

秸秆生物炭对黏壤土入渗规律的影响

岑睿, 屈忠义, 孙贯芳, 杨芳

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要:为提高干旱半干旱区耕作土壤灌溉水的利用效率,采用秸秆生物炭对黏壤土进行改良,并用 3 种经典入渗模型进行入渗模拟,寻求适于描述研究区土壤入渗规律的模型及改良方案。采用双环入渗试验测定 4 种生物炭施用水水平(10 t/hm², 20 t/hm², 30 t/hm², 50 t/hm²)的田间作物生育期内土壤含水率、入渗速率及累积入渗量,分别采用 Green-Ampt 模型、Philip 模型和 Kostiakov 经验公式对试验组与对照组(CK)的入渗过程进行模拟。结果表明:施用量为 30 t/hm² 较 CK 效果最为明显,施用层(0—40 cm)入渗速率增加 44.6%,耕作层土壤含水率增加 8.9%,累积入渗量增加 45.45%。比较 3 种模型的入渗过程拟合结果,认为 Kostiakov 经验公式拟合的效果符合实测规律,可为研究区改良土壤水分入渗过程提供理论依据。

关键词:生物炭;入渗模型;土壤入渗速率

中图分类号:S152.7⁺2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0284-06

Effects of Biochar on the Physical Properties and Infiltration of Clay Loam

CEN Rui, QU Zhongyi, SUN Guanfang, YANG Fang

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract: For improving irrigation water utilization efficiency of clay loam in arid and semi arid region, using biochar as soil conditioner to reformed cultivated soil at Hetao irrigation area, we simulate water infiltration process with three classical infiltration models to seek a suitable infiltration model to describe cultivated soil infiltration process and select a most effective proposal to improve the irrigation efficiency in semiarid climate area. There were four biochar application rates (10 t/hm², 20 t/hm², 30 t/hm², 50 t/hm²) and we carried out the double loop infiltration test under irrigated condition to measure soil moisture content, infiltration rate and cumulative infiltration amount during the crop growing period for the four applications. The Green-Ampt model, Philip model and Kostiakov empirical formula were used to simulate the infiltration process of experimental group and control group (CK). The results show that the effect of group of 30 t/hm² was most significant and application layer (0 to 40 cm) infiltration rate increased by 44.6%, soil moisture content increased by 8.9% and cumulative infiltration volume increased by 45.45%. Compared with the infiltration process fitting results of three models, the Kostiakov empirical formula fitting presented better tendency and was close to the testing values, which could provide the theory basis for soil improvement in the study area.

Keywords: biochar; soil infiltration rate; infiltration model

最有效的灌溉措施要依据目标土壤的入渗能力来制定,忽视这一点将导致灌溉水利用率降低和水资源浪费等结果^[1]。土壤入渗是降水或灌溉水在重力作用下在土壤中向下运动的过程^[2-3],是制定有效灌溉方案的基本信息,也是土壤结构和理化性质的综合表现。入渗速率和相对供水状况将决定有多少水留在非饱和带,有多少水将流失^[4]。基于入渗的物理过程,产生了许多经典的理论模型和半经验模型,对目

标土壤的入渗特征进行预测并指导实践。其中, Philip 模型和 Green-Ampt 模型都有具体的物理背景^[5-7],可用于建立土壤物理特征与入渗特征参数间的关系, Kostiakov^[6]模型是根据大量试验数据而建立的,利用入渗速率与时间的双对数曲线斜率描述土壤质地。改良土壤的入渗特征是土壤添加剂对土壤理化性质影响的综合表现^[8-9],模型拟合参数的差异也是土壤结构变化的量化描述^[4]。

收稿日期:2016-05-02

修回日期:2016-05-26

资助项目:国家自然科学基金“生物炭对不同土壤水力特性、水肥利用效率影响及耦合响应机理研究”(41161038)

第一作者:岑睿(1988—),男,内蒙古武川县人,博士研究生,主要从事水土保持及农业节水灌溉等方面的研究。E-mail:64937216@qq.com

通信作者:屈忠义(1969—),男,巴盟临河人,教授,主要从事灌溉排水原理与管理优化决策、节水灌溉理论和区域水盐运移方面的科学研究。E-mail:quzhongyi68@sohu.com

各国学者在生物炭用于土壤改良方面已经进行了诸多探索,通过调查及室内模拟试验肯定了生物炭具有改善土壤结构与理化性质和提高作物产量的作用^[9]。Glaser 等^[10]发现在亚马逊地区具有丰富生物炭的耕作土壤比周围不含生物炭的田间持水率高 18%。王丹丹等^[11]分别研究了粉粒含量不同的生物炭对粉砂壤土(黑垆土和湘黄土)持水性能的影响,结果表明生物炭可以提高粉砂壤土田间持水量和导水性能,其中粉粒含量较高的槐树皮生物炭对半干旱地区砂壤土的作用效果更显著。Liang 等^[12]通过 3 a 的田间试验观察发现,当田间生物炭施用量达 90 t/hm² 时可以显著增加当地土壤的持水力,增幅可达 9.0%。田丹等^[13]通过土柱试验研究了生物炭对砂土水力特征参数的影响,发现生物炭能够显著改变砂土的土壤结构,即随着生物炭施用量的增加,砂土密度减小、总孔隙度增大、饱和导水率减小、持水能力增加。然而,秸秆生物炭对黏壤土入渗规律方面的研究并不多见。

本文针对河套灌区干旱半干旱的气候特征,采用生物炭对研究区易发生结皮的耕作土壤进行改良,基于实时监测的大田试验数据,选用三种经典入渗模型

对原状土及不同施用水平下改良土壤的入渗规律进行模拟研究。探究适用于土壤质地及灌溉方式的入渗模型,为生物炭土壤改良技术推广,提高研究区有限水资源条件下土壤蓄水能力,减少土壤水分的深层渗漏并为节水灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年 4—10 月在位于内蒙古巴彦淖尔市临河区双河镇九庄试验站(107°23′12.01″E,40°45′58.28″N)进行,研究区位于黄河冲积平原,属于中温带大陆性干旱半干旱季风气候区。降雨稀少,年平均降水 133.8 mm,年蒸发量达 2 294.6 mm,年平均气温 6~8℃,多年平均日照时间为 3 229.9 h,无霜期为 130 d^[14-15]。试验区以黏壤土为主,漫灌为主要灌溉形式,水肥利用率低。土壤有机质含量为 10.35 g/kg,其他物理性质见表 1。

本次试验的土壤改良剂为玉米秸秆生物炭,由辽宁金和福农业开发有限公司生产提供,粒径 1.5~2.0 mm,pH 值为 7.84,近中性,营养元素质量百分含量分别为:氮 1.68%、磷 0.82%、钾 1.55%。

表 1 试验土壤物理组成表

处理	土壤颗粒分布/%			土壤类型容重/ (g·cm ⁻³)	饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	田间 持水量/%	0—40 cm 孔隙率/%
	0.05~2 mm	0.002~0.05 mm	0.002 mm				
CK	43.09	50.50	6.41	1.48	1.414×10 ⁻⁴	24.91	44.03
Bo-10	50.02	44.41	5.57	1.42	1.909×10 ⁻⁴	25.28	46.57
Bo-20	47.45	46.03	6.52	黏壤土 1.41	2.115×10 ⁻⁴	27.78	47.65
Bo-30	44.66	48.86	6.49	1.40	2.051×10 ⁻⁴	26.35	46.15
Bo-50	43.09	50.50	6.41	1.33	2.108×10 ⁻⁴	26.44	49.93

1.2 试验设计

设置对照和试验组共 5 组处理,进行双环入渗试验。试验组为 4 个生物炭施用水平:10 t/hm²,20 t/hm²,30 t/hm²,50 t/hm²,每组三个重复,经过激光土地平整后,按照设置施用量采用旋耕机分别均匀混入各试验田表层 0—40 cm 中,每个重复小区面积为 60 m²,以玉米为供试作物。各处理标记为:CK(对照),Bo-10(10 t/hm²),Bo-20(20 t/hm²),Bo-30(30 t/hm²),Bo-50(50 t/hm²)。将双环入渗仪外环打入试验田距地表 15 cm 处,地面以上留 15 cm 作为水头护臂;内环打入至侧壁入水口处,以保证水流的畅通;参照当地漫灌水头,马氏瓶水头设定为 10 cm。双环入渗仪仪器高 30 cm 外环直径 30 cm,内环直径 10 cm,供水计量装置为马氏瓶(图 1)。

1.3 分析方法

采用烘干法^[4]对土样的土壤水分含量进行检测。采用德国新帕泰克公司(Sympatec GmbH)激光粒度仪对土

样的土壤颗粒进行分析。用马氏瓶进行供水,秒表定时,记录马氏瓶水位变化,计算得到入渗速率。以马氏瓶出水作为试验起始,记录初始读数,记录频率为:0~10 min,30 s/次;10~30 min,1 min/次;30~60 min,5 min/次;60~120 min,10 min/次;120~300 min,20 min/次。

入渗量计算:

$$I_s = \frac{h_M \cdot \left(\frac{D_M}{2}\right)^2 \cdot \pi}{\left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \cdot \pi}$$

式中: I_s 为各处理入渗水量(cm); h_M 为马氏瓶消耗量(cm); D_M 为马氏瓶直径(cm); D_i 为内环直径(cm)。

入渗速率计算:

$$i_s = \frac{I_s}{t_s}$$

式中: i_s 为各处理入渗率(cm/min); t_s 为记录时间(min)。

采用 Origin Lab 软件进行数据统计分析及模型回归拟合。

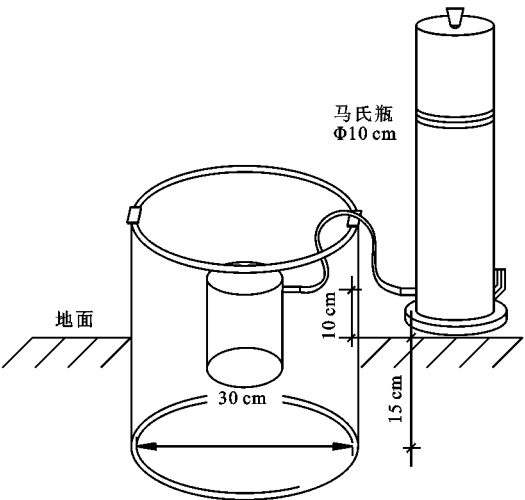


图 1 试验装置示意图

1.4 入渗模拟方法

(1) Kostiakov 入渗模型^[6], $\lg i_{10} = b + a \lg t_{10}$, 即 $i(t) = 10^b t^a$, 简化为: $i(t) = kt^a$ 。式中: t 为时刻(min); $i(t)$ 为入渗率(cm/min); k 为经验入渗系数, 表示非饱和土壤入渗速度达到相对稳定时的入渗速度; a 为经验入渗指数, 反映土壤水分入渗能力的衰减速度。

(2) Philip 入渗模型, Philip 在假定初始含水率均匀分布的前提下, 利用级数形式描述一维垂直入渗问题^[4], Philip 两项入渗公式是常用形式: $i_0 = 0.5 S t^{-0.5} + B$, 式中 i_0 为入渗速率(cm/min); S 为土壤吸湿率(cm/min); t 为入渗时间(min); S 为吸渗率。在入渗初期, 参数 S 起主要作用, 相当于水平渗吸的情况。随着入渗时间的增长, 参数 B 稳渗率则为^[7,16]影响入渗的主要因素。

(3) Green-Ampt 入渗模型^[17], $i(t) = K_s \left[\frac{h_0 + S_f + z_f}{z_f} \right]$, 式中, $i(t)$ 为土壤入渗速率(cm/s); t 为入渗历时(s); K_s 为饱和导水率(cm/s); h_0 为土表面的积水深度(cm); S_f 为湿润锋面吸力势(cm); z_f 为概化湿润锋深度(cm)。则 t 时刻的累计入渗量为: $I = (\theta_s - \theta_i) z_f$, 式中: θ_s 为饱和含水率(g/g); θ_i 为初始含水率(g/g); I 为累积入渗量(cm)。对于入渗时间较短公式最后可简化为 0: $i(t) = K_s (1 + S_f/z_f)$, 在 Green-Amp 入渗模型中, I, θ_s, θ_i 均为试验获取数据, 欲求土壤的入渗特性, 需要获得 K_s 和 S_f 就可以计算, 而双环入渗仪饱和导水率通过文献^[17]公式求得, 故 S_f 为变量, 对各组采用 Green-Ampt 模型进行拟合。

2 结果与分析

2.1 不同生物碳用量对土壤入渗速率的影响

土壤入渗速率是判断土壤入渗能力的指标之一,

随着入渗过程的进行土壤入渗速率是逐渐减小的。在不同生物碳用量的影响下, 土壤入渗速率也相应产生差异。为分析比较生物炭施用量对研究区土壤入渗速率的影响, 分别点绘各施水平下土壤入渗速率随时间变化的曲线(图 2)。

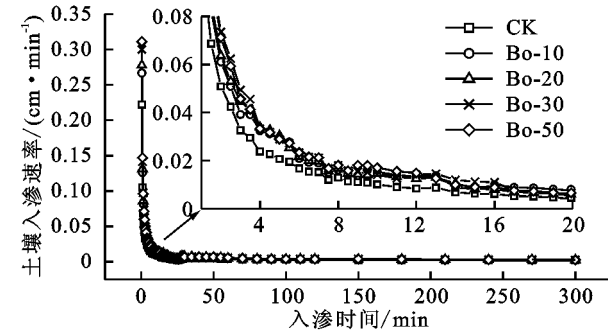


图 2 土壤入渗速率

试验组和 CK 的入渗速率随时间变化趋势基本相同, 整个入渗过程分为两个阶段, 即非稳定入渗阶段(0~60 min)和稳定入渗阶段(>60 min)。取典型时刻(1 min, 5 min, 10 min, 30 min, 60 min)的入渗速率对试验组和 CK 的入渗过程进行比较(表 2)。在非稳定入渗阶段, 随生物炭输入量增加各组入渗速率均呈现递增趋势。其中 Bo-30 变化最为显著, 2 min 时开始高于其他处理(图 2), 在各典型时段较 CK 分别高出 35.0%, 40.3%, 39.6%, 44.4%, 45.9%, 41.7%, 且在整个人渗过程中与 Bo-50 相差甚微。入渗速率在 30~60 min 内开始趋于平缓, 在 60 min 后各组都进入稳定入渗阶段, 此时各组(Bo-10, Bo-20, Bo-30, Bo-50)入渗速率相较于 CK 分别增加了 34.09%, 56.82%, 45.45%, 50%。

表 2 不同施用量特征值

入渗速率 典型时刻	处理/cm				
	CK	Bo-10	Bo-20	Bo-30	Bo-50
1 min	0.1050	0.1260	0.1312	0.1417	0.1469
5 min	0.0206	0.0291	0.0305	0.0289	0.0289
10 min	0.0101	0.0153	0.0146	0.0141	0.0170
30 min	0.0045	0.0060	0.0077	0.0065	0.0066
60 min	0.0037	0.0050	0.0052	0.0054	0.0056
土壤稳定入渗率	0.0044	0.0059	0.0069	0.0064	0.0062

2.2 不同生物碳用量对土壤累积入渗量的影响

水分入渗过程达到稳定后可用稳定入渗率表征入渗能力, 但在达到稳定入渗之前, 常用累积入渗量表征入渗能力^[18-19], 本试验在 30 min 时各组(Bo-10, Bo-20, Bo-30, Bo-50)累积入渗量出现明显差异(图 3), 分别较 CK 增加 37.6%, 38.83%, 44.6%, 44.2%。各处理在 60 min 左右达到稳定入渗, 且各处理累积入渗量均随生物炭施用量增加而增大。

2.3 经典入渗模型拟合结果对比分析

根据 3 种经典模型的模拟结果(图 4)对生物炭改良方案进行分析。CK 为对照组实测值,K—CK,P—CK,G—CK 分别为相应的 Kostiakov 模型、Philip 模型、Green-Ampt 模型的对照组模拟值。

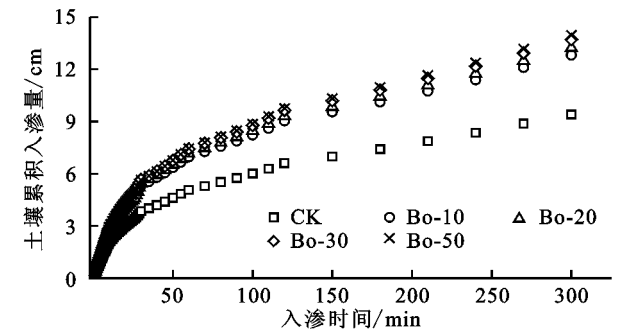


图 3 土壤累积入渗量

在考斯加柯夫经验式中,砂质土壤 α 值较小,黏质

土壤 α 值较大^[6]。不同施用水平下的模拟结果中,加入生物炭的土样的 α 值均小于 CK(表 3),说明该粒径的生物炭可以改善黏壤土的性状,增加土壤的孔隙率及导水能力,从而降低了黏性土壤易结皮的可能性。在模拟中,对土壤入渗采用分段模拟,结果较实测值更为接近,各施用量水平的模拟值较其他模型而言与实测值最为接近。故认为 Kostiakov 经验模型可以较准确地描述河套灌区黏壤土及改良土壤的入渗过程。

在 Philip 模型的拟合参数中,不同时间 t 下的吸渗率 S 和稳渗率 B 的拟合参数值见表 3,吸湿率 S 随生物炭施用量的增大逐渐增大,说明生物炭的添加对入渗初期影响较大;随着时间的增加,稳渗率 B 亦逐渐增加,但各组差异不明显,说明稳渗阶段受生物炭输入量的影响不显著;与其他模型的模拟结果对比可以看出 Philip 模型与实测值偏差较大,在稳定入渗后偏差明显,各组结果图中均有体现。

表 3 入渗方程最佳拟合参数

处理	Kostiakov						Philip			Green-Ampt	
	$t \leq 30 \text{ min}$			$t > 30 \text{ min}$			S	B	r	r	S_f
	K	α	r	K	α	r					
Ck	0.112	-1.075	1.00	0.009	-0.249	0.71	0.2464	-0.0209	0.919	152.059	0.997
Bo-10	0.130	-0.988	0.99	0.012	-0.249	0.71	0.2963	-0.0241	0.917	136.518	0.994
Bo-20	0.144	-1.052	0.99	0.015	-0.299	0.69	0.309	-0.0253	0.923	128.315	0.993
Bo-30	0.154	-1.043	0.99	0.012	-0.249	0.71	0.338	-0.0279	0.922	143.752	0.992
Bo-50	0.155	-1.050	0.99	0.012	-0.236	0.68	0.344	-0.0288	0.919	143.086	0.994

Green-Ampt 模型中,饱和导水率 K_s 随着施用量的增加基本呈增大趋势,湿润锋面吸力势 S_f 也随着施用量的增加而增大,说明生物炭的输入改变了原状土的土壤水势,同时,如前所述,也会对土壤含水率产生影响,而非饱和入渗过程中初始含水率对土壤水势的影响较显著,Green-Ampt 模型中假定湿润区土壤水参数保持不变,而拟合中 K_s 和 S_f 相互影响,共同作用,因此在非稳定入渗时期与实测值有一定的偏差(图 4),没能全面地描述不同土质变化下的入渗规律;在图 4A 和图 4C 中 Green-Ampt 的拟合与实测值较相近,但在图 4B、图 4D、图 4E 中偏差较大,区分效果优于 Philip 模型,且后期稳定入渗后的模拟值均与实测值接近,但略差于 Kostiakov 经验模型的模拟精度。

3 讨论

自然条件下,土壤质地是影响土壤持水性的重要因素之一^[20-21]。黏壤土本身具有土体密实,透气性差等特点,吸水后容易造成土壤板结,影响作物的生长。质地较粗的土壤释水速率明显高于黏土含量较多的土壤。生物炭具有较大的比表面积及孔隙度,含氧官

能团的存在,赋予了生物炭一定的极性,使其具有良好的亲水性^[22],从而增强了其对土壤水分的持留能力,添加到土壤当中一定程度上能够改善土壤持水能力^[23]、增强土壤阳离子交换量及增加土壤肥料吸附量^[24-25]。在 Piccolo 等^[26]的生物炭对土壤持水力影响的研究中显示,添加 0.05 g/kg 的木炭腐殖酸可以显著提高土壤的持水能力,增加土壤含水量。

然而,Tryon^[27]的研究结果表明,在粗颗粒土质中生物炭的添加可以显著提高土壤的含水率;但在细颗粒土质中添加过多生物炭反而会显著降低土壤含水率。针对本研究区的黏壤土,生物炭的施用量与入渗速率呈抛物线关系(图 5),当用量为 30.62 t/hm² 时稳定入渗速率达到最大(0.006 83 cm/min),与实测的最佳施用水平值吻合。

采用 Kostiakov 经验模型模拟中,根据考斯加柯夫经验公式的原理,土壤的渗吸速率 i 是时间 t 的函数,且入渗率与时间的对数关系为线性关系^[6]。将入渗速率与对应的时间进行对数运算,发现在 30 min 时入渗速率随时间变化的曲线斜率 α 有明显变化,所以将整个入渗过程以 30 min 为界进行分段拟合,即分为非稳定入渗阶段和稳定入渗阶段,分别对其进行

线性回归分析得到拟合方程见图 6。采取分段模拟的方式^[28],获得了较好的模拟效果,也体现了经验模型对描述统计规律时的灵活性,在部分基于物理意义的基础上,实现了与实际监测数据较好的吻合效果,认为是最适于描述该研究区入渗规律的模型。

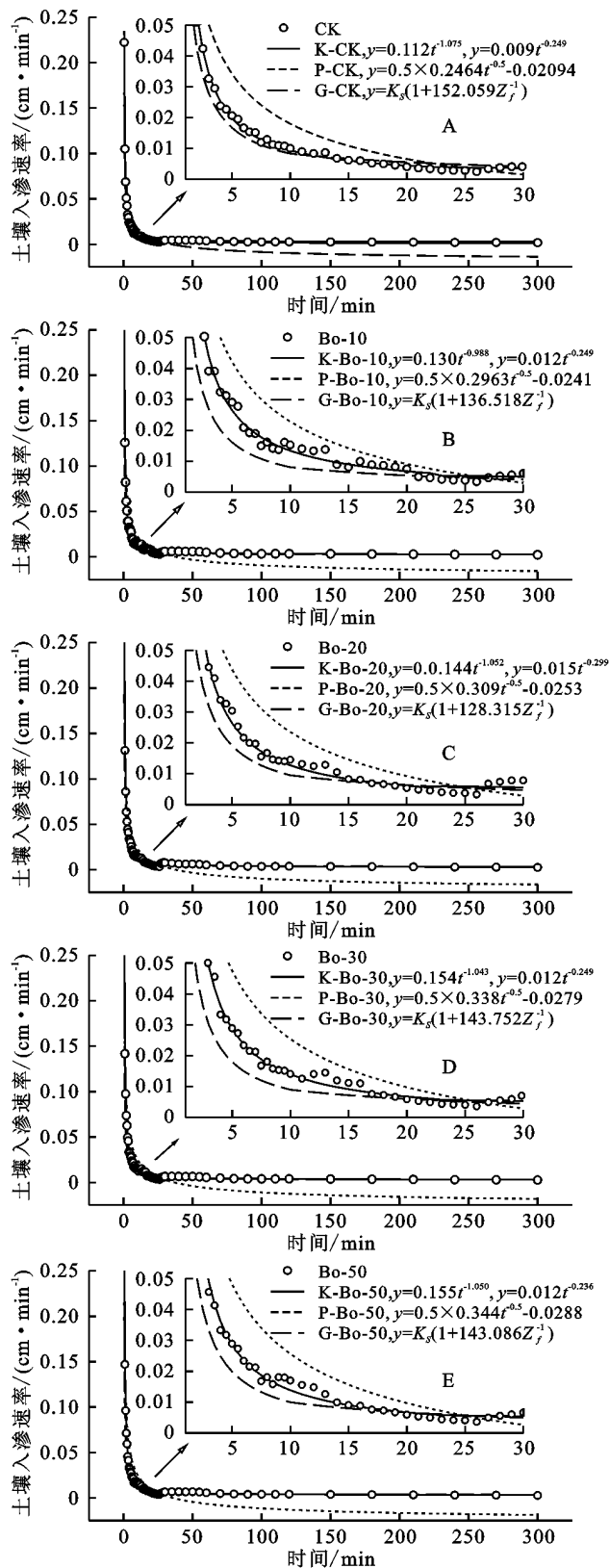


图 4 不同施用量下各入渗模型拟合结果对比

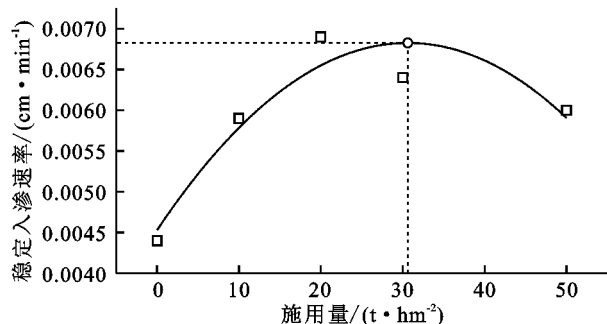


图 5 最佳施用量拟合关系

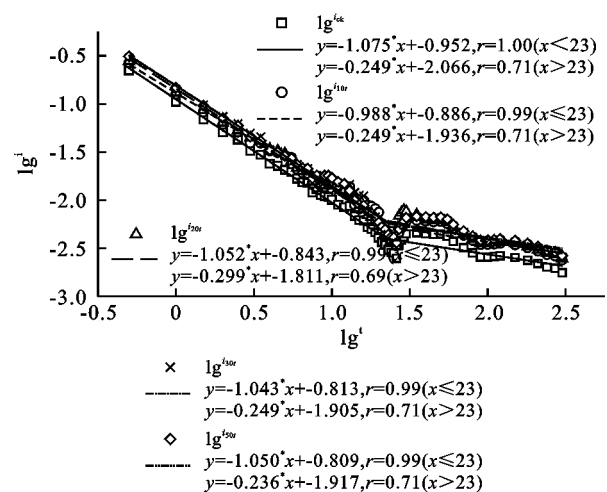


图 6 入渗速率 i 与时间 t 的双对数关系曲线

4 结论

(1) 对比不同生物炭施用量对研究区黏壤土的改良效果,施用量为 30 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时效果最佳,较 CK 施用层入渗速率提高了 45.45%,耕作层含水率提高了 8.9%,土壤累积入渗量提高了 44.6%。

(2) 对比各方法施用水平下稳定入渗速率与生物炭施用量的拟合关系得出,当施用量为 30.62 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 时稳定入渗速率达到最大组,与大田试验结果一致。

(3) 通过比较三种入渗模型对研究区改良土壤水分入渗过程的拟合结果,Kostiakov 模型比其他拟合结果更贴近于实测值,能够较准确描述该地区土壤及改良后土壤的入渗情况,为今后大面积推广玉米秸秆生物炭改良剂提供理论依据。

根据以上分析得出生物炭在黏壤土改良中具有一定的可行性,但鉴于不同土壤质地条件,其函数形式及参数值存在一定的差异,有待于进一步的研究。

参考文献:

- [1] Machiwal D, Jha M K, Mal B C. Modelling infiltration and quantifying spatial soil variability in a wasteland of Kharagpur, India[J]. Biosystems Engineering, 2006, 95 (4): 569-582.
- [2] 雷志栋,杨诗秀,谢森传.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社,1988.

- [3] 刘春成,李毅,任鑫,等.四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J].农业工程学报,2011,27(5):62-67.
- [4] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [5] 袁建平,张素丽,张春燕,蒋定生.黄土丘陵区小流域土壤稳定入渗速率空间变异[J].土壤学报,2001,38(4):579-583.
- [6] 郭素珍.土壤物理学[M].呼和浩特:内蒙古文化出版社,1998.
- [7] 王全九,来剑斌.Green-Ampt模型与Philip入渗模型的对比分析[J].农业工程学报,2002,18(2):13-16.
- [8] 刘祥宏.生物炭在黄土高原典型土壤中的改良作用[D].陕西杨凌:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2013.
- [9] 陈温福,张伟明,孟军.农用生物炭研究进展与前景[J].中国农业科学,2013,46(16):3324-3333.
- [10] Glaser B, Balashov E, Haumaier L, et al. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region[J]. Organic Geochemistry, 2000,31(7):669-678.
- [11] 王丹丹,郑纪勇,颜永毫,等.生物炭对宁南山区土壤持水性能影响的定位研究[J].水土保持学报,2013,27(2):101-104.
- [12] Liang B, Lehmann J, Solomon D, et al. Black carbon increases cation exchange capacity in soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2006,70(5):1719-1730.
- [13] 田丹,屈忠义,李波,等.生物炭对砂土水力特征参数及持水特性影响试验研究[J].灌溉排水学报,2013,32(3):135-137.
- [14] 杜斌,屈忠义,于健,等.内蒙古河套灌区大田作物膜下滴灌作物系数试验研究[J].灌溉排水学报,2014,33(4):16-20.
- [15] 李琲.内蒙古河套灌区参与式灌溉管理运行机制与绩效研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2008.
- [16] 范严伟,赵文举,王昱.入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J].兰州理工大学学报,2015,2,41(4):65-70.
- [17] 任宗萍,张光辉,王兵,等.双环直径对土壤入渗速率的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):95-103.
- [18] 解文艳,樊贵盛.土壤含水量对土壤入渗能力的影响[J].太原理工大学学报,2004,35(3):272-275.
- [19] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.
- [20] Cambardella C A, Elliott E T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993,57(4):1071-1076.
- [21] 钟继洪,唐淑英,谭军.广东红壤类土壤结构特征及其影响因素[J].土壤与环境,2002,11(1):61-65.
- [22] 万彤,孟冠华,刘宝河,等.混凝—活性炭吸附处理印染废水的试验研究[J].广东化工,2012(12):101-102,109.
- [23] 齐瑞鹏,张磊,颜永毫,等.定容重条件下生物炭对半干旱区土壤水分入渗特征的影响[J].应用生态学报,2014,28(8):2281-2288.
- [24] 高海英,何绪生,耿增超,等.生物炭及炭基氮肥对土壤持水性能影响的研究[J].中国农学通报,2011,27(24):207-213.
- [25] 张文玲,李桂花,高卫东.生物质炭对土壤性状和作物产量的影响[J].中国农学通报,2009,25(17):153-157.
- [26] Piccolo A, Nardi S, Concheri G. Macromolecular changes of humic substances induced by interaction with organic acids[J]. European Journal of Soil Science, 1996,47(3):319-328.
- [27] Tryon E H. Effect of Charcoal on Certain Physical, Chemical, and Biological Properties of Forest Soils[J]. Ecological Monographs, 1948,18(1):81-115.
- [28] 董玉云,费良军,穆红文.膜孔肥液单向交汇入渗特性及数学模型研究[J].干旱地区农业研究,2012,30(3):81-84.

~~~~~

(上接第283页)

- [15] 庄至凤,姜广辉,何新等.基于分形理论的农村居民点空间特征研究:以北京市平谷区为例[J].自然资源学报,2015,30(9):1534-1546.
- [16] 郗瑞卿,刘富民.基于分形理论的土地利用景观格局变化研究:以镇赉县镇赉镇为例[J].水土保持研究,2013,20(2):217-222.
- [17] 秦占飞,常庆瑞.土地利用类型分维数及稳定性研究:以陕西省蒲城县为例[J].水土保持通报,2012,32(1):115-118.
- [18] 李君,李小建.综合区域环境影响下的农村居民点空间分布变化及影响因素分析:以河南巩义市为例[J].资源科学,2009,31(7):1195-1204.
- [19] 聂笃宪,曾文曲,文有为.分形维数计算方法的研究[J].微机发展,2004,14(9):17-19,22.
- [20] 葛美玲,蔺启忠.基于遥感图像的城市形态分维计算网格法的实现[J].北京大学学报:自然科学版,2007,43(4):517-522.
- [21] 姜广辉,张凤荣,陈军伟等.基于 Logistic 回归模型的北京山区农村居民点变化的驱动力分析[J].农业工程学报,2007,23(5):81-87.
- [22] 李玉华,高明,吕焯等.重庆市农村居民点分形特征及影响因素分析[J].农业工程学报,2014,30(12):225-232.