

1977-2017年萨吾尔山冰川变化及其对气候变化的响应

王炎强¹, 赵军¹, 李忠勤^{1,2}, 张明军¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 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/天山冰川站, 兰州 730000)

摘要: 利用1977年MSS和1989年、1998年、2006年TM及2017年OLI/TIRS遥感影像资料, 通过目视解译和GIS技术, 提取萨吾尔山地区五个时期的冰川信息, 同时对研究区周边气温降水的趋势性和周期性进行分析, 探讨该地区最近40年冰川对气候变化的响应。研究表明: (1)1977-2017年, 研究区冰川总面积减小了10.51 km², 退缩45.72%, 退缩速率为1.14% · a⁻¹, 且冰川处于加速退缩阶段; (2)冰川规模越小, 退缩越快; (3)南坡退缩速度最快, 东南坡和西南坡次之, 东北坡退缩最慢, 冰川退缩率在5°~40°坡度大体呈现随坡度增大而增加的趋势; (4)研究区正处于气温上升期, 降水增加期, 降水量增加幅度不能弥补由气温升高造成的冰川消融, 引起冰川退缩速率不断加快; (5)与其他因素主导区域的冰川相比, 研究区冰川退缩率较高, 面积较小的冰川占比较多是形成这一结果的另一因素。

关键词: 萨吾尔山; 冰川变化; 遥感; 气候变化

冰川是冰冻圈的重要组成部分^[1], 作为高山固体水库, 是极为重要的固态水储备资源, 其经过消融形成的河川径流对中下游干旱地区农业畜牧业的生存和发展有着极为重要的作用, 同时, 冰川在相当大程度上也影响着区域的生态环境和社会经济可持续发展^[2]。冰川变化是气候变化的产物^[3], 在全球整体气温缓步上升的大环境下, 中国西部的绝大部分冰川均呈现出不同程度的持续退缩, 尤其是近几十年更是处于加速退缩的状态, 许多小冰川已经或者即将消失。冰川的加剧退缩影响着水资源的时空演化和利用^[4], 在短期内会使河水径流增加, 但从长远和可持续发展的角度来看, 河川径流在将来很可能会大量减少^[5-7]。所以, 冰川变化情况对当地水资源以及生态环境有着严重影响。

从空间上来看, 受典型西风系统和印度季风控制的喜马拉雅地区冰川退缩, 西风地区的喀拉昆仑、西昆仑地区的冰川变化异常^[8]。近年来, 东帕米尔高原^[9]和西藏^[10]地区冰川还出现了冰崩情况。所以萨吾尔山作为受西风带北支控制的地区, 研究这一地区的冰川变化情况对于认识中国西部地区冰川变化的格局和揭示冰川变化的成因机制有着重要的科学意义。本文以萨吾尔山地区冰川为研究对象, 以多期Landsat MSS、TM和OLI/TIRS遥感影像作为数据源, 并结合已有的冰川编目数据, 研究冰川变化特征, 同时利用

收稿日期: 2018-07-09; 修订日期: 2018-12-03

基金项目: 国家重大科学研究计划(2013CBA01801); 国家自然科学基金项目(41471058, 41641003, 41601076); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA2006020103)

作者简介: 王炎强(1989-), 男, 山西运城人, 博士研究生, 主要从事环境遥感及GIS应用研究。

E-mail: wyyq0203@163.com

通讯作者: 赵军(1963-), 男, 山西河津人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态环境遥感与GIS应用研究。

E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

1961-2016年的年均气温、夏季平均气温及降水数据,探讨该地区最近40年冰川对气候变化的响应。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

萨吾尔山东西横跨中哈两国,是天山和阿尔泰山脉中部的过渡段。该山脉不仅是新疆内陆与北冰洋水系极为明显的分水岭^[11-12],还是准噶尔盆地西部山地中最北部最高的一条山脉^[13](图1);位于47°N左右,呈东西走向,是一个不对称的断块山地,南坡陡而北坡缓,主峰木斯套峰海拔3835 m,向东渐低,向平原倾没。该山区积雪期约100天左右,一般年份积雪深70~80 cm。海拔2500~3835 m地带的冬雪可以残存至夏季融化。冰川消融季末大约在每年的8、9月份。中国境内的萨吾尔山北坡平均雪线3310~3350 m,南坡平均雪线3660 m左右。

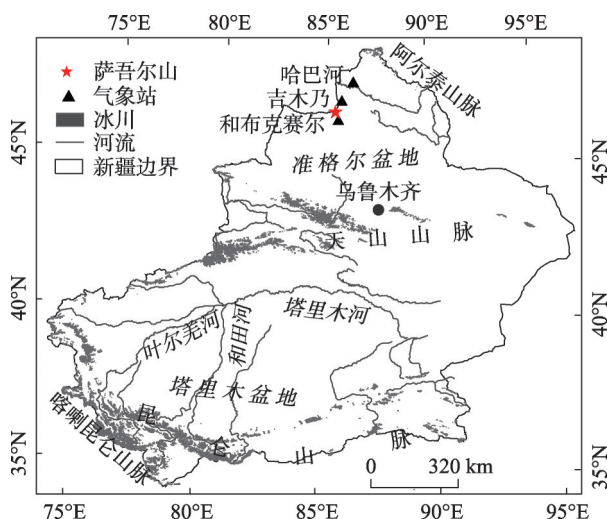


图1 萨吾尔山位置

Fig. 1 Map showing the location of the Sawuer Mountain

1.2 数据来源

本文使用的1977年、1989年、1998年、2006年和2017年五个时期Landsat MSS、TM和OLI/TIRS数据来源于美国地质调查局网站(<http://www.usgs.gov/>)和美国马里兰大学网站(<http://glcf. umiacs.umd.edu/data/>),所下载的遥感影像数据产品经过系统辐射校正、地面控制点几何校正和利用DEM进行的地形校正。为了减少积雪和云量对提取冰川边界的影响,尽量选取了8、9月份无云少积雪的影像(表1)。DEM来源于地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn/>)分辨率为90 m的SRTM(Shuttle Radar Topography Mission)数据。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网站(<http://cdc.cma.gov.cn/>)的中国地面气候资料数据集,选用研究区周边吉木乃、和布克赛尔和哈巴河三个气象站点近57年的年均气温数据、夏季平均气温(夏季均温)和年降水量数据(表2)。

1.3 冰川边界获取的方法

冰川边界提取常用方法主要有监督分类、非监督分类、雪盖指数和比值阈值等^[14],但目前提取冰川信息最为精确的方法仍然是人工解译。由于研究区冰川分布较少,为使获取的冰川边界更加精确,所以采用人工目视解译方法,并以冰川编目数据和Google Earth三维图像为参考,提取冰川边界(图2)。

1.4 小波分析

小波分析是一种信号的时间尺度调和分析方法,在时域和频域上同时具有良好的局部性,能够得到研究对象序列在不同时间尺度上的变化周期以及异常变化的规律,从而

表1 萨吾尔山遥感影像信息

Table 1 Images used in this study

ID	接受日期	传感器	分辨率/m	轨道号	云量/%	影像说明
LM21560271977246AAA03	1977-09-03	MSS	60	156/27	1	解译影像
LT41440271989237XXX01	1989-08-25	TM	30	144/27	0	解译影像
LT51450271998245BIK00	1998-09-02	TM	30	144/27	0	解译影像
LE71450272000227SGS00	2000-08-14	ETM+	30	145/27	0	参考影像
LT51450272006251IKR00	2006-09-08	TM	30	145/27	0	解译影像
LC81450272015196LGN01	2015-07-15	OLI/TIRS	30	145/27	0	参考影像
LC81440272017210LGN00	2017-07-29	OLI/TIRS	30	144/27	4	解译影像

为短期的气候预测提供科学依据^[15-16]。本文采用复值 Morlet 小波作为母小波函数：

$$\varphi(t)=e^{ict}\cdot e^{-t^2/2} \tag{1}$$

式中： c 为常数； i 为虚部； t 是小波变化位移。小波变换系数为：

$$W_f(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{+\infty}f(t)\varphi(\frac{t-b}{a})dt \tag{2}$$

式中： $W_f(a,b)$ 是小波变换系数； $f(t)$ 是时间序列； a 是分辨尺度因子（放大因子）； b 是平移因子； φ 是 $\varphi(t)$ 的复共轭函数^[17]。

小波方差图能够反映出研究对象随时间尺度的分布情况，同时可以确定在不同尺度扰动下时间序列的相对强度，其峰值所对应的尺度是该时间序列的主要尺度，从而确定时间序列中存在的主周期^[18]。

1.5 精度评估

冰川边界提取的精度通常主要受到传感器和图像配准误差这两个方面的影响^[19-21]。冰川面积提取的误差由 Hall 等^[19]提出的不确定公式计算：

$$a=2\lambda\cdot\sqrt{\lambda^2+\varepsilon^2} \tag{3}$$

式中： a 为提取面积误差； λ 为影像分辨率； ε 为配准误差（此处按 1 个像元计算）。计

表2 研究区气象站的基本信息

Table 2 Meteorological stations used in this study

站名	经度/E	纬度/N	海拔高度/m	资料时段/年
吉木乃	85°52′	47°26′	984	1961-2016
和布克赛尔	85°43′	46°47′	1292	1961-2016
哈巴河	86°24′	48°03′	533	1961-2016

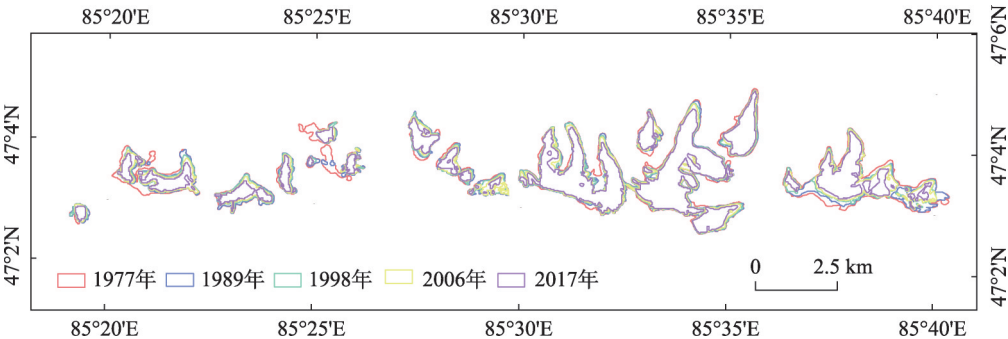


图2 萨吾尔山冰川边界分布

Fig. 2 Glacial border distribution in the Sawuer Mountain

算得出,提取的单条冰川面积误差为 $\pm 0.0025\text{ km}^2$ 。

2 结果分析

2.1 冰川面积变化分析

2.1.1 冰川面积变化特征

(1) 冰川面积总体变化

1977-2017年萨吾尔山地区的冰川呈现持续退缩状态,冰川面积由1977年的 23 km^2 减少到2017年的 12.49 km^2 ,面积退缩了 10.52 km^2 ,占到1977年总面积的45.72%,年均退缩速率为 $1.14\% \cdot \text{a}^{-1}$ (表3)。

表3 1977-2017年萨吾尔山冰川面积变化情况

Table 3 Glacier area variation of Sawuer Mountain from 1977 to 2017

时间/年	冰川面积/ km^2	时段/年	面积减少量/ km^2	面积退缩率/%
1977	23.00			
1989	20.02	1977-1989	2.98	12.96
1998	17.96	1989-1998	2.06	10.29
2006	16.06	1998-2006	1.90	10.58
2017	12.49	2006-2017	3.57	22.23
		1977-2017	10.52	45.70

(2) 不同时段冰川面积变化

冰川面积退缩速率在不同的时段上存在一定差异。1977-1989年,冰川年均退缩速率最慢,为 $1.08\% \cdot \text{a}^{-1}$;1989-1998年,冰川年均退缩速率为 $1.14\% \cdot \text{a}^{-1}$;1998-2006年,冰川年均退缩速率为 $1.32\% \cdot \text{a}^{-1}$;2006-2017年,冰川年均退缩速率最快,为 $2.02\% \cdot \text{a}^{-1}$ (表3)。由此可以看出,1977-2017年萨吾尔山地区退缩速率明显有逐渐加快的趋势,表明该区域冰川在近期处于一个加速退缩的阶段。

(3) 不同规模冰川面积变化

据萨吾尔山地区冰川面积的大小,将冰川分为五个等级,分别为 $\leq 0.1\text{ km}^2$ 、 $0.1\sim 0.5\text{ km}^2$ 、 $0.5\sim 1\text{ km}^2$ 、 $1\sim 5\text{ km}^2$ 及 $\geq 5\text{ km}^2$,统计各年份不同等级规模的冰川面积大小(图3)。结果显示,1977-2017年间,小于等于 0.1 km^2 的冰川面积先减小后增大, $0.1\sim 0.5\text{ km}^2$ 的冰川面积先增大后减小, $0.5\sim 5\text{ km}^2$ 的冰川面积先减小再增大再减小,大于等于 5 km^2 的冰川面积则是持续减小最终消失。结合对应年份研究区冰川条数可以看出(图3),不同规模冰川面积增加主要是由于比之更大规模的冰川经过消融后发生断裂,从而使较小规模冰川面积增大。

对1977-2017年单条冰川面积与其变化

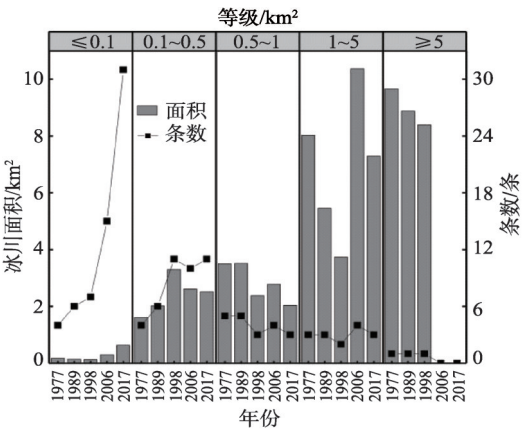


图3 不同规模冰川面积和条数分布

Fig. 3 Area and number distribution of glaciers of different sizes

率的关系进一步统计发现(图4),冰川面积退缩率随着冰川面积规模的增大而减小,并逐渐趋于稳定。同时也能看出,部分小冰川已经消失,1977年原有17条冰川,其中3条已经消失;较小面积规模的冰川退缩速率不同,可能与其所处地形有关,位于阴坡的冰川退缩速率相对较慢。

2.1.2 不同坡向、坡度的冰川面积变化

(1) 不同朝向冰川面积变化

按照不同的朝向对冰川面积进行统计(图5)。结果显示:1977-2017年间,研究区各坡向的冰川均处于退缩状态,但各坡向退缩率又存在一定差异。其中,南坡冰川退缩最为严重,退缩率高达85.42%;东南坡和西南坡次之,退缩率分别为84.91%和84.81%;东北坡的冰川退缩率最小,为30.97%;其次为北坡的冰川,退缩率为38.51%,其他冰川退缩率介于北坡和西南坡之间。冰川在偏北坡方向的分布具有明显的优势,而在偏南坡方向的冰川分布较少,其原因主要是偏北坡受到太阳辐射的影响相对较弱,较有利于冰川的发育和积累。

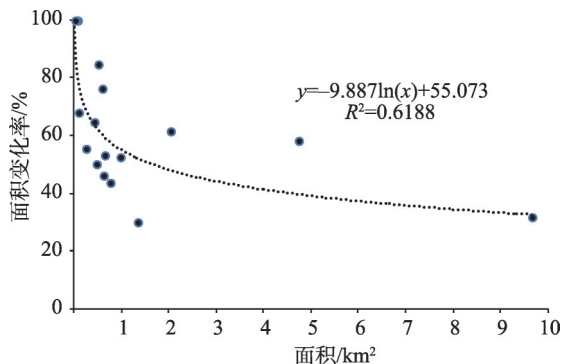


图4 1977-2017年单条冰川面积退缩率

Fig. 4 The proportion of single glacier retreat from 1977 to 2017

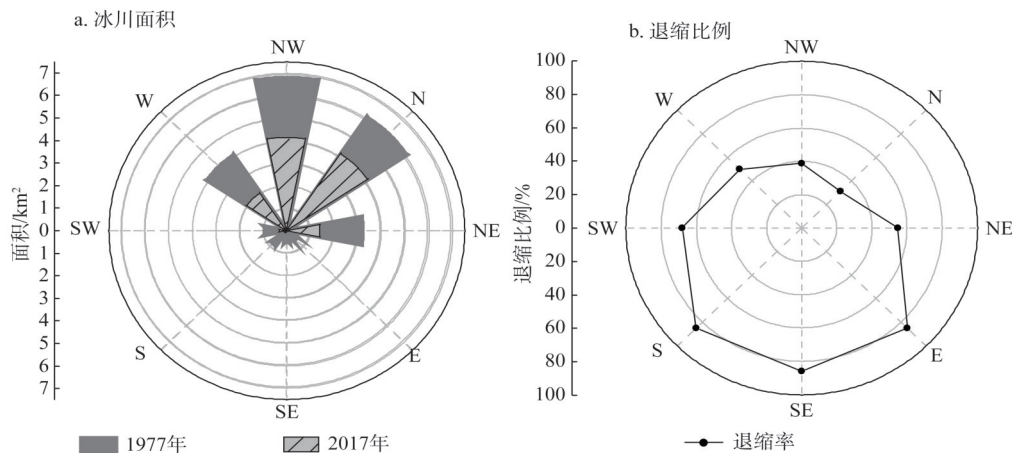


图5 1977-2017年不同坡向冰川面积分布及退缩比例

Fig. 5 Distribution and retreat rate of glaciers of different aspects during 1977-2017

研究表明,南坡、东南坡和西南坡冰川面积之所以退缩率较高,除与坡向有关外,各坡向上的冰川面积大小也是退缩率差异的主要影响因素。1977年南坡、东南坡和西南坡的冰川面积均不到0.8 km²,而北坡和东北坡冰川面积均大于6 km²,从而形成该地区南坡、东南坡和西南坡冰川高退缩率的现象。

(2) 不同坡度冰川面积变化

将冰川面积数据按照不同坡度等级分别进行统计,结果发现:冰川在坡度上的分布主要在5°~40°的7个等级上,占到总面积的91.05%;在<5°和>45°的坡度上冰川分布较少,分别占到总面积的5.17%和3.78%,表明该地区的冰川在地形较为平缓和较为陡峭的

区域分布较少。1977-2017年间,各坡度上的冰川均处于退缩状态,不同坡度上冰川退缩比例差异明显,其中在 $5^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 坡度范围内,冰川退缩速率大体呈现随坡度增大而增加的趋势。

2.2 气候变化及其对冰川变化的影响

2.2.1 气温和降水的变化

(1) 整体变化趋势

气温变化:1961-2016年,吉木乃、和布克赛尔和哈巴河三个站点年均气温和夏季均温升降浮动变化大体一致,都呈现出升高趋势,年均气温增温的倾向率分别为 $0.4^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,夏季均温增温倾向率分别为 $0.34^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 、 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$;在该时段内,这三个站点的年均气温均值分别为 4.27°C 、 3.86°C 和 4.95°C ,年均气温最低的两个值均出现于1969和1984年,夏季均温均值分别为 19.41°C 、 18.22°C 和 21.01°C ,夏季均温最低值均出现于1961年。从图7可以看出这三个站点的年均气温在1961-1969年都处于降低的变化趋势,1969年后持续上升。

降水变化:1961-2016年,吉木乃、和布克赛尔和哈巴河三个站点年降水量呈现略微增加的变化趋势,增加的倾向率分别为 $12.15\text{ mm}/10\text{ a}$ 、 $5.82\text{ mm}/10\text{ a}$ 和 $15.8\text{ mm}/10\text{ a}$,年降水量变化与年均气温变化相比较为平缓(图7)。

(2) 周期性分析

采用复值Morlet小波分析对各测站1961-2016年年均气温和年降水量的多时间尺度进行分析。

如图8所示,吉木乃、和布克赛尔和哈巴河三个站点的年均气温随着时间尺度的增加,周期性规律也越来越明显,在24年以上尺度,周期变化具有较好的连续性,经历了6个气温增大—减小的交替时期。从图9中可以看出,3个站点都在28年的时间尺度上出现第一主周期,其规律性最为明显,在图8中28年周期所对应的循环交替时期正处于自2012年或2013年开始的升温时期,且2016年年均气温增大的等值线还未达到最大值,此结论与在德国波恩召开的第二十三届联合国气候变化框架公约缔约方大会(UNFCCC COP 23)报告中,世界气象组织(WMO)提出的预计2013-2017年的全球平均气温将达到历史最高纪录的这一结果相吻合^[22]。综合分析说明,未来该地区及周边区域的气温很可能继续上升。

从图8中可以看出,3个站点的年降水量呈现一定差异,其周期变化具有较好的连续性,时间尺度分别表现为:吉木乃站为15~23年,和布克赛尔站为15~25年,哈巴河站为19~24年。由图9可以得出,吉木乃、和布克赛尔和哈巴河3个站点的第一主周期分别为18年、18年和23年,综合分析可知3个站点的年均降水量正处于增加时期,且未达到最大值,说明未来该地区及周边区域的年降水量很可能会继续略有增加。

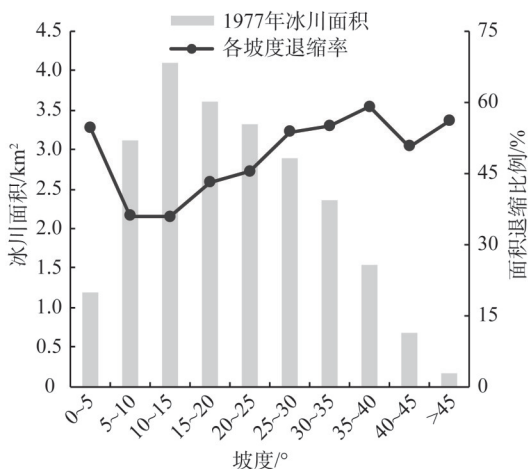


图6 1977-2017年不同坡度冰川分布及退缩率
Fig. 6 Distribution and retreat rate of glaciers of different slopes during 1977-2017

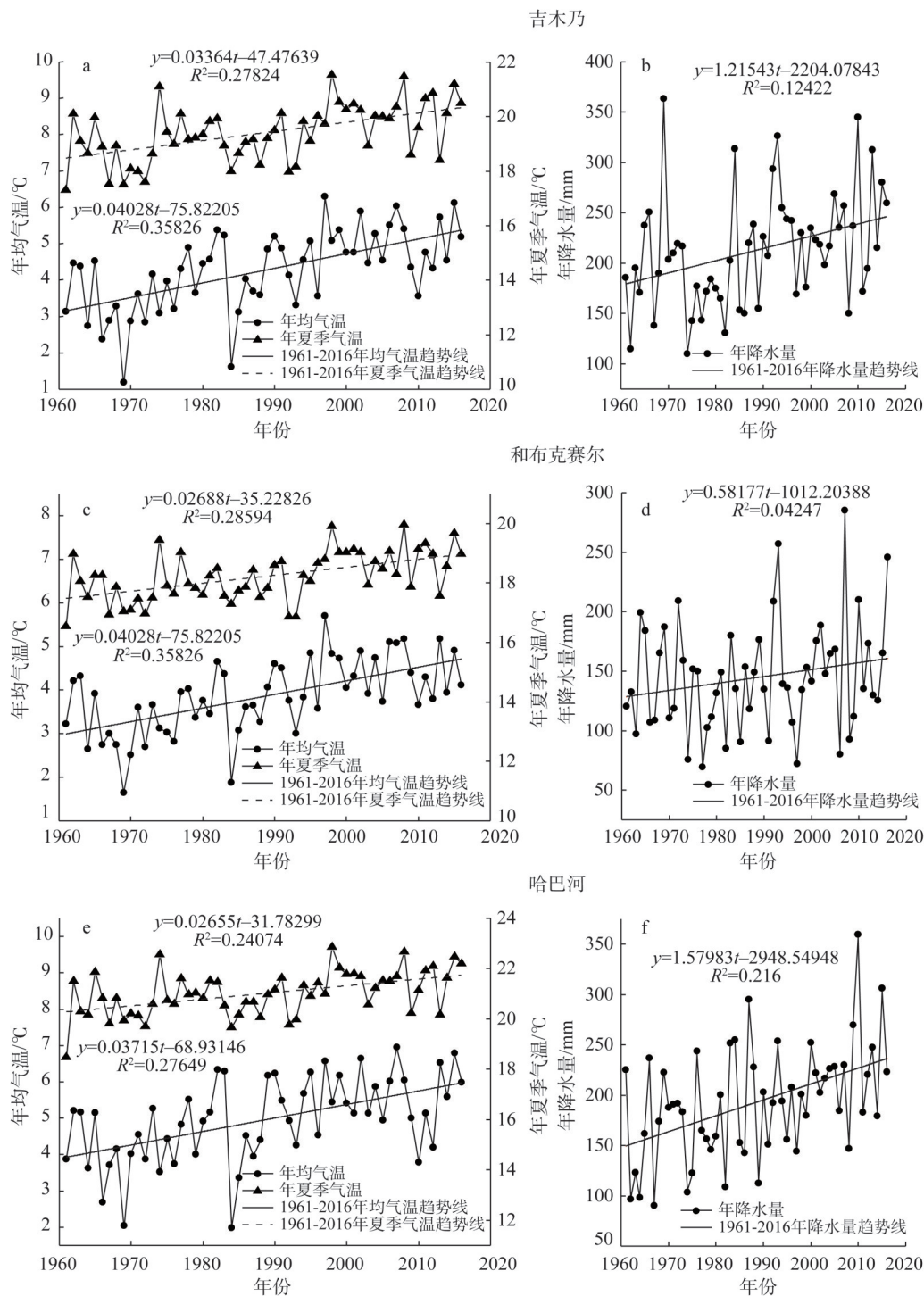
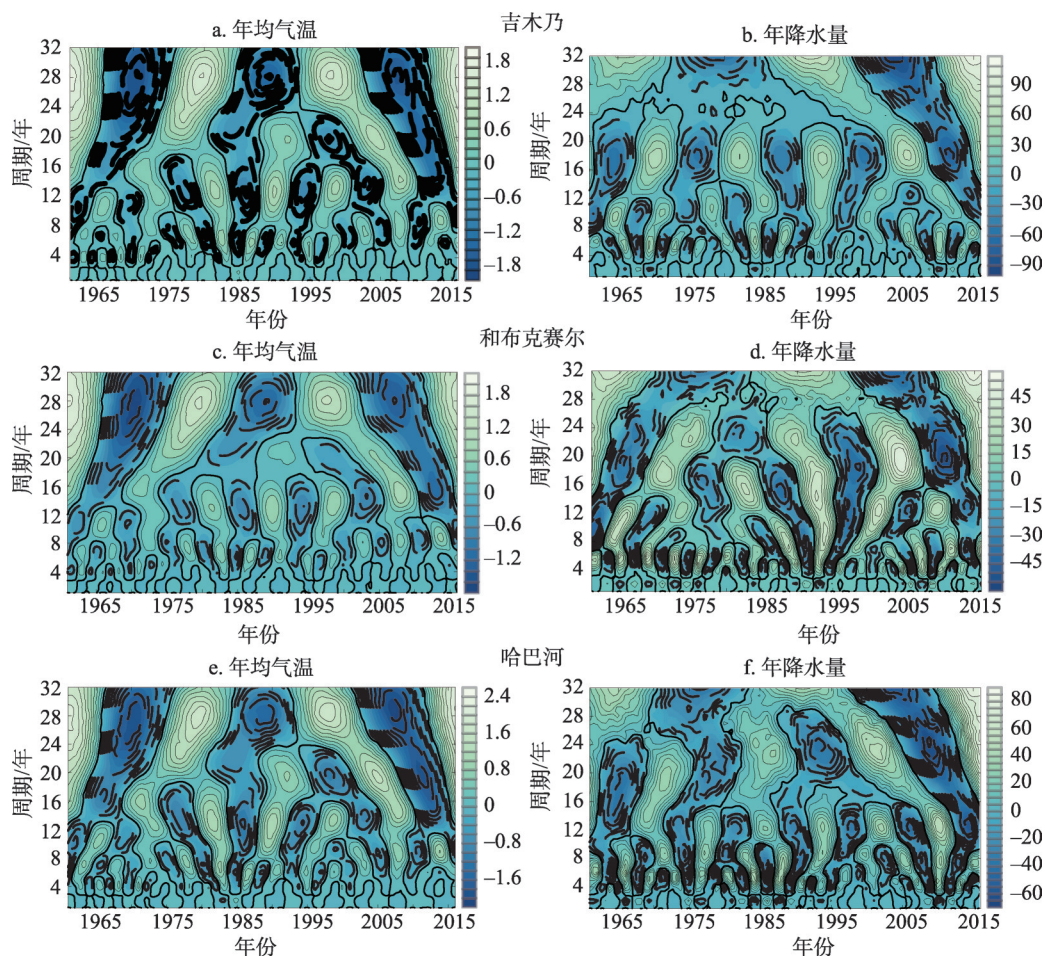


图7 年均气温、夏均气温和年降水量变化

Fig. 7 The variation of average annual temperature, average summer temperature and annual precipitation

2.2.2 气候变化对冰川变化的影响

冰川变化通常受到地理位置、地形条件的影响，但气候变化是其变化的最重要原



注: 正负值分别用实线和虚线表示, 零值用加粗实线表示。

图8 Morlet小波变换小波系数实部的时频分布

Fig. 8 The contour map of the real part of Morlet wavelet transformation coefficient of annual temperature and precipitation

因,而在气候变化中,与冰川进退变化关系最为密切的则是气温和降水^[23]。对位于萨吾尔山冰川周边地区的吉木乃、和布克赛尔和哈巴河3个气象站点1961-2016年间的年均气温、夏季均温、年降水量和周期特征的分析可知:3个站点的年均气温和夏季均温增温幅度均高于全球平均地表温度的升温率($0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$)^[24]。相关研究表明,若要弥补由于升温造成的物质亏损,在气温每升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的情景下,降水量需要增加25%或35%^[23,25];康尔泗^[26]对高亚洲地区部分冰川平衡线和物质平衡在气候变化背景下的变化进行分析时发现,夏季气温升高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,如保持平衡线不变,需要固态降水增加幅度大都在年降水量的40%以上,甚至需增加约1倍。显然,研究区周边的3个气象站点年均气温升温率都在 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 以上,夏季均温升温率都在 $0.27\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 以上,而降水量的增幅不到8.2%,虽然降水量有所增加,但仍无法弥补气温升高造成的冰川消融。结合Morlet小波分析结果,研究区正处于气温上升期和降水增加期,但降水量增幅预期较小,所以可以推断,自1977年以来萨吾尔山冰川不断退缩,且退缩速率不断加快主要是气候变暖引起的;在未来还将进一步退缩。

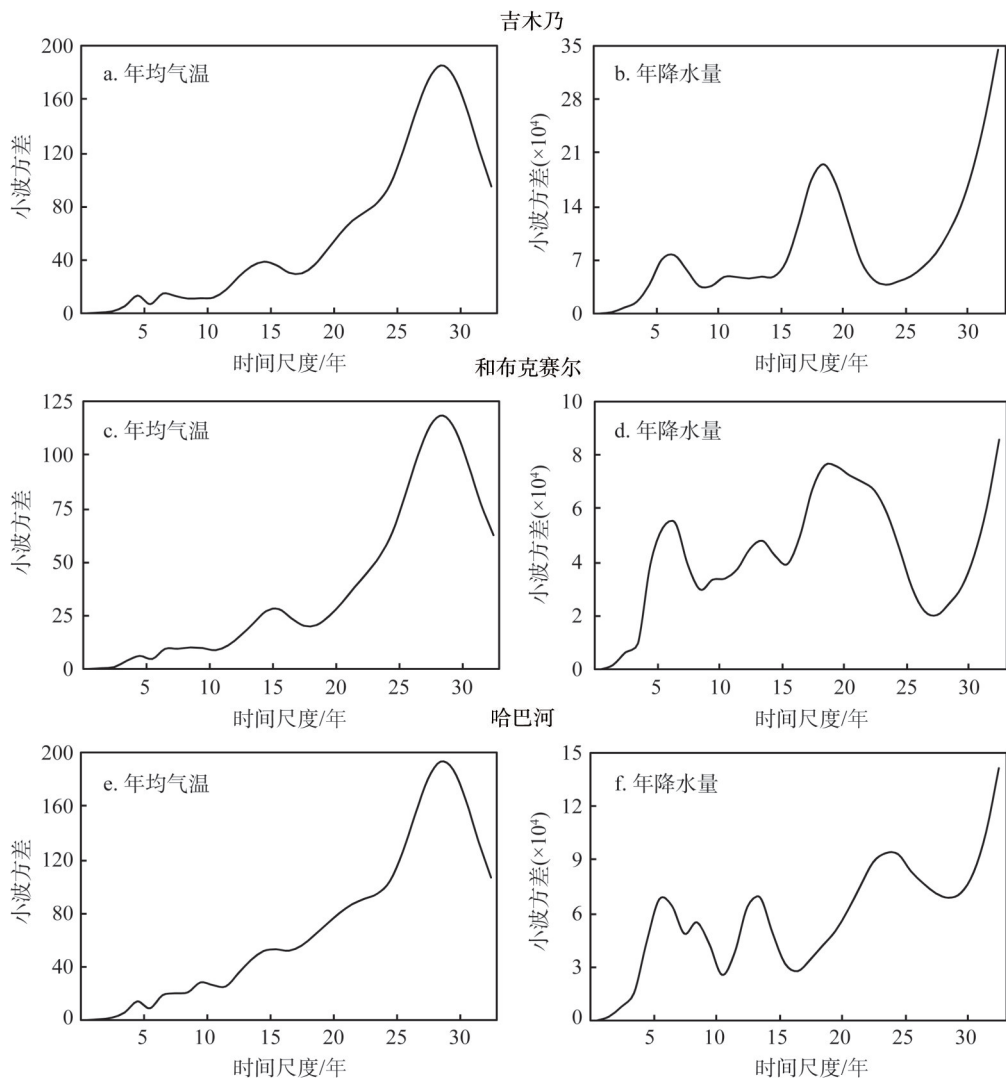


图9 小波方差图

Fig. 9 The map of wavelet variance

2.2.3 与其他因素主导区域的冰川变化对比

在全球气候变暖的大背景下,大多数冰川都呈现出退缩趋势^[27-28]。为进一步研究受西风带北支主导的萨吾尔山冰川变化特征,选取受西风带和印度季风主导的其他地区冰川变化情况与本文做对比(表4)。结合已经发表的成果,对不同研究时段受中间西风主导的喀喇昆仑山^[29-31]、西昆仑^[32]、东帕米尔高原地区^[33],受印度季风主导的喜马拉雅山东段^[34]和受西风带北支主导的天山及其部分地区^[35-38]的冰川变化研究进行统计分析,发现研究区的冰川与其他地区冰川相比,其退缩率明显较高。本文研究得出1977-2017年间受西风带北支主导的萨吾尔山地区冰川退缩率为 $1.14\% \cdot a^{-1}$,相对于处于相同主导环境的天山^[35] ($0.31\% \cdot a^{-1}$),受中间西风主导的喀喇昆仑山部分地区^[29] ($0.36\% \cdot a^{-1}$)、西昆仑峰区^[32] ($0.03\% \cdot a^{-1}$)、和东帕米尔高原地区^[33] ($0.15\% \cdot a^{-1}$),受印度季风主导的喜马拉雅山东段^[34] ($0.61\% \cdot a^{-1}$)的冰川变化幅度呈明显大的趋势。

表4 不同主导因素区域冰川变化比较

Table 4 Comparison of glacier changes in different regions

主导因素	研究区域	研究时段/年	面积退缩率/%	年均退缩率/%	数据源	资料来源
中间西风	叶尔羌河流域	1968-2009	14.62	0.36	地形图、TM、ETM+	冯童等 ^[29]
	努布拉流域	1993-2015	4.64	0.20	TM、ETM+、OLI/TIRS	刘凯等 ^[30]
	克勒青河流域	1978-2015	8.00	0.22	MSS、TM、ETM+、OLI/TIRS	许艾文等 ^[31]
	西昆仑峰区	1990-2011	0.65	0.03	TM、ETM+	李成秀等 ^[32]
	东帕米尔高原	1972-2011	5.79	0.15	MSS、TM、ETM+	曾磊等 ^[33]
印度季风	喜马拉雅山东段	1980-2007	16.40	0.61	地形图、TM、ETM+	李治国等 ^[34]
西风带北支	天山	1960-2007	11.50	0.31	—	王圣杰等 ^[35]
	乌鲁木齐河源1号	1962-2006	14.00	0.32	地形图、航片	李忠勤等 ^[36]
	台兰河流域	1972-2011	11.50	0.29	地形图、ETM+	怀保娟等 ^[37]
	奎屯河流域	1964-2015	32.60	0.64	地形图、ETM+、OLI/TIRS	张慧等 ^[38]
	萨吾尔山	1977-2017	45.72	1.14	MSS、TM、ETM+、OLI/TIRS	本文

萨吾尔山冰川退缩如此之快的原因,除气候变暖是其主要原因外,冰川面积大小也是冰川退缩快的主要影响因素。研究区小于1 km²的冰川条数占区域总条数的93.75%,小冰川相对于大冰川,空间结构较不稳定,对气候变化的敏感性较强,更易发生消融,末端退缩速率也更快^[5,39]。

3 结论

本文利用1977年、1989年、1998年、2006年和2017年MSS、TM、ETM+和OLI/TIRS影像数据资料,对萨吾尔山地区近40年间的冰川变化进行分析,得出以下结论:(1)1977-2017年间,萨吾尔山冰川总体处于退缩状态,冰川总面积减小10.51 km²,退缩了45.72%,退缩速率为1.14%·a⁻¹。随着时间段的推移,冰川退缩速率明显增大,说明该地区冰川处于加速退缩阶段。(2)冰川规模等级和面积退缩速率呈反相关关系,即冰川规模越小,退缩越快,表明规模较小的冰川对气候变化的敏感性更大。(3)1977-2017年间,研究区各坡向冰川均处于不同程度的退缩状态,其中,南坡退缩速度最快,东南坡和西南坡次之,东北坡退缩最慢;冰川退缩率在5°~40°坡度大体呈现随坡度增大而增加的趋势。(4)1961-2016年间,研究区周边气温明显升高,降水量略微增加,且未来几年气温和降水量仍会继续增加,降水量增加幅度不能弥补由气温升高造成的冰川消融,引起冰川退缩速率不断加快。(5)与其他因素主导区域冰川变化对比发现,萨吾尔山冰川退缩速率明显较高,其原因除气候变暖外,该地区面积较小的冰川占比较多是形成这一结果的另一因素。

致谢:感谢中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)所提供的气象数据和USGS(U.S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov>)数据共享平台提供的Landsat MSS、TM、ETM+和OLI/TIRS影像。

参考文献(References):

[1] KARGEL J S, LEONARD G J, BISHOP M P. Global Land Ice Measurements from Space. Berlin, Heidelberg: Springer,

- 2014.
- [2] 上官东辉, 刘时银, 丁永建, 等. 玉龙喀什河源区32年来冰川变化遥感监测. 地理学报, 2004, 59(6): 855-862. [SHANGGUAN D H, LIU S Y, DING Y J, et al. Glacier changes at the head of Yurungkax River in the West Kunlun Mountains in the past 32 years. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 855-862.]
- [3] 段建平, 王丽丽, 任贾文, 等. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展. 地理科学进展, 2009, 28(2): 231-237. [DUAN J P, WANG L L, REN J W, et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the past century. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 231-237.]
- [4] 王璞玉, 李忠勤, 李慧林. 气候变暖背景下典型冰川储量变化及其特征: 以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1189-1198. [WANG P Y, LI Z Q, LI H L. Ice volume changes and their characteristics for representative glacier against the background of climatic warming: A case study of Urumqi Glacier No. 1, Tianshan, China. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7): 1189-1198.]
- [5] 祝合勇, 杨太保, 田洪阵. 1973-2010年阿尔金山冰川变化. 地理研究, 2013, 32(8): 1430-1438. [ZHU H Y, YANG T B, TIAN H Z. Glacier variation in the Altun Mountains from 1973 to 2010. *Geographical Research*, 2013, 32(8): 1430-1438.]
- [6] 何毅, 杨太保, 陈杰, 等. 1972-2013年东天山博格达峰地区冰川变化遥感监测. 地理科学, 2015, 35(7): 925-932. [HE Y, YANG T B, CHEN J, et al. Remote sensing detection of glacier changes in Dong Tianshan Bogda region in 1972-2013. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(7): 925-932.]
- [7] 李治国, 姚檀栋, 田立德. 国内外冰川变化对水资源影响研究进展. 自然资源学报, 2008, 23(1): 1-8. [LI Z G, YAO T D, TIAN L D. Progress in the research on the impact of glacial change on water resources. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(1): 1-8.]
- [8] YAO T D, THOMPSON L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [9] SHANGGUAN D H, LIU S Y, DING Y J, et al. Characterizing the May 2015 Karayaylak Glacier surge in the eastern Pamir Plateau using remote sensing. *Journal of Glaciology*, 2016, 62(235): 944-953.
- [10] TIAN L D, YAO T D, GAO Y, et al. Two glaciers collapse in western Tibet. *Journal of Glaciology*, 2016, 63(237): 1-4.
- [11] 王宗太. 中国各山脉的冰川最新统计及其分布特征. 干旱区地理, 1988, 11(3): 11-17. [WANG Z T. New statistical figures and distribution feature of glaciers on the various mountains in China. *Arid Land Geography*, 1988, 11(3): 11-17.]
- [12] 王立伦, 刘潮海, 康兴成, 等. 我国阿尔泰山现代冰川的基本特征: 以哈拉斯冰川为例. 冰川冻土, 1983, 5(4): 27-38. [WANG L L, LIU C H, KANG X C, et al. Fundamental features of modern glaciers in the Altay Mountain of China: A case study of Halasi Glacier. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(4): 27-38.]
- [13] 尹立东. 萨吾尔山地植被概况. 植物生态学与地植物学丛刊, 1986, 10(4): 316-322. [YIN L D. Vegetation of the Sawurshan Mountain. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1986, 10(4): 316-322.]
- [14] 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. 地理空间信息, 2010, 8(3): 43-46. [WANG G F, ZHANG T B, ZHANG J P, et al. Comparison of glacier information extraction methods based on remote sensing. *Geospatial Information*, 2010, 8(3): 43-46.]
- [15] 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析. 地理研究, 2009, 28(2): 354-362. [JIANG X Y, LIU S H, MA M M, et al. A wavelet analysis of the precipitation time series in Northeast China during the last 100 years. *Geographical Research*, 2009, 28(2): 354-362.]
- [16] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 基于小波与R/S方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析. 地理研究, 2012, 31(5): 811-820. [PAN Y J, WANG Y L, PENG J, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: Based on wavelet analysis and R/S analysis. *Geographical Research*, 2012, 31(5): 811-820.]
- [17] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007: 175-181. [WEI F Y. *Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology*. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 175-181.]
- [18] 邱海军, 曹明明, 曾彬. 基于小波分析的西安降水时间序列的变化特征. 中国农业气象, 2011, 32(1): 23-27. [QIU H J, CAO M M, ZENG B. Wavelet analysis on the temporal series of precipitation in Xi'an. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(1): 23-27.]
- [19] HALL D K, BAYR K, SCHFNER W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893-2001). *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(4): 566-577.
- [20] SILVERIO W, JAQUET J M. Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(3): 342-350.
- [21] YE Q H, KANG S C, CHEN F, et al. Monitoring glacier variation on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau,

- from 1969 to 2002 using remote sensing and GIS technologies. *Journal of Glaciology*, 2006, 52(179): 537-545.
- [22] UNFCCC. Decision 1/ CP. 23: The Memorandum of Understanding Agreement: WMO's Annual Statements on the State of the Climate. The twenty-three session of the Conference of the Parties to the UNFCCC; 2017 Nov 6-Nov 10; Bonn, Germany.
- [23] OEREMANS J. Extracting a climate signal from 169 glacier records. *Science*, 2005, 308(5722): 675-677.
- [24] 秦大河, STOCKER T, 259名作者和TSU (驻伯尔尼和北京). IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6. [QIN D H, THOMAS S, 259 Authors and TSU (Bern & Beijing). Highlights of the IPCC Working Group I Fifth Assessment Report. *Progressus Inquisitiones De Mutatione Climatis*, 2014, 10(1): 1-6.]
- [25] RAPER S C B, BROWN O, BRAITH W R J. A geometric glacier model for sea level change calculations. *Journal of Glaciology*, 2000, 46(154): 357-368.
- [26] 康尔泗. 高亚洲冰冻圈能量平衡特征和物质平衡变化计算研究. 冰川冻土, 1996, 18(S1): 12-22. [KANG E S. Study on the characteristics of energy balance and the variation of mass balance in high Asian cryosphere. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1996, 18(S1): 12-22.]
- [27] HAEBERLI W, CIHLAR J, BARRY R G. Glacier monitoring within the global climate observing system. *Annals of Glaciology*, 2000, 31(1): 241-246.
- [28] 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. 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. [SHI Y F, SHEN Y P, HU R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [29] 冯童, 刘时银, 许君利, 等. 1968-2009年叶尔羌河流域冰川变化: 基于第一、二次中国冰川编目数据. 冰川冻土, 2015, 37(1): 1-13. [FENG T, LIU S Y, XU J L, et al. Glacier change of the Yarkant River basin from 1968 to 2009 derived from the first and second glacier inventories of China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(1): 1-13.]
- [30] 刘凯, 王宁练, 白晓华. 1993-2015年喀喇昆仑山努布拉流域冰川变化遥感监测. 冰川冻土, 2017, 39(4): 710-719. [LIU K, WANG N L, BAI X H. Variation of glaciers in the Nubra basin, Karakoram Mountains, revealed by remote sensing images during 1993-2015. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(4): 710-719.]
- [31] 许艾文, 杨太保, 王聪强, 等. 1978-2015年喀喇昆仑山克勒青河流域冰川变化的遥感监测. 地理科学进展, 2016, 35(7): 878-888. [XU A W, YANG T B, WANG C Q, et al. Variation of glaciers in the Shaksam River Basin, Karakoram Mountains during 1978-2015. *Progress in Geography*, 2016, 35(7): 878-888.]
- [32] 李成秀, 杨太保, 田洪阵. 1990-2011年西昆仑峰区冰川变化的遥感监测. 地理科学进展, 2013, 32(4): 548-559. [LI C X, YANG T B, TIAN H Z, et al. Variation of West Kunlun Mountains glacier during 1990-2011. *Progress in Geography*, 2013, 32(4): 548-559.]
- [33] 曾磊, 杨太保, 田洪阵. 近40年东帕米尔高原冰川变化及其对气候的响应. 干旱区资源与环境, 2013, 27(5): 144-150. [ZENG L, YANG T B, TIAN H Z. Response of glacier variations in the eastern Pamirs Plateau to climate change during the last 40 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(5): 144-150.]
- [34] 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变化遥感监测. 地理研究, 2011, 30(5): 939-952. [LI Z G, YAO T D, YE Q H, et al. Monitoring glacial variations based on remote sensing in the Luozha region, eastern Himalayas, 1980-2007. *Geographical Research*, 2011, 30(5): 939-952.]
- [35] 王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近50年来中国天山冰川面积变化对气候的响应. 地理学报, 2011, 66(1): 38-46. [WANG S J, ZHANG M J, LI Z Q, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 38-46.]
- [36] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应: 以乌鲁木齐河源1号冰川为例. 冰川冻土, 2007, 29(3): 333-342. [LI Z Q, SHEN Y P, WANG F T, et al. Response of glacier melting to climate change: Take Urumqi Glacier No. 1 as an example. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 333-342.]
- [37] 怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近40年来天山台兰河流域冰川资源变化分析. 地理科学, 2014, 34(2): 229-236. [HUAI B J, LI Z Q, SUN M P, et al. Glaciers change in the Tialan River watershed in the last 40 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(2): 229-236.]
- [38] 张慧, 李忠勤, 牟建新, 等. 近50年新疆天山奎屯河流域冰川变化及其对水资源的影响. 地理科学, 2017, 37(11): 1771-1777. [ZHANG H, LI Z Q, MU J X, et al. Impact of the glacier change on water resources in the Kuytun River Basin, Tianshan Mountains during recent 50 years. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, 37(11): 1771-1777.]
- [39] JOHANNESSON T, RAYMOND C, WADDINGTON E. Time-scale for adjustment of glaciers to changes in mass balance. *Journal of Glaciology*, 1989, 35(121): 355-369.

Glacier changes in the Sawuer Mountain during 1977-2017 and their response to climate change

WANG Yan-qiang¹, ZHAO Jun¹, LI Zhong-qin^{1,2}, ZHANG Ming-jun¹

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The Sawuer Mountain spans the two countries between China and Kazakhstan and is the transitional section between the Tianshan Mountains and the central Altay Mountains. This mountain range is not only the most obvious watershed for the inland and Arctic sea systems in Xinjiang, but also the highest mountain in the northernmost part of the western Junggar Basin. Muz Taw Mountain is the main peak of the Sawuer Mountain and Muz Taw Glacier in the peak is the most important tourist resource in Jimunai county. The northern slope of the study area runs through a glacier snow-fed river, the Ulejkururasu River, which is also a boundary river between China and Kazakhstan. Glaciers, as the alpine solid reservoir, whose river runoff by ablation plays a very important role in the survival and development of agriculture and livestock husbandry in the middle and lower reaches of arid regions. Meanwhile, glaciers also affect the sustainable development of ecological environment and social economy in a large extent. Therefore, it is possible to predict future changes in the glacier and the future development of the area affected by the glacier via understanding the changing trends of glaciers and their response to climate change. Based on the Landsat 1977 MSS, 1989 TM, 1998 TM, 2006 TM and 2017 OLI / TIRS remote sensing image data, the glacier information of five periods in the Uighur region was extracted by visual interpretation and GIS technology. The trend and periodicity of temperature and precipitation were analyzed to investigate the response of the glaciers to climate change in recent 40 years in the region. The results show that: (1) From 1977 to 2017, the total glacier area in the study region decreased by 10.51 km², retreating by 45.72%, and the retreat rate was 1.14% · a⁻¹, with the glacier retreating at an accelerating stage. (2) The smaller the glacier scale, the faster the retreat speed; (3) The south slope retreats fastest, followed by the southeast slope and the southwest slope, and the slowest retreat is in the northeast slope, and the gradient of the glacier shrinkage at 5°-40° generally shows a trend of increasing with the increase of the slope; (4) The study region is in the period of temperature rise and precipitation increase, and the increase of precipitation cannot make up for the glacier ablation caused by the temperature increase, leading to the accelerating retreating rate of glacier. (5) Compared with the glaciers dominated by other factors, the glacier retreats. More glaciers with higher retreat rates and smaller areas is another factor in forming this result.

Keywords: Sawuer Mountain; glacier change; climate change; remote sensing