

生物炭对黏质砂红壤沼液入渗减渗效果的影响

陈斯, 吴凤平, 王辉, 欧阳赞

引用本文:

陈斯, 吴凤平, 王辉, 欧阳赞. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0888>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

砂壤土贮存池中沼液入渗及氮磷迁移特征

孙国峰, 宗焦, 盛婧, 周炜, 张丽萍, 王子臣

农业环境科学学报. 2023, 42(1): 209–215 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0361>

人工降雨模拟河南淮河流域潮土非点源氮输出

袁远, 杨海洋, 王江彦, 申冲, 杨国馨, 吴明作

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 123–131 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0576>

基于不同湿润速度下PAM水解过程对砂壤土入渗的影响

韩冬, 魏占民, 于健, 宋日权

农业环境科学学报. 2015(6): 1174–1180 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.06.022>

生物炭和猪粪肥对铜污染土壤中菹菜生长及铜形态的影响

陈璇, 郭雄飞, 陈桂葵, 黎华寿, 贺鸿志

农业环境科学学报. 2016, 35(5): 913–918 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.05.014>

稻秆及稻秆生物炭添加对稻田红壤有机碳组分及CH₄和CO₂累积排放量的影响

廖添怀, 李欢, 王艳玲

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1598–1609 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1381>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.

CHEN S, WU F P, WANG H, et al. Influence of biochar on biogas infiltration and infiltration reduction effect of clayey and sandy red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 578–588.

生物炭对黏质砂红壤沼液入渗减渗效果的影响

陈斯, 吴凤平*, 王辉, 欧阳赞

(湖南农业大学水利与土木工程学院, 长沙 410128)

摘要:为减缓黏质砂红壤沼液水分下渗,本研究以生物炭不同混掺量和不同混掺厚度为影响因子进行室内土柱模拟试验,设置3种生物炭混掺量(1%、3%和5%)和4种混掺厚度(5、10、15 cm和20 cm),同时设置不混掺生物炭为对照处理(CK),以探究生物炭对黏质砂红壤沼液入渗减渗效果的影响,并优选出适宜的土壤水分入渗模型。结果表明:生物炭减小了沼液灌溉下红壤的湿润峰运移速率和累积入渗量,对红壤入渗表征为减渗效果。对于不同混掺量,红壤湿润锋运移速率和累积入渗量随着生物炭混掺量的增加而减小,其中5%混掺量处理为最小值。对于不同混掺厚度,1%和3%混掺量时,红壤湿润锋运移速率和累积入渗量随着混掺厚度的增加呈先减后增的趋势,其中10 cm混掺厚度处理为最小值,较CK处理平均分别减小21.62%和26.89%;5%混掺量处理下,红壤湿润锋运移距离和累积入渗量随着混掺厚度的增加呈递减趋势,其中20 cm混掺厚度处理为最小值,较CK处理分别减小35.58%和45.49%。采用Philip、Kostiakov、Horton模型对红壤水分入渗过程进行模拟,通过比较模型参数、RMSE和 R^2 发现,Kostiakov模型拟合效果优于其他模型。研究表明,生物炭可抑制红壤水分入渗能力,减缓沼液水分入渗进程,达到减渗效果,进而降低了沼液下渗过快而引起地下水污染的风险。

关键词:水分入渗;生物炭;沼液;减渗;入渗模型

中图分类号:S156 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)03-0578-11 doi:10.11654/jaes.2022-0888

Influence of biochar on biogas infiltration and infiltration reduction effect of clayey and sandy red soil

CHEN Si, WU Fengping*, WANG Hui, OUYANG Zan

(College of Water Resources and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Regulating the biogas infiltration process in red soil mixed with biochar can provide a scientific basis for slowing down water infiltration in clayey and sandy red soil. In this study, we conducted soil column experiments with different mixing amounts and thicknesses of biochar. We set three mixing amounts (1%, 3%, and 5%) and four mixing thicknesses (5, 10, 15 cm, and 20 cm) of biochar to study the effect of biochar on biogas infiltration and infiltration reduction in clayey and sandy red soil and to select a suitable soil infiltration model for biochar mixing with biogas. In addition, the soil without biochar was set as the control treatment (CK). The results showed that biochar reduced the transport rate of the red soil wetting peak, reduced the accumulated infiltration, and characterized the infiltration effect on red soil as a reduction of infiltration. For different mixing amounts, the transport rate and cumulative infiltration of red soil wetting fronts decreased with the increase of biochar mixing amount. They reached the minimum value with a 5% mixing amount. For different mixing thicknesses, the transport rate and cumulative infiltration of wetting fronts showed a trend of decreasing first and then increasing with the

收稿日期:2022-09-05 录用日期:2022-11-07

作者简介:陈斯(1998—),男,湖南龙山人,硕士研究生,主要从事农业水土环境研究。E-mail:656186929@qq.com

*通信作者:吴凤平 E-mail:wufengping1209@126.com

基金项目:湖南省高新技术产业科技创新引领计划(科技攻关类)(2020NK2003);湖南省水利科技项目重大项目(XSKJ2021000-02);湖南省研究生科研创新项目(CX20210668)

Project supported: Leading Program of Science and Technology Innovation in High-tech Industries of Hunan Province, China (Science and Technology Tackling Category) (2020NK2003); Major Projects of Water Science and Technology of Hunan Province, China (XSKJ2021000-02); The Postgraduate Research Innovation Project of Hunan Province, China (CX20210668)

increase of mixing thickness at 1% and 3% mixing amounts, reaching the minimum value at 10 cm mixing thickness, decreasing by 21.62% and 26.89%, respectively, compared with the CK treatment. Under the 5% mixing treatment, the transport distance and cumulative infiltration of wetting fronts in red soil tended to decrease with increasing mixing thickness and reached the minimum value at 20 cm mixing thickness, decreasing to 35.58% and 45.49%, respectively, compared with the CK treatment. The Philip, Kostiakov, and Horton models were used to simulate the water infiltration process in red soil. The Kostiakov model was better than the other models by comparing model parameters, $RMSE$ and R^2 . The study showed that biochar inhibited the water infiltration capacity of red soil, slowed down the process of methane water infiltration, and reduced the risk of groundwater pollution.

Keywords: water infiltration; biochar; biogas; infiltration reduction; infiltration model

随着我国经济的快速发展,规模化养殖行业发展迅速,畜禽养殖产生的粪污水量庞大、分布广泛,粪污水排放量急剧增长引起的生态环境问题日益突出^[1]。沼液经畜禽粪污厌氧发酵制成,含有大量的有机质,沼液还田可以改良耕地土壤结构、增加土壤肥力、缓解农业用水紧张等,但沼液下渗过快易造成地下水和周边水体污染^[2-4]。因此,如何科学合理地减缓沼液在土壤内的入渗速度,降低沼液渗漏过快而产生地下水污染的风险具有重要意义。

生物炭是由有机物质在缺氧或无氧的条件下经高温热解制成的具有孔隙结构丰富、比表面积大、吸附性能强等特点^[5-6]的固态炭^[7],可作为土壤改良剂施入土壤,具有改变土壤质地和结构,改善土壤理化性质^[8],改变水分在土壤中迁移及停留时间的作用,进而可影响土壤水分的入渗进程^[9-10]。包维斌等^[11]发现在旱区沙壤土中添加生物炭可以提高土壤保水持水性能,减缓水分入渗,增加水分的持留时间;詹舒婷等^[12]的研究表明藜麦秆和油菜秆生物炭可显著增加土壤水分的入渗时间,减缓湿润锋的运移;肖茜等^[13]发现高混掺量的生物炭可减缓土壤的水分入渗速度,降低土壤累积入渗量;解倩等^[14]通过研究不同浓度及粒径的生物炭对黄绵土入渗过程的影响,发现生物炭能明显抑制黄绵土中水分的入渗能力,且高浓度及小粒径的抑制作用更强;齐瑞鹏等^[15]通过室内土柱模拟发现,生物炭虽然增强了壤土中水分的入渗能力,却降低了风沙土中水分的入渗能力;李帅霖等^[16]研究3种生物炭施用方式和4种混掺量对土壤入渗的影响发现,生物炭对土壤水分入渗受施用方式和混掺量的双重影响。由此可见生物炭类型、混掺量及施用方式对土壤水分入渗特征有显著影响。

沼液在南方地区多应用于营养贫瘠的红壤,而红壤水分入渗速率大于其他南方典型土壤^[17],造成地下水污染的风险更大。沼液和生物炭配施于土壤能起到互补和协同作用,其中沼液弥补了生物炭养分不足

的问题,生物炭也能够减缓沼液中的养分流失^[18]。目前已有研究中关于生物炭对减缓沼液灌溉下南方红壤水分入渗的影响鲜有报道,而生物炭对土壤水分入渗的影响取决于生物炭的混掺量及施加方式^[11-16]。因此,本研究采用室内土柱模拟试验,设置稻壳炭不同混掺量和不同混掺厚度处理,探究生物炭对减缓黏质砂红壤水分入渗效果的影响,丰富生物炭对土壤水分效应的研究,以期为当地沼液和生物炭的资源化利用提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试红壤采自湖南省岳阳县某果园基地(29°38'41"N, 113°43'35"E),利用随机、多点法采集0~20 cm表层土壤,土样自然风干后清除掉表面的枯枝落叶、碎石等杂质并过2 mm筛。利用比重法测定土壤的颗粒组成,粒径为 $0 \leq d < 0.002$ 、 $0.002 \leq d < 0.020$ 、 $0.02 \leq d < 2.000$ mm的土壤颗粒占比(质量分数)分别为21.5%、10.4%、68.1%,根据国际制土壤质地分类标准该土质为砂质黏壤土。供试水样取自岳阳县某猪场的生猪养殖废水处理并发酵而得的沼液,pH为6.81,电导率为 $8.4 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$,总氮为 $942.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷为 $86.49 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。供试生物炭为河南立泽环保科技有限公司提供的稻壳炭,碳化温度为 500°C ,水分系数为4.8%,有机碳含量为 $450.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH为8.12,灰分含量为10.52%,生物炭研磨后过2 mm筛。

1.2 试验设计及方法

试验于2021年9—11月在湖南岳阳峰岭菁华果园试验基地进行。根据前人研究及预试验结果^[18],本研究共设置3种生物炭混掺量处理(1%、3%和5%)、4种混掺厚度处理(5、10、15 cm和20 cm)和1个对照处理(CK,不混掺生物炭),共计13个处理,每个处理3次重复(表1)。

采用室内一维土柱模拟试验,选用内径为10 cm、

表1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理编号 Treatment number	生物炭混掺厚度 Biochar maxing thickness/cm	生物炭混掺量 Biochar maxing amount/%
CK	0	0
T5A1	5	1
T5A3	5	3
T5A5	5	5
T10A1	10	1
T10A3	10	3
T10A5	10	5
T15A1	15	1
T15A3	15	3
T15A5	15	5
T20A1	20	1
T20A3	20	3
T20A5	20	5

高度为 50 cm 的有机玻璃管,装土高度为 45 cm。为防止土粒从柱底散落并减小空气不流通对入渗的影响,装填前在土柱底部铺设细纱网。试验前将生物炭和红壤混合均匀,根据当地土壤性质控制红壤容重为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。将处理好的土样按设置土柱高度分层填充(每 5 cm 为一层),分层界面处打毛。根据生物炭混掺厚度 5、10、15 cm 和 20 cm,先将未混掺生物炭的红壤填充至土柱高度 40、35、30 cm 和 25 cm 处,再将混掺生物炭的混合土壤分别填入试验土柱,使土柱最终高度均为 45 cm,压实边缘,避免贴壁缝隙形成边际效应。装土完成后,土柱静置 24 h。土柱表层铺设一层防冲滤网,以减轻入渗液对土表的扰动和破坏。在马氏瓶内装入处理好的沼液,供水水头控制在 3.5 cm。入渗过程中使用秒表计时,按先密后疏的原则记录马氏瓶水位高度、湿润锋运移位置及对应的入渗时间,湿润锋运移至土柱 2/3 高度(30 cm)时停止供水。

1.3 入渗模型

为量化描述生物炭掺入对红壤水分入渗特性的影响,采用 Philip、Kostiakov 和 Horton 模型对入渗速率和入渗时间的关系进行拟合。

Philip 模型:

$$f(t) = 0.5st^{-0.5} + f_c \quad (1)$$

式中: $f(t)$ 表示入渗速率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; s 表示吸渗率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-0.5}$, 代表入渗能力; t 表示入渗时间, min ; f_c 表示稳定入渗速率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

Kostiakov 模型:

$$f(t) = Kt^{-n} \quad (2)$$

式中: K 、 n 为模型拟合参数。

Horton 模型:

$$f(t) = f_c + (f_i - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: f_i 表示初始入渗速率, $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$; k 为衰减指数, 无量纲, 表示入渗速率随时间而减少的程度。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 进行数据整理和绘图, 使用 SPSS 22 软件进行统计分析及入渗过程的模型拟合, 使用多重比较中 Duncan 法进行显著性差异分析, 并将均方根误差 ($RMSE$)、决定系数 (R^2) 和模型参数作为评价各模型拟合效果的标准。 $RMSE$ 的计算公式:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (4)$$

式中: n 为样本数; S_i 为模型拟合值; O_i 为实测值。

2 结果与分析

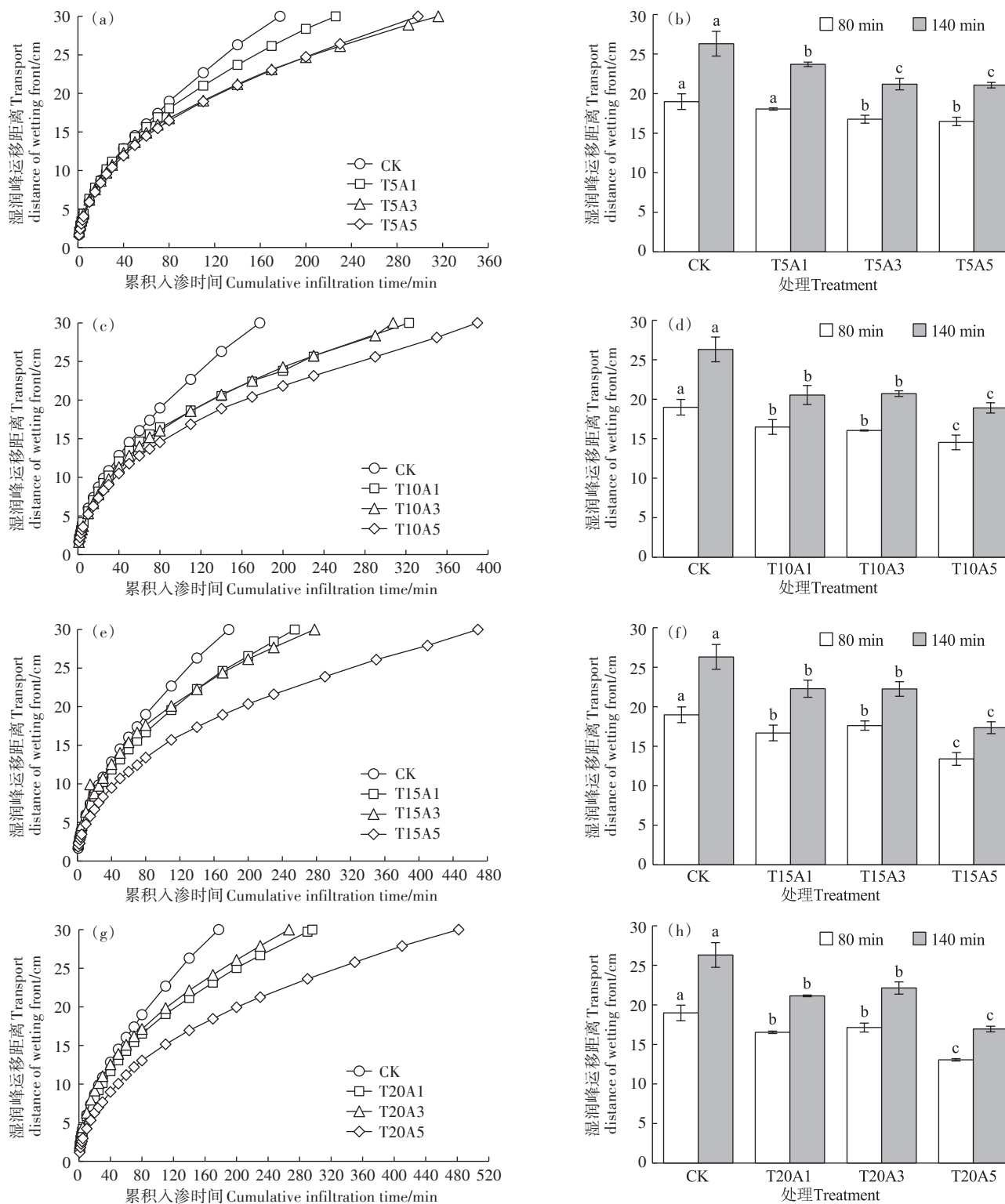
2.1 沼液灌溉下生物炭对红壤湿润锋运移的影响

2.1.1 生物炭混掺量对湿润锋运移速率的影响

由图 1 可知, 湿润锋曲线在入渗初期(0~80 min)增长较快, 入渗中期(80~140 min)增长逐渐缓慢, 入渗后期(140 min 以后)增长趋于稳定, 与 CK 处理相比, 混掺生物炭处理显著减小了湿润峰运移距离。比较不同混掺量对湿润锋运移的影响发现, 入渗初期各处理差异并不显著, 入渗中后期 5 cm 混掺厚度处理湿润锋运移距离表现出 CK>1% 混掺量>3% 混掺量≈5% 混掺量, 10、15 cm 和 20 cm 混掺厚度处理表现出 CK>1% 混掺量≈3% 混掺量>5% 混掺量。湿润锋运移至 30 cm 时, CK 和 1%、3%、5% 混掺量处理平均所用时间分别为 177.333、275.033、291.950、409.717 min, 湿润锋运移速率分别为 0.169、0.109、0.103、0.073 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。5% 混掺量处理入渗总时长较 CK 处理增加 131.04%, 湿润锋运移速率较 CK 处理减小 56.80%, 对红壤水分入渗的减渗效果较好。入渗前期各处理差异较小, 因此对比分析入渗中期和后期生物炭混掺量对湿润锋运移距离的影响(图 1b、图 1d、图 1f、图 1h), 发现 5% 混掺量处理的湿润锋运移距离显著低于 CK 处理和 1%、3% 混掺量处理。以上结果表明生物炭可有效减缓红壤湿润锋运移速率, 大致表现为湿润锋运移速率随生物炭混掺量的增加而减小。

2.1.2 生物炭混掺厚度对湿润锋运移速率的影响

由图 2 可知, 各处理湿润锋变化曲线均处于 CK



(a)、(c)、(e)和(g)分别为生物炭不同混掺量在5、10、15 cm和20 cm处理下的湿润锋变化曲线图;(b)、(d)、(f)和(h)分别为生物炭不同混掺量在5、10、15 cm和20 cm处理下80 min和140 min时的湿润锋运移距离。不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

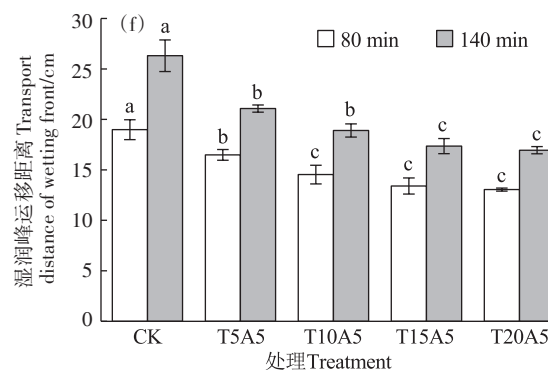
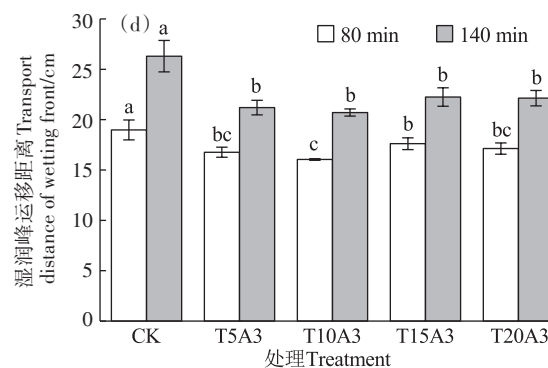
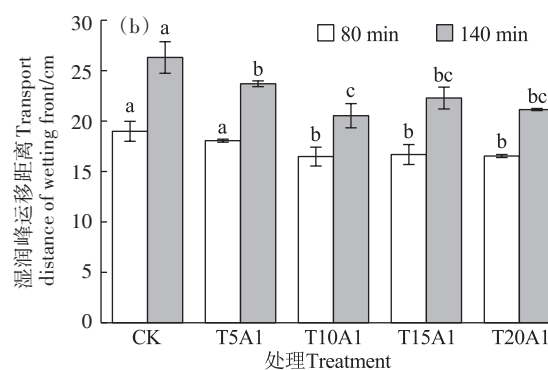
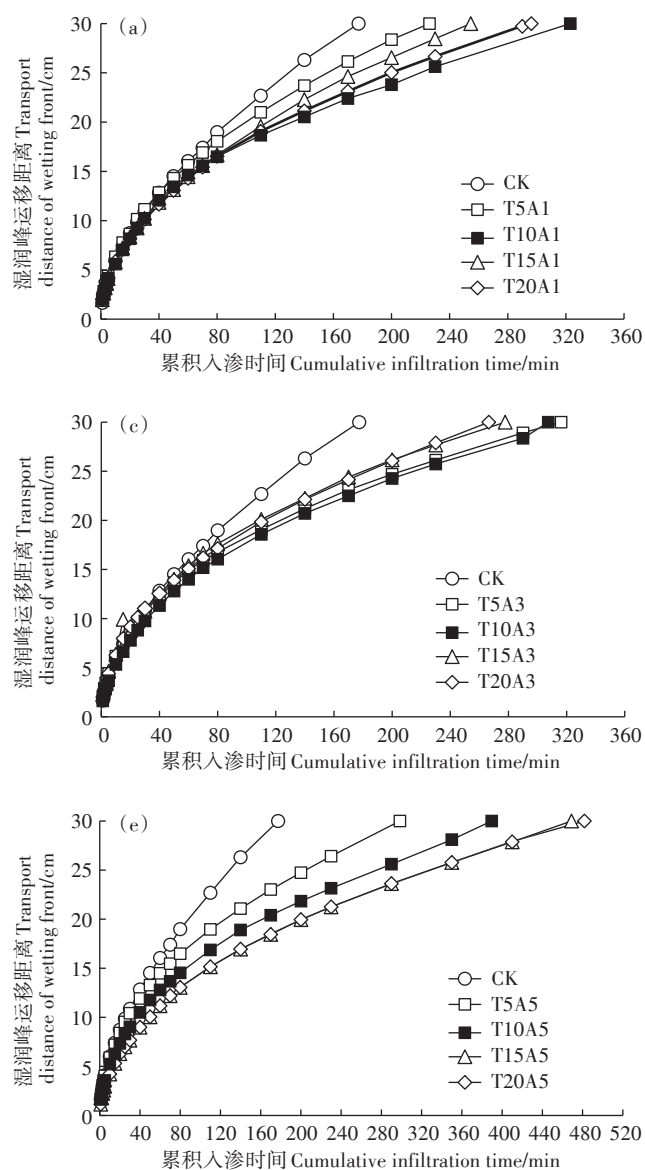
(a)、(c)、(e)、and (g) respectively showed the graphs of the variation of wetting fronts under treatments of 5, 10, 15 cm, and 20 cm for different mixing amounts of biochar; (b)、(d)、(f)、and (h) respectively showed the transport distances of wetting fronts at 80 min and 140 min for different mixing amounts of biochar under treatments 5, 10, 15 cm, and 20 cm. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 生物炭不同混掺量下湿润锋变化曲线

Figure 1 Variation curve of wetting fronts with different maxing amounts of biochar

处理下方,且生物炭不同混掺厚度处理的减渗效果有所差异。生物炭1%混掺量时,10 cm混掺厚度处理累积入渗时间最长,湿润锋运移速率最小,减渗效果较好;3%混掺量时5 cm混掺厚度处理减渗效果较好;5%混掺量时20 cm混掺厚度处理减渗效果较好。比较各混掺量处理的平均值可知,CK和5、10、15、20 cm混掺厚度处理湿润锋运移至30 cm处的平均入渗时长分别为177.333、280.255、340.122、333.743、

348.146 min,湿润锋运移速率分别为0.169、0.107、0.088、0.090、0.086 $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$,其中20 cm混掺厚度处理减渗效果较好。分析红壤入渗中后期湿润锋运移距离(图2b、图2d、图2f)可知,1%和3%混掺量处理湿润锋运移距离随着混掺厚度的增加呈“V”型趋势,10 cm混掺厚度处理最低;5%混掺量处理的湿润锋运移距离随着混掺厚度的增加呈递减趋势,20 cm混掺厚度处理湿润锋运移距离最小。综上所述,生物炭混



(a)、(c)和(e)分别为生物炭不同混掺厚度在1%、3%、5%混掺量处理下的湿润锋变化曲线图;(b)、(d)和(f)分别为生物炭不同混掺厚度在1%、3%、5%混掺量处理下80 min和140 min时的湿润锋运移距离。

(a), (c), and (e) respectively showed the graphs of the variation of the wetting fronts at different maxing thicknesses of biochar under treatments 1%, 3%, and 5%; (b), (d), and (f) respectively showed the transport distances of the wetting fronts at 80 min and 140 min for different maxing thicknesses of biochar under treatments 1%, 3%, and 5%.

图2 生物炭不同混掺厚度下湿润锋变化曲线

Figure 2 Variation curve of wetting fronts with different maxing thickness of biochar

掺厚度对红壤水分入渗的减渗作用在不同混掺量下表现不同,1%混掺量下10 cm混掺厚度处理减渗效果较好,3%混掺量下5 cm混掺厚度减渗效果较好,5%混掺量下20 cm混掺厚度处理减渗效果较好,且减渗效果表现为T20A5>T10A1>T5A3,因此,将T20A5处理作为减渗的最佳组合方式。

2.2 沼液灌溉下生物炭对红壤累积入渗量的影响

2.2.1 生物炭混掺量对累积入渗量的影响

各处理累积入渗量随入渗时间的变化曲线如图3所示,红壤累积入渗量随入渗时间的延长而增加,且不同时刻增加程度有所差异,从入渗前期到后期累积入渗量增加速率表现出逐渐减小到趋于稳定的趋势。由于入渗在140 min时基本达到稳定,为量化生物炭不同混掺量的减渗效果,比较各处理入渗140 min时绝对减渗指标减渗量(ΔI)和相对减渗指标减渗率(η),分别采用如下公式计算:

$$\Delta I = I_0 - I_i \quad (5)$$

$$\eta = (I_0 - I_i) / I_0 \quad (6)$$

式中: I_0 为CK处理的累积入渗量; I_i 为*i*处理的累积入渗量。

1%、3%和5%混掺量处理的减渗量分别为13.15~24.35、11.76~23.71 mm和24.27~40.64 mm,5%混掺量处理明显大于1%和3%混掺量处理;1%、3%和5%混掺量处理减渗率的变化范围为14.72%~27.25%、13.16%~26.53%和27.16%~45.49%,5%混掺量处理绝对减渗量和相对减渗率均高于其他处理,说明5%混掺量处理减渗效果较好。分析生物炭混掺量对入渗各阶段累积入渗量的影响规律发现,入渗前期减渗效果不显著。将80 min和140 min的累积入渗量作为入渗中期和后期的累积入渗量(图3b、图3d、图3f、图3h),可以看出两者趋势大致相同,红壤累积入渗量除5 cm混掺厚度处理表现为CK>1%混掺量>3%混掺量>5%混掺量,其他组处理均表现为CK>1%混掺量≈3%混掺量>5%混掺量。结果表明,红壤累积入渗量随生物炭混掺量的增加呈现出逐渐减小的趋势,5%混掺量处理减渗效果较好。

2.2.2 生物炭混掺厚度对累积入渗量的影响

由图4可知,同一时刻各处理累积入渗量均低于CK处理,表明生物炭可减少红壤累积入渗量,对红壤入渗呈减渗效果。对比分析入渗中后期红壤累积入渗量发现,1%和3%混掺量处理下红壤累积入渗量随着混掺厚度的增加呈“V”型趋势,10 cm混掺厚度处理最小;5%混掺量处理下红壤累积入渗量随着混掺

厚度的增加呈递减趋势,20 cm混掺厚度处理最小。入渗历时140 min时各处理对红壤水分入渗的减渗效果:5、10、15 cm和20 cm处理的减渗量范围为13.15~24.27、23.71~28.64、11.76~36.44 mm和17.68~40.64 mm,减渗率范围为14.72%~27.16%、26.53%~32.06%、13.16%~40.79%和11.96%~45.49%。15 cm和20 cm混掺厚度处理减渗效果变化较大,受生物炭混掺量影响较大。结果表明生物炭可显著降低红壤累积入渗量($P<0.05$),不同混掺厚度在不同混掺量处理下表现出的减渗效果有所差异:1%和3%混掺量时10 cm混掺厚度处理减渗效果较好;5%混掺量时20 cm混掺厚度处理减渗效果较好;红壤累积入渗量表现为CK>T10A1≈T10A3>T20A5,减渗效果表现为T20A5>T10A3≈T10A1。T20A5处理为减渗的最佳组合方式。

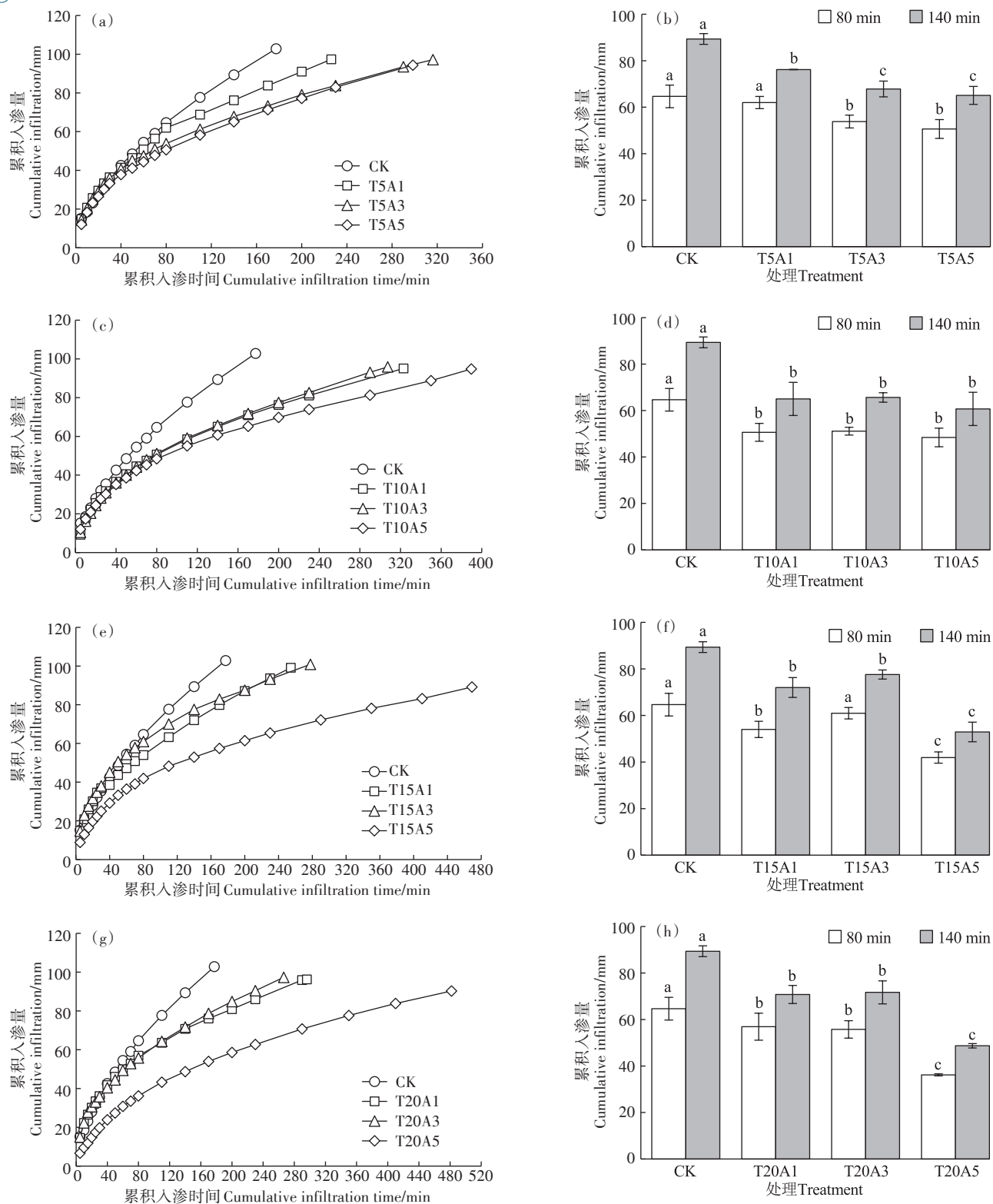
2.3 生物炭不同处理下红壤水分入渗模型拟合

2.3.1 Philip入渗模型拟合结果

Philip模型拟合参数如表2所示。Philip模型的 R^2 在0.986~0.999之间,RMSE在0.013~0.054之间,拟合精度较高。混掺生物炭各处理*s*值与CK处理相比差异显著($P<0.05$)。就不同混掺量而言,5 cm和10 cm混掺厚度处理下*s*值随着生物炭混掺量的增加呈先减后增的趋势;15 cm和20 cm混掺厚度处理*s*值呈先增后减的趋势。就不同混掺厚度而言,1%混掺量处理*s*值随生物炭混掺厚度的增加而上下波动;3%混掺量处理*s*值呈先减后增的趋势;5%混掺量处理*s*值则呈逐渐下降的趋势。这表明生物炭混掺量和混掺厚度对入渗吸渗率有不同程度的影响。而各处理*f_c*值在-0.113~0.245 mm·min⁻¹范围内,大多数处理的*f_c*值与实际入渗速率不符,因此Philip模型不适用于本研究。

2.3.2 Kostiakov入渗模型拟合结果

由表3可知,Kostiakov模型的 R^2 在0.993~1.000之间,RMSE在0.013~0.044之间,拟合精度较高。拟合参数受生物炭混掺量和混掺厚度共同影响。就不同生物炭混掺量而言,*K*值和*n*值的变化趋势不同。5 cm混掺厚度处理下*K*值随生物炭混掺量增加呈递减的趋势;10 cm混掺厚度处理下*K*值呈先减后增的趋势;15 cm和20 cm混掺厚度处理下*K*值呈先增后减的趋势;各处理*K*值大致表现为大于CK处理;而*n*值随生物炭混掺量增加呈先增后减的趋势,各处理*n*值大于CK处理。就不同混掺厚度而言,*K*值和*n*值的变化趋势一致。1%和3%混掺量处理下,*K*值和*n*值均随生物炭混掺厚度增加呈先减后增的趋势,20 cm



(a)、(c)、(e)和(g)分别为生物炭不同混掺量在5、10、15 cm和20 cm处理下的累积入渗量变化曲线图；(b)、(d)、(f)和(h)分别为生物炭不同混掺量在5、10、15 cm和20 cm处理下80 min和140 min时的累积入渗量。

(a), (c), (e), and (g) respectively showed the graphs of cumulative infiltration under treatments 5, 10, 15, and 20 cm for different mixing amount of biochar. (b), (d), (f), and (h) respectively showed the cumulative infiltration at 80 min and 140 min for different mixing amount of biochar under treatments 5, 10, 15, and 20 cm.

图3 生物炭不同混掺量下累积入渗量变化曲线

Figure 3 Variation curve of cumulative infiltration with different biochar incorporation contents

混掺厚度处理最大,不同混掺厚度处理间差异显著($P<0.05$);5%混掺量处理下 K 值和 n 值呈先增后减的趋势,20 cm混掺厚度处理最小。

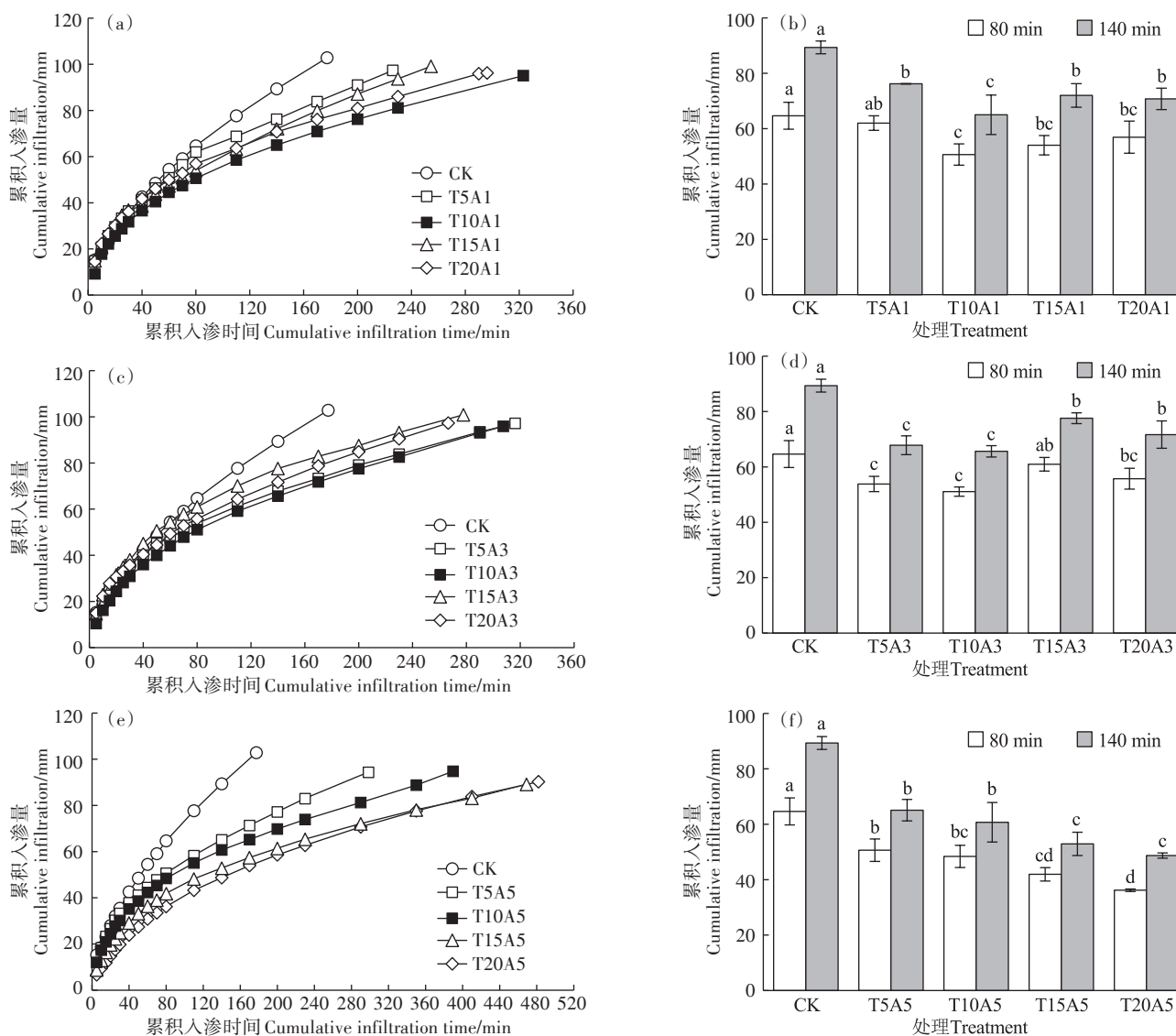
2.3.3 Horton入渗模型拟合结果

由表4可知,Horton模型的 R^2 在0.928~0.986之间, $RMSE$ 在0.058~0.770之间,拟合精度低于Philip模型和Kostiakov模型。在1%混掺量处理下,各参数未表现出明显规律;3%混掺量处理下, f_c 、 f_i 、 k 值均随生物炭混掺厚度的增加呈先减后增的趋势;5%混掺量处理下,各参数随生物炭混掺厚度增加整体呈递减

趋势。各生物炭混掺处理的 f_c 值均显著低于CK处理($P<0.05$),表明生物炭减小了红壤稳定入渗速率,但拟合 f_c 值较实际 f_c 值高,不符合稳渗率实际情况,所以Horton模型不适用于拟合本研究红壤入渗过程。

3 讨论

土壤入渗过程主要受到土壤容重、土壤质地、土壤前期含水量、土壤结构等的影响^[13,17]。本研究红壤入渗过程中的湿润锋运移距离、累积入渗量随入渗时间变化的曲线均呈从陡峭到平缓的趋势,混掺生物炭



(a)、(c)和(e)分别为生物炭不同混掺厚度在1%、3%、5%混掺量处理下的累积入渗量变化曲线图;(b)、(d)和(f)分别为生物炭不同混掺厚度在1%、3%、5%混掺量处理下80 min和140 min时的累积入渗量。

(a), (c), and (e) respectively showed the graphs of cumulative infiltration at different maxing thicknesses of biochar under treatments 1%, 3%, and 5%. (b), (d), and (f) respectively showed the cumulative infiltration at 80 min and 140 min for different maxing thicknesses of biochar under treatments 1%, 3%, and 5%.

图4 生物炭不同混掺厚度下累积入渗量变化曲线

Figure 4 Variation curve of cumulative infiltration with different biochar maxing thickness

处理对红壤水分入渗进程呈减渗效果。入渗初期曲线较陡峭,土壤含水量低,水势梯度较大,入渗水分所受吸力较大,入渗较快,此时生物炭的影响较小,各处理湿润锋运移距离和累积入渗量差异较小;入渗中后期曲线逐渐平缓,土壤含水量较高,基质势减小,入渗水分受到的吸力减小,入渗变慢,此时土壤结构对入渗过程的影响较大,而不同生物炭处理对土壤结构影响存在差异,因此减渗效果不同^[19]。

入渗中后期,生物炭处理下红壤湿润锋运移距离、累积入渗量均低于CK处理,表明生物炭减缓了沼液水分入渗进程,且高混掺量、高混掺厚度处理对红壤沼液入渗的减渗效果较好。李欣怡^[20]通过研究生物炭对沼液入渗过程的影响发现生物炭混掺量越多,

湿润锋推移速度越慢,累积入渗量越小。本试验中生物炭混掺量对沼液入渗的影响研究与李欣怡^[20]的研究结果大致相同。这可能是生物炭的添加增加了土壤小孔隙总体积,减少了中孔隙总体积,降低了土壤的有效孔隙占比,同时生物炭吸附的沼液中的有机悬浮颗粒,可能会堵塞土壤孔隙,使得土壤透水性能变差,从而抑制水分入渗过程,减少累积入渗量,降低入渗速率^[16,21]。齐瑞鹏等^[15]发现杂木黑炭降低了砂土的入渗性能,李帅霖等^[16]发现苹果木炭施于耕层土壤可以减缓湿润锋的下移,这与本研究中生物炭能减缓土壤水分入渗进程的研究结果一致^[13,19-20],这可能是因为生物炭对土壤入渗性能的影响与土壤质地有关,都是生物炭添加到砂质土壤后,土壤结构发生改变,大

表2 Philip模型拟合参数

Table 2 Fitting parameters of Philip model

混掺厚度 Maxing thickness/cm	1% 混掺量 1% maxing amount				3% 混掺量 3% maxing amount				5% 混掺量 5% maxing amount			
	$s/(mm \cdot min^{-0.5})$	$f/(mm \cdot min^{-1})$	R^2	RMSE	$s/(mm \cdot min^{-0.5})$	$f/(mm \cdot min^{-1})$	R^2	RMSE	$s/(mm \cdot min^{-0.5})$	$f/(mm \cdot min^{-1})$	R^2	RMSE
0	10.021d	0.245	0.997	0.025	10.021c	0.245	0.997	0.025	10.021b	0.245	0.997	0.025
5	13.890ab	-0.033	0.999	0.030	13.285b	-0.061	0.998	0.023	11.298a	0.016	0.993	0.048
10	11.593c	-0.020	0.999	0.013	9.529d	0.094	0.987	0.054	11.007a	-0.017	0.999	0.019
15	14.064a	-0.074	0.998	0.038	14.788a	-0.059	0.998	0.027	8.059c	0.046	0.991	0.038
20	13.807b	-0.064	0.996	0.042	14.810a	-0.113	0.997	0.037	5.578d	0.109	0.986	0.033

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

表3 Kostiakov模型拟合参数

Table 3 Fitting parameters of Kostiakov model

混掺厚度 Maxing thickness/cm	1% 混掺量 1% maxing amount				3% 混掺量 3% maxing amount				5% 混掺量 5% maxing amount			
	K	n	R^2	RMSE	K	n	R^2	RMSE	K	n	R^2	RMSE
0	4.647e	0.402d	1.000	0.013	4.647d	0.402e	1.000	0.013	4.647b	0.402d	1.000	0.013
5	6.970c	0.510c	0.999	0.033	6.732c	0.521c	0.998	0.031	5.446a	0.482b	0.994	0.044
10	5.822d	0.507c	0.999	0.015	4.390e	0.439d	0.994	0.038	5.475a	0.503a	0.999	0.021
15	7.516b	0.539b	0.998	0.042	8.288b	0.546ab	0.999	0.027	3.763c	0.456c	0.995	0.028
20	8.120a	0.561a	0.995	0.042	8.784a	0.577a	0.999	0.037	2.480d	0.399d	0.993	0.023

表4 Horton模型拟合参数

Table 4 Fitting parameters of Horton model

混掺厚度 Maxing thickness/cm	1% 混掺量 1% maxing amount					3% 混掺量 3% maxing amount					5% 混掺量 5% maxing amount				
	$f/(mm \cdot min^{-1})$	$f/(mm \cdot min^{-1})$	k	R^2	RMSE	$f/(mm \cdot min^{-1})$	$f/(mm \cdot min^{-1})$	k	R^2	RMSE	$f/(mm \cdot min^{-1})$	$f/(mm \cdot min^{-1})$	k	R^2	RMSE
0	0.720a	2.760c	0.051ab	0.969	0.081	0.720a	2.760c	0.051a	0.969	0.081	0.720a	2.760a	0.051a	0.969	0.081
5	0.609b	3.582a	0.055a	0.964	0.123	0.457cd	3.117b	0.043a	0.964	0.457	0.441b	2.625a	0.039bc	0.976	0.088
10	0.389d	2.063d	0.028c	0.986	0.058	0.409d	2.158d	0.032b	0.968	0.409	0.391b	2.568a	0.041b	0.955	0.118
15	0.525bc	3.452ab	0.049ab	0.972	0.111	0.552b	3.558a	0.046a	0.968	0.552	0.295c	1.755b	0.031cd	0.953	0.089
20	0.471cd	3.243b	0.043b	0.972	0.116	0.522bc	3.659a	0.050a	0.979	0.522	0.274c	1.249c	0.028d	0.928	0.770

孔隙和有效孔隙比例减小,水分运动通道更复杂,从而使入渗性能降低^[10]。齐瑞鹏等^[15]发现杂木黑炭提高了壤土的水分入渗性能。魏永霞等^[22]的研究表明生物炭能提高黑土区土壤水分入渗能力。岑睿等^[23]发现秸秆炭提高了黏壤土水分入渗速率,这与本研究结果相反,可能是由于研究土壤的质地不同,生物炭添加到质地较细的黏壤土后,可能会增加土壤有效孔隙,扩大水分运动通道,从而促进水分入渗^[10,20]。王艳阳等^[24]和李帅霖等^[16]提出添加生物炭使土壤以双层或多层的结构存在,与下层均质土壤形成层状结构,这与本研究情况相似,层状结构的不同孔隙结构导致土层含水率和水势梯度不同,从而使入渗性能发生改变。上层土壤厚度越大,水分入渗至炭土交界面的时间越长,入渗率变小,单位时间内提供给下层土壤的水量减少,入渗量也相应减少,这与吴叔赢等^[25]对层状土壤中上层土壤厚度越大稳渗率越小的研究结果基本一致。

本研究采用3种模型对红壤入渗过程进行拟合,Philip模型拟合精度较高,但其 f_c 值与现实意义不符,这可能是室内模拟试验入渗时间较短造成了模拟值和实测值不符,因此Philip模型不适用于本研究,其较为适用于初始含水量均匀分布的均质土壤的一维垂直入渗过程。Kostiakov模型拟合精度较高且各参数符合实际情况,拟合效果较好。Horton模型拟合精度低于Philip模型和Kostiakov模型,同时拟合参数 f_c 值较高,不符合稳渗率实际情况。由此可见Kostiakov模型最适合分析沼液灌溉下混掺生物炭的红壤水分入渗过程^[22-25]。

本研究通过稻壳炭不同混掺量和不同混掺厚度来确定生物炭对红壤水分入渗的减渗效果,还具有一定的局限性,由于生物炭的性质受到原材料种类、热解温度、热解时间等因素的影响,不同生物炭对红壤水分入渗影响存在差异^[12]。今后将开展不同种类生物炭对减缓红壤水分入渗的影响研究,为生物炭降低沼液水分渗漏过快造成地下水污染的风险提供科学依据。

4 结论

(1)沼液灌溉条件下,混掺生物炭处理对减缓红壤水分入渗效果明显,可降低沼液在土壤中入渗过快而造成地下水污染的风险。

(2)以湿润锋运移速率和减渗指标为减渗效果评价指标,1%和3%生物炭混掺量下10 cm混掺厚度处

理表现出的减渗效果较好;5%生物炭混掺量下20 cm混掺厚度处理表现出减渗效果较好。综合比较,5%混掺量、20 cm混掺厚度处理减渗效果最好。

(3)利用Philip模型,Kostiakov模型和Horton模型对沼液灌溉下红壤水分入渗过程进行模拟,其中Kostiakov模型拟合效果较好。

参考文献:

- [1] HU Y N, CHENG H F, TAO S. Environmental and human health challenges of industrial livestock and poultry farming in China and their mitigation[J]. *Environment International*, 2017, 107(11):111-130.
- [2] 吴树彪,崔畅,张笑千,等.农田施用沼液增产提质效应及水土环境影响[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(8):118-125, 179. WU S B, CUI C, ZHANG X Q, et al. Effect of biogas slurry on yield increase, quality improvement, water and soil environment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8):118-125, 179.
- [3] 刘聪,郑瑶琪,刘爽,等.秋闲期沼液施用对黑土区土壤氮素损失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(11):2528-2536. LIU C, ZHENG Y Q, LIU S, et al. Effects of biogas slurry application on nitrogen loss soil in black soil area during the autumn fallow period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(11):2528-2536.
- [4] 周炜,孙国峰,王鑫,等.沼液与有机肥配施条件下氮损失风险的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8):1743-1750. ZHOU W, SUN G F, WANG X, et al. Risk of nitrogen loss under the combined application of biogas slurry and organic fertilizer[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8):1743-1750.
- [5] XU G, LV Y, SUN J, et al. Recent advances in biochar applications in agricultural soils: Benefits and environmental implications[J]. *Clean: Soil Air Water*, 2012, 40(10):1093-1098.
- [6] 袁金华,徐仁扣.生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2011, 20(4):779-785. YUAN J H, XU R K. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):779-785.
- [7] CHAN K Y, VAN ZWIETEN L, MESZAROS I, et al. Using poultry litter biochars as soil amendments[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2008, 46:437-444.
- [8] 张晓玲,陈效民,陶朋闯,等.施用生物质炭对旱地红壤有机碳矿化及碳库的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(2):191-196. ZHANG X L, CHEN X M, TAO P C, et al. Effects of biochar on soil organic carbon mineralization and carbon pool in upland red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2):191-196.
- [9] GLASER B, LEHMANN J, ZECH W. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(4):219-230.
- [10] 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 H Y, HE X S, GENG Z C, et al. Effects of biochar and biochar-based nitrogen fertilizer on soil water-holding capacity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(24):207-213.

- [11] 包维斌, 白一茹, 赵云鹏, 等. 生物炭添加对宁夏中部旱区土壤水分入渗及持水性的影响[J]. 土壤通报, 2018, 49(6): 1326-1332. BAO W B, BAI Y R, ZHAO Y P, et al. Effect of biochar on soil water infiltration and water holding capacity in the arid regions of middle Ningxia[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(6): 1326-1332.
- [12] 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. ZHAN S T, SONG M D, LI Z P, et al. Effects of different straw biochars on soil water infiltration and evaporation[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 294-300.
- [13] 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 Q, ZHANG H P, SHEN Y F, et al. Effects of biochar on water infiltration, evaporation and nitrate leaching in semi-arid loess area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 128-134.
- [14] 解倩, 王丽梅, 齐瑞鹏, 等. 生物炭对黄绵土水分入渗和持水性能的影响[J]. 地球环境学报, 2016, 7(1): 65-76, 86. XIE Q, WANG L M, QI R P, et al. Effects of biochar on water infiltration and water holding capacity of loessial soil[J]. *Journal of Earth Environment*, 2016, 7(1): 65-76, 86.
- [15] 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 R P, ZHANG L, YAN Y H, et al. Effects of biochar addition into soils in semiarid land on water infiltration under the condition of the same bulk density[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8): 2281-2288.
- [16] 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 S L, WANG X, WANG S, et al. Effects of application patterns and amount of biochar on water infiltration and evaporation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(14): 135-144.
- [17] 胡传旺, 王辉, 刘常, 等. 南方典型土壤水力特征差异性分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 97-102. HU C W, WANG H, LIU C, et al. Different analysis of hydraulic characteristics of typical soils in south China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(2): 97-102.
- [18] 陈姣, 吴凤平, 王辉, 等. 生物炭对南方红壤和水稻土水力学特性的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 73-80. CHEN J, WU F P, WANG H, et al. The effects of biochar amendment on hydraulic properties of red and paddy soils in southern China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(9): 73-80.
- [19] 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. WANG Y Q, BAO W B, ZHAO Y P, et al. Amending soil by biochar reduces the ability of the soil to infiltrate water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2018, 37(12): 60-65.
- [20] 李欣怡. 生物炭配施沼液对土壤水平入渗特征及理化性质的影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020: 21-24. LI X Y. Study on the effect of biochar combined with biogas slurry on horizontal infiltration characteristics and physical and chemical properties[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020: 21-24.
- [21] HANKS R J, BOWERS S A. Numerical solution of the moisture flow equation for infiltration into layered soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1962, 26(6).
- [22] 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. WEI Y X, WANG H, LIU H, et al. Effect of biochar on soil moisture and its infiltration performance in black soil area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 290-299.
- [23] 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 R, QU Z Y, SUN G F, et al. Effects of biochar on the physical properties and infiltration of clay loam[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(6): 284-289.
- [24] 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 Y Y, WEI Y X, SUN J P, et al. Soil water infiltration and distribution characteristics under different biochar addition amount[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(8): 113-119.
- [25] 吴叔赢, 张建丰, 高瑞, 等. 上层土壤厚度对模拟指流水分运动的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 169-173. WU S Y, ZHANG J F, GAO R, et al. Effect of soil depth on water movement in simulated finger flow[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(10): 169-173.

(责任编辑:朱晓昱)