新三峡库区长期地质安全战略研究

殷跃平

（中国地质环境监测院，100081，北京）

摘　要：2020年11月三峡水利枢纽工程由175 m试验性蓄水过渡到正常蓄水运行阶段。由于三峡库区人口增加达到1000万人以上，加之长江航运年货运量将达到2亿t，如何保障库区城镇和航道长期地质安全成为防灾减灾工作的重中之重。总结了三峡工程蓄水运行期间库区地质灾害演化特征，介绍了三峡库区地质灾害监测预警系统，指出了水位循环消落导致库岸岩体劣化问题以及滑坡涌浪风险，提出了库区城镇和航道长期地质安全措施建议：大力提升库区城镇滑坡、高边坡和岸坡劣化带实时监测与精准预警信息化水平；高度重视岸坡劣化带造成的滑坡崩塌灾害风险并加快分区分期综合治理；进一步加强库区城镇扩展新区不良地质工程和潜在滑坡灾害整治，探索划定地质灾害红线；加强库区城镇地质灾害风险管理和地质安全诊断；加强三峡库区地质灾害防治和应急处置能力建设；加快三峡工程蓄水以来的地质灾害科学技术研究。为三峡后续工作提供前瞻性、针对性、储备性的防灾减灾技术综合对策参考。

关键词：新三峡库区；地质安全；地质灾害；岩体劣化；监测预警

Studies on long-term geological safety strategy in the new Three Gorges Reservoir area//Yin Yueping

Abstract: In November 2020, the water storage level of the Three Gorges Dam was transitioned from 175 meter in experimental period to a normal operation level. Due to the population increase of over 10 million people in the Three Gorges Reservoir area, coupled with the annual cargo volume of the Yangtze River reaching 200 million tons, how to ensure long-term geological safety of townships and waterways in the reservoir area has become a top priority for disaster prevention and mitigation. Based on features of evolution of geological hazards in the Three Gorges Reservoir area during impoundment and operation periods, introductions are made on the monitoring and early warning system for geological hazards and problems with rock mass degradation and landslide surge risk caused by water level cycling and subsidence. Measures for long-term geological safety are proposed, such as using real-time monitoring for accurate early warning of landslides, high slopes, and bank slope degradation zones in urban areas around the reservoir area by application of information technology, paying more attention to the risks of landslides and collapses caused by deterioration zone of bank slope and accelerate comprehensive management of zoning and staging; strengthening remediation of unqualified geological structures and potential landslide disasters in the new areas expanded from the cities in the reservoir area, defining redlines for geological hazards; highlighting geological hazard risk management and geological safety diagnosis in resettlement townships; building up geological disaster prevention and emergency response capabilities; focusing on scientific and technological research on geological hazards since the impoundment of the reservoir, so as to work out forward-looking and targeted technologies and measures for comprehensive prevention and reduction of disasters during the follow-up work of the Three Gorges Project.

收稿日期：2024-11-14

作者简介：殷跃平，中国工程院院士，研究员，主要研究方向为地质灾害防治。

基金项目：中国工程院战略咨询项目“新三峡库区城镇和航道长期地质安全保障战略研究”（2021-XZ-001）。

Keywords: new Three Gorges Reservoir area; geological safety; geological hazards; rock mass degradation; monitoring and early warning
中图分类号：TV61+P642.2 **文献标识码**：B **文章编号**：1000-1123(2024)22-0026-10

一、引 言

自2008年175 m试验性蓄水以来，三峡水库水位抬升超过100 m，而且每年因防洪需要需消落水位约30 m，库区地质环境发生了很大变化，在峡谷区形成了数百公里的斜坡岩体劣化带，沿江滑坡地质灾害风险增高，并发生了龚家坊、红岩子等数起滑坡涌浪灾害。滑坡涌浪问题成为三峡工程蓄水运行期间库区地质灾害防治问题中的“新灾种”。近年，巫峡、西陵峡、瞿塘峡，以及长江支流秭归九畹溪、巫山大宁河、巫峡抱龙河等库岸斜坡岩体均出现不同程度的劣化甚至形成危岩体。随着岩体长期劣化导致强度降低，库岸斜坡一旦失稳入江，将会形成危害性很大的涌浪，对周边城镇和航道长期地质安全构成威胁。

二、三峡水库蓄水运行期间库区地质灾害特征

三峡库区位于中国地形第二级阶梯和第三级阶梯过渡带，以大巴山脉和巫山山脉为骨架，形成以中山、低山和峡谷为主的侵蚀地貌景观，长江河谷呈东西向镶嵌其中。地势总体呈中段高，向东、西两侧降低；南、北两侧高，中部长江一线最低。奉节一带曾是向西流动的“川江”和向东流动的“峡江”的分水岭，后因8 km长的瞿塘峡贯通，形成了自西向东流动的长江。

1.三峡水库型滑坡时间过程特征

2008年9月—2021年4月，三峡水库进行了13次175 m试验性蓄水。其中，2008年、2009年试验性蓄水坝前最高水位分别为172.8 m、171.4 m；2010—2020年试验性蓄水坝前最高水位均为175 m（见图1）。

表1显示了每次水位升降的持续时间、总变化幅度和平均变化幅度。第1次175 m试验性蓄水水位升降引

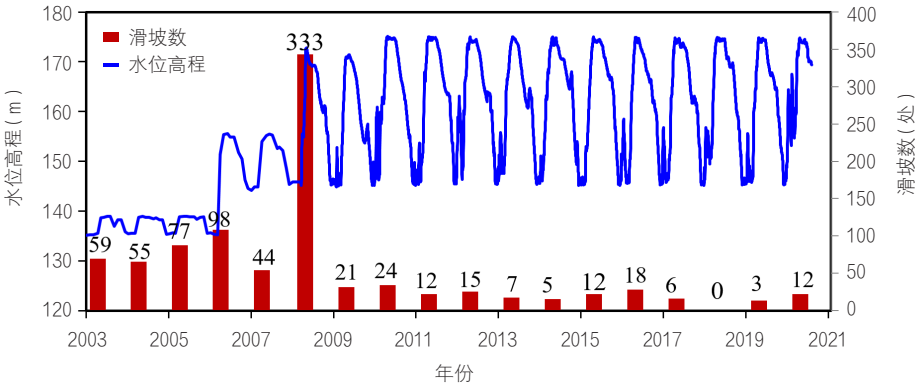


图1 三峡库区175 m试验性蓄水的水位过程线与滑坡发生关系

表1 三峡水库175 m试验性蓄水及水位消落变化情况

序号	蓄水				退水			
	时间	历时（d）	总幅度（m）	均幅（m/d）	时间	历时（d）	总幅度（m）	均幅（m/d）
1	2008.09.28—2008.11.04	37	27.53	0.744	2008.11.13—2009.06.19	218	27.59	0.127
2	2009.09.15—2009.11.24	70	25.56	0.365	2009.11.25—2010.06.19	206	26.21	0.127
3	2010.09.10—2010.10.26	46	14.8	0.322	2011.03.01—2011.07.05	185	29.55	0.160
4	2011.09.10—2011.10.30	50	22.76	0.455	2012.01.01—2012.07.15	166	29.34	0.177
5	2012.09.10—2012.10.30	50	15.72	0.314	2012.12.24—2013.07.15	173	29.34	0.170
6	2013.09.10—2013.11.12	63	17.88	0.283	2013.12.13—2014.06.16	185	28.76	0.156
7	2014.08.03—2014.10.31	89	28.52	0.320	2014.12.05—2015.06.30	207	28.91	0.140
8	2015.08.18—2015.10.28	71	28.96	0.408	2015.12.31—2016.06.08	160	28.5	0.178
9	2016.09.08—2016.11.03	56	29.34	0.524	2016.11.29—2017.06.17	200	29.3	0.147
10	2017.08.18—2017.10.21	64	28.8	0.450	2017.11.27—2018.06.09	194	28.98	0.149
11	2018.08.25—2018.10.31	67	24.5	0.366	2019.01.02—2019.06.06	155	29.24	0.189
12	2019.09.02—2019.10.31	59	28.83	0.489	2019.12.23—2020.06.08	168	29.06	0.173
13	2020.09.11—2020.10.28	47	20.12	0.428	2020.12.12—2021.06.09	179	29.45	0.165

发了大量老滑坡复活和新滑坡发生。凉水井滑坡是这期间复活的老滑坡之一，滑坡为顺层滑坡滑动后堆积形成的老滑坡，总体积约400×10^4 m^3。2008年11月22日，坝前水位上升到171.49 m，滑坡复活并出现大变形，出现大型的圈椅状裂缝，从后缘一直贯通延伸到长江，导致滑坡体上房屋严重破坏，紧急撤离滑坡区内11户55人。2009年4月12日，水位下降至160.2 m后，滑坡变形再次加剧，长江航道被迫临时限制通航。同时诱发产生了多处新生滑坡，如龚家坊滑坡。龚家坊滑坡位于巫山县长江左岸的巫峡口，为逆向岩质斜坡，主要由中厚层—薄层状石灰岩构成。2008年11月23日，三峡水库蓄水至172.8 m高程后，龚家坊发生了第一次滑坡，体积约38×10^4 m^3，形成13 m高的涌浪。2009年5月18日，三峡水库蓄水退水至150.5 m高程后，该斜坡再次发生崩塌，体积约1.5×10^4 m^3。

老滑坡复活和新滑坡出现与水位升降过程关系密切。总体来看，13次175 m试验性蓄水期间，库区共发生滑坡801处，滑坡总体积约6.7亿m^3。其中，2008年9月1日至12月31日首次水位升降过程造成老滑坡复活和新生滑坡333处，占总数量的41.6%。在总结第一次水位升降经验后，第2~13次175 m试验性蓄水减少了水位日平均升幅，略微增加了水位日平均降幅，老滑坡复活和新生滑坡发生数量大幅下降。从2011年开始，175 m试验性蓄水期间发生滑坡数量下降至十几处，特别是2013—2014年和2017—2019年，均下降至10处以下，滑坡发生处于低水平偶发阶段。

对801处水库滑坡进行分析，约有120处为新生滑坡，占总数量的15%。新生滑坡可分为两种变形失稳类型：第一类仅出现初始缓慢变形拉裂，例如地面开裂、小规模塌岸、沉陷等，尔后持续缓慢变形，例如青石神女溪滑坡；第二类是发生快速失稳滑动，例如龚家坊滑坡。据2009年调查，三峡库区涉水滑坡崩塌共1946处。因此可以粗略推断，13次175 m试验性蓄水引发了约41%的滑坡变形失稳。

首次水位升降过程中，水库型滑坡集中发生在水位上升至160 m以上高程之后。水位缓慢下降后，滑坡数量仍不断增加，一直持续到2009年6月份水位下降到145 m高程之后。第2次175 m试验性蓄水水位升降期间，滑坡主要发生在两个时段：水位持续上升且水位达160 m以上后（2009年10—12月）和夏汛期间水位急剧升降期（2010年4—8月）。第3次175 m试验性蓄水水位升降诱发的水库型滑坡与前两次相比数量显著减少，主要发生在水位上升初期和水位下降的中后期。从第4次175 m试验性蓄水水位升降开始，水库诱发的滑坡主要集中在水位下降期间，滑坡数量不多，出现时间较分散。2015—2017年的滑坡均发生在库水位下降的夏汛期间，时间较集中分布在6月。2020年的滑坡发生在夏汛和秋汛接连发生的洪水期间，时间分布在6—8月。

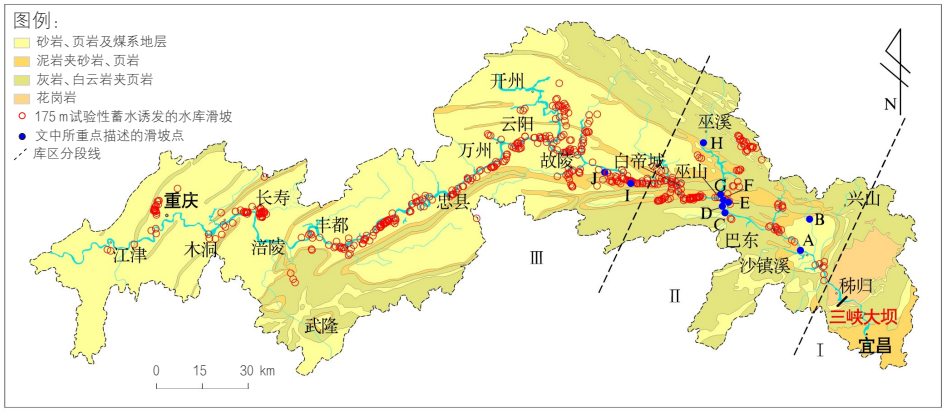
三峡库区175 m试验性蓄水引发的滑坡符合山区水库蓄水变化规律：蓄水初期为滑坡高发时段，随着时间的推移，滑坡发生呈递减态势，特别是在后期滑坡治理和库岸防护力度得到加强的情况下，递减趋势明显。

2.水库型滑坡空间分布特征

图2展示了175 m试验性蓄水初期诱发的滑坡分布情况。从地理空间来看，水库型滑坡主要集中分布在长江的干流和部分支流（见图2）。由于长江沿线的斜坡地质环境条件差异巨大，各段的滑坡发育情况也有较大差异。可按地质岩性将三峡库区划分为3个库段：

（1）下库段

从坝址至庙河的结晶岩低山丘陵宽谷段，库段长16 km（图2中Ⅰ）。由黄陵背斜核部前震旦纪结晶岩体组成，两岸地形低缓，河谷开阔，基本无大型滑坡发育，



注：A为树坪滑坡，B为泥儿湾滑坡，C为青石滑坡，D为干井子滑坡，E为望霞崩塌，F为龚家坊滑坡，G为红岩子滑坡，H为川主村滑坡，I为凉水井滑坡

图2 三峡库区175 m试验性蓄水诱发滑坡分布（时间：2008.9.1—2021.4.1）

规模较大的仅有野猫面滑坡。该滑坡位于牛肝马肺峡至空岭滩之间的峡谷北岸，距三峡水库坝址17 km，体积约1680×10^4 m^3。专业监测表明，野猫面滑坡体整体无明显位移性变化。滑坡体局部监测点在库水位上升及消落期有微量变化，但方向性没有统一的规律，滑坡体目前处于基本稳定状态。

（2）中库段

从庙河至白帝城的碳酸盐岩夹碎屑岩段，长141.5 km（图2中II）。该段地貌上峡谷与宽谷相间出现，构造上属上扬子台褶带的黔江拱褶断束。水库型滑坡主要发育在巫山县至白帝城附近区域。区域岩性分布复杂多变，连续出露从志留系的粉砂岩至三叠系的地层。峡谷区岩性主要为灰岩，宽谷区岩性主要为泥岩、砂岩和页岩互层。该段崩塌、滑坡比较发育。龚家坊滑坡为峡谷区发育的典型岩质滑坡，望霞崩塌也发生在该段峡谷区。秭归县沙镇溪镇至巴东县城段也是滑坡极易发生区域，但由于靠近库首，其新生滑坡和老滑坡复活多集中在2003—2007年的135 m蓄水和156 m蓄水期间。这一区域出露的基岩地层主要为侏罗系和三叠系巴东组地层，为三峡库区的易滑地层。该段主要为堆积层的老滑坡，发育有千将坪滑坡、树坪滑坡、卡门子湾等大型滑坡。

（3）上库段

从白帝城至库尾猫儿峡的碎屑岩段，长492.5 km（图2中III）。该段地貌上为低山丘陵宽谷，构造上属四川台坳的川东褶皱带。水库型滑坡主要发育在巫山县至云阳县故陵镇段、云阳县至丰都县段、长寿区至木洞镇段。该段主要出露的岩性为侏罗系泥岩粉砂岩砂岩互层，多为中、缓倾角顺向坡，滑坡发育。典型滑坡如凉水井滑坡、峰包岭滑坡群等都分布在该段。

3.三峡库区地质灾害发育阶段

在资料收集整理、野外调查和趋势分析基础上，认为三峡库区地质灾害发生规律具有如下特征：

①早期水库滑坡的发生与水位升降过程关系密切。三峡水库蓄水初期老滑坡复活和新生滑坡高发，例如：2008年175 m试验性蓄水造成333处滑坡；从2011年开始滑坡明显下降至十几处；2017—2019年滑坡数小于10处，处于低水平偶发阶段。水库型滑坡主要集中分布在长江的干流和部分支流。

②水位升降速率影响水库滑坡稳定性，对区域滑坡的发生具有一定的控制作用。建议以1 d、5 d和10 d的多水位变化指标进行库区滑坡的风险控制。

③从滑坡发生原因和发生时间来看，水库滑坡诱灾因素从早期的蓄水、蓄水+降雨演化为岩体劣化。季节变动带（消落带）的快速岩溶及岩体劣化是岩溶岸坡重要的诱灾因素。岩体劣化给三峡库区高陡岩溶岸坡带来了前所未有的失稳风险，使得库区地质灾害防治面临巨大挑战。

可以把三峡库区的地质灾害划分为5个阶段（见表2）。其中：

第一阶段为1994年三峡移民工程开工之前，库区地质灾害主要由河流冲蚀和降雨等自然因素诱发。

第二阶段为1994—2003年移民迁建期间，高强度的人类工程活动和降雨是主要的诱发因素。

第三阶段为2003—2008年三峡水库阶段性蓄水期间，主要由库水位变动引发。

第四阶段为2008年开始的175 m水位试验性蓄水，诱发因素为库水位周期性变动及降雨。

第五阶段与消落带岩体劣化的灾变效应密切关联，其标志性事件可以是巫山箭穿洞危岩体和秭归卡门子湾滑坡（2019年12月无明显水位变动和降雨，秭归卡门子湾在12月10日发生了滑坡。10多年水位变动导致的滑坡体中下部岩体劣化被认为是该红层基岩滑坡的诱发因素）。

三、三峡库区地质灾害监测预警

三峡库区是我国最早系统开展地质灾害监测预警的地区之一，不仅为库区防灾减灾发挥了重要作用，也

表2 三峡库区地质灾害发育阶段与诱发因素

阶 段	诱发因素	典型滑坡案例
第一阶段（1994年以前）	自然因素	云阳鸡扒子滑坡、秭归新滩滑坡
第二阶段（1994—2003年）	人类工程活动+降雨	武隆五一滑坡、巫山新城址中段滑坡
第三阶段（2003—2008年）	蓄水	秭归千将坪滑坡、秭归白家包滑坡、巫山龚家坊滑坡、巫山青石滑坡
第四阶段（2008—2019年）	蓄水+降雨	秭归泥儿湾滑坡、巫山红岩子滑坡、巫山干井子滑坡
第五阶段（2019年至今）	蓄水+岩体劣化、蓄水+降雨+岩体劣化	秭归卡门子湾滑坡、巫山箭穿洞危岩体

为全国和国际地质灾害监测预警提供了非常宝贵的经验。三峡工程兴建和蓄水运行以来，加强了地质灾害监测预警理论研究和技术研发，涵盖蓄水引发的地质灾害形成机理、分析评价方法、监测预警预报技术方法、监测仪器研制、信息化建设等，解决了库区地质灾害监测预警工程中的理论及技术难题，丰富了我国地质灾害监测预警理论、技术与方法体系，极大地提升了我国地质灾害监测预警科学研究水平。

三峡库区地质灾害监测预警工程所建设的监测预警体系，是由专业监测预警体系、群测群防监测预警体系和信息系统三部分构成。在地方各级政府的组织实施及配合支持下，采取群专结合，以群测群防监测为基础，对地质灾害全面监测预警；以专业监测预警为重点，对重要地段、危害严重的滑坡实施重点监测预警和险情调查评估；以信息系统为决策支持中心，存储、管理、应用相关信息，及时预警预报险情，为政府及有关部门提供三峡库区内已经发生的地质灾害和将要发生的地质灾害动态信息，为政府防灾减灾决策及时提供科学依据和技术支持，为三峡库区社会稳定、经济建设和可持续发展提供保障。

1. 专业监测系统

专业监测预警是采用精密的地表监测设备（如自动位移计、GNSS、雨量计等）进行全天候的连续专业监测，并为后续地质灾害的科学预警提供可靠数据支持。三峡库区以丘陵山地为主，历来就是地质灾害的重灾区和多发区，水库蓄水水位迅速抬升及水位升降，导致大量老滑坡复活和新滑坡产生。截至2020年年底，三峡库区共实施专业监测218处，包括专业监测的崩塌、滑坡和不稳定库岸共204处以及应急专业监测点14处，分布在三峡库区秭归、巴东等17个区县。其中湖北三峡库区专业监测点81处、应急监测点4处，重庆三峡库区专业监测点123处、应急监测点10处。从分布情况看，专业监测点主要分布在万州下游崩塌、滑坡频发的区县，包括秭归、巴东、巫山、奉节、云阳、万州等6个区县，实施专业监测的崩塌、滑坡数量为159处，占三峡库区专业监测总数的78%。

三峡库区地质灾害专业监测采用地表位移监测、深部位移（钻孔倾斜）监测、地下水水位监测、滑坡推力监测、雨量监测、地裂缝等与宏观地质调查巡查相结合的综合监测手段。其中地表位移监测使用最为普遍，覆盖库区所有专业监测点。对于部分重点滑坡，根据需要采用多种监测手段相结合构建滑坡立体监测体系。

2. 群测群防网络监测体系

构建群测群防网络，就是通过简易监测或定期巡查发现地质灾害前兆，及时启动防灾预案而成功避灾；或者当地居民发现局部滑塌或裂缝等宏观前兆，及时报告当地政府主管部门，当地主管部门人员及时巡查、判断可能成灾时，通过广播、电话通知、手机短信、呼喊等手段组织撤离而实现成功避灾。对库区已经查明的4000多处地质灾害点全部纳入群测群防监测点，均按县、乡、村三级群测群防监测网体系运行，落实了监测预警岗位责任制，逐级签订了责任书，每个群测群防地质灾害点都有监测人和责任人，制定了汛期值班制度、险情巡视警报制度等，同时制定发放防灾工作明白卡和避险明白卡。由于群测群防员处于地质灾害防治一线，三峡库区建立的地质灾害点群测群防体系具有很强的时效性，在库区地质灾害防治中发挥了重要作用。据统计，群测群防员及时发现了千余处地质灾害点有变形迹象，为防灾减灾作出了突出贡献。

3. 地质灾害防治信息系统

三峡库区构建了功能强大的地质灾害预警与防治决策支持系统，在网络及基础设施、标准化体系、数据体系和安全防护体系等支持下，建立了基于SOA的国家、省、市、县四级联动，野外/室内资源共享的地质灾害防治信息服务平台，增加了基于无人机的地质灾害应急响应系统、地质灾害风险识别与险情发布系统等，具有较完备的地质灾害信息管理和处理分析功能。地质灾害灾险情应急技术支撑平台引入了Mesh自组网通信技术，融合航空图像监控系统，建成了轻量级便携式的地质灾害临灾调查与远程会商移动通信平台；集成有线网络、无线通信、卫星通信等技术，建立了地质灾害灾险情现场调查和应急会商数据通信网络，构建了一套地质灾害灾险情现场调查与多方会商的应急支撑平台，有效增强了地质灾害应急响应支撑力度。

4. 典型地质灾害监测预警案例

箭穿洞危岩体位于巫峡神女峰下，自三峡水库蓄水运行以来，岸坡岩体劣化强烈（图3）。研究表明，箭穿洞岩体呈“塔柱状”，基座为大冶组的泥质条带灰岩，岩石强度较低，在上部荷载和坡体应力作用下，该层出现了劈裂状的裂缝。基座上分布3处平硐，平硐顶板的岩体呈网状或块状，#3平硐的顶板已发生了小规模的垮塌；平硐底板岩体在长江江水的作用下顺着纵张裂缝逐渐被掏蚀，形成宽0.1～1.0 m、深1～2 m的裂缝；基座岩体为泥质条带状构造，在长江江水的掏

蚀作用下，见条带被掏蚀，形成层间裂缝，高5～20 cm，贯通长度1～2.9 m。

箭穿洞危岩体的变形均与危岩基座相关，基座变形引发上部岩体变形，破坏方式属于基座压裂型崩塌失稳。在箭穿洞基座平硐内布置了振弦式应力传感器，以监测水库运行期间水位变动与危岩体底座应力变化的规律。根据危岩压力监测曲线（见图4），变化具有两个特点：①周期性变化，危岩基座压力曲线呈波动状起伏，在水位下降时基座压力增大，水位上升时基座压力减小，且在8月份库水位最低时达到最大值；②系统性增加，基座岩体结构随水库周期性消落逐渐劣化，在危岩体上部荷载作用下，基座岩体被压碎，并逐年向上部发展，应力值每年约增加1 MPa。因此，自2019年以来，对箭穿洞危岩实施了工程治理。

图3 巫峡箭穿洞危岩体及底座应力监测

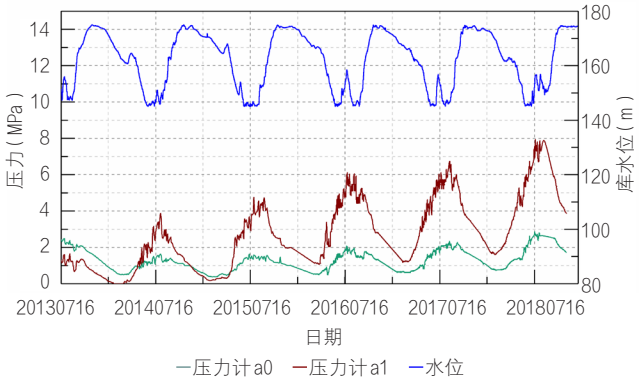


图4 巫峡箭穿洞#1平硐内压力a0和a1点监测曲线

四、三峡库区长期地质安全研究

2008—2020年长达13年的三峡水库175 m试验性蓄水运行表明，每年蓄水引发的库岸滑坡已从2008年的333次下降到近几年的10次以下，巴东、巫山、奉节、云阳、万州等主要移民城市和近百座移民城镇库岸逐渐趋于稳定，由水库蓄水引发的地质灾害已由高发期向低风险水平的平稳期过渡。但是，滑坡涌浪灾害问题仍然突出，对三峡库区城镇和航道的长期地质安全构成了严重危害（表3）。

表3 三峡库区重大滑坡崩塌（潜在）涌浪灾害情况

序号	时间	地点	滑坡涌浪灾情描述
1	2003年7月13日	秭归千将坪滑坡	千将坪滑坡造成滑坡体上居民11人死亡（失踪），大量建筑物及公路被摧毁。滑坡堵江并形成最高约43 m的坝体，涌浪共造成3 km内22艘渔船翻沉，13人失踪
2	2008年11月5日—9日	秭归泥儿湾滑坡	总体积约80×10^4 m^{3}的滑坡体持续变形，第一次剧烈变形在对岸产生了1 m左右的涌浪爬高。潜在涌浪风险造成200 m高程以下的居民和学校撤离约两周，归州河航道限行封航
3	2008年11月23日	巫山龚家方崩塌	涌浪造成13 km沿岸航标灯塔和其他设施受到不同程度损毁，停靠在码头的多条船只缆绳拉断，多条大型旅游船只船底受损，直接经济损失达500万元
4	2008年11月	巫溪川主村滑坡	总体积约150×10^4 m^{3}的滑坡滑入大宁河，堵塞1/4河道，形成了涌浪，大宁河航道限行封航
5	2009年3—4月	云阳凉水井滑坡	总体积约360×10^4 m^{3}的滑坡体持续强烈变形，潜在的涌浪风险造成长江航道长时间限航，经济损失巨大
6	2010年10月11日	巫山青石滑坡	滑坡前缘剧烈变形后，潜在的涌浪风险造成神女溪景区关闭1年多，直接经济损失过亿元
7	2010年10月21日	巫山望霞崩塌	崩塌发生后，潜在涌浪风险造成长江航道巫峡段多次长时间限航、封航，经济损失过亿元
8	2012年12月28日	兴山昭君大桥旁侧山体崩塌	体积约0.6×10^4 m^3，入水后形成的水浪高约16 m，漫过昭君大桥桥面2 m左右。一辆客车受到冲击，两名行人为滚石所伤，涌浪传播至对岸的爬高达3.4～5.2 m，破坏了对岸的部分农田及桥面上的商贩摊位
9	2015年6月	巫山红岩子滑坡	总体积约23×10^4 m^{3}的滑坡滑入大宁河与长江交汇处，形成最大12 m的爬高，造成2人死亡，13艘船只翻沉
10	2015年7月	巫山干井子滑坡	总体积约200×10^4 m^{3}的滑坡体持续破坏，造成长江航道巫峡段限航，造成大量经济损失

1.水库蓄水滑坡涌浪复合灾害

2003年千将坪滑坡是三峡水库蓄水后第一起滑坡涌浪事件。千将坪滑坡开始变形后成功进行了监测预警，居民点人员及时撤离，但由于没有开展涌浪预警，造成了滑体外人员伤亡超过滑体内的后果。2008年龚家方滑坡涌浪后，库区系统开展了涌浪评价与风险防范工作。据不完全统计，蓄水以来三峡

库区重庆段遭受滑坡涌浪威胁达40多次。总体来讲，三峡水库175 m试验性蓄水后滑坡涌浪灾害风险显著增加。

图5为滑坡涌浪致灾概化示意。这一岩土体运动既可以是滑坡，例如千将坪滑坡和红岩子滑坡，滑动入水产生涌浪致灾；也可以是崩塌，例如箭穿洞危岩体和冠木岭危岩体。

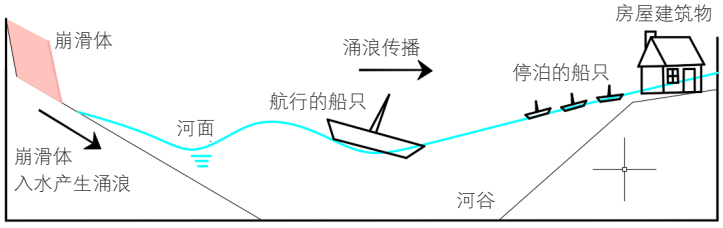


图5 滑坡崩塌入江涌浪灾害示意

2.消落带岩体劣化灾害风险

由于三峡库区水位在高程145～175 m范围周期性涨落，消落带岸坡渗流场、应力场、温度场等发生周期性变化，导致了岸坡岩体结构和物理力学性能加速降低，即岸坡岩体劣化。据初步调查，三峡库区自长寿至秭归段库岸两岸总长约1070 km，其中岸坡劣化强烈区段长约205 km，主要分布于云阳左岸、奉节顺向区、巫山高陡峡谷区、巴东上游碳酸盐岩高陡峡谷区、巴东下游至郭家坝碎屑岩段和秭归碳酸盐岩高陡峡谷区（见图6）。

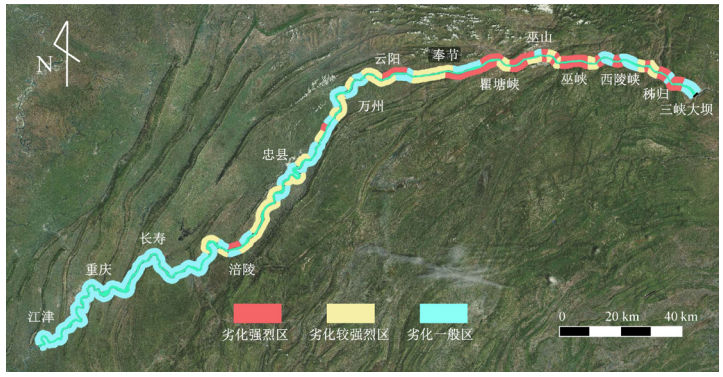


图6 三峡库区岸坡岩体劣化程度及分布情况

考虑三峡库区各段地形地质条件、岩体劣化孕育特征及地质灾害现状等因素，可将库岸分为15个大段，详细分段情况见表4。

可将消落带岩体宏观劣化类型分为碳酸盐岩劣化型与碎屑岩劣化型两个大类7个亚类（见图7）。

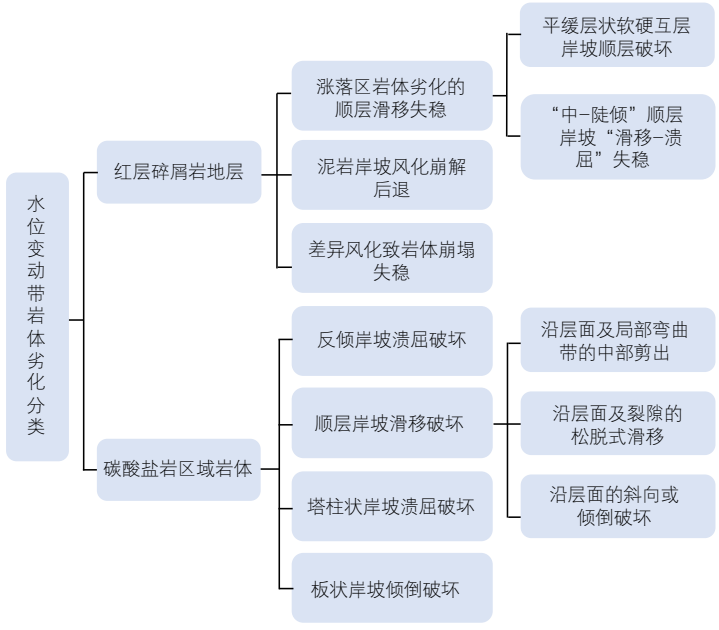


图7 三峡库区消落带岩体劣化破坏分类

3.峡谷区岸坡劣化带防治工程

三峡工程蓄水运行以来，消落带岩体劣化过程加速，导致有些地段岸坡变形和应力明显变化，显示进入临滑破坏状态，称为临失稳岸坡。以巫峡箭穿洞危岩最为典型，其防治工程针对危岩“上硬下软”的岩性组合，提出基座补强加固、消落带防劣化是关键，通过对削方、抗滑键、支墩等多种工程方案在经济、技术、施工难度以及对周边环境影响等方面的比选，最终选择了基座软弱岩体补强加固+防护工程（锚索、被动防护网、主动防护网、水下柔性防护垫）的治理方案。防治效果表明，上述新技术、新方法和新工艺的运用是切实可行和科学有效的，可为三峡库区以箭穿洞危岩为代表的同类危岩以及临失稳岸坡整治工程的防治技术研究及有效治理提供一定的经验借鉴。

在三峡库区，广泛分布被多组大型优势软弱结构面分离，但破坏面尚未完全贯通，稳定性正在持续下降的岸坡，称为亚失稳岸坡。由于水库变动导致消落区规律性新生裂纹或裂缝扩张，宏观上未发生明显变形破坏，且监测数据未显示明显异常，但持续劣化将发生较大规模破坏或整体崩滑失稳。以巫峡板壁岩危岩为

表4 三峡库区库岸分段情况

序号	分段名称	库岸工程地质条件及岩体劣化分段特征
1	九畹溪至庙河段平缓岩溶区	全长约4.6 km，其特征为薄层—中厚层、缓倾层状（块状）结构灰岩、白云岩夹薄层的泥页岩被大量冲蚀溶蚀及松动剥落。整体上，该段岸坡为缓坡，坡体坡度较小。该段由水位变动岩体劣化致灾的风险性低
2	西陵峡村至九畹溪段高陡岩溶区	全长约3.0 km，其特征为陡倾至陡立顺层及斜顺层岸坡层状结构，岩性主要以寒武系灰岩和白云岩居多，劣化类型主要表现为碳酸盐岩的溶蚀作用，以溶蚀潜蚀及裂缝显化扩张型为主，岩体结构面较发育，岩体破碎加剧。由于岩层陡倾，当结构面扩展或显化后，在重力作用下会引发块体的旋转或下滑。该段由水位变动岩体劣化致灾的风险性高；局部危岩体的致灾风险极高
3	链子崖至西陵峡村段高陡岩溶区	全长约6.2 km，岩性为奥陶系灰岩白云岩和夹薄层泥灰岩、泥质白云岩、页岩。由于九畹溪大断裂的穿过，致使该段岩体极其破碎，劣化类型主要表现为岩体机械侵蚀（掏蚀）。该段由水位变动岩体劣化致灾的风险性中等；局部危岩体的致灾风险高—极高
4	郭家坝至链子崖段高陡岩溶区	全长约3.6 km，其特征为陡倾至陡立顺层及斜顺层岸坡层状结构，岩性主要以二叠系、三叠系灰岩和白云岩居多，劣化类型主要表现为碳酸盐岩溶蚀作用，以溶蚀潜蚀及裂缝显化扩张型为主，岩体结构面极其发育、岩体破碎加剧。当结构面扩展或显化后，在重力作用下会引发块体的旋转或下滑。该段由水位变动岩体劣化致灾的风险性高
5	宝塔河至郭家坝段平缓宽谷区	全长约32.9 km，该段以侏罗系红层碎屑岩为主，岸坡平缓，坡体结构主要以顺层、斜顺层居多，岩性主要为砂岩夹泥页岩互层，主要表现的岸坡岩体劣化类型为冲蚀磨蚀、松动剥落、结构面崩解与块裂及软硬相间侵蚀等，其中以松动剥落类型居多。该段由水位变动岩体劣化致灾的风险性低
6	小溪河至宝塔河段平缓宽谷区	全长约8.8 km，该段以三叠系和侏罗系泥灰岩、红层碎屑岩为主，其特征为缓倾顺层岸坡层状结构面较发育、岩体破碎加剧。由于岩层陡倾，当结构面扩展或显化后，在重力作用下会引发块体的旋转或下滑，造成岩体表层松动破碎，岩体结构面进一步增多。该段由水位变动岩体劣化致灾的风险性高
7	神女溪至小溪河高陡岩溶区	全长约24 km，主要是三叠系下统坚硬的中厚层状强岩溶化灰岩及白云岩岩组；呈高陡峡谷状产出。库岸整体变形表现为水对岩体的掏蚀、浪蚀及溶蚀作用，岩体呈现局部的强烈劣化崩解、溶蚀、滑移等现象，其余区段存在不同程度的溶蚀和物理劣化现象。该段由水位变动岩体劣化致灾的风险性极高
8	巫峡口至神女溪段高陡岩溶区	全长约12 km，主要是三叠系中下统地层，局部出露志留系、泥盆系地层，岩性主要为坚硬的中—厚层状中等岩溶化灰岩及白云岩岩组；形成切向和逆向的岩质岸坡，呈高陡峡谷状产出。库岸整体变形表现为水对岩体的掏蚀、浪蚀及溶蚀作用。该段由水位变动岩体劣化致灾的风险性中等
9	大溪至巫山段宽谷岩溶区	全长约30 km，主要是三叠系中统巴东组坚硬的中—厚层状中等岩溶化灰岩夹软弱的薄层状泥岩岩组，该类岩体整体破碎；形成切向—近顺向岩土质混合岸坡。库岸整体呈宽缓谷状及台阶状产出。库岸整体变形表现为水对土体和岩体的掏蚀、浪蚀及溶蚀作用，库岸消落带岩土体劣化严重。该库岸段大量既有地灾点虽然已做防护处理，但近年来突发和变形的地灾点数量仍然很大，故由劣化致灾的风险性为高
10	瞿塘峡段高陡岩溶区	全长约6 km，主要是三叠系中下统坚硬的中—厚层状中等岩溶化灰岩及白云岩岩组；形成切向岩质岸坡，呈高陡峡谷状产出。库岸整体变形表现为水对岩体的掏蚀、浪蚀及溶蚀作用。水位变动带岩体的表观劣化呈微弱发展趋势，主要表现为构造及岩体裂缝的缓慢新生和扩展，本段库岸由劣化致灾的风险性为小
11	奉节至瞿塘峡段岩溶区	全长约20 km，主要是三叠系中统巴东组坚硬的中—厚层状中等岩溶化灰岩夹软弱的薄层状泥岩，岩体整体破碎，形成切向岩质岸坡；库岸整体呈宽缓谷状及台阶状产出。库岸整体变形表现为水对土体和岩体的掏蚀、浪蚀及溶蚀作用，库岸消落带岩土体劣化严重。该库岸段大量既有地灾点已做防护处理，由水位变动劣化致灾的易损对象等级低，故由劣化致灾的风险性为中等
12	万州至奉节段顺层红层区	全长约103 km，主要是侏罗系红层较坚硬—软弱的中厚层状砂、泥岩互层岩组；在库岸南侧多形成顺向库岸段，北侧多为逆向库岸段，库岸整体呈宽缓谷状及台阶状产出。库岸整体变形表现为水对土体和易风化岩体的掏蚀和浪蚀作用。由于库岸顺层发育且局部库岸段存在软弱夹层，受水位影响，存在局部或整体滑移的趋势和应力调整现象。库岸消落带岩土体劣化严重，该库岸段由劣化致灾的风险性高
13	丰都至万州段缓倾顺层红层区	全长约152 km，主要是侏罗系红层较坚硬—软弱的中厚层状砂、泥岩互层岩组；以同倾顺向库岸为主，库岸整体呈宽缓谷状产出。库岸整体变形表现为水对土体和易风化岩体的掏蚀和浪蚀作用。同时，由于库岸顺层发育，受水位影响，存在局部滑移的趋势和应力调整现象。库岸消落带岩土体劣化比较严重，但由劣化致灾的风险性低
14	江北至丰都段切层红层区	全长约155 km，主要是侏罗系红层地层，部分出露三叠系地层；岩性主要为较坚硬—软弱的中厚层状砂、泥岩互层岩组。库岸多呈切向坡，大部分区域呈宽谷状产出。水位变动带岸坡多覆盖厚层第三系、第四系冲洪积土层；库岸整体变形表现为水对土体和易风化岩体的掏蚀和浪蚀作用，库岸消落带岩土体劣化较严重，但由劣化致灾的风险性低
15	江津至江北段宽谷红层区	全长约155 km，以侏罗系较坚硬—软弱的中厚层状砂、泥岩互层岩组为主；库岸多呈切向坡产出；库岸坡度平缓，多覆盖第四系冲洪积土层及残坡积层。主要表现的岸坡岩体劣化类型为冲蚀磨蚀、松动剥落、局部结构面崩解与块裂及软硬相间侵蚀等，其中以松动剥落类型居多，由劣化致灾的风险性低

例，从设计理念上，在对此类岸坡进行防护治理时，不以抗倾和抗滑稳定性计算作为设计依据，应以补强加固措施为主，辅以生态防护等工程协同实施。防护材料不应采用高强锚索、高强混凝土等强力材料，应更多地选用可封闭、耐冲刷、耐久的水稳定性胶结和锚固新型材料。对劣化关键部位如裂隙、层面、溶孔等进行胶结、封闭、固化，以提高其整体防劣化能力，进而提升岸坡整体稳定性。

五、战略对策与措施建议

自2008年三峡水库175 m试验性蓄水以来，三峡库区地质灾害呈现新特点：一是由于水库运行，库水位

每年循环涨落30 m，造成库岸岩体结构劣化软化，增加了滑坡涌浪复合型灾害风险；二是移民城镇高切坡防护工程已运行20余年，失稳失效案例增多，监测预警能力亟待智能化升级；三是库区新一轮建设正在向前期地质勘查程度偏低的支流和更高山地发展，面临新的地质灾害风险。因此，提出如下对策建议。

1.大力提升库区城镇滑坡、高边坡和岸坡劣化带的实时监测与精准预警信息化水平

据2020年调查数据，重庆库区地质灾害点达到3733处，但监测预警仍以群测群防为主，采用仪器的专业监测点仅有140处。此次研究发现，云阳、奉节、巫山等城区高边坡仍采用相对落后的人工定期监测方式，信息获取滞后，难以进行及时准确的科学判断。建议进一步推广成熟的专业监测预警设备和技术，及时对已有监测设备和信息系统平台等进行维护更新与升级，全面加强库区地质灾害监测预警体系的科技支撑能力建设。应充分利用北斗卫星和多要素传感器等先进技术，建立实时监测系统，提升库区城镇滑坡、高边坡和水库消落带岸坡劣化灾变的健康诊断和精准预警科技水平。

2.高度重视岸坡劣化带造成的滑坡崩塌灾害风险，并加快分区分期综合治理

近年来，库区长江干流峡谷区及支流九畹溪、神龙溪、大宁河、神女溪、抱龙河等消落区岸坡岩体均出现了不同程度劣化问题。建议加快峡谷区高陡岸坡岩体劣化调查、监测、评价工作；以预警避让和坡体养护为主、工程治理为辅的原则，结合自然景观资源保护，因地制宜采用新型锚固材料和新型护坡/灌浆材料等适配性加固技术，尽早对劣化程度高、滑坡崩塌导致涌浪风险大的岸坡实施工程防护与整治；特别是要高度关注支流大宁河和巫峡神女溪等景区航道和游客的安全，对稳定性差的地段加快进行实时监测和工程处置。

3.加强城镇扩展新区不良地质工程和滑坡灾害整治，探索划定地质灾害红线

目前，三峡库区城镇因移民就地后靠迁建已经结束，进入城镇新扩展区规划建设阶段。城镇新扩展区主要向工程地质勘察程度相对偏低，甚至是地质灾害隐患更高的支流和后山扩建。部分开发建设由于未进行系统且符合规范的更大范围场区前期勘察和整治，仅考虑局部地基稳定性问题，带来了地质安全风险，甚至引发特大地质灾害。对城镇扩展新区建设用地应先期开展区域和场地地质安全评价与综合整治。应规范城镇建设用地适宜性评估，开展地质灾害精细调查和风险区划，探索划定地质灾害红线，并作为库区城镇国土空间规划的限制性因素。

4.加强库区城镇地质灾害风险管理和地质安全诊断

随着库区城镇建设速度加快，地质环境容量严重不足，不得不利用滑坡体作为建设场地，这也带来了新的地质问题。不少治理后的边坡被改造为建筑物地基，加载严重，甚至毁损了已有防护工程，地质灾害风险加大。因此，应进一步贯彻落实长江经济带绿色发展要求，结合适度发展的模式需要，科学合理布局与调整城镇功能，遵循“生态优先、绿色发展”战略导向，规范城镇建设用地适宜性评估，严格科学管控库区城镇和各类工程建设规模，保障地质安全和可持续发展。同时，20世纪90年代以来先后在移民迁建城镇区实施的滑坡防治工程、高切坡防护工程和库岸防护工程已开始随着时间推移出现“老化”现象，建议定期进行城镇区重点滑坡危岩灾害风险地段的“健康诊断”，及早发现隐患，科学进行处置。

5.加强三峡库区地质灾害防治和应急处置能力建设

三峡库区地质灾害具有长期性、阶段性、隐蔽性和突发性等特点。三峡工程处于常态运行阶段，库水位每年30 m的周期性升降决定了地质灾害隐患难以全部准确调查和预测，应急处置成为三峡工程后续工作中的一项重要且长期内容。建议加强对峡谷区地质灾害应急专业队伍和应急处置船舶等专业装备的建设，提高峡谷区地质灾害的应对能力和机械化快速处置水平。建议加强与水库运行调度、航运、旅游等部门的协同沟通，适时并有效地开展突发新生地质灾害的应急处置。

6.加快三峡工程蓄水以来的地质灾害科学技术研究

自2001年二期地质灾害防治规划实施以来，积累了大量的经验教训，三峡库区初步经受了水位周期性涨落的考验。同时，三峡库区在地质灾害调查、勘察、监测和防治理论及技术上也遇到了一系列新的挑战。建议尽快制定专项研究计划，更好发挥有关学校和科研机构的专业力量，采用产学研相结合的方式联合攻关，在二、三期已取得的防灾减灾成果基础上，进一步凝炼理论和实践认识，为今后地质灾害防治提供科学

依据，全面提升库区地质灾害防治科技水平。同时，建议加强高层次、高水平、开放式的地质灾害防治科研基地建设，为国内外学者提供良好的地质灾害研究平台，以促进有关学科的发展。

六、结 语

以地质灾害失稳机理和成灾模式为主线，重点研究了三峡工程蓄水运行以来的地质灾害演化规律，以及如何保障城镇和航道长期地质安全的战略措施。主要结论包括：①大力提升库区城镇滑坡、高边坡和岸坡劣化带的实时监测与精准预警信息化水平；②高度重视岸坡劣化带造成的滑坡崩塌灾害风险，并加快分区分期综合治理；③进一步加强库区城镇扩展新区不良地质工程和潜在滑坡灾害整治，探索划定地质灾害红线；④加强库区城镇的地质灾害风险管理和地质安全诊断；⑤加强三峡库区地质灾害防治和应急处置能力建设；⑥加快三峡工程蓄水以来的地质灾害科学技术研究。

致谢：本文在研究期间，得到了任辉启院士、刘汉龙院士、马飞教授级高工、黄波林教授、张枝华教授级高工的指导与帮助，特此致谢！

参考文献：

[1] HUANG B L, YIN Y P, LIU G N, et al.Analysis of waves generated by Gongjiafang landslide in Wu Gorge, three Gorges reservoir, on November 23, 2008[J].Landslides, 2012, 9(3):395-405.

[2] HUANG B L, YIN Y P, YAN G Q, et al.A study on in situ measurements of carbonate rock mass degradation in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir, China[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 80(2):1-11.

[3] TANG H M, WASOWSKI J, JUANG C H.Geohazards in the three Gorges Reservoir Area, China-Lessons learned from decades of research[J].Engineering Geology, 2019, 261(C):105267.

[4] YIN Y P, HUANG B L, WANG W P, et al.Reservoir-induced landslides and risk control in Three Gorges Project on Yangtze River, China[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 8(5):577-595.

[5] YIN Y P, HUANG B L, ZHANG Q, et al.Research on recently occurred reservoir-induced Kamenziwan rockslide in Three Gorges Reservoir, China[J].Landslides, 2020, 17(8):1935-1949.

[6] YIN Y P, WANG H D, GAO Y L, et al.Real-time monitoring and early warning of landslidesat relocated Wushan Town, the Three GorgesReservoir, China[J].Landslides, 2010, 7(3):339-349.

[7] 黄波林，殷跃平，刘广宁，等.三峡库区龚家方崩滑体涌浪物理原型试验与数值模拟对比研究[J].岩石力学与工程学报，2014，33(S1):2677-2684.

[8] 吴润泽，程温鸣，刘军旗，等.三峡库区地质灾害防治信息系统及预警指挥系统数据管理模式探讨[J].中国地质灾害与防治学报，2018，29(5):102-107.

[9] 闫国强，黄波林，代贞伟，等.三峡库区巫峡段典型岩体劣化特征研究[J].水文地质工程地质，2020，47(4):62-72.

[10] 蒋文明，王鲁琦，赵鹏，等.三峡库区箭穿洞危岩体变形破坏模式与防治效果分析[J].中国地质灾害与防治学报，2021，32(5):105-112.

[11] 蒋先念，张晨阳.三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析[J].中国地质灾害与防治学报，2021，32(2):36-42.

责任编辑 熊 璠