

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.073



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



三峡库区水位变动影响下危岩稳定性研究进展

吕玉香^{1,2}, 杜春兰², 刘东升¹, 何丙辉³, 张枝华², 曾玉²

(1. 重庆市地质矿产勘查开发局, 重庆 401121; 2. 重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队(重庆市地质灾害防治工程勘查设计院), 重庆 400700; 3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要:三峡库区危岩具有隐蔽性、突发性、破坏力强、危害性大等特点, 库水位周期性变动引起的岩体损伤(劣化)已成为威胁库区危岩长期稳定的关键。近年来, 许多学者针对水位变动影响下岩体损伤致灾机理、危岩失稳模式和稳定性计算方法等开展了大量研究。综合分析研究表明, 针对水-岩作用引起的岩体损伤(劣化)试验方法、测试技术和设备等逐步发展, 水位变动影响下岩体劣化致灾机理和危岩失稳模式研究更加深入, 危岩稳定性计算方法更加科学。未来仍有6个方面的问题需要深入研究: 涉水危岩的成灾机理和破坏特征; 复杂动态力学环境下的室内模拟实验、原位试验、大型结构面探测; 岩体损伤(劣化)规律与空间表达; 复杂动力条件下的危岩失稳模式研究; 累积损伤和长期稳定性研究、涉水危岩的失稳破坏模式; 遥感技术和机器学习方法的应用。

关键词:三峡库区; 水位变动; 岩体损伤; 危岩稳定性; 失稳模式

中图分类号: TU457; P642.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)04-0055-16

State-of-the-art review of dangerous rock stability under influence of water level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area

LYU Yuxiang^{1,2}, DU Chunlan², LIU Dongsheng¹, HE Binghui³, ZHANG Zhihua², ZENG Yu²

(1. Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration, Chongqing 401121, P. R. China; 2. Hydrogeology & Engineering Team 208, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration (Chongqing Reconnaissance and Design Academy of Geological Disasters Prevention and Treatment Engineering), Chongqing 400700, P. R. China; 3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, P. R. China)

Abstract: The dangerous rock in the Three Gorges Reservoir area has the characteristics of concealment, sudden occurrence, strong destructiveness, and great hazard. The deterioration of rock mass caused by periodic fluctuations of reservoir water level has become a critical threat to the long-term stability of these hazardous rocks. In recent years, scholars have conducted extensive research on the damage and disaster mechanisms of rock mass under the influence of water level fluctuations, as well as on instability models of dangerous rocks and stability calculation methods. Comprehensive analysis and research have led to the conclusion that advancements

收稿日期: 2024-05-07

基金项目: 重庆市地质矿产勘查开发局科研项目(DKJ-2023-208-B-004); 重庆市自然科学基金(CSTB2023NSCQ-MSX0068)

作者简介: 吕玉香(1984-), 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事水工环境地质、防灾减灾研究, E-mail: 156052027@qq.com.

Received: 2024-05-07

Foundation items: Research Project of Chongqing Geological and Mineral Exploration and Development Bureau (No. DKJ-2023-208-B-004); Natural Science Foundation of Chongqing (No. CSTB2023NSCQ-MSX0068)

Author brief: LYU Yuxiang(1985-), PhD, senior engineer, main research interests: hydrogeology, engineering geology and environmental geology, disaster prevention and reduction, E-mail: 156052027@qq.com.

in testing methods, techniques, and equipment for assessing rock mass damage caused by water-rock interaction have deepened the understanding of disaster mechanisms related to rock mass deterioration and instability modes of dangerous rocks influenced by water level fluctuations. Furthermore, various calculation methods for evaluating dangerous rock stability have been developed. However, there are still six areas worthy of further study: disaster mechanisms and failure characteristics related to water-related hazardous rocks; laboratory simulation experiments under complex dynamic mechanical environments, in-situ tests, and large-scale structural plane detection; regularity and spatial expression of rock mass damage; studies on instability models for dangerous rocks under complex dynamic conditions; cumulative damage assessment and long-term stability studies; instability failure modes associated with water-related hazardous rocks; as well as application of remote sensing technology and machine learning methods.

Keywords: Three Gorges Reservoir area; water level fluctuations; rock mass damage; dangerous rock stability; instability mode

危岩是指位于陡崖或陡坡上被多组岩体结构面切割且稳定性较差的岩石块体及其组合,其形成、失稳与运动属于斜坡动力地貌过程的主要表现形式^[1]。三峡库区危岩多发育于高陡峡谷区,具有隐蔽性、突发性、破坏力强、危害性大等特点^[1]。特别是三峡工程蓄水运行后,库水位的周期性升降、山体的地质结构、岩体的自重压力以及强降雨的渗流作用导致岸坡消落带岩体强度逐渐减弱,严重影响上部危岩体的稳定性^[2-6],威胁长江航道安全。如 2008 年 11 月 23 日,巫峡龚家坊危岩崩塌,38 万 m³ 崩塌体坠入长江,形成最高 31 m 的涌浪;2022 年 7 月 27 日,瞿塘峡吊嘴危岩发生 30 m³ 崩塌,入江后溅起的水花高达 25 m。据初步统计,目前已查明威胁长江航道的危岩崩塌共 50 处(巫山 35 处、奉节 15 处),初步发现危岩单体 317 块,其中 173 块可能入江形成涌浪,推测黄岩窝 W2 危岩(36 万 m³)最大涌浪高度约 32 m,浪高大于 2 m 的影响范围约 15 km。因此,开展三峡库区水位变动影响下的危岩稳定性研究具有重要的科学和现实意义。

笔者基于文献检索和分析,结合在三峡库区多年的地灾防治工作经验,分析水位变动影响下岩体损伤特征规律和致灾机理,研究水位变动影响下的失稳模式和稳定性计算方法,提出水位变动影响下三峡库区危岩稳定性研究趋势及需要解决的问题。

1 三峡库区危岩分类及稳定性影响因素

1.1 三峡库区的地质背景及孕灾条件

三峡库区是指受长江三峡工程蓄水淹没的地区(图 1),涉及 2 座城市、11 座县城和 116 座场镇,目前人口超 2 200 万。三峡库区为亚热带季风气候,年平均气温 14.0~18.8℃,年平均日照 1 200~1 600 h,多年平均降雨量 1 000~1 200 mm,时空分布不均,

约年降雨总量的 70% 集中在 5 月—9 月,且多为大雨或暴雨,库区崩塌、滑坡灾害的发生与降雨有同步性,也主要集中在 5 月—9 月。库区地处中国地形第二阶梯和第三阶梯的过渡带,其中江津至奉节段为低山丘陵平行岭谷地貌,奉节至宜昌段为中山峡谷地貌。构造上,三峡库区地处大巴山断褶带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造单元的交汇处,主要地层岩性为三叠系至侏罗系碳酸盐岩、砂泥岩,地质环境脆弱。2008 年三峡库区试验性蓄水后,周期性水位涨落与沿江城镇就地后靠迁建等人为因素叠加,强烈改变了库区地质环境,地质灾害防治面临新考验。

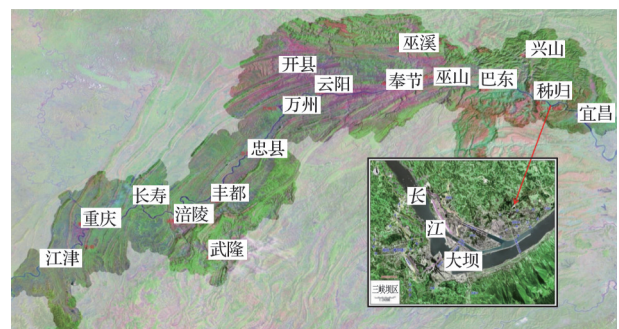


图 1 三峡库区位置

Fig. 1 Location of the Three Gorges Reservoir area

1.2 三峡库区危岩分类

危岩分类研究始于 20 世纪 80 年代,学者主要基于各自研究领域和失稳模式提出了不同的危岩分类方案,多数学者按危岩的破坏模式对其进行分类。胡厚田^[7]将危岩分为倾倒式、滑移式、错断式、鼓胀式、拉裂式 6 种类型。重庆地方标准《地质灾害防治工程勘察规范》(DB50/143—2003)将危岩类型简化为倾倒式、滑移式、坠落式。原国土资源部《滑坡防治工程勘察规范》(DZ/T 0218—2006)采用了胡

厚田^[7]的分类方案。刘卫华^[8]将危岩类型划分为倾倒式、楔块式、贴坡式、软弱基座式、悬挂式5种。徐刚等^[9]根据危岩破坏时的初始运动方式,将危岩分为倾倒式、滑移式、错断式、悬挑式、坐落式和坠落式等6类,并根据危岩结构面组合特征及影响因素的差异,进一步细分为11个亚类。另外,根据形态特征的不同,Wang等^[10]将危岩分为悬臂式、立柱式危岩。

基于对破坏模式的不同认识,陈洪凯等^[11-12]将三峡库区危岩分为滑塌式、倾倒式、坠落式危岩,或拉剪倾倒型、压剪滑动型、拉裂-压剪坠落型、拉裂坠落型。根据地质结构、地形地貌等组合特征,学者认为,三峡库区峡谷区塔柱状危岩^[13]、板状危岩^[14]较典型,灰岩地区危岩可称为类砌体型危岩^[15],红层地区近水平砂-泥岩互层危岩较为典型^[16]。

张枝华等^[17]根据三峡库区岸坡主要劣化灾变模式将碳酸盐岩岸坡危岩分为倾倒式、溃屈式、滑移式危岩3个大类,图2为典型的塔柱状危岩基座溃屈-倾倒式崩塌模式。在此基础上,提出巫峡段3种典型岩体劣化致灾危岩:倾倒溃屈型——黄岩窝危岩,剪切溃屈型——猴儿岩危岩,塔柱状压裂溃屈型——巫峡箭穿洞3号危岩。

1.3 三峡库区危岩稳定性影响因素

学者对三峡工程岸坡稳定性做了大量的研究与探讨,从坡体岩性、结构、水位变动、岩体劣化、降雨入渗等方面分析了岸坡稳定性的影响因素^[13,18-21]。周云涛等^[16]基于岩腔平行后退理论提出了岩腔泥岩后退的剪切破坏和拉破坏力学机制。刘新荣等^[21]从地质因素和环境因素两方面对库岸稳定性影响因素进行分析总结,归纳了5类易引发消落带变形破坏的致灾岩组,总结了岩质岸坡存在的3种岩体结构变形特征。许彬^[22]通过室内试验、理论分析及数值模拟发现,各因素对消落带稳定性影响的敏感性依次为动荷载幅值>消落带岩体劣化区范围>坡

角>坡高>动荷载频率>消落带水位高度>消落带岩体劣化区形态>层面倾角>层面厚度。上述研究为库区危岩稳定性分析奠定了理论基础。

危岩的形成通常是多因子叠加作用的结果,因此难以预测^[23-24]。殷跃平等^[13]提出三峡库区危岩体失稳的主要影响因素包括地质因素、地质构造因素、库水位变动、大气降水、植物根劈作用、温差作用等。董好刚等^[25]基于调查资料将三峡库区云阳—江津段的危岩稳定性因素分为地形地貌、地层岩性、岩体结构、危岩体规模、水文地质、风化作用、土地利用类型7个方面。Wen等^[26]通过递归特征消元法选出影响危岩崩塌的主要因子,排名前五的是海拔、与房屋的距离、多年平均降水量、与河流的距离、水文地质。Sang等^[27]基于InSAR遥感数据和机器学习方法系统分析了地形、气象、地震等多因素对三峡库区边坡变形的复合影响,发现地震和降水对地表变形的贡献最大。贺凯等^[28]认为,节理裂隙的切割、软硬岩层的差异风化、基底(潜在)软弱层以及外力作用是导致塔柱状岩体崩塌失稳的主要因素。王健等^[29]提出,三峡库区巫峡段黄南背危岩体失稳的3个主要因素是底部岩体受压出现压溃破坏、底部破碎岩体受水位波动影响劣化加剧、基座角砾岩体遇水水解。陈小婷等^[30]认为,库水位变动和岩溶作用是造成三峡库区岩溶库岸危岩失稳的主要原因。也有学者认为,由于地表水和斜坡内地下水的周期性波动,裂隙碳酸盐岩体周期性处于地表水冲蚀、酸性雨水溶蚀、温差张裂和应力疲劳等状态下,造成水位变动带岩体劣化^[4,31],导致岩体质量和物理力学性质下降,裂隙岩体劣化加速了如箭穿洞、板壁岩等新生地质灾害的形成^[32]。库水位升降影响危岩稳定性的原因主要包括:岸坡部分淹没引起的浮力作用、库水位骤降产生的渗透水压力、坡脚侵蚀崩塌造成岸坡抵抗荷重减少以及库水位升降作用引起的岸坡岩土体强度参数的变化。

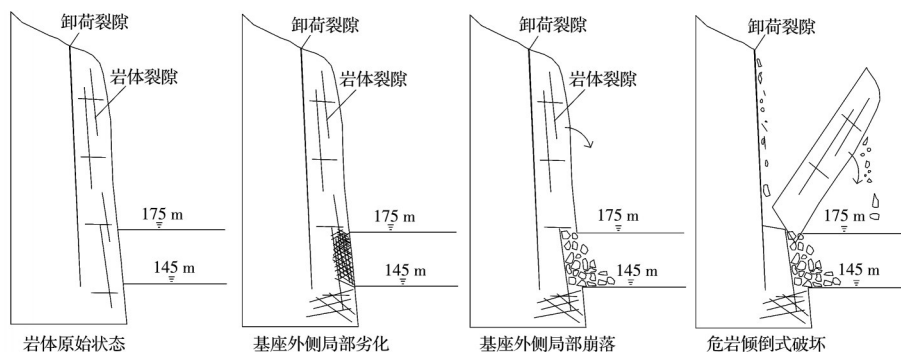


图2 塔柱状危岩基座的溃屈-倾倒式崩塌^[16]

Fig. 2 Buckling-toppling collapse of tower-shaped dangerous rock base

三峡库区危岩稳定性影响因素与危岩的成因机理密切相关,影响三峡库区危岩稳定的因素可归结为内在因素和外部因素。内在因素可分为几何因素和物理因素,几何因素包括地形地貌、节理裂隙尺寸等,物理因素包括岩性、岩体材料基本物理指标和岩体强度参数等;外部因素则为雨水冲刷、库水位升降、温差改变、人为工程活动等。外部因素通过对内部因素的改变来影响危岩的稳定性。与非涉水危岩相比,由于水位变动引起的岩体损伤(劣化)是影响库区涉水危岩体长期稳定的关键。

2 三峡库区水位变动影响下的危岩稳定性研究现状

库水位变动是影响危岩稳定性的外部因素。

在水位变动影响下,库岸岩体岩性、基本物理指标和岩体强度下降(弱化),称为岩体损伤(劣化)。随着岩体劣化逐步发展,不同工程地质条件下的危岩体以多种形式失稳。

2.1 水位变动影响下的岩体损伤(劣化)研究

在自然条件下,由于腐蚀或风化造成的基座岩体破坏和内部控制性结构面贯通是一个漫长的过程^[33-34]。三峡水库蓄水至 175 m 后,形成了 145~175 m 消落带,库水位升降对消落带岩体造成的浸泡、震荡、溶蚀及冲刷等导致库岸岩体产生明显损伤劣化,削弱岸坡的稳定性^[35],进一步诱发地质灾害^[36-37]。目前,对库水位变动致使消落带岩体损伤劣化方面的研究已取得大量研究成果,见表 1。

表 1 水位变动影响下的岩体损伤劣化研究

Table 1 Research on rock mass damage and deterioration under the influence of water level fluctuations

文献	方法	结果/结论
黄波林等 ^[4]	野外调查、原位测试和室内试验	浸泡-风干循环后的灰岩样品力学参数平均每循环下降率约 0.7%;地表破碎灰岩岩体声波年下降率为 11.23%;岩溶岸坡声波年下降率为 10%~60%
Wang 等 ^[34]	水力耦合损伤模型	岩体损伤会放大基底岩体所经历的有效应力,并加速危岩失稳
Liu 等 ^[35]	室内干湿循环实验	干湿循环降低了颗粒接触网络的微观结构强度;泥质砂岩强度降低
黄波林等 ^[5]	野外调查、室内试验	岩体劣化导致溶蚀岩体结构降级,岸坡局部持续形变;岩体劣化、岩溶水动力作用、岸坡形变相互促进,推动了岸坡灾变发生
Yuan 等 ^[36]	室内干湿循环实验	岩体强度参数随干湿循环次数的增加而减小;干湿对参数的劣化影响:拟合抗压强度>内聚力>材料常数>内摩擦角
邓华锋等 ^[37]	室内干湿循环实验	干湿循环作用过程中土体抗剪强度参数劣化幅度明显;干湿循环作用下土样内部的微观裂纹、裂隙反复张开闭合,逐渐发育汇集;岸坡消落带区局部安全系数劣化趋势与消落带土体抗剪强度参数劣化规律一致
Lin 等 ^[38]	室内干湿循环实验	干湿循环使砂岩软化,裂隙增加
刘新荣等 ^[39]	室内干湿循环实验	砂岩的抗剪强度随“饱和-风干”水-岩循环作用的增加而降低
刘新荣等 ^[40]	室内实验、数值模拟	水-岩循环作用导致砂岩黏聚力和内摩擦角不断下降,库区消落带岩土材料性质不断劣化
傅晏 ^[41]	室内干湿循环实验	水-岩相互作用初期至后期砂岩劣化过程具有渐进性和非均匀性
Estabragh 等 ^[42]	室内干湿循环实验	干湿循环的过程伴随着累积性的发展
张梁 ^[43]	室内干湿循环实验、电镜扫描以及能谱分析	砂岩颗粒之间黏结的断裂数量随干湿循环次数的增加而增加,裂纹也有相同的趋势
王子娟 ^[44]	室内试验、理论分析及数值计算	砂岩各力学参数受干湿循环作用的影响强弱不一,岩样的抵抗拉伸性能对水的敏感性大于抗压性能
刘广宁等 ^[56]	原位声波测试和室内干湿循环、耐崩解实验	长期处于干湿循环条件下,岩体物理力学性质呈降低趋势,不同岩性劣化程度不同,岩体总体向破碎、解体的趋势发展,并且具有渐进性和累积性
胡明军等 ^[47]	原位试验与室内干湿循环实验	岩体单一年度强度弱化率为 0.3%~25.9%;在 50 次干湿循环后岩体强度弱化率为 16.4%~23.9%
柳万里等 ^[48]	单轴压缩试验	饱水作用使巴东组泥岩特征强度降低、脆性变形减弱、塑性变形增强
Yan 等 ^[49]	高精度三维激光扫描点云技术	岩体劣化点云响应特征可划分为裂隙显现-扩展、崩塌-块体坠落和滑移-旋转 3 种类型
潘永亮等 ^[50]	MTS 三轴压缩声发射试验	随着水压力的增大,软岩的起裂应力、损伤应力、峰值应力、残余应力以及弹性模量整体均呈现出减小的趋势
闫国强等 ^[51]	物理模拟试验	蓄水后,随着劣化的进行,岸坡变形加剧直至溃屈破坏,岩体劣化缩短了劣化-致溃屈失稳进程
薛晶晶等 ^[52]	室内超声波测试,单轴抗压试验	I 号砂岩遇水后,波速与强度均相应大幅度衰减,多次干湿循环后,波速与强度趋于平稳

续表

文献	方法	结果/结论
李克钢等 ^[53]	单轴压缩试验	随着干湿循环次数的增加,砂岩呈现从脆性到延性转化的破坏规律
Wang等 ^[54]	Duncan Change本构模型	获得了砂岩在干湿循环作用下的单轴和三轴压缩应力-应变曲线
Luo等 ^[55]	室内试验	前3次水-岩循环作用中,岩石的长期强度显著降低;6次水-岩循环作用后,岩石的长期强度降低率趋于稳定,砂岩致密的微观结构转变为疏松多孔状态
邓华锋等 ^[56]	室内干湿循环实验	水压力的反复升降变化和浸泡-风干循环作用对岩样造成了不可逆的渐进累积损伤,微观上岩样微裂纹、裂隙、孔隙逐步发育、汇集,宏观上孔隙率增加、三轴卸荷强度、抗剪强度劣化
Fang等 ^[57]	渗流试验、扫描、化学试验	导水率与干湿循环次数呈正相关。随着干湿循环次数的增加,分形维数下降;水与岩石的相互作用改变了砂岩的离子浓度、微观结构和渗透率
Liang等 ^[58]	室内干湿循环实验	得到了砂岩在酸碱环境中干湿循环降解的断裂准则;II型断裂韧性的退化程度比I型低,砂岩的I型断裂韧性退化规律与II型大致一致
殷跃平等 ^[3]	原位跨孔声波测试、井下电视、稳定性分析	三轴受压应力状态能提高岩体强度,且明显抑制岩体劣化;表层结构面的劣化敏感性高于深层
Jiang等 ^[59]	室内干湿循环实验	在水-岩作用过程中,层状砂岩的变形和强度特性的退化趋势非常明显,水在层状砂岩的软化和弱化过程中起重要作用,层状砂岩物理力学性能的退化归因于微观结构的变化
黄波林等 ^[60]	数值模拟	层面与大型结构面会强烈改变三维裂隙岩体的连通性,在岩体劣化探测方面更应注重大型结构面的发育
王永新 ^[61]	室内实验、数值模拟	库水水-岩循环作用造成的岸坡破坏是一个损伤累积并扩大发展、最后破坏的渐变过程
张景昱等 ^[62]	数值模拟	库水位变化对库岸边坡稳定性影响明显;在高水位运行期间安全系数骤减后迅速恢复
Wang等 ^[63]	室内干湿循环实验、离散元分析	分析了岸坡稳定性随干湿循环次数的变化规律,认为岩体劣化不可逆
黄叶宁等 ^[64]	考虑水压力升降变化和浸泡-风干循环过程的水-岩作用试验	水-岩作用下,节理岩体抗剪强度呈先陡后缓的劣化趋势;节理面微观结构损伤劣化显著;节理面粗糙度系数和岩壁强度降低,节理面上下盘吻合度降低,进而导致水-岩作用下节理岩体剪切性能特性逐渐劣化
Liang等 ^[65]	三轴试验	长期饱和状态会增加岩石的软化,从而增加变形并降低强度;水,尤其是水分的不均匀分布,促进了岩石表面附近拉伸裂纹的扩展
Huang等 ^[66]	室内试验、数值模拟	岩体内的裂缝和破坏区将沿着现有的垂直裂缝扩展并延伸到基趾,基岩体发生破裂,最终导致整个岩体破坏
邓成进等 ^[67]	室内实验、数值模拟	水位升降过程对变幅区岩体质量的劣化作用较为明显,会导致库岸边坡破坏的时间大大缩短

2.1.1 试验方法

关于水位变动对岩体损伤影响的研究,早期以室内干湿循环试验为主^[36-40],辅以电镜扫描、能谱分析、数值分析等手段^[41-42],分析岩体物理力学性质、岩体结构等随浸泡时间和频次的变化。干湿循环试验主要关注水-岩作用带来的岩土体物理力学性能变化,简单易行,但未考虑水压力的影响。随着研究的深入,逐步考虑库水压力变化以及应力和水-岩耦合作用^[43],增加了原位声波测试、矿物成分分析、耐崩解试验^[44],原位岩体回弹强度测试、点荷载试验^[45],单轴、三轴压缩试验^[46-47],物理模型试验^[48]等试验手段。通过这些试验手段可以更深入了解岩体在水力作用下的微裂纹扩容及损伤破裂等细观力学行为,更全面地表达水-岩耦合作用岩体劣化特征和过程,为科学分析消落带岩体破坏机理提供更好的支撑。另外,Yan等^[49]利用高精度三维激光扫描点云技术从宏观/微观尺度揭示了岩体劣化规律,认为岩体劣化点云响应特征可划分为裂隙显现-扩展、崩塌-块体坠落和滑移-旋转3种类型。

2.1.2 岩体损伤(劣化)特征和规律

砂岩的劣化主要表现为岩样微裂纹、裂隙、孔隙逐步发育、汇集,孔隙率增加,抗剪强度下降^[50-59]。柳万里等^[48]发现,饱水作用会使巴东组泥岩特征强度降低、脆性变形减弱、塑性变形增强。潘永亮等^[50]研究表明,随着水压力的增大,软岩(侏罗系泥质粉砂岩)的起裂应力、损伤应力、峰值应力、残余应力以及弹性模量整体均呈减小趋势。碳酸盐岩体劣化主要表现为溶蚀加重、强度弱化、力学参数变化。黄波林等^[31]研究表明,灰岩样品力学参数平均每循环下降率约0.7%,地表破碎灰岩岩体声波年下降率为11.23%,岩溶岸坡声波年下降率为10%~60%。

岩体劣化除了岩体(块)强度下降外,还有结构面的劣化。结构面的劣化与其分布、岩层埋深密切相关,具有一定的不均一性。黄波林等^[4]利用原位探测技术分析了三峡库区消落带岩溶岩体劣化的空间分布特征,认为劣化区的分布与有水力联系的裂隙网络分布有关。结构面由于分布不均,密集分布可能导致前期岩体劣化加速约7~45倍,后期劣

化速率逐渐放缓^[3, 14]。胡明军等^[47]发现,原位岩体一年的强度弱化率为0.3%~25.9%,岩体强度弱化主要沿结构面产生,50次干湿循环后岩石强度弱化率为16.4%~23.9%,100次干湿循环后CaO的溶失量为0.5%~5.6%,岩块表面水蚀痕迹加重、溶孔变大、裂纹延伸。Jiang等^[59]发现,水在层状砂岩的软化和弱化过程中起重要作用,层状砂岩物理力学性能的退化归因于微观结构的变化。另外,黄波林等^[60]提出了基于裂隙网络的连通性和水力边界条件的劣化岩体空间分析方法,认为层面与大型结构面会强烈改变三维裂隙岩体的连通性,在岩体劣化探测方面应更注重大型结构面的发育。同时,研究发现岩体损伤劣化过程具有渐进性、非均匀性、累积性和不可逆性^[61-64]。

2.1.3 岩体损伤(劣化)致灾机理

在研究岩体劣化特征和趋势的基础上,学者通过室内试验、数值模拟等手段进一步揭示了水位变动导致的岩体劣化对岸坡稳定的影响机制。Liang等^[65]通过三轴实验全面研究了含水率和水分分布等对砂岩的影响,认为长期饱和状态会增加岩石的软化,从而增加变形并降低强度。水,尤其是水分的不均匀分布,促进了岩石表面附近拉伸裂纹的扩展。Huang等^[66]以箭穿洞危岩为例,分析了应力渗流下改进的时变裂纹扩展模式与结构岩体破坏模式的耦合效应,结果表明,岩体内的裂缝和破坏区将沿着现有垂直裂缝扩展并延伸到基趾,基岩体发生破裂,最终导致整个岩体破坏。黄波林等^[5]发现,岩体劣化导致溶蚀岩体结构降级,岸坡局部持续形变,岩体劣化、岩溶水动力作用、岸坡形变相互促进,推动了岸坡灾变的发生。Wang等^[34]认为水位变动引起的岩体损伤会放大基底岩体所经历的有效应力,并加速危岩失稳。殷跃平等^[13]基于试验和调查提出,库区涉水厚层危岩体的演化过程分为基座初始损伤区的形成、渐进式累积变形和突发性破坏3个阶段,其中库区周期性水位升降导致涉水危岩体基座初始损伤区的形成。总之,与非涉水危岩体相比,水位变动引起的岩体劣化缩短了涉水危岩体劣化-致溃屈失稳进程^[49, 67]。

2.1.4 小结

已有研究主要围绕库水位变动引起的岩体损伤(劣化)试验方法、岩体损伤(劣化)特征和规律、岩体损伤(劣化)致灾机理开展研究,试验方法逐步由室内干湿循环试验扩展到原位声波测试、矿物成分分析、耐崩解试验、原位岩体回弹强度测试、点荷载试验、单轴及三轴压缩试验、物理模型试验等。

岩体劣化主要表现在岩体强度和结构面的劣化,劣化过程具有渐进性、非均匀性、累积性和不可逆性。库水位变化导致消落带岩体和结构面损伤,引起库岸岩体强度劣化,导致库岸垮塌,形成岩体凹腔或直接软化消落带以上岩体基座,最终形成库岸危岩或导致(加速)库岸岩体(危岩体)失稳,发生地质灾害。上述研究成果为水位变动影响下三峡库区危岩稳定性分析与评价奠定了理论基础。然而,目前在水位变化对涉水岩体及结构面的损伤机理、岩体劣化对岸坡长期稳定性影响机制方面的认识尚不够深入,且未形成完善的研究体系,未来仍需持续深入研究。

2.2 水位变动影响下危岩的失稳模式

近年来,随着三峡库区龚家坊等典型地质灾害的发生,学者们开始深入研究三峡水库水位变动影响下的危岩稳定性问题。研究发现,库水位升降引起的岩体劣化是导致危岩失稳的关键因素,危岩破坏模式主要有基座压裂滑移、倾倒破坏、滑移-剪切复合破坏、倾倒-滑移复合破坏、旋转滑移等模式,见表2。

2.2.1 水位变动影响下典型的危岩失稳模式

贺凯等^[28]根据柱状危岩体的应力分布情况将其分为整体倾倒、剪切滑移与压裂溃屈3种破坏类型。Huang等^[66]、张全等^[68]通过物理模型试验发现,水位变动加速了柱状危岩体基座岩体劣化,增加了其压溃式崩塌的危险性。张枝华等^[69]通过干湿循环试验、监测、稳定性计算发现,库水周期性变化造成了典型柱状危岩体(箭穿洞危岩)基座岩体的劣化,加速了危岩体的破坏过程。王文沛等^[70]、陈小婷等^[71]通过数值分析预测箭穿洞危岩的破坏模式为基座压裂滑移。Huang等^[72]通过模拟研究发现,箭穿洞危岩的破坏模式为崩塌破坏。实际上,库区危岩体的稳定性往往受到水动力、荷载、坡体应力、降雨、植物根劈作用等多种因素的影响,导致危岩失稳模式较为复杂。殷跃平等^[13]在箭穿洞危岩体空间形态、近5a专业监测变形数据和基座岩体干湿循环强度参数劣化规律的基础上,通过数值模型对其进行应力-应变和变形破坏趋势预测分析,提出箭穿洞危岩的破坏模式可能为滑移、压溃、或滑移+压溃。

库区其他典型危岩的破坏模式也是如此,多为复合破坏。王健等^[29]采用原位试验、数值模拟方法预测黄南背西危岩体的失稳模式为倾倒、滑移和坠落复合型破坏。陈小婷等^[73]、胡刘洋等^[74]通过数值模拟和抗剪强度折减法计算判断冠木岭危岩破坏模式为倾倒滑移或基座压裂滑移。陈云飞等^[75]研究

表2 水位变动影响下危岩的失稳模式

Table 2 Instability modes of dangerous rocks under the influence of water level fluctuations

文献	研究对象	研究方法	失稳模式
贺凯等 ^[28]	柱状危岩体	综合研究	整体倾倒、剪切滑移与压裂溃屈
Huang等 ^[66] 、 张全等 ^[68]	典型柱状危岩体	物理模型试验	压溃
张枝华等 ^[69]	箭穿洞危岩	干湿循环试验、监测、稳定性计算	基座压裂滑移或倾倒破坏
王文沛等 ^[70]	箭穿洞危岩	数值模拟(FLAC2D)	基座压裂滑移
陈小婷等 ^[71]	箭穿洞危岩	数值分析(FEM/DEM)	基座压裂
殷跃平等 ^[13]	箭穿洞危岩	专业监测、数值模拟、静力学定量计算	滑移、压溃或滑移+压溃
Huang等 ^[72]	箭穿洞危岩	监测,稳定性计算	崩塌破坏
王健等 ^[29]	黄南背危岩	原位试验、数值模拟	倾倒、滑移和坠落复合
陈小婷等 ^[73]	冠木岭危岩	数值分析(UDEC)	倾倒、压溃、崩塌复合
胡刘洋等 ^[74]	冠木岭危岩	抗剪强度折减法	倾倒滑移或基座压裂座滑
陈云飞等 ^[75]	板壁岩危岩	抗剪强度折减法	滑移-剪切复合
胡雷等 ^[14]	黄岩窝危岩	抗剪强度折减法	倾倒-滑移复合
殷跃平等 ^[13]	三峡库区	综合研究	红层地区的顺层岩体劣化致滑移失稳、泥岩岸坡风化崩解后退、差异风化致岩体崩塌失稳;碳酸盐岩地区的类土质岸坡劣化雪崩式破坏、顺层岸坡劣化滑移式破坏、塔柱状岸坡劣化溃屈式破坏、板状岸坡劣化崩塌式破坏
刘新荣等 ^[2]	巫山段	数值分析(UDEC)	滑移、倾倒、旋转滑移
张枝华等 ^[17]	重庆段	专业监测、原位试验、数值模拟等	碳酸盐岩逆向层状劣化岸坡溃屈式垮塌,顺向层状劣化岸坡沿层面斜向或倾倒式崩塌,平缓层状柱状岸坡压裂溃屈式崩塌、板状岸坡滑移或倾倒式崩塌;红层碎屑岩劣化岸坡差异风化致岩体崩塌失稳

认为,随着岩体不断劣化,板壁岩危岩体基座破碎带不断被压剪破坏,后期顶部主控裂缝与底部基座破碎带逐步形成相互贯通的滑移面,形成滑移-剪切破坏。胡雷等^[14]通过数值分析发现,黄岩窝危岩体的破坏模式为顶部出现岩块倾倒崩落和底部软弱区贯通之后发生滑移的复合式破坏。

2.2.2 水位变动影响下危岩失稳模式分类

殷跃平等^[13]结合对三峡库区干流消落带劣化调查和深入研究,将三峡库区岩体劣化致灾分为7种类型,即红层地区的顺层岩体劣化致滑移失稳、泥岩岸坡风化崩解后退、差异风化致岩体崩塌失稳,碳酸盐岩地区的类土质岸坡劣化雪崩式破坏、顺层岸坡劣化滑移式破坏、塔柱状岸坡劣化溃屈式破坏、板状岸坡劣化崩塌式破坏。张枝华等^[17]根据三峡库区重庆段沿岸工程地质条件,将水位变动影响下岸坡危岩失稳模式分为:碳酸盐岩逆向层状劣化岸坡溃屈式垮塌,碳酸盐岩顺向层状劣化岸坡沿层面斜向或倾倒式崩塌,碳酸盐岩平缓层状柱状岸坡压裂溃屈式崩塌、板状岸坡滑移或倾倒式崩塌,红层碎屑岩劣化岸坡差异风化致岩体崩塌失稳7种模式。三峡库区巫山段是水位变动诱发危岩灾害的典型区域。刘新荣等^[2]将三峡库区巫山段的近水平层状危岩岸坡分为紧密层状、松散碎裂状、溶蚀凹腔状、含挤压碎裂带等典型消落带劣化区形态,其相应的失稳模式分别为滑移破坏、向坡外倾倒破

坏、倾倒破坏以及沿破碎带切割面的旋转滑移破坏。

2.2.3 小结

前人通过干湿循环试验、专业监测、物理模型试验、原位试验、数值模拟等方法研究了三峡库区危岩失稳模式,认为水位变动影响下多数危岩多为倾倒、滑移、压溃、坠落等复合破坏模式,其中典型塔柱状危岩以压裂溃屈破坏为主,板状危岩以倾倒或滑移破坏为主。与非涉水危岩相比,红层地区的涉水危岩有顺层岩体劣化致滑移失稳、泥岩岸坡风化崩解后退、差异风化岩体崩塌失稳等特殊失稳模式,碳酸盐岩地区有类土质岸坡劣化雪崩式破坏、顺层岸坡劣化滑移式破坏、塔柱状岸坡劣化溃屈式破坏、板状岸坡劣化崩塌式破坏等特殊形式。上述破坏模式主要取决于岩体形态、地质结构、地层组合、岩体强度、人类工程活动等,但目前学界对复杂动力条件下涉水危岩破坏模式的构建、劣化空间表达等研究还不够深入,未来需要加强。

2.3 考虑水位变动影响的危岩稳定性计算方法

关于危岩稳定性计算方法已有丰富的研究成果,常用的稳定性计算方法主要基于极限平衡理论^[10]、断裂力学理论^[76]、突变理论^[77]、三维成像技术^[78]、振动力学理论^[79]、能量理论^[80]等。总体而言,危岩稳定性计算的发展经历了材料力学法→断裂力学分析的过程,具体涉及力学解析法、图解法、

数值分析法。此外,部分学者对危岩体力学参数进行了研究^[81]。上述成果为危岩崩塌地质灾害预测提供了科学依据。目前,考虑水位变动影响的危岩稳定性研究还相对较少。在水位变动及自重荷载等多因素共同作用下,三峡库区危岩底部区域损伤劣化速度加快,成为影响危岩整体稳定性的“薄弱环节”,易发生底部压裂,引发整体失稳^[82]。传统方法将危岩视作整体,忽略了薄弱区域对危岩整体稳定性的

影响。另外,危岩基座岩体在干燥状态和饱和状态下的力学性质相差较大,其力学强度呈波动状态,传统的稳定性计算方法未考虑岩体参数的波动变化,可能导致计算结果与实际情况不符。基于此,学者结合危岩体的地质结构和劣化特征,从引入损伤变量改进计算方法、强度弱化(折减)计算、考虑劣化动态过程改进计算方法、构建岩体强度劣化模型等方面进行危岩稳定性计算探索,见表 3。

表 3 水位变动影响下危岩稳定性计算方法研究

Table 3 Research on calculation methods for dangerous rock stability under the influence of water level fluctuations

文献	计算方法	具体方法	结果/结论
贺凯等 ^[83]	引入损伤	基于损伤的底部压裂破坏稳定性评价法	箭穿洞危岩目前处于欠稳定状态,与专业监测和实际调查结果相符
Wang 等 ^[63]	变量计算	引入损伤理论,在室内试验中进行损伤叠加计算	危岩体在 9 次干湿循环前后发生失稳破坏,与实际检测曲线契合度很高
吴晓宾等 ^[84]	强度折减 (弱化)法	将岩体参数弱化,利用 Geo-Studio 软件	计算结果与专业监测和定性判断结果基本一致
胡雷等 ^[14]		利用数值模型计算,每个水位周期强度参数下降值取 1%,为等效 c 、 φ 值折减系数,取每个水位周期下降约 1.5%	随着岩体劣化,巫山黄岩窝危岩稳定性系数年均下降约 0.01
胡刘洋等 ^[74]		抗剪强度折减法,将岩体 c 、 φ 值在每一周期后下降 1%	在经过 20 个水文周期后,冠木岭危岩处于欠稳定-不稳定状态
刘新荣等 ^[2]		利用通用离散单元法程序(UDEC),取最不利情况最终劣化程度对应的岩体参数进行计算	得到了三峡库区典型危岩岸坡变形破坏特征和失稳模式
陈小婷等 ^[73]		考虑劣化动态过程,利用 UDEC 软件,采用伪时间增量的方式模拟	10 次水位周期计算所得破坏区比相同时步、无劣化效应时增加了近 4 倍
殷跃平等 ^[3]	考虑劣化动态过程的计算	基于消落带原位跨孔声波的 GSI(t)时效函数以及二维、三维结构面强度劣化包线分析方法	GSI 系统对岩体劣化评价有宽泛的适用性,且适用范围随着 GSI 的下降而缩小;表层结构面的劣化敏感性高于深层,受劣化影响,表层 H-B 准则适用范围缩小最明显
闫国强等 ^[85]		引入岩体 GSI(t)劣化函数,利用能量法推导出临界挠曲段高阶平衡方程	考虑了岸坡随劣化时间的动态演化过程,与传统静态计算方法相比,该方法更符合工程实际
张景昱等 ^[62]		岩体强度劣化模型	库水位变化对岸坡稳定性影响明显,水-岩作用程度越大,岩体平衡越容易被打破,且岸坡稳定性越差,而新的平衡对应的安全性逐年降低
殷跃平等 ^[86]	岩体强度劣化模型	建立水位下降干燥状态、水位上升饱和状态及过渡状态下消落区劣化岩体的损伤本构模型,提出采用水位周期涨落后劣化带的峰值应力与劣化带有效应力之比作为高陡岸坡危岩溃屈失稳稳定系数的定量评价方法	弥补了常规抗倾覆和抗滑移极限平衡稳定性分析方法不能刻画损伤至溃屈失稳过程的缺陷

2.3.1 引入损伤变量的计算方法

针对高陡危岩的底部压裂失稳模式,贺凯等^[83]引入损伤理论,提出了考虑底部薄弱区域损伤演化的稳定性评价方法:首先,建立岩体底部压裂失稳力学概化模型;其次,将损伤变量引入到荷载应力与岩体承载力的计算中,得到岩体破坏时的真实受力情况,进而分析危岩的破坏方式。结果显示,箭穿洞危岩目前处于欠稳定状态,与专业监测和实际调查结果相符。Wang 等^[63]在概化模型的基础上引入损伤理论,在室内试验中进行损伤叠加计算,结果显示,危岩体在 9 次干湿循环前后发生失稳破坏,这与实际检测曲线的契合度很高。该方法能有效

反映干湿循环过程中基座岩体在持续自重作用下岩体强度的降低,进而持续追踪其力学状态,得到其稳定状态。

2.3.2 强度折减(弱化)法

吴晓宾等^[84]考虑岩体劣化的影响,将岩体参数弱化,利用 Geo-Studio 软件计算了巫山板壁岩危岩体经 50 次干湿循环后的稳定性系数,结果与专业监测和定性判断结果基本一致。陈云飞等^[75]采用抗剪强度折减法分析岩体劣化工况下板壁岩危岩体的破坏过程与长期稳定性,为三峡库区类似危岩体的防灾减灾提供参考。胡雷等^[14]考虑岩石劣化和结构面劣化,参照室内干湿循环试验和劣化规律研究结

果^[3],每个水位周期强度参数下降值取1%,等效 c 、 φ 值折减系数取每个水位周期下降约1.5%,结果表明,随着岩体劣化,巫山黄岩窝危岩稳定性系数年均下降约0.01。胡刘洋等^[74]同样采用抗剪强度折减法,将岩体 c 、 φ 值在每一周期后下降1%来达到岩体劣化的效果,计算了冠木岭危岩体的长期稳定性。刘新荣等^[2]考虑岩体强度弱化影响,利用通用离散单元法程序(UDEC),取最不利情况最终劣化程度对应的岩体参数进行稳定性计算,得到了三峡库区典型危岩岸坡的变形破坏特征和失稳模式。

2.3.3 考虑劣化动态过程的计算方法

目前多数危岩体稳定性计算方法不考虑时间效应,相关软件也没有强度随时间衰减的本构模型,无法体现劣化影响。为此,陈小婷等^[73]利用UDEC软件,采用伪时间增量的方式模拟岩石强度的时间相关劣化效应,结果显示,10次水位周期计算所得破坏区比相同时步、无劣化效应时增加了近4倍。殷跃平等^[3]使用原位跨孔声波测试和井下电视,改进了地质强度指标(geological strength index,简称GSI)评价系统对岸坡消落带劣化岩体的描述,为岸坡稳定性分析提供了新途径。闫国强等^[85]根据弹塑性受压板理论,引入岩体GSI(t)劣化函数^[3],利用能量法推导出临界挠曲段高阶平衡方程,并计算了三峡库区典型顺层岸坡的稳定性。该方法考虑了岸坡随劣化时间动态演化的过程,与传统静态计算方法相比,更加符合工程实际。

2.3.4 岩体强度劣化模型

张景昱等^[62]考虑库水长期作用下的水-岩劣化效应,建立了岩体强度劣化模型,对岸坡水-岩作用区域进行划分,并对影响区域的岩体进行网格化处理,利用强度参数分布模型进行网格单元赋值,对典型岸坡进行了长期稳定性分析。结果表明,库水位变化对岸坡稳定性影响明显,水-岩作用程度越大,岩体平衡越容易打破,岸坡稳定性越差,而新的平衡对应的安全性逐年降低。殷跃平等^[86]在现场调查及监测的基础上建立了水位下降干燥状态、水位上升饱和状态及过渡状态下消落区劣化岩体的损伤本构模型,提出采用水位周期涨落后劣化带的峰值应力与其有效应力之比作为高陡岸坡危岩溃屈失稳稳定系数的定量评价方法,弥补了常规抗倾和抗滑移极限平衡稳定性分析方法不能刻画损伤至溃屈失稳过程的缺陷。

2.3.5 基于遥感技术和机器学习模型的新方法

近年来,遥感技术与机器学习方法逐步被用于三峡库区地质灾害识别、稳定性、易发性评价

中^[26, 87-90]。Menegoni等^[91]使用遥控飞机系统输入数据,分析了不连续数据采集对基于赤平投影运动学分析结果的影响。基于赤平投影的运动学分析虽广泛适用,但在崩塌易发性评估中仅使用平均坡度方向,而忽略了复杂的坡度拓扑和悬挑区域。Lukačić等^[92]利用高分辨率三维点云评估各种不连续性数据采集方法对三维崩塌易发性评价的影响,认为精确确定不连续集数量及其相关加权密度对可靠的敏感性评估至关重要。三维崩塌易发性评价能识别岩石边坡上潜在的崩塌源区,使未来的工程设计更有针对性。Wen等^[26, 93]基于SHAP和XGBoost机器学习模型进行混合优化,提高了危岩崩塌易发性评估的准确性。

2.3.6 小结

涉水危岩体稳定性计算与非涉水危岩体的区别在于,涉水危岩体稳定性计算需考虑水位变动引起的岩体劣化特征和过程。已有研究结合危岩体的地质结构和劣化特征,采用引入损伤变量的计算方法、强度弱化(折减)法、考虑劣化动态过程的计算方法、岩体强度劣化模型等方法探索计算了水位变动影响下的危岩稳定性。计算结果更加科学合理,为危岩防治提供了科学依据,但目前考虑水位变动影响的岩体累积损伤演化过程、动力累积损伤力学模型和长期稳定性等方面的研究还不够系统。另外,近年来,遥感技术与机器学习方法逐步应用于危岩崩塌易发性评价中,未来需加强三峡库区受水位变动影响的危岩稳定性研究以及遥感技术、机器学习等手段的应用。

3 结论及展望

通过对水位变动影响下三峡库区危岩稳定性研究进展的梳理发现,水位变动引起的岩体损伤(劣化)是影响库区危岩长期稳定的关键。近年来,针对水-岩作用引起的岩体损伤(劣化)试验方法、测试技术和设备等逐步发展,由室内干湿循环试验扩展到原位声波测试、矿物成分分析、耐崩解试验、原位岩体回弹强度测试、点荷载试验、单轴及三轴压缩试验、物理模型试验等。岩体劣化主要表现在岩体强度和结构面的劣化,劣化过程具有渐进性、非均匀性、累积性和不可逆性。岩体劣化、岩溶水动力作用、岸坡形变相互促进,加速了危岩失稳进程。在库区水位变动影响下,危岩破坏模式主要有基座压裂滑移、倾倒破坏、滑移-剪切复合破坏、倾倒-滑移复合破坏、旋转滑移以及多种模式的组合。由于多因素叠加影响,危岩失稳模式较为复杂,多为复

合失稳模式。针对危岩体的地质结构和劣化特征,已有研究从引入损伤变量改进计算方法、强度弱化(折减)计算、考虑劣化动态过程改进计算方法、构建岩体强度劣化模型等方面进行危岩稳定性计算探索,计算结果更符合工程实际。未来仍有以下问题需要开展深入研究。

1) 涉水危岩的成灾机理和破坏特征。加强库水位变化影响下涉水岩体(含结构面)的损伤机理、库岸岩体劣化机理研究,进一步探索库岸涉水危岩的成灾机理和破坏特征。

2) 复杂动态力学环境下的室内模拟实验、原位试验、大型结构面探测。已有的试验测试方法主要针对水-岩相互作用、降雨影响或者地震荷载等,但考虑地下水、温差和复杂应力条件的试验和模拟研究较少,原位测试和长期观测技术也有待完善。有必要开展复杂动态力学环境下的室内模拟实验、原位试验、大型结构面探测等研究,开发水位涨落期间岩土体强度、环境演化监测技术和设备。同时,加强对涉水库岸危岩的现场监测,获取不同水位条件下危岩的变形趋势,并与室内试验和理论分析成果相互检验,为涉水危岩破坏的理论研究和室内试验研究提供验证条件。

3) 岩体损伤(劣化)规律与空间表达。已有研究主要从物理力学参数、矿物成分、裂隙形态和数量等方面阐述岩体损伤劣化特征。但岩体劣化三维空间分布规律、岩体内部裂隙和结构面劣化展布形态,劣化分布与地质背景、水位变动幅度和频率、水压力等相关关系的研究刚刚起步,分析方法尚未定型,还需开展大量研究。

4) 复杂动力条件下的涉水危岩失稳模式。在危岩稳定性分析时,已有研究考虑的因素与实际力学环境仍有较大差距。有必要在复杂动态力学环境研究的基础上开展不同类型危岩体水-岩作用、水力侵蚀、波浪淘蚀、水压力等多因素协同作用下的危岩失稳模式研究,为后续危岩的风险评价提供理论基础。

5) 累积损伤和长期稳定性。已有研究对岩体损伤致灾机理和危岩失稳模式形成了一定的认识,但有关考虑水位变动影响下岩体累积损伤演化过程、动力累积损伤力学模型和长期稳定性等方面的研究还不够系统。目前,长期稳定性研究主要是通过室内干湿循环试验获取相关劣化参数,利用强度折减法等方法或模型进行稳定性计算和预测,这种方法忽略了自然条件下岩体的劣化过程,尤其是结构面的劣化。目前常用的模拟预测软件中没有与时间效应相关的模型,不能自动实现劣化带来的岩

体参数动态变化,主要通过调整岩体力学参数和节理接触参数来实现劣化效应。因此,岩体累积损伤和危岩长期稳定性还需开展深入研究,以确保长江航道的长期地质安全。

6) 涉水危岩的失稳破坏模式。研究涉水危岩与非涉水危岩在失稳破坏方面存在的相同点和差异性,构建考虑库水位影响的涉水危岩失稳破坏模式。

7) 遥感技术和机器学习方法的应用。当前涉水危岩的稳定性研究多基于相对传统的岩土力学模型方法,未来需要加强遥感技术和机器学习方法在涉水危岩稳定性评价中的应用,以进一步提高准确性,降低风险。

参考文献

- [1] 陈洪凯,董平,唐红梅.危岩崩塌灾害研究现状与趋势[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2015,32(6):53-60.
Chen H K, Dong P, Tang H M. The status quo and trends of perilous rock and collapse disaster[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2015, 32(6): 53-60. (in Chinese)
- [2] 刘新荣,王浩,郭雪岩,等.考虑消落带岩体劣化影响的典型危岩岸坡稳定性研究[J].岩土力学,2024,45(2):563-576.
Liu X R, Wang H, Guo X Y, et al. Stability of typical perilous rock bank slope considering the influence of deterioration of rock mass in fluctuation belt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2): 563-576. (in Chinese)
- [3] 殷跃平,闫国强,黄波林,等.三峡水库消落带斜坡岩体劣化过程地质强度指标研究[J].水利学报,2020,51(8):883-896.
Yin Y P, Yan G Q, Huang B L, et al. Geological strength index of the slope rock mass deterioration process of the hydro-fluctuation belt in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(8): 883-896. (in Chinese)
- [4] 黄波林,殷跃平,张枝华,等.三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(9):1786-1796.
Huang B L, Yin Y P, Zhang Z H, et al. Study on deterioration characteristics of shallow rock mass in water the level fluctuation zone of Karst bank slopes in Three Gorges Reservoir area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(9): 1786-1796. (in Chinese).
- [5] 黄波林,殷跃平,李滨,等.三峡工程库区岩溶岸坡岩体劣化及其灾变效应[J].水文地质工程地质,2020,47(4):51-61.

- Huang B L, Yin Y P, Li B, et al. Rock mass deterioration and its catastrophic effect of Karst bank slope in the Three Gorges Project Reservoir area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 51-61. (in Chinese)
- [6] 黄波林, 刘广宁, 王世昌, 等. 三峡库区高陡岸坡成灾机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Huang B L, Liu G N, Wang S C, et al. Study on disaster mechanism of high and steep bank slope in Three Gorges Reservoir area[M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [7] 胡厚田. 崩塌分类的初步探讨[J]. *铁道学报*, 1985, 7(2): 90-100.
Hu H T. Preliminary investigation on the classification of landfalls[J]. *Journal of the China Railway Society*, 1985, 7(2): 90-100. (in Chinese)
- [8] 刘卫华. 高陡边坡危岩体稳定性、运动特征及防治对策研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
Liu W H. Study on stability, movement characteristics and countermeasures of potential unstable rock mass in high-steep slope[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [9] 徐刚, 张志斌, 范泽英. 危岩失稳模式分类研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(增刊1): 390-399.
Xu G, Zhang Z B, Fan Z Y. Study on Classification of of dangerous rocks failure modes[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(S1): 390-399. (in Chinese)
- [10] Wang W, Yuan W, Wang Q Z, et al. Earthquake-induced collapse mechanism of two types of dangerous rock masses[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2016, 15(2): 379-386.
- [11] 陈洪凯, 唐红梅, 王蓉. 三峡库区危岩稳定性计算方法及应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(4): 614-619.
Chen H K, Tang H M, Wang R. Calculation method of stability for unstable rock and application to the Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 614-619. (in Chinese)
- [12] 陈洪凯, 唐红梅. 长江三峡水库区危岩分类及宏观判据研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2005, 16(4): 53-57.
Chen H K, Tang H M. Classification and identify of perilous rock in the area of the Three Gorges Reservoir [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2005, 16(4): 53-57. (in Chinese)
- [13] 殷跃平, 黄波林, 张枝华, 等. 三峡工程库区地质灾害防治[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Yin Y P, Huang B L, Zhang Z H. Prevention and control of geological disasters in Three Gorges Reservoir area[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
- [14] 胡雷, 张鹏, 黄波林. 三峡库区典型岩溶岸坡危岩体失稳模式和长期稳定性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(5): 64-73.
Hu L, Zhang P, Huang B L. Analysis of failure modes and long-term stability of dangerous rock mass on typical Karst bank slope in the Three Gorges Reservoir area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(5): 64-73. (in Chinese)
- [15] 王贺, 陈洪凯, 王小委. 类砌体型危岩解体破坏模型试验[J]. *工程地质学报*, 2016, 24(增刊1): 710-716.
Wang H, Chen H K, Wang X W. Tests for formatted collapse disaster of quasi-masonry structure perilous rock [J] *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(S1): 710-716. (in Chinese)
- [16] 周云涛, 石胜伟, 张勇, 等. 岩腔后退近水平砂-泥岩互层危岩稳定性研究[J]. *工程地质学报*, 2017, 25(5): 1220-1229.
Zhou Y T, Shi S W, Zhang Y, et al. Stability of unstable rock in nearly-horizontal sandstone-mudstone stratum due to enlarged rock-cell[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(5): 1220-1229. (in Chinese)
- [17] 张枝华, 黄波林, 胡明军, 等. 三峡工程重庆库区消落区岩体劣化灾变特征与早期防控研究[R]. 重庆: 重庆市地质矿产勘查开发局208水文地质工程地质队(重庆市地质灾害防治工程勘查设计院), 2023.
Zhang Z H, Huang B L, Hu M J, et al. Research on the characteristics and early prevention and control of rock mass deterioration and disaster in the subsidence area of the Chongqing reservoir area of the Three Gorges Project [R]. Chongqing: Hydrogeology & Engineering Team 208, Chongqing Bureau of Geology and Mineral Exploration (Chongqing Reconnaissance and Design Academy of Geological Disasters Prevention and Treatment Engineering), 2023. (in Chinese)
- [18] 殷跃平. 三峡库区地下水渗透压力对滑坡稳定性影响研究[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2003, 14(3): 4-11.
Yin Y P. Seepage pressure effect on landslide stability at the Three Gorges Reservoir area[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2003, 14(3): 4-11. (in Chinese)
- [19] 丁秀丽, 付敬, 张奇华. 三峡水库水位涨落条件下奉节南桥头滑坡稳定性分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(17): 2913-2919.
Ding X L, Fu J, Zhang Q H. Stability analysis of landslide in the south end of Fengjie highway bridge with fluctuation of water level of Three Gorges Reservoir[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(17): 2913-2919. (in Chinese)
- [20] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭. 库水位上升诱发边坡失稳机理研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(5): 769-773.
Liu C H, Chen C X, Feng X T. Study on mechanism of slope instability due to reservoir water level rise[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(5): 769-773. (in Chinese)
- [21] 刘新荣, 景瑞, 缪露莉, 等. 巫山段消落带岸坡库岸再

- 造模式及典型案例分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(7): 1321-1332.
- Liu X R, Jing R, Miao L L, et al. Reconstruction models and typical case analysis of the fluctuation belt of reservoir bank slopes in Wushan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(7): 1321-1332. (in Chinese)
- [22] 许彬. 消落带岩体劣化影响下顺层库岸边坡动力损伤及失稳机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- Xu B. Study on dynamic damage and instability mechanism of bank slope of bedding reservoir under the influence of rock mass deterioration in fluctuating zone[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022. (in Chinese)
- [23] 唐红梅, 林孝松, 陈洪凯, 等. 重庆万州区地质灾害危险性分区及评价[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(3): 1-5.
- Tang H M, Lin X S, Chen H K, et al. Risk zoning assessment of geological disaster in Wanzhou area, Chongqing City[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15(3): 1-5. (in Chinese)
- [24] 楚敬龙, 杜加强, 滕彦国, 等. 基于GIS的重庆市万州区滑坡灾害危险性评价[J]. 地质通报, 2008, 27(11): 1875-1881.
- Chu J L, Du J Q, Teng Y G, et al. Landslide hazard evaluation for Wanzhou District, Chongqing City, China, using GIS[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(11): 1875-1881. (in Chinese)
- [25] 董好刚, 陈立德, 黄长生. 三峡库区云阳—江津段危岩形成的影响因素及稳定性评价[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 645-650.
- Dong H G, Chen L D, Huang C S. Influence factors and stability assessment of dangerous rocks in Yunyang-Jiangjin on Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 645-650. (in Chinese)
- [26] Wen H J, Hu J W, Zhang J L, et al. Rockfall susceptibility mapping using XGBoost model by hybrid optimized factor screening and hyperparameter[J]. Geocarto International, 2022, 37(27): 16872-16899.
- [27] Sang H W, Chang L, Xi C J, et al. A closer look into variables controlling hillslope deformations in the Three Gorges Reservoir area[J]. Engineering Geology, 2024, 337: 107584.
- [28] 贺凯, 陈春利, 冯振, 等. 塔柱状岩体崩塌灾害研究现状[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 714-724.
- He K, Chen C L, Feng Z, et al. A review on the collapse hazards of tower-shaped rock[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3): 714-724. (in Chinese)
- [29] 王健, 黄波林, 赵永波, 等. 三峡库区黄南背西危岩体变形机理研究及失稳模式预测[J]. 华南地质与矿产, 2018, 34(4): 339-346.
- Wang J, Huang B L, Zhao Y B, et al. Study on deformation and failure mechanism of Huangnanbeixi dangerous rock in Three Gorges Reservoir area[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2018, 34(4): 339-346. (in Chinese)
- [30] 陈小婷, 黄波林, 李滨, 等. 三峡水库碳酸盐岩区岩溶作用与斜坡破坏[J]. 中国岩溶, 2020, 39(4): 567-576.
- Chen X T, Huang B L, Li B, et al. Karstification and slope failure in carbonate areas of Three Gorges Reservoir[J]. Carsologica Sinica, 2020, 39(4): 567-576. (in Chinese)
- [31] Cojean R, Cai Y J. Analysis and modeling of slope stability in the Three-Gorges Dam Reservoir (China)—the case of Huangtupo landslide[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 8(2): 166-175.
- [32] 黄波林, 殷跃平. 水库区滑坡涌浪风险评估技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(3): 621-629.
- Huang B L, Yin Y P. Risk assessment research on impulse wave generated by landslide in reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(3): 621-629. (in Chinese)
- [33] Li X, Konietzky H. Numerical simulation schemes for time-dependent crack growth in hard brittle rock[J]. Acta Geotechnica, 2015, 10(4): 513-531.
- [34] Wang L Q, Yin Y R, Zhou C Y, et al. Damage evolution of hydraulically coupled Jianchuandong dangerous rock mass[J]. Landslides, 2020, 17(5): 1083-1090.
- [35] Liu X R, Jin M H, Li D L, et al. Strength deterioration of a shaly sandstone under dry-wet cycles: a case study from the Three Gorges Reservoir in China[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2018, 77(4): 1607-1621.
- [36] Yuan W, Liu X R, Fu Y. Study on deterioration of strength parameters of sandstone under the action of dry-wet cycles in acid and alkaline environment[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2018, 43(1): 335-348.
- [37] 邓华锋, 肖瑶, 方景成, 等. 干湿循环作用下岸坡消落带土体抗剪强度劣化规律及其对岸坡稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2629-2638.
- Deng H F, Xiao Y, Fang J C, et al. Shear strength degradation and slope stability of soils at hydro-fluctuation belt of river bank slope during drying-wetting cycle[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(9): 2629-2638. (in Chinese)
- [38] Lin M L, Jeng F S, Tsai L S, et al. Wetting weakening of tertiary sandstones-microscopic mechanism[J]. Environmental Geology, 2005, 48(2): 265-275.
- [39] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. (库)水-岩作用下砂岩抗剪强度劣化规律的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1298-1302.
- Liu X R, Fu Y, Wang Y X, et al. Deterioration rules of

- shear strength of sand rock under water-rock interaction of reservoir[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1298-1302. (in Chinese)
- [40] 刘新荣, 傅晏, 王永新, 等. 水-岩相互作用对库岸边坡稳定的影响研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 613-616, 627.
Liu X R, Fu Y, Wang Y X, et al. Stability of reservoir bank slope under water-rock interaction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 613-616, 627. (in Chinese)
- [41] 傅晏. 干湿循环水岩相互作用下岩石劣化机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
Fu Y. Study on the mechanism of rock deterioration under the interaction of dry-wet circulating water and rock[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [42] Estabragh A R, Moghadas M, Javadi A A. Effect of different types of wetting fluids on the behaviour of expansive soil during wetting and drying[J]. Soils and Foundations, 2013, 53(5): 617-627.
- [43] 张梁. 酸性环境干湿交替作用下泥质砂岩宏微观损伤特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
Zhang L. Study on macro- and micro-damage characteristics of argillaceous sandstone under alternating dry and wet conditions in acidic environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [44] 王子娟. 干湿循环作用下砂岩的宏微观损伤演化及本构模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
Wang Z J. Study on macro-meso damage evolution and constitutive model of sandstone under dry-wet cycle[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016. (in Chinese)
- [45] 邓华锋, 骆祚森, 张景昱, 等. 库岸边坡消落带水-岩作用研究进展与展望[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 95-104.
Deng H F, Luo Z S, Zhang J Y, et al. Progress and prospects of research on water-rock interaction in reservoir bank slope[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2023, 45(5): 95-104. (in Chinese)
- [46] 刘广宁, 齐信, 黄波林, 等. 库水波动带岸坡原位声波测试及劣化特性研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 367-375.
Liu G N, Qi X, Huang B L, et al. Sonic wave test and degradation characteristics of reservoir bank slope within water fluctuation belt[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 367-375. (in Chinese)
- [47] 胡明军, 张枝华, 殷跃平, 等. 三峡库区巫峡段消落带碳酸盐岩强度弱化研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1615-1627.
Hu M J, Zhang Z H, Yin Y P, et al. Study on strength weakening of carbonate rocks with water level fluctuating in Wuxia of Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1615-1627. (in Chinese)
- [48] 柳万里, 晏鄂川, 戴航, 等. 巴东组泥岩水作用的特征强度及其能量演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 311-326.
Liu W L, Yan E C, Dai H, et al. Study on characteristic strength and energy evolution law of Badong formation mudstone under water effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 311-326. (in Chinese)
- [49] Yan G Q, Huang B L, Qin Z, et al. Rock mass deterioration model of bank slope based on high-precision 3D multiperiod point clouds in the Three Gorges Reservoir, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2022, 55(1): qjgh2020-100.
- [50] 潘永亮, 简文星, 杨光辉, 等. 水压力作用下三峡库区侏罗系软岩损伤演化特性研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 693-701.
Pan Y L, Jian W X, Yang G H, et al. Damage and evolution characteristics of Jurassic soft rock in Three Gorges Reservoir area under water pressure[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 693-701. (in Chinese)
- [51] 闫国强, 殷跃平, 黄波林, 等. 三峡库区顺层灰岩岸坡劣化-溃屈灾变机制研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2568-2580.
Yan G Q, Yin Y P, Huang B L, et al. Deterioration-buckling failure mechanism of consequent bedding limestone bank slope in Three Gorges Reservoir area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2568-2580. (in Chinese)
- [52] 薛晶晶, 张振华. 干湿交替中砂岩强度与波速关系的试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2011, 33(3): 51-54.
Xue J J, Zhang Z H. Experimental research on relationship between strength of sandstone and wave velocity during wet and dry cycles[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2011, 33(3): 51-54. (in Chinese)
- [53] 李克钢, 郑东普, 黄维辉. 干湿循环作用下砂岩力学特性及其本构模型的神经网络模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊2): 168-173.
Li K G, Zheng D P, Huang W H. Mechanical behavior of sandstone and its neural network simulation of constitutive model considering cyclic drying-wetting effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S2): 168-173. (in Chinese)
- [54] Wang Z J, Liu X R, Yang X, et al. An improved Duncan-Chang constitutive model for sandstone subjected to drying-wetting cycles and secondary development of the model in FLAC3D[J]. Arabian Journal for Science and

- Engineering, 2017, 42(3): 1265-1282.
- [55] Luo Z S, Li J L, Jiang Q, et al. Effect of the water-rock interaction on the creep mechanical properties of the sandstone rock[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2018, 62(2): 451-461.
- [56] 邓华锋, 张恒宾, 李健林, 等. 水-岩作用对砂岩卸荷力学特性及微观结构的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2344-2352.
- Deng H F, Zhang H B, Li J L, et al. Effect of water-rock interaction on unloading mechanical properties and microstructure of sandstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(7): 2344-2352. (in Chinese)
- [57] Fang J C, Deng H F, Li J L, et al. Study on the seepage characteristics and degradation mechanism of a single-jointed sandstone under the cyclic dry-wet process in the Three Gorges Reservoir[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(10): 8123-8136.
- [58] Liang H, Yuan W, Fu Y, et al. Degradation law of mixed-mode (I/II) fracture toughness of sandstone under drying-wetting cycles in acid and alkaline environments[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14(14): 1312.
- [59] Jiang Q, Deng H F, Li J L, et al. The degradation effect and mechanism by water-rock interaction in the layered sandstone in the Three Gorges Reservoir area[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2019, 12(23): 722.
- [60] 黄波林, 王健, 殷跃平, 等. 基于裂隙网络的消落带岩体劣化区域分布研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(6): 1901-1908.
- Huang B L, Wang J, Yin Y P, et al. Spatial distribution analysis of degraded Karst rock mass in fluctuation zone based on fracture network[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(6): 1901-1908. (in Chinese)
- [61] 王永新. 水-岩相互作用机理及其对库岸边坡稳定性影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- Wang Y X. Study on water-rock interaction mechanism and its influence on the stability of reservoir bank slope [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006. (in Chinese)
- [62] 张景昱, 宛良朋, 潘洪月, 等. 考虑水-岩作用特点的典型岸坡长期稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(10): 1851-1858.
- Zhang J Y, Wan L P, Pan H Y, et al. Long-term stability of bank slope considering characteristics of water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(10): 1851-1858. (in Chinese)
- [63] Wang L Q, Huang B L, Zhang Z H, et al. The analysis of slippage failure of the Huangnanbei slope under dry-wet cycles in the Three Gorges Reservoir region, China [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 1233-1249.
- [64] 黄叶宁, 邓华锋, 李健林, 等. 水-岩作用下节理岩体剪切力学特性及本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 545-557.
- Huang Y N, Deng H F, Li J L, et al. Shear mechanical properties and constitutive model of jointed rock mass under water-rock interaction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 545-557. (in Chinese)
- [65] Liang X, Tang S B, Tang C A, et al. Influence of water on the mechanical properties and failure behaviors of sandstone under triaxial compression[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(2): 1131-1162.
- [66] Huang B L, Dong X C, Yang C, et al. Structural damage to carbonate pillar hazardous rock masses subject to long-term water-level fluctuations in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2022, 55(2): qjgegh2021-044.
- [67] 邓成进, 王孔伟, 袁秋霜, 等. 库水长期升降作用下库岸边坡稳定性研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 96-100.
- Deng C J, Wang K W, Yuan Q S, et al. Stability of reservoir slope under repetitive variation of reservoir water level[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(4): 96-100. (in Chinese)
- [68] 张全, 黄波林, 郑嘉豪, 等. 柱状危岩体压溃式崩塌产生涌浪预测分析[J]. 岩土力学, 2021, 42(10): 2845-2854.
- Zhang Q, Huang B L, Zheng J H, et al. Prediction and analysis of surge generated by crushing failure collapse of columnar dangerous rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(10): 2845-2854. (in Chinese)
- [69] 张枝华, 杜春兰, 余姝, 等. 三峡库区巫峡箭穿洞危岩体稳定性分析及防治工程设计[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 48-54.
- Zhang Z H, Du C L, Yu S, et al. Stability analysis and design of control works on Jianchuandong dangerous rockmass in Wuxia Gorge, the Three Gorges Reservoir [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 48-54. (in Chinese)
- [70] 王文沛, 李滨, 黄波林, 等. 三峡库区近水平厚层斜坡滑动稳定性研究: 以重庆巫山箭穿洞危岩为例[J]. 地质力学学报, 2016, 22(3): 725-732.
- Wang W P, Li B, Huang B L, et al. Stability analysis of sub-horizontal thick-bedded slope in Three Gorges Reservoir area: a case study of Jianchuandong dangerous rockmass in Wushan, Chongqing[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(3): 725-732. (in Chinese)
- [71] 陈小婷, 黄波林. FEM/DEM法在典型柱状危岩体破

- 坏过程数值分析中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(4): 137-141.
- Chen X T, Huang B L. Application of the FEM/DEM method to numerical analyses of the failure process of representative pillar-shape dangerous rockmass[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(4): 137-141. (in Chinese)
- [72] Huang B, Zhang Z, Yin Y, et al. A case study of pillar-shaped rock mass failure in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2016, 49(3): 195-202.
- [73] 陈小婷, 王健, 黄波林, 等. 库水位变动条件下柱状危岩体变形破坏机理[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(2): 9-18.
- Chen X T, Wang J, Huang B L, et al. Deformation and failure mechanism of pillar-shaped dangerous rock mass under reservoir's water level fluctuation[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(2): 9-18. (in Chinese)
- [74] 胡刘洋, 张鹏, 黄波林. 三峡库区消落带岩体劣化下危岩体长期变形破坏机理: 以冠木岭为例[J]. 工程地质学报, 2023, 31(6): 1891-1900.
- Hu L Y, Zhang P, Huang B L. Long-term deformation and failure mechanism of dangerous rock mass in water-level-fluctuation zone of Three Gorges Reservoir area: a case study of Guanmuling[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(6): 1891-1900. (in Chinese)
- [75] 陈云飞, 张鹏, 黄波林, 等. 考虑岩体劣化的库岸典型危岩体破坏过程与长期稳定性分析[J]. 地质力学学报, 2022, 28(6): 938-947.
- Chen Y F, Zhang P, Huang B L, et al. Failure process and long-term stability analysis of typical unstable rock mass in the Three Gorges Reservoir area considering rock mass deterioration[J]. Journal of Geomechanics, 2022, 28(6): 938-947. (in Chinese)
- [76] 陈洪凯, 鲜学福, 唐红梅. 危岩稳定性断裂力学计算方法[J]. 重庆大学学报, 2009, 32(4): 434-437, 452.
- Chen H K, Xian X F, Tang H M. Stability analysis method for perilous rock by fracture mechanics[J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(4): 434-437, 452. (in Chinese)
- [77] 陈涛. 滑塌式危岩尖点突变模型研究[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2015, 36(4): 346-350.
- Chen T. Study on cusp catastrophe model for unstable sliding rock[J]. Journal of Ningxia University (Natural Science Edition), 2015, 36(4): 346-350. (in Chinese)
- [78] 黄江, 石豫川, 吉锋, 等. 三维激光扫描技术在高边坡危岩体调查中的应用与讨论[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(11): 45-49.
- Huang J, Shi Y C, Ji F, et al. Discussion on the application of 3-D laser scanning technology to the investigation of high slope perilous rockmass[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30(11): 45-49. (in Chinese)
- [79] Du Y, Xie M W, Jiang Y J, et al. Experimental rock stability assessment using the frozen-thawing test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(4): 1049-1053.
- [80] 贾艳昌, 谢谟文, 昌圣翔, 等. 基于固有振动频率的滑移式和坠落式危岩块体稳定性评价模型研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(7): 2149-2156.
- Jia Y C, Xie M W, Chang S X, et al. A model for evaluation of stability of sliding- and falling-type dangerous rock blocks based on natural vibration frequency[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(7): 2149-2156. (in Chinese)
- [81] 王林峰, 陈洪凯, 唐红梅. 考虑软质岩体支撑作用的危岩稳定性分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(2): 65-70.
- Wang L F, Chen H K, Tang H M. Stability analysis of perilous rock considering soft rock mass's support[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2014, 11(2): 65-70. (in Chinese)
- [82] 陈洪凯, 秦鑫. 危岩稳定性分析研究现状及趋势[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(10): 49-60.
- Chen H K, Qin X. Status quo and trend of unstable rock stability analysis[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(10): 49-60. (in Chinese)
- [83] 贺凯, 高杨, 殷跃平, 等. 基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(7): 82-89.
- He K, Gao Y, Yin Y P, et al. Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 82-89. (in Chinese)
- [84] 吴晓宾, 王平. 软件Geo-Studio在重庆市巫山县板壁岩W1危岩体稳定性分析应用[J]. 矿产与地质, 2019, 33(3): 535-541.
- Wu X B, Wang P. Application of Geo-Studio in the stability analysis of W1 dangerous rock body in slate rock belt in Wushan County of Chongqing City[J]. Mineral Resources and Geology, 2019, 33(3): 535-541. (in Chinese)
- [85] 闫国强, 黄波林, 王勋, 等. 基于岩体劣化顺层灰岩岸坡滑移-弯曲失稳机理和评价[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 668-679.
- Yan G Q, Huang B L, Wang X, et al. Sliding-bending failure mechanism and evaluation of bedding limestone bank slope based on rock mass deterioration in Three

- Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(3): 668-679. (in Chinese)
- [86] 殷跃平, 王鲁琦, 赵鹏, 等. 三峡库区高陡岸坡溃屈失稳机理及防治研究[J]. *水利学报*, 2022, 53(4): 379-391. Yin Y P, Wang L Q, Zhao P, et al. Crashed failure mechanism & prevention of fractured high-steep slope in the Three Gorges Reservoir, China[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2022, 53(4): 379-391. (in Chinese)
- [87] Wang Y K, Tang H M, Huang J S, et al. A comparative study of different machine learning methods for reservoir landslide displacement prediction[J]. *Engineering Geology*, 2022, 298: 106544.
- [88] Song Y X, Li Y, Zou Y J, et al. Synergizing multiple machine learning techniques and remote sensing for advanced landslide susceptibility assessment: a case study in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2024, 83(8): 227.
- [89] Miao F S, Zhao F C, Wu Y P, et al. Landslide susceptibility mapping in Three Gorges Reservoir area based on GIS and boosting decision tree model[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2023, 37(6): 2283-2303.
- [90] Ma J W, Lei D Z, Ren Z Y, et al. Automated machine learning-based landslide susceptibility mapping for the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Mathematical Geosciences*, 2024, 56(5): 975-1010.
- [91] Menegoni N, Giordan D, Perotti C, et al. Detection and geometric characterization of rock mass discontinuities using a 3D high-resolution digital outcrop model generated from RPAS imagery-Ormea rock slope, Italy[J]. *Engineering Geology*, 2019, 252: 145-163.
- [92] Lukačić H, Noël F, JABOYEDOFF M, et al. Impact of discontinuity data acquisition methods on rockfall susceptibility assessment using high-resolution 3D point cloud[J]. *Engineering Geology*, 2024, 340: 107677.
- [93] Wen H J, Hu J W, Zhang J L, et al. Explainable machine learning model for rockfall susceptibility evaluation [C]//Geo-Risk 2023. Arlington, Virginia. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2023: 102-110.

(编辑 胡英奎)