

# 冰碛湖溃决型泥石流演化过程试验研究

党超<sup>1,2</sup>, 褚娜娜<sup>1,2</sup>

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** [目的] 分析冰碛湖溃决型泥石流演化过程中运动参数的变化特征, 为冰碛湖溃决型泥石流的防治提供理论依据。[方法] 采用水槽试验, 探讨冰碛湖溃决型泥石流形成和演化过程。[结果] 冰碛湖溃决型泥石流属于典型的水力类泥石流; 根据水沙两相流容重的变化, 冰碛湖溃决型洪水演化为泥石流的过程可以概括为挟沙水流—泥石流—挟沙水流的演变, 相对应的泥石流的粒径从粉砂到砾石, 再到粉沙的变化过程; 泥石流容重越大, 一次泥石流过程中颗粒粒径越粗。从不同组次的试验结果来看, 冰碛湖溃决型泥石流粒径与其容重也存在正相关关系。[结论] 泥石流的运动和演化过程本质上取决于冰碛湖溃决型洪水功率和沟床堆积物的粒径特征。

**关键词:** 冰碛湖溃决型洪水; 泥石流; 演化过程; 试验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)04-0029-05

中图分类号: P642.23

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.04.007

## Experimental Study on Evolution of Debris Flow Induced by Moraine Lake Outburst Floods

DANG Chao<sup>1,2</sup>, CHU Nana<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Civil Engineering & Architecture, Three Gorge University, Yichang, Hubei 443002, China)

**Abstract:** [Objective] Studying the characteristics of motion and evolution parameters of debris flow induced by glacier lake outburst floods(GLOFs) in order to provide countermeasures for debris flows prevention of this type. [Methods] Base on flume tests, the formation and evolution of debris flow due to moraine lake outburst floods were studied. [Results] The debris flow evolved from GLOFs was attributed to hydraulic reasons, the forming process could be divided into 5 phases. According to unit weight of water-sediment flow, the evolution process of debris flow could be summarized by successive sediment-laden flow, debris flow, sediment-laden flow. Correspondingly, The grain sizes of debris flow evolved from silts to gravels, and to silts in sequence. The outcomes from different sets of the test also showed that the grain sizes of the debris flow positively correlated to the unit weigh of the debris flow. [Conclusion] The motion processes of debris flow depend both on the hydraulic power of the GLOFs and on the grain sizes of bed materials.

**Keywords:** glacier lake outburst flood; debris flow; evolution process; experiments

自最后一次小冰期以来, 由于冰川的持续退缩, 在冰川的上部以及前部形成了许多不同类型的冰碛湖。近 100 a 来, 由于气候变暖趋势加剧, 导致分布在各大洋的海洋性和大陆性冰川强烈消融后退, 冰碛湖也变得异常不稳定, 冰碛湖溃决事件发生的频率明显增高<sup>[1-3]</sup>。再则, 由于人类活动不断地向高山地区扩张和冰碛湖溃决事件的难以预见性, 使得冰碛湖溃决带来的危害变得异常严重。世界各地爆发的冰碛湖溃决事件充分证明了冰碛湖溃决引发的洪水或泥

石流的巨大破坏力。例如, 1981 年聂拉木樟藏布冰碛湖溃决, 摧毁了部分中尼公路及桥梁基础设施<sup>[4]</sup>; 1982 年定结县金错冰碛湖溃决, 淹没了 8 个村落、大片农田及牲畜<sup>[5]</sup>; 1983—1985 年培龙沟连续 3 a 爆发冰崩湖溃决, 形成特大规模的泥石流, 并完全堵塞帕隆藏布; 1988 年米堆沟光谢错发生溃决, 形成了最大流量达 1 027 m<sup>3</sup>/s 的稀性泥石流<sup>[6]</sup>。

我国西藏地区分布有大量冰碛湖, 主要分布在帕隆藏布, 朋曲以及年楚河等雅鲁藏布江支流流域, 澜

收稿日期: 2014-08-24

修回日期: 2014-09-15

资助项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划优秀中青年人才项目“滑坡堰塞坝溃决预测模型的不确定性和非线性研究”(20151207)

第一作者: 党超(1982—), 男(汉族), 山东省滕州市人, 博士, 讲师, 主要从事山地灾害形成机制研究。E-mail: dangchao1982@126.com。

沧江和金沙江流域也有冰碛湖分布<sup>[2-3,7-8]</sup>。这些冰碛湖,基本位于海拔 4 000 m 以上的高山和极高山地区,很难及时地对冰碛湖水位进行观测和冰碛湖溃决的预警,冰碛湖一旦发生溃决,极可能形成大型泥石流,对下游的城镇基础设施和人民群众的生命财产安全造成极大的威胁。而且,大规模的冰碛湖溃决支沟泥石流汇入主河后,常形成大规模的土石坝,堵塞主河,造成上游地区被淹没;主河堆积土石坝溃决后,又形成强大的溃决洪水,对下游地区造成难以估量的次生灾害。因此,研究冰碛湖溃决以后泥石流的形成和演化过程对于认识这种特殊的灾害类型十分必要。

## 1 冰碛湖溃决泥石流形成试验

由于泥石流模型试验的相似性还存在许多难以解决的问题,特别是模型砂的相似性问题,如果按照模型比例缩放,会使模型砂的黏粒含量过大,模型砂的性质与原型将有很大不同,也不符合冰碛湖溃决泥石流各种物源的特性。本试验旨在探讨冰碛湖溃决洪水演化为泥石流的过程以及冰碛湖溃决泥石流运动的一般规律,并不对特定沟道原型进行试验,因此未考虑试验的相似性问题。

### 1.1 试验砂的配制

试验砂的配制主要参考米堆沟各种松散物源以及光谢错 1988 年溃决时形成的泥石流堆积物的级配特征<sup>[9]</sup>。在进行试验砂配置时,选取了 4 种不同松散物源样品,即泥石流堆积物、终碛堤、崩坡积物、冰水堆积物 4 种类型的堆积物。在考虑颗粒级配连续性和分形相似的基础上,选择粒径小于 2 cm 的部分配制模型砂,分别对应于级配 1 到级配 4(图 1)。为了在试验中能够更好地观测松散颗粒的启动和运动过程,对不同粒径组的泥沙颗粒分别进行染色处理。

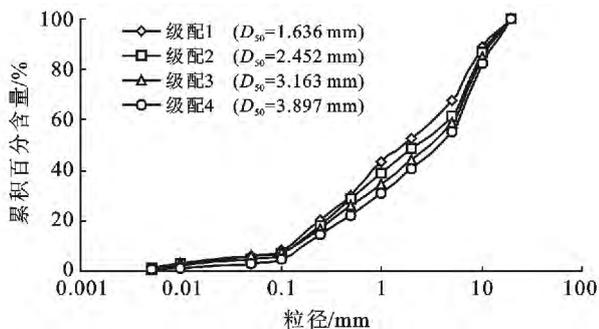


图 1 试验砂级配图( $D_{50}$ 为试验砂中值粒径)

### 1.2 试验装置

试验装置由三部分组成,即供流系统,试验水槽

和集水池。供流系统由蓄水池、闸门以及前部引流过渡段组成。其中蓄水池宽 1 m,长 1 m,高 0.5 m,最大蓄水库容 500 L;蓄水池前端设置闸门,用以流量控制;闸门前部设置长 25 cm 的缓冲段,防止在试验开始前,闸门漏水从而影响水槽内堆积物的性质。试验水槽长 4 m,宽 0.2 m,高 0.3 m,坡度可以在  $0^\circ \sim 9^\circ$  之间任意调节。两侧为钢化玻璃,以便试验观测。水槽前端与供流系统的缓冲段相连,末端与集水池相接,并将接口处用沥青或黏土封闭,防止漏水现象的发生。考虑到米堆沟泥石流的物源主要来自冰川 U 型谷两侧的各种冰碛物、坡积物及古泥石流堆积扇,试验砂在试验水槽内的铺设时,首先在槽底均匀铺设 10 cm 厚的试验砂,其上采用倒石堆的形式堆积,高度为 20 cm,宽度为 15 cm,长度为 35 cm。泥石流形成和运动的相关数据均在水槽末端进行测量。集水池长 1 m,宽 1 m,高 1 m,与水槽相接处开一高 0.5 m,宽 0.22 m 的开口,以便水槽与集水池的连接;集水池使用砖砌成,内贴测量米尺,以便测量洪水过程。

### 1.3 泥石流的临界体积比浓度

国内外一般通过水沙两相流的混合容重或固体颗粒的体积比浓度,以及固体颗粒得级配来区分泥石流与高含沙水流,泥石流的容重要大于挟沙水流,而且表现出宽级配的特征。通过大量野外泥石流的观测分析,泥石流的底限容重  $\gamma_m$  在  $1.2 \sim 1.5 \text{ t/m}^3$  之间,体积比含沙量  $S_v$  在  $0.12 \sim 0.29$  之间<sup>[10-11]</sup>。根据对我国西南地区以及西北地区的泥石流的观测资料,一般把体积比浓度容重为  $S_v = 0.18$ ,或者  $\gamma_m = 1.30 \text{ t/m}^3$  作为泥石流的底限容重,而小于这个容重一般都认为是挟沙洪水。因此通过上面的分析,在本文的试验以  $S_v = 0.18$  为冰碛湖溃决泥石流形成的下限浓度。

## 2 冰碛湖溃决泥石流运动形态类型

黏性泥石流多为阵性流<sup>[6]</sup>,而冰碛湖溃决泥石流的运动形态类型属于单峰连续流,例如第 5 组的 5 次试验,溃决洪水体积  $V$  分别为 50,70,90,110 和 130 L, $J = (\text{沟道坡度})0.122$ , $D_{50} = 3.163 \text{ mm}$ ,溃决洪水与泥石流流量过程以及输沙过程如图 2 所示。从图 2 可以看出,冰碛湖溃决泥石流的流量和输沙过程随着溃决洪水流量的变化而不断的变化,都呈单峰形态。这与我国其他地方爆发的降雨型稀性泥石流类似,例如 1978 年 7 月 21 日云南大盈江浑水沟爆发的泥石流和 1978 年 5 月 22 日四川凉山黑沙河爆发的泥石流,其流量过程线均为连续的单峰值型<sup>[12]</sup>。

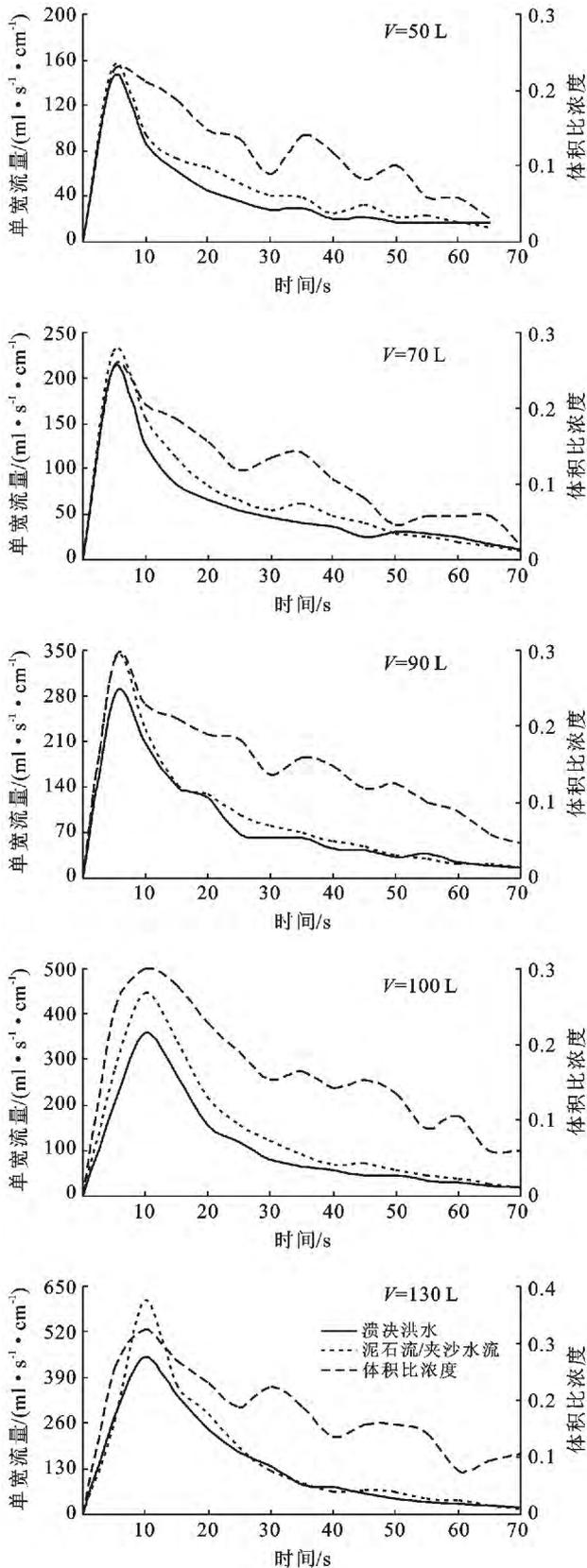


图 2 冰碛湖不同溃决洪水流量(V)时泥石流流量及输沙过程

冰碛湖溃决泥石流的这种运动形态与其形成的水源、物源以及沟道条件是密切联系在一起的。从水源条件上看,一般来讲冰碛湖溃决过程线为单峰连续

流,因此水流提供给泥沙启动的能量以及能量的耗散也是一个连续的过程,其具体的表征就是溃决洪水连续的输沙过程;从物源条件上看,不论是终碛堤还是沟道内的崩坡积物其黏粒含量很低,因此泥石流浆体的结构力和黏滞力非常的小,通过类比大盈江稀性泥石流<sup>[12]</sup>,试验中所有组次浆体的静切力都小于 0.5 Pa,黏度小于 0.003 Pa·s,达到结构流体的特征;再则,冰川 U 型谷由于冰川的侵蚀作用形成,沟道比较顺直,很少产生由于沟道的变化产生的堵塞现象。

### 3 冰碛湖溃决泥石流的运动演化特征

以体积比浓度  $S_v=0.18$  作为判别泥石流和挟沙水流的临界条件,则冰碛湖溃决洪水始于挟沙洪水再演变为泥石流,最后又逐渐过渡到挟沙洪水。根据泥石流容重的变化,可大致将泥石流过程分为:前期挟沙水流,中期连续泥石流(稀性泥石流或水石流),后期挟沙水流 3 个阶段,这与野外观测到得结果是完全一致的<sup>[13]</sup>。

固体物质组成直方图表明(图 3),当  $S_v < 0.18$  时,颗粒组成呈单峰型,符合一般挟沙水流的正态分布规律;泥石流中值  $d_{50}$  粒径较小,流体中的固体物质主要是小于 0.01~0.5 mm 的颗粒。当  $S_v > 0.18$  时,粗沙和砾石的含量明显增大,同样出现单峰的特征,与黏性泥石流的双峰型有很大的差别<sup>[14]</sup>。在泥石流运动的后期,由于水流携沙力的减小,大颗粒不断的停积下来,水沙混合两相流又转变为携沙水流,其组成物质也以细颗粒为主。从一次冰碛湖溃决泥石流运动演化过程中粒径的变化来看,随着容重的增大,最粒径从粉砂向砾石方向移动,容重与固相粒径组成呈正相关关系。

#### 3.1 冰碛湖溃决泥石流容重与机械组成

冰碛湖溃决泥石流由水和泥沙两部分组成,泥沙颗粒囊括了包括土粒的各级粒径,不均匀系数很大。在一次冰碛湖溃决泥石流过程中,随着泥石流容重的增大,泥石流的粒径组成从粉粒—砂粒—砾石变化,即泥石流容重越大,其颗粒组成越粗。那么对于不同容重的多次泥石流,此结论是否成立,如果以泥石流中值粒径  $d_{50}$  来表征泥石流固体颗粒的机械组成,可以得出泥石流容重与  $d_{50}$  的关系(图 4)。从图 4 中可以看出,不同组次形成的不同容重的泥石流,容重越大,其颗粒组成越粗。其中,以试验砂  $D_{50} = 3.163$  mm 时为例,泥石流最大容重  $\gamma_{mp}$  与固体颗粒中值粒径( $d_{50}$ )的关系可以表示为:

$$\gamma_{mp} = 0.853d_{50}^{0.25} \quad (R^2 = 0.77) \quad (1)$$

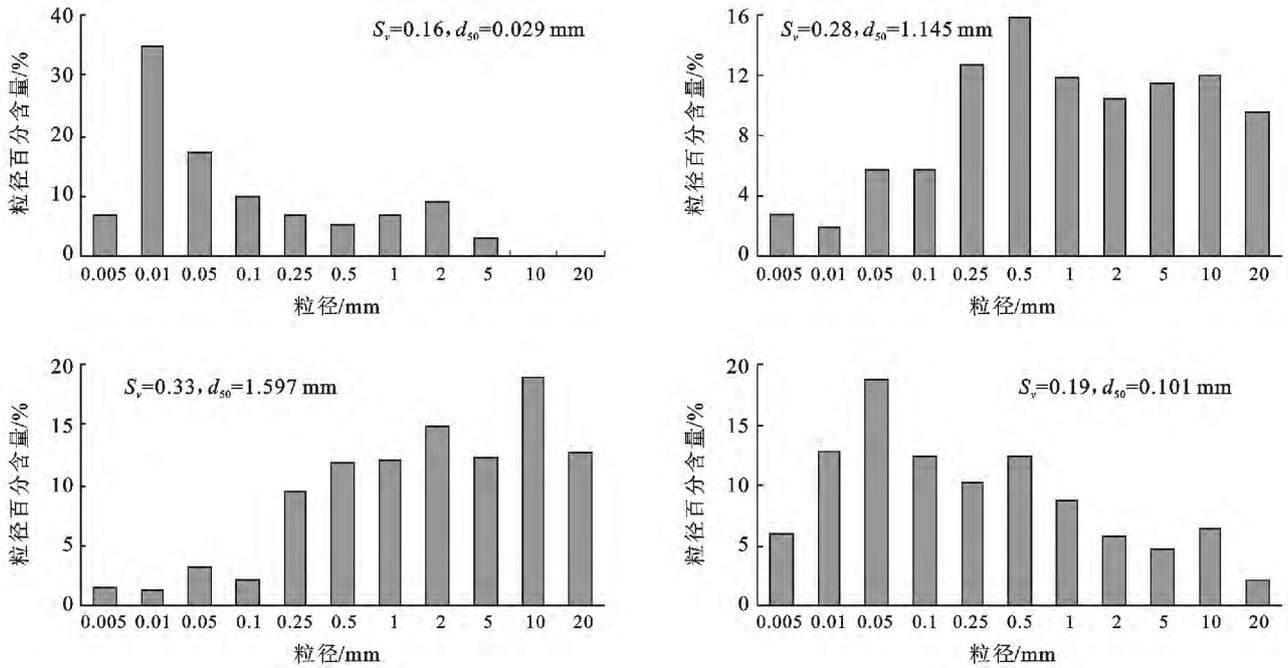


图 3 一次冰碛湖溃决泥石流过程中粒径组成

这与蒋家沟黏性泥石流的容重—中值粒径关系类似<sup>[15]</sup>,但是在同一容重下,试验中冰碛湖溃决泥石流的颗粒组成明显的要粗于蒋家沟泥石流。另一方面,当试验砂的粒径组成不同时,泥石流容重与中值粒径关系明显的出现很大的差异,这也说明冰碛湖溃决泥石流的机械组成与沟道内松散物源的级配特征密切相关。虽然对于类似于蒋家沟黏性泥石流,可以通过泥石流的机械组成来确定其容重,但是对于冰碛湖溃决泥石流这种黏粒含量很少的稀性泥石流来说,利用该方法确定其容重是不准确的。

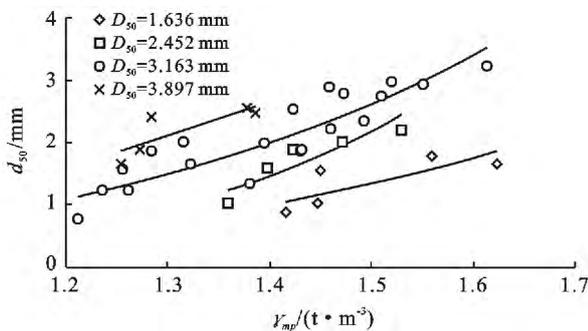


图 4 泥石流中值粒径与容重关系

### 3.2 冰碛湖溃决泥石流机械组成的影响因素

冰碛湖溃决泥石流的形成受到溃决洪水功率以及堆积物级配特征的影响,因此泥石流的机械组成作为泥石流形成和演化过程中非常重要的特征参数,势必直接受制于上述两个参数。

溃决洪水峰值功率( $W_{op}$ )为:

$$W_{op} = \gamma q_p J$$

式中: $J$ ——沟道坡度, $q_p$ ——单宽峰值流量, $\gamma$ ——水的容重,其物理意义为一次溃决洪水可提供给泥沙启动的最大能量。从图 5 可以看出,冰碛湖溃决泥石流中值粒径随溃决洪水峰值功率增大而增大,以试验砂  $D_{50} = 3.163 \text{ mm}$  时为例,两者的关系可以表示为:

$$d_{50} = 0.366(\gamma q_p J)^{0.53} \quad (R^2 = 0.92) \quad (2)$$

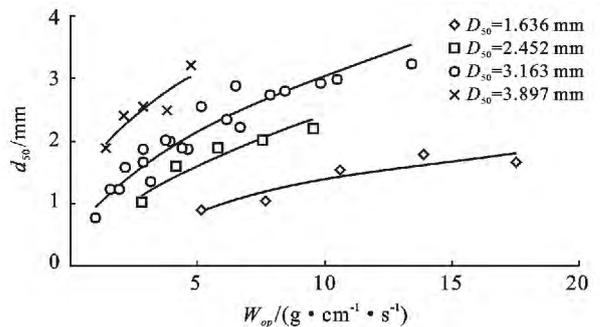


图 5 泥石流中值粒径与峰值功率的关系

但是当沟床铺砂级配不同时,在同一溃决洪水功率下,形成的泥石流的中值粒径有所不同。为了能够表征溃决洪水特征对泥石流机械组成的影响,可以定义无量纲参数  $d_{50}/D_{50}$ ,其物理意义为沟床铺砂与泥石流机械组成的相关程度。通过试验数据的分析, $d_{50}/D_{50}$ 与溃决洪水之间的关系可以表示为:

$$d_{50} = 0.34 \left( \frac{q_p J}{\sqrt{g} D_{50}^{3/2}} \right)^{0.43} D_{50} = 0.34 K^{0.43} D_{50} \quad (3)$$

$$R^2 = 0.81$$

式中: $g$ ——重力加速度; $K$ ——泥石流形成因素, $K$ 值越大越容易形成泥石流,反之亦然。

从图6可以看出,冰碛湖溃决泥石流的机械组成受到溃决洪水特征以及沟床铺砂的影响。值得注意的是,部分试验中泥石流机械组成的中值粒径要大于沟床铺砂的中值粒径,即出现 $d_{50}/D_{50} > 1$ 的情况,其主要原因在于在溃决洪水达到峰值流量前,由于流量相对较小,大部分的细颗粒物被冲刷,堆积物表面粗化,使得沟床堆积物整体变粗;当流量达到峰值时,大部分较粗的颗粒启动并参混至泥石流中,使得其中值粒径比沟床铺砂要大。

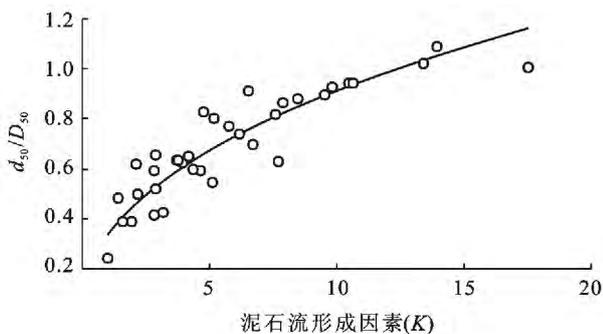


图6 试验中 $d_{50}/D_{50} - K$ 的关系

## 4 结论

从冰碛湖溃决泥石流形成的模式来看,属于典型的水力类泥石流。冰碛湖溃决泥石流一般黏粒含量很少,为单峰值连续流;在一次泥石流过程中,容重、流量过程与溃决洪水过程非常匹配。根据泥石流容重的变化,可大致将泥石流过程分为:前期挟沙水流,中期连续泥石流(稀性泥石流或水石流),后期挟沙水流;对应的泥石流的粒径从粉砂到砾石,再到粉沙的变化过程。冰碛湖溃决泥石流粒径与其容重存在正相关关系,同样取决于冰碛湖溃决洪水功率和沟床堆积物的粒径特征。

冰碛湖溃决及其引发的泥石流往往会造成极为严重的灾害,但是由于冰碛湖常常是位于高海拔地区,加之冰碛湖溃决的突然性,目前有关于冰碛湖溃决泥石流形成和演化的相关资料非常的匮乏,通过试验的手段研究冰碛湖溃决以后泥石流的形成和演化

规律,对于完善泥石流的相关理论以及防灾减灾都有非常重要的意义。

### [参考文献]

- [1] Clague J J, Evans S G. A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(17/18): 1763-1783.
- [2] 车涛,晋锐,李新,等.近20a来西藏朋曲流域冰碛湖变化及潜在溃决冰碛湖分析[J].冰川冻土,2004,26(4): 397-402.
- [3] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Li Yong, et al. Changes in glacial lakes and glaciers of post-1986 in the Poiqu River basin, Nyalam, Xizang (Tibet) [J]. Geomorphology, 2007, 88(3/4): 298-311.
- [4] 梁光模,程尊兰.西藏公路水毁研究[M].四川成都:四川科学技术出版社,2001.
- [5] 徐道明.西藏喜马拉雅山区危险性冰碛湖及溃决特征[J].地理学报,1989,44(5):343-352.
- [6] 朱平一,何子文,汪阳春.川藏公路典型山地灾害研究[M].四川成都:成都科技大学出版社,1999.
- [7] 程尊兰,朱平一,宫怡文.典型冰碛湖溃决型泥石流形成机制分析[J].山地学报,2003,21(6):716-720.
- [8] 崔鹏,马东涛,陈宁生,等.冰碛湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J].第四纪研究,2003,23(6):621-627.
- [9] 游勇,程尊兰.西藏波密米堆沟泥石流堵河模型试验[J].山地学报,2005,23(3):288-293.
- [10] 康志成,李焯芬,马蔼乃,等.中国泥石流研究[M].北京:科学出版社,2004.
- [11] 吴积善,康志成,田连权.云南蒋家沟泥石流观测研究[M].北京:科学出版社,1990.
- [12] 张信宝,刘江.云南大盈江流域泥石流[M].四川成都:成都地图出版社,1989.
- [13] Cui Peng, Dang Chao, Cheng Zunlan, et al. Debris flows resulting from glacial-lake outburst floods in Tibet, China [J]. Physical Geography, 2010, 31(6): 508-527.
- [14] 杜榕桓,康志成,陈循谦.云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M].重庆:科学技术文献出版社重庆分社,1987.
- [15] 李培基,梁大兰.泥石流容重及其计算[J].泥沙研究,1982(3):75-83.