

生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响

魏永霞^{1,2} 王鹤¹ 刘慧^{2,3} 吴昱^{4,5}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;

3. 东北农业大学理学院, 哈尔滨 150030; 4. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 哈尔滨 150090;

5. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 为探究黑土区施用生物炭对土壤水分及其入渗性能影响的持续性, 2016—2018年连续3年在东北黑土区进行了单次施加生物炭(75 t/hm², BC处理)和不施加生物炭(CK处理)的室内外对比试验, 分析各土层土壤含水率及土壤水分入渗过程。结果表明: 施加生物炭可增加各土层土壤含水率, 使其极值比 K_e 和变异系数 C_v 减小, 且土壤含水率、 K_e 、 C_v 的变化幅度均随生物炭施用年限增加而减弱, 2016—2018年苗期耕层土壤含水率增加最多, 分别增加了14.54%、11.48%和7.08%; 施加生物炭明显增大了土壤累积入渗量、土壤入渗速率, 增强了土壤入渗能力, 促进了湿润锋的运移, 各年份BC处理土壤累积入渗量由大到小依次为2016年、2017年、2018年, 初始入渗速率 f_i 分别增加了70.48%、58.98%和48.41%, 土壤稳定入渗速率 f_c 由大到小依次为2016年BC处理(1.65 mm/min)、2017年BC处理(1.22 mm/min)、2018年BC处理(1.17 mm/min)、2016年CK处理(0.46 mm/min)、2017年CK处理(0.43 mm/min)和2018年CK处理(0.38 mm/min); 2016—2018年中, 2016年BC处理湿润锋运移距离最深(32.24 mm), 各表征土壤入渗性能的指标均于生物炭施用当年效果最优, 而后逐年减弱; 土壤累积入渗量与时间具有幂函数关系, 湿润锋运移距离与时间具有三次函数关系, R^2 均在0.963~0.998之间; Philip、Kostiakov、Horton 3个人渗模型拟合对比结果表明, Kostiakov模型 R^2 最高(0.946~0.991)、RMSE最小(0.516~1.941 mm/min), 拟合参数与实际情况相符, 故本研究中Kostiakov模型拟合的土壤水分入渗过程最优。本研究可为东北黑土区施加生物炭后改良土壤水分入渗过程提供理论依据。

关键词: 生物炭; 土壤含水率; 累积入渗量; 湿润锋; 入渗速率; 入渗模型

中图分类号: S156.2; S152.7⁺2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)09-0290-10

Effect of Biochar on Soil Moisture and Its Infiltration Performance in Black Soil Area

WEI Yongxia^{1,2} WANG He¹ LIU Hui^{2,3} WU Yu^{4,5}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. School of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

4. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey and Research Institute, Harbin 150090, China

5. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to explore the persistence of the effects of biochar application on soil moisture and infiltration performance in black soil areas, biochar applied with 75 t/hm² (BC) and without biochar (CK) were carried out for three consecutive years from 2016 to 2018. The indoor and outdoor comparative tests of biochar treatment were carried out to analyze the soil moisture content of various soil layers and the process of soil water infiltration. The results showed that biochar application could make the soil moisture content of each soil layers increase and the extreme value ratio K_e and variation

收稿日期: 2019-01-02 修回日期: 2019-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51479033)、黑龙江省博士后面上资助经费项目(LBH-Z17017)和东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室开放项目(2017009)

作者简介: 魏永霞(1961—),女,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用与保护研究,E-mail: wyx0915@163.com

通信作者: 刘慧(1981—),女,副教授,博士,主要从事农业节水理论与技术研究,E-mail: xiaolaida@163.com

coefficient C_v decrease. And the variation of soil moisture content, K_a and C_v was getting decreased with the increase of biochar application period. From 2016 to 2018, the soil moisture content of the cultivated layer was increased the most, which was increased by 14.54%, 11.48% and 7.08%, respectively. The biochar significantly increased the soil infiltration and soil infiltration rate, enhanced the soil infiltration capacity and promoted the migration of the wet peaks. The order of soil infiltration in the BC group from 2016 to 2018 was 2016, 2017 and 2018, and the initial infiltration rate f_1 was increased by 70.48%, 58.98% and 48.41%. The stable infiltration rate f_c was 2016 BC treatment (1.65 mm/min), 2017 BC treatment (1.22 mm/min), 2018 BC treatment (1.17 mm/min), 2016 CK treatment (0.46 mm/min), 2017 CK treatment (0.43 mm/min) and 2018 CK treatment (0.38 mm/min). And the 2016 BC treatment humid peak was the deepest in 2016 to 2018 at 32.24 mm. The indexes indicating that soil infiltration performance was the best in the year of biochar application and then weakened year by year. The soil infiltration amount had a good power function relationship with time. The wet peak migration distance and time had a good cubic function relationship, R^2 was between 0.963 and 0.998. Comparing the fitting results of three infiltration models of Philip, Kostiakov and Horton models, Kostiakov model had the highest R^2 value (0.946 ~ 0.991) and the smallest RMSE (0.516 ~ 1.941 mm/min). There was no phenomenon that the fitting parameters were inconsistent with the actual situation, also. In the case of this study, the soil water infiltration process was optimal by Kostiakov model. The results provided a theoretical basis for improving the soil water infiltration process after applying biochar in the black soil region of Northeast China.

Key words: biochar; soil moisture content; cumulative infiltration; humid peak; infiltration rate; infiltration model

0 引言

土壤水分入渗是指降水或灌溉水由地表进入土壤的过程,是土壤水分运动中心环节,对地表径流、地表侵蚀、地下水补给、植物根系吸水等均存在重要影响^[1-3]。土壤入渗能力直接影响土壤含水率,决定土壤水分有效库容及作物对土壤水分可利用率。由于东北黑土区的地理条件以及黑土入渗能力弱等原因,导致黑土区水资源利用效率低。因此,研究分析黑土区土壤水分入渗规律不仅可以改善土壤结构、增加水资源利用效率,还可为农业生产发展提供理论依据和技术指导^[4-5]。

生物炭是由植物生物质在高温缺氧或无氧状况下裂解炭化而成的一种高度芳香化的难溶性物质^[6],具有巨大比表面积、高度发达孔隙结构及较强离子吸附交换能力^[7]。已有研究发现,施用生物炭可改善土壤理化性质、结构性质以及蓄水持水能力等^[8-9],土壤中添加生物炭后可增加土壤孔隙度、降低土壤容重^[10]、增加土壤团聚体数量及其稳定性^[11]、提高土壤入渗能力及持水性^[12]等。国内外学者在添加生物炭对土壤水分入渗的影响方面进行了大量的研究。TRYON^[13]在研究中发现,生物炭改善了土壤结构,使沙土土壤的有效水含量增加,但黏质土壤的有效水含量减少;齐瑞鹏等^[14]通过土柱试验发现,生物炭明显降低了沙土的入渗能力,却增强了壤土的入渗能力;王艳阳等^[15]发现,生物炭-土壤的双层结构不仅增加了上层土壤蓄水能力,而且对

下层土壤的持水性能也显著提高;岑睿等^[16]发现,粘土中施加生物炭量 30 t/hm²时,施用层(0~40 cm)土壤入渗速率增加 44.6%、含水率增加 8.9%、累积入渗量增加 45.45%。刘易等^[17]研究认为,生物炭的施炭量不同,对不同程度盐渍化土壤的入渗速率、累积入渗量不同,中盐渍化土壤施加生物炭后促进了土壤入渗,重盐渍化土壤中对水分入渗却是抑制作用。上述研究结果可看出,不同质地土壤中添加生物炭对土壤入渗的影响差异较大,这与生物炭对不同土壤性能改变不同有关^[18-19]。

目前,东北黑土区对土壤水分改良措施研究多集中于地膜、秸秆覆盖等方面,而针对生物炭对土壤水分改良的研究相对较少,对施用生物炭后土壤水分入渗过程及入渗模型的研究更为少见。本文在仅施加一次生物炭、施炭量为 0.75 t/hm²的条件下,采用室内一维垂直定水头法与室外径流小区相结合,研究 3 年土壤水分动态变化和土壤累积入渗量、入渗速率、湿润锋运移距离等入渗特征指标,分析施炭后土壤水分变化及其入渗规律,对比评价 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型 3 种入渗模型的适用性。旨在揭示黑土区施加生物炭后连续多年土壤水分入渗规律,为该区农业水土资源高效可持续利用提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验区位于北纬 45°43'09",东经 126°36'35"的

黑龙江省水利科学研究院综合试验基地,该试验区属温带大陆性季风气候,多年平均气温 3.1°C ,无霜期 $130\sim 140\text{d}$,多年平均水面蒸发量 796mm ,耕地土壤多以黑土为主,入渗能力较弱,年平均降水量介于 $400\sim 650\text{mm}$,7—9月降雨量占全年降雨总量的70%以上。该区主要粮食作物为大豆和玉米。

1.2 试验材料

供试生物炭购于辽宁金和福开发有限公司,采用玉米秸秆在 450°C 无氧条件下烧制而成,粒径为 $1.5\sim 2.0\text{mm}$,全碳质量分数70.38%,全氮质量分数1.53%,全磷质量分数0.73%,全钾质量分数1.66%,灰分质量分数31.8%,pH值为9.36。供试大豆品种为黑河3号。供试土壤为壤土,有效磷(P_2O_5)质量比为 16.9mg/kg ,铵态氮(N)质量比为 100.9mg/kg ,速效钾(K_2O)质量比为 280.1mg/kg ,干容重为 1.22g/cm^3 , $0\sim 80\text{cm}$ 土层平均田间持水率为29.4%。

1.3 试验设计

野外试验在黑龙江省水利科学研究院综合试验基地径流小区进行,小区规格为 $2\text{m}\times 5\text{m}$,分别设置施加生物炭(BC组)和不施加生物炭(CK组)处理,生物炭施用量根据前期试验成果选择施用增产效果较好的 75t/hm^2 [20],每个小区重复3次,共计6个小区。生物炭仅在2016年施入耕层($0\sim 20\text{cm}$),2017、2018年不再施加,径流小区采用相同的施肥方案,化肥施用量与当地农民习惯施加水平一致并以底肥形式一次性施入。室内采用土柱试验测定土壤水分入渗过程,土样为大豆成熟期的耕层($0\sim 20\text{cm}$)土,在自然状态下风干后剔除杂草杂物,研磨过 2mm 筛后待用。

1.4 观测指标与方法

1.4.1 土壤含水率

采用干燥法测定大豆各个生育期末(苗期、分枝期、开花—结荚期、鼓粒期) $0\sim 10\text{cm}$ 、 $10\sim 20\text{cm}$ 、 $20\sim 40\text{cm}$ 、 $40\sim 60\text{cm}$ 、 $60\sim 80\text{cm}$ 不同土层的土壤含水率,分析土壤水分的动态变化。

极值比 K_a 和变异系数 C_v 可表征施生物炭后土壤含水率的变异程度, K_a 计算式为

$$K_a = \frac{X_{\max}}{X_{\min}} \quad (1)$$

式中 X_{\max} ——土壤含水率的最大值, cm^3/cm^3

X_{\min} ——土壤含水率的最小值, cm^3/cm^3

1.4.2 土壤水分入渗性能参数

采用垂直入渗试验测定土壤水分入渗过程,试验土样取自各年大豆成熟期,严格按照田间径流耕层土壤容重配比土柱用土,试验装置为内径 10cm 、

高 80cm 的有机玻璃土柱,每年设置CK组和BC组两个处理,3次重复,每年共计6个土柱。装土时,用凡士林涂满有机玻璃筒壁,然后装土并将土柱内壁边缘土壤压实保证无边缘效应,装土至 60cm 。试验过程中,利用马氏瓶定水头供水,维持土面 5cm 的积水深度,分时间段记录马氏瓶水位变化和湿润锋下移位置。 $0\sim 5\text{min}$ 每 30s 记录1次, $5\sim 15\text{min}$ 每 1min 记录1次, $15\sim 30\text{min}$ 每 3min 记录1次, $30\sim 60\text{min}$ 每 5min 记录1次, $60\sim 120\text{min}$ 每 10min 记录1次, 120min 后每 30min 记录1次,当湿润锋到达 40cm 停止试验记录。

每次在土柱上选取6个方向分别读取湿润锋距离,将读取的6个湿润锋点数据取平均值作为最终湿润锋距离;采用 $0\sim 5\text{min}$ 土壤入渗速率均值作为初始入渗速率;采用各时刻土壤入渗量之和作为土壤累积入渗量;每年最终数据取3次重复的平均值。

分别选取Philip模型、Kostiakov模型、Horton模型3个入渗模型对土壤入渗速率和入渗时间的关系进行拟合,分别为:

Philip模型

$$f(t) = 0.5st^{-0.5} + f_c \quad (2)$$

式中 $f(t)$ ——土壤入渗速率, mm/min

f_c ——土壤稳定入渗速率, mm/min

t ——时间, min s ——模型参数

Kostiakov模型

$$f(t) = at^b \quad (3)$$

式中 a ——模型参数,代表土壤水分入渗开始第1时段的平均入渗速率, mm/min

b ——模型参数,表示土壤水分入渗速率随时间变化的快慢程度

Horton模型

$$f(t) = f_c + (f_1 - f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

式中 f_1 ——土壤初始入渗速率, mm/min

k ——衰减指数

1.5 数据处理方法

采用Excel 2010和Origin 9.0软件进行基本数据处理、绘图,利用SPSS 19.0进行拟合度检验和显著性分析,采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)和多重比较中最小显著性差异法(LSD)比较各土壤入渗速率差异,显著性水平为0.05,应用Matlab 2016软件进行土壤水分入渗的拟合。

2 结果与分析

2.1 生物炭对土壤含水率的影响

2.1.1 对土壤含水率动态的影响

2016年施加生物炭后,2016—2018年大豆各生

育期土壤含水率在土壤剖面的动态变化如图 1 所示。每个生育期内 3 年各处理土壤含水率随土层深度变化趋势一致,苗期土壤含水率均呈“下降-上升-再下降”趋势;分枝期变化情况与苗期相反,表现为“上升-下降-再上升”,这是因为降雨后前期水分保留在土壤中,当阳光直射于土壤表层时土壤含水率

会减小,表层土壤含水率就会小于 20 cm 土层土壤含水率;开花-结荚期和鼓粒期土壤含水率在土壤剖面变化也呈“上升-下降-再上升”趋势,但与分枝期不同之处在于 20 ~ 60 cm 土层含水率一直是减小的状态,土层深度达 60 cm 后土壤含水率又开始再次增加。

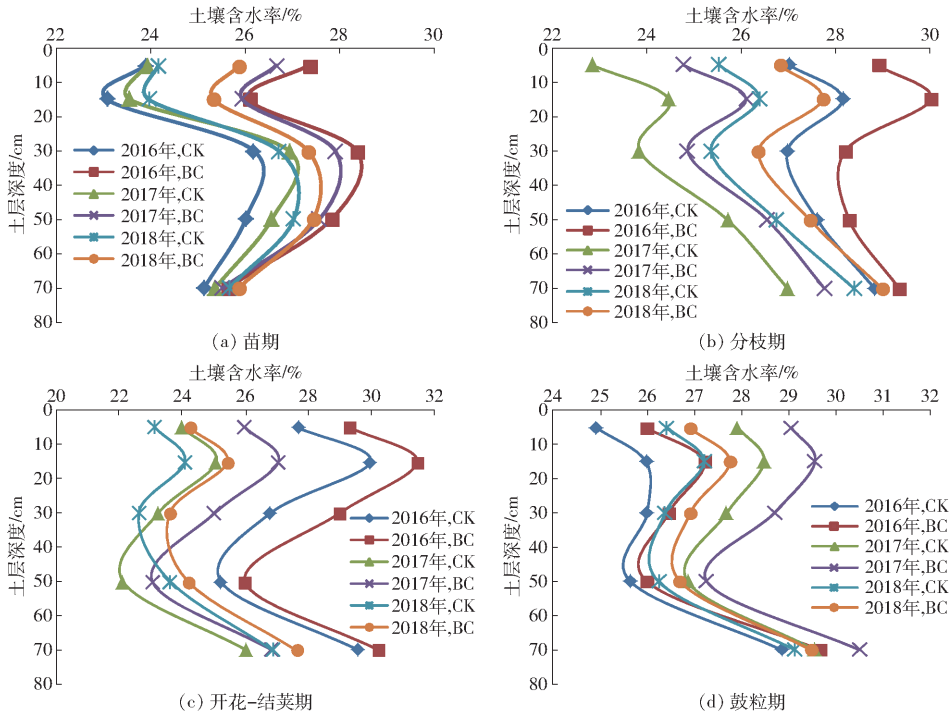


图 1 全生育期土壤水分动态分布

Fig. 1 Dynamic distribution of soil moisture in whole growth period

3 年土壤含水率分布在 22% ~ 32% 范围内,各年由于降雨蒸发情况不尽相同,各含水率之间存在差异,但在不同年份 BC 组土壤含水率均高于 CK 组。同一年中施炭处理与不施炭处理土壤含水率在耕层差异最大,苗期 2016 年耕层土壤含水率增长率为 14.54%, 2017、2018 年分别为 11.48% 和 7.08%;分枝期 2016、2017、2018 年土壤含水率增加率分别为 8.46%、6.90% 和 4.97%;开花-结荚期增长率为 8.32%、5.99% 和 4.69%;鼓粒期土壤含水率的增长率分别为 4.27%、4.05% 和 1.76%。图 1 中土壤含水率动态曲线随土层深度增加,同一年的 BC 组和 CK 组曲线间距越来越小,表明土壤含水率的差异在逐渐减小,60 ~ 80 cm 土层 3 年各处理的土壤含水率差异不显著,主要是由于生物炭仅施加在土壤的耕层,对深层土壤水分影响不明显所致。同时可看出各生育期土壤含水率增加量随着施炭后年限的延长而减小,主要是由于生物炭仅在第 1 年施加,后续试验年中生物炭有少量已发生降解,对土壤水分已不再产生效果。

2.1.2 土壤含水率在土壤垂直剖面的变异程度

分析土壤含水率的变异性可充分了解其变异程

度,通常同一年的施炭处理和不施炭处理之间变异程度越大说明生物炭对增加土壤含水率的效果越好,本文采用极值比 K_a 和变异系数 C_v 表示土壤含水率的变异程度, K_a 和 C_v 越小说明土壤含水率变异程度越小,变异性分析见表 1。

相同处理 K_a 和 C_v 随着土层深度增加总体上呈

表 1 土壤含水率在土壤剖面的变异程度

Tab. 1 Variation degree of soil water content in soil profile

变异指标	年份	处理	土层深度/cm				
			0 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80
K_a	2016	CK	1.406	1.366	1.329	1.280	1.266
		BC	1.120	1.114	1.105	1.138	1.113
	2017	CK	1.374	1.364	1.303	1.286	1.264
		BC	1.139	1.129	1.124	1.159	1.137
	2018	CK	1.370	1.367	1.348	1.264	1.230
		BC	1.155	1.137	1.166	1.173	1.145
C_v /%	2016	CK	3.225	2.559	2.454	2.154	1.608
		BC	2.065	1.739	1.695	1.354	1.075
	2017	CK	3.256	2.720	2.562	2.250	1.511
		BC	2.163	1.822	1.748	1.578	1.179
	2018	CK	3.015	2.683	2.492	2.216	1.660
		BC	2.293	2.092	1.820	1.757	1.303

减小趋势,这主要是由于耕层土受外界环境影响比较大,随土壤深度增加土壤受外界影响逐渐减弱,故土层越深土壤含水率变异程度越小。相同年份同一土层深度,施炭处理的 K_a 和 C_v 比不施炭处理的明显减小,说明施炭处理的土壤含水率变异程度明显减小,即施炭处理与不施炭处理之间变异程度增大,生物炭对增加土壤含水率有良好的效果。不同年份,施炭处理在 2016 年 10~20 cm 土层 K_a 和 C_v 减小幅度最大,并且施炭处理土壤含水率 K_a 和 C_v 的减小幅度随土层增加、施炭年限延长而减弱,这可能与生物炭 2016 年施加于土壤耕层且 2017、2018 年两年未再施加,增强了施炭当年耕层土壤保水持水能力有关。综上,生物炭具有良好的提高土壤持水性的能力,且土壤持水性的提高随施炭年限增加而减弱。

2.2 生物炭对土壤水分入渗性能的影响

2.2.1 对土壤累积入渗量的影响

土壤入渗过程达到稳定入渗后可用稳定入渗率来表征土壤入渗能力,但未达到稳定入渗之前通常用累积入渗量来表征土壤入渗能力^[12],累积入渗量指一定时间段内单位表面积入渗到土壤的水分总和^[21]。从图 2 可看出,在 0~5 min 范围内各年不同处理土壤累积入渗量变化差异不显著。随时间推移 5~60 min 土壤入渗过程中土壤累积入渗量增加迅速,施炭处理(BC 组)与未施炭处理(CK 组)土壤累积入渗量差异逐渐显现,且随施炭年限的增加不论 BC 组还是 CK 组累积入渗量均减小。年份相同时,施炭处理的累积入渗量曲线明显在不施炭处理之上,即 BC 组累积入渗量明显多于 CK 组;年份不同时,随施炭年限增加施炭处理累积入渗量的增长率逐渐减小,2016、2017、2018 年 BC 组与 CK 组相比累积入渗量分别增长了 143.85%、128.99% 和 114.03%。土壤入渗大于 60 min 后,各土壤累积入渗曲线达稳定入渗阶段,累积入渗量随时间均匀增长,同一年中 BC 组累积入渗量高于 CK 组,不同年份随施炭年限增加累积入渗量减小,这主要因为生物炭的添加有利于形成较大的孔隙度和比表面积,减小土壤容重,土壤容重又与土壤入渗性能负相关,土壤容重减小,土壤入渗能力增强,说明施用生物炭可以明显增大土壤累积入渗量,增强土壤入渗能力,且入渗能力的增强效果随生物炭施加年限的增加而减弱。

采用幂函数 $I = ct^d$ 对 3 年土壤累积入渗量进行拟合, I 为土壤累积入渗量, c 为入渗系数, d 为入渗指数,拟合结果见表 2, R^2 均不小于 0.991,说明单次施用生物炭后连续 3 年土壤累积入渗量与时间均具

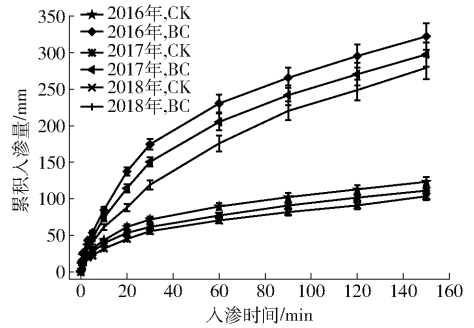


图 2 各处理土壤累积入渗量随时间的变化曲线

Fig. 2 Variation curves of soil cumulative infiltration in each treatment with time

表 2 各处理土壤累积入渗量随时间变化过程的拟合结果

Tab. 2 Fitting results of each treatment of soil cumulative infiltration with time

年份	处理	拟合结果		R^2	F
		c	d		
2016	CK	0.450	14.132	0.991	1 077.528
	BC	0.537	24.370	0.992	1 280.975
2017	CK	0.436	13.182	0.994	1 697.941
	BC	0.541	21.332	0.995	1 984.403
2018	CK	0.432	11.900	0.993	1 438.512
	BC	0.538	19.135	0.995	1 944.129

有较好的幂函数关系。各年施炭处理的入渗系数和入渗指数较不施炭处理均有所增加。经检验各年 BC 组的 F 值均大于 CK 组,说明施炭处理与不施炭处理之间土壤累积入渗量的差异明显,表示生物炭可以增加土壤累积入渗量,提高土壤入渗性能。

2.2.2 对土壤入渗速率的影响

土壤入渗速率也是表征土壤入渗能力的重要指标之一。从图 3 可看出,开始 5 min 内土壤入渗速率迅速减小,5~60 min 随着入渗时间的增加土壤入渗速率逐渐减小且变化趋势趋于平缓,60 min 后土壤入渗速率变化不明显,接近稳定状态,即入渗时间在 60 min 左右时认为达到稳定入渗速率。同一入渗时刻,施加生物炭处理的土壤入渗速率明显高于未施炭处理,且随施炭年限增加同一时刻的土壤入渗速率有所下降,就 $t = 20$ min 而言,施炭组(BC 组)的 3 年土壤入渗速率在该时刻由大到小为 2016 年、2017 年、2018 年,各土壤入渗速率分别为 6.87、5.72、4.41 mm/min。未施炭组(CK 组)土壤入渗速率 3 年内相差不大,同时 5~60 min 内入渗速率随生物炭施加年限的增加而变小,这可能与径流小区 3 年种植同一种作物(大豆)使土壤板结有关。

各处理的土壤初始入渗速率(f_1)、稳定入渗速率(f_c)以及 150 min 的平均入渗速率变化情况如表 3 所示。土壤初始入渗速率 BC 组较 CK 组显著增加,2016、2017、2018 年 f_1 分别增加了 70.48%、

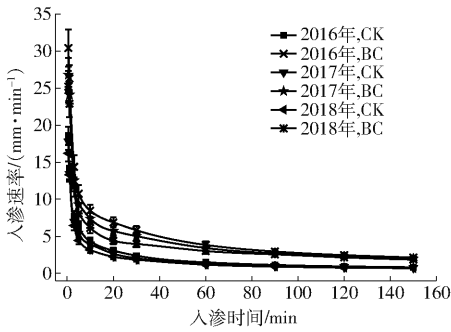


图 3 各处理土壤入渗速率随时间的变化曲线

Fig. 3 Changing curves of soil infiltration rate with time

58.98% 和 48.41%，说明土壤中施用生物炭可以改变土壤初始入渗速率，使其增加显著，且增加程度随施炭年限的延长而减弱。土壤稳定入渗速率是一个极为重要的判断土壤入渗性能的指标之一，3 年 f_c 由大到小依次为 2016 年 BC (1.65 mm/min)、2017 年 BC (1.22 mm/min)、2018 年 BC (1.17 mm/min)、2016 年 CK (0.46 mm/min)、2017 年 CK (0.43 mm/min)、2018 年 CK (0.38 mm/min)，可知 3 年 BC 组 f_c 均高于 CK 组，表明生物炭施入土壤后显著提高了土壤的入渗性能，虽然提高效果随施炭年限增加而减弱，但对 f_c 依然是促进作用，说明生物炭对土壤入渗性能的改善作用很强。土壤平均入渗速率在施加生物炭后的变化趋势同 f_1 、 f_c 一致，土壤各入渗速率的主要影响因子是土壤结构性质、土壤初始含水率和土壤的地貌特征。由于生物炭自身具有孔隙度大、比表面积大、吸附性强的特点，施入土壤后，使土壤容重降低、孔隙度增大，更易于形成水稳性团聚体，使土壤水分在入渗过程中入渗速度加快，促进地表水分快速进入土壤，对黑土区夏季暴雨频发导致的耕地侵蚀、水土流失等现象也有所改善。

表 3 各处理土壤水分入渗特性

Tab. 3 Soil moisture infiltration characteristics in

指标	each treatment					
	2016 年		2017 年		2018 年	
	CK	BC	CK	BC	CK	BC
初始入渗速率	6.30 ^b	10.74 ^a	5.68 ^b	9.03 ^a	5.04 ^{bc}	7.48 ^{ab}
稳定入渗速率	0.46 ^b	1.65 ^a	0.43 ^b	1.22 ^{ab}	0.38 ^{bc}	1.17 ^{ab}
平均入渗速率	0.82 ^b	2.15 ^a	0.74 ^{bc}	1.99 ^{ab}	0.69 ^{bc}	1.86 ^{ab}

注：同列不同小写字母表示同一年各处理差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

2.2.3 对湿润锋运移的影响

土壤水分入渗过程中，可从上到下将土壤水剖面分为饱和层、延伸层、湿润层和湿润锋，湿润区前端与干土层形成的明显交界面称作湿润锋^[22]，湿润锋可表征水分在土壤基质吸力和重力作用下的运动特征。施用生物对湿润锋运移有明显影响(图 4)，

沿土层深度的垂直方向上各处理湿润锋均随入渗时间增加而向下运移。在入渗初期(前 5 min)各处理湿润锋之间差异不明显；5 ~ 30 min 湿润锋运移距离随入渗时间增加而迅速增加， $t = 20$ min 时，2016、2017、2018 年施炭组湿润锋运移距离分别为 14.74、12.94、8.81 cm，较同年未施炭组分别增加了 106.44%、96.75% 和 80.11%，说明生物炭施入土壤后大幅度增强了土壤水垂直下渗能力，促进了湿润锋的运移；随入渗时间继续延长(30 ~ 60 min)，各湿润锋变化趋于平缓，60 min 后湿润锋运移距离开始稳步增长；当入渗时间达到 150 min 时，3 年 6 个处理的湿润锋最终运移距离分别为 14.33、32.24、13.12、30.27、10.35、26.94 cm，施用生物炭可以很大程度增加土壤水分的入渗、促进湿润锋的运移，并且施炭后在 2016、2017、2018 年湿润锋运移距离大体上呈现减小状态，说明生物炭可以更易于土壤水垂直向下入渗到更深土层供给作物生长发育，而且单次施用生物炭后连续 3 年中这种趋势逐渐减弱，但对提高入渗能力的作用依然很显著。

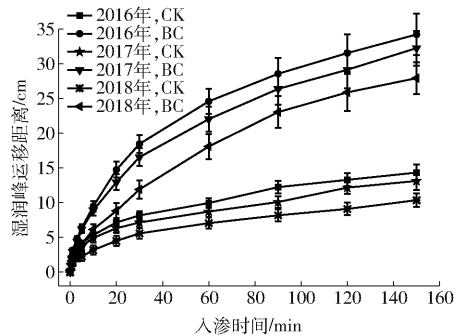


图 4 各处理湿润锋运移距离随时间的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of humid peak migration distance of each treatment with time

为进一步探究单次施用生物炭后连续 3 年内各处理湿润锋运移距离与入渗时间的关系，采用幂函数 $L = et^3 + ft^2 + gt + h$ ($e \neq 0$, f, g, h 为常数) 对其进行拟合， L 为湿润锋运移距离，拟合结果见表 4。决定系数 R^2 在 0.963 ~ 0.998 范围内，表明 3 年 6 个处理的湿润锋运移距离与时间具有较好的三次函数关系。经检验同一年中 F 值在施炭小区大于不施炭小区， F 值越大说明施炭处理与不施炭处理湿润锋运移距离之间的差异越明显，表明生物炭很明显地增加了土壤累积入渗量、入渗速率，提高了土壤入渗性能，促进了湿润锋的运移；并且 F 值在生物炭施用当年数值明显高于其他两年，各处理 F 值随年份延长迅速减小，2017 年与 2018 年相同处理 F 值较为接近，说明生物炭对湿润锋运移的促进效果在施用当年最为明显而后逐年减弱。

表4 各处理湿润锋运移距离随时间变化的拟合结果

Tab.4 Fitting result of each treatment of humid peak migration distance with time

年份	处理	拟合结果				R^2	F
		e	f	g	h		
2016	CK	0.277 7	-0.002 7	9.15×10^{-6}	1.989 5	0.992	441.459
	BC	0.689 6	-0.006 3	2.09×10^{-5}	2.580 3	0.998	1 602.799
2017	CK	0.236 4	-0.002 3	8.55×10^{-6}	1.918 9	0.968	103.321
	BC	0.604 0	-0.005 4	1.80×10^{-5}	2.498 6	0.994	590.636
2018	CK	0.191 4	-0.001 9	6.65×10^{-6}	1.198 8	0.963	87.504
	BC	0.391 3	-0.002 2	5.18×10^{-6}	1.930 7	0.993	505.788

2.2.4 3种入渗模型的模拟结果分析

为进一步探究各年各处理土壤入渗速率与时间变化的关系以及各入渗模型在黑土区的适用性,将入渗速率随时间变化的数据利用 Philip 模型、Kostiakov 模型、Horton 模型 3 个常用的入渗模型进行拟合,拟合结果如表 5 所示。决定系数 R^2 的取值范围为 $[0, 1]$, R^2 越接近 1, 表明方程变量对土壤入渗速率的解释能力越强,这一模型对已有数据的拟合程度也就越好;均方根 RMSE 越趋近于 0, 说明所选模型的拟合度越佳。Philip 模型的 R^2 在 0.929 ~ 0.968 之间, RMSE 在 1.202 ~ 2.225 mm/min 之间, 表明 Philip 模型对土壤入渗速率随时间关系的拟合程度较好,反映土壤水分入渗能力的吸湿率 s 越大代表土壤水分入渗能力越强,施炭组的 s 由大到小

依次为 2016 年、2017 年、2018 年,这与实际土壤水分入渗能力相一致,但 Philip 模型拟合的稳定入渗速率 f_c 在 $-1.463 \sim -1.178$ mm/min 范围内,与实际的 f_c 正负相反,且各 CK 组 f_c 值与真实值相差较多,说明 Philip 模型不适用于本试验研究。Kostiakov 模型的 R^2 都不小于 0.946, RMSE 在 0.516 ~ 1.941 mm/min 范围内,表示该模型对于土壤入渗速率随时间变化的拟合度良好。Horton 模型的 R^2 在 0.842 ~ 0.924 之间, RMSE 各处理均大于 2 mm/min, 同时模型拟合的 f_c 过高,不符合稳定入渗速率真实物理意义,所以 Horton 模型不适用于拟合本研究土壤入渗速率。故 Kostiakov 模型最为适合于分析黑土区单次施用生物炭后连续多年土壤水分入渗的过程。

表5 各处理3种土壤水分入渗模型拟合结果

Tab.5 Fitting results of three kinds of soil moisture infiltration models

模型	参数	2016年		2017年		2018年	
		CK	BC	CK	BC	CK	BC
Philip 模型	s	24.87	43.90	24.20	39.57	23.22	37.59
	$f_c / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	-1.249	-1.261	-1.401	-1.178	-1.463	-1.458
	R^2	0.948	0.968	0.949	0.952	0.941	0.929
	RMSE / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	1.259	1.716	1.202	1.921	1.252	2.225
Kostiakov 模型	$a / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	10.58	20.29	9.93	18.23	9.39	16.80
	b	-0.744	-0.606	-0.805	-0.61	-0.814	-0.659
	R^2	0.976	0.976	0.991	0.959	0.984	0.946
	RMSE / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.852	1.495	0.516	1.749	0.653	1.941
Horton 模型	k	0.498	0.438	0.697	0.460	0.688	0.516
	$f_c / (\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	10.98	71.98	11.82	59.27	-25.04	17.24
	R^2	0.842	0.882	0.897	0.891	0.861	0.924
	RMSE / $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	2.188	3.307	2.720	2.882	2.022	2.312

参数 a 代表土壤水分入渗开始第 1 时段的平均入渗速率,第 1 时段平均入渗速率越大土壤入渗性能越好;参数 b 表示土壤水分入渗速率随时间变化的快慢程度,参数 b 越大土壤水分入渗速率随时间增加递减越快^[23]。Kostiakov 模型拟合得到的参数 a 和 b 在各年施用生物炭后均有所增加,3 年拟合参数 a 分别为 10.58、20.29、9.93、18.23、9.39、

16.80 mm/min, 参数 a 在 2016—2018 年各自增加了 9.71、8.30、7.41 mm/min, 增加率分别为 91.78%、83.59% 和 78.91%; BC 组拟合参数 b 与 CK 组相比 2016—2018 年分别增大了 0.138、0.195 和 0.155, 增长率为 22.77%、31.97% 和 23.52%, 说明施炭后参数 a 代表的第 1 时段平均入渗速率的增加幅度明显高达 90% 以上, 且随着施炭年限增加平均入渗速

率的增加率减小,施炭后参数 b 表示的入渗速率随时间增加递减加快,但加快幅度仅为第1时段平均入渗速率增加幅度的 $1/3$,且与生物炭施用年限关系并无明显差异。

3 讨论

土壤水是地表水和地下水的纽带,是植物生长的必要水源,土壤水分相对充足对作物生长利大于弊,本研究结果表明在单次施加生物炭后连续3年中,施炭小区各个生育期不同土层土壤含水率明显增加,高于未施炭小区,与 CASTELLINI 等^[24] 研究结果一致,本研究3年土壤含水率分布在 $22\% \sim 32\%$ 范围内,施炭后土壤含水率的增加率为 $1.76\% \sim 14.54\%$,土壤含水率在施用生物炭当年增加量最大,土壤含水率增加量随着施炭后年限的增长而减小,各土层土壤含水率增长随土层增加而减少, $60 \sim 80$ cm 土层各处理的土壤含水率差异不明显。3年施炭处理土壤含水率的变化幅度 K_a 和变异系数 C_v 均减小,且变异性的减弱程度也随生物炭施用年限增加而变小,说明生物炭可明显增加土壤水分,这主要是生物炭施入土壤后,由于自身具有较大比表面积、多孔结构、亲水性、吸力大等特点,通过改善土壤理化性质将更多水分留在土壤中,与相关研究结果^[25-26] 一致。土壤含水率增加主要因素为生物炭,次要因素为施炭年限和土层深度;仅一次施用生物炭对土壤含水率的影响程度逐年减弱、随土层深度增加而减小。土壤含水率随土层深度的变化主要是耕层土受外界环境影响较大,随土层深度增加土壤受外界影响逐渐减弱,与勾芒芒等^[27] 所述一致。

土壤水分入渗过程各处理土壤水分的累积入渗量、入渗速率、湿润锋曲线均呈先陡峭后平缓的趋势,且随施炭年限增加各年 BC 组曲线呈下降态势。土壤入渗 $5 \sim 30$ min 曲线变化明显,可能是土壤水分含量少、基质势较大、生物炭中含有较多亲水官能团,使入渗早期土壤吸水速度快,土壤水分变化大,与刘易等^[17] 结果相同;随着土壤水分继续入渗,土壤水分含量增多、基质势减小,土壤入渗速率减小且减少程度逐渐减弱^[16],在累积入渗量、入渗速率、湿润锋进程曲线图上变化逐渐趋于平缓,同文献^[15, 28] 研究结论一致。在施用生物炭情况下,土壤团聚体含量增加、孔隙度增大,增加有效孔隙和过水横断面,促进水分流通通道形成,减弱水分流动的复杂程度,使得土壤累积入渗量增多、入渗速率增大、湿润锋进程加快。入渗能力随施用生物炭年限逐年减弱,可能是因为施炭后 BC 组随年限增加土壤中小颗粒所占比例逐渐增多,大孔隙减少,使土壤进一

步紧实,从而降低了土壤水分入渗的性能,与谭帅等^[29] 研究结果相符。因此施用生物炭增大了土壤的通透性,促进了土壤水分的入渗,且入渗能力的促进作用随施用生物炭年限的增加而减弱。

本研究中 Philip 模型拟合的 f_c 与实际土壤入渗的 f_c 正负相反,不符合实际施加生物炭后土壤稳定入渗速率的变化趋势,与实际结果有出入,故该模型拟合欠佳。Horton 模型 R^2 相对较小、RMSE 均大于 2 mm/min,同时此模型拟合的 f_c 过高,不符合稳定入渗速率真实物理意义,所以 Horton 模型对于拟合黑土区施加生物炭后土壤水分入渗过程有一定缺陷,同样不适合于本研究数据的拟合。Kostiakov 模型各处理 R^2 最高 ($0.946 \sim 0.991$)、RMSE 最小 ($0.516 \sim 1.941$ mm/min),并且没有出现拟合参数与实际情况不符的现象,所以在本研究中 Kostiakov 模型拟合土壤入渗过程最优,这与文献^[16, 30-31] 在土壤水分入渗模型的研究中得出的结果一致。综上 Kostiakov 模型较好拟合黑土区生物炭添加条件下土壤水分的入渗过程,对该区土壤入渗适用性优。

本研究取径流小区土壤在室内一维垂直土柱中进行的入渗试验,没有考虑大田的自然土壤水蒸散发、日照、湿度、温度、风速等土壤地理环境,也没有考虑土壤水平发生的入渗,故有待增加大田试验考虑多重因素后进一步分析,获得更为精准的生物炭施用后连续多年对土壤入渗性能的调节作用。

4 结论

(1) 黑土区施加生物炭可有效提高土壤含水率,且持续效应明显,土壤含水率增长率随生物炭施用年限的增加而减小。2016—2018 年苗期耕层土壤含水率增加最多,分别增加了 14.54% 、 11.48% 和 7.08% 。生物炭施入土壤后可减小土壤含水率的极值比 K_a 和变异系数 C_v ,提高土壤持水保水性,且施炭年限越长,其效果越弱。

(2) 生物炭可明显提高土壤入渗能力,增加土壤累积入渗量和入渗速率,且增加效果随施用年限增加而减弱,土壤累积入渗量与时间具有良好的幂函数关系。施炭后各年份累积入渗量由大到小依次为 2016 年、2017 年、2018 年,2016—2018 年初始入渗速率分别增加了 70.48% 、 58.98% 和 48.41% ,3 年土壤 f_c 由大到小依次为 2016 年 BC 处理 (1.65 mm/min)、2017 年 BC 处理 (1.22 mm/min)、2018 年 BC 处理 (1.17 mm/min)、2016 年 CK 处理 (0.46 mm/min)、2017 年 CK 处理 (0.43 mm/min)、2018 年 CK 处理 (0.38 mm/min)。

(3) 生物炭可促进湿润锋的运移,对湿润锋运

移的促进效果随施炭年限延长而逐渐减弱,且湿润锋距离与时间呈三次函数关系, R^2 在0.963~0.998之间。2016—2018年中,2016年BC处理湿润锋运移距离最深,达32.24 mm,2017、2018年BC处理湿润锋运移距离逐渐减小,分别为30.27 mm和26.94 mm。

(4) Philip模型、Kostiakov模型、Horton模型中,Kostiakov模型可较好地模拟本研究的土壤水分入渗过程,其 R^2 最高(0.946~0.991)、RMSE最小(0.516~1.941 mm/min),由该模型拟合的各年的参数 a 值表明,施加生物炭使第1时段平均速率明显增加,与研究结果相符。

参 考 文 献

- [1] 冯瑞云,王慧杰,郭峰,等. 秸秆型土壤改良剂对土壤结构和水分特征的影响[J]. 灌溉排水学报,2015,34(9):44-48.
FENG Ruiyun, WANG Huijie, GUO Feng, et al. Effects of straw-type soil amendments on soil structure and water characteristics[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2015,34(9):44-48. (in Chinese)
- [2] 吕刚,吴祥云. 土壤入渗特性影响因素研究综述[J]. 中国农学通报,2008,24(7):494-499.
LÜ Gang, WU Xiangyun. A summary of the research on influencing factors of soil infiltration characteristics[J]. China Agricultural Bulletin, 2008,24(7):494-499. (in Chinese)
- [3] 张斌,刘晓雨,潘根兴,等. 施用生物炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学,2012,45(23):4844-4853.
ZHANG Bin, LIU Xiaoyu, PAN Genxing, et al. Changes in soil properties, rice yield and trace greenhouse gas emissions in paddy fields after application of biochar[J]. Scientia Agricultural Sinica,2012,45(23):4844-4853. (in Chinese)
- [4] 马晓刚,张兵,史东梅,等. 丘陵区不同土地利用类型紫色土入渗特征研究[J]. 水土保持学报,2007,21(5):25-29.
MA Xiaogang, ZHANG Bing, SHI Dongmei, et al. Study on infiltration characteristics of purple soil by different land use types in hilly area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007,21(5):25-29. (in Chinese)
- [5] 闫东锋,杨喜田. 豫南山区典型林地土壤入渗特征及影响因素分析[J]. 中国水土保持科学,2011,9(6):43-50.
YAN Dongfeng, YANG Xitian. Characteristics and influencing factors of soil infiltration of typical woodland in southern mountains of Henan Province[J]. Science of Soil and Water Conservation in China, 2011,9(6):43-50. (in Chinese)
- [6] LEHMANN J, GAUNT J, RONDON M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems a review[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2006,11(2):403-427.
- [7] 王欣,尹带霞,张凤,等. 生物炭对土壤肥力与环境质量的影响机制与风险解析[J]. 农业工程学报,2015,31(4):248-257.
WANG Xin, YIN Daixia, ZHANG Feng, et al. Influence mechanism and risk analysis of biochar on soil fertility and environmental quality[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(4):248-257. (in Chinese)
- [8] KLASSON K T, JR L L B, UCHIMIYA M, et al. Influence of biochar pyrolysis temperature and post-treatment on the uptake of mercury from flue gas[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 123(7):27-33.
- [9] LIN Y, MUNROE P, JOSEPH S, et al. Water extractable organic carbon in untreated and chemical treated biochar[J]. Chemosphere, 2012,87(2):151-157.
- [10] 魏永霞,张翼鹏,张雨凤,等. 黑土坡耕地连续施加生物炭的土壤改良和节水增产效应[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):284-291,312.
WEI Yongxia, ZHANG Yipeng, ZHANG Yufeng, et al. Influences of biochar's two consecutive years supply on soil improvement and water saving & yield increasing in sloping farmland of black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2):284-291,312. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180236&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.036. (in Chinese)
- [11] 尚杰,耿增超,赵军,等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报,2015,26(7):1969-1976.
SHANG Jie, GENG Zengchao, ZHAO Jun, et al. Effects of biochar on hydrothermal characteristics of loess soil and the stability of agglomerates[J]. Journal of Applied Ecology, 2015,26(7):1969-1976. (in Chinese)
- [12] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(16):128-134.
XIAO Qian, ZHANG Hongpei, SHEN Yufang, et al. Effects of biochar on soil moisture infiltration, evaporation and nitrate nitrogen leaching in Loess Region[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(16):128-134. (in Chinese)
- [13] TRYON E H. Effect of charcoal on certain physical, chemical, and biological properties of forest soils[J]. Journal of Ecological Monographs,1948,18(1):81-115.
- [14] 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,2014,25(8):2281-2288.
QI Ruipeng, ZHANG Lei, YAN Yonghao, et al. Effect of biochar on soil water infiltration characteristics in semi-arid area under constant capacity weight[J]. Journal of Applied Ecology, 2014,25(8):2281-2288. (in Chinese)
- [15] 王艳阳,魏永霞,孙继鹏,等. 不同生物炭施加量的土壤水分入渗及其分布特性[J]. 农业工程学报,2016,32(8):113-119.
WANG Yanyang, WEI Yongxia, SUN Jipeng, et al. Soil moisture infiltration and its distribution characteristics of different

- biochar[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(8): 113-119. (in Chinese)
- [16] 岑睿,屈忠义,孙贯芳,等. 秸秆生物炭对黏壤土入渗规律的影响[J]. 水土保持研究,2016,23(6):284-289.
CEN Rui, QU Zhongyi, SUN Guanfang, et al. Effect of straw biochar on infiltration law of viscous loam[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016,23(6): 284-289. (in Chinese)
- [17] 刘易,黄建,马彦茹,等. 生物炭输入对盐化灰漠土壤水分运移的影响[J]. 新疆农业科学,2017,54(2):343-351.
LIU Yi, HUANG Jian, MA Yanru, et al. Effect of biochar input on water transport in salinized gray desert soil[J]. Xinjiang Agricultural Science, 2017,54(2): 343-351. (in Chinese)
- [18] 安艳,姬强,赵世翔,等. 生物炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. 环境科学,2016,37(1):293-300.
AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shixiang, et al. Effects of biochar on soil agglomeration distribution and water retention in orchards [J]. Environmental Science, 2016,37(1): 293-300. (in Chinese)
- [19] 葛顺峰,彭玲,任饴华,等. 秸秆和生物炭对苹果园土壤容重、阳离子交换量和氮素利用的影响[J]. 中国农业科学, 2014,47(2):366-373.
GE Shunfeng, PENG Ling, RENG Yihua, et al. Effects of straw and biochar on soil bulk density, cationic exchange and nitrogen utilization in apple orchard[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2014,47(2): 366-373. (in Chinese)
- [20] 魏永霞,冯鼎锐,刘志凯,等. 生物炭对黑土区坡耕地水土保持及大豆增产效应研究[J]. 节水灌溉,2017(5):37-41.
WEI Yongxia, FENG Dingrui, LIU Zhikai, et al. Effects of biochar on soil and water conservation and soybean yield in sloping farmland of black soil area[J]. Water-saving Irrigation, 2017(5): 37-41. (in Chinese)
- [21] 赵云鹏,白一茹,王幼奇,等. 城市绿地覆盖砂石后土壤水分入渗过程及模型分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017,45(7):66-72.
ZHAO Yunpeng, BAI Yiru, WANG Youqi, et al. Analysis of soil water infiltration process and model after urban green space covering gravel[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2017,45(7): 66-72. (in Chinese)
- [22] 张启昌,孟庆繁,兰晓龙. 黄土低山丘陵区湿润锋运动的实验研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(4):84-88.
- [23] 张志华,桑玉强,孔玉华,等. 太行山低山丘陵区坡位对土壤渗透性能影响研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(9):43-47,78.
ZHANG Zhihua, SANG Yuqiang, KONG Yuhua, et al. Effect of slope position on soil permeability in Taihang mountain hilly area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018,37(9): 43-47,78. (in Chinese)
- [24] CASTELLINI M, GIGLIO L, NIEDDA M, et al. Impact of biochar addition on the physical and hydraulic properties of a claysoil[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 154: 1-13.
- [25] 唐光木,葛春辉,徐万里,等. 施用生物黑炭对新疆灰漠土肥力与玉米生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9):1797-1802.
TANG Guangmu, GE Chunhui, XU Wanli, et al. Effect of applying biochar on the quality of greydesert soil and maize cropping in Xinjiang, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011,30(9):1797-1802. (in Chinese)
- [26] LAIRD D A, FLEMING P, DAVIS D D, et al. Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil[J]. Geoderma, 2010, 158(3/4): 443-449.
- [27] 勾芒芒,屈忠义. 生物炭与化肥互作对土壤含水率与番茄产量的影响[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):283-288.
GOU Mangmang, QU Zhongyi. Effects of biochar and fertilizer on soil moisture content and tomato yield[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11): 283-288. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181133&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.033. (in Chinese)
- [28] 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.
GAO Haiying, HE Xusheng, GENG Zengchao, et al. Effect of biochar and carbon-based nitrogen fertilizer on soil water holding performance[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(24): 207-213. (in Chinese)
- [29] 谭帅,周蓓蓓,王全九. 纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报,2014,51(2):263-269.
TAN Shuai, ZHOU Beibei, WANG Quanjiu. Effects of nano-carbon on the water infiltration process of disturbed yellow soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 263-269. (in Chinese)
- [30] 李帅霖,王霞,王朔,等. 生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(14):135-144.
LI Shuilin, WANG Xia, WANG Shuo, et al. Effects of biochar application mode and dosage on soil moisture infiltration and evaporation[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(14): 135-144. (in Chinese)
- [31] 张妙,李秧秧,白岗栓. 生物炭和PAM共施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响[J]. 水土保持研究,2018,25(5):124-130.
ZHANG Miao, LI Yangyang, BAI Gangshuan. Effects of biochar and PAM on water infiltration and evaporation in yellow soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018,25(5): 124-130. (in Chinese)