

崔宏环,马鏢,胡治强,等.稻壳灰改良强风化泥岩边坡渗流特性[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(2):196-204.  
DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250406

CUI Honghuan,MA Biao,HU Zhiqiang,et al.Seepage characteristics of highly weathered mudstone slopes improved with rice husk ash[J].Journal of Liaoning Technical University(Natural Science),2026,45(2):196-204.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250406

## 稻壳灰改良强风化泥岩边坡渗流特性

崔宏环<sup>1,2</sup>, 马 鏢<sup>1\*</sup>, 胡治强<sup>1</sup>, 张 松<sup>1</sup>, 季艳杰<sup>1</sup>

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000;

2. 河北省装配式建造与地下工程技术创新中心, 河北 张家口 075000)

**摘 要:** 为实现边坡渗流绿色调控、促进农业固废资源化利用, 利用稻壳灰改良典型强风化膨胀性泥岩, 通过一维垂直入渗试验及土水特征曲线, 研究不同稻壳灰掺量下泥岩的持水与渗流特性。研究表明: 稻壳灰可有效填充孔隙、改善颗粒级配, 显著提高进气值与残余体积含水率、降低减湿速率, 同时延缓湿润锋推进速率、缩短湿润锋前进距离、降低渗透系数、增强土体持水能力。稻壳灰掺量为6%时, 改良效果最佳。将参数 $\beta$ 、塑性指数 $I_p$ 、稻壳灰掺量 $q$ 引入传统GA模型, 改进的GA模型更符合稻壳灰改良后土体的实际情况。研究结论为农业固废在膨胀性泥岩边坡绿色防护中的应用提供参考。

**关键词:** 稻壳灰; 强风化泥岩; 湿润锋前进法; 渗流; 绿色边坡

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)02-0196-09

## Seepage characteristics of highly weathered mudstone slopes improved with rice husk ash

CUI Honghuan<sup>1,2</sup>, MA Biao<sup>1\*</sup>, HU Zhiqiang<sup>1</sup>, ZHANG Song<sup>1</sup>, JI Yanjie<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China; 2. Hebei

Innovation Center of Prefabricated Construction and Underground Engineering, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** To achieve green regulation of slope seepage and promote the resource utilization of agricultural solid waste, this study employs rice husk ash (RHA) to amend typical highly weathered expansive mudstone. The water retention and seepage characteristics of the mudstone under different RHA contents were investigated through one-dimensional vertical infiltration tests and soil-water characteristic curve (SWCC) measurements. The results indicate that RHA effectively fills soil pores and improves particle gradation, significantly increasing the air-entry value and residual volumetric water content, reducing the desaturation rate. RHA decelerates the wetting front advance rate, shortens the wetting front migration distance, decreases the permeability coefficient, and enhances the overall water retention capacity of the soil. The optimal improvement effect is observed at 6% of RHA content. By incorporating the soil-water interaction coefficient  $\beta$ , plasticity index  $I_p$ , and RHA content  $q$  into the traditional Green-Ampt (GA) model, the improved GA model better reflects the actual infiltration behavior of RHA-amended soil. These findings provide a reference for the application of agricultural solid waste in the green protection of expansive mudstone slopes.

**Keywords:** rice husk ash; highly weathered mudstone; wetting front advance method; seepage; green slopes

收稿日期: 2025-09-29 修回日期: 2025-12-21 接受日期: 2026-01-07 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52172347); 新疆生产建设兵团财政科技计划资助项目(2023AB016-02)

作者简介: 崔宏环(1974-), 女, 河北张家口人, 博士, 教授, 主要从事特殊土地处理方面的研究。E-mail: chh1496@hebiace.edu.cn

通信作者: 马 鏢(2001-), 男, 河北保定人, 硕士研究生, 主要从事特殊土地处理方面的研究。E-mail: mb2023221121@hebiace.edu.cn

0 引言

边坡滑坡灾害是较常见的地质灾害<sup>[1-2]</sup>。强风化泥岩的矿物组成以伊利石、蒙脱石等亲水性黏土矿物为主, 化学组分富含 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等氧化物<sup>[3]</sup>。这类岩土体干缩湿胀特性显著、原生裂隙发育且易崩解, 易引发路基不均匀沉降与边坡浅层滑塌<sup>[4]</sup>。近年来, 冀北地区通过新建和改扩建公路, 形成较为完善的高速公路网络。然而, 冀北地区山体多且陡峭, 大部分已通车的公路或是规划在建的项目均涉及膨胀性泥岩问题, 存在一定的安全隐患。降雨诱发的水分入渗通过裂隙网络快速迁移, 导致孔隙水压力骤升、抗剪强度降低, 进而诱发渐进式边坡失稳<sup>[5-6]</sup>。如何有效调控渗流过程, 成为破解强风化泥岩边坡工程滑坡难题的关键。

渗流对边坡稳定性影响较大。LI 等<sup>[7]</sup>提出湿润锋前进法, 研究发现, 非饱和土中水分迁移速率与基质吸力的非线性关系是决定渗透系数和湿润锋推进深度的关键。周磊等<sup>[8]</sup>通过红黏土边坡数值模拟发现, 湿润锋推进速率每降低 10%, 边坡安全系数可提高约 15%。刘阿强等<sup>[9]</sup>针对全吸力范围内渗透系数测定方法, 揭示低吸力区水分快速迁移是诱发瞬时滑坡的主要因素。上述研究成果表明, 通过改良土体渗流特性、控制渗流过程, 可延缓湿润锋推进速率、降低渗透系数、提高边坡

稳定性。传统改良材料(如石灰、水泥)虽能改善土体力学性能, 但能耗及碳排放量较高, 工业固废资源化利用成为目前的研究热点<sup>[10-11]</sup>。稻壳灰作为一种绿色农业废弃物, 可改善土壤结构、增强其抗渗性能。陈伟等<sup>[12]</sup>利用稻壳灰地聚物固化黄土, 研究表明, 生成的硅铝酸盐胶体可填充土体孔隙、降低渗透系数、提升抗剪强度。丑亚玲等<sup>[13]</sup>研究表明, 稻壳灰通过增强盐渍土的憎水性和持水能力, 可有效抑制冻融循环过程中的水分重分布。目前, 稻壳灰对强风化泥岩渗流的改良机制尚不明确, 对稻壳灰改良强风化泥岩的渗流调控机制展开研究具有重要的现实意义。

鉴于此, 作者采用稻壳灰对冀北山地典型强风化膨胀性泥岩进行改良, 通过土水特征曲线联合测定试验及一维垂直入渗试验, 研究稻壳灰对泥岩颗粒结构、孔隙特性的影响机制, 以期为改良强风化泥岩提供理论依据。

1 一维垂直入渗试验

1.1 试验材料

泥岩样本取自张家口京新高速公路胶泥湾至西洋河段公路路堑浅层, 外观呈灰白色, 硬塑状态。泥岩基本物理特性指标见表 1, 粒径级配曲线见图 1。由图 1 可知, 土样不均匀系数为 8.503, 曲率系数为 0.876, 属于土粒不均匀、级配不良的土。

表 1 泥岩基本物理特性指标  
Tab.1 basic physical property indicators of the mudstone

| 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 | 天然<br>含水率/% | 饱和<br>含水率/% | 土粒相对密度 | 孔隙比  | 孔隙率/% | 饱和渗透系数<br>/(cm·s <sup>-1</sup> ) |
|------|------|------|-------------|-------------|--------|------|-------|----------------------------------|
| 34.2 | 21.5 | 12.7 | 5.75        | 32.4        | 2.58   | 0.58 | 36.7  | 4.26×10 <sup>-4</sup>            |

注: 含水率均为体积分数。

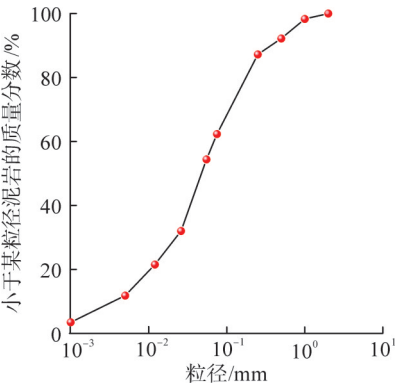


图 1 试验土样粒径级配曲线

Fig.1 grain size distribution curve of test soil sample

稻壳灰呈灰色粉末状, 相对密度为 1.80, 平均粒径为 131.679 μm, 主要成分及质量分数见表 2, 稻壳灰的 XRD 图谱见图 2。

表 2 稻壳灰主要成分及质量分数  
Tab.2 main chemical compositions and mass fractions of rice husk ash

| 化学成分                           | 质量分数/% | 化学成分 | 质量分数/% |
|--------------------------------|--------|------|--------|
| SiO <sub>2</sub>               | 80.62  | CaO  | 5.35   |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.85   | MgO  | 0.49   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.73   | 其他   | 5.96   |

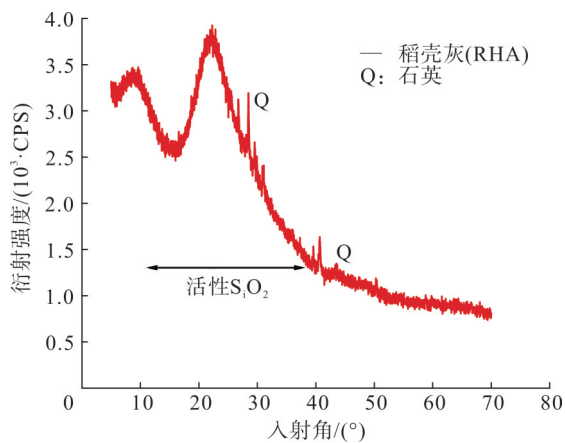


图2 稻壳灰XRD图谱

Fig.2 XRD spectrum of rice husk ash

## 1.2 试样制备

将强风化泥岩风干, 碾碎后过2 mm筛, 放入烘箱中24 h, 确保完全干燥。开展击实试验, 确定不同稻壳灰掺量强风化泥岩改良土的最优含水率。以石灰为碱性激发剂, 其掺量(质量分数)为2%, 稻壳灰掺量(质量分数)分别取0、2%、4%、6%、8%。试样养护时间为28 d, 养护温度为20℃, 相对湿度为90%<sup>[14]</sup>。

## 1.3 试验装置

试验装置见图3。采用压力板法测定改良土的土水特征曲线, 利用渗流装置测定改良土的渗透系数。渗透装置主要包括土柱模具、数据采集系统和供(排)水系统。土柱模具的内径为10 cm, 高为65 cm, 壁厚为1 cm。在模具两侧等间距布置4个插入式含水率传感器和4个张力传感器(探针), 分别测量所在位置土体的含水率(均为体积分数)和基质吸力。含水率测量范围为0~100%, 精度为±2%; 基质吸力测量范围为0~200 kPa。

供水系统采用马氏瓶, 为土柱提供恒定水头的入渗条件。将马氏瓶出水口与土柱上顶盖进水口相连, 土柱底板预留出水口。数据采集系统采用HC5000型数采仪, 记录含水率和基质吸力随时间的变化情况, 采集间隔为15 s。

极端降水诱发浅层孔隙水压力骤升是导致冀北地区强风化泥岩路堑边坡浅层滑塌的主要原因, 滑塌深度一般为0.5~2.0 m。一维垂直入渗试验难以完全复刻现场复杂的降雨强度、持续时间、裂隙网络及三维渗流场。鉴于此, 通过控制土柱高度(65 cm)、击实密度、最优含水率及恒定水头入渗条件, 有效模拟边坡浅层土体在强降雨初期的水分迁移以及湿润锋推进过程。

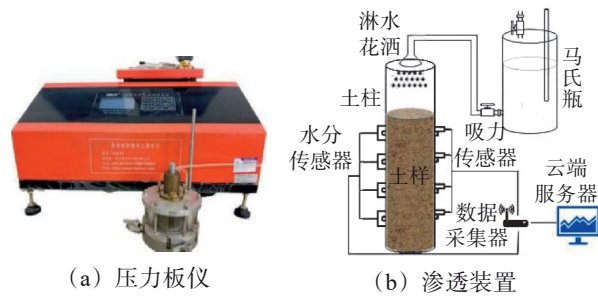


图3 试验装置

Fig.3 experiment setup

## 2 结果与分析

### 2.1 改良泥岩土水特征曲线及参数

土水特征曲线(SWCC)可反映土体含水率与基质吸力的关系, 是描述非饱和土体持水能力和水分迁移特性的关键曲线。采用Van Genuchten (VG) 模型对试验数据进行拟合, 该模型形式简洁、参数物理意义明确, 在岩土工程中应用广泛<sup>[15]</sup>, 其表达式为

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) / [1 + (\alpha\psi)^n]^m, \quad (1)$$

式中:  $\theta$  为含水率;  $\theta_r$  为残余含水率;  $\theta_s$  为饱和含水率;  $\psi$  为基质吸力, kPa;  $\alpha$ 、 $m$ 、 $n$  为拟合参数, 其中,  $\alpha$  与进气值  $\psi_{air}$  有关,  $\psi_{air} = 1/\alpha$ ;  $n$  为减湿速率参数,  $m$ 、 $n$  与土水特征曲线斜率及残余水饱和度有关<sup>[16]</sup>。

为定量评价稻壳灰掺量对土体持水能力的影响, 参考文献[17]~文献[20], 选用3个关键特征值( $\psi_{air}$ 、 $\theta_r$ 、 $n$ )进行分析。 $\psi_{air}$ 越大, 土体开始失水的吸力阈值越高, 持水能力越强;  $\theta_r$ 越大, 高吸力下土体残留水分越多, 干燥条件下持水能力越强;  $n$ 越小, 减湿速率越慢, 土体持水能力越强<sup>[21]</sup>。不同稻壳灰掺量下改良土的SWCC拟合曲线见图4, VG模型拟合参数见表3。

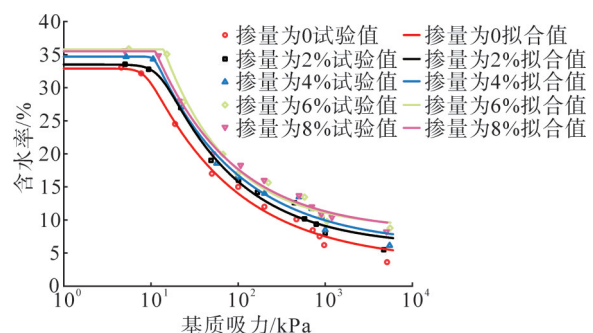


图4 不同稻壳灰掺量下的土水特征

Fig.4 soil-water characteristic under different rice husk ash admixture ratios

表3 土水特征曲线 VG 模型拟合参数  
Tab.3 fitting parameters of soil-sater characteristic curve based on the VG model

| 稻壳灰掺量/% | $\alpha$ | $m$   | $n$   | $\theta_r$ | $R^2$ |
|---------|----------|-------|-------|------------|-------|
| 0       | 0.114    | 0.596 | 2.476 | 2.61       | 0.99  |
| 2       | 0.092    | 0.576 | 2.358 | 4.47       | 0.98  |
| 4       | 0.089    | 0.558 | 2.264 | 5.16       | 0.98  |
| 6       | 0.071    | 0.508 | 2.032 | 7.81       | 0.98  |
| 8       | 0.086    | 0.489 | 1.956 | 7.23       | 0.99  |

由图4和表3可知, VG模型可以较好地拟合土体含水率与基质吸力的关系。稻壳灰掺量由0增至6%,  $\alpha$ 、 $n$ 减小,  $\psi_{air}$ 、 $\theta_r$ 增大, 减湿速率明显变慢, 土体的持水能力逐渐增强。稻壳灰掺量由6%增至8%,  $\psi_{air}$ 、 $\theta_r$ 、 $n$ 均减小, 与稻壳灰掺量为0时相比, 尽管土体持水能力仍有所提升, 但提升幅度较小。这表明稻壳灰掺量超过6%后, 继续增大稻壳灰掺量对于土体持水能力的提升效果减弱。

不同稻壳灰掺量下土水特征曲线均呈典型的“S”形特征。随着稻壳灰掺量的增加(小于6%), 土水特征曲线整体向高基质吸力方向偏移, 土体持水能力显著增强。在低至中基质吸力阶段(基质吸力小于等于100 kPa), 改良土的含水率明显高于素土(稻壳灰掺量为0)。在高基质吸力阶段

(基质吸力大于100 kPa), 改良土的含水率更高, 残余含水率更大, 土体更难完全失水, 减湿速率更慢。通过以上分析可知, 在强风化泥岩中掺入稻壳灰, 可降低水分迁移速率, 缩短湿润锋前进距离, 提高土体抗渗性, 降低降雨条件下边坡失稳风险, 提高边坡稳定性。

## 2.2 一维垂直入渗试验分析

### (1) 含水率与基质吸力的演化特征

不同稻壳灰掺量下土体含水率与基质吸力的演化特征分别见图5、图6。 $\theta$ 与 $\psi$ 的演化过程均分为3个阶段: ①稳定阶段, 湿润锋抵达监测点前,  $\theta$ 较小,  $\psi$ 较大且几乎不变; ②快速变化阶段, 湿润锋抵达监测点后,  $\theta$ 迅速增大,  $\psi$ 迅速减小; ③缓慢变化阶段, 该阶段土体接近饱和,  $\theta$ 与 $\psi$ 的变化速率明显变缓, 逐渐趋于稳定。 $\theta$ 增大与 $\psi$ 减小主要发生在快速变化阶段, 表明该阶段土体湿润速率较快, 水分入渗对土体应力影响较大。

随着稻壳灰掺量的增加, 稳定阶段的持续时间显著延长, 快速变化阶段的起始时间相应推迟, 表明稻壳灰通过改善土体结构、降低渗透性, 延缓了湿润锋的推进速率, 增强了土体的水稳定性, 对渗流过程起到了有效调控作用。

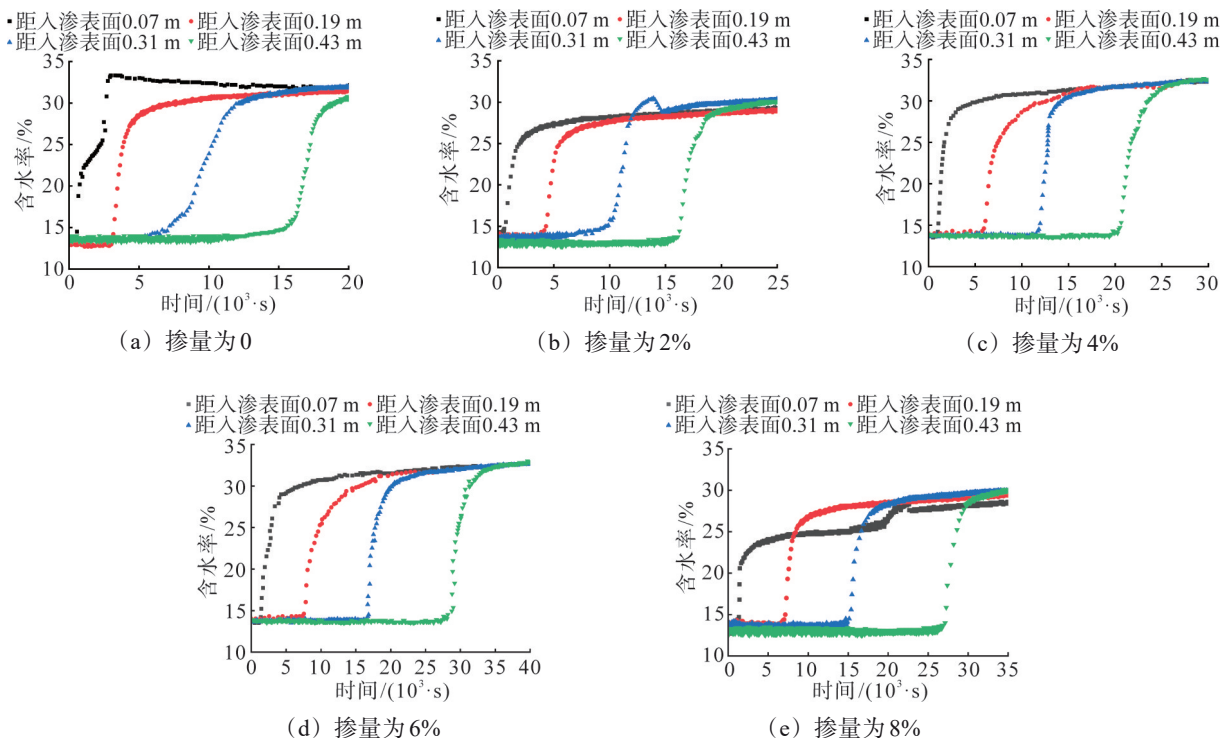


图5 不同稻壳灰掺量下含水率的演化特征

Fig.5 evolution characteristics of moisture content under different rice husk ash admixture ratios

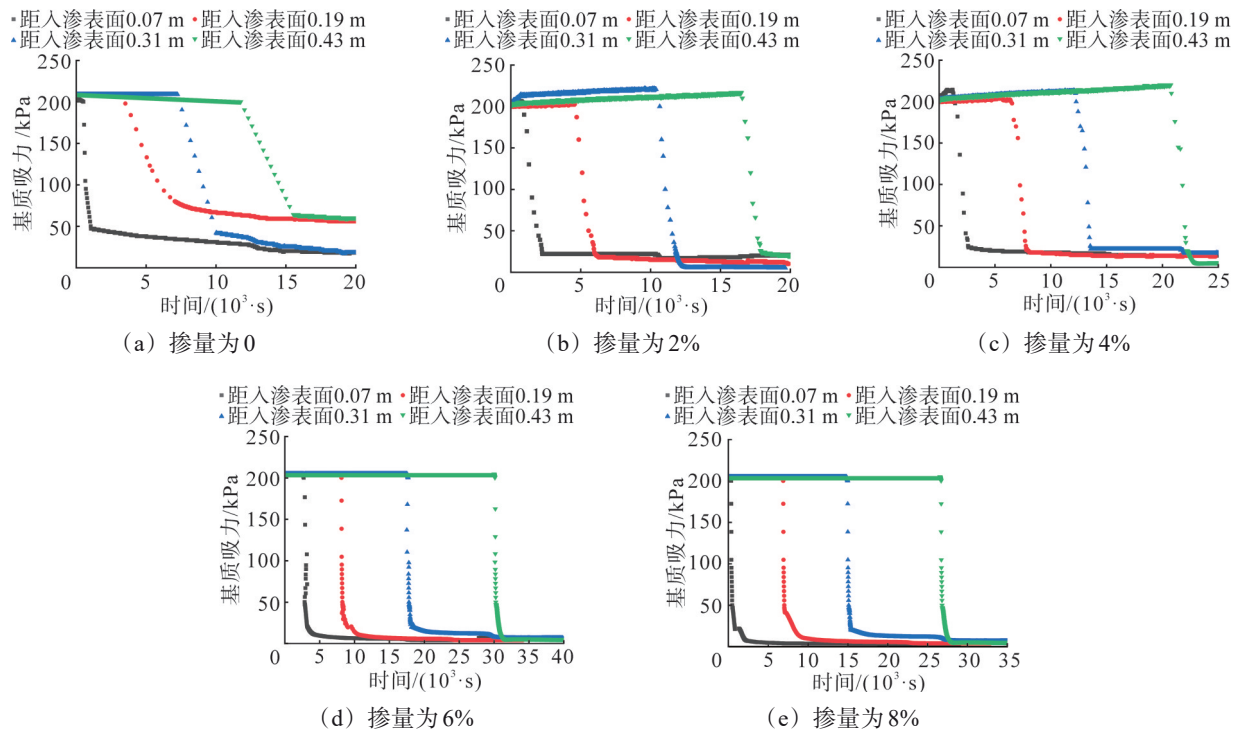


图6 不同稻壳灰掺量下基质吸力的演化特征

Fig.6 evolution characteristics of matrix suction under different rice husk ash admixture ratios

(2) 湿润锋的演化特征

不同稻壳灰掺量下湿润锋抵达时间见表4。传感器埋深相同时,湿润锋抵达时间随稻壳灰掺量的增加而延长,表明随着稻壳灰掺量的增加,湿润锋下移,前进速率变慢,土体的抗渗能力增强。

表4 不同稻壳灰掺量下湿润锋抵达时间

Tab.4 wetting front arrival time under different rice husk ash admixture ratios

| 稻壳灰<br>掺量/% | 不同传感器埋深下湿润锋抵达时间/( $10^4 \cdot s$ ) |       |        |        |
|-------------|------------------------------------|-------|--------|--------|
|             | 7 cm                               | 19 cm | 31 cm  | 43 cm  |
| 0           | 552                                | 3 046 | 7 268  | 15 774 |
| 2           | 641                                | 4 166 | 10 009 | 16 087 |
| 4           | 1 145                              | 5 966 | 11 910 | 20 517 |
| 6           | 1 450                              | 7 606 | 16 734 | 28 586 |
| 8           | 1 430                              | 7 029 | 15 242 | 27 208 |

湿润锋前进距离  $Z_w$  与速率随时间  $t$  的变化见图7。 $Z_w$  与  $t$  呈幂函数关系,满足  $Z_w = at^b$ 。 $a$ 、 $b$  为拟合参数,其中, $a$  反映了入渗初期湿润锋的推进距离, $a$  越大,土体初期水分迁移越快,抗渗能力越弱; $b$  反映了湿润锋前进过程中的衰减程度<sup>[22]</sup>。不同稻壳灰掺量下  $R^2$  均大于 0.99,表明幂函数能较好地模拟不同稻壳灰掺量下水的入渗过程。稻壳灰掺量较少(小于 2%)时,湿润锋前进速率较快。稻壳灰掺量较多(大于 4%)时,湿润锋的前进速率明显变慢。入渗 200 min 时,与素土相比,稻壳灰掺量为 6% 时,湿润锋前进距离缩短约 38%,前进速率减缓约 37%。整体来看,稻壳灰掺量为 6% 时,湿润锋前进距离最短,土体抗渗能力最强,改良效果最佳。

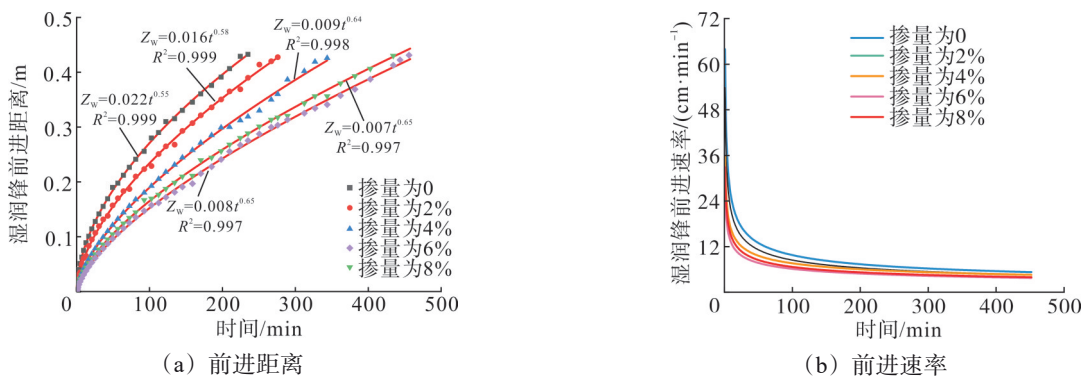


图7 不同稻壳灰掺量下湿润锋前进距离与速率随时间的变化

Fig.7 variation of wetting front advance distance and rate with time under different rice husk ash admixture ratios

### (3) 稻壳灰掺量对渗透系数的影响

湿润锋前进法假定入渗过程中湿润区的含水率等值线平稳前进,  $t_1$  到  $t_2$  时刻的平均渗透系数<sup>[23]</sup>为

$$k = \frac{(\theta_2 + \theta_1 - 2\theta_0)}{2(\psi_1 - \psi_2 + \gamma_w v \Delta t)} \gamma_w v^2 \Delta t, \quad (2)$$

式中:  $\theta_0$  为土体初始含水率;  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  分别为  $t_1$ 、 $t_2$  时刻湿润锋截面的基质吸力, kPa;  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为  $t_1$ 、 $t_2$  时刻湿润锋截面的含水率;  $\Delta t$  为时间差, s;  $\gamma_w$  为水的重度, kN/m<sup>3</sup>;  $v$  为湿润锋前进速率, m/s。

不同稻壳灰掺量下土体渗透系数见图8。基质吸力为 $[10^0, 10^1]$ 时, 土体处于渗透活跃阶段, 此时土体为近饱和状态。该阶段渗透系数随基质吸力的变化不明显。掺入稻壳灰后, 土体渗透系数显著降低, 表明在湿润条件下稻壳灰能减缓水流, 且效果显著。基质吸力为 $[10^1, 10^3]$ 时, 土体处于渗透稳定阶段, 此时土体为饱和状态。该阶段, 稻壳灰削弱了水分快速渗透带来的潜在破坏作用, 维持土壤的稳定性。基质吸力为 $[10^3, 10^5]$ 时, 土体处于渗透抑制阶段, 此时土体非常干燥, 呈低饱和状态。该阶段, 稻壳灰对土体入渗性能的影响最显著。通过对比可知, 稻壳灰掺量较多(大于4%)的情况下, 土体渗透系数明显减小, 表明稻壳灰可显著降低土体的渗透性, 增大降雨初期土体对水的渗透阻力, 延缓水分进入土壤的速度, 降低土体失稳风险。

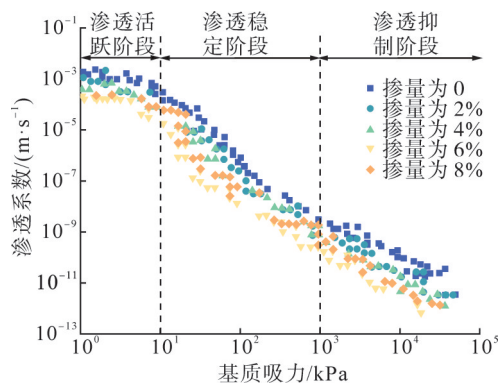


图8 不同稻壳灰掺量下土体渗透系数

Fig.8 comparison of soil permeability coefficient under different rice husk ash admixture ratios

## 3 湿润锋渗流计算模型

### 3.1 Green-Ampt(GA)模型

传统GA模型是土壤入渗的经典理论模型, 本

质上基于达西定律, 假设湿润锋处存在一个恒定的基质吸力水头<sup>[24]</sup>, 将非饱和入渗过程简化为湿润锋前面的非饱和区与后面的饱和区之间的流动, 公式简单易用。文献[25]在传统GA模型的基础上, 提出一维瞬态垂直入渗条件下湿润锋前进距离与入渗时间的函数关系式, 即

$$t = \frac{(\theta_s - \theta_i)}{K} \left[ z_w + h_m \ln \left( \frac{-z_w + h_m}{h_m} \right) \right], \quad (3)$$

式中:  $\theta_i$  为任一时刻对应的含水率;  $K$  为渗透系数, m/s;  $h_m$  为基质吸力水头, m。

### 3.2 非饱和情况下湿润锋运移模型

非饱和入渗过程中, 土体含水率无法达到饱和值, 传统GA模型未考虑非饱和渗透系数随饱和度下降而显著衰减的实际情况, 存在一定的局限性。鉴于此, 基于非饱和土孔隙水平衡微分方程, 依据雷诺层流理论, 推导得到非饱和土渗透系数的理论计算式<sup>[26]</sup>, 即

$$K = \frac{n^2 \gamma_w}{\mu} S_r^{1+\beta} \beta = K_s S_r^{1+\beta}, \quad (4)$$

式中:  $\mu$  为土水作用力系数;  $S_r$  为饱和度;  $K_s$  为饱和渗透系数, m/s;  $\beta$  为反映非饱和状态下孔隙水与土骨架之间相互作用强度的参数。

$\beta$  与土体矿物成分、孔隙大小、孔隙分布状态、颗粒级配及表面化学特性密切相关。 $\beta$  越大, 土水相互作用力越强, 随着饱和度下降, 非饱和渗透系数衰减得越剧烈, 即土体低饱和度下渗透能力迅速降低。

传统GA模型建立在土壤均质、各向同性等理想化假设的基础之上, 未充分考量土体组分变化对水分入渗过程的影响。考虑到稻壳灰改良强风化泥岩的实际场景中, 土体组分随稻壳灰掺量  $q$  及塑性指数  $I_p$  而发生变化, 土体的孔隙结构、水分运移路径及持水特性也随之改变。因此, 本文采用不同类型的拟合式来构建  $\beta$  与  $q$ 、 $I_p$  的关系, 进而将  $q$ 、 $I_p$  引入传统GA模型, 确保改进后的GA模型充分考虑土体颗粒组分结构改变对水分入渗过程的动态影响。

模型改进参数之间的关系见图9。为定量描述  $\beta$  与  $q$ 、 $I_p$  的关联, 采用多种拟合式进行拟合, 拟合结果见表5。

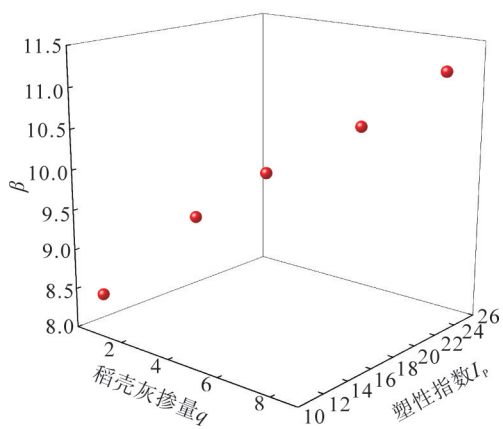


图9 模型改进参数之间的关系

Fig.9 relationships among the improved model parameters

表 5 不同拟合式的拟合结果

Tab.5 expressions of various fitting models and their coefficient of determination

| 类型  | 拟合式                                                  | $R^2$ |
|-----|------------------------------------------------------|-------|
| 线性  | $\beta=4.10+0.22q+0.35I_p$                           | 0.999 |
| 对数  | $\beta=3.78e^{0.03q}+0.05I_p$                        | 0.974 |
| 指数  | $\beta=2.83+2.45\ln(q+1)+2.03\ln I_p$                | 0.971 |
| 多项式 | $\beta=3.8+0.25q+0.3I_p-0.01q^2+0.01I_p^2+0.005qI_p$ | 0.988 |

由表 5 可知， $\beta$  与  $q$ 、 $I_p$  呈现较强的相关性，其

中，线性拟合式的拟合效果最佳。对于强风化泥岩等细粒土， $\beta$  通常较大，表现为低饱和度下土体渗透能力迅速降低。稻壳灰通过填充孔隙、生成胶凝物质、改善颗粒级配，使土水作用力增强， $\beta$  增大，从而降低非饱和渗透系数。

为了更好地刻画稻壳灰改良土微观结构变化对宏观渗流特性的影响，将拟合效果最佳的线性拟合式与式 (3)、式 (4) 联立，得到改进的 GA 模型，即

$$t=\frac{\theta_s-\theta_i}{K_s S_r^{5.10+0.22q+0.35I_p}}\left[z_w+h_m \ln \left(\frac{-z_w+h_m}{h_m}\right)\right], \quad (5)$$

其中， $S_r=\frac{\theta_r}{\theta_s}+\frac{\theta_s-\theta_r}{\theta_s\left[1+(\alpha \psi)^n\right]^m}$ 。

3.3 模型可靠性检验

为检验改进 GA 模型的可靠性，将不同稻壳灰掺量下，湿润锋前进距离的模型计算值与试验值进行对比，见图 10。传统 GA 模型下，湿润锋前进距离的计算值与试验值偏差较大，表现为湿润锋完成入渗的时间明显快于试验值。不同稻壳灰掺量下，改进的 GA 模型对湿润锋前进距离的计算值均更接近试验值，表明改进的 GA 模型在预测入渗精度方面得到了提升，更符合稻壳灰改良土体后的实际入渗情况，较为可靠。

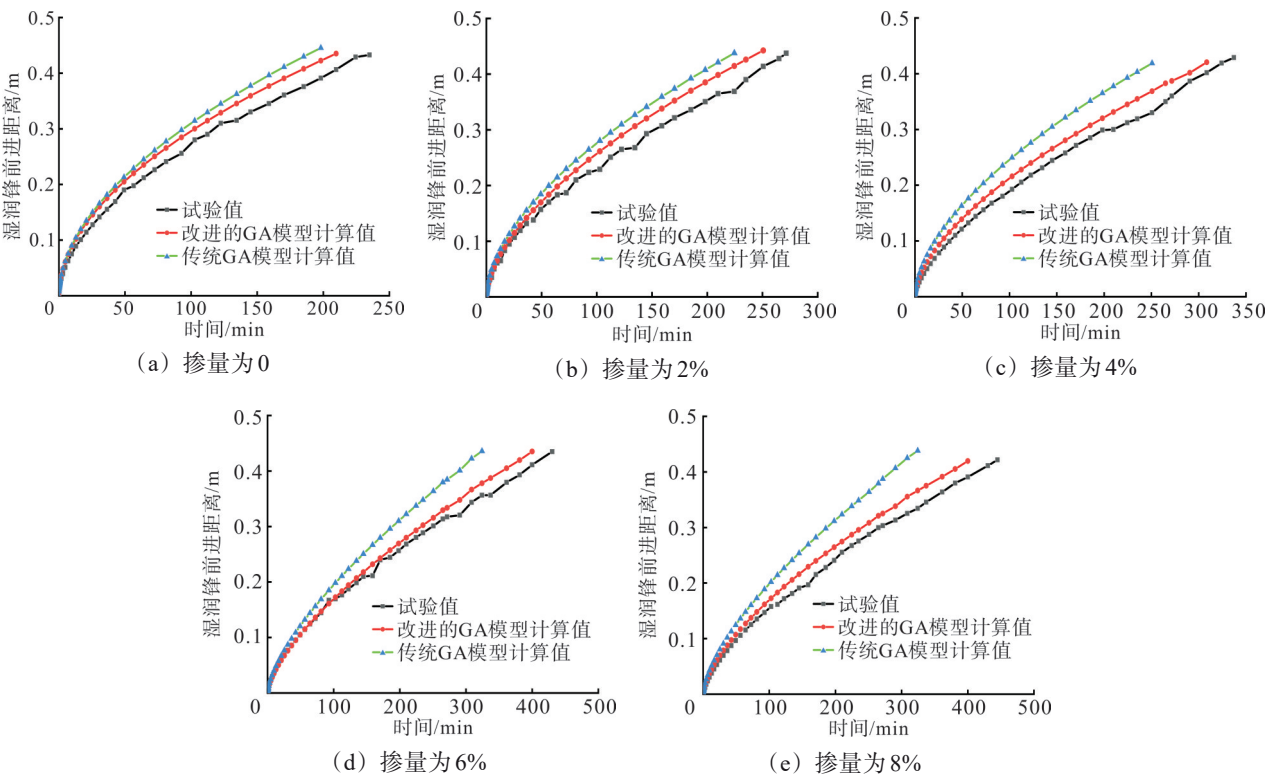


图 10 不同稻壳灰掺量下  $Z_w$  的模型计算值与试验值对比

Fig.10 comparison between model calculated values and experimental values of  $Z_w$  under different rice husk ash admixture ratios

## 4 结论

(1) 以土水特征曲线的3个特征值(进气值、减湿速率、残余含水率)为切入点,分析稻壳灰掺量对土水特征曲线的影响机制。掺入稻壳灰可增大土体进气值和残余含水率,显著降低土体减湿速率,增强土体的持水能力。

(2) 入渗时间相同的条件下,掺入稻壳灰可缩短湿润锋前进距离、降低湿润锋前进速率。稻壳灰掺量为6%时,对土体渗透特性的改良效果最佳。降雨初期,土体处于高基质吸力阶段,是防护关键期。

(3) 基于非饱和入渗理论与VG模型,引入参数 $\beta$ ,通过拟合建立 $\beta$ 与改良土塑性指数 $I_p$ 、稻壳灰掺量 $q$ 的定量关系,对传统GA模型进行改进。改进的GA模型,其湿润锋前进距离的计算值与试验值更吻合,模型较为可靠。

在未来的研究中,可结合现场试验及数值模拟,优化稻壳灰最佳掺量(约6%)与碱激发剂的配比,耦合渗流模型与改良后的土水特征曲线,进一步提升不同降雨情景下边坡安全系数的预测精度,优化边坡防护方案。

## 参考文献(References):

- [1] 苏永攀,郑佳乐,陈飞,等.降雨条件下双层滑面滑坡时程稳定性分析[J].公路交通科技,2024,41(8):96-105.  
SU Yongpan, ZHENG Jiale, CHEN Fei, et al. Time-history stability analysis on double-layer sliding surface landslide under rainfall[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024,41(8):96-105.
- [2] 宋洋,马旭琪,牛凯,等.降雨强度对含软弱夹层边坡失稳破坏临界长度影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2023,42(5):538-547.  
SONG Yang, MA Xuqi, NIU Kai, et al. The influence of rainfall intensity on the critical length of instability failure of slope with weak interlayer[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023,42(5):538-547.
- [3] 许有俊,马运锋.长春泥岩地区AM桩抗压承载性能[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2019,35(1):82-90.  
XU Youjun, MA Yunfeng. Compressive bearing capacity of AM pile in mudstone area of Changchun[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2019,35(1):82-90.
- [4] 蒲济林,周建基.黑方台古风化红层砂泥岩物理性质试验研究[J].人民黄河,2016,38(5):100-103,120.  
PU Jilin, ZHOU Jianji. Experimental study on physical properties of palaeo-weathering red sandy mudstone in Heifangtai area[J]. Yellow River, 2016,38(5):100-103,120.
- [5] LI R H, WU F, JIANG S Y, et al. Field-based investigation of failure modes and thresholds of granite residual soil slopes under heavy rainfall conditions[J]. PLoS One, 2025,20(2):e0317836.
- [6] KOU H J, SHI Z M, LU G Y, et al. Progressive failure and quantitative stability analysis of rock slope with cross-type discrete fracture network using spring-based smoothed particle hydrodynamics method[J]. Alexandria Engineering Journal, 2024, 105:25-43.
- [7] LI X, ZHANG L M, FREDLUND D G. Wetting front advancing column test for measuring unsaturated hydraulic conductivity[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009,46:1431-1445.
- [8] 周磊,易文,江伟健,等.降雨作用下微生物改良红黏土边坡稳定性分析[J].中南林业科技大学学报,2023,43(7):179-188.  
ZHOU Lei, YI Wen, JIANG Weijian, et al. Stability analysis of microbially modified red clay slopes under rainfall[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2023, 43(7): 179-188.
- [9] 刘阿强,李旭,刘艳,等.全吸力范围内渗透系数快速测定方法研究[J].岩土力学,2022,43(11):3209-3219.  
LIU Aqiang, LI Xu, LIU Yan, et al. A rapid determination method of hydraulic conductivity in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(11):3209-3219.
- [10] 李秋实,骆轩佩,韩丹.石墨尾矿掺量对沥青胶浆性能的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(1):34-41.  
LI Qiushi, LUO Xuanpei, HAN Dan. Effect of graphite tailings content on the properties of asphalt mastic[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2026,45(1):34-41.
- [11] 张延年,何明恒.碱固废协同激发胶凝材料强度与水化特性研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(4):455-462.  
ZHANG Yannian, HE Mingheng. Strength and hydration characteristics of alkali solid waste synergistically stimulated cementitious materials[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025,44(4):455-462.
- [12] 陈伟,黄志军,徐宏,等.稻壳灰地聚物固化黄土水稳定性及微观机理分析[J].水利水电技术(中英文),2024,55(12):171-179.  
CHEN Wei, HUANG Zhijun, XU Hong, et al. Analysis of water stability and microscopic mechanism of rice husk ash ground polymer solidified loess[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(12):171-179.
- [13] 丑亚玲,韩航天.稻壳灰改良盐渍土力学特性及抗冻性的研究[J].兰州理工大学学报,2023,49(1):127-135.  
CHOU Yaling, HAN Hangtian. Experimental study on mechanical properties and freezing resistance of rice husk ash improved saline soil[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2023,49(1): 127-135.
- [14] 刘可定,林丽萍.滤纸基质吸力率定曲线的率定方法[J].矿冶工程,2017,37(5):35-39.

- LIU Keding, LIN Liping. Calibration curve of matrix suction measurement with filter paper[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2017, 37(5): 35-39.
- [15] 毕骏, 谌文武. 参数  $m$  的形式和最大基质吸力点对 Van Genuchten 方程各参数的影响[J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3604-3612.
- BI Jun, CHEN Wenwu. Influence of forms of parameter  $m$  and largest matric suction point on the parameters of Van Genuchten model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(12): 3604-3612.
- [16] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 1-5.
- WANG Tiehang, LU Jing, YUE Caikun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 1-5.
- [17] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1055-1060.
- CAI Guoqing, ZHAO Chenggang, LIU Yan. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1055-1060.
- [18] 秦冰, 陈正汉, 孙发鑫, 等. 高吸力下持水曲线的温度效应及其吸附热力学模型[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(10): 1877-1886.
- QIN Bing, CHEN Zhenghan, SUN Faxin, et al. Temperature effect on water retention curve under high suction and its modeling based on thermodynamics of sorption[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(10): 1877-1886.
- [19] 曾召田, 崔哲旗, 孙德安, 等. 南宁膨胀土持水性能的温度效应及微观机制[J]. 岩土力学, 2023, 44(8): 2177-2185.
- ZENG Zhaotian, CUI Zheqi, SUN Dean, et al. Temperature effect on water retention capacity of Nanning expansive soil and its microscopic mechanism[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(8): 2177-2185.
- [20] 张宏, 刘海洋, 李聪. 风积沙路基土土-水特征曲线温度效应研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(7): 42-49.
- ZHANG Hong, LIU Haiyang, LI Cong. Temperature effect of soil-water on characteristic curve of aeolian sand subgrade soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(7): 42-49.
- [21] 陈勇, 严可翔, 苏剑, 等. 湿-载-热对粉质黏土持水性能的影响特征及预测模型[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 45-52.
- CHEN Yong, YAN Kexiang, SU Jian, et al. Effect and modeling of wetting-loading-heating on water retention capacity of silty clay[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 45-52.
- [22] 陈勇, 邹皓天, 苏剑, 等. 基于数据挖掘的土水特征曲线影响分析及预测研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(2): 451-466.
- CHEN Yong, ZOU Haotian, SU Jian, et al. Impact analysis and prediction research of soil-water characteristic curves based on data mining[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(2): 451-466.
- [23] 詹舒婷, 宋明丹, 李正鹏, 等. 不同秸秆生物炭对土壤水分入渗和蒸发的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 294-300.
- ZHAN Shuting, SONG Mingdan, LI Zhengpeng, et al. Effects of different straw biochars on soil water infiltration and evaporation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(1): 294-300.
- [24] BAUWE A, KAHLE P, LENNARTZ B. Hydrologic evaluation of the curve number and Green and Ampt infiltration methods by applying Hooghoudt and Kirkham tile drain equations using SWAT[J]. Journal of Hydrology, 2016, 537: 311-321.
- [25] 李宁, 许建聪, 钦亚洲. 降雨诱发浅层滑坡稳定性的计算模型研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(5): 1485-1490.
- LI Ning, XU Jiancong, QIN Yazhou. Research on calculation model for stability evaluation of rainfall-induced shallow landslides[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1485-1490.
- [26] 邵龙潭, 温天德, 郭晓霞. 非饱和土渗透系数的一种测量方法和预测公式[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(5): 806-812.
- SHAO Longtan, WEN Tiande, GUO Xiaoxia. Direct measurement method and prediction formula for permeability coefficient of unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 806-812.