

降雨入渗下根带土水力特性及边坡稳定性研究

何玉琼, 钟志群, 赵鋆嬉, 周炫屹, 代国发*

昆明理工大学交通工程学院, 云南 昆明 650500

摘要: 为研究降雨入渗条件下根带土水力特性及植被对边坡稳定性的影响, 构建灌草协同植被群落恢复模式, 对根带土进行直剪试验以量化植被根系加固效应, 并借助降雨冲刷试验分析植被护坡效应, 同时运用 fish 语言对 FLAC3D 软件进行二次开发, 开展降雨与根系耦合作用下非饱和边坡稳定性变化的研究。研究表明: (1) 灌草协同下植被根系可显著提高土体抗剪强度, 使土体黏聚力提升 85.20%, 且在降雨冲刷下植被可有效抑制坡面侵蚀; (2) 在降雨作用下, 植被边坡能减缓雨水入渗, 延缓土体饱和和所需时间, 同时协同根系力学加固效应抑制潜在滑动面上移幅度, 使安全系数衰减幅度较裸坡减少 37%; (3) 不同降雨入渗方式、降雨强度及坡度下植被护坡效应差异显著, 在强降雨及陡坡状态下, 边坡安全系数大幅下降; (4) 研究揭示了植被力学与水力协同增效的护坡机制, 建议在灌草协同护坡模式下弃土场边坡坡度宜控制在 45 度以内, 为山区地质灾害防治提供科学依据。

关键词: 降雨入渗; 根土复合体; 水力特性; 边坡稳定性; 数值模拟

中图法分类号: U416.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2026)02-0199-12

Study on Hydraulic Characteristics of Root Zone Soil and Slope Stability Under Rainfall Infiltration

HE Yu-qiong, ZHONG Zhi-qun, ZHAO Yun-xi, ZHOU Xuan-yi, DAI Guo-fa*

Faculty of Transportation Engineering/Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

Abstract: In order to study the hydraulic characteristics of root zone soil and the influence of vegetation on slope stability under rainfall infiltration, this paper constructs a restoration model of shrub-grass synergistic vegetation community, conducts straight shear tests on root zone soils to quantify the effect of vegetation root reinforcement, and employs rainfall scouring tests to analyze the effect of vegetation slope protection. Furthermore, it uses fish language to perform the secondary development of FLAC3D software, enabling the study of the unsaturated slope stability under the coupling effects of rainfall and root system. The results show that: (1) The root system of vegetation under shrub and grass synergy can significantly enhance the shear strength of the soil, increasing soil cohesion by 85.20%. Additionally, vegetation can effectively inhibit slope erosion under rainfall washout; (2) Under rainfall conditions, the vegetation slope can slow down rainwater infiltration, delay the time required for soil saturation, and, combined with the mechanical reinforcement effect of roots, inhibit the upward shift of potential sliding surfaces. This results in a 37% reduction in the rate of safety factor decay compared to bare slopes; (3) The slope-protection effectiveness of vegetation varies significantly under different rainfall infiltration modes, rainfall intensities, and slope gradients. Under heavy rainfall and steep slope conditions, the slope safety factor decreases substantially; (4) The study reveals synergistic slope-protection mechanism combining the mechanical and hydraulic effects of vegetation. It is recommended that under the shrub-grass synergy model, the slope gradient of spoil-field slopes should be controlled within 45 degrees. This provides scientific guidance for the prevention and control of geological hazards in mountainous areas.

Keywords: Rainfall infiltration; root-soil composite; hydraulic performance; slope stability; numerical simulation

边坡失稳是常见的工程地质灾害, 这类灾害不仅直接威胁人民生命安全, 更会造成基础设施损毁等重大经济损失^[1,2]。降雨入渗, 土壤水分含量增加, 土体基质吸力及抗剪强度发生改变, 导致边坡结构失稳^[3,4]。基于植物根系加固效应

的生态防护技术能有效提升坡体结构的稳定性、拦截地表径流、重建受损生态系统而获得广泛应用^[5,6]。然而在降雨过程中, 根系与土体间的相互作用如何影响水分运移, 以及植物固土效应的动态衰减规律仍有待明确。

收稿日期: 2025-05-19

修回日期: 2026-03-06

基金项目: 云南省交通厅项目(云交科教便[2022]4号)

第1作者简介: 何玉琼(1975-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 斜坡稳定性。E-mail: 461420459@qq.com

*通讯作者: Author for correspondence. E-mail: 3489038140@qq.com

随着研究手段的多样化,研究者综合运用试验研究与数值模拟等途径,系统探究了植物根系的固坡作用机制。闫聪等^[7]基于室内剪切试验,证实根系的分布使土体抗剪强度获得有效提升。何伟鹏等^[8]采用人工降雨试验,得出草本植物覆盖层可使表层土体流失量降低,同时显著提升坡面整体稳定性。陈伯洲等^[9]通过微观结构分析证实,生态修复区域土壤中细颗粒物占比提升,黏土矿物含量增加,土体构型改良与团聚体结构发育的共同作用使表层土体抗冲刷性能提高。黄少平等^[10]通过大型边坡物理模型降雨试验,得出植被覆盖可使坡面径流速率下降,累计径流量缩减,且径流调控效率随坡角减小而增加。毛正君等^[11]运用数值分析方法,揭示植被根系发育程度与边坡稳定系数呈显著正相关。张小荣等^[12]通过数值模拟发现,含根土体抗剪强度较素土显著提高,其中黏聚力随根系面积占比增加而增大,该力学强化效应使边坡安全系数同步增长。廖田婷等^[13]通过数值仿真结合离心模型测试,得出不同类型植物的根系网络均可减缓水分渗透速度,同时借助根系的锚固作用,使土体稳定系数提高。植被-土壤的水力效应主要体现在土体入渗特性和土壤基质吸力上,植被叶片蒸腾及根系吸水作用会导致根系周围土壤基质吸力发生变化^[14-16]。王轩等^[17]通过基质吸力函数和非饱和抗剪强度量化分析,得出植物根系可使土体内摩擦角提升并重构基质吸力梯度场,形成具有自稳特征的边坡增强效应。植被布局模式及其根系结构特征都会对边坡稳定系数产生显著调控效应^[18]。目前植被边坡的水力特性研究虽多,但降雨与根系耦合作用下的边坡破坏机制仍不明确,且缺乏非饱和渗流-应力理论在实际工程中的综合应用,尤其是结合水文地质、地形及植物本身保水固土性设计的弃土坡稳定性分析。

本文依托云南芒市某弃土场边坡,通过实地考察与分析,筛选适应当地气候特征的生态防护植物作为边坡治理的供试材料,构建灌草协同的植被恢复模式。采用直剪试验定量分析根系加固对土体抗剪强度的影响,同时使用数值模拟手段对植被边坡进行模拟分析,模拟降雨和根系加固耦合作用下非饱和边坡的失稳过程,分析裸坡和植被边坡中的水分迁移,阐明根系加固对边坡

安全系数的影响,为定量评价边坡稳定性以及预防地质灾害和弃土场治理提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 研究工点概况

研究工点弃土场位于云南省芒市(98°20'49"E,24°24'59"N),属南亚热带季风气候区。该地多年平均气温19.6℃,夏季平均气温23.9℃,冬季平均气温12.2℃;年降雨量1653.6mm,其中夏季降雨量达1015.9mm,占全年总量的61.4%,属云南省典型多雨区。弃土场土壤天然状态下呈黄色,经现场多次级配筛分试验后计算该土样粒径大于2mm的颗粒含量为全重的22.3%,土样粒径大于0.075mm的颗粒含量为全重的94.3%,不均匀系数 C_u 均大于5,曲率系数 C_c 均小于1,属级配不良砂,其特征为持水能力弱;土壤养分状况较差:有机质含量极低(0.186%),全氮(22.50 mg/kg)、全磷(169.62 mg/kg)含量均低。

1.2 研究区植物筛选与种植

在弃土场分级边坡选取坡向、坡度一致的两块面积100m²的样地进行对比分析,一块为植被恢复样地,另一块为裸坡样地。鉴于前述弃土场土壤持水性弱、养分贫瘠的特点,适宜种植耐干旱耐贫瘠的植物,且所选植被要满足其对当地环境的高度适应性和快速生长特性。草本植物在控制地表径流和防止水土流失方面普遍比灌木更有效,然而其作用在短时强降雨下会减弱;灌木冠层通过承接雨水,显著削弱了雨滴对地面的冲击和侵蚀力,但灌木分布的不连续性,可能导致其树冠遮蔽下的裸地面临水土流失的风险^[19]。因此,根据当地自然环境、水文地质以及植物本身保水固土性质,在植被恢复样地上构建灌草协同恢复模式:以耐旱耐瘠、抗逆性强、根系发达、枝叶繁茂、生长迅速的木豆、山毛豆等灌木为主(木豆、车桑子、银合欢、戟叶酸模、山毛豆),辅以护坡草本(狗牙根、高羊茅、宽叶雀稗、狗尾草、孔雀草),基于立地适配性、水土保持及以往弃土场治理成功案例,设定灌木和草本播种量约为7:3,采取人工沟状撒播种子的方式在植被恢复样地上进行播种,播种时间为2023年7月25日,试验于播种后135d进行。研究区灌草协同恢复模式植物生长情况如图1所示。

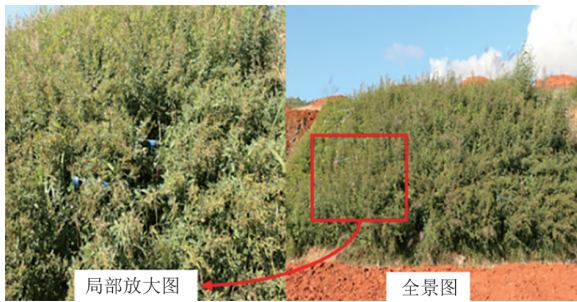


图1 研究区灌草协同恢复模式植物生长情况图
Fig. 1 Illustration of plant growth conditions under the shrub-grass synergistic recovery model in the study area

1.3 根系构型观测、植株拉拔试验及降雨冲刷试验

根据当地适生性指标,选取当地生长较为突出的山毛豆、木豆两种耐干旱、耐贫瘠的人工种植物以及自然生长的草本植物类芦作为典型样本,通过现场采集三种植株的根系样本,采用Photoshop2020图像处理技术完成格式转换、曝光参数优化及噪点消除等处理,最终生成如图2所示的根系空间分布特征图,直观呈现不同根系的生长模式。

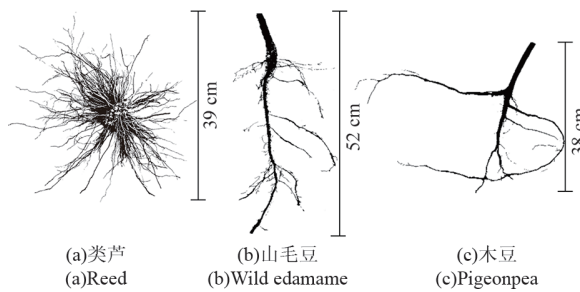


图2 根系空间分布特征图
Fig. 2 Root spatial distribution characteristics diagram

在研究区进行野外植株拉拔试验,采用HP-500艾德堡数显推拉力计测定植株拉拔力,用精度0.01 m的卷尺测量总根长和株高,精度0.02 mm的游标卡尺测量地茎。对山毛豆、木豆和类芦各完成有效拉拔试验20株,记录其关键参数,分析植物根系抗拔力与形态特征关系,探究其力学强度特性及土壤固持能力。

在研究区选取灌草植被边坡及相邻裸坡作对比对象,开展降雨冲刷试验。在两类边坡相同坡向和坡位处分别布设100 cm×100 cm标准观测样方,如图3所示。依据降水量等级标准与历史记录,设计200 L、5 h的降雨工况,通过喷淋装置模拟天然降雨过程,采用径流泥沙收集装置连

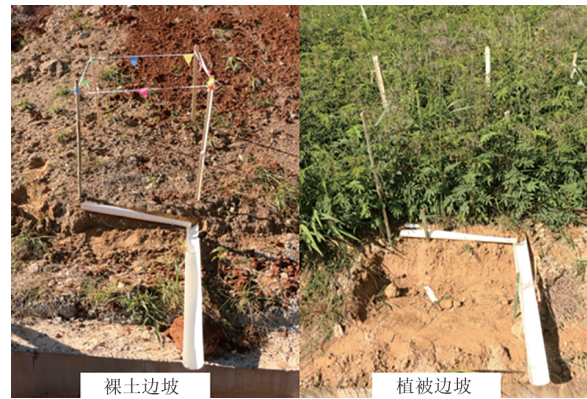


图3 两类边坡降雨冲刷试验位置图
Fig. 3 Diagram of slope rainfall erosion test locations for two types of slopes

续获取坡面侵蚀物质,试验后对采集样品进行沉淀,并带回实验室进行烘干称重处理,定量评估植被的水土保持效能。降雨结束后观察现场两类边坡表现形态,系统分析植被层对坡面侵蚀过程的抑制作用。

1.4 土体参数测定

选取弃土场的工程弃土和灌草混种下植物根土复合体进行分析,在裸坡和灌草边坡上分别设置坡上、坡中、坡下6个采样剖面,各剖面点开挖30 cm深坑,采集20 cm×20 cm×30 cm的原状土块,将采集的土壤样本进行密闭封存后送至实验室。通过烘干法完成水分含量测定,用环刀法测出两类土体的天然密度,同时将每大块土分装为5个环刀样本,对其进行直剪试验,取平均值作为该组土样的抗剪强度指标,其中直剪试验所测抗剪强度指标包括黏聚力和内摩擦角。在弃土场选择合适场地进行双环入渗试验测定两类土体的入渗性能,在双环入渗试验的基础上,计算根土复合层和弃土的饱和渗透系数,其余数据参考地勘报告得出。

1.5 边坡数值模拟

1.5.1 FLAC3D非饱和降雨渗流和应力修正 (1)饱和-非饱和渗流理论

运用FLAC3D软件开展饱和和非饱和土渗流场模拟时,渗流场演化过程严格遵循达西渗流理论,其控制方程可表述为:

$$q_i = -k_{ii} \hat{k}(s) [p - \rho_f x_j g_j]_i \quad (1)$$

式中: q_i 为定向渗流速率, m/s; k_{ii} 为渗透系数张量, $m^2/(Pa \cdot s)$; $\hat{k}(s)$ 为相对渗透率; s 为饱和度;

p 为孔隙水压力, Pa; ρ_f 为流体密度, kg/m^3 ; g_j 为重力场分量。

FLAC3D 在默认渗流分析模块中采用饱和渗透系数体系, 通过内置 fish 脚本语言的二次开发, 可构建非饱和渗流计算模块。其中, Van Genuchten 理论模型被广泛应用于表征土体含水量与基质吸力间的非线性关系^[20], 即:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (p/a)^n\right]^m} \quad (2)$$

式中: θ_r 为残余含水率; θ_s 为土体完全饱和时的含水率; a, n, m 为拟合参数; p 为孔隙水压, kPa。

基于体积含水率和饱和度的换算关系 $\theta = ns$, 结合式(2)可推导出饱和度随基质吸力变化的定量关系, 即:

$$s = s_r + \frac{1 - s_r}{\left[1 + (p/a)^n\right]^m} \quad (3)$$

式中: s_r 为残余饱和度; s 为饱和度。

(2) 应力场、密度及抗剪强度参数修正

针对 FLAC3D 内置饱和土有效应力理论未考虑基质吸力作用的局限性, 本文基于 Bishop 非饱和土力学模型对土体单元应力分布进行修正, 即:

$$\sigma' = \sigma - \beta(1 - s)' \times (u_a - u_w) \quad (4)$$

式中: σ' 为有效应力, kPa; σ 是总应力, kPa; u_a 为土体孔隙气压力, kPa; u_w 为孔隙水压力, kPa; β 为比奥系数, 取值为 1。

雨水渗入促使土体结构更紧密, 饱和土体密度可通过以下本构方程进行计算, 即:

$$\rho_s = \rho_d + ns\rho_w \quad (5)$$

式中: ρ_s 为饱和密度; ρ_d 为干密度; ρ_w 为水的密度; n 为孔隙率。

传统摩尔-库伦强度准则确定的剪切强度指标未能计入降雨入渗诱发的湿度波动对土体强度衰减的影响, 因此需要在 FLAC3D 中基于弗雷德隆德非饱和土强度理论^[21]对剪切参数进行动态校核, 即:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a)_f \tan \phi' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b \quad (6)$$

式中: τ 为土体剪切强度, kPa; c' 为有效黏聚力, kPa; ϕ' 为有效摩擦角, °; $(\sigma - u_a)_f$ 为净法向应力, kPa; $(u_a - u_w)_f$ 为基质吸力, kPa; ϕ^b 为随基质吸力

变化的土体内摩擦角, °; 根据文献^[22], ϕ^b 为固定值。在 FLAC3D 进行力学计算时, 每个时步将初始黏聚力替换为广义黏聚力公式 $c' + (u_a - u_w)_f \tan \phi^b$, 实现非饱和土强度参数的动态更新。

(3) FLAC3D 中非饱和降雨入渗的实现

基于上述原理, FLAC3D 中边坡降雨入渗的过程如图 4 所示。其核心操作可概括为: 通过设定流体抗拉强度构建负孔隙水压分布模型, 采用 fix id 命令生成符合土体特性的初始渗流场, 之后使用 zone_pp 命令实时获取单元孔隙水压数据并计算饱和度, 进而动态调整非饱和区渗透系数; 结合接触面边界定义降雨范围, 通过表层节点边界压力归零机制处理地表径流效应, 最终实现降雨入渗-停雨排水全过程的动态模拟。具体细节及操作步骤可参见对应研究文献^[23,24]。

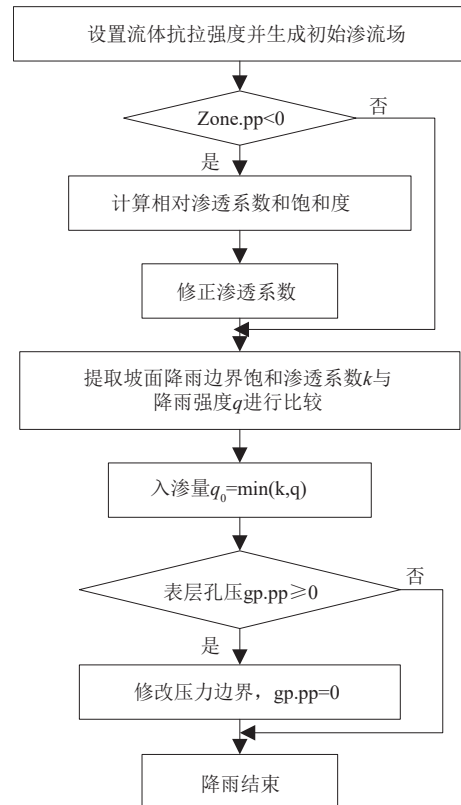


图 4 FLAC3D 降雨入渗实现过程图
Fig. 4 FLAC3D rainfall infiltration process diagram

1.5.2 边坡计算模型构建 为分析降雨条件下弃土场植被边坡的稳定性, 通过现场勘察和测量, 建立如图 5 所示的边坡模型。计算模型整体宽和高分别为 21 m、11 m, 坡顶长度为 8 m, 坡脚长度为 7 m, 边坡高度为 6 m, 坡率为 1:1, 左右边界

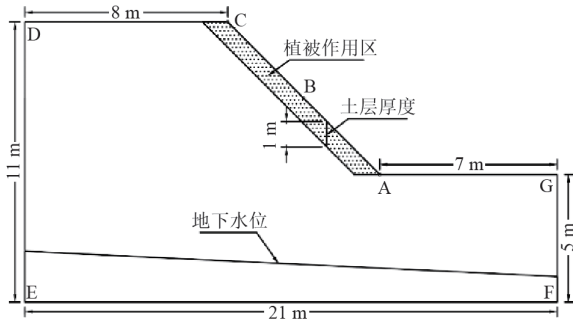


图5 边坡模型尺寸及监测点布置

Fig. 5 Slope model size and monitoring point layout

的地下水位高度分别为2 m和1 m,边坡CD、

AC、AG为降雨入渗边界。灌草协同恢复模式用于弃土场修复,因此模拟中根系作用区域内的土层厚度为距地表深1 m,将该区域内的土体等效为各向同性介质,模拟中使用的参数见表1。边坡土体设为理想弹塑性材料,且遵循摩尔-库仑强度准则,此外,在边坡坡角,坡中和坡顶表层土体处设置监测点A、B、C,以分析边坡表层孔隙水压变化情况。根据表1中的土体饱和渗透系数,非饱和区渗透系数按式(2)所示的Van-Genuchten模型确定,模型中的拟合参数取值如下: $n=2$; $m=1$; $a=10$,同时弃土残余饱和度为0.23,根土复合体残余饱和度为0.28。

表1 边坡土体相关物理参数

Table 1 Physical parameters related to slope soil

土层类型 Soil type	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) Density	弹性模量/Mpa Elastic modulus	泊松比 Poisson ratio	渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) Hydraulic conductivity	黏聚力/kPa Cohesion	内摩擦角/ $^{\circ}$ Internal friction angle
弃土	1 717	12.5	0.32	2.26×10^{-4}	16.55	23.99
根土复合体	1 612	12.5	0.32	7.44×10^{-5}	30.65	20.17

1.5.3 降雨方案设计 上述物理冲刷试验降雨工况为200 L/5 h,等效降雨强度约为40 mm/h,旨在验证植被在短历时强降雨下的水土保持效能,为深入探究极端持续降雨对边坡渗流场及稳定性的长期影响机制,同时依托试验中观测到的植被水力特性,本研究数值模拟选取更具区域代表性的极端降雨情景。根据当地气象数据可知,该地2001年的最大日降雨量为158.3 mm,设计出持续降雨时长为72 h,降雨强度为160 mm/d(约6.67 mm/h),降雨停止后继续计算48 h,总计算时长为120 h的降雨方案。

特征如图2所示,类芦的须根在表层形成密集网,既能提升表层土体抗剪切性能,又可形成抵御降雨冲刷的天然屏障,显著降低浅层滑坡风险;山毛豆与木豆则通过垂直根系强化深层固土能力;两者均具备发达的主根系统,形成连接不同土层的“生物锚杆”,使土体整体稳定性增强。边坡土体相关物理参数如表1所示,根据表中直剪试验数据可知,弃土的黏聚力为16.55 kPa,内摩擦角为23.99 $^{\circ}$,而灌草组合模式下的根土复合体黏聚力为30.65 kPa,内摩擦角为20.17 $^{\circ}$,数据证实,在植物根系的作用下,土体黏聚力提高了85.20%。

2 试验结果与分析

2.1 根系分布与土体抗剪强度变化

典型灌草植被通过差异化根系构型协同提升土体稳定性,山毛豆、木豆及类芦的空间分布

2.2 植株拉拔特性分析

山毛豆、木豆和类芦的拉拔力及生长量指标统计结果如表2所示,由表2可得,类芦的平均拉拔力为304.35 N,显著高于木豆和山毛豆,且其

表2 植被拉拔力和生长量指标平均值

Table 2 Average value of vegetation pull-out force and growth index

植物名称 Plant names	拉拔力/N Drawing force	株高/cm Plant height	地径/mm Ground diameter	根长/cm Root length
山毛豆	177.68 \pm 49.322	94.30 \pm 15.117	6.95 \pm 1.223	33.30 \pm 5.981
木豆	251.75 \pm 98.282	150.33 \pm 31.150	9.51 \pm 2.184	33.79 \pm 12.801
类芦	304.35 \pm 143.114	155.30 \pm 30.115	3.24 \pm 0.732	24.23 \pm 7.384

注:表中数据均为平均值 \pm 标准差。

Note: The data in the table are mean \pm standard deviation.

平均株高均大于木豆和山毛豆。类芦根系为须根,与土体的摩擦力大于拉拔力导致其根系被拔断,拔出后根长较短。木豆和山毛豆的根长差别不大,但木豆的平均拉拔力、株高和地径均显著高于山毛豆,这是两者根系的空间分布差所致,木豆的水平根系牵拉能力更强。相比之下,当山毛豆根系受垂直向上的拉力作用时,其侧根系与土体间的夹角较小且受力后不易产生抵抗作用,这初步反映了类芦通过根系延伸和地上部分协同作用显著增强土体抗剪强度,木豆主要依赖水平根系提升力学性能,而山毛豆的根系固持效果相对较差。

2.3 坡面侵蚀的水土保持效应分析

地表径流的冲刷作用是导致边坡表层土壤迁移的主要驱动力。为量化植被的抗冲刷效果,

对两类边坡的侵蚀物质进行沉淀烘干处理,见图6(a)。称重结果显示,植被边坡的产泥沙量仅为133 g,显著低于裸坡的849 g,沉积物总量减少约84.33%,显著的减沙效果直观证实了植被边坡具备抗冲刷能力。植被通过多重机制防护坡面:冠层枝叶阻滞和覆盖地表,削弱雨水冲击;由图6(b)可观测到植被区地表形成了连续、褐色的生物结皮层,该结皮层由根系分泌物及微生物共同作用形成,它们能黏合分散的土粒,促进土壤团聚体的形成,从而有效抑制水流剥离松散物质,提升抗冲刷效能^[25]。但在200 L/5 h(即40 mm/h)的暴雨工况下,雨强远大于土体入渗速率,超渗径流仍不可避免,尽管植被边坡整体减蚀显著,却仍存在侵蚀。相较之下,裸坡因缺乏此类防护机制,表层土壤在水流持续冲刷下呈现加速流失态势,如图6(c)所示。

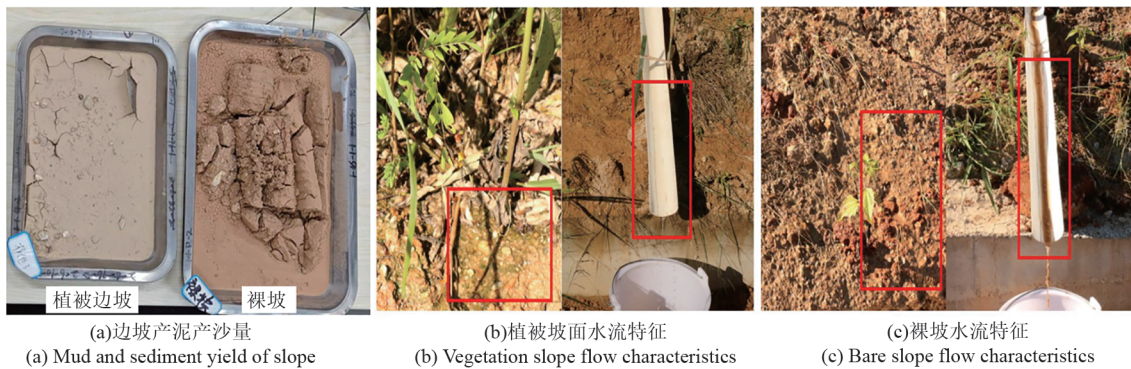


图6 冲刷对比试验
Fig. 6 Scouring comparison test

3 数值模拟结果与分析

3.1 降雨入渗下边坡渗流场分析

在开展降雨入渗数值模拟研究时,首要步骤是构建边坡的初始渗流场,图7为裸坡的初始渗流场分布图,由图可知,裸坡的最表层初始孔压为-93.4 kPa,最底层初始孔压为20 kPa,由于植被边坡对应的初始渗流场与其基本一致,故不再赘述。

降雨作用下两类边坡渗流场分布如图8所示,与初始渗流场对比可知,降雨作用下,两类边坡湿润锋均向坡体深部迁移,表层暂态饱和区逐步扩展,非饱和区范围持续缩减,入渗主要集中于浅层区域。随降雨历时延长,水分渗透深度增加,孔隙水压整体上升。由图8(a)、(b)

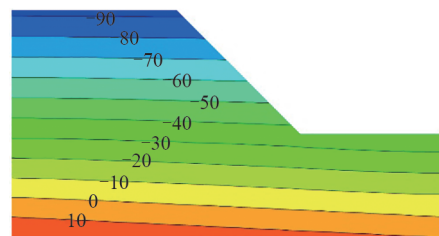


图7 裸坡的初始渗流场分布图(单位:kPa)
Fig. 7 Initial seepage field distribution diagram of bare slope (unit: kPa)

可得,降雨1 d后,裸坡坡面孔压开始增大为0,而植被边坡仅坡底为0,坡面仍为负值,且等值线密集,说明植被对降雨入渗有抑制作用,其表层致密根系结构形成阻渗层,降低土壤透水性能,削弱水分垂向运移能力。由图8(c)、(d)可得,降雨3 d后,裸坡在表层0.5 m深度内孔隙水压已全为0,表层土体基质吸力已完全散失;而

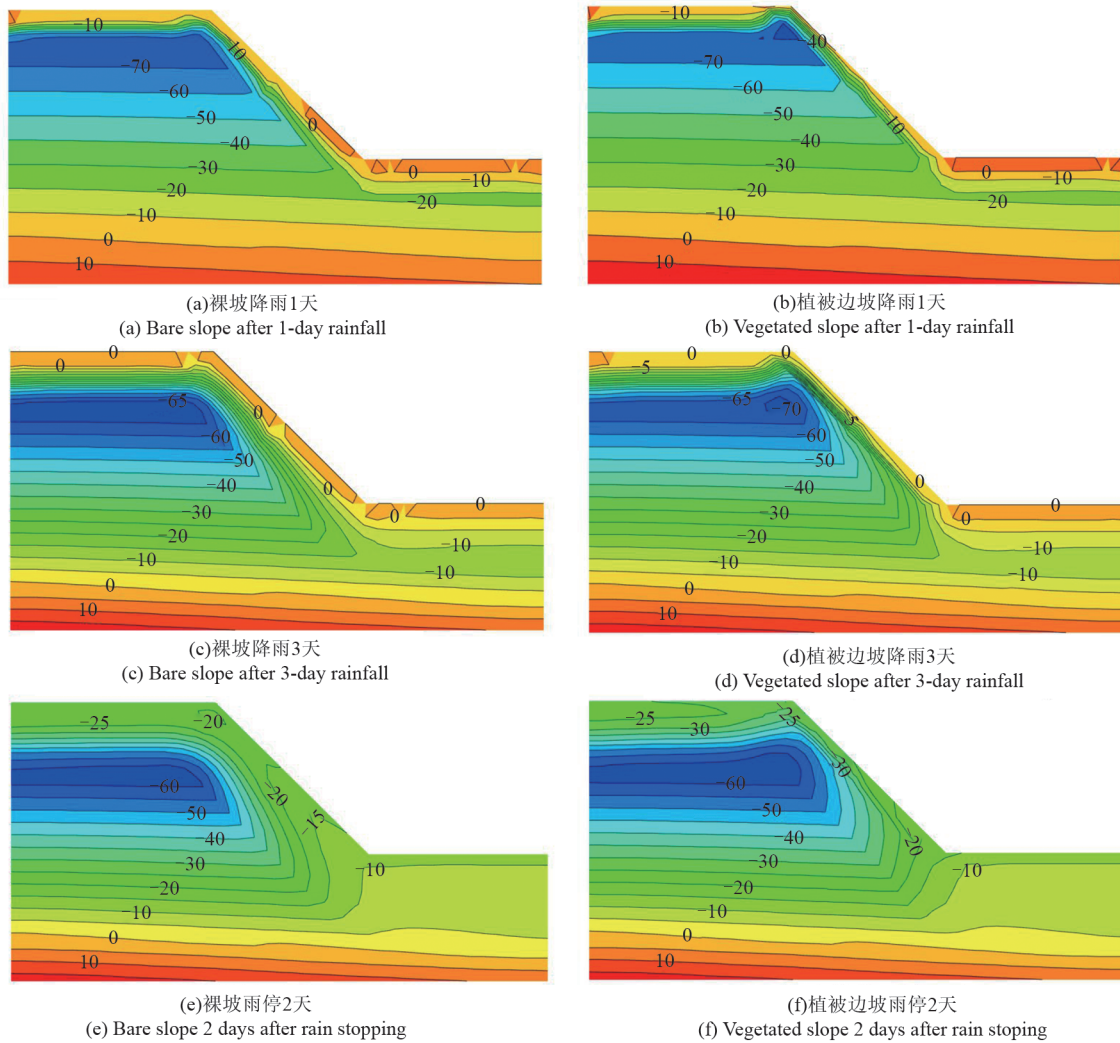


图 8 降雨作用下两类边坡渗流场分布图(单位:kPa)

Fig. 8 Diagram of seepage field distribution for two types of slopes under rainfall conditions(unit: kPa)

植被边坡同深度内仍存在负孔隙水压,其持水能力随饱和和阈值接近而减弱,但仍保留部分吸力。降雨停止后,两类边坡表层水分在重力作用下向深层迁移,过湿带水分沿坡面外排。由图 8(e)、(f)可得,降雨停止 2 d 后,两类边坡表层都重新形成负压区,在相同区域范围内,植被边坡孔隙水压为-20 kPa~-30 kPa,裸坡孔隙水压为-15 kPa~-25 kPa,这表明植被边坡保持更大基质吸力。

两类边坡降雨 3 d 测点孔压变化如图 9 所示,测点 A、B、C 分别位于边坡坡角、坡中、坡顶(见图 6)。结果显示,相同降雨强度下,两类边坡孔隙水压均不断增大,坡脚孔压最先增大为 0,因坡角距地下水位最近,孔隙水压响应最快;

而坡中和坡顶距离地下水位较远,入渗雨水到达此处需要的时间更多,所以孔隙水压增大为 0 所需时间越长。对比两类边坡三个测点的孔压变化趋势,可以得出裸坡各测点斜率都大于植被边坡。裸坡坡脚、坡中、坡顶孔隙水压分别在降雨 16 h、28 h、36 h 后到达 0,植被边坡对应时间分别为 24 h、52 h、64 h,这是因为裸坡的渗透系数大,降雨入渗快,所以裸坡在降雨各时刻内孔隙水压的绝对值低于植被边坡。植被边坡孔压变化图显示坡脚孔隙水压增大为 0 所需时间远短于坡顶和坡底,这是因为降雨强度大于根土复合体的渗透系数,雨水不能完全入渗,会流向坡脚,所以坡脚孔压增大为 0 耗时较少,且此现象与现实相符。

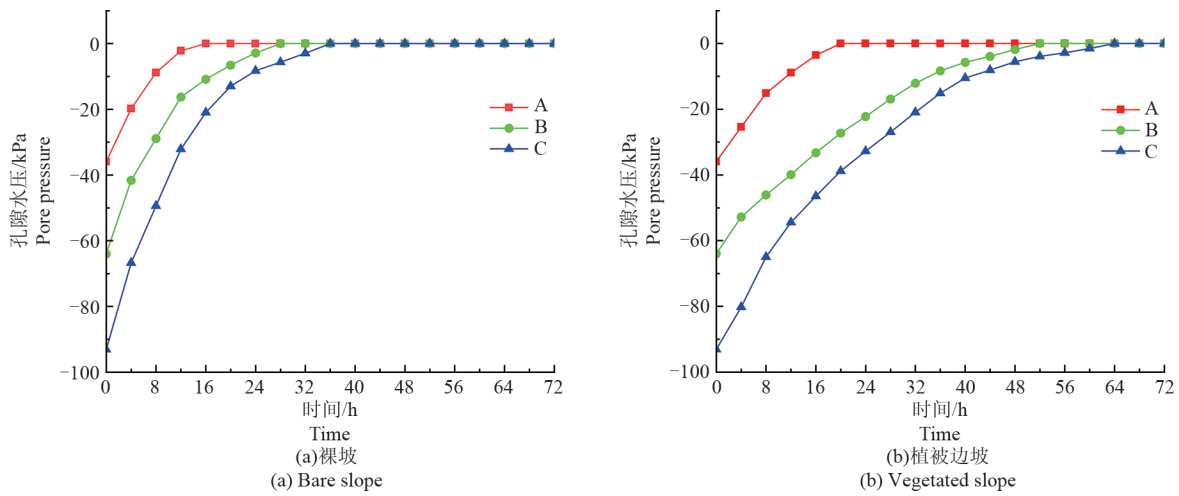


图9 降雨作用下两类边坡降雨3 d 测点孔压变化图

Fig. 9 Diagram of pore pressure changes at measurement points in two types of slopes after 3 days of rainfall

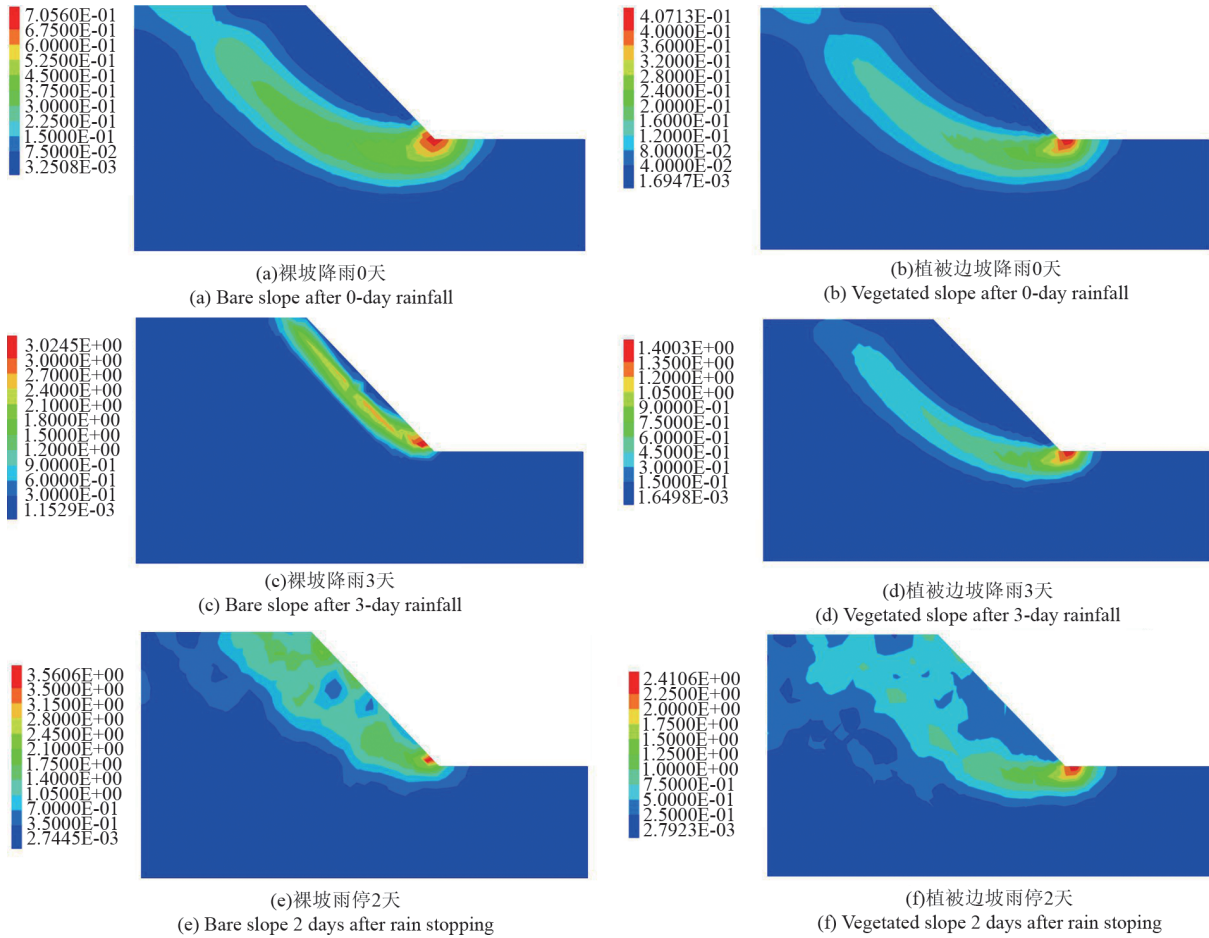


图10 降雨前后两类边坡剪应变增量云图

Fig. 10 Shear strain increment contour maps of two types of slopes before and after rainfall

3.2 降雨入渗下边坡稳定性分析

降雨前后两类边坡的剪切应变增量云图如图10所示,剪切应变增量云图中出现边坡潜在的塑性贯通区域,由于岩土自重产生的持续应力

作用,该薄弱区可能逐步发育为剪切滑动面。由图10(a)、(b)可得,两类边坡在初始状态下的潜在滑动面呈圆弧状分布,剪切应变集中于坡脚,边坡中上部几乎不发生剪切应变,且由于植被的

固土作用,植被边坡潜在滑移面有所下移,坡脚滑出口的应力相对较小。由图10(c)、(d)可得,降雨3 d后,裸坡的应变带逐渐从坡脚处向坡顶方向发展,贯通区逐渐发展扩大,这是因为降雨入渗使边坡表层土体基质吸力和抗剪强度下降,从而导致边坡潜在滑移面上移;此时植被边坡因为雨水入渗较慢,且植被根系增加了土体黏聚力,潜在滑移面上移,但较裸坡上移幅度较小。由图10(e)、(f)可得,当降雨停止2 d后,潜在滑移区开始往上延伸贯穿坡面,这是由于边坡浅层水分向下迁移,会对土体抗剪强度造成影响,但随着坡体表层水分的减少,潜在滑移面在逐渐下移。

两类边坡整体安全系数变化如图11所示,当未进行降雨时,植被边坡较裸坡安全系数提高1.73%,此时植被对边坡表现为力学加固作用。随着降雨持续时间的增加,裸坡的安全系数从2.086下降到1.598,降低23.39%,此时,植被边坡的安全系数从2.122下降到1.809,降低14.75%。这些结果表明降雨入渗使土体基质吸力逐渐散失,从而导致边坡安全系数不断降低,植被边坡安全系数降幅小是因为根土复合体减缓了降雨入渗速度,使土体保留部分基质吸力,从而提高土体的有效应力,提高了边坡稳定性,这说明植被根系的力学和水力共同作用对边坡稳定性有积极作用。当降雨停止后,坡体内水分减少,使边坡安全系数逐渐增加,由于裸坡无植被影响,水分减少均匀,孔隙水压下降明显,导致其安全系数增幅大于植被边坡。

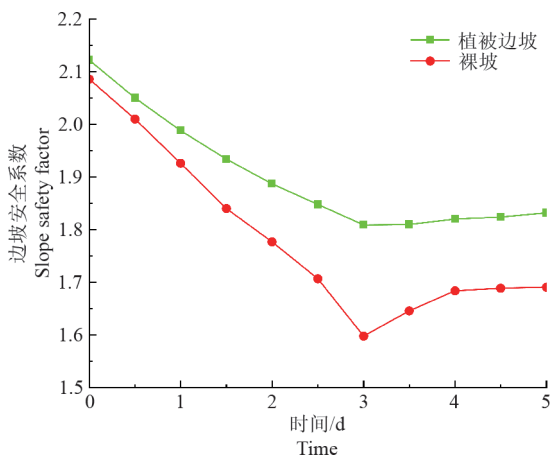


图11 两类边坡安全系数变化

Fig. 11 Variation of safety factor for two types of slopes

3.3 植被边坡稳定性的影响因素

3.3.1 降雨入渗边界 降雨强度为160 mm/d,研究坡顶入渗与坡面入渗两种降雨入渗边界对边坡稳定性的影响,两类边坡在两种入渗方式下的安全系数变化如图12所示,降雨3 d后,在坡顶入渗下,植被边坡安全系数下降8.53%,裸坡安全系数下降9.01%,两类边坡在坡顶入渗下安全系数下降速率大致相同;在坡面入渗下,植被边坡安全系数下降3.39%,裸坡安全系数下降19.27%,植被边坡的降幅仅为裸坡的17.59%,表明植被对坡面入渗的抑制作用更为显著。

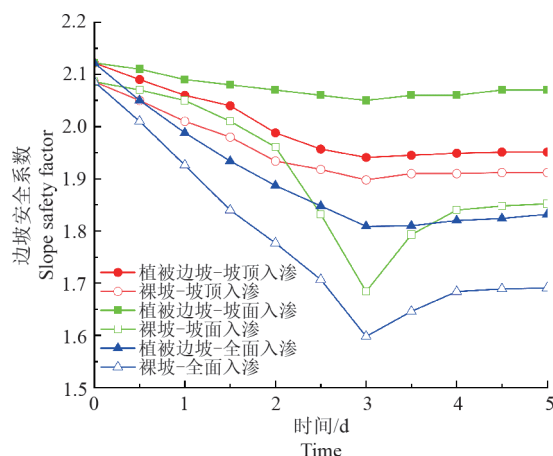


图12 两种入渗方式下边坡安全系数变化

Fig. 12 Variation of slope safety factor under two infiltration methods

3.3.2 降雨强度 边坡几何模型和水力参数同上,降雨强度分别为 $I_1=80$ mm/d、 $I_2=160$ mm/d、 $I_3=320$ mm/d,降雨历时和结束时长同上文一致,研究降雨强度对植被边坡稳定性的影响。安全系数随降雨强度的变化过程如图13所示,由图可知,随着降雨强度和降雨持时的增加,两类边坡安全系数不断减小,当降雨停止后,两类边坡安全系数都逐渐增加。当 $I_1=80$ mm/d,植被边坡安全系数降低10.70%,裸坡安全系数降低15.15%;当 $I_3=320$ mm/d,植被边坡安全系数降低15.88%,裸坡安全系数降低25.65%。当雨强增大时,植被边坡安全系数下降幅度显著小于裸坡,说明在强降雨下,植被仍具有固土效应。

3.3.3 坡度 当坡高和土壤的水力特征同上述模型一致,且降雨强度和计算工况与前文全面降雨入渗160 mm/d工况相同的情况下,研究边坡角度对植被边坡稳定性的影响。安全系数随坡度

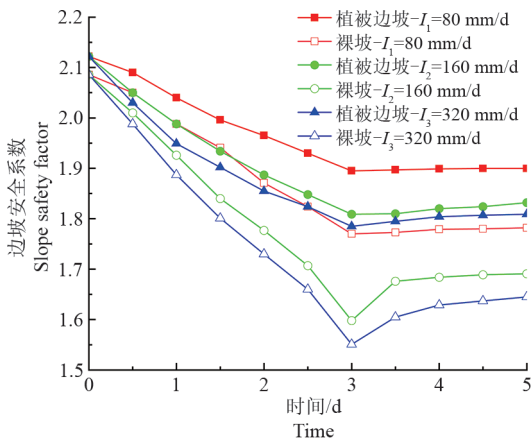


图 13 不同降雨强度下边坡安全系数变化

Fig. 13 Variation of slope safety factor under different rainfall intensities

的变化过程如图 14 所示,由图可知,两类边坡安全系数在持续降雨条件下的稳定性都在不断降低,当坡面倾斜度增加时,安全系数加速衰减,在停止降雨后,边坡稳定性系数恢复性增长。对比不同坡度的数据可以发现,60度斜坡的安全系数显著低于 30度斜坡,说明坡度对边坡稳定性影响较大。

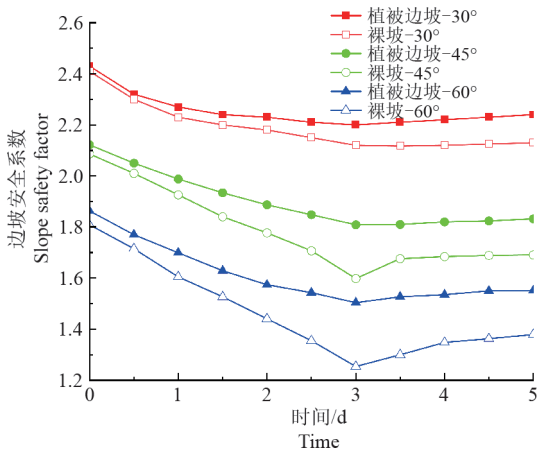


图 14 不同坡度下边坡安全系数变化

Fig. 14 Variation of slope safety factor under different slopes gradients

4 讨论

4.1 植被根系对土体抗剪强度参数的影响

植被根系通过提升土体抗剪强度,从而增强边坡稳定性^[26]。本文结合根系空间分布特征和力学性能试验,揭示植被根系对土体抗剪强度的影响机制。直剪数据证实,根土复合体的黏聚力较裸土提高 85.20%,这是因为植被根系通过须

根的物理缠结和主根的锚固作用,显著增强土壤颗粒之间的黏结力,使土体黏聚力增加,从而增强土体抗剪强度^[27]。而试验得出根土复合体的内摩擦角较裸土有所下降,这是因为内摩擦角反映的是根土复合体整体的抗剪特性,由于根系的存在改变了土体的应力分布和剪切破坏模式,从而导致其并不会表现出明显的增大和减小,这与前人研究结果一致^[28]。

4.2 植被边坡稳定性影响因素的综合分析

实际工程中常面临坡顶入渗与坡面入渗作用场景^[29],为深入解析其作用机理的差异性,分别研究两种入渗方式对植被边坡稳定性的影响。本研究表明:在 160 mm/d 的降雨强度下,两类边坡在坡面入渗下安全系数下降速率相差较大,这是由于植被种植区域在边坡坡面,当在坡顶降雨条件下,植被此时未对边坡整体稳定性起到显著影响,而在坡面降雨条件下,植被边坡坡面的土体在植被的作用下,雨水入渗速度慢,土体仍保持一定基质吸力,从而使边坡稳定性大幅提高,这与物理试验中植物本身可以减缓雨水下落速度、削弱溅蚀,当降雨强度较大时,植被固土效应更明显相符。降雨结束后,两种降雨方式下的两类边坡稳定性都有不同程度的提高,雨水入渗多的土体在降雨停止后水分减小更明显,故边坡安全系数增幅也更大。

降雨强度是影响植被边坡稳定性的重要因素,降雨强度越大,持续时间越长,边坡安全系数降幅越大^[30]。本研究发现:在强降雨条件下,植被边坡的安全系数下降幅度显著小于裸坡,说明植被在强降雨下仍具有显著的固土效应。这是由于降雨强度和土体饱和和渗透系数的关系显著影响边坡安全系数^[31],当降雨强度大于土体渗透系数时,植被边坡由于土体渗透系数小,能够更有效地减缓雨水的入渗速度,同时结合植被根系可以提高土体抗剪强度,证实植被根系可通过水力和力学双重调控,从而减缓雨水对土体的侵蚀和冲刷,维持边坡的相对稳定性。

地形坡度是制约坡面水文响应特征的关键因素^[32],本研究发现,随着边坡角度的增大,两类边坡安全系数都在不断降低。这是因为坡度增加会减少雨水在坡面的入渗,助长地表径流的形成;径流速度加快,冲刷力增强,从而导致坡面土

体稳定性降低^[33]。然而,研究结果显示30度与45度植被边坡在降雨全过程及后续恢复阶段,其安全系数始终保持在较高水平,表现出较好的稳定性,这表明在此坡度范围内,植被根系能更有效地发挥其固土作用。因此,对于采用本文所述灌草协同模式修复的弃土场边坡,建议将坡度上限严格限定在45度,以确保足够的安全系数,有效防范失稳风险。

本文通过结合物理试验与数值模拟分析,阐明灌草植被对边坡稳定性的作用机理。然而,现有研究多依赖短期试验数据,对植被长期生长效应及其在不同环境条件下的适应性关注不足,未来研究建议开展长期野外监测,研究植被边坡在不同季节和降雨事件下的动态稳定性变化,深入探究植被根系的动态生长规律与环境适应能力,为边坡稳定性评估及生态修复实践提供更坚实的科学依据。

5 结论

本文基于云南某弃土场边坡对植被根系加固机制进行量化研究,开展降雨冲刷实验,分析植被护坡效应,同时结合FLAC3D软件进行数值模拟,研究降雨条件下边坡的渗流场变化及边坡安全系数变化,主要结论如下:

(1)通过灌木和草本植物的合理搭配,构建灌草协同的植被恢复模式,显著提升土体抗剪强度,使土体黏聚力提高85.20%,在降雨冲刷下,植被边坡通过冠层枝叶阻拦雨水、根系协同微生物形成生物结皮增强土粒胶结力、根系释放有机物优化土壤等机制,有效抑制坡面侵蚀,形成抗剪加固与水土保持的双重防护机制。

(2)灌草协同模式下植被根系通过形成阻渗层减缓降雨入渗速度,植被作用区土体达到饱和所需时间更长;在无降雨条件下,植被根系力学加固使边坡稳定性提高了1.73%;在持续强降雨(160 mm/d)作用下,灌草协同植被边坡潜在滑移面上移幅度较裸土边坡小,边坡安全系数降幅显著低于裸坡,且在雨停后具有更高基质吸力,证明灌草协同下植被通过力学和水力双重作用有效延缓边坡失稳进程。

(3)降雨入渗边界、降雨强度和坡度均显著影响边坡稳定性。坡面入渗时灌草协同植被边坡稳定性高于坡顶入渗;降雨强度越高,边坡安

全系数降幅越大,但灌草协同植被边坡降幅显著小于裸土边坡;坡度越大,边坡稳定性越低。因此,在弃土场边坡治理工程中,推荐优先采用灌草协同护坡技术,并建议将边坡坡度控制在45度以内,以有效保障浅层边坡的稳定性。

参考文献

- [1] 蒋水华,刘 贤,黄劲松,等.多层非均质边坡降雨入渗分析的改进Green-Ampt模型[J].岩土工程学报,2024,46(06):1177-1186.
- [2] 韩佳明,董 照,苏三庆,等.均质非饱和边坡降雨入渗解析解及在黄土边坡的应用[J].岩土力学,2023,44(01):241-250.
- [3] 王鹭洵,蒋函静,许 帅,等.降雨入渗下非饱和土边坡浅层破坏机制分析[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(07):2701-2711.
- [4] Cheng H, Wu Z, Chen H, et al. Stability analysis of unsaturated-saturated soil slopes under rainfall infiltration using the rigorous limit equilibrium method[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(4): 147.
- [5] 陈晓东,聂小军,张永慧,等.中国高陡岩质边坡植被重建技术现状与展望[J].环境科学与技术,2024,47(S1):70-78.
- [6] 赵 旭,范豪举,许敬叔,等.降雨条件下植被根系对非饱和土浅层滑坡的加固作用[J].北京工业大学学报,2024,50(09):1100-1110.
- [7] 闫 聪,胡夏嵩,李希来,等.高寒矿区排土场植被恢复对边坡土体物理力学性质影响研究[J].工程地质学报,2022,30(02):383-393.
- [8] 何伟鹏,胡夏嵩,刘昌义,等.不同植物对黄土边坡产流产沙与抗剪强度的影响[J].水土保持研究,2023,30(04):18-26.
- [9] 陈伯洲,胡建华,吴 威,等.白龙江流域不同植被类型修复模式下土壤理化性质与边坡稳定性[J].山地学报,2024,42(02):260-277.
- [10] 黄少平,陈俊毅,肖衡林,等.不同坡度植被边坡降雨入渗和径流侵蚀规律的试验研究[J].岩土力学,2023,44(12):3435-3447.
- [11] 毛正君,张瑾鸽,毕银丽,等.紫花苜蓿对黄土边坡浅层破坏防护时间效应的数值分析[J].农业工程学报,2022,38(15):72-83.
- [12] 张小荣,马艳霞,张吾渝.基于FLAC3D的寒旱环境植被根系分布形态对边坡稳定性的影响[J].科学技术与工程,2023,23(09):3831-3838.
- [13] 廖田婷,蒋关鲁,张崇磊,等.考虑水文效应的不同植被根系护坡效果数值分析[J].长江科学院院报,

- 2022,39(09):102-108+117.
- [14] Garg A, Coe J L, Ng C W W. Field study on influence of root characteristics on soil suction distribution in slopes vegetated with *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla*[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(12): 1631-1643.
- [15] 谢亚军,顾浩,苏宇宸,等.考虑植被力学-水力作用的洪泽湖堤防加固效果分析[J].河海大学学报(自然科学版),2024,52(02):61-68.
- [16] Cheng P, Wu L, Zhang H, et al. Inclusion of root water absorption and reinforcement in upper bound limit stability analysis of vegetated slopes[J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 169: 106227.
- [17] 王轩,李珍玉,肖宏彬,等.基于土-水特征曲线的植物边坡抗剪强度研究[J].水土保持学报,2021,35(05):57-62+71.
- [18] 张艳杰,庞清刚,刘洋,等.紫穗槐根土复合体特征对黄土边坡稳定性的影响[J].水土保持通报,2024,44(04):33-44.
- [19] Li X, Zhang Y, Ji X, et al. Effects of shrub-grass cover on the hillslope overland flow and soil erosion under simulated rainfall[J]. *Environmental Research*, 2022, 214: 113774.
- [20] 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(5):892-898.
- [21] D.G.雷德隆德,H.拉哈尔佐.非饱和土土力学[M].北京:中国建筑工业出版社,1997:256-348.
- [22] 吴俊杰,王成华,李广信.非饱和土基质吸力对边坡稳定的影响[J].岩土力学,2004(05):732-736+744.
- [23] 蒋中明,熊小虎,曾铃.基于FLAC3D平台的边坡非饱和降雨入渗分析[J].岩土力学,2014,35(03):855-861.
- [24] 何玉琼,赵黎嬉,张家明,等.土质边坡非饱和渗流及其稳定性研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(04):408-416.
- [25] 淡晨希,张琼,刘刚,等.暴雨条件下黄土高原坡面灌草植被与生物结皮对水土流失和水动力特征的影响[J].应用生态学报,2025,36(04):1091-1098.
- [26] 王连锐,严亚,商崇菊,等.两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应[J].水土保持通报,2024,44(02):146-154.
- [27] 潘天辉,杜峰,王月.陕北黄土区护坡植物根系分布和抗剪增强分析[J].水土保持研究,2020,27(03):357-363+371.
- [28] Huang M, Sun S, Feng K, et al. Effects of *Neyraudia reynaudiana* roots on the soil shear strength of collapsing wall in Benggang, southeast China[J]. *Catena*, 2022, 210: 105883.
- [29] 宋享桦,谭勇,陆焯,等.不同入渗边界条件下简单均质砂土边坡失稳模型试验和数值模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(05):1204-1218.
- [30] 涂美义,袁世宇,陈江军,等.不同降雨工况下的矿山修复工程边坡稳定性评价[J].地质科技通报,2024,43(06):63-77.
- [31] 谢强,田大浪,刘金辉,等.土质边坡的饱和-非饱和渗流分析及特殊应力修正[J].岩土力学,2019,40(03):879-892.
- [32] 张丽娜,李萍,胡向阳,等.不同坡度和植被覆盖黄土对降雨入渗的响应规律[J].水土保持学报,2024,38(06):113-121.
- [33] 常志勇,杨以翠,卢宝鹏,等.模拟降雨条件下坡度和降雨强度对桂南崩积体侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2024,38(02):118-125.