

# 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

张晓博<sup>1</sup> 赵学胜<sup>2</sup> 葛大庆<sup>3</sup> 刘 斌<sup>3</sup>

1 防灾科技学院生态环境学院,河北 三河,101601  
2 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京,100083  
3 中国国土资源航空物探遥感中心,北京,100083

**摘 要:**利用新型 C 波段 Sentinel-1 卫星获取的 2015 年 2 月至 2017 年 2 月期间的影像数据,研究分析了天山中部南伊内里切克冰川不同时段运动特征。利用偏移量追踪技术计算不同时间段冰川位移,首先采用三步配准的方法进行主辅影像高精度整体配准,然后基于归一化互相关(normalized cross correlation,NCC)算法通过调整窗口参数精确估算局部偏移量,进一步分离得到冰川移动信息。监测结果表明:(1)在空间分布上,狭长的冰舌区是冰川主要的高速流动区域,冰舌区底部流速小于上部,两侧流速小于中间,末端流速明显减缓。(2)在季节变化上,冰川运动速率与温度变化趋势一致,在 5 月至 8 月期间运动速率最快,沿剖面线的最高速率达 49 cm/d;在 11 月至次年 2 月期间运动最为缓慢,速率为 25~30 cm/d 左右。(3)在年度变化上,2015 年夏季的运动速率比 2016 年整体高约 1~3 cm/d,其他季节则没有明显差异。与高分辨率 L 波段 PAL-SAR-2 影像的监测结果进行定量对比分析时,将冰舌区的像元进行抽稀后统计,得到两种数据获取的运动速率之差的均值为 3.48 cm/d,标准差为±3.78 cm/d,证实了南伊内里切克冰川运动监测结果的可靠性。

**关键词:**南伊内里切克;冰川;运动速率;Sentinel-1;偏移量追踪  
**中图分类号:**P237 **文献标志码:**A

冰川是具有流动特性、长期存在的自然粒雪体和自然冰体,是地球上重要的淡水资源<sup>[1]</sup>。冰川运动作为冰川变化的主要因素可用于指示气候变化,为冰川物质平衡研究提供重要信息<sup>[2]</sup>。此外,冰川巨大的刨蚀和搬运作用形成的冰碛结构松散、含水量大,遇到高温融雪、暴雨等会形成泥石流、滑坡等地质灾害。所以,监测山地冰川运动具有极其重要的意义。但是山地冰川条件复杂,传统地面测量人力消耗较大且费用较高。雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)和偏移量追踪技术作为两种遥感测量手段,可利用光学影像或星载雷达影像实现高效、零接触、大尺度的冰川监测<sup>[3]</sup>。相比于前者,偏移量追踪技术更适用于速度较快、相干性较差、长时间段的山地冰川运动监测。

新型高分辨率合成孔径雷达卫星 Sentinel-1、ALOS-2 的相继升空为冰川持续监测提供了重要的数据。Sentinel 是欧盟和欧洲空间局(Euro-

pean Space Agency, ESA)联合推出的哥白尼计划的空间部分<sup>[4]</sup>,空间任务需求建立在全球环境与安全监测(global monitoring of environment and security, GMES)服务的基础上,即数据持续供应、较短重访周期、快速数据分发、大尺度地理空间覆盖等<sup>[5]</sup>。其中,Sentinel 数据分发时效性保障了冰川实时监测的需求,大范围空间覆盖提供了监测大尺度、快速流动冰川的能力。本文的研究区是天山最大的山地冰川——南伊内里切克冰川,其运动特征可用于亚洲中纬地区水资源和环境变化研究。目前对该冰川的运动特征研究较少,仅有文献<sup>[6-7]</sup>分别利用 ENVISAT ASAR 和 ALOS PALSAR 估算了 2004 年、2007—2008 年的运动场。本文首次利用 Sentinel-1 数据基于偏移量追踪技术研究南伊内里切克在 2015—2017 年期间空间、季节及年度运动变化特征,并通过 ALOS PALSAR-2 和 Sentinel-1 两种数据交叉验证证明监测结果的可靠性。

1 研究区概况与数据

南伊内里切克冰川位于天山西段,发源于海拔 7 443 m 的天山主峰托木尔峰脚下,西接伊塞克湖盆地,南邻塔里木盆地北缘的阿克苏绿洲,是阿克苏重要的水源。该冰川面积约 567 km<sup>2</sup>,以树枝状山谷冰川最为发育,拥有多级支流和东西

走向的狭长冰舌,冰舌区域坡度较缓<sup>[8]</sup>。其所在地区最冷的月份在 1 月,5 月开始气温大幅升高,7 月份达到峰值,此后温度开始降低。图 1 为研究区地理位置和地形图,其中冰川地理位置数据下载于全球陆地冰川空间测量(global land ice measurements from space, GLIMS)网站<sup>[9]</sup>,地形图采用 30 m 分辨率的 ASTER 数据。

本文选取了 9 景覆盖南伊内里切克冰川的 C

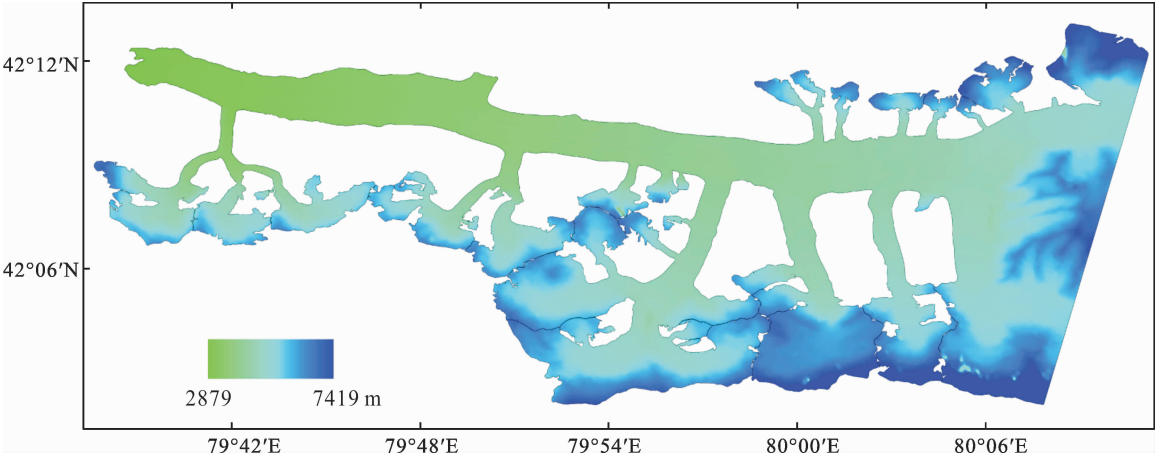


图 1 研究区地理位置和地形图  
Fig. 1 Location of Research Area and Digital Elevation Map

波段 Sentinel-1 降轨影像,时间自 2015 年 2 月至 2017 年 2 月,影像参数见表 1。Sentinel-1 任务由 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B 两颗卫星组成,分别于 2014 年和 2016 年发射成功,双星重访周期为 6 d,任务目标是提供雷达持续测量地球的能力,确保 C 波段合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)卫星的持续性。该卫星具有条带模式(stripmap mode,SM)、干涉宽扫描模式(interferometric wide swath mode,IW)、超宽扫描模式(extra-wide swath mode,EW)和波动模式(wave mode,WM)4 种观测模式<sup>[10]</sup>。本文使用 VV 极化方式的 IW 模式 Sentinel-1 影像,幅宽 250 km,方位向分辨率 20 m,距离向分辨率 5 m,数据来源于 ESA 官网。另外,本文使用了 ALOS-2 卫星搭载的 PALSAR-2 传感器提供的 L 波段 SAR 数据,其空间分辨率 2 m,极化方式为 HH,接收时间为 2015-02-10 和 2015-11-03。

2 偏移量追踪技术

偏移量追踪技术根据使用的 SAR 数据不同,

表 1 影像组合  
Tab. 1 Image Pairs

ID	影像	主影像	从影像	时间基线/d	空间基线/m
1	Sentinel-1	2015-02-12	2015-05-19	96	246
2	Sentinel-1	2015-05-19	2015-08-23	96	4
3	Sentinel-1	2015-08-23	2015-11-15	84	24
4	Sentinel-1	2015-11-15	2016-02-19	96	28
5	Sentinel-1	2016-02-19	2016-05-25	96	20
6	Sentinel-1	2016-05-25	2016-08-29	96	51
7	Sentinel-1	2016-08-29	2016-11-27	90	81
8	Sentinel-1	2016-11-27	2017-02-07	72	31
9	Sentinel-1	2015-02-12	2015-11-15	276	266
10	PALSAR-2	2015-02-10	2015-11-03	266	60

分为相干性追踪法和强度追踪法两类,其中强度追踪法对相干性低、地表特征明显的区域更适用。强度追踪法对局部偏移量的正确估算基于归一化互相关(normalized cross correlation,NCC)准则,通过匹配窗口的相似度最大化确定方位向和距离向上的相对形变<sup>[11]</sup>。NCC 基于像元进行计算,若想获得亚像元配准精度,可通过强度插值和相关性插值两种不同的插值方法来实现,文献[12]发现在冰川等大尺度移动目标监测中强度插值的效果更佳。NCC 计算公式为:

$$\rho(x,y)=\frac{\sum_{x,y}(r(x,y)-u_r)(s(x-u,y-v)-u_s)}{(\sum_{x,y}(r(x,y)-u_r)^2\sum_{x,y}(s(x-u,y-v)-u_s)^2)^{1/2}}$$

(1)

式中,  $\rho(x,y)$  为归一化互相关系数;  $(x,y)$  为参考像元位置;  $(x-u,y-v)$  为搜索像元位置;  $r$  和  $s$  分别为参考像元和搜索像元的像元值;  $u_r$  和  $u_s$  分别为参考窗口和搜索窗口的像元平均值。

利用基于 SAR 强度图的强度追踪法计算冰川运动主要包括主辅影像精确配准、局部偏移量计算和偏移量分离 3 个步骤。由于 Sentinel-1 采用新型逐行扫描地形观测(terrain observation by progressive scan, TOPS)成像模式,高精度影像配准是 Sentinel-1 TOPS 影像进行干涉处理的基础,方位向配准的绝对精度需达 0.01 个像元,否则不同脉冲串之间会出现明显的相位跳变现象。本文利用三步配准的方法进行主辅影像高精度配准。首先基于地形进行初步配准,然后通过强度互相关最大化的方法进行精确配准,最后针对脉冲串间相位连续性的问题基于频谱多样性进行重叠区配准。

在计算局部偏移量时,匹配窗口过小会降低信噪比且无法提取较大的形变量,窗口过大则计算效率降低<sup>[13]</sup>。由于研究区冰川运动速度较快,本文利用多尺度方法均衡计算效率和精度之间的矛盾。首先利用大窗口提取大尺度移动信息得到初始偏移量,然后在此基础上利用小窗口精细估算得到高空间分辨率的偏移量。

除了地表形变产生的偏移量之外,主辅影像的局部偏移量还包含卫星飞行姿态不稳定、配准误差等因素引入的偏移量。其中,两景影像轨道状态不一致引起的偏移量与基线有关,为了避免基线误差的影响,本文选择较稳定的点拟合二次多项式来去除卫星姿态对影像偏移量的影响。

形变位移量的估算误差主要来源于地形起伏和电离层影响引入的配准误差,以及轨道参数不精确带来的偏移分量估算误差。本文利用插值的方法提高像元配准精度,并通过拟合二次多项式消除轨道误差。另外,通过提高信噪比的阈值改善偏移量估算的精度,但阈值过高会减少计算值的数量。通常情况下,距离向和方位向偏移量估算误差约为像元的  $1/20$ <sup>[14]</sup>。

3 冰川运动结果分析

3.1 对比分析

由于山地冰川条件复杂,缺乏同时期的地面实测数据,本文利用 Sentinel-1 和 PALSAR-2 两种数据的监测结果交叉验证结果的可靠性。偏移量追踪技术提取得到方位向和距离向位移量,经

二维矢量合成得到平面位移量,由于两种影像成像参数不同,结果均从斜距方向转化到地距方向。图 2 为利用两种数据得到的南伊内里切克冰川不同时段水平方向的运动速率图,底图为 SAR 强度图。受制于卫星飞行轨道,很难得到同一地区完全同步的数据,本文使用的两种数据覆盖时间基本一致,图 2(a)是利用 Sentinel-1 2015-02-12 和 2015-11-15 两期影像提取的南伊内里切克冰川运动速率图,图 2(b)是由 PALSAR-2 2015-02-10 和 2015-11-03 两期影像得到的运动速率图。

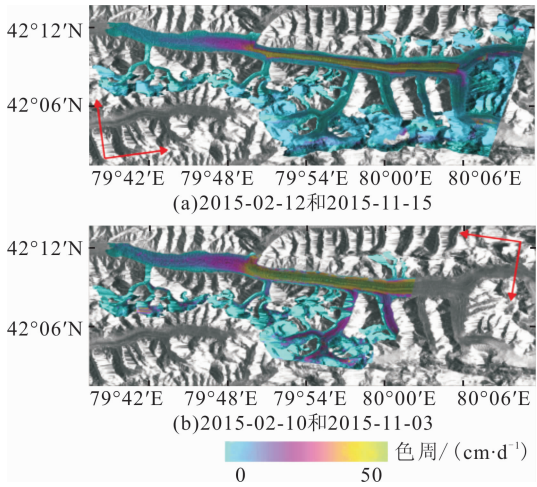


图 2 运动速率图

Fig. 2 Motion Velocity Map

首先将冰舌区的像元进行抽稀,得到如图 3 中所示的约 3 000 个像元的冰川运动速率对比图。然后对两种数据获取的运动速率作差,得到均值为 3.48 cm/d,标准差为  $\pm 3.78$  cm/d。冰舌区运动速率较快,其信噪比相对较低,对于其他运动速率较慢的区域,精度优于 3 cm/d。尽管存在一定的差异,但获得的速率具有较高的空间一致性,表明两种数据可以进行相互验证。经分析,导致 ALOS 与 Sentinel-1 提取的运动速率出现差异的主要原因有:数据的成像参数不同,将方位向和距离向合成为水平向流速实际上是对三维位移矢量的简化处理;本文处理的主辅影像的时间基线较长,对于时刻处于运动变化的冰舌区域,地表目标变化过大,导致影像信噪比较低;配准算法及数字高程模型(digital elevation model, DEM)误差引入的影像配准误差对偏移量计算带来影响;两种数据并不完全同步,速率之间存在微小差别是可能的。

利用 Sentinel-1 和 PALSAR-2 得到的冰舌区的运动速率分布基本一致,但从图 2 中可以看出两种数据提取冰川运动信息的能力存在差异。在南北分支上 Sentinel-1 未能提取到运动信息,

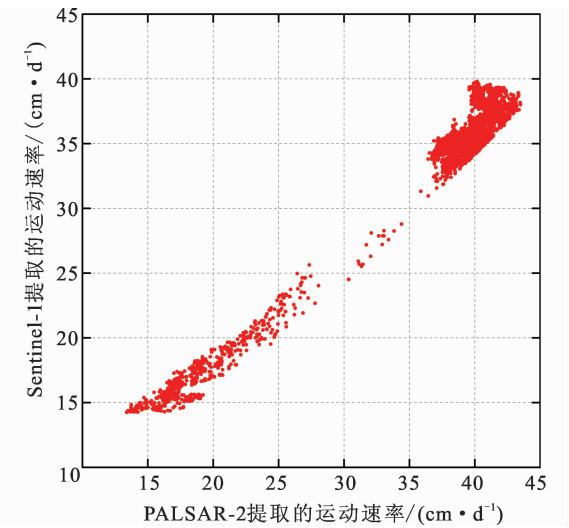


图 3 Sentinel-1 和 PALSAR-2 得到冰舌区域像元的运动速率对比图

Fig. 3 Motion Velocities Comparison of Representative Pixels in Glacier Tongue Area from Sentinel-1 and PALSAR-2

主要由于 Sentinel-1 降轨影像中部分地区因山体遮蔽形成了阴影。另外,PALSAR-2 的空间分辨率较高,影像的信噪比相对较好,所以得到的结果中冰舌边缘信息较为完整。但 PALSAR-2 影像幅宽较小,本文使用的单幅影像不能完全覆盖研究区。

3.2 形变分析

本文利用 Sentinel-1 数据得到了南伊内里切克冰川 2015 年 2 月至 2017 年 2 月不同时间段的运动速率图(见图 4),色周均为 60 cm/d。结果显示该冰川高速流动的区域主要是狭长的冰舌区,冰舌区底部流速小于上部,两侧流速小于中间,末端流速明显减缓。

为了更好地分析冰川运动的空间和时间特征,图 5 给出了冰川 AB 沿线不同时间段的运动速率剖面图。其中,AB 为图 4(a)冰舌区域绿色标识的曲线,总长约 25.13km;黑色曲线表示沿

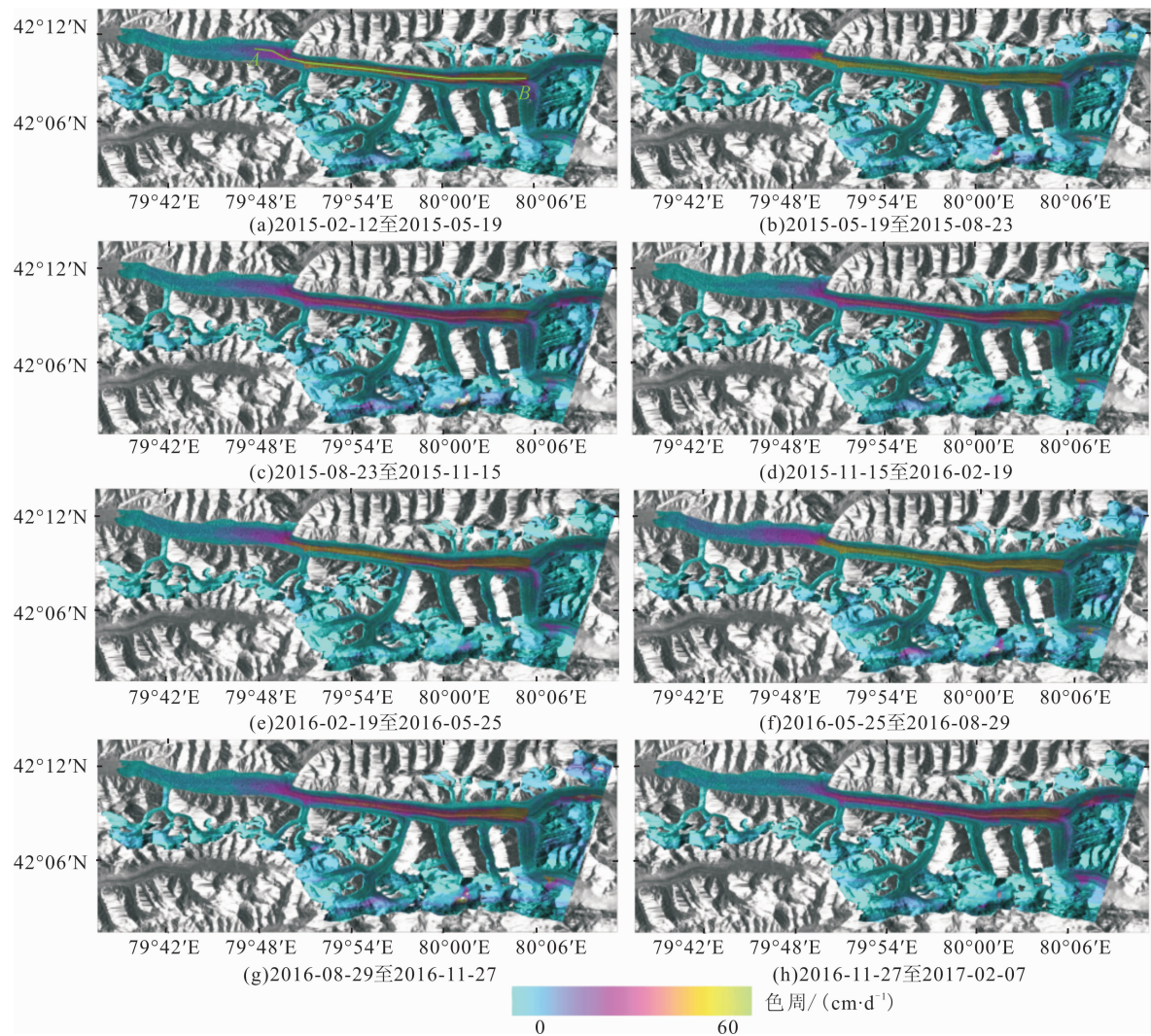


图 4 利用 Sentinel-1 得到的不同时段运动速率图

Fig. 4 Motion Velocity Maps in Different Periods Using Sentinel-1 Images

线的地形坡度;实线表示 2015 年 2 月至 2016 年 2 月不同时间段的运动速率,破折线表示 2016 年 2 月至 2017 年 2 月不同时间段的运动速率。

通过对南伊内里切克冰川运动的长期监测,本文发现该冰川全年处于运动状态。冰舌区域的运动速率主要集中在 20~49 cm/d,与文献[6]利用 ASAR 得到的该冰川 2004 年的速率基本一致。冰川 5 月至 8 月运动速率最快,随后逐渐减缓,11 月至次年 2 月期间运动速率达到最小,流速在季节上的变化与该地区温度变化的趋势一致。冰舌区域 AB 沿线上,5 月到 8 月这个时间段内冰川运动速率最高,大部分在 40 cm/d 以上,最大达 49 cm/d;2 月至 5 月期间的运动速率在 32~38 cm/d 之间;11 月到次年 2 月期间的运动速率达到最低,中间区段基本在 25~30 cm/d;而 8 月至 11 月期间的冰川运动速率与冬季大致相同,在 7~14 km 区段提高了约 2~3 cm/d。

就剖面图整体而言,不同季节间的运动速率在剖面线 4~20 km 间差异较大,其中夏季速率

比冬季高约 15~20 cm/d,而在剖面线两端差异较小。推测其主要原因是冰舌两端与中间区段相比,流动分支较多,受到的应力更复杂,并且冰川末端的厚度变化较大,因此流速与冰川厚度、温度及地形等多种因素有关,并非完全与温度成比例变化。

在不同年度上,2015 年夏季的运动速率比 2016 年整体高约 1~3 cm/d,其他季节则没有明显差异。由于研究区人迹罕至,地表温度存档数据不完善,本文利用冰川南部相距约 100 km 阿克苏市的地表温度数据,在假设该区域内同一海拔温度相同的前提下,根据海拔变化与温度变化的关系估算南伊内里切克冰川的地表温度,图 6 显示该地区 5 月至 9 月期间的大部分时间 2015 年地表温度偏高,与 2015/2016 年强厄尔尼诺过程导致 2015 年全球地表温度历史最高的全球气候系统研究相吻合<sup>[15]</sup>。因此,夏季的差异性变化主要是由于 2015 年该时间段内地表温度整体偏高,冰川内部或底部融化,冰屑黏结性减小。

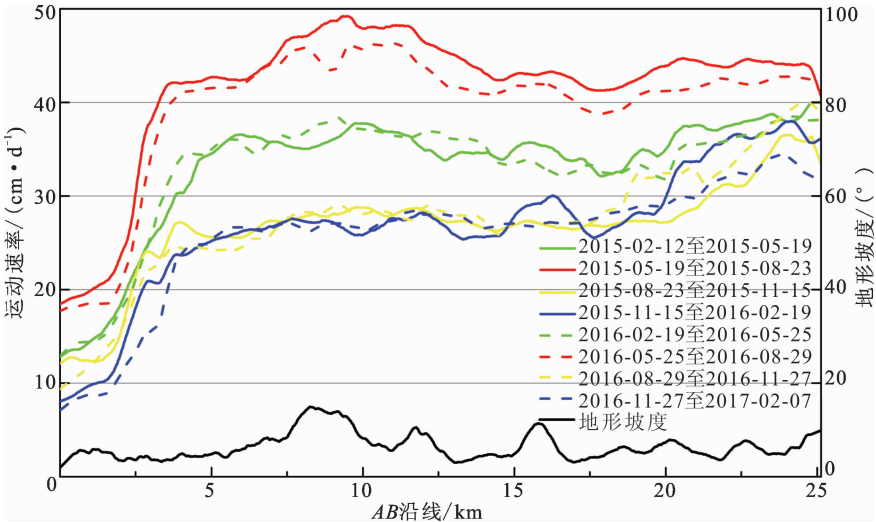


图 5 冰川运动速率剖面图

Fig. 5 Average Motion Velocity Profile Graph

4 结 语

监测南伊内里切克冰川运动对于了解亚洲中纬地区水资源和环境变化有重要意义。本文利用 C 波段 Sentinel-1 和 L 波段 PALSAR-2 数据基于偏移量追踪分析了南伊内里切克冰川 2015 年 2 月至 2017 年 2 月期间的空间、季节及年度运动变化特征,发现:

1) 两种数据监测得到的冰舌区域运动速率之差的均值为 3.48 cm/d,标准差为±3.78 cm/d,交叉验证了监测结果的可靠性。

2) 空间分布上,南伊内里切克冰川高速流动

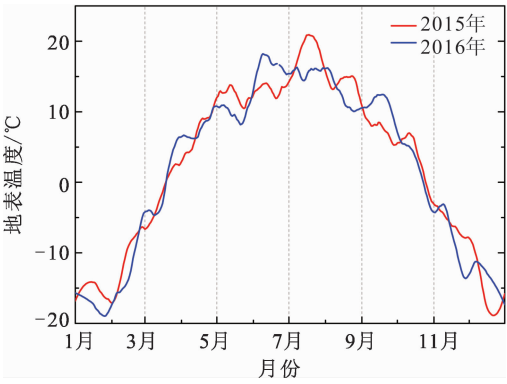


图 6 2015 年和 2016 年冰川区域地表温度对比

Fig. 6 Land Surface Temperature Comparison Between 2015 and 2016

的区域主要是狭长的冰舌区,冰舌区底部流速小于上部,两侧流速小于中间,末端流速明显减缓。

3)在季节上,5 月至 8 月期间冰川平均运动速率最大,11 月至次年 2 月期间冰川运动速率最小,季节上的变化与温度变化的趋势保持一致;不同季节间的运动速率在剖面线 4 ~20 km 间差异较大,而在剖面线两端差异较小,主要原因是冰舌两端流动分支较多,受到的应力更复杂,并且冰川末端的厚度变化较大。因此,流速与冰川厚度、温度及地形等多种因素有关,并非完全与温度成比例变化。

4)在不同年度上,2015 年夏季的运动速率比 2016 年整体高约 1~3 cm/d,其他季节则没有明显差异。根据估算的地表温度,发现该地区 5 月至 9 月期间的大部分时间 2015 年地表温度偏高,因此,夏季的差异性变化主要是由于 2015 年该时间段内地表温度整体偏高,冰川内部或底部融化,冰屑黏结性减小。

参 考 文 献

[1] Li Zhiguo, Yao Shandong, Tian Lide. Progress in the Research on the Impact of Glacial Change on Water Resources [J]. *Journal of Natural Resources*, 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)

[2] Mcavane B, Covey C, Joussaume S, et al. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001

[3] 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

[4] Torres R, Snoeij P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 Mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120(6): 9-24

[5] Malenovský Z, Rott H, Cihlar J, et al. Sentinels for Science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 Missions for Scientific Observations of Ocean, Cryosphere, and Land [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120(10):91-101

[6] Erten E, Reigber A, Hellwich O, et al. Glacier Velocity Monitoring by Maximum Likelihood Tex-

ture Tracking[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009, 47(2):394-405

[7] 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): 1 226-1 236(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):1 226-1 236)

[8] Aizen V B, Aizen E M, Melack J M, et al. Association Between Atmospheric Circulation Patterns and Firn-Ice Core Records from the Inilchek Glacierized Area, Central Tien Shan, Asia [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2004, 109 (D8): 657-678

[9] Raup B, Racoviteanu A, Khalsa S J S, et al. The GLIMS Geospatial Glacier Database: A New Tool for Studying Glacier Change [J]. *Global & Planetary Change*, 2007, 56(1):101-110

[10] Salvi S, Stramondo S, Funning G J, et al. The Sentinel-1 Mission for the Improvement of the Scientific Understanding and the Operational Monitoring of the Seismic Cycle [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120(10):164-174

[11] Scambos T A, Dutkiewicz M J, Wilson J C, et al. Application of Image Cross-Correlation to the Measurement of Glacier Velocity Using Satellite Image Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42(3):177-186

[12] Drury M. Sub-Pixel Precision Image Matching for Measuring Surface Displacements on Mass Movements Using Normalized Cross-Correlation [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(1):130-142

[13] Yan S, Guo H, Liu G, et al. Monitoring Muztagh Kuksai Glacier Surface Velocity with L-band SAR Data in Southwestern Xinjiang, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 70(7):3 175-3 184

[14] Strozzi T, Luckman A, Murray T, et al. Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2002, 40(11):2 384-2 391

[15] Zhai Panmao, Yu Rong, Guo Yanjun, et al. The Strong El Nino in 2015/2016 and Its Dominant Impacts on Global and China's Climate [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, 74(3):309-321(翟盘茂,余荣,郭艳君,等. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报, 2016, 74(3):309-321)

Motion Characteristics of the South Inilchek Glacier Derived  
from New C-Band SAR Satellite

ZHANG Xiaobo<sup>1</sup> ZHAO Xuesheng<sup>2</sup> GE Daqing<sup>3</sup> LIU Bin<sup>3</sup>

1 School of Ecology and Environment, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 101601, China

2 College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

3 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing for Land and Resources, Beijing 100083, China

**Abstract:** This study presents the results of measuring the motion characteristics of the South Inilchek glacier with the C-band Sentinel-1 images acquired from February 2015 to February, 2017. During the offsets estimation in offset-tracking method, we firstly adopt three-step method to achieve high precision overall registration, and then change the matched window size to estimate the local offset with the NCC(normalized cross correlation) algorithm, which was further separated to get glacier motion information. The observation results show that the significant high-speed flow area was the ice tongue, where the flow velocity reduced from the upper to the bottom and slowed obviously at the end, and increased from its both sides to the middle. Moreover, the glacier motion velocity had the same trend with the temperature variation seasonally. The glacier tongue moved with the maximum average velocity of 49 cm/d during the period of May to August, and with the slowest moving in the interval from November to February for about 25-30 cm/d. While in terms of annual changes the velocity in the summer of 2015 was higher than that in 2016 as a whole for about 1-3 cm/d, and there was no marked difference in the other seasons. Furthermore, the monitoring result was demonstrated by comparing the results from Sentinel-1 images in quantity with that from high resolution L-band PAL-SAR-2 images. The statistics of the sparse pixels in the tongue indicated that the average of the velocity difference was 3.48 cm/d and the standard deviation was  $\pm 3.78$  cm/d, which confirmed the reliability of the results.

**Key words:** the South Inilchek; glacier; motion velocity; Sentinel-1; offset-tracking

**First author:** ZHANG Xiaobo, PhD, specializes in ground deformation monitoring with InSAR technique. E-mail: zxb@cidp.edu.cn  
**Foundation support:** The National Natural Science Foundation of China, No. 41504048.