

# 川藏公路南线泥石流坝溃决洪水过程试验研究

郭国和<sup>1</sup>, 吴国雄<sup>2</sup>, 程尊兰<sup>3</sup>

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804; 2. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 3. 中国科学院 地表过程与动力学重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:** 川藏公路南线(西藏境内)由于区域地质地貌和气候环境条件的特殊性,近几十年来曾多次发生泥石流堵溃事件,坝体溃决所产生的洪水给下游造成了灾难性破坏。根据13组室内泥石流坝溃决模型试验对洪水流量过程进行研究发现,对流量影响最大的是堵塞坝的溃决形式,即重力再启动形式的溃决洪峰流量最大,水力再启动次之,冲刷型溃决最小;溃坝洪水洪峰流量与上游来水量流量成正比关系。溃决过程中的洪峰位置出现在库区水下泄30%~50%的时候;不论哪种形式溃决,洪峰在时间轴上的位置主要集中在整个洪水历时的1/3处。该研究可以为泥石流坝溃决洪水预测和下游综合避险减灾提供参考。

**关键词:** 川藏公路; 泥石流坝; 模型试验; 溃决; 洪水过程

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2010)03-0001-05

中图分类号: U416.1

## Experimental Study on Process of Flood Triggered by Debris flow Dam Break Along South Section of Sichuan-Tibet Highway

GUO Guo-he<sup>1</sup>, WU Guo-xiong<sup>2</sup>, CHENG Zun-lan<sup>3</sup>

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

**Abstract:** Because the natural and geological environment along the south section of Sichuan-Tibet highway (in Tibet) is unique and fragile, debris flow in the area has repeatedly blocked off the mainstream, forming huge dams, and the outburst floods have caused catastrophic damages to the downstream in the recent decades. 13 groups of indoor dam-break flood model tests were constructed to study the induced flood routing. It is found that the most important factor affecting the discharge of the outburst flood is the developing form of the breach, of which the gravitational initiation causes the largest discharge, followed by hydraulic initiation, and the least one is gradual erosion. The flood discharge and the upstream discharge show the linear relationship approximately. The flood peak occurs when 30%~50% of the reservoir capacity is effused and the time of flood peak in the timeline concentrates on about 1/3 of the entire flood duration, no matter what the breach type is. The study can provide a reference to the prediction of debris flow dam-break flood and is beneficial to the comprehensive disaster mitigation in the downstream areas.

**Keywords:** Sichuan-Tibet highway; debris flow dam; model test; break; process of induced flood

堵江灾害主要是堰塞湖库区对上游的淹没和溃坝洪水对下游的淹没和冲刷,以及由此引发的次生灾害。川藏公路南线(西藏境内)地质地貌和气候环境条件特殊,冰雪崩或其形成的堆积坝溃决、冰湖溃决、滑坡(含崩塌)或其堵塞坝溃决等所激发的泥石流多次发生,由于这类泥石流开始时的流量特别大,流速非常快,又含有大量巨砾,极易形成堵塞坝,而且规模

较大<sup>[1]</sup>。例如,林芝县的培龙沟1984年和1985年的两次特大冰崩型泥石流均形成堵塞坝,回水淹埋了上游6 km的川藏公路;溃坝后,涌波又冲毁了下游2 km川藏公路和沿程的5座桥梁,至今这上下游共8 km的路段成为川藏公路著名的“盲肠”,经常发生断道和翻车事故<sup>[1-2]</sup>。类似的例子在川藏公路沿线的米堆沟、古乡沟、东茹弄巴等都曾发生过<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2009-12-03

修回日期: 2010-01-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“西藏东南部冰湖溃决泥石流的形成机制”(40771024); 西部交通建设科技项目“川藏公路南线然乌至培龙段冰湖型泥石流坝溃决预警技术研究”(200631879284)

作者简介: 郭国和(1981—),男(汉族),河南省南阳市人,博士研究生,从事道路工程及灾害治理技术的学习和研究。E-mail: ggh401@126.com。

天然堵江坝溃决造成的洪水突发性强,持续时间短,洪峰巨大,容易给下游河道造成灾难性破坏,因此人们试图通过预测可能溃坝洪水的洪峰最大值来解决这个问题。1984年美国天气局的Fread提出了预测土坝溃口特征和洪水过程的数学模型<sup>[4]</sup>。1988年Costa等对各种类型的堵江天然坝成因与溃坝洪水峰值流量进行了比较全面的归纳研究,并从能量观点出发,结合12个滑坡坝溃决实例建立了洪峰流量公式,但用此关系式来预测南美危地马拉的La Josefina滑坡坝溃决洪峰流量,结果并不令人满意<sup>[5]</sup>。Clague, Cenderelli等分别对不列颠哥伦比亚省和尼泊尔在珠穆朗玛峰地区的冰碛湖的溃坝机理和洪水进行了系统研究<sup>[6-7]</sup>。Waythomas对阿拉斯加查卡查纳河火山碎屑堵塞坝成因与溃决洪水进行了研究<sup>[8]</sup>。Fenton等研究了美国亚利桑那州大峡谷更新世熔岩坝的溃决洪水洪峰流量<sup>[9]</sup>。

国内的柴贺军对岷江上游扣山古滑坡堵江坝进行了野外调查和室内试验,并进行了坝体稳定性分析和溃坝洪水预测<sup>[10]</sup>。晏鄂川等对岷江叠溪滑坡堵江坝溃决洪水流量、洪峰及其演进过程进行了理论分析,建立了一套预测溃坝洪水特征的计算公式,实例验证效果较好<sup>[11]</sup>。冯焱等对1967年雅砻江天然坝的溃坝洪水和溃坝过程进行了调查和研究<sup>[12]</sup>。陈储军采用美国天气局的BREA CH模型和计算机程序,估算了西藏年楚河上游冰川终碛湖白湖的溃决洪水<sup>[13]</sup>。陈德明等对泥石流与主河水流交汇机理进行研究,并提出了泥石流堵河的临界条件<sup>[14]</sup>;吴积善、程尊兰等分析了西藏东南部泥石流坝的形成机理<sup>[11]</sup>;党超等以试验为基础提出了泥石流坝的3种溃决形式<sup>[15]</sup>。朱勇辉等对国外40 a来出现的土坝溃决模型进行了分类和总结<sup>[16]</sup>。

从已有的文献看,关于泥石流坝的研究,不论是国内还是国外都比较少,研究起步较晚,而且主要是围绕着堵塞坝的形成条件开展的,对于泥石流坝形成后的稳定性及溃坝洪水特征则涉及较少。本文采用室内试验来模拟堵塞坝的溃决过程,并通过试验数据统计分析对溃坝洪水过程展开研究。

## 1 溃坝模型试验与数据统计

### 1.1 试验模型设计

(1) 泥石流坝概化模型。试验因素的选择和参数取值由川藏公路南线典型泥石流堵塞坝概化确定(见表1)。

表1 泥石流坝概化模型参数

河道概化模型		坝体概化模型	
试验因素	参数取值	试验因素	参数取值
主河宽/m	55	下坡角/(°)	20
流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	50~150	上坡角/(°)	25
与坝体夹角/(°)	90	坝顶纵坡/‰	0
		坝高/m	20~30

注:河道和坝体断面形状分别为等腰梯形和梯形。

(2) 模型砂的配置。模型砂的配置需满足在粒径范围和连续性方面的相似性。模型砂的粒径范围按相似比尺1:100缩放为0~2 cm。在连续性方面,以培龙沟1985年堵塞坝物质级配为参考,最终确定模型砂样品的颗粒组成(图1)。

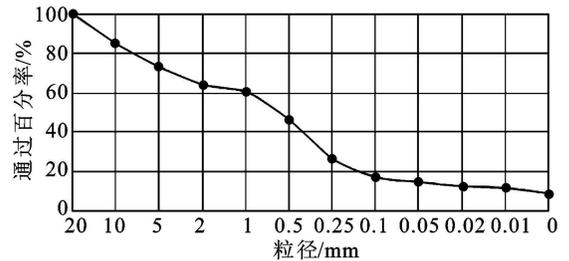


图1 拟配模型砂样品的颗粒组成

(3) 模型平面布置。试验的主要装置由供流系统、试验槽和集水池3部分组成(图2)。其中供流系统由蓄水池、抽水装置、调流池、三角堰、分流设施、前部引流过渡段组成,并通过三角堰和调水阀门按设计要求供给相应历时的主河流量。

水槽长5 m,宽0.55 m,高0.3 m,外侧为玻璃壁,水槽纵比降为3%,它是泥石流坝溃决试验的关键部分,设计要求能方便地调整槽底的纵比降,并利于观测数据和泥石流堵塞坝的堆放。集水池用于收集坝体溃决洪水尾流。

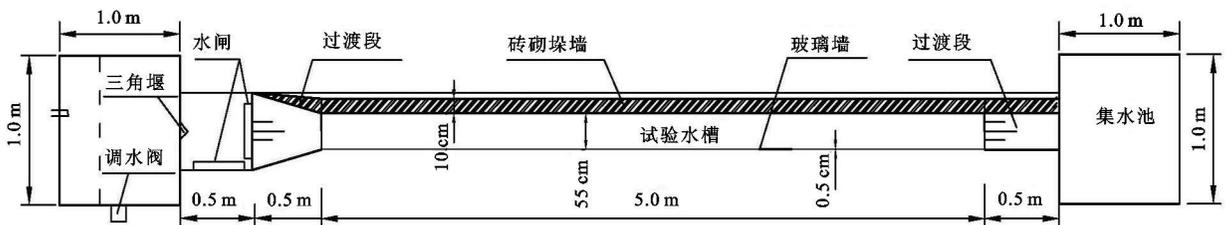


图2 模型试验平面布置

(4) 试验观测记录手段。在试验中,联合标尺法、录像解析法、浮标法等对溃坝过程进行观测记录。

### 1.2 试验数据观测与溃坝类型统计

通过在中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室进行 13 组泥石流坝溃决模型试验,详细观测试验过程,并记录在不同坝体形态、结构和不同的河道特征条件下,泥石流坝的溃决过程、溃口过流宽度、库区水位、坝下水位和坝址处洪水流量变化情况,得到泥石流坝溃决洪水时变过程参数,为理论研究提供基本数据。

这里参照文献[15]提出的泥石流坝 3 种溃决形式,将模型试验数据及溃坝类型列于表 2。试验中也可以发现,冲刷型溃决具有坡面松散颗粒以推移质形

式启动和陡坎发育两个阶段;集中的过坝水流从坝顶开始冲刷坝体,泥砂在坡面集中水流的作用下开始启动并形成含砂水流或稀性泥石流,但其启动的范围一般情况下只限于冲刷的坝顶和坡面的冲沟及其两侧,且扩展相对较慢,沟槽纵坡大致在稳定冲刷平衡比降。水力型泥石流再启动时,泥石流物质在溢坝表面流的渗透作用和拖拽力作用下,逐渐以一定厚度的堆积物重新开始向下游运动。重力再启动是当过流一段时间后,由于泥石流堆积物含水量的增加,同时在坝体中孔隙水压力的作用下,使坝体的抗冲刷强度降低而造成坡面稳定性破坏,坝体下游坡面上出现大面积的泥石流堆积物再启动(坍塌滑移)现象。

表 2 试验数据及溃坝类型统计

试验组次	坝前水宽/ m	库水长度/ m	溃口顶宽/ m	溃口深度/ m	溃决历时/ s	洪峰时刻/ s	洪峰流量/ ( $10^{-3} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	溃决形式
1	0.55	5.25	0.52	0.20	216	43	7.1	水力再启动
2	0.55	5.25	0.35	0.20	712	324	6.0	水力再启动
3	0.55	4.30	0.17	0.15	144	46	6.7	水力再启动
4	0.55	5.25	0.32	0.25	360	95	7.0	重力再启动
5	0.55	5.25	0.23	0.20	780	356	1.8	冲刷溃决
6	0.55	5.25	0.38	0.20	157	80	9.9	重力再启动
7	0.55	5.25	0.12	0.20	1 620	1 210	2.9	冲刷溃决
8	0.55	5.25	0.20	0.20	1 200	420	2.4	冲刷溃决
9	0.55	5.25	0.13	0.20	480	86	3.6	冲刷溃决
10	0.55	5.25	0.26	0.20	934	300	4.0	重力再启动
11	0.55	5.25	0.30	0.20	300	86	4.0	水力再启动
12	0.55	5.25	0.32	0.20	360	100	4.3	水力再启动
13	0.55	5.25	0.30	0.20	120	50	7.6	水力再启动

通过对 13 组模型试验溃坝过程分析认为,冲刷型溃决、水力再启动、重力再启动 3 种溃坝形式对应各为 4 组,6 组,3 组。

## 2 溃坝流量过程分析

### 2.1 洪峰流量与溃坝类型的关系

就泥石流坝溃口发育的 3 种方式而言,水力再启动溃决和重力再启动溃决的洪水历时相对比较接近,而冲刷型溃决的洪水历时则要长的多(图 3)。这是因为,对于冲刷型逐渐溃决,堵塞坝溃口是比较缓慢地发展的,由溢流、坡面松散颗粒启动、陡坎发育、坝顶拉通形成溃口、溃口拓宽刷深等一系列循序渐进的过程组成,库区水是较为平稳均匀的排泄出去,所以洪水过程持续时间长,洪峰流量小;而重力再启动型溃决以溃口无发育或很小为特征,以坡面整体失稳的形式引发大面积泥石流流体再复活启动,溃决过程较为迅猛,堰塞湖库区水在很短时间向下游涌出,溃坝洪水流量大。在试验条件相同时,水力再启动这种溃

决方式是由表面流的表层泥石流堆积体复活启动,相对于重力再启动而言,在管涌、渗流以及较大的溢坝坡面流的作用下,达到最大洪峰流量之前已有更多的堰塞湖水下泄,因而洪峰流量较重力再启动的小。

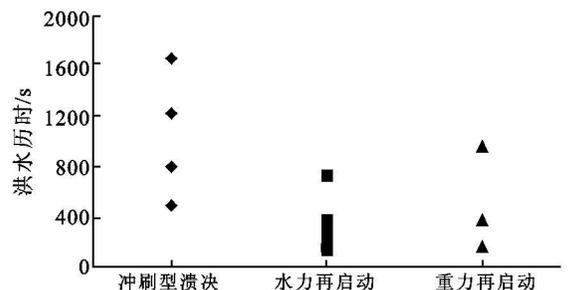


图 3 不同溃决方式的洪水历时对比

图 4 中,冲刷逐渐溃决型溃决洪水的洪峰流量都低于  $4 \text{ L/s}$ ,大致集中在  $2 \sim 4 \text{ L/s}$  的范围;水力再启动型溃决洪水的洪峰流量均集中在  $4 \sim 8 \text{ L/s}$  的范围内;而泥石流重力再启动型溃决洪水的洪峰流量都大于  $4 \text{ L/s}$ ,大致处于  $4 \sim 10 \text{ L/s}$  的范围。重力再启动

型溃决的洪峰流量之所以会在很大范围内变化,比如试验 6 中的最大流量达到了  $10 \text{ L/s}$ , 是因为试验设计的主河流量也是最大流量  $1.4 \text{ L/s}$ 。同时, 试验中还有很多因素影响着洪峰流量, 相对较高的坝体, 较窄的顶宽, 坝体下游坡度大, 堆积嵌锁差, 巨砾含量少, 级配偏细, 含水量大, 空隙率大以及主河流量较大, 河床纵比降较大的工况下, 管涌或渗流速度会加快, 从而可能导致较大的溃坝洪水。从试验观察与数据对比分析发现, 与泥石流坝溃决洪水流量关系最大的就是堵塞坝的溃决形式。

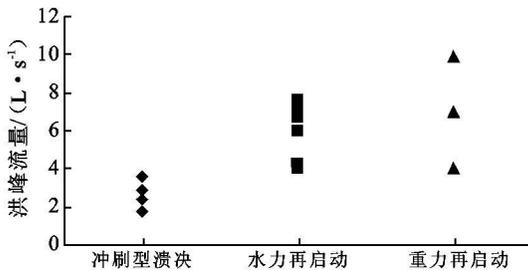


图 4 不同溃决方式的洪峰流量对比

## 2.2 洪峰流量与上游来水量的关系

模型试验在上游来水量方面只做了 4 组不同工况, 即对  $20 \text{ cm}$  坝高条件下,  $0.25, 0.5, 1, 1.4 \text{ L/s}$  上游来水量进行了试验, 分别为试验 2, 1, 3 和 6。根据试验结果, 洪峰流量、洪水历时与上游来水量的关系如图 5 所示。

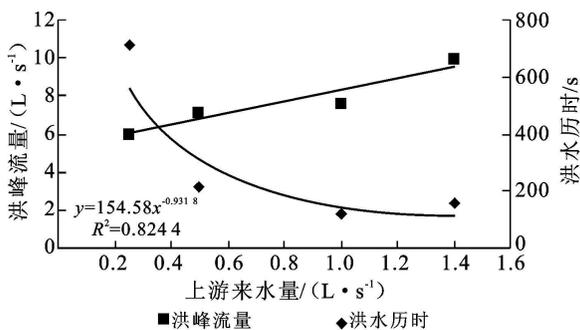


图 5 洪峰流量、洪水历时与上游来水量关系

从图 5 中可以看出, 堵塞坝溃决的洪峰流量与上游来水量有近似正比的线性关系, 洪水历时随着其增大而缩短。这也不难理解, 较大的上游来水量会提高堰塞湖库区水位的上漲速度, 并对堵塞坝体产生较大的涌波压力, 加速管涌、渗流的进程。同时, 坝体下游坡面松散颗粒在较大水头的溢坝水流推移搬运用作用下, 溃决初期溃口发育的速度快, 溃决过程快, 溃口底部物质在较短的时间内达到冲刷平衡比降, 洪峰流量自然就大。但是一旦溃口发育到最大时, 而上游来水量只占洪峰流量的很少比重, 洪峰流量主要由溃决下

泄的库区水所贡献。培龙沟 1985 年泥石流堵塞坝溃决最大流量为主河平均流量的 10 多倍<sup>[2]</sup>, 这可能是与灾害的规模效应有关, 并不能完全由室内模型试验反映出来。

## 2.3 洪峰流量与库区水量的关系

关于天然土石坝的研究认为<sup>[5]</sup>, 洪峰流量与库区水的势能关系很大。但是通过试验可以看出, 只有试验 3 和 4 的库区水量不同, 而其它 11 组试验的库区水量是相同的, 在这些几乎相同库区水势能条件下产生的溃决洪水流量差异很大。这是因为溃决形式是影响溃决过程和洪峰流量的主导因素, 在同种溃决形式下的溃决洪水洪峰流量与库区水的势能是密切相关的。

虽然每次试验中溃决洪水流量的大小不同, 但是溃决洪水的时变水过程曲线都是相似的。下面研究一下洪峰流量出现时刻与库区水的势能释放比例的关系以及洪峰时刻在时间轴上的位置。

在图 6 中, 去掉了试验 8 的数据, 可以发现溃决过程中的洪峰位置出现在库区水下泄  $30\% \sim 50\%$  的时候, 平均值为  $38.58\%$ 。也就是说, 在库区水量下泄大约  $1/3 \sim 1/2$  之间时, 整个洪水过程最大流量出现。而根据现场考察, 由于泥石流坝体结构和形成条件的特殊性, 堰塞湖形成距溃决时间一般不会太久, 洪水持续时间前期峰值流量的出现对抢险救灾具有直观的指导作用。

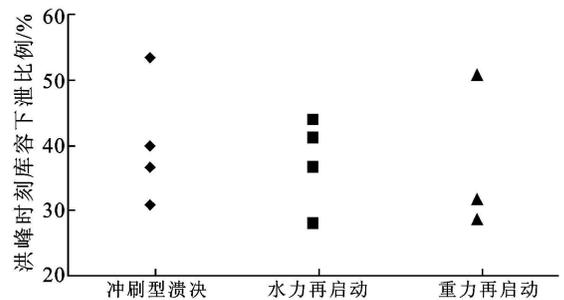


图 6 不同溃决方式洪峰时刻前下泄库区水量的比例

## 2.4 洪峰时刻在时间轴上的位置

从图 7 可以看到, 洪峰时刻在时间轴上的位置主要集中在整个洪水历时的  $20\% \sim 50\%$  之间, 平均值为  $33\%$ 。也就是说不论哪种类型的溃决, 其洪峰时刻出现在整个洪水历时大约  $1/3$  的时刻。这样一旦泥石流坝形成, 能根据已有溃坝资料并在第一时间采集到堵塞坝参数与地形、地貌、气象数据等资料, 预估洪水可能的持续时间。

由于泥石流坝形成条件的特殊性, 它溃决产生的洪水有周期短, 洪峰巨大等特点。例如, 培龙沟 1985

年特大型冰川泥石流堵塞主河后的溃决洪水达  $30\ 646.61\ \text{m}^3/\text{s}^{[2]}$ 。从川藏公路典型泥石流坝溃决过程来看,泥石流坝溃决过程要比洪水过程短的多,一般是在很短的时间内堵塞坝就冲刷到底(大约  $1\sim 1.5\ \text{h}$ ),而洪水过程要持续很长一段时间(大约几个小时甚至  $1\ \text{d}$ )。认识到这一点,对于溃坝洪水预测和下游应急减灾尤为重要。

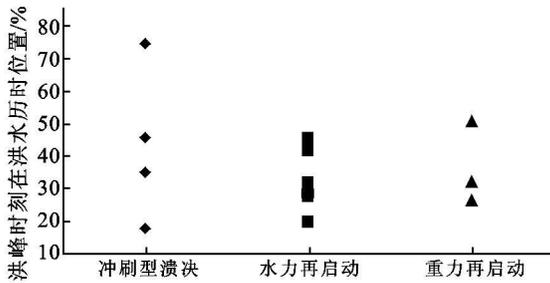


图7 不同溃决方式洪峰时刻在时间轴上的位置

## 2.5 多因素交叉作用分析

以上基于室内试验从溃决方式、洪水历时、洪峰时刻、上游来水量、库容方面对泥石流坝溃决流量过程规律进行了统计分析,但它们之间因受影响坝体溃决过程的多种因素交织作用而相互关联。3种溃坝方式具有不同的溃口发育速度,若上游来水量大,库容大,溃决流量大,则溃口发展快,洪水历时短且流量大,洪峰时刻靠前;若上游来水量小,库容小,溃决流量小,则溃口发展慢,洪水历时长且流量小,洪峰时刻滞后。也就是说,不同的坝体条件和主河条件,通过影响坝体溃决的不同方式,从而影响库水泄流时间和洪峰流量。

## 3 结论

泥石流坝的溃决过程及其洪水运动是一种非常复杂的自然现象,由于此类现象多发生在人烟稀少,构造强烈的山区,而且泥石流坝存在时间一般不会很长,溃决后形成规模巨大的洪水,因此泥石流坝形成及溃决的具体资料很少。本文在模型试验的基础上,对溃坝流量过程特征进行研究,得出洪峰流量与溃坝形式、洪水历时以及洪峰时刻之间的规律,以期对泥石流坝溃决洪水预测及川藏公路沿线应急避险减灾提供依据。然而,由于泥石流坝溃决问题的复杂性和影响因素的交互性,试验模型与野外原型必然存在某

种程度上的差异,研究成果仍需通过更多现场资料进一步验证和完善。

### [参考文献]

- [1] 吴积善,程尊兰,耿学勇. 西藏东南部泥石流堵塞坝的形成机理[J]. 山地学报, 2005, 23(4): 399-405.
- [2] 朱平一,何子文,汪阳春,等. 川藏公路典型山地灾害研究[M]. 成都:成都科技大学出版社, 1999.
- [3] 罗德富,毛济周. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策[M]. 北京:科学出版社, 1995.
- [4] Fread D L. Breach: a erosion model for earthen dam failures[R]. National Weather Service (NWS) Report, NOAA, Silver Spring, M A, 1984.
- [5] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams[J]. Geological Society of America Bulletin, 1988(100): 1054-1068.
- [6] Clague J J, Evans S G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia[J]. Quaternary Science Reviews, 2000(19): 1763-1783.
- [7] Cenderelli D A, Wohl E E. Peak discharge estimates of glacial-lake outburst floods and "normal" climatic floods in the Mount Everest region, Nepal[J]. Geomorphology, 2001(40): 57-90.
- [8] Waythomas C F. Formation and failure of volcanic debris dam in the Chakachatna River valley associated with eruptions of the spur volcanic complex, Alaska[J]. Geomorphology, 2001(39): 111-129.
- [9] Fenton C R, Robert H W, Thure E C. Peak discharge of a Pleistocene lava-dam outburst flood in Grand Canyon, Arizona, USA[J]. Quaternary Research, 2006(7): 324-335.
- [10] 柴贺军,董云,李绍轩,等. 大型天然土石坝的溃坝方式及其环境效应分析[J]. 地质灾害与环境保护, 2005, 16(2): 172-176.
- [11] 晏鄂川,郑万模,唐辉明,等. 滑坡堵江坝溃决洪水及其演进的理论分析[J]. 水文地质工程地质, 2001(6): 14-22.
- [12] 冯焱,夏毓常,陈愈炯. 雅鲁江天然坝的溃坝洪水和溃坝过程[J]. 水力发电学报, 1994(4): 61-69.
- [13] 陈储军,刘明,张帆. 西藏年楚河冰川终碛湖溃决条件及洪水估算[J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 347-352.
- [14] 陈德明. 泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征[D]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2000.
- [15] 党超,程尊兰,刘晶晶. 泥石流堵塞坝溃决模式实验[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 15-19.
- [16] 朱勇辉,廖鸿志,吴中如. 国外土坝溃坝模拟综述[J]. 长江科学院院报, 2003, 20(2): 26-29.