

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0308

LI Da, SHANGGUAN Donghui, HUANG Weidong. Research on the area change of Lake Merzbacher in the Tianshan Mountains during 1998 - 2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(4):1126-1134. [李达, 上官冬辉, 黄维东. 1998 - 2017 年天山麦兹巴赫冰川湖面面积变化研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(4):1126-1134.]

1998 - 2017 年天山麦兹巴赫冰川湖面面积变化研究

李 达^{1,2}, 上官冬辉¹, 黄维东³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 甘肃省水文水资源局, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 天山麦兹巴赫冰川湖突发洪水是阿克苏河重要的致灾源。利用 1998 - 2017 年不同时段 Landsat、环境灾害卫星及高分遥感数据, 通过 Munsell HSV 变换, 获取了湖面范围。通过对比不同时期的冰湖面积, 对 1998 - 2017 年麦兹巴赫冰川湖最大面积的变化进行了分析。结果表明: 麦兹巴赫冰川湖的面积从 1998 年的 3.75 km² 逐渐变化为 2017 年的 2.87 km², 影响冰湖储量的下湖面积从 3.3 km² 减少为 1.88 km², 呈现缩小趋势, 上湖面积则有明显扩张。叠加了时间因子的正积温同冰湖面积有良好的正相关性, 说明气温通过影响冰雪融水以及冰坝稳定性, 从而影响冰湖的面积。研究内容可为区域性冰湖面积变化提供特殊案例, 并为冰湖面积扩张归因分析提供科学参考。

关键词: 麦兹巴赫冰川湖; 遥感; 面积变化; 天山

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)04-1126-09

0 引言

冰冻圈是全球变化的指示器, 冰湖作为冰冻圈的重要组成部分, 在气候变化研究中扮演着重要的角色^[1-5]。冰湖指的是由冰川作用形成的湖泊或者主要由冰川融水补给的湖泊^[5]。根据湖堤的不同, 一般分为冰碛阻塞湖、冰川阻塞湖等几种。冰川阻塞湖又称冰川湖, 其湖坝由冰体组成, 多为冰川波动变化阻塞支谷水流形成; 终碛阻塞湖又称冰碛湖, 其湖坝由冰碛物组成, 常见的有冰川退缩后冰川融水被冰川终碛阻挡形成的终碛湖, 以及冰川侧碛阻塞支谷水流形成的侧碛湖^[6]。无论是冰体湖坝还是冰碛物湖坝都不稳定, 容易发生溃决, 形成突发洪水。冰湖溃决洪水也是世界上冰川分布区域的重要灾害之一^[7-9]。冰湖储水量是决定冰湖溃决洪水破坏力的决定性因素, 但由于冰湖多分布于人迹罕至的高寒地区, 交通不畅, 冰湖储水量难以直接监测。已有的研究一般利用湖泊面积反演代替

冰湖储量, 进而反映冰湖的动态变化^[10]。通过研究冰湖面积变化, 进而对潜在溃决洪水的危害性进行评估, 对下游地区的灾害风险评估工作有着重要的意义。

随着全球气候增暖, 冰川退缩, 冰湖也出现了快速扩张的趋势, 尤其是在青藏高原地区以及天山地区^[4-5, 11-12]。增温导致的冰川退缩和冰川融水增加是冰湖面积扩张的重要影响因素^[13]。同时, 温度变化与冰湖溃决息息相关, 尤其是冰川阻塞湖, 温度是冰坝失稳的重要影响因子^[14]。天山地区是我国冰湖的重要分布区之一, 近年来天山山区显著增温^[15], 受冰川融水补给的冰湖面积也发生明显扩张^[13]。虽然冰湖编目以及冰湖的年代际变化研究已经较为系统, 但个体冰湖的特异性变化研究还有待加强, 冰湖的年际加密观测以及面积-气温归因分析研究有待进一步提高。兹巴赫冰川湖便是天山地区最具代表性的冰川阻塞湖。本文首先结合多幅遥感影像, 通过 Munsell HSV 变换等方法提取

收稿日期: 2018-05-04; 修订日期: 2018-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671066; 41271082; 41471060); 冰冻圈科学国家重点实验室自主研究项目(SKLCSS-ZZ-2017)资助

作者简介: 李达(1993-), 男, 河北保定人, 2016年在河北师范大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事冰湖及冰川灾害研究. E-mail: lida@lzb.ac.cn

通信作者: 上官冬辉, 研究员, 从事冰川变化、冰川灾害研究. E-mail: dhguan@lzb.ac.cn.

了麦兹巴赫冰川湖近 20 年来的湖泊面积, 以期分析麦兹巴赫冰川湖近些年来面积变化特征; 其次, 通过分析吉尔吉斯境内的天山站气温数据, 寻找冰湖变化与气温特征的敏感性, 探讨引起湖泊面积变化的原因。

1 研究区概况

麦兹巴赫冰川湖位于吉尔吉斯斯坦境内阿克苏河支流昆马力克河的上游, 伊利尔切克冰川南北两支的交汇处(42°13' N, 79°52' E), 湖面海拔约 3 300 m, 是典型的冰川阻塞湖(图 1)。伊利尔切克冰川北支退缩形成湖盆, 南支阻塞湖盆形成冰坝。1902 年德国科学家 Merzbacher^[16] 发现并命名麦兹巴赫湖。麦兹巴赫冰川湖自 1998 年来一直处于双湖的状态, 即受南伊利尔切克冰川阻塞产生的“下湖”, 以及连接北伊利尔切克冰川末端的“上湖”, 上下湖由狭长的水道相连。两湖之间还零星分布有一些小湖泊。上游湖常年保持蓄水状态, 而下湖则仅当蓄水期间有水, 溃决后通常是空湖。作为阿克苏河重要的冰川融水补给源地, 伊利尔切克冰川有着丰富的水资源储量, 但是麦兹巴赫冰川湖的突发洪水给下游地区带来了极大的危害。自 1956 年协合拉水文站建站观测以来, 麦兹巴赫冰川湖就一直与冰湖溃决、突发洪水联系起来^[17], 协合拉水文站水文记录数据分析表明, 麦兹巴赫冰川湖洪水次数高达 50 余次, 几乎每年都会发生洪水, 有些年份还会发生两次洪水^[18]。突发洪水给下游居民的生活和生活造成了严重的影响, 威胁着下游居民的生命财产安全。

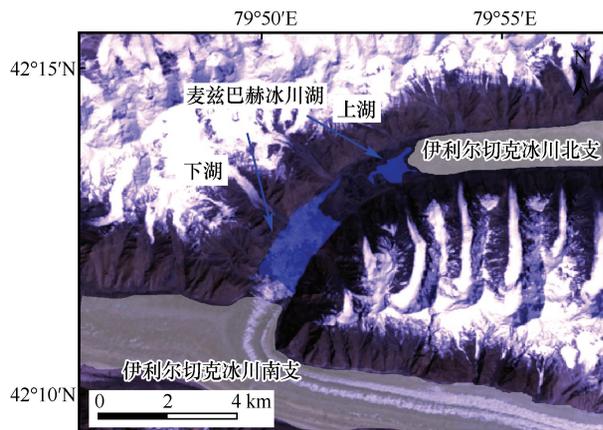


图 1 麦兹巴赫冰川湖(背景: Landsat 5 TM 影像, 2010 年 7 月 15 日)

Fig. 1 Location of the Lake Merzbacher (Source: Landsat 5 TM, 2010-07-15)

2 数据源与数据处理

麦兹巴赫冰川湖位于天山山脉腹地, 海拔高, 冰川地貌发育, 交通极为不便, 利用遥感影像进行冰湖观测, 实现冰湖面积的提取是目前较为理想的研究方法。由于麦兹巴赫冰川湖开始蓄水的时间大致为每年的 5、6 月份, 一般在 7 月底 8 月初“下湖”就会发生溃决, 溃决前夕麦兹巴赫冰川湖面积达到一年中的最大值, 故遥感数据应尽量选择靠近溃决的日期。但是湖泊溃决往往在短短几天内完成, 受限于遥感图像的时间分辨率, 单独依靠溃决前夕的卫星数据获取近 20 年来的湖泊面积数据并不现实, 必须扩大数据选取的时间范围。Xie 等^[19]对麦兹巴赫冰川湖 2009 年、2010 年的年内面积变化进行了研究, 湖泊面积的年内变化表明, 溃决前五日之内的遥感数据可以满足提取冰湖面积的需求, 利用 2012 年 7 月 3 日(洪峰时间 7 月 8 日)的环境卫星数据以及 2015 年 7 月 15 日(洪峰时间 7 月 27 日)的 Landsat 数据进行检验, 结果表明误差控制在 10% 以内, 所以湖泊溃决前夕 5 日之内遥感数据满足试验的基本要求。利用 2014 年的多源遥感数据, 多次重复提取冰湖的试验表明, 湖泊溃决后的 15 日之内, 湖盆表面都会有浮冰残留, 通过对浮冰覆盖范围的识别也能够实现湖泊最大面积的提取, 其误差小于 12%, 并且距溃决时间越近精度越高, 也可以基本满足研究的需要。为此, 遥感数据选择依据如下: (1) 选取湖泊溃决前夕 5 日之内的遥感数据, 直接提取湖泊面积; (2) 如不能获取湖泊溃决前夕 5 日内的遥感数据, 或其质量较差, 则选用湖泊溃决后 15 日内的遥感数据, 通过解译浮冰残留范围, 获取湖泊的最大面积。依据协和拉水文站提供的水文数据(洪峰时间), 本次研究选取 1998 - 2017 年湖泊溃决期间, 湖泊溃决前夕以及溃决后多幅遥感数据, 提取了 1998 - 2017 年来麦兹巴赫冰川湖面积变化的相关数据。数据源包括 Landsat TM、Landsat ETM+ (<https://landsatlook.usgs.gov/viewer.html>)、国产环境卫星、高分一号数据等 (<http://www.cresda.com/CN/>)(表 1)。

Landsat 系列数据产品已经进行了系统的几何纠正和辐射校正, 均方根误差小于 12 m, 校正精度都在半个像元左右^[20-22], 因此可以直接进行湖面提取工作, 并且作为其他遥感影像的配准基础。利用 ENVI 软件 FLAASH Atmospheric Correction 模块对

表1 研究所用数据列表

Table 1 List of the data used in this study

| 数据源 | 轨道号 | 时间 | 分辨率/m |
|----------------|---------|------------|-------|
| Landsat 5 TM | 148/031 | 1998-08-22 | 30 |
| Landsat 5 TM | 148/031 | 2007-07-14 | 30 |
| Landsat 5 TM | 147/031 | 2007-08-08 | 30 |
| Landsat 5 TM | 147/031 | 2010-08-16 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 1999-07-25 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2000-07-27 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2001-08-31 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2002-07-01 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2002-08-18 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2003-07-20 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2004-08-07 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2004-07-22 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2005-06-23 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2005-08-10 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2006-07-28 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2008-07-17 | 30 |
| Landsat 7 ETM+ | 147/031 | 2015-07-21 | 30 |
| GF-1 WFV3 | 65/84 | 2014-08-14 | 16 |
| GF-1 WFV2 | 63/84 | 2016-06-20 | 16 |
| GF-1 WFV4 | 65/85 | 2016-06-25 | 16 |
| GF-1 WFV1 | 65/83 | 2016-07-02 | 16 |
| HJ1A CCD1 | 52/64 | 2010-07-15 | 30 |
| HJ1A CCD2 | 46/63 | 2017-07-07 | 30 |
| HJ1A CCD2 | 47/64 | 2011-07-17 | 30 |
| HJ1B CCD1 | 50/64 | 2012-07-08 | 30 |
| HJ1B CCD1 | 47/64 | 2015-07-19 | 30 |
| HJ1B CCD2 | 46/64 | 2009-07-30 | 30 |
| HJ1B CCD2 | 46/64 | 2013-07-17 | 30 |
| HJ1B CCD2 | 46/64 | 2014-08-05 | 30 |

高分一号数据进行大气校正后再以 Landsat 数据为基准进行配准, 误差小于 2 个像元 (16 m)。同样, 利用 ENVI 软件对 HJ 卫星数据进行几何校正和大气校正, 误差小于 1 个像元 (30 m)^[21]。

由于湖面上常年存在大面积浮冰, 实现冰与水的分离、冰湖面积计算是重要的一步。目前有研究表明, 利用 IHS 空间变换或者改进型水体归一化指数, 可以实现湖泊水体的提取工作^[23], 但麦兹巴赫冰川湖独特的地理环境造就了其多云雾的天气状况, 尤其夏季, 多云雾的天气条件极大地制约了光学遥感的图像质量。在试验过程中, 云雾对湖泊水体的提取产生较大影响^[23]。这使得上述几种方法对于麦兹巴赫冰川湖区域多云的天气状况不相适应。而 HSV 色彩空间相较于传统的 RGB 色彩空间

更符合人的认知感受, 与人的视觉特性较为相近, 易于进行目标识别处理^[24-25], 所以本次试验先对影像数据进行 Munsell HSV 变换, 之后再进行分类从而实现冰湖面积提取。重复试验表明 Landsat 数据的 band4、band3、band2 分别对应转化为 Hue、Sat、Val 分量能获得最好效果, 并且对薄云有一定的祛除效果。在图 2 中可以看出原始图像受薄云影响, 上湖难以辨别, 但通过 Munsell HSV 变换后可以明显分辨上湖的水域轮廓, 而且变换前后对比可以明显地观察到 Munsell HSV 变换能够把水体 (图上显示为绿色)、山地背景 (图上显示为红色) 和干扰因素云 (图上显示为蓝色) 区分出来。面积提取完成后进行矢量化并计算湖泊面积。

Xie 等^[19]通过人工修正将冰湖面积的提取精度提高到 98% 以上, 本次试验由目视解译的方法完成, 对比 Xie 等 2009、2010 年的湖泊数据, 误差为 0.052 km² 和 0.06 km², 小于 1.6%。考虑到图像选取时间所带来的误差, 不同年份湖泊提取面积以及总误差如表 2 所示。

3 结果与分析

3.1 湖泊面积缩小, 上下湖变化趋势相反

麦兹巴赫冰川湖面积年际变化的数据结果表明 (图 3), 在 20 年中, 湖泊的总体面积从 1998 年的 3.75 km² 波动变化为 2017 年的 2.87 km²。麦兹巴赫冰川湖湖泊的面积在整体上可以分为两个阶段, 第一个阶段是 2010 年以前, 湖泊面积虽然每年都有浮动变化, 但除却个别年份有较大变异之外, 每年的面积都稳定在一个较小的区间之内, 是一个较为稳定的阶段; 第二个阶段是指 2010 年之后, 湖泊面积波动变化愈加剧烈, 波动范围显著扩大, 年际变化愈加明显。2014 年湖泊面积达到一个峰值之后, 面积逐年缩减, 且缩减趋势明显。

麦兹巴赫冰川湖的上下两湖虽补给来源相同, 但二者的变化趋势截然相反。“上湖”随着北伊利尔切克冰川的退缩, 湖盆沿冰川向上扩张^[26], 面积不断增长, “下湖”则逐渐萎缩 (图 3)。相较于 1998 年的 0.4 km², 2017 年“上湖”面积增长了近 1.5 倍, 为 0.95 km², “下湖”则缩减了将近一半, 从 1998 年的 3.3 km² 下降至 2017 年的 1.88 km²。上下湖的波动性也不尽相同, “上湖”波动性较弱, 表现出稳步上升的趋势, “下湖”波动性较强年际变化较大。因为“下湖”面积远超“上湖”, 麦兹巴赫冰川湖总面积的

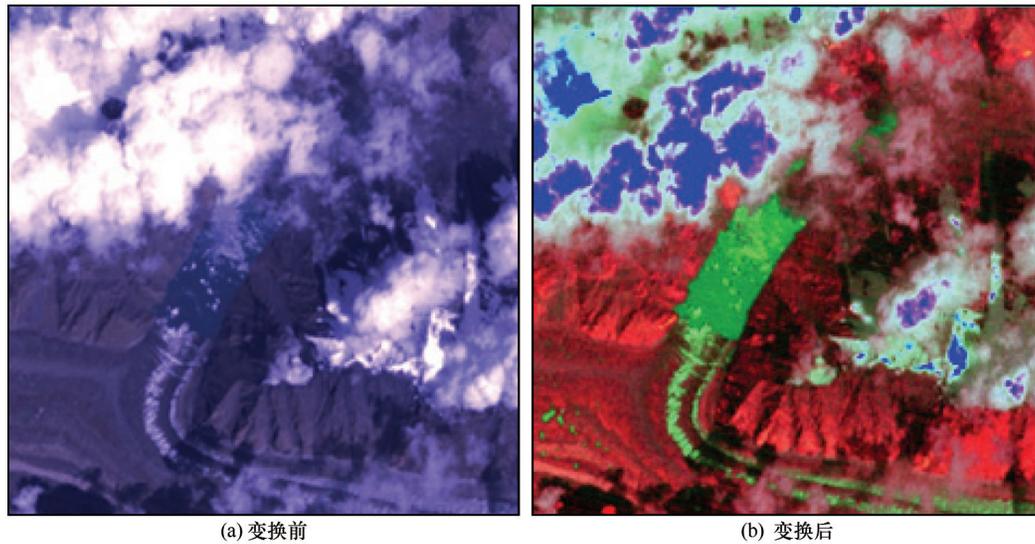


图2 Munsell HSV 变换前后效果对比(Landsat 5 TM 影像, 2008 年 7 月 9 日)

Fig. 2 The images before (left) and after (right) Munsell HSV transformation (Landsat 5 TM image, 2008-07-09)

表2 麦兹巴赫冰川湖面积以及提取误差

Table 2 The area of Lake Merzbacher and Error Percentages of the area extraction

| 数据时间 | 总面积/km ² | “上湖”面积/km ² | “下湖”面积/km ² | 总误差 |
|------------|---------------------|------------------------|------------------------|--------|
| 1998-08-22 | 3.75 | 0.40 | 3.30 | <10.4% |
| 1999-07-25 | 3.92 | 0.34 | 3.54 | <6.4% |
| 2000-07-27 | 3.57 | 0.37 | 3.16 | <4.0% |
| 2001-08-31 | 3.56 | 0.43 | 3.09 | <15.0% |
| 2002-08-18 | 3.15 | 0.43 | 2.68 | <13.2% |
| 2003-07-20 | 3.48 | 0.44 | 2.99 | <8.4% |
| 2004-08-07 | 4.13 | 0.50 | 3.58 | <4.0% |
| 2005-07-09 | 3.39 | 0.56 | 2.79 | <9.3% |
| 2006-07-28 | 3.65 | 0.53 | 3.07 | <4.0% |
| 2007-07-14 | 3.35 | 0.47 | 2.85 | <10.0% |
| 2008-07-15 | 3.71 | 0.51 | 3.13 | <4.0% |
| 2009-07-30 | 3.33 | 0.60 | 2.66 | <4.0% |
| 2010-07-15 | 3.76 | 0.64 | 3.08 | <4.0% |
| 2011-07-17 | 3.29 | 0.46 | 2.78 | <4.0% |
| 2012-07-08 | 2.69 | 0.49 | 2.17 | <4.0% |
| 2013-07-19 | 3.16 | 0.78 | 2.30 | <4.0% |
| 2014-08-05 | 3.88 | 0.84 | 2.97 | <7.4% |
| 2015-07-24 | 3.79 | 0.82 | 2.87 | <7.4% |
| 2016-06-25 | 3.22 | 0.79 | 2.33 | <7.4% |
| 2017-07-07 | 2.87 | 0.95 | 1.88 | <7.4% |

变化波动目前主要受“下湖”主导。

3.2 冰湖面积变化与温度之间的相关关系

麦兹巴赫冰川湖位于天山腹地, 交通极为不便, 难以获得有效的实测数据, 因此选用吉尔吉斯斯坦天山站(78.2°N, 41.9°E, 3 614 m a. s. l., 以下称天山站)的气象数据代替, 二者海拔相近, 具有一定的代表性。由于上下两湖储量上的差距, 上

湖实际上受冰川融水补给变化影响较小, 所以下湖面积分析主要是指“下湖”。

3.2.1 多年平均气温变化

由于麦兹巴赫冰川湖开始蓄水的时间为每年的5、6月份, 7月底、8月初为溃决高发时段, 实际上冰湖蓄水时间只有3~4个月, 所以本次试验获取了1980 - 2014年每年4月1日至7月31日的平均温

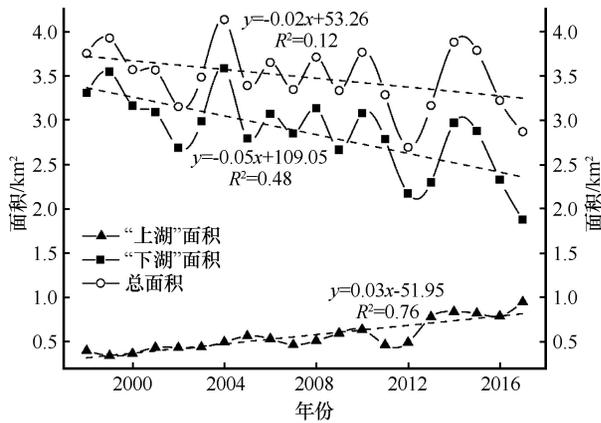


图3 2000 - 2017年麦兹巴赫冰川湖“上湖”与“下湖”面积变化

Fig. 3 Variations of the area of Lake Merzbacher (the upper lake, lower lake and total lake) during 2000 - 2017

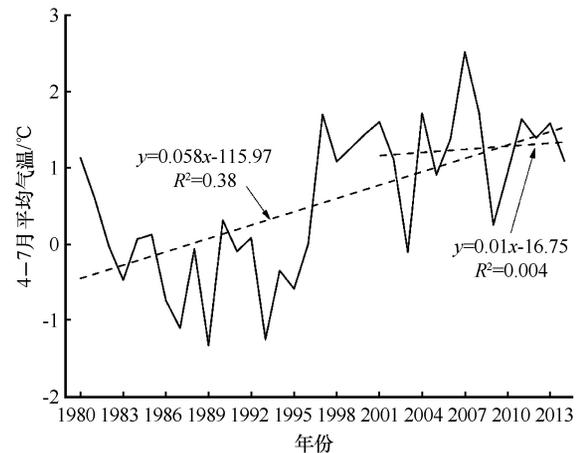


图4 1980 - 2016年每年4月至7月麦兹巴赫冰川湖平均气温
Fig. 4 Variation of the temperature over the Lake Merzbacher averaged from April to July during 1980 - 2016

度(图4)。

1980年以来, 4 - 7月平均气温呈现出波动上升的趋势, 这说明麦兹巴赫冰川湖气温可能存在年代际的增温现象, 增温幅度将近1 °C。2000 - 2014年这15年间4 - 7月平均温度波动幅度虽然较大, 但整体变化趋势趋于稳定, 增温并不明显。平均气温的波动变化与麦兹巴赫冰川湖面积变化并不一致, 一些平均气温为低值的年份, 如2003年、2010年, 湖泊面积却比较大, 一些高值年份, 如2007年、2013年, 湖泊面积却相对较小, 湖泊面积与平均气温总体上相关性较差。

3. 2. 2 正积温与湖泊面积变化的相关性

冰雪消融与正积温之间存在线性关系^[27-28], 从而得以形成度日模型计算冰川物质平衡。冰川融水是麦兹巴赫冰川最重要的输入源, 在一定程度上正积温可以反映冰川融水的入湖总量, 再通过冰湖面积与储量之间的相关性获取湖泊的面积变化。由于湖泊溃决后冰川融水会直接通过湖盆不再发生贮存(直至冰坝泄水通道闭合才能再次进行积累), 此时的冰川融水对一年中湖泊面积已无贡献, 所以设置冰湖溃决发生时的日期作为计算正积温的终点, 不同年份的正积温如图5所示。

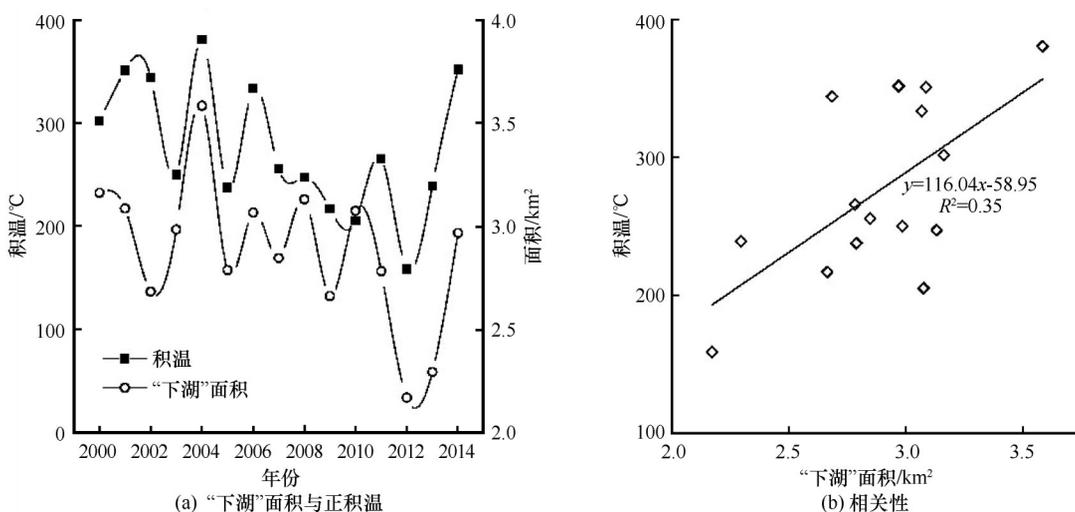


图5 2000 - 2014年麦兹巴赫冰川湖“下湖”面积与正积温变化曲线(a)与麦兹巴赫冰川湖“下湖”面积与正积温相关性(b)
Fig. 5 Variations of the area of Lower Lake of Lake Merzbacher and positive accumulated temperature during 2000 - 2014 (a) and correlated between area of the Lower Lake of Lake Merzbacher and positive accumulated temperature (b)

图5显示积温与“下湖”面积有同步变化的趋势但只存在弱的正相关性(相关系数 $r=0.632$, $P=$

0.012, 相关性显著), 其中非相关因素来源于2002年、2008年以及2010年的变异, 2002年的高积温

值对应的是较小的“下湖”面积, 2008 年与 2010 年则相反, 较低的积温值对应的却是较高的“下湖”面积。如果排除这三年的统计值, 积温与“下湖”面积的相关系数 $r=0.855$, 为强相关 ($P<0.01$, 相关性显著)。这意味着冰湖面积在一定程度上受正积温的影响, 正积温的变化可以部分解释冰湖面积的变化。

3.3 溃决时间制约着湖泊的发展

较早的溃决是制约湖泊发展、扩张的重要原因之一。近年来麦兹巴赫冰川湖面积的缩小与其溃决日期的不断提前是一致的[图 6(a)]。2012 年、2016 年和 2017 年冰湖面积的缩减都与溃决时间较早紧密相连, 但两者并没有强相关性。麦兹巴赫冰川湖在年内往往需要经历一个缓慢汇水然后溃决

快速放水的过程。“从无到有”缓慢增长, 历程大约 2~3 个月, 但突发洪水释放却非常迅速, 短短几天就泄洪完毕。其溃决时间通常处在 7 月中下旬至 8 月初。而较早的溃决使得蓄水时间较短, 湖泊面积也会相对较小。2000 - 2014 年每年 4 月、5 月、6 月单月的平均气温变化表明[图 6(b)], 1998 年来 4 月份气温有上升的趋势, 6 月份气温则出现下降的趋势。这说明气温的提早回升、慢速回暖可能与湖泊的提早溃决相关。过早的升温一方面可能提前提升水温从而导致冰坝内部管涌形成提前, 另一方面可能导致湖泊蓄水时间提前, 增加水对冰坝的影响时间, 从而影响冰坝的稳定性。随着全球气候变暖, 麦兹巴赫冰川湖溃决日期提前的趋势在未来可能会越来越明显。

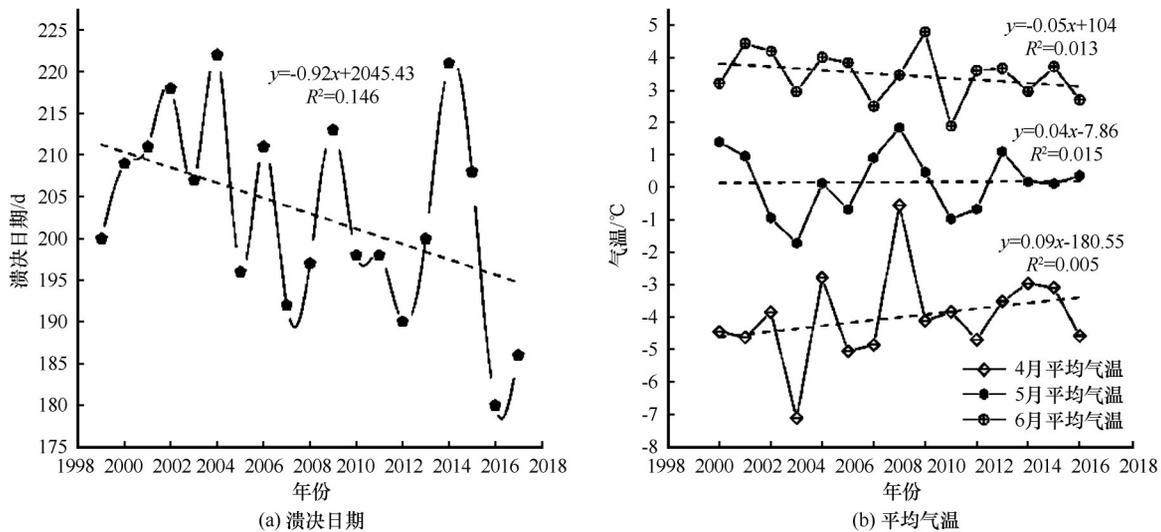


图 6 1999 - 2017 年麦兹巴赫冰川湖溃决日期(a)及 2000 - 2014 年的 4、5、6 月平均气温(b)

Fig. 6 Outburst date of the Lake Merzbacher, 1999 - 2017 (a) and average temperature of April, May and June, 2000 - 2014 (b)

4 讨论

麦兹巴赫冰川湖储量随着“下湖”面积的缩减不断降低, 这与上下两湖的形成机制相关。上下两湖的湖盆均是北伊利尔切克冰川退缩形成, 但湖盆深度截然不同^[26]。“下湖”冰坝是受南伊利尔切克冰川挤压形成, 坝体较高, 湖盆较深; “上湖”位于北伊利尔切克冰川前缘, 冰坝由冰川前缘环状冰碛物以及死冰形成, 坝体较低, 湖盆较浅, 事实上, “上湖”在 1990 年曾发展到与下湖相当的规模, 最深处也达到约 100 m, 但受 1996 年冰川跃动的影响而完全破坏^[26]。经过 20 年来的发展, 尽管“上湖”面积增加近 2 倍, 但由于面积基数小, 并且冰川融水所

携物质沉积, 平均深度从 2005 年的 8 m 降至 2011 年的 2 m^[23], 即便“上湖”面积增大, 蓄水能力也比“下湖”小得多。

近年来麦兹巴赫冰川湖呈现面积缩小的趋势, 而天山地区冰湖总体呈现扩张趋势^[13], 两者看似矛盾, 实际上同为天山地区气候变暖的结果。增温不仅会导致冰川融水增加, 直接引发冰湖面积的扩张^[13], 还会影响冰湖坝体的稳定性, 制约冰湖面积的变化。麦兹巴赫冰川湖与伊利尔切克冰川相连, 直接受冰川融水补给, 冰川融水的增长当然会导致冰湖面积的扩张, 但气温的升高同时会加速冰坝内部的管涌^[29], 使得冰坝失稳, 引发冰湖的提前溃决。平均温度是表征冰川融水量大小的重

要指标^[30-31]。考虑到上下两个湖湖泊形成机制的差异,平均气温的变化应该与“下湖”面积变化相关。试验中两者相关性较差,也正说明平均气温所代表的冰川融水变化与麦兹巴赫冰川湖面积并不能直接相关,而需要拆解和分析其中的影响因子,关于湖泊溃决时间、积温的相关分析也证明了这一点。

本文所述正积温实际上是叠加了冰湖溃决时间因子的正积温,与传统意义上度日模型中的正积温有所不同。溃决日期以及气温是正积温的两个重要组成部分,从某种意义上来说,溃决时间既影响正积温的大小,也可以通过正积温进行表达,两者有较强的一致性,但在本质上它们是气温变化对湖泊面积变化产生影响的两个方面,正积温代表冰川融水量的大小,表达的是气温对湖泊水量输入的影响,溃决时间表达的则是气温对冰湖稳定性的影响。在统计结果上,如果不考虑2002年、2008年以及2010年变异的情况,正积温与“下湖”面积为强正相关。2008年、2010年低积温值反而产生较大湖泊面积的情况可能受其它因素的影响。比如冰下释放水的影响,2008年存在冰下释放水过程^[32],可能其在湖泊溃决之前就进行了排放,从而对湖泊的蓄水情况产生了影响,使湖泊面积发生迅速扩张。另外,变异也有可能地区降水的变化有关,由于缺少伊利尔切克冰川地区降水数据,具体原因还需要进一步研究探讨。

冰湖面积的减小并不能直接与灾害风险降低挂钩。麦兹巴赫冰川湖蓄水总量随“下湖”面积的缩减逐渐降低,Häusler等^[26]认为冰川跃动后冰川融水所携带的大量沉积物不仅仅会影响“上湖”,同时也会在“下湖”沉积,这无疑使得麦兹巴赫冰川湖蓄水能力更加弱化。然而这并不意味着突发洪水流量的明显降低,Shangguan等^[32]指出虽然麦兹巴赫冰川湖蓄水量减少,但由于冰湖溃决时常伴有冰下释放水,冰湖溃决洪水和冰下释放水两者叠加,突发洪水危害犹在。

受遥感数据时间分辨率的限制,未能有效提取麦兹巴赫冰川湖年内变化情况,冰湖年内发展速率与气候变化之间的相关关系还有待进一步研究。

5 结论

利用1998-2017年不同时段 Landsat、环境灾害卫星及高分遥感数据,采用Munsell HSV变

换,对天山麦兹巴赫冰川湖面积变化进行分析,得到结论如下:

(1) 与天山整体冰湖发展扩张的趋势不同,近20年来麦兹巴赫冰川湖的湖泊面积逐渐缩小,从1998年的3.75 km²逐渐变化为2017年的2.87 km²其中上下两湖的变化趋势截然相反,“上湖”面积扩张,从1998年的0.4 km²增长到2017年的0.95 km²,“下湖”面积则从1998年的3.3 km²下降至2017年的1.88 km²,由于下湖湖盆深度远超上湖,下湖面积的缩减也意味着湖泊整体蓄水量的减少。

(2) 麦兹巴赫冰川湖面积变化受冰川融水补给和自身冰湖稳定性两方面的制约。叠加了溃决时间因素的正积温与麦兹巴赫冰川湖湖泊面积的变化有良好的一致性,说明区域性的气温变化通过影响冰雪融水以及冰湖坝体稳定程度对冰湖面积、储量造成影响,是麦兹巴赫冰川湖近些年来变化的重要影响因子。

参考文献(References):

- [1] Qin Dahe, Zhou Botao, Xiao Cunde. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China[J]. *Acta Meteorologica*, 2014, 72(5): 869-879. [秦大河,周波涛,效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响[J]. *气象学报*, 2014, 72(5): 869-879.]
- [2] Shi Yafeng. Glacier recession and lake shrinkage indicating the climatic warming and drying trend in central asia[J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(1): 1-13. [施雅风. 山地冰川与湖泊萎缩所指示的亚洲中部气候干暖化趋势与未来展望[J]. *地理学报*, 1990, 45(1): 1-13.]
- [3] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Ye Baisheng, et al. Climatic implications on variations of lakes in the cold and arid regions of China during the recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 623-632. [丁永建,刘时银,叶柏生,等. 近50 a中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 623-632.]
- [4] Wang Xin, Liu Shiyin, Mo Hongwei, et al. Expansion of glacial lakes and its implication for climate changes in the Chinese Himalaya[J]. *Acta Geographica Sinica*, 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.]
- [5] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Han Lei, et al. Definition and classification systems of glacial lake for inventory and hazards study[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1173-1183. [姚晓军,刘时银,韩磊,等. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究[J]. *地理学报*, 2017, 72(7): 1173-1183.]
- [6] Costa J E, Schuster R L. The formation and failure of natural dams[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(7): 1054-1068.
- [7] Jonathan C, Fiona T. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods[J]. *Global & Planetary Change*, 2016, 144: 1-16.
- [8] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards

- in the Himalayas[J]. *Quaternary International*, 2000, 65(99): 31 - 47.
- [9] Cao Xuecheng, Liu Zhouzhou, Li Weisheng. Glacial lake mapping and analysis of the potentially dangerous glacial lakes before Nepal 4·25 Earthquake in 2015[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 573 - 583. [曹学诚, 刘周周, 李维胜. 尼泊尔 4·25 地震震前冰湖制图与潜在危险性分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 573 - 583.]
- [10] Cook S J, Quincey D J. Estimating the volume of Alpine glacial lakes[J]. *Earth Surface Dynamics*, 2015, 3(4) 559 - 575.
- [11] Wang Xin, Wu Kunpeng, Jiang Lianghong, et al. Wide expansion of glacial lakes in Tianshan Mountains during 1990 - 2010 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 983 - 993. [王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹, 等. 近 20 年天山地区冰湖变化特征[J]. *地理学报*, 2013, 68(7): 983 - 993.]
- [12] Wortmann M, Krysanova V, Kundzewicz Z, et al. Assessing the influence of the Merzbacher Lake outburst floods on discharge using the hydrological model SWIM in the Aksu headwaters, Kyrgyzstan/NW China [J]. *Hydrological Processes*, 2014, 28(26): 6337 - 6350.
- [13] Wang Xin, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Changes of glacial lakes and implications in Tian Shan, central Asia, based on remote sensing data from 1990 to 2010[J]. *Environmental Research Letters*, 2013, 8(4): 575 - 591.
- [14] Ng F, Liu Shiyin. Temporal dynamics of a Jokulhlaup system [J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(192): 651 - 665.
- [15] Apar. Climatic change in Tianshan Mountain areas during recent 50 years [J]. *Journal of Shihezi University (Natural Science)*, 2014, 32(1): 86 - 92. [阿帕尔. 近 50 年新疆天山山区主要气候要素变化[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2014, 32(1): 86 - 92.]
- [16] Merzbacher G. *The central Tian-Shan mountains, 1902 - 1903* [M]. London: John Murray, 1905.
- [17] Shen Yongping, Wang Guoya, Ding Yongjian, et al. Changes in Merzbacher Lake of Inylchek Glacier and glacial flash floods in Aksu River basin, Tianshan during the period of 1903 - 2009 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(6): 993 - 1002. [沈永平, 王国亚, 丁永健, 等. 百年来天山阿克苏河流域麦兹巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(6): 993 - 1002.]
- [18] Liu Shiyin, Cheng Guodong, Liu Jingshi. Jokulhlaup characteristics of the Lake Mertzbakher in the Tianshan Mountains and its relation to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 31 - 36. [刘时银, 程国栋, 刘景时. 天山麦兹巴赫冰川湖突发洪水特征及其与气候关系的研究[J]. *冰川冻土*, 1998, 20(1): 31 - 36.]
- [19] Xie Zunyi, Shanguan Donghui, Zhang Shiqiang, et al. Index for hazard of Glacier Lake Outburst flood of Lake Merzbacher by satellite-based monitoring of lake area and ice cover [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 107(5): 229 - 237.
- [20] Sun Yongling, Jiang Liming, Liu Lin, et al. Surface flow velocity of mountain glaciers derived from Landsat-7 ETM+ SLC-OFF images: extraction and quantitative evaluation: a case study of the Siachen Glacier in the Karakoram [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 596 - 603. [孙永玲, 江利明, 柳林, 等. 基于 Landsat-7 ETM+SLC-OFF 影像的山地冰川流速提取与评估——以 Karakoram 锡亚琴冰川为例[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 596 - 603.]
- [21] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. Monitoring recent surging of the Yulinchuan Glacier on north slopes of Muztag range by remote sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 765 - 774. [郭万钦, 刘时银, 许君利, 等. 木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川跃动遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 765 - 774.]
- [22] Zhang Zhen, Liu Shiyin, Wei Junfeng, et al. Monitoring recent surging of the Karayaylak Glacier in Pamir by remote sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 11 - 20. [张震, 刘时银, 魏俊锋, 等. 新疆帕米尔跃动冰川遥感监测研究[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 11 - 20.]
- [23] Wang Gang, Li Xiaoman, Tian Jie. Comparison of several water-body information extraction methods in Landsat TM remote sensing image [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(3): 141 - 142. [王刚, 李小曼, 田杰. 几种 TM 影像的水体自动提取方法比较[J]. *测绘科学*, 2008, 33(3): 141 - 142.]
- [24] Sun Buwei, Zhao Ping, Cheng Lei, et al. Study on extraction method of water body from TM based on Munsell HSV transformation [J]. *Remote Sensing Technology and Application*. 2009, 24(6): 797 - 800. [孙步伟, 赵萍, 程雷, 等. 基于 Munsell HSV 变换的 TM 影像水体提取方法研究[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(6): 797 - 800.]
- [25] Su C H, Chiu H S, Hsieh T M. An efficient image retrieval based on HSV color space [C]//International Conference on Electrical and Control Engineering. IEEE, 2011: 5746 - 5749.
- [26] Häusler H, Ng F, Kopečný A, et al. Remote-sensing-based analysis of the 1996 surge of Northern Inylchek Glacier, central Tien Shan, Kyrgyzstan [J]. *Geomorphology*, 2016, 273: 292 - 307.
- [27] Cui Yuhuan, Ye Baisheng, Wang Jie, et al. Analysis of the spatial-temporal variations of the positive degree-day factors on the Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 265 - 274. [崔玉环, 叶柏生, 王杰, 等. 乌鲁木齐河源 1 号冰川度日因子时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 265 - 274.]
- [28] Gao Xin, Zhang Shiqiang, Ye Baisheng, et al. Recent changes of glacier runoff in the Hexi Inland River basin [J]. *Advance in Water Science*, 2011, 22(3): 344 - 350. [高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 河西内陆河流域冰川融水近期变化[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 344 - 350.]
- [29] Ng F, Liu Shiyin, Mavlyudov B, et al. Climatic control on the peak discharge of glacier outburst floods [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(21): 141 - 159.
- [30] Song Gaoju, Wang Ninglian, Jiang Xi, et al. Study on glacial melt-water change of Qiyi Glacier in climate warming of Qilian Mountain [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(2): 84 - 88. [宋高举, 王宁练, 蒋熹, 等. 气候变暖背景下祁连山七一冰川融水径流变化研究[J]. *水文*, 2010, 30(2): 84 - 88.]
- [31] Wu Sufen, Liu Zhihui, Han Ping, et al. Impact of climate change on water resources of the Urumqi River basin [J] *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 703 - 706. [吴素芬, 刘志辉, 韩萍, 等. 气候变化对乌鲁木齐河流域水资源的影响[J]. *冰川冻土*, 2006, 28(5): 703 - 706.]
- [32] Shanguan Donghui, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Quick release of internal water storage in a glacier leads to underestimation of the hazard potential of glacial lake outburst floods from Lake Merzbacher in central Tian Shan Mountains [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44: 9786 - 9795.

Research on the area change of Lake Merzbacher in the Tianshan Mountains during 1998 – 2017

LI Da^{1,2}, SHANGGUAN Donghui¹, HUANG Weidong³

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Bureau of Hydrology and Water Resources of Gansu Province, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The glacial outburst flood of Lake Merzbacher is the serious disaster source of the Aksu River. In this study, utilizing the remote sensing data of Landsat, HJ-1A/B and GF-1 from 1998 to 2017, the lake's area was abstracted with the method of Munsell HSV Transform. By analyzing and comparing the maximum lake area of different years, it was found that the area of Lake Merzbacher has shrank from 3.75 km² to 2.87 km² in recent 20 years. Lake Merzbacher contains two small lakes, Upper lake and Lower lake. Lower lake which dominates the storage of the whole lake has shrank from 3.3 km² to 1.88 km² during 1998 – 2017. On the contrary, Upper lake has expanded. As a consequence, the total water capacity has reduced. The relationship between the area of Lake Merzbacher and temperature was examined, and it is found that positive accumulated temperature affected by the lake's outburst date has strong positive correlation with the area of Lower lake, which means that temperature can make a difference to the lake's area through impacting meltwater to the lake and the stability of the dam.

Key words: Lake Merzbacher; remote sensing; area change; Tianshan Mountains

(责任编辑: 王欣; 编辑: 周成林)