

DOI: 10.11779/CJGE201705017

# 基于土壤物理特性扩展技术的土水特征曲线预测方法

刘士雨<sup>1, 2</sup>, 俞 缙<sup>1, 2</sup>, 蔡燕燕<sup>1, 2</sup>, 涂兵雄<sup>1, 2</sup>

(1. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 土水特征曲线是模拟水和污染物在非饱和土中运移的重要水力特性参数。但是, 土水特征曲线的直接量测方法比较困难。Arya 和 Paris 提出了一种通过粒径分布曲线预测土水特征曲线的模型——AP 模型。该模型引入一个转换系数  $\alpha$  建立土体假想形态与真实形态之间的联系。但是, 现有的推导系数  $\alpha$  的方法一方面计算过程过于复杂, 另一方面没有全面考虑土的物理特性。基于土壤物理特性扩展技术提出一种新的计算参数  $\alpha$  的方法。为了验证新方法, 从非饱和土水力特性数据库中选出不同类型的土壤样本, 采用新方法分别计算出各类型土壤的参数  $\alpha$ 。然后, 将计算出的参数  $\alpha$  用于预测其他土样的土水特征曲线, 从而验证新方法计算出的参数  $\alpha$  的有效性。还将提出的新方法与其他利用 AP 模型预测土水特征曲线的代表性方法进行对比, 结果显示该方法预测结果更加准确。

**关键词:** 土水特征曲线; 土壤物理特性; Arya 和 Paris 模型; 扩展技术

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)05-0924-08

作者简介: 刘士雨(1979-), 男, 博士, 讲师, 主要从事非饱和土力学理论与试验等方面的教学和研究工作。E-mail: scholarrain@163.com。

## Prediction of soil water characteristic curve using physically based scaling technique

LIU Shi-yu<sup>1, 2</sup>, YU Jin<sup>1, 2</sup>, CAI Yan-yan<sup>1, 2</sup>, TU Bing-xiong<sup>1, 2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China; 2. Fujian Research Center for Tunneling and Urban  
Underground Space Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** The soil water characteristic curve (SWCC) is an important hydraulic parameter for modeling water flow and contaminant transport in the unsaturated soil. However, direct measurement of the SWCC is still difficult. The Arya and Paris (AP) model estimates the SWCC from particle-size distribution curve (PSD) based on the shape similarity of the two curves. It introduces an empirical parameter,  $\alpha$ , used to scale pore attributes from hypothetical formations to natural structures. Several approaches are used to derive  $\alpha$ . However, the calculation procedures of these approaches are either quite complicated or developed without paying much attention to the physical significance of the soil properties. In the present paper the physically based scaling technique (PBS) is employed to derive  $\alpha$  for the AP model. Fifty soil samples, representing a range of textures that include sand, sandy loam, loam, silt loam and clay, are selected from UNSODA hydraulic property database for calculating  $\alpha$  using the PBS approach. In addition, nineteen soil samples with different textures are used to verify the effectiveness of proposed  $\alpha$  values. The results are compared with those of other approaches and show that the PBS technique combining with the AP model is a more useful and easier approach to predict SWCC from PSD.

**Key words:** soil water characteristic curve; basic soil property; Arya and Paris model; scaling technique

## 0 引言

工程中遇到的土大多处于非饱和状态<sup>[1]</sup>。土水特征曲线(SWCC)反映土壤持水能力, 是非饱和土的一个重要水力特性参数之一, 也是水文和环境工程研究中模拟渗流和污染物迁移的重要输入参数<sup>[2-5]</sup>。但 SWCC 的测定往往耗时长, 成本高, 并且受土体结构空间变异特性的影响, 测试中容易产生较大的误差<sup>[6]</sup>。所以从比较容易获得的土壤参数来预测 SWCC 的间接方法逐渐受到学者们的重视<sup>[7]</sup>。

间接方法分为物理经验方法、经验方法和分形几何方法<sup>[8]</sup>。物理经验方法的理论基础在于粒径分布曲线(PSD)与 SWCC 的形状相似性。基于这一特征, Arya 等<sup>[9]</sup>率先提出了一种预测 SWCC 的模型——AP 模型。该模型引入一个转换系数  $\alpha$  建立土体假想形态

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51679093, 51374112); 福建省自然科学基金面上项目(2015J01210); 福建省教育厅科技产学研项目(JA15023); 华侨大学引进高层次人才启动项目(14BS211)

收稿日期: 2016-05-22

与真实形态之间的联系。起初, Arya 等建议所有土壤的  $\alpha$  值为一常数, 而一些学者认为固定的  $\alpha$  值降低了预测的准确度, 从而提出了推导系数  $\alpha$  的方法<sup>[10-12]</sup>。但是, 现有的推导系数  $\alpha$  的方法一方面计算过程过于复杂, 另一方面没有全面考虑土的物理特性。

随着环境问题的日益突出, 扩展技术被用于从小尺度模型来描述野外足尺包气带的水力特性<sup>[13-15]</sup>。

Kosugi 等<sup>[16]</sup>基于土壤物理特性扩展 (PBS) 技术, 提出了描述大尺度区域 SWCC 的方法。该方法提供了一个将多条 SWCC 合并为一条参考 SWCC 的简便途径, 而且参数中考虑了土壤的物理特性<sup>[17]</sup>。

本文提出了将 PBS 技术与 AP 模型相结合, 从 PSD 来预测 SWCC 的新方法。为了验证新方法, 从非饱和土水力特性数据库 (UNSDA)<sup>[18]</sup>中选出不同类型的 50 个土壤样本 (包括: 砂、砂质壤土、壤土、粉砂壤土和黏土), 采用新方法分别计算出各类型土壤的参数  $\alpha$ 。然后, 再选取另外 19 个土样来验证新方法计算出的参数  $\alpha$  的有效性, 并与其他利用 AP 模型预测 SWCC 的代表性方法进行对比。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

土样取自非饱和土水力特性数据库 (UNSDA)<sup>[18]</sup>, 包括砂、砂质壤土、壤土、粉质壤土和黏土共 69 个土样, 其中随机选取 50 个土样用于通过扩展技术计算参数  $\alpha$ , 剩余 19 个土样用于验证计算出的参数  $\alpha$  的有效性, 所取土样如表 1 所示。UNSDA 由取自美国、英国、荷兰、德国、比利时、俄罗斯、意大利、澳大利亚等国家的 790 个土样所组成, 包括土样的土水特征曲线、粒径分布曲线、体积密度和颗粒密度等信息。

表 1 所取土样的分类及 UNSODA 代号

Table 1 Textural classes and UNSODA codes for samples		
土壤类别	UNSDA 代号(code)	用途
砂(S)	1462, 1463, 1464, 1465, 1466, 1467, 3330, 3331, 3332, 3340, 4523, 4660, 4661	计算 $\alpha$
	1460, 2100, 4650, 4651	验证 $\alpha$
砂质壤土(SL)	1161, 1380, 1381, 2532, 3290, 3310, 3320, 3321, 3323	计算 $\alpha$
	3291, 3300, 3301, 3311	验证 $\alpha$
壤土(L)	1370, 2530, 2531, 4591, 4600, 4610, 4620	计算 $\alpha$
	3293, 3302, 3303, 4592	验证 $\alpha$
粉质壤土(SiL)	1280, 1281, 1282, 1341, 1342, 1350, 1352, 1490, 2000, 2002, 2010, 2011, 4510, 4671	计算 $\alpha$
	4672, 4673	验证 $\alpha$
黏土(C)	1340, 1351, 2001, 2012	计算 $\alpha$
	1162, 1163, 2360, 2362, 4680	验证 $\alpha$
1400, 2361, 4681		

### 1.2 方法

#### (1) AP 模型

AP 模型基于物理及概念化的趋近方法, 配合分形和相似理论, 来模拟水分含量与基质吸力的变化。AP 模型假设所有土壤孔隙都互相联通, 可利用毛细管公式从土壤的孔隙半径  $r$ , 根据毛细管水柱上升的高度  $h$  来估算基质吸力。毛细管公式如下:

$$h = \frac{2\gamma \cos\Theta}{\rho_w gr} , \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  为表面张力 ( $N/m$ ),  $\Theta$  为接触角,  $\rho_w$  为水的密度 ( $kg/m^3$ ),  $g$  为重力加速度 ( $m/s^2$ )。

为了便于理解与推算土中孔隙的分布, 假想土是由许多不同粒径的球体颗粒, 按照其成分比例堆砌成的理想化基质。首先, 将 PSD 按照土粒径从细到粗划分成  $n$  个分量, 每一个分量皆占有一定的质量比例。然后, 由孔隙与土颗粒半径的经验公式<sup>[9]</sup>得出每一个粒径分量所代表的孔隙半径, 其公式如下:

$$r_i = \frac{D_i}{2} \left[ \frac{2en_i^{1-\alpha_i}}{3} \right]^{0.5} , \quad (2)$$

式中,  $D_i$  和  $r_i$  分别为第  $i$  个粒径分量的土颗粒直径 ( $cm$ ) 与对应的孔隙半径 ( $cm$ ),  $\alpha$  为转换系数,  $n_i$  为第  $i$  个粒径分量的土颗粒数量,  $e$  为孔隙比。 $n_i$  和  $e$  按下式计算:

$$n_i = \frac{6W_i}{\pi D_i^3 \rho_s} , \quad (3)$$

$$e = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_b} , \quad (4)$$

式中,  $W_i$  为第  $i$  个粒径分量的土颗粒质量 ( $kg$ ),  $\rho_b$  为土的干密度 ( $kg/cm^3$ ),  $\rho_s$  为土的颗粒密度 ( $kg/cm^3$ )。

联合式 (1) ~ (4), 便可得到每个分量的基质吸力的计算式:

$$h_i = \frac{\gamma}{\rho_w g D_i \sqrt{\frac{2(\rho_s - \rho_b)}{3\rho_b} \left( \frac{W_i}{6\pi D_i^3 \rho_s} \right)^{1-\alpha_i}}} . \quad (5)$$

另外, AP 模型假设土的体积含水率  $\theta_i$  是由各个孔隙半径  $r_i$  所代表的孔隙空间由小到大逐渐充满水后得到的, 其含水率的多少按照各粒径分量的累积质量的比例来估算。由第 1 个分量的孔隙 (即分量中最小的孔隙) 开始先充满水, 其余分量的孔隙逐渐累加, 最后加总的含水率为饱和含水率 ( $S_w$ )。其计算方式为

$$\theta_i = \phi S_w \sum_{i=1}^I W_i , \quad (6)$$

式中,  $\phi$  为土的孔隙率 ( $cm^3 \cdot cm^{-3}$ ), 饱和度  $S_w$  为测得的饱和含水率与理论孔隙率的比值,  $\phi S_w$  可以被看作是土中封闭气泡对饱和度影响的校正<sup>[11]</sup>。土的孔隙率可由体积密度  $\rho_b$  和颗粒密度  $\rho_s$  计算得到:  $\phi = 1 - (\rho_b / \rho_s)$ 。

由以上可知, 一旦得到了土的转换系数  $\alpha$ , 便可由式 (5)、(6) 推出土水特征曲线。

## (2) 土壤物理特性扩展 (PBS) 技术

扩展技术是用比例因子把相关联的一组曲线描述为一个单一曲线<sup>[15]</sup>。Miller 等<sup>[14]</sup>将扩展技术应用到土壤的研究中, 假定“几何上类似的”土壤的微观结构, 差异仅在于特征长度  $\lambda$  的不同<sup>[19]</sup>。扩展系数  $\delta_j$  被定义为土样  $j$  的特征长度  $\lambda_j$  与参考土壤的特征长度  $\lambda_{\text{ref}}$  的比值<sup>[14]</sup>, 即

$$\delta_j = \frac{\lambda_j}{\lambda_{\text{ref}}} \quad . \quad (7)$$

Kosugi 等<sup>[16]</sup>提出了一种基于土壤物理特性扩展 (PBS) 技术, 引入土壤孔隙半径中值  $r_m$  作为特征长度  $\lambda_j$ , 来扩展土壤的 SWCC。他们首先假设土壤的孔隙服从对数正态分布, 即

$$f(\ln r) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (8)$$

式中,  $r$  为孔径 (cm),  $\sigma$  为孔径分布的标准差。

基于这个假设, SWCC 可由式 (8) 的累积分布曲线得到, 即

$$S_e(\ln h) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = F_n \left[ \frac{(\ln h_m - \ln h)}{\sigma} \right]. \quad (9)$$

式中  $\theta_s$  和  $\theta_r$  分别为饱和体积含水率和残余体积含水率 (cm<sup>3</sup>·cm<sup>-3</sup>);  $\ln h_m$  为  $\ln(h)$  的均值; 中值吸力  $h_m$  由孔隙半径中值  $r_m$  运用式 (1) 推出,  $F_n(x)$  为正态分布函数:

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-x^2/2) dx \quad . \quad (10)$$

继而 Kosugi 等<sup>[16]</sup>给出了参考土水特征曲线函数  $S_{e,R}$ :

$$S_{e,R}(\ln h) = F_n \left[ \frac{(\ln h_{m,R} - \ln h)}{\sigma_R} \right], \quad (11)$$

式中,  $\ln h_{m,R}$  和  $\sigma_R$  分别为参考土样的均值和标准差, 由下式计算:

$$\ln h_{m,R} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \ln h_{m,j}, \quad (12)$$

$$\sigma_R^2 = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \ln \sigma_j^2, \quad (13)$$

式中,  $J$  为土样数量,  $\ln h_{m,j}$  和  $\sigma_j$  分别为土样  $j$  的均值和标准差。

据此, 扩展系数为<sup>[15-16]</sup>

$$\delta_j = \frac{r_{m,j}}{r_R} = \frac{h_{m,R}}{h_{m,j}} \quad . \quad (14)$$

## (3) 基于 PBS 技术推导 $\alpha$

首先, 运用 PBS 技术计算表 1 中的 50 个计算样

本的  $\alpha$  值。计算详细过程如下:

### a) 扩展量测的 SWCC

利用对数正态分布模型 (式 (9)) 拟合 SWCC 的实际量测值, 得到每个土样的  $h_{m,\text{measured}}$  和  $\sigma_{\text{measured}}$  值。接着, 利用式 (11) ~ (13) 计算每种土壤 (包括砂、砂质壤土、壤土、粉砂壤土和黏土) 和所有土壤的参考土水特征曲线函数  $S_{e,R_{\text{measured}}}$ 。本研究中, 假设土壤孔隙率等于饱和体积含水率  $\theta_s$ , 对于数据库中没有提供孔隙率和饱和体积含水率  $\theta_s$  的土样, 把 SWCC 中对应于最低吸力的体积含水率作为饱和体积含水率  $\theta_s^{[20]}$ , 并假设吸力无穷大时残余体积含水率  $\theta_r$  等于零<sup>[21]</sup>。

### b) 扩展预测的 SWCC

土壤 PSD 与 SWCC 具有相似性, 因此 PSD 同样符合对数正态分布, PSD 的累积概率曲线表达式  $f(\ln D_i)$  为<sup>[22]</sup>

$$f(\ln D_i) = F_n \left[ \frac{(\ln D_i - \mu_p)}{\sigma_p} \right], \quad (15)$$

式中,  $D_i$  为第  $i$  个粒径分量的土颗粒直径 (cm),  $\mu_p$  和  $\sigma_p$  分别为  $\ln D_i$  的均值和标准差。

接下来, 应用式 (2) ~ (6), 选择一系列可能的  $\alpha$  值 ( $\alpha_{\text{potential}}$ ), 来推测每种土壤和全部土壤的 SWCC。然后, 用对数正态分布模型 (式 (9)) 拟合推测的 SWCC 得到每个土样的参数  $h_{m,\text{predicted}}$  和  $\sigma_{\text{predicted}}$ 。最后, 应用式 (11), 依据可能的  $\alpha$  值 ( $\alpha_{\text{potential}}$ ) 来计算每种土壤和全部土壤的参考土水特征曲线函数  $S_{e,R_{\text{predicted}}}$ 。

### c) 计算最优 $\alpha$ 值 ( $\alpha_{\text{opt}}$ )

利用迭代的方法计算  $S_{e,R_{\text{measured}}}$  和  $S_{e,R_{\text{predicted}}}$  两者之间的最小均方根误差 (RMSE), 以确定每种土壤和全部土样的最优  $\alpha$  值 ( $\alpha_{\text{opt}}$ )。最小均方根误差 (RMSE) 计算公式如下:

$$\text{RMSE}(\alpha_{\text{potential}})$$

$$= \left\{ \frac{\sum_{l=1}^L [S_{e,R_{\text{measured}}}(\ln h_l) - S_{e,R_{\text{predicted}}}(\ln h_l, \alpha_{\text{potential}})]^2}{L-1} \right\}^{0.5}, \quad (16)$$

式中,  $L$  为 SWCC 吸力值 ( $h$ ) 的数量,  $h_l$  为每条 SWCC 第  $l$  个点对应的吸力值 (cm)。

## (4) 验证

获得每种土壤和所有土壤的  $\alpha_{\text{opt}}$  后, 利用  $\alpha_{\text{opt}}$  预测表 1 中的 19 个验证土样的 SWCC, 并与先前具有代表性的类似研究 (如表 2 所示) 的预测结果相比较, 从而检验 PBS 方法的有效性。确定系数 ( $R^2$ ) 和均方根误差 (RMSE) 用于判定这些方法预测 SWCC 的准

确性。

表 2 列出了利用 AP 模型预测 SWCC 具有代表性的方法, 包括常  $\alpha$  值和变  $\alpha$  值两类。除了表 2 中列出的方法, 还有其他一些利用 AP 模型预测 SWCC 的方法。例如, Basile 等<sup>[10]</sup>假定  $\alpha$  为土壤吸力 ( $h$ ) 的函数。但是, 这种函数关系导致利用该方法预测 SWCC 非常复杂<sup>[12]</sup>。分形的概念也被用来确定  $\alpha$  值<sup>[23]</sup>, 但是该方法只考虑孔隙的弯曲程度对 SWCC 的影响, 而忽略了其他因素影响因素, 如容重等。由于这些方法存在的缺陷, 在本文并未将其列入表 2 中。

表 2 利用 AP 模型预测 SWCC 的代表性方法

Table 2 Representative methods to predict SWCCs according to AP model

方法	$\alpha$ 值与计算公式
固定 $\alpha$	对于所有土壤 $\alpha = 1.38$ <sup>[9]</sup> ; 对于所有土壤 $\alpha = 0.938$ <sup>[12]</sup> ; 砂 $\alpha = 1.285$ , 砂质壤土 $\alpha = 1.459$ , 壤土 $\alpha = 1.375$ , 粉砂壤土 $\alpha = 1.150$ , 黏土 $\alpha = 1.160$ <sup>[11]</sup> 。
逻辑方程 (Logistic) <sup>[11]</sup>	$(Y + \Delta Y) = \frac{Y_f Y_i}{Y_i + (Y_f - Y_i) \exp[-\mu(x + \Delta x)]}$ 式中 $Y$ 是 $\lg N_i$ 的因变量, $Y_f$ 是 $\lg N_i$ 的终值, $Y_i$ 是 $\lg N_i$ 的初值, $\mu$ 是比例系数, $x$ 是 $\lg n_i$ 的独立变量, $\Delta Y = \Delta \lg N_i$ , $\Delta x = \Delta \lg n_i$ , $\alpha_i = \lg N_i / \lg n_i$ , $n_i$ 和 $N_i$ 分别为假想和实际土体中第 $i$ 个粒径分量的土颗粒数量。
线性方程 (Linear) <sup>[11]</sup>	$\alpha_i = \left[ \frac{a + b \lg(8W_i/D_i^3)}{\lg n_i} \right]$ 式中 $W_i$ 为第 $i$ 个粒径分量的土颗粒质量 (kg), $D_i$ 为第 $i$ 个粒径分量的土颗粒直径 (cm), $n_i$ 为假想土体中土颗粒数量, $a$ , $b$ 为常数。
函数 $\alpha = f(\theta)$ <sup>[12]</sup>	$\alpha_i = 0.947 + 0.427 \exp(-\theta_i/0.129)$ 式中 $\theta_i$ 为土体中第 $i$ 个粒径分量的含水率 ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ )。

## 2 结果与讨论

### 2.1 扩展量测的 SWCC

50 个用于计算最优  $\alpha$  值的土样的 SWCC 数据如图 1 所示。SWCC 数据经对数正态模型 (式 (9)) 拟合后得知, 所有土样拟合结果的确定系数  $R^2$  均大于 0.91。拟合结果说明了利用对数正态模型描述 SWCC 测量数据的有效性。

将 PBS 技术应用于图 1 所示的各组土样, 得到扩展后的 SWCC 数据 (圆圈) 和参考 SWCC (实线), 如图 2 所示。参考 SWCC 的参数值  $h_{m,\text{ref}}$  和  $\sigma_{\text{ref}}$  列于表 3 中。利用扩展后的 SWCC 数据与参考 SWCC 之间的均方根误差 RMSE 来评估扩展的有效性, 结果同样列

于表 3 中。表 3 显示, 所有土样一同扩展比土样按土壤种类扩展得到的 RMSE 值高得多, 这说明了同一种土壤相似性更强。

表 3 每种土壤和所有土样的扩展结果对比

Table 3 Scaling results for each texture and all soils

土壤类别	$h_{m,\text{ref}}/\text{cm}$	$\sigma_{\text{ref}}$	RMSE
砂	42.08	1.25	0.119
砂质壤土	756.09	3.78	0.105
壤土	3333.71	4.97	0.063
粉砂壤土	1452.21	4.33	0.122
黏土	43047.72	3.18	0.042
所有土样	835.11	3.75	0.226

### 2.2 最优 $\alpha$ 值 ( $\alpha_{\text{opt}}$ )

每种土壤和全部土样的  $\alpha_{\text{opt}}$ ,  $S_{e,R_{\text{measured}}}$  与  $S_{e,R_{\text{predicted}}}$  之间的 RMSE 值如表 4 所示。比较其他土壤, 砂质壤土和壤土的 RMSE 值更低, 所以他们的预测准确性更好。其原因可能是随机抽取的砂质壤土和壤土的验证土样与计算  $\alpha$  土样的物理特性 (粒径分布、干密度、颗粒密度等) 更为接近, 也可能是验证土样与计算  $\alpha$  土样的吸力大部分为总吸力或者大部分为基质吸力。图 3 给出了各组土样的测量土水特征曲线的参考曲线 (reference SWCC<sub>m</sub>) 和最优预测土水特征曲线的参考曲线 (optimal reference SWCC<sub>p</sub>)。为了定性评估参数  $\alpha$  预测 SWCC 的敏感性, 图 3 还包括对应可能的  $\alpha$  值的预测土水特征曲线的参考曲线 (possible reference SWCC<sub>p</sub>)。从图 3 中可看出, 砂质壤土和壤土的 reference SWCC<sub>m</sub> (虚线) 和 optimal reference SWCC<sub>p</sub> (粗实线) 更接近, 说明这两组土样 SWCC 的预测结果更接近量测值。

表 4 每种土壤和所有土样的最优  $\alpha$  值 ( $\alpha_{\text{opt}}$ )

Table 4 Optimal  $\alpha$  values ( $\alpha_{\text{opt}}$ ) for each texture and all soils

土壤类别	砂	砂质壤土	壤土	粉砂壤土	黏土	所有土样
$\alpha_{\text{opt}}$	1.43	1.76	1.58	1.39	1.30	1.48
RMSE	0.034	0.012	0.017	0.085	0.033	0.038

### 2.3 验证结果

利用表 1 中的测试土样来验证 PBS 技术得到的  $\alpha_{\text{opt}}$  预测 SWCC 的有效性, 预测结果与表 2 中的其他具有代表性的方法进行对比。首先, 为了直观地对比各种方法的预测效果, 分别在 5 种土壤中各随机选取 1 个土样 (a 砂 code 4650, b 砂质壤土 code 3311, c 壤土 code 3302, d 粉砂壤土 code 2012, e 黏土 code 2361), 图 4 给出了 5 个土样的 SWCC 量测数据与预测结果。由图 4 可知, 对于各种土样, 利用 PBS 技术得到 SWCC 的预测结果都比较近量测值。这说明了 PBS 技术结合 AP 模型预测 SWCC 方法的可行性。

接下来, 通过对表 1 中的测试土样在相应的吸力值上量测的与预测的体积含水率的偏差来判断各种



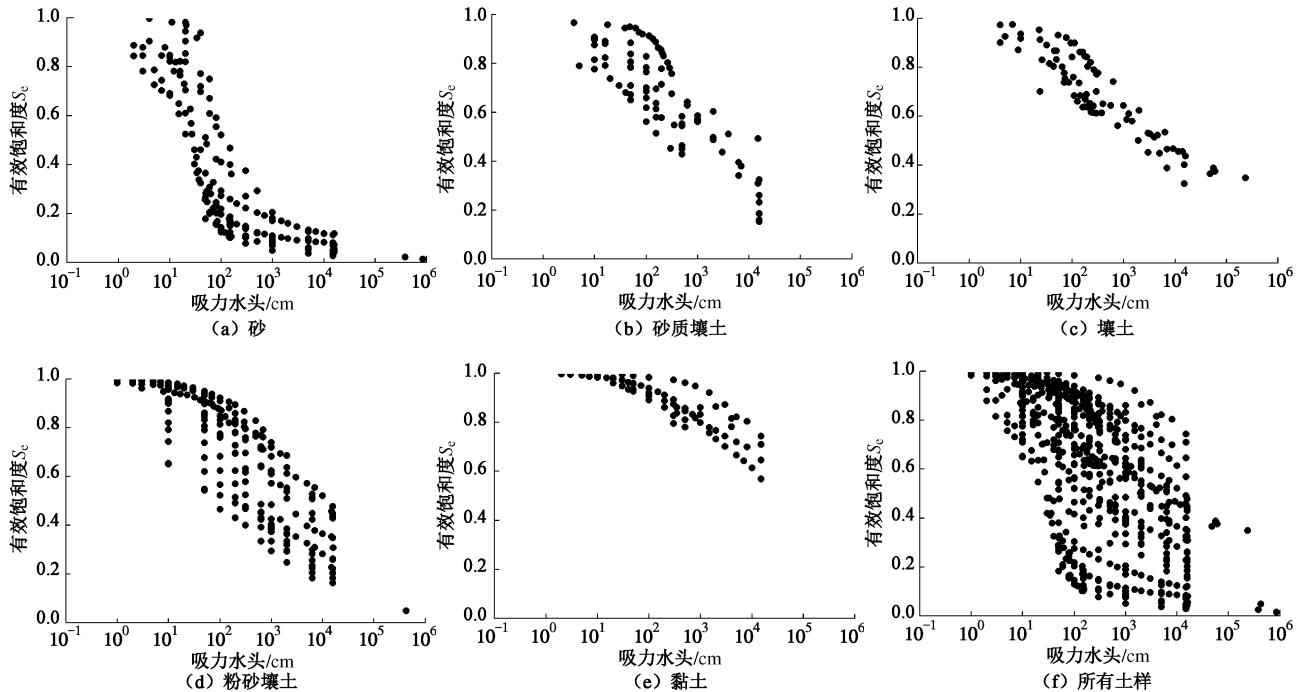


图 1 未扩展的每种土壤和所有土样 SWCC 量测值

Fig. 1 Unscaled measured SWCCs for each texture and all soils

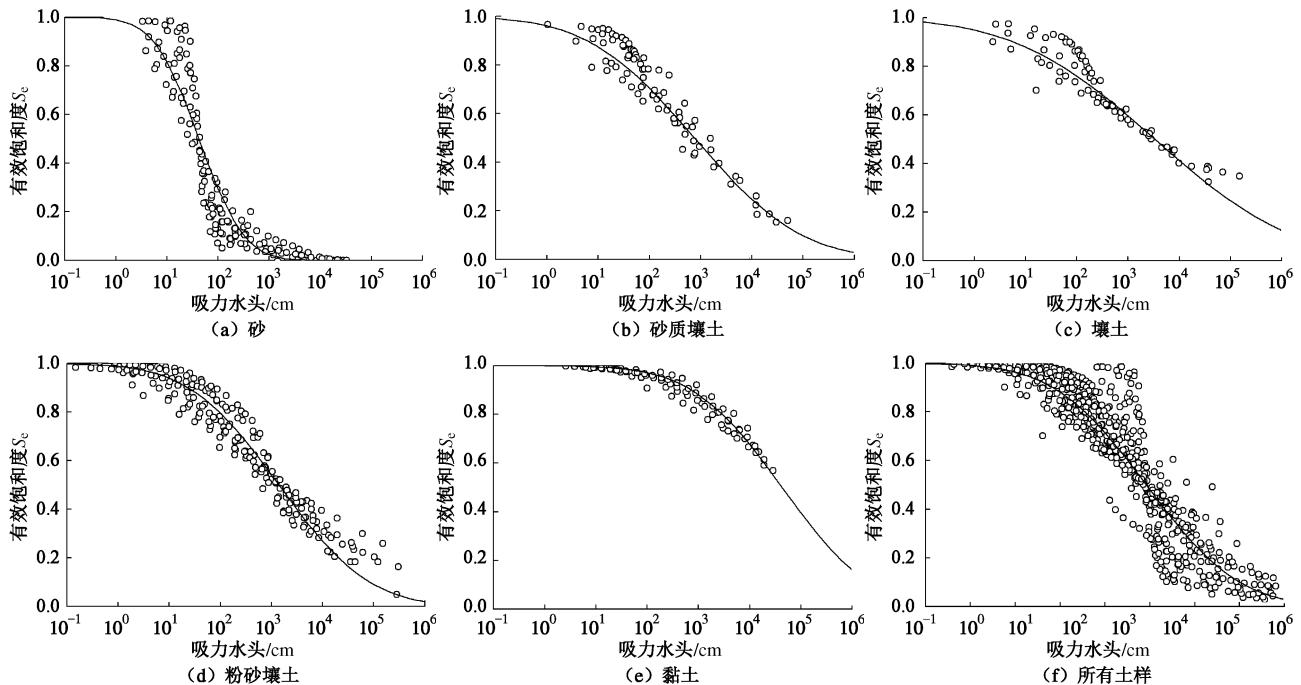


图 2 扩展的每种土壤和所有土样 SWCC 量测值

Fig. 2 Scaled measured SWCCs for each texture and all soils

方法的预测能力,结果如图 5 所示。各种方法预测的体积含水率与量测值之间的均方根误差 (RMSE) 列于表 5 中。表 5 表明,最好的预测结果来自于应用 PBS 技术得到的各类土壤的最优  $\alpha$  值 ( $\alpha_{opt,T}$ ), 对应的 RMSE 值为 0.032。这可能是由于土样按土壤种类进行分类后,土样内部结构更具有相似性的缘故。最差的是逻辑方程的预测结果,对应的 RMSE 值为 0.235。

由图 5(h)可知,最高的线性回归决定系数 ( $R^2=0.964$ ), 并且回归直线与 1:1 直线几乎重合,说明应用 PBS 技术得到的各类土壤的最优  $\alpha$  值 ( $\alpha_{opt,T}$ ) 使预测的与量测的体积含水率之间具有更好的一致性。对于其他的方法,有些方法出现了巨大的偏差。图 5 显示,  $\alpha=0.938$  (图 5 (b)), 逻辑方程 (图 5 (c)) 和  $\alpha=f(\theta)$  (图 5 (e)) 在高吸力和低吸力范围都低估了体积含

水率, 而线性方程(图5(d))却高估了体积含水率。值得注意的是, 虽然信息较为全面、丰富和开放的

NSODA更适合用来验证土水特征曲线预测方法的准确性。但NSODA的土样信息中并没有标明吸力是总

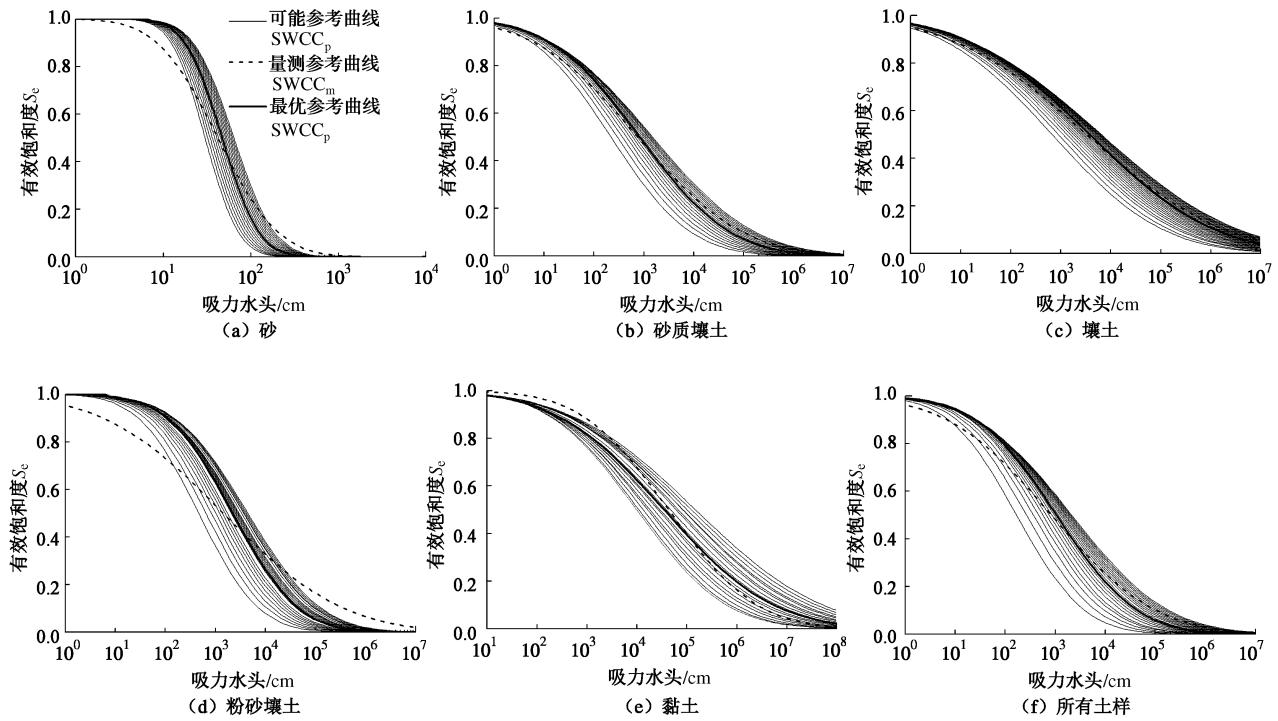


图3 每种土壤和所有土样的量测参考曲线(黑色虚线)、可能参考曲线(灰色实线)和最优参考曲线(黑色实线)

Fig. 3 Reference SWCC<sub>m</sub> (black dash lines), possible reference SWCC<sub>p</sub> (gray solid lines) and optimal reference SWCC<sub>p</sub> (black solid lines) corresponding to  $\alpha_{opt}$  for each texture and all soils

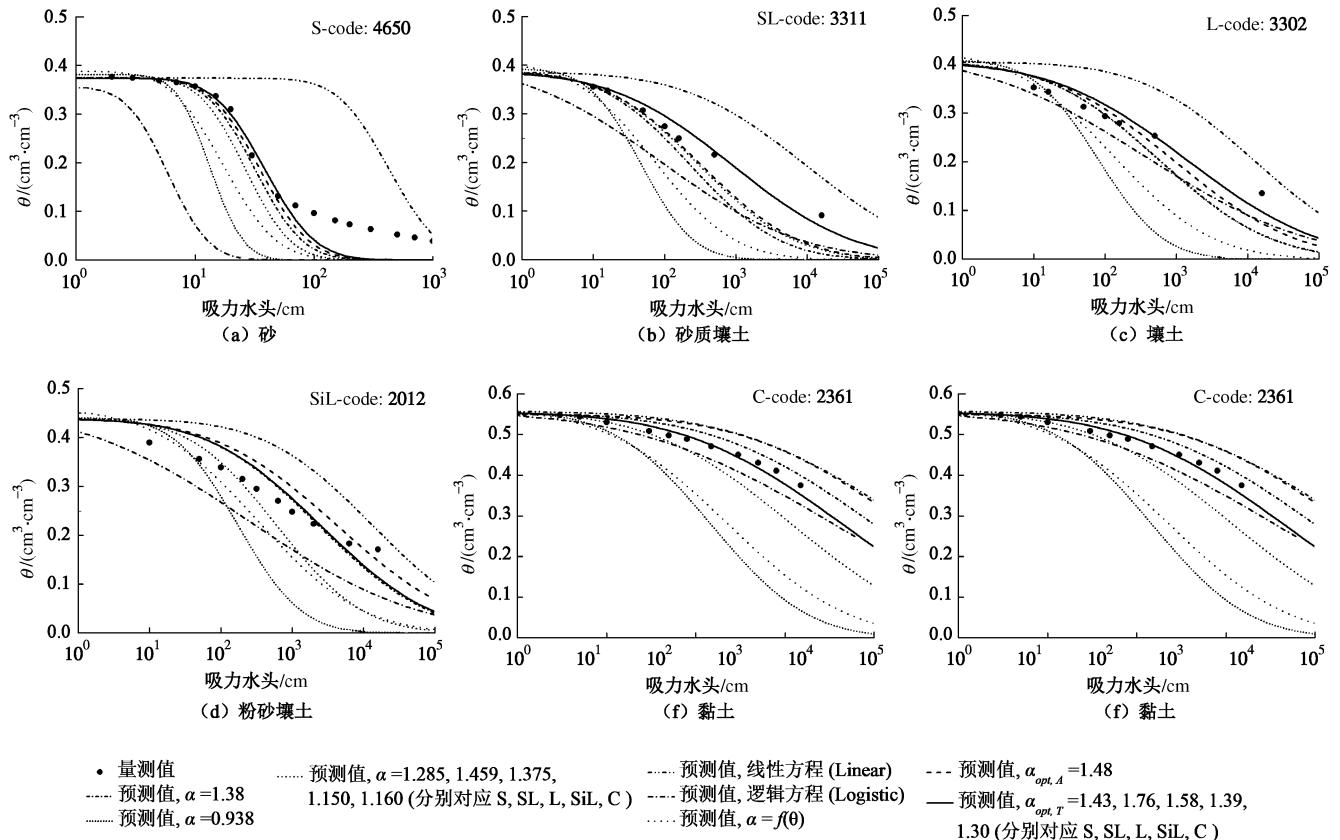
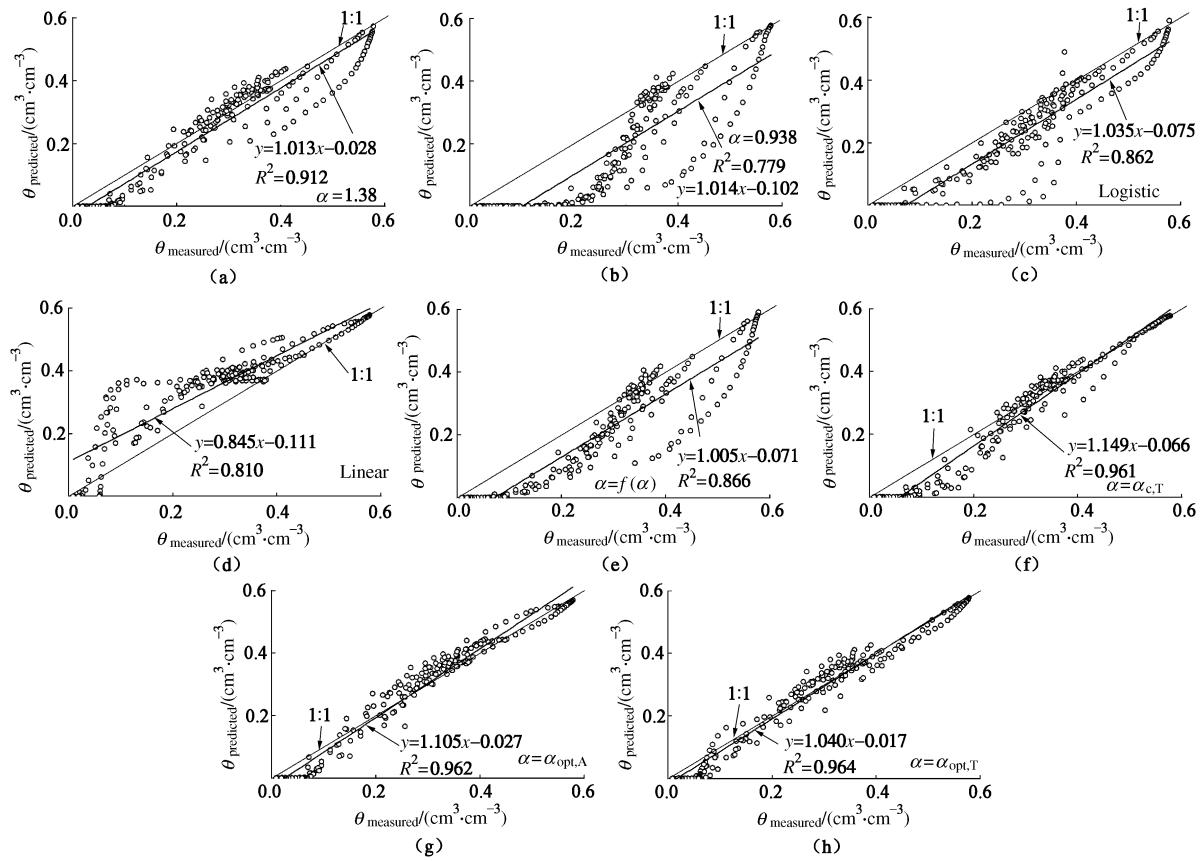


图4 各种方法的SWCC预测效果对比

Fig. 4 Comparison between SWCC prediction methods and experimental data for each texture

图 5 对比不同  $\alpha$  值预测的体积含水率与量测值之间的偏差Fig. 5 Comparison between measured and predicted volumetric water contents,  $\theta$ , using different  $\alpha$  equations for all test soils

吸力还是基质吸力。这也是本文提出方法的预测结果与实测值有一定预测偏差的原因之一。如果能针对土样的总吸力和基质吸力分别来计算参数  $\alpha$  值, 再运用  $\alpha$  值来估算预测土样的总吸力和基质吸力, 那么本方法的预测结果将会更加准确。

表 5 各方法量测的与预测的体积含水率之间的均方根误差

Table 5 Comparison of RMSE values for different SWCC prediction results

方法	$\alpha = 1.38$	$\alpha = 0.938$	Linear	Logistic
RMSE	0.054	0.128	0.095	0.235
方法	$\alpha = f(\theta)$	$\alpha = \alpha_{c,T}^a$	$\alpha = \alpha_{opt,A}^b$	$\alpha = \alpha_{opt,T}^c$
RMSE	0.093	0.049	0.038	0.032

注: <sup>a</sup> $\alpha_{c,T}$  文献[11]提出的各类土壤的  $\alpha$  值 (砂、砂质壤土、壤土、粉质壤土和黏土  $\alpha$  值分别为 1.285, 1.459, 1.375, 1.150, 1.160;

<sup>b</sup> $\alpha_{opt,A}$  为应用 PBS 技术得到的所有土壤的最优  $\alpha$  值 ( $\alpha=1.48$ );

<sup>c</sup> $\alpha_{opt,T}$  为应用 PBS 技术得到的各类土壤的最优  $\alpha$  值 (砂、砂质壤土、壤土, 粉质壤土和黏土最优  $\alpha$  值分别为 1.43, 1.76, 1.58, 1.39, 1.30)。

综上, 与其它预测方法相比较, PBS 技术的预测值和量测值之间表现出更好的一致性, 尤其将 PBS 技术应用于相似土样时预测效果更好。PBS 技术结合 AP 模型是一种从 PSD 预测 SWCC 可行而且更有效的方法。而且, 与现有常用的计算  $\alpha$  的方法中含有没有物理意义的经验参数不同, PBS 技术计算  $\alpha$  的方法中

所有参数都具有实际的物理意义。

### 3 结语

本文提出了运用 PBS 技术与 AP 模型相结合, 从 PSD 来预测 SWCC 的新方法。从非饱和土水力特性数据库 (UNSDA) 中选出不同类型的 50 个土壤样本 (包括: 砂、砂质壤土、壤土、粉砂壤土和黏土), 采用新方法分别计算出各类型土壤的参数  $\alpha$ 。然后, 再选取 19 个土样来验证新方法计算出的参数  $\alpha$  的有效性, 并与其他利用 AP 模型预测 SWCC 的代表性方法进行对比。结果表明, 与其它方法相比, PBS 技术提高了 AP 模型预测 SWCC 的准确性, 特别是将 PBS 技术应用于相似的土样时预测效果更好。虽然验证结果清楚地展示了新方法在土壤水文研究中预测 SWCC 的能力, 但是, 本文仅利用非饱和土水力数据库 (UNSDA) 的数据来验证新方法, 其实用性还需实际工程的检验。

### 参考文献:

- [1] 陈正汉. 非饱和土与特殊土力学的基本理论研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 201-271. (CHEN Zheng-han. On basic theories of unsaturated soils and special soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2):

- 201–271. (in Chinese))
- [2] HENRY E J, SMITH J E. Numerical demonstration of surfactant concentration-dependent capillarity and viscosity effects on infiltration from a constant flux line source[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, **329**(1): 63–74.
- [3] IRESON A M, MATHIAS S A, WHEATER H S, et al. A model for flow in the chalk vadose zone incorporating progressive weathering[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **365**(3): 244–260.
- [4] LIU S Y, YASUFUKU N, LIU Q, et al. Bimodal and multimodal descriptions of soil-water characteristic curves for structural soils[J]. *Water Science and Technology*, 2013, **67**(8): 1740–1747.
- [5] LIU S Y, YASUFUKU N, LIU Q, et al. Physically based closed-form expression for the bimodal unsaturated hydraulic conductivity function[J]. *Water Science and Technology*, 2013, **68**(2): 328–334.
- [6] 张季如, 胡泳, 余红玲, 等. 黏性土粒径分布的多重分形特性及土-水特征曲线的预测研究[J]. *水利学报*, 2015, **46**(6): 650–657. (ZHANG Ji-ru, HU Yong, YU Hong-ling, et al. Predicting soil-water characteristic curve from multi-fractal particle-size distribution of clay[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, **46**(6): 650–657. (in Chinese))
- [7] ARYA L M, BOWMAN D C, THAPA B B, et al. Scaling soil water characteristics of golf course and athletic field sands from particle-size distribution[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, **72**(1): 25–32.
- [8] 刘建立, 徐绍辉, 刘慧. 估计土壤水分特征曲线的间接方法研究进展[J]. *水利学报*, 2004, **35**(2): 68–78. (LIU Jian-li, XU Shao-hui, LIU Hui. A review of development in estimating soil water retention characteristics from soil data[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, **35**(2): 68–78. (in Chinese))
- [9] ARYA L M, PARIS J F. A physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, **45**(6): 1023–1030.
- [10] BASILE A, D'URSO G. Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clay-loamy soils from particle-size determination[J]. *Soil Technology*, 1997, **10**(3): 261–272.
- [11] ARYA L M, LEIJ F J, VAN GENUCHTEN M TH, et al. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, **63**(3): 510–519.
- [12] VAZ C M P, IOSSI M D F, NAIME J D M, et al. Validation of the Arya and Paris water retention model for Brazilian soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, **69**(3): 577–583.
- [13] MILLER E E, MILLER R D. Physical theory of capillary flow phenomena[J]. *Journal of Applied Physics*, 1956, **27**(4): 324–332.
- [14] PECK A J, LUXMOORE R J, STOLAZY J C. Effects of spatial variability of soil hydraulic properties in water budgetmodelling[J]. *Water Resources Research*, 1997, **13**(2): 348–354.
- [15] TULI A, KOSUGI K, HOPMANS J W. Simultaneous scaling of soil water characteristic and unsaturated hydraulic conductivity functions assuming lognormal pore-size distribution[J]. *Water Resources Research*, 2001, **24**(6): 677–688.
- [16] KOSUGI K, HOPMANS J W. Scaling water retention curves for soils with lognormal pore-size distribution[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**(6): 1496–1505.
- [17] DAS B S, HAWS N W, RAO P S C. Defining geometric similarity in soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2005, **4**(2): 264–270.
- [18] NEMES A, SCHAAP M G, LEIJ F J. Description of the unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0[J]. *Journal of Hydrology*, 2001, **251**(3): 151–162.
- [19] WARRICK A W, MULLEN G J, NIELSEN D R. Scaling field measured soil hydraulic properties using similar media concept[J]. *Water Resources Research*, 1977, **13**(2): 355–362.
- [20] CHAN T P, GOVINDARAJU R S. Soil water retention curves from particle-size distribution data based on polydisperse sphere systems[J]. *Vadose Zone Journal*, 2004, **3**(4): 1443–1454.
- [21] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil water characteristic curve[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1994, **31**(4): 521–532.
- [22] BUCHAN G D. Applicability of the simple lognormal model to particle-size distribution in soils[J]. *Soil Science*, 1989, **147**(3): 155–161.
- [23] TYLER S, WHEATCRAFT S. Application of fractal mathematics to soil water characteristic estimation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, **53**(4): 987–996.