

引用格式: Zhang Yali, Zhang Lifeng, He Yi, *et al.* Axial Two-dimensional Velocity and Motion Mechanism of the South Inylchek Glacier in Central Tianshan Mountains[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(6): 1319-1327. [张亚丽, 张立峰, 何毅, 等. 中天山南依内里切克冰川轴部二维流速及运动机制[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(6): 1319-1327.]
DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2022.6.1319

中天山南依内里切克冰川轴部二维流速及运动机制

张亚丽^{1,2,3}, 张立峰^{1,2,3}, 何毅^{1,2,3}, 杨旺^{1,2,3}, 曹胜鹏^{1,2,3}

(1. 兰州交通大学 测绘与地理信息学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 甘肃 兰州 730070;

3. 甘肃省地理国情监测工程实验室, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 冰川运动一定程度上会引发泥石流、滑坡等地质灾害, 因此掌握冰川运动过程至关重要。冰川流速揭示冰川运动过程, 而已有冰川流速构建方法未考虑冰川流动方向, 揭示的冰川运动机制不够精准。选取中天山南依内里切克冰川为对象, 基于2018—2020年 Sentinel-1A 升轨数据, 利用像素偏移追踪 (Pixel Offset Tracking, POT) 技术获得南依内里切克冰川方位向与距离向位移场, 引入冰川流动方向构建冰川主流线轴部二维流速, 分析冰川运动机制。结果表明: 稳定区像元偏移速度远小于冰川主流线轴部二维流速, 利用 POT 技术构建的轴部二维流速模型监测冰川运动过程良好。2018、2019 和 2020 年中天山南依内里切克冰川轴部二维平均流速分别为 62.28 cm/d、49.41 cm/d、61.89 cm/d, 消融区 (冰舌) 轴部二维流速随高程的降低呈先缓慢减小后逐渐增大再迅速减小趋势, 冰川流速由轴部向两侧边缘递减。随着气温升高, 冰川运动速度逐渐增大, 气温升高可能是中天山南依内里切克冰川流速加快的主要原因。

关键词: 南依内里切克冰川; 运动速度; Sentinel-1A; POT

中图分类号: P343.6; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)06-1319-09

1 引言

冰川作为气候变化的关键指标之一, 影响着人类的生活与发展。20 世纪以来, 全球气候变暖致使世界多地冰川出现退缩^[1]。其中, 山地冰川的退缩将使得大部分以冰川径流为供水源的地区发生严重的缺水危机。此外, 由冰川退缩引起的冰川跃动、冰川泥石流以及冰湖溃决洪水等冰川灾害将造成严重人员伤亡和财产损失^[2-3]。因此, 监测山地冰川运动具有重要的现实意义。

冰川流速揭示冰川运动过程, 以往研究利用花

杆测量、GPS 测量等传统观测手段监测冰川运动速度, 但存在监测范围小、效率低、成本高和监测点密度低的缺点^[4]。当前研究大部分基于遥感影像提取冰川流速^[5], 雷达影像因不受云雨干扰、穿透性强等优点, 更适合山地冰川流速提取^[6-8]。目前采用较多的雷达卫星有 ALOS-1/2、GF-3、PARSAR、Sentinel-1A/B、TerraSAR-X、RadarSAT-2 等^[9-11], Sentinel-1A 数据由于其开放性, 且具备影像幅宽大、重返周期短、成像质量高等优势, 在冰川运动监测中广泛使用。基于雷达影像的冰川运动监测方法包括干涉测量技术和 POT 技术^[12], 干涉测量技术利

收稿日期: 2021-07-12; 修订日期: 2022-10-13

基金项目: 中国博士后科学基金面上基金项目 (2019M660092XB), 甘肃省科技计划项目 (20JR2RA002), 甘肃省教育厅项目 (2019A-043), 甘肃省自然科学基金项目 (20JR10RA249), 甘肃省青年科学基金项目 (20JR10RA272), 兰州交通大学—天津大学创新项目基金项目 (2020055), 兰州交通大学优秀平台 (201806)。

作者简介: 张亚丽 (1998—), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事冰川变化研究。E-mail: 493497605@qq.com

通讯作者: 张立峰 (1982—), 男, 吉林农安人, 博士, 副教授, 主要从事遥感应用研究。E-mail: 119273207@qq.com

用影像相位信息获取冰川形变,但因影像间相位失相干影响无法有效测量大尺度位移;POT 技术利用影像强度信息获取冰川形变,可弥补相位失相干的不足,适用于冰川运动这种大梯度形变的提取^[9]。利用 POT 技术获取冰川形变后除以影像时间间隔即得冰川方位向与距离向流速,一般而言,冰川整体运动趋势可由冰川主流线轴部二维流速大致反映^[13],以往研究基本上均直接利用矢量合成方位向和距离向流速来获取冰川轴部二维流速^[14],没有考虑冰川流动方向。

本文以中天山南依内里切克冰川为研究对象,基于 2018—2020 年 Sentinel-1A 升轨数据,利用 POT 技术获取冰川方位向和距离向流速,引入冰川流动方向构建冰川主流线轴部二维流速,定量分析冰川主流线轴部二维流速和垂直于距离向的剖面线距离向流速,依据气象数据进一步解释冰川运动机制,为冰川灾害预警提供技术支撑和理论依据。

2 研究区及数据源

2.1 研究区

南依内里切克冰川(South Inylchek Glacier, 中国冰川编目编号 5Y673K1)位于汗腾格里山之南、托木尔山之北、子午山以西的断裂谷中^[15],发源于海拔 7 443 m 的天山主峰托木尔峰,上游属中国,中下游属吉尔吉斯斯坦(图 1),是天山最大的冰川,融水是塔里木盆地重要的水源^[16-17]。据中国冰川目录记载,该冰川长 63.5 km,冰面宽 2.8 km,总面积 567.2 km²,海拔在 2 900—7 400 m 之间,是中低纬度地区长度超过 50 km 的八大冰川之一^[18]。

该区地处偏僻,气候环境恶劣。此外,它是典型的山谷冰川,具有明显的冰雪积累区(粒雪盆)和消融区(冰舌),东西走向的狭长冰舌区坡度较缓,坡度大都在 10° 以下,为冰川的形成提供了有利条件^[19]。

2.2 数据源

Sentinel-1A 卫星是欧空局于 2014 年发射的主动式微波遥感卫星,搭载 C 波段 SAR 传感器,重访周期 12 d,平均轨道高度 693 km,具有全天时、全天候工作特性。一般情况下全极化数据(VV、HH)的回波强度比交叉极化(VH、HV)高很多且更能全面描述地物后向散射特性(振幅信息)^[20]。因此,研究选取 2018—2020 年 3 对 VV 极化方式干涉宽幅(Interferometric Wide swath, IW, 5 m×20 m)模式下的

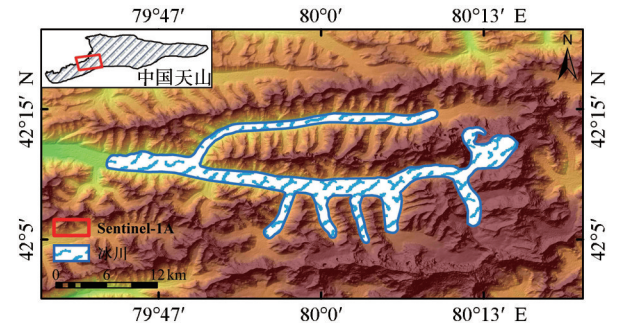


图 1 南依内里切克冰川地理位置与地形特征
Fig. 1 Geographical location and topographic features of the South Inylchek Glacier

Sentinel-1A 升轨数据 (<https://search.asf.alaska.edu/>) 来监测冰川运动信息,表 1 为所选数据对参数。

表 1 Sentinel-1A 数据对参数				
Table 1 Data pair parameters of Sentinel-1A				
时段	主影像	从影像	时间基线/d	空间基线/m
1	2018-02-09	2018-11-24	288	115.12
2	2019-02-04	2019-11-19	288	-234.89
3	2020-02-11	2020-11-25	288	63.93

南依内里切克冰川近几年编目数据难以获取,本文利用 10 m 分辨率哨兵 2 号数据 (<https://earth-explorer.usgs.gov/>) 基于人工解译方法来提取其边界信息,即利用该数据短波红外波段(band 11)、近红外波段(band 8)和可见光红色波段(band 4)假彩色合成的影像人工矢量化冰川边界。此外,选用 90 m 分辨率 SRTM DEM 数据 (<https://download.geoservice.dlr.de/>) 主要用于影像地理编码和冰川地形分析。

3 方法

3.1 POT 技术

POT 技术的核心算法是互相关算法,它基于 SAR 图像后向散射强度信息,对研究区前后时相的两景影像进行精确配准,通过搜索窗口寻找强度互相关系数搜索峰值确定偏移量^[21-22]。该偏移量主要包含地表位移偏移量(冰川运动偏移量)、电离层误差偏移量、轨道误差偏移量(同一卫星获取相同地物影像时重复轨道不够精确导致的轨道偏移)和地形起伏偏移量,表达式为:

$$O_{sum} = O_{offset} + O_{ion} + O_{orbit} + O_{topo} \quad (1)$$

其中: O_{sum} 是总偏移量; O_{offset} 是地表位移偏移量; O_{ion} 是电离层误差偏移量; O_{orbit} 是轨道误差偏移量; O_{topo}

是地形起伏偏移量。

电离层误差对长波段(如L波段)和两极地区有很大影响^[23],考虑到 Sentinel-1A 数据携带 C 波段传感器,且研究区位于中纬度地带,故电离层误差偏移量 O_{ion} 很小,可忽略不计。地形起伏在垂直基线短或地形平坦的地区影响很小^[24],由于该冰川冰舌区坡度较缓且影像对垂直基线较短,所以由地形起伏引起的偏移量 O_{topo} 较小,利用外部 SRTM DEM 数据可消除地形起伏影响。轨道误差通过拟合整个形变场的双线性多项式来确定^[14],这里根据拟合二次多项式(公式(2))来消除轨道误差偏移量 O_{orbit} 。

$$O_{tra} = k_1 + k_2x + k_3y + k_4x^2 + k_5xy + k_6y^2 \quad (2)$$

其中: $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ 为待定系数; x 和 y 分别是 SAR 坐标系下的距离向坐标值和方位向坐标值。

获取偏移量时,互相关窗口和互相关阈值的选取至关重要。互相关窗口越大,耗费时间越长,奇异值越少,偏移量越连续;互相关阈值越大,耗费时间越短,奇异值越少,偏移量越连续,但会丢失部分细节信息^[14],反之则反。因此,通过多次实验后选取的互相关阈值为 0.1,互相关窗口大小为 64×64 ,使偏移结果在保证细节清晰的情况下有更好的连续性。通常,最终偏移量估算精度可达像素精度的 1/10。

3.2 轴部二维流速解算方法

冰川运动机制十分复杂,但主流线轴部二维流速可大致反映冰川整体运动趋势,为更好定量分析中天山南依内里切克冰川运动状态,利用 POT 技术

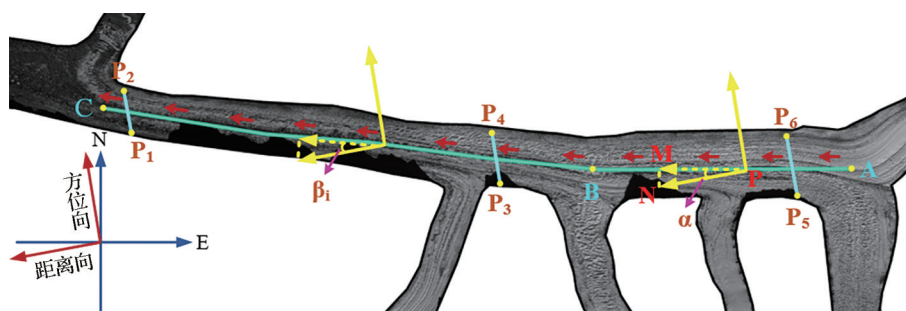
获取的日均方位向和距离向流速来构建冰川主流线轴部二维流速。针对冰川主流线轴部二维流速的解算思路如图 2 所示,先由遥感影像分析研究区冰川轴部地形特征,观察冰川运动方向(轴部二维流速方向),合理分解方位向和距离向流速;再插值获取轴部等间隔采样点分解后的流速并计算其与轴部二维流速夹角;最后根据二者夹角关系获取冰川主流线轴部二维流速。具体流程如下:

根据中天山南依内里切克冰川轴部地形特征将其划分为直线(AB)和折线(BC)两部分,AC 总长约 28 500 m,等间隔约 500 m 取 60 个点,直线部分取 22 个点,折线部分取 38 个点;中天山南依内里切克冰川大致呈东西走向,对距离向流速更加敏感,通过插值获取到 60 个点的距离向流速;计算直线上 22 个点的轴部二维流速与距离向流速之间的夹角 α 以及折线上 38 个点的轴部二维流速与距离向流速之间的夹角 $\beta_i (i=1, 2, \dots, 38)$, 夹角计算过程以 P 点为例,其切线 PM 方向为该点冰川运动方向(轴部二维流速方向),PN 方向为雷达成像系统的距离向,在三角形 PMN 中,通过测量工具获取 PM 和 PN 长度,由三角形边角关系可知, $\alpha = \arctan \frac{MN}{PM}$; 结合公式(3)和公式(4)可得冰川主流线轴部二维流速。

$$d_{cur} = d_r \cos \beta_i (i=1, 2, \dots, 38) \quad (3)$$

$$d_{str} = d_r \cos \alpha \quad (4)$$

其中: d_{cur} 是折线上点的轴部二维流速; d_{str} 是直线上点的轴部二维流速; d_r 是距离向流速。



红色箭头为冰川运动方向

图2 南依内里切克冰川轴部二维流速解算示意图(底图为哨兵2号 band4)

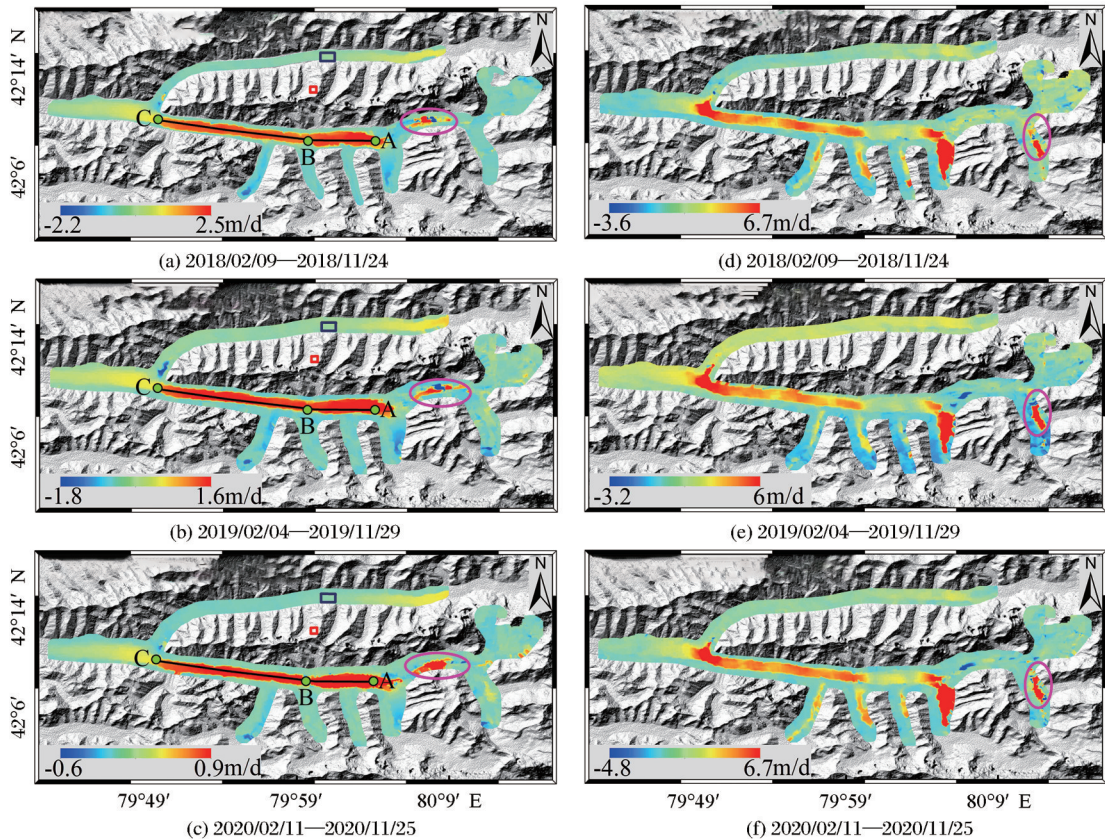
Fig. 2 Schematic diagram of axial two-dimensional velocity calculation of the South Inylchek Glacier (the base map is Sentinel-2 band 4)

4 结果与分析

基于 2018—2020 年 3 个时段 Sentinel-1A 升轨数据,利用 POT 技术对中天山南依内里切克冰川进行连续监测,获得该冰川方位向与距离向位移场,

除以影像时间间隔后即得日均方位向和距离向流速(图 3)。图 3 显示,该冰川 3 个时段内的整体速度变化趋势高度一致,即 POT 技术监测冰川运动结果可信度高。主流线轴部区域冰川基本均向西运动,

流速较大且向两侧边缘递减;日均距离向和方位向流速达米级,其中,2018年日均距离向和方位向流速最大值分别为2.5 m/d和6.7 m/d,最小值分别为-2.2 m/d和-3.6 m/d;2019年日均距离向和方位向流速最大值分别为1.6 m/d和6 m/d,最小值分别为-1.8 m/d和-3.2 m/d;2020年日均距离向和方位向流速最大值分别为0.9 m/d和6.7 m/d,最小值分别为-0.6 m/d和-4.8 m/d;距离向流速(图3(a)—图3(c))的极差比方位向流速(图3(d)—图3(f))小很多。



注:(a)、(b)和(c)是日均距离向流速,(d)、(e)和(f)是日均方位向流速,正值代表向西运动

图3 2018—2020年日均方位向和距离向流速

Fig.3 Daily mean azimuth and range velocity from 2018 to 2020

图4明显看出,2018—2020年冰川消融区(冰舌)轴部二维流速变化趋势保持一致,随高程降低逐渐减小。其中,2018年轴部二维流速与2020年相近,最大流速约72 cm/d,最小流速约40 cm/d;2019年轴部二维流速最小,最大流速约60 cm/d,最小流速约26 cm/d;2020年轴部二维流速最大,最大流速约78 cm/d,最小流速约30 cm/d。

此外,沿剖面线AC,冰川高程由3 980 m左右逐渐降低到3 420 m左右。依据AC剖面线流速,可用虚线1和虚线2将冰川消融区分为3部分,第一部分在0—11.6 km之间,第二部分在11.6—20.4 km

冰川运动机制十分复杂,但主流线轴部二维流速可大致反映冰川整体运动趋势,加之中天山南依内里切克冰川呈东西走向,对距离向流速更加敏感。所以本文通过引入冰川流动方向构建的主流线轴部二维流速(AC剖面线流速)和垂直于距离向的3条剖面线(P_1P_2 、 P_3P_4 、 P_5P_6)距离向流速来解释中天山南依内里切克冰川运动机制。利用上述公式(3)和公式(4)可获取AC剖面线流速(图4),剖面线 P_1P_2 、 P_3P_4 、 P_5P_6 距离向流速通过插值得到(图5)。

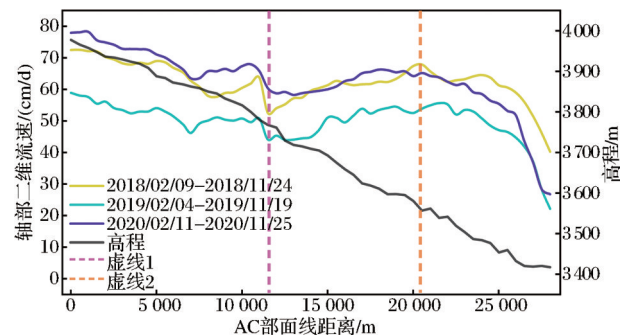


图4 南依内里切克冰川沿AC剖面线流速

Fig.4 The velocity of the South Inylchek Glacier along the AC profile

之间,第三部分在20.4—28.5 km之间。计算2018—2020年各部分轴部二维流速可知,第一部分冰川运动速度最大且逐渐减小,各时段轴部二维流速为65 cm/d、52 cm/d和69 cm/d;第二部分冰川运动速度次之且缓慢增大,各时段轴部二维流速为61 cm/d、50 cm/d和63 cm/d;第三部分冰川运动速度最小且迅速减小,各时段轴部二维流速为56 cm/d、43 cm/d和48 cm/d。

图5可知,2020年各剖面线距离向流速最大,

2018年次之,2019年最小,且各时段剖面线 P_1P_2 距离向流速最大可达54 cm/d、46 cm/d和56 cm/d,剖面线 P_3P_4 距离向流速最大可达79 cm/d、63 cm/d和82 cm/d,剖面线 P_5P_6 距离向流速最大可达65 cm/d、52 cm/d和68 cm/d;各时段剖面线 P_1P_2 、 P_3P_4 和 P_5P_6 距离向流速基本均在沿剖面线600 m左右开始突增,800—2 000 m左右保持稳定高速流动,2 000 m后突减至0 cm/d左右,即中天山南依内里切克冰川流速由轴部向两侧边缘递减。

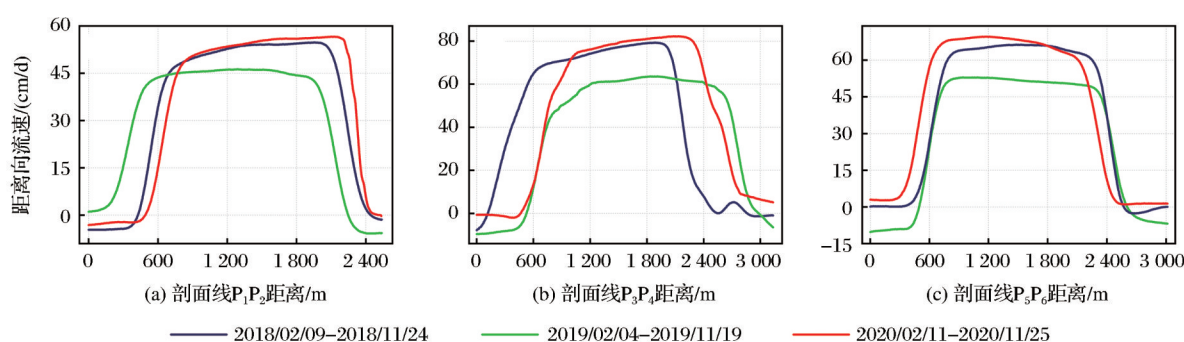


图5 2018—2020年剖面线流速

Fig.5 The profile velocity from 2018 to 2020

5 讨论

5.1 误差分析

分析图4冰川轴部二维流速可知,各年份最大流速分别为72 cm/d、59 cm/d和78 cm/d,最小流速分别为34 cm/d、21 cm/d和26 cm/d。而图3冰川整体流速显示的各年份最大距离向流速分别为2.5 m/d、1.6 m/d和0.9 m/d,最大方位向流速分别为6.7 m/d、6 m/d和6.7 m/d;最小距离向流速分别为-2.2 m/d、-1.8 m/d和-0.6 m/d,最小方位向流速分别为-3.6 m/d、-3.2 m/d和-4.8 m/d。冰川轴部二维流速获取的最大流速和最小流速与冰川整体流速得到的最大流速和最小流速相差很大,这主要与影像间失配准有关。不同时相获取的两幅影像受到消融、积雪、裂缝等自然现象影响^[14],使得冰川表面地物后向散射特性发生变化,导致两幅影像配准时出现失配准现象。POT技术关键在于利用地物后向散射特性(振幅信息)提取冰川流速,影像间失配准会提取到错误的冰川运动信息。图3紫色椭圆区位于中天山南依内里切克冰川上游积累区,利用POT技术获取的该区速度场存在“空值”和“奇异值”,通过低通滤波方式进行剔除优化后,发现该区速度还是存在突变现象且使整个冰川速度场由厘米级变化到米级,与前人研究存在一定差别^[9,14]。然而,冰川整体运动

趋势主要由中轴线流速大致反映,本文着重研究中天山南依内里切克冰川主流线轴部二维流速,由影像间失配准引起的冰川上游积累区速度突变对该冰川整体运动趋势影响不大。

5.2 精度分析

冰川地理环境复杂,气候环境恶劣,导致冰川运动地面实测数据匮乏,很难对其运动速度进行简单直观分析,为此,大多数研究提出了非冰川覆盖区运动速度为零的假设。研究选取高稳定性非冰川基岩区的一块矩形区域(图3(a)—图3(c)红色框)得到1 558个像元的偏移速度,根据像元偏移速度频数分布直方图(图6(a)—图6(c))明显看出,所有像元偏移速度均在0 cm/d附近。经统计分析可知,2018年像元偏移速度大部分集中在2.7—4 cm/d,平均偏移速度为2.2 cm/d;2019年像元偏移速度大部分集中在-2—-0.7 cm/d,平均偏移速度为-1.1 cm/d;2020年像元偏移速度大部分集中在-6.7—-5.8 cm/d与-1.8—0.8 cm/d,平均偏移速度为-2.7 cm/d。相比冰川主流线轴部二维流速,非冰川基岩区偏移速度小到可忽略不计,说明POT技术提取冰川流速可靠性高,是本文利用POT技术引入冰川流动方向构建的轴部二维流速模型监测中天山南依内里切克冰川运动过程良好的前提。

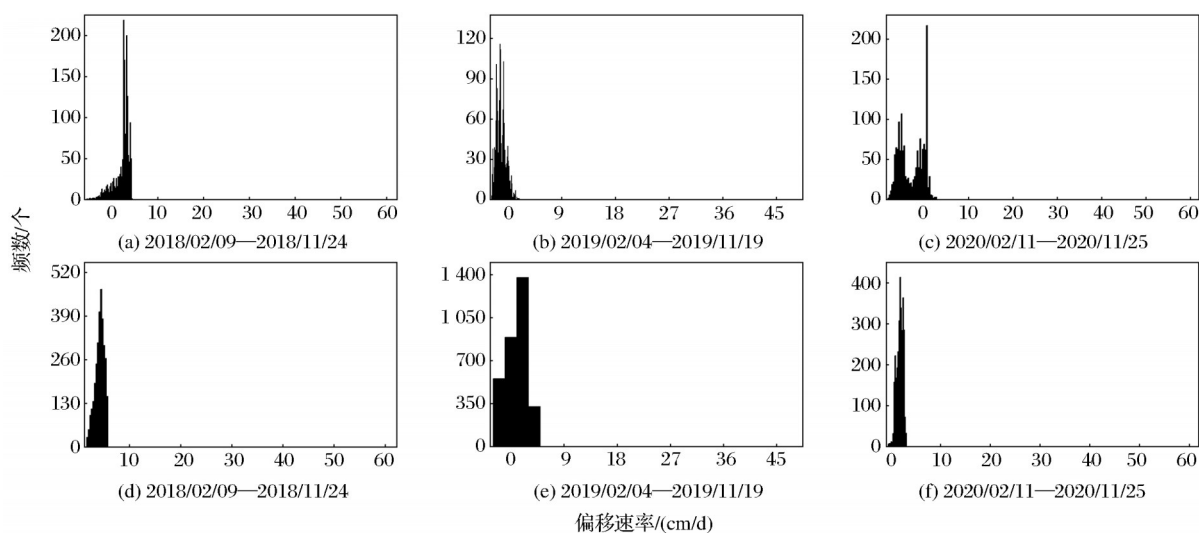


图 6 像元偏移速度频数分布直方图

Fig. 6 Histogram of frequency distribution of pixel migration velocity

此外,以往大部分研究提到北伊内里切克冰川目前正处于运动缓慢甚至停滞状态^[9,15],通过选取北伊内里切克冰川一块矩形区域(图3(a)—图3(c)蓝色框),分析该区域3149个像元的偏移速度频数分布直方图(图6(d)—图6(f))可知,2018年像元偏移速度大部分集中在3.6—5.7 cm/d,平均偏移速度为4.1 cm/d;2019年像元偏移速度大部分集中在-2.8—3.7 cm/d,平均偏移速度为0.9 cm/d;2020年像元偏移速度大部分集中在0.8—2.7 cm/d,平均偏移速度为1.8 cm/d。即北依内里切克冰川确实处于运动缓慢甚至停滞状态,侧面说明POT技术提取冰川流速可信度高。由此可见,本文利用POT技术构建的轴部二维流速模型监测冰川运动过程良好。

5.3 冰川运动机制

图5剖面线 P_1P_2 、 P_3P_4 、 P_5P_6 的距离向流速由轴部向两侧边缘递减,主要原因是两侧边缘流速受到两边山体摩擦力影响^[9];图4 AC剖面线各部分流速发生变化主要与冰重、高差等因素有关^[25]。一般来说,冰重大会加快冰川移动速度,随着冰重减小,冰川移动速度会逐渐降低。粒雪盆区冰川冰在自身重力大于地面摩擦力时开始运动,随着冰川不断移动,冰重逐渐减小,摩擦力逐渐增大,使得第一部分冰川速度出现减小趋势,但日均流速仍高于后两部分。第二部分冰川流速呈缓慢增大趋势,2018年到2020年冰川流速分别由52 cm/d增加到67 cm/d,44 cm/d增加到53 cm/d,59 cm/d增加到64 cm/d。这一现象主要与高差有关,因为一般情况下高差大的区域,冰川移动速率会加快。通过计算可知,第一

部分高差为210 m且沿AC剖面线距离为11.6 km,第二部分高差为207 m且沿AC剖面线距离为8.8 km,第三部分高差为142 m且沿AC剖面线距离为8.1 km,即在各部分剖面线距离一定时,第二部分高差达最大,故第二部分冰川流速呈缓慢增加趋势。第三部分冰川流速减小迅速,2018年到2020年冰川流速分别由67 cm/d低至40 cm/d,53 cm/d低至22 cm/d,64 cm/d低至26 cm/d。冰川坡度和冰川厚度会产生运动驱动力,而该冰川冰舌坡度大都在 10° 以下,因此在坡度一定的情况下,冰川厚度成为决定冰川运动驱动力的主要因素。随着冰川运动,第三部分的冰川厚度不断减薄,故该部分冰川流速锐减。此外,该区域高差小也是导致流速变小的原因之一。

图4和图5均可看出轴部二维流速和沿剖面线 P_1P_2 、 P_3P_4 、 P_5P_6 距离向流速在2020年达最大,2018年次之,2019年最小,且2020年冰川轴部平均二维流速达61.89 cm/d,2018年达62.28 cm/d,2019年仅为49.41 cm/d。推测这一现象可能与当地气温和降水有关,但该区地处偏僻,鲜有气象站点覆盖,致使气温与降水数据不完善,故研究利用冰川上游地区阿瓦提县的气温和降水数据(<http://data.cma.cn/>)来分析二者与冰川运动速度之间的关系。从图7明显看出,2018年和2020年气温变化趋势一致,平均气温相差 0.66°C ;2019年气温变化总体趋势与2018年和2020年大体一致,但3月到7月气温出现大幅波动,平均气温与2018年相差 2.58°C 。联系图4和图7发现,2019年沿剖面线AC的冰川轴部二维流

速最小且气温最低;随着气温升高,冰川运动速度逐渐增大。由图7可知,各年份夏季降水量居多,但降水量与沿剖面线AC的轴部二维流速并无明显关系,这可能与时间序列的长短以及季节的选取有关。由此看来,气温对冰川变化的促进作用比降水更为显著。

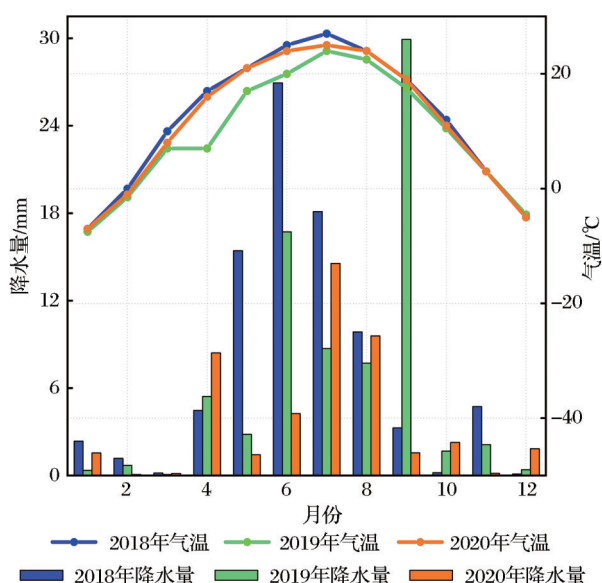


图7 2018—2020年阿瓦提气温降水量

Fig.7 Temperature and precipitation in Awat from 2018 to 2020

6 结 论

利用POT技术基于2018—2020年Sentinel-1A升轨数据,对中天山南依内里切克冰川进行连续监测。通过定量分析该冰川主流线轴部二维流速和垂直于距离向的3条剖面线距离向流速,并结合冰川厚度、高差、气温、降水等因素解释不同区域速度发生变化的原因,得出以下结论:稳定区像元偏移速度均在0 cm/d附近,远小于冰川主流线轴部二维流速,本文利用POT技术构建的轴部二维流速模型监测冰川运动过程良好。2018、2019和2020年中天山南依内里切克冰川轴部二维平均流速分别为62.28 cm/d、49.41 cm/d和61.89 cm/d;消融区(冰舌)轴部二维流速随高程的降低呈先缓慢减小后逐渐增大再迅速减小趋势,流速发生变化主要与冰重、高差等因素有关;冰川流速由轴部向两侧边缘递减,原因是两侧边缘流速受到两边山体摩擦力影响而减小。随着气温升高,冰川运动速度逐渐增大,气温升高可能是中天山南依内里切克冰川流速加快的主要原因。

因为中天山南依内里切克冰川呈东西走向,对距离向流速更加敏感,所以本文构建的轴部二维流速模型未考虑方位向流速。但本文通过引入冰川流动方向获取的冰川主流线轴部二维流速,对比直接矢量合成方位向与距离向流速,能更真实描述冰川实际运动过程,更精准分析冰川运动机制。此外,由于该冰川气象站点数据不完善,因此用冰川上游阿瓦提县数据代替该冰川气温和降水数据,得到二者与冰川运动速度之间的关系。对比前人研究,发现冰川上游阿瓦提县数据与该冰川年均气温和降水量存在一定差别。因此,今后的研究中将尝试采用格点数据分析二者与冰川运动速度之间的关系,以期最大程度符合真实关系。

参考文献(References):

- [1] Bolch T. Climate change and glacier retreat in Northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data[J]. *Global and Planetary Change*, 2007, 56(1/2):1-12.
- [2] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of flacial hazards in the Himalayas[J]. *Quaternary International*, 2000, 65(99): 31-47.
- [3] Tong Liqiang, Tu Jienan, Pei Lixin, *et al.* Preliminary discussion of the frequently debris flow events in Sedongpu Basin at Gyalaperi Peak, Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(6):1552-1561.[童立强, 涂杰楠, 裴丽鑫, 等. 雅鲁藏布江加拉白垒峰色东普流域频繁发生碎屑流事件初步探讨[J]. *工程地质学报*, 2018, 26(6):1552-1561.]
- [4] Wang Min. Extraction of glacier motion field in Kangchenjunga Area based on GF-3 SAR images[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.[王敏. 基于GF-3 SAR影像提取干城章嘉峰地区冰川运动场[D]. 成都:西南交通大学, 2020.]
- [5] Cao Bo, Wang Jie, Zhang Chen, *et al.* The remote sensing in research of modern glacier changes[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2011, 26(1):52-59.[曹泊, 王杰, 张忱, 等. 遥感技术在现代冰川变化研究中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2011, 26(1):52-59.]
- [6] Erten E, Reigber A, Hellwich O, *et al.* Glacier velocity monitoring by maximum likelihood texture tracking [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2):394-405.
- [7] Trouve, E, Fallourd, *et al.* Monitoring temperate glacier displacement by multi-temporal TerraSAR-X images and continuous GPS measurements[J]. *IEEE Journal of Selected Topics*

- in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2011, 4 (2):372-386.
- [8] Luckman A, Quincey D, Bevan S. The potential of satellite radar interferometry and feature tracking for monitoring flow rates of himalayan glaciers[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(2-3):172-181.
- [9] Zhang Xiaobo, Zhao Xuesheng, Ge Daqing, *et al.* Motion characteristics of the South Inylchek Glacier Derived from new C-Band SAR satellite[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(3):429-435.[张晓博, 赵学胜, 葛大庆, 等. 利用新型C波段雷达卫星研究南伊内里切克冰川运动特征[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(3):429-435.]
- [10] Liu Guoxiang, Zhang Bo, Zhang Rui, *et al.* Monitoring dynamics of Hailuoguo Glacier and the secondary landslide Disasters based on combination of Satellite SAR and ground-based SAR [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7):980-995.[刘国祥, 张波, 张瑞, 等. 联合卫星SAR和地基SAR的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(7):980-995.]
- [11] Tazio S, Frank P, Andreas W, *et al.* Circum-arctic changes in the flow of glaciers and ice caps from Satellite SAR data between the 1990s and 2017[J]. Remote Sensing, 2017, 9(9):947. DOI:10.3390/rs9090947.
- [12] Strozzi T, Luckman A, Murray T, *et al.* Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11):2384-2391.
- [13] Zhang Shengpeng, Zhou Zhongzheng, Zhao Lijiang, *et al.* Extraction of Gangnalou Glacier velocity based on SAR migration tracking method[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020, 524(11):36-41.[张生鹏, 周中正, 赵利江, 等. 基于SAR偏移量跟踪法提取岗纳楼冰川流速[J]. 测绘通报, 2020, 524(11):36-41.]
- [14] Li Jia, Li Zhiwei, Wang Changcheng, *et al.* Using SAR of offset-tracking approach to surface motion of the South Inylchek Glacier in Tianshan[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4):1226-1236.[李佳, 李志伟, 汪长城, 等. SAR偏移量跟踪技术估计天山南依内里切克冰川运动[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4):1226-1236.]
- [15] Li J, Li Z W, Ding X L, *et al.* Investigating mountain glacier motion with the method of SAR intensity-tracking: Removal of topographic effects and analysis of the dynamic patterns[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 138:179-195.
- [16] Hagg W, Mayer C, Helm L A. Sub-debris melt rates on Southern Inylchek Glacier, Central Tian Shan[J]. Geografiska Annaler, 2008, 90(1):55-63.
- [17] Julia N, Mahdi M, Hans-Ulrich W. Estimating spatial and temporal variability in surface kinematics of the Inylchek Glacier, Central Asia, using TerraSAR-X data[J]. Remote Sensing, 2014, 6(10):9239-9259.
- [18] Li Yi, Yan Shiyong, Li Zhiguo, *et al.* The flow state of South Inylchek Glacier in the Tianshan Mountains in 2016: Extraction and analysis based on Landsat-8 OLI Image [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(6):1281-1288.[李毅, 闫世勇, 李治国, 等. 基于Landsat-8 OLI影像的天山南伊内里切克冰川2016年冰川表面运动状态提取与分析[J]. 冰川冻土, 2017, 39(6):1281-1288.]
- [19] Aizen Vladimir B. Association between atmospheric circulation patterns and firn-ice core records from the Inylchek Glacierized Area, Central Tien Shan, Asia[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2004, 109: D08304. DOI: 10.1029/2003JD003894.
- [20] Li Shirao. PO-SBAS model based on baseline combination optimization for extracting Bugyai Kangri glacier motion field [D]. Chongqing: Southwest Jiaotong University, 2020.[李诗娆. 基于基线组合优化的PO-SBAS模型提取布加岗日冰川运动场[D]. 重庆: 西南交通大学, 2020.]
- [21] Ruan Zhixing. Study on feature and spatial information extraction method of mountain glacier movement based on SAR image [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences. [阮智星. 基于SAR图像的山地冰川运动特征与空间信息提取方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学.]
- [22] Wang Shizhe, Ke Changqing. Distribution and variation of glacier velocity in Himalayas based on ALOS PALSAR[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5):170-183.[王仕哲, 柯长青. 基于ALOSPALSAR的喜马拉雅山冰川流速分布及变化[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(5):170-183.]
- [23] Zhang Qimin, Zheng Yitong, Zhang Lu, *et al.* South Inylchek surface motion extraction and analysis based on time-series pixel tracking algorithm[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(6):1273-1282.[张齐民, 郑一桐, 张露, 等. 基于时序像素跟踪算法的南伊内里切克冰川运动提取与特征分析[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6):1273-1282.]
- [24] Wang Lei, Jiang Zongli, Liu Shiyin, *et al.* Characteristic of glaciers' movement Along Karakoram Highway [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(2):412-423.[王磊, 蒋宗立, 刘时银, 等. 中巴公路沿线冰川运动特征[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(2):412-423.]
- [25] Zhou J, Zhen L, Guo W. Estimation and analysis of the surface velocity field of mountain glaciers in Muztag Ata using satellite SAR data[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, 71(8):3581-3592.

Axial Two-dimensional Velocity and Motion Mechanism of the South Inylchek Glacier in Central Tianshan Mountains

Zhang Yali^{1,2,3}, Zhang Lifeng^{1,2,3}, He Yi^{1,2,3}, Yang Wang^{1,2,3}, Cao Shengpeng^{1,2,3},

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730000, China;

2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730000, China;

2. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Glacier movement can cause debris flow, landslide and other geological disasters to a certain extent, so it is very important to master process of glacier movement. Glacier velocity reveals the process of glacier movement, but some existing methods of constructing glacier velocity do not consider direction of glacier flow, and mechanism of glacier movement revealed is not precise enough. Based on Sentinel-1A ascending orbit data from 2018 to 2020, this paper uses Pixel Offset Tracking (POT) technology to obtain azimuth and range displacement fields of the South Inylchek Glacier in Central Tianshan Mountains, introduces the glacier flow direction to construct the axial two-dimensional velocity of glacial mainstream line, and analyzes the mechanism of glacier movement. The results show that pixel migration velocity in stable region is far less than the axial two-dimensional velocity of glacier mainstream line. The axial two-dimensional velocity model constructed by POT technology is good for monitoring the glacier movement process. In 2018, 2019 and 2020, the axial two-dimensional average velocities of the South Inylchek Glacier in Central Tianshan Mountains are 62.28 cm/d, 49.41 cm/d and 61.89 cm/d, respectively. The axial two-dimensional velocity of ablation area (ice tongue) decreases slowly at first, then increases gradually, and last decreases rapidly with the decrease of elevation, and the glacier velocity decreases from axis to edge of both sides. With the increase of temperature, the speed of glacier movement increases gradually. The increase of temperature may be the main reason for the acceleration of glacier velocity.

Key words: South Inylchek Glacier; Movement speed; Sentinel-1A; POT