

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

· 原状土壤 *

付晓莉^{1,2} 邵明安^{1†} 吕殿青^{3,1}

(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 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100) (3 湖南师范大学资源环境学院, 长沙 410081)

摘 要 用离心机法测定了四种原状土壤不同容重下的土壤水分特征曲线实测点, 从实验上获得了四种原状土壤的质量含水量、吸力和容重三者间定量关系曲面。分析了土壤的扰动性对土壤三变量关系曲面的影响, 并以实测数据为基础, 进一步对我们提出的一种模型进行验证, 比较该模型对填装土壤和原状土壤三变量曲面的拟合情况。结果表明: 土壤的扰动性使实测的土壤三变量曲面发生较大的变化。填装土和原状土的初始容重差别越大, 土壤的扰动性对土壤三变量曲面的影响就越大。两处理模型参数的差异大小能很好地反映土壤扰动性对三变量关系曲面的影响。原状土壤的三变量曲面实验研究和探索有益于将变容重土壤水动力学研究拓展到田间土壤, 具有一定的实践意义。

关键词 原状土壤; 土壤三变量曲面; 模型

中图分类号 S152 文献标识码 A

田间条件下, 土壤在湿胀干缩的过程中其容重也会发生相应变化, 从而可能影响到工程建设、生态环境和农业生产等各种管理措施的实施。沼泽湿地的开垦和退化导致土壤容重增大^[1~3], 产生的大量裂隙在影响着景观生态的同时还会为优先流的形成创造条件^[4]。另有研究表明, 重型农业机械和其他耕作措施等人为因素以及土壤干旱等自然因素都会使土壤容重发生变化, 进而影响作物的产量^[5,6]。因此, 变容重土壤水动力学研究在丰富和完善土壤水分运动的同时, 对于其他领域的研究也具有重要的指导意义。土壤水分特征曲线是研究土壤水动力学的基本参数, 受到众多学者的关注^[7,8]。国内外学者就容重变化对土壤水分运动的影响也进行了大量的研究^[9~12], 但都仅限于将容重作为一个影响因素来考虑。近年, 邵明安等^[13]鉴于土壤水分特征曲线测定过程中容重变化较大这一事实, 认为土壤的持水特征应是由土壤质量含水量、吸力和容重共同构成的三变量曲面。并在原有 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水分特征曲线测定过程中的质量含水量、吸力和容重

间定量关系的曲面模型。这一假设的提出为土壤水分运动的研究开拓了一个思路。但由于该研究还刚刚起步, 有关的研究也只对填装土壤的三变量曲面进行了描述, 而土壤水分特征曲线测定过程中原状土壤的三变量关系研究有待开展。本研究测定了四种原状土壤不同容重下的土壤水分特征曲线, 并在邵明安等^[13]研究的基础上, 选择一种较好的土壤持水特征三变量模型, 分析土壤的扰动性对质量含水量、吸力和容重间三变量关系的影响, 以期进一步完善土壤水分特征曲线测定过程中的质量含水量、吸力和容重三变量关系研究。

1 土壤质量含水量、吸力和容重三变量曲面模型

邵明安等^[13]结合土壤物理研究中普遍使用的 Brooks-Corey 土壤水分特征曲线模型, 提出了两种描述土壤水分特征曲线测定过程中质量含水量、吸力和容重三变量关系的曲面模型。并且, 填装土实验证明这两种模型均能够较好地拟合实测数据。鉴于

* 国家自然科学基金项目(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

† 通讯作者, E-mail: mashao@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 付晓莉(1982~), 女, 辽宁盘锦人, 博士研究生, 研究方向为环境土壤物理学

收稿日期: 2006-10-30; 收到修改稿日期: 2007-02-04

考虑了滞留含水量和饱和含水量的模型在理论上更具优势,本文将以此模型为例说明土壤的扰动性对三变量曲面关系的影响情况。该模型具体形式如下:

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

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}), 在拟合时用式 $m_s = 1/b - 1/2.65$ 代替; m_r 为滞留质量含水量 (g g^{-1}), 用 1.5 MPa 时的质量含水量近似; h 为土壤水吸力 (MPa); b 为土壤容重 (g cm^{-3}); a 、 m 、 n 为模型系数。

2 材料与方法

2.1 供试土壤

以黄土高原地区典型的地带性土壤黄绵土、黑

垆土和塬土以及南方红壤(湖南桃源)为供试土壤,这四种土壤的基本物理特性见表 1。为便于分析土壤的扰动性对三变量持水曲面的影响,将填装土壤的装土容重同列于表 1 中^[13]。土壤机械组成采用吸管法测定,滞留含水量用 1.5 MPa 时的含水量近似,取土容重用环刀法测定。由于表层土受人为因素影响较大,其特性具有较大的空间变异性,测试的土壤均取自地表 20 cm 以下的心土层。取土时各点间隔为 1 m,由北向南依次采样。取土过程为:将铝盒倒扣在平整后的土面上,并用剖面刀削出较铝盒略大的四方体,然后向下慢慢地压铝盒,直至铝盒装满土为止。最后用铁锹将铝盒挖出,削平表面并密封,以保持其良好的结构状态。铝盒的尺寸为 20 cm × 12 cm × 5.8 cm。

2.2 测定方法

用日本 HITACHI 公司生产的 CR21 G 离心机测

表 1 供试土壤的基本物理性质

Table 1 Physical properties of soil tested

土壤 Soil	质地 Texture	滞留含水量 Residual water content (g g^{-1})	取土容重 Sampled bulk density (g cm^{-3})	填装容重 Packed bulk density (g cm^{-3})
黄绵土 Huangmian soil	壤土 Loam	0.025	1.25	1.30
黑垆土 Heilu soil	粉砂质黏壤土 Silt clay loam	0.053	1.39	1.40
塬土 Lou soil	粉砂质黏土 Silt clay	0.071	1.48	1.40
红壤 Red soil	黏土 Clay	0.083	1.47	1.30

定不同容重下的土壤水分特征曲线,测定时温度恒定为 20 。测定前先将原状土导入特制的环刀中,浸水饱和,测其饱和质量含水量。然后放入离心机中通过设置离心机的转速以确定相对应的吸力,待测试土样达到平衡后,取出土样,用游标卡尺确定容重的变化,接下来用蜡封法固定容重。再次进行饱和,测定该容重下的饱和质量含水量后,放入离心机中,离心力由小到大的增加,直至先前固定容重时所受到的离心力为止,这样就得到该容重下的土壤水分特征曲线。重复以上步骤即可测定不同容重下的土壤水分特征曲线^[13]。测定的吸力范围为 0.01 ~ 1.0 MPa。每种土壤设置 4 个重复,文中的数据均为 4 个重复的平均值。

2.3 数据处理

用离心机法测定一定容重下的土壤水分特征曲线时,容重越小土壤水分特征曲线的实测点越少,因此实测的质量含水量、吸力和容重间的关系为半个

曲面(见图 1)。用 SigmaPlot 软件(最小二乘法)将实测的半个曲面进行非线性网格化后拓展得到整个曲面。模型参数 a 、 m 、 n 均通过非线性拟合获得。

3 结果与分析

3.1 原状土和填装土的实测土壤质量含水量、吸力和容重三变量关系曲面间的差异

由实测的不同容重下的土壤水分特征曲线点可得到质量含水量、吸力和容重三变量共同构成的曲面。为更好地阐明原状土和填装土的结构差异对这种三变量关系的影响,将邵明安等^[13]的填装土实测图与本研究的原状土实测图叠加在一起,如图 1 所示。由图 1 可知,无论土壤扰动与否,整个测定过程中四种土壤的三变量曲面均表现出如下特征:随容重的增大,相同吸力下土壤质量含水量降低,在近饱和段这一规律更明显;质量含水量-容重关系曲线在

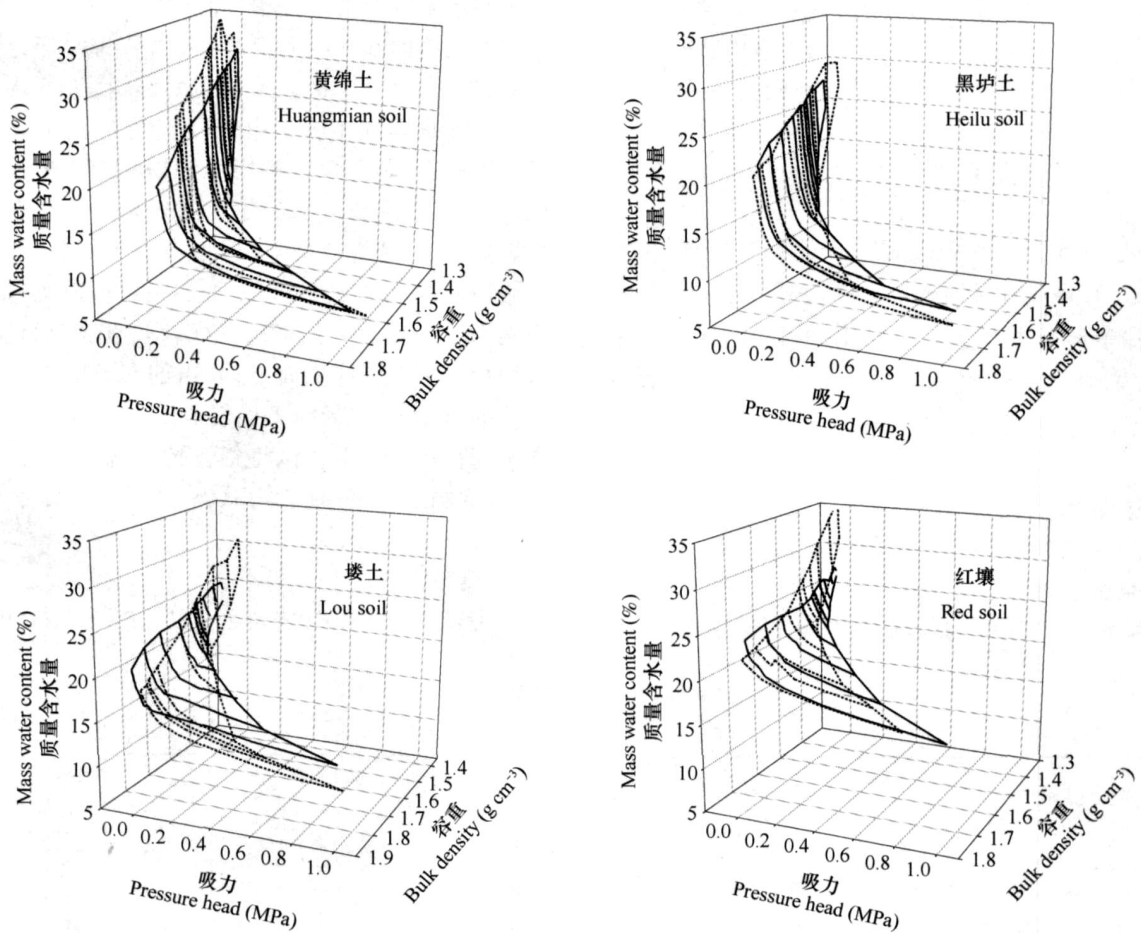


图1 实测的土壤三变量关系曲面(实线-原状土;虚线-填装土)

Fig. 1 Measured soil three-variable surfaces (solid line-undisturbed soil; dash line-packed soil)

吸力为 0 MPa 时斜率最大,即随容重的增加饱和和质量含水量变化最大。在高吸力段,三变量曲面均随土壤质地的变黏而变陡。但原状土和填装土的实测图又存在明显的差异。

首先,随土壤质地变黏,两种处理的饱和和质量含水量变化幅度不同。对原状土而言,土壤质地越黏,饱和和质量含水量减小的幅度越小,饱和和质量含水量-容重关系曲线越平缓。四种原状土的饱和和质量含水量变化幅度依次为 11.9%、6.93%、5.01% 和 3.72%。而填装土壤表现出相反的规律,即土壤质地越黏,饱和和质量含水量减小的幅度越大,饱和和质量含水量-容重关系曲线越陡。四种填装土的饱和和质量含水量变化幅度依次为 7.02%、9.48%、12.3% 和 13.6%。除黄绵土外,其他三种填装土的饱和含水量变化幅度均大于原状土壤。且除黄绵土外,质地越黏,两种处理得到的饱和含水量变化幅度间的差异越大,其差异依次为 2.55%、7.32% 和 9.90%。

其次,土壤的扰动性改变了三变量曲面的形状。尽管土壤扰动性对黑垆土曲面的影响相对较小,但黑垆土和_楼土仍有良好的一致性,即在小容重段原状土三变量曲面低于填装土,在大容重段原状土三变量曲面高于填装土。这说明:原状土的质量含水量在小容重段较低,在大容重段较高。黄绵土和红壤的规律性有别于黑垆土和_楼土。黄绵土在整个低吸力段均表现出原状土的曲面低于填装土。而红壤两种处理的曲面在高吸力段处基本重合。

3.2 土壤的扰动性对实测质量含水量、吸力和容重三变量关系曲面的影响分析

田间土壤经过人工过筛后进行填装,在很大程度上破坏了土壤的结构特性,改变了土壤的孔隙分布状况,进而影响土壤的持水特征。由于实测的土壤质量含水量、吸力和容重三变量持水特征曲面是由不同容重下的土壤水分特征曲线实测点构成的,因而这种土壤结构特性的破坏必然成为影响土壤三

变量性质的重要因素之一。

对于原状土自身而言,黄绵土和黑垆土的取土容重小(黄绵土为 1.25 g cm^{-3} ,黑垆土为 1.39 g cm^{-3}),土壤的结构性好,有一定量的大、中孔隙,初始饱和质量含水量大,但土壤质地较轻,持水能力较差,故饱和质量含水量随容重的增大减小得快。而垆土和红壤的取土容重大(垆土为 1.48 g cm^{-3} ,红壤为 1.47 g cm^{-3}),大孔隙较少,初始饱和质量含水量较小,在小容重段可供排出的水少,所以该段的饱和含水量变化较小。总之,原状土的饱和质量含水量-容重关系曲线随质地变黏而变平缓。

填装土是人工过 1 mm 筛后控制容重进行填装。与原状土的取土容重相比,黄绵土的初始容重变大,垆土和红壤的初始容重变小,而黑垆土的初始容重基本不变(装土容重分别为:黄绵土 1.30 g cm^{-3} ,黑垆土和垆土 1.40 g cm^{-3} ,红壤 1.30 g cm^{-3})。填装过程减少黄绵土的大孔隙,增加垆土和红壤的中等孔隙,使垆土和红壤的饱和质量含水

量随容重的增大变化较大。因此,填装土壤的质地越黏,饱和质量含水量-容重关系曲线越陡。

对于黄绵土而言,填装后的大孔隙明显减少,所以饱和质量含水量的变化幅度较原状土小。又因为增加了中等孔隙,故近饱和段的持水量有所增加,使填装土曲面在整个低吸力段均高于原状土曲面。黑垆土的装土容重与原状土的取土容重基本相等,所以饱和质量含水量的变化幅度和曲面的差异均不大。但垆土和红壤的装土容重明显小于原状土的取土容重,依次减小 5% 和 12% 左右,明显增加了土壤近饱和处的持水能力和持水量。因此,垆土和红壤填装土处理的饱和质量含水量变化幅度大,在小容重、近饱和处的曲面较高。另外,前三种土壤的原状土曲面在高吸力段高于填装土曲面,这是因为原状土含有较多的小孔隙(团聚体内的孔隙),在高吸力段的持水能力强。红壤的两种处理曲面在高吸力段差别不大可能是由于黏粒含量高、饱和时间过长造成的。

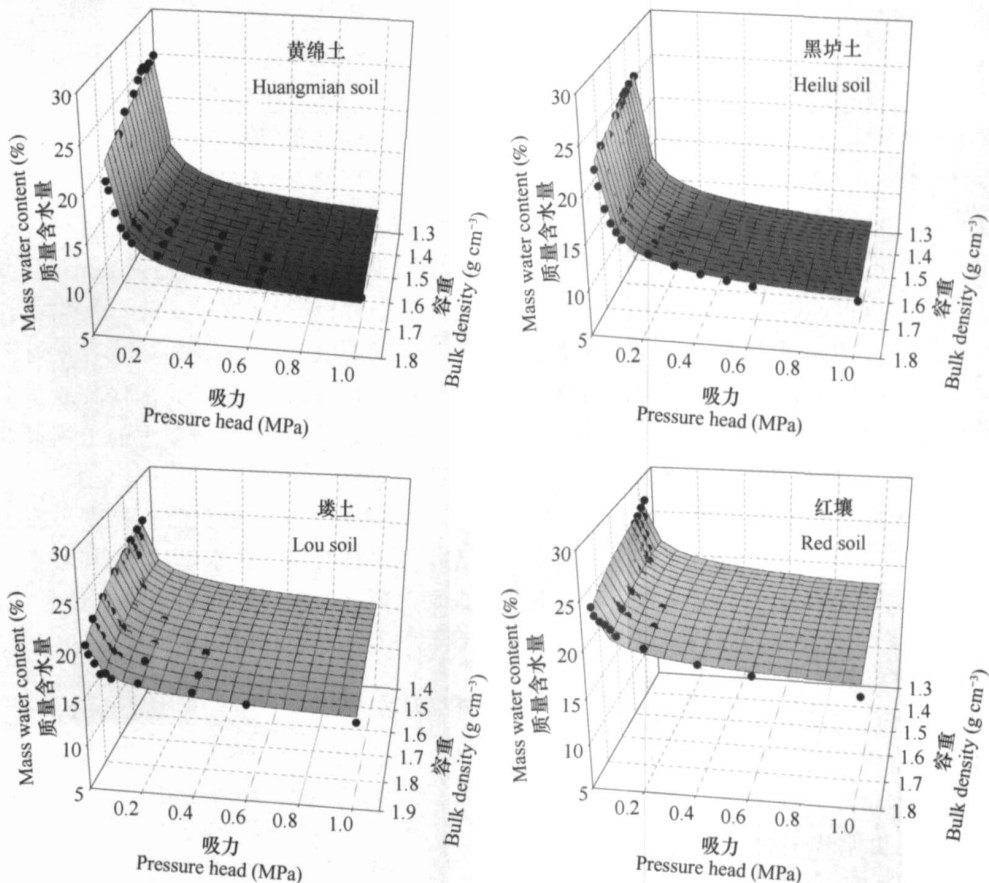


图2 原状土壤的三变量曲面拟合图(“·”为实测点;网格为回归曲面)

Fig. 2 Fitted soil three-variable surfaces for undisturbed soils (“·”: Measured point; Mesh: Regression surface)

3.3 土壤的扰动性对模型拟合结果的影响

用文^[13]给出的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原状土实测数据进行非线性回归,拟合图和结果分别见图2和表2。该模型对填装土的拟合结果^[13]同列于表2中。由表2可知,对原状土而言,该模型对黄绵土、黑垆土和垆土的实测数据拟合较好,决定系数均达到0.97;尽管对红壤的拟合效果略差,但仍可正确反映质量含水量随吸力和容重的变化趋势(见图2)。填

装土的模型参数 a 、 m 随土壤质地变黏逐渐增大, n 随土壤质地变黏减小;原状土的模型参数也有类似的规律,即质地黏重的垆土和红壤有较大的 a 、 m 值和较小的 n 值,质地较轻的黄绵土和黑垆土有较小的 a 、 m 值和较大的 n 值。另外,黑垆土两种处理的 n 值相等, m 值相差较小;而垆土和红壤两种处理下的模型参数差别较大。这与两种处理下的实测图差别大小密切相关,说明模型参数间的差别能很好地反映土壤扰动性对质量含水量、吸力和容重三变量关系曲面的影响。

表2 原状土壤和填装土壤的非线性回归分析结果

Table 2 Results of nonlinear regression analysis of both undisturbed and packed soils

处理 Treatments	土壤 Soil	a	m	n	R^2	SEE	Norm
原状土 Undisturbed soils	黄绵土 Huangmian soil	0.101	1.761	0.289	0.982	0.667	5.294
	黑垆土 Heilu soil	0.091	2.143	0.295	0.995	0.340	2.566
	垆土 Lou soil	0.136	3.059	0.120	0.976	0.425	3.068
	红壤 Red soil	0.172	2.776	0.111	0.938	0.653	4.710
填装土 Packed soils	黄绵土 Huangmian soil	0.097	0.806	0.400	0.966	1.208	9.665
	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 、 n 分别为模型所对应的参数, 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 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

4 结论

由于土壤经过人为加工后在很大程度上改变了土壤的结构,不能准确地阐明田间土壤的持水特性。土壤质量含水量、吸力和容重三变量关系曲面是由不同容重下的土壤水分特征曲线实测点构成的,因此,这种结构性的破坏必将影响土壤三变量曲面的性质。本文对原状土进行了测定分析,并结合邵明安等^[13]的填装土实测资料,分析了土壤的扰动性对土壤三变量曲面的影响。分析结果得出以下结论:

1) 原状土的饱和和质量含水量-容重关系曲线随土壤质地变黏而变缓,与填装土实测规律相反。对于黑垆土和红壤,原状土在三变量曲面在小容重段低于填装土,在大容重段高于填装土。黄绵土在整个低吸力段均表现出原状土的曲面低于填装土曲面。黑垆土的两种处理的初始容重基本相等,两种处理实测的土壤三变量曲面差异性较小。重壤土两处理的初始容重差别较大,土壤的扰动性对重壤土的三变量曲面影响强度大,在低吸力段更明显。

2) 值得注意的是:在试验过程中,通过填装的方法很难使重壤土的容重达到甚至接近其原状土的容重。因此,进行土壤三变量关系实测分析时,对于质地较轻的土壤,在土壤的填装容重逼近取土容重的情况下,用填装土的实验来代替原状土的分析是可以接受的;但对于质地黏重的土壤最好采用原状土进行分析。

3) 两处理模型参数的差异大小能很好地反映土壤扰动性对质量含水量、吸力和容重三变量关系曲面的影响。扰动性对曲面影响越大,两处理模型参数的差异越大,反之亦然。

参考文献

- [1] 宋长春, 阎百兴, 王毅勇, 等. 沼泽湿地开垦对土壤水热条件和性质的影响. 水土保持学报, 2003, 17(6): 144~147. Song C C, Yan B X, Wang Y Y, et al. Effect of mires reclamation on soil moisture, temperature and characters (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2003, 17(6): 144~147
- [2] 王世岩. 三江平原退化湿地土壤物理特征变化分析. 水土保持学报, 2004, 18(3): 167~170, 174. Wang S Y. Analysis on change of physical characteristics of degraded wetland soils in Sanjiang Plain (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation,

- 2004, 18(3):167~170, 174
- [3] 刘红玉,吕宪国,张世奎,等. 三江平原流域湿地景观破碎化过程研究. 应用生态学报,2005,16(2):289~295. Liu H Y, Lu X G, Zhang S K, *et al.* Fragmentation process of wetland landscape in watersheds of Sanjiang Plain (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(2):289~295
- [4] 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
- [5] 贺明荣,王振林. 土壤紧实度变化对小麦籽粒产量和品质的影响. 西北植物学报,2004,24(4):649~654. He M R, Wang Z L. Effects of soil compaction on grain yield and quality of wheat (In Chinese). Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2004, 24(4):649~654
- [6] 刘晚苟,山仑. 不同土壤水分条件下容重对玉米生长的影响. 应用生态学报,2003,14(11):1906~1910. Liu W G, Shan L. Effect of soil bulk density on maize growth under different water regimes (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11):1906~1910
- [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] 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, 15:1633~1635
- [10] 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
- [11] Hwang S I, Powers S E. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties. Soil Sci. Soc. Am. J., 2003, 67:1103~1112
- [12] Kennedy G W, Price J S. A conceptual model of volume-change controls on the hydrology of cutover peats. Journal of Hydrology, 2005, 302:13~27
- [13] 邵明安,吕殿青,付晓莉,等. 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. 填装土壤. 土壤学报, 2007, 44(6):1003~1009. Shao M A, Lu D Q, Fu X L, *et al.* Quantitative relationship between mass water content, pressure head and bulk density in determination of soil water retention characteristics. Packed soils (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(6):1003~1009

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

Fu Xiaoli^{1,2} Shao Mingan^{1†} Lu Dianqing^{3,1}

(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, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 College of Resources and Environmental Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract Centrifuging method was used to determine soil water characteristic curves of four undisturbed soils different in bulk density, and through the experiment, surfaces depicting quantitative relationship between mass water content, pressure head and bulk density in the four soil samples were obtained. Based on the measured data, effects of soil disturbance on the three-variable surfaces were analyzed, a fitting model proposed by the authors was verified, and fitting results of the packed and undisturbed soils were compared. Results show that soil disturbance obviously changed the soil three-variable surfaces. The bigger the difference in initial bulk density between packed and undisturbed soils, the greater the effect of soil disturbance on the surface. The differences in model parameters between the two treatments demonstrate the effects of soil disturbance on the three-variable surfaces. The study of soil three-variable surface for undisturbed soils is sure of some practical significance in extrapolating the study of soil hydrodynamics in soils different in bulk density to field soils.

Key words Undisturbed soils; Soil three-variable surface; Model