

上覆碳酸盐岩红土层对磷石膏水分运移的影响及 Green-Ampt 模型模拟

陈浩¹, 刘冬冬^{1,2}, 冯娜³, 杨娅¹, 唐俊杰¹

(1.贵州大学, 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550000; 2.喀斯特地质资源与地质环境教育部重点实验室, 贵州 贵阳 550000; 3.中国科学院 亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410000)

摘要: [目的] 分析上覆碳酸盐岩红土对磷石膏入渗特性的影响机制, 为西南喀斯特地区磷石膏堆场合理处置及利用提供科学依据。[方法] 通过室内扁平土柱入渗试验研究 3 种磷石膏容重(1.2, 1.3, 1.4 g/cm³)和 3 种上覆土层厚度(0, 6, 12 cm)对磷石膏水分入渗过程的影响, 并通过改进的分层型 Green-Ampt 模型进行入渗过程数值模拟。[结果] ①6 和 12 cm 覆土厚度处理下水分入渗到底部的时间差异不显著($p>0.05$), 而在 0 与 6 cm、0 与 12 cm 覆土厚度处理下入渗时间差异显著($p<0.05$)。覆土厚度为 0 cm 的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率显著高于 6, 12 cm 的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率($p<0.05$), 稳定入渗率随覆土厚度增大而显著减小。6, 12 cm 覆土厚度累积入渗量差异不显著($p>0.05$), 其余覆土厚度之间累积入渗量差异显著($p<0.05$)。②相同覆土厚度下, 磷石膏容重对初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率的影响均不显著($p>0.05$)。③湿润峰深度实测值与模拟值决定系数(R^2)变化范围为 0.951~0.995, 均方根误差(RMSE)为 12.174~40.856, 平均绝对百分比误差(MAPE)为 0.070~0.227。覆土 6 和 12 cm 时, 累积入渗量实测值与模拟值决定系数(R^2)变化范围为 0.963~0.999, 均方根误差(RMSE)为 1.471~11.201, 平均绝对百分比误差(MAPE)为 0.046~0.169。[结论] 磷石膏覆土与未覆土的土壤水分入渗特征存在显著差异, 改进的分层型 Green-Ampt 模型能够用于模拟上覆土层条件下磷石膏的入渗过程。

关键词: 覆土; 磷石膏; 水分运移; Green-Ampt 模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2025)01-0225-10

中图分类号: S157.1, TQ177.3

文献参数: 陈浩, 刘冬冬, 冯娜, 等. 上覆碳酸盐岩红土层对磷石膏水分运移的影响及 Green-Ampt 模型模拟[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 225-234. Chen Hao, Liu Dongdong, Feng Na, et al. Effect and simulation of overlying carbonate red soil layers on water migration in phosphogypsum [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 225-234. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.024; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.024.

Effect and simulation of overlying carbonate red soil layers on water migration in phosphogypsum

Chen Hao¹, Liu Dongdong^{1,2}, Feng Na³, Yang Ya¹, Tang Junjie¹

(1.College of Resource and Environment Engineering, Guizhou

University, Guiyang, Guizhou 550000, China; 2.Key Laboratory of Karst Geological

Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang, Guizhou 550000, China;

3.Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410000, China)

Abstract: [Objective] The influence of overlying carbonate red soil on the infiltration characteristics of phosphogypsum was analyzed in order to provide a scientific basis for the rational disposal and utilization of phosphogypsum storage yards in southwest karst areas. [Methods] The influences of three phosphogypsum bulk densities (1.2, 1.3, 1.4 g/cm³) and three overburden thicknesses (0, 6, 12 cm) on the water infiltration process of phosphogypsum were studied through an indoor flat soil column infiltration test, and the

收稿日期: 2024-04-07

修回日期: 2024-11-06

采用日期: 2024-11-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“孔/裂隙水驱动下垦殖坝地土壤—表层岩溶带氮肥的快速流失机制”(42067004); 贵州省优秀青年人才项目(黔科合平台人才-YQK[2023]005); 贵州省水利科技经费项目(KT201803)

第一作者: 陈浩(1999—), 男(土家族), 贵州省印江县人, 硕士研究生, 主要从事岩溶区生态水文过程研究。Email: gs.haochen22@gzu.edu.cn.

通信作者: 刘冬冬(1989—), 男(汉族), 江苏省盐城建湖县人, 博士, 教授, 主要从事地球关键带水土过程及生态环境效应研究。Email: liudongdongcn@foxmail.com.

infiltration process was numerically simulated using the improved layered Green-Ampt model. [Results] ① The difference in water infiltration time to the bottom between the 6 cm and 12 cm soil cover treatments was not significant ($p > 0.05$). However, significant differences in infiltration time were observed between the 0 and 6 cm treatments, as well as between the 0 and 12 cm treatments ($p < 0.05$). The initial infiltration rate, average infiltration rate, and stable infiltration rate of the 0 cm soil cover were significantly higher than those of the 6 and 12 cm soil cover ($p < 0.05$), and the stable infiltration rate decreased significantly with the increase in soil cover thickness. There was no significant difference in cumulative infiltration between the 6 and 12 cm cover soil thicknesses ($p > 0.05$), but there was a significant difference among the other cover soil thicknesses ($p < 0.05$). ② For the same cover thickness, the influence of phosphogypsum bulk density on the initial infiltration rate, average infiltration rate, and stable infiltration rate was not significant ($p > 0.05$). ③ The coefficient of determination (R^2) between the measured and simulated values of the wetting peak depth varied was 0.951—0.995, the root mean square error (RMSE) ranged was 12.174—40.856, and the average absolute percentage error (MAPE) ranged was 0.070—0.227. When the soil was covered at 6 and 12 cm, the variation range of the determination coefficient (R^2) between the measured and simulated values was 0.963—0.999, the root mean square error (RMSE) was 1.471—11.201, and the average absolute percentage error (MAPE) was 0.046—0.169. [Conclusion] There were significant differences in soil water infiltration characteristics between phosphogypsum-covered soil and uncovered soil, and the improved layered Green-Ampt model could be used to simulate the infiltration process of phosphogypsum under the condition of overlying soil.

Keywords: cover soil; phosphogypsum; water migration; Green-Ampt model

近年来,长江流域磷石膏尾矿库和堆场的污染问题已引起广泛关注,并成为众多学者探讨的焦点。相关资料表明^[1-2],目前全球磷石膏堆存量已超过 6.00×10^9 t,且中国磷石膏堆存量超过 6.00×10^8 t。合理解决磷石膏堆存问题已显得刻不容缓。由于中国经济发展的需要,导致磷石膏堆场储量大、利用率低,严重占用大量土地资源,并伴随高昂的管理费用等问题^[2-3]。同时,由于地表风化和降水淋滤作用,磷石膏可能对周围土壤、水体和大气造成严重的环境污染,破坏生态平衡,进而对人体健康构成威胁^[4-5]。因此,为了更好践行“绿水青山就是金山银山”的理念,厘清磷石膏的水分渗透过程是实现科学处理磷石膏堆存问题的重要前提。针对磷石膏堆存问题的关键在于其内部杂质难以有效去除,这不仅导致环境污染,还限制了其综合利用^[6]。对此有关管理部门提出了“三磷”整治以及《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》等措施。早期磷石膏主要应用于建筑和化工领域,这在资源利用、环保和降低成本等方面取得了显著成效,但也面临着可持续性和环境影响等问题。随着研究的深入,学者们开始重点关注磷石膏在土壤改良和土壤化应用方面的潜力。研究^[7-9]表明,磷石膏可以作为土壤调理剂,改善土壤的理化特性,增强离子吸附和团聚体稳定性,调控土壤 pH 值,改良土壤结构,并调控根区土壤的微生物环境。磷石膏土壤化具有可行性,但受环保和农业部门政策限制得不到推广^[2]。利用植物修复磷石膏堆场,可以

减少磷石膏中的有害物质对水体和土壤的污染,并达到生态修复的效果^[10]。磷石膏覆土不仅可以减缓磷石膏渗滤液的流失速度,还可以作为磷石膏治理生态修复的一种方法。目前,土壤化和生态修复是磷石膏利用的新方向,这可以有效提高其综合利用效率。然而,磷石膏的品质、标准体系、生态保护压力和技术创新等方面仍面临诸多挑战。针对磷石膏土壤化和生态修复途径,了解其土壤入渗特性至关重要。因此,引入一个能够准确模拟土壤入渗过程的模型显得尤为重要。Green-Ampt 模型作为一种有效的土壤入渗模拟工具,可以为相关研究和工程实践提供有价值的参考。本研究选择采用 Green-Ampt 模型来模拟磷石膏在不同覆土条件下的水分运移过程,以预测水分入渗速率,从而为磷石膏的合理处置提供试验依据。最初,Green 和 Ampt^[11]提出了渗透理论,并建立了均质土壤的 Green-Ampt 入渗模型,然而并不适用于多层土壤入渗。随后 Mein 和 Larson^[12]则建立了一个两阶段 Green-Ampt 模型,用于描述恒定强度降雨条件下均匀土壤的入渗特征,但模型假设简单、参数确定困难。Jahanshir 等^[13]则利用分层土壤的 Green-Ampt 模型,提出了一种基于入渗试验数据估计分层土壤水力参数的理论方法,可实现多层土壤的入渗,但模型应用方面有一定局限性。随着多层土壤入渗理论的不完善,研究者们更多地致力于改进 Green-Ampt 模型,以适应特定入渗情境的需求。例如,Chen 等^[14]考虑了坡面水流的积水效应,并对

Green-Ampt 模型进行了改进,使得改进后的模型在描述润湿锋特征时更符合工程实际。另外,黄良誉等^[15]考虑了边坡植被恢复中的降雨入渗情况,对 Green-Ampt 模型进行了改进,使得改进后的模型可以更合理地分析石漠化边坡格构内植被水泥土生态恢复技术的人渗情况。

前人^[2,16-18]研究主要集中在磷石膏工业化综合利用以及渗滤液对周边土壤和地下水的污染问题上,然而在西南喀斯特地区磷石膏堆场后期多采用上覆土层的方式进行生态修复,目前对磷石膏上覆土层条件下的人渗研究少见报道。基于此,本研究目的为:①探索上覆土层厚度和磷石膏容重对磷石膏入渗特性(累积入渗量,入渗速率和湿润锋深度)的影响规律;②分析磷石膏容重和上覆土层厚度对磷石膏上覆土层入渗的显著性影响差异;③构建改进的分层型 Green-Ampt 模型,并评价其在磷石膏上覆土层条件下水分运移的模拟精度。研究结果不仅有助于促进分层型多孔介质水分入渗理论的发展,也可为喀斯特地区磷石膏堆场的后期生态修复提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵州省福泉市摆纪磷石膏堆场(107°32.3′—107°32.5′E,26°37.9′—26°38.2′W)。该堆场为瓮福磷肥基地的配套废渣堆放场,主要堆放磷石膏浆液废渣。地下水主要由大气降水和堆场废水渗漏补给^[19]。研究区属于亚热带季风型湿润气候,年均温约 14℃,无霜期 245~278 d,年均降水量 1 033~1 220 mm。

1.2 试验设计

试验于 2022 年 4—6 月进行,磷石膏取自贵州省福泉市摆纪磷石膏堆场,人工挖取,充分风干后用于土柱入渗试验,磷石膏呈灰白色。磷石膏上层所覆土样取自贵州省贵阳市花溪区西部马尾松林的碳酸盐岩红土,人工挖取表层土壤,经充分风干后碾压粉碎、过 2 mm 土筛。磷石膏样品的纯度通过 X 射线荧光光谱(XRF)分析得出,SO₃ 为 52.41%,CaO 为 38.142%,SiO₂ 为 4.793%,P₂O₅ 为 1.702%,F 为 1.610%,Fe₂O₃ 为 0.367%,Al₂O₃ 为 0.361%,MgO 为 0.197%,其余成分为 0.418%。主要成分 SO₃ 和 CaO 的含量表明磷石膏样品具有较高的纯度;通过激光粒度仪测量供试土样的机械组成,土壤黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 15.7%、81.3%和 3.0%,根据美国农业部标准可知,土壤质地为粉砂质壤土;磷石膏颗粒组成中,小于或等于 75 μm 含量颗粒所占比例达到 63.78%;土样土壤有机

质含量为 7.5 g/kg,土样 pH 值为 6.4;通过铝盒取样烘干法^[20]测得供试土样的初始含水率为 8.14±0.36%,磷石膏的初始含水率为 16.87±1.18%;测定土壤饱和含水率为 48.90±5.48%,磷石膏饱和含水率为 50.94±7.03%。通过环刀法^[21]测定碳酸盐岩红土 1.3 g/cm³ 时的饱和导水率为 0.12 cm/min,磷石膏容重 1.2, 1.3 和 1.4 g/cm³ 时的饱和导水率分别为 0.61, 0.64, 0.65 cm/min。

扁平土柱入渗试验通过扁平土柱配套供水马氏瓶进行。扁平土柱和供水马氏瓶均采用有机玻璃制成,扁平土柱长 30 cm、宽 2 cm、高 30 cm,马氏瓶直径 6 cm、高 50 cm,马氏瓶外壁贴有刻度尺,精确到毫米。供水水头固定在 2.5 cm,以稳压供水。整个入渗试验过程中实验室温度为常温,无外在干扰因素。试验采用垂直定水头入渗法^[22]模拟磷石膏入渗过程,研究不同土层覆盖厚度(0, 6, 12 cm)和磷石膏容重(1.2, 1.3, 1.4 g/cm³)对入渗特性(累积入渗量、入渗速率和湿润峰深度)的影响。在土柱装填阶段,按每个处理的设计厚度将磷石膏、碳酸盐岩红土进行分层(每 3 cm 为 1 层)填装,并层间打毛,每个土柱共 10 层,上覆土层容重固定为 1.3 g/cm³。土层上覆厚度为 0 cm 时,填装磷石膏至设计高度。试样填装完后,在其上表面放置纱布,防止供水初期对表层试样的冲刷。在入渗过程中,用高分辨率相机对扁平土柱入渗情况进行实时拍摄,通过相机连接三维可视化建模 MVS 软件进行实时记录。通过 Image-Pro 6.0 软件处理拍摄的图像,根据图像湿润峰深度与实际入渗湿润峰深度的比例关系计算出湿润峰深度,并利用霍顿公式^[23]拟合得到稳定入渗率。每 5 min 人工记录 1 次马氏瓶刻度,当湿润锋到达土柱底部停止入渗试验,每个土柱试验重复 2 次。

1.3 分层型 GREEN-AMPT 模型构建与评价

1.3.1 分层型 Green-Ampt 模型的构建

(1) 未上覆土层的 Green-Ampt 模型。传统的 Green-Ampt 模型基于毛细管理论,其基本假设是^[24],在入渗过程中存在着明确定义的水平湿润锋面,将湿润的和未湿润的区域截然分开,即含水率的分布呈阶梯状,湿润区的含水率为饱和含水率,湿润锋前的含水率为初始含水率。根据以往的研究^[25],应用 Green-Ampt 模型的关键在于确定 K_s (饱和导水率)和 S_f (湿润峰处的吸力)。本试验中, K_s 通过室内定水头法测定,而 S_f 则根据 30% 的试验数据利用 Green-Ampt 模型公式求得。根据《土壤水动力学》^[24]中 Green-Ampt 模型公式计算均质土壤的入渗。首先,根据入渗时间 t 和 30% 湿润锋深度 Z_f 的

试验数据计算 S_f :

$$t = \frac{\theta_s - \theta_i}{K_s} \cdot \left[Z_f - (S_f + H) \cdot \ln \frac{Z_f + S_f + H}{S_f + H} \right] \quad (1)$$

式中: t 为入渗时间 (min); θ_s 为土壤饱和含水率 (cm^3/cm^3); θ_i 为土壤初始含水率 (cm^3/cm^3); K_s 为饱和导水率 (cm/min); Z_f 为概化的湿润锋深度 (cm); S_f 为湿润锋处的吸力 (cm); H 为地表积水深度 (cm)。

其次,用求出的 S_f 值以及试验测定的 $\theta_s - \theta_i$, H 和 K_s 代入公式(1)求余下的湿润锋深度 Z_f 以及 $Z_f - t$ 关系,根据 $Z_f - t$ 关系代入公式(2)计算另外 70% 的累积入渗量 I :

$$I = (\theta_s - \theta_i) \cdot Z_f \quad (2)$$

式中: I 为累积入渗量 (cm)。

根据求出的湿润锋深度 Z_f 与累积入渗量 I 和试验数据 Z_f 与 I 计算 R^2 , RMSE 和 MAPE。

(2) 上覆土层条件下磷石膏入渗的 Green-Ampt 模型。使用 Jahanshir 等^[13] 改进的分层土壤 Green-Ampt 模型模拟上覆土层条件下的磷石膏入渗。该改进模型假设各土层均为均质,初始含水量均匀,层间界面尖锐,各土层上界面有效入渗速率大于该土层入渗速率能力,并且湿润锋后含水量大小均匀。

当入渗未到达分层界面时,由入渗时间 t 与土层中 30% 累积入渗量 I_1 试验数据求 S_{f1} :

$$t = \frac{1}{K_1} \cdot \left\{ I_1 - \Delta\theta_1 (H - S_{f1}) \cdot \ln \left[\frac{I_1 + \Delta\theta_1 \cdot (H - S_{f1})}{\Delta\theta_1 \cdot (H - S_{f1})} \right] \right\} \quad (3)$$

式中: K_1 为土层的饱和导水率 (cm/min); I_1 为土层的累积入渗量 (cm); $\Delta\theta_1$ 为土层的湿度增量; S_{f1} 为土层湿润锋处的吸力 (cm)。

其次,用求出的 S_{f1} 值以及试验测定的 $\Delta\theta_1$, H 和 K_1 代入公式(3)求出余下的累积入渗量 I_1 以及 $I_1 - t$ 关系,根据 $I_1 - t$ 关系代入公式(4)计算另外 70% 湿润锋深度 Z_{f1} :

$$I_1 = \Delta\theta_1 \cdot Z_{f1} \quad (4)$$

式中: Z_{f1} 为土层的湿润峰深度 (cm)。

根据求出的累积入渗量 I_1 与湿润锋深度 Z_{f1} 和试验数据 I_1 与 Z_{f1} 计算 R^2 , RMSE 和 MAPE。

当湿润峰深度 Z_{f1} 大于 6 cm 或者 12 cm 时,表示土壤水入渗到磷石膏层,首先,由在磷石膏层内的入渗时间 t 与磷石膏层 30% 的累积入渗量 I_2 试验数据求 S_{f2} :

$$t = t_1 + \frac{I_2 - I_1}{K_2} + \Delta\theta_2 \cdot \left[\frac{Z_{f1}}{K_1} - \frac{Z_{f1} + H - S_{f2}}{K_2} \right] \cdot \ln \left(\frac{I_2 - I_1 + \Delta\theta_2 \cdot (Z_{f1} + H - S_{f2})}{\Delta\theta_2 \cdot (Z_{f1} + H - S_{f2})} \right) \quad (5)$$

式中: t_1 为土壤水入渗到土层与磷石膏层边界的入渗时间 (min); K_2 为磷石膏层的饱和导水率 (cm/min); $\Delta\theta_2$ 为磷石膏层的湿度增量; S_{f2} 为磷石膏层湿润锋处的吸力 (cm)。

其次,用求出的 S_{f2} 值以及试验测定的 $\Delta\theta_2$, H 和 K_2 代公式(5)求出余下累积入渗量 I_2 以及 $I_2 - t$ 关系,根据 $I_2 - t$ 关系代入公式(6)计算另外 70% 湿润锋深度 Z_{f2} :

$$I_2 = I_1 + (Z_{f2} - Z_{f1}) \cdot \Delta\theta_2 \quad (6)$$

式中: Z_{f2} 为磷石膏层的湿润峰深度 (cm)。

根据求出的累积入渗量 I_2 与湿润锋深度 Z_{f2} 和试验数据 I_2 与 Z_{f2} 计算 R^2 , RMSE 和 MAPE。

1.3.2 精度评价指标 采用决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和平均绝对百分比误差 (MAPE) 作为评价模型的指标。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2} \quad (7)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - P_i)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\text{MAPE} = \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - P_i}{S_i} \right| \times \frac{100\%}{n} \quad (9)$$

式中: n 为实测数据和模拟数据的个数; S_i 为实测数据; P_i 为模型模拟值; \bar{S} 为 S_i 均值。 R^2 的取值范围为 $[0, 1]$, 表示函数的拟合优度,越接近 1 表明函数的拟合效果越好; RMSE 的取值范围在 $[0, +\infty)$, RMSE 越小表示模型的拟合效果越好; MAPE 的取值范围在 $[0, +\infty)$, 0 表示完全准确的预测, MAPE 越大, 预测越不准确。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 软件进行数据整理及统计,采用 SPSS 软件通过 ANOVA 单因素方差分析对数据进行差异显著性分析,用 Origin 2018 软件绘图。基于 Python 3.9 平台进行分层型 Green-Ampt 模型编程,模拟得出磷石膏入渗特性指标 (累积入渗量和湿润锋深度)。

2 结果与分析

2.1 上覆土层厚度对不同容重磷石膏水分入渗速率的影响

覆土层和磷石膏层的物质组成和孔隙结构差异导致不同覆土厚度下的水分入渗特性有所不同。表 1 显示,覆土厚度为 0, 6, 12 cm 时,入渗时间分别是

28.17, 92.50 和 95.00 min。覆土越厚,入渗所需时间越长。值得注意的是,6 cm 和 12 cm 的覆土厚度之间的入渗时间差异不显著($p > 0.05$)。当覆土厚度为 0 cm 时,初始入渗速率为 442.74 mm/h,明显高于 6 cm 和 12 cm 的 170.50 mm/h 和 162.02 mm/h。随着覆土厚度增加,平均入渗率和稳定入渗率下降,0 cm 到 6 cm 的变化最显著($p < 0.05$)。6 cm 和 12 cm 时,入渗率变化不显著($p > 0.05$)。磷石膏容

重为 1.2 g/cm³ 时,随着覆土厚度增加,平均入渗率和稳定入渗率下降,12 cm 时达到最小值,分别为 56.52 和 39.56 mm/h。磷石膏容重为 1.3 和 1.4 g/cm³ 时,入渗率随覆土厚度增加而上升。图 1 显示,在最初的 0~20 min 内,3 种厚度的覆土下,磷石膏的水分入渗速率快速下降,20 min 后速率逐渐稳定,6 cm 和 12 cm 厚度下尤为明显。总结来说,覆土厚度显著影响水分入渗特性,尤其是初始和平均入渗速率。

表 1 不同处理条件下的入渗特征参数

Table 1 Infiltration characteristic parameters under different treatment conditions

试验处理	入渗历时/ min	初始入渗率/ (mm·h ⁻¹)	平均入渗率/ (mm·h ⁻¹)	稳定入渗率/ (mm·h ⁻¹)	累积入渗量/ mm
覆土 0 cm	28.17±7.11 ^b	442.74±95.09 ^a	243.39±62.14 ^a	154.49±56.61 ^a	449.02±149.36 ^b
覆土 6 cm	92.50±21.62 ^a	170.50±80.20 ^b	73.52±24.13 ^b	62.17±17.19 ^b	1 145.24±194.08 ^a
覆土 12 cm	95.00±26.46 ^a	162.02±29.84 ^b	67.83±25.97 ^b	51.57±11.11 ^b	1 151.44±358.21 ^a
磷石膏容重 1.2 g/cm ³	66.67±39.07 ^a	270.35±175.32 ^b	148.06±120.36 ^b	110.21±88.24 ^{ab}	809.18±439.53 ^{ab}
磷石膏容重 1.3 g/cm ³	75.83±43.98 ^a	246.80±162.03 ^b	128.75±102.16 ^b	88.55±60.37 ^{ab}	954.95±495.92 ^a
磷石膏容重 1.4 g/cm ³	73.17±33.89 ^a	258.11±142.25 ^b	107.93±55.78 ^b	69.47±23.64 ^{ab}	981.56±346.06 ^a

注:表中数据为平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示两种试验处理差异显著($p < 0.05$)。

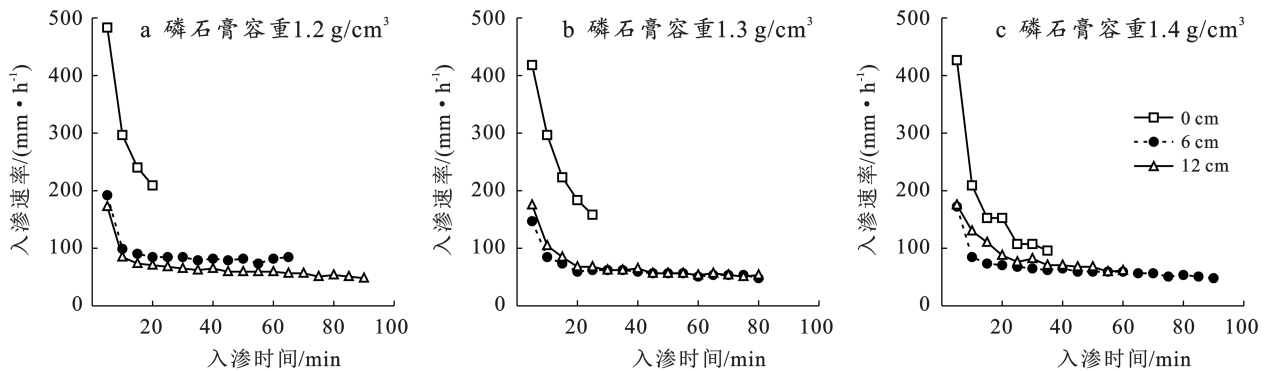


图 1 磷石膏容重和覆土厚度对磷石膏水分入渗速率曲线的影响

Fig.1 Influence of phosphogypsum bulk density and covering soil thickness on water infiltration rate curve of phosphogypsum

2.2 上覆土层厚度对不同容重磷石膏累积入渗量的影响

从表 1 可以看出,当覆土厚度为 6 cm 和 12 cm 时,累积入渗量之间的差异不显著($p > 0.05$)。而其他覆土厚度的累积入渗量差异显著($p < 0.05$)。图 2 显示,随着覆土厚度增加,同一磷石膏容重和入渗历时下的累积入渗量逐渐减少。磷石膏容重为 1.3 和 1.4 g/cm³ 时,覆土厚度 12 cm 的累积入渗量高于 6 cm,这可能是由于累积入渗量受磷石膏容重和覆土厚度共同影响。以磷石膏容重为 1.3 g/cm³ 为例,入渗历时从 5 min 增加到 20 min 时,覆土厚度为 0, 6 和 12 cm 的累积入渗量分别增加了 58.64, 18.13 和 21.91 mm,从 0 cm 到 6 cm 的累积入渗量减少了 67.53%。当覆土厚度为 12 cm 时,累积入渗量随磷

石膏容重增加而上升,例如入渗 60 min 时,容重为 1.4 g/cm³ 的累积入渗量是容重 1.2 和 1.3 g/cm³ 的 1.48 和 1.16 倍。入渗初期,累积入渗量随覆土厚度变化较大。但随着时间推移,覆土厚度对累积入渗量的影响减小。总的来说,覆土厚度和磷石膏容重共同影响水分累积入渗量,初期影响较大,后期逐渐减小。

2.3 上覆土层厚度对不同容重磷石膏湿润锋的影响

由图 3 可以看出,随着覆土厚度增加,相同入渗历时内的湿润锋深度减小。入渗初期,湿润锋深度受到覆土厚度影响显著,这种影响随时间减弱。增加覆土厚度使磷石膏的水分入渗曲线变得平缓,减缓湿润锋移动速度,且覆土越厚,效果越明显。表 1 显示,当覆土厚度为 0 cm,磷石膏容重为 1.2, 1.3 和 1.4 g/cm³

时,湿润锋到达底部所需的时间分别是 20, 25 和 37 min。覆土厚度为 6 cm 时,时间分别增加到 65, 80 和 90 min;覆土厚度为 12 cm 时,进一步增加到 75, 115 和 120 min。这表明,覆土厚度增加延长了湿润

锋到达底部的时间,且时间随磷石膏容重增加而增加。在 120 min 的入渗过程中,基质流是主要入渗方式。湿润峰在土层内时界面差异不明显,但进入磷石膏层后差异显著。

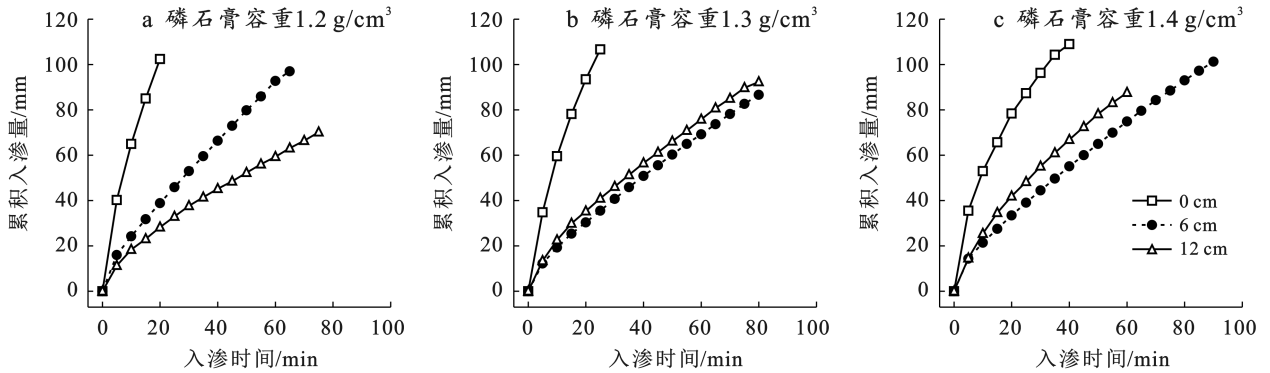


图 2 不同磷石膏容重下不同覆土厚度累积入渗量随入渗时间的变化曲线

Fig.2 Variation curve of cumulative infiltration with infiltration time under different phosphogypsum bulk density and different covering soil thickness

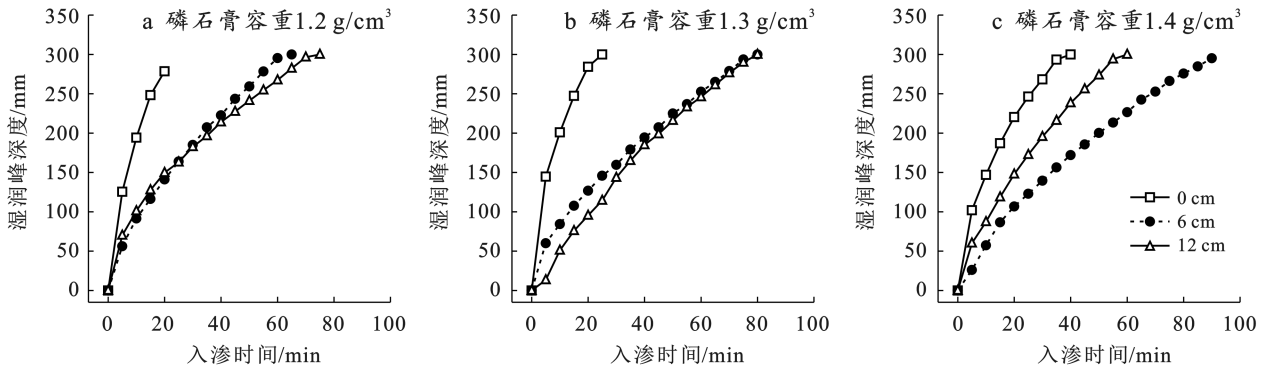


图 3 不同磷石膏容重下不同覆土厚度湿润锋深度随入渗时间的变化曲线

Fig.3 Variation curve of wetting front depth with infiltration time under different phosphogypsum bulk density and different covering soil thickness

2.4 分层型 GREEN-AMPT 入渗模型适用性评价

通过 Python 3.9 基于 Green-Ampt 模型来模拟累积入渗量和湿润锋深度,并将模拟结果与实际测量数据进行对比。上覆土层 6 cm 且磷石膏容重为 1.2 g/cm³ 的模型模拟效果最好,模拟湿润峰深度 R^2 , RMSE 和 MAPE 分别为 0.991, 12.174 和 0.121,模拟累积入渗量 R^2 , RMSE 和 MAPE 分别为 0.999, 1.471, 0.046 (表 2)。当覆土层为 0 cm 时,传统的 Green-Ampt 模型对湿润峰深度和累积入渗量的模拟效果不理想, R^2 值较低, RMSE 范围为 3.922 ~ 30.561, MAPE 范围为 0.174 ~ 1.186, 说明模型对纯磷石膏的入渗模拟效果较差。然而,当磷石膏的上覆土层为 6 和 12 cm 时,模拟效果显著改善。模拟湿润峰深度 R^2 范围为 0.951 ~ 0.995, RMSE 范围为 12.174 ~ 40.856, MAPE 范围为 0.070 ~ 0.227; 模拟累

积入渗量 R^2 范围为 0.963 ~ 0.999, RMSE 范围为 1.471 ~ 11.201, MAPE 范围为 0.046 ~ 0.169。分层型 Green-Ampt 模型在这两种厚度下的模拟效果较好。图 4 结果显示,上覆土层为 6 cm 时,磷石膏容重为 1.3, 1.4 g/cm³ 时,累积入渗量和湿润峰深度的模拟值大多高于实测值;当上覆土层为 12 cm 时,磷石膏容重为 1.2 和 1.4 g/cm³ 时,累积入渗量的模拟值大多高于实测值,磷石膏容重为 1.3 g/cm³ 时,湿润峰深度的模拟值大多高于实测值。总体而言,分层型 Green-Ampt 模型在模拟磷石膏上覆土层下的水分入渗方面具有较好的准确性,特别是当磷石膏有上覆土层时,模型的模拟精度显著提高。然而,当磷石膏没有上覆土层时,传统的 Green-Ampt 模型的模拟精度较差,可能是由于无覆土层时磷石膏的入渗速率极快,入渗时间较短,导致模型模拟效果较差。

表 2 Green-Ampt 模型的模拟精度结果

Table 2 Simulation accuracy results of Green-Ampt model

上覆土层厚度/cm	磷石膏容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	模型方法	湿润锋深度 Z_f			累积入渗量 I		
			R^2	RMSE	MAPE	R^2	RMSE	MAPE
0	1.20	单层型 Green-Ampt 模型	—	5.830	0.174	—	3.922	0.452
	1.30		—	16.670	0.421	—	7.892	1.186
	1.40		—	30.561	1.020	—	9.047	0.773
6	1.20	双层型 Green-Ampt 模型	0.991	12.174	0.121	0.999	1.471	0.046
	1.30		0.991	18.781	0.070	0.980	9.715	0.119
	1.40		0.995	13.814	0.079	0.978	11.201	0.125
1.20	0.961		39.803	0.227	0.974	7.113	0.157	
12	1.30		0.952	40.856	0.196	0.985	8.039	0.169
	1.40		0.951	28.496	0.140	0.963	8.137	0.143

注: R^2 为决定系数; RMSE 为均方根误差; MAPE 为平均绝对百分比误差; — 表示数据不可取。

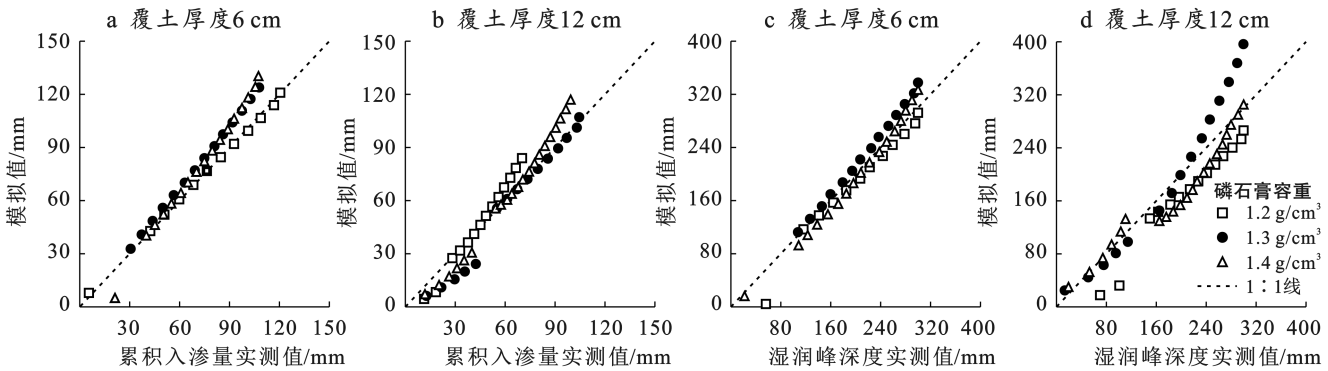


图 4 覆土厚度 6 和 12 cm 下不同磷石膏容重累积入渗量和湿润锋深度实测值与模拟值

Fig.4 Measured and simulated values of cumulative infiltration and wetting front depth of phosphogypsum with different bulk densities under cover thickness of 6 and 12 cm

3 讨论

3.1 上覆不同厚度土层对磷石膏入渗过程的影响

在本研究中,覆土厚度显著影响上覆土层磷石膏的水分入渗过程(图 1)。张雅楠等^[26]对露天煤矿排土场不同覆土厚度进行垂直入渗试验发现,覆土厚度为 10—30 cm 的初始入渗率显著高于 40—50 cm 的初始入渗率,覆土厚度越大入渗时间越长,这与本研究相似。当磷石膏容重分别为 1.2, 1.3, 1.4 g/cm^3 时,覆土厚度为 0 cm 的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率显著高于 6, 12 cm 的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率 ($p < 0.05$), 入渗时间随覆土厚度增加而增大。覆土可能导致土壤结构发生变化,特别是当覆土性质与下层土壤性质差异较大时。这种结构变化可能包括孔隙度减小、土壤紧实度增加等,从而降低土壤的入渗能力。常艺睿等^[27]进行室内土柱入渗试验发现,上覆 3 个粒径水平(20~30, 5, 2 mm)的蓄水陶土层均可显著促进土壤湿润锋运移距离,与本研究结果不一致。这很有可能是因为陶土与黄土和本

研究中碳酸盐岩红土与磷石膏的土壤结构不一样,土壤本身的物理特性可以决定土壤的入渗能力,而蓄水陶土作为一种土壤改良材料,可以通过改变土体结构,使土水势在蓄水陶土与土壤交界面发生变化,从而促进土壤水分入渗^[27]。另外,覆土层的存在可能阻碍水分在土壤中的运移。由于覆土层的紧密性和弱透水性,水分在向下渗透时可能受到阻碍,导致入渗率降低。有研究^[28]表明,只要存在层状结构,就会产生阻水作用。覆土层的厚度和含水量也会影响下层土壤的入渗性能,较厚的覆土层可能降低下层土壤的初始含水量,从而影响其吸水能力和初始入渗率。本研究中,未覆土初始入渗率分别是覆土 6, 12 cm 的 2.6, 2.7 倍。入渗时磷石膏中的水稳性团聚体含量^[29]比碳酸盐岩红土层更多,碳酸盐岩红土的孔隙度比磷石膏小,故磷石膏比碳酸盐岩红土更有利于土壤水入渗,上覆碳酸盐岩红土对磷石膏水分入渗有着较强的抑制作用,且随着上覆碳酸盐岩红土厚度的增加,这种抑制作用有逐渐增强的趋势。

上覆碳酸盐岩红土厚度不变的情况下(0, 6 cm),

相同入渗时间内累积入渗量、初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率均随磷石膏容重的增加而降低;覆土厚度为 12 cm 时,部分累积入渗量随磷石膏容重的增加会呈现增加的现象。说明土壤容重与土壤入渗性能呈现负相关关系,土壤容重决定着土壤的紧实特性以及松散程度,随着磷石膏容重的增加,其结构逐渐紧密,孔隙度变小,导致土壤水分运移路径减少,湿润锋运移变慢,从而阻碍土壤入渗^[30-31]。裴青宝等^[32]通过水平土柱入渗试验发现,同一入渗时刻,容重小的入渗率和累积入渗量较大。以上研究结果均和本论文研究结果相似。另外,通过测定磷石膏的饱和导水率发现,磷石膏的饱和导水率随着磷石膏容重的增加呈现增大的现象,这与陈敏等^[33]研究容重对煤矸石水力特性的影响发现,随着煤矸石容重的增加其饱和导水率呈下降趋势结果不一致,这可能是由于煤矸石和磷石膏的物质组成和孔隙结构不一样,表明饱和导水率和孔隙度也有着密切联系,容重变化时孔隙结构也会产生影响,进而引起饱和导水率的变化。综上所述,本试验中磷石膏容重越小越容易引起磷石膏上覆土层水分的入渗。

入渗初期的累积入渗量随覆土厚度变化较大,随着入渗历时的推移,覆土厚度对累积入渗量的影响逐渐减弱,且本试验中磷石膏累积入渗量并不随覆土厚度的增加而一直均匀减小。不同覆土厚度下的磷石膏入渗速率均逐渐减小,最后趋于稳定。在入渗初期,各组试验的湿润锋差异不显著,随着入渗的进行,同一覆土厚度下的不同磷石膏容重湿润锋的显著性逐渐显著。另外,本试验中使用的上覆土层为碳酸盐岩红土,在喀斯特地区,多分布有红壤、灰壤和黄壤土,不同土壤种类也会对土壤入渗产生重要影响。因此,在今后的研究中,需综合考虑上覆土壤种类及土层厚度等因素并对其进行深入研究。

3.2 GREEN-AMPT 入渗模型模拟磷石膏入渗的适用分析

由于 Green-Ampt 模型的理论已经相对完善,在土壤入渗过程中具有明确的物理意义、与土壤物理特性关联紧密,已被广泛应用于多个研究领域。磷石膏土壤化和生态修复是目前研究热点,结合 Green-Ampt 模型模拟其覆土入渗情况具有一定的必要性。模型的适用性应当从 R^2 , RMSE 和 MAPE 等指标进行评价,这些指标在单层型 Green-Ampt 模型和双层型 Green-Ampt 模型方面表现并不一致。对于单层型 Green-Ampt 模型,评估累积入渗量和湿润峰深度的指标 R^2 并不可靠,因为其 RMSE 小于 20 的值占总数的 83.3%,而 MAPE 小于 0.2 的值占总数的

16.7%。而对于双层型 Green-Ampt 模型,当磷石膏上覆土层 6 和 12 cm 时, R^2 大于 0.9 的值占总数的 100%, RMSE 小于 20 的值占总数的 75%, MAPE 小于 0.2 的值占总数的 91.7%。总的来说,这表明该模型在模拟磷石膏未覆土时的精度较低,而在模拟磷石膏覆土时的精度较高。黄良誉等^[15]将土柱降雨入渗模型分为饱和区、湿润过渡区和非饱和区,改进 Green-Ampt 入渗模型发现,改进模型的湿润锋运移深度和试验结果普遍高于 Green-Ampt 入渗模型的湿润锋运移深度结果。李强等^[34]建立考虑土壤水分剖面形状和非饱和浸润区等效参数的改进 Green-Ampt 模型,改进模型入渗深度的计算结果比经典 Green-Ampt 模型的值要高。以上结果均与本文模拟结果较为类似,原因是经典 Green-Ampt 入渗模型忽略浸润区的影响,在相同土质参数和相同时间内,其计算出的值较实测值偏小,故模拟的结果会高于 Green-Ampt 模型得出的结果。模拟精度结果表明本试验采用分层型 Green-Ampt 模型来模拟具有理论的可靠性,不足之处是经典 Green-Ampt 模型忽略浸润区的影响,加之本次试验的次数有限,未来可以继续改进 Green-Ampt 模型,并增加试验的次数,从而提升试验结果的准确性与可靠性。

4 结论

(1) 随着覆土厚度的增加,土壤的初始入渗率、平均入渗率和稳定入渗率都呈现下降趋势。在相同的入渗历时长内,湿润锋深度也随覆土厚度的增加而减少。当覆土厚度为 0 cm 时,随着磷石膏容重的增加,累积入渗量逐渐减少。

(2) 在相同的覆土厚度下,不同的磷石膏容重(1.2, 1.3, 1.4 g/cm³)对初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率和累积入渗量的影响并不显著。但在相同的磷石膏容重下,不同的覆土厚度(0, 6 cm)对这些指标的影响则较为显著。

(3) 使用分层型 Green-Ampt 模型模拟磷石膏覆土 6 cm 和 12 cm 的入渗情况时,模拟湿润峰深度 $R^2 \geq 0.951$, MAPE ≤ 0.227 , 模拟累积入渗量 $R^2 \geq 0.963$, RMSE ≤ 11.201 , MAPE ≤ 0.169 , 模型适用于模拟磷石膏覆土 6 和 12 cm 的入渗情况。

参考文献 (References)

- [1] 欧志兵, 杨文娟, 何宾宾. 国内外磷石膏综合利用现状 [J]. 云南化工, 2021, 48(11): 6-9.
Ou Zhibing, Yang Wenjuan, He Binbin. The general introduction of phosphogypsum comprehensive utilization technology in China [J]. Yunnan Chemical Technology,

- 2021,48(11):6-9.
- [2] 邓华,侯硕旻,李中军,等.磷石膏综合利用现状及展望[J].无机盐工业,2024,56(1):1-8.
Deng Hua, Hou Shuomin, Li Zhongjun, et al. Current situation and prospect of comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2024,56(1):1-8.
- [3] 李剑秋,李子军,王佳才,等.磷石膏充填材料与技术发展现状及展望[J].现代矿业,2018,34(10):1-4.
Li Jianqiu, Li Zijun, Wang Jiakai, et al. Development status and prospect of phosphogypsum filling material and technique [J]. Modern Mining, 2018,34(10):1-4.
- [4] 保关丽.污泥-磷石膏固化体的工程特性分析及环境风险评价[D].云南昆明:昆明理工大学,2022.
Bao Guanli. Engineering characteristic analysis and environmental risk assessment of sludge-phosphogypsum solidified body [D]. Kunming, Yunnan: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [5] 朱雪涛,杜兵,阿曼角,等.半水磷石膏地下充填材料的磷和氟浸出特性及地球化学模拟[J].中国环境科学,2022,42(2):680-687.
Zhu Xuetao, Du Bing, A Manjiao, et al. Leaching properties of phosphorus and fluorine in hemihydrate phosphogypsum as underground filling materials and geochemical simulation [J]. China Environmental Science, 2022,42(2):680-687.
- [6] 徐长忠,於金浩,李义连.磷石膏的预处理和综合利用研究进展[J].安全与环境工程,2024,31(1):260-270.
Xu Changzhong, Yu Jinhao, Li Yilian. Research progress of pretreatment and comprehensive utilization of phosphogypsum [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024,31(1):260-270.
- [7] 杨花,齐佳敏,李彬.磷石膏改良土壤研究进展[J].磷肥与复肥,2023,38(5):40-44.
Yang Hua, Qi Jiamin, Li Bin. Research progress of phosphogypsum in soil improvement [J]. Phosphate & Compound Fertilizer, 2023,38(5):40-44.
- [8] 卢维宏,王要芳,刘娟,等.磷石膏无害化改性及其在农田土壤改良中的应用研究进展[J].土壤,2023,55(4):699-707.
Lu Weihong, Wang Yaofang, Liu Juan, et al. Phosphogypsum (PG) harmless modification and its application in farmland soil improvement: A review [J]. Soils, 2023,55(4):699-707.
- [9] Tian Tao, Zhang Chaolan, Zhu Feng, et al. Effect of phosphogypsum on saline-alkalinity and aggregate stability of bauxite residue [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021,31(5):1484-1495.
- [10] 尚凯.磷石膏堆场污染原位控制及生态修复研究进展[J].广州化工,2015,43(24):42-43.
Shang Kai. Research progress of phosphogypsum stacks pollution *in situ* control and ecological restoration [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2015,43(24):42-43.
- [11] Green W H, Ampt G A. Studies on soil physics: Part I. the flow of air and water through soils[J]. Journal of Agricultural Science, 1911(4):1-24.
- [12] Mein R G, Larson C L. Modeling infiltration during a steady rain [J]. Water Resources Research, 1973,9(2):384-394.
- [13] Jahanshir M H, Heidarpour M. Application of the Green-Ampt model for infiltration into layered soils [J]. Journal of Hydrology, 2015,527:824-832.
- [14] Chen Bin, Ren Qingyang, Wang Feifei, et al. Progressive failure analysis of slope water damage based on improved green-ampt infiltration model [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021,39(7):5109-5118.
- [15] 黄良誉,何廷全,周成,等.边坡植被恢复中植被水泥土 Green-Ampt 入渗模型的改进与应用[J].岩土工程学报,2022,44(S1):183-188.
Huang Liangyu, He Tingquan, Zhou Cheng, et al. Improvement and application of Green-Ampt infiltration model for vegetated cement soil in vegetation restoration of slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022,44(S1):183-188.
- [16] 陈舟,赵贵清,王志光,等.岩溶区某磷石膏堆放场渗漏特征分析[J].水文地质工程地质,2017,44(2):144-150.
Chen Zhou, Zhao Guiqing, Wang Zhiguang, et al. Leakage characteristics of a phosphorus gypsum storage site in karst area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017,44(2):144-150.
- [17] 张政.磷石膏渗滤液与岩溶含水介质作用机理研究[D].贵州贵阳:贵州大学,2019.
Zhang Zheng. Study on reaction processes and mechanism of phosphogypsum leachate and karst medium [D]. Guiyang, Guizhou: Guizhou University, 2019.
- [18] Melki S, Gueddari M. Impact assessment of phosphogypsum leachate on groundwater of Sfax-agareb (southeast of Tunisia): Using geochemical and isotopic investigation [J]. Journal of Chemistry, 2018,1:2721752.
- [19] 彭展翔,褚学伟.摆纪磷石膏堆场渗漏分析[J].地下水,2012,34(5):14-15.
Peng Zhanxiang, Chu Xuewei. Leakage analysis of phosphogypsum still in Baiji [J]. Ground Water, 2012,34(5):14-15.
- [20] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.

- Shao Mingan, Wang Quanjiu, Huang Mingbin. Soil Physics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [21] Abed Gatea Alshammary A, Kouzani A Z, Kaynak A, et al. Soil bulk density estimation methods: A review [J]. *Pedosphere*, 2018, 28(4):581-596.
- [22] 冯娜,刘冬冬,丁继辉,等.反演含碎石碳酸盐岩红土水力特性[J].*水土保持学报*, 2022, 36(1):101-109.
- Feng Na, Liu Dongdong, Ding Jihui, et al. Inversion of hydraulic properties of carbonate-derived laterite containing gravel [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1):101-109.
- [23] 印家旺,阿拉木萨,苏宇航,等.科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究[J].*水土保持通报*, 2022, 42(4):90-98.
- Yin Jiawang, A L, Su Yuhang, et al. Comparative study on soil infiltration characteristics of different land use types in horqin sandy land [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(4):90-98.
- [24] 雷志栋.土壤水动力学[M].北京:清华大学出版社, 1988.
- Lei Zhidong, Yang Shixiu, Xie Senchuan. *Soil Water Dynamics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1988.
- [25] 陈俊英,何旭佳,杨亚龙,等.盐碱土入渗下修正 Green-Ampt 模型参数确定与验证[J].*农业工程学报*, 2021, 37(12):125-133.
- Chen Junying, He Xujia, Yang Yalong, et al. Parameter determination and verification of improved Green-Ampt model under saline-alkali soil infiltration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(12):125-133.
- [26] 张雅楠,吕刚.露天煤矿排土场覆土厚度对土壤水分入渗及植物水分利用的影响[J].*水土保持学报*, 2023, 37(5):345-351.
- Zhang Yanan, Lü Gang. Effect of soil cover thickness on soil water infiltration and plant water utilization in the dump of open pit coal mine [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5):345-351.
- [27] 常艺睿,马娟娟,孙西欢,等.上覆蓄水陶土层对黄土高原土壤水分入渗与蒸发的影响[J].*水土保持学报*, 2022, 36(6):101-109.
- Chang Yirui, Ma Juanjuan, Sun Xihuan, et al. Effect of overlying water storage clay layer on soil water infiltration and evaporation on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6):101-109.
- [28] 张建丰.黄土区层状土入渗特性及其指流的实验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2004.
- Zhang Jianfeng. Experimental study on infiltration characteristics and finger flow in layer soils of the loess area [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2004.
- [29] Basset C, Abou Najm M, Ghezzehei T, et al. How does soil structure affect water infiltration? A meta-data systematic review [J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 226:105577.
- [30] 阿茹·苏里坦,常顺利,张毓涛.天山林区不同群落土壤水分入渗特性的对比分析与模拟[J].*生态学报*, 2019, 39(24):9111-9118.
- Aru SULTAN, Chang Shunli, Zhang Yutao. Comparative analysis and simulation of soil moisture infiltration characteristics in different communities in the forests of Tianshan Mountains, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(24):9111-9118.
- [31] 林代杰,郑子成,张锡洲,等.不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素[J].*水土保持学报*, 2010, 24(1):33-36.
- Lin Daijie, Zheng Zicheng, Zhang Xizhou, et al. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1):33-36.
- [32] 裴青宝,赵新宇,张建丰,等.容重对红壤水平入渗特性的影响[J].*水土保持学报*, 2014, 28(6):111-114.
- Pei Qingbao, Zhao Xinyu, Zhang Jianfeng, et al. Effects of density on horizontal infiltration characteristics of red loam soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6):111-114.
- [33] 陈敏,陈孝杨,王芳,等.容重对煤矸石水力特性的影响[J].*煤炭技术*, 2017, 36(3):52-54.
- Chen Min, Chen Xiaoyang, Wang Fang, et al. Effect of bulk density on coal gangue hydraulic characteristics [J]. *Coal Technology*, 2017, 36(3):52-54.
- [34] 李强,贾森,李鑫,等.考虑非饱和浸润区的改进 Green-Ampt 模型[J].*岩土力学*, 2022, 43(12):3484-3492.
- Li Qiang, Jia Sen, Li Xin, et al. An improved Green-Ampt model considering unsaturated infiltration zone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(12):3484-3492.