

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0080

WANG Yingzheng, LI Jia, WU Lixin, et al. Using remote sensing images to monitor the glacier changes in Qilian Mountains during 1987–2018 and analyzing the impact factors[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):344–356. [汪赢政, 李佳, 吴立新, 等. 1987–2018年祁连山冰川变化遥感监测及影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):344–356.]

1987–2018年祁连山冰川变化遥感监测 及影响因子分析

汪赢政^{1,2}, 李佳^{1,2}, 吴立新^{1,2}, 郭磊^{1,2}, 李建江^{1,2}

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙410083; 2. 中南大学地灾感知认知预知研究室, 湖南长沙410083)

摘要: 祁连山冰川融水是维系我国西北地区生态平衡的重要因素。为评估祁连山冰川在全球气候变暖背景下的状态, 利用Landsat-TM、ETM+、OLI等遥感影像, 基于波段比值阈值法提取1987–2018年共计7期冰川边界进行时序变化分析。结果显示: 近31年来祁连山冰川面积从2 080.39 km²退缩到1 442.09 km², 年均退缩率达0.99%, 相比1956–1990年间的退缩率(0.58%)大幅增加; 近31年来冰川物质平衡线高度稳步上升; 冰川主要分布在海拔4 700~5 100 m之间, 冰川退缩随海拔降低而增加; 约93%的冰川的面积小于2.0 km², 小于0.1 km²的冰川的总数和总面积呈增加态势; 0.5~1.0 km²的冰川退缩最快, 年均退缩率达1.53%, 而大于10.0 km²的冰川退缩最慢, 年均退缩率为0.59%; 祁连山冰川退缩主要由夏季均温升高引起, 且最近十年间冰川呈现出加速退缩的态势。

关键词: 祁连山; 冰川退缩; 遥感; Landsat; 气候

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0344-13

0 引言

祁连山冰川是中西部干旱地区的重要水资源。得益于丰富的祁连山冰川融水, 年降水量不足200 mm的河西走廊成为了我国西北地区最主要的商品粮基地和经济作物集中地, 并孕育了超过500万的人口^[1]。同时, 冰川作为气候的产物^[2], 对气候变化十分敏感。有研究预测, 以现有全球变暖速度, 中国的冰川面积将于21世纪减少1 800~4 000 km², 约占总量的30%~67%^[3]。由于青藏高原的升温幅度高于全球平均值^[4], 且祁连山冰川分布海拔相对较低, 规模相对较小, 在过去几十年中祁连山冰川消融十分迅速。冰川消融带来的大量融水在短时间内或将对干旱地区的发展产生积极的影响, 但同时也可能引发冰湖溃决及泥石流灾害等。从长期来

看, 冰川的加速消融将不利于经济的可持续发展和生态平衡保持。因此, 加强祁连山冰川变化监测在保障流域水资源安全, 理解河川径流量变化规律, 保护中西部地区生态系统等方面都有重要意义。

目前关于祁连山地区冰川变化的研究已经有一系列成果。对祁连山西段而言, 2002年刘时银等^[5]发现冰川面积在小冰期至1990年间持续减少, 综合气象站点数据认为冰川退缩与气温升高和降水减少有关。2016年Wang等^[6]发现冰川面积在1957–2010年间减少了17.21%, 且冰川退缩率随研究时段的不同而不同; 与已有的祁连山冰川变化结果对比发现西部冰川退缩较慢, 究其原因可能是西部地势较高使得温度变化不明显及冰川本身分布海拔高。对祁连山中段而言, 2013年别强等^[7]发现黑河流域冰川退缩强烈, 且低海拔的冰川消融更

收稿日期: 2019-08-08; 修订日期: 2020-04-20

基金项目: 国家重点研究计划“全球变化及应对”重点专项(2018YFA0605504); 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA20100101); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ50761); 国家自然科学基金项目(41904006); 中南大学领军人才支持计划(506030101); 湖湘高层次人才聚集工程项目(2018RS3013); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2019zzts637)资助

作者简介: 汪赢政(1994–), 男, 河南驻马店人, 2017年在湖南科技大学获学士学位, 现为中南大学在读硕士研究生, 从事冰川变化遥感监测研究. E-mail: wy-zheng@outlook.com

通信作者: 李佳, 讲师, 从事冰川动态变化、冰川灾害遥感监测研究. E-mail: lijia20050710@csu.edu.cn.

快, 同年陈辉等^[8]发现黑河和北大河流域的冰川在 1956–2003 年间分别缩减了 29.60% 和 18.70%, 退缩差异的可能原因是黑河流域的冰川规模较小, 对气候变化更为敏感。对祁连山东段而言, 2010 年曹泊等^[9]发现冷龙岭冰川在 1972–2007 年间减少了 24.286 km² (0.67%·a⁻¹), 且在 1994–2000 年间退缩最快 (1.05%·a⁻¹)。2012 年 Pan 等^[10]发现冷龙岭西段冰川在 1972–2007 年间持续退缩, 面积共减少了 24.4 km² (0.81%·a⁻¹), 综合气象站点数据认为冰川变化主要与气温升高和冰川规模小有关系。2017 年王晶等^[11]发现大雪山地区的山谷冰川年均退缩率 (0.45 km²·a⁻¹) 比悬冰川 (0.18 km²·a⁻¹) 及冰斗型冰川 (0.06 km²·a⁻¹) 快, 且冰川在不同坡度和坡向的变化不同。对整个祁连山而言, 2014 年 Tian 等^[12]发现该区域冰川在 1956–2010 年间缩减了 (30±8)%, 且近 20 年间加速退缩; 区域年均温上升速率为 0.03~0.05 °C·a⁻¹, 且 2000 年后增温更明显; 并认为冰川退缩主要受气温升高影响, 祁连山冰川在近 20 年间不可能有物质积累, 且将来会加速退缩。2015 年孙美平等^[13]利用中国冰川编目数据发现近 50 年来分布在海拔 4 300~5 100 m 间、东侧和北侧的面积小于 1.0 km² 的冰川缩减最快, 还发现祁连山东段冰川比中段和西段退缩快。2017 年李虹蓉等^[14]利用两期遥感影像发现冰川在 1987–2015 年间从 2 072.7 km² 缩减到 1 506.3 km², 共退缩了 27.3%, 且退缩冰川主要分布在朝北和东北方向、海拔 4 200~5 300 m、坡度 10°~20° 区域。最近 He 等^[15]发现祁连山冰川在 1960s–2015 年间减少了 396.89 km², 且东部冰川缩减快于西部, 结合气象和地形数据认为该现象主要是由气温增加造成, 但也与冰川规模、类型及局部地形等参数有关。

通过梳理以上成果不难发现, 关于祁连山冰川面积变化的已有研究或集中于某一流域, 或采用时间间隔较长的两三期数据对数十年内的冰川变化状况进行研究, 或基于少数气象站点数据对整个研究区域内的气温、降水进行统计分析。从冰川变化数据的时间分辨率、空间覆盖率和气候数据的完整性来看, 有必要作进一步的研究。为探究祁连山冰川变化规律, 认识祁连山冰川变化与气候变化之间的关系, 有必要在时间轴上对冰川变化观测加密, 并结合更全面的气候数据进行响应分析。

鉴于此, 本文利用 Landsat 影像获取了整个祁

连山冰川在 1987 年、1991 年、1997 年、2001 年、2007 年、2013 年及 2018 年的分布情况, 结合地形参数和祁连山全区的日值、月值气象数据集系统分析了冰川分布特征及变化原因, 在前人工作的基础上揭示了更多祁连山冰川变化特征及其对气候变化的响应规律。

1 研究区概况

祁连山脉位于青藏高原东北部 (93°30′~103°30′ E, 35°40′~39°30′ N), 主要由多条西北–东南走向的平行山脉组成, 东西横跨约 800 km, 南北纵贯约 300 km (图 1)。根据中国第二次冰川编目结果, 祁连山地区共有冰川 2 683 条, 总面积 1 597.81 km²^[16]。祁连山地区山体海拔介于 4 000~5 500 m 之间, 由西南向东北降低。疏勒南山的岗则吾结峰 (又称团结峰) 是最高峰, 海拔 5 826 m。气候类型为高原大陆性气候, 西段、中段和东段分别受西风带、偏南季风和东亚季风控制^[17]。祁连山地区年均气温约 5 °C, 年降水量约 250 mm。降水主要集中在夏季, 且呈现出由东向西逐渐减少的空间趋势^[18]。研究表明, 近 50 年来祁连山地区气温逐渐上升, 平均增温幅度约为 0.05 °C·a⁻¹, 从 1980 年代中期开始升温显著加剧^[19]。祁连山冰川分为亚大陆型和极大陆型两种, 前者集中于祁连山的东部地区, 后者主要分布在西部区域^[20]。冰川物质平衡线在海拔 4 400~5 000 m 左右, 东部区域高度明显低于西部^[21]。

2 数据及研究方法

2.1 数据

2.1.1 遥感影像

祁连山境内冰川数量多、分布广、海拔高, 使得实地测量方法受限, 而多时相遥感影像数据对于冰川时空演变研究来说是一个不错的数据源。综合考虑研究区域的空间范围、研究时间跨度、冰川勾绘精度对影像空间分辨率的要求等因素, 决定采用 Landsat 系列卫星数据。从美国地质调查局 (USGS) 下载了覆盖祁连山全境的 1987–2018 年间共七个时期的 Landsat-TM (1987 年 31 景、1991 年 26 景、1997 年 20 景、2001 年 6 景、2007 年 23 景)、ETM+ (2001 年 25 景) 和 OLI 影像 (2013 年 29 景、2018 年 29 景)。数据产品级别为 L1T, 经过了辐射校正和正射校正。已有研究表明 USGS Landsat

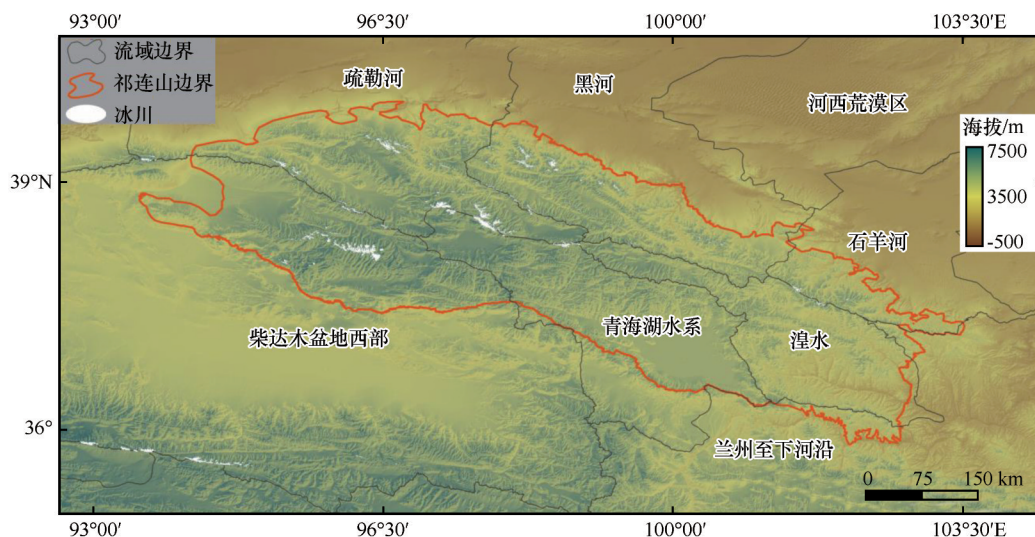


图1 祁连山地区冰川分布

Fig. 1 Map showing the glacier distribution in the Qilian Mountains

L1T 影像的校正精度能够满足冰川变化检测所需^[22]。为降低冰川勾绘的不确定性,我们一般选取消融期末(8-9月),且寻求云覆盖低(80%影像的云量小于3%)、季节性积雪少、阴影面积小的影像。同时本文还获取了2018年高分辨率的高分一号(GF-1)、高分二号(GF-2)、资源三号01、02星(ZY301、ZY302)等遥感影像,用于验证由Landsat影像提取冰川边界的精度。

2.1.2 地形数据

2000年2月11日,美国太空总署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)通过C波段干涉雷达测量获取了覆盖全球80%以上的陆地数字高程模型(SRTM DEM)^[23]。本研究所使用的地形数据下载自USGS(<https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/>),数据格式为GeoTIFF,初始空间分辨率为1 arcsec。本文对其进行Albers投影并采样至30 m分辨率。地形数据主要用于研究冰川分布及变化与地形参数之间的关系。

2.1.3 气象数据

为研究气温和降水对冰川变化的影响,本研究从中国气象数据网申请获取了全国地面气温、降水日值/月值 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格网数据集(V2.0)。该数据集是利用ANUSPLIN软件的薄盘样条法(Thin Plate Spline)对1961年至最新的全国国家级台站的气温、降水资料进行空间插值得到的。本文使用数据集的空间范围为 $72^{\circ} \sim 136^{\circ} \text{E}$, $18^{\circ} \sim 54^{\circ} \text{N}$ 。已有研究对该数据集的质量进行了广义交叉验证及误差分析,结果显示格点数据的精度较高,插值效果

较为理想^[24]。本文根据祁连山的地理范围提取了1982-2018年的气温和降水格点数据集。首先采用逐年滑动法计算冰川与气温之间的滞后时长^[25],之后获取各期冰川参数对应时间段内的气候数据,然后将每年的日值降水数据累加得到年值降水,最后取各个时间段内的年均值。取月均温大于 0°C 的月份(6、7、8、9月)的平均值作为当年的夏季均温值,然后取各个时间段内的年均值。

2.2 研究方法

目前可用于提取冰川边界的方法有:波段比值法、主成分分析法、光谱角制图法、监督分类和非监督分类法等^[26]。波段比值法具有效率及精度高的特点,目前在冰川变化研究中应用最广。波段比值法是基于冰雪在可见光和近红外波段的强反射与在短波红外波段的低反射特性,将冰雪与周围地物信息进行区分。波段比值常用的公式有Red/SWIR和NIR/SWIR。其中Red、NIR、SWIR分别对应红、近红外和短波红外波段的地表反射率。Andreassen等^[27]的研究表明,NIR/SWIR会将阴影区中的植被错分为冰川,尤其在地形起伏较大的山区或影像本身的太阳高度角较小时。因此本研究采用Red/SWIR法提取祁连山冰川信息。

遥感成像的像元亮度值(Digital Number, DN)实际上记录的是地表信息灰度值。欲获得各波段地表反射率,首先需对Landsat L1T影像进行辐射定标和大气校正。当对Red和SWIR波段进行比值处理后,还需设置一个合适的阈值才能将冰川和周围地物区分开,得到二值图。阈值是根据冰川

区环境具体设定,一般为 2.0 左右。受影像中积雪、冰碛、阴影等因素影响,二值图中的冰川内部会出现裂缝或空白,冰川外围会存在离散的小冰块,所以还需应用数学形态学的开闭运算^[28]。之后将冰川二值图转化为冰川边界矢量文件。受 Landsat 影像的栅格属性影响,冰川边界呈锯齿状,因此还需对其进行光滑处理。由于影像质量问题 and 处理误差不可避免,经过上述自动化处理得到的冰川矢量边界和实际值还有一定的出入,因此还需进行目视解译。目视解译通常基于 Landsat 全色-多光谱融合影像和 Google Earth 历史影像等分辨率更高的影像。此外,为减小积雪影响,通常要综合相邻月份或者年份影像的分类结果。最后将提取的冰川边界统一进行 Albers 投影。已有研究表明该投影能最大程度保证冰川投影面积与实地相同,适用于区域尺度的冰川分布及变化研究^[29]。

3 结果及分析

3.1 祁连山冰川 1987—2018 年面积变化

祁连山冰川面积随时间变化的结果如表 1 所示。统计结果显示 1987 年、1991 年、1997 年、2001 年、2007 年、2013 年和 2018 年的祁连山冰川面积依次为 2 080.39、1 939.12、1 805.65、1 691.13、1 619.26、1 531.21 km² 和 1 442.09 km²。在六个相邻时段内,祁连山冰川面积依次缩减了 -141.27、-133.47、-114.51、-71.87、-88.05 km²

和 -89.12 km²,由此看出近 31 年来祁连山冰川一直处于退缩状态。31 年间祁连山冰川面积共减少了 638.30 km²,总退缩比例达 30.68%,年退缩率达到了 0.99%。Tian 等^[12]获取的 1956 年、1990 年祁连山冰川面积分别为 2 541.6 km² 和 2 041.5 km²。可见祁连山冰川年退缩率已经从前 34 年(1956—1990 年)间的 0.58% 变为到 1987—2018 年的 0.99%,大幅加快。

从表 1 还可以看出各个时间段内祁连山冰川退缩速度不尽相同。在 1987—1991 年、1991—1997 年、1997—2001 年、2001—2007 年、2007—2013 年及 2013—2018 年间的冰川年均退缩量依次为 -35.32、-22.25、-28.63、-11.98、-14.68 km²·a⁻¹ 及 -17.82 km²·a⁻¹,由此看出冰川在 1987—1991 年间退缩最快,而 2001—2007 年间退缩最慢。在变化时间轴上,2001 年是一个明显的界限。1987—2001 年间冰川面积减少了 389.26 km²,年均退缩率为 1.34%,明显高于祁连山的整体年均退缩率(0.99%);而 2001—2018 年间冰川年均退缩率仅为 0.87%。曹泊等^[9]对祁连山东段冷龙岭冰川的面积变化研究结果显示,该区域冰川在 2000—2007 年间的冰川退缩速率要慢于 1994—2000 年间。周祖昊等^[30]对苏干湖流域冰川的面积变化研究结果显示,该区域冰川在 2000—2013 年间的退缩速率减缓,而在 1989—2000 年间急剧退缩。由此可见,进入 21 世纪以来,祁连山冰川退缩速度明显放缓。

表 1 1987—2018 年祁连山冰川面积统计结果

Table 1 Statistics of glacier areas in Qilian Mountains from 1987 to 2018

年份	冰川总面积/km ²	变化面积/km ²	年均变化/(km ² ·a ⁻¹)	年均变化率/(%·a ⁻¹)
1987	2 080.39	—	—	—
1991	1 939.12	-141.27	-35.32	-1.70
1997	1 805.65	-133.47	-22.25	-1.15
2001	1 691.13	-114.51	-28.63	-1.59
2007	1 619.26	-71.87	-11.98	-0.71
2013	1 531.21	-88.05	-14.68	-0.91
2018	1 442.09	-89.12	-17.82	-1.16

注:年均变化率=面积变化量/(原始面积×时间间隔)×100%^[11]。

3.2 随海拔区间分布及其变化

山体的海拔是否超过冰川平衡线(或雪线)高度及两者之间的相对高度差是决定山地冰川数量及规模的主要因素^[31]。为研究冰川分布及变化与海拔之间的关系,本文以 200 m 为间隔,统计了各

个时段冰川面积及变化量随高度的分布情况(图 2)。结果显示,从 4 500 m 起算,随着海拔的增高,七个时期的冰川面积均呈现先增加后减少的分布规律,而且都在 4 900~5 100 m 的高度带内达到峰值,约占总面积的 30%;而海拔在 5 500 m 以上的

冰川占比均不足1%。形成这种分布的主要原因是气温随着海拔升高而逐渐下降,低温有利于冰川的发育;但海拔达到一定的数值后,可供冰川发育的附着面减少,所以冰川面积减少。

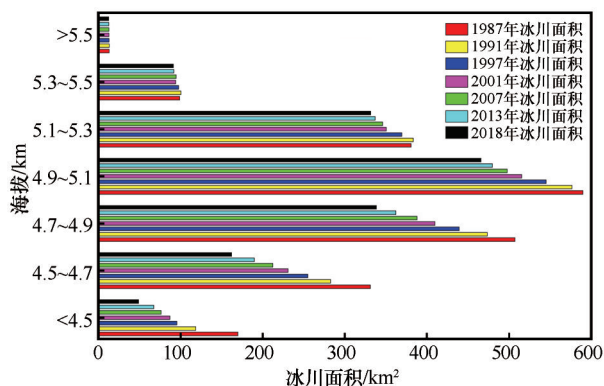


图2 祁连山冰川面积在不同海拔区间内的分布情况
Fig. 2 The distribution of glacier areas in different altitude zones in Qilian Mountains

冰川面积变化的海拔分布以5 100 m为分界线(表2)。当海拔低于5 100 m时,冰川面积均表现为随时间推移而退缩,且海拔越低年减少率越大,但超过5 100 m后冰川面积基本上保持不变,甚至增加。因此低于5 100 m的面积占比随时间推移逐渐减少。导致这种分布的原因是低海拔冰川的厚度较薄,对气候变化更加敏感^[7],且低海拔位置本身温度相对较高。此外,我们获取了祁连山1987–2018年七个时期的冰川中值高度(自上而下将冰川面积二等分所对应的等高线高程^[32]),依次为4 913、4 936、4 945、4 949、4 957、4 965 m和4 978 m。已有学者^[33]基于世界冰川目录(Word Glacier Inventory, WGI)数据统计发现冰川物质平衡线高度(Equilibrium-line Altitude, ELA)与中值高度有极高的相关性($R=0.998$, $P=0.01$)。基于该结论可看出31年间冰川物质平衡线高度逐渐上升。

表2 祁连山冰川面积在不同海拔区间内的变化情况

Table 2 The change of glacier areas in different altitude zones in Qilian Mountains

海拔/km	1987 – 1991 年		1991 – 1997 年		1997 – 2001 年		2001 – 2007 年		2007 – 2013 年		2013 – 2018 年	
	变化量/ km ²	年变化率/ (%·a ⁻¹)	变化量/ km ²	年变化率/ (%·a ⁻¹)	变化量/ km ²	年变化率/ (%·a ⁻¹)	变化量/ km ²	年变化率/ (%·a ⁻¹)	变化量/ km ²	年变化率/ (%·a ⁻¹)	变化量/ km ²	年变化率/ (%·a ⁻¹)
<4.5	-51.10	-7.53	-23.02	-3.24	-8.63	-2.26	-10.68	-2.05	-8.90	-1.94	-18.57	-5.51
4.5~4.7	-48.44	-3.66	-27.82	-1.64	-24.07	-2.36	-18.43	-1.33	-22.63	-1.78	-27.61	-2.91
4.7~4.9	-33.65	-1.66	-34.40	-1.21	-29.38	-1.67	-21.88	-0.89	-25.71	-1.10	-23.77	-1.31
4.9~5.1	-13.21	-0.56	-31.57	-0.91	-29.77	-1.37	-17.48	-0.57	-18.20	-0.61	-13.85	-0.58
5.1~5.3	2.69	0.18	-13.95	-0.61	-18.89	-1.28	-4.55	-0.22	-9.04	-0.44	-5.37	-0.32
5.3~5.5	1.59	0.40	-2.73	-0.45	-3.62	-0.93	0.54	0.10	-2.84	-0.50	-0.62	-0.13
>5.5	0.17	0.32	-0.34	-0.42	-0.20	-0.39	0.11	0.15	-0.26	-0.33	-0.02	-0.03

3.3 随冰川朝向分布及其变化

冰川朝向可通过地形坡向获取,一般分为8个方位,即正北、东北、正东、东南、正南、西南、正西和西北。本文结合SRTM DEM生成的坡向数据和冰川边界数据获取了祁连山冰川朝向分布。考虑到坡向是循环性变量,我们参考Davis等^[34]的做法,先获取每条冰川的平均坡向,再统计8个坡向上各自分布的冰川面积量,结果如图3和表3所示。在7个时间点,祁连山冰川面积在各个坡向上的分布并不相同。整体而言,北坡(包括西北、正北和东北方向)冰川面积大于南坡,东坡冰川面积大于西坡。分布在正北和东北方向的冰川均占当年冰川总面积的40%和20%左右,而东南方向仅占3%左右。祁连山由众多西北–东南走向的山脉和宽谷组成,使得正北和东北朝向接收到的太阳辐射较

少,温度偏低,有利于冰川的发育,而南方向则由于太阳辐射作用强而抑制了冰川发育。另外,青藏高原中部海拔较高,不利于水汽往祁连山南坡输送,这也是祁连山南坡和东南坡冰川分布较少的原因之一^[14]。

从各个时期间的冰川面积变化来看,31年来祁连山各坡向上的冰川面积均在减少,然而减少速度却相差较大。从绝对退缩量来说,正北和东北方向最多,东南方向最少,依次为212.56 km²、179.99 km²、18.23 km²。从退缩百分比来说,则东北方向、正南方向、正东方向和东南方向较大,正北方向较小,依次为38.98%、38.31%、35.79%、31.63%、25.15%。究其原因,可能是东北方向的地势较低,使得该方向温度比海拔较高的西南方向高,且东南方向太阳辐射较为严重^[14]。

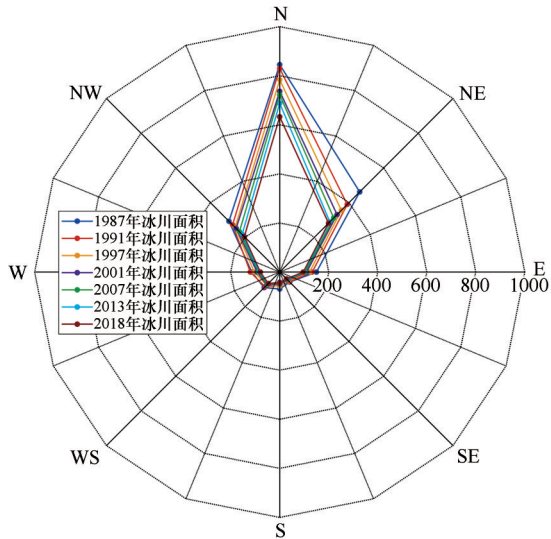


图3 祁连山冰川面积在不同朝向的分布情况
Fig. 3 The distribution of glacier area in different aspects in Qilian Mountains

表3 祁连山冰川面积在不同朝向的分布情况
Table 3 The distribution of glacier area in different aspects in Qilian Mountains

朝向	不同年份的冰川面积/km²						
	1987年	1991年	1997年	2001年	2007年	2013年	2018年
正北	845.22	829.80	783.64	736.68	722.13	687.88	632.66
东北	461.71	389.58	355.82	330.96	311.64	289.18	281.73
正东	149.80	132.78	122.00	109.85	104.60	99.69	96.19
东南	57.63	55.93	50.81	46.55	44.96	43.92	39.40
正南	69.05	54.42	56.94	48.45	44.37	41.71	42.60
西南	89.73	84.72	75.12	74.98	72.11	68.33	66.09
正西	114.16	119.95	103.83	92.19	86.77	83.68	79.09
西北	292.80	271.86	257.41	251.44	232.65	216.85	204.32

表4 祁连山冰川数量和面积在不同规模区间内的分布情况
Table 4 The distribution of glacier numbers and areas in different scale zones in Qilian Mountains

冰川规模/ km²	1987年		1991年		1997年		2001年		2007年		2013年		2018年	
	数量/条	面积/km²	数量/条	面积/km²	数量/条	面积/km²	数量/条	面积/km²	数量/条	面积/km²	数量/条	面积/km²	数量/条	面积/km²
<0.1	331	21.35	441	28.96	608	36.61	767	41.77	840	43.00	962	46.63	1 088	44.35
0.1~0.5	1 349	357.00	1 356	341.67	1 269	312.67	1 170	286.07	1 130	277.77	1 057	259.13	986	243.71
0.5~1.0	508	349.88	428	296.91	378	263.05	340	236.51	320	224.47	302	211.83	263	184.09
1.0~2.0	273	384.29	252	357.37	236	334.45	229	324.41	215	305.52	203	289.71	190	267.03
2.0~5.0	177	530.06	162	487.13	147	439.77	134	399.15	129	380.35	119	356.52	119	352.57
5.0~10.0	31	213.29	30	204.55	30	200.75	30	199.71	30	199.23	27	180.85	25	166.55
>10.0	15	224.52	15	222.52	15	218.35	14	203.52	13	188.92	13	186.52	13	183.78
合计	2 684	2 080.39	2 684	1 939.12	2 683	1 805.65	2 684	1 691.13	2 677	1 619.26	2 683	1 531.21	2 684	1 442.09

4 误差分析与讨论

4.1 误差分析

对遥感手段获取的冰川边界进行检验，常用方

3.4 冰川规模分布及其变化

冰川规模决定了冰川面对外部环境变化的自我调节能力，也是影响冰川退缩的一个重要客观因素。本文将祁连山冰川面积划分为7个等级，统计各等级中冰川的数量和面积(表4)。我们发现祁连山各个时期的冰川数量均以单个面积在0.1~0.5 km²之间的为主，占据总数量的40%以上。小型冰川数量上占据优势，但总面积占比却较低。各个时期0.1~0.5 km²冰川的面积只占总面积的17%左右。2~5 km²冰川的数量虽然只占5%左右，但其面积却占总面积的25%左右。

随着时间的推移，各等级中冰川的数量呈现不同的变化。1987-2018年，小于0.1 km²的冰川数量一直增加，到2018年已经超过1 000条，大余其它等级的数量；0.1~5.0 km²的冰川数量有不同程度的递减；大型冰川数量只有细微变化。各等级中冰川面积的变化规律和冰川数量类似。在31年间，小于0.1 km²冰川的面积以0.74 km²·a⁻¹的速度增加；0.1~0.5 km²、0.5~1.0 km²、1.0~2.0 km²、2.0~5.0 km²的冰川的面积则分别以-3.65、-5.35、-3.78、-5.73、-1.51、-1.31 km²·a⁻¹的速度减少。小型冰川的数量和面积逐渐增加是由于较大冰川退缩或裂解成多个小型冰川。而中大型冰川处于较为稳定的状态，数量及面积变化均较微小。在各个时期0.5~1.0 km²的冰川的退缩率最高(10%左右)，说明这种规模的冰川对气候变化响应最为迅速。

法有三种：一是地面实地测量获得冰川边界进行验证；二是基于已发表的同类研究成果进行验证；三是利用更高分辨遥感影像的解译结果进行验证。由于祁连山地形复杂、气候恶劣等原因难以开展大

规模实地考察,因此本文采用后两种方法进行结果检验。

4.1.1 与已有研究结果进行对比

第二次冰川编目是在科技部专项支持下,由中国冰川学者利用遥感和GIS方法历时数年完成。相关成果已上传至基金委国家地球系统科学数据平台(<http://westdc. westgis. ac. cn/>)。一般认为第二次冰川编目成果可较为真实地反映中国冰川在2004–2011年间的分布。2015年,孙美平等^[13]基于第二次冰川编目成果指出祁连山冰川面积为 $(1\,597.81 \pm 70.30) \text{ km}^2$ 。在祁连山地区,基于2006年、2007年、2009年Landsat影像编目的冰川数各占总数的49.11%、34.44%和17.32%。因此可大致认为第二次编目给出的祁连山冰川面积对应时间为2006/2007年。本文获取的2007年祁连山冰川面积为 $1\,619.26 \text{ km}^2$ (表1),与第二次冰川编目仅相差 21.45 km^2 (1.34%),在其误差范围内($1\,527.51 \sim 1\,668.11 \text{ km}^2$)。对冰川条数而言,第二次编目结果为2 684条,其中有2 299条的冰川面积小于 1.0 km^2 ;本文获取的总条数为2 677条,面积小于 1.0 km^2 的有2 290条,结果差别甚微。对冰川朝向而言,结果相差也非常小。本文的冰川朝向结果与孙美平等^[13]的结果基本一致,都显示冰川在北、东北和西北方向分布较多,在东南方向分布最少。孙美平等^[13]的结果还表明,在1956–2010年间祁连山冰川的整体退缩率为20.88%。在选取与其较为一致的时段后,本文的结果显示1987–2007年间祁连山冰川整体退缩率为22.17%,该结果与孙美平等的结果也较为一致。2014年Tian等^[12]获取的2010年祁连山冰川面积为 $1\,575.8 \text{ km}^2$,本文获取的2007年、2013年冰川面积分别为 $1\,619.26 \text{ km}^2$ 和 $1\,531.21 \text{ km}^2$,若假设2010年冰川面积为2007年和2013年均值,则结果为 $1\,575.24 \text{ km}^2$,与Tian等^[12]的结果仅相差 0.56 km^2 。同时Tian等^[12]的结果还表明祁连山冰川面积在1956–2010年间共退缩了 $(30 \pm 8)\%$,本文获取的1987–2018年冰川面积退缩率(30.68%)也与其基本一致。2016年Wang等^[6]获取的祁连山大雪峰和党河南地区1957/1966年、1994年、2000年和2010年冰川面积分别为 332.5 、 309.2 、 292.7 km^2 和 275.3 km^2 。在相同区域,本文获取的2001年冰川面积为 293.0 km^2 ,二者之间仅相差 0.3 km^2 。2017年周祖昊等^[30]获取的祁连山苏干湖流域2013

年冰川面积为 314.05 km^2 。在相同区域,本文获取的2013年冰川面积为 298.62 km^2 ,二者相差了 15.43 km^2 (4.91%)。较大的差异可能由影像源不同导致。本文采用的是2013年Landsat-8 OLI影像,而周祖昊等^[30]采用的是2013年Landsat-7 ETM+影像。此外,李虹蓉等^[14](2017)获取的祁连山1987年冰川面积为 $2\,072.70 \text{ km}^2$,而本文相应结果为 $2\,080.39 \text{ km}^2$,二者仅相差 7.69 km^2 (0.37%)。同时李虹蓉等^[14]的结果还表明祁连山冰川面积在1987–2015年间共退缩了27.3%,本文获取的1987–2018年冰川面积退缩率(30.68%)也与其较为一致。总的来说,和已有工作的对比表明本文的结果较为可靠。

4.1.2 与高分辨率遥感结果对比

本文还从GF-1、GF-2、ZY3-01、ZY3-02影像上获取了祁连山六个子区域(具体区域位置可见图4和表5)的冰川面积,与基于同年Landsat影像的冰川面积对比,最大差异仅为2.46%。统计结果详见表5。从这些检验结果来看,本文基于Landsat影像提取的冰川边界较为可靠。

冰川面积提取的不确定性可由如下公式估计^[35]:

$$\delta = \frac{1}{2} \times l \times r \quad (1)$$

式中: δ 为冰川边界误差; l 为冰川轮廓长度; r 为遥感影像分辨率。假设冰川识别精度为1个遥感像元大小^[36](从上述检验结果来看,此假设较为保守),本文7个时期的冰川面积不确定性分别为117.33、112.09、110.72、54.15、100.86、53.66 km^2 和51.34 km^2 ,引起的1987–2018年间冰川退缩率的不确定性为5.89%。

4.2 祁连山冰川变化对气候变化的响应分析

夏季均温和年降水是影响冰川形成、发育和退缩的主要因子^[30]。气象意义上的夏、冬季节是根据月平均气温是否大于 0°C 来进行划分^[37]。本文得到了1961–2018年祁连山冰川区域的夏季均温、年降水时间序列分布,如图5所示。近58年来祁连山冰川区域的夏季均温和年降水均呈现上升趋势,平均增速分别为 $0.35^\circ\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $19.6 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。从气温和降水的变化特征可以明显看出祁连山气候已经由冷干向暖湿转变,与施雅风等^[38]的西北气候转型结论相一致。

在分析气候要素与冰川变化关系时,需要考虑到冰川变化的滞后性。当前冰川变化可能是对数

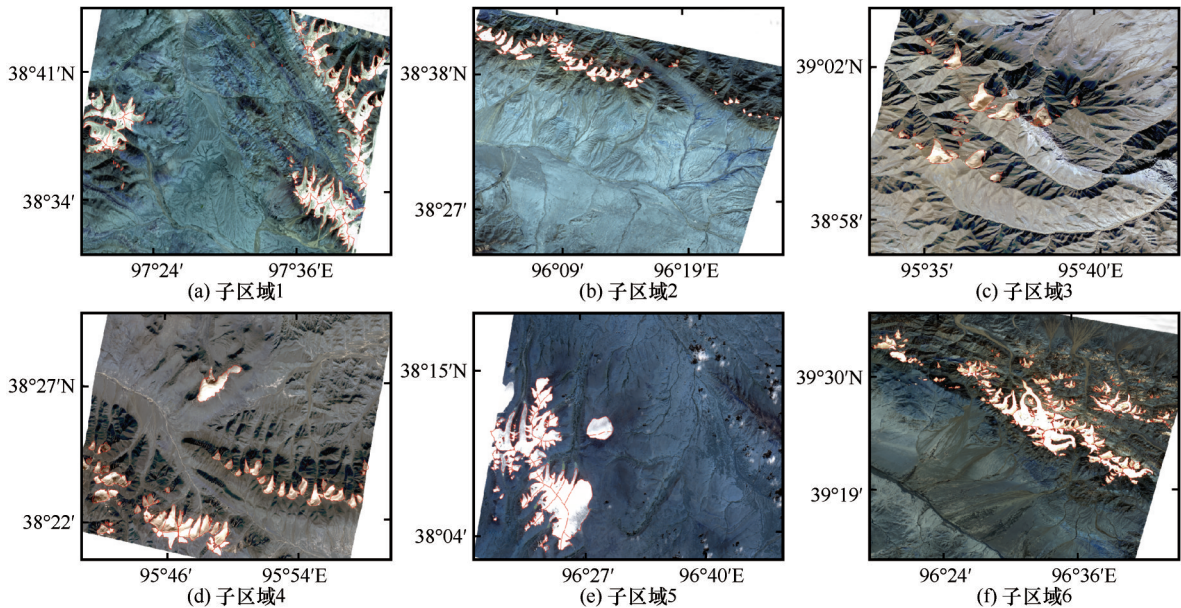


图 4 用于冰川边界精度验证的子区域

Fig. 4 The areas where accuracy evaluation of glacier boundary were performed

表 5 基于高分辨率影像的冰川边界精度验证结果

Table 5 The results of accuracy evaluation of glacier boundary based on high resolution images

子区域	经度/E	纬度/N	海拔/m	影像	面积/km ²	差别/km ²	比率/%
1	97. 31° ~ 97. 74°	38. 51° ~ 38. 76°	4 400 ~ 5 500	Landsat	87. 38	0. 98	1. 13
				GF-1	86. 40		
2	96. 04° ~ 96. 46°	38. 40° ~ 38. 69°	4 600 ~ 5 550	Landsat	33. 10	-0. 66	-1. 95
				GF-1	33. 76		
3	95. 50° ~ 95. 75°	38. 92° ~ 39. 05°	4 550 ~ 5 200	Landsat	5. 02	-0. 05	-1. 00
				GF-2	5. 07		
4	95. 67° ~ 96. 01°	38. 34° ~ 38. 48°	4 650 ~ 5 450	Landsat	28. 30	0. 68	2. 46
				GF-2	27. 62		
5	96. 33° ~ 96. 76°	38. 03° ~ 38. 30°	4 600 ~ 5 700	Landsat	120. 71	-0. 97	0. 80
				ZY3-01	121. 68		
6	96. 29° ~ 96. 73°	39. 23° ~ 39. 58°	4 300 ~ 5 450	Landsat	121. 99	-2. 72	-2. 18
				ZY3-02	124. 71		

年前气候要素变化响应的结果。1992 年王宁练等^[25]指出北半球的山地冰川前端变化约滞后于气候 12 ~ 13 年。我们可用的祁连山气候数据始于 1961 年，比冰川面积统计第一期(1987 年)早了 26 年，可以讨论冰川面积变化与气候变化之间的关系。我们采用王宁练等^[25](1992 年)提出的逐年滑动法计算滞后性，即从 1961 - 1987 年间任选某一年开始计算与冰川面积获取年份间隔相同的 7 个年均温和夏季均温值，再分别计算两者与冰川面积的相关性，根据相关性最大的年份来确定滞后时间。结果显示年均温和夏季均温与冰川面积相关性最高的年份均是 1976 年，相关系数分别为 0. 83 和

0. 94。因此可认为祁连山冰川面积变化滞后时间为 11 年。该结果与田洪阵等^[18](2013 年)得到的基本相同。同时也证明了夏季均温对冰川的影响比年均温大。由于某年的冰川变化可能受多年气候的影响，本文仅考虑了两期冰川之间的时间段。依据 11 年的滞后期，我们提取各个冰川面积获取时段所对应的气候参数区间为 1976 - 1980 年、1981 - 1986 年、1987 - 1990 年、1991 - 1996 年、1997 - 2002 年和 2003 - 2007 年。1987 年冰川面积则对应 1973 - 1976 年间的夏季均温和年降水。用于冰川面积变化响应分析的夏季均温和年降水分布如图 6、图 7 所示。

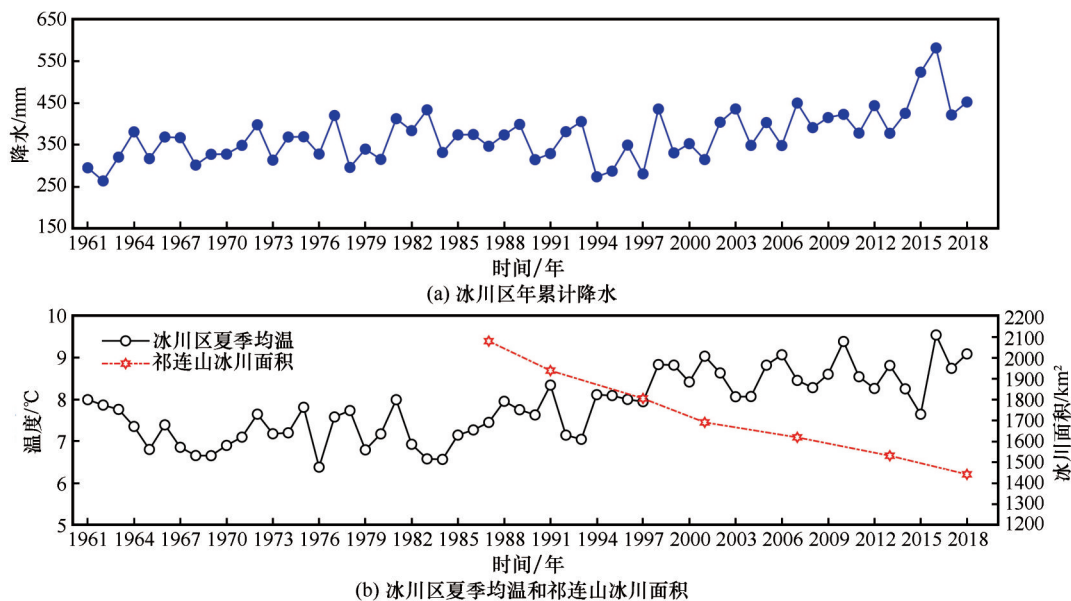


图5 1961—2018年间祁连山冰川区域内夏季均温和年降水量以及1987—2018年间祁连山冰川面积
Fig. 5 The summer mean temperature and annual precipitation of Qilian glacier areas during the period of 1961—2018 and the glacier area in the Qilian Mountains during the period of 1987—2018

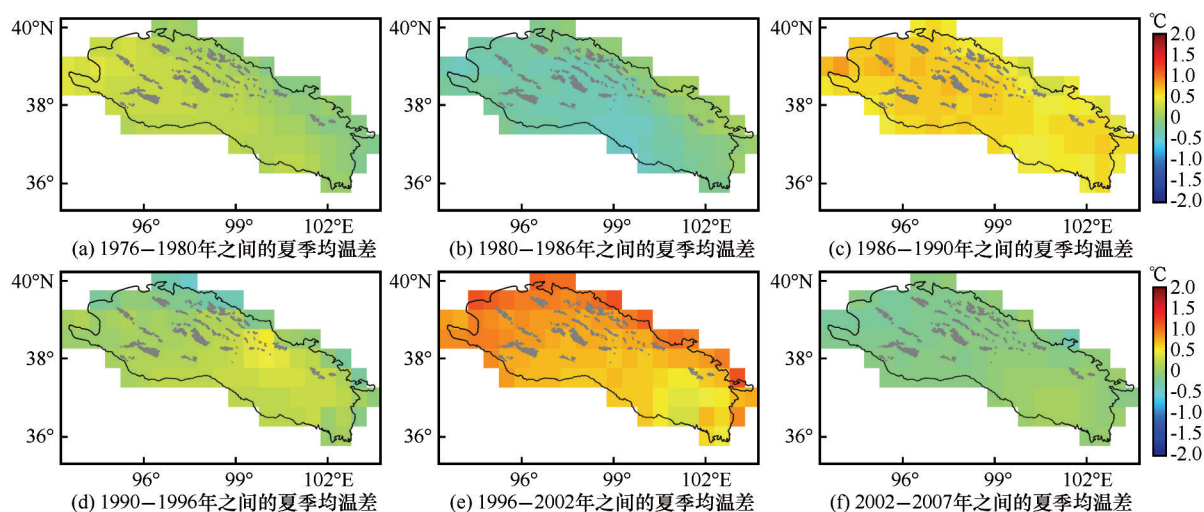


图6 祁连山地区不同年份之间的夏季平均气温差变化

Fig. 6 The changes of average summer temperature over different periods in Qilian Mountains

1973—2007年间祁连山冰川区夏季均温的上升速率为 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。1986—1990年、1996—2002年这两个时段内的夏季增温最为明显，分别达到 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。1980—1986年、2002—2007年这两个时段内夏季均温有所降低，但是幅度很小，分别为 $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $-0.003\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。1973—2007年间祁连山冰川区的年降水量变化也较为明显。1976—1980年和1986—1996年两个时段内降水较少，其余时段则增加，尤其是1997—2007年，增幅达 $6.0\text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

我们的结果显示1987—1991年间祁连山冰川

退缩最为严重，速率达到了 $35.32\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ 。在对应的时段内（1976—1980年）夏季均温升高了 $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年降水几乎无变化。1980—1986年间夏季均温下降了 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年降水增加了 45.31 mm 。对应时段内（1991—1997年）的冰川退缩速率（ $22.25\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ ）有了较大的回落。1986—1990年间夏季气温又升高了 $0.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年降水减少了 26.68 mm 。对应时段内（1997—2001年）的冰川退缩速率（ $28.63\text{ km}^2\cdot\text{a}^{-1}$ ）再次增加。1990—1996年间夏季均温仅升高了 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，年降水减少了 20.80 mm 。对应时段内（2001—2007年）的冰川退

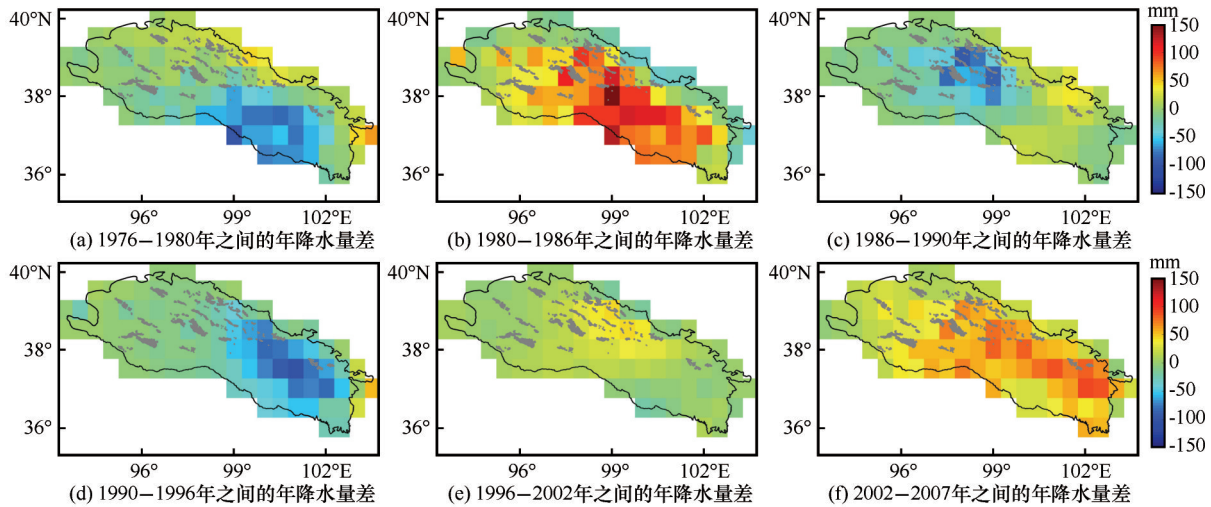


图7 祁连山地区不同年份之间的年均降水变化

Fig. 7 The changes of annual precipitation over different periods in Qilian Mountains

缩率($11.98 \text{ km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$)为所有时段最低。由此可见,夏季气温增加及年降水减少的气候条件最有利于冰川的消融。但相比之下,冰川对气温升高的响应要灵敏得多。微小的气温升高都能引起冰川较为显著的退缩。因为气温的变化会直接影响冰川物质消融和积累速度,而冰川降水增加引起物质累积则需要一个过程。在1996—2007年间,虽然降水增多,但夏季气温也在升高,冰川因而呈现出了加速退缩的态势。

5 结论

全球气候变暖已经是不争的事实,在此背景下研究冰川的动态变化对生态环境和人类生产生活的影响具有重要意义。考虑到现有祁连山冰川变化研究的区域及时间分辨率有待提高,本文对整个祁连山地区的冰川变化进行了长时间序列研究,结果表明:

(1)近30年来,祁连山冰川整体上呈现退缩趋势。冰川面积已经从1987年的 $2\,080.39 \text{ km}^2$ 缩减到2018年的 $1\,442.09 \text{ km}^2$,面积缩减了(30.68 ± 5.89)%。1987—2001年间的冰川面积年均退缩率为1.34%,而2001—2018年间仅为0.87%。由此可见,祁连山冰川退缩速度在21世纪后开始放缓。

(2)祁连山冰川主要分布在海拔 $4\,900 \sim 5\,100 \text{ m}$ 间。冰川退缩率随海拔的升高而下降,尤其是当海拔超过 $5\,100 \text{ m}$ 后,冰川面积无明显退缩。1987—2018年间的七个时期的冰川中值高度数值表明,祁连山的冰川物质平衡线高度在逐渐上升。

(3)祁连山冰川数量以单个面积在 $0.1 \sim$

0.5 km^2 间的为主,冰川面积以 $2 \sim 5 \text{ km}^2$ 间的为主。近30年间不同规模冰川的数量变化形式不同,小于 0.1 km^2 的在增加, $0.1 \sim 10.0 \text{ km}^2$ 的有不同程度的递减,而大于 10.0 km^2 的无明显变化。各时期内的 $0.5 \sim 1.0 \text{ km}^2$ 的冰川的退缩率最高,可见这种规模的冰川对气候变化的响应较为迅速。

(4)祁连山冰川分布坡向结果显示,北坡冰川面积大于南坡,东坡冰川面积大于西坡。近30年间祁连山各坡向上的冰川面积均在减少,但正北和东北方向冰川的绝对退缩量最多,而东南方向最少。

(5)祁连山冰川面积变化与气温间存在11年的滞后时长。在考虑冰川变化的滞后性后,对比各时期内的冰川变化率与夏季均温差和年均降水发现,祁连山冰川的年变化率与夏季均温有较好的对应关系,且在高温、少雨的条件下冰川融化速率较快。

致谢:感谢美国地质调查局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>)提供Landsat历史影像和数字高程模型产品;感谢中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供气温和降水的日值、月值的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点数据集;感谢泛第三极大数据系统(<http://data.tpdac.cn/zh-hans/>)提供祁连山边界和流域边界。

参考文献(References):

- [1] Li Dan. Evaluation of water resources sustainable utilization based on water ecological footprint theory-A case of Hexi inland river basin, China[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2014. [李丹. 基于水生态足迹的水资源可持续利用评价——以河西内陆河流域为例[D]. 兰州: 西北师范大学,

2014.]
- [2] Shen Yongping, Liu Shiyin, Zhen Lili, et al. Fluctuations of glacier mass balance in watersheds of Qilian Mountain and their impact on water resources of Hexi Region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(3): 244 – 250. [沈永平, 刘时银, 甄丽丽, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(3): 244 – 250.]
 - [3] Zheng du, Lin Zhengyao, Zhang Xueqin. Process 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]. *地学前缘*, 2002, 9(1): 95 – 102.]
 - [4] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Tropical glacier and ice core evidence of climate change on annual to millennial time scales[J]. *Climatic Change*. 2003, 59(1): 137 – 155.
 - [5] Liu Shiyin, Shen Yongping, Sun Wenxin, et al. Glacier variation since the maximum of the Little Ice Age in the western Qilian Mountains, Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 227 – 233. [刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 227 – 233.]
 - [6] Wang Puyu, Li Zhongqin, Yu Guobin, et al. Glacier shrinkage in the Daxue and Danghenan ranges of the western Qilian Mountains, China, from 1957 to 2010 [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(2): 127.
 - [7] Bie Qiang, Qiang Wenli, Wang Chao, et al. Monitoring glacier variation in the upper reaches of the Heihe River based on remote sensing in 1960 – 2010[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(3): 574 – 582. [别强, 强文丽, 王超, 等. 1960-2010年黑河流域冰川变化的遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 574 – 582.]
 - [8] Chen Hui, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Change of glaciers in the central Qilian Mountain[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(4): 588 – 593. [陈辉, 李忠勤, 王璞玉, 等. 近年来祁连山中段冰川变化[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(4): 588 – 593]
 - [9] Cao Bo, Pan Baotian, Gao Hongshan, et al. Glacier variation in the Lenglongling range of eastern Qilian Mountains from 1972 to 2007 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(2): 242 – 248. [曹泊, 潘保田, 高红山, 等. 1972 – 2007年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(2): 242 – 248.]
 - [10] Pan Baotian, Cao Bo, Wang Jie, et al. Glacier variations in response to climate change from 1972 to 2007 in the western Lenglongling mountains, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology*, 2012, 58(211): 879 – 888.
 - [11] Wang Jing, Qin Xiang, Li Zhenlin, et al. Glaciers change detection from 2004 to 2015 in the Daxueshan, Qilian MTS[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2017, 32(3): 490 – 498. [王晶, 秦翔, 李振林, 等. 2004 – 2015年祁连山西段大雪山地区冰川变化[J]. *遥感技术与应用*, 2017, 32(3): 490 – 498.]
 - [12] Tian Hongzhen, Yang Taibao, Liu Qiping. Climate change and glacier area shrinkage in the Qilian mountains, China, from 1956 to 2010[J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 187 – 197.
 - [13] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: based on the revised first and second Chinese glacier inventory[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1402 – 1414. [孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近50年来祁连山冰川变化-基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. *地理学报*, 2015, 70(9): 1402 – 1414.]
 - [14] Li Hongrong, Yang Taibao, Tian Hongzhen, et al. Study on glacier retreat and future change trends in the Qilian Mountains during 1987 – 2015[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(30): 59 – 63. [李虹蓉, 杨太保, 田洪阵, 等. 1987 – 2015年祁连山冰川退缩及未来变化趋势研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(30): 59 – 63.]
 - [15] He Jing, Wang Ninglian, Chen Anan, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains, Northwest China, between the 1960s and 2015[J]. *Water*, 2019, 11(3): 623.
 - [16] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. The second Chinese glacier inventory: data, methods and results[J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357 – 372.
 - [17] Zhang Qiang, Zhang Jie, Sun Guowu, et al. Research on atmospheric water-vapor distribution over Qilianshan Mountains[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(4): 633 – 643. [张强, 张杰, 孙国武, 等. 祁连山山区空中水汽分布特征研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(4): 633 – 643.]
 - [18] Tian Hongzhen. Glacier area changes in the Qilian Mountains, China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. [田洪阵. 祁连山区现代冰川面积变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.]
 - [19] Yin Xianzhi, Zhang Qiang, Xu Qiyun, et al. Characteristics of climate change in Qilian Mountains region in recent 50 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2009, 28(1): 85 – 90. [尹宪志, 张强, 徐启运, 等. 近50年来祁连山区气候变化特征研究[J]. *高原气象*, 2009, 28(1): 85 – 90.]
 - [20] Shi Yafeng, Liu Shiyin. The calculation of Chinese glacier's response to the global climate warming in the 21st century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(4): 434 – 438. [施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估[J]. *科学通报*, 2000, 45(4): 434 – 438.]
 - [21] Cao Bo. Glacier changes in the Lenglongling Mountain, Eastern Qilian Shan, China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. [曹泊. 祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.]
 - [22] 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.]
 - [23] Zyl J J V. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography [J]. *Acta Astronautica*, 2001, 48(5): 559 – 565.
 - [24] Zhao Yufei, Zhu Jiang, Xu Yan. Establishment and assessment of the gird precipitation datasets in China for recent 50 years [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2014, 34(4): 414 – 420. [赵煜飞, 朱江, 许艳. 近50 a中国降水格点数据集的建立及质量评估[J]. *气象科学*, 2014, 34(4): 414 – 420.]
 - [25] Wang Ninglian, Zhang Xiangsong. Mountain glacier fluctuations and climatic change during the last 100 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 14(3): 242 – 250. [王宁练, 张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化[J]. *冰川冻土*, 1992, 14(3): 242 – 250.]
 - [26] Wang Gaofeng, Zhang Tingbin, Zhang Jianping, et al. Comparative study of glaciers information extraction method based on remote sensing image[J]. *Geospatial Information*, 2010, 8(3): 43 – 46. [王高峰, 张廷斌, 张建平, 等. 遥感影像的冰

- 川信息提取方法对比[J]. 地理空间信息, 2010, 8(3): 43–46.]
- [27] Andreassen L M, Paul F, Kääb A, et al. Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s[J]. *The Cryosphere*, 2008, 2(2): 131–145.
- [28] 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. [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.]
- [29] Li Hongrong. Glacier variation in Tergun Daba Qilian Mountains in the past 30 years, China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [李虹蓉. 祁连山吐尔根达坂地区近30年来的冰川变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]
- [30] Zhou Zuhao, Han Ning, Cai Jingya, et al. Variation characteristics of glaciers and their response to climate change in the Qilian Mountains: take the Suganhu basin as an example[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1172–1179. [周祖昊, 韩宁, 蔡静雅, 等. 祁连山区冰川演变特征及对气候变化的响应—以苏干湖流域为例[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6): 1172–1179.]
- [31] Shi Yafeng. Glaciers and their environments in China: the present, past and future[M]. Beijing: Science Press, 2000: 9–12. [施雅风. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2000: 9–12.]
- [32] Liu Zongxiang, Xie Zichu. Plotting of trend surface of firn line and median altitudes of glaciers in the interior water systems of the Tibetan Plateau and their main features[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(4): 356–359. [刘宗香, 谢自楚. 青藏高原内陆水系冰川粒雪线与中值高度趋势面的绘制与主要特征[J]. 冰川冻土, 1995, 17(4): 356–359.]
- [33] Braithwaite R J, Raper S C B. Estimating equilibrium-line altitude (ELA) from glacier inventory data[J]. *Annals of Glaciology*, 2009, 50(53): 127–132.
- [34] Davis J C. Statistics and data analysis in geology[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2002: 316–320.
- [35] Fujita K, Sakai A, Nuimura T, et al. Recent changes in Imja Glacial Lake and its damming moraine in the Nepal Himalaya revealed by in situ surveys and multi-temporal ASTER imagery[J]. *Environmental Research Letters*, 2009, 4(4): 1–7.
- [36] Hagg W, Mayer C, Lambrecht A, et al. Glacier changes in the Big Naryn basin, Central Tian Shan[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 40–50.
- [37] Zhang Xiangsong, Sun Zuozhe, Zhang Jinhua, et al. Some relationships of the fluctuation of glacier No. 1 with climate change at the Source of Urumqi River, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1984, 6(4): 1–12. [张祥松, 孙作哲, 张金华, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川的变化及其与气候变化的若干关系[J]. 冰川冻土, 1984, 6(4): 1–12.]
- [38] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219–226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219–226.]

Using remote sensing images to monitor the glacier changes in Qilian Mountains during 1987 – 2018 and analyzing the impact factors

WANG Yingzheng^{1,2}, LI Jia^{1,2}, WU Lixin^{1,2}, GUO Lei^{1,2}, LI Jianjiang^{1,2}

(1. School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Laboratory of GeoHazards Perception, Cognition and Prediction, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Glacier meltwater from Qilian Mountains plays an important role in maintaining the ecological balance in northwest China. In order to cognize the glacier change caused by climate warming in Qilian Mountains, we adopted Landsat images (TM, ETM+ and OLI) and band ratio threshold method to extract seven terms of glacier boundaries between 1987 and 2018, and interpreted the time series of glacier boundaries combining with topographic and climatic data. The results show: (1) During recent 31 years, the area of glacier in Qilian Mountains has shrank from 2 080.39 km² to 1 442.09 km², corresponding to an annual rate of 0.99%, which is significantly higher than the retreat rate (0.58%) from 1956 to 1990; (2) The equilibrium-line altitude has increased steadily during recent 31 years; (3) The glaciers are mainly distributed between 4 700 and 5 100 m a. s. l., and the intensity of glacier shrinkage increases as the altitude decreases; (4) About 93% glaciers have an area below 2.0 km²; the total number and area of glaciers small than 0.1 km² are increasing; (5) The glaciers between 0.5 km² and 1.0 km² experienced the fastest shrinkage, with an average annual retreat rate of 1.53%, while that larger than 10.0 km² experienced the slowest shrinkage, with an average annual retreat rate of 0.59%; (6) The glacier shrinkage in Qilian Mountains is mainly caused by the rise of summer temperature, and more importantly, the glacier shrinkage has intensified during the last decade.

Key words: Qilian Mountains; glacier shrinkage; remote sensing; Landsat; climate

(责任编辑: 王飞腾; 编辑: 周成林)