DOI：10.11779/CJGE202207007 “十三五”国家重点研发计划项目

堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发

蔡耀军[1,2]，周 招[2]，杨兴国[3]，魏迎奇[4]，郑东健[5]，彭文祥[1,6]，钟启明[7]，王 衡[8]

(1. 长江勘测规划设计研究有限责任公司，湖北 武汉 430010；2. 长江设计集团有限公司，湖北 武汉 430010；3. 四川大学，四川 成都 610065；4. 中国水利水电科学研究院，北京 100048；5. 河海大学，江苏 南京 210024；6. 国家大坝安全工程技术研究中心，湖北 武汉 430010；7. 南京水利科学研究院，江苏 南京 210029；8. 中国葛洲坝集团勘测设计有限公司，湖北 武汉 430073)

摘 要：中国西南高山峡谷地区极易因降雨或地震造成山体滑坡、泥石流堵塞天然河道形成堰塞湖，堰塞湖漫顶溃决极易形成超过历史最大天然洪水的溃决洪峰，严重威胁沿岸人民群众生命财产安全并破坏生态环境。鉴于当前堰塞湖风险处置技术水平尚难以满足堰塞湖高效应急处置需求，“十三五”国家重点研发计划项目“堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发”以“高效快速、科学减灾”为目标，通过3年联合攻关，在揭示堰塞湖形成及溃决机理、堰塞湖多源信息快速获取、堰塞湖险情监控预警、堰塞湖风险评估以及堰塞湖应急处置和抢险装备研发等方面取得一系列创新成果，为堰塞湖高效处置提供了理论方法和科学手段，社会和经济效益显著，具有广阔的应用前景。

关键词：堰塞湖；溃决机理；多源信息；风险评估；应急处置

中图分类号：TV62 **文献标识码**：A **文章编号**：1000–4548(2022)07–1266–15

作者简介：蔡耀军(1963—)，男，博士，正高级工程师，现任长江设计集团有限公司副总工程师，兼任水利部长江勘测技术研究所所长，中国水利学会勘测专业委员会常务副主任，湖北省地质学会副理事长。长期从事水利水电工程勘察、特殊岩土、地质灾害防治与抢险技术研究和应用，先后主持南水北调中线、丹江口大坝加高、汉江兴隆水利枢纽、湖南皂市水利枢纽、金沙江旭龙水电站、阳江中-低放废料地下岩洞处置等二十余项大中型工程勘察研究，主持完成十余项科研项目，是“十三五”国家重点研发计划项目“堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发”首席科学家，“十二五”国家科技支撑计划项目“南水北调中线工程膨胀土和高填方渠道建设关键技术研究与示范”及“十一五” “南水北调工程若干关键技术研究与应用”课题负责人，国家863计划“南水北调中线工程生态环境效应遥感监测技术”负责人。金沙江白格堰塞湖应急抢险国家防总专家组组长，西藏波密县冰湖险情处置水利部专家组组长。获国家及省部级科技奖15项；授权国家发明专利5项，实用新型专利14项；发表学术论文52篇，出版著作9部；主编国家、行业标准 3 部。先后获得全国水利系统先进青年科技工作者、全国水利水电勘测系统先进生产者、湖北省有突出贡献中青年专家、湖北省优秀留学回国人员等称号。E-mail：1761939361@qq.com。

Rapid detection for risk assessment, emergency disposal technology and equipment development of barrier lakes

CAI Yao-jun[1, 2], ZHOU Zhao[2], YANG Xing-guo[3], WEI Ying-qi[4], ZHENG Dong-jian[5], PENG Wen-xiang[1, 6], ZHONG Qi-ming[7], WANG Heng[8]

(1. Changjiang Inst. of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Design Group Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 3. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 4. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 5. Hohai University, Nanjing 210024, China; 6 National Dam Safety Engineering Technology Research Center, Wuhan 430010,China; 7. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 8. CGGC Survey and Design Ltd., Wuhan 430073, China)

Abstract: Influenced by the severe rainfalls or earthquakes, landslides and debris flows are easy to occur in the mountainous and canyon areas of Southwest China, leading to blockage of rivers and formation of barrier lakes. Once overtopping breach occurs, the barrier lake is very easy to form a flood peak exceeding the largest natural flood in history, which severely threatens the lives and properties of the people along the river and destroys the ecological environment. During the 13th Five-Year Plan Period, the National Key Research and

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFC1508600）；自主创新项目（BSH2021G03，BSH2021G01）；博士后科学基金项目（2022M710490）
收稿日期：2022–03–05

Development program “Rapid detection for risk assessment, emergency disposal technology and equipment development of barrier lakes” was Approved to solve the shortage problem of efficient emergency disposal technology of barrier lakes. After three years of joint researches, some innovations were made in the aspects of formation and breach mechanism, rapid acquisition of multi-source information, danger monitoring and early warning, risk evaluation, emergency disposal, emergency equipments of barrier lakes. The researches have provided a theoretical method and scientific means for the efficient disposal of barrier lakes with remarkable social and economic benefits and broad application prospects.

Keyword: barrier lake; breach mechanism; multi-source information; risk assessment; emergency disposal

0 引　　言

堰塞湖作为一种重大频发自然灾害，主要由山体滑坡、崩塌以及泥石流等动力地质作用堵塞河道、沟谷而形成，拦堵天然河道的固体堆积物则称为堰塞体。随着上游持续来水，堰塞湖水位不断雍高极易造成堰塞体漫顶溃决，形成灾害链长远、破坏力巨大的非常态溃决洪峰，严重威胁下游沿岸人民群众生命财产安全。为缓解堰塞湖溃决洪水次生灾害，提升堰塞湖应急处置水平，“十三五”期间，科技部设立“重大自然灾害监测预警与防范”重点专项，2018 年 12 月“堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发”（2018YFC1508600）项目正式获批立项，该项目由长江勘测规划设计研究有限责任公司牵头，四川大学、中国水利水电科学研究院、河海大学、水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院、中国葛洲坝集团勘测设计有限公司、中国船舶重工集团应急预警与救援装备股份有限公司、香港科技大学深圳研究院、长江水利委员会长江科学院、长江水利委员会长江水文局共 10 家单位共同参与。

项目围绕堰塞湖灾害防治、减灾以及救灾能力提升，通过三年时间联合攻关，解决了基于岸坡地质运动堰塞体形成机理及不同结构及环境作用下堰塞湖溃决机理等两项科学问题，突破堰塞湖多源信息快速感知、携砂水流堰塞体溃决过程模拟、考虑结构形态要素堰塞湖致灾风险评估以及堰塞湖高效疏通排水和堰塞体控溃削峰等关键技术，有力提升中国堰塞湖应急处置技术水平，为保障人民生命财产安全提供科学技术保障。

1 研究背景

近些年受地震活动、极端气候及人类活动影响，堰塞湖呈现高发频发态势，尤其是在中国西南高山峡谷地区，地震及强降雨极易诱发山体滑坡或泥石流事件，堵塞天然河道，形成堰塞湖[1-2]。2008 年汶川地震在沱江、嘉陵江、岷江以及大渡河等流域诱发形成 256 座不同规模的堰塞湖，其中唐家山堰塞湖最大可蓄水量达到 3.2 亿 m^3，严重威胁下游绵阳、遂宁地区 130 万人民群众生命安全[3-4]。2018 年金沙江上游右岸白格村短时间内连续发生两次滑坡堵江事件（图 1），其中“11·03”白格堰塞湖溃决洪峰达到 31000 m^3/s，造成下游迪庆、丽江、大理等 4 州市共计 5.4 万人受灾[5-7]。

图 1　白格堰塞湖淹没波罗乡

Fig. 1 Boluo township flooded by Baige barrier lake

堰塞湖所处地理环境复杂，潜在破坏力大、影响范围广，而且自然存活时间较短，堰塞湖应急处置极具难度和挑战性。Costa 等[8]根据众多堰塞湖案例统计，堰塞湖在一天、一周、一月、半年及一年之内溃决比例分别高达 27%，41%，56%，80%，85%。石振明等[9]收集国内外 276 座堰塞湖案例，揭示堰塞湖自然寿命低于一天、一周、一月及一年的比例依次高达 34%，50%，67%，86%。但由于中国对堰塞湖研究起步较晚、认知水平较低，现阶段对其关键技术问题尚处于起步和探索阶段，尤其是堰塞湖溃决机理、风险评估及应急处置缺乏有效的理论指导和科学支撑，不能满足当前堰塞湖风险快速评估及高效应急处置要求。总体而言，针对堰塞湖险情，当前主要面临如下挑战。

（1）挑战 1：堰塞湖形成及溃决机理揭示

研究堰塞体物质来源和运动堆积过程与堰塞体物质组成和结构形态内在关系，揭示堰塞湖形成机理；研究不同结构及变化环境作用下堰塞湖溃决发展过程，揭示堰塞湖溃决机理，为堰塞湖溃决洪水预测提供技术支撑[10-11]。目前主要根据堰塞湖溃决案例的地貌参数特征统计分析堰塞湖形成过程，而实际堰塞湖形成与滑坡体积、滑坡运动机制、岩体完整性以及河道水流条件和河谷地貌等密切相关，不同类型的滑体性质、运动特征等存在较大差异，直接造成堰塞体具有不同的几何形态和物质组成等特征[12-16]。此外堰塞

湖漫顶溃决会经历多个阶段的发展演变，涉及均匀冲刷及陡坎溯源侵蚀引起的纵向下切、坡脚侧向冲刷与边坡坍塌引起的横向展宽，以及不同阶段纵向与横向冲刷交替发展，但当前对堰塞湖溃口发展机理缺乏深入了解，对溃口携砂水流作用机制和模拟研究甚少，堰塞湖模型尺度普遍偏小，难以对堰塞湖漫顶溃决过程影响因素做系统性试验分析[17-19]。

（2）挑战 2：堰塞湖多源信息获取

堰塞湖发生位置通常位于交通险阻、人迹罕至之地，堰塞体物质结构组成及水文信息普遍难以在短时间内获取，在分秒必争的堰塞湖应急处置现场极易因对堰塞湖信息缺乏足够了解，造成应急决策偏差或处置不当而引发严重次生灾害[20-21]。过去获取堰塞湖信息以卫星遥感为主，现时无人机技术得到广泛应用，卫星遥感获取地形时序数据精度有限、实时性较差，无人机测量数据后期处理量大，而且高山峡谷地区难以控制高分辨率的固定航线[22-23]。堰塞湖多源信息获取普遍存在数据匮乏、孤立、滞后等问题，难以实现信息互通及三维动态可视化，急需开发研究堰塞湖多源数据快速融合与智能识别平台，为堰塞湖抢险救灾提供全方位的数据服务支撑。

（3）挑战 3：堰塞湖应急监测与风险评估

现有的堰塞湖应急监测主要局限于堰塞湖水位及湖区岸坡稳定性监测，方法单一、制约因素多，而针对堰塞体变形、渗透破坏及溃口发展并无可靠技术手段实现有效监测预警，急需创新监测技术建立多源、多维信息监控方法，实现堰塞湖险情应急监测预警。尽管在处置 2008 年汶川地震引发的系列堰塞湖之后，中国颁布实施了《堰塞湖风险等级划分标准》[24]，提出了查表法和数值分析法进行堰塞湖风险评估，但经过近些年深入研究，发现该标准的评价指标体系尚不够完善，生态环境损失缺乏有效科学评估方法[25]。

（4）挑战 4：堰塞湖应急处置技术水平提升

2008 年汶川地震之后，中国颁布了《堰塞湖应急处置技术导则》[26]，明确了堰塞湖应急处置工程措施及非工程措施方法选用和主要技术要求，为堰塞湖应急处置提供了技术指导。开挖引流槽是当前应用最广泛、最有效的工程除险措施[27-29]，但引流槽结构如何设计、如何更高效地实施引流槽，不但缺乏理论指导，也缺乏科学数据支撑。引流槽只是实现提前过流、减小堰塞湖蓄水量，并不能彻底消除堰塞湖风险，堰塞湖漫顶水流在经历相对缓慢的冲刷下切后，会进入不可控的快速发展阶段，并往往引发超标准洪水，给下游造成难以承受的损失。尽管自 2000 年易贡堰塞湖抢险便对堰塞湖控溃进行了尝试，但一直未能取得实质性突破。当前，引流槽疏通开挖主要依靠大型挖掘及输运机械单点开挖、分散运输，效率不高，而且大型机械设备普遍存在吨位大、难以运抵现场等问题，急需研发高效的专用抢险装备及可供选择的其他施工方法。

2　研究目标、内容及关键科学问题

2.1　研究目标及内容

堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发旨在通过研究堰塞湖形成及溃决规律，揭示堰塞湖形成演变机制及其与溃决机理内在联系，提升堰塞湖信息快速获取、堰塞体结构快速探测和险情快速监控预警能力、堰塞湖致灾风险快速评价技术，开发应急抢险成套关键技术和装备，提升堰塞湖应急抢险决策水平和能力。

项目下设 6 个课题，各课题名称及承担单位、负责人如表 1 所示，项目技术路线如图 2 所示。

表 1　课题设置

Table 1 Arrangement of tasks

课题序号	课题名称	承担单位	课题负责人
1	堰塞体形成与溃决机理及溃决过程研究	四川大学	杨兴国
2	堰塞湖多源信息快速感知与探测技术研究	中国水利水电科学研究院	魏迎奇
3	堰塞湖险情应急监测与预警技术研究	河海大学	郑东健
4	堰塞湖致灾风险评估技术研究	南京水利科学研究院	钟启明
5	高风险堰塞湖应急处置技术研究	长江勘测规划设计研究有限责任公司	蔡耀军
6	堰塞湖应急抢险关键装备研发	中国葛洲坝集团勘测设计有限公司	王衡

2.2　关键科学问题和技术问题

围绕“堰塞湖风险评估快速检测与应急抢险技术和装备研发”，主要解决两大关键科学问题和 4 大关键技术问题。

（1）项目解决两大关键科学问题

a）基于岸坡地质和运动过程分析的堰塞体形成机理

堰塞体突发性强、事前位置不确定、基础资料匮乏，堰塞体组成物质颗粒级配宽泛、几何形态不规则。研究堰塞体形态结构与滑源区岩土结构及滑坡运动特征内在关系，分析岩土启动、运动及堆积过程能量耗散机制，提出堰塞体物质组成和结构快速识别方法，揭示基于滑坡堆积体生成关系的堰塞体形成演化机制。

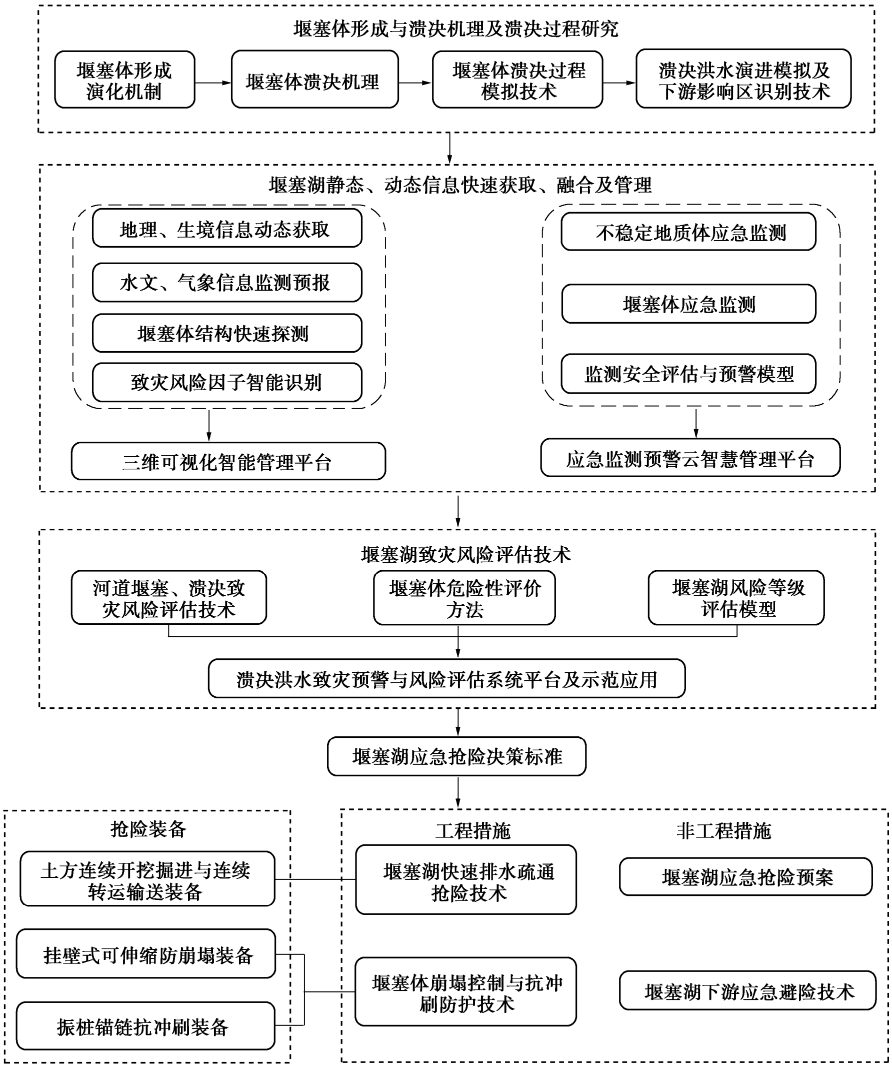


图 2 项目技术路线

Fig. 2 Technical route of program

b）不同结构及变化环境下的堰塞体溃决机理

堰塞湖溃决过程表现出强烈的非线性特点，溃口断面宽度、水头、携砂浓度以及溃决流量呈现典型非恒定特征。开展不同颗粒级配、堰塞体几何形态及携砂水流流变和冲蚀特性试验，建立适用于堰塞湖溃决分析携砂水流流固耦合本构方程，揭示多因素对堰塞体溃决影响规律，提升堰塞湖溃决洪水预测精度。

（2）项目解决 4 大关键技术问题

a）堰塞湖多源信息快速感知、动态识别与结构探测技术

堰塞湖通常地处偏远、水陆交通及通讯困乏之地，短时间内难以全方面获取水文地理数据及堰塞体物质结构等信息，传统方法数据采集时效性不强、巨量数据处理缓慢。构建空天地水下一体化的动态立体信息感知体系，获取水文、气象、生境等相关地理空间数据和堰塞体结构等工程数据，研究基于三维模型重构技术的堰塞湖三维智慧应用平台，实现堰塞湖多源信息的快速感知、更新、识别、融合、共享与应用。

b）堰塞湖险情应急监控与预警技术

传统的险情监测方法以接触式为主，针对堰塞湖区难以到达、地形险峻、安全风险极高的特殊环境，以及堰塞体渗透破坏、溃口高速水流冲刷下的形态变化等，急需研究适应环境能力强、分辨率高的多尺度一体化监测技术体系，研发堰塞湖应急监测安全评估及预警模型，搭建监测信息云智慧管理平台。

c）堰塞湖致灾风险评估技术研究

准确识别堰塞湖风险是应急处置决策的前提。研究涵盖堰塞湖规模、入库流量、堰塞体物质组成、堰塞体几何形态等要素的堰塞体危险性评估技术，建立堰塞湖链生的生命损失、经济损失、生态损失评估模型及综合灾损评估模型，开发堰塞湖溃决洪水致灾预警与风险评估系统平台，实现堰塞湖灾害快速分析预

测、预警和风险快速评估。

d）堰塞湖疏通排水及控溃削峰技术

针对高风险堰塞湖，开发快速疏通排水成套技术，针对常规挖掘机及输运设备吨位大以及工作效率相对低下等问题，研发装配组合式土方连续开挖及输运一体化装备，提升堰塞湖疏通排水作用效率。开发堰塞湖溃口柔性防护技术及配套设备，约束溃口快速发展，坦化洪水下泄进程。

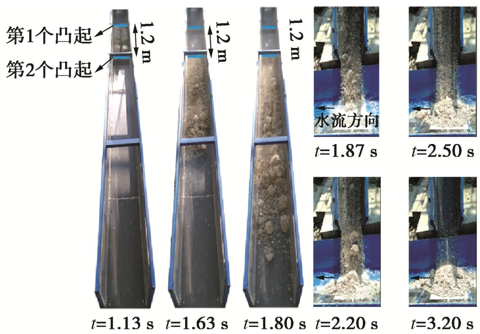
3　主要创新成果

3.1　堰塞湖形成及溃决机理

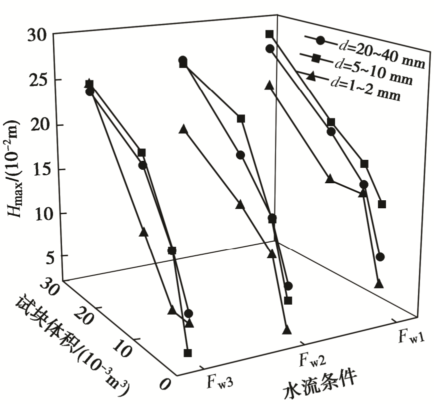
（1）堰塞体形成演化机制

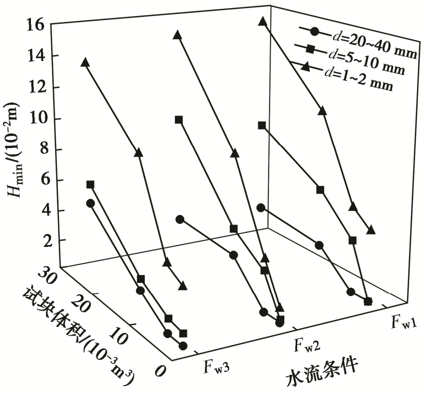
入江堰塞体物质组成与堆积形态很大程度上取决于物源区岩土性质（岩性、完整性、岩体结构、滑面形态）与岩土失稳运动属性（失稳机制、剪出口相对高差、运动速度）及河道形态，并可概括为失稳岩土体积、变形机制、物源区高度、岩性、岩体完整性、河道宽度、失稳流通宽度等 6 个指标[30]。

项目团队选用不同粒径骨料，以及不同水、水泥及石灰配比，拌制不同抗压强度和破碎程度方形试块，开展滑坡堵江物理模型试验，如图 3 所示，研究岩体在滑坡堵江过程中运动特征和破碎机制，揭示了滑坡运动特征与堆积体形态结构的内在关联，并提出堵塞指数（BI）评估滑坡的堵江能力，建立了滑坡堵江类型的判别方法。

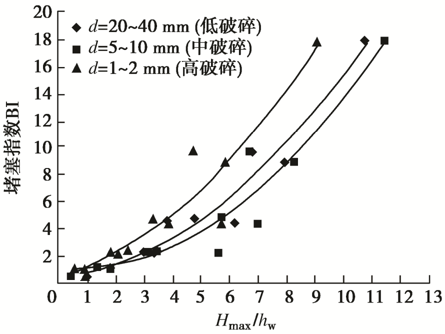


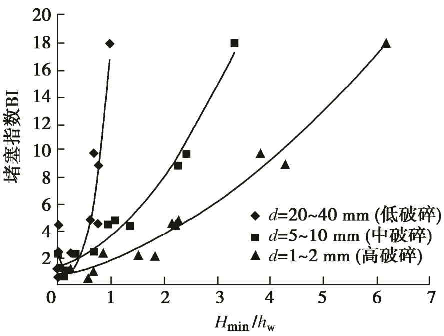
（a）岩体运动堵江动态过程





（b）堰塞体堆积特性





（c）滑坡堵江判别方法

图 3　堰塞湖形成机理模拟

Fig. 3 Simulation of formation mechanism of barrier lake

（2）堰塞体溃决机理

堰塞湖溃决过程极为复杂，漫顶水流冲刷堰塞体坡面、形成初始溃口，随着溃口尾部下切和上游水位抬升，溃口流量逐渐增大，加剧初始溃口冲刷，引发溃口侧向坍塌，该溃决过程涉及到非恒定高速急变流动态冲刷堰塞坝体，涵盖水力学、泥沙动力学及土力学耦合过程。针对不同结构形态及环境下的堰塞体溃决破坏，开展国内外最大比尺的堰塞湖溃决模型试验，揭示逐层均匀冲蚀、多级跌坎冲蚀和陡坎溯源冲蚀形成内在机制以及高速水流剪切冲刷、陡坎涡流溯源冲蚀的底蚀机制和坡脚冲刷、边坡坍塌溃口横向拓展机制，提出堰塞体溃决参数模型，量化溃决洪峰与坝高、物质组成等因素量化关系表达式，提高了图 4 所示溃决洪峰流量、溃口深度、底宽、顶宽、历时等关键参数的预测精度，提升复杂物质结构条件下堰塞体溃决预测的精度和可靠性。

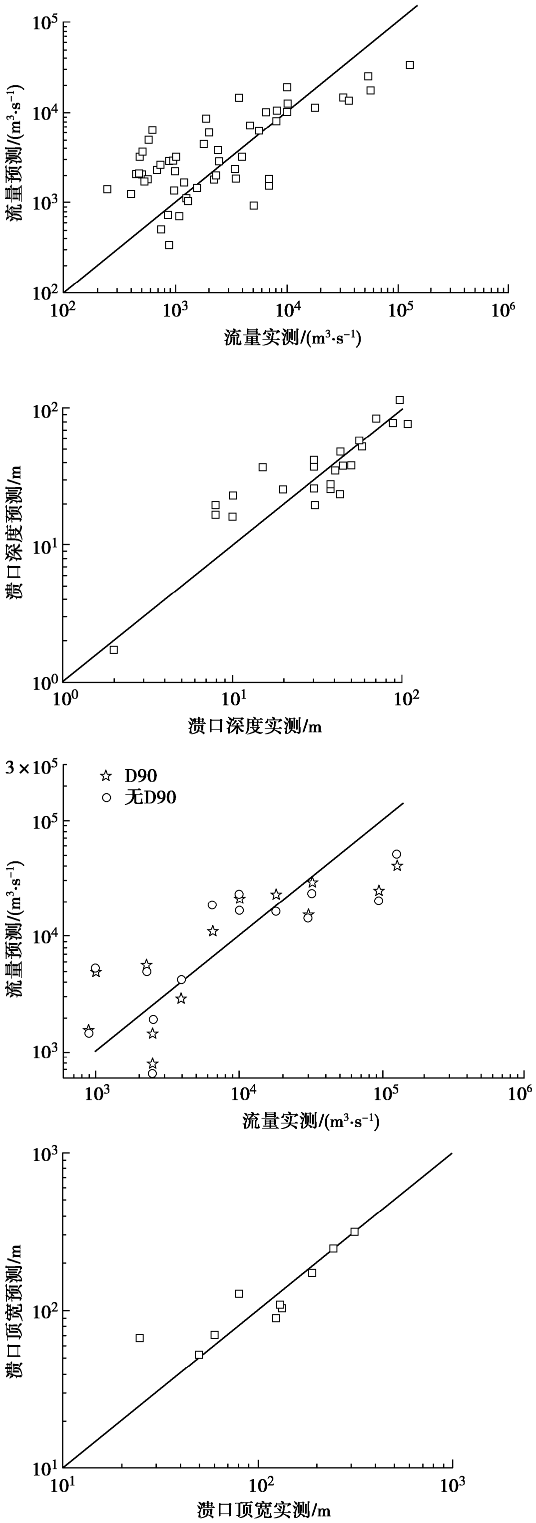


图 4　参数模型预测结果

Fig. 4 Predicted results by parametric model

堰塞湖漫顶溃决如图 5 所示依次可划分为初始阶段、溯源冲刷阶段、快速发展阶段和恢复稳定等四阶段，溃口发展包括纵向下切及横向展宽两过程，其中纵向下切贯穿整个溃决发展过程，在溃决初始阶段及恢复稳定阶段下切速率相对甚小，而在溯源冲刷和快速发展阶段下切速率随溃决流量增大而急剧增大，溃口底板自下游向上游不断下降。而横向展宽主要集中在溃决快速发展和恢复稳定阶段，主要由高速水流不断侵蚀溃口边坡坡脚、底板下切致使溃口边坡变得陡峭，而造成溃口侧向边坡产生坍塌破坏；溯源侵蚀推进至龙口后，流道内水头差快速下降，水流下切能力急剧减弱，侧向侵蚀加强。溃口洪峰出现时，溃口切深大致占总溃深的 1/3，溃口宽度约占溃后总宽度的 1/2。

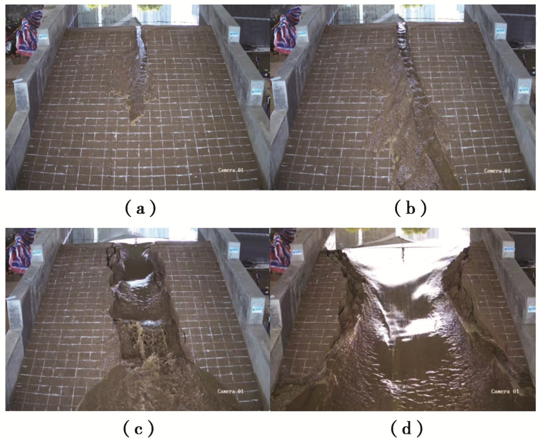


图 5　堰塞湖溃决发展过程

Fig. 5 Breach development process of barrier lake

溃口发展具有自下游向上游推进的显著特点，初始小流量阶段，下切主要发生在尾部，并使流道内水头差和流速逐渐增大，进而使水流侵蚀能力得到提升；溯源陡坎也在尾部首先形成，继而多个小陡坎逐步演变为一个大陡坎向龙口推进。因此，堰塞体下游坡坡度对堰塞湖溃决洪水发展过程具有重要影响，如图 6 所示。溃决洪水流量普遍呈现缓慢增长、快速增长、快速消落、逐步趋稳的单峰曲线变化规律，说明溃决洪水过程呈现典型非恒定变化特征。堰塞湖溃决洪水过程随堰塞体下游坡坡度降低而逐渐延长、滞后，溃决洪峰亦相应显著降低，溃决洪水过程曲线由“尖瘦”型向“矮胖”型转变。造成该现象的主要原因是流道内砂石料不断对溃决水流冲刷掏蚀作出适应性调整，即流道底坡抗冲蚀能力与水流冲刷掏蚀能力相互作用，堰塞体下游坡越缓，坡面砂石料临界启动切应力越大、侵蚀率越小，从而造成堰塞体坍塌滞后[19]。堰塞体下游坡度越大，溃口水流越容易由初始小流量阶段过渡到溯源侵蚀阶段。

（3）堰塞湖携砂水流溃决过程模拟

天然河道水流携带着大量砂石，不同携砂量的水流具有不同的冲蚀特性，携砂水流对溃口发展影响显著。通过开展携砂水流流变和冲蚀特性试验，建立适用于堰塞湖溃决分析的携砂水流的流固耦合本构，揭示携砂水流的携砂量对堰塞坝溃决的影响规律（如图

7 所示，C_V 为携砂量）；基于典型堰塞体非线性冲刷机理，开发了如图 8 所示堰塞体三维漫顶溃决数值分析模型（DABA），实现溃决过程水土耦合作用下堰塞体冲刷数值模拟，为携砂水流作用下的堰塞体漫顶溃决预测提供了高效、可靠的分析工具。

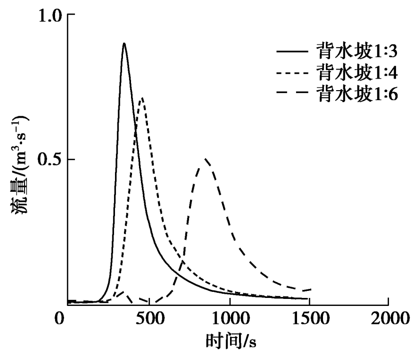
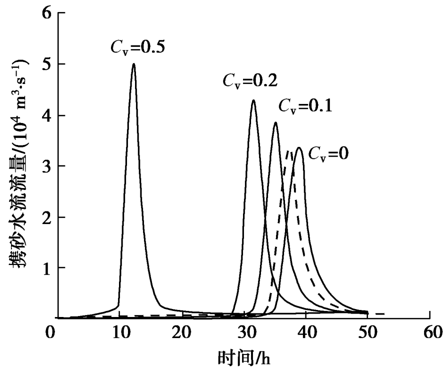
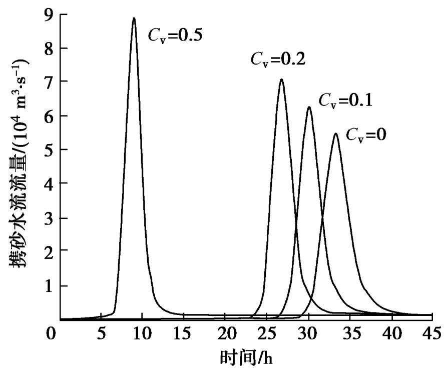


图 6 不同结构形态堰塞体溃决洪水过程

Fig. 6 Breach flood process with different forms of barrier body



（a）



（b）

图 7 不同水流携砂量的溃决过程

Fig. 7 Breach process with different sand carrying amounts

3.2 堰塞湖信息快速获取技术

堰塞湖信息普遍存在数据量大、类型复杂、来源广泛以及地理参考坐标不统一等问题，在时间急迫的堰塞湖应急处置现场，亟需建立堰塞湖信息快速获取技术体系，为堰塞湖应急处置提供技术支撑[20, 23]。

（1）多源信息感知及识别技术体系

结合堰塞湖案例、现场抢险、应急监测和测量等工程实践，以现行规程规范为依据，考虑感知信息类别、感知技术方式以及信息识别、融合重构等诸多因素，建立了图 9 所示空—天—地—水三维空间的堰塞湖多源信息感知技术体系，提出了堰塞湖信息感知时间响应等级划分标准以及不同响应等级条件下感知信息精度标准；为今后堰塞湖信息感知的快速准确获取提供了技术指导。

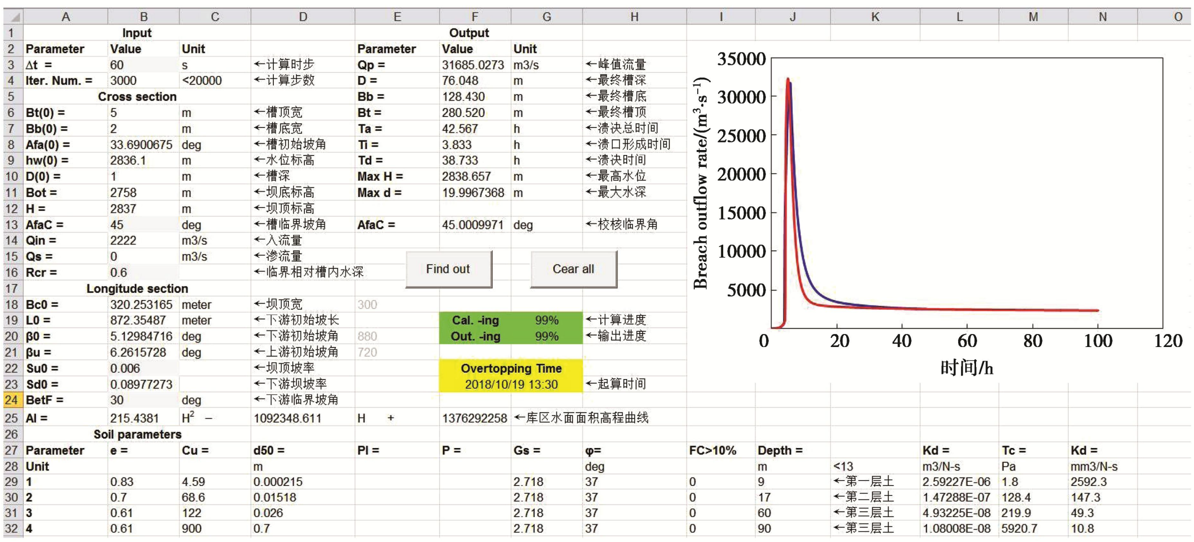


图 8 堰塞体三维漫顶溃决数值分析模型

Fig. 8 3D numerical analysis model for overtopping breach

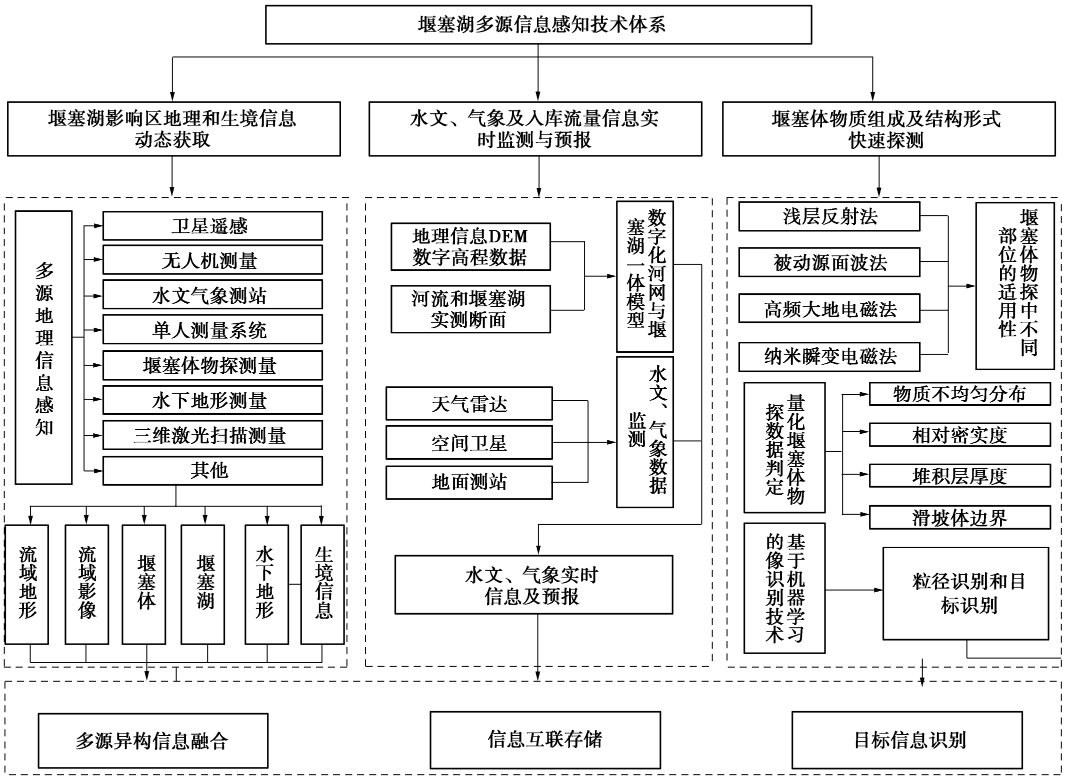
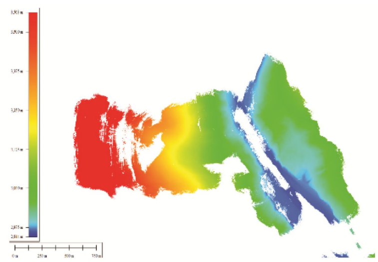


图 9　堰塞湖多源信息感知技术体系

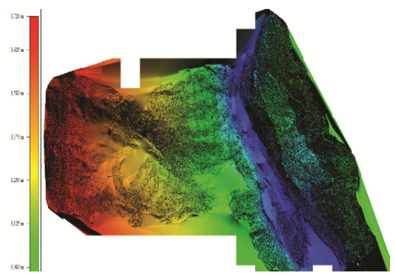
Fig. 9 Multi-source information perception technology system of barrier lakes

（2）多源空间数据结构快速转换技术

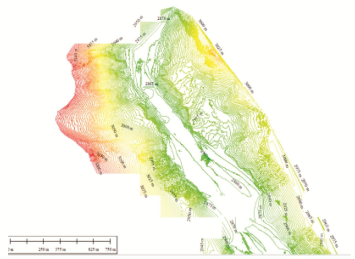
针对不同分辨率、多源异构地理信息数据，考虑高山峡谷各向数据特征，研发了高山峡谷地区光学无人机贴地航测方法、无人机倾斜摄影图像集群快速处理方法及水下地形快速构建技术，构建基于多方向克里金方法的 DEM 与 LiDAR 点云融合技术，建立多源空间数据结构快速转换及不同分辨率栅格转换方法，实现图 10 所示光学成像和 LiDAR 数据互补、高低精度搭配的堰塞湖地理信息快速获取和数据处理。



（a）点云数据



（b）DEM数据



（c）地形数据

图 10　多源空间数据结构快速转换

Fig. 10 Fast conversion of multi-source spatial data structures

（3）堰塞湖致灾风险因子智能识别技术

针对不同水文情势，建立了无监测站点的入库流量快速推算方法、快速布站技术和上游来水实时监测技术，开发了堰塞湖数字化河网智能提取和雨水情联动的水文快速预报技术，建立了堰塞湖三维可视化与智能管理平台；研发针对堰塞体大深度、高能耗材料特性的无线天然源面波探测技术及装备，开发堰塞体材料粒径智能识别系统，实现堰塞体结构快速探测。

3.3　堰塞湖险情监控及预警技术

当前堰塞湖险情应急监控仍主要采用传统的地质灾害监测方法，同时 InSAR 技术和 GNSS 监测技术开始用于堰塞湖相关的不稳定岸坡监测中。但针对堰塞湖诱发的险情、堰塞湖物源区后续险情、堰塞体险情演变、溃口发展动态等仍未形成专门的监测技术体系和专门的方法，专用监控预警设备研发进展缓慢，亟需系统研究堰塞湖险情应急监测预警技术及设备、安

全评估及预警模型等方面的理论方法与技术[31-32]。

（1）堰塞湖不同区域地质灾害识别技术

研发堰塞湖区基于无人机平台的 MiniSAR 监测技术，通过两次或多次干涉测量获取地表相位信息，引入外部数字高程模型，运用二轨法去除地形相位，大规模获取观测时段内形变信息，分析岸坡稳定性，如图 11 所示结合实地核查，确定重点监控对象。

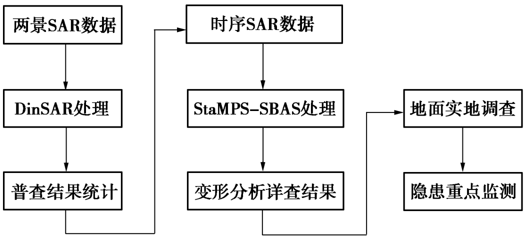


图 11 堰塞湖不稳定地质体灾害识别技术流程

Fig. 11 Technical process of identifying unstable geological body in barrier lakes

针对堰塞体物源区后续风险，研发了三维激光扫描变形监测及计算机双目变形监测技术。提出复合正态分布变换 NDT 与最近点迭代 ICP 算法的二重点云配准方法，引入渐进形态学滤波方法，实现三维激光扫描边坡变形高精度监测。研发了如图 12 所示双目视觉边坡变形监测装备，实现堰塞湖恶劣环境下非接触、高可靠性、低成本连续跟踪监测。

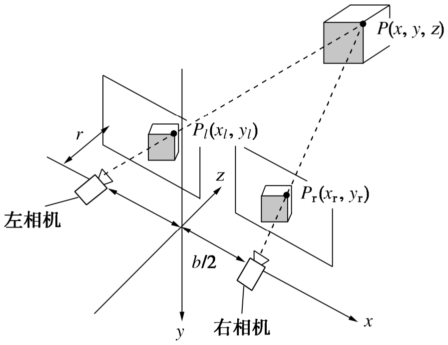


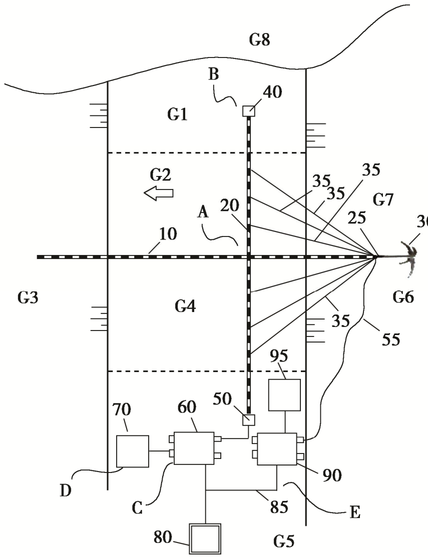
图 12 计算机双目视觉边坡变形监测基本原理

Fig. 12 Principle of slope deformation monitoring based on computer binocular vision

针对堰塞体变形及渗透破坏风险，研发了无人机倾斜摄影变形监测、随机布置分布式光纤变形监测及基于水流浊度的渗透变形光纤监测技术。

（2）堰塞湖溃口形态实时自动监控技术

堰塞湖溃决过程中，现场环境危险复杂，人员及设备均需提前撤离，堰塞湖溃口动态难以实时监测，溃口监控长期以来处于空白状态。针对高速水流及溃口形态瞬息万变的特点，首创锚拉式空间自主定位的阵列位移监测技术和设备（图 13），实现堰塞湖溃口三维形态实时监控，并在野外模型试验中实测溃口纵向下切及横向展宽冲刷变形，取得如图 14 所示良好效果，监控揭示堰塞体坡面最大冲刷宽度达到 4.5 m，堰塞体溃口最大下切深度达到 1.76 m，与无人机实测结果基本一致。

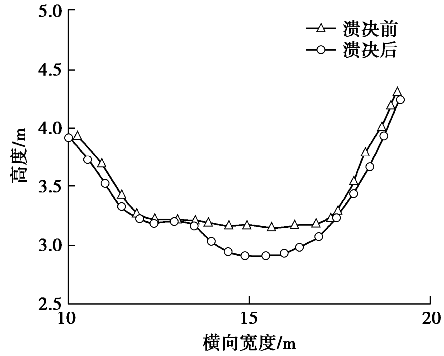


（a）溃口冲刷变形测量示意图

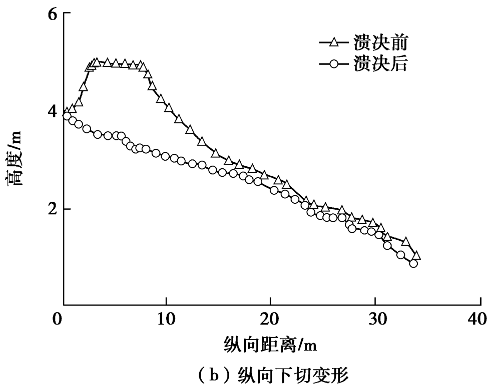
（b）野外试验实测溃口形态发展

图 13 堰塞体溃口应急监测

Fig. 13 Emergency monitoring of barrier body breach



（a）横向展宽变形



（b）纵向下切变形

图 14 堰塞体横向展宽及纵向下切实时监测

Fig. 14 Real-time monitoring of breach broadening and undercutting

（3）监测信息安全评估及预警技术

通过分析各信息的样本概率密度函数，运用信息熵聚类算法，提出了各测点的多源信息融合方法。运用灰色关联分析提取监测数据的空间关系规律，建立了灰色关联与时序模型组合插补模型。运用神经网络非线性映射能力，分析堰塞体和堰塞湖边坡测点位移与其整体变形的关系，提出了堰塞体和堰塞湖边坡局部和整体变形性态递推预测方法。针对堰塞湖应急监测资料不足特点，提出了小样本数据的迁移学习建模方法，基于矩问题理论创建了小样本监测数据警戒值确定技术，并从堰塞湖水漫顶、湖区岩土失稳、堰塞体溃决等 3 个层面提出了堰塞湖险情预警方法。

3.4　堰塞湖致灾风险评估技术

（1）堰塞湖灾损评估技术

从生命损失、经济损失、生态损失等 3 个层面，分别构建了堰塞湖淹没区及下游溃决洪水影响区的灾损评价指标体系及单类损失评估模型和综合评估模型，建立了灾损评价等级划分标准。

（2）堰塞体危险性评价技术

基于堰塞湖大数据，构建了由堰塞体形态 I（高度/长度）、堰塞体体积 V_d、堰塞湖流域面积 A_b 和堰塞体颗粒特征 S_d（由 d_{90}，d_{60}，d_{30} 和 d_5 表征）或 M_i（定性表征）等指标组成的堰塞体危险性精细化评估模型 $L_s(\mathrm{IVAS}) = -0.264\lg I + 1.166\lg V_d - 1.551\lg A_b - 0.168\cdot\lg S_d - 4.847$ 和简化评估模型 $L_s(\mathrm{IVAM}) = -0.198\cdot\lg I + 1.387\lg V_d - 1.432\lg A_b + 4.169 M_i - 8.674$，简化评价方法针对只有定性描述堰塞体颗粒组成的情形[32]。L_s 为堰塞体危险性评价指标，当 $L_s>0$ 时，表示堰塞体不危险，当 $L_s<0$ 时，表示堰塞体危险[33]。

基于堰塞湖溃决机理及堰塞体危险性特指的溃决可能性与溃决可能引发的洪峰水平两层含义，构建了由堰塞湖来水量 Q、库容 V_b、堰塞体平均粒径 d_{50}、堰塞体形态（由高度 H 和长度与高度比值 L_H 表征）等组成的评价指标体系，提出了各指标划分等级标准，建立了查表法和模糊数学评判两种评价方法[30]。

（3）堰塞湖风险评估技术

在堰塞湖信息相对完整情形下，建立了基于堰塞体溃决概率和堰塞湖灾损的堰塞湖风险评估模型 $R = P_f F$，其中溃决概率 P_f 由堰塞体危险性 L_s 确定，

$$P_f = \frac{e^{-L_s}}{1 + e^{-L_s}} \quad , \tag{1}$$

灾损 F 由生命损失、经济损失、生态损失综合确定。

在难以获取堰塞湖详细信息、决策时间十分紧迫情形下，构建了由堰塞体危险性 4 个指标和堰塞湖灾损 4 个指标组成的评价指标体系和风险等级划分标准，提出了查表法（表 2，3）和模糊数学评判两种快速评价方法。

表 2　堰塞湖风险等级划分

Table 2 Division of risk grade of barrier lakes

灾损	危险性			
	极高	高	中	低
极严重	I	I	II	II
严重	II	II	II	III
较严重	II	III	III	III
一般	III	III	IV	IV

表 3　堰塞体单因素危险性级别

Table 3 Danger levels of single factor of barrier body

级别	分级指标			
	V_b /(10^6 m^3)	Q /(m^3·s^{-1})	d_{50} /mm	H(m)，L_H
极高	≥100	≥150	<2	H≥70，L_H<20 或 H [30,70)，L_H≤5
高	10～100	50～150	2～20	H≥70，L_H≥20 或 H [30,70), L_H (5,20) 或 H [15,30), L_H≤5
中	1～10	10～50	20～200	H [30,70)，L_H≥20 或 H [15,30), L_H(5,20) 或 H<15, L_H≤5
低	<1	<10	≥200	H [15,30), L_H≥20 或 H<15, L_H>5

（4）溃决洪水演进与风险评估平台

采用地理信息系统和数字高程模型相结合的快速空间信息处理技术，结合鹰眼大视野展示和显示范围设置，开发了堰塞湖溃决洪水致灾预警与风险评估系统平台，实现堰塞湖风险快速评估、溃决过程三维展示和洪水演进过程动态展示，实现下游河道断面实时水位和流量预测、受灾区域（以乡镇为单位）水情预警信息及洪水损失评估结果实时发布，见图 15。

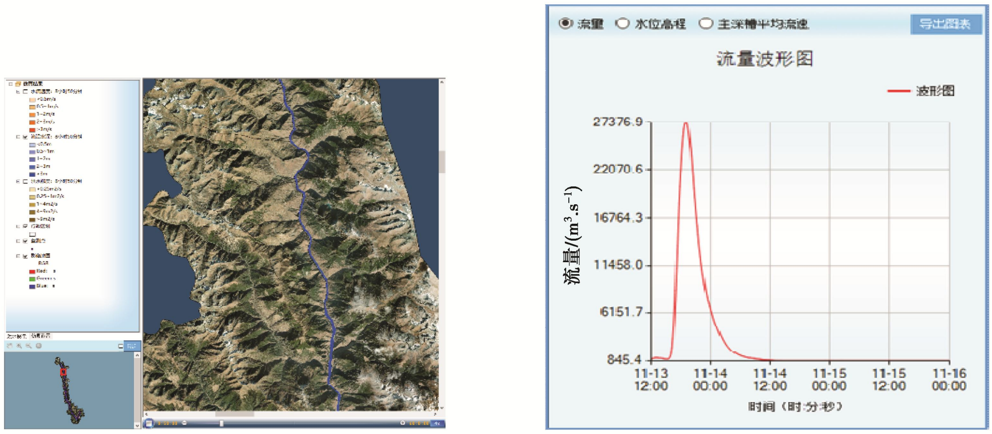
3.5　堰塞湖应急处置技术

（1）堰塞湖应急抢险预案及应急处置决策

针对堰塞湖灾情发生的不确定性、风险等级不确定性、灾害模式不确定性及信息获取不及时性等特征，研究考虑多风险等级、堰塞体特征、乏信息状态的堰塞湖应急抢险预案的制定方法，提出了如图 16 所示堰塞湖应急预案编制方法。从应急处置必要性、可行性及技术方案优选 3 个层次，构建了堰塞湖应急处置决策模型，从适用条件、方案可控性、处置效果、技术难度、资源需求、实施周期、次生风险、风险可控性等方面提出工程措施方案优选评价指标，基于堰塞湖应急处置情景推演，建立了不同方案的量化评价方法，为险情科学应对、精准施策提供了技术保障。

（2）堰塞湖快速疏通排水技术

开展国内外规模最大的堰塞湖引流槽体型优化大型物理试验、大功率虹吸排水冲刷及堰塞体定向钻进成洞排水试验（图 17），实现溃口发展及溃决洪水全过程模拟，揭示了溃口演化机制及引流槽横断面型式、纵坡降、尾部陡坎对溃前水位、溃决过程及洪峰



（a）溃决洪水演进　　（b）断面洪水流量过程

图 15 溃决洪水演进与风险评估平台

Fig. 15 Breach flood evolution and risk assessment platform

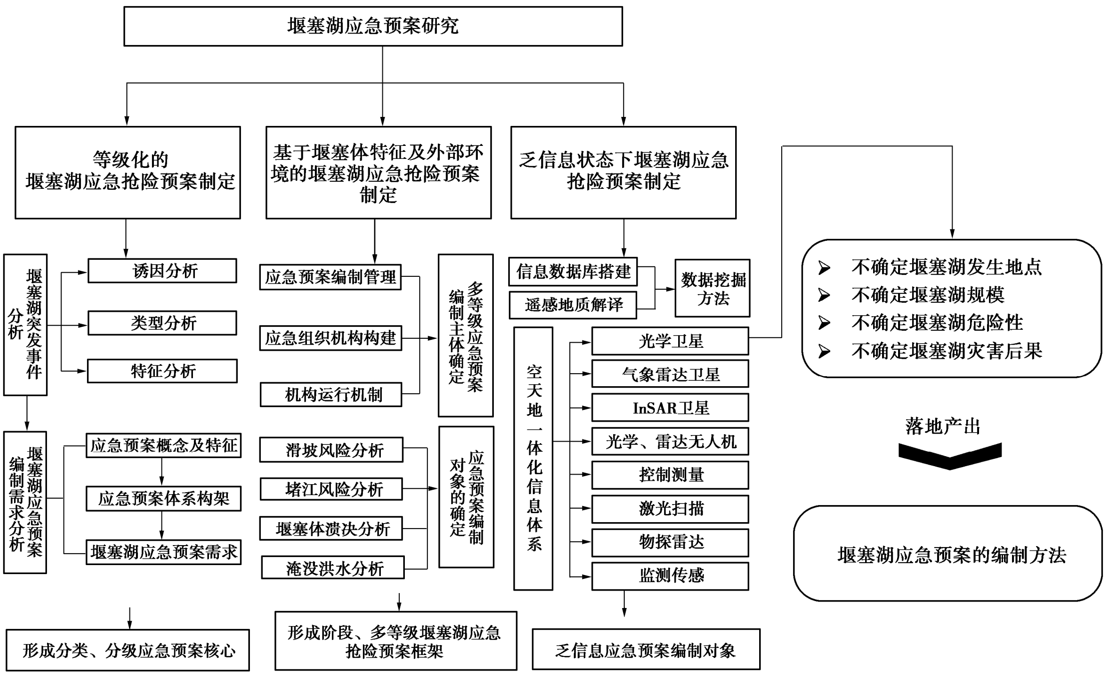


图 16 堰塞湖应急抢险预案研究框架

Fig. 16 Research framework of emergency plan for barrier lakes


（a）堰塞湖引流槽模型搭建　　（b）虹吸排水冲刷试验

图 17 引流槽快速成槽技术

Fig. 17 Rapid formation technology of flow-conducted trough

流量影响规律，建立了堰塞湖应急疏通排水技术体系并纳入中国堰塞湖应急抢险规范，提出了以引流槽开挖为主、真空整流虹吸排水及大功率冲刷为辅的快速排水技术及设计方法，较传统方法实现溃前水位和溃口洪峰双降显著效果。

（3）堰塞湖控溃削峰技术

堰塞湖溃口演变涉及非线性发展的纵向下切和横向展宽。结合模型试验及堰塞湖案例数据分析，提出堰塞湖水位–溃决流量典型过程线，如图 18 所示，将溃口洪峰出现之前溃决过程依次划分为溃决过流孕育阶段（ΔT_1）、溃决发展阶段（ΔT_2）及溃决形成阶段（ΔT_3）。溃决过流孕育阶段持续时间长、溃口发展缓慢、上游水位持续上升，从减灾角度应通过工程措施加速本阶段溃口发展、缩短该阶段持续时间，降低堰塞湖最大雍高水位（H_{max}），避免更大范围淹没和形成更大的蓄水量。溃决发展阶段是溯源陡坎形成阶段，也是溃口流量由缓慢增长向快速增长转变的过渡期，一旦多级陡坎整合为单一的大陡坎并快速向上游推进，便会进入溃决阶段，溃口尺寸及流量将急剧增大。为了降低堰塞湖溃决洪峰（Q_{max}），控制溃口发展速度成为关键，但溃口附近安全风险极高，不具备实时控溃施工条件。针对上述特殊条件，项目团队提出了“控后不控早、柔性自适应”的堰塞湖控溃理念，研发了挂壁式石笼串护坡及柔性网链护底的引流槽控溃防护技术，通过典型案例研究，揭示溃口下切与展宽随溃口流量发展演变规律，提出了最优防护时机和防护设施超前布设空间位置参数。

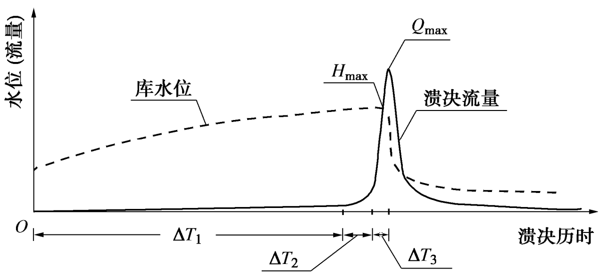


图 18 堰塞湖库水位–溃决流量变化过程

Fig. 18 Variation process of water level and breach flood of barrier lakes

为验证柔性自适应防护措施的有效性和防护结构与溃决洪水的互馈机制，在汶川地震堰塞湖重灾区开展了以白格堰塞湖为参照、1∶20 比尺的野外模型试验（堰塞体长×宽×高为 33 m×5 m×4 m），溃前防护设施布置如图 19 所示，引流槽上游 1/3 范围边墙布置石笼串，上游坡面布置柔性网链。共开展 5 组试验，工况 1 为常规的梯形槽，工况 2 为复式断面引流槽，工况 3 在工况 2 基础上增设尾部陡坎，工况 4 在工况 3 基础上增设石笼串，工况 5 在工况 4 基础上增设柔性网链。堰塞湖溃口流量过程线如图 20 所示，各工况溃前最大雍高水位依次为 2.607，2.568，2.565，2.563，2.616 m，最大溃决洪峰依次为 4.821，3.964，4.297，4.025，3.848 m^3/s。试验表明复式断面引流槽能有效加快初期过流孕育阶段发展进程、降低堰塞湖最大雍高水位，尾部陡坎能加速溯源陡坎形成、加快溃口冲刷发展和溃决进程，通过引流槽体型优化明显减小堰塞湖蓄水量，削峰比例达到 17.8%。采取石笼串防护后，溃口最终宽度减小、下切深度有所增大，削峰比例 6.3%。同时布设石笼串和柔性网链后，溃决时间明显延后，溃决过程明显拉长，溃口洪水呈现坦化现象，削峰比例达到 10.4%。引流槽体型优化与柔性防护联合运用，削峰比例达到 20.2%，对减轻堰塞湖溃决洪水次生灾害具有重要意义[30]。相比于河道堤防工程常用的铅丝笼护坡结构，柔性防护措施能随溃口形态变化不断调整自身结构形式，持续保护溃口边坡及底坡，并且能在溃决过程中择机发挥作用，实现溃决初期不干扰引流槽正常泄流、溃决后期延缓溃口发展。

图 19 柔性防护措施

Fig. 19 Flexible protective measures

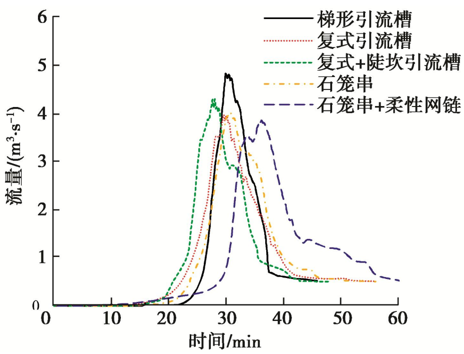


图 20 溃决洪水流量变化过程

Fig. 20 Process of breach flood rate

溃口柔性防护效果除了与防护时机有关外，还与防护范围、网链网眼大小等有关，通过结构设计和施工组织优化，可望取得更好的削峰效果。

（4）引流槽快速开挖成槽技术装备

针对堰塞湖引流槽开挖抢险作业时间紧、工程量大、施工场地狭窄、批量施工机械难以进场等问题，项目团队根据堰塞湖抢险救援的环境特点和险情特

征，成功研制如图 21 所示高效开挖、输送一体化装备，实现堰塞湖重大抢险装备零的突破，破除了常规机械设备单点开挖、分散运输的局限性，单台套装备开挖运输效率大于 1000 m^3/h，显著提升堰塞湖抢险救援能力。

图 21 连续开挖输送一体化装备

Fig. 21 Continuously excavating and conveying integrated equipments

该装备由模块化连续开挖掘进机和履带式可伸缩输运机组合而成，其中单个模块最大重量为 140 kN，在陆路通行条件不具备时，可借助直升机吊运进退场。设备自主移动性强，输运机具有远程操控、自动调平等功能，可大幅减少抢险现场设备和人员数量，显著提升堰塞湖复杂环境下的施工安全。设备设计通过粒径为 40 cm，对于超径块石，可借助其他设备提前破碎或即时破碎后挖运。

4 结　论

本项目以堰塞湖风险评估快速检测和应急处置为背景，围绕“堰塞体形成与溃决机理—多源信息快速感知与探测—险情应急监控与预警—致灾风险评估—应急处置技术—应急抢险关键设备”等开展系统研究。研究内容涵盖工程地质学、水文地质学、灾害学、力学、数学、信息科学等多学科，堰塞湖应急处置技术研究将促进多学科的交叉融合，有效推动堰塞湖风险处置技术领域科技进步。

（1）促进理论学科发展。项目团队首次建立堰塞体形态结构与滑源区岩土结构及滑坡运动特征内在关联模型，揭示基于岸坡地质和运动过程分析的堰塞体形成机理；通过物理模型试验揭示堰塞湖溃口下切及展宽变化规律，提出了不同致灾因子作用下的堰塞体溃决机理。

（2）提升堰塞湖应急处置技术水平。项目团队构建了基于空—天—地—水的堰塞湖信息感知体系，研发了堰塞体结构高效探测及堰塞湖监测预警技术专用设备，实现堰塞湖多源数据快速融合与智能识别，建立了堰塞湖应急监测技术体系和安全预警模型；构建基于溃决机理和灾变机制的堰塞湖风险评价指标体系，建立了堰塞体危险性、堰塞湖灾损及风险等级评估模型；构建了堰塞湖应急处置决策模型和应急排水疏通技术体系，首创堰塞湖柔性自适应控溃技术，开发了高危堰塞湖应急处置成套技术及高效疏通装备，实现延缓堰塞体溃决、人工控制溃口洪峰流量零的突破。

（3）推动技术应用标准化。在本项目实施前，仅有 SL450—2009 和 SL451—2009 等两项标准对堰塞湖风险等级划分和应急处置提出总体要求和技术性指导，随着近些年对堰塞湖开展深入研究，部分条文已经不能满足堰塞湖高效应急处置的需求。项目团队基于项目研究成果，充分吸纳技术应用过程中的成功经验，形成了《堰塞湖风险等级划分与应急处置技术规范》SL/T450—2021 标准 1 部，为中国堰塞湖高效、科学应急处置提供了标准化方案。

本项目相关研究发表论文 119 篇，其中 SCI/EI 收录 65 篇；出版专著 5 部；申请国家专利 56 项，已授权专利 23 项，获得软件著作权 20 项，形成行业标准 1 部。项目团队 1 人次入选国家级人才称号，1 人次入选省部级人才称号。项目成果荣获省部级特等奖 2 项，为金沙江白格、雅江加拉、恩施屯堡、西藏定日、波密等堰塞湖（冰湖）抢险救灾工作发挥科技支撑作用，取得显著社会效益。

参考文献：

[1] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元. 中国滑坡堵江的类型及其特点[J]. 成都理工学院学报, 1998, **25**(3): 411–416. (CHAI He-jun, LIU Han-chao, ZHANG Zhuo-yuan. Study on the categories of landslide damming of rivers and their characteristics[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, **25**(3): 411–416. (in Chinese))

[2] 聂高众, 高建国, 邓　砚. 地震诱发的堰塞湖初步研究[J]. 第四纪研究, 2004, **24**(3): 293–301. (NIE Gao-zhong, GAO Jian-guo, DENG Yan. Preliminary study on earthquake-induced dammed lake[J]. Quaternary Sciences, 2004, **24**(3): 293–301. (in Chinese))

[3] 王光谦, 王永强, 刘　磊, 等. 堰塞坝及其溃决模拟研究评述[J]. 人民黄河, 2015, **37**(9): 1–7. (WANG Guang-qian, WANG Yong-qiang, LIU Lei, et al. Reviewed on barrier dam and simulation on dam breach[J]. Yellow River, 2015, **37**(9): 1–7. (in Chinese))

[4] 胡卸文, 罗　刚, 王军桥, 等. 唐家山堰塞体渗流稳定及溃决模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(7):

1409－1417. (HU Xie-wen, LUO Gang, WANG Jun-qiao, et al. Seepage stability analysis and dam-breaking mode of Tangjiashan barrier dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(7): 1409－1417. (in Chinese))

[5] 陈祖煜, 陈生水, 王　琳, 等. 金沙江上游“11·03”白格堰塞湖溃决洪水反演分析[J]. 中国科学：技术科学，2020, **50**(6): 763－774. (CHEN Zu-yu, CHEN Sheng-shui, WANG Lin, et al. Back analysis of the breach flood of the “11·03” Baige barrier lake at the Upper Jinsha River[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2020, **50**(6): 763－774. (in Chinese))

[6] 蔡耀军, 栾约生, 杨启贵, 等. 金沙江白格堰塞体结构形态与溃决特征研究[J]. 人民长江, 2019, **50**(3): 15－22. (CAI Yao-jun, LUAN Yue-sheng, YANG Qi-gui, et al. Study on structural morphology and dam-break characteristics of Baige barrier dam on Jinsha River[J]. Yangtze River, 2019, **50**(3): 15－22. (in Chinese))

[7] CAI Y J, CHENG H Y, WU S F, et al. Breaches of the Baige Barrier Lake: emergency response and dam breach flood[J]. Science China Technological Sciences, 2020, **63**(7): 1164－1176.

[8] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, **100**(7): 1054－1068.

[9] 石振明, 马小龙, 彭　铭, 等. 基于大型数据库的堰塞坝特征统计分析与溃决参数快速评估模型[J]. 岩石力学与工程学报，2014, **33**(9): 1780－1790. (SHI Zhen-ming, MA Xiao-long, PENG Ming, et al. Statistical analysis and efficient dam burst modelling of landslide dams based on a large-scale database[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(9): 1780－1790. (in Chinese))

[10] YANG F G, ZHOU X Q, LIU X N, et al. Experimental study of breach growth processes in sand dams of quake lakes[J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2012, **5**(5): 445－459.

[11] SCHMOCKER L, HAGER W H. Modelling dike breaching due to overtopping[J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, **47**(5): 585－597.

[12] YAN J, CAO Z X, LIU H H, et al. Experimental study of landslide dam-break flood over erodible bed in open channels[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2009, **21**(1): 124－130.

[13] 张　婧, 曹叔尤, 杨奉广, 等. 堰塞坝泄流冲刷试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, **42**(5): 191－196. (ZHANG Jing, CAO Shu-you, YANG Feng-guang, et al. Experimental study on outlet and scour of blocked dam[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2010, **42**(5): 191－196. (in Chinese))

[14] 蒋先刚, 吴　雷. 不同底床坡度下的堰塞坝溃决过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 1): 3008－3014. (JIANG Xian-gang, WU Lei. Influence of bed slope on breaching process of natural dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S1): 3008－3014. (in Chinese))

[15] 钟启明, 陈生水, 邓　曌. 堰塞坝漫顶溃决机理与溃坝过程模拟[J]. 中国科学：技术科学, 2018, **48**(9): 959－968. (ZHONG Qi-ming, CHEN Sheng-shui, DENG Zhao. Breach mechanism and numerical modeling of barrier dam due to overtopping failure[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2018, **48**(9): 959－968. (in Chinese))

[16] 钟启明, 陈生水, 梅世昂. 均质黏性土坝漫顶溃决机理及溃坝过程模拟[J]. 工程科学与技术, 2019, **51**(5): 25－32. (ZHONG Qi-ming, CHEN Sheng-shui, MEI Shi-ang. Breach mechanism and breach process simulation of homogeneous cohesive earthen dam due to overtopping[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, **51**(5): 25－32. (in Chinese))

[17] WANG G Q, LIU F, FU X D, et al. Simulation of dam breach development for emergency treatment of the Tangjiashan Quake Lake in China[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2008, **51**(2): 82－94.

[18] CAO Z X, YUE Z Y, PENDER G. Landslide Dam failure and flood hydraulics. Part II: coupled mathematical modelling[J]. Natural Hazards, 2011, **59**(2): 1021－1045.

[19] 谢　忱, 李从江, 杨兴国, 等. 基于物理模型试验的堰塞坝冲刷溃决过程研究[J]. 工程科学与技术, 2021, **53**(6): 43－53. (XIE Chen, LI Cong-jiang, YANG Xing-guo, et al. Erosion and breach of landslide dam based on physical model tests[J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, **53**(6): 43－53. (in Chinese))

[20] 魏迎奇, 孙黎明, 傅中志, 等. 堰塞湖多源信息及其感知技术[J]. 人民长江, 2019, **50**(4): 1－7. (WEI Ying-qi, SUN Li-ming, FU Zhong-zhi, et al. Multi-source information and perception technology of barrier lakes[J]. Yangtze River, 2019, **50**(4): 1－7. (in Chinese))

[21] 何秉顺, 赵进勇, 王　力, 等. 三维激光扫描技术在堰塞湖地形快速测量中的应用[J]. 防灾减灾工程学报，2008, **28**(3): 394－398. (HE Bing-shun, ZHAO Jin-yong, WANG Li, et al. The application of landslide lake topographic measurement by LiDAR[J]. Journal of Disaster Prevention

and Mitigation Engineering, 2008, **28**(3): 394－398. (in Chinese))

[22] 吕杰堂, 王治华, 周成虎. 西藏易贡滑坡堰塞湖的卫星遥感监测方法初探[J]. 地球学报, 2002, **23**(4): 363－368. (LÜ Jie-tang, WANG Zhi-hua ZHOU Cheng-hu. A tentative discussion on the monitoring of the yigong landslide-blocked lake with satellite remote sensing technique[J]. Acta Geosicientia Sinica, 2002, **23**(4): 363－368. (in Chinese))

[23] 孙黎明. 高山峡谷区滑坡堰塞体快速感知与模拟计算方法研究: 以白格堰塞湖为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, **52**(7): 44－52. (SUN Li-ming. Study on quick information perception and simulative calculation method of landslide dammed-body in alpine and gorge region: taking Baige Landslide-Dammed Lake as study case[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021, **52**(7): 44－52. (in Chinese))

[24] 堰塞湖风险等级划分标准: SL 450—2009[S]. 2009. (Standard for Classification of Risk Grade of Landslide Lake: SL 450—2009[S]. 2009. http://kns.cnki.net/detail/32.1117.TV20211D15.1934.006.html. (in Chinese))

[25] 杜镇瀚, 钟启明, 董海洲, 等. 堰塞湖风险评估研究综述[J/OL].河海大学学报(自然科学版):1-19[2022-01-21]. (DU Zhen-han, ZHONG Qi-ming, DONG Hai-zhou, et al. A review of demmed lake risk assessment sludies[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences): 1-19[2022-01-21]. http://kns.cnki.net/detail/Ol/32.1117.TV202/1015.1934.006.html. (in Chinese))

[26] 堰塞湖应急处置技术导则: SL 451—2009[S]. 2009. (Technique Guideline for Emergency Disposal of Landslide Lake: SL 451—2009[S]. 2009. (in Chinese))

[27] 杨启贵, 姚晓敏, 申邵洪, 等. 基于应急与常态统合管理的堰塞湖风险处置实践: 以 2020 年清江屯堡堰塞湖处置为例[J]. 人民长江, 2020, **51**(12): 25－30. (YANG Qi-gui, YAO Xiao-min, SHEN Shao-hong, et al. Risk disposal of barrier lake based on routine and emergency coordinated management theory: case of Tunbao barrier lake on Qingjiang River in 2020[J]. Yangtze River, 2020, **51**(12): 25－30. (in Chinese))

[28] 刘 宁, 杨启贵. 唐家山堰塞湖应急除险技术实践[J]. 中国工程科学, 2009, **11**(6): 74－81. (LIU Ning, YANG Qi-gui. The emergency handling technique and practice of Tangjiashan barrier lake[J]. Engineering Sciences, 2009, **11**(6): 74－81. (in Chinese))

[29] 刘 宁, 杨启贵, 陈祖煜. 堰塞湖风险处置[M]. 武汉: 长江出版社, 2016. (LIU Ning, YANG Qi-gui, CHEN Zu-yu. Hazard mitigation for barrier lakes[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2016. (in Chinese))

[30] 蔡耀军, 李建清, 彭文祥. 堰塞湖应急处置技术[M]. 武汉: 长江出版社, 2021. (CAI Yao-jun, LI Jian-qing, PENG Wen-xiang. Emergence disposal technology of high-risk barrier lakes[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2021. (in Chinese))

[31] 余晓露, 郑东健. 基于人工神经网络的边坡新多点监控模型[J]. 人民黄河, 2020, **42**(6): 117－119, 129. (YU Xiao-lu, ZHENG Dong-jian. A new multi-point monitoring model of slope based on artificial neural network[J]. Yellow River, 2020, **42**(6): 117－119, 129. (in Chinese))

[32] 武 鑫, 郑东健, 刘永涛, 等. 滑坡失稳时间预测方法研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2021, **41**(4): 89－94. (WU Xin, ZHENG Dong-jian, LIU Yong-tao, et al. A review of temporal prediction methods for landslide failure[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, **41**(4): 89－94. (in Chinese))

[33] SHAN Y B, CHEN S S, ZHONG Q M. Rapid prediction of landslide dam stability using the logistic regression method[J]. Landslides, 2020, **17**(12): 2931－2956.