



岗纳楼冰川表面流速时空变化特征提取及分析

周中正, 许才军, 刘洋, 熊露雲

引用本文:

周中正, 许才军, 刘洋, 熊露雲. 岗纳楼冰川表面流速时空变化特征提取及分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(2): 226–233.

ZHOU Zhongzheng, XU Caijun, LIU Yang, XIONG Luyun. Extraction and Analysis of Temporal–Spatial Variation Characteristics of Surface Velocity of the Gangnalou Glacier[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 226–233.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

藏东南然乌湖流域雅弄冰川流速季节性变化

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1579–1588 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210104>

川藏铁路沿线Sentinel-1影像几何畸变与升降轨适宜性定量分析

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1450–1460 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210130>

多模态序列遥感影像的洪涝灾害应急信息快速提取

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(10): 1441–1449 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210465>

利用方向相位特征进行多源遥感影像匹配

A Multi-source Remote Sensing Image Matching Method Using Directional Phase Feature

武汉大学学报·信息科学版. 2020, 45(4): 488–494 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180445>

基于通讯信号塔RCS建模的SAR影像绝对辐射定标

SAR Image Absolute Radiometric Calibration Based on RCS Modeling of Communication Tower

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(11): 1746–1755 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210052>



岗纳楼冰川表面流速时空变化特征提取及分析

周中正¹ 许才军^{1,2,3} 刘 洋^{1,2,3} 熊露雲¹

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 国家自然资源部地球物理大地测量重点实验室,湖北 武汉,430079

3 武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室,湖北 武汉,430079

摘 要:冰川表面流速是反映冰川动态变化的重要指标,能够为冰川物质平衡提供重要信息。利用2016年的13景Sentinel-1A影像和合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)偏移量追踪法测定岗纳楼冰川表面流速场,并根据地表温度是否大于0℃将其分为冰封期(10月—次年3月)和消融期(4月—9月)。其中,冰封期流速场较为稳定,中轴流速快于两侧,边界流速趋于0 m/a;消融期流速场冰舌中下部与冰舌上部差异明显,冰川表面流速具有分区特征。基于SAR观测数据,在冰川积累增厚、消融减薄及冰川表面流动的综合影响下,冰封期冰川表面流速最大为65.43 m/a;消融期冰川表面流速最大为46.28 m/a。通过分析冰川中线流速、冰面高程以及地表温度之间的关系可知,冰封期内,岩床坡度是影响冰川流速的主要原因,且岗纳楼冰川为“压缩-舒张”流运动模式;消融期内,地表温度升高、冰面海拔变化是冰川表面流速出现分区现象的主要原因。

关键词:岗纳楼冰川;冰川表面流速;时空变化特征;合成孔径雷达;偏移量追踪法;“压缩-舒张”流

中图分类号:P237

文献标志码:A

山地冰川对气候变化极为敏感,被公认为是最适合反映全球气候变化的指示器^[1-3]。冰川流速作为研究冰川动态变化的重要指标之一,以往因观测技术受限没有得到足够的研究,现今合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术能全天时、全天候地对冰川进行观测,已成为测量冰川表面流速的常用技术手段之一。

SAR测量方法主要包括差分合成孔径雷达干涉测量法(differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR)^[4]、多孔径雷达干涉测量法(multiple aperture interferometry, MAI)^[5]和SAR偏移量追踪法^[6-8]。文献[9]结合D-InSAR和SAR偏移量追踪法对珠穆朗玛峰地区1992—2002年共20个冰川的表面流速进行测量,发现只有一个冰川处于活动状态,其表面流速大于40 m/a。文献[10]使用升降轨ERS-1/2串联模式数据提取Siachen冰川的三维冰川表面流速信息,冰川的最大表面流速为43 cm/d,位于冰川中上游地区。SAR技术应用于冰川研究已取得许多成果^[6-15],但不同SAR测量方法有不同限制。D-InSAR和MAI需要地面有足够的相干性,

不易测量无相干目标(无裸土或无冰碛物)的冰川表面流速。SAR偏移量追踪法不受冰面失相干的影响,但精度受影像分辨率影响,一般为分辨率的1/10到1/30^[11],因此需要高分辨率影像。

目前关于岗纳楼冰川的研究较少,且主要集中在冰碛物的沉积类型、组构特征^[16]以及冰川质量亏损估计^[17]等方面,少有文献对岗纳楼冰川表面流速的时空变化特征进行分析。本文利用SAR偏移量追踪法对2016年岗纳楼冰川表面流速进行测定,提取冰川表面流速场时空变化特征,并结合地表温度数据等对特征成因进行分析。

1 研究区与数据

1.1 研究区

岗纳楼冰川位于中国青海省天峻县境内西北,哈拉湖流域内东北处,地处祁连山主峰疏勒南山团结峰南坡,冰川覆盖面积约14.1 km²,其地理位置见图1。《中国第二次冰川编目数据集》^[18]表明,哈拉湖流域中共有118条冰川,总面积达93.97 km²。其中,岗纳楼冰川覆盖面积最大,为

收稿日期:2021-03-30

项目资助:国家自然科学基金(42074007,41874011,41721003);国家重点研发计划(2018YFC1503603)。

第一作者:周中正,硕士,主要从事SAR数据处理与冰川学研究。zhongzhengzhou@whu.edu.cn

通讯作者:刘洋,博士,副教授。Yang.Liu@sgg.whu.edu.cn

哈拉湖提供了大量冰雪融水,是湖水主要来源之一。岗纳楼冰川总长度 8.4 km,冰川冰舌常伸出山谷,冰舌长度约 5 km,冰川末端已下伸到海拔 4 520 m 的山麓平原上,雪线高度为 4 850~5 100 m,是罕见的特殊形态冰川(图 1)。冰川流上部近似向南,伸出山谷后,冰川流转为 N80°W 方向^[16]。这一走向与哨兵 1A(Sentinel-1A)升轨卫星的距离向(卫星视线向在地面的投影)近似平行。

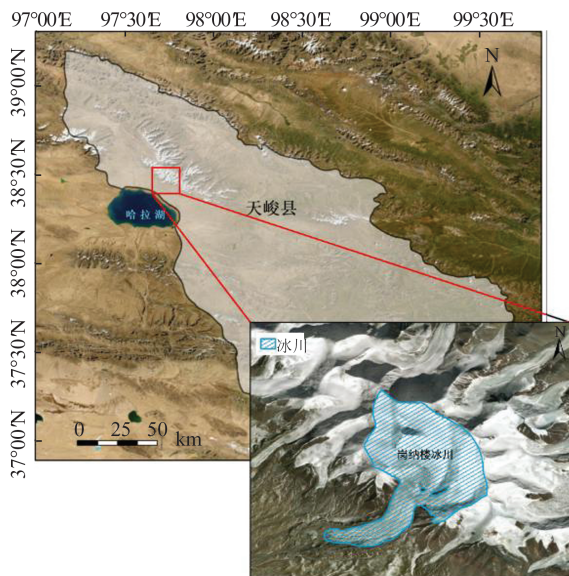


图 1 岗纳楼冰川地理位置

Fig.1 Location of the Gangnalou Glacier

1.2 数据源

为研究岗纳楼冰川表面流速时空变化特征,本文选取 2016 年共 13 幅 Sentinel-1A 升轨干涉宽幅单视复数影像,地面分辨率在 2.7 m×22 m 到 3.5 m×22 m 之间(<https://earth.esa.int>),时间跨度为 2016-01-11—2016-12-12,雷达极化方式均为 VV,处理后得到 12 幅干涉影像图(表 1),观测范围覆盖整个哈拉湖流域。数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据采用 30 m SRTM 数据,高程精度 10 m^[19]。卫星星历采用欧空局提供的 Sentinel-1A 卫星精密轨道星历(精度优于 5 cm),用于提升影像配准精度和效率。为结合地表温度分析岗纳楼冰川表面流速时空变化特征,本文选用 2016 年共 46 期中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)地表温度数据,地面分辨率 1 km,时间分辨率 8 d。该地表温度数据是由 8 天中天气晴好的地表温度求平均值获得,因此可以消除部分云干扰,适合分析岗纳楼冰川表面流速时空变化特征。

表 1 Sentinel-1A 升轨干涉宽幅单视复数影像数据
Tab.1 Sentinel-1A Ascending Single Look Complex Images of Interferometric Wide Mode

编号	主影像日期	从影像日期	时间基线/d	垂直基线/m	极化方式
1	2016-01-11	2016-02-04	24	32.04	VV
2	2016-02-04	2016-02-28	24	85.78	VV
3	2016-02-28	2016-04-16	48	3.37	VV
4	2016-04-16	2016-05-10	24	0.17	VV
5	2016-05-10	2016-06-03	24	68.75	VV
6	2016-06-03	2016-07-21	48	67.62	VV
7	2016-07-21	2016-08-14	24	108.32	VV
8	2016-08-14	2016-09-07	24	26.45	VV
9	2016-09-07	2016-10-01	24	55.12	VV
10	2016-10-01	2016-10-25	24	87.04	VV
11	2016-10-25	2016-11-18	24	13.59	VV
12	2016-11-18	2016-12-12	24	107.46	VV

2 研究方法与数据处理

2.1 偏移量追踪法

偏移量追踪法包含相干性追踪法和强度追踪法两类。其中,强度追踪法仅需地表纹理特征明显就能提取偏移量,因此更适用于冰川表面等失相干地区^[7]。强度追踪法的基本原理是计算主影像参考窗口与从影像搜索窗口的归一化互相关(normalized cross correlation, NCC)函数,以最大化 NCC 值为准则确定偏移量^[20],计算式为:

$$NCC_{u,v} = \frac{\sum_{x,y} (f_{x,y} - f_r)(g_{x+u,y+v} - g_s)}{\sqrt{\sum_{x,y} (f_{x,y} - f_r)^2} \sqrt{\sum_{x,y} (g_{x+u,y+v} - g_s)^2}} \quad (1)$$

式中, x,y 为参考像元横、纵坐标; u,v 为搜索像元相对于参考像元的横、纵坐标偏移量; $f_{x,y}$ 和 $g_{x+u,y+v}$ 分别是参考像元和搜索像元的像元值; f_r 和 g_s 分别为参考窗口和搜索窗口的平均像元值。

SAR 偏移量追踪法流程如图 2 所示,主要步骤包括:

1) SAR 影像配准。采用谱分集配准法配准 Sentinel-1A 影像,并去除相位斜坡和相位跳变^[21-23]。

2) 局部偏移量计算。先以大参考窗口估计初始偏移量,然后再用小窗口进一步计算,大窗口设为 320×64 像元(约 1 600 m×1 280 m),小窗口设为 160×32 像元(约 800 m×640 m),同时设置每隔 10×2 像元(约 50 m×40 m)计算一次偏移量,影像过采样因子设为 2,并去除地形起

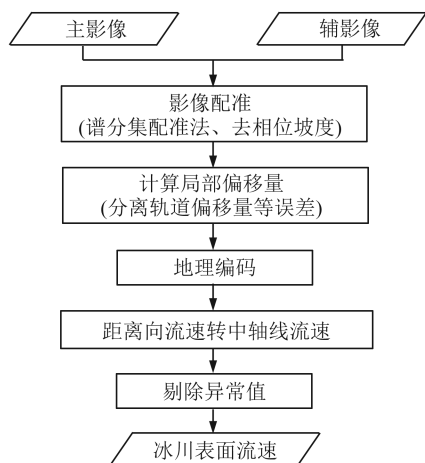


图2 SAR偏移量追踪法流程图

Fig.2 Flowchart of SAR Offset Tracking

伏^[24-25]、电离层影响^[26]、轨道位置差异等误差因素^[14,27],最后像元偏移量转化为地表形变量。

3)地理编码。常规地理编码后,本文将距离向流速观测值除以距离向与冰川中线的锐夹角余弦值,使速度方向转为沿冰川中线方向。而对于冰川中线之外的某一点 Q ,可以从中线上选择距离 Q 的最近点 P ,利用 P 点处距离向与中线的锐夹角余弦值来进行计算。该方法在冰川中线附近的效果较好,而在冰川边界处会有一定的误差,但冰川边界处的流速趋近于 0 m/a ,该误差也在一定程度上得到削减。如无特殊说明,本文中的冰川表面流速均指由距离向SAR观测流速转换得到的沿冰川中线的流速。

4)异常值剔除。因降雪、雪崩、冰裂隙等自然因素,偏移量计算得到的冰川表面流速场将存在异常值。本文将流速误差超过 3σ (σ 为流速中误差)的异常值区域剔除,并根据最邻近法进行插值,再采用平滑滤波使冰川表面流速场恢复连续性。

2.2 地表温度计算

为分析地表温度对岗纳楼冰川表面流速的影响,本文对覆盖研究区的MOD11A2影像像元进行计算,获取研究区地表温度平均值。地表温度计算式为:

$$L = 0.02V - 273.15 \quad (2)$$

式中, V 为像元的灰度值; L 为地表温度。

图3为2016年岗纳楼冰川地表温度变化图,选取时间段为2016-01-01—2016-12-26,采样间隔为8 d。从图3可以看出,在2016-03-29—2016-09-29期间,岗纳楼冰川地表温度基本高于 0°C ,8月达到最高温度;其余时间段温度低于 0°C ,1月达到最低温度。

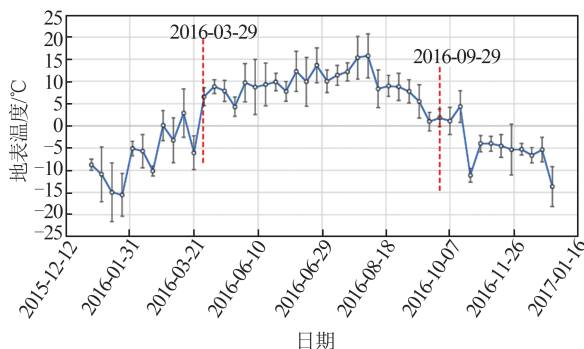


图3 2016年岗纳楼冰川地表温度变化

Fig.3 Surface Temperature Changes of the Gangnalou Glacier in 2016

2.3 岗纳楼冰川表面流速场

依据地表温度变化,本文将流速场分为冰封期(10月—次年3月)和消融期(4月—9月)两个时间段。且由于冰川表面流速方向与方位向(即沿轨方向)差异较大,方位向流速场精度大大低于距离向,因此本文主要使用距离向SAR观测流速结果。鉴于冰川可近似看作沿中线流动^[13,28],本文将距离向流速转为沿中线流速,2016年冰封期和消融期岗纳楼冰川表面流速分布分别如图4、图5所示。其中,正值表示速度方向沿中线向下,负值表示速度方向沿中线向上。

由图4可知,冰封期内岗纳楼冰川表面流速稳定,流速峰值在 $39.90\sim 65.43\text{ m/a}$ 间变化,冰川中轴流速明显快于两侧,并在边界处趋于 0 m/a 。由图5可知,消融期内冰川表面流速峰值在 $23.41\sim 46.28\text{ m/a}$ 间变化,4月—9月冰舌上下部的表面流速值显著不同,呈现明显的分区特征。

3 结果与分析

3.1 流速可靠性分析

冰川表面流速的误差可通过无冰稳定区域的流速值进行估算^[6,8,14-15](流速理论值为 0 m/a)。本文选取冰川边界附近的控制点进行误差估算,结果见表2。由表2可知,距离向流速均方根误差(root mean square error, RMSE)的平均值为 3.40 m/a ,方位向流速RMSE的平均值为 11.92 m/a 。方位向流速相对误差较大,不利于后续结果分析;距离向流速相对误差较小,结果可靠,适合用于后续分析。

3.2 地表温度对冰川表面流速的影响分析

图6为卫星视线向和冰川表面的观测几何,其中 P 点为目标点, P' 为冰川消融或流动

后的同名点。由图 6 可知,当地表温度升高,冰川消融会加剧,从而使得冰川厚度变薄,引起卫星视线向位移的增加,但冰川表面流动却会使得卫星视线向位移减小。因此对本文研究而言,冰川消融减薄会使 SAR 观测得到的表面流速低于实际值,而冰川积累增厚则会使 SAR 观测得到的表面流速高于实际值。根据图 5 中 4 月—9 月红色流速场的位置,可发现其

基本位于冰舌中下部,这部分区域冰川海拔低,因此冰川消融也更加剧烈。此外,从图 3 中可以看出,4 月—9 月岗纳楼冰川的地表温度均高于 0°C ,8 月初温度达到最高,此时冰川消融最为剧烈。在图 5 中也反映出这一特点,2016-07-21—2016-08-14 的距离向流速场几乎全部被红色流速场所覆盖,冰川消融明显强于其他时间段。

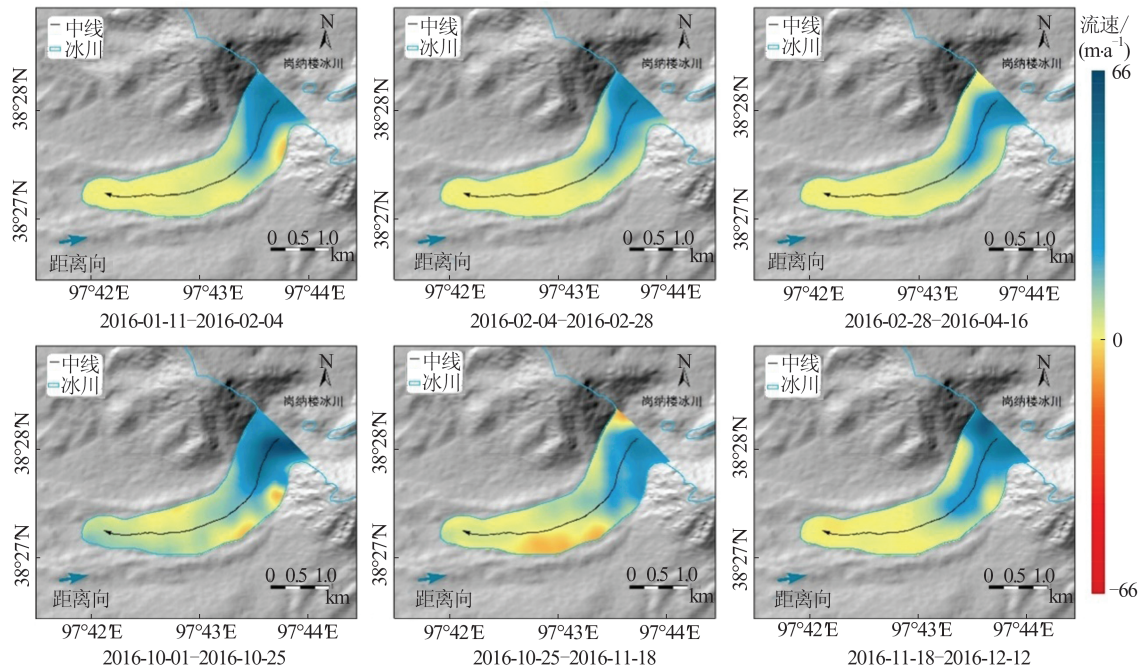


图 4 2016 年岗纳楼冰川表面流速(冰封期)

Fig.4 Surface Velocity of the Gangnalou Glacier in 2016 (Freezing Period)

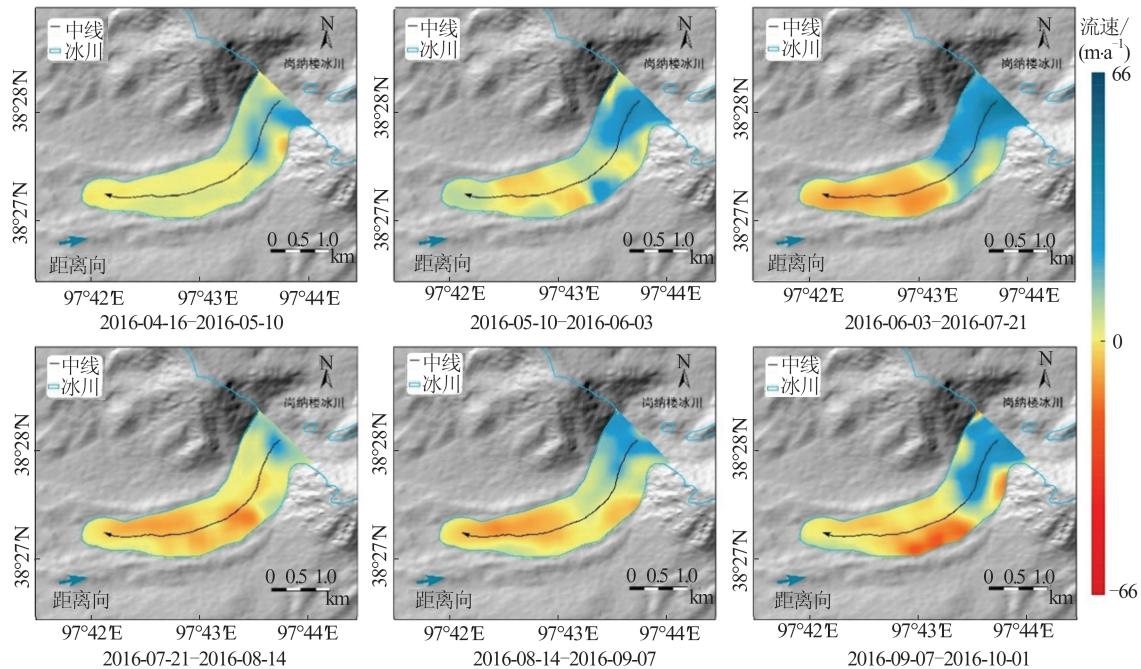


图 5 2016 年岗纳楼冰川表面流速(消融期)

Fig.5 Surface Velocity of the Gangnalou Glacier in 2016 (Ablation Period)

表2 冰川表面流速与均方根误差/(m·a⁻¹)
Tab.2 Glacier Surface Velocity and Its RMSE/(m·a⁻¹)

时间跨度	距离向		方位向	
	流速	流速RMSE	流速	流速RMSE
2016-01-11—2016-02-04	25.89	1.02	40.14	3.50
2016-02-04—2016-02-28	25.22	0.66	62.95	3.35
2016-02-28—2016-04-16	25.90	0.31	25.79	1.92
2016-04-16—2016-05-10	16.34	1.36	62.35	3.83
2016-05-10—2016-06-03	24.41	6.63	92.55	37.50
2016-06-03—2016-07-21	27.34	8.65	43.15	16.46
2016-07-21—2016-08-14	13.83	1.83	78.40	7.75
2016-08-14—2016-09-07	16.74	2.19	40.78	14.77
2016-09-07—2016-10-01	20.98	6.61	64.38	25.71
2016-10-01—2016-10-25	38.65	6.23	42.87	16.21
2016-10-25—2016-11-18	23.57	3.94	46.62	7.22
2016-11-18—2016-12-12	35.00	1.36	47.44	4.87
平均值	24.49	3.40	53.95	11.92

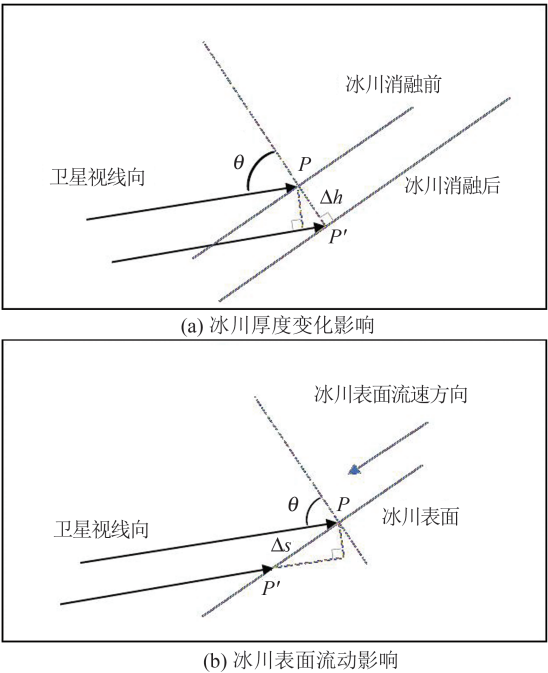


图6 冰川消融与卫星视线向位移关系
Fig.6 Relationship Between Glacier Ablation and Satellite Line-of-Sight Displacement

3.3 岩床坡度对冰川表面流速的影响分析

文献[29]研究了冰川的动力学机制,“压缩-舒张”流运动模式如图7所示。当坡度陡峭时,冰川运动加速并且变薄,会形成“舒张流”,该区域会产生大的拉张裂隙,也就是冰裂隙。与“舒张流”相反,在岩床坡度平缓地区,冰川运动变慢并且冰川堆积变厚,这就是“压缩流”。鉴于冰川中线的运动速度可以大致反映冰川的整体运动趋势,本文从山谷出口处开始,提取冰封期内岗纳

楼冰川中线上的表面流速以及冰面高程,来分析岩床坡度对岗纳楼冰川表面流速的影响。岗纳楼冰川中线A→B及冰面高程变化拐点S₁、S₂、S₃如图8所示,冰川中线流速及冰面高程采样结果如图9所示。需注意的是,图9中岩床坡度变化是根据冰面相对高程变化所得,受冰雪积累影响,模拟冰下地形较实际冰下地形平缓。

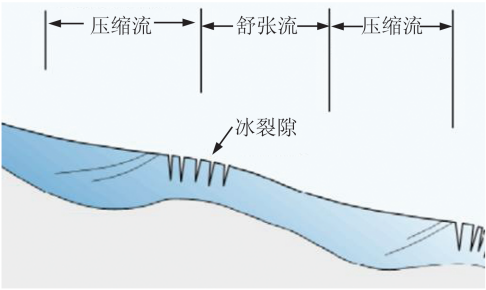


图7 “压缩-舒张”流运动模式示意图^[29]
Fig.7 Diagram of Compressive and Extending Flow Mode^[29]

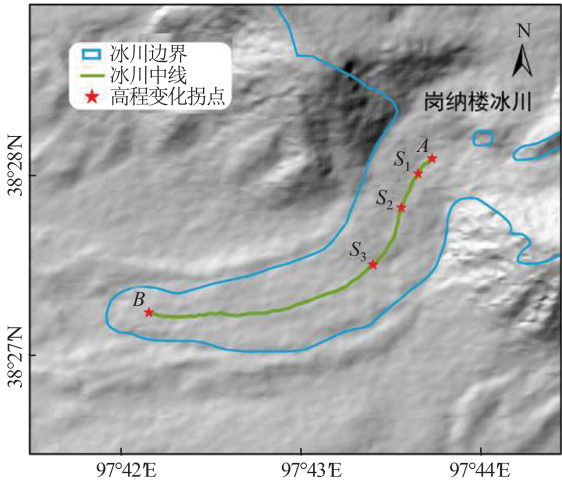


图8 岗纳楼冰川中线示意图
Fig.8 Diagram of the Gangnalou Glacier Central Line

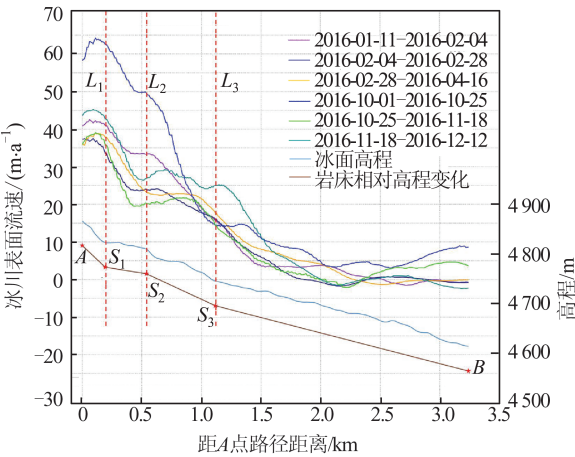


图9 岗纳楼冰川中线表面流速及冰面高程
Fig.9 Surface Velocity and Elevation Along the Central Line of the Gangnalou Glacier

根据之前的讨论,岗纳楼冰川进入冰封期后地表温度低于 0°C ,冰川消融微弱,而冰川积累仅在冰川整体运动上产生影响,因此岩床坡度将是导致 $A \rightarrow B$ 冰川中线表面流速局部变化的主要原因。从图 9 中可以看出,冰川表面流速的增减与岩床坡度大小变化情况大致相吻合。在岩床坡度拐点处分别标绘红色虚线 L_1 、 L_2 和 L_3 ,可发现虚线 L_1 之前冰川表面流速增大,对应 $A \rightarrow S_1$ 岩床坡度较陡;虚线 L_1 和 L_2 之间冰川表面流速减小,对应 $S_1 \rightarrow S_2$ 岩床坡度较平缓;而在虚线 L_2 之后的冰川表面流速的增减与岩床坡度大小变化也有相同的对应关系,由此可见这是以岩床坡度为主导因素的冰川运动。综上,可判断岗纳楼冰川的运动模式为“压缩-舒张”流运动模式。

4 结 语

本文采用 SAR 偏移量追踪法,测定了 2016 年岗纳楼冰川表面流速场。结果显示,在冰川积累增厚及冰川表面流动的影响下,冰封期岗纳楼冰川表面流速值最大为 65.43 m/a ,中轴流速快于两侧并向两侧递减,边界处表面流速趋于 0 m/a ;在冰川消融减薄及冰川表面流动的影响下,消融期岗纳楼冰川表面流速值最大为 46.28 m/a 。此外,由于消融期地表温度升高,岗纳楼冰川舌中下部海拔较低,使得流速场表现出分区特征。当岗纳楼冰川进入冰封期时,岩床坡度则是影响冰川表面流速的主要因素。通过分析冰面相对高程变化、岩床坡度变化与冰川中线流速之间的关系,可推知岗纳楼冰川为“压缩-舒张”流运动模式。

参 考 文 献

- [1] Cuffey K M, Paterson W S B. The Physics of Glaciers[M]. New York, USA: Academic Press, 2010
- [2] Bennett M R, Glasser N F. Glacial Geology: Ice Sheets and Landforms[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011
- [3] Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. Recent Contributions of Glaciers and Ice Caps to Sea Level Rise[J]. *Nature*, 2012, 482(7386): 514-518
- [4] Zhou Chunxia, Deng Fanghui, 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*, 2014, 39(8): 940-944 (周春霞, 邓方慧, 艾松涛, 等. 利用 DInSAR 的东南极极记录 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)
- [5] Bechor N B D, Zebker H A. Measuring Two-Dimensional Movements Using a Single InSAR Pair[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(16): L16311
- [6] 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 (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)
- [7] 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)
- [8] 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)
- [9] Quincey D J, Luckman A, Benn D. Quantification of Everest Region Glacier Velocities Between 1992 and 2002, Using Satellite Radar Interferometry and Feature Tracking[J]. *Journal of Glaciology*, 2009, 55(192): 596-606
- [10] Kumar V, Venkataramana G, Høgda K A. Glacier Surface Velocity Estimation Using SAR Interferometry Technique Applying Ascending and Descending Passes in Himalayas[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, 13(4): 545-551
- [11] Wang Qun. Application of DInSAR and Offset Tracking Techniques in Monitoring Mountain Glacier Velocity[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2018 (王群. DInSAR 和偏移量跟踪技术在山地冰川流速监测中的应用[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018)
- [12] 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
- [13] Ding Yifan, Cheng Xiao, Cheng Cheng, et al. Monitoring Ice Velocity by SAR Offset-Tracking and Analysis of Influence Factors for the Kangshung Glacier in the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(5): 1650-1658 (丁一凡, 程晓, 程铨, 等. 基于偏移追踪的青藏高原卓琼冰川流速监测及成因分析[J]. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1650-1658)
- [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] 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 (5139): 1525-1530
- [16] Wu Anbin. The Characteristics of Sedimentary Fabric of Modern till of 5th Gangloulou Glacier, Shuleinanshan[J]. *Journal of Lanzhou University*, 1980, 16(3): 119-126 (武安斌. 疏勒南山岗纳楼5号冰川现代冰碛物的沉积组构特征[J]. 兰州大学学报, 1980, 16(3): 119-126)
- [17] Wu Hongbo, Yang Meng, Yang Chunli, et al. Effect of Glacier Mass Loss on Water Level Fluctuation of Lake in Hala Lake Basin[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2016, 27(4): 13-20 (吴红波, 杨萌, 杨春利, 等. 冰川亏损对哈拉湖流域湖泊水位波动的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(4): 13-20)
- [18] Liu Shiyin, Guo Wanqin, Xu Junli, et al. The Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0) [EB/OL]. [2020-10-30]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/f92a4346-a33f-497d-9470-2b357ccb4246> (刘时银, 郭万钦, 许君利, 等. 中国第二次冰川编目数据集 (V1.0) [EB/OL]. [2020-10-30]. <https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/f92a4346-a33f-497d-9470-2b357ccb4246>)
- [19] Li Peng, Li Zhenhong, Shi Chuang, et al. Quality Evaluation of 1 Arc Second Version SRTM DEM in China[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(9): 24-28 (李鹏, 李振洪, 施闯, 等. 中国地区30 m分辨率SRTM质量评估[J]. 测绘通报, 2016(9): 24-28)
- [20] 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)
- [21] Geudtner D, Torres R, Snoeij P, et al. Sentinel-1 System Capabilities and Applications [C]// IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada, 2014
- [22] Wu Wenhao. TOPS Interferometry with Sentinel-1 [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016 (吴文豪. 哨兵雷达卫星 TOPS 模式干涉处理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016)
- [23] Huang Zhen, Zhao Shuangming, Chang Qing. Interferometric Test Using Domestic GF-3 Satellite[J]. *Journal of Geomatics*, 2021, 46(4): 7-11 (黄震, 赵双明, 常青. 国产高分三号卫星干涉测量试验[J]. 测绘地理信息, 2021, 46(4): 7-11)
- [24] Sansosti E, Berardino P, Manunta M, et al. Geometrical SAR Image Registration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2861-2870
- [25] 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
- [26] Wegmuller U, Werner C, Strozzi T, et al. Ionospheric Electron Concentration Effects on SAR and InSAR [C]// IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing, Denver, CO, USA, 2006
- [27] Strozzi T, Wegmuller U, Werner C, et al. Potential of a C-Band SAR Mission with 12-Day Repeat Cycle to Derive Ice Surface Velocity with Interferometry and Offset Tracking[C]// IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Barcelona, Spain, 2007
- [28] 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 & 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)
- [29] Nye J F. The Mechanics of Glacier Flow [J]. *Journal of Glaciology*, 1952, 2(12): 82-93

Extraction and Analysis of Temporal–Spatial Variation Characteristics of Surface Velocity of the Gangnalou Glacier

ZHOU Zhongzheng¹ XU Caijun^{1,2,3} LIU Yang^{1,2,3} XIONG Luyun¹

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Key Laboratory of Geophysical Geodesy, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China

³ Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Objectives: The temporal-spatial variation characteristic of the glacier surface velocity is an important indicator of dynamic change of glacier and can provide important information for glacier mass balance. Surface temperature, glacier bed slope and glacier altitude are all important factors that affect glacier surface velocity, and their respective effects need to be analyzed. **Methods:** In this paper, the offset-tracking method was used to measure the surface velocity of the Gangnalou Glacier, based on high-resolution Sentinel-1A synthetic aperture radar (SAR) images ranging from January 2016 to December 2016. We divided the surface velocity into freezing period and ablation period based on whether surface temperature was greater than 0 °C or not. For further analysis, we extracted the central line glacier velocity, and then jointly used surface temperature and digital elevation model (DEM) to analyze the influences of temperature and glacier bed slope. **Results:** The results showed that surface velocity of freezing period was more stable and central line glacier velocity was faster than that of boundary which tended to 0 m/a. SAR measurements were affected by glacier ablation, accumulation and motion, and showed that the maximum surface velocity was 65.43 m/a during freezing period and 46.28 m/a during ablation period. This surface velocity field showed a partitioning phenomenon in which the velocities of the middle and lower parts of glacier tongue were significantly different from that of the upper part during ablation period. **Conclusions:** The surface velocity of the Gangnalou Glacier was affected by many complex factors, of which glacier ablation and glacier bed slope are main factors. The partitioning phenomenon in the ablation period could be better explained by increasing surface temperature and changing glacier altitude, which directly affected glacier ablation and accumulation. Additionally, by analyzing the effect of the glacier bed slope, we found that the Gangnalou Glacier followed the compressive and extending flow mode in the freezing period.

Key words: the Gangnalou Glacier; surface velocity of glacier; temporal-spatial variation characteristics; synthetic aperture radar(SAR); offset tracking; compressive and extending flow

First author: ZHOU Zhongzheng, master, specializes in SAR data processing and glaciology. E-mail: zhongzhengzhou@whu.edu.cn

Corresponding author: LIU Yang, PhD, associated professor. E-mail: Yang.Liu@sgg.whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(42074007, 41874011, 41721003); the National Key Research and Development Program of China(2018YFC1503603).

引文格式: ZHOU Zhongzheng, XU Caijun, LIU Yang, et al. Extraction and Analysis of Temporal–Spatial Variation Characteristics of Surface Velocity of the Gangnalou Glacier[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(2): 226–233. DOI:10.13203/j.whugis20200133(周中正, 许才军, 刘洋, 等. 岗纳楼冰川表面流速时空变化特征提取及分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, 47(2): 226–233. DOI:10.13203/j.whugis20200133)