排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2020 年 3 月 Mar. 2020 | 第 38 卷 第 3 期 Vol.38 No.3

生物炭对黑垆土土壤水分运移特征参数影响


王幼奇

王幼奇[1,2],包维斌[1,2],白一茹[1,2*],陆学娥[1,2],夏子书[1,2],杨帆[1,2],钟艳霞[1,2]
(1. 宁夏大学资源环境学院,宁夏 银川 750021;2. 旱区特色资源与环境治理教育部国际合作联合实验室,宁夏 银川 750021)

摘要:为了了解生物炭施加对宁南山区黑垆土土壤水分运移特征参数影响,以宁南山区典型土壤黑垆土为研究对象,按 0%,1%,2%和 3%的比例将土壤改良剂生物炭施加到垂直和水平土柱中,探讨不同施加比例下入渗速率、饱和体积含水量、饱和导水率、饱和扩散率等土壤水分运移特征参数的变化.研究结果表明:生物炭施加比例 1%,2%和 3%的土壤体积含水量较 0%增加了 2.98%,6.45%和 7.94%,生物炭施加减缓了土壤入渗速率,提高了土壤持水性能;Philip 模型比 Kostiakov 模型更加能反映出不同比例生物炭施加下土壤水分入渗过程;生物炭施加比例 1%,2%和 3%的饱和体积含水量分别较 0%增加了 5.05%,8.33%和 9.85%,饱和导水率分别减少了 45.71%,62.86%和 74.28%,生物炭施加提高了土壤持水能力;Van Genuchten 中 1%,2%,3%的参数 a 较 0%分别减少了 31.90%,29.25%,19.23%;n 分别减少了 0.28%,0.16%,0.66%;生物炭施加比例 1%,2%和 3%的饱和扩散率分别较 0%减少了 58.46%,77.96%和 89.28%.生物炭施加改良了土壤结构,增加了土壤体积含水量,提高了土壤持水性能.

关键词:生物炭;入渗;水动力学参数;宁南山区;黑垆土
中图分类号:S277.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-8530(2020)03-0292-06
Doi:10.3969/j.issn.1674-8530.19.0171

王幼奇,包维斌,白一茹,等. 生物炭对黑垆土土壤水分运移特征参数影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(3):292-297.
WANG Youqi, BAO Weibin, BAI Yiru, et al. Effects of biochar on soil water transport characteristics of Heilu soil[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2020,38(3):292-297.(in Chinese)

Effects of biochar on soil water transport characteristics of Heilu soil

WANG Youqi[1,2], *BAO Weibin*[1,2], *BAI Yiru*[1,2*], *LU Xuee*[1,2], *XIA Zishu*[1,2], *YANG Fan*[1,2], *ZHONG Yanxia*[1,2]
(1. College of Resources and Environment, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China; 2. Arid Area Characteristic Resources and Environmental Governance Department of Education International Cooperation Joint Laboratory, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: Biochar applied in soil can alter characteristic parameters of soil water migration in Heilu soil in the southern Ningxia mountain region. A typical Heilu soil in the region was selected to the study object. Then, a soil amendment-biochar was added into one-dimensional vertical and horizontal soil columns in four proportions, such as 0%, 1%, 2% and 3%, to explore the change in soil water transport characteristics, namely, infiltration rate, saturated volumetric water content, saturated hydraulic conductivity, and saturated diffusivity. The results show that soil water content in the soils with 1%,

收稿日期:2019-07-08; **修回日期**:2019-08-27; **网络出版时间**:2019-08-27
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20190827.0957.006.html
基金项目:国家自然科学基金资助项目(41867003,41761049);宁夏自然科学基金资助项目(2018AAC03027);宁夏回族自治区科技重大专项项目(2018BEG02010);宁夏环境保护科学技术研究项目(2018-007)
第一作者简介:王幼奇(1980—),男,安徽泾县人,副教授(wyq0563@163.com),主要从事水土资源与环境研究.
通信作者简介:白一茹(1984—),女,陕西渭南人,副教授(yr0823@163.com),主要从事旱区水土资源调控研究.

2% and 3% biochar is increased by 2.98%, 6.45% and 7.94% compared with the plain soil. The Philip model can reflect soil water transport process in different biochar mixing proportions more exactly than the Kostiakov model. The saturated volumetric water content in the amended soils with 1%, 2% and 3% biochar is increased by 5.05%, 8.33% and 9.85%, respectively, and the saturated hydraulic conductivity is decreased by 45.71%, 62.86% and 74.28%, respectively. The parameter a in the Van Gencuhten model for the amended soils with 1%, 2%, and 3% biochar is reduced by 31.90%, 29.25%, and 19.23%, and the parameter n in the model is reduced by 0.28%, 0.16%, and 0.66%, respectively. The saturated diffusivity in the amended soils with 1%, 2%, and 3% biochar is reduced by 58.46%, 77.96% and 89.28% compared with the plain soil, respectively. These facts suggest that biochar can improve soil structure, and can increase soil volumetric water content and improve soil water holding capacity.

Key words: biochar; infiltration; hydrodynamic parameters; mountain area of Southern Ningxia; Heilu soil

土壤水分运移特征参数是反映土壤运动过程和土壤持水性能的重要指标,其主要由饱和导水率、饱和扩散率、非饱和扩散率、吸渗率、饱和含水率、滞留含水率和初始含水率等构成[1].目前,测定土壤水分运移特征参数的方法包括理论法、室内试验法和野外试验法等[2].理论法由于土壤颗粒大小、数量的差异导致土壤孔隙比不一,因此根据水的黏滞性和土壤孔隙比推导出的土壤水分运移特征参数存在一定缺陷性[3].室内试验法推导出的土壤水分运移特征参数相比理论法更具科学性,但取样烦琐、样品数量、体积均偏少,无法准确代表野外的实际情况[4].野外试验法土壤扰动小、得出的土壤水分运移特征参数与实际情况想接近,同时也存在费时、费力和成本高的问题[5].近年来研究发现采用垂直入渗与水平入渗相结合的方法测定的土壤水分运移特征参数接近于实际情况,精确度较高,避免了理论法和室内试验法的缺陷[6].

国内外研究者对土壤水分运移特征参数进行了大量研究,如 VILLARREAL 等[7]通过一维水平入渗试验确定了阿根廷潘帕斯壤土,粉质壤土和砂质壤土不同壤水含量下的土壤水分扩散系数和吸收率. 邵明安等[8]以简单入渗法推求出适应性广泛的 Van Genuchten 模型中水分运移特征参数 α 和 n.可以看出利用一维垂直和水平入渗试验可以简便和准确的推求不同质地土壤水分运移特征参数.

在此基础上,相关学者利用一维垂直和水平入渗试验对土壤改良剂施加条件下的土壤水分运移特征参数进行探索并取得了良好的结果,周蓓蓓等[9]发现在土壤中施加土壤改良剂枯草芽孢杆菌,土壤饱和导水率、吸渗率、稳定入渗率等随枯草芽孢杆菌施加比例增加呈现先减少后增大的规律.王全九等[10]研究了施加土壤改良剂 PAM 下土壤水盐运移特性,也发现施量为 0.04%时,吸渗率、经验系数最小,而经验指数 β 和水分扩散率达到最大.

文中利用一维垂直土柱积水入渗试验获取湿润锋运移距离、入渗速率和累积入渗量等数据,水平土柱吸渗试验获 Van Genuchten 模型参数、饱和扩散率等,对宁南山区不同比例生物炭施加下土壤水分运移特征参数进行研究,进而明确生物炭施加比例对土壤水分运移的影响,以期为生物炭改善土壤结构、优化土壤持水性能提供借鉴.

1　材料与方法

1.1　研究区概况

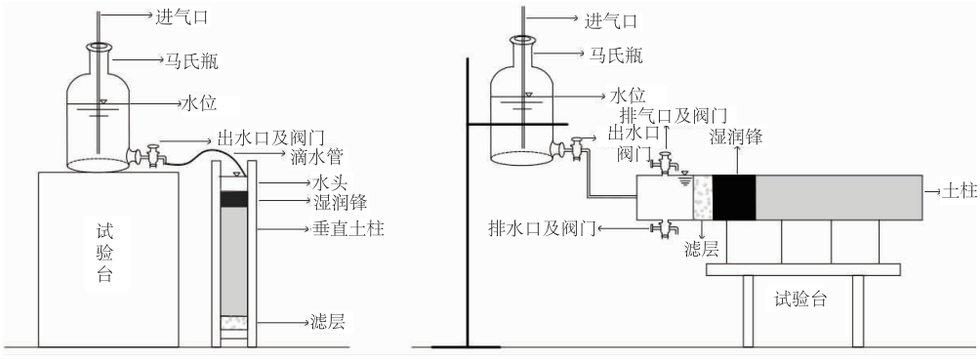
研究区位于固原市泾源县,属宁南山区的六盘山区,气候干旱、降雨少,年均温 5.7 ℃,高于10 ℃的积温为 1 970 ℃,年降水量约为 650.9 mm,水分蒸发量 668 mm,年干燥度 1.02.土壤类型较为复杂,主要以黑垆土为主,其黏粒含量 12.53%,粉粒含量 72.66%,砂粒含量 14.82%,属粉质壤土.土壤容重为 1.39 g/cm^3,土壤初始含水量为 0.86%.

1.2　研究方法

1.2.1　样品采集及测定

将土样和生物炭进行研磨、过 2 mm 筛以备用.按生物炭施加比例(0%,1%, 2%,3%)将土壤和生物炭混匀,并按土壤实际容重 1.39 g/cm^3 分层填装到内径为 10 cm,长 50 cm 的垂直和水平土柱中,填装高度为 30 cm.为防止出现分层现象,每层 5 cm 填装时打毛土壤表面,装填完成后将滤纸覆盖土壤表面以利于土壤水分均匀入渗.使用内径 19 cm,高 45 cm的马氏瓶供水,垂直入渗时水头控制在 3 cm,

水平入渗时无水头.马氏瓶开始供水后,记录不同时间段马氏瓶水位和土柱湿润锋运距,当湿润锋到达土柱底部时停止供水,试验结束,各试验重复3次(试验装置如图1所示).土壤含水量采用烘干法测定,容重、饱和含水量用环刀法测定,饱和导水率用定水头法测定.



(a) 垂直入渗 (b) 水平入渗

图1 土壤垂直、水平入渗示意图

Fig.1 Schematic of vertical and horizontal soil infiltration

1.2.2 参数计算公式

Philip模型入渗公式为

$$I=St^{0.5}, \tag{1}$$

式中:I为累积入渗量,cm;S为土壤吸渗率,cm/min$^{0.5}$;t为入渗时间,min.

Kostiakov模型入渗公式为

$$f(t)=at^{-b}, \tag{2}$$

式中:a,b为根据试验数据拟合的模型参数.

Van Genuchten模型入渗公式为

$$\alpha=\frac{2K_S}{Sd}\left[\frac{1}{m}\left(\frac{\theta_s-\theta_i}{\theta_s-\theta_r}\right)\right]^{1/n}, \tag{3}$$

$$n=\frac{S}{d(\theta_S-\theta_i)-S}, \tag{4}$$

上述式中:θ_s为土壤饱和体积含水率,cm^3/cm^3;θ_r为土壤滞留含水率,cm^3/cm^3;θ_i为土壤初始含水率,cm^3/cm^3,当土壤初始含水量比较低时,认为滞留含水量与初始含水量相等;d为Boltzmann变量($\lambda=x/t^{0.5}$)的最大值即特征湿润锋长度,cm/min$^{0.5}$;K_s为土壤饱和导水率,cm/min;α为标定参数,cm^{-1};n为土壤水分特征曲线指数.

非饱和扩散率$D(\theta)$计算公式为

$$D(\theta)=D_S\left(\frac{\theta-\theta_r}{\theta_s-\theta_r}\right)^L, \tag{5}$$

$$D_s=\frac{ab}{(\theta_s-\theta_i)(\theta_s-\theta_i-a)}, \tag{6}$$

$$L=\frac{a}{\theta_s-\theta_i-a}-1, \tag{7}$$

上述式中:θ为土壤含水率,cm^3/cm^3;D_s为土壤水分饱和扩散率;L为参数.其中参数a和b由累积入渗量I、入渗率i、湿润锋x_f之间的关系获得,$I=ax_f$,$i=b/x_f$.

1.3 数据分析

运用经典统计学和地统计学理论,采用Excel 2010,Origin 9.0和SPSS 19.0对相关数据进行统计分析.异常值用正常的最大或最小值替代,后续采用处理过的数据进行分析计算.

2 结果与分析

2.1 不同生物炭施加比例对湿润峰的影响

图2为不同生物炭施加比例下湿润锋、累积入渗量进程随时间的变化关系.由图2可知同一入渗时间内生物炭施加比例越高,湿润峰运移越慢、累积入渗量越小.随入渗时间推移,各处理湿润锋、累积入渗量曲线之间的差距也逐渐增加.在入渗初始阶段(20 min内),0%,1%,2%和3%的累积入渗量、湿润锋曲线出现重合.可能是入渗初期阶段由于土体干燥、基质势大导致生物炭的亲水性能未完全发挥出来,从而出现累积入渗量、湿润锋曲线重叠的现象.随着入渗历时增加土壤基质势开始减小,生物炭巨大的表面积、亲水性开始影响入渗过程,导致不同施加比例下的累积入渗量、湿润锋曲线出现差异.在入渗初始阶段之后,生物炭施加比例越高其累积入渗量、湿润锋变化曲线的增速越慢且趋于平缓.0%,1%,2%和3%的湿润锋到达同一土柱深度(35 cm)所用的时间分别为240,291,318和432 min.入

渗结束后,生物炭施加比例 0%,1%,2%和 3%对应的土壤平均体积含水量分别为 0.403,0.415,0.429,0.435 cm^3/cm^3,1%,2%和 3%的土壤体积含水量比 0%分别增加了 2.98%,6.45%和 7.94%.因为生物炭施加分散了土壤颗粒之间的黏结,增加了土壤表面积和孔隙度,形成稳定的土壤团聚体,使土壤水分更加有利于储存在土壤微孔结构中,导致土壤入渗速率降低、持水性能提高,这对水分缺乏的西北具有重要的现实意义.

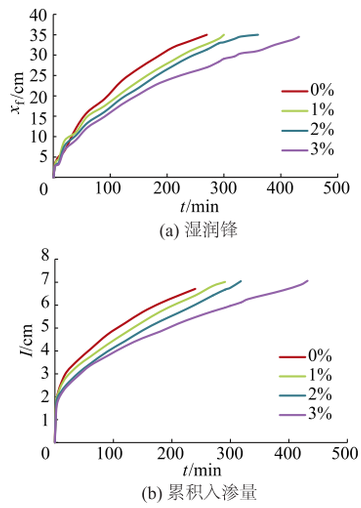


图 2　不同生物炭施加比例下湿润锋、累积入渗量进程随时间的变化关系

Fig.2　Progress of wetting front and cumulative infiltration with time in different biochar application ratios

2.2　土壤水分入渗过程的拟合分析

为进一步揭示不同施加比例下土壤入渗规律,采用 Philip 和 Kostiakov 模型对入渗实测数据进行拟合.拟合结果显示(见表 1),在 Philip 模型中吸湿率 s 值依次为 0%,1%,2%,3%,而 s 值反映土壤入渗速率,其值越小,土壤入渗越慢.结合图 2 可以看出,随生物炭施加比例增加,入渗历时增加明显,入渗结束时所对应的累积入渗量和土壤体积含水量增加,可能是生物炭的微孔结构、巨大的比表面积吸附了更多的土壤水分,有效延长了入渗过程、增加了土壤持水能力.Kostiakov 模型中,参数 a 值依次为 0%,1%,2%,3%,参数 b 依次为 0%,1%,3%,2%,而参数 a 值越大其初始入渗率越大,b 值越大其入渗率的衰减程度越大,说明随生物炭施加比例增加初始入渗率依次减小,未施加生物炭的土壤水分入渗率降速最快.通过对比发现,Philip 和 Kostiakov 模型对不同生物炭施加比例下土壤水分入渗过程的拟合效果存在一定差异.Philip 模型对不同生物炭施加比例下土壤入渗过程拟合效果较 Kostiakov 模型好,其 R^2 均高于 0.986,能更好地反映生物炭施加后土壤水分入渗过程.

表 1　不同生物炭施加量下的土壤水分入渗模型分析

Tab.1　Analysis of soil moisture infiltration model in different biochar mixing proportions

x/%	Philip 模型		Kostiakov 模型		
	s	R^2	a	b	R^2
0	0.111	0.986	0.872	0.808	0.970
1	0.103	0.992	0.842	0.799	0.963
2	0.096	0.988	0.644	0.644	0.888
3	0.072	0.993	0.641	0.711	0.962

2.3　生物炭施加对土壤水动力参数的影响

饱和体积含水量 θ_s 能够直观反映土壤持水性能.根据图 3 可知 0%,1%,2%和 3%的饱和体积含水量分别为 0.396,0.416,0.429 和 0.435 cm^3/cm^3.1%,2%和 3%的饱和体积含水量分别比 0%增加了 5.05%,8.33%和 9.85%,即随生物炭施加比例 x 增加,饱和体积含水量也呈现出增加的规律.

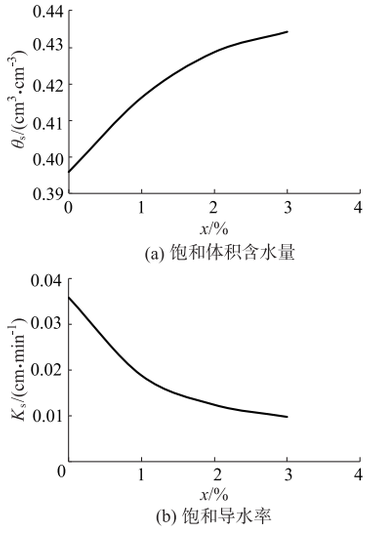


图 3　生物炭施加对饱和体积含水量和饱和导水率的影响

Fig.3　Effect of biochar on saturated volumetric soil moisture and hydraulic conductivity

同时采用二项式对生物炭施加比例 x 和饱和体积含水量 θ_s 进行拟合,得到拟合方程:$\theta_s=-36.92x^2+2.382x+0.396$,$R^2$ 为 0.999,达到极显著水平($P<0.01$).也可以得出生物炭施加比例增加,对应的土壤饱和体积含水量也逐渐增大.其中 3%的土壤饱和体积含水量最大、土壤持水能力最好,根据试验效果建议当地农民施加 3%的生物炭到农田土壤中.饱和导水率是单位时间内在一定水压下通过土壤的水量,饱和导水率大则土壤结构良好、孔隙度丰富、

土壤入渗性能好.0%,1%,2%和3%的饱和导水率分别为0.035,0.019,0.013 和 0.009 cm/min,与 0%相比分别减少了 45.71%,62.86%和 74.28%,即随生物炭施加比例增加,饱和导水率呈减小规律.同时对饱和导水率 K_s 和生物炭施加比例 x 的关系进行二项式拟合得到拟合方程:$K_s = 0.003\ 6x^2 - 0.019\ 2x + 0.035\ 5$,$R^2$为 0.994,也达到极显著水平($P<0.01$).拟合曲线也反映了随生物炭施加比例增加,对应的土壤饱和导水率逐渐减小的规律.生物炭施加不仅改善了土壤结构、提高了土壤饱和体积含水量,更重要的是提高了干旱半干旱区的土壤持水性.

2.4 生物炭施加对入渗模型参数的影响

由表 2 可知,Van Genuchten 模型与 Philip 和 Kostiakov 模型相比,不仅能反映土壤入渗能力大小,而且也能反映土壤饱和含水率的变化.在 Van Genuchten 模型拟合中,参数 s,d 和 k_s均呈现随生物炭施加比例增加逐渐减小趋势,而土壤饱和含水率 θ_s则呈相反趋势,说明不同比例生物炭施加均能改善土壤结构、提高土壤饱和含水率.参数 α 是进气吸力的倒数,进气值是土壤水分特征曲线接近饱和时拐点的吸力值[8].对于相同土壤质地而言,α 值越小其进气吸力越大,土壤水分越不容易流失.研究中施加生物炭的土壤 α 值远小于未施加生物炭的土壤,说明生物炭施加增加了进气吸力、有利于土壤水分储存.参数 n 值是土壤吸水速率大小的反映,其主要受到土壤孔隙度数量、大小等影响.本研究中施加生物炭的土壤 n 值也均远小于未施加生物炭的土壤.Van Gencuhten 模型可以拟合施加生物炭后的土壤水分特征曲线,其模型中生物炭施加比例 1%,2%和 3%的参数 α 比 0%分别减少了 31.90%,29.25%和 19.23%,n 分别减少了 0.28%,0.16%和 0.66%,说明生物炭施加比例不同,土壤吸水速率降低程度不同.可能是生物炭施加增加了土壤表面积和微孔隙度数量、减少了土壤大孔隙度,这也在一定程度上揭示了生物炭施加后土壤饱和导水率下降的原因.

表 2 Van Genuchten 模型下土壤水分特征曲线的模拟参数

Tab.2 Parameters of soil moisture characteristic curve in Van Genuchten model

x/%	s/(cm·min$^{-0.5}$)	d/(cm·min$^{-0.5}$)	k_s/(cm·min^{-1})	θ_s/(cm^3·cm^{-3})	θ_r/(cm^3·cm^{-3})	α/cm^{-1}	n
0	0.111	0.631	0.036	0.396	0.054	15.281	1.067
1	0.103	0.551	0.019	0.417	0.054	10.406	1.064
2	0.096	0.500	0.013	0.429	0.054	10.812	1.050
3	0.072	0.370	0.010	0.435	0.054	12.343	1.060

2.5 生物炭施加对土壤水分扩散率的影响

由图 4 可以看出累积入渗量与湿润锋进程、入渗率与湿润锋的倒数及湿润锋平方与入渗时间之间具有很好的线性关系.

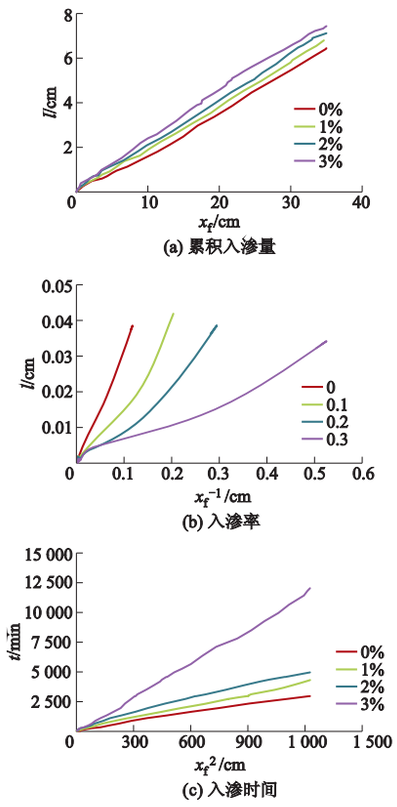


图 4 线性回归拟合曲线

Fig.4 Linear regression curves

利用线性回归得到拟合参数 a,b,分别计算对应土壤饱和扩散率 D_s和参数 L.由表 3 可知,不同比例生物炭施加的线性拟合 R^2均高于 0.965,拟合效果较好,尤其是累积入渗量与湿润锋进程的模拟 R_a^2都在 0.997 以上.生物炭施加比例 0%,1%,2%和 3%的饱和扩散率 D_s分别为 1.502,0.624,0.331 和 0.161.1%,2%和 3%的饱和扩散率 D_s分别比 0%减少了 58.46%,77.96%和 89.28%.一般而言,土壤扩散率主要受土壤含水量、孔隙度等因素的影响[8].生物炭施加不仅增加了土壤含水量,而且生物炭自身巨大的表面积、极强的吸附能力导致土壤大孔隙数量减少、微孔隙数量增加,因而随生物炭施加比例增加,通水大孔隙少,土壤含水量提高,饱和扩散率减少.0%,1%,2%和3%的下土壤非饱和扩散率分别为 $D(\theta) = 3.020(\theta - 0.054)^{0.651}$,$D(\theta) = 0.797(\theta - 0.054)^{0.241}$,$D(\theta) = 0.356(\theta - 0.054)^{0.072}$和 $D(\theta) = 0.162(\theta - 0.054)^{0.005}$.说明生物炭施加到土壤中不仅可以起到改变土壤原有结构的作用,而且通过影响

土壤扩散率来提高土壤持水性.

表 3　线性回归系数及饱和扩散率 D_s 与参数 L
Tab.3　Linear regression coefficient and saturated diffusion rate D_s and parameter L

x/%	a	R_a^2	b	R_b^2	D_s	L
0	0.213	0.997	0.311 2	0.994	1.502	0.651
1	0.201	0.999	0.182 7	0.976	0.624	0.241
2	0.194	0.999	0.115 9	0.965	0.331	0.072
3	0.191	0.997	0.060 9	0.982	0.161	0.005

3　结　论

1）0%,1%,2%和 3%湿润锋运行时间分别为 240,291,318 和 432 min,对应土壤平均体积含水量分别为 0.403,0.415,0.429,0.435 cm^3/cm^3,比 0%分别增加了 2.98%,6.45%和 7.94%,饱和扩散率 D_s分别为 1.502,0.624,0.331 和 0.161,比 0%分别减少了 58.46%,77.96%和 89.28%.

2）生物炭施加比例 1%,2%和 3%的饱和体积含水量分别比 0%增加了 5.05%,8.33%和 9.85%,饱和导水率分别减少了 45.71%,62.86%和 74.28%,说明生物炭施加增加了饱和体积含水量,降低了饱和导水率和入渗速率.

3）Van Gencuhten 模型可以拟合施加生物炭后的土壤水分特征曲线,Van Gencuhten 模型中 1%,2%和 3%的 a 比 1%分别减少了 31.90%,29.25%和 19.23%,n 分别减少了 0.28%,0.16%和 0.66%.

参考文献(References)

[1] 柴红阳,陈俊英,张林,等,不同斥水程度粘壤土一维入渗特性的试验研究[J].排灌机械工程学报,2019,37(7):632-638.
CHAI Hongyang, CHEN Junying, ZHANG Lin, et al. Experiment on one-dimensional infiltration characteristics of clay loam soil with different water repellency[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering,2019,37(7):632-638.(in Chinese)

[2] QIAO J B, ZHU Y J, JIA X X, et al. Pedotransfer functions for estimating the field capacity and permanent wilting point in the critical zone of the Loess Plateau, China[J]. Journal of soils & sediments, 2019, 19(1): 140-147.

[3] 白一茹,赵云鹏,王幼奇,等.宁夏砂田不同砾石覆盖厚度土壤入渗过程及模型分析[J].水土保持学报,2017,31(4):81-85.
BAI Yiru, ZHAO Yunpeng, WANG Youqi, et al. Soil infiltration process and model analysis of field mulched with different thickness of gravel-sand in Ningxia[J]. Journal of soil and water conservation,2017,31(4):81-85.(in Chinese)

[4] 李霞,张东兴,张瑞,等.土壤物理特性对深松阻力影响的试验[J].江苏大学学报(自然科学版),2014,35(1):34-39.
LI Xia, ZHANG Dongxing, ZHANG Rui, et al. Experiment of subsioling draught under different soil physical properties[J]. Journal of Jiangsu University(natural science edition),2014,35(1):34-39. (in Chinese)

[5] 魏童,谭军利,葛敏,等.压砂条件下水分一维垂直入渗试验研究[J].排灌机械工程学报,2018,36(8):29-33.
WEI Tong, TAN Junli, GE Min, et al. One-dimensional vertical infiltration of water under gravel fragments condition[J].Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2018,36(8):29-33.(in Chinese)

[6] ABROL V, BEN-HUR M, VERHEIJEN F G A, et al. Biochar effects on soil water infiltration and erosion under seal formation conditions: rainfall simulation experiment[J]. Journal of soils and sediments, 2016, 16(12):2709-2719.

[7] VILLARREAL R, LOZANO L A, MELANI E M, et al. Diffusivity and sorptivity determination at different soil water contents from horizontal infiltration [J]. Geoderma, 2019, 338:88-96.

[8] 邵明安,王全九,ROBERT Horton.推求土壤水分运动参数的简单入渗法:I.理论分析[J].土壤学报,2000,37(2): 217-224.
SHAO Ming'an, WANG Quanjiu, ROBERT Horton. A simple infiltration method for estimating soil hydraulic properties of unsaturated soils: I. theoretical analysis [J].Acta pedologica sinica,2000,37(2): 217-224.(in Chinese)

[9] 周蓓蓓,侯亚玲,王全九.枯草芽孢杆菌改良盐碱土过程中水盐运移特征[J].农业工程学报,2018,34(6):104-110.
ZHOU Beibei, HOU Yaling, WANG Quanjiu. Characteristics of water and salt migration in process of improving saline alkali soil with bacillus subtilis[J].Transactions of the CSAE,2018,34(6):104-110.(in Chinese)

[10] 王全九,张继红,谭帅.微咸水入渗下施加 PAM 土壤水盐运移特性研究[J].土壤学报,2016,53(4):1056-1064.
WANG Quanjiu, ZHANG Jihong, TAN Shuai. Effects of PAM on Characteristics of water and salt movement in soil under brackish water infiltration[J].Acta pedologica sinica,2016,53(4):1056-1064.(in Chinese)

(责任编辑　谈国鹏)