

生物炭添加量对红壤水分运移的影响

刘世思, 裴青宝, 宋奕欣, 孙晓初, 张振宇
(南昌工程学院, 江西 南昌 330099)

摘要: 为探究不同的生物炭添加量对红壤水分运动规律的影响,设置5组生物炭混掺量1% (T1)、2% (T2)、3% (T3)、4% (T4)和5% (T5),并以不掺生物炭为对照组(CK),通过室内土柱模拟试验分析不同处理对湿润锋(Z_f)、累积入渗量(I)和土壤含水量的影响,通过入渗模型对入渗过程的拟合,来评价模型的模拟性能。研究表明:湿润锋运移距离随着生物炭含量的增加呈现出先减小后趋于稳定再减小的趋势,湿润锋运移距离最大的为T1(44.2 cm),最小的为T5(18.1 cm),当生物炭添加量为T3和T4时,相比CK组分别减少了23.3%和26.3%;累积入渗量也呈现出先减小后趋于稳定再减小的趋势,入渗量最大的为CK(84.3 cm),最小的为T5(26.0 cm),生物炭添加量为T3和T4时,累积入渗量分别为30.4和30.1 cm;CK组土壤含水量较处理组低,可见生物炭可以提高土壤保水性能;通过比较模型参数RRMSE和 R^2 ,发现Kostiakov模型拟合效果最优。研究结果可对丘陵红壤的土壤水分管理提供参考。

关键词: 红壤; 水分运移; 生物炭; 湿润锋; 累积入渗量; 拟合模型

中图分类号:S156.6;S152.7

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2024)05-0217-08

Effect of biochar addition on water transport in red soils

LIU Shisi, PEI Qingbao, SONG Yixin, SUN Xiaochu, ZHANG Zhenyu

(Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330099, China)

Abstract: The effects of different biochar additions on water transport in red soils were investigated by an indoor soil column simulation test. Five groups with biochar dosage rates of 1% (T1), 2% (T2), 3% (T3), 4% (T4), and 5% (T5) were set, along with a control group without biochar (CK). The analysis focused on the effects of these treatments on wet front (Z_f), cumulative infiltration (I), and soil moisture content, and the performance of different infiltration models was evaluated by fitting the infiltration process. According to the test results, wet front migration initially decreased, then stabilized, and subsequently declined as the biochar content increased; the maximum wet front migration was observed in T1 at 44.2 cm, while the minimum was seen in T5 at 18.1 cm. Compared to the CK group, wet front migration decreased by 23.3% and 26.3% in T3 and T4, respectively. Cumulative infiltration also exhibited the same variation trend as the wet front migration, with maximum infiltration in CK at 84.3 cm and minimum in T5 at 26.0 cm; while that for T3 and T4 were measured at 30.4 cm and 30.1 cm, respectively. Soil water content was higher in treatment groups compared to the CK group, indicating that biochar can improve soil water retention performance. It was found that the Kostiakov model had the best fitting effect when comparing the RRMSE and R^2 results of different models. These results can provide valuable insights for effective water management practices in hilly red soil regions.

Key words: red earth; water transport; biochar; wet front; cumulative infiltration; fitting model

收稿日期:2024-04-21; 修回日期:2024-05-20

基金项目:江西省水利科学院科研平台开放研究基金项目(2021SKSH08);江西省科技厅重点研发计划项目(20203BBFL63073);江西省水利厅科技成果重点推广计划项目(202425TGKT09)

作者简介:刘世思(1997—),男,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为农业节水灌溉技术。

通讯作者:裴青宝(1983—),男,甘肃兰州人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事农业节水灌溉与城市雨水利用研究。

1 研究背景

在中国南方热带和亚热带地区,红壤覆盖面积约为 $204 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。该地区气候温暖湿润,使得红壤发育条件较好,土壤中铁和铝氧化物等含量较高,红壤是该地区最重要的土壤资源^[1]。红壤土亦为江西省的主要土壤类型之一,在全省境内广泛分布,省内主要经济作物有蜜橘、脐橙和甘蔗等,其中蜜橘种植面积约为 $9\,067 \text{ hm}^2$,是江西省重要的支柱产业。作为物质传输和运移的载体,土壤水与大气水、地表水、地下水和植被都存在着紧密联系^[2],是气象、水文、生态和农业系统的关键因子^[3]。土壤水分入渗是满足植物需水和地下水补给循环的关键机制^[4],是反映土壤运动过程和土壤持水性能的重要指标,其主要是由土壤含水量、饱和导水率、饱和扩散率、饱和含水率和初始含水率等构成^[5]。国内外学者围绕生物炭对土壤含水率和蒸散发等方面开展了一系列的研究,发现土壤中加入生物炭可以减少风蚀和水蚀对其造成的损失,降低土壤表面反照率,改善土壤结构和提高土壤持水能力^[6]。在研究方法上,国内外学者多采用数学模型和数值模拟等来预测土壤水分运动的规律^[7],其中较为成熟的模型有 Kostiakov 和 Philip 模型^[8]等。

近年来,生物炭作为一种可持续的土壤改良剂,被广泛使用在农业方面,其可改善微生物活性、土壤肥力和耕地土壤水分^[9]。生物炭具有多孔结构、丰富的官能团、各种无机营养物质和高碳稳定性、质地疏松等特点,可直接改善土壤松紧度、降低土壤容重^[10]、改良土壤渗透阻力、提高持水能力等优势。生物炭可通过对原材料的热解来制备,当其被埋在土壤中时,能将碳以稳定的形式储存在土壤中。土壤中加入生物炭可以形成特殊的双层土壤结构,提高上、下层的蓄水量和含水量,还能提高土壤有机碳和养分含量^[11]。因此,生物炭具有提高土壤肥力、固定污染物和废水处理等^[12]多种用途。有研究表明,施加生物炭提高了土壤保水性能,可能是由于生物炭内部的孔隙度高,混掺后增加了土壤微孔,起到了保水能力^[13]。Sun 等^[14]将两种不同的生物炭分别添加到土壤中,出现了不同试验结果,其原因主要是与生物炭性质的差异相关。Verheijen 等^[15]研究发现生物炭降低了砂质壤土的容重,提高了砂质壤土的持水能力。

由于红壤丘陵地区具有生态稳定性低、生物系统和生产力波动大、水土流失和洪涝灾害严重、土地

生产力和肥力低下以及土壤保水性差等特点^[16],国内外学者提出了一些措施来恢复退化红壤的肥力。如用石灰、肥料和化肥的混合物改良地表和地下土壤;采用挖沟和凿土技术提高蜜橘和其他深根作物的整个生根深度^[17];综合利用红壤资源,最大限度地减少水土流失,为作物增产提供保障。Qian 等^[18]在红壤中添加生物炭,发现土壤总孔隙度和毛管孔隙度随生物炭配比的增加而增加,对土壤吸湿系数和饱和含水量等均有显著影响。Ullah 等^[19]研究发现,添加生物炭可以增加红壤土中锰(Mn)、锌(Zn)和铜(Cu)的含量,还可以增加土壤中微生物的数量和 pH 值。Wu 等^[20]发现在红壤中添加生物炭对提高酸性土壤磷素的有效性具有重要意义。

前人侧重于研究添加生物炭后红壤中微生物和微量元素含量的变化等,而对入渗过程等方面的研究较少。加之在南方丘陵地区红壤孔隙度较大和保水性差等因素,会对丘陵区柑橘和蜜橘的产量和品质产生影响。本文为了探究生物炭含量对红壤水分运动的影响,通过室内入渗试验,研究了不同生物炭混掺量下红壤的累积入渗量、湿润锋运移距离以及不同土层深度土壤的含水量,采用不同的模型对入渗过程进行拟合,评价不同的生物炭混掺量对入渗模型的适用性,为主要经济作物区科学使用生物炭进行土壤改良和确定生物炭的合理施用量提供理论依据和技术参考。

2 试验材料与方法

2.1 取样区概况

本试验取样区位于江西省南丰水利科学院农业示范基地,其地理位置处于北纬 $27^\circ 05'$,东经 $116^\circ 27'$,气候湿润,降雨量大。取样区所在丘陵地区的土壤类型以红壤为主,土壤容重为 1.37 g/cm^3 ,土壤有机质主要有木质素类、脂肪族化合物和含氮化合物等。

2.2 土壤样品采集与测定

本试验样品取自南丰基地蜜橘果园,利用随机、多点法取 $0 \sim 25 \text{ cm}$ 深的土壤。清除掉土样的杂质后,对土壤样品进行自然风干和碾碎,经过 2 mm 的筛子筛选后备用。土壤粒径采用 BT-9300H 型激光粒度分布仪^[21]测定,测定结果如图 1 所示,其中粒径在 $d < 0.002 \text{ mm}$ 、 $0.002 \text{ mm} \leq d < 0.02 \text{ mm}$ 、 $0.02 \text{ mm} \leq d < 2 \text{ mm}$ 的体积占比分别为 1.10% 、 19.02% 和 79.88% ,根据国际制土壤质地分类标准,试验样品属于砂质黏壤土。

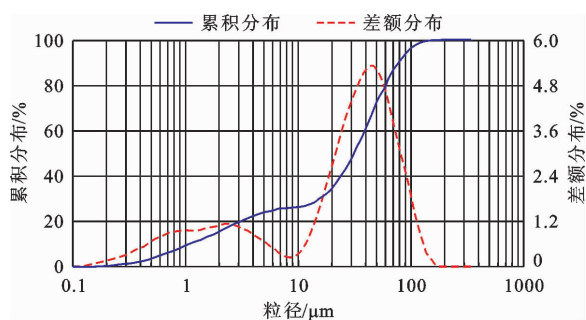


图1 试验样品土壤粒径分析

2.3 试验材料

2.3.1 生物炭材料 本文主要采用由水稻秸秆生产的生物炭,其粒径为80目(0.178 mm),pH值为9.72,容重为0.48 g/cm³;总有机碳含量为39.8%,含水量为2.5%,比表面积为170.3 m²/g,总孔隙度为57.23%。

2.3.2 试验设计 本试验主要设置5种生物炭混掺量处理(1%、2%、3%、4%和5%,分别用T1、T2、T3、T4和T5表示)和1个对照处理(CK,不掺生物炭),每组试验重复3次。

2.3.3 生物炭土样的制备 本研究主要按照土壤容重为1.37 g/cm³的标准将土样填装到垂直土柱中,土柱内径为10 cm、高为80 cm。每一次填装的土层厚度为5 cm,土柱内所需的总土重为8 603.6 g,T1、T2、T3、T4和T5所需要的生物炭的质量分别为86.04、172.07、258.11、344.14和430.18 g,将这两者的混合物放入搅拌机进行搅拌,开机30 min后停止搅拌。搅拌完成进行土料装填,土层的填装高度为80 cm,为防止土层之间出现分层现象,每填装5 cm后打毛土壤的表层,当填装完成后盖一层滤纸,使得土壤水分入渗均匀。装填完成后,静置12 h进行试验。

2.4 试验方法

采用马氏瓶为入渗提供定水头,其外标刻度用来读取不同时刻的水量。用秒表记录不同时刻马氏瓶的水位得到累积入渗量 I ;用土柱外标刻度读取湿润锋运移距离 Z_f ;入渗结束后用土钻每隔5 cm取样一次,称重后用电热恒温鼓风干燥箱对土样烘干,得到土壤质量含水率,与容重相乘得体积含水率。

2.4.1 土壤水分入渗试验 马氏瓶供水时水头控制在4 cm,用秒表记录不同时刻马氏瓶的水位,末时刻水位减初时刻水位即得到累积入渗量(I)和土柱内湿润锋运移距离(Z_f)(采用先密后疏的方法),当入渗时间达到480 min时停止供水,每组试验重

复3次,试验装置如图2所示。

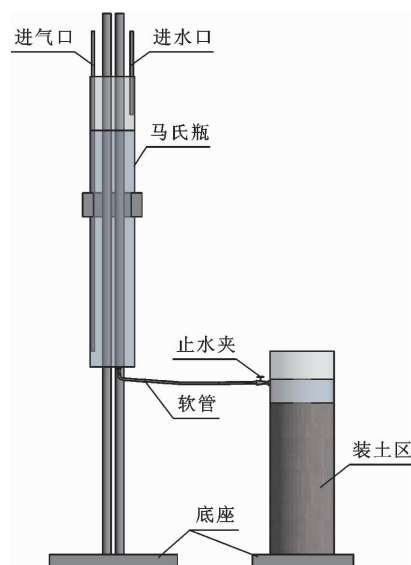


图2 垂直土柱入渗示意图

2.4.2 入渗模型 目前,对红壤水分运动规律进行定量描述及模型拟合没有统一的定义。不同研究区因土壤类型、生物质条件等存在差异,其所选用的拟合模型也不同,而适宜的入渗模型是研究入渗过程的重要手段。

本研究选用3种入渗模型分别对红壤水分入渗过程进行模拟,并对拟合结果和模型的适用性进行分析。

(1) Kostiaikov 模型入渗公式^[22]为

$$I = at^b \quad (1)$$

式中: I 为累积入渗量,cm; a 、 b 为根据试验参数拟合的模型参数; t 为入渗时间,min。

(2) 入渗速率与入渗时间模型公式^[23]为

$$V(t) = bt^c \quad (2)$$

式中: $V(t)$ 为入渗速率,cm/min; c 为拟合参数,根据经验值取 $c = -0.565$ 。

(3) Philip 入渗公式^[24]为

$$I(t) = St^{0.5} + f_c t \quad (3)$$

式中: $I(t)$ 为土壤表面入渗速率,cm/min; S 为吸渗率,cm·min^{-0.5}; f_c 为稳渗率,cm/min。

2.4.3 数据分析 通过决定系数 R^2 和相对均方根误差(relative root mean square error, $RRMSE$)对模型进行评价^[25]。

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (4)$$

$$RRMSE = \frac{1}{\bar{X}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (5)$$

式中: X_i 为第 i 个时间段的实测值; Y_i 为第 i 个时间段的模拟值; n 为样本点数; $\bar{X}$ 、 $\bar{Y}$ 分别为 X_i 、 Y_i 的平均值。 $RRMSE$ 越小, 说明模型验证的预测值与实测值的拟合程度越高。

3 结果与分析

3.1 湿润锋运移与入渗时间的关系

图 3 为不同处理下湿润锋运移距离随入渗时间的变化情况。

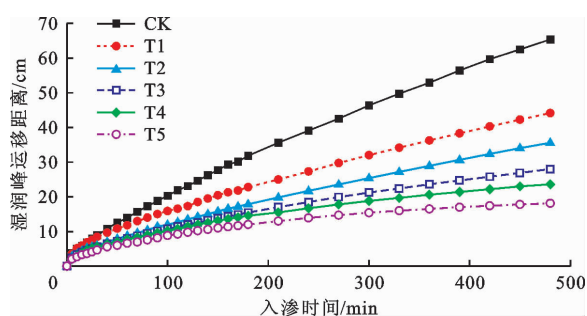


图 3 不同处理湿润锋运移距离随入渗时间的变化

由图 3 可以看出, 在 0 ~ 50 min 内水分入渗较快, 50 ~ 200 min 入渗缓慢, 200 min 后入渗趋于稳定, 生物炭处理下湿润锋运移距离较 CK 显著减小 ($P < 0.05$)。

在各处理组中, 湿润峰运移距离最大的为 T1 (44.2 cm), 最小的为 T5 (18.1 cm)。当入渗时间为 60 min 时, 处理组 (T1、T2、T3、T4 和 T5) 的湿润锋运移距离较对照组 CK 分别减少了 10.9%、37.5%、42.3%、44.8% 和 52.2%。在入渗前期, CK 和 T1 的湿润锋运移距离差异较小。

分析入渗时间为 120、240 和 360 min 时的湿润锋运移距离发现: 入渗 120 min 时, 处理组 T3 和 T4 相对于对照组分别减少了 48. % 和 50.7% ; 240 min 时, T3 和 T4 相对于对照组分别减少了 52.6% 和 57.2% ; 360 min 时, T3 和 T4 相对于对照组分别减少了 55.3% 和 61.1% ; 3 个时刻后, T4 与 T3 相比分别减少了 5.2%、9.7% 和 10.2%。当生物炭添加量为 3% (T3) 和 4% (T4) 时, 湿润锋运移距离相比 CK 组分别减少了 23.3% 和 26.3% , 可见在 T3 和 T4 处理下湿润锋运移距离基本相近。说明生物炭可以减缓土壤水分运移, 运移速率随着混掺量的增加呈现出先减小后趋于稳定再减小的趋势。

当湿润锋运移距离达到 20 cm 时, CK、T1、T2、T3、T4 和 T5 所用的时间分别为 97.6、145.5、215.5、270.0、340.0 和 480.0 min, 湿润锋运移的速率分别为 0.145、0.095、0.065、0.043、0.031 和 0.011 cm/min。各处理较对照组湿润锋运移的速率分别减少了 34.5%、55.2%、70.3%、78.6% 和 92.4% , 可见随着生物炭混掺量的增加, 其对水分的阻滞作用更加明显。

对照组初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率的变化范围分别为 0.413 ~ 0.214、0.112 ~ 0.099、0.127 ~ 0.108 cm/min, 处理组初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率的变化范围分别为 0.362 ~ 0.127、0.098 ~ 0.082、0.122 ~ 0.088 cm/min。可见添加生物炭会对红壤水分入渗速率起到一定的减缓效果。

3.2 累积入渗量与入渗时间的关系

图 4 为不同处理下累积入渗量随入渗时间的变化情况。

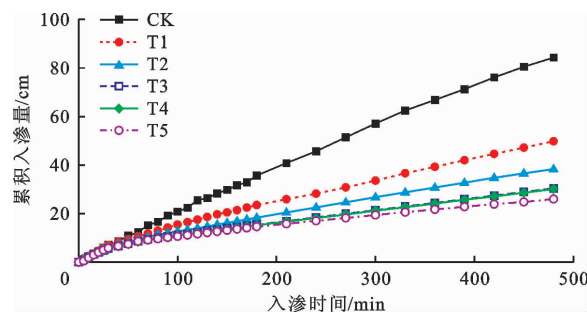


图 4 不同处理累积入渗量随入渗时间的变化

由图 4 可以看出, 在入渗初期, 各处理组的累积入渗量并没有明显的差异, 入渗后期其与湿润锋运移距离随时间的变化规律基本相似。当入渗结束时, CK 的累积入渗量为 84.3 cm, T1、T2、T3、T4、T5 各处理组的累积入渗量分别为 49.8、38.4、30.4、30.1、26.0 cm; 随着入渗时间的延长, 对照组 CK 的累积入渗量显著高于其他处理组; T3 和 T4 处理下的累积入渗量相差很小, 基本处于一个相对稳定的状态; T5 相对于 T3 累积入渗量减少了 14.5%。说明累积入渗量随着生物炭混掺量的增加呈现出先减小后趋于稳定再减小的趋势, 生物炭对土壤水分入渗起到抑制作用, 能提高土壤持水性能。

3.3 土壤含水量与湿润深度的关系

图 5 为不同处理对土壤含水量的影响。

综合图 3、5 可以看出, 在不同生物炭混掺量处理下的湿润锋运移距离不同, 且在同一湿润深度下

土壤的含水量也不相同。在入渗初期(湿润深度为 5.0 cm),T1、T2、T3、T4、T5 各处理组与对照组 CK 相比,土壤含水量分别降低了 0.4%、23.0%、29.1%、30.1%和 32.1%,CK 与 T1 相比,二者土壤含水量差异较小,与其他组相比差异较明显;当湿润深度为 20.0 cm 时,T3、T4 和 T5 相对于 T2 分别减少了 5.2%、7.8%和 21.1%,T4 相对于 T3 减少了 2.7%,T5 的土壤含水量下降明显。说明生物炭混掺量越大,影响土壤水分入渗的效果越明显,因此添加适量的生物炭可以减缓红壤水分流失,起到一定的保水效果。

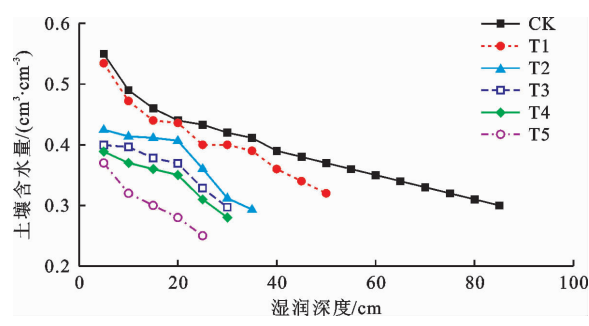


图5 不同处理对土壤含水量的影响

3.4 不同生物炭混掺量下入渗模型分析

3.4.1 累积入渗量与入渗时间拟合 将原始累积入渗量数据代入 Kostiakov 和 Philip 拟合模型中,得出拟合参数。不同处理下累积入渗量 I 与入渗时间 t 之间的模型拟合及评价参数分别见表 1、2。

表 1 不同处理下 Kostiakov 模型拟合及评价参数

处理	a	b	R^2	$RRMSE$
CK	2.300 1	0.518 9	0.992 9	0.004 5
T1	1.492 3	0.644 8	0.998 9	0.006 1
T2	0.984 1	0.705 5	0.997 9	0.007 1
T3	0.595 8	0.732 1	0.997 2	0.005 7
T4	0.576 2	0.745 8	0.997 1	0.005 4
T5	0.458 1	0.770 5	0.996 6	0.005 2

表 2 不同处理下 Philip 模型拟合及评价参数

处理	S	f_c	R^2	$RRMSE$
CK	1.213	0.022 1	0.999 3	0.008 2
T1	0.976	0.013 5	0.992 4	0.007 2
T2	0.826	-0.002 2	0.990 9	0.006 5
T3	0.643	0.009 1	0.999 2	0.006 1
T4	0.513	0.008 9	0.996 5	0.009 1
T5	0.443	0.007 3	0.992 6	0.006 3

由表 1 可以看出,Kostiakov 模型各处理组的参数 a 均小于 CK 组,而参数 b 均大于 CK 组,处理组 T3 和 T4 在同一模型下拟合参数相近;各处理组的 R^2 值均大于 0.99, $RRMSE$ 的值均趋于 0,说明 Kostiakov 模型拟合效果较好;随着生物炭含量的增加,Kostiakov 模型中的参数 a 值减小,参数 b 增大,说明混掺后土壤对入渗的水分有减缓效果,这从图 3 中也可以得到验证。

由表 2 可以看出,Philip 模型各处理组参数 S 和 f_c 值均小于 CK 组,T2 处理下 f_c 值为负,与实际情况不符;不同处理组的 R^2 均大于 0.99, $RRMSE$ 均趋近于 0,说明该模型模拟性能较好;除 T2 组发生异常外,其他处理组随着混掺量的增加,Philip 模型中的参数 S 和 f_c 值呈减小趋势。

综上,Kostiakov 和 Philip 模型都能很好地模拟生物炭混掺下土壤水分入渗规律,Philip 模拟下 T2 的结果与实际不符,因此,相对而言 Kostiakov 模型模拟的结果更优。

3.4.2 入渗速率与入渗时间拟合 根据公式(2)得出的不同处理下入渗速率与入渗时间模型的拟合参数见表 3。

表 3 不同处理下入渗速率与入渗时间模型拟合参数

处理	b	R^2	$RRMSE$
CK	1.475	0.999	<0.001
T1	1.277	0.993	<0.001
T2	1.153	0.982	0.006
T3	0.868	0.996	<0.001
T4	0.829	0.992	<0.001
T5	0.736	0.991	<0.001

由表 3 可以看出,在入渗速率与入渗时间的拟合过程中,各处理组的参数 b 值均小于 CK 组,各处理组的 R^2 除 T2 外均大于 0.99,表明该模型的拟合效果较好;随着生物炭含量的增加,入渗速率与入渗时间的拟合参数 b 呈现出减小趋势。主要是随着生物炭混掺量的增加,土壤粒径占比发生了相应的变化,进而有效减缓了水分的入渗速率。

4 讨 论

4.1 生物炭对土壤入渗能力的影响

土壤入渗是指水分从土壤表层向土壤内部渗透的过程,是土壤水分运动过程中的一个重要阶段^[26]。土壤的物理性质会随着土层深度的增加呈

现不同的差异,对土壤的入渗能力也会产生不同的影响^[27]。入渗初期土壤受初始含水量的影响,对水的吸力较大,所以入渗速度较快,随着入渗过程的推移,生物炭处理下的入渗速度明显低于未加炭的情况。究其原因是因为生物炭本身具有多孔结构,表现出一定的亲水性,能够发挥其吸附能力。在入渗过程中生物炭由于本身的结构容易发物理性的破碎,其碎片可能会填充土壤之间的孔隙^[28],导致水流通道变得复杂,从而延长了入渗时间,降低了土壤入渗速率。陈斯等^[29]的研究表明,生物炭处理在沼液灌溉条件下对减缓红壤土水分入渗效果显著。赵子璇等^[30]发现在褐土中加入生物炭后会降低土壤水分的入渗能力,尤其在降水量较少的地区,可以用来增加表层土壤含水率,减少土壤的深层渗漏,从而提高作物的产量。王幼奇等^[31]在灰钙土中加入生物炭以改善其水分损失快、持水性能差的特点,提高保水性能。秦佳豪等^[32]发现根层铺膜也会提高土壤保水性能。魏永霞等^[33]阐明生物炭能提高黑土土壤水分入渗能力,与本研究结果相反,表明不同性质的生物炭添加到不同的土壤中,所产生的结果也不尽相同。由于黑土的粉粒占比较高,使得入渗能力较弱,添加生物炭后砂粒含量占比增加,土壤入渗能力提高;红壤的粗砂粒占比较高,使得入渗能力较强,添加生物炭后细砂粒占比增加,水分入渗能力减小^[34]。本次试验在入渗 100 min 后,可以看出加入生物炭的各处理组的累积入渗量显著低于 CK 组,在不同生物炭含量下各处理组的土壤含水量高于 CK 组,说明生物炭本身具有滞水效果,从而可提高土壤的持水性能,添加生物炭后,增加了细砂粒占比,使得粗砂粒占比减少,土壤的密实度增加,土壤的滞水能力提高。由于土壤细小粒径之间的间隙较小,能形成较多的微小孔隙和毛细管,这些细小通道能够增加土壤的毛细吸力,使水分更容易被土壤颗粒吸附和保持,来增加土壤的持水能力^[15]。Wang 等^[35]研究发现,生物炭通过改变土壤物理和水力性质,减缓了土壤水分入渗过程,使土壤水分损失减少 5%~15.02%,能有效减少灌溉用水量,从而使土壤水分利用效率提高 2%~9.43%。

4.2 生物炭对土壤持水能力的影响

生物炭在炭化过程中会使表面的含氧官能团减少,表现出疏水性,由于其具有多孔结构,可以提高土壤含水量,尤其是在质地粗糙的土壤中^[36]。Blanco-Canqui^[37]分析近年来关于生物炭对土壤物理性质影响的研究,表明生物炭可以提高 90% 的土

壤保水性能,为植物的生长提供有利的条件。郑健等^[38]研究发现,由于生物炭内部的结构迫使水分保持在毛细状态,因而可减少水分散失,提高土壤对水分的吸持能力。生物炭使用在农田中,可以提高土壤肥力和减缓气候变化的影响,因为其增加了碳的固存,减少了温室气体(一氧化二氮和甲烷)的排放^[39]。关于生物炭对粉质壤土保水性的研究表明,其可降低土壤容重和饱和导水率,明显改善土壤、植物的有效持水能力^[40]。在本研究中,混掺不同比例的生物炭可以有效降低水的入渗速度,显著提高深层土壤含水量。

对红壤区而言,混掺生物炭可以有效减小土壤水分流失以及滑坡和土地退化等灾害发生的风险,同时能提高土壤的持水性能,有利于作物抗旱以及应对极端天气造成的不良影响,为作物增产提供有利保障,生物炭还可通过改善土壤性质来改善土壤肥力和提高作物生产力^[41]。

4.3 入渗模型适宜性评价

本试验采用 3 种模型对红壤入渗过程进行拟合,Philip 模型拟合效果较好,但在 T2 处理组下的 f_c 值与实际不相符,造成该现象的原因可能是在室内试验模拟中,生物炭与土壤搅拌均匀分层加入土柱后静置时间未达标,因此 Philip 模型不适用本研究。Kostiakov 模型拟合程度较高,且与实际相符合。入渗速率与入渗时间模型模拟的结果除 T2 处理组之外,其余处理组的 R^2 均大于 0.99,RRMSE 均趋近于 0,显然该模型模拟的效果也较好。

Kostiakov 和入渗速率与入渗时间拟合模型均能很好地模拟生物炭对红壤水分入渗过程的影响,但后者拟合精度低于前者,相比之下,Kostiakov 模型模拟结果更优,高言等^[42]的研究结果也与该模型模拟结果相同。

5 结 论

(1)混掺生物炭处理对减缓红壤水分入渗效果明显。对照组初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率的变化范围分别为 0.413~0.214、0.112~0.099、0.127~0.108 cm/min,处理组初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率的变化范围分别为 0.362~0.127、0.098~0.082、0.122~0.088 cm/min,施加生物炭可以有效延长水分入渗时间。

(2)生物炭能减缓红壤湿润锋的运移距离,在整个入渗过程中各处理组的累积入渗量始终低于对照处理组,添加生物炭可减少红壤水分入渗量,提高

红壤持水能力。

(3)从生物炭混掺量对湿润锋运移距离、累积入渗量和土壤含水量的影响结果来看,T3 和 T4 处理组呈现出相近的规律,为了节约资源,减少浪费,对红壤推荐使用3%的生物炭混掺量。

参考文献:

- [1] HAN Yi, YI Dan, YE Yingcong, et al. Response of spatiotemporal variability in soil pH and associated influencing factors to land use change in a red soil hilly region in southern China[J]. *Catena*, 2022, 212: 106074.
- [2] HIRMAS D R, GIMENEZ D, NEMES A, et al. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle[J]. *Nature*, 2018, 561(7721): 100-103.
- [3] 米美霞,邵明安,武小刚,等. 煤矸石和钙结石对植物生长和土壤含水量的影响[J]. *土壤学报*, 2021, 58(6): 1460-1471.
- [4] REN Xiuzi, CHAI Xiaohong, QU Yuanyuan, et al. Restoration of grassland improves soil infiltration capacity in water – wind erosion crisscross region of China’s Loess Plateau[J]. *Land*, 2023, 12(8): 1485.
- [5] 柴红阳,陈俊英,张林,等. 不同斥水程度黏壤土一维入渗特性试验研究[J]. *排灌机械工程学报*, 2019, 37(7): 632-638.
- [6] 孙树臣,赵鑫,翟胜,等. 生物质炭施用对土壤水分影响的研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 112-119.
- [7] 刘文光,贾生海,范严伟,等. 夹砂层土壤膜孔水分入渗规律数值模拟与试验验证[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(4): 243-248.
- [8] 王幼奇,阮晓晗,白一茹,等. 不同种植年限压砂地土壤水分入渗过程及模型分析[J]. *排灌机械工程学报*, 2022, 40(10): 1048-1055.
- [9] XING Xuguang, LIU Ye, GARG A, et al. An improved genetic algorithm for determining modified water-retention model for biochar-amended soil[J]. *Catena*, 2021, 200: 105143.
- [10] 王娟,黄成真,冯绍元,等. 生物炭对滨海滩涂区土壤理化特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(10): 125-130 + 138.
- [11] DUAN Manli, LIU Gaohuan, ZHOU Beibei, et al. Effects of modified biochar on water and salt distribution and water-stable macro-aggregates in saline-alkaline soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(6): 2192-2202.
- [12] WANG Liuwei, OK Y S, TSANG D C W, et al. Biochar composites: emerging trends, field successes and sustainability implications[J]. *Soil Use and Management*, 2022, 38(1): 14-38.
- [13] AMOAKWAH E, FRIMPONG K A, OKAE-ANTI D, et al. Soil water retention, air flow and pore structure characteristics after corn cob biochar application to a tropical sandy loam[J]. *Geoderma*, 2017, 307: 189-197.
- [14] SUN Junna, YANG Runya, LI Wenxue, et al. Effect of biochar amendment on water infiltration in a coastal saline soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18(11): 3271-3279.
- [15] VERHEIJEN F G A, ZHURAVEL A, SILVA F C, et al. The influence of biochar particle size and concentration on bulk density and maximum water holding capacity of sandy vs sandy loam soil in a column experiment[J]. *Geoderma*, 2019, 347: 194-202.
- [16] HUANG Dong, YANG Xiaohuan, CAI Hongyan, et al. Identifying human-induced spatial differences of soil erosion change in a hilly red soil region of southern China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(11): 3103.
- [17] CABAL C, DE DEURWAERDER H P T, MATESANZ S. Field methods to study the spatial root density distribution of individual plants[J]. *Plant and Soil*, 2021, 462(1-2): 25-43.
- [18] QIAN Zhuangzhuang, TANG Luozhong, ZHUANG Shun-yao, et al. Effects of biochar amendments on soil water retention characteristics of red soil at south China[J]. *Biochar*, 2020, 2(4): 479-488.
- [19] ULLAH Z, ALI S, MUHAMMAD N, et al. Biochar impact on microbial population and elemental composition of red soil[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(16): 757.
- [20] WU Yunchao, ZOU Ziwei, HUANG Chenxu, et al. Effect of biochar addition on phosphorus adsorption characteristics of red soil[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 893212.
- [21] ARRIAGA F J, LOWERY B, MAY S M D. A fast method for determining soil particle size distribution using a laser instrument[J]. *Soil Science*, 2006, 171(9): 663-674.
- [22] 常艺睿,马娟娟,孙西欢,等. 上覆蓄水陶土层对黄土高原土壤水分入渗与蒸发的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 101-109.
- [23] DAGADU J S, NIMBALKAR P T. Infiltration studies of different soils under different soil conditions and comparison of infiltration models with field data[J]. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2012, 3(2): 154-157.
- [24] FAN Yanwei, GONG Jiaguo, WANG Ying, et al. Application of Philip infiltration model to film hole irrigation[J]. *Water Supply*, 2019, 19(3): 978-985.
- [25] AHMED M, AHMAD S, RAZA M A, et al. Models cali-

- bration and evaluation [M]//Systems Modeling. Singapore: Springer, 2020: 151-178.
- [26] 吕文聪,邱阳,谢忠奎,等. 砾石覆盖粒径对土壤入渗过程的影响[J]. 水土保持研究,2021,28(6): 46-51.
- [27] 詹舒婷,宋明丹,李正鹏,等. 不同秸秆生物炭对土壤水分入渗和蒸发的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(1): 294-300.
- [28] VILLAGRA-MENDOZA K, HORN R. Changes in water infiltration after simulated wetting and drying periods in two biochar amendments[J]. Soil Systems, 2019, 3(4): 63-77.
- [29] 陈斯,吴凤平,王辉,等. 生物炭对黏质砂红壤沼液入渗减渗效果的影响[J]. 农业环境科学学报,2023,42(3): 578-588.
- [30] 赵子璇,马娟娟,孙西欢,等. 褐土区生物炭施用量对水分入渗规律的影响[J]. 中国农村水利水电,2022(11): 108-112.
- [31] 王幼奇,包维斌,赵云鹏,等. 生物炭添加对淡灰钙土水分入渗过程的影响[J]. 灌溉排水学报,2018,37(12): 60-65.
- [32] 秦佳豪,洪明,闫辰啸,等. 根层铺多孔膜对和田风沙土水分入渗及蒸发的影响研究[J]. 水资源与水工程学报,2021,32(2): 233-240.
- [33] 魏永霞,王鹤,刘慧,等. 生物炭对黑土区土壤水分及其入渗性能的影响[J]. 农业机械学报,2019,50(9): 290-299.
- [34] SHI Gaoxin, WU Yu, LI Tianxiao, et al. Mid-and long-term effects of biochar on soil improvement and soil erosion control of sloping farmland in a black soil region, China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 320: 115902.
- [35] WANG He, SHAO Dongguo, JI Bin, et al. Biochar effects on soil properties, water movement and irrigation water use efficiency of cultivated land in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2022, 829: 154520.
- [36] ZHAO Ruirui, LIU Yong, GUNDALE M J. Soil amendment with biochar and manure alters wood stake decomposition and fungal community composition[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2023, 15(9): 1166-1185.
- [37] BLANCO-CANQUI H. Biochar and soil physical properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 687-711.
- [38] 郑健,孙强,石聪,等. 土壤混掺生物炭对微咸水蒸发特性的影响[J]. 水土保持学报,2023,37(4): 294-303.
- [39] GONDIM R S, MUNIZ C R, LIMAS C E P, et al. Explaining the water-holding capacity of biochar by scanning electron microscope images[J]. Revista Caatinga, 2018, 31(4): 972-979.
- [40] GHASSEMI-GOLEZANI K, FARHANGI-ABRIZ S. Improving plant available water holding capacity of soil by solid and chemically modified biochars[J]. Rhizosphere, 2022, 21: 100469.
- [41] LUO Chaoyi, YANG Jingjing, CHEN Wen, et al. Effect of biochar on soil properties on the Loess Plateau: results from field experiments[J]. Geoderma, 2020, 369: 114323.
- [42] 高言,沈洪政,杨婷,等. 不同生物炭添加量对土壤水分运动过程的影响及模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2021(9): 134-140.

