

添加生物炭對酸性紅壤肥力之影響

Effects of Application of Biochar on Soil Fertility of Acidic Red Soils

國立屏東科技大學
水土保持系
助理教授

簡士濠*

Shih-Hao Jien

國立屏東科技大學
水土保持系
助理教授

江介倫

Jie-Lun Chiang

國立屏東科技大學
水土保持系
碩士班研究生

王建昇

Chien-Sen Wang

國立屏東科技大學
水土保持系
大學部學生

張庠睿

Hsiang-Jui Chang

摘要

紅壤為臺灣地區重要耕作土壤之一。長期的耕犁與過量使用化學肥料造成土壤的酸化與嚴重退化，故永續維持土壤品質與產量為目前農業迫切課題之一。本研究主要利用林業廢棄物—銀合歡木材於厭氧高溫下燒製成之生物炭，添加至酸性紅壤中，孵育 3 個月，以評估添加生物炭對紅壤肥力之改善與不同添加量下土壤養分之動態變化。實驗結果顯示酸性紅壤經添加 5% 生物炭後，土壤 pH 值顯著由 4.0 提升至 5.1、有機碳含量顯著增加至少 7.0 g kg^{-1} ，而鹽基飽和度顯著增加 2 倍以上，且增加幅度與生物炭添加量呈正相關。此外，土壤經改良後，土壤微生物活性以 5% 添加量顯著最高，且隨時間漸達穩定平衡；土壤中可交換性氮與有效磷含量亦隨生物炭添加而顯著增加，同樣以 5% 施用量下所增加之幅度最高。然而，可交換性氮與有效磷皆隨孵育期間的降雨淋洗而損失，以未改良土壤之損失比率最高。整體而言，施用生物炭至酸性紅壤中，不僅可有效改善土壤品質，亦可達到保持土壤肥力的效用。

關鍵詞：紅壤，生物炭，土壤肥力，可交換性氮，有效磷。

ABSTRACT

Red soil is an important rural soil in Taiwan. Long-term cultivation and unsuitable chemical fertilizer application accelerate soil degradation. Therefore, sustainable maintenance of soil quality and crop productivity is an urgent issue for agriculture now. This study used a forestry waste, woods of white leadtree (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit), to prepare a wood biochar as an soil amendment, which was incorporated into the acidic red soils for 3 months incubation. This study aimed to evaluate the variation of

*通訊作者，國立屏東科技大學水土保持系助理教授，91201 屏東縣內埔鄉學府路 1 號，shjien@mail.npust.edu.tw

soil fertility and the dynamic changes of nutrients. The experimental results indicated that applying biochar into the soil significantly increased soil pH from 4.0 to 5.1, organic carbon contents increased at least 7.0 g kg^{-1} and base saturation percentages were 2 times at least than those of un-amended soils. Furthermore, microbial biomass carbon, exchangeable nitrogen and available phosphorous contents were also increased with increasing applying rate of biochar. The increasing amounts of mentioned-above properties were positively related to applying rates of biochar. As a whole, applying biochar into the red soil could improve soil qualities and retain soil fertility efficiently.

Keywords: Red soil, biochar, soil fertility, exchangeable nitrogen, available phosphorous.

一、緒 論

台灣位處亞熱帶及熱帶地區，屬高溫多雨之氣候，土壤有機物分解快速；此外，台灣地狹人稠，為使農作物獲高產量，農地集約並超限利用，因此，長期耕作下土壤肥力較不易維持。紅壤為台灣地區重要耕作土壤之一，佔臺灣面積約10%，該土壤主要於高溫多雨且乾濕季節分明之氣候條件下化育生成，常被歸類為不利作物生長的低生產力土壤之一。前人研究指出，第四紀洪積母質紅壤由於風化淋洗作用強烈，pH 值多呈強酸之特性，pH 約在 3.5 至 4.5 之間。此外，紅壤表層土壤有機物質分解迅速，加上流失與沖蝕現象普遍，有機質含量多未達 2%，且鹽基飽和度亦偏低(<10%) (千田，1980；劉和莊，1986；謝和王，1989；江，1992)。有鑒於上述之紅壤特性，為使土壤永續利用、增進作物產量及維持土壤品質，利用有機資材改良紅壤劣化性質為目前所迫切需要。以往農業所利用之有機資材主要為生物固形物(biosolids)、禽畜堆肥(composts)或綠肥(green manure)等，但該些資材通常需長期固定添加以維持土壤有機質，且長具有重金屬污染的風險；因此，上述資材之種類與施用量乃需審慎評估。

有鑒於有機改良資材易隨時間礦化分解的缺點，將廢棄物(農業廢棄物或生物固形物)轉製為炭化物質，亦稱為生物炭(biochar)，並將之使用為土壤改良劑為近年新興之方法。生物炭為一富含碳之固形物質，由生物質(biomass)在氧氣受

限制之環境下熱裂解產生(Lehmann *et al.*, 2003)。由於高溫炭化之故，生物炭本身所含之有機碳較難以礦化分解，因而可長期維持土壤中之碳含量。許多學者已提出添加生物炭至土壤中可長期建立土壤中碳匯池(soil carbon sink) (Kuzayakov *et al.*, 2009；Sánchez *et al.*, 2009；Steinbeiss *et al.*, 2009)。除改善了以往有機資材易礦化分解的缺點外，生物炭同樣可有效改善土壤品質，例如促進土壤構造、團粒穩定性、導水度；增加土壤中微生物活性及減少養份淋洗損失，並促進植物生長(Lehmann and Joseph, 2009；Joseph *et al.*, 2010)。Chan *et al.* (2007)指出，生物炭與其它有機資材相較下，屬於養分含量較低之土壤改良資材；然而，土壤經添加生物炭後，仍可有效改善土壤之保肥能力，並增加土壤固碳能力。許多學者以將生物炭作為一改良劑並施用於退化土壤中以改善土壤物理化學特性，並增加作物產量(Lehmann and Joseph, 2009；Joseph *et al.*, 2010)。生物炭常被用於改良酸性且養分貧脊之土壤，主要藉本身之高鹼度與高比表面積特性來提高酸性土壤之 pH 值與陽離子交換容量(cation exchange capacity, CEC)，進而降低鋁毒性與保持土壤養分(Chen *et al.*, 2010；Laird *et al.*, 2010；Yuan *et al.*, 2011)。Chan *et al.* (2008)利用家禽廢棄物製成之生物炭，以 10 t/ha 的添加量下，發現可明顯改善地中海地區農地(新成土)的生產量，主要乃由於生物炭可增加養分涵養量，尤其是土壤含氮量的顯著增加。Laird *et al.* (2009)發現當土壤添加生物炭後，能保持更多的水分，且具有較高之比表面積(約 18%)；此外，

pH 與陽離子交換容量皆明顯增加。

台灣的低海拔低區山坡地區原生樹種，多被銀合歡(*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit)所入侵，為避免生態系受破壞及維持生物多樣性，大規模伐除入侵樹種為行政當局可實行之有效方式；然而，大規模伐除入侵樹種，卻也製造大量之林業廢棄物，如能有效將伐除之銀合歡木材資源化再利用，將可避免最終廢棄物處置問題。因此，本研究主要選擇台灣地區南部一酸性紅壤，以銀合歡樹材於高溫厭氧炭化成之炭化物質作為土壤改良劑，目的為探討生物炭於不同施用量下，酸性紅壤肥力之變化情形；同時，本研究亦探討生物炭添加後土壤養分之動態變化。

二、材料與方法

2.1 供試土壤之採集

本試驗於台灣地區南部之大平頂台地上，採集表土 15 cm 內之土壤作為供試土壤，土壤基本性質如表 1 所示。台地上主要種植作物為鳳梨。本研究區域乾濕季節明顯，依據中央氣象局恆春測候站 1971-2011 年之資料(CWB, 2011)，本研究區之年平均降雨量約 1,691 mm，夏季的颱風帶來豐沛的降雨，使 75%的降雨多集中於 5 至 9 月，10 月至翌年 4 月為東北季風(俗稱為落山風)最旺盛的乾旱季節。年平均氣溫約 25.2°C，1 月份最低，平均氣溫 17.5°C，8 月份最高，平均 26.4°C，在季節性的變化上呈冬乾夏濕的狀態，若依科本氏氣候分類可將本研究區域分類為乾濕熱帶氣候(wet-dry tropical climate)。平均相對濕度全年變化約為 85%。

2.2 生物炭來源及製備

於南台灣墾丁國家公園內，已有近 50%的面積已遭受銀合歡樹種的嚴重入侵，超過 50%入侵比例的森林面積則將近佔有 35%的國家公園面積(Chin *et al.*, 2007)。墾丁國家公園管理處已於 2002 年即開始伐除入侵銀合歡及防治入侵的擴散。本試驗採用伐除之銀合歡(*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit)木材，於厭氧、高溫(750°C)之情況下，熱裂解製備成之炭化物質(生

表 1 供試土壤與生物炭之基本性質分析

Properties	Red soil	Biochar
pH	3.95 ± 0.02	9.94 ± 0.22
Organic carbon content (%)	1.90 ± 0.20	1.82 ± 0.14
CEC (cmol(+) kg ⁻¹)	7.41 ± 1.05	22.3 ± 1.65
Total N (g kg ⁻¹)	0.09 ± 0.02	3.64 ± 0.07
NH ₄ ⁺ + NO ₃ ⁻ content (g kg ⁻¹)	0.03 ± 0.02	0.66 ± 0.05
Available P content (g kg ⁻¹)	0.09 ± 0.01	0.03 ± 0.00
Exchange Ca (cmol(+) kg ⁻¹)	0.37 ± 0.05	8.84 ± 0.73
Exchange Mg (cmol(+) kg ⁻¹)	0.02 ± 0.01	0.41 ± 0.00
Exchange K (cmol(+) kg ⁻¹)	0.10 ± 0.14	0.19 ± 0.03
Exchange Na (cmol(+) kg ⁻¹)	ND	0.27 ± 0.08
Specific surface area (m ² g ⁻¹)	29.4	153

ND: not detectable.

物炭，biochar)。將生物炭細磨並過 100 mesh 篩以供後續分析及土壤改良使用，生物炭之基本性質如表 1 所示。

2.3 土壤孵育試驗

本試驗以三種不同生物炭添加比例，分別為 0%、2.5%和 5% (重量比)，添加至土壤中。每一添加比例皆為 3 重複。各比例生物炭與紅壤均勻混合後，即置入 Wagner 1/5000a 圓形塑膠盆中，其土盆直徑為 16 cm，高 19 cm。每盆皆裝填約 15 公分之土壤，並於保持田間含水量狀態下(約 60%之土壤含水量)，進行 3 個月之孵育。

2.4 模擬降雨之淋洗試驗

本試驗假設每月降雨一次的狀況下，以試驗地年 2007-2011 年平均雨量(2,595 mm year⁻¹)為基準，計算月平均雨量，於實驗室內，以人為添加去離子水方式，模擬雨量及淋洗現象。添加水量計算為月平均雨量乘以試驗土盆底面積 200 cm²，即可得知每月土盆去離子水添加量，計算結果為每月須加約 4.3 公升之去離子水。

2.5 土壤基本性質分析

所有土樣經風乾、磨碎與過篩(<2 mm)後，進行各土壤物理化學及生物性質項目之分析，分析方法如下：

表 2 孵育後不同生物炭施用率之土壤化學性質

Treatment	pH	Organic Carbon (%)	Base saturation (%)
0%	3.95 ± 0.02a ^{a)}	1.90 ± 0.20a	6.40 ± 4.39a
2.5%	4.65 ± 0.02b	2.84 ± 0.13b	14.2 ± 0.83b
5%	5.07 ± 0.01c	2.62 ± 0.08b	26.0 ± 16.6b

^{a)} Values followed by the same letter within a column are not significantly different at $p < 0.05$ level based on Duncan's test.

- (1) pH 值：以玻璃電極法測定(Mclean, 1982)。
- (2) 有機質：以 Walkley-Black 濕式氧化法測定(Nelson and Sommers, 1982)。
- (3) 交換性鹽基離子：中性醋酸銨法 (pH=7) (Thomas, 1982)。
- (4) 可交換性氮(NH_4^+ -N 與 NO_3^- -N)：2M KCl 萃取(Mulvaney, 1996)。
- (5) 有效磷：土壤 Bray No. 1 磷(Kuo, 1996)。
- (6) 土壤微生物生質碳：氯仿薰蒸法(Brookes *et al.*, 1985)。
- (7) 比表面積：利用比表面積測定裝置測定(SA-3100, Beckman Coulter, USA)。

2.6 統計方法

本研究試驗設計採完全逢機設計(complete random design, CRD)，並以 SAS 統計軟體中 GLM 程序進行雙因子變異數分析(two-way ANOVA)，此外，其他處理間平均值的多重比較則採用 Duncan 新多變域測驗法，顯著差異設在 $P < 0.05$ 。

三、結果與討論

3.1 添加生物炭後土壤 pH、有機質及交換性鹽基離子之變化

本研究中，土壤經添加不同比例之生物炭，經 3 個月孵育後，pH 值顯著($P < 0.05$)增加 0.7-1.1 單位，且升高幅度隨生物炭施用量的增加而增加(表 2)。實驗結果顯示，生物炭在孵育過程中本身所釋放的鈣、鎂等鹽基離子，可促使改良土壤 pH 的增加。Yuan *et al.* (2011)使用稻殼生物炭添加於酸性紅壤中，生物炭的高鹼

度可顯著中和紅壤之酸度，此亦稱為石灰中和效應(liming effect)。此外，Xu *et al.* (2006)亦指出當有機資材添加置土壤後，微生物便開始進行分解作用，而釋放出鹼性陽離子，使土壤的 pH 值增加；但當微生物活性降低，鹼性陽離子的釋放量亦降低。

另一方面，當生物炭添加到土壤後，生物炭中有機態氮的銨化作用亦可能使整體土壤的 pH 值升高。有機氮在土壤中的銨化及硝化作用也會影響 pH 值的變化，且此兩反應的發生乃受土壤起始 pH 值所影響。當土壤有較低的起始 pH 值時，銨化作用會是主要反應，此將釋放出 OH^- ，而使 pH 值增加，反之硝化作用則釋放 H^+ ，使 pH 值降低(Helyar and Porter, 1989)。

一般適合植物生長的土壤有機質含量應該在 3.0-5.0%之間，當有機質含量低於 2%，則表示土壤不易維持農作物的正常生長。民國 67~70 年間農業試驗所與各改良場於全台灣地區共採集 5730 個土壤樣本，進行土壤肥力能限分類規範調查研究，調查結果指出所有樣本中有 44.8%，其土壤有機質含量在 2%以下(臺灣省農業試驗所，1982)。至民國 81 年農業試驗所進行全省農田土壤肥力調查，採取八個鄉鎮的農田土壤樣本，報告中指出土壤有機質含量約在 1.3-3.4%之間(郭，1993)。由過去 30 年的調查資料顯示，台灣農田土壤有機質含量皆普遍偏低，實有增加土壤有機質含量之必要性。本研究結果顯示，紅壤有機碳含量偏低($< 2.0\%$)，同時，鹽基飽和度亦不超過於 10% (表 1)，顯示此土壤肥力狀態偏低，易造成作物生長過程中對養分的需求缺乏。然而，試驗土壤經添加不同量之生物炭並經 3 個月孵育後，有機碳含量由對照組的 1.80%顯著增加至 2.80%以上(表 2)，此結果指出添加生物炭應可增加酸性紅壤之有機質含超過 2.0%，使之足以供給作物良好生長的土壤環境。此外，土壤鹽基飽和度隨生物炭的添加量增加而顯著的增加，且此含量高於對照組約 2 倍之多，主要由於生物炭本身所含的鈣、鎂等鹽基離子於孵育過程中逐漸釋放，而使土壤的鹽基飽和度明顯提高所致。

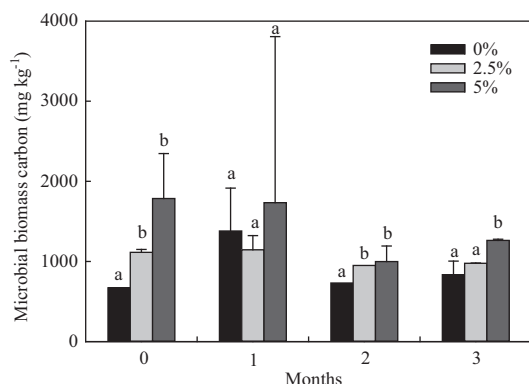


圖 1 生物炭添加後微生物生質量隨時間之變化。圖中各不同生物炭添加量處理間不同字母表示處理間具顯著差異($p < 0.05$)

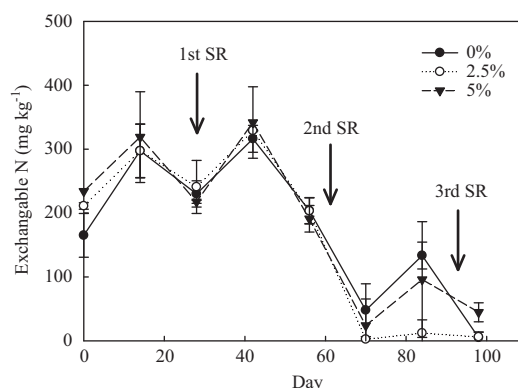


圖 2 生物炭添加後可交換性氮($\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$)隨時間之變化。模擬降雨(simulated rainfall, SR)於 30 天、60 天與 90 天各進行一次

3.2 添加生物炭後土壤微生物生質碳之變化

微生物生質量的活性，普遍被使用於評估農田土壤的肥力狀態。該含量約佔土壤總有機碳的 1-4% 之間，當土壤環境變化時，相較於直接分析有機碳含量，微生物生質量為一個更合適之評估指標(Leita *et al.*, 1999)。圖 1 為生物炭添加至酸性紅壤中並孵育 3 個月後之微生物生質碳量變化。結果顯示，在不同施用量間的比較下，生物炭添加後，微生物生質碳量顯著($P < 0.05$)高於對照組，且微生物生質碳量隨施用量的增加而明顯增加。此結果主要係因生物炭本身提供之有效碳、氮及養分，可促進微生物生長；同時，添加生物炭所造成的土壤團粒比表面積增加(表 1)，亦使得微生物較易附著生存，進而促進活性(van Zwieten *et al.*, 2010)。此外，孵育 3 個月後，改良土壤之微生物生質碳量具有明顯降低的趨勢，此顯示土壤中微生物的活性逐漸趨於穩定。

3.3 添加生物炭後土壤可交換性氮與有效磷之變化

圖 2 顯示經添加不同施用量之生物炭後，可交換性氮 ($\text{NH}_4^+\text{-N} + \text{NO}_3^-\text{-N}$) 含量隨孵育時間之變化。在三個不同施用量處理下，孵育初期及結束後，改良土壤的可交換性氮皆以 5% 添加量之處理較高，此表示添加生物炭可明顯增加土壤中的可交換性氮含量，而此增加量主要乃由生物炭

本身所貢獻。土壤中可交換性氮的礦化作用主要為銨化作用(ammonification)和硝化作用(nitrification)，且此兩個反應的發生，受土壤的起始 pH 值所影響。在低 pH 值環境中，土壤會以銨化作用為主要反應(Robson and Abbot, 1989)；而 Paul and Clark (1996)指出硝化作用最合適的 pH 值約在 6.6-8.0 之間，當土壤 pH 值低於 6.0 時，硝化速率會降低，當土壤 pH 值低於 4.5 時，則硝化作用幾近停止，亦即為硝化細菌在低 pH 值土壤中活性會降低。本研究中之供試土壤的起始 pH 值約為 4.0 (表 1)，即便在 5% 的生物炭添加量處理下，其 pH 值也約在 5.0 左右。因此，本研究在孵育期間，可交換性氮於開始孵育 2 週後即顯著上升，6 週後達最高峰 ($> 300 \text{ mg kg}^{-1}$)，由 pH 質推測，可交換性氮增加應為孵育過程中有機態氮礦化為銨態氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)所造成，此結果亦反映在使土壤 pH 值的提升。前人研究亦證實當植物殘體施入土壤後，土壤的起始 pH 值會顯著影響植物殘體中有機態氮的銨化作用與硝化作用，以及植物殘體的分解速率(Xu *et al.*, 2006; Xu and Coventry, 2003; Tang and Yu, 1999)。孵育 30 天後，可交換性態氮含量迅速的降低，可能是因試驗進行中，第一次模擬降雨時，在添加去離子水過程中，造成土壤溶液以優勢流現象或淋洗而流出，間接使得可交換性氮的損失。然而，於整體孵育試驗結束後，可交換性氮含量為 5% 生物

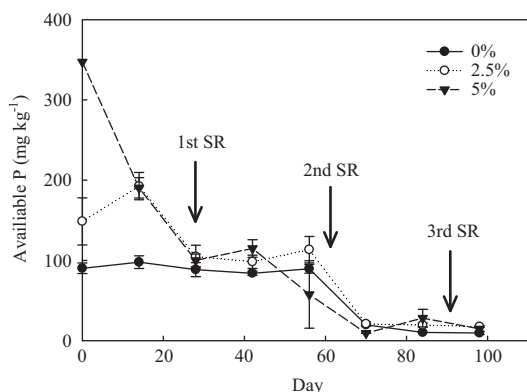


圖 3 生物炭添加後有效磷隨時間之變化。模擬降雨(simulated rainfall, SR)於 30 天、60 天與 90 天各進行一次

炭添加量(30.7 kg ha^{-1}) $\approx$ 2.5%添加量 (36.7 kg ha^{-1}) $>$ 對照組(無添加生物炭) (19.9 kg ha^{-1})，表示添加生物炭仍可有效增加並維持土壤中可交換性氮含量。

酸性紅壤經添加不同施用量之生物炭後，有效磷含量隨孵育時間的變化顯示於圖 3。結果顯示，於孵育開始時(第 0 天)，不同施用量處理間，有效磷含量隨生物炭施用量愈高而明顯增加，其中以 5%施用量處理為最高，約為 350 mg kg^{-1} 。在孵育時間的變化上，於生物炭添加初期，不同施用量處理下之有效磷含量仍明顯高於對照組，此結果可能是因生物炭添加後使土壤微生物活性增加，而使得有機物質分解而釋放更多有效磷。經孵育 30 天後，第一次降雨模擬，導致有效磷受淋洗而損失，致使各處理間並無明顯差異；隨後，有效磷隨第二次及第三次降雨模擬下，淋洗損失愈多，土壤中有效磷含量較初添加生物炭時顯著較低。然而，經 3 次模擬降雨狀況下，孵育 3 個月後，土壤有效磷含量仍以添加 5% 之生物炭改良土壤(93.7 kg ha^{-1}) $>$ 2.5%添加量 (12.5 kg ha^{-1}) $>$ 對照組(無添加生物炭) (10.4 kg ha^{-1})。由上述有效磷含量隨孵育時間變化之結果可觀察出，生物炭的有效磷含量雖不高(表 1)，但以較高施用量添加下，可有效增加酸性紅壤中之有效磷含量，此結果與 Chan *et al.* (2008)相似。然而，本研究亦發現，孵育期間經 3 次降雨淋洗

後，經改良之土壤中有效磷的損失達 80%以上，而無添加生物炭的紅壤，其有效磷損失率則達 97%以上。長期的生物炭之高施用量添加下，土壤中累積過多的磷並不會對作物造成危害，然而，當土壤中累積過多的磷，使其所能吸附的磷達飽和後，生物炭添加於土壤後有效磷的淋洗損失風險於未來仍需特別注意。

四、結 論

本試驗結果指出以生物炭作為土壤改良劑，可明顯改善土壤化學性質與肥力。相較於未添加生物炭之土壤，添加 5%之生物炭並孵育 3 個月後，土壤 pH 顯著提升至 5.0 以上，有機碳含量提升 2.0%以上，可達一般農地土壤有機碳含量水準，且鹽基飽和度可提升至少 4 倍以上。此外，添加生物炭至土壤中亦可顯著改善紅壤之肥力，2.5%及 5%之施用量皆可增加土壤中之微生物活性、可交換性態氮含量與有效磷含量。孵育 3 個月後，添加生物炭之土壤之微生物活性與可交換性態氮含量皆顯著高於對照組。在有效磷含量方面，生物炭施用量以高比例添加下，短期內可增加酸性土壤的有效磷含量。

參考文獻

1. 千田勝己，「台灣某些紅壤的黏土礦物特性與有關理化性質之研究」，國立臺灣大學農業化學研究所博士論文，台北市，1980。
2. 臺灣省農業試驗所，「臺灣省農業試驗所年報民國七十年版」，pp. 73，1982。
3. 江志峰，「台灣地區若干不同母質來源紅壤之特性、化育與分類」，國立中興大學土壤學研究所碩士論文，台中市，1992。
4. 郭鴻裕，「臺灣地區農田地力增進初步調查報告」，臺灣省農業試驗所特刊第 42 號，台中，pp. 90，1993。
5. 劉黔蘭、莊作權，「台灣紅壤之理化與黏土礦物特性」，中國農業化學會誌，第 24 卷，pp. 430-442，1986。
6. 謝兆申、王明果，「台灣土壤」，中興大學土壤調查試驗中心，台中市，1989。

7. Brookes, P.C., Lanmann, A., Pruden, G., and Jenkinson, D.S., "Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil." *Soil Biology and Biochemistry*, Vol. 17, pp. 837-842, 1985.
8. Central Weather Bureau. Climate Statistics Data. Central Weather Bureau, Taipei, Taiwan, 2011. Available at <http://www.cwb.gov.tw/eng/index.htm/> Accessed on 2011 December 31.
9. Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., and Joseph, S., "Agronomic values of greenwastes biochar as a soil amendment." *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 45, pp. 629-634, 2007.
10. Chan, K.Y., Van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., and Joseph, S., "Using poultry litter biochars as soil amendments." *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 46, pp. 437-444, 2008.
11. Chen, Y., Shinogi, Y., and Taira, M., "Influence of biochar use on sugarcane growth, soil parameters, and groundwater quality." *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 48, pp. 526-530, 2010.
12. Chin, C.C., Wei, C.H., and Chen, C.T., "Study on the invasive of in Kenting National Park." *Hwa Kang Journal of Agriculture*, Vol. 20, pp. 41-52, 2007. (in Chinese with English abstract)
13. Helyar, R., and Porter, W.M., "Soil acidification, its measurement and processes involved.", In Robson, A.D. (ed.). *Soil acidity and plant growth*. Academic Press Australia, Sydney, AUS, pp. 61-100, 1989.
14. Joseph, S.D., Camps_Arbestain, M., Lin, Y. *et al.*, "An investigation into the reactions of biochar in soil. Austra." *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 48, pp. 501-515, 2010.
15. Kuo, S., "Phosphorus." In Sparks, D.L., *et al.* (eds.). *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical methods*. SSSA Book Series No. 5, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA. pp. 869-919, 1996.
16. Kuzyakov, Y., Subbotina, I., Chen, H.Q., Bogomolova, I., and Xu, X.L., "Black carbon decomposition and incorporation into soil microbial biomass estimated by ¹⁴C labeling." *Soil Biology and Biochemistry* Vol. 41, pp. 210-219, 2009.
17. Laird, D., Fleming, P. and Wang, B.Q. *et al.*, "Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil." *Geoderma* Vol. 158, pp. 436-442, 2010.
18. Lehmann, J., de Silva, J.P. Jr, Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., Glaser, B., "Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments." *Plant and Soil* Vol. 249, pp. 343-357, 2003.
19. Lehmann, J. and Joseph, S.D., *Biochar for environmental management*. London: Science and technology, Earthscan, 2009.
20. Leita, L., De Nobili, M., Mondni, C. *et al.*, "Influence of inorganic and organic fertilization on soil microbial biomass, metabolic quotient and heavy metal bioavailability." *Biology and Fertility of Soils*, Vol. 28, pp. 371-376, 1999.
21. McLean, E.O., "Soil pH and lime requirement." In Page, A.L. *et al.* (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties*. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 199-224, 1982.
22. Mulvaney, R.L., "Nitrogen-Inorganic forms.", In Sparks, D.L. *et al.* (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 3: Chemical Methods*. SSSA Book Series No. 5, Soil Sci. Soc. Am., Madison, WI, USA, pp. 1123-1184, 1996.
23. Nelson, D.W. and Sommers, L.E., "Total carbon, organic carbon, and organic matter." In Page, A.L. *et al.* (eds.). *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties*.

- 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 539-577, 1982.
24. Paul, E.A. and Clark, F.E., Soil microbiology and biochemistry. 2nd ed. Academic Press, San Diego, CA, USA, 1996.
 25. Robson, A.D. and Abbott, L.K., "The effect of soil acidity on microbial activity in soils." In Robson, A.D. (ed.). Soil acidity and plant growth. Academic Press Australia, Sydney, AUS, pp. 139-165, 1989.
 26. Sánchez, M.E., Lindao, E., Margaleff, D., Martínez, O., and Morán, A., "Pyrolysis of agricultural residues from rape and sunflowers: production and characterization of bio-fuels and biochar soil management." Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, Vol. 85, pp. 142-144, 2009.
 27. Steinbeiss, S., Gleixner, G., and Antonietti, M., "Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity." Soil Biology and Biochemistry, Vol. 41, pp. 1301-1310, 2009.
 28. Tang, C. and Yu, Q., "Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation." Plant and Soil, Vol. 215, pp. 29-38, 1999.
 29. Thomas, G.W., "Exchangeable cation" In Page, A.L. *et al.* (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 159-165, 1982.
 30. Xu, J.M., Tang, C., and Chen, Z.L., "The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH." Soil Biology and Biochemistry, Vol. 38, pp. 709-719, 2006.
 31. Xu, R.K. and Coventry, D.R., "Soil pH changes associated with lupin and wheat plant materials incorporated in a red-brown earth soil." Plant and Soil, Vol. 250, pp. 113-119, 2003.
 32. Yuan, J.H., Xu, R.K., Wang, N. *et al.*, "Amendment of acid soils with crop residues and biochars." Pedosphere, Vol. 21, pp. 302-308, 2011.
 33. van Zwieten, L., Kimber, S., Downie, A. *et al.*, "A glasshouse study on the interaction of low mineral ash biochar with nitrogen in a sandy soil." Australian Journal of Soil Research, Vol. 48, pp. 569-576, 2010.

收稿日期：民國 101 年 2 月 22 日
 修正日期：民國 101 年 3 月 9 日
 接受日期：民國 101 年 3 月 13 日