

引用格式: Zhang Qimin, Zheng Yitong, Zhang Lu, *et al.* South Inylchek Glacier 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.]  
doi: 10.11873/j.jissn.1004-0323.2020.6.1273

## 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

张齐民<sup>1,2</sup>, 郑一桐<sup>1,2</sup>, 张露<sup>3</sup>, 李治国<sup>4</sup>, 闫世勇<sup>1,2</sup>

(1. 自然资源部国土环境与灾害监测重点实验室, 江苏 徐州 221116;

2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116;

3. 三亚中科遥感研究所, 海南 三亚 572029;

4. 商丘师范学院 环境与规划学院, 河南 商丘 476000)

**摘要:** 选用 Sentinel-1A 卫星 TOPS 模式下获取的 8 景升轨 SAR 数据, 基于小基线集像素跟踪时序分析技术 (Small Baseline Subset Pixel Tracking technique, SBAS-PT), 获取了南伊内里切克冰川 2018 年 1 月至 2018 年 12 月期间不同时段的面流速分布及其时空变化特征。研究结果表明: 2018 年南伊内里切克冰川 1 月到 3 月整体运动速率较小, 从 4 月起速率明显增加, 7 月到 8 月达到最高, 9 月份起运动速率开始放缓, 10 月到 12 月期间冰川表面运动速率较小, 全年的平均表面流速约为  $30\text{cm}\cdot\text{d}^{-1}$ 。总体而言, 南伊内里切克冰川中上游区域流速明显高于冰川下游, 冰川下游冰川物质消融减薄和补给量减少以及表碛物增多等因素致使冰川末端区域逐渐趋于稳定。

**关键词:** 南伊内里切克冰川; Sentinel-1A 影像; 小基线集像素跟踪时序分析技术; 冰川表面运动速率  
**中图分类号:** P343.6; TP79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2020)06-1273-10

### 1 引言

冰川作为指示全球气候变化的一个重要因子, 日益受到各国研究人员的关注<sup>[1-2]</sup>。随着全球变暖的趋势不断加剧, 山地冰川消融已经成为海平面上升的重要因素。另外, 冰川作为重要的淡水资源, 是内陆山地地区农牧业发展的主要水源<sup>[3-4]</sup>。因此, 开展冰川活动性的研究具有非常显著的社会和环境效益, 在全球气候变化研究中意义重大。

近年来, 基于像素跟踪算法 (Pixel Tracking, PT) 的冰川运动提取得到了广泛的关注。PT 算法通过对雷达影像强度图内的所有像素进行精密匹

配来计算冰川的位移量, 且不依赖于 SAR 影像的相干性, 无需相位解缠<sup>[5]</sup>, 对大梯度形变具有较好地适用性, 因此, 对于流速较快的山地冰川而言, PT 算法是一种非常有效的监测手段<sup>[6]</sup>。早在 2002 年, Strozzi 等<sup>[7]</sup>基于强度与相干性两种偏移量追踪方法对 Monacobreen 冰川的跃动现象进行了研究, 证明了 PT 算法在冰川运动提取的研究上具有可行性, 随后更多的学者采用 PT 方法来提取冰川流速, 邵珠德等<sup>[8]</sup>在 PT 方法的基础上结合 DEM 数据, 基于 4 景 ALOS/PALSAR 影像估算出了南极 Amery 冰架上的冰川流速。PT 方法一般基于归一化互相关匹配算法 (Normalized Cross-Correlate, NCC), 通

收稿日期: 2019-11-18; 修订日期: 2020-11-05

基金项目: 海南省财政科技计划项目 (418MS112), 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA19070202), 国家自然科学基金面上项目 (41671072) 资助。

作者简介: 张齐民 (1996—), 男, 山东济南人, 硕士研究生, 主要从事雷达遥感与冰川变化研究。E-mail: lwyzqm@163.com

通讯作者: 闫世勇 (1982—), 男, 江苏徐州人, 副教授, 主要从事雷达遥感应用研究。E-mail: yanshiyong@cumt.edu.cn

过计算两幅影像匹配模板的相关程度进而实现亚像素级配准<sup>[9-10]</sup>,但一般仅限于两幅影像之间,往往难以获取冰川运动的时序特征及其跃动等突发状况。而且前人研究使用的影像数量较少,观测周期短,时间分辨率低,未能更好地反映冰川动态变化过程。随着在轨遥感卫星数量的增多和数据获取能力的提升,在原有PT算法的基础上借助SBAS-InSAR的思想,Casu等<sup>[11]</sup>提出SBAS-PT算法,并基于25景Envisat影像提取出塞拉利昂内格拉火山口运动时序分布图,此后Euillades等<sup>[12]</sup>将SBAS-PT算法应用于Viedma冰川流速提取与分析中,取得了较好的应用效果。

当前冰川运动研究大多集中在年际变化上,对整个消融期和积累期内冰川变化的细节认识较为匮乏,且相关研究主要在两极地区,缺乏对中低纬度山地冰川运动短期时空特征的遥感监测。作为传统PT技术和时序InSAR技术的结合体,时序PT技术能够提供更为可靠的精度。为了充分利用冰川区SAR数据,分析冰川在整个消融期和积累期内运动细节及其详尽的变化情况,利用2018年的8景

Sentinel-1A数据,基于SBAS-PT算法对南伊内里切克冰川表面运动展开时序分析,为研究冰川运动的时空分布和季节变化特征提供强有力的基础数据支持。

## 2 研究区和数据

### 2.1 研究区

南伊内里切克冰川(South Inylchek Glacier, 中国冰川编目编号5Y673K1)地处中亚地区,发源于海拔7443 m的天山主峰托木尔峰脚下<sup>[5]</sup>,由中国第二次冰川编录数目统计知,冰川主干全长63.5 km,宽2.8 km,是全球中低纬度地区长度超过50 km的八大高山冰川系统之一,详细地理位置信息如图1所示,其中冰川边界参照RGI(Randolph Glacier Inventory)6.0全球冰川边界编目数据。该冰川末端区域表碛覆盖现象严重,平均厚度可达2 m<sup>[13-14]</sup>,受亚洲大陆性气候影响,消融期为3~10月,最长消融期可达220 d<sup>[15]</sup>,最低气温出现在1月份,3月份开始大幅回温,7月份达到峰值,9月份开始回落,年平均气温约为-7.7℃<sup>[16-18]</sup>。

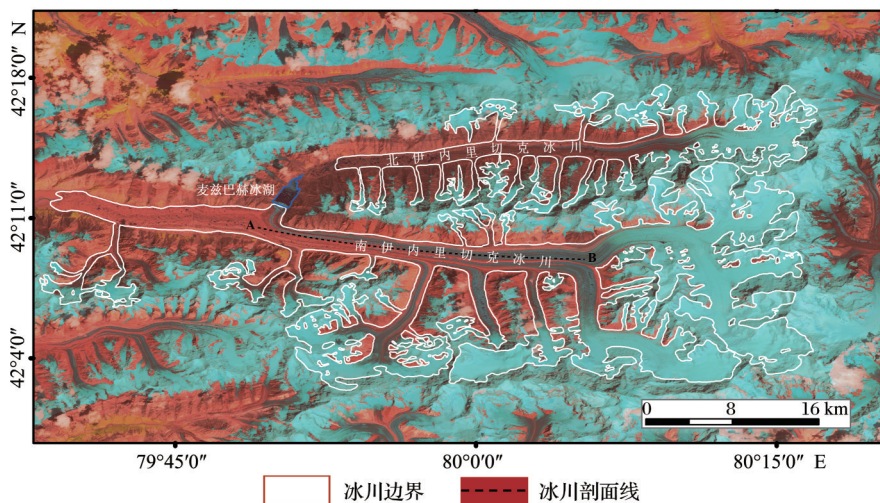


图1 覆盖南伊内里切克冰川的Landsat-8 OLI假彩色影像(成像时间2018年7月21日)

Fig.1 A False-Color remote sensing image of Landsat-8 OLI covered the South Inylchek Glacier (Imaging time:21 July 2018)

### 2.2 研究区数据

选用2018年1月至2018年12月的Sentinel-1A卫星获取的8景升轨SAR数据,基于小基线集的思想,筛选出合适的影像对开展南伊内里切克冰川表面运动时序分析,相应的基线组合如图2所示。Sentinel-1A是欧空局2014年发射的C波段SAR卫星,具有波动模式(WM)、条带模式(SM)、超宽扫描模式(EW)和干涉宽扫描模式(IW)等4种观测模式<sup>[19]</sup>,本文选取的数据为TOPS成像模式下

IW影像,距离向分辨率5 m,方位向分辨率20 m,幅宽可达250 km,轨道号132,单星重访周期可达12 d。由于其重访周期短、覆盖范围广及数据免费获取等特点而广泛应用于大型冰川运动提取与分析<sup>[20-21]</sup>。另外,为了更好地反映该地区冰川运动与气温和降水等气象因素之间的关系,图3给出了研究区周边的3个气象站点2018年的气象监测资料。

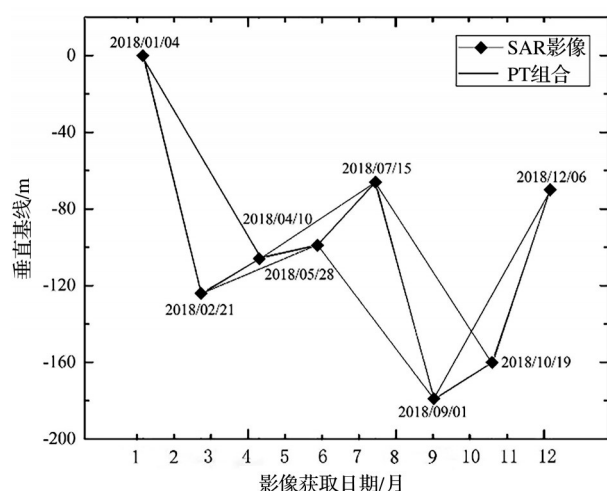
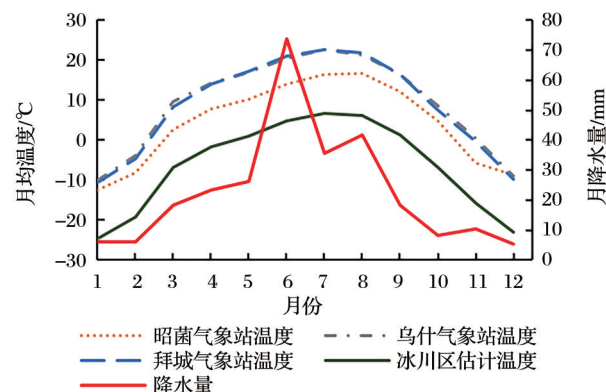


图2 SAR影像小基线集时空基线分布图

Fig.2 Time-spaces baseline distribution of small baseline set of SAR images



(其中降水量由周边三个站点的降水量估算得出,冰川区的温度由周边其他站点温度经过海拔改化后估算得出)

图3 南伊内里切克冰川附近气象台站气温和降水资料

Fig.3 Temperature and precipitation data of meteorological stations near South Inylchek Glacier

### 3 研究方法

#### 3.1 小基线集像素跟踪算法

传统的像素跟踪技术一方面受限于较大的时间跨度可能会导致过大位移量,搜索窗口往往会随之增大,不仅计算量增大且易导致匹配准确性的降低;另一方面空间基线过长则会增加地形相关偏移量的影响,而且该方法一般仅限于两幅影像之间进行相关处理,往往难以获取冰川运动的时序特征及其跃动等突发状况。小基线集方法是由 Bernardino 等研究人员提出的一种时间序列 InSAR 分析方法,该方法通过将获取的数据生成一系列短基线差分干涉图,从而更好地克服失相干现象。借助小基线集像素跟踪技术和冰川表面稳定性较好的监测点,

可以增加运动监测频率,更好地反映冰川运动的时空演变特征。同时,基于小基线集方法的最优基线组合,增加了多余观测,再借助SVD分解等方法,能够进一步降低噪声的影响,具备更好地鲁棒性和可靠性。本文基于小基线集像素跟踪技术,通过时间和空间两个基线约束形成的时空基线组合(图2),获取了相应组合的偏移量跟踪结果,并在此基础上反演得到了冰川表面运动的时序信息,其相应的数据处理流程图如图4所示。

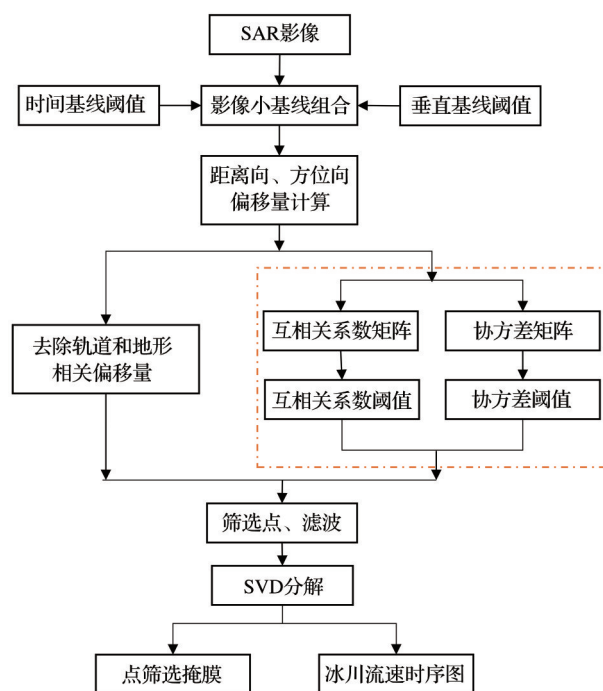


图4 SBAS-PT数据处理流程

Fig.4 SBAS-PT data processing flow

对于同一研究区域内按照时间顺序  $t_0, \dots, t_N$  排列的  $N+1$  幅 SAR 影像,选取其中一幅作为主影像并将其他影像配准到主影像上,通过选择合适的时间和空间基线的阈值,将 SAR 影像相互组合得到  $M$  景像素偏移图。其中  $M$  满足以下条件:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq N \left( \frac{N+1}{2} \right) \quad (1)$$

对于从影像  $t_A$  和主影像  $t_B$  ( $t_B > t_A$ ) 在两个不同时刻获取的 SAR 影像生成的像素偏移图,方位向坐标  $x$  及距离向坐标  $r$  的像素在两个方向上的像素偏移量可以表示为:

$$\begin{aligned} off_{azimuth}^j(x, r) &= P_{B\_azimuth}(x, r) - P_{A\_azimuth}(x, r) \\ &\approx \frac{1}{R_{azimuth}} [D_{azimuth}(t_B, t_A, x, r)] \\ &+ off_{lopo}^j(x, r) + off_{orbit}^j(x, r) + off_{ionosphere}^j(x, r) + off_{noise}^j \end{aligned} \quad (2)$$



$$\begin{aligned} \text{off}_{\text{range}}^j(x, r) &= P_{B_{\text{range}}}(x, r) - P_{A_{\text{range}}}(x, r) \\ &\approx \frac{1}{R_{\text{range}}} [D_{\text{range}}(t_B, t_A, x, r)] \\ &+ \text{off}_{\text{topo}}^j(x, r) + \text{off}_{\text{orbit}}^j(x, r) + \text{off}_{\text{ionosphere}}^j(x, r) + \text{off}_{\text{noise}}^j \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $P_{B_{\text{azimuth}}}(x, r)$  和  $P_{A_{\text{azimuth}}}(x, r)$  分别代表主影像和从影像在方位向上坐标为  $(x, r)$  的像素,  $P_{B_{\text{range}}}(x, r)$  和  $P_{A_{\text{range}}}(x, r)$  则代表主从影像距离向上坐标为  $(x, r)$  的像素。  $j \in (1, \dots, M)$  对应  $M$  个 PT 影像对。  $R_{\text{azimuth}}$  和  $R_{\text{range}}$  分别表示主影像的方位向分辨率及距离向分辨率。  $D_{\text{azimuth}}(t_B, t_A, x, r)$  和  $D_{\text{range}}(t_B, t_A, x, r)$  代表像素实际水平位移距离。  $\text{off}_{\text{topo}}^j(x, r)$  表示像素位移图中的地形偏移量, 在地形起伏相对较小, 垂直基线相对较短的情况下可忽略地形相位。  $\text{off}_{\text{orbit}}^j(x, r)$  表示轨道偏移量, 基于 RANSAC 算法拟合多项式能够去除轨道差异导致的偏移量。  $\text{off}_{\text{ionosphere}}^j(x, r)$  代表电离层偏移量, 电离层变动造成的影响在高纬度地区较为明显, 南伊内里切克冰川地处中低纬度区域, 因此可以忽略。  $\text{off}_{\text{noise}}^j$  代表匹配算法的误差噪声偏移量, 采用自适应中值滤波可以削弱其影响。去除非冰川运动偏移量后, 可将上式简化为:

$$\begin{aligned} \text{off}_{\text{azimuth}}^j(x, r) &= P_B(x, r) - P_A(x, r) \\ &\approx \frac{1}{R_{\text{azimuth}}} [D_{\text{azimuth}}(t_B, t_A, x, r)] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{off}_{\text{range}}^j(x, r) &= P_B(x, r) - P_A(x, r) \\ &\approx \frac{1}{R_{\text{range}}} [D(t_B, t_A, x, r)] \end{aligned} \quad (5)$$

两个获取时间之间的平均像素偏移速度可写成:

$$v_{\text{azimuth}}^j = \frac{\text{off}_{\text{azimuth}}^j}{t_B - t_A} \quad (6)$$

$$v_{\text{range}}^j = \frac{\text{off}_{\text{range}}^j}{t_B - t_A} \quad (7)$$

第  $k$  幅像素位移图的偏移量值可以表示为:

$$\sum_{i=t_{A,k+1}}^{t_{B,k}} (t_i - t_{i-1}) v_{\text{azimuth}}^i = \text{off}_{\text{azimuth}}^k \quad (8)$$

$$\sum_{i=t_{A,k+1}}^{t_{B,k}} (t_i - t_{i-1}) v_{\text{range}}^i = \text{off}_{\text{range}}^k \quad (9)$$

上述公式代表各时间段内平均像素速度的积分和, 将其表示为矩阵形式可得:

$$Av = \text{off} \quad (10)$$

其中:  $A$  表示时间基线矩阵,  $v$  代表对应观测时期的冰川流速,  $\text{off}$  则代表对应观测时期的像素偏移量观测值矩阵。

### 3.2 SVD 分解

SVD 分解是通过正交变换将矩阵对角化分解的一种方法。设  $A$  为  $m \times n$  维的矩阵, 矩阵  $A$  的秩  $\text{rank}(A) = r (r > 0)$ , 则有:

$$A = USV^T \quad (11)$$

其中:  $U$  是由  $AA^T$  的所有特征值组成的  $m \times m$  的矩阵,  $V$  是由  $A^T A$  的所有特征值组成的  $n \times n$  维矩阵,  $S$  是一个  $m \times n$  的对角阵, 主对角线上的元素称为奇异值, 对角阵中共有  $r$  个奇异值。  $U$  和  $V$  都是酉矩阵, 满足  $U^T U = I$  和  $V^T V = I$ 。对于奇异矩阵  $A$ , 通过下式可求得其广义逆矩阵:

$$A^+ = V \sum^{-1} U^T \quad (12)$$

其中:  $\sum^{-1} = \begin{pmatrix} \sum_r^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$ , 且  $\sum_r^{-1} = \text{diag} \left( \frac{1}{\text{off}_1} \dots \frac{1}{\text{off}_r} \right)$

对于方程:  $Av = \text{off}$ ,  $A$  矩阵为非列满秩矩阵, 故其最小二乘解不唯一。利用 SVD 分解求得广义逆矩阵  $A^+$  后, 附加最小范数的最小二乘解可以写为  $v = A^+ \text{off}$ , 代入式 (11) 得:

$$v = V \sum^{-1} U^T \text{off} \quad (13)$$

公式 (13) 即为 SVD 分解法求解方程最小范数解的计算公式, 基于 SVD 分解法, 即可得到冰川的运动速率。

### 3.3 目标点识别

为了获得更加可靠的偏移量信息, 本文以归一化互相关系数和协方差作为筛选点的条件, 选择研究区内稳定点作为跟踪目标, 前者用来反映配准像素的相似程度, 后者则用来反映匹配质量。归一化互相关系数计算公式如式 (14) 所示:

$$\begin{aligned} NCC(u, v) &= \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}][g(x+u, y+v) - \bar{g}(u, v)]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{x,y} [g(x+u, y+v) - \bar{g}(u, v)]^2}} \end{aligned} \quad (14)$$

其中:  $(x, y)$  代表地物点在匹配图像中的坐标;  $(u, v)$  代表点在模板图像中的坐标;  $f(x, y)$  为模板图像的像素值;  $g(x+u, y+v)$  表示匹配图像的像素值;  $\bar{f}$  表示模板图像的平均像素值;  $\bar{g}$  代表匹配图像的平均像素值。

相应的协方差计算公式如式 (15) 所示:

$$\text{cov}_{u,v} = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}][g(x+u, y+v) - \bar{g}(u, v)]}{XY} \quad (15)$$

其中:  $(x, y)$ 、 $(u, v)$ 、 $f(x, y)$ 、 $g(x+u, y+v)$ 、 $\bar{f}$  以及



$\bar{g}(u, v)$ 所代表的含义同式(14),  $\text{cov}_{u, v}$ 表示配准点的协方差,  $XY$ 则表示模板图像的像素数。

联合归一化互相关系数和协方差值可筛选出可靠的匹配点,如图5所示,其中归一化互相关系数

阈值设置为0.3,协方差阈值设置为0.01。筛选结果表明,经过双阈值约束,冰川表面绝大部分稳定匹配点得以保留,为后续时序分析奠定了良好的基础。

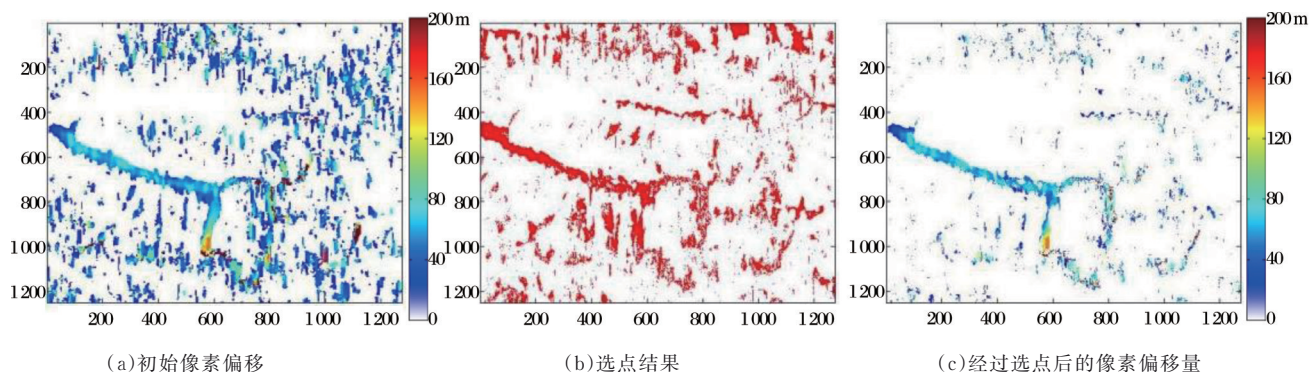


图5 基于互相关系数与协方差选点

Fig.5 Selecting points based on correlation coefficient and covariance

## 4 结果与分析

### 4.1 冰川运动时序分布

利用上述SBAS-PT时序分析方法和南伊内里切克冰川8景SAR影像,依据小基线集的原则得到了13对数据的优化组合(图2),获取了目标冰川表面不同时期的运动分布信息。为了减少轨道差异和噪声点等的影响,首先基于RANSAC和多项式拟合去除轨道偏移量,选出可靠的像素点,再利用自适应中值滤波(RAMF)削弱噪声影响,最终合成方位向与距离向偏移量,得到2018年13期冰川表面运动分布图,如图6所示。

另外,基于PT算法非冰川区稳定的基本假设前提,采用非冰川区稳定匹配点的偏移均方根误差等统计特征来表示各期提取精度,其中方位向RMSE最小值与最大值分别为 $0.38 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $1.35 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,距离向则分别为 $0.25 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $0.79 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,精度约为0.1像素,考虑到该地区复杂的地形和DEM精度等因素影响,以及各期结果的均方根误差基本都在 $1 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右,远小于冰川表面运动速度,说明了像素跟踪时序分析方法的可靠性。

根据小基线集数据处理流程,基于13期冰川运动结果的主辅影像组合,建立时间基线系数矩阵,然后依据SVD分解法得到各时期冰川表面的运动速率图如图7所示。

通过图7能够发现,南伊内里切克冰川1~3月整体运动速率较小,从4月起速率明显增加,7~8月达到最高,9月份起运动速率开始放缓,10~12月期

间表面运动速率较小。为了更好地反映南伊内里切克冰川随时间的变化情况,将各个时期的冰川运动速率在时间周期上积分,得到冰川运动分布在不同时间的时列演化结果(图8),其表面位移量随时间不断增加,整体运动趋势基本保持不变,全年的最大累积位移量超过140 m。而且,时序图充分反映了南伊内里切克冰川表面运动的时空差异性,基本呈现上游速度快,中游速度稍慢,下游速度逐渐减弱趋向于稳定的态势。其中下游与麦兹巴赫冰湖交界处,与周围区域相比,冰川表面存在一个明显的快速流动区,这可能与中游冰川应力释放有关。

### 4.2 冰川运动特征分析

为了更好地分析冰川运动的时序特征,沿图1中所示的AB剖面线对南伊内里切克冰川中部消融区不同区域2018年的表面运动速率和累积位移量进行了提取(图9)。剖面所示冰川中部消融区的运动速率保持在 $10 \sim 50 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。整体而言,冰川在1~4月及9~12月期间运动速率较慢,低于全年平均速率,而5~8月期间运动速率较快。对比发现,消融期内冰川在距离剖面末端A点2.4 km至17.8 km之间流速加快的特征更为明显,为了更加准确分析冰川运动变化,表1给出了沿剖面AB的速度统计信息。

综合分析表1和图9知,南伊内里切克冰川中部消融区2018年平均运动速率约为 $30 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,标准差为 $4.66 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,标准差整体上呈先增后降的趋势;其中,1~2月期间运动速率标准差最小,在6~7

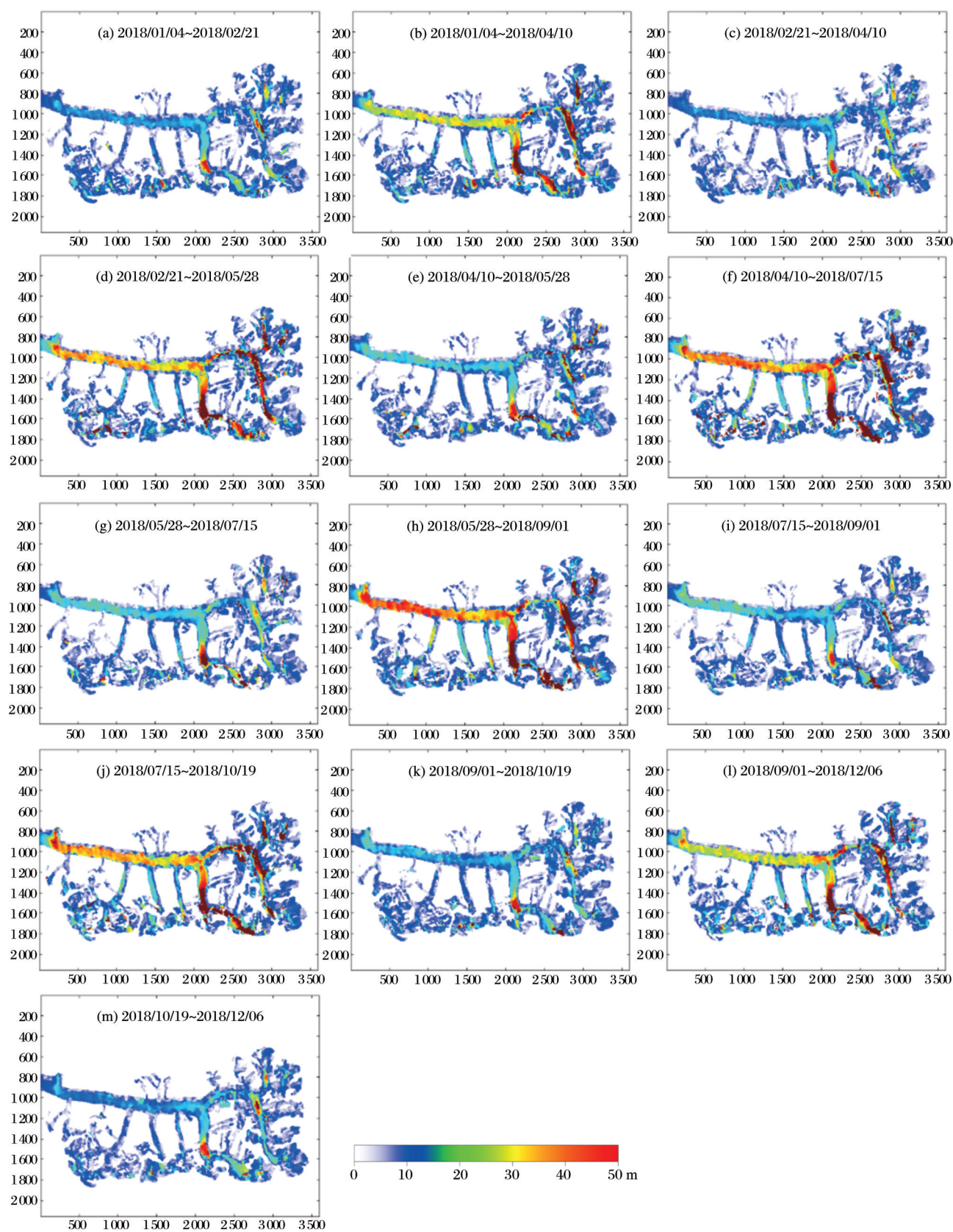


图 6 各影像对之间的冰川表面位移分布

Fig.6 Distribution of glacier surface displacement between pairs of images



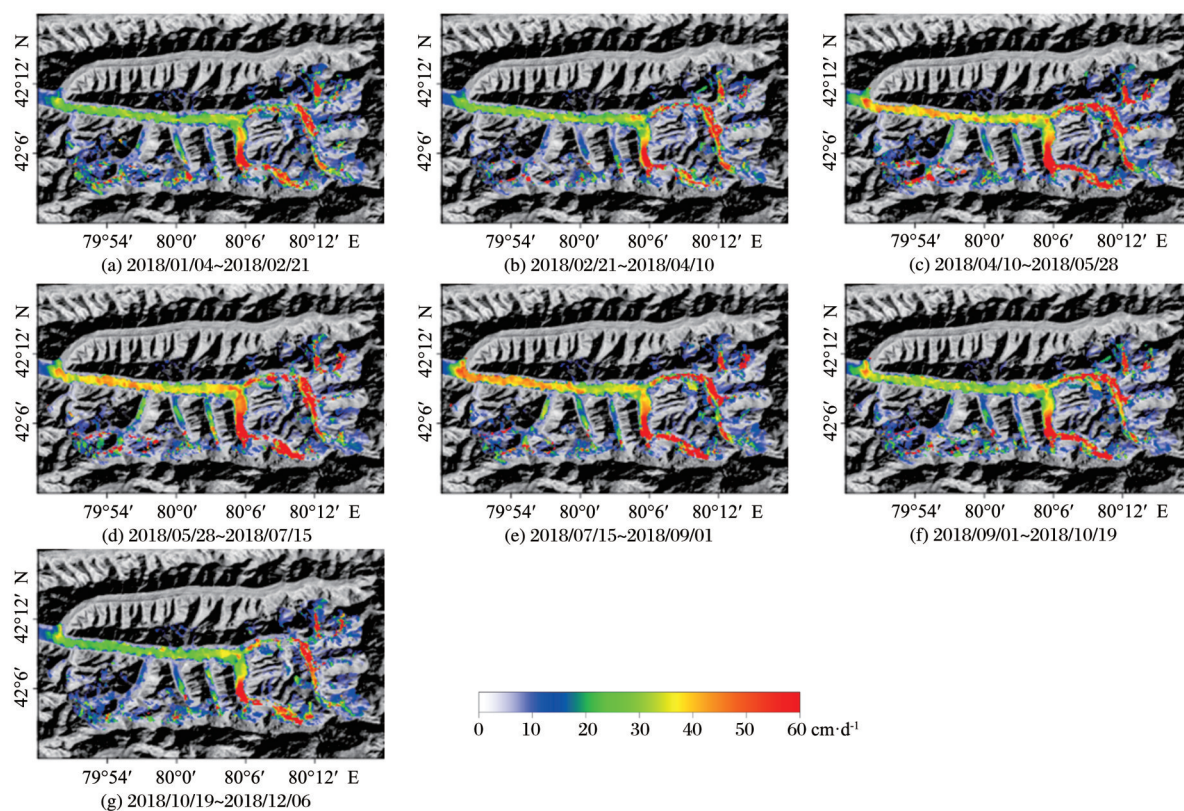


图 7 SVD 分解后各时期的冰川表面运动速率分布

Fig.7 Distribution of glacier surface velocity in each period after SVD decomposition

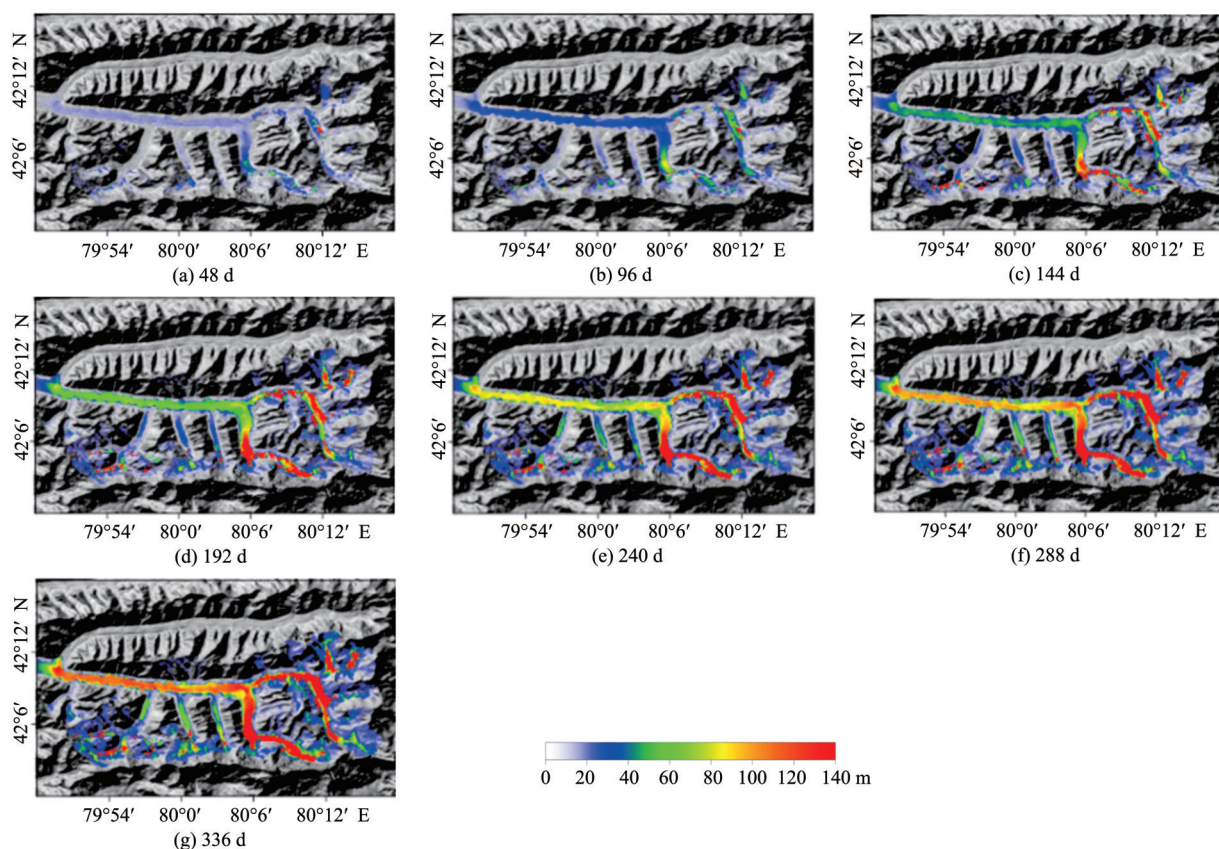


图 8 南伊内里切克冰川表面位移场时间序列结果

Fig.8 Time-series results of surface displacement field of the South Inylchek Glacier



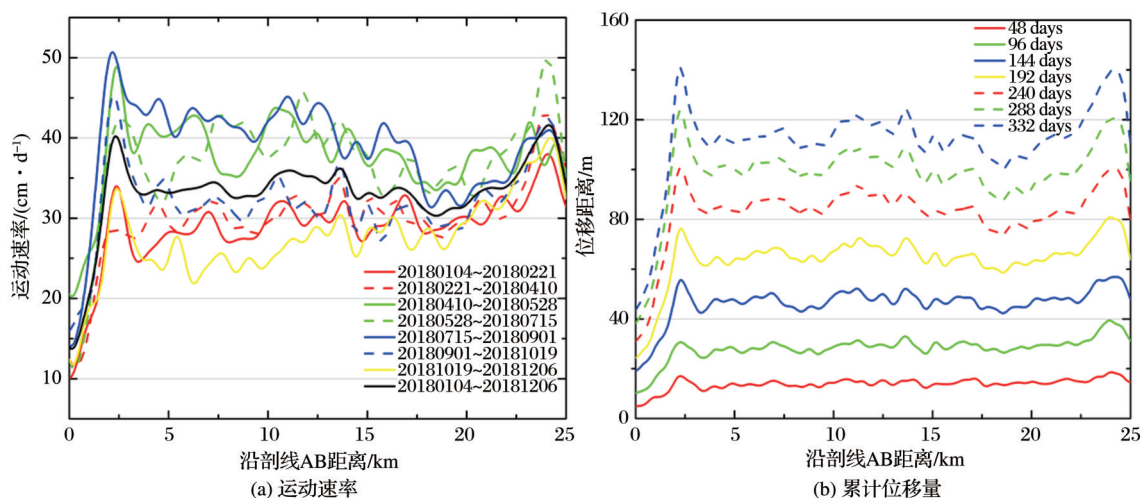


图9 冰川表面AB沿线运动速率和累积位移量

Fig.9 Velocity and cumulative deformation along the profile AB on glacier surface

月份达到最大值  $6.86 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ , 标准差的季节性变化与速率变化的趋势大体上保持一致。7~8月期间冰川流速高于全年平均 16.9%, 该时段是全年各月份中冰川运动最活跃的时期。11~12月冰川流速低于全年平均 16.8%, 这是冰川一年中运动最缓慢的时期。对比相邻两个时期的流速可以发现, 4~5月内冰川流速比 2~3月的流速高 23.1%, 冰川在这一期间进入消融期。9~10月内冰川流速比 7~8月内下降了 17.3%, 此时冰川的消融期结束。

表1 南伊内里切克冰川中部消融区各时期运动速率统计表

Table 1 Statistical graph of the movement rate of each period in the central ablation region of the South

Inylchek Glacier				
时间周期	运动速率/cm		平均运动速率变化率/%	
	平均	标准差	与全年平均对比	与前一时期对比
2018年全年平均	33.27	4.66	—	—
1月4日至2月21日	29.01	4.70	-12.8	—
2月21日至4月10日	30.16	5.30	-9.3	4.0
4月10日至5月28日	37.13	5.17	11.6	23.1
5月28日至7月15日	37.82	6.86	13.7	1.8
7月15日至9月1日	38.91	6.43	16.9	2.9
9月1日至10月19日	32.18	5.29	3.2	-17.3
10月19日至12月6日	27.69	5.36	-16.8	-14.0

## 5 讨论

由冰川整体运动分布可见, 冰川中部消融区位移场较为完整, 但中上游部分区域出现了严重噪声及明显的空值区域, 其主要原因是受到南伊内里切克冰川中上游终年被积雪覆盖和 Sentinel-1A 影像 C 波段波长较短的制约, 容易导致匹配错误; 另外,

较大的匹配模板虽然可以提高信噪比, 但冰川边缘的位移信息也会受到一定的损失, 冰川边缘两侧会受到“压缩”效应, 导致部分区域呈现为空值。

影响南伊内里切克冰川表面流速的因素较多, 其中温度和降水的季节性变化占主导地位<sup>[17]</sup>。冰川所在的区域 5 月份气温开始大幅升高, 同时降水量也大幅增加, 至 7 月份均达到最大值<sup>[8]</sup>, 9 月份开始回落 (图 3), 相应的冰川流速在 4~5 月期间明显加快, 7~8 月份达全年运动最活跃时期, 9~10 月份流速开始大幅下降。这种现象与气温和降水的变化趋势基本一致, 从侧面表明该冰川运动主要受到这两个因素的影响和制约。另外, 夏季升温 and 降水现象的增加, 也进一步促进了冰川内部的消融, 冰川融水的增加和地表温度的提高也在一定程度上加速了冰川的运动<sup>[5]</sup>。

另外, 在空间分布上, 南伊内里切克冰川中部消融区表面剖面两端流速高于中间部分的流速, 究其原因, 一方面是受到冰川支流辅助的推动作用, 另一方面是受到末端麦兹巴赫冰湖分流的作用, 此处由于冰川末端运动减缓和中游冰川物质的挤压等双重作用, 使得冰川物质应力积累在该支流交汇处得以释放, 进而加剧了冰川物质流动。而且, 冰川中部流速波动性较大, 结合光学影像可知, 冰碛物的阻碍、两侧支流的物质供给是造成这一现象的主要原因。

## 6 结语

本文基于小基线集像素跟踪技术, 利用 8 景 Sentinel-1A 影像提取了 2018 年南伊内里切克冰川

表面运动速率及其时序演变特征,研究结果表明:

(1)南伊内里切克冰川中上游区域运动速率普遍高于下游,且2018年全年累积位移量基本超过100 m,最大值达到141 m,全年的平均表面流速约为 $30 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ;冰川中部消融区在7~8月达到最大速率,10月至次年3月流速较低,同温度与降水变化的趋势保持一致。

(2)冰川流速时序结果精度约 $1 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ ,验证了基于时序像素跟踪方法开展冰川运动检测的可靠性与准确性,表明该方法对流速较快的冰川而言具有良好的适用性,能更好地反映冰川表面运动速度的持续演变情况,更有利于冰川表面运动的时空分布特征研究。

(3)基于非冰川区残差统计特征的冰川表面运动精度分析存在一定不足,后期将进一步收集实测数据和冰川区气象资料,并融合多源遥感数据,延长南伊内里切克冰川表面运动观测周期,为分析冰川活动性与气候变化之间的响应关系提供更可靠的数据支撑。

#### 参考文献 (References):

- [1] Derkacheva A, Mouginot J, Millan R, *et al.* Data Reduction Using Statistical and Regression Approaches for Ice Velocity Derived by Landsat-8, Sentinel-1 and Sentinel-2[J]. Remote Sensing, 2020, 12: 1935. doi: 10.3390/rs12121935.
- [2] Kääb A. Combination of SRTM3 and Repeat ASTER Data for Deriving Alpine Glacier Flow Velocities in the Bhutan Himalaya[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 94(4): 463-474. doi: 10.1016/j.rse.2004.11.003.
- [3] Fang Jinxin, Pu Tao, Shi Xiaoyi, *et al.* Runoff Variation and its Influence Factors in the Yanggong River Basin of Mt. Yulong Region Due to Climate Change[J], Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(2): 268-274. [方金鑫, 蒲焱, 史晓宜, 等. 气候变化背景下玉龙雪山漾弓江流域径流变化及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 268-274.]
- [4] Li Zhiguo, Yao Tandong, Tian Lide. Progress in the Research on the Impact of Glacial Change on Water Resources [J]. Journal of Natural Science, 2008, 23(1): 1-8. [李治国, 姚檀栋, 田立德. 国内外冰川变化对水资源影响研究进展[J]. 自然资源学报, 2008, 23(1): 1-8.]
- [5] 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.]
- [6] Zheng Yitong. Design and Implementation of SAR Pixel Tracking Parallel Algorithms for Mountain Glacier Motion Monitoring [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019. [郑一桐. 面向山地冰川运动监测的SAR偏移量跟踪算法并行化设计与实现[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.]
- [7] 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. doi: 10.1109/TGRS.2002.805079.
- [8] Shao Zhude, Ke Changqing. Upstream Velocity of the Amery Ice Shelf derived from Satellite RaDAR Future Tracking [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016, 28(3): 324-330. [邵珠德, 柯长青. 基于特征跟踪方法的Amery冰架上游流速估算[J]. 极地研究, 2016, 28(3): 324-330.]
- [9] 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 and Remote Sensing, 2007, 45(6): 1529-1558. doi: 10.1109/TGRS.2006.888937.
- [10] Yan S Y, Liu G, Wang Y J, *et al.* Accurate Determination of Glacier Surface Velocity Fields with a DEM-Assisted Pixel-Tracking Technique from SAR Imagery [J]. Remote Sensing, 2015, 7: 10898-10916. doi: 10.3390/rs70810898.
- [11] Casu F, Manconi A, Pepe A, *et al.* Deformation Time-series Generation in Areas Characterized by Large Displacement Dynamics: The SAR Amplitude Pixel-Offset SBAS Technique [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(7): 2752-2763. doi: 10.1109/tgrs.2010.2104325.
- [12] Euillades L D, Euillades P A, Riveros N C, *et al.* Detection of Glaciers Displacement Time-series Using SAR [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 184: 188-198. doi: 10.1016/j.rse.2016.07.003.
- [13] Nobakht M, Motagh M, Wetzel H U, *et al.* The Inylchek Glacier in Kyrgyzstan, Central Asia: Insight on Surface Kinematics from Optical Remote Sensing Imagery [J]. Remote Sensing, 2014, 6(1): 841-856. doi: 10.3390/rs6010841.
- [14] Li Jia, Li Zhiwei, Wang Changcheng, *et al.* Using SAR Offset-tracking Approach to Estimate 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] Han Haidong, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* Near-Surface Meteorological Characteristics on the Koxkar Baxi Glacier, Tianshan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(6): 967-975. [韩海东, 刘时银, 丁永建, 等. 科其喀尔巴西冰川的近地层基本气象特征[J]. 冰川冻土, 2008, 30(6): 967-975.]
- [16] Neelmeijer J, Motagh M, Wetzel H U, *et al.* Observation of the Surface Velocity Field of Inylchek Glacier (Kyrgyzstan) by Means of TerraSAR-X Imagery [C]// Erdbeben - Pers-

- pektiven für die Geowissenschaften, 2012.
- [17] 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 年运动状态提取与分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1281-1288.]
- [18] Osmonov A, Bolch T, Xi C, *et al.* Glacier Characteristics and Changes in the Sary-Jaz River Basin (Central Tien Shan, Kyrgyzstan) -1990-2010[J]. *Remote Sensing Letters*, 2013, 4(8): 725-734. doi:10.1080/2150704X.2013.789146.
- [19] Zhao Jiarui, Ke Changqing. Flow Velocity of the Pine Island Glacier, West Antarctica, Derived from Sentinel-1 SAR Data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(1): 12-18. [赵家锐, 柯长青. 基于 Sentinel-1 SAR 数据的南极松岛冰川流速监测[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(1): 12-18.]
- [20] Zhang M, Chen F, Tian B, *et al.* Characterization of Kyagar Glacier and Lake Outburst Floods in 2018 based on Time-Series Sentinel-1A Data[J]. *Water*, 2020, 12(1): 184. doi: 10.3390/w12010184.
- [21] Lemos A, Shepherd A, Mcmillan M, *et al.* Ice Velocity of Jakobshavn Isbræ, Petermann Glacier, Nioghalvfjærdsfjorden, and Zachariae Isstrøm, 2015~2017, from Sentinel 1-a/b SAR Imagery[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(6): 2087-2097. doi: 10.5194/tc-12-2087-2018.

## South Inylchek Glacier Surface Motion Extraction and Analysis based on Time-series Pixel Tracking Algorithm

Zhang Qimin<sup>1,2</sup>, Zheng Yitong<sup>1,2</sup>, Zhang Lu<sup>3</sup>, Li Zhiguo<sup>4</sup>, Yan Shiyong<sup>1,2</sup>

(1.Key Laboratory of Land, Environment and Disaster Monitoring, Ministry of Natural Resources,  
Xuzhou 221116, China;

2.School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology,  
Xuzhou 221116, China;

3.Sanya Institute of Remote Sensing, Sanya 572029, China;

4.Department of Surveying and Planning, Shangqiu Normal University, Shangqiu 476000, China)

**Abstract:** The 8 scenes SAR imagery acquired by Sentinel-1A satellite in TOPS mode are employed in surface motion extraction and analysis of South Inylchek Glacier during period from January to December in 2018 with Small Baseline Subset Pixel Tracking Technique (SBAS-PT), which could overcome the limit of the temporal incoherence. The results show that its overall movement rate is relatively small during period from January to March. The ice motion increased significantly since April and reached the maximum during period between July and August, then the movement rate began to slow down from September. And the ice motion became slow again during the period between October and December. The average surface velocity of the whole year is about  $30 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$ . In general, the ice motion rate in the upstream part of South Inylchek Glacier is significantly higher than that in the lower part of the glaciers. Both the reduction of the ice material supplement and the increase of moraine on glacier surface have made the ice gradually become to be stable in downstream part of the glacier.

**Key words:** South Inylchek Glacier; Sentinel-1A image; Small baseline subset pixel tracking technique; Glacier surface motion rate