

基于 DL Breach 模型的堰塞湖溃决洪水分析

周兴波^{1,2}, 王双敬³, 杨子儒^{1,2}, 杨 晟⁴

(1. 水电水利规划设计总院, 北京 100120; 2. 国家防汛抗旱技术研究中心, 北京 100120;

3. 中铁工程装备集团有限公司, 河南 郑州 450016; 4. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014)

摘要: 为了高效精准地分析预测堰塞湖溃决洪水, 回顾了 DL Breach 模型的基本原理, 反演分析了唐家山堰塞湖溃决洪水流量过程, 并与实测流量过程作对比。结果表明 DL Breach 模型具有可靠性和稳定性, 利用该模型计算得出的唐家山堰塞湖溃口流量过程与实测流量过程较为接近, 溃口峰值流量计算值为 $7323 \text{ m}^3/\text{s}$, 较实测值 $6500 \text{ m}^3/\text{s}$ 误差约为 11.2%, 峰值出现时间计算值较实测值提前近 1 h, 主要是由于唐家山堰塞湖溃口的小石梁提升了堰塞体的抗冲刷能力。此外, 坝体材料粒径增大会降低峰值流量; 而黏聚力、上游坡比及初始溃口深度增大会降低溃口底高程, 对峰值流量的影响较小。

关键词: 防洪工程; 堰塞湖; 溃决洪水; 洪峰流量; DL Breach 模型

中图分类号: TV698

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)01-0068-05

Analysis of barrier lake breach flood based on DL Breach model//ZHOU Xingbo^{1,2}, WANG Shuangjing³, YANG Ziru^{1,2}, YANG Shen⁴(1. *China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China*; 2. *National Center for Flood Control and Drought Relief Technology Research, Beijing 100120, China*; 3. *China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China*; 4. *POWERCHINA Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China*)

Abstract: In order to efficiently and accurately analyze and predict the flood discharge of the dam breach of a barrier lake, the basic principles of the DL Breach model were reviewed, and the flood discharge process of the dam breach of Tangjiashan Barrier Lake was inversely analyzed and compared with the measured discharge process. The results show that the DL Breach model is reliable and stable. The discharge process of the dam breach of Tangjiashan Barrier Lake calculated by this model is close to the measured value. The calculated peak discharge is $7323 \text{ m}^3/\text{s}$, which is approximately 11.2% higher than the measured value of $6500 \text{ m}^3/\text{s}$. The calculated peak discharge occurrence time is nearly 1 h earlier than the measured time, mainly due to the fact that the small stone beam at the breach of Tangjiashan Barrier Lake enhances the anti-scouring ability of the barrier body. In addition, an increase in material particle size will reduce the erosion of the breach and decrease the peak discharge, while an increase in material cohesion, upstream slope ratio and initial breach depth will reduce the bottom elevation of the breach, but has little effect on the peak discharge.

Key words: flood control project; barrier lake; breach flood; flood peak discharge; DL Breach model

近年来, 极端气候多发频发, 堤坝库群安全保障和堰塞湖应急处置挑战巨大^[1]。地震、暴雨等自然灾害诱发山体滑坡堵塞江河形成堰塞湖, 由于其没有专设的泄洪设施, 极易导致漫顶溃决, 对下游沿岸人民生命财产安全和重大基础设施安全威胁极大^[2-3]。1933年岷江叠溪地震、1999年台湾南投地震等均形成堰塞湖漫顶溃决事件^[3-4]。2008年汶川地震形成34座堰塞湖, 其中最大的唐家山堰塞湖库容约为 2.2 亿 m^3 , 直接威胁下游绵阳、遂宁130多

万人的生命财产安全以及宝成铁路和兰成渝成品油管道等重要基础设施安全^[5-7]。2014年云南鲁甸地震形成红石岩堰塞湖, 对下游沿岸数千人和天花板、黄角树两座梯级水电站造成极大威胁^[8-9]。2018年西藏自治区江达县白格村与四川省白玉县则巴村交界处金沙江右岸先后两次发生山体滑坡, 堵塞金沙江干流, 分别形成库容约为 2.2 亿 m^3 和 7.75 亿 m^3 的堰塞湖, 严重威胁下游沿岸人民生命财产安全和叶巴滩、苏洼龙、梨园等梯级水电站安全^[10-13]。因此, 高

基金项目: 国家自然科学基金项目(52309154); 国家重点研发计划项目(2021YFC3090105); 中国电力建设股份有限公司资助项目(DJ-HXGG-2022-02)

作者简介: 周兴波(1988—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事溃坝分析、水库群风险防控研究。E-mail: zhou_xingbo@126.com

效准确地分析预测堰塞湖溃决洪水,对高风险等级堰塞湖应急抢险与风险处置具有重要的现实意义。

高效精准的溃决洪水分析对堰塞湖风险评估至关重要^[14]。目前,堰塞湖溃坝洪水分析方法可分为两大类:一类是基于水量平衡方程,采用宽顶堰流量公式计算溃口流量,统筹考虑溃口发展过程;另一类是以圣维南方程组为水流控制方程,采用有限差分数值计算方法,通过附加边界条件求得控制方程近似解。两类方法各有所长,前者可考虑溃口水流的跌落现象,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,但其溃口并非严格的宽顶堰,按宽顶堰流量公式计算存在一定局限;后者严格按照水动力学及水土力学耦合方法描述溃决过程,但圣维南方程组是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建立,这些假定与真实情况尚存在一定差距,若初始条件或边界条件设置不当,会导致计算结果不收敛。

基于宽顶堰流量公式的溃口流量计算方法,一般对溃口冲刷和几何展宽过程可作概化处理,采用溃口侵蚀率、扩展系数等参数概化物理过程。在现有的溃坝洪水分析模型中可将溃口的几何扩展过程假定为三角形、梯形、抛物线形等,溃口的冲刷过程是建立在泥沙动力学中已有的经验泥沙输运方程的基础上,如 Meyer-Peter & Muller 方程、Englund-Hanson 方程等。这类模型被广泛应用于商业/工程软件,例如 DAMBRK^[15-16]、FLDWAV^[17]、BREACH^[18]、BEED^[19]、BRADAW^[20]、HEC-RAS^[21]、MIKE11^[22-23]和 DB-IWHR^[24-25]等。本文在简要介绍 DL Breach 模型^[26-27]原理的基础上,针对记录完整的唐家山堰塞湖溃决过程,进行了全面的反演分析与计算验证,分析该模型在堰塞湖溃决洪水计算分析中的合理性及适用性,可为应急抢险处置决策提供技术支撑。

1 DL Breach 模型

DL Breach 模型可精细化模拟漫顶表层冲刷和陡坎冲刷,可区分黏性土和非黏性土,适用于均质土坝和心墙坝,也可用于堰塞湖溃决洪水分析,该模型主要包括溃口流量计算、溃口泥沙输运计算和溃口扩展过程模拟等。

1.1 溃口流量计算

根据水流冲刷溃口的速度快慢,分两个阶段计算堰塞湖溃口流量:前一阶段溃口冲刷较快,采用宽顶堰流量公式(式(1))进行计算;后一阶段溃口冲刷缓慢,采用 Keulegan 公式(式(2))进行计算。

$$Q = k_{sm}(c_1 b H^{1.5} + c_2 m H^{2.5}) \quad (1)$$

$$\text{其中 } k_{sm} = \begin{cases} 1.0 & 0 < J < 0.67 \\ 1.0 - 27.8(J - 0.67)^3 & J \geq 0.67 \end{cases}$$

$$H = z_s - z_b \quad J = (z_1 - z_b)/(z_s - z_b)$$

式中: Q 为溃口流量; k_{sm} 为堰流尾水淹没修正系数; z_s 为上游库水位; z_b 为溃口底高程; z_1 为下游尾水位; b 为溃口底宽度; m 为溃口边坡坡度; c_1 、 c_2 为常数,一般取 $c_1 = 1.7$, $c_2 = 1.3$ 。

Keulegan 公式是基于能量守恒定律的恒定非均匀流方程,考虑了河道断面变化引起的水头损失。

$$z_s - z_t = \left(\frac{2gn^2L}{R^{4/3}} + \lambda_{en} + \lambda_{ex} \right) \frac{Q|Q|}{2gA^2} - LB \frac{\rho_a C_d U_{win}^2 \cos\theta_{win}}{\rho g A} \quad (2)$$

式中: g 为重力加速度; n 为曼宁系数; L 为水流冲刷溃口的长度; R 为水力半径; λ_{en} 和 λ_{ex} 分别为溃口入口处与出口处的水头损失; A 为溃口面积; B 为溃口水面宽度; ρ 、 ρ_a 分别为水与空气的密度; C_d 为风的阻力系数; U_{win} 为风速; θ_{win} 为风的方向与溃口轴向方向的夹角。

1.2 溃口泥沙输运计算

DL Breach 模型考虑了溃坝水流中的河床质及悬移质泥沙,总输砂率 q_b 由河床质输砂率 q_{b*} 与悬移质输砂率 q_* 决定,如式(3)所示。

$$\begin{cases} q_b = q_* + q_{b*} / Q \\ q_* = \frac{1}{20} \left(\frac{U^3}{gR\omega_s} \right)^{1.5} / \left[1 + \left(\frac{1}{45} \frac{U^3}{gR\omega_s} \right)^{1.15} \right] \\ q_{b*} = 0.0053 (\tau'_b / \tau_c - 1)^{2.2} \sqrt{(\gamma_s / \gamma - 1) g d^3} \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{其中 } \tau_c = 0.03(\gamma_s - \gamma)d \quad \tau'_b = (n'/n)^{1.5} \tau_b \\ n' = d^{1/6} / 20$$

式中: U 为泥沙通量; ω_s 为泥沙流速; d 为泥沙粒径; τ_c 为临界剪应力; τ_b 为河床剪应力; γ_s 为泥沙容重; γ 为水的容重。

1.3 溃口扩展过程模拟

溃口边坡稳定性取决于土料性质、溃口河床高度等,采用滑楔法^[22]获取各阶段的溃口边坡,如图1所示设置固定的边坡值模拟溃口扩展过程,采用角度 α_1 、 α_2 、 α_3 表征溃口几何形状,其正切值为溃口深度与溃口宽度增量一半的比值。

2 唐家山堰塞湖溃决洪水反演分析

2.1 基本概况

2008年5月12日,汶川8.0级地震导致山体滑坡堵塞通口河形成唐家山堰塞湖,堰塞坝顺河长约803m,横河最大宽度约为611m,坝高82~124m,体积

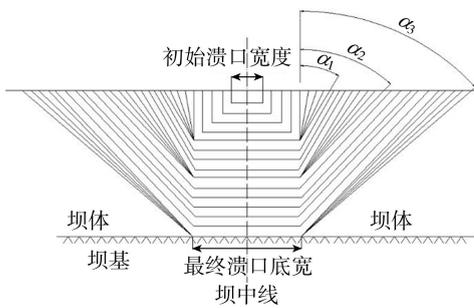


图1 溃口发展过程

约为 2037 万 m^3 。堰塞坝顶面地形起伏较大,横河方向左侧高右侧低,左侧最高点高程为 793.90 m,右侧最高点高程为 775.00 m。堰塞湖水位库容曲线见图 2,在水位为 752 m 时,库容为 3.16 亿 m^3 ,742 m 时库容为 2.38 亿 m^3 ,714 m 时库容为 0.86 亿 m^3 。

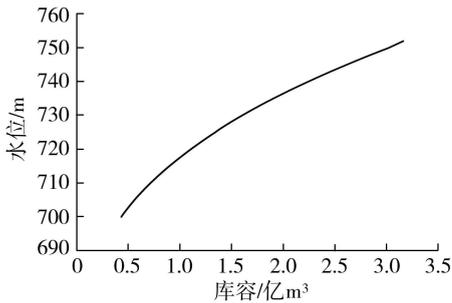


图2 唐家山堰塞湖水位库容曲线

为规避唐家山堰塞坝快速溃决对下游造成灾难性损失,5月27日决定采用机械开挖泄流渠的工程除险方案,借水力冲刷拓宽泄流渠,以提高泄水能力,避免发生溃坝。5月30日,唐家山堰塞湖坝体上形成了长为475 m、上游段深12 m、下游段深13 m的泄流渠。6月7日7时8分,堰塞湖开始顺利泄流,至11日下午,彻底消除了唐家山堰塞湖险情。

2.2 计算参数取值与结果分析

唐家山堰塞坝计算参数取值如下:坝基高程 669.00 m,坝高 82~124 m,上、下游坡比分别为 0.25、0.41,坝体材料的中值粒径为 17 mm,泊松比为 0.36,黏聚力为 25 kPa,内摩擦角的正切值为 0.47。以坝基高程 669.00 m 为 DL Breach 模型计算基准高程,根据溃决实测流量过程线可知,初始溃口深度为 13 m,初始溃口宽度为 7.8 m,设定 06:00 堰塞湖起溃,此时库水位为 742.46 m,槽底高程为 735.20 m,断面宽度为 35 m,天然入库流量为 $80 m^3/s$ 。

根据上述参数取值计算分析唐家山堰塞湖溃口的流量过程,得到溃口流量、库水位、溃口底高程、溃口水深计算结果与实测过程对比,分别如图 3~6 所示。

由图 3 可知,溃口流量计算值与实测值总体拟合较好,溃口峰值流量计算值为 $7232 m^3/s$,较实测值 $6500 m^3/s$ 偏大 $732 m^3/s$,误差约为 11.2%,峰值

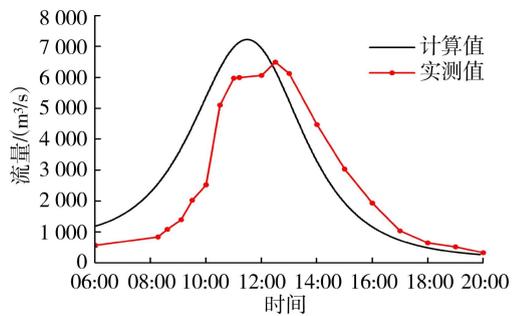


图3 溃口流量实测值与计算值对比

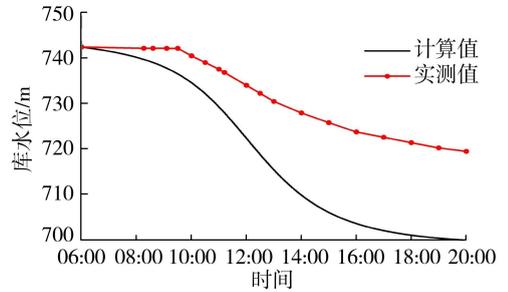


图4 库水位实测值与计算值对比

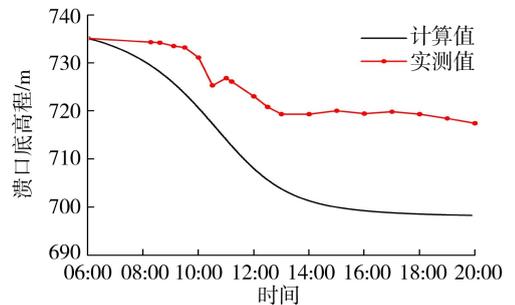


图5 溃口底高程实测值与计算值对比

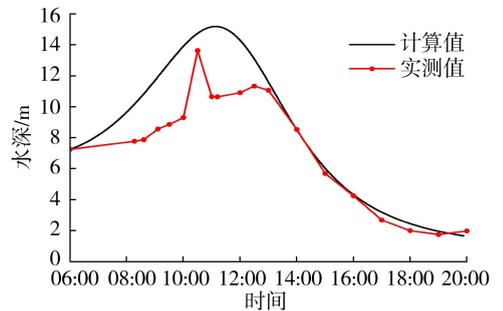


图6 溃口水深实测值与计算值对比

出现时间计算值为 11:28,较实测峰值时间 12:30 提前近 1 h。分析其原因,主要是由于唐家山堰塞湖溃决冲刷过程中溃口处有一小石梁,且小石梁处已形成陡坎冲刷、水头跌落的现象,足以说明小石梁提升了堰塞体抗冲刷的能力,降低了堰塞体冲刷侵蚀溃决的速率,故而使得计算峰值流量稍大且峰值时间提前。

由图 4~6 可知,库水位计算值相比实测值偏低,溃口底高程计算值也较实测值偏低,而溃口水深计算值与实测值吻合度较高。这表明唐家山堰塞湖溃口的小石梁确实起到了抵御冲刷侵蚀的作用,在

溃口水深增大过程中,实测水深比计算水深小,而在溃口水深减小过程中,实测水深和计算水深较为吻合,说明溃口冲蚀过程在出现峰值流量后拟合较好。

2.3 参数敏感性分析

为进一步分析参数取值对 DL Breach 模型的影响,选取粒径、黏聚力、上游坡比及初始溃口深度进行参数敏感性分析,各变量取值见表 1,各分析方案仅改变单一变量,并对照溃口峰值流量过程和溃口底高程发展过程分析参数的敏感性。

表 1 参数敏感性分析方案

方案	参数取值	粒径/mm	黏聚力/kPa	上游坡比	初始溃口深度/m
1	下限值	10	20	0.20	7.0
2	基准值	17	25	0.25	7.8
3	上限值	22	30	0.30	8.5

溃口底高程以基准值为参考进行定性分析;溃口峰值流量以计算峰值为基准进行定量分析,并分析峰值出现时间的变化,粒径、黏聚力、上游坡比、初始溃口宽度对峰值流量的敏感性分析见图 7~10,具体计算结果见表 2。

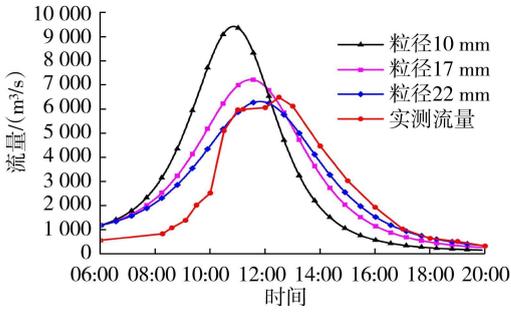


图 7 粒径敏感性分析

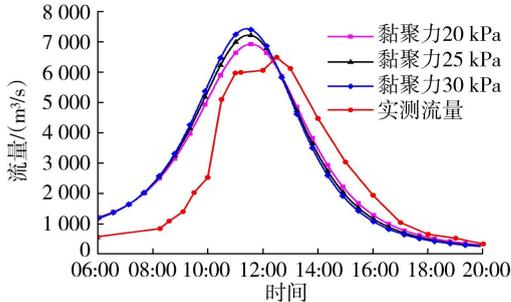


图 8 黏聚力敏感性分析

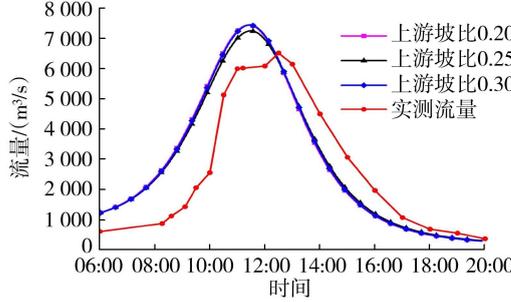


图 9 上游坡比敏感性分析

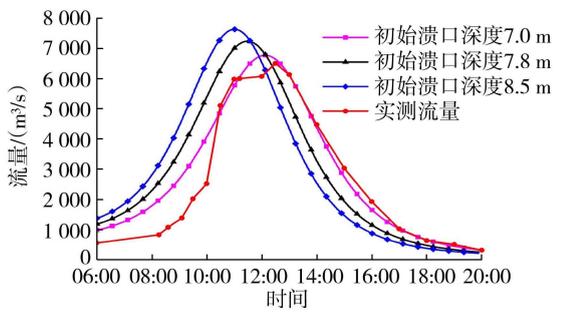


图 10 初始溃口深度敏感性分析

表 2 参数敏感性分析结果

敏感性参数	取值	溃口底高程	溃口峰值流量		
			数值/ (m ³ /s)	变幅/%	峰值出现时间
粒径	10 mm	偏低	9433	30.4	提前
	17 mm	基准值	7232	0.0	基准值
	22 mm	偏高	6323	-12.6	延迟
黏聚力	20 kPa	偏高	6934	-4.1	无变化
	25 kPa	基准值	7232	0.0	基准值
	30 kPa	偏低	7442	2.9	无变化
上游坡比	0.20	偏高	6934	-4.1	无变化
	0.25	基准值	7232	0.0	基准值
	0.30	偏低	7429	2.7	无变化
初始溃口深度	7.0 m	偏高	6765	-6.5	延迟
	7.8 m	基准值	7232	0.0	基准值
	8.5 m	偏低	7625	5.4	提前

由表 2 可知,粒径对峰值流量影响较为显著,黏聚力、上游坡比和初始溃口深度对峰值流量影响较小,且随粒径的增大,溃口底高程计算结果较基准值升高,溃口底高程偏大,而随着黏聚力、上游坡比及初始溃口深度的增大,溃口底高程的计算结果降低。

3 结论

高效精准的堰塞湖溃决洪水分析模型对应急处置决策极为重要。在回顾 DL Breach 模型基本原理的基础上,反演分析了唐家山堰塞湖溃决过程,计算得出的溃口流量、堰塞湖库水位、溃口底高程、溃口水深等变化过程与实测变化过程总体较为相符,验证了 DL Breach 模型计算分析的可靠性和稳定性。参数敏感性分析结果表明,较大的材料粒径可降低溃口峰值流量,而较大的材料黏聚力及上游坡比会降低溃口底高程但对峰值流量的影响较小。DL Breach 模型采用 Keulegan 公式分段计算溃口流量,可更好地反映溃口流量过程,但溃口初始尺寸选定为矩形,与漫顶溃决起初的 V 形或 U 形尚有一定差距,虽通过参数敏感性分析得出溃口初始尺寸对峰值流量的影响不大,但今后可做进一步的改进研究。

参考文献:

[1] 周兴波, 杨子儒, 杜效鹄, 等. 极端气候下堤坝库群工程

- 安全与应急管理的思考[J]. 水力发电,2023,49(5):4-9. (ZHOU Xingbo, YANG Ziru, DU Xiaohu, et al. Reflections on engineering safety and emergency management of dams and dykes under extreme climates [J]. Water Power,2023,49(5):4-9. (in Chinese))
- [2] 杜镇瀚,钟启明,董海洲,等. 堰塞湖风险评估研究综述[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):13-25. (DU Zhenhan, ZHONG Qiming, DONG Haizhou, et al. A review of risk assessment studies on dammed lake[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):13-25. (in Chinese))
- [3] 罗辉,邓创,赵高文. 2008—2017年中国典型滑坡堰塞坝(湖)灾害事件统计与初步分析[J]. 水利水电科技进展,2020,40(1):17-24. (LUO Hui, DENG Chuang, ZHAO Gaowen. Statistics and preliminary analysis for typical landslide dams in China in past decade [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020,40(1):17-24. (in Chinese))
- [4] 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. (ZHOU Xingbo, CHEN Zuyu, LI Shouyi, et al. On the standard of flood return period for high risk barrier lake in emergency disposal[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015,46(4):405-413. (in Chinese))
- [5] 刘宁,张建新,林伟,等. 汶川地震唐家山堰塞引流除险工程及溃坝洪水演进过程[J]. 中国科学:技术科学,2009,39(8):1359-1366. (LIU Ning, ZHANG Jianxin, LIN Wei, et al. Draining Tangjiashan barrier lake after Wenchuan earthquake and the flood propagation after the dam break[J]. Science in China: Technological Sciences, 2009,39(8):1359-1366. (in Chinese))
- [6] LIU Ning, CHEN Zuyu, ZHANG Jianxin, et al. Draining the Tangjiashan barrier lake [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2010,136(11):914-923.
- [7] 杜镇瀚,钟启明,董海洲,等. 基于贝叶斯网络的堰塞坝稳定性快速评价模型[J]. 水利水电科技进展,2023,43(4):37-45. (DU Zhenhan, ZHONG Qiming, DONG Haizhou, et al. Rapid evaluation method of landslide dam stability based on Bayesian network [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(4):37-45. (in Chinese))
- [8] ZHOU Xingbo, CHEN Zuyu, YU Shu, et al. Risk analysis and emergency actions for Hongshiyuan barrier lake [J]. Natural Hazards,2015,79(3):1933-1959.
- [9] 刘宁. 红石岩堰塞湖排险处置与统合管理[J]. 中国工程科学,2014,16(10):39-46. (LIU Ning. Hongshiyuan landslide dam danger disposal and coordinated management[J]. Strategic Study of CAE,2014,16(10):39-46. (in Chinese))
- [10] 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 Yaojun, LUAN Yuesheng, YANG Qigui, 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))
- [11] 周兴波,周建平,杜效鹄,等. 金沙江白格堰塞湖应急抢险与处置技术[J]. 中国科学:技术科学,2022,52(2):343-356. (ZHOU Xingbo, ZHOU Jianping, DU Xiaohu, et al. Emergency rescue and disposal technology for Baige Barrier Lake on the Jinsha River, China [J]. Science in China: Technological Sciences,2022,52(2):343-356. (in Chinese))
- [12] 周兴波,周建平,杜效鹄,等. 白格堰塞湖抢险处置应急管理 with 经验启示[J]. 水利学报,2021,52(10):1229-1239. (ZHOU Xingbo, ZHOU Jianping, DU Xiaohu, et al. Lessons and experiences from emergency management of Baige barrier lake on the Jinsha River, China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(10):1229-1239. (in Chinese))
- [13] 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(3):8-12. (ZHOU Xingbo, DU Xiaohu, YAO Yu. Research and analysis on Baige landslide dam break flood in Jinsha River [J]. Water Power,2019,45(3):8-12. (in Chinese))
- [14] 蔡耀军,栾约生,易杜靓子,等. 堰塞体危险性快速评价指标与分级研究[J]. 人民长江,2022,53(2):35-40. (CAI Yaojun, LUAN Yuesheng, YI Duliangzi, et al. Rapid evaluation on risk level of barrier dams and its classification [J]. Yangtze River,2022,53(2):35-40. (in Chinese))
- [15] FREAD D L. The development and testing of a dam-break flood forecasting model [C]//Proceedings of Dam-Break Flood Routing Model Workshop. Washington, D. C.: United States Water Resources Council,1977:164-197.
- [16] FREAD D L. DAMBRK: the NWS dam-break flood forecasting model [R]. Silver Spring: National Weather Service,1980.
- [17] FREAD D L, LEWIS J M. FLDWAV: a generalized flood routing model [R]. New York: ASCE,1988.
- [18] FREAD D L. BREACH: an erosion model for earthen dam failures [R]. Silver Spring: National Weather Service,1988.
- [19] SINGH V P, SCARLATOS P D. Breach erosion of earth-fill dams and flood routing (BEED) model [R]. Battelle: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station,1989.
- [20] BROWN R J, ROGERS D C. BRDAM users' manual [R]. Denver: US Department of the Interior,1981.

(下转第78页)