

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.022

CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.022

牛雨婷,徐俊鹏,董勤各,等.生物炭-秸秆隔层协同改良对盐碱土壤水分入渗过程的影响[J].水土保持学报,2026,40(1):144-152.

NIU Yuting, XU Junpeng, DONG Qinge, et al. Impact of biochar-straw interlayer synergistic improvement on water infiltration processes in saline-alkali soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):144-152.

生物炭-秸秆隔层协同改良对盐碱 土壤水分入渗过程的影响

牛雨婷^{1,2}, 徐俊鹏^{1,2}, 董勤各^{1,2}, 冯浩^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究生物炭-秸秆隔层协同改良措施(表层土壤添加生物炭+耕层下方铺设秸秆隔层)对旱区盐碱农田土壤水分运移规律的影响,为河套灌区盐碱农田土壤水分运移过程的合理调控提供科学依据和技术参考。[方法] 利用土柱垂直入渗试验,设置生物炭添加量分别为0.5%(SC0.5)、2.5%(SC2.5)、7.5%(SC7.5)与秸秆隔层联合施用的处理,以未添加生物炭且无秸秆隔层的处理(CK)作为对照,系统分析不同组合下土壤水分入渗过程与入渗模型参数的变化特征。[结果] 1)在只添加生物炭的表层土中,随生物炭添加量增加,相同时间内湿润锋运移深度和累积入渗量均逐渐减少。以60 min为例,SC0.5、SC2.5、SC7.5处理湿润锋运移深度较CK分别减小3.49%、6.97%和10.41%,累积入渗量分别减少7.75%、8.88%、15.50%。湿润锋通过秸秆隔层表现为“阻滞-波动”动态特征,其通过土壤与秸秆隔层交界面上方的过渡区的平均湿润锋推进速率较CK减少9.10%~45.45%,而在通过秸秆隔层时入渗率出现波动特征。2)生物炭与秸秆隔层的协同作用受生物炭添加量影响,具有阈值效应,可能为0.5%~2.5%。总体来看,SC0.5处理在增加总累积入渗量方面效果最佳,较CK增加16.88%,但同时减缓湿润锋运移,较CK增加总入渗时间22.22%。3)Kostiakov模型和Philip模型均能较好地模拟盐碱土壤水分入渗过程,其中Kostiakov模型具有更高的模拟精度,而Philip模型可从参数物理意义角度解释土壤水分入渗机制,二者在解析生物炭-秸秆隔层协同改良措施下土壤水分运移过程上具有互补性。[结论] 生物炭-秸秆隔层协同改良措施对土壤水分入渗效果受生物炭添加量影响,其中SC0.5处理对减缓湿润锋运移,增加累积入渗量综合效果最好,研究可为西北旱区中重度盐碱农田土壤改良提供理论指导和技术支撑。

关键词: 盐碱地; 生物炭; 秸秆; 入渗率; 入渗模型

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)01-0144-09

Impact of Biochar-Straw Interlayer Synergistic Improvement on Water Infiltration Processes in Saline-Alkali Soil

NIU Yuting^{1,2}, XU Junpeng^{1,2}, DONG Qinge^{1,2}, FENG Hao^{1,2}

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the effects of synergistic improvement measure of biochar and straw interlayer (surface soil biochar application combined with a straw interlayer beneath the plow layer) on water movement patterns in saline-alkali farmland soil of arid regions. This will provide a scientific basis and technical references for the rational regulation of water movement processes in saline-alkali soil of the Hetao Irrigation Area. [Methods] Using vertical soil column infiltration experiments, this study established treatments combining straw

收稿日期: 2025-07-15

修回日期: 2025-08-30

录用日期: 2025-09-25

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-11-03

资助项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1900300)

第一作者: 牛雨婷(2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事盐碱改良研究。E-mail: NiuYuting2002@163.com

通信作者: 董勤各(1982—), 男, 副研究员, 博士, 博士生导师, 主要从事节水灌溉、盐碱地改良研究。E-mail: qgdong2011@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

interlayer with biochar application at rates of 0.5% (SC0.5), 2.5% (SC2.5), and 7.5% (SC7.5), with the treatment without biochar or straw interlayer (CK) serving as the control. The variation characteristics of soil water infiltration processes and infiltration model parameters under different combinations were systematically analyzed. [Results] 1) In the surface soil with biochar application alone, both the wetting front depth and the cumulative infiltration amount decreased gradually as the amount of biochar added increased over the same period. At 60 minutes, the SC0.5, SC2.5, and SC7.5 treatments showed reductions of 3.49%, 6.97%, and 10.41% in wetting front depth and 7.75%, 8.88%, and 15.50% in cumulative infiltration, respectively, compared to CK. The wetting front exhibited a "stagnation-fluctuation" dynamic characteristic when passing through the straw interlayer. The average advancement rate of the wetting front in the transition zone above the soil-straw interlayer interface decreased by 9.10%–45.45% compared to CK. Additionally, the infiltration rate fluctuated when passing through the straw interlayer. 2) The synergistic effect of the biochar and straw interlayer was influenced by biochar application rates, exhibiting a threshold effect, likely ranging from 0.5% to 2.5%. Overall, the SC0.5 treatment demonstrated the optimal performance in increasing the total cumulative infiltration, which was 16.88% higher than that of CK. However, it also slowed down the wetting front movement, increasing total infiltration time by 22.22% compared to CK. 3) Both the Kostiakov and Philip models effectively simulated the water infiltration process in saline-alkali soil. The Kostiakov model exhibited higher simulation accuracy, while the Philip model could explain the soil infiltration mechanism in terms of the physical significance of the parameters. These two models exhibited complementarity in analyzing the soil water movement process under the synergistic improvement of biochar-straw interlayer. [Conclusion] The effect of the biochar-straw interlayer synergistic improvement on soil water infiltration is affected by biochar application rates. Among the treatments, SC0.5 treatment demonstrated the best comprehensive performance in slowing down the wetting front movement and increasing cumulative infiltration. This study can provide theoretical guidance and technical support for the improvement of moderately to severely saline-alkali farmland soil in the arid regions of northwestern China.

Keywords: saline-alkali soil; biochar; straw; infiltration rate; infiltration model

Received: 2025-07-15

Revised: 2025-08-30

Accepted: 2025-09-25

Online(www.cnki.net): 2025-11-03

盐碱地作为我国重要的耕地后备资源,具有巨大的开发潜力。据统计^[1-2],我国现有可利用盐碱地面积约 37 万 km²,且分布范围持续扩大。然而,上述耕地盐碱化程度不断加剧,已成为制约现有盐碱土地资源高效利用和我国农业可持续发展的关键瓶颈,对未来国家粮食增收构成严峻挑战。盐碱土壤较高盐分将破坏土壤物理结构和化学平衡,降低土壤水力传导性、通气性及养分供给能力,影响作物生长、产量和籽粒品质^[3]。因此,开发经济、高效、可持续的盐碱土壤改良技术已成为盐碱化地区农业生产的迫切需求。目前,盐碱地改良主要包括排水洗盐、掺沙改土、秸秆隔层、种植耐盐作物、撒施石膏和生物炭添加等措施^[4]。其中,生物炭添加和秸秆隔层是对现有农业废弃资源的系统开发应用,不仅能够改善土壤结构、调控土壤水分运动过程,还能实现对农业废弃资源的循环利用,具有显著的环境和经济效益^[5]。

生物炭是一种由秸秆、木屑等生物质在无氧/缺氧条件下经高温(300~1 000 °C)热解生成的固态有机碳

材料^[6],其发达的孔隙结构、大比表面积和丰富表面官能团(如羧基、羟基等)形成自身的强吸附能力,可通过调控土壤孔隙与水力学特性影响水分运移^[7-8]。有研究^[9-10]表明,生物炭可通过促进大孔隙形成从而加快土壤水分入渗提高累积入渗量,但其提升效果并不随生物炭添加量增加而增强。棉秆生物炭通过增强土壤亲水性提升土壤的吸水能力与持水量,从而延长水分在该土层的停留时间,致使湿润锋运移延缓、累积入渗量降低,且该趋势随棉秆生物炭施用量的增加而加剧^[11-12]。整体上,生物炭添加量与土壤保水能力和透水性均呈非线性效应,因此,可能存在最佳的生物炭添加量阈值^[13-14]。上述研究表明,生物炭添加对土壤水分运移的影响受制于生物炭种类、添加量及土壤类型等因素。因此,深入探究生物炭适宜添加量,对于土壤水分入渗过程的有效调控具有重要意义。

秸秆还田作为农业废弃物资源化利用的重要途径,可通过地表覆盖、翻压还田与耕层下方埋设等方式调控土壤水分运移,已成为改善农田水分状况的

重要措施。相较于秸秆覆盖以抑制蒸发为主的保水机制,秸秆隔层通过将秸秆埋置于特定土层,直接改变土壤孔隙网络和导水路径,从而影响土壤水分入渗动态与持水能力。秸秆隔层可引起土壤异质性,在土壤层与秸秆隔层界面处形成不连续毛管,导致毛管势突然变化,从而减缓土壤水运移速率^[15-16]。同时,长度较短或粉末状的秸秆填充土壤孔隙将增加水分入渗阻力,可降低土壤水分入渗率、提升土壤蓄水量^[17-18]。氨化粉碎秸秆翻压还田可降低土壤体积质量、增加土壤孔隙度、提高土壤稳定入渗率^[19]。而段状秸秆因自身孔隙与土壤结构相互作用形成优先通道,反而增加总孔隙度加速湿润锋下移^[20-21]。上述现象表明,秸秆隔层的形态、埋设方式等因素通过改变土壤孔隙结构和导水路径,对土壤水分入渗的影响规律存在不一致性,仍需进一步系统研究。

尽管已有大量研究探讨生物炭添加和秸秆隔层对土壤水分运移过程的影响,但生物炭添加与秸秆隔层协同调控作物根区土壤结构对盐碱土壤水分入渗的影响尚不清晰,尤其缺乏联合改良措施下生物炭添加阈值效应的量化研究。因此,拟针对内蒙古河套灌区典型的中重度盐碱土壤,尝试提出表层土壤添加生物炭与耕层下方铺设秸秆隔层(简称生物炭-秸秆隔层协同改良措施)相结合的土壤改良技术,实现减缓盐碱土壤水分入渗率和湿润锋运移速度,增加土壤持水能力的作用。本文分别设置生物炭添加量为0.5%(SC0.5)、2.5%(SC2.5)、7.5%(SC7.5)与秸秆隔层联合施用的处理,以未添加生物炭且无秸秆隔层的处理(CK)作为对照,借助室内土柱试验,研究生物炭添加和秸秆隔层共同作用于典型盐碱土壤时的水分入渗变化规律,揭示生物炭-秸秆隔层协同改良措施对盐碱土壤水分的耦合作用机制和改良效果,并对比评价Kostiakov入渗模型和Philip入渗模型的适用性,旨在寻找较为合适的生物炭-秸秆隔层协同改良技术措施,为河套灌区盐碱土壤水分运移过程的合理调控提供科学依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤取自内蒙古自治区巴彦淖尔市水利科学研究所长胜试验站(40°58'34"N,108°35'51"E)向日葵农田,采样深度为0~40 cm。将取回的土样自然风干、磨碎、去除杂物,使用2 mm筛网将其筛分,混合均匀后备用。土壤pH为8.84,EC_{1:5}为6.62 mS/cm,全磷、全钾质量分数分别为0.67、20.34 g/kg,硝态氮、铵态氮质量分数分别为2.94、231.65 mg/kg。土壤砂粒、粉粒、黏粒质量分数分别为46.19%、36.73%、

17.08%。按照国际土壤质地分类标准,供试土壤属于壤土。

试验选用生物炭为玉米秸秆生物炭,购自郑州金邦环保科技有限公司。生物炭颗粒直径为40~80目,纤维素、碳、灰分、氮含量分别为13.7%、75.3%、9.68%、1.49%,比表面积为593 m²/g,O/C为0.19,H/C为0.39。试验选用玉米秸秆采自陕西省武功镇,干燥的玉米秸秆经铡刀切割为3~5 cm段状并碾压破碎备用。试验设置秸秆隔层+添加质量分数为0.5%的生物炭(SC0.5)、秸秆隔层+添加质量分数为2.5%的生物炭(SC2.5)、秸秆隔层+添加质量分数为7.5%的生物炭(SC7.5)及不添加秸秆和生物炭的对照(CK)4个处理。质量分数为生物炭和原土混合后的质量分数,生物炭掺混深度为0~10 cm,秸秆埋深设置为30~35 cm,每个处理重复3次。

1.2 试验装置与测定方法

试验在西北农林科技大学旱区作物生境调控模拟实验室开展。选用内径15 cm、高60 cm的透明有机玻璃土柱,有机玻璃柱底部有保留网状分布的直径2 mm小孔以保持土柱通气性,侧面贴有刻度尺,用于湿润锋的记录。马氏瓶内径为20 cm、高30 cm。试验装置图见图1。

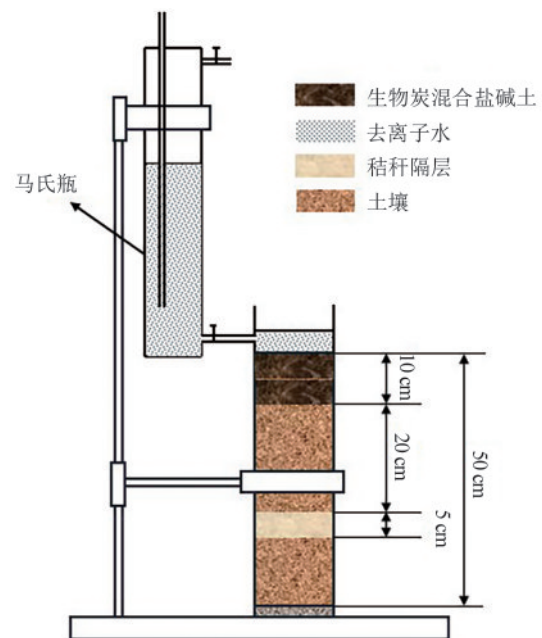


图1 室内一维定水头垂直入渗试验装置示意

Fig. 1 Laboratory one-dimensional constant-head vertical infiltration test setup

装土前,先在土柱底部装填干净的砂石(粒径2~5 cm)作为反滤层,厚度2 cm。管壁均匀涂抹一薄层凡士林,减少入渗时优势流产生。将土样按照设定体积质量1.38 g/cm³分次等量装入土柱,为使土柱各处体积质量一致,每次装填的土层控制为5 cm,压实1层后将

其表面刷毛,再装填下 1 层,以保证土层间接触良好。

对于生物炭-秸秆隔层协同改良处理土柱,当土柱装填至 15 cm 高度时,先在土表平铺 1 层 300 目尼龙布,然后均匀铺设切割破碎的玉米秸秆,即设置秸秆隔层,压实后秸秆隔层厚度为 5 cm,体积质量为 0.09 g/cm^3 [3],在秸秆隔层上表再平铺 1 层尼龙布,再装填 20 cm 厚土样,最后将均匀混合对应质量分数的生物炭的土样装填 10 cm,装填完成后有机玻璃管内土柱高度为 50 cm。之后将土柱静置 48 h,使土壤在重力作用下自然沉降。

用制备的去离子水进行垂直一维土柱积水入渗试验,供水水头为 3.5 cm,各处理水头均相同。试验开始前在土壤表层放 1 张滤纸,防止入渗开始供水瞬间对土壤表面的冲刷。当湿润锋到达距离土表面 40 cm 时停止供水,代表入渗结束。

入渗过程中记录不同时刻的湿润锋运移位置和马氏瓶水位变化情况。按照 0~10 min 间隔 30 s, 10~60 min 间隔 2 min, 60~120 min 间隔 10 min, 120~720 min 间隔 30 min, 720~1 320 min 间隔 1 h, 之后每隔 4 h 先密后疏的规律记录数据,直到湿润锋运移至距离土表 40 cm 时停止读数。

1.3 模型模拟

目前,关于土壤水分入渗率与入渗时间的关系,常用的经验公式和入渗模型包括 Kostiakov 模型和 Philip 模型等,因其形式简洁、应用便捷而被广泛采用。Kostiakov 入渗模型为:

$$i(t) = Kt^{-\alpha} \quad (1)$$

式中: $i(t)$ 为入渗率, cm/min; t 为入渗时间, min; K 为入渗系数, cm/min; α 为入渗指数。

Philip 入渗模型为:

$$i(t) = 0.5St^{-0.5} + A \quad (2)$$

式中: $i(t)$ 为入渗率, cm/min; t 为入渗时间, min; S 为土壤呼吸率, $\text{cm}/\text{min}^{0.5}$; A 为稳渗率, cm/min。

上述模型均利用决定性系数 $\text{RMSE}(R^2)$ 来判断模型模拟的精度,当 R^2 越接近 1 时模型拟合度越好。其计算公式为:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

式中: m 为变量数量; y_i 为因变量实测值; \hat{y}_i 为因变量模拟值。

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2016 软件整理统计分析数据, IBM SPSS Statistics 27 软件进行土壤水分入渗过程模拟,使用 OriginPro 2024 软件绘制图形。

2 结果与分析

2.1 生物炭-秸秆隔层协同改良措施对土壤水分入渗特性的影响

2.1.1 生物炭-秸秆隔层协同改良措施对湿润锋的影响 不同生物炭添加量下生物炭-秸秆隔层协同改良措施对土壤湿润锋运移随时间变化曲线见图 2。入渗 60 min 时,各处理湿润锋均运移至生物炭与土壤层交界面,湿润锋运移深度为 $\text{SC0.5} > \text{SC2.5} > \text{SC7.5}$,与 CK 相比, SC0.5、SC2.5、SC7.5 的湿润锋运移深度分别减小 3.49%、6.97%、10.41%。各处理湿润锋运移通过秸秆隔层与土层交界面上方的过渡区(此处定义为距离土表 28~30 cm 的土层)的平均湿润锋推进速率存在差异,表现为 $\text{CK} (0.011 \text{ cm}/\text{min}) > \text{SC2.5} (0.010 \text{ cm}/\text{min}) > \text{SC7.5} (0.008 \text{ cm}/\text{min}) > \text{SC0.5} (0.006 \text{ cm}/\text{min})$,与 CK 相比, SC0.5、SC2.5、SC7.5 的平均湿润锋推进速率分别减少 45.45%、9.10%、27.27%。在湿润锋通过秸秆隔层时(30~35 cm),湿润锋运移曲线趋势相较于 30 cm 前的运移曲线趋势发生显著变化,具体为湿润锋运移深度随时间变化呈波动性,出现局部加速或迟滞现象。各处理通过秸秆隔层平均湿润锋推进速率表现为 $\text{SC7.5} (0.021 \text{ cm}/\text{min}) > \text{SC2.5} (0.012 \text{ cm}/\text{min}) > \text{CK} (0.006 \text{ cm}/\text{min}) > \text{SC0.5} (0.003 \text{ cm}/\text{min})$,与 CK 相比, SC0.5 平均湿润锋推进速率减少 100%,而 SC2.5 和 SC7.5 的平均湿润锋推进速率分别增加 100%、250%。各处理湿润锋运移至 40 cm 时所用总时间表现为 $\text{SC0.5} > \text{CK} > \text{SC2.5} > \text{SC7.5}$,与 CK 相比, SC0.5 入渗时间增加 22.22%, SC2.5 和 SC7.5 入渗时间分别下降 27.78%、29.63%。

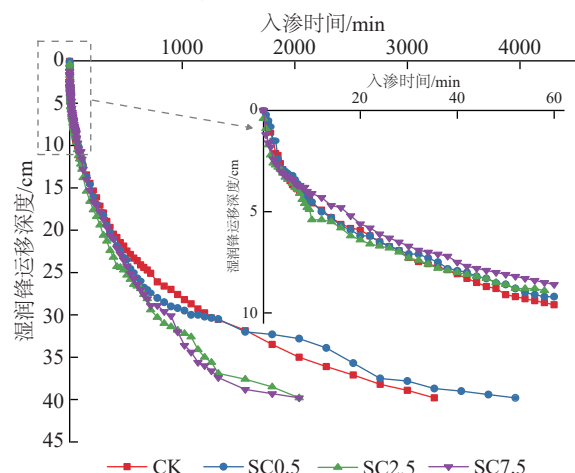


图 2 不同处理下湿润锋随入渗时间变化

Fig. 2 Variation of wetting front with time under different treatments

2.1.2 生物炭-秸秆隔层协同改良措施对累积入渗量的影响 不同生物炭添加量下的生物炭-秸秆隔层协同改良措施对土壤累积入渗量随时间变化曲线的影响见

图3。随入渗时间增加,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。入渗 60 min 时,累积入渗量为 SC0.5>SC2.5>SC7.5,与 CK 相比,SC0.5、SC2.5、SC7.5 的累积入渗量分别降低 7.75%、8.88%、15.50%。当湿润锋运移至秸秆隔层与土壤交界面(30 cm)时,各处理累积入渗量表现为 SC7.5 (15.11 cm)>SC0.5 (15.02 cm)>SC2.5 (14.93 cm)>CK (14.50 cm);与 CK 相比,SC0.5、SC2.5 和 SC7.5 累积入渗量分别增加 3.59%、2.97%、4.20%。入渗结束时,各处理累计入渗量表现为 SC0.5>SC2.5>CK>SC7.5,SC0.5 和 SC2.5 较 CK 分别增加 16.88% 和 3.33%,SC7.5 较 CK 相对减少 3.11%。

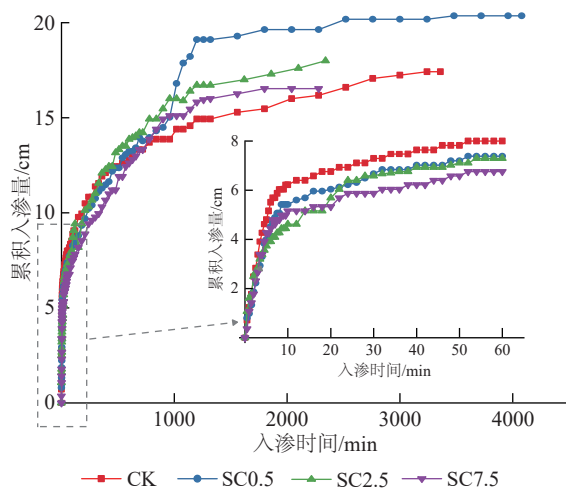


图3 不同处理下累积入渗量随入渗时间变化

Fig. 3 Variation of cumulative infiltration with time under different treatments

2.1.3 生物炭-秸秆隔层协同改良措施对土壤水分入渗率的影响 不同生物炭添加量下的生物炭-秸秆隔层协同改良措施对土壤入渗率随时间变化的影响见图4。0~60 min内土壤水分入渗率变化特征基本可划分为渗润阶段(0~10 min)、渗漏阶段(10~20 min)和稳渗阶段(20~60 min)3个阶段^[22]。0~10 min时,生物炭-秸秆隔层协同改良处理的土壤水分入渗率均低于CK, 10 min时,各处理土壤水分平均入渗率表现为CK(0.622 cm/min)>SC0.5(0.542 cm/min)>SC7.5(0.170 cm/min)>SC2.5(0.462 cm/min),相较于CK, SC0.5、SC2.5、SC7.5分别减少12.86%、25.72%、17.04%。60 min时,各处理土壤水分平均入渗率表现为CK(0.133 cm/min)>SC0.5(0.123 cm/min)>SC2.5(0.121 cm/min)>SC7.5(0.112 cm/min),相较于CK, SC0.5、SC2.5、SC7.5分别降低7.72%、8.85%、15.48%。

当湿润锋运移通过秸秆隔层上方过渡区(28~30 cm)期间(对应时间690~960 min),各处理入渗率均呈下降趋势,SC0.5、SC2.5、SC7.5处理在960 min

时的入渗率较690 min时分别下降26.25%、20.27%、12.66%。生物炭-秸秆隔层协同改良处理湿润锋通过秸秆隔层时间为900~2100 min,各处理土壤水分入渗率表现为先上升后下降逐渐趋于平稳的波动趋势。入渗结束时,各处理土壤水分平均入渗率表现为SC2.5(0.0769 cm/min)>SC7.5(0.00725 cm/min)>CK(0.00518 cm/min)>SC0.5(0.00499 cm/min),相较CK, SC2.5和SC7.5分别增加48.46%和39.96%,而SC0.5降低3.67%。

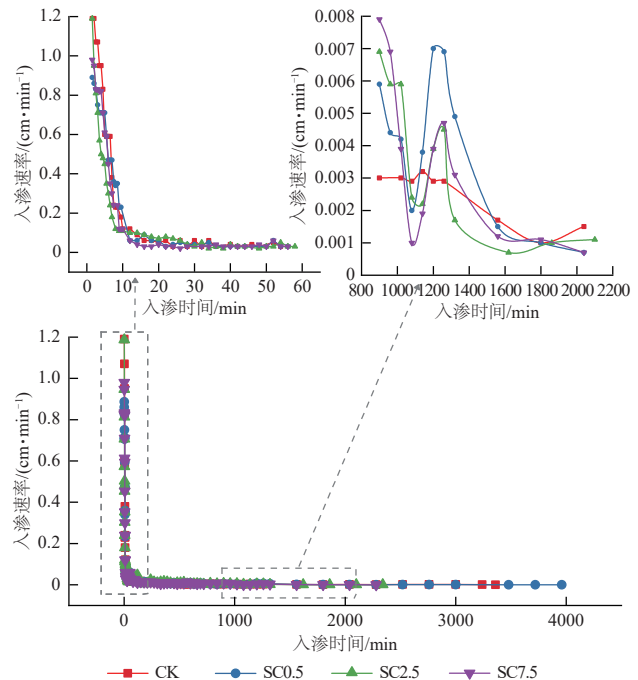


图4 不同处理下入渗率随入渗时间变化

Fig. 4 Variation of infiltration rate with time under different treatments

2.2 生物炭-秸秆隔层协同改良措施对土壤水分入渗参数的影响

通过Kostiakov模型和Philip模型对土壤水分入渗率的时间变化特征进行拟合的相关参数见表1。Kostiakov模型的 R^2 为0.876~0.911, Philip模型的 R^2 为0.812~0.882, Kostiakov模型对于各处理的土壤水分入渗率与时间关系拟合效果更好。

2.2.1 生物炭-秸秆隔层协同改良措施下Kostiakov入渗模型的参数 在Kostiakov入渗模型中,参数 K 、 α 分别为入渗系数、入渗指数。 K 值表征土壤水分入渗初始阶段(单位时间为1 min)单位面积(cm^2)上的平均入渗率, α 值表征曲线衰减速率。由表1可知,受生物炭添加量影响, K 值表现为SC2.5>SC7.5>SC0.5,分别较CK降低14.08%、18.35%、28.24%。 α 值表现为SC2.5>CK>SC7.5>SC0.5,其中SC2.5较CK升高19.16%,而SC7.5和SC0.5较CK分别降低1.59%、13.27%。参数 K 和 α 对土壤水分入渗率随

时间变化过程具有协同调控作用。在入渗初期,入渗系数 K 对入渗率的影响占主导地位;随着入渗时间持续增加,入渗指数 α 所反映的入渗曲线衰减特性对入渗率的调控作用显著增强,即 K 值主要决定初期入渗率的大小,而 α 值则主导后期入渗率的衰减趋势与变化幅度。

表1 Philip和Kostiakov入渗模型拟合参数

Table 1 Fitting parameters of Philip and Kostiakov infiltration models

处理	Philip模型			Kostiakov模型		
	S	A	R^2	K	α	R^2
CK	3.160	0.121	0.847	2.202	0.882	0.911
SC0.5	2.556	0.082	0.882	1.580	0.765	0.907
SC2.5	2.235	0.086	0.839	1.892	1.051	0.973
SC7.5	2.642	0.104	0.812	1.798	0.868	0.876

2.2.2 生物炭-秸秆隔层协同改良措施下Philip入渗模型的参数 在Philip入渗模型中,参数 S 、 A 分别为土壤呼吸率、稳渗率。 S 值表征土壤在初始阶段的毛细吸力作用, A 值表征土壤达到稳定状态后的导水能力。由表1可知, S 值表现为 $SC7.5 > SC0.5 > SC2.5$,较CK分别减少16.39%、19.11%、29.27%。 A 值表现为 $SC7.5 > SC2.5 > SC0.5$,分别较CK减少14.04%、28.92%、32.3%。说明生物炭-秸秆隔层协同改良措施降低 S 值和 A 值,并且随生物炭添加量的增加, A 值降幅呈递减趋势。在入渗初期,土壤吸湿率 S 通过表征土壤初始毛细吸力,对入渗率起主导调控作用;而在入渗后期,稳渗率 (A) 作为土壤稳定导水能力的量化指标,对入渗率的影响更为显著。

2.2.3 Philip入渗模型和Kostiakov入渗模型对比 Kostiakov模型通过独立参数 K (初始入渗系数) 和 α (衰减指数) 描述非均匀孔隙介质中入渗率的动态衰减过程,其优势在于能够量化生物炭-秸秆隔层协同改良措施对入渗前期和后期进行差异化调控,且Kostiakov模型精度 ($R^2=0.876\sim 0.911$) 略高于Philip模型 ($R^2=0.812\sim 0.882$),但因该模型的经验性本质,对土壤物理特性(如基质吸力等)的数理过程刻画较弱。Philip模型将入渗过程分解为吸湿主导阶段和稳渗阶段,其参数 S (吸湿率) 和 A (稳渗率) 直接关联土壤毛细吸力与饱和导水率,参数物理意义更明确。因此,Kostiakov模型在数值模拟方面能更准确地拟合盐碱土壤水分入渗过程,而Philip模型更能从物理意义上解析生物炭-秸秆隔层协同改良措施对盐碱土壤水分入渗的影响机制。

3 讨论

3.1 生物炭-秸秆隔层协同改良措施对盐碱土壤水分入渗过程的影响

生物炭具有发达孔隙结构,富含含氧官能团,作为外源物质输入土壤可改变土壤的孔隙结构,进而影响盐碱土壤水分入渗过程^[23]。本研究发现,随生物炭添加量的增加(0.5%~7.5%),入渗60 min时,湿润锋运移距离降低3.49%~10.41%,累积入渗量减少7.75%~15.50%,与余辉等^[13]在西南喀斯特区石灰土中开展的玉米秸秆生物炭添加试验结果相似。可能是因为生物炭主要通过物理结构和化学性质双重路径调控水分行为在孔隙结构方面,其丰富的内部微孔作为小孔隙系统,通过毛细作用增强水分保持^[24],延缓水分入渗;而生物炭颗粒可填充土壤颗粒间的空隙,减小土壤平均孔直径,降低土壤的总孔隙率和连通大孔隙率;同时,生物炭颗粒呈不规则形态可改变土壤基质的大孔隙连通性^[22],增加土壤水分运移路径,降低土壤孔隙连通性,与GRAY等^[25]的粒径效应研究一致。在表面化学方面,生物炭表面常带有羧基(-COOH)、羟基(-OH)等极性基团,亲水基团通过氢键与水分子结合,增强对水分的吸附能力,进一步延缓水分向大孔隙系统的转移^[26],进而降低累积入渗量。

秸秆隔层降低土壤与秸秆隔层交界面上部过渡层平均湿润锋推进速率,较CK减少9.10%~45.45%,同时,湿润锋在运移通过秸秆隔层过程中入渗率呈明显波动现象。当湿润锋运移至土壤与秸秆隔层交界面上部过渡层时,秸秆隔层表现出显著的阻滞效应,与ZHANG等^[27]研究结果一致。该阻滞作用可能源于土壤层与秸秆隔层界面处形成的不连续毛管系统,导致毛管势梯度发生变化,此现象在其他异质材料隔层(如砂石隔层、黏土隔层)中也有存在^[15]。当湿润锋运移通过秸秆隔层时,入渗率表现为先上升后下降逐渐趋于平稳的波动趋势。入渗率先上升可能是因为秸秆隔层形成的大孔隙促进优先流的发展,水分运移模式从均质基质流向非均质流态转变^[28]。前人^[29-30]研究表明,秸秆的添加改变土壤孔隙结构,形成快速导水通道,使优先流增多,促进水分运移。张宏媛等^[20]也通过CT扫描等证明,段状秸秆隔层的添加增加隔层总孔隙度,促进湿润锋运移。而入渗率后下降逐渐趋于平稳可能是因为秸秆隔层不断吸水,随着含水率升高其内部水势快速下降,当湿润锋运移至秸秆隔层与下层土壤交界面时,秸秆隔

层水势显著低于下层土壤,形成逆向水势梯度,进而阻滞土壤水分向下运移,使入渗率相对下降。而随着入渗的进行,秸秆隔层与土壤水势差逐渐相近,入渗率逐渐趋于平稳^[3]。

尽管生物炭和秸秆单独作用机制不同,但二者耦合施用影响湿润锋和累积入渗量。具体表现为少量生物炭添加量(SC0.5)减缓湿润锋运移,增加累积入渗量,降低平均入渗率;而大量生物炭施用量(SC7.5)加快湿润锋运移,减少累积入渗量,增加平均入渗率。因此,生物炭-秸秆隔层协同改良措施中生物炭的施用量可能具有阈值效应,阈值可能为0.5%~2.5%。可能是因为当生物炭用量低于阈值时,表层生物炭在土壤水分入渗作用下向下层土壤和秸秆隔层运移,占据、填充或者阻塞原始大孔隙^[31-32],减小下层土壤和秸秆隔层中的平均孔直径,生物炭主要表现为占据效应^[33],进而减缓湿润锋运移,降低平均入渗率。而由于形成的小孔隙相对大孔隙具有更高的抗重力保水能力,因此增加累积入渗量^[34]。相反,当生物炭用量高于阈值时,生物炭-秸秆隔层协同改良处理表现出更高的入渗率,更低的累积入渗量,可能是因为过量生物炭的主导作用由占据效用转变为“大孔隙形成效应”^[35],其引发的大孔隙流与秸秆优先流叠加^[33],使得水分快速通过土壤而未能有效蓄积,导致水分滞留时间缩短,进而降低累积入渗量。然而,受本试验设计限制,目前暂无法通过现有数据对阈值效应的物理机制作出完整阐释。后续研究将从优化试验设计、丰富检测方法等方面入手,深入探究生物炭-秸秆隔层协同改良下阈值效应产生的物理机制,为土壤水分运移规律研究提供更充分的理论支撑。

3.2 经验入渗模型参数的物理含义解析

本研究通过对比 Kostiakov 和 Philip 模型发现,二者在描述生物炭-秸秆隔层协同改良措施下土壤水分运移机制上具有互补性。Kostiakov 模型具有更高的拟合精度, R^2 值达0.876~0.911,能更精确描述生物炭-秸秆隔层协同改良处理下土壤水分入渗过程,与张锦涛等^[36]和 SUN 等^[37]在生物炭改良土壤中的发现一致。Kostiakov 模型的结果显示,生物炭和秸秆隔层组合共同降低参数 K ,与 SUN 等^[38]在单施稻草生物炭研究中发现参数 K 降低的结论一致。且参数 K 随生物炭添加量增加呈先减小后增大的变化趋势,可能是因为生物炭和秸秆隔层共同作用下具有阈值效应,其中,少量生物炭添加量(<2.5%)主要通过填充土壤孔隙降低入渗

能力,而大量生物炭添加(>7.5%)促使大孔隙网络形成,使参数 K 升高,此非线性响应与 CT 观测的孔隙结构变化一致^[20]。Philip 模型的拟合度略低(0.812~0.882),但参数具有明确物理意义^[39]。吸湿率(S)代表土壤对水汽的吸收能力,是反映土壤初始入渗能力的关键指标^[40],随生物炭量的增加呈先减小后升高趋势,可能是因为生物炭的少量添加堵塞土壤孔隙结构,降低土壤吸湿水能力,且抑制效应随添加量递增;而生物炭添加过量时,生物炭丰富的表面结构和表面含氧官能团与水分子发生相互作用,进而提升土壤的吸水能力。

4 结论

1)在表层只添加生物炭的土层中,相同时间内湿润锋运移深度和累积入渗量随生物炭添加量的增加而逐渐降低。而湿润锋通过秸秆隔层表现为“阻滞-波动”动态特征。在土壤与秸秆隔层交界面上部过渡层平均湿润锋推进速率较 CK 减少 9.10%~45.45%,而在通过秸秆隔层时其入渗率出现波动特征。

2)生物炭与秸秆隔层的协同作用具有阈值效应,阈值可能为 0.5%~2.5%。总体来看,SC0.5 处理在增加总累积入渗量(较 CK 增加 16.88%)方面效果最佳,但同时减缓湿润锋运移(较 CK 增加总入渗时间 22.22%)。

3)Kostiakov 模型和 Philip 模型在描述生物炭-秸秆隔层协同改良处理下土壤水分入渗规律上具有互补性。Kostiakov 模型具有更高的拟合度(R^2),能更好地拟合生物炭-秸秆隔层协同改良下土壤水分入渗过程。而 Philip 模型可从参数物理意义角度解释土壤水分入渗,为其机制解析提供物理依据。

参考文献:

- [1] 冯起,尹鑫卫,朱猛,等.统筹推进西北地区盐碱地综合治理利用:现状、挑战与对策建议[J].中国科学院院刊,2024,39(12):2060-2073.
FENG Q, YIN X W, ZHU M, et al. Overall promotion of integrated management and utilization of saline-alkali land in northwest China: Conditions, challenges, and recommendations [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2024, 39 (12): 2060-2073.
- [2] CHEN Y N, FANG G H, LI Z, et al. The crisis in oases: Research on ecological security and sustainable development in arid regions [J]. Annual Review of Environment and Resources, 2024, 49: 1-20.

- [3] 赵永敢.“上膜下秸”调控河套灌区盐渍土水盐运移过程与机理[D].北京:中国农业科学院,2014.
ZHAO Y G. Process and mechanism of "upper film and lower straw" regulating water and salt transport in saline soil in Hetao irrigation area[D].Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [4] 赵作章,陈劲松,彭尔瑞,等.土壤盐渍化及治理研究进展[J].中国农村水利水电,2023(6):202-208.
ZHAO Z Z, CHEN J S, PENG E R, et al. Research progress on soil salinization and management [J].China Rural Water and Hydropower, 2023(6):202-208.
- [5] ENAIME G, LÜBKEN M. Agricultural waste-based biochar for agronomic applications[J].Applied Sciences, 2021, 11(19):e8914.
- [6] JEFFERY S, VERHEIJEN F G A, VAN DER VELDE M, et al. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis[J].Agriculture, Ecosystems and Environment, 2011, 144(1):175-187.
- [7] HUSSAIN R, GHOSH K K, GARG A, et al. Effect of biochar produced from mesquite on the compaction characteristics and shear strength of a clayey sand[J].Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(2):1117-1131.
- [8] 马玮键,邢泽炳,韩春风,等.基于近红外光谱的土壤氮含量模型及生物炭对土壤光谱的影响[J].农业工程,2022,12(12):22-27.
MA W J, XING Z B, HAN C F, et al. Soil nitrogen content model based on near infrared spectroscopy and effect of biochar on soil spectra [J].Agricultural Engineering, 2022, 12(12):22-27.
- [9] 岑睿.不同改良剂对河套灌区典型土壤理化特性及作物生长影响机理试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
CEN R. Experimental study on the influence mechanism of different modifiers on typical soil physical and chemical properties and crop growth in Hetao irrigation area [D].Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [10] 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.
- [11] 孔芊芊.生物炭对南疆盐渍土团聚体特征和水盐运移的影响[D].新疆阿拉尔:塔里木大学,2023.
KONG Q Q. Effect of biochar on aggregate characteristics and water and salt migration of saline soil in southern Xinjiang [D].Ala' Er, Xinjiang: Tarim University, 2023.
- [12] 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.
- [13] 余晖,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 H, FANG R J, YU J J, 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.
- [14] 陈希霖.生物质炭对滨海盐碱土水分及溶质迁移的影响[D].杭州:浙江科技大学,2023.
CHEN X L. Effects of biomass charcoal on water and solute migration in coastal saline-alkali soil [D].Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2023.
- [15] LIU H H, DONG J, LIU Q, et al. Effect of Median soil-particle size ratio on water storage capacity of capillary barrier [J].Water, 2024, 16(13):e1774.
- [16] 吴烽,张林瑄,郭相平,等.秸秆隔层及不同灌水上限对土壤水氮分布的影响[J].灌溉排水学报,2020,39(6):73-78.
WU F, ZHANG S X, GUO X P, et al. Effects of straw interlayers and different irrigation limits on soil water and nitrogen distribution [J].Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6):73-78.
- [17] 沈秉涛,王妍,刘云根,等.秸秆混掺对石漠化地区土壤水氮分布的影响[J].节水灌溉,2023(6):66-75.
SHEN B T, WANG Y, LIU Y G, et al. Effect of straw blending on the distribution of water and nitrogen in soils of rocky desertification areas [J].Water Saving Irrigation, 2023(6):66-75.
- [18] 卢闯.玉米秸秆隔层对土壤溶液盐浓度与离子运动的影响[D].北京:中国农业科学院,2017.
LU C. Effect of corn straw interlayer on salt concentration and ion movement in soil solution [D].Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.
- [19] WANG X Y, YANG K, ZHENG J. Effect of straw addition on soil infiltration characteristics and model-fitting analysis [J].Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(13):e395.
- [20] 张宏媛,逢焕成,卢闯,等.CT扫描分析秸秆隔层孔隙特征及其对土壤水入渗的影响[J].农业工程学报,2019,35(6):114-122.

- ZHANG H Y, PANG H C, LU C, et al. Pore characteristics of straw interlayer based on computed tomography images and its influence on soil water infiltration[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(6): 114-122.
- [21] 赵廷红, 袁文磊, 苏宗刚. 弱矿化水及秸秆隔层对土壤水盐运移的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(1): 94-102.
- ZHAO T H, YUAN W L, SU Z G. Effects of weak mineralized water and straw interlayer on soil water and salt transport[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(1): 94-102.
- [22] 沈冰, 黄红虎. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 48-49.
- SHEN B, HUANG H H. Principles of hydrology[M]. Beijing: China Water and Power Press, 2008: 48-49.
- [23] 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.
- [24] LIU Z L, DUGAN B, MASIELLO C A, et al. Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties [J]. PLoS One, 2017, 12(6): e0179079.
- [25] GRAY M, JOHNSON M G, DRAGILA M I, et al. Water uptake in biochars: The roles of porosity and hydrophobicity[J]. Biomass and Bioenergy, 2014, 61: 196-205.
- [26] ZHANG H Y, CHENG Y, ZHONG Y H, et al. Roles of biochars' properties in their water-holding capacity and bound water evaporation: Quantitative importance and controlling mechanism [J]. Biochar, 2024, 6(1): e30.
- [27] ZHANG H Y, LU C, PANG H C, et al. Straw layer burial to alleviate salt stress in silty loam soils: Impacts of straw forms [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(1): 265-276.
- [28] KODEŠOVÁR, NĚMEČEK K, KODEŠV, et al. Using dye tracer for visualization of preferential flow at macro-and microscales[J]. Vadose Zone Journal, 2012, 11(1): e0088.
- [29] DUAN Z Y, WANG C, ZHU C L, et al. Effects of straw incorporation and decomposition on soil preferential flow patterns using the dye-tracer method[J]. Agriculture, 2024, 14(2): e201.
- [30] LIAO Y, DONG L B, LV W W, et al. Response of soil infiltration and water to orchard mulching practices in the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2025, 252: e108848.
- [31] BAI N L, ZHANG H L, ZHOU S, et al. Long-term effects of straw return and straw-derived biochar amendment on bacterial communities in soil aggregates [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): e7891.
- [32] RAZZAGHI F, OBOUR P B, ARTHUR E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis [J]. Geoderma, 2020, 361: e114055.
- [33] WANG L F, LUO P, JIANG C Y, et al. Distinct effects of biochar addition on soil macropore characteristics at different depths in a double-rice paddy field [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: e159368.
- [34] BLANCO-CANQUI H. Biochar and soil physical properties [J]. Soil Science Society of America Journal, 2017, 81(4): 687-711.
- [35] 张雅馥, 王金满, 王敬朋, 等. 生物炭添加对矿区压实土壤水力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 58-65.
- ZHANG Y F, WANG J M, WANG J P, et al. Effects of biochar addition on the hydraulic properties of compacted soils in mining areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(22): 58-65.
- [36] 张锦涛, 毛旭锋, 宋秀华, 等. 生物炭和保水剂的施加对高寒城市绿地土壤持水特性的影响: 以西宁市为例 [J]. 水土保持研究, 2025, 32(4): 197-207.
- ZHANG J T, MAO X F, SONG X H, et al. Effects of biochar and water-retention agents on water-holding characteristics of urban green space soil in alpine areas: A case study of Xining City [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(4): 197-207.
- [37] SUN J N, YANG R Y, ZHU J J, et al. Contrasting effects of corn straw biochar on soil water infiltration and retention at tilled and compacted bulk densities in the Yellow River Delta [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2019, 99(4): 357-366.
- [38] SUN Y D, WANG X T, WU Q, et al. Use of rice straw nano-biochar to slow down water infiltration and reduce nitrogen leaching in a clayey soil [J]. Science of the Total Environment 2024, 948: e174956.
- [39] GHORBANI D S, HOMAEE M, MAHDIAN M H, et al. Site-dependence performance of infiltration models [J]. Water Resources Management, 2009, 23(13): 2777-2790.
- [40] WANG T T, STEWART C E, MA J B, et al. Applicability of five models to simulate water infiltration into soil with added biochar [J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(5): 701-711.