

砾石对强风化白云岩弃渣土体入渗特性的影响

颜科宇¹, 王道祥¹, 陈正发¹, 毛燕俊¹, 陈平平², 郭镒维³, 刘慧梅¹

(1. 云南农业大学 水利学院, 云南 昆明 650201; 2. 中国电建集团昆明勘测设计

研究院有限公司, 云南 昆明 650201; 3. 云南省滇中引水工程建设管理局, 云南 昆明 650224)

摘 要: [目的] 探究砾石对强风化白云岩隧洞开挖弃渣土体水分入渗特性的影响, 为大型输水隧洞开挖弃渣场安全稳定性评估提供科学依据。[方法] 通过室内模拟土柱入渗试验, 采用一维垂直定水头入渗法, 以无砾石为对照(CK), 研究 3 种砾石粒径(2~5 mm, 5~10 mm, 10~20 mm)和 4 种砾石含量(10%, 20%, 30%, 40%)条件下强风化白云岩弃渣土体湿润锋运移及水分入渗速率变化, 并对其入渗过程进行拟合和适用性评价。[结果] 与 CK 处理相比, 含砾石的弃渣土体在相同时间下湿润锋运移深度、水分入渗各参数及累计入渗量显著降低, 初始、稳定、平均入渗速率及累计入渗量分别减小了 17.34%~68.67%, 6.45%~51.94%, 28.51%~73.06% 和 6.74%~49.42% ($p < 0.05$)。砾石对弃渣土体水分入渗过程表现出显著的阻滞效应, 其中砾石粒径对其无显著影响($p > 0.05$), 而砾石含量的影响显著($p < 0.05$), 随着砾石含量的增加, 砾石对弃渣土体水分入渗的抑制效果呈阈值特征。当砾石含量超过 30% 时, 入渗参数随砾石含量增加的变化不再显著($p > 0.05$)。基于 3 种典型入渗模型的拟合度及参数模拟值的实际物理意义进行综合分析表明, Horton 模型在模拟强风化白云岩弃渣土体水分入渗过程中优于 Kostiaikov 和 Philip 模型。[结论] 砾石含量是抑制强风化白云岩弃渣土体水分入渗的主要因素, Horton 模型对其入渗过程的拟合具有最佳适用性。

关键词: 强风化白云岩; 弃渣土体; 砾石; 土壤水分入渗; 入渗模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)03-0016-09

中图分类号: TU4, S152.7

文献参数: 颜科宇, 王道祥, 陈正发, 等. 砾石对强风化白云岩弃渣土体入渗特性的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(3): 16-24. Yan Keyu, Wang Daoxiang, Chen Zhengfa, et al. Effects of gravel on moisture infiltration characteristics in highly weathered dolomite spoil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(3): 16-24. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.03.002; CSTR:32312.14.stbctb.2025.03.002.

Effects of gravel on moisture infiltration characteristics in highly weathered dolomite spoil

Yan Keyu¹, Wang Daoxiang¹, Chen Zhengfa¹, Mao Yanjun¹, Chen Pingping², Guo Yiwei³, Liu Huimei¹

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201,

China; 2. Kunming Engineering Corporation Limited of Power China, Kunming, Yunnan 650201, China;

3. Construction and Administration Bureau of Water Diversion Project in Central Yunnan, Kunming, Yunnan 650201, China)

Abstract: [Objective] The effects of gravel on the moisture infiltration characteristics of excavation spoil in highly weathered dolomite tunnels were investigated, in order to provide a scientific basis for evaluating the stability of safe spoil disposal sites while excavating large-scale water diversion tunnels. [Methods] Indoor simulated soil column infiltration experiments were conducted using a one-dimensional vertical constant-head infiltration method, with gravel-free conditions as controls (CK). This study examined the movement of the wetting front and variations in moisture infiltration rates with three gravel particle sizes (2—5, 5—10, 10—20 mm) and four gravel contents (10%, 20%, 30%, and 40%) in a highly weathered dolomite excavation spoil, while also fitting and assessing the applicability of the infiltration processes. [Results] Compared to the CK treatment, including gravel

收稿日期: 2024-12-20

修回日期: 2025-01-17

采用日期: 2025-01-17

资助项目: 云南省滇中引水工程建设管理局科研项目“滇中引水工程水土保持关键技术研究”(DZYS-ZH-STBC-SJ-001); 云南省教育厅科学研究资助项目(2024J0444)

第一作者: 颜科宇(2000—), 男(汉族), 四川省自贡市人, 硕士研究生, 研究方向为水土生态工程。Email: y2803269927@126.com。

通信作者: 陈正发(1985—), 男(彝族), 云南省砚山县人, 博士, 副教授, 主要从事水土生态工程、农业水土资源利用与保护方面的研究。Email: chenzhengfa2013@126.com。

in the spoil significantly reduced the depth of the wetting front movement, moisture infiltration parameters, and cumulative infiltration amounts under identical time conditions. The initial, steady, and average infiltration rates and the cumulative infiltration amounts decreased by 17.34%—68.67%, 6.45%—51.94%, 28.51%—73.06%, and 6.74%—49.42%, respectively ($p < 0.05$). Gravel had a significant hindering effect on the moisture infiltration process in the spoil, with particle size showing no significant influence ($p > 0.05$). Meanwhile, gravel content had a significant impact ($p < 0.05$). As the gravel content increased, the suppression of moisture infiltration showed a threshold effect. When the gravel content surpassed 30%, the changes in the moisture infiltration parameters became non-significant with further increases in gravel content ($p > 0.05$). A comprehensive analysis of the fitting degrees of the three typical infiltration models and the physical significance of the simulated parameters indicated that the Horton model was more effective than the Kostikov and Philip models in simulating moisture infiltration in a highly weathered dolomite excavation spoil. [Conclusion] The gravel content was a primary factor in suppressing moisture infiltration in highly weathered dolomite excavation spoils. The Horton model showed the best applicability for fitting the infiltration process.

Keywords: highly weathered dolomite; excavation spoil; gravel; soil moisture infiltration; infiltration model

滇中引水工程是中国水资源调配的重要基础设施,旨在缓解滇中地区的水资源短缺问题,同时可促进区域生态系统稳定及西南地区的经济与环境协调发展^[1-3]。然而,为解决引水隧洞开挖过程中产生的弃石弃土存放问题,需要规划建设专门的弃渣场^[4]。近年来,气候变化导致区域极端降雨事件频发,降雨条件下的水分入渗过程已成为影响弃渣场土壤侵蚀和边坡稳定性的重要因素^[5]。在降雨入渗条件下,显著增加了水土流失和边坡失稳的风险,进而引发崩塌、滑坡和泥石流等次生地质灾害问题,对区域生态环境和工程安全造成严重威胁^[6-8]。因此,开展弃渣场渣土体渗透特性研究对于评估弃渣场的安全稳定性及保障工程安全具有重要意义。

白云岩作为滇中引水工程沿线典型的地质岩性类型,普遍存在风化程度高、岩体强度低等特点,在强风化作用下易形成粉质黏土或碎块状岩石。同时,在输水隧洞建设过程中,钻爆法隧洞开挖产生的碎石与粉质土混合,由此堆积形成的弃渣土体往往夹杂大量砾石,构成土壤—砾石二元混合体。有研究^[9]表明,土壤—砾石二元混合体能够改善弃渣场边坡的抗剪强度,增强边坡的承载能力,同时有效减缓土壤侵蚀和径流。然而,一定含量砾石的存在也可能增强土壤的入渗性能,导致水分在边坡内部积聚,增加堆积体的水负荷,从而进一步削弱边坡的稳定性,成为导致边坡失稳的重要因素^[10]。此外,砾石的存在可改变土壤的孔隙特征、水分的过水断面和运动通道,使含砾石土壤的水分入渗过程比均质土壤更为复杂^[11]。相关研究^[12]表明,砾石含量、粒径和分布特征等因素均会对土壤水分入渗过程产生不同程度的影响,由此导致目前关于砾石对土壤水分入渗过程的研究结果还存在一定的争议。Wu等^[13]研究

指出,随着砾石含量和粒径的增加,土壤的水分入渗能力显著降低。而黄光灵等^[14]则认为,砾石的存在能提升西南喀斯特地区土壤的有效孔隙度,从而改善其水分入渗能力。与此同时,学者们对不同砾石条件下土壤水分入渗模型的适用性也进行了深入探讨。Dong等^[15]研究发现,砂土在含砾石条件下最适用的是Philip模型,而叶瀛韬等^[16]针对不同砾石含量土壤水分入渗模型拟合度的研究表明,Horton模型适用于10%和30%的砾石含量,Philip模型适用于20%的砾石含量。综上所述,尽管已有很多文献对不同砾石含量条件下土壤入渗过程进行了研究,但这些研究大多关注砾石含量对耕作土壤入渗过程的影响,而针对砾石对弃渣土体水分入渗过程的研究相对较少,导致不同含量及粒径条件下弃渣土体水分入渗过程差异性特征尚不清楚,特别是对不同水分入渗模型在此情境中的适用性缺乏综合的评价,从而增加了弃渣场稳定性评估的复杂性和不确定性^[17]。基于此,本研究以滇中引水工程强风化白云岩输水隧洞开挖弃渣土体为研究对象,通过室内土柱入渗试验,测定强风化白云岩弃渣土体在不同砾石含量与粒径条件下的湿润锋运移及水分入渗特征,并对3种典型的土壤水分入渗模型(Kostikov, Philip和Horton模型)的适用性进行评估,以筛选出最佳的水分入渗模型,以期为滇中引水工程弃渣场的稳定性评估及安全防护措施设计提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于云南省楚雄彝族自治州禄丰市仁兴镇(25°21'27"N, 102°12'55"E),海拔1 592~2 525 m,地势呈东北高、西南低的特点,四周环山,属于亚热

带高原季风气候。该地区年均气温为 15.4℃,无霜期年平均为 261 d,年降水量在 770~1 125 mm,降雨事件频繁。年平均降水日数为 73 d,最多可达 94 d,极端情况下,年最大降雨量可达 1 174.5 mm,而最少降雨量为 668.0 mm。降雨主要集中在 5—10 月,其中 7 月降雨最为频繁。频繁的降雨事件及高降水量使得该区域易发土壤侵蚀、泥石流及滑坡等地质灾害,对区域水土生态环境和居民生活构成潜在威胁。

1.2 供试样品采集与试验设计

1.2.1 供试样品采集 供试土壤取自滇中引水工程楚雄段典型弃渣场——大美桥渣场。该弃渣场主要堆放龙潭输水隧洞开挖产生的弃土弃渣,弃渣场以全、强风化白云岩及黏土、粉质黏土为主,在降雨过程中弃渣场表面易发生严重的土壤侵蚀,同时造成弃渣场土体内部结构松动而影响稳定性。为研究砾石对弃渣土体入渗特性的影响,于 2024 年 4 月采用 S 形取样法从渣场顶部到底部进行取样,取土深度为 0—30 cm,在渣场横向间距 30 m 的基础上重复取样 3 次,以确保样品的代表性和可靠性。供试砾石为弃渣场大块的弱风化白云岩过筛所得,透水性极低。将取回的样品带回云南农业大学水保实验室自然风干,并去除杂草、树根等物质后,将砾石依次通过 20, 10 和 5 mm 网筛,土壤通过 2 mm 网筛备用。采用简易比重计法测定土壤粒径分布,其中黏粒(<0.002 mm),粉粒(0.002~0.05 mm),砂粒(0.05~2 mm)含量分别为 42.78%, 32.47%, 24.75%。

1.2.2 试验设计与方法 采用一维垂直定水头入渗法开展土壤入渗试验。为便于观察土壤水分的运移,土柱采用 1 cm 厚的亚克力玻璃制成,内径为 10 cm,高度为 80 cm。供水系统使用内径为 12 cm、高度为 50 cm 的亚克力玻璃制成的马氏瓶,供水水头维持在约 5 cm。为确保试验结果的准确性和可靠性,土料的最大粒径必须控制在试样直径的 1/5 以下^[18]。为此本试验选用砾石粒径分别为 2~5 mm, 5~10 mm, 10~20 mm 的 3 组粒径,砾石含量(质量百分比)设置为 10%, 20%, 30% 与 40% 共 4 个梯度,试验过程中将过筛的砾石与弃渣土充分混合,同时将无砾石土壤设置为对照组(CK),共 13 组处理,每个处理设有 3 个重复。在装填土柱前,底部须放置 2 mm 厚的鹅卵石和一层滤网,以防止土壤细颗粒流失。同时为减少土柱边壁的影响,土柱内壁需涂一层凡士林。装填时,细土的容重按 1.5 g/cm³进行备样,土壤与砾石按照质量比均匀混合后,以每 5 cm 为 1 层进行装填。每个土柱共装填 6 层,总高度为 30 cm。土柱表面亦放置 1 层鹅卵石和滤纸,以防止表层土壤受到马

氏瓶供水的冲击。在试验过程中,按照先密后疏的原则进行读数(前 20 min,间隔 2 min; 20~50 min,间隔 5 min; 50~180 min,间隔 10 min; 之后间隔 30 min),直至湿润锋运移至马氏瓶底部。土壤湿润锋运移过程主要通过观察水分在土柱中随时间的变化来确定湿润锋的下移情况。

土壤入渗率为单位时间从单位面积地表进入的水量,其中初始入渗速率为前 4 min 的平均入渗速率,稳定入渗速率为入渗曲线变幅较小时的入渗速率,平均入渗速率为湿润锋运移至土柱底部时累计入渗量与时间的比值。计算公式为:

$$i = \frac{I}{t} \quad (1)$$

式中: i 为入渗率(mm/min); t 为入渗时间(min); I 为 t 时间内的累计入渗水量(mm)。

1.3 入渗模型

分别选取经验模型 Kostiakov 和物理模型 Philip, Horton 作为典型的水分入渗模型,对不同砾石含量及粒径条件下土壤水分入渗过程进行模拟^[19]。

(1) Kostiakov 模型:

$$i(t) = -at^{-b} \quad (2)$$

式中: $i(t)$ 为入渗率(mm/min); a, b 为经验求得的模型参数。

(2) Philip 模型:

$$i(t) = 0.5St^{0.5} + i_c \quad (3)$$

式中: S 为吸渗率(mm/min); i_c 为稳定入渗速率(mm/min)。

(3) Horton 模型:

$$i(t) = (i_1 - i_c)e^{-ct} + i_c \quad (4)$$

式中: c 为递减指数; i_1 为初始入渗速率(mm/min)。

1.4 数据分析

本研究基础数据处理采用 Microsoft Excel 2013 进行,在 SPSS 19.0 软件中采用双因素分析(ANOVA)对不同砾石含量及粒径条件下土壤入渗参数的差异性进行分析,如果均值差异显著,将应用 $p < 0.05$ 的最小显著差异检验。采用 ArcGIS 10.5 和 Origin 2021 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 砾石对弃渣土体湿润锋运移的影响

图 1 为不同砾石含量及粒径条件下弃渣场土体湿润锋运移深度随时间变化曲线。由图 1 可见,各处理的湿润锋运移深度均随水分入渗过程的进行逐渐增加,在水分入渗初期,湿润锋的浸润速率较大,砾石含量对湿润锋的运移深度影响差异不显著,各处理的湿润锋运移深度变化曲线基本重合,后随着时

间的推移,湿润锋运移深度变化曲线趋于平缓,各处理间湿润锋变化特征表现出显著性差异。与CK处理相比,土壤中砾石的存在可显著减缓湿润锋的运移,且随着砾石含量的增加,湿润锋的阻滞作用愈发明显。当砾石含量超过30%时,曲线的重叠性较大,湿润锋运移深度的变化趋势基本相同。以水分入渗历时600 min为例,土壤中含砾石的湿润锋运移深度相比CK减少3.23%~22.67%,在粒径为2~5 mm, 5~10 mm和10~20 mm条件下,40%砾石含量的湿润锋运移深度相比10%分别减小8.32%,13.39%和18.65%。同时,当湿润锋深度运移至30 cm时,各砾

石含量处理间时间大小关系表现为:40%>30%>20%>10%>CK。此外,随着砾石粒径的增大,对湿润锋运移的阻碍作用愈加明显,含砾石土壤的湿润锋运移曲线重叠性也逐渐增加。在相同砾石含量下,粒径为10~20 mm的湿润锋运移深度相比2~5 mm, 5~10 mm分别减小1.16%~8.25%和2.23%~7.54%,湿润锋深度运移至30 cm的时间分别推迟23~72 min和7~46 min。综上分析可见,砾石含量和粒径均对弃渣场土体湿润锋的运移具有显著的阻滞效应,且当砾石含量超过30%时,砾石含量的继续增加对湿润锋的阻滞作用逐渐减弱。

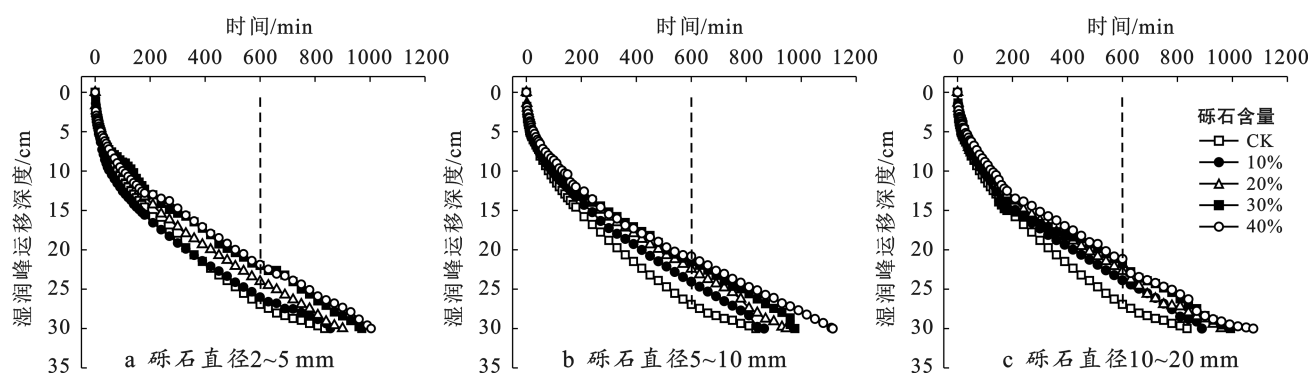


图1 不同砾石含量及粒径下湿润锋运移深度变化

Fig.1 Depth variation of wetting front migration under different gravel content and particle sizes

2.2 砾石对弃渣土体水分入渗的影响

2.2.1 土壤入渗速率变化 图2为不同砾石含量及粒径条件下弃渣场土体入渗速率随时间变化曲线。由图2可知,土壤水分入渗过程随时间的变化可以分为湿润阶段,渗漏阶段和渗透阶段3个阶段。在入渗初期,土壤水分的主要驱动力来自土壤基质势梯度,当土壤含水量超过最大分子持水量时,土壤入渗速率急剧下降,后随着水分在土壤孔隙中的逐渐填充,土壤毛细力和重力的作用使得水分进一步渗入土壤,此时入渗速率开始趋于稳定。当孔隙完全被水分充满时,土壤水分仅受到重力的影响,最终进入稳定入渗阶段。由图2还可看出,各处理的湿润阶段均发生在前10 min内,而不同处理处于湿润阶段和渗透阶段的持续时间均存在较大差异性。具体而言,CK的湿润阶段持续时间为10~240 min,在240 min后进入渗透阶段。与CK处理相比,土壤中砾石的存在可有效减短土壤孔隙达到饱和的时间,从而加速土壤水分进入稳定入渗阶段。随着砾石含量的增加,土壤水分进入稳定入渗阶段所需的时间越短,当砾石含量超过30%时,土壤入渗速率达到阈值,土壤入渗速率曲线随时间变化表现出较大的重叠性,导致30%与40%的砾石含量下土壤水分达到稳定入

渗阶段的时间无显著差异。在3种粒径条件下,砾石含量为10%,20%,30%和40%达到稳定入渗时间分别为100~200 min,70~100 min,40~50 min,40 min。此外,随着砾石粒径的增大,土壤水分达到稳定入渗的所需时间也逐渐缩短,在4种砾石含量条件下,砾石粒径为2~5 mm,5~10 mm与10~20 mm达到的稳定入渗时间分别为40~180 min,40~150 min,40~100 min。综上,砾石含量和粒径均对弃渣场土体的入渗产生阻碍作用,且当砾石含量超过30%时,砾石含量的继续增加对土壤入渗的阻碍作用逐渐减弱。

2.2.2 土壤入渗参数特征 初始、稳定及平均入渗速率是表征土壤入渗特性的重要参数^[20]。砾石含量及粒径对弃渣场土体水分初始、稳定及平均入渗速率的双因素方差分析结果详见表1。由表1可知,砾石含量和砾石粒径及其交互作用对土壤初始入渗速率均有显著影响($p < 0.05$),砾石含量对稳定入渗速率和平均入渗速率均有显著影响($p < 0.01$)。主体间效应 F 值及偏 η^2 值结果表明,砾石含量对土壤水分入渗参数的影响最大,砾石粒径及两者的交互作用无显著影响,表明砾石含量是影响弃渣场土体入渗特性的重要因素。

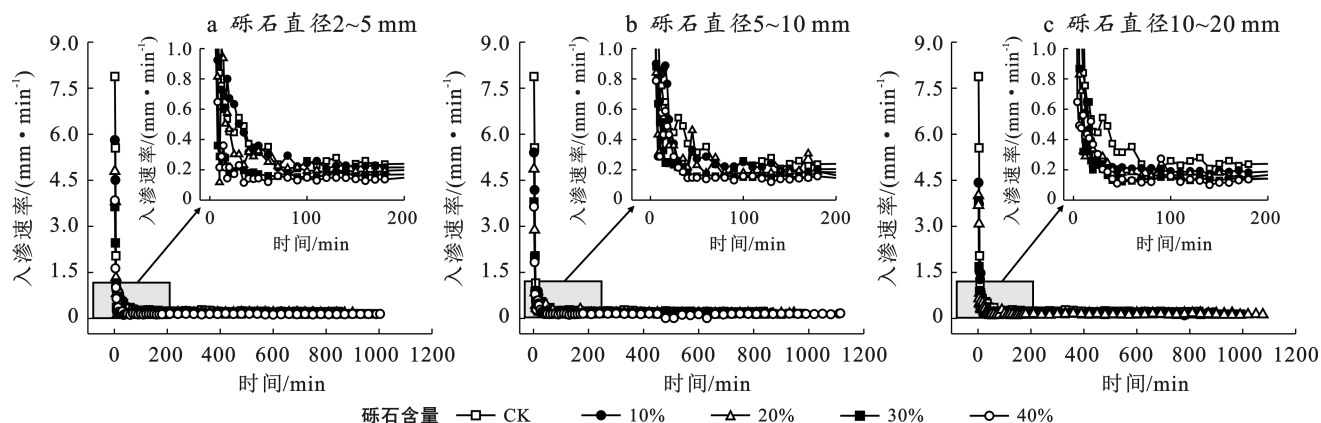


图2 不同砾石含量及粒径下土壤入渗速率变化

Fig.2 Variation of soil infiltration rate under different gravel content and particle sizes

无砾石(CK)与土壤中含砾石处理的稳定入渗速率相比,初始入渗速率分别减小86.18%~91.19%和84.24%~95.88%。

结果表明,砾石的存在会引发土壤水分入渗参数发生显著变化。土壤中含砾石处理的初始、稳定及平均入渗速率分别分布在2.17~5.41 mm/min, 0.12~0.23 mm/min和0.15~0.61 mm/min,与CK处理相比,分别减小17.34%~68.67%, 6.45%~51.94%和28.51%~73.06% ($p < 0.05$)。其次,随着砾石含量的增加,各处理的土壤入渗参数均显著降低 ($p < 0.05$),而当砾石含量超过30%时,土壤水分入渗各参数间

无显著差异 ($p > 0.05$)。在3种粒径条件下,40%砾石含量的初始入渗速率、稳定入渗速率及平均入渗速率相比10%分别减小42.92%~46.90%, 30.00%~33.33%和39.53%~48.08% ($p < 0.05$),各砾石含量处理土壤入渗各参数大小关系均表现为:CK>10%>20%>30%>40%。此外,砾石粒径对土壤各水分入渗参数的影响虽无显著差异,但在4种砾石含量条件下,随着粒径的增大,土壤入渗均有逐渐降低的趋势。综上所述,砾石含量对弃渣场土体入渗性能的影响最大,砾石含量增加可显著抑制土壤水分入渗性能。

表1 不同砾石含量及粒径下土壤水分入渗参数变化

Table 1 Variation of soil moisture infiltration parameters under different gravel content and particle sizes

砾石粒径	砾石含量/%	初始入渗速率/ (mm·min ⁻¹)	稳定入渗速率/ (mm·min ⁻¹)	平均入渗速率/ (mm·min ⁻¹)
2~5 mm	CK	6.72±0.23 ^a	0.23±0.01 ^a	0.61±0.15 ^a
	10	5.16±0.15 ^b	0.21±0.02 ^{ab}	0.52±0.07 ^b
	20	4.30±0.20 ^c	0.19±0.02 ^{bc}	0.44±0.11 ^{bc}
	30	3.05±0.17 ^d	0.16±0.03 ^c	0.30±0.03 ^c
	40	2.74±0.07 ^d	0.14±0.02 ^c	0.27±0.04 ^c
5~10 mm	10	4.80±0.12 ^b	0.20±0.01 ^b	0.48±0.12 ^b
	20	3.88±0.20 ^c	0.18±0.02 ^c	0.37±0.10 ^b
	30	2.89±0.07 ^d	0.16±0.01 ^c	0.30±0.07 ^c
	40	2.74±0.15 ^d	0.14±0.02 ^c	0.27±0.03 ^c
10~20 mm	10	4.07±0.03 ^b	0.19±0.02 ^b	0.43±0.02 ^b
	20	3.54±0.08 ^c	0.17±0.01 ^{bc}	0.33±0.03 ^{bc}
	30	2.76±0.02 ^d	0.14±0.02 ^c	0.28±0.04 ^c
	40	2.17±0.02 ^e	0.13±0.02 ^c	0.26±0.04 ^c
主体间效应分析 F 值 (偏 η^2)				
砾石含量		404.217(0.982)**	46.931(0.862)**	43.357(0.853)**
砾石粒径		20.958(0.583)**	2.929(0.163) ^{ns}	0.600(0.038) ^{ns}
砾石含量×砾石粒径		2.716(0.420)*	0.647(0.147) ^{ns}	0.803(0.176) ^{ns}

注:数据为平均值±标准误差;不同小写字母表示相同粒径条件下不同砾石含量间差异显著 ($p < 0.05$);**表示 $p < 0.01$ 水平差异显著,*表示 $p < 0.05$ 水平差异显著,ns表示不显著。

2.3 砾石对弃渣土体累积入渗量的影响

在达到稳定入渗速率之前,累计入渗量是表征土壤水分入渗能力的重要参数^[21]。图 3 为不同砾石含量及粒径条件下弃渣场土体水分累计入渗量随时间变化曲线。由图 3 可见,各处理的累计入渗量均随水分入渗过程的进行逐渐增加,在入渗初期,各处理间的累计入渗量差异不明显,表现为快速增长。随着时间推移,累计入渗增量逐渐减小,最终进入稳定入渗量增加阶段,此时各处理间的累计入渗量特征表现出显著的差异。与 CK 处理相比,土壤中砾石的存在

可显著降低土壤水分的累计入渗量,且随着砾石含量的增加,水分的累计入渗量逐渐减少。在 3 种粒径条件下,CK 相比砾石含量为 10%,20%,30% 和 40% 的累计入渗量分别增加了 6.74%~23.01%,17.94%~31.48%,6.74%~47.64% 和 41.34%~49.42%,各砾石含量处理土壤累计入渗量大小关系均表现为:CK>10%>20%>30%>40%。此外,随着砾石粒径的增大,砾石对土壤的阻滞效应导致土壤累计入渗量明显减少。综上所述,砾石对弃渣场土体水分累计入渗过程具有抑制作用,从而减少土壤的累计入渗量。

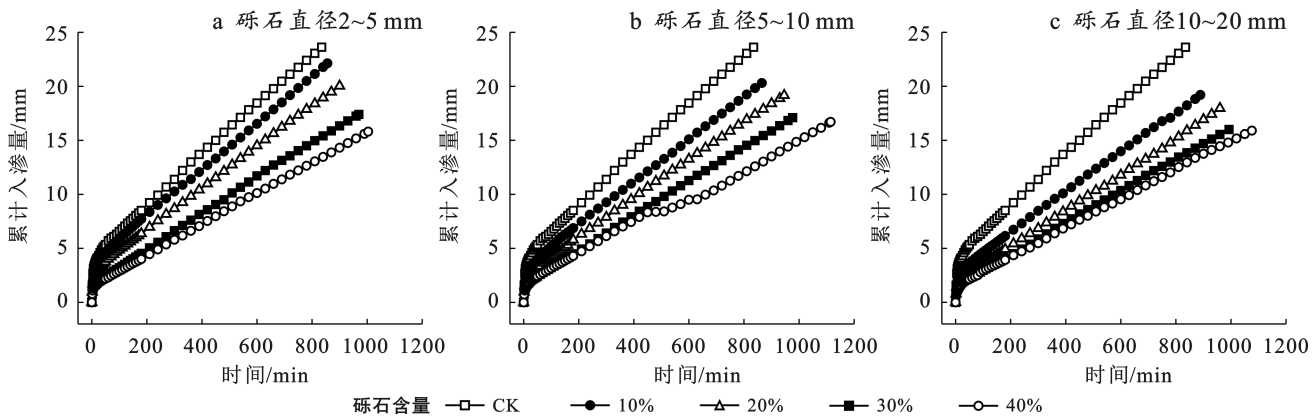


图 3 不同砾石含量及粒径下累积入渗量变化

Fig.3 Variation of cumulative infiltration under different gravel content and particle sizes

2.4 不同砾石含量及粒径条件下水分入渗过程模拟

为进一步研究不同砾石含量及粒径条件下土壤水分的入渗过程,本研究采用 Kostiakov, Philip 和

Horton 模型对不同砾石含量及粒径条件下土壤入渗速率随时间变化过程进行拟合,各模型参数的拟合结果详见表 2。

表 2 不同砾石含量及粒径下土壤入渗模型拟合结果

Table 2 Fitting results of soil infiltration models under different gravel content and particle sizes											
砾石粒径	砾石含量/%	Kostiakov 模型			Philip 模型			Horton 模型			
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>S</i>	<i>i</i> _c	<i>R</i> ²	<i>i</i> ₁	<i>i</i> _c	<i>c</i>	<i>R</i> ²
2~5 mm	CK	17.72	1.01	0.93	16.59	-0.49	0.72	11.64	0.27	0.30	0.98
	10	11.96	0.99	0.90	12.50	-0.30	0.73	10.76	0.28	0.30	0.93
	20	9.85	0.97	0.89	10.50	-0.24	0.73	8.53	0.27	0.27	0.93
	30	8.21	1.12	0.89	7.00	-0.14	0.66	7.03	0.16	0.32	0.98
	40	9.17	1.25	0.96	6.69	-0.14	0.65	8.12	0.15	0.39	0.99
5~10 mm	10	11.21	1.00	0.89	11.62	-0.29	0.72	10.00	0.25	0.30	0.92
	20	11.22	1.19	0.91	9.00	-0.20	0.66	10.53	0.21	0.39	0.97
	30	8.34	1.13	0.94	6.96	-0.13	0.69	7.43	0.17	0.35	0.99
	40	7.69	1.11	0.92	6.62	-0.11	0.70	7.84	0.17	0.40	0.95
10~20 mm	10	8.89	0.90	0.91	10.52	-0.25	0.77	6.82	0.19	0.21	0.97
	20	8.88	1.08	0.88	8.09	-0.17	0.67	7.67	0.17	0.31	0.95
	30	8.92	1.23	0.95	6.75	-0.14	0.67	8.32	0.16	0.40	0.99
	40	9.32	1.42	0.86	5.73	-0.09	0.60	21.78	0.18	0.91	0.94

注:*a*,*b*为模型参数;*S*为吸渗率;*i*_c为稳定入渗速率;*c*为递减指数;*i*₁为初始入渗速率。

从表 2 可知,Kostiakov 和 Horton 模型的拟合度 (*R*²) 均超过 0.86,而 Philip 模型的拟合度则介于

0.60~0.77,平均拟合度依次表现为:Horton 模型 (0.96)>Kostiakov 模型 (0.91)>Philip 模型 (0.69)。

同时,结合入渗模型各参数实际意义探讨入渗模型的适用性。其中,Kostiakov模型的参数 a 表示入渗曲线的斜率, a 值越大,瞬时入渗率的变幅越大。在不同砾石含量条件下, a 值的大小总体表现为:CK>10%>20%>30%>40%,这一结果与实测数据相吻合。其次,在Philip模型中,参数 S (吸渗率)可反映初始入渗速率的变幅,该模拟结果与实测值相符,但 i_c (稳定入渗速率)的模拟值均为负数,这与实际情况不符。此外,在Horton模型的模拟结果中,不同砾石含量条件下 i_1 (初始入渗速率)值与 i_c 值的大小关系也表现为:CK>10%>20%>30%>40%,与实测情况一致,但模拟的 i_1 值相较于实测值略显偏大。综合实测值与拟合值间的一致性及拟合精度来看,Horton模型的拟合效果最佳,因而更适用于不同砾石含量及粒径条件下对弃渣土体水分入渗过程的模拟。

3 讨论

3.1 砾石对弃渣土体入渗特性的影响

弃渣场是工程建设过程中产生的土石材料混合而成的堆积体^[22]。砾石的存在显著影响弃渣土体的水分运动,其含量和粒径的不均匀性使得土壤水分入渗过程更为复杂。本研究结果表明,砾石对土壤湿润锋运移、土壤入渗速率及累计入渗量具有显著的阻滞效应,这与李雪垠等^[23]研究结果一致。然而黄光灵等^[14]研究表明,砾石可改善土壤的孔隙结构,增加土壤孔隙连通率和孔隙等效直径促进土壤水分入渗。这一现象是由于本研究的对象为强风化白云岩粉质土,与西南喀斯特地区石灰岩相比,该土壤细颗粒含量较高,易堵塞砾石“骨架”间的大孔隙,且砾石作为不透水层,会减少土壤的过水断面,从而表现出砾石抑制强风化白云岩弃渣土体中水分的入渗^[24]。其次,本研究还发现在相同粒径条件下,当砾石含量不超过30%时,随着砾石含量的增加,阻滞效应越显著,而当砾石含量超过30%时,土壤的入渗参数变化不再表现出显著性差异。这主要是由于粉质土的有效孔隙度相对较小,水流通道条件较差,而砾石含量可直接决定有效孔隙度,砾石的紧密接触会造成有效孔隙度显著降低;当砾石含量达到30%时,会导致有效孔隙度出现阈值,当砾石含量继续增加时,土壤的入渗速率不再进一步降低,这也是砾石含量对水分入渗参数影响较大,而砾石粒径无显著影响的原因。此外,在相同砾石含量条件下,砾石粒径增大可延缓土壤湿润锋的运移。可能是由于在湿润锋运移过程中,砾石凹下部分的土壤也需要湿润,当砾石粒径增大时,凹下部分土壤的面积增加,造成土

壤水分入渗路径弯曲度也随之增大,在一定程度上阻碍了湿润锋的运移,从而导致湿润锋在到达相同运移距离时所需的时间有所延长^[25]。

3.2 弃渣土体水分入渗模型综合分析

弃渣土体水分入渗模型的准确度对于提高工程设计的可靠性至关重要。本研究对Kostiakov、Philip、Horton这3种典型土壤水分入渗模型拟合度结果分析表明,Horton模型的拟合效果最好,Kostiakov模型次之,Philip模型的拟合效果较差。Horton模型由于适用于非饱和土中的垂直一维入渗,且参数 i_1 和 i_c 具有物理意义,在大多数土壤水分入渗过程模拟中的效果较好^[12,26]。然而,Kostiakov模型是典型的指数模型,在时间无限趋近0时,水分入渗速率趋于无穷大,与实际的水分入渗情况不符,不适用于表征水分入渗初期土壤水分的运动变化,且该模型为一种半经验模型,其参数没有明确的物理意义,不能反映土壤入渗能力,所以在模拟土壤渗透率时的适用性不强^[27]。同时,Kostiakov模型的 R^2 值小于Horton模型,因此Kostiakov模型的模拟效果相对较差。其次,许多研究^[28-29]结果表明,Philip模型适用于初始含水量均匀的均质土壤的一维垂直入渗过程,而本文的研究对象存在砾石,所以拟合效果相对较差。然而,Wu等^[13]研究发现Kostiakov模型对于描述砾石对土壤水分入渗的影响效果较好,这与本研究结果存在差异,这可能是由于砾石的存在形式和土壤的特性不同造成的。

4 结论

(1) 强风化白云岩弃渣土体中砾石的存在对湿润锋运移、土壤入渗速率及累计入渗量具有显著的阻滞效应。与CK处理相比,在相同时间内,土壤中含砾石的处理的湿润锋运移深度、土壤入渗速率及累计入渗量显著降低;同时,土壤入渗过程达到稳定入渗所需的时间明显缩短。

(2) 双因素分析表明,砾石含量对强风化白云岩弃渣土体水分入渗参数的影响最大($p<0.05$),砾石粒径及两者的交互作用对其无显著影响($p>0.05$)。当砾石含量不超过30%时,随着砾石含量的增加,土壤湿润锋运移至相同深度所需的时间明显增加,土壤入渗各参数及累计入渗量显著降低($p<0.05$);然而,当砾石含量超过30%时,各参数随含量增加变化不显著($p>0.05$);3种砾石条件下,各砾石含量处理土壤水分入渗各参数大小关系均表现为:CK>10%>20%>30%>40%。

(3) 3种典型入渗模型的拟合度表明,Horton和

Kostiakov 模型相比 Philip 模型均能较好地模拟强风化白云岩弃渣土体水分入渗过程,但综合参数模拟值的实际物理意义进行评估和分析表明,Horton 模型的拟合结果更接近实测值,能够较好地描述砾石对强风化白云岩弃渣土体水分入渗过程的影响。

参考文献(References)

- [1] 向天兵,杨小龙,司建强,等.滇中引水工程龙泉隧洞近接施工影响控制研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(S2):859-865.
Xiang Tianbing, Yang Xiaolong, Si Jianqiang, et al. Research on adjacent construction influence control of Longquan tunnel of Central Yunnan water diversion project [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023,19(S2):859-865.
- [2] 贾绍凤,梁媛.调水工程研究评述与展望[J].地球科学进展,2023,38(3):221-235.
Jia Shaofeng, Liang Yuan. Commentaries on and prospects of the water diversion project [J]. Advances in Earth Science, 2023,38(3):221-235.
- [3] 桂耀,肖昌虎,侯丽娜.跨流域引调水工程规划方案优选研究:以滇中引水工程为例[J].中国农村水利水电,2017(9):63-66.
Gui Yao, Xiao Changhu, Hou Lina. The planning scheme optimization of inter-basin water transfer projects: Taking the water diversion for central area of Yunnan for example [J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9):63-66.
- [4] 王经运,杨志坚.南水北调某工程施工土石方平衡及影响因素[J].水利水电技术,2016,47(S1):24-27.
Wang Jingyun, Yang Zhijian. Brief analysis on earthwork balance for construction of a project of south-to-north water transfer project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2016,47(S1):24-27.
- [5] 郭兵,姜琳,罗巍,等.极端气候胁迫下西南喀斯特山区生态系统脆弱性遥感评价[J].生态学报,2017,37(21):7219-7231.
Guo Bing, Jiang Lin, Luo Wei, et al. Study of an evaluation method of ecosystem vulnerability based on remote sensing in a southwestern karst mountain area under extreme climatic conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(21):7219-7231.
- [6] Li Rui, Jing Jun, Tang Zhengyi, et al. Effects of Karst vegetation-soil-rock composite structure on soil and water flow/leakage processes and driving factors at the micro-plot scale [J]. Soil and Tillage Research, 2025, 247:106370.
- [7] Zheng Yunxin, Hu Zhiping, Wang Rui, et al. Slope stability analysis under heavy rainfall conditions based on a modified green-ampt model [J]. Water Resources Management, 2024,38(7):2627-2646.
- [8] 杨洪舟,王建文,陈平平,等.滇中引水工程弃渣场立地分类及植被恢复条件评价[J].水利水电技术(中英文),2024,55(增刊2):531-539.
Yang Haozhou, Wang Jianwen, Chen Pingping, et al. Site classification and evaluation of vegetation restoration conditions for slag dump of central Yunnan water diversion project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(Suppl.2):531-539.
- [9] Gao Yaohui, Zhang Yan, Ma Chunchi, et al. Failure process and stability analysis of landslides in southwest China while considering rainfall and supporting conditions [J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 10: 1084151.
- [10] Dong Hui, Zhao Yifan, Jiang Xiuzi, et al. Boundary effect on the hydraulic characteristics of gravelly soil slopes in physical model tests [J]. Journal of Hydrology, 2019,578:124054.
- [11] Wang Yichen, Li Yi, Wang Xiaofang, et al. Finger flow development in layered water-repellent soils [J]. Vadose Zone Journal, 2018,17(1):1-11.
- [12] 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 bio-char on water infiltration characteristics of limestone soil in southwest karst area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(5):225-235.
- [13] Wu Xiaolong, Meng Zhongju, Dang Xiaohong, et al. Effects of rock fragments on the water infiltration and hydraulic conductivity in the soils of the desert steppes of Inner Mongolia, China [J]. Soil and Water Research, 2021,16(3):151-163.
- [14] 黄光灵,王星,徐勤学,等.西南喀斯特区砾石对石灰土土壤孔隙及水分入渗的影响[J].水土保持学报,2024,38(4):312-321.
Huang Guangling, Wang Xing, Xu Qinxue, et al. Effect of gravel on soil porosity and water infiltration of lime soil in southwest karst area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(4):312-321.
- [15] Dong Xiaoyu, Qin Fucang, Li Long, et al. Study on water vertical infiltration characteristics and water content simulation of sandstone overlying loess [J]. Water, 2022,14(22):3716.
- [16] 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 Yingtao, Li Zhanling, Wang Hui. Effects of gravel nesting with different contents on infiltration characteristics of red soil [J]. Water Saving Irrigation, 2022(5): 1-6.

- [17] 董家兴,周志强,赵永川,等.滇中引水工程砂化白云岩隧洞围岩地质特征与破坏机制[J].岩石力学与工程学报,2024,43(S1):3464-3476.
Dong Jiaying, Zhou Zhiqiang, Zhao Yongchuan, et al. Study on geological characteristics and failure mechanism of surrounding rock of sandy dolomite tunnel in water diversion project in Central Yunnan [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43 (S1):3464-3476.
- [18] 国家发展和改革委员会.水电水利工程土工试验规程:DL/T 5355—2006[S].北京:中国电力出版社,2007.
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Code for soil tests for hydropower and water conservancy engineering: DL/T 5355—2006 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [19] 陈秋帆,李成荣,卢琦,等.短时强降雨下黏土表层覆盖苔藓水分入渗特征及其模型模拟[J].水土保持通报,2023,43(4):1-9.
Chen Qiufan, Li Chengrong, Lu Qi, et al. Water infiltration characteristics and model simulation of bryophytes on surface layer of clay soil under short-term heavy rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4):1-9.
- [20] 刘欢平,郑彩霞,石琪仙,等.聚丙烯酰胺与腐植酸混施对紫色土水分入渗特性的影响[J].水土保持通报,2023,43(4):121-127.
Liu Huanping, Zheng Caixia, Shi Qixian, et al. Effect of mixed application of polyacrylamide and humic acid on water infiltration characteristics of purple soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 121-127.
- [21] Peng Youliang, Liu Xiaogang, Zhu Yifei, et al. Effects of pressure heads and soil bulk density on infiltration characteristics of vertically inserted moistube irrigation [J]. Environmental and Earth Sciences Research Journal, 2019, 6(3):119-124.
- [22] 齐芳,丁建林,崔嘉琪,等.西南生态脆弱区重大建设工程渣场的生态修复技术和策略[J].应用与环境生物学报,2024,30(4):848-860.
Qi Fang, Ding Jianlin, Cui Jiaqi, et al. Overview of technologies and strategies for ecological restoration of dreg fields in major construction projects in ecologically fragile areas of southwest China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2024, 30 (4): 848-860.
- [23] 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 Xueyin, Li Zhaoxia, Wang Tianwei, et al. Rock interbed containment effect on infiltration processes in purple soil regions [J]. Advances in Water Science, 2016, 27(5):662-669.
- [24] Leal J, Avila E A, Darghan A E, et al. Spatial modeling of infiltration and its relationship with surface coverage of rock fragments and porosity in soils of an Andean micro-watershed in Tolima (Colombia) [J]. Geoderma Regional, 2023, 33:e00637.
- [25] 周蓓蓓,邵明安.不同碎石含量及直径对土壤水分入渗过程的影响[J].土壤学报,2007,44(5):801-807.
Zhou Beibei, Shao Ming'an. Effect of content and size of rock detritus on infiltration [J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(5):801-807.
- [26] Gan Fengling, Shi Hailong, Gou Junfei, et al. Effects of bedrock strata dip on soil infiltration capacity under different land use types in a karst trough valley of southwest China [J]. Catena, 2023, 230:107253.
- [27] Atta-Darkwa T, Asare A, Amponsah W, et al. Performance evaluation of infiltration models under different tillage operations in a tropical climate [J]. Scientific African, 2022, 17:e01318.
- [28] 李鸿,史东梅,盘礼东.生物炭与化肥配施对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤水分及入渗特性的影响[J].西南大学学报(自然科学版),2024,46(4):121-132.
Li Hong, Shi Dongmei, Pan Lidong. Effects of biochar and fertilizer application on soil moisture and infiltration performance of the erosive plow layer soil in sloping farmland of purple soil [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2024, 46(4):121-132.
- [29] 马雪燕,穆兴民,王双银,等.黄土丘陵区不同植被恢复对土壤入渗影响及适宜模型研究[J].水土保持学报,2023,37(2):67-75.
Ma Xueyan, Mu Xingmin, Wang Shuangyin, et al. Study on the effects of different vegetation restoration on soil infiltration and suitable models in the loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):67-75.