ISSN：3105-0085
EISSN：3105-0093

长江上游边坡降雨致灾机理分析与生态安全防护研究

李利芳 雷 刚 * 刘怿城 蔡华林

宜宾学院 质量管理与检验检测学部，四川 宜宾 644000

摘 要：长江上游承担着我国生态安全屏障的重要功能，这一区域由降雨引发的边坡灾害较为频繁，对当地生态稳定和群众生命财产构成威胁。围绕宜宾段沿江边坡，本文把筠连“2·8”滑坡作为典型案例，借助文献梳理、理论推演和案例剖析，梳理降雨条件下边坡失稳的致灾机理，并形成工程措施和生态修复彼此衔接的防护技术框架。研究表明，降雨入渗会升高坡体内的孔隙水压力，削弱基质吸力并降低抗剪强度，这是边坡失稳的关键环节；在水与力共同作用时，破坏面由坡脚向上发展，最终贯通成滑裂面。据此提出的以排水优先、支挡辅助、生态为根本的综合防治思路，期望为长江上游灾害防控及生态屏障建设提供理论依据与实际借鉴。

关键词：长江上游；降雨入渗；边坡失稳；致灾机理；生态防护

DOI：10.64649/yh.shygl.issn3105-0085.202610019

0 引言

长江上游西起青藏高原东缘，东至四川盆地及三峡库区，是我国地质灾害高风险区和重要生态屏障区。据自然资源部统计，我国每年发生的滑坡、崩塌等地质灾害中，约 70% 以上与降雨直接相关。特别是近年来极端降雨事件增多，降雨型边坡灾害对交通干线、城镇建设和人民生命财产安全的影响更加突出。前人研究多集中于单一因素或单一工况下的稳定性分析，如李卓等 [1] 借助模型试验证实，前期降雨极易引发浅层滑坡。但针对长江上游砂泥岩互层复杂地质的降雨致灾机理认识仍不够深入，且工程防护与柔性生态修复措施相互割裂，缺乏“工程－生态”协同防护范式。

1 长江上游边坡灾害特征与典型灾害

1.1 长江上游边坡灾害发育特征

相比黄土高原和东南丘陵大多在数十米高差内的滑坡，长江上游边坡的相对高差常达数百米甚至上千米。这里河流比降大、水流湍急，且长江上游支流密集，降雨后汇流快，坡脚淘蚀明显。高位岩体一旦失稳，势能迅速转化为动能，常转化为碎屑流或泥石流，破坏范围远大于原始滑坡体积。筠连“2·8”滑坡滑动距离超过 1 km，沿途冲击铲刮扩容 [2]；若滑体入江，还可能形成涌浪、堵江等次生灾害。灾害破坏具有明显的放大效应和链式特征。

受高陡地形和强降雨影响，边坡灾害会在短历时强降雨或持续阴雨之后突然发生，从降雨到成灾的时间窗口较短，且受前期降雨累积效应影响显著，给早期识别和预警预报带来了极大挑战。

此外，修路切坡、建房开挖以及弃渣堆放，留下了不少人工边坡；坡脚原有支撑被削除，坡面裂缝随之增加，一旦遭遇强降水或河水冲刷更容易发生失稳。

1.2 典型灾害案例分析——以筠连“2·8”滑坡为例

2025 年 2 月 8 日 11 时 50 分，宜宾市筠连县沐爱镇金坪村 2 组突发山体滑坡（如图 1 所示）。据调查评估报告，滑坡区坡陡临空，相对高差约 356 m，平均坡度超过 50°；滑体母岩为砂泥岩互层，砂岩起骨架作用，泥岩夹层相对软弱，在长期风化卸荷作用下发生松动变形。

据邻近气象站记录，2025 年 1 月 8 日至 2 月 7 日，有效降雨日长达 26 d，累计降水量为 85.4 mm。雨水沿岩体裂隙持续入渗后，软化泥岩夹层、降低其抗剪强度，并增加坡体自重和下滑力。坡体稳定性逐渐降低，最终达到临界状态并发生突然失稳。高位岩体滑动后向下高速俯冲，沿途冲击铲刮扩容，运移途中两次受阻转向，形成冲击速度快、滑动距离远、影响范围大的高位远程滑坡。



图 1 四川省筠连县山体滑坡灾前灾后影像对比图

2 降雨诱发边坡失稳的致灾机理

2.1 降雨入渗过程与渗流场演化

降雨入渗是边坡失稳的起始环节。雨水落到坡面后，并非全部转化为地表径流，其中一部分则通过坡面裂隙和孔隙渗入坡体内部。入渗强度受降雨强度、土体渗透性、初始含水率和坡度等共同制约。降雨初期，表层土体含水率上升，基质吸力降低。一旦降雨强度大于土体入渗能力，坡面产生地表径流，坡体内部形成暂态饱和区，孔隙水压力由负向正过渡。

Ng 和 Shi[3] 指出，边坡安全系数不仅取决于降雨强度和初始地下水位，还受降雨持续时间控制，并存在一个安全系数最低的“临界降雨历时”。所以对宜宾段砂泥岩互层边坡的预警阈值设定不能仅以短时雨强作为判据，还应将前期累积降雨和持续入渗时间一并纳入。对于砂泥岩互层边坡，由于泥岩渗透性较弱，雨水易在泥岩顶面汇集，形成暂时性滞水层，使软弱夹层长期处于较高含水率状态；连续多日的小到中雨使坡体含水率逐渐升高、基质吸力不断衰减，为后续强降雨诱发失稳创造了条件。

2.2 非饱和土强度衰减机制

天然状态下，长江上游边坡表层土体大多处于非饱和状态。非饱和土的抗剪强度不仅与有效黏聚力和有效内摩擦角有关，还与基质吸力密切相关。根据 Fredlund 等提出的非饱和土抗剪强度理论 [4]，其抗剪强度可表示为：

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)tan\varphi' + (u_a - u_w)tan\varphi^b \quad (1)$$

式中：c'为有效黏聚力；σ 为总法向应力；u_a 为孔隙气压力；u_w 为孔隙水压力；ϕ' 为有效内摩擦角；(u_a-u_w) 为基质吸力；ϕ^b 为与基质吸力相关的摩擦角。

降雨入渗过程中，土体含水率升高，基质吸力 (u_a-u_w) 逐渐减小直至消失，非饱和土吸附强度部分不断衰减，整体抗剪强度随之降低。对于浅层残积土和堆积层边坡，基质吸力是维持边坡稳定的重要因素。当强降雨使表层土体快速饱和后，基质吸力丧失、抗剪强度下降，易发生浅层滑坡 [1]。

泥岩等软质岩土体遇水后还会发生软化。泥岩浸水后，黏土矿物发生水化膨胀，颗粒间连接力减弱，黏聚力降低。筠连“2·8”滑坡调查结果表明，持续降雨入渗导致泥岩夹层软化，是高位滑坡发生的关键内在因素 [2]。对含软弱夹层的边坡，雨水先在夹层内形成暂态饱和区，夹层软化后成为控制边坡稳定性的关键薄弱面。

2.3 水 – 力耦合作用下的边坡失稳过程

降雨诱发边坡失稳是渗流场和应力场共同变化的过程。降雨入渗首先改变坡体内部渗流场，含水率升高、孔隙压力增大；渗流场变化又引起应力场调整，土体有效应力降低，潜在滑面上的抗滑力减小。同时土体自重增加使下滑力增大。两者叠加，坡体稳定性系数逐渐降低。

边坡失稳通常经历以下几个阶段：初始入渗阶段，坡脚附近土体率先达到较高含水率，基质吸力丧失，抗剪强度下降，局部出现剪切塑性区；随着降雨持续，塑性区向坡体上方扩展，坡顶受应力集中影响出现拉张裂缝；塑性区沿潜在滑面延伸并贯通，形成连续滑裂面；滑裂面以上滑体在重力作用下发生整体滑动。

对含软弱夹层的黏性土坡，失稳过程可细分为夹层软化、夹层挤压、拉伸裂缝、坡顶沉降和断裂滑移 5 个阶段 [5]。边坡破坏时裂隙先在坡脚处产生，再向上延伸至坡顶并贯通。因此，坡脚和软弱夹层应作为加固与排水的重点部位。

随着干湿循环次数的增加，孔隙水压力以及湿润锋的迁移速度增加，土体结构逐渐损伤，边坡安全系数持续下降，多次降雨周期后，稳定性储备不断降低，最终在某一次降雨过程中发生失稳。

3 边坡稳定性评价方法

3.1 极限平衡分析法

极限平衡法将可能的滑动体离散为若干条块，通过力和力矩平衡计算边坡稳定安全系数。常用方法包括瑞典条分法、毕肖普法、简布法等。虽然概念清晰、计算简便，适合快速评价整体稳定性；但它通常需要预先假定滑裂面位置和形状，难以反映坡体内部应力和位移演化。对筠连“2·8”这类受软弱夹层控制的高位滑坡，应先通过地质调查确定潜在滑面，再开展极限平衡计算，不宜直接套用均质土坡假定。

3.2 数值模拟方法

常用的数值方法包括有限元法（FEM）、有限差分法（FDM）和离散元法（DEM）等。有限元法可计算边坡应力场和位移场，基于强度折减的有限元分析能自动搜索最危险滑裂面，减少对预先假定滑面的依赖。离散元法（DEM）适合模拟岩体破碎、滑体解体和远程碎屑流运动，可用于分析高位滑坡失稳后的运动过程。对本文案例，可先用有限元强度折减法评价降雨入渗条件下的稳定性，再用离散元方法辅助分析滑动后的铲刮扩容过程。

3.3 多因素敏感性分析

边坡稳定性受多种因素共同影响，各因素的敏感性差异显著。基于层次分析法和灰色关联分析法，可以对各影响因素的敏感性进行定量评价。一般而言，对于长江上游砂泥岩互层边坡，降雨强度和持续时间的敏感性最高，其次是岩土体强度参数和坡度，坡高和地下水位的敏感性相对较低。这一排序为边坡监测预警和工程治理提供了优先级参考：在监测方面，应重点关注降雨量和坡体含水率变化；在治理方面，应优先采取排水措施和加固软弱夹层。

4 生态安全防护技术体系

4.1 工程 – 生态协同防护模式

传统的边坡防护多采用浆砌石、混凝土挡

ISSN：3105-0085
EISSN：3105-0093

墙，这类硬性工程防护效果不错，但造价较高，大面积的灰色硬化面也会破坏原来的自然生态景观。工程－生态协同防护模式的出发点很明确：在保证边坡稳定的前提下，尽可能恢复边坡的生态功能，实现防灾、环境和经济的平衡。植被的作用并非只是为了“绿化”。冠层截留和茎流改变降雨在坡面的分配，根系则通过加筋作用提高土体黏聚力和抗剪强度。草类根系对表层抗侵蚀贡献更突出，灌木根系对浅层滑动的抑制作用更强，因此灌草结合比单一植被类型更有利于坡面防护与浅层稳定。根据边坡类型和破坏程度的不同，可以采取差异化的防护策略：

（1）坡度小于 30° 、稳定性较好的缓坡。比如撒草籽或灌草混播等纯生态防护措施，利用植被根系的抓力增强表层土体抗侵蚀能力，同时恢复植被覆盖率。

（2）坡度 30° ～ 45° 、稳定性一般的中坡。宜工程与生态相结合的复合防护，如格构梁＋植被护坡、锚杆＋挂网喷播植草、植生袋护坡等。格构梁或锚杆提供结构支撑，植被承担坡面防护和生态修复的作用。

（3）稳定性较差的陡坡或高陡边坡。应以工程治理为主、生态修复为辅，如抗滑桩、锚索框架等重型支挡结构，同时在坡顶、坡脚和平台处补种植被，减少坡面冲刷。

4.2 长江上游生态防护策略

4.2.1 预防为主、防治结合

对宜宾等降雨集中、地质条件复杂的地区，以监测预警为先导，布设雨量计、土壤含水率计、GNSS 位移监测点和裂缝计，结合临界降雨阈值模型开展汛期预警。阈值应结合本地砂泥岩互层边坡的入渗试验和历史灾害数据校正，不宜直接采用外地经验值。

4.2.2 排水为先、支挡为辅、生态为本

排水措施包括坡顶截水沟、仰斜排水孔、软弱夹层排水盲沟等，用于拦截地表径流、降低地下水位和孔隙水压力；支挡措施按稳定性计算结果选择抗滑桩、锚索或格构梁；生态修复用于坡面防冲和植被恢复，三者应统一设计。

4.2.3 分区分类修复

缓坡耕地和宜林荒山重点建设水土保持林、整治坡耕地；中低山丘陵区封山育林、补植抚育，依靠自然恢复提升森林覆盖；沿河陡崖和工程开挖边坡推广客土喷播、植生袋护坡等生态工程技术，筑牢生态缓冲带。

4.2.4 强化工程建设中的生态保护与修复

工程建设尽量避开灾害高风险区，确需施工时严格控制开挖坡度和高度，生态修复坚持“三同时”原则，最大限度减少对生态环境的破坏。

5 结论

长江上游降雨型边坡灾害的有效防治既依赖于对致灾机理的科学认知，也取决于防护策略与区域实际的精准契合。本文围绕“致灾机理—稳定性评价—生态防护”三个环节开展了系统研究，得出了以下认识：含软弱夹层的高陡边坡对降雨过程极为敏感，控制雨水入渗并优先落实排水措施，是切断致灾链条的首要环节；评价方法的合理选型及其与工程条件的精准契合，是保障防护决策可靠性的基础；“排水为先、支挡为辅、生态为本”的综合防治体系与分区分类生态修复策略，不仅具有较强的针对性与可操作性，也与长江经济带“生态优先、绿色发展”的战略导向相契合。

参考文献：

[1] 李卓，何勇军，李宏恩，等．前期降雨作用下边坡滑坡模型试验 [J]. 河海大学学报（自然科学版），2016,44(5):400−405.

[2] 四川省自然资源厅．筠连县“2·8”山体滑坡灾害调查评估报告 [R]. 成都：四川省自然资源厅，2025.

[3]Ng C W W, Shi Q. Influence of rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated soils[J].Quarterly Journal of Engineering Geology,1998,31(2):105−113.

[4]Fredlund D G, Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York: John Wiley & Sons,1993.

[5] 何忠明，王保林，胡庆国．强降雨条件下含软弱夹层粘性土坡稳定性分析 [J]. 土木建筑与环境工程，2018,40(5):109−116.

作者简介：李利芳（2007.01—），女，汉族，四川人，本科，研究方向：边坡稳定性分析。
通讯作者：雷刚（1990.05—），男，汉族，四川人，博士，研究方向：边坡稳定性分析。
项目信息：本论文得到省级大学生创新创业训练计划支持项目（项目批准号：S202610641254）资助；本论文也得到宜宾学院培育项目（项目批准号：2021PY64）资助。