

1990—2020 年那曲地区冰湖变化研究*

雷鹏嗣^{1,2)} 王伟财^{2)†} 张太刚^{1,2)}

(1)兰州大学资源环境学院, 730000, 甘肃兰州; 2)中国科学院青藏高原研究所, 100101, 北京)

摘要 基于 Landsat 遥感影像, 采用目视解译的方法提取了青藏高原内部那曲地区冰湖和冰川 1990、2000、2010 及 2020 年 4 期边界数据, 并分析近 30 年来该地区冰湖变化的特征与原因。结果表明: 那曲地区现有冰湖 255 个, 总面积 $(27.829 \pm 4.62) \text{ km}^2$, 冰湖主要集中在东南部, 其次是西南部; 1990—2020 年, 研究区新增冰湖 72 个, 面积增长 6.14 km^2 ; 冰湖扩张趋势明显, 具体表现为低海拔地区 ($\leq 4700 \text{ m}$) 原有冰湖快速扩张, 较高海拔地区 ($> 5100 \sim 5700 \text{ m}$) 新增冰湖集中出现; 气温与降水是冰湖变化的关键因素, 由于降水与气温分布及变化存在时空差异, 冰湖变化呈现“南快北慢, 逐期加快”的特征; 冰湖与冰川的位置关系也会影响冰湖变化, 离冰川位置越近, 对冰湖发育越有利, 同时与冰湖接触的冰川退缩速率相较于其余冰川有更大的退缩速率, 但冰川与冰湖面积变化速率并无明显相关性。

关键词 那曲地区; Landsat; 冰湖; 冰川; 冰湖溃决洪水

中图分类号 P9

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2021303

0 引言

冰湖是在冰川作用下形成、主要受冰川融水补给的湖泊, 一般位于冰川末端、表面或者侧方^[1-2]。由于冰湖与冰川密不可分的关系, 冰湖变化常被当作全球气候变化的敏感性指标^[3-5]。冰湖在内外力作用下极易发生溃决, 形成冰湖溃决洪水 (glacial lake outburst flood, GLOF), 对下游地区造成严重破坏和影响。近年来针对冰湖变化和 GLOF 的研究吸引了越来越多国内外学者的关注。GLOF 作为一种常见的冰川灾害, 一般发生在世界高海拔地区, 例如喜马拉雅山脉、阿尔卑斯山脉、天山和安第斯山脉等^[6-8]。近年来第三极地区 (青藏高原及周边地区) GLOF 频发, 其中大半发生在我国西藏境内, 截止到 2019 年我国西藏地区有 33 个冰湖共发生 37 次冰湖溃决事件^[9-12]。冰湖通常位于远离人类聚居地的高海拔地区, 一旦溃决, 很难及时预警, 形成的洪水或泥石流往往会对当地居民生命财产安全带来极大威胁^[13-14]。因此, 针对高海拔地区冰湖分布与变化的研究, 既有明确的科学意义, 又有重要的现实意义。

冰川的消融退缩为冰湖的形成与扩张提供了充足的水源和空间, 导致冰湖在数量和面积上快速增加。1976—2010 年, 喜马拉雅山脉中部波曲流域冰川补给湖显著扩张 (+122.1%), 而非冰川补给湖在同一

时期变化不大 (+2.8%)^[15]。Zhang 等^[16] 基于冰湖扩张的速率及文献资料, 在波曲流域筛选出 8 个溃决风险较高的冰湖, 发现 1974—2017 年这 8 个冰湖对应的补给冰川高程平均变化速率为 $(-0.71 \pm 0.05) \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$, 高于区域内冰川高程变化速率平均值 $(-0.39 \pm 0.13) \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$; 2013—2017 年, 这些冰川的平均流速 $(10 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1})$ 约为整个研究区域冰川流速平均值的 2 倍。研究表明, 冰川消融对冰湖扩张起到了明显的促进作用, 同时冰湖与冰川存在相互作用的关系, 由于水体吸收太阳辐射, 导致周围区域升温, 因此冰湖面积的增长反过来加速冰川退缩^[17-18]。自 20 世纪 80 年代全球变暖加速以来, 青藏高原地区的冰川一直处于负质量平衡状态, 冰川退缩速率不断加快^[19]。1990—2018 年, 第三极不同区域不同海拔梯度的冰湖均呈现不同程度增长, 昆仑山东部和祁连山地区冰湖增长率最大, 达到 45.6%, 阿尔泰山增长率仅为 7.5%; 同时第三极地区 1990 年的冰湖最高分布海拔为 6078 m, 2020 年上升到 6247 m, 冰湖面积增长有向更高海拔发展的趋势^[20]。整个第三极乃至全球冰湖整体呈现快速扩张的趋势^[21-23]。伴随着冰川退缩, 冰湖面积、水量增大, 冰湖溃决危险性也随之增大, 近年来第三极发生冰湖溃决事件的频率明显升高^[12]。

2013 年以来, 西藏北部那曲地区已经报道过 2 次冰湖溃决事件, 分别是然则日阿错 (2013 年) 和金翁

* 中国科学院青年创新促进会资助项目; 国家自然科学基金资助项目 (41771088)

† 通信作者: 王伟财 (1984—), 男, 研究员。研究方向: 冰湖变化与风险评估。E-mail: weicaiwang@itpcas.as.cn

收稿日期: 2021-12-11

错(2020年),在此之前,从未有过关于该地区冰湖溃决洪水的报道.然则日阿错和金翁错都位于嘉黎县尼屋乡,2次事件均造成尼屋乡大量房屋、桥梁等设施被冲毁,部分牲畜失踪甚至人员伤亡,给当地社会稳定发展造成极大威胁^[24-25].嘉黎县水文局通过实地考察等方式获得的资料显示,该地区仍有面积较大且较危险的冰湖,未来仍有爆发GLOF(或泥石流)的风险.虽然已有整个青藏高原地区的湖泊数据集发布^[26-28],但针对那曲地区冰湖分布及变化的研究亟待加强.本文通过对那曲地区1990—2020年冰湖、冰川的时空变化特征和成因机制进行探讨,为开展冰湖溃决风险评估、高危险GLOF模拟提供基础数据,同时对当地防灾减灾提供决策参考.

1 研究区概况

那曲位于青藏高原内陆(西藏最北端),介于 $83^{\circ}55' \sim 95^{\circ}5'E$ 和 $29^{\circ}55' \sim 36^{\circ}30'N$,处于冈底斯山脉、唐古拉

山脉和念青唐古拉山脉之间.行政区总面积 43万 km^2 ,下辖11个区县,总人口50万.当地自然资源丰富,是我国的重要牧区之一,也是长江、怒江等重要河流的发源地^[29-30].

那曲地区属于高原气候区,平均海拔 $>4 \text{500 m}$.由于海拔较高,含氧量较低,气候干燥且多极端天气(干旱、雪灾).年平均气温为 $-0.9 \sim -3.3^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $48\% \sim 51\%$,年降水量约 400mm ,降水主要集中在每年的6—9月,期间是该地区最温暖最适合植物生长的时期,同时也是主要的冰雪消融期.

研究区内发育有众多冰湖(图1),尤其是那曲东南部即藏东南地区,为中国海洋性冰川最集中的地区之一^[31].近年来青藏高原气候变暖加剧,冰川活动性增强,给冰湖的扩张提供了有利条件,对当地水文和生态环境造成巨大的影响,2013年以来报道过2次冰湖溃决事件的嘉黎县正是位于该地区,且均发生在气候突然变暖的6、7月份.

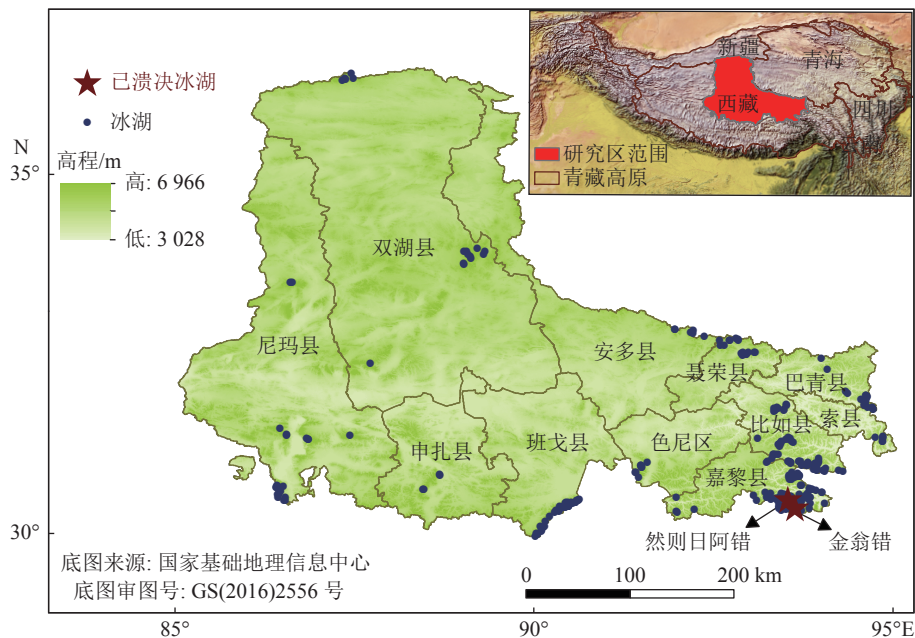


图1 研究区概况及冰湖分布

2 数据与方法

2.1 数据源 采用的数据包括: 1)1990、2000、2010和2020年4期共96幅空间分辨率为 30m 的Landsat_TM/OLI影像(2020年选用Landsat8_OLI,其余3期均为Landsat4、5_TM)作为调查研究区冰川、冰湖变化的基础数据.考虑到影像的品质与可用性,选取4—11月云覆盖率 $< 15\%$ 的影像数据,部分地区由于积雪覆盖或云盖等原因,单一影像无法满足精度要求,需使用1990/2000/2010/2020年($\pm 1 \sim 2$)的1幅或多幅影像对同一对象进行识别(图2). 2)青藏高原2017年冰川编

目数据——TPG2017(V1.0)^[32-33]、中国西部冰湖编目数据(2015)^[27, 34]均来自青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>),高亚洲冰湖编目数据集来自国家冰川冻土沙漠科学数据中心^[26]. 3)空间分辨率 30m 的ASTER GDEM数字高程数据来自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),用以确定冰湖海拔高度、冰碛垄坡度、冰舌坡度等信息. 4)那曲地区1990—2020年气象站点资料来自国家气象数据中心(<http://data.cma.cn>),地区行政区划矢量数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>).

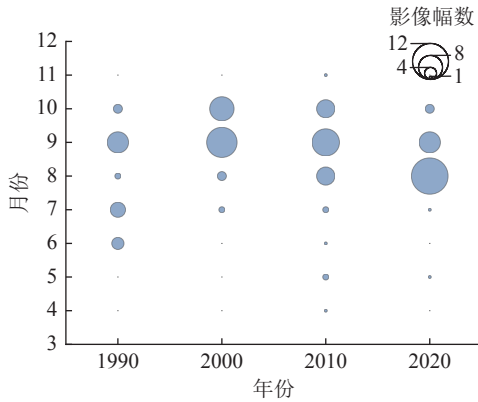


图 2 遥感影像时相分布

2.2 研究方法

2.2.1 冰湖、冰川边界矢量化 目前在遥感影像上对冰湖等地物边界的提取一般采用计算机自动分类和人工目视解译 2 类。计算机自动分类包括阈值统计法波段运算(例如归一化水体指数)、非监督和监督分类^[35-37]。虽然利用计算机自动提取耗时短、节省精力,适用于大尺度信息提取,但是在解译精度上不如人工目视解译^[38-39]。本文研究区部分区域受地貌或气候条件影响,自动分类精度无法满足要求,因此选用目视解译法提取冰川冰湖边界信息。

在 ArcGIS 10.7 中,对 Landsat TM 影像作 4—3—2 波段假彩色合成,以提取冰川、冰湖的边界信息。考虑到影像空间分辨率的限制,为了保证解译精度,只对面积 > 0.02 km² 的冰湖进行提取^[40-41],同时为了保证

纳入分析的湖泊受冰川融水的补给,只分析位于根据冰川数据集建立的 2 km 缓冲区内的冰湖^[42]。对于遥感影像无法确定边界的冰湖/冰川,借助 Google Earth 辅助识别。最终获得 1990、2000、2010、2020 年 4 期冰川/冰湖矢量数据;通过 ArcGIS 10.7 地理计算模块得到冰川及冰湖面积、地理坐标等信息,并利用 ASTER GDEM 提取得到冰湖海拔高度信息。

2.2.2 误差分析 提取边界的不确定性主要来源于遥感影像品质和目视解译时的主观因素,冰川与冰湖面积误差主要源于影像分辨率,解译产生的面积误差计算式^[16, 43-45]为

$$A = L \cdot \lambda / 2, \quad (1)$$

式中: A 为冰湖/冰川面积误差 (m²); L 为冰湖/冰川周长 (m); λ 为影像空间分辨率 (30 m)。

3 结果

3.1 冰湖分布与变化特征 如表 1 所示,那曲地区现有面积 > 0.02 km² 的冰湖 255 个,总面积 (27.83 ± 4.62) km²,其中冰湖面积平均值 0.11 km²,最大冰湖面积 2.27 km²。冰川、冰湖分布特征相似,总体表现为东多西少、南多北少。其中嘉黎县、比如县发育冰湖数量最多、面积最大,占总数量的 50.98%,占总面积的 53.54%。分布在色尼区、安多县、申扎县、索县、聂荣县的冰湖有 31 个,面积 (3.35 ± 0.54) km²,仅占总数量的 12.16%,总面积的 12.04%。

表 1 1990—2020 年那曲各区县冰湖数量与面积变化

地区	1990		2000		2010		2020	
	数量/个	面积/km ²	数量/个	面积/km ²	数量/个	面积/km ²	数量/个	面积/km ²
聂荣县	11	1.38	13	1.44	14	1.45	12	1.34
申扎县	2	0.06	2	0.07	2	0.06	3	0.11
色尼区	4	0.24	4	0.25	5	0.28	5	0.34
安多县	3	0.25	3	0.28	4	0.36	4	0.40
尼玛县	19	1.23	17	1.25	21	1.47	22	1.48
巴青县	14	2.58	16	2.70	15	2.76	19	2.99
索县	6	0.49	7	0.54	7	1.12	7	1.16
班戈县	26	2.26	29	2.41	30	2.44	40	2.95
双湖县	14	1.40	14	1.76	13	1.87	13	2.15
比如县	33	5.91	36	6.07	39	6.42	55	7.27
嘉黎县	51	5.89	54	6.40	61	6.91	75	7.63
总计	183	21.69±3.52	195	23.15±3.75	211	25.14±4.05	255	27.83±4.62

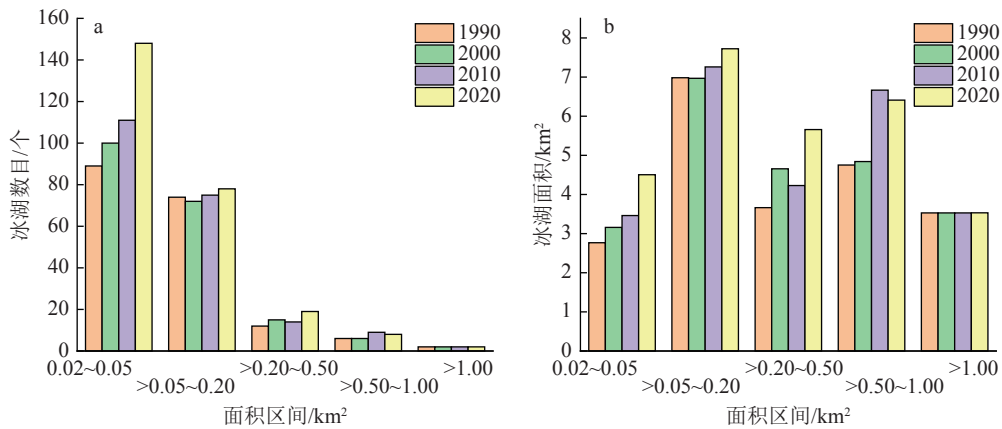
1990—2020 年,那曲地区新增冰湖 79 个,消失冰湖 7 个,冰湖数量从 183 个增长至 255 个,增长率 39.34%;

总面积由 (21.69 ± 3.52) km² 扩张至 (27.83 ± 4.62) km²,在原来基础上增长了 28.29%。1990—1999、2000—2009

和 2010—2020 年冰湖面积增长速率分别为 0.15、0.20、0.24 km² · a⁻¹, 冰湖数量增长率分别为 6.55%、8.21%、20.85%。不管是冰湖的数量还是面积, 变化速率均表现为逐期加快。除聂荣县冰湖面积、双湖县冰湖数量略微减小, 其他区县冰湖数量和面积均有不同程度的增长。不同地区的冰湖变化特征存在差异, 嘉黎县冰湖数量增长最多(24 个), 冰湖面积扩张最快, 达到 0.06 km² · a⁻¹; 其次是比如县, 新增冰湖 22 个, 冰湖面积增长速率为 0.05 km² · a⁻¹。从冰湖数量和面积变化

特征来看, 那曲东南部冰湖发育更多, 扩张比其他区域更明显。

3.1.1 按冰湖规模分类对比 纳入本研究的冰湖面积范围为 0.02~2.27 km²。为了解不同规模冰湖分布和变化特征, 按 0.02~0.05、>0.05~0.20、>0.20~0.50、>0.50~1.00、>1.00 km² 共 5 个面积区间划分冰湖类别。图 3 显示: 研究区冰湖主要以面积 <0.2 km² 的小冰湖为主, 冰湖规模越大, 位于该面积区间的冰湖越少; 各面积区间冰湖总面积近似正态分布。



a. 不同面积区间冰湖数目变化; b. 不同面积区间冰湖面积变化。

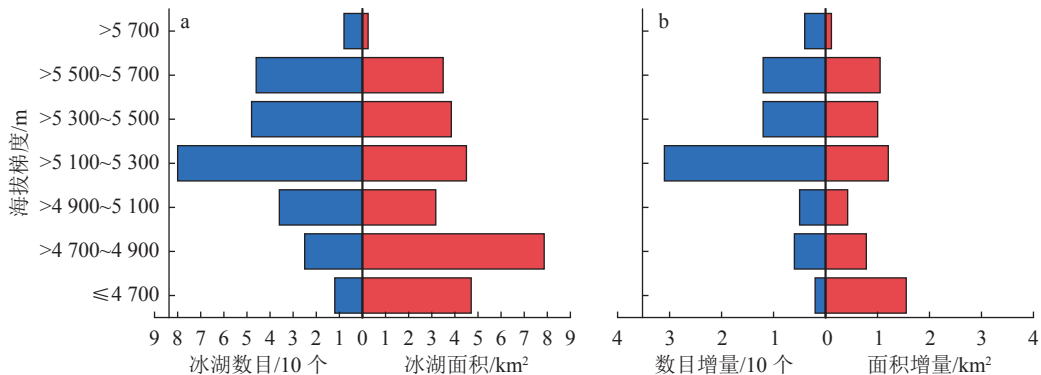
图 3 1990—2020 年冰湖变化按规模大小分类对比

1990—2000 年, 仅有 >1.00 km² 这一区间冰湖没有明显变化, 其余规模类冰湖数量和面积都有不同程度的增长。新增冰湖集中在 0.02~0.05 km² (59 个), 占研究区新增冰湖总数的 81.94%; 0.02~0.05、>0.20~0.50、>0.50~1.00 km² 这 3 类冰湖面积增长最明显, 贡献了冰湖面积增量的 87.88%。2010—2020 年期间 >0.50~1.00 km² 这一区间冰湖面积与数量减小, 则是因为然则日阿错于 2013 年发生溃决, 冰湖面积从 0.56 km² 缩减到 0.36 km²。

3.1.2 按冰湖海拔梯度分类对比 研究区冰湖发育

在海拔 4 062~5 783 m, 以 200 m 为区间间隔, 将整个海拔范围划分为 7 个梯度(图 4)。冰湖集中分布在海拔 5 100~5 700 m, 这一区间的冰湖数量占研究区冰湖总数的 68.24%。单一梯度冰湖数量峰值出现在 >5 100~5 300 m, 发育有冰湖 80 个, 总面积(4.50±1.07) km²。冰湖面积与海拔的关系表现为明显的负相关, 海拔越高, 冰湖面积越小。海拔 ≤4 700 m 与 >5 700 m 的地区冰湖都较少, 但整体规模相差很大, 平均面积分别为 0.39、0.03 km², 对应为冰湖规模最大和最小的海拔梯度。

1990—2020 年, 各海拔梯度内冰湖数量和面积均



a. 不同海拔梯度冰湖数量与面积分布; b. 不同海拔梯度冰湖数量与面积变化。

图 4 不同海拔梯度冰湖分布与变化

有不同程度增长。>5 100~5 700 m 区间新增冰湖最多 (55 个), 占冰湖新增总数的 76.39%, 面积增量 3.26 km², 占比 53.12%。海拔 ≤4 700 m 的地区新增冰湖仅有 2 个, 却为面积增量峰值梯度, 反映了处于这一海拔梯度的地区冰湖的快速扩张。总的来说, 海拔较低地区 (≤5 100 m) 表现为原有冰湖面积快速增大, 伴随少量新冰湖形成; 高海拔地区 (>5 100~5 700 m) 则主要表现为大量小型冰湖出现, 尤其是在 2010 年以后, 这一区间新增了 37 个冰湖, 是这一阶段新增冰湖总数的 77%, 随着气温持续上升, 这一现象有向更高海拔发展的趋势。

3.1.3 按冰湖与冰川位置关系分类对比 按冰湖与冰湖距离大小, 将研究区内冰湖分为冰川接触湖

($L=0$)、近冰川补给湖 ($0<L\leq 0.5$ km)、远冰川补给湖 ($0.5<L\leq 2$ km) 3 类。1990—2020 年新出现的冰湖主要是冰川接触湖 (39 个)、近冰川补给湖 (28 个), 二者占新增冰湖总数的 86%, 消失的冰湖以远冰川补给湖为主 (5 个)。由图 5 可以看出, 3 类冰湖均呈数量增加、面积增长趋势。无论数量还是面积变化, 变化速率由大到小均依次为冰川接触湖、近冰川补给湖、远冰川补给湖。冰川的退缩为冰湖的发育提供了空间和物质基础, 由于与冰川位置关系有所差别, 在相同气候条件下, 不同类型冰湖数量与面积变化存在明显差异, 离冰川越近, 对冰湖的发育越有利。

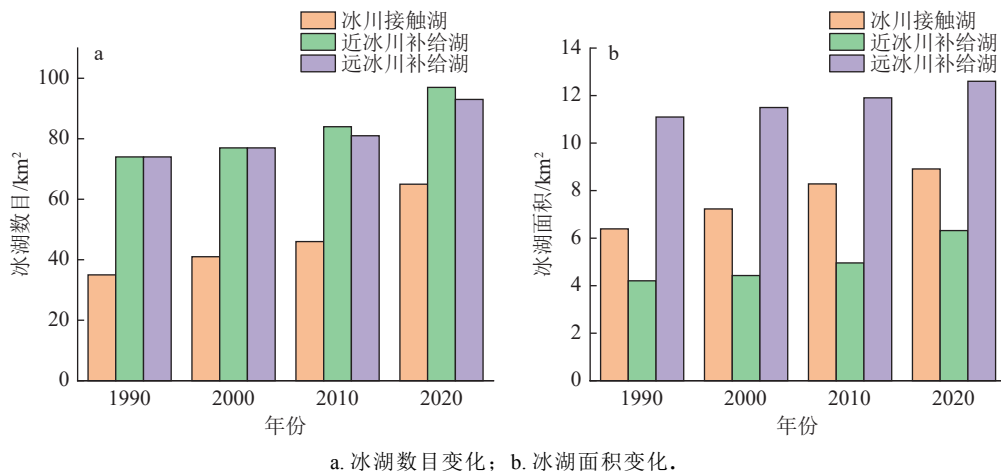


图 5 1990—2020 冰湖变化按与冰川位置关系对比

3.2 冰川变化 通过遥感图像获取的那曲地区冰川变化特征如表 2 所示, 研究区内冰川退缩明显, 1990—2020 年冰川数量减少 51 条, 面积由 (2395.44±131.62) km² 减少到 (2114.92±118.36) km², 在原来基础上缩减了 11.7%, 变化速率为 9.35 km²·a⁻¹。具体来看, 1990—1999 年冰川面积变化相对较缓, 2000—2020 年冰川数量减少了 36 条, 面积缩减速率为 11.27 km²·a⁻¹, 明显高于前 10 年变化速率, 反映近 30 年那曲地区冰川处于加速退缩状态, 这与该地区冰湖加速扩张的趋势是一致的。

表 2 1990—2020 年那曲地区冰川数量与面积变化

年份	数量	面积/km ²	较上一时期 变化面积/km ²	变化速率/ (km ² ·a ⁻¹)
1990	2010	2395.44±131.62		
2000	2005	2329.05±128.97	66.390	6.640
2010	1989	2239.39±125.45	89.660	8.970
2020	1969	2114.92±118.36	124.470	11.310

通过对研究区内对冰湖存在明显补给作用的 224 条冰川进行编目统计发现: 冰湖补给冰川规模大部分处于中等偏上的水平 (冰湖补给冰川面积均值是所有冰

湖面积平均值的 2.1 倍); 同时冰川面积与面积变化率存在较强的负相关 ($R^2=0.63$, 图 6), 冰川规模越小, 面积缩减率越大。这说明在相同气候背景下, 小型冰川对环境变化更加敏感。

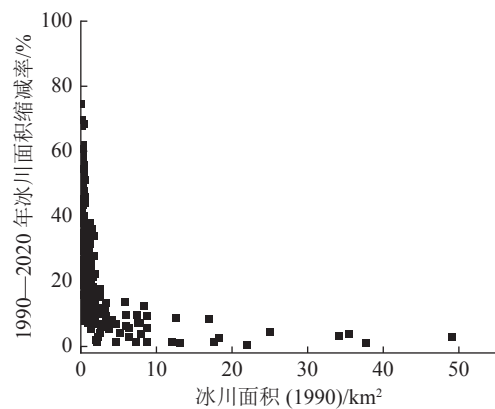


图 6 冰川规模与退缩速率相关性

4 讨论

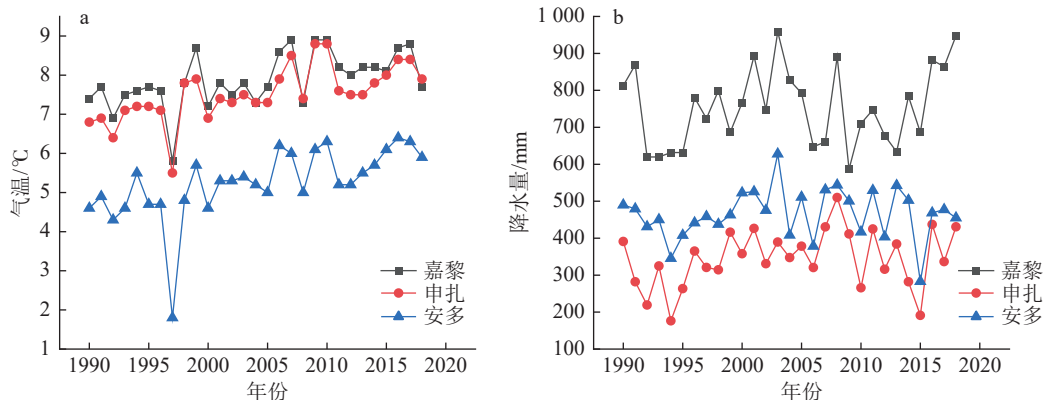
4.1 冰湖数据集可靠性分析 气象资料统计, 那曲地区降水主要集中在每年 6—9 月, 尤其是 6、7 月份, 降

水尤其丰富. 为了排除年内不同月份冰湖面积有所差异这一导致误差的因素, 同时避免积雪影响矢量化结果, 选取了雨季末期和雨季后8—10月份的遥感影像77幅(图2), 占本研究使用遥感影像总数的86%, 其余月份影像主要作为辅助数据.

那曲地区冰湖分布在以往许多研究中均有涉及^[26-27, 34]. 根据2021年发布的高亚洲冰湖编目数据集(使用2018年遥感影像)^[26], 那曲地区共有面积 $>0.02\text{ km}^2$ 的冰湖203个. 与本研究通过人工目视解译得到的数据集相比, 该数据集中存在而2020年已消失或者实际面积 $\leq 0.02\text{ km}^2$ 的冰湖有16个; 高亚洲冰湖编目数据集中面积 $\leq 0.02\text{ km}^2$ 或者未出现, 但在本研究数据集中面积 $>0.02\text{ km}^2$ 的冰湖有66个. 对于面积较小的冰湖, 矢量化结果极易受影像质量影响, 这也是本研究与2018年高亚洲冰湖编目数据集比较的主要误差来源(造成2数据集出现误差的冰湖平均面积为 0.03 km^2). 经过对上述误差的校正, 该数据集中那曲地区2018年冰湖数目更正

为255个, 与本研究冰湖数据集冰湖数目相等. 同时包含在2个冰湖数据集内的冰湖共220个, 总面积分别为 (23.98 ± 4.45) 和 $(26.02\pm 4.52)\text{ km}^2$, 结果在误差范围之内, 且符合研究区冰湖逐年扩张的趋势. 综上, 本研究冰湖矢量化结果能够准确地反映不同时期冰湖规模及分布特征, 具有一定准确性和可靠性.

4.2 冰湖对气候变化的响应 冰湖的水量补给主要来源于冰川融水和大气降水, 当补给量大于外流和蒸发, 冰湖面积增大, 反之则减小, 气温与降水是导致冰湖变化的主要因素. 那曲东南部是整个地区冰湖分布最集中, 发育最快的区域(占新增冰湖总数的75%, 总面积的69.3%), 其次是西南部, 最后是北部, 同时, 冰湖扩张速率也呈逐期增大的趋势. 本研究选择位于那曲地区东南、西南、中北部的3个气象站, 分别是嘉黎站($93.17^\circ\text{E}, 30.40^\circ\text{N}$)、申扎站($88.38^\circ\text{E}, 30.57^\circ\text{N}$)、安多站($91.06^\circ\text{E}, 32.21^\circ\text{N}$), 通过分析3个气象站点记录的1990年以来年平均气温与年降水量(图7), 探究研究区冰湖变化在时间与空间上的差异.



a. 那曲地区近30年年平均气温变化; b. 那曲地区近30年年降水量变化.

图7 1990—2018年那曲地区气温与降水量变化

数据显示, 近30年来那曲地区东南、西南、中北部气温与降水变化趋势几乎一致. 以嘉黎站为例, 1990—2020年气温呈波动上升的趋势, 1990—1999、2000—2009、2010—2018年3个阶段平均气温分别为 7.41 、 7.9 、 8.31°C , 升温明显; 降水年际变化无明显规律, 3个阶段年降水均值分别为 717.5 、 777.1 、 770.3 mm , 先增长后略微减小. 不同站点记录的降水量和气温有较明显区别, 位于那曲东南的嘉黎站气温最高, 降水最多, 均表现为从南向北、由东到西递减.

结合冰湖变化特征来看, 在气候变化趋势基本一致的情况下, 那曲东南部气温最高, 降水最多, 因此冰湖分布更多, 扩张速率最快. 以2000、2010年为节点, 分3个阶段讨论气候变化对冰湖变化的影响. 2000年之前, 冰湖扩张速率保持在一个较低的水平,

面积增长了6.73%, 此阶段冰川退缩也较缓慢. 之后10年, 随着气温升高, 降水增多, 冰湖面积增长明显加快, 增长速率为1990—2000年的1.37倍, 相较于1990—1999年, 新增冰湖的数量也有所增加. 2010年后气温仍保持上升趋势, 降水量略有减少, 在原有冰湖继续扩张的同时, 发育了大量新生冰湖(尤其在海拔高于 5100 m 的地区, 新增冰湖数目是前20年的2.2倍), 温度升高导致冰川退缩产生的融水对冰湖的补给效应显然大于降水量减少对冰湖的影响, 使得这一时期冰湖的扩张速率略大于2000—2009年.

4.3 冰川与冰湖变化的联系 在前文中, 已经对冰湖按与冰川位置关系分类, 并得到不同类别冰湖变化特征差异: 与补给冰川距离越近的冰湖, 能够得到更多的冰川融水, 扩张速率越快. 同样地, 将对冰湖有补

给作用的冰川按其补给冰湖类型(冰川接触湖、近冰川补给湖、远冰川补给湖)分类对比. 与冰湖变化特征相似, 1990—1999、2000—2009、2010—2020 年 3 类冰川退缩速率均为逐期加快. 不同类型冰川变化速率存在差异, 与冰湖直接接触的冰川变化最明显, 1990—2020 年平均每条冰川面积减少了 0.331 km^2 , 近冰湖冰川、远冰湖冰川退缩速率为 $0.242 \text{ km}^2 \cdot \text{条}^{-1}$ 、 $0.145 \text{ km}^2 \cdot \text{条}^{-1}$.

为了更直观地了解冰川退缩与冰湖扩张的关系, 对研究区内 2 个典型冰湖的变化过程进行比较. 2 个冰湖都位于那曲东南部(冰湖 A 坐标 $94^\circ 38' 45.6'' \text{ E}$,

$31^\circ 45' 50.4'' \text{ N}$; 冰湖 B 坐标 $94^\circ 43' 33.6'' \text{ E}$, $31^\circ 44' 6'' \text{ N}$), 二者直线距离 8 km, 且同为冰川接触湖(图 8). 1990 年冰湖 A 面积由 0.14 km^2 增大到 0.65 km^2 , 冰湖 B 扩张速率明显小于 A, 只增大了 0.095 km^2 ; 对应地, 冰湖 A 的补给冰川在这段时间面积减少了 1.41 km^2 , 是冰湖 B 补给冰川面积退缩量的 15.50 倍. 处于同一气候环境的冰湖及母冰川变化差异如此明显, 可以看出, 冰川退缩提供的融水和空间起到了促进冰湖扩张的作用, 同时, 冰湖的存在也促进了冰川退缩, 反映冰湖与冰川存在相互影响的关系.

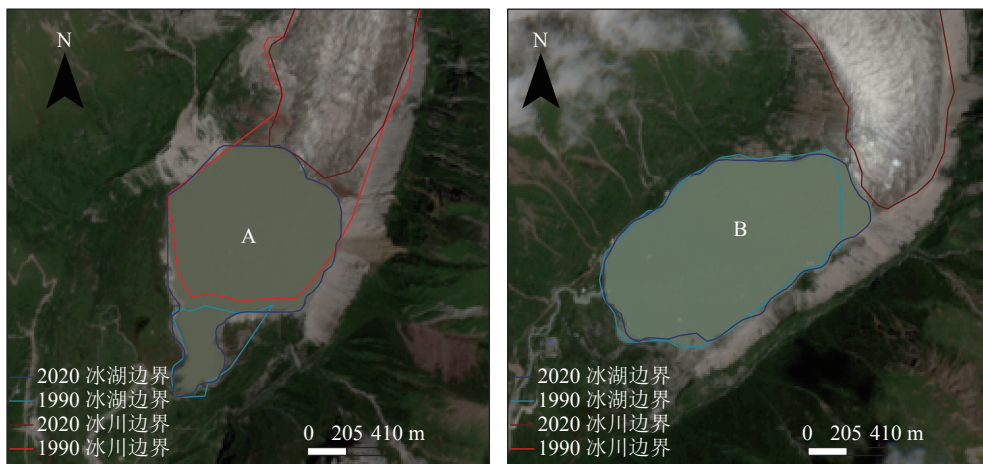


图 8 冰湖 A、B 变化过程(两图均取自 2020 年 8 月 19 日遥感影像)

随后我们将研究区内所有冰湖和对应补给冰川的面积变化进行对比, 虽然部分快速扩张冰湖的补给冰川退缩速率也较大, 但整个研究区冰湖与母冰川变化速率并无明显相关性($R^2=0.18$). 由此可见, 冰川退缩虽然对冰湖的扩张有促进作用, 但并不是导致冰湖变化的唯一因素, 冰湖类型、冰湖溢流口流量、湖盆地形等因素均可以影响冰湖面积变化; 除了冰湖通过吸收太阳辐射对冰川的加热作用, 冰川类型(是否有表碛覆盖)、所处气候环境也会影响冰川变化. 冰川与冰湖虽然存在相互影响, 但只是众多影响因素之一, 无法说明冰湖与冰川变化存在明显相关性.

4.4 冰湖溃决危险性评估 本研究已完成那曲地区冰湖分布及近 30 年来变化特征研究, 未来可在本研究成果基础上进一步开展冰湖溃决危险性评估. 冰湖溃决过程较复杂且难以预测. 在冰崩、冰滑坡、强降水等因素的诱发下, 本就处于不稳定状态的冰湖极易溃决, 西藏地区冰湖溃决机制主要为漫顶和管涌 2 类^[2]. 冰湖储水量、是否存在出水口及出流流量、冰湖与冰川位置关系、冰碛垄岩土性质及坡度、冰舌坡度及裂隙发育程度等因素都会影响冰湖稳定性. 通过选取正确合理的指标综合评价得到冰湖溃

决危险性, 并结合已溃决冰湖验证评价方法的准确性. 对于高溃决危险冰湖, 应用溃坝模型及水动力学模型, 对溃口出流及洪水演进过程模拟, 得到洪峰流量、洪水到达时间、水深分布及变化信息, 制作冰湖溃决风险专题图, 为冰湖下游防灾减灾工作提供科学建议.

5 结论

1) 研究区现有面积 $>0.02 \text{ km}^2$ 的冰湖 255 个, 总面积 27.83 km^2 , 冰湖集中分布在那曲南部(85.4%), 尤其是位于东南的嘉黎县、比如县. 1990—2020 年, 共新增冰湖 79 个, 7 个原来存在的冰湖消失, 总面积净增量 6.13 km^2 , 增长率 28.29%.

2) 新生冰湖面积主要集中在 $0.02 \sim 0.05 \text{ km}^2$, 占新增冰湖总数的 82%, 面积 $>0.05 \sim 1.00 \text{ km}^2$ 的冰湖数目变化不大, 但面积增长较快. 面积 $>1.00 \text{ km}^2$ 的冰湖最稳定, 冰湖数目和面积都没有变化.

3) 随着海拔升高, 新增冰湖数目类似正态分布, 1990—2020 年新增冰湖集中在海拔 $>5 100 \sim 5 700 \text{ m}$, 海拔 $\leq 4 700 \text{ m}$ 和 $>5 700 \text{ m}$ 的地区有少量新增冰湖. 不同海拔梯度冰湖面积变化并无明显规律, 海拔

≤ 4700 m 地区冰湖扩张速率最快($1.64\% \cdot a^{-1}$), 其次是 $>5100 \sim 5700$ m 地区, 结合冰湖数目变化趋势来看, 低海拔地区主要表现为原有冰湖快速扩张, 高海拔地区则为大量新增冰湖形成。

4) 由于气候分布与变化的影响, 研究区冰湖变化在空间与时间上有明显差异。那曲东南部冰湖扩张比其他地区更加明显, 自 1990 年以来随着时间变化, 冰湖变化速率呈逐期增大的趋势。研究区内冰川退缩为冰湖扩张提供了有利条件, 冰湖反过来也促进了冰川退缩, 但冰川退缩速率与冰湖扩张速率并无显著相关性。

6 参考文献

- [1] QIN D, YAO T, DING Y. Glossary of cryospheric science [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2016
- [2] 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
- [3] HARRISON S, KARGEL J S, HUGGEL C, et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods[J]. The Cryosphere, 2018, 12(4): 1195
- [4] RICHARDSON S D, REYNOLDS J M J Q I. An overview of glacial hazards in the Himalayas[J]. Quaternary International, 2000, 65: 31
- [5] YI G H, DENG W, LI A N, et al. Response of lakes to climate change in Xainza basin Tibetan Plateau using multi-mission satellite data from 1976 to 2008[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(3): 604
- [6] CUI P, DANG C, CHENG Z, et al. Debris flows resulting from glacial-lake outburst floods in Tibet, China[J]. Physical Geography, 2010, 31(6): 508
- [7] HAEBERLI W J A O G. Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps[J]. Annals of Glaciology, 1983, 4: 85
- [8] WORN R, STOFFEL M, HUGGEL C, et al. Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina)[J]. Journal of Hydrology, 2012, 444: 134
- [9] 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
- [10] ZHANG G X, YAO T D, XIE H, et al. An inventory of glacial lakes in the Third Pole region and their changes in response to global warming[J]. Global & Planetary Change, 2015, 131: 148
- [11] ZHENG G X, BAO A M, ALLEN S, et al. Numerous unreported glacial lake outburst floods in the Third Pole revealed by high-resolution satellite data and geomorphological evidence [J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(13): 1270
- [12] 刘建康, 张佳佳, 高波, 等. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述[J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1335
- [13] COOK K L, ANDERMANN C, GIMBERT F, et al. Glacial lake outburst floods as drivers of fluvial erosion in the Himalaya[J]. Science, 2018, 362(6410): 53
- [14] LLIBOUTRY L J J O G. Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. II. Movement of a covered glacier embedded within a rock glacier[J]. Journal of Glaciology, 1977, 18(79): 255
- [15] WANG W, XIANG Y, GAO Y, et al. Rapid expansion of glacial lakes caused by climate and glacier retreat in the Central Himalayas[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(6): 859
- [16] ZHANG G Q, BOLCH T, ALLEN S, et al. Glacial lake evolution and glacier-lake interactions in the Poiqu River basin, central Himalaya, 1964–2017[J]. Journal of Glaciology, 2019, 65(251): 347
- [17] LOUBERE P. The global climate system[J]. Nature Education Knowledge, 2012, 3(10): 24
- [18] PANDEY P, ALI S N, CHAMPATI RAY P K. Glacier-glacial lake interactions and glacial lake development in the central Himalaya, India (1994–2017)[J]. Journal of Earth Science, 2021, 32(6): 1563
- [19] YAO T D. Glacial fluctuations and its impacts on lakes in the southern Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(20): 2071
- [20] WANG X, GUO X, YANG C, et al. Glacial lake inventory of high-mountain Asia in 1990 and 2018 derived from Landsat images[J]. Earth System Science Data, 2020, 12(3): 2169
- [21] SHUGAR D H, BURR A, HARITASHYA U K, et al. Rapid worldwide growth of glacial lakes since 1990[J]. Nature Climate Change, 2020, 10(10): 939
- [22] 李治国, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 1980—2007年喜马拉雅东段洛扎地区冰川和冰湖变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 47
- [23] WANG W, YAO T, YANG X. Variations of glacial lakes and glaciers in the Boshula mountain range, southeast Tibet, from the 1970s to 2009[J]. Annals of Glaciology, 2011, 52(58): 9
- [24] ZHENG G, MERGILI M, EMMER A, et al. The 2020 glacial lake outburst flood at Jinwuco, Tibet: causes, impacts, and implications for hazard and risk assessment[J]. The Cryosphere, 2021: 1
- [25] 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
- [26] 王欣, 郭小宇, 杨成德, 等. 高亚洲冰湖编目数据集 [DS]. 兰州: 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2021
- [27] 王欣. 中国西部冰湖编目数据(2015) [DS]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2018
- [28] 张国庆. 中国湖泊数据集(1960s–2020) [DS]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2019
- [29] 那曲市人民政府. 自然地理 [Z]. 2020
- [30] 那曲市人民政府. 那曲概况 [Z]. 2020
- [31] 邬光剑, 姚檀栋, 王伟财, 等. 青藏高原及周边地区的冰

- 川灾害[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1285
- [32] 叶庆华. 青藏高原2017年冰川数据-TPG2017(V1.0) [DS]. 北京: 国家青藏高原科学数据中心, 2019,
- [33] YE Q, ZONG J, TIAN L, et al. Glacier changes on the Tibetan Plateau derived from Landsat imagery: mid-1970s–2000–13[J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63(238): 273
- [34] 杨成德, 王欣, 魏俊锋, 等. 2015年中国西部冰湖编目数据集[J]. *中国科学数据*, 2018, 3(4): 36
- [35] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589
- [36] HUGGEL C, KääB A, HAEBERLI W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, 39(2): 316
- [37] 彦立利, 王建. 基于遥感的冰川信息提取方法研究进展[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(1): 110
- [38] NIE Y, LIU Q, WANG J, et al. An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis [J]. *Geomorphology*, 2018, 308(1): 91
- [39] UKITA J, NARAMA C, TADONO T, et al. Glacial lake inventory of Bhutan using ALOS data: methods and preliminary results[J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(58): 65
- [40] CHEN X Q, CUI P, LI Y, et al. Changes in glacial lakes and glaciers of post-1986 in the Poiqu River basin, Nyalam, Xizang (Tibet)[J]. *Geomorphology Amsterdam*, 2007, 88(3/4): 298
- [41] 王伟财. 藏东南伯舒拉岭地区冰湖变化及危险性与影响分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013
- [42] PETROV M A, SABITOV T Y, TOMASHEVSKAYA I G, et al. Glacial lake inventory and lake outburst potential in Uzbekistan[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 228
- [43] HARITASHYA U K, KARGEL J S, SHUGAR D H, et al. Evolution and controls of large glacial lakes in the Nepal Himalaya[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 798
- [44] SALERNO F, THAKURI S, D'AGATA C, et al. Glacial lake distribution in the Mount Everest region: Uncertainty of measurement and conditions of formation[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 92: 30
- [45] HALL D K, BAYR K J, SCHÖNER W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893–2001)[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566

Changes in Glacial Lakes in Naqu from 1990 to 2020

LEI Pengsi^{1,2)} WANG Weicai²⁾ ZHANG Taigang^{1,2)}

(1) College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, 730000, Lanzhou, Gansu, China;

2) Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, 100101, Beijing, China)

Abstract Due to global warming and retreat of glaciers in recent years, the number and total area of glacial lakes in Qinghai-Tibet Plateau have increased rapidly, leading to increased frequency of glacial lake outburst floods (GLOF), threatening people's property and livelihood in downstream regions. Remote sensing images from Landsat were subject to visual interpretation, to obtain the boundary of glacial lakes and glaciers in Naqu in 1990, 2000, 2010 and 2020. Characteristics and reasons for change in glacial lakes in Naqu in the past 30 years were then analyzed. A total of 255 glacial lakes were identified in Naqu, with a total area of (27.83 ± 4.62) km². Glacial lakes were concentrated in the southeast and southwest of Naqu. Noticeable expansion of glacial lakes was found from 1990–2020, total number of glacial lakes increased by 72, and total surface area increased by 6.14 km². Original glacial lakes expanded rapidly in the low altitude region (≤ 4700 m), newer glacial lakes were distributed in high altitude area (> 5100 – 5700 m). Temperature and precipitation were critical factors in the expansion of glacial lakes. Due to spatial and temporal differences in temperature and precipitation in Naqu, expansion of glacial lake was faster in the south, compared to the north, expansion rate of the whole region accelerated gradually. The location of glacial lakes could also affect the process of expansion. A closer distance of a glacial lake to the glacier favors its development. Glaciers connected to lakes shows higher melting rate. No evidence was found for a linear relationship between glacier and glacial lake area change.

Keywords Naqu; Landsat; glacial lake; glacier; glacial lake outburst flood (GLOF)

【责任编辑: 刘先勤】