

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.12.014

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

曾凤铃¹, 邹玉霞¹, 张卫华¹, 运剑苇², 张伟¹, 邵清清³

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 天津市中水科技咨询有限责任公司, 天津 300170;
3. 宁夏水利水电勘测设计研究院有限公司 重庆分公司, 重庆 401121

摘要: 为探究生物炭用量和粒径对紫色土入渗过程与持水性能的影响, 采用室内一维土柱模拟试验, 设置 4 种生物炭用量(0%, 1%, 3%, 5%)和 3 种粒径(0~0.25, 0.25~0.5, 0.5~1 mm), 其中 0% 施用量为对照处理(CK). 结果显示: 添加不同用量和粒径的生物炭均延长了湿润锋达到土柱底部的时间, 相同粒径条件下湿润锋运移深度和累积入渗量随生物炭施用量的增加而降低($p < 0.05$), 3% 施用量时较小粒径(0.25~0.5 mm)的生物炭对水分入渗的抑制作用优于大粒径(0.5~1 mm), 湿润锋运移深度随入渗时间的变化规律符合幂函数. 生物炭可以改变土壤剖面含水率的分布趋势, 增强紫色土的持水能力, 整体增效为: 5% > 3% > 1% > CK, 0~0.25 mm > 0.25~0.5 mm > 0.5~1 mm > CK. 入渗结束 24 h 时, 施用生物炭处理下各土层土壤含水率均比 CK 高, 其中土层 10~30 cm 中施炭处理的含水率明显增大($p < 0.05$), 各处理土壤平均含水率较 CK 增加了 6.48%~13.51%. Kostiakov 模型对添加生物炭后紫色土的水分入渗过程的拟合程度优于 Philip 模型, $R^2 > 0.89$. 本研究揭示了施用生物炭后土壤水分入渗与再分布的变化规律, 可为应用生物炭改良紫色土区土壤水分运动过程提供科学依据.

关键词: 紫色土; 生物炭; 入渗; 土壤水分再分布

中图分类号: P426.68; S152.7 **文献标志码:** A

文章编号: 1673-9868(2022)12-0136-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Rate and Particle Size of Biochar on Water Infiltration and Redistribution Characteristics of Purple Soil

ZENG Fengling¹, ZOU Yuxia¹, ZHANG Weihua¹,
YUN Jianwei², ZHANG Wei¹, SHAO Qingqing³

1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Tianjin Zhongshui Technology Consulting Co. Ltd., Tianjin 300170, China;
3. Chongqing Branch of Ningxia Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co. Ltd., Chongqing 401121, China

收稿日期: 2021-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A20326); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2019F002); 西南大学实验教学改革研究项目(SYJ2022040).

作者简介: 曾凤铃, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与流域管理研究.

通信作者: 张卫华, 副教授.

Abstract: In order to investigate the effects of the rate and particle size of biochar on the infiltration process and water retention of purple soil, a one-dimensional soil column simulation experiment was conducted under the condition of water accumulation. Biochar derived from rice straw was applied to soil in 4 application rates (0%, 1%, 3% and 5%) and 3 particle sizes (0–0.25, 0.25–0.5 and 0.5–1 mm). The 0% application rate was used as the control (CK). The results showed that the addition of biochar with different rate and particle size delayed the time of wetting front reached the bottom of soil column. With the same particle size of biochar, the depth of wetting front migration and cumulative infiltration volume decreased with the increase of the application rate of biochar ($p < 0.05$). The inhibition effect of small particle size biochar (0.25–0.5 mm) on water infiltration was better than that of large particle size biochar (0.5–1 mm) at 3% of application. The variation of wetting front migration depth with infiltration time demonstrated a power function relationship. Meanwhile, biochar can change the distribution of soil moisture content and enhance the water holding capacity of purple soil. The overall effect was 5% > 3% > 1% > CK, 0–0.25 mm > 0.25–0.5 mm > 0.5–1 mm > CK. At 24 h after infiltration, the soil moisture content of each soil layer treated with biochar was higher than that of control, of which the moisture content of 10–30 cm layer of soil treated with biochar was significantly increased ($p < 0.05$), the average soil moisture content of each treatment increased by 6.48%–13.51% compared with control. The fitting degree of Kostiakov model to the water infiltration process of purple soil after adding biochar is better than that of Philip model, $R^2 > 0.89$. This study revealed the change regulation of soil water infiltration and redistribution after the application of biochar, which can provide a scientific basis for the application of biochar to improve soil water movement in purple soil area.

Key words: purple soil; biochar; infiltration; redistribution of soil water

土壤本身具有导水性^[1], 降雨和灌溉水会通过地表下渗至土壤内部形成土壤水^[2], 进一步参与农田水分的循环. 水分入渗过程与地表产流、土壤侵蚀、植物根系吸水以及土壤水分再分布等过程密切相关^[3-4]. 紫色土作为我国西南地区主要的耕作土壤, 其有机成分较低^[5], 土壤结构疏松, 胶结度和持水性较差, 物理风化剧烈^[6], 频繁的农耕活动导致土地质量退化, 土壤抗侵蚀能力降低^[7], 从而极易发生干旱缺水与水土资源流失.

生物炭是在低氧或缺氧条件下, 将各种农作物秸秆或其他有机质原料进行高温热解, 得到的一种富碳物质^[8]. 由于受到制炭原料以及热解温度等条件的影响, 生物炭形成了以微孔为主的多孔碳架结构, 比表面积大, 表面富有多种官能团, 是一种良好的吸附性材料^[9], 在改良土壤和农业节水增产等方面具有巨大的潜力. 已有大量研究表明^[10-11], 添加生物炭可以改变土壤容质量大小, 影响其孔隙分布, 促使土壤团聚体更稳定, 从而降低土壤抗剪强度和渗透阻力, 促进水分下渗和提高耕层蓄水保水能力. 李帅霖等^[12]通过室内土柱模拟试验研究, 发现在土壤表层添加较高质量比例(4%)的生物炭可以提高质地较黏土壤的入渗能力, 但低施用量(1%和2%)却降低了土壤水分的下渗速率. 解倩等^[13]研究结果表明生物炭在高施用量和小粒径条件下抑制黄绵土水分入渗的作用更强. Sun 等^[14]在利用生物炭改良滨海地区盐渍土时发现, ≤ 0.25 mm 粒径的生物炭在不同添加比例下均表现出抑制土壤水分下渗的能力, 而未经筛分的生物炭在低施用量下没有产生明显影响. Verheijen 等^[15]发现在 20% 添加量下 0.05~1 mm 和 2~4 mm 两种粒径生物炭分别使沙土的持水能力增加了 53.3% 和 43.1%. 孙宁婷等^[16]研究表明玉米秸秆炭表现出了阻滞紫色土水分入渗, 减少土壤中全磷的流失, 但混施竹炭对入渗过程影响不显著. 由此可见, 利用生物炭改良土壤水分入渗与持水能力, 与生物炭施用量、粒径和种类等因素密切相关. 也有研究指出因土壤类型和质地的不同, 生物炭对土壤入渗性能的影响存在较大差异, 在壤土中添加生物炭可以促进水分下渗, 相同条件下却降低了风沙土的入渗能力^[17].

目前,关于秸秆还田以及活性炭、PAM 等新型材料改良紫色土水分运动的研究较多,而生物炭作用下的紫色土水分运动特征与机理尚不明晰,所以有必要尝试利用生物炭改良紫色土.本研究开展了室内一维土柱模拟试验,探究在不同生物炭施用量和粒径方式下紫色土水分入渗及再分布规律,以期丰富生物炭对紫色土地区水分运移影响方面的研究,为应用生物炭还田改良土壤入渗、控制耕地水土流失和减少农业秸秆废弃物污染提供理论基础和科学依据.

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试土壤采自重庆市北碚区西南大学紫色土试验基地,采集 0~20 cm 深的土壤样品,室内风干后,挑除杂质并研磨过 2 mm 筛备用,其黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 7.37%,46.15%,46.48%,属壤土(国际制),pH 值为 6.50,有机碳质量分数为 10.15 g/kg.研究区域主要农作物为水稻,因此供试生物炭选择水稻秸秆炭,制备温度 450℃,在绝氧条件下热解 60 min 得到,经测定其比表面积为 224.25 m²/g,孔容为 0.114 cm³/g,pH 值为 9.36.生物炭研磨后过筛,制备得到 0~0.25,0.25~0.5,0.5~1 mm 3 个粒径等级,装入密封袋备用.

1.2 试验设计

于 2020 年 1—3 月进行室内模拟试验,将供试土样与生物炭按不同施用比例和粒径混合均匀备用.生物炭添加方式分别为:控制生物炭粒径 0.25~0.50 mm,划分 4 个生物炭用量梯度 0%,1%,3%,5%;控制生物炭施加量 3%,设置 3 种生物炭粒径 0~0.25,0.25~0.5,0.5~1 mm;设置添加比例 0%为空白对照(CK).参考张润华^[18]和 Yu 等^[19]的试验装置,采用内径宽×厚×高为 5 cm×1 cm×50 cm,精度为 1 mm 的有机玻璃土柱.有机玻璃土柱分正面和可拆卸的后盖(两者用凡士林和夹板进行固定),方便分层取样,内壁采用粗糙打磨技术,尽量降低边缘效应,底部开若干直径为 1mm 的小孔,便于在分布试验时水流出.为减少堆土过程中土壤受力压实不均匀,每 3 cm 一层将供试土壤分层填装至土柱中,填装时打毛土壤表面,让各层土壤紧密接触,填装深度 30 cm,采用干堆法^[20-21]控制土柱容质量为 1.25 g/cm³.在土柱顶部设置缓冲层,均匀铺设厚度 1 cm 的白沙,防止水流扰动表层土壤(图 1).

1.3 试验方法

供水装置选择内径 8 cm,高 20 cm 的小型马氏瓶,设置 5 cm 的积水深度.入渗开始后立刻计时,根据先密后疏的原则,读取不同时间下湿润锋在土柱中的位置和马氏瓶水面深度,当湿润锋移动到土柱底部时即入渗结束,停止计时,关闭止水夹,去除土柱顶部积水.在入渗结束后的 24 h,从表层向下每 3 cm 一层采集土样测定其土壤含水率,分析土壤剖面水分再分布的规律.

为进一步研究生物炭对紫色土水分入渗特征参数的影响,选取 Philip 模型和 Kostakov 模型对土壤入渗速率与入渗时间的变化关系进行分析.

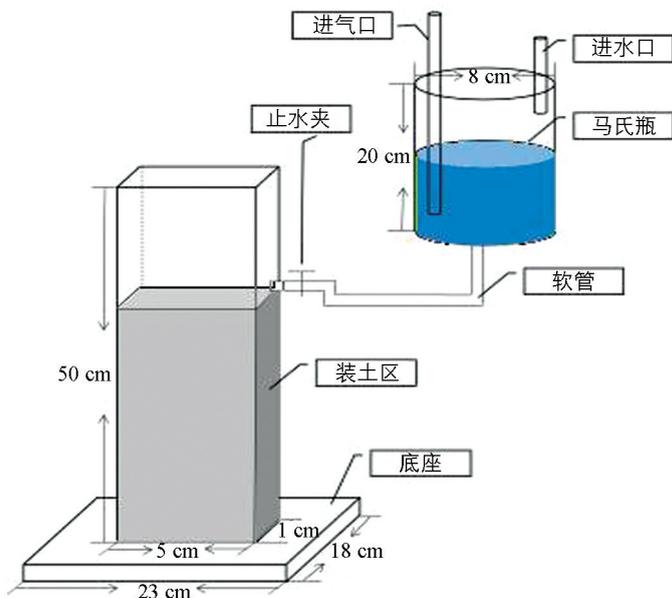


图 1 室内一维垂直入渗试验装置

Philip 入渗模型:

$$f_{(t)} = \frac{1}{2}St^{-0.5} + f_c$$

式中: $f_{(t)}$ 为土壤入渗速率 (cm/min); t 为入渗时间 (min); S 为吸渗率 (cm/min^{0.5}); f_c 为稳定入渗速率 (cm/min).

Kostiakov 入渗模型:

$$f_{(t)} = at^{-b}$$

式中: a 为入渗开始到第一个单位时段结束时的平均入渗速率; b 为入渗速率随时间衰减的程度; a, b 均为经验参数.

1.4 数据处理

所有试验数据均取自 3 次重复试验的平均值, 数据处理与制图在 Excel 2010 软件中进行, 运用 SPSS 22.0 进行显著性检验与分析, 并利用 OriginPro 2018 拟合 Philip 模型和 Kostiakov 模型.

2 结果与分析

2.1 生物炭施加量和粒径对湿润锋的影响

入渗过程中, 将土壤被湿润的先头部分与干燥土层间形成的明显边界定义为湿润锋, 它反映了水分受土壤基质吸力和重力作用的运动特征^[22]. 如图 2 所示, 不同处理下湿润锋运移深度变化的总体趋势一致, 即随着入渗的进行, 湿润锋不断向下移动, 施用生物炭处理明显延长了湿润锋运移时间. 入渗初期, 粒径相同时 (0.25~0.5 mm) 不同生物炭施用量下湿润锋运移深度差异不大; 随着入渗时间增加, 各处理湿润锋运移速率变缓, 施炭条件下的湿润锋运移深度较 CK 显著降低 ($p < 0.05$); 入渗时间 $t = 140$ min 时, 对照处理的湿润锋率先运移至土柱底部 (30 cm), 此时不同施用量下的湿润锋运移深度为 18.6 cm (1%), 14.9 cm (3%) 和 13.4 cm (5%), 分别较 CK 减少了 37.87%, 50.10% 和 55.44%; 入渗后期, 5% 施用量的湿润锋运移速率略高于 3% 施用量的湿润锋运移速率, 两者间始终无明显差异.

3% 施用量时, 不同生物炭粒径对湿润锋的运移影响显著 ($p < 0.05$), 各粒径间差异无统计学意义. 入渗进行至 55 min 时, CK 处理的湿润锋运移深度最大 (17.8 cm), 其次为 0.5~1 (10.4 cm), 0.25~0.5 (9.0 cm), 0~0.25 mm (8.9 cm). 随着入渗时间的延长, 0~0.25, 0.25~0.5, 0.5~1 mm 粒径对湿润锋运移的抑制作用表现愈加明显, 与 CK 相比, 分别使湿润锋平均运移速率降低了 67.29%, 70.83%, 63.82%.

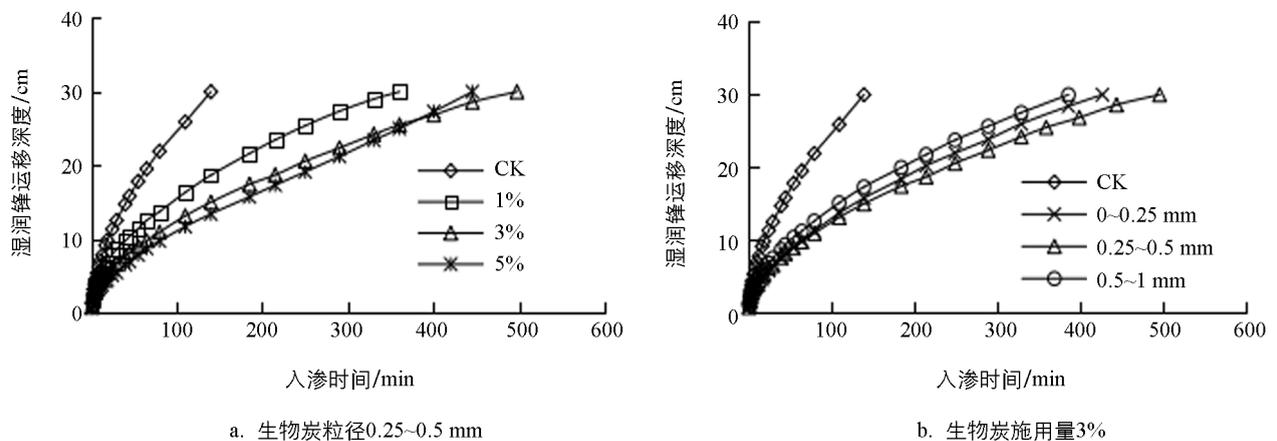


图 2 湿润锋运移深度随入渗时间的变化关系

如表 1 所示, 不同生物炭用量和粒径处理下, 湿润锋运移深度与入渗时间呈良好的幂函数关系: $F = At^B$, 决定系数 R^2 为 0.987~0.997. 其中, 系数 A 在数值上等于湿润锋初始运移速率, 幂指数 B 表征湿润锋运移的衰减程度^[23]. 施用生物炭处理下的系数 A 和 B 均小于 CK, 这表明添加生物炭可以降低土壤水

分初始入渗速率,一定程度上能够抑制土壤水分下渗,在高施用量和小粒径条件下生物炭的影响更剧烈。

表 1 湿润锋运移深度与入渗时间的函数拟合结果

处理		A	B	R^2
0.25~0.5 mm	CK	1.51	0.606	0.994
	1%	1.29	0.543	0.997
	3%	0.96	0.560	0.992
	5%	0.81	0.578	0.987
3%	0~0.25 mm	0.88	0.585	0.997
	0.25~0.5 mm	0.96	0.560	0.992
	0.5~1 mm	1.35	0.516	0.995

2.2 生物炭施用量和粒径对累积入渗量的影响

累积入渗量可以表征入渗达到稳定状态前土壤水分的入渗能力^[4]。不同处理下,累积入渗量随入渗时间的增长而不断增加,施用生物炭对累积入渗量表现出不同程度的抑制效应(图 3)。0.25~0.5 mm 粒径条件下累积入渗量与生物炭施用量呈显著负相关($p < 0.05$),随着生物炭施用量的增加,各施用量处理间累积入渗量的差值呈减小趋势。入渗结束时,与 CK 相比,1%,3%和 5%施用量的累积入渗量分别减少了 6.86%,14.71%和 27.45%。由图 3 可以看出,生物炭施用量一定时,相同时刻下添加不同粒径的生物炭明显降低了土壤的累积入渗量,各处理下累积入渗量从大到小依次为:CK(10.2 cm),0.5~1(9.7 cm),0~0.25(9.3 cm),0.25~0.5 mm(8.7 cm),其中 0.25~0.5 mm 粒径生物炭对累积入渗量的抑制作用最强,3 种粒径间差异无统计学意义($p > 0.05$)。

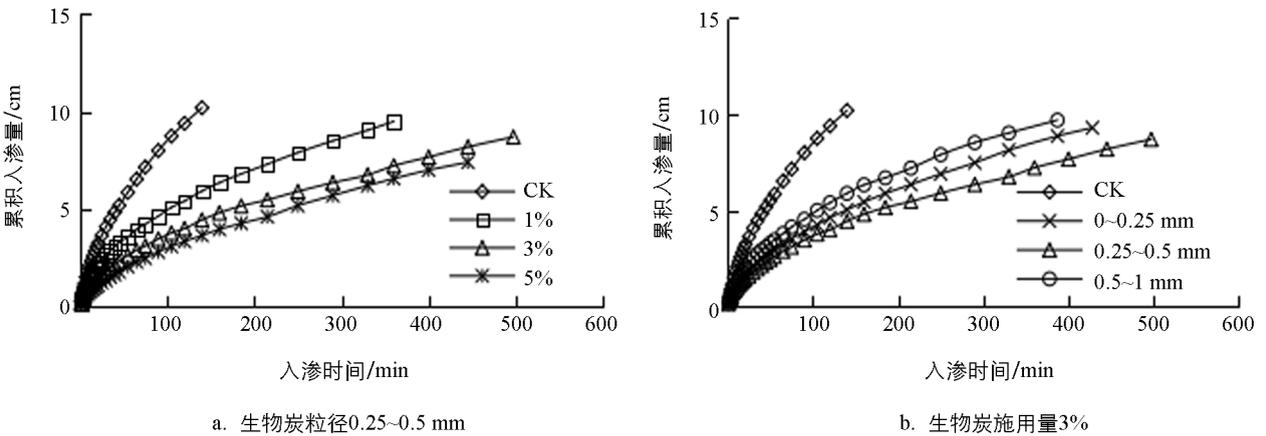


图 3 不同生物炭施用量与粒径下累积入渗量的动态变化

2.3 生物炭施用量和粒径对入渗特征参数的影响

采用 Philip 和 Kostikov 入渗模型拟合土壤入渗速率随时间变化的过程,探究施加不同质量比例和粒径的生物炭后的土壤水分入渗规律以及适用于紫色土地区的最优入渗模型。如表 2 所示,Philip 模型拟合的决定系数 R^2 为 0.780~0.903,吸渗率 S 体现了土壤前期入渗能力的大小,从表 2 可以看出施炭处理下的 S 值均低于 CK,结果显示施炭处理明显减小了土壤初期入渗能力,但各粒径组稳定入渗速率 f_c 与真实值相差较大,说明 Philip 模型在本试验研究的适用性较差。Kostikov 模型的决定系数 R^2 为 0.897~0.970,模型拟合结果与实测结果基本吻合。其中,模型参数 a 值随生物炭施用量和粒径的变化规律与上述累积入渗量的变化规律一致,且均低于 CK,说明施用生物炭阻碍了土壤水分的初始下渗,不同处理的 b 值均比 CK 大,表明施用生物炭加快了土壤入渗能力的衰减^[24],使得水分在土壤中的流通速度变缓,从而提高了对土壤水分的吸持能力。综合而言,Kostikov 模型对施用生物炭后紫色土的入渗过程的拟合程度更优。

表 2 生物炭在不同添加量和添加粒径下的土壤水分入渗模型拟合结果

处理	Philip 模型			Kostiakov 模型			
	S	f_c	R^2	a	b	R^2	
0.25~0.5 mm	CK	0.498	0.080	0.787	0.302	0.246	0.912
	1%	0.393	0.039	0.780	0.213	0.283	0.897
	3%	0.327	0.023	0.891	0.168	0.316	0.961
	5%	0.221	0.021	0.903	0.118	0.289	0.970
3%	0~0.25 mm	0.337	0.030	0.851	0.179	0.294	0.946
	0.25~0.5 mm	0.327	0.023	0.891	0.168	0.316	0.961
	0.5~1.0 mm	0.392	0.004	0.819	0.210	0.291	0.924

2.4 生物炭施用量和粒径对土壤剖面水分再分布的影响

为探究添加生物炭后紫色土水分再分布特征, 测得入渗结束 24 h 后剖面水分随土层深度变化的动态曲线, 如图 4 所示. 各处理土壤含水率随土层的加深而减小, 施用生物炭处理下土壤表层含水率均高于 CK 处理, 各处理间差异不明显; 生物炭对土层深度 10~30 cm 处土壤含水率的影响达到显著水平 ($p < 0.05$). 0.25~0.5 mm 粒径条件下, 不同施用量处理的土壤剖面平均含水率从大到小依次为: 32.39% (5%), 31.65% (1%), 31.08% (3%), 28.95% (CK), 数据表明添加不同用量的生物炭可以有效减缓土壤退水速率, 其用量越大土壤持水能力越强; 与 CK 相比, 3% 用量下 0~0.25, 0.25~0.5, 0.5~1.0 mm 粒径的土壤平均含水率依次增加了 13.51%, 9.31%, 6.48%, 其中 0~0.25 mm 粒径生物炭的储水作用最优. 总体而言, 入渗结束后生物炭强大的亲水性和吸附性继续发挥效用, 在土壤中表现出良好的持水能力, 抑制了深层水分流失.

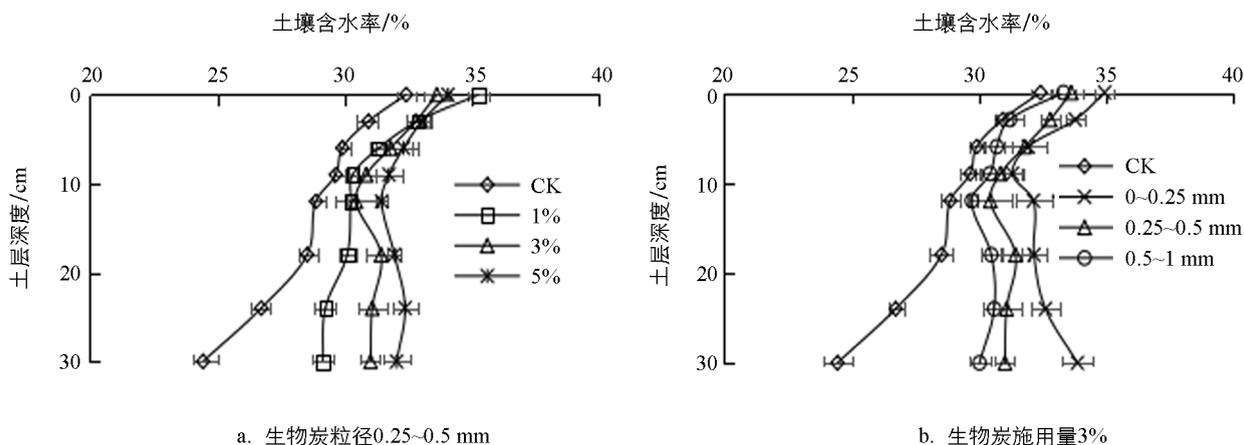


图 4 各处理土壤剖面含水率的分布特征

3 讨论

3.1 生物炭对土壤入渗能力的影响

土壤质地、容质量、初始含水率和孔隙特征等是影响土壤入渗能力的主要因素^[1]. 生物炭具有高孔隙率、巨大的比表面积和较强的吸附性, 土壤中添加后可以改善土壤的理化性质和优化土壤结构, 从而改变水分在土壤中的入渗路径及速度^[25], 影响土壤的渗透能力.

本研究结果表明, 相同粒径条件下随着生物炭施用量的增大, 其对土壤水分入渗的抑制作用逐渐递增, 这与齐瑞鹏等^[17]、肖茜等^[26]的研究结论一致. 入渗初期土壤的渗透能力主要受初始含水率^[1]的影响, 各处理间曲线变化剧烈, 重叠程度较高. 随着入渗过程的推进, 施炭处理下的曲线明显低于未施炭处理且逐渐趋于平缓. 究其原因, 可能是由于入渗进行一段时间后, 生物炭表面发生氧化, 表现出亲水性^[10], 其

强大的吸附性能开始发挥作用;另一方面,水流入渗速率主要受土壤孔隙的影响^[27],生物炭不仅内部孔隙发达,还可以与土壤颗粒相互作用改变土壤孔隙结构^[28]. Esmaelnejad 等^[29]通过野外定位试验,发现生物炭会增加土壤孔隙数量,但添加细粒生物炭会堵塞土壤颗粒间的孔隙,降低孔隙尺寸. 安宁等^[30]研究表明添加较高含量的水稻秸秆生物炭降低了土壤大孔隙中当量孔径 100~500 μm 和 >500 μm 的孔隙度. 本研究试验在定容质量条件下进行,土壤的总孔隙度未发生变化^[31],但可能改变了孔隙的分布特征与孔隙间的连通性,添加较小粒径的生物炭虽然可以增加小孔隙的数量,但有可能减少了大孔隙和中孔隙的数量^[32-33],导致有效孔隙度降低,水流弯曲度增加. 此外,在水分下渗过程中生物炭因其结构脆性易发生物理破碎^[34],表面松散细小的颗粒被水流冲洗剥离,产生的碎片或细粒子可能会填充土壤颗粒或颗粒间的孔隙^[35],导致水分流通通道变得复杂曲折,从而改变了水分在土壤中的流动路径和停留时间,大大降低土壤入渗速率,延长入渗时间.

生物炭施用量一定时,0.25~0.5 mm 粒径表现出更好的阻滞土壤水分入渗的能力,其次是 0~0.25 mm 粒径处理,但两者没有显著差异,说明细粒生物炭能够很好地抑制土壤水分下渗. 解倩等^[13]发现小粒径生物炭(≤ 0.25 mm)降低黄绵土入渗能力的作用强于大粒径(1~2 mm),与本研究结论相似. 但毛天旭等^[31]在研究生物炭粒径对喀斯特地区黄壤入渗能力的影响时,得出了相反的结论. 这可能是因为试验选用的土壤类型不同,其物理性质差异较大,这也是决定土壤入渗特性的主要因素之一^[1]. 紫色土的容质量比黄壤小,质地疏松,含有更多的非毛管孔隙^[36],粒径较小的生物炭更容易与土壤矿物颗粒相互作用,形成复杂的微团粒结构,产生大量闭合的细小孔隙^[37],截断水流连通性通道,加之粒径较小的生物炭吸附性更强,因此本研究中粒径较小的生物炭对紫色土水分入渗的抑制作用更明显. 而黄壤中加入大粒径生物炭虽然可以增加土壤大孔隙的数量,但随着入渗过程的进行,生物炭在吸水饱和过程中产生膨胀,又有可能减少土壤大孔隙,减少过水断面,从而阻碍土壤水分下渗^[37].

3.2 生物炭对土壤持水能力的影响

生物炭在热解炭化过程中会导致表面的含氧官能团减少,表现出疏水性,但其表面与内部具有丰富的孔隙,又可以增强对水分的吸持能力,有利于水分的储存,因此生物炭持水能力的表现受到这两方面特性的共同制约^[9, 38]. Blanco-Canqui^[28]汇总分析了近年来不同试验条件下生物炭对土壤物理性质影响的研究结果,认为生物炭可以提高 90% 的土壤保水能力,从而导致植物有效水分的增加. Chen 等^[39]研究发现生物炭可以减少土壤水分蒸发,增强其持水能力,其中生物炭特性、施用量和粒径是影响土壤持水性能的重要因素. 在本研究中,添加不同用量和粒径的生物炭,有效减缓了土壤剖面含水量的退水速度,尤其显著提高了深土层的土壤含水率. 王艳阳等^[40]研究表明在紫色土中施用生物炭可以提高上层土壤的蓄水能力和下层土壤的持水能力,与本研究结论相似. 粒径一定时,生物炭施用量越高其持水能力越强,3% 施用量下小粒径生物炭(0~0.25 mm)对土壤持水能力的提升作用更明显,这可能是因为小粒径生物炭的比表面积更大,具有更多的微孔孔隙^[9],能够吸持大量的水分.

综上所述,对于紫色土地区而言,施用生物炭抑制了土壤水分入渗,存在延长坡面产流时间、增加地表径流和加剧土壤侵蚀发生概率的风险,但同时生物炭也可以提高土壤持水能力,一定程度上可以保留耕层水分,减少水分深层漏失,增强对土壤养分的固持. 因此,在实际应用生物炭改良土壤入渗性能与持水能力时,需综合考虑生物炭特性(如原料和热解温度)、土壤类型、施用量和粒径等因素的影响,以便选取适宜的生物炭与施用模式. 本研究中试验为机理性试验,为进行更准确的测量以及比较各处理的组间差异,试验填装所用土壤的结构和孔隙状况与田间土壤自然状况存在一定差异,且未涉及生物炭用量和粒径对土壤孔隙数量及大小的定量化研究. 因此,考虑到生物炭对土壤结构及其理化性质的改变是一个长期的过程,其在不同土壤环境下的效用也有所差异,所以有必要开展更多的田间试验,进一步阐明长时间尺度下生物炭对土壤水分迁移的影响及其田间水动力学特性.

4 结论

生物炭能够显著降低湿润锋的运移速度, 延长水分入渗时间. 0.25~0.5 mm 粒径下随生物炭施用量的增加其抑制效应更明显, 但 3% 和 5% 处理间差异减小, 其中 3% 施用量的入渗历时最长; 生物炭用量一定时, 0.25~0.5 mm 粒径表现出更好的阻碍湿润锋下移的作用. 幂函数可以较好地表述不同生物炭施用量与粒径条件下湿润锋运移深度与时间的变化关系, R^2 为 0.987~0.997.

添加 1%, 3% 和 5% 生物炭处理均降低了土壤累积入渗量, 其减少量达 CK 的 6.86%~27.45%; 不同生物炭粒径在 3% 施用量下的累积入渗量表现为: CK > 0.5~1 mm > 0~0.25 mm > 0.25~0.5 mm, 各粒径与 CK 差异明显, 但不同粒径间差异不大. 本研究中紫色土施用生物炭后土壤水分入渗的变化规律符合 Kostiaikov 入渗经验模型.

添加不同用量与粒径的生物炭可以增加耕层土壤的含水率, 显著提高深土层的持水能力. 入渗结束后 24 h, 以较高施用量(5%)和小粒径(0~0.25 mm)处理的土壤持水能力表现更优, 土壤平均含水率分别高于对照组 11.88% 和 13.51%.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 赵西宁, 吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述 [J]. 西北林学院学报, 2004(1): 42-45.
- [3] 刘贤赵, 康绍忠. 降雨入渗和产流问题研究的若干进展及评述 [J]. 水土保持通报, 1999, 19(2): 57-62.
- [4] 白文波, 宋吉青, 李茂松, 等. 保水剂对土壤水分垂直入渗特征的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 18-23.
- [5] 王齐齐, 徐虎, 马常宝, 等. 西部地区紫色土近 30 年来土壤肥力与生产力演变趋势分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2018(6): 1492-1499.
- [6] 青长乐, 牟树森, 王定勇, 等. 紫色土再研究 I 紫色土的母质—红层 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2009, 31(7): 120-125.
- [7] 万丹, 何财基, 王玉民, 等. 藏东南高寒区尼洋河河谷地带不同土地利用方式土壤抗蚀性研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2018, 43(9): 106-114.
- [8] 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展 [J]. 地球科学进展, 2014, 29(1): 68-79.
- [9] 张伟明, 修立群, 吴迪, 等. 生物炭的结构及其理化特性研究回顾与展望 [J]. 作物学报, 2021, 47(1): 1-18.
- [10] 张千丰, 王光华. 生物炭理化性质及对土壤改良效果的研究进展 [J]. 土壤与作物, 2012, 1(4): 219-227.
- [11] BUSSCHER W J, NOVAK J, EVANS D, et al. Influence of Pecan Biochar on Physical Properties of a Norfolk Loamy Sand [J]. Soil Science, 2010, 175(1): 10-14.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [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 Soil 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] 孙宁婷, 王小燕, 周豪, 等. 生物质炭种类与混施深度对紫色土水分运移和氮磷流失的影响 [J]. 土壤学报, 2022, 59(3): 722-732.
- [17] 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.
- [18] 张润华. 电场及“电场-腐殖质”耦合作用下的土壤水分运动 [D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [19] YU Z H, LI H, LIU X M, et al. Influence of Soil Electric Field on Water Movement in Soil [J]. Soil and Tillage Re-

search, 2016, 155: 263-270.

- [20] 赵吉霞, 邓利梅, 陆传豪, 等. 模拟酸雨淋溶对紫色母岩风化成土特征的影响研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2021, 43(11): 151-161.
- [21] 钱伟. 黄土中水-气运移规律试验研究——以黄土干湿循环和重塑土柱试验为例 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
- [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(4): 84-88.
- [23] 宋日权, 褚贵新, 冶军, 等. 掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(S1): 109-114.
- [24] 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.
- [25] TAN Z X, LIN C S K, JI X Y, et al. Returning Biochar to Fields: A Review [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 116: 1-11.
- [26] 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.
- [27] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 40-45.
- [28] BLANCO-CANQUI H. Biochar and Soil Physical Properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 687-711.
- [29] ESMAEELNEJAD L, SHORAFI M G M, et al. Impacts of Woody Biochar Particle Size on Porosity and Hydraulic Conductivity of Biochar-Soil Mixtures: An Incubation Study [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2017, 48(14): 1710-1718.
- [30] 安宁, 李冬, 李娜, 等. 长期不同量秸秆炭化还田下水稻土孔隙结构特征 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(12): 2150-2157.
- [31] 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.
- [32] YANG C D, LIU J J, LU S G. Pyrolysis Temperature Affects Pore Characteristics of Rice Straw and Canola Stalk Biochars and Biochar-Amended Soils [J]. Geoderma, 2021, 397: 15097.
- [33] 王红兰, 唐翔宇, 张维, 等. 施用生物炭对紫色土坡耕地耕层土壤水力学性质的影响 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 107-112.
- [34] SPOKAS K, NOVAK J, MASIELLO C. Physical Disintegration of Biochar: An Overlooked Process [J]. Environmental Science and Technology Letters, 2014, 1(8): 326-332.
- [35] VILLAGRA M, HORN R. Changes in Water Infiltration after Simulated Wetting and Drying Periods in two Biochar Amendments [J]. Soil Systems, 2019, 3(4): 63-77.
- [36] 傅涛. 三峡库区坡面水土流失机理与预测评价建模 [D]. 重庆: 西南农业大学, 2002.
- [37] 文曼. 黄土高原地区生物炭的土壤水动力学效应 [D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2012.
- [38] ZHANG Y F, WANG J M, FENG Y. The Effects of Biochar Addition on Soil Physicochemical Properties: A review [J]. Catena, 2021, 202: 105284.
- [39] CHEN C, WANG R Q, SHANG J Y, et al. Effect of Biochar Application on Hydraulic Properties of Sandy Soil under Dry and Wet Conditions [J]. Vadose zone journal VZJ, 2018, 17(1): 1-8.
- [40] 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.