

Characterizing the Surface Velocities of Zemu Glacier, Himalayas, Based on GF-3 SAR Images

Min Wang¹, Guoxiang Liu^{1,2*}, Xiaowen Wang¹, Bo Zhang¹, Yuan Li¹

¹Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan

²State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Chengdu Sichuan

Email: *rsgxliu@swjtu.edu.cn

Received: Apr. 2nd, 2020; accepted: Apr. 16th, 2020; published: Apr. 23rd, 2020

Abstract

GF-3 is the first civil C-band SAR satellite in China with multiple observation modes, which has shown a potential in detecting small surface displacements. In order to verify the reliability of GF-3 in extracting large-scale ground displacement such as glacier flow, this paper investigated the surface velocity of Zemu Glacier, Himalayan, with five strip-mode GF-3 images acquired in 2018 using Pixel Offset Tracking (POT) technique. The results show that the maximum flow velocity is about 1 m/d in the snow basin of Zemu Glacier, while the maximum velocity in the ablation area is about 30 cm/d. The flow velocity gradually slows down from the top to the end of the ice tongue. By correlating the flow velocities with the climatic and topographic data, it is suggested that the changes in external temperature primarily control the flow speed of Zemu Glacier, although the topography may also influence the velocities in some areas. As a validation, we also used five Sentinel-1A images, acquired near to acquisition time of GF-3 images, to estimate the velocity of Zemu Glacier. The standard deviation of velocity difference between the measurements from GF-3 and Sentinel-1A is about ± 1.58 cm/d, indicating that GF-3 images could be an important data source in glacier motion retrieval.

Keywords

GF-3, Zemu Glacier, Glacier Motion, Pixel Offset Tracking

基于GF-3 SAR影像分析喜马拉雅山热姆冰川运动特征

王敏¹, 刘国祥^{1,2*}, 王晓文¹, 张波¹, 李圆¹

*通讯作者。

¹西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都

²高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室, 四川 成都

Email: *rsgxliu@swjtu.edu.cn

收稿日期: 2020年4月2日; 录用日期: 2020年4月16日; 发布日期: 2020年4月23日

摘要

高分三号(GF-3)是我国第一颗民用C波段多模式SAR卫星, 已在微小地表形变探测中展现出一定潜力。为验证GF-3提取冰川流动等大尺度位移的可靠性, 本文选取5景条带模式GF-3影像, 采用像素偏移追踪技术(POT)测量了喜马拉雅山脉热姆冰川2018年的流速场。结果显示热姆冰川粒雪盆区域流动速度最大, 约为1 m/d, 而在消融区流速最高到达30 cm/d, 从冰舌上端至末端流速逐渐变缓。结合研究区气候和地形资料, 分析发现外界温度变化是控制热姆冰川流动快慢的主要因素, 同时局部地区流速受地形影响。选取与GF-3邻近时期拍摄的5景Sentinel-1A影像为数据源, 利用POT进行热姆冰川同时期运动速度估计, 发现两者估计的流速差值标准差为 ± 1.58 cm/d, 表明GF-3影像可作为冰川运动信息提取的一种重要数据源。

关键词

高分三号, 热姆冰川, 冰川运动, 像素偏移追踪

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受全球气候变暖影响, 近年来全球冰川面积不断萎缩, 冰川消融和退化加剧[1]。相对于地球两极冰川, 发育在高寒山区的山地冰川受当地气温影响更加敏感, 是气候变化的天然指示器[2]。以青藏高原为核心的世界“第三极”是除南极和北极以外冰川发育最为集中的地区, 是长江、黄河、印度河、塔里木河等 10 多条亚洲大江大河的源头, 因而被称为“亚洲水塔” [3]。青藏高原第二次综合科学考察的研究结果显示[4] [5], 以青藏高原为核心的“第三极”地区更是全球变暖最强烈的地区, 研究显示自上世纪以来该地区每 10 年升温高达 0.3°C~0.4°C, 升温幅度是同期全球其他地区平均值的 2 倍, “亚洲水塔”正在经历前所未有的快速失衡演变。位于青藏高原南部的喜马拉雅山地区部分冰川已呈现出快速退缩状态, 大量冰川末端形成由于融水聚集而成的冰碛湖, 导致冰川泥石流与冰川洪水频发, 危及区内人员生命财产安全和社会经济活动正常运行[6]。

流动性是冰川的主要特征, 冰川运动速率变化与冰川的形态、物质分布状况、水热力条件和气候变化都有着密切关系。因此, 针对冰川运动速度变化进行监测能够为冰川运动状态研究和潜在风险评估(如冰川跃动和冰碛湖溃决)提供重要线索[7]。受制于极端气象和艰险的地形条件, 冰川运动速度测量很难通过现场作业手段(如 GNSS 和埋置花杆测量)进行, 而遥感监测凭借大范围、多尺度、高效率、低成本等优势, 是目前冰川流速测量主要的技术手段。根据数据源类型, 利用遥感技术监测冰川运动可主要分为基于光学遥感和雷达遥感两种途径[8]-[13]。其中, 喜马拉雅山地区常常云雾遮挡严重, 无云或少云干扰

的光学数据难以获取,为利用光学遥感影像测量冰川运动带来了困难。合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像是一种主动遥感技术,拥有不受云雨影响,全天候全天时获取数据的特点,近年来已成为冰川运动监测的主要手段[14] [15]。利用短时间重访(一般1周以内)的SAR影像组成干涉对,采用两轨法差分干涉技术(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR) [16]和多孔径干涉测量技术(Multiple Aperture Interferometric, MAI)基于SAR相位信息提取冰川表面视线向/方位向运动已在数个冰川得到成功应用[17]。但是,由于SAR干涉测量易受相位失相干影响而无法有效测量大尺度位移,目前大多数研究是基于SAR强度影像采用像素偏移追踪技术(Pixel Offset Tracking, POT)测量冰川表面运动速度[18]。

目前国际上用于监测冰川运动的SAR卫星主要有ALOS-1/2、Sentinel-1A/B、TerraSAR-X、RadarSAT-2等[19] [20] [21]。高分三号(GF-3)卫星是我国发射的首颗C波段多极化高分辨率合成孔径雷达卫星,具有高分辨率、大成像幅宽、辐射精度高、多成像模式和长时工作的特点[22]。与ALOS-1/2、TerraSAR-X、RadarSAT-2等商业卫星相比,GF-3数据具有高性价比的优势;与免费的Sentinel-1A/BSAR数据相比,GF-3精细模式具有更高的空间分辨率。目前GF-3影像已在地表形变监测方面表现出一定的应用潜力[23]-[30],然而在大尺度位移诸如冰川流速场提取方面应用较少[31]。本文选取喜马拉雅山脉干城章嘉峰地区最大的山地冰川——热姆冰川为研究对象,首次基于GF-3 SAR强度影像采用POT技术测量了该冰川的季节表面运动速度,并通过与基于Sentinel-1A SAR影像提取的该冰川表面运动场对比,验证和评估了GF-3 SAR数据应用于冰川运动调查的可行性。

2. 研究区域概况与 SAR 数据

热姆冰川(Zemu Glacier)位于喜马拉雅山脉中部东端世界第三高峰干城章嘉峰东坡,是印度锡金干城章嘉峰地区最长的冰川,为表碛覆盖型冰川。根据国际山地综合发展中心2014年发布的冰川编目目录,热姆冰川面积约77.27 km²,高差3113 m,以树枝状山谷冰川最为发育,冰川自多个粒雪盆向冰舌流动,坡度渐缓,冰舌呈东西走向。受青藏高原明显变暖影响,冰舌表面发育有多个小型冰湖,该冰川融水是提斯塔河(Testa River)的重要水源补给,其运动特征对维持提斯塔流域生态的稳定和调节河流径流供水具有重要意义[32] [33]。热姆冰川地理位置如图1所示,其中白色实线为国界线,右上角为热姆冰川放大图。

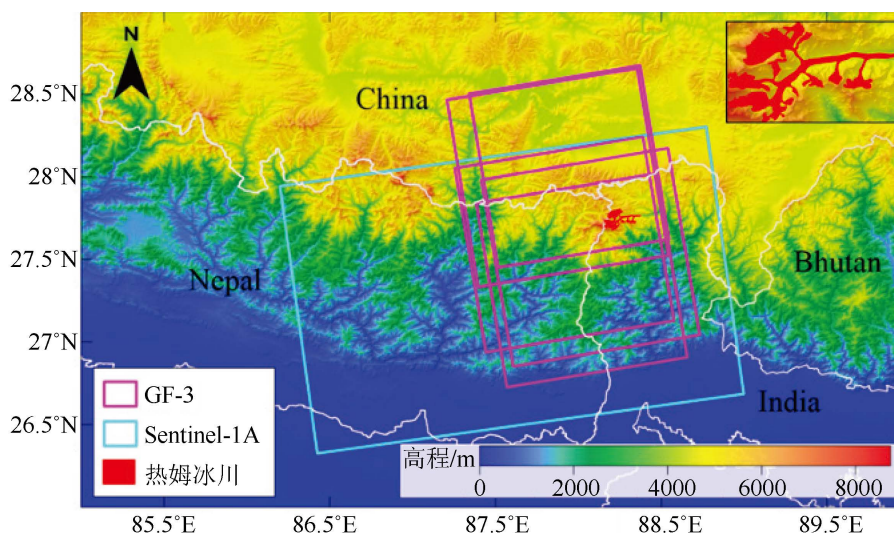


Figure 1. Geographic location of Zemu Glacier and the coverage of SAR images

图 1. 热姆冰川地理位置与卫星 SAR 影像覆盖情况

本文选取覆盖研究区于 2018 年拍摄的 5 景 GF-3 SAR 数据(<http://dds.nsoas.org.cn/mainIndex.do>)进行热姆冰川运动速度提取,影像覆盖范围如图 1 红色矩形边框所示。GF-3 SAR 数据成像模式为精细条带 2 模式,极化方式为 HH 极化,距离分辨率为 2.25 m,方位分辨率为 4.75 m。由于缺乏同时期的地面实测数据,为了验证 GF-3 数据监测结果可靠性,本文选取与 GF-3 同期拍摄的 5 景 Sentinel-1A 升轨 SAR 数据(<https://search.asf.alaska.edu>)作为验证数据,其成像模式为干涉宽扫描模式,极化方式为 VV 极化,距离分辨率 2.34 m,方位分辨率为 13.99 m。表 1 展示了所用 SAR 影像的参数,可以看出 GF-3 干涉对垂直基线均数十倍于 Sentinel-1A 垂直基线,这可能是由于 GF-3 卫星相对较差的卫星定轨参数导致。另外,本文基于英国 University of East Anglia 气候研究所气候数据 CRUTS4.03 提取了研究区的气温资料,以分析热姆冰川运动和气温变化的关系。

Table 1. The SAR image pairs used in this study and the related main parameters

表 1. 本文使用的 SAR 影像匹配像对及其主要参数

卫星	主影像获取时间	从影像获取时间	时间基线/d	垂直基线/m
GF-3	2018/03/10	2018/04/08	29	1566.92
GF-3	2018/05/07	2018/09/29	145	1764.23
GF-3	2018/09/29	2018/11/26	58	836.21
Sentinel-1A	2018/03/07	2018/04/12	36	72.22
Sentinel-1A	2018/05/06	2018/09/27	144	10.86
Sentinel-1A	2018/09/27	2018/11/26	60	32.57

3. SAR 像素偏移追踪技术

考虑研究区内较大的地形起伏,以及 GF-3 SAR 像对较长的空间基线,本文拟基于 GF-3 影像的强度信息采用像素偏移追踪技术(POT)获取热姆冰川表面运动场。POT 技术首先将前后时相的两景影像进行精确配准,然后通过搜索窗口寻找强度互相关系数搜索峰值确定偏移量,最后将偏移量分解到方位向和距离向,得到两景影像获取时间段内冰川在方位向和距离向的位移量。POT 技术获取的结果除了包含地表位移产生的像素偏移,还可能包含两景影像轨道参数误差、地形起伏误差和电离层扰动误差等。其中,由于电离层误差一般在两极地区影响较大,尤其对长波段(L 波段)影响严重,考虑到本文研究区域位于中低纬度区,冰川往往具有大尺度位移的特征,电离层误差可忽略。因此, POT 估计的偏移量可表达为:

$$D_{\text{offset}} = D_{\text{def}} + D_{\text{orbit}} + D_{\text{top}} \quad (1)$$

式中 D_{offset} 为主从影像偏移量, D_{def} 为地面位移引起的偏移量, D_{orbit} 为卫星轨道和成像姿态不一致引起的偏移量, D_{top} 为地形起伏引起的偏移量。

为消除影像轨道不一致的影响,本文根据冰川边界以外的稳定点偏移估计量,构建二阶多项式轨道误差改正模型。此外,由于 GF-3 卫星重复观测时轨道不一致导致影像空间基线较长,研究区域地形起伏大,地形引起的偏移量不容忽略。因此,本文引入 30 米 SRTM DEM 作为辅助数据,以提高影像配准精度,减小地形起伏带来的影响[34]。该过程首先建立主从影像与 SAR 坐标系下的 DEM 之间映射关系,生成初始配准查找表,得到研究区由于地形影响引起的偏移量;然后利用重采样获得具有相同成像几何的主从影像,进一步使用图像互相关方法获取两者的配准多项式,据此精化配准查找表;最后根据精化配准查找表重采样从影像,改善轨道定位不准确引起的偏移量误差。结果显示 GF-3 方位向和距离向影像配准精度均在 1/15 个像元内,保证了 POT 估计结果的精度[35]。

本文使用的 5 景 GF-3 影像中,获取时间为 2018/03/10 和 2018/04/08 的 2 景影像覆盖范围接近,而

与其它 3 景影像覆盖范围相差较大。为避免影像配准失败的情况,选取获取时间为 2018/03/10 影像为主影像与 2018/04/08 影像进行匹配,其余影像均与获取时间为 2018/05/07 的影像配准,其中由于获取时间为 2018/04/08 和 2018/05/07 的影像因空间基线过长(超过 3 km)难以配准,本文未能测量相应时间内热姆冰川表面流速。针对与 GF-3 影像邻近时间获取的 5 景 Sentinel-1A 影像,皆以 2018/03/07 影像为主影像进行配准。为避免 Sentinel-1A/相邻 burst 之间出现明显相位跳变现象,基于 DEM、精密轨道数据以及 burst 重叠区相位信息进行精确匹配,使其方位向配准精度达到 0.001 个像元以内。在精确配准完成后,即可通过搜索窗口寻找强度互相关系数搜索峰值得到偏移量。考虑小窗口能精细估算得到高空间分辨率的偏移量,本文将 GF-3 数据的搜索窗口(距离向×方位向)设为 80×80 像元,将 Sentinel-1A 数据搜索窗口设为 200×40 像元。

4. 冰川运动结果与分析

由于 GF-3 卫星和 Sentinel-1A 卫星轨道方位角稍有差异(分别为 10.8° 和 10.1°),为了交叉验证基于两种卫星 SAR 数据估计的冰川表面流速场,本文将 POT 获取的方位向和距离向位移量进行合成转换至水平方向。图 2(a)~(c)展示基于 GF-3 影像三个像对获取的热姆冰川二维水平流速图,图 2(d)~(f)为基于 Sentinel-1A 影像获取的二维水平流速图。

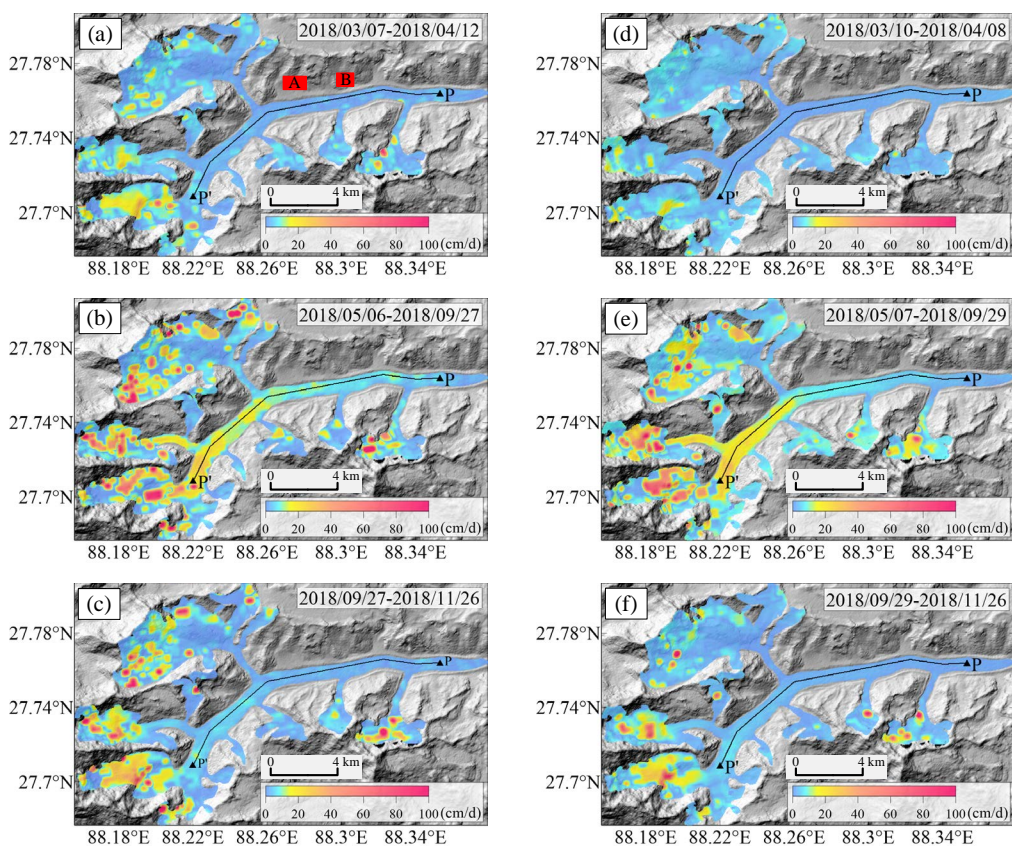


Figure 2. 2D surface velocities of Zemu glacier from the GF-3 and Sentinel-1A SAR images

图 2. 基于 GF-3 与 Sentinel-1A SAR 影像获取的热姆冰川二维水平流速图

观察 2018 年热姆冰川表面流速(图 2),发现该冰川积累区与消融区运动速率差异较大,粒雪盆区域运动速率快于冰舌区域,热姆冰川最大位移速率分布于粒雪盆区域,约 1 m/d,在冰川消融区内运动速率

分布于 0 cm/d~30 cm/d, 冰舌区域运动速率自冰舌上端至末端大致呈自快到慢的趋势。为更准确地评价热姆冰川表面运动时空特征, 沿冰川中线选取剖面线 PP' (总长度 14.34 km) 提取了冰川时序运动变化曲线, 其中 P 点位于冰川粒雪盆, P' 点位于冰舌末端(见图 2)。图 3 展示了基于 GF-3 和 Sentinel-1A 6 个 SAR 像对测量的沿 PP' 热姆冰川表面流速(单位: cm/d), 其中红、绿、蓝实线为 GF-3 测量结果, 相应颜色虚线表示基于 Sentinel-1A 测量结果, 黑色实线表示沿剖面线高程变化。根据图 3 可以看出, 基于两种卫星 SAR 影像获取的冰川运动速率分布大体一致。从空间分布来看, 冰川表面运动速率大致随海拔升高不断增加, 与世界众多其它针对山地冰川运动监测的报道一致[12] [14]。同时, 冰川表面运动表现出明显的季节性差异, 其中 5 月至 9 月冰川运动速率最快, 9 月至 11 月次之, 3 月至 4 月最慢。

在各观测时间段内, 基于 GF-3 影像提取的热姆冰川表面运动场沿剖面线平均运动速率分别为 1.65 cm/d、10.52 cm/d 和 2.65 cm/d; 基于 Sentinel-1A 影像提取的表面运动场沿剖面线平均运动速率分别为 2.14 cm/d、11.35 cm/d 和 3.44 cm/d。GF-3 三个像对测量的平均速率均小于 Sentinel-1A 三个像对结果, 可能主要是由于: 1) 卫星平台成像参数不同, 两种数据成像时间不完全一致; 2) 对于时刻处于运动的冰川, 影像不同的匹配误差对偏移量估计带来一定影响。虽然整体上 GF-3 和 Sentinel-1A 速率变化趋势较为吻合, 但是沿剖面线上 Sentinel-1A 速率较 GF-3 波动较大, 推测是因为 Sentinel-1A 影像相对于 GF-3 影像空间分辨率较低, 并且影像信噪比较低, 导致提取的冰川位移噪声较多。

深入比较图 3 展示的不同 SAR 像对测量的冰川表面运动速率, 发现剖面线 9~14 km 不同时间段的冰川运动速率差异较大, 但在冰舌末端冰川运动速率差异较小。其中, 在 9~14 km 段 2018/05/07~2018/09/29 时段日平均速率比 2018/03/10~2018/04/08 时段高约 8 cm/d~28 cm/d。分析光学遥感影像发现沿剖面线 9~14 km 段对应冰川两侧分布的多个子粒雪盆, 是冰川支流向冰川主干汇入位置, 冰川结构受到复杂应力条件随时间快速发生变化, 导致各像对在此位置较为明显的速度差异。为了探究热姆冰川整体运动快慢与气温之间的关系, 本文基于气候数据 CRU TS4.03 获取了研究区 2018 年 3 月至 11 月每月平均气温(图 4), 其中 5 月至 9 月平均气温最高, 为 4.28℃, 9 月至 11 月平均气温为零下 2.03℃, 3 月至 4 月平均温度最低, 为零下 5.6℃。结合 6 个 SAR 像对估计的平均运动速率, 发现气温与冰川运动速率变化呈强烈正相关。因此, 可以推测外界温度是控制热姆冰川运动快慢的主要因素之一, 同时局部地区表面流速受地形条件影响。

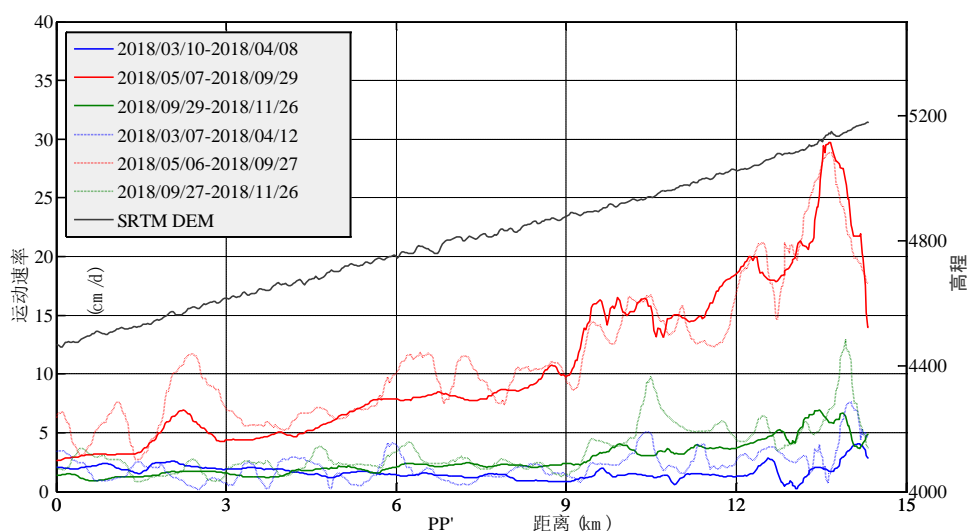


Figure 3. Glacier velocities and topographic changes along the profile PP'

图 3. 沿剖面线 PP' 冰川运动速率及地形变化

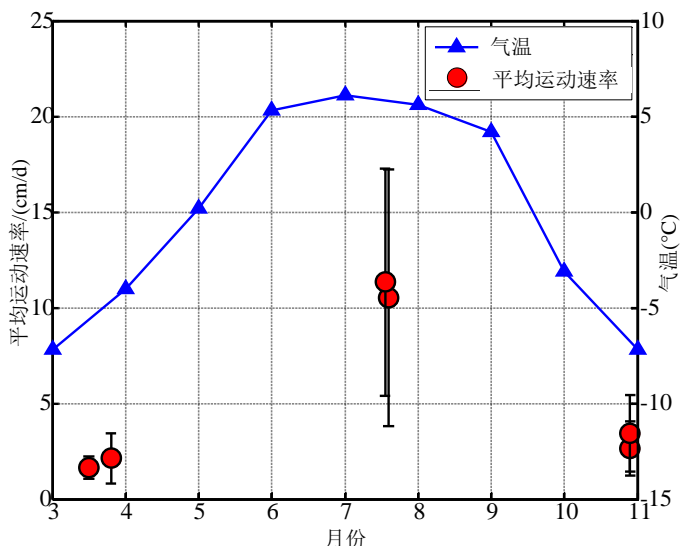


Figure 4. The average surface velocities of Zemu Glacier from 6 image pairs and the air temperature changes from March to November 2018

图 4. 基于 6 个像对估计的热姆冰川平均流速与 2018 年 3 月至 11 月年内气温变化图

由于非冰川基岩区较为稳定，理论上基岩区偏移量为 0，本文通过统计分析基岩区运动速率来评估像素偏移追踪技术的误差[36]。本文通过在研究区基岩区选取两块区域(图 2(a)红色矩形 A、B 区域)，并对其抽稀得到约 800 个像元的运动速率，对两种卫星 SAR 影像 6 个时间段的对应像元分别统计分析，图 5(a)~(c)展示了基于 GF-3 影像获取的基岩区偏移估计速率直方图，图 5(d)~(f)展示了基于 Sentinel-1A 影像获取的基岩区偏移估计速率直方图，均值与标准差统计结果参见表 2。可以看出，基岩区的位移均值和标准差相对于测量得到的冰川运动速率均可以忽略，其中 GF-3 和 Sentinel-1A 6 个时间段内基岩区速率均值为 0.42 cm/d、0.43 cm/d、0.51 cm/d、0.69 cm/d、0.28 cm/d 和 0.33 cm/d，标准差分别为 0.24 cm/d、0.23 cm/d、0.08 cm/d、0.46 cm/d、0.20 cm/d 和 0.19 cm/d。同时为了定量分析各观测时间段内 GF-3 与 Sentinel-1A 数据获取的热姆冰川运动速率差异，通过对两种数据对应时间段剖面线上约 500 个像元的运动速率进行统计并做差，得到差异均值分别为 0.49 cm/d、0.84 cm/d 和 0.79 cm/d (平均 0.71 cm/d)，差异标准差为±1.23 cm/d、±2.10 cm/d 和±1.40 cm/d (平均±1.58 cm/d)，可以看出两种卫星 SAR 影像的像素偏移追踪误差接近，交叉验证了基于 GF-3 影像监测热姆冰川表面运动结果的可靠性。

Table 2. Mean and standard deviation of velocity in bedrock area of study area

表 2. 基岩区偏移估计速率均值与标准差

卫星	数据对	均值(cm/d)	标准差(cm/d)
GF-3	2018/03/10~2018/04/08	0.42	0.24
GF-3	2018/05/07~2018/09/29	0.43	0.23
GF-3	2018/09/29~2018/11/26	0.51	0.08
Sentinel-1A	2018/03/07~2018/04/12	0.69	0.46
Sentinel-1A	2018/05/06~2018/09/27	0.28	0.20
Sentinel-1A	2018/09/27~2018/11/26	0.33	0.19

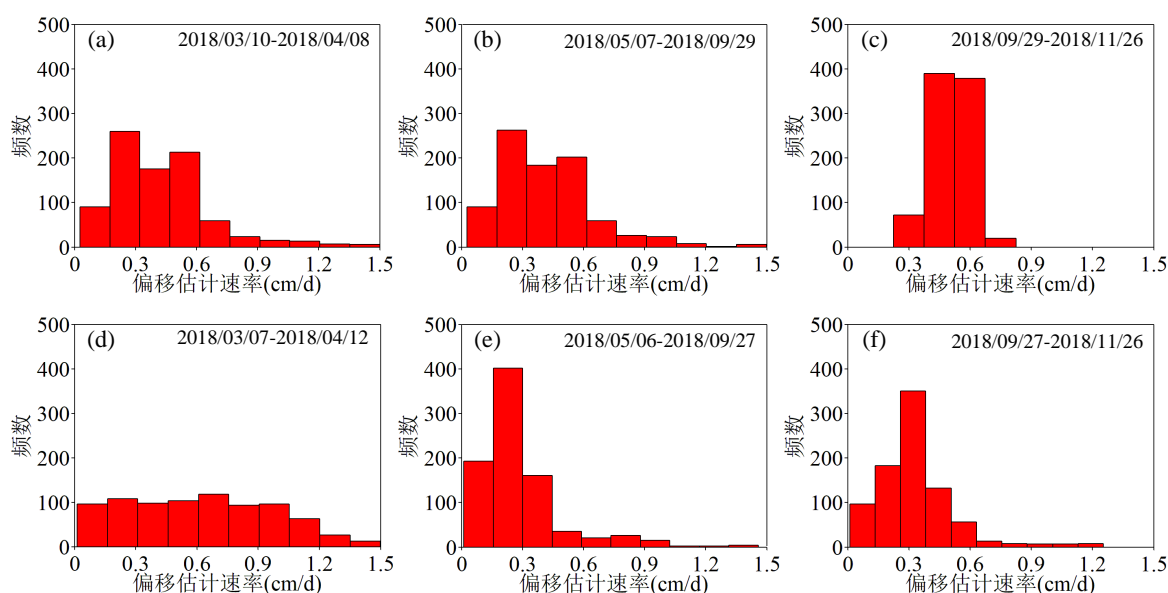


Figure 5. Statistical histograms of deviation of velocity in bedrock area based on GF-3 and Sentinel-1A images
图 5. 基于 GF-3 与 Sentinel-1A 影像获取的基岩区偏移估计速率统计直方图

5. 结论

本文选取了 5 景 GF-3 影像和 5 景 Sentinel-1A 影像，利用像素偏移追踪技术获取了喜马拉雅山脉干城章嘉峰地区热姆冰川表面运动场，结合高分辨率地形和气温资料，从不同时空尺度分析了 2018 年热姆冰川动态变化特征。基于本文研究得出以下结论：

1) 从空间分布上，热姆冰川高速流动区集中在粒雪盆区域，最高约 1 m/d，沿冰舌上端至末端冰川表面流速大致由快至慢变化，末端流速明显减缓，冰舌运动速率分布于 0 cm/d~30 cm/d，冰川运动速率随海拔升高呈加速趋势。在时间分布上，热姆冰川表面流速呈显著季节性变化。

2) 结合研究区气温与不同时间段冰川运动速率分析，发现运动速率变化与温度变化呈强烈正相关，表明外界温度是控制热姆冰川运动快慢的主要因素。在不同时间段，在剖面线 9~14 km 段冰川运动速率差异较大，但冰舌末端冰川运动速率差异较小，其原因可能是剖面线 9~14 km 段冰川两侧分布较多粒雪盆，冰川支流汇入，应力条件复杂导致。

3) 两种 SAR 卫星影像监测得到的冰川运动速率基本一致，沿剖面线运动趋势相似。经统计，GF-3 和 Sentinel-1A 提取热姆冰川速率分布差值的均值和标准差分别为 0.71 cm/d 和 ± 1.58 cm/d，交叉验证了基于 GF-3 影像监测热姆冰川表面运动结果的可靠性。

4) GF-3 影像具有全天时、全天候、高分辨率、大幅宽和高性价比的优势，可为冰川运动变化监测提供重要新的数据选择，在冰川流速场测量监测方面发挥重要作用。

仍然需要注意的是，与国际上较为成熟的星载 SAR 卫星相比，高分三号周期化获取数据能力仍有不足。但随着我国更多星载 SAR 卫星的发射，国产 SAR 数据规模化应用条件得到满足，国产 SAR 数据将在地表环境变化监测中得到更广泛的应用。

基金项目

国家重点研发计划(2017YFB0502700)，国家自然科学基金(41771402)，国家自然科学基金青年科学基金(41804009)，四川省科技支撑计划应用基础面上项目(20YYJC4292)。

参考文献

- [1] Jacob, T., Wahr, J., Pfeffer, W., *et al.* (2012) Recent Contributions of Glaciers and Ice Caps to Sea Level Rise. *Nature*, **482**, 514-518. <https://doi.org/10.1038/nature10847>
- [2] Beniston, M. (2003) Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Climatic Change*, **59**, 5-31. <https://doi.org/10.1023/A:1024458411589>
- [3] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 3-16.
- [4] 姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1203-1209.
- [5] 姚檀栋, 余武生, 邬光剑, 等. 青藏高原及周边地区近期冰川状态失常与灾变风险[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2270-2782.
- [6] Ricardson, S.D. and Reynolds, J.M. (2000) An Overview of Glacial Hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, **65/66**, 31-47. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(99\)00035-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(99)00035-X)
- [7] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010: 17-18.
- [8] Dwyer, J.L. (1995) Mapping Tide-Water Glacier Dynamics in East Greenland Using Landsat Data. *Journal of Glaciology*, **41**, 584-595. <https://doi.org/10.1017/S0022143000034900>
- [9] Berthiera, E., Vandonb, H., Baratouxc, D., *et al.* (2005) Surface Motion of Mountain Glaciers Derived from Satellite Optical Imagery. *Remote Sensing of Environment*, **95**, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.005>
- [10] Goldstein, R.M., Engelhardt, H., Kamb, B., *et al.* (1993) Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream. *Science*, **262**, 1525-1530. <https://doi.org/10.1126/science.262.5139.1525>
- [11] 黄磊, 李震, 周建民, 等. SAR 监测冰川变化研究进展[J]. 地球科学进展, 2014, 29(9): 985-994.
- [12] Zhou, J.M., Li, Z. and Guo, W.Q. (2013) Estimation and Analysis of the Surface Velocity Field for Mountain Glaciers in Muztag Ata Using Satellite SAR Data. *Environmental Earth Sciences*, **71**, 3581-3592. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2749-5>
- [13] Scherler, D., Leprince, S. and Strecker, M.R. (2008) Glacier Surface Velocities in Alpine Terrain from Optical Satellite Imagery: Accuracy Improvement and Quality Assessment. *Remote Sensing of Environment*, **112**, 3806-3819. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.018>
- [14] Luckman, A., Quincey, D. and Bevan, S. (2007) The Potential of Satellite Radar Interferometry and Feature Tracking for Monitoring Flow Rates of Himalayan Glaciers. *Remote Sensing of Environment*, **111**, 172-181. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.019>
- [15] Kumar, V., Venkataramana, G. and Hogda, K.A. (2011) Glacier Surface Velocity Estimation Using SAR Interferometry Technique Applying Ascending and Descending Passes in Himalayas. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **13**, 545-551. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.02.004>
- [16] Joughin, I.R., Kwok, R. and Fahnestock, M.A. (1998) Interferometric Estimation of Three-Dimensional Ice-Flow Using Ascending and Descending Passes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **36**, 25-37. <https://doi.org/10.1109/36.655315>
- [17] Gourmelen, N., Kim, S.W., Shepherd, A., *et al.* (2011) Ice Velocity Determined Using Conventional and Multi-Aperture InSAR. *Earth and Planetary Science Letters*, **307**, 156-160. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.04.026>
- [18] Strozzi, T., Luckman, A., Murray, T., *et al.* (2002) Glacier Motion Estimation Using SAR Offset-Tracking Procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **40**, 2384-2391. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.805079>
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Tazio, S., Frank, P., Andreas, W., *et al.* (2017) Circum-Arctic Changes in the Flow of Glaciers and Ice Caps from Satellite SAR Data between the 1990s and 2017. *Remote Sensing*, **9**, 947. <https://doi.org/10.3390/rs9090947>
- [22] 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.
- [23] 丁赤飏, 刘佳音, 雷斌, 等. 高分三号 SAR 卫星系统级几何定位精度初探[J]. 雷达学报, 2017, 6(1): 11-16.
- [24] 杨劲松, 任林, 王隼. 高分三号卫星对海浪的首次定量遥感[J]. 海洋与湖沼, 2017, 48(2): 207-209.
- [25] Li, X.M., Zhang, T., Huang, B., *et al.* (2018) Capabilities of Chinese Gaofen-3 Synthetic Aperture Radar in Selected Topics for Coastal and Ocean Observations. *Remote Sensing*, **10**, 1929. <https://doi.org/10.3390/rs10121929>
- [26] Weizeng, S., Yexin, S. and Jian, S. (2017) Preliminary Assessment of Wind and Wave Retrieval from Chinese Gao-

- fen-3 SAR Imagery. *Sensors*, **17**, 1705. <https://doi.org/10.3390/s17081705>
- [27] Wang, J.L., Yu, W.D., Deng, Y.K., *et al.* (2019) Demonstration of Time-Series InSAR Processing in Beijing Using a Small Stack of Gaofen-3 Differential Interferograms. *Journal of Sensors*, **2019**, Article ID: 4204580. <https://doi.org/10.1155/2019/4204580>
- [28] 刘泽宇, 柳彬, 郭炜炜, 等. 高分三号 NSC 模式 SAR 图像舰船目标检测初探[J]. 雷达学报, 2017, 6(5): 45-54.
- [29] 马建威, 孙亚勇, 陈德清, 等. 高分三号卫星在洪涝和滑坡灾害应急监测中的应用[J]. 航天器工程, 2017, 26(6): 161-166.
- [30] 谷鑫志, 曾庆伟, 谌华, 等. 高分三号影像水体信息提取[J]. 遥感学报, 2019, 23(3): 555-565.
- [31] 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.
- [32] Racoviteanu, A.E., Arnaud, Y., Williams, M.W., *et al.* (2015) Spatial Patterns in Glacier Characteristics and Area Changes from 1962 to 2006 in the Kanchenjunga-Sikkim Area, Eastern Himalaya. *The Cryosphere*, **9**, 505-523. <https://doi.org/10.5194/tc-9-505-2015>
- [33] Racoviteanu, A. and Williams, M.W. (2012) Decision Tree and Texture Analysis for Mapping Debris-Covered Glaciers in the Kangchenjunga Area, Eastern Himalaya. *Remote Sensing Basel*, **4**, 3078-3109. <https://doi.org/10.3390/rs4103078>
- [34] 陈强, 罗容, 杨莹辉, 等. 利用 SAR 影像配准偏移量提取地表形变的方法与误差分析[J]. 测绘学报, 2015, 44(3): 301-308.
- [35] 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.
- [36] 王欣, 刘琼欣, 蒋亮虹, 等. 基于 SAR 影像的喜马拉雅山珠穆朗玛峰地区冰川运动速度特征及其影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2015, 37(3): 570-579.