第 43 卷 第 3 期　　土 壤 学 报　　Vol. 43, No. 3
2006 年 5 月　　ACTA PEDOLOGICA SINICA　　May, 2006

简单入渗法在确定 Brooks-Corey 水分特征曲线模型参数中的应用研究 *

韩祥伟[1,3]　邵明安[2,1†]　王全九[1]

(1 中国科学院水利部水土保持所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌　712100)

(2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京　100100)

(3 中国科学院研究生院, 北京　100039)

APPLICATION STUDY OF SIMPLE INFILTRATION METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF THE BROOKS-COREY MODEL OF SOIL WATER RETENTION CURVE

Han Xiangwei[1,3]　Shao Mingan[2,1†]　Wang Quanjiu[1]

(1 The State Key Laboratory of Soil and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS and MWR, Yangling, Shaanxi　712100, China)

(2 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing　100100, China)

(3 Graduate School of CAS, Beijing　100039, China)

关键词　水平入渗; 土壤水分特征曲线; Brooks-Corey 模型

中图分类号　S152.7　　**文献标识码**　A

土壤水分特征曲线是描述土壤含水量与吸力(基质势)之间的关系曲线, 它反映了土壤水能量与土壤水含量的函数关系, 因此它是表示土壤基本水力特性的重要指标, 对研究土壤水滞留与运移有十分重要的作用。几十年来, 人们投入大量的精力发展确定水分特征曲线的方法, 这些方法归纳起来分为两大类: 一类是直接测定法, 如张力计法、离心机法、压力膜法等; 另一类是间接推求法。这些方法中多数缺乏精度、耗时、需昂贵的专用设备、需特殊操作技能, 或者仅能提供很有限范围内的导水特性资料。同时人们也发展了多种经验公式, 其中 van Genuchten 模型[1]和 Brooks-Corey 模型[2]得到了广泛的应用。van Genuchten 模型适用的土壤质地范围比较宽, 同时可以使饱和土壤吸力为零, 符合吸湿过程中土壤吸力变化特点, 而 Brooks-Corey 模型形式简单, 便于推求描述土壤水分运动模型和确定土壤水分运动参数。

邵明安等[3]提出推求土壤 van Genuchten 模型参数的简单入渗法。它是基于一维土壤水分运动的 Richards 方程, 假定在任意时刻土壤水吸力分布与波尔兹曼变换后的湿润锋距离成线性关系, 推导出求解模型参数的简便公式[3], 并通过验证, 得到很好的试验结果[4]。Wang 等[5]利用相似的方法获得了推求 Brooks-Corey 模型参数的理论关系, 从而可利用入渗资料获得土壤水分特征曲线。在文献[5]中, Wang 等仅通过给定土壤水分运动参数, 利用数值模型模拟土壤水分运动过程, 然后利用模拟结果, 推求土壤水分运动参数。但该方法是否适合于实际土壤, 还需要实验检验。本文根据土壤入渗实验资料, 利用简单入渗法确定了 Brooks-Corey 水分特征曲线模型参数, 并将由此得到的土壤水分特征曲线与实测值进行比较, 用于验证简单入渗法确定实际土壤的 Brooks-Corey 模型参数的可行性。

* 国家自然科学基金项目(40025106, 40371060)和中国科学院"百人计划"项目资助

† 通讯作者: 邵明安教授, 电话: 029 - 87018861

作者简介: 韩祥伟(1982～), 女, 山东莱芜人, 硕士研究生, 主要从事于土壤物理方面的研究。E-mail: hanxiangweisd@163.com

收稿日期: 2004 - 10 - 11; 收到修改稿日期: 2005 - 01 - 04

1　理论基础

描述土壤水分特征曲线的 Brooks-Corey 模型表示为:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{h_d}{h}\right)^n \quad (h \geq h_d)$$

$$S_e = 1 \quad (h \leq h_d) \tag{1}$$

式中,S_e 是有效饱和度,θ 是压力 h(m) 下的土壤含水量($m^3 m^{-3}$),θ_s 是饱和含水量($m^3 m^{-3}$),θ_r 是残余含水量($m^3 m^{-3}$),h_d 是进气吸力(m),n 为系数。

Wang 等通过假定土壤吸力剖面,求解了 Richards 方程,并获得累积入渗量和入渗率与湿润锋距离间的关系[5],具体表示为:

$$I = A_1 x_f \tag{2}$$

$$i = \frac{A_2}{x_f} \tag{3}$$

其中,

$$A_1 = \frac{\theta_s - \theta_r}{1 + n^2} + \theta_r - \theta_i \tag{4}$$

$$A_2 = ank_s h_d \tag{5}$$

式中,I 是累积入渗量(m),x_f 是湿润锋距离(m),i 是入渗率($m\ s^{-1}$),θ_s 是饱和含水量($m^3 m^{-3}$) θ_i 是初始含水量($m^3 m^{-3}$),a 是系数,通常取 1,k_s 是饱和导水率($m\ s^{-1}$)。

由式(2)和式(3)可获得确定参数 n、h_d 的表达式:

$$n = \sqrt{\frac{\theta_s - \theta_r}{A_1 + \theta_i - \theta_r} - 1} \tag{6}$$

$$h_d = \frac{A_2}{ank_s} \tag{7}$$

由式(6)和式(7)可知,欲获得参数 n、h_d,需要已知初始含水量、饱和含水量、残余含水量以及饱和导水率、A_1 和 A_2,而初始含水量、饱和含水量和残余含水量可根据试验条件来获得,而饱和导水率、A_1 和 A_2 需要根据实验结果来推求。因此,在实验过程中测定累积入渗量和湿润锋距离、入渗率与湿润锋距离间关系,并测定饱和导水率,这样就可以计算出两个主要参数,进而获得土壤水分特征曲线。

2　材料与方法

采用两种不同质地的土壤作为研究对象,分别利用简单入渗法和离心机实测法得到水分特征曲线。两种土壤采自渭河滩、陕西安塞,分别为沙土、粉质粘壤土。土样经风干过 1 mm 筛后,作为试验土样。

将土样分层均匀地装入长约 20 cm、直径 5 cm 的有机玻璃管中,装土容重及初始含水量见表 1。利用马氏瓶供水,并维持水头为零。在实验过程中,记录累积入渗量和湿润锋距离随时间的变化。当湿润锋距离到达土柱长度的 1/2 左右时,结束入渗实验,同时利用定水头法测定两种土壤的饱和导水率。上述实验分析进行了 3 个重复。

为了验证所建立理论的合理性,利用离心机法[6]测定两种土壤的水分特征曲线。在测定过程中将土样按照设计容重(沙土约 1.7 $Mg\ m^{-3}$,粉质粘壤土约 1.3 $Mg\ m^{-3}$)装入内径约 5 cm,高约 5 cm 的环刀中,在设计的转速下离心相应的时间,每次离心结束后称重,同时,间接测定土壤的体积,结合烘干土重,计算出不同吸力下土壤的体积含水量。改变转速和离心时间,可以得到不同吸力下的土壤含水量。

3　结果与分析

两种土样的容重和水分含量特征值列在表 1 中。其中饱和含水量根据土壤的容重和比重计算获得[7],残余含水量与 - 15 $\times 10^5$ Pa 压力时的含水量近似。实测的土壤饱和导水率列在表 2 中。

表 1　两种土壤的饱和含水量(θ_s)、初始含水量(θ_i)及残余含水量(θ_r)

土样名称	重复	容重 ($Mg\ m^{-3}$)	θ_s ($m^3 m^{-3}$)	θ_i ($m^3 m^{-3}$)	θ_r ($m^3 m^{-3}$)
沙土	1	1.647	0.392	0.007 3	0[3]
	2	1.691	0.376	0.006 8	
	3	1.699	0.373	0.009 2	
粉质沙壤土	1	1.311	0.477	0.016 3	0.014
	2	1.310	0.505	0.016 3	
	3	1.311	0.506	0.016 3	

根据实测的累积入渗量和湿润锋随时间变化过程,计算了累积入渗量和入渗率与湿润锋距离间关系,并利用式(2)和式(3)进行处理,获得参数 A_1、A_2,结果列在表 2 中。

将表 2 中的参数分别代入式(6)和式(7)中,计算模型参数 n、h_d,三次实验所得沙土的模型参数 n 的平均值为 0.602,进气吸力 h_d 的平均值为

0.458 m;粉质沙壤土的两个参数的平均值, n 为 0.421, h_d 为 1.771 m。

表 2 两种土壤的 k_s 以及 A_1、A_2 的值

土样名称	重复	k_s (10^{-6}m s^{-1})	A_1 ($\times10^{-1}$)	A_2 ($\times10^{-7}$)
沙土	1	4.366	2.551	13.92
	2	5.567	2.648	10.00
	3	4.838	2.627	15.98
粉质沙壤土	1	2.399	4.175	18.47
	2	1.965	4.117	14.92
	3	2.376	4.162	16.97

将所获参数的平均值代入 Brooks-Corey 模型(式(1))计算土壤水分特征曲线,结果如图 1 和图 2 所示。同时,将实测的土壤水分特征曲线也点绘在图 1 和图 2 中。总体来讲,由简单入渗法获得的两种土壤的水分特征曲线与实测水分特征曲线吻合较好。为了进一步说明图 1 和图 2 中简单入渗法与实测水分特征曲线的吻合程度,对实测含水量与同一压力下简单入渗法计算所得的含水量作图 3 和图 4。简单入渗法计算出的含水量,与相同压力下实测含水量拟合斜率接近于 1,而且相关性很好,说明简单入渗法测定的土壤水分特征曲线是合理可靠的。

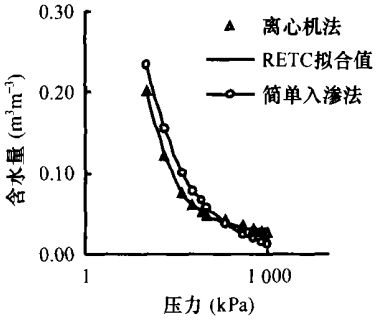

图 1 沙土简单入渗法、RETC 软件拟合和实测土壤水分特征曲线的比较

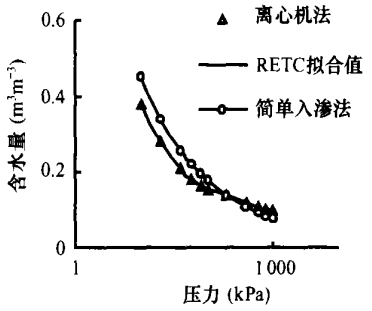

图 2 粉质粘壤土简单入渗法、RETC 软件拟合和实测土壤水分特征曲线的比较

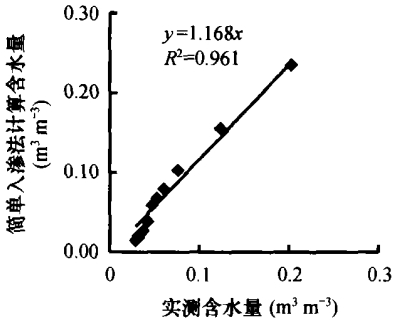

图 3 沙土含水量

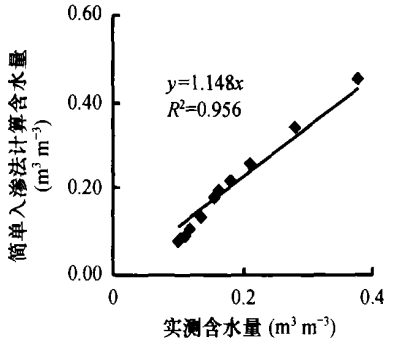

图 4 粉质粘壤土含水量

4 结 论

实验和分析获得的结果表明:简单入渗法所获得 Brooks-Corey 模型参数与实测值吻合较好,该方法可用于土壤水分特征曲线的推求;简单入渗法简洁、节省实验时间、具有一定的应用前景。

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] Brooks R H, Corey A J. Hydraulic properties of porous media. Hydrol. Paper 3. Fort Collins, CO: Colo. State Univ., 1964. 3, 27

[3] 邵明安,王全九,Horton R. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法 I. 理论分析. 土壤学报,2000,37(1):9～16

[4] 邵明安,王全九,Horton R. 推求土壤水分运动参数的简单入渗法 II. 试验验证. 土壤学报,2000,37(2):1～8

[5] Wang Q J, Horton R, Shao M A. Horizontal infiltration method for determining Brooks-Corey model parameters. Soil Sci. Soc. Am. J., 2002, 66(6):1 733～1 739

[6] 吕殿青,邵明安,王全九. 土壤持水特征测定中的容重变化及其确定方法. 水利学报, 2003,(3):110～114

[7] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京:中国农业出版社,2000