

# 典型冰湖溃决型泥石流形成机制分析

程尊兰, 朱平一, 官怡文

( 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

**摘 要:**冰湖溃决型泥石流是形成于高寒山区的一种特殊泥石流类型。本文以位于西藏喜马拉雅山南坡的樟藏布沟 1981 年暴发的大于百年一遇冰湖溃决型泥石流为例, 探讨了冰湖溃决型泥石流的形成过程, 形成条件、机制、发展趋势和危害。

**关键词:**泥石流; 冰湖溃决; 高寒山区

**中图分类号:** P642. 23

**文献标识码:** A

樟藏布沟位于喜马拉雅的南坡聂拉木县, 1981- 07- 11 0: 30, 樟藏布沟发生了 > 100 a 一遇的冰湖溃决型泥石流, 严重地危害了中( 国) 尼( 泊尔) 公路聂友段, 甚至危害到尼泊尔境内。冰湖溃决型泥石流发生于高寒地区, 来势凶猛, 暴发突然, 流量大, 破坏力强, 对西藏等高寒地区公路交通、居民点等危害严重。但由于其形成环境严酷, 形成条件特殊, 同时因其所处独特的自然地理、地段条件, 目前对其研究不多<sup>[1~ 5]</sup>。本文以樟藏布沟冰湖溃决型泥石流为例, 讨论此类泥石的形成条件、机制、发展趋势和危害。

## 1 流域自然地理条件

泥石流发育的樟藏布沟所在波曲河流域, 位于喜马拉雅山南坡, 受印度洋吹来的西南季风的影响, 降水( 含雨、雪) 丰沛, 随高程变化显著。海拔 1 700~ 2 500 m, 年降水量 2 500~ 3 000 mm, 海拔 2 500~ 3 100 mm, 年降水量 1 500~ 2 500 mm, 海拔 3 100~ 3 900 mm, 年降水量 600~ 1 500 mm, 海拔 3 900 mm 以上全年都可能下雪。据聂拉木县气象资料, 固态降水占年降水量的 40%。

樟藏布沟是西藏自治区聂拉木县境内喜马拉雅

山南坡波曲河左岸的一级支流, 长 8. 5 km, 流域面积 50. 5 km<sup>2</sup>, 呈阔叶状, 流域完整系数达 0. 7。流域最高点海拔 6 109 m, 入波曲河汇口处海拔为 3 168 m, 相对高差 2 941 m。流域海拔 4 440 m 以上为冰川及永久积雪区, 面积达 27. 7 km<sup>2</sup>, 占流域总面积的 45. 15%。公路海拔为 3 320 m, 公路以上山坡平均坡度 > 40°。在海拔 3 550 m 以上流域包括 7 条主要支沟, 沟道纵比降大, 达 149. 6‰~ 478. 9‰。

樟藏布沟流域山高谷深坡陡, 出露地层为前震旦系康山桥组( AnZk) 云母石英片岩、黑云母片麻岩以及第四系残坡积碎石土, 地质构造复杂, 岩体节理、裂隙发育、重力地质作用尤为突出, 滑坡、崩塌多处发生。同时樟藏布沟沟谷两侧冰碛台地广泛分布, 现代冰川区冰舌表面和前缘分别有表碛和侧碛堤、终碛堤分布。上述堆积物结构松散, 大小混杂, 从粘粒至数米乃至数十米的巨砾均有, 在洪水作用下极易参与泥石流活动。

次仁玛错冰湖位于樟藏布沟 3<sup>#</sup> 支沟, 湖面高度变化在 4 640~ 4 690 m, 1981 年溃决前, 冰湖长 1. 5 km, 面积 0. 643 km<sup>2</sup>, 蓄水量仅 2 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。冰湖上缘紧拉阿玛次仁冰川( 图 1)。上述各因素为樟藏布沟泥石流的形成提供了充分的必要条件。

收稿日期( Received date): 2003- 09- 20; 改回日期( Accepted): 2003- 11- 20。

基金项目( Foundation item): 国家自然科学基金资助项目( 40371016); 交通部西部交通建设科技项目( 200131879257) [This research is supported by The National Science Foundation Project ( No. 40371016), The Ministry of Communications( No. 200131879257). ]

作者简介( Biography): 程尊兰( 1952- ), 女( 汉族), 四川隆昌人, 副研究员, 主要从事山地灾害及防治工程研究, 已发表相关论文近 30 篇。[ Chen Zunlan( 1952- ), female, han nationality, born in Longchang Sichuan, associated professor, major in mountain hazards and prevention methods study, has announced nearly 30 articles, E-mail: czl@imde. ac. cn]

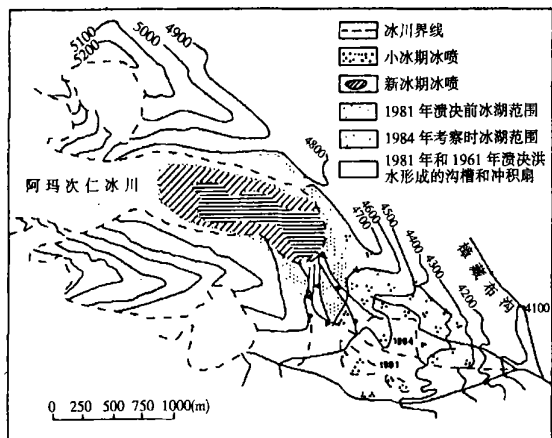


图1 次仁玛错冰湖平面图

Fig. 1 Plan of Cirenmacuo Ice Lake

## 2 冰湖溃决泥石流形成过程及危害

### 2.1 形成过程概况

樟藏布沟泥石流暴发前期降水(雪和雨)充沛,上年冬季和当年春季的冰雪积累量大,暴发前的1981-07-05日~10气候炎热,气温上升,冰川消融加剧,产生大量的融水渗入冰体导致部份冰川滑动并崩落。与此同时,阿玛次仁冰川的跃动使冰川前缘伸张裂隙十分发育,应力释放,导致约 $7 \times 10^6 \text{ m}^3$ 的冰体脱离冰舌滑入次仁玛错冰湖中,冰湖水位壅高上涨,漫溢不稳定状态的终碛堤,造成7月11日午夜冰湖溃决。溃决口顶宽230 m,底宽40~60 m,深达50 m,据计算,溃决最大流量为 $1.596 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,出现在溃坝后23 min,洪峰过程60 min,溃决水体总量 $1.9 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。湖水位平均下降32 m。

次仁玛错冰湖溃决洪水顺樟藏布沟迅速向下推进,沿途掏蚀沟床松散物质,并冲刷形成山洪泥石流。在流域中下游又得到两岸物质的大量补给,最终演变成高容重粘性泥石流。容重达 $2.0 \text{ t/m}^3$ 以上,流体中最大漂砾达 $3.0 \times 10^3 \text{ t}$ 。泥石流固体物质主要来源于次仁玛错冰湖以下的冰碛物和主沟床各种堆积物,共计达 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。溃决洪水首先在冰碛台地上部冲出一条长约400 m的沟槽,侵蚀总量估计为 $1.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。部分巨大漂砾堆积台地下半部形成总计积扇,其余进入主沟。主沟长6 km,平均纵比降240‰,平均侵蚀深度10 m以上,最大达23 m,侵蚀的固体物质总量约 $2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

巨大的樟藏布沟泥石流冲出沟口,泥石流流量达 $2777 \text{ m}^3/\text{s}$ ,最大流量达 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ,堵断波曲

河,并直扑对岸高约30 m的曲乡台地,形成高约50 m,沿河长180 m的泥石流堵塞坝,持续约1 h,回水淹没了波曲河上游100 m处,距河床30 m高阶地上的曲乡村。

波曲河上的泥石流堵塞坝瞬间溃决,在波曲河水的推波助澜下,泥石流龙头高达30 m以上,沿着波曲河迅猛下泄。从樟藏布沟口至友谊桥长约20 km的河谷,两侧的坡洪积物均遭到严重的冲刷侵蚀,这些被侧向侵蚀的物质源源不断地补给了泥石流,同时部分堆积于河床。泥石流在友谊桥(流量达 $2575 \text{ m}^3/\text{s}$ )受阻塞高达25 m。距冰湖溃口50 km的尼泊尔境内巴勒比斯桥处为 $1549 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

友谊桥以下至尼泊尔境内的逊科西水电站约30 km河段,泥石流除继续强烈侧向侵蚀外,河床显著淤积升高,泥石流堆积形态典型。逊科西以下泥石流被稀释转化为洪水。

根据波曲河堆积段河谷的长度和断面估算(表1),此次泥石流堆积总量约 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,按一般情况,大约有数量的泥沙搬运至更远的下游,这样,此次泥石流输沙总量可能达 $4 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。除了樟藏布沟进入波曲河的固体物质 $1.8 \times 10^6 \text{ m}^3$ 外,沿途侧向侵蚀获得的固体物质约 $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。

此次泥石流过程,流体中最在漂砾达 $17.7 \text{ m} \times 11.3 \text{ m} \times 6.7 \text{ m}$ 。现沟床中最大砾径16.0 m,平均粒径1.0 m左右,细颗粒含量少。表1说明了泥石流堆积物的颗粒组成特征。

### 2.2 泥石流危害

樟藏布沟冰湖溃决泥石流危害严重。1981年强大的泥石流侵蚀掉了谷底较宽展台地及其上面的牧场,人行小道和简易悬索桥;摧毁了位于沟口跨越樟藏布沟的中尼公路原707<sup>#</sup>桥(1孔 $\times$ 6 m钢筋混凝土桥);诱发了樟藏布沟南岸的707<sup>#</sup>滑坡,前缘局部复活,滚石、滑塌经常发生,危害近150 m公路,目前滑坡仍在继续活动,每逢雨季,断道时有发生;泥石流横过波曲河,爬坡冲毁对岸30 m高曲乡村20余户民房及小型水电站;波曲河友谊桥及附近建筑物全部被毁,约有6000 m路被冲失并变成主河道,另有1370 m路基被冲毁,导致波曲河50多km沿河两岸松散物质大量坍塌和滑坡,另有1370 m路基被冲毁,诱发了波曲河左岸友谊桥古滑坡多处局部复活;尼泊尔境内的逊科西水电站部份被毁,尼泊尔境内死亡达200人。

表 1 1981 年泥石流沿波曲河谷的堆积

Table 1 Deposition of debris flows along the Boqu Valley

断 面	河床纵比降 ( ‰)	河床宽 (m)	堆积宽 (m)	堆积厚度 ( m)	平均最大粒 径( m)	样点 堆积类型
达德巴尼	50	20	35	2.0~ 5.0	3.8	龙头
普尔坪	30	30	60	3.0~ 7.0	2.4	残留体
库背多尔沟口	30	38	80	2.5~ 7.0	5.4	龙头
杰普	20	35	55	2.0~ 4.0	3.5	龙头
巴勒比斯上段	80	40	45	2.0~ 3.0	2.1	天然堤
巴勒比斯下段	7	45	80	2.0~ 3.0	/	/
引水闸上段	6	45	60	1.7	1.6	天然堤
引水闸下段	6	50	60	5.0	1.1	挖淤物

3 冰湖溃决条件和泥石流形成机制

1981- 07- 14, 樟藏布沟仁玛错冰湖溃决泥石流的暴发, 除受一般形成因素影响外, 冰湖溃决产生巨大洪峰是其根本原因。

3.1 冰湖溃决条件

次仁玛措冰湖是典型的冰川终碛阻塞湖, 简称终碛湖。终碛湖溃决应具备以下条件:

1. 应当是现代冰川终碛阻塞湖。一般要有新冰期以来形成的未经成岸作用和处于稳定状态的终碛堤。这种冰碛堤形成时代较新、胶结度差、结构疏松而易失稳。次仁玛措冰湖是小冰期以来形成的现代终碛湖, 属于易溃决的冰湖。

2. 终碛湖距冰川较近。一般具有危险性的终碛湖湖岸与现代冰川直接相连或相距相近, 有的冰舌伸入湖泊达数百米。次仁玛措冰湖与阿玛次仁冰川相毗连, 并有冰舌伸入。

3. 冰川规模大、活动强烈、易发生快速前进跃动或崩坠于湖而形成涌浪, 其波涌压力冲击终碛堤。阿玛次仁冰川属季风海洋型冰川, 所在位置纬度低、冰川消融水平高、进退变化大、冰舌纵比降大、具跃动冰川性质, 冰川底部温度亦高、冰舌下段裂隙纵横、地下水道发育, 上述特点为此终碛湖溃决的重要诱发因素。

4. 终碛湖规模相对较大。湖泊规模越大, 则容积也越大, 相应水体库容对终碛堤的静压力也越大, 从而影响到湖堤的稳定性, 同时溃决时形成的洪峰流量也大。然而, 太大的冰湖由于自身的调蓄能力, 有制约冰碛溃决的趋向。次仁玛措湖溃决前面积

0.643 km<sup>2</sup>, 属于相对较大的冰湖。1981 年溃决后, 面积缩小为 0.265 km<sup>2</sup>。

5. 高温多雨。气温高、降水充沛使冰川消融径流量增加, 导致大量融水汇入冰湖。同时, 冰川融水沿冰裂隙下渗至底床, 使冰舌一部分呈空冰舌, 冰舌由缓慢运动瞬时转入高速运动滑入湖中。此外, 气候的湿热变化也决定了冰川的积累和消融、前进或后退, 从而影响到冰湖溃决的可能性。它还可以使死冰体迅速消融水量陡增, 导致冰湖溃决。次仁玛措湖地处相对高温多雨的地区, 尤其在夏季 7、8 月份。因此, 次仁玛措湖完全具备终碛湖溃决的基本条件。

3.2 冰湖溃决机制及泥石流形成

冰湖溃决有多种机制。次仁玛措冰湖溃决主要是前期降水充沛, 天气持续高温、冰雪消融快, 大量融水渗入冰体, 同时发生冰川跃动, 前沿伸张裂隙扩大, 导致 7 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> 的冰体脱离冰舌, 滑入湖中, 造成湖水水位迅速升高, 漫溢处于不稳定状态的终碛堤, 造成冰湖溃决, 冰湖溃决的力学机制是:

1. 大方量冰川脱离母体, 呈跃动性前进, 快速进入水体, 造成巨大涌浪, 形成波动涌压力。

2. 湖水的静水压力和波动双重作用, 一方面造成水流漫坝, 另一方面使原本胶结较弱, 力学性质较差的坝体失稳定溃决。

由于上述作用次仁玛措冰湖溃决时所形成的洪峰流量( 最大溃决流量约 16 000 m<sup>3</sup>/s ), 至少是波曲河多年平均洪峰流量的 16 倍。在此条件下, 强大的水力对沟床和沟岸不稳定的冰碛物和坡面风化物产生强烈铲蚀和冰刷, 在极短时间内造成大量松散物质与洪流掺合转变为挟沙水流, 局部地段形成泥石

流。再加之沿途接受两岸的崩塌、滑坡固体物质不断补给, 则演变为大规模的粘性泥石流。

根据洪痕调查, 表 2 是沿河各断面的水力要素和流量资料, 据此资料按曼宁公式可计算出各断面

条件下的泥石流流量。

根据断面调查, 计算出樟藏布支沟与波曲河汇口处泥石流流量为  $2\ 777\ \text{m}^3/\text{s}$ , 属于大型泥石流。

表 2 波曲河泥石流河段各断面流量

Table 2 Discharge of cross-sections in the debris flow zone of the Boqu River

断面编号	断面位置	水位 (m)	水面宽 (m)	断面面积 ( $\text{m}^2$ )	水力半径 ( $\text{m}^2$ )	河床 坡度	泥石流		
							糙率* 系数	流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )	流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
I	樟藏布沟支沟沟口	18.5	52.0	512	7.19	0.23	3	5.4	2 777
II	友谊	17.4	59.0	480	7.62	0.12	4	5.37	2 575

\* 糙率系数据实测资料按曼宁公式求得。

4 趋势分析

樟藏布沟泥石流发育处于旺盛, 流水和重力慢等外动力地质作用强烈, 具备了泥石流的陡峻地形和丰富松散固体物质的充分条件, 只要有高强度的地表径流起动, 即会激发泥石流。

据刘湘海等人考察报告, 樟藏布沟曾于 1964 a 暴发过一次冰湖溃决, 时隔 17 a 后的 1981 年冰湖再次溃决, 1983 年又发生过一次沟谷堵塞溃决洪水。由此推测冰湖溃决洪水的频率约为 10~ 20 a 一次, 这与华籍尼泊尔人阿旺藏布( 73 岁) 提供的波曲河每 10 年暴发一次洪水的资料相近, 但 1981 年樟藏布沟泥石流频率 > 100 a 一遇。

次仁玛错冰湖经 1981 年溃决后, 冰湖长度缩短为 1.1 km, 面积约  $0.255\ \text{km}^2$ , 1<sup>#</sup> 支沟内一小型冰湖, 长 270 m, 最大宽度约 120 m, 目前西藏冰川都处于退缩阶段, 冰川退缩使冰川末端及其终碛之间具有更多的蓄水条件。另外, 据西藏地震史料汇编, 聂拉木地区历史曾多次发生强烈地震, 8 级以上强震间隔期的 100 a, 5~ 6 级地震 4~ 20 a 一次, 有感地震每年多次。强烈地震可引起冰湖大规模溃决, 从而暴发大规模泥石流。

同时, 樟藏布沟处于印度洋板块与欧亚板块接触带的喜马拉雅褶皱带内, 新构造运动强烈, 地表提升较为明显、沿沟流域因风化剥蚀, 松散物质丰富。

上述条件显示, 樟藏布沟今后发生泥石流的可能性很大, 且随着全球气候变暖, 具发生频率可能 < 10 a 一次, 故其危害性是非常显著的。

参考文献(References):

[ 1] Li De-ji, You Yong. Midui Ice lake break in Bomi, Tibet[ J]. *Journal of Mountain Research*, 1992, 10( 4): 219~ 224. [ 李德基、游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议[ J]. 山地研究, 1992, 10( 4): 219~ 224.]

[ 2] Zhu Ping-yi, Cheng Zun-lan. Cause to blockage of river by debris-flow sediment of Peilong Gully in the Sichuan-Tibet Highway[ J]. *Journal of Natural Hazards*, 2000, 9( 1): 80~ 83. [ 朱平一, 程尊兰, 等. 川藏公路培龙沟泥石流输沙堵江成因探讨[ J]. 自然灾害学报, 2000, 9( 1): 80~ 83.]

[ 3] Zhu Ping-yi, Wang Yang-chun. Water disasters to highways in Tibet[ J]. *Journal of Natural Hazards*, 2001, 10( 4): 148~ 152. [ 朱平一, 汪阳春. 西藏公路水毁灾害[ J]. 自然灾害学报, 2001, 10( 4): 148~ 152.]

[ 4] Xu Dao-ming. Formation and deposition of debris flow induced by break of Boqu ice-lake in Tibet[ J]. *Glaciers and Frozen Earth*. 1987, 9( 1): 23~ 24. [ 徐道明, 西藏波曲河冰湖溃决泥石流的形成与沉积特征[ J]. 冰川冻土, 1987, 9( 1): 23~ 24.]

[ 5] Lü Ru-ren, Tang Bang-Xing, Zhu Ping-yi. Debris Flows and Environment in Tibet [ M ]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press. 69~ 112 [ 吕儒仁, 唐邦兴, 朱平一. 西藏泥石流与环境[ M ]. 成都: 成都科技大学出版社, 2000. 69~ 112.]

Typical Debris Flow Triggered by Ice-Lake Break

CHENG Zun-lan, ZHU Ping-yi, GONG Yi-wen

( Institute of Mountain hazards and Environment , Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu, 610041 )

**Abstract:** Debris flow triggered by break of ice-lake is one of special occurrences in frigid alpine areas. In 1981, there was such a debris flow occurring the Zizangbu Gully on the south slope of the Himalayas, of return period more than 100 years. Through analysis of this very occurrence, the present paper discusses in details its forming condition, initiation mechanism, developing trend, and hazards.

**Key Words:** debris flow; ice-lake break; alpine

山地学报作者、读者意见调查表

姓名\_\_\_\_\_年龄\_\_\_\_\_职务或职称\_\_\_\_\_电话( E. mail )\_\_\_\_\_

您对本刊总体印象( 优   √   良   △   差   × )

☐文稿学术性           ☐编辑质量           ☐印刷质量           ☐其它

您希望本刊新增哪类文稿或减少哪类文稿: \_\_\_\_\_

本刊存在的问题, 不足之处及您的建议: \_\_\_\_\_

注: ①凡填写本调查表者, 将赠送本刊一年杂志或本刊百期光盘一张, 以示谢意。

②调查表与反馈信息请寄: 成都市人民南路四段9号《山地学报》编辑部   冯海燕   收   邮编: 610041