

土壤持水特征测定中质量含水量、吸力和容重三者间 定量关系 I. 填装土壤*

邵明安¹ 吕殿青^{1,2} 付晓莉¹ 王全九^{1,3} 刘春平²

(1 中国科学院水利部水土保持研究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 湖南师范大学资源与环境科学学院, 长沙 410081)

(3 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘要 在试验过程中,通常采用一个土样进行连续试验来测定土壤的持水特征。此时,土样的有机质、黏粒矿物类型和阳离子交换量等性质基本保持不变,而土壤的容重在水力学和机械压力共同作用下会发生很大的变化。因此,我们认为实测的土壤持水特征不再是土壤吸力和含水量相对应的一条曲线,而是由土壤质量含水量、吸力和容重三变量共同确定的一个曲面。本文在 Brooks-Corey 土壤水分特征曲线模型的基础上,提出了两种描述土壤质量含水量、吸力和容重三变量关系的曲面模型,分析了模型的优缺点和适用条件,并采用离心机石蜡控容重法实测了四种质地填装土壤的三变量特征曲面。研究结果表明:土壤持水特征是由土壤质量含水量、吸力和容重三变量共同确定的一个曲面这一假设是合理的;类似于 Brooks-Corey 模型的两种幂函数经验曲面模型能够合理地描述填装土壤的实测数据,决定系数均大于 0.94;模型 的拟合效果略好于模型,但模型 包含两个物理意义明确的参数,具有一定的优势。这一研究将为校正容重变化对土壤水力学参数的影响提供新的途径。

关键词 土壤三变量曲面模型;Brooks-Corey 型模式;填装土

中图分类号 S152 **文献标识码** A

在降雨、入渗、径流、水分再分布与蒸发的水文循环过程中,土壤经历由干到湿,再由湿到干的交替过程,土壤含水量和容重都在发生变化。土壤湿润时可接近饱和含水量,土壤发生较大的膨胀,封闭孔隙;土壤干燥时,其表面收缩产生裂缝,改变了土壤的容积,严重影响土壤水分的运动过程^[1~6]。土壤水分特征曲线是土壤水分运动研究中最基本和最重要的参数之一,受到众多学者的关注^[7,8]。然而,传统的水文学和土壤物理学在研究土壤水分运动时,假定在干湿过程中土壤的容积不变,以 Darcy-Richards 方程为基础进行定量分析。因此,为了使预报结果更准确,众多学者从不同的角度就容重变化对土壤水分运动参数的影响进行了研究。其中最普遍的方法是将容重作为多个影响因素之一,建立预报土壤水分特征曲线和土壤导水率的土壤传递函数^[9,10]。这种方法是以前一定的数据库资料为基础,而对于小尺度的、微观的土壤水分运动研究而

言,更趋向于直接测定土壤水分特征曲线。在土壤水分特征曲线的直接测定过程中,由于外力和内力的共同作用,土壤容重会发生较大的变化^[11]。对于通用的压力膜法和离心机法而言,这一现象更加明显。研究证实:压力膜法测定过程中壤土的容重变化范围在 1.183 ~ 1.765 g cm⁻³^[12],离心机法测定过程中重壤土容重变化范围在 1.2 ~ 1.9 g cm⁻³^[13~15]。值得注意的是,虽然关于容重变化对土壤水分特征曲线的影响已有大量的报道^[16~18],也有报道是用经验公式直接将土壤容重和水分特征曲线参数联系起来,形成预报不同压实程度下的土壤导水率经验模型^[19,20],但这些研究均是预先采用不同的容重处理,然后测定土壤水分特征曲线,分析不同的容重处理对水分特征曲线的影响。而关于测定过程本身引起的容重变化对土壤持水特征的影响情况鲜有报道。另外,土壤持水特征的测定通常是使用一个土样连续进行,那么,在此过程中影响土壤持水特征的

* 国家自然科学基金项目(批准号 40371060)、湖南省自然科学基金项目(06JJ3020)和湖南省教育厅资助科研项目(06C500)资助
作者简介:邵明安(1956~),研究员,从事土壤物理及旱地农业研究
收稿日期:2006-10-20;收到修改稿日期:2007-02-04

其他性质(如,有机质、黏粒矿物类型、阳离子交换量等)可认为不起作用,只有容重仍在时刻变化着。因此,本文假定测定过程中:土壤的持水特征不再是一条曲线,而是由土壤质量含水量、土壤吸力和土壤容重三个变量共同确定的空间曲面。本文将结合土壤物理研究中普遍使用的 Brooks-Corey 土壤水分特征曲线经验模型,提出两种描述土壤质量含水量、吸力和容重三变量关系的曲面模型。并通过实测的填装土壤的三变量曲面,对提出的两种曲面模型进行验证。

1 土壤质量含水量、吸力和容重三变量曲面模型

在土壤持水特征测定过程中,土壤质量含水量随着吸力、容重的增大呈减小趋势。根据三变量的变化趋势和已通用的 Brooks-Corey^[21]土壤水分特征曲线模型,提出两种描述土壤质量含水量、吸力和容重三变量关系的曲面模型。

模型

$$m = a b^{-m} h^{-n} \quad (1)$$

式中, m 为质量含水量 (g g^{-1}); b 为容重 (g cm^{-3}); h 为吸力 (MPa); a, m, n 为系数,可由实测的三变量关系曲面拟合而得到。

模型 直接反映质量含水量、吸力和容重三变量间的关系,土壤质量含水量随容重和吸力的增大呈幂函数递减趋势。模型 易于对容重和吸力实现变量分离,有利于进一步推求非饱和导水率曲面模型。然而模型 有奇异点,即 $h = 0$ 时含水量应为饱和含水量,但在饱和点模型 不能应用,在该点不具有连续性。模型 的优点是:形式简单,变量关系清晰,易于分离变量。

模型

$$\frac{m - m_r}{m_s - m_r} = a_1 \frac{m}{b} h^{-n_1} \quad (2)$$

式中, m 为质量含水量 (g g^{-1}); m_s 为饱和质量含水量 (g g^{-1}),可由土壤的孔隙度(饱和容积含水量)与该容重的比值来近似,即

$$m_s = \frac{1}{b} - \frac{1}{s} \quad s = 2.650 \quad (3)$$

m_r 为滞留质量含水量 (g g^{-1}),通常可用吸力为 1.5 MPa 时所对应的质量含水量来近似,对于一种土壤而言,不同容重下滞留含水量的值很接近,因此,可将它视为一个常数; b 为容重 (g cm^{-3}); h 为吸力 (MPa); a_1, m_1, n_1 为系数。

模型 能反映土壤质量含水量随吸力、容重的幂函数递减趋势。与模型 类似,模型 在饱和点不连续,不能完全适用于整个含水量范围。但模型 较模型 多引入两个具有物理意义的参数,即饱和质量含水量 m_s 和滞留质量含水量 m_r 。虽然应用时用含有容重的关系式代替饱和质量含水量 m_s 进行拟合,但在滞留质量含水量 m_r 不为零时,满足 h 时的极限条件 (h 时,质量含水量趋向于滞留含水量,等式(2)左端趋向 0,等式(2)右端趋向于 0)。因此,模型 较模型 具有一定的优势。

2 材料与方法

2.1 供试材料

供试土壤分别为黄土高原安塞的黄绵土、洛川的黑垆土、武功的塬土和湖南桃源的红壤,取土层为 20~40 cm,土壤物理性质如表 1 所示。其中,土壤机械组成采用吸管法测定,滞留含水量用 1.5 MPa 时的含水量来近似,取土容重用环刀法测定。

表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Some basic properties of tested soils

土壤 Soil	质地 Texture	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	滞留含水量 Residual water content (g g^{-1})	取土容重 Sampled bulk density (g cm^{-3})
黄绵土 Huangmian soil	壤土 Loam	38.24	16.73	0.245	1.317
黑垆土 Heilu soil	粉砂质黏壤土 Silt clay loam	62.63	21.55	0.526	1.504
塬土 Lou soil	粉砂质黏土 Silt clay	64.44	33.25	0.710	1.517
红壤 Red soil	黏土 Clay	36.47	54.91	0.826	1.470

2.2 试验方法

利用高速离心机和特制的一套具有承压、透水和通气功能的有机玻璃配套装置,结合石蜡法固定土壤容积从而获得土壤水分特征空间曲面数据。首先将风干土样经过碾压过 1 mm 土筛后,均匀混合制成试验土样,然后称取 60g 土样,按照设定的容重(黄绵土为 1.3 g cm^{-3} ,黑垆土和垆土为 1.4 g cm^{-3} ,红壤为 1.3 g cm^{-3})装入 D (直径) $\times h$ (高度)为 $4.4 \text{ cm} \times 4.4 \text{ cm}$ 的有机玻璃盒中,并将土样饱和。待土样饱和后称重,用游标卡尺量取距离确定饱和时的土壤容重,随后将土样放入离心管中,按照设定的转速确定相应的离心力和吸力(0.01 ~ 1 MPa)。待土样平衡后,取出有机玻璃土样盒,称重获得质量含水量,并通过测量土面高度来确定该吸力下的土壤容重。最后用石蜡法固定土壤体积,并保证试验土样通气透水(直径为 3 ~ 4 mm 的细塑料管作为土壤孔隙,开孔率为 40%),再次将土样饱和,然后用离心机按照设定的转速测定该定容重下的土壤水分特征曲线,直到先前固定容重时所受的离心力为止。对每个设定的吸力均重复上述过程,即可获得不同容重下的土壤水分特征曲线实测点,形成实测的三变量特征曲面。

2.3 数据处理

实测的土壤质量含水量、吸力和容重间的三变量曲面为半个曲面,本文用 Sigmaplot 软件(最小二乘原理)和统计分析方法(决定系数、标准差和参数变异和曲面分布形态的 F 检验)对实测数据进行拟合,获得参数进而得到完整的曲面。其中,模型参数

a, m, n 通过拟合获得。

3 结果与讨论

3.1 实测的土壤质量含水量、吸力和容重三变量关系曲面

用离心机法测定土壤三变量曲面时,每个容重下的土壤水分特征曲线只能测到先前固定容重时设定的力为止,因此所获得的土壤持水特征是半个土壤特征曲面。图 1 描述了四种土壤的实测曲面。图 1 中曲线 1 为最大容重下的土壤水分特征曲线;曲线 2 为不同容重下的饱和含水量曲线,反映了容重对饱和质量含水量的影响;曲线 3 为考虑容重变化的土壤水分特征曲线,贯穿完整的土壤水分特征曲面,三条曲线是离心机法测定土壤水分特征曲面的边界线。边界线内部分为不同容重下的土壤水分特征曲线。由图 1 实测的三变量曲面可知:在相同吸力下,小容重的土壤具有较大的质量含水量,质量含水量随着容重的增大而呈递减趋势;不同容重下质量含水量间的差别随土壤质地的变黏明显增大,特别是在低吸力范围内这一现象更明显;曲面的陡直程度随土壤质地的变重而增加。

3.2 不同的土壤质量含水量、吸力和容重三变量曲面模型模拟

采用两种描述土壤质量含水量、吸力和容重三变量间关系的曲面模型对实测数据进行非线性拟合可获得完整的土壤三变量特征曲面(见图 2),其拟合参数和统计结果见表 2。

表 2 两种模型下不同土壤的三变量曲面参数和统计结果

Table 2 Parameters and statistic results of soil three-variable surfaces generated by using the two models

模型 Model	土壤 Soil	a	m	n	R^2	SEE	Norm
模型 I	黄绵土 Huangmian soil	0.135	2.208	0.323	0.975	0.850	9.277
Model I	黑垆土 Heilu soil	0.151	1.074	0.202	0.986	0.500	6.082
	垆土 Lou soil	0.279	1.418	0.111	0.981	0.448	5.543
	红壤 Red soil	0.328	1.109	0.055	0.971	0.491	3.800
模型 II	黄绵土 Huangmian soil	0.097	0.806	0.400	0.966	1.208	9.665
Model II	黑垆土 Heilu soil	0.112	1.625	0.295	0.963	0.919	6.691
	垆土 Lou soil	0.169	1.912	0.182	0.977	0.585	4.643
	红壤 Red soil	0.263	2.056	0.092	0.942	0.731	5.273

注: a, m 和 n 分别为各模型所对应的拟合参数, R^2 为决定系数, SEE 代表估计标准差, Norm 表示残差平方和的平方根 Note: a, m and n are the model parameters, R^2 stands for coefficient of determination, SEE for estimated standard error and Norm for square root of the residual sum of squares

由图 2 可见,模型 和模型 的曲面与实测数据点匹配较好,两种模型表现出相同的趋势,即曲面坡度随土壤质地加重更加陡直,同吸力下质量含水量的差别也随土壤质地变黏而逐渐增大,这说明容重变量对黏质土壤质量含水量的影响较大,与实测数据相一致。由表 2 可知,采用模型 和模型 对实测数据进行非线性拟合的决定系数均大于 0.94。其中,模型 的参数 a 随土壤质地变黏而逐渐增大, n 值随土壤质地变黏而减小, m 值的变化没有规律。模型 获得的拟合参数中,除 a 和 n 的变化趋势与模型 一致外, m 值随土壤质地变黏而增

大。模拟和统计结果均表明:模型 、模型 均能反映土壤三变量特征曲面的变化趋势,适合定量描述土壤质量含水量、吸力和容重三者之间的关系。虽然与模型 相比,模型 具有较大的 R^2 、较小的 SEE 和 Norm,其拟合效果略好于模型 ,但差别不大。另外,模型 引入了两个具有物理意义的参数,不但能反映土壤的容重变化对绝对质量含水量的影响情况,还能反应相对质量含水量的变化趋势。同时,在滞留含水量不为零时,模型 能满足 h 时的极限条件。因此,模型 较模型 具有一定的优势。

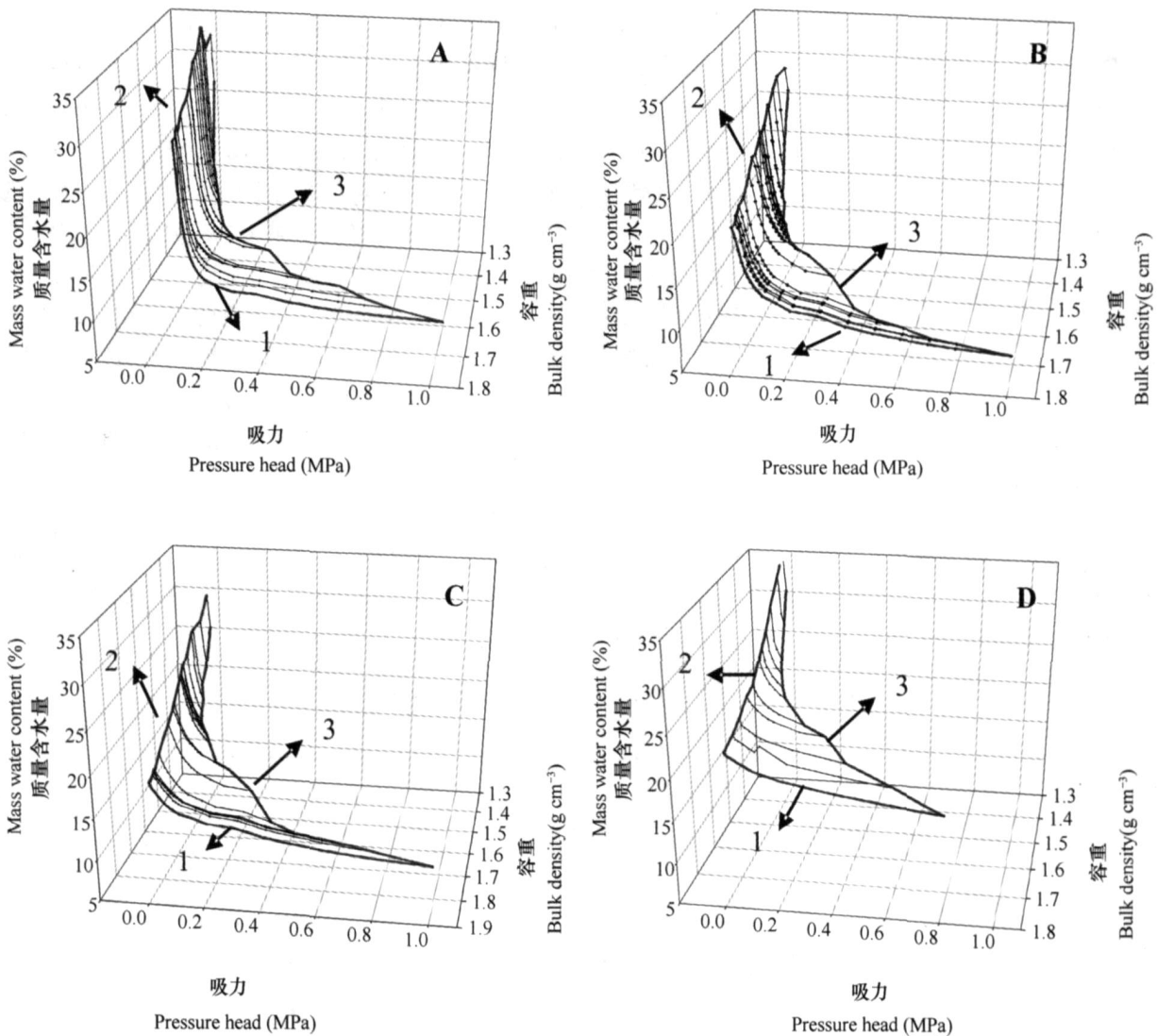


图 1 实测的土壤三变量特征曲面(A:黄绵土;B:黑垆土;C:垆土;D:红壤)

Fig. 1 Measured soil three-variable characteristic surfaces (A: Huangmian soil; B: Heilu soil; C: Lou soil; D: Red soil)

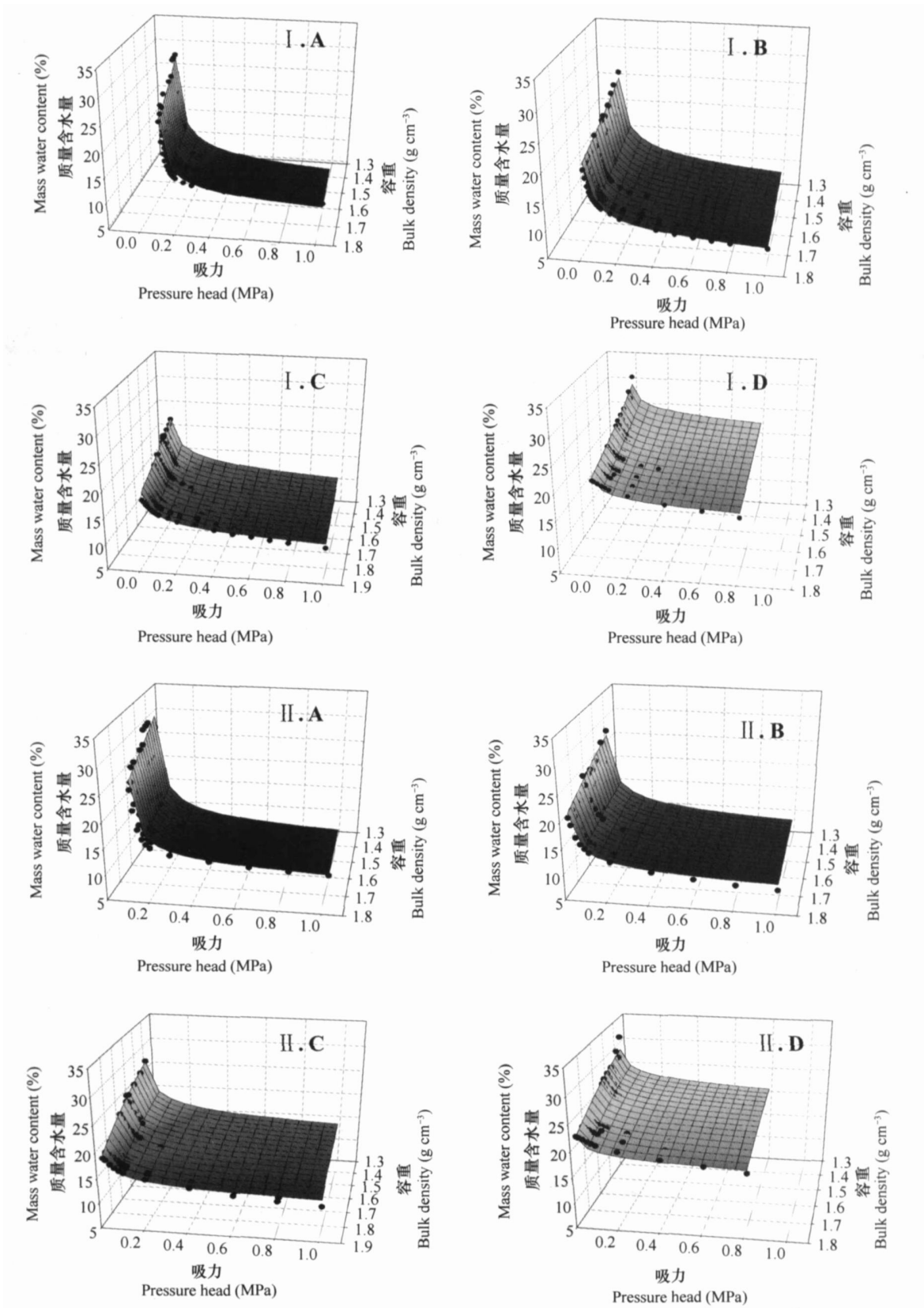


图2 两种模型下的土壤三变量曲面(A:黄绵土;B:黑垆土;C:楼土;D:红壤;“·”为实测点;网格为回归曲面)

Fig. 2 Soil three-variablesurfaces generated using two different models (A: Huangmian soil; B: Heilu soil; C: Lou soil; D: Red soil; “·”: Measured point; Mesh: Regression surface)

4 土壤质量含水量、吸力和容重三变量关系曲面的应用

由于土壤容重是影响土壤孔隙状况的主要因素之一,因此,土壤容重变化必将引起土壤的导水特性发生相应的变化。土壤三变量曲面假设的提出及其模型的建立可为校正土壤水分特征曲线测定过程中的容重影响因素奠定基础,也为解决土壤水分运动参数测定中长期存在的容重变化问题提供新的途径。根据土壤三变量特征曲面模型能获得不同容重下的土壤水分特征曲线,亦可尝试土壤特征曲面和土壤水分特征曲线间的相互转化。对于同一土壤而言,土壤水分性质(含水量、土壤水分运动参数)的空间变异主要受土壤容重变化的影响,因此可将土壤三变量特征曲面模型应用于土壤水分性质的空间变异性研究。

5 结 论

土壤的持水特征是由质量含水量、吸力和容重三变量共同构成的空间曲面,它可用类似于 Brooks-Corey 模型的幂函数类来定量描述。模型 是以质量含水量为因变量的曲面模型,形式简单,易于对容重和吸力实现变量分离,能较好地反映土壤三变量特征曲面的变化趋势,但在 $h = 0$ 时不连续。模型 引入了滞留质量含水量、饱和质量含水量等具有一定物理含义的参数,满足 h 时的极限条件。填装土壤的试验结果表明,两种模型均能较好地模拟四种质地土壤的三变量特征曲面变化趋势。虽然模型 的拟合效果略好于模型 ,但模型 包含两个物理意义明确的参数,具有一定的优势。

参 考 文 献

- [1] Mitchell A R, van Genuchten M TH. Shrinkage of bare and cultivated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1992, 56: 1 036 ~ 1 042
- [2] Chertkov V Y, Ravina I. Modeling the crack network of swelling clay soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1998, 62: 1 162 ~ 1 171
- [3] Cabidoche K M, Ruya S. Field shrinkage curve of a swelling clay soil: Analysis of multiple structural swelling and shrinkage phases in the prisms of a Vertisol. *Aust. J. Soil. Res.*, 2001, 39: 143 ~ 160
- [4] 邵明安,吕殿青.土壤收缩特征曲线实验研究. *土壤学报*, 2003, 40(3): 471 ~ 474. Shao M A, Lu D Q. Experimental study on soil shrinkage characteristic curves (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 471 ~ 474
- [5] 吕殿青,邵明安.土壤干湿收缩特征研究进展. *土壤通报*, 2003, 34(3): 225 ~ 228. Lu D Q, Shao M A. A review of soil shrinkage characteristics (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(3): 225 ~ 228
- [6] 熊东红,周红艺,杜长江,等.土壤裂缝研究进展. *土壤*, 2006, 38(3): 249 ~ 255. Xiong D H, Zhou H Y, Du C J, et al. A review on the study of soil cracking (In Chinese). *Soils*, 2006, 38(3): 249 ~ 255
- [7] Huang G H, Zhang R D, Huang Q Z. Modeling soil water retention curve with a fractal method. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 137 ~ 146
- [8] 韩祥伟,邵明安,王全九.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. *土壤学报*, 2006, 43(3): 506 ~ 508. Han X W, Shao M A, Wang Q J. Application study of simple infiltration method for determining the parameters of the Brooks-Corey Model of soil water retention curve (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 506 ~ 508
- [9] 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
- [10] Gupta S C, Larson W E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent and bulk density. *Water Resour. Res.*, 1979, 15: 1 633 ~ 1 635
- [11] Baumgartl Th, Köck B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2004, 68: 57 ~ 65
- [12] Lu D Q, Shao M A, Horton R. Effect of changing bulk density during water desorption measurement on soil hydraulic properties. *Soil Science*, 2004, 169(5): 1 ~ 11
- [13] 邵明安.不同方法测定土壤基质势的差别及准确性的初步研究. *土壤通报*, 1985, 16(5): 223 ~ 226. Shao M A. Primary study of difference and accuracy in soil potential measured by different methods (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 1985, 16(5): 223 ~ 226
- [14] 邵明安,黄明斌.土根系统水动力学.陕西:陕西科学技术出版社,2000. 55 ~ 107. Shao M A, Huang M B. *Hydraulic Dynamics of Soil-Root Systems* (In Chinese). Shaanxi: Shaanxi Science and Technology Press, 2000. 55 ~ 107
- [15] 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. Lu D Q, Shao M A, Wang Q J. Bulk density change during soil water retention characteristics and its determining method (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003(3): 110 ~ 114
- [16] 曹红霞,康绍忠,武海霞.同一质地(重壤土)土壤水分特征曲线的研究. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2002, 30(1): 9 ~ 12. Cao H X, Kang S Z, Wu H X. Study on soil water characteristic curves of soils of same quality (heavy loam) (In Chinese). *Jour. of Northwest Sci-Tech Univ. of Agri. and For. (Nat. Sci. Ed.)*, 2002, 30(1): 9 ~ 12
- [17] 李小刚.影响土壤水分特征曲线的因素. *甘肃农业大学学报*, 1994, 29(3): 273 ~ 278. Li X G. Factors affecting soil moisture characteristic curves (In Chinese). *Journal of Gansu Agricultural University*, 1994, 29(3): 273 ~ 278
- [18] Startsev A D, McNabb D H. Skidder traffic effects on water reten-

- tion, pore-size distribution, and van Genuchten parameters of Boreal forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 224 ~ 231
- [19] Assouline S. Modeling the relationship between soil bulk density and the water retention curve. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5: 554 ~ 563
- [20] Assouline S. Modeling the relationship between soil bulk density and the hydraulic conductivity function. *Vadose Zone Journal*, 2006, 5: 697 ~ 705
- [21] Brooks R H, Corey A T. *Hydraulic Properties of Porous Media*. Hydrology Paper. Fort Collins, Colorado: Colorado State Univ., 1964. 3 ~ 27

QUANTITATIVE RELATIONSHIP BETWEEN MASS WATER CONTENT, PRESSURE HEAD AND BULK DENSITY IN DETERMINATION OF SOIL WATER RETENTION CHARACTERISTICS . PACKED SOILS

Shao Ming'an¹ Lu Dianqing^{1,2} Fu Xiaoli¹ Wang Qianjiu^{1,3} Liu Chunping²

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

(3 Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract Generally, in an experiment oriented to determine soil water retention characteristics, just one soil sample is used continuously. During the experiment, the soil would not change much in organic matter content, clay mineral type and cation exchange capacity, but would in bulk density because of hydraulic and mechanical pressures in combination. Therefore a hypothesis is put forth that soil water retention characteristic should be a surface consisting of mass water content, pressure head and bulk density instead of a curve of two variables, pressure head and water content. In this study, two models to fit soil three-variable characteristic surfaces of different soils were proposed based on the Brooks-Corey soil water retention curve model. Advantages, disadvantages and application conditions of the two were illuminated. In addition, soil three-variable surfaces measured for packed soil samples through centrifuging and controlling bulk density using paraffin material were used to verify the proposed models. Results show that the hypothesis of three-variable characteristic surface is reasonable. The two proposed models based on the Brooks-Corey power function fit the measured data well with determination coefficients being greater than 0.94. Although Model performed a bit better than Model, the latter seems to be superior in application because it contains two additional parameters with definite physical meaning. The findings of this research could be cited as a new method in verifying the effect of bulk density on soil hydraulic parameters.

Key words Soil three-variable surface model; Brooks-Corey type; Packed soils