

doi: 10.6046/gtzyyg.2020.02.21
引用格式: 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. (Feng L L, Jiang L M, Liu L, 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.)

新疆克拉牙依拉克冰川变化(1973—2016) 主被动遥感监测分析

冯力力^{1,2}, 江利明^{1,2}, 柳林³, 孙亚飞⁴

(1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430071;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 华中科技大学物理学院引力实验中心,
武汉 430074; 4. 河南城建学院, 平顶山 467036)

摘要: 2015 年 5 月,新疆克拉牙依拉克冰川西支发生跃动,本文利用 1973 年美国锁眼(Key Hole)卫星光学遥感数据、2000 年的美国 SRTM DEM 数据以及 2013 年、2016 年的 TanDEM-X 双站 InSAR 数据,获取了 1973—2016 年克拉牙依拉克冰川的表面高程变化情况。结果表明,1973—2013 年,克拉牙依拉克冰川积累区出现轻微高程减薄,2013—2016 年,西支冰川末端表面高程增厚明显,冰川上部则出现清晰的表面高程减薄;利用 2013—2016 年 Landsat ETM+ 光学遥感数据监测了冰川表面运动速度变化,发现西支冰川从 2015 年 4 月中开始活动强烈,到跃动发生时,运动速度到达顶峰。综合分析认为,跃动发生前该冰川末端未出现明显前进或者后退的趋势,而冰川流速发生了较大的变化;此外,结合气象站点数据结果,认为该冰川此次跃动与局部气候变化关系不大,跃动的主要原因很可能为冰川自身结构变化,为本区域冰川灾害预警机制的建立提供了数据基础。
关键词: 克拉牙依拉克冰川; 冰川跃动; 主被动遥感监测; 高程变化; 冰川流速
中图法分类号: P 228; P 343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2020)02-0162-08

0 引言

2015 年 5 月,新疆公格尔九别峰北坡冰川西支发生快速下滑移动,导致周边草场以及房屋被冰体淹没。冰川跃动是一种特殊的冰川现象,这种冰川在短时间(2~3 a)内以超出正常速度几倍的速度运动,然后又逐渐恢复平静状态,通常是周期性的^[1]。冰川跃动期间会引起冰川物质快速转移和重新分布,并伴随明显的表面特征,比如冰裂隙、冰川上部表面高程剧烈下降以及冰川末端突然前进等^[2,3]。目前大多数跃动冰川集中在阿拉斯加、格陵兰岛、加拿大北极以及中亚的部分山系(喀喇昆仑、帕米尔、天山等)^[4-8],在俄罗斯高加索、安第斯、新西伯利亚群岛等一些区域也出现过关于冰川跃动的报道^[9-11]。国内上官冬辉等^[12]利用 Landsat 影像发现喀喇昆仑北坡的两条冰川曾发生过冰川跃动;郭

万钦等^[13]基于 Landsat 光学遥感数据监测到木孜塔格峰西北坡鱼鳞冰川中支在 2007—2011 年间发生冰川跃动,冰川北侧末端几年内前进了约 548 m;刘景时等^[14]利用环境减灾卫星数据监测到克勒青河谷克亚吉尔冰川的跃动,并指出冰川跃动造成的河道阻塞是引发当地洪水灾害的主要原因;国外 Kotlyakov 等^[8]利用 Resurs-F 及 Landsat 等数据对西帕米尔地区跃动冰川的跃动周期进行了长期监测,发现该区域跃动冰川跃动期从数月到 10 a 不等;Kaab 等^[15]对 2016 年发生在西藏 Aru 地区的两条跃动冰川利用多种遥感影像进行了长时间序列的研究,首次提出温度和降水是引发跃动冰川主要因素。目前关于东帕米尔地区跃动冰川的研究较为匮乏。20 世纪 60 年代,遥感技术不断发展,为山地冰川的监测提供了重要技术手段,开创了遥感监测冰川变化的新时代。随着合成孔径雷达技术的发展,

收稿日期: 2019-08-28; 修订日期: 2020-02-26
基金项目: 国家重点研发计划项目“全球山地冰川物质平衡及要素的观测与反演”(编号: 2017YFA0603103)和国家自然科学基金重点项目“喀喇昆仑-喜马拉雅冰川物质平衡的空间大地测量研究”(编号: 41431070)共同资助。
第一作者: 冯力力(1995-),女,硕士研究生,主要从事主被动遥感冰川监测研究。Email: fenglili17@mails.ucas.edu.cn。
通信作者: 江利明(1976-),男,研究员,博士生导师,主要从事 InSAR 大地测量研究。Email: jlm@whigg.ac.cn。

尤其以2010年德国宇航局TanDEM-X科学计划和2000年美国国家航空航天局SRTM航天计划为代表的双站InSAR^[16–18],具有全天时、全天候的雷达成像能力,且双站观测模式能够有效消除大气扰动和时间去相干的影响,该技术在全球尺度的高分辨率、高精度DEM测绘领域有着巨大优势和广阔应用前景^[19–21]。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

克拉牙依拉克冰川(冰川编号5Y663B0025,38°37.41'N、75°17.16'E),位于公格尔九别峰北坡(图1),根据中国第二次冰川编目资料该冰川面积115.2 km²,是东帕米尔地区最大的冰川。该冰川分布着大量表碛,表碛覆盖率约为22.3%。

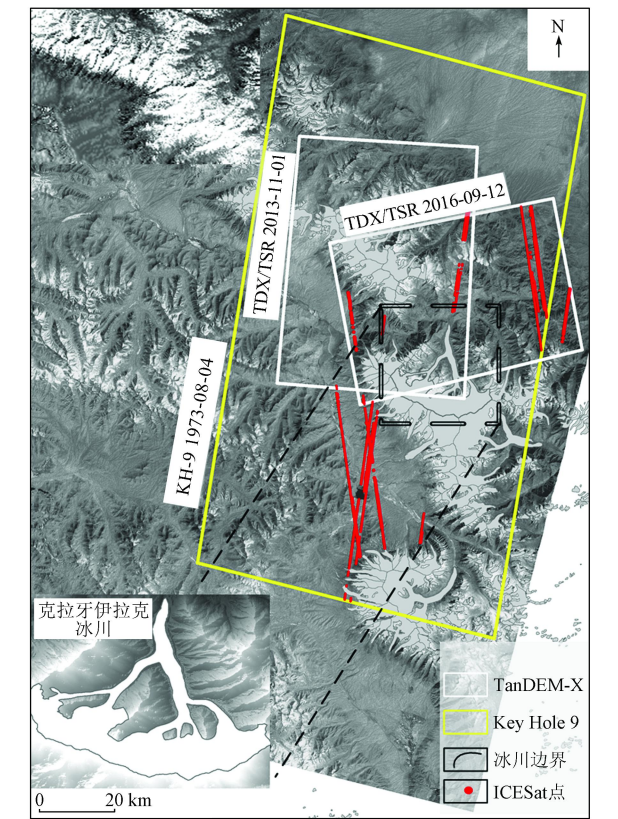


图1 研究区域及遥感数据分布情况
(底图为2018年04月05日Landsat 8影像)

Fig.1 Study area and distribution of remote sensing data

公格尔山位于东帕米尔高原的东南部,该区是东帕米尔高原最大的现代冰川作用中心,发育冰川有327条,总面积为640.15 km²。该区属于极大陆性冰川区,主要受高空西风环流和局地环流控制,降水

主要来自中纬度高空西风环流。本次冰川跃动发生在中巴经济走廊穿越区和丝绸之路经济带上重要交通区域,有较大的现实研究意义。由于该冰川环境恶劣,野外观测难度大,并且缺乏定位观测,因此遥感成为监测跃动冰川的主要手段。

1.2 数据源

本文研究中使用数据见表1。

表1 研究使用数据概览
Tab.1 Data used in this study

数据源	日期	空间分辨率/m	用途
SRTM DEM	2000-02-11/22	30	获取冰川表面高程
Key Hole	1973-08-04	6~9	获取冰川表面高程、物质平衡
TanDEM-X	2013-11-01	3	获取冰川表面高程
双站 SAR	2016-09-12	3	获取冰川表面高程
Landsat OLI	2013-09-07	15	提取冰川边界、获取冰川表面运动速度
	2015-06-17	15	提取冰川边界
	2016-06-01	15	提取冰川边界
	2017-10-20	15	提取冰川边界
	2018-04-30	15	提取冰川边界
Landsat OLI	2014-09-26	15	获取冰川表面运动速度
	2015-04-13	15	获取冰川表面运动速度
	2015-04-29	15	获取冰川表面运动速度
	2015-05-08	15	获取冰川表面运动速度
	2015-05-15	15	获取冰川表面运动速度
	2015-07-11	15	获取冰川表面运动速度
	2015-08-12	15	获取冰川表面运动速度
	2016-05-01	15	获取冰川表面运动速度
中国第二次冰川编目	2009年	—	冰川边界参考

1.2.1 TanDEM-X 双站 InSAR 数据

2010年6月21日,德国宇航局成功发射TanDEM-X(TDX)卫星,与之前的TerraSAR-X(TSX)卫星进行双星座模式运行,开创了真正意义的星载双站SAR干涉测量。与其他卫星星座运行方式相比,TanDEM-X双站SAR采用近距离螺旋结构运行,消除了时间去相干和大气去相干等去相干源;与2000年NASA获取的SRTM DEM相比,覆盖范围由南北纬60°扩展到全球,分辨率和高程精度分别提高到12 m和2 m^[20],根据用户需求,甚至可以分别达到6 m和0.8 m。未来几年内,TanDEM-X DEM将会替代SRTM DEM,成为新一代全球DEM基础数据。在本研究中,使用了2013年11月1日和2016年9月12日获取的两对TanDEM-X双站SAR影像,数据格式是已配准单视复数数据(CoSSC),两对数据的基本参数见表2。

表2 TanDEM-X 双站 InSAR 数据参数列表
Tab.2 Parameter list of TanDEM-X bistatic InSAR

双站 SAR 影像 ID	获取时间	极化方式	轨道	垂直基线	模糊度	中心入射角/°C
dims_op_oc_dfd2_578247212_1	2013-11-01	HH	D	97.524 8	-82.042	46.185 3
dims_op_oc_dfd2_578247212_2	2016-09-12	HH	D	128.461 6	58.656	44.562 3

1.2.2 Key Hole 数据

Key Hole 卫星系列是以军事侦察为目的的美国遥感卫星,在 CORONA 卫星运作后期,突破传统单一拍摄角度的摄影系统,发展了以 2 种角度拍摄的摄影系统,即利用两组镜头同时进行前视(forward)与后视(afterward)的影像拍摄,在该条件下可产生地表的立体影像,进一步生产数字高程模型,是当时最为先进遥感探测技术^[22]。KH-9 遥感卫星从 1973 年一直运行到 1980 年,记录了大量高空间分辨率(6~9 m)的地面信息,美国 USGS 在 2002 年对该数据进行解密,并公开发布,由于 KH-9 影像具有出色的立体成像能力,因此非常适用于提取早期高精度 DEM,数据获取网址: <https://earthexplorer.usgs.gov/>, 在本文中,使用了 1973 年 8 月 4 日获取的 3 景 KH-9 影像生成 1973 年克拉牙依拉克冰川区域 DEM。

1.2.3 其他遥感数据

ICESat(Ice, Cloud, and Land Elevation satellite)是 NASA 地球观测系统(EOS)的一部分,是首颗载有激光雷达传感器的卫星。ICESat 上搭载的 GLAS(Geoscience Laser Altimeter system)是一种星载的激光传感器系统,激光器每秒 40 次发射脉冲,在地面上形成直径为 70 m 左右的光斑,经过均值处理获得光斑中心高程值^[23]。ICESat 卫星测高高程精度在平坦区域为 0.1 m,但在地形起伏较大的区域或地形复杂的区域,其高程精度在 1 m 左右^[24]。本实验采用 ICESat 卫星测高数据作为高程基准数据对 TanDEM-X 双站 InSAR 和 Key Hole 9 获取的 DEM 进行精度评估,ICESat 空间分布情况见图 1,仅采用位于平坦区域的 ICESat 点进行 DEM 精度评估。

1972 年 Landsat 发射至今,美国陆地卫星系列(Landsat 1—5、7 和 8)提供了近 40 a 连续、一致的对地观测数据,加之其较大的覆盖范围和适中的分辨率,已成为全球冰川学研究的重要数据源。在本研究中,为减小积雪覆盖对冰流速提取时对特征点识别的影响,选取了 2013—2017 年 6 月—10 月获取的影像,每景影像的云覆盖率低于 40%。

2 方法

2.1 TanDEM-X DEM 生成方法

在本研究中,TanDEM-X DEM(TDX DEM)生成方法主要采用外部 DEM 差分方法。具体如下,首先,利用 SRTM-C DEM 作为外部 DEM,进行相位模拟计算,生成双站模拟相位^[25]。其次,已配准的单视复数据共轭生成干涉图,与双站模拟相位差分

处理,进行相位解缠,从而降低 TDX 双站 InSAR 干涉条纹对相位解缠效率和精度的影响。解缠后的 TDX 双站 InSAR 差分相位重新加入 SRTM-X 双站模拟相位,获得 TDX 双站 InSAR 解缠相位,直接进行相位高程转换及地理编码,生成 TDX raw DEM,由于卫星轨道基线偏差等原因,TDX raw DEM 存在较大的趋势性偏差,采用二次多项式拟合对其校正,即

$$g(x,y) = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x \cdot y + a_4x^2 + a_5y^2 \quad , \quad (1)$$

TDX raw DEM 去除误差趋势面后,生成校正后的 TDX DEM。技术流程见图 2。

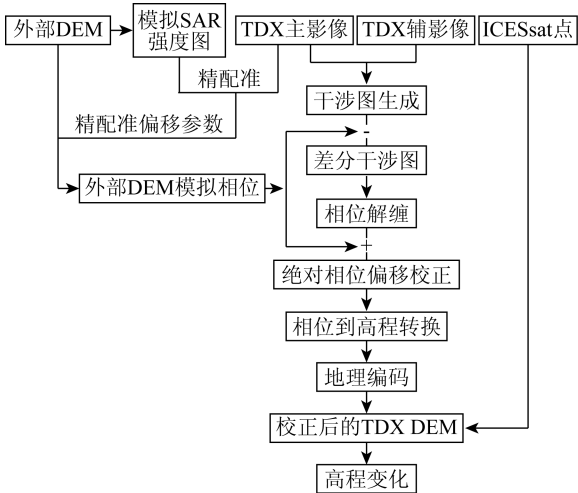


图 2 TDX 双站 InSAR 生成 DEM 技术流程图
Fig. 2 Flowchart of TanDEM-X DEM generation

2.2 KH-9 DEM 生成方法

由于原始影像获取后采用胶片方式存储,且存储时间久远,胶片不可避免地产生几何畸变。因此在使用前需对其进行几何纠正,利用影像上的十字标重建影像的几何结构^[26]。几何纠正利用原始影像上均匀分布的十字标及其理论位置,采用二次多项式求取参数,对影像进行纠正。使用双线性插值去除十字丝。并且将内定向框标之外的部分去除,再对影像进行 Wallace 滤波和直方图均衡化(图 3)。第二步是影像内外定向,获得内外定向参数,并进行直方图均衡局部自适应滤波,以增强局部对比度;第三步,利用 ERDAS 2013 LPS 模块中的相机模型提取 DTM,为了获得理想的三角测量结果,需要结合 Landsat 和 SRTM 影像,在不同特征点选取至少 30 个地面控制点(ground control points, GCP),GCP 一般选择道路河流的交叉等变化较小的区域,尽可能保证 GCP 点均匀分布在影像上,空间三角测量 RMSE 需控制在一个像素值内,在水平和垂直方向上的 GCP 的 RMSE 残差不大于 10 m。最后加入 30 m 分辨率的 SRTM 数据将原始 KH-9 DEM 重采样至

30 m 分辨率,得到最终 KH-9 DEM 结果。

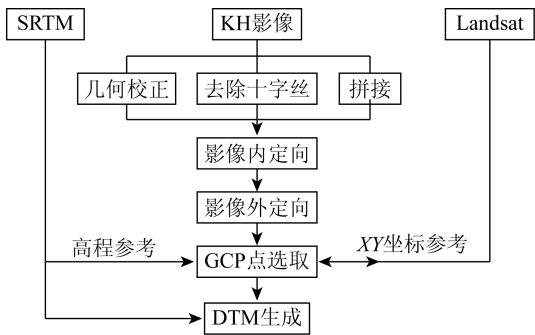


图3 KH-9 DEM 提取技术流程图

Fig. 3 Flow chart of KH-9 DEM generation

2.3 冰川表面流速计算

本研究利用亚像元互相关方法提取冰川表面流速。亚像元互相关方法提取冰川表面流速的具体步骤如下：首先,对两景光学影像进行精确配准,然后对配准后的两景影像进行互相关计算。本文采用频率域互相关算法,该算法的基础是傅里叶变换定理^[27],根据两景影像傅里叶变换的相位差计算偏移量。本研究利用基于 IDL 编程语言的 ENVI 插件 Cosi-corr 实现亚像元互相关方法提取冰川表面流速,对该区域 2013—2016 年的 Landsat 8 L1T 数据进行互相关计算,通过归一化互功率的逆傅里叶变换来提取冰川表面流速,窗口大小是亚像元互相关方法的一个关键的参数,窗口越小计算量越小,但得到相邻各点的相关系数差别较大;窗口越大,计算出相邻各点的相关系数变化趋于平缓,但计算量会增加,通过反复试验,得到最佳窗口设置(最大窗口设为 64×64,最小窗口设为 8×8)。

2.4 不确定性分析

2.4.1 TDX DEM 和 KH-9 DEM 精度评定

本研究研究区为山地冰川,主要讨论冰川区域 DEM 高程精度的评估方法。对于冰川区而言,由于降雪积累和冰雪消融等作用影响,冰川表面高程处于不停的变化过程中,需要采用其他同期展开高精度的测量工作,如 GPS 测量和星载激光测高等,但在高寒海拔地区、且表面地形起伏较大的山地冰川,这种同期观测工作开展困难,因此本研究假设冰川表面的绝对高程精度与邻近非冰川区一致,由于非冰川区的地形比较稳定,几乎不存在高程变化,利用 2003—2008 年 3 780 个分布在非冰川区域的 ICESat 点对 TDX 和 KH-9 生成的 DEM 结果进行了详细的高程精度评估。在利用高精度的高程参考数据进行绝对相位偏移校正以后,TanDEM-X DEM 的高程精度为 ±1.16 m,计算所得 1973 年 KH-9 DEM 的中误差为 ±17.53 m。

2.4.2 冰川表面高程变化的不确定性

根据误差传播定律,利用非冰川区域的高程变化结果对冰川区域的高程变化结果进行不确定性(σ)的评估^[28],即

SE = STDV_{off-glacier} / √n , (2)

σ = √MED² + SE² , (3)

式中:STDV 和 SE 为非冰川区域的标准差及均方根误差;MED 为非冰川区域的平均高程差值;n 为包含的像元数。经过校正,非冰川区域的残差均值为 0.97 m。

2.4.3 冰川表面流速误差评估

利用遥感影像提取冰川表面冰流速度的主要误差源有以下 2 个方面:①图像自身的质量,由于图像获取的时间间隔较长,在两个时相间冰川表面可能已经发生了变化,如积雪的覆盖、冰川消融等,由这些因素产生的偏移结果与冰川流速无关;②影像配准误差,两景影像配准的精度会直接影响偏移量的提取。

3 研究结果

3.1 高程变化情况

对 SRTM DEM,KH-9 DEM 以及 TDX DEM 进行配准后,差值计算获得 1973—2000 年、2000—2013 年以及 2013—2016 年冰川表面高程变化结果,本研究采用第二次冰川编目获取的克拉牙依拉克冰川物质平衡线海拔高度 4 170 m,将该冰川分为积累区和消融区,由于冰川积累区受积雪的影响较大,存在大量噪声,且此次冰川跃动主要发生在支流冰川的消融区,因此本研究只考虑消融区部分。

Gardelle^[29]在 2013 年发表的文章中提出了详细的冰川表面高程变化结果统计方法,可以利用分段法来计算冰川表面高程变化,但是由于研究区域中包含一条跃动的冰川,且主要的跃动区域并不在传统意义上的雪线划分出的积累区和消融区,并不适用这种分段方法。因此,根据结果,将冰川的物质积蓄区与接收区提取出来,直接统计积蓄区与接收区的高程变化情况,西支冰川上游的积蓄区(A)出现减薄,凹陷严重的区域达 127 m,整个积累区的高程平均下降了约 35 m;支流末端接收区(B)明显增厚,最大值达到了 120 m,平均增厚约 49 m,在积累区以及支流末端分别有一个明显的凹陷和隆起的区域从而影响了冰川整体高程变化结果。

1973—2000 年以及 2000—2013 年的冰川表面

高程变化结果中,冰川海拔较高的区域出现轻微的高程增加现象,冰川下游以及末端无明显异常情况。

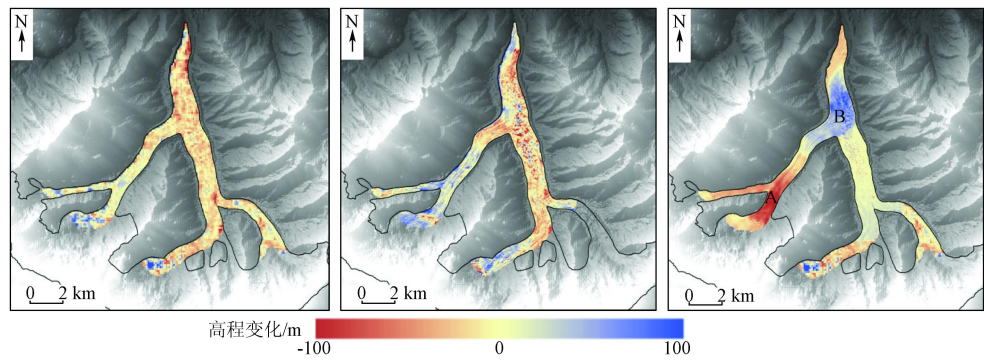


图 4 1973—2000 年、2000—2013 年及 2013—2016 年克拉牙依拉克冰川表面高程变化
Fig. 4 Elevation difference of the Karayaylak glacier in 1973—2000, 2000—2013 and 2013—2016

3.2 冰川表面末端变化和冰流速结果

通过对 Landsat TM/ETM + 数据进行目视解译,获得克拉牙依拉克冰川西支在 1972—2016 期间末端变化情况,支流末端整体处于退缩的状态(图 5),

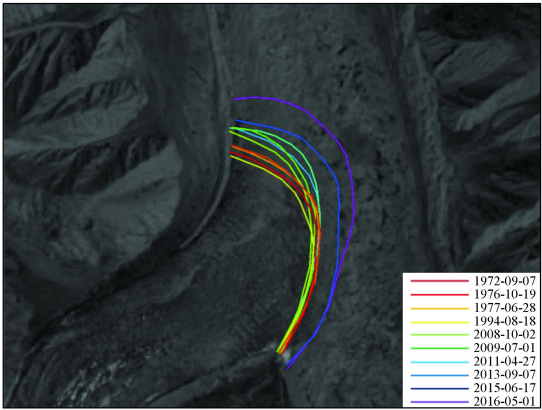
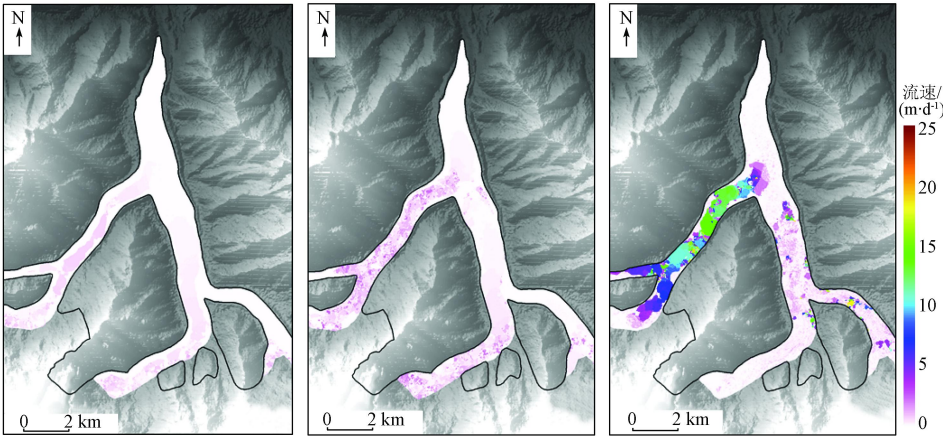


图 5 1972—2016 年克拉牙依拉克冰川西支末端变化情况
Fig. 5 Changes in the terminus of the west branch of the Karayaylak glacier from 1972 to 2016

蒋宗立等^[30]利用合成孔径雷达数据干涉测量及特征匹配方法获取公格尔山区冰川的表面流速,表明克拉牙依拉克冰川自 2007—2011 年冰川表面流速几

乎没有变化,运动速度超过 $0.6\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 的区域很少。

从表面运动速度计算结果来看(图 6),克拉牙依拉克冰川西支 2013 年 9 月—2015 年 4 月冰流速没有发生明显变化,从 2015 年 4 月中旬开始,冰流速呈增加趋势,在 5 月 8—15 日达到最高水平,西支跃动段平均运动速度达 $5.06\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,其最大可视运动速率在冰川西支中部达到了 $20.43\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,5 月 15 日—8 月 12 日期间,冰川流速明显降低,西支跃动段平均运动速率降到 $0.63\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,除了主支流汇合口 B 处到末端有一小段运动较大外,其他部分均恢复到了正常水平,此外,东支中段冰川没有捕捉到较大表面运动信号,总体运动速率呈下降趋势,从 4 月 13—29 日的 $0.88\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$ 降到 5 月 15 日—8 月 12 日的 $0.11\text{ m}\cdot\text{d}^{-1}$,与支流末端的变化情况对应。公格尔区域的冰川以悬挂冰川为主,克拉牙依拉克冰川分布着大量表碛,降水增多,山顶上覆盖的冰雪厚度增加,在重力增大的情况下,冰块和积雪滚落下来,形成冰崩和雪崩。冰崩和雪崩不断为冰川中下部提供物质来源,致其重力不断增加,这是冰川上部加速运动的主要因素。一条冰川的跃动过程包括平



(a) 2013—2014 年 (b) 2014—2015 年 (c) 20150413—20150429

图 6 - 1 2013—2015 年克拉牙依拉克冰川表面日平均流速

Fig. 6 - 1 Average surface flow velocities of the Karayaylak glacier from 2013 to 2015

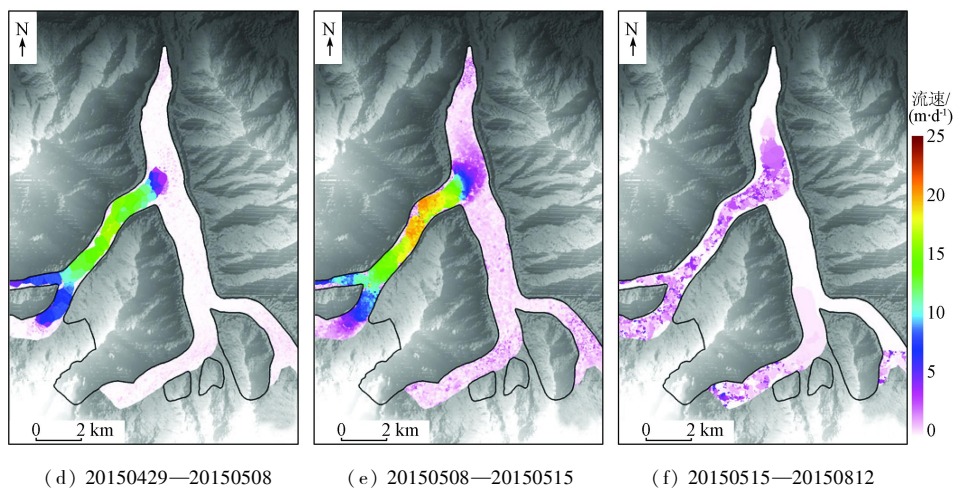


图 6 – 2 2013—2015 年克拉牙依拉克冰川表面日平均流速

Fig. 6 – 2 Average surface flow velocities of the Karayaylak glacier from 2013 to 2015

静期及跃动期 2 个阶段,在跃动期,冰流速度急剧增大,大量冰体向下转移,冰川上部表面急剧下降,而冰川中下部则急剧升高;跃动过后的恢复阶段冰川上游冰量重新增多,运动速度恢复常态,冰体运动的前峰向下游推进,而下游被抬高的冰体在消融作用下不断减薄,冰舌末端逐渐退缩,这个过程一直持续到下一次跃动。本研究中积蓄区与接收区之间冰川表面运动速度从 2015 年 4 月 13 日—5 月 15 日急剧增大,从 5 月 15 日—8 月 12 日这段时间积蓄区与接收区之间表面运动速度开始恢复正常,持续时间 3 个月。

3.3 讨论

跃动冰川的机理较为复杂,根据 Duncan 的研究结果^[31],跃动冰川可分为温性冰川和多温型冰川 2 种类型。温性冰川每年夏季有大量融水进入冰内和冰下,冰下有效应力与冰下水压力有关,水压力与冰下排水量有关,排水量大小与冰下排水通道连接的缝洞系统和冰下通道之间的转换有关^[32]。连接的缝洞系统处于冰体高速运动状态,具有较高的水压力^[33]。当冰川底部有效应力达到某一临界值时,储水洞穴打开,转换为冰下通道排水状态,通道排水系统塌陷,最终导致冰体快速运动。多温型冰川积蓄区的冰不断积累,应力不断增加,导致冰的蠕变速率增加,产生热量,并启动冰体快速运动和应变加热之间的正反馈。最终,冰川底床部位达到压力熔点,并在冰川底部产生融水。冰川下游处于冻结状态的冰体和冻土阻碍了冰川融水的流失,冰川底部水上升的压力导致底部拖动和快速滑动^[34]。底部水全部流失后,冰川跃动结束。

在本研究中,跃动主要发生在支流冰川中下部,为评估冰川的稳定性,根据我国第二次冰川编目资料,积累区与消融区面积之比为 2.15,表明冰川不

稳定,慕斯塔格气象站点数据显示,跃动发生前,帕米尔地区的降水处于稳定增加态势,加上冰川本身的悬挂结构,积累区过于陡峭,大量冰雪的堆积,影响冰川内部应力结构。关于支流冰川跃动的原因,部分学者认为与冰川水文条件控制有关^[35 – 37],还有学者归因于对区域气候变化的热复杂反应。此外,东帕米尔毗邻青藏高原西北和塔里木盆地的西边缘,自新生代印度次大陆板块与欧亚板块碰撞以来,帕米尔成为青藏高原构造挤压最强烈的地区之一^[38],是板块碰撞过程中地壳缩短增厚的典型地区,至今仍在挤压造山过程中。克拉牙依拉克冰川规模大,活动频繁,此次跃动前 5 个月内,该区域曾先后发生过数 10 次震级 3.0 以上的中小型地震。综上,克拉牙依拉克冰川支流跃动可能主要与冰川本身结构及热能条件有关。

4 结论

本研究利用多种遥感数据对克拉牙伊拉克冰川进行长时间表面特征观测,获得 1973—2016 年冰川表面高程变化情况,及 2013—2015 年冰川表面流速及 1972—2016 年支流冰川末端变化情况。

1) 从 1960 年以来,该地区没有发生过类似的跃动事件,因此此次跃动的原因与冰川本身的周期运动关系不明显,气温降水不是诱发冰川跃动的主要因素,从跃动情况来看,是多种外力综合作用于冰川本身的后果。

2) 跃动冰川源表面坡度达到 12—13°,对于跃动型冰舌这种坡度相对较大,这种坡度为冰川的跃动施加了过多的驱动应力。

3) 综合主支流冰川坡度、热能情况、表碛物覆盖等多种因素,并未发现主支流冰川存在明显差异,

对于这种支流冰川跃动,还需要更进一步的分析。

随着全球气候变暖问题的日益严峻,利用遥感卫星进行冰川监测为建立完善的冰川灾害预警机制提供了极大的便利。

参考文献(References):

[1] Meier Mark F, Post Post Austin. What are glacier surges? [J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6(4): 807.

[2] Kamb B, Raymond C F, Harrison W D, et al. Glacier surge mechanism; 1982—1983 surge of variegated glacier, Alaska[J]. Science, 1985, 227(4686): 469 – 479.

[3] Luckman A. Karakoram glacier surge dynamics [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38(18): n/a – n/a.

[4] Citterio M, Paul F, Ahlström A P, et al. Remote sensing of glacier change in West Greenland: Accounting for the occurrence of surge – type glaciers [J]. Annals of Glaciology, 2009, 50(53): 70 – 80.

[5] Copland L, Sylvestre T, Bishop M P, et al. Expanded and recently increased glacier surging in the Karakoram [J]. Arctic Antarctic & Alpine Research, 2011, 43(4): 503 – 516.

[6] Fischer A, Rott H, Björnsson H. Observation of recent surges of Vatnajökull, Iceland, by means of ERS SAR interferometry [J]. Annals of Glaciology, 2003, 37(1): 69 – 76.

[7] Jiskoot H, Murray T, Luckman A. Surge potential and drainage – basin characteristics in East Greenland [J]. Annals of Glaciology, 2017, 36(1): 142 – 148.

[8] 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.

[9] Dowdeswell Julian A, Williams M. Surge – type glaciers in the Russian High Arctic identified from digital satellite imagery [J]. Journal of Glaciology, 1997, 43(145): 489 – 494.

[10] Kotlyakov V M, Rototaeva O V, Nosenko G A. The September 2002 Kolka glacier catastrophe in north Ossetia, Russian Federation: Evidence and analysis [J]. Mountain Research & Development, 2014, 24(Feb 2004): 78 – 83.

[11] Sevestre Heïdi, Benn Douglas 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.

[12] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 喀喇昆仑山克勒青河谷近年来发现有跃动冰川 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(5): 641 – 644.

Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. Surging glacier found in Shaksgam River, Karakorum Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 641 – 644.

[13] 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 W Q, Liu S Y, Xu J L, 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.

[14] 刘景时, 王 迪. 2009 年夏季喀喇昆仑山叶尔羌河上游发生冰川跃动 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 992.

Liu J S, Wang D. Glacier surge in the upper reaches of the Yarkant

River in the Karakorum Mountains in 2009 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(5): 992 – 992.

[15] Kääb A, Leinss S, Gilbert A, et al. Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge – like instability [J]. Nature Geoscience, 2018, 11(2): 1.

[16] Farr T G, Rosen P A, Caro E, et al. The Shuttle Radar Topography Mission [J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45(2): 361.

[17] González J H, Antony J M W, Bachmann M, et al. Bistatic system and baseline calibration in TanDEM – X to ensure the global digital elevation model quality [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012, 73(3): 3 – 11.

[18] Martone, Michele, Braitogam, et al. Coherence evaluation of TanDEM – X interferometric data [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012, 73(6): 21 – 29.

[19] Gruber A, Wessel B, Huber M, et al. Operational TanDEM – X DEM calibration and first validation results [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012, 73(6): 39 – 49.

[20] Rizzoli P, Bräutigam B, Kraus T, et al. Relative height error analysis of TanDEM – X elevation data [J]. Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2012, 73(6): 30 – 38.

[21] Rossi C, Fritz T, Eineder M, et al. Towards AN Urban DEM Generation with Satellite SAR Interferometry [R]. Isprs, 2012.

[22] 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(531): 531 – 539.

[23] Huber M, Wessel B, Kosmann D, et al. Ensuring globally the TanDEM – X height accuracy: Analysis of the reference data sets ICE – Sat, SRTM and KGPS – tracks [C]. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, Igarss, 2009.

[24] Gonzalez J H, Bachmann M, Scheiber R, et al. Definition of ICESat selection criteria for their use as height references for TanDEM – X [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(6): 2750 – 2757.

[25] Sun Y, Jiang L M, Liu L, et al. Mapping glacier elevations and their changes in the western Qilian Mountains, northern Tibetan Plateau, by Bistatic InSAR [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing, 2017, (99): 1 – 11.

[26] Zhou Y S, Li Z W, Jia L. Slight glacier mass loss in the Karakoram region during the 1970s to 2000 revealed by KH – 9 images and SRTM DEM [J]. Journal of Glaciology, 2017, 63(238): 331 – 342.

[27] Leprince S, Barbot S, Ayoub F, et al. Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, application to ground deformation measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(6): 1529 – 1558.

[28] Bolch T, Pieczonka T, Benn D I. Multi – decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery [J]. Cryosphere, 2011, 5(2): 349 – 358.

[29] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y, et al. Region – wide glacier mass balances over the Pamir – Karakoram – Himalaya during 1999 – 2011 [J]. Cryosphere, 2013, 7(6): 1885 – 1886.

[30] 蒋宗立, 刘时银, 龙四春, 等. 基于合成孔径雷达技术及 DEM 的公格尔山冰川动力特征分析 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(2):

286 – 295.

Jiang Z L,Liu S Y,Long S C,et al. Analysis of the glacier dynam-ics features in Kongur Mountain based on SAR technology and DEMs[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2014,36(2):286 – 295.

[31] Quincey D J,Glasser N F,Cook S J,et al. Heterogeneity in Karako-ram glacier surges[J]. Journal of Geophysical Research Earth Sur-face,2015,120(7):1288 – 1300.

[32] Kamb B. Glacier surge mechanism based on linked cavity configu-ration of the basal water conduit system[J]. Journal of Geophysical Research;Solid Earth,1987,92(B9):9083 – 9100.

[33] Fowler C A. A theory of glacier surges[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth,1987,92(B9):9111 – 9120.

[34] Benn D I,Evans D J A. Glaciers and glaciation[J]. Hodder Edu-cation,2010,29(3):869 – 875.

[35] Clarke G K C,Collins S G,Thompson D E. Flow,thermal struc-ture,and subglacial conditions of a surge – type glacier[J]. Cana-dian Journal of Earth Sciences,1984,21(2):232 – 240.

[36] Mayer C,Fowler A C,Lambrecht A,et al. A surge of North Gasher-brum Glacier, Karakoram,China[J]. Journal of Glaciology,2011, volume 57(205):904 – 916(913).

[37] Murray T,Stuart G W,Miller P J,et al. Glacier surge propagation by thermal evolution at the bed[J]. Journal of Geophysical Re-search Solid Earth,2000,105(B6):13491 – 13507.

[38] Chevalier M L. 青藏高原西部喀喇昆仑断裂活动构造研究进展综述(英文)[J]. 地球学报,2019,40(1):37 – 54.

Chevalier M L. Active tectonics along the Karakorum fault,western Tibetan Plateau:A review[J]. Acta Geoscientia Sinica,2019,40(1):37 – 54.

Karayaylak glacier changes in the Kongur Mountain of eastern Pamir between 1973 and 2016 based on active and passive remote sensing technologies

FENG Lili^{1,2}, JIANG Liming^{1,2}, LIU Lin³, SUN Yafei⁴

(1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth’s Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, CAS, Wuhan 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,China; 3. MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurement, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467036, China)

Abstract: Located on the northern slope of Kongur Mountains , Karayaylak glacier surged in May 2015. For the purpose of obtaining the glacier surface elevation changes of the Karayaylak glacier from 1973 to 2016, the authors used the 1973 Keyhole satellite optical remote sensing data , the US SRTM DEM data in 2000, and the TanDEM – X bistatic SAR data in 2013 and 2016. The results show that , from 1973 to 2013, there was no obvious elevation change; from 2013 to 2016, clear surface thickening was observed at the terminus of the west branch , whereas a relatively obvious glacial surface elevation thinning was detected in the upper part of the glacier . Landsat OLI image from 2013 to 2015 were employed to monitor the change of glacier surface velocities . The distributions and changes of the glacier surface velocities indicate that the western tributary of Karayaylak glacier moved faster than any other tributaries. According to the comprehensive analysis , it is considered that there is no obvious advance or retreat trend at the terminus of the glacier before glacier surge , and the flow velocity of the glacier has changed greatly . In addition, combined with the results of meteorological data , it is believed that the glacial surge has little to do with local climate change. The main reason for the surge is probably attributed to the structural change of the glacier it – self.

Keywords: Karayaylak glacier; glacier surge; active and passive remote sensing ; glacier elevation change ; glacier flow velocity

(责任编辑: 李 瑜)