

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-02

魏春蕊, 杨成生, 魏云杰, 等. 联合 Sentinel-1 与 Landsat8 影像的希夏邦马峰冰川三维运动反演 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(1): 6-17.

WEI Chunrui, YANG Chengsheng, WEI Yunjie, *et al.* Three-dimensional movement inversion of Shisha Pangma glacier using Sentinel-1 and Landsat8 images[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(1): 6-17.

联合 Sentinel-1 与 Landsat8 影像的 希夏邦马峰冰川三维运动反演

魏春蕊¹, 杨成生¹, 魏云杰², 熊国华¹, 李晓阳¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;

2. 中国地质环境监测院 (自然资源部地质灾害技术指导中心), 北京 100081)

摘要: SAR 偏移量技术和光学偏移量技术是冰川运动监测重要的技术手段,但目前对于融合不同平台的影像进行三维形变的研究较少。文章选取 2019 年 11 月至 2021 年 1 月西藏聂拉木县希夏邦马峰地区的大型冰川作为研究对象,基于方差分量估计融合该研究区的 Sentinel-1 与 Landsat8 两种数据进行冰川的三维位移解算,选取了同一时期的光学影像对偏移量估计结果进行对比分析,同时选取稳定区域进行精度评估,分析该方法在冰川运动监测中的适用性和精确性。结果表明,该冰川在 2019 年 11 月至 2021 年 1 月,联合解算的东西向最大流速为 21 cm/d,南北向最大流速为 68 cm/d,垂直向最大流速为 17 cm/d。对比单一影像获取的冰川位移结果,多影像联合解算方法,能够弥补 SAR 数据的失相干和光学数据的低质量像元值的不足,获得更加完整和详细的冰川信息,监测结果精度更高。可为利用不同平台的数据联合监测山地冰川的多维度和高精度变化提供参考和技术支持。

关键词: Sentinel-1; Landsat8; 偏移量跟踪技术; 联合解算; 冰川三维监测

中图分类号: P343.6⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2022)01-0006-12



Three-dimensional movement inversion of Shisha Pangma glacier using Sentinel-1 and Landsat8 images

WEI Chunrui¹, YANG Chengsheng¹, WEI Yunjie², XIONG Guohua¹, LI Xiaoyang¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. China Institute of Geological Environment Monitoring (Guide Center of Prevention Technology for Geo-hazards, MNR), Beijing 100081, China)

Abstract: SAR offset and optical offset are important techniques for glacier movement monitoring, but there are few researches on 3D deformation by integrating images from different platforms. In this paper, large glaciers in The Shisha Pangma area of Nyalam County, Tibet from November 2019 to January 2021 were selected as the research area. Based on variance component estimation, Sentinel-1 and Landsat8 data of the study area were combined for three-dimensional glacier calculation. Optical images of the same period were selected for comparative analysis of the offset estimation results. At the same time, the accuracy

收稿日期: 2021-12-08; 修订日期: 2022-01-21

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(42174032); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190637); 第二次青藏高原综合科学考察研究专题“重大工程扰动灾害及风险”(2019QZKK0904)

第一作者: 魏春蕊 (1996-), 女, 甘肃定西人, 测绘科学与技术专业, 硕士研究生, 主要从事偏移量技术在地质灾害应用方面的研究。

E-mail: 3162869269@qq.com

of the method was evaluated by selecting the stable area, and the applicability and accuracy of the method in glacier movement monitoring were analyzed. The results show that the maximum velocity of the glacier is 21 cm/day in the east-west direction, 68 cm/day in the north-south direction, and 17 cm/day in the vertical direction. Compared with the glacier displacement results obtained from a single image, the multi-image joint algorithm can compensate for the incoherence of SAR data and the low quality pixel values of optical data, and obtain more complete and detailed glacier information and higher accuracy of monitoring results. This paper can provide reference and technical support for using data from different platforms to jointly monitor multi-dimensional and high-precision changes of mountain glaciers.

Keywords: Sentinel-1; Landsat8; offset tracking technology; fusion solution; three-dimensional glacier monitoring

0 引言

全球气候变暖导致冰川和冻土消融,进而引发滑坡、泥石流等自然灾害。西藏是我国山地冰川分布最广泛的区域,据资料统计,20 世纪以来西藏地区发生过多次冰湖溃决事件^[1-2]。1991 年由冰川活动诱发西藏八宿县吉达乡江查村各布马错冰湖溃决引发泥石流,冲毁 10 余处川藏公路路基、55 ha 农田,冲走 11 户民房、144 头牲畜、18 座木桥^[3];2000 年位于康马县萨马达乡雅拉山口北坡的冲巴吓错湖因后缘冰川滑坡引发涌浪溃坝洪水和泥石流,使冰湖下游的萨马达、康马、少岗和南尼等 4 个乡受灾^[4];2014 年由于冰川泥石流导致波密县的那隆藏布支沟冰湖溃决造成贡乡 2.7ha 农田和 550 m 乡村道路被洪水冲毁等^[5]。冰川运动变化的精确监测能够为冰川灾害的预警和气候分析提供理论依据,具有重大意义。

近年来,偏移量跟踪技术在冰川位移的研究中得到了广泛应用^[6-7]。目前,偏移量跟踪技术根据影像来源不同可分为两大类: SAR 偏移量技术、光学偏移量技术。由于 SAR 影像的获取不受天气条件的限制,且测量周期短,监测范围广,许多国内外学者将 SAR 偏移量跟踪技术应用到测量冰川流速的研究中^[8-9]。然而 SAR 影像侧视成像的特点使结果受叠掩和阴影等几何畸变的影响较大,且计算结果为距离向和方位向形变,因此一些学者也集中研究基于光学影像的像素偏移量跟踪技术^[10-11]。例如, BERTHIER 等^[12]利用 SPOT5 光学影像获取了阿尔卑斯地区山地冰川流速场^[12], DEHECQ 等^[13]利用 Landsat-5 和 7 影像,获取了帕米尔-喀喇昆仑-喜马拉雅 (PKH) 三年期间的冰川年速度场。

随着多源数据和多平台影像的发展,针对大量级的位移监测,也有学者相继提出多孔径差分干涉测量技术 (MAI)^[14]、融合 InSAR 升降轨技术的冰川二维或三维运动监测^[15],融合多个轨道的 Offset-tracking 或 MAI 形变测量技术^[16-17]、小基线时序处理的 PO-SBAS 技

术^[18]和融合多源 InSAR 数据的三维形变测量^[19],但目前对于融合 SAR 影像与光学影像监测多维度形变的研究较少。因此,文中选取西藏聂拉木县希夏邦马峰地区的大型冰川作为实验区,基于方差分量估计,利用 Sentinel-1 与 Landsat8 两种影像进行了冰川位移的三维分解研究,分析该方法在冰川运动监测中的适用性和精确性。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

希夏邦马峰为喜马拉雅山脉中段的高峰之一,空间位置如图 1(a) 所示,是一座完全在中国西藏自治区聂拉木县境内的 8 000 m 级高峰。希夏邦马峰地区山地冰川持续退缩,并且冰湖加速扩张,该地区冰湖溃决等自然灾害^[20]增多。文中的研究对象属于希夏邦马峰的大型冰川,如图 1(b) 所示,该冰川有 3 条上游支流并且在中游汇集,为冰川三维运动特征分析提供了典型实验区域。

1.2 研究区数据

文中采用了 Sentinel-1 和 Landsat8 两种数据源。考虑到计算的高效率以及冰川在较长时间间隔里其位移量较明显的因素,采用了从欧空局获取的间隔 48 d 的 2019 年 12 月至 2020 年 12 月 9 景 Sentinel-1 升轨影像,详细参数信息如表 1 所示,其距离向分辨率为 5 m、方位向分辨率为 20 m。对于光学数据,采用了 2019 年 11 月至 2021 年 1 月之间的 6 景美国 Landsat8 影像,参数信息如表 2 所示, Landsat8 的全色影像空间分辨率为 15 m。这两种数据的影像覆盖范围如图 1 所示。

2 研究方法与数据处理

文中对获取的 Sentinel-1 影像进行偏移量估计得到其距离向和方位向的形变量,对 Landsat8 影像进行偏移量估计得到东西向和南北向的形变量。为了融合这四个方向的形变量来求解冰川三维流速,操作步骤如下: (1) 对距离向和方位向的形变位移结果进行投影转换和

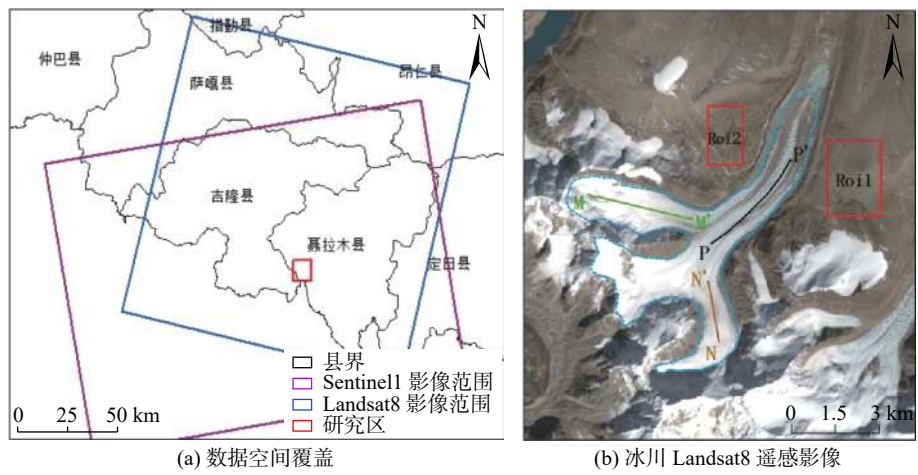


图 1 实验区数据覆盖图和冰川光学影像图

Fig. 1 Data coverage map of the experimental area and glacier optical images

表 1 研究所采用的 Sentinel-1 数据参数

Table 1 The Sentinel-1 data parameters used in the study

影像编号	采集日期	空间基线/m	时间基线/d
1	2019-12-08	0.00	0
2	2020-01-25	-39.83	48
3	2020-03-13	-112.08	96
4	2020-04-30	-112.19	144
5	2020-06-17	-51.88	192
6	2020-08-04	-33.98	240
7	2020-09-21	-105.59	288
8	2020-11-08	-101.99	336
9	2020-12-26	125.79	384

表 2 研究所采用的 Landsat8 影像参数

Table 2 The Landsat8 imaging parameters used in the study

影像编号	采集日期	太阳高度角/(°)	太阳方位角/(°)	含云量/%
1	2019-11-19	38.52	157.40	1.74
2	2020-01-22	35.61	150.5	4.65
3	2020-02-07	39.10	147.2	3.28
4	2020-11-21	37.78	157.5	2.54
5	2021-01-08	33.93	153.0	4.20
6	2021-01-24	36.10	150.0	1.32

分辨率重采样,并将其分解至东西、南北和垂直向的位移;(2)根据观测误差的来源不同,与光学形变数据组成四个观测方程,基于方差分量估计对计算的 SAR 偏移量数据和光学偏移量数据进行随机模型的验后估计,从而得到冰川的三维形变速率;(3)对于解算的结果采用同期的光学影像对进行冰川流速及其运动特征的对比分析,并通过计算稳定区域的标准差进行精度估计。技术流程如图 2 所示,主要分为三个关键的步骤: SAR 偏移量估计、光学偏移量估计、联合解算。

2.1 SAR 偏移量估计

由于 SAR 影像易受失相干的影响,文中采用小基

线集像素跟踪算法^[21],通过设置时空阈值得到最优的基线组合(图 3),并利用对相干性要求较低的强度跟踪算法进行偏移量的估算,其主要的参数设置包括配准窗口、互相关系数和步长。匹配窗口的大小对影像配准的精度非常重要,采用多尺度窗口可以提高计算结果的精度^[22],获得更加精确的 SAR 影像距离向和方位向偏移结果。为了在偏移量信息和噪声值之间达到较好的平衡,经过多次实验确定最终的搜索窗口为 128×128 像素(距离向×方位向),搜索步长为 5×1 像素(距离向×方位向),将相关系数阈值设置为 0.2,以掩膜在失相干严重区域获得的不可靠位移值。

2.2 光学偏移量估计

光学影像的偏移量估算结果易受失相关噪声、轨道误差、条带误差以及卫星姿态角误差的影响^[23],其中失相关噪声包括由云雪、地表建筑物以及地形阴影等。为了减少失相关噪声的影响,文中对获取的时间跨度小且含云量少的影像计算每一影像对的太阳高度角和太阳方位角差值,选取其差值较小的影像对(表 3),共计 7 组影像对用于影像对的匹配。

文中以 COSI-Corr 软件为偏移量估算平台,基于亚像素相关性匹配算法获取影像对的東西向和南北向形变变量。为了得到较好的数据处理结果,进行多次实验选择合适的参数:初始搜索窗口设置为 64×64,最终相关搜索窗口设置为 32×32,步长设置为 4,迭代次数为 2,掩膜阈值为 0.9。处理过程中,采用了以下措施来削弱或消除误差的影响:设置信噪比阈值>0.9 去除失相关噪声引起的误差;利用一次多项式曲面拟合模型去除轨道误差;利用“均值相减法”去除条带误差;利用改进后的“均值相减法”去除卫星姿态角误差^[24]。

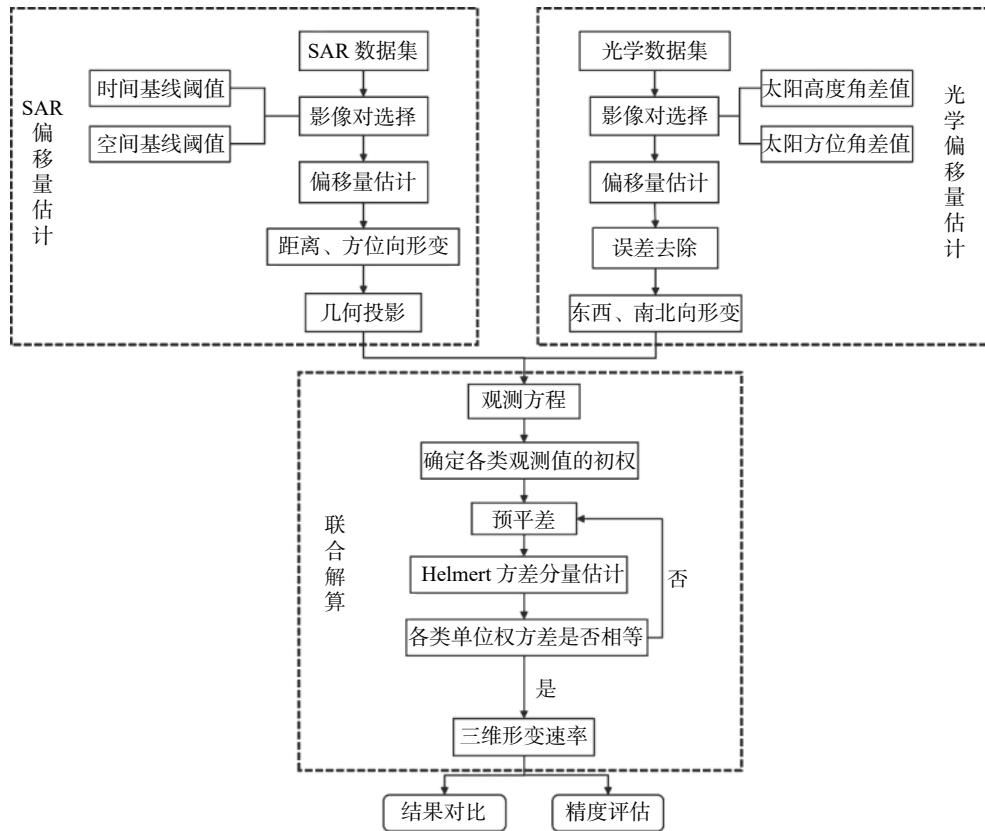


图 2 联合解算冰川三维形变速率技术流程图

Fig. 2 Technical flow chart of 3D deformation rate

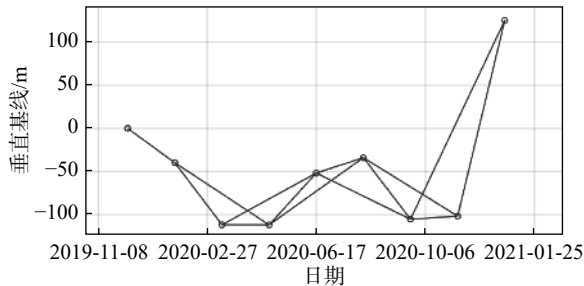


图 3 SAR 影像时空基线组合分布图

Fig. 3 Space ottemporal baseline combination distribution of SAR images

表 3 研究所采用的 Landsat8 影像对

Table 3 The Landsat8 image pairs used in the study

Landsat8影像对的日期	太阳高度角差值/(°)	太阳方位角差值/(°)
2019-11-19—2020-02-07	0.58	10.2
2019-11-19—2020-11-21	0.74	0.1
2020-01-22—2020-11-21	2.17	7.0
2020-01-22—2021-01-08	1.68	2.5
2020-01-22—2021-01-24	0.49	0.5
2020-02-07—2020-11-21	1.32	0.5
2020-11-21—2021-01-24	1.68	7.5

2.3 联合解算

在多类观测数据的联合平差中, Helmert 方差分量

估计是对不同类型的观测值进行定权的常用方法之一。它的基本思想: 将观测值按不同的观测来源分类, 确定各类观测值的初始权, 进行预平差; 然后根据一定的原则计算各类观测值的验后单位权方差, 进行观测测量方差的迭代运算, 直至各类观测值的单位权中误差相等或各类单位权方差之比等于 1。之前有学者已经用该方法探索过 InSAR 观测量与 GPS 数据的融合^[25]。同样, 文中基于方差分量估计对计算的 SAR 偏移量数据和光学偏移量数据进行随机模型的验后估计, 具体步骤和原理:

首先, 以 Landsat8 数据为参考对象, 将 SAR 数据的坐标系统转换到 Landsat8 数据的坐标系统下, 并对 SAR 干涉对重采样进行分辨率的统一, 使得两种图像的像元能够一一对应, 便于后续的计算。

假设有 N 幅研究区的 SAR 影像组成了 m 个干涉对, 对第 r ($r \leq m$) 个影像对的相干点 i 来说, 假设发生了匀速形变, 则有:

$$Los^{ri} = [t_r \cdot C_e^{ri} t_r \cdot C_n^{ri} t_r \cdot C_u^{ri}] \cdot [v_e^i v_n^i v_u^i]^T \quad (1)$$

$$Az^{ri} = [t_r \cdot D_e^{ri} t_r \cdot D_n^{ri} t_r \cdot D_u^{ri}] \cdot [v_e^i v_n^i v_u^i]^T \quad (2)$$

式中: Los^{ri} 、 Az^{ri} ——第 r 个干涉对得到的相干点 i 在 Los

向和方位向的形变量;

v_e^i 、 v_n^i 、 v_u^i —— i 在东西、南北和垂直三个方向上的形变速率;

t_r ——第 r 个干涉对的时间间隔;

C_e^{ri} 、 C_n^{ri} 、 C_u^{ri} ——Los 向上相干点 i 在东西、南北和垂直方向上的投影;

D_e^{ri} 、 D_n^{ri} 、 D_u^{ri} ——方位向上相干点 i 在东西、南北和垂直方向上的投影。其值根影的

几何关系(图 4)来计算。

$$\begin{aligned} C_e^{ri} &= -\sin \theta_{inc}^i \sin(\alpha_{azi}^i - 3\pi/2) \\ C_n^{ri} &= -\sin \theta_{inc}^i \cos(\alpha_{azi}^i - 3\pi/2) \\ C_u^{ri} &= \cos \theta_{inc}^i \\ D_e^{ri} &= -\cos(\alpha_{azi}^i - 3\pi/2) \\ D_n^{ri} &= -\sin(\alpha_{azi}^i - 3\pi/2) \\ D_u^{ri} &= 0 \end{aligned}$$

式中: θ_{inc}^i 、 α_{azi}^i ——为相干点 i 的入射角和方位角。

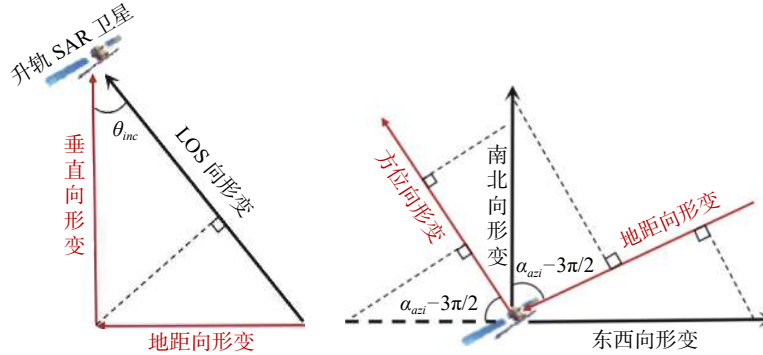


图 4 升轨 SAR 影像的几何关系 (箭头的方向为正)

Fig. 4 Geometric relation of rail SAR image (arrow direction is positive)

利用光学偏移量技术获取了 f 幅影像对, 对第 k 幅影像对的相干点 i 来说, 则有:

$$[Q_e^{ki} Q_n^{ki}]^T = t_k \cdot [v_e^i v_n^i]^T \quad (3)$$

式中: Q_e^{ki} 、 Q_n^{ki} ——相干点 i 在东西、南北方向的形变量。

基于最小二乘模型融合 SAR 干涉对观测量和光学影像对观测量求解三维地表形变:

$$L = BX + V \quad (4)$$

式中: X ——求解的三维形变速率, $X = [v_e^i v_n^i v_u^i]^T$;

L —— $2m$ 个 SAR 偏移量测量值和 $2f$ 个光学偏移量组成的观测量, $L = [Los^{1i} \cdots Los^{mi} Az^{1i} \cdots Az^{fi} Q_e^{1i} \cdots Q_e^{fi} Q_n^{1i} \cdots Q_n^{fi}]^T$;

V ——相对应的观测残差;

B ——三个方向上的观测值组成的矩阵。

$$B = \begin{bmatrix} t_1 \cdot C_e^{1i} \cdots t_m \cdot C_e^{mi} & t_1 \cdot D_e^{1i} \cdots t_m \cdot D_e^{mi} & t_1 \cdots t_f & 0 \cdots 0 \\ t_1 \cdot C_n^{1i} \cdots t_m \cdot C_n^{mi} & t_1 \cdot D_n^{1i} \cdots t_m \cdot D_n^{mi} & 0 \cdots 0 & t_1 \cdots t_f \\ t_1 \cdot C_u^{1i} \cdots t_m \cdot C_u^{mi} & t_1 \cdot D_u^{1i} \cdots t_m \cdot D_u^{mi} & 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 \end{bmatrix}^T$$

假设观测值的方差是已知的, 则利用最小二乘平差可以计算得到三维形变速率的最优估值:

$$\hat{X} = (B^T P B)^{-1} B^T P L \quad (5)$$

其中, P 为各个观测量方差组成的权阵:

$$P = \text{diag}(1/\sigma_{Los^{1i}}^2 \cdots 1/\sigma_{Los^{mi}}^2 1/\sigma_{Az^{1i}}^2 \cdots 1/\sigma_{Az^{fi}}^2 1/\sigma_{Q_e^{1i}}^2 \cdots 1/\sigma_{Q_e^{fi}}^2 1/\sigma_{Q_n^{1i}}^2 \cdots 1/\sigma_{Q_n^{fi}}^2)$$

要得到最优的三维形变速率估值, 除函数模型外, 还需要观测量的随机模型, 也就是先验方差, 就可以在平差模型中精确定权。通常观测值的方差往往很难精确获取, 所以基于方差分量估计进行权阵的验后估计。由于 SAR 偏移量的观测误差受失相干、过采样和匹配窗口的影响, 光学偏移量的观测误差受各种噪声、匹配窗口和步长等影响, 因此根据观测值所受观测误差的不同进行分组, 将 SAR 观测量的距离向和方位向各自分成一组, 光学观测量的东西向和南北向各自分为一组, 总共四组观测值。设每一组观测值为 L_i 、权重为 P_i ($i=1,2,3,4$), 基于最小二乘方法得到第一次的估值:

$$\begin{cases} \hat{X} = N^{-1} W \\ V_1 = B_1 \hat{X} - L_1 \\ V_2 = B_2 \hat{X} - L_2 \\ V_3 = B_3 \hat{X} - L_3 \\ V_4 = B_4 \hat{X} - L_4 \end{cases} \quad (6)$$

其中: $L = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ L_4]^T$, $B = [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4]^T$, $P = \text{diag}[P_1 \ P_2 \ P_3 \ P_4]^T$, $N = B^T P B = \sum_{i=1}^4 B_i^T P_i B_i = \sum_{i=1}^4 N_i$, $W = B^T P L = \sum_{i=1}^4 B_i^T P_i L_i$

假设初始权阵 P_i 为单位阵, 则方差分量和观测残差的关系:

$$\hat{\theta} = S^{-1}W_{\theta} \quad (7)$$

$$S = \begin{bmatrix} m - 2tr(N^{-1}N_1) + tr(N^{-1}N_1)^2 & tr(N^{-1}N_1N^{-1}N_2) & tr(N^{-1}N_1N^{-1}N_3) & tr(N^{-1}N_1N^{-1}N_4) \\ tr(N^{-1}N_1N^{-1}N_2) & m - 2tr(N^{-1}N_2) + tr(N^{-1}N_2)^2 & tr(N^{-1}N_2N^{-1}N_3) & tr(N^{-1}N_2N^{-1}N_4) \\ tr(N^{-1}N_1N^{-1}N_3) & tr(N^{-1}N_2N^{-1}N_3) & f - 2tr(N^{-1}N_3) + tr(N^{-1}N_3)^2 & tr(N^{-1}N_3N^{-1}N_4) \\ tr(N^{-1}N_1N^{-1}N_4) & tr(N^{-1}N_2N^{-1}N_4) & tr(N^{-1}N_3N^{-1}N_4) & f - 2tr(N^{-1}N_4) + tr(N^{-1}N_4)^2 \end{bmatrix}$$

最后计算新的权阵估计值:

$$\hat{P}_1 = P_1, \hat{P}_2 = \frac{\sigma_{01}^2}{\sigma_{02}^2 P_2^{-1}}, \hat{P}_3 = \frac{\sigma_{01}^2}{\sigma_{03}^2 P_3^{-1}}, \hat{P}_4 = \frac{\sigma_{01}^2}{\sigma_{04}^2 P_4^{-1}} \quad (8)$$

将得到的新权阵估计值代入到式 (6) 中计算最小二乘估计值 $\hat{x}$, 循环进行迭代式 (6) 到 (8), 直到

$$\hat{\sigma}_{01}^2 \approx \hat{\sigma}_{02}^2 \approx \hat{\sigma}_{03}^2 \approx \hat{\sigma}_{04}^2 \quad (9)$$

当循环迭代结束时, 此时的 $\hat{P}_1$ 、 $\hat{P}_2$ 、 $\hat{P}_3$ 、 $\hat{P}_4$ 就是利用方差分量估计所得到的权阵, 将其代入到式 (6) 中即可得到最优的三维形变速率。

3 结果与分析

3.1 冰川解算结果

3.1.1 SAR 偏移量冰川位移结果

对于覆盖研究实验区冰川的 9 景 Sentinel-1 影像, 基于小基线集的思想得到了 14 对 SAR 影像的优化组

式中: $\hat{\theta} = [\hat{\sigma}_{01}^2 \quad \hat{\sigma}_{02}^2 \quad \hat{\sigma}_{03}^2 \quad \hat{\sigma}_{04}^2]^T$ 为四组观测值的单位权中误差, $W_{\theta} = [V_1^T P_1 V_1 \quad V_2^T P_2 V_2 \quad V_3^T P_3 V_3 \quad V_4^T P_4 V_4]^T$, 并且

合(图 3), 利用 SAR 偏移量强度跟踪技术获取了目标冰川每对影像的距离向位移量(图 5)和方位向位移量(图 6)。从目标冰川的 SAR 偏移量组合对结果中可以看出, 在 2020 年, 1-3 月整体形变量较小, 4-8 月的形变量增加, 9 月份形变量减缓, 11-12 月形变量较小, 这也符合冰川季节性的变化趋势。对于图中形变值缺失的部分, 由于 SAR 影像的失相干特性, 在计算过程中掩膜了低相干区域的值。因此, 形变值缺失的区域部分可以通过与光学偏移量的融合得到形变信息的补偿。

3.1.2 光学偏移量冰川位移结果

为了获取目标冰川的光学偏移量观测值, 利用同时期的 6 景 Landsat8 影像, 计算每一影像对的太阳高度角和太阳方位角差值, 选取差值较小的影像对组合成 7 对影像用于偏移量计算。基于 COSI-Corr 平台的频率域相关算法获得初始偏移量解算结果, 冰川的南北向和东西向表面位移分布分别如图 7 和图 8 所示。同样, 由于

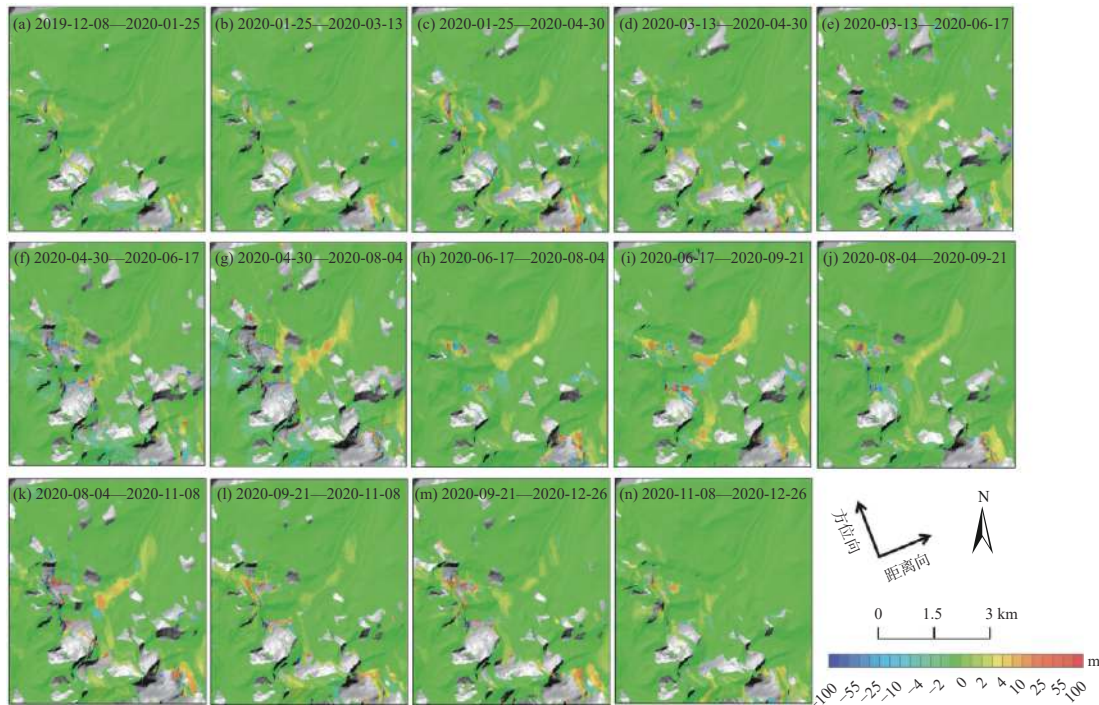


图 5 SAR 影像对之间的距离向冰川表面位移分布

Fig. 5 Distance between the SAR image pairs is displaced to the glacial surface

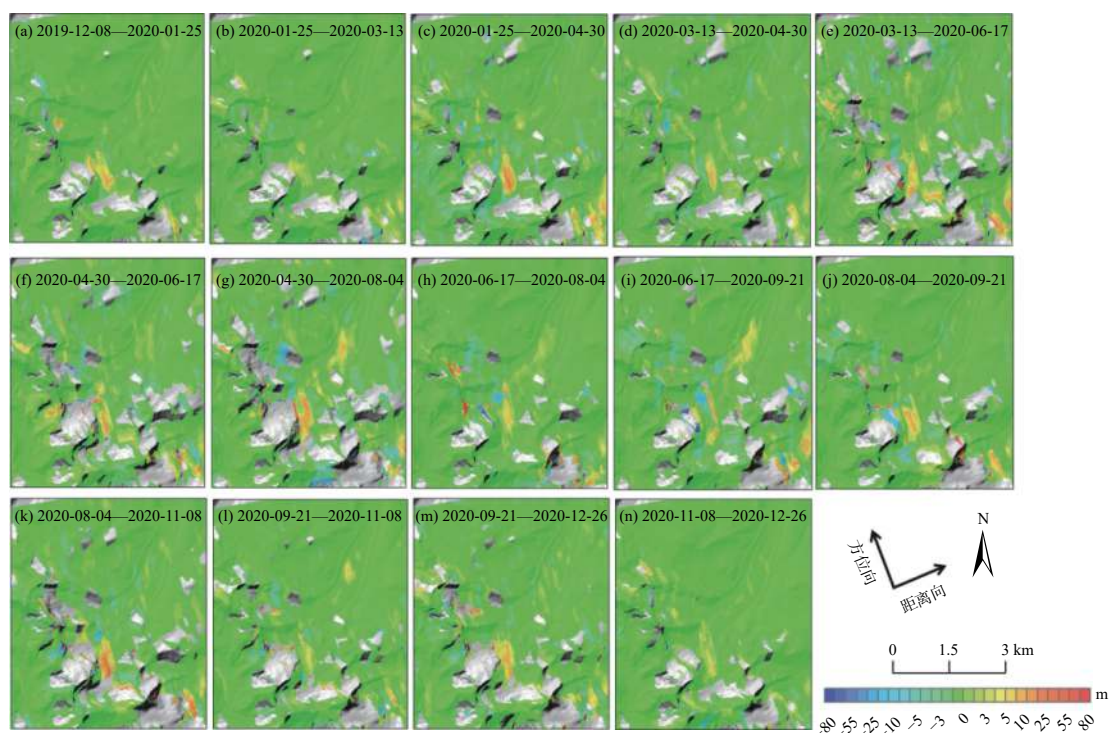


图 6 SAR 影像对之间的方位向冰川表面位移分布

Fig. 6 Azimuthal to glacial surface displacement distribution between SAR image pairs

在误差处理过程中,将 $SNR < 0.9$ 的形变值剔除而导致了局部形变值的缺失。因此,与 SAR 偏移量结果融合可以进行信息互补。

为了验证太阳高度角和太阳方位角对结果精度的影响,选取光学偏移量计算结果中东西向和南北向稳定区域(见图 1(b) 的红色框 Roi1 和 Roi2)的标准差进行精

度评定。通过统计发现标准差与太阳高度角差值和太阳方位角差值之间的相互关系如图 9 所示,当太阳高度角差值和太阳方位角差值较小时,其标准差较低;当太阳高度角差值和太阳方位角差值较大时,其标准差较高。这也说明,在时间跨度较小的条件下,选择太阳高度角差值和太阳方位角差值较小的光学影像对能够提

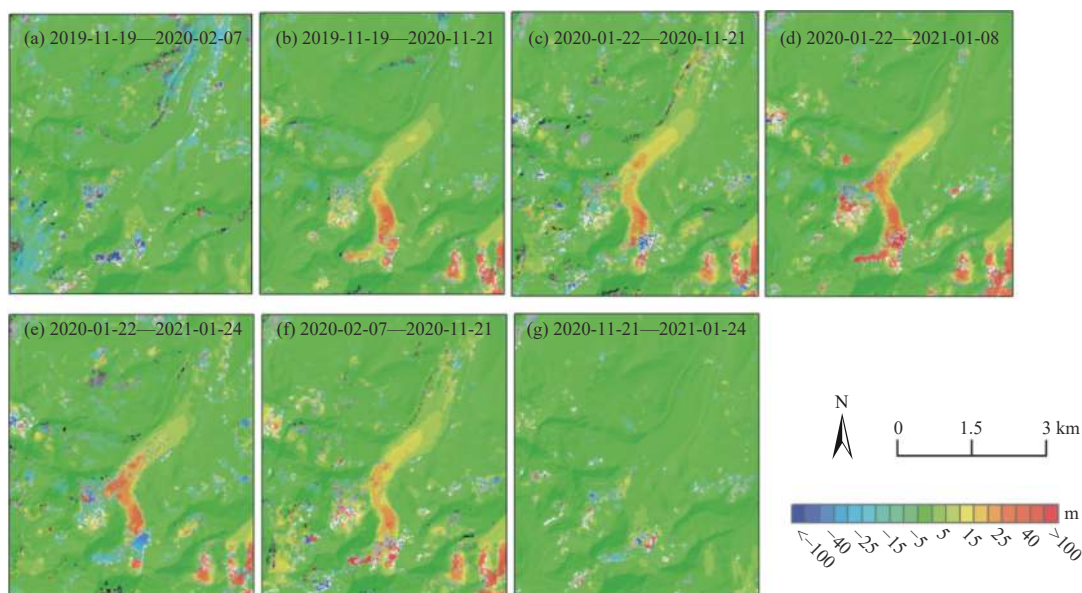


图 7 Landsat8 影像对之间的南北向冰川表面位移分布

Fig. 7 Distribution of north-south glacial surface displacement between Landsat8 image pairs

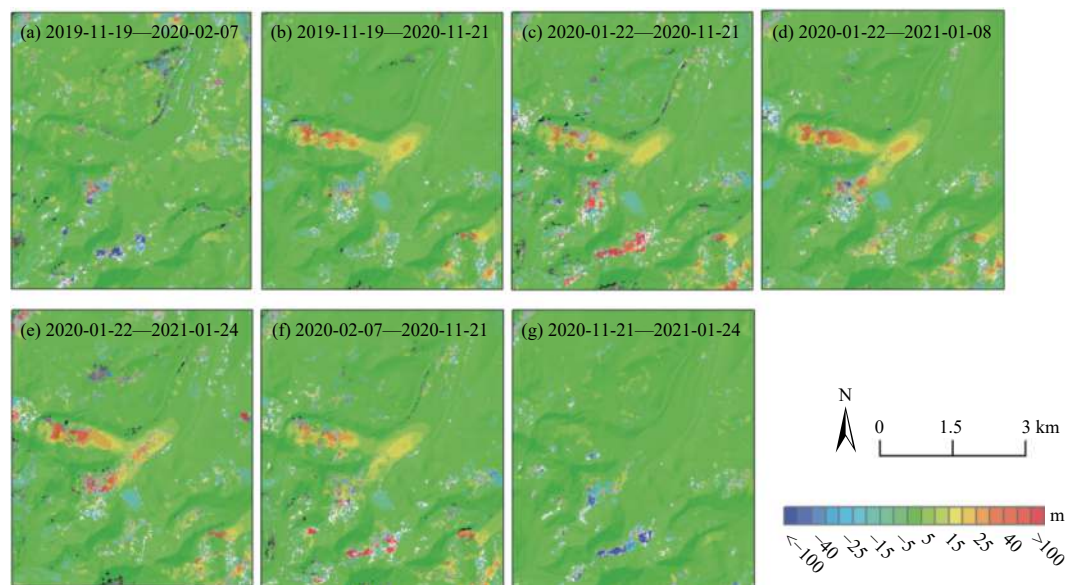


图 8 Landsat8 影像对之间的东西向冰川表面位移分布

Fig. 8 Distribution of east-west glacial surface displacement between Landsat8 image pairs

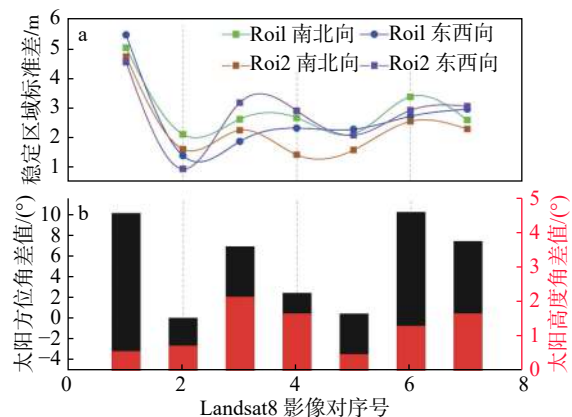


图 9 太阳高度角差值和太阳方位角差值与稳定区域标准差的关系

Fig. 9 Relationship between the solar height angular difference and the solar azimuth difference and the standard deviation of the stable region

高偏移量估算结果的精度。

3.1.3 SAR 和光学偏移量联合解算冰川位移结果

按照文中介绍的方差分量估计联合解算模型, 将 SAR 与 Landsat8 两种数据源提取结果进行融合, 得到了冰川同期的三维形变速率(图 10)。结果显示, 该冰川在东西向的最大形变速率为 21 cm/d, 南北向的最大形变速率为 68 cm/d, 垂直向的最大形变速率为 17 cm/d。总体上呈现出该冰川上游的运动速度快, 中游的速度比较慢, 下游的速度逐渐减小。对于冰川上游三个分支的冰川流速变化较大且不均匀, 并且南北向的最大流速达到 68 cm/d, 主要原因有: 地形起伏变化大, 下坡运动增大了冰川的流速; 上游为冰川消融区域, 在监测结果中存在特征点消失导致的局部信息不连续。

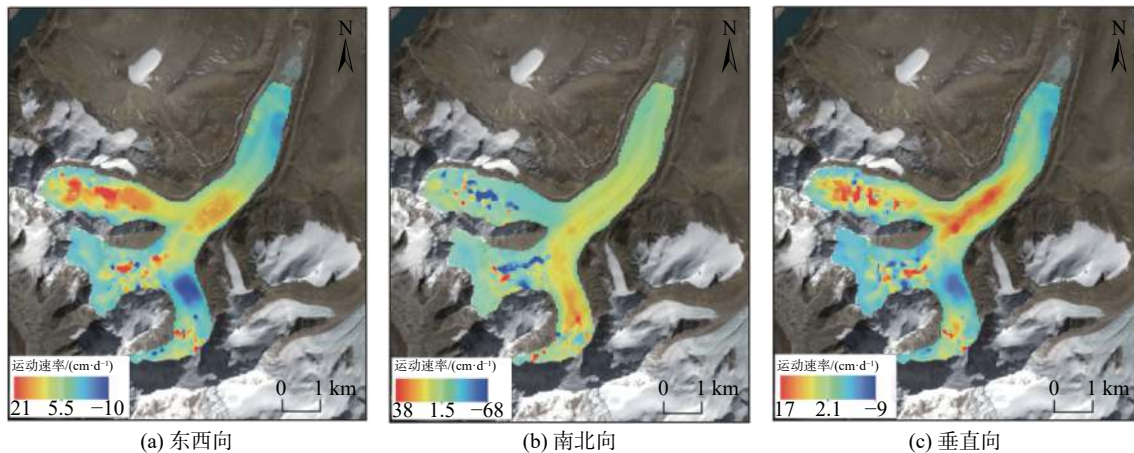


图 10 联合解算的冰川表面运动速率分布

Fig. 10 Jointly solved distribution of glacier surface motion rates

为了更好地分析目标冰川的表面流速,将解算后的结果进行东西向、南北向和垂直向上的流速合成(图 11)。总体上该冰川从西南方向往东北方向流动,从上游开始消融到中游汇合,与冰川的实际运动方向具有一致性,其中流速较大的地区包括上游冰川的消融区域,坡度较大的区域和三条上游冰川支流汇合的区域。

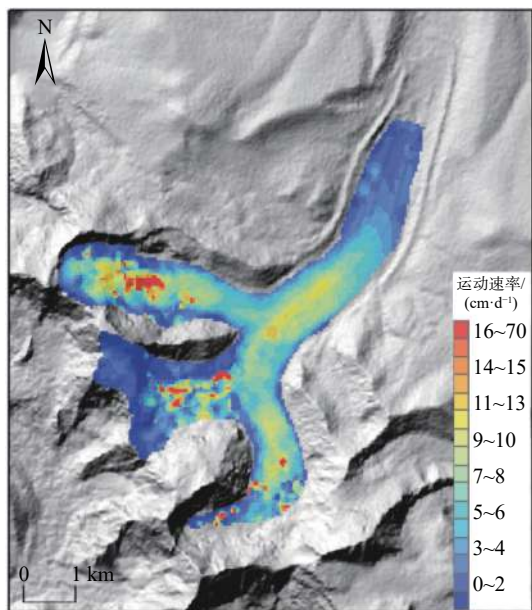


图 11 合成后的冰川表面运动速率分布

Fig. 11 Distribution of glacial surface motion rates after synthesis

3.2 结果对比

为了检验联合模型解算的冰川位移及其运动特征的可靠性,对联合解算的南北向和东西向的冰川流速与同一时期光学影像对的冰川流速进行对比分析。这里

选择光学影像对的原因是,光学偏移量的结果与联合解算后的南北和东西向为一致的方向,具有对比性,而 SAR 偏移量的结果为距离向和方位向,无可对比性。因此,选择 2019 年 11 月 19 日与 2021 年 1 月 24 日的 Landsat8 影像对,从表 2 可知该影像对的太阳高度角差值和太阳方位角差值较小,其差值分别为 2.42° 和 7.4° ,结合图 9 分析得到的结果具有较高的精度。在进行误差消除处理和去除低质量点后,对影像对进行了偏移量估计,得到该冰川南北向和东西向的表面运动速率。如图 12 所示,从整体上看,冰川在南北向和东西向的运动速率达到了 60 cm/d ,并且运动速率较大的区域为冰川上游消融区和中游支流汇集区,与联合结算后的结果与图 10(a)、图 10(b) 较为符合。由于光学影像偏移量技术不能获取垂直向位移,且没有其他监测数据可以被利用,因此我们无法对冰川的垂直向位移进行对比。

为了进一步分析两种数据监测结果的一致性,按冰川的主流方向在上游和中游提取了这两种监测结果分别在南北向和东西向上冰川剖面 MM' 、 NN' 、 PP' (图 1) 的流速剖面图(图 13),分别对这三条剖面进行分析:

(1) MM' 剖面: 在南北向上,整体趋势具有一致性,同期光学影像对出现了因低质量点剔除的流速值见图 13(a) 绿色框,但在数据融合后出现了较大的流速变化可达到 60 cm/d ,根据地形因素分析,流速增大的位置对应于较陡的斜坡,受地形的影响较大;在东西向上,整体的变化趋势较为一致,同样在融合后变化较大的地方见图 13(b) 绿色框,也是对应的斜坡位置。所以,融合后冰川流速的运动特征与地形起伏的变化相关。由于偏

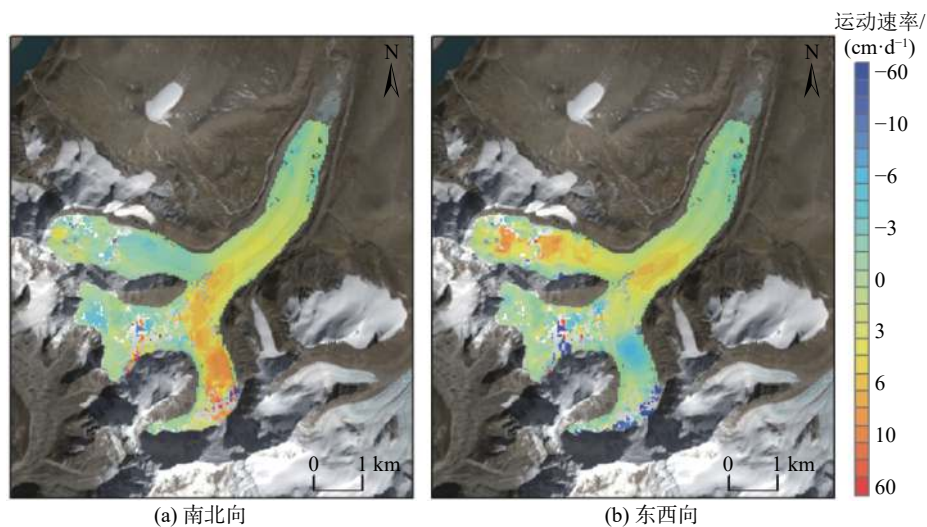


图 12 2019 年 11 月—2021 年 1 月光学影像对间的冰川运动速率分布

Fig. 12 Glacial motion rate distribution between optical image pairs from November 2019 to January 2021

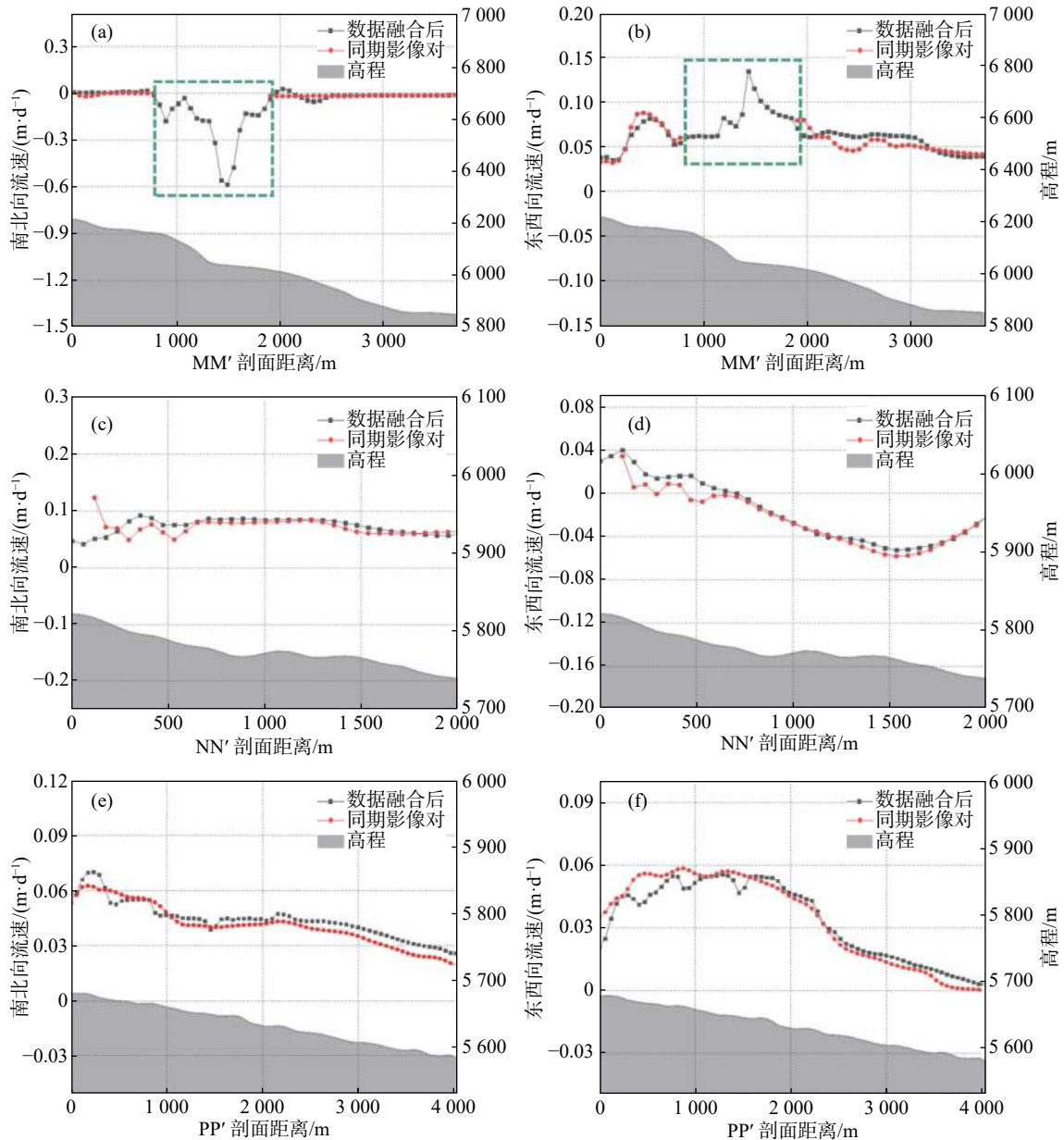


图 13 冰川剖面 MM'、NN'、PP' 在南北向和东西向上的流速和高程图

Fig. 13 Flow velocity and elevation of MM', NN', PP'

注: (a)(b) 分别为同期影像对与融合后 MM' 剖线的南北向和东西向流速; (c)(d) 分别为同期影像对与融合后 NN' 剖线的南北向和东西向流速; (e)(f) 分别为同期影像对与融合后 PP' 剖线的南北向和东西向流速。

移量估算易受冰川表面特性变化的影响, 对于同期影像对低质量的缺失值, 通过融合后的数据得到了补偿, 从图 13 中可以看出, 融合后其对应的流速也较大。

(2) NN' 剖面: 从图 13(c) 和图 13(d) 可以看出, 融合后与同期影像对的结果整体趋势上的变化是一致的, 在南北向上, 流速变化较为平缓; 在东西向上, 在坡度较陡的位置冰川流速较大。根据地形因素分析, 冰川的运动与坡度的变化有关。

(3) PP' 剖面: 在冰川的中游区域, 从图 13(e) 和图 13

(f) 可以看出, 总体趋势具有一致性, 并且地势起伏变化小, 同期影像对与融合后的结果没有出现较大的流速变化差异, 微小的差异是因为研究方法的不同。对于图 13(f) 中东西向凸起的流速变化, 是因为冰川的三条支流汇集增大了流速的变化。

3.3 精度分析

由于缺乏实测数据, 采用先验信息辅助进行精度分析是常用的方法, 比如利用稳定区域的标准差。由于光学偏移量的结果与联合解算后的南北和东西方向一致,

具有可对比性。因此,对于两种不同方法的冰川流速监测结果,我们统计了融合后与同期影像对在稳定区域见图 1(b) 的红色框 Roi1 和 Roi2 的标准差(表 4)。在南北方向上, Landsat8 影像对在稳定区域的统计结果分别为 1.0 cm/d 和 0.77 cm/d,而融合解算结果在稳定区域的标准差分别为 0.56 cm/d 和 0.48 cm/d,相比于同期光学影像对结果提升了 44% 和 38%;在东西方向上, Landsat8 影像对在稳定区域的统计结果分别为 0.99 cm/d 和 0.84 cm/d,而融合解算结果在稳定区域的标准差分别为 0.91 cm/d 和 0.6 cm/d,相比于同期影像对结果提升了 8% 和 29%。总体而言,融合后冰川位移监测结果的不确定性小于同期光学影像对的监测结果。

表 4 融合后和同期影像对稳定区域的标准差统计
Table 4 Standard deviation statistics for stable regions after fusion and concurrent images

统计值	融合后结果/(cm·d ⁻¹)		Landsat8影像对结果/(cm·d ⁻¹)	
	南北向	东西向	南北向	东西向
Roi1	0.56	0.91	1.0	0.99
Roi2	0.48	0.60	0.77	0.84

4 结论

多维、高精度的冰川运动变化监测能够为冰川灾害的预警和气候分析提供理论依据。因此,文中基于强度信息的 SAR 偏移量和基于亚像素频率域相关性匹配的光学偏移量方法,结合方差分量估计,解算了覆盖研究区冰川的三维流速,分析了冰川在不同方向的形变特征,并与同期光学影像对的计算结果进行对比分析,最后统计了稳定区域的标准差进行精度分析。

(1)不同平台影像偏移量融合可改善冰川位移监测的时间分辨率,提供更多的冰川位移细节信息。

(2)实验区冰川在融合后东西向的最大形变速率为 21 cm/d,南北向的最大形变速率为 68 cm/d,垂直向的最大形变速率为 17 cm/d,其中流速较大的地区包括上游冰川的消融区域,坡度较大的区域和三条上游冰川支流汇合的区域。

(3)融合后的监测结果与同期光学影像对在南北向和东西向上具有较好的一致性,并且山地冰川的运动与坡度有关,陡坡处流速增大。

(4)融合后冰川位移监测结果的不确定性小于同期光学影像对的监测结果,在南北方向和东西方向上监测结果精度分别提升了 38% 和 8%。

总体来说,同期单影像对解算方法虽然计算量小,但时间分辨率低,并且结果为二维形变。而不同平台影

像的融合解算具有获取冰川的多维度形变信息,可进一步改善冰川监测的时间分辨率和获得更多形变特征的优势,但对于垂直向的研究及其精度分析需要进一步探索,因为垂直向的位移包含了冰川厚度的变化和沿斜坡的垂直向运动。基于不同平台解算多维度的形变信息研究可能是未来的发展趋势,本文可为利用不同平台的数据联合监测山地冰川的多维和高精度变化提供参考和技术支持。

参考文献 (References) :

[1] 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): 1377-1390. [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): 1377-1390. (in Chinese with English abstract)]

[2] 童龙云,张继,孔应德. 西藏定日朋曲流域达仓沟冰湖溃决泥石流特征 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 34-39. [TONG Longyun, ZHANG Ji, KONG Yingde. Characteristics of the dacanggou debris flow induced by breakout of glacier-lake in the Pengqu basin Diru County of Tibet [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2019, 30(6): 34-39. (in Chinese with English abstract)]

[3] 王伟财. 藏东南伯舒拉岭地区冰湖变化及危险性与影响分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013. [WANG Weicai. Variation of glacial lakes and assessment of GLOF hazards in the Boshula mountain range, southeast of Tibetan Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese with English abstract)]

[4] 刘春玲,童立强,祁生文,等. 喜马拉雅山地区冰川湖溃决灾害隐患遥感调查及影响因素分析 [J]. 国土资源遥感, 2016, 28(3): 110-115. [LIU Chunling, TONG Liqiang, QI Shengwen, et al. Remote sensing investigation and influence factor analysis of glacier lake outburst potential in the Himalayas [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2016, 28(3): 110-115. (in Chinese with English abstract)]

[5] 刘建康,张佳佳,高波,等. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述 [J]. 冰川冻土, 2019, 41(6): 1335-1347. [LIU Jiankang, ZHANG Jiajia, GAO Bo, et al. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(6): 1335-1347. (in Chinese with English abstract)]

[6] 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.

[7] RIGNOT E, MOUGINOT J, SCHEUCHL B. Ice flow of the

- Antarctic ice sheet [J]. *Science*, 2011, 333(6048): 1427 – 1430.
- [8] KUMAR V, VENKATARAMAN G, HØGDA K A, et al. Estimation and validation of glacier surface motion in the northwestern Himalayas using high-resolution SAR intensity tracking [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(15): 5518 – 5529.
- [9] 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.
- [10] SCHERLER D, LEPRINCE S, STRECKER M R. Glacier-surface velocities in alpine terrain from optical satellite imagery—Accuracy improvement and quality assessment [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(10): 3806 – 3819.
- [11] DEHECQ A, GOURMELEN N, TROUVE E. Deriving large-scale glacier velocities from a complete satellite archive: Application to the Pamir-Karakoram-Himalaya [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 55 – 66.
- [12] BERTHIER E, VADON H, BARATOUX D, et al. Surface motion of mountain glaciers derived from satellite optical imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(1): 14 – 28.
- [13] DEHECQ A, GOURMELEN N, TROUVE E. Deriving large-scale glacier velocities from a complete satellite archive: Application to the Pamir-Karakoram-Himalaya [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 55 – 66.
- [14] HU J, LI Z W, DING X L, et al. 3D coseismic Displacement of 2010 Darfield, New Zealand earthquake estimated from multi-aperture InSAR and D-InSAR measurements [J]. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(11): 1029 – 1041.
- [15] GRAY L. Using multiple RADARSAT InSAR pairs to estimate a full three-dimensional solution for glacial ice movement [J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(5).
- [16] MINCHEW B M, SIMONS M, RIEL B, et al. Tidally induced variations in vertical and horizontal motion on Rutford Ice Stream, West Antarctica, inferred from remotely sensed observations [J]. *Journal of Geophysical Research:Earth Surface*, 2017, 122(1): 167 – 190.
- [17] HU J, LI Z W, DING X L, et al. Two-dimensional co-seismic surface displacements field of the Chi-Chi earthquake inferred from SAR image matching [J]. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2008, 8(10): 6484 – 6495.
- [18] 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.
- [19] 敖萌,张路,廖明生,等.基于方差分量估计的多源InSAR数据自适应融合形变测量[J].*地球物理学报*, 2020, 63(8): 2901 – 2911. [AO Meng, ZHANG Lu, LIAO Mingsheng, et al. Deformation monitoring with adaptive integration of multi-source InSAR data based on variance component estimation [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2020, 63(8): 2901 – 2911. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李海,杨成生,惠文华,等.基于遥感技术的高山极高山区冰川冰湖变化动态监测:以西藏藏南希夏邦玛峰地区为例[J].*中国地质灾害与防治学报*, 2021, 32(5): 10 – 17. [LI Hai, YANG Chengsheng, HUI Wenhua, et al. Changes of glaciers and glacier lakes in alpine and extremely alpine regions using remote sensing technology: a case study in the Shisha Pangma area of southern Tibet [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2021, 32(5): 10 – 17. (in Chinese with English abstract)]
- [21] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2375 – 2383.
- [22] 杨丽叶,赵超英,杨成生. PO-SBAS技术用于错朗玛冰川三维时序运动特征分析[J].*地球物理学进展*, 2020, 35(6): 2116 – 2123. [YANG Liye, ZHAO Chaoying, YANG Chengsheng. Three-dimensional time series movement analysis of the Cuolangma glacier with PO-SBAS technique [J]. *Progress in Geophysics*, 2020, 35(6): 2116 – 2123. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 贺礼家,冯光财,冯志雄,等.哨兵-2号光学影像地表形变监测:以2016年MW7.8新西兰凯库拉地震为例[J].*测绘学报*, 2019, 48(3): 339 – 351. [HE Lijia, FENG Guangcai, FENG Zhixiong, et al. Coseismic displacements of 2016 MW7.8 Kaikoura, New Zealand earthquake, using Sentinel-2 optical images [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 339 – 351. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 柳林,宋豪峰,杜亚男,等.联合哨兵2号和Landsat 8估计白格滑坡时序偏移量[J].*武汉大学学报·信息科学版*, 2021, 46(10): 1461 – 1470. [LIU Lin, SONG Haofeng, DU Yanan, et al. Time-series offset tracking of the Baige landslide based on Sentinel-2 and Landsat8 [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(10): 1461 – 1470. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 胡俊.基于现代测量平差的InSAR三维形变估计理论与方法[D].长沙:中南大学,2013. [HU Jun. Theory and method of estimating three-dimensional displacement with InSAR based on the modern surveying adjustment[D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese with English abstract)]