

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

杨瑞敏^{1,2}, 朱立平¹, 王永杰¹, 除多³

(1. 中国科学院青藏高原研究所青藏高原环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100085;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 西藏高原大气环境科学研究所, 拉萨 850000)

摘 要:冰湖溃决灾害是青藏高原地区主要的灾害之一。详细了解冰湖的面积和水量变化及其原因, 有助于更准确地确定其溃决的可能性和产生破坏的程度和范围。米堆冰湖为一个典型的冰碛物阻塞冰湖, 1988年7月15日曾发生溃决。本研究利用1980年1:5万地形图和DEM、1988年TM影像、2001年IKONOS影像以及2001、2007、2009、2010年ALOS影像, 提取冰湖溃决前后的面积变化, 结合野外实地测得的冰湖水深, 获得冰湖不同时期的水量及其变化。同时, 利用自动水位计, 监测湖泊相对水深的变化及其原因。结果显示, 米堆溃决前面积达到 $64 \times 10^4 \text{ m}^2$, 水量为 $699 \times 10^4 \text{ m}^3$, 溃决使得 $601.83 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的水量溢出, 水位下降了17.18 m, 但溃决口并未达到冰湖最低处, 溃决后仍有 $97.17 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的水量。近年来, 气温升高融水增加使得冰湖面积和水量不断增加, 按照目前的水量增加速率, 冰湖再次发生溃决的可能性较小, 而在由于其他原因使得冰湖发生堵塞或大量外来物质(冰川断裂、滑坡等)填充进冰湖时, 可能导致冰湖水位急剧上升, 再次发生溃决。

关 键 词:藏东南; 米堆冰湖; 溃决; 面积和水量; 遥感

1 引言

冰湖溃决灾害是高山冰川区最常见和最严重的灾害之一^[1]。在全球变暖的大背景下, 冰川融水增多, 退缩加剧, 不稳定性增强, 导致冰湖发生溃决的危险程度大大提高^[2]。因此, 对冰湖的研究得到越来越多的关注^[3-4]。目前对冰湖溃决的研究主要集中在以下3个方面: ①冰湖溃决洪水或泥石流的估算及其模拟研究。崔鹏等^[5]分析了主要由冰滑坡和冰崩入湖导致的冰湖溃决的机理和条件, 并归纳出冰湖溃决泥石流沿程演化的6种模式。Osti和Egashira^[6]对1998年发生在尼泊尔的Tam Pokhari冰湖溃决事件进行了分析, 估算了其洪峰流量及其产生的泥石流强度。②结合坝体形态、周边地形以及补给冰川条件等, 对冰湖危险性程度进行研究。刘淑珍等^[7]依据冰湖特征以及后方现代冰川的特征等将西藏自治区洛扎县283个冰湖按照危险程度进行了划分。王欣等^[8]对中国喜马拉雅山地区冰湖进

行潜在危险性冰碛湖的识别和危险性冰碛湖溃决概率等级估算。McKillop和Clague^[9-10]在统计学的基础上对加拿大大不列颠哥伦比亚地区的冰碛物坝体溃决的可能性进行了评估。③进行气候变化与冰湖变化的关系研究, 分析冰湖向溃决发生的趋势和进程。车涛等^[11]对朋曲流域内冰湖进行研究, 得出流域内冰湖数量有所减少, 但冰湖面积增加。Chalise等^[12]提出, 随着气候变暖, 冰川退缩加剧, 引起更多的冰湖溃决发生。Harrison等^[13]通过对智利山区的一个冰川湖的形成、演化研究, 发现气候变暖引起冰川退缩后, 松散的岩屑进入冰湖后引起湖面上涨导致溃决。Ng等^[14]利用热动力模型分析了40年来发生在天山Merzbacher冰湖洪水与气候变化的关系。程尊兰等^[15]研究了波密地区及聂拉木地区气候变化与冰湖溃决泥石流的关系。

中国喜马拉雅山区是冰碛堰塞湖集中分布的地区之一^[16], 过去的几十年间, 冰湖溃决洪水灾害严重威胁了当地人民的生命和财产安全^[17]。一些

收稿日期: 2012-02; 修订日期: 2012-05.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41130529); 中科院创新方向项目(KZCX2-EW-113); 中科院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室开放课题(2010-7)。

作者简介: 杨瑞敏(1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事湖泊水量变化与气候变化关系研究。E-mail: yangruimin@itpcas.ac.cn

学者从不同的角度对西藏东南部(简称藏东南)地区的冰湖溃决灾害开展广泛研究,如冰湖溃决产生的原因与过程^[18]、冰湖溃决发生的气象条件^[19]、冰湖溃决出现的频率和趋势^[20]、冰湖堰塞体不同程度垮塌后的危害^[21]。然而,由于缺乏对冰湖面积和水量变化的详细资料,在分析冰湖溃决发生的原因时,多数研究只是根据溃决冰湖的遗迹推算其水量变化的原因和幅度;在分析冰湖溃决产生的危害时,只是根据堰塞体和沟谷形态对其溃决产生的洪水进行估算;在对潜在冰湖溃决的危险程度评价时,目前的研究只是对其不同溃决条件进行假设,而缺乏假设条件发生时产生洪水强度的可能性分析。

因此,在冰湖溃决洪水灾害研究中,详细了解冰湖的面积和水量变化及其原因,有助于更准确地认识其溃决的可能性和产生破坏的程度与范围。本文研究的米堆冰湖(也称光榭错),曾于1988年7月15日发生溃决。本研究利用地形图以及高分辨率遥感影像,结合实地测量得到的冰湖水下地形,获得冰湖溃决前后的面积和储水量变化,通过对冰湖相对水深变化的季节监测,分析气候变化条件下,该冰湖的稳定程度及其影响。

2 研究区概况

米堆冰湖位于96°29.9' E, 29°29.7' N, 隶属西藏波密县玉普乡(图1)。该湖为冰碛堰塞体形成的冰川末端湖,其后为米堆冰川(也称贡扎冰川),湖泊具有出口,出湖河流沿米堆沟由南向北注入帕隆藏布上游段,即玉普藏布。川藏公路沿玉普藏布由东向西分布。米堆沟属于冰川槽谷,流域面积约为123.8 km²,沟谷出口与玉普藏布交汇处东距然乌30 km,西距波密县城97 km^[18]。结合遥感影像和实地测量获得,米堆沟长度约9 km,沟谷总落差为214 m,坡降为27.89‰。流域内主要分布米堆、俄次和古勒3个村庄以及大片的农田(图2)。米堆冰川主要分为3支,米堆冰湖分布在它的中支即主冰川末端。该冰川由粒雪盆、冰瀑布、冰舌组成。冰瀑布位于海拔4850~4100 m处,冰面坡度为25°~30°;冰舌段平均海拔约为4000 m,2010年7月作者

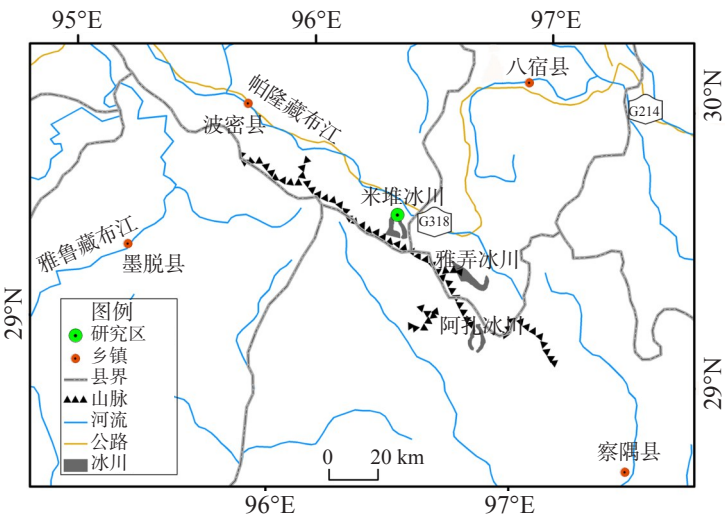


图1 米堆冰湖位置示意图

Fig.1 Sketch map of the location of Midui Glacial Lake

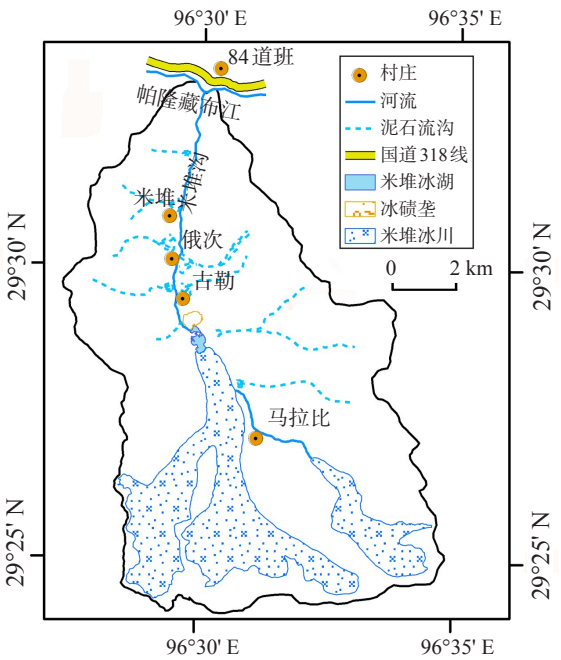


图2 米堆冰湖流域图

Fig.2 Map of Midui Glacial Lake drainage basin

野外考察发现冰舌上裂隙发育;冰湖湖面海拔为3778 m,东西支冰川融水亦注入米堆冰湖。米堆冰湖曾于1988年7月15日发生溃决,其原因主要是由于米堆冰川滑动,冰舌冲入冰湖,使得湖水上涌而发生坝体溃决^[18]。

米堆冰湖所在的藏东南地区属于印度洋季风亚热带山地气候区,是中国海洋性冰川分布和发育最集中的地区之一。受印度洋季风气候影响,该地

区降水十分丰富,冰川区年平均降水量 1000~3000 mm^[22]。冰川表面消融,运动速度快,平衡线海拔低,对气候变化极为敏感。近年的研究发现,这里的冰川退缩加剧^[23],冰川末端湖面积增加与冰川退缩具有较高的耦合性^[24],冰湖面积扩大与水量增加,导致其溃决危险性增高。

3 研究资料与方法

3.1 冰湖面积计算

湖泊面积大小是计算湖泊水量变化的必要条件。根据能够收集到的资料,本研究主要选用了 1:5 万纸质地形图以及 1:5 万 DEM 数据, TM、IKONOS、ALOS 卫星遥感数据。地形图以及卫星遥感数据资料情况见表 1。为减少季节变化对冰湖的影响,本研究选用的地图和影像资料的获取时间主要集中在 10-12 月份(表 1)。

对于不同类型的数据,采用不同的处理方法。将纸质地形图以 300dpi 精度扫描成数字图像,然后将扫描后的地形图在 ArcMAP 中进行几何纠正,纠正的均方根误差(RMSE)控制在 5 m 以内,投影定义为高斯-克吕格投影。对于分辨率为 30 m 的 TM 影像,在 ENVI 中,首先以地形图为基准,对其进行几何纠正,纠正的均方根误差控制在 0.15 个象元(即 5 m)以内。对于高分辨率的 IKONOS/ALOS 影像,利用数字高程模型 DEM 以及地形图在 ENVI 中进行正射校正。为了提高解译精度,将获取时间相同(2001 年 IKONOS)或相近(2009 年 ALOS-PRISM 与 ALOS-AVNIR2)的全色与多光谱影像进行融合,作为同期影像使用。为提高各期冰湖面积的对比精度,鉴于影像间同名地物易于寻找,再次以 2009 年 ALOS-PRISM 与 ALOS-AVNIR 融合后的影像为基准影像,对其他各期影像做二次配准。

在 ENVI 中,对 TM/IKONOS/ALOS 影像数据进行解译,主要用到的方法有假彩色合成、结合太阳高度角、DEM 等判别阴影区等。在 ArcMAP 中,利用矢量化工具提取地形图中米堆冰湖边界并计算其面积。

3.2 冰湖水量计算

湖泊水量是其在不同水面面积条件下的容量,获得不同面积条件下的水深则能够计算其水量大小。2010 年 7 月,使用 Hydro Science 生成的 HSW-1000DIG 型数显便携式超声波测深仪对米堆冰湖

的水深进行了实地测量(图 3),共获得 110 个水深数据。使用 Surfer 10 软件,利用克里格差值方法,对水深数据进行处理,获得米堆冰湖的水下地形。之后,利用 Cut/Fill 方法计算获得 2010 年米堆冰湖的储水量。

3.3 基于水位监测的冰湖水量变化原因分析

为了解米堆冰湖水量变化的原因,于 2010 年 6

表 1 本研究使用的地形图和影像数据
Tab.1 Topographical map and satellite images used in this study

数据类型	影像类型	分辨率	获取时间
地形图(1:5 万)	—	—	1980-10
DEM(1:5 万)	—	—	1980-10
遥感影像	TM	30m	1988-10-27
遥感影像	IKONOS	1 m (全色)、4m(多光谱)	2001-11-14
遥感影像	ALOS-AVNIR2	10m(多光谱)	2007-12-23
遥感影像	ALOS-PRISM	2.5m(全色)	2009-11-12
遥感影像	ALOS-AVNIR2	10m(多光谱)	2009-10-14
遥感影像	ALOS-PRISM	2.5m(全色)	2010-12-23

注:AVNIR-2 为先进可见光近红外辐射计;PRISM 为全色遥感立体测绘仪。

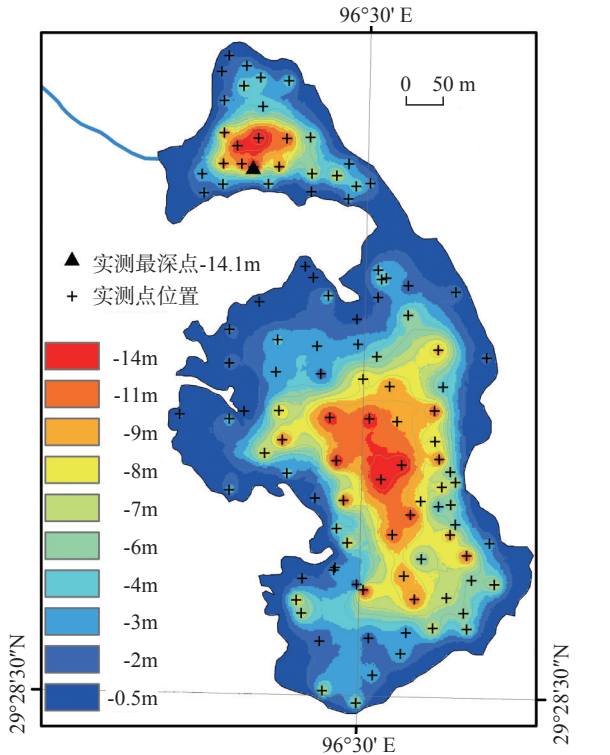


图 3 米堆冰湖水下地形图

Fig.3 Map of underwater topography of Midui Glacial Lake

月 19 日-10 月 30 日和 2011 年 6 月 12 日-11 月 4 日两个时段放置美国 HOBO 公司生产的自动水位计,用于记录米堆冰湖监测位置的相对水深和水温变化。水位计设定的记录频率为 2 次/h,每年监测结束后,取出水位计下载数据后,对获得的数据进行异常值剔除等处理,运用 Origin 函数绘图软件,得出米堆冰湖监测位置 6-11 月的相对水深和水温变化趋势(图 4)。

4 结果分析

4.1 冰湖面积及其变化

从地形图和遥感影像上对米堆冰湖边界提取结果如图 5,各期面积如表 2。其中, TM 影像获得时间为 1988 年 11 月,为冰湖溃决后 3 个月,冰湖一分为二,且不相通,其面积相较于 1980 年减少了 $8.41 \times 10^4 \text{ m}^2$, 减少的比例为 1980 年时冰湖面积的 26.9%。1988-2001 年,冰湖面积仍处于减少之中,减少量为 $2.37 \times 10^4 \text{ m}^2$, 减少的比例为 1988 年冰湖面积的 10.36%。但 2001-2010 年,冰湖则不断扩张。2001-2007 年,面积增加 $1.66 \times 10^4 \text{ m}^2$, 年平均增长率为 1.35%; 2007-2009 年,面积增加 $0.4 \times 10^4 \text{ m}^2$, 年平均增长率为 0.89%; 2009-2010 年,面积增加 $0.9 \times 10^4 \text{ m}^2$, 增长率为 4.00%。该湖南部与冰川相连, 2001-2010 年冰湖面积的年平均增长率为 1.61%, 扩张区域不断向冰川存在位置发展, 指示冰川处于后退之中。

如图 5 所示, 1980 年有两个出水口, 即出水口 1 和出水口 2; 1988 年溃决发生 3 个月之后, 两个出水口消失; 自 2001 年以后, 仅有出水口 1。但由于缺少与溃决前邻近的影像资料, 不能确定出水口 2 消失的时间以及出水口 1 再次出现的时间。

4.2 冰湖储水量及其变化

根据实测的冰湖水下地形数据和 2010 年冰湖面积, 运用 Cut/Fill 方法计算获得 2010 年冰湖储水量。从图 5 可以看出, 在湖岸线相对平缓(等深线相对稀疏)的东北部, 2001、2007、2009 年的边界基本重合, 因此, 这些时段的湖泊面积变化主要是向冰川区扩展, 水位变化

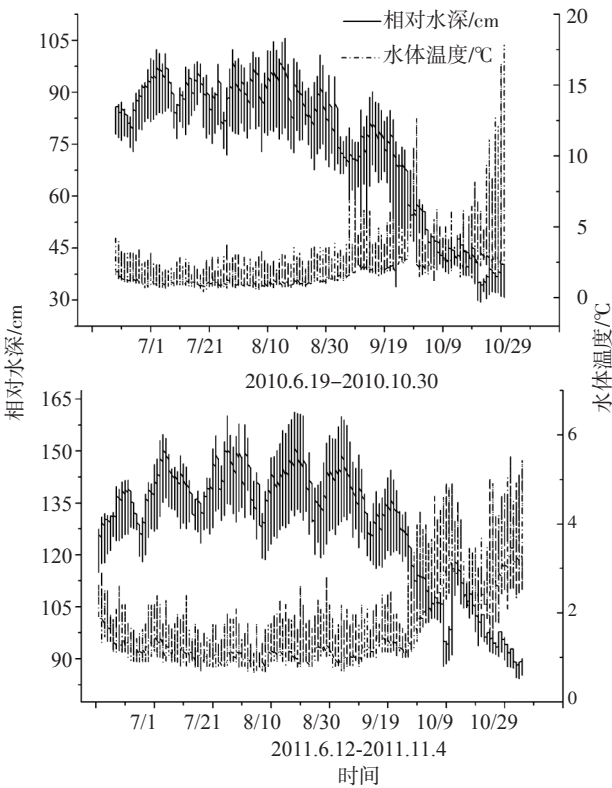


图 4 米堆冰湖水位、水温的季节变化
Fig.4 Seasonal variations of water level and temperature in Midui Glacial Lake

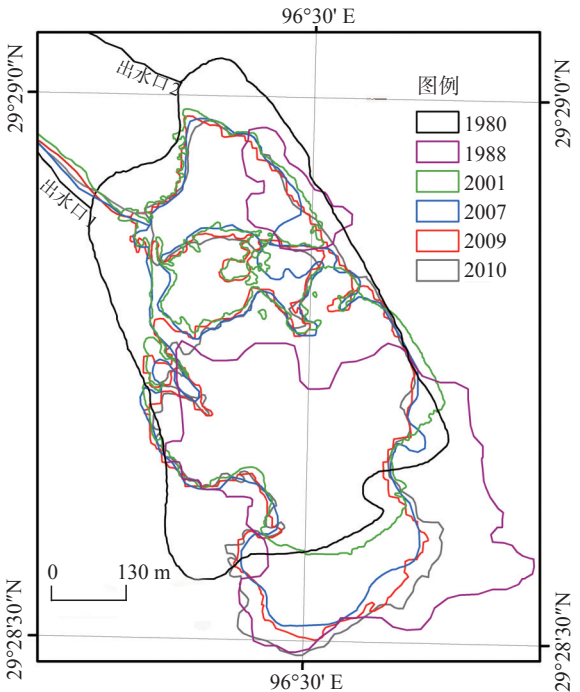


图 5 米堆冰湖各期面积变化
Fig.5 Variations of Midui Glacial Lake area in different stages

较小;结合其面积,分别获得冰湖2001、2007、2009年的储水量。根据卫星遥感影像解译的1980、1988年湖泊边界,结合水下地形和DEM,计算1980年和1988年溃决后的湖泊水量。由于目前缺乏冰湖溃决前不久(如1987年冬季)的影像资料,难以了解当时的库容状况,但根据2011年7月野外实地考察,1988年溃决前湖面高出现在湖面17.18 m,假定当时的冰川边界与1980年时情形相同,结合DEM等提取出当时的湖面面积,并估算其水量(表2)。

从冰湖储水量上看,从1980年至1988年溃决前,储水量增加 $163.5\times10^4\text{ m}^3$,占1980年储水量的30.5%;在1988年溃决前后,储水量减少 $601.83\times10^4\text{ m}^3$,占溃决前储水量的86.1%;从1988年溃决后至2001年,储水量继续减少,减少量为 $8.65\times10^4\text{ m}^3$,占1988年溃决后的8.9%;而2001-2010年,冰湖储水量处于不断增加之中。2001-2007年,储水量增加 $16.12\times10^4\text{ m}^3$,占2001年的18.3%,年平均增长率为 $2.69\times10^4\text{ m}^3/\text{a}$;2007-2009年,储水量增加 $2.07\times10^4\text{ m}^3$,占2007年的2.0%,年平均增长率为 $1.04\times10^4\text{ m}^3/\text{a}$;2009-2010年,储水量增加 $6.32\times10^4\text{ m}^3$,占2009年的5.9%。整个2001-2010年期间,储水量增加 $24.56\times10^4\text{ m}^3$,年平均增长率为 $2.73\times10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 。

4.3 冰湖相对水深的季节变化

尽管对米堆冰湖的相对水深进行2年的监测,由于每年水位计放置的位置稍有偏差,比较相对水深的年际变化意义不大。然而,从其年内(季节)变化看,在融水季节(6-8月),冰湖相对水深较大,9月份开始下降,降幅在15 m左右,10月份持续下降,相对于7、8月份降幅达50~60 m。从冰湖的水温变化看,在6月气温较高的季节,水温相对较低,而在9-10月气温下降后,水温反而有所回升(图4)。

5 讨论

5.1 米堆冰湖溃决前后的面积变化

冰湖面积大小一方面是对水量变化的反映,另一方面对于与冰川直接接触的冰湖,其面积的变化也反映了冰川变化对冰湖的影响。由于没有米堆冰湖在1988年溃决前不久的影像,本文对米堆冰湖溃决前后的面积变化仅是通过水位变化进行推算,难以确定溃决前冰川与湖泊的位置关系。但根据1988年冰湖溃决后与1980年的影像/地形图比较,其面积由 $31.24\times10^4\text{ m}^2$ 减至 $22.84\times10^4\text{ m}^2$,减少幅度为26.9%。尽管靠近冰碛垄和冰湖出口的位置已经出露大片湖底,但冰湖在靠近冰川一侧的面积却不断扩大,1980年的冰川区域在1988年溃决后已经被湖泊覆盖,反映了大片冰川的迅速消失,可能指示了冰湖溃决前冰川大面积断裂坍塌的事件。李德基和游勇^[18]在对米堆冰湖溃决原因的分析中,也认为断裂的冰体冲入湖泊可能是导致水量急剧增长的原因。实际上,西藏地区发生的典型冰湖溃决事件,许多激发原因都与冰体滑坡和管涌有关^[25]。1988年冰湖溃决后至2001年,冰湖在靠近冰川的一侧面积又不断收缩,反映了冰川向冰湖方向的快速推移,由于米堆冰川具有较陡的坡度和较高的积累,冰川的这种前进现象可能指示着冰川末端达到某一高程时才呈现相对稳定状态。由于目前的冰川前缘已经退缩到1988年溃决后的位置,其再次前进到2001年时所在位置或更远处的可能性仍然存在,在合适的补给和动力条件下,这种前进如果是快速突发的,对冰湖水位上升具有极大影响,可能引起溃决的发生。

表2 米堆冰湖1988、2001、2007、2009、2010年面积和水量及其变化
Tab.2 Areas & volumes and their variations of Midui Glacial Lake in 1988, 2001, 2007, 2009 and 2010

时间	期初面积/ 10 ⁴ m ²	期末面积/ 10 ⁴ m ²	面积变化比例 (相比期初)/%	年均面积 变化率/10 ⁴ m ²	期初水量/ 10 ⁴ m ³	期末水量/ 10 ⁴ m ³	水量变化比例 (相比期初)/%	年均水量 变化率/10 ⁴ m ³
1980-1988(溃决前)	31.24	64.00	104.9	4.10	535.50	699	30.5	20.44
1988(溃决前)- 1988(溃决后)	64.00	22.84	-64.3	—	699.00	97.17	-86.1	—
1988(溃决后)-2001	22.84	20.47	-10.4	0.18	97.17	88.53	-8.9	-0.67
2001-2007	20.47	22.14	8.1	0.28	88.53	104.69	18.3	2.69
2007-2009	22.14	22.53	1.8	0.20	104.69	106.76	2.0	1.04
2009-2010	22.53	23.43	4.0	0.90	106.76	113.08	5.9	6.32
2001-2010				0.33				2.73

5.2 米堆冰湖溃决前后水量变化和近年来水量增长

冰湖溃决产生的水量大小决定着其对地表条件的破坏程度。在研究已经发生溃决的冰湖时,常常通过洪水遗迹或者湖泊水位的变化估算水量变化。Cenderelli 和 Wohl^[26-27]通过对 1977 年 9 月 3 日和 1985 年 8 月 4 日发生在尼泊尔的两次冰湖溃决洪水分析,认为其比一般的季节洪水流量要高出 7~60 倍。前人对米堆冰湖溃决的研究中,李德基和游勇^[18]通过对溃决后洪峰痕迹的量测,绘制了流量过程线并估算了洪峰变化以及溃决出的水量多少,认为 1988 年 7 月 15 日的溃决至少使 $540 \times 10^4 \text{ m}^3$ 水量泄出,并认为决口已经冲刷至与湖底持平,整个冰湖的库容基本消失。本研究结果中,1988 年溃决前湖面高出现在湖面 17.18 m,水量为 $699 \times 10^4 \text{ m}^3$,1988 年 10 月 27 日,米堆冰湖刚刚溃决 3 个月后仍有 $97.17 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的库容,尽管溃决使得 $601.83 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的水量流出,但当时的溃决决口并未降低到全湖最深处,表明冰湖的堰塞坝体并未完全垮塌。

米堆冰湖溃决后的 1988-2001 年,湖泊面积变化的位置显示冰川向湖泊方向扩展,湖泊面积和水量均呈现下降的趋势。其原因一方面与冰川不稳定,仍向冰湖方向运动有关;另一方面,冰湖水量的补给与泄出存在负平衡,可能与当时仍存在较大的溃决决口,湖水排泄流量较大有关。2001-2010 年,冰湖的水量开始呈现正增长,储水量增加了 $24.56 \times 10^4 \text{ m}^3$,年平均增长率为 $2.73 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 。其中,2001-2007 年、2007-2009 年、2009-2010 年,年平均增长率分别为 $2.70 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $1.04 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $6.32 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,显示冰湖水量增加速率加剧的趋势。尽管米堆冰湖的目前库容仅仅达到 $113 \times 10^4 \text{ m}^3$,2001-2010 年的年平均增长率也只有 $2.73 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$,远低于冰湖溃决前的库容,但从溃决后的 1988-2001 年和 2001-2010 年两个时期冰湖水量由负增长到正增长这一现象看,推测冰湖的出口流量应该正在减小,更多的冰川融水能够积聚到冰湖内。

5.3 米堆冰湖再次溃决的可能性分析

冰湖发生溃决不仅与其水量的变化密切相关,更多地受制于水量增加的速率。冰湖出水口发生堵塞,或者冰川和滑坡体快速进入冰湖都能够引起冰湖水量迅速增加,从而引起溃决发生,溃决洪水在沟谷的演进过程则直接关系到灾害的程度。陈储军等^[28]利用遥感影像和航片并结合实地调查,分

析了西藏年楚河流域上游冰川崩塌程度对桑旺湖、白湖水量变化以及其溃决发生可能性与破坏程度的影响。一些学者则利用模型分析不同地形和水量条件下冰湖溃决后洪水的演进过程及其影响范围^[29]。这些研究均假设冰湖水量达到一定程度后,瞬间泄出后产生的后果。从米堆冰湖的水量变化看,2001-2010 年,冰湖水量快速增加,反映了其补给增强与泄水减弱的事实。近年来,藏东南地区气温增加显著,冰川融水径流增加^[30]。本研究的结果也显示,米堆冰湖的相对水深与水温成反相关关系,在水深增加时,水温降低,这说明增加的水量主要为冷水即冰川融水,随着全球变暖程度的增加,冰川融水对冰湖的补给速率将会越来越高。

然而,以冰湖 2001-2010 年的水量平均增长率看,若达到 1988 年溃决前的水量至少需要 214 年,即使按照 2009-2010 年最高的年增长速率计算,也需要 92 年。从上述的米堆冰湖在 1988 年溃决后至 2001 年和 2001-2010 年期间的水量绝对量变化看,冰湖的泄水能力在逐渐减弱。其原因一方面可能与出口河道逐渐淤积有关,更多的原因则可能是由于河道两岸边坡陡峻、物质疏松,极易发生滑坡。据李德基等^[18]考察研究得出,米堆沟在洪水期(7、8 月份)平均流量约为 $7 \sim 15 \text{ m}^3/\text{s}$,则估算其日径流总量为 $(60.48 \sim 129.6) \times 10^4 \text{ m}^3$ 。如果滑坡体将出湖河流完全堵塞,则冰湖水量将在 4~8 天内达到 1988 年冰湖溃决前的库容。因此,在 7、8 月份的融水期,一旦发生滑坡堵河现象,必须尽快采取疏通排泄措施。

就米堆冰湖来讲,由于冰湖与其补给冰川直接相连,冰川的垮塌入湖同样能够引起水量的快速增加。由于冰川沟谷地形陡峭,厚达百米的冰川底部消融后,悬空的冰舌稳定性大大减弱,使得冰川前进直至发生断裂的可能性大大增强。1988 年冰湖溃决后,垮塌的冰川区域被湖泊区域覆盖,而到 2001 年,冰川再次推进到 1980 年冰湖溃决前的位置。2001 年以来,冰川前缘缓慢后退已经退缩到 1988 年冰湖溃决、冰川垮塌后的位置,目前不排除冰川由于稳定性减弱再一次推进到 1980 年冰湖溃决前的位置。一旦该事件出现,将导致冰湖水量急剧增长,溃决再次发生。然而,由于目前的冰湖储水量为 $113.08 \times 10^4 \text{ m}^3$,不仅小于 1988 年溃决前的储水量 $699 \times 10^4 \text{ m}^3$,也小于 1980 年时储水量 $535.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,即使冰川发生与 1988 年冰湖溃决时同等规模

的断裂,也不会产生更大程度的危害。但当冰湖的出水河口堵塞或流量减小,冰川断裂或滑动同时发生时,将会造成严重的危害,因此,监测冰湖的出水河口流量是监测冰湖稳定与否的关键措施之一。

6 结论

(1) 米堆冰湖1988年发生溃决后,与1980年相比,水面面积和水量分别减少了26.9%和81.9%。由于溃决出口较大,冰湖面积和水量仍出现持续下降。2001年以来的面积增加和水量增长一方面是冰川融水加强的结果,同时也可能与溃决出口减小有关。

(2) 在米堆冰湖目前的水量增长条件下,冰湖在近百年期间处于相对稳定状态。然而,由于冰湖的出水口河道具有发生堵塞的可能,一旦发生完全堵塞,冰湖在4~8天内将可能再次达到溃决前的库容,具有发生再次溃决的危险。

(3) 米堆冰湖发生溃决与其补给冰川发生断裂进入湖泊,引起水量迅速增加有关。冰湖的面积变化显示,冰湖溃决后,米堆冰川仍出现向冰湖方向的移动,并在溃决前的位置停留后开始逐渐消融。由于目前的米堆冰川已经由于消融退缩到米堆冰湖溃决后的位置,应密切注意监测其运动可能性。

致谢:本研究得到中科院藏东南高山环境综合观测研究站的大力支持,中科院青藏所博士生胡星、张继峰协助作者开展部分野外工作,谨此致谢!

参考文献

- [1] Bajracharya B, Shrestha A B, Rajbhandari L. Glacial lake outburst floods in the Sagarmatha region. *Mountain Research and Development*, 2007, 27(4): 336-344.
- [2] Richardson, S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 2000, 65-66(1): 31-47.
- [3] 铁永波, 唐川. 冰湖溃决评价体系研究进展. *水科学进展*, 2009, 20(3): 448-452.
- [4] 姚治君, 段瑞, 董晓辉, 等. 青藏高原冰湖研究进展及趋势. *地理科学进展*, 2010, 29(1): 10-14.
- [5] 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. *第四纪研究*, 2003, 23(6): 621-628.
- [6] Osti R, Egashira S. Hydrodynamic characteristics of the Tam Pokhari Glacial Lake outburst flood in the Mt. Everest region, Nepal. *Hydrological Processes*, 2009, 23(20): 2943-2955.
- [7] 刘淑珍, 李辉霞, 鄢燕, 等. 西藏自治区洛扎县冰湖溃决危险度评价. *山地学报*, 2003, 21(B12): 128-132.
- [8] 王欣, 刘时银, 郭万钦, 等. 我国喜马拉雅山区冰碛湖溃决危险性评价. *地理学报*, 2010, 64(7): 782-790.
- [9] McKillop R J, Clague J J. Statistical, remote sensing-based approach for estimating the probability of catastrophic drainage from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1-2): 153-171.
- [10] 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. *Natural Hazards*, 2007, 41(1): 131-157.
- [11] 车涛, 晋锐, 李新, 等. 近20a来西藏朋曲流域冰湖变化及潜在溃决冰湖分析. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 397-402.
- [12] Chalise S R, Shrestha M L, Budhathoki K P, et al. Glacio-hydrological aspects of climate change in the Himalayas: mitigation of glacial lake outburst floods in Nepal// Wagener T, Franks S, Gupta HV, et al. *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change-Impact Assessment and Decision Making*. IAHS PUBLICATION, 2005, 295: 309-316.
- [13] Harrison S, Glasser N, Winchester V, et al. A glacial lake outburst flood associated with recent mountain glacier retreat, Patagonian Andes. *Holocene*, 2006, 16(4): 611-620.
- [14] Ng F, Liu S Y, Mavlyudov B, et al. Climatic control on the peak discharge of glacier outburst floods. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34: L21503.
- [15] 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. *冰川冻土*, 2008, 30(6): 954-959.
- [16] 徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征. *地理学报*, 1989, 44(3): 343-352.
- [17] 吕儒仁, 唐邦兴, 朱平一, 等. 西藏泥石流与环境. 成都: 成都科技大学出版社, 1999: 69-105.
- [18] 李德基, 游勇. 西藏波密米堆冰湖溃决浅议. *山地学报*, 1992, 10(4): 219-224.
- [19] 余忠水, 德庆卓嘎, 马艳鲜, 等. 西藏波密天摩沟9.4特大泥石流形成的气象条件. *山地学报*, 2009, 27(1): 82-87.
- [20] 刘晶晶, 程尊兰, 李泳, 等. 西藏冰湖溃决主要特征. *灾害学*, 2008, 23(1): 55-60.
- [21] 刘建康, 程尊兰, 郭芬芬, 等. 藏东南典型冰湖溃决危险性分析. *灾害学*, 2011, 26(2): 45-49.
- [22] 刘时银, 上官冬辉, 丁永建, 等. 20世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化. *冰川冻土*, 2005, 27(1): 55-63.

- [23] 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩. 科学通报, 2008, 53(17): 2091-2095.
- [24] 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. 冰川冻土, 2009, 31(1): 19-26.
- [25] 刘伟. 西藏典型冰湖溃决型泥石流的初步研究. 水文地质工程地质, 2006, 33(3): 88-92.
- [26] Cenderelli D A, Wohl E E. Peak discharge estimates of glacial-lake outburst floods and "normal" climatic floods in the Mount Everest region, Nepal. *Geomorphology*, 2001, 40(1-2): 57-90.
- [27] Cenderelli D A, Wohl E E. Flow hydraulics and geomorphic effects of glacial-lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(4): 385-407.
- [28] 陈储军, 刘明. 西藏年楚河冰川终碛湖溃决条件及洪水估算. 冰川冻土, 1996, 18(4): 347-352.
- [29] 岳志远, 曹志先, 车涛, 等. 冰湖溃决洪水的二维水动力学数值模拟. 冰川冻土, 2007, 29(5): 756-763.
- [30] 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 近期藏东南帕隆藏布流域冰川的变化特征. 科学通报, 2010, 55(18): 1775-1780.

Study on the Variations of Lake Area & Volume and Their Effect on the Occurrence of Outburst of MUDUI Glacier Lake in Southeastern Tibet

YANG Ruimin^{1,2}, ZHU Liping¹, WANG Yongjie¹, CHU Duo³

(1. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100085, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Tibet Institute of Plateau Atmospheric and Environmental Science Research, Lhasa 850001, China)

Abstract: Glacial lake outburst is one of the main hazards on the Tibetan Plateau. It is very important to understand the detailed information of variations and reasons of glacial lake area & volume for evaluating the possibility of glacial lake outburst and its damage degree. Midui Glacial Lake is a typical moraine-dammed lake, which had an outburst on July 15th in 1988. In this study the authors extract this lake areas in different stages from the topographic map (1:5000) taken in 1980 and TM images in 1988, IKONOS in 2001, ALOS in 2001/2007/2009/2010. The lake volumes in different stages are calculated by using the lake areas and the bathymetric survey results. Meanwhile, the authors monitor the relative lake water level changes by using automatic water gauges. Results show that the area and water volume of Midui glacial lake were $64 \times 10^4 \text{ m}^2$ and $699 \times 10^4 \text{ m}^3$, respectively before its outburst on June 15th in 1988. There was a water loss of $601.83 \times 10^4 \text{ m}^3$ due to this outburst and the relative lake level decreased by 17.18 m. However, the out flow bed was still higher than the lake bottom so that there were still $97.17 \times 10^4 \text{ m}^3$ water volume in the lake after the outburst. In recent years, the lake area and volume have been continually increasing due to the increase of glacial melting water caused by climate warming. There is a less possibility of lake outburst according to present increasing rate of the lake area & volume. However, if the outflow of the lake is blocked or a large amount of external materials (glacier breakdown, landslide) were filled into the lake, the lake level will rise sharply and a new outburst will occur.

Key words: southeastern Tibet; Midui Glacial Lake; outburst; lake area & volume; remote sensing

本文引用格式:

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. 地理科学进展, 2012, 31(9): 1133-1140.