

封丘地区土壤传递函数的研究*

朱安宁 张佳宝

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

陈效民

(南京农业大学资源与环境学院, 南京 210095)

陈德立

(澳大利亚墨尔本大学)

摘要 以黄淮海平原封丘地区的潮土和风沙土为研究对象, 试图寻求解决土壤水动力学特性参数问题的更加实用可行的方法。根据大量的土壤基本物理性质和土壤持水数据, 利用多元逐步回归分析方法, 分别建立了 van Genuchten 模型的参数 θ_s 、 θ_r 、 a 、 n 的土壤传递函数模型, 并通过统计分析和数学模拟进行模型验证。研究结果表明, van Genuchten 模型参数与土壤的质地、有机质含量及容重等基本物理性质有一定的线性相关性。van Genuchten 模型的参数估计模型对粘性土壤的拟合效果较好, 而拟合砂性土壤时误差较大。

关键词 土壤物理性质, 水分特征曲线, van Genuchten 模型, 土壤传递函数, 数学模拟
中图分类号 S152.72

当前, 区域土壤水分和溶质运移的研究已成为土壤物理学研究的一大热点, 然而, 用计算机数值模拟土壤水和溶质运移所遇到的主要问题之一是难于获取土壤水分运动参数, 如土壤水分特征曲线 $h(\theta)$ 、饱和导水率 K_s 、非饱和导水率 $K(\theta)$ 等。Childs 早在 1940 年就注意到土壤物理性质影响土壤水分特性, 特别是 70 年代末以来, 许多学者在研究土壤水分运动参数与土壤基本理化性质关系方面做了大量的工作^[1, 2], 从而建立了研究土壤水分运动参数的一种新方法——PTFs 法 (Pedo-Transfer Functions, 土壤传递函数)。

PTFs 法是用统计模型由土壤基本性质预测土壤水分运动参数的方法^[3, 4], 即由已知的土壤水分运动参数和与之相对应的土壤基本理化性质建立多元回归方程, 用此回归方程结合土壤基本理化性质来预测土壤的水分运动参数。

本研究利用黄淮海封丘地区的土壤质地、有机质含量及容重的实测数据, 用多元逐步回归方法建立 van Genuchten 关于土壤水分特征曲线 $h(\theta)$ 关系式中的经验系数 θ_s 、 θ_r 、 a 、 n 的土壤传递函数模型, 并通过统计分析和数值模拟进行模型验证。从而确定该地区的土壤水力学特性参数 $h(\theta)$ 与土壤基本物理性质之间的相互关系, 为进一步研究土壤水和溶质运移等问题提供一个科学而便利的手段。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

本研究的试验区域选择在河南省封丘县。全县土壤划分为两大土类, 即潮土土类和风沙土土类。其中, 潮土是该地区分布最广、面积最大的耕作土壤, 占全县土壤总面积的 98.3%。潮土是发育在黄河冲积母质上, 经过人为耕作熟化而形成的土壤, 潮土具有质地复杂和剖面层次明显且厚薄不一的特征。风沙土是由黄河主流沉积颗粒较粗的砂粒, 经风力的再搬运顺风向于河床旁、古河道旁堆积发育而成的土壤, 在该地区多呈断续条带状的砂丘或砂垄存在。目前, 风沙土占全县土壤总面积的 1.68%。

根据该县的土壤分布状况, 我们在全县 7 个乡镇挖掘了 7 个典型的土壤剖面, 在每个剖面中根据质地

* 国家重点基础研究发展规划项目 (G1999011803) 和 ACIAR 项目 (LWR 1/96/164) 资助

收稿日期: 2000-12-28; 收到修改稿日期: 2002-03-24

变化分层取9个土样(每个土样三个重复)。按国际制质地名称划分,涉及的土壤类型有砂土、壤砂土、砂壤土、粉砂壤土、粉砂粘壤土及粉砂粘土等。

1.2 分析方法

土壤水分特征曲线用压力膜法测定。用 100 cm^3 环刀取原状土样置于压力膜仪内,仪器内压力分别设为 10 kPa、30 kPa、50 kPa、100 kPa、300 kPa、500 kPa、1 500 kPa,记录不同压力时的土壤含水量,高于 -10 kPa 的基质势用张力计在田间测定。

土壤颗粒分布用吸管法按国际制土粒分级标准测定,即根据砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和粘粒(小于0.002 mm)三种粒级的含量来确定实验土壤的质地类型。

容重与有机质含量按常规方法测定。

2 模型参数的获取

研究认为, van Genuchten 模型具有很好的灵活性。该模型几乎可以很好地拟合任何 $\theta(h)$ 关系^[4-6], 并与 Mualem 模型结合得到常用的 VG-Mualem 模型,从而可以进一步估算出由 Mualem 模型描述的土壤非饱和和导水率 $K(\theta)$ 。这样也就间接地建立了土壤非饱和和导水率 $K(\theta)$ 与土壤基本物理性质之间的关系,从而利用土壤普查资料就可以很方便地得到土壤的非饱和和导水率。

表征土壤水力特性的 van Genuchten-Mualem 模型为:

$$S = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = [1 + |ah|^{-n}]^{-m} \quad (1)$$

$$K(\theta) = K_s S^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - S^{\frac{1}{m}})]^2 \quad (2)$$

式中, S 是饱和度, θ 是体积含水量 ($\text{L}^3 \text{L}^{-3}$), θ_r 和 θ_s 分别为残余含水量和饱和含水量 ($\text{L}^3 \text{L}^{-3}$); h 是压力水头 (L); a 和 n 是表示土壤水分特征曲线形状的参数, $m = 1 - 1/n$; K_s 为饱和导水率 (L T^{-1})。

式(1)的 van Genuchten 模型包括 θ_s 、 θ_r 、 a 、 n 等4个独立参数 ($m = 1 - 1/n$, 不是一个独立的参数)。关于残余含水量 θ_r , 对它的物理含义目前文献中尚无统一的看法^[7], 不同的情况对 θ_r 有不同的处理方法。van Genuchten 认为水分特征曲线的高负压部分比水容量 $C(\theta) \rightarrow 0$ 时的含水量为 θ_r , 或近似取水势 -1 500 kPa 的土壤含水量(凋萎点含水量)作为残余含水量。

本文利用非线性最小平方优化程序 RETC^[8] 求解实测的土壤水分特征曲线的 van Genuchten 模型中4个参数 θ_s 、 θ_r 、 a 、 n 。求解的基本原理是利用最小二乘法建立4个参数的非线性方程组,然后用 Picard 迭代法进行求解^[9]。

本研究利用封丘地区54个土壤样品的基本物理性质数据和土壤水分特征曲线数据分别建立 van Genuchten 模型的4个参数 θ_s 、 θ_r 、 a 、 n 的多元回归方程。

3 模型的建立

由于参数 a 、 n 数据不满足线性回归模型的正态性假设(假设随机误差项 ε_i 服从均值为0,方差为 σ^2 的正态分布),但满足对数正态分布,因此,我们利用参数 a 、 n 的常用对数形式建立回归模型。

3.1 相关分析

利用多元回归分析方法建立模型之前,我们必须对数据进行相关分析,相关分析是研究变量间密切程度的一种常用的统计方法。线性相关分析研究两个变量间线性相关的程度,探索因变量随自变量变化的趋势,以便确定数据是否适合线性模型,如果变量之间有一定的相关性,就可以建立线性回归方程。

van Genuchten 模型参数与土壤基本物理性质的相关系数见表1。

表1的相关分析结果表明,残余含水量 θ_r 与砂粒、粉砂含量的相关性在0.01的概率水平下显著,与粘粒、有机质含量在0.05的概率水平下显著,和容重没有相关性,并且与砂粒含量成负相关,与其它几种基本物理性质成正相关。饱和含水量 θ_s 与粉砂含量、容重的相关性较好,在0.01的概率水平下显著,与砂粒含量在0.05的概率水平下显著,和粘粒含量及有机质含量的相关性不好。 $\lg a$ 、 $\lg n$ 与土壤砂粒、粉砂、粘粒、有机质含量的相关性明显要好于前两种参数,除容重外,都极显著相关。

表 1 VG 模型参数与土壤基本物理性质的相关系数

Table 1 Coefficients of VG model parameters and soil physical properties ($n = 54$)

	θ_r	θ_s	$\lg a$	$\lg n$
砂粒	- 0.495**	- 0.278*	- 0.498**	0.747**
粉砂	0.477**	0.367**	0.367**	- 0.691**
粘粒	0.307*	- 0.145	0.674**	- 0.556**
有机质含量	0.328*	0.061	0.606**	- 0.505**
容重	0.078	- 0.532**	- 0.207	0.340*

3.2 结果与讨论

相关分析表明 van Genuchten 模型的 4 个参数 θ_s 、 θ_r 、 a 、 n 与上述土壤的基本物理性质之间分别存在一定的线性相关性。为此, 我们可以利用多元逐步回归方法建立它们之间的线性回归模型如下:

$$\theta_r = 0.223 - 0.00161 \times \text{Sa\%} \quad R = 0.50 \quad n = 54 \quad (3)$$

$$\theta_s = 0.789 - 0.216 \times \text{Bd} + 0.00067 \times \text{Si\%} - 0.00167 \times \text{Cl\%} \quad R = 0.65 \quad n = 54 \quad (4)$$

$$\lg a = -3.292 + 0.04033 \times \text{Cl\%} + 0.0525 \times \text{Om} \quad R = 0.75 \quad n = 54 \quad (5)$$

$$\lg n = 0.0646 + 0.0025 \times \text{Sa\%} - 0.00732 \times \text{Om} \quad R = 0.81 \quad n = 54 \quad (6)$$

式中, Sa% 为砂粒百分含量, Bd 是土壤容重, Si% 是粉砂百分含量, Cl% 是粘粒百分含量, Om 是有机质含量。

上述 4 个参数的回归模型中, 残余含水量 θ_r 与土壤基本物理性质的拟合效果很差, 其判别系数 R^2 仅为 0.25。 $\lg n$ 模型的拟合效果相对较好, 其中砂粒含量是影响 $\lg n$ 的主要因素, 有机质含量的增加会提高空气进气值, 故其偏回归系数为负, 而砂粒含量则相反, 砂粒含量的增加会导致空气进气值降低。式(4)的饱和含水量模型涉及的基本物理性质中, 容重是最主要的影响因子, 因为土壤饱和含水量与容重是密切相关的; 容重的偏回归系数为负值, 意味着容重的增加会导致饱和含水量的减小; 式中, 粉砂、粘粒的含量对饱和含水量的影响较小。式(5)的 $\lg a$ 回归模型表明, 粘粒含量与有机质含量是 $\lg a$ 的影响因子, 其中粘粒含量是主要影响因子。

4 模型的验证

4.1 方差分析

模型建立之后, 必须对其进行验证, 以确定模型是否可以应用于科研和生产实践。表 2 列出了土壤水分特征曲线的 van Genuchten 模型中 4 个参数 θ_s 、 θ_r 、 a 、 n 回归模型的估计的标准误、残差平方和、 F 值和 $F_{0.01}$ 值。

表 2 参数模型的方差分析

Table 2 ANOVA of parameter models

模型 Model	标准误 Std. error ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	残差平方和 Sum of square of residual	F	$F_{0.01}$
θ_r	0.070	0.255	16.86**	7.15
θ_s	0.030	0.044	11.93**	4.20
$\lg a$	0.360	6.611	32.28**	5.05
$\lg n$	0.053	0.141	48.39**	5.06

方差分析表 2 中, 各参数模型的 F 值都大于 $F_{0.01}$ 值, 结果表明, 当回归方程包含不同的自变量时,

其显著性概率均小于 0.01, 拒绝回归系数均为 0 或不都为非 0 的原假设。其中, 参数 $lg a, lg n$ 模型的 F 值较 θ_s, θ_r 模型的 F 值要大, 表明 $lg a, lg n$ 模型的拟合情况更好, 这与它们的复相关系数是一致的。从表中可以看出, 残余含水量 θ_r 模型的残差平方和与模型估计的标准误差都较大, 表明实验误差以及其它意外因素对实验结果有一定的影响。而其它三个模型的情况相对较好。

4.2 数学模拟

利用封丘地区砂土、砂壤土、粉砂粘土等三种不同类型土壤实测的基本物理性质数据和土壤持水数据对上述参数模型进行数学模拟验证(见图 1 至图 3)。通过参数模型得到的砂土、砂壤土、粉砂粘土的 van Genuchten 模型如下:

砂土:

$$\theta = 0.3915(1 + 0.00000163h^{1.9001})^{-0.4737} + 0.0756 \quad (7)$$

砂壤土:

$$\theta = 0.3544(1 + 0.00092745h^{1.3569})^{-0.2630} + 0.1227 \quad (8)$$

粉砂粘土:

$$\theta = 0.2817(1 + 0.00637567h^{1.1712})^{-0.1462} + 0.1917 \quad (9)$$

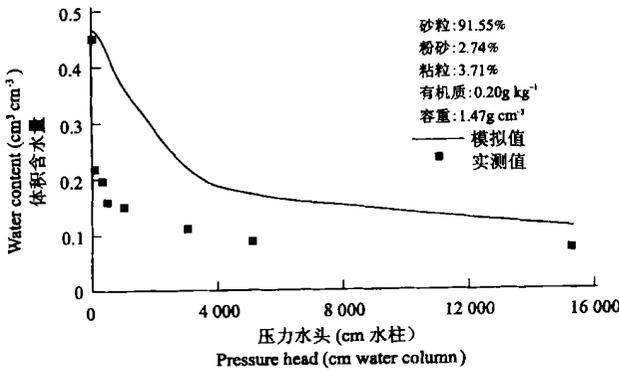


图 1 砂土的拟合和实测的水分特征曲线

Fig. 1 Fitted and observed water retention curves of sandy soil

除饱和含水量外, 体积含水量的模拟值大于实测值, 但其拟合效果明显要好于砂土, 模拟值与实测值的差值基本在 $0.02 \sim 0.07 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 之间, 并且随着基质势的降低, 其差值有减小的趋势。

图 3 粉砂粘土的拟合和实测的水分特征曲线表明, 参数模型对粉砂粘土的拟合效果非常好, 其模拟

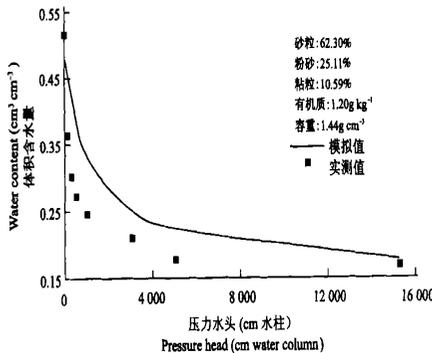


图 2 砂壤土的拟合和实测的水分特征曲线

Fig. 2 Fitted and observed water retention curves of sandy loam soil

从图 1 的由 van Genuchten 模型的 4 个参数模型拟合的砂土的水分特征曲线和实测的水分特征曲线, 可以看出, 体积含水量的模拟值普遍大于实测值, 除饱和含水量外, 高基质势部分模拟值与实测值相差较大, 说明参数 a 的预测值偏小; 随着基质势的减小, 其差值也越来越小, 到 -1500 kPa 时, 差值仅为 $0.03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, 表明参数 n 的预测效果较好。由此可见, 对于砂土来说, 上述参数估计模型在曲线的低基质势部分的拟合效果要好于高基质势部分。

参数模型对砂壤土的拟合和实测水分特征曲线见图 2。同砂土一样, 除

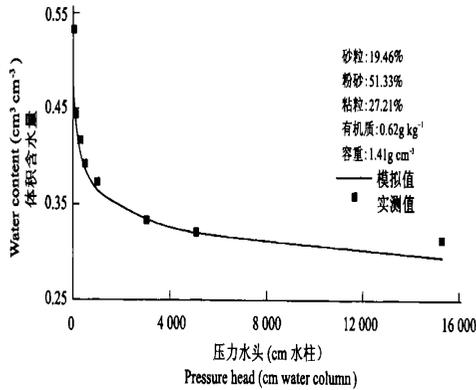


图 3 粉砂粘土的拟合和实测的水分特征曲线

Fig. 3 Fitted and observed water retention curves of silt clay soil

值与实测值之差小于 $0.01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ 。在 -100 kPa 以上的高基质势部分模拟值稍稍小于实测值, 在 -100 kPa 以下的低基质势部分模拟值略大于实测值。

5 结 语

通过对上述三种类型土壤的拟合和实测的水分特征曲线的比较, 可以发现, 参数模型的拟合曲线在形状和趋势上与实测曲线能很好的拟合, 其中, 对砂性土壤的拟合效果较差, 模拟值基本上都大于实测值, 这与砂土样品取样数量偏少有关, 而对粘性土壤的拟合效果较好。

综上所述, 利用土壤传递函数方法对区域土壤水和溶质运移、农田水分循环研究中参数的确定具有一定的意义。但是由于土壤的空间变异性, 要提高模型的预测精度, 以及对不同类型土壤的适用性, 必须要有大比例尺度上的大量的样品采集和室内外实验与观测方法的改进, 同时, 要利用更多的土壤基本理化性质以及更详细的土壤质地数据才能实现。

参考文献

1. van Genuchten M Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1980, 44: 892~ 898
2. Rawls W J, Gish T J, Brakensiek D L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. *Adv. Soil Sci.*, 1991, 16: 213~ 234
3. Vereecken H, Diels J, Van Orshoven J, *et al.* Functional evaluation of pedo-transfer function for the estimation of soil hydraulic properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1 371~ 1 378
4. Tietje O, Tapkenhinrichs M. Evaluation of pedo-transfer function. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1993, 57: 1 088~ 1 095
5. Vereecken H, Maes J, Feyen J, *et al.* Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density, and carbon content. *Soil Sci.*, 1989, 148: 389~ 403
6. Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 1976, 12: 513~ 521
7. 李光永, 曾德超. 滴灌土湿润体特征值的数值解法. *水利学报*, 1997, 7: 1~ 6
8. Yates S R, van Genuchten M Th, Warrick A W, *et al.* Analysis of measured, predicted and estimated hydraulic conductivity using the RETC computer program. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 347~ 354
9. 徐绍辉, 张佳宝. 求土壤水力特征的一种迭代法. *土壤学报*, 2000, 37(2): 271~ 274

STUDY ON PEDOTRANSFER FUNCTION IN FENGGU

Zhu An-ning Zhang Jia-bao

(Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Chen Xiao-min

(College of Resource and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Chen De-li

(University of Melbourne, Parkville Victoria 3052, Australia)

Summary

In this paper, we have studied the fluvio-aeolic and eolian sandy soil in Fenggu County, Huanghuaihai plain area and tried to find the practical and feasible ways to solve problems of the parameter of soil hydraulic properties. Based on a great many of fundamental soil physical properties and soil water retention data in Fenggu county, pedotransfer function models of *van Genuchten* model parameters (θ_s , θ_r , a , n) were established by the use of multivariate stepwise regression analysis respectively and verified by means of statistics analysis and numerical simulation. The results showed that parameters of *van Genuchten* model had some linear correlation with basic soil physical properties. The fitted effect of parameter estimation model of *van Genuchten* model on clay soil was very well but the effect on sandy soil was not good because of big errors.

Key words Soil physical properties, Water retention curves, van Genuchten model, Pedotransfer function, Mathematical simulation