

文章编号: 1008-2786-(2015)6-703-10

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000085

冰川终碛湖溃决-再生特征与机理

赵万玉¹ 陈晓清^{1*} 刘建康² 苏凤环¹

(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. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心/中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734)

摘 要: 冰川终碛湖溃决引发的大规模山洪泥石流灾害,常给下游沿河一带造成重大人员伤亡和财产损失,受到社会广泛关注。冰川终碛湖一次溃决常未到底,其部分溃决后,残留湖因源头冰川进退、冰舌持续消融致后期湖面面积增大,湖水量增加。作者将这种现象定义为冰川终碛湖溃决-再生现象。以西藏波密米堆沟光谢错和聂拉木章藏布次仁玛错冰湖为研究对象,基于前人研究成果,利用遥感解译方法,分析了光谢错和次仁玛错冰湖面积的变化和冰川末端进退变化的特征。研究表明:光谢错、次仁玛错呈现出冰湖面积增大→溃决缩小→面积再增大的过程,光谢错在 1988 年溃决后面积已恢复至溃决前的 63.6%,次仁玛错在 1981 年溃决后面积已基本恢复至溃决前的大小;从 1980 年代末至现在,贡扎冰川、阿玛次仁冰川末端处于退缩状态,终碛湖面积呈扩张状态。结合波密、聂拉木两气象站多年年降水量和年平均气温观测资料进行同步对比分析,初步探讨了冰川终碛湖再生现象的机理:1. 冰川末端的前进与后退是冰湖面积变化的主导者,冰舌前进推动湖盆底冰碛物和溃口两侧岸坡垮塌导致堵塞泄流通道,冰川末端的退缩提供了空间条件;2. 持续高温与强降雨的耦合作用是冰湖溃决的直接激发条件,持续高温累积是冰川消融冰湖面积增大的主要因素。

关键词: 冰川终碛湖; 光谢错; 次仁玛错; 溃决-再生; 西藏

中图分类号: P931.4

文献标志码: A

冰湖是冰川活动产生融水在冰川前部或者侧部汇集而成的,一般分为冰川终碛湖(冰碛阻塞湖)、冰川阻塞湖、冰斗湖、槽谷湖和冰蚀湖 5 个基本类型^[1],其中冰川终碛湖的分布地域广、数量多、规模较大,且溃决成灾风险较高。随着全球气候变暖的作用,特别是 1950 年代以来青藏高原变暖趋势超过北半球及同纬度地区^[2],青藏高原上的冰川和冰湖发生了巨大变化,我国境内大多数冰川处于退缩阶段,特别是青藏高原东南山区、横断山脉、喜马拉雅

山脉等山地冰川强烈退缩^[3],冰川融水使得冰湖数量增加、面积扩大,大大增加了冰湖溃决的风险,冰湖溃决洪水及泥石流灾害也随之增加。自 1935 年以来,西藏地区已发生 27 次冰湖溃决事件^[4],导致严重的人员伤亡,甚至波及至邻国尼泊尔境内,更多潜在危险的冰碛湖给下游居民点、公路、水利水电设施等造成巨大潜在危害,这个问题成为相关行业与科研工作的一大难题。

目前,对于西藏冰湖的研究主要集中在以下方

收稿日期(Received date): 2014-11-28; 改回日期(Accepted): 2015-03-05。

基金项目(Foundation item): 中国交通建设股份有限公司科技研发项目“堰塞湖风险评估与减灾关键技术研究”、水利部公益性行业科研专项经费项目“藏东南水灾害危险性评估及减灾对策研究”(201301037) 和国家国际科技合作专项项目“中巴喀喇昆仑公路地质灾害综合减灾与环境保护合作研究”(2012DFA20980) 资助。[This research is supported by the risk evaluation and mitigation technology of barrier lake project of China Communications Construction Company Ltd., Non-profit Industry Financial Program of MWR(201301037) and the Special Program for International S & T Cooperation projects of China(2012DFA20980).]

作者简介(Biography): 赵万玉(1986-),男,青海西宁市人,硕士。主要从事山地灾害减灾技术研究。[Zhao Wanyu(1986-), male, born in Xining, Qinghai, Master, majoring in the research on mountain hazard mitigation technology.] E-mail: wanyu860426@163.com

* 通信作者(Corresponding author): 陈晓清(1974-),男,四川遂宁人,博士,研究员。主要从事山地灾害防治理论研究与技术研发。[Chen Xiaoping(1974-), male, born in Suining, Sichuan, Ph. D, Professor, majoring in the research on mountain hazard mitigation theory and technology.] E-mail: xqchen@imde.ac.cn

面: 1. 冰湖溃决危险性评估。陈晓清等对喜马拉雅山中段波曲流域内 49 个冰湖进行了溃决危险性评价^[5]。柳金峰等从冰川特征、冰湖特征和下游沟道特征 3 个类别选取了 8 个冰湖溃决危险性指标对帕隆藏布流域然乌-培龙段冰湖进行了溃决危险性评估^[6]; 刘建康等对藏东南莫如弄巴流域错下湖冰湖的溃决的可能性进行了评估^[7]。2. 气温和降水对冰湖溃决的影响研究。刘晶晶等分析认为冰湖溃决是年均温剧烈波动后区域响应的结果^[8]。3. 冰湖溃决特征研究。引起冰湖溃决的因素很多, 例如降水量、气温、终碛堤土体结构与性质、堤坝内埋藏冰消融, 还有冰舌断裂形成涌浪导致溃决等偶然事件。刘晶晶通过西藏冰湖溃决事件, 分析了终碛湖溃决的时空分布特征^[9], 并用水力学和土力学理论研究了冰湖终碛堤溃决的力学机制^[10]; 黄金辉通过实验手段, 探讨了涌浪诱发冰湖溃决后的发展过程以及溃决流量特征^[11]。4. 冰湖溃决型泥石流的研究, 包括泥石流的形成机制、发展趋势、减灾对策与预警技术。崔鹏等分析了由冰滑坡、冰崩入湖导致冰湖溃决的机理和条件, 总结了冰湖溃决泥石流演化的 6 种模式^[12]; 程尊兰等分析了章藏布沟内的冰湖溃决型泥石流的形成条件和发展趋势^[13]; 陈晓清推导了冰川终碛湖溃决泥石流流量的洪峰流量和洪峰的最大高度, 并通过米堆沟光谢错进行了验证^[14]。

由于受冰川活动的影响, 冰湖溃决后形成泥石流的规模远超于一般沟道的泥石流。因此, 对冰湖溃决型泥石流的预警和评估是建立在冰湖变化的基础上, 只有掌握冰湖变化的特征, 才能更好地对冰湖溃决型泥石流做预警防范和灾害评估。冰川终碛湖最显著的变化是冰湖面积的变化, 王欣等分析了喜马拉雅山区冰湖扩张的特征以及气候变化对冰湖的影响^[15]。此外, 还有藏东南地区的一些冰湖在溃决后的一段时间面积逐步增大^[16-17]。这些终碛湖溃决后, 并未一溃到底, 且面积逐步增大, 湖水量增多, 故再次溃决的风险增加。作者将冰川终碛湖在溃决后很长的一段时间内呈现出湖面面积增大、湖水量增加的这种现象, 称之为终碛湖的溃决-再生现象 (Outburst - Regeneration Phenomenon of glacier lake)。到目前, 尚未提及到冰川终碛湖溃决-再生现象的概念和产生这种现象的原因, 冰川终碛湖溃决-再生的机理是什么? 如何评价其溃决风险? 这些问题将成为冰湖研究的热点。本文以西藏帕隆藏布江流域米堆沟光谢错、波曲流域章藏布次仁玛错冰湖作为研究对象, 通过遥感解译数据分析了冰川

终碛湖面积变化的特征、冰川末端进退状况, 并初步探讨了冰湖溃决-再生机理, 为今后冰湖溃决型泥石流灾害的防灾减灾提供参考。

1 研究区概况

光谢错在 1988 年发生溃决, 形成的泥石流和洪水造成川藏公路严重被毁, 交通中断半年之久, 目前光谢错的面积也大大增加^[18-19]; 波曲流域支流章藏布的次仁玛错在 1981 年发生溃决, 洪水摧毁了 50 km 范围内的中(国)尼(泊尔)公路及全部桥梁设施, 目前次仁玛错冰湖面积也大大增加^[13, 20]。由于冰湖溃决后造成重大的灾害, 故备受大家关注。冰湖多位于高海拔地段, 采集数据非常困难, 数据常有空缺。因此, 本文选择了数据相对丰富的米堆沟光谢错和章藏布次仁玛错两个冰川终碛湖, 作为研究对象。

1.1 米堆沟光谢错

光谢错位于波密县境内, 属米堆沟流域, 流域分布范围 $29^{\circ}23'18'' \sim 29^{\circ}32'10''N$, $96^{\circ}27'45'' \sim 96^{\circ}35'05''E$ 。米堆沟沟口东距然乌 22 km, 西距波密县城 94 km, 于川藏公路 84 道班处汇入帕隆藏布江。米堆沟流域面积 123.8 km^2 , 主沟长 16.768 km, 沟道平均纵比降 63.5‰, 流域源头最高点高程 6 595 m, 最低点为 3 595 m, 相对高度达 3 000 m。流域上游海拔 3 800 m 以上为冰川及永久积雪区; 中下游山坡基岩裸露, 寒冻风化极其强烈, 局部地段森林植被发育良好, 针阔叶林混杂, 牧草茂密^[21]。米堆沟内主要分布米堆、俄次、古勒 3 个村庄和部分农耕地。

米堆沟内贡扎冰川分为东支、中支、西支 3 支冰川, 中支冰川即贡扎主冰川(图 1), 光谢错冰湖(图 2)就分布在贡扎主冰川末端。在 1988 年溃决之前光谢错呈长方形, 最长 950 m, 最宽 550 m, 湖面面积 0.523 km^2 ; 1988 年由于连续高温和降雨, 使光谢错湖水位达 40 a 最高。7 月 15 日 23 时左右, 发生瞬时部分溃坝, 约 10 min 后溃口下切到底, 历时 2.5 h 左右, 排泄水量达 $2.78 \times 10^6 \text{ m}^3$, 光谢错溃决引发的溃决型泥石流属于稀性泥石流, 溃决洪峰流量达 $1\,270 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[22]。

1.2 章藏布次仁玛错

次仁玛错位于波曲流域, 流域分布范围 $27^{\circ}49' \sim 29^{\circ}05'N$, $85^{\circ}38' \sim 88^{\circ}57'E$, 地处西藏西南部聂拉木县。波曲流域面积 $2\,018.4 \text{ km}^2$, 主沟长 86.5 km, 沟道纵比降变化幅度较大, 流域最高点高程 8 012 m, 最低点 1 468 m, 相对高度达 6 544 m。流域植被呈现山地垂直结构类型, 由低海拔向高海拔依次出



图1 米堆沟贡扎冰川

Fig.1 Gongzha Glacier in Migui Gully



图2 光谢错冰湖

Fig.2 Guangxiexuo Glacier Lake

现常绿阔叶林带、针阔混交林带、针叶林带、灌木林带、灌丛草甸带、高山寒冻荒漠带及高山冰雪冻土带。次仁玛错冰湖(图3)位于波曲流域章藏布3号支沟,湖面海拔变化在4 640~4 690 m,冰湖上游为阿玛次仁冰川。次仁玛错冰湖于1964年、1981年、1983年发生3次大规模冰湖溃决型泥石流灾害,1981-07-11灾害最为严重,造成聂拉木县重大的经济损失和人员伤亡^[23]。

2 数据来源与分析方法

通过遥感资料可以准确直观地获取数据。为准



图3 次仁玛错冰湖

Fig.3 Cirenmacuo Glacier Lake

确分析光谢错、次仁玛错冰湖面积的变化特征和冰川末端的进退状况,本文搜集了较为丰富的数据资料,包括1:5万、1:10万地形图和TM、ETM+、SPOT影像、Google Earth和人工实测数据等,光谢错、次仁玛错遥感影像数据来源具体见表1。

对于不同时期不同类型的数据资料,需进行不同的处理手段,尽可能做到统一的标准,以便具有可对比性。先将选用的地形图扫描后,进行几何纠正,在ArcGIS 10软件中对冰湖的边界进行数字化。选用美国Landsat卫星的TM、ETM+影像作为工作底图,进行多波段的合成后,在ArcGIS 10软件支持下进行人工解译冰湖的面积。冰湖多期的边界和面积数据均是在ArcGIS软件支持下完成的,然后通过获取的冰湖面积和冰川末端的进退状况来分析冰川终碛湖溃决-再生特征与机理,具体分析方法见图4。

3 终碛湖溃决-再生特征与机理探讨

3.1 终碛湖溃决-再生特征

3.1.1 终碛湖面积变化

通过遥感解译提取的不同时期冰湖面积和冰川末端进退的数据见表2,为了增加冰湖面积变化的直观性,本文给出了光谢错、次仁玛错主要的影像资料(图5、图6)。从表2可以看出,光谢错40 a间经历了冰湖面积增大→溃决缩小→面积再增大的过程,这过程反映了冰湖的溃决-再生过程。为了更加直观地反映面积变化的趋势,图7给出了光谢错1973—2013年的面积变化图。具体而言,1973年冰湖面积为0.248 km²,1980年面积扩张至0.307 km²,1988年3月(溃决前)面积扩张至0.349 km²,比1973年增加了0.101 km²,平均增加速率为0.67%。

表 1 光谢错、次仁玛错遥感影像数据来源

Table 1 Remote sense image data sources of Guangxiecuo and Cirenmacuo glacier lake

地点	流域与沟名	采用影像数据来源与类型
光谢错	帕隆藏布江,米堆沟	1973-10-27 MSS 影像/1980 年 1:5 万地形图/1988-03-01 TM 影像(30 m)/1990 年李德基等人工实测/2001-11-14 Google Earth/2011-11-08 SPOT 影像(2.5 m)/2013-02-12 Google Earth
次仁玛错	波曲,章藏布	1980 年 1:10 万地形图/1988 年 TM 影像(30 m)/2001 年 ETM 影像(15 m)/2005-12-24 Google Earth/2013-01-02 Google Earth/2014-01-16 Google Earth

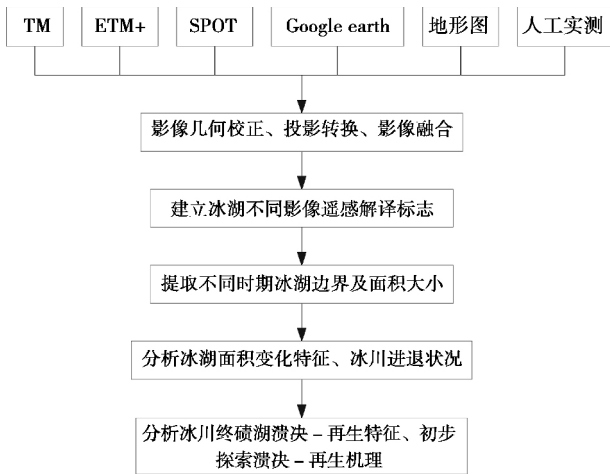


图 4 终碛湖溃决-再生过程分析方法

Fig. 4 Analysis method of outburst-regeneration process of glacier lake

1988-07-15 光谢错发生溃决。根据 1990 年 8 月中科院成都山地所李德基等现场实际测量的数据,冰湖面积为 0.129 km²,比起溃决前面积缩小了 0.220 km²;2013 年冰湖面积为 0.222 km² 经过 40 a 的变化已基本恢复至 1988 年溃决前的 63.6%,比 1990 年增加了 0.093 km²,平均增加速率为 0.40%。

分析认为,1990—2013 年的增加速率小于 1973—1988 年的增加速率,可以看出冰湖面积的扩张是一个相对漫长的过程。

图 8 是次仁玛错 1980—2014 年的面积变化图,34 a 间也经历了冰湖面积增大→溃决缩小→面积再增大的过程。1980 年冰湖面积为 0.382 km²,1981 年 7 月、1983 年冰湖两次溃决,至 1988 年冰湖面积减小为 0.115 km²,1980 年的冰湖面积可反映溃决之前,则经过两次溃决后,面积缩小了 0.267 km²。从表 2 可以看出,自从 1988 年以后,次仁玛错冰湖的面积整体呈逐渐增加趋势,尤其是 2005 年 2014 年 9 a 间增加迅速,到 2014 年冰湖面积增加至 0.368 km²,比 1988 年增加了 0.253 km²,平均增加速率为 1.58%。

3.1.2 冰川末端进退变化

据相关研究,冰湖的扩张与冰川末端进退的关系密不可分^[15]。表 2 给出了光谢错、次仁玛错终碛堤与冰舌之间的距离变化数据。光谢错从 1973—2013 年的 40 余年间,冰川末端发生多次进退,图 9 (a) 更加形象地描绘了冰川末端进退的状况。其中,

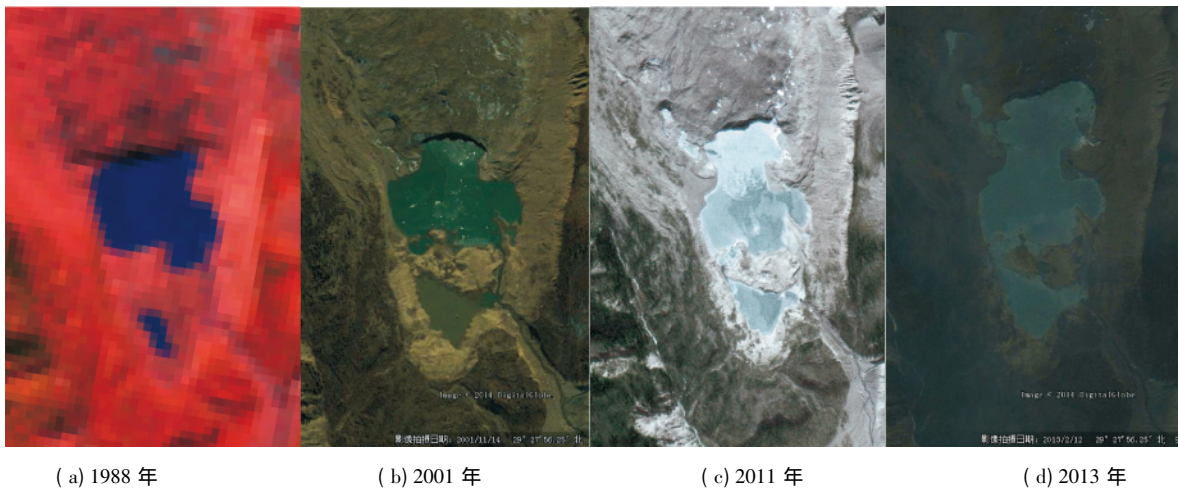
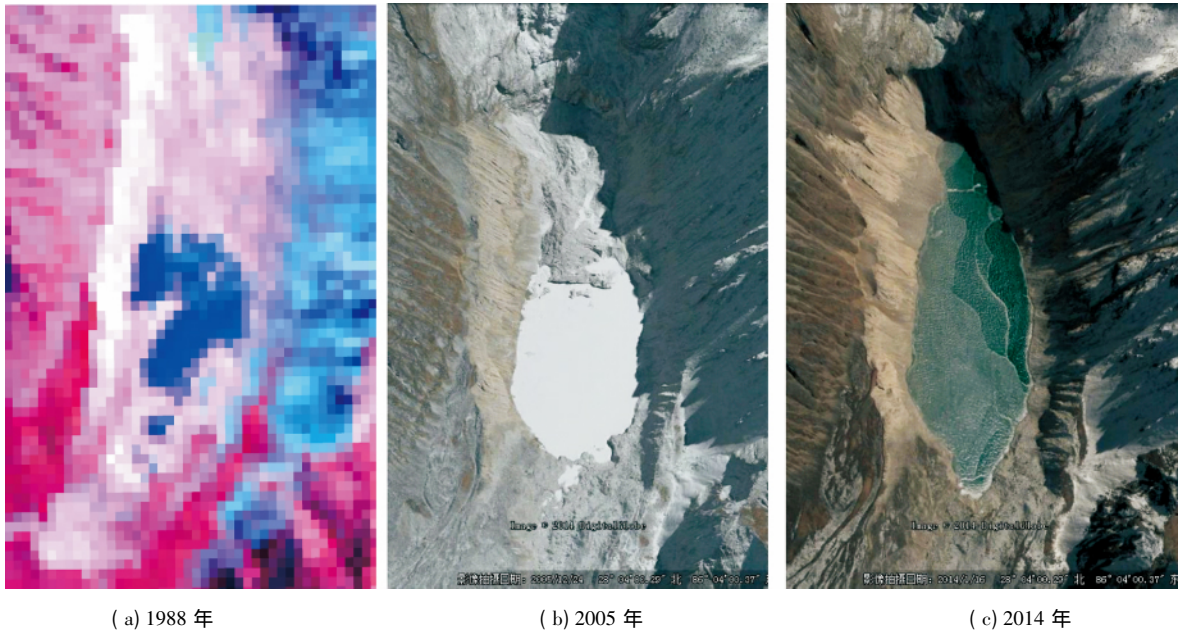


图 5 光谢错终碛湖图像(2001 年、2013 年影像来自 Google Earth)

Fig. 5 The image of Guangxiecuo glacier lake



(a) 1988 年 (b) 2005 年 (c) 2014 年

图 6 次仁玛错终碛湖图像
(2005 年、2014 年影像来自 Google Earth)
Fig. 6 The image of Cirenmacuo glacier lake

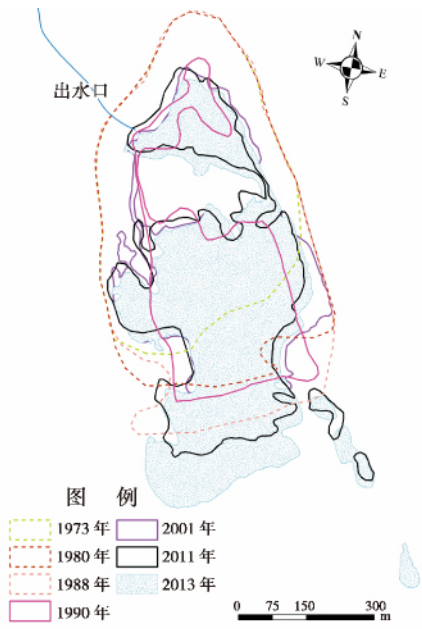


图 7 光谢错冰湖面积变化图
Fig. 7 Area change map of Guangxiecuo glacier lake

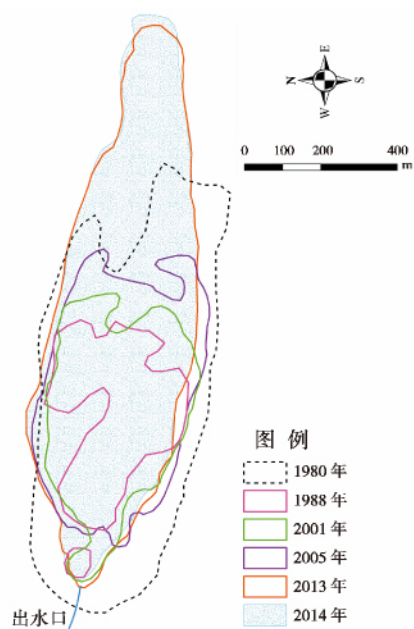


图 8 次仁玛错冰湖面积变化图
Fig. 8 Area change map of Cirenmacuo glacier lake

虚线框的长短代表冰川末端进退状况 , 具有填充物的长短代表冰湖的扩张和缩小状况。1973—1988 年冰川末端一直处于退缩状态 , 退缩了 177. 38 m。相比 1988 年 , 1990 年冰川末端发生前移 , 前移了 66. 96 m。从 1990—2013 年冰川末端又处于退缩状态 , 退缩了近 231. 83 m。相应地 , 当冰川末端退缩时 , 冰湖就向冰川末端扩张 , 图 5 与图 7(a) 具有很

好的吻合性。
次仁玛错从 1980—2014 年 34 a 间 , 整体呈退缩状态 , 图 9(b) 描绘了冰川末端进退的状况。由于冰川前缘地形为陡崖状 , 故从图 6(b) 看出冰川在陡崖处呈不连续状态。从 1980—1988 年冰川末端向前推进了 383. 81 m , 1988—2014 年冰川末端一直处于退缩状态 , 退缩了 707. 90 m , 特别是在 2005—2013

表 2 光谢错、次仁玛错冰湖面积变化和终碛堤与冰舌距离

Table 2 The area & distance of end moraine dam and glacier tongue of Guangxiexuo and Cirenmacuo glacier lake

名称	年份	面积 /km ²	面积变化 /km ²	终碛堤与冰舌之间距离 /m	冰舌进退距离 /m
光谢错	1973	0.248	0.000	753.01	0.00
	1980	0.307	0.059	843.96	90.95
	1988	0.349	0.101	930.39	177.38
	1990	0.129	-0.119	863.43	110.42
	2001	0.167	-0.081	893.93	140.92
	2011	0.186	-0.062	976.15	223.14
	2013	0.222	-0.026	1 095.26	342.25
次仁玛错	1980	0.382	0.000	1 078.71	0.00
	1988	0.115	-0.267	694.90	-383.81
	2001	0.175	-0.207	758.37	-320.34
	2005	0.226	-0.156	896.05	-182.66
	2013	0.367	-0.015	1 387.74	309.03
	2014	0.368	-0.014	1 402.80	324.09

年间退缩非常迅速。

3.2 终碛湖溃决-再生机理

基于光谢错和次仁玛错湖面面积变化特征、冰川末端进退状况的分析,光谢错和次仁玛错冰湖分别于 1988 年和 1981 年溃决后,到目前冰湖面积逐渐增大,蓄水量也逐步增加,再次溃决的可能性也增大。终碛湖溃决-再生现象主要表现在两个方面: 1. 冰湖面积增大。冰川前进和退缩状态的频繁出现,在全球气候变暖的背景下,冰川处于退缩状态,冰川末端退缩为冰湖的扩张提供了空间; 2. 冰湖库水量增加。全球气候变暖和在气候中长波动期的多雨季节内旬均高温,加之长时间的日照辐射使得冰川消融,高强度的降雨产生的累积热融作用,加剧了冰川的消融,导致冰湖水量急剧增加。针对光谢错、次仁玛错湖面面积增大的现象,作者从冰川末端活动状况、区域气候和降水量的变化两个方面进行了初步推断和分析。

3.2.1 冰川活动状况对终碛湖再生的影响

冰湖的溃决与冰川末端的运动是密切相关的。根据李德基等对米堆沟光谢错 1988 年溃决后的现场调查显示,光谢错溃决是因冰舌断裂入湖,导致水量剧增,后因气温、水温升高致使冰碛堤内的埋藏冰消融造成管涌而破坏^[18]。补给其水源的冰川前部,即冰舌部位碎裂呈块状冲入冰湖,加剧了冰湖水位的快速上涨;一般的冰川融水补给冰湖是渐变式的,不可能导致冰川终碛湖的快速溃决。同样,冰湖面积的增大和水量的增加同样也与冰川末端的运动紧

密相关。

冰川末端的进退运动,为终碛湖溃决后水量的增加提供了水源和空间条件。冰川前进时,具有强大的搬运能力,冰碛物是含有巨砾的宽级配砾石土,冰川推动冰碛物前移,且连续堆积,逐渐加厚增高形成堤坝;冰川退缩时,冰碛物停留后形成终碛堤,为冰湖的扩张提供了空间,冰湖的面积显著增大,冰湖水量就随之增加。由于堤肩两侧海拔相对较低的位置都是湖水的出水口,由于湖水排泄水位低于东端出水口,西端的出水口是光谢错是唯一的泄流通道。当入水量大于出水量,湖体的水量增加;反之,当出水量大于入水量,湖体的水量就减少。只有将溃口加高或者堵塞,才有可能使冰湖形成封闭的湖盆,促使水位的上升,湖水量的增加。目前,光谢错面积的增大,水位明显增加(图 10),其原因是与冰川前进有关,冰川在前进过程中,推动冰碛物逐渐堵塞泄流通道;或由于溃口处物质松散,极不稳定,导致两侧坡体垮塌,堵塞泄流通道。

在光谢错 1973—2013 年 40 余年的冰川退缩过程中,持续性退缩过程有 1973—1988 年和 1990—2013 年两个阶段。1973—1988 年冰川末端退缩了 177.38 m,1990—2013 年退缩了 231.83 m;相应地冰湖就向冰川末端方向扩张,1973—1988 年冰湖面积扩大了 0.101 km²,1990—2013 年冰湖面积增加了 0.093 km²,冰川末端的退缩和冰湖的扩张具有很强的吻合性。因此,冰川末端的前进与后退是冰湖面积变化的主导者。

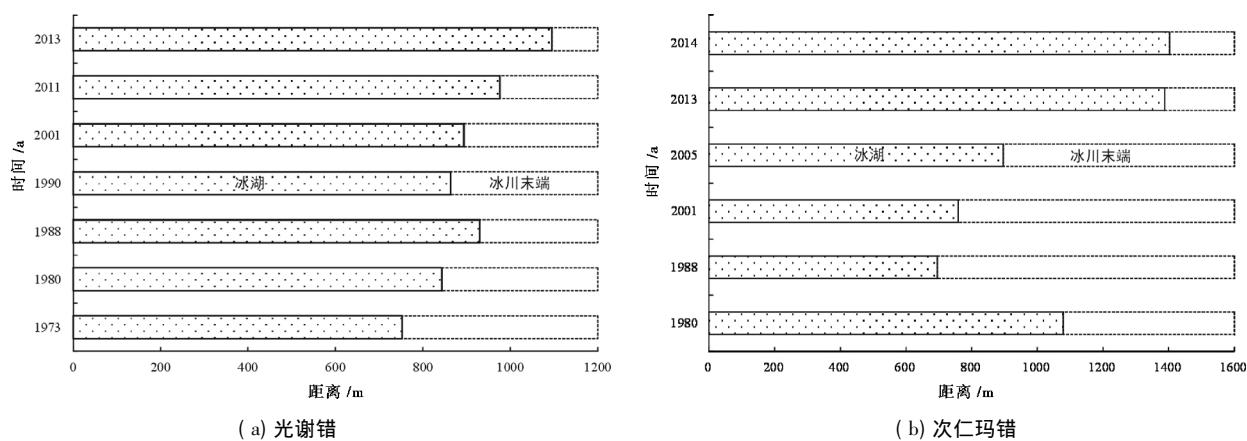


图9 光谢错、次仁玛错冰舌进退示意图

Fig. 9 Sketch map of glacier tongue advancement and retreat of Guangxiecuo and Cirenmacuo



图10 米堆沟光谢错溃口对比图

Fig. 10 Comparison of Guangxiecuo glacier lake in Midui gully

3.2.2 区域降水与气温变化对终碛湖再生的影响

冰湖规模的变化与区域气候背景和冰川融水补给具有密切关系,由于本文缺乏冰川融水实测资料,很难用数据进行量化,故选取气温和降水两个关键性因素来分析它们对冰湖面积变化的影响特征。本文获取了光谢错邻近的波密气象站和次仁玛错邻近的聂拉木气象站多年年降水量和年平均气温的数据。

图11是波密站1961—2012年年降水量和平均气温序列图,1961—2012年期间降水量分布和气温变化波动性很大,图11是年降水量和年平均气温曲线的3次拟合曲线。从年降水量的统计情况看,1961—1985年降水量呈上升趋势,1985—2012年呈下降趋势,整体趋势呈先上升后下降的趋势;从气温的统计情况看,自1961年起现在,年平均气温呈整体上升趋势。图12是聂拉木气象站1967—2012年年降水量和年平均气温的时间序列图,从中反映1967—2012年期间降水量分布和气温变化差异性

很大。图12是年降水量和年平均气温曲线的3次拟合曲线,从图12(a)看出聂拉木县的降水量呈现出先增加后减小的趋势;图12(b)反映出自1975年以来气温呈整体上升趋势。

从图11和图12可以看出,光谢错、次仁玛错溃决时的年降水量和年平均气温并不是系列数据中的峰值,所以瞬时的年降水量和年平均气温不可能引发冰湖的直接溃决,年降水量的剧烈波动和年平均气温的前期积累对于冰湖的溃决起了很大的作用,而且高温和强降雨的耦合作用成为冰湖溃决的直接激发条件。通过长序列的年平均气温曲线分析,波密站和聂拉木站的气温呈上升趋势,气温升高使得冰川前缘消融,冰川融水成为冰湖湖水的主要供给者。冰川前缘一般都呈陡崖形式的稳定坡度而存在,同时发育有大量的冰裂缝,冰川融水通过冰裂缝渗入,加快了冰川前缘的融化,并且常伴随着冰崩的发生(图13)。另外,持续高强度的降雨由于热融作

用,加速了冰川的消融,增加了冰湖的水量。光谢错和次仁玛错的年降水量曲线显示,年降水量在溃决之后呈减小趋势。因此,持续高温积累是导致冰湖面积增大的主要因素。

4 结 论

以冰川终碛湖光谢错、次仁玛错为研究对象,采

用多期遥感影像、地形图进行比对,同时结合波密、聂拉木气象站多年的气温、降水资料数据,分析光谢错、次仁玛错冰湖面积的变化特征和冰川末端的进退状况,并对冰川终碛湖的溃决-再生机理进行初步探讨,得出以下结论:

1. 光谢错、次仁玛错都经历了冰湖面积增大→溃决缩小→面积再增大的过程。光谢错在1988年溃决后,目前面积逐渐增大,已恢复至溃决前面积的

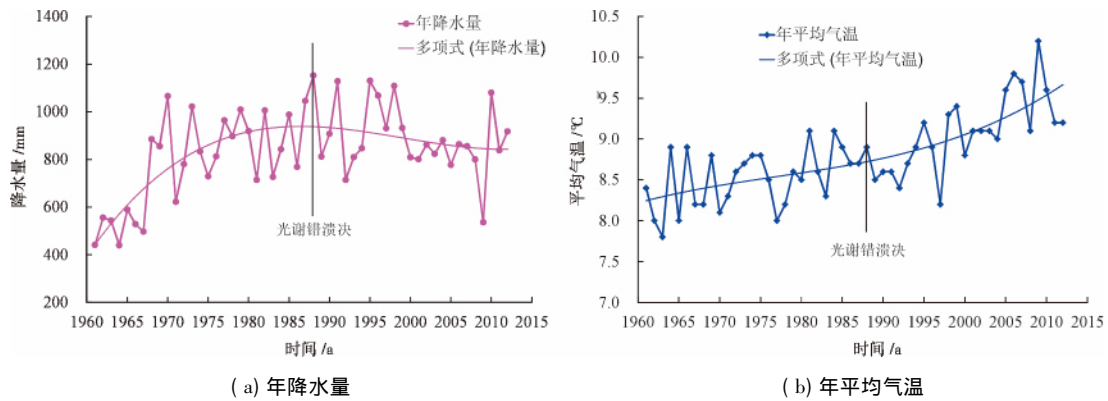


图 11 波密站 1961—2012 年年降水量和平均气温变化曲线

Fig. 11 Variation map of annual precipitation and annual mean temperature in Bomi from 1961 to 2012

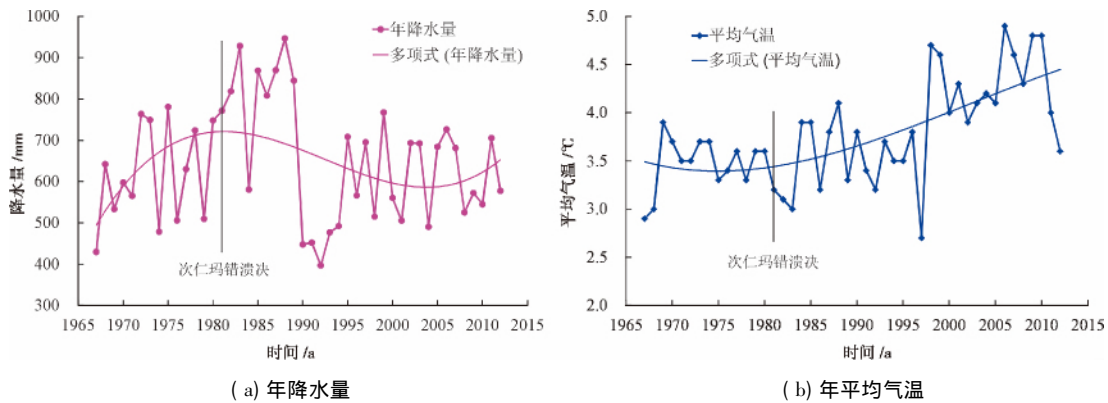


图 12 聂拉木站 1967—2012 年年降水量和平均气温变化曲线

Fig. 12 Variation map of annual precipitation and annual mean temperature in Nyalam from 1967 to 2012



图 13 米堆沟贡扎冰川对比图

Fig. 13 Comparison of Gongzha glacier in Midui gully

63.6%; 次仁玛错在1981年溃决后, 面积也逐渐增大, 已基本恢复至溃决前的大小。

2. 1980年代末期至现在, 贡扎冰川、阿玛次仁冰川末端处于退缩状态, 光谢错、次仁玛错终碛湖面积呈扩张状态, 冰川末端退缩和终碛湖面积扩大呈现很好的吻合性。

3. 冰湖溃决与冰川末端的运动密不可分, 冰川末端的前进和退缩是冰湖面积变化的主导者, 冰舌前进推动冰碛物和溃口两侧松散物质的垮塌导致堵塞泄流通道, 冰川末端的退缩提供了空间条件。

4. 结合波密站、聂拉木站多年的年降水量和年平均气温数据, 持续的高温和强降雨的耦合作用是冰湖溃决的直接激发条件, 持续高温积累是冰川消融冰湖面积增大的主要因素。

由于西藏冰川的遥感影像等资料常有空缺, 故搜集的资料有限, 在分析方面存在一定的局限性, 本文从定性分析的角度简要讨论了冰川终碛湖的再生机理, 下一步将通过采集典型终碛湖的水深、水温、出水量等参数来更深入地讨论再生机理, 这将更有助于了解冰湖的溃决和冰湖溃决型泥石流监测预警。

致谢: 衷心感谢中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所陈华勇助理研究员、邓明枫助理研究员对本文提供的帮助。

参考文献(References)

- [1] Wang Shijin, Qin Dahe, Ren Jiawen. Progress and prospect in risk assessment of hazards from glacier lake outbursts [J]. *Advances in water science*, 2012, 23(5): 735-742 [王世金, 秦大河, 任贾文. 冰湖溃决灾害风险研究进展及其展望[J]. *水科学进展*, 2012, 23(5): 735-742]
- [2] Zheng Du, Lin Zhenyao, Zhang Xueqin. Progress in studies of Tibetan plateau and global environmental change [J]. *Earth Science Frontiers* 2002, 9(1): 95-102 [郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展[J]. *地质学前沿* 2002, 9(1): 95-102]
- [3] Sun Honglie, Zheng Du. Evolution and development of Qinghai-Tibet Plateau [M]. Guangzhou: Technology Press of Guangdong, 1998: 158-159 [孙鸿烈, 郑度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998: 158-159]
- [4] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century [J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1377-1390 [姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1377-1390]
- [5] Chen Xiaoqing, Cui peng, Yang Zhong, et al. Risk assessment of glacier lake outburst in the Poiq River Basin of Tibet Autonomous Region [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(4): 509-516 [陈晓清, 崔鹏, 杨忠, 等. 喜马拉雅山中段波曲流域近期冰湖溃决危险性分析与评估[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 509-516]
- [6] Liu Jinfeng, Cheng Zunlan, Chen Xiaoqing. The hazard assessment of glacier-lake outburst in Palongzangbu River from Ranwu to Peilong [J]. *Mountain Research*, 2012, 30(3): 369-377 [柳金峰, 程尊兰, 陈晓清. 帕隆藏布流域然乌-培龙段冰湖溃决危险性评估[J]. *山地学报*, 2012, 30(3): 369-377]
- [7] Liu Jiankang, Cheng Zunlan, Guo Fenfen, et al. Analysis on Risk of Glacier-lake Outburst in Southeastern Tibet [J]. *Journal of Catastrophology*, 2011, 26(2): 45-49 [刘建康, 程尊兰, 郭芬芬, 等. 藏东南典型冰湖溃决危险性分析[J]. *灾害学*, 2011, 26(2): 45-49]
- [8] Liu Jingjing, Tang Chuan, Cheng Zunlan, et al. Impact of temperature on glacier-lake outbursts in Tibet [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(4): 1121-1129 [刘晶晶, 唐川, 程尊兰, 等. 气温对西藏冰湖溃决事件的影响[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(4): 1121-1129]
- [9] Liu Jingjing, Cheng Zunlan, Li Yong, et al. Characteristics of glacier-lake breaks in Tibet [J]. *Journal of Catastrophology*, 2008, 23(1): 55-60 [刘晶晶, 程尊兰, 李泳, 等. 西藏冰湖溃决主要特征[J]. *灾害学*, 2008, 23(1): 55-60]
- [10] Liu Jingjing, Cheng Zunlan, Li Yong, et al. A study of the outburst form of the end-moraine lake in Tibet [J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences (Beijing); Peking University)*, 2009, 16(4): 372-380 [刘晶晶, 程尊兰, 李泳, 等. 西藏终碛湖溃决形式研究[J]. *地质学前沿(中国地质大学(北京); 北京大学)*, 2009, 16(4): 372-380]
- [11] Huang Jinhui, Liu Jiankang, Cheng Zunlan, et al. An experiment of the effects of waves on glacier lake outburst induced by waves overtopping [J]. *Mountain Research*, 2014, 32(2): 241-248 [黄金辉, 刘建康, 程尊兰, 等. 涌浪规模对冰碛湖溃决的影响实验[J]. *山地学报*, 2014, 32(2): 241-248]
- [12] Cui Peng, Ma Dongtao, Chen Ningsheng, et al. The initiation, motion and mitigation of debris flow caused by glacial lake outburst [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 621-628 [崔鹏, 马东涛, 陈宁生, 等. 冰湖溃决泥石流的形成、演化与减灾对策[J]. *第四纪地质*, 2003, 23(6): 621-628]
- [13] Cheng Zunlan, Zhu Pingyi, Gong Yiwen. Typical debris flow triggered by ice-lake break [J]. *Mountain Research*, 2003, 21(6): 716-720 [程尊兰, 朱平一, 宫怡文. 典型冰湖溃决型泥石流形成机制分析[J]. *山地学报*, 2003, 21(6): 716-720]
- [14] X Q Chen, P Cui, N S Chen, et al. Calculation of discharge of debris flows caused by moraine-dam failure at midui gully, tibet, China [J]. *Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering*, 2007, 31(B2): 195-207
- [15] Wang Xin, Liu Shiyin, Mo Hongwei, et al. Expansion of glacier lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 66(7): 895-904 [王欣, 刘时银, 莫宏伟, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖扩张特征及其气候意义[J]. *地理学报*, 2011, 66(7): 895-904]
- [16] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. The cause and potential hazard of glacial lake outburst flood occurred on July 5,

- 2013 in Jiali County, Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 158–165 [孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 2013 年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 158–165]
- [17] Xin Xiaodong, Yao Tandong, Ye Qinghua, et al. Study of the fluctuations of glaciers and lakes around the Ranwu Lake of South-east Tibetan Plateau using Remote Sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 19–26 [辛晓冬, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 1980—2005 年藏东南然乌湖流域冰川湖泊变化研究[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(1): 158–165]
- [18] Li Deji, You Yong. Discussion about Midui Gully glacier lake [J]. *Mountain Research*, 1992, 10(4): 219–224 [李德基, 游勇. 西藏波密堆沟冰湖溃决浅议[J]. *山地研究(现山地学报)*, 1992, 10(4): 219–224]
- [19] Yang Ruimin, Zhu Liping, Wang Yongjie, et al. Study on the variations of lake area & volume and their effect on the occurrence of outburst of MUDUI Glacier Lake in Southeastern Tibet [J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(9): 1133–1140 [杨瑞敏, 朱立平, 王永杰, 等. 西藏东南部米堆冰湖面积和水量变化及其对溃决灾害发生的影响[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(9): 1133–1140]
- [20] Li Zhen, Chen Ningsheng, Zhang Jianping, et al. Characteristics of the disaster chain of outburst and glacier lakes in the Boiqu River basin [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(4): 143–152 [李震, 陈宁生, 张建平, 等. 波曲流域冰湖及其溃决灾害链特征分析[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(4): 143–152]
- [21] Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment. Debris flow and environment in Tibet [M]. Chengdu: Chengdu Science & Technology University Press, 1999: 69–78 [中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 西藏泥石流与环境[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1999, 69–78]
- [22] Chen Xiaoqing, Cui Peng, Yang Zhong, et al. Change in glacier lakes in Boiqu River Basin, Middle Himalayas during Last 15 Years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 793–800 [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]
- [23] Cheng Zunlan, Zhu Pingyi, Dang Chao, et al. Hazards of debris flow due to glacier-lake outburst in Southeastern Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(6): 954–959 [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]

Outburst – Regeneration Characteristic and Mechanism of Glacier Lake

ZHAO Wanyu¹, CHEN Xiaoqing¹, LIU Jiankang², SU Fenghuan¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS / Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu, 611734, China)

Abstract: Large-scale mudslides disaster causing by outburst of glacier lakes has attracted broad attention for causing heavy casualties and property losses frequently to the downstream. Many glacier lakes show a phenomenon of larger area and increasing reservoir water after outburst, which was known as glacier lake outburst-regeneration phenomenon. Two typical glacier lakes: the Guangxiecuo Lake in Midui Gully and the Cirenmacuo Lake in Zhangzangbu, Tibet Autonomous Region of China are taken for the study. Characteristics of glacial lake area variation and glacier retreat and advance were analyzed basing on remote sensing interpretation method. Studies have shown that: the two lakes show a process of glacial lake area increase → area reduction after outburst → area increase again. Area of the Guangxiecuo Lake has been restored to 63.6% since it outburst in 1988, and area of the Cirenmacuo Lake has been restored to the size before outburst in 1981. The Gongzha glacier and the Armagh Tsering glacier have been in a state of retreat from the late 1980s and early 1990s to the present, and glacier lake area show a expansion state at the same time. Combining with years of annual precipitation and annual mean temperature data from Bomi station and Nyalam station, the glacier lake outburst-regeneration mechanism was discussed: 1) The advance and retreat of the end of glaciers is a major influencer to glacial lake regeneration, because glacier advance pushing moraine and loose matter on both sides of the breach collapse cause discharge channel blocked, and glacier retreat provides space conditions. 2) The coupling effect of high temperature and heavy rainfall becomes a direct excitation condition for glacial lake outburst, and the temperature rise is a major factor leading to glacial lake area increase.

Key words: Glacier lake; Guangxiecuo glacier lake; Cirenmacuo glacier lake; outburst-regeneration; Tibet