

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0081

LI Zhijie, WANG Ninglian, HOU Shanshan. Monitoring recent surging of the North Kyzkurgan Glacier in central Pamir by remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(5):1267-1276. [李志杰, 王宁练, 侯姗姗. 帕米尔中部North Kyzkurgan冰川跃动变化遥感监测[J]. 冰川冻土, 2021, 43(5):1267-1276.]

帕米尔中部North Kyzkurgan冰川跃动变化遥感监测

李志杰^{1,2}, 王宁练^{1,2,3}, 侯姗姗^{1,2}

(1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 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, 陕西 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: 跃动冰川作为一种特殊类型的冰川, 蕴含着巨大的灾害风险, 对其开展监测研究具有重要意义。本研究基于1973年以来的Landsat影像、ASTER立体像对和ITS_LIVE数据产品, 监测分析了帕米尔中部North Kyzkurgan冰川在跃动前、跃动中、跃动后的面积、高程、流速变化, 揭示了该冰川完整的跃动发生过程。结果表明: North Kyzkurgan冰川是一条典型的跃动冰川, 在1973—2011年处于恢复阶; 2011—2016年处于跃动阶; 2016年之后重新进入恢复阶。North Kyzkurgan冰川所在地区气候寒冷, 降雪量丰富, 同时该冰川积累区面积比率超过0.8, 冰川作用正差近1 000 m, 因此冰川补给物质充足。在积蓄区物质积累、不断增厚的情况下, 冰川底部达到压力熔点, 融水不断增多, 在融水的润滑和顶托作用下, 最终导致冰川发生跃动。因此, North Kyzkurgan冰川跃动的发生主要与热力学因素有关。

关键词: 冰川跃动; 冰川灾害; 帕米尔; 遥感; North Kyzkurgan冰川

中图分类号: P343.6² **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)05-1267-10

0 引言

跃动冰川指周期性发生快速运动的冰川, 当冰川发生跃动时其运动速度可达到平时的数倍乃至上百倍, 进而引起冰川物质的快速转移和重新分布^[1-2]。尽管跃动冰川数量仅占全球冰川的约1%, 但其重要影响却不可忽视^[3]。一方面, 探究冰川发生跃动的原因机制有助于拓展当前对于冰川变化的认识; 另一方面, 监测跃动冰川可为防灾减灾提供重要支撑^[4]。冰川跃动可能直接导致冰湖溃决洪水、冰川融水泥石流、高山堰塞湖等一系列自然灾害, 对下游地区产生重大威胁^[5]。例如, 2015年5月新疆公格尔九别峰北坡的克拉牙依拉克冰川发生跃动, 造成部分草场和房屋被冰体淹没冲毁^[6]。因此, 关注和监测跃动冰川具有十分重要的科学和现实意义。

近年来“帕米尔-喀喇昆仑异常”现象受到了广

泛关注, 多项研究表明自1970s以来, 帕米尔、喀喇昆仑、西昆仑等地区的冰川接近或处于正平衡状态, 基本保持稳定甚至有扩张现象^[7-9]。跃动冰川的大量存在是“帕米尔-喀喇昆仑异常”现象的突出特征, 由此蕴含的冰川灾害风险也在不断增大^[4]。帕米尔跃动冰川主要分布在高原西北部和东部, Goerlich等^[10]利用多源DEM和Landsat影像对帕米尔跃动冰川进行了编目, 认为该地区有多达186条冰川发生过跃动现象, 其中也包括本研究中的North Kyzkurgan冰川, 但Goerlich等未深入分析这些冰川的跃动过程, 其编目结果也存在一定的不确定性。Kotlyakov等^[11]利用多源影像和实地调查资料对西帕米尔冰川进行监测, 发现1960—2003年有19条冰川发生跃动。Lü等^[12]利用Landsat ETM+/OLI、ASTER影像对东帕米尔昆盖山冰川进行监测, 发现1999—2016年有9条冰川发生跃动。此外, Wendt等^[13]、张震等^[14]还分别报道了Fedchenko冰川的Bi-

收稿日期: 2021-05-09; 修订日期: 2021-09-01

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA19070302; XDA20060201); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZ-KK020102)资助

作者简介: 李志杰, 博士研究生, 主要从事冰川变化与气候变化研究. E-mail: lizhijie820@163.com

通信作者: 王宁练, 教授, 主要从事冰冻圈与全球变化研究. E-mail: nlwang@nwnu.edu.cn

vachny 支冰川、昆盖山 5Y663L0023 冰川的跃动现象,深入分析了冰川跃动的过程与机理。关于 2015 年 5 月的东帕米尔克拉牙依拉克冰川跃动事件,Shangguan 等^[15]、张震等^[6]、冯力力等^[16]分别进行了报道。因此在总体上,当前对于帕米尔跃动冰川的认识多集中在局部区域或特定冰川,而对多数跃动冰川缺乏深入研究,对其跃动时间、过程、周期以及最新的动态变化等尚缺乏基本了解。

跃动冰川具有明显的表面特征,如末端在数月或数年内突然前进、冰面裂隙发育和破碎化、积蓄区和接收区高程的剧烈波动、冰流速突然加快至平时的数倍到数十倍等,通过这些特征可有效的识别和监测跃动冰川^[1,17]。遥感和 GIS 技术的快速发展,为山地冰川的监测研究提供了有效的技术手段。通过多源遥感影像和 DEM 等对山地冰川开展联合监测,可有效识别出冰川跃动导致的面积、高程、流速变化^[18]。本文以帕米尔中部近 50 年来面积、高程、流速变化极为显著的 North Kyzkurgan 冰川为研究对象,利用 1973 年以来的 Landsat 影像、ASTER 立体像对和 ITS_LIVE 数据产品,揭示了该冰川的完整跃动发生过程,并对跃动周期、跃动原因等进行了探讨,以深化对于帕米尔跃动冰川的认识。

1 研究区概况

帕米尔高原指位于高亚洲西部,阿赖山以南,兴都库什山以北的广阔高原山地,面积超过 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图 1)。帕米尔高原地形高峻,西部发育了一系列呈西南—东北走向的平行山脉和山间河谷,使得湿润的西风气流可以顺坡爬升,带来丰富的降水,因此发育了面积广阔的山地冰川^[19]。North

Kyzkurgan 冰川(G072447E38852N)位于帕米尔高原中部,是一条典型的复式山谷冰川,末端有少量表碛覆盖。2020 年时冰川面积为 $(26.27 \pm 0.50) \text{ km}^2$,最大长度约 9.4 km,平均高程 4 960 m,平均坡度约 16° 。若以雪线高度(4 700 m)划分^[20],该冰川的积累区面积比率超过 0.8,冰川作用正差约 1 000 m。Fedchenko 气象站位于研究冰川以西约 20 km,该站的观测资料表明 1935—1990 年该地区年均气温约为 -6.9°C ,年均降水量约为 1 200 mm 且以降雪为主,极低的气温和丰富的降雪为该冰川提供了充足的物质补给。

2 数据与方法

2.1 数据来源

2.1.1 遥感影像

本研究使用了 1973—2020 年的 20 景 Landsat MSS\TM\ETM+\OLI 影像,这些影像均为 L1T 级产品,由 USGS (United States Geological Survey) 进行了系统辐射校正和几何校正,并结合 DEM 进行了地形校正(表 1)。由于 Landsat 系列影像有相当高的正射校正精度,达到 1/2 像元左右,因此本研究直接利用 Landsat 影像开展冰川变化研究^[17,21]。本研究还选用了获取于 2002 年、2009 年、2014 年、2020 年的 4 对 ASTER 立体像对,以提取不同时期的 DEM,探究冰川跃动前、跃动中和跃动后的表面高程变化(表 1)。为避免季节性积雪、云、山地阴影的影响,本研究尽可能选取了消融季末期,冰川区无云、阴影覆盖的影像。Landsat 影像来源于 USGS (<http://glovis.usgs.gov>),ASTER 立体像对来源于 NASA (<https://search.earthdata.nasa.gov/>)。

2.1.2 冰川流速数据

ITS_LIVE (Inter-mission time series of land ice velocity and elevation) 产品包含了 1985—2018 年高亚洲主要冰川的流速数据,来源于 NASA 的 MEASUREs 项目 (<https://its-live.jpl.nasa.gov/>)。该产品基于 Landsat 4、5 (1~4 波段) 和 7、8 (全色波段) 影像,采用 Gardner 等^[22]提出的自动裂缝特征跟踪处理链方法,通过进行局部归一化、过采样、特征跟踪等提取冰川运动速度。该数据具有良好的鲁棒性,减少了因图像匹配、冰川跃动等因素引起的误差,由于 Landsat 8 空间分辨率和波谱分辨率的提高,2013 年以后该产品的误差显著降低,数据质量得到进一步提升^[23-24]。ITS_LIVE 产品已广泛应用于高

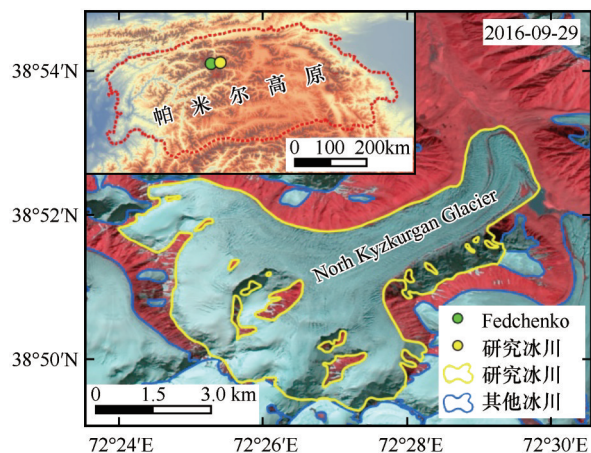


图 1 North Kyzkurgan 冰川的地理位置

Fig. 1 Geographic location of the North Kyzkurgan Glacier

表 1 遥感影像数据列表
Table 1 List of the satellite data used in this study

影像编号	获取日期	空间分辨率/m	用途
LM11630331973193AAA02	1973-07-12	60	冰川边界提取
LM21630331977271AAA02	1977-09-28	60	冰川边界提取
LT51510331988324ISP00	1988-11-19	30	冰川边界提取
LT51510331993273ISP00	1993-09-30	30	冰川边界提取
LT51510331997252ISP01	1997-09-09	30	冰川边界提取
LE71510332000237SGS00	2000-08-24	15	冰川边界提取
LE71510332001207SGS00	2001-07-26	15	冰川边界提取
LE71510332003245ASN01	2003-09-02	15	冰川边界提取
LE71510332003261ASN01	2003-09-18	15	冰川边界提取
LE71510332006237PFS00	2006-08-25	15	冰川边界提取
LT51510332008187KHC01	2008-07-05	30	冰川边界提取
LT51510332009253KHC00	2009-09-10	30	冰川边界提取
LT51510332011275KHC01	2011-10-02	30	冰川边界提取
LE71510332012238PFS00	2012-08-25	15	冰川边界提取
LC81510332013280LGN01	2013-10-07	15	冰川边界提取
LC81510332014219LGN01	2014-08-07	15	冰川边界提取
LC81510332015286LGN01	2015-10-13	15	冰川边界提取
LC81510332016273LGN00	2016-09-29	15	冰川边界提取
LC81510332017227LGN00	2017-08-15	15	冰川边界提取
LC81510332020268LGN00	2020-09-24	15	冰川边界提取
AST_L1A_00310082002061131	2002-10-08	15	冰面高程提取
AST_L1A_00310112009061031	2009-10-11	15	冰面高程提取
AST_L1A_00308222014061103	2014-08-22	15	冰面高程提取
AST_L1A_00308062020061034	2020-08-06	15	冰面高程提取

亚洲冰川运动的相关研究中,充分验证了其可靠性和准确性^[24-25]。本研究中选用了 2000—2018 年的单年流速及误差数据,空间分辨率为 240 m,数据版本为最新的 V01。

2.1.3 气象数据

本研究使用了塔吉克斯坦 Fedchenko 气象站 1935—1990 年的气温和降水观测数据 (<https://nsidc.org/data/G02174>),该气象站位于 Fedchenko 冰川中游海拔 4 179 m 处(38. 83° N, 72. 22° E),距 North Kyzkurgan 冰川中心仅约 20 km(图 1)。

2.2 方法

2.2.1 冰川边界解译

本研究采用目视解译方法提取冰川边界。由于 North Kyzkurgan 冰川末端仅存在少量表碛,因此本研究直接在 Landsat 假彩色合成影像中,根据冰川区与非冰川区显著的色彩差异进行冰川边界的数字化^[26-27]。在实际解译过程中,本研究首先完成 2020 年的冰川边界提取,在此基础上结合其他年份的 Landsat 影像,保持冰川上部积累区不变,只修改

冰川末端发生变化的部分,从而获取其他年份的冰川边界。

2.2.2 DEM空间匹配

本研究基于 ENVI 软件中的“DEM Extraction”模块利用 ASTER 立体像对提取 DEM。我们采用相对定向法提取 DEM,在每对立体像对中自动生成连接点并进行修正,确保每对影像中连接点不少于 80 个且均匀分布,最终连接点的 Y 方向最大视差控制在一个像元以内^[28]。为保证 DEM 提取的精度,将提取的 ASTER DEM 空间分辨率设置为 30 m 并全部投影到 WGS84 UTM zone 43 N 坐标系下。

我们采用统计学方法对 DEM 空间匹配误差进行校正,但多源 DEM 之间的高程差是数据匹配偏差与冰川变化共同作用的结果,因此在非冰川区开展校正工作以排除冰川变化的影响。本研究基于 DEM 的空间匹配偏差与坡向、坡度等地形因子的相关关系,对不同时期 ASTER DEM 之间的空间匹配偏差进行了计算和校正(表 2)^[29]。在校正过程中我们采用±100 m 作为剔除非冰川区高程差中异常值

的阈值,还剔除了地面坡度小于5°的区域,以提高匹配精度^[30]。

表2 不同DEM之间的空间偏移量
Table 2 The X-Y-Z shift vector between two DEMs

基准DEM	待匹配DEM	偏移量/m		
		X方向	Y方向	Z方向
ASTER2002	ASTER2009	23.5	64.2	-37.5
ASTER2009	ASTER2014	-33.7	-86.2	11.7
ASTER2014	ASTER2020	37.1	48.7	-4.6

2.3 不确定性分析

2.3.1 冰川边界提取的不确定性

本研究采用统计冰川轮廓线经过的像元数量的方法,评价目视解译提取冰川边界的不确定性^[31]。如公式(1):

$$E_A = N \cdot \lambda / 2 \tag{1}$$

式中: E_A 为解译结果的不确定性, N 为冰川轮廓线经过的像元数量, λ 为像元面积(MSS影像为3 600 m², TM为900 m²,ETM+/OLI为225 m²)。

冰川面积变化的不确定性(E_{AC})由公式(2)计算得出:

$$E_{AC} = \sqrt{(E_{A1})^2 + (E_{A2})^2} \tag{2}$$

式中: E_{A1} 和 E_{A2} 分别为两个时期冰川边界提取的不确定性。

2.3.2 冰面高程变化的不确定性

经过空间匹配后,尽管DEM之间在非冰川区的高程差已趋近于0,但仍会存在一定的高程残差,因此必须对DEM的空间匹配精度进行评价。如公式(3)、(4)所示^[30]:

$$SE = STDV / \sqrt{n} \tag{3}$$

$$\sigma = \sqrt{MED^2 + SE^2} \tag{4}$$

式中:SE和STDV为非冰川区DEM高程差的均方根误差和标准差; n 为去空间自相关处理后的像元数量(本研究采用600 m作为去空间自相关距离); σ 为DEM间的高程变化误差;MED为非冰川区DEM间的平均高程差。表3为不同时期DEM空间匹配校正前后的误差特征分布,可见校正后DEM间在非冰川区的高程差明显减小,匹配精度显著提高。

表3 DEM高程差不确定性
Table 3 The uncertainties of DEM differences

基准DEM	匹配DEM	校正前		校正后		n	SE/m	σ /m
		MED/m	STDV	MED/m	STDV			
ASTER2002	ASTER2009	51.37	54.45	0.19	23.06	528	1.00	1.02
ASTER2009	ASTER2014	27.87	50.11	0.32	23.25	486	1.05	1.10
ASTER2014	ASTER2020	-17.59	48.86	0.92	22.78	528	0.99	1.35

3 结果

3.1 冰川面积和长度变化

基于Landsat影像的冰川边界解译结果表明(图2),1973—2020年North Kyzkurgan冰川的面积和长度都经历了显著变化。1973—2006年,North Kyzkurgan冰川处于退缩状态,末端累计退缩约1.31 km,冰川面积也由(26.63±2.00) km²减少为(24.27±0.48) km²。2006—2011年,North Kyzkurgan冰川整体处于退缩状态,面积减少至(24.01±0.93) km²,但值得注意的是在此期间,在冰川末端退缩的同时还发生了膨胀变宽的现象[图3(a),黑色箭头处]。总体上,1973—2011年North Kyzkurgan冰川处于退缩状态且退缩速率较为稳定,冰川面积累计减少(2.62±0.41) km²(9.84%±1.54%)。2011—2016年,North Kyzkurgan冰川末端突然大幅

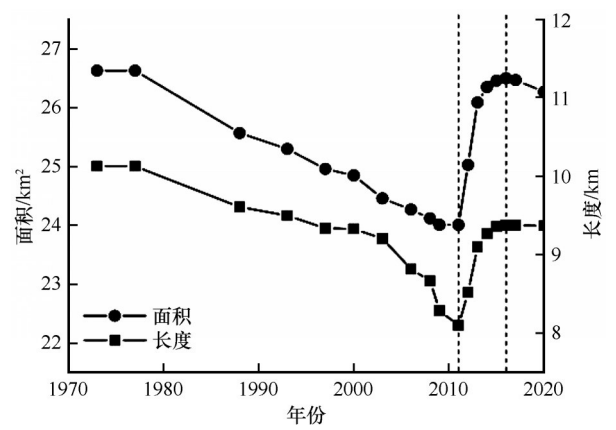


图2 1973—2020年North Kyzkurgan冰川面积和长度变化
Fig. 2 Glacier area and length change for North Kyzkurgan Glacier during 1973—2020

度前进了1.17 km,冰川面积也急剧扩张了(2.49±0.14) km²(10.37%±0.58%),达到了(26.50±

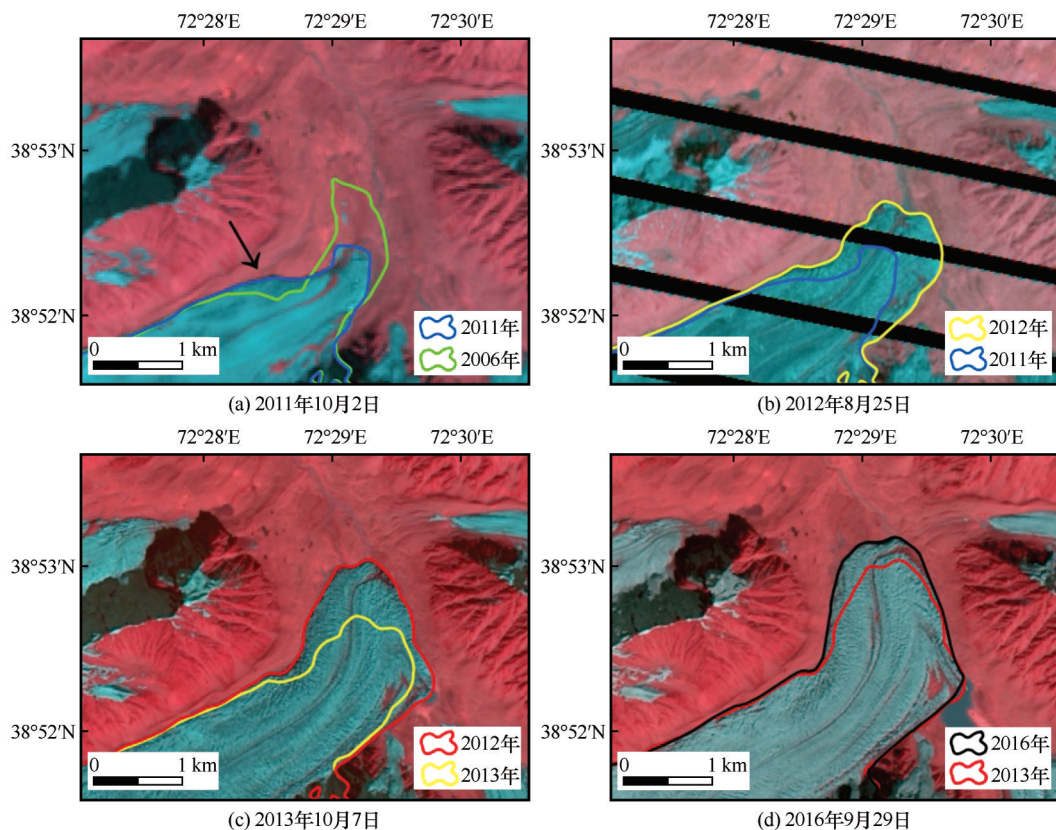


图3 2011—2016年 North Kyzkurgan 冰川末端位置变化

Fig. 3 Terminus positions at different time spans for North Kyzkurgan Glacier during 2011—2016

0.50) km²。这6年内 North Kyzkurgan 冰川的长度和面积变化极为显著,几乎相当于该冰川自1973—2011年来近40年的长度和面积退缩量。2016年, North Kyzkurgan 冰川面积和长度达到了1970s以来的最大值,此后又开始退缩。

本研究进一步分析了2011—2016年, North Kyzkurgan 冰川末端的前进和表面特征变化过程。如图3所示,2006年8月—2011年10月 North Kyzkurgan 冰川末端出现了膨胀变宽现象[图3(a),黑色箭头处],但冰川表面依然平整,表明冰川物质已开始挤压转移,但规模较为有限。2011年10月—2013年10月,冰川面积发生了迅速扩张,末端累计前进1.08 km,冰川表面裂隙广泛发育,剧烈破碎化,表明冰川物质由积蓄区向接收区迅速转移[图3(b)和3(c)]。2013年10月—2016年9月,冰川面积进一步扩张,末端继续前进,但前进的幅度已明显减弱,在2016年9月后末端前进停滞,表明冰川物质的转移过程逐渐减弱直至结束[图3(d)]。

3.2 冰面高程变化

本研究选择影像质量较优的2002年、2009年、2014年和2020年4期 ASTER 立体像对提取 DEM,

对 North Kyzkurgan 冰川的表面高程变化状况进行了计算和分析。计算结果表明:2002—2009年冰川跃动发生前[图4(a)], North Kyzkurgan 冰川积蓄区上部表面高程基本保持稳定,末端表面高程降低,积蓄区下部高程却略有升高。同时期冰川的相应位置也发生了膨胀变宽,但冰川表面仍基本保持平整[图3(a)],表明积蓄区下部冰体因受到了强烈挤压而膨胀变形^[2]。2009—2014年跃动发生期间[图4(b)], North Kyzkurgan 冰川表面高程变化非常显著,冰川末端高程明显升高,最大升高幅度达到了近180 m,冰川中游高程则明显降低,表明在跃动过程中大量物质由积蓄区转移到了接收区,因此也导致了冰川末端的大幅度前进。2014—2020年冰川跃动结束后[图4(c)], North Kyzkurgan 冰川的表面高程普遍降低,表明由于跃动造成的冰面剧烈破碎化,导致冰川末端处于强烈消融状态。

此外, Zhou 等^[20]利用 KH-9 DEM 和 SRTM DEM 计算帕米尔中部冰川表面高程变化的结果表明,1975—1999年 North Kyzkurgan 冰川积蓄区增厚速率为(0.50±0.31) m·a⁻¹,接收区减薄速率高达(1.87±0.31) m·a⁻¹,而同时期帕米尔中部冰川的整

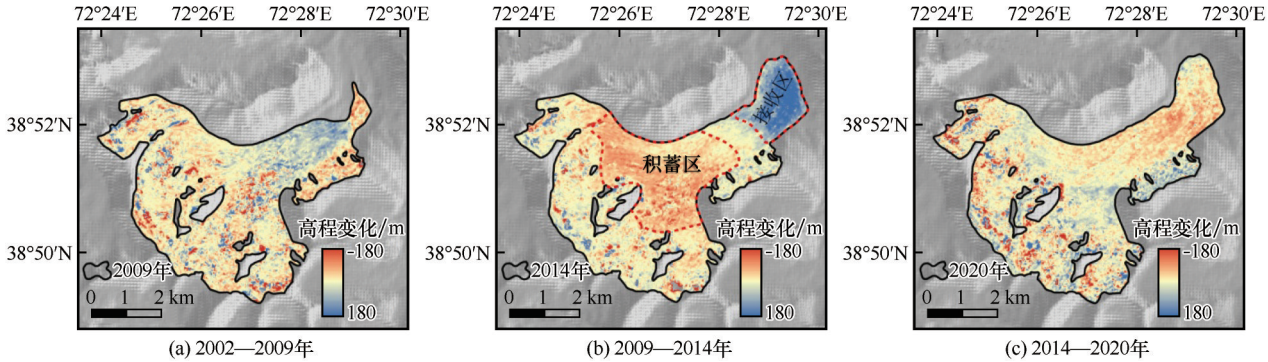


图4 2002—2009年、2009—2014年以及2014—2020年North Kyzkurgan冰川表面高程变化
Fig. 4 Elevation difference of the North Kyzkurgan Glacier during 2002—2009, 2009—2014 and 2014—2020

体物质平衡水平却仅为 $(0.03\pm0.24)\text{ m w. e.}\cdot\text{a}^{-1}$ 。这表明1975—1999年在帕米尔中部冰川基本保持稳定的同时,North Kyzkurgan冰川的表面高程却发生了显著变化,冰川末端处于强烈退缩状态。

3.3 冰面流速变化

本研究基于ITS_LIVE产品计算和分析了2000—2018年North Kyzkurgan冰川表面的年平均[图5(a)]和年最大流速[图5(b)]变化。如图5所示,在2000—2011年,North Kyzkurgan冰川运动速度十分缓慢且稳定,年平均流速介于 $7.38\sim15.47\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,年

最大流速介于 $34.37\sim105.12\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。即便是冰川下游发生膨胀变宽的2006—2011年,冰川流速也仅有微弱的增加。2011年之后伴随着冰川末端的快速前进,冰川流速也显著加快,2013年冰川表面最大流速达到最高约 $(400.60\pm1.91)\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,2014年平均流速达到最高约 $(39.39\pm0.54)\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$,是跃动发生前的数十倍。冰川最大流速出现的位置集中在中下游,并伴随着流速的增加向下游转移。总体上,North Kyzkurgan冰川表面流速在2013年前后达到顶峰,此后迅速减缓,在2016年基本恢复到了跃动发生前的水平。

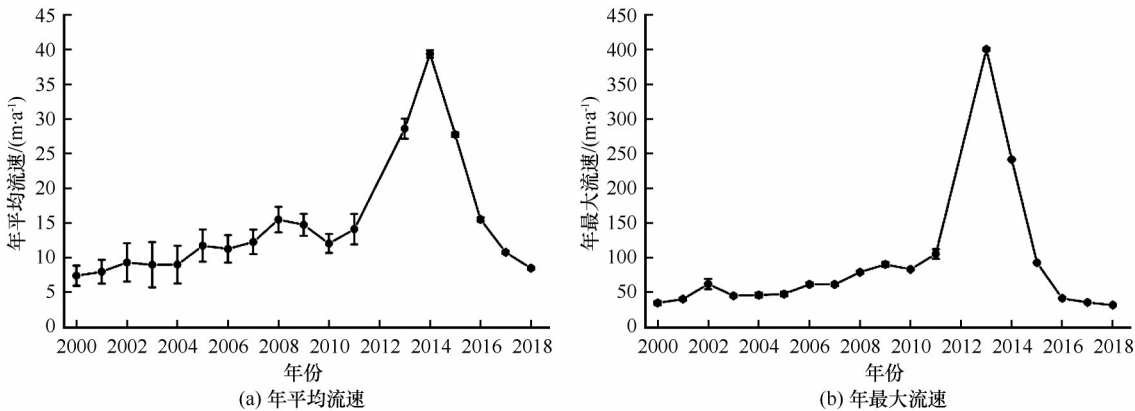


图5 2000—2018年North Kyzkurgan冰川的年平均流速(a)和年最大流速(b)
Fig. 5 Annual average and maximum surface flow velocities of the North Kyzkurgan Glacier from 2000 to 2018

4 讨论

4.1 冰川跃动过程

冰川跃动的发生具有周期性,从十几年到上百年不等,通常根据运动状态划分跃动周期内的恢复阶和跃动阶^[1,32]。由于冰川跃动会引发面积、长度、高程、流速等一系列的变化,因此可以根据这些变化识别跃动冰川的恢复阶和跃动阶^[10]。就North Kyzkurgan冰川而言,2011年以前,在整体上冰川面

积持续退缩,表面高程缓慢降低,运动速度基本稳定;2011—2016年,冰川末端迅速前进,面积大幅度扩张,积蓄区和接收区高程剧烈波动,冰川流速也显著加快,同时冰川表面裂隙广泛发育,剧烈破碎化;2016年之后,冰川末端前进停滞,表面高程降低,流速也恢复到跃动发生前的水平。这些综合变化表明,North Kyzkurgan冰川是一条典型的跃动冰川,1973—2011年处于恢复阶,2011—2016年处于跃动阶,2016年之后重新进入了恢复阶,因此该冰

川的跃动周期至少在 40 年以上。

此外,值得注意的是 2006—2011 年 North Kyzkurgan 冰川下游出现了膨胀变宽的现象[图 3(a)],这种现象的出现主要与冰川跃动的发生过程有关。冰川跃动是冰体内部应力集中释放的结果,由于积蓄区不断增厚,下部冰体受到的应力逐渐增加,当达到冰体所能承受的极限时,应力获得集中释放,即引发冰川跃动^[33-34]。因此跃动过程先是冰川积蓄区下部挤压冰体产生缓慢变形,然后才引起上下游的快速运动^[2,17,32]。图 3 和图 4 显示冰川膨胀变宽的位置出现在积蓄区下部向接收区的过渡处,且此时冰川表面仍基本保持平整,即表明这种现象的出现是上游物质积累挤压所致。在高亚洲其他冰川跃动事件中也观察到了同类现象,如喀喇昆仑山的 Balt Bare 冰川和木孜塔格的鱼鳞川冰川^[2,10,17]。在 2006—2011 年 North Kyzkurgan 冰川下游膨胀变宽的同时,冰川流速却基本保持稳定,同样表明此时尚处于快速跃动前。

帕米尔是全球跃动冰川集中分布的地区之一,现有的跃动冰川编目和相关研究表明,帕米尔跃动冰川存在较大的异质性,跃动阶从数月到十几年不等,跃动周期则从十几年到数十年不等^[10-11]。总体而言,西帕米尔和东帕米尔跃动冰川的跃动阶和跃动周期相对较短,分别集中在数年和十几年,而帕米尔中部跃动冰川的跃动阶和跃动周期相对较长。西帕米尔的 Medvezhy 冰川分别在 1937 年、1951 年、1963 年、1973 年、1989 年、2001 年、2011 年发生跃动,每次跃动阶长度不到 1 年,跃动周期在 10~14 年左右^[35]。Oshanina 冰川分别在 1961—1962 年、1983—1984 年、2010—2011 年发生跃动,其跃动周期稳定在 25 年左右^[10-11]。东帕米尔昆盖山的 G074348E 39282N 冰川跃动阶为 3 年左右,两次跃动的间隔也仅为 10 年^[12],5Y663L0023 冰川跃动阶为 4 年,恢复阶最短为 15 年左右^[14]。本研究中位于帕米尔中部的 North Kyzkurgan 冰川跃动阶为 6 年,跃动周期则达到了 40 年以上,而同样位于帕米尔中部的 Bivachny 冰川分别于 1975—1978 年、2011—2014 年发生跃动,两次跃动间隔也在 35 年左右^[11,13],因此从东、西帕米尔向帕米尔中部,跃动冰川的跃动周期呈现增加趋势。这种现象在一定程度上与地形因素有关,东、西帕米尔山地,如科学院山脉、昆盖山等地区的跃动冰川上游往往存在大面积的积雪陡壁,在积蓄区接受降雪直接补给的同时也接受雪崩

补给,因此物质积累过程迅速,跃动周期相对较短^[4,36]。而研究冰川所在的帕米尔中部腹地,地形平缓,缺乏雪崩补给(图 1),只能依赖降雪的缓慢积累,因此跃动周期较长。

4.2 跃动发生的潜在因素

冰川跃动的发生机理较为复杂,可以将跃动冰川分为温冰川和多温型冰川^[37]。温冰川的跃动机制主要由水文模型解释,夏季冰川消融产生的大量融水进入冰体和冰下,水量增加导致静水压力增加,排水系统发生扩张,当融水减少、静水压力下降时引发排水通道坍塌,在冰川底部融水的润滑作用下触发冰川跃动,因此温冰川的跃动周期短、运动速度快、通常在冬季开始夏季结束^[38-39]。多温型冰川的跃动机制主要由热力模型解释,冰川上部物质不断积累、应力不断增加,导致底部达到压力熔点,产生大量融水,而冰川下游的冰体和冻土阻碍了融水流失,使融水在冰床不断蓄积,在融水的润滑和顶托作用下,冰川发生快速滑动即冰川跃动,因此多温型冰川的跃动周期长、运动速度慢,在任何季节都可开始与结束^[40]。

North Kyzkurgan 冰川所在的帕米尔中部地区气候寒冷,降水量丰富且以降雪为主,Fedchenko 气象站 1935—1990 年的气象观测资料显示,该地区年平均气温为 $-6.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ [图 6(a)],年均降水量高达 1 200 mm[图 6(b)]。而近三十年来的气象观测资料以及 CRU 再分析资料都表明,帕米尔中部气温呈上升趋势 $[0.1\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}]$,降水量则基本保持稳定^[41-42]。与此同时, North Kyzkurgan 冰川的积累区面积比率超过 0.8,冰川作用正差达到 1 000 m,因此极低的气温和丰富的降雪为该冰川提供了充足的物质补给。跃动冰川的恢复阶长短一般取决于降雪填平积蓄区所需的时间^[43],而 North Kyzkurgan 冰川缺乏雪崩补给,物质积累几乎完全依赖降雪直接补给,因此跃动周期漫长。基于 DEM 和遥感影像的观测结果显示,在 1973—2011 年长达近 40 年的时间里, North Kyzkurgan 冰川积蓄区表面高程不断升高,表明这一时期该冰川获取了充分的物质积累。在积蓄区物质不断增多,冰川底部受到的应力不断增大以及近几十年气温升高的共同影响下,冰川底部达到了压力熔点,融水不断增加,最终触发了冰川跃动。综上所述, North Kyzkurgan 冰川跃动的发生是物质长期积累的结果,主要由热力学因素所致。

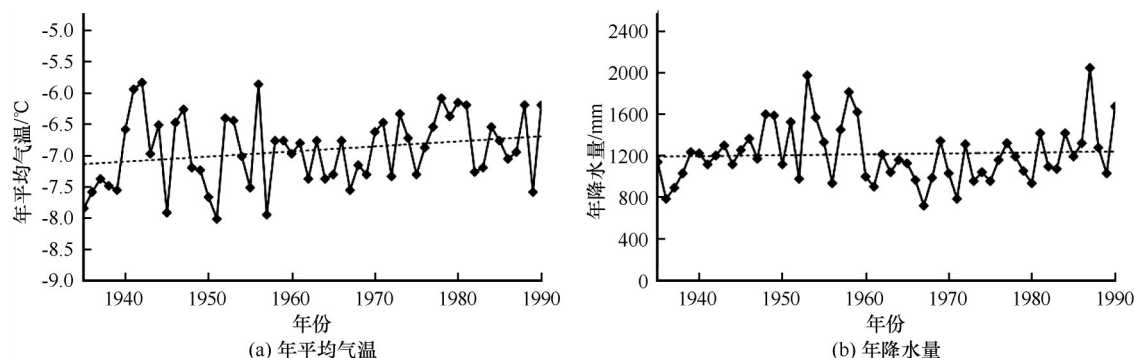


图6 1935—1990年研究区年平均气温(a)和年降水量变化(b)

Fig. 6 Mean annual air temperature and precipitation for 1935—1990 in study region

5 结论

本文利用1973年以来Landsat影像、ASTER立体像对和ITS_LIVE数据产品,对帕米尔中部North Kyzkurgan冰川开展联合监测,从冰川面积、高程、流速等方面分析了该冰川跃动前、跃动中和跃动后的变化特征,揭示了该冰川的完整跃动过程。研究结果表明:

North Kyzkurgan冰川是一条典型的跃动冰川,在1973—2011年处于恢复阶,2011—2016年处于跃动阶,2016年之后重新进入恢复阶。North Kyzkurgan冰川所在的帕米尔中部地区气候寒冷,降雪量丰富,同时该冰川的积累区面积比率超过0.8,冰川作用正差近1 000 m,因此冰川补给物质充足。随着积蓄区不断增厚,冰川底部达到压力熔点,融水不断增多,在融水的润滑和顶托作用下,最终导致冰川发生跃动。因此,North Kyzkurgan冰川跃动的发生主要与热力学因素有关。

参考文献(References):

- [1] Qin Dahe. Glossary of cryospheric science[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014. [秦大河. 冰冻圈科学辞典[M]. 北京: 气象出版社, 2014.]
- [2] Bhambri R, Hewitt K, Kawishwar P, et al. Surge-type and surge-modified glaciers in the Karakoram[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 15391.
- [3] Sevestre H, Benn D I. Climatic and geometric controls on the global distribution of surge-type glaciers: implications for a unifying model of surging[J]. Journal of Glaciology, 2015, 61 (228): 646-662.
- [4] Farinotti D, Immerzeel W W, Kok R J, et al. Manifestations and mechanisms of the Karakoram glacier Anomaly[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(1): 8-16.
- [5] Ding Yongjian, Yang Jianping, Fang Yiping, et al. Adaptation research of cryosphere change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 11-22. [丁永建, 杨建平, 方一平, 等. 冰冻圈变化的适应框架与战略体系[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 11-22.]

- [6] Zhang Zhen, Liu Shiyin, Wei Junfeng, et al. Monitoring recent surging of the Karayaylak Glacier in Pamir by remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2016, 38(1): 11-20. [张震, 刘时银, 魏俊峰, 等. 新疆帕米尔跃动冰川遥感监测研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 11-20.]
- [7] Hewitt K. The Karakoram Anomaly? Glacier expansion and the 'Elevation Effect', Karakoram Himalaya[J]. Mountain Research and Development, 2005, 25(4): 332-340.
- [8] 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.
- [9] Wang Yetang, Hou Shugui, Huai Baojuan, et al. Glacier anomaly over the western Kunlun Mountains, Northwestern Tibetan Plateau, since the 1970s[J]. Journal of Glaciology, 2018, 64(246): 624-636.
- [10] Goerlich F, Bolch T, Paul F. More dynamic than expected: an updated survey of surging glacier in the Pamir[J]. Earth System Science Data, 2020, 12: 3161-3176.
- [11] Kotlyakov V M, Osipova G B, Tsvetkov D G. Monitoring surging glaciers of the Pamirs, central Asia, from space[J]. Annals of Glaciology, 2008, 48(1): 125-134.
- [12] Lü Mingyang, Guo Huadong, Lu Xiancai, et al. Characterizing the behaviour of surge- and non-surge-type glaciers in the Kingata Mountains, eastern Pamir, from 1999 to 2016[J]. The Cryosphere, 2019, 13(1): 219-236.
- [13] Wendt Y, Mayer C, Lambrecht A, et al. A glacier surge of Bivachny Glacier, Pamir Mountains, observed by a time series of high-resolution Digital Elevation Models and glacier velocities[J]. Remote Sensing, 2017, 9(4): 388.
- [14] Zhang Zhen, Liu Shiyin, Wei Junfeng, et al. Monitoring a glacier surge in the Kungey Mountain, eastern Pamir Plateau using remote sensing[J]. Progress in Geography, 2018, 37(11): 1545-1554. [张震, 刘时银, 魏俊峰, 等. 东帕米尔高原昆盖山跃动冰川遥感监测研究[J]. 地理科学进展, 2018, 37(11): 1545-1554.]
- [15] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Characterizing the May 2015 Karayaylak Glacier surge in the eastern Pamir Plateau using remote sensing[J]. Journal of Glaciology, 2016, 62(235): 944-953.
- [16] Feng Lili, Jiang Liming, Liu Lin, et al. Karayaylak glacier changes in the Kongur Mountain of eastern Pamir between 1973 and 2016 based on active and passive remote sensing technologies[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(2): 162-169. [冯力力, 江利明, 柳林, 等. 新疆克拉牙依拉克冰川变化(1973-2016)主被动遥感监测分析[J]. 国土资源

- 遥感, 2020, 32(2): 162-169.]
- [17] Gou 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.]
- [18] Paul F, Strozzi T, Schellenberger T, et al. The 2015 surge of Hispar Glacier in the Karakoram[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(9): 888.
- [19] Zhang Zhen. Mass changes of glaciers in eastern Pamir using Remote Sensing and GIS[D]. Lanzhou: University of Chinese Academy of Sciences, 2016. [张震. 基于遥感和GIS的东帕米尔高原冰川冰量变化研究[D]. 兰州: 中国科学院大学, 2016.]
- [20] Zhou Yushan, Li Zhiwei, Li Jia, et al. Geodetic glacier mass balance (1975-1999) in the central Pamir using the SRTM DEM and KH-9 imagery[J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(250): 309-320.
- [21] Shangguan Donghui, Bolch T, Ding Yongjian, et al. Mass changes of Southern and Inylchek Glacier, Central Tian Shan, Kyrgyzstan, during 1975 and 2007 derived from remote sensing data[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(2): 703-717.
- [22] Gardner A S, Moholdt G, Scambos T, et al. Increased West Antarctic and unchanged East Antarctic ice discharge over the last 7 years[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(2): 521-547.
- [23] Gardner A S, Scambos T, Moholdt G, et al. ITS_LIVE regional glacier and ice sheet surface velocities[DB]. Data archived at National Snow and Ice Data Center, 2019. DOI: 10.5067/6II6VW8LLWJ7.
- [24] Huang Danni, Zhang Zhen, Zhang Shasha, et al. Characteristics of glacier movement in the eastern Pamir Plateau[J]. *Arid Land Geography*, 2021, 44(1): 131-140. [黄丹妮, 张震, 张莎莎, 等. 东帕米尔高原冰川运动特征分析[J]. *干旱区地理*, 2021, 44(1): 131-140.]
- [25] Dehecq A, Gourmelen N, Gardner A S, et al. Twenty-first century glacier slowdown driven by mass loss in High Mountain Asia[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(1): 22-27.
- [26] Nuimura T, Sakai A, Taniguchi K, et al. The GAMDAM glacier inventory: a quality controlled inventory of Asian glaciers[J]. *The Cryosphere*, 2015, 8(3): 849-864.
- [27] Sakai A. Brief communication: Updated GAMDAM glacier inventory over high-mountain Asia[J]. *The Cryosphere*, 2019, 13(7): 2043-2049.
- [28] Chen An'an. Glacier mass budgets in the High Mountain Asia based on Multi-source DEMs over past 50 years[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017. [陈安安. 基于多源DEM的近50年高亚洲地区冰川物质平衡[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.]
- [29] Nuth C, Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change[J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(1): 271-290.
- [30] Bolch T, Pieczonka T, Benn D I. Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery[J]. *The Cryosphere*, 2011, 5(2): 349-358.
- [31] 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.]
- [32] Xie Zichu, Liu Chaohai. Introduction to Glaciology[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010. [谢自楚, 刘潮海. *冰川学导论*[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.]
- [33] Been D I, Fowler A C, Hewitt I, et al. A general theory of glacier surges[J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(253): 701-716.
- [34] Been D I, Jones R L, Luckman A, et al. Mass and enthalpy budget evolution during the surge of a polythermal glacier: a test of theory[J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(253): 717-731.
- [35] Muzinska A. Transport conditions of mountain-surging glaciers as recorded in the micromorphology of quartz grains (Medvezhiy Glacier, West Pamir)[J]. *Geologos*, 2015, 21(2): 127-138.
- [36] Lin Hui, Li Gang, Cuo Lan, et al. A decreasing glacier mass balance gradient from the edge of the Upper Tarim Basin to the Karakoram during 2000-2014[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 6712.
- [37] Quincey D J, Glasser N F, Cook S J, et al. Heterogeneity in Karakoram glacier surges[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120(7): 1288-1300.
- [38] Burgess E W, Forster R R, Larsen C F, et al. Surge dynamics on Bering Glacier, Alaska, in 2008-2011[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(6): 1251-1262.
- [39] Lingle C S, Fatland R. Does englacial water storage drive temperate glacier surge?[J]. *Annals of Glaciology*, 2003, 36(1): 14-20.
- [40] Fowler A C, Murray T, Ng F. Thermally controlled glacier surging[J]. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(159): 527-538.
- [41] Xian Liju, Mu Zhenxia, Jiang Huifang, et al. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of climatic factor in Tajikistan for nearly 31 years[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2015, 26(2): 44-50. [鲜丽菊, 穆振侠, 姜卉芳, 等. 塔吉克斯坦近31年气候要素时空变化特征分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(2): 44-50.]
- [42] Yang Xuwen, Wang Ninglian, Chen An'an, et al. The relationship between area variation of the Aral Sea in the arid Central Asia and human activities and climate change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(2): 681-692. [杨雪雯, 王宁练, 陈安安, 等. 中亚干旱区咸海面积变化与人类活动及气候变化的关联研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(2): 681-692.]
- [43] Eisen O, Harrison W D, Raymond C F. The surges of Variegated Glacier, USA, and their connection to climate and mass balance[J]. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(158): 351-358.

Monitoring recent surging of the North Kyzkurgan Glacier in central Pamir by remote sensing

LI Zhijie^{1,2}, WANG Ninglian^{1,2,3}, HOU Shanshan^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, 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: As a special type of glacier, surging glaciers are often related to glacier hazard events such as glacial lake outburst flood, glacial debris flow and landslide. Although only 1% of the world's glaciers have been observed to surge, the scientific and practical significance of surging glaciers can not be ignored. In this paper, based on Landsat MSS/TM/ETM+/OLI images, ASTER stereo pair images, and ITS_LIVE data, we obtained the glacier area, elevation and velocity changes of the North Kyzkurgan Glacier in central Pamir before, during and after the surging, and revealed the complete surge process of this glacier. The results show that, the North Kyzkurgan Glacier is a typical surging glacier, which was in the quench phase during 1973—2011, in the active phase during 2011—2016. After 2016, the glacier entered a quench phase again. In the active phase of 2011—2016, the glacier terminal rapidly speeds up and advances, with marked thinning over the accumulation area and thickening on the ablation area. The active phase of the surging glacier was 6 years, the quench phase was likely about 40 years at least. The main reason behind the glacier surge may be the extremely low temperature and abundant precipitation, as was recorded at the Fedchenko Meteorological Station in 1935—1990. In addition, the accumulation area ratio of the North Kyzkurgan Glacier is more than 0.8, and the positive difference of glaciation is about 1 000 m, so the glacier material accumulation is rapidly. With the continuous thickening of glacier accumulation area which build-up by snowfall, avalanches and drifting snow, the glacier bed was raised to the pressure melting point and produced meltwater. The meltwater reduced basal drag and faster sliding, and finally led to the glacier surging. Therefore, the surging of the North Kyzkurgan Glacier was mainly caused by thermal-mechanism.

Key words: glacier surging; glacier hazards; Pamir; remote sensing; North Kyzkurgan Glacier

(责任编辑: 郭万钦; 编辑: 周成林)