



利用高分三号影像监测依嘎冰川表面运动

王群^{1,2,3} 张蕴灵^{1,2,3} 范景辉⁴ 傅宇浩^{1,2,3}

1 中国公路工程咨询集团有限公司,北京,100097

2 空间信息应用与防灾减灾技术交通运输行业研发中心,北京,100097

3 中咨数据有限公司,北京,100097

4 中国自然资源航空物探遥感中心,北京,100083

摘要:冰川运动是冰川及冰川湖危险性评估的重要依据。高分三号作为中国首颗民用星载合成孔径雷达卫星,因其全天时、全天候以及高空间分辨率的特点在冰川运动监测中有着重要优势。利用5景精细条带2成像模式的高分三号影像,应用偏移量跟踪技术监测了念青唐古拉山依嘎冰川在2017-11—2018-03期间4个时段的运动分布情况。通过与高分三号影像时间分布类似的两景Sentinel-1影像的偏移量跟踪结果进行对比,并基于研究区基岩运动速度应为0的假设,计算了高分三号各个时段结果基岩区的速度残差,评估了高分三号影像在冰川表面运动监测中的适用性。高分三号监测结果表明,4个时段依嘎冰川表面具有相似的流速分布,其表面速度最大处均分布在冰川表面高程变化最剧烈的中部,且与基于两景Sentinel-1影像的偏移量跟踪结果在总体强弱态势上吻合;各个时段高分三号监测结果基岩区速度残差的均方根误差分别为1.4 cm/d、2.0 cm/d、1.7 cm/d、2.3 cm/d,验证了利用高分三号影像监测依嘎冰川表面运动的可靠性。以上分析结果表明,高分三号影像可作为冰川表面运动监测的常规数据来源之一。由于高分三号同时具有高空间分辨率和高性价比的特点,因此它能为中国冰川遥感监测发挥独特作用。

关键词:冰川运动;高分三号;偏移量跟踪技术;依嘎冰川

中图分类号:P237 **文献标志码:**A

受全球气候变暖影响,中国大部分冰川呈现出加速退缩趋势^[1],且近年来冰崩、冰川湖溃决洪水等冰川灾害时有发生,规模和频率都有所增加^[2]。冰川运动作为冰川的特征之一,是研究冰川物质平衡和全球气候变化的重要参数之一,也是冰川及冰川湖危险性评估的重要依据,监测冰川运动变化对研究气候变化和冰川灾害预警有重要意义^[3]。

目前,现场实地监测和遥感监测等多种技术手段都可用于监测冰川运动速度的变化^[4-5]。但是冰川往往分布在人迹罕至、环境恶劣的地区,对实地观测人员的生命安全有着极大的威胁,并且实地监测费时费力,监测范围和频次受限^[6]。随着遥感技术的发展,特别是星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)的出现,冰川区的SAR影像可以全天时、全天候获取,有效克服一

些冰川区多云雨天气条件的限制,提高影像获取频率;还可以根据SAR影像的强度信息和相位信息,应用偏移量跟踪技术、差分干涉雷达测量技术(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)、多孔径干涉测量技术(multiple aperture interferometry, MAI)等多种技术手段获取大范围、高精度的冰川表面运动情况,成为冰川运动监测的重要手段之一^[7-14]。

目前,可用于监测冰川表面运动的主要在轨SAR卫星包括Sentinel-1、TerraSAR-X、COSMO-SkyMed星座、RadarSAT-2等,国内外学者也利用以上SAR卫星数据在冰川表面运动监测研究中取得了较多应用成果。高分三号(GF-3)卫星是首颗中国自主研发的C频段多极化SAR卫星,具有高分辨率、大成像幅宽、多成像模式等特点,与Sentinel-1等免费数据相比具有高分辨

收稿日期:2019-01-18

项目资助:国家重大科技专项(07-Y30B10-9001-14/16);中欧科技合作“龙计划”四期(32365);中国地质调查局地质调查项目(DD20190515)。

第一作者:王群,硕士,助理工程师,主要从事InSAR技术应用与研究。wangq0723@163.com

通讯作者:范景辉,博士,教授级高级工程师。jhfan2004@qq.com

率的优势,与 TerraSAR-X、COSMO-SkyMed、RadarSAR-2 等商业数据相比具有性价比高的优势,其在海洋、气象、水利、减灾等多个领域均有成功应用案例^[15]。但利用高分三号影像监测冰川表面运动的研究尚属空白,故本文以发掘高分三号在中国冰川遥感监测中的作用为目标,利用覆盖念青唐古拉山依嘎冰川的 5 景高分三号影像,采用基于 SAR 影像强度信息的偏移量跟踪技术,提取了依嘎冰川表面运动分布情况,分析了其运动特征,并与 Sentinel-1 及前人研究结果对比,评估了高分三号监测冰川表面运动的适用性。

1 研究区与数据

1.1 研究区

依嘎冰川位于中国西藏自治区那曲地区嘉黎县念青唐古拉山脉西段,地处易贡藏布一级支流尼都藏布上游北侧,具体位置和范围见图 1。根据 2014 年中国科学院寒区旱区环境与工程研究所发布的《中国第二次冰川编目》,依嘎冰川面积约为 46.3 km²,高差接近 3 000 m^[16]。依嘎冰川末端与尼都藏布相接,其运动极可能堵塞河道,形成堰塞湖,威胁下游众多村落的安全,监测其运动情况具有重要的意义。

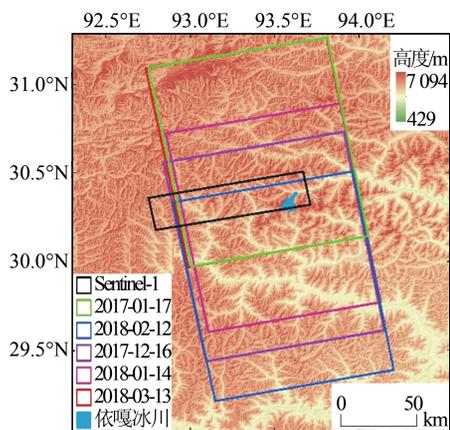


图 1 依嘎冰川地理位置

Fig.1 Geographic Location of the Yiga Glacier

1.2 数据

高分三号卫星于 2016-08-10 在中国太原卫星发射基地发射,是国家高分辨率对地观测系统重大专项中的唯一一颗民用微波遥感卫星,同时也是中国自主研制的首颗 C 波段多极化卫星,重复周期 29 d^[17]。本文收集了研究区 2017-11—2018-03 之间的 5 景升轨高分三号影像,成像模式为精细条带 2 模式,斜距向分辨率为 2.25 m,方位

向分辨率为 4.78 m,极化方式为 HH 极化,使用的高分三号数据主要参数见表 1;同时收集了与本文高分三号影像时间分布类似的两景升轨 Sentinel-1 数据,成像模式为方位波束扫描 (terrain observation by progressive scans, TOPS) 模式,斜距向分辨率为 2.33 m,方位向分辨率为 13.96 m,极化方式为 VV 极化,使用的 Sentinel-1 数据主要参数见表 2;采用 30 m 分辨率的 AW3D30 数字表面模型 (digital surface model, DSM) 数据辅助 SAR 影像配准和地理编码,其高程精度优于 5 m^[18]。

表 1 本文使用的高分三号数据主要参数

Tab.1 Main Parameters of GF-3 Images Used in This Paper

主影像	从影像	垂直基线/m	时间基线/d
2017-11-17	2017-12-16	-1 766.8	29
2017-12-16	2018-01-14	2 195.8	29
2018-01-14	2018-02-12	-1 177.1	29
2018-02-12	2018-03-13	412.8	29

表 2 本文使用的 Sentinel-1 数据主要参数

Tab.2 Main Parameters of Sentinel-1 Images Used in This Paper

主影像	从影像	垂直基线/m	时间基线/d
2017-12-10	2018-01-15	37.1	36

2 研究方法与数据处理

2.1 研究方法

本文使用偏移量跟踪技术对覆盖依嘎冰川的高分三号和 Sentinel-1 影像进行处理。偏移量跟踪技术可以计算两景 SAR 影像获取的时间段内冰川在距离向和方位向的运动分布情况^[19]。一般来说,偏移量跟踪技术的精度可以达到 SAR 影像像元分辨率的 1/10 以上^[20],以 10 m 分辨率的高分三号数据为例,其结果精度优于 1 m。

偏移量跟踪技术的关键算法是归一化互相关算法,归一化互相关算法计算出的 SAR 影像总偏移量一般是地形、电离层、轨道以及冰川运动引起的偏移量的总和^[9,21-22]。在研究区地形起伏不大且 SAR 影像对空间基线较短时,地形起伏引起的偏移量往往可以忽略^[21],而电离层引起的偏移量与研究区的纬度和 SAR 影像的波长相关^[23]。本文研究区处于低纬度区域,SAR 数据为 C 波段,且与电离层变化的空间尺度相比冰川面积很小,电离层影响可以忽略。但研究区地形陡峭,影像对的平均垂直基线在 1 000 m 以上,地形引

起的偏移量不可忽略。故本文使用基于外部数字高程模型(digital elevation model, DEM)辅助的SAR影像配准方法,该方法利用外部DEM和SAR影像的轨道信息建立起主从影像的配准查找表,将研究区地形引起的偏移量计算到查找表内,并且对根据初始查找表重采样获得的主影像与从影像实施互相关配准,据此进一步精化查找表,降低由轨道定位不准确引起的偏移量误差,在空间基线较大时仍能精确地配准两幅SAR影像,提高地形起伏地区偏移量跟踪结果的精度^[24-25]。

2.2 数据处理

本文使用的5景高分三号影像,除2017-11-17和2018-03-13两个时间段接收的影像具有相似的覆盖范围外,其余3景SAR影像的覆盖范围均有较大差别。故首先依据依嘎冰川在SAR影像中的具体位置,将5景SAR影像适当裁

剪为同一覆盖范围,然后利用外部DEM辅助SAR影像配准。配准完成后,设定搜索窗口对SAR影像执行基于影像强度信息的互相关计算,互相关系数最大处即为像元的偏移量。本文将搜索窗口设为 150×150 像元,可以较好地保留结果的局部细节。对Sentinel-1数据的搜索窗口设为 256×64 像元。

3 结果与分析

3.1 结果分析

对高分三号以及Sentinel-1影像应用偏移量跟踪技术获取了依嘎冰川地距向和方位向的位移分布,将地距向和方位向位移合成并转化为冰川日均流速,从而得到了两个数据集的依嘎冰川水平面二维速率场,如图2所示。图2中,GF-3表示高分三号影像,S1表示Sentinel-1影像。

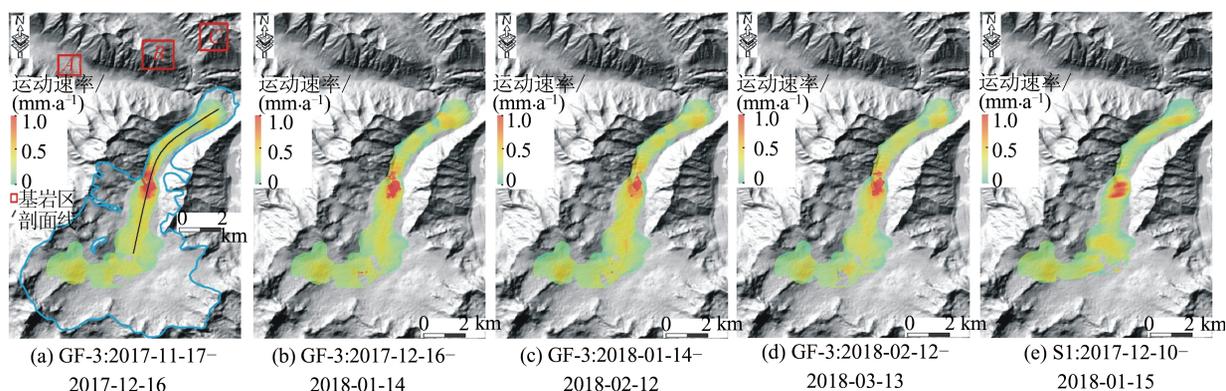


图2 依嘎冰川水平面二维速率图

Fig.2 2D Velocity on Horizontal Plane of the Yiga Glacier

根据高分三号监测结果图(图2(a)~2(d))可知:(1)整体来看,在可监测到的冰川运动范围内,冰川末端到冰川上端,冰川表面速度呈现出先减速、后增加到基本稳定,再到显著增加、显著减少至稳定的趋势。其中,冰川最大速度主要分布在冰川中部区域,在4个监测时段内,中部冰川区的运动速率均大于 1 m/d 。(2)由于缺少明显的地物特征(如裂隙、冰碛物等),依嘎冰川积累区表面较为平滑,偏移量跟踪技术适用性降低,导致大部分积累区无法监测出形变结果。(3)与近似同时期Sentinel-1影像结果相比(图2(e)),两组冰川流速结果的强弱态势在空间上高度吻合,最大流速均分布在冰川中部,但在细节上略有不同。相比 15 m 空间分辨率的Sentinel-1流速结果, 5 m 分辨率的高分三号流速监测结果细节更加丰富。(4)在4个监测时段内,依嘎冰川表面运

动分布具有高度一致性,与文献[26]利用COSMO-SkyMed反演出的依嘎冰川运动结果进行对比,在冰川中部坡度陡变处的流速显著增加、显著减小变化情况一致,两种结果显示出的冰川运动分布总体吻合。

为量化分析依嘎冰川的速率变化情况,沿冰川主冰流线取一条剖面线(图2(a)中黑色曲线,起点为冰川末端),统计了沿剖面线高分三号结果在4个时段的冰川速率变化及高程变化(见图3);将高分三号监测结果欠采样至Sentinel-1相同的分辨率,并对比剖面线上高分三号与Sentinel-1的速率分布(见图4)。

由图3可以看出,剖面线上4个时段依嘎冰川具有相似的速率分布,经统计,各个时段剖面线上冰川的平均运动速率依次为 50 cm/d 、 49 cm/d 、 48 cm/d 和 49 cm/d ,十分接近,表明

2017-11—2018-03 依嘎冰川运动速率稳定;与高程联合分析可知,距剖面线起点的 4 000~4800 m 是冰川表面高程变化最剧烈的区域,此处冰川运动速率急剧增加,到 5 500 m 处,高程变化稳定,冰川速率也下降并趋于稳定。以上表明,地面高程变化与冰川速率的变化密切相关。在距剖面线起点约 600 m 处,速率出现陡降,除与局部坡度变缓有关外,也与此处山谷走向变化、冰流受山体阻挡有关。由图 4 可知,高分三号和 Sentinel-1 剖面线上速率整体变化态势较为吻合,在距剖面线起点约 4 500 m 的坡度陡变处,两种结果的运动速率都显著增加。但 Sentinel-1 结果速率分布相比高分三号波动较大,且最大速率低于高分三号结果,其原因应为 Sentinel-1 空间分辨率较低导致的信息采样不足,一方面降低了结果的信噪比,另一方面也难以反映出局部的运动速率高值。

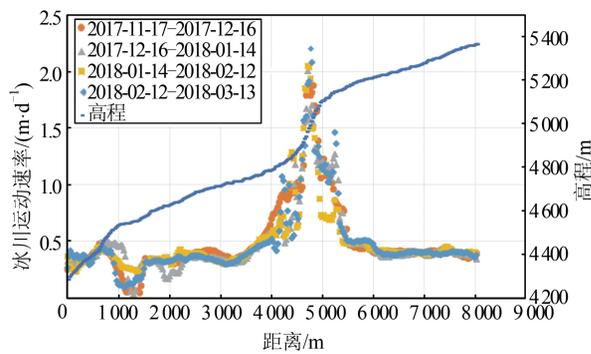


图 3 高分三号影像依嘎冰川监测结果剖面线速率及高程变化图

Fig.3 Velocity Profiles of GF-3 Monitoring Results of the Yiga Glacier and Elevation Variation Along the Profile

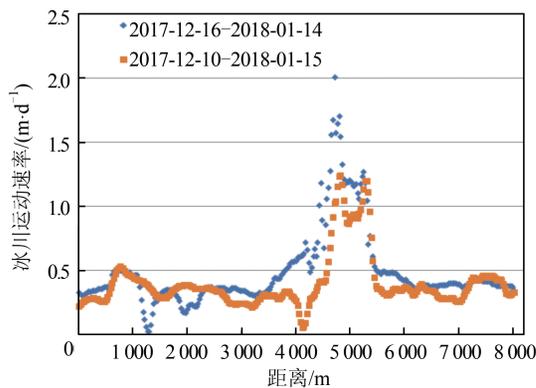


图 4 高分三号(2017-12-16—2018-01-14)与 Sentinel-1(2017-12-10—2018-01-15)影像监测结果剖面线速率图

Fig.4 Velocity Profiles of Monitoring Results of GF-3 (2017-12-16—2018-01-14) and Sentinel-1 (2017-12-10—2018-01-15) Images

将本文监测的 2018-01-14—2018-02-12 期间的剖面线上冰川平均运动速度与文献[26]采用升降轨 COSMO-SkyMed 影像计算出的 2017 年 1、2 月份的三维平均运动速度进行比较^[26],两者具有相似的变化趋势:冰舌末端到高程陡变区,两种结果都呈现出速度先增加后减少至稳定的特征;高程变化最剧烈的区域,均是速度变化最大的区域,也均是冰川最大速度的分布位置;高程陡变区至冰川上部,冰川速率均表现为稳定的速度;本文剖面线上速度最大值为 2.08 m/d,文献[26]监测的三维平均运动速度最大值为 2.4 m/d,两者最大速度值较为接近,但本文剖面线速度总体小于文献[26]估计的速度。一方面是因为本文获取的是冰川表面的二维速率分量,是文献[26]三维速率在水平面的分量,从而出现剖面线上速率较小的现象,另一方面也可能与剖面线的位置以及获取速率的时间没有完全吻合有关系。相比文献[26]仅涉及了约 1 个月内的两个时段冰川表面运动状况,未能对冰川表面运动时序特征开展分析,本文获得了冰川 2017-11—2018-03 共 4 个时段的冰川表面运动时序结果,对依嘎冰川的认识更为深入。

3.2 误差分析

偏移量跟踪技术的主要误差来源是 SAR 影像的配准、地形等^[27]。基于外部 DEM 辅助的配准方法可有效降低地形引起的偏移量,提高配准精度。本文使用 30 m 分辨率的数字表面模型(digital surface model, DSM)辅助 SAR 影像配准,高分三号影像对配准精度最终优于 1/15 像元,针对本文使用的高分三号影像,每个影像对的配准误差不超过 0.4 m,对应的冰川表面运动速率配准误差约为 1.3 cm/d; Sentinel-1 影像对配准精度优于 1/30 像元,配准误差不超过 0.5 m,对应冰川表面运动速率配准误差不超过 1.4 cm/d。在假设研究区基岩的运动速率应为 0 的基础上,偏移量跟踪技术的结果精度可以通过统计基岩区的均方根误差(root mean square error, RMSE)来评价^[28]。通过在研究区基岩区选取 3 块区域(图 2(a)中红色矩形 A、B、C 区域),分别计算了区域内 4 个时段速率的均方根误差,计算结果如表 3 所示。

高分三号 4 个时段及 Sentinel-1 影像对的基岩区速率残差的平均均方根误差依次为 1.4 cm/d、2.0 cm/d、1.7 cm/d、2.3 cm/d、1.6 cm/d,仅占剖面线上冰川平均运动速率的 2.8%、4.1%、3.5%、

4.7%、3.2%。其中,分辨率较低的 Sentinel-1 结果的平均均方根误差与高分三号接近,其原因在于 Sentinel-1 影像对的配准精度更高,时间基线更长。由以上结果可知,两种数据的均方根误差远小于依嘎冰川的运动速率,验证了本文偏移量跟踪技术结果的可靠性。

表3 研究区基岩区速率残差的均方根误差/(cm·d⁻¹)

Tab.3 The RMSE of Velocity in the Bedrock Region of Offset Tracking Techniques/(cm·d⁻¹)

影像对	A	B	C	均值
2017-11-17—2017-12-16	1.1	1.7	1.3	1.4
2017-12-16—2018-01-14	1.8	2.3	1.8	2.0
2018-01-14—2018-02-12	1.4	1.5	2.2	1.7
2018-02-12—2018-03-13	1.8	3.1	2.0	2.3
2017-12-10—2018-01-15	1.6	1.8	1.3	1.6

4 结语

本文利用5景高分三号影像,应用偏移量跟踪技术对依嘎冰川2017-11—2018-03期间的表面运动速度进行了监测,得出以下结论:

1)4个时段的依嘎冰川表面速度变化不明显,速度空间分布具有一致性。从冰川末端到冰川上端,冰川表面速度呈现出先减速后增加到基本稳定,再到显著增加、显著减少至稳定的趋势,其最大速率分布在冰川中部,速率高于1 m/d,与高程联合分析发现,此处也是冰川表面高程变化最大的区域。

2)与以往研究结果及两景 Sentinel-1 的偏移量跟踪结果进行对比,并计算高分三号4个时段基岩区速率残差的均方根误差,本文结果与以往学者的研究成果及 Sentinel-1 的结果十分吻合,且基岩区的均方根误差小于3.1 cm/d,远小于依嘎冰川的运动速率,验证了本文结果的可靠性。

3)高分三号可以全天时、全天候获取影像,具有高分辨率、大幅宽等优势,能有效应用到冰川表面运动监测中,可作为冰川表面运动定期监测的重要数据来源之一。考虑到其高空间分辨率和高性价比的优势,高分三号必将在中国冰川遥感监测中发挥独特作用。

本文研究表明国产 SAR 卫星数据可用于定期监测冰川运动变化情况,但本文研究区尚无实测数据验证,下一步工作将结合地基 SAR 等实地测量仪器、星地联合验证结果的可靠性。高分三号的业务化数据获取能力与现有成熟星载 SAR 系统相比仍有不足,随着中国更多星载 SAR 系统

的发射运行,国产 SAR 数据的规模化应用条件将逐步得到满足。

参 考 文 献

- [1] Vaughan D G, Comiso J, Allison I, et al. Observations: Cryosphere, Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. New York: Cambridge University Press, 2013
- [2] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Study on the Glacial Lake Outburst Flood Events in Tibet Since the 20th Century[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1 377-1 390(姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(8): 1 377-1 390)
- [3] 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)
- [4] 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
- [5] Mouginot J, Scheuchl B, Rignot E. Mapping of Ice Motion in Antarctica Using Synthetic-Aperture Radar Data[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(12): 2 753-2 767
- [6] Yan S, Run Z, Liu G, et al. Deriving Ice Motion Patterns in Mountainous Regions by Integrating the Intensity-Based Pixel-Tracking and Phase-Based D-InSAR and MAI Approaches: A Case Study of the Chongce Glacier[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7): 611-624
- [7] Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B, et al. Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream[J]. *Science*, 1993, 262(5 139): 1 525-1 530
- [8] Gray A L, Mattar K E, Vchon P W, et al. InSAR Results from the RADARSAT Antarctic Mapping Mission Data: Estimation of Glacier Motion Using a Simple Registration Procedure [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Seattle, WA, USA, 1998
- [9] 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
- [10] Zhou Chunxia, Deng Fanhui, Ai Songtao, et al. Determination of Ice-Flow Velocity at the Polar Record Glacier and Dalk Glacier Using DInSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*

- ty, 2014, 39(8): 940-944(周春霞, 邓方慧, 艾松涛, 等. 利用DInSAR的东南极记录 and 达尔克冰川冰流速提取与分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(8): 940-944)
- [11] Li J, Li Z W, Wu L X, et al. Deriving a Time Series of 3D Glacier Motion to Investigate Interactions of a Large Mountain Glacial System with Its Glacial Lake: Use of Synthetic Aperture Radar Pixel Offset-Small Baseline Subset Technique[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 559: 596-608
- [12] Mouginot J, Rignot E, Scheuchl B, et al. Comprehensive Annual Ice Sheet Velocity Mapping Using Landsat-8, Sentinel-1, and RADARSAT-2 Data [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(4):364-383
- [13] Wang Sisheng, Jiang Liming, Sun Yongling, et al. Evaluation of Methods for Deriving Mountain Glacier Velocities with ALOS PALSAR Images: A Case Study of SKyang Glacier in Central Karakoram [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(2): 54-61(王思胜, 江利明, 孙永玲, 等. 基于 ALOS PALSAR 数据的山地冰川流速估算方法比较:以喀喇昆仑地区斯克洋坎力冰川为例 [J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 54-61)
- [14] Zhang Xiaobo, Zhao Xuesheng, Ge Daqing, et al. Motion Characteristics of the South Inilchek 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)
- [15] Zhang Qingjun. System Design and Key Technologies of the GF-3 Satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(3): 269-277(张庆君. 高分三号卫星总体设计与关键技术[J]. 测绘学报, 2017, 46(3): 269-277)
- [16] Liu Shiyin, Guo Wanqing, Xu Junli, et al. The Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0) [R]. Cold and Arid Regions Science Data Center, Lanzhou, China, 2014(刘时银, 郭万钦, 许君利, 等. 中国第二次冰川编目数据集(版本 1.0)[R]. 寒区旱区科学数据中心, 兰州, 中国, 2014)
- [17] Wang H, Yang J, Mouche A, et al. GF-3 SAR Ocean Wind Retrieval: The First View and Preliminary Assessment[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(7): 694-705
- [18] Grohmann C H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on Selected Brazilian Sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 212: 121-133
- [19] 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): 2 384-2 391
- [20] Haemmig C, Huss M, Keusen H, et al. Hazard Assessment of Glacial Lake Outburst Floods from Kyang Glacier, Karakoram Mountains, China [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 34-44
- [21] Li J, Li Z, Zhu J, et al. Deriving Surface Motion of Mountain Glaciers in the Tuomuer-Khan Tengri Mountain Ranges from PALSAR Images [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 101: 61-71
- [22] Deng Fanghui, Zhou Chunxia, Wang Zemin, et al. Ice-Flow Velocity Derivation of the Confluence Zone of the Amery Ice Shelf Using Offset-Tracking Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(7): 901-906(邓方慧, 周春霞, 王泽民, 等. 利用偏移量跟踪测定 Amery 冰架冰流汇合区的冰流速 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(7): 901-906)
- [23] Wegmueller U, Werner C, Strozzi T, et al. Ionospheric Electron Concentration Effects on SAR and InSAR [C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, CO, USA, 2006
- [24] GAMMA Remote Sensing. Differential Interferometry and Geocoding Software:DIFF and GEO(Geocoding and Image Registration) [R]. GAMMA Remote Sensing AG, Bern, Switzerland, 2008
- [25] Wang Qun, Fan Jinghui, Zhou Wei, et al. Research on the DEM-Assisted Offset Tracking Technique Applied to Glaciers Movement Monitoring [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2018, 30(3): 167-173(王群, 范景辉, 周伟, 等. DEM 辅助偏移量跟踪技术的山地冰川运动监测研究 [J]. 国土资源遥感, 2018, 30(3): 167-173)
- [26] Wang Q, Fan J, Zhou W, et al. 3D Surface Velocity Retrieval of Mountain Glacier Using an Offset Tracking Technique Applied to Ascending and Descending SAR Constellation Data: A Case Study of the Yiga Glacier [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, 12(6): 614-624
- [27] 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)

- [28] Yan Shiyong. Research on Extraction of Alpine Glacier Surface Movement by SAR Remote Sensing [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013(闫世勇. 山地冰川表面运动雷达遥感监测方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013)

Monitoring the Motion of the Yiga Glacier Using GF-3 Images

WANG Qun^{1,2,3} ZHANG Yunling^{1,2,3} FAN Jinghui⁴ FU Yuhao^{1,2,3}

¹ China Highway Engineering Consultants Corporation, Beijing 100097, China

² Research and Development Center of Transport Industry of Spatial Information Application and Disaster Prevention and Mitigation Technology, Beijing 100097, China

³ China Highway Engineering Consultants Corporation Data Co. Ltd., Beijing 100097, China

⁴ China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China

Abstract: Glacier motion represents a significant reference for the hazard assessment of glacier and glacial lakes. GF-3, as the first civil spaceborne synthetic aperture radar satellite in China, has important advantages in monitoring glacier motion due to its characteristics of all-weather, all-time capabilities and high spatial resolution. Based on five GF-3 images with FS II imaging modes, the surface velocities of the Yiga Glacier, located in Nyenchen Tonglha Mountains, are estimated over five time periods using offset tracking technique during November 2017 to March 2018. The results were compared with the offset tracking results of Sentinel-1 images which have a similar time with GF-3 image and based on the assumption that the velocity of the bedrock in the study area should be 0, the velocity residuals of the bedrock in each period are calculated, then the applicability of GF-3 image in monitoring glacier surface motion was evaluated. The results of GF-3 data show that the distribution of the Yiga Glacier motion is similar in four periods, and the maximum surface velocities are all distributed in the central part of the glacier where the elevation changes dramatically. Meanwhile, the results are consistent with the results of Sentinel-1 based on two images. The RMSEs of velocity residuals in the bedrock area in four periods are 1.4 cm/d, 2.0 cm/d, 1.7 cm/d and 2.3 cm/d, respectively, which validate the reliability of the deformation estimated used GF-3 images in this paper. Based on the above analysis, GF-3 SAR data can be used as one of the conventional data sources for monitoring glacier surface movement. Because of its high spatial resolution and high cost performance, GF-3 can play a unique role in monitoring the motions of glaciers in China.

Key words: glacier motion; GF-3; offset tracking; the Yiga Glacier

First author: WANG Qun, master, assistant engineer, specializes in interferometric synthetic aperture radar. E-mail: wangq0723@163.com

Corresponding author: FAN Jinghui, PhD, professor. E-mail: jhfan2004@qq.com

Foundation support: The National Science and Technology Major Project of China(07-Y30B10-9001-14/16); ESA-MOST China Dragon 4 Cooperation(32365); Geological Survey Program of China Geological Survey (DD20190515).

引文格式: WANG Qun, ZHANG Yunling, FAN Jinghui, et al. Monitoring the Motion of the Yiga Glacier Using GF-3 Images[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(3):460-466. DOI:10.13203/j.whugis20190036(王群, 张蕴灵, 范景辉, 等. 利用高分三号影像监测依嘎冰川表面运动[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3):460-466. DOI:10.13203/j.whugis20190036)