

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.148>



考虑时变水位的堰塞坝上游淹没经济损失分析：以唐家山堰塞坝为例

李 博^{1,2}, 白泽文^{1,2}, 孙 蕊^{1,2*}, 彭 铭^{1,2}, 石振明^{1,2}, 季思同^{1,2}

1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092

2. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092

摘 要：堰塞坝形成引发的上游回水淹没常导致建筑物等固定资产严重损毁。由于上游水位的动态变化特性，传统损失评估方法存在显著不确定性。为此，提出一种融合淹没深度与持续时间影响的动态水位淹没损失评估方法。以唐家山堰塞坝为例，首先利用时间序列分析与DABA模型模拟水位动态变化过程，进而构建建筑物在不同时序水深条件下的双因素（水深—历时）易损性函数，最终实现经济损失的量化评估。结果表明：海拔高程是决定建筑物受淹时序的关键因素，而地形类型与泄洪速度则主导了损失累积速率及其空间分布格局。平坦低程区（如漩坪乡）在淹没初期（前100 h）损失急剧累积，而斜坡高程区（如禹里镇）则呈现缓慢线性增长趋势。人工开挖泄流槽工程可显著降低斜坡区的总损失（如禹里镇损失减少约40%），但对低洼地区的减灾效果有限。相较于固定水位模型，提出的时变水位模型在地形复杂区域的损失评估精度更高。人工干预泄洪相比自然溃坝模式展现出显著的减灾效益。本研究为堰塞坝上游淹没经济损失的动态评估提供了理论依据与技术路径，并为应急处置工程决策提供了量化支持工具。

关键词：堰塞坝；淹没损失；时变水位；建筑物易损性；时间序列；DABA模型；工程地质学。

中图分类号：P642

文章编号：1000-2383(2025)10-3873-12

收稿日期：2025-06-30

Economic Loss Assessment of Upstream Inundation under Time-Varying Water Levels in Landslide-Dammed Lakes: A Case Study of Tangjiashan Dammed Lake

Li Bo^{1,2}, Bai Zewen^{1,2}, Sun Rui^{1,2*}, Peng Ming^{1,2}, Shi Zhenming^{1,2}, Ji Sitong^{1,2}

1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The upstream backwater inundation triggered by landslide dam formation often leads to severe destruction of fixed assets such as buildings. Due to the dynamic nature of upstream water levels, traditional loss assessment methods exhibit significant uncertainty. To address this, in this paper it proposes a dynamic water level inundation loss assessment method that integrates the

基金项目：国家自然科学基金—联合基金重点项目(No. U23A2044); 广西重点研发计划项目(No. 桂科 AB25069121); 国家自然科学基金—青年基金(Nos. 42207238, 42407242).

作者简介：李博(1981—)，男，博士，教授，主要从事岩石裂隙多场耦合、地质灾害防控研究。ORCID: 0000-0002-9993-3448. E-mail: libotj@tongji.edu.cn

*** 通讯作者：**孙蕊(1993—)，女，博士，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

引用格式：李博, 白泽文, 孙蕊, 彭铭, 石振明, 季思同, 2025. 考虑时变水位的堰塞坝上游淹没经济损失分析：以唐家山堰塞坝为例. 地球科学, 50(10): 3873–3884.

Citation: Li Bo, Bai Zewen, Sun Rui, Peng Ming, Shi Zhenming, Ji Sitong, 2025. Economic Loss Assessment of Upstream Inundation under Time-Varying Water Levels in Landslide-Dammed Lakes: A Case Study of Tangjiashan Dammed Lake. *Earth Science*, 50(10): 3873–3884.

impacts of both inundation depth and duration. Taking the Tangjiashan landslide dam as a case study, this research first utilizes time series analysis and the DABA model to simulate the dynamic water level fluctuation process. Subsequently, a dual-factor (water depth-duration) vulnerability function for buildings under varying temporal water depth conditions is constructed. Finally, a quantitative assessment of economic losses is achieved. The results demonstrate that elevation is the key factor determining the inundation sequence of buildings, while terrain type and flood release velocity dominate the loss accumulation rate and its spatial distribution pattern. Specifically, losses accumulate rapidly in flat, low-elevation areas (e.g., Xuanping Township) during the initial inundation phase (first 100 hours), whereas sloping, higher-elevation areas (e.g., Yuli Town) exhibit a slow, linear increase trend. Artificially excavated drainage channels significantly reduce total losses in sloping areas (e.g., approximately 40% reduction in Yuli Town), but their mitigating effect is limited in low-lying areas. Compared to the fixed water level model, the time-varying water level model proposed herein demonstrates superior accuracy in loss assessment within topographically complex regions. Artificially induced flood release shows significant disaster mitigation benefits compared to the natural dam breach mode. This study provides a theoretical foundation and technical pathway for the dynamic assessment of economic losses due to upstream inundation caused by landslide dams, and offers a quantitative decision support tool for emergency response engineering.

Key words: landslide dam; inundation loss; time-varying water level; building vulnerability; time series analysis; DABA model; engineering geology.

0 引言

滑坡堵江形成堰塞坝过程中,坝体阻断河道,上游水位持续抬升,引发大范围回水淹没灾害.以2008年汶川特大地震诱发的唐家山堰塞坝为例,其体积达2 037万 m^3 ,蓄水量约3.18亿 m^3 ,是当时最具风险的堰塞湖之一(曹波等,2008).上游因水位抬升,回水区遭受了大范围淹没影响.同时,倘若堰塞坝发生溃坝会对下游构成严重洪水威胁(严祖文等,2009).若上游存在城镇或人员聚集区且撤离不及时,将导致重大人员伤亡和财产损失(冯文凯等,2019).类似的灾害在近年来仍有发生,如2018年10月11日及11月3日白格地区连续两次大型滑坡形成的特大型堰塞坝,其上游回水淹没范围延伸至80 km,造成100户房屋倒塌、2 620户受损,8 300余人被迫紧急转移安置(王升,2022).因此,亟需开展堰塞坝形成后上游回水影响区淹没损失定量评估研究,为应急处置方案提供科学依据,实现洪灾损失的最小化.然而,淹没损失不仅受淹没水深的直接影响,还与淹没历时存在明显的耦合关系.堰塞坝溃决过程中,库容变化受溃决速率、水力结构与坝体稳定性的共同影响,进而导致上游回水淹没时间在空间上呈现出强烈的非线性分布特征.这种时空耦合的不确定性,致使堰塞坝上游淹没损失定量评估面临严峻挑战.

现有堰塞坝损失评估研究主要涉及坝址区、下游区和上游区.其中,坝址区多借鉴滑坡灾害评估方法,已建立包括定性、半定量和定量在内的多种分析框架(谢全敏等,2004;金江军等,2007;曾韬睿

等,2023).下游区研究主要聚焦于堰塞坝溃决引发的洪水淹没损失,因洪水具有流速大、破坏力强等特征,相关损失模型强调损失与淹没深度及洪水流速的正相关关系(石振明等,2016;戴兴建等,2019).坝址区与下游区的损失评估体系相对成熟,本文不作为重点讨论对象.

在上游区域的损失研究中,其淹没过程与典型洪涝灾害具有相似性,相关评估方法可借鉴洪涝研究成果.目前常用方法主要包括基于RS与GIS的洪涝监测技术(刘成堃等,2020)和洪水深度—损失曲线法(Hasanzadeh Nafari *et al.*, 2017).其中,RS与GIS技术通过整合多源卫星遥感数据开展洪水范围及静态水深分布提取,可实现对受灾区域的快速评估(Cian *et al.*, 2024);而洪水深度—损失曲线法则通过建立水深与财产损失之间的定量关系,用于估算不同淹没深度下的经济损失(Nirwansyah *et al.*, 2023).

然而,堰塞坝形成后,上游水位迅速上涨,并随时间持续波动,呈现明显的时空非线性特征(Zeng *et al.*, 2022;杨泽文等,2025).现有研究多集中于静态水深条件下的淹没损失评估,即针对某一固定水深开展损失计算(Oliveri and Santoro, 2000; Wu *et al.*, 2016),而对动态变化过程的关注不足.已有研究表明,长期且波动性的水位变化会对关键基础设施构成更大风险(Mahmud, 2021),长时间洪水会导致结构损毁加剧(如木门需更换而非修复、地板需重铺),总损失平均增加6%(McBean *et al.*, 1988);同时,淹没水深的变化也会导致淹没范围判断误差,进而引发应急响应延迟,显著放大洪灾造

成的经济损失(向素玉等,1995;Verkade, 2008;de Moel and Aerts, 2011),导致传统固定水深模型在上游水位的时空动态特征变化场景下评估精确度下降.因此,充分考虑上游水位的时空动态特征及其对建筑物的影响,是实现上游区域淹没损失准确评估的关键.

针对堰塞坝上游回水淹没过程的显著时空非线性特征,本文提出考虑时变水位的淹没经济损失计算方法.将该方法应用于唐家山堰塞坝案例,首先基于时间序列及 DABA 模型模拟时变水位条件下的上游淹没动态过程,进而建立淹没水深—历时变化关系模型.在此基础上,开展上游淹没经济损失定量分析.最后,定量评估时变水位特性及开挖泄流槽工程措施对经济损失结果的调控效应.

1 考虑时变水位上游淹没经济损失计算方法

1.1 考虑时变水位上游淹没经济损失计算流程

本文考虑时变水位上游淹没经济损失计算流程如下:

(1)时变水位计算.采用时间序列和 DABA 模型对库区时变水位进行计算,模拟时变水位下堰塞坝上游淹没过程,建立淹没水深—淹没历时变化关系;

(2)建筑物易损性分析.建立建筑物洪水易损性曲线,将淹没水深(h)、淹没历时(t)及损失率三者进行耦合,构建出三维损失率函数 $Rd(h, t)$,用于表征建筑在动态水位作用下的损失演化过程.

(3)时变水位损失计算.在时变水位条件下,建立建筑物的淹没过程曲线,动态跟踪不同高程建筑的淹没水深和历时,基于三维损失率函数对完整水位变化过程进行积分计算,量化建筑物在全过程中的累计损失.图 1 展示了时变水位上游淹没经济损失计算框架.

1.2 时变水位计算方法

由质量守恒知, t 时刻的堰塞坝库容 V_t 等于前一时刻 $V_{t-\Delta t}$ 的库容,加上新增的水量,得到堰塞坝库容变化关系(图 2):

$$V_t = V_{t-\Delta t} + (Q_{in} - Q_{ot} - Q_{se} - Q_{et})\Delta t, \quad (1)$$

式中: Q_{in} 、 Q_{ot} 、 Q_{se} 和 Q_{et} 分别是 t 时刻的入流量、溢流量、渗流量和蒸发量.

本文仅考虑漫顶溃坝形式,水位变化分为两个部分,即溃坝前水位上升阶段和溃坝后的水位下降

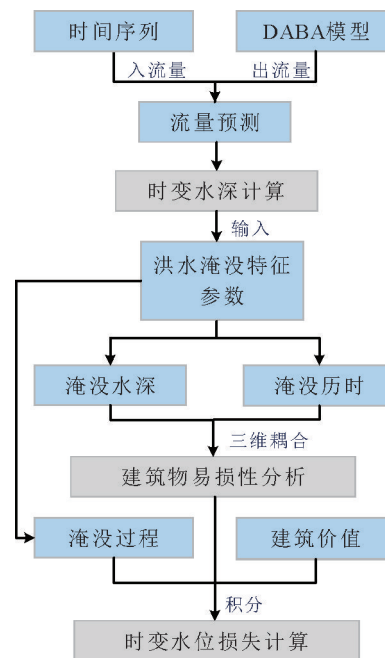


图 1 时变水位上游淹没经济损失计算流程

Fig.1 Flowchart of economic loss calculation for upstream inundation under time-varying water levels

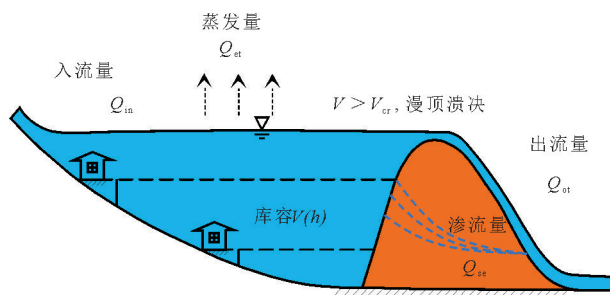


图 2 堰塞坝库容变化关系

Fig.2 Relationship of reservoir capacity variation of the landslide dam

阶段,降雨及其他因素在短期内对库容影响较小,因此本研究未予考虑.分别采用时间序列和 DABA 模型计算确定 Q_{in} 和 Q_{ot} .

1.2.1 时间序列模型 在堰塞坝溃决前的蓄水阶段,坝体通常处于无出流状态,导致堰塞湖库容随时间呈单调递增趋势,水位持续抬升.在此过程中,入流量 Q_{in} 是驱动库容和水位变化的关键输入变量,且具有显著的不确定性.为量化其未来演变,可基于现有水文观测站数据,采用时间序列模型对入库流量进行预测.

时间序列中的 AR 模型(自回归模型)是一种用于分析和预测时间序列数据的统计方法,其核心思想是利用序列过去值的线性组合来预测当前值.

$$X_t = c + \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \cdots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t, (2)$$

式中: X_t 为当前时刻的观测值, c 为常数项(截距), φ_i 为自回归系数, p 为自回归(AR)过程的阶数, ε_t 为白噪声误差项。

AR模型适用于严格满足平稳性条件的时间序列数据. 当实际统计数据显示出非平稳特性(如均值、方差随时间变化)时, 需先对数据进行差分预处理以满足平稳性要求, 此时应采用更为通用的ARIMA模型(自回归积分滑动平均模型). ARIMA模型通过差分将非平稳序列转化为平稳序列, 再结合AR(自回归)和MA(滑动平均)成分建模, 其数学定义为:

$$(1-B)^d X_t = c + \varphi_1 (1-B)^d X_{t-1} + \cdots + \varphi_p (1-B)^d X_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_q \varepsilon_{t-q}, (3)$$

式中: d 为差分阶数(消除非平稳性), B 为滞后算子($BX_t = X_{t-1}$), q 为移动平均阶数, θ_q 为移动平均系数, 用于修正历史误差的影响。

1.2.2 DABA模型 当堰塞湖库容(V_t)超过其临界承载容量(V_{cr})时(即 $V_t > V_{cr}$), 坝体将发生漫顶溢流并引发冲刷侵蚀, 通常导致堰塞坝快速溃决. 溃决过程中, 坝址处溢流量(Q_{ot})显著增大. 为精确模拟此溃坝洪水过程及其流量变化, 本研究采用物理模型DABA进行计算。

DABA模型由Chang and Zhang(2010)开发, 是一个基于浅水流理论和水土侵蚀机制的物理模型. 该模型耦合了浅水流方程与侵蚀理论, 用以模拟水流与坝体土体的相互作用. 土体的侵蚀特性通过临界侵蚀剪应力和侵蚀系数两个关键参数进行表征(公式(4)). 模型通过求解描述宽顶堰溃口处水流的流体动力学方程及水流连续性方程, 模拟溃坝过程中的水动力过程。

$$E = K_d (\tau - \tau_c), (4)$$

$$K_d = 20\,075 e_v^{4.77} C_u^{-0.76}, (5)$$

$$\tau_c = 6.8 (PI)^{1.68} p^{-1.73} e_v^{-0.97}, p > 10\%, (6)$$

$$\tau_c = \frac{2}{3} g d_{50} (\rho_s - \rho_w) \tan \varphi_s, p < 10\%, (7)$$

式中: E 为土壤侵蚀速率, τ 为土水接触面的剪应力, K_d 为侵蚀系数, τ_c 为临界侵蚀剪应力。

模型输入包括大坝几何参数、土体材料参数(特别是侵蚀参数)以及上游入流量; 其输出为随时间步长变化的溃坝参数, 例如溃口尺寸(宽度、深度)、溃决时间、水位及峰值流量, 溃决流量 Q_b 可采用宽堰顶公式进行计算(公式(8)). DABA模型的核心优势在于能够动态预测溃口形态的演变过程, 无需预先设定溃口发展模式. 图3展示了该模型模拟的典型溃口发展过程。

$$Q_b = 1.7 A_b \sqrt{h_{wl} - h_z} = 1.7 [W_b + (h_{wl} - h_z)] \tan \alpha_c (h_{wl} - h_z)^{3/2}, (8)$$

式中: h_{wl} 为库水位, h_z 为溃口标高, W_b 为溃口底宽, α_c 为溃口侧坡坡度。

综合库容随高程变化关系和库容随时间的变化关系(如公式(9)所示), 实际作用水位是时间的函数。

$$\begin{cases} V = V(h_{wl}) \\ \frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{ot} - Q_{se} - Q_{et} \end{cases} (9)$$

当不考虑渗流和蒸发时, 公式进一步简化为:

$$A_1 \frac{dh}{dt} = Q_{in} - Q_{ot}, (10)$$

式中: A_1 为库水表面积。

在获得上游水位高程随时间变化的关系后, 处于上游某一特定高程 H_0 处建筑物的淹没深度为:

$$h(t) = h_{wl}(t) - H_0. (11)$$

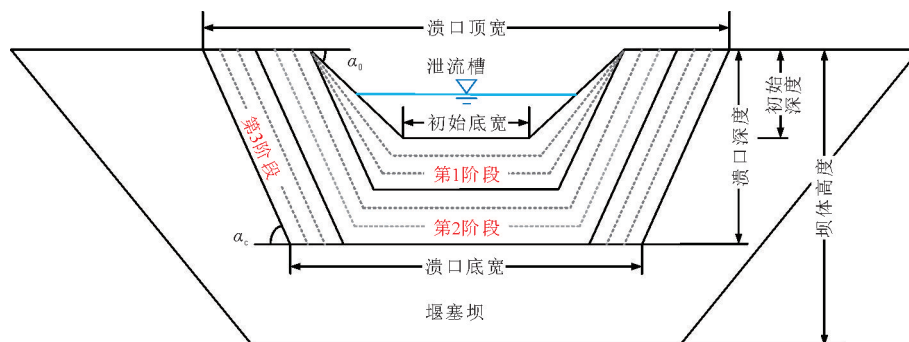


图3 溃口横截面发展示意图

Fig.3 Schematic diagram of breach cross-section development

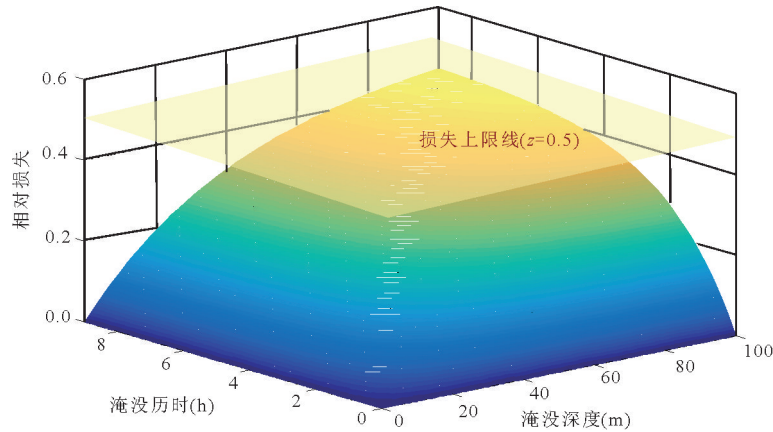


图 4 特定淹没深度下持续一定淹没时长的建筑物的相对随时曲面图

Fig.4 Surface plot of relative loss for buildings under specific inundation depth and duration

1.3 时变水位损失率函数构建

为量化上游淹没过程,针对淹没水深及淹没历时,提出以下基本假设:

1.3.1 淹没水深 洪水造成的经济损失随淹没水位的增加而增大.当水位达到临界值以上且淹没历时足够长时,损失趋于稳定.依据 Gerl *et al.* (2016) 的研究,将最大相对损失设定为 50%.基于此,构建了如下基于淹没水深的相对损失率函数:

$$rd(h) = -0.5062 \times 0.6276^h + 0.5062, \quad (12)$$

式中: h 为淹没水深.

1.3.2 淹没历时 在恒定淹没深度条件下,损失率随时间呈现非线性增长.初始阶段增长迅速,随后逐渐趋缓,即损失增长率随时间递减(Nofal and van, 2016).基于此,构建了如下基于淹没历时的相对损失函数:

$$P_r(t) = -0.9804 \times 0.9756^t + 0.9804, \quad (13)$$

式中: t 为淹没历时.

综合上述分析,本文提出耦合淹没水深(h)与淹没历时(t)双因素的建筑物相对损失函数,表征在特定水深 h 下,经历时长 t 的淹没后,建筑物的相对损失率(图4):

$$Rd(h, t) = rd(h) \times P_r(t) = (-0.9804 \times 0.9756^t + 0.9804) \times (-0.5062 \times 0.6276^h + 0.5062). \quad (14)$$

1.4 时变水位损失计算方法

本文提出一种融合淹没深度与历时影响的动态水位损失计算方法.其核心思路为:基于水位动态过程解析,确定不同淹没深度阈值 h 对应的有效淹没历时;具体而言,当实时水位超过给定深度 h 时,该时段即计入该深度下的持续淹没时间.进而,

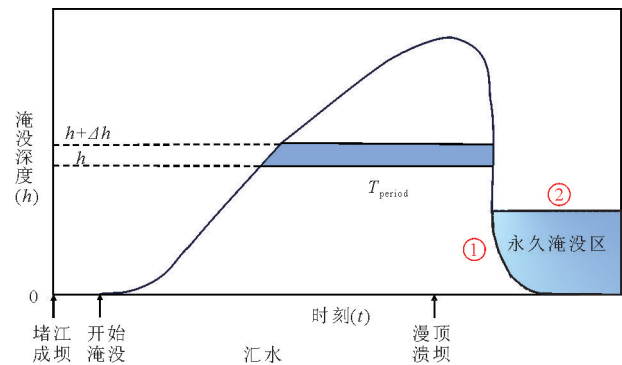


图 5 淹没损失沿深度积分计算示意图

Fig.5 Schematic diagram of inundation loss calculation by depth integration

通过损失率函数 $Rd(h, t)$ 对完整淹没过程的时间积分运算,量化建筑物在全淹没周期内的累积损失总量.具体方法如下:

对淹没深度取微元(图5所示)可得:

$$\Delta l = [rd(h + \Delta h) - rd(h)] \times P_r(T_{\text{period}}). \quad (15)$$

对淹没深度取积分,则单个受灾建筑物在整个升降型洪水存续期间累积的建筑物损失表示为:

$$loss = E \cdot \int_0^{H_{\max}} P_r(T_{\text{period}}) drd(h), \quad (16)$$

式中: E 为独栋建筑的价值, T_{period} 为淹没水深为 h 下的持续时间. $H_{\max}$ 洪水淹没的最大深度.当洪水淹没的过程 $h(t)$ 确定时,任意特定淹没深度下的作用时长(淹没历时)可由该函数关系直接确定:

$$T_{\text{period}} = T(h). \quad (17)$$

根据堰塞坝溃坝对上游建筑物的影响,分为两种情况:

(1)当堰塞坝溃坝结束后,上游建筑物重新出露水面以上,即受影响区域内洪水完全褪去(图6).

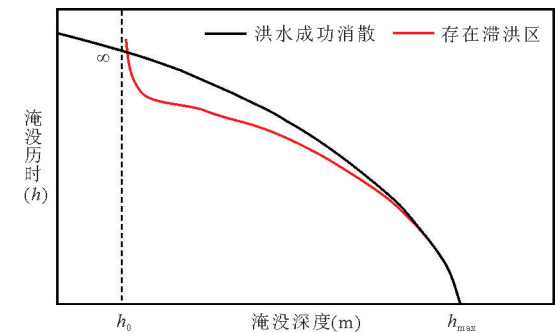


图6 洪水消散情况的 T_{period} 随淹没深度 h 曲线
Fig. 6 Curve of T_{period} vs. inundation depth h for flood dissipation

(2)当堰塞坝溃坝结束后,上游建筑物部分仍然被淹没在水面 h_0 下,即受影响区域内存在滞洪区(图6):

$$T_{\text{period}} \begin{cases} \inf, h < h_0 \\ T(h), h \geq h_0 \end{cases} \quad (18)$$

则

$$P_r(T_{\text{period}}) = \begin{cases} 1, h < h_0 \\ g(h), h \geq h_0 \end{cases} \quad (19)$$

得到:

$$\text{loss} = E \cdot \int_0^{h_0} \text{drd}(h) + E \cdot \int_{h_0}^{H_{\text{max}}} g(h) \text{drd}(h). \quad (20)$$

由于淹没深度随时间变化的过程难以通过具体的函数关系精确表示,特别是溃坝后水位下降的过程,具有高度的非线性和不确定性,因此本文采用数值解法来求解 T_{period} .

2 案例应用及分析

2.1 唐家山堰塞坝淹没区域概况

唐家山堰塞坝位于北川县上游,影响禹里镇(高程720~750 m,斜坡地形)和漩坪乡(高程690 m,平坦地形),如图7所示.2008年滑坡形成堰塞坝后,河道回水严重,虽然人员疏散及时,但堰塞坝库区水位持续上涨,致使交通受阻、居民住地被淹,仍造成了较大损失.

2.2 唐家山堰塞坝计算工况设置

根据堰塞坝灾害处置过程中灾害阶段演变特征及工程干预措施的不同,结合航空影像、现场地质调查及工程减灾数据(胡卸文等,2009;彭铭等,2024),确定两种典型工况,具体参数如表1所示.

2.3 唐家山堰塞坝水位计算模型

在洪水上升阶段,为有效预测入流量,采用



图7 禹里、漩坪和堰塞坝址地形图
Fig.7 Topographic map of Yuli, Xuanping, and landslide dam site

表1 堰塞坝计算工况及参数

Table 1 Calculation scenarios and parameters for the landslide dam

工况	工况一	工况二
泄洪措施	自然泄洪	开挖泄流槽
坝体材料	高侵蚀性材料	三层不同风化程度碎裂岩
坝顶高程(m)	752	742
最大库容(10 ⁸ m ³)	3.16	2.47

ARIMA模型进行建模分析.通过对已有观测数据(张建新,2009)的自相关函数(ACF)和偏自相关函数(PACF)分析(图8),初步确定AR(1)模型适用.为增强序列平稳性,对数据进行一阶差分处理,并扩展为ARIMA(1,1,0).通过BIC分析(图9),结果显示ARIMA(1,1,1)模型的BIC值最小,预测效果最优,因此最终选用ARIMA(1,1,1)作为该阶段的最佳预测模型.

图10展示了库容的观测值、ARIMA模型的预测值及其95%置信区间.可以看出,大多数观测值均落在预测值的95%置信区间范围内,表明所建模型具有较高的拟合精度与预测可靠性,能够较好地反映入流量的变化趋势.

采用DABA模型对唐家山堰塞坝溃决后水位下降阶段进行计算,模拟分析洪水演进过程.通过Google Earth获取研究区DEM数据,并结合Global Mapper生成等高线图,在HEC-RAS中构建河道地形模型(图11).将DABA模型计算所得的溃坝参数(表2)输入HEC-RAS洪水模拟系统,以开展溃决洪水演进模拟.

在完成洪水上升段与下降段的水位变化过程模拟后,以淹没起始时刻作为0时刻基准,得到漩坪乡(图12)和禹里镇(图13)在各阶段的淹没动态

过程.

2.4 淹没损失计算结果分析

本文采用相对损失和绝对损失反映区域微观建筑易损性和宏观经济影响.其中,相对损失指建筑物在特定淹没情境下价值的百分比损失,反映建筑物受淹过程中的相对受损程度;绝对损失则为研究区域内建筑物在整个淹没周期内的累计直接经济损失,用于宏观评估区域总损失水平.

漩坪在工况 1、2 中全都遭遇了严重的洪水灾害,损失都在前 100 h 内急剧上升,而后逐渐稳定

(图 14).工况 2 的最终损失到达了假定经济损失上限(50%).这是由于其溃坝程度低,残余坝体抬高了上游水位,导致溃坝结束后,漩坪处于持续淹没状态.

禹里乡整体的损失随淹没时间呈近似线性增加的趋势(图 15a).这是由于禹里的斜坡地形,导致各高程处遭遇回水淹没作用的开始和截止时间均不同.由图 15b 可知,泄流槽的开挖导致堰塞坝提前溃决,使禹里在工况 2 中淹没时间减少了 217 h,绝对损失从 4 793 万元降至 2 876 万元,降幅达 40%.

对比漩坪和禹里两地损失可发现,禹里由于绝对高程较高,其回水淹没过程相较漩坪存在约 200 h 的明显延迟.具体表现为,在两种工况下,漩坪的损失曲线均在前 100 h 呈现陡升趋势,而禹里始终保持缓慢线性增长(图 16).该差异揭示了堰塞坝上游淹没过程中的两类关键因素:一是绝对高程越高,建筑受淹时滞越长,损失启动越晚;二是斜坡地形具有更强的水流疏导能力,能够有效延缓淹没进程.绝对高程抬升可推迟洪水影响时点,斜坡地形有助于削弱洪水积聚与滞留,两者在泄流槽等人工措施的配合下,可显著减缓损失累积速率,提升堰塞坝上游区域的抗淹没能力.

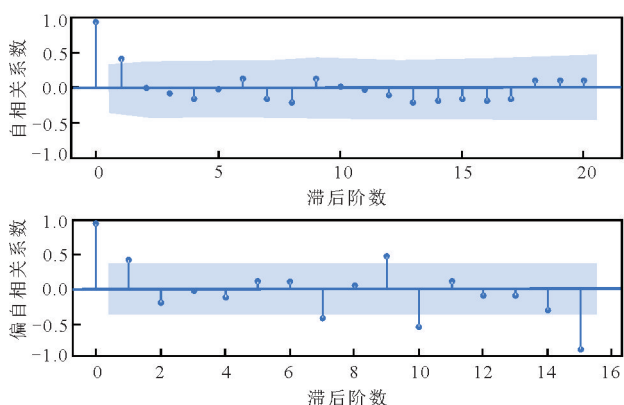


图 8 入流量自相关函数和偏相关函数

Fig.8 Autocorrelation function and partial autocorrelation function of inflow

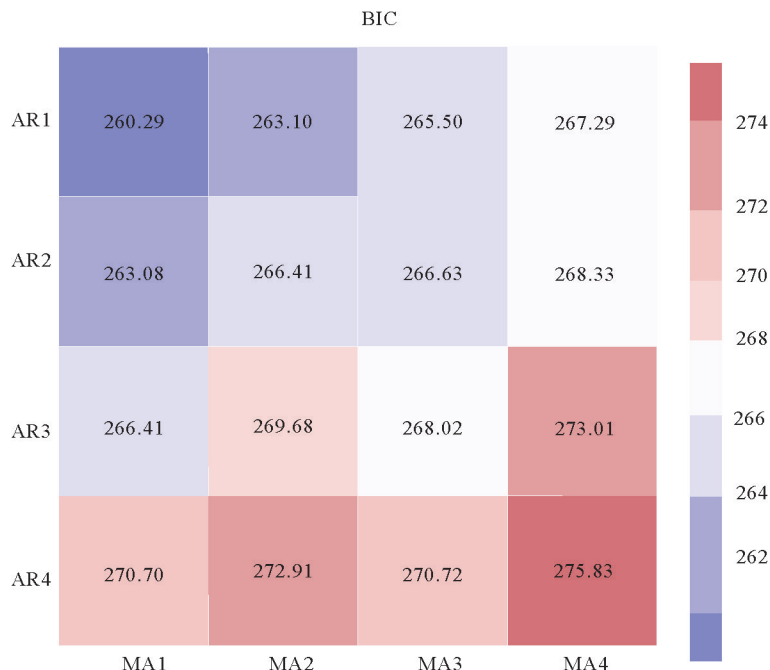


图 9 入流量 BIC 分析图

Fig.9 BIC analysis of inflow
数字为 BIC 值

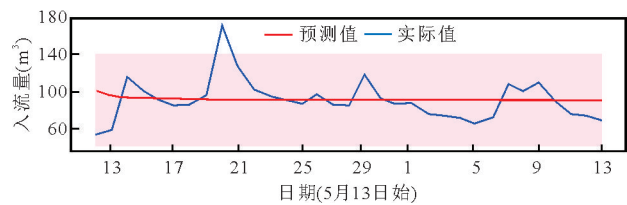


图 10 入流量预测结果曲线
Fig.10 Predicted inflow result curve

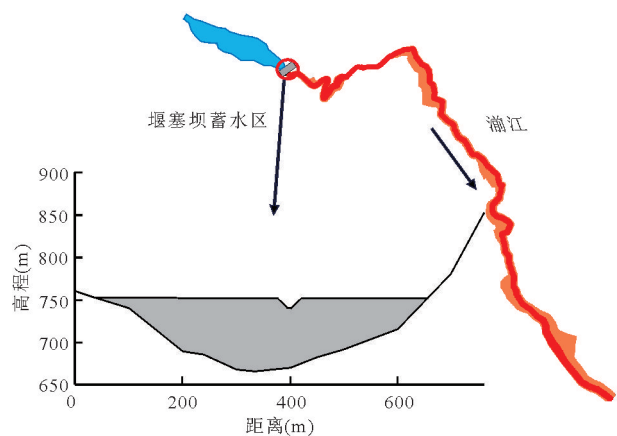


图 11 河道及坝址模型
Fig.11 River channel and dam site model

表 2 溃决参数		
Table 2 Breach parameters		
溃决参数	工况 1	工况 2
溃口顶宽(m)	353	200
溃口底宽(m)	214	90
溃口深度(m)	82	42
溃决时间(h)	8.9	14
峰值流量(m³/s)	35 100	6 500

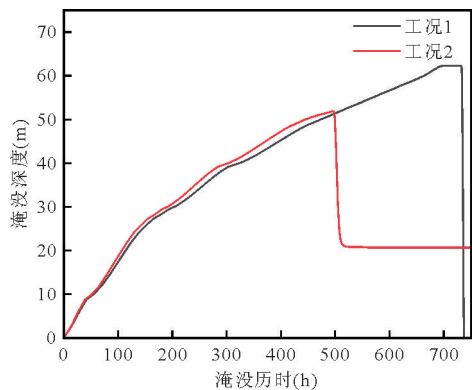


图 12 漩坪淹没深度随时间的变化曲线
Fig.12 Variation curve of inundation depth over time in Xuanping

3 讨论

3.1 时变水位对上游淹没损失的影响

为进一步验证本文所构建的“时变水位”的损失评估模型的优势,本节选取工况 1 对漩坪乡和禹里镇构建“固定水深模型”并与动态模拟结果进行对比分析,探讨不同模型在洪水损失模拟中的适用性和误差表现.其中固定水深模型采用最大水深 $h=33\text{ m}$ 与最大历时 $t=480\text{ h}$ 作为输入.

在固定水深模型下,漩坪乡建筑物的相对损失率亦为 50%,与动态模拟结果(0.496 28)高度一致,结果对比如图 17a 所示.这表明在该类持续性极端淹没区域中,固定水位模型能够合理近似估算区域总损失,具有较高可用性.

与漩坪相比,禹里镇地势起伏较大,建筑物分布于高程 720~750 m 之间,属斜坡地形区.上游洪水淹没过程表现为水位逐步抬升,高程越高的建筑越晚受淹,淹没过程呈现出显著的阶段性与非均质性.固定水位模型绝对损失(5 282 万元)高于时变水位(4 793 万元),如图 17b 所示.其原因在于,固定水位模型未考虑建筑在不同高程受淹时间的差异性,过度简化了“逐步进淹”这一关键过程,导致对高程较高建筑的淹没时间估计偏高,从而出现损失高估

现象.

对于地形平缓、水深长期稳定的区域(如漩坪),固定水位模型可作为快速估算工具使用;但在地形起伏显著、洪水推进具有时序差异的区域(如禹里),应优先采用动态模拟模型,以避免对损失过程的过度简化.本文构建的时变水位模型可以在此类复杂地形条件下表现出较高的损失评估精度.

3.2 泄洪速度对上游淹没损失影响启示

堰塞坝的泄洪速度直接决定了上游区域水位的变化快慢与滞水持续时间,进而影响建筑物的受损程度.若泄洪过缓,上游水位将长时间维持在高位,导致广泛的浸泡和滞水损害;若泄洪过快,虽能快速降低水位,但也可能引发坝体不稳定,造成下游灾害放大.因此,科学调控泄洪速度,是连接“上游保护”与“下游风险控制”的关键环节.

在自然溃坝情境中,坝体失稳多呈非控制状态,其泄洪过程取决于多个因素,如坝体材料、坝体形态、年平均流量、库容等(Peng and Zhang, 2012).这些因素共同决定了溃决发生时的水力冲刷能力与坝体快速崩塌程度,易形成不确定性极强的高能洪水过程.此时,上游往往难以实现水位调控,回水范围扩大、滞水时间延长,导致大范围建筑物长时

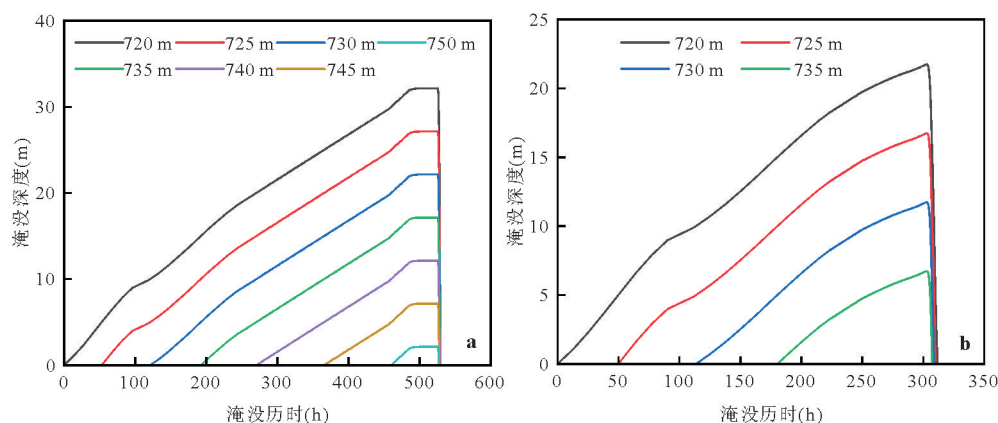


图 13 禹里淹没深度随时间的变化关系

Fig.13 Variation of inundation depth over time in Yuli

a. 工况 1; b. 工况 2

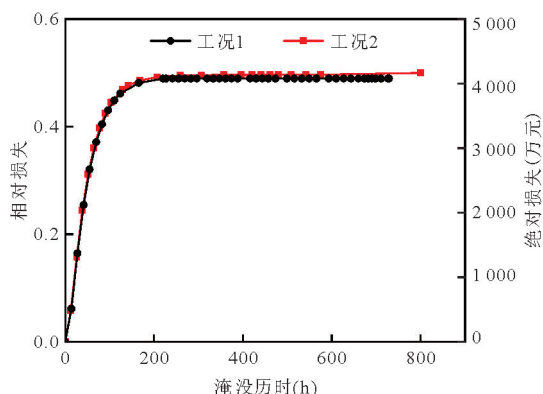


图 14 漩坪相对损失随时间的变化关系

Fig.14 Variation of relative loss over time in Xuanping

间浸泡,经济损失显著放大。

相比之下,人工干预措施可通过控制泄流路径与流量过程,有计划地调整泄洪速度,实现对上游水位的逐步消减。一方面,通过开挖泄流导洞或管道引导初期库水外排,维持坝前水位稳定;另一方面,通过提前开挖泄流槽降低坝顶高程,使堰塞体更早、更缓地发生溃决,在安全前提下削减溃坝峰值,缩短上游淹没历时。这些措施不仅有助于保障坝体整体安全,也为上游高程区域争取更多的应急响应时间,显著提升洪水灾害的整体可控性。

3.3 模型不足之处

在本文提出的时变水位损失率函数中,将最大损失率定位于限定值(50%),但实际案例中(如漩坪乡),长期浸没可能引发建筑物地基软化、墙体坍塌等长期不可修复损坏,导致损失远超模型预设上界。因此,实际应用中需结合地质勘察数据动态修正淹没历时阈值。此外,目前采用统一的易损性曲

线评价建筑物易损性,但不同建筑类型(如砖混、钢筋混凝土、木结构)在洪水中的脆弱性不同,须进一步考虑不同建筑类型的影响。

未来的研究可在现有模型基础上进一步改进与扩展。一方面,通过引入高分辨率遥感和实时监测数据,提高模型对堰塞坝上游水位动态变化的预测精度,并进一步优化建筑物易损性曲线,使其更加符合不同建筑类型的脆弱性。另一方面,通过动态模拟堰塞坝溃决及其上游淹没过程,将研究结果与区域灾害预警系统集成,实现对潜在风险区域的实时监测和预警。针对不同地形和水位变化特征,设计更具针对性的工程防护措施(如分级泄流、坡脚支护和应急通道建设),以降低淹没损失并缓解次生地质灾害风险。

4 结论

本文针对堰塞坝上游建筑物淹没损失评估问题,构建了时变水位淹没损失计算模型,并以唐家山堰塞坝为研究对象,系统分析了漩坪、禹里两乡镇在不同工况下的淹没损失特征,主要结论如下:

(1) 本文提出一种考虑库水淹没过程的时变水位上游淹没损失计算模型。该模型能够模拟堰塞坝上游水位动态变化对建筑物的时序性影响,较好地刻画了上游水位升降过程中的建筑物损失随时间递增的演化规律。

(2) 高斜坡地形相比低平坦地形在回水淹没中具有更强的抗灾能力。较高的绝对高程使建筑物受淹时间延迟,降低了损失速率;地形上的坡度有助于洪水分散与排泄,减缓了淹没深度与持续时间。

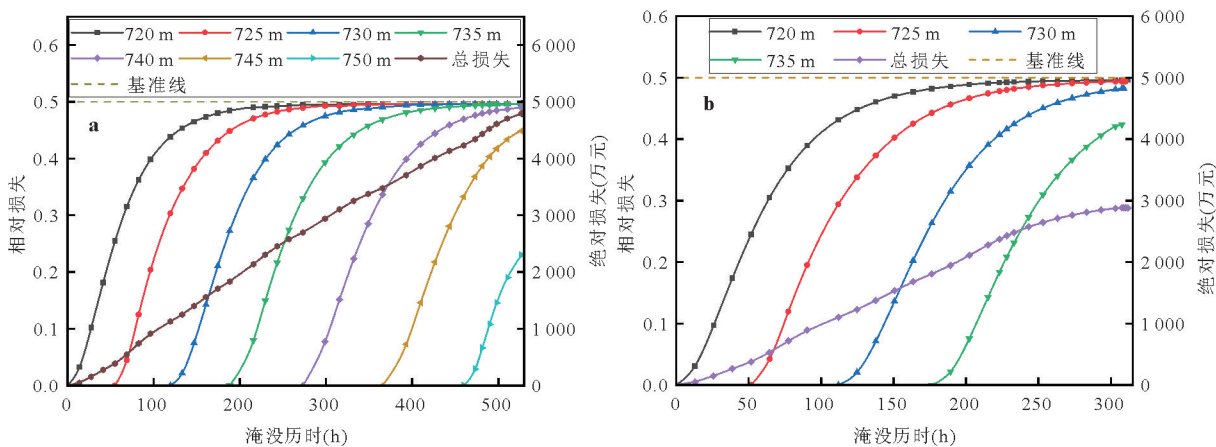


图 15 禹里损失随时间的变化关系
Fig.15 Variation of loss over time in Yuli
a. 工况 1; b. 工况 2

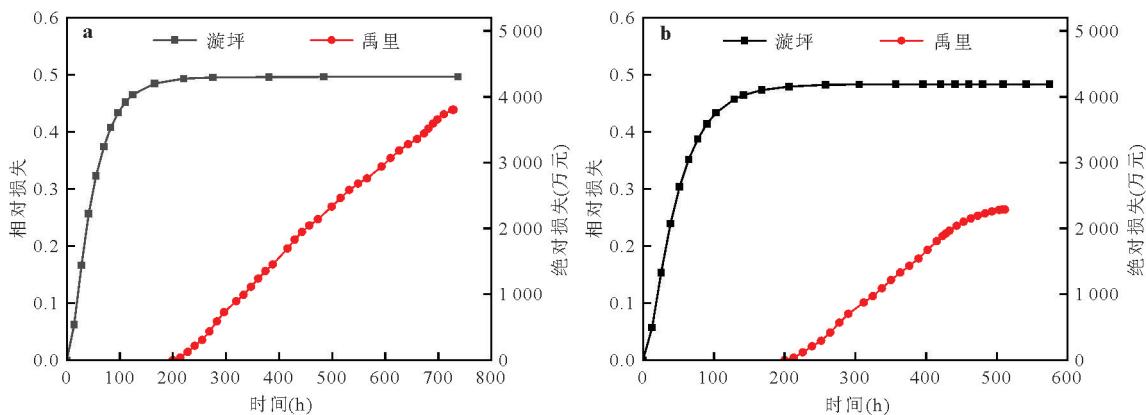


图 16 禹里和漩坪损失随时间的变化关系
Fig.16 Variation of loss over time in Yuli and Xuanping
a. 工况 1; b. 工况 2

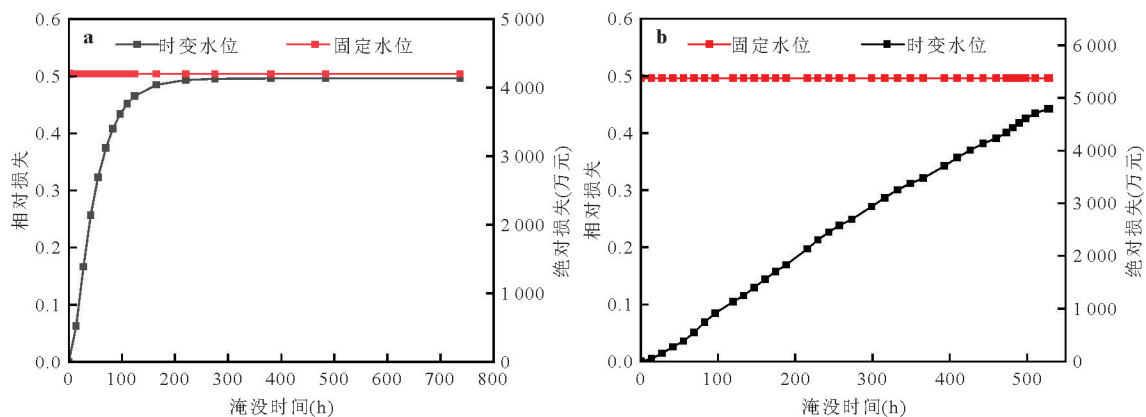


图 17 固定与时变水位模型损失结果对比
Fig.17 Comparison of loss results between fixed and time-varying water level models
a. 漩坪; b. 禹里

相反,平坦地形(如漩坪乡)地势低洼、积水滞留,导致损失在初期迅速累积,最终远高于斜坡区域(如禹里镇)。(3)人工泄洪相较自然溃坝具有显著减灾效益。

干预措施可有效削减洪水峰值并缩短淹没历时,使绝对损失降低约 40%。但在平坦地形区(如漩坪乡),由于残余坝体高程仍高于地面,易形成长期滞水,减灾效果相对有限。

(4)时变水位模型相比固定水位模型在地形复杂区域的损失评估精度更高。对于地形平坦、水位稳定区域(如漩坪乡),固定水位模型可用于快速估算;但在地形起伏显著、淹没过程具阶段性推进特征的区域(如禹里镇),固定模型易造成损失高估,时变模型更能反映真实淹没过程。

References

- Cao, B., Jiang, N. M., Xiong, J., 2008. Construction Technology and Organization for Emergency Treatment of Tangjiashan Dammed Lake. *Yangtze River*, 39(22): 4—6, 51(in Chinese).
- Chang, D. S., Zhang, L. M., 2010. Simulation of the Erosion Process of Landslide Dams Due to Overtopping Considering Variations in Soil Erodibility along Depth. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(4): 933—946. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-933-2010>
- Cian, F., Delgado Blasco, J. M., Ivanescu, C., 2024. Improving Rapid Flood Impact Assessment: An Enhanced Multi-Sensor Approach Including a New Flood Mapping Method Based on Sentinel-2 Data. *Journal of Environmental Management*, 369: 122326. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122326>
- Dai, X. J., Yin, Y. P., Xing, A. G., 2019. Simulation and Dynamic Analysis of Yigong Rockslide-Debris Avalanche-Dam Breaking Disaster Chain. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 30(5): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- de Moel, H., Aerts, J. C. J. H., 2011. Effect of Uncertainty in Land Use, Damage Models and Inundation Depth on Flood Damage Estimates. *Natural Hazards*, 58(1): 407—425. <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9675-6>
- Feng, W. K., Zhang, G. Q., Bai, H. L., et al., 2019. A Preliminary Analysis of the Formation Mechanism and Development Tendency of the Huge Baige Landslide in Jinsha River on October 11, 2018. *Journal of Engineering Geology*, 27(2): 415—425(in Chinese with English abstract).
- Gerl, T., Kreibich, H., Franco, G., et al., 2016. A Review of Flood Loss Models as Basis for Harmonization and Benchmarking. *PLoS One*, 11(7): e0159791. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159791>
- Hasanzadeh Nafari, R., Amadio, M., Ngo, T., et al., 2017. Flood Loss Modelling with FLF-IT: A New Flood Loss Function for Italian Residential Structures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(7): 1047—1059. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1047-2017>
- Hu, X. W., Huang, R. Q., Shi, Y. B., et al., 2009. Analysis of Blocking River Mechanism of Tangjiashan Landslide and Dam-Breaking Mode of Its Barrier Dam. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 28(1): 181—189(in Chinese with English abstract).
- Jin, J. J., Pan, M., Li, T. F., 2007. Regional Landslide Disaster Risk Assessment Methods. *Journal of Mountain Science*, 25(2): 197—201(in Chinese with English abstract).
- Liu, C. K., Ma, R., Zhang, L., et al., 2020. Research on Flood Simulation and Loss Evaluation Based on 3D GIS. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 51(12): 204—209(in Chinese with English abstract).
- Mahmud, S., 2021. Inundation and Hazard Mapping Due to Breaching and Over-Topping of Flood Control Embankments in Harirampur (Dissertation). Bangladesh University of Engineering and Technology, Dhaka.
- McBean, E. A., Gorrie, J., Fortin, M., et al., 1988. Adjustment Factors for Flood Damage Curves. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114(6): 635—646. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(1988\)114:6\(635\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(1988)114:6(635))
- Nirwansyah, A. W., Braun, B., Demirdag, I., et al., 2023. Method for Economic Loss Estimation in Traditional Coastal Salt Farming towards Tidal Inundation. *MethodsX*, 10: 102176. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102176>
- Oliveri, E., Santoro, M., 2000. Estimation of Urban Structural Flood Damages: The Case Study of Palermo. *Urban Water*, 2(3): 223—234. [https://doi.org/10.1016/S1462-0758\(00\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S1462-0758(00)00062-5)
- Peng, M., Ma, F. J., Shen, D. Y., et al., 2024. A Method for Estimating Human Loss of Life in Dam-Breach Flood Considering Human-Fluid Interaction. *Advanced Engineering Sciences*, 56(1): 127—137(in Chinese with English abstract).
- Peng, M., Zhang, L. M., 2012. Breaching Parameters of Landslide Dams. *Landslides*, 9(1): 13—31. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0271-y>
- Shi, Z. M., Xiong, Y. F., Peng, M., et al., 2016. An Efficient Risk Assessment Method for Landslide Dam

- breach: Taking the Hongshiyuan Landslide Dam Formed by the 2014 Ludian Earthquake as an Example. *Journal of Hydraulic Engineering*, 47(6): 742–751(in Chinese with English abstract).
- Verkade, J., 2008. The Value of Flood Warning Systems. Delft, Deltares.
- Wang, S., 2022. Study on Risk Probability Evaluation of Backwater Flooded Area of Baige Landslide Blocking River Disaster (Dissertation). Chengdu University of Technology, Chengdu (in Chinese with English abstract).
- Wu, X. H., Zhou, L., Gao, G., et al., 2016. Urban Flood Depth-Economic Loss Curves and Their Amendment Based on Resilience: Evidence from Lizhong Town in Lixia River and Houbai Town in Jurong River of China. *Natural Hazards*, 82(3): 1981–2000. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2281-5>
- Xiang, S. Y., Chen, J., Wei, W. Q., 1995. Urban Flood Submerging Simulation Analysis Based on GIS. *Earth Science*, 20(5): 575–580(in Chinese with English abstract).
- Xie, Q. M., Liu, P., Xia, Y. Y., 2004. Study on Risk Evaluation of Landslide Hazard. *Metal Mine*, (3): 58–61(in Chinese with English abstract).
- Yan, Z. W., Wei, Y. Q., Cai, H., 2009. Seepage Stability Assessment on Barrier Dams. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 26(10): 122–125(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. W., Wu, B. B., Liu, W. M., et al., 2025. Progress in Erosion Mechanism and Geomorphological Effects of High-Energy Outburst Floods. *Earth Science*, 50(2): 718–736(in Chinese with English abstract).
- Zeng, P., Wang, S., Sun, X. P., et al., 2022. Probabilistic Hazard Assessment of Landslide-Induced River Damming. *Engineering Geology*, 304: 106678. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106678>
- Zeng, T. R., Yin, K. L., Gui, L., et al., 2023. Quantitative Vulnerability Analysis of Buildings Based on Landslide Intensity Prediction. *Earth Science*, 48(5): 1807–1824 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. X., 2009. Hydrologic Analysis and Emergency Application of Barrier Lake Breaking (Dissertation). Tsinghua University, Beijing (in Chinese with English abstract).
- ### 中文参考文献
- 曹波, 蒋乃明, 熊进, 2008. 唐家山堰塞湖应急处置施工技术和施工组织. 人民长江, 39(22): 4–6, 51.
- 戴兴建, 殷跃平, 邢爱国, 2019. 易贡滑坡—碎屑流—堰塞坝溃坝链生灾害全过程模拟与动态特征分析. 中国地质灾害与防治学报, 30(5): 1–8.
- 冯文凯, 张国强, 白慧林, 等, 2019. 金沙江“10·11”白格特大型滑坡形成机制及发展趋势初步分析. 工程地质学报, 27(2): 415–425.
- 胡卸文, 黄润秋, 施裕兵, 等, 2009. 唐家山滑坡堵江机制及堰塞坝溃坝模式分析. 岩石力学与工程学报, 28(1): 181–189.
- 金江军, 潘懋, 李铁锋, 2007. 区域滑坡灾害风险评估方法研究. 山地学报, 25(2): 197–201.
- 刘成堃, 马瑞, 张力, 等, 2020. 3D GIS支持下的洪水淹没模拟与快速损失评估研究. 水利水电技术, 51(12): 204–209.
- 彭铭, 马福军, 沈丹祎, 等, 2024. 考虑人体与水流相互作用的溃坝洪水生命损失评估模型. 工程科学与技术, 56(1): 127–137.
- 石振明, 熊永峰, 彭铭, 等, 2016. 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. 水利学报, 47(6): 742–751.
- 王升, 2022. 白格滑坡堵江灾害回水淹没区危险性概率评价研究(硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 向素玉, 陈军, 魏文秋, 1995. 基于GIS城市洪水淹没模拟分析. 地球科学, 20(5): 575–580.
- 谢全敏, 刘鹏, 夏元友, 2004. 滑坡灾害风险评估研究. 金属矿山, (3): 58–61.
- 严祖文, 魏迎奇, 蔡红, 2009. 堰塞坝渗透稳定性评估. 长江科学院院报, 26(10): 122–125.
- 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(2): 718–736.
- 曾韬睿, 殷坤龙, 桂蕾, 等, 2023. 基于滑坡致灾强度预测的建筑物易损性定量评价. 地球科学, 48(5): 1807–1824.
- 张建新, 2009. 堰塞湖溃决水文分析与应急应用研究(博士学位论文). 北京: 清华大学.