

共同施用堆肥與炭化稻殼對坡地土壤 氮與磷釋放潛勢之影響

Effects of Co-applying Compost and Rice Hull Biochar on Release Potential of Nitrogen and Phosphorus in Slopeland Soils

國立屏東科技大學
水土保持系
副教授

簡士濠*

Shih-Hao Jien

國立屏東科技大學
水土保持系
碩士班研究生

陳文棋

Wen-Chi Chen

摘 要

添加有機資材維持坡地農田土壤品質已為目前慣行之農業管理方式。然而，因有機質分解迅速而過量或過常施用有機資材不符經濟效益，且易造成過剩營養鹽流失而污染集水區或下游水體之水質。本研究以不易分解之炭化稻殼，以 1、2 及 4% (w/w) 之比例與蔗渣堆肥(20 ton ha⁻¹)共同施用至老埤系(Lo) (pH = 4.4)、石門村系(Sme) (pH = 6.8)及鎮平系(Cn) (pH = 8.4)不同坡地農田土壤中，進行 70 天的培育試驗，評估共同施用該二種資材後土壤中氮與磷釋放潛勢及對小白菜(*Brassica rapa chinensis*)產量的影響。實驗結果顯示，培育 70 天後，施用炭化稻殼可明顯提升 Lo 和 Sme 土壤之 pH 至少 0.3 個單位以上，但降低 Cn 土壤之 pH 至少 0.8 個單位。培育期間，共同施用堆肥與炭化稻殼之處理因生物固氮作用，無機態氮釋放量皆低於對照組與單獨添加堆肥處理者；相較於控制組，Lo 土壤之無機態氮釋放量減少 15-29%，Sme 土壤減少 20-28%，Cn 土壤<7%。共同施用炭化稻殼與堆肥後，三種土壤無機態氮釋放量依序為 Sme (58-65 mg/kg) > Lo (30-45 mg/kg) > Cn (<20 mg/kg)，以中性 pH 之壤質 Sme 土壤的氮礦化速率最高。有效磷方面，添加炭化稻殼處理皆能明顯增加三種土壤之有效磷含量 1.1-7.0 倍；然而，有效磷將隨培育時間為土壤所逐漸吸附固定，以富含鐵鋁氧化物之 Lo 土壤與含鈣之 Cn 土壤的固定量最高，二土壤於培育結束後分別減少 38-58%及 72-75%。整體而言，施用炭化稻殼可中和坡地農田土壤之 pH 及增加有效磷含量，進而促進小白菜產量，以堆肥搭配 4% 之炭化稻殼為最佳。同時，本研究果顯示添加炭化稻殼可顯著減少土壤中無機態氮

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

的釋放潛勢，進而可降低下游集水區水體氮污染之風險。

關鍵詞：坡地農田土壤，堆肥，碳化稻殼，無機態氮，有效磷。

ABSTRACT

Maintaining of soil quality on slopelands by applying organic amendments has been considered as a common agricultural management method in Taiwan. However, over use of organic amendments due to rapid decomposition of soil organic matter is wasting and might pollute water body at catchments or down streams. Therefore, decomposition-resistant rice hull biochar (RHB) and bagasse compost were used as amendments and co-applied into rural soils on slopelands with 1%, 2% and 4% (w/w) and 20 ton ha⁻¹ respectively, to evaluate release potential of nitrogen and phosphorus after 70 days incubation. The studied soils were Loapi soil (Lo) (pH = 4.4), Shihmentsun soil (Sme) (pH = 6.8), and Chenpin soil (Cn) (pH = 8.4). The results indicated that soil pH increased 0.3 units for Lo and Sme soils, and decreased 0.8 units for Cn soil by incorporating RHB after 70 d incubation. Biological N fixation (BNF) resulted in reduction of inorganic N contents in the treatments of co-applying of RHB and compost as comparing with the treatments of control and compost application only. The inorganic N decreased by 15-29%, 20-28% and <7% for the soils of Lo, Sme and Cn, respectively, as comparing with the control. After incubation, the order of inorganic N contents were Sme soil (58-65 mg/kg) > Lo soil (30-45 mg/kg) > Cn soil (<20 mg/kg) regardless of application rates of RHB. Regarding available phosphorus (AP), AP contents increased by 1.1 to 7 times in three soils after application of compost and RHB, and the contents increased with application rates of RHB. However, the 38-58% and 72-75% of AP were gradually fixed in Lo soil and Cn soil, respectively, after incubation. Consequently, application of RHB into the soils could improve soil pH regardless acidic and alkaline soils, and increase AP contents, which therefore promote production of *Brassica rapa chinensis*, especially for the treatment of co-applying of 4% RHB and compost. Besides, application of RHB could decrease release of inorganic N and therefore reduce nitrogen pollution potential at catchments.

Keywords: Slopeland, compost, Rice hull biochar, Inorganic nitrogen, Available phosphorous.

一、緒 論

台灣地區地狹人稠，於有限之耕地面積下，部分山坡地已被作為農業使用；同時，為獲得作物高產量，過量施用化學肥料已為慣行的農業管理方式。長期施用化學肥料已明顯促使坡耕地土壤品質之退化，其中包含有機質含量偏低(<2%)

及土壤酸化等問題，尤以坡耕地土壤最為嚴重。因此，近年來，有機資材的搭配使用已逐漸成為慣行之農業管理方式。然而，台灣地區高溫多雨，為求高產量而農地耕犁頻繁，因而有機物質分解迅速，通常需長期且大量添加有機資材以維持土壤品質。因此，有鑒於有機資材易隨時間礦化分解的缺點，將農業廢棄物轉製為炭化資材

(biochar)，並使用作為土壤改良劑以增加有機物含量並減緩土壤中碳或氮的快速礦化流失已為近年來新興之方法(Lemann *et al.*, 2003; Rondon *et al.*, 2007; DeLuca *et al.*, 2009)。

炭化資材為一富含碳之固形物質，由生物質(biomass)在氧氣受限之環境下熱裂解產生(Lehmann *et al.*, 2003)。由於高溫炭化之故，炭化資材本身所含的碳為芳香環化合物，較難被礦化分解因而可長期維持土壤中的碳含量。此外，除維持土壤中碳含量外，在農業上使用炭化資材可改善土壤品質，藉由改善保水力以減少養分淋洗的損失(Brochhoff *et al.*, 2010)，和增加土壤陽離子交換容量(Liang *et al.*, 2010)及降低土壤 N₂O 的釋放(Yanai *et al.*, 2007)。炭化資材亦為一多孔隙之炭化物質，施入土壤後可作為土壤微生物的棲居所，以增加微生物活性(Lemann *et al.*, 2003)，進而促進土壤有機質的分解。儘管炭化資材中所含的碳構造相當穩定，在表面官能基上仍有部分較活性的碳可供微生物利用(Cheng *et al.*, 2008; Zimmermann, 2010)。Hamer *et al.* (2004)和 Cheng *et al.* (2008)研究顯示，將一木材所製備的炭化資材施入土壤後，在短期兩個月的培育期間約有 0.26-0.4%的碳被礦化。

此外，當炭化物質施入農田土壤後，除增加微生物活性以改善土壤的生物性質外，亦可能影響土壤中氮的礦化。前人研究指出炭化資材的碳氮比相對較高，當添加至土壤後可能造成短期的生物固氮作用(biological N fixation) (Rondon *et al.*, 2007; DeLuca *et al.*, 2009)。Zheng *et al.* (2013)將兩種不同氮型式的化學肥料和炭化資材施入土壤後，發現生物固氮作用增加，進而降低氮的淋洗損失。Novak *et al.* (2010)在實驗室培育條件下進行氮礦化試驗，發現桃殼製備之炭化物質添加後在短期上會造成生物固氮作用。然而，仍有較少的研究報導關於當炭化資材以不同施用量添加至農田土壤後對固氮作用的影響。此外，炭化資材具有較高的 pH 值和石灰潛勢，當添加至土壤後增加土壤的 pH 值及土壤陽離子交換容量，進而間接影響磷的有效性含量(Yamato *et al.*, 2006)。Parvage *et al.* (2012)將 1% (w/w)的生物炭

施入 11 個以 3 種質地等級區分的土壤後發現，土壤中水溶性磷含量明顯增加，且其增加範圍約在 11-253%之間。

以往多數研究皆在於探討短期單獨施用炭化資材或合併化學肥料施用至土壤後對氮礦化作用的影響(Novak *et al.*, 2010; Nelson *et al.*, 2011; Bruun *et al.*, 2012)。針對共同施用有機肥料與炭化資材對養分的循環或土壤性質之變化，目前相關研究仍少。本研究主要旨在於探討蔗渣堆肥與不同比例之炭化稻殼共同添加下，對台灣不同 pH 之山坡地農耕土壤氮礦化及有效性磷含量釋放潛勢的影響，期望可基於廢棄物再利用觀點下，發展新的農業管理方法，減少有機或化學肥料的施用量及施用次數；同時，亦可減少山坡地集水區或下游水體氮或磷的污染。

二、材料與方法

2.1 供試土壤採集及性質分析

本研究選用之土壤，分別為老埤土系(Laopi, Lo)、石門村土系(Shihmentsun, Sme)及鎮平土系(Chenpin, Cn)。三種供試土壤均取自台灣中南部山坡地農田土壤(圖 1)，老埤土系為洪基母質紅壤，石門村土系為砂頁岩新沖積土，而鎮平系為具石灰性之粘板岩新沖積土。三種土壤主要代表三種不同 pH 與三種不同質地(表 1)。土壤採集後，經風乾、磨碎及過篩(< 2 mm)後，以備後續基本性質分析之用。土壤基本性質分析方法如下：

- (1) pH 值：以玻璃電極法測定(Mclean, 1982)，土水比為 1:1 (w/w)，靜置一小時，其間攪拌二至三次，插入電極前先予以充分攪拌，最後以玻璃電極測定。
- (2) 粒徑分析：採用吸管法測定(Gee and Bauder, 1986)。
- (3) 總碳含量：以高溫灰化法測定之(Nelson and Sommers, 1982)。
- (4) 陽離子交換容量：以醋酸鉍法(pH = 7) (Rhoades, 1982)。
- (5) 無機態氮含量：以 2 M KCl 萃取(Mulvaney, 1996)。

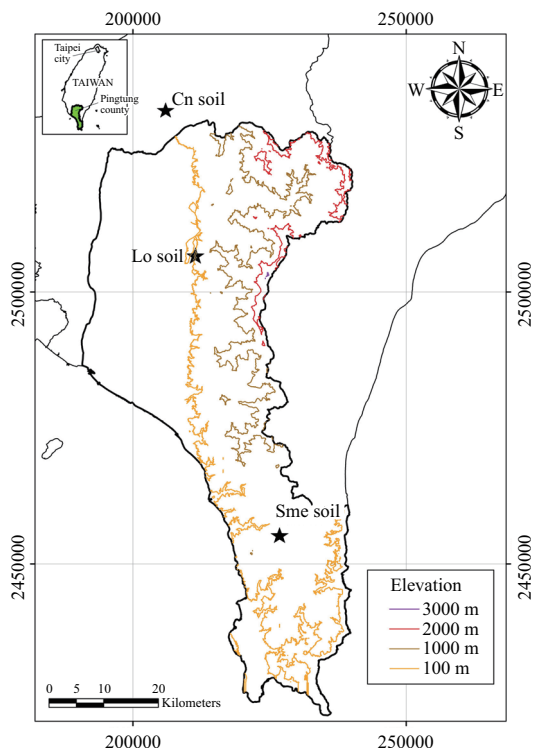


圖 1 本研究土壤採樣位置；Cn：鎮平系土壤；Lo：老埤系土壤；Sme：石門村系土壤

- (6) 有效性磷含量：以 Mehlich-3 法萃取 (Mehlich, 1984)。
- (7) 碳酸鈣含量：以重量法(Gravimetric determination)測定。以 3M HCl 加入 5 g 土壤中，待反應後測定重量，損失之重量即為土壤中碳酸鈣含量(Allison and Moodie, 1965)。
- (8) 游離鐵(free Fe)含量：Dithionite-Citrate-Bicarbonate (DCB)法(Mehra and Jackson, 1960)，秤取 1 g 之土樣，加置 100mL 之燒杯中，加入 40 mL 0.3 M 檸檬酸鈉和 5 mL 1M 之碳酸氫鈉，再加入約 1 g 之連二亞硫酸鈉(sodium dithionite)，在約 80°C 左右之水中加熱攪拌 15 分鐘後，離心後再加入 10 mL 之飽和氯化鈉溶液再離心，之後收集上清液，以水稀釋致 100 mL，以原子吸收光譜儀(Z2300, Hitachi, Japan)分析萃取液鐵與鋁濃度。

表 1 供試土壤基本性質分析

Properties	Soils		
	Lo	Sme	Cn
pH	4.40	6.80	8.40
EC (dS m ⁻¹)	0.08	0.19	1.96
Sand (%)	14	17	85
Silt (%)	57	66	14
Clay (%)	29	17	1.0
Texture	SiCL	SiL	LS
CEC (cmol(+) kg ⁻¹)	15	14.6	4.0
OC (%)	1.78	1.38	0.32
TN (%)	0.16	0.19	0.01
NH ₄ ⁺ -N (mg kg ⁻¹)	2.84	11.2	ND
NO ₃ ⁻ -N (mg kg ⁻¹)	14.2	47.8	8.33
Inorganic N (mg kg ⁻¹)	17.1	59	22.3
CaCO ₃ (%)	ND	ND	4.30
Free Fe contents (%)	2.19	4.15	1.10

Lo: Laopi series; Sme: Shihmentsun series; Cn; Chenpin series; ND: Not detected.

表 2 堆肥及炭化稻殼基本性質分析

Properties	Compost	RHB
pH (1: 10 w/v)	5.50	7.70
OC (%)	34.2	31.0
TN (%)	0.68	0.41
C/N	50	76
CEC (cmol(+) kg ⁻¹)	82.5	26.1
Exchange K (g kg ⁻¹)	6.94	7.01
Exchange Na (g kg ⁻¹)	0.44	0.28
Exchange Ca (g kg ⁻¹)	4.61	0.47
Exchange Mg (g kg ⁻¹)	2.12	0.22

RHB: rice hull biochar; OC: organic carbon contents; TN: total nitrogen contents; CEC: cation exchange capacity.

2.2 堆肥與炭化稻殼

本試驗土壤改良資材乃採用台灣糖業股份有限公司處出品之蔗渣堆肥，以及工業技術研究院製備之炭化稻殼。炭化稻殼於 400°C 高溫厭氧環境下製備而成。炭化稻殼細磨並過 60 mesh 篩後供後續培育試驗之用，堆肥與炭化稻殼之基本性質如表 2 所示。本研究以永續農業為目的，利用台灣目前最大宗之農業廢棄物(稻殼與蔗渣)，將其回收後製，作為可再利用之土壤改良資材。

李(2002)指出，台灣目前每年約產生蔗渣 152 萬噸，而稻殼為 37 萬噸。

2.3 培育試驗

取三種供試土壤各約 600 g 置於塑膠盒中，分別添加 1、2%及 4%比例的生物炭後，再於各比例之生物炭處理下添加 20 ton ha⁻¹ 的蔗渣堆肥，並將之混合均勻。加入去離子水並控制土壤水分在最大容水量(water holding capacity, WHC)的 70%左右後，蓋上塑膠蓋進行室溫培育試驗。培育期間於第 0、7、14、28、42 及 70 天時進行土壤取樣，測定土壤 pH 值、NO₃⁻-N 及 NH₄⁺-N 含量，另於培育期間開始及結束後測定 Mehlich-3 法萃取有效磷含量。對照組為不添加有機資材者，且所有處理均為三重複。

2.4 小白菜(*Brassica rapa chinensis*)盆栽試驗

將三種土壤盛裝約 3.5-4 kg 至 Wagner 栽培盆中，盆中土壤高度約 15 cm。將各施用量之堆肥與土壤均勻混合，加水至 WHC 的 70%左右。種植小白菜前先使之發芽，而後移幼株至盆栽中，每盆栽種植一株小白菜，並於溫室中進行栽種。二星期後，採收植體地上部，並將採收的植體地上部，以去離子水洗淨後置於烘箱中，並以 65°C 烘乾後秤重，各處理均三重複。

2.5 統計分析

本研究中，所有數據以 SAS 統計軟體分析之，處理間平均值的多重比較採用 Duncan 新多變域測驗法，顯著差異設在 $P < 0.05$ 。所有試驗設計採完全逢機設計(complete random design, CRD)。

三、結果與討論

3.1 施用炭化稻殼後土壤 pH 值之變化

三種土壤經施用堆肥及炭化稻殼後，培育期間之 pH 值變化如圖 2 所示。實驗結果顯示，培育初期，共同施用堆肥與炭化稻殼之 Lo 及 Sme 土壤 pH 值顯著($p < 0.05$)隨炭化稻殼施用量增加而上升，而此應為炭化稻殼之高鹼度所致(Yuan

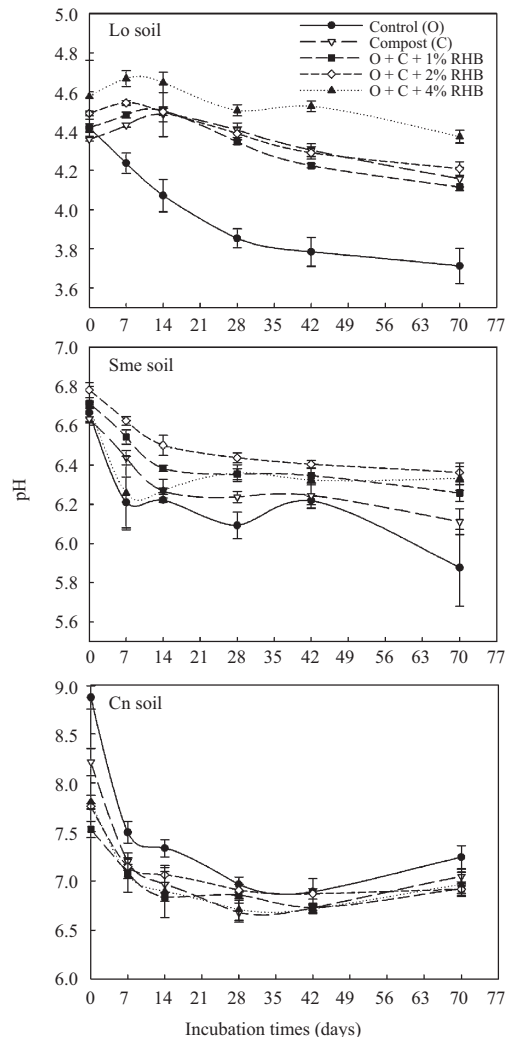


圖 2 土壤 pH 於施用炭化稻殼後之動態變化

et al., 2011)。石灰質之 Cn 土壤經添加堆肥與炭化稻殼後，pH 則顯著降低，而此為稀釋作用所造成(Liu and Zhang, 2012)。

培育期間，三土壤之對照組 pH 於初期皆迅速衰減，7 天後 pH 衰降趨勢漸緩至培育結束，而此為硝化作用(nitrification)逐漸釋放 H⁺所致(Yuan et al., 2011)。添加蔗渣堆肥及炭化稻殼後，Lo 土壤於培育初期 7 天內 pH 些微提升，而 7 天後則緩慢下降至培育結束。Lo 土壤的 pH 較低，而該 pH 環境易促使鉍化作用，故釋出 OH⁻使 pH 值於培育初期暫升；然而，7 天後，Lo 土

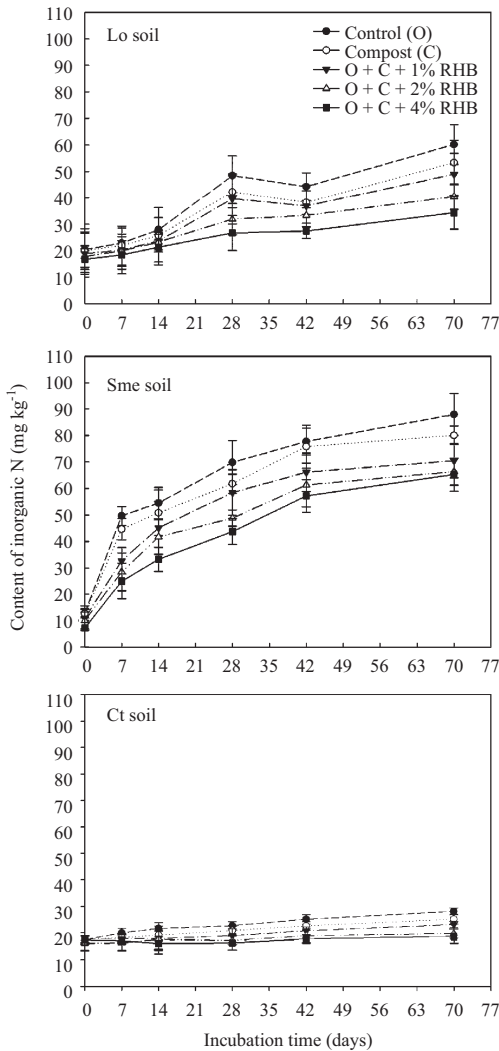


圖 3 土壤無機態氮於施用炭化稻殼後之動態變化

壤 pH 值下降則為硝化作用漸盛行並釋放 H^+ 所致 (Yuan *et al.*, 2011)。相異於 Lo 土壤，Sme 和 Cn 土壤於培育開始後便以硝化作用為主要反應，進而促使 pH 隨培育時間逐漸降低 (Xu *et al.*, 2006)。此外，圖 2 顯示 Cn 土壤於培育後期之 pH 具上升趨勢，此為蔗渣堆肥及炭化稻殼中所含之交換性 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 、 Na^+ 等陽離子隨培育時間逐漸釋出所致。Yuan *et al.* (2011) 亦指出，當炭化資材以不同比例施入土壤後，土壤 pH 值隨施用量而增加，他們歸因於炭化資材中所含的鹼性物質釋放後將中和土壤的酸度並提高 pH 值。

經 70 天培育後，Lo 和 Sme 對照組土壤中的 pH 值約降低 0.7 個單位，而 Cn 對照組土壤的 pH 值則降低約 1.6 個單位，顯示砂質土壤中硝化作用較為明顯，砂質土壤中孔隙較大，空氣易進入孔隙，因而可幫助硝化作用之進行，此結果與 Huang and Chen (2010) 一致。

3.2 施用炭化稻殼後土壤無機態氮 ($NH_4^+-N + NO_3^- -N$) 之變化

本研究以蔗渣堆肥與炭化稻殼施入土壤後，無機態氮之累積釋放量隨培育時間的變化顯示於圖 3。三土壤之對照組處理於培育結束後，Lo 土壤的無機態氮釋放量約增加 40 mg/kg，增加率為 195% (表 3)，Sme 土壤的無機態氮釋放量約增加 75 mg/kg，增加率為 588%，而 Cn 土壤的無機態氮釋放量則約增加 9 mg/kg，增加率為 61%。

三種土壤僅添加蔗渣堆肥後的無機態氮釋放量皆略低於對照組 (圖 3)，原因可能為蔗渣堆肥之 C/N 比約為 50，當施入土壤後，微生物競爭碳源，而形成生物固氮作用 (biological N fixation)，因而降低無機態氮在土壤中之有效性。前人研究指出，一般腐熟堆肥的 C/N 比約在 12-15 之間，若堆肥的 C/N 比大於 30，施入土壤後可能會形成生物固氮作用 (Bernal *et al.*, 1998; Zmora-Nahum *et al.*, 2005)。Bruun *et al.* (2012) 亦指出，以 C/N 比約 50 的麥桿殘體施入土壤後，於 14 天短期培育期間，土壤中之無機態氮含量幾乎為微生物所固定。相較於僅添加蔗渣堆肥處理之結果，三種土壤在共同添加堆肥與不同比例之炭化稻殼之處理下，土壤無機態氮的釋放量皆顯著低於僅堆肥處理者；且隨炭化稻殼施用量愈高，無機態氮釋放量愈低。圖 3 顯示，於培育結束後，相較於對照組，共同添加堆肥與炭化稻殼的 Lo 土壤無機態氮施放量減少 15-29%，而 Sme 土壤減少 20-28%，Cn 土壤則 <7%。本研究用炭化稻殼的 C/N 比約 74，因而當以越高比例之炭化稻殼施入土壤後，將使得更多的無機態氮被微生物固定，故造成無機態氮釋放量顯著 ($p < 0.05$) 降低 (圖 3)。Tammeorg *et al.* (2012) 以兩種不同有

表 3 供試土壤於 70 天培育時間下之無機態氮釋放率

Treatments	Incubation days				
	7	14	28	42	70
	Lo soil				
Control (O)	11.8a	36.8ab	137b	117bc	195c
Compost (C)	9.50a	28.5b	111c	91.0c	167d
COM + RHB (1%)	6.88a	24.9b	110c	95.2c	159d
COM + RHB (2%)	11.8a	30.3ab	79.2b	87.1b	127c
COM + RHB (4%)	9.59a	26.90b	59.0c	63.2c	104d
	Sme soil				
Control (O)	289a	327ab	447b	508bc	588c
Compost (C)	252a	301ab	387c	497d	531d
COM + RHB (1%)	200a	313b	435c	505d	545d
COM + RHB (2%)	183a	314b	385c	508d	558d
COM + RHB (4%)	246a	359b	504c	690d	801e
	Cn soil				
Control (O)	14.5a	23.7ab	30b	43.7b	60.8c
Compost (C)	2.42a	7.91ab	17.5c	27.3cd	41.6e
COM + RHB (1%)	1.54a	1.93a	7.54b	18bc	31.1c
COM + RHB (2%)	1.41a	9.75b	7.41b	17.8c	23.2c
COM + RHB (4%)	-2.06a	-7.89ab	-6.57b	2.63c	7.46d

Lo: Laopi series; Sme: Shihmentsun series; Cn: Chenpin series.

The each value was average value calculated from 3 replicates.

The values followed by different letters in the same row mean significant difference ($p < 0.05$).

表 4 供試土壤添加堆肥與炭化稻殼後小白菜產量

Treatments	Lo	Sme	Cn
	g/pot (dry weight)		
Control (O)	0.56 ± 0.21Aa	6.62 ± 0.71Ba	0.13 ± 0.06Ca
Compost (C)	1.15 ± 0.04Ab	5.56 ± 0.63Ba	0.06 ± 0.01Ca
COM + RHB (1%)	1.22 ± 0.07Ab	3.79 ± 0.11Bbc	0.27 ± 0.37Ca
COM + RHB (2%)	1.35 ± 0.19Ab	3.87 ± 0.85Bb	0.06 ± 0.12Ca
COM + RHB (4%)	1.63 ± 0.05Ac	5.14 ± 0.86Bab	0.07 ± 0.01Ca

Lo: Laopi series; Sme: Shihmentsun series; Cn: Chenpin series.

The values followed by different letters in the same column mean significant difference ($p < 0.05$); the values followed by different capitalized letters in the same row mean significant difference ($p < 0.05$).

機質肥料施入土壤，再添加不同比例的炭化稻殼後探討對氮礦化作用的影響，結果顯示生物炭添加後，土壤中無機態氮含量均隨炭化稻殼施用量增加而降低，其歸因為生物固氮作用所致。

上述結果雖指出土壤於添加炭化稻殼後，無機態氮釋放量減少，但在盆栽試驗中，小白菜 (*Brassica rapa chinensis*) 的產量皆無明顯減少

(表 4)。反之，在炭化稻殼高施用量(4%)下，Lo 及 Sme 土壤的小白菜產量反而顯著($p < 0.05$)增加，此表示土壤中減少的無機態氮量並不影響產量，反而意喻著在不影響產量的情況下，炭化稻殼的添加將將可減少氮的淋洗潛勢。Borchard *et al.* (2012)於溫帶地區的砂質與坩質土壤中添加 0.2%-1.5%的炭化木材，結果亦顯示添加炭化資

材減少黑麥草中對土壤中氮的吸收量，但不致導致減產；同時，經由炭化資材的施用，減少了坵質土中 16%-31% 的氮淋洗量。本試驗結果與 Borchard *et al.* (2012) 的結果類似，顯示出施用炭化資材將可顯著減緩氮的淋洗潛勢，尤其針對壤質土。

綜觀而論，因添加炭化稻殼而促使土壤中氮的固定，反而可較單獨添加堆肥時的土壤更能提供作物更為長效的有效氮供給，於農業管理上更具效益。Lehmann and Rondon (2006) 指出如供給適量的炭化資材，並額外施入養分至土壤中，將可增加作物對氮的吸收並增加產量。Chan *et al.* (2007) 指出添加炭化資材將促進作物對土壤中氮的吸收效率，進而增加產量，儘管土壤中的無機態氮並無隨施用炭化資材而增加，主要原因是炭化資材對土壤物理特性的改善而使作物根系延展良好，故吸收氮的效率增加。

除各處理間無機態氮釋放潛勢具有差異之外，不同土壤間之無機態氮釋放潛勢也具有顯著差異。於相同處理下，培育結束後，以 Sme 土壤中的無機態氮釋放量為最高，其次為 Lo 土壤，而 Cn 土壤則最低。在 Sme 土壤中，所有添加炭化稻殼處理於培育開始後無機態氮含量即迅速釋出，第 7 天之增加率為 183-252% (表 3)，至第 7 天後，無機態氮釋放量隨時間減少並逐漸維持穩定。相較於 Lo 和 Sme 土壤，在 Cn 土壤中，所有炭化稻殼施用量處理下，無機態氮含量隨培育時間亦顯著 ($p < 0.05$) 增加，但增加率僅 7.45-41.6%。於農田土壤中，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，硝化菌活性降低而使致硝化速率降低 (Paul and Clark, 1996)。本研究 Lo 土壤的起始 pH 值約在 4.5，此 pH 值下，可能使得培育初期時硝化作用不旺盛，使得各處理於培育開始後無機態氮的釋出較為緩慢。在 Sme 土壤中，起始 pH 值約在 6.6 左右，因此 Sme 土壤於培育開始後，所有處理即快速的釋出無機態氮，且至培育結束後所有處理的無機態氮釋放量均高於其他兩土壤。Cn 土壤在所有處理下，無機態氮釋放量最低，此可能歸因於 Cn 土壤之起始 pH 值過高，因而使微

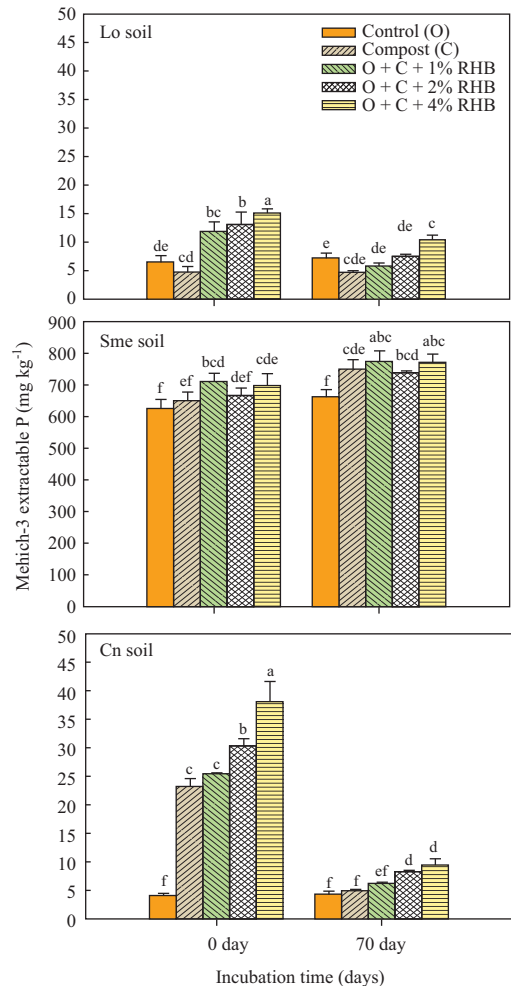


圖 4 土壤有效磷隨於施用炭化稻殼後之動態變化；圖中各不同生物炭施用量處理間不同字母表示處理間具顯著差異 ($P < 0.05$)

生物的活性降低所致。由上述結果顯示，所有處理中，三個土壤的無機態氮釋出量差異主要取決於土壤的起始 pH 值，即 pH 值接近中性的 Sme 土壤，有相對較高的無機態氮釋出量。

3.3 施用生物炭後土壤有效磷之變化

添加蔗渣堆肥及炭化稻殼後，於培育第 0 天，Lo 和 Cn 土壤的有效磷 (Mehlich-3 可萃取磷) 含量皆隨炭化稻殼施用量提高而增加 (圖 4)；相較於僅添加堆肥處理，添加炭化稻殼後有效磷增加 5-60 mg/kg，此應為炭化稻殼本身所提供之

有效磷。然而，培育 70 天後，添加堆肥與炭化稻殼處理下，Lo 和 Cn 土壤的有效磷含量均顯著下降($p < 0.05$)，原因為 Lo 和 Cn 土壤於培育初期所釋出的磷，經 70 天的培育後大多被吸附固定於該兩種土壤中，因而使得磷的有效性明顯降低，含量上已屬於極低等級($< 18 \text{ mg/kg}$) (Kelling *et al.*, 1999)。Brady and Weil (2002)指出土壤性質會明顯影響磷的固定能力，土壤中的可溶性磷會受 pH 值的高低影響其溶解度，亦可能與 Al^{3+} 、 $\text{Fe}^{2+/3+}$ 、 Ca^{2+} 等金屬複合物鍵結而降低溶解度(Pierzynski *et al.*, 2005)。本研究，Lo 土壤為風化程度較高的紅壤，其含有相對較高的鐵鋁氧化物(表 1) (簡等人，2012)，此可能造成培育 70 天後部份的磷被固定於鐵鋁氧化物中，而降低其有效性。在 Cn 土壤中，含有較大量的碳酸鈣(表 1)，因此在培育過程中，Ca 離子可能與有機資材所釋出的磷鍵結沉澱而降低其溶解度(Hedley and McLaughlin, 2005; Pierzynski *et al.*, 2005)。除土壤性質影響外，另一造成磷有效性降低的原因可能為，可溶性磷與生物炭表面帶正電荷的金屬複合物鍵結而被固定所致(DeLuca *et al.*, 2009)。Sme 土壤經蔗渣堆肥及炭化稻殼添加，經 70 天的培育後，Sme 土壤於各個處理下的 Mehlich-3 可萃取磷含量皆顯著高於培育第 0 天時。然而，在不同處理間比較下，其 Mehlich-3 可萃取磷含量與對照組相較並無顯著的差異。此結果顯示，在高磷含量的 Sme 土壤中，添加堆肥及生物炭並於培育 70 天後，將會增加有效磷的含量，此可能歸因於 Sme 土壤的 pH 值介在中性範圍，使磷的溶解度增加。

四、結 論

本試驗結果顯示添加炭化稻殼後可明顯改善酸或鹼性土壤之 pH 值，亦可減少土壤中 7%-29%無機態氮的釋放量；同時，更可於培育初期增加土壤中 18%-125%有效磷含量，且不影響小白菜產量，甚至增加產量。本試驗結果意喻共同施用炭化稻殼與堆肥於坡地農田土壤中將可減少堆肥於坡地農田土壤中的施用量或施用次數，且不致影響作物產量。本試驗建議之改良

方式亦將可能改善非點源污染源的釋放潛勢而減緩集水區或下游水體水質的劣化。

謝 誌

本研究感謝行政院國家科學委員會給予經費支持，計畫補助編號為 NSC-101-2313-B-020-013-MY2。同時，本研究感謝工業技術研究院簡全基博士對炭化稻殼的提供。

參考文獻

1. 王建昇、林亭君、艾至宣、林宗輝、簡士濠：「不同土地利用方式對土壤有機質及團粒穩定度之影響」，土壤與環境，第 15 卷第 1-2 期，pp. 63-76，2012。
2. 李家興：短期施用住糞堆肥對輪作系統下土壤品質之影響與評估，國立台灣大學碩士論文，台北，台灣，2012。
3. 簡士濠，江介倫，王建昇，張序睿：「添加生物炭對酸性紅壤肥力之影響」，農業工程學報，第 58 卷第 4 期，pp. 15-22：2012。
4. Allison L. E. and C. D. Moodie, "Carbonate." In: Blacketal, C. A. (Editor), *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA, CSSA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 1379-1400, 1982.
5. Bernal, M. P., C. Paredes, M. A. Sanchez-Monedero and J. Cegarra, "Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide-range of organic wastes," *Bioresource Technology*, **62**, 91-99, 1998.
6. Borchard, N., A. Wolf, V. Laabs, R. Aeckersberg, H. W. Scherer, A. Moeller and W. Amelung, "Physical activation of biochar and its meaning for soil fertility and nutrient leaching – a greenhouse experiment," *Soil Use and Management* **28**:177-184, 2012.
7. Brady, N. C., and R. R. Weil (Editors), *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002.

8. Brockhoff, S. R., N. E. Christians, R. J. Killorn, R. Horton, and D. D. Davis, "Physical and mineral-nutrition properties of sand-based turfgrass root zones amended with biochar," *Agronomy Journal*, **102**: 1627-1631, 2010.
9. Bruun, E. W., P. Ambus, H. Egsgaard, and H. Hauggaard-Nielsen, "Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics." *Soil Biology and Biochemistry*, **46**: 73-79, 2012.
10. Chan, K. Y., L. Van Zwieten, I. Mesaros, A. Downie, and S. Joseph, "Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment," *Australian Journal of Soil Research* **45**: 629-634, 2007.
11. Cheng, C. H., J. Lehmann, J. E. Thies and S. D. Burton, "Stability of black carbon in soils across a climatic gradient," *Journal of Geophysical Research*, **113**: 2020-02027, 2008.
12. DeLuca, T. H., M. D. MacKenzie, and M. J. Gundale, "Biochar effects on soil nutrient transformations." In: Lehmann, J. and S. Joseph, (Editors), *Biochar for Environmental Management*, Earthscan, London, pp. 251-270, 2009.
13. Gee, G. W., and Bauder, J. W., "Particle-size analysis." In: Klute, A. (Editor). *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods*, 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 383-411, 1986.
14. Hamer, U., B. Marschner, S. Brodowski, and W. Amelung, "Interactive priming of black carbon and glucose mineralization," *Organic Geochemistry*, **35**:823-830, 2004.
15. Hedley, M. and M. McLaughlin, "Reactions of phosphate fertilizers and by-products in soil," In: Sims, J. T., and A. N. Sharpley, (Editors), *Phosphorus: Agriculture and the Environment*. Agron Monog No. 46. Madison, WI, USA, pp 181-252, 2005.
16. Lehmann, J., J. P. Jr. da Silva, C. Steiner, T. Nehls, W. Zech, and B. Glaser, "Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertiliser, manure and charcoal amendments." *Plant and Soil*, **249**:343-357, 2003.
17. Lehmann, J. and M. Rondon, "Bio-char soil management on highly weathered soils in the humid tropics," In: N. Uphoff, A.S. Ball, E. Fernandes *et al.* (Editors), *Biological Approaches to Sustainable Soil Systems*, CRC Press, Taylor and Francis Group, USA. pp. 517-530, 2006.
18. Liang, B., J. Lehmann, S. P. Sohi, J. E. Theis, B. O'Neill, L. Trujillo, J. Gaunt, D. Solomon, J. Grossman, E. G. Neves, and F. J. Luizao, "Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil." *Organic Chemistry*, **41**:206-213, 2010.
19. 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.
20. Mehra, O. P. and M. L. Jackson. "Iron oxides removed from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate." *Clays and Clay Mineral*, **7**:317-327, 1960.
21. Mehlich, A., "Mehlich-3 soil test extractant – a modification of Mehlich-2 extractant." *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, **15**: 409-416, 1984.
22. Mulvaney, R. L. "Nitrogen-Inorganic forms," In Sparks D.L. *et al.* (Editors), *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, N. O., S. C. Agudelo, W. Yuan, and J. Gan, "Nitrogen and Phosphorus Availability in Biochar-Amended Soils," *Soil Science*, **176**: 218-226, 2011.
24. Nelson, D. W. and L. E. Sommers, "Total carbon, organic carbon, and organic matter." In: Page,

- A.L. *et al.* (Editors), *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.
25. Novak, J. M., W. J. Busscher, D. W. Watts, D. A. Laird, M. A. Ahmedna and M. A. S. Niandou, "Short-term CO₂ mineralization after additions of biochar and switchgrass to a typic Kandiuult," *Geoderma*, **154**: 281-288, 2010.
 26. Parvage, M. M., B. Ulén, J. Eriksson, J. Strock and H. Kirchmann, "Phosphorus availability in soils amended with wheat residue char," *Biology and Fertility of Soils*, **49**: 245-250, 2013.
 27. Paul, E. A. and F. E. Clark, *Soil Microbiology and Biochemistry*. 2nd ed. Academic Press, San Diego, CA, USA, 1996.
 28. Pierzynski, G. M., R. W. McDowell, and J. T. Sims, "Chemistry, cycling, and potential movement of inorganic phosphorus in soils," In: Sims, J. T. and A. N., Sharpley, (Editors), *Phosphorus: Agriculture and the Environment*, Agron Monog No. 46. Madison, WI, USA, pp 53-86, 2005.
 29. Rhoades, J. D., "Cation exchangeable capacity." In: Page A. L. *et al.* (Editors.). *Methods of Soil Analysis. Part 2: Chemical and Microbiological properties*, 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI, USA, pp. 149-157, 1982.
 30. Rondon, M., J. Lehmann, J. Ramirez, and M. Hurtado, "Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions," *Biology and Fertility of Soils*, **43**: 699-708, 2007.
 31. Tammeorg, P., T. Brandstaka, A. Simojiki, and J. Helenius, "Nitrogen mineralisation dynamics of meat bone meak and cattle manure as affected by the application of softwood chip biochar in soil." *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, **103**: 19-30, 2012.
 32. Xu, J. M., C. Tang, and Z. L. Chen, "The role of plant residues in pH change of acid soils differing in initial pH," *Soil Biology and Biochemistry*, **38**: 709-719, 2006.
 33. Yanai, Y., K. Toyota, and M. Ozakaki, "Effects of charcoal addition on N₂O emissions from soil resulting from rewetting air-dried soil in short-term laboratory experiments." *Soil Science and Plant Nutrition*, **53**: 181-188, 2007.
 34. Yamato, M., Y. Okimori, I. F. Wibowo, S. Anshori, and M. Ogawa, "Effects of the application of charred bark in *Acacia mangium* on the yield of maize, cowpea, peanut and soil chemical properties in south Sumatra, Indonesia." *Soil Science and Plant Nutrition*, **52**: 489-495, 2006.
 35. Yuan, J. H., R. K. Xu, W. Qian, and R. H. Wang, "Comparison of the ameliorating effects on an acidic Ultisol between four crop straws and their biochars." *Journal of Soils and Sediments*, **11**: 741-750, 2011.
 36. Zheng, H, Z. Wang, X. Deng, S. Herbert, and B. Xing, "Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil." *Geoderma*, **206**: 32-39, 2013.
 37. Zimmerman, A., "Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar)," *Environmental Science & Technology*, **44**: 1295-1301, 2010.
 38. Zmora-Nahum, S., O. Markovitch, J. Tarchitzky and Y. Chen, "Dissolved organic carbon (DOC) as a parameter of compost maturity," *Soil Biology and Biochemistry*, **37**: 2109-2116, 2005.

收稿日期：民國 103 年 1 月 22 日
 修正日期：民國 103 年 6 月 3 日
 接受日期：民國 103 年 6 月 29 日