

## 以有限資料建立土壤轉換函數推估 坡耕地之總體密度

### Estimating a Pedotransfer Function for Predicting Soil Bulk Density of Rural Sloplands by Using Limit Dataset

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  
助理教授

李明熹

Ming-Hsi Lee

國立屏東科技大學  
水土保持系  
碩士班研究生

劉睿呈

Ruei-Cheng Liou

#### 摘要

總體密度(bulk density, Bd)為一重要之土壤物理性質，它可直接影響土壤孔隙度、有效水分含量及水力傳導度並間接影響作物生長。總體密度因現地採樣耗時，通常較難於野外測定獲得，因而該性質於土壤資料庫中常付之闕如。本研究於台灣南部具相同母質來源之老埤臺地上，以網格法(間距為 250 公尺)採集 165 個表土(0-20 公分)土樣。本研究目的在於以較易於野外判定或室內分析獲得之土壤特性，如：土地利用類型、pH、土壤有機質含量、質地、鹽基含量、游離鐵含量等性質，以逐步回歸方式建立一適合台灣地區高度風化之坡耕地下，可準確預測 Bd 之土壤轉換函數(pedotransfer function, PTF)。研究結果顯示，pH、黏粒與土壤有機質為影響研究區域內 Bd 之主要性質，約可解釋 30%之變異。本研究所建立預測 Bd 之 PTF 為  $Bd = 0.875 + 0.073 \text{ pH} + 0.002 \text{ Clay} - 0.065 \ln(\text{SOM})$ ， $R^2$  為 0.30。此外，本研究於研究區域內另採集 59 個土樣，實際測定 Bd，以驗證所建立之 PTF 準確度；結果顯示該 PTF 平均預測誤差 (mean prediction error, MPE)及均方根誤差(root mean square prediction error, RMSPE)分別為-0.02 及 0.13，顯示此 PTF 可準確預測研究區域內之 Bd。

**關鍵詞：**總體密度，土壤轉換函數(PTF)，土地利用。

#### ABSTRACT

Bulk density (Bd) is an important soil property to be considered to directly affect

\*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

soil porosity, available water content and water conductivity in determining crop productivity. Due to time-consuming sampling procedure *in-situ*, Bd is usually absence in soil database. This study aims to establish a pedotransfer function (PTF) to predict Bd for highly weathered rural soils at Laopi terrace, southern Taiwan. One hundred and sixty five surface soils (0-20 cm) were collected at the terrace, and then were separated into 2 data sets. Data set 1 (n=106) was used for PTF establishment, and the data set 2 (n=59) was used for validation. Soil properties easily obtained *in-situ* or from indoor analysis, such as land uses, pH, soil organic matter (SOM), texture, base contents, and free Fe contents etc. were used to establish the PTF in this study. The stepwise regression was selected in this study to establish the PTF. The results indicated that pH, clay fraction and SOM are major factors to influence Bd at the terrace, and they compose a PTF to well predict Bd as follows:  $Bd = 0.875 + 0.073pH + 0.002Clay - 0.065\ln(SOM)$ . This PTF's  $R^2$  is 0.30. Regarding validation of this PTF, the data set 2 was used to fit the PTF to validate the predictive quality. Mean prediction error (MPE) and root mean square prediction error (RMSPE) are -0.02 and 0.13, respectively, implicating this PTF could well predict Bd at this terrace.

**Keywords:** Bulk density, Pedotransfer function, Land uses.

## 一、緒 論

總體密度(bulk density, Bd)已被認為可直接影響土壤孔隙、土壤水分有效性與水力傳導度(Dam *et al.* 2005)，並間接影響植物根系生長之重要土壤物理性質；此外，總體密度亦常被運用來估算土壤養分通量、土壤碳庫或土壤流失量的體積及重量之轉換因子(王建昇等，2012；Jien and Wang, 2013; Hseu *et al.*, 2014)。林明毅(2011)提出 Bd 可作為土壤轉換函數 (pedotransfer function, PTF)的重要參數之一，可利用 Bd、田間含水量、有機質、砂粒和黏粒建立一預測有效水分含量的土壤轉換函數。

測定土壤總體密度過程中，於野外採樣乃使用土環法(soil core method)採集土柱，並攜回實驗室測定總體密度。現地利用定體積不銹鋼管採取土柱時，常受到土壤中礫石或樹根而產生測定誤差(Huntington *et al.* 1989; Rawls 1983)。於林地或坡地土壤中，因礫石與樹根含量多，故測定之 Bd 值變異高，因而採樣重複數須至少高於 5 重複以

上(De Vos *et al.* 2005; Prévost 2004; Terry *et al.* 1981)，導致 Bd 的量測通常相當費時且不符經濟效益(Benites *et al.* 2007; Heuscher *et al.* 2005)，因而常被忽略而導致資料付之闕如。

有鑑於上述之測定 Bd 的困難與限制，加上該參數的重要與日俱增，許多學者開始建立 PTF 以推估 Bd 值之研究，並推估該值所涉及的幾種土壤參數，如：土壤有機質、土壤質地、土壤構造、土層深度和土壤含水量(Adams 1973; Rawls 1983)。除上述幾種土壤參數之外，仍有學者嘗試以不同的土壤物理或化學性質為參數建立 Bd 之土壤轉換函數，Bernoux *et al.* (1998)採用多元逐步回歸(Stepwise regression)的過程表明，黏粒含量，有機碳和 pH 為他們研究區域內最合適預測 Bd 之土壤參數。Jalabert *et al.* (2010)利用法國 1,279 個土壤樣品，並以一般增強回歸模式(Generalized Boosted Regression Modelling, GBM)的方法，評估以 3 個和 10 個土壤性質作為 PTF 的參數來評估總體密度預測準確度，結果顯示以多參數建立的 PTF 具有較佳之  $R^2$  值( $R^2 = 0.86$ )，

且主要影響 Bd 的土壤參數為有機碳含量 (SOC)、樹種、礫石含量、母岩和土壤深度。Brahim *et al.* (2012)利用 SOC、砂粒、坩粒和 pH 建立表土(<40 cm)之 PTF 模型；利用 SOC、黏粒和土壤碳酸鈣(CaCO<sub>3</sub>)含量建立底土(>40 cm)之 PTF 模型。

建立 PTF 所需之土壤參數因各地氣候、地質條件、土壤類型及農業管理方式不同下，將會反應出具區域專一性之 PTF (Martin *et al.* 2009)。Ghehi *et al.* (2012)指出，當研究區域具均質之土壤類型、物化性質及地貌變化，則將相當適合做為建立 PTF 之區域；而本研究區域則相當符合 Ghehi *et al.* (2012)的說明，位於台灣南部之老埤台地上的土壤皆為洪積母質紅壤，地勢緩和，面積約 300 公頃，因此可作為相當適合建立 PTF 之研究區域。綜上所述，加上台灣目前於土壤資料庫中 Bd 值因現地採樣耗時且繁雜之限制，使其數據資料常付之闕如，因此本研究於具均質土壤性質且地貌緩和之老埤臺地上，嘗試建立一於紅壤坡耕地下可預測 Bd 之 PTF，未來或可提供農業管理策略之參考。

## 二、研究材料與方法

### 2.1 研究地區概況

本研究區位於台灣南部之老埤台地，面積約 1160 頃，海拔高程介於 50 m-160 m，地形地勢由東向西減緩。台地上土地利用類型主要以農業用地為大宗，其次為林業用地。老埤台地屬於現代沖積層上方之第四紀更新世山麓台地堆積層，區內以礫石層為主，其中雜了砂質、坩砂質頁岩及少數矽質頁岩(林朝榮, 1963)。就土壤分類而言，全區土壤為高風化程度的典型老育濕潤極育土 (Typic Paleudults) (Soil Survey Staff, 2014)，該類型土壤佔台地 80%以上面積，土壤剖面質地以砂質粘壤土及壤土為主，土壤顏色多數呈棕色至紅棕色之間；而土壤反應大多呈強酸反應(pH < 4.4)，表面有機質含量約在 2%-3%左右(黃國禎等, 2009)。依據中央氣象局氣象統計年報(2001 年至 2011 年)國立屏東科技大學教學氣象站氣候觀測資料，平頂山台地年平均雨量為 2,900 mm

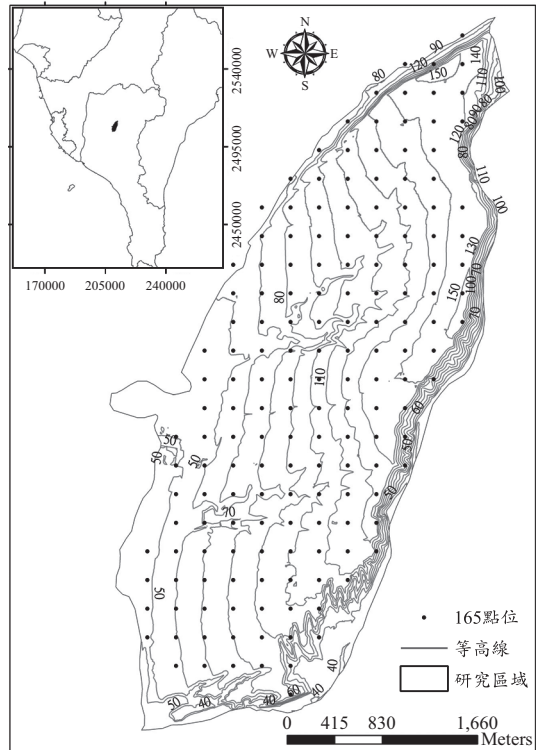


圖 1 研究區域與採樣點位置

左右、年平均氣溫約 24°C 左右，而年平均濕度為 79%，乾溼季明顯，屬熱帶型季風氣候。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 土壤樣品採集與測定

本研究於研究區域以網格方式，等距 250 m 採取一表土(0-20 cm)土壤樣品(圖 1)，並同時調查該區之土地利用方式，總計採取 165 個土壤樣品，採集樣品時先去除地表枯枝落葉和雜物，採取表土並以四分法採取土樣採集土樣經風乾、磨碎及過篩(< 2 mm)後，其土壤基本性質分析方法如下：總體密度使用土環法(Blake and Bauder, 1986)，取一固定體積之金屬環採取土樣，將其烘乾秤重即可得總體密度。土壤質地分析以吸管法(Gee and Bauder, 1986)測定其砂粒、坩粒與黏粒含量。以 Walkley-Black 濕式氧化法(Nelson and Sommers, 1982)測定土壤有機碳(SOM)。玻璃電極法(McLean, 1982) (土水比=1:2)測定土壤

表 1 研究區域土壤性質之描述性統計(n = 106)

Items	Bd	Sand	Silt	Clay	pH	SOM	Ca	Mg	CEC	BSP	Fe <sub>d</sub>
	Mg/m <sup>3</sup>	-----%-----				%	-----cmol(+)/kg-----			%	g/kg
平均數	1.24	22.2	26.2	51.5	4.66	2.31	1.45	0.11	12.4	32.9	22.9
中位數	1.23	22.0	26.0	54.0	4.40	2.17	0.79	0.06	10.6	25.9	23.4
標準偏差	0.13	14.1	8.92	16.4	0.88	1.13	1.59	0.14	5.80	21.7	7.73
最小值	0.97	1.00	1.00	14.0	3.30	0.01	0.04	0.01	0.01	7.87	0.01
最大值	1.57	53.0	67.0	84.0	7.70	7.04	7.76	0.61	33.2	98.6	37.4
變異係數	10.0	64.0	34.0	32.0	19.0	49.0	110	127	47.0	66.0	34.0

Bd: bulk density; SOM: soil organic matter; CEC: cation exchange capacity; BSP: base saturation percentage; Fe<sub>d</sub>: free iron contents.

反應。交換性陽離子容量使用中性醋酸銨法 (pH = 7) (Rhoades, 1982)。以 Dithionite-Citrate-Bicarbonate 複合溶液萃取法(Mehra and Jackson, 1960)測定游離態鐵含量。

### 2.2.2 土壤轉換函數建立與驗證

本試驗以多重線性迴歸(multiple linear regression, MLR)中之逐步回歸(stepwise regression)作為 PTF 建立之方法。在選定回歸變數時，逐一選擇輸入土壤性質作為變數進入模式，並排除不適合之變數。本研究選擇之土壤變數有 pH、砂粒、粉粒、黏粒、SOM、鈣及鎂離子、陽離子交換容量(cation exchange capacity, CEC)、鹽基飽和度(base saturation percentage, BSP)及游離鐵(free iron, Fe<sub>d</sub>)含量等土壤基本性質，並使用 SPSS (SPSS 21th version, IBM, USA)軟體進行數據分析與變數轉換。此外，為避免多重共線性(Multicollinearity)問題，本研究利用逐步回歸法建立一適用之模型，去除共線性之變數，僅採用適合變數建立 PTF。

### 2.2.3 土壤轉換函數驗證

本研究同時僅採用 165 個土樣中之 106 個土樣資料作為建立 PTF 之資料，剩餘的 59 個土樣資料則用於驗證所建立之 PTF。回歸模型使用判定係數(R<sup>2</sup>)、平均預測誤差(mean prediction error, MPE) 和均方根預測誤差(root mean squared prediction error, RMSPE)等方式作為驗證和評估 PTF 準確度，其公式如下：

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y) \dots\dots\dots(1)$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y)^2} \dots\dots\dots(2)$$

其中  $\hat{y}$  和  $y$  分別是 BD 的預測值和實際值， $n$  是觀測值的總數。R<sup>2</sup> 值表示實測值的和預測值之間的相關性。一個合適的預測方程式，其中 MPE 應盡量趨近於 0，而 RMSPE 值介於 10-20%之間屬模式尚可接受之誤差範圍，10%以下則表示模式可準確預測土壤性質。

## 三、結果與討論

### 3.1 研究區域土壤性質

老埤台地上土壤由於母岩相同，均為洪積母質紅壤，且台地坡度平緩，介於 5-10%，因此土壤性質上具同質性(homogeneity)。Ghehi *et al.* (2012)指出，當研究區域具相近之土壤類型、均質之土壤物化性質及緩和的地貌變化時，則該區域可適合用於 PTF 之建立。因此本研究期望於老埤台地上已相對容易獲得之土壤性質資料建立一土壤轉換函數以推估 Bd。本研究於區域內所選取 106 個表土性質如表 1 所示，土壤質地介於壤土與粉質黏土之間；土壤反應為中性至強酸性；SOM 含量皆低於 2.5%，屬低有機質含量；CEC 與 BSP 因土壤高度風化之故，故值皆偏低，而游離鐵含量則因紅壤緣故，含量較其餘類型土壤高。此外，結果發現，雖台地上土壤性質具同質性，但仍存在變異，如：Bd、質地、pH 及 Fe<sub>d</sub> 屬低度變異，SOM 含量、CEC 及 BSP 屬中度變異，而 Ca 及 Mg 含量則屬高度變異。結果顯示

表 2 不同土地利用下之土壤性質

Landuses	Bd	Sand	Silt	Clay	pH	SOM	Ca	Mg	CEC	BSP	Fe <sub>d</sub>
Bamboo (n = 5)	1.16b (0.11)*	17.2a (10.8)	33.2a (8.58)	49.6a (12.1)	4.88ab (0.78)	3.49a (2.06)	1.72a (2.08)	0.23a (0.28)	10.1a (1.68)	37.7a (32.2)	15.9a (9.73)
Banana (n = 11)	1.22ab (0.12)	26.6a (13.9)	27.6ab (6.99)	45.8a (17.4)	4.38bc (0.31)	2.37b (1.18)	1.72a (1.43)	0.14ab (0.17)	10.4a (1.66)	33.9a (16.5)	24.2b (6.95)
Grass (n = 6)	1.28a (0.07)	23.0a (11.1)	28.0ab (8.12)	49.0a (12.3)	4.87ab (0.83)	2.07b (0.32)	1.62a (1.37)	0.21a (0.21)	12.3a (4.42)	34.6a (19.3)	23.0b (9.83)
Pineapple (n = 54)	1.18ab (0.11)	22.2a (14.1)	25.8ab (7.61)	52.0a (16.9)	4.05c (0.40)	2.26b (0.70)	0.75a (1.08)	0.05b (0.08)	10.8a (3.66)	24.0a (14.7)	24.7b (6.12)
Forest (n = 30)	1.25ab (0.11)	25.8a (12.5)	25.1ab (6.93)	49.1a (15.7)	4.96a (0.82)	2.33b (0.94)	1.38a (1.4)	0.19a (0.1)	12.7a (6.07)	35.6a (22.4)	22.5b (5.52)

Bd: bulk density; SOM: soil organic matter; CEC: cation exchange capacity; BSP: base saturation percentage;

Fe<sub>d</sub>: free iron contents.

\*: Standard deviation.

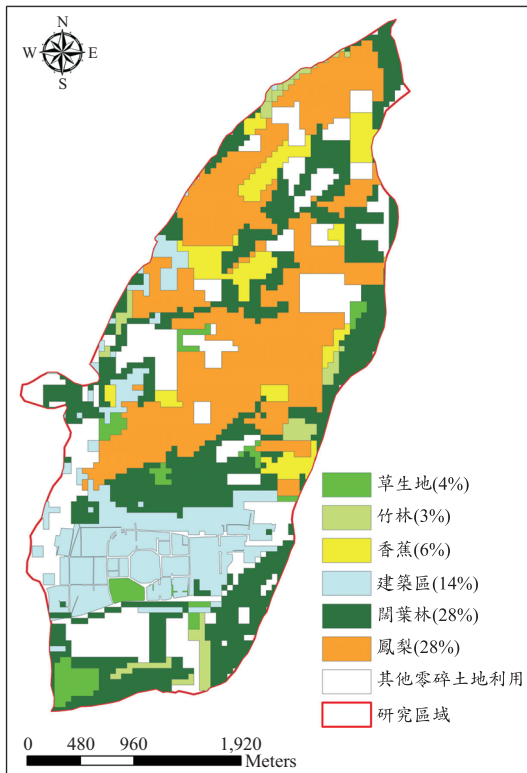


圖 2 研究區域內之不同土地利用類別及面積(括弧內)

台地上不同土地利用可能對某些土壤性質產生影響，而造成區域異質性(heterogeneity) (吳文斌等, 2007)，又或在相同土地利用方式下，不同的

耕作制度和田間管理措施(灌溉或施肥種類與施用率)，而造成表土土壤性質之變異程度增加。有鑑於此，本研究最後亦會將「土地利用方式」作為建立 Bd 預測 PTF 的變數之一，並討論其與 PTF 之關聯性。

就土地利用而言，圖 2 顯示鳳梨田與闊葉林為研究區域中主要土地利用種類，分別佔研究區域面積之 28%及 22%，而香蕉用地則佔研究區域約 6%，草地約佔 4%，竹林地約佔 4%。圖 3 顯示各土地利用類別下土壤性質之差異，竹林地與鳳梨田之 Bd 顯著較其他土地利用類別低( $p < 0.05$ )，此應為竹林地皆於台地崖或坡度較高之位置，土壤因崩塌等原因土壤擾動而造成較低之 Bd 值，此現象亦可解釋游離鐵含量(Fe<sub>d</sub>)於竹林地接顯著較低( $p < 0.05$ )之原因，主要為土壤化育程度因坍塌或泥沙遞移現象而相對較其他區域之紅壤弱。其餘土壤性質，如 pH 與 BSP 部分，則以香蕉地與鳳梨田土壤有較低之趨勢，應為施肥(降低 pH)與耕犁(養分流失)所致。有機質含量方面，除竹林地顯著較其餘土地利用高( $p < 0.05$ )之外，其餘土地利用皆屬於 SOM 含量缺乏的等級，反映出亞熱帶/熱帶氣候加速有機質礦化的現象。

此外，由圖 3 及表 2 可得知，因土地利用改變而造成顯著變化之土壤性質有 Bd、pH、SOM 含量、Ca 及 Mg 含量與 Fe<sub>d</sub> 含量；此亦表示此些土壤性質的變化可能間接導致 Bd 改變，因此本

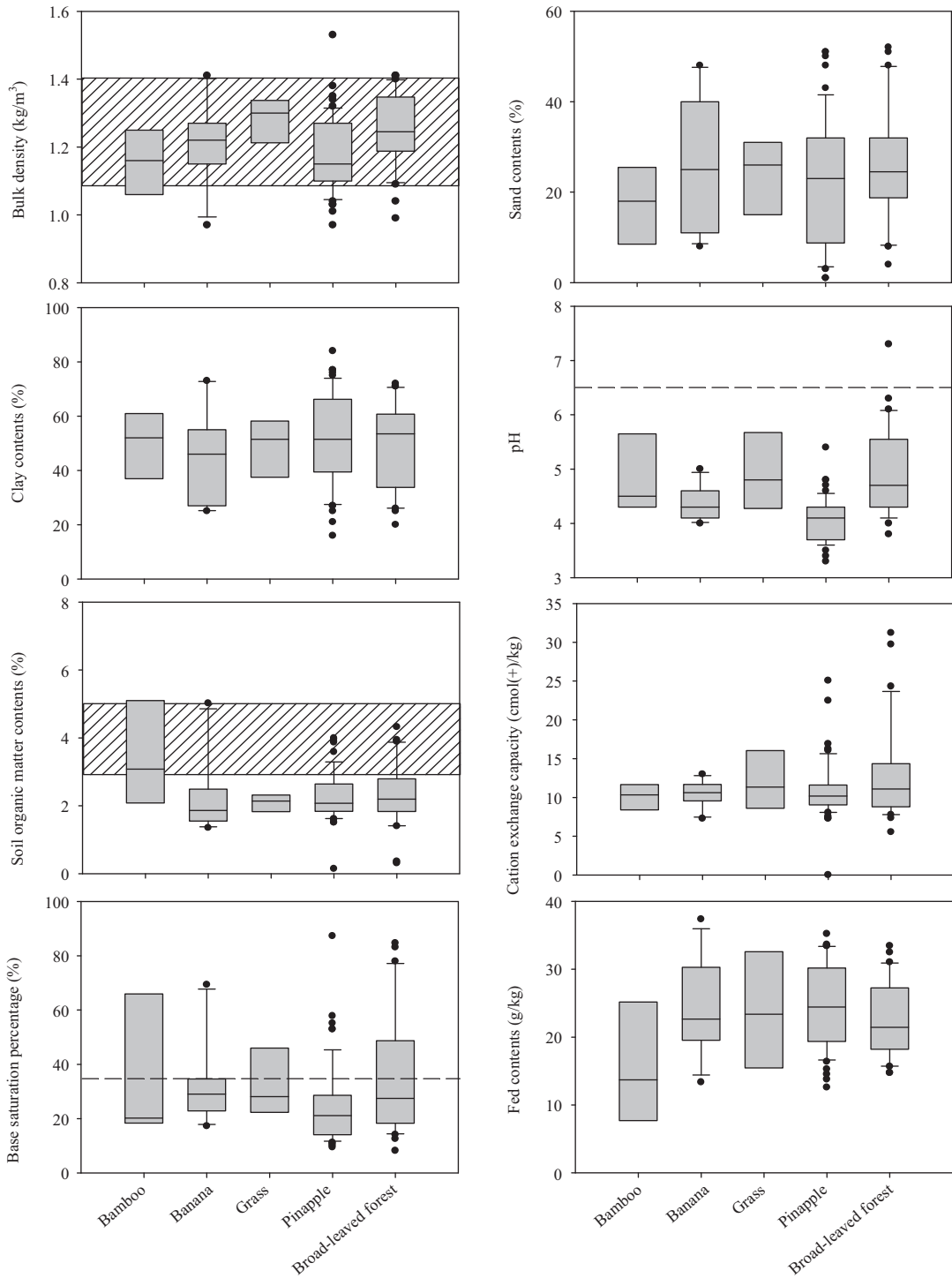


圖 3 不同土地利用下之土壤性質盒形圖。其中 Bd 與 SOM 陰影部分為一般農地正常含量範圍，Bd 為 1.0-1.3 kg/m<sup>3</sup>；SOC 為 3%-5%。pH 圖虛線為 6.5 處，pH 6.5 以下為酸性土壤；BSP 圖虛線為 BSP = 35%，35%以下為鹽基含量缺乏。

表 3 各土壤性質之 Pearson 相關係數(n= 106)

	Bd	Sand	Silt	Clay	pH	SOM	Ca	Mg	CEC	BSP	Clt	Fe <sub>d</sub>
Bd	1.00											
Sand	<b>-0.20*</b>	1.00										
Silt	<b>-0.21*</b>	0.12	1.00									
Clay	<b>0.26**</b>	<b>-0.89**</b>	<b>-0.57**</b>	1.00								
pH	<b>0.37**</b>	0.07	0.03	-0.07	1.00							
SOM	<b>-0.25**</b>	-0.10	0.04	0.06	-0.05	1.00						
Ca	<b>0.27**</b>	0.04	-0.02	-0.02	<b>0.56**</b>	-0.09	1.00					
Mg	<b>0.26**</b>	0.05	0.04	-0.06	<b>0.46**</b>	-0.06	<b>0.71**</b>	1.00				
CEC	0.12	-0.02	-0.01	0.02	<b>0.24*</b>	-0.02	<b>0.24*</b>	<b>0.24*</b>	1.00			
BSP	<b>0.24*</b>	0.01	0.03	-0.02	<b>0.44**</b>	-0.07	<b>0.70**</b>	<b>0.49**</b>	-0.06	1.00		
Clt	<b>-0.26**</b>	0.07	0.04	-0.08	<b>0.58**</b>	0.08	<b>0.26**</b>	<b>0.29**</b>	0.15	<b>0.29**</b>	1.00	
Fe <sub>d</sub>	0.10	<b>-0.32**</b>	<b>-0.23*</b>	<b>0.37**</b>	<b>-0.32**</b>	<b>0.19*</b>	<b>-0.27**</b>	<b>-0.30**</b>	-0.06	-0.16	<b>-0.21*</b>	1.00

Bd: bulk density; SOM: soil organic matter; CEC: cation exchange capacities; BSP: base saturation percentage; Clt: cultivation.

\*:  $p < 0.05$ ; \*\*:  $p < 0.01$

研究建議這些土壤性質皆可選入作為預測 Bd 之 PTF 變數。Jalabert *et al.* (2010)將「土地利用」此一非量化變數(nominal descriptors)作為建立 PTF 之變數之一，同時加入植被種類及母岩種類此二非量化變數，結果可顯著提升預測模式之準確度， $R^2$  由 0.45 增加至 0.67。

除土地利用而影響之土壤性質之外，本研究選擇為變數之土壤性質尚包括有砂粒、粉粒、黏粒、CEC 及 BSP 等土壤性質。選擇這些變數之依據乃參考自前人研究；例如：Bernoux *et al.* (2002)為計算土壤碳庫，而嘗試建立一當地預測 Bd 之 PTF，並提出 pH、黏粒含量及 SOC 含量為 PTF 中最為重要之變數。Benites *et al.* (2007)於巴西農田土壤收集超過 1500 個土壤樣品，嘗試建立預測 Bd 之 PTF，結果發現以 SOC、黏粒及鹽基含量為該 PTF 的最重要因子，可解釋 60%以上之 Bd 預測變異。此外，Benites *et al.* (2007)亦提出，於高度風化土壤中，如 PTF 中可加入氧化鐵含量作為變數之一，可提升預測模式之  $R^2$  值。Sequeira *et al.* (2014)以美國農部的約 20,000 筆資料，嘗試預測土壤 Bd 值，他們認為土壤質地，亦即砂粒、粉粒及黏粒含量，應該作為預測 Bd 最重要的變數，因為該變數為土壤資料庫中最常

見且容易分析獲得之土壤資料。除一般常見之土壤物理化學資料以外，一些次要變數也常被納入 PTF 的變數，例如：母岩種類、土層深度、土地利用及植被覆蓋等變數(Martin *et al.*, 2009; Jalabert *et al.*, 2010)，但能解釋的變異皆低於 10%。

### 3.2 本研究區域預測 Bd 之 PTF 建立

為建立台灣南部高風化坡耕地土壤的總體密度之轉換函數(PTF)，本研究主要以複回歸中的逐步回歸作分析，選進之變數(土壤性質)須盡量與 Bd 具有顯著之相關性。各土壤變數間之相關係數(Pearson's coefficient,  $p < 0.05$ )顯示於表 3，表中指出可選進之變數為砂粒、粉粒、黏粒、pH、土壤有機質含量、鈣及鎂含量、鹽基飽和度及土地利用方式(本研究以“每年耕犁次數”量化此變數)。其中以 pH 與 Bd 相關係數最高，達 0.37 ( $p < 0.01$ )，其次為鈣、鎂、黏粒含量及耕犁次數(土地利用) (0.25-0.27,  $p < 0.01$ )，最後以土壤有機質含量(-0.25,  $p < 0.01$ )與鹽基飽和度(0.24,  $p < 0.05$ )。其中，鈣、鎂、黏粒與有機質皆為聚合土壤顆粒間之重要膠結物質，間接影響土壤總體密度；而耕犁次數更是直接影響土壤 Bd，耕犁越頻繁，Bd 越低。

表 4 本研究於逐步回歸下建立之模式

Model	PTF	Adjusted R <sup>2</sup>	變數	Beta (β)	解釋變異量	VIF	條件指數
m1	Bd = 0.941 + 0.06 pH	0.13	pH	0.37	0.14	1.000	12.6
m2	Bd = 0.875 + 0.064 pH + 0.002 Clay	0.21	pH	0.40	0.14	1.005	6.45
			Clay	0.29	0.09	1.005	16.2
m3	Bd = 0.875 + 0.073 pH + 0.001 Clay - 0.065 ln (SOM)	0.30	pH	0.40	0.14	1.005	3.95
			Clay	0.28	0.09	1.008	7.39
			ln (SOM)	-0.27	0.07	1.003	18.4

表 5 各土壤轉換函數之驗證指標

Model	PTF	n	MPE	RMSPE
A	Bd = 1.524 - 0.0046(Clay%) - 0.051 (OC%) - 0.0045 (pH <sub>water</sub> ) + 0.001 (Sand%)	165	-0.15	1.97
B	Bd = 1.578 - 0.054(OC%) - 0.006 (Silt%) - 0.004 (Clay%)	165	-0.24	3.08
C	Bd = 1.5597 - 0.0004 Clay - 0.0077 OC - 0.0004 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	165	-0.02	0.20
m3	<b>Bd = 0.875 + 0.064 pH + 0.002 Clay - 0.065 ln (SOM%)</b>	<b>59</b>	<b>-0.02</b>	<b>0.13</b>
		<b>165</b>	<b>0.00</b>	<b>0.06</b>

Model A was established by Bernoux *et al.* (1998); model B was established by Tomasella and Hodnett (1998); model C was established by Benites *et al.* (2007); model m3 was established in this study. MPE: mean prediction error; RMSPE: root mean square prediction error.

根據表 3，將與 Bd 具顯著相關變數皆選進逐步回歸分析，同時分析過程排除 2.5 倍標準偏差之離群值(outliers)，且檢定各變數之共線性(multicollinearity)，以排除高度相關性之兩變數被同時選進模式。共線性診斷為當變數之 variance inflation factor (VIF) > 10 或條件指數>30，則該變數則由模式中排除。逐步回歸結果如表 4 所示，共線性檢定已去除不適合之變數，包含：砂粒、坩粒、鈣及鎂含量、鹽基飽和度、耕犁次數與游離鐵含量，故逐步回歸過程僅選進了三個變數(pH、clay 及 SOM)，同時依該些變數建議三個適用模式(表 4)。其中，以第三個變數之 R<sup>2</sup> 最佳，可達 0.30，故本研究推薦第三模式(m3)為本研究區域之最佳預測 Bd 之 PTF，模式如下所示：

$$Bd = 0.875 + 0.073 \times pH + 0.001 \times Clay - 0.065 \times \ln(SOM) \dots\dots(3)$$

其中，表 4 顯示如單以 pH 作為變數，無法有效預測 Bd (m1 model)，pH 僅能解釋 Bd 約 14% 的變異，雖然 pH 與預測之 Bd 具有良好相關性(beta

值 = 0.37)。模式 m2 雖加入黏粒之變數，然而仍無法有效預測 Bd，調整後之 R<sup>2</sup> 僅有 0.21，且 pH 與黏粒亦僅能解釋 Bd 約 21% 的變異。模式 m2 加入之黏粒變數，仍與 Bd 具有良好之相關性(β 值 = 0.29)。表 5 中模式 m3，除 pH 與黏粒之外，亦加入了 ln (SOM) 的變數，其與 Bd 亦具有良好之相關性(β 值 = -0.27)；而 ln (SOM) 的加入，提高了 R<sup>2</sup> 值至 0.30。以目前有限資料庫(n = 165)來看，模式 m3 已屬可有效預測 Bd 之 PTF。本研究建立之 PTF 與 Bernoux *et al.* (1998) 結果相符合，他們於巴西亞馬遜區域，利用 323 個點位資料，建立一預測當地 Bd 之 PTF，其中土壤變數包括黏粒含量、總有機碳含量、pH 及砂粒含量，而該 4 個變數即可解釋 Bd 約 56% 之變異。

### 3.3 本研究預測模式與其它熱帶地區模式之比較及其驗證

本研究選取了其他熱帶地區耕地土壤之 Bd 預測 PTF，以本研究之土壤資料代入各地區之 PTF 中，並評估模式對本研究區域 Bd 預測之準



確度。各模式之準確度乃以平均預測誤差(mean prediction error, MPE)及均方根誤差(root mean square prediction error, RMSPE)來做評估。本研究之模式 A 為參考 Bernoux *et al.* (1998)於巴西亞馬遜盆地中採集 323 個土層作為建立預測 Bd 之 PTF，其中盆地上超過 70%以上之土壤類型為淋溶土(Alfisol)、極育土(Ultisol)及氧化物土(Oxisol)。土壤質地多為粉質黏土及黏土，而該研究與本研究於老埤台地上所採集之土壤(極育土及氧化物土)相當類似。本研究參考之 B 模式為 Tomasella and Hodnett (1998)於亞馬遜流域周遭採取 614 個土壤層次作為建立預測 Bd 之樣點。其中 Tomasella and Hodnett (1998)所分析之區域中，土壤種類多，且其中所採用的 614 個土層之土壤質地範圍較廣，質地範圍為砂質土至黏土。表 5 中之 C 模式，為 Benites *et al.* (2007)於巴西里約的農業研究中心土壤資料庫中選取 363 個土壤剖面，共 1,002 個土層，並使之建立 Bd 之 PTF；其中包含 13 種土壤類型，主要為極育土與氧化物土佔所有調查土壤約 60%。值得一提的是，C 模式主要乃依據極育土與氧化物兩種土壤類型的資料建立而成。

將本研究共 165 點土壤資料套入以上 A、B 及 C 模式中，顯示模式 A、B 及 C 之 MPE 為-0.02 至-0.24 之間(表 5)，負值顯示模式 A、B 及 C 皆會低估本研究區域之 Bd 值。表 5 同時顯示出套用模式 A 及 B 的 RMSPE 分別為 1.97 和 3.08，顯示模式 A 及 B 無法準確預估本研究區域之土壤 Bd 值。A 模式不適用於本研究區域之原因可能在於 A 模式主要針對單一土地利用類別(林地)而建立，而本研究土壤則具複雜之土地利用類別。Jalabert *et al.* (2010)曾提出，土地利用方式可解釋至少 3%以上 Bd 之變異，因而地區內不同土地利用方式將影響 PTF 之適用度。模式 B 不適用於老埤台地上之原因可能在於建立 B 模式之土壤的母質與質地分布範圍過廣(砂土至黏土皆有)，以至於模式 B 於本研究區之適用性最低。Jalabert *et al.* (2010)亦提出，母質種類可解釋 Bd 至少 20%以上之變異，而質地則至少可解釋 5%

以上之變異。

根據表 5 結果，模式 C 對於本研究區域之 Bd 預測將較具準確度(MPE = -0.02，RMSPE = 0.20)。主要原因可能在於 Benites *et al.* (2007)所使用之土壤類型與質地，皆與本研究相近；同時，該研究主要亦選擇農地土壤作為建立模式的依據，因此可能較適用於本研究區域。然而，Benites *et al.* (2007)研究區域之熱帶雨林氣候與本研究區之熱帶季風氣候仍將使得模式 C 無法完全適用於老埤台地上(圖 4)。

故為驗證本研究回歸出之 PTF 準確性，我們利用研究區域中 165 點土壤資料中之 59 個土壤資料來驗證 m3 模式之準確度；同時，亦將 165 點全數套入 m3 模式中，評估 MPE 及 RMSPE。驗證結果如表 5 所示，當套入 59 點土壤資料(驗證組)於模式 m3 中之 MPE 為-0.02，表示 m3 模式所推估之 Bd 值仍有些微低估的情形，但相較於其它地區之 PTF(模式 A、B 及 C)，預測準確度已優於該些模式。於 RMSPE 部分，一般於 PTF 的研究中，若推估之 Bd 值與實測值的 RMSPE 介於 10%到 20%間是可以接受的，於需要精準估算 Bd 值的研究中，其 PTF 所推估出之 Bd 值的 RMSPE 值須小於 10%(De Vos *et al.* 2005)，而本研究 m3 模式之 RMSPE 為 13%，屬可接受之誤差範圍，預測準確度亦較其它地區模式優異。倘若將 165 點土壤資料全數套入模式 m3，MPE 及 RMSPE 分別為 0.00 及 6%，更進一步顯示，模式 m3 可準確預測本研究區域坡耕地土壤之 Bd 值。

圖 4 進一步顯示模式 A、B、C 及 m3 的 Bd 估測值與實測值之散佈圖。可更了解實際推估本研究區域內 Bd 之情形，模式 A 和 B 大部份的點分佈在 1:1 斜線的下半部，尤其在模式 B 的部分，顯示以上兩模式之推估有嚴重低估之情形。模式 C 雖然點位分佈較 A 及 B 模式佳，但由圖中發現，仍有少數點位有低估之情形。模式 A、B 及 C 的低估現象，於本研究建立之 m3 模式則不復見，顯示 m3 模式相較於其它熱帶地區所建立之預測模式，仍較適合台灣當地之現況。

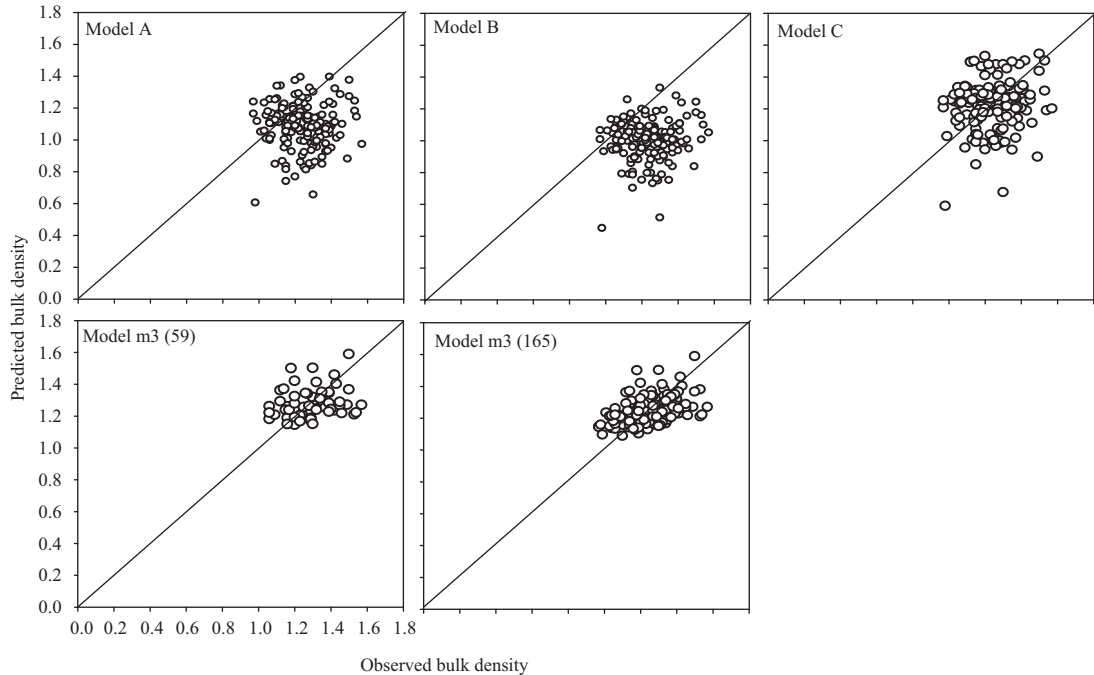


圖 4 由土壤轉換函數推估之 Bd 值與實測 Bd 值之線性關係

#### 四、結 論

本研究利用逐步回歸分析建立適用於台灣南部高風化土壤之總體密度(Bd)的土壤轉換函數(PTF)。本研究建立之「m3」預測模式中最重要之變數為 pH、黏粒(clay)及土壤有機質(SOM)含量，而此三種土壤性質可解釋研究區域內 Bd 值 30%以上之變異。相較於其他亞熱帶/熱帶地區之預測 Bd 的 PTF，本研究 m3 模式的決定係 ( $R^2$  值)雖僅為 0.30，但在交叉驗證下(cross validation)，平均預測誤差(MPE)及均方根誤差(RMSPE)仍顯示 m3 模式可準確預估研究區域之 Bd 值。未來仍建議須增加土壤樣品數，且進一步調查研究區之“植被種類”或“其他農田管理方式”，並將其加入作為建立 PTF 之變數，或可更為提升台灣當地坡耕地預測 Bd 之 PTF 的精確度與地區適用性。

#### 謝 誌

本研究感謝行政院科技部給予經費支持，計畫補助編號為 MOST-103-2313-B-020-007-MY2。

#### 參考文獻

1. 王建昇，「不同土地利用對平頂山台地上土壤性質與土壤流失量之影響」，國立屏東科技大學水土保持學系碩士論文，2012。
2. 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，15(1&2)，63-76，2012。
3. 吳文斌，楊鵬，唐華俊，Luca, O., and Ryosuke, S。「土地利用對土壤性質影響的區域差異研究」，中國農業科學，40(8)，1697-1702，2007。
4. 林明毅，「土壤轉換函數應用於水分特性曲線之研究」，國立中興大學水土保持學系碩士論文，2011。
5. 林朝榮，台灣之第四紀(上)(下)。臺灣文獻，14(1,2)，1-92，1963。
6. 黃國禎，江介倫，邱宏彬，黃彥凱，黃 瑩，「老埤台地不同植生下土壤理化性質之研究」，作物、環境與生物資訊，6(1)，51-60，2009。
7. 簡士濠，江介倫，王建昇，張岸睿，「添加

- 生物炭對酸性紅壤肥力之影響」，農業工程學報，58(4)，15-22，2012。
8. 簡士濠，陳文棋，「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」，農業工程學報，60(4)，61-71，2014。
  9. Adams, W.A., "The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils." *Journal of Soil Science*, 24(1), 10-17, 1973.
  10. Benites, V.M., Machado, P.L.O.A., Fidalgo, E.C.C., Coelho, M.R., and Madari, B.E., "Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil." *Geoderma*, 139(1-2), 90-97, 2007.
  11. Bernoux, M., Cerri, C., Arrouays, D., Jolivet, C., and Volkoff, B., "Bulk Densities of Brazilian Amazon Soils Related to Other Soil Properties." *Soil Science Society of America Journal*, 62(3), 743-749, 1998.
  12. Blake, G.R., and Hartge, K.H., "Methods of soil analysis, Part 1, Physical and mineralogical methods: Agronomy monograph." ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA, (9), 363-375, 1986.
  13. Brahim, N., Bernoux, M., and Gallali, T., "Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case." *Journal of Arid Environments*, 81, 77-83, 2012.
  14. Dam, R.F., Mehdi, B.B., Burgess, M.S.E., Madramootoo, C.A., Mehuys, G.R., and Callum, I.R., "Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada." *Soil and Tillage Research*, 84(1), 41-53, 2005.
  15. De Vos, B., Van Meirvenne, M., Quataert, P., Deckers, J., and Muys, B. "Predictive Quality of Pedotransfer Functions for Estimating Bulk Density of Forest Soils." *Soil Science Society of America Journal*, 69(2), 500-510, 2005.
  16. Gee, G.W., Bauder, J.W., Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods: Agronomy monograph ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA, (9), 383-411, 1986.
  17. Gharahi Ghehi, N., Nemes, A., Verdoodt, A., Van Ranst, E., Cornelis, W.M., Boeckx, P., "Nonparametric Techniques for Predicting Soil Bulk Density of Tropical Rainforest Topsoils in Rwanda" *Soil Science Society of America Journal*, 76, 1172-1183, 2012.
  18. Heuscher, S.A., Brandt, C.C., and Jardine, P.M., "Using Soil Physical and Chemical Properties to Estimate Bulk Density." *Soil Science Society of America Journal*, 69(1), 51-56, 2005.
  19. Huntington, T.G., Johnson, C.E., Johnson, A.H., Siccama, T.G., and Ryan, D.F., "Carbon, organic matter, and bulk density relationships in a forested spodosol." *Soil Science*, 148(5), 380-386, 1989.
  20. Jalabert, S.S.M., Martin, M.P., Renaud, J.P., Boulonne, L., Jolivet, C., Montanarella, L., and Arrouays, D., "Estimating forest soil bulk density using boosted regression modeling." *Soil Use and Management*, 26, 516-528, 2010.
  21. Martin, M.P., Lo Seen, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K.M., Bourgeon, G., and Arrouays, D., "Optimizing Pedotransfer Functions for Estimating Soil Bulk Density Using Boosted Regression Trees." *Soil Science Society of America Journal*, 73(2), 485-493, 2009.
  22. McLean, E.O., Soil pH and lime requirement. In A. L. Page *et al* (Eds.), Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy monograph ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA, (9), 199-244, 1982.
  23. Mehra, O.P. and Jackson, M.L., "Iron oxides removed from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate," *Clays and Clay Minerals*, Vol. 7, 317-327, 1960.
  24. Nelson, D.W., Sommers, L.E., Total carbon,

- organic carbon and organic matter. En: AL Page; RH Miller; DR Keeney (eds.), Methods of Soil Analysis, Part. 2. 2da. edn. Agronomy 9. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA., 539-577, 1982.
25. Prévost, M., "Predicting Soil Properties from Organic Matter Content following Mechanical Site Preparation of Forest Soils." *Soil Science Society of America Journal*, 68(3), 943-949, 2004.
26. Rawls, W.J., "Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content 1." *Soil Science*, 135(2), 123-125, 1983.
27. Rhoades, J.D., Methods of Soil Analysis, Part 2, Chemical and Microbiological properties. 2nd ed, American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, 1982.
28. Sequeira, C.H., Wills, S.A., Seybold, C.A., and West, L.T., "Predicting soil bulk density for incomplete databases" *Geoderma*, 213, 64-73, 2014.
29. Soil Survey Staff, Keys to soil taxonomy, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC., 2014.
30. Terry, T.A., Cassel, D.K., and Wollum, A.G., "Effects of Soil Sample Size and Included Root and Wood on Bulk Density in Forested Soils." *Soil Science Society of America Journal*, 45(1), 135-138, 1981.

收稿日期：民國 104 年 6 月 5 日

修正日期：民國 104 年 7 月 15 日

接受日期：民國 104 年 7 月 30 日