欖色至淡橄欖棕色，微鹼性粘板岩老沖積物沉積而成之含石灰結核，排水不完全沖積土。其質地剖面全層均以坩質壤土為主。

複合(化學)肥料

- 為了與一般田間耕作時施用複合(化學)肥料的效果做比較，本研究選用台灣農民常用的長岡化工鐵牛牌特1號複合有機肥料(11% N、11% P₂O₅、11%K₂O)。(以CF為代號)

試驗生物炭

- 稻殼D(300°C):市售的稻殼炭。
- 稻殼F(500°C):台東農家所提供。
- 竹炭WB(700°C)、光臘樹WA(700°C):林業試驗所森林利用組所提供。
- 柑橘4B(400°C)、柑橘6B(600°C)、番石榴4E(400°C)、番石榴6E(600°C):農業試驗所農業化學組所提供。

土壤性質	Ce	Eh
總體密度 (Mg/m ³)	1.13	1.31
風乾土水分含量 (%)	1.19	1.11
砂粒(Sand) (%)	36.04	18.06
黏粒(Clay) (%)	35.43	27.62
坩粒(Silt) (%)	28.53	54.32
土壤質地級	黏質壤土	坩質粘壤土
水份吸持容量 (%)	43.4	64.0
酸鹼度(pH)	4.44	7.82
電導度(EC) (dS/m)	1.17	1.39
有機碳 (g/kg)	5.60	14.4
可交換性鉀 (cmol(+)/kg soil)	0.69	0.81
可交換性鈉 (cmol(+)/kg soil)	3.55	3.32
可交換性鈣 (cmol(+)/kg soil)	0.63	21.3
可交換性鎂 (cmol(+)/kg soil)	0.76	2.93
陽離子交換容量 (cmol(+)/kg soil)	5.65	9.10
鹽基飽和度 (%)	99.6	100
銨態氮(NH ₄ -N) (mg/kg)	8.45	3.59
硝酸態氮(NO ₃ -N) (mg/kg)	2.33	18.0
有效性磷 (mg/kg)	5.39	35.3
有效性鉀 (mg/kg)	0.21	0.21
水團粒穩定度 (%)	27.7	10.6
全氮量 (g/kg)	1.35	2.62
全磷量 (g/kg)	0.25	0.85

性質(Properties)	D	F	WB	WA	4B	6B	4E	6E
pH	6.34	7.73	10.6	10.5	10.2	11.1	10.5	10.4
EC (dS/m)								
30min	0.58	0.50	0.94	0.73	1.53	6.83	3.56	5.89
24hr	0.84	0.85	1.10	1.08	1.89	7.18	4.37	7.00
Mehlich 3-extractable (g/kg)								
P	0.52	0.53	0.67	0.83	0.69	0.99	0.49	0.41
K	6.57	5.33	7.76	5.85	16.4	34.0	16.6	27.3
Ca	0.51	0.80	0.55	4.31	20.2	19.3	10.4	9.41
Mg	0.30	0.24	0.27	0.44	1.43	4.64	0.98	0.94
Available (g/kg)								
N	0.09	0.07	0.05	0.05	0.10	0.14	0.24	0.09
Cation Exchange Capacity (cmol(+)/kg soil)								
Total (g/kg)								
N	6.63	6.98	6.17	5.56	15.6	8.13	13.8	10.7
P	1.15	1.12	1.40	1.83	5.31	8.74	4.93	6.66
K	7.80	10.8	13.0	8.31	17.3	33.2	28.8	44.6
Ca	1.78	2.26	1.14	7.39	66.5	103	46.8	54.2
Mg	1.03	0.86	0.85	1.10	6.63	9.10	8.27	8.91
Cd	0.03	0.11	0.04	ND	ND	ND	ND	ND
Cr	1.56	3.51	1.20	1.41	320	11214	583	122
Cu	4.26	4.42	4.85	23.5	59.3	176	70.1	55.6
Ni	0.82	4.46	1.17	0.77	78.9	129	67.2	18.7
Pb	ND	0.18	0.43	ND	2.18	0.45	ND	ND
Zn	1.76	8.89	25.2	ND	93.7	449	54.4	124
Total element (%)								
C	42.3	52.2	81.8	83.0	38.2	30.9	51.4	47.6
N	0.54	0.65	0.64	0.54	1.03	0.49	0.85	0.89
H	2.89	2.35	1.60	1.49	2.36	1.08	2.21	1.72
O	22.0	14.7	13.3	12.6	16.8	17.5	13.9	15.0
C/N	79	81	128	154	37	63	60	53
O/C (molar ratio)	0.35	0.19	0.11	0.10	0.29	0.38	0.18	0.21
H/C (molar ratio)	0.82	0.54	0.23	0.22	0.74	0.42	0.52	0.43

試驗方法

種子發芽測定(生物毒性)

- 利用測定複合化學肥料腐熟度的方法-種子發芽測定法(簡宜裕等人, 2005)-來評估八種生物炭是否具有生物毒性(會抑制作物發芽與根系生長)。
- 若試驗組的發芽率為對照組發芽率的90%以上，且根的伸長不受抑制，則該資材可視為不具生物毒性。
- 本項測試並非用於探討八種資材在養分提供方面之重要性，測試的目的旨在證明八種資材是否會抑制作物發芽與根系生長，並非以其結果作為後續不同添加量之設計基礎。

盆栽試驗

- 皺葉白菜(pak choi)(*Brassica rapa chinensis*)。
- 生物炭與複合化學肥料的添加率設定為2%與0.5%，對照組(Control, C, 皆不添加)與添加0.5%化肥(複合有機肥料)(CF)。
- 試驗樣本的處理方式-一個批次的樣本包括2種土壤(Ce及Eh)、8種添加材料(2%生物炭+0.5%複合化學肥料)、0.5%複合化學肥料與對照組，3重覆樣本，共計60個。每種土壤之處理組代號包括Control、CF、D、F、WB、WA、4B、6B、4E、6E，計10種。將上述混合好的土壤樣本約裝填於塑膠栽培盆中(共60盆)，在溫室(23~26°C)種植期間每週控制水分在60%~80%田間含水量，28天後進行小白菜採收，植體分地上部與根後，紀錄鮮重與葉長。
- 試驗後土壤樣品性質分析土壤風乾、磨碎與過篩(2 mm)，分析包括、水團粒穩定度、pH值、電導度(EC)與有機碳。

統計分析

- ✓ 本研究的統計分析為利用"統計分析系統軟體(Statistical Analysis System (SAS) 9.4 package, SAS Institute Inc., SAS Campus Drive, Cary, NC, USA)"進行分析(計算平均值、標準偏差及平均值的差異)。
- ✓ 試驗結果(包括種子發芽試驗與種子直播試驗)利用單因子變異數分析(one-way analysis of variance, one-way ANOVA)比較處理之間的平均數差異,以鄧肯氏新多變域分析法(Duncan's new multiple analysis method)分析處理間的顯著差異(顯著相關水準訂為*: p< 0.05, **: p< 0.01及***: p<0.001)。
- ✓ 圖表中的數據以平均值±1標準偏差(means ± 1 standard deviation (SD))來表示。
- ✓ 為了瞭解共同添加的效應與添加生物炭的效應,本研究分別計算處理組效應(%)與生物炭效應(%)如下:

$$\text{處理組效應}(\%) = [(\text{處理組}-\text{對照組})/\text{對照組}]*100 \quad (1)$$

$$\text{生物炭效應}(\%) = \{[(\text{CF}+\text{生物炭})\text{處理組}-(\text{CF組})-(\text{對照組})]/(\text{對照組})\}*100 \quad (2)$$

結果

- ◆D、F、WB、WA及4B生物炭不會抑制種子發芽與根系生長
- ◆6B、4E與6E生物炭則有減低發芽率與抑制根系生長的情況(根系較短與根尖有枯黑的情形)
- ◆主要是因為4E與6E生物炭本身的pH值與EC值都較高。
- ◆4E (pH 10.2及EC 2.79 dS/m)
- ◆6E (pH 10.2及EC 4.96 dS/m)

生物炭	種子發芽數	發芽率(%)	pH	EC (dS/m)	種子發芽照片
D	25	100	6.29	0.648	
F	24	96	7.60	0.631	
WB	24	96	9.76	0.805	
WA	25	100	9.42	0.565	
4B	25	100	9.60	1.04	
6B	25	100	10.3	4.47	
4E	21	84	10.2	2.79	
6E	23	92	10.2	4.96	
對照組	24	96	6.30	0.006	

種子發芽測定 (生物毒性)

盆栽試驗

處理	株長		地上部鮮重		pH (第14天)		EC (第14天)		pH (收穫後)		EC (收穫後)		土壤有機碳		水團粒穩定度	
	處理組效應(%)	生物炭效應(%)	處理組效應(%)	生物炭效應(%)	處理組效應(%)	生物炭效應(%)	處理組效應(%)	生物炭效應(%)	處理組效應(%)	生物炭效應(%)	處理組效應(%)	生物炭效應(%)	處理組效應(%)	生物炭效應(%)	處理組效應(%)	生物炭效應(%)
Ce soil																
CF	94		32		-2		14		6		273		22		-14	
CF-D	79	-14	12	-21	4	5	18	4	5	-1	311	38	191	169	-12	2
CF-F	72	-21	27	-5	4	6	20	6	8	2	302	29	210	188	-13	1
CF-WB	70	-24	19	-13	14	15	19	5	12	6	285	12	308	286	-31	-17
CF-WA	151	57	122	89	17	19	24	11	9	2	177	-97	378	356	-26	-12
CF-4B	197	103	259	227	17	19	8	-5	41	35	233	-40	165	143	-20	-6
CF-6B	293	199	319	286	25	27	14	1	64	58	268	-5	129	107	-9	5
CF-4E	135	42	72	40	24	26	17	3	47	40	377	104	203	181	-16	-2
CF-6E	128	34	91	59	35	37	30	16	49	43	365	92	165	143	-20	-6
Eh soil																
CF	8		36		-4		84		-16		494		13		14	
CF-D	29	21	232	195	-9	-5	-1	-85	-15	1	147	-347	48	35	1	-13
CF-F	5	-3	50	13	0	3	141	57	-18	-2	715	222	41	28	6	-8
CF-WB	-4	-12	15	-21	-5	-1	175	91	-12	4	794	301	69	56	33	19
CF-WA	-37	-45	-77	-113	17	21	154	70	-16	0	1065	571	71	57	30	17
CF-4B	-31	-40	-59	-95	9	13	133	49	-5	11	1179	685	38	25	14	0
CF-6B	-26	-34	-24	-60	13	17	231	147	5	21	1144	651	14	1	32	19
CF-4E	-68	-76	-93	-129	7	11	211	127	-4	12	1342	848	38	25	44	31
CF-6E	-23	-31	-36	-72	11	15	159	74	1	17	1063	570	39	26	61	47



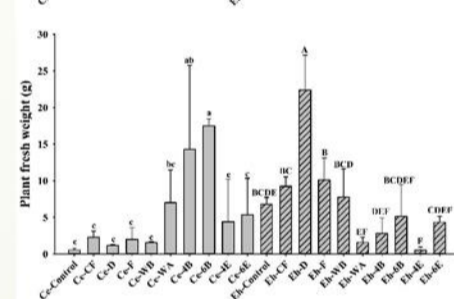
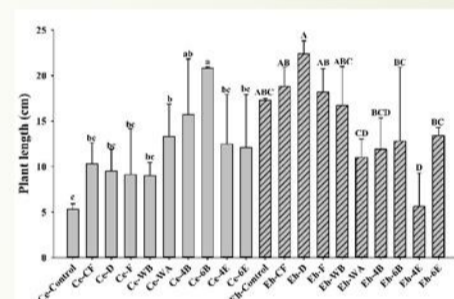
植物生長分析

➢ Ce土壤

- ✓ 與對照組相比,株長增加1.7~3.9倍,鮮重增加2.1~31.7倍,包括WA、4B及6B的添加處理最為顯著,而6B生物炭處理組有最大株長與鮮重。
- ✓ 各處理組的效應(與對照組比較),株長提高70%(WB)~293%(6B),鮮重提高12%(D)~319%(6B)。
- ✓ 生物炭(WA、與4B、6B、4E與6E)與CF的共同添加,可增益與促進植體生長,由生物炭效應中可知增益效應為株長增益34%~199%與鮮重增益40%~286%。

➢ Eh土壤

- ✓ 生物炭處理影響植體生長,造成植體生長較矮小與降低鮮重,只有D處理組之株長有明顯增加,而鮮重有顯著提高。
- ✓ 各處理組的效應(與對照組比較),除CF、D及F之株長有提高(分別為8%、29%及5%),其他處理則為減少4%(WB)~68%(4E);鮮重的部分則包括CF、D、F與WB有提高(分別為36、232、50及15%),其他為減少24%(6B)~93%(4E)。
- ✓ 只有D生物炭與CF的共同添加,有增益與促進植體生長的效益,D生物炭效應之增益效應為株長增益21%與鮮重增益195%。



土壤性質分析

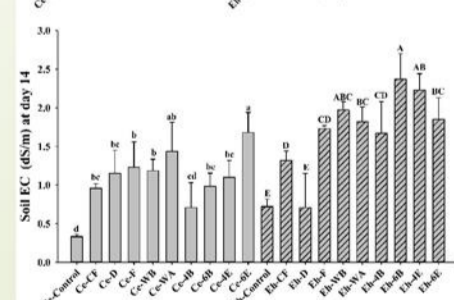
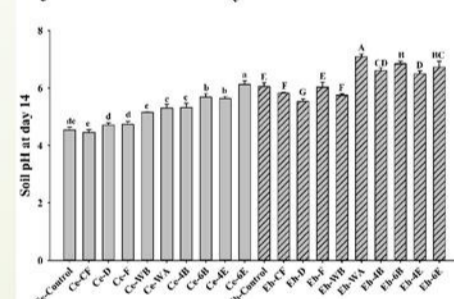
生長第14天的鮮土土壤pH值與電導度(EC)值

➢ Ce土壤

- ◆ 6E處理組之pH值顯著最高。
- ◆ pH值不同處理間的效應,生物炭處理為提高的影響,從提高4%(D及F)至35%(6E),而生物炭的效應為提高5%(D)至37%(6E)。
- ◆ 添加處理都顯著提高土壤的EC值(約為對照組的3~5倍),而6E處理組顯著最高。
- ◆ EC值之處理組效應皆為提高的效應,從8%(4B)至30%(6E),生物炭效應中4B生物炭為降低效應(-5%),其他為提高效應(1%~16%)。

➢ Eh土壤

- ◆ WA處理組之pH值顯著最高。
- ◆ CF、D與WB表現出降低pH的處理效應,F處理組沒有影響,其他為提高pH的效應(7%~17%),而生物炭效應中僅D(-5%)及WB(-1%)為降低效應;
- ◆ 6B處理組EC顯著最高。
- ◆ EC值僅D處理組與D生物炭表現出降低效應(分別為-1%處理組效應及-85%生物炭效應),其他處理組效應介於84%(CF)~231%(6B),生物炭效應介於49%(4B)~147%(6B)。



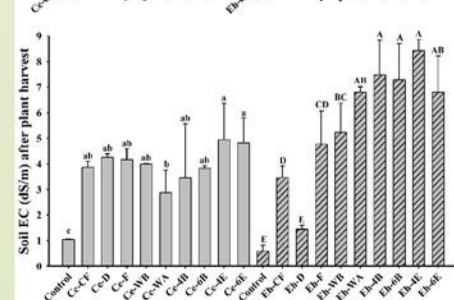
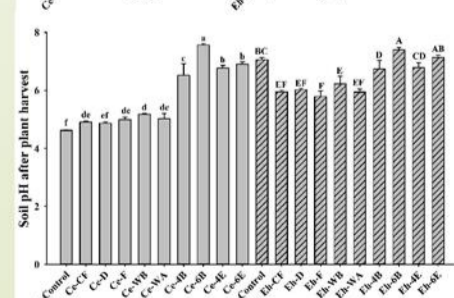
植體收穫後的土壤pH值與電導度(EC)值

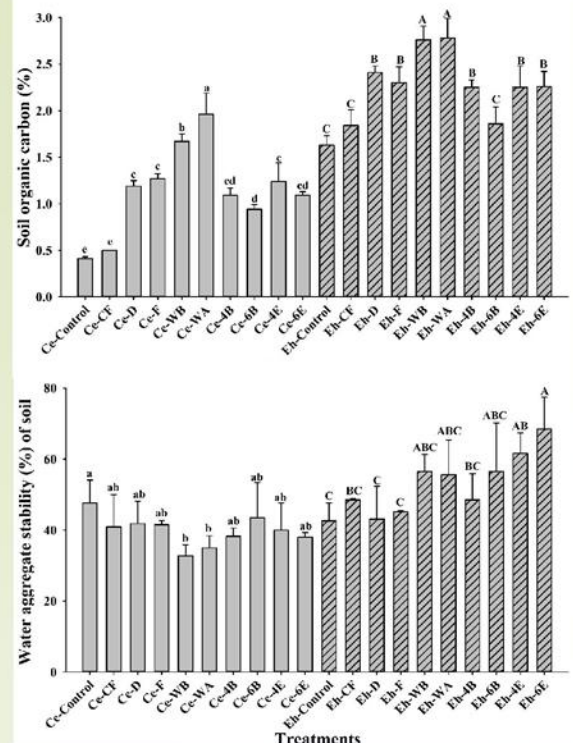
➢ Ce土壤

- 6B處理組有顯著最高的pH值(高於對照組3.0 pH單位)。處理組皆顯示提高pH的效應(5%~64%),生物炭效應也大都為提高效應(2%~58%),生物炭D為降低效應(-1%)。
- 所有處理的EC值皆顯著高於對照組(約為對照組的2.8~4.8倍),4E及6E處理組之EC值明顯最高。EC之處理組效應高於177%,生物炭效應中包括WA、4B與6B為負的效應(-97%、-40%與-5%),其他皆為正效應(12%~104%)。

➢ Eh土壤

- 6B處理組有顯著最高的pH值(高於對照組0.3 pH單位),CF、D、F、WB、WA、4B及4E處理組pH值皆顯著低於對照組(減少0.3~1.3 pH單位),6E沒有顯著差異。除了6B及6E為提高pH的處理組效應(5%及1%),其他處理組效應皆為負的(降低)效應(-4%~18%),而生物炭效應中,僅F為降低效應(-2%)與WA為沒有影響,其他生物炭皆為提高效應(1%~21%)。
- EC值的變化,4B、6B與4E顯著最高。處理組效應高於147%(最高為1342%),生物炭效應中僅D生物炭為負的效應(-34%),其他皆為正效應(222%~848%)。





➤Ce土壤

➤添加生物炭顯著提升Ce土壤有機碳的含量，約增加2倍(6B)至5倍(WA)；在處理組效應中，添加生物炭之處理組有很高的增加效應，介於129%(6B)與378%(WA)之間，而生物炭效應介於107%與356%之間，顯示於肥料中共同添加生物炭及顯著的提高土壤有機碳含量，這有助於增加土壤碳匯(碳儲存量)。

➤Eh土壤

➤對Eh土壤而言SOC也有類似的情形，但約只增加1.4倍至1.7倍；生物炭處理組效應介於14%(6B)與71%(WA)之間，生物炭效應介於1%(6B)與57%(WA)之間，然而雖然明顯低於酸性土壤，本研究也證實共同添加生物炭於堆肥中並施用於弱鹼性土壤，仍然能有助於增進土壤碳匯。後續需要長期試驗來證明生物炭增進土壤碳匯的持續性。

土壤水團粒穩定度(WAS%)

➤Ce土壤

➤添加WB與WA兩種生物炭顯著降低WAS%(與對照組比較)，處理組效應皆為負(降低)效應(-9%~-26%)，在生物炭效應上包括D、F與6B為正(提高)效應(分別為2%、1%與5%)，其他生物炭為負效應(-2%~-17%)。

➤Eh土壤

➤只有4E與6E處理組織WAS%顯著高於對照組(分別提高19%與25.8%)，處理組有提高Eh土壤之團粒穩定度。進一步由處理組效應與生物炭效應中可以證實，處理組效應提高1%~61%，生物炭效應提高17%~47%，但D與F生物炭之生物炭效應為負效應(-13%與-8%)。WB、WA、6B、4E與6E生物炭的提高效應更佳，特別是4E與6E生物炭。

討論

☐ pH及EC

- ☐ 由於其固有的鹼性，生物炭可能會增加土壤 pH 值，因此它已成為酸性土壤的一種有前途的改良劑。弱鹼性Eh土壤由於鈣離子(Ca²⁺)含量高因而具有的緩衝能力較高，隨時間的下降不太明顯。收穫後生物炭處理的土壤pH值明顯高於對照，表明生物炭固有鹼度的影響能夠持續隨著時間的推移。
- ☐ 添加生物炭和/或堆肥可以增加土壤EC，這種 EC 增加可歸因於從生物炭和堆肥中釋放鹼性陽離子。增加生物炭施用量會導致土壤EC降低，其結果可歸因於生物炭對鹽分的吸附作用。我們的研究結果表明，在Ce土壤中添加WA生物炭與在Eh土壤中添加D生物炭中發生相對明顯的鹽分吸附現象。

☐ 土壤有機碳

- ☐ Ce土壤中共同添加的效應顯著高於對照組與只添加肥料的處理組(CF)，生物炭的效應更是如此，8種生物炭的效應遞減順序WA > WB > F > 4E > D > 4B, 6E > 6B。在Eh土壤中，效應明顯低於Ce土壤，8種生物炭的效應遞減順序WA > WB > D > F > 6E > 4B, 4E > 6B。
- ☐ 8種生物炭的O/C molar ratio由低至高為WA、WB、4E、F、6E、D、6B，H/C molar ratio由低至高為WA、WB、6B、6E、4E、F、4B、D，依據前人研究的結果，WA與WB為相對非常穩定的生物炭(O/C與H/C皆非常低)，其他6種生物炭因為H/C比值相對較高，表示生物炭中可能含有較多未聚合的芳香結構(noncondensed aromatic structures)，例如木質素，添加在土壤中比較不穩定(容易被微生物分解或崩解)。

☐ 水團粒穩定度

- ☐ 酸性紅壤的土壤構造本來就很明顯，添加生物炭後可能因為生物炭的分解也造成土壤構造被破壞(水團粒穩定度%降低)，但因為添加量不高(2%)與添加滯留時間不長(28天)，並不會對高黏粒含量的紅壤之土壤構造造成明顯的破壞；WB及WA生物炭因為高度的聚合作用而非常穩定，在酸性紅壤中無法被分解釋放出有機碳與土壤粒子膠結形成穩定的構造，因此降低土壤構造的穩定性(水團粒穩定度%降低)。
- ☐ 在石灰性Eh土壤中，因為鈣離子含量高造成土壤粒子的蓄聚現象，土壤呈現大塊狀構造，密實與不易通透水分，添加生物炭後希望藉以分散土壤粒子，然而鹼性的生物炭無法有效達成此項目的，只有弱酸性的D生物炭與弱鹼性的F生物炭有較明顯的效果。

結論

- ☐ 生物炭對於種子發芽不具有強烈的毒性與抑制伸長的作用，但選用時仍應預先了解生物炭之pH與EC值。
- ☐ 鹼性生物炭的石灰效應有助於改良強酸性土壤的pH值，使其適於植物生長，藉由生物炭的改良作用可進一步減少肥料的使用量，達到合理化施肥的目標，並有助於達到多個SDGs的目標。
- ☐ 在鹼性土壤中，利用微酸性的生物炭可有效降低土壤pH值，增進作物生長。
- ☐ 本研究短期試驗中土壤有機碳含量平均提高2.6倍，證明生物炭的增匯效益是存在的。
- ☐ 本研究建議在強酸性Ce土壤中添加4B生物炭與微鹼性Eh土壤中添加D生物炭，對於提高作物生長、改良土壤與增進土壤碳匯，可以達到三贏(win-win-win)的效益。
- ☐ 未來仍然需要長期的現地試驗，以進一步探究生物炭對作物與土壤的長期影響與效益。

