

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2026.02.031

CSTR:32310.14.stbxb.2026.02.031

钟韵, 申子超, 张广欣, 等. 基于三元 Copula 函数的三峡库区消落带岸坡动态失稳风险评估[J]. 水土保持学报, 2026, 40(2): 386-396.

ZHONG Yun, SHEN Zichao, ZHANG Guangxin, et al. Dynamic risk assessment of bank slope instability in water-level fluctuation zone of Three Gorges Reservoir area using trivariate Copula function[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(2): 386-396.

## 基于三元 Copula 函数的三峡库区消落带 岸坡动态失稳风险评估

钟韵<sup>1</sup>, 申子超<sup>1</sup>, 张广欣<sup>2,3</sup>, 邱利文<sup>2,3</sup>, 黄桂云<sup>2,3</sup>,  
吴笛<sup>2,3</sup>, 党美荣<sup>1</sup>, 朱士江<sup>1</sup>

(1. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 武汉 430014; 3. 三峡库区珍稀资源植物湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:** [目的] 为深化对复杂水文边界条件下岸坡动态失稳过程的风险评估, 提出一种多因子联合概率-物理耦合分析框架。[方法] 以降雨强度( $I$ )、降雨历时( $D$ )和库水位变动速率( $R$ )为核心触发因子, 基于三元 Copula 函数建立水文因子的联合分布, 与非饱和渗流-稳定性有限元模型耦合, 提出临界触发边界函数(CRPC), 实现从水文情景到失稳响应的定量映射; 考虑植被-排水协同效应, 实现边坡失稳的联合概率评估。[结果] 三元 Clayton Copula( $\theta=10.213$ )在拟合优度与相关性检验中表现最佳, 较好地刻画了水文因子的非线性依赖关系。模型回溯验证表明, 预测与实测失稳时刻的误差仅 0.5 h, 事件点至 CRPC 的标准化距离为 0.08, 布里尔得分(Brier score)为 0.12, 曲线下面积(ROC-AUC)达 0.87, 显示出较强的判别力。协同植被-排水防护显著降低失稳风险, 单次事件失稳概率下降约 4.7%, 年失稳概率降低 36.3%, 效果优于单一措施。[结论] 构建的三元 Copula-物理耦合框架能够揭示水文多因子非线性相关性及其对边坡力学响应的影响, 验证结果表明, 该框架在失稳时序再现和风险识别方面具有较好可靠性, 可为库区滑坡风险预测、预警及生态-工程防护优化提供定量依据。

**关键词:** 消落带; 岸坡稳定性; Copula 函数; 植被护坡; 概率评估

中图分类号: P642.22; TV698.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)02-0386-11

## Dynamic Risk Assessment of Bank Slope Instability in Water-Level Fluctuation Zone of Three Gorges Reservoir Area Using Trivariate Copula Function

ZHONG Yun<sup>1</sup>, SHEN Zichao<sup>1</sup>, ZHANG Guangxin<sup>2,3</sup>, QIU Liwen<sup>2,3</sup>, HUANG Guiyun<sup>2,3</sup>,  
WU Di<sup>2,3</sup>, DANG Meirong<sup>1</sup>, ZHU Shijiang<sup>1</sup>

(1. Engineering Research Center of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. National Engineering Research Center of Eco-Environment in the Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430014, China; 3. Hubei Key Laboratory of Rare Resource Plants in Three Gorges Reservoir Area, Yichang, Hubei 443000, China)

**Abstract:** [Objective] To enhance the risk assessment of the dynamic instability process of bank slopes under complex hydrological boundary conditions, a multi-factor joint probability-physical coupling analysis framework is proposed. [Methods] Using rainfall intensity ( $I$ ), rainfall duration ( $D$ ), and reservoir water-level fluctuation rate ( $R$ ) as core triggering factors, a joint distribution of hydrological factors was established based on a trivariate Copula function. This was coupled with an unsaturated seepage-stability finite element model, and a critical triggering boundary function (critical rainfall pattern curve, CRPC) was proposed to achieve quantitative mapping

收稿日期: 2025-09-17

修回日期: 2025-11-06

录用日期: 2025-11-14

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-12-29

资助项目: 中国长江三峡集团有限公司生态环保基金项目(NBWL202200369); 湖北省教育厅科学技术研究项目(Q20231214); 国家自然科学基金项目(52069016)

第一作者: 钟韵(1992—), 男, 博士, 讲师, 主要从事水土资源高效利用与生态修复研究。E-mail: zhongyunjx92@163.com

通信作者: 朱士江(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事消落带陆生生态环境治理与农业水资源利用研究。E-mail: 46212465@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

from hydrological scenarios to instability responses. Considering the vegetation-drainage synergistic effect, a joint probability assessment of slope instability was achieved. [Results] The trivariate Clayton Copula ( $\theta=10.213$ ) demonstrated the best performance in the goodness-of-fit and correlation tests, effectively characterizing the nonlinear dependencies among the hydrological factors. Model retrospective validation showed that the error between the predicted and observed instability time was only 0.5 hours. The standardized distance from the event point to the CRPC was 0.08, the Brier score was 0.12, and the area under the receiver operating characteristic (ROC-AUC) reached 0.87, demonstrating strong discriminatory power. The synergistic vegetation-drainage protection significantly reduced instability risk, decreasing the single-event instability probability by approximately 4.7% and the annual instability probability by 36.3%, outperforming individual measures. [Conclusion] The constructed trivariate Copula-physical coupling framework can reveal the nonlinear correlations among multiple hydrological factors and their influence on the slope's mechanical response. The validation results indicate that the framework possesses good reliability in reproducing the instability timeline and identifying risks, providing a quantitative basis for the landslide risk prediction, early warning, and ecological-engineering protection optimization in reservoir areas.

**Keywords:** water-level fluctuation zone; bank slope stability; Copula function; slope protection with vegetation; probability assessment

Received: 2025-09-17

Revised: 2025-11-06

Accepted: 2025-11-14

Online(www.cnki.net): 2025-12-29

滑坡是库区最频发且危害最大的地质灾害类型,其在水库波动带的活跃性直接威胁水库安全运行与生态平衡。三峡水库作为全球最大的水利枢纽工程,年均约 30 m 的水位消落,形成约 348.93 km<sup>2</sup>的消落带<sup>[1]</sup>,该区域岸坡岩土体长期承受库水位非稳态波动与季节性强降雨的耦合作用,坡体结构逐渐劣化,浅层强度反复衰减,灾害风险尤为突出<sup>[2-3]</sup>,严重威胁长江航运安全与库区生态稳定。

目前,针对库区岸坡稳定性的研究已取得阶段性进展,部分学者<sup>[4-5]</sup>通过监测、物理试验与统计方法,识别降雨、库水位等典型致灾因子,建立降雨强度( $I$ )-历时( $D$ )临界线等触发阈值模型,为揭示滑坡诱发机制提供理论基础。概率统计方法的应用进一步深化,Copula 函数等工具成功刻画降雨-历时、降雨-径流等水文变量的非线性依赖结构,证实传统独立或线性假设易低估极端事件发生概率<sup>[6]</sup>,并揭示“非极端降雨+水位骤变”组合在风险评估中的关键作用。然而,现有研究<sup>[7]</sup>大多仍局限于多变量统计分析或双变量坡体物理过程耦合,缺乏多因子与坡体物理过程整合的概率框架,难以揭示库区复杂非稳态的失稳机制。

三峡库区的岸坡失稳多由多因子协同触发,水位骤降显著改变坡体的应力场与渗流结构,削弱其初始稳定性,使其对中低强度降雨敏感性倍增<sup>[8]</sup>。此类非极端降雨与水位骤降叠加的“危险组合”致灾效

应远超传统单因子预测水平<sup>[9]</sup>。由于现有模型假设水文因子独立或线性相关,无法反映非线性、非对称及尾部依赖特征,联合发生概率被系统性低估。因此,亟须构建一种融合多因子联合概率结构与物理失稳响应过程的分析框架,为消落带岸坡的动态风险评估与防护设计提供科学依据。为此,本文提出面向库区消落带的多因子联合概率-物理耦合分析框架,揭示  $I$ 、 $D$  与库水位变动速率( $R$ )的协同致灾机制,不仅可丰富消落带边坡失稳的概率建模方法,也为库岸防护措施的优化提供量化支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究于 2024 年 3 月至 2025 年 6 月在三峡库区上游童庄河江心岛(30.9°N, 110.7°E)进行,该岛位于湖北省宜昌市秭归县——三峡大坝的“坝上首县”(图 1)。秭归县岸坡稳定性直接关系到三峡工程安全运行及库区群众生命财产安全。研究区属亚热带季风气候,年平均气温约 19 °C,年平均降雨量高达 1 452 mm,降雨主要集中在夏季。作为三峡水库核心影响区,该岸坡每年都经受近 30 m 水位变幅的周期性水位涨落。这种由水库调度主导的强人工干预,与区域强降雨耦合,形成驱动岸坡失稳的主要破坏力<sup>[10]</sup>。选择童庄河江心岛为试验区,正是为精准捕捉这种“自然降雨-人工调度”双重作用下的岸坡失稳风险,验证本研究提出的多因子概率分析框架。

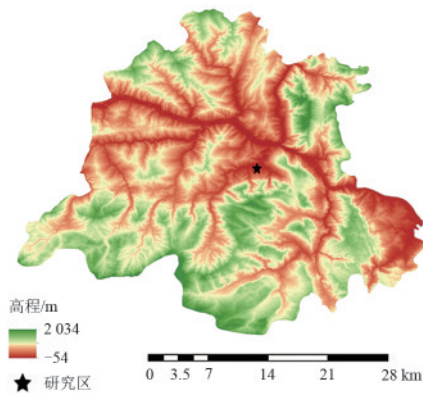


图1 研究区概况

Fig. 1 Schematic diagram of study area

## 1.2 水文数据来源与处理

本研究所用降雨数据由布设在试验区的自动雨量计获取,分辨率为0.1 mm;水位数据来自岸坡断面监测桩与在线水位计,并结合长江水文网实测资料进行校核与补充,形成2023—2024年的完整连续序列。

降雨事件识别采用最小事件间隔时间法(IETD),设定事件间隔阈值为6 h,并以 $P>5$  mm作为独立降雨事件判别标准。经分割后的历史降雨序列被拆分为若干独立事件<sup>[11]</sup>。每个被识别出的独立降雨事件都由其 $I$ 和 $D$  2个特征来描述,并匹配同步或滞后的水位变动速率 $R$ ,从而形成 $(I, D, R)$ 的样本数据集。

## 1.3 试验方法

**1.3.1 土样采集** 在研究区150~170 m高程带,沿坡面自上而下布设3个采样剖面,每个剖面间隔约50 m,均垂直于坡向布置。根据地形和植被分布情况,选择代表性的采样点,在150、155、160、165 m高程各取1组原状土样,共计12组。采用环刀法采样,用于渗透试验的环刀内径61.8 mm、高20.0 mm(体积约60 cm<sup>3</sup>),用于直剪试验的环刀内径39.1 mm、高80.0 mm(体积约96 cm<sup>3</sup>)。环刀体积分别为60、96 cm<sup>3</sup>。采后立即密封保存,以保持天然含水状态,并编号记录采样位置和高度。这些土样用于后续的力学与渗透试验,以获取土体的物理力学性质。

**1.3.2 土体物理力学参数测定** 原状土体的饱和重度为20.1 kN/m<sup>3</sup>,土体抗剪强度指标通过电动四联直剪仪(DSJ-2型)测定,试样为直径39.1 mm、高80.0 mm的圆柱体土柱,采用反压饱和法使饱和度达到95%以上,在围压50、100、200 kPa下开展等应变固结不排水剪切试验,剪切速率控制为0.8 mm/min,并依据莫尔-库仑准则拟合强度包络线,得到有效黏聚力13.6 kPa,有效内摩擦角15.9°。土体的渗透特性由变水头渗透试验测得,试样高度40 mm、直径61.8 mm,试验温度控制在(20±1)°C,饱和渗透系数为 $5.11 \times 10^{-6}$  m/s;压力板仪用于获取土水特征曲线(吸力10~1 500 kPa),体积含水率由TDR探针同步监测,采用Van-

Genuchten模型拟合土水特征曲线(SWCC),反演得到饱和体积含水率40%,残余体积含水率4%。

**1.3.3 植被根系力学特性与根土复合体学参数测定** 针对植被效应,选取3种典型护坡植物(狗牙根、秋华柳和疏花水柏枝),采集的新鲜根系样品置于4 °C冷藏条件保存,试验前用酒精清洗干净,在万能材料试验机(Instron5944,美国)上开展单根拉伸试验,加载速率为50 mm/min,采用橡胶衬垫夹具固定根样,以避免夹伤,断裂发生于根中部的试样作为有效值,并据此计算根系极限抗拉强度。试验结果表明,3种典型护坡植物的根系极限抗拉强度均与其直径呈显著的负幂律关系( $R^2>0.61$ ),即根系越细,其单位面积的抗拉能力越强,其关系曲线见图2。在此基础上,采集含根原状土柱制备直剪试样,在电动四联直剪仪开展直剪试验,法向应力取50、100、200 kPa,剪切速率为0.8 mm/min,得到有效黏聚力为23.5 kPa,有效内摩擦角为25°,与裸土对照,量化根系对土体抗剪强度的增强效应。针对根土复合体其余物理参数测定,采用与裸土相同的方法,得到根土复合体饱和和体积含水率为44.3%,残余体积含水率为8%,饱和重度为21.4 kN/m<sup>3</sup>,饱和渗透系数为 $2 \times 10^{-5}$  m/s。

## 1.4 模型构建与联合概率分析

### 1.4.1 研究框架

本研究提出针对库水位剧烈变动区消落带边坡稳定性评估的多因子联合概率建模框架(图3)。本框架主要创新点包括:1)引入 $R$ 因子,构建三元Copula模型,刻画关键水文因子之间的非线性依赖关系;2)基于概率样本驱动的非饱和渗流-边坡稳定性耦合模型,提出临界触发边界函数(CRPC),实现从水文情景到失稳响应的量化耦合;3)在框架内参数化植被与排水措施,系统比较不同防护情景下的失稳概率,揭示工程与生态因素的协同调控效应。

### 1.4.2 水文触发因子联合分布建模

#### 1) 边缘分布函数构建

为评估不同概率分布函数对 $I$ 与 $R$ 数据的拟合效果,初选4种常见概率分布函数进行边缘建模比较。通过计算赤池信息准则(AIC)、贝叶斯信息准则(BIC)和Kolmogorov-Smirnov拟合优度(K-S值)对模型拟合效果进行评价。AIC和BIC可表示为:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \quad (1)$$

$$BIC = 2k - 2\ln(n) \quad (2)$$

式中: $k$ 为模型参数个数; $L$ 为最大似然估计下的似然函数值; $n$ 为样本容量。AIC值和K-S检验中的 $D$ 值越小, $p$ -value越接近1,表明边际分布的拟合效果越好。由于日尺度 $D$ 属于自然离散型变量,本文采用非参数的核密度估计(KDE)构建 $D$ 的边缘分布。

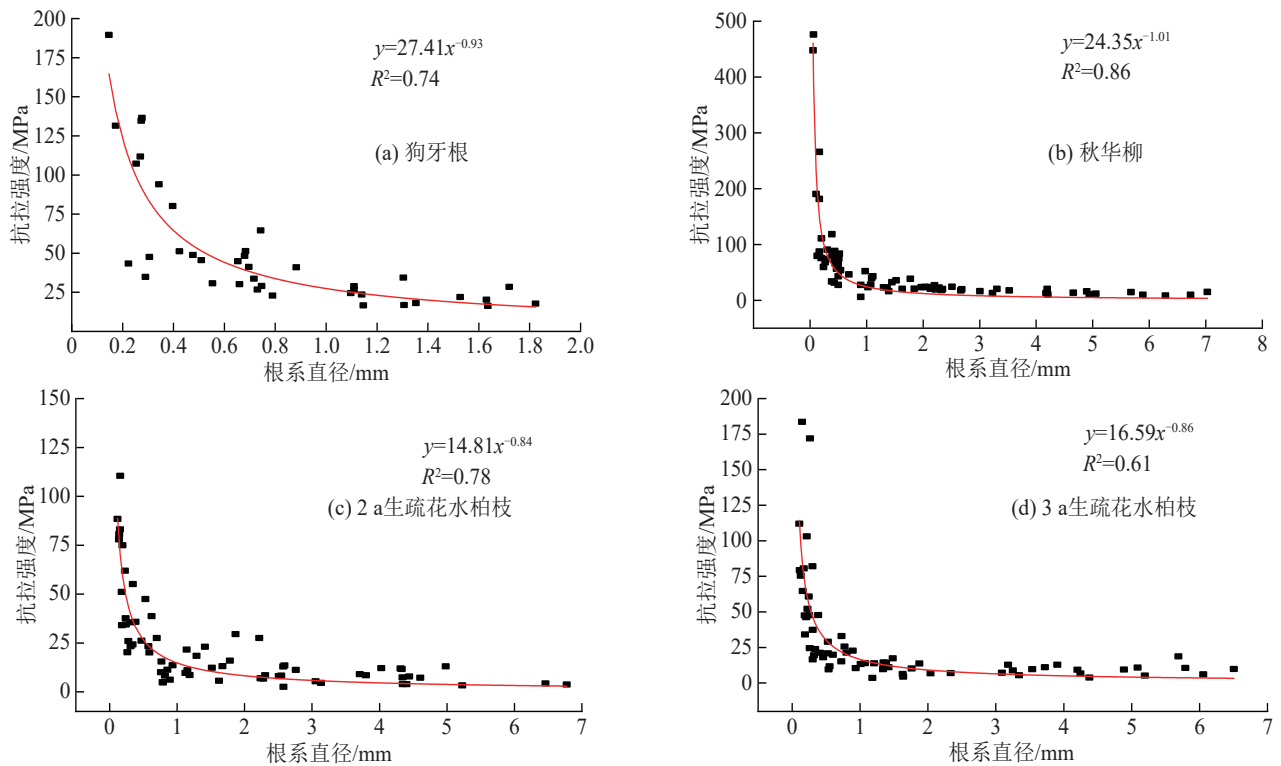


图 2 护坡植物根系抗拉强度曲线

Fig. 2 Tensile strength curves of roots of slope protection plants

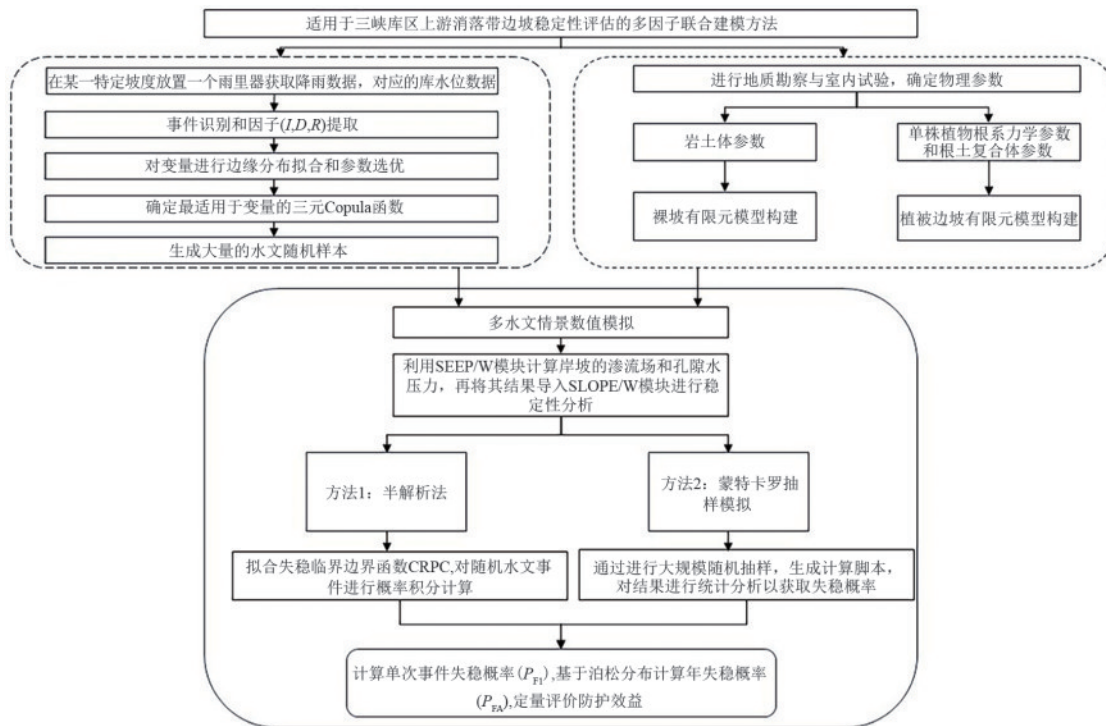


图 3 研究框架

Fig. 3 Research framework

2) 基于 Copula 函数的三元联合建模

为量化 I、D 与 R 之间的联合分布关系, 本文基于

Sklar 定理引入 Copula 函数建立三维联合分布模型。

考虑消落带边坡中尾部相关性显著, 即极端降雨与

快速退水共同出现时滑坡风险增大, Clayton Copula

可有效捕捉尾部依赖特征, 因而被选为联合分布建模函数, 其分布形式为:

$$C_{\theta}(u_1, u_2, u_3) = (u_1^{-\theta} + u_2^{-\theta} + u_3^{-\theta} - 2)^{-\frac{1}{\theta}}, \theta > 0 \quad (3)$$

式中:  $C_{\theta}$  为 Copula 联合分布函数;  $u_i = F_i(x_i) \in [0, 1]$

为变量的边缘分布函数值; $\theta$ 为Clayton Copula的唯一依赖参数,控制变量间的关联强度;采用最大似然法估算参数 $\theta$ 为10.213。

模型建立后,通过蒙特卡罗采样生成伪观测点,并经边缘分布反变换至实际物理空间,作为失稳判据与数值模拟输入。考虑到数值模型对降雨时序分辨率的需求,本文引入区域化Huff曲线法对日尺度降雨进行时间降尺度,Huff曲线参数源自三峡库区长期高分辨率降雨数据的统计分析,将总雨量分配为典型雨型过程线<sup>[12-13]</sup>。研究依据中国气象局暴雨定义标准(24 h降雨量 $\geq 50$  mm)将模拟事件划分为暴雨和非暴雨。暴雨采用三峡库区典型致灾雨型的第2时程(2nd Quartile)50%频率Huff曲线进行分配;非暴雨则按缓变蓄水特征处理,避免人为引入不真实的强度峰值。最终得到的小时级降雨过程与 $R$ 作为模型动态边界,实现水文随机性与物理响应的耦合。

#### 1.4.3 边坡物理响应数值模拟

##### 1) 有限元模型构建

本研究基于三峡库区上游土质岸坡典型二元沉积结构特征(上部粉质黏土层,下部基岩),建立二维有限元模型,模型几何参数依据实际岸坡形态设定:剖面宽度470.0 m,高度246.0 m,坡度为22°(图4)。通过离散化方法生成三角形与四边形混合网格(单元尺寸3 m),共划分10 065个节点和9 863个单元。土体物理力学参数由室内试验测定。模型计算由3个阶段组成:①依据调度规程确定初始库水位及下降速率;②进行稳态渗流分析,模拟饱和-非饱和水分运移;③耦合降雨与库水位下降过程(时间步长2 h),采用修正Mohr-Coulomb准则描述非饱和土强度衰减,并通过Morgenstern-Price法迭代计算安全系数(FS)。

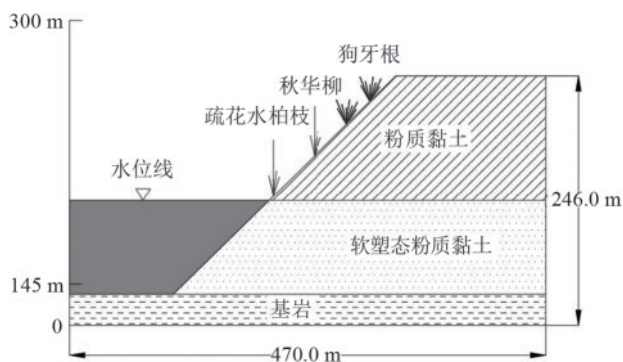


图4 研究区斜坡简化剖面示意

Fig. 4 Simplified slope profile of study area

##### 2) 护坡措施的数值实现与对比工况

为系统性解析植被固土效应及工程措施的协同

增效机制,本研究设置3种核心对比工况:①裸土边坡;②植被防护边坡;③植被-排水联合防护边坡。

植被防护边坡在不同高程带采用“灌草搭配”模式,植被类型以狗牙根为主,疏花水柏枝与秋华柳混交种植的模式,局部地块的种植密度控制在5株/ $m^2$ 。低位(145~155 m)以狗牙根为主,覆盖度达100%;中位(155~165 m)以狗牙根-疏花水柏枝混生为主;高位(165~175 m)采用秋华柳-疏花水柏枝混合配置。联合防护工况中,在坡脚布设盲沟(直径150 mm),沿坡面纵向间距2.5 m设置PVC排水管(倾角 $10^\circ$ ,孔径50 mm),模型中相应单元渗透系数取 $10^{-2}$ ~ $10^{-3}$  m/s,用以模拟其快速消散孔隙水压力的作用。

依据单根拉伸和根土复合体直剪试验结果,建立根系抗拉强度-直径经验函数(图2),并结合根径分布统计,在模型中映射为等效抗拉力密度。数值上将根系力学效应等效为“土钉”单元,土钉参数直接采用试验所得。根系深度分布和空间密度按原位植被调查结果设置(狗牙根0.8~1.0 m,疏花水柏枝/秋华柳1.5~2.5 m),在有限元网格中按层位赋予相应土钉等效增强单元。植被的水力改良效应通过将相关单元的饱和渗透系数设为裸土的4倍<sup>[14-15]</sup>,以模拟根系产生的优先渗流通道对降雨入渗的潜在影响。考虑到根系自重与固土贡献相比其效应量级极小,在模型中予以忽略。

#### 1.4.4 失稳概率评估

##### 1) 临界降雨触发边界函数

为定量表征降雨-水位耦合作用下边坡失稳的触发机制,本研究基于渗流-应力耦合数值模拟方法,构建三维临界降雨触发边界函数(critical rainfall pattern curve, CRPC)。该函数定义为安全系数临界状态(FS=1.0)的参数空间曲面,用于辨识 $I$ 、 $D$ 与 $R$ 组合下的临界失稳条件。

CRPC数据点是通过控制变量法和二分法迭代的混合策略获取的。在参数预设区间内选定特定( $I$ ,  $R$ )组合,并序贯调整降雨历时,然后运行有限元计算,直到满足临界条件(FS $\approx 1.0$ )。为提高搜索效率,采用二分法将安全系数误差收敛至预设容差( $|FS-1.0| < 0.01$ ),所得临界降雨历时记为 $D_c$ 。遍历多组( $I$ ,  $R$ )组合后,生成临界状态样本点集,构成CRPC离散样本点集。基于离散样本点集,引入非线性回归方法建立连续预测模型。基于对降雨水位阈值机制的物理规律,选用幂律型经验函数:

$$D_c = aI^{-b}R^{-c} + d \quad (4)$$

式中:系数 $b$ 和 $c$ 分别为边坡稳定性对降雨强度和水

位下降速率的敏感性指数;  $d$  为边坡的基准稳定偏移量;  $a$  为回归系数。

2) 基于联合样本的失稳概率评估

CRPC 为单次事件失稳概率 ( $P_{F1}$ ) 提供半解析计算路径,其核心在于将水文触发因子的联合概率密度函数在 CRPC 曲面定义的失稳域内积分。考虑到其对函数拟合精度的依赖性,本文引入蒙特卡罗模拟作为补充。

通过 Copula 函数构建的水文联合模型生成大量随机情景,并与物理稳定性模型耦合,最终推导岸坡年失稳概率 ( $P_{FA}$ )。分析流程涵盖:对每一水文情景开展稳定性计算,依据判据判定坡体状态,并通过统计分析量化年失稳概率及植被护坡效益。

① 概率统计:基于全部情景的最小安全系数结果集,依据  $FS < 1.0$  的失稳标准统计失效事件数,按公式(5)计算失稳概率 ( $P_{F1}$ )<sup>[16]</sup>。

$$P_{F1} \approx \frac{N_{failure}}{N} \tag{5}$$

② 年概率推演:考虑年内水文事件数的随机性,假定年事件数  $N$  服从参数为  $\lambda$  的泊松分布,根据全概率公式计算年失稳概率 ( $P_{FA}$ )<sup>[17]</sup>。

$$P_{FA} = 1 - e^{-\lambda P_{F1}} \tag{6}$$

## 2 结果与分析

### 2.1 水文触发因子的统计特征与相关性

基于 2023—2024 年实测数据,分析关键水文触发因子的统计特性及其耦合关系,识别潜在的多因子耦合模式,并为后续联合概率建模提供支撑。由图 5 的水位变动幅度 ( $\Delta H$ ) 的频率分布可知,约 64% 的降雨事件中  $\Delta H$  低于  $\pm 1.0$  m,整体呈右偏分布,表明多数事件水位变化较小,但伴随水位骤降超过 2.5 m 的极端响应。该分布的偏态性与轻微双峰结构,表明水位对降雨的响应偏离经典正态分布,反映调蓄机制与降雨量级的非线性耦合特征。由降雨事件叠加水位时序曲线可知,强降雨集中发生于库水位退水阶段,典型如 2023 年 9 月中旬与 2024 年 6 月上旬,表明降雨与水位下降存在高联合发生概率,凸显“协同触发”效应的灾害风险。统计降雨事件前后 48 h 的  $\Delta H$  发现,41% 的事件伴随显著水位下降 ( $\Delta H < -0.5$  m),而水位显著上升 ( $\Delta H > 0.5$  m) 仅占 25%,表明库区水位对降雨的响应并非线性或对称关系,不存在简单的“降雨→水位上涨”因果链,而是受水库调度主导的复杂非线性行为调控。因此,降雨与水位变动呈现非对称性、非独立性与时序相关性,构成显著统计耦合特征,该发现为构建多变量联合致灾概率模型奠定理论与数据基础。

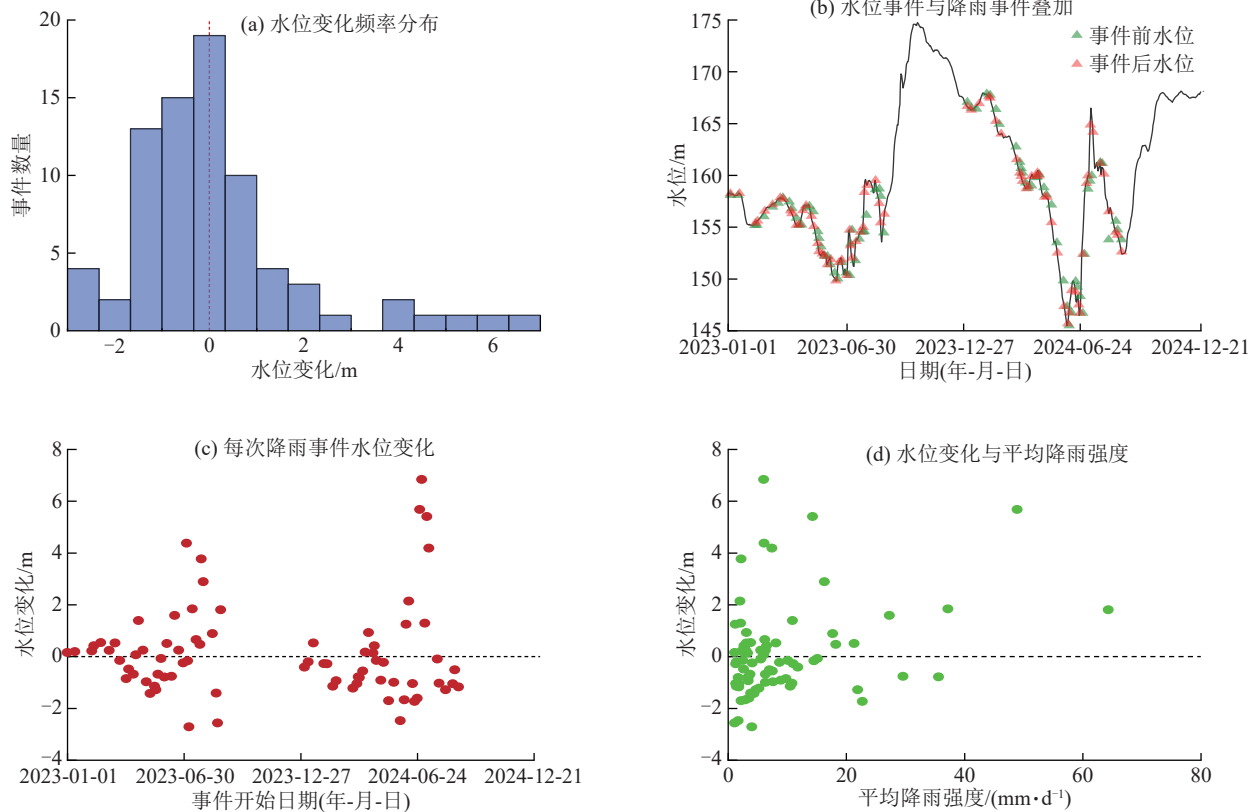


图 5 水文触发因子的统计特征

Fig.5 Statistical characteristics of hydrological triggering factors

为构建联合分布模型,需确定各随机变量( $I, D, R$ )的边缘分布。经多候选概率分布函数拟合评估(表 1),广义极值分布(GEV)最优拟合  $I$ ,而 Gamma 分布则最适用于拟合  $R$ ;离散型  $D$  则采用非参数核密度估计(KDE)构建。边缘分布及其拟合参数汇总见表 2。

表 1 候选分布函数对变量的拟合参数与优度对比

Table 1 Comparison of fitting parameters and goodness-of-fit among candidate distribution functions

变量	分布类型	AIC	BIC	K-S 统计量
降雨强度( $I$ )	Gamma	3 890.95	3 896.6	0.029 6
	GEV	3 893.36	3 903.59	0.020 1
	Lognormal	3 894.11	3 906.01	0.032 3
	Exponential	4 159.43	4 166.29	0.218 9
水位变化率( $R$ )	Lognormal	2 041.39	3 906.76	0.022 3
	Gamma	2 041.98	2 054.03	0.025 8
	GEV	2 043.42	2 054.63	0.025 9
	Exponential	2 257.71	2 067.98	0.207 1

表 2 降雨强度、历时与水位变动速率的边缘分布拟合参数汇总

Table 2 Summary of fitted parameters for marginal distributions of rainfall intensity, duration, and water level fluctuation rate

变量	拟合分布	分布参数
降雨强度( $I$ )	广义极值分布(GEV)	$\mu=27.1, \sigma=10.3, \xi=0.08$
降雨历时( $D$ )	非参数核密度估计(KDE)	Bandwidth=0.4
水位变化率( $R$ )	Gamma 分布	$\alpha=2.85, \beta=1.25$

基于边缘分布,构建三元 Clayton Copula 联合分布模型。图 6 为该模型生成的 1 000 组伪观测样本点在  $[0,1]$  标准化空间分布。可知,样本在低值区域显著聚集,呈现 Clayton Copula 典型的左尾依赖特性,即  $I, D, R$  同时取较小值时,联合发生概率显著增大。该特征表明三峡库区上游中低强度-短历时-中高退水速率组合存在较高的联合发生风险,但实际样本中极端事件较少,结合实际滑坡诱发机制分析,此类工况仍是边坡失稳的关键触发工况。后续失稳临界触发边界函数估算将评估右尾样本区间的贡献,以兼顾物理机制与数据结构差异。

2.2 不同工况下的临界降雨-退水模式曲线

图 7 为  $D_c$  与  $I$  及  $R$  之间的多变量耦合关系。由响应曲面可知,  $D_c$  随  $I$  和  $R$  增加呈双曲线递减趋势,表明强降雨与快速退水共同作用显著缩短边坡临界失稳时间。在  $5 \leq I \leq 100$  mm/h 与  $0.3 \leq R \leq 4.0$  m/d 范围内,  $D_c$  可表征为幂律函数( $R^2=0.966$ ),其中  $I$  和  $R$  的负指数分别为  $-0.450$  和  $-0.605$ ,定量证实其负

相关性。 $R$  的指数绝对值(0.605)大于  $I$ (0.450),表明裸土边坡对水位下降速率的敏感性更强。

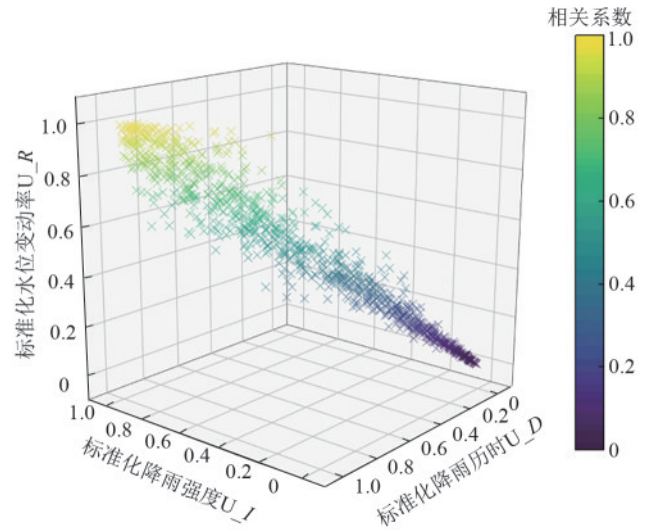


图 6 基于三元 Clayton Copula 模拟样本三维散点图  
Fig. 6 Three-dimensional scatter plot of samples simulated by trivariate Clayton Copula model

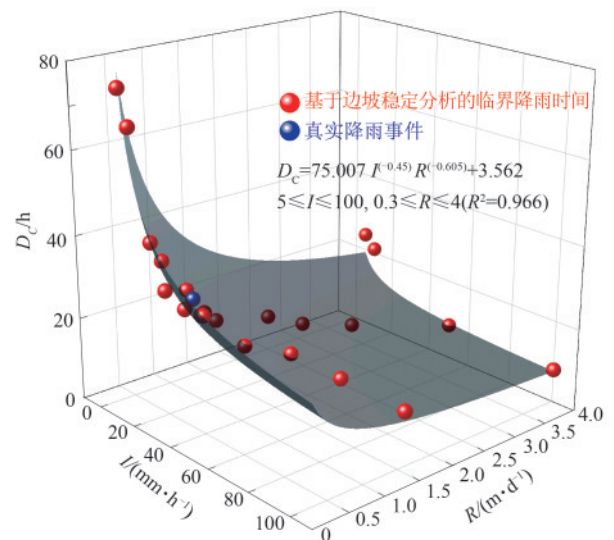


图 7 裸土岸坡降雨-退水复合作用下的 CRPC 曲面  
Fig. 7 CRPC surface plot for bare slope under combined effects of rainfall and recession

为评估工程防护措施,图 8 构建 2 种典型护坡情景的 CRPC 曲面。与裸土边坡相比,植被护坡使 CRPC 曲面整体上移,常数项从 3.562 增至 12.529,但  $I$  的敏感性指数  $-1.322$  远大于裸土  $-0.450$ ,表明强降雨下根系诱导优先流加速入渗,加剧深部孔隙水压力积聚,导致稳定性急剧恶化。配置排水系统后,CRPC 曲面常数项进一步升至 23.531,  $I$  和  $R$  的敏感性指数降低( $-0.984$  和  $-0.918$ ),表明排水有效释放孔隙水压力,削弱水文边界对失稳概率的激发作用。敏感性分析揭示防护措施在特定耦合工况下存在“反向演化”风险,在“极端降雨+中水位”组合工况

下,植被边坡  $D_c$  最低降至 13 h,较裸土边坡反而降低 7.1%,证实根系诱导优先流形成结构性弱化带。当排水系统穿越潜在滑动面时,CRPC 曲面局部出现“二次凹陷”,临界降雨强度  $I_c$  较无排水情景降低

1.2~5.5 mm/h,表明极端降雨下排水系统可能加剧地下水集中效应,诱发孔压剧增。结果表明,忽略水文-力学耦合效应将导致“局部优化引发全局失稳”的设计悖论。

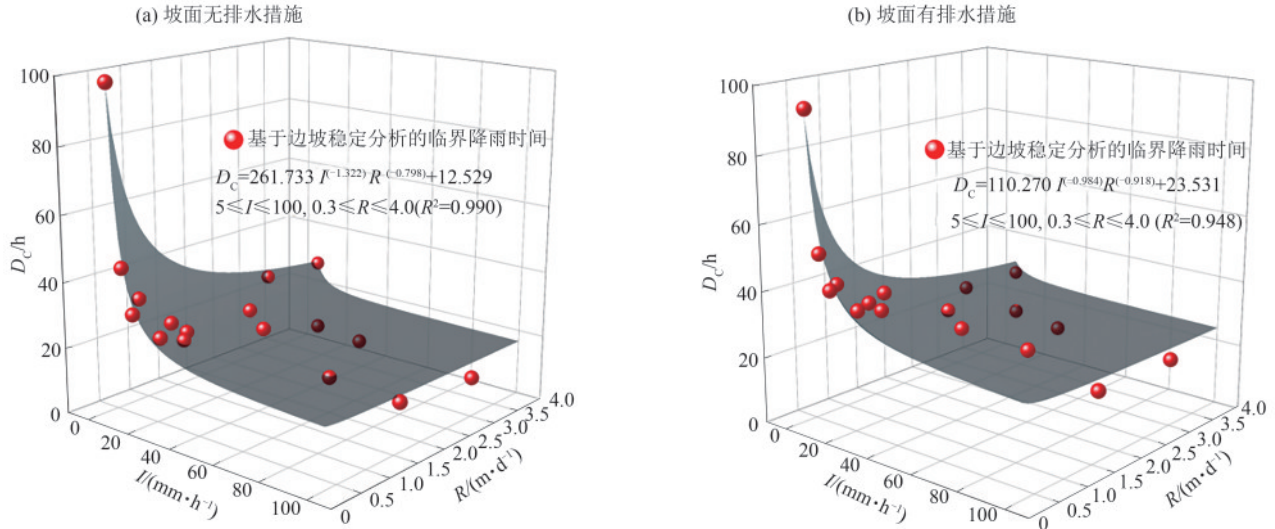


图 8 植被岸坡降雨-退水复合作用下的 CRPC 曲面

Fig. 8 CRPC surface plots for vegetated bank slope under combined effects of rainfall and recession

2.3 模型验证

为检验 CRPC 与耦合数值模型的有效性,本研究选取秭归县“黄土包”滑坡<sup>[17]</sup>(2010年7月4日)作为回溯性验证案例。该事件的监测资料记录触发条件为  $I=19.5$  mm/h,  $D=26$  h,  $R=0.88$  m/d。将该事件的  $(I, D, R)$  组合投影至裸土 CRPC 曲面(图 7),并在耦合有限元模型中以逐时降雨强度与同步水位边界进行回溯仿真。结果显示,在耦合降雨-退水作用下,FS 随时间逐步下降,且雨强较大阶段 FS 下降速率增大;模型预测边坡首次跌破临界状态( $FS=1.0$ )的时刻约为 25.5 h,模拟得到的最小安全系数为 0.99(图 9),该结果与现场记录的失稳时刻及失稳迹象高度吻合。

临界条件识别方面均表现良好,预测失稳时刻与实测值误差仅为 0.5 h,事件点至临界面的标准化距离为 0.08,布里尔得分(Brier score)为 0.12,曲线下面积(ROC-AUC)达到 0.87,有效区分“失稳”与“未失稳”情景。

表 3 模型验证的定量指标

Table 3 Quantitative metrics for model validation

指标	计算方法	验证结果
时间误差 $ \Delta t /h$	$ t_{sim} - t_{obs} $	0.50
标准化距离 ( $d_{nom}$ )	$d/\sigma$	0.08
Brier score	$(1/N) \sum (P - O)^2$	0.12
ROC-AUC	曲线下面积	0.87

注: Brier score 越接近 0,表明概率预测误差越小; ROC-AUC 越接近 1,表明判别性能越好;  $t_{sim}$  为模拟失稳时刻;  $t_{obs}$  为实测失稳时刻;  $P$  为模型概率预测;  $O$  为观测二元事件。

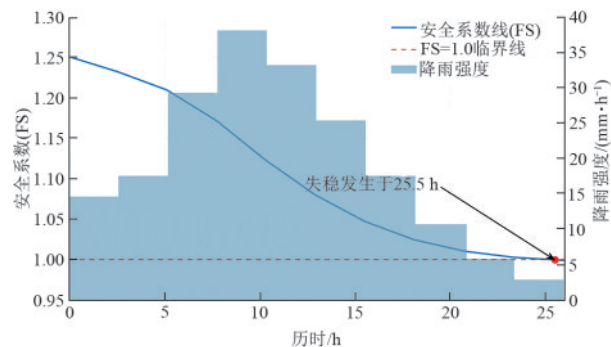


图 9 真实滑坡事件的回溯模拟安全系数时程曲线

Fig. 9 Time-history curve of factor of safety from retrospective simulation of a real landslide event

为增强模型验证的定量性,进一步计算失稳时刻预测误差、事件点至 CRPC 临界面的标准化距离及二元事件判别指标(表 3)。结果表明,模型在失稳时序再现和

2.4 边坡失稳概率评估

基于概率-物理耦合分析框架,对 1 000 次随机水文情景的蒙特卡洛模拟,定量评估岸坡失稳风险及生态防护措施效益。据 2 a 实测数据,年平均独立水文事件频率( $\lambda$ )设定为 24 次。表 4 汇总 3 种边坡类型的失稳概率评估结果。

表 4 不同岸坡情景下的失稳概率与防护效益评估

Table 4 Assessment of instability probability and protection benefit under different bank slope scenarios

边坡类型	$P_{F1}/\%$	$P_{FA}/\%$	年生存概率/ $\%$	防护效益
裸土边坡	7.3	82.7	17.4	1.00
无排水植被边坡	3.8	59.8	40.2	2.36
有排水植被边坡	2.6	46.4	53.6	3.17

注:  $P_{F1}$  为单次事件失稳概率;  $P_{FA}$  为年失稳概率; 年生存概率 =  $1 - P_{FA}$ ; 防护效益 = 裸土年生存概率/防护情景年生存概率。

由表 4 可知,自然降雨-水位波动耦合作用下,消落带裸土岸坡的单次失稳概率为 7.3%,年失稳概率高达 82.7%,揭示高频次、中等强度扰动下岸坡失稳的高累积风险,证实三峡库区岸坡失稳机制不仅受极端事件冲击,更源于高频扰动累积效应。植被护坡(无排水)单次事件失稳概率几乎减半(从 7.3% 降至 3.8%),年防护效益提高到 2.36 倍,量化植被根系加固对降低长期风险的价值,但年失稳概率仍高达 59.8%,表明植被措施防护能力存在上限。CRPC 曲面分析结果同样印证这一结论,强降雨下无有效排水时,根系诱导优先流成为潜在风险。结合植被与合理排水系统,单次事件失稳概率降至 2.6%,年生存率提升至 53.6%,相比裸土提升近 3.20 倍。排水系统能够有效疏解地表入渗和优先流产生的孔隙水压力,并与植被加固形成高效协同,从而显著提升岸坡抵御复杂水文荷载的能力。

### 3 讨论

#### 3.1 水文因子耦合作用的非线性特征与风险放大效应

本研究通过三元 Copula 模型揭示  $I$ 、 $D$  与  $R$  之间的非线性依赖关系。Clayton Copula 模型呈现显著的下尾部相关性,表明中低强度降雨事件与快速水位下降过程具有高联合发生概率。该发现突破传统研究中变量独立<sup>[5]</sup>或线性相关的简化假设<sup>[6]</sup>。研究结果与 ZHAO 等<sup>[8]</sup>、HOU 等<sup>[9]</sup>在三峡库区典型滑坡案例的观测现象一致,但本研究首次基于三元 Copula 理论对该联动机制的概率进行量化。

CRPC 进一步表明, $R$  在失稳过程中起主导作用,与李鹏岳等<sup>[10]</sup>在双家坪堆积体滑坡的模拟结果一致,也与仝德富等<sup>[17]</sup>在谭家湾滑坡的实际观测结论一致,表明快速退水通过降低土体有效应力与破坏基质吸力,成为比降雨入渗更高效的“致灾预备因子”<sup>[18]</sup>,其物理机制为水位骤降不仅导致坡体内部产生指向坡外的超孔隙水压力,削弱抗剪强度<sup>[19]</sup>,同时消落带土体因快速失水而产生的收缩裂隙,为后续降雨的快速入渗提供优势通道<sup>[20]</sup>,形成“先降后雨”的放大致灾效应。

失稳概率的非线性放大效应也应关注,年失稳概率在  $\lambda \approx 24$  的高频水文扰动背景下被急剧放大,与 GARIANO 等<sup>[11]</sup>在气候变化背景下提出的高频次、中等强度事件可能主导长期风险的观点一致。传统基于极值理论的滑坡风险评估方法仅关注极端事件重现期<sup>[7]</sup>,而本研究提出的基于全事件序列的累积风险评估方法,更适用于三峡库区等频繁受非极端扰动影响的区域。

#### 3.2 植被护坡的量化效益与“反向演化”机制

本研究将植被的护坡效应参数化,根系加筋可使黏聚力提升至 23.5 kPa,摩擦角提升至 25°,与室内外试验<sup>[4]</sup>结果相符。根系通过缠绕、锚固和固结作用,显著增加土体的表观黏聚力和内摩擦角<sup>[21-22]</sup>,构成植被护坡力学效益的核心机制。参数改善促使 CRPC 曲面整体抬升,显著扩大边坡稳定域范围。然而,在“强降雨+中水位”组合下,CRPC 曲面显示植被坡面的  $D_c$  反而低于裸坡,此现象揭示根系优先流机制的负面效应:强降雨情景下,根系腐烂或与土体接触面形成的优势通道<sup>[14]</sup>,使水流绕过具有高基质吸力的浅层土壤,迅速在深部潜在滑裂面附近聚集<sup>[12]</sup>,该过程在林业水文学中定义为“径流促渗”和“根系通道流”<sup>[23]</sup>,其导致水流直接、高效地输送至深部潜在的软弱滑裂面,威胁边坡整体稳定性<sup>[24]</sup>。本研究首次基于三峡库区消落带背景,通过数值模拟量化此类“反向演化”风险,凸显生态防护系统性设计的必要性。

排水系统设计不当同样可诱发失稳风险。极端工况下,引入排水系统后 CRPC 曲面显示的  $D_c$  反而小幅降低。若排水管道穿越潜在滑动面或出口设置不当,极端降雨时排水系统可能转化为地表水汇入结构面或软弱夹层的“快速通道”。这种“管道效应”急剧抬升关键部位的孔隙水压力,其致灾效率甚至高于无排水情景下的弥散式入渗<sup>[25]</sup>。已有工程事故案例表明,排水孔堵塞或水流导向非预期脆弱区域是导致边坡失稳的重要诱因<sup>[26]</sup>。因此,排水系统设计需精细考虑地质结构、潜在滑裂面空间关系及水力路径,避免局部优化引发系统性失效。

#### 3.3 工程与生态措施的协同效益

本研究证实,植被与排水系统的协同配置是应对复杂水文扰动的最优策略,该结论不仅通过数值验证 GRIFFITHS 等<sup>[15]</sup>关于土体改良可显著提升边坡可靠度的理论,更将理论范畴从单一岩土参数改良扩展到植被-水力-工程排水多场耦合的复杂系统层面。排水系统在此协同作用中发挥关键调控功能,通过截断“强降雨-优先流-孔压累积-失稳”构成的风险链条,使植被的正向力学加固效益得以充分释放<sup>[27]</sup>,同时抑制其水力增渗负面效应<sup>[28]</sup>。这种协同作用促使防护效果从线性叠加转变为非线性倍增,实现系统稳定性的指数级提升。生态工程实践<sup>[29-30]</sup>表明,单一生态措施往往因效应局限或潜在风险难以达成预期目标,而植被与排水工程的适配性整合可产生显著协同增益。该结果证明生态防护体系需遵循系统性设计原则,通过多要素联动规避因局部优化引发的全局失效风险。

### 3.4 模型优点与局限性

与传统方法相比,本文提出的框架在再现快速退水与降雨叠加的尾部依赖特征、直接联系概率分布与边坡失稳过程及评估防护效益方面表现突出,即引入  $R$  因子,模型更好地捕捉该特征,而现有  $I-D$  模型对此描述不足<sup>[4]</sup>。CRPC 方法较传统阈值法更贴近物理机理,防护效益评估表明在概率意义上植被与排水协同措施优势显著。但该方法亦存在不足与局限:其概率模型基于 2 a 实测水文数据构建,该数据时间尺度在表征长周期气候变异性及罕见极端事件方面存在固有局限性,导致超长期风险预测存在较高的不确定性,因此其结果应理解为基于当前水文气候条件的“情景分析”,而非确定性预报。随着监测数据的不断积累,所提模型可被持续验证、修正与优化,以提高其长期预测的可靠性。

## 4 结论

1) 消落带岸坡失稳风险由极端水文事件与高频累积效应共同主导。年平均 24 次水文事件频率下,裸土岸坡年失稳概率高达 82.7%。高频次中强度扰动通过动水压力引发裂隙扩展,是岸坡年失稳概率趋近饱和阈值( $>0.9$ )的主因。

2) 失稳临界触发边界函数(CRPC)可直接用于事件级与年级失稳概率的计算。水位下降速率对岸坡稳定性的影响为降雨强度的 1.7 倍,植被边坡对降雨扰动的响应幅度约为裸土边坡的 3.0 倍,表明非极端组合情景下仍可能触发临界响应,需高度关注耦合扰动的致灾潜势。

3) 植被护坡可系统性提升临界失稳阈值,但存在明确上限。根系力学-水力效应使土体抗剪强度提升,其中黏聚力增加 8~20 kPa,内摩擦角提高 30.0%~40.0%。耐淹植物筛选优化护坡效能,极端条件下单次事件失稳概率由裸土情景下的 11.2% 降至 3.8%,但在超设计水位耦合极端降雨下,根系诱发优先流可导致局部薄弱面抗剪强度下降 27.0%~42.0%。

4) 概率-物理耦合框架量化工程措施的协同效应。植被与排水系统联合配置可有效增强岸坡对复合水文扰动的适应能力。组合防护情景下,年失稳概率从裸土的 82.7% 降至 46.4%,年生存概率提升至 53.6%,防护效益提升 3.17 倍。

### 参考文献:

[1] ZHANG F L, DENG M L, YI Q L, et al. Deformation characteristics and thresholds of the tanjiawan landslide in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Journal of Mountain Science, 2022, 19(5): 1370-1385.  
[2] WANG T, LIU Y Q, WANG J Z, et al. Assessment of

spatial variability of hydraulic conductivity of seasonally frozen ground in northeast China [J]. Engineering Geology, 2020, 274: e105741.

- [3] 张桂荣,程伟.降雨及库水位联合作用下秭归八字门滑坡稳定性预测[J].岩土力学,2011,32(增刊1):476-482.  
ZHANG G R, CHENG W. Stability prediction of Bazimen landslide in Zigui under the combined action of rainfall and reservoir water level [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 476-482.  
[4] 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 H W. Atmosphere-vegetation-soil interaction: Theories and mechanisms [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(1): 1-47.  
[5] DEMISA M G, WANG S H, HOU Q K, et al. A probabilistic framework for rainfall-induced instability in unsaturated slopes using bivariate rainfall and multivariate soil random fields [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2025, 84(4): e207.  
[6] LIU X, WANG Y. Analytical solutions for annual probability of slope failure induced by rainfall at a specific slope using bivariate distribution of rainfall intensity and duration [J]. Engineering Geology, 2023, 313: e106969.  
[7] 谭畅,周文超,邓子昊,等.极端降雨诱发浅层滑坡的重现期计算方法[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(2):72-77.  
TAN C, ZHOU W C, DENG Z H, et al. Calculation of the return period for shallow landslides triggered by extreme rainfall [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 72-77.  
[8] ZHAO N H, HU B, YI Q L, et al. The coupling effect of rainfall and reservoir water level decline on the Baijiabao landslide in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Geofluids, 2017, 2017(1): e3724867.  
[9] HOU T S, XU G L, ZHANG D Q, et al. Stability analysis of Gongjiacun landslide in the three Gorges Reservoir area under the action of reservoir water level fluctuation and rainfall [J]. Natural Hazards, 2022, 114(2): 1647-1683.  
[10] 李鹏岳,巴仁基,倪化勇,等.库水位升降速率对雅安双家坪堆积体滑坡稳定性影响模拟分析[J].地质力学学报,2017,23(2):288-295.  
LI P Y, BA R J, NI H Y, et al. Simulation analysis of the influence of the reservoir water level fluctuation rate on the stability of Shuangjiaping accumulation landslide in Ya'an [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(2): 288-295.  
[11] GARIANO S L, GUZZETTI F. Landslides in a changing climate [J]. Earth-Science Reviews, 2016, 162: 227-252.

- [12] BORDONI M, MEISINA C, VALENTINO R, et al. From rainfall to slope failure: A probabilistic approach for shallow landslide triggering[J]. *Water*, 2020, 12(6): e1774.
- [13] ZHANG J, HAN Z, LIU W, et al. Spatiotemporal patterns of storm-induced landslides in the Three Gorges Reservoir area, China [J]. *Geomorphology*, 2021, 375: e107545.
- [14] GHESTEM M, SIDLE R C, STOKES A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability [J]. *BioScience*, 2011, 61(11): 869-879.
- [15] GRIFFITHS D V, FENTON G A. Probabilistic slope stability analysis by finite elements [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2004, 130(5): 507-518.
- [16] ALEOTTI P, CHOWDHURY R. Landslide hazard assessment: Summary review and new perspectives [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1999, 58(1): 21-44.
- [17] 全德富, 谭飞, 苏爱军, 等. 基于多源数据的谭家湾滑坡变形机制及稳定性评价 [J]. *地质科技通报*, 2021, 40(4): 162-170.
- TONG D F, TAN F, SU A J, et al. Deformation mechanism and stability evaluation of Tanjiawan landslide based on multi-source data [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(4): 162-170.
- [18] FAN X, SCARINGI G, XU Q, et al. Coping with landslide hazards in the Three Gorges Reservoir, China: Effect of the 2008 Wenchuan earthquake [J]. *Engineering Geology*, 2017, 228: 14-25.
- [19] SPRINGMAN S M, JOMMI C, TEYSSEIRE P. Instability of steep slopes in unsaturated soils: Case study of the Riella landslide [J]. *Géotechnique*, 2003, 53(1): 3-19.
- [20] ZHANG Y M, HU X L, TANNANT D D, et al. Field monitoring and deformation characteristics of a landslide with piles in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Landslides*, 2018, 15(3): 581-592.
- [21] 格日乐, 张成福, 蒙仲举, 等. 3种植物根-土复合体抗剪特性对比分析 [J]. *水土保持学报*, 2014, 28(2): 85-90.
- GE R L, ZHANG C F, MENG Z J, et al. The shear property comparison of three roots-soil composites [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(2): 85-90.
- [22] 周霞, 魏杨, 李东嵘, 等. 黄土区紫花苜蓿根系对土体抗剪性能的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(2): 53-59.
- ZHOU X, WEI Y, LI D R, et al. Strengthening effects of alfalfa roots on soil shear resistance in loess region [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(2): 53-59.
- [23] JOHNSON M S, LEHMANN J. Double-funneling of trees: Stemflow and root-induced preferential flow [J]. *Écoscience*, 2006, 13(3): 324-333.
- [24] 杨馥铖, 李姜瑶, 余冬梅, 等. 西宁盆地黄土区坡形及植被类型对坡面土壤入渗影响 [J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 30-40.
- YANG F C, LI J Y, YU D M, et al. Effects of slope shape and vegetation type on soil infiltration on slope in the loess area of Xining basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 30-40.
- [25] HUTCHINSON N N. Assessment of the effectiveness of corrective measures in relation to geological conditions and types of slope movement [J]. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 1977, 16(1): 131-155.
- [26] TAKE W A, BEDDOE R A. Recent advances in the understanding of rainfall-induced shallow landslides in partially saturated soil [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2014, 51(9): 973-993.
- [27] 周云艳, 陈建平, 王晓梅. 植物根系固土护坡机理的研究进展及展望 [J]. *生态环境学报*, 2012, 21(6): 1171-1177.
- ZHOU Y Y, CHEN J P, WANG X M. Progress of study on soil reinforcement mechanisms by root and its expectation [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1171-1177.
- [28] ILSTEDT U, MALMER A, VERBEETEN E, et al. The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 251(1/2): 45-51.
- [29] MICKOVSKI S B, VAN BEEK L P H, SALIN F. Uprooting resistance of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) [C] // *Eco-and Ground Bio-Engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability*. Dordrecht: Springer, 2007: 53-60.
- [30] STOKES A, DOUGLAS G B, FOURCAUD T, et al. Ecological mitigation of hillslope instability: Ten key issues facing researchers and practitioners [J]. *Plant and Soil*, 2014, 377(1): 1-23.