

堰塞湖溃决生命损失快速评估

李丽萍, 刘建康, 韩晓兰, 张恒翔, 宋哲源, 赵万玉

Rapid risk assessment of loss of life in dammed lakes: A case study of the Shiping landslide in the Minjiang River Basin

LI Liping, LIU Jiankang, HAN Xiaolan, ZHANG Hengxiang, SONG Zheyuan, and ZHAO Wanyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

岷江上游汶川地震前后泥石流易发性评价

Susceptibility assessment of debris flow in the upper reaches of the Minjiang River before and after the Wenchuan earthquake

赵佳忆, 田述军, 李凯, 侯鹏鹞 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(1): 51-59

印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究

The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India

殷跃平, 李滨, 张田田, 王猛, 万佳威, 刘晓杰, 高杨, 朱赛楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 1-8

喜马拉雅中段冰湖终碛坝体溃决过程实验研究

Experimental study on the process of end-moraine dam failure in the middle Himalaya glacial lake: Taking the Jialongcuo glacial lake end-moraine dam as an example

苏鹏程, 刘威, 李昊, 陈乔, 刘阳, 张议芳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 18-28

云南德钦县一中河泥石流成灾特征及危险性评价

Formation mechanism and hazard assessment of debris flow in Yizhong River, Deqin County, Yunnan Province

宋银, 陈亮, 王研, 何清, 杨林, 巴净慧, 陈典 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 103-109

西藏色东普沟2024年两期冰川泥石流堵江灾害发育特征研究

Research on the characteristics of the Sedongpu glacial debris flow and river-damming hazards, occurred in April 15 and May 14, 2024, in Xizang, China

万佳威, 高浩源, 高杨, 肖金城, 李军, 李江山, 李浩文 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(6): 24-32

黄河流域甘肃段地质灾害发育特征

The development characteristics of geological hazards in Gansu segment of the Yellow River basin

郭富, 宋晓玲, 刘明霞 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 130-136



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202303002

李丽萍, 刘建康, 韩晓兰, 等. 堰塞湖溃决生命损失快速评估——以岷江流域石坪滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(1): 28-36.

LI Liping, LIU Jiankang, HAN Xiaolan, et al. Rapid risk assessment of loss of life in dammed lakes: A case study of the Shiping landslide in the Minjiang River Basin[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(1): 28-36.

堰塞湖溃决生命损失快速评估 ——以岷江流域石坪滑坡为例

李丽萍¹, 刘建康¹, 韩晓兰¹, 张恒翔¹, 宋哲源¹, 赵万玉²

(1. 西华大学应急管理学院, 四川成都 610039;

2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川成都 610299)

摘要:堰塞湖溃决具有突发性、冲击力大、影响范围广等特点, 严重威胁下游群众生命财产安全, 快速评估堰塞湖溃决可能造成的生命损失, 对应急决策、应急疏散等应急响应工作具有重要的指导意义。为达到及时、快速和准确评估的目的, 文章构建了一套基于简化参数的堰塞湖溃决生命损失快速评估方法体系, 分别从堰塞坝稳定性、溃决洪水峰值流量、溃决洪水演进、洪水生命损失 4 个模块进行分析和计算, 并利用白格滑坡堰塞湖溃决事件进行验证, 准确率达到 65%。在此基础上, 选取岷江流域堵江风险较高的石坪滑坡为预测分析对象, 通过文章提出的方法体系评估了堰塞坝的稳定性, 计算了全溃条件下的洪水峰值流量及其洪水演进, 划定了洪水风险对汶川县威州镇造成的影响范围, 预测了洪水可能造成的失踪人口或死亡人口。案例计算结果显示, 在部分报警情况下, 石坪滑坡堰塞湖溃决将造成威州镇人口损失约 753 人, 需加强监测预警、应急预案和应急疏散演练等防灾减灾备灾工作降低灾害风险。通过堰塞湖溃决生命损失快速评估方法体系的建立, 可以为堰塞湖灾害的防灾减灾规划和应急处置与决策提供依据。

关键词:堰塞湖; 溃决洪水; 生命损失; 快速评估; 岷江

中图分类号: P694

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)01-0028-09

Rapid risk assessment of loss of life in dammed lakes: A case study of the Shiping landslide in the Minjiang River Basin

LI Liping¹, LIU Jiankang¹, HAN Xiaolan¹, ZHANG Hengxiang¹, SONG Zheyuan¹, ZHAO Wanyu²

(1. School of Emergency Management, Xihua University, Chengdu, Sichuan 610039, China;

2. Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610299, China)

Abstract: Dammed lakes are characterized by suddenness, high impact and wide range of influence, which seriously threaten the lives and properties of people downstream. Rapid assessment of the potential loss of life is of great significance for emergency decision-making, emergency evacuation and other emergency response activities. In order to achieve timely, rapid and accurate assessment, this paper constructs a system of rapid assessment methods for barrier lake breaching loss of life based on

收稿日期: 2023-03-01; 修订日期: 2024-01-07

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(U19A2049); 西华大学人才引进项目(Z212017); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0902); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190644)

第一作者: 李丽萍(1999—), 女, 四川南充人, 土木水利专业, 硕士研究生, 从事地质灾害机理和应急处置技术的研究。

E-mail: 2775332466@qq.com

通讯作者: 刘建康(1985—), 男, 四川自贡人, 岩土工程专业, 博士, 高级工程师, 从事地质灾害机理和应急处置技术的研究与教学。

E-mail: j_jiankang@foxmail.com

simplified parameters, analyzing and calculating four modules respectively, barrier body stability, outburst flood peak, failure flood evolution and loss of life, and validating them using the Baige Dammed Lakes event with an accuracy rate of 65%. On this basis, the Shiping landslide, which has a high risk of river blockage in the Minjiang River Basin, was selected for prediction and analysis. The stability of the barrier body was assessed through the methodological system proposed in this paper, the peak flood flow under full breach conditions and its flood evolution were calculated, the impact range caused by the flood risk on the Wenchuan County town of Weizhou was delineated, and the possible missing or dead population caused by the flood was predicted. The results of the case calculations show that under partial alarm conditions, the Shiping landslide barrier lake breaching will result in a loss of population of approximately 753 people in Weizhou town, and that disaster prevention, mitigation and preparedness work such as monitoring and early warning, emergency planning and emergency evacuation drills need to be strengthened to reduce disaster risk. A basis for disaster prevention and mitigation planning and emergency response and decision-making for Dammed Lakes can be provided through the establishment of this rapid assessment method system for loss of life.

Keywords: dammed lakes; outburst flood; loss of life; rapid assessment; Minjiang River

0 引言

堰塞湖是地震、降雨等因素造成的山体滑坡、崩塌等堵断河道或河谷而形成的^[1],其主要危害方式是坝体溃决导致堰塞湖水快速下泄从而形成洪水灾害。部分堰塞湖较稳定可以存在较长时间,还有部分堰塞湖在形成后较短时间内会发生溃决,是地质灾害应急处置的重要工作内容。如唐家山堰塞湖遭遇溃坝危机时,专家按照三分之一溃坝方案在下游地区撤离超过 19 万民众^[2];金沙江白格堰塞湖发生险情时,应急抢险人员转移安置村民 18 849 人^[3]。

为减少堰塞湖溃决带来的生命财产损失,国内外学者围绕堰塞湖稳定性、溃坝机制和洪水风险等方面开展了深入研究并取得丰硕成果。(1)堰塞湖稳定性评估方面,主要从稳定性定义、影响稳定性指标以及评估方法等角度,通过定性和定量手段,利用野外调查、历史调查等数据,建立了各种堰塞湖稳定性评估模型。如 Zheng 等^[4]在无量纲堆积指标 *DBI* 基础上,考虑了坝体材料中值粒径的作用。崔鹏等^[5]结合野外考察资料,将坝体结构、物质组成、坝高和最大库容等选作堰塞湖危险性的评估指标。(2)溃决洪峰流量预测方面,主要采用经验模型和物理模型进行计算,其中经验模型容易忽略溃口的发展过程。多数情况是基于坝体的溃坝案例数据来建立模型关系。如吴庆龙等^[6]、朱兴华等^[7]采用经验模型,分别根据流量—水位关系的计算、野外水槽试验,得到经验公式算出溃决洪峰流量,而物理模型则充分考虑坝体溃口的物理发展过程。(3)溃决洪水演进方面,一般通过水力学方法和数值模拟来实现,水力学方法一般通过实测数据反算出公式里所需参数,数值模

拟则是通过数学模型仿真得到演进结果。如晏鄂川等^[8]采用水量平衡原理得到概化过程线,看作近似的溃坝洪水过程线。刑爱国等^[9]基于 Fluent 数值模拟分析了下游河道的溃坝洪水演进过程。(4)生命损失评估方面,一般根据历史案例进行溃坝数据回归分析得到统计模型,在致灾因子不完全确定的情况下常采用模糊数学模型,引入神经网络、模糊数学等方法,动态分析模型则将风险人员的撤离行为、撤离过程的变量影响等因子也加以考虑。王志军等^[10]以生命以及经济损失为目标对象,构建了基于 GIS 技术的溃坝损失评估模型。石振明等^[11]以 2014 年鲁甸因地震形成的红石岩堰塞湖为例,利用河道三维地形信息和人口分布数据,实现快速定量生命风险评估。尹卫霞等^[12]归纳了洪水灾害人口损失评估的框架,构建了人口损失和风险定量评估的方法。

综上所述,现有堰塞湖溃决风险评估研究理论较为完善,但考虑到我国西南高山峡谷区精细化地形数据覆盖度较低、堰塞湖形成初期详细资料获取难度大等现实问题,亟须探索对评估参数要求低且评价程序便捷的生命损失评估方法。基于此,本文提出一套基于简化参数的堰塞湖溃决生命损失快速评估方法体系,具有堰塞湖稳定性、溃决洪水峰值流量、洪水演进和洪水生命损失等评估功能,验证准确率较高,并通过岷江流域石坪滑坡案例进行了验证,可以为堰塞湖灾害的防灾减灾规划和应急处置与决策提供依据^[13]。

1 快速评估方法体系构建

本文以及时、快速和准确评估为目标,采用易于获取的计算参数(表 1),利用准确性较高和适用范围较广

的经验公式,构建了一套堰塞湖溃决生命损失快速评估方法体系,主要分为4个功能模块:(1)堰塞坝稳定性判别;(2)溃决洪水峰值流量预测;(3)溃决洪水演进计算;(4)洪水风险区生命损失评估。通过模块一快速判定是否具有溃坝风险后,快速获取数据并按照模块二、模块三进行计算得到演进结果,最后根据堰塞坝演进结果来进行模块四生命损失评估,系统如图1所示。

1.1 堰塞坝稳定性判别

Ermini等^[19]基于堰塞坝体积(V_d)、坝体高度(H_d)和控制流域面积(A_b),提出用地貌无量纲堆积体指数(dimensionless blockage index, DBI)判堰塞湖坝体稳定性。其中,堰塞坝体积(V_d)是主要稳定因素,它决定坝

体的自重;控制流域面积(A_b)是主要失稳因素,它决定河流的流量和水能;坝体高度(H_d)是评价坝体遭遇漫顶或管涌破坏时的重要参数,影响坝体下游坡度、漫顶时水流速度和冲蚀程度,同时也控制坝前水位和坝体内水力比降。 DBI 判别标准区间值为 $DBI < 2.75$ 堰塞坝稳定; $2.75 < DBI < 3.08$ 堰塞坝稳定性不确定; $DBI > 3.08$ 堰塞坝属于不稳定域,存在溃坝风险, DBI 计算公式如下所示:

$$DBI = \lg \left[\frac{A_b \cdot H_d}{V_d} \right] \quad (1)$$

式中: A_b ——控制流域面积/ km^2 ;

H_d ——堰塞坝高度/ m ;

V_d ——堰塞坝体积/ m^3 。

表 1 快速评估方法体系计算参数一览表

Table 1 List of calculation parameters for the rapid assessment methodology system

序号	参数名称	符号	单位	数据来源	所属模块
1	控制流域面积	A_b	km^2	水文资料、地形图或影像图	(1)
2	堰塞坝高度	H_d	m	地形测量	(1)
3	堰塞坝体积	V_d	m^3	根据坝高和河道地形估算	(1)
4	溃决洪水峰值流量	Q_p	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	根据溃口深度和宽度计算	(2)
5	溃口深度	h	m	经验值或计算工况设定	(2)
6	溃口宽度	b	m	经验值或Froehlich ^[14] 估算值	(2)
7	堰塞湖库容	V_{m1}	10^7m^3	根据坝高和河道地形估算	(2)
8	距坝趾 L/m 断面的最大演进流量	Q_{LM}	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	李斯特万公式计算	(3)
9	堰塞湖库容	W	m^3	根据坝高和河道地形估算	(3)
10	坝趾最大流量	Q_m	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	白世录 ^[15] 经验公式计算	(3)
11	控制断面距坝趾的距离	L	m	根据地图数据测量	(3)
12	经验系数	V_k	—	山区 $V_k=7.15$; 半山区 $V_k=4.76$; 平原 $V_k=3.13$	(3)
13	水力坡降计算参数	α_i	—	$\alpha_i=100i$, i 为河道平均水力坡降	(3)
14	洪水断面的水位高度	h_i	m	严容 ^[16] 公式估算值	(3)
15	洪水断面距离坝址的长度	L_i	km	根据地图数据测量	(3)
16	溃决洪水演进传播时间	T	h	根据洪水断面距离坝址的长度计算	(3)
17	经验系数	k	—	山区 $k=1.1 \sim 1.5$	(3)
18	洪水期断面最大平均流速	V_{m2}	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	洪水期断面最大平均流速,可采用历史最大值,无资料山区可采用 $3.0 \sim 5.0 \text{m/s}$	(3)
19	风险人口数量	P_{AR}	人	根据人口统计数据和淹没建筑面积计算	(4)
20	人口密度	ρ	$\text{人}/\text{m}^2$	人口统计数量除以建筑总面积计算	(4)
21	淹没建筑面积	A	m^2	根据演进计算结果划定淹没建筑范围	(4)
22	修正后风险人口死亡率建议值	f	—	根据 f_0 进行修正系数计算	(4)
23	风险人口死亡率建议值	f_0	—	根据具体情况选定死亡率建议值 ^[17]	(4)
24	溃坝程度系数	α	—	根据 P_i, θ_i, h_j, w_j 计算	(4)
25	修正系数	β	—	$\beta=1.4$	(4)
26	直接影响因素权重系数	k_1	—	$k_1=0.75$	(4)
27	间接影响因素权重系数	k_2	—	$k_2=0.25$	(4)
28	m_1 影响程度建议值	P_i	—	根据 P_{AR}, S_D, W_T, U_D 4方面结果查表 ^[18]	(4)
29	m_1 影响程度权重值	θ_i	—	查看权重数值表 ^[18]	(4)
30	m_2 影响程度建议值	h_j	—	根据风险人口中青壮年比例、溃坝时间、距坝距离、坝高、库容等6方面情况查表 ^[18]	(4)
31	m_2 影响程度权重值	w_j	—	查看权重数值表 ^[18]	(4)
32	风险人口死亡数量	f_s	人	根据风险人口数量和风险人口死亡率建议值计算	(4)

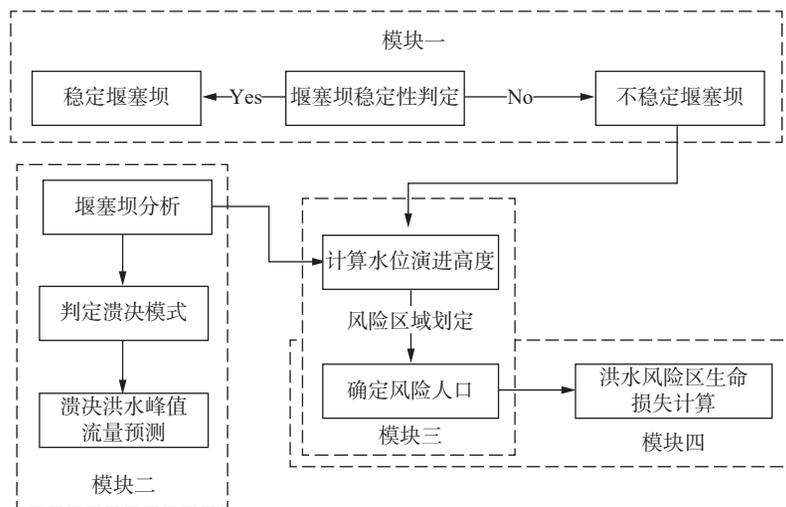


图1 快速评估方法体系框架图

Fig. 1 Map of the rapid dam failure assessment system

1.2 溃决洪水峰值流量预测

溃坝过程是由一个诸多因素影响的复杂过程,包括坝体和堰塞湖几何参数、入流量、坝体材料构成和力学参数等,对溃坝过程的合理模拟和对溃决参数的合理预测是溃坝风险分析的基础和前提。溃决洪水峰值流量的计算方法较多,常见的主要有3种方法:一是利用已经溃决土石坝的溃决参数与溃决洪峰流量的回归关系进行计算,相较于其余2种方法精确度偏低,但该方法能够满足快速粗略估计溃决洪峰流量;二是把参数输入模型计算,即利用溃决的几何特征,并给定估计溃决持续时间进行计算,该模型一般用于溃决洪水的反演;三是基于物理机制的溃决扩展模型,通过溃口的冲刷演变过程对洪峰流量进行计算,该方法精度较高但建立模型周期长。本文为达到快速评估的目的选取第一种经验模型,采用白世录^[14]经验公式即根据坝体参数快速估算溃决参数。计算公式如下所示:

$$Q_p = \frac{8}{27} b \sqrt{gh}^{3/2} \quad (2)$$

式中: Q_p ——溃决洪水峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

h ——溃口深度/m;

b ——溃口宽度/m。

其中溃口宽度(b)根据 Froehlich^[14]基于库容和溃口深度提出的溃口宽度经验公式进行计算:

$$b = 15 V_{m1}^{0.32} h^{0.19} \quad (3)$$

式中: V_{m1} ——堰塞湖库容/(10^7 m^3);

h ——溃口深度/m。

1.3 溃决洪水演进计算

溃决洪水演进计算包括流量、水位高度和传播时

间3部分。溃决洪水演进是复杂多变的,影响因素包括流速、流量、断面面积、断面形状、时间、距离、河流平面及底坡形状、两岸岩土性质等方面,现有的任何一个方程式或方程组都不能反映其流量及流态的变化,本文则分别计算其演进流量、演进水位高度以及演进时间来量化其演进变化。

(1) 溃决洪水演进流量采用李斯特万公式进行计算:

$$Q_{LM} = \frac{W}{\frac{W}{Q_m} + \frac{L}{V_k}} \quad (4)$$

式中: Q_{LM} ——距坝趾 L/m 的控制断面最大溃坝演进流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

W ——堰塞湖库容/ m^3 ;

Q_m ——坝趾最大流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

L ——控制断面距坝趾的距离/m;

V_k ——经验系数,山区河道 $V_k=7.15$, 半山区河道 $V_k=4.76$, 平原河道 $V_k=3.13$ 。

(2) 溃决洪水演进水位高度, 严容^[15]通过叠溪堰塞湖溃决洪水水位线拟和最相似的曲线关系, 基于计算参数(α_i)、距坝距离(L)和水位(h_i)的双对数关系提出经验计算公式:

$$\alpha_i = \frac{\lg \frac{h_{i-1}}{h_i}}{\lg \frac{L_i}{L_{i-1}}} \quad (5)$$

式中: α_i ——计算参数, 其值等于 $100 i$, i 为河道平均水力坡降;

h_i ——洪水断面的水位高度/m;

L_i ——洪水断面距离坝址的长度/km。

(3) 溃决洪水演进传播时间, 与洪水流速、断面坝址距离有关, 洪水流速与河道断面形态、比降、糙率等因素有关, 本文溃决洪水演进传播时间(T)采用以下经验公式:

$$T = L_i / kV_{m2} \quad (6)$$

式中: T ——溃决洪水演进传播时间/h;

L_i ——洪水断面距离坝址的长度/km;

k ——经验系数, 山区 $k=1.1 \sim 1.5$;

V_{m2} ——洪水期断面最大平均流速, 有资料的地区可采用历史最大值, 无资料山区可采用 $3.0 \sim 5.0$ m/s。

1.4 洪水风险区生命损失评估

(1) 风险人口数量的确定

风险人口的数量取决于溃坝洪水的淹没范围和人口分布情况。由于堰塞湖溃坝后的淹没范围非常大, 且山区精确数据较为匮乏, 难以详细分析人口位置分布, 本文采用人口密度法进行估算, 即假设一定范围内(通常划分到乡镇级别)人口是均匀分布的, 风险人口(P_{AR})通过以下公式进行估算:

$$P_{AR} = \rho A \quad (7)$$

式中: ρ ——人口密度, 以人口统计数量除以建筑总面积得到/(人·m⁻²);

A ——淹没建筑面积/m²。

(2) 生命损失评估

溃坝是一个“可能性小”和“严重性大”的突发事件, 溃决洪水具有突发性, 对于淹没区域内的高风险人群来说, 有些人会在洪水的冲击下死亡, 而有些人则会成功逃脱, 成为幸存者^[18]。生命损失评估是分析在溃决洪水中死亡的风险人口, 可通过人口死亡率结合风险人口的数量来估算的生命损失。

周克发等^[20]用 Graham 和 D&M 方法分析了中国 8 座溃坝的统计数据, 提出了风险人口死亡率计算方法, 吴欢强^[21]基于直接和间接影响因素对该人口死亡率计算方法做出修改。具体计算公式如下:

$$f = f_0 \cdot \alpha \cdot \beta \quad (8)$$

$$\alpha = k_1 m_1 + k_2 m_2 \quad (9)$$

$$f_s = P_{AR} \cdot f \quad (10)$$

式中: f_0 ——风险人口死亡率建议值;

α ——溃坝程度系数;

β ——修正系数, 取值 1.4;

m_1 ——直接影响因素的危害程度影响因子;

m_2 ——间接影响因素的危害程度影响因子;

k_1, k_2 ——直接、间接影响因素的权重系数, 取值分别为 0.75 和 0.25;

f_s ——风险人口死亡数量/人。

1) 直接影响因素的危害程度影响因子 m_1

m_1 是从风险人口(P_{AR})、洪水严重程度(S_D)、报警时间(W_T)以及溃坝严重性认识程度(U_D)四个维度来计算得到的。

$$m_1 = \sum_{i=1}^n P_i \theta_i \quad (11)$$

式中: P_i ——影响程度建议值;

θ_i ——影响程度权重值^[17]。

2) 间接影响因素的危害程度影响因子(m_2)

m_2 是从风险人口中青壮年比例、溃坝发生时间、距坝距离、坝高、库容、下游地形来计算得到的。

$$m_2 = \sum_{j=1}^n h_j w_j \quad (12)$$

式中: h_j ——影响程度建议值;

w_j ——影响程度权重值^[17]。

2 评估方法体系准确率验证

2.1 白格堰塞湖概况

2018 年 11 月 3 日 17 点 40 分左右, 白格堰塞湖原山体滑坡点发生二次滑坡, 堵塞上次自然泄流通道, 堰塞坝总体积约 $3\ 020 \times 10^4$ m³。白格堰塞坝位于西藏自治区江达县波罗乡白格村附近, 距离上游规划的波罗水电站 20 km。

2.2 白格堰塞湖溃决快速评估

根据白格堰塞湖实际数据^[22]如表 2 所示, 白格堰塞坝高度 110 m, 体积 $3\ 020 \times 10^4$ m³, 控制流域面积参照附近铜叶巴滩水电站取值为 173 484 km²。将地貌特征参数代入判别式(1)计算, 得到地貌无量纲堆积体指数为 5.8。根据判断标准, 当 $DBI > 3.08$, 堰塞坝属于不稳定域, 存在溃坝风险。

表 2 白格堰塞湖基本参数
Table 2 Basic parameters of the Baige weir

日期	坝高/m	库容/ (10 ⁸ m ³)	坝口 高程/m	堰塞坝 体积/(10 ⁴ m ³)	控制流域 面积/km ²
11月3日	110	7.75	2 966	3 020	173 484

白格滑坡形成的堰塞湖, 其溃决洪水对昆明、丽江、大理、迪庆 4 个州(市)11 个县造成影响。本文分析

仅针对丽江市辖区,根据模块一至三计算得到的演进水位高度、演进流量以及演进时间结果如表3所示,确定淹没范围为洪水风险区域。利用地形图或影像资料圈定洪水风险区的建筑物面积,代入式(8)即可得到风险人口数量,由于统计人口数据与灾害发生时实际人口数据有一定偏差得到计算结果约为26720人,与丽江市实际撤离人数20213人数的误差小于35%。

表3 白格堰塞湖溃决至丽江市的洪水计算结果
Table 3 Flood calculations for the Baige weir outburst to Lijiang City

地点	L_i/km	$Q_{LM}/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	h_i/m	T/h
丽江市	565	6 585.95	2.81	24.15

3 典型滑坡堰塞湖溃决生命损失快速评估

3.1 石坪滑坡概况

石坪滑坡地处岷江上游南段一龙门山巨型推覆断褶带中央推覆构造带,其前缘紧挨岷江边,后缘坡度较陡,局部地区出露破碎基岩。勘查数据显示,滑坡面积约为3532430 m^2 ,平均深度约50m,体积1900 $\times 10^4\text{m}^3$ 。滑坡体表面农作物、植被,覆盖率约80%。滑坡体西北低、东南高,大致滑动方向315°,坡度比较平缓,平均约18°,坡脚高程1400m,后缘高程1615m,相对高差215m,石坪滑坡全貌如图2所示。石坪滑坡主要由第四系的滑坡堆积和冲洪积组成,物质组成主要为夹碎石及角砾的粉质黏土,松散-稍密,干燥-稍湿,其碎石含量一般在10%~30%,偶见达到40%以上。碎石粒径多数在10~50mm,较少在50cm以上。



图2 岷江流域石坪滑坡全貌图

Fig. 2 Overview of Shiping landslide in Minjiang River Basin

石坪滑坡一直处于滑动变形的活动中,坡脚发育大

规模崩滑堆积体,在降雨、地震等情况下极易形成新的不稳定滑坡体,甚至发生整体滑动失稳而堵断岷江形成堰塞湖。根据刘宁等^[23]预测分析,石坪滑坡堰塞坝顶宽120m,河床原始高程1413m,坝高60m,有效坝长312m,迎水面边坡25°,背水面边坡12°,横断面积19528 m^2 ,堰塞湖库容将达到1.05 $\times 10^8\text{m}^3$,是岷江流域一处潜在高风险堰塞湖隐患,对下游安全构成严重威胁。

3.2 堰塞坝稳定性判别

根据预测,石坪滑坡堰塞坝高度60m,体积6.09 $\times 10^6\text{m}^3$,控制流域面积参照附近铜钟水电站取值为13912 km^2 。将地貌特征参数代入判别式(1)计算,得到地貌无量纲堆积体指数为5.14。根据判断标准,当 $DBI > 3.08$,堰塞坝属于不稳定域,存在溃坝风险。

3.3 溃决洪水峰值流量预测

石坪滑坡堰塞坝为天然土石坝,根据研究表明^[24],溃坝方式主要为漫顶诱发的逐渐溃决或局部溃决。因此,本文采用1/3溃决模式,将参数代入式(2)~(4),计算预测石坪堰塞湖溃决的峰值流量 Q_p 。根据估算结果,1/3溃决条件下,石坪堰塞湖溃决洪水峰值流量 Q_p 为4665.8 m^3/s ,远大于坝址处200a一遇的设计洪峰流量2460 m^3/s ^[25]。

3.4 溃决洪水演进计算

将堰塞湖、岷江河流等基本参数代入式(5)~(7),得到石坪滑坡堰塞湖1/3溃决条件下洪水演进至汶川县威州镇的计算结果(表4)。其中,溃决洪水演进水位高度计算过程中,选取距离石坪滑坡坝址2km处的断面作为计算的起点,因该断面与溃坝时水位非常相似,即 $L_1=2\text{km}$,其水位 $h_1=60\text{m}$,茂县到雁门乡 α 取0.29,雁门乡到汶川县河床断面较为宽阔,岸坡接近直立,是U型河谷,河流的坡降较大,则 α 取0.65^[16]。从威州镇境内开始以0.5km为间隔,计算每个点位的洪峰高度并且划定影响范围。

3.5 洪水风险区生命损失评估

(1) 风险人口数量的确定

石坪滑坡如果形成堰塞湖,其溃决洪水将影响茂县南新镇,汶川县雁门乡、威州镇、绵虬镇、银杏乡及映秀镇,影响范围沿岷江干流约80km。本文分析仅针对威州镇辖区,根据表2计算得到的演进水位高度和淹没宽度结果,确定淹没范围为洪水风险区域(图3)。通过第七次人口普查数据统计,威州镇常住人口34460人,其中40岁以下中青年占比41.5%。利用地形图或影像资料圈定洪水风险区的建筑物面积,代入式(8)即可得

表 4 石坪滑坡堰塞湖 1/3 溃决洪水演进计算结果
(汶川县威州镇境内)

Table 4 Calculation of the evolution of the 1/3 breaching of the Shiping landslide weir

断面	L_i/km	$Q_{LM}/(m^3 \cdot s^{-1})$	H_i/m	T/h	洪水淹没宽度/m
1	11.2	4 362.17	36.41	0.48	277
2	11.7	4 349.53	35.39	0.50	545
3	12.2	4 336.97	34.44	0.52	639
4	12.7	4 324.48	33.55	0.54	502
5	13.2	4 312.06	32.72	0.56	577
6	13.7	4 299.71	31.94	0.59	313
7	14.2	4 287.43	31.20	0.61	294
8	14.7	4 275.22	30.51	0.63	296
9	15.2	4 263.08	29.85	0.65	212
10	15.7	4 251.01	29.23	0.67	286
11	16.2	4 239.01	28.64	0.69	367
12	16.7	4 227.08	28.08	0.71	599
13	17.2	4 215.21	27.55	0.74	467
14	17.7	4 203.41	27.04	0.76	549
15	18.2	4 191.68	26.55	0.78	566
16	18.7	4 180.01	26.09	0.80	407
17	19.2	4 168.40	25.65	0.82	342
18	19.7	4 156.86	25.22	0.84	340
19	20.2	4 145.39	24.81	0.86	386
20	20.7	4 133.97	24.42	0.88	481
21	21.2	4 122.62	24.05	0.91	193
22	21.7	4 111.34	23.68	0.93	331
23	22.2	4 100.11	23.34	0.95	257
24	22.7	4 088.94	23.00	0.97	429
25	23.2	4 077.84	22.68	0.99	450
26	23.7	4 066.79	22.37	1.01	399
27	24.2	4 055.81	22.06	1.03	267
28	24.7	4 044.88	21.77	1.06	238
29	24.9	4 040.53	21.66	1.06	257

到风险人口数量, 约为 11 093 人。

(2) 生命损失评估

1) 直接影响因素的灾害程度影响因子(m_1)计算

石坪滑坡堰塞湖溃决洪水的风险人口为 11594 人; 根据表 2 洪水演进计算结果, 估算得到威州镇洪水严重程度为中等; 报警时间(W_T)假设小于 0.25 h; 溃坝严重性认识程度(U_D); 根据计算式(11)以及具体权重^[17]计算得出 $m_1=0.64$;

2) 间接影响因素的灾害程度影响因子(m_2)计算

根据第七次人口普查数据统计, 风险人口中青壮年比例假设为 41.5%; 溃坝假设发生在工作日白天; 威州镇距坝距离为 11.2 km; 坝高为 60 m; 库容为 $1.05 \times 10^8 m^3$; 下游地形为山地; 最终根据计算式(12)以及具体权重^[17]计算得出 $m_2=0.39$ 。

3) 危险人口死亡人口(f_s)

综上所述, 石坪滑坡堰塞湖溃坝程度系数 $\alpha=0.58$, 结合风险人口死亡率建议值^[20], 得到不同情况下的威州镇溃决洪水风险区生命损失(表 5)。评估结果显示可以看出, 警报时间的长短对溃决洪水造成的伤亡人数有明显影响。

4 结论与展望

(1) 为达到及时、快速和准确开展堰塞湖溃决风险评估, 本文构建了一套基于简化参数的洪水生命损失快速评估方法体系, 分别从堰塞坝稳定性、溃决洪水峰值

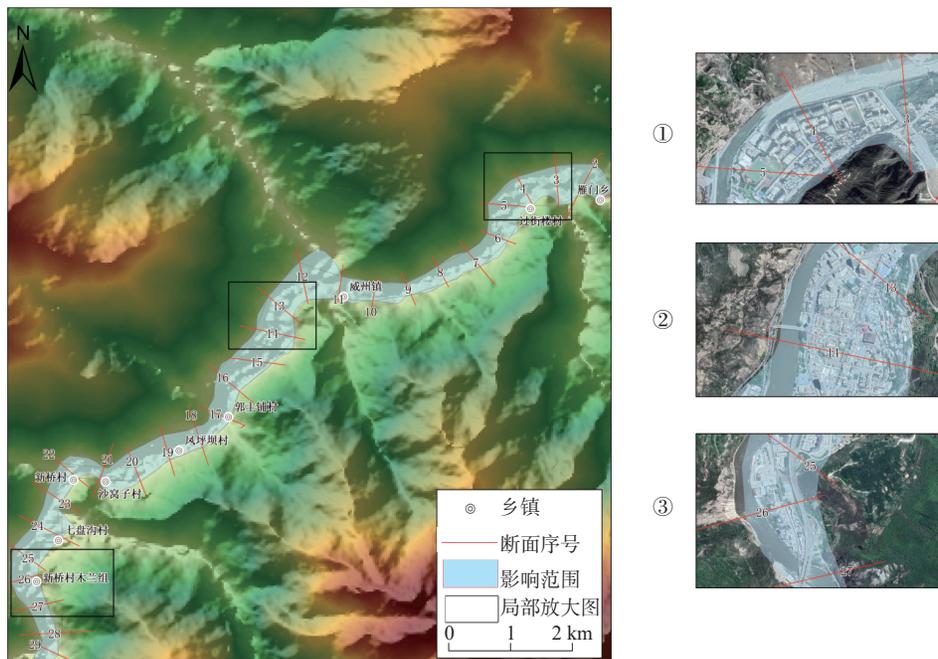


图 3 石坪滑坡堰塞湖 1/3 溃决洪水风险区域划定

Fig. 3 The delineation of the flood risk area for the potential breach of one-third of the Shiping landslide dam lake

表 5 石坪滑坡堰塞湖 1/3 溃决洪水不同报警程度下的生命损失(汶川县威州镇境内)

Table 5 Life losses under different alarm levels of the one-third breach flood of the Shiping landslide dam lake (within the jurisdiction of Weizhou Town, Wenchuan County)

编号	名称	距坝址距离/km	人口	无报警死亡人口	部分报警死亡人口	充分报警死亡人口
1	雁门乡	11.2	6 535	1 592	425	53
2	雁门乡过街楼村	12.7	750	183	49	6
3	威州镇郭主铺村	19.2	1 173	286	76	10
4	威州镇凤坪坝村	20.0	300	73	19	2
5	威州镇沙窝子村	20.9	690	168	45	6
6	威州镇新桥村	21.8	400	97	26	3
7	七盘沟村	22.7	1 476	360	96	12
8	威州镇新桥村木兰组	23.7	270	66	18	2
总计			11 594	2 824	753	94

流量、溃决洪水演进和洪水生命损失 4 个模块进行分析和计算,并利用白格滑坡堰塞湖溃决事件进行验证,准确率达到 65%。

(2)本文以岷江流域石坪滑坡为分析对象,快速评估方法体系预测结果显示石坪滑坡堰塞坝不稳定,容易突发溃坝险情,1/3 溃决条件下坝址洪峰流量约 $4.36 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$,洪水演进至威州镇造成的风险人口高达 11 594 人,其中 2 824 人面临生命损失风险。

(3)根据预测评估结果,不同报警程度下溃决洪水的死亡人口差异高达 9 倍,建议加强石坪滑坡和岷江干流洪灾的监测预警。同时,为提高群众对预警的响应行动效率,建议通过科普宣传和应急演练等方式,加强沿岸居民安全风险意识,减少或避免堰塞湖溃坝造成的生命损失。

(4)白格堰塞湖案例的评估结果较实际数值偏高,快速评估方法体系评估结果的准确度有待提高,本文对于造成生命损失的因素考虑有限,为提高评价体系的实际应用能力,还可以从多维度更加全面的进一步研究堰塞湖溃决带来的生命损失。

参考文献(References):

- [1] 严祖文,魏迎奇,蔡红.堰塞坝形成机理及稳定性分析[J].中国地质灾害与防治学报,2009,20(4):55-59. [YAN Zuwen, WEI Yingqi, CAI Hong. Formation mechanism and stability analysis of barrier dam [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2009, 20(4): 55-59. (in Chinese with English abstract)]
- [2] SHI Z M, GUAN S G, PENG M, et al. Cascading breaching of the Tangjiashan landslide dam and two smaller downstream landslide dams [J]. Engineering Geology, 2015, 193: 445-458.
- [3] FAN Xuanmei, XU Qiang, ALONSO-RODRIGUEZ A, et al.

Successive landsliding and damming of the Jinsha River in eastern Tibet, China: prime investigation, early warning, and emergency response [J]. Landslides, 2019, 16(5): 1003-1020.

- [4] ZHENG Hongchao, SHI Zhenming, SHEN Danyi, et al. Recent advances in stability and failure mechanisms of landslide dams [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 201.
- [5] 崔鹏,韩用顺,陈晓清.汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估[J].四川大学学报(工程科学版),2009,41(3):35-42. [CUI Peng, HAN Yongshun, CHEN Xiaoqing. Distribution and risk analysis of dammed lakes reduced by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(3): 35-42. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吴庆龙,张培震,张会平,等.黄河上游积石峡古地震堰塞溃决事件与喇家遗址异常古洪水灾害[J].中国科学(D辑:地球科学),2009,39(8):1148-1159. [WU Qinglong, ZHANG Peizhen, ZHANG Huiping, et al. A palaeo-earthquake induced damming and bursting of Yellow River and the abnormal flood that destroyed Lajia relic [J]. Science in China (Series D (Earth Sciences)), 2009, 39(8): 1148-1159. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 朱兴华,崔鹏,陈华勇,等.串珠状堰塞湖级联溃决对汶川震区河流演化的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(4):64-69. [ZHU Xinghua, CUI Peng, CHEN Huayong, et al. Effects of cascade failure of dammed lakes on the evolution of rivers in Wenchuan earthquake region [J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2012, 44(4): 64-69. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 晏鄂川,郑万模,唐辉明,等.滑坡堵江坝溃决洪水及其演进的理论分析[J].水文地质工程地质,2001,28(6):15-17. [YAN Echuan, ZHENG Wanmo, TANG Huiming, et al. Theoretics analyse on outburst flood and its process for landslide dam [J]. Hydrogeology & Engineering Geology,

- 2001, 28(6): 15-17. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 邢爱国, 徐娜娜, 宋新远. 易贡滑坡堰塞湖溃坝洪水分析 [J]. *工程地质学报*, 2010, 18(1): 78-83. [XING Aiguo, XU Nana, SONG Xinyuan. Numerical simulation of lake water down-stream flooding due to sudden breakage of Yigong landslide dam in Tibet [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(1): 78-83. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 王志军, 宋文婷, 周敏. 基于 GIS 空间信息格网的溃坝损失评估模型 [J]. *自然灾害学报*, 2011, 20(4): 102-106. [WANG Zhijun, SONG Wenting, ZHOU Min. Model of evaluating loss caused by dam breach based on GIS spatial information grid [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2011, 20(4): 102-106. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 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. [SHI Zhenming, XIONG Yongfeng, PENG Ming, et al. An efficient risk assessment method for landslide dam breach: Taking the Hongshiyuan landslide dam formed by the 2014 Ludian earthquake as an example [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(6): 742-751. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 尹卫霞, 余瀚, 崔淑娟, 等. 暴雨洪水灾害人口损失评估方法研究进展 [J]. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 148-158. [YIN Weixia, YU Han, CUI Shujuan, et al. Review on methods for estimating the loss of life induced by heavy rain and floods [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 148-158. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 王立朝, 温铭生, 冯振, 等. 中国西藏金沙江白格滑坡灾害研究 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(1): 1-9. [WANG Lichao, WEN Mingsheng, FENG Zhen, et al. Researches on the Baige landslide at Jinshajiang River, Tibet, China [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)]
- [14] C FROEHLICH D. Embankment dam breach parameters revisited [C] //Proceeding of the 1995 ASEC conference on Water Resource Engineering, 1995: 887-891.
- [15] 白世录. 土坝溃坝流量计算方法的研究 [J]. *水利水电工程*, 1990(2): 40-47. [BAI Shilu. Research on the calculation method of the flow rate of earth dam failure [J]. *China Industrial Economics*, 1990(2): 40-47. (in Chinese)]
- [16] 严容. 岷江上游崩滑堵江次生灾害及环境效应研究 [D]. 成都: 四川大学, 2006. [YAN Rong. Secondary disaster and environmental effect of landslided and collapsed dams in the upper reaches of Minjiang River [D]. Chengdu: Sichuan University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 周克发. 溃坝生命损失分析方法研究 [D]. 南京: 南京水利科学研究所, 2006. [ZHOU Kefa. Study on the analysis method for loss of life due to dam breach dissertation for master degree of engineering [D]. Nanjing: Hydraulic Research Institute, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 曹冲. 基于 HEC-RAS 及 ArcGIS 的水库大坝溃坝生命损失分析 [D]. 郑州: 郑州大学, 2020. [CAO Chong. Analysis of loss of life of reservoir dam break based on HEC-RAS and ArcGIS [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [19] CASAGLI N, ERMINI L ROSATI G. Determining grain size distribution of the material composing landslide dams in the Northern Apennines: Sampling and processing methods [J]. *Engineering Geology*, 2003, (69): 83-97
- [20] 周克发, 李雷, 盛金保. 我国溃坝生命损失评价模型初步研究 [J]. *安全与环境学报*, 2007, 7(3): 145-149. [ZHOU Kefa, LI Lei, SHENG Jinbao. Evaluation model of loss of life due to dam breach in China [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7(3): 145-149. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 吴欢强. 溃坝生命损失风险评价的关键技术研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2009. [WU Huanqiang. Key technologies of dam-break life loss risk assessment research [D]. Nanchang: Nanchang University, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 周兴波, 杜效鹤, 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]. *Hydroelectric Engineering*, 2019, 45(3): 8-12. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 刘宁, 程尊兰, 崔鹏, 等. 堰塞湖及其风险控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2013. [LIU Ning, CHENG Zunlan, CUI Peng, et al. Dammed lake and risk management [M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 柴贺军, 刘汉超, 张倬元, 等. 天然土石坝稳定性初步研究 [J]. *地质科技情报*, 2001, 20(1): 77-81. [CHAI Hejun, LIU Hanchao, ZHANG Zhuoyuan, et al. Preliminary stability analysis of natural rock field dam resulting from damming landslide [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(1): 77-81. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 范继辉, 程根伟, 张艳, 等. 岷江上游水电梯级开发存在的问题及建议 [J]. *中国水利*, 2005(10): 47-49. [FAN Jihui, CHENG Genwei, ZHANG Yan, et al. The problems and suggestions about hydropower cascade exploitation in the upper reaches of Minjiang River [J]. *China Water Resources*, 2005(10): 47-49. (in Chinese with English abstract)]