

文章编号: 1008-2786-(2019)3-347-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000428

近 20a 西喀喇昆仑地区吉尔吉特河流域冰川 面积变化及其对气候变化的响应

张 威^{1,2}, 王宁练^{1,2,3*}, 李 想^{1,2}, 刘 凯^{1,2}

(1. 西北大学 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 西安 710127; 2. 西北大学 城市与环境学院
地表系统与灾害研究院, 西安 710127; 3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘 要: 冰川被誉为“固态水库”, 对区域生态环境和发展至关重要。喀喇昆仑山地区的冰川出现了退缩停滞乃至前进的现象, 被称为“喀喇昆仑异常”。为探明西喀喇昆仑地区吉尔吉特河(Gilgit River)流域的冰川面积变化及其影响因素, 本文基于 1993、2000、2016 年三个时期的多景 LandsatTM/ETM+/OLI 遥感数据, 通过目视解译法提取三期冰川边界。结果表明: (1) 1993—2016 年, 吉尔吉特河流域冰川面积共萎缩了 $45.82 \pm 9.07 \text{ km}^2$, 约占 1993 年冰川总面积的 $4.07 \pm 0.80\%$ 。其中, 1993—2000 年冰川面积的年均萎缩率为 $0.19 \pm 0.02\%$, 2000—2016 年冰川面积的年均萎缩率为 $0.17 \pm 0.03\%$, 即近 15a 来研究区冰川面积萎缩呈微弱的减缓趋势。(2) 1993—2016 年研究区内共有 12 条冰川发生过前进现象, 其中 G073768E36822N(冰川编码)冰川发生了较为快速的前进, 在 1996—1999 年末端前进了 477 m, 前进速率为 $159 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。(3) 近 40 a 来, 吉尔吉特河流域的气温呈持续上升趋势, 降水呈先减少后增加趋势。气温升高是研究区冰川退缩的主要原因, 降水的增加缓解了因升温而导致的冰川面积萎缩。

关键词: 冰川; 吉尔吉特河流域; 气候变化; 遥感

中图分类号: P343.6

文献标志码: A

冰川因其对气候变化的敏感性而成为全球气候变化的灵敏指示器^[1-3]。受气候变暖的影响, 过去 100 年间全球大多数冰川处于萎缩状态, 尤其最近几十年呈加速态势^[4-6]。冰川快速萎缩所引起的海平面上升、水资源供给安全等问题已经引起了全球关注^[7-8]。喀喇昆仑山冰川融水哺育了南亚地区重要的中巴经济走廊, 冰川变化对于该地区意义重大。

以青藏高原为核心的高亚洲地区因广泛发育的山地冰川使其成为亚洲众多大河的发源地, 素有“亚洲水塔”之称^[9-10]。受不同气候系统的控制, 近

几十年全球变暖背景下高亚洲地区冰川形成了自东南向西北萎缩速率逐渐变小的空间格局^[11]。尤其是 20 世纪九十年代以来, 喀喇昆仑山地区的冰川出现了退缩停滞乃至前进的现象, 被称为“喀喇昆仑异常”^[12-14]。“喀喇昆仑异常”一经提出就引起了冰川学领域的广泛关注。Hewitt^[15]等发现: 20 世纪 90 年代以来喀喇昆仑山中部冰川出现明显扩张, 主要表现在大型山谷冰川的前进和跃动。Bhambri^[16]等对喀喇昆仑山跃动冰川的研究表明, Liligo 冰川在 1991—1996 年跃动了 1.4 km, Balt Bare 冰川在 2006—2012 年跃动了 1 km。近期有学者利用遥感

收稿日期(Received date): 2018-12-26; 改回日期(Accepted date): 2019-04-09

基金项目(Foundation item): 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19070302); 中国科学院“一带一路”科技合作专项(131C11KYSB20160061)。[“Strategic Priority Research Program” of CAS(XDA19070302); “Belt & Road” Partnership Program of CAS(131C11KYSB20160061)]

作者简介(Biography): 张威(1995-), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要研究方向: 冰川与气候变化。[ZHANG Wei(1995-), male, born in Heze, Shandong province, M. Sc. candidate, research on glacier and climate change] E-mail: zhangwei1995@stumail.nwu.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 王宁练(1966-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 冰冻圈与全球变化。[WANG Ninglian(1966-), male, Ph. D., professor, research on cryosphere and global change] E-mail: nlwang@nwu.edu.cn

资料分析了 1993—2015 年喀喇昆仑山努布拉流域的冰川面积变化,该地区的冰川为退缩状态且面积年均萎缩率为 0.20%^[17]。以上研究表明,即使在喀喇昆仑山的不同区域,其冰川变化的趋势和幅度也可能存在着明显差异。

冰川快速萎缩可导致冰湖溃决,洪扎河流域的 Ghulkin 冰川是距离中巴公路最近的冰川之一,仅 2008 年就诱发了 4 次冰湖溃决型泥石流,近年不断诱发冰融水系改道与泥石流灾害,对中巴公路的危害最为严重^[18]。吉尔吉特河流域的 Ghamu Bar 湖主要受冰川融水的补给,自 2001—2013 年,面积由 2.6 ha 增至 17.9 ha,邻近的村庄经常受到山洪的冲击^[19]。冰川面积作为衡量冰川变化的基础物理量和物质平衡估算的基本参数,目前喀喇昆仑地区公开的冰川面积资料主要为获取于 2000 年前后单期 Randolph 冰川编目数据集^[20],不能反映该地区近十几年的冰川变化。因此,本文拟选取西喀喇昆仑地区吉尔吉特河流域作为研究区,并基于 1993、2000 和 2016 年前后三个时段获取的 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像,通过目视解译的方法提取吉尔吉特河流域冰川边界,并利用数理统计方法从冰

川规模、朝向和海拔效应等方面对近 20 a 来的冰川变化进行分析,最后结合气温和降水等气候因子探讨影响该区域冰川变化的主要控制因素。本研究一方面可为后续开展冰川物质平衡估算提供基础数据,另一方面对严重依赖于冰川融水的下游地区的水资源变化评估具有重要的参考意义。

1 研究区概况

吉尔吉特河流域位于印度河流域上游的喀喇昆仑山西段(72°28'~74°22'E,35°41'~36°54'N)(图 1)。发源于高海拔冰川融水的吉尔吉特河和洪扎河是印度河上游的主要支流,两者在吉尔吉特汇入印度河,整个流域面积约为 12671 km²^[21]。流域内现存的气象观测站极为稀少,位于流域上游的 Yasin 站(73°15' E,36°27' N;海拔高度 2970 m)的年平均气温为 4.91 °C,多年平均降水量为 314 mm,且降水主要集中在 4—9 月^[22]。研究区海拔分布在 1415~7104 m,高耸的山势条件以及高大山体截留高空水汽的能力,使得高山上的降水随海拔递增,为冰川发育提供了较为丰富的物质条件^[23]。

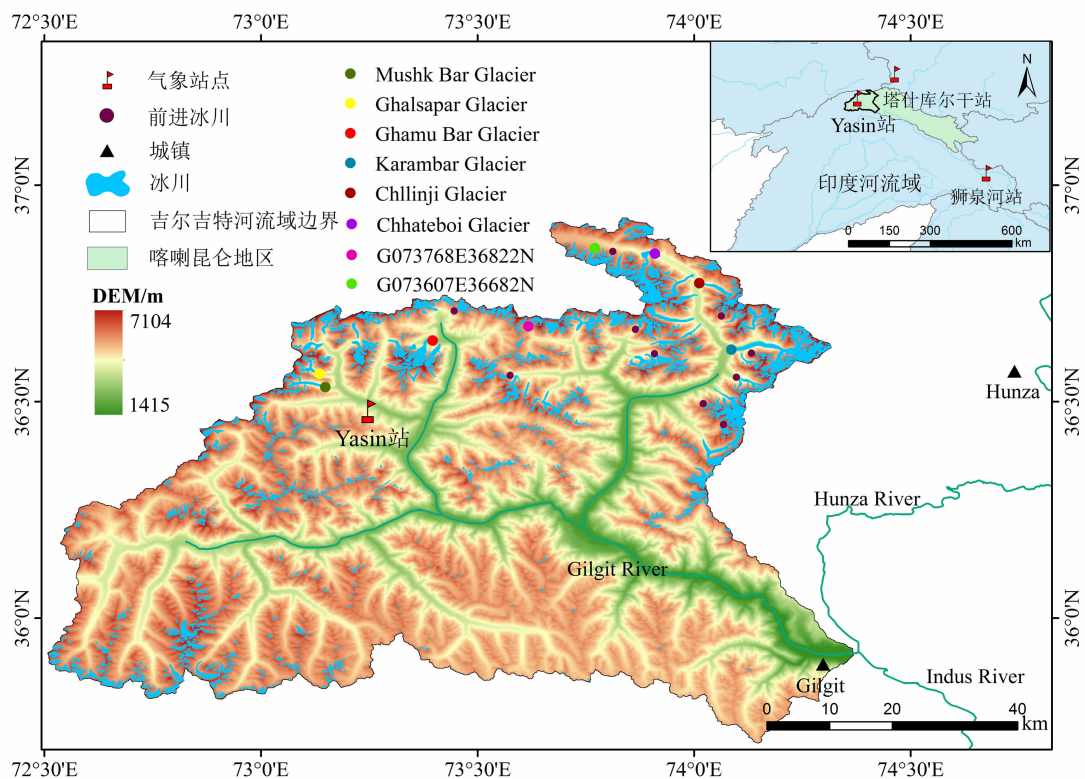


图 1 吉尔吉特河流域地理位置及 2016 年冰川分布

Fig. 1 Geographic location of the Gilgit River Basin and distribution of glaciers in 2016

2 数据与方法

2.1 研究数据

本研究使用的 Landsat 卫星系列 TM/ETM + / OLI 遥感影像 (表 1) 均下载自美国地质调查局 (<https://www.usgs.gov/>)。以上 Landsat 遥感数据均为 Level 1T 级数据产品,已经过几何校正和地形校正,并基于 DEM 数据进行了地形校正。另外,为了减少目视解译过程中季节性积雪对冰川边界的影响,本文尽可能地选择夏季消融期和云、雪覆盖较少的影像。最终选取了 1993、2000 和 2016 年 3 个时期为主的影像,而对于这 3 个时段个别区域云、雪覆盖较为严重的影像,采用相邻年份的同区域遥感影像代替。本文所使用的高程数据是由美国地质调查局 (<https://www.usgs.gov/>) 公开的 30 m 空间分辨率的 SRTM 数据。本文选用研究区周边的狮泉河 (80°6'E,32°30' N;海拔 4278.6 m) 和塔什库尔干 (75°12'E,37°48' N;海拔 3090.9 m) 两个气象站以及 CRU TS v. 4. 01 格点数据集 (分辨率为 0. 5° × 0. 5°) 的年平均气温和降水数据来研究气候变化对

冰川的影响,气象数据下载自 <http://data.cma.cn/> 和 <http://www.cru.uea.ac.uk/>。另外,在进行目视解译遥感数据来提取冰川边界时,我们参考了 2000 年时段的 Randolph Glacier Inventory 6. 0 冰川编目数据集,该数据集由全球陆地冰川监测计划机构发布 (GLIMS,<http://www.glims.org/>)。

2.2 处理方法

研究区内有较多的表碛覆盖型冰川,目前基于遥感影像的自动分类方法主要是依据地物的光谱和纹理差异来提取冰川信息,但冰川表碛与其周边裸岩具有相同的光谱和纹理特征,从而自动分类方法难以准确地区分表碛的边界^[24]。因此,本文使用目视解译的方法获取冰川边界。为了减小使用不同来源遥感数据提取冰川边界的误差,本文首先利用 ENVI 软件平台基于 2000 年 Landsat ETM + 影像对其他所有时段影像进行了相对几何配准和数据融合,然后在 Arcgis 软件平台下参考 The Randolph Glacier Inventory 6. 0 冰川编目数据集对配准后的遥感数据进行冰川边界矢量化。考虑到 2000 年的遥感影像受积雪影响较小及冰川边界形态最为明显,因此首先基于 2000 年遥感影像进行像元水平上的

表 1 吉尔吉特河流域所用遥感影像属性信息

Tab. 1 Information of the remote sensing images used in the Gilgit River Basin

影像编号	获取日期	分辨率/m	云量/%	传感器	说明
LT51500351993202ISP00	1993 - 07 - 21	30	3. 45	TM	解译影像
LT51500341993186ISP00	1993 - 07 - 05	30	5. 22	TM	解译影像
LT51500341994189ISP00	1994 - 07 - 08	30	24. 49	TM	参考影像
LT51500351994125ISP00	1994 - 05 - 05	30	2. 48	TM	参考影像
LT51500351996211ISP00	1996 - 07 - 29	30	38. 45	TM	判定前进冰川
LT51500351998216XXX01	1998 - 08 - 04	30	10. 00	TM	判定前进冰川
LE71500351999259SGS00	1999 - 09 - 16	30	0. 73	ETM +	判定前进冰川
LE71500352000246SGS01	2000 - 09 - 02	30	20. 47	ETM +	解译影像
LE71510352000253SGS00	2000 - 09 - 09	30	2. 74	ETM +	解译影像
LE71500352004257PFS01	2004 - 09 - 13	30	1. 39	ETM +	判定前进冰川
LE71500352005259PFS00	2005 - 06 - 16	30	0. 69	ETM +	判定前进冰川
LE71500352012231PFS00	2012 - 08 - 18	30	26. 29	ETM +	判定前进冰川
LC81500352014276LGN00	2014 - 10 - 03	30	1. 76	OLI	判定前进冰川
LC81500342015231LGN00	2015 - 8 - 19	30	1. 73	OLI	判定前进冰川
LC81500352016314LGN01	2016 - 11 - 09	30	5. 60	OLI	解译影像
LC81500342016314LGN00	2016 - 11 - 09	30	8. 96	OLI	解译影像

目视解译,其次参考 1993 年和 2016 年的遥感影像在 2000 年冰川边界的基础上进行调整,最终提取到 3 个不同时间段的冰川矢量边界。

根据 Landsat 系列遥感影像波段的波谱范围,选择计算机显示的红、绿、蓝 (RGB) 波段。在该波段组合显示下,冰川区与非冰川区光谱差异明显,其中雪在图像上表现为亮蓝色,冰川为暗蓝色,而裸岩呈现为对比明显的浅红色(图 2(a))。针对 Landsat 影像中的难以判别是否为冰川的阴影和积雪区,通过更高空间分辨率的 Google Earth 影像所观察到的表面纹理和形态特征来确定是否为冰川(图 2(b))。对于表碛的识别主要依据冰川末端的水文特征以及冰川两侧的地形^[25],即由于受到冰川融水的长期冲刷,形成了冰川末端较为明显的水系出露特征,这是识别表碛覆盖的一个重要标志。此外,冰川冰舌具有连续的物质补给,即使由于冰川快速消融使裸冰区和表碛覆盖区冰川表明高程下降,但活动冰舌部位与冰川两侧地形相比依然有较大的高程差,可利用 DEM 数据获取冰川末端的等高线对其进行判别。对冰川上部边界矢量化而言,主要是参考使用 SRTM 数据提取的小流域边界,相邻冰川的边界以山脊线为界划分,进而得到单条冰川的上部边界。另外,剔除面积小于 0.01 km² 的区域,因为小面积的多边形常为积雪或者阴影^[26-28],这样有利于减小分析冰川变化的误差。解译过程中冰川编码与 RGI6.0 保持一致,对于没有编码的冰川主要依据全球陆地冰川监测计划 (GLIMS) 编码体系中的方法,

即选取冰川标识点(几何中心点)的经纬度的十进制值乘以 1000 并取整作为该冰川的编码。最后将冰川数据投影转换成 Albers 等积投影,得到可用于下一步冰川变化特征分析的面积信息。

2.3 精度评价

在目前遥感地表分类的精度评价研究中,人工目视判读结果往往被作为真值,但受遥感数据源的几何校正精度影响和空间分辨率的限制,仍会存在一定的误差^[29]。研究表明,Landsat 系列影像具有相当高的几何校正精度,部分影像甚至达到 1/6 至 1/10 个像元的精度^[30]。因此,本文通过对所有影像的相对几何校正后,不再考虑由几何校正引起的误差,仅考虑由遥感影像分辨率造成的误差部分,其带来的系统误差可由下式计算^[31]:

$$\beta = \frac{N \cdot A}{2} \quad (1)$$

β 为单期冰川面积矢量化误差; N 为冰川边界所经过的像元数量; A 为单个遥感影像像元面积。计算结果表明,1993、2000 和 2016 年 3 个时期冰川面积提取的不确定性分别为 ± 47.32 、 ± 44.97 、 ± 42.16 km², 约为研究区各时段冰川总面积的 $\pm 4.20\%$ 、 $\pm 4.04\%$ 、 $\pm 3.90\%$ 。

通过不同时段冰川面积相减来计算冰川面积变化时,考虑到高海拔山地冰川变化主要发生在末端^[32],面积变化误差仅涉及到冰川末端变化的部分,可由下式计算^[33]:

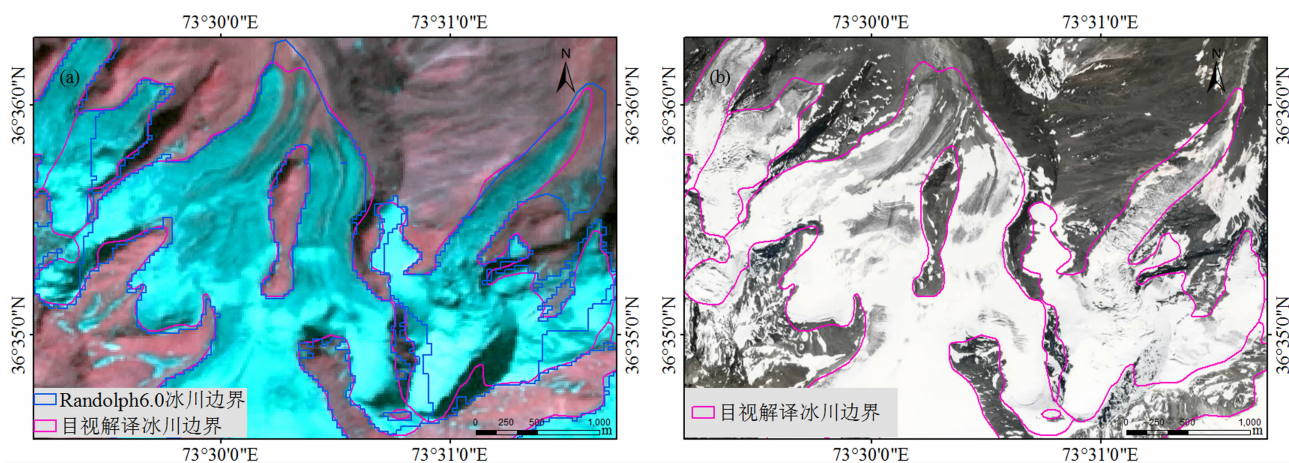


图 2 目视解译冰川矢量边界

(a: 与 Randolph6.0 冰川编目对比;b: 利用 Google Earth 检验冰川边界)

Fig. 2 Glacier boundary based on manual visual interpretation

(a: Comparison with Randolph 6.0 Glacier inventory; b: the high-resolution Google Earth imagery was used to verify glacier border)

$$\beta_{AB} = \sqrt{(\beta_A)^2 + (\beta_B)^2} \tag{2}$$

其中, β_{AB} 为两期冰川面积变化的误差; β_A 和 β_B 分别为单期冰川末端变化部分的面积误差。

3 结果与分析

3.1 冰川的面积变化

研究区在 1993、2000 和 2016 年的冰川面积分别为 $1126.77 \pm 47.32 \text{ km}^2$ 、 $1111.78 \pm 44.97 \text{ km}^2$ 和 $1080.95 \pm 42.16 \text{ km}^2$ (表 2)。1993—2016 年,冰川面积减少了 $45.82 \pm 9.07 \text{ km}^2$, 约占 1993 年冰川面积的 $4.07 \pm 0.80\%$, 年均萎缩率为 $0.18 \pm 0.03\%$, 冰川数量从 1284 条增加到 1304 条, 为大冰川分解成小冰川所致。在所研究的两个时间段内冰川面积的萎缩率存在差异。1993—2000 年, 冰川面积减少了 $14.99 \pm 5.36 \text{ km}^2$, 年均萎缩率为 $0.19 \pm 0.02\%$; 2000—2016 年, 冰川面积减少了 $30.83 \pm 6.78 \text{ km}^2$, 年均萎缩率为 $0.17 \pm 0.03\%$ 。即近 15a 来吉尔吉特河流域冰川面积萎缩呈微弱的减缓的趋势。

3.2 不同规模冰川的面积变化

以 1993 年的冰川规模为基准(一条冰川分裂为多条冰川仍按照一条冰川进行统计), 将吉尔吉特河流域冰川按规模划分为 $< 0.1 \text{ km}^2$ 、 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 、 $0.5 \sim 1.0 \text{ km}^2$ 、 $1.0 \sim 2.0 \text{ km}^2$ 、 $2.0 \sim 5.0 \text{ km}^2$ 、 $5.0 \sim 10.0 \text{ km}^2$ 、 $> 10.0 \text{ km}^2$ 等 7 个等级, 统计各等级冰川在 1993—2016 年间三个时期的面积分布和面积萎缩率如图 3 所示。由各等级冰川面积的分布可以看出, 面积规模越大的冰川其在所研究流域内占总冰川面积的比例也越大。由各等级冰川的面积萎缩率可以得出, 面积萎缩率随冰川规模增大呈现出递减的趋势。在 1993—2016 年, 规模大于 10.0 km^2 的冰川的萎缩率为 0.38% , 基本处于稳定状态; 但规模为 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 和规模小于 0.1 km^2 的冰川萎缩率分别达到 9.30% 和 12.12% ,

冰川萎缩较为明显。可见, 冰川规模越小, 冰川面积萎缩率越大, 小规模冰川对气候变化更加敏感。

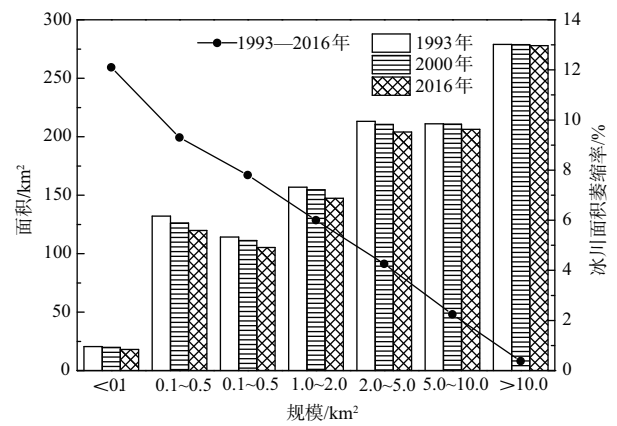


图3 不同规模冰川面积分布与面积萎缩率
Fig. 3 Distribution and shrinking rate of glacier area with different sizes

3.3 不同朝向冰川的面积变化

结合 SRTM 数据和冰川矢量化边界数据, 提取并分析研究区不同朝向冰川面积的变化情况(图 4)。结果发现, 吉尔吉特河流域冰川主要分布在 NE 和 N 朝向, 而 SW、SE 朝向相对较少。1993—2016 年研究区内各个朝向的冰川均处于萎缩状态, 其中 NE、N、E 朝向萎缩较快, 萎缩率分别为 5.98% 、 5.83% 和 5.16% ; SW、S、W 朝向萎缩较慢, 萎缩率分别为 2.06% 、 1.93% 和 1.72% 。研究区 N 朝向的冰川面积萎缩率高于 S 朝向(图 4(b)), 研究区位于西喀喇昆仑地区, 夏季受印度季风的影响^[34], 在 S 朝向形成比 N 朝向更多的降水, 降水的增加更有利于 S 朝向冰川的积累, 减缓了冰川消融, 同时由图 4(c)可知, N 朝向和 S 朝向冰川的平均面积分别为 0.85 km^2 和 1.03 km^2 , 表明 N 朝向的冰川平均规模小于 S 朝向, 小冰川对于气候变化更加敏感, 因而 N 朝向的冰川面积萎缩率高于 S 朝向。东朝向(E、NE)萎缩率高于西朝向(W、SW), 这主要是受到冰川自身规模的影响。

表 2 1993—2016 年吉尔吉特河流域冰川的面积变化

Tab. 2 Changes of the glacier area in the GilgitRiver Basin during 1993—2016

年份	冰川面积/ km^2	数量/条	时段	面积变化/ km^2	面积变化率/%	年均变化率/ $\% \cdot \text{a}^{-1}$
1993	1126.77 ± 47.32	1284	1993—2000	-14.99 ± 5.36	-1.33 ± 0.48	-0.19 ± 0.02
2000	1111.78 ± 44.97	1292	2000—2016	-30.83 ± 6.78	-2.77 ± 0.61	-0.17 ± 0.03
2016	1080.95 ± 42.16	1304	1993—2016	-45.82 ± 9.07	-4.07 ± 0.80	-0.18 ± 0.03

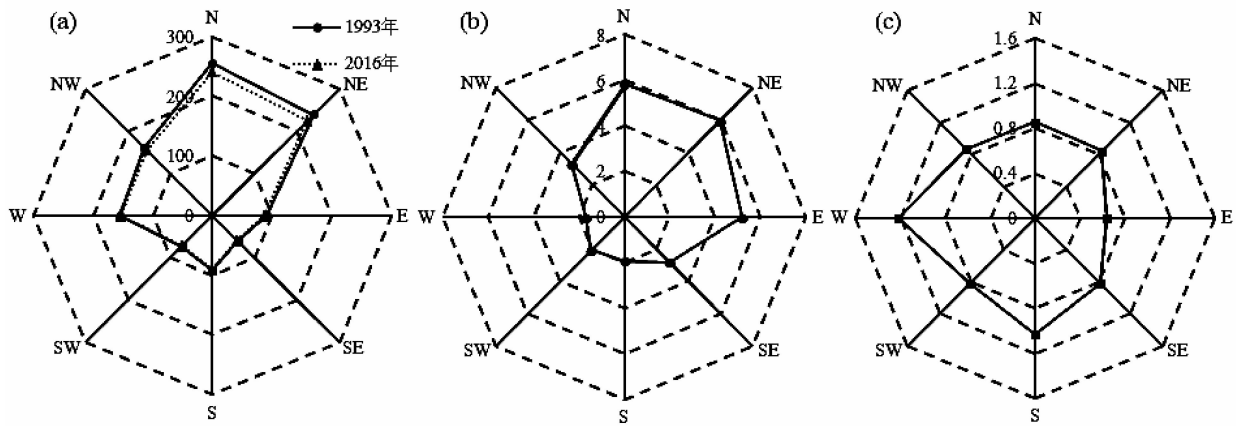


图4 吉尔吉特河流域不同朝向冰川的面积分布和变化情况

(a:1993 年和 2016 年不同朝向的冰川面积分布/ km^2 ; b:1993—2016 年不同朝向冰川面积变化率/%; c:不同朝向平均面积/ km^2)

Fig.4 Distribution and changes of the glacier area in different aspects in the Gilgit River Basin

(a:Distribution of the glacier area in different aspects in 1993 and 2016; b:Shrinking rate of the glacier area in different aspects between 1993 and 2016; c:The average glacier area in different aspects)

3.4 不同高程的冰川面积变化

以 400 m 间距划分高度带,统计了吉尔吉特河流域在各个高度带冰川面积的分布情况(图 5),结果表明:研究区冰川面积主要分布在海拔 4200 ~ 4600 m 和 4600 ~ 5000 m 两个高度区间,面积高达 349.95 km^2 和 360.65 km^2 ,约为总面积的 32.37% 和 33.36%。从变化趋势上来看,冰川面积萎缩主要集中在海拔 3800 ~ 5000 m,海拔高于 5000 m 的冰川面积基本没有变化。1993—2016 年,海拔 4200 ~ 4600 m 高度带冰川面积萎缩最为显著,面积减少了 22.17 km^2 ,约为流域冰川面积萎缩总量的 48.38%。其次是海拔 4600 ~ 5000 m 和海拔 3800 ~ 4200 m 高度带,相应的冰川面积减少了 13.50 km^2 和 5.51 km^2 ,约为总萎缩量的 29.46% 和 12.03%。1993—2000 年,海拔 3400 ~ 3800 m 和 3800 ~ 4200 m 高度带冰川面积有微弱的增加,这可能是受到前进冰川的影响。

3.5 前进冰川变化特征

通过三次冰川矢量化边界数据可以发现研究区内有 12 条冰川末端在 1993—2016 年发生了不同程度的前进现象。这些前进冰川主要位于研究区的东北部,其末端海拔为 3300 ~ 4700 m。对冰川的前进长度和面积变化进行统计(表 3),结果发现, G073768E36822N 冰川和 G073607E36682N 冰川在 1993—2016 年呈现先前进再后退的状况,其中在 1993—2000 年分别前进了 0.46 km 和 0.28 km,面

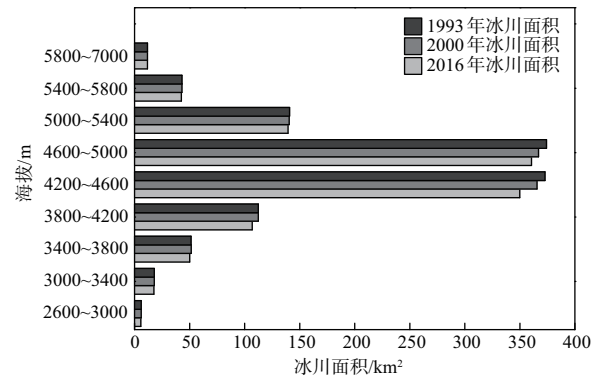


图5 吉尔吉特河流域不同海拔高度冰川面积变化

Fig.5 Changes in glacier area in different altitude ranges in the Gilgit River Basin

积分别增加了 0.34 km^2 和 0.21 km^2 ;在 2000—2016 年分别后退了 0.2 km 和 0.44 km,面积也分别减少了 0.03 km^2 和 0.35 km^2 。G073929E36596N 冰川和 G073889E36686N 冰川在 1993—2016 年持续前进,分别前进了 0.26 km 和 0.46 km;面积分别增加了 0.37 km^2 和 0.39 km^2 。G073560E36559N 冰川和 G074083E36446N 冰川在 1993—2000 年分别前进了 0.04 km 和 0.14 km,面积却减少了 0.01 km^2 和 0.06 km^2 ,导致前进冰川面积减少的原因是冰舌两侧消融强烈。

对比不同时段的遥感影像,对前进冰川做了进一步分析。G073768E36822N 冰川(图 6(a))在 1996—1999 年末端前进了 477 m,速率为 159 $\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。G073889E36686N 冰川在 1996—2000

表 3 1993—2016 年吉尔吉特河流域的前进冰川

Tab. 3 A summary of the advancing glaciers in the Gilgit River Basin during 1993—2016

冰川编码	冰川规模 /km ²	末端海拔/m			面积变化/km ²		长度变化/km	
		1993	2000	2016	1993—2000	2000—2016	1993—2000	2000—2016
G073768E36822N	7.54	4353	4251	4311	+0.34	−0.03	+0.46	−0.20
G073799E36831N	3.81	4069	4054	4100	+0.08	−0.06	+0.10	−0.03
G074059E36761N	13.30	3387	3387	3358	0	+0.64	0	0.23
G074077E36706N	0.78	4697	4640	4673	+0.11	−0.02	+0.12	−0.04
G074109E36693N	6.65	3947	3931	3895	+0.02	−0.01	+0.04	−0.05
G073607E36682N	6.37	4177	4127	4235	+0.21	−0.35	+0.28	−0.46
G073560E36559N	1.95	3887	3870	3915	+0.01	−0.05	+0.04	−0.11
G074083E36446N	2.27	4623	4593	4521	+0.06	+0.08	+0.14	+0.27
G074071E36433N	2.13	4395	4395	4352	0	+0.03	0	+0.12
G073929E36596N	6.53	3883	3844	3835	+0.25	+0.02	+0.22	+0.04
G073889E36686N	5.48	3903	3845	3805	+0.12	+0.07	+0.27	+0.19
G073464E36719N	5.36	4114	4083	4231	+0.03	−0.12	+0.09	−0.40

年末端前进了 296 m,速率为 $69\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$;在 2000—2005 年末端处于基本处于停滞状态;在 2005—2011 年末端前进了 203 m,速率为 $34\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。G073607E36682N 冰川(图 6(b))在 1996—1999 年末端前进了 166 m,速率为 $55\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$;1999—2005

年末端基本处于停滞状态;2005—2012 年末端后退了 424 m,速率为 $61\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。冰川在前进后发生较为快速的后退可能是由于末端气温较高使得冰川消融强烈,以及冰川上部物质对冰川末端的动力补给减少所造成的。

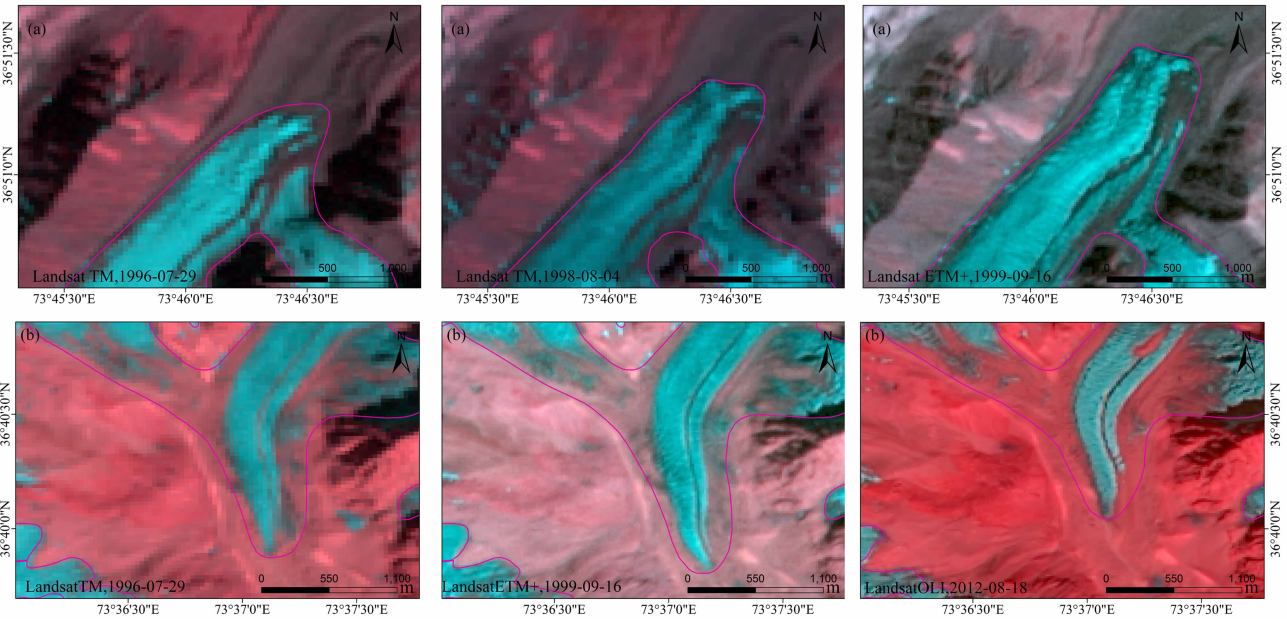


图 6 前进冰川的变化情况

(a:G073768E36822N 的变化情况;b:G073607E36682N 的变化情况)

Fig. 6 Image showing the variations of advancing glaciers

(a: the variations of G073768E36822N; b: the variations of G073607E36682N)

4 冰川对气候的响应

气温和降水是影响冰川面积变化最主要的两个气象要素,其中气温影响冰川的消融量,降水则影响冰川的积累量^[35-36]。由于西喀喇昆仑地区气象站点分布极少,因此本文选用研究区周边的塔什库尔干、狮泉河 2 个站点的气象数据以及 CRU 格点数据集对其气候变化进行分析(图 7,图 8)。1975—2015 年 2 个站点的年均气温均呈持续波动上升趋势,塔什库尔干、狮泉河站的年均温升高速率分别为 $0.33\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 和 $0.59\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$;但两个站点的年降水量略有差异,塔什库尔干站呈现出显著的增加趋势,增加速率为 $9.54\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,狮泉河站则呈微弱的下降趋势,下降速率为 $1.65\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。由图 8 可知,1975—2015 年研究区年平均气温上升明显,大部分冰川所在区域

增温速率超过 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$;年降水量变化呈现出自东北向西南减少的趋势,除西南部少数区域降水减少以外,研究区内大部分区域降水增加速率为 $5\sim 10\text{ mm} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ 。

气候变化和冰川波动关系复杂,且冰川对气候的响应具有滞后性^[37],王宁练^[38]等研究发现北半球山地冰川末端变化在统计意义上滞后气候变化 12~13 a。本研究只有 1993 年、2000 年、2016 年 3 期数据,为了更好地分析气候变化对冰川变化的影响,本文选用 1975—2015 年的气象资料。以 CRU 数据集各像元年均气温与年降水量的平均值代表研究区的气候变化,计算 1975—2015 年研究区年平均气温与年降水量的距平值(图 9)。结果表明,近 40 a 来研究区的年平均气温与年降水量的距平值整体上均呈现出上升的趋势,其增加的速率分别为 $0.462\text{ }^{\circ}\text{C} (10\text{ a})^{-1}$ 和 $5.79\text{ mm} (10\text{ a})^{-1}$ 。年降水量的距平值在 1975—1995 年呈下降趋势,在 1995—

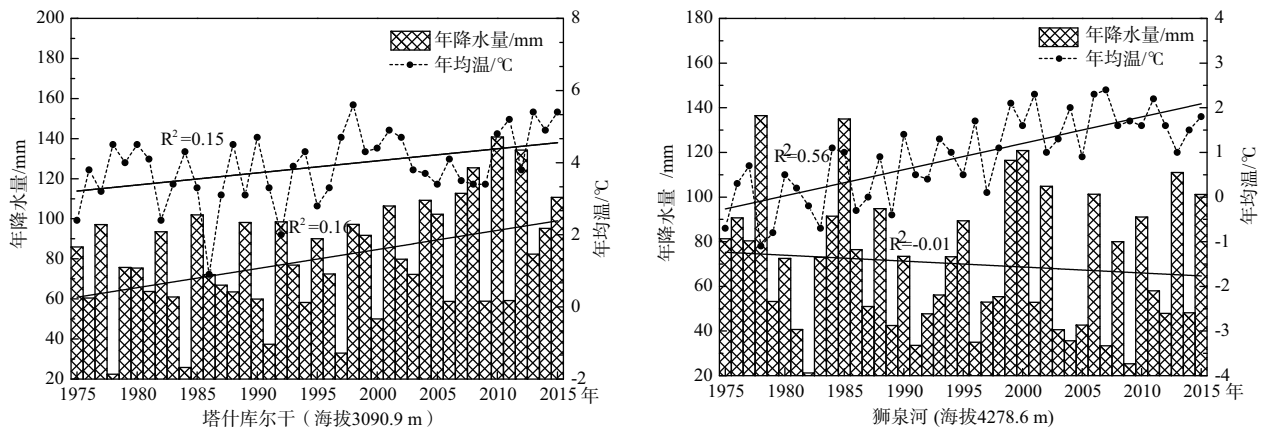


图 7 吉尔吉特河流域附近气象站点年平均气温和降水量变化

Fig. 7 Variations of average annual temperature and annual precipitation at the two meteorological stations near the Gilgit River Basin

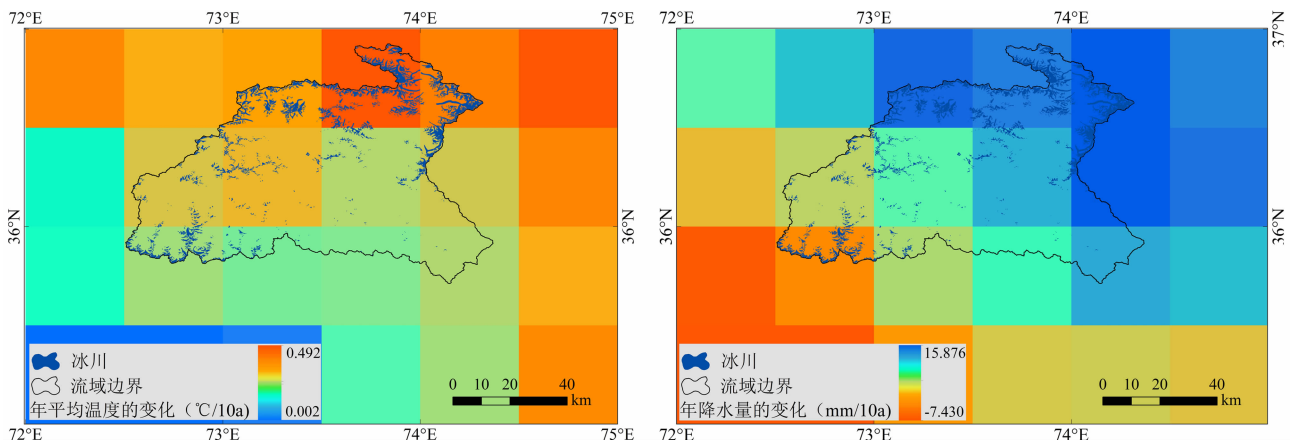


图 8 1975—2015 年吉尔吉特河流域年平均气温和年降水量的变化

Fig. 8 Variations of annual mean air temperature and annual precipitation in the Gilgit River Basin

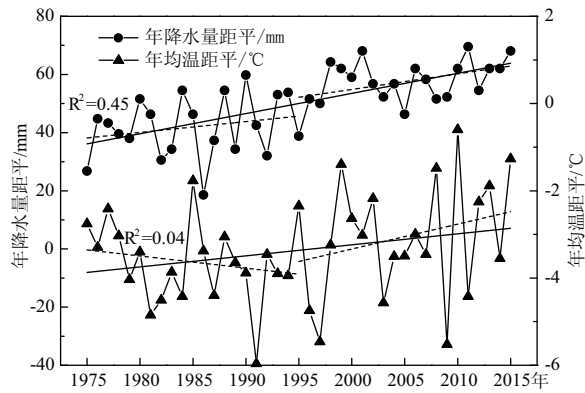


图9 1975—2015 年研究区年平均气温
和年降水变化趋势

Fig.9 The trend of annual mean air temperature and
annual precipitation in study area during 1975—2015

2015 年呈上升趋势;年平均气温的距平值在这两个时段内均呈上升趋势。由此可知,研究区内冰川面积萎缩是气温快速上升的结果,降水的增加在一定程度上弥补了气温升高造成的冰川物质亏损,使其冰川面积萎缩速率减缓。但降水量的增加不及气温升高给冰川物质平衡带来的影响,从而导致冰川面积萎缩。

在全球气候变暖趋势下,与其他地区相比,吉尔吉特河流域冰川萎缩率较小(表4)。Yao^[11]等在青藏高原冰川变化的研究中指出,在 1970 s—2000 s,青藏高原冰川面积萎缩率为 0.57% a⁻¹。由于西风环流的增强,喀喇昆仑地区降水量增加,导致研究区冰川萎缩率较小^[43]。Ridley^[44]等利用区域气候模型研究表明,未来一个世纪降水量增加可能会导致喀喇昆仑山区冰川缓慢萎缩或保持稳定。因此,降水量增加在一定程度上补偿了研究区冰川的消融,

这是近 15 a 来吉尔吉特河流域冰川萎缩呈减缓趋势的原因之一。

5 结论

本文通过目视解译法提取吉尔吉特河流域 1993、2000、2016 年三期冰川边界,得到如下结论:

(1)1993—2016 年,吉尔吉特河流域冰川面积萎缩了 45.82 ± 9.07 km²,约占总面积的为 4.07 ± 0.80%。1993—2000 年冰川的年均萎缩率为 0.19 ± 0.02%,2000—2016 年冰川的年均萎缩率为 0.17 ± 0.03%,近 15 a 来冰川萎缩呈微弱的减缓趋势。

(2)不同规模面积变化的结果表明:冰川规模越小,冰川面积萎缩率越大,小规模冰川对气候变化更加敏感。1993—2016 年规模小于 0.1 km² 的冰川萎缩率可达 12.12%,规模大于 10.0 km² 的冰川萎缩率仅为 0.38%。不同朝向的对比结果显示:各个朝向冰川普遍处于萎缩状态,位于东北朝向的冰川萎缩率最大,西朝向萎缩率最小。冰川沿海拔变化的结果表明:吉尔吉特河流域冰川集中分布在海拔 4200 ~ 4600 m 和 4600 ~ 5000 m,海拔 4200 ~ 4600 m 冰川面积减少最为显著。

(3)1993—2016 年研究区内共有 12 条冰川发生过前进现象,其中 G073768E36822N 冰川发生了较为快速的前进,在 1996—1999 年末端前进了 477 m,前进速率为 159 m · a⁻¹。

(4)近 40 a 来,吉尔吉特河流域的气温呈持续上升趋势,降水呈先减少后增加趋势。气温升高是研究区冰川退缩的主要原因,降水的增加缓解了因升温而导致的冰川面积萎缩。

表 4 不同地区冰川的萎缩情况

Tab.4 Shrinkage of the glaciers in different regions

研究区	年均面积变化率 /% · a ⁻¹	数据源	解译方法	研究时段	来源
阿尔泰山	-1.65	landsatOLI、Sentinel-2A MSI	比值阈值法、人工修正	1990—2016	[39]
东天山	-1.28	landsatTM/ETM+	比值阈值法、人工修正	1990—2011	[40]
念青唐古拉山东段	-1.24	landsatTM/ETM+ /OLI	比值阈值法、人工修正	1999—2015	[41]
疏勒河上游	-0.77	landsatTM/ETM+ /OLI	比值阈值法、人工修正	2000—2015	[42]
吉尔吉特河流域	-0.18	landsatTM/ETM+ /OLI	目视解译	1993—2016	本研究

参考文献 (References)

- [1] GRINSTED A. An estimate of global glacier volume [J]. *Cryosphere*, 2013, **7**(1): 141–151.
- [2] SCHERLER D, BOOKHAGEN B, STRECKER M R. Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover[J]. *Nature Geoscience*, 2011, **4**(3): 156–159.
- [3] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010: 1–10. [XIE Zichu, LIU Chaohai. The introduction of glaciology[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010: 1–10]
- [4] 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等. 近百年来青藏高原冰川的进退变化[J]. 冰川冻土, 2004, **26**(5): 517–522. [PU Jianchen, YAO Tandong, WANG Ninglian, et al. Fluctuations of the glaciers on the Qinghai-Tibetan Plateau during the past century[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(5): 517–522]
- [5] 任贾文. 全球冰冻圈现状和未来变化的最新评估: IPCC WGI AR5 SPM 发布[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(5): 1065–1067. [REN Guwen. Updating assessment results of global cryospheric change from SPM of IPCC WGI Fifth Assessment Report[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(5): 1065–1067]
- [6] DYURGEROV M B, MEIER M F. Twentieth century climate change: evidence from small glaciers [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2000, **97**(4): 1406–1411.
- [7] BRADLEY R S, VUILLE M, DIAZ H F, et al. Climate change, threats to water supplies in the tropical Andes[J]. *Science*, 2006, **312**(5781): 1755–1756.
- [8] WANG Weicai, XIANG Yang, GAO Yang, et al. Rapid expansion of glacial lakes caused by climate and glacier retreat in the Central Himalayas[J]. *Hydrological Processes*, 2015, **29**(6): 859–874.
- [9] IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P, BIERKENS M F. Climate change will affect the Asian water towers[J]. *Science*, 2010, **328**(5984): 1382–1385.
- [10] KUANG Xingxing, JIAO J J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2016, **121**(8): 3979–4007.
- [11] YAO Tandong, THOMPSON L, YANG Wei, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, **2**(9): 663–667.
- [12] AZAM M F, WAGNON P, BERTHIER E, et al. Review of the status and mass changes of Himalayan-Karakoram glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 2018, **64**(243): 61–74.
- [13] BOLCH T, KULKARNI A, KÄÄB A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers[J]. *Science (New York, N. Y.)*, 2012, **336**(679): 310–314.
- [14] BOLCH T, PIECZONKA T, MUKHERJEE K, et al. Brief communication: glaciers in the Hunza catchment (Karakoram) have been nearly in balance since the 1970s[J]. *Cryosphere*, 2017, **11**(1): 531–539.
- [15] HEWITT K. The karakoram anomaly glacier expansion and the ‘elevation effect,’ Karakoram himalaya[J]. *Mountain Research and Development*, 2005, **25**(4): 332–340.
- [16] BHAMBRI R, HEWITT K, KAWISHWAR P, et al. Surge-type and surge-modified glaciers in the Karakoram [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 15391.
- [17] 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[J]. 冰川冻土, 2017, **39**(4): 710–719. [LIU Kai, WANG Ninglian, BAI Xiaohua. Variation of glaciers in the Nubra basin, Karakoram Mountains, revealed by remote sensing images during 1993–2015 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, **39**(4): 710–719]
- [18] 廖丽萍, 朱颖彦, 杨志全, 等. 中国—巴基斯坦喀喇昆仑公路 Ghulkin 冰川百年进退变化[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(6): 1391–1399. [LIAO Liping, ZHU Yingyan, YANG Zhiquan, et al. Advance and retreat of the Ghulkin Glacier along the Karakoram Highway over hundred years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(6): 1391–1399]
- [19] ASHRAF A, NAZ R, IQBAL M B. Altitudinal dynamics of glacial lakes under changing climate in the Hindu Kush, Karakoram, and Himalaya ranges[J]. *Geomorphology*, 2017, **283**: 72–79.
- [20] RAUP B, RACOVITEANU A, KHALSA S J, et al. The GLIMS geospatial glacier database: a new tool for studying glacier change [J]. *Global and Planetary Change*, 2007, **56**(1/2): 101–110.
- [21] MUHAMMAD, ADNAN, GHULAM, et al. Snowmelt runoff prediction under changing climate in the Himalayan cryosphere: A case of Gilgit River Basin [J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, **8**(5): 941–949.
- [22] ADNAN M, NABI G, KANG Shichang, et al. Snowmelt runoff modelling under projected climate change patterns in the gilgit river basin of northern Pakistan [J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2017, **26**(2): 525–542.
- [23] OWEN L A. GLACIATIONS I Late Quaternary in Highland Asia [M]. *Encyclopedia of Quaternary Science*, 2007: 1109–1116.
- [24] 张明华. 基于 ETM+ 影像的西藏南迦巴瓦峰地区海洋性冰川信息提取[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(2): 226–232. [ZHANG Minghua. Extracting the temperate glacier information in the Mount Namjagbarwa, Tibet autonomous region, based on ETM+ image [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(2): 226–232]
- [25] 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.
- [26] PAUL F, ANDREAS K, MAISCH M, et al. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods[J]. *Annals of Glaciology*, 2002, **34**(1): 355–361.
- [27] BOLCH T, YAO T, KANG S, et al. A glacier inventory for the

- western Nyainqentanglha Range and the Nam Co Basin, Tibet, and glacier changes 1976 – 2009 [J]. *Cryosphere*, 2010, **4**(3): 419 – 433.
- [28] 上官冬辉, 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[J]. *地理学报*, 2004, **59**(6): 855 – 862. [SHANG GUAN Donghui, LIU Shiyin, DING Yongjian, et al. Glacier changes at the head of Yurungkax River in the West Kunlun Mountains in the past 32 Years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2004, **59**(6): 855 – 862]
- [29] 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(英文)[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **70**(2): 206 – 220. [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]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **70**(2): 206 – 220]
- [30] 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. [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]
- [31] 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]
- [32] NIMURA T, SAKAI A, TANIGUCHI K, et al. The GAMDAM glacier inventory: a quality-controlled inventory of Asian glaciers [J]. *Cryosphere*, 2015, **9**(3): 849 – 864.
- [33] ZHANG Zhen, LIU Shiyin, ZHANG Yong, 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.
- [34] NAIDU C V, DURGALAKSHMI K, KRISHNA K M, et al. Is summer monsoon rainfall decreasing over India in the global warming era? [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2009, 114: D24108.
- [35] 李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40a 观测事实[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(2): 117 – 123. [LI Zhongqin, HAN Tianding, JING Zhefan, et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and glacier no.1 at headwater of Urumqi river, Tianshan, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(2): 117 – 123]
- [36] 王璞玉, 李忠勤, 高闻宇, 等. 气候变化背景下近 50 年来黑河流域冰川资源变化特征分析[J]. *资源科学*, 2011, **33**(3): 399 – 407. [WANG Puyu, LI Zhongqin, GAO Wenyu, et al. Glacier changes in the Heihe River Basin over the past 50 years in the context of climate change [J]. *Resources Science*, 2011, **33**(3): 399 – 407]
- [37] DING Yongjian, LIU Shiyin, LI Jing, et al. The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China [J]. *Annals of Glaciology*, 2006, **43**(1): 97 – 105.
- [38] 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. [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]
- [39] PAN C G, POPE A, KAMP U, et al. Glacier recession in the Altai Mountains of Mongolia in 1990 – 2016 [J]. *Geografiska Annaler Series A-Physical Geography*, 2018, **100**(2): 185 – 203.
- [40] 李佳, 杨太保, 何毅, 等. 1990—2011 年天山东部冰川退缩对气候的响应[J]. *水土保持研究*, 2014, **21**(3): 212 – 216. [LI Jia, YANG Taibao, HE Yi, et al. Response of glacier retreat to climate in eastern tianshan from 1990 to 2011 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, **21**(3): 212 – 216]
- [41] JI Qin, YANG Taibao, DONG Jun, et al. Glacier variations in response to climate change in the eastern Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau from 1999 to 2015 [J]. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2018, **50**(1): 1 – 12.
- [42] ZHANG Xiaowen, LI Haojie, ZHANG Zhihua, et al. Recent glacier mass balance and area changes from DEMs and landsat images in upper reach of shule river basin, northeastern edge of Tibetan plateau during 2000 to 2015 [J]. *Water*, 2018, **10**(6): 796.
- [43] YADAV R R, GUPTA A K, KOTLIA B S, et al. Recent wetting and glacier expansion in the northwest Himalaya and Karakoram [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 6139.
- [44] RIDLEY J, WILTSHIRE A, MATHISON C. More frequent occurrence of westerly disturbances in Karakoram up to 2100 [J]. *The Science of the Total Environment*, 2013, 468 – 469 (Suppl): S31 – S35.

Glacier Changes and Its Response to Climate Change in the Gilgit River Basin, Western Karakorum Mountains over the Past 20 Years

ZHANG Wei^{1,2}, WANG Ninglian^{1,2,3*}, LI Xiang^{1,2}, LIU Kai^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Northwest University, Xi'an 710127, China

2. Institute of Earth Surface System and Hazards, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China

3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Glacier is one of the most important freshwater repositories on the earth surface. Contrary to other regions of Tibetan Plateau, glaciers on the Karakoram Mountains were found to show a slow retreat or even advancement, which was often called as “Karakoram anomaly”. Based on the Landsat TM/ETM +/OLI remote sensing data of 1993, 2000 and 2016, the glacier boundaries within the Gilgit River Basin over the western part of Karakorum can be delimited for three stages by means of visual interpretation. The results showed that: (1) From 1993 to 2016, the glacier area in the Gilgit River Basin had shrunk by almost $45.82 \pm 9.07 \text{ km}^2$, which accounted for $4.07 \pm 0.80\%$ of the total area of glaciers in 1993. Among them, average annual shrinkage rate of glacier area during the period from 1993 to 2000 was $0.19 \pm 0.02\%$, and the figure from 2000 to 2016 was $0.17 \pm 0.03\%$, which indicates that the glacier shrinkage in the study area showed a slight slowing trend in the past 15 years. (2) From 1993 to 2016, the average atrophy rate of glaciers with an area of $<0.1 \text{ km}^2$ was as high as 12.12%, while that of glaciers with an area of $>10.0 \text{ km}^2$ was only 0.38%. Although glaciers in the Gilgit River Basin were generally in a state of shrinkage, the shrinkage rate tended to be related with their orientations: glaciers facing northeastward suffered from the largest shrinkage, while those facing westward had the smallest shrinkage rate. (3) In the study area, 12 glaciers showed advancement between 1993 and 2016, among which, the glacier coded G073768E36822N had the largest advancing rate, as its glacier terminus had advanced by 477 m from 1996 to 1999 with an advancing rate of $159 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$. (4) In the past 40 years, there was increasing trends in temperature over the Gilgit River Basin, while the precipitation had decreased first and then increased. Our analyses show that the rising temperature is the main cause of glacier shrinkage, while the increase in precipitation compensates for the glacier loss due to warming.

Key words: Glacier; Gilgit River Basin; Climate Change; Remote Sensing