

基于遥感技术的高山极高山区冰川冰湖变化动态监测

李海, 杨成生, 惠文华, 朱赛楠, 张勤

Changes of glaciers and glacier lakes in alpine and extremely alpine regions using remote sensing technology A case study in the Shisha Pangma area of southern Tibet

LI Hai, YANG Chengsheng, HUI Wenhua, ZHU Sainan, and ZHANG Qin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-02>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于遥感影像多尺度分割与地质因子评价的滑坡易发性区划

Landslide susceptibility assessment based on multi-scale segmentation of remote sensing and geological factor evaluation

李文娟, 邵海 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 94-99

印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究

The February 7 of 2021 glacier-rock avalanche and the outburst flooding disaster chain in Chamoli, India

殷跃平, 李滨, 张田田, 王猛, 万佳威, 刘晓杰, 高杨, 朱赛楠 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 1-8

雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译

Remote sensing interpretation of development characteristics of high-position geological hazards in Sedongpu gully, downstream of Yarlung Zangbo River

李壮, 李滨, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 33-41

西藏笨多高位变形体遥感解译与危险性预测分析

Remote sensing interpretation and risk prediction analysis of Benduo high deformation body in Tibet

卫童瑶, 殷跃平, 李滨, 褚宏亮, 高杨, 王猛, 赵超英, 刘晓杰 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 17-24

面向东川复杂山地泥石流沟谷三维地形建模及特征分析的无人机遥感探测应用研究

Application research of unmanned aerial vehicle remote sensing detection for 3D terrain modeling and feature analysis of debris flow gullies in complex mountainous area of Dongchuan

毕瑞, 甘淑, 李绕波, 胡琳 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 91-100

西藏嘉黎断裂带沿线高位链式地质灾害发育特征分析

Characteristics, types, main causes and development of high-position geohazard chains along the Jiali fault zone, Tibet, China

万佳威, 褚宏亮, 李滨, 高杨, 贺凯, 李壮, 李艺豪 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(3): 51-60



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.05-02

基于遥感技术的高山极高山区冰川冰湖变化 动态监测

——以西藏藏南希夏邦玛峰地区为例

李 海¹, 杨成生¹, 惠文华¹, 朱赛楠², 张 勤¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质环境监测院(自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081)

摘要: 在全球变暖的大背景下, 我国藏南地区冰川持续退缩, 冰湖不断扩张, 从而引发了一系列的地质灾害问题。文章利用 Landsat 系列影像, 在面向对象分类方法的基础上采用波段比值法和 NDWI 指数提取了藏南希夏邦玛峰地区 1994—2018 年共 9 期冰川和冰湖的面积。研究表明, 希夏邦玛峰地区净冰川持续退缩, 总体速率为 $(1.28 \pm 0.32) \%/a$, 冰湖的扩张速率约为 $(1.88 \pm 1.07) \%/a$ 。同时, 面积小于 1 km^2 的冰川退缩极为严重, 高达 33.25%。其次气象再分析数据表明夏季气温和降水的增加可能是该地区净冰川退缩加快的重要原因, 并且共同促进了冰湖的加速扩张, 大大提高了该地区冰湖溃决的风险。

关键词: 冰川; 遥感; 冰湖; 冰湖溃决洪水

中图分类号: P237; P343.6

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)05-0010-08

Changes of glaciers and glacier lakes in alpine and extremely alpine regions using remote sensing technology: A case study in the Shisha Pangma area of southern Tibet

LI Hai¹, YANG Chengsheng¹, HUI Wenhua¹, ZHU Sainan², ZHANG Qin¹

(1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. China Institute of Geo-Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for
Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China)

Abstract: Under the background of global warming, glaciers in southern Tibet continue to retreat and glacier lakes continue to expand, resulting in a series of geological disasters. In this paper, based on the object-oriented classification method, the area of glaciers and glacier lakes in Shisha Pangma peak region of South Tibet from 1994 to 2018 were extracted by using band ratio method and NDWI index. The results show that the net glaciers in Shisha Pangma peak region continue to retreat, with an overall rate of $(1.28 \pm 0.32) \%$ per year, and the expansion rate of the glacier lakes are about $(1.88 \pm 1.07) \%$ per year. At the same time, glaciers with an area of less than 1 km^2 retreat seriously, up to 33.25%. Secondly, the meteorological reanalysis data show that the increase of summer temperature and precipitation may be important reasons for the accelerated retreat of net glaciers in

收稿日期: 2021-05-11; 修订日期: 2021-06-14

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目(DD20190637); 国家自然科学基金项目(41731066); 国家重点研发计划项目(2018YFC1504805)

第一作者: 李 海(1994-), 男, 四川平昌人, 硕士研究生, 主要从事遥感技术应用方面的研究。E-mail: 1126243324@qq.com

通讯作者: 杨成生(1982-), 男, 河南新乡人, 测绘科学与技术专业, 博士, 教授, 主要从事 InSAR 技术理论及高精度地质灾害调查与监测方面的研究。E-mail: ycsgps@163.com

the region, and jointly promote the expansion of glacier lakes, greatly increasing the risk of glacier lakes outburst in the region.

Keywords: glaciers; remote sensing; glacial lakes; glacial lakes outburst

0 引言

山地冰川作为冰冻圈的重要组成部分,其变化与气候变化、区域水循环有着密切的关系^[1-2]。对于属于干旱与半干旱区的冰川发育区,冰川融水作为其径流的主要补给源,是区域内可靠的水源保证和生态保障^[3-4]。同时冰川的持续消融大大提高了冰湖溃决的风险,危及下游百姓的生命财产安全^[5-7]。中国冰川集中分布在青藏高原及其周围的喜马拉雅山脉、天山、喀喇昆仑等山脉,各地冰川分布见表 1^[8]。研究表明,除喀喇昆仑山区少量冰川以外,中国西部冰川普遍处于退缩、变薄状态,但是受气候和地形差异的影响,不同区域存在差别^[9-12]。其中青藏高原地区冰川退缩速率总体呈现由边缘向内陆腹地、东部向西部变慢的规律^[13]。冰湖是由冰川挖掘、融化形成洼坑或者冰碛物堵塞致冰川槽谷积水而成的一类湖泊^[14-15]。王欣等^[16]分析了近 30 年来我国喜马拉雅山区冰湖变化的特征,剔除在气候变化的作用下,冰川变化是冰湖变化的主要影响因素。近年来喜马拉雅地区冰川退缩严重,一些以冰川融水为主要补给的湖泊,面积扩张较快,冰湖溃决危险性急剧升高,引起了研究者的广泛关注。

表 1 中国各地冰川面积分布

Table 1 Glacier area distribution in China

地区	冰川面积/km ²	占全国冰川百分比/%
昆仑山	12 082.95	20.34
念青唐古拉山	10 818.45	18.21
天山	9 235.96	15.55
喜马拉雅山	8 411.96	14.16
喀喇昆仑山	4 897.37	8.24
羌塘高原	3 355.34	5.65
帕米尔	2 849.36	4.80
唐古拉山	2 217.23	3.73
祁连山	1 930.49	3.25
冈底斯山	1 572.82	2.65
横断山	1 462.46	2.46
阿尔泰山	279.91	0.47
阿尔金山	275.00	0.46
萨吾尔山	16.84	0.03

喜马拉雅地区是中国重要的冰川作用区,也是冰湖溃决等地质灾害的多发区^[17-18]。在已有的 15 次冰湖溃决事件记录中,12 次发生在本区。其中藏南的希夏

邦玛峰地区就曾多次发生冰湖溃决灾害^[19-20],如 1968 年的阿亚错、1981 年波曲的章臧布错和 2002 年聂拉木县北侧的嘉龙错,并且上述冰湖溃决引发的洪水和泥石流均造成多处人工设施损坏和人员伤亡^[21-22]。鉴于希夏邦玛峰地区冰川广布、作用强烈、冰湖溃决灾害多的特点,文章利用陆地资源卫星(Landsat 系列)影像,通过面向对象的阈值分类方法提取了希夏邦玛峰地区 1994—2018 年共 9 期冰川冰湖的面积,并探究了冰川冰湖的变化规律。对指导该地区的水资源调控和冰川冰湖灾害的防治有重要的参考意义。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区位于西藏南部喜马拉雅山脉中段,内有希夏邦玛峰。该地区主要受到大陆西北季风和南亚西南季风环流影响,由于地势阻隔,山脉南北两侧气候相差较大。南侧夏季高温多雨,北侧相对寒冷干旱^[23-24]。研究区山脉南北两侧皆以沉积构造带为主,地层疏松、板块活跃,在频繁的地震和冰川作用的影响下,滑坡、冰湖溃决等地质灾害频繁发生^[25]。此外,研究区内有中国和尼泊尔重要边境通商口岸城市吉隆镇和聂拉木县,政治经济地位独特。

1.2 数据介绍

本次冰川冰湖的监测数据包括遥感数据、DEM 数据、气象数据、冰川编目数据 4 种。其中遥感影像主要来源于美国陆地资源卫星(Landsat 系列)TM5、ETM、ETM+、OLI8 传感器影像,皆由美国地质调查局免费提供(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)。首先,经过影像筛选发现该地区每年 10 月份前后的影像具有云量少、积雪少的特点。其次,以往研究表明 1992 年后该地区气温上升速率明显加快^[26],综合影像资源、云量、积雪等多方面因素,选取 1994—2018 年跨度 24 年 9 期,每期大致 10 月份的影像开展研究(表 2)。冰川参考数据选用 2013 年伦道夫冰川编目数据(RGI, Version 3.2, 2013),基本反映 2010 年前的冰川分布情况。地形数据选用 SRTM DEM,高程精度为 16 m(95% 置信区间)^[27]。

对于气象数据的选取,由于该地区气象站点稀疏,仅聂拉木县设有气象站,但是聂拉木县位于山脉南侧峡谷之间,受南亚暖湿季风影响显著,不能准确反映山脉北侧冰川区域的气候^[28-29]。全球网格气象再分析数据

表 2 光学影像数据详情
Table 2 Details of optical image data

影像时间	传感器类型	条带号/行号	空间分辨率
1994年10月	TM5	141/40	30 m多光谱
1994年10月	TM5	140/40	30 m多光谱
2000年11月	ETM	141/40	30 m多光谱+15 m全色
2000年11月	ETM	140/40	30 m多光谱+15 m全色
2003年10月	ETM+	141/40	30 m多光谱+15 m全色
2003年11月	ETM+	140/40	30 m多光谱+15 m全色
2007年10月	ETM+	141/40	30 m多光谱+15 m全色
2007年9月	ETM+	140/40	30 m多光谱+15 m全色
2008年11月	ETM+	141/40	30 m多光谱+15 m全色
2008年10月	ETM+	140/40	30 m多光谱+15 m全色
2010年10月	ETM+	140/40	30 m多光谱+15 m全色
2010年10月	ETM+	140/40	30 m多光谱+15 m全色
2012年11月	ETM+	141/40	30 m多光谱+15 m全色
2012年10月	ETM+	140/40	30 m多光谱+15 m全色
2015年11月	OIL8	141/40	30 m多光谱+15 m全色
2015年11月	OIL8	140/40	30 m多光谱+15 m全色
2018年11月	OIL8	141/40	30 m多光谱+15 m全色
2018年10月	OIL8	140/40	30 m多光谱+15 m全色

集,采用特殊的插值方法,充分考虑了地形、距离、海拔等因素对气候影响。因此采用来源于美国国家海洋和大气管理局 (<https://psl.noaa.gov/data/gridded/>) 提供的 NOAA\NCEP 陆地表面 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格气温再分析数据和 CMP $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 网格降水再分析数据。其中气温数据均方根误差为 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 日降水量偏差小于 1 mm , 精度较高^[30-31]。

2 数据处理

文章在面向对象的基础上采用阈值分类方法提取冰川冰湖面积。首先在 ENVI5.3 软件中对 Landsat 系列影像进行大气校正、影像融合、拼接等影像预处理工作。为了更准确的提取冰川边界,运用面向对象的阈值分类方法对影像进行了分割与分类工作,全部处理流程如图 1 所示。为了方便后期的交叉验证和人工修正,采用伦道夫冰川编目数据或前一期冰川提取矢量结果参与的多尺度分割方法。通过多次试验,最终确定分割因子为 60、形状因子为 0.4、紧致度因子为 0.5。

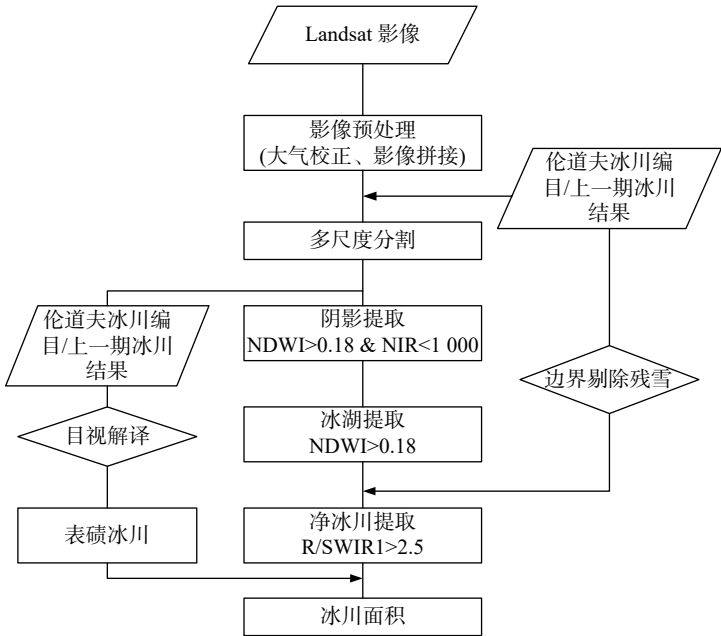


图 1 数据处理流程

Fig. 1 Data processing flow

对山体阴影区的分类主要采用目视解译进行。为了避免山体阴影对冰川分类结果的影响,首先对山体阴影进行提取,并在结合 Google-Earth 多期历史影像交叉验证阴影区冰川范围。利用山体阴影与冰湖具有相似的光谱响应特征,以及其在近红外波段的超低反射,并经多次试验,阴影提取采用归一化水指数 $\text{NDWI}>0.18$ 、

近红外光谱 $\text{NIR}<1\ 000$ 。随后,采用 $\text{NDWI}>0.18$ 对冰湖进行了提取。考虑到提取精度和实际意义,冰湖提取排除了面积小于 3 个像素冰湖。

采用波段比值法提取净冰川。根据冰川在红波段的高反射和短波红外高吸收的光谱特性,实验采用 $\text{R/SWIR1}>2.5$ 进行冰川提取。然而研究区地面常存在

的少量残留积雪,影响冰川提取的准确度。而以往的研究往往只采用 2~3 期影像对冰川进行长时间序列监测,时间间隔较长,无法发现积雪的变化以降低积雪的影响或者需要大量的人工目视判读(表 2)。而本文收集了研究区 1994—2018 年共 9 期影像,时间间隔短,可以通过前后对比发现积雪的变化。在冰川持续退缩的大前提下,自动去除前时相冰川边界以外的积雪。其

中 1994 年的冰川提取则参考 RGI 数据。由于 RGI 数据反映的是 2000—2010 年间的冰川状况,故仅以此作为参考并辅以人工目视判读,剔除积雪。2000 年的冰川提取参考 1994 年冰川提取结果。以此类推提取了 9 期的冰川冰湖面积,结果如表 3 所示。冰川冰湖整体提取结果如图 2 所示。

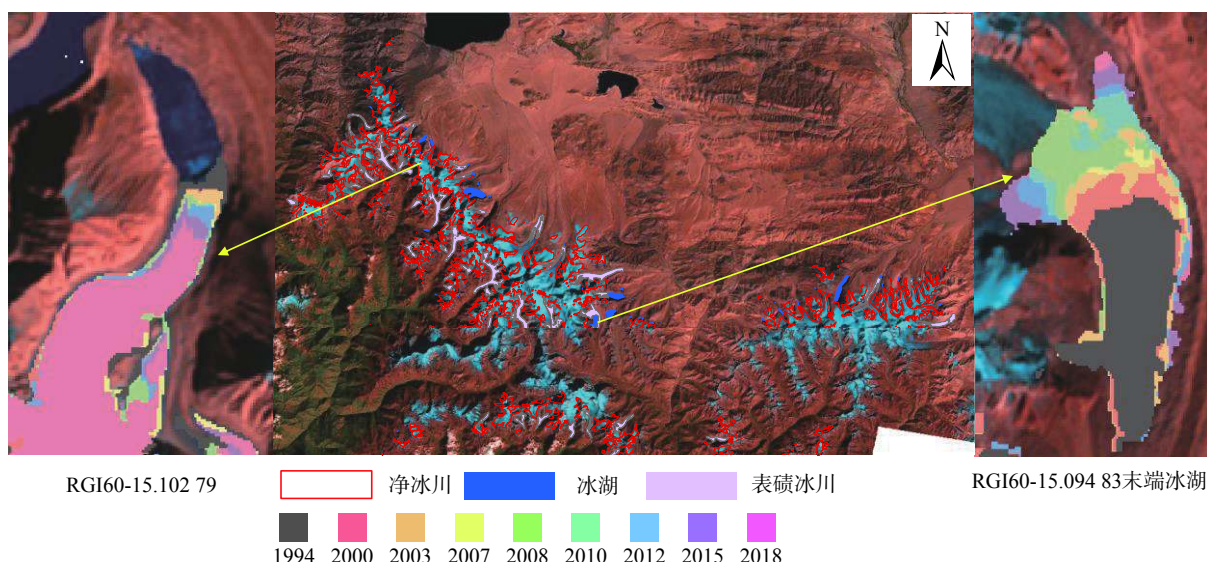


图 2 1994 年冰川冰湖轮廓提取图 (TM 影像 5、4、3 合成) 和单个冰川、冰湖 9 期变化结果

Fig. 2 Overall extraction of glacial and glaciers lake in 1994 (TM images 5, 4, 3 are synthesized), the results of 9-stage change of single glacial and glaciers lake

注:冰川名字来源于 RGI。

由于本次实验没有地面测量资料,因此冰川冰湖误差评估参照第二次冰川编目误差评估办法,即将空间分辨率的一半作为缓冲区域确定面积不确定度^[11]。因此冰川冰湖面积变化误差 e 的公式(1)为:

$$e = \sqrt{\varepsilon_1 + \varepsilon_2} \quad (1)$$

式中: ε_1 、 ε_2 ——前后时相冰川、冰湖面积的误差。

由误差传播定律可知,面积变化率误差 ε 的计算公式为:

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_2}{x}\right)^2 + \left(\frac{y \times \varepsilon_1}{x^2}\right)^2} \quad (2)$$

式中: x 、 y ——分别指冰川、冰湖前后两期的面积。

表碛覆盖型冰川采用较为可靠的目视解译。研究区南侧受到南亚暖湿季风影响,属于温带海洋性冰川区,表碛覆盖型冰川广布。然而由于表碛冰川在光谱特性上和裸地相似,难以实现自动化提取。近年来,不少学者针对表碛冰川的自动化提取提出了许多方法,但是

都存在准确度不高且需要专家目视修正的问题,不适用于变化分析^[32-33]。鉴于该地区表碛覆盖型冰川较集中、面积大且数量少、退缩缓慢等特点,参考伦道夫冰川编目数据,以目视解译方式提取 1994、2018 年首尾两期的表碛冰川轮廓。1994 年表碛冰川面积为 $(168.41 \pm 17.6) \text{ km}^2$ 。至 2018 年,在部分净冰川退缩裸露出表碛冰川的形势下,表碛冰川面积增加至 $(223.97 \pm 19.48) \text{ km}^2$ 。而表碛冰川的退缩主要表现为表碛冰川向末端冰湖演变,面积为 11.03 km^2 。

3 分析与讨论

3.1 冰川冰湖总体变化分析

文章共提取了 1994—2018 年间共 9 期冰川冰湖的轮廓,面积变化如图 3 所示。结果显示 24 年间冰川总体上持续退缩,面积从 $(1\,012.66 \pm 68.42) \text{ km}^2$ 退缩至 $(699.89 \pm 61.50) \text{ km}^2$ 、退缩比例为 $(30.83 \pm 7.66) \%$ 、年平均退缩速率为 $(1.28 \pm 0.32) \%$,冰川的退缩速率经历了加速减速的

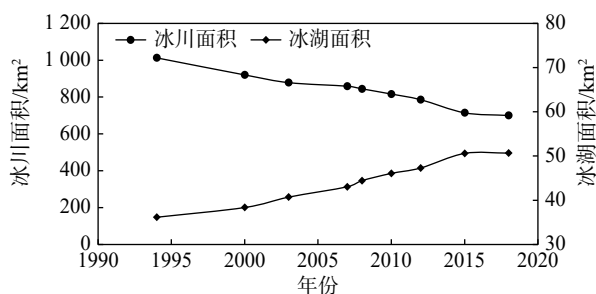


图 3 24 年冰川冰湖面积变化

Fig. 3 Changes of glaciers and glacial lakes area in 24 years

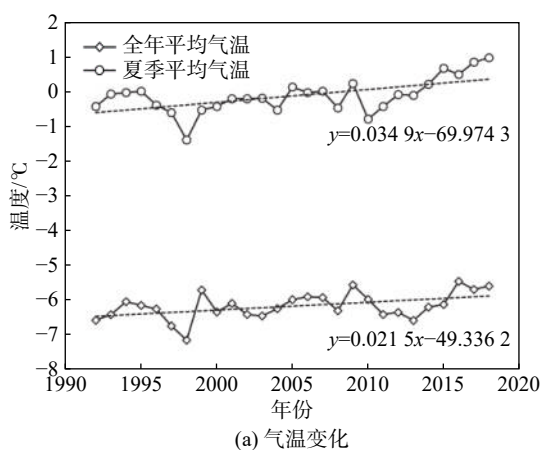
轮换。该地区的冰湖在 24 年间面积从 $(36.15 \pm 4.32) \text{ km}^2$ 扩张至 $(50.65 \pm 7.09) \text{ km}^2$ 、扩张比率为 $(47.23 \pm 25.79) \%$ 、年平均扩张速率为 $(1.889 \pm 1.07) \%$ ，冰湖扩张速率高于冰川退缩速率，并且其扩张的快慢变化与冰川退缩的快慢变化基本吻合，相关系数为 -0.98 。较高的相关性说

明该地区冰湖扩张水源基本来源于冰川融水，间接证明了冰川、冰湖的提取方法可靠。

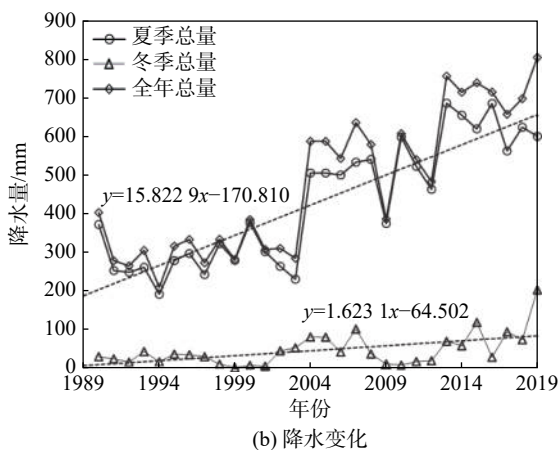
3.2 冰川变化与气候变化的响应

文章探究了该地区冰川冰湖变化与气候变化的响应关系。研究表明，冰川冰湖变化和当地的气候变化存在显著的关联，其中气温和降水影响最大^[34]。

用 1992—2018 年近 27 年的夏季气温和全年气温变化分别与冰川面积变化作比较。为了防止因部分异常气温影响拟合结果，采用鲁棒性更好的稳健估计法拟合气温变化。从图 4(a)可以看出全年平均气温和夏季平均气温均呈上升趋势，与冰川面积变化呈负相关，这可能是该地区冰川退缩速率加快的重要原因。夏季平均气温以每年 $0.035 \text{ } ^\circ\text{C}$ 的速率上升，并从 2010 年以来上升了 $1.8 \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右，为冰川在夏季的消融创造了良好的条件，这也导致 2010 年后冰川退缩速率加快。



(a) 气温变化



(b) 降水变化

图 4 研究区气温和降水变化

Fig. 4 Variation of temperature and precipitation in the study area

同时，分析了该地区 1990—2019 年的近 30 年的降水变化，将其细分为夏季、冬季、全年降水总量三组。如图 4(b) 所示，该地区降水主要集中在夏季，且全年降水和夏季降水均呈现不断上升趋势。与此同时，夏季降水以 15.8 mm/a 的速率上升，趋势明显，但冬季降水较少且无明显上升。30 年间降水量增加了约 500 mm ，年增量为 17.2 mm ，且大部分来自夏季降水，对应冰川在消融季的退缩。而春冬冰川物质积累季，降水并无明显增多。综上所述，夏季气温和降水的升高是本地区冰川的退缩加快的重要原因。与此同时降水增加和冰川的加速退缩，共同促进冰湖的快速扩张，提高了该地区冰湖溃决的风险。

3.3 影响冰川变化的其他因素

为了进一步研究该地区冰川变化的规律，本文进一

步讨论了冰川面积的大小、冰川经纬度位置、流向多个因素对冰川变化的影响。首先利用 SRTM DEM 提取研究区域内的山脊线作为分冰岭，将冰川与冰川之间按山脊线分开，划分成独立的冰川。山脊线主要采用水文分析法和表面分析法相结合的方法自动化提取^[11]。由于 DEM 精度问题，部分山脊线会偏离山脊位置，需要少量人工修定。整个冰川区经过分冰岭分割之后，大约有 2 000 个冰川，其中细碎冰川较多，分别在 1994、2018 年的结果中选择其中 100 个冰川作为统计样本，从面积大小、冰川纬度、经度位置、流向四个角度进行统计，统计结果如表 3 所示。

通过统计不同大小冰川的变化率，探究冰川大小对冰川变化的影响。根据冰川的数量和面积特征，将 100 个冰川按面积大小分为 6 组，分别是 $0 \sim 1 \text{ km}^2$ 、 $1 \sim$

表 3 9 期冰川冰湖面积表
Table 3 Area of glaciers and glacial lakes in Phase 9

年份	1994	2000	2003	2007	2008	2010	2012	2015	2018
冰川面积/km ²	1 012.66	920.10	878.23	858.81	844.55	816.30	785.59	714.45	699.89
冰湖面积/km ²	36.15	38.35	40.70	43.04	44.43	46.07	47.29	50.59	50.65

2 km²、2 ~ 3 km²、3 ~ 4 km²、4 ~ 7 km²、7 ~ 20 km²。统计结果如表 4 所示,随着面积的增大,冰川的退缩速率变小,说明:①面积较大的冰川应对外界气候变化更具

有稳定性,同时面积较大的冰川对气候具有较大的调节作用;②小面积的冰川冰量损失极为严重,因此随着冰川的持续退缩,相同的气候的变化将带来更严重的退缩。

表 4 不同角度下冰川的退缩率
Table 4 Retreat rates of glaciers with multipectives

冰川面积/km ²	变化率均值/%	纬度位置	变化率均值/%	经度位置	变化率均值/%	流向	变化率均值/%
0 ~ 1	-33.25	低	-21.91	西	-17.52	北	-31.11
1 ~ 2	-30.04	中	-21.75	中	-20.13	东北	-14.28
2 ~ 3	-22.08	高	-17.11	东	-22.67	东南	-26.10
3 ~ 4	-17.91					南	-20.61
4 ~ 7	-18.37					西南	-22.02
7 ~ 20	-13.98					西北	-17.10

通过统计不同经纬度位置的冰川的变化率,探究位置对冰川变化的影响。从经纬度位置来看,研究区北侧冰川和西侧冰川退缩速率较慢,这与其他研究者获得的两大规律基本吻合:①喜马拉雅山脉冰川退缩速率整体呈现由东侧向西侧逐步降低;②喜马拉雅山脉冰川退缩速率外侧高于内侧^[35-36]。该结果与地形差异而导致的气候差异有着密切的关系。研究区受南亚印度洋温湿季风和大陆西北干冷季风双重影响^[37],由于山体的阻隔印度洋季风由南向北迅速减弱,而由西北而来的大陆性季风因希夏邦玛山脉的阻隔向东减弱。致使冰川退缩速率出现了南快北慢、东快西慢的现象。

通过统计不同流向冰川的变化率,探究流向对冰川变化的影响。将 100 个冰川大致按北、东北、东南等 6 个方向分类。冰川变化结果如表 3 所示。结合图 1,北向冰川多位于研究区南侧,冰川面积小,南亚季风影响严重,退缩较大。东北流向冰川主要分布于希夏邦玛峰东北侧,该地区冰川退缩最慢,其次是西北流向冰川,主要位于右侧的错朗玛冰川群北侧,主要原因是希夏邦玛冰川群相对纬度高,气温相对较低。东南流向冰川主要分布在错朗玛冰川群的南侧地区,西南流向冰川为希夏邦玛峰西南侧冰川,两者皆为南亚季风的迎风坡,但是西南流向冰川较慢可能是左侧存在山脉阻隔,南亚季风较弱所致。综上所述,经纬度位置和流向对冰川变化的影响,主要原因在于局部气候的差异。

因此根据本文研究结果,提出以下建议:①持续关

注气温和降水对冰川的影响;②对面积扩张严重的高危冰湖进行更细致的监测;③走健康绿色发展道路,减缓全球变暖的速率。

4 结论

本文利用 Landsat 系列影像对冰川变化显著的希夏邦玛峰区域进行了长时间序列的冰川冰湖变化规律研究。结果表明:①1994—2018 年该地区冰川面积退缩比例为 30.83%,冰湖面积扩张比率为 47.23%,冰湖扩张严重;②该地区冰川退缩速率加快的主要原因在于夏季气温的升高;③随着冰川面积的逐渐减小,相同的气温变化将带来更加严重的冰川退缩;④南亚季风、西北大陆季风、地形等多重因素致使该地区冰川退缩速率整体呈现南快北慢、东快西慢的现象。

参考文献 (References) :

[1] ZHANG Z, LIU S Y, ZHANG Y, et al. Glacier variations at Aru Co in western Tibet from 1971 to 2016 derived from remote-sensing data [J] . *Journal of Glaciology*, 2018, 64(245): 397 - 406.

[2] LI G, LIN H, YE Q H. Heterogeneous decadal glacier downwasting at the Mt. Everest (Qomolangma) from 2000 to 2012 based on multi-baseline bistatic SAR interferometry [J] . *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 336 - 349.

[3] DING Y J, LIU S Y, LI J, et al. The retreat of glaciers in response to recent climate warming in Western China [J] . *Annals of Glaciology*, 2006, 43: 97 - 105.

- [4] 吴珊珊,姚治君,姜丽光,等.现代冰川体积变化研究方法综述 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(2): 237–246. [WU Shanshan, YAO Zhijun, JIANG Liguang, et al. Method review of modern glacier volume change [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(2): 237–246. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 周玉杉.基于多源遥感数据的青藏高原及其周边区域冰川物质平衡变化研究 [J]. *地理与地理信息科学*, 2019, 35(4): 142. [ZHOU Yushan. Investigation of glacier mass balance in the Qinghai-Tibet plateau and its surroundings based on multi-source remote sensing data [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2019, 35(4): 142. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 郭光剑,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): 1285–1292. [WU Guangjian, YAO Tandong, WANG Weicai, et al. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1285–1292. (in Chinese with English abstract)]
- [7] NIE Y, LIU Q, LIU S Y. Glacial lake expansion in the central Himalayas by landsat images, 1990–2010 [J]. *PLoS One*, 2013, 8(12): e83973.
- [8] 舒梅海.近25年阿尔泰山区冰川冰湖变化及特征[D].湘潭:湖南科技大学,2017. [SHU Meihai. Variations and characters of glacier and glacial lakes in Altai mountains in recent 25 years[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [9] GARDELLE J, BERTHIER E, ARNAUD Y, et al. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999–2011 [J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(4): 1263–1286.
- [10] HEWITT K. The karakoram anomaly glacier expansion and the ‘elevation effect’ karakoram Himalaya [J]. *Mountain Research and Development*, 2005, 25(4): 332–340.
- [11] 刘时银,姚晓军,郭万钦,等.基于第二次冰川编目的中国冰川现状 [J]. *地理学报*, 2015, 70(1): 3–16. [LIU Shiyin, YAO Xiaojun, GUO Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3–16. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 许艾文.近40年中国喀喇昆仑山冰川变化的遥感监测[D].兰州:兰州大学,2017. [XU Aiwen. Monitoring glacier change based on remote sensing in China karakoram for the last four decades[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 冀琴.1990—2015年喜马拉雅山冰川变化及其对气候波动的响应[D].兰州:兰州大学,2018. [JI Qin. Glacier variations in response to climate change in the Himalaya during 1990–2015[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 柴开国.珠峰地区冰湖变化及其影响研究[D].湘潭:湖南科技大学,2017. [CHAI Kaiguo. The change of glacial lake and its influence in the Everest region[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 王欣,刘时银,姚晓军,等.我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目 [J]. *地理学报*, 2010, 65(1): 29–36. [WANG Xin, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing data [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 29–36. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 蒋亮虹.基于多源遥感数据的喜马拉雅中段冰川变化监测与分析[D].湘潭:湖南科技大学,2015. [JIANG Lianghong. Variation and implication of glaciers based on multi-source remote sensing data in central Himalaya[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 吕卉.近40年喜马拉雅山冰川波动对气候变化的响应[D].兰州:兰州大学,2013. [LYU Hui. Response of glacier variation to climate change in the Himalayan mountains, during the last 40 years[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 汪宙峰,张廷山,王成武.西藏喜马拉雅山地区冰湖溃决的预测模型及其应用研究 [J]. *冰川冻土*, 2016, 38(2): 388–394. [WANG Zhoufeng, ZHANG Tingshan, WANG Chengwu. Prediction model and its application for glacial lake outburst in the Himalayas area, Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(2): 388–394. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 徐道明,冯清华.西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征 [J]. *地理学报*, 1989, 44(3): 343–351. [XU Daoming, FENG Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in Xizang Himalayas [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1989, 44(3): 343–351. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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. [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. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 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 [J]. *冰川冻土*, 2004, 26(4): 397–402. [CHE Tao, JIN Rui, LI Xin, et al. Glacial lakes variation and the potentially dangerous glacial lakes in the Pumqu basin of Tibet during the last two decades [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(4): 397–402. (in Chinese with English abstract)]

- [23] WANG X, LIU S Y, GUO W Q, et al. Using remote sensing data to quantify changes in glacial lakes in the Chinese Himalaya [J] . *Mountain Research and Development*, 2012, 32(2): 203 – 212.
- [24] 吕儒仁,等.西藏泥石流与环境[M].成都:成都科技大学出版社,1999. [LYU Ruren, et al. Tibet autonomous region debris flow and environment in Tibet[M]. Chengdu: Chengdu University of Science and Technology Press, 1999. (in Chinese)]
- [25] 刘春玲,童立强,祁生文,等.喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析 [J] . 国土资源遥感, 2016, 28(3): 110 – 115. [LIU Chunling, TONG Liqiang, QI Shengwen, et al. Remote sensing investigation and influence factor analysis of glacier lake outburst potential in the himalayas [J] . *Remote Sensing for Land & Resources*, 2016, 28(3): 110 – 115. (in Chinese with English abstract)]
- [26] JAIN S K, MIR R A. Glacier and glacial lake classification for change detection studies using satellite data: A case study from Baspa basin, western Himalaya [J] . *Geocarto International*, 2019, 34(4): 391 – 414.
- [27] KOLECKA N, KOZAK J. Assessment of the accuracy of SRTM C- and X-band high mountain elevation data: A case study of the polish Tatra mountains [J] . *Pure and Applied Geophysics*, 2014, 171(6): 897 – 912.
- [28] 祁威,张懿锂,高俊刚,等.1971—2009年珠穆朗玛峰地区尼泊尔境内气候变化 [J] . 地理学报, 2013, 68(1): 82 – 94. [QI Wei, ZHANG Yili, GAO Jungang, et al. Climate change on southern slope of Mt. Qomolangma region in Nepal from 1971 to 2009 [J] . *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(1): 82 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 杨续超,张懿锂,张玮,等.珠穆朗玛峰地区近34年来气候变化 [J] . 地理学报, 2006, 61(7): 687 – 696. [YANG Xuchao, ZHANG Yili, ZHANG Wei, et al. Climate change in Mt.Qomolangma region in China during the last 34 years [J] . *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7): 687 – 696. (in Chinese with English abstract)]
- [30] XIE P P, CHEN M Y, YANG S, et al. A gauge-based analysis of daily precipitation over east Asia [J] . *Journal of Hydrometeorology*, 2007, 8(3): 607 – 626.
- [31] FAN Y, VAN DEN DOOL H. A global monthly land surface air temperature analysis for 1948-present [J] . *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D1): D01103.
- [32] HUANG L, LI Z, HAN H D, et al. Analysis of thickness changes and the associated driving factors on a debris-covered glacier in the Tianshan Mountain [J] . *Remote Sensing of Environment*, 2018, 206: 63 – 71.
- [33] LIPPL S, VIJAY S, BRAUN M. Automatic delineation of debris-covered glaciers using InSAR coherence derived from X-, C- and L-band radar data: a case study of Yazgyl Glacier [J] . *Journal of Glaciology*, 2018, 64(247): 811 – 821.
- [34] LI D S, CUI B L, WANG Y, et al. Glacier extent changes and possible causes in the Hala Lake Basin of Qinghai-Tibet Plateau [J] . *Journal of Mountain Science*, 2019, 16(7): 1571 – 1583.
- [35] 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 [J] . 地理学报, 2009, 64(7): 782 – 790. [WANG Xin, LIU Shiyin, GUO Wanqin, et al. Hazard assessment of moraine-dammed lake outburst floods in the Himalayas, China [J] . *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 782 – 790. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 车涛,李新,MOOL P,等.希夏邦玛峰东坡冰川与冰川湖泊变化遥感监测 [J] . 冰川冻土, 2005, 27(6): 801 – 805. [CHE Tao, LI Xin, MOOL P, et al. Monitoring glaciers and associated glacial lakes on the east slopes of mount Xixia Bangma from remote sensing images [J] . *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(6): 801 – 805. (in Chinese with English abstract)]
- [37] WAKE C P, MAYEWSKI P A, XIE Z C, et al. Regional distribution of monsoon and desert dust signals recorded in Asian glaciers [J] . *Geophysical Research Letters*, 1993, 20(14): 1411 – 1414.