

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.04.003

堰塞湖风险评估研究综述

杜镇瀚¹, 钟启明^{2,3}, 董海洲¹, 单熠博²

- (1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098;
2. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024;
3. 水利部水库大坝安全重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要:从堰塞湖的灾害链演化过程出发,基于堰塞湖风险评估概念,围绕堰塞湖危险性评价、溃决过程与洪水演进模拟和溃决损失评估等 3 个方面,从定性和定量的角度综述了堰塞体稳定性评价方法,对溃坝参数模型、简化数学模型、精细化数学模型以及洪水演进模型进行了对比分析,从生命损失和经济损失两个角度总结了损失计算方法,最后针对堰塞湖风险评估未来在危险性评价中的不确定性问题、溃决洪水模拟的准确性问题、溃决损失评估的定量化方法、风险定量评估体系和风险动态评估体系五个方面进行展望。

关键词:堰塞湖;风险评估;危险性;溃决过程;洪水演进;生命损失;经济损失

中图分类号:P343.3;P642.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)04-0013-13

A review of risk assessment studies on dammed lake

DU Zhenhan¹, ZHONG Qiming^{2,3}, DONG Haizhou¹, SHAN Yibo²

- (1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China;
3. Key Laboratory of Reservoir Dam Safety of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China)

Abstract: Started from the evolution process of the disaster chain of dammed lake, based on the concept of dammed lake risk assessment, this paper focused on three aspects: the hazard assessment of dammed lake, the breach process and flood routing simulation, and the loss assessment after dammed lake breaching. A comprehensive review has been conducted on the qualitative and quantitative assessment methods around the world, as well as the research status. In addition, the parametric model of beaching, simplified mathematical model, refined mathematical model and flood routing model were compared. The loss calculating method was summarized from two aspects, life loss and economic loss. At last, this paper pointed out the prospect of the future risk assessment of dammed lake in five aspects: uncertainty in the risk assessment, accuracy of outburst flood simulation, quantitative method of outburst loss assessment, quantitative risk assessment system and dynamic risk assessment system.

Key words: dammed lake; risk assessment; dangerousness; breach process; flood routing; life loss; economic loss

在一定的地质地貌条件下,由于降水、地震等原因引起的山崩、滑坡、泥石流等堵截山谷、河道,造成贮水而形成的湖泊统称为堰塞湖;阻塞山谷、河道的堆积体称为堰塞体^[1]。我国位于强地震活动带的青藏高原、中南及西南山区为堰塞湖的高发区^[2],如 2000 年 4 月 9 日发生在青藏高原的易贡堰塞湖(图 1),由 5 520 m 高程的雪山向下高速滑动,历时约 10 min,滑程 8 km,堆积于约 2 190 m 高程的易贡藏布江,形成坝高 54 m、长 2 500 m、最大蓄水量可达 28.8 亿 m³、实际蓄水量达 15.34 亿 m³的滑坡堰塞湖^[3]。2008 年 5 月 12 日,汶川大地震造成了 257 处堰塞湖,其中规模最大、潜在威胁最严重的是唐家山堰塞湖(图 2),最大蓄水量可达 3.16 亿 m³,实际蓄水量达 2.3 亿 m³,而其形成恰逢雨季,增大了堰塞湖的溃决风险,对下游 170 万人民造成

基金项目:国家自然科学基金长江水科学联合基金重点项目(U2040221);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y320005)

作者简介:杜镇瀚(1998—),男,硕士研究生,主要从事堰塞湖风险评估方法研究。E-mail:duzh1031@163.com

通信作者:钟启明(1981—),男,教授级高级工程师,主要从事土石(堰塞)坝风险评估方法研究。E-mail:qmzhong@nhri.cn

引用本文: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.

了巨大的威胁^[4-5]。2018年10月10日和11月3日,金沙江上游白格地区分别发生了两次大规模山体滑坡,形成白格堰塞湖(图3),最大蓄水量分别达2.49亿m³和7.56亿m³,实际蓄水量分别为2.49亿m³和5.78亿m³,溃决后对下游造成了重大的经济损失^[6-7]。



图1 易贡堰塞湖

图2 唐家山堰塞湖

图3 “11·3”白格堰塞湖

Fig.1 Yigong dammed lake

Fig.2 Tangjiashan dammed lake

Fig.3 “11·3” Baige dammed lake

堰塞体虽然由土石材料构成,但其与人工填筑的土石坝存在较大的差别^[8]:①坝体形态方面,堰塞体沿河流运动方向一般较长,且顶部凹凸不平;②结构材料方面,大部分堰塞体结构复杂,不均匀性强,颗粒级配宽泛;③水动力条件方面,由于堰塞体上没有泄洪设施,极易发生漫顶溃决。据统计^[9],84.4%的堰塞湖在形成1a内发生溃决,风险远高于人工修筑的水库大坝。堰塞湖一旦溃决,往往造成严重的洪水灾害,给下游人民生命财产安全带来严重的威胁。合理评估堰塞湖的风险有利于科学的应急响应,减少社会财产损失,保障人民生命安全并降低环境生态破坏,因而具有重要的理论意义和实际价值。

我国堰塞湖风险评估工作从21世纪初开始兴起,经历2008年“5·12”汶川地震后得到了广泛关注。经过20余年的发展,理论和实践方面都取得了丰硕的成果,但是还未形成完整的体系和严谨的理论框架。本文从堰塞湖风险评估的概念入手,围绕堰塞湖灾害链的演化过程展开论述,对堰塞湖风险评估的研究现状进行分析总结并展望了堰塞湖风险评估的未来发展趋势。

1 堰塞湖风险评估概念

关于风险的定义,不同领域的学者有着不同的理解,但通常从两方面特征进行描述:①可能性,即发生的概率;②后果,即造成的损失^[10]。2009年,ISO31000:2009《风险管理国际标准》将风险定义为“一个事件后果与其发生可能性的组合”。我国现行的国家风险管理标准GB/T24353—2009《风险管理原则与实施指南》中也采用了这一定义。根据该定义,风险可以用后果的期望值来量化,即灾害发生的频率和损失的乘积。对于堰塞湖,风险可表示为堰塞湖的溃决概率与溃决损失的乘积,即:

$$R = PC$$

(1)

式中: R 为堰塞湖风险; P 为堰塞湖溃决概率; C 为堰塞湖溃决损失。

堰塞湖风险评估过程可分为3个主要步骤:①对堰塞湖进行危险性评价,得到堰塞湖溃决的概率;②通过堰塞湖溃决过程与洪水演进模拟获取洪水淹没情况;③堰塞湖溃决损失评估,即对淹没区的损失情况进行定量评估,将溃决概率与溃决损失相乘得到堰塞湖的风险,并进行综合评估。

2 堰塞体溃决危险性评价

对于堰塞湖而言,其溃决危险性评价可转化为挡水构筑物堰塞体稳定性评价。堰塞体稳定性主要与其物质组成^[11]、结构特征^[12]、堰塞湖水动力条件^[13]以及当地的降水条件和次生灾害^[14-15]相关。围绕着这些影响因素,国内外学者针对堰塞体稳定性评价方法展开了一系列研究,目前根据其研究特性可分为定性评价和定量评价。

2.1 定性评价方法

堰塞体稳定性的定性评价,主要以其形成机制、物质组成以及坝体几何形态为依据,初步判断坝体的抗冲蚀能力,最终评价堰塞体的整体稳定性^[16]。定性评价方法的主要特点是不经过数学计算,通过卫星遥感、无人机航测以及地形检测等技术手段,结合历史资料得到结论。

定性评价方法主要可以分为工程类比法和历史分析法。工程类比法是指将需要研究的堰塞体根据形成

条件和地质条件与其他堰塞体进行类比,从而评价该堰塞体的稳定性;历史分析法是指通过对堰塞体本身的形成历史以及发展趋势进行预测分析,从而揭示其发展规律以评定堰塞体的稳定性。

自“5·12”汶川地震后,我国一批学者以及水利行业标准根据不同的评价指标对堰塞湖危险性进行了分级。选取的评价指标主要包括堰塞湖规模、流域面积、径流量、堰塞体高度、物质组成、坝体结构等,一般将堰塞湖危险等级分为极高危险、高危险、中危险和低危险 4 个等级(表 1)。

近年来,随着卫星遥感监控、无人机航测、地表位移实时监测等技术的发展,许多学者虽然没有将堰塞湖危险性进行等级划分,但结合多方面因素实现了对堰塞湖地貌形态、物质组成、几何结构的快速测算和风险的实时分析预警(表 1)。

表 1 堰塞湖危险性定性评价方法
Table 1 Qualitative risk assessment methods for dammed lakes

文献	考虑因素	基于技术	划分等级
Cui 等 ^[4]	物质组成、坝体结构、坝高和最大库容	野外观测和遥感数据	极高危险、高危险、中危险和低危险
SL450—2009 《水利行业标准》	堰塞湖规模、堰塞体物质组成和坝高	野外观测和遥感数据	极高危险、高危险、中危险和低危险
程根伟等 ^[17]	流域面积、径流量以及库容	工程对比分析	无风险、近期低风险和高风险
王世新等 ^[18]	堰塞湖蓄水量和下游人口、经济发展水平	遥感数据和历史数据	极度危险、高度危险和危险
何秉顺等 ^[19]	物质组成和渗流情况	三维激光雷达技术和历史对比	
李守定等 ^[20]	物质组成和整体结构构造	宏观现象监控和地表位移检测	
许强等 ^[21]	物质组成和整体形变等	现场勘察和 InSAR 监测等	
孙黎明 ^[22]	物质组成、堰顶高程和覆盖面积	无人机倾斜摄影和 LiDAR 方法	

目前,单纯开展定性评价的研究较少,而定性评价大多作为定量评价的基础,也是堰塞湖风险评估的第一步,完整且迅速地获取地形信息和遥感数据是溃决洪水分析和损失评估的基础。

2.2 定量评价方法

2.2.1 数理统计法

数理统计法是根据大量堰塞湖的资料数据确定参数,再提出数学表达式或判别准则,通过堰塞体的稳定性评价来确定堰塞湖的危险性。国外学者对该方面研究起源较早,1999 年,Casagli 等^[11]提出了利用基于堰塞体体积和堰塞湖流域面积等 2 个参数的堆积指标法来判断堰塞体的稳定性。其后,诸多学者也根据收集的堰塞湖基础资料,采用逻辑回归方法,提出一系列的判别方法,主要考虑的因素包括堰塞湖的水动力学指标、堰塞体的地貌学指标和物质组成等,见表 2。

就目前研究现状来看,逻辑回归拟合分析是数理统计法的主流,但该方法依赖样本的可靠性及拟合因子的合理性和代表性,随着堰塞湖基础资料的不断丰富,稳定性评价的准确性也逐渐提高。

2.2.2 物理模型法

堰塞湖危险性评价物理试验主要以小尺度简化水槽试验为主^[23-26]。近年来,国内学者基于不同的致灾因子,尝试了还原真实应力场的离心模拟试验^[27]以及考虑地震荷载的振动台试验^[28]。总的来说,物理模型法是根据堰塞体的基础资料,采用相似的物理材料制成模型来还原堰塞体的失稳过程,是评价堰塞体稳定性最直观的一种方法。但该方法一般将堰塞体作为形状规则、材料均匀的坝体处理,与真实的堰塞体有较大的差异,加上模型缩尺的问题,模拟的结果能否合理反映实际的情况仍值得深入研究。

2.2.3 数值分析法

数值分析法一般通过坝体信息和材料结构特征分析堰塞体的稳定性。目前,堰塞体稳定性分析常用的数值方法包括极限平衡法、有限单元法、有限差分法、离散单元法和非连续变形分析法等^[16],这些方法属于确定性分析方法。但离散单元法和非连续变形分析法在堰塞体上的应用相对较少,表 3 为一些确定性数值分析法。近些年来,学者们尝试将不确定分析方法,主要包括模糊层次分析法、熵值法、模糊综合分析法等应用到堰塞湖的危险性评价研究中,但不确定性分析方法起步较晚,数学理论和工程实际的结合还存在许多问题,尚需改进。

表2 基于数理统计的堰塞体稳定性评价方法

Table 2 Assessment methods for landslide dam stability based on mathematical statistics

文献	案例数	数学表达式	判别准则
Casagli 等 ^[11]	70	$I_{BI} = \lg\left(\frac{V_d}{10^6 A_b}\right)$	$I_{BI} > 5$ 为稳定区 $4 < I_{BI} \leq 5$ 为不确定区 $3 \leq I_{BI} < 4$ 为不稳定区
Ermini 等 ^[29]	84	$I_{DBI} = \lg\left(\frac{A_b H_d}{V_d}\right)$	$I_{DBI} \leq 2.75$ 为稳定区 $2.75 < I_{DBI} \leq 3.08$ 为不确定区 $I_{DBI} > 3.08$ 为不稳定区
Korup ^[30]	83	$I_s = \lg\left(\frac{H_d^3}{V_l}\right)$	$I_s > 0$ 为稳定区 $-3 < I_s \leq 0$ 为不确定区 $I_s \leq -3$ 为不稳定区
	110	$I_a = \lg\left(\frac{H_d^2}{A_b}\right)$	$I_a > 3$ 为稳定区 $I_a \leq 3$ 为不稳定区
	108	$I_r = \lg\left(\frac{H_d}{H_r}\right)$	$I_r > -1$ 为稳定区 $I_r \leq -1$ 为不稳定区
Dong 等 ^[31]	43	$I_{L1} = -2.55 \lg Q - 3.64 \lg H_d + 2.99 \lg W_d + 2.73 \lg L_d - 3.87$	$I_{L1} > 0$ 为稳定区 $I_{L1} \leq 0$ 为不稳定区
	43	$I_{L2} = -2.22 \lg A_b - 3.76 \lg H_d + 3.17 \lg W_d + 2.85 \lg L_d + 5.93$	$I_{L2} > 0$ 为稳定区 $I_{L2} \leq 0$ 为不稳定区
	84	$I_{L3} = -4.48 \lg A_b - 9.31 \lg H_d + 6.61 \lg(10^6 V_d) + 6.39$	$I_{L3} > 0$ 为稳定区 $I_{L3} \leq 0$ 为不稳定区
Stefanelli 等 ^[32]	300	$I_{HDSI} = \lg\left(\frac{V_d}{A_b S_s}\right)$	$I_{HDSI} > 7.44$ 为稳定区 $5.74 < I_{HDSI} \leq 7.44$ 为不确定区 $I_{HDSI} \leq 5.74$ 为不稳定区
Shan 等 ^[33]	27	$I_{L4} = -0.264 \lg I + 1.166 \lg V_d - 1.551 \lg A_b - 0.168 \lg S_d - 4.847$	$I_{L4} > 0$ 为稳定区 $I_{L4} \leq 0$ 为不稳定区
	115	$I_{L5} = -0.198 \lg I + 1.387 \lg V_d - 1.432 \lg A_b + 4.169 M_i - 8.674$	$I_{L5} > 0$ 为稳定区 $I_{L5} \leq 0$ 为不稳定区
石振明等 ^[34]	79	$I_{Z1} = 0.435 \ln H_d + 0.076 \ln L_d + 0.501 \ln W_d + 1.352 \ln L_1 - 1.122 \ln V_1 - 15.568$	$I_{Z1} > 0$ 为稳定区 $I_{Z1} \leq 0$ 为不稳定区
	79	$I_{Z2} = -1.896 \ln\left(\frac{H_d}{H_r}\right) + 1.126 \ln\left(\frac{H_d}{W_d}\right) - 0.113 \ln\left(\frac{L_1}{W_d}\right) - 1.101 \ln\left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right) - 0.387 \ln\left(\frac{L_d}{W_d}\right) + 8.766$	$I_{Z2} > 0$ 为稳定区 $I_{Z2} \leq 0$ 为不稳定区

注: I_{BI} 为堆积体指标; V_d 为堰塞体体积, m^3 ; A_b 为堰塞湖流域面积, m^2 ; I_{DBI} 为无量纲堆积体指标; H_d 为堰塞体高度, m ; I_s 为 backstow 指标; I_a 为 basin 指标; I_r 为 relief 指标; H_r 为堰塞湖流域最高点与堰塞体底部高程的差值; I_{L1} 、 I_{L2} 、 I_{L3} 、 I_{L4} 、 I_{L5} 、 I_{Z1} 、 I_{Z2} 分别为逻辑回归指标; Q 为堰塞湖上游来流峰值流量, m^3/s ; W_d 为堰塞体宽度, m ; L_d 为堰塞体长度, m ; I_{HDSI} 为水力形态学指标; S_s 为被阻塞河道坡度, $\%$; S_d 为颗粒组成指标; V_1 为堰塞湖蓄水量, m^3 ; L_1 为回水长度, m ; I 为堰塞体最大水力梯度,即 H_d/W_d ; M_i 的取值方法见文献[33]。

表3 基于数值分析的堰塞体稳定性评价方法

Table 3 Assessment methods for landslide dam stability based on numerical analysis

方法	判别方法	文献	考虑因素
确定性分析方法	简化毕肖普法	Mizuyama 等 ^[35]	堰塞体形状、材料及渗流情况
	三维简布法	Awal 等 ^[36]	堰塞体渗流情况
	瑞典条分法	Hu 等 ^[37]	不同水位、不同地震荷载
	有限差分法	崔银祥等 ^[38]	常水位和极限水位的渗流量
	有限元强度折减法	宋彦辉 ^[39]	不同水位(水位骤降)和地震
不确定性分析方法	有限元法	罗刚 ^[40]	堰塞体渗流、应力—应变状态
	模糊层次分析法	乔路等 ^[41]	堰塞体几何和坝料物理力学指标,渗流、冲刷和抗滑因素
	广义熵值法	孙妍等 ^[42]	堰塞湖规模和集雨面积、堰塞体物质组成、高度
	模糊综合分析法	Liao 等 ^[43]	堰塞湖最大库容,堰塞体坝料组成、坝高、坝长宽比
	模糊层次分析法与最大熵值法	王如宾等 ^[44]	堰塞湖规模,堰塞体物质组成、高度、集雨面积、降水量

从上述分析可以发现,确定性分析方法重点在于分析外荷载作用下堰塞体自身的稳定性状态,但大多采

用人工土石坝的模拟方法,未能充分考虑堰塞体与土石坝不同的坝料组成和结构特征以及水动力条件。不确定性分析方法发展较晚,但是随着信息技术和人工智能的发展,该方法对于研究考虑各种不确定因素作用下堰塞湖的危险性有着良好的发展前景。

3 堰塞湖溃决过程与洪水演进模拟

3.1 溃决过程数值模拟方法

数值模拟是堰塞湖溃决过程预测的重要手段,总的说来,数学模型一般分为 3 类:第一类是参数模型,第二类是基于溃决机理的简化数学模型,第三类是基于溃决机理的精细化数学模型^[45]。

3.1.1 参数模型

参数模型大多基于溃坝案例数据进行统计分析,采用经验公式计算溃坝相关参数(如溃口峰值流量、溃口尺寸、溃坝历时等)。由于参数模型公式简单、计算快捷,也常用于溃坝致灾后果的快速评价。1977 年,Kirkpatrick^[46]提出了第一个预测土石坝溃口峰值流量的经验公式,随后一些学者也提出了一系列关于土石坝溃决的参数模型^[47]。由于结构和材料的复杂性,目前可专门用于堰塞湖溃决参数预测的参数模型较为缺乏。1985 年,Costa 等^[48-49]在 10 个堰塞湖溃决案例的基础上,提出了 3 个预测溃口峰值流量的回归方程,通过堰塞体高度和堰塞湖蓄水量两个参数或其组合进行预测;随后,又建立了堰塞湖势能与溃口峰值流量之间的关系。1997 年,Walder 等^[50]建立了堰塞湖下泄水量和水位下降高度与溃口峰值流量的关系。早期的参数模型仅简单考虑了堰塞湖的水动力条件,且只给出了溃口峰值流量的表达式。2012 年,Peng 等^[51]开发了一种溃决参数快速预测模型,可综合考虑堰塞体形态、堰塞湖水动力条件以及堰塞体材料的冲蚀特性。利用该模型可以预测溃口峰值流量、溃口最终尺寸(顶宽、底宽、深度)以及溃坝历时。表 4 为典型的堰塞湖溃口峰值流量预测参数模型。

表 4 堰塞湖溃口峰值流量参数模型

Table 4 Parametric models for peak breach flow discharge of dammed lake		
文献	案例数	表达式
Costa ^[48]	10	$Q_p = 6.3 H_d^{1.59}$
		$Q_p = 672 V_1^{0.56}$
		$Q_p = 181 (H_d V_1)^{0.43}$
Costa 等 ^[49]	12	$Q_p = 0.0158 E_p^{0.41}$
Walder 等 ^[50]	18	$Q_p = 1.6 V_0^{0.46}$
		$Q_p = 6.7 d_d^{1.73}$
		$Q_p = 0.99 (d_d V_0)^{0.40}$
Peng 等 ^[51]	45	精细化方程: $\frac{Q_p}{g^{1/2} H_d^5} = \left(\frac{H_d}{H'_r}\right)^{-1.417} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{-0.265} \left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right)^{-0.471} \left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right)^{1.569} e^a$
		简化方程: $\frac{Q_p}{g^{1/2} H_d^{5/2}} = \left(\frac{H_d}{H'_r}\right)^{-1.371} \left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right)^{1.536} e^a$

注: Q_p 为溃口峰值流量; H'_r 取 1 m; g 为重力加速度; E_p 为堰塞湖势能; d_d 为堰塞湖水位下降高度; V_0 为堰塞湖下泄水量。对于精细化方程,当土体冲蚀率为“高”时, $a=1.276$; 当土体冲蚀率为“中”时, $a=-0.336$; 当土体冲蚀率为“低”时, $a=-1.532$ 。对于简化方程,当土体冲蚀率为“高”时, $a=1.236$; 土体冲蚀率为“中”时, $a=-0.380$; 土体冲蚀率为“低”时, $a=-1.615$ 。

虽然参数模型可简单快捷地对溃坝参数进行预测,但却无法提供溃决洪水流量过程线。

3.1.2 简化数学模型

1965 年,Cristofano^[52]建立了第一个均质坝漫顶溃决数学模型,其后,各国学者提出了一系列模拟土石坝溃坝的数学模型^[47]。

对于堰塞湖的溃决过程模拟,目前大多借助土石坝溃决模型,但由于堰塞体与人工填筑的均质坝在材料特性和结构特点上差异巨大,其溃决机理也明显不同^[47,53]。近年来,有关学者在深入研究易贡、唐家山、小岗剑等拥有堰塞湖溃决实测资料案例的基础上,提出一系列考虑堰塞体物质组成、坝料冲蚀特性和坝体结构特征的基于堰塞湖溃决机理的简化数学模型(表 5),并应用于 2018 年 10—11 月白格和加拉堰塞湖的应急处置。

表 5 堰塞湖溃决过程简化数学模型
Table 5 Simplified mathematical models for breach process of dammed lake

模型	溃口形态		溃口流量	坝料冲蚀	边坡稳定性与残留坝高
	横断面	纵断面			
DABA ^[54-55]	倒梯形	下游坡角增大至定值	宽顶堰公式	冲蚀率公式	考虑边坡稳定性,不预设残留坝高
DB-IWHR ^[56-57]	倒梯形	下游坡角增大至定值	宽顶堰公式	冲蚀率公式	考虑边坡稳定性,预设残留坝高
NHRI-DB ^[58-59]	倒梯形	下游坡角逐渐减小	宽顶堰公式	冲蚀率公式	考虑边坡稳定性,预设或不预设残留坝高

总之,简化数学模型的优势在于一定程度上考虑了堰塞湖的溃决机理,且计算速度较快,但大多数简化数学模型在溃口冲蚀过程存在假设,无法真正模拟溃口的演化规律及溃坝过程中的水土耦合作用。

3.1.3 精细化数字模型

为了描述溃坝过程中的水土耦合作用,近年来,随着计算机性能的提升及泥沙科学和计算流体力学的发展,出现了一些以非平衡坝料输移理论为基础、基于浅水假设的精细化溃坝数学模型。该类模型主要基于水流连续性方程、动量方程与能量方程,耦合泥沙运动方程,目前基于水动力坝料冲蚀方程的一维、沿深度平均二维和三维数学模型的研究取得了明显的进展,可以更详细地模拟土石坝的溃决过程^[60-63]。为了处理不连续混合流态组成的漫顶水流,通常采用近似黎曼解法和全变差递减法(TVD)等激波捕捉方法,并采用有限体积法、水平集法、光滑颗粒流体动力学法等数值模拟方法对控制方程进行求解。该方法可考虑溃坝过程中的水土耦合作用,实现对溃坝过程的精细化模拟,并可模拟复杂边界条件和溃口演化规律,目前普遍用于颗粒较为均匀的土石坝溃决过程的模拟,是堰塞湖溃决过程模拟的发展方向。

3.2 溃坝洪水演进数值模拟方法

溃坝洪水兼具激波和稀疏波的特征,按离散基本原理可分为特征线法(MOC)、有限差分法(FDM)、有限元法(FEM)和有限体积法(FVM)。特征线法、有限差分法和有限元法在很多缓流问题的计算中取得了很大的成功,但不完全适合求解溃坝洪水的强间断流动。

有限体积法是 20 世纪 80 年代以来发展起来的一种新型微分方程离散方法,综合了有限差分法和有限元法的优点,对由一个或多个控制体组成的任意区域以至整个计算区域都严格满足物理守恒定律。有限体积法不是直接对方程组进行数值离散,而是从积分形式的守恒性方程组出发,采用非结构网格进行离散,在控制体边界上形成间断解的 Riemann 问题。在求出每个控制体边界沿法向输入(出)的流量和动量通量后,对每个控制体分别进行水量和动量的平衡计算,得到计算时段末各控制体平均水深和流速。

Riemann 解的 Godunov 格式是目前求解大梯度流动的主流格式,应用较多的有 Roe 格式^[64]、Osher 格式^[65]、HLL 格式^[66]、HLLC 格式^[67]等;另外,有限差分法捕捉激波的高分辨率方法以及许多格式也可直接利用到有限体积法中。

一些通用的商业软件如 DHI-MIKE、InfoWorks、HEC-RAS 等也可用来模拟溃坝洪水的演进过程。

4 堰塞湖溃决损失评估

我国学者自 21 世纪初开始对溃决损失进行系统的研究。刘永志等^[68]从灾害链的角度对洪涝灾害进行了系统研究,总结了灾害链的意义;黄国如等^[69]对洪涝灾害的风险指标进行了分析,总结了风险等级的区划方法。总体而言,溃决损失研究仍然处在探索阶段,且主要针对人工修筑的水库大坝,堰塞湖的溃决损失研究更是匮乏。但水库大坝与堰塞湖在溃决洪水演进时有着共通性,对于下游受灾群众而言,溃坝产生的危害以洪涝灾害的形式呈现,因此水库大坝溃决损失评价方法具有借鉴意义。参考水库大坝溃决损失的分类,将堰塞湖溃决损失评估分为生命损失评估和经济损失评估两方面。

4.1 生命损失评估方法

生命损失是指溃决洪水淹没范围内因洪水灾害导致死亡的人口数。生命损失受到定性与定量因素的耦合作用,造成致灾因子体系间作用关系的不确定性与灰色性,增加了定量评估的难度^[70]。当前的生命损失评估方法大多以主要影响因素为参数建立模型,Peng 等^[71-72]将生命损失评估模型分为 3 个类型,即经验模型、物理模型和折衷模型。

4.1.1 经验模型

经验模型是指通过对历史数据的统计,结合数学方法建立生命损失与影响因素之间的关系模型。1988

年,Brown 等^[73]通过统计世界多国的溃坝历史数据,并考虑风险人口和警报时间等因素,最早提出了生命损失经验公式(B&G 法)。随后,各国学者考虑了更多的影响因素,主要包括风险人口密度、警报时间、溃坝洪水严重性、风险人口对洪水理解程度、溃坝时间、天气、坝高、库容、风险人口距坝址距离、建筑物易损性和应急预案等,提出了一系列的经验公式对生命损失进行估算(表 6)。

表 6 生命损失评估方法
Table 6 Life loss assessment methods

方法	文献	基于理论(试验)	模型特点
经验模型	Brown 等 ^[73]	数理统计	提出较早,但是公式粗糙,实际效果差
	Dekay 等 ^[74]	对数回归分析	基于 B&G 法,考虑洪水严重程度因素
	Graham ^[75]	对数回归分析	基于 D&M 法,给出了风险人口死亡率表
	周克发 ^[76]	经验分析	基于 Graham 法,初步建立了生命损失评价模型
	侯保灯 ^[77]	灰色关联理论	建立关联度与生命损失之间的关系模型
	王君等 ^[78]	可变模糊集理论	采用相邻模糊标度法确定指标权重,但精度不够
	胡亮等 ^[70]	对数回归分析	建立了风险人口与生命损失的关系
物理模型	Abt 等 ^[79]	水动力学试验	通过试验得到人类生存能力和在洪水中的稳定性
	Lind 等 ^[80]	水动力学试验	用圆柱体模拟人类在水中行为并建立模型
	Sakamoto 等 ^[81]	模型试验	首次引入健康指数指标建立 LSM 模型
	Penning-Rowsell 等 ^[82]	室外试验	基于不同区域的洪水风险提出了评估操作框架
折衷模型	Assaf 等 ^[83]	概率理论	综合考虑了群众面对洪灾的行为反应
	Reiter ^[84]	概率理论	基于 Graham 法首次将淹没区域分区考虑
	Aboelata 等 ^[85]	统计学和概率论	提出确定性和不确定性两种估计模式
	胡江等 ^[86]	风险和 LQI 理论	将风险和 LQI 理论引入到加固决策优化过程中
	Peng 等 ^[71]	贝叶斯网络	结合贝叶斯网络和蒙特卡洛法建立损失评价模型
	王志军等 ^[87]	概率理论	建立了淹没区划分标准和对应死亡率函数
	宋明瑞 ^[88]	统计学和概率论	建立分区并研究生命损失产生机理,建立模型

4.1.2 物理模型

物理模型是模拟人类在洪水中的行为,以个体为研究对象,探索人类在动水中的稳定程度,研究过程十分复杂,较少应用于实际案例之中,且人类在洪水中的行为与生命损失的关联仍需进一步研究考证。国外对物理模型的研究较多,国内目前缺少关于此类模型的相关研究(表 6)。

4.1.3 折衷模型

折衷模型是介于经验模型和物理模型的一种模型,在一定程度上考虑了生命损失产生的机理,并以此将洪水淹没区域分为若干个子区域。在每个子区域内以历史数据或专家判断校准,从而得到生命损失和关键因素之间的关系。

总之,经验模型一般是宏观的,并未强调机理的研究,但是使用方便且模型发展较为成熟;物理模型主要注重于机理研究,研究个体生命在洪水灾害中的不稳定性,该类方法大多较为复杂,且无法考虑危险个体的主观因素;折衷模型可结合生命损失机理来研究损失率和洪水特性之间的关系,是未来生命损失评估方法的发展方向。近些年国外研究多集中于折衷模型,国内则多侧重于经验模型。在未来生命损失评估中,可以针对我国国情,增加对堰塞湖风险机理的研究,研究出适合我国实际情况的生命损失评价体系。

4.2 经济损失评估方法

自 20 世纪 70 年代起,国内外针对溃决经济损失评估展开了一系列的研究,但关于堰塞湖溃决经济损失评估的研究相对比较匮乏,鉴于溃决洪水的相通性,可借鉴人工土石坝的经验^[89]。将经济损失分为直接经济损失和间接经济损失,分析方法可分为数理统计法和模糊数学法,目前的研究均侧重于直接经济损失。

4.2.1 数理统计法

数理统计法是建立在大量调查数据的基础上,依赖于社会经济资料和各行业财产损失率资料的完整性,研究洪水深度、流速以及淹没时间等因素和损失之间的关系。数理统计法工作量较大、操作复杂且花费高昂(表 7)。

4.2.2 模糊数学法

通过构建多指标数学模型来评估洪水经济损失的方法是目前学术界的主流。模糊数学法根据洪灾风险的形成机制,结合区域内的洪水特征、气象条件、社会经济分布情况等,构建基于数学模型的综合评估方法

(表7)。目前模糊数学法实用性较广,且随着大数据时代的到来,其具有很大的提升空间。但是在构建模型的过程中,很多参数需要主观定义或简化处理,而经济损失是动态发展的,目前的损失研究主要停留在静态评估上,模糊数学法仍存在精度的问题。

表 7 经济损失评估方法
Table 7 Economic loss assessment methods

方法	文献	方法基础	方法特点
数理统计法	Das 等 ^[90]	基于非传统的水深-损失曲线	拟合了 6 条不同财产类型的新曲线
	康相武等 ^[91]	基于大尺度洪灾损失调研	提出了各行业的损失率建议值
	王志军等 ^[92]	基于淹没范围区划	基于洪水区域划分,并给出了各划分区域损失率建议表
	刘欣欣等 ^[93]	基于溃坝洪水特性系数修正	提出流速修正系数以及预警时间修正系数对损失率进行修正
模糊数学法	武靖源等 ^[94-95]	基于人工神经网络	应用 BP 算法建立了洪灾经济损失评估系统结构图
	Li 等 ^[96]	基于可变模糊集理论	提出了一种基于变量模糊集和信息扩散的综合灾害风险评估方法
	程涛等 ^[97]	基于插值法	以淹没面积为洪灾频率控制指标,通过插值实现了快速评估
	周蕾等 ^[98]	基于动态分析	考虑了灾后恢复力,分析了人群动态行为对灾后经济损失的影响程度

目前的经济损失评估方法大多未考虑溃决洪水对生态环境的影响,但生态损失从长远来看也是一种经济损失,生态环境和经济之间的联系是不可忽略的。生态损失评估方法的研究难点主要在于:①如何将生态价值量化,从而清晰明确地对生态损失进行定量评估;②如何对风险区生态损失的影响因子进行分析与提炼,并量化影响因子,构建完善的指标体系。

5 堰塞湖风险评估发展趋势

- a. 对于堰塞湖而言,发生溃决灾害是一种概率性事件,而一种完整的灾害链体系不可能得到精确的溃决概率,因此需要深入研究堰塞湖的孕育-致灾机制,克服致灾因子分析的不确定性,结合大量堰塞湖基础数据,通过不断改进算法获取逼近真实的堰塞湖溃决概率。
- b. 堰塞湖溃决洪水模拟的准确性问题。堰塞湖溃决洪水模拟涉及复杂的水土耦合作用,由于堰塞体材料颗粒分布的不确定性,准确预测不同致灾因子作用下堰塞湖的溃决过程是下游洪水演进和灾害评估合理性的关键。应根据堰塞体的形成机理,充分利用物探手段,现场获取堰塞体的材料和结构特征。
- c. 堰塞湖溃决损失评估的定量化方法。由于溃决损失研究起步较晚,缺乏相关影响因素的历史数据,如何利用有限的数据对损失评价模型中的参数进行量化处理是目前的一大难题。随着大数据时代的到来和多学科交叉研究的兴起,各邻域的数据、方法相结合,加上算法的精进,一定程度上弥补了历史数据缺乏的问题。
- d. 堰塞湖风险定量评估体系。目前堰塞湖风险尚未形成一个完整的定量评估体系,危险性评价和灾害损失评估相互独立,且定量化程度不高。可以从人工智能的角度,通过智能网络探索合理的堰塞湖风险整体评估模型。
- e. 堰塞湖风险动态评估体系。堰塞湖风险是一个动态的过程,但目前的危险性评价和损失评价大多是静态分析,忽略了灾害本身的不确定性发展过程。后续研究可考虑人类行为和社会组织撤离的动力学特性,结合卫星遥感、无人机航拍等技术进行堰塞湖风险的动态评估。

6 结 语

本文基于堰塞湖灾害链的发展演化过程,从风险评估的概念入手,进行堰塞湖风险评估的定性和定量总结。在堰塞体溃决危险性评价方面,目前国内研究较多且近些年多集中于定量评价中,基于数理统计方法的参数模型以及结合信息科技和人工智能的不确定性方法是目前发展的主流。连接堰塞体溃决危险性和洪涝灾害损失之间的堰塞湖溃决过程以及洪水演进模拟是堰塞湖风险评价的枢纽,溃决模型的研究目前主要集中于简化模型上,可以在考虑堰塞湖溃决机理的情况下快速模拟溃口形态和流量演化过程;而洪水演进部分目前多借助于商业软件开展数值分析。在堰塞湖溃决损失评估方面多借鉴洪涝灾害的损失估算方法;在生命损失估算方面,国外研究多集中于折衷模型,而国内则多侧重于经验模型;在经济损失估算方面,研究多集中于直接经济损失,目前学术界的 research 主流是构建多指标数学模型。

总体而言,堰塞湖风险评估的基本框架已初步形成,但仍需在堰塞湖危险性评价中的不确定性问题、堰塞湖溃决洪水模拟的准确性问题、堰塞湖溃决损失评估的量化方法、堰塞湖风险定量评估体系、堰塞湖风险动态评估体系等方面开展系统深入的研究。

参考文献:

- [1] COSTA J E, SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100(7): 1054-1068.
- [2] 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))
- [3] 殷跃平. 西藏波密贡高速巨型滑坡特征及减灾研究[J]. 水文地质工程地质, 2000, 27(4): 8-11. (YING Yueping. Study on characteristics and disaster reduction of giant landslide at Yigong Expressway in Bomi, Tibet[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2000, 27(4): 8-11. (in Chinese))
- [4] CUI Peng, ZHU Yingyan, HAN Yongshun, et al. The 12 May Wenchuan earthquake-induced landslide-dammed lakes: distribution and preliminary risk evaluation[J]. Landslides, 2009, 7(6): 209-223.
- [5] 李相南, 陈祖煜. 两种溃坝模型在唐家山堰塞湖溃决模拟中的对比[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(2): 20-26. (LI Xiangnan, CHEN Zuyu. Comparison of two models for back analysis of dam breach of Tangjiashan Barrier Lake[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(2): 20-26. (in Chinese))
- [6] ZHONG Qiming, CHEN Shengshui, WANG Lin, et al. Back analysis of breaching process of Baige landslide dam[J]. Landslides, 2020, 17(7): 1681-1692.
- [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] 陈生水, 钟启明. 土石坝溃坝数学模型及应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2019.
- [9] SHEN Danyi, SHI Zhenming, PENG Ming, et al. Longevity analysis of landslide dams[J]. Landslides, 2020, 17(8): 1797-1821.
- [10] 周姝天, 翟国方, 施益军, 等. 城市自然灾害风险评估研究综述[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 180-186. (ZHOU Shutian, ZHAI Guofang, SHI Yijun, et al. A literature review of urban natural disaster risk assessment[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 180-186. (in Chinese))
- [11] CASAGLI N, ERMINI L. Geomorphic analysis of landslide dams in the Northern Apennine[J]. Transactions of the Japanese Geomorphological Union, 1999, 20(3): 219-249.
- [12] 刘怀湘, 王兆印, 刘乐. 河床结构对堰塞坝稳定性的影响研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(3): 98-103. (LIU Huaixiang, WANG Zhaoyin, LIU Le. Study on the influence of riverbed structures on the landslide dam stability[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3): 98-103. (in Chinese))
- [13] 石振明, 刘思言, 彭铭. 堰塞坝坝体材料渗流特性研究现状及展望[C] // 2014 年全国工程地质学术年会. 太原: 《工程地质学报》编辑部, 2014: 88-93.
- [14] 彭铭, 蒋明子. 滑坡涌浪作用下堰塞坝稳定性研究[C] // 2017 中国地球科学联合学术年会论文集(十五). 北京: 中国地球物理学会, 2017: 435-437.
- [15] 周亦良, 姚令侃, 艾洪舟, 等. 地震力与共振动水压力综合作用下冰碛堰塞坝失稳机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(7): 1726-1735. (ZHOU Yiliang, YAO Lingkan, AI Hongzhou, et al. Instability of moraine dams under the combined action of seismic forces and resonant hydrodynamic pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(7): 1726-1735. (in Chinese))
- [16] 年廷凯, 吴昊, 陈光齐, 等. 堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1796-1812. (NIAN Tingkai, WU Hao, CHEN Guangqi, et al. Research progress on stability evaluation method and disaster chain effect of landslide dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1796-1812. (in Chinese))
- [17] 程根伟, 范继辉, 程尊兰. 四川 5·12 地震灾区滑坡堰塞坝溃决灾害风险评估[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2008, 34(6): 1086-1090. (CHENG Genwei, FAN Jihui, CHENG Zunlan. Breaking risk evaluation of earthquake-induced lakes in Sichuan, China[J]. Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition), 2008, 34(6): 1086-1090. (in Chinese))
- [18] 王世新, 周艺, 魏成阶, 等. 汶川地震重灾区堰塞湖次生灾害危险性遥感评价[J]. 遥感学报, 2008, 12(6): 900-907. (WANG Shixin, ZHOU Yi, WEI Chengjie, et al. Risk evaluation on the secondary disasters of dammed lakes using remote

- sensing datasets,in the Wenchuan earthquake[J]. Journal of Remote Sensing,2008,12(6):900-907. (in Chinese))
- [19] 何秉顺,丁留谦,王玉杰,等. 四川安县肖家桥堰塞湖稳定性初步评估[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(增刊2):3626-3631. (HE Bingshun,DING Liujian,WANG Yujie,et al. Preliminary evaluation of stability of Xiaojiaqiao dammed lake in Anxian County,Sichuan Province[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(Sup2):3626-3631. (in Chinese))
- [20] 李守定,李晓,张军,等. 唐家山滑坡成因机制与堰塞坝整体稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1):2908-2915. (LI Shouding,LI Xiao,ZHANG Jun,et al. Study of geological origin mechanism of Tangjiashan landslide and entire stability of landslide dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(Sup1):2908-2915. (in Chinese))
- [21] 许强,郑光,李为乐,等. 2018年10月和11月金沙江白格两次滑坡-堰塞堵江事件分析研究[J]. 工程地质学报,2018,26(6):1534-1551. (XU Qiang,ZHENG Guang,LI Weile,et al. Study on successive landslide damming events of Jinsha River in Baige Village on October 11 and November 3,2018[J]. Journal of Engineering Geology,2018,26(6):1534-1551. (in Chinese))
- [22] 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 Liming. Research on rapid information perception and simulation calculation method of landslide barrier body in alpine and gorge region,taking baige barrier lake as an example[J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2021,52(7):44-52. (in Chinese))
- [23] 常东升,张利民,徐耀,等. 红石河堰塞湖漫顶溃坝风险评估[J]. 工程地质学报,2009,17(1):50-55. (CHANG Dongsheng,ZHANG Liming,XU Yao,et al. Analysis of overtopping failure of hongshihe landslide dam after Wenchuan earthquake[J]. Journal of Engineering Geology,2009,17(1):50-55. (in Chinese))
- [24] DAVIES T R,MANVILLE V,KUNZ M,et al. Modeling landslide dam break flood magnitudes:case study[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2007,133(7):713-720.
- [25] YAN Jun,CAO Zhixian,LIU Huaihai,et al. Experimental study of landslide dam-break flood over erodible bed in open channels[J]. Journal of Hydrodynamics,2009,21(1):124-130.
- [26] CHEN Suchin,LIN Tsungwen,CHEN Chienyuan. Modeling of natural dam failure modes and downstream riverbed morphological changes with different dam materials in a flume test[J]. Engineering Geology,2015,188:148-158.
- [27] 赵天龙,陈生水,王俊杰,等. 堰塞坝漫顶溃坝离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(11):1965-1972. (ZHAO Tianlong,CHEN Shengshui,WANG Junjie,et al. Centrifugal model tests overtopping failure of barrier dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2016,38(11):1965-1972. (in Chinese))
- [28] SHI Zhenming,WANG Youquan,PENG Ming,et al. Characteristics of the landslide dams induced by the 2008 Wenchuan earthquake and dynamic behavior analysis using large-scale shaking table tests[J]. Engineering Geology,2015,194:25-37.
- [29] ERMINI L,CASAGLI N. Prediction of the behaviour of landslide dams using a geomorphological dimensionless index[J]. Earth Surface Processes and Landforms,2003,28(1):31-47.
- [30] KORUP O. Geomorphometric characteristics of New Zealand landslide dams[J]. Engineering Geology,2004,73:13-35.
- [31] DONG Jiayun,TUNG Yuhsiang,CHEN Chienchin,et al. Logistic regression model for predicting the failure probability of a landslide dam[J]. Engineering Geology,2011,117:52-61.
- [32] STEFANELLI C T,SEGONI S,CASAGLI N,et al. Geomorphic indexing of landslide dams evolution[J]. Engineering Geology,2016,208:1-10.
- [33] SHAN Yibo,CHEN Shengshui,ZHONG Qiming. Rapid prediction of landslide dam stability using the logistic regression method[J]. Landslides,2020,17(12):2931-2956.
- [34] 石振明,程世誉,张清照,等. 堰塞坝稳定性快速评估模型:以小岗剑(上)堰塞坝为例[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(2):95-100. (SHI Zhenming,CHENG Shiyu,ZHANG Qingzhao,et al. A fast model for landslide dams stability assessment:a case study of Xiaogangjian (upper) landslide dam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2020,18(2):95-100. (in Chinese))
- [35] MIZUYAMA T,SATOHUKA Y,OGAWA K,et al. Estimating the outflow discharge rate from landslide dam outbursts[J]. Disaster Mitigation of Debris Flows Slope Failures and Landslides,2006(1):365-377.
- [36] AWAL R,NAKAGAWA H,BABA Y,et al. Study on landslide dam failure by sliding[J]. Journal of Chemical Physics,2007,51(92):7-12.
- [37] HU Xiewen,LUO Gang,LYU Xiaoping,et al. Analysis on dam-breaking mode of Tangjiashan barrier dam in Beichuan County

- [J]. *Journal of Mountain Science*,2011,8(2):354-362.
- [38] 崔银祥,聂德新,刘惠军. 通过三维渗流计算评价某滑坡坝渗透稳定性[J]. *水土保持研究*,2005(2):98-100. (CUI Yinxiang,NIE Dexin,LIU Huijun. Seepage stability assessment of a landslide dam by three-dimensional seepage simulation[J]. *Research of Soil and Water Conservation*,2005(2):98-100. (in Chinese))
- [39] 宋彦辉. 基于有限元强度折减法的滑坡坝稳定性分析[J]. *岩石力学与工程*,2010,29(增刊1):242-247. (SONG Yanhui. Stability analysis of landslide dam based on fem shear strength reduction method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2010,29(Sup1):242-247. (in Chinese))
- [40] 罗刚. 唐家山高速短程滑坡堵江及溃坝机制研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
- [41] 乔路,杨兴国,周宏伟,等. 模糊层次分析法的堰塞湖危险度判定:以杨家沟堰塞湖危险度综合评价为例[J]. *人民长江*,2009,40(22):51-53. (QIAO Lu,YANG Xingguo,ZHOU Hongwei,et al. Risk assessment of barrier lake based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. *Yangtze River*,2009,40(22):51-53. (in Chinese))
- [42] 孙研,王绍玉. 基于自然和社会属性的堰塞湖风险评估[J]. *四川大学学报(工程科学版)*,2011,43(增刊1):24-28. (SUN Yan,WANG Shaoyu. Risk evaluation of landslide lake based on the natural and social property[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*,2011,43(Sup1):24-28. (in Chinese))
- [43] LIAO Haimei,YANG Xingguo,XU Fugang,et al. A fuzzy comprehensive method for the risk assessment of a landslide-dammed lake[J]. *Environmental Earth Sciences*,2018,77(22):750.
- [44] 王如宾,万宇,阳龙,等. 基于模糊层次法和广义熵值法的堰塞坝险情风险分析[J]. *三峡大学学报(自然科学版)*,2020,42(4):16-21. (WANG Rubin,WAN Yu,YANG Long,et al. Risk analysis of barrier dam diseases based on fuzzy analytic hierarchy process and generalized entropy method[J]. *Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences)*,2020,42(4):16-21. (in Chinese))
- [45] ASCE/EWRI Task Committee on Dam/Levee Breach. Earthen embankment breaching[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2011,137(12):1549-1564.
- [46] KIRKPATRICK G W. Evaluation guidelines for spillway adequacy[C] // *The Evaluation of Dam Safety*. New York:American Society of Civil Engineers,1977:395-414.
- [47] ZHONG Qiming,WANG Lin,CHEN Shengshui,et al. Breaches of embankment and landslide dams -state of the art review[J]. *Earth-Science Reviews*,2021,216:103597.
- [48] COSTA J E. Floods from dam failures;Open-File Report 85-560[R]. Washington D. C. :US Geological Survey,1985.
- [49] COSTA J E,SCHUSTER R L. The formation and failure of natural dams[J]. *Geological Society of America Bulletin*,1988,100(7):1054-1068.
- [50] WALDER J S,O'CONNOR J E. Methods for predicting peak discharge of floods caused by failure of natural and constructed earthen dams[J]. *Water Resources Research*,1997,33(10):2337-2348.
- [51] PENG Ming,ZHANG Liming. Breaching parameters of landslide dams[J]. *Landslides*,2012,9(1):13-31.
- [52] CRISTOFANO E A. Method of computing erosion rate for failure of earthfill dams[R]. Denver:US Bureau of Reclamation,1965.
- [53] 梁军,陈晓静. 纵向增强体土石坝漫顶溢流安全性能分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2019,47(3):238-242. (LIANG Jun,CHEN Xiaojing. Analysis on the overtopping safe operation performance of longitudinal reinforced rockfill dam[J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2019,47(3):238-242. (in Chinese))
- [54] CHANG D S,ZHANG L M. Simulation of the erosion process of landslide dams due to overtopping considering variations in soil erodibility along depth[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*,2010,10(4):933-946.
- [55] ZHANG Liming,XIAO Te,HE Jian,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.
- [56] CHEN Zuyu,MA Liqiu,YU Shu,et al. Back analysis of the draining process of the Tangjiashan barrier lake[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2015,141(4):05014011.
- [57] WANG Lin,CHEN Zuyu,WANG Naixin,et al. Modeling lateral enlargement in dam breaches using slope stability analysis based on circular slip mode[J]. *Engineering Geology*,2016,209:70-81.
- [58] ZHONG Qiming,CHEN Shengshui,MEI Shiang,et al. Numerical simulation of landslide dam breaching due to overtopping[J]. *Landslides*,2018,15(6):1183-1192.
- [59] ZHONG Qiming,CHEN Shengshui,SHAN Yibo. Prediction of the overtopping-induced breach process of the landslide dam[J]. *Engineering Geology*,2020,274:105709.

- [60] CAO Zhixian, YUE Zhiyuan, PENDER G. Landslide dam failure and flood hydraulics. Part II: coupled mathematical modelling [J]. *Natural Hazards*, 2011, 59(2): 1021-1045.
- [61] WU Weiming, MARSOOLI R, HE Zhiguo. Depth-averaged two-dimensional model of unsteady flow and sediment transport due to noncohesive embankment break/breaching [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(6): 503-516.
- [62] CANTERO-CHINCHILLA F N, CASTRO-ORGAZ O, DEY S, et al. Nonhydrostatic dam break flows. II: one-dimensional depth-averaged modeling for movable bed flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 142(12): 04016069.
- [63] 张贵金, 罗舸旋子, 朱博渊, 等. 极端条件下堆石坝溃坝风险及应急预案 [J]. *水利水电科技进展*, 2021, 41(2): 28-35. (ZHANG Guijin, LUO Gexuanzi, ZHU Boyuan, et al. Dam-break risk and emergency plan of a rockfill dam under extreme conditions [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2021, 41(2): 28-35. (in Chinese))
- [64] ROE P L. Approximate Riemann solvers, parameter vectors, and difference schemes [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 43: 357-372.
- [65] OSHER S, SOLOMON F. Upwind difference schemes for hyperbolic conservation laws [J]. *Mathematics of Computation*, 1982, 158: 339-374.
- [66] HARTEN A. High resolution schemes for hyperbolic systems of conservation laws [J]. *Journal of Computational Physics*, 1983, 49: 357-393.
- [67] TORO E F, SPRUCE M, SPEARES W. Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver [J]. *Shock Waves*, 1994, 4: 25-34.
- [68] 刘永志, 唐雯雯, 张文婷, 等. 基于灾害链的洪涝灾害风险分析综述 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 20-27. (LIU Yongzhi, TANG Wenwen, ZHANG Wenting, et al. Review of flood disaster risk analysis based on disaster chain [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 20-27. (in Chinese))
- [69] 黄国如, 罗海婉, 卢鑫祥, 等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(6): 1-6. (in Chinese))
- [70] 胡亮, 钟启明, 陈亮. 土石坝溃决人员生命损失评估方法研究 [J]. *人民长江*, 2021, 52(4): 201-208. (HU Liang, ZHONG Qiming, CHEN Liang. Study on evaluation method of life loss in dam breach [J]. *Yangtze River*, 2021, 52(4): 201-208. (in Chinese))
- [71] PENG Ming, ZHANG Liming. Analysis of human risks due to dam-break floods-part I: a new model based on Bayesian networks [J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(1): 903-933.
- [72] PENG Ming, ZHANG Liming. Analysis of human risk due to dam break floods-part II: application to Tangjiashan landslide dam failure [J]. *Natural Hazards*, 2012, 64(2): 1899-1923.
- [73] BROWN C A, GRAHAM W J. Assessing the threat to life from dam failure [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 1988, 24(6): 1303-1309.
- [74] DEKAY M L, MCCLELLAND G H. Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood [J]. *Risk Analysis*, 1993, 13(2): 193-205.
- [75] GRAHAM W J. A procedure for estimating loss of life caused by dam failure [J]. *Sedimentation & River Hydraulics*, 1999, 6(5): 1-43.
- [76] 周克发. 溃坝生命损失分析方法研究 [D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.
- [77] 侯保灯. 基于灰色关联分析法的溃坝生命损失综合评价模型 [J]. *水力发电*, 2012, 38(10): 76-80. (HOU Baodeng. Comprehensive evaluation model based on gray relational analysis for life loss of dam failure [J]. *Water Power*, 2012, 38(10): 76-80. (in Chinese))
- [78] 王君, 袁永博. 基于可变模糊聚类迭代模型的溃坝生命损失预测 [J]. *水电能源科学*, 2012, 30(6): 82-85. (WANG Jun, YUAN Yongbo. Forecasting life loss of dam break based on variable fuzzy clustering iterative model [J]. *Water Resources and Power*, 2012, 30(6): 82-85. (in Chinese))
- [79] ABT S R, WITTNER R J, TAYLOR A, et al. Human stability in a high flood hazard zone [J]. *Water Resources Bulletin*, 1989, 25(4): 881-890.
- [80] LIND N, HARTFORD D, ASSAF H. Hydrodynamic models of human instability in a flood [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2004, 40(1): 89-96.
- [81] SAKAMOTO D, JOHNSTON B, LIND N. BC Hydro's life safety model formal model description [R]. British Columbia: BC Hydro Engineering, 2004.

[82] PENNING-ROUSELL E, FLOYD P, RAMSBOTTOM D, et al. Estimating injury and loss of life in floods; a deterministic framework[J]. Natural Hazards,2005,36(1):43-64.

[83] ASSAF H, HARTFORD D N D, CATTANACH J D. Estimating dam breach flood survival probabilities[R]. Canberra:ANCOLD Bulletin,1997:23-42.

[84] REITER P. Loss of life caused by dam failure, the RESCDAM LOL method and its application to Kyrkosjarvi dam in Seinajoki [R]. Helsinki:PR Water Consulting Ltd.,2001.

[85] ABOELATA M A, BOWLES D S. LIFESim: a model for estimating dam failure life loss[R]. Logan:Institute for Dam Safety Risk Management, Utah State University,2005.

[86] 胡江, 苏怀智. 基于生命质量指数的病险水库除险加固效应评价方法[J]. 水利学报,2012,43(7):852-859. (HU Jiang, SU Huaizhi. Quantitative evaluation framework of reinforcement based on the LQI for dangerous Dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(7):852-859. (in Chinese))

[87] 王志军, 宋文婷. 溃坝生命损失评估模型研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(3):205-210. (WANG Zhijun, SONG Wenting. Study of estimation model of loss of life caused by dam break[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2014,42(3):205-210. (in Chinese))

[88] 宋明瑞. 基于数值模拟的溃坝生命损失研究[D]. 天津:天津大学,2016.

[89] 李雷, 王仁钟. 大坝风险评价与风险管理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[90] DAS S, LEE R. A nontraditional methodology for flood stage-damage calculations[J]. Journal of the American Water Resources Association,1988,24(6):1263-1272.

[91] 康相武, 吴绍洪, 戴尔阜, 等. 大尺度洪水灾害损失与影响预评估[J]. 科学通报,2006,51(增刊2):155-164. (KANG Xiangwu, WU Shaohong, DAI Erfu, et al. Loss and impact pre-assessment of large scale flood disaster[J]. Chinese Science Bulletin,2006,51(Sup2):155-164. (in Chinese))

[92] 王志军, 宋文婷, 马小童. 溃坝经济损失评估方法研究[J]. 长江科学院院报,2014,31(2):30-34. (WANG Zhijun, SONG Wenting, MA Xiaotong. A method of estimating economic loss caused by dam-break[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2014,31(2):30-34. (in Chinese))

[93] 刘欣欣, 顾圣平, 赵一梦, 等. 修正损失率的溃坝洪水经济损失评估方法研究[J]. 水利经济,2016,34(3):36-40. (LIU Xinxin, GU Shengping, ZHAO Yimeng, et al. Evaluation methods for economic loss due to dam-break flood using modified loss rate[J]. Journal of Economics of Water Resources,2016,34(3):36-40. (in Chinese))

[94] 武靖源, 韩文秀, 徐杨, 等. 洪灾经济损失评估模型研究(I):直接经济损失评估[J]. 系统工程理论与实践,1998(11):54-57. (WU Jingyuan, HAN Wenxiu, XU Yang, et al. A study on evaluation theory and mathematical model for economic loss of flood damage (I)-direct economic loss[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,1998(11):54-57. (in Chinese))

[95] 武靖源, 韩文秀, 徐杨, 等. 洪灾经济损失评估模型研究(II):间接经济损失评估[J]. 系统工程理论与实践,1998(12):85-89. (WU Jingyuan, HAN Wenxiu, XU Yang, et al. A study on evaluation theory and mathematical model for economic loss of flood damage (II)-indirect economic Loss[J]. Systems Engineering-Theory & Practice,1998(12):85-89. (in Chinese))

[96] LI Qiong, ZHOU Jianzhong, LIU Donghan, et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion[J]. Safety Science,2012,50(5):1275-1283.

[97] 程涛, 吕娟, 张立忠, 等. 区域洪灾直接经济损失即时评估模型实现[J]. 水利发展研究,2002(12):40-43. (CHENG Tao, LYU Juan, ZHANG Lizhong, et al. Realization of immediate assessment model for direct economic loss of regional flood disaster [J]. Water Resources Development Research,2002(12):40-43. (in Chinese))

[98] 周蕾, 吴先华, 吉中会. 考虑恢复力的洪涝灾害损失评估研究进展[J]. 自然灾害学报,2017,26(2):11-21. (ZHOU Lei, WU Xianhua, JI Zhonghui. Research advance in flood damage assessment considering resilience [J]. Journal of Natural Disasters,2017,26(2):11-21. (in Chinese))

(收稿日期:2021 - 07 - 02 编辑:胡新宇)