

郭荣鑫, 鲁志春, 周亮, 等. 水库塌岸防治与风险管控研究综述: 现状及展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(1): 295-310. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.022

GUO Rongxin, LU Zhichun, ZHOU Liang, et al. A review of prevention and risk management of reservoir bank collapse: Current status and prospects[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(1): 295-310. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.022

水库塌岸防治与风险管控研究综述: 现状及展望

郭荣鑫¹, 鲁志春¹, 周亮¹, 王彪¹, 苏爱军², 董杉²

(1. 长江工程监理咨询有限公司(湖北), 湖北武汉 430000; 2. 中国地质大学(武汉)
湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 湖北武汉 430074)

摘要:【目的】水库塌岸是水库库区典型的工程地质灾害, 直接威胁沿岸居民生命财产及基础设施安全, 其防治与风险管控是水利工程领域的重大挑战之一。【方法】系统梳理国内外水库塌岸研究现状, 首先阐明其成因机制与典型破坏模式; 进而综述从勘查识别到预测评价的技术方法体系, 辨析图解法、数学分析法与数值模拟等方法的适用性; 论述融合工程治理与生态修复的协同防治措施, 以及“天-空-地-水”专业监测与群测群防技术体系。在此基础上, 从管理视角构建以风险评估为科学依据、以“预报-预警-预演-预案”(“四预”)为主线的水库塌岸风险管控系统框架, 详细阐述其闭环管理流程与实施策略。【结果】结果表明, 水库塌岸成因复杂, 库水位波动是主导外部触发因素, 岸坡的地质结构与岩土体性质是控制其稳定性的内在基础; 塌岸识别与预测技术呈现经验性与机理模型融合的趋势, 数值模拟与机器学习等机理与数据驱动方法, 代表了高精度与智能化预测的发展方向; 其防治措施从单一的工程措施向“工程-生态”协同治理转变, 生态护坡等措施正日益受到重视; 监测预警体系已发展为“群专结合、立体协同”的成熟范式; 风险管控初步形成了以“四预”为主线、以风险评估为科学依据的系统性管理框架, 实现了从被动应急向主动防控的战略转变, 显著提升了水库库区的综合风险管理能力。【结论】当前对水位、降雨、渗流、地质构造等多因素动态耦合作用机理的认识仍不充分, 需深化多场耦合机理研究, 发展融合物理机理与数据驱动的“灰箱”模型, 推动预测技术智能化与标准化; 攻克复杂条件下的塌岸预测难题; 应研究植被根系固土机理的量化模型、生态护坡材料的耐久性及其与工程结构的协同工作机理, 发展生态友好的韧性防治技术; 构建智慧管控“大脑”, 实现风险“四预”的闭环管理。

关键词: 水库塌岸; 风险识别; 监测预警; 防治措施; 风险管控; 地质灾害; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.01.022

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV697.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)01-0295-16



与作者互动
听语音
聊科研

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-11-04; 录用日期: 2025-11-10; 网络出版日期: 2025-11-11

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(42407221)

作者简介: 郭荣鑫(1985—), 男, 高级工程师, 主任, 硕士, 主要从事水库工程的地质灾害防治、风险预测与管理研究。E-mail: guo.rx@crhdc.com.cn

通信作者: 鲁志春(1990—), 男, 工程师, 博士, 主要从事岩土体力学性质、试验、仿真技术与地质灾害防治研究。E-mail: luzhichun@crhdc.com.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

A review of prevention and risk management of reservoir bank collapse: Current status and prospectsGUO Rongxin¹, LU Zhichun¹, ZHOU Liang¹, WANG Biao¹, SU Aijun², DONG Shan²

(1. Yangtze River Engineering Supervision Consulting Co., Ltd., (Hubei), Wuhan 430000, Hubei, China; 2. Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: [Objective] Reservoir bank collapse is a typical engineering geological hazard in reservoir areas, directly threatening the lives and property of residents and the safety of infrastructure along the banks. Its prevention and risk management represent a major challenge in the field of hydraulic engineering. [Methods] The current state of research was systematically reviewed on reservoir bank collapse domestically and internationally. It begins by elucidating its causative mechanisms and typical failure modes. It then summarizes the technical methodology system, from investigation and identification to prediction and evaluation, analyzing the applicability of various methods, including graphical, mathematical analysis, and numerical simulation approaches. The paper discusses integrated prevention and mitigation measures that combine engineering governance with ecological restoration, as well as the technical system encompassing professional “sky-air-ground-water” integrated monitoring and community-based monitoring, forecasting, and prevention. Building on this foundation and from a management perspective, this paper constructs a systematic risk management framework for reservoir bank collapse. This framework uses risk assessment as its scientific basis and the “Four Pre” s (Forecasting, Early Warning, Simulation, and Preparedness) as its core process, detailing its closed-loop management process and implementation strategies. [Results] The results indicate that the causes of reservoir bank collapse are complex. Reservoir water level fluctuation is the dominant external triggering factor, while the geological structure of the bank slope and the properties of the rock and soil mass form the internal basis controlling its stability. Identification and prediction technologies are showing a trend of integration between empirical and mechanistic models. Mechanistic and data-driven methods such as numerical simulation and machine learning represent the development direction of high-precision and intelligent prediction. Prevention and mitigation measures are shifting from single engineering solutions to “engineering-ecological” collaborative governance, with measures like ecological slope protection receiving increasing attention. The monitoring and early warning system has evolved into a mature paradigm characterized by the “integration of professional and community-based monitoring” and “stereoscopic collaboration”. Risk management has preliminarily formed a systematic management framework using the “Four Pre” s as the main line and risk assessment as the scientific basis, achieving a strategic shift from passive response to active prevention and control, significantly enhancing the comprehensive risk management capability of reservoir areas. [Conclusion] Current understanding of the dynamic coupling mechanisms involving multiple factors such as water level, rainfall, seepage, and geological structure remains insufficient. There is a need to deepen research on multi-field coupling mechanisms, develop “grey-box” models that integrate physical mechanisms and data-driven approaches, and promote the intellectualization and standardization of prediction technologies to overcome the challenges of predicting bank collapse under complex conditions. Research on quantitative models of vegetation root soil reinforcement mechanisms, the durability of ecological slope protection materials, and their synergistic mechanisms with engineering structures should be conducted to develop eco-friendly and resilient prevention and mitigation technologies. It is essential to build an intelligent management “brain” to achieve closed-loop management of the “Four Pre” s for risk.

Keywords: reservoir bank collapse; risk identification; monitoring and early warning; prevention and mitigation measures; risk management; geological hazard; influence factor

0 引言

全球气候变化背景下, 极端天气事件频发, 水文过程的变异性和不确定性显著增强, 对水利工程安全构成了前所未有的挑战^[1-2]。水库作为调控水资源、防洪兴利的关键基础设施, 其长期稳定运行至关重要。然而, 水库运营不可避免地改变了库区及沿岸的自然平衡, 诱发了一系列工程地质灾害, 其中水库塌

岸最为普遍。水库塌岸主要指在库水位周期性波动、地下水渗流潜蚀、风浪冲刷及岩土体性质劣化等多动力场耦合作用下, 库岸岩土体发生变形、失稳并向后倒退的地质现象^[3-4]。该过程不仅直接重塑库岸地貌, 更对沿岸居民生命财产、基础设施(如公路、输电线路、管线)以及生态与环境构成直接的威胁, 并常引发涌浪等次生灾害, 形成具有破坏力的灾害链, 影响着水库的综合效益与公共安全^[5-7]。因此, 在全

球变化与人类活动交织影响的新形势下, 深入开展水库塌岸的成灾机理、风险识别与管控研究, 已成为水利工程、工程地质及风险管理领域亟需攻克的难题。

系统认知水库塌岸的成因机理与演化规律, 是进行有效风险防控的基石。国内外学者在此领域已进行了大量探索, 并呈现出不同的研究侧重与发展路径。我国的研究工作紧密围绕三峡、溪洛渡、白鹤滩等巨型水库工程建设与运营中的实际需求展开, 形成了特色鲜明的研究体系。首先, 在成因机理与破坏模式方面, 研究揭示了水库塌岸是“水-岩(土)-应力”环境耦合作用的复杂结果。缪吉伦等^[3]较早系统分析了库岸再造的内在机理, 强调了水岩相互作用的控制性影响; 殷跃平^[6]则深入剖析了三峡库区边坡的结构特性及其对失稳模式的控制作用。在此基础上, 汤明高等^[8]通过对三峡库区的系统研究, 凝练并分类了冲磨蚀型、坍塌型、崩塌型、滑移型及流土型等典型塌岸模式, 为后续的定量预测与分类防治奠定了理论基础。其次, 在预测评价方法层面, 经历了从经验半经验方法向物理机理与数据驱动模型发展的过程。早期, 源于苏联的卡丘金法、佐洛塔廖夫法等图解法因简便实用, 在我国得到了广泛应用与本地化修正^[9-10]。针对复杂地质条件, 许强等^[11]创新性地提出了“岸坡结构法”, 突出了岩体结构面在控制岩质库岸塌岸范围中的决定性作用, 实现了预测理念从“土体”到“岩体”的重要跨越。近年来, 随着计算技术的进步, 数值模拟法(如有限元、有限差分、离散元)能够更精细地模拟水-力耦合过程^[12], 而机器学习方法(如随机森林、支持向量机)则在利用海量监测数据挖掘塌岸规律、进行易发性区划方面展现出巨大潜力^[13-14]。最后, 在防治技术体系上, 形成了以护岸、支挡、排水、锚固等为代表的刚性工程措施与以植被恢复为代表的生态柔性措施相结合的综合治理思路。值得注意的是, 针对不同水库类型(如山区河道型与平原湖泊型)的防护对策亦存在显著差异, 相关研究为差异化防治策略的制定提供了重要参考^[15]。

相较于国内聚焦于水库工程这一特定场景, 国际学术界对岸坡失稳的研究, 其背景更多集中于天然河流系统。这一取向差异, 主要源于欧美地区的大型水库建设高潮早于 20 世纪中叶已基本结束, 其库岸稳定性问题已得到较全面的认知与处理, 当前的研究焦点已更多转向河流健康、生态修复与可持续流域管理。因此, 国际上的前沿工作更多地体现在对河流岸坡坍塌动力学过程的精细刻画与模拟上。例如,

DARBY 等^[16]和 DENG 等^[17]发展了耦合水动力侵蚀与土体失稳的河岸崩塌模型, 揭示了水位变化下渗流场演变与岸坡稳定性之间的动态反馈机制。ZHAO 等^[18]则对河岸后退的多种机理、先进观测手段与数学建模进展进行了系统性综述, 为本领域研究提供了全面的视角与方法论借鉴。此外, 在侵蚀与变形监测方面, 基于 LiDAR、无人机摄影测量以及分布式光纤传感(DFOS)等技术构成的“空-天-地”一体化技术体系, 在国际上的应用已趋于成熟和常规化^[19-20]。这些研究虽然在具体环境上与国内有别, 但其对失稳物理过程的深刻揭示、对多源监测数据的融合分析方法, 以及对生态-工程协同治理理念的倡导, 均为我国水库塌岸研究的深化提供了宝贵的借鉴。

尽管国内外研究成果丰硕, 但纵观现有研究, 仍存在若干亟待弥合的“断层”与可供拓展的“空间”。其一, 在研究视角上, 现有文献多侧重于塌岸的“成因机理-预测模型-防治技术”这一线性链条, 虽有个别研究触及风险管理, 但尚未将“防-治-管”有机整合, 形成一个从机理认知到管理决策的闭环系统。特别是如何将先进的监测预警成果有效地转化为前瞻性的风险管控行动, 相关系统性论述尚显不足。其二, 在技术融合上, 图解法等传统方法与现代数值模拟、机器学习之间尚存在“鸿沟”, 缺乏能够有效融合经验知识与数据驱动优势的混合预测模型。同时, 监测数据的获取能力飞速提升, 但其在风险“预报”中的深度挖掘与同化应用仍滞后。其三, 在管理实践上, 水库管理部门的实际需求是如何将复杂的科研成果, 转化为简洁明了的“何时、何地、做什么事”的操作指南。当前研究对“四预”(预报、预警、预演、预案)风险管控框架如何在水库塌岸这一具体场景中落地实施, 其流程、职责与协同机制缺乏深入的探讨和清晰的勾勒。

基于此, 本文旨在系统梳理水库塌岸的成因机制、破坏模式、识别预测方法、防治措施及监测技术的最新进展, 并重点探讨其风险管控体系, 特别是“四预”措施的实施策略。通过对国内外研究的对比分析, 本文期望为水库运行管理部门提供从理论到实践的全面参考, 并为未来水库塌岸防治与风险管控的智能化、精准化发展指明方向。

1 水库塌岸成因与破坏模式

水库塌岸的成因具有典型的多样性与耦合性, 水位波动是主导外部触发因素, 而地质结构是内在控制条件。不同的成因组合导致了不同的破坏模式: 水动

力主导下多形成冲磨蚀型;重力与结构面控制下多形成崩塌型;渗流与软弱面结合则易引发滑移型。当前研究正从单一成因分析向多场(水-力-化学)耦合作用机理深化,这对于准确预测与防治塌岸至关重要。

2.1 塌岸成因

水库塌岸是指库岸岩土体在库水位波动、风浪冲刷、地下水渗透等自然与人为因素作用下,发生变形、失稳并向后倒退的地质现象^[3,21]。此过程常伴随剥蚀、崩塌、滑移等多种地貌再造形式,对库周居民、基础设施及生态环境构成直接或潜在威胁,如图1所示。塌岸多发生于水库蓄水初期或水位剧烈波动期,具有突发性强、破坏力大、影响范围广等特点^[4,22]。其发生机理是内外动力地质作用耦合的结果,并表现为特定的破坏模式。

水库塌岸是多种因素复杂互动的结果,主要可归纳为以下五类。

(1)水位波动与地下水渗流。库水位的周期性升降是诱发塌岸最核心的外部动力。水位上升时,岸坡岩土体长期浸泡,一方面通过物理和化学作用软化岩

土、降低其抗剪强度(即水岩相互作用);另一方面,抬高的库水补给岸坡地下水,导致孔隙水压力增大,有效应力降低。水位快速下降时,岸坡内地下水向库区排泄,产生指向坡外的渗透力,直接打破岸坡平衡。DENG等^[17]与ZHAO等^[22]通过模型与实验证实,水位下降速率是控制塌岸规模的关键触发因子。地下水渗流作用在土质岸坡中尤为显著,而在岩质岸坡中,水流沿裂隙渗入产生的渗透压力与软化效应同样不可忽视^[23]。

(2)波浪与水流的冲刷。库区风浪、船行波等水动力对岸坡基底进行持续冲刷与磨蚀,搬运坡脚物质,使上部岸坡因失去支撑而发生失稳。HOUSER^[21]与NANSON等^[24]的研究分别量化了风浪与船行波对岸坡侵蚀的贡献,表明在开阔水域或航道附近,此类作用主导的塌岸尤为突出。

(3)气象因素。强降雨是重要的触发因素,它迅速增加岸坡土体饱和度与自重,同时抬升地下水位,共同导致抗剪强度骤降。在寒冷地区,冻融循环对岸坡稳定性的影响显著,反复的冻结与融化会破坏土体



(a) 水库塌岸影响耕地



(b) 水库塌岸影响房屋



(c) 水库塌岸影响道路



(d) 水库塌岸影响库周居民安全

图1 典型水库塌岸

Fig. 1 Typical reservoir bank collapse

结构,使其变得松散,抗侵蚀能力下降^[25-26]。

(4)地质构造与岸坡结构。岸坡的地质条件是决定其稳定性的内在基础。断层、破碎带、软弱夹层等不良地质构造,以及岩土体的矿物成分(如三峡库区红层软岩中的亲水矿物),共同构成了塌岸的“物质基础”与“结构面”。许强等^[11]提出的“岸坡结构法”正是基于此原理,强调岩层产状与临空面组合关系对塌岸模式的控制作用。

(5)人类工程活动。水库建设本身改变了自然平衡,而库区周边不合理的工程活动,如道路开挖、削坡建房、采石等,会进一步破坏岸坡的天然支撑,显著增加其失稳风险。

1.2 主要破坏模式

基于成因机制与变形特征差异,水库塌岸可表现为多种破坏模式。汤明高等^[8]对三峡库区的典型塌岸模式进行了系统归纳,结合其他研究,主要可分为以下四类,各类模式特征、主控因素及示意图归纳如表1所列。

2 水库塌岸识别与预测方法

水库塌岸的识别与预测已形成从宏观勘查到微观机理、从经验估算到数值模拟与数据挖掘的多元技术体系。当前,“空-天-地”一体化勘查技术为识别提供了丰富的数据源。在预测方面,图解法和类比法因其简便性仍在工程实践中占据重要地位,而数值模拟和机器学习则代表了高精度与智能化的发展方向。未来的趋势在于融合多源数据与多类方法,发展兼具物理机理与数据驱动优势的混合预测模型,以提升预测的准确性与可靠性。

准确识别潜在塌岸区域并预测其发展趋势,是实施有效防治与风险管控的前提。本章将水库塌岸的勘查评价(早期识别)与预测方法相结合,系统阐述其技术体系。

2.1 勘查与早期识别方法

塌岸的早期识别依赖于多源勘查技术,旨在圈定不稳定岸段、识别变形前兆。其主要方法如表2所列,主要包括以下几个方面。

(1)工程地质与水文地质勘查。工程地质与水文地质勘查是最基础且不可或缺的手段。通过地面调查、钻探、物探等方法,查明岸坡的地层岩性、地质构造(如断层、裂隙)、软弱夹层分布及水文地质条件。许强等^[11]强调,详细的工程地质勘查是应用“岸坡结构法”进行精准预测的先决条件。冯文凯^[27]的研究也表明,对库岸公路边坡进行系统的地质勘查

与风险分析,是保障路基边坡安全的关键。

(2)遥感与无人机勘查。星载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术可实现大范围库岸的毫米级形变监测,有效识别缓慢、持续的变形区域,适用于区域性的风险初步筛查^[28-29]。无人机航测则凭借其高灵活性与分辨率,可快速获取高危区的地表裂缝、微地貌等精细信息,戴可人等^[28]联合InSAR与无人机技术,在白鹤滩库区蓄水前成功识别了多处地质灾害隐患。

(3)水文气象条件分析。水文气象条件配合塌岸危险性分析可作为中短期预报的一种方式。收集与分析历史及实时的库水位、降雨、地下水位等数据,识别出易触发塌岸的水位波动模式(如快速消落)和降雨阈值,为动态风险评估提供依据^[30]。

2.2 塌岸预测方法

在勘查识别的基础上,预测方法旨在定量或半定量地估计塌岸的可能范围、规模和演化过程。现有方法主要分为图解法、数学分析法、数值模拟法与数据驱动法等。

2.2.1 图解法

图解法基于简化假设与经验公式,通过几何作图预测塌岸最终剖面,在工程实践中应用广泛。

(1)工程地质类比法。该方法将目标库岸与地质条件相似且已稳定的库岸进行类比,借用其稳定坡角进行预测。张梁等^[10]出该方法简便快捷,适用于资料缺乏的初期阶段,但其精度严重依赖于类比对象的选取是否恰当。

(2)卡丘金法。该方法综合考虑水位波动幅度与波浪作用,通过计算水下稳定坡角(α)与水上稳定坡角(β)来预测塌岸宽度(见图2)。

图2中, S 为塌岸带最终宽度(m), A 为库水位变化幅度(m), h_p 为波浪冲刷深度(m), h_b 为波浪爬高(m), h_s 为设计高水位以上岸坡高度(m), h_1 为自然岸坡拉裂区土体高度(m), h_2 为自然岸坡滑移区土体高度(m), α 为水下浅滩冲刷后稳定坡角($^\circ$), β 为岸坡水上稳定坡角($^\circ$), γ 为原始岸坡坡角($^\circ$)。由图3可知,基于卡丘金法,可采用如下公式进行计算塌岸预测范围

$$S = N \left[\frac{A + h_p + h_b}{\tan \alpha} + \frac{h_s - h_b}{\tan \beta} - \frac{A + h_p}{\tan \gamma} \right] \quad (1)$$

式中, N 为与土体颗粒组成有关的系数(如砂土为0.5,亚黏土为0.6,黏土为1.0)。

彭仕雄^[9]评述认为,该方法在均质土质岸坡中效果较好,但对复杂地质条件适应性不足。此外,卡丘金法依赖大量参数输入,如系数、坡角和波浪特性

表 1 水库塌岸主要破坏模式

Table 1 Common failure modes of reservoir bank collapse

破坏模式	主要特征	主控因素	示意图(引自汤明高等 ^[8])	
冲(磨)蚀型	岸坡在水流和波浪长期作用下, 表层土体或岩体被逐渐剥离、搬运, 岸线持续、缓慢后退	水动力冲刷、岩土体抗冲刷能力		
崩塌型	多见于节理发育的陡峭岩质岸坡。岩体在重力与水的作用下, 沿裂隙发生突然性的倾倒、坠落或滚动	岩体结构面、重力、水的楔裂作用		
滑移型	岸坡岩土体沿某一潜在或既定的滑动面(如软弱夹层、地下水水位附近)发生整体性或局部性的剪切滑移。可分为浅层滑移与深层滑坡	水位波动引起的孔隙水压力变化、滑动面强度		
复合型	实际工程中常见两种或以上模式的组合。例如, 坡脚先被冲磨, 继而引发上部岸坡的滑移或崩塌	多种因素耦合作用	多种模式组合	

表 2 水库塌岸主要勘查与早期识别方法

Table 2 Methodological framework for reservoir bank collapse investigation and early identification

方法类别	主要技术手段	主要识别内容	特点
地质勘查 遥感勘查 水文气象分析	地面调查、钻探、物探 卫星 InSAR、无人机航拍 水位/雨量监测站、数据挖掘	地层结构、软弱面、地下水 大范围形变、裂缝、地貌变化 触发条件、动态风险	基础性强, 精度高, 但点状分布, 成本较高 覆盖范围广, 效率高, 适合不同尺度筛查 揭示塌岸与外部动力的关联, 支持预警

数据, 数据不足可能导致预测误差。

(3) 佐洛塔廖夫法。该方法将岸坡再造过程细分为五个作用带, 动态模拟波浪冲刷与堆积过程, 尤其适用于波浪作用主导的宽浅库区^[29-31]。通过将岸坡分为五段, 并分别分析每段的冲刷、堆积及稳定性, 可以绘制出库岸的最终剖面形态, 如图 3 所示。

佐洛塔廖夫法认为库岸再波浪作用下可分为五个区域: 浅滩外缘堆坡, 指的是远离岸坡的波浪堆积区域; 堆积浅滩, 指的是由波浪搬运的沉积物堆积形成的坡面; 冲蚀浅滩, 指的是波浪作用下形成的冲刷坡角区域; 爬升带剥蚀坡, 指的是波浪爬升过程中对坡面冲(磨)蚀的区域; 水上岸坡稳定带, 指的是正常水位以上的岸坡滑移后稳定区域。

佐洛塔廖夫法适合水动力作用显著的库区, 如大型水库的中下游宽浅地带或冲积平原库区。在这些场

景中, 该方法能够通过分段分析, 详细刻画波浪作用对岸坡再造的动态调整过程。然而, 该方法对数据需求较高, 且模型构建和分段分析需要较多经验支持。此外, 对于地质条件复杂或水动力作用不显著的库区, 其预测效果可能受到一定限制。因此, 佐洛塔廖夫法通常用于波浪主导的岸坡预测, 并与其他方法结合使用以提高其适用性和准确性。

(4) 岸坡结构法。岸坡结构法是一种结合地质结构特性分析的水库塌岸预测方法, 其核心思想是通过分析库岸的岩土体结构、层理分布及软硬交替等地质特性, 研究库岸的潜在滑移面和失稳条件, 从而预测库岸的塌岸范围及规模^[11]。如图 4 所示, 该方法以库岸的地质结构为主要研究对象, 强调库岸内在的力学特性对岸坡稳定性的影响, 适用于地质条件复杂的山区水库, 特别是在岩质岸坡或多层结构显著的库区

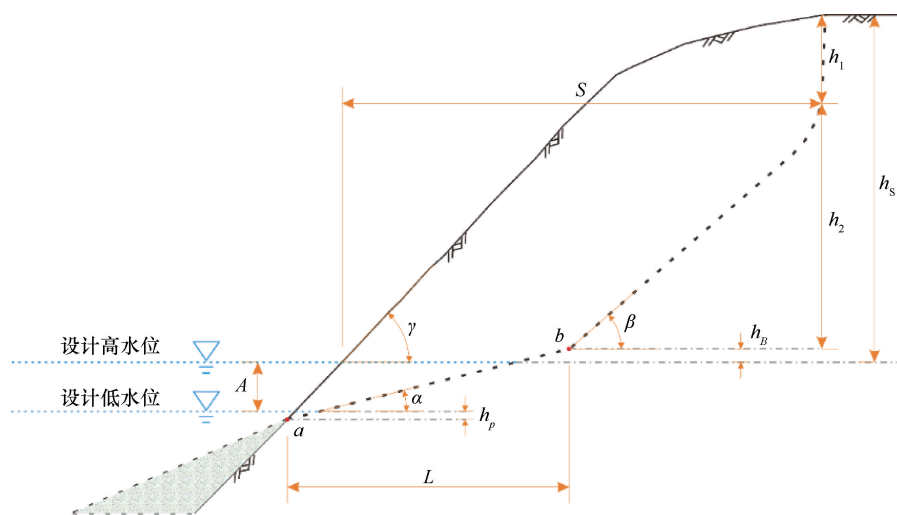


图 2 卡丘金法应用图解

Fig. 2 Schematic diagram of the Kachugin method

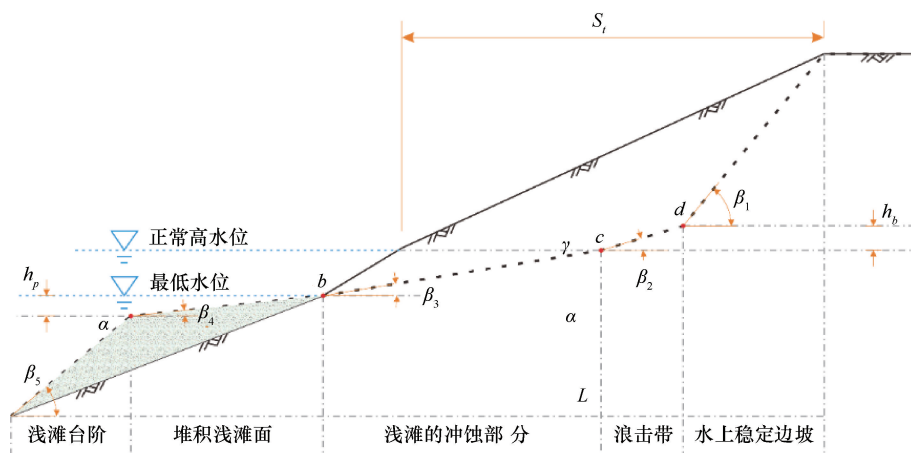


图 3 佐洛塔廖夫法应用图解

Fig. 3 Schematic diagram of the Zolotarev method

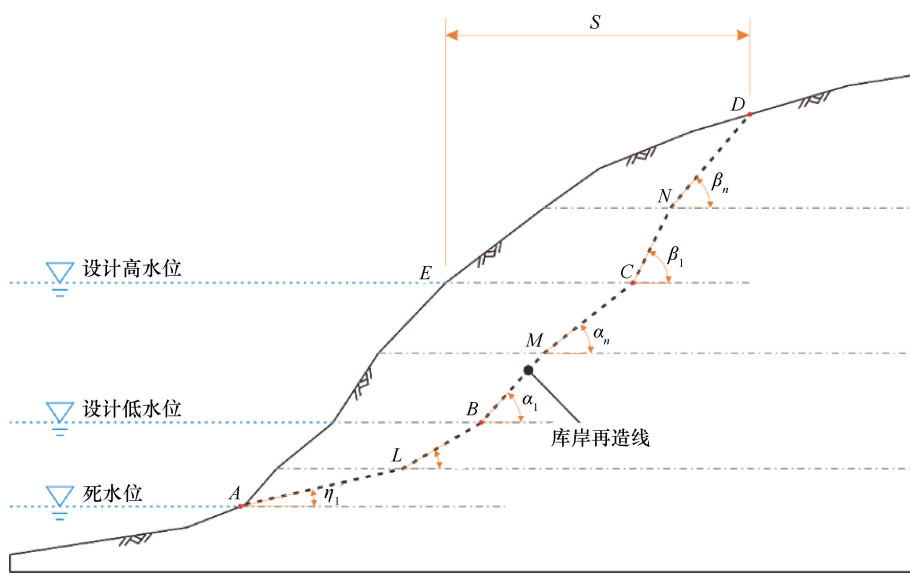


图4 岸坡结构法应用图解

Fig. 4 Schematic diagram of the bank slope structure method

中具有良好的应用效果。

岸坡结构法广泛应用于地质条件复杂的山区水库,特别是在软硬岩层交替分布的库岸预测中效果显著。例如,在三峡库区的红层软岩结构研究中,岸坡结构法被用于识别潜在失稳区域,为库区滑坡防治提供了重要参考^[11]。然而,该方法在地质条件简单的库区中应用价值有限,且对地质数据的依赖性和计算复杂度使其适合于专项分析或结合其他方法使用。因此,岸坡结构法更适合作为针对复杂地质条件的专用工具,为库岸的精细化预测和防控设计提供支撑。

2.2.2 数学分析法

数学分析法是一类基于数学模型定量描述水库塌岸范围动态变化的预测方法,其核心在于通过时间函数、几何关系和经验公式,模拟库岸的塌陷过程,推测最终塌岸范围、滑移体积及其变化速率。这类方法依赖于对库岸地质条件、水动力作用和时间演化规律的研究,能够较为准确地刻画库岸的动态调整过程。在众多数学分析法中,康德拉捷夫数学分析法因其对塌岸范围随时间变化的描述能力而广泛应用于研究库岸的动态稳定性。康德拉捷夫数学分析法由康德拉捷夫于1953年提出^[10],是一种针对水库库岸塌陷动态变化的时间函数模型。其核心思想是,库岸的塌岸宽度和塌岸体积在时间上的变化呈现非线性特征,初期变化速率较快,随后逐渐减缓,最终趋于稳定状态。通过建立指数函数模型,该方法能够预测库岸塌岸范围及其动态过程,

塌岸宽度随时间变化的计算公式为

$$l = L(1 - e^{-\frac{v_0 t}{L}}) \quad (2)$$

式中, l 为库岸在任一时间 t 内的塌岸宽度(m); L 为库岸的最终塌岸宽度(m); v_0 为库岸初期的塌岸速率(m/a); t 指水库运行年限(a)。

塌岸体积随时间变化的计算为

$$W_t = W_0(1 - e^{-kt}) \quad (3)$$

式中, W_t 为库岸在任一时间 t 内的塌岸体积(m³); W_0 为库岸的最终塌岸体积(m³); t 为增长系数,反映库岸塌陷速率的时间依赖性。

平均塌岸速率的计算为

$$K = \frac{1}{t} \ln \left(1 - \frac{W_t}{W_0} \right) \quad (4)$$

式中, K 为库岸的平均塌岸速率(m/a); t 指水库运行年限(a)。公式(2)、式(3)和式(4)通过时间函数描述了库岸塌岸宽度、体积及速率的动态变化规律。

康德拉捷夫数学分析法在水库塌岸范围的动态研究中具有重要应用价值,尤其适用于时间过程的研究和长期趋势的预测。然而,该方法对模型参数的准确性要求较高,且忽略了多种动态作用(如波浪、降雨、渗流)对库岸的综合影响,难以适应复杂地质环境。因此,该方法通常与其他方法(如图解法)结合使用,以提高预测的全面性和可靠性。

2.2.3 数值模拟法

随着计算机技术的发展,数值模拟法逐渐成为塌岸预测的重要工具。数值模拟通过建立岸坡的地质模

型, 将水位变化、降雨量、地下水渗透等因素作为输入条件, 模拟库岸在不同条件下的变形和滑移过程。有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)、离散元法(DEM)等数值方法能够预测库岸的塌岸范围、滑移深度和崩塌量^[12,32]。这种方法适用范围广, 适合复杂地质环境下的预测, 但对操作人员的模拟技术要求较高。

2.2.4 其他预测法

近年来, 机器学习技术在库岸塌岸预测中的应用逐渐增多。通过收集历史塌岸数据, 训练神经网络、支持向量机(SVM)等机器学习模型, 可以预测库岸的不稳定区域和发生概率。机器学习预测法能够自动识别塌岸的潜在风险区域, 尤其适用于数据量丰富的库区, 实现快速、动态的塌岸风险评估^[13-14]。

以上预测方法各有优势, 通常根据库区的地质条件、水文环境和预测精度需求进行选择或组合使用。在实际应用中, 合理的预测方法能够为水库管理者提供科学的风险评估依据, 支持后续的监测预警和防控措施制定。各预测方法特点如表3所列。

3 水库塌岸“防”与“治”

水库塌岸的防治已从单一的工程治理, 发展为“专业监测与群测群防结合”“工程措施与生态修复并重”的综合防控体系。未来, 防治措施将更注重生态友好性与可持续性。而监测预警体系的发展方向, 则在于基于“天-空-地-水”立体网络, 利用物联网、大数据和人工智能技术, 实现监测数据的智能融合与预警模型的动态优化, 最终形成精准、高效、主动的风险管控能力。

水库塌岸的防控是一个“防”与“治”相结合的系统工程。“防”指通过监测预警体系提前感知风险、发布警报, “治”则指采取工程或生态措施主动加固与修复岸坡。本章将对此进行系统阐述。

3.1 监测预警体系

监测是预警的基础, 预警是监测的目的。我国已

形成“群专结合”的监测预警体系, 并逐步建立起“天-空-地-水”立体化监测网络。

3.1.1 群测群防体系

群测群防是我国地质灾害防治的特色与基础防线。张惠等^[33]研究指出, 该体系源于1966年邢台地震后的灾害防治实践, 并在地质灾害防治中发挥了不可替代的作用。在三峡库区等地, 通过培训库区居民担任群防员, 定期巡查、上报裂缝、地声、地下水异常等宏观前兆, 实现了对高风险区域的有效覆盖^[34-35]。

3.1.2 专业监测技术

专业监测技术构成了精准预警的核心, 监测内容主要包括变形监测、相关影响因素监测(如水文动力)和宏观前兆检测等。

(1)变形监测。变形监测主要针对地表和地下深部位移进行追踪监测。如图5所示, 地表监测方面, 采用GNSS、毫米雷达波、地面合成孔径雷达(GB-InSAR)、测量机器人等, 实现点、面结合的位移与变形速率监测^[36]。

地下深部位移监测方面, 采用钻孔测斜仪(见图6)、多点位移计、分布式光纤传感(DFOS)等, 精准捕捉滑动面位置与深部变形趋势^[19-37]。

(2)水文动力监测。通过水位计、雨量计(见图6)、渗压计等, 实时监测库水位、降雨量、地下水位及孔隙水压力的变化, 这是分析塌岸触发条件的关键^[30]。

(3)遥感监测。天基星载InSAR技术用于大范围、毫米级形变筛查^[29]。空基无人机航拍与激光雷达(LiDAR)可快速获取高危区高清影像与三维模型, 用于精细化解译与变化检测^[28]。目前遥感监测技术在水库塌岸行业已形成较为成熟的技术体系, 天基全域监测, 空基专业核查, 地面人工复核, 形成技术闭环, 已经在水库塌岸的早期识别中得到具体应用。

3.1.3 “天-空-地-水”立体化监测体系与预警

如图7所示, 张业刚等^[38]提出的“天-空-地-水”立体化监测体系, 通过集成上述多种技术,

表3 水库塌岸主要预测方法对比

Table 3 Comparative analysis of bank collapse prediction methodologies

方法类别	代表方法	原理基础	优点	局限性
图解法	卡丘金法、岸坡结构法	几何学、经验公式	简便、直观、参数需求少	对复杂地质适应性差, 精度有限
数学分析法	康德拉捷夫法	时间函数、统计分析	能描述动态过程	忽略多种动力耦合, 参数敏感
数值模拟法	有限元法(FEM)、有限差分法(FDM)	物理力学、多场耦合	机理清晰, 适用复杂条件	计算成本高, 对参数和建模要求高
其他预测法, 以机器学习法为例	机器学习(如SVM, RF)	统计学、大数据挖掘	强大的非线性拟合能力	依赖大量数据, “黑箱”模型解释性弱

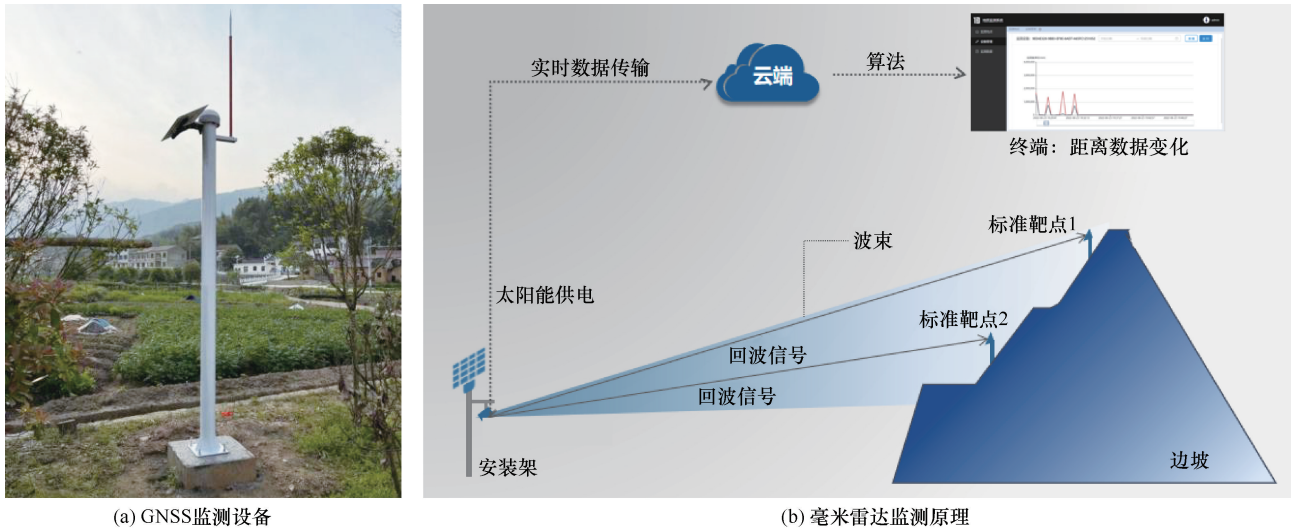


图5 GNSS地表位移监测及毫米雷达波面域监测

Fig. 5 GNSS surface displacement monitoring and millimeter-wave radar planar domain monitoring



图6 地下深部位移监测及水文监测设备

Fig. 6 Deep underground displacement monitoring and hydrological monitoring equipment

实现了多尺度、全要素的数据采集。监测数据最终汇入基于GIS的可视化预警平台,通过设定位移速率、降雨强度、水位变化率等阈值,实现蓝、黄、橙、红四级预警,为风险管控提供直接依据^[39]。

3.2 防治措施

根据其作用原理,水库塌岸防治措施可分为工程治理与生态修复两大类。工程治理措施又可细分为护坡、加固、排水和控导工程。唐辉明^[5]与葛华^[40]三峡库区的研究实践中,强调了根据塌岸模式与风险等级进行针对性防治设计的重要性。

3.2.1 护坡工程

如图8所示,护坡工程旨在保护岸坡表面,抵御水动力冲刷与侵蚀。(1)传统护坡。采用浆砌石、混凝土板、模袋混凝土等刚性结构或石笼、格宾网等柔性结构覆盖坡面。(2)生态护坡。使用生态袋、植生混凝土等材料,或在坡面种植狗牙根、香根草等适生植被^[7],兼具防护与生态功能。

3.2.2 加固工程

旨在提高岸坡岩土体的整体强度和稳定性,主要针对深层失稳。(1)抗滑桩/排桩。穿过潜在滑面,

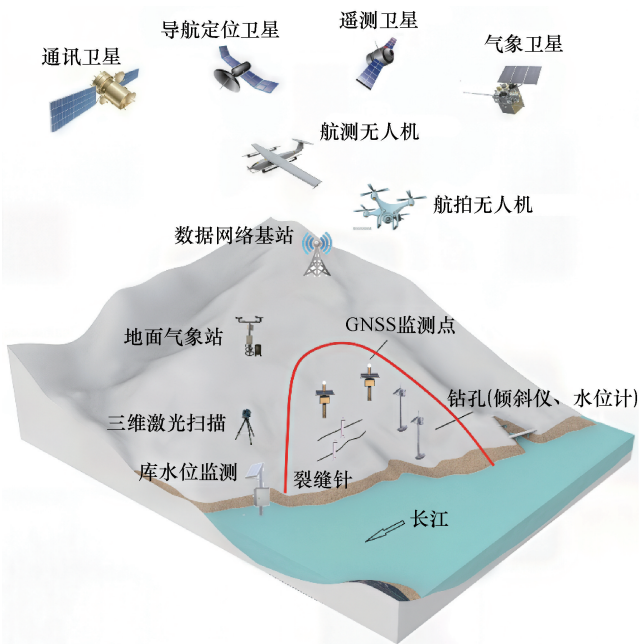


图7 天-空-地-水立体化综合监测体系示意

Fig. 7 Schematic of integrated air-space-ground-water monitoring system

提供抗滑力。(2)锚固工程。采用锚杆(索)将不稳定岩土体锚固于稳定岩层中,常与钢筋混凝土格构联合使用,构成锚索格构。

3.2.3 排水工程

通过降低岸坡内部孔隙水压力来提升稳定性。(1)地表排水。设置截水沟、排水沟,引排地表径流。(2)地下排水。采用仰斜孔、渗水盲沟、排水隧洞乃至全德富等^[41]提出的串联集水井等专利技术,有效疏排地下水。

3.2.4 控导工程

通过调整水流流向,避免水流直接顶冲或淘刷岸坡。常用措施包括丁坝、顺坝及导流堤。汤明高等^[42]在山区河道型水库研究中指出,控导工程对于保护河流入库段岸坡尤为有效^[15]。

4 水库塌岸风险管控

水库塌岸风险管控的本质是一项系统的管理活动。它要求管理者以动态风险评估为科学依据,以“四预”一体化管控流程为核心手段,将先进的技



(a) 奉节县城库岸



(b) 涪陵白涛集镇库岸



(c) 宜昌市夷陵区太平溪镇龙潭坪消落带绿化效果

(d) 乌杨坝河/库岸带绿化效果^[7]

图8 水库岸坡治理工程实例

Fig. 8 Case of reservoir slope treatment projects

术成果转化为清晰的管理指令和高效的组织行动。未来的发展方向是构建更加智能化、集成化的风险管控平台, 实现“四预”流程的自动触发与智能决策辅助, 并不断加强跨部门、跨区域的协同管理能力, 从而全面提升水库库区的综合防灾减灾救灾水平。

水库塌岸风险管控是在勘查、预测、监测与防治基础上, 从被动应对转向主动防控的高级阶段。其核心在于将技术成果转化为管理行动, 通过“四预”(预报、预警、预演、预案)闭环管理体系, 实现风险的动态化解与应急响应的有序高效。本章侧重从管理视角, 探讨该体系的构建与实施。

4.1 风险评估

风险评估是“四预”体系的起点, 其目标是为管理部门的资源优先配置和差异化管控策略提供量化依据^[43]。如图9所示, 该过程通常遵循国际通用的风险评价框架, 综合易发性、危险性和易损性三大要素, 最终通过风险矩阵划定风险等级(极高、高、中、低)^[44-45]。

易损性	危险性			
	极高	高	中	低
极高	极高	极高	高	中
高	极高	高	中	中
中	高	高	中	低
低	高	中	低	低

图9 风险矩阵法

Fig.9 Risk assessment matrix

4.1.1 易发性与危险性评估

管理部门依托专业团队, 利用前文所述的技术手段(如机器学习区划、数值模拟、监测数据分析), 识别出潜在在不稳定岸段(易发性)并评估其在特定触发条件(如暴雨、水位骤降)下失稳的概率与规模(危险性)^[13,47]。

4.1.2 易损性评估

同时, 管理方需协同社会、经济、环境等部门, 对承灾体(人口、财产、关键基础设施、生态功能区)进行普查与价值评估, 量化可能损失^[14,48]。

最终形成的风险区划图是水库管理单位制定国土空间规划、工程防治计划、监测布设方案和应急预案的核心决策底图。

4.2 “四预”管控流程与实践

“四预”^[49]是一个前后衔接、循环递进的管理闭环, 其流程与核心管理任务如图10所示。

4.2.1 预报

预报是在风险评估基础上, 结合实时与预测数

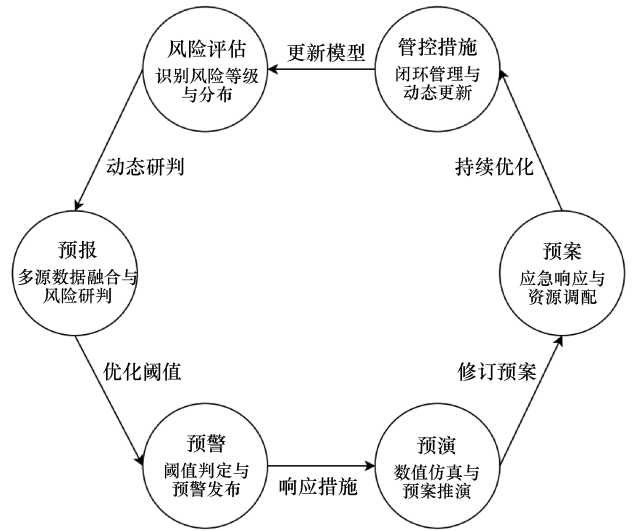


图10 “四预”管控流程示意

Fig.10 Schematic of “four-prevention” control flowchart

据, 对特定时段和区域的塌岸风险进行前瞻性研判和提示。其管理实践的关键在于信息的整合与发布。

(1) 动态风险评估。理部门需建立机制, 融合气象预报、水库调度计划(未来水位过程)、实时监测数据与动态风险评估模型。

(2) 风险信息发布。基于风险评估结果, 发布具有时效性和空间指向性的风险预报提示, 例如“未来24小时, ××库段在橙色风险等级以上”。这为后续预警和预案准备提供了宝贵的提前量。

4.2.2 预警

预警是风险临灾前的紧急响应启动信号。一个有效的预警系统遵循“监测-分析-决策-发布”流程, 并强调“群专结合”。

(1) 预警阈值与等级。管理部门组织专家, 依据技术规程和本地实际, 确定关键参数(如位移速率、累计雨量)的预警阈值, 并对应建立蓝、黄、橙、红四级预警制度^[39]。

(2) 信息发布与响应触发。预警信息由属地防汛抗旱或地质灾害应急指挥部等权威机构统一发布。发布同时, 即自动触发相应级别的应急响应程序, 通知相关责任部门和人员采取行动(如加强巡查、准备转移)。吴爽爽^[50]在岷爬滑坡的研究中, 构建的预测预警模型即服务于此类管理决策。

4.2.3 预演

预演是利用仿真技术在数字空间中模拟塌岸灾害全过程, 其管理目的在于“沙盘推演”, 优化应急预案。

(1) 决策支持。管理人员通过预演, 直观了解不

同情景下(如百年一遇降雨叠加水位快速消落)塌岸的影响范围、淹没深度、传播路径和关键受灾对象。

(2)预案检验与优化。预演结果用于检验现有应急预案的科学性和可行性,辅助管理者修订疏散路线、评估安置点容量、优化救援物资配置,并可用于培训应急指挥人员,提升实战能力。

4.2.4 预案

预案是“四预”体系的最终输出和行动指南,其价值在于将前序环节的成果固化为标准化的应急响应程序^[51]。

(1)分级分类。预案体系通常涵盖综合预案、专项预案和现场处置方案,确保从宏观到微观的全覆盖。

(2)明确响应措施。预案必须明确规定在不同预警级别下,“谁来做、做什么、何时做、如何做”。例如:蓝色预警,群测群防员加密巡查;黄色预警,专业监测队伍进行数据复核与现场核查;橙色预警,乡镇政府组织风险区人员做好转移准备,交通部门对可能受影响道路进行监控;红色预警,政府立即启动应急指挥中心,强制组织危险区人员转移,并实施交通管制、医疗救援等全方位响应。

(3)多部门联动。预案的成功执行依赖于水利、自然资源、应急管理、交通、公安、卫生等部门的高效协同,必须通过预案明确各部门的职责分工与信息共享机制。

5 结论与展望

5.1 结论

本文系统梳理了水库塌岸防治与风险管控领域的研究现状与实践进展。通过对塌岸成因、破坏模式、识别预测方法、防治措施、监测预警体系及风险管控框架的综合分析,得出以下主要结论。

(1)水库塌岸成因复杂,是多场耦合作用的结果。库水位波动是主导外部触发因素,通过物理侵蚀与改变地下水渗流场共同作用;而岸坡的地质结构与岩土体性质是控制其稳定性的内在基础。不同成因组合导致了冲磨蚀型、崩塌型、滑移型及复合型等多样化的破坏模式。

(2)塌岸识别与预测技术呈现经验性与机理模型融合的趋势。“空-天-地”一体化勘查技术为识别提供了丰富数据源;图解法等经验方法因简便实用仍在工程中广泛使用,而数值模拟与机器学习等机理与数据驱动方法,则代表了高精度与智能化预测的发展方向。

(3)防治措施从单一的工程结构向“工程-生态”协同治理转变。护坡、加固、排水与控导工程构成了工程防治的核心,而生态护坡等绿色措施因其环境友好性和可持续性,正日益受到重视并成为重要补充。

(4)监测预警体系已发展为“群专结合、立体协同”的成熟范式。专业化的“天-空-地-水”立体监测网络与广泛覆盖的群测群防体系相结合,并通过大数据平台实现信息集成与智能分析,为风险预警提供了坚实的数据基础。

(5)风险管控初步形成了以“四预”为主线、以风险评估为科学依据的系统性管理框架。该框架将预报、预警、预演、预案串联成一个有机整体,实现了从被动应急向主动防控的战略转变,显著提升了水库库区的综合风险管理能力。

5.2 展望

基于现状分析,笔者认为未来水库塌岸防治与风险管控应在以下方面持续深化研究与探索实践。

(1)深化多场耦合机理研究,破解复杂环境下的失稳预测难题。当前对水位、降雨、渗流、地质构造等多因素动态耦合作用机制的认识仍不充分。未来应针对不同类型的塌岸,加强室内大型物理模型试验与现场原位监测,发展能够真实反映水-岩-土相互作用全过程的多场耦合数学模型,从根本上提升对复杂库岸失稳机理的认知水平和预测能力。

(2)推动预测技术智能化与标准化,提升工程实践的精准度。建议大力发展融合物理机理与数据驱动的“灰箱”模型,兼顾模型的解释性与预测精度。同时,行业主管部门可牵头组织编制针对不同水库类型(如山区河道型、平原湖泊型)和不同地质条件的塌岸预测技术指南或手册,促进先进方法的规范化应用和成果的可比性。

(3)大力发展生态友好的韧性防治技术,服务可持续发展目标。未来应重点研究植被根系固土机理的量化模型、生态护坡材料的耐久性及其与工程结构的协同工作机理。鼓励在适宜岸段优先采用近自然的生态修复技术,并通过全生命周期成本效益分析,推广“绿色+灰色”基础设施有机结合的综合治理模式。

(4)构建智慧管控“大脑”,实现风险“四预”的闭环管理。充分利用数字孪生技术,构建与物理库岸实时交互映照的虚拟水库。在此基础上,集成物联网感知、大数据分析和人工智能决策支持,开发集成化的智慧管控平台,实现从数据感知到预警发布、从预案模拟到应急指挥的自动化、智能化与可视化,最终形成智慧水库安全运行的决策“大脑”。

参考文献 (References):

- [1] 翟盘茂,周佰铨,陈阳,等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 629-635.
ZHAI P M, ZHOU B Q, CHEN Y, et al. Several new understandings in the climate change science[J]. *Climate Change Research*, 2021, 17(6): 629-635.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2021-the Physical Science Basis; Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2023.
- [3] 缪吉伦,肖盛燮,彭凯. 库岸再造机理及塌岸防治研究[J]. 重庆交通大学学报, 2003, 22(2): 124-126.
MIAO J L, XIAO S X, PENG K. Study on mechanism of reservoir bank rebuilding and prevention measures[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong Institute*, 2003, 22(2): 124-126.
- [4] JI F, LIU C J, SHI Y C, et al. Characteristics and parameters of bank collapse in coarse-grained-material reservoirs based on back analysis and long sequence monitoring[J]. *Geomorphology*, 2019, 333: 92-104.
- [5] 唐辉明. 长江三峡工程水库塌岸与工程治理研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 648-656.
TANG H M. Study on reservoir bank collapse and its engineering prevention in the Three Gorges areas, Changjiang river [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 648-656.
- [6] 殷跃平. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 145-154.
YIN Y P. Human-cutting slope structure and failure pattern at the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(2): 145-154.
- [7] 袁兴中,向羚丰,扈玉兴,等. 跨越界面的生态设计: 重庆市三峡库区澎溪河/库岸带生态系统修复[J]. 景观设计学(中英文), 2021, 9(3): 12-27.
YUAN X Z, XIANG L F, HU Y X, et al. Ecological design across interface: Ecosystem restoration of Pengxi River/reservoir in Three Gorges Reservoir area, Chongqing [J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2021, 9(3): 12-27.
- [8] 汤明高,许强,黄润秋. 三峡库区典型塌岸模式研究[J]. 工程地质学报, 2006, 14(2): 172-177.
TANG M G, XU Q, HUANG R Q. Types of typical bank slope collapses on the Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(2): 172-177.
- [9] 彭仕雄. 水库塌岸预测的现状与冲堆平衡法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2332-2340.
PENG S X. State-of-art art of bank collapse predicting of reservoir and a balanced alluvial accumulation approach [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(11): 2332-2340.
- [10] 张梁,王俊杰,阎宗岭. 山区库岸塌岸预测方法综述[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 227-232.
ZHANG L, WANG J J, YAN Z L. Summary on methods to predict soil bank failure of mountain reservoir [J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences)*, 2010, 29(2): 227-232.
- [11] 许强,刘天翔,汤明高,等. 三峡库区塌岸预测新方法: 岸坡结构法[J]. 水文地质工程地质, 2007, 34(3): 110-115.
XU Q, LIU T X, TANG M G, et al. A new method of reservoir bank-collapse prediction in the Three Gorges Reservoir: River Bank Structure Method [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2007, 34(3): 110-115.
- [12] NAGATA N, HOSODA T, MURAMOTO Y. Numerical analysis of river channel processes with bank erosion [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 126(4): 243-252.
- [13] 黄发明. 基于3S和人工智能的滑坡位移预测与易发性评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
HUANG F M. Landslide Displacement Prediction and Susceptibility Assessment Based on 3S and Artificial Intelligence [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [14] 王飞. 澜沧江小湾水库库岸崩滑危险性评价与风险评估[D]. 昆明: 云南大学, 2018.
WANG F. Collapses-Landslides Susceptibility and Risk Assessment in the Riparian Zone of Xiaowan Reservoir, Lancang River [D]. Kunming: Yunnan University, 2018.
- [15] 汤明高,许强. 山区型水库塌岸防护对策研究[J]. 水利水电技术, 2009, 40(2): 78-81.
TANG M G, XU Q. Study on protective measures on bank collapse of reservoir in mountainous area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2009, 40(2): 78-81.
- [16] DARBY S E, RINALDI M, DAPPORTO S. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112 (F3): 2006JF000722.
- [17] DENG S S, XIA J Q, ZHOU M R, et al. Coupled modeling of bank retreat processes in the Upper Jingjiang Reach, China [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(14): 2863-2875.
- [18] ZHAO K, COCO G, GONG Z, et al. A review on bank retreat: Mechanisms, observations, and modeling [J]. *Reviews of Geophysics*, 2022, 60(2): e2021RG000761.
- [19] 张磊. 基于DFOS的库岸边坡变形机理及预测研究[D]. 南京: 南京大学, 2020.
ZHANG L. Research on Deformation Mechanism and Prediction of Reservoir Landslide Based on DFOS Technology [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [20] RENGERS F K, TUCKER G E. The evolution of gully headcut morphology: A case study using terrestrial laser scanning and hydrological monitoring [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2015, 40(10): 1304-1317.
- [21] HOUSER C. Relative importance of vessel-generated and wind waves to salt marsh erosion in a restricted fetch environment [J]. *Journal of Coastal Research*, 2010, 262: 230-240.
- [22] ZHAO K, GONG Z, ZHANG K L, et al. Laboratory experiments of bank collapse: The role of bank height and near-bank water depth [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2020, 125 (5): e2019JF005281.
- [23] FOX G A, WILSON G V. The role of subsurface flow in hillslope and stream bank erosion: A review [J]. *Soil Science Society of America*

- Journal, 2010, 74(3): 717-733.
- [24] NANSON G C, VON KRUSENSTIERNA A, BRYANT E A, et al. Experimental measurements of river-bank erosion caused by boat-generated waves on the Gordon River, Tasmania [J]. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1994, 9(1): 1-14.
- [25] 宋岳, 段世委, 陈书文. 官厅水库塌岸影响因素分析[J]. *水利水电工程设计*, 2004, 23(1): 34-37.
- SONG Y, DUAN S W, CHEN S W. Geological analysis on bank collapsing phenomena of Guanting Reservoir [J]. *Design of Water Resources & Hydroelectric Engineering*, 2004, 23(1): 34-37.
- [26] KIMIAGHALAM N, GOHARROKHI M, CLARK S P, et al. A comprehensive fluvial geomorphology study of riverbank erosion on the Red River in Winnipeg, Manitoba, Canada [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 1488-1498.
- [27] 冯文凯. 库岸公路边坡稳定性风险分析: 以三峡库区渝巴公路岸坡为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- FENG W K. Risk Analysis of Stability of Highway Bank Slopes [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2005.
- [28] 戴可人, 沈月, 吴明堂, 等. 联合 InSAR 与无人机航测的白鹤滩库区蓄水前地质灾害隐患广域识别[J]. *测绘学报*, 2022, 51(10): 2069-2082.
- DAI K R, SHEN Y, WU M T, et al. Identification of potential landslides in Baihetan Dam area before the impoundment by combining InSAR and UAV survey [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2069-2082.
- [29] 邓辉. 高精度卫星遥感技术在地质灾害调查与评价中的应用 [D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- DENG H. Application on Investigation and Evaluation of Geohazard by High-Precision Satellite Remote Sensing Technique [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [30] 蒋宏伟. 万州区滑坡灾害位移与库水位及降雨响应关系研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- JIANG H W. Study on the Response of Landslide Displacements to Reservoir Water Level and Rainfall in Wanzhou District [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [31] 唐辉明. 长江三峡工程水库塌岸研究[J]. *鄂州大学学报*, 2003, 10(4): 1-6.
- TANG H M. Study on reservoir bank collapse and its engineering preference in the Three Gorges Project [J]. *Journal of Ezhou University*, 2003, 10(4): 1-6.
- [32] JIA D D, SHAO X J, WANG H, et al. Three-dimensional modeling of bank erosion and morphological changes in the Shishou bend of the middle Yangtze River [J]. *Advances in Water Resources*, 2010, 33(3): 348-360.
- [33] 张惠, 李英祥, 邹彤彤. 应急治理中的合作生产何以有效?: 以中国灾害群测群防体系的实践为例[J]. *公共行政评论*, 2023, 16(2): 44-62.
- ZHANG H, LI Y X, ZOU T T. What makes co-production in emergency governance Effective? Taking the disaster monitoring and prevention system operated by mass people as an example [J]. *Journal of Public Administration*, 2023, 16(2): 44-62.
- [34] 王朝阳. 滑坡监测预报效果评估方法研究: 以三峡工程库区为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2012.
- WANG C Y. Study on the Effectiveness Evaluation Method of Landslide Monitoring and Forecast [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [35] 文良友, 蔡频. 溪洛渡水电站水库影响区地质灾害的预测预防 [J]. *水力发电*, 2018, 44(1): 94-97.
- WEN L Y, CAI P. Prediction and prevention of geological hazards in reservoir influence area of xiluodu hydropower station [J]. *Water Power*, 2018, 44(1): 94-97.
- [36] 何朝阳. 滑坡实时监测预警系统关键技术及其应用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- HE C Y. Research on Key Technology and Application of Real-Time Monitoring and Early Warning System of Landslide [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.
- [37] 彭纪超, 王松林, 张运勋, 等. 钻孔测斜仪在滑坡变形监测中的应用研究 [J]. *西安科技大学学报*, 2014, 34(4): 440-444.
- PENG J C, WANG S L, ZHANG Y X, et al. Application of borehole inclinometer in landslide deformation monitoring [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2014, 34(4): 440-444.
- [38] 张业刚, 尹莉莉, 黄珊, 等. “天空地”协同技术在三峡库区消落区“四乱”监管中的应用 [J]. *水利信息化*, 2024(2): 53-57.
- ZHANG Y G, YIN L L, HUANG S, et al. Application of “sky, space and ground” collaborative technology in supervision of “four disorders” in the Three Gorges Reservoir area [J]. *Water Resources Informatization*, 2024(2): 53-57.
- [39] 彭凤凌. 基于 JavaWeb 地质灾害群专结合监测预警系统的研制 [D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- PENG F L. Development of a JavaWeb-based Integrated Monitoring and Early Warning System for Geological Disasters [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [40] 葛华. 三峡库区塌岸预测与防治措施研究: 以重庆市万州区为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- GE H. A Study on the Forecasting of Reservoir Bank Collapse and Its Controlling Measures in Three Gorges Areas [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [41] 全德富, 苏爱军. 一种用于滑坡治理的串联集水井的排水装置和方法: CN110397048A [P]. 2019-11-01.
- [42] 汤明高. 山区河道型水库塌岸预测评价方法及防治技术研究: 以三峡水库为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- TANG M G. Research of Forecast, Evaluation and Protective Measures of Bank Failure in Mountain Reservoir [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007.
- [43] 齐信, 唐川, 陈州丰, 等. 地质灾害风险评估研究 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(5): 33-40.
- QI X, TANG C, CHEN Z F, et al. Research of geohazards risk assessment [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(5): 33-40.
- [44] 王涛, 吴树仁, 石菊松. 国际滑坡风险评估与管理指南研究综述 [J]. *地质通报*, 2009, 28(8): 1006-1019.
- WANG T, WU S R, SHI J S. A review of international landslide risk assessment and management guidelines [J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(8): 1006-1019.

- [45] 吴树仁,石菊松,张春山,等. 地质灾害风险评估技术指南初论[J]. 地质通报, 2009, 28(8): 995-1005.
WU S R, SHI J S, ZHANG C S, et al. Preliminary discussion on technical guideline for geohazard risk assessment [J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(8): 995-1005.
- [46] 谢家龙,李远耀,王宁涛,等. 考虑库水位及降雨联合作用的云阳县区域滑坡危险性评价[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(12): 72-81.
XIE J L, LI Y Y, WANG N T, et al. Assessment of regional landslide hazard in Yunyang County considering the combined effect of reservoir water level and rainfall [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(12): 72-81.
- [47] 薛晓辉,周玲,秦爱红. 库岸涉水滑坡危险性现状分析与预测评价[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(5): 169-175.
XUE X H, ZHOU L, QIN A H. Status analysis and prediction assessment on risk of wading landslide on reservoir bank [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(5): 169-175.
- [48] 高玉欣,刘德成,高雪媛. 区县地质灾害风险评价中易损性评价研究[J]. 环境生态学, 2021, 3(5): 49-54.
GAO Y X, LIU D C, GAO X Y. Study on vulnerability assessment of geological hazard risk assessment in districts and counties [J]. Environmental Ecology, 2021, 3(5): 49-54.
- [49] 尚海龙,田苡菲,王志扬,等. 数字孪生流域主要建设需求分析[J]. 中国水利, 2023(3): 54-59.
SHANG H L, TIAN Y F, WANG Z Y, et al. A demand analysis for the construction of digital twin basin [J]. China Water Resources, 2023(3): 54-59.
- [50] 吴爽爽. 水位大变幅条件下呷爬滑坡变形演化特征与预测预警方法研究[D]. 武汉:中国地质大学, 2022.
WU S S. The Deformation Characteristics, the Methods for Prediction and Threshold Warning of the Gapa Landslide under Large Variations in Reservoir Level [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2022.
- [51] 胡健伟,孔祥意,赵兰兰,等. 防洪“四预”基本技术要求解读[J]. 水利信息化, 2022(4): 13-16.
HU J W, KONG X Y, ZHAO L L, et al. Interpretation of basic technical requirements for “Four-Pre” in flood prevention [J]. Water Resources Informatization, 2022(4): 13-16.

(责任编辑 王 璐)