

在高張力條件下決定 van Genuchten 模式的殘餘水分含量 (θ_r) 參數之研究

蔡曼辰⁽¹⁾ 林湘芸⁽²⁾ 蔡義誌^(3*) 林俐玲⁽⁴⁾

摘要

本研究以壓力鍋排水實驗獲取 30 種土樣的高張力段之水分含量，並以 van Genuchten (1980) 建議的 -1500kPa 含水量實測值做為殘餘水分含量。另將 θ_r 視為待定參數，以最佳擬合方式求取其值，也嘗試用不同的方法求取殘餘水分含量，共計有 8 種方法，分別探討這些方法之實用性及適用性，以在高張力條件下決定 van Genuchten 模式的 θ_r 參數。結果顯示，將 θ_r 值視為未知參數，直接擬合出的最佳擬合 θ_r 值，能真實地呈現出實驗量測資料的趨勢，也是最為簡便快速的方法。但是，在缺乏高張力資料的狀況下，輔以土壤水分係數 ($MF = 1$) 或 USDA - NRCS (2011) 的經驗估算公式來求取殘餘水分含量，能讓所建立的水分特性曲線更能貼近高張力段實測值。

(關鍵詞：土壤水分特性曲線、土壤殘餘水分含量、壓力鍋)

A Study for Determining the Parameter θ_r of van Genuchten Model under High Pressure Condition

Min-Chen Tsai⁽¹⁾ Xiang-Yun Lin⁽²⁾ Yi-Zhih Tsai^(3*) Li-Ling Lin⁽³⁾

Graduate student⁽¹⁾, Graduate student⁽²⁾, Nantou County Government⁽³⁾, Professor⁽⁴⁾, Department of Soil and Water Conservation, National Chung-Hsing University, Taichung, Taiwan, 402, R.O.C.

(1) 國立中興大學水土保持學系 碩士班研究生

(2) 國立中興大學水土保持學系 碩士班研究生

(3) 南投縣政府 (通訊作者 e-mail:tyz@alumni.nchu.edu.tw)

(4) 國立中興大學水土保持學系 教授

ABSTRACT

In this study, the measured high-pressure water content of 30 kinds of soil samples was obtained by pressure plate extractor, and measured -1500kPa water content data as residual water content was suggested by van Genuchten (1980). In addition, θ_r was regarded as an unknown parameter, and determined by curve fitting. Eight kinds of different methods were applied to estimate residual water contents. The practicality and applicability of these methods were discussed separately, in order to determine the parameter θ_r of van Genuchten model under high pressure condition. The result showed that the best-fit θ_r , which was regarded as an unknown parameter, is able to come out the trend of measured data, and it is the most simple and rapid method. However, in the absence of measured high-pressure data, the curve fitting method combined with soil moisture factor ($MF - 1$) or the USDA – NRCS (2011) empirical formula, is used to estimate the residual water content so as to establish a soil water characteristic curve closer to the measured high-pressure data.

(Keywords : soil water characteristic curve, soil residual water content, pressure plate extractor)

前言

一般在描述土壤水分特性 (soil water characteristics) 時，普遍使用土壤的含水量 (water content) 與基質勢能 (matric potential) 所相互關係之土壤水分特性曲線 (Soil Water Characteristic Curve, SWCC) 來呈現，或稱為土壤保水曲線 (Soil Water Retention Curve)。歷年來多位學者致力於以物理模式及經驗參數建立起土壤水分特性曲線之函數方程式 (Brooks and Corey, 1964; Mualem, 1976; van Genuchten, 1980; Arya and Paris, 1981; Haverkamp and Parlange, 1982; van Genuchten and Leij, 1992; Fredlund and Xing, 1994; Kosugi, 1994, 1996; Arya et al., 1999; Leij et al., 2002)，其中以 van Genuchten (1980) 模式是目前最被接受且適用性廣的方程式 (Krishnapillai and Ravichandran, 2012; Meskini-Vishkaee et al., 2014)。

在一般的研究中，欲求得 van Genuchten (1980) 模式的土壤水分特性曲線，必須先獲得兩個重要參數，分別為飽和水分含量 (saturated water content) 及殘餘水分含量 (residual water content) 值，此值攸關著水分特性曲線模型之重要關鍵。飽和水分含量就是當土壤處於飽和狀態，土體所有空隙空間充滿水分時的水分含量，可由土壤孔隙率換算求得。至於，殘餘水分含量經由 van Genuchten (1980) 定義為水分含量的變化梯度 ($d\theta/dh$) 為零的時候，此時的水分含量即為殘餘水分含量。但是，在實際應用上並不易獲得，van Genuchten (1980) 則是建議尋找一個足以符合殘餘水分含量的負值壓力頭 (pressure head)，例如永久凋萎點 (permanent wilting point, $h = -1500\text{kPa}$)，以此點的水分含量當作殘餘水分含量。此外，土壤因本身性質上的差異，每種土壤的殘餘水分含量也不

相同，其中以土壤粘粒含量 (clay content) 及有機碳含量 (organic carbon content) 對其影響，有極為顯著的相關性 (Seybold and Harms, 2012; Poeplau et al., 2015)。

然而，傳統量測殘餘水分含量的實驗，多以壓力鍋 (pressure plate extractor) 排水實驗來進行，過程繁瑣且非常耗時，一次的實驗便需投入不少人力與時間，倘欲測得完整之水分特性曲線數據，實驗所需時間往往需花費更久之時間。據此，本研究嘗試採用 30 種不同地區之土樣進行壓力鍋排水實驗，量測土壤之殘餘水分含量值，再藉由風乾、烘乾等較為快速之實驗方式，以界定土樣達殘餘水分含量之風乾烘乾處理條件，比較不同方式得到相同殘餘水分含量值之實驗方法難易。輔以 U.S. Department of Agriculture - Natural Resource Conservation Service (USDA - NRCS, 2011) 及 Seybold and Harms (2012) 的 -1500kPa 含水量推估公式比較，進一步探討殘餘水分含量三種實驗方法之實用性及推估公式之適用性。

研究材料與方法

1. van Genuchten 模式

van Genuchten (1980) 提出的水分特性曲線方程式，是以 Brooks and Corey (1964) 發展的模式為基礎，給定一個無因次 (dimensionless) 的水分含量公式：

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

(1)

式中 Θ 為有效飽和度 (effective saturation) ($L^3 L^{-3}$)； θ 為土壤水分含量； θ_s 和 θ_r 分別為飽和水分含量和殘餘水分含量。另外再導入以水分勢能 (h) 為變數的參數公式 $\Theta(h)$ ：

$$\Theta(h) = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m$$

(2)

式中的 α 、 n 、 m 為待定參數。令式 (1) 等於式 (2)，則可獲得以水分勢能為變數的水分特性曲線方程式：

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha h)^n \right]^m}, m = 1 - 1/n$$

(3)

當 $h \rightarrow \infty$ ，式 (3) 的 $\theta \rightarrow \theta_r$ ，此時土壤處於基質勢能負值極大的狀態，代表難以實驗方式獲得 θ_r ，van Genuchten (1980) 則建議可使用 $h = -1500kPa$ 估算殘餘水分含量。圖 1 為式 (3) 所繪出典型的水分特性曲線 ($\alpha = 0.005$, $n = 2$, $m = 0.5$, $\theta_s = 0.5$)，藉由改變 θ_r 值 ($\theta_r = 0, 0.1, 0.2, 0.3$)，顯示出水分特性曲線模型右半部分受 θ_r 影響甚巨，這也意味著土壤儲存水分的能力，受 θ_r 影響很大。

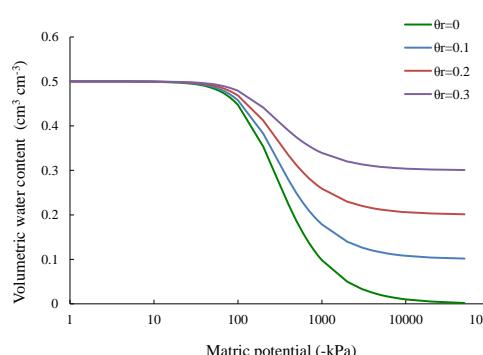


圖 1 式 (3) 之典型的水分特性曲線圖
 $(\alpha=0.005, n=2, m=0.5, \theta_s=0.5, \theta_r=0, 0.1, 0.2, 0.3)$

Figure 1 Typical plot of the soil water characteristic curves based on Eq. (3) ($\alpha = 0.005, n=2, m=0.5, \theta_s=0.5, \theta_r=0, 0.1, 0.2, 0.3$)

2. 殘餘水分含量估算式

- (1) U.S. Department of Agriculture – Natural Resource Conservation Service (USDA - NRCS, 2011)

NRCS 利用粘粒含量及有機質含量 (organic matter content, OM) 百分比推估土壤於 -1500kPa 下之水分含量 (-1500kPa water, g 100g⁻¹) 經驗式：

$$-1500 \text{ kPa water} = clay \times (1 - OM / 100) \times F + OM \quad (4)$$

式中，Clay 為粘粒含量百分比 (g 100g⁻¹)；OM 為有機質含量百分比 (g 100g⁻¹)；F 為常數 0.4, Seybold and Harms (2012) 指出其意義為 -1500kPa 水分與粘粒含量之比值(-1500kPa Water to total Clay Ratio, 1500WCR)，並建議以常數 0.4 替代。

(2) Seybold and Harms (2012)

Seybold and Harms 改良 NRCS 之公式，並以顯著影響的土壤粘粒含量、有機碳含量等因子，發展出以下估算式：

$$\begin{aligned} -1500 \text{ kPa water} &= 0.406 \times clay + 0.752 \times OC \\ &\quad (5) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -1500 \text{ kPa water} &= 0.382 \times clay + 0.616 \times OC + 0.982 \\ &\quad (6) \end{aligned}$$

式中，Clay 為粘粒含量百分比 (g 100g⁻¹)；OC 為有機碳含量百分比 (g 100g⁻¹)。Seybold and Harms 以 74,224 個樣本測試式 (5)，74,227 個樣本測試式 (6)，結果式 (6) 的均方根誤差 (Root Mean Square Error, RMSE) 及赤池資訊準則 (Akaike information criterion, AIC) 均小於式 (5)，代表式 (6) 用於推估土壤 -1500kPa 的水分含量優於式 (5)。由於，本研究所使用的土樣為台灣本地土壤，和原測試樣本相比，有時空分佈上的差異，考量估算式在台灣的適用性，故選用這兩式一起討論。

3. 研究材料

本研究選用分佈於台灣北、中、南等地區的 30 種土樣做為實驗分析之用，土樣質地 (soil texture) 包含有砂土、壤質砂土、砂質壤土、壤土、粘質及坋質壤土等類。土樣先進行過篩風乾等前置處理 (林俐玲, 1996)，依 USDA 土壤粒徑分類標準，再分別以 Stoke's law 配合吸管法 (pipette method) 量測土壤在各粒徑 (粘粒粒徑 < 0.002 mm；坋粒粒徑 0.002-0.05 mm；砂粒粒徑 0.05-2 mm) 的含量比例，決定土樣的質地；以比重瓶法

(pycnometer method) 測顆粒密度 (particle density, ρ_s)；以金屬管法 (core method) 測總體密度 (bulk density, ρ_b)；將土樣風乾 7 天後秤重 (W_A) 再經烘乾 (24 小時 105°C oven-dry) 稱重 (W_O)，水分係數 (moisture factor of soils, MF) 即可由 $MF = 1 + (W_A - W_O)/W_O$ 求出；有機質含量 (OM) 採重鉻酸鉀 ($K_2Cr_2O_7$) 氧化滴定法測得。本研究的土樣基本性質分析結果如表 1 所示，顆粒密度分佈從 2.23 g/cm^3 至 2.74 g/cm^3 、平均值 2.61 g/cm^3 、標準偏差 0.10 g/cm^3 ；總體密度分佈從 0.85 g/cm^3 至 1.74 g/cm^3 、平均值 1.34 g/cm^3 、標準偏差 0.17 g/cm^3 ；水分係數分佈從 1.01 至 1.07、平均值 1.03、標準偏差 0.02；有機質含量分佈從 0.21 % 至 8.62 %、平均值 2.32 %、標準偏差 2.10 %。

4. 實驗方法及步驟

(1) 壓力鍋排水實驗

待測土樣經過風乾過篩 (粒徑 $< 2\text{mm}$) 處理後，依 Oliveira et al. (1996) 所提出的實驗室土壤裝填方法，將每組土樣各以三重複裝填，並預濕達飽和。然後進行壓力鍋排水實驗，分別測定 1/3bar、1bar、2bar、4bar、8bar、12bar、15bar 等壓力下之水分含量，獲得土樣的水分特性曲線及 -1500kPa 的水分含量 (蔡義誌，2008)。

表 1 土樣基本性質

Table 1 The properties of the soil samples

採樣地點	土樣 質地	顆 粒 密 度 ρ_s (g/cm^3)	總 體 密 度 ρ_b (g/cm^3)	水 分 係 數 MF	有 機 質 含 量 OM (%)
------	----------	--	--	--------------------------	--------------------------------------

(1) 魚池蓮 華池	砂土	2. 71	1. 30	1. 03	0.5 8
(2) 福山哈 盆溪	砂土	2. 61	1. 30	1. 05	6.1 2
(3) 三義火 炎山	砂土	2. 58	1. 30	1. 01	2.8 4
(4) 信義豐 丘	壤質 砂土	2. 56	1. 30	1. 02	4.2 7
(5) 高雄大 樹	壤質 砂土	2. 65	1. 30	1. 01	1.2 2
(6) 大溪阿 姆坪	壤質 砂土	2. 61	1. 33	1. 01	0.4 9
(7) 坪林	壤質 砂土	2. 68	1. 36	1. 01	1.8 2
(8) 復興高 義	壤質 砂土	2. 56	1. 30	1. 02	0.6 7
(9) 草屯風 水坪	砂質 壤土	2. 67	1. 52	1. 03	0.6 1
(10) 集集	砂質 壤土	2. 62	1. 19	1. 02	2.7 8
(11) 雙東 1	砂質 壤土	2. 74	1. 36	1. 02	1.2 2
(12) 雙東 2	砂質 壤土	2. 64	1. 40	1. 01	1.5 9
(13) 福興 1	砂質 壤土	2. 67	1. 44	1. 01	0.9 4
(14) 福興 2	砂質 壤土	2. 65	1. 27	1. 01	1.5 3
(15) 爺享	砂質 壤土	2. 63	1. 34	1. 05	5.9 5
(16) 巴陵 1	砂質 壤土	2. 52	1. 38	1. 04	6.6 7
(17) 巴陵 2	砂質 壤土	2. 23	0. 85	1. 07	8.6 2
(18) 大溪湳 子溝	砂質 壤土	2. 56	1. 55	1. 02	1.7 3
(19) 鯉魚 1	砂質 壤土	2. 68	1. 16	1. 02	2.1 8

(20) 鯉魚 2	砂質壤土	2. 65	1. 47	1. 01	1. 7	1.1	
(21) 大溪新峰	砂質壤土	2. 54	1. 17	1. 02	1. 5	2.0	
(22) 九份二山	壤土	2. 47	1. 34	1. 05	1. 6	1.9	
(23) 高坡	壤土	2. 61	1. 14	1. 03	1. 1	1.1	
吉	(24) 大溪百吉	壤土	2. 59	1. 65	1. 02	1. 1	2.3
板山	(25) 復興角板山	壤土	2. 69	1. 42	1. 03	1. 2	0.3
浮	(26) 復興羅浮	壤土	2. 66	1. 49	1. 03	1. 0	1.1
乾溝	(27) 乾溝	粉質壤土	2. 74	1. 74	1. 03	1. 5	0.7
陵	(28) 復興華陵	粉質壤土	2. 46	1. 15	1. 06	1. 9	5.0
仁	(29) 復興澤仁	粉質壤土	2. 59	1. 37	1. 05	1. 4	1.6
里	(30) 台中后里	粘質壤土	2. 61	1. 45	1. 04	1. 1	0.2

(2) 風乾實驗

待測土樣的前置裝填及預濕飽和等兩項準備作業，與前述壓力鍋排水實驗之準備作業相同，使之起始條件均相同。再將達飽和的土樣，倒至皿器中攤平，使其充分接觸空氣，並不時翻動之。控制環境溫度在 20-26°C、溼度在 51-60%之間，避免陽光直射，記錄風乾 12、24、36、42、48、60 小時之土重，計算土壤水分含量。

(3) 烘乾實驗

以前述壓力鍋排水實驗之準備作業，來備妥烘乾實驗所需的土樣。同樣地，將達飽

和的土樣，倒至燒杯中攤平，置入已控制溫度在 50°C 之烘箱內，記錄烘乾 1、3、5、7、9 小時之土重，計算土壤水分含量。

5. 資料分析

利用壓力鍋排水實驗測得 30 種土樣之基質勢能 (-kPa) 與水分含量 (cm^3/cm^3) 之數據，再以式 (3) 的 van Genuchten 模式依據最小平方法 (non-linear least squares) 進行擬合，模式的參數最佳解由卡方檢定 (Reduced Chi-square, χ^2) 及決定係數 (coefficient of determination, R^2) 來判斷，以獲得完整的土壤水分特性曲線，其結果如圖 2 所示。

在本研究中，對於模式參數的處理方式，是將飽和水分含量 (θ_s) 當作已知的經驗常數 (empirical constants)，以孔隙度代入擬合；殘餘水分含量 (θ_r) 則是由不同的方法獲得，包括實驗測值、經驗公式估算值、水分係數 ($MF - 1$)、風乾及烘乾實驗等方法，將於後文討論；參數 α 、 n 為待定參數，由擬合結果決定；參數 m 則由 n 值依式 (3) 換算而得。

結果與討論

1. 土壤水分特性曲線

一般而言，粗顆粒土壤於低張力時，由於孔隙較大，水分很快的排出，水分特性曲線快速下降，殘餘水分含量較低；細質地土壤因保水力較佳故於高張力時仍能保留較多水分，殘餘水分含量較高，水分特性曲線亦較為平緩。以土樣編號 (2) 的福山哈盆溪為例，其質地雖為粗顆粒之砂土，但在 -1500kPa

蔡旻辰、林湘芸、蔡義誌、林俐玲：
在高張力條件下決定 van Genuchten 模式的殘餘水分含量 (θ_r) 參數之研究

含水量卻相對較高，因為該地之土樣含有較高之有機質，含量高達 6.12%，可增加土壤

保水之能力 (Wösten and van Genuchten, 1988)。

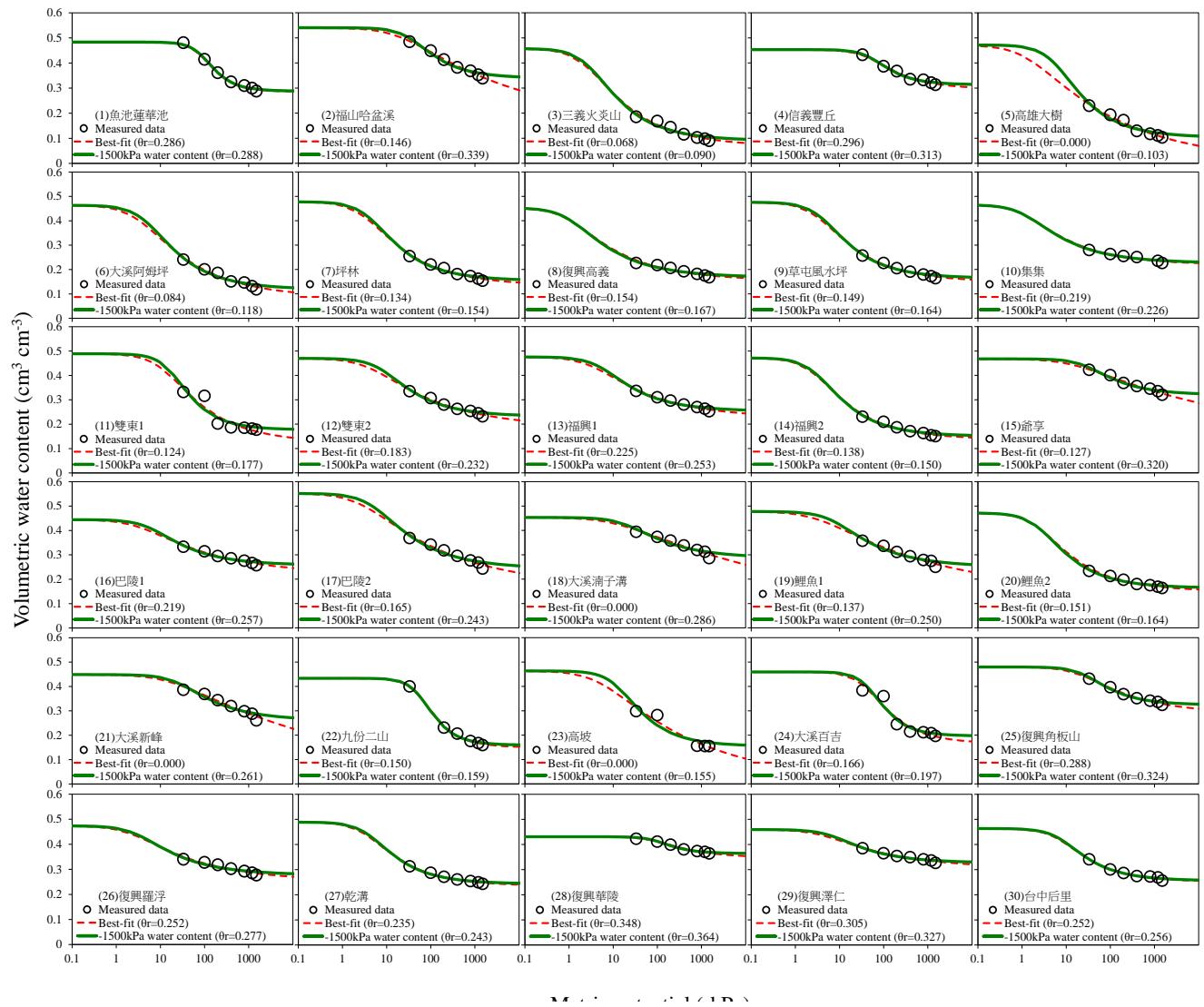


圖 2 土樣之水分特性曲線

Figure 2 Soil water characteristic curves of soil samples

表 2 水分特性曲線之擬合參數

Table 2 Fitting parameters of soil water characteristic curves

採樣地點	$\theta_r = -1500\text{kPa}$ 含水量實測值					$\theta_r =$ 最佳擬合值			
	飽和水分 含量 $\theta_s (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	殘餘水分 含量 $\theta_r (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	α (kPa^{-1})	n	R^2	殘餘水分 含量 $\theta_r (\text{cm}^3 \text{cm}^{-3})$	α (kPa^{-1})	n	R^2
(1) 魚池蓮 華池	0.483	0.288	0.0107	2.163	0.996*	0.286	0.011 2	2.096	0.993 *
(2) 福山哈 盆溪	0.540	0.339	0.0262	1.659	0.975*	0.146	0.051 6	1.160	0.994 *
(3) 三義火 炎山	0.457	0.090	0.3281	1.522	0.989*	0.068	0.411 7	1.406	0.995 *
(4) 信義豐 丘	0.453	0.313	0.0173	1.862	0.989*	0.296	0.019 9	1.600	0.989 *
(5) 高雄大 樹	0.472	0.103	0.1645	1.573	0.987*	0.000	0.761 6	1.214	0.995 *
(6) 大溪阿 姆坪	0.464	0.118	0.1971	1.513	0.990*	0.084	0.305 5	1.351	0.995 *
(7) 坪林	0.478	0.154	0.2329	1.538	0.993*	0.134	0.315 6	1.411	0.997 *
(8) 復興高 義	0.453	0.167	0.8820	1.435	0.992*	0.154	0.989 8	1.364	0.995 *
(9) 草屯風 水坪	0.476	0.164	0.2405	1.553	0.995*	0.149	0.310 3	1.441	0.998 *
(10) 集集	0.466	0.226	0.7955	1.444	0.995*	0.219	0.852 7	1.395	0.997 *
(11) 雙東 1	0.489	0.177	0.0535	1.779	0.938*	0.124	0.083 0	1.428	0.941 *
(12) 雙東 2	0.470	0.232	0.1196	1.532	0.988*	0.183	0.242 8	1.278	0.996 *
(13) 福興 1	0.476	0.253	0.1790	1.509	0.990*	0.225	0.300 2	1.325	0.996 *
(14) 福興 2	0.472	0.150	0.3164	1.558	0.994*	0.138	0.372 9	1.466	0.997 *
(15) 爺享	0.468	0.320	0.0323	1.588	0.970*	0.127	0.076 3	1.114	0.984 *
(16) 巴陵 1	0.444	0.257	0.1566	1.490	0.985*	0.219	0.308	1.264	0.995

蔡旻辰、林湘芸、蔡義誌、林俐玲：
在高張力條件下決定 van Genuchten 模式的殘餘水分含量 (θ_r) 參數之研究

							3	*
(17)	巴陵 2	0.552	0.243	0.1862	1.439	0.980*	0.165	0.375 1
(18)	大溪湧 子溝	0.453	0.286	0.0480	1.449	0.942*	0.000	0.107 8
(19)	鯉魚 1	0.478	0.250	0.1254	1.445	0.974*	0.137	0.330 6
(20)	鯉魚 2	0.472	0.164	0.3814	1.556	0.996*	0.151	0.410 2
(21)	大溪新 峰	0.449	0.261	0.0365	1.483	0.938*	0.000	0.065 8
(22)	九份二 山	0.433	0.159	0.0163	2.064	0.997*	0.150	0.016 7
(23)	高坡	0.464	0.155	0.0714	1.646	0.949*	0.000	0.202 0
(24)	大溪百 吉	0.459	0.197	0.0196	1.986	0.941*	0.166	0.023 5
(25)	復興角 板山	0.480	0.324	0.0337	1.673	0.988*	0.288	0.048 0
(26)	復興羅 浮	0.474	0.277	0.3109	1.442	0.983*	0.252	0.459 0
(27)	乾溝	0.489	0.243	0.2354	1.587	0.997*	0.235	0.286 2
(28)	復興華 陵	0.431	0.364	0.0095	1.991	0.983*	0.348	0.010 6
(29)	復興澤 仁	0.459	0.327	0.1405	1.492	0.988*	0.305	0.258 5
(30)	台中后 里	0.464	0.256	0.1199	1.616	0.996*	0.252	0.138 4

註：* 達 5% 顯著水準

圖 2 中綠色實線是依 van Genuchten (1980) 建議的 -1500kPa 含水量做為殘餘水分含量而繪製，此含水量值來自張力 15bar 的壓力鍋排水實驗量測值，也就是將 θ_r 視為一已知的經驗常數代入式 (3) 擬合，獲得待定參數 α 、 n 。紅色虛線則為最佳擬合曲線

(best-fit curve)，將 θ_r 視為未知的擬合參數，不具備任何物理意義，其值純粹由擬合方程式及實驗值決定(van Genuchten and Nielsen, 1985; van Genuchten et al., 1991; Kosugi, 1994; Cornelis et al., 2005; 曹舜評等, 2011)，由此方式獲得的擬合參數有 θ_r 、 α 、 n 。在本研究中，擬合方程式的 R^2 均達 5% 顯著水準，並

彙整 30 種土樣的輸入參數及擬合後獲得的參數於表 2 之中。將 θ_r 視為已知經驗常數 (-1500kPa 含水量實測值) 擬合所獲得的結果，其 α 值分佈從 0.0095 至 0.8820kPa^{-1} 、平均值 0.1829kPa^{-1} 、標準偏差 0.21kPa^{-1} ； n 值分佈從 1.435 至 2.163、平均值 1.620、標準偏差 0.20；進一步，按照土樣的質地分類（如表 3），砂土的 α 平均值 0.1217kPa^{-1} 、 n 平均值 1.781，壤質砂土的 α 平均值 0.2987kPa^{-1} 、 n 平均值 1.584，砂質壤土的 α 平均值 0.2055kPa^{-1} 、 n 平均值 1.525，壤土的 α 平均值 0.0904kPa^{-1} 、 n 平均值 1.762，粉質壤土的 α 平均值 0.1285kPa^{-1} 、 n 平均值 1.690，粘質壤土的 α 平均值 0.1199kPa^{-1} 、 n 平均值 1.616。若將 θ_r 視為未知的待定參數，直接由擬合方程式及實驗值決定出最佳擬合值，其結果， θ_r 值分佈從 0 到 $0.348(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ 之間、平均值 $0.167(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ 、標準偏差 $0.09(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ ； α 值分佈從 0.0106 至 0.9898kPa^{-1} 、平均值 0.2715kPa^{-1} 、標準偏差 0.25kPa^{-1} ； n 值分佈從 1.080 至 2.096、平均值 1.389、標準偏差 0.23；另外，按照質地分類（如表 3），砂土的 θ_r 平均值 $0.167(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ 、 α 平均值 0.1582kPa^{-1} 、 n 平均值 1.554，壤質砂土的 θ_r 平均值 $0.134(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ 、 α 平均值 0.4785kPa^{-1} 、 n 平均值 1.388，砂質壤土的 θ_r 平均值 $0.141(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ 、 α 平均值 0.2951kPa^{-1} 、 n 平均值 1.288，壤土的 θ_r 平均值 $0.171(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ 、 α 平均值 0.1498kPa^{-1} 、 n 平均值 1.492，粉質壤土的 θ_r 平均值 $0.296(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ 、 α 平均值 0.1851kPa^{-1} 、 n 平均值 1.443，粘質壤土的 θ_r 平均值 $0.252(\text{cm}^3\text{cm}^{-3})$ 、 α 平均值 0.1384kPa^{-1} 、 n 平均值 1.547。由表 2 的結果，最佳擬合方式的 R^2 普遍高於 -1500kPa 含水量實測值的擬合 R^2 ，除了土樣編號 (1) 魚池蓮華池和 (24) 大溪百吉這兩

處外，這兩處在最佳擬合的 R^2 雖然沒有較高，但其卡方檢定 χ^2 值卻有較優，且擬合結果也都達到 5% 顯著水準。此外，另一值得注意的地方，在於 30 種土樣最佳擬合的 θ_r 值均小於 -1500kPa 含水量實測值，代表著以 -1500kPa 含水量視為殘餘水分含量是否適當，仍有待釐清。

表 3 以土壤質地分類之水分特性曲線擬合參數平均值

Table 3 The average values of fitting parameters for soil water characteristic curves grouped by soil textures

土樣 質地	$\theta_r = -1500\text{kPa}$ 含水 量 實測值			$\theta_r =$ 最佳擬合值		
	θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	α (kPa^{-1})	n			
				θ_r ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$)	α (kPa^{-1})	n
砂土	0.23 9	0.1 217	1.7 81	0.16 7	0.1 582	1.5 54
壤質 砂土	0.17 1	0.2 987	1.5 84	0.13 4	0.4 785	1.3 88
砂質 壤土	0.23 0	0.2 055	1.5 25	0.14 1	0.2 951	1.2 88
壤土	0.22 2	0.0 904	1.7 62	0.17 1	0.1 498	1.4 92
粉質 壤土	0.31 1	0.1 285	1.6 90	0.29 6	0.1 851	1.4 43
粘質 壤土	0.25 6	0.1 199	1.6 16	0.25 2	0.1 384	1.5 47

2. 土壤水分係數、粘粒含量、有機質含量與殘餘水分含量之相關性

Nitao and Bear (1996) 曾建議殘餘水分含量應要和被量測到的最低含水量有所關連，因此嘗試以本研究所量測到的最低含水量，也就是土壤水分係數 (MF)，來做為殘餘水分含量的探討。 MF 為風乾土壤內水分含量之指標，土壤經自然風乾後依舊保有一些無法經由蒸發而散失的水分，這些水分的存在會直接影響實驗的準確性，通常在實驗操作前，會先測得 MF 供後續數據換算之參考。本研究為了使 MF 方便與其他方式獲得的 θ_r 值比較，水分係數的部分特地以 $MF - 1 = (W_A - W_O)/W_O$ 來呈現，再將前述式子的重量比值轉換成體積含量比值後，以此比值代替剩殘餘水分含量 (蔡義誌, 2008)。首先，比較 $MF - 1$ 和 -1500kPa 含水量實測值、最佳擬合 θ_r 值之分佈關係，其結果如圖 3 (a) 所示， $MF - 1$ 和殘餘水分含量之間存在著一定程度之相關性 ($R^2 = 0.3564$)。

Seybold and Harms (2012) 和 Poeplau et al. (2015) 分別指出 -1500kPa 含水量與粘土含量、有機碳含量有極高的相關性，而有機質含量與有機碳含量之間也存在著非常明確的關係，可以藉由 $OM = 1.724 \times OC$ 關係式換算。故本研究將粘粒含量、有機質含量與 θ_r 值做分佈關係圖，其結果如圖 3 (b) 和 (c)，由 (b) 圖顯示出本研究選用土樣之粘粒含量與殘餘水分含量兩者間的相關程度不高 ($R^2 = 0.0307$)，可能原因在於土樣來源多數屬於粗質地的土壤，粘粒含量偏低，容易發生低估情形。圖 3 (c) 顯示出的結果和 (b) 圖類似，有機質含量與殘餘水分含量之間的相關程度似乎也不高 ($R^2 = 0.1423$)。

3. 估算殘餘水分含量

本研究希望透過簡便的方式，快速獲取殘餘水分含量，而估算的結果套用至土壤水分特性曲線上，亦能被接受。藉由分析土樣的基本性質，透過式 (4)、式 (5) 及式 (6) 直接估算 -1500kPa 含水量值，並以此做為殘餘

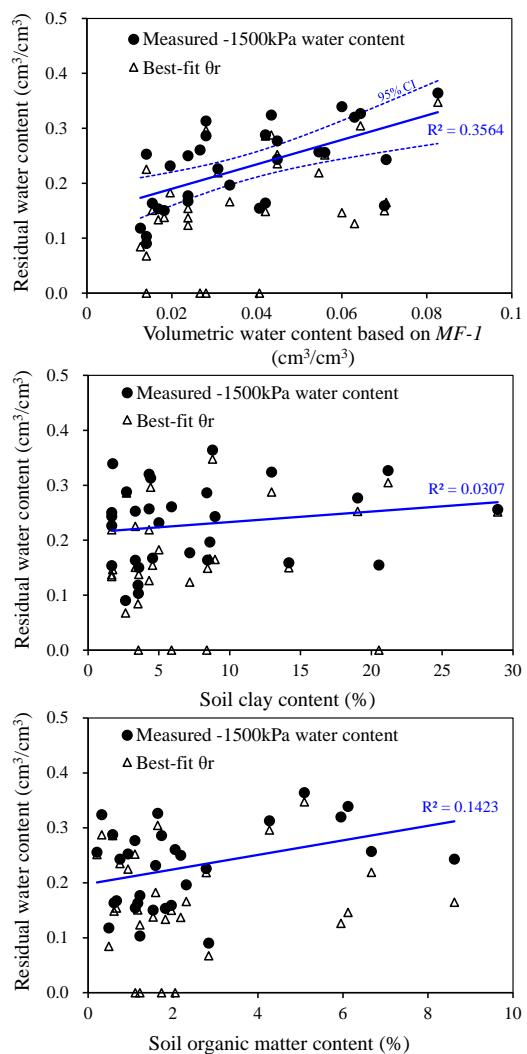


圖 3 土壤水分係數 (a)、粘粒含量 (b)、有機質含量 (c) 與殘餘水分含量值之關係圖

Figure 3 Relationships between soil moisture factor (a), clay content (b), organic matter content (c) and residual water content

水分含量的估算值。圖 4 即為估算結果與-1500kPa 含水量實測值之無偏估線 ($1:1$ line) 點位分佈比較圖，不論是式 (4) 或是式 (5)、式 (6) 的估算結果，與-1500kPa 含水量實測值比較，均呈現低估之情形，由前一節粘粒含量、有機質含量與殘餘水分含量之相關程度不高，可以確定此一低估情形。除此之外，本研究更以均方根誤差 (RMSE) 來檢驗估算式與實測值之優劣 (蔡義誌，2008)，其 RMSE 的計算式如下：

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} [\log(K_m) - \log(K_p)]^2}{N}} \quad (7)$$

式中 K_m 及 K_p 分別為實測值及估算值； N 為樣本數量，也就是土樣的個數。當 RMSE 值越小代表估算值越能貼近實測值，也就代表估算式可以用於獲取殘餘水分含量。在這三式之中，式 (4) 的估算值點位分佈與式 (6) 較為接近，且式 (4) 的 RMSE = 0.594 最小；其次是式 (6) 的 RMSE = 0.617；最後是式 (5) 的 RMSE = 0.724 最大，由以上結果代表本研究使用式 (4) 進行估算殘餘水分含量會優於另外兩個式子。

$MF - 1$ 和最佳擬合 θ_r 值在圖 4 中的點位分佈情形，以最佳擬合 θ_r 值最為接近實測值的分佈，也最為接近 $1:1$ line 線，其 RMSE = 0.140 為所有估算式中最小，由於最佳擬合 θ_r 值是直接從擬合方程式及實驗值決定而得，最能反應出實測值之間的結果。在圖中，以

$MF - 1$ 的分佈離實測值最遠，低估情形最為明顯，在 RMSE = 0.786 為所有估算式中最大，這表示 $MF - 1$ 和殘餘水分含量之間存有相關性，但因 MF 是風乾土壤內部保有無法蒸發而散失水分的指標，為本研究所量測到的最低含水量，因此 $MF - 1$ 的 RMSE 最大是可被上述理由所解釋。

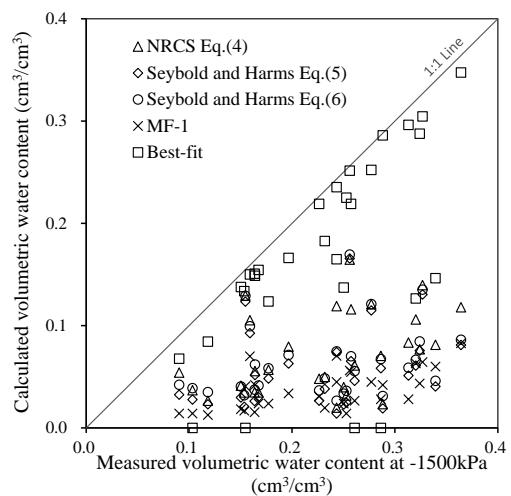


圖 4 殘餘水分含量估算值與 -1500kPa 含水量實測值之無偏估線點位分佈圖

Figure 4 The unbiased estimate line of calculated residual water content and measured -1500kPa water content

4. 風乾及烘乾實驗求取殘餘水分含量

將各時間點的風乾、烘乾量測值做線性迴歸，以此迴歸式反推達到 -1500kPa 含水量所須的時間，並按照土壤質地分類表示，彙整於表 4。圖 5 則是以各質地的風乾、烘乾 θ_r 時間代回 30 種土樣迴歸式之中，求取各土樣的殘餘水分含量，並繪制為無偏估線 ($1:1$ line) 點位分佈比較圖。圖中，不論是風乾或是烘乾實驗所得的結果，其點位均有非常好

的分佈，落於 1 : 1 line 線上，風乾 θ_r 值的 RMSE = 0.032、烘乾 θ_r 值的 RMSE = 0.022，都具有相當小的 RMSE。其中，烘乾 θ_r 值的 RMSE 又比風乾來得小，其因是烘箱能良好控制實驗條件並且減少環境干擾，使得乾實驗的結果優於風乾實驗。然而，本研究非以時間總平均值去求取 θ_r 值，而是以各質地的平均風乾、烘乾時間去求取 θ_r 值，再加上土壤內內部變因（如：結構、顆粒堆疊、有機質含量…等）均有巨大的異質性且不易控制，造成往後的應用仍有侷限性。

表 4 以土壤質地分類之風乾、烘乾 θ_r 時間

Table 4 The time of air-dried, oven-dried θ_r , grouped by soil textures

土樣 質地	風乾實驗		烘乾實驗	
	-1500kPa θ_r 值時間(hr)	達最佳 擬合 θ_r 值時間(hr)	-1500kPa θ_r 值時間(hr)	達最佳 擬合 θ_r 值時間(hr)
砂土	49.3	56.6	6.8	7.8
壤質 砂土	44.5	49.6	6.3	6.9
砂質 壤土	37.5	48.0	5.9	7.4
壤土	35.2	40.4	6.3	7.2
粉質 壤土	34.6	36.1	4.6	4.9
粘質 壤土	39.8	40.2	3.3	3.4
平均 值	39.3	46.4	5.9	6.9
最大 值	66.8	81.8	8.1	10.6

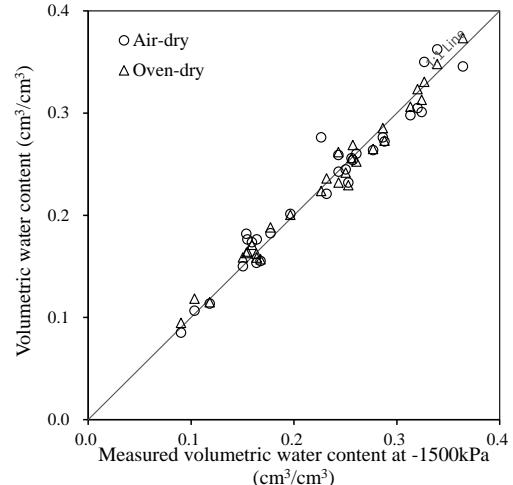


圖 5 風乾、烘乾實驗結果與 -1500kPa 含水量實測值之無偏估線點位分佈圖

Figure 5 The unbiased estimate line of results of air-dried, oven-dried experiment and measured -1500kPa water content

從本研究的結果可知，風乾經過至少 66.8 小時（平均值 39.3 小時）以上，即能讓所有 30 種土樣達到 -1500kPa 含水量或更低；風乾至少 81.8 小時（平均值 46.4 小時）以上，達到最佳擬合 θ_r 值；風乾至少 90.2 小時（平均值 60.8 小時），可達到水分係數 $MF - 1$ ，這遠比風乾 7 天（168 小時）更加容易達成。相同地，以定溫控制 50°C 烘乾至少 8.1 小時（平均值 5.9 小時）以上，即能達到 -1500kPa 含水量；烘乾至少 10.6 小時（平均值 6.9 小時）以上，達到最佳擬合 θ_r 值；烘乾至少 11.02 小時（平均值 9.23 小時），可達到水分係數 $MF - 1$ 對應的含水量。

5. 以估算 θ_r 值繪製土壤水分特性曲線

本研究除了前節所述，以壓力鍋排水實驗獲取的 -1500kPa 含水量實測值及實驗量測值直接擬合決定的最佳擬合值做為殘餘水分含量之外，也嘗試用不同的方法求取殘餘水分含量，包括土壤水分係數的 *MF - 1*、經驗估算公式式 (4)、式 (5)、式 (6)、較為快速且簡便的風乾及烘乾實驗，共計有 8 種求取殘餘水分含量的方法，分別探討這些方法之適用性及適用性。由於 30 種土樣不容易一一繪圖說明，本研究挑選 5 種較具代表性的土樣說明之，分別是土樣編號 (3) 三義火炎山、(15) 爺享、(18) 大溪湳子溝、(25) 復興角板山及 (28) 復興華陵，其土壤質地依次為砂土、砂質壤土、砂質壤土、壤土、坋質壤土。

圖 6 到圖 10 為上述 5 種的水分特性曲線，其擬合所用的 θ_r 值來自於 -1500kPa 含水量實測值、最佳擬合 θ_r 值、*MF - 1*、NRCS 的式 (4)、Seybold and Harms 的式 (5) 及式 (6)、風乾與烘乾實驗 θ_r 值，分別以 8 條曲線呈現，且擬合 R^2 均達 5% 顯著水準，並將這 5 個土樣的各水分特性曲線之擬合參數彙整於表 5 之中。然而，本研究在低張力下的量測資料數不多，容易造成各曲線在低張力段的擬合結果有所差異，索性此差異並不影響高張力段的討論。本研究為了聚焦高張力段的曲線變化與 θ_r 值之關係，特地將圖中超過基質勢能 -300kPa 之曲線放大圖置放於右上角處，以方便比較各水分特性曲線在高張力段的趨勢。

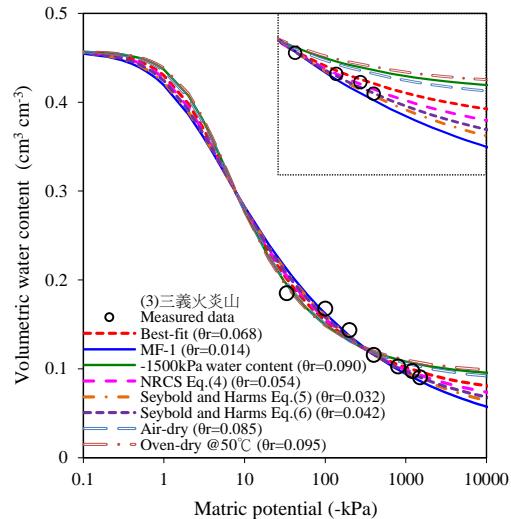


圖 6 土樣 (3) 之水分特性曲線及殘餘水分含量

Figure 6 Soil water characteristic curves and residual water contents of soil sample (3)

圖 6 的土樣 (3) 在基質勢能超過 -400kPa 後，各曲線因殘餘水分含量差異的影響而明顯分散開，其中以 -1500kPa 含水量實測值做為 θ_r 值 ($\theta_r = 0.090$) 的綠色線分佈在較高的位置 ($R^2 = 0.989$)，而最佳擬合 θ_r 值 ($\theta_r = 0.068$) 的紅色虛線分佈在中間 ($R^2 = 0.995$)，*MF - 1* ($\theta_r = 0.014$) 的藍色線分佈在最低的位置 ($R^2 = 0.992$)，表示殘餘水分含量的差異，確實會影響水分特性曲線的變化。再比較壓力鍋高張力段的實測值 (8bar、12bar、15bar) 點位分佈多落在綠色線以下的位置，介於紅色虛線和藍色線之間，這樣的結果也能從 RMSE 反應出來，實測值和綠色線的 RMSE = 0.047 為最大；藍色線的 RMSE = 0.024 次之；紅色虛線的 RMSE = 0.017 為

最小，也就是說對於高張力段的擬合結果以最佳擬合 θ_r 值所建立的水分特性曲線更能貼近實測值。對於式 (4)、式 (5) 及式 (6) 估算的 θ_r 值所建立的曲線，均分佈在紅色虛線與藍色線之間，比對高張力段的實測值，似乎這 3 式均適合用在土樣 (3) 上，其中式 (4) 在高張力段的 RMSE = 0.008 又比其他兩式來得小，甚至比紅色虛線還小，由此結果來看式 (4) 是最適合用於求取土樣 (3) 的殘餘水分含量。至於，風乾與烘乾 θ_r 值所建立的曲線，分別如圖中藍色空心線和橘色空心線，均分佈在綠色線附近，對於高張力段的表現不甚理想。

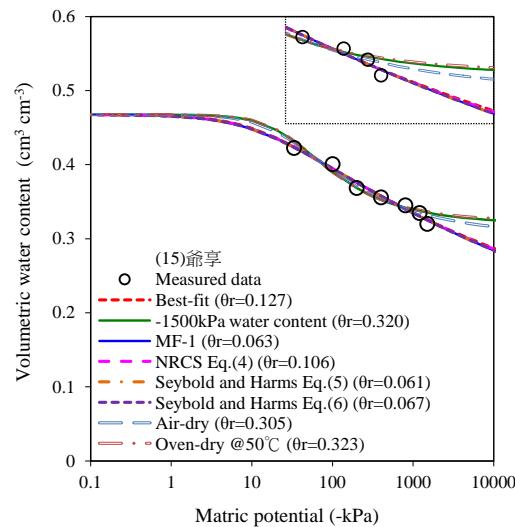


圖 7 土樣 (15) 之水分特性曲線及殘餘水分含量

Figure 7 Soil water characteristic curves and residual water contents of soil sample (15)

土樣 (15) 在基質勢能超過 -800kPa 後，各曲線也有散開的趨勢 (如圖 7 所示)，其中以 -1500kPa 含水量實測值做為 θ_r 值 ($\theta_r =$

0.320) 的綠色線分佈在較高的位置 ($R^2 = 0.970$)，且風乾和烘乾的曲線也分佈在附近，其餘曲線則集中在一起，分佈在較低的位置。雖然，最佳擬合 θ_r 值 ($\theta_r = 0.127$) 的 $R^2 = 0.984$ 非最高，略低於 MF - 1 ($\theta_r = 0.063$) 的 $R^2 = 0.989$ ，但其卡方檢定 χ^2 值卻有較優，且擬合結果也都達到 5% 顯著水準。再進一步，比較高張力段的實測值 (8bar、12bar、15bar) 點位分佈，12bar 和 15bar 測值點落在綠色線以下的位置，且趨勢與藍色線一致。再比較 RMSE，高張力段實測值和綠色線的 RMSE = 0.012 為最大；藍色線的 RMSE = 0.006 為最小，代表以 MF - 1 最適合用於求取土樣 (15) 的殘餘水分含量，並建立水分特性曲線。另

以，以上樣 (15) 的 MF - 1 透過圖 3 (a) 的 5% 信賴區間，獲取 θ_r 之變動範圍介於 0.248 至 0.323 之間，本例實測值 ($\theta_r = 0.320$) 落在 95% 信賴區間內，也可驗證 MF - 1 的適用性。

同樣地，土樣 (18) 和土樣 (15) 有著相同的情況，在基質勢能超過 -800kPa 後，各曲線也有散開的趨勢 (如圖 8 所示)，其中綠色線 ($\theta_r = 0.286$) 分佈在較高的位置 ($R^2 = 0.942$)。在這 8 條曲線中，以 MF - 1 ($\theta_r = 0.028$) 的 $R^2 = 0.978$ 為最高，且高張力段實測值和藍色線的 RMSE = 0.014 為最小，也就是表示 MF - 1 是最適合求取土樣 (18) 的殘餘水分含量，並建立水分特性曲線。

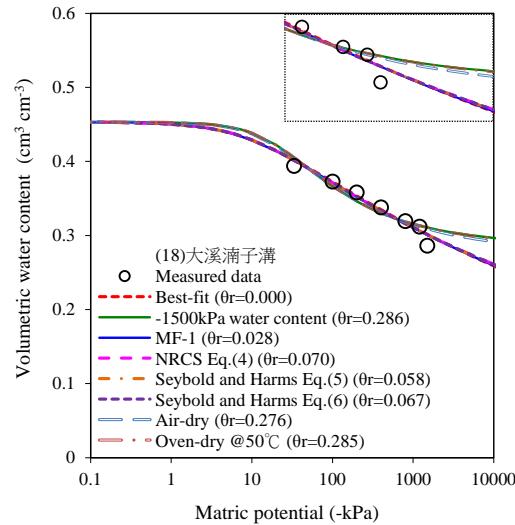


圖 8 土樣 (18) 之水分特性曲線及殘餘
水分含量

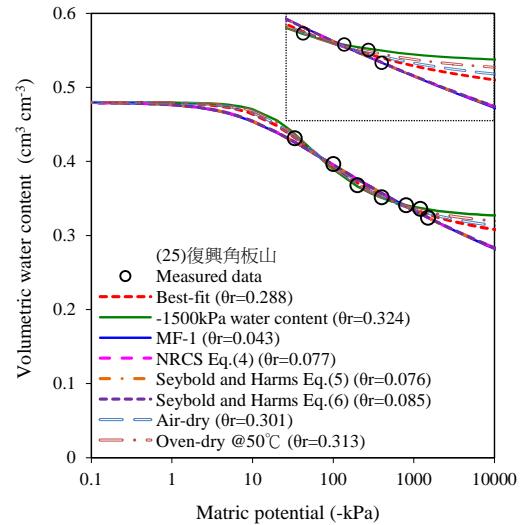


圖 9 土樣 (25) 之水分特性曲線及殘餘
水分含量

Figure 8 Soil water characteristic curves and residual water contents of soil sample (18)

此外，土樣 (15)、土樣 (18) 經由最佳擬合 θ_r 值、MF-1 式 (4)、式 (5) 及式 (6) 這 5 種方法所建立的曲線，其與高張力段實測值 (8bar、12bar、15bar) 的 RMSE 均存在非常微小的差距。土樣 (15) 5 種方法的 RMSE 值在四捨五入後，均為 0.006，觀察其 θ_r 值分佈從 0.061 到 0.127 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) 之間，意謂著不論使用何種方法估算 θ_r 值，且介於 0.061 到 0.127 間的時候，其估算方法都是可被接受的，由圖中曲線交疊在一起的情形也能解釋此一說明。再看土樣 (18) 的 RMSE 值均為 0.014，其 θ_r 值分佈從 0 到 0.07 ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) 之間，代表在這區間的估算方法都是可被接受的。

Figure 9 Soil water characteristic curves and residual water contents of soil sample (25)

圖 9 和圖 10 分別顯示土樣 (25) 和土樣 (28) 在基質勢能超過 -800kPa 後，各曲線有散開的趨勢。圖 9 中，綠色線 ($\theta_r = 0.324$) 分佈在較高的位置 ($R^2 = 0.988$)；紅色虛線 ($\theta_r = 0.288$) 分佈在中間的位置 ($R^2 = 0.995$)；藍色線 ($\theta_r = 0.043$) 分佈在較低的位置 ($R^2 = 0.990$)，以最佳擬合 θ_r 值的紅色虛線 R^2 較高，並且高張力段實測值和紅色虛線的 RMSE = 0.005 為最小，代表最佳擬合 θ_r 值是最適合土樣 (25) 的殘餘水分含量。圖 10 中，綠色線 ($\theta_r = 0.364$) 分佈在較高的位置 ($R^2 = 0.983$)；紅色虛線 ($\theta_r = 0.348$) 分佈在中間的位置 ($R^2 = 0.989$)；藍色線 ($\theta_r = 0.083$) 分佈在較低的位置 ($R^2 = 0.984$)，以最佳擬合 θ_r 值的紅色虛線 R^2 較高，且高張力段的 RMSE = 0.002 最小，是最適合土樣 (28) 的殘餘水分含量。

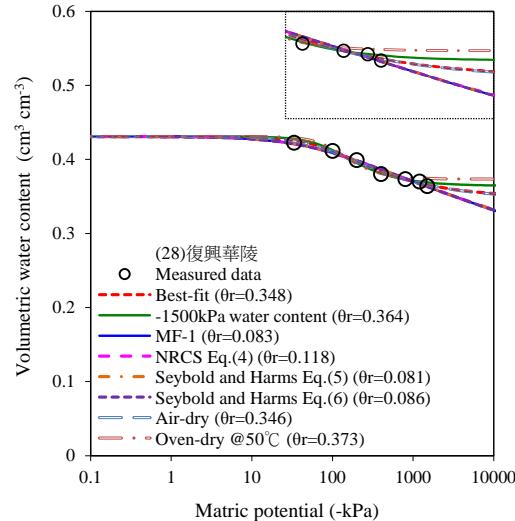


圖 10 土樣 (28) 之水分特性曲線及殘餘水分含量

Figure 10 Soil water characteristic curves and residual water contents of soil sample (28)

本研究為了進一步瞭解最佳擬合之限制，以土樣編號 (25) 復興角板山為例，從壓力鍋量測資料中，由低張力分別擬合到 2bar、到 4bar、到 8bar、到 12bar 及到 15bar，建立 5 條水分特性曲線，如圖 11 所示。藉由逐漸加入高張力資料的方式，觀察曲線及擬合參數的變化，探討以有限的量測資料，能否獲得可信的殘餘水分含量值。在本例子中，擬合到 2bar 的結果，獲得最佳擬合 θ_r 值 = 0，這是缺乏高張力資料所擬合的結果；擬合到 4bar，獲得最佳擬合 θ_r 值 = 0.241；擬合到 8bar，最佳擬合 θ_r 值 = 0.297；擬合到 12bar，最佳擬合 θ_r 值 = 0.305；擬合到 15bar，最佳擬合 θ_r 值 = 0.288，這些擬合曲線的 α 值介於 0.044 kPa⁻¹ 到 0.054 kPa⁻¹ 之間， n 值則在 1.11 到 1.45 之間變化。由前述的結果，已知

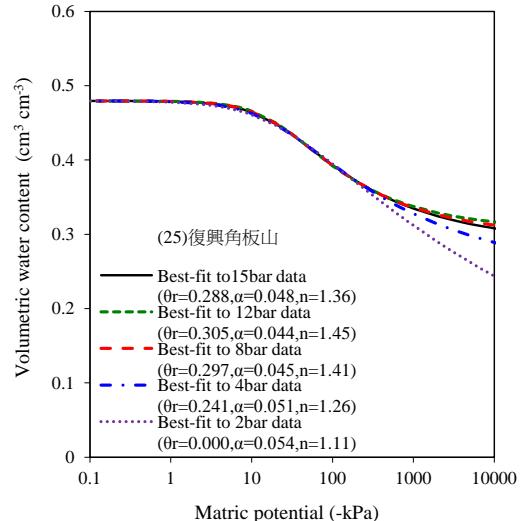


圖 11 土樣 (25) 的量測資料擬合到 2bar, 4bar, 8bar, 12bar, 15bar 之水分特性曲線及擬合參數變化

Figure 11 The changes of soil water characteristic curves and fitting parameters from measured data of soil sample (25) was fitted to 2bar, 4bar, 8bar, 12bar, 15bar

擬合到 15bar 的最佳擬合 θ_r 值，是最適合土樣 (25) 的殘餘水分含量，比較這些 θ_r 值，倘僅以低張力量測資料去做擬合，容易使 θ_r 值偏離最佳值。要避免這種情形發生，加入高張力段量測資料去擬合，是最有效、也最可靠的解決方式。但是，在缺乏高張力資料的狀況下，輔以其他估算 θ_r 值的方法，是個不錯的選擇，以本研究 30 種土樣的結果，建議使用土壤水分係數 (MF - 1) 或式 (4) 來求取殘餘水分含量，讓所建立的水分特性曲線更能貼近高張力段實測值。

表 5 不同 θ_r 的水分特性曲線之擬合參數

Table 5 Fitting parameters of soil water characteristic curves from different θ_r

採樣地點	$\theta_r = \text{NRCS 式 (4)}$						$\theta_r = \text{Seybold and Harms 式 (5)}$						$\theta_r = \text{Seybold and Harms 式 (6)}$					
	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	a (kPa^{-1})	n	R^2	R MSE^\dagger	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	a (kPa^{-1})	n	R^2	R MSE^\dagger	θ_r ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	a (kPa^{-1})	n	R^2	R MSE^\dagger			
山	(3) 三義火炎	0.054	0.4624	1.358	0.995*	0.008	0.032	0.5432	1.301	0.994*	0.0015	0.042	0.5071	1.324	0.994*	0.0010	0.0	
	(15) 翁亨	0.106	0.0792	1.104	0.989*	0.006	0.061	0.0846	1.089	0.989*	0.0006	0.067	0.0839	1.091	0.989*	0.0006	0.0	
	(18) 大溪湧子	0.070	0.1034	1.100	0.977*	0.014	0.058	0.1053	1.096	0.978*	0.0014	0.067	0.1039	1.099	0.977*	0.0014	0.0	
	(25) 復興角板	0.077	0.1092	1.096	0.990*	0.005	0.076	0.1094	1.095	0.990*	0.0005	0.085	0.1078	1.098	0.990*	0.0005	0.0	
	(28) 復興華陵	0.118	0.0186	1.073	0.985*	0.002	0.081	0.0189	1.064	0.984*	0.0002	0.086	0.0189	1.065	0.984*	0.0002	0.0	

—

採樣地點	$\theta_r = MF - 1$					$\theta_r = \text{風乾實驗值}$					$\theta_r = \text{烘乾實驗值}$					
	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (kPa ⁻¹)	n	R ²	MSE [†]	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (kPa ⁻¹)	n	R ²	MSE [†]	θ_r (cm ³ cm ⁻³)	α (kPa ⁻¹)	n	R ²	MSE [†]	
山	(3) 三義火炎	0.014	0.6086	1.267	0.992*	0.024	0.085	0.3467	1.491	0.994*	0.039	0.095	0.3124	1.552	0.993*	0.054
	(15) 爺享	0.063	0.0843	1.090	0.989*	0.006	0.305	0.0366	1.450	0.980*	0.010	0.323	0.0315	1.628	0.967*	0.013
	(18) 大溪湳子	0.028	0.1095	1.087	0.978*	0.014	0.276	0.0514	1.389	0.950*	0.019	0.285	0.0483	1.442	0.943*	0.020
	(25) 復興角板	0.043	0.1150	1.086	0.990*	0.005	0.301	0.0424	1.440	0.996*	0.005	0.313	0.0376	1.539	0.994*	0.006
溝	(28) 復興華陵	0.083	0.0189	1.064	0.984*	0.002	0.346	0.0115	1.508	0.992*	0.002	0.373	0.0091	1.541	0.945*	0.008

註：† 高張力段 8bar – 15bar 的 RMSE

*達 5% 顯著水準

結論

在本研究中，30 種土樣的擬合方程式之 R^2 均達 5% 顯著水準。而且，殘餘水分含量的差異，確實會影響水分特性曲線的變化，尤其在高張力段的部分特別明顯。此外，風乾和烘乾實驗所得水分特性曲線在高張力段的表現不甚理想，但由烘乾 θ_r 值的 RMSE 比風乾來得小，且烘箱有著能良好控制實驗條件並且減少環境干擾的優點，烘乾實驗會比風乾實驗更適合用於實驗設計。關於以經驗估算公式（式(4)、式(5) 及式(6)）估算殘餘水分含量的部分，經過 30 種土樣的分析比較，以式(4) 所得的 RMSE 為最小，優於式(5) 及式(6)。

土壤水分係數 (MF) 為本研究所量測到的最低含水量，已低於永久凋萎點，即基質勢能已超過於 -1500kPa，所以水分係數足以代表殘餘水分含量值（蔡義誌，2008）。本研究部分土樣以 $MF - 1$ 獲取的 θ_r 值，在高張力段的表現，比最佳擬合 θ_r 值更佳，具有更小的 RMSE。

將 θ_r 視為未知參數，直接由擬合方程式及實驗值決定出的最佳擬合 θ_r 值，比其他殘餘水分含量估算公式更接近實驗值，RMSE 最小，最能真實地呈現出實驗量測資料的趨勢，也是最為簡便快速的方法。而且，最佳擬合 θ_r 值所建立水分特性曲線的 R^2 普遍高於其他估算公式的擬合 R^2 ，再加上高張力段的 RMSE 也普遍較低，代表此方法是適合用來獲取本研究土樣的殘餘水分含量。但是，在缺乏高張力量測資料的狀況下，輔以土壤水分係數 ($MF - 1$) 或 USDA - NRCS (2011) 的經驗估算公式（式(4)）來求取殘餘水分含

量，能讓所建立的水分特性曲線更能貼近高張力段實測值。

參考文獻

1. 林俐玲(1996)，「土壤物理學實習手冊」，國立中興大學。
2. 曹舜評、張圖杰 (2011)，「砂箱不同剩餘水分之土壤水分特性曲線推估」，坡地防災學報，10(1)，50-58。
3. 蔡義誌 (2008)，「不飽和土壤水力傳導度與介質孔隙分佈關係之研究」，國立中興大學水土保持研究所博士論文。
4. Arya, L.M., and Paris, J.F. (1981). "A physico-empirical model to predict soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1023-1030.
5. Arya, L.M., Leij, F.J., van Genuchten, M.Th., and Shouse, P.J. (1999). "Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 510-519.
6. Brooks, R.H., and Corey, A.T. (1964). "Hydraulic properties of porous media." *Hydrology Paper No. 3*. Colorado State University, Fort Collins, CO.
7. Cornelis, W. M., Khloso, M., Hartmann, R., van Meirvenne, M., and De Vos, B. (2005). "Comparison of unimodal analytical expressions for the

- soil-water retention curve.” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69(6), 1902-1911.
8. Fredlund, D.G., and Xing, A. (1994). “Equations for the soil-water characteristic curve.” *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.
9. Haverkamp, R., and Parlange, J.Y. (1982). “Comments on a physico-emperical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data.” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46, 1348-1349.
10. Kosugi, K. (1994). “Three-parameter lognormal distribution model for soil water retention.” *Water Resour. Res.*, 30, 891-901.
11. Kosugi, K. (1996). “Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties.” *Water Resour. Res.*, 32, 2697-2703.
12. Krishnapillai, S.H., and Ravichandran N. (2012). “Improving the predictive capability of popular SWCCs by incorporating maximum possible suction.” *International Journal of Geosciences*, 2, 468-475.
13. Leij, F., Schaap, M.G., and Arya, L.M. (2002). “Water retention and storage: Indirect methods.” p. 1009-1045. In J.H. Dane and G.C. Topp (ed.) *Methods of Soil Analysis: Part 4—Physical Methods*. SSSA Book Ser. No. 5. SSSA, Madison, WI.
14. Meskini-Vishkaee, F., Moammadi, M.H., and Vanclooster, M. (2014). “Predicting the soil moisture re-tention curve, from soil particle size distribution and bulk density data.” *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 4053-4063.
15. using a packing density scaling factor
16. Mualem, Y. (1976). “A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media.” *Water Resour. Res.*, 12, 513-522.
17. Nitao, J., and Bear, J. (1996). “Potentials and their role in transport in porous media.” *Water Resour. Res.*, 32, 225-250.
18. Oliviera, I.B., Demond, A.H., and Salehzadeh, A. (1996). “Packing of sands for the production of homogenous porous media.” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60, 49-53.
19. Poeplau, C., Eriksson, J., and Katterer, T. (2015). “Estimating residual water content in air-dried soil from organic carbon and clay content.” *Soil & Tillage Research*, 145, 181-183.
20. Seybold, C.A., and Harms, D.S. (2012). “Estimation of -1500 kPa Water Retention in Soil Survey.” *Soil Science*, 177(4), 229-235.
21. USDA-NRCS (2011). *National Soil Survey Handbook*, Title 430-VI.
<<http://soils.usda.gov/technical/handbook>> (verified March 2, 2011).
22. van Genuchten, M.Th. (1980). “A closed-form equation for predicting

蔡旻辰、林湘芸、蔡義誌、林俐玲：
在高張力條件下決定 van Genuchten 模式的殘餘水分含量 (θ_r) 參數之研究

- the hydraulic conductivity of unsaturated soils.” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892-898.
23. van Genuchten, M.Th., and Nielsen, D.R. (1985). “On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils.” *Ann. Geophys.*, 3, 615-628.
24. van Genuchten, M.Th., Leij, F.J., and Yates, S.R. (1991). “The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.” *U. S. Environmental Protection Agency Research Document: EPA/600/2-91/065*, Oklahoma, U.S.A., 1-85.
25. van Genuchten et al. (ed.) *Proc. Int. Workshop on Indirect Methods of Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. 11-13 Oct. 1989. U.S. Salinity Laboratory and Dep. Soil and Envir. Sci., Univ. of California, Riverside.
26. Wösten, J.H.M., and van Genuchten, M.Th. (1988). “Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions.” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52, 1762-1770.

104 年 11 月 03 日收稿

104 年 11 月 09 日修改

104 年 11 月 26 日接受

