

植被水力与力学加筋效应对降雨作用下 边坡稳定性的影响机制

蒋水华¹, 向壮¹, 吕胜才², 万建宏¹, 黄劲松¹

(1. 南昌大学工程建设学院, 南昌 330031; 2. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵阳 550081)

摘要: [目的] 旨在研究植被水力效应与力学加筋效应对降雨作用下非饱和土边坡稳定性的影响机制。[方法] 基于二维有限元方法, 分析4种典型根系形态的吸水作用对边坡孔隙水压分布的影响, 进而以均匀布形根系为代表, 定量评估降雨及坡角变化条件下植被水力效应、力学加筋效应及其协同作用对边坡稳定性的影响。[结果] 1) 根系吸水可显著降低孔隙水压、增大基质吸力, 其中指数形根系的吸水效果最为显著; 2) 在水力效应方面, 同时考虑根系吸水及其引起的渗透系数变化对边坡稳定性的提升效果最佳; 3) 降雨作用下, 植被力学加筋效应是维持边坡稳定性的主导因素, 并且其增稳效果随着根系深度的增加而增强; 4) 植被力学加筋效应对边坡稳定性的贡献明显高于水力效应, 且随着坡角增大, 这种差异更为明显。[结论] 研究结果可为生态护坡工程中植被种类优选提供重要参考。

关键词: 生态护坡; 降雨; 水力效应; 力学加筋效应; 稳定性分析

中图分类号: S157.2; P642.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0115-10

Mechanism of the Hydrological and Mechanical Reinforcement Effects of Vegetation on the Slope Stability under Rainfall

Jiang Shuihua¹, Xiang Zhuang¹, Lü Shengcai², Wan Jianhong¹, Huang Jinsong¹

(1. School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. China Power Construction Group Guiyang Survey and Design Institute Co. Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the mechanisms by which the hydrological and mechanical reinforcement effects of vegetation influence the stability of unsaturated soil slopes under rainfall conditions. [Methods] Based on a two-dimensional finite element method, this study first analyzes the effects of water uptake by four typical root architectures on the pore water pressure distribution within the slope. Then, using the uniform root distribution as a representative case, it quantitatively evaluates the influences of vegetation hydrological effects, mechanical reinforcement, and their combined effects on slope stability under varying rainfall conditions and slope angles. [Results] 1) Root water uptake significantly reduces pore water pressure and increases matric suction, among which the exponential root architecture shows the most pronounced uptake effect. 2) In terms of hydrological effects, the greatest improvement on the slope stability is achieved when both the root water uptake and root-induced changes in the hydraulic conductivity are considered. 3) Under the rainfall conditions, the mechanical reinforcement effect of vegetation is the dominant factor in maintaining the slope stability, and its stabilizing contribution increases with the root depth. 4) The contribution of vegetation mechanical reinforcement to the slope stability is significantly greater than that of the hydrological effect, and this difference becomes more pronounced as the slope angle increases. [Conclusion] The results of this study provide an important reference for vegetation selection in ecological slope protection engineering.

收稿日期: 2026-02-06

修回日期: 2026-03-24

录用日期: 2026-03-30

网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-07-08

资助项目: 江西省创新研究群体项目(20242BAB24001); 国家自然科学基金项目(52579103, 52408371); 江西省研究生创新专项(YC2024-S065)

第一作者: 蒋水华(1987—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程可靠性与风险分析研究。E-mail: sjiangaa@ncu.edu.cn

通信作者: 万建宏(1995—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事桩基工程理论与技术研究。E-mail: wanjianhong@ncu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

Keywords: ecological slope protection; rainfall; hydrological effect; mechanical reinforcement; stability analysis

Received: 2026-02-06

Revised: 2026-03-24

Accepted: 2026-03-30

Online(www.cnki.net): 2026-07-08

随着我国矿产资源开发及交通、水利水电等基础设施的大规模开工建设,出现大量裸露工程边坡^[1]。这些裸露工程边坡不仅破坏原有植被覆盖和自然景观,而且经常诱发土壤侵蚀、水土流失、土地沙化及滑坡泥石流等一系列生态问题^[2-3]。在此背景下,生态护坡技术凭借其低成本、景观协调性及卓越的生态效益,在水土保持、地质灾害防治及生态环境修复等方面优势显著,已逐渐成为工程边坡防护的首选方案^[4-5]。

植物根系产生的水力效应和力学加筋效应,是提升边坡稳定性和抗冲刷性能的关键因素^[6-7]。近年来,国内外学者围绕植被水力效应已开展大量研究。Indraratna等^[8]在考虑土壤条件、植被类型和大气因素的基础上,建立了根系吸水的数值模型,并分析根系吸水速率对孔隙水压分布的影响规律;Ng等^[9]指出根系吸水作用可显著提高土壤剪切强度;Ng等^[10]开展的离心机模型试验进一步表明,若忽略降雨前植被的蒸腾作用,将低估降雨后边坡稳定系数。植被的水力效应不仅体现在根系吸水引起的土体孔隙水压变化上,还包括植物根系对土体渗透性的影响。植物根系的存在可以改变土体的水力特性^[11-12]。刘小燕^[13]通过探讨不同根系分布方式对根系土壤渗透性的影响发现,竖直根系对土壤渗透性的改善效果最优;王鑫皓等^[14]研究证实植物根系的存在能够提高土壤渗透性,不同根系构型对土壤渗透性的影响存在差异;胡兵立等^[15]针对根土复合体饱和渗透系数的定量研究表明,根的存在可显著提高土体饱和渗透系数,且该系数与根体积含量呈线性正相关。关于力学加筋效应,学界已深入探讨了植物根系的力学加筋特性,并建立了多种根系加筋模型^[16-18]。

现有边坡稳定性分析仍主要考虑根系的力学加筋效应^[19-21],忽视了根系吸水引起的孔隙水压变化及其对土体渗透系数改变等水力效应,难以全面揭示植被对边坡稳定性的影响。鉴于水力效应与力学加筋效应的互补性,一些学者将其纳入边坡稳定性分析框架并探讨其协同作用机制。例如,Ni等^[22]针对无限长边坡,系统探讨了根系力学加筋效应和水力效应(包括不同根系结构下的蒸散作用,以及植物根系引起土体水力参数变化)对边坡稳定性的协同作用;Feng

等^[23]探讨了在干燥条件和不同坡度下2种效应的相互作用;钟彩尹等^[24]基于二维有限元方法分析了植被根系吸水作用对非饱和土边坡稳定性的影响机制。然而,现有研究在量化植被水力与力学加筋的协同效应时,多基于无限长边坡假设,难以真实反映复杂边坡几何与边界条件对水力-力学过程的影响。在分析水力效应时,往往未充分考虑根系对渗透系数等水力参数的影响,进而限制了植被水力效应与力学加筋效应对边坡稳定性协同作用机制的深入认识。

针对上述问题,本文旨在探究植被水力效应与力学加筋效应对降雨作用下非饱和土边坡稳定性的影响机制,揭示不同根系形态对边坡中孔隙水压力分布的演化规律。本研究基于有限元法,模拟不同根系形态对边坡孔隙水压分布的影响,进而以均布形根系为典型代表,量化降雨条件下植被水力效应(涵盖根系吸水作用及土体饱和和渗透系数变化)、力学加筋效应及其协同作用对边坡稳定性的影响,以期为生态护坡的优化设计提供更为科学的理论依据。

1 植被水力和力学加筋效应分析方法

1.1 根系吸水控制方程

在非饱和土中,水分运动可以通过 Richards 方程描述。该方程遵循质量守恒原理和达西定律,为考虑非饱和土中根系吸水的影响,本文在 Richards 方程中引入一个随深度 z 变化的源汇项 $S(z)$ 。考虑源汇项后的 Richards 方程表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) - S(z) = \frac{\partial \theta_w}{\partial t} \quad (1)$$

式中: H 为总水头,m; k_x 和 k_z 分别为非饱和土体在 x 、 z 方向上的渗透系数,m/s; $S(z)$ 为源汇项,表示根系吸水, s^{-1} ; θ_w 为体积含水率; t 为时间,s。根据Feddes等^[25]提出的宏观根系吸水模型,该模型结构清晰且物理意义明确,被广泛应用于岩土工程领域,可将源汇项表示为:

$$S(\phi, z) = \alpha(\phi) G(z) T_p \quad (2)$$

式中: $\alpha(\phi)$ 为无量纲蒸腾折减函数,用于反映土壤基质吸力(ϕ , kPa)对根系吸水能力的限制作用; $G(z)$ 为描述植物根系形状的函数, m^{-1} ; T_p 为植物潜在蒸腾速率,m/s。本文采用Garg等^[26]提出的蒸腾折减函数,计算表达式为:

$$\alpha(\phi) = \begin{cases} 0.117 \ln \phi + 0.538 & \phi \leq 52 \\ 1 & 52 < \phi \leq 90 \\ -0.335 \ln \phi + 2.6 & 90 < \phi \leq 1500 \end{cases} \quad (3)$$

在数值模拟中,通常采用根系分布函数 $G(z)$ 表征根系在土层中的空间分布。现有研究通常将根系形态简化为均布形^[25]、三角形^[27]、指数形^[11]和抛物线

$$G(z) = \begin{cases} \frac{1}{z_r} & \text{均布形} \\ \frac{2}{z_r} \left(\frac{z - z_{\max}}{z_r} + 1 \right) & \text{三角形} \\ \frac{\exp(z + z_r - z_{\max}) - 1}{\exp(z_r) - z_r - 1} & \text{指数形} \\ \frac{2}{z_r^3} \left[(z + z_r - z_{\max})z_r - (z + z_r - z_{\max})^2 \right] & \text{抛物线形} \end{cases} \quad (4)$$

式中: z_r 为根区深度, m; $z_{\max}$ 为根系顶部高程, m。当超过植物根系区域时, $G(z)$ 取 0。将 4 种典型根系形态函数进行归一化处理, 根系形态函数随根系深度 (z) 变化见图 1。均布形函数随根系深度保持不变, 三角形和指数形函数随根系深度逐渐减小, 而抛物线形函数随根系深度先增加后减小, 整体上呈抛物线。不同根系形状示意图 2。

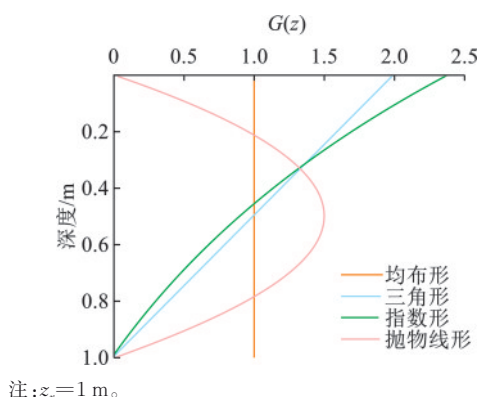


图 1 4 种植物根系分布函数

Fig.1 Four plant root distribution functions

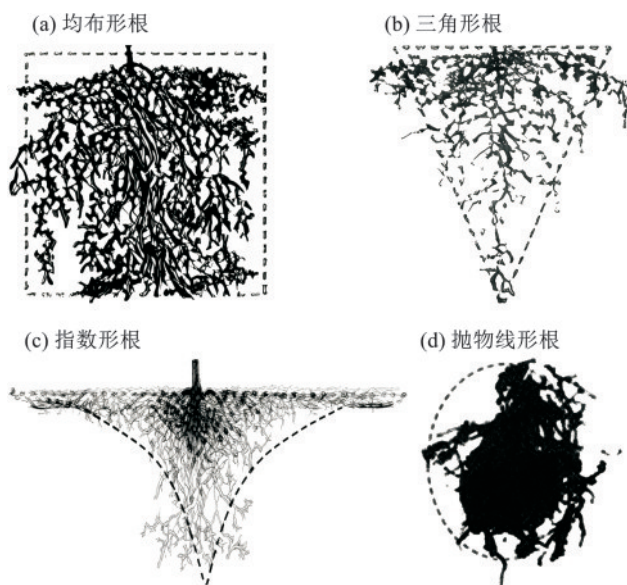


图 2 不同植物根系形状示意

Fig.2 Diagram of root shapes of different plants

形^[28]4 种典型结构。

本文采用统一的函数形式对上述 4 种根系形态进行描述。

为求解公式(1)的 Richards 方程, 需要确定土-水特征曲线(SWCC)及渗透系数函数曲线。本文选用 van Genuchten^[29]提出的土-水特征曲线模型(VG 模型)描述非饱和土基质吸力与体积含水率之间的关系。

$$S_e = \frac{1}{\left[1 + |ah_p|^n \right]^m} \quad (5)$$

$$\theta = \theta_r + S_e(\theta_s - \theta_r) \quad (6)$$

$$C(\theta) = \frac{\alpha m}{1 - m} (\theta_s - \theta_r) S_e^{\frac{1}{m}} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \quad (7)$$

$$k(\theta) = k_s S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (8)$$

式中: θ 为体积含水率; θ_s 和 θ_r 分别为饱和体积含水率和残余体积含水率; h_p 为孔隙水压水头, m; S_e 为有效饱和度; $C(\theta)$ 为比水容量, m^{-1} ; k_s 为饱和渗透系数, m/s; α 、 n 、 m 均为经验常数, Mualem^[30]指出 $m = 1 - 1/n$ 。

1.2 根系力学加筋模型

植被根系在土体中纵横交错, 构建起类似于加筋土的“根-土复合体”。通过根系自身的抗拉强度显著提升土体抗剪强度, 这种由根系力学效应引起的土体抗剪强度增量通常被称为根系黏聚力。目前, Wu 等^[17]提出的垂直根系模型是计算根系黏聚力最为经典的方法之一。该模型基于如下假设: 1) 根系为均匀分布的线弹性材料, 且与剪切面垂直相交; 2) 剪切带厚度充分, 且在土壤剪切过程中保持不变; 3) 根系在非剪切区的锚固长度足够长, 受到的摩擦与约束足够大, 保证根系不被拔出; 4) 所有根系达到最大抗拉强度瞬间, 同时断裂。然而, 实际工程应用与试验观测表明, 土体剪切破坏过程中根系失效往往是渐进性的, 而非模型所假设的那样同时断裂, 该模型计算的根系黏聚力往往高于实测值。为克服这一局限性, Schwarz 等^[18]在保留原模型物理意义明确、计算

简便的基础上,引入 1 个修正系数对 Wu 等^[17]模型进行修正,同时通过折减计算来反映根系的渐进破坏过程。修正后的根系黏聚力表达式为:

$$c_r = k_1 T_r (\cos \theta + \sin \theta \tan \varphi') RAR \quad (9)$$

式中: T_r 为土壤剪切面上所有根系的平均抗拉强度, kPa; RAR 为根面积比,即根系总横截面积与土壤剪切面积之比; θ 为根系受剪切后在土壤中的偏移角度, ($^\circ$); φ' 为土壤有效内摩擦角, ($^\circ$)。为简化根系黏聚力计算公式,将 $\cos \theta + \sin \theta \tan \varphi'$ 取为 1.2; k_1 为修正系数,通过试验测得修正系数 k_1 取 0.4,可准确量化根系的实际加筋效果。

1.3 边坡稳定性分析方法

本文采用强度折减法计算边坡稳定系数^[31],并借助 COMSOL 软件予以实现。该方法通过引入强度折减系数,对土体的抗剪强度参数进行同步折减,直至边坡达到临界破坏状态。折减后的强度参数定义为:

$$c_m = c/F_{SR} \quad (10)$$

$$\varphi_m = \arctan(\tan \varphi/F_{SR}) \quad (11)$$

式中: c 为土体黏聚力, kPa; c_m 为折减后土体实际发挥作用的黏聚力, kPa; φ 为土体内摩擦角, ($^\circ$); φ_m 为折减后实际发挥作用的内摩擦角, ($^\circ$); F_{SR} 为强度折减系数。采用强度折减法进行边坡稳定性分析的重

要一步是确定边坡失稳判据。本文依据 2 条准则判定边坡是否失稳: 1) 数值计算过程中迭代不收敛, 即非线性方程求解无法达到预设的收敛容差时, 可判定边坡发生失稳破坏; 2) 塑性剪切带贯通, 即计算结果显示从坡脚至坡顶形成连续贯通的塑性应变区时, 可判定边坡发生失稳破坏, 此时对应的折减系数即为边坡稳定系数。

2 案例分析

2.1 模型构建及参数取值

某植被边坡模型总高 10 m, 其中边坡高度为 5 m, 坡比为 1: $\sqrt{3}$ 。模拟区域分为上下 2 层: 上层为厚度 1 m 的植被根系复合层, 下层为裸土层, 基于 COMSOL Multiphysics 平台构建边坡二维有限元模型^[32], 其几何构型与尺寸见图 3。为兼顾计算精度与效率, 模型网格采用三角形单元划分, 共计生成 10 839 个网格单元。在水力边界条件设置方面, 植被区通过添加考虑源汇项的 Richards 方程来模拟植被区内的根系吸水作用。模型左、右两侧分别设定为定水头边界, 总水头分别为 4.5、1.5 m, 形成从左侧 4.5 m 高度向右侧 1.5 m 高度逐渐降低的初始地下水位线。边坡顶面设定为降雨入渗边界(流量边界), 其余边界均设定为不透水(无流动)边界。

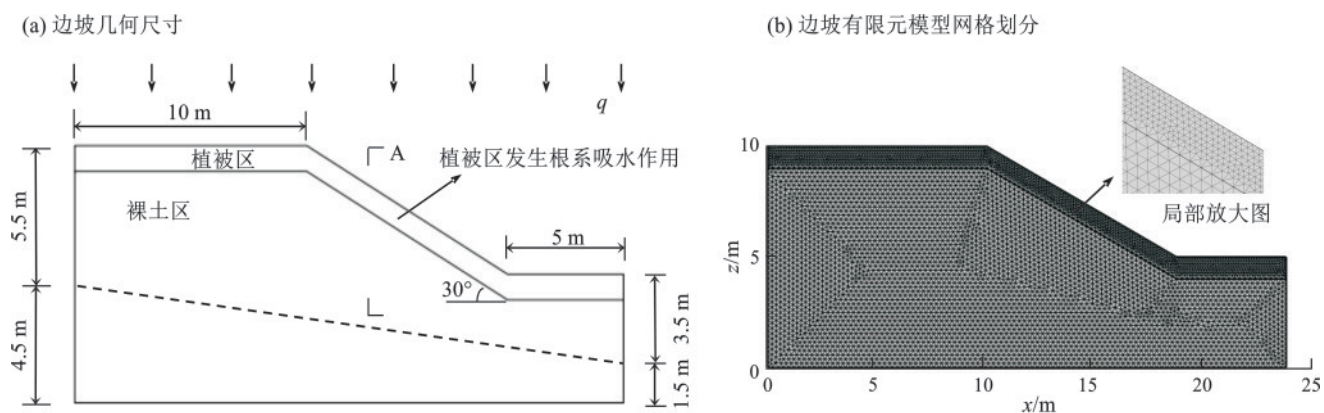


图 3 边坡几何结构及有限元网格划分

Fig.3 Slope geometry and finite element mesh generation

模型计算所需的物理力学参数见表 1。土体力学参数参考 Qin 等^[32]选取, 其中关于根系参数, 结合 Leung^[33]对灌木及乔木根系抗拉强度(10~100 MPa)的研究成果, 取抗拉强度 T_r 为 54 MPa, 取根面积比 RAR 为 0.025%。为定量分析植被的水力效应, 本文设置 2 种饱和渗透系数工况: 1) 忽略根系对土体结构的改善作用, 假设植被土饱和和渗透系数与裸土保持一致; 2) 考虑根系的增渗效应, 将植被土饱和和渗透系数设定约为裸土的 2 倍^[34]。

2.2 根系形态对边坡孔隙水压分布的影响

图 4a 对比分析了根系吸水作用下植被根系形态对边坡孔隙水压空间分布特征的影响。选取截面 A 进行分析, 设定蒸腾速率 T_p 为 10 mm/d, 经过 72 h 的持续根系吸水作用, 在 4 种典型根系形态中, 指数形和三角形根系对边坡孔隙水压的影响最显著, 尤其是在靠近地表区域形成的较大负孔隙水压区, 是因为这 2 种形态在地表浅层具有更高的根密度。相比之下, 均布形和抛物线形根系对边坡孔隙水压的影响较弱, 其中抛物线形根系对应的最大负孔隙水压

出现在根区中部,与其根密度峰值位于根区中部的分布特征相吻合。总体而言,4种根系形状对边坡孔隙水压分布的影响与图1中的根系分布函数对应,表明根系形态直接决定吸水区域的空间分布,进而影

响边坡内部吸力场。图4b进一步对比分析了均布形根系条件下吸水时间对边坡孔隙水压的影响,表明随着吸水时间的延长,土体负孔隙水压呈现逐渐累积并增大的变化趋势。

表 1 裸土和植被土物理力学参数取值
Table 1 Physical and mechanical parameters of bare soil and vegetated soil

模拟区域	$k_s/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	θ_s	θ_r	α/m^{-1}	n	$\gamma_d/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$T_p/(\text{mm}\cdot\text{d}^{-1})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	T_r/MPa	RAR/%
裸土	6.000×10^{-6}	0.403	0.05	1.16	1.3	15.68	—	3.00	24	—	—
植被土	1.356×10^{-5}	0.403	0.05	1.16	1.3	15.68	10	9.48	24	54	0.025

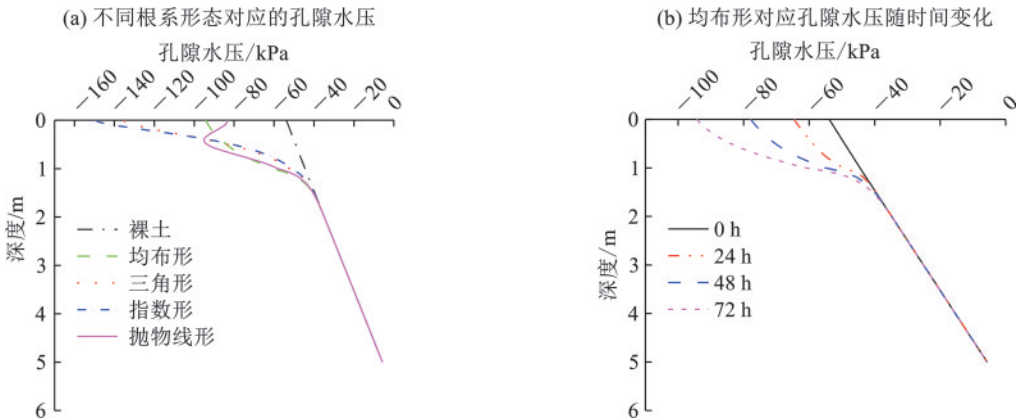


图 4 根系吸水作用下植被边坡孔隙水压分布
Fig.4 Pore water pressure distribution of vegetated slope under root water uptake

2.3 降雨作用下植被边坡孔隙水压响应特征分析
为揭示植被水力效应对边坡降雨入渗过程的影响,以均布形根系(根深1 m)为例,设置3种计算工况(表2):仅考虑渗透系数变化(工况1, H_1)、仅考虑初始根系吸水(工况2, H_2)及二者协同作用(工况3, H_3)。降雨强度 q 为65 mm/d,降雨历时为72 h。

表 2 计算工况
Table 2 Calculation conditions

工况设置	水力效应	说明
工况1	H_1	考虑植被对土体饱和和渗透系数的影响
工况2	H_2	考虑发生根系吸水作用(初始时刻已发生根系吸水作用,在降雨过程中不考虑)
工况3	H_3	同时考虑植被对土体饱和和渗透系数的影响和发生根系吸水作用

图5a对比分析了不同工况下植被边坡与裸土边坡在降雨72 h后的孔隙水压分布。结果显示,与裸土边坡相比,所有植被工况下均表现出更大的负孔隙水压。对比工况3和工况2可知,在工况3中,边坡表层1 m范围内有着更大的渗透系数。得益于植被土较高的渗透性,降雨入渗过程中水分能够迅速向深层土体运移,进而有效避免表层土体发生瞬态饱和,使得表层土体在降雨期间仍能够维持较高的基质吸力。超过1 m范围之外,由于表层土体入渗的雨水较

多,使下层土体水分增加更明显,负孔隙水压值更小。工况1和裸土工况对比分析与其类似。对比工况3和工况1可知,二者的渗透系数相同,差别仅在于工况3下植物根系已发生72 h的根系吸水作用。经过72 h的降雨,由于这2种工况在边坡表层1 m范围内入渗能力基本一致,故孔隙水压分布也几乎一致。而超过1 m范围外,工况3因已发生72 h根系吸水作用,导致其孔隙水压初始值更大,降雨后保留着更高的负孔隙水压。工况2与裸土工况的对比分析类似。

图5b对比了工况3下植被边坡与裸土边坡孔隙水压随降雨历时的变化关系曲线。降雨初期($t=0$),植被边坡地表孔隙水压低至-94 kPa,远低于裸土边坡的-53.6 kPa。随着降雨的持续,雨水不断入渗,二者之间的吸力差逐渐缩小,说明根系吸水作用随降雨时间逐渐减弱。同时,由于二者表层土体渗透系数不同,故表层土体孔隙水压分布仍存在一定差异。

图6比较了裸土边坡和植被边坡在降雨作用下的孔隙水压等值线图,其中植被边坡工况为工况3,植被边坡在降雨24 h后仍保持着较高的负孔隙水压,但是随着降雨历时的延长(至 $t=72$ h),植被的水力截留效应逐渐减弱,最终与裸土边坡趋于一致。表明植被的水力效应主要在降雨初期发挥显著的延缓入渗、维持吸力作用,而在长历时降雨下其效能会逐渐衰减。

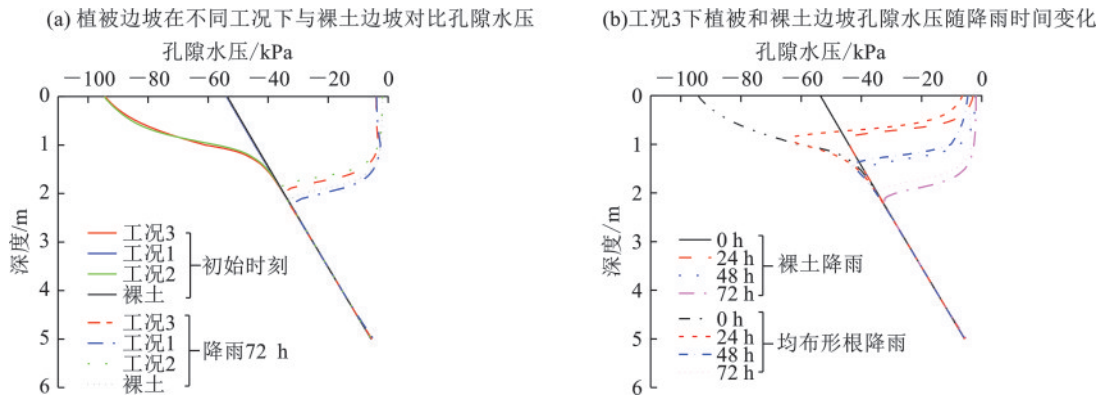


图5 降雨作用下植被边坡和裸土边坡孔隙水压分布

Fig.5 Pore water pressure distribution of vegetated slope and bare slope under rainfall

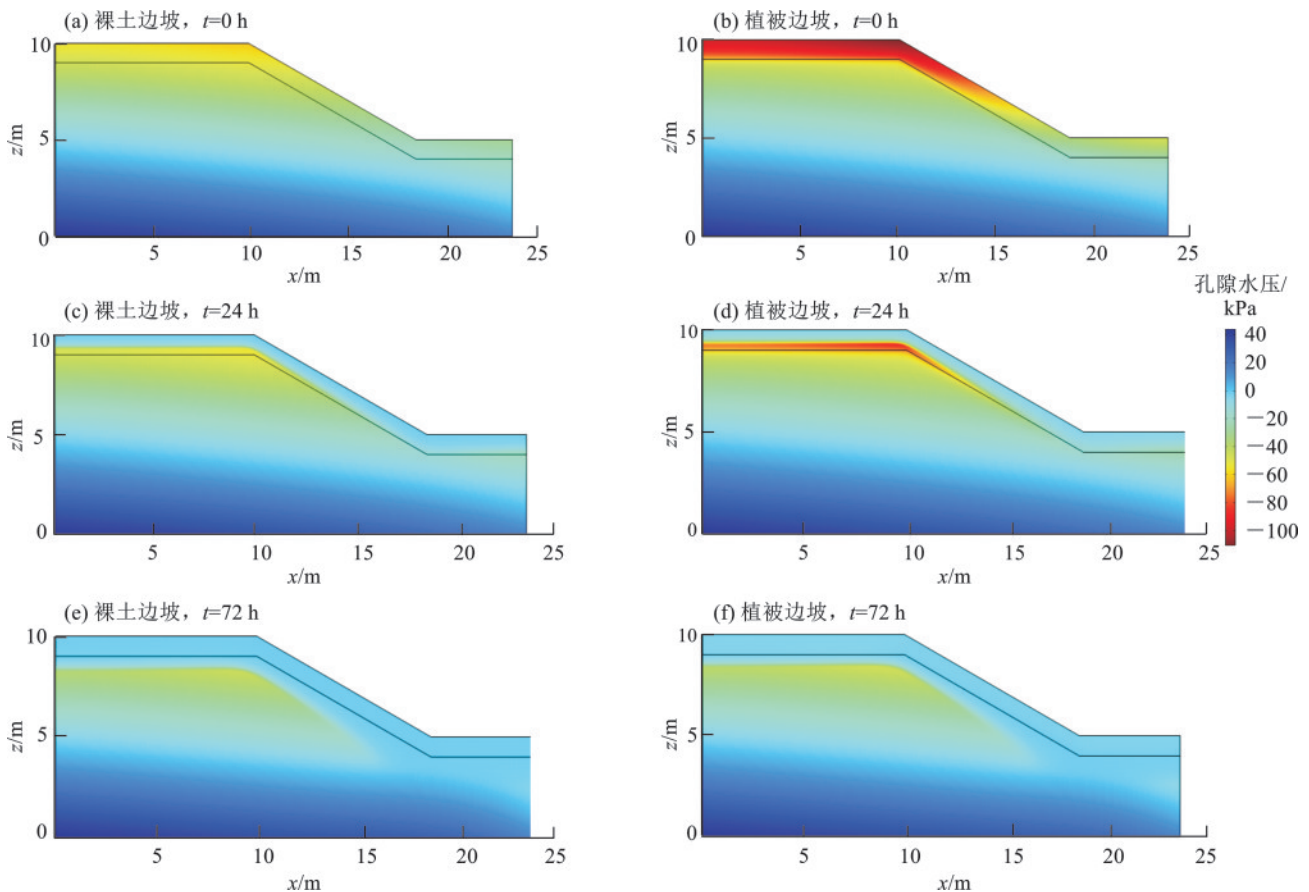


图6 降雨作用下裸土边坡与植被边坡的孔隙水压分布

Fig.6 Pore water pressure of bare slope and vegetated slope under rainfall

2.4 水力与力学效应对边坡稳定性的协同机制

为验证本文所采用的边坡稳定性计算模型的准确性,以裸土边坡为研究对象,分别基于有限元强度折减法(采用COMSOL Multiphysics)和刚体极限平衡法(采用GeoStudio)进行边坡稳定性计算。具体而言,刚体极限平衡法通过将COMSOL计算所得孔隙水压数据导入GeoStudio的SLOPE/W模块予以实现。由图7可知,2种方法计算得到的裸土边坡在降雨前后的稳定系数(FOS)吻合良好,其差值分别约为0.03和0.02。该对比结果验证了本文边坡稳定性计算模型的合理性,为后续的边坡稳定性分析奠定了基础。

本案例选取均布形根系为典型研究对象,图8对比分析了3种植被工况在降雨前后的边坡FOS变化关系曲线。需指出的是,该分析仅聚焦于水力效应,故在稳定性分析中忽略根系力学加筋作用(即根系黏聚力增量为0 kPa)。降雨前,植被边坡FOS(2.085)(图8c)高于裸土边坡(2.019)(图8a),表明经过72 h的根系吸水作用,土体产生的基质吸力显著提升边坡初始稳定性。经历72 h降雨后,各工况下边坡FOS均显著降低,其中裸土边坡稳定性最差,其FOS降至1.400。考虑表层土体渗透系数变化(工况1)的FOS为1.422(图8b),因其表层土体有着较高的渗透性,有利于水分向深层土体

运移,进而有效避免表层土体发生瞬态饱和,使得表层土体在降雨期间能够维持较高的基质吸力,从而有利于边坡稳定。考虑根系吸水作用(工况2)下的边坡FOS为1.454(图8d),其土体基质吸力高于裸土工况(降雨前发生了根系吸水作用),故其FOS高于裸土边

坡。同时考虑上述2种因素的协同工况(工况3)的边坡FOS最高,为1.473(图8f),表明植被水力效应对边坡稳定性的提升并非单一机制,根系对土体饱和和渗透系数的改变不可忽略。因此,需要综合考虑根系吸水和增渗效应,才能准确评价植被的水力护坡效益。

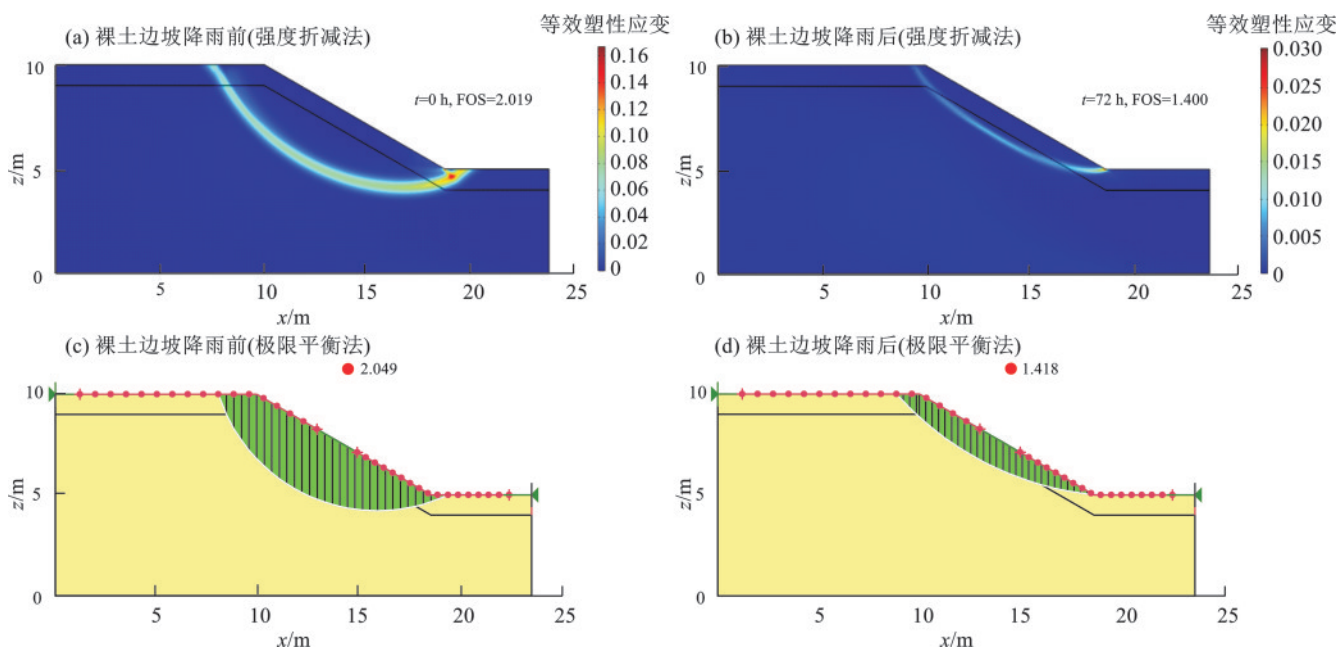


图7 2种方法的边坡FOS对比

Fig.7 Comparison of slope FOS with two methods

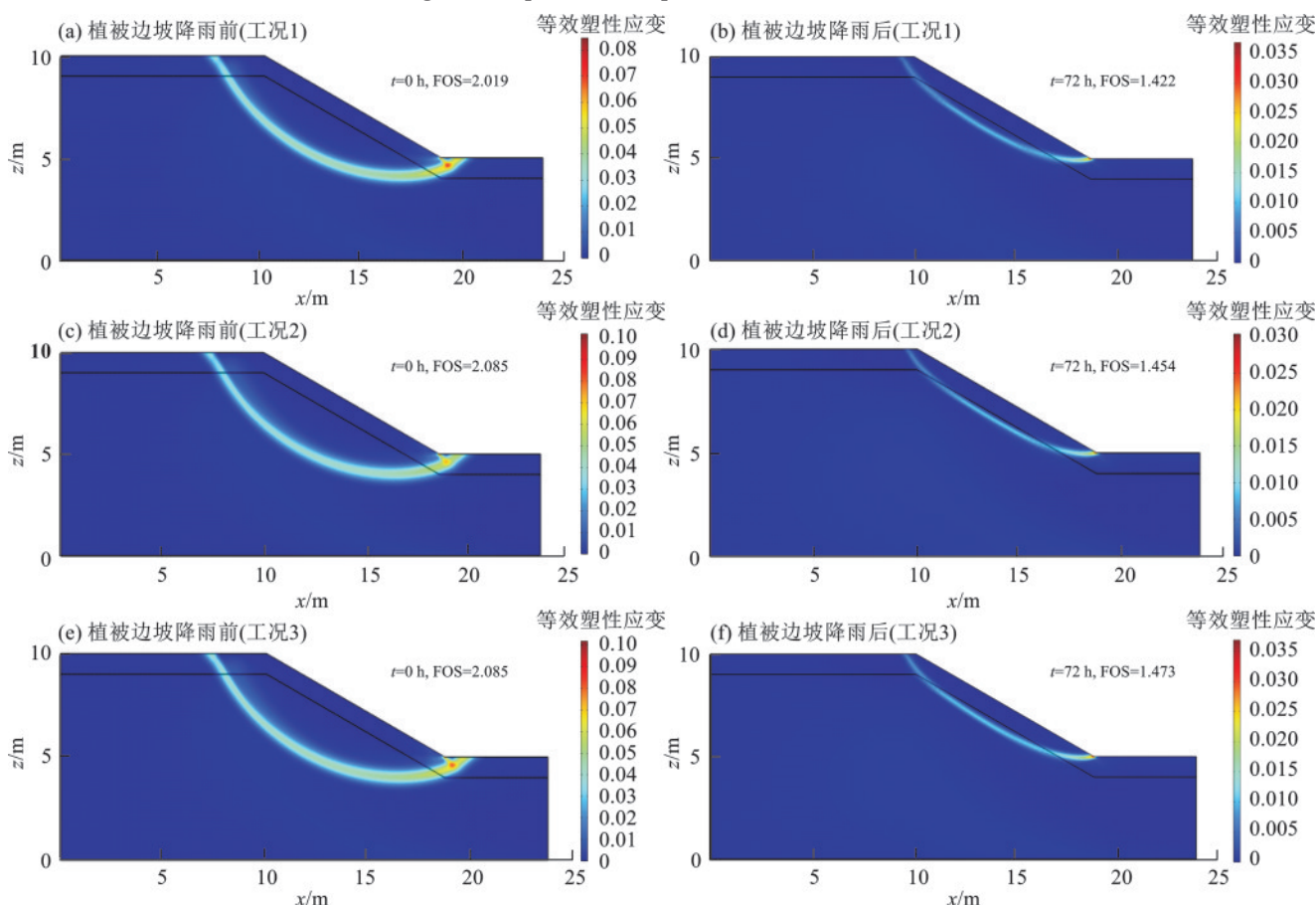


图8 降雨作用下3种工况边坡FOS对比

Fig.8 Comparison of slope FOS for three conditions under rainfall

为进一步阐明水力效应和力学加筋效应对边坡稳定性的协同影响机制,图9对比分析了植被水力效应(H,对应工况3)与根系力学加筋效应(M, $c_r=6.48$ kPa)及其协同作用(M+H)对边坡稳定性的影响。由图8可知,降雨前,裸土边坡的FOS均低于各植被护坡工况。其中,水力效应(H)和力学加筋效应(M)分别使边坡FOS较裸土提升约0.06和0.10,考虑2种效应协同时(M+H),FOS比裸土边坡高约0.16,因此,协同作用下(M+H)边坡稳定性的增益效果最为显著。降雨前单一水力或力学效应对边坡稳定性的提升幅度差异较小。随着降雨持续,各工况下FOS均呈下降趋势,但是衰减特征存在显著差异。至降雨结束时,仅考虑水力效应的边坡FOS降幅高达0.611,与裸土边坡降幅(0.619)基本持平。表明随着土体趋于饱和,水力增稳效应基本失效。相比之下,考虑力学加筋效应的边坡FOS降幅较缓(0.48),且随着降雨进行,其数值逐渐逼近协同作用下的FOS。数据表明,力学加筋效应与水力效应对应的FOS差值从降雨初始时的0.037扩大至结束时的0.168。此差距不断扩大的趋势表明,在持续降雨期间,植被对边坡稳定性的提升主要源于根系的力学加筋效应。

图10对比分析了不同根系深度下植被水力效应和力学加筋效应对边坡稳定性的影响。由图10a可知,在降雨初始时刻,根系深度为0.5 m时根系吸水效率最高,由公式(2)和公式(4)决定,对应的边坡FOS达到2.098,大于其他根系深度1 m(FOS=2.085)、根系深度1.5 m(FOS=2.076)。降雨结束之后,根系深度为1.5 m时的边坡FOS值最大,其值为1.49。这是由于根区饱和和渗透系数改变造成的,根系深度为1.5 m对应的饱和渗透系数变化区域最大,在表层区域,

植被土更高的渗透系数有着更大的负孔隙水压,更有利于边坡稳定。综上,不同根系深度下植被水力效应对边坡稳定性的影响在降雨过程中无显著差异,说明根系深度变化对植被水力效应的影响较小。

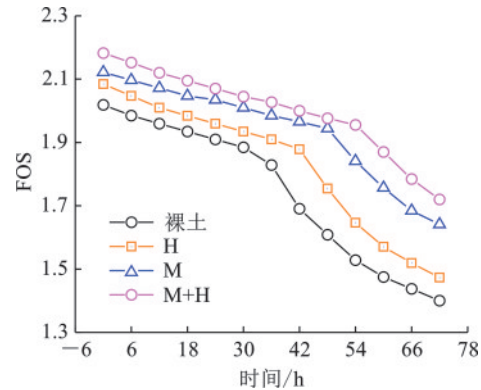


图9 降雨作用下植被水力效应和力学加筋效应对边坡稳定性的影响

Fig.9 Effects of vegetation hydraulic and mechanical reinforcement on slope stability under rainfall

与水力效应不同的是,植被的力学加筋效应呈现出显著的深度依赖性。由图10b可知,在考虑力学加筋效应时,随降雨的进行,根系深度为0.5 m,边坡FOS下降幅度最大,高达0.55。根系深度分别为1.0、1.5 m时,边坡FOS下降幅度依次为0.481、0.388。随着根系深度的增加,边坡稳定性在降雨期间的衰减幅度显著减小。植被边坡与裸土边坡的FOS差值随降雨进行逐渐增大,并且根系越深,该差值扩大趋势越明显(1.5 m根深时差值从0.15增至0.38)。说明根系深度越大,根系力学加筋作用越明显,越有利于维持降雨作用下的边坡稳定性。因此,为充分发挥深层根系的力学加筋优势,建议在生态护坡工程中优先选用主根发达、根系深入的乔灌木(如刺槐、紫穗槐),避免使用单一浅根型草本植物。

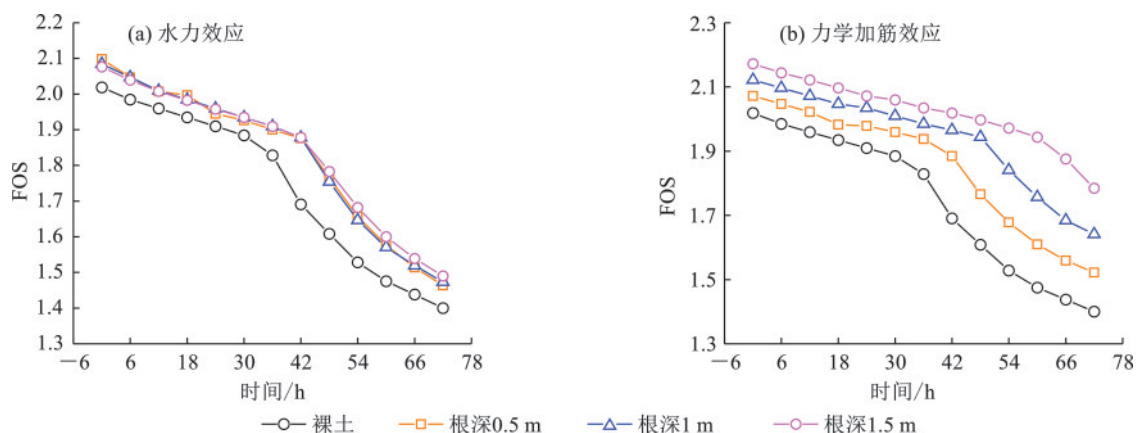


图10 降雨作用下不同根系深度对应的水力效应(H)和力学加筋效应(M)对边坡稳定性的影响

Fig.10 Hydraulic effect (H) and mechanical reinforcement effect (M) on slope stability for different root depths under rainfall

除降雨因素外,边坡坡角也是影响植被护坡效能的关键几何参数。图11分析了天然条件下不同坡角对边坡稳定性的影响规律。结果显示,所有工况下的边坡FOS均随坡角增加而呈下降趋势,但植被边坡与裸土边坡的FOS差值却随坡角的增大而呈扩大。深入对比分析植被水力效应和力学加筋效应发现,当坡角较低时,植被水力效应和力学加筋效应对边坡稳定性的影响差别很小;随着坡角的增大,特别是超过45°后,植被水力效应与力学加筋效应之间的差异明显。在高陡边坡中,相比于植被水力作用,根系力学加筋作用更能有效抵抗滑移面的下滑力,是维持边坡稳定性的主导因素。

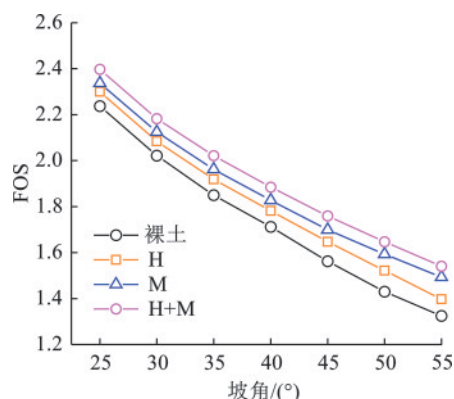


图11 不同坡角下植被水力效应和力学加筋效应对边坡稳定性的影响

Fig.11 Effects of vegetation hydraulic and mechanical reinforcement on slope stability under different slope angles

3 结论

1)根系形态显著调控吸水效能,其中指数形根系在其影响区内产生的吸水作用最为显著。仅考虑单一水力效应时,植被边坡在降雨作用下的稳定性均优于裸土边坡。植被的水力护坡效益并非由单一机制主导,同时考虑根系吸水作用与土体饱和渗透系数的改变,植被边坡FOS达到最大。

2)植被的水力效应和力学加筋效应均能提升边坡稳定性,在降雨作用下,水力效应的贡献随着土体趋于饱和而迅速衰减,而根系的力学加筋效应则表现出更强的持久性,是维持降雨期间边坡稳定的主导因素。根系深度对水力效应影响较小,但对力学加筋效应影响显著,根系越深,降雨期间力学加筋效应越明显,越有利于边坡稳定。因此,建议工程中优先配置主根发达的深根型植物,避免采用单一浅根型草本植物。

3)尽管植被边坡和裸土边坡的FOS均随边坡的坡角增加而降低,但是植被的生态护坡效能(相对裸土的提升值)却随坡角的增大而增大。在高陡边坡条件下,植被力学加筋效应对边坡稳定性的贡献明显高于水力效应,是抵抗滑移力的主导机制。

参考文献:

- [1] 戴方喜,宋林旭.边坡生态防护与治理技术的研究及应用[J].中国水土保持,2007(7):20-22.
Dai Fangxi, Song Linxu. Study and application of ecological protective and control techniques of slopes[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(7):20-22.
- [2] 王灿.三维生态保护毯护坡抗冲刷性能试验及状态预测研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
Wang Can. Research on anti-scouring performance test and state prediction of slope protection by three-dimensional ecological protection blanket[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2021.
- [3] Chen Bozhou, Shui Wei, Liu Yuanmeng, et al. Analysis of slope stability with different vegetation types under the influence of rainfall[J]. Forests, 2023, 14(9): e1865.
- [4] 李天斌,徐华,周雄华,等.高寒高海拔地区岩质陡边坡JYC生态基材护坡技术[J].岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2332-2339.
Li Tianbin, Xu Hua, Zhou Xionghua, et al. Protection techniques of steep rock slope with jyc ecological base materials in high-cold and high-altitude area [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(11): 2332-2339.
- [5] Gonzalez-Ollauri A, Mickovski S B. Plant-Best: A novel plant selection tool for slope protection[J]. Ecological Engineering, 2017, 106: 154-173.
- [6] 吴宏伟.大气-植被-土体相互作用:理论与机理[J].岩土工程学报, 2017, 39(1): 1-47.
Wu Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: Theories and mechanisms [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1-47.
- [7] 徐文秀,鲍玉海,韦杰,等.水库消落带典型草本植物根系对土壤抗冲性能的影响[J].水土保持学报, 2019, 33(4): 65-71.
Xu Wenxiu, Bao Yuhai, Wei Jie, et al. Impacts of the typical herbaceous plant roots on soil scour resistance in the reservoir riparian zone [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(4): 65-71.
- [8] Indraratna B, Fatahi B, Khabbaz H. Numerical analysis of matric suction effects of tree roots [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2006, 159(2): 77-90.
- [9] Ng C W W, Menzies B. Chapter synopses [M] // Advanced unsaturated soil mechanics and engineering. Boca Raton: CRC Press, 2014: 25-26.
- [10] Ng C W W, Kamchoom V, Leung A K. Centrifuge modelling of the effects of root geometry on transpiration-induced suction and stability of vegetated slopes [J]. Landslides, 2016, 13(5): 925-938.
- [11] Leung A K, Garg A, Coe J L, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water

- infiltration rate and soil hydraulic conductivity[J].Hydrological Processes,2015,29(15):3342-3354.
- [12] 蒋希雁,杨尚青,冯峰,等.植被根系对土体渗透特性影响的试验研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(3):370-375.
- Jiang Xiyan, Yang Shangqing, Feng Feng, et al. Experimental study on the influence of vegetation roots on soil permeability[J].Journal of Hefei University of Technology (Natural Science),2022,45(3):370-375.
- [13] 刘小燕.根系土的工程性状研究及其在生态边坡稳定分析中的应用[D].江西 赣州:江西理工大学,2014.
- Liu Xiaoyan. Study on engineering properties of root soil and its application in stability analysis of ecological slope [D].Ganzhou, Jiangxi: Jiangxi University of Science and Technology,2014.
- [14] 王鑫皓,王云琦,马超,等.根系构型对土壤渗透性能的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):73-82.
- Wang Xinhao, Wang Yunqi, Ma Chao, et al. Effect of root architecture on soil permeability[J].Science of Soil and Water Conservation,2018,16(4):73-82.
- [15] 胡兵立,苏立君,谢奇峻.乔木根径、含量和分布类型对根土复合体饱和和渗透系数的影响[J].土木与环境工程学报(中英文),2024,46(5):16-25.
- Hu Bingli, Su Lijun, Xie Qijun. Influence of tree root diameter, content and distribution type on saturation permeability coefficient of rooted soil[J].Journal of Civil and Environmental Engineering,2024,46(5):16-25.
- [16] Wu T H. Investigation of landslides on Prince of Wales Island, Alaska[M].Ohio, USA: Ohio State University,1976.
- [17] Wu T H, McKinnell W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J].Canadian Geotechnical Journal,1979,16(1):19-33.
- [18] Schwarz M, Preti F, Giadrossich F, et al. Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy) [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(3):285-291.
- [19] Li Yunpeng, Wang Yunqi, Ma Chao, et al. Influence of the spatial layout of plant roots on slope stability[J].Ecological Engineering,2016,91:477-486.
- [20] 杨文辉,章定文,闫茜,等.深浅根混种法加固边坡稳定性的数值分析[J].东南大学学报(自然科学版),2020,50(1):161-168.
- Yang Wenhui, Zhang Dingwen, Yan Qian, et al. Numerical analysis on stability of slope reinforced by combination of deep and shallow roots[J].Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2020,50(1):161-168.
- [21] 袁海莉.灌木根系植入土质边坡的有限元模拟分析[J].路基工程,2021(5):35-39.
- Yuan Haili. Analysis on finite element simulation of the shrub roots planted soil slopes[J].Subgrade Engineering, 2021(5):35-39.
- [22] Ni J J, Leung A K, Ng C W W, et al. Modelling hydro-mechanical reinforcements of plants to slope stability[J].Computers and Geotechnics,2018,95:99-109.
- [23] Feng S, Liu H W, Ng C W W. Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation on shallow slope stability[J].Computers and Geotechnics,2020,118:e103335.
- [24] 钟彩尹,崔鹏,朱帅润,等.植物根系吸水对非饱和土边坡稳定性影响的分析[J].水土保持学报,2022,36(2):99-105.
- Zhong Caiyin, Cui Peng, Zhu Shuairun, et al. Analysis of the influence of root water absorption on the stability of unsaturated soils slope[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(2):99-105.
- [25] Feddes R A, Kowalik P, Kolinska-Malinka K, et al. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function[J].Journal of Hydrology,1976,31(1/2):13-26.
- [26] Garg A, Leung A K, Ng C W W. Transpiration reduction and root distribution functions for a non-crop species *Schefflera heptaphylla*[J].Catena,2015,135:78-82.
- [27] Lynch J. Root architecture and plant productivity [J].Plant Physiology,1995,109(1):7-13.
- [28] Raats P A C. Uptake of water from soils by plant roots [J].Transport in Porous Media,2007,68(1):5-28.
- [29] 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.
- [30] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J].Water Resources Research,1976,12(3):513-522.
- [31] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J].Géotechnique,1999,49(3):387-403.
- [32] Qin Changbing, Wang Rui, Chen Wenkang, et al. Stability of *Ficus virens*-reinforced slopes considering mechanical and/or hydrological effects[J].Forests,2024,15(1):e133.
- [33] Leung F T Y. Native shrubs and trees as an integrated element in local slope upgrading[D].Hong Kong, China: The University of Hong Kong,2014.
- [34] 李光杰,许旭堂.降雨条件下草本植物根系对残积土边坡渗流稳定性的影响[J].井冈山大学学报(自然科学版),2024,45(3):86-98.
- Li Guangjie, Xu Xutang. Influence of herbaceous roots on seepage stability of residual soil slope under rainfall condition[J].Journal of Jinggangshan University (Natural Sciences Edition),2024,45(3):86-98.