

考虑梯级坝级联溃决的生命损失评估与预警决策

彭铭^{1,2} 季思同^{1,2} 孙蕊^{1,2*} 朱艳³ 杨鸽⁴ 曹子君⁵ 白泽文^{1,2}

1.同济大学 土木防灾减灾全国重点实验室, 上海, 200092; 2.同济大学 土木工程学院 地下建筑与工程系, 上海, 200092; 3.中船第九设计研究院工程有限公司, 上海, 200063; 4.中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 杭州, 311122; 5.西南交通大学智慧城市与交通学院, 成都, 611756

摘要: 梯级坝级联溃决引发的洪水放大效应显著提升下游生命风险, 亟需系统化的风险评估与预警决策方法。本文构建了融合“洪水演进模拟-生命损失评估-预警决策”的分析框架。基于不同类型坝体的溃口参数与地形数据, 采用二维水动力模型模拟级联溃决过程, 引入 HURAM 模型量化不同风险区域生命损失率, 并构建预警疏散时间与总疏散损失的响应关系, 确定“最优”预警决策。以清江流域为例, 模拟假设发生千年一遇洪水并诱发三座梯级坝级联溃决场景。结果表明, 该方法框架能系统性评估级联溃决的生命损失风险与制定合理的预警决策, 级联溃决显著放大洪峰流量, 隔河岩 (8.29%), 高坝洲 (47.05%), 同时受上游坝体结构与“U”型河谷地形影响, 坝前水位提升而溃决洪水流量削弱; 级联溃决二维模型较一维模型更精细刻画风险区, 生命损失风险提高约 5.3%; 在高坝洲溃坝前 3.4 小时启动预警, 可使疏散总损失降至最低 (约 8.70 亿元)。级联溃决放大效应受地形与坝体结构共同调控, 生命损失率受水深等致灾因子的非线性影响显著增强, 相应成果为梯级坝级联溃决灾害的风险评估与应急管理提供了可行路径与理论支撑。

关键词: 梯级坝; 级联溃决; 生命损失评估; 预警决策; 洪水放大效应

中图分类号: P694 **收稿日期:** 2025-06-28

Assessment of Life Loss and Early Warning Strategies under Cascading Failures of Cascade Dams

Ming Peng^{1,2} Sitong Ji^{1,2} Rui Sun^{1,2*} Yan Zhu³ Ge Yang⁴ Zijun Cao⁵ Zewen Bai^{1,2}

1.State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd, Shanghai 200063, China; 4. Power China Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 5. Southwest Jiaotong University, Smart City and Transportation College, Chengdu 611756, China

Abstract: Cascading failures of cascade dams significantly amplify downstream life risk due to the flood magnification effect, highlighting the urgent need for a systematic framework for risk assessment and early warning decision-making. This study proposes an integrated analytical framework that couples flood evolution simulation, life loss estimation, and early warning optimization. A two-dimensional hydrodynamic model is employed to simulate cascading dam-break scenarios based on breach parameters of different dam types and high-resolution terrain data. The HURAM model is used to quantify life loss rates across varying risk zones. Furthermore, a response relationship between early warning lead time and total evacuation loss is established to identify the optimal warning strategy. Using the Qingjiang River Basin as a case study, a hypothetical scenario involving three sequential dam failures triggered by a 1-in-1000-year flood is simulated. The results demonstrate that the proposed framework enables comprehensive life loss risk assessment and informed early warning decisions under cascading failure conditions. Compared to single dam failure, cascading breaches increase peak flood discharges by 8.29% at Geheyan and 47.05% at Gaobazhou. However, due to the influence of upstream dam structures and U-shaped valley topography, local flood attenuation occurs despite upstream water level rise. The two-dimensional model captures terrain and velocity distribution more accurately, resulting in an approximately 5.3% increase in estimated life loss risk relative to the one-dimensional model. To minimize evacuation loss, the optimal early warning time is determined as 3.4 hours before Gaobazhou dam failure, reducing total economic loss to approximately 870 million CNY. The results highlight that the flood amplification effect is constrained by both terrain and dam structure, while life loss is highly sensitive to non-linear interactions with hazard parameters such as water depth. This study provides a practical approach and theoretical

基金项目: 国家自然科学基金-联合基金重点项目 (U23A2044), 广西重点研发计划项目 (桂科 AB25069121), 国家自然科学基金-青年基金 (42207238, 42407242)

作者简介: 彭铭(1981—), 男, 教授, 主要从事地质灾害、溃坝机理、风险评估与决策研究。E-mail: pengming@tongji.edu.cn, ORCID:0000-0001-9134-4391

*通讯作者: 孙蕊(1993—), 女, 博士后, 主要从事加筋土边坡动力响应及可靠度分析、地质灾害研究。E-mail: sr-tjut@tongji.edu.cn

0 引言

随着我国能源结构转型和“双碳”战略的深入实施,西部山区沿河流域已形成大规模的梯级水电开发体系(周洪福等, 2015)。梯级坝通过水力-电力耦合实现了能源的高效利用,但其空间邻近性也带来了显著的风险隐患。一旦上游坝体发生溃决,洪水将迅速传至下游,引发级联溃决(图1),对下游居民生命安全、财产损失及生态系统构成严重威胁(Zhou et al., 2018; 刘家宏等, 2023)。例如,2020年美国伊登维尔与桑福德大坝连续溃决事件造成约1亿美元经济损失,约11000人被迫疏散(Mehta et al., 2020)。2021年,中国嫩江流域“永安-新发”梯级坝级联溃决事件造成约16660人受灾,淹没农田达217 km²(Wang et al., 2022)。与单一坝体溃决相比,梯级坝在水动力上呈现较强关联性,其溃坝洪水具有能量放大与风险传递效应,致灾能力显著增强(于子波等, 2021; 崔鹏等, 2022; Wang et al., 2023; 王建中等, 2025; 杨泽文等, 2025)。受限于梯级坝级联溃决历史案例稀少、数据不完整,以及地形、坝型和溃决方式等多因素的影响,级联溃决灾害在洪水模拟时仍面临一定难度。同时,洪水放大效应显著扩大灾害影响范围,增强致灾强度,导致下游生命损失风险评估存在较高不确定性。此外,受灾范围广泛,造成经济量化困难,增加了预警与疏散策略制定的复杂性。因此,如何精确模拟梯级坝级联溃决洪水演进,据此评估生命损失风险,从而制定高效预警方案,是当前防灾减灾研究的重要方向。

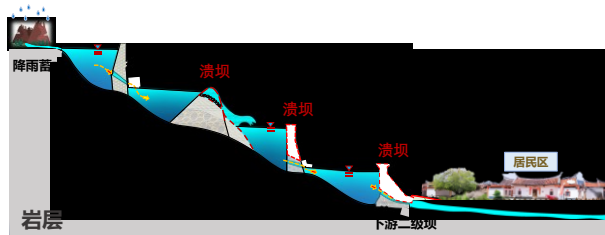


图1 梯级坝级联溃决空间示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cascading failure in cascade dams

目前,针对梯级坝级联溃决过程的洪水演进研究主要集中于模型试验和数值模拟两类方法。模型试验多通过室内水槽复现坝体溃决与洪水传播过程,深入探讨失稳机制与水流特性(Niu et al., 2012; 许唯临等, 2013; Chen et al., 2014; Takayama et al., 2021)。尽管该方法可实现对局部地区洪水演化的精

细化模拟,但在大尺度流域条件下存在适用性差、周期长、成本高等问题。近年来,数值模拟方法应用日益广泛,学者们普遍采用如 DB-IWHR、DL-BREACH 等溃坝模型(周兴波等, 2015; Wu et al., 2016; 郭新蕾等, 2017),结合 DAMRK、MIKE21、FLOW-3D、HEC-RAS 等水动力软件,对梯级坝级联溃决过程与洪水演进开展模拟分析,揭示其水力特征、演化规律(王霞等, 2009; Dai et al., 2020; Rita et al., 2023; 马黎等, 2025)。然而,受限于坝型结构差异、溃决路径变化及溃口形态不确定等多重因素,现有研究在多类型坝体组合的级联溃决洪水演进规律仍显不足。

在生命损失风险评估方面,现有方法主要可归为三类:经验模型、物理模型与概率模型。其中,经验模型通过回顾历史灾害案例,建立水深、流速与人员伤亡率之间的统计关系,进而推导生命损失函数(Ge et al., 2021)。物理模型基于人体稳定性理论与洪水动力学原理,模拟不同水力条件下的人员致死概率(Jonkman and Penning-Rowsell, 2008)。概率模型则利用蒙特卡洛模拟、贝叶斯网络等方法,开展多源不确定性建模,从而提高风险评估结果的稳健性与可靠性(Peng and Zhang., 2012; Brazdova and Riha., 2014)。然而,上述研究多聚焦于单一坝体溃决灾害,对梯级坝在洪水演进中产生的洪水放大效应考虑不足。尤其在级联溃决这一特殊条件下,洪水能量高度集中、传播速度极快,严重压缩下游人员的应急响应和安全疏散时间,从而使生命损失评估面临更高的不确定性和挑战。

预警机制作为灾害应对的关键环节,在梯级坝面临级联溃决灾害时亦存在多重难题。现有方法多依赖于水深、流速等物理指标设定静态阈值,或结合模糊逻辑、事件树、贝叶斯网络等方法划分风险等级并制定预警策略(孟颖与唐玲玲, 2019; 胡良明等, 2018; Zhu et al., 2021)。但这些方法大多建立在单一坝体溃决假设之上,缺乏考虑级联溃决洪水放大的合理预警阈值及优化响应策略。

为弥补上述研究不足,本文提出融合“洪水演进模拟-生命损失评估-预警决策”的梯级坝预警决策分析框架。该框架通过量化下游区域的生命损失风险,结合区域经济评估潜在经济损失,建立总疏散损失与预警疏散时间之间的响应函数,并基于最小总疏散损失原则确定最优预警疏散决策。同时,进一步探讨级联溃决洪水的演进特性及其对生命损

失评估结果的影响。以清江流域梯级坝为案例，假设存在级联溃决风险，论述所提出方法的可行性，为梯级坝的灾害风险管理提供理论支持与技术支撑。

1 考虑级联溃决的生命损失评估与预警决策方法

1.1 方法框架

本文采用经验公式分析不同类型坝体的溃口参数，并融合一维与二维河道地形数据，基于 HEC-RAS 水动力模拟软件，分别开展一维快速模拟与二维高精度模拟，模拟梯级坝级联溃决洪水的演进过程及洪水传播特性。获取溃决洪水特征参数，引入 HURAM 生命损失评估模型，对下游区域的潜在生命损失风险进行定量评估。在风险评估基础上，结合区域社会经济数据，分别对生命损失价值、可转移财产损失及基本疏散经济损失进行精确量化，进而建立总疏散损失与预警启动时间之间的响应函数。最终，依据“最小总疏散损失”原则，确定梯级坝级联溃决灾害的最优预警疏散决策。本文的研究流程如图 2 所示。

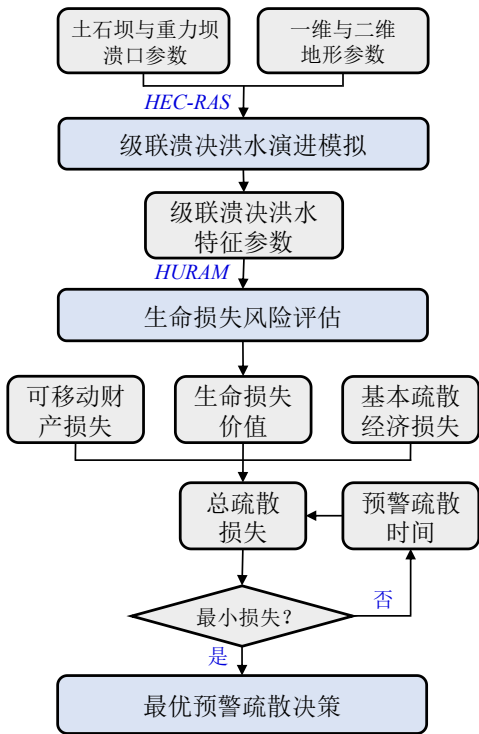


图 2 研究方法的框架和流程图

Fig. 2 The framework and flowchart of the proposed method

1.2 级联溃决洪水演进模拟

1.2.1 溃口参数分析

面板堆石坝在材料组成、溃决机理及溃口形态等方面与土石坝具有相似性，其溃口参数分析通常

可参考适用于土石坝的计算方法。部分学者依据现有溃坝数据库模型，推导出假定土石坝为理想溃口参数，由五个参数组成：溃口深度 (H_b)、溃口顶部宽度 (B_t)、平均溃口宽度 (B_{ave})、土石坝单一溃坝峰值流量 (Q_p) 与溃决失效时间 (T_f)，各参数量化形式如表 1 所示 (Xu and Zhang, 2009)。

表 1 溃坝参数经验公式

参数	公式
溃口深度 H_b	$Y_1 = H_b / H_d$
溃口顶部宽度 B_t	$Y_2 = B_t / H_b$
平均溃口宽度 B_{ave}	$Y_3 = B_{ave} / H_b$
溃口峰值流量 Q_p	$Y_4 = Q_p / \sqrt{gV_w^{5/3}}$
溃决失效时间 T_f	$Y_5 = T_f / T_r$

注： V_w 为库容， H_d 为原始坝高， T_r 单位时间， g 为重力加速度。

采用加法形式拟合上述五个参数，公式可表示为 (Xu and Zhang, 2009)：

$$Y_i = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + (b_{31}X_{31} + b_{32}X_{32} + b_{33}X_{33}) + (b_{41}X_{41} + b_{42}X_{42}) + (b_{51}X_{51} + b_{52}X_{52} + b_{53}X_{53}) \quad (1)$$

式中， Y_i 为目标函数， b_i 为回归系数， X_i 为控制变量。

混凝土坝的溃决通常表现为瞬时破坏特征。该类坝体的溃口形状通常呈矩形且分坝段垂向破坏，针对混凝土重力坝，溃口宽度为一个坝段或多个坝段，通常小于坝顶宽度一半，溃坝持续时间一般在 0.1 - 0.5 h，混凝土拱坝，溃口宽度通常为 80% 坝顶长度至全长，溃坝持续时间小于 0.1 h (杨彦龙等, 2022)。针对混凝土坝溃决的峰值流量，已有众多研究成果。本文采用基于溃口形态的经验公式估算混凝土坝的单一溃坝峰值流量 (李雷等, 2006)，表达式为：

$$Q_{p1} = \frac{8}{27} \sqrt{g} \left(\frac{B}{b} \right)^{1/4} b (H_0)^{3/2} \quad (2)$$

式中， B 为坝址长度， b 为溃口长度， H_0 为坝址上游水深， Q_{p1} 为混凝土坝单一溃坝峰值流量。

1.2.2 数值模拟原理

HEC-RAS 水动力模拟软件被广泛应用于溃坝洪水模拟，其模型基于非恒定流条件下的圣维南方程组，即简化形式的 Navier-Stokes 浅水方程，涵盖连续性方程与动量方程，其基本表达式如下：

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_i \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + g \left(\frac{\partial H}{\partial x} + S_f + S_b \right) = v_i \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho h} \quad (4)$$

式中, t 为时间, Q 为流量, A 为河道断面面积, q_l 为外部流量, V 为横断面平均流速, z_s 为水面高程, ν_t 为湍涡流粘度, H 为水面高程, S_f 为摩擦斜率, S_h 为附加力项, $\tau_{s,x}$ 为水表面应力, ρ 为水密度, h 为水深。

在坝体溃口演化过程中, 库区水位通过渗透侵蚀和侧向水压力对坝体稳定性产生显著影响。溃口的发展速率受坝体结构形式、破坏机制以及过流面积等多种因素控制。HEC-RAS 可通过计算不同溃口类型的侵蚀速率, 模拟坝体破坏的全过程。对于土石坝溃口发展可分为三个阶段, 首先, 漫顶水流侵蚀导致边坡坍塌, 溃口坡角增至临界值, 溃决速率较慢; 其次, 随着溃口加深加宽, 坡角保持临界值不变, 溃决速率显著加快; 最后, 垂直侵蚀停止, 水平侵蚀减缓, 溃决速率逐渐降低 (如图 3)。在此过程中, 水库水位迅速下降, 其典型变化可通过正弦级数函数进行近似描述 (Syafri et al., 2020)。由于混凝土坝刚度大、坝体自重所产生的力矩显著, 其溃决过程往往表现为突发性、瞬时性破坏。一旦初始溃口形成, 大量河水将以高速穿越坝址, 产生高强度的洪水波, 对下游区域造成严重冲击。

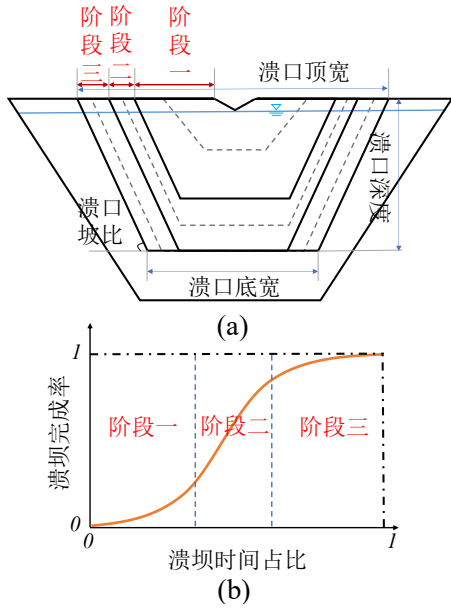


图 3 土石坝溃口演化过程: (a) 溃口发展, (b) 溃决时程曲线
Fig. 3 Breach development in earth-rock dams: (a) breach progression, (b) breach outflow hydrograph

1.2.3 梯级坝级联溃决模型验证

基于上述级联溃决洪水建模方法, 本文选取 Zheng 等 (2022) 开展的大型室内梯级坝级联溃决水槽试验数据, 其中 C1 工况 (中细粒土坝体) 具备明确的溃决过程及洪水演进记录, 作为本研究模型验证的依据。考虑到该试验未显式包含复杂地形起伏与坡度影响, 我们使用 HEC-RAS 二维模块中

“蓄水区-连接体”方式对试验水槽及上下游坝体结构进行简化建模, 确保基本结构特征与试验保持一致 (图 4)。

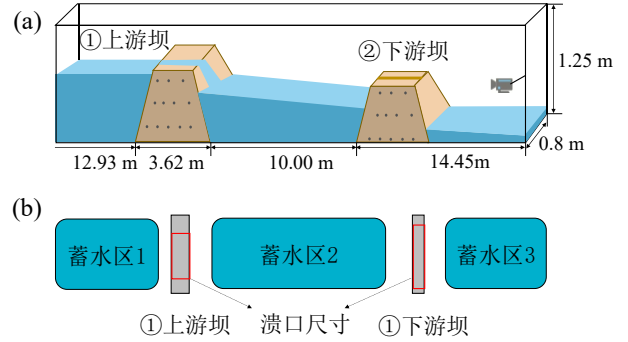


图 4 模型试验与数值模型对比图: (a) 水槽试验, (b) 2D 数值模型
Fig. 4 Comparison between physical experiment and numerical model: (a) flume experiment, (b) 2d numerical model

模拟结果表明, 二维模型可较好地复现溃决洪水从上游向下游传递的主要演进特征, 模拟所得上下游坝体的溃决启动时序与峰值流量也与试验数据较为一致 (如图 5)。相比水槽试验, 模拟中坝体溃决后流量衰减速度较快, 主要由于数值模型中未考虑坝体残留物对持续冲刷过程的阻滞作用。与试验结果对比表明, 所构建的二维溃决模型在重现溃决过程与流量演变方面具有一定的有效性。

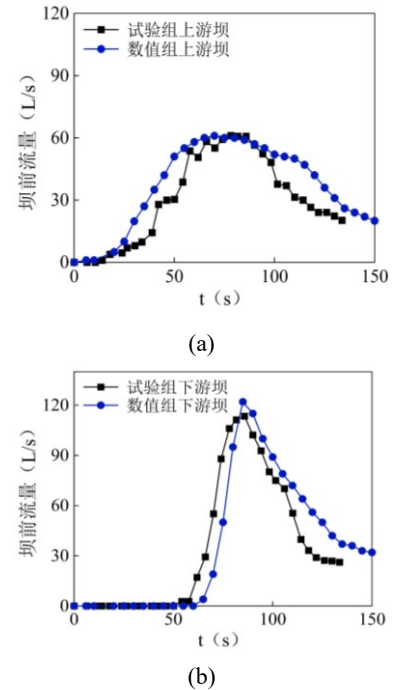


图 5 上下游坝前流量过程曲线: (a) 上游坝, (b) 下游坝
Fig. 5 Flow process curves before upstream and downstream dams: (a) upstream dam, (b) downstream dam

1.3 生命损失风险评估

本文采用 Peng 和 Zhang 等 (2012a, b) 提出的

基于贝叶斯网络的生命损失风险评估模型-HURAM 开展梯级水坝下游区域生命损失风险评估。该模型结合洪水过程模拟与专家知识, 构建包含 8 个基础节点与 6 个中间节点的生命损失评估网络 (如图 6)。

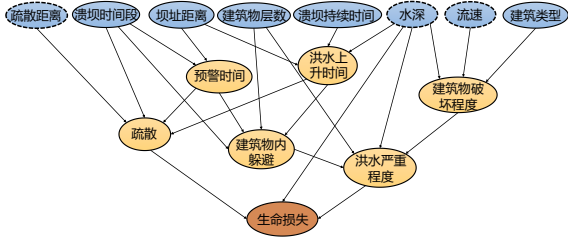


图 6 生命损失风险评估 HURAM 模型

Fig. 6 HURAM model for life loss risk assessment

在贝叶斯网络量化阶段, 针对基本节点 (无父节点连接), 采用历史灾害案例的统计资料进行频率估算, 或在数据不足时, 假设其服从合理的概率分布并通过专家赋权进行参数设定; 而对于中间节点 (由一个或多个父节点影响), 则需基于父节点的状态组合构建条件概率表, 如建筑物内避难节点, 假定可用时间大于需求时间, 则避难成功:

$$W_i + R_i > T_i + S_i \quad (5)$$

式中, W_i 为预警时间, R_i 为洪水上升时间, T_i 为预警传播时间, S_i 为居民反应时间, 同时考虑不同溃决时间段居民在楼层位置, 模拟不同组合情况下出现的概率大小, 实现节点量化。

HURAM 模型在确定每一时刻节点或变量的先验概率分布后, 可结合不同类型洪水模拟结果推导其后验概率分布。根据贝叶斯定理, 考虑包含 n 个随机变量 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 的贝叶斯网络, 其联合概率函数 θ_{ijk} 可表示为:

$$\theta_{ijk} = P(X_i = k | \pi(X_i) = j) \quad (6)$$

式中, i 的取值范围为 1 到 n , j 和 k 的取值范围分别为 1 到 q_i 和 1 到 r_i , 其中假设节点 X_i 有 r_i 个可能取值, 其父节点 $\pi(X_i)$ 的取值组合数为 q_i , 网络参数的似然函数 $L(\theta)$ 可表示为:

$$L(\theta|D) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \prod_{k=1}^{r_i} \theta_{ijk}^{m_{ijk}} \quad (7)$$

$$m_{ijk} = \sum_{l=1}^m \chi(i, j, k; D_l) \quad (8)$$

$$\chi(i, j, k, D_l) = \begin{cases} 1 & \text{if } X_i = k \text{ and } \pi(X_i) = j \\ 0 & \text{if not} \end{cases} \quad (9)$$

式中, θ 是由所有 θ_{ijk} 组成的向量, D 表示输入到贝叶斯网络中的一组独立同分布的数据, m_{ijk} 是满足 $X_i = k$ 且 $\pi(X_i) = j$ 的样本数量, m 是数据集 D 中的样本总数, χ 是样本 D_l 的特征函数。基于上述公式

可得后验概率分布:

$$p(\theta|D) \propto p(\theta) \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^{q_i} \prod_{k=1}^{r_i} \theta_{ijk}^{m_{ijk}} \quad (10)$$

1.4 最优预警疏散决策

梯级坝发生级联溃决灾害时, 下游区域将面临严重的生命安全威胁与经济损失。科学的确定预警疏散时间, 对于在保障人员安全与控制社会成本之间实现最优平衡, 具有重要意义。本文参考 Peng 和 Zhang (2013a, b) 针对堰塞坝灾害的应急疏散决策模型, 构建面向梯级坝级联溃决灾害的预警疏散决策框架。该框架引入预警时间与三类疏散损失之间的定量关联, 三类疏散损失分别包括:

(1) 基本疏散经济损失: 主要涵盖人员转移安置费用以及因预警响应而导致的区域经济活动损失, 其表达式如下:

$$C = C_i + C_{GDP} \\ = cP_{eva}(PAR)(W_i + 3) + \frac{GDP_p}{365}(PAR)(W_i + 4) \quad (11)$$

式中, C_i 人员疏散安置费用, C_{GDP} 商业损失, c 为每人每天消费, PAR 为区域安置人数, P_{eva} 疏散人口比例, W_i 预警时间, GDP_p 人均 GDP。

(2) 可移动财产损失: 鉴于部分资产在足够的时间内是可以进行转移的, 因此该部分损失与避难人数比例、安全区避难能力以及财产属性密切相关, 其表达式如下:

$$D = (1 - P_{eva})(1 - P_{safe})(PAR)\alpha(I - S)n \quad (12)$$

式中, P_{safe} 安全区内避难人数比例, α 可转移财产属性比例, I 人均年收入, S 人均年支出, n 为人均工作时间。

(3) 生命损失价值: 基于人力资本法估算, 表达式如下:

$$M_L = (GDP_p)L(LOL) \quad (13)$$

式中, L 为人平均寿命, LOL 死亡人数。

将上述三类损失价值相加, 获得疏散总损失与疏散时间的函数关系, 表达式如下:

$$E(L_i) = \int L(t)f(t)dt = \int_{t_0}^{+\infty} [C(W_i) + D(W_i) + L(W_i)]dt \quad (14)$$

通过总疏散损失与预警疏散时间之间的函数关系, 并将总损失达到最小值时所对应的预警时间确定为最优预警时间 (t_{op}), 如图 7 所示。

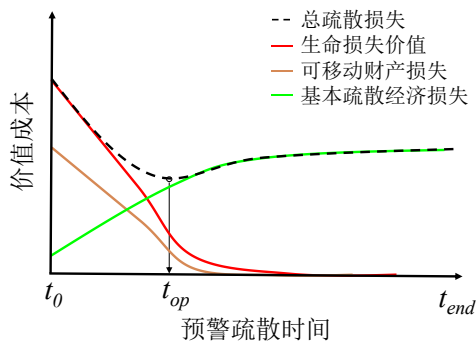


图 7 预警疏散时间与损失价值关系

Fig. 7 Relationship between warning evacuation time and loss value

2 清江流域梯级坝生命损失评估与预警决策

2.1 区域概况

清江是长江南岸的重要一级支流，流域整体地势呈西高东低，地貌以高山峡谷为主。清江干流全长约 432 km，流域面积约 1.67 万 km²，水资源储量丰富，已建成由水布垭、隔河岩、高坝洲三座水库组成的梯级坝水电工程，其主要工程参数详见表 2。

表 2 清江梯级坝体参数

Table 2 Parameters of cascade dams in the Qingjiang river

	坝高 (m)	坝长 (m)	水位 (m)	库容 (亿 m ³)	类型
水布垭	233	660	400	43.1	面板堆石坝
高坝洲	151	653	200	34.5	混凝土重力坝
隔河岩	57	419	80	4.3	重力拱坝

清江在宜都市汇入长江，三座坝体（水布垭、隔河岩、高坝洲）与宜都市距离依次为 149.9 km、20 km、12 km（图 8）。同时，宜都市位于清江与长江交汇区域的核心地段，常住人口约 35.83 万，人均地区生产总值（GDP）约 25 万元。城市发展高度依赖水资源的调控能力与安全保障水平，梯级坝一旦发生级联溃决，下游宜都市将面临严重威胁。基于此，本文假设清江流域遭遇千年一遇洪水并引发梯级坝级联溃决灾害（实际尚未发生），将所构建的方法框架应用于该流域，开展级联溃决灾害的生命损失风险评估与预警响应研究，旨在为梯级坝安全管理与灾害防控提供理论支撑与决策依据。



图 8 清江干流梯级水库及其影像图

Fig. 8 Cascade reservoirs along the mainstream of the Qingjiang river and their satellite images

2.2 级联溃决洪水模拟

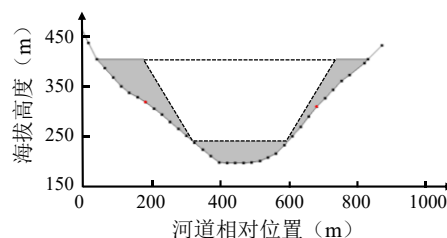
考虑各级坝体结构类型的差异，构建梯级坝级联溃决的洪水数值模型。清江干流梯级水库依次为面板堆石坝（上游水布垭）、混凝土重力坝（中游隔河岩）和小型重力拱坝（下游高坝洲）。针对水布垭面板堆石坝，采用回归参数法计算其溃口几何尺寸，参考式（1）；对于隔河岩重力坝，参考式（2），隔河岩水库大坝坝顶全长为 653.5 m，划分为 30 个坝段，其中第 11~18 号坝段位于大坝中部，为总长约 188 m 的溢流坝段。本研究选取该溢流坝段作为溃口区域，用以模拟可能的结构性破坏情景，设定垂向贯通破坏模式；高坝洲为小型重力拱坝，模拟中简化为整体溃决情形。通过系统设置不同坝型的溃口参数，构建更贴近实际工程结构的级联溃坝数值模型，各级坝体溃口参数如表 3 所示。

表 3 梯级坝溃口参数计算表

Table 3 Parameters of the breach models

溃口参数	H_b (m)	Q_p (m ³ /s)	B_t (m)	B_{ave} (m)	T_f (h)
水布垭	143	115930	696	584	3.5
隔河岩	151	289389	188	188	0.3
高坝洲	47	72816	410	200	0.05

采用 Google 地图提取清江流域梯级坝体沿河道断面的地形高程数据，并导入至 HEC-RAS 软件中，构建了洪水演进的基础地形模型。在此基础上，结合上述溃口参数计算结果，在模型中设定各坝体的溃口几何特征。如图 9 所示，数值模型充分反映了梯级坝溃决的空间结构特征。



(a)

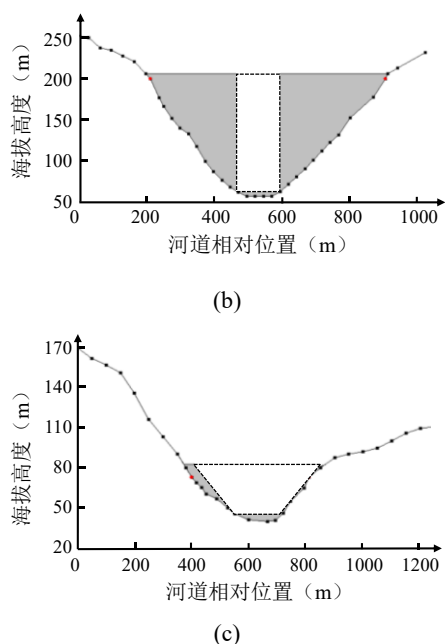


图9 梯级坝溃口示意图: (a) 水布垭, (b) 隔河岩, (c) 高坝洲

Fig. 9 Schematic diagram of cascade dam breaches: (a)

Shuibuya dam, (b) Geheyan dam, (c) Gaobazhou dam

梯级坝溃决灾害具有突发性强、传播迅速、干预难度大的特点，因此在模型构建过程中需兼顾计算效率与模拟精度。为满足不同精度需求及计算资源约束，本研究采用两种建模策略。首先，基于实测河道断面数据，选取典型代表断面，假设洪水沿河道单向传播，构建一维快速模拟模型，用于实现溃决过程的高效初步评估（图 10a）。其次，依托区域数字高程数据（DEM）重建全域地形，并结合地形起伏与水流多向扩散特征，构建二维精细水力模型，精确模拟洪水在复杂地形条件下的空间传播行为（图 10b）。

模型初始条件设定为坝前正常蓄水位，溃决触发机制采用漫顶溃决模式，即当水位超过坝顶高程时启动溃决过程。同时，边界条件根据大坝安全管理规范设置为千年一遇设计洪峰流量 $22000 \text{ m}^3/\text{s}$ 。针对不同地形与地表特性，设定不同区域曼宁糙率系数及溃决历时等参数，确保模型输入与实际地质条件相近。

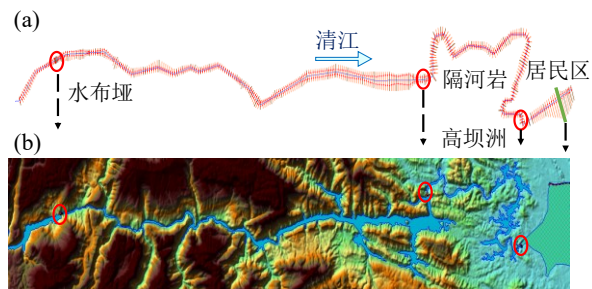


图10 数值模型: (a) 一维快速模型, (b) 二维精细化模型

Fig. 10 Numerical model:

(a) one-dimensional rapid simulation model, (b) two-dimensional high-resolution model

模拟结果表明，极端降雨诱发的梯级坝级联溃决将导致洪水在短时间内迅速向下游传播，对宜都市等人口密集区域构成严重威胁。如图 11 所示，在一维模型模拟下，自高坝洲水库溃决起约 11 h 后，洪水波峰抵达下游居民区核心位置，最大水位达 53.2 m，最大淹没深度为 6.2 m（图 11b），显示该区域面临较高洪涝风险。随着洪水逐步汇入长江，区域水位明显回落（图 11c），但局部地势低洼区仍存在滞水风险，需引起防洪排涝重视。

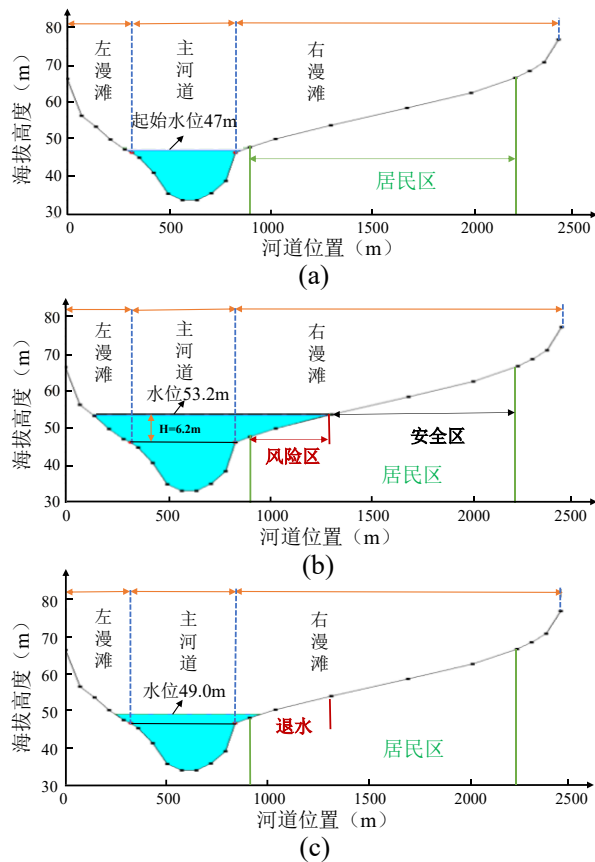


图11 一维模型下级联溃决洪水淹没区演进过程: (a) 高坝洲溃决前水位分布, (b) 高坝洲溃决 11 h 后下游淹没阶段, (c) 高坝洲溃决 40 h 退水阶段

Fig. 11 Evolution of flood inundation area under one-dimensional model of cascade failure: (a) water level distribution before the failure of Gaobazhou Dam, (b) inundation stage in the downstream area 11 h after the failure of Gaobazhou Dam, (c) recession stage 40 h after the failure of Gaobazhou Dam

二维模型集成了高精度地形数据，能够动态模拟洪水在复杂地形中的多向扩散过程，精准捕捉淹没深度、流速分布及人员疏散路径。图 12 显示，该模型不仅揭示了主要河道的洪水演进，还反映了低

洼地带洪水滞留及城市建成区洪水蔓延路径，有助于识别潜在高风险区域。由于多向水流与地形约束，二维模型在相同时刻的洪水淹没深度低于一维模型，且泄流阶段洪水持续时间更长（图 12b, c）。

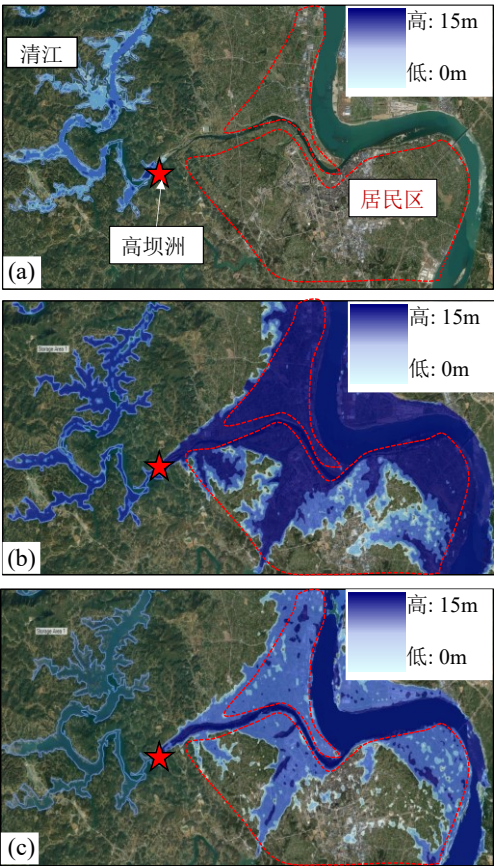


图 12 二维模型下级联溃决洪水淹没区演进过程：(a) 高坝洲溃决前水位分布, (b) 高坝洲溃决 11h 后下游淹没阶段, (c) 高坝洲溃决 40 h 后退水阶段

Fig. 12 Evolution of flood inundation area under two-dimensional model of cascade failure: (a) water level distribution before the failure of Gaobazhou Dam, (b) inundation stage in the downstream area 11 h after the failure of Gaobazhou Dam, (c) recession stage 40 h after the failure of Gaobazhou Dam

2.3 生命损失风险评估

2.3.1 一维模型生命损失评估

一维洪水模拟基于典型河道断面构建。为实现对下游区域生命损失风险的快速量化评估，假设分析区域内人口分布均匀，选取宜都市城镇中心具有代表性的断面作为分析对象（如图 13）。基于洪水演进的致灾参数（水深、平均流速、疏散距离），采用 HURAM 生命损失风险评估模型（如图 6）划定下游宜都市潜在的洪水风险区。

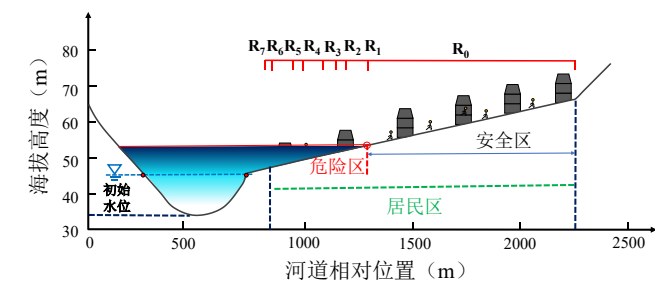


图 13 一维模型城镇中心典型河道断面简化图
Fig. 13 Simplified cross-section of a typical river channel at the town center in the one-dimensional model

依据水深与疏散距离的不同组合，将居民区域划分为 $R_0 - R_7$ 共八个风险等级区间（如表 4），作为贝叶斯网络模型的输入，用以不同风险区间对应生命损失率的定量评估。其中， R_0 表示未受洪水影响的安全区。

表 4 级联溃决洪水危险区间划分

Table 4 Classification of hazard zones for cascade failure floods

区间	水深 (m)	疏散距离 (m)
R_0	0	0
R_1	0 - 1.0	0 - 100
R_2	1.0 - 1.5	100 - 153
R_3	1.5 - 3.0	153 - 311
R_4	3.0 - 4.5	311 - 462
R_5	4.5 - 4.8	462 - 500
R_6	4.8 - 6.0	500 - 631
R_7	>6.0	>631

考虑人口分布均匀，区域内每一风险区段的人口数量（ PAR ）可按居住面积估计，公式如下：

$$PAR_i = \frac{SA_i}{A} \times P_{all} \tag{15}$$

式中， SA_i 为第 i 区域面积， A 为居住区总面积， P_{all} 为居住区总人口。宜都市人口分布详见表 5。

基于现有 Hugin 软件构建的可视化 HURAM 模型，在保持网络结构稳定的前提下，结合洪水数值模拟结果，对关键输入变量的先验概率分布进行更新。网络输入节点涵盖多个关键参数，包括溃坝发生时间（8:00 - 17:00）、坝体至居民区的距离（4.18 - 12 km）、建筑层数（3 层）、洪水持续时间（3 - 9 h）、洪水流速（1 - 2 m/s）及建筑材料类型（砖块、混凝土）；也包含洪水深度和疏散距离可变参数。通过对上述节点的概率分布进行更新，实现了不同危险等级下生命损失率的量化估算。基于更新后的概率输入，进一步开展各条件组合下的生命损失风险系统分析（如图 14 所示），并汇总不同洪水风险区间的生命损失率，得到总体风险水平分布（见表 5）。

结果表明，在模拟的级联溃决灾害中，区域累计生命损失人数为 169 人。随着风险等级从 R_0 至 R_7 逐级升高，灾害严重程度显著增加。其中， R_6 区域的生命损失率最高，占总死亡人数的 44.3%。由于该区域洪水淹没深度大、疏散距离远、人口基数大，造成较高的生命损失风险。当疏散距离小于 300 m、洪水深度低于 3 m 时 (R_3)，人员死亡率

均为 0。在此类区域，建筑结构可起到一定的屏障与缓冲作用，同时人员具备较强的自主避险能力，整体生命损失率趋近于零。上述结果凸显了对高风险区域（尤其是 R_5 - R_7 区间）实施重点管控与提前疏散的重要性，同时也验证了在低水深、短距离区间采取就地避险措施的可行性与有效性。

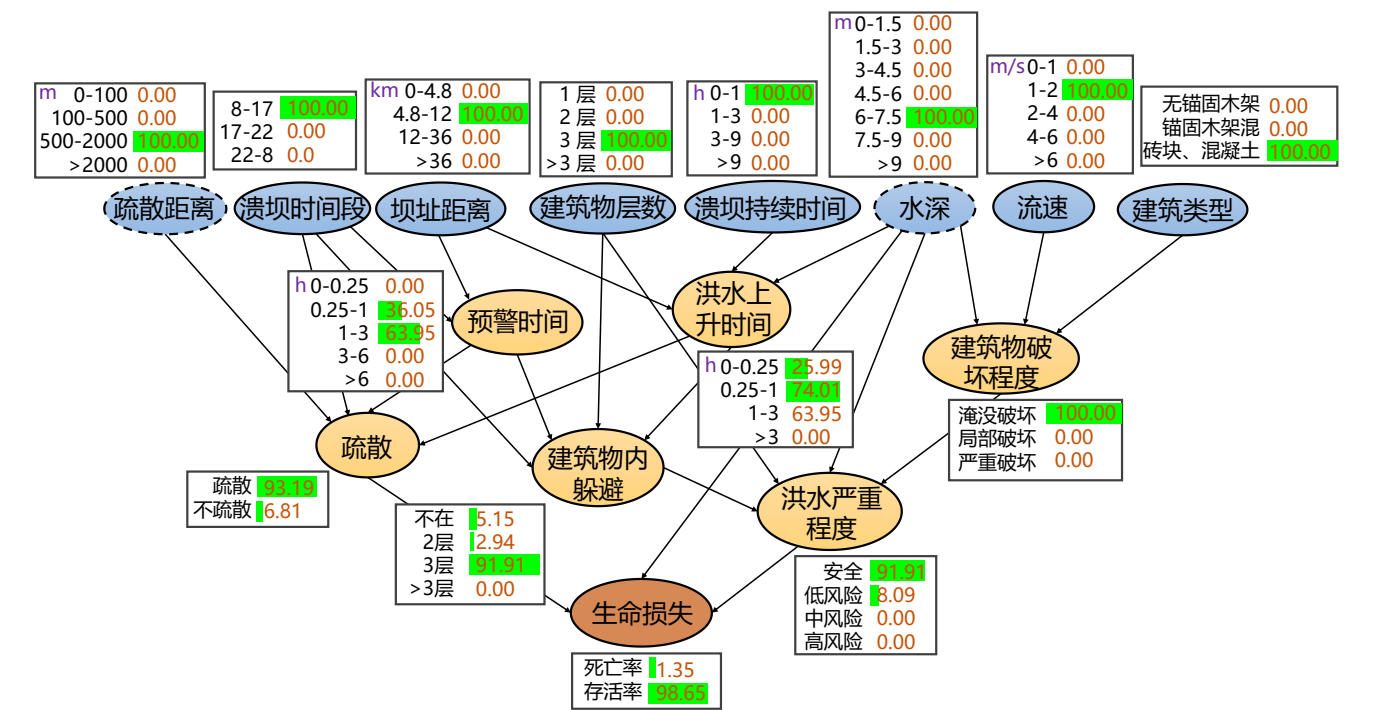


图 14 一维模型下危险区 R_7 生命损失率评估示意图

Fig. 14 Schematic diagram of fatality rate assessment in high-risk zone R_7 under one-dimensional model

表 5 洪水风险区间生命损失率

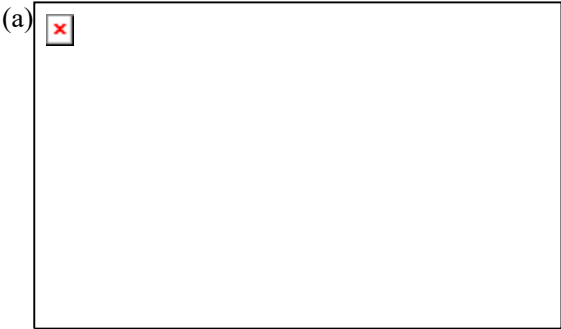
Table 5 Fatality rates in flood risk zones

区域	R_0	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	总计
人口数	202965	23935	12781	37721	36141	9095	31354	4308	35.83 万
损失/%	0	0	0	0	0.06	0.15	0.24	1.35	-
死亡人数	0	0	0	0	22	14	75	58	169

2.3.2 二维模型生命损失评估

在高精度地形高程数据的基础上构建的二维模型，充分考虑了洪水流速的空间不确定性，有效突破了一维模型以城市中心河道为简化断面的假设，更真实地反映了区域地形起伏的差异。该模型继续采用 HURAM 生命损失评估框架，并设定多个确定性输入参数，包括溃坝发生时间 (8:00 - 17:00)、坝体至居民区的距离 (4.18 - 12 km)、建筑层数 (3 层)、洪水持续时间 (3 - 9 h)、洪水流速 (1 - 2 m/s) 以及建筑材料类型 (砖块、混凝土)。基于二维级联溃坝洪水模拟，提取并统计了三项关键水力特征参数 (水深、疏散距离与流速) 在各淹没区间的空间分布情况。如图 15 所示，大部分区域的水深集中在

1.5 - 4.5 m 之间，最大疏散距离小于 2000 m，洪水流速主要分布在 1 - 4 m/s 范围内。与一维模型相比，二维模型未将流速简化为平均值，而是考虑水力参数波动性，从而更准确刻画洪水传播过程中的空间变换。



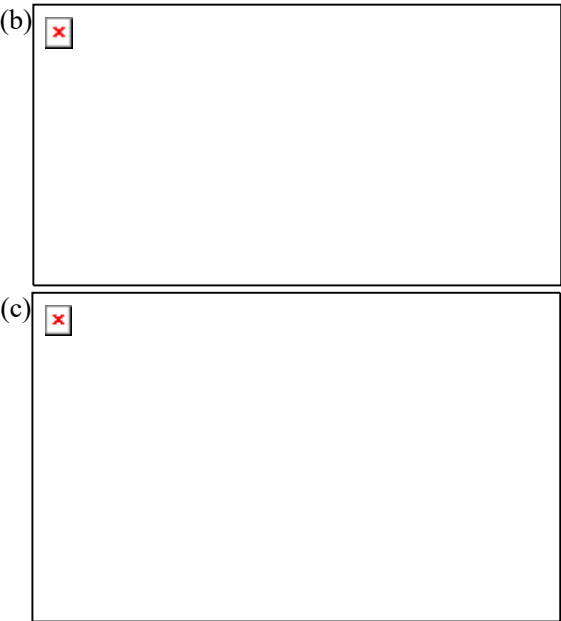


图 15 淹没区的洪水特征参数占比: (a) 水深, (b) 疏散距离, (c) 流速

Fig. 15 Distribution proportions of key hydraulic parameters in inundated zones: (a) water depth; (b) evacuation distance; (c) flow velocity.

基于二维模型洪水模拟所获取的关键水力特征参数, 本文将结果输入 HURAM 生命损失评估模型, 开展区域尺度下的生命损失率定量分析。评估结果表明, 在二维模拟条件下, 区域平均生命损失率约为 0.1% (如图 16)。高风险区域占总居住面积的 48.8%, 结合人口密度与分布特征, 估算受影响人口约为 17.8 万人, 预期死亡人数约为 178 人。相较于一维模型, 二维模型在地形与水流路径刻画方面更为精细, 能够动态反映洪水在不同地貌单元中的扩散特征。因此, 所评估的生命损失风险水平相对较高, 整体增幅约为 5.3%。研究表明, 在地形复杂区域, 仅依赖一维模型可能低估洪水对下游居民的实际威胁, 难以准确反映潜在灾害风险。

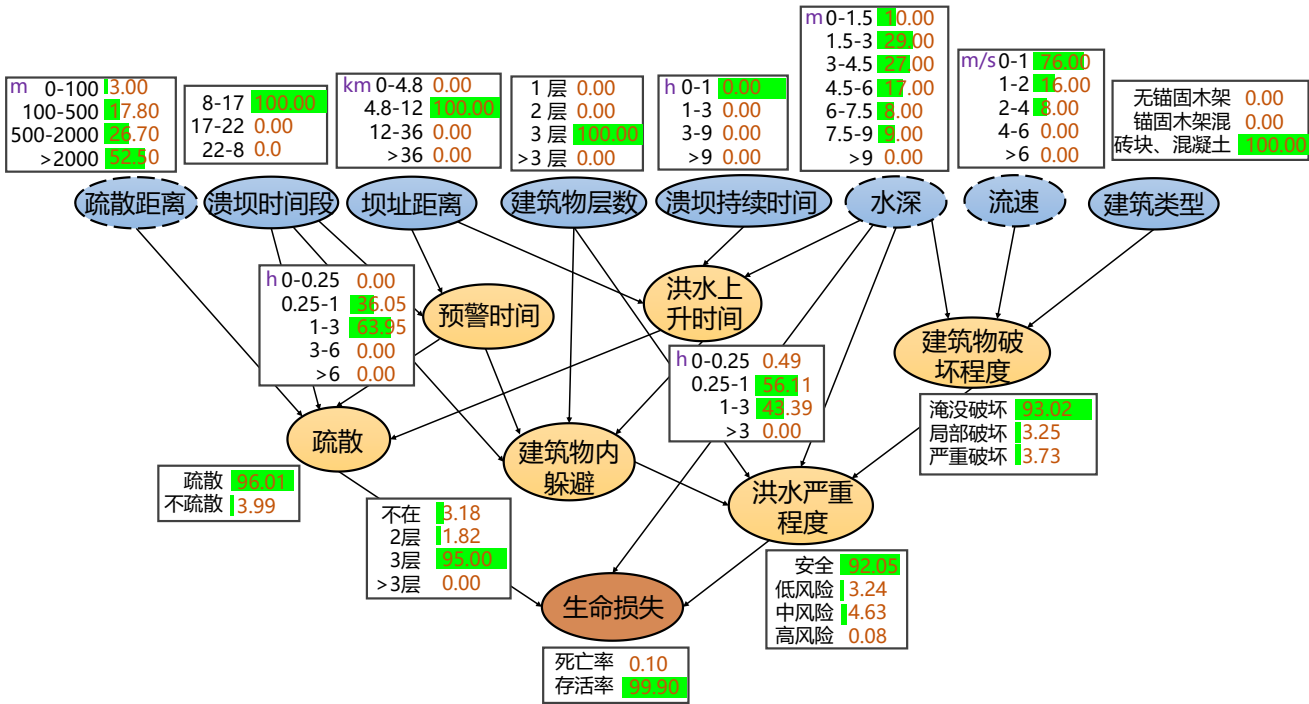


图 16 二维模型下危险区生命损失率评估示意图

Fig. 16 Estimated fatality rates in high-risk zones based on the two-dimensional model

2.4 最优预警决策

本研究假设清江流域遭遇千年一遇洪水并发生梯级坝级联溃决灾害, 基于二维精细化数值模拟结果, 开展最优预警时间的决策分析。通过量化不同预警时间对应的生命损失率 (图 16), 并结合区域经济数据估算生命价值与各疏散成本, 设定疏散时间以每小时为间隔, 计算结果如表 6 所示, 当预警时间为 $t = 0$ (即无提前预警) 时, 洪水突袭导致人员伤亡剧增, 生命损失对应的货币价值占总损失的

98.5%, 成为主要损失来源。随着预警时间延长, 人员伤亡显著减少, 生命损失价值与直接财产损失同步下降, 而疏散安置成本则相应上升。当预警时间超过 5 h 后, 居民基本完成有效撤离, 生命损失趋近于零, 此时总损失主要由疏散与安置相关费用构成。

表 6 预警时间与损失价值关系表

Table 6 Relationship between warning time and loss value				
时间	基本疏散	生命损失	可移动损失	总疏散

(h)	(百万)	(百万)	(百万)	(百万)
0.0	379.0	133119	1932	135430
1.0	570.0	28787	603	29960
2.0	690.7	4002	100	4792.7
3.0	807.6	60	10	877.6
4.0	924.5	6	2	932.5
5.0	1041.4	0	0	1041.4
6.0	1158.3	0	0	1158.3
7.0	1275.2	0	0	1275.2
8.0	1392.1	0	0	1392.1
9.0	1509.0	0	0	1509.0
10	1625.9	0	0	1625.9

在高坝洲坝体溃决前启动预警，可为下游居民争取宝贵的响应时间，有效降低灾害带来的人员伤亡与财产损失。评估结果表明，预警时间与总损失之间存在显著的非线性关系（如图 17），其中生命损失对预警时间最为敏感，且呈现出最陡峭的变化趋势。这主要归因于级联溃决过程中洪水放大效应，极大扩大了灾害波及范围，尤其提升了下游人口的风险水平。图 17 中的曲线显示，随着预警时间的延长，生命损失价值和可移动财产损失迅速下降，并在约 5 h 后趋于平稳，几乎降至零；与此同时，基本疏散经济损失则呈线性增长。总疏散损失曲线呈现“先降后升”的特征，表明存在一个最优预警时间窗口。当在高坝洲坝体溃决前约 3.4 h 启动下游预警与疏散措施时，能够实现总损失最小化，对应经济损失约为 8.70 亿元。

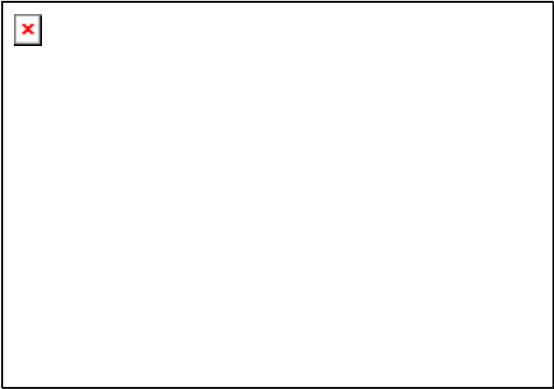


图 17 预警时间-价值成本曲线

Fig. 17 Warning time vs cost-value curve

3 讨论

3.1 梯级坝级联溃决洪水特征评估

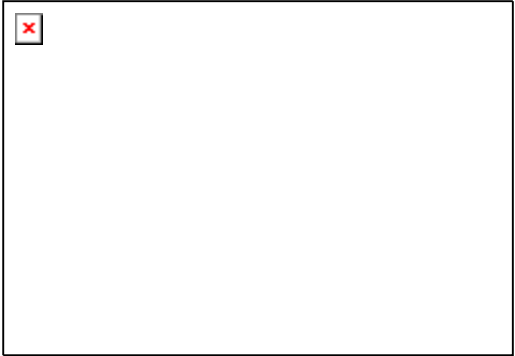
相比单一坝体溃决，梯级坝级联溃决所引发的洪水灾害风险更为显著，其核心机制在于洪水能量和水量在溃决下泄过程中叠加，形成明显的放大。随着上游坝体溃决洪水依次传递，下游坝体所承受

的洪峰流量大幅提升，远高于单一坝体溃决情形。以二维模型模拟结果为例，隔河岩水库在级联溃决条件下的洪峰流量较单一坝体溃决提升约 8.29%，而高坝洲水库的增幅更高达 47.05%（如表 7）。

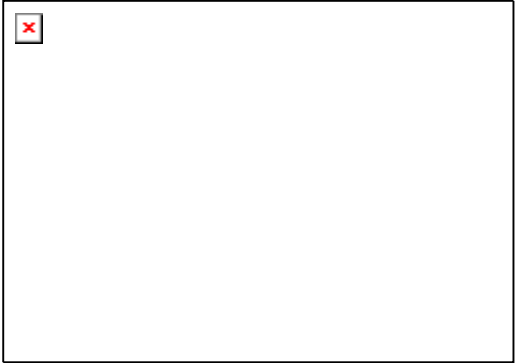
表 7 梯级坝峰值流量对比

Table 7 Comparison of peak discharge among cascade dams			
类型	模拟值 (m³/s)	计算值 (m³/s)	放大效应 (%)
水布垭	145590	115930	-
隔河岩	313385	289389	8.29
高坝洲	107079	72816	47.05

然而，值得注意的是，在所有下游坝体中洪峰流量的放大趋势并非均保持一致，其变化特征受区域地形地貌与坝体结构形式的共同影响（如图 18）。本研究中，尽管隔河岩坝址洪峰流量达到 313385 m³/s，其下游高坝洲水库的洪峰流量仅为 107079 m³/s，明显低于上游。该现象主要归因于高坝洲坝址区域特殊的地形约束：坝体两侧地形显著抬高，溃口呈现“U”型结构，形成明显的横向束流效应。在上游洪水迅速涌入时，地貌与坝体几何形态共同形成“瓶颈效应”，限制了洪水的横向扩散与下泄速度。尽管局部水位明显抬升，坝体溃决过程中的洪峰流量反而受到抑制。由此可见，梯级坝级联溃决的洪水演进过程不仅取决于上游洪水量的放大效应，更受制于下游地形与坝体结构约束。



(a)



(b)



(c)

图 18 梯级坝溃口峰值流量分布图: (a) 水布垭, (b) 隔河岩, (c) 高坝洲

Fig. 18 Distribution of peak discharges at cascade dam breaches:

(a) Shuibuya dam, (b) Geheyan dam, (c) Gaobazhou dam

3.2 生命损失影响参数的敏感性分析

系统评估疏散距离、水深和流速三项致灾参数对生命损失率的影响。研究结果表明,生命损失率对这三类参数表现出明显的非线性响应特征。随着洪水水深(图 19a)、疏散距离(图 19b)及流速(图 19c)的增加,生命损失率呈现“先缓慢上升、后快速增长”的趋势。尤其在超过某一临界阈值后,损失率急剧攀升。这种非线性关系说明,在高水深和远距离疏散等高危情境中,即便参数略有波动,也可能显著加剧人员伤亡。此外,一维模型通常以河道中轴断面作为计算基础,采用平均流速简化洪水传播过程,难以反映实际地形下洪水流动的空间变化,尤其忽略了局部高风险区域的强化效应。相比之下,二维模型能够更精准地捕捉复杂地形条件下的水动力变化,显著提升对高风险区域的识别能力与生命损失评估的可靠性。

如图 19 可知,在三项敏感参数中,水深对区域生命损失率的影响最为显著,其次为疏散距离,流速影响相对较小。水深的增加不仅延长了人员暴露时间,还直接削弱个体的逃生能力,显著提高致死概率。因此,在生命损失评估模型构建和预警疏散策略制定中,应重点考虑水深的致灾影响,强化其监测与管理,以最大程度降低灾害带来的人员伤亡风险。

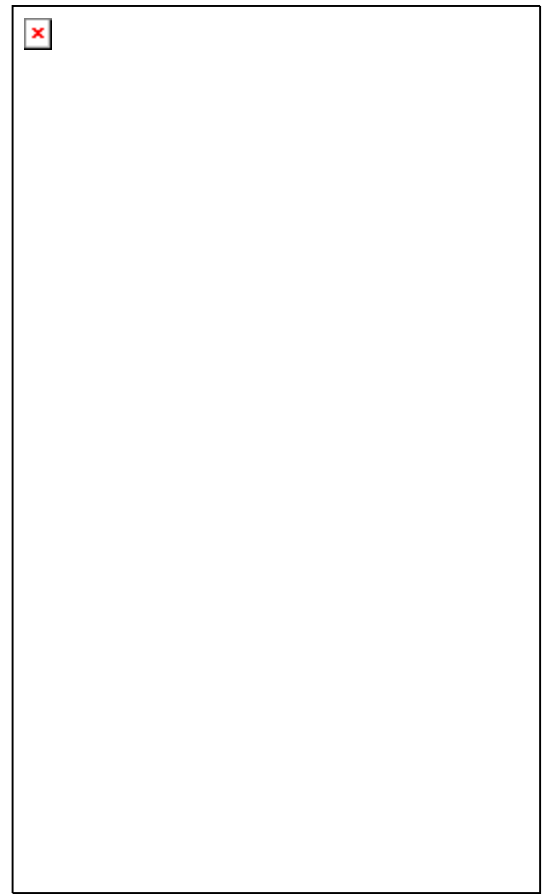


图 19 洪水特征对生命损失的敏感图: (a) 洪水深度, (b) 疏散距离, (c) 洪水流速

Fig. 19 Sensitivity of life loss to flood characteristics: (a) flood depth, (b) evacuation distance, (c) flood velocity

为进一步探讨时间因素对生命损失的影响,本文分析了在不同溃坝持续时间和预警时间条件下生命损失率的变化(图 20)。结果表明,两者均与生命损失率呈负相关。随着溃坝持续时间和预警时间增加,人员疏散成功率提高,生命损失显著减少。其中,预警时间影响尤为突出,超过 6 h 后,生命损失率趋近于 0,表明及时预警对减灾至关重要。

相较于时间变量,洪水特征参数对生命损失率的影响也表现出显著差异性。结果显示,洪水深度的敏感性最为显著。造成该现象的原因可能在于:在贝叶斯网络结构中,水深作为关键输入参数,影响了多个下游节点(如人员暴露程度、建筑物破坏水平、疏散成功概率等),因而在模型中对生命损失的传导路径更长、影响程度更大。

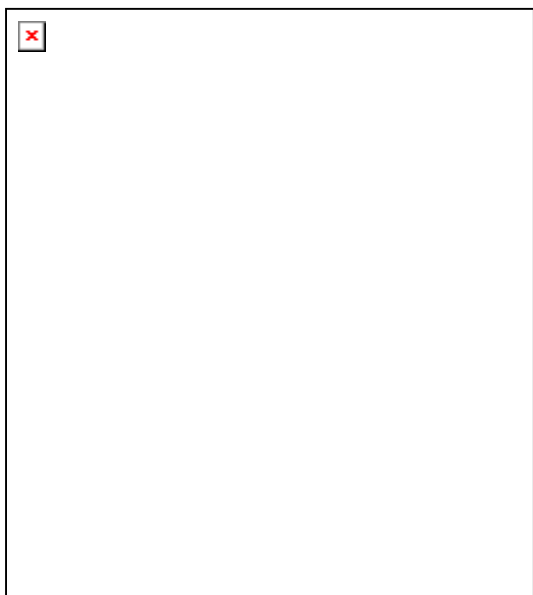


图 20 不同时间对生命损失的敏感图: (a) 溃坝持续时间, (b) 预警时间

Fig. 20 Sensitivity of life loss to different time factors: (a) dam breach duration, (b) warning time

3.3 研究不足与展望

本文提出的“洪水演进模拟-生命损失评估-预警决策”一体化分析框架,提升了复杂灾害链建模的系统性与决策支持的科学性。但仍存在一些不足:首先,研究基于假设情景,缺乏真实工程案例支持,坝体参数和溃口模型采用单一溃坝经验公式存在简化,与实际溃坝过程中的复杂变化仍有差距。其次,生命损失评估中假设人口沿河道均匀分布,未能反映实际人口集中分布在河岸附近的特征,可能影响评估精度。此外,经济损失评估主要聚焦于直接损失,尚未考虑洪水持续时间、基础设施中断等间接损失因素,预警策略优化也未覆盖灾后恢复等内容。

未来研究可结合典型工程案例验证模拟结果,引入耦合水动力-泥沙模型或基于物理机制修正的溃口演化模型,利用人口调查或遥感数据构建更真实的人口分布模型,并引入自适应投入产出模型评估间接损失。同时,可参考如 2020 年美国伊登维尔级联溃坝事件等案例,进一步验证和完善所提方法框架,提升其实用性与推广价值。

4 结论

本研究构建了融合“洪水演进模拟-生命损失评估-预警决策”的分析框架,针对假设条件下清江流域可能发生的梯级坝级联溃决灾害,系统分析了洪水传播过程与生命损失风险影响规律。主要结论如下:

(1) 构建了融合“洪水演进模拟-生命损失评估-预警策略优化”分析框架,系统整合了级联溃坝演化、生命风险与应急响应机制。研究在单一坝体风险模型的基础上,引入多类型坝体的级联溃决模拟,通过一维与二维洪水演进模型,分析洪水演进及其导致的生命损失风险规律。同时,结合疏散时间与经济成本权衡,提出最优预警启动时机,为梯级坝级联溃决下的风险评估与预警决策提供理论支撑。

(2) 揭示了梯级坝级联溃决过程洪水放大效应。数值模拟结果显示,隔河岩水库在级联溃坝条件下的洪峰流量较单一坝体溃决提升约 8.29%,而高坝洲水库的增幅更高达 47.05%,随着上游坝体溃决洪水依次传递,下游坝体所承受的洪峰流量大幅提升,远高于单一坝体溃决情形。

(3) 区域地形与坝体结构对级联溃决洪水存在约束作用。在所有下游坝体中洪峰流量的放大趋势并非均保持一致,当隔河岩坝址洪峰流量达到 $313385 \text{ m}^3/\text{s}$,其下游高坝洲水库的洪峰流量仅为 $107079 \text{ m}^3/\text{s}$,受上游坝体结构与“U”型河谷地形地貌特征影响,坝前水位提升而溃决洪水流量减弱,对洪水存在一定削峰作用。

(4) 洪水特征参数与时间变量对生命损失风险存在非线性影响。二维模型在充分考虑地形起伏和人口分布差异的基础上,相较一维模型将高风险区域识别精度显著提升,导致生命损失估值整体上升约 5.3%。敏感性分析表明,水深、疏散距离和洪水流速,三者均呈现明显的非线性响应特征,溃坝持续时间与预警时间对生命损失的负反馈,水深对生命损失的传导路径更长、影响程度更大。

(5) 在假设的梯级坝级联溃决情景中,科学合理地设定预警时间可显著降低总体灾害损失。若未实施预警与组织疏散,生命损失将占总损失的绝对主导(约 98.5%)。随着预警时间延长,人员伤亡显著减少,生命损失价值与直接财产损失同步下降,而疏散安置成本则相应上升。总体损失呈“先降后升”趋势,存在“最优预警时间”使总损失最小。当高坝洲溃坝前约 3.4 h 启动预警疏散,可实现总经济损失最小化,约为 8.70 亿元。

References

- Zhou,Y.,Guo,S.,Chang,F.J.,et al.,2018.Methodology that Improves Water Utilization and Hydropower Generation without Increasing Flood Risk in Mega Cascade Reservoirs.*Energy*,143:785-796.
doi:10.1016/j.energy.2017.11.035

- Mehta,A.M.,Weeks,C.S.,Tyquin,E.,2020.Towards Preparedness for Dam Failure: An Evidence Base for Risk Communication for Downstream Communities.*International Journal of Disaster Risk Reduction*,50: 101820. doi: 10.1016/j.ijdr.2020.101820
- Wang,T.,Li,Z.,Ge,W.,et al.,2022.Calculation of Dam Risk Probability of Cascade Reservoirs Considering Risk Transmission and Superposition.*Journal of Hydrology*, 609: 127768. doi:10.1016/j.jhydrol.2022.127768
- Wang,T.,Li,Z.,Ge,W.,et al.,2023.Risk Consequence Assessment of Dam Breach in Cascade Reservoirs Considering Risk Transmission and Superposition.*Energy*,265:126315. doi:10.1016/j.energy.2022.126315
- Niu,Z.,Xu,W.,Li,N.,et al.,2012.Experimental Investigation of the Failure of Cascade Landslide Dams.*Journal of Hydrodynamics*,24(3):430-441. doi:10.1016/S1001-6058(11)60264-3
- Chen,H.Y.,Xu,W.L.,Deng,J,et al.,2014.Experimental Investigation of Pressure Load Exerted on A Downstream Dam by Dam-Break Flow.*Journal of Hydraulic Engineering*,140(2):199-207. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000743
- Takayama,S.,Fujimoto,M.,Satofuka,Y.,2021.Amplification of Flood Discharge Caused by the Cascading Failure of Landslide Dams.*International Journal of Sediment Research*,36(3):430-438. doi:10.1016/j.ijsrc.2020.10.007
- Wu,W.,2016.Introduction to DLBreach-A Simplified Physically-based Dam/Levee Breach Model.Clarkson University, NY.
- Dai,S.,He,Y.,Yang,J.,et al.,2020.Numerical Study of Cascading Dam-break Characteristics Using SWEs and RANS.*Water Supply*,20(1):348-360. doi:10.2166/ws.2019.168
- Santa Rita,L.C.S.,Oliveira,A.N.,Almeida,A.Q.,et al.,2023.Dam Safety in Sergipe: Jacarecica I and Jacarecica II hypothetical Cascade Dam-break Simulation.*RBRH*,28:e32. doi:10.1590/2318-0331.282320230041
- Ge,W.,Wang,X.,Li,Z.,et al.,2021.Interval Analysis of the Loss of Life Caused by Dam Failure.*Journal of Water Resources Planning and Management*,147(1):04020098. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001311
- Jonkman,S.,Penning-Rowse,E.,2008.Human Instability in Flood Flows.*JAWRA Journal of the American Water Resources Association*,44(5):1208-18. doi:10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x
- Peng,M.,Zhang,L.M.,2012a.Analysis of Human Risks Due to Dam-break Floods-part 1: A New Model Based on Bayesian Networks.*Natural Hazards*,64(1):903-33. doi:10.1007/s11069-012-0275-5
- Brazdova,M.,Riha,J.,2014.A Simple Model for the Estimation of the Number of Fatalities Due to Floods in Central Europe.*Natural Hazards and Earth System Sciences*,14(7),1663-1676. doi:10.5194/nhess-14-1663-2014
- Zhu,Y.,Peng,M.,Zhang,P.,et al.,2021.Warning Decision-making for Landslide Dam Breaching Flood Using Influence Diagrams.*Frontiers in Earth Science*,9:679862. doi:10.3389/feart.2021.679862
- Xu,Y.,Zhang,L.M.,2009.Breaching Parameters for Earth and Rockfill Dams.*Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,135(12):1957-1970. doi:10.1007/s10346-011-0271-y
- Syafri,R.R.,Hadi,M.P.,Suprayogi,S.,2020.Hydrodynamic Modelling of Juwana River Flooding Using HEC-RAS 2D.Conference Series:Earth and Environmental Science. IOP Publishing,412(1):012028.
- Zheng,H.C.,Shi,Z.M.,Peng,M.,et al.,2022.Amplification Effect of Cascading Breach Discharge of Landslide Dams.*Landslides*,19(3):573-587. doi:10.1007/s10346-021-01816-0
- Peng,M.,Zhang,L.,2012b.Analysis of Human Risks Due to Dam Break Floods-part 2: Application to Tangjiashan Landslide Dam Failure.*Natural hazards*,64:1899-923. doi:10.1007/s11069-012-0336-9
- Peng,M.,Zhang,L.,2013.Dynamic Decision Making for Dam-break Emergency Management-Part 1: Theoretical Framework.*Natural Hazards and Earth System Sciences*,13(2):425-37. doi:10.5194/nhess-13-425-2013
- Peng,M.,Zhang,L.,2013.Dynamic Decision Making for Dam-break Emergency Management-Part 2: Application to Tangjiashan Landslide Dam Failure.*Natural Hazards and Earth System Sciences*,13(2):439-54. doi:10.5194/nhess-13-439-2013

附中文参考文献

- 周洪福, 聂德新, 王春山, 2015.水电工程坝基玄武岩体波速与变形模量关系.地球科学(中国地质大学学报), 40(11):1904-1912.
- Zhou,H.F.,Nie,D.X.,Wang,C.S.,2015, Correlation between Wave Velocity and Deformation Modulus of Basalt Masses as Dam Foundation in Hydropower Projects.*Earth*

- Science(Journal of China University of Geosciences)*,40(11):1904-1912(in Chinese with English abstract).
- 刘家宏, 周晋军, 王浩, 2023.梯级水电枢纽群巨灾风险分析与防控研究综述.水利学报, 54(1):34-44.
- Liu,J.H.,Zhou,J.J.,Wang,H.,2023.Review on catastrophe risk analysis and mitigation of cascade hydropower complexes.*Journal of Hydraulic Engineering*,54(1):34-44(in Chinese).
- 于子波, 向衍, 孟颖, 等, 2021.梯级水库连溃风险分析及洪水演进模拟.人民珠江, 42(8):11-16.
- Yu,Z.B.,Xiang,Y.,Meng,Y.,et al.,2021.Risk Analysis of Sequential Dam Break of Cascade Reservoirs and Simulation of Flood Routing.*Pearl River*,42(8):11-16(in Chinese).
- 崔鹏, 王姣, 王昊, 等, 2022.如何科学防控与预警巨灾风险? .地球科学, 47(10):3897-3899.
- Cui,P.,Wang,J.,Wang,H.,et al.,2022.How to Scientifically Prevent Manage and Prewarn Catastrophic Risk?.*Earth Science*, 47(10):3897-3899(in Chinese with English abstract).
- 王建中, 孙万光, 李晓军, 等, 2025.梯级水库心墙坝连溃过程数值模拟.中国农村水利水电, (04): 7-13.
- Wang,J.Z.,Sun,W.H.,Li,X.J.,et al.,2025. Numerical Simulation of the Successive Breach Process of the Core Wall Dam in Cascade Reservoirs.*China Rural Water and Hydropower*, (04): 7-13(in Chinese).
- 杨泽文, 吴兵兵, 刘维明, 等, 2025.高能溃决洪水侵蚀机理与地貌效应研究进展.地球科学, 50(02): 718-736.
- Yang,Z.W.,Wu,B.B.,Liu,W.N.,et al.,2025.Progress in Erosion Mechanism and Geomorphological Effects of High-Energy Outburst Floods.*Earth Science*,50(02):718-736(in Chinese with English abstract).
- 许唯临, 2013.梯级库群的连锁溃决.中国水利水电出版社, 01.
- Xu,W.L.,2013.Cascading Failure of Cascade Reservoirs.*China Water&Power Press*,01(in Chinese).
- 周兴波, 陈祖煜, 黄跃飞, 等, 2015.特高坝及梯级水库群设计安全标准研究III: 梯级土石坝连溃风险分析.水利学报, 46(07):765-772.
- Wang,X.B.,Chen,Z.Y.,Huang,Y.F.,et al.,2015. Evaluations on the Safety Design Standards for Dams with Extra Height or Cascade Impacts.Part III:Risk Analysis of Embankment Break in Cascade.*Journal of Hydraulic Engineering*,46(07):765-772(in Chinese).
- 郭新蕾, 周兴波, 夏庆福, 等, 2017.梯级水库群控制梯级极端工况泄洪安全分析.水利学报, 48(10):1157-1166.
- Guo,X.L.,Zhou,X.P.,Xia,Q.F.,et al.,2017.Safety Analysis of Flood Discharge Structures of the Control Cascade Reservoir under Extreme Operating Condition.*Journal of Hydraulic Engineering*,48(10):1157-1166(in Chinese).
- 王霞, 郑雄伟, 陈志刚, 2009.某梯级水库溃坝应急分析.水利规划与设计, (01):52-53+70.
- Wang,X.,Zhen,X.W.,Chen,Z.G.,2009.Emergency Analysis of Dam Failure in A Cascade Reservoir System.*Water Resources Planning and Design*, (01):52-53+70(in Chinese).
- 马黎, 田耘, 陈灵淳, 等, 2024.梯级水库群溃坝洪水风险分析—以澜沧江上游为例.河南科学, 42(02):157-164.
- Ma,L.,Tian,G.,Chen,L.C.,et al.,2024.Dam-break Flood Risk for Cascade Reservoirs:A Case Study of the Upper Lancangjiang River.*Henan Science*, 42(02):157-164(in Chinese).
- 孟颖, 唐玲玲, 2022.考虑致灾后果的溃坝洪水风险评估与等级划分.长江科学院院报, 39(10):61-65+96.
- Meng,Y.,Tang,L.L.,2022. Risk Assessment and Rating of Dam-break Flood in Consideration of Disaster Consequences.*Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*,39(10): 61-65+96(in Chinese).
- 胡良明, 张志飞, 李仟, 等, 2018.梯级水库土石坝连溃模拟及风险分析.水力发电学报, 37(07):65-73.
- Hu,L.M.,Zhang,Z.F.,Li,Q.,et al.,2018.Sequential Dam Break Simulation and Risk Analysis of Earth-rock Dams of Cascade Reservoirs.*Journal of Hydroelectric Engineering*,37(07): 65-73(in Chinese).
- 杨彦龙, 沈海尧, 黄维, 2022.混凝土坝破坏模式及溃口几何参数探讨.大坝与安全, (03):1-9.
- Yang,Y.L.,Shen,H.Y.,Huang,W.,2022.Discussion on Failure Modes of Concrete Dams and Geometric Parameters of Dam Break.*Dam & Safety*, (03):1-9(in Chinese).
- 李雷, 王仁钟, 盛金保, 等, 2006.大坝风险评价与风险管理.中国水利水电出版社, 192.
- Li,L.,Wang,R.Z.,Sheng,J.B.,et al.,2006.Dam Risk Assessment and Risk Management. *China Water&Power Press*,192(in Chinese).

作者贡献

彭铭: 方法提出、监督指导、审阅与编辑、资金支持;

季思同: 方法提出、数值计算、论文撰写与修改;

孙蕊: 方法提出、监督指导、审阅与编辑;

朱艳: 监督指导;

杨鸽：审阅与编辑；
曹子君：审阅与编辑；
白泽文：审阅与编辑。