

帕隆藏布江上游冰湖分布及其变化

程尊兰¹, 时亮^{1,2}, 刘建康^{1,2}, 赵鑫^{1,2}, 刘大翔^{1,2}

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所/中国科学院
山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100039)

摘要: 利用高分辨率遥感影像的判读, 结合现场调查、校核和前人资料分析, 研究了西藏自治区帕隆藏布江上游然乌—培龙段冰湖的分布变化规律。结果发现: (1) 该区有大小冰湖 131 个, 其中面积 $>0.01 \text{ km}^2$ 的有 99 个, 最大冰湖面积达到 0.976 km^2 。(2) 99 个面积 $>0.01 \text{ km}^2$ 的冰湖中冰碛湖最多达 68 个, 占 68.7%; 分布于海拔 4 500~5 000 m 的冰湖有 53 个, 占 53.3%。(3) 可对比的 83 个冰湖中, 冰碛湖总面积 2005 年为 7.21 km^2 , 较 1988 年的 7.03 km^2 仅增加 2.56%。其中, 面积减小的有 45 个, 占 54.2%, 面积增加的 38 个, 占 45.8%。(4) 近 18 a 来, 该冰湖区总面积变化很小, 但部分冰湖面积增大异常, 受海洋性冰川影响, 在该区域内出现大范围冰湖溃决的可能性很小, 但暴发零星冰湖溃决的可能性很大。

关键词: 西藏自治区; 帕隆藏布江; 冰湖; 遥感技术

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)05-0008-05

中图分类号: P642.25

Distribution and Change of Glacier Lakes in the Upper Palongzangbu River

CHENG Zun-lan¹, SHI Liang^{1,2}, LIU Jian-kang^{1,2}, ZHAO Xin^{1,2}, LIU Da-xiang^{1,2}

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

Abstract: Combined with field investigations and historical data, interpretation of high-precision remote sensing images shows the following facts about glacier lakes within the Ranwu—Peilong section in the upper Palongzangbu River. (1) There were 131 glacier lakes of various sizes totally, of which 99 were larger than 0.01 km^2 , with the largest being 0.976 km^2 . (2) 68 out of the 99 glacier lakes were morained lakes, with 53 distributing between 4 500 and 5 000 m altitude and accounting for 68.7%. (3) The total area of the 83 comparable glacier lakes increased by only 2.56%, from 7.03 km^2 in 1998 to 7.26 km^2 in 2005. (4) The total area of glacier lakes varied little in the last 18 years, but some had an abnormal increase in area. These glacier lakes are all oceanic, so the lakes are unlikely to break at a large scale and only occasional outburst is possible.

Keywords: Tibet; Palongzangbu River; glacier lake; remote sensing

西藏高山、极高山冰湖的分布与变化, 既是全球气候变化的反映, 也与冰湖溃决泥石流的发育与演化息息相关。帕隆藏布上游地区北依高耸的念青唐古拉山, 冰川发育, 冰湖棋布。但冰湖主要分布在海拔 4 000 m 以上的高山和极高山地区, 其发展变化过程很难为人所知, 因此冰湖的相关资料比较匮乏。通过高分辨率遥感影像的判读, 研究冰川、冰湖的分布和变化过程是一种有效的方法。

本文拟通过对 1988 年和 2005 年多幅遥感影像的解译, 分析西藏东南部帕隆藏布江上游冰湖分布状

况及其 18 a 多的变化, 以期能为冰湖溃决泥石流的预警和灾害防治提供科学依据。

1 研究区概况

帕隆藏布江为雅鲁藏布江左岸一级支流, 北依念青唐古拉山, 南邻喜马拉雅山脉的岗日嘎布。帕隆藏布上游然乌—培龙段海拔高度和相对高差都很大, 河流深切, 山坡陡峻。流域内最高点是加拉白垒峰, 海拔 7 284 m, 与其南边相距约 48 km 的南迦巴瓦峰 (7 782 m) 遥相对应。雅鲁藏布江从两山中穿过, 形

收稿日期: 2011-10-24

修回日期: 2011-11-23

资助项目: 国家科技支撑计划专题项目(2008BAB42B06)、“堰塞湖风险评估与应急管理研究”(2009BAK56B05)、“重大堰塞体灾害风险评估技术”(2008BAK50B04-5); 交通部西部交通建设科技项目“西藏扎墨公路典型地质灾害防治研究”(00731874004-2)、“川藏公路安久拉山至古乡段雪崩形成机制与雪崩启动监测预警技术”(201231879210)、“新疆边防公路病害整治与环境保护关键技术研究”(2009318797029)

作者简介: 程尊兰(1952—), 女(汉族), 四川省隆昌县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事泥石流和山区洪水(含山洪)的成灾机理与减灾技术研究。E-mail: czl@imde.ac.cn。

成平均深达 5 000 m 以上、最深达 5 382 m 的闻名世界的雅鲁藏布江大峡谷。帕隆藏布培龙—通麦段河流深切,相对高差在 2 000~2 500 m,通麦—然乌段相对高差在 1 500 m 以上,最大达 2 800 m;山坡坡度一般在 30°以上,最大达 80°。研究区地貌类型主要有:现代冰川、寒冻风化侵蚀剥蚀山地、侵蚀坡地、古冰川槽谷、峡谷和陡崖、泥石流堆积扇。

帕隆藏布然乌—培龙段距孟加拉湾不足 1 000 km,公路通过的河谷地段距雅鲁藏布江大拐弯最近距离仅 15 km。气候上干湿季分明,干季一般始于 10 月下旬,受到南支高原西风带的控制,气候相对干燥少雨;雨季始于 5 月下旬至 6 月初,印度洋孟加拉湾暖湿气流沿雅鲁藏布江及其他山口的水汽通道进入,气候转为湿润多雨。

帕隆藏布然乌—培龙段流域内的降水主要来自孟加拉湾,经由雅鲁藏布江下游通道的水汽沿程爬高冷凝所致,年降水具有沿河谷干流自下游向上游递减的特点。在通麦以下段降水丰沛,多年平均降水可达 1 100~1 400 mm;波密县多年平均降水量约 900 mm;然乌一带年降水量约 700 mm。倾多一带因处于背风坡,多年平均降水量为波密县的 1/2 左右^[1]。区域内雨季长,年内降水均匀,波密冬半年降水量约为全年平均雨量的 35%。

帕隆藏布流域气候垂直分带明显,培龙段以下年平均气温在 10~12 °C 以上,这是河谷亚热带北缘的气候特点;越往上游,年平均气温越低,由暖温带逐渐过渡到寒温带,最后到常年 0 °C 以下的高山冰雪区。海拔 4 100 m 左右是年平均气温 0 °C 线通过带。研究区内绝大部分山地常年处在寒冻风化剥蚀和冰雪作用之下。海拔 5 800~6 000 m 以上的山区有多年积雪和现代冰川发育。

帕隆藏布然乌—培龙段,现代海洋性冰川以及古冰川十分发育,面积大。整个流域内(包括易贡藏布)集中分布着我国最大面积的海洋性冰川群,总面积达 4 638.42 km²,共有冰川 1 861 条^[1],其中然乌至培龙

段川藏公路沿线两侧共有冰川 461 条,冰川总面积 817.64 km²,冰川储量达 7.01×10¹⁰ m³。冰川如此发育,一是因为距今 340 万年以来的新构造运动,造就了流域内和四周山脊上有许多海拔 5 500~6 500 m 的山峰,以及海拔 4 500 m 以上的高大山体,成为水汽冷凝的中心;二是正对雅鲁藏布江下游和察隅河水汽通道,水汽来源充沛,又有多个巨大的冷凝中心,因此形成了大面积的典型海洋性冰川。

大面积的海洋性冰川的覆盖,致使该区域内有大量末次冰期冰川退缩时形成的冰湖,主要分布在河流冰川作用范围附近地区,而且以冰碛湖为主。

研究区雪线高度分布在 4 500~4 700 m,比青藏高原极地型冰川雪线高度低 800~1 200 m。根据对粒雪年层和降水梯度的观测推算,研究区内雪线附近年降水量约为 2 500~3 000 mm,是我国西部大陆型冰川的 5~10 倍;另一方面,据统计,我国大陆型冰川消融径流模数一般在 40~70 L/(s·km²),而研究区内冰川径流模数大多都在 100 L/(s·km²)以上,是大陆型冰川的 3~5 倍^[1-3]。

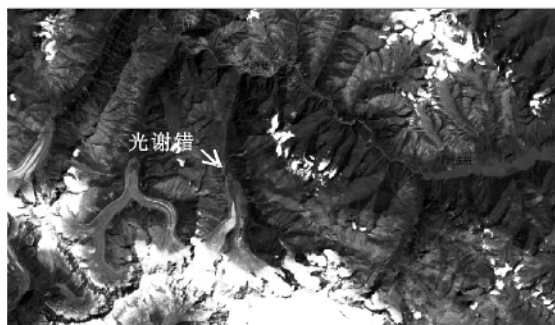
2 研究方法

2.1 影像选取

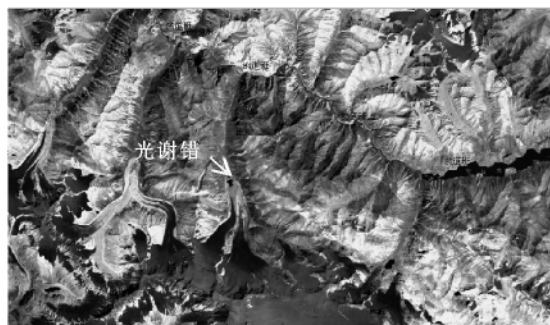
由于本区受印度洋暖湿气流和青藏高原地形上升的影响,流域内常有云雾,较难获得无云或云非常稀少的遥感影像。通过大量筛选,采用 1988/2005 年美国 Landsat 卫星的 TM(thematic mapper)影像作为工作底图。由于帕隆藏布流域分布于两景影像中,故选取 1988 年 10 月 27 日和 11 月 25 日,及 2005 年 9 月 30 日和 10 月 28 日的 4 幅影像图。TM 影像共有 7 个波段(TM₁—TM₇),其中 TM₁—TM₅, TM₇ 波段,分辨率为 30 m, TM₆ 分辨率为 60 m。

2.2 影像预处理

获得的卫星影像虽然已经经过了几何校正等处理,但在进行解译前,还需要进行一系列预处理。



a 4,3 和 2 波段合成解译冰湖



b 7,5 和 2 波段合成解译冰川

图 1 典型对象不同波段合成图

(1) 利用 ERDAS 软件进行图像拼接。

(2) 选取波段进行假彩色合成,本次解译的主题是冰川和冰湖,经过多种组合、比较,选取 4,3 和 2 波段进行 RGB 合成来解译冰湖,选取 7,5 和 2 波段进行 RGB 合成来解译冰川(图 1)。

(3) 选取典型地物点进行地理配准,使其能与数字地形图进行叠加。

3 结果与分析

3.1 冰湖分布现状

帕隆藏布然乌—培龙段是西藏冰湖分布比较密集的地区,通过遥感影像解译,初步判定该区域内共有大小冰湖 131 个,其中面积大于 0.01 km^2 的有 99 个,面积大于 0.1 km^2 的有 23 个,面积最大的为莫如弄巴流域的错下,面积为 0.976 km^2 。本文对这 99 个面积 $>0.01 \text{ km}^2$ 的冰湖进行了全面分析研究。

3.2 冰湖的类型和面积

通过遥感解译,结合野外调查数据和地形图分析,判定区域内冰湖有 4 种类型,即终碛湖、侧碛湖、冰斗湖和冰川堵塞湖。在面积大于 0.01 km^2 的 99 个冰湖中(表 1),冰碛湖(包括终碛湖和侧碛湖)的数量最多,占总数量的 68.7%(其中,终碛湖 56.6%,侧碛湖 12.1%,见图 2)。其次为冰川堵塞湖(22.2%),冰斗湖的数量最少。从冰湖的面积上看,有 76.8% 的冰湖面积都小于 0.1 km^2 ,其中 65.7% 冰湖面积小于 0.05 km^2 ,帕隆藏布冰湖面积明显小于西藏其他的冰湖分布区,如朋曲、波曲流域的冰湖面积^[4-5]。从冰湖类型看,冰碛湖面积较大,最大面积接近于 1 km^2 (图 3);相对而言冰斗湖、冰川堵塞湖面积较小,都小于 0.1 km^2 。

表 1 冰湖类型和面积统计

面积/ km^2	终碛湖	侧碛湖	冰斗湖	冰川堵塞湖	合计
0.01~0.03	20	2	6	15	43
0.03~0.05	12	4	2	4	22
0.05~0.1	6	1	1	3	11
0.1~0.5	16	5	0	0	21
>0.5	2	0	0	0	2
合计	56	12	9	22	99

3.3 冰湖分布的高程

帕隆藏布流域的冰川属于典型海洋性冰川,雪线在海拔 $4\,500\sim 4\,700 \text{ m}$,冰湖分布的高程比大陆性冰川以及过渡性冰川要低。有 53.3% 的冰湖分布于海拔 $4\,500\sim 5\,000 \text{ m}$ 的范围内,与雪线高程基本一致,在这个海拔高度冰川的积累和消融都比较强烈,冰川运动速度较快,因为有大量的冰湖出现。而小于海拔

$3\,500 \text{ m}$ 和大于海拔 $5\,000 \text{ m}$ 分布的冰湖较少(表 2)。从不同类型冰湖分布的高程来看,冰碛湖和冰斗湖绝大部分都在海拔 $5\,000 \text{ m}$ 以下,而冰川堵塞湖都在海拔 $5\,000 \text{ m}$ 以上。这主要是因为,海拔 $5\,000 \text{ m}$ 以上,现代冰川的活动性大大降低,因而由冰川侵蚀地貌形成的冰湖的数量很少;而在雪线附近,冰温较高,降水相对充沛,冰川积累和消融年内变化比较剧烈,冰川活动性强,形成了大量的冰斗、终碛或侧碛垄、冰川堵塞水流通道等地貌并积水成湖;海拔低于 $3\,500 \text{ m}$ 时,由于冰湖距离现代冰川较远,或已经发生了溃决,许多冰湖不断萎缩以至消失,因此少有冰湖出现。



图 2 典型冰碛湖:光谢错



图 3 面积较大的冰碛湖:多依错

表 2 冰湖类型和高程统计

高程/ m	终碛湖	侧碛湖	冰斗湖	冰川堵塞湖	合计
<3 500	4	0	0	0	4
3 500~4 000	7	1	0	0	8
4 000~4 500	18	3	3	0	24
4 500~5 000	26	7	6	14	53
>5 000	1	1	0	8	10
合计	56	12	9	22	99

3.4 冰湖变化特征

通过对研究区不同年代遥感影像的叠合分析,可

以对该区域内冰湖近 20 a 来的变化特征进行对比分析。

3.4.1 不同类型冰湖的变化特征 据帕隆藏布上游可对比的 83 个冰湖统计,2005 年冰湖的总面积为 7.21 km²,1988 年为 7.03 km²,冰湖的总面积增加幅度为 2.56%(表 3),远远低于波曲流域冰湖 47%的增加面积^[5]和朋曲流域 13%的增加面积^[4]。帕隆藏布上游有 54.2%的冰湖(45 个)面积呈现减小的趋势,有 45.8%的冰湖(38 个)呈现增大的趋势。从不同类型的冰湖的变化看,冰斗湖的总面积略有减小,冰碛

湖(终碛湖、侧碛湖)面积增加幅度不大,但冰川堵塞湖面积增加的幅度很大,达 25%。冰碛湖(终碛湖、侧碛湖)的总面积变化幅度很小的原因是帕隆藏布流域的冰碛湖多形成于小冰期及冰退阶段,新冰期保留下来的甚少,这些冰碛湖大多发生过溃决、淤积消失而趋于稳定^[1]。例如冰碛湖郭奶错,在 2007 年对其进行考察时发现,在冰碛湖的前端有 5 道不同时期形成的终碛堤,高度在 30~50 m,溃口形态明显,终碛堤之间为湖相沉积,这也说明该冰碛湖在历史上曾多次发生溃决(图 4)。

表 3 不同类型冰湖的面积变化统计

冰湖类型	2005 年面积/km ²	1988 年面积/km ²	面积变化率/%	面积增大个数	面积减小个数
终碛湖	5.45	5.43	0.37	24	25
侧碛湖	1.03	0.96	7.29	5	5
冰斗湖	0.23	0.24	-4.17	1	6
冰川堵塞湖	0.50	0.40	25.00	8	9
合计	7.21	7.03	2.56	38	45



图 4 郭奶错及下游郭奶弄巴 U 型谷

3.4.2 不同高程冰湖的变化特征 从表 4 可以看出,海拔 4 500 m 以下的冰湖总面积减小,而 4 500 m 以上的冰湖总面积则增大。这主要是因为海拔 4 500 m 以下的冰湖受到冰川作用的影响会随着海拔高度的降低而减小,以致无影响;许多冰湖多已发生过溃决,终碛垄或侧碛堤不断地被冲刷,或者由于泥沙的淤积作用,大部分冰湖都处于衰退期,所以面积不断地减小。

3.4.3 不同大小冰湖的变化特征 虽然该区域内冰湖的总面积在 18 a 来变化较小,而且面积减小冰湖的数量多于面积增大冰湖的数量,但是从表 5 可以看出,在面积小于 0.03 km² 的冰湖中,多数冰湖出现了萎缩;而面积在 0.03~0.5 km² 的冰湖中,面积增大的数量明显多于面积减小的数量,而且总面积在不断地增大。这说明面积较大的冰湖有继续增大的趋势,而较小的冰湖则处于逐渐萎缩状态。值得注意的是

个别冰湖扩张的速度很快,例如,拉普弄巴流域一终碛湖 1988 年面积为 0.004 km²,2005 年增加为 0.016 9 km²,面积增幅为原来的 4.12 倍,又如达公弄巴流域内的一冰湖,1988 年面积 0.075 4 km²,2005 达 0.176 km²,增幅为 133%。面积增幅超过 1 倍的冰湖数量虽然仅占面积增加冰湖的 13.5%,但是增加的面积却占增加总面积的 23.9%。

表 4 不同高程冰湖的面积变化统计

高程/m	2005 年面积/km ²	1988 年面积/km ²	面积变化率/%
<3 500	0.10	0.13	3.08
3 500~4 000	0.39	0.51	23.53
4 000~4 500	2.46	2.59	5.02
4 500~5 000	3.70	3.39	9.14
>5 000	0.43	0.37	16.22
合计	7.21	7.03	2.56

表 5 不同大小冰湖的面积变化

面积/km ²	2005 年面积/km ²	1988 年面积/km ²	面积变化率/%	面积增大个数	面积减小个数
0.01~0.03	0.63	0.73	-13.70	11	27
0.03~0.05	0.63	0.65	-3.08	9	7
0.05~0.10	0.59	0.46	28.26	7	2
0.10~0.05	3.87	3.65	6.03	10	8
>0.50	1.49	1.54	-3.25	1	1
合计	7.21	7.03	2.56	38	45

4 结论

(1) 帕隆藏布上游然乌—培龙段有大小冰湖 131 个,其中面积 $>0.01 \text{ km}^2$ 的有 99 个, $0.01 \sim 0.05 \text{ km}^2$ 的有 65 个,占冰湖总数 65.7%; $0.01 \sim 0.1 \text{ km}^2$ 的有 76 个,占冰湖总数 76.8%。面积最大的冰湖为莫如弄巴流域的错下冰湖,面积 0.976 km^2 。

(2) 面积 $>0.01 \text{ km}^2$ 的 99 个冰湖中,冰碛湖数量最多,有 68 个,占 68.7% (其中终碛湖 56 个,占 56.6%; 侧碛湖 12 个,占 12.15%); 其次为冰川堵塞湖 22 个,占 22.2%; 冰斗湖仅 9 个,占 9.1%。

(3) 帕隆藏布流域冰川属海洋性冰川,面积 $>0.01 \text{ km}^2$ 的 99 个冰湖中,有 53 个冰湖,分布于海拔 $4\,500 \sim 5\,000 \text{ m}$,与雪线高程基本一致。这里冰川的积累和消融都比较强烈,冰川运动速度快,有利于冰湖的形成。

(4) 据帕隆藏布可对比的 83 个冰湖分析,2005 年冰湖总面积 7.21 km^2 ,仅较 1988 年的冰湖总面积 7.03 km^2 增加了 2.56%,低于西藏其他地区冰湖面积增大幅度。18 a 来,83 个冰湖中有 45 个 (占 54.2%) 冰湖面积呈现减小趋势,有 38 个 (45.8%) 冰湖面积呈现增大趋势。冰湖面积变化具有下列规律: ① 冰斗湖总面积略有减小,冰碛湖总面积增加幅度不大,冰川堵塞湖总面积增加幅度很大,达 25%。

② 海拔 $<4\,500 \text{ m}$ 的冰湖总面积减小,而 $>4\,500 \text{ m}$ 的冰湖总面积则增大。③ 面积 $<0.03 \text{ km}^2$ 的冰湖中,面积减小的冰湖数明显多于面积增大的冰湖数; 在面积 $0.03 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 的冰湖中,面积增大的冰湖数多于面积减小的冰湖数。

(5) 近 18 a 以来,帕隆藏布流域上游地区冰湖虽然总面积变化很小,大部分冰湖都处于衰退期,但是少部分冰湖面积增大的速度异常。由于该区为海洋性冰川区,具有气温高、降水充沛、湍流热交换强、冰川产量大等特点,冰川舌异常地不稳定,因而相比于大陆性冰川区的冰湖,该流域内冰湖发生溃决的可能性较大。因此在该区域内出现大范围的冰湖溃决的可能性很小,但是爆发零星冰湖溃决的可能性很大。

[参 考 文 献]

- [1] 朱平一,何子文,汪阳春,等. 川藏公路典型山地灾害 [M]. 成都:成都科技大学出版社,1999:35-52.
- [2] 杨针娘. 中国冰川径流及其对河流的补给作用 [M]// 中国冰川概论. 北京:科学出版社,1988:35-51.
- [3] 杨针娘,胡鸣高. 青藏高原东部冰川径流特征 [J]. 冰川冻土,1990,12(3):219-226.
- [4] 车涛,晋锐,李新,等. 近 20 a 来西藏朋曲流域冰湖变化及潜在溃决冰湖分析 [J]. 冰川冻土,2004,26(4):397-402.
- [5] 陈晓清,崔鹏,杨忠,等. 近 15 a 喜马拉雅山中段波曲流域冰川和冰湖变化 [J]. 冰川冻土,2005,27(6):793-800.

欢迎订阅 2013 年《农民致富之友》杂志

《农民致富之友》杂志创刊于 1959 年,由黑龙江省农业委员会主管,黑龙江省农业系统宣传中心主办,国内外公开发行人。曾用刊名:《人民公社建设》,《黑龙江农业》。该刊为中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊,中国学术期刊综合评价数据库来源期刊,中国学术期刊网(光盘版)收录期刊,龙源期刊网全文数据库收录,维普资讯网全文数据库收录,万方数据库全文数据库收录。

该刊旨在宣传党的政策,宣传农村改革,指导农村基层工作,为发展农村商品经济,为农民致富,为实现农业现代化服务。国际标准刊号 ISSN 1003-1650,国内统一刊号 CN 23-1009/F。该刊面向企事业单位、科研院所相关专业的科技人员、管理人员和高校师生,为农业、林业、畜牧业研究和教学助力。欢迎订阅、投稿。

《农民致富之友》为半月刊,16 开,逢每月 1 日,15 日出版,国内外公开发行人,订阅量达 20 万册,每期定价 20.00 元,全年 24 期共 480 元。欢迎读者到当地邮局订阅,邮发代号 14-72,也可与本杂志社直接联系,办理订阅手续。

地址:北京邮政 100074-18 信箱《农民致富之友》杂志社
编辑部电话:(010)52895552
理事会秘书处:(010)81580749
网址:www.nmzfzy.net

邮编:100074
广告部电话:(010)52895552
传真:(010)81580749
电子邮箱:nmzfzy@vip.163.com