水　利　学　报
2021年10月　SHUILI　XUEBAO　第52卷　第10期

文章编号：0559-9350(2021)10-1229-11

白格堰塞湖抢险处置应急管理与经验启示

周兴波[1,2]，周建平[2,3]，杜效鹄[1,2]，陈祖煜[4]

（1. 水电水利规划设计总院，北京　100120；2. 国家能源水电工程技术研发中心，北京　100120；
3. 中国电力建设股份有限公司，北京　100048；4. 中国水利水电科学研究院，北京　100038）

摘要： 基于2018年金沙江白格堰塞湖应急处置工作，全面总结了部际联合会商、央地协同联动等应急抢险工作机制，深入分析了金沙江中游梯级水库群联合调度削峰对防灾减灾所发挥的重要作用。研究表明，若无梨园水库拦蓄，将可能新增淹没面积约160 km^2，必对沿江两岸造成更大的损失。据此认识到，迅速获取堰塞湖信息是抢险处置的前提，快速研判堰塞湖风险是重要支撑，精准分析溃决洪水是核心技术，协同联动工作机制是基本保证，动态抢险工程管理是科学方法，完善的高坝水库群是应对洪灾的根本手段。进而提出加强乏信息条件下堰塞湖多源信息快速获取与处理技术、乏信息条件下风险快速研判技术能力、抢险处置专用装备研发、抢险工程统筹管理和协同联动体系完善、高坝水库群开发建设和风险防控与应急调度体系建设等建议，为堰塞湖应急管理水平提升和流域综合防灾减灾提供借鉴。

关键词： 堰塞湖；滑坡；溃堰洪水；应急除险；风险处置

中图分类号： TV641　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.13243/j.cnki.slxb.20210653

1　研究背景

堰塞湖是由山体滑坡、崩塌、泥石流等堵塞河道而形成一定库容的水体，是一种自然现象，古而有之[1-2]。堰塞湖在亚洲、欧洲、美洲、大洋洲等区域均有发生[3-8]，从分布区域来看，亚洲的堰塞湖主要分布在中国西南山区、喜马拉雅山脉、日本、中东及东南亚等地区，欧洲的堰塞湖主要分布在阿尔卑斯山脉、意大利等地区，美洲的堰塞湖主要分布在美国和加拿大山区、南美洲的安第斯山脉，大洋洲的堰塞湖则主要集中在新西兰地区[9]。据初略统计，堰塞湖形成后有22%在1 d内溃决，有50%在10 d内溃决，有83%在半年内溃决[1]。因此，堰塞湖一旦形成，多数存活期较短，随着蓄水量增多，容易漫顶溃决，形成溃堰洪水，应急处置往往需要与时间赛跑。

堰塞湖具有滑坡方量大、集雨面积广、湖体水量日益增多，对下游人民群众生命财产安全构成巨大威胁，抢险处置工程措施受气候条件、水文条件和地质条件影响，信息匮乏，且水陆交通不便或中断、周边作业环境危险、处置时间极为紧迫等因素制约，应急处置难度非常大，若稍有不当，可能会造成灾难性的后果。1933年10月9日，四川叠溪海子、小海子两个地震滑坡堰塞湖溃决，洪峰流量超过10 000 m^3/s，导致2500余人伤亡[10]。2010年8月7日，甘肃舟曲县城北部山区突降特大暴雨，引发山洪泥石流堵塞白龙江形成堰塞湖，导致近1700人死亡失踪[11]。

近年来，随着应急管理水平提升和科技装备现代化，国内外先后成功处置多起堰塞湖，为堰塞湖应急处理置积累了丰富经验。如，1996年贵州印江河山体滑坡形成的岩口堰塞湖，2008年汶川地震形成的唐家山、肖家桥、小岗剑等34座堰塞湖[12]，2014年云南鲁甸地震形成的牛栏江流域红石岩

收稿日期：2021-06-23；网络首发时间：2021-10-12
网络首发地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20211012.1020.001.html
基金项目：国家自然科学基金项目(U19A2049)；中国科学院学部咨询评议项目(2018-Z16-A-099)
作者简介：周兴波(1988-)，博士，主要从事溃坝机理与数值计算、流域安全与应急管理研究。E-mail：zhou_xingbo@126.com
通讯作者：周建平(1962-)，教授级高级工程师，主要从事水电工程设计与咨询、流域安全管理研究。E-mail：zjp@powerchina.com

堰塞湖[13]，2018年金沙江上游的两次白格堰塞湖；1982年美国华盛顿圣海伦斯火山喷发形成的斯皮利特湖、科尔德沃特湖和2004年日本中越地震形成的东竹泽堰塞湖等。

2018年10月10日和17日，我国西藏自治区昌都市江达县白格村与四川省甘孜州白玉县交界处和西藏自治区林芝市米林县加拉村先后发生山体滑坡和冰川崩塌，分别堵塞金沙江和雅鲁藏布江，形成库容分别约为2.2亿和5.5亿 m^3 的大型堰塞湖。同年10月29日，雅鲁藏布江加拉村色东普沟因上次冰崩残留冰体消融下滑形成冰川泥石流，再次堵塞雅鲁藏布江，形成最大库容约3.26亿 m^3 的大型堰塞湖。11月3日，金沙江上游白格村发生二次原位山体滑坡，再次堵塞金沙江，形成最大库容约7.75亿 m^3 的大型堰塞湖。对比一个月内发生的4次滑坡堵江，均具有规模巨大、处置极险、作业艰难、条件复杂的突出特点。11·03白格堰塞湖由于库容大、影响区域广、潜在损失重，且下游有叶巴滩、苏洼龙等在建水电站和梨园、阿海、金安桥等已建梯级水电站群，故其应急处置工作最为典型。

10·11白格堰塞湖存活期相对较短，自山体滑坡堵江至漫顶过流约43 h，未来得及采取工程处置措施，仅在现场监测的同时，做好下游梯级水电站和沿岸相应的应急预警和转移安置。基于10·11白格堰塞湖漫顶过流，及其对下游梯级电站群的影响，11·03白格堰塞湖最大库容约为10·11的3.5倍，为保障下游沿岸人民生命财产安全和在建的叶巴滩、苏洼龙水电站、在运的梨园水电站及流域系统安全，经对比分析和综合研判，采取了堰塞体人工开挖导流槽、在建苏洼龙电站围堰破拆、在运梨园电站水库腾空等一系列应急处置措施，将堰塞湖最大库容由7.75亿 m^3 减少至5.3亿 m^3，溃决洪峰流量由可能的45 000 m^3/s 削减至33 900 m^3/s，有效减轻了溃决洪水对下游梯级水电站群和沿岸城镇的影响。

文献[14–23]从溃堰洪水分析、水文预报、应急监测、应急调度、泄洪放空、抢险处置技术等方面开展了较多的研究，但从抢险处置工作机制、下游沿岸减灾分析、应急管理体系和能力方面的分析研究较少。笔者在参与两次白格堰塞湖抢险处置工作基础上，系统归纳堰塞湖抢险处置应急管理体系，分析应急工作和行业管理不足，总结经验教训与启示，为今后堰塞湖处置和技术规范修订提供借鉴。

2　系统联动的应急管理机制

2.1　联合应急抢险工作机制　10·11白格堰塞湖险情发生后，应急管理部迅速启动应急响应，会同自然资源部、水利部、国家气象局、国家能源局等部门，在中央层面建立了部际联合会商和央地协同联动工作机制，调派中央专家组赴现场指导，并在11·03白格堰塞湖抢险处置前成立了现场指挥部，迅速获取基础信息，快速研判灾情，研究应对措施，协同处置调度，确保最大限度减少灾害损失。

2.1.1　*部际联合会商制度*　部际联合会商制度的首要目的是实现信息精准且及时共享，避免抢险信息孤岛问题；其次是充分发挥各个行业技术专家集体智慧，尽可能做到科学决策；第三是分析研判统筹制定抢险方案，确保现场抢险有序，下游避险有序，提高应急抢险的效能。

10·11白格堰塞湖险情发生后，应急管理部会同自然资源部、水利部、国家气象局、国家能源局等有关部门，牵头成立部际联合工作组，建立部际联合会商制度，确保堰塞湖抢险处置高效实施。部际会商应急抢险组织体系见图1。部际联合工作组和部际联合会商制度的建立，为11·03白格堰塞湖的成功抢险处置提供了工作机制保障。

2.1.2　*央地协同联动机制*　我国防灾减灾救灾实行分级负责、属地为主的原则，地方政府承担应急抢险救灾主体责任，中央发挥统筹指导和支持作用。因此，白格堰塞湖应急抢险工作在部际联合会商制度的基础上，中央统筹派出由应急管理部牵头，自然资源部、水利部、国家能源局等单位参加的联合工作组赴现场，指导协助地方查明滑坡原因，研判险情灾情发展趋势，提出应急处置措施。

白格堰塞湖应急抢险处置先后召开了12次部际联合会商会议。滑坡堵江所处金沙江川藏段，是

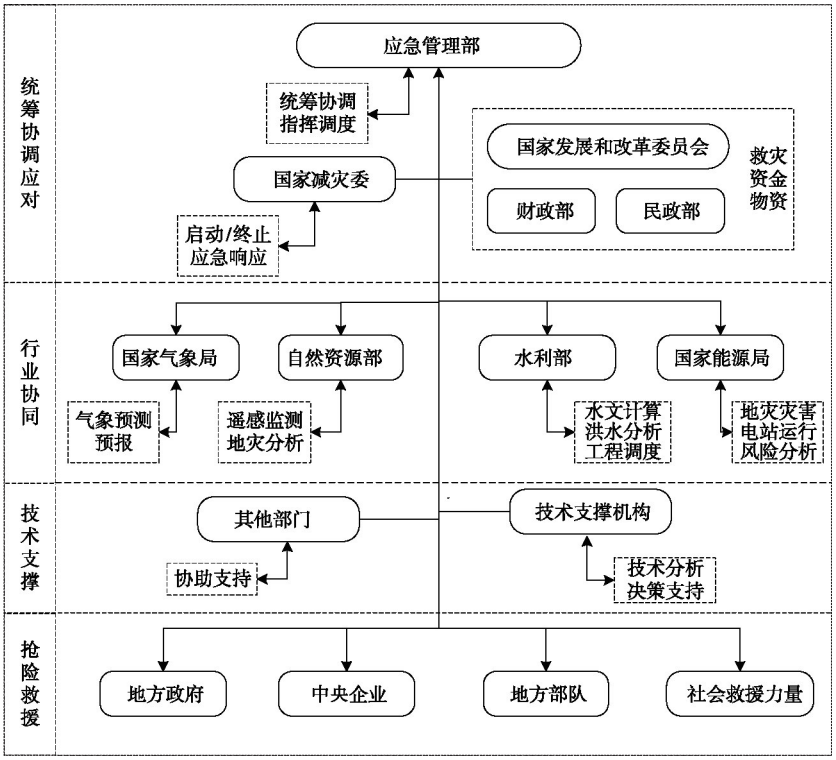


图1　部际会商应急组织体系

四川和西藏两省区的界河，在应急抢险工作会商中，四川省、西藏自治区政府及各有关部门、应急抢险现场指挥部均视频参会，确保中央、地方协同联动，高效抢险处置。

2.2　应急响应社会动员　考虑到11·03白格堰塞湖溃决可能造成的危害，中央和地方政府迅速做出决策，动员沿江群众抓紧疏散转移安置，做好安全警戒。

在中央层面，国家防汛抗旱总指挥部按照《国家防汛抗旱应急预案》有关规定，自11月12日4时启动防汛Ⅲ级应急响应，要求西藏、四川、云南省级防汛抗旱指挥部、长江防汛抗旱总指挥部强化沿岸风险监测研判，加强应急值守和会商分析，根据实际情况及时启动相应级别的应急响应，采取有效措施，确保人民群众生命安全，最大程度减少灾害损失。长江防汛抗旱总指挥部于11月12日4时启动防汛Ⅲ级应急响应，要求西藏自治区、四川省、云南省防汛抗旱指挥部加强组织领导，落实工作责任，全力以赴做好堰塞湖险情应急处置相关工作。

在地方层面，11月7日云南省防汛抗旱总指挥部下发《关于做好金沙江干流堰塞湖下游防范工作的紧急通知》，并与长江防汛抗旱指挥部及四川、西藏和前线指挥部构建了纵横联系的行政应急联系机制、水情监测预警机制和应急转移机制。11月11日晚云南省启动省级防汛III级应急响应。昆明市从11月13日20时启动Ⅲ级应急响应，要求禄劝县、东川区以及昆明市密切关注上下游水位、流量变化情况，组织受威胁群众疏散转移。迪庆州启动了I级应急响应，积极做好群众动员。据统计[24]，迪庆金沙江流域10个乡镇共转移安置19 177人，其中香格里拉市12 393人，德钦县3910人，维西县637人，开发区2237人。丽江市于11月12日启动防汛II级应急响应，11月13日提升为防汛I级应急响应。丽江市24个乡镇受金沙江堰塞湖险情影响，转移21 373人，其中，玉龙县18 379人，永胜县2796人，华坪县198人。大理州通过实地走访确认金沙江沿江村落，可能影响鹤庆县、宾川县2个乡镇6个村委会129户528人。楚雄州受影响的4县共有9个乡镇40个村组，需转移人口约10 585人。昭通市对可能影响的巧家、永善、水富、绥江4县区及时划定沿线受威胁区，对沿江住户、企业等受威胁区进行宣传告知。

2.3　堰塞湖淹没及其溃堰洪灾损失及分析　堰塞湖淹没及其溃堰洪水影响涉及金沙江河段两岸，溃

堰洪水截断止于梨园水库。据统计[24]，11·03白格堰塞湖溃决洪水泄洪过流中共转移人口85 134人，无人员伤亡，其中四川转移18 849人、西藏转移25 282人、云南转移41 003人；估计直接经济损失约135亿元。其中，云南省共有迪庆州和丽江市的4个县、16个乡镇受灾，民房倒塌8051间，受损18 189间；公路累计受损632.12 km，跨江桥梁冲毁13座、受损13座；金沙江防洪堤受损55 km，农田灌溉设施受损31处，沟渠损坏97.85 km，人畜饮水管道受损636 km，冲毁泵站27座、水池1座，损坏水文站2座；电站、电厂被淹4个，电线受损201 km，通信设施受损56台套；农业受灾面积5.05万亩，成灾4.32万亩、绝收2.19万亩，冲毁农田1.35万亩。

金沙江中游的梨园水库提前预泄，腾空库容，拦洪削峰，发挥了重要的防灾减灾作用。通过梨园、阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉、观音岩大型水电站的拦蓄调节，阿海电站水库的出库流量仅为854 m^3/s，低于11月1日堰塞湖导致金沙江断流前的下游天然流量2040 m^3/s。

现假设没有梨园水电站及其中游其他梯级的调洪作用，白格溃决洪水以梨园水库的入库流量向下游演进至攀枝花市。梨园电站至攀枝花市距离350 km，采用一维非恒定流圣维南方程计算洪水演进，假定工况梨园下游洪水无实测资料，无法率定洪水演进计算参数，故采用上游苏洼龙至梨园的河道进行计算分析，曼宁系数取0.06，洪水过程取11·03白格堰塞湖溃决洪水演进至梨园电站水库的实测过程，见图2。

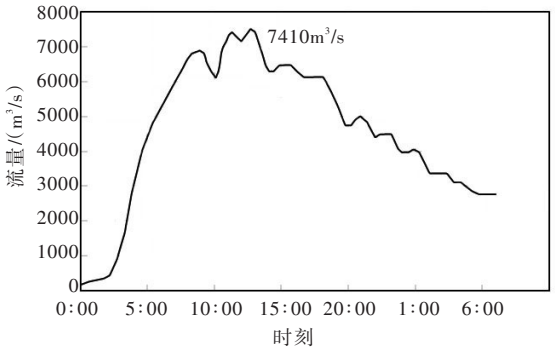


图2　梨园电站入库流量过程

以梨园电站至攀枝花市区段的9个沿江典型乡镇(图3)为分析对象，计算各乡镇断面水位增幅变化和可能淹没面积，分析计算结果见表1。

表1　假定无梨园电站下游典型乡镇淹没情况

序号	名称	东经	北纬	距离/km	水位增幅/m	区域淹没面积/km^2
1	梨园水电站	100.29°	27.67°	0		
2	丽江市宁蒗县拉伯乡	100.45°	27.62°	20	13.13	1.56
3	丽江市古城区金安乡	100.44°	26.81°	120	12.91	0.96
4	大理州鹤庆县中江乡	100.41°	26.49°	160	10.45	1.78
5	大理州鹤庆县朵美村	100.39°	26.30°	180	8.30	2.06
6	丽江市永胜县涛源镇	100.57°	26.22°	200	10.71	1.75
7	大理州宾川县钟英乡	100.76°	26.16°	225	7.35	1.52
8	楚雄市大姚县湾碧乡	101.20°	26.36°	270	4.83	1.03
9	攀枝花市西区格里坪镇	101.54°	26.60°	330	4.56	0.93
10	攀枝花市区	101.70°	26.57°	350	3.39	1.29

选取丽江市宁蒗县拉伯乡作为典型代表，将断面位置的洪水流量和地形相结合，并叠加遥感影像，可绘制洪水淹没图，如图4所示。同理也可绘制丽江市古城区金安乡、大理州鹤庆县中江乡等8个典型乡镇的洪水淹没图。

若无梨园电站调洪作用，将可能新增淹没面积总计约160 km^2，必对沿江造成更大的损失，9个典型乡镇具体情况为：(1)丽江市宁蒗县拉伯乡，水位上涨13.13 m，沿江淹没较多农田，部分道路受损，少量房屋被淹；(2)丽江市古城区金安乡附近，水位上涨12.91 m，两座桥梁将受到洪水冲击威胁，沿江部分工厂会被淹没，由于该地区地势较陡，居民大多位于高位，基本不受威胁；(3)大理州鹤庆县中江乡，水位上涨10.45 m，两座桥梁受到洪水冲击威胁，该地区地势平缓，居民密集且大多沿江而居，江左岸洪水淹没较严重，大量房屋、公路被淹；(4)大理州鹤庆县朵美村，水位上涨8.30 m，该地区右岸地势平缓居民多沿江居住于此，部分房屋将被洪水淹没，部分公路被淹，少量农

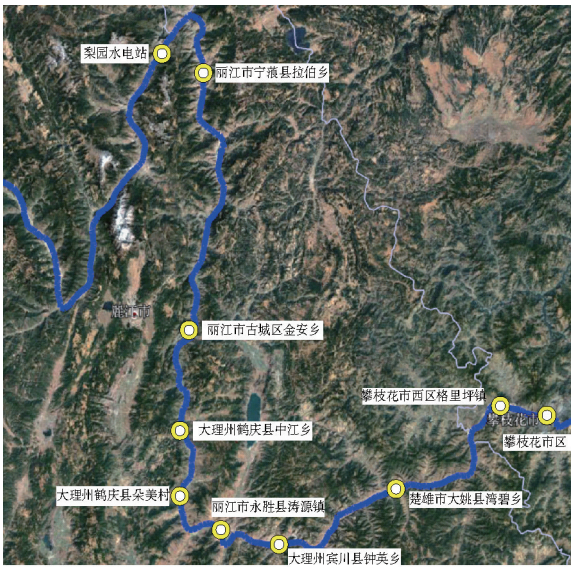


图3　梨园下游河道乡镇分布

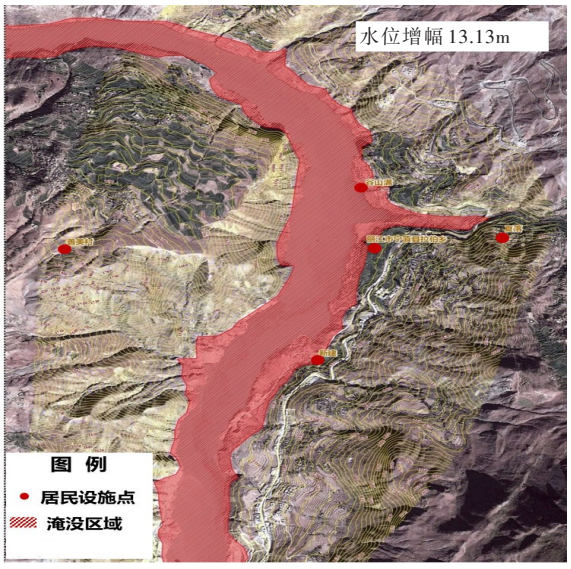


图4　丽江市宁蒗县拉伯乡洪水淹没分布

田被淹；(5)丽江市永胜县涛源镇水域面积较大，水位上涨 10.71 m，该区域部分公路被淹，沿江少量房屋被淹；(6)大理州宾川县钟英乡地势较陡，水位上涨 7.35 m，居民大多位于高位，基本不受威胁；(7)楚雄市大姚县湾碧乡地势较陡，水位上涨 4.83 m，居民基本不受威胁；(8)攀枝花市西区格里坪镇较为平坦，毗邻攀枝花市区，水位上涨 4.56 m，沿江基本不受威胁；(9)攀枝花市区，水位上涨 3.39 m，沿江基本不受威胁。

3　应急管理的经验启示

堰塞湖抢险处置环境危险、时间紧迫、交通不便，堰塞体物质结构组成不明、溃堰洪水风险极高，应急抢险处置难度极大。白格堰塞湖的成功处置，为今后堰塞湖应急抢险积累了宝贵经验。

3.1　迅速获取堰塞湖信息是应急处置的基本前提　迅速精准获取水文、滑坡体规模等有关基础信息，掌握堰塞体的基本特征，是堰塞湖险情分析评估和应急抢险处置决策的基本前提。

堰塞湖水文信息主要包括降水、区域来水、入湖流量、水位变化、库容，其中库容–水位关系曲线是堰塞湖风险分析和抢险处置中需要提供的首要资料。水文信息的获取，可通过已有水文气象监测站点和临时搭建的应急监测站点。白格堰塞湖应急抢险水文监测充分利用堰塞湖上游的岗拖(90 km)、波罗(20 km)两座现有水文站监测上游来流量，利用堰塞湖下游的叶巴滩(54 km)、巴塘(158.5 km)、苏洼龙(223.5 km)、奔子栏(379.9 km)等站点监测溃堰洪水演进过程。同时，在堰塞体上下游约 3 km 处分别搭建了临时水位观测点。滑坡体、堰塞体规模特征及地形通过现场无人机航空摄影、卫星遥感等手段及时测得。

堰塞体的基本特征主要通过勘测调查与研究确定，勘测内容包括堰塞体几何特征、物质组成及其材料物理力学性质。堰塞体几何特征包括高度、长度、宽度，以及堆积形态，物质组成主要分析判断是否包括岩块、碎石、卵石、砂砾石、泥土及其各成分的含量，必要时可进行物理力学性质试验和颗分实验，确定其黏聚力、内摩擦角、密度、级配曲线等。应急抢险初期主要以人工现场表观查看为主，同时采用高分辨率卫星遥感和地形图对堰塞体进行监测，也可采用 GPS、免棱镜全站仪、激光测距仪、三维激光扫描等开展勘查测量。白格堰塞湖两次抢险中均采用了现场人工表观查看、无人机倾斜摄影、卫星遥感等技术，分析了白格滑坡的下滑方量、堰塞体的长宽高及垭口位置，尤其是 11·03 白格堰塞湖勘测结果有力支撑了人工引流槽的开挖布置。

3.2　快速研判堰塞湖风险是应急处置的重要支撑　堰塞湖在形成初期，其安全性和所处风险水平是

应急抢险处置的重要依据和支撑，因此尽管在堰塞湖基础信息不全、堰塞体堆积材料信息匮乏、所处环境条件尚不清晰的情况下，也应尽可能快速研判评价堰塞湖安全性，确定其风险等级。水利部在2008年汶川地震形成的34座堰塞湖应急处置工作经验基础上，编制了《堰塞湖风险等级划分标准》（SL 450—2009），规定堰塞湖规模按其库容可分为大型、中型、小(1)型和小(2)型；堰塞体危险级别按堰塞湖规模、堰塞体高度及其物质组成分为极高危险、高危险、中危险和低危险；堰塞体溃决损失严重性按风险人口、重要城镇以及设施重要性分为极严重、严重、较严重和一般；综合考虑堰塞体危险性和溃决损失严重性，指导堰塞湖风险等级评定为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级，如表2所示[12]。

表2　堰塞湖风险等级划分

风险等级	堰塞体危险性级别	溃决损失严重性级别
Ⅰ	极高危险	极严重、严重
	高危险、中危险	极严重
Ⅱ	极高危险	较严重、一般
	高危险	严重、较严重
	中危险	严重
	低危险	极严重、严重
Ⅲ	高危险	一般
	中危险	较严重、一般
	低危险	较严重
Ⅳ	低危险	一般

如前文所述，10·11和11·03白格堰塞湖库容均大于1.0亿m^3，属大型堰塞湖；两次白格堰塞体最大高度分别为138和149 m，均大于70 m，堰塞体危险级别为极高危险；白格堰塞湖下游有在建的叶巴滩、苏洼龙、在运的梨园、阿海、金安桥等梯级水电站，以及四川、西藏、云南境内的城镇，10·11白格堰塞湖溃决损失严重性级别为严重，11·03白格堰塞湖溃决损失严重性级别为极严重。因此，两次白格堰塞湖风险等级均为Ⅰ级。

堰塞湖风险等级的确定，可为应急处置和后续处置标准选取提供支撑，如应考虑的上游来水的洪水标准、堰塞湖库水位预警超高、堰塞体稳定性控制标准、溃堰洪水风险分析等。

3.3　精准分析计算溃堰洪水是应急处置的核心技术　分析预测溃堰洪水过程，是划定堰塞湖洪水过流淹没范围、制定抢险救灾方案的重要依据。堰塞湖溃决过程涉及非恒定高速急变流对堰塞坝体的冲刷，是水力学、土力学、泥沙动力学及水土力学耦合的过程，其机理极为复杂。漫顶和渗透破坏是堰塞湖溃决的两种主要方式，前者是漫坝水流对坝体表面冲刷形成初始溃口，过坝流量增大导致溃口进一步冲刷，失稳坍塌而扩大；后者是由于坝体或坝基内部渗流，引起内部水流冲刷坝体，进而导致通道扩展并发生坍塌。

对于溃口洪水计算，基于物理过程的模型综合考虑溃口流量、溃口扩展、溃口冲刷及其三者之间的相互作用，在实践中应用较为广泛。溃口流量计算一般采用宽顶堰公式，或采用数值差分求解圣维南方程组近似解。两类方法各有所长，前者可考虑溃口水流跌落，通过溃口侵蚀率和溃口边坡稳定分析模拟溃口的物理冲刷过程，计算效率高，但其溃口并非严格的宽顶堰，存在一定的局限性；后者按水、土两相耦合的流体力学描述溃决过程，但圣维南方程组是建立在流速沿整个过水断面均匀分布、河床比降小、水面曲线近似水平等基本假定的前提下，计算效率相对较低。

溃口冲刷采用侵蚀率来表征，即单位时间内水流裹挟冲刷堰塞体土石料的厚度，一般有指数模型、线性模型和双曲线模型，其中，Meyer-Peter & Muller、Englund-Hanson等经验公式均呈指数模型[25]。

$$\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=\begin{cases}a_1(\tau-\tau_c)^{b_1} & \text{指数/线性模型}\\ \dfrac{k(\tau-\tau_c)}{a_2+b_2k(\tau-\tau_c)} & \text{双曲线模型}\end{cases}\tag{1}$$

式中：τ为剪应力；τ_c为临界剪应力；a_1、b_1为指数回归系数，或者由经验给定，b_1取值为1时即为线性模型；k为单位变换因子；a_2、b_2为双曲线回归系数。

双曲线侵蚀率模型具有实际物理含义，认为水流冲刷土石料时，土石料抵抗冲刷侵蚀的能力应具有一定的“强度”，即双曲线有一当$(\tau-\tau_c)$接近无限值时的渐进线，即$\mathrm{d}z/\mathrm{d}t$的极值$1/b_2$。唐家山堰塞湖溃决洪水反演分析中，a_2=1.1，b_2=0.0007，即侵蚀率的极限值为1.429 mm/s。白格堰塞湖溃决预测计算中，a_2=1.1，b_2=0.0004、0.0005、0.0007，即侵蚀率的极限值为2.5 ~ 1.429 mm/s。双曲线模型的侵蚀率模型基本解决了高流速堰塞湖溃决洪水计算不收敛的问题，提高了溃坝洪水计算分析的精确度。

溃堰洪水演进计算分析是下游沿岸转移撤离的技术依据。目前，洪水演进计算主要是采用数值差分求解圣维南方程组近似解的过程，可分为一维、二维、三维。应急抢险中，考虑计算工作量和效率，主要以一维计算为主，如马斯京根法、有限差分法等。但河道地形、糙率、几何形状等因素对洪水演进计算结果影响较大。白格堰塞湖溃决洪水演进分析预测至下游叶巴滩、苏洼龙、奔子栏、石鼓、梨园各站点的洪峰流量和到达时间偏差较大，尚需进一步地深入研究。

3.4　高效协同联动工作机制是应急处置的基本保证　高效协同的多方联合应急抢险工作机制，尤其是部际联合会商和央地协同联动机制，实现精准信息传送共享，确保了分析研判的准确性和应急决策的科学性。部际联合会商确保了行业之间信息共享、专家共享、技术共享、资源共享，统筹整合各行业形成合力。央地协同联动确保了中央层面的应急管理部、水利部、自然资源部、国家气象局、国家能源局等部门技术资源，与四川省甘孜州、西藏自治区昌都市等地方政府共同协商、研究制定统一抢险处置方案。

白格堰塞湖应急抢险中，水利部门依托长江流域水文测站、能源电力部门依托已建在建水电工程测站均可测得水文信息，自然资源、应急管理及研究机构依托滑坡点监测和卫星资源均可获取滑坡和堰塞湖特征信息，不同渠道获取的信息，通过部际联系会议共同会商，打破了信息壁垒，同时也使得各行业技术专家共同研判，提高了应急抢险方案制定的效率。

应急管理部作为白格堰塞湖应急抢险处置的牵头部门，统筹各方抢险目标，协同制定系统处置方案，确保了抢险处置的可行性和高效性。在应急抢险处置分析评估中，滑坡体尚存在滑塌风险，人工干预面临滚石或塌方风险，但人工不干预，11·03白格堰塞湖的最大库容达7.75亿m^3，溃堰洪水必将威胁下游梯级水电站工程安全。经应急、自然资源、水利、能源等多部门协同研判后，制定了滑坡体监测—堰塞体人工开挖引流槽—在建苏洼龙围堰破拆—在运梨园电站水库腾空—在运阿海、金安桥、龙开口等梯级电站水库降低水位限制运行—沿岸四川、西藏、云南三省人员财产转移等一系列处置方案，参与抢险各方共同会商，协同优化抢险方案，效果较好。

3.5　动态抢险工程管理是应对突发灾害的科学方法　实践证明，应急抢险处置方案高效实施，动态优化管理，不仅可使险情损失尽可能降至最低，而且也是应急抢险处置工程必须遵循的工作方法。2008年唐家山堰塞湖人工干预，开挖引流槽施工过程中，结合施工中揭露的物质组成和地质条件，考虑现场实际的施工能力，对引流槽结构进行了4次大的优化调整。一是引流槽开挖揭露表明引流槽沿线以松散的残坡堆积物为主，对控制快速溯源冲刷可起到锁口作用，为此取消原陡坡段和平缓段出口所有的防护措施；二是对引流槽平缓段出口方向较原设计方向向左微调，以便引导水流归槽入河；三是为适应平缓段上游侧施工，将原平缓段的槽底纵坡调整为倒坡；四是结合现场施工进度较原设计方案快，在接近完成预期目标时，将引流槽进口高程由742 m降低至741 m，在临近施工结束时，又将槽底高程全线降低至740 m，在现实可能的情况下将唐家山堰塞湖最大库容减少至最小[1]。2014年云南鲁甸牛栏江红石岩堰塞湖应急抢险中，同样也坚持了动态优化工程管理的原则，取

得了成功经验。

11·03白格堰塞湖抢险优先考虑下游正在施工的叶巴滩水电站现场的挖掘机，中国电建技术专家连夜奔赴现场，水电五局反铲第一个达到堰顶开挖作业，确保处置方案高效实施。在抢险施工人员和机械到达白格堰塞体上后，为了防止右岸滚石和滑塌，增设修建了拦挡坎；最先预期引流槽开挖深度为10 m，在结合上游来水和湖水上升速度的实际情况，现场施工能力强、进度快，开挖深度依次调整为11、12、13 m，最终开挖引流槽全线深13.5 m后撤离人员和施工机械。事实证明，对于突发事件的应急抢险工程，组织经验丰富的工程师现场动态优化，合理分担风险，可充分发挥恶劣环境下高强度的施工能力，大大减轻对下游造成的威胁和损失。

3.6 梯级水库群拦洪削峰是截断洪水灾害的根本手段 在建的叶巴滩水电站总库容11.85亿m^3，正常蓄水位以下库容10.8亿m^3，调节库容5.37亿m^3，如叶巴滩水电站双曲拱坝建成，考虑拱坝超静定结构的超载能力和叶巴滩泄流能力，或将成功拦截白格堰塞湖溃决洪水，避免流域系统性风险事件。事实证明，白格堰塞湖溃堰洪水演进至下游在运梨园电站水库的入库洪峰流量为7190 m^3/s，梨园水库预先腾空库容，使得出库洪峰流量仅为4500 m^3/s，成功拦截并削减白格堰塞湖溃决洪水，充分体现了高坝大库防灾减灾的重要作用。

与此同时，也应该清醒地认识到，11·03白格堰塞湖在人工开挖引流槽处置的情况下，溃堰洪水演进至下游在建或筹建的叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙电站的洪峰流量均超过每个电站大坝的校核洪水标准，详见表3。

表3 金沙江上游在建梯级水电站及溃堰洪峰

电站	阶段	规模	坝型	校核洪水标准	校核洪峰/(m^3/s)	溃堰洪峰/(m^3/s)
叶巴滩	在建	一等	混凝土拱坝	5000年一遇	10100	28300
拉哇	筹建	一等	面板堆石坝	可能最大洪水	11900	22000
巴塘	在建	二等	沥青心墙坝	5000年一遇	10500	20900
苏洼龙	在建	一等	沥青心墙坝	可能最大洪水	12500	19800

因此，流域高坝水库群在发挥其防灾减灾、清洁电力、生态环保等综合经济社会效益的同时，其面临的超标洪水、超强地震、巨型滑坡堵江等自然风险，及其灾害链导致的次生灾害，对水库群大坝建设也提出了新的更高的要求。那么，对于白格堰塞湖灾害事件后，是否需要提高下游每座梯级水库群大坝的设防标准呢？

从流域系统安全角度，设防标准越高风险概率越低。但任何一项工程的设计建设均需要统筹安全可靠性和经济合理性，权衡风险与效益的关系。如果叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙等梯级水电站普遍提高工程设防标准，显然不够科学。因此，对水库群系统而言，应坚持系统观念和风险理念，统筹流域水库群系统中的各个梯级，对不同的梯级类型，分配与之相适应的风险任务。对龙头水库和控制梯级，必须保证不溃坝，具备截断洪水风险的能力，在经济合理、技术可行的条件下，可适当提高设防标准。对流域中的关键梯级，在保证自身安全的前提下，必须保证不向下游叠加放大洪峰流量。对流域中的薄弱梯级，应采取补强加固的工程措施，提高安全裕度，降低失效概率。此外，为确保梯级水库群系统安全，应在其规划、设计、建设、运行、退役的各个阶段，结合可能遭遇的风险，建立全生命期的风险防控体系，尤其是加强运行期流域水库群安全监测，建立流域层面的安全与应急管理信息平台，并接入水文、地质等灾害风险因素、流域沿岸的经济社会基础信息，支撑流域梯级水库群应急联合调度，进一步完善梯级水库群的安全保障与风险防控体系，增强应急管理能力。

4 思考与建议

堰塞湖具有隐蔽性和突发性，其影响范围广，破坏力大。灾情发生后，争分夺秒，需要果断决策，快速处置。近20年以来，我国抢险处置了多起堰塞湖灾害，积累了一定的抢险处置实践经验。本文系统总结白格堰塞湖应急抢险工作机制和应急管理经验，提出今后需要研究的方向，以期形成一套成熟的应对管理机制和技术支撑体系。一旦灾情发生，立即组成一个具有决策和组织能力的指挥体系，一个高水平的技术专家团队和一个富有战斗力的应急处置施工队伍，是成功应对堰塞湖灾害的基础条件。

(1)加强乏信息条件下堰塞湖多源信息快速获取与处理技术体系建设。山体滑坡、地震滑坡、泥石流等堵塞江河形成堰塞湖，均发生在高山峡谷，水文气象、地形地貌、地质条件、经济社会状况等排险处置与抢险救灾基础信息精准感知获取不易，原始基础信息数据处理效率不高，可结合现有雷达、GNSS、无人机、卫星遥感等成熟接触和非接触式应急测绘与监测技术，建立“空天地一体化”预测预警系统，强化乏信息条件下堰塞湖应急抢险处置关键基础信息的感知获取，满足堰塞湖应急抢险“绝对快、相对准”的需求，达到堰塞湖风险分析研判与科学处置决策的要求。白格滑坡堰塞湖事件发生后，通过解译光学卫星遥感影像和合成孔径雷达(InSAR)遥感数据发现，白格滑源区自1960年代就已开始明显变形，滑坡发生前一年内山体整体下错约20 m。实践经验表明，InSAR技术可以作为较早发现滑坡前兆的技术之一。

(2)加强流域系统堰塞湖风险快速研判技术能力和标准体系建设。堰塞湖风险分析研判的核心技术是溃堰洪水计算和洪水演进分析，通过系统反演已有实例的溃决过程，研究崩塌型堰塞体和泥石流型堰塞体溃决机理，进而验证计算模型的合理性和率定模型参数。如对基于双曲线的冲刷侵蚀模型，重点率定侵蚀率参数b_2。对侵蚀性很高的细砂或非塑性粉土，其取值可为0.0001 ~ 0.0003；对侵蚀性中等的节理岩石或细砂砾石，其取值可为0.0005 ~ 0.0007；对侵蚀性很低的堆石或岩石，其取值可为0.001 ~ 0.01。洪水演进计算也可采用同样方法进行分析研究。此外，可在机理研究、实例反演和实践经验的基础上，研究制定堰塞湖溃决洪水风险分析技术导则、堰塞湖应急监测与预警技术导则等技术规范，完善现行堰塞湖应急抢险技术标准体系。

(3)加强适用于堰塞湖抢险处置的专用装备的攻关研发和应用。11·03白格堰塞湖应急抢险处置的技术力量基本到位，保证了抗击溃堰洪水灾害工作的顺利实施。但白格滑坡堵江应急处置也暴露出重大灾害应急处置过程中的不少问题和短板。其中，最为突出的是，缺乏适宜于交通不便区域的水文应急监测、抢险设备运输与施工等专用设备，抢险挖掘机是通过边修路边前进的方式到达堰塞体坝顶，行进路上耗费时间较多。可按照交通抢通类、挖掘推铲类、库水抽排类开展堰塞湖抢险处置的专用装备整合研发。交通抢通类可根据山区和水上行走要求，研究履带式、轮式水陆两栖全地形车、应急架桥抢通车等；挖掘推铲类主要以堰塞体上作业要求为主，研究水陆两栖挖掘机，满足打桩、插板、螺旋钻、凿岩、铣刨、抓斗、液压钳夹等要求的多功能挖掘机，可空降轻型多功能遥控抢险车等。库水抽排类主要是控制堰塞湖库水位，为应急处置和下游人口转移赢得更多的时间，研究移动泵站、抽排机器人、可空降排水车等。

(4)完善应急抢险工程统筹协调和协同联动工作保障体系。堰塞湖应急抢险涉及面广、信息来源多、现场情况动态多变，且各行业部门之间、中央与地方之间、抢险现场与后方指挥部之间均需要统筹协调，因此，统筹协调、协同联动的工作保障体系是应急抢险成功的组织保障。白格堰塞湖应急抢险更为突出，地方层面涉及四川、云南、西藏三省区，行业层面涉及自然资源、水利、能源、气象、应急、国土等多部门，部际联合会商和央地协同联动机制，统筹了基础信息获取、风险分析研判、抢险处置方案、处置措施实施等各个阶段各方面的风险防控目标，面对复杂、艰巨的排险任务和抢险救灾工作，制定系统的抢险处置方案，紧扣处置工程和人员转移的关键环节，分头有序组织实施，实现了人员零伤亡的抢险处置目标。白格堰塞湖在风险分析研判阶段，水利行业、能

源行业专业技术人员均开展了溃堰洪水分析；在抢险处置阶段，关键环节是在交通不便的情况下，如何将施工设备运到现场，对比了空路、水路、陆路等进场方案，最终采用“边修路边进场”的陆路方案，调用叶巴滩水电站施工设备，解决了这一难题。

(5)加强流域梯级水库群全生命期风险防控与应急调度体系建设。实践证明，应对超标准洪水的最有力的武器就是梯级水库群。白格堰塞湖溃决洪水影响整个金沙江流域，正是因为梨园电站水库腾空库容拦洪削峰，以及下游阿海、金安桥、龙开口、鲁地拉等梯级电站水库群的联合应急调度，有效减小了对下游沿岸的影响。如若金沙江上游叶巴滩、拉哇、巴塘、苏洼龙、昌波等梯级电站水库群建成投运，通过联合调度，将可避免白格堰塞湖溃决洪水对下游的影响。因此，应加快金沙江上游、雅砻江中上游、大渡河上游、澜沧江中上游，以及雅鲁藏布江的梯级电站水库群建设，进一步提升水库调度的防灾减灾作用。同时，目前对水库群系统风险防控和应急调度的研究与应用尚且不多，应从流域系统安全风险层面，加强流域梯级水库群风险防控基础理论研究，并在现行技术标准要求的发电、防洪、航运、灌溉与供水、防凌、生态、泥沙、枢纽工程管理等运行调度基础上，进一步加强流域水库群应急调度体系，提升水库群应对突发事件和超标准洪水的运行调度水平。

参 考 文 献：

[1] 刘宁，杨启贵，陈祖煜．堰塞湖风险处置[M]．武汉：长江出版社，2016．

[2] 刘宁．堰塞湖应急处置实践与认识[J]．水科学进展，2010，21(4)：541-549．

[3] ERMINI L，CASAGLI N．Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index[J]．Earth Surface Processes & Landforms，2010，28(1)：31-47．

[4] STROM A．Landslide dams in Central Asia region [J]．Journal of the Japan Landslide Society，2010，47(6)：309-324．

[5] DUMAN T Y．The largest landslide dam in Turkey：Tortum landslide [J]．Engineering Geology，2009，104(1/2)：66-79．

[6] NICOLETTI P G，PARISE M．Seven landslide dams of old seismic origin in southeastern Sicily (Italy) [J]．Geomorphology，2002，46(3)：203-222．

[7] GEERTSEMA M，CLAGUE J J．1，000-year record of landslide dams at Halden Creek，northeastern British Columbia [J]．Landslides，2006，3(3)：217-227．

[8] KORUP O．Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams [J]．Engineering Geology，2004，73(1/2)：13-35．

[9] EVANS S G，HERMANNS R L，STROM A，et al．Natural and Artificial Rockslide Dams[M]．New York：Springer，2011．

[10] 王兰生，杨立铮，李天斌．四川岷江叠溪铰场地震滑坡及环境保护[J]．地质灾害与环境保护，2000，11(3)：195-199．

[11] WANG G L．Lessons learned from protective measures associated with the 2010 Zhouqu debris flow disaster in China [J]．Natural Hazards，2013，69(3)：1835-1847．

[12] 周兴波，陈祖煜，李守义，等．高风险等级堰塞湖应急处置洪水重现期标准[J]．水利学报，2015，46(4)：405-413．

[13] 石振明，熊永峰，彭铭，等．堰塞湖溃坝快速定量风险评估方法——以2014年鲁甸地震形成的红石岩堰塞湖为例[J]．水利学报，2016，47(6)：742-751．

[14] ZHANG L，XIAO T，HE J，et al．Erosion-based analysis of breaching of Baige landslide dams on the Jinsha River，China，in 2018 [J]．Landslides，2019，16(10)：1965-1979．

[15] ZHONG Q，CHEN S，WANG L，et al．Back analysis of breaching process of Baige landslide dam[J]．Landslides，2020，17(7)：1681-1692．

[16] 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.
[17] 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.
[18] 周兴波, 杜效鹄, 姚虞. 金沙江白格堰塞湖溃坝洪水分析[J]. 水力发电, 2019, 45: 12-16.
[19] 张晨笛, 林永鹏, 徐梦珍, 等. 怒江干流堰塞坝特征及稳定河床机制[J]. 水利学报, 2019, 50(10): 1165-1176.
[20] 程海云. "11·3"金沙江白格堰塞湖水文应急监测预报[J]. 人民长江, 2019(3): 23-27.
[21] 王敏, 卢金友, 姚仕明, 等. 金沙江白格堰塞湖溃决洪水预报误差与改进[J]. 人民长江, 2019(3): 34-39.
[22] 陈敏. 金沙江白格堰塞湖处置中水库应急调度经验与启示[J]. 人民长江, 2019, 50(3): 10-14.
[23] 郭新蕾, 周兴波, 夏庆福, 等. 梯级水库群控制梯级极端工况泄洪安全分析[J]. 水利学报, 2017, 48(10): 1157-1166.
[24] 陈祖煜, 胡贵良, 蔡文靖, 等. 金沙江白格堰塞湖应急处置与减灾分析报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
[25] 周兴波, 陈祖煜, 李守义, 等. 不同推移质输沙模型在溃坝洪水模拟中的对比分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015(6): 1097-1108.

Lessons and experiences from emergency management of Baige Barrier Lake on the Jinsha River, China

ZHOU Xingbo[1, 2], ZHOU Jianping[2, 3], DU Xiaohu[1, 2], CHEN Zuyu[4]

(1. *China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing* 100120, *China*;
2. *Research and Development Center of National Energy and Hydropower Engineering Technology, NEA, Beijing* 100120, *China*;
3. *POWERCHINA Limited, Beijing* 100048, *China*;
4. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100038, *China*)

Abstract: Based on the experience of emergency treatment of Baige Barrier Lake in the upper reaches of the Jinsha River in 2018, the joint emergency rescue work mechanism such as inter-ministerial joint consultation, central-local goverments coordination and linkage, emergency response social mobilization and disaster situation were summarized, and the possible disasters in the the Jinsha River if there is no cascade hydropower stations joint operation and regulation was deeply analyzed. The results show that without flood regulation of the Liyuan Hydropower Station, the inundation area would be increased about 160 km^2, causing greater losses along the river. It is recognized that timely acquisition of barrier lake information is the prerequisite for emergency disposal, rapid risk assessment is the technolical support, accurate analysis of landslide dam break flood is the key, the coordination and linkage working mechanism is the guarantee, the dynamic rescue project management is the scientific method, and the perfect high-dam reservoirs is the fundamental way to deal with flood disasters. It is further proposed that (a) to strengthen the rapid acquisition and processing technology of multi-source information of barrier lake under the condition of lack information, (b) to strengthen the technical capability of rapid risk analysis and judgment under the condition of little information, (c) to strenghen the research and development of special equipment for emergency disposal of barrier lake, (d) to improve the overall management of emergency rescue projects and the perfect coordinated linkage system, (e) to strenghen the development of high dams and risk management and emergency dispatch system. It should provide references for the improvement of barrier lake risk disposal technology and the comprehensive disaster prevention and mitigation of the river basin.

Keywords: barrier lake; landslide; landslide dam break flood; emergency response; risk treatmen

(责任编辑: 王冰伟)