

长江上游滑坡堰塞体溃决机理研究

冯雨实

重庆城市职业学院, 重庆 402160

DOI:10.61369/UAID.2024100010

摘要：长江上游地区因其复杂的地质构造和频繁的地质灾害活动，成为我国滑坡堰塞体形成与溃决的高发区域。本文系统梳理了长江上游滑坡堰塞体的形成背景、溃决模式与机理、影响因素、模拟方法与应急处置技术的研究进展。通过分析唐家山、红石岩、白格等典型案例，揭示了漫顶溃决、渗透破坏和坝体失稳三种主要溃决模式的内在机制，阐述了物质组成、结构特征和水文条件对溃决过程的关键影响。文章详细评述了物理模型试验、数值模拟和原型观测等技术手段在溃决机理研究中的应用现状，总结了基于DB-IWHR模型等现代技术的应急处置方法，并提出了当前研究中存在的挑战与未来发展方向，为长江上游滑坡堰塞体的风险评估与防灾减灾提供理论支撑。

关键词：长江上游；滑坡；堰塞体；机理研究

Study on the Breach Mechanism of Landslide-Dammed Lakes in the Upper Reaches of the Yangtze River

Feng Yushi

Chongqing City Vocational College, Chongqing 402160

Abstract： Due to its complex geological structure and frequent geological disaster activities, the upper reaches of the Yangtze River have become a high-incidence area for the formation and breach of landslide-dammed lakes in China. This paper systematically summarizes the research progress on the formation background, breach modes and mechanisms, influencing factors, simulation methods, and emergency response techniques of landslide-dammed lakes in the upper reaches of the Yangtze River. Through the analysis of typical cases such as Tangjiashan, Hongshiyuan, and Baige, it reveals the inherent mechanisms of three main breach modes: overtopping breach, seepage failure, and dam instability. It expounds on the critical influence of material composition, structural characteristics, and hydrological conditions on the breach process. The article provides a detailed review of the current application status of technical means such as physical model testing, numerical simulation, and prototype observation in the study of breach mechanisms. It summarizes modern emergency response methods based on models like the DB-IWHR and highlights the challenges and future development directions in current research. This provides theoretical support for risk assessment and disaster prevention and mitigation of landslide-dammed lakes in the upper reaches of the Yangtze River.

Keywords： upper reaches of the Yangtze River; landslide; dammed lake; mechanism research

引言：研究背景与意义

长江上游地区地处青藏高原东缘向四川盆地的过渡带^[1]，地质构造复杂，新构造运动强烈，地震活动频繁，加之降水丰沛，使得该区域成为我国滑坡、泥石流等地质灾害的高发区^[2]。历史上，这一地区曾多次发生大型滑坡堵塞江河形成堰塞体的事件，如1786年康定-泸定大地震引发的大渡河堰塞湖溃决、1933年叠溪地震形成的堰塞湖群、2000年易贡滑坡堰塞坝以及2008年汶川地震触发的唐家山堰塞湖等。这些堰塞体一旦溃决，往往引发灾难性洪水，对下游人民生命财产和基础设施构成严重威胁^[3]。

滑坡堰塞体是由滑坡、崩塌等地质灾害物质快速堆积堵塞河道形成的天然坝体^[4]，与人工土石坝相比，其结构松散、未经压实、缺乏防渗和泄洪设施，稳定性极差。据统计，全球约93%的滑坡堰塞体在形成后一年内会发生溃决，其中又有34%在24小时内即告失稳。长江上游地区的滑坡堰塞体因其特殊的形成环境和物质组成，具有溃决速度快、破坏力强的特点。例如，2008年汶川地震形成的唐家山堰塞湖，从开始漫顶到完全溃决仅用了约30小时，峰值流量达到6500 m³/s；2018年金沙江白格堰塞湖两次溃决，第二次溃决时峰

资助项目：重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目 KJQN202203911。

作者简介：冯雨实（1981—），男，汉族，吉林省长春市人，硕士研究生，副教授，现就职重庆城市职业学院，土木建筑。

值流量高达31000 m³/s, 给下游沿岸带来巨大防洪压力。

本文基于大量文献资料和典型案例分析, 系统梳理长江上游滑坡堰塞体溃决机理的研究现状, 总结溃决模式与关键影响因素, 评述现有研究方法与技术手段, 探讨应急处置措施的效果与优化方向, 并提出未来研究的重点领域, 以期为该地区的滑坡堰塞体风险防控提供科学参考。

一、滑坡堰塞体的基本特性与形成条件

长江上游地区的滑坡堰塞体具有独特的地质环境背景和形态结构特征, 这些特性直接影响其稳定性和溃决行为。该区域横跨第一、二级地形阶梯, 地形高差悬殊, 河谷深切, 岸坡陡峻, 为大型滑坡提供了有利的地形条件。岩性上以坚硬的岩浆岩和变质岩为主, 经历长期构造运动和风化作用后, 岩体破碎, 节理裂隙发育, 在强震或强降雨条件下极易发生大规模滑坡。统计表明, 长江上游滑坡堰塞体主要分布在金沙江、雅砻江、大渡河、岷江等干支流的中上游河段, 这些区域同时具备陡峭的地形、破碎的岩性和频繁的触发因素三大基本条件。

形态特征方面, 长江上游的滑坡堰塞体通常规模较大。以唐家山堰塞体为例^[6], 其顺河向长度达803m, 横河向宽度约612m, 最大高度约124m, 体积约2037万 m³; 红石岩堰塞体顺河向平均宽度262m, 横河向平均长度301m, 高度83–96m, 体积约1200万 m³; 而2018年白格堰塞体体积更是高达3000万 m³。这些堰塞体的几何形态多不规则, 坝顶宽度变化大(如唐家山堰塞体坝顶宽仅17m), 上下游坡比差异显著(红石岩堰塞体上游坡比约1:2.5, 下游坡比约1:5.5)。这种非均匀的形态特征导致其在库水作用下的应力分布复杂, 容易产生局部破坏。

长江上游滑坡堰塞体的形成条件具有鲜明的地域特色。强震是该区域大型堰塞体形成的主要触发因素, 2008年汶川地震直接造成了至少256处规模不一的堰塞湖, 其中唐家山、小岗剑等34处被列为高危堰塞湖。暴雨和持续降雨则是另一重要诱因, 如2018年金沙江白格滑坡就是在雨季末期发生的^[6]。值得注意的是, 近年来随着极端气候事件增多, 长江上游堰塞体的发生频率呈上升趋势, 加之该区域水电开发密集, 堰塞体对梯级水电站的连锁影响尤为突出^[7]。

长江上游滑坡堰塞体具有规模大、物质组成复杂、结构松散和稳定性差等特点, 这些特性与其特定的地质地理环境和触发机制密切相关。深入理解这些基本特性是研究其溃决机理的重要基础, 也为后续的风险评估和应急处置提供了关键参数依据。

二、溃决模式与机理分析

滑坡堰塞体的溃决过程表现出复杂的多模式特征, 其内在机理涉及水力学作用与岩土体响应的强烈耦合。基于长江上游典型案例的系统分析, 研究者们逐渐识别出三种主要的溃决模式: 漫

顶溃决、渗透破坏和坝体失稳。这些模式可能单独发生, 也可能相互交织、先后触发, 共同决定堰塞体的最终溃决形式和灾害规模。

漫顶溃决是长江上游滑坡堰塞体最常见的破坏形式, 约占历史案例的50%以上。当入库水量持续增加导致库水位超过坝顶高程时, 水流漫过堰塞体顶部形成冲刷, 进而引发溃决。唐家山堰塞湖的溃决过程是典型的漫顶冲刷案例: 2008年6月7日开始开挖引流槽, 槽底高程740m; 至6月10日1时30分, 湖水位上涨至743.1m开始漫顶; 初期水流速度约2.3–2.9m/s, 对应剪应力20–30Pa; 随着冲刷加深, 流速增至4.9m/s, 剪应力达80Pa; 最终在12时36分达到峰值流量6500m³/s。分析表明, 该过程的溃决机理可分为四个阶段: (1)初始渗流阶段—库水通过堰塞体内部孔隙渗透, 局部可能形成管涌但未贯通; (2)表面冲刷阶段—漫顶水流开始侵蚀坝顶松散物质, 形成初始沟槽; (3)剧烈下切阶段—水流集中冲刷导致沟槽快速下切, 两侧边坡因失去支撑而发生周期性坍塌; (4)平衡稳定阶段—溃口扩大到一定程度后, 水流能量分散, 冲刷与堆积达到动态平衡。红石岩堰塞体的物理模型试验显示, 漫顶溃决过程中溃口展宽速度约为1.43mm/s, 而唐家山案例的反演分析表明槽底平均侵蚀速率约0.5mm/s, 这些参数对预测溃决进程具有重要价值。

多模式耦合是复杂堰塞体溃决的突出特点。长江上游许多大型堰塞体往往经历多种破坏模式的交替或叠加作用。例如, 红石岩堰塞体在实际处置过程中同时表现出漫顶冲刷和内部渗透特征: 一方面, 开挖的引流槽(深8m, 宽5m)引导水流集中下切; 另一方面, 堰塞体内存在的渗透通道加速了细颗粒流失。通过耦合水力学模型和边坡稳定分析, 再现了这一复杂过程: 初始阶段以漫顶冲刷为主, 当下切到一定深度后, 两侧边坡的渗透压力增大, 导致局部滑塌加速溃口扩展。这种多场耦合作用使得单一模式的预测模型往往低估实际溃决速度, 因此发展综合分析方法成为当前研究重点。

三、溃决影响因素研究

滑坡堰塞体的溃决过程受到多因素综合影响, 这些因素既包括堰塞体自身的物质组成与结构特性, 也涉及外部水文条件与地质环境。深入分析这些影响因素及其相互作用机制, 是准确预测溃决过程和制定有效防控措施的科学基础。长江上游地区的堰塞

体因其特殊的形成环境和物质来源，在这些影响因素方面表现出鲜明的地域特色。

物质组成是决定堰塞体溃决行为的内在关键因素。长江上游堰塞体的物质组成普遍具有宽级配特征，但不同案例间存在显著差异。唐家山堰塞体的颗粒分析显示，其粒径分布范围跨越6个数量级（从毫米级的细粒到米级的巨型块石），其中细粒（ $<2\text{mm}$ ）含量约20%，这种组成使其既容易发生渗透破坏，又具有一定的抗冲刷能力。相比之下，2018年金沙江白格堰塞体的块石含量更高（ $>50\text{cm}$ 的颗粒占60%以上），细粒物质不足10%，因此其渗透性更好，降低了管涌风险，但同时也因结构松散而更容易发生整体滑动。王琳等^[9]通过室内试验系统研究了颗粒组成对溃决模式的影响，发现当细粒（ $<0.075\text{mm}$ ）含量超过30%时，堰塞体主要发生渗透破坏；细粒含量在15%–30%之间时，漫顶冲刷占主导；而细粒低于15%时，则可能出现突发性整体失稳。这些阈值指标为预判长江上游堰塞体的溃决模式提供了重要依据^[9]。

地震活动作为长江上游地区的特色触发因素，对堰塞体稳定性有持续影响^[10-11]。2008年汶川地震后，唐家山堰塞体区域记录到余震上千次，其中4级以上余震就达60多次。这些余震不仅可能直接引发坝体裂缝和局部滑塌，还会通过振动使颗粒重新排列，增加密度，产生看似矛盾的双重效应。现场观测发现，唐家山堰塞体在5.9级余震后表面沉降达20cm，但同时渗透系数降低了约30%。这种复杂响应使得地震活跃区的堰塞体稳定性评估尤为困难，目前尚缺乏可靠的定量模型加以描述。

人类干预作为特殊影响因素，在现代堰塞体处置中扮演着越来越重要的角色^[12]。长江上游近年来的重大堰塞体事件几乎都采取了应急工程措施，如唐家山开挖了深13m、宽8m的引流槽，红石岩开挖了深8m、宽5m的泄流槽。这些措施显著改变了自然溃决过程：一方面，人工泄流降低了库水位上升速度，延长了预警时间；另一方面，集中冲刷又可能加速局部溃口发展。通过对比分析发现，开挖引流槽可使唐家山堰塞体的峰值流量降低12.6%（从 $9343\text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $8170\text{ m}^3/\text{s}$ ），溃决库容减少36.5%（从3.14亿 m^3 降至2.0亿 m^3 ），但同时使溃决时间提前约1.5小时。这种工程干预效应的定量评估，是长江上游堰塞体研究的重要课题。

长江上游滑坡堰塞体的溃决过程受到多因素交织影响，这些因素之间还存在复杂的交互作用。例如，细粒含量高的堰塞体在持续降雨条件下更容易发生渗透破坏，而块石为主的堰塞体则对地震震动更为敏感。目前的研究虽然已经识别出主要影响因素，但在定量表征这些因素的耦合效应方面仍有不足，特别是对于人类干预与自然过程的相互作用机制认识有限。未来需要发展更加系统化的影响因素分析框架，建立考虑多因素耦合的溃决预测模型，以提升长江上游堰塞体灾害的风险评估水平^[13]。

四、研究方法与技术进展

滑坡堰塞体溃决研究方法的进步为深入理解其溃决机理提供了坚实基础^[14-15]。近年来，针对长江上游堰塞体的特殊性和复杂性，研究者们发展了一系列物理模型试验、数值模拟技术和现场监测方法，形成了多尺度、多手段的综合研究体系。这些方法各有优势又互为补充，共同推动着溃决机理研究的深化和实用化。

物理模型试验是揭示溃决机理的直观手段，尤其适用于研究颗粒组成与溃决模式的关联性。长江上游堰塞体的模型试验面临尺度效应挑战，为解决这一问题，研究者们发展了多种创新方法。王兆印^[16]团队设计的大型水槽试验（比尺1:50–1:100）采用原型相似材料，通过调整黏土含量（10%–30%）模拟不同堰塞体组成，观测到细粒含量高于20%时渗透破坏占主导，低于15%时则以漫顶冲刷为主。周公旦等^[17]针对梯级堰塞体的连锁溃决现象，构建了串联水槽系统，发现上游溃决洪水可使下游堰塞体的溃决峰值流量放大1.3–1.8倍，这一结果为长江上游梯级风险评估提供了重要参数。

方法集成与交叉验证是当前研究的重要趋势，未来，随着5G传输、AI分析和无人机测绘等技术的发展，长江上游堰塞体研究将迈向更智能化的实时模拟–预警体系。长江上游滑坡堰塞体的研究方法已从早期的经验类比发展到现在的多学科交叉融合，形成了具有区域特色的技术体系。物理模型试验在揭示机理方面不可替代，数值模拟技术为应急决策提供了实用工具，而现场监测数据的积累不断推动着理论的完善。下一步需要重点突破尺度效应难题，发展能够兼顾计算精度和速度的新型模型，并加强多源数据的同化融合，以全面提升对长江上游这一特殊地质环境中堰塞体溃决机理的认识水平和预测能力。

五、应急处置案例分析

长江上游地区作为滑坡堰塞体灾害的高发区域，近年来积累了丰富的应急处置经验，形成了一系列具有中国特色的抢险技术和方法。通过剖析典型案例的处置过程与技术措施，可以深入理解理论研究成果如何转化为实践应用，并为未来类似事件提供宝贵参考。本部分重点分析唐家山、红石岩和白格三个具有代表性的堰塞体应急处置案例^[18-19]，比较其处置策略与技术成效。

唐家山堰塞体（2008年汶川地震触发）是国内外最为人们所知的高风险堰塞湖案例，其应急处置体现了“主动泄流、控制溃决”的核心思想。该堰塞体高82–124m，库容3.26亿 m^3 ，直接威胁下游130万人口的安全。处置方案经过多轮比选，最终确定“以开挖泄流槽为主，配合爆破扩槽”的技术路线。工程实施面临极端困难：地形险要（坡陡达 70° ），天气恶劣（余震和降雨不断），

设备运输困难（最终动用米-26直升机吊运大型设备）。抢险队伍在7天内完成了梯形泄流槽开挖（长475m，底宽8m，深13m），槽底高程降至740m，比原坝顶低15m。监测数据显示，泄流槽使漫顶时间推迟了8天，峰值流量从预估的9343 m³/s降至实际6500 m³/s，降幅达30%。陈祖煜团队^[20]的事后反演表明，泄流

槽改变了溃决模式：自然状态下溃口将发展至151m宽，而实际为145m；同时下泄库容从3.14亿 m³减少至2.3亿 m³，显著降低了洪水风险。该案例的成功创造了世界堰塞湖处置的典范，其经验被纳入《堰塞湖风险等级划分标准》（SL450-2009）。

参考文献

- [1] 刘延国, 邹强, 逯亚峰, 等. 青藏高原东缘地形急变流域生态水文分区研究 [J]. 水利学报, 2022, 53(02): 243-252.
- [2] 孙清元, 郑万模, 倪化勇. 我国西南地区山地灾害灾情年际综合评估 [J]. 沉积与特提斯地质, 2007, (03): 105-107.
- [3] 何浩波, 吕定勋, 彭克喜, 等. 滑坡碎屑流堵江形成过程的模型试验研究 [J]. 贵州科学, 2023, 41(03): 84-87.
- [4] 石振明, 张公鼎, 彭铭, 等. 非均质结构堰塞坝溃决机理模型试验 [J]. 工程科学与技术, 2023, 55(01): 129-140.
- [5] 邓宏艳, 孔纪名, 王成华. 不同成因类型堰塞湖的应急处置措施比较 [J]. 山地学报, 2011, 29(04): 505-510.
- [6] 陈祖煜, 雷盼, 张强, 等. 白格堰塞体风险后评估——再次堵江洪水分析和应对措施 [J]. 水利规划与设计, 2020, (01): 1-5+48.
- [7] 鄢勇. 梯级水电站面临堰塞湖灾害时应对措施研究 [J]. 四川水力发电, 2021, 40(04): 87-90.
- [8] 王琳, 苑鹏飞, 钟启明, 等. 基于溃决机理的堰塞湖溃决快速风险评估方法研究 [J]. 自然灾害学报, 2024, 33(01): 51-62. DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0105.
- [9] 彭勃, 杨剑. 基于干扰理论下的汶川地震灾区生态环境演变研究——以唐家山堰塞湖片区为例 [J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(01): 191-194.
- [10] 李鹏. 堰塞体结构快速探测与稳定性监测关键技术与装备. 湖北省, 长江地球物理探测(武汉)有限公司, 2023-11-09.
- [11] 赵哲苇, 李家欢, 李文炜, 等. 基于系统可靠度理论的堰塞坝边坡稳定性评价 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36(05): 9-14+86.
- [12] 周招, 杨启贵, 蔡耀军, 等. 堰塞湖风险处置研究现状与展望 [J]. 人民长江, 2024, 55(04): 9-18. DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.04.002.
- [13] 蔡耀军, 栾约生, 易杜靓子, 等. 堰塞体危险性快速评价指标与分级研究 [J]. 人民长江, 2022, 53(02): 35-40.
- [14] 钟启明, 陈生水, 单熠博. 考虑材料冲蚀性沿深度变化的堰塞体漫顶溃决模拟 [J]. 人民长江, 2020, 51(01): 180-186.
- [15] 王琳, 张润宇, 苑鹏飞, 等. 基于径向基网络的堰塞体溃决峰值流量预测研究 [J]. 水力发电学报, 2024, 43(05): 68-79.
- [16] 蒋先刚, 崔鹏, 王兆印, 等. 堰塞坝溃口下切过程试验研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(04): 38-44.
- [17] 陈华勇, 崔鹏, 唐金波, 等. 堵塞坝溃决对上游来流及堵塞模式的响应 [J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1148-1157. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.10.001.
- [18] 蔡耀军, 徐复兴, 朱萌, 等. 金沙江白格滑坡残留体失稳堵江风险分析 [J]. 工程科学与技术, 2021, 53(06): 33-42. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100608.
- [19] 黎黎明. 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(07): 44-52.
- [20] 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(02): 20-26.