

崔宏环,王漠,张立群,等.高温暴雨双因子扰动下强风化泥岩边坡稳定性演化分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(4):399-406.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260012

Cui Honghuan, Wang Mo, Zhang Liqun, et al. Stability evolution analysis of strongly weathered mudstone slope under dual-factor disturbance of high temperature and heavy rainfall[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2026, 45(4): 399-406. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20260012

高温暴雨双因子扰动下强风化泥岩边坡稳定性演化分析

崔宏环^{1,2}, 王漠^{1*}, 张立群¹, 吴惠真¹, 胡治强¹, 白航¹

(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: 针对极端暴雨与气温升高对高速公路路堑边坡稳定性造成严重威胁的问题, 通过室内直剪试验、变温渗透试验及基质吸力试验, 并结合 Green-Ampt (GA) 与 Van Genuchten (VG) 模型, 构建基于温度-含水率的动态评价模型, 模拟双因子扰动下湿润锋深度及边坡安全裕度的动态演化进程。研究结果表明: 土体黏聚力随含水率呈抛物线变化, 于 15%~17% 达到峰值; 随着温度的升高, 渗透系数增大, 土水特征曲线向右下方偏移, 土体持水能力降低; 高温与高含水率协同作用可显著加快湿润锋推进速率, 导致边坡安全裕度显著减小。研究结论为极端气候区边坡灾害的早期预警与防治提供理论支撑。

关键词: 强风化泥岩; 温-雨耦合; 边坡稳定性; 安全裕度; GA 模型; 湿润锋

中图分类号: U418.5+

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)04-0399-08

Stability evolution analysis of strongly weathered mudstone slope under dual-factor disturbance of high temperature and heavy rainfall

Cui Honghuan^{1,2}, Wang Mo^{1*}, Zhang Liqun¹, Wu Huizhen¹, Hu Zhiqiang¹, Bai Hang¹

(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 address the severe threats posed by extreme rainstorms and rising temperatures to the stability of highway cut slopes, this study establishes a dynamic evaluation model based on temperature and moisture content by integrating laboratory direct shear tests, variable-temperature permeability tests, and matric suction tests with the Green-Ampt (GA) and Van Genuchten (VG) models. The model simulates the dynamic evolution of wetting front depth and slope safety margins under dual-factor disturbances. The results indicate that soil cohesion follows a parabolic relationship with moisture content, peaking between 15% and 17%. As temperature increases, the permeability coefficient rises while the soil-water characteristic curve (SWCC) shifts downward and to the right, reflecting a significant reduction in soil water-holding capacity. Furthermore, the synergistic effect of high temperature and high moisture content markedly accelerates the advancement rate of the wetting front, leading to a substantial decrease in the slope's safety margin. These conclusions provide critical theoretical support for the early warning and disaster prevention of slopes in extreme climate regions.

Keywords: strongly weathered mudstone; temperature-rainfall coupling; slope stability; stability margin Green-Ampt model; wetting front

0 引言

2025 年, 中国北方地区降雨格局明显转变,

降雨带北移引发的极端暴雨事件呈现“频次激增、强度破纪录、持续时间长”等特征, 成为边坡失稳等地质灾害的主要诱因。据应急管理部等发布

收稿日期: 2026-01-12 修回日期: 2026-03-28 接受日期: 2026-04-08 责任编辑: 黄琦

基金项目: 河北省高等学校科学研究项目 (QN2025241)

作者简介: 崔宏环 (1974-), 女, 河北张家口人, 博士, 教授, 主要从事边坡稳定性方面的研究。E-mail: chh1496@hebiace.edu.cn

通信作者: 王漠 (2002-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事边坡稳定性方面的研究。E-mail: wm2024201112@hebiace.edu.cn

的统计数据^[1-3], 2025 年前三季度华北地区雨季持续 59 d, 相较区域多年同期偏长近一倍。根据河北建筑工程学院气象监测站实测数据, 2025 年张家口地区降雨量和温度较往年显著增长。这种异常气候打破了北方干旱-半干旱山区边坡已长期适应的水热平衡状态, 温度与降雨的协同效应持续放大。“温-雨”复合灾害模式给中国北方地区的地质环境稳定性带来了严峻挑战, 对强风化泥岩边坡的影响尤为突出。强风化泥岩作为典型的高塑性土体, 具有较强的膨胀性, 在遇水膨胀和干燥收缩过程中易产生裂隙, 导致边坡浅层滑塌频发。以京新高速胶泥湾上行 K196+324-K196+414 段为例, 该区段属于半干旱气候区, 受季风影响, 夏季高温多雨, 冬季寒冷干燥。2022 年 8 月、2025 年 6 月该区段发生大面积路堑边坡滑塌、路面开裂, 严重影响车辆的正常通行。

极端降雨与温度耦合对边坡稳定性影响较大。黄晓虎等^[4]通过物理模型试验发现, 强降雨使膨胀土裂隙充填物软化, 滑带参数大幅降低, 最终导致坡体失稳。Loche 等^[5]研究表明, 温度与滑坡呈正相关, 温度升高会放大浅层滑坡风险, 与降雨耦合时可改变土壤饱和度分布, 增大孔隙水压力, 降低边坡安全裕度。Dhanai 等^[6]通过大量数据验证温度上升会放大降雨强度, 导致基质吸力下降, 边坡稳定性降低。北方山区边坡多由风化碎屑岩与黏性土混合构成, 其渗透系数对温度的变化较为敏感。夏季持续高温使土体颗粒间的联结力减弱、孔隙度增大, 渗透系数可提升 30%~50%, 为雨水快速入渗提供通道。这种降雨驱动的“入渗效应”与温度主导的“渗透强化效应”形成耦合, 导致边坡潜在滑面含水量急剧升高、有效应力显著降低, 最终诱发边坡失稳。目前国内相关研究多聚焦单因素且研究区域集中于南方, 缺乏对极端降雨-温度复合条件下北方干旱-半干旱山区基础设施风险的定量评估和灾害应对策略研究。

鉴于此, 作者以典型强风化泥岩为研究对象, 通过直剪试验与变温渗透试验, 建立含水率-黏聚力及温度-渗透系数演化模型, 结合土-水特征曲线(SWCC)与 Van Genuchten (VG) 模型^[7]确定含水率与基质吸力的关系。将动态参数与改进的 Green-Ampt (GA) 入渗模型^[8]耦合, 模拟湿润锋发展进程, 揭示“温-雨”耦合效应下的边坡失稳机理, 为极端气候条件下边坡灾害的精准预测与防治提供理论依据。

1 试样制备与试验方法

1.1 土样采集与试样制备

试验所用土样取自京新高速公路胶泥湾至西洋河(冀晋界)段上行 K196+324-K196+414 段路堑, 该路堑段为强风化泥岩, 矿物组成以伊利石、蒙脱石等亲水性黏土矿物为主, 富含 SiO_2 、 Al_2O_3

及 Fe_2O_3 等氧化物。这类岩土体是典型的半岩半土介质, 力学性质介于坚硬岩石与松散土体之间, 处于不断劣化的过渡演化阶段。在长期风化作用下, 研究区段泥岩颗粒间的原生胶结已极度弱化, 结构较为松散, 在“温-雨”环境的周期性扰动下极易崩解, 原位力学响应已强烈倾向于土的特性, 故采用碾碎后重塑土进行分析。

将取回的泥岩碾碎风干后过 2 mm 筛, 得到泥岩的颗粒级配曲线, 见图 1。开展轻型击实试验, 测得土样的最优含水率为 17%, 最大干密度为 1.72 g/cm^3 , 液限为 27.6%, 塑限为 17.8%。泥岩的 XRD 衍射图谱见图 2。该强风化泥岩中石英、长石占比相对较高, 这是由于山区泥岩受母岩(花岗岩、片麻岩)影响, 符合北方花岗岩风化形成的陆相泥岩的化学特征。制备的试样见图 3。

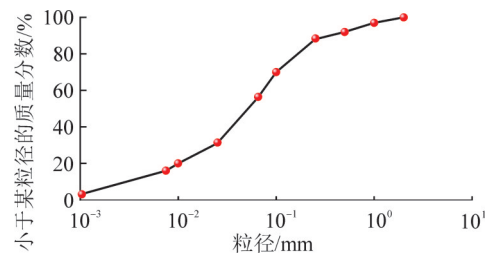


图 1 泥岩颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of mudstone

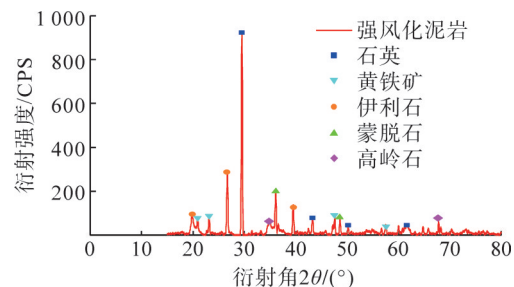


图 2 泥岩 XRD 图谱

Fig.2 XRD pattern of mudstone



(a) 现场取样

(b) 环刀试样

图 3 泥岩试样

Fig.3 Mudstone samples

1.2 试验方案

为全面反映泥岩自相对干燥至较为湿润过程中的性质变化及温度对渗透系数的影响, 使研究结果更具普适性, 设计 6 种质量含水率 ω (11%、13%、15%、17%、19%、21%), 7 种温度 (5 °C、10 °C、15 °C、20 °C、25 °C、30 °C、35 °C), 分

别开展直剪试验、变温常水头渗透试验及基质吸力试验。

本文在试样制备及力学性质分析时采用质量含水率 ω ,在用渗流模型计算湿润锋深度时,采用体积含水率 θ ,两者换算式为

$$\theta = \frac{\rho_d}{\rho_w} \omega,$$

式中: ρ_d 为土体干密度; ρ_w 为水的密度,取 1.0 g/cm^3 。

(1) 直剪试验

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[9],采用应变控制式四联电动直剪仪开展试验。依据目标含水率配置土样,将配制好的土样置于保鲜膜中,恒温密封24 h,确保含水率分布均匀,然后制备成直径为61.8 mm、高为20 mm的圆柱体试样。试验过程中,法向应力分别设置为50 kPa、100 kPa、150 kPa、200 kPa,剪切速率设置为0.02 mm/min,试验持续进行直至试样破坏,实时记录剪切过程中剪应力与水平位移的变化。

(2) 变温常水头渗透试验

为探究温度对渗透系数的影响,首先,按照90%的压实度制备高为4 cm、截面积为30 cm²的圆柱体试样。然后,将试样置于真空饱和缸中并注水浸泡9 h,以确保其达到完全饱和状态。在保持试样含水率恒定的前提下,将饱和试样密封后置于高低温交变湿热试验箱中恒温处理12 h,确保试样内部达到设计温度。最后,将试样迅速移至渗透仪中开展试验,记录管中水位移动时间。具体试验流程见图4。

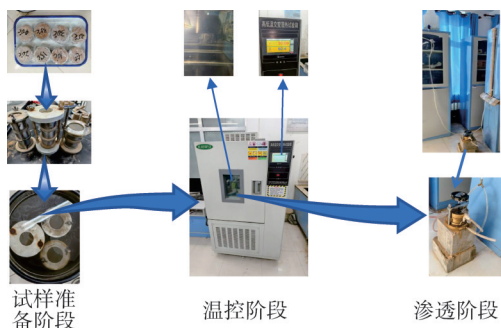


图4 变温渗透试验流程

Fig.4 Procedure of the variable temperature permeability test

(3) 变温基质吸力试验

采用压力板法测定土-水特征曲线,通过轴向平移装置实现负压调控,以此模拟土壤吸力环境。试样经24 h恒温处理达到目标温度,试验过程中通过温水、冷水循环及外加保温棉方式,维持测试温度恒定。连接压力板测试系统,记录试样初始质量,施加负压(-5 kPa),待水流稳定后,记录试样的饱和体积含水率 θ_s 。逐级施加气压,增大基质吸力并对试样称重,计算当前吸力下的体积含水率 θ 。当试样质量变化小于0.1%时,视为排水结束,将试样烘干测重,以验证VG模型的残余体积含水率 θ_r 。

2 试验结果分析

2.1 直剪试验结果分析

土体黏聚力 c 及内摩擦角随质量含水率 ω 的变化见图5。

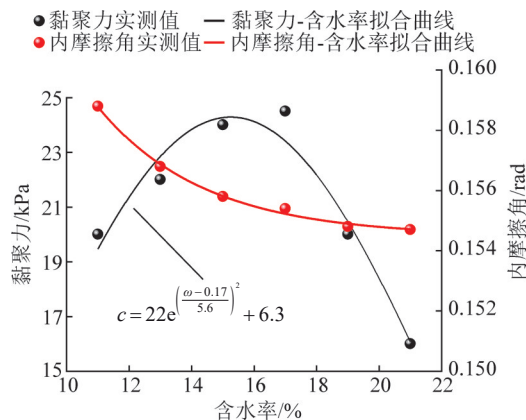


图5 土体内摩擦角及黏聚力随含水率的变化

Fig.5 Variation of internal friction angle and cohesion with water content

由图5可知,黏聚力随 ω 的增大呈先增后减的非线性变化趋势,在 $\omega \approx 15\%$ 时黏聚力达到峰值。随着 ω 继续增大,黏聚力明显减小。产生这种现象的原因是非饱和土壤中水分可调控颗粒间的相互作用:低 ω 条件下, ω 的增大可增强土颗粒间的毛细力和表面张力,提升颗粒的黏聚性,导致剪切强度提高; ω 超过最优值后,过量水分充填孔隙并形成润滑层,削弱颗粒间的摩擦阻力,导致土体抗剪能力下降。

内摩擦角随 ω 的增大逐渐减小。这是由于随着 ω 的增大,水分在土颗粒表面形成润滑水膜,降低了颗粒间的滑动摩擦系数。鉴于内摩擦角变化的数量级仅为 10^{-3} ,为便于后续研究,本文不考虑含水率对内摩擦角的影响。

2.2 变温渗透试验结果分析

温度敏感系数可更直观地反映单位温度变化引起的饱和渗透系数变化量,其计算式为

$$S = \frac{k_{T+\Delta T} - k_T}{k_T \cdot \Delta T}, \quad (1)$$

式中: T 为温度; k_T 为 T 温度下的饱和渗透系数; ΔT 为温度变化量。

温度敏感系数及饱和渗透系数 k_s 随温度的变化见图6。土体饱和渗透系数与温度近似呈正相关。随着温度的升高,饱和渗透系数明显增大。温度由 5°C 增至 35°C ,饱和渗透系数由 0.0032 cm/s 增至 0.0044 cm/s ,增大约37%。饱和渗透系数在温度达到 30°C 时显著增大,可见温度是影响土体渗透性的关键因素,较高的温度会加速入渗过程。

文献[10]~文献[12]研究表明,渗透系数与动力黏滞系数成反比。水的动力黏滞系数对温度具有较高的敏感性,其数值随温度的升高急剧减小。

从水动力学角度来看,温度较高时,水分子热运动加剧,分子间作用力较弱,导致黏滞性下降,水在土体孔隙中流动所受的阻力减小,流动性增强,渗透系数增大。从物理化学微观机理来看,强风化泥岩富含蒙脱石等黏土矿物,温度升高会促使黏土颗粒表面的结合水膜变薄,双电层厚度减小,导致土体膨胀性减弱^[13]。同时,热力学作用可重塑微观孔隙结构,促进有效孔隙体积的增大及孔隙喉道的连通,进而在水力梯度相同的条件下,能通过的水流量更大,在宏观层面表现为饱和渗透系数增大。水动力学与黏土物理化学性质的叠加演变,共同构成“高温增渗”的内在机制^[14]。

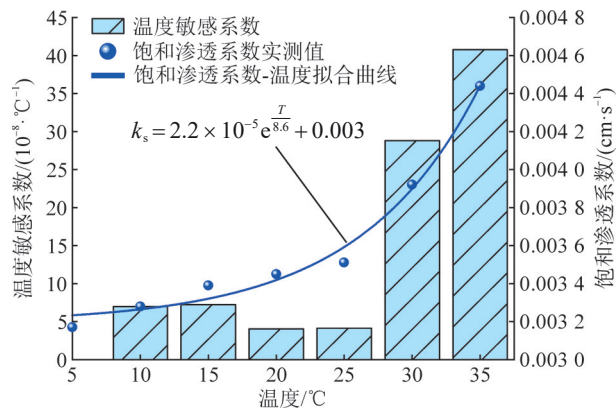


图6 温度敏感系数及饱和渗透系数随温度的变化

Fig.6 Variation of temperature sensitivity coefficient and saturated permeability coefficient with temperature

2.3 基质吸力试验结果分析

通过基质吸力试验得到的土-水特征曲线(SWCC)见图7。采用式(2)所示VG模型^[7]对试验值进行拟合,结果见表1。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m}, \quad (2)$$

式中: θ_s 为饱和体积含水率; ψ 为基质吸力; α 、 n 、 m 为拟合参数,其中, α 与进气值有关, n 、 m 与土-水特征曲线斜率及残余水饱和度有关,本文假设 $m=1-1/n$ ^[15]。

由图7及表1可知,随着温度的升高,土-水特征曲线整体向右下方移动,表明温度对土体持水能力影响显著, VG模型可以较好地拟合不同温度下 θ 与基质吸力的关系。文献[16]~文献[18]采用3个关键特征值(进气值 ψ_{air} 、残余体积含水率 θ_r 、减湿速率)来反映土-水特征曲线的差异及演化规律。其中, $\psi_{air} = 1/\alpha$, 表征土体吸力阈值, α 越小,土体持水能力越强; θ_r 为高基质吸力下土体的最低含水率,其值越大,表明干燥条件下土体持水能力越强。温度由 5℃ 升至 35℃, ψ_{air} 明显降低,气体更易进入孔隙; θ_r 由 8.27 减小至 2.61,表明高温条件下土-水界面吸附作用减弱,吸附水膜

变薄,可保留的束缚水量减少,土体持水能力显著降低; θ_s 基本不变,表明在此温度范围内,土体孔隙结构未发生明显变化。土体持水能力的降低会导致土体更易失水,更快达到饱和状态,这会直接降低土体的剪切强度,降低边坡安全裕度。

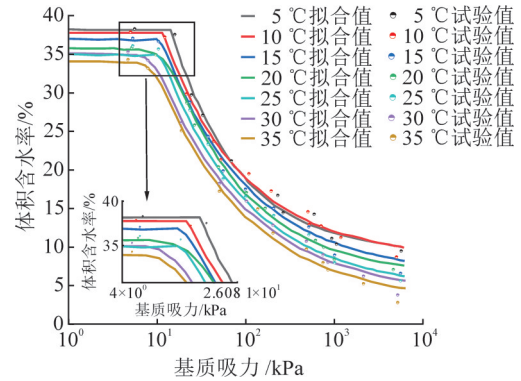


图7 土-水特征曲线

Fig.7 Soil-water characteristic curves

表1 土-水特征曲线 VG 模型拟合参数

Tab.1 Fitting parameters of VG model for soil-water characteristic curves

温度/℃	α	m	n	θ_r	R^2
5	0.089	0.471	1.892	8.27	0.99
10	0.086	0.489	1.956	8.11	0.98
15	0.071	0.508	2.032	7.81	0.98
20	0.080	0.532	2.137	6.14	0.98
25	0.089	0.558	2.264	5.16	0.99
30	0.092	0.576	2.358	4.47	0.98

3 “温-雨”耦合下边坡稳定性计算

3.1 GA 模型计算湿润锋深度

(1) 计算原理

GA 模型是一种经典的解析入渗模型,常用于描述非饱和土壤中降雨入渗过程及湿润锋发展规律。与基于非饱和土力学原理的 Richards 方程^[19]相比, GA 模型具有参数需求少、求解方便等优势。本文采用适用于斜面降雨入渗的 GA 模型^[8]进行分析,即

$$t = \frac{(\theta_s - \theta_r)}{k_0} \left[z_w + h_m \ln \left(\frac{z_w - h_m}{-h_m} \right) \right], \quad (3)$$

式中: z_w 为湿润锋深度; h_m 为吸力水头; t 为入渗时间; k_0 为 θ 接近 θ_s 时的渗透系数。鉴于自然条件下土体难以达到完全饱和状态,取饱和渗透系数的 1/2 作为 k_0 的计算值^[20],即 $k_0 = k_s/2$ 。

依据文献[21], z_w 可基于前文 SWCC 曲线关键参数计算获取; k_s 可通过图6中的拟合式获取; h_m 可通过数值计算求解。通过上述参数联动求解,得到不同温度和含水率工况下湿润锋深度随入渗时长的演化规律,为后续边坡稳定性评价提供基础。

(2) 有限元计算验证

为验证 GA 模型湿润锋深度计算结果的准确性, 采用 MIDAS GTS NX 有限元软件建立边坡数值模型。模型坡脚为 45°, 坡高 15 m, 共划分 1 415 个节点, 1 489 个单元, 坡面设置降雨强度为 300 mm/d 的降雨边界与潜在渗流面, 边坡两侧与底部统一设置为不透水边界。孔隙比 e 取 0.56, θ_s 取 36.20%, k_s 取 3.5×10^{-5} m/s, ω 取 15%、17%、19% (对应的 θ 分别为 25.80%、29.24%、32.68%)。渗流数值计算以 Richards 方程为基础, 强风化泥岩的土水特征曲线 (SWCC) 及相对渗透系数函数采用 VG 模型进行拟合。有限元计算完成后, 通过后处理模块提取 360 min 时 (此时边坡安全裕度降至失稳临界状态) 的瞬态水动力特征, 沿坡面法向提取各时刻湿润锋深度, 将含水率发生剧烈衰减的深度界定为有限元湿润锋特征深度。有限元模型及不同含水率下湿润锋深度云图见图 8。GA 模型与有限元模型计算结果对比见表 2。

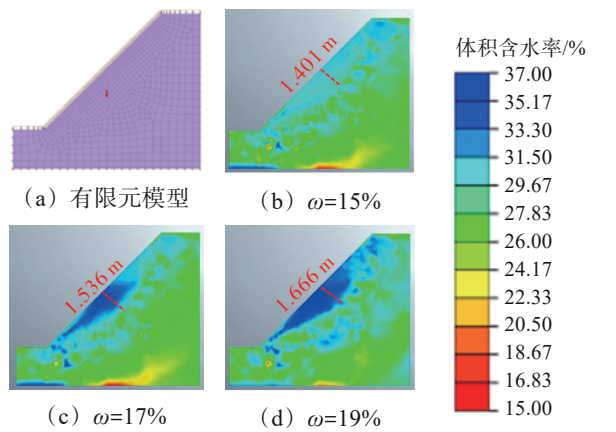


图 8 有限元模型及不同含水率下湿润锋深度云图
Fig.8 Finite element model and contours of infiltration depth

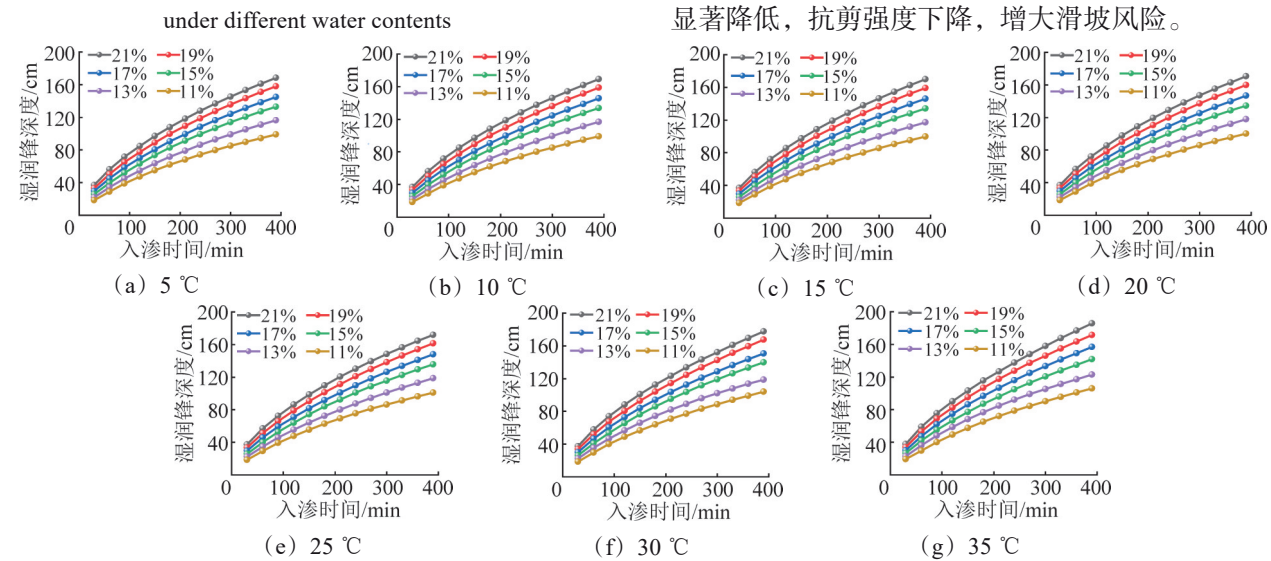


图 9 不同温度及含水率下湿润锋深度随时间的变化
Fig.9 Variation of wetting front depth with time under different temperatures and water contents

表 2 GA 模型与有限元计算湿润锋深度对比 Tab.2 Comparison of GA model and finite element calculation of wetting front depth		
$\omega/\%$	计算方法	湿润锋深度/m
15	有限元	1.401
	GA 模型	1.350
17	有限元	1.536
	GA 模型	1.470
19	有限元	1.666
	GA 模型	1.600

由图 8 及表 2 可知, 降雨入渗过程中, 坡体表面的水分向下运移, 形成明显的湿润锋。在含水率及入渗历时相同的条件下, 数值模拟所得湿润锋下移深度与 GA 模型计算值非常接近。有限元模型综合考虑了坡体内部复杂的初始基质吸力分布及非饱和储水的动态变化过程, 导致计算结果出现微小偏差, 但整体相对误差均在合理范围 (小于 5%) 内, 表明 GA 模型在计算强风化泥岩湿润锋深度时具有较高的计算精度, 能够满足工程实际需求, 可为后续基于不同湿润锋深度的边坡稳定性评价提供数据支撑。

3.2 “温-雨”耦合效应对湿润锋深度的影响

为明晰温度-降雨耦合效应对土体湿润锋深度的动态调控机制, 基于土水特征曲线和 GA 入渗模型进行数值模拟, 得到湿润锋深度随时间的变化曲线, 见图 9。湿润锋深度随入渗时长非线性增长, 且在入渗历时约 60 min 时, 湿润锋推进速率达到相对稳定状态, 符合持续降雨模式下湿润锋深度与时间的线性关联特征^[21]。温度升高对湿润锋的向下推进具有显著的促进作用。以持续降雨 400 min 且含水率为 21% 的极端工况为例, 温度由 5 °C 升高至 35 °C 时, 湿润锋推进深度增加了近 10.7%。产生这种现象的原因是温度升高使土体孔隙增大, 湿润锋更易向深部发展, 使土体内部孔隙水压上升, 应力显著降低, 抗剪强度下降, 增大滑坡风险。

3.3 温度对土体入渗速率的影响

不同含水率及温度下土体入渗速率随时间的变化见图 10。在含水率相同的条件下,入渗速率随着温度的升高小幅上升。早期入渗阶段(历时小于 100 min),温度对入渗速率影响显著。在此阶段,初始含水率相同的条件下,35℃时的初始入

渗速率明显更高,表明温度对入渗过程具有催化作用。中后期入渗阶段(历时大于等于 100 min),入渗速率随时间持续衰减,但高温条件下的入渗速率仍高于低温条件,可见在整个入渗过程中,温度对土体渗流特性的驱动作用不可忽视。

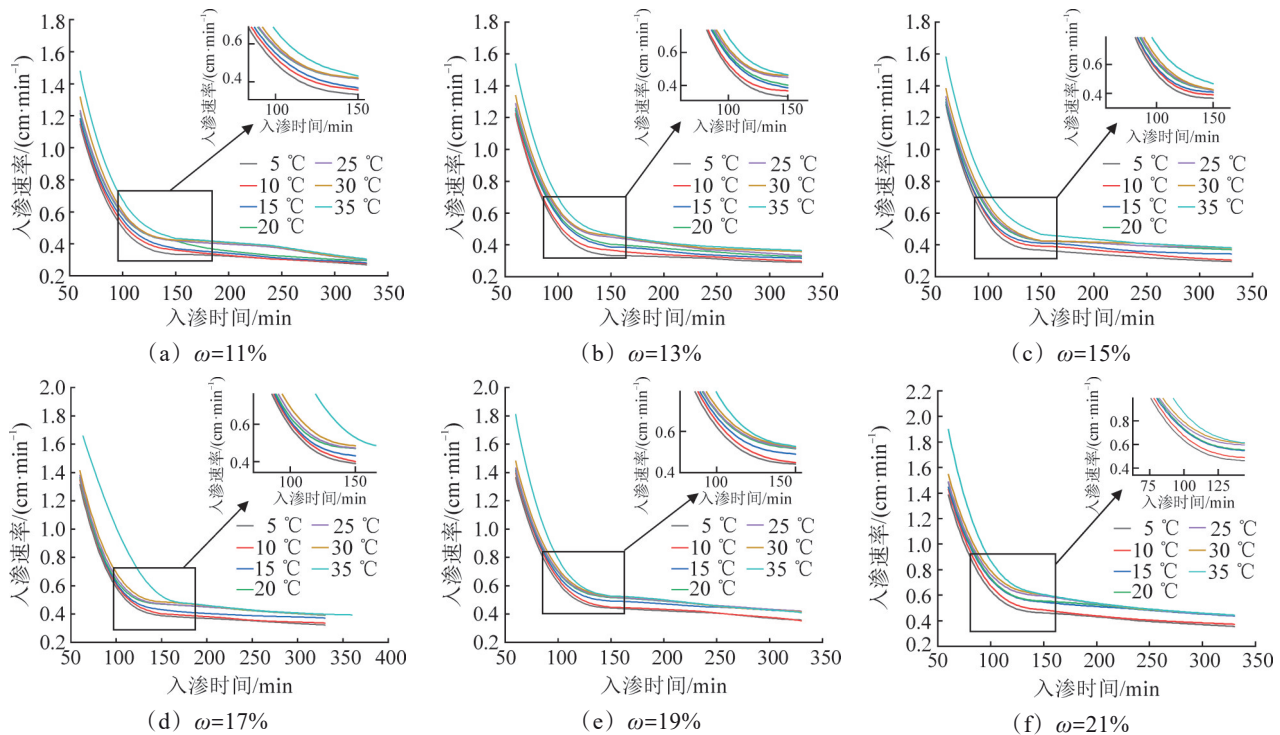


图 10 不同含水率及温度下入渗速率随时间的变化

Fig.10 Variation of infiltration rate with time under different water contents and temperatures

具体而言,随着温度的升高,累积入渗量增速加快,入渗速率初始值增大且衰减曲线更平缓,最终趋于更高的稳定值。含水率提升会使相同温度下土体进入稳态入渗阶段的时间相对延后,即土体达到稳定入渗阶段所需的时间更长,湿润锋持续向深部发展。在温度升高与含水率增大的共同作用下,湿润锋推进速率与湿润锋深度发生改变,进而影响孔隙水压力与边坡安全裕度。产生这种现象的原因是高温会降低水的动力黏滞系数,使渗透系数呈指数型增长。在高降雨强度下,土体基质吸力减小,湿润锋推进速率更快,温度对入渗速率影响更为突出。

3.4 边坡稳定性计算

为定量评价极端气候下强风化泥岩路堑边坡稳定性的时变规律^[22-23],基于无限边坡极限平衡模型开展理论推演。同时,根据《工程结构可靠度设计统一标准》^[24]界定的极限状态设计准则,选取边坡稳定裕度 g_s 作为动态评价指标。当 $g_s \leq 0$ 时,土体抗滑力不足以抵抗现有滑动力,边坡处于失稳危险状态;当 $g_s > 0$ 时,边坡处于稳定状态。基

于时变参数的边坡稳定裕度计算式为

$$g_s = c' + \gamma_i z_w \cos^2 \beta \tan \phi' + s_f \gamma_i \tan \phi' - \gamma_i z_w \sin \beta \cos \beta, \quad (4)$$

式中: c' 为土体有效黏聚力; γ_i 为土体天然重度; ϕ' 为土体有效内摩擦角; β 为边坡倾角; s_f 为湿润锋处的吸力水头。

基于式(4)开展数值求解,得到不同初始含水率及温度下边坡稳定裕度随时间的动态演化曲线,见图 11。

整体来看,所有工况下边坡安全裕度均随时间的推移逐渐减小,表明持续“温-雨”耦合作用会对边坡稳定性产生渐进劣化效应。演化初期曲线下降较为平缓,中后期出现加速下降的现象,直至进入稳定或破坏状态。该演化规律揭示了边坡失稳并非瞬时发生,而是累积损伤的过程,可为边坡灾变预警提供时间窗口。

含水率对边坡稳定性的影响尤为明显。降雨条件下,入渗使土体含水率升高,导致孔隙水压力上升、有效应力下降,同时削弱黏性土体强度指标。相较于较低含水率工况,边坡含水率偏高时,不仅初始稳定裕度更低,且抵达失稳风险阈

值的演化时长显著缩短,表明含水率升高对边坡稳定性具有直接、快速的劣化作用。这是由于暴雨增渗使岩土体的孔隙水压力升高,有效应力降低,岩土体力学参数发生软化,从而削弱边坡抗滑力,使其稳定性快速耗散。

环境升温对边坡稳定性具有显著的劣化作用,加速边坡失稳进程。在中高温环境下,渗透系数

增大,导致水分入渗加快,孔压升高,曲线下降低速率变大,边坡临界破坏时间提前。对于非饱和土而言,温度变化会影响其基质吸力,改变土体强度特性,表明温度与含水率并非简单的线性叠加,而是存在显著的协同放大效应。图11(f)工况下最易引发边坡失稳破坏,在工程中应予以重视。

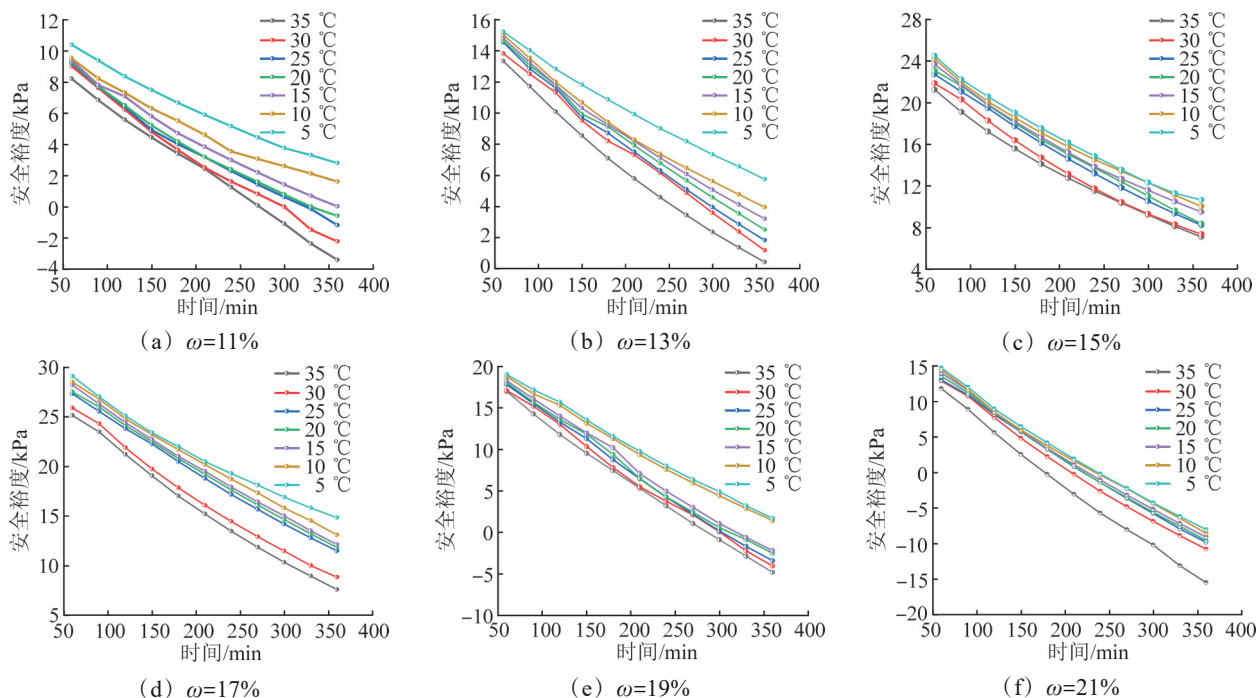


图11 不同含水率及温度下安全裕度随时间的变化

Fig.11 Variation of safety factor with time under different water contents and temperatures

4 结论

以河北省张家口市胶泥湾地区强风化泥岩路堑边坡为研究对象,通过室内试验与理论建模,揭示“温-雨”耦合作用下边坡稳定性的动态演化机制,主要结论如下。

(1) 含水率对土体黏聚力影响显著。直剪试验表明,土体黏聚力随含水率的增大先增后减,在最优含水率(17%)附近达到峰值。含水率超过最优值后,自由水的“润滑”作用与毛细力的丧失共同导致黏聚力急剧下降。

(2) 温度升高可显著增强土体的渗透性。变温渗透试验表明,渗透系数随温度的升高呈指数型增长,其微观机制是高温降低孔隙水动力黏滞系数,压缩黏土矿物双电层厚度,改善微观渗流通道,从而加快水分入渗。

(3) 有限元数值模拟与GA模型计算结果高度吻合,证实本文采用的理论计算方法能够较准确地反映边坡渗流深度的动态演化规律,验证了在高温暴雨双因子扰动下,边坡稳定性评价的准确性与可靠性。

(4) “温-雨”耦合作用会加剧湿润锋发展、增

大边坡失稳风险。结合VG模型与GA入渗模型计算发现,高温高含水率条件下湿润锋深度增长加快,边坡安全裕度加速下降。“温-雨”耦合作用可显著缩短边坡从稳定状态转入危险状态的演化时长。揭示了北方地区“温-雨”耦合作用影响边坡稳定性的阈值条件,为建立预警模型提供理论支撑。

(5) 构建边坡稳定性动态评价模型,将动态黏聚力与渗透系数引入边坡稳定性计算式,实现边坡安全裕度时变规律的定量评价。

参考文献(References):

- [1] 国家防灾减灾救灾委员会办公室,中华人民共和国应急管理部. 2025年8月全国自然灾害情况[EB/OL].(2025-09-10)[2025-10-28]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202509/t0250910_557539.shtml.
- [2] 中华人民共和国应急管理部.国家防总针对京津冀启动防汛四级应急响应 派出两个工作组协助指导[EB/OL].(2025-08-19)[2025-10-28]. https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202508/t0250819_555449.shtml.
- [3] 国家防灾减灾救灾委员会办公室,中华人民共和国应急管理部.

- 2025 年全国自然灾害情况[EB/OL].(2025-10-17)[2025-10-28].
https://www.mem.gov.cn/xw/yjglbgzdt/202601/t20260116_592135.shtml.
- [4] 黄晓虎,胡禹龙,郭飞,等.降雨及库水联合作用下膨胀土滑坡变形机理研究[J].工程科学与技术,2026,58(2):109-122.
Huang Xiaohu,Hu Yulong,Guo Fei,et al.Study on the mechanism of landslide promotion of expansive soil under the combined action of rainfall and reservoir water[J].Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(2):109-122.
- [5] Loche M, Scaringi G. Assessing the influence of temperature on slope stability in a temperate climate: a nationwide spatial probability analysis in Italy[J]. Environmental Modelling & Software,2025,183:106217.
- [6] Dhanai P, Singh V P, Soni P. Rainfall triggered slope instability analysis with changing climate[J].Indian Geotechnical Journal,2022, 52(2): 477-492.
- [7] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1980,44:892-898.
- [8] 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.
- [9] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
- [10] Hubbert M K. Darcy's law and the field equations of the flow of underground fluids[J]. Hydrological Sciences Journal, 1956, 207(1): 222-239.
- [11] 邵玉娟,施斌,刘春,等.黏性土水理性质温度效应研究[J].岩土工程学报,2011,33(10):1576-1582.
Shao Yuxian, Shi Bin, Liu Chun, et al. Temperature effect on hydro-physical properties of clayey soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(10): 1576-1582.
- [12] 王福刚,杨国华,程辉,等.热变形对饱和黏性土渗透系数的影响[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1835-1844.
Wang Fugang, Yang Guohua, Cheng Hui, et al. Influence of thermal deformation on hydraulic conductivity of saturated clayey soil[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1835-1844.
- [13] Wang S, Gainey L, Mackinnon I D R, et al. Thermal behaviors of clay minerals as key components and additives for fired brick properties: a review[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 66: 105802.
- [14] Ma J, Zhang Y L, Lv J K, et al. Experimental study on permeability characteristics of mudstone under high temperature overburden condition[J]. Processes, 2023, 11(10): 2828.
- [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] Guo H T, Zhou R J, Sun C, et al. Experimental study on soil-water characteristics and strength characteristics of complete-intense weathering mudstone in seasonal frozen area[J]. PLoS One, 2023, 18 (5): e0285484.
- [17] 陈莎莎, 陈晗, 黄海健, 等. 干密度对非饱和黏土土-水特性及强度特征的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025, 44 (4): 447-454.
Chen Shasha, Chen Han, Huang Haijian, et al. The influence of dry density on the soil water characteristics and strength characteristics of unsaturated clay soil[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025, 44(4): 447-454.
- [18] Alnmr A, Alzawi M O, Ray R, et al. Experimental investigation of the soil-water characteristic curves (SWCC) of expansive soil: effects of sand content, initial saturation, and initial dry unit weight [J]. Water, 2024, 16(5): 627.
- [19] Richards L A. Capillary conduction of liquids through porous mediums[J]. Journal of Applied Physics, 1931, 1: 318-333.
- [20] Bouwer H. Infiltration of water into nonuniform soil[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1969, 95(4): 451-462.
- [21] 连继峰. 雨水入渗下路基土质边坡水分运移时空特征与浅层稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017: 23-30.
- [22] Lu N, Godt J. Infinite slope stability under steady unsaturated seepage conditions[J]. Water Resources Research, 2008, 44: W11404.
- [23] Xie M W, Esaki T, Cai M F. A time-space based approach for mapping rainfall-induced shallow landslide hazard[J]. Environmental Geology, 2004, 46: 840-850.
- [24] GB 50153—2008 工程结构可靠性设计统一标准[S].