

# 藏东南典型冰湖溃决危险性分析<sup>\*</sup>

刘建康<sup>1,2,3</sup>, 程尊兰<sup>1,2</sup>, 郭芬芬<sup>2,3</sup>, 徐 伟<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院地表过程与动力学重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘 要:** 自川藏公路南线(西藏境内)修建通车以来, 因受到泥石流、滑坡崩塌等自然灾害的影响而经常出现交通被迫中断的现象。其中, 冰湖溃决泥石流由于其突发性强、洪峰高、流量大、破坏性强、持续时间短、范围广等特点, 已成为藏东南地区危害程度最为严重的特殊灾种。通过对错下湖区域水文气候、冰川活动以及地震等要素的分析, 初步认为该冰湖存在可能溃决的危险; 通过终碛堤 1/3 和 1/2 溃决模式进行计算, 得到溃决洪峰流量分别为 2 236 m<sup>3</sup>/s 和 3 697 m<sup>3</sup>/s。错下湖一旦溃决, 洪水汇入帕隆藏布江时将淹没以至冲毁沟口段公路、桥梁等基础设施, 同时, 主河还将面临泥石流堵江的危险。

**关键词:** 冰湖溃决洪水; 泥石流; 地震; 灾害评估; 错下湖; 藏东南

**中图分类号:** P642.23; P343.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2011)02-0045-05

冰湖溃决是我国喜马拉雅山区十分普遍的现象, 近 50 年来至少发生过 20 余次较大的溃决事件, 造成巨大的人员伤亡和财产损失<sup>[1]</sup>, 从而引起各界重视。从 1970 年代初起, 中科院青藏高原综合考察队收集了喜马拉雅山区冰湖溃决历史资料, 并讨论了危险性冰湖及其溃决原因<sup>[2]</sup>, 由此展开了国内学者在此领域的研究工作。徐道明<sup>[1-3]</sup>等通过对溃决冰湖的考察, 总结出冰湖溃决的特征、主要因素和暴发周期等; 吕儒仁<sup>[4]</sup>等通过对资料的数理统计分析, 提出判别冰碛湖溃决可能性的 7 个指标, 并分析出冰湖溃决与气候背景的关系等; 程尊兰<sup>[5-6]</sup>等结合气候变暖、异常等方面, 分析了藏东南地区危险性冰湖溃决的未来发展趋势。在国外, Richardson<sup>[7]</sup>等通过对喜马拉雅山区 26 个冰湖溃决的研究, 提出 5 种导致冰湖溃决的激发因素以及所占的比例; Huggel<sup>[8]</sup>等利用遥感技术对阿尔卑斯山地区危险性冰湖提取特征指标, 从而对溃决洪峰预测进行评估; McKillop<sup>[9]</sup>等针对英国哥伦比亚省西南部地区分布的终碛湖, 提出一套比较完善的冰湖危险性评估方案。

本文通过对西藏错下湖各方面的综合分析, 结合判别溃决可能性的指标以及水文气候、地震等触发因素, 提出该冰湖存在溃决的可能, 并在此基础上对冰湖溃决后的危险进行评估, 包括溃

决洪峰流量、洪水演进等计算工作。本文的分析探讨将为西藏地区危险性冰湖的评估以及制定冰湖溃决泥石流综合防治技术方案提供科学依据和借鉴。

## 1 研究区概况

西藏莫如弄巴流域因受印度洋季风的影响而发育海洋性冰川, 自小冰期气候变暖以来, 雪线海拔不断提高, 冰川逐渐退缩, 在该地区形成大量终碛湖, 错下湖即是其中 13 个冰湖中最大最危险的一个(图 1)。错下湖四周有 5 处大小不等的冰川, 总面积为 2.1 km<sup>2</sup>, 虽然这些冰川规模不大, 但由于坡度大、裂隙多等特点, 发生冰崩涌入湖内的可能极大。与冰湖直接相连的冰川为冰斗悬冰川, 面积为 0.74 km<sup>2</sup>, 前缘冰舌与冰湖以陡坎相连, 坡度达到 33%, 冰川平均坡度为 22%, 是其中一条最容易诱发冰湖溃决的冰川。

错下湖呈长方形, 长度 1.94 km, 最大宽度 0.63 km, 平均宽度 0.50 km。湖面面积 0.976 km<sup>2</sup>, 平均水深 36 m 左右, 据估算湖水体积达到 3.571 × 10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>。错下湖湖面高程 4 850 m, 莫如弄巴汇入帕隆藏布江沟口海拔高程 3 220 m, 垂直高差达 1 630 m。因此, 错下湖是西藏地区冰湖的典型代

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2010-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(40771024); 国家科技支撑计划专题项目(2008BAKSOB04-5)

作者简介: 刘建康(1985-), 男, 四川自贡人, 博士研究生, 主要从事防灾减灾与岩土工程研究。E-mail: j\_jiankang@yahoo.com.cn

表之一, 具有海拔高、落差大的特点, 并且下游沟谷两侧物源丰富, 溃决洪水极易转化为大规模泥石流, 有着非常大的破坏性力。

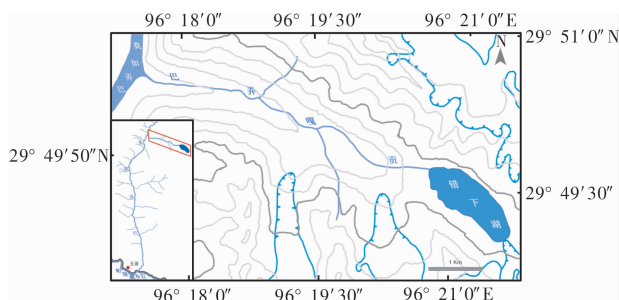


图1 错下湖所在位置

## 2 影响错下湖溃决的因素

### 2.1 气候变化

全球气候变暖导致冰川消融退缩, 为冰湖的形成、扩大提供了条件, 但它并不是构成冰湖溃决的必要条件。根据气候资料调查显示, 近 60 年来西藏地区 13 个冰湖发生的 15 次溃决事件与气温、降雨的突然变化存在一定关系, 即冰湖溃决是气候波动转折点或突变点上的产物。其中, 气候由湿冷年代转向湿热或干热的过渡年份或气候突变(突然升温并伴随丰雨)年份的夏秋季节<sup>[4]</sup>, 是最有利于冰湖溃决发生的气候背景, 1964 年 8 – 9 月连续 3 次冰湖(隆达错、吉莱错和达门拉咳错)溃决即是最好的例证。

图 2 所示为藏东南林芝地区 1965 – 2005 年以来气候的变化特征曲线<sup>[5–6,10]</sup>, 其中气温和降雨的波动性是影响冰川活动的一个重要参数。随着全球变暖趋势的不断发展, 气候异常的现象也频繁发生并且越演越烈。研究表明, 近年来一些异常现象已经打破历史记录<sup>[11]</sup>, 如 2006 年全球出现大范围的气候异常, 包括欧洲最暖的秋天、非洲大角地区的极端干旱和严重洪涝、菲律宾群岛的暴雨等。因此, 激发冰川跃动的气候异常现象还会发生, 并最终导致冰崩、冰滑坡坠入冰湖造成终碛堤溃决。

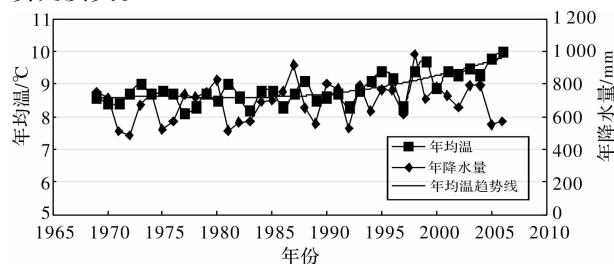


图2 藏东南林芝地区 1965 – 2005 年气候变化曲线

### 2.2 地震活动

青藏高原受到板块作用的影响, 自始新世以来强烈抬升、新构造运动频繁, 因此成为地震多发地带。据统计<sup>[12]</sup>, 在  $29^{\circ} \sim 36^{\circ} \text{N}$ ,  $90^{\circ} \sim 96^{\circ} \text{E}$  的  $4.4 \times 10^5 \text{ km}^2$  范围内, 自 1900 年以来, 发生  $4 \frac{3}{4}$  级以上地震约 142 次, 其中大于 6 级地震约 30 次。

地震对于冰湖溃决来讲, 主要起到三方面的作用: ①促使冰湖附近的冰川失稳发生冰崩、冰滑坡, 从而导致涌浪孕育冰湖溃决; ②地震作用使得终碛堤物质结构发生变化, 如管涌、潜蚀现象的出现, 导致坝体稳定性降低; ③下游沟谷中在地震破坏力作用下形成山崩或滑坡堆积物(图 3), 为溃决洪水演变成泥石流提供物源条件。



图3 堆积物

吕儒仁等<sup>[4]</sup>学者认为, 西藏地区的冰川泥石流与前期地震有着一定的联系, 如 1902 年易贡特大泥石流与 1897 年印度阿萨姆  $8 \frac{3}{4}$  级大地震相关, 培龙弄巴 1983 – 1985 年大型冰川泥石流与 1980 年以来帕隆藏布流域的中强地震群相联系。错下湖流域位于波密—墨脱活动地震带, 为 VIII 度烈度区。因此, 无论是暴发冰川泥石流还是冰湖溃决泥石流, 地震都是一个很关键的因素。

### 2.3 冰川活动及其他因素

当错下湖地区遭受强烈气候波动或是地震作用时, 冰湖附近的冰川稳定性将大大减小。冰舌在冰进过程中, 由于冰川表面与底部速度差异的影响, 冰川表面发育大量冰裂隙。气候突变时, 例如猛烈升温或者相对早些湿冷气候温度的大幅度回跳, 大量消融水流汇集于冰舌地段, 沿着冰裂缝强烈下渗。随着冰裂缝的进一步加深拉宽, 水流下渗到冰滑面, 大大减小了冰体与基岩间的阻力, 最终造成冰体失稳形成滑坡和冰崩(图 4); 地震对于冰川活动的作用, 则更加明显剧烈。当冰舌脱离冰川后瞬间涌入湖内, 为冰湖溃决发生提供激发条件。

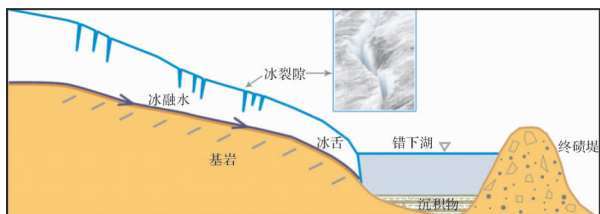


图4 冰滑坡诱发冰湖溃决示意图

另外, 还有其他一些方面是错下湖存在溃决可能的原因, 例如终碛堤的形状: 坝高  $h$  为 36 m, 坝顶长  $L$  为 250 m, 坝顶宽  $B$  为 32 m, 背水坡度  $D_g$  为  $35^\circ$ 。西藏的冰湖溃决表明<sup>[4]</sup>, 坝顶宽度在 3 ~ 1 000 m 范围都能发生,  $B < 60$  m 为击溃性溃决; 背水坡度越大, 坝体越不稳定,  $D_g$  大于  $20^\circ$  都是有利于冰湖溃决的。

### 3 冰湖溃决危险性评估

#### 3.1 冰湖溃决洪峰流量 $Q_p$

评价冰湖溃决危害程度的一个重要参数指标是确定洪峰流量  $Q_p$  的大小。对于溃坝洪峰流量  $Q_p$  的计算, 国内外还没有成熟的理论, 特别是针对冰湖终碛堤这样的特殊案例, 更多地是采用经验或是修正公式。其中, 一部分学者通过总结大量冰湖溃决事件得出  $Q_p$  与库容  $V$  之间的关系式, 如 Huggle<sup>[8]</sup> 的  $Q_p = 0.000\ 7V^{1.017}$ , Popov<sup>[13]</sup> 的  $Q_p = 0.048V^{0.896}$  等经验公式。这些公式因受区域性、背景因素等影响而存在诸多差异, 局限性很大。如利用以上公式对错下湖进行洪峰估算,  $Q_p$  超过

2 万  $\text{m}^3/\text{s}$ 。根据西藏冰湖溃决事件的历史记录分析, 较错下湖规模更大的冰湖洪峰流量也未曾超过这个数值, 因此以上公式不符合该冰湖的预测估算。

为了能更加合理地对错下湖溃决洪峰流量进行预测, 文中采用水利工程上常用的溃坝洪峰流量公式进行对比计算, 比如圣维南公式解 (A. Ritter)、黄河水利委员会修正公式等。这些公式依据溃口的形状来确定洪峰  $Q_p$ , 因此问题的关键在于确定错下湖终碛堤溃口平均宽度  $b$  与溃口深度  $h$ 。

对于溃口平均宽度  $b$  的确定, 有研究表明它的大小与溃口深度  $h$  存在一定关系。Froehlich、美国垦务局等在大量研究工作基础上总结出两者的回归经验公式, 并受到广泛应用。其中, Froehlich 根据溃决时的水库库容及溃口高度提出以下计算溃口宽度的公式<sup>[14]</sup>

$$b = 15V_m^{0.32}h^{0.19}, \quad (1)$$

式中:  $V_m$  为溃决时的水库库容 ( $10^7 \text{ m}^3$ );  $h$  为溃口高度 (m)。

对于溃口深度  $h$  来讲, 早时冰川科学家调查西藏冰湖溃决地区后得出这样的结论: 溃口深度常达到终碛堤高度的  $1/3$ <sup>[4]</sup>, 如表 1 所示。同时大量溃坝流量曲线表明, 洪水一般在下泄  $1/3$  库容的时候出现洪峰流量。因此, 在评估堰塞湖等重大堰塞体风险时主要采用  $1/3$  溃决模式进行计算, 再根据情况的特殊性辅以其他模式作为参考。结合藏东南历史冰湖溃决的规律, 本文在计算错下湖洪峰流量  $Q_p$  时, 除采用  $1/3$  模式外, 并辅以  $1/2$  溃决模式作为保守参考, 计算结果如表 2 所示。

表 1

西藏地区冰湖溃决记录<sup>[2,4]</sup>

冰湖名称	溃决时间	终碛堤高度/m	溃口高度/m	溃口宽度/m	溃决体积/ $10^6 \text{ m}^3$	洪峰流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )
穷比吓玛错	1940-07-10	—	50	—	12.4	1 036 (44 km 处)
桑旺	1954-07-16	—	40	—	240	10 000 (120 km 处)
隆达错	1964-08-25	60	22	85	10.8	3 100 (支沟口)
吉来错	1964-09-21	120	41	—	23.4	4 483
达门拉亥	1964-09-26	—	17	31	—	2 010
章藏布	1981-07-11	80	32	—	19	16 000

表 2 错下湖溃决洪峰流量计算结果

溃决模式	计算方法	溃口宽度 $b/\text{m}$	洪峰流量/( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$1/3$ $h = 12 \text{ m}$	Froehlich <sup>[15]</sup>	36	$Q_p = 0.607V_m^{0.295}h^{1.24} = 2\ 236$
	A Ritter <sup>[16]</sup>	36	$Q_p = \frac{8}{27}(\frac{B}{b})^{1/4}b\sqrt{gh}^{3/2} = 2\ 253$
	黄委会 <sup>[16]</sup>	36	$Q_p = 1.5bh^{3/2} = 2\ 245$
$1/2$ $h = 18 \text{ m}$	Froehlich	39	3 697
	A Ritter	39	4 395
	黄委会	39	4 468

从表 2 中可以看出, 通过 Froehlich 公式得到溃口平均宽度  $b$  后, 对比 Froehlich 与其他两种  $Q_p$  计算结果, 误差较小。因此, 采用 Froehlich 计算方法, 分别按  $1/3$  和  $1/2$  模式得到错下湖溃决洪峰流量分别是  $2\ 236 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $3\ 697 \text{ m}^3/\text{s}$ 。值得注意的是, 由于错下湖下游贡嘎弄巴段沟床比降为  $136\%$ , 并且沟谷两侧松散堆积物较发育, 溃决洪水极易转变成稀性泥石流甚至粘性泥石流, 下游段洪峰流量数值将大大超过这个数值。



3.2 溃决洪水对下游地区的危害

错下湖距离帕隆臧布江汇口处 31.92 km，溃决洪峰流量汇入主河时将有所减少。为简化计算，暂不考虑固体物质对洪水演进的影响，仅从清水出发，通过洪水演进公式进行计算<sup>[16]</sup>。

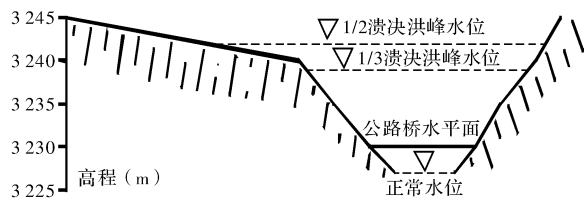
$$Q_n = \frac{W}{\frac{W}{Q_p} + \frac{L}{VK}}, \tag{2}$$

式中： $Q_n$  为洪水演进至下游某处的洪峰流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )； $W$  为冰湖溃坝时的库容( $\text{m}^3$ )； $L$  为下游某处距溃口距离( $\text{m}$ )； $V$  为河道洪水期断面最大平均流速( $5 \text{ m/s}$ )； $K$  为经验系数(1.5)。

从表 3 计算结果以及图 5 可以看出，当错下湖按 1/3 模式溃决时，经过 2.7 h 后洪水洪峰到达帕隆臧布江，高出公路面 9 m 的巨浪将淹没沟口段一切基础设施。如果是泥石流，则会淤埋和冲毁整个沟口地段，甚至还有可能堵江形成泥石流坝；当错下湖按 1/2 模式溃决时，后果将会更加严重。

表 3 错下湖溃决汇入帕隆臧布江洪水演进计算结果

溃决模式	溃口处 $Q_p/(\text{m}^3/\text{s})$	汇入口 $Q_n/(\text{m}^3/\text{s})$	洪峰到达时间/h	洪峰水深/ $\text{m}$	淹没公路水深/ $\text{m}$
1/3	2 236	1 765	2.7	12	9
1/2	3 697	2 565	2.1	15	12



(注：该断面距离沟口公路桥约100 m)

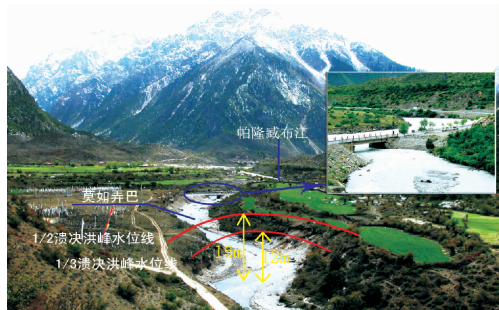


图 5 洪峰汇入帕隆臧布江沟口水位示意图(镜头朝南)

3.3 错下湖溃决可能引起的次生灾害链

错下湖由于其自身地理位置的特殊性，溃决诱发的危害程度将加大，甚至会诱发更大规模的次生灾害链。冰湖溃决洪水在贡嘎弄巴段掏刷沟谷两岸坡积物，由于固体物质沿途大量补给，叠加形成特大规模的泥石流，汇入帕隆臧布江主河

后形成泥石流堵塞坝。坝体溃决后，将会给川藏线莫如弄巴以下公路和沿江城镇、村庄的生命财产造成极其严重的灾难，后果不堪设想。近 30 年来，帕隆臧布江就发生过多起泥石流堵江事件<sup>[17-19]</sup>，后果非常严重，如莫如弄巴附近的培龙沟、冬茹弄巴曾先后 5 次堵塞帕隆臧布江，米堆沟也发生过一次局部堵江，造成巨大的损失。由于次生灾害链形成机制复杂，有待开展进一步的研究分析工作。错下湖冰湖溃决诱发的灾害链如图 6 所示。



图 6 错下湖冰湖溃决可能诱发的灾害链分布图

4 结语

本文通过气候、地震和冰川活动等方面对错下湖流域进行分析后，认为该冰湖存在可能溃决的危险，并结合西藏地区发生过的冰湖溃决事件一些基本规律，利用 Froehlich 公式计算出溃决洪峰流量，从中得出分析结果：冰湖溃决洪水或形成的泥石流汇入帕隆臧布江时将淹没甚至淤埋沟口段基础设施，一旦堵江则上下游公路城镇将面临更大的风险。虽然从目前情况分析来看，出现这种灾害的几率不大，但有一定危险性，因此必须引起高度重视，超前提出科学的防治方案。

但是，还需要进行更多研究以确保危险性评估工作取得进一步完善：①冰湖终碛堤最终溃口的形状，因为它的最终形态将决定洪水以及泥石流的暴发规模。如果能更加准确确定溃口大小，则会得到更加具有评估价值的洪峰流量；②冰湖溃决洪水演进转变为泥石流的转化演算，这需要

野外调查的分析并辅以模型试验研究的佐证。泥石流洪峰流量不仅较洪水更大, 破坏力更猛, 而且对于研究淤积沟口段堵塞坝的形成机制来讲也具有非常重要的科学依据; ③冰湖溃决泥石流堵江的可能性, 包括坝体的规模、稳定性等方面的预测。

## 参考文献:

- [1] 吕儒仁, 唐邦兴. 西藏的冰湖溃决泥石流[C]//滇藏铁路勘测选线讨论会论文选辑. 北京: 中国铁道学会铁道工程委员会, 1981.
- [2] 徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险性冰湖及其溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 343–352.
- [3] 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): 23–34.
- [4] 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, 1999.
- [5] 程尊兰, 田金昌, 张正波, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流形成的气候因素与发展趋势[J]. 地学前缘, 2009, 16(6): 207–214.
- [6] 程尊兰, 朱平一, 党超, 等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 954–959.
- [7] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas[J]. Quaternary International, 2000, 65(6): 31–47.
- [8] Huggel C, Haeberli W. An assessment procedure for glacier hazards in Swiss Alps[J]. Can Geotech, 2004, 41(6): 1068–1083.
- [9] McKillop R J, Clague J J. A procedure for making objective preliminary assessments of outburst flood hazard from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia[J]. Nat Hazards, 2007, 41: 131–157.
- [10] 假拉, 杜军, 边巴扎西, 等. 西藏气象灾害区划研究[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [11] 苗秋菊, 张婉佩, 沈永平. 2006 年全球气候异常, 多项纪录被打破[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(1): 50–54.
- [12] 国家地震局. 中国地震简目[M]. 北京: 地震出版社, 1977.
- [13] Popov N. Glacier debris flows migration in Kazakhstan: assessment, prediction and control, in: Debris-flow hazard mitigation: mechanics[C]//1st international conference. San Francisco, California: American Society of Civil Engineers, 1997: 113–122.
- [14] Froehlich D C. Embankment dam breach parameters revisited[C]//Proceeding of the 1995 ASEC conference on Water Resource Engineering. San Antonio, Texas, 1995: 887–891.
- [15] Froehlich D C. Peak outflow from breached embankment dam[J]. Journal of Water Resource Planning and Management, 1996, 121(1): 90–97.
- [16] 铁道部第三勘测设计院. 桥涵水文[M]. 北京: 人民铁道出版社, 1979.
- [17] 程尊兰, 田金昌, 张正波, 等. 西藏江河堵溃灾害及成灾环境分析[J]. 灾害学, 2009, 24(1): 26–30.
- [18] 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.
- [19] 乔建平, 蒲晓虹, 王萌, 等. 大地震诱发滑坡的分布特点及危险性区划研究[J]. 灾害学, 2009, 24(2): 25–29.

## Analysis on Risk of Glacier-Lake Outburst in Southeastern Tibet

Liu Jiankang<sup>1, 2, 3</sup>, Cheng Zunlan<sup>1, 2</sup>, Guo Fenfen<sup>2, 3</sup> and Xu Wei<sup>2, 3</sup>

(1. Key Lab of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. Graduated University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Since construction and opening to traffic, traffic interruptions occur often along the southern line of Sichuan-Tibet highway (in Tibet) due to hazards like debris flow and landslides. Debris flows caused by glacier-lake outburst have become the most serious disasters with the characteristics of unexpected occurrence, high flood peak, great discharge, destructive, short time duration and broad range. Based on analysis on important factors as hydrological climate, glacier movement and earthquake records, etc. in Cuoxiahu area, the glacier-lake is preliminarily proved to be in danger of outburst. Outburst peak flows are obtained respectively as 2 236 m<sup>3</sup>/s and 3 697 m<sup>3</sup>/s by calculation in the mode of 1/3 and 1/2 dam break. Once the outburst of the lake happen, infrastructure such as roads, bridges along the Parlung Tsangpo River would be washed off, even worse, the main river also faces the danger of being blocked by debris flows.

**Key words:** GLOF; debris flow; earthquake; hazard assessment; Cuoxiahu; southeastern Tibet