

层状土持水性室内模拟初步研究

贾俊超^{1,2}, 张兴昌¹

(1.陕西省生物农业研究所, 西安 710043; 2.陕西省酶工程技术研究中心, 西安 710043)

摘 要:为了探究不同水势下层状土体和均质土体的持水性能,通过设置 5 个均质土体和 4 个层状土体(粗夹细、上粗下细、上细下粗和细夹粗),利用高速离心法比较分析了不同均质和层状土体在不同水吸力下的持水性。结果表明:层状土体的持水能力要高于相同土壤材料配比下均匀混合的均质土,其中粗夹细层状土体的含水量平均增加了 $0.025\text{ cm}^3/\text{cm}^3$;细质地土壤的数量较土体结构对持水性的影响更大;常见的水分特征曲线模型被用来模拟均质和层状土体,基于各模型的决定系数(R^2)和均方根误差(RMSE),可知 van Genuchten 模型拟合效果最好;van Genuchten 模型拟合参数结果表明,层状土体的滞留含水量和饱和含水量大于相同土壤材料配比下的均质土,而拟合的形状参数 α 值较均质土则减小。试验表明:相同材料配比下,层状土的保水能力要高于均质土,且粗夹细层状土有更强的持水能力。另外,质地较细土壤含量对土壤持水性的影响要大于土体结构。

关键词:层状土; 水分特征曲线; 持水能力; 粗夹细

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)06-0090-04

Preliminary Study on Water Retention of Layered Soil by Laboratory Simulation

JIA Junchao^{1,2}, ZHANG Xingchang¹

(1.Biological Agriculture Institute of Shaanxi, Xi'an 710043, China;

2.Enzyme Engineering Research Center of Shaanxi, Xi'an 710043, China)

Abstract: To reveal the water holding performance of the layer and homogeneous soil at different water potentials, five homogeneous soils and four layered soils (fine embedded into coarse, coarse covered with fine, fine covered with coarse and coarse embedded into fine) were set up to study their soil water retention curves by high-speed centrifuge method. The results show that the water retention capacity of the layered soil is higher than that of the homogeneous soil under the same soil material ratio; the water retention capacity in the treatment of coarse sandwiched fine is the highest, and the water content increases by $0.025\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ on average; under the same external suction, the effect of the amount of fine soil on soil water holding capacity is greater than that of soil structure; the soil water retention curve of layered soil can be simulated by the commonly models; the fitting accuracy of van Genuchten model is higher than the Brooks-Corey and Log normal distribution models based on the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE); the simulated parameters of soil water retention curve by the van Genuchten model indicate that the saturated water content and residual water content of the homogeneous soil are lower than those of layered soil, and the shape parameter α of homogeneous soils is higher than that of layered soil under the same soil material ratio. The results show that the water holding capacity of layered soil is higher than that of homogeneous soil under the same material ratio, and the water holding capacity of fine embedded into coarse is stronger. In addition, the effect of soil content with fine texture on soil water retention is greater than that of soil structure.

Keywords: layered soil; soil water retention curve; water retention capacity; fine embedded into coarse

层状土体在自然界中较为常见,层状土由于界面毛管障碍作用,会降低土壤水分向下的运动,使得界面以上土层的含水量增加^[1-2]。在干旱半干旱区,水

分匮乏严重制约着植被的生长^[3]。而层状土由于界面阻水作用,可以增加土体含水量,降低有害物质污染地下水的风险,因此在矿区复垦中广泛应用层状土

收稿日期:2019-11-19

修回日期:2020-01-09

资助项目:陕西省科学院博士启动基金“层状土壤持水性室内模拟研究”(Y20N008F12)

第一作者:贾俊超(1990—),男,河南汝州人,博士,助理研究员,主要从事土壤物理研究。E-mail:jiajunchao163@163.com

通信作者:张兴昌(1965—),男,陕西武功人,博士,研究员,主要从事环境保护与生态修复研究。E-mail:zhangxc@ms.iswc.ac.cn

作为表层回填重构土^[4-5]。

目前,关于层状土持水性的研究已有诸多报道,层状土中细质土、夹层深度、土体厚度均会影响土体中的水分运动^[6]。Yang^[7]和 kale^[8]等通过对层状土的入渗试验表明,入渗速率受细质土影响最大。张建丰等^[9]研究了不同质地夹层的入渗特征,认为夹层厚度对土体稳渗率影响很大;Leconte 等^[10]发现上层土体的厚度对入渗过程起到了重要的影响;任利东等^[2]研究了不同厚度的层状土对持水性的影响,结果表明层状土体的分层厚度与土壤含水量呈负相关关系。Hachum 等^[11]研究了层状土积水条件下的稳定入渗率,发现各分层入渗率的调和平均数约等于土柱整体的入渗率。另外,对上粗下细的土体持水性研究,表明低渗透率的细质土抑制了土体的水分运动速率,同时提高了土壤持水能力^[12-14];为了更详细地分析层状土的入渗过程和持水特性,一些经验模型^[15-17]被开发出来模拟降雨条件下的土壤水分运动过程,并用 Richard 方程数值解模拟做了很好的验证。Huang 等^[5]通过对不同结构层状土体的蒸发性能研究,认为不论是粗质地覆盖细质地还是细质地覆盖粗质土层状土体的水分蒸发都主要来源于粗质地土层。以上研究都是从入渗、蒸发和水分再分布的角度来探讨层状土的持水性。

土壤水分特征曲线的两个坐标分别代表土壤水的能量和数量,通过该曲线拟合方程既可以用于土壤水吸力和土壤含水量之间的相互转换,也可以应用于研究土壤持水能力和水分有效性^[18],其主要受土壤质地、土壤结构、容重和温度的影响^[6]。目前,描述土壤水分特征曲线的成熟模型主要有 van Genuchten (VG) 模型^[19]、Brooks-Corey (BC) 模型^[20]、Dual Porosity (DP)^[21] 模型及 Log normal distribution (LND) 模型^[22]。上述模型都是以均质土体为前提,对于非均质土体来说,相关学者已研究了不同形式下的土壤水分特征曲线模型,例如土石混合结构^[23]、膨胀性砂岩^[24]及重构土^[25]等,得到了一些相对应的水分特征曲线模型参数。层状土体为非均质土体结构,土体尺度和分层界面都会影响其持水性,因此,用土壤水分特征曲线来研究层状土体的持水性还未见报道,本文用高速离心机法测定同一土体尺度下,不同层状结构土体在不同水吸力下的含水量,并分析水分的能量与数量关系,以期揭示不同层状结构土体的持水能力,为矿区土地复垦过程中表土重构提供一些理论基础。

1 材料与方法

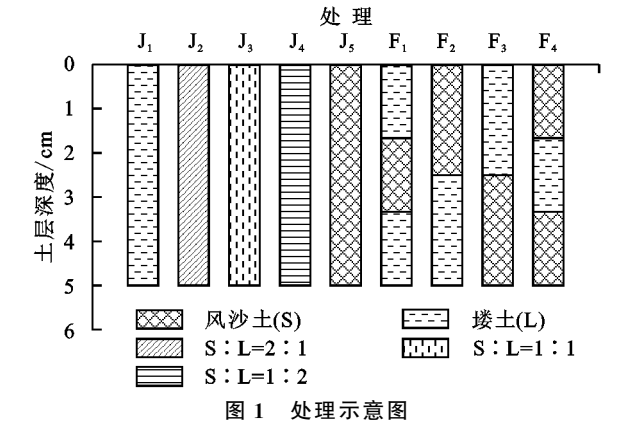
1.1 供试材料

试验所用的风沙土采自于陕西神木,矮土采自于

陕西杨凌。样品经风干、研磨后过 2 mm 筛备用,土壤机械组成和容重见表 1。其中用激光粒度仪 (NANOPHOXTM, 德国 Symaptec 公司) 测定土壤机械组成,用高速离心机 (CR21G, 日本 HITACHI 公司) 测定土壤水分特征曲线。

表 1 供试土壤物理性质			%
指标	砂粒	粉粒	黏粒
风沙土	90.47	6.17	3.36
矮土	6.51	61.18	32.31

各处理示意图见图 1,本试验共 9 个处理,每个处理重复 3 次,其中 J₁—J₅ 为均质土处理 (J₁ 是纯风沙土, J₂, J₃ 和 J₄ 分别是风沙土和矮土 1 : 2, 1 : 1, 2 : 1 均质混合, J₅ 是纯矮土), F₁—F₄ 为分层处理。装土前在环刀 (高 5 cm、体积 100 cm³) 底部铺上定性滤纸,防止土壤漏出,分层填装时把界面处打毛尽量保持土壤孔隙的连续性,风沙土和矮土填装后的容重见表 1。将装土的环刀放入水槽中,水深与环刀高度相平,保持 48 h 后,通过设定离心机转速和时间,依次用称重法计算水吸力在 1, 10, 20, 40, 60, 80, 100, 200, 400, 600 kpa 时的质量含水量。



1.2 数据处理

本文采用 Excel 2007 做数据分析, Sigmaplot 12.0 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤持水性

图 2 为不同均质和层状土体处理下土壤持水性的实测值和拟合曲线。可以看出,不论均质或层状土,拟合曲线在高水吸力阶段表现陡直,而在低水吸力阶段变得平缓,这种趋势在风沙土中表现最为显著。这是因为不同大小孔隙的水对应不同的吸力区域,在低吸力区土壤含水量流失来自大孔隙,且减大幅度较大,持水性曲线相对平缓;在高吸力区域,土壤含水量流失来自小孔隙中,土壤含水量的减小缓慢,所以持水性曲线变化幅度较大^[26]。

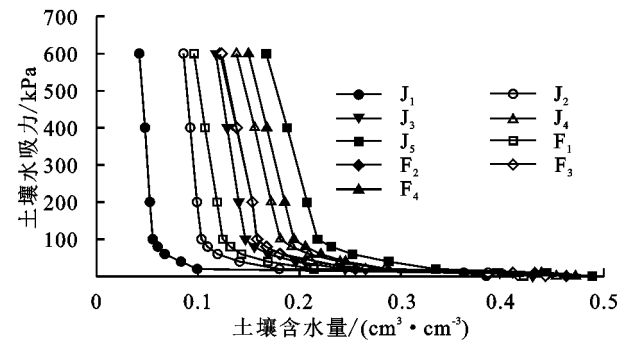


图2 不同处理土壤水吸力和含水量之间的关系曲线

对于均质土 J_1 — J_5 , 曲线逐渐向右移动, 在相同水吸力条件下, 随着掺土数量的增加, 含水量逐渐增大, 这主要是由于掺土中的黏粒含量高, 土体中细小孔隙数量和比表面积增大, 进而增强了对水分的吸附能力^[24]。对于层状土 F_1 — F_4 , 曲线移动趋势和均质土相似。同一土壤水吸力下, 相同配比材料层状土的含水量要大于均匀混合的含水量, 这主要是因为层状土中, 分层界面存在毛管障碍^[6,12], 可能阻碍了水分的穿透, 导致水分含量增加。由以上分析可知, 在相同材料配比下, 无论粗夹细、上粗下细、上细下粗或细夹粗层状土较均质土有更好的持水性。另外, 在相同水吸力下, 均质土处理的土壤含水量由大到小依次为 $J_5 > J_4 > J_3 > J_2 > J_1$, 层状土含水量依次为 $F_4 > F_3 > F_2 > F_1$, 由以上结果可知细质地土壤的含量和土层结构都会影响土壤持水量。通过对比均质土和层状土相同水吸力下含水量, 其大小依次为 $J_5 > F_4 > J_4 > F_3 > F_2 > J_3 > F_1 > J_2 > J_1$, 对比均质土和层状土含水量在相同吸力下的大小可知, 细质地土壤含量对土体持水性的影响要大于土体结构。

表 2 对比分析了相同土壤材料配比下, 10~100 kPa 土壤水吸力之间均质和层状土的含水量的差值。由表 2 可知, 层状土含水量高于相同材料配比下均质土的含水量, 其中土壤含水量 F_1 比 J_2 的高 $0.025 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, F_2 比 J_3 高 $0.012 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, F_3 比 J_3 高 $0.014 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, F_4 比 J_4 高 $0.010 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。对比表 2 各含水量差值的标准差, 可以得出含水量差值在各个水吸力下相近。对比细质地土壤含量和土壤结构对含水量差值大小的影响, 可以得出含水量差值主要受土壤结构的影响, 含水量差值并不随着细质地土壤含量的增加而增加。由以上结果可以得出, 在相同材料配比下, 层状土的含水量要高于均质土, 且不同的层状结构含水量增加程度不同, 其中粗夹细结构的持水性最强。众所周知, 土壤水分是干旱半干旱区植被恢复的主要限制因子, 因此在矿区表层土回填过程中, 推荐采用层状土体作为表层土的重构模式, 尤其是粗夹细层状土体对持水量的增加最为显著。

表 2 相同土壤材料配比下层状土与均质土的含水量差值

水吸力/kPa	cm^3/cm^3			
	$\theta_r(F_1-J_2)$	$\theta_r(F_2-J_3)$	$\theta_r(F_3-J_3)$	$\theta_r(F_4-J_4)$
10	0.034	0.010	0.020	0.003
20	0.028	0.011	0.014	0.005
40	0.023	0.012	0.011	0.012
60	0.022	0.012	0.012	0.013
80	0.021	0.012	0.011	0.013
100	0.020	0.014	0.013	0.013
均质	0.025	0.012	0.014	0.010
标准差	0.005	0.001	0.003	0.005

2.2 常用模型评价分析及参数估计

应用 RETC^[27] 软件结合 VG、BC 和 LND 模型对其水分特征曲线进行求参, 得到不同土体结构处理各模型下的决定系数和均方根误差比较分析见表 3。结果表明: 层状和均质土壤水分特征曲线 VG 和 BC 模型都有较高的拟合精度, 各处理的 RMSE 均小于 $0.0098 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 决定系数 R^2 均大于 0.9913。基于 R^2 和 RMSE 对比分析 VG、BC 和 LND 模型拟合精度, 可知 LND 模型的模拟效果相对较差, 决定系数 R^2 最小为 0.9542。对比均质和层状土体水分特征曲线的拟合精度的差异, 可以看出层状土体和均质土体相近, 并没有因为层状土体中界面存在而降低水分特征曲线的拟合精度。结合表 2 我们可知层状土体在各个吸力阶段增加的含水量值大小相近, 是一个相对稳定的值, 这也可以说明层状土体含水量随着水吸力的变化是相对稳定的值, 因此均质土的水分特征曲线模型也可以较好的模拟层状土体。综上所述, RETC 可以用来拟合层状和均质土的土壤水分特征曲线, 尽管其模拟效果因不同模型、土壤质地和层状结构的不同存在差异, 层状土体的拟合精度并没有因为界面的存在显著降低拟合精度。另外, 通过对比发现 VG 模型模拟层状土水吸力和含水量之间的关系曲线拟合效果最好。

表 3 不同处理各模型拟合误差比较

处理	决定系数 R^2			均方根误差 RMSE		
	VG	BC	LND	VG	BC	LND
J_1	0.9978	0.9995	0.9949	0.0057	0.0027	0.0087
J_2	0.9997	0.9967	0.9969	0.0019	0.0067	0.0064
J_3	0.9997	0.9955	0.9555	0.0019	0.0071	0.0223
J_4	0.9965	0.9920	0.9779	0.0019	0.0093	0.0154
J_5	0.9988	0.9913	0.9542	0.0036	0.0098	0.0264
F_1	0.9995	0.9973	0.9959	0.0024	0.0058	0.0071
F_2	0.9989	0.9962	0.9554	0.0037	0.0071	0.0244
F_3	0.9992	0.9954	0.9610	0.0030	0.0073	0.0213
F_4	0.9990	0.9952	0.9661	0.0033	0.0074	0.0197

注: VG、BC 和 LND 是土壤水分特征曲线模型, 分别代表 van Genuchten、Brooks-Corey 和 log normal distribution。

VG 模型模拟的各土体结构土壤水分数量和能量的关系曲线参数见表 4。对于土壤残余含水量(θ_r)来说,相同材料配比下,层状土(F_1 — F_4)的残余含水量比均质土(J_1 — J_4)的大,这是因为层状土界面处的毛管障碍阻碍了水分的溢出,从而使残余含水量增大^[28]。饱和含水量(θ_s)是土体中能够保持的最大含水量,它代表着土体中气相和液相所能占得最大体积,对于均质土(J_1 — J_5)来说,土含量的增加与饱和含水量的变化正相关,这是由于土质地较细、容重小、土壤总孔隙度大。 α 是模型中的一个形状参数,其值大小可以表示土壤中水分释放的速度^[26]。 α 值既是模型的形状参数,也可以表示土壤进气吸力的倒数^[24]。新构土体的 α 值与土壤质地之间没有显著的相关关系,胡振琪等^[29]采集晋陕蒙能源区露天煤矿排土场表层重构土,并测定其土壤水分特征曲线,结果表明黏壤土和粉壤土的残余含水量和饱和含水量相差较大,而形状参数 α 值很接近;摄晓燕等^[24]研究了风沙土和砒砂岩的复配土的土壤水分特征曲线,结果表明 α 值与砒砂岩含量呈正相关。本试验结果表明,在均质土中土含量与 α 值呈正相关,说明土壤释水速度加快。相同材料配比下均质土的 α 值要大于层状土,而 F_2 的 α 值要大于 J_3 ,表明在层状土中水分从粗质地层向外渗出时,释水速度变快^[28]。

表 4 VG 模型对各处理的拟合参数

处理	$\theta_r /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\theta_s /$ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	α / cm	n
J_1	0.0257	0.3874	0.0451	2.1156
J_2	0.0465	0.4181	0.0481	1.7403
J_3	0.0571	0.4295	0.0483	1.4938
J_4	0.0793	0.4525	0.0688	1.2868
J_5	0.0910	0.4862	0.0660	1.2157
F_1	0.0814	0.4229	0.0459	1.5923
F_2	0.0941	0.4658	0.0527	1.4796
F_3	0.0904	0.4415	0.0458	1.4577
F_4	0.0945	0.4745	0.0631	1.3468

注:VG 是 van Genuchten 模型。 θ_r 和 θ_s 分别是残余含水量和饱和含水量; n 和 α 均是模型的形状参数。

3 结论

- (1) 相同材料配比下,层状土的保水能力要高于均质土,且粗夹细层状土有更强的持水能力。相同外加吸力的情况下,质地较细土壤含量对土壤持水性的影响要大于土体结构。
- (2) VG 模型模拟的复配土体土壤水分数量和能量关系曲线准确度较高,层状结构中界面的存在并没有降低水分特征曲线的拟合精度,相同材料配比下

- 层状土的饱和含水量和残余含水量都较均质土增大。
- 层状土较均质土有更强的保水特性,其中粗夹细层状结构的持水能力最强。以上研究结果可为干旱半干旱露天矿区表层土回填和植被恢复提供理论基础。
- 参考文献:
- [1] 仲轩野,朱成立,柳智鹏,等.不同矿化度对层状土入渗规律的影响研究[J].节水灌溉,2019(5):63-66.
 - [2] 任利东,黄明斌,樊军.不同类型层状土壤持水能力的研究[J].农业工程学报,2013,29(19):104-111.
 - [3] 乔江波,朱元骏,贾小旭,等.黄土高原关键带全剖面土壤水分空间变异性[J].水科学进展,2017,28(4):515-522.
 - [4] Jannis G, Christine S, Lücke A, et al. inverse estimation of soil hydraulic and transport parameters of layered soils from water stable isotope and lysimeter data[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17 (1). DOI: 10.2136/vzj2017.09.0168.
 - [5] Huang M, Bruch P G, Barbour S L. Evaporation and water redistribution in layered unsaturated soil profiles [J]. Vadose Zone Journal, 2013,12(1).DOI:10.2136/vzj2012.0108.
 - [6] 邵明安.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
 - [7] Yang H, Rahardjo H, Leong E C. Behavior of unsaturated layered soil columns during infiltration[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2006,11(4):329-337.
 - [8] Kale R V, Sahoo B. Green-Ampt infiltration models for varied field conditions: a revisit [J]. Water Resource Management, 2011,25(14):3505-3536.
 - [9] 张建丰,王文焰,汪志荣,等.具有砂质夹层的土壤入渗计算[J].农业工程学报,2004,20(2):27-30.
 - [10] Leconte R, Brissette F P. Soil moisture profile model for two-layered soil based on sharp wetting front approach [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2001,6(2): 141-149.
 - [11] Hachum A Y, Alfaro J F. Rain infiltration into layered soils:prediction[J]. Journal of the Irrigation & Drainage Division American Society of Civil Engineers, 1980,106(4):311-319.
 - [12] 王文焰,张建丰,汪志荣,等.砂层在黄土中的阻水性及减渗性的研究[J].农业工程学报,1995,11(1):104-110.
 - [13] Chen S, Mao X M, Barry D A, et al. Model of crop growth, water flow, and solute transport in layered soil[J]. Agricultural Water Management, 2019,221: 160-164.
 - [14] 郝瑞,施斌,曹鼎峰,等.层状土毛细水上升过程中 Lucas-Washburn 模型评价及修正[J].水文地质工程地质, 2018,45(6):85-92.

[11] 张冰洁,王灵灵,薛亚莉.渭河下游河道造床流量及过洪能力变化分析[J].陕西水利,2018(1):8-9,11.

[12] 李福田,高澜.造床流量计算方法初探[J].河海大学学报,1990,18(4):113-116.

[13] Carling P. The concept of dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1988,13(4):355-367.

[14] 柴雪柯.渭河流域水沙变化及其影响因素[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2017.

[15] 陈星星.近代渭河下游河道演变趋势研究[D].西安:西安理工大学,2017.

[16] 戴清,胡健,袁玉萍.渭河下游河道输水能力与断面形态响应关系研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2007,5(3):227-232.

[17] 马雪妍.渭河下游平滩流量与水沙条件响应关系研究[J].水资源与水工程学报,2006,17(3):79-82.

[18] 宝婉宁,郭维东,李翔.辽河干流中下游河段造床流量和平滩流量及有效流量分析[J].泥沙研究,2018,43(2):55-60.

[19] Wolman M G, Miller J P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes[J]. the Journal of Geology, 1960,68(1):54-74.

[20] Ma Y, Huang H Q, Xu J, et al. Variability of effective discharge for suspended sediment transport in a large semi-arid river basin[J]. Journal of Hydrology, 2010,388(3):357-369.

[21] Roy N G, Sinha R. Effective discharge for suspended sediment transport of the Ganga River and its geomorphic implication[J]. Geomorphology, 2014,227:18-30.

[22] 张为,高宇,许全喜.三峡水库运用后长江中下游造床流量变化及其影响因素[J].水科学进展,2018,29(3):331-338.

[23] 陈栋,余明辉,朱勇辉.三峡建库前后下荆江有效流量研究[J].水利水电快报,2018,29(6):788-798.

[24] Benson M A, Thomas D M. A definition of dominant discharge[J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 1966,11(2):76-80.



(上接第 93 页)

[15] Cui G, Zhu J. Prediction of unsaturated flow and water backfill during infiltration in layered soils[J]. Journal of Hydrology, 2018,557:509-521.

[16] Chu X, Marino M A. Determination of ponding condition and infiltration into layered soils under unsteady rainfall[J]. Journal of Hydrology, 2005,313(3):195-207.

[17] Corradini C, Melone F, Smith R E. Modeling local infiltration for a two layered soil under complex rainfall patterns[J]. Journal of Hydrology, 2000,237:58-73.

[18] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.

[19] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society America Journal, 1980,44(5):892-898.

[20] Brooks R H, Corey A T. Hydraulic Properties of Porous Media[R]. Fort Collins, USA: Colorado State University, 1964.

[21] Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties[J]. Water Resources Research, 1996,32(9):2697-2703.

[22] Durner W. Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure[J]. Water Resources Research, 1994,30(2):211-223.

[23] Li J H, Zhang L M, Li X. Soil-water characteristic curve and permeability function for unsaturated cracked soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011,48:1010-1031.

[24] 摄晓燕,张兴昌,魏孝荣.适量砒砂岩改良风沙土的吸水和保水特性[J].农业工程学报,2014,30(14):115-123.

[25] Jia J C, Zhang P P, Yang X F, et al. Feldspathic sandstone addition and its impact on hydraulic properties[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2018,98(3):399-406.

[26] 文曼.黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.

[27] van Genuchten M T, Leij F J, Yates S R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils[D]. California, USA: Salinity Laboratory, 1992.

[28] 贾俊超.砒砂岩添加对风沙土水分运动和苜蓿生长的影响[D].北京:中国科学院大学,2019.

[29] 胡振琪,张学礼.基于 ANN 的复垦土壤水分特征曲线的预测研究[J].农业工程学报,2008,24(10):15-19.