

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.021

余辉,方荣杰,余佳峻,等. 生物炭对西南喀斯特区石灰土水分入渗特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(5):225-235.

YU Hui, FANG Rongjie, YU Jiajun, et al. Effect of biochar on water infiltration characteristics of limestone soil in southwest karst area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 225-235.

生物炭对西南喀斯特区石灰土水分入渗特征的影响

余辉^{1,2,3,4}, 方荣杰^{1,2}, 余佳峻^{1,2,3,4}, 徐勤学^{1,2}, 敖利满^{1,2}, 付智勇^{3,4}, 陈洪松^{3,4}

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541006; 2. 桂林理工大学广西岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541006; 3. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 湖南 长沙 410125; 4. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

摘要: [目的] 为探究玉米秸秆生物炭对西南喀斯特区石灰土水分入渗特征的影响。[方法] 设置 5 个生物炭施量梯度(0, 2%, 4%, 6% 和 8%)、3 种砾石含量土壤(10%, 20%, 30%) 和无砾石土壤, 进行一维积水入渗试验。[结果] (1) 随生物炭施量增加, 除 10% 砾石含量外, 湿润锋运移深度均逐渐减少, 且添加生物炭对含砾石土壤的抑制效果弱于无砾石情况。以 60 min 为例, 无砾石时比未施生物炭(CK) 减少 10%~27%, 3 种含砾石情况则分别减少 1%~17%, 1%~16%, 1%~21%, 其中施量为 8% 时, 各处理的运移深度最小。(2) 生物炭减少石灰土的累积入渗量。无砾石时的累积入渗量比 CK 减少 9%~27%, 而含砾石时比 CK 减少 11%~21%, 其中砾石和生物炭施量分别为 30% 和 8% 时累积入渗量最少, 2% 施量均无显著影响。(3) 随生物炭施量增加, 无砾石土壤初始入渗率和稳定入渗率逐渐减小; 而对含砾石土壤稳定入渗率的影响比初始入渗率更显著。(4) 与 Philip 模型相比, Horton 和 Kostikov 模型均能用于拟合本研究中土壤水分入渗过程, 但 Horton 模型的拟合趋势与实际结果更符。[结论] 玉米秸秆生物炭有效减少喀斯特区石灰土的土壤水分入渗, 含砾石条件下玉米秸秆生物炭减少土壤水分入渗效果弱于无砾石的均质土。研究结果可为西南喀斯特区石灰土降雨入渗调控、土壤水分管理提供参考。

关键词: 生物炭; 喀斯特; 土壤水分; 砾石; 入渗特征

中图分类号: S152.7 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242-(2024)05-0225-11

Effect of Biochar on Water Infiltration Characteristics of Limestone Soil in Southwest Karst Area

YU Hui^{1,2,3,4}, FANG Rongjie^{1,2}, YU Jiajun^{1,2,3,4}, XU Qinxue^{1,2},

AO Liman^{1,2}, FU Zhiyong^{3,4}, CHEN Hongsong^{3,4}

(1. Guangxi Key Laboratory of Theory and Technology for Environmental Pollution Control, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 2. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006, China; 3. Key Laboratory of Agra-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 4. Huanjiang Observation and Research Station for Karst Ecosystems, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the effect of corn straw biochar on water infiltration characteristics of calcareous soil in southwest karst area. [Methods] Five biochar application gradients (0, 2%, 4%, 6%, and 8%), three gravel content soils (10%, 20%, 30%) and no gravel soil were set up to carry out one-dimensional water infiltration test. [Results] (1) With the increase of biochar application rate, except for 10% gravel content, the migration depth of the wetting front gradually decreased, and the inhibition effect of adding biochar on gravel soil was weaker than that on non-gravel soil. Taking 60 min as an example,

收稿日期: 2024-04-02 修回日期: 2024-05-13 录用日期: 2024-06-11 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-09-03

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1300702); 广西重点研发项目 (桂科 AB22035058)

第一作者: 余辉 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: 860823387@qq.com

通信作者: 徐勤学 (1982—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持与农业生态研究。E-mail: xqx@glut.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

compared with CK (without gravel), it was reduced by 10%~27%, and the three gravel conditions were reduced by 1%~17%, 1%~16%, and 1%~21%, respectively. When the application amount was 8%, the migration depth of each treatment was the smallest. (2) Biochar reduced the cumulative infiltration of lime soil. The cumulative infiltration amount without gravel was 9%~27% lower than that of CK, while that with gravel was 11%~21% lower than that of CK. Among them, the cumulative infiltration amount was the least when the amount of gravel and biochar was 30% and 8%, respectively, and the amount of 2% had no significant effect. (3) With the increase of biochar application rate, the initial infiltration rate and stable infiltration rate of gravel-free soil decreased gradually. The effect of biochar on the stable infiltration rate of gravel soil is more significant than the initial infiltration rate. (4) Compared with the Philip model, both the Horton and Kostiakov models can be used to fit the soil water infiltration process in this study, but the fitting trend of the Horton model is more consistent with the actual results. [Conclusion] Corn straw biochar presents a promising solution for mitigating soil water infiltration in calcareous soil within karst regions. The distinguishing factor lies in the observation that the efficacy of corn straw biochar in mitigating soil water infiltration is less pronounced under gravel-infused conditions compared to homogeneous soil devoid of gravel. These findings offer valuable insights for the regulation of rainfall infiltration and effective soil moisture management in limestone-rich soils across the southwest karst landscape.

Keywords: biochar; karst; soil moisture; gravel; infiltration characteristics

Received: 2024-04-02

Revised: 2024-05-13

Accepted: 2024-06-11

Online(www.cnki.net): 2024-09-03

水分入渗是降水—地表水—土壤水相互转化的重要环节,也是降水转化为土壤水并供给植物吸收利用的重要途径^[1]。我国西南喀斯特区是世界上喀斯特连续面积分布最广的生态脆弱区,该地区广泛分布的石灰土土层浅薄,土壤蓄水能力弱,加之该地区强烈的岩溶作用,大部分的降雨通过土壤快速渗漏,进入地下河,无法被植物吸收利用,生态系统十分脆弱^[2]。水是制约这一脆弱生态系统良性发展的重要因素^[3]。因此,在喀斯特地区治理石灰土的水分快速漏失,从而有效利用稀缺的水资源是该地区生态恢复重建的关键,也是喀斯特地区水土保持工作的重要内容。

近年来,有学者^[4]发现,生物炭是一种良好的土壤改良剂,在水土保持领域中具有广阔的应用前景。生物炭是在无氧或缺氧环境中经过高温裂解的产物,由于其较为发达的孔隙结构和较强的离子吸附交换能力,以及较大的比表面积^[5-6],已被应用于农业土壤^[7],以改善土壤养分循环、土壤结构和土壤水分下渗等不同方面的土壤功能^[8-9],特别是生物炭对土壤水分运动过程的影响引起众多学者的关注。有研究^[10]表明,在土壤中添加生物炭后,通过改变土壤孔隙数量和结构特征,使土壤水分通道变得曲折复杂,从而降低土壤水分的入渗能力,其表面富含官能团也可增强土壤对水的吸持力,增加土壤的保水性。然而,一些研究人员得出不同的结论,如黄成真等^[11]在

盐渍土中施加生物炭后发现其反而能促进大孔隙的形成,进而增强土壤水分的入渗。研究结果的差异表明,生物炭对土壤水分入渗的影响非常复杂^[12]。造成差异的原因众多,其中包括生物炭本身的粒径、施量、种类及土壤质地等多种因素的影响^[13-15]。对于土质特殊的喀斯特地区,FAN等^[16]通过模拟降雨试验发现,生物炭能改变土壤孔隙结构,降低土壤的入渗能力;毛天旭等^[17]研究表明,生物炭同样能抑制喀斯特坡耕地的黄壤的水分下渗,且大粒径生物炭的抑制作用显著小于小粒径的生物炭。表明生物炭在干旱频发的喀斯特地区,对减少土壤水分的快速渗漏具有重要意义。利用生物炭减少土壤水分漏失可能同样适用于我国西南喀斯特区广泛分布的石灰土中,但目前类似的研究仍鲜有报道。

事实上,石灰土因其成土的母质岩性及人类耕作活动等的影 响,土壤中存在大量砾石,土壤砾石含量高也是作为区别非喀斯特地区的一大特征^[18-19]。砾石对土壤入渗过程有明显影响,与砾石形态、含量、分布及其他环境因素有关。目前砾石对土壤水分入渗过程影响的研究结论并不统一。CHEN等^[20]研究表明,在喀斯特坡地土壤中含有的大量砾石可能促进土壤水分的入渗;杨艳芬等^[21]研究表明,含砾石土壤的累积入渗量和湿润锋运移速度均小于无砾石土壤,且随砾石含量增加有 1 个转折点;叶瀛韬等^[22]研究发现,砾石对土壤入渗过程的影响随施量的增加,不

是单一的抑制或者促进,而是存在1个阈值。在含砾石的土壤中,入渗性能因为砾石的存在而与均质土壤有所差别。因此,在探究生物炭在喀斯特地区石灰土中的适用性时,砾石是不容忽视的。

目前关于生物炭对土壤入渗性能影响的研究大多以黄土和黑土等这类单一的均质土壤为主,少数的关于生物炭对喀斯特地区土壤水分入渗过程的影响研究往往忽略砾石的存在。施用生物炭缓解喀斯特地区石灰土快速渗漏的适用性目前尚不明确,尤其是喀斯特地区普遍存在的含砾石石灰土这类结构性差的非均质土壤入渗性能的影响未得到证实。基于此,本研究选取西南喀斯特区典型的石灰土和石灰岩,以及较高性价比的玉米秸秆生物炭,通过垂直一维水分入渗试验,比较各砾石含量下不同施量生物炭对土壤入渗过程的影响,明确生物炭对含砾石石灰土的入渗特征的影响,以期对西南喀斯特区石灰土土壤改良和土壤水分保持提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤取自广西壮族自治区桂林市灵川县海洋乡水牛厄(25°16'51"N,110°33'46"E),该取样区域属于典型的喀斯特峰丛坡地,年平均气温17.5℃,年平均降雨量约为1645mm,属于亚热带季风气候^[23]。土壤中砾石含量高,土层浅薄,土壤属于喀斯特地区典型的石灰土。取样点位于下坡位,坡度约30°,取土深度为0—20cm,土壤的初始含水率约为18%,土壤体积质量为1.19g/cm³。待取回的土壤自然风干后,剔除里面残留的石块和植物的根系,并过2mm筛备用。使用Mastersizer 3000型激光粒度仪测定试验所用土壤的机械组成,其中,砂粒、粉粒和黏粒分别为36.7%,56.6%和6.7%,根据国际制土粒分级标准的划分^[24],属于粉砂质黏壤土。试验所用砾石为当地的大块石灰岩经过破碎开采,然后将开采后剩余的岩石碎屑通过筛分、清洗、烘干后使用,密度约为2.70g/cm³,透水性极弱,可忽略不计。

试验所用的玉米秸秆生物炭购于河南星诺环保科技有限公司,该生物炭的烧制温度为500℃,有机碳质量分数为82.0%,氮质量分数为1.4%~1.7%,速效磷质量分数为900~1600mg/kg,速效钾质量分数为14~49g/kg,灰分质量分数为17.2%,比表面积为693m²/g,pH为7~10。生物炭经研磨后,过1mm孔筛备用。

1.2 试验设计与方法

室内模拟试验于2023年5—6月进行,在砾石质量分数为0,10%,20%,30%的土壤中分别添加质量比

为0,2%,4%,6%,8%的生物炭,共20个处理,每种处理3个重复。其中,砾石比例依据前期对喀斯特坡面砾石的调查结果^[25],选用粒径为2~5,5~10mm以1:5的比例添加至土样中。本试验设置无生物炭施加(0)的处理为对照(CK)。试验选用内半径为7.5cm、高为60cm的透明有机玻璃柱,土柱侧面贴有刻度尺,用于湿润锋的记录,底部安装有通气阀门,以减少空气压力对土壤水分入渗的影响。在装土前,在土柱底部放置1cm厚的砾石和1层滤纸,用于防止土壤颗粒的流失,为减少土柱边壁的影响,在土柱内壁涂抹1层凡士林。然后,将土壤、生物炭及砾石按照质量比混合均匀后,按照设计的细粒体积质量1.20g/cm³,每5cm为1层装填入土柱,每层装填土之间谨慎打毛,保证土层间不出现分层。上层20cm土壤均匀混有生物炭,20cm以下土壤不施加生物炭,整个土柱均混有砾石,填土的总高度35cm(图1)。土柱装填完毕后,在土壤表面放1层滤纸,以防止冲刷破坏土壤表面,最后将装好的土柱在室温下静置3天。

采用一维定水头垂直积水入渗试验测定土壤水分入渗特性^[26]。入渗的装置主要包括试验土柱、马氏瓶(内径10cm、高60cm)和固定支架。马氏瓶自动供水并控制恒定2cm水头。为保证湿润锋推进的同时尽快达到恒定的水头,试验开始时迅速向每个土柱中加入350mL水,并同步开始马氏瓶供水。累积入渗量和湿润锋运移深度按照由密至疏(0~10min间隔1min,10~30min间隔2min记录1次,而后间隔5min)的原则记录,当湿润锋推进至土柱底端时停止记录,整个试验过程中试验室的温度为16℃,并且整个试验持续时间短,可忽略蒸发对试验结果的影响。

1.3 数据处理

试验中的所有数据均是各处理重复测定的平均值,由于试验所用马氏瓶的内半径一致,因此用马氏瓶中水深变化来反映累积入渗量^[27],单位为cm。采用Excel 2021进行试验数据整理,SPSS 27.0软件进行单因素方差分析、主效应分析和显著性检验($p < 0.05$),并采用Origin 2023软件作图。

为进一步研究不同施量生物炭对土壤入渗过程的影响,采用Philip模型、Kostiakov模型和Horton模型对土壤水分入渗速率随时间变化的关系进行拟合^[17]。

Philip入渗公式为:

$$F(t) = 0.5St^{-0.5} + A \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为入渗速率(cm/min); t 为入渗历时(min); S 为吸渗率(cm/ $t^{-0.5}$); A 为稳定入渗率(cm/min)。

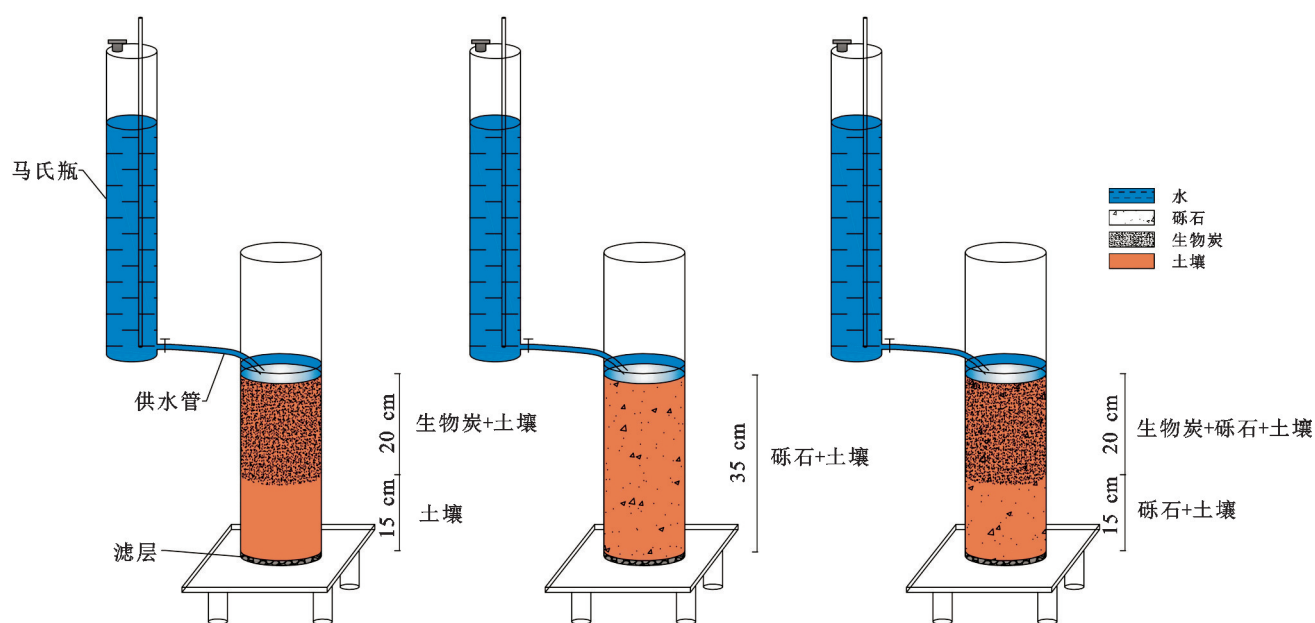


图 1 室内一维定水头垂直入渗试验装置

Fig.1 Indoor one-dimensional constant head vertical infiltration test device

Kostiakov 入渗公式为:

$$F(t) = at^{-\alpha} \quad (2)$$

式中: $F(t)$ 为入渗速率 (cm/min); t 为入渗历时 (min); 参数 a 、 α 为根据试验求得的模型参数;

Horton 入渗公式为:

$$F(t) = f_c + (f_1 - f_c)e^{-bt} \quad (3)$$

式中: $F(t)$ 为入渗速率 (cm/min); t 为入渗历时 (min); f_1 为初始入渗率 (cm/min); f_c 为稳定入渗率 (cm/min); b 为试验求得的参数。

2 结果与分析

2.1 生物炭施量对石灰土湿润锋运移的影响

生物炭施量对各砾石质量分数石灰土湿润锋运移过程产生影响(图 2),各处理湿润锋的一维垂向运移深度均随入渗时间而逐渐增加,但因砾石质量分数和生物炭施量的不同,各处理间湿润锋运移深度随时间变化特征有所差异。在无砾石土壤中,4 种生物炭施量均显著减缓湿润锋的运移 ($p < 0.05$),相同时刻土壤湿润锋运移深度表现为 $8\% < 6\% < 4\% < 2\% < \text{CK}$ 。以 60 min 为例,无砾石土壤的湿润锋运移深度比 CK 减少 10%~27%。在含砾石的土壤中,3 种砾石条件下湿润锋的运移距离均显著低于无砾石土壤,表现为 $30\% < 20\% < 10\% < 0$;在含砾石土壤中添加生物炭后,生物炭同样延缓湿润锋的运移,但影响程度因砾石的不同而有所差异。10%砾石条件下,表现为 $8\% < 4\% < 6\% < 2\% < \text{CK}$,8%施量处理与 CK 差异显著 ($p < 0.05$);在 20%和 30%砾石的情况下,均表现为 $8\% < 6\% < 4\% < 2\% < \text{CK}$,其中含砾石 20%时,6%

和 8%施量处理与 CK 差异显著,含砾石 30%时除 2%外,各施量处理均与 CK 存在显著差异。随砾石的质量分数增加,湿润锋的运移深度分别减少 1%~17%,1%~16%,1%~21%。与无砾石土壤相比,各生物炭施量下湿润锋运移深度的减少量均表现为无砾石土壤 > 含砾石土壤。

2.2 生物炭施量对石灰土累积入渗量的影响

从图 3 可以看出,不同砾石条件下,生物炭施量对土壤累积入渗过程的影响较为一致,随入渗时间的增加,土壤累积入渗量均呈增加趋势,但同一入渗历时内,各处理间累积入渗量存在差异。在无砾石条件下,各生物炭施量处理下的累积入渗量与时间的变化曲线明显置于 CK 之下,入渗 60 min 时,各处理均进入入渗稳定阶段,随生物炭施量的增加,累积入渗量比 CK 分别减少 9%,12%,16%和 27%。在含砾石的条件下,各砾石条件下土壤累积入渗量均显著低于无砾石土壤,同时间内比无砾石土壤分别减少 13%,28%和 33%;不同砾石条件下,生物炭施量土壤累积入渗过程的影响存在差异。与 CK 相比,在砾石为 10%的条件下,仅 8%施量的生物炭明显减少土壤累积入渗量 ($p < 0.05$),比 CK 减少 19%。在砾石为 20%的条件下,6%和 8%生物炭施量下土壤累积入渗量分别减少 12%,18%。当砾石达到 30%时,除 2%施量外,其他施量处理均显著抑制土壤累积入渗过程 ($p < 0.05$),随生物炭施量的增加,累积入渗量分别减少 13%,17%,21%。与无砾石土壤相比,生物炭在砾石为 10%和 20%的砾石土壤中对累积入渗量的减少比例更小,而在 30%砾石土壤中无规律。

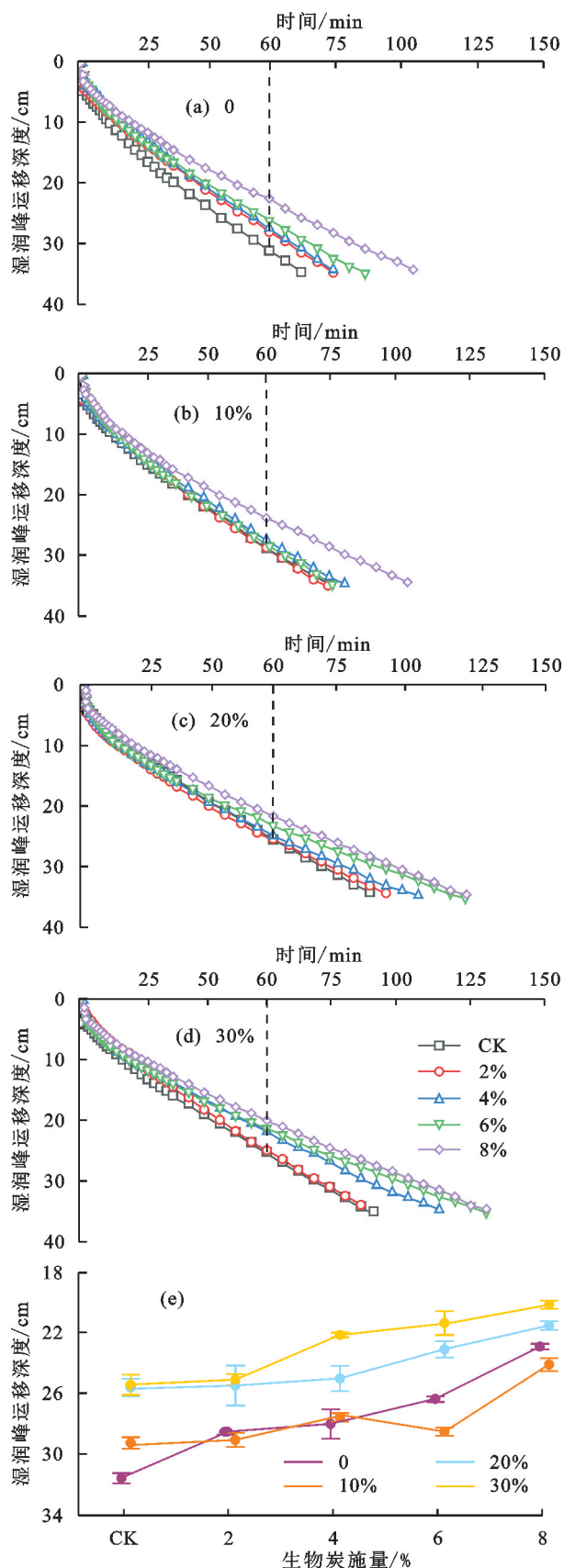


图2 不同施量生物炭对湿润锋进程的影响

Fig.2 Effects of different amounts of biochar on the wetting front process

2.3 生物炭施量对石灰土水分入渗参数的影响

在各砾石石灰土中添加不同施量的生物炭处理下

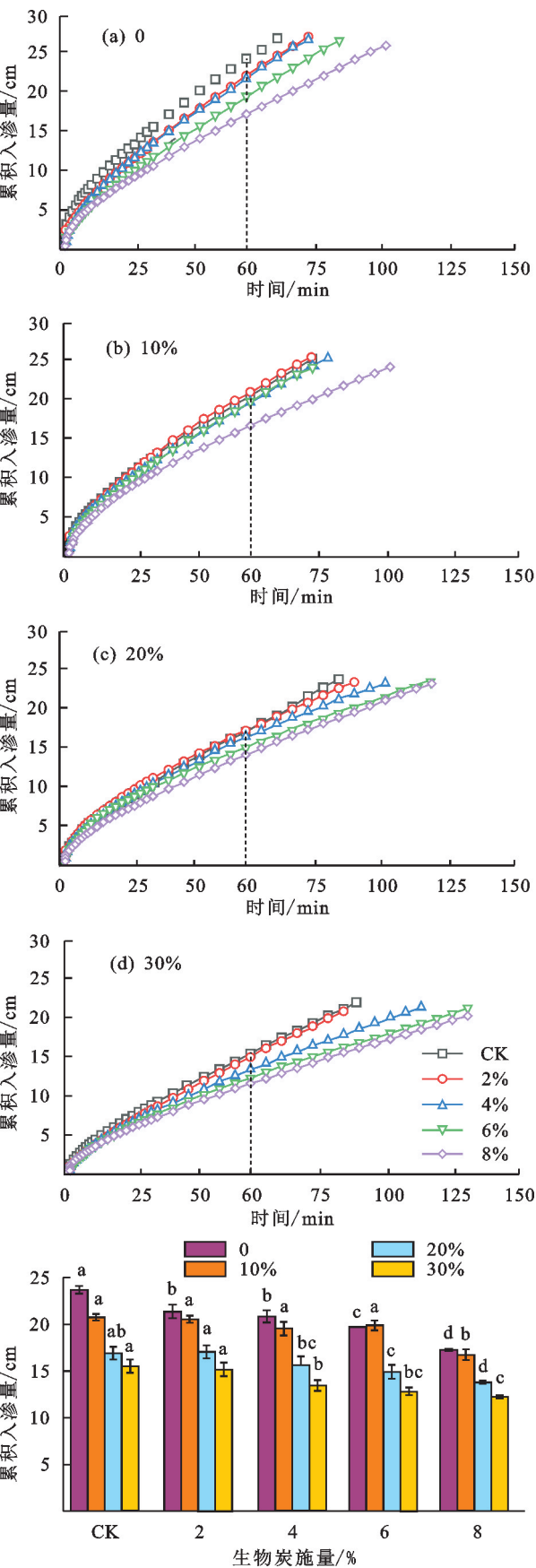
土壤初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率的变化见表1和图4。土壤初始入渗率较高,10 min内入渗率大幅度降低,随时间推移逐渐趋于稳定。在无砾石土壤中,不同生物炭施量下初始入渗率和平均入渗率显著低于CK($p < 0.05$),表现为 $8\% < 6\% < 4\% < 2\% < \text{CK}$,2%施量处理显著高于6%和8%施量处理,其余施量间无显著差异($p > 0.05$);除2%施量外,其余施量下的稳定入渗率显著低于CK,表现为 $8\% < 6\% < 4\% < \text{CK}$,各施量间无显著差异($p > 0.05$)。在含砾石土壤中,与无砾石土壤间平均入渗率和稳定入渗率均存在显著差异($p < 0.05$),表现为 $0 > 10\% > 20\% > 30\%$,各砾石间也存在显著差异;20%和30%砾石下初始入渗率显著低于无砾石土壤,表现为 $0 > 20\% > 30\%$,30%砾石显著低于20%砾石。

在含砾石的条件下,不同生物炭施量下初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率均因砾石的不同而存在差异。对于初始入渗率而言,10%砾石土壤中各生物炭施量处理显著低于CK($p < 0.05$),各施量处理间无显著差异($p > 0.05$);20%和30%砾石的条件下,各施量生物炭均无显著影响。对于平均入渗率而言,10%砾石条件下,6%和8%施量处理显著低于CK,表现为 $8\% < 6\% < \text{CK}$,2种施量间无显著差异;20%和30%砾石条件下,8%施量处理下显著低于CK。对稳定入渗率而言,10%砾石条件下,8%施量处理下显著低于CK;20%砾石条件下,6%和8%施量处理显著低于CK,表现为 $8\% < 6\% < \text{CK}$,2种施量间无显著差异;30%砾石条件下,除2%施量处理外,其余施量处理均显著低于CK,表现为 $8\% < 6\% < 4\% < \text{CK}$,3种施量处理间无显著差异。在同一生物炭施量下,不同砾石土壤初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率具不同的影响效果。从整体来看,未添加生物炭处理比施加生物炭处理更为显著。

由表2可知,砾石和生物炭施量及二者交互作用效应对石灰土的初始入渗率、平均入渗率有显著影响,砾石和生物炭施量对石灰土稳定入渗率均有显著影响,二者交互作用下影响不显著。 F 检验结果表明,砾石对各入渗参数影响最大,生物炭添加量次之,二者之间的交互效应影响最小。

2.4 石灰土水分入渗过程的拟合

采用 Philip 模型、Horton 模型和 Kostikov 模型分别对土壤入渗速率与时间之间的关系进行拟合(表3)。3种模型拟合的决定性系数(R^2)均 > 0.814 ,说明3种入渗模型可以较好地模拟不同生物炭施量对各砾石土壤入渗速率的变化过程。



注：图柱上方不同小写字母表示不同生物炭施量差异显著($p<0.05$)。

图 3 不同施量生物炭对累积入渗量的影响

Fig.3 Effects of different amounts of biochar on accumulative infiltration

表 1 不同处理下土壤水分入渗特征参数
Table 1 Characteristic parameters of soil water infiltration under different treatments

砾石质量 分数/%	生物炭 施量/%	初始入渗率/ (cm·min ⁻¹)	平均入渗率/ (cm·min ⁻¹)	稳定入渗率/ (cm·min ⁻¹)
0	CK	0.77±0.03Aa	0.56±0.02Aa	0.36±0.0Aa
	2	0.62±0.01Ba	0.46±0.01Ba	0.30±0.01ABa
	4	0.59±0.03BCa	0.44±0.02BCa	0.28±0.01Ba
	6	0.54±0.04Ca	0.41±0.04Ca	0.27±0.05Ba
	8	0.54±0.05Ca	0.40±0.02Ca	0.26±0.06Ba
10	平均值	0.61±0.03	0.45±0.02	0.29±0.03
	CK	0.66±0.06Ab	0.46±0.02Ab	0.27±0.03Ab
	2	0.58±0.05ABa	0.43±0.04ABab	0.28±0.02ABa
	4	0.59±0.06ABa	0.42±0.03ABa	0.26±0.0ABa
	6	0.55±0.02Ba	0.41±0.02BCa	0.26±0.02ABab
20	8	0.51±0.04Ba	0.37±0.03Cab	0.23±0.03Bab
	平均值	0.58±0.05	0.42±0.03	0.26±0.02
	CK	0.53±0.03Ac	0.38±0.02Ac	0.23±0.01Abc
	2	0.48±0.08Aab	0.30±0.04Abc	0.22±0.01Ab
	4	0.52±0.10Aab	0.37±0.05ABa	0.22±0.01Ab
30	6	0.51±0.05Aab	0.36±0.02ABab	0.20±0.01Bbc
	8	0.41±0.07Aab	0.30±0.04Bbc	0.19±0.01Bab
	平均值	0.49±0.07	0.34±0.03	0.21±0.01
	CK	0.43±0.03Ad	0.31±0.01Ad	0.20±0.02Ac
	2	0.39±0.08Ab	0.30±0.03Ac	0.22±0.02Ab
	4	0.39±0.05Ab	0.29±0.02ABb	0.18±0.01Bc
	6	0.41±0.07Ab	0.29±0.04ABb	0.17±0.02Bc
	8	0.32±0.04Ab	0.24±0.02Bc	0.17±0.02Bb
	平均值	0.39±0.05	0.29±0.02	0.19±0.02

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同大写字母表示相同砾石下不同生物炭施量差异显著($p<0.05$)；不同小写字母表示相同生物炭施量下不同砾石间差异显著($p<0.05$)。

根据 Philip 模型的拟合结果可以看出,随砾石和生物炭的增加,吸渗率(S)除个别处理外均逐渐减小,稳渗率(A)无明显规律且出现负值,说明 Philip 模型不适用于本研究的拟合;根据 Horton 模型的拟合结果可以看出,初始入渗率(f_1)和稳定入渗率(f_c)均随砾石和生物炭的增加逐渐减小,经验参数(b)无明显规律,进一步说明在石灰土中施加生物炭能减小其入渗能力;根据 Kostiakov 模型的拟合结果可以看出,经验参数(a)随生物炭和砾石的增加而减小,而经验参数(α)无明显规律。从整体来看,相比于 Philip 模型,Horton 模型和 Kostiakov 模型均能较好地拟合本研究中含砾石土壤中施加生物炭后入渗速率与时间的关系,但 Horton 模型的拟合趋势更接近实测值,因此 Horton 模型更适用于本研究中各处理下的拟合。

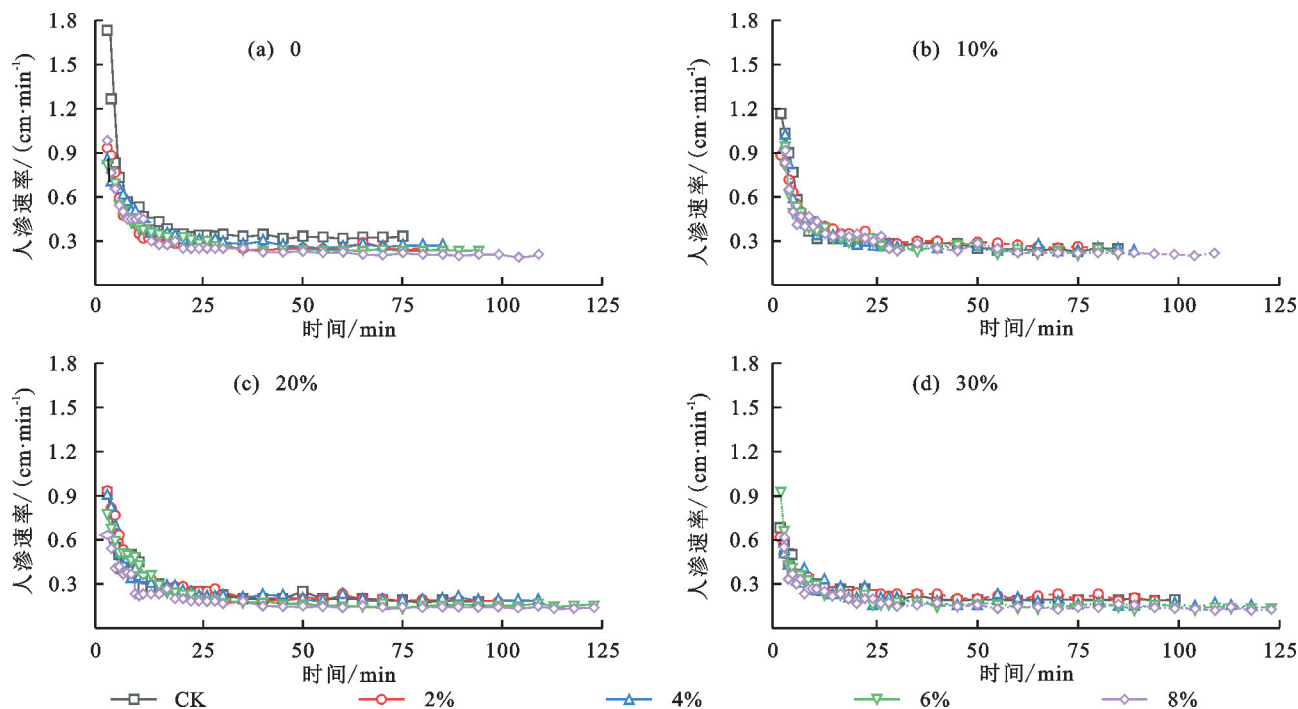


图 4 不同施量生物炭对入渗速率的影响

Fig.4 Effects of different amounts of biochar on infiltration rate

表 2 生物炭和砾石含量对石灰土入渗特征参数的主效应分析
Table 2 Main effect analysis of biochar and gravel content on infiltration parameters of lime soil

入渗参数	变因	F 值
初始入渗率	A	8.051 **
	B	149.328 **
	A×B	3.527 **
平均入渗率	A	11.715 **
	B	270.870 **
	A×B	4.359 *
稳定入渗率	A	5.286 **
	B	192.266 **
	A×B	1.792

注: A 为生物炭施量; B 为砾石质量分数; A×B 为二者的交互效应; * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$ 。

3 讨论

土壤水分的入渗过程受土壤质地、体积质量等多种因素共同影响^[28]。生物炭本身密度低,孔隙结构发达,作为土壤的外源物质输入土壤,可降低土壤体积质量、改变土壤的孔隙结构和数量^[29]。入渗前期,添加生物炭明显降低石灰土的初始入渗率,随着时间延长施加生物炭处理的累积入渗量、稳定入渗率及湿润锋运移深度均低于未添加生物炭处理。可能是由于施加生物炭后,土壤物理性质发生改变,从而减缓土壤水分入渗过程,与 WANG 等^[8]的研究结果一致。生物炭本身密度较小,在设计体积质量条件下装填土柱后,土壤和生物炭颗粒间更加紧凑,孔隙在土壤中的分布情况及孔隙间的连通性发生改变^[13],使得土壤中的有效孔

隙数量减少,进而减少作为水分在土壤中流动的通道。同时, VILLAGRA-MENDOZA 等^[30]的研究结果表明,添加细小的生物炭也可能堵塞土壤中的大孔隙,减少土壤中大孔隙间的连通性,促进土壤中、小孔隙的形成,从而使得水分运动通道变得曲折复杂,土壤水分入渗受到抑制。由于生物炭本身的多孔性和具有较大的比表面积,使其比土壤具有更强的持水能力,可吸附超过自身 10 倍的水分,从而增加土壤团聚体,改变土壤孔隙结构,有助于改善石灰土水分快速入渗,提高土壤持水性和保水性^[10]。生物炭表面许多纳米孔隙增强毛细作用,从而延缓土壤水的流动,降低土壤水分的入渗速率^[31-32]。

本研究结果与詹舒婷等^[33]的研究结果不一致,可能是由于生物炭制作原料和工艺的不同所引起的生物炭物理特性的改变而产生的差异。另外,生物炭对土壤入渗过程的影响也与试供土本身的质地有关^[34]。

含砾石的土壤水分运动有别于均质土壤,砾石的存在可以改变土壤的孔隙结构,进而影响水分下渗路径,是水分入渗的重要影响因素之一^[35]。本研究中,10%,20%,30%砾石对石灰土入渗过程影响的研究结果表明,砾石对土壤累积入渗量、入渗速率及湿润锋的运移均有抑制作用,且随砾石质量分数的增加,抑制效果越明显。杨燕芬等^[21]研究结果表明,砾石能够抑制土壤水分的入渗,但随砾石质量分数的增加存在 1 个阈值,当粒径为 5~10 mm 时,这个阈值出现于 40%砾石的情况,30%砾石下均表现为抑制土壤水分的入渗。可能因为一方面,在细土中增加砾石

后,砾石和细土混合土壤的体积质量增大,混合土壤中的有效孔隙度减少,土壤水分下渗更为缓慢。同时,由于砾石相较于土壤颗粒组分,孔隙度很小,透水性极弱,加入细土后,混合土壤的过水断面减小,土壤水分入渗受到抑制。由于砾石还增加土壤水分通道的弯曲程度,从而抑制水分在土壤中的下渗。另一方面,砾石作为土壤中的“骨料”,可减少土壤的压实,砾石与土壤的接触面有助于大孔隙的形成。但当砾石

质量分数较少时,其产生的大孔隙较少,孔隙间无连通或形成的连通通道很少,使其因大孔隙的发育而产生的促进土壤水分入渗的作用小于因减小断面和水流路径曲折而产生的抑制作用,从而表现为抑制土壤水分的入渗^[21]。然而,CHEN 等^[20]在喀斯特地区实地观测的结果则表明,含砾石土壤的稳定入渗率与砾石质量分数呈正线性关系,可能是由于砾石来源、粒径、分布及土壤体积质量等的差异所造成的。

表 3 不同处理下土壤水分入渗模型拟合结果

Table 3 Fitting results of soil water infiltration model under different treatments

砾石质量 分数/%	生物炭 施量/%	Philip 模型			Horton 模型				Kostiakov 模型		
		S	A	R ²	f ₁	f _c	b	R ²	a	α	R ²
0	CK	3.5	-0.02	0.945	2.5	0.33	0.38	0.955	1.8	0.55	0.952
	2	2.2	0.10	0.957	1.4	0.30	0.25	0.946	1.2	0.40	0.944
	4	1.8	0.15	0.934	1.0	0.27	0.12	0.946	1.0	0.34	0.956
	6	1.7	0.13	0.996	1.0	0.26	0.18	0.947	0.9	0.34	0.961
	8	1.8	0.08	0.939	1.0	0.21	0.18	0.965	0.9	0.40	0.936
10	CK	2.3	0.07	0.945	1.4	0.27	0.21	0.966	1.2	0.43	0.944
	2	2.4	0.06	0.948	1.7	0.30	0.36	0.896	1.3	0.45	0.936
	4	2.3	0.06	0.901	1.4	0.25	0.25	0.949	1.2	0.44	0.896
	6	2.0	0.10	0.972	1.2	0.26	0.22	0.959	1.0	0.39	0.968
	8	1.8	0.08	0.960	0.9	0.19	0.13	0.953	0.9	0.39	0.971
20	CK	1.7	0.10	0.810	1.0	0.23	0.22	0.908	0.9	0.38	0.837
	2	1.8	0.09	0.810	0.9	0.19	0.13	0.907	0.9	0.38	0.837
	4	1.7	0.07	0.898	0.9	0.19	0.16	0.916	0.9	0.39	0.911
	6	1.6	0.07	0.827	0.7	0.14	0.09	0.922	0.8	0.38	0.881
	8	1.3	0.08	0.873	0.7	0.17	0.15	0.892	0.7	0.36	0.881
30	CK	1.3	0.11	0.917	0.8	0.21	0.18	0.889	0.7	0.33	0.917
	2	1.0	0.14	0.946	0.6	0.21	0.19	0.889	0.6	0.28	0.894
	4	1.0	0.10	0.857	0.5	0.15	0.09	0.886	0.6	0.30	0.894
	6	1.1	0.08	0.814	0.5	0.13	0.09	0.900	0.6	0.32	0.857
	8	1.3	0.04	0.892	1.0	0.15	0.36	0.823	0.7	0.44	0.868

本研究中,不同施量生物炭对 3 种砾石质量分数下石灰土入渗过程的研究结果表明,在相同砾石质量分数条件下,高施量(8%)的生物炭均显著减小各砾石土壤的累积入渗量,抑制湿润锋的运移。这是由于一方面,生物炭直接通过影响土壤本身的孔隙结构来抑制土壤水分的运动^[17],增强石灰土的储水能力;另一方面,在设计细粒体积质量条件下,土柱填充的过程中,虽然砾石作为土壤中的“骨料”,可减少土壤的压实,但由于生物炭密度较小,随生物炭施量的增加,生物炭与土壤颗粒的混合物难以压实,细粒间及细粒与砾石间接触更为紧密,从而减少砾石与土壤间产生的大孔隙^[36],抑制土壤水分的下渗。与无砾石的土壤不同,低施量(2%)的生物炭对 3 种砾石土壤的入渗能力均无明显影响,3 种砾石中只有生物炭达到一

定量后才表现为明显抑制,且抑制效果弱于无砾石的土壤。说明在含砾石土壤中添加生物炭后,土壤入渗过程受砾石和生物炭共同制约。根据主效应分析的结果来看,砾石在土壤入渗过程的影响中起主导作用(表 2)。砾石的形状及在土壤中的空间分布状况不均一^[37],且砾石的存在还可改变土壤的孔隙状况,形成少量的大孔隙。使得生物炭对含砾石土壤水分入渗的影响,一部分通过堵塞土壤中因砾石的存在而形成的大孔隙,另一部分则是通过影响土壤中的孔隙结构来抑制土壤水分的入渗过程。因此,相同施量的生物炭在含砾石土壤中的抑制效果更弱。也进一步说明含砾石土壤的水分入渗过程较均质土更为复杂,在探究生物炭对喀斯特地区含砾石土壤入渗过程的影响时,砾石的存在是不容忽视的。从砾石质量分数较

高(20%,30%)的试验组中可以看出,生物炭减少土壤水分的稳定入渗率,对初始入渗率无明显影响。说明生物炭在较高砾石的土壤中主要通过降低稳定入渗率来抑制土壤水分的入渗过程。李雪垠等^[38]研究认为,稳定入渗率的减少主要是大孔隙所占比例和过水断面引起的。添加生物炭后,减少土壤中孔隙所占的比例,从而表现为降低土壤水分的稳定入渗率。

采用 Philip、Horton 和 Kostiakov 模型拟合不同生物炭施量下各砾石石灰土入渗过程,从拟合的 R^2 来看,Horton 模型的拟合效果较好,其次是 Kostiakov 模型,Philip 模型拟合效果最差,与李雨晨等^[39]对红壤丘陵区不同盖度生物结皮水分入渗过程的拟合结果一致。原因是 Philip 模型中时间(t)的指数为固定常数-0.5,更适用于初始含水量均匀的均质土壤的一维垂直入渗过程,而本文的研究对象包括含有砾石的土壤,因此拟合效果较差。而 Kostiakov 模型在初始入渗率假设为无穷大时,当时间无限增大后,入渗速率逐渐趋近于0,本文中一维垂直入渗过程受重力势能的影响,最终趋近于1个稳定值,这更符合土壤水动力学。Horton 模型虽然是通过大量数据得出的经验公式,但是其增加常数项 b ,可以反映土壤水分在长时间的重力作用下达到稳定入渗的过程,对长时间入渗过程拟合效果较好。因此,Horton 模型对本研究不同生物炭施量下各砾石石灰土入渗过程拟合最优,适用性也最好。

综上所述,生物炭和砾石均可改变土壤孔隙结构和数量,从而影响土壤的入渗过程。生物炭添加对石灰土水分入渗的影响不仅要考虑施加量,石灰土中大量存在的砾石也不容忽视。特别是明确不同施量生物炭在不同砾石土壤中对土壤水力特征的影响,对在砾石普遍存在的西南喀斯特区的土壤结构改善和水分维持具有重要意义。本研究通过土柱模拟试验说明生物炭的添加能够抑制含砾石石灰土水分的下渗,但抑制效果弱于在无砾石土壤中。同时也初步探明生物炭对石灰土水分入渗特征的影响,进一步说明生物炭在减少喀斯特地区含砾石和无砾石石灰土的快速渗漏同样有效。室内模拟试验与野外实际情况有所差异,后期需开展系统长期的野外观测试验,研究施用生物炭对喀斯特区含砾石土壤的改良效果。

4 结论

(1)在无砾石条件下,同时间内石灰土湿润锋运移深度、累积入渗量、初始入渗率和稳定入渗率均随玉米秸秆生物炭施量的增加逐渐降低。随生物炭施量增加,累积入渗量分别减少10%,12%,17%和27%,湿润锋运移深度分别减少10%,11%,17%和27%。

(2)与无砾石土壤不同的是,在含砾石的石灰土中施加玉米秸秆生物炭后初始入渗率无明显规律,同时间内湿润锋运移深度、累积入渗量和稳定入渗率均有所降低。随砾石质量分数的增加,各施量的平均累积入渗量比 CK 分别减少8%,9%和13%,平均湿润锋运移深度分别减少6%,7%,13%。

(3)相比于 Philip 模型,Kostiakov 模型和 Horton 模型均能较好地模拟各生物炭施量下含砾石土壤入渗过程。但从整体来看,Horton 模型的拟合结果趋势更接近实测值,拟合度也更好。

(4)从试验结果来看,玉米秸秆生物炭能有效减少西南喀斯特区石灰土的水分入渗。建议在含有10%砾石土壤中施加8%的生物炭,含有20%砾石的土壤中施加6%的生物炭,当土壤中砾石达到30%时,可施加4%的生物炭,能有效缓解喀斯特区石灰土的快速渗漏。后期需开展长期原位降雨入渗和土壤水分观测试验,以更好地将生物炭技术应用于西南喀斯特区水分漏失调控和土壤水分管理中。

参考文献:

- [1] 李雪转,樊贵盛.土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(3):188-190.
LI X Z, FAN G S. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 188-190.
- [2] 白晓永,张思蕊,冉晨,等.我国西南喀斯特生态修复的十大问题与对策[J].中国科学院院刊,2023,38(12):1903-1914.
BAI X Y, ZHANG S R, RAN C, et al. Ten problems and solutions for restoration of karst ecosystem in Southwest China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1903-1914.
- [3] 陈洪松,王克林.西南喀斯特山区土壤水分研究[J].农业现代化研究,2008,29(6):734-738.
CHEN H S, WANG K L. Soil water research in karst Mountain areas of southwest China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(6): 734-738.
- [4] LI Y Y, ZHANG F B, YANG M Y, et al. Impacts of biochar application rates and particle sizes on runoff and soil loss in small cultivated loess plots under simulated rainfall[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 1403-1413.
- [5] RENNER R. Rethinking biochar[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41(17): 5932-5933.
- [6] ZHANG Q Z, DU Z L, LOU Y L, et al. A one-year short-term biochar application improved carbon accumulation in large macroaggregate fractions[J]. Catena, 2015, 127: 26-31.

- [7] 郭颂,杨卫君,宋世龙,等.不同灌水量与生物炭用量对春小麦光合特性的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(3):65-73.
GUO S, YANG W J, SONG S L, et al. Change in photosynthesis of spring wheat with irrigation amount and biochar amendment[J].Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(3):65-73.
- [8] WANG H, SHAO D G, JI B, 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:e154520.
- [9] HOSSAIN M Z, BAHAR M M, SARKAR B, et al. Biochar and its importance on nutrient dynamics in soil and plant[J].Biochar,2020,2(4):379-420.
- [10] 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.
- [11] 黄成真,王娟,仲昭易,等.普通生物炭和酸改性生物炭对盐渍土入渗、蒸发过程的影响[J].中国农村水利水电,2020(11):138-142.
HUANG C Z, WANG J, ZHONG Z Y, et al. Effect of common biochar and acid modified biochar on infiltration and evaporation of saline soil[J].China Rural Water and Hydropower,2020(11):138-142.
- [12] 郭祥林,高佩玲,吴畏,等.微咸水灌溉下不同生物炭对盐碱土盐运移的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(8):98-105.
GUO X L, GAO P L, WU E, et al. Effects of different biochar on water and salt transport in saline-alkaline soil under brackish irrigation[J].Journal of Irrigation and Drainage,2023,42(8):98-105.
- [13] 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.
- [14] SUN J N, YANG R Y, LI W X, 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] 王娟,陈安全,宋文瑾,等.生物炭种类与施量对新复垦区土壤水分入渗过程的影响[J].农业机械学报,2022,53(11):388-394.
WANG J, CHEN A Q, SONG W J, et al. Effect of biochar species and application amounts on soil water infiltration of newly reclaimed area[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(11):388-394.
- [16] FAN C H, YIN X A, FANG Q, et al. Effects of surface-underground runoff regulated by biochar on nutrient loss in Karst mountainous areas[J].Journal of Soil Science and Plant Nutrition,2023,23(3):3163-3173.
- [17] 毛天旭,屠丹,刘曼曼,等.生物质炭添加对喀斯特地区坡耕地黄壤水分入渗过程的影响[J].应用生态学报,2020,31(9):2903-2910.
MAO T X, TU D, LIU M M, et al. Effects of biochar addition on soil moisture infiltration process of the yellow soil in karst area[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(9):2903-2910.
- [18] FU T G, CHEN H S, ZHANG W, et al. Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in a small Karst Catchment in Southwest China[J].Environmental Monitoring and Assessment,2015,187(3):e92.
- [19] 党宏宇,陈洪松,邵明安.喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J].农业工程学报,2012,28(8):38-43.
DANG H Y, CHEN H S, SHAO M A. Effects of laminated rock fragments on soil infiltration processes in karst regions[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2012,28(8):38-43.
- [20] CHEN H S, LIU J W, ZHANG W, et al. Soil hydraulic properties on the steep karst hillslopes in northwest Guangxi, China[J].Environmental Earth Sciences,2012,66(1):371-379.
- [21] 杨艳芬,王全九,曾辰,等.土石混合介质水分入渗特性试验研究[J].水土保持学报,2009,23(5):87-90.
YANG Y F, WANG Q J, ZENG C, et al. Experimental research on water infiltration characteristics of stony-soil medium[J].Journal of Soil and Water Conservation,2009,23(5):87-90.
- [22] 叶瀛韬,李占玲,王蕙.不同含量砾石嵌套对红壤入渗特性的影响[J].节水灌溉,2022(5):1-6.
YE Y T, LI Z L, WANG H. Effects of gravel nesting with different contents on infiltration characteristics of red soil[J].Water Saving Irrigation,2022(5):1-6.
- [23] 徐勤学,李春茂,陈洪松,等.喀斯特峰丛坡地灌木林地与梯田旱地土壤水分入渗特征[J].农业工程学报,2018,34(8):124-131.
XU Q X, LI C M, CHEN H S, et al. Characteristics of soil moisture infiltration in shrub land and terraces dryland in Karst peaks hillslopes[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2018,34(8):124-131.

- [24] 吴克宁,赵瑞.土壤质地分类及其在我国应用探讨[J].土壤学报,2019,56(1):227-241.
WU K N, ZHAO R. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227-241.
- [25] 张志蓉.桂西北石质土壤中砾石的分布规律及其对水分性质的影响[D].武汉:华中农业大学,2008.
ZHANG Z R. Distribution of gravel and its effect on water properties in stony soil of northwest Guangxi[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [26] 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.
- [27] 吕刚,王婷,王韞策,等.辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J].水土保持学报,2017,31(4):86-92.
LÜ G, WANG T, WANG W C, et al. Effect of gravel content and particle size on soil infiltration in low mountainous upland region of western Liaoning Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 86-92.
- [28] 魏永霞,王鹤,吴昱,等.生物炭对不同坡度坡耕地土壤水动力学参数的影响[J].农业机械学报,2019,50(3):231-240.
WEI Y X, WANG H, WU Y, et al. Effect of biochar on soil hydrodynamic parameters under different slopes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 231-240.
- [29] SU C C, MA J F, CHEN Y P. Biochar can improve the soil quality of new creation farmland on the Loess Plateau[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(3): 2662-2670.
- [30] VILLAGRA-MENDOZA K, HORN R. Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils[J]. Geoderma, 2018, 326: 88-95.
- [31] CREAMER A E, GAO B, ZHANG M. Carbon dioxide capture using biochar produced from sugarcane bagasse and hickory wood[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 249: 174-179.
- [32] 刘旭,白一茹,马嫻,等.生物炭对黄绵土水分吸渗特征及水力学参数的影响[J].干旱区资源与环境,2023,37(3):77-84.
LIU X, BAI Y R, MA X, et al. Effects of biochar on water absorption characteristics and hydraulic parameters of loessial soil[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(3): 77-84.
- [33] 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.
- [34] 翟必宇,王娟.生物炭缓解作物干旱胁迫及其机理研究综述[J].节水灌溉,2024(3):75-82.
ZHAI B Y, WANG J. Review on crop response to drought stress under biochar addition and its mechanism[J]. Water Saving Irrigation, 2024(3): 75-82.
- [35] 苏智冉,郭加伟,张锦豪,等.砾石对土壤水文过程影响研究进展与展望[J].灌溉排水学报,2023,42(4):100-107.
SU Z R, GUO J W, ZHANG J H, et al. Influence of rock fragments on subsurface hydrological processes: Progresses and perspectives[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 100-107.
- [36] 曾凤铃,邹玉霞,张卫华,等.生物炭用量与粒径对紫色土水分入渗及再分布特征的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2022,44(12):136-144.
ZENG F L, ZOU Y X, ZHANG W H, et al. Effects of rate and particle size of biochar on water infiltration and redistribution characteristics of purple soil[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2022, 44(12): 136-144.
- [37] ZHANG Y H, ZHANG M X, NIU J Z, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress[J]. Catena, 2016, 147: 153-166.
- [38] 李雪垠,李朝霞,王天巍,等.紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J].水科学进展,2016,27(5):662-669.
LI X Y, LI Z X, WANG T W, et al. Rock interbed containment effect on infiltration processes in purple soil regions[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5): 662-669.
- [39] 李雨晨,平原,澹腾辉,等.红壤丘陵区不同盖度生物结皮对水分入渗的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):71-77.
LI Y C, PING Y, TAN T H, et al. Effects of biocrust with different coverage on water infiltration in red soil hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 71-77.