

库区边坡失稳预警指标体系建设研究

何永江

新疆塔里木河流域开都孔雀河水利管理中心希尼尔水库管理站

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6746

[摘要] 当前边坡稳定性监测技术已成行业焦点,对灾害预防亦发挥核心作用,因此科学构建库区边坡失稳预警指标体系对保障水利工程安全运行具有重要意义。预警指标体系作为地质灾害防控的核心环节,将多源监测数据融入风险评估流程,已实现灾害识别的智能化转型。针对指标体系构建过程中的关键难点,在确立预警阈值前,需系统整合地质特征与环境因素,进行动态参数校准,将实时监测信息与历史案例库关联,这样可显著提升预警精准度,优化边坡安全防控机制。本文立足库区边坡地质特性,主要就预警指标层级架构与阈值设定方法展开深入探讨,并提出分级响应机制优化方案,以供实践参考。

[关键词] 边坡稳定性; 预警阈值; 多源监测; 风险评估

中图分类号: U213.1+3 文献标识码: A

Research on Comparison and Optimization of Sedimentation Reservoir Desilting and Dredging Technologies

Yongjiang He

Xinjiang Tarim River Basin Kaidu Peacock River Water Conservancy Management Center Xini'er Reservoir Management Station

[Abstract] Scientifically constructing a warning indicator system for slope instability in reservoir areas is of crucial significance for ensuring the safe operation of hydraulic engineering. Currently, slope stability monitoring technology has become a focal point in the industry and plays a central role in disaster prevention. As the core component of geological disaster prevention and control, the warning indicator system integrates multi-source monitoring data into the risk assessment process, achieving an intelligent transformation in disaster identification. To address the key difficulties in constructing the indicator system, it is necessary to systematically integrate geological characteristics and environmental factors, perform dynamic parameter calibration, and correlate real-time monitoring information with historical case databases before establishing warning thresholds. This can significantly enhance the accuracy of warnings and optimize the slope safety prevention and control mechanism. Based on the geological characteristics of reservoir areas, this paper mainly delves into the hierarchical structure of warning indicators and threshold setting methods, and proposes an optimized hierarchical response mechanism for practical reference.

[Key words] slope stability; early warning threshold; multi-source monitoring; risk assessment

引言

随着水利工程建设规模持续扩大,边坡安全管控需依托科学化技术路径,实现灾害风险的前置化解。基于地质力学理论与大数据分析,实现监测数据的深度挖掘将进一步提升预警时效性。对于库区安全管理,由于水位波动与降雨侵蚀的耦合作用,构建动态预警模型能强化灾害响应能力,同时优化资源配置效率,管理效能的显著提升可增强灾害防控水平,使工程安全获得多维度技术支撑。现阶段,行业规范对边坡预警精度提出更高标准。传统监测手段滞后性突出,致使出现数据孤岛、阈值僵化、

响应迟缓、评估片面等技术瓶颈,引发误报率高、漏报风险、资源浪费等问题,制约防控效能提升。现有预警机制存在动态适应性不足、缺乏环境变量耦合分析、存在阈值设定经验化或参数单一化等缺陷。而指标体系的科学构建可有效破解上述困境。因此,探索多维度、自适应的预警指标优化路径,基于地质环境特征,对提升边坡安全管理水平和降低灾害损失具有重要实践价值。

1 预警指标体系建设的意义

1.1 提升灾害识别精度

边坡稳定性评估需要多维度数据支撑,对监测时效性与分析准确性要求极高。对于复杂地质条件下的风险研判,在传统监测模式中需要人工判读、经验推演和反复验证,同时会消耗大量人力资源。但在智能预警体系支持下,将地质参数与气象数据有机融合,通过算法模型进行动态趋势预测,消除主观判断偏差,进而实现灾害征兆的毫秒级捕捉^[1]。

1.2 优化应急响应效率

在边坡管理流程中,预警决策需要即时响应能力,因此时效性成为关键指标。而在动态指标体系框架下,仅需系统自动触发分级响应机制,其余风险评估与处置方案生成均由智能平台完成,这使预警响应周期与灾害发展速度形成有效匹配,进而避免传统模式中的人为决策延迟。指标体系作为风险管控的中枢神经,其科学性直接决定应急处置的精准程度。

1.3 有助于生态协同保护

目前,多源监测技术已成为边坡管理的基础设施,将预警指标体系引入库区生态评估流程,能实现工程安全与环境保护的平衡,通过阈值联动机制支持灾害防控与生态修复同步推进,保障库区运行中地质环境的可持续性。预警体系作为工程安全与生态平衡的调节器,既是灾害防控与环境保护的衔接点,同时构成可持续发展的核心保障^[2]。

2 预警指标体系建设中的问题

2.1 指标覆盖不全

由于地质条件的区域差异性,现有指标并未充分涵盖特殊岩土体的响应特征,不同库区的水文地质特性差异显著。目前,部分工程对预警指标设置过于简化,忽视降雨入渗对边坡稳定性的非线性影响,简单将预警阈值视为固定参数,影响指标体系的动态适应性,在复杂工况中难以精准响应,严重制约预警技术应用。另外,部分系统的指标构建缺少环境变量耦合分析的理论支撑,使预警模型在应用中缺乏动态校准机制。指标体系的僵化设计理念,会阻碍其在复杂地质环境中的有效实施^[3]。

2.2 阈值设定科学性不足

边坡失稳预警阈值是地质参数与工程特性的量化映射,属于动态平衡过程,其中岩体强度衰减规律、水位变化速率等关键要素,以及降雨强度-历时关系等环境因子,共同构成决策基础。阈值设定想要精准有效,必须融合历史案例与实时监测数据。当前,指标阈值设定普遍依赖经验公式,参数选取不够科学严谨,导致预警灵敏度失衡,影响系统可靠性。工程实践表明,在阈值校准环节,系统往往仅关注位移量值和变形速率,这在多因素耦合场景下又增加误判风险。实际指标应用中,存在阈值静态化的操作误区,对于突发性降雨事件缺乏实时修正机制,没有建立动态反馈通道,参数固化与环境突变,这对边坡失稳预警准确性构成重大挑战。

2.3 系统联动性欠缺

边坡失稳预警指标体系与应急响应存在脱节现象,在边坡失稳预警触发阶段,诸多技术环节尚未贯通,对灾害链式反应的阻断能力和协同处置效率影响显著。对于预警信息传递,需要建

立跨部门联动机制,若响应流程未与指标分级精准匹配,预警信号触发后会出现处置措施与风险等级不匹配的窘境,设备调度、人员疏散等关键环节,会给应急响应带来执行障碍。

3 预警指标体系构建策略

3.1 指标层级的科学划分

指标体系需要结构化的设计逻辑,应以地质风险特征为划分依据,从岩土力学特性和环境驱动因素双维度切入,才能确保预警逻辑严密。在体系构建中,需将库区地质条件细分为基础层、触发层、响应层三级架构,明确各层级核心参数,形成地质本底、环境扰动、变形响应的递进关系,在动态监测过程中实现风险的精准定位,提供更具操作性的预警指引。体系设计应依据库区地质分类标准,适配不同岩土类型的技术需求。例如:西南地区红层边坡预警失效多源于对自身结构面发育规律认知不足,对水岩作用的动态响应机制把握欠缺。因此,在区域性指标构建中,需制定差异化校准策略,客观评估岩体结构、水文地质等要素的耦合效应,做好基础数据与动态监测的关联分析,明确指标参数的时空演变规律,结合历史灾害数据库,保障阈值设定的科学性与适应性。在体系验证阶段,既要采用历史案例回溯检验,也要实施模拟推演测试,这样可以全面验证体系效能,充分满足复杂工况的预警需求^[4]。

3.2 阈值动态校准机制

边坡失稳预警阈值的科学设定需要数据支撑,各环境要素之间存在非线性关联,即便单一参数超标,在综合评估中仍可能属于安全范围。地质参数与水文条件需要建立关联模型,做好历史数据挖掘及实时监测的交叉验证,最大限度避免误判带来的经济损失。若边坡失稳监测数据出现异常波动,就需启动阈值修正程序。系统还应嵌入机器学习模块,定期分析预警效能,优化算法模型,尽可能提升阈值设定的科学性,也要建立反馈校正通道,避免阈值固化导致的预警失效,消除数据噪声干扰,确保响应措施精准匹配。例如:三峡库区边坡预警实践表明,需将水位日变幅与累积位移量联动分析,不仅关注绝对位移值,还应监测变形加速度,同时结合降雨强度指数,若出现短时强降雨或水位骤降的耦合情形,则自动激活阈值修正程序,各监测站点应依据地质特征差异化调整参数^[5]。

3.3 多源数据融合应用

在环境扰动因素影响下,单一监测手段的局限性日益凸显,多源数据融合有助于完善风险评估体系,利用卫星遥感与地面监测的互补优势。地质灾害的预警效能,进一步取决于数据融合的深度,系统可借助InSAR技术、GNSS定位,能实现大范围形变监测的精准化,保证预警模型具有时空连续性,更好地捕捉边坡渐进破坏特征。例如:丹江口库区实践表明,预警体系需融合地质勘察数据,通过三维地质建模和变形趋势预测。对于复杂构造带的边坡,在监测过程中引入的智能算法实现了位移预测与风险分级的同步化,同时优化了应急资源配置。对预警响应机制,数据融合是提升体系智能化水平的关键环节。对指标体系优化,系统应强化多源数据的协同分析,注重环境变量的动态权重分

配。数据融合的深度决定预警体系的成熟度,让边坡管理通过智能分析形成风险预判、分级预警的闭环。让管理部门借助大数据平台、云计算、人工智能技术,实现灾害预警、风险评估、决策支持效果,为工程安全运行奠定技术基础。在智能监测支持下,将多源数据转化为风险图谱,通过算法模型进行灾害链推演,消除信息孤岛,最终构建起立体化预警网络。

3.4 风险分级响应优化

无论边坡失稳的常规监测还是应急场景,风险等级始终是决策核心,管理部门应当建立标准化流程,为预警响应提供制度保障,并对处置措施进行动态优化,对预案执行予以科学引导。针对边坡失稳的不同风险级别响应机制是预警体系的关键,只有实现预警信号与处置措施的精准匹配,才能发挥体系最大效能。系统要构建情景化响应方案,通过历史案例库验证预案的可行性,做好边坡失稳预警信息与应急资源的精准对接,各方实现高效协同,通过标准化流程规范预警响应,保障灾害防控的全链条闭环管理。例如:从长江流域实践看,高风险预警触发后,边坡失稳预警系统自动联动交通管制与疏散方案,这也优化了应急响应时效,从而缩短灾害处置周期。针对阈值动态调整需求,可以建立专家在线会商机制,并启动多部门联合演练,进一步验证响应流程的可靠性,对预警响应各环节进行压力测试。同时,体系构建必须强化制度保障,从技术标准、操作规程、责任体系等维度,加大规范执行力度,确保预警机制得到刚性落实。在运行阶段,管理部门也要完善反馈机制,加快响应流程迭代升级,在实战检验中,进一步优化分级响应的精准度。伴随监测技术的持续进步,边坡失稳预警体系的智能化水平也能够同步提升,灾害防控能力得到显著增强,从而实现工程安全与社会效益的双赢。

3.5 协同管理机制构建

对于边坡失稳预警体系,应当建立跨部门协作框架,在完成数据共享机制构建后,再去整合监测资源的统一调度平台,保障信息实时互通,开展常态化的联合研判会商,保障预警响应的协同一致性,这既提升处置效率,也强化系统韧性。体系要保障预警信息的权威性,加强标准规范和流程监管,进而提升整体防控效能。例如:小浪底库区实践中,通过建立流域管理机构主导的协作机制,气象、水文等多部门数据实现互联互通,基于联合研判模型,达到了预警信息秒级推送目的。当前,应急响应机制也要同步优化,推动了信息共享标准化,处置流程规范化,在联合演练中,提升了部门的协同作战能力。不仅完善了边坡失稳灾害防控的全链条管理,部门的协同能力体现出综合应急管理水平。在体系运行过程中,可以建立联合值班制度和应急指挥平台,做好预警信息的分级推送,进而提升响应速度的可控性,实现处置资源的优化配置。预警体系需融合技术平台与管理制度。管理

机制,体系运行在制度框架内,同时技术保障以数据驱动的决策模式。技术平台与管理制度。机制运行,技术支撑、管理规范与责任落实并重,通过标准化流程或智能决策系统。体系构建并持续优化。如此一来,边坡失稳预警响应效率显著提升,从而构建起高效可靠的灾害防控体系。

3.6 智能评估模型开发

边坡失稳预警体系需依托算法模型的技术支撑,模型构建需从地质机理出发为技术突破方向。传统方法存在局限性,而智能模型可突破经验阈值束缚,实现边坡失稳动态化预警。改变单一参数预警模式,设立多因子耦合评估,预警逻辑非简单阈值比较,而是综合岩体强度、水文条件、环境扰动等要素。整合机器学习算法,组织深度神经网络训练,深度挖掘监测数据关联规律,优化预警判据。深化机理模型与数据模型融合。建立动态评估机制,不再依赖固定阈值,而是依据实时工况、历史数据、环境参数等特征动态调整。系统对监测数据进行智能诊断,为风险评估提供量化依据,模型可适配不同地质条件。将预警逻辑内置于系统核心,实现自动优化。制定边坡失稳评估标准体系,明确模型验证的具体方法,构建科学的评价框架。设置基于实时反馈的动态修正机制,确保边坡失稳预警精度持续提升。

4 结束语

库区边坡安全想要实现本质提升,就必须构建科学的预警体系。预警精度直接决定防控成效,随着监测技术迭代升级,体系构建一定要做好动态优化与迭代完善,逐渐提升指标体系的环境适应性,尽可能降低预警误报漏报现象发生概率,减少应急资源浪费,助力水利工程建设可持续发展。管理部门应通过技术创新、机制优化等手段,为边坡安全防控提供全方位支撑。

【参考文献】

- [1] 蒋一帆,李家科.不同雨强和坡度条件下黄土边坡失稳机理研究[J].中国地质灾害与防治学报,2025,36(06):48-63.
- [2] 余子熙,王鑫尧,王春.非饱和土边坡降雨失稳机制及可靠度分析[J].工程建设,1-8.
- [3] 曹柏慧,何蓉花,王弈宁.InSAR技术在大型露天矿边坡失稳预警中的应用探索[J].科技与创新,2025,(21):230-232.
- [4] 李轲,王波,钱军.极端降雨条件下库区边坡失稳溃崩运动模拟[J].四川水利,2025,46(05):57-61.
- [5] 林春平.露天矿山开采边坡失稳原理与防治技术分析[J].中国金属通报,2025,(10):70-72.

作者简介:

何永江(1978--),男,汉族,四川南充人,本科,工程师,研究方向:水利工程运行。