

添加生物碳對紅壤性質影響之探討

林俐玲⁽¹⁾ 許靖男⁽²⁾ 何俊賢⁽³⁾

摘要

由於地理位置與氣候之關係，導致台灣降雨集中、降雨強度大，又因地形之陡峻，容易造成土壤沖蝕現象。在這樣的自然條件下，土壤中的營養元素容易流失，造成土壤劣化與酸化等情形。本研究主要以生物碳作為土壤改良劑添加不同濃度(0%、1%、5%及 10%)之生物炭於紅壤中進行改良，探討改良後土壤之基本性質是否更有助於作物生長。結果顯示生物炭在高濃度時對於紅壤之保水能力有明顯之提升，在低濃度時則與對照組無明顯之差異；對於保肥能力而言，在添加濃度為 1%之土壤陽離子交換能量有明顯上升之趨勢，因此能夠保存更多營養鹽，有助於作物之生長。在高濃度時，零電點反而有上升之情形，使得陽離子交換能量有下降之情形，對作物生長較無助益。

(**關鍵詞**：土壤改良劑、生物碳、保水力、保肥力)

Investigation of Application with Biochar on the Red Soil Properties

Li-Ling Lin⁽¹⁾ *Ching-Nan Hsu*⁽²⁾ *Chun-Hsien Ho*⁽³⁾

Professor⁽¹⁾ Graduate Students⁽²⁾, Master⁽³⁾ Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taiwan

ABSTRACT

The rainfall in Taiwan was concentrated and strong due to the location and climate. It's easily to trigger erosion because of the steep terrain. In this conditions, the nutrient minerals in soil would be eroded and transform the soil into acidic status. This study was taking the biochar as soil amendment to improve the soil characteristics. And to observe whether it could contribute to crop growth. The results shown that the water retention with high biochar concentration were higher

(1)國立中興大學水土保持學系教授

(2)國立中興大學水土保持學系碩士班研究生(通訊作者 e-mail：shinymimi@hotmail.com)

(3)國立中興大學水土保持學系碩士

than low concentration.

The CEC with 1% biochar was higher compared to other treatments and thus could provide more nutrient minerals for crops. The zero point of charge(pH_0) with high biochar concentration increased and thus made the CEC become lower than control group(0%).

(**Keywords:** soil amendment, biochar, water retention capacity, fertility)

前言

台灣地區雨量豐沛，年平均雨量達 2,500 公釐，其中因位在歐亞板塊與菲律賓板塊之交界處，造成地勢山高坡陡。由於地形與氣候之影響，使淋洗作用強烈，造成土壤中鹽基與矽酸鹽礦物流失，使陽離子交換能量降低，進而影響土壤的保肥能力。土壤中的保肥能力與土壤本身之 pH 值有關，土壤愈酸其保肥力愈低，根據台灣已調查之 80 萬公頃的農地中，pH 值在 5.5 以下之酸性土壤便占了 28 萬公頃，約為總面積之 35%(連深,1991)。此外台灣地區雨量主要集中於夏秋兩季，由於降雨集中加上地勢之關係，使原本不穩定之坡地產生崩壞之情形，造成山崩、地滑、土石流…等常見災害。本研究運用土壤改良劑來改善土壤的基本性質，藉以增加土壤保肥能力並改善土壤之團粒穩定度，以期能提高土地之農業生產量與降低坡地災害。

近數十年來，土壤改良劑主要以磷酸根與矽酸根為主，此兩類化合物之結構皆為四面體且具有特性吸附(specific adsorption)之能力，能夠吸附土壤中之-OH 與-OH₂，藉以降低土壤零電點(pH_0)，Gouy-Chapman 提出之土壤膠體表面電荷之理論式：(Van Olph'n, 1977)

$$\sigma = \left(\frac{2n\epsilon KT}{\pi}\right)^{1/2} \sinh(pH_0 - pH) \quad (1)$$

$$CEC = S \times \sigma \quad (2)$$

式中：

σ = 表面電荷密度(esu / cm²)

n = 電解質濃度(ions / cm³)

ϵ = 溶液介電常數

K = Boltzman 常數

T = 絕對溫度(K)

pH = 土壤酸鹼值

pH_0 = 土壤零電點

CEC = 陽離子交換量

S = 土壤比表面積(m² / g)

由式(1)可以看出當土壤零電點增加時，土壤表面電荷密度也會隨之增加，由式(2)則顯示若土壤表面電荷密度增加時，將使得陽離子交換量能提高，增加土壤吸附營養鹽的能力。

常見之土壤改良劑有磷肥、矽酸鈉、磷酸銨、沸石、飛灰、爐渣、玄武岩石粉及矽質玄武岩石粉(張菊香、萬鑫森, 1993)，對於土壤團粒穩定性、保肥力與保水力皆有不同成效。但磷肥價格較為昂貴，若大量使用對於農民而言負擔較大。另外由於台灣降雨集中，施用後可能因淋洗作用而流入河川或湖

泊造成優養化之現象，對生態環境造成危害。

台灣市售之沸石大多都經過高溫處理，使沸石結構產生改變。飛灰與爐渣屬工業廢棄物，有造成重金屬汙染之疑慮。玄武岩石粉的成分中，交換性鈉含量過高，對於土壤有絮散的作用，會降低土壤的團粒穩定性造成土壤流失情形產生。由於以上因素，尋找天然且對自然環境影響較小的土壤改良劑是有其必要性的。

近年來國外許多學者使用枯枝落葉、家禽糞便、花生殼…等有機體進行熱裂解反應後所形成之生物碳(Biochar)進行土壤改良(Gaskin, 2008; Julie, 2010; Novak, 2009; Steiner, 2007)。生物碳主要成分為有機碳、灰分(ash)與水分，其中灰分成分中所含有礦物質與營養鹽，可供植物生長所需，且由於碳本身有較多之孔隙，能夠吸附水分避免水分流失，對於農業土壤將有很大之助益。根據製作原料的不同與熱裂解溫度的高低所製

成之生物碳其 pH 值、灰含量與比表面積皆會有所不同(Novak, 2009)，也因此改良效果也會隨原料的不同而有很大之差別。本研究以生物碳作為土壤改良劑，期望能改善紅壤之基本性質，並分析基本性質之變化對於農業土壤之影響。

材料與方法

一、土樣試驗材料

本研究採集彰化縣八卦山脈之支脈，銀行山紅壤，現地海拔高度約為 230m，以種植龍眼與鳳梨為主，地表上有大量枯枝落葉覆蓋。將採集之土壤於室內風乾一周後，以 4 號篩(5mm)及 10 號篩(2mm)進行過篩，後取小於 2mm 之土樣進行土壤基本性質分析，分析項目包含水分係數、顆粒密度、質地、水分特性曲線、比表面積、酸鹼度(pH)與零電點(pH_0)等試驗。土樣採集現地如圖 1 所示，土壤基本性質如表 1 所示。



圖 1 土樣採集地點-銀行山

Picture 1 Location of soil sample collection on Bank Mountain

*圖片來源：王永琦(2004)

表 1 紅壤基本性質

Table 1 The basic properties of the red soil

土樣	顆粒密度 (g/cm ³)	酸鹼度 (pH)	砂粒含量 (%)	粉粒含量 (%)	粘粒含量 (%)	質地
銀行山紅壤	2.51	5.38	19.83	50.23	29.94	粉質粘壤土

二、土壤改良劑 - 生物碳

本研究所使用之生物碳為彰化縣埔鹽鄉大有社區所燒製，以當地樟樹與榕樹枯枝為原料，在攝氏 500~700 度間進行絕氧悶燒所形成之高碳含量之物質。利用電動磨粉機將

生物碳磨碎後以 18 號篩(1mm)過篩，將過篩完之生物碳以重量百分比濃度 0%(對照組)、1%、5% 及 10%與紅壤均勻攪拌後，進行三個月之養置，後再進行土壤性質分析。生物碳基本性質如表 2 示。

表 2 生物碳基本性質

Table 2 The basic properties of biochar

基本性質	有機碳(%)	有機質(%)	CEC(cmol/kg)
	25.51	43.88	42.65
基本性質	pH _{H₂O}	pH _{KCl}	ΔpH (pH _{KCl} - pH _{H₂O})
	9.06	7.81	-1.25

三、分析方法

1. 土壤前置處理與基本性質分析

將過篩後<2mm 的原始紅壤進行以下的基本性質分析，包含土壤水分係數、土壤顆粒密度及粒徑分析，量測方法如下(林俐玲、董小萍，1996)：

(1) 土壤水分係數(Moisture Factor of Soil, MF)

土壤實驗結果主要以 105°C烘乾過後的土重為基礎，土壤水分係數會隨著土壤質地及生成環境的不同而有所改變。土壤烘乾後

其理化性質會發生很大的變動，因此必須測出風乾土樣的重量水分含量，做為日後風乾土與烘乾土重量的轉換係數。

(2) 土壤顆粒密度(Particle Density of Soil, ρ_s)

本研究以比重瓶法來測定顆粒密度，分別量測土樣質量與被土樣取代的水量，由阿基米得原理可知土樣體積與取代土樣的水體積兩者一樣，以水質量除以水密度即可得土樣體積，由此求得顆粒密度。

(3) 粒徑分析(Particle Size Distribution)

本研究使用吸管法(Pipette sampling)，將

土樣加入六偏磷酸鈉 (Sodium hexametaphosphate) 作為分散劑進行化學分散，再利用超音波粉碎機進行物理分散，根據 Stokes' Law 在重力下的沉降原理分別量測出砂粒(Sand)、粉粒(Silt)及粘粒(Clay)的個別重量百分比，後參考質地三角圖 (Soil Triangle)，來判斷土壤之質地。

2. 水分特性曲線 (Soil-moisture retention curve)

描述土壤保水特性需要兩個參數，即土壤保持之水分含量與基質勢能。水分含量常以體積水分含量(θ_v)表示之，而基質勢能常以壓力(Pressure)、張力(Tension)或水力頭(Hydraulic Head)來表示之，土壤水分含量愈少，移走水分所需要的功就愈大，本研究使用壓力鍋將土樣置於壓力鍋中，循序的增加空氣壓力，並量測在不同張力下土壤的水分含量。

3. 土壤零電點(Point of zero charge)

本研究採用 VanRaij and Peech(1972)所提出的電位滴定法(Potentiometric titration)，再利用 Gouy-Chapman 模式計算土壤表面電荷密度，零電點。

4. 比表面積(Specific surface)

測定土壤比表面積以 BET(Brunauer、Emmett and Teller, 1938)吸附方程式最為廣泛被使用，經由不同飽和鹽類溶液的吸附所增加之重量來推算出土壤粘粒膠體之比表面積，BET 吸附方程式如下：

$$\frac{P}{W(P_0 - P)} = \frac{1}{W_m \cdot C} + \frac{C-1}{W_m \cdot C} \times \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

式中：

W=在 P 壓力下，土壤粘粒所吸附之水氣量(mg/g)

P_0 =飽和水蒸汽壓

W_m =在土壤粘粒表面形成一單層水膜所需吸附之水汽量(mg/g)

C=形成單層水膜所需之熱量常數

BET 吸附方程式於推導時乃假設在吸附第一層水汽分子，其後吸附與脫離水汽分子所需的熱能相等，在達平衡後，其吸附速率與脫離速率亦會相等。

比較線性方程式 $y = a + bx$ 與(4)式，為決定(4)式中的 W_m 和 C，將 $P/W(P_0 - P)$ 作為縱坐標， P/P_0 作為橫坐標，將不同相對濕度下所得值繪於圖上，利用最小平方法(Least square method)求得一迴歸直線 (Linear regression)，將

$$a = \frac{1}{W_m \cdot C} \quad (5)$$

$$b = \frac{C-1}{W_m \cdot C} \quad (6)$$

將(5)式與(6)式聯立求解，即可求出 W_m 和 C，再將 W_m 帶入(7)式(黃瓊慧、董小萍，1993)便可求得比表面積。

$$S = \frac{W_m}{M} \times N_A \times A = 1.209 \times \frac{W_m}{M} \times N_A \times \left(\frac{M}{\rho N_A}\right)^{2/3} \quad (7)$$

5. 土壤飽和水力傳導度 (Hydraulic Conductivity)

達西定律(Darcy's Law)可用來描述土壤水分穩定的流動狀態，當水分的移動為單一

方向的一維流動，達西定律可以下式表示：

$$q = K \left(\frac{\Delta H}{L} \right) \quad (8) \text{ 移項}$$

轉換後可得

$$K = \frac{qL}{\Delta H} = \frac{QL}{A\Delta H} = \frac{VL}{At\Delta H} \quad (9)$$

式中：

K=水力傳導度(Hydraulic Conductivity) ;
cm/hr)

V=水分體積(cm³)

A=土柱截面積(cm²)

L=土著高度(cm)

ΔH=水力頭差(cm)

由於水力傳導度會隨著土壤水分含量多寡而產生改變所以量測不易，因此本研究先將土樣進行飽和以便量測土壤的飽和水力傳導度。

四、統計分析方法

1. 變異數分析 (analysis of variance, ANOVA)(陳耀茂，2004)

變異數分析主要用於多個群體之間之平

均值是否有存在著差異性。變異數分析將平均值之總變異分為(1)不同處理方式所產生之組間變異與(2)測量時所產生之隨機誤差或組內變異，可以下式表示：

$$\text{總變異(離差)} = \text{組間變異} + \text{組內變異} \quad (10)$$

即：

$$X_{ij} - \bar{X} = (\bar{X}_j - \bar{X}) + (X_{ij} - \bar{X}_j) \quad (11)$$

X_{ij} =各組內之測量值

\bar{X}_j =各組平均值

\bar{X} =總平均值

將(11)式兩邊取平方和便能求出總變異與各種來源變異之關係：

$$\sum_j^k \sum_i^{n_j} (X_{ij} - \bar{X})^2 = \sum_j^k n_j (\bar{X}_j - \bar{X})^2 + \sum_j^k \sum_i^{n_j} (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 \quad (12)$$

$$\text{總平方和} = \text{組間平方和} + \text{組內平方和} \quad (13)$$

其中總平方和即為總變異(SST)，組間平方和即為組間變異(SSB)，而組內平方和即為殘差平方和(SSE)，將上述各式整理成常見之變異數分析表，如表 3 所示：

表 3 變異數分析表
Table 3 Table of analysis of variance

變異來源	平方和(SS)	自由度(df)	均方(MS)	F 比值
處理方式	SSB	k-1	MSB = SSB/k - 1	F = MSB/MSE
殘差	SSE	n-k	MSE = SSE / n - k	
總和	SST	n-1		

若計算值大於查表之臨界值 $F_{(\alpha)}(k-1, n-k)$ ，即：

$$F > F_{(\alpha)}(k-1, n-k) \quad (14)$$

則代表資料間有顯著性之差異。若無此情形則代表資料間其差異性並不明顯。

2. Duncan 多重全距檢定法

本研究是採用 Duncan 多重全距檢定法(以下簡稱 Duncan 法)，採用此方法之原因為 Duncan 法在檢視微小差異時其檢定力較為顯著，由於土壤改良劑在低濃度改良土壤基本性質其差異可能較不明顯，故採用此法來檢定對照組與控制組間是否有微小變異存在。Duncan 法基本計算流程如下：

(1) 先將 k 組平均值 \bar{X}_j 由小到大排列。

(2) 計算平均值之均方誤差，

$$S_y = \sqrt{\frac{MSE}{k}} \quad (15)$$

(3) 由 Duncan 所設計之顯著性全距表查出 $\gamma_{\alpha}(p, n-k)$ ，其中 $p=2, 3, 4, \dots, k$ 。

(4) 利用下式計算 $p=2, 3, 4, \dots, k$ 之顯著性全距，

$$R_p = \gamma_{\alpha}(p, n-k) S_y \quad (16)$$

(5) 將最大與最小平均值之差值與 R_k 做比較，再將最大與次小之平均值之差值與 R_{k-1} 做比較，重覆此步驟直到所有平均值都與最大值做過比較為止。

(6) 將次大與最小平均值之差值與 R_{k-1} 做比較，重覆此步驟直到將 C_k^2 個均值一一做完比較。

若兩個平均值之差值大於其相對應之顯著性全距，則代表兩個平均值間有顯著性差異。若小於顯著性全距，則無顯著性差異。

結果與討論

一、土壤保水力

(1) 水分特性曲線

土壤水分含量在低張力(0~1/3 bar)下主要受毛細作用與孔隙分布影響，而在高張力(1/3~15 bar)下則是受土壤質地(砂、粉、粘粒含量)與土壤比表面積影響(郭魁士, 1983)，將銀行山紅壤以不同濃度之生物碳處理後，在不同張力下其土壤水分含量如表 4 所示，將張力作為橫軸(X 軸)，土壤水分含量作為縱軸(Y 軸)繪製成土壤水分特性曲線如圖 2 所示。

經由 Duncan 法檢定後發現，當添加濃度為 0%與 1%時，土壤含水量在各個張力下皆無明顯之差異，而添加濃度為 5%與 10%，經檢定後發現有顯著性之差異，由此結果可得知土壤在經過高濃度生物碳改良後其土壤含水量有明顯增加。在田間容水量，即張力為 1/3 bar 時，添加濃度 0%、1%、5%與 10%之土壤含水量分別為 37.47%、34.41%、43.55%與 47.28%；而在張力為 12bar 時，其相對應之土壤水分含量為 20.85%、19.58%、28.55%與 33.17%。由此結果可以得知，在高濃度生物碳(5%與 10%)之處理下，有效水分含量區間內(1/3 bar~15 bar)之土壤水分含量有明顯提高。推論水分含量增加原因主要是由於生物碳本身有許多小孔隙，增加土壤孔隙率，所以能夠吸附較多水分。而有效水分含量之

多寡即代表植物可利用水分之多少，因此生物碳對於改善土壤保水力有明顯之改善。

(2) 飽和水力傳導度

在不飽和土壤中，水力傳導度會隨著土壤水分含量之多寡而有所變化，在較乾燥的

土壤中，孔隙度愈大其水力傳導度亦愈大。因此粘土之水力傳導度在乾燥狀態下會大於砂土。而在土壤為飽和狀態時，水分主要在粗孔隙中移動，此時砂土的水力傳導度會大於粘土。

表 4 不同生物碳濃度處理下之土壤體積水分含量

Table 4 The soil water content with different treatments

張力 (bar)	土壤經不同濃度生物碳處理後之體積水分含量(%)			
	0%	1%	5%	10%
1/3	37.47 ^{a*}	34.41 ^{a*}	43.55 ^{b*}	47.28 ^{c*}
1	28.53 ^{a*}	26.96 ^{a*}	38.67 ^{b*}	43.82 ^{c*}
2	26.18 ^{a*}	23.77 ^{a*}	35.66 ^{b*}	40.55 ^{c*}
4	24.48 ^{a*}	21.71 ^{a*}	33.55 ^{b*}	38.17 ^{c*}
8	22.47 ^{a*}	20.00 ^{a*}	31.08 ^{b*}	35.74 ^{c*}
12	20.85 ^{a*}	19.58 ^{a*}	28.55 ^{b*}	33.17 ^{c*}

*註腳英文字母相同者代表處理未達 5% 顯著水準

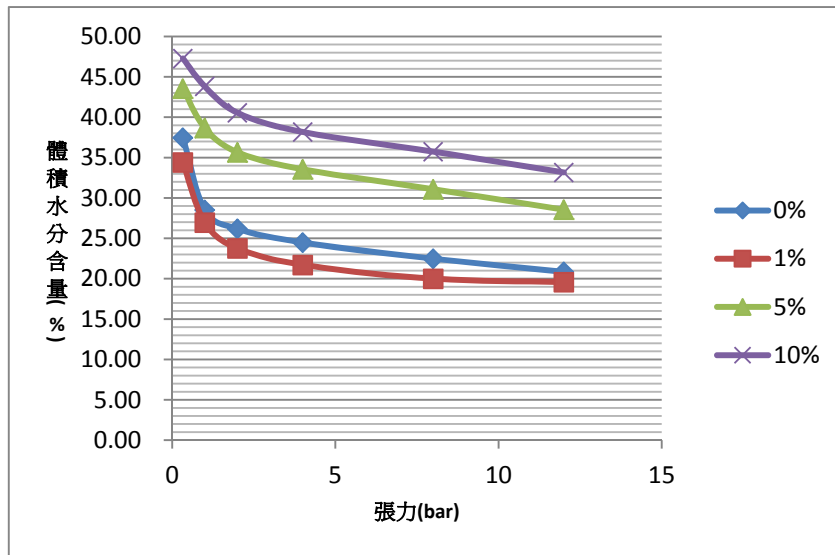


圖 2 不同濃度生物碳處理後之體積水分含量比較圖

Figure 2 The comparison of water retention curves with different treatments

土壤飽和時水力傳導度為一定值，此值主要受土壤質地與構造影響，如：砂土之飽和水力傳導度約為 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/sec 之間；粘土之飽和水力傳導度則為 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ cm/sec 之間，而根據不同土壤之質地，量測飽和水力傳導度之方法也不盡相同。

本研究使用定水頭量測土壤飽和水力傳導度，實驗結果如表 5 與圖 3 所示。當添加濃度為 0%、1%、5% 與 10% 其相對應之飽和水力傳導度分別為 0.48、0.67、0.30、0.18 cm/hr。其中以添加濃度為 1% 時為最大，而當添加濃度為 10% 時反而較小。究其原因可能是因為添加濃度較高之生物碳使原本土壤之孔隙度變大因此降低了水力傳導度。在壓力鍋試驗中也可以看出在高濃度時土壤有較多之含水

量，水分移動較慢，大部分依然儲存於土壤內部。綜合壓力鍋試驗與飽和水力傳導度試驗，生物碳對於土壤吸附水分確實有顯著之影響，應用於農業土壤可使作物能獲得充足之水源。

表 5 不同添加濃度飽和水力傳導度實驗結果

Table 5 The result of saturated hydraulic conductivity with different treatments

添加濃度	飽和水力傳導度(cm/hr)
0%	0.48 ^{a*}
1%	0.67 ^{b*}
5%	0.30 ^{c*}
10%	0.18 ^{c*}

*註腳英文字母相同者代表處理未達 5% 顯著水準

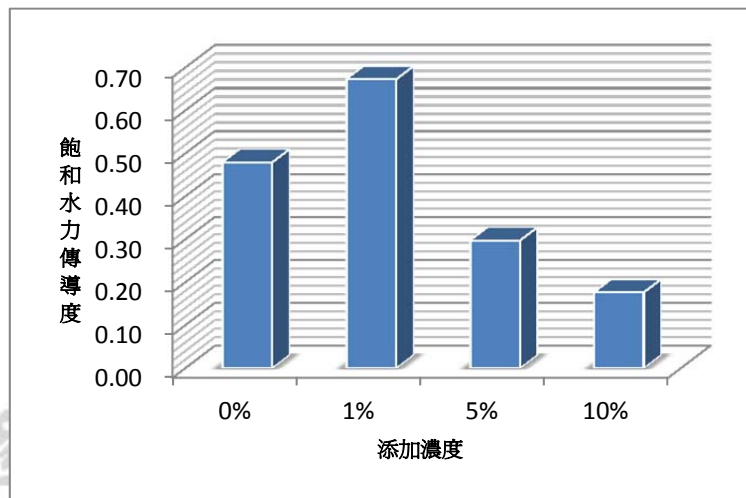


圖 3 不同添加濃度之飽和水力傳導度比較圖

Figure 3 The comparison of hydraulic conductivity with different treatments

(3) 土壤零電點

土壤零電點定義為在某 pH 值下其表面

淨電荷為 0 的狀態(Parks, 1962)，若所測定土壤膠體之 pH 值大於零電點，則代表膠體表面帶負電荷可吸附陽離子；若所測定膠體

之 pH 值小於零電點，則表示膠體表面帶正電荷可吸附陰離子。常見之植物營養元素有 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} ...等陽離子，因此改良過後土壤之 pH 值若能大於零電點將有助於植物吸收所需之養分。(王明光譯，2000)

以電位滴定法量測土壤之零電點，實驗結果如圖 4~7 所示，圖中四條電位滴定曲線之交點(紅色圓圈處)即為土壤之零電點。當添

加濃度為 0%、1%、5%與 10% 其零電點分別為 4.85、3.60、8.14、8.03，當添加濃度為 1% 時，土壤零電點下降至 3.60，而當添加濃度為 5%與 10% 時，其土壤零電點均在 8 以上，此值與理論不合，推測其原因可能是因為台灣一般礦物質土壤其有機碳含量較少達到 5% 以上，因此在量測土壤零電點時會受到有機碳本身之影響。

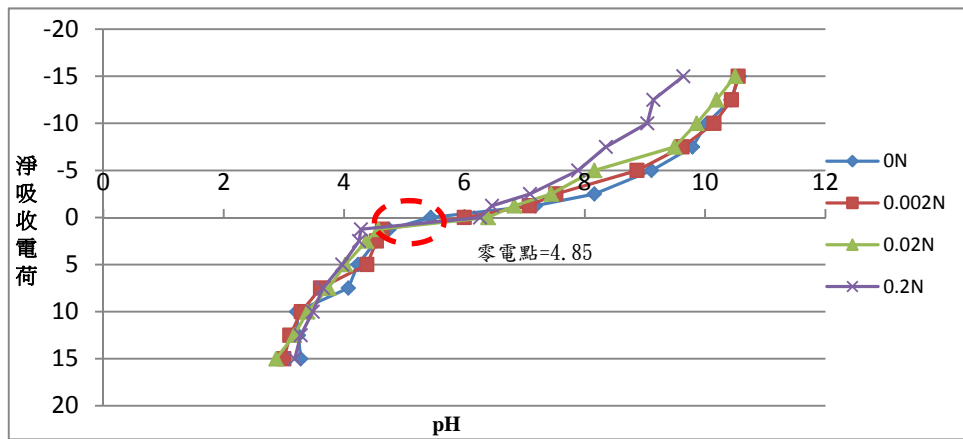


圖 4 添加濃度 0% 之電位滴定曲線

Figure 4 The potentiometric titration curves with 0% biochar

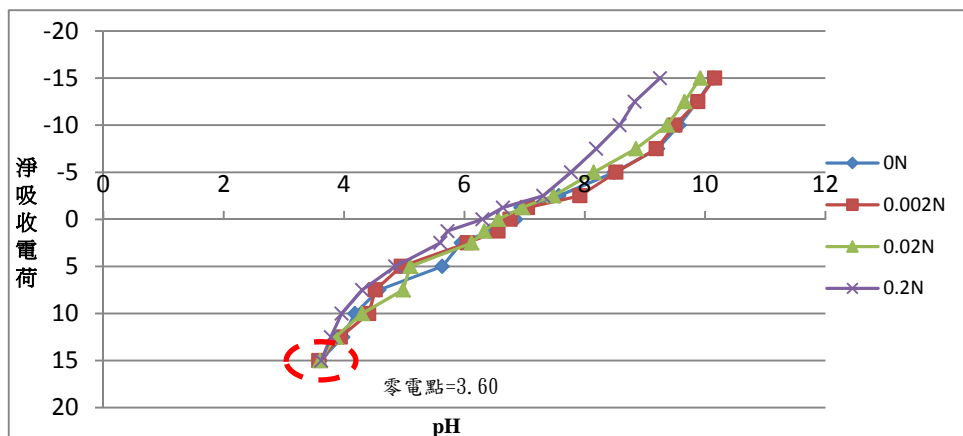


圖 5 添加濃度 1% 之電位滴定曲線

Figure 5 The potentiometric titration curves with 1% biochar

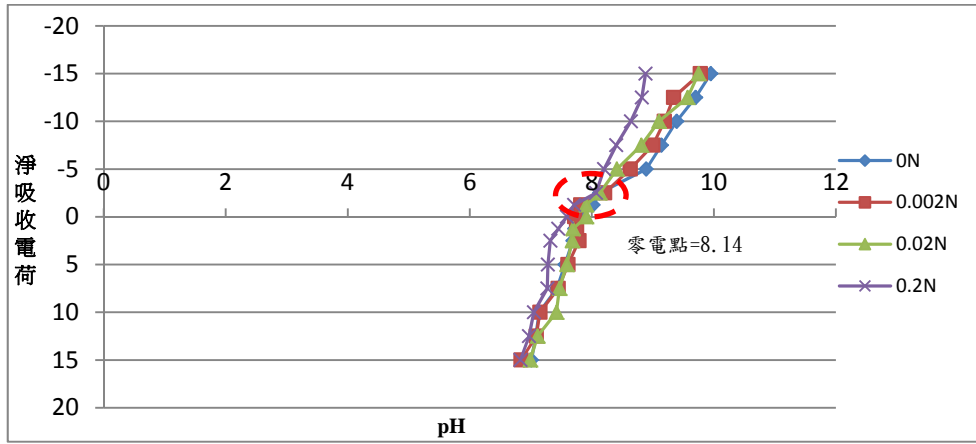


圖 6 添加濃度 5% 之電位滴定曲線

Figure 6 The potentiometric titration curves with 5% biochar

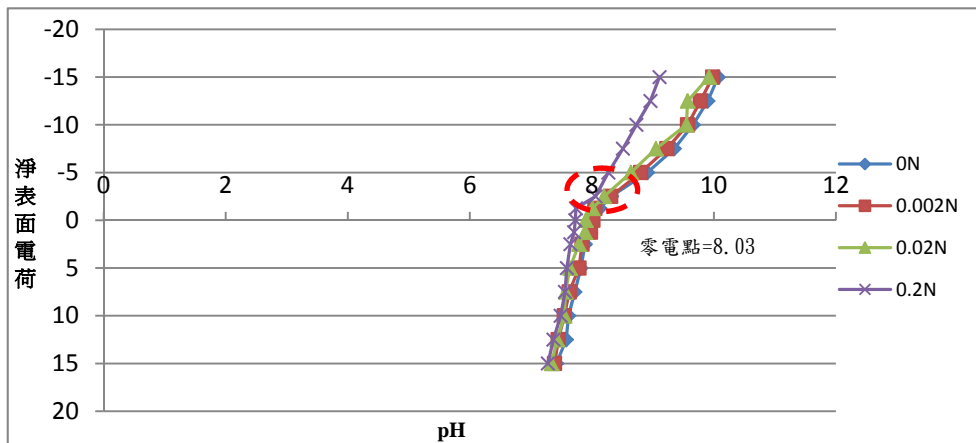


圖 7 添加濃度 10% 之電位滴定曲線

Figure 7 The potentiometric titration curves with 10% biochar

(4) 比表面積

比表面積係指單位重量之面積(m^2/g)或單位體積之面積(m^2/cm^3)，一般而言粒子愈小其比表面積會愈大，因此以砂粒、粉粒與粘粒而言，粘粒會有較大之比表面積。除質地外顆粒形狀亦會影響比表面積之值，在同體積下，片狀或板狀之粒子其比表面積會大

於圓球狀之粒子。土壤中常見之粘質土或有機質土有較大之比表面積，由於比表面積之大小會與水分及營養元素之吸附成正相關，因此此值之大小對於農業用土壤佔有很重要之影響力。Kohnke(1968)提出粘粒與土壤質地之比表面積範圍，如表 6 所示。

表 6 不同粘粒與土壤質地之比表面積(Kohnk, 1968)

Table 6 The specific surface area of different clays and soils

粘粒與土壤類型	比表面積(m ² /g)
蒙特石粘粒	500-800
伊來石粘粒	60-120
高嶺石粘粒	20-40
美國中西部土壤之粘粒	300-400
石灰質冰積土之粘粒	150-200
粘土	150-250
玢質粘壤土	120-200
玢質壤土	50-150
壤土	50-100
砂質壤土	10-40
坩土	5-20

比表面積之實驗結果如表 7 與圖 8 所示，由結果可以看出當添加濃度為 1% 時其土壤比表面積最大，而當添加濃度為 5% 與 10% 時比表面積反而有下降之趨勢出現。推究其原因為添加過多的生物碳使得土壤性質發生改變，因此與一般礦物質土壤有性質上之差異。

表 7 不同添加濃度下土壤之比表面積
Table 7 The specific surface area with different treatments

添加濃度	比表面積(m ² /g)
0%	9.07
1%	9.32
5%	7.37
10%	7.12

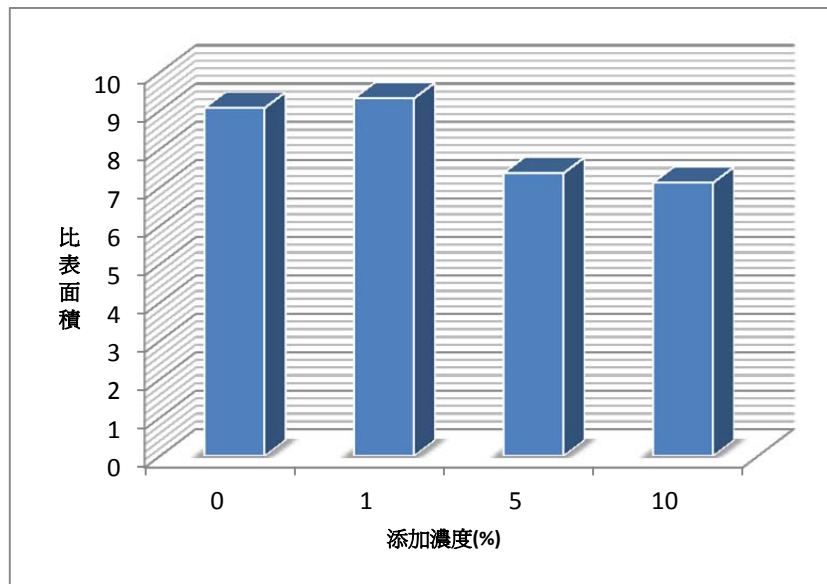


圖 8 不同添加濃度下土壤之比表面積比較圖

Figure 8 The comparison of specific surface area with different treatments

(5) 土壤表面電荷量

當添加濃度為 5%與 10%時,由電位滴定試驗之結果可以得知其土壤零電點均超過 pH=8,與理論不合。因此在計算土壤表面電荷量時將以添加濃度 0%與 1%為主,並比較改良前後土壤表面電荷量之變化,計算結果如表 8 與圖 9 所示。

由計算結果可以看出當添加濃度為 1%時,在不同電解質濃度(0.002N、0.02N 與 0.2N)下其土壤表面電荷密度均大於未改良前,當電解質濃度為 0.2N 時,表面電荷密度由 -31.7984(me/cm²) 提高至 -134.7820(me/cm²)。

(6) 陽離子交換量

同一種土壤其陽離子交換量並非固定值,

最主要的影響因子有二。一為土壤 pH 值,由式(1)可以看出,當土壤 pH 值有所改變,則土壤表面電荷密度也會跟著改變。二為土壤比表面積,比表面積愈大與則陽離子接觸的面積也愈大。將土壤表面電荷密度與土壤比表面積代入式(2),計算結果如表 9 與圖 10 所示。

當添加濃度為 1%時由表 7 與表 8 可發現,土壤比表面積與土壤表面電荷皆有增加之趨勢,因此代入式(2)可以發現陽離子交換量會比對照組高。在電解質濃度 0.002N~0.2N 間,對照組之陽離子交換量介於 0.29~2.88(me/100g),而添加濃度為 1%之土壤其陽離子交換量則介於 1.26~12.56(me/100g)之間。結果顯示陽離子交換量在添加生物碳後獲得明顯之提升,因此可以吸附更多營養元素以供植物使用。

表 8 不同生物碳添加濃度之 Gouy-Chapman 公式計算值

Table 8 The calculated values of surface charge density of the soils with different treatments by Gouy-Chapman equation

Gouy-Chapman 公式		表面電荷密度	
電解質濃度	添加濃度	$\sigma \times 10^{-8} (\text{me} / \text{cm}^2)$	$\sigma \times 10^3 (\text{esu} / \text{cm}^2)$
0.002N	0%	-3.1799	-9.2149
	1%	-13.4780	-39.058
0.02N	0%	-10.0556	-29.1400
	1%	-42.6219	-123.5138
0.2N	0%	-31.7984	-92.1486
	1%	-134.7820	-390.5849

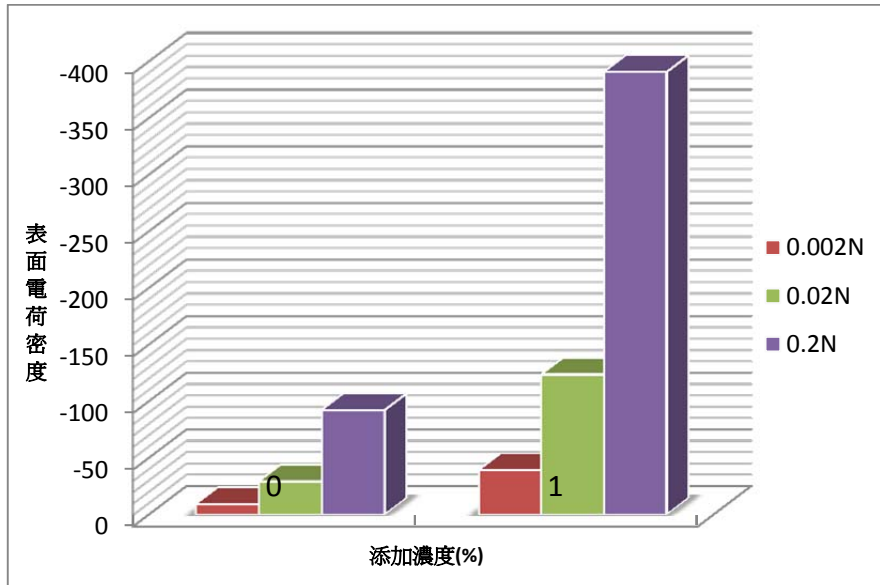


圖 9 不同生物碳添加濃度之 Gouy-Chapman 公式土壤表面電荷比較圖

Figure 9 The comparison of surface charge density with different treatments calculated by Gouy-Chapman equation

表 9 不同添加濃度下土壤之陽離子交換量

Table 9 The CEC with different treatments

電解質濃度	添加濃度	陽離子交換量(me/100g)
0.002N	0%	0.29
	1%	1.26
0.02N	0%	0.91
	1%	3.97
0.2N	0%	2.88
	1%	12.56

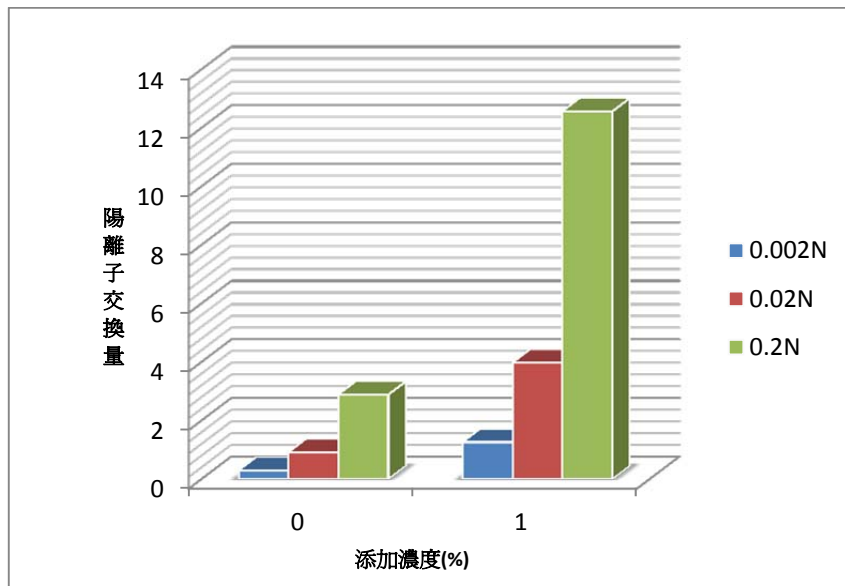


圖 10 不同添加濃度下之土壤陽離子交換量比較圖

Figure 10 The comparison of CEC with different treatments

結論與建議

(1) 結論

當添加濃度為 1% 時，陽離子交換量有明顯之增加，因此生物碳對於保肥能力有顯著之改善，而對於土壤保水力經由 Duncan 法分析後顯示則無明顯之差異。此外，若添加濃度過高會使得生物碳需求量增大，增加製作生物碳之原料量以及製作時所花費之成本，因此若添加濃度較低則可以減少原料來源不足與花費昂貴等問題產生，更有助於推廣生物碳作為普遍之土壤改良劑。綜觀以上各點，以本研究而言使用添加濃度為 1% 之生物碳即可達到改良土壤之目的。

(2) 建議

本次實驗所選擇之濃度為 0%、1%、5%

與 10%，而實際現地在施用時添加濃度不會超過 5%，在添加濃度為 1% 時，許多土壤基本性質都有先升後降或先降後升的情形產生，因此建議往後研究可將添加濃度再細分為 0.5%、1% 及 1.5%，討論細微濃度變化對於土壤基本性質之影響。

在土壤養置方面是採用室內養置，因此可能使微生物無法參與土壤的改良作用。建議後續研究可在戶外進行養置，如此所測得之土壤性質或許會較貼近現地狀況。

生物碳根據製作原料的不同其改良效果亦會有很大之差異，本次實驗使用彰化縣埔鹽鄉大有社區利用社區內部枯枝落葉所燒製之生物碳，其他常見之生物碳材料另有花生殼、山核桃殼、家禽糞便...等。根據不同需求，如改善地表逕流之產生、促進土壤肥力、增加土壤水分含量、改善坡面之穩定性、增

加農作物產量...等，可以選擇不同原料所製成之生物碳來使用。

另外本次研究僅以紅壤為材料進行實驗，後續可再以生物碳對台灣常見土壤，如黃壤，進行改良並比較其改良之效果。

參考文獻

1. 王明光譯(2000)，「環境土壤化學」，五南圖書，第 173-176 頁。
2. 王永琦(2004)，「土壤先前含水量對沖蝕影響之研究」，國立中興大學碩士論文。
3. 林俐玲、董小萍(1996)，「土壤物理實習手冊」，國立中興大學水土保持系。
4. 陳耀茂(2004)，「變異數分析與多重比較的 SPSS 使用手冊」，鼎茂圖書。
5. 張菊香、萬鑫森(1993)，「矽質玄武岩石粉改良紅壤之效應」，中國農業化學會誌，第三十一卷，第二期，第 247-253 頁。
6. 黃瓊慧、董小萍(1993)，「使用 BET 吸附方程式計算土壤比表面積之研究」，水土保持學報，第二十六卷，第一期，第 39-44 頁。
7. 連深(1991)，「酸性土壤之利用與改良」，土壤管理手冊，國立中興大學土壤調查試驗中心，第 263-276 頁。
8. 郭魁士(1983)，「土壤學」，中國書局。
9. Brunauer, S., P. H. Emmett and E. Teller. (1938), "Adsorption of gases in multimolecular layers," J. Amer. Chem. Soc. 60:309-319.
10. Gaskin, J. W., C. Steiner, K. Harris, K. C. Das and B. Bibens. (2008), "Effect of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agriculture use," American Society of Agriculture and Biological Engineers. 51(6):2061-2069.
11. Kohnke H. (1968), "Soil physics."
12. Novak, J. M., I. M. Lima, B. Xing, J. W. Gaskin, C. Steiner, K. Das, M. Ahmedna, D. Rehrh, D. W. Watts, W. J. Busscher and Schomberg, H. (2009), "Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand," Annals of environmental science 3, 195-206.
13. Novak, J. M., W. J. Busscher, D. L. Laird, M. Ahmedna, D. W. Watts and M. A. S. Niandou (2009), "Impact of biochar amendment on fertility of Southeastern Coastal Plain Soil," Soil Science 174:105-112.
14. Julie, M. (2010), "Guidelines on practical aspects of biochar application to field soil in various soil management systems," International Biochar Initiative.
15. Parks, G. A. and P. L. deBruyn. (1962), "The zero point of charge of oxides," J. Phys. Chem. 66:967-973.
16. van Olphen, H. (1977), "An introduction to clay colloid chemistry ." Interscience Publishers, John Wiley and Sons, New York.
17. van Raij, B. and M. Peech. (1972),

“Electrochemical properties of some
oxisols and alfisols of the tropics,” *Soil
Science* 36:587-593.

18. Steiner, C., W. G. Teixeira, J. Lehmann, T. Nehls, J. L. V. de Macedo, W. E. H. Blum and W. Zech. (2007), ”Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil,” *Plant and Soil* 291, 275.

102 年 02 月 04 日收稿

102 年 02 月 22 日修改

102 年 02 月 27 日接受

水土保持學報 45 (2): 599 – 616 (2013)

Journal of Soil and Water Conservation, 45 (2): 599 – 616 (2013)

