引文格式:刘泽伟,杨成生,李涛,等.联合Lutan-1和Sentinel-1A SAR偏移量追踪技术的错朗玛冰川位移监测[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(3):503-518.DOI:10.13203/j.whugis20240076

Citation:LIU Zewei,YANG Chengsheng,LI Tao,et al.Joint Monitoring Glacier Displacement of the Cuolangma Glacier Based on Lutan-1 and Sentinel-1A Imageries with SAR Offset-Tracking[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(3):503-518.DOI:10.13203/j.whugis20240076

联合Lutan-1和Sentinel-1A SAR偏移量追踪技术的错朗玛冰川位移监测

刘泽伟[1] 杨成生[1] 李 涛[1,2] 魏春蕊[1] 周临轩[1]
吕 森[1,2] 朱赛楠[3]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 自然资源部国土卫星遥感应用中心,北京,100048
3 中国地质环境监测院,北京,100081

摘 要:全球气候变暖导致冰川积雪加速消融,造成一系列冰川泥石流、冰湖溃决等地质灾害。中国自主研发的陆地探测一号(Lutan-1,LT-1)卫星在冰川位移监测中的应用潜力尚缺乏系统评估。选取中国西藏自治区错朗玛冰川为实验对象,分别采用2022年哨兵1号A星(Sentinel-1A)影像和LT-1影像,对冰川位移进行了偏移量监测技术的对比研究,并利用Helmert方差分量估计方法联合两种影像解算冰川三维形变速率。研究结果表明,中值窗口偏移量解算方法和均值窗口偏移量解算方法均能提高偏移量解算的精度,且LT-1在偏移量解算精度和空间分辨率方面均优于Sentinel-1A。实验结果显示,错朗玛冰川在2022年方位向和视线向最大累积形变量分别为21.45 m和-7.61 m。联合解算的三维形变速率结果表明,冰川在2022-04—2022-09期间,东西向、南北向和垂直向最大形变速率分别为-0.125 m/d、0.147 m/d和-0.134 m/d。冰川顶部位移主要向东和北方向,呈现逐渐退缩趋势,冰川中部位移主要向西和北方向,冰川物质逐渐积累。冰川下部位移主要向东和北方向,呈现逐渐退缩的趋势。

关键词:LT-1;Sentinel-1A;SAR偏移量追踪技术;冰川监测;Helmert方差分量估计

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-03-08

DOI:10.13203/j.whugis20240076 **文章编号**:1671-8860(2026)03-0503-16

Joint Monitoring Glacier Displacement of the Cuolangma Glacier Based on Lutan-1 and Sentinel-1A Imageries with SAR Offset-Tracking

LIU Zewei[1] *YANG Chengsheng*[1] *LI Tao*[1,2] *WEI Chunrui*[1] *ZHOU Linxuan*[1]
LÜ Sen[1,2] *ZHU Sainan*[3]

1 School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China
3 China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China

Abstract: **Objectives**: Against the backdrop of global climate warming accelerating the melting of glaciers and snow, which in turn triggers geological disasters such as glacier debris flows and glacial lake outburst floods, monitoring glacier displacement using China's independently developed Lutan-1 (LT-1) satellite helps fill the gap in the currently limited research on this topic. **Methods**: We selected the Cuolangma Glacier in Tibet, China, as the experimental subject and conducted a comparative study of glacier displacement using offset tracking techniques with Sentinel-1A imagery and LT-1 imagery from 2022. Additionally, the Helmert variance component estimation method was applied to jointly process both datasets to calculate the glacier's three-dimensional deformation rate. **Results**: Experimental results indicate that both the median

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3000404);国家自然科学基金(42174032);中央高校基本科研业务费(30102262206)。

第一作者:刘泽伟,硕士生,主要从事InSAR及偏移量技术在地质灾害中的应用研究。2024026010@chd.edu.cn

通信作者:杨成生,教授。yangchengsheng@chd.edu.cn

window and mean window offset tracking methods improve the accuracy of offset calculations. It also shows that LT-1 provides higher offset calculation accuracy and spatial resolution compared to Sentinel-1A. Experimental results further reveal that the maximum cumulative displacements of the Cuolangma Glacier in 2022 along the azimuth and line of sight (LOS) directions a 21.45 m and −7.61 m, respectively. The jointly processed three-dimensional deformation rate results show that, from April to September 2022, the maximum deformation rates of the glacier in the east-west, north-south, and vertical directions were −0.125 m/d, 0.147 m/d, and −0.134 m/d, respectively. The displacement of the glacier's upper part primarily occurred towards the east and north, showing a gradual retreat trend. The displacement in the middle part primarily occurred towards the west and north, with glacier material gradually accumulating, and the displacement in the lower part primarily occurred towards the east and north, also showing a gradual retreat trend. **Conclusions**: The LT-1 satellite data from China, using offset tracking technology, can effectively monitor glacier movement and shows superior performance compared to Sentinel-1A. The joint processing method provides a valuable reference for three-dimensional glacier monitoring in the high-altitude regions of Tibet.

Key words: Lutan-1; Sentinel-1A; SAR offset-tracking technique; glacier monitoring; Helmert variance component estimation

冰川是一种重要的淡水资源,随着全球气候变暖,全球大部分的冰川都处于退缩和消融状态,造成了海平面的上升和淡水资源的匮乏[1]。中国的喜马拉雅山脉中部地区地形起伏较大,包含较多冰川、冰湖,也是许多河流的发源地。随着冰川消融加速,冰湖河流有所扩张,导致了一系列的突发性冰川泥石流、冰湖溃决洪水、滑坡等地质灾害的发生[2-6]。对中国喜马拉雅山脉中部地区的冰川运动速度的监测可为冰川动力学和物质平衡研究提供重要参考,同时也可为区域气候变化以及自然灾害预警提供重要依据[7]。传统的地面观测技术对冰川监测存在现场布设困难、成本高等问题,而卫星遥感技术则具有监测范围广、效率高、长时序监测等优点。光学卫星遥感技术易受到云雨、昼夜等观测条件的影响[8-9],合成孔径干涉雷达(interferometric synthetic aperture radar,InSAR)卫星遥感技术具有全天时、全天候、高分辨率的优点,能够有效对冰川形变进行监测[10-12]。

利用差分InSAR(differential InSAR,D-InSAR)技术监测冰川大量级形变时,往往会因为形变量级超过InSAR技术的最大可监测形变梯度,导致影像失相干而无法获取地表有效的位移信息[13]。合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)偏移量追踪技术是通过匹配两幅SAR影像中同名点像素开展位移监测的一种技术,其不受失相干现象的影响,能够稳定获取冰川的形变信息,且精度能够达到亚像元级别。STROZZI等[14]在2002年利用欧洲遥感卫星数据对摩洛哥冰川进行了监测,证实了SAR偏移量追踪技术能够弥补D-InSAR技术对大量级地表形变监测的失相干问题,之后许多学者将SAR偏移量追踪技术应用于冰川位移监测[15-19]。CASU等[20]结合小基线集(small baseline subset,SBAS)技术的思想,利用奇异值分解法(singular value decomposition,SVD)对偏移量追踪结果进行时序计算。杨丽叶等[21]利用该方法对Sentinel-1A数据进行处理,获取了错朗玛冰川2017年的运动时序结果。SAR偏移量追踪技术能够同时获取卫星方位向和视线(line of sight,LOS)向的二维偏移量。方位向偏移量反映了东西方向和南北方向的地表水平运动,LOS向偏移量反映了水平向与垂直向的地表运动,结合SAR升降轨数据可获取地表的三维形变信息。SAMSONOV等[22]利用该方法使用哨兵1号A星(Sentinel-1A)升降轨数据获取了美国阿拉斯加东南部冰川的三维时序运动监测,并取得较好的结果。也有学者提出,通过融合不同源数据的InSAR技术获取地表三维形变[23],但目前针对不同源数据融合用于地表形变监测的研究仍较少。

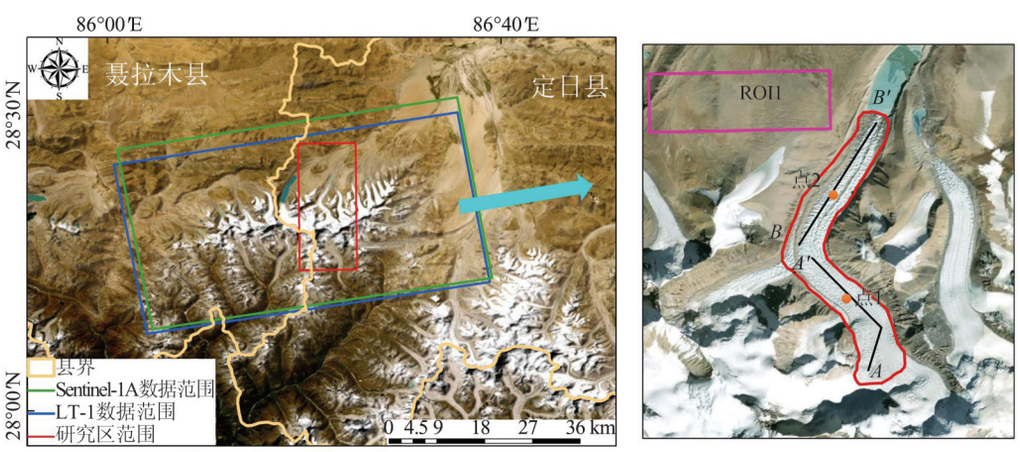
利用SAR偏移量追踪技术进行地表位移监测精度受SAR影像分辨率影响较大,影像分辨率会直接影响偏移量结果的误差大小。中国在2022年发射的陆地探测一号(Lutan-1,LT-1)卫星具有全天时、全天候、多极化的优点,搭载先进的L波段多极化多通道SAR载荷,具备多种成像模式,最高空间分辨率为3 m[24],有助于提升SAR影像偏移量解算精度。然而,具有中国自主

知识产权的 LT-1 SAR 影像的实际应用效果，及其与国外成熟 SAR 卫星系统之间是否存在精度与稳定性差异，目前相关研究报道较为有限。为此，本文以中国喜马拉雅山脉中段地区的错郎玛冰川为例，选用 LT-1 升轨数据和 Sentinel-1A 升轨数据，利用不同窗口以及取值策略开展了冰川位移偏移量结果的对比研究，并利用 SVD 分解法和 Helmert 方差分量估计[2]，联合两类 SAR 数据偏移量结果获取了错朗玛冰川的三维形变速率。

1　研究区域及数据

1.1　研究区域概况

错朗玛冰川位于中国西藏自治区日喀则市定日县境内，属于喜马拉雅山脉中段地区，地理位置为 86°20′E 至 86°40′E，28°10′N 至 28°30′N（图 1）。该区域夏季主要受西南季风控制，冬季则受西风控制[4]，属于典型的高原山地气候，常年冰雪覆盖，气温极低，平均温度为 5 ℃。夏季降水相对充沛且较为集中，冬季降水较少且气候干冷，平均降水量为 390 mm。错朗玛冰川地形起伏较大，最高海拔高达 6 500 m，最低海拔为 550 m。该冰川为南北走向，平均坡度为 9.9°，总面积为 7.8 km^2，冰川前缘横向裂隙发育，冰舌坡度为 16.7°[21]。自 20 世纪 80 年代以来，随着区域气温持续上升，错朗玛冰川冰坝高度逐渐降低，且因地表复杂，导致下游冰湖河流扩张，是开展冰川监测的典型实验区。



注：粉色矩形框内为非冰川的稳定区域，点 1 和点 2 为选取的时序特征点，AA' 和 BB' 为剖线。

图 1　研究区域位置示意图

Fig. 1　Location Map of the Study Area

1.2　数据概况

本研究收集到的 6 景 LT-1 的 L 波段升轨数据时间覆盖为 2022-04—2022-09，获取了 2022 年 9 景 Sentinel-1A 的 C 波段升轨数据。LT-1 升轨数据方位向和距离向分辨率均为 3 m。Sentinel-1A 升轨数据方位向和距离向分辨率分别为 20 m 和 5 m。同时获取美国国家航空航天局发布的 30 m 空间分辨率的航天飞机雷达地形测绘任务数字高程模型（digital elevation model，DEM）数据，用于辅助 SAR 影像配准和地理编码。

2　研究方法

LT-1 和 Sentinel-1A 数据影像对组合情况可分别见表 1 和表 2。为了对比 LT-1 影像与 Sentinel-1A 影像在冰川位移监测中的应用效果，实验中首先采用相同的数据处理参数分别对 LT-1 和 Sentinel-1A 开展 SAR 偏移量解算，并对比分析其监测结果。然后，利用 SVD 分解法解算并对比两种数据获取的 2022 年错朗玛冰川方位向和 LOS 向的时序偏移量结果。最后，利用 Helmert 方差分量估计对两种数据偏移量解算结果进行联合解算，获取错朗玛冰川 2022-04—2022-09 的三维运动特征，具体技术流程如图 2 所示。

2.1　时序 SAR 偏移量追踪技术

SAR 偏移量追踪技术分为基于强度追踪法和基于相位匹配法两类。基于强度跟踪法的偏移量解算受地表失相干影响较小，因此在冰川等运动量级较大的地表形变监测中具有更好的适用性[25-26]。强度追踪法的基本原理是利用主影像与辅影像之间的归一化互相关系数（normalized cross correlation，NCC）进行匹配（图 3），在给定搜索窗口内计算相似性测度，并通过确定最大相似性测度的位置来获取主辅影像之间的偏移

表1 LT-1数据影像对组合

Table 1 Combination of LT-1 Data Interference Pairs

时段	主影像日期	辅影像日期	时间基线/d	空间基线/m
1	2022-04-01	2022-05-11	40	131.614
2	2022-04-10	2022-05-11	31	2.425
3	2022-04-10	2022-05-20	40	−12.597
4	2022-04-10	2022-09-25	168	−64.040
5	2022-04-24	2022-05-11	17	−51.414
6	2022-05-11	2022-05-20	9	−15.023
7	2022-05-11	2022-09-25	137	−66.487
8	2022-05-20	2022-09-25	128	−51.414

表2 Sentinel-1A数据影像对组合

Table 2 Combination of Sentinel-1A Data Interference Pairs

时段	主影像日期	辅影像日期	时间基线/d	空间基线/m
1	2021-12-21	2022-03-27	96	−102.415
2	2021-12-21	2022-05-04	144	−114.251
3	2022-02-07	2022-05-14	96	−53.246
4	2022-02-07	2022-07-01	144	12.638
5	2022-03-27	2022-07-01	96	54.048
6	2022-03-27	2022-08-18	144	−11.932
7	2022-05-14	2022-08-18	96	−0.095
8	2022-05-14	2022-10-05	144	102.951
9	2022-07-01	2022-10-05	96	37.067
10	2022-07-01	2022-11-22	144	−67.158
11	2022-08-18	2022-11-22	96	−1.179
12	2022-08-18	2023-01-09	144	146.633
13	2022-10-05	2023-01-09	96	43.587

量[27]。NCC的计算公式为:

$$N_{\mathrm{NCC}}=\frac{\left\|\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(h_{i,j}-u_h\right)\left(k_{i,j}-u_k\right)\right\|}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(h_{i,j}-u_h\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\left(k_{i,j}-u_k\right)^2}} \tag{1}$$

式中,$m\times n$为窗口大小;(i,j)为窗口内像素的坐标;$h_{i,j}$与$k_{i,j}$分别为(i,j)处主影像与辅影像的幅度值;u_h与u_k分别表示窗口内主影像和辅影像的平均幅度值,计算主辅影像N_{NCC}最大值进行匹配,即可求解亚像素级别偏移量。

窗口大小作为求解偏移量过程中的一个重要参数,其对偏移值估计结果有明显的影响。本文分别利用不同影像窗口尺寸(32×32至256×256)计算主辅影像的偏移量,获得若干个偏移量结果$of_1,of_2,\cdots,of_n$,对每一个像素值$of_1(i,j)$、$of_2(i,j)$、$\cdots$、$of_n(i,j)$从小到大排序,并取中位数[10](简称为中值法)和取平均数(简称为均值法)作为对应像素的偏移量结果,该偏移量结果可以表示为:

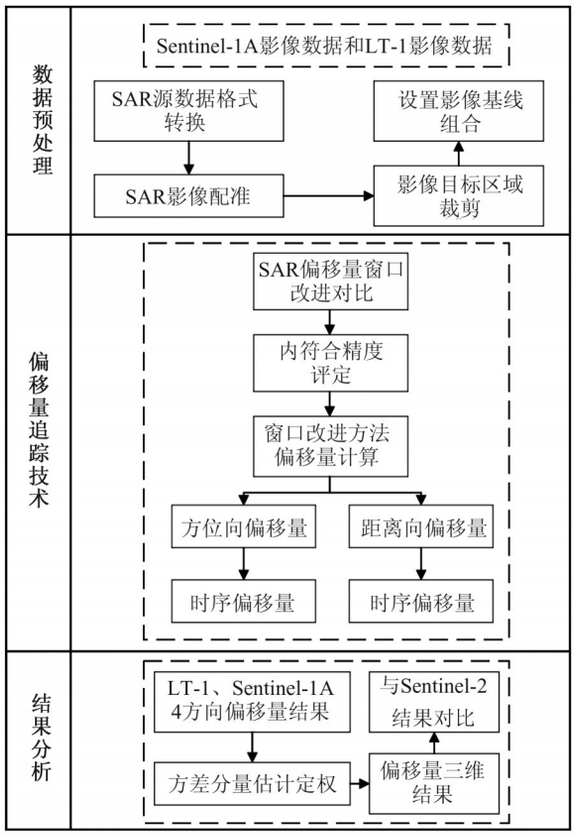
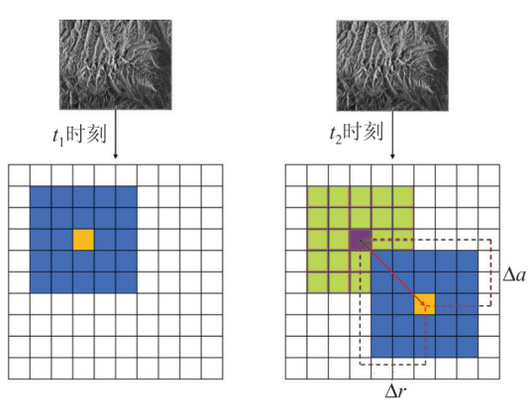


图2 研究路线图

Fig. 2 Technical Flowchart



注:在SAR图像中,Δa表示方位向像素偏移,Δr表示距离向像素偏移。

图3 SAR偏移量原理示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of SAR Offset-Tracking

$$D_{\mathrm{offset}}=D_{\mathrm{motion}}+D_{\mathrm{top}}+D_{\mathrm{orb}}+D_{\mathrm{ion}} \tag{2}$$

式中,D_{motion}为除地表形变;D_{top}为地形引起的偏移量;D_{orb}为轨道位置差异;D_{ion}为电离层误差。D_{top}在垂直基线较短的影像对中很小[15],由于本文采用的影像对空间基线最大不超过150 m,因此D_{top}可以忽略。D_{orb}可以利用多项式拟合去除[3],D_{ion}只对高纬度地区影响较大,错朗玛冰川位于中低纬度地区,因此D_{ion}也可以忽略。

SBAS技术通过对多主影像的小基线组合进

行联合求解,不仅能削弱多种误差的影响,还可获取可靠时序形变结果[28]。利用小基线组合获取偏移量观测值,求解各相邻观测时段的平均地表位移速率,相邻时段内的平均位移速率 v 定义为:

$$\boldsymbol{v}=\left[v_2,\ v_3,\ \cdots,\ v_N\right]^{\mathrm{T}}=\left[\frac{d_2-d_1}{t_2-t_1},\frac{d_3-d_2}{t_3-t_2},\ \cdots,\frac{d_N-d_{N-1}}{t_N-t_{N-1}}\right]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中,N为影像数量,其获取时间分别为 t_1、t_2、…、t_N;d_N表示时刻 t_N为对应的累积位移量;v_N为时间间隔(t_{N-1}, t_N)内的平均位移速率。由偏移量追踪技术获得的影像对观测值,其偏移量 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{offset}}$可表示为各时间间隔位移增量的线性组合,即:

$$\boldsymbol{d}_{\mathrm{offset}}=\sum_{k=2}^{N}(t_N-t_{N-1})v_N \tag{4}$$

将式(4)写成矩阵形式为:

$$\boldsymbol{d}_{\mathrm{offset}}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{v} \tag{5}$$

式中,$\boldsymbol{B}$为一个 $M\times(N-1)$的矩阵,其中 M表示影像对数量;对第 i个影像对,当第 k个时间间隔(t_{k-1}, t_k)位于该影像对主影像与辅影像获取时间之间时,矩阵元素 $B(i,k)=t_k-t_{k-1}$,否则 $B(i,k)=0$[28]。

由于 $\boldsymbol{d}_{\mathrm{offset}}$为不同主影像获取的地表形变观测量矩阵,在求解 v 时会导致 B 出现秩亏。因此,采用 SVD 分解法获取形变速率在最小范数约束下的最小二乘解,后续将形变速率在各个时间段进行积分即可求得时序结果。

2.2　基于 Helmert 方差分量估计的三维位移分解

SAR 偏移量解算结果包括方位向和 LOS 向两个方向,其中 LOS 向偏移量形变速率与地表真实三维形变速率有如下关系[2]:

$$V_{\mathrm{LOS}}^{\mathrm{A}}=v_{\mathrm{U}}\cos\theta^{\mathrm{A}}-v_{\mathrm{E}}\sin\theta^{\mathrm{A}}\sin\left(\alpha^{\mathrm{A}}-\frac{3\pi}{2}\right)-v_{\mathrm{N}}\sin\theta^{\mathrm{A}}\cos\left(\alpha^{\mathrm{A}}-\frac{3\pi}{2}\right) \tag{6}$$

式中,$V_{\mathrm{LOS}}^{\mathrm{A}}$为 LOS 向升轨(ascend,A)形变速率;$v_{\mathrm{U}}$为垂直形变速率;$v_{\mathrm{E}}$为东西向形变速率;$v_{\mathrm{N}}$为南北向形变速率;$\theta^{\mathrm{A}}$为卫星升轨入射角;$\alpha^{\mathrm{A}}$为卫星升轨方位角。

方位向偏移量形变速率和地表真实三维形变速率的关系为:

$$V_{\mathrm{azimuth}}^{\mathrm{A}}=-v_{\mathrm{E}}\cos\left(\alpha^{\mathrm{A}}-\frac{3\pi}{2}\right)+v_{\mathrm{N}}\sin\left(\alpha^{\mathrm{A}}-\frac{3\pi}{2}\right) \tag{7}$$

式中,$V_{\mathrm{azimuth}}^{\mathrm{A}}$为方位向升轨形变速率。

联合 LT-1 和 Sentinel-1A 数据,利用 SAR 偏移量追踪技术可以解算 4 个方向的偏移量结果,即可列出 4 个方程,求解 3 个未知数:

$$\boldsymbol{L}=\boldsymbol{B}\boldsymbol{v}+\boldsymbol{V} \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{L}=[V_{\mathrm{LOS}}^{\mathrm{LT-1}}\ V_{\mathrm{azimuth}}^{\mathrm{LT-1}}\ V_{\mathrm{LOS}}^{\mathrm{Sentinel-1A}}\ V_{\mathrm{azimuth}}^{\mathrm{Sentinel-1A}}]$,由 LT-1和Sentinel-1A升轨数据获取的LOS向和方位向形变速率组成;$\boldsymbol{v}=[v_{\mathrm{E}}\ v_{\mathrm{N}}\ v_{\mathrm{U}}]$;$\boldsymbol{V}$为观测残差。

利用最小二乘平差即可解算地表三维真实形变速率:

$$\hat{\boldsymbol{v}}=\left(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}\right)^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{L} \tag{10}$$

式中,$\boldsymbol{P}$为 4 个方向的权阵。由于 Sentinel-1A 数据和 LT-1 数据不同源,要得到最优三维形变速率估值,还需要利用先验方差在平差模型中精确定权[2]。在进行三维形变速率分解时,先进行预平差得到初始权阵,再按照 Helmert 方差分量估计原则将初始权阵代入进行迭代运算,直至各个观测量的权阵近似相等,得到最终的权阵进行平差解算,从而获取地表真实三维形变速率。本文利用两组数据获取 4 个方向的偏移量,按照 4 个方向的预平差模型可表示为[23]:

$$\begin{cases}\boldsymbol{v}=\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{W}\\ \boldsymbol{V}_i=\boldsymbol{B}_i\hat{\boldsymbol{v}}-\boldsymbol{L}_i\ (i=1,2,3,4)\\ \boldsymbol{N}=\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{B}=\sum_{i=1}^{4}\boldsymbol{B}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{B}_i\\ \boldsymbol{W}=\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}\boldsymbol{L}=\sum_{i=1}^{4}\boldsymbol{B}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_i\boldsymbol{L}_i\end{cases} \tag{11}$$

式中,$\boldsymbol{B}=[\boldsymbol{B}_1\ \boldsymbol{B}_2\ \boldsymbol{B}_3\ \boldsymbol{B}_4]$,$\boldsymbol{B}_i$为观测方程的系数矩阵;$\boldsymbol{L}_i$为观测值矩阵;$\boldsymbol{V}_i$为改正数矢量;在首次最小二乘平差中,$\boldsymbol{P}_i$为单位阵。方差分量和观测残差的关系可以由下式表示为[23]:

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{\theta}}=\boldsymbol{S}^{-1}\boldsymbol{W}\\ \boldsymbol{W}=\left[\boldsymbol{V}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{V}_1\ \boldsymbol{V}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{V}_2\ \boldsymbol{V}_3^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_3\boldsymbol{V}_3\ \boldsymbol{V}_4^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P}_4\boldsymbol{V}_4\right]^{\mathrm{T}}\end{cases} \tag{12}$$

式中,$\hat{\boldsymbol{\theta}}=\left[\sigma_1^2\ \sigma_2^2\ \sigma_3^2\ \sigma_4^2\right]^{\mathrm{T}}$,为 4 个方向观测值的单位权中误差;$\boldsymbol{S}$为 4×4 维的对称矩阵,其元素可表示为:

$$S_{ij}=\begin{cases}\mathrm{tr}(\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{N}_i\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{N}_j),\ i<j\\ m_i-2\mathrm{tr}(\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{N}_i)+\mathrm{tr}(\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{N}_i)^2,\ i=j\\ \mathrm{tr}(\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{N}_j\boldsymbol{N}^{-1}\boldsymbol{N}_i),\ i>j\end{cases} \tag{13}$$

式中,tr()表示矩阵的迹;m_i表示参与计算的偏移量结果数量,$i=j=1,2,3,4$。利用单位权中误差更新权阵:

$$\begin{cases}\hat{\boldsymbol{P}}=\boldsymbol{P}_1\\ \hat{\boldsymbol{P}}_2=\dfrac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2\boldsymbol{P}_2^{-1}}\\ \hat{\boldsymbol{P}}_3=\dfrac{\sigma_1^2}{\sigma_3^2\boldsymbol{P}_3^{-1}}\\ \hat{\boldsymbol{P}}_4=\dfrac{\sigma_1^2}{\sigma_4^2\boldsymbol{P}_4^{-1}}\end{cases}\tag{14}$$

将新的权阵估计值代入上述观测方程获取新的改正数进行迭代计算,直至$\sigma_1^2\approx\sigma_2^2\approx\sigma_3^2\approx\sigma_4^2$终止迭代,得到的权阵$\boldsymbol{P}_1$、$\boldsymbol{P}_2$、$\boldsymbol{P}_3$、$\boldsymbol{P}_4$为最终的权阵,并代入式(10)解算形变速率。

3 结果与分析

3.1 互相关窗口改进方法对比

利用SAR偏移量方法进行地表位移监测时,互相关窗口的尺寸对结果影响较大。本文分别选取互相关窗口尺寸从32×32像素到256×256像素按32个像素逐次增加,分别对LT-1数据和Sentinel-1A数据进行偏移量计算,并利用§2的中值法和均值法对获取的最终偏移量结果进行对比。图4(a)和图4(c)分别是利用LT-1数据影像对2022-05-11—2022-09-25不同窗口大小的方位向和LOS向偏移量计算结果。同时,选取与LT-1数据时间相近的Sentinel-1A数据影像对2022-05-14—2022-10-05进行不同窗口偏移量结果的对比,方位向和LOS向偏移量分别如图4(b)和图4(d)所示。从结果中可以看出,方位向和LOS向的结果均显示较小的窗口能够更高分辨率地获取偏移量,但较小的窗口也产生较多的噪声。随着窗口的逐渐增大,噪声水平逐渐降低,但是冰川形变场的细节也在丢失。窗口大小为128×128像素和160×160像素的中值法和均值法均能较好地平衡冰川形变场的噪声和位移细节。

实验中选取了非冰川区域的偏移量结果进行内符合精度评定,选取的位置见图1中粉色方框。统计了LT-1数据和Sentinel-1A数据方位向和距离向偏移量不同窗口结果的标准差(图5),可以看出两种数据的方位向和LOS向的中值法和均值法获取的结果的标准差均比128×128像素窗口和160×160像素窗口小,说明中值法和均值法能提升偏移量的精度。LT-1数据方位向与LOS向偏移量标准差比Sentinel-1A数据方位向和LOS向偏移量标准差小得多,说明利用LT-1数据可以获得更优的冰川位移监测结果。

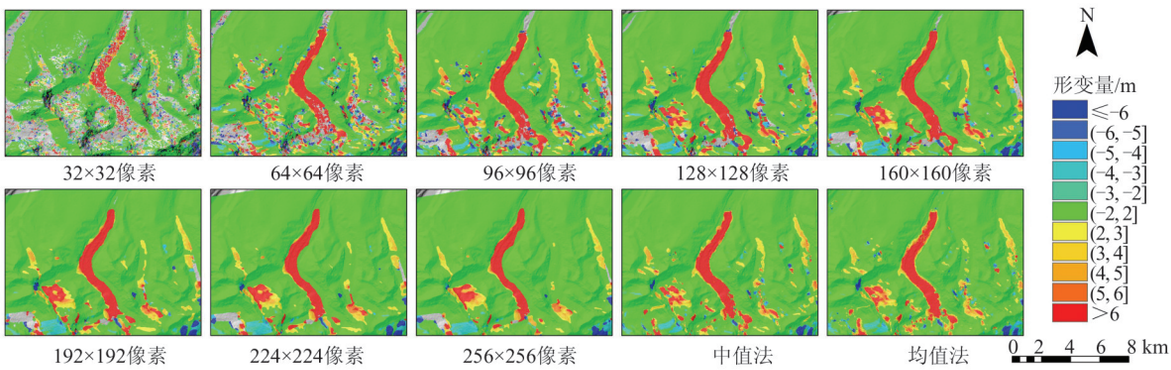
3.2 错朗玛冰川时序偏移量结果

当获取多个影像对的中值法以及均值法的方位向和LOS向偏移量结果后,即可利用SVD解算。考虑到偏移量结果中存在奇异值时,均值法会将奇异值代入计算,而中值法则会剔除,所以针对两种数据中值法计算的分解方法获取两种数据方位向和LOS向的时序偏移量结果。LT-1数据解算的方位向和LOS向时序偏移量结果如图6所示,Sentinel-1A数据解算的方位向和LOS向时序偏移量结果可见图7,两类数据时序结果均表明错朗玛冰川在2022年的形变持续增大。时序偏移量结果选取图1中点1和点2两个特征点,提取其时序的结果见图8,其中方位向正值表示位移与卫星飞行方向相同,LOS向正值表示位移靠近卫星传感器方向。错朗玛冰川2022年累积形变持续增加,Sentinel-1A数据方位向在点1和点2的最大累积形变量分别为21.45 m和15.05 m。LOS向上点1和点2最大累积形变量分别为−7.61 m和7.04 m。LT-1数据的累积形变量变化曲线与Sentinel-1A数据的变化曲线具有较强的一致性,2022-04-01—2022-09-25,方位向上点1和点2最大累积形变量分别为10.32 m和6.34 m,LOS向上点1和点2最大累积形变量分别为−5.58 m和4.27 m。

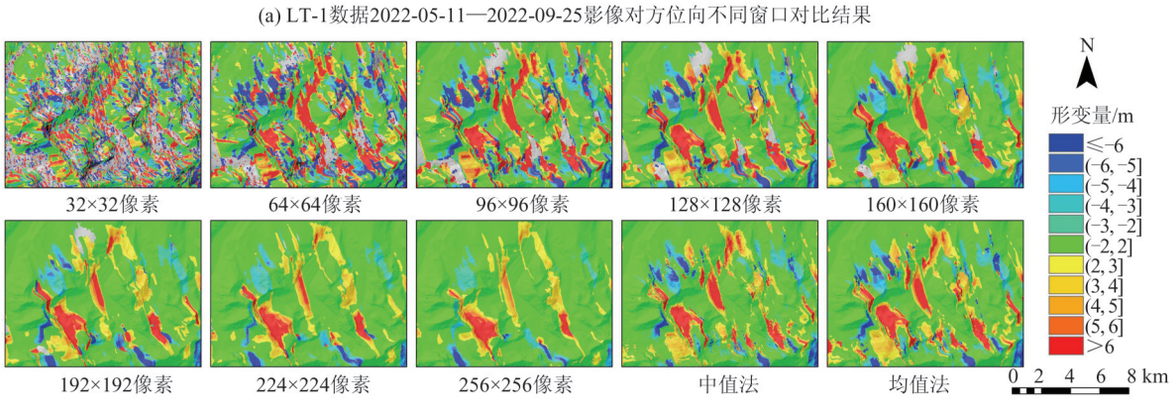
3.3 Helmert方差分量估计解算冰川三维形变速率

由于SAR偏移量解算只能获取方位向和LOS向的形变结果,所以联合不同源LT-1和Sentinel-1A数据2022-04—2022-09偏移量结果,利用Helmert方差分量估计定权可联合解算获取错朗玛冰川2022-04—2022-09三维形变速率。图9和图10分别为利用中值法和均值法获取的冰川三维形变速率,东西方向正值为向东方向,负值为向西方向,南北方向形变速率正值为向北运动,负值为向南运动。同时,本文还利用Sentinel-2光学数据,采用中值法获取了2022-04-02—2022-09-29的东西向和南北向偏移量形变速率,如图11所示。

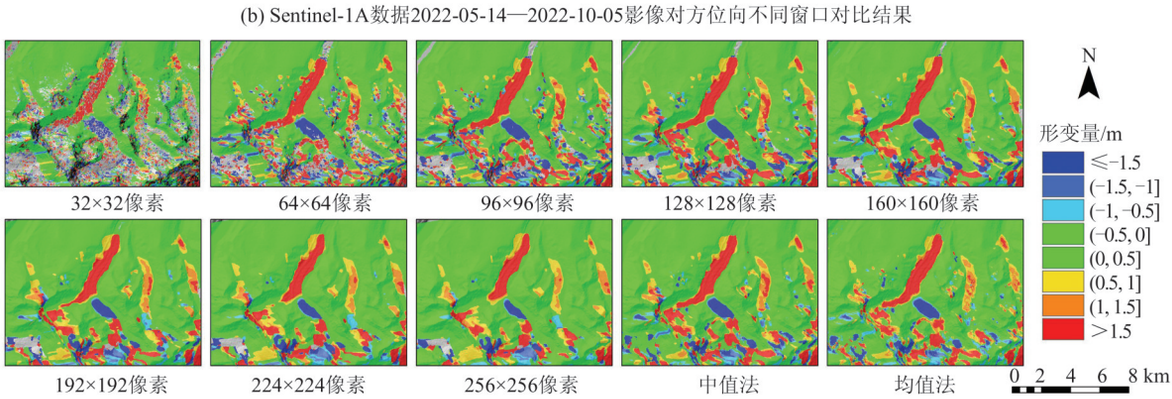
由图9和图11可以看出,联合解算的东西方向和南北方向的形变速率与光学数据获取的东西方向和南北方向形变速率和形变特征具有较好的一致性。本文沿图1中AA'和BB'进一步做形变速率剖线分析,结果分别如图12和图13所示。图12显示,AA'剖线3个方向的形变速率与高程变化具有较强的相关性,形变速率较大位置



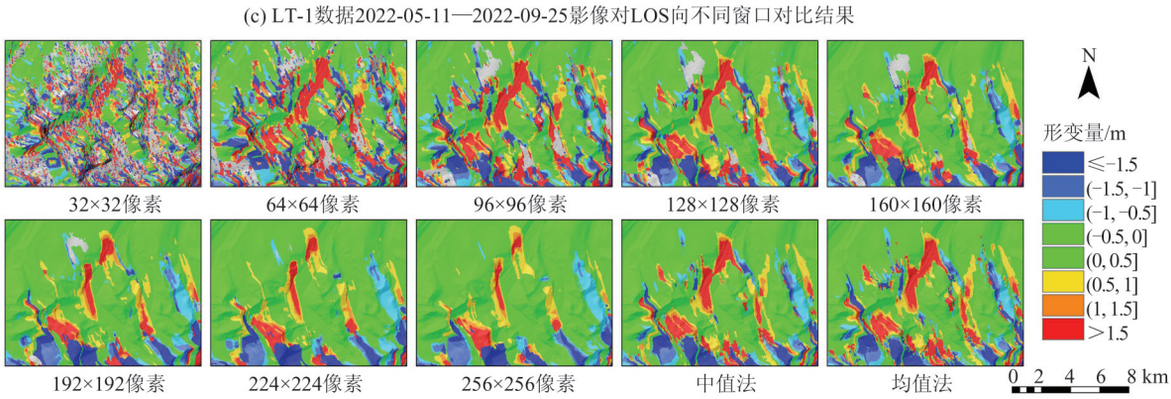
(a) LT-1数据2022-05-11—2022-09-25影像对方位向不同窗口对比结果



(b) Sentinel-1A数据2022-05-14—2022-10-05影像对方位向不同窗口对比结果



(c) LT-1数据2022-05-11—2022-09-25影像对LOS向不同窗口对比结果



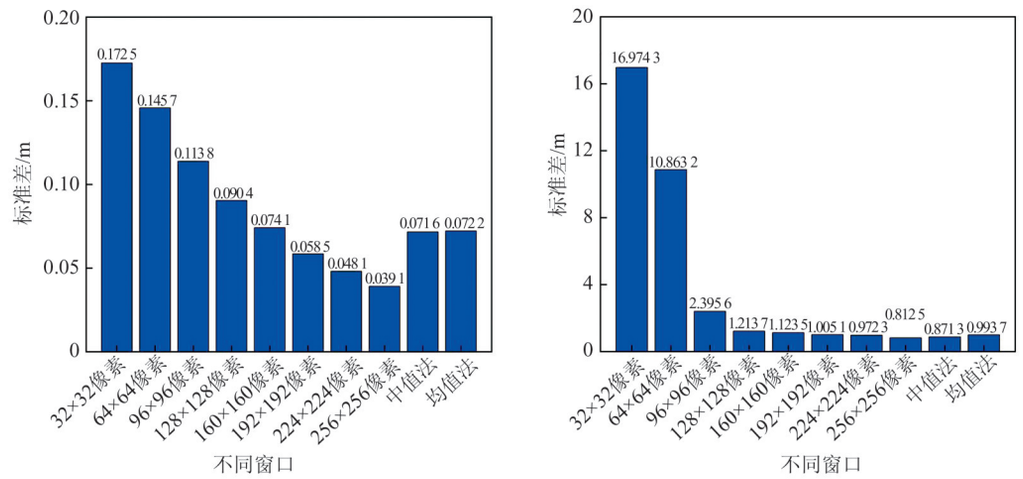
(d) Sentinel-1A数据2022-05-14—2022-10-05影像对LOS向不同窗口对比结果

图 4　LT-1 数据影像对和 Sentinel-1A 数据影像对的方位向和 LOS 向不同窗口偏移量结果对比

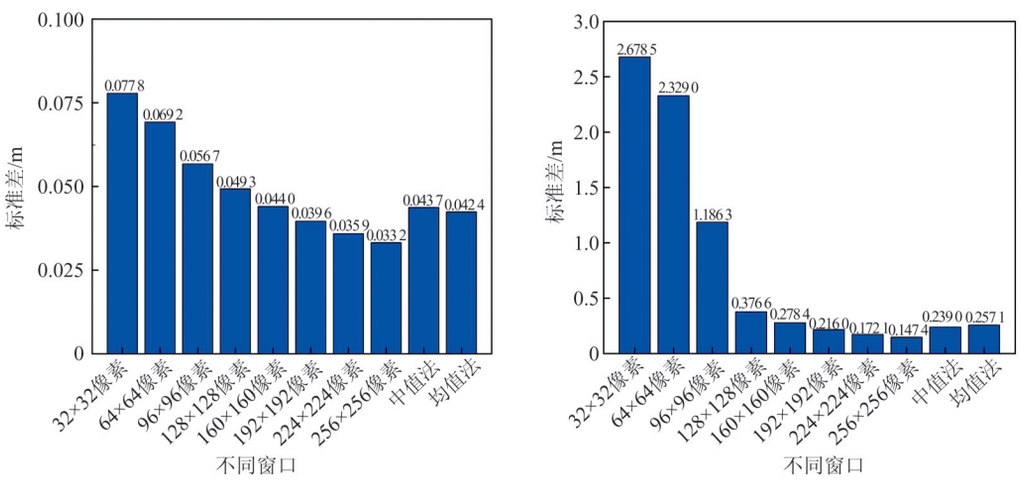
Fig. 4　Comparison of Azimuth and LOS Window Offset Results of LT-1 Interference Pair and Sentinel-1A Interference Pair

的坡度变化同样较大。

在起始位置处,地表坡度较大,3 个方向的形变速率均相对较大,随后在距离起始位置 1 500 m 处,地表坡度的急剧变化导致冰川物质流失加速,使得 3 个方向的形变速率达到了第 2 个峰值。而在距离起始位置 3 400 m 位置处,地表高程变化



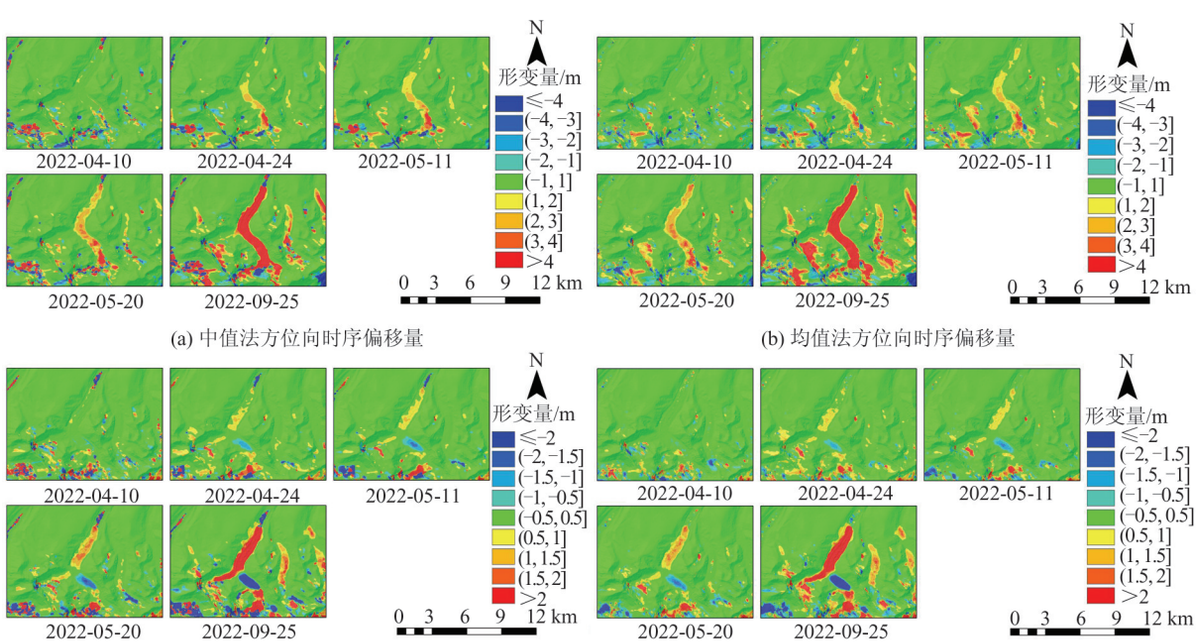
(a) LT-1数据方位向不同窗口精度　　(b) Sentinel-1A数据方位向不同窗口精度



(c) LT-1数据LOS向不同窗口精度　　(d) Sentinel-1A数据LOS向不同窗口精度

图5　错朗玛冰川不同窗口偏移量精度评定

Fig. 5　Accuracy Evaluation of Different Window Offsets of the Cuolangma Glacier

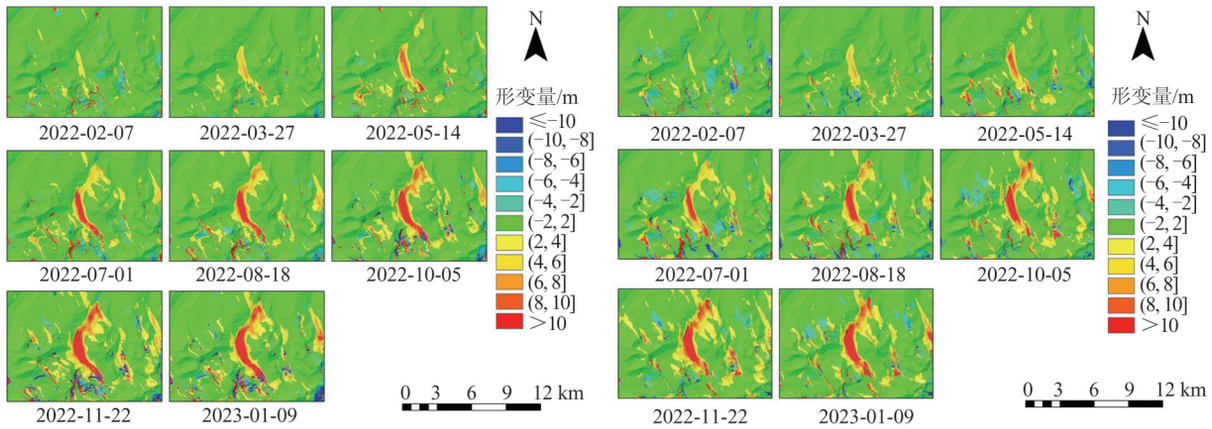


(a) 中值法方位向时序偏移量　　(b) 均值法方位向时序偏移量

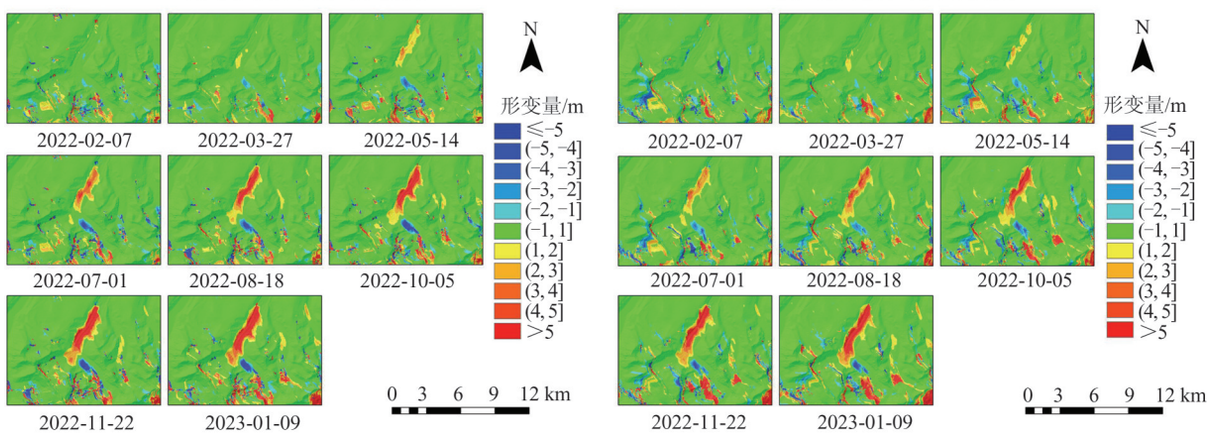
(c) 中值法LOS向时序偏移量　　(d) 均值法LOS向时序偏移量

图6　LT-1数据2022-04-01—2022-09-25时序结果

Fig. 6　Time Series Results of LT-1 Data During 2022-04-01 and 2022-09-25



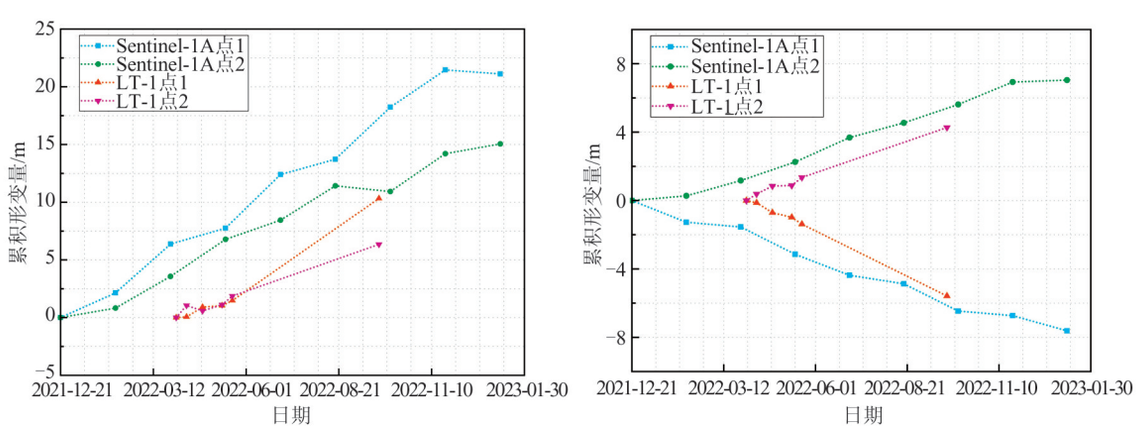
(a) 中值法方位向时序偏移量　　(b) 均值法方位向时序偏移量



(c) 中值法LOS向时序偏移量　　(d) 均值法LOS向时序偏移量

图 7　Sentinel-1A 数据 2021-12-21—2023-01-09 时序结果

Fig. 7　Time Series Results of Sentinel-1A Data During 2021-12-21 and 2023-01-09

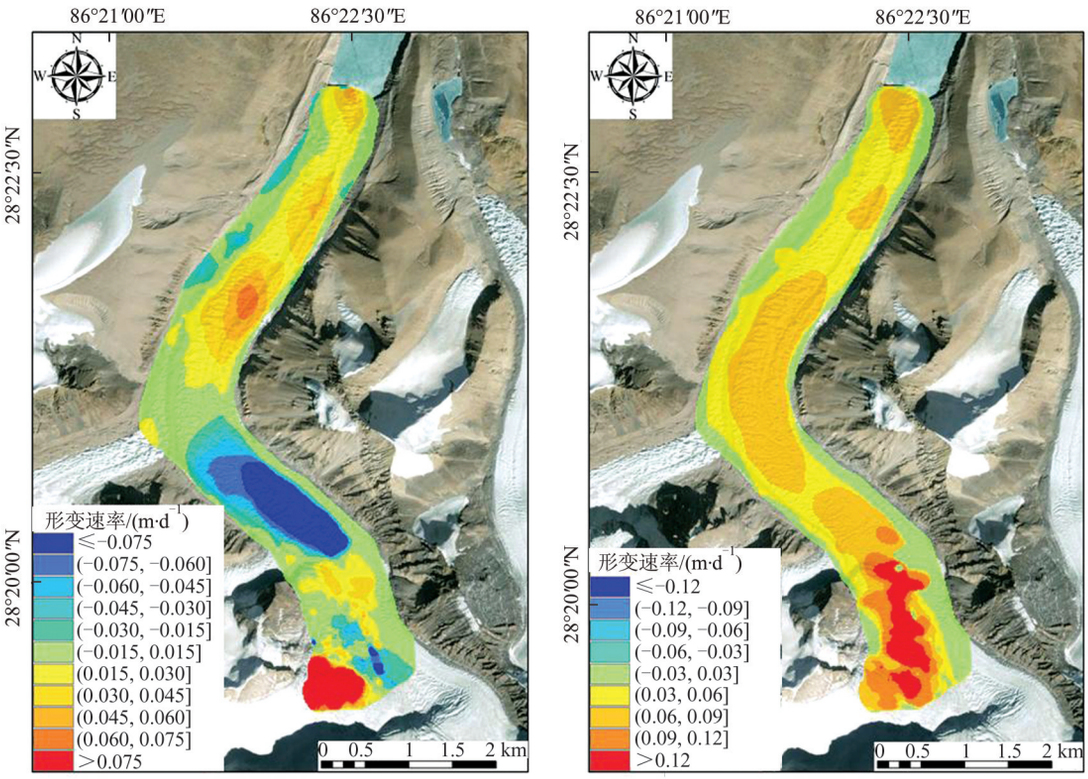


(a) 方位向　　(b) LOS向

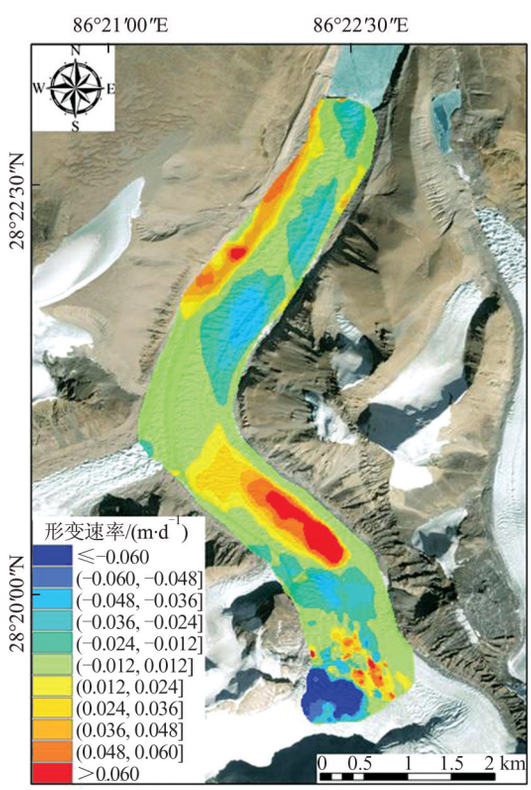
图 8　错朗玛冰川方位向和 LOS 向时序图

Fig. 8　Sequence Diagram of the Azimuth Direction and the LOS Direction of the Cuolangma Glacier

变得较为缓慢，3 个方向的形变速率趋于稳定。东西向上，冰川上部向东、下部向西运动，光学数据解算的最大形变速率为−0.114 m/d，中值法和均值法解算的最大形变速率分别为−0.125 m/d 和−0.107 m/d。南北向上，冰川整体向北运动，光学数据解算的最大形变速率为 0.145 m/d，中值法和均值法解算的最大形变速率分别为 0.147 m/d 和 0.124 m/d。垂直方向上，冰川上部以沉降为主，下部受冰碛物堆积影响出现一定抬升，中值法和均值法解算的最大形变速率分别为−0.134 m/d 和−0.072 m/d。对于 BB' 剖线，地势起伏较为复杂，冰碛物持续堆积，导致 3 个方向的形变速率均较小。东西运动分量上，



(a) 东西向形变速率 (b) 南北向形变速率

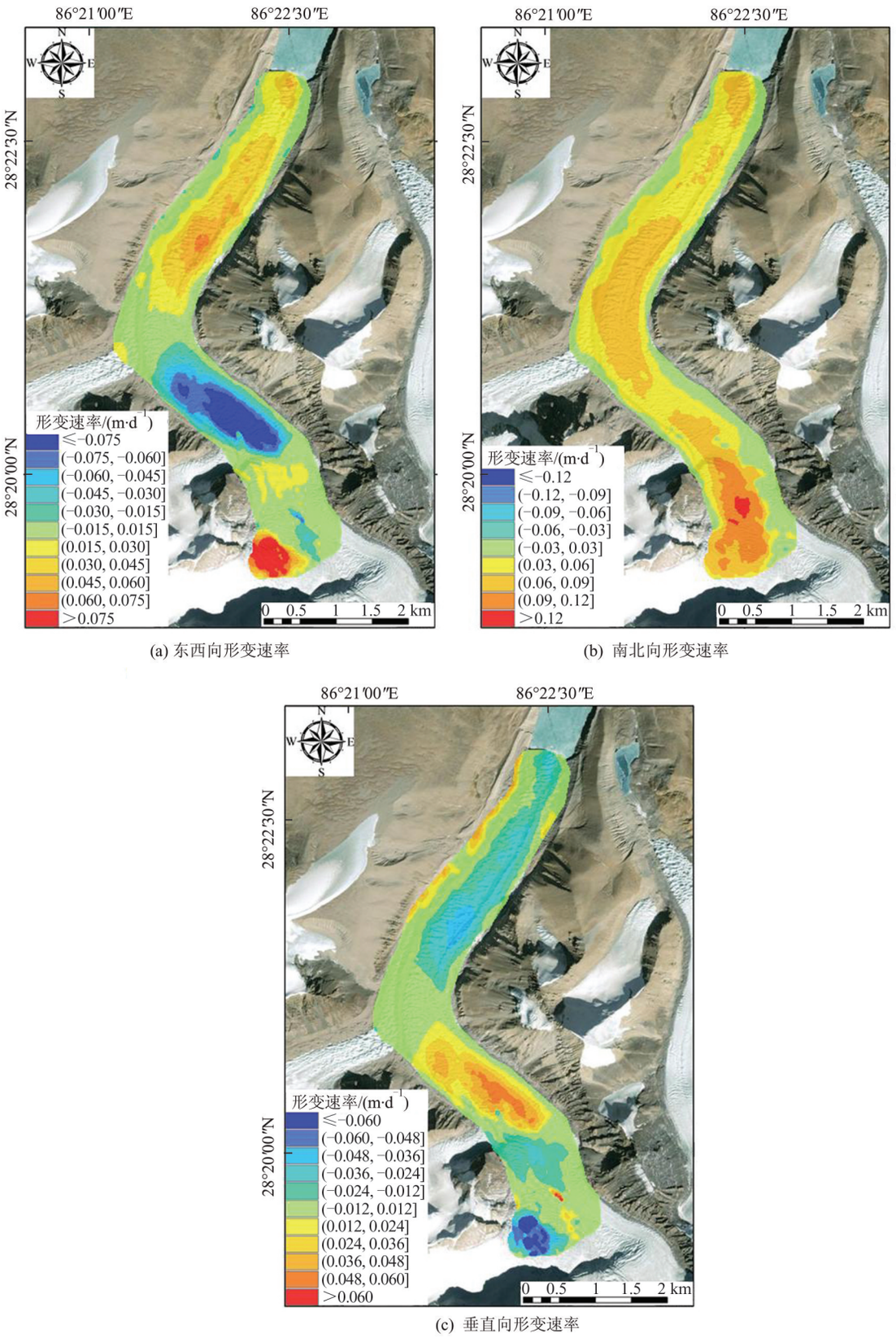


(c) 垂直向形变速率

图9 中值法偏移量联合解算形变速率

Fig. 9 Joint Calculation of Deformation Rate by Median Offset-Tracking

冰川整体向东运动,中上部形变速率较大。距离起始位置1 300 m处,形变速率达到峰值,光学数据解算的最大形变速率为0.043 m/d,中值法和均值法解算的最大形变速率分别为0.060 m/d和0.061 m/d。南北运动分量上,整体向北运动,光学数据解算的最大形变速率为0.091 m/d,中值法和均值法解



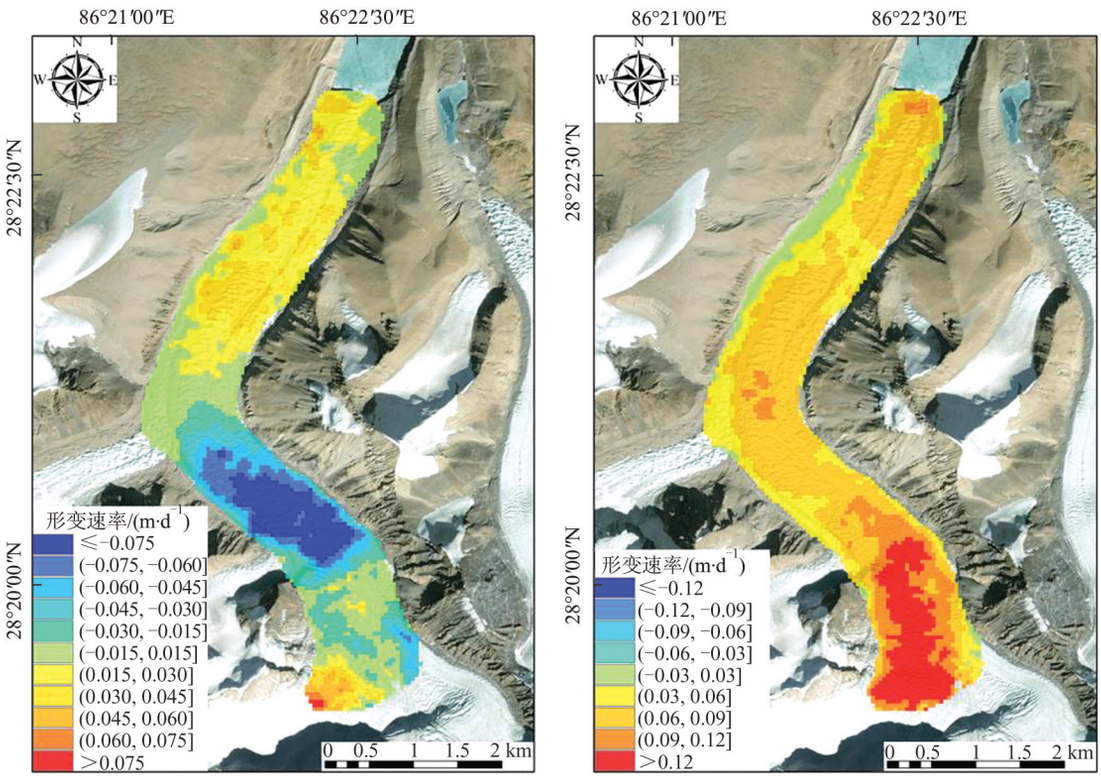
(a) 东西向形变速率　　(b) 南北向形变速率

(c) 垂直向形变速率

图 10　均值法偏移量联合解算形变速率

Fig. 10　Joint Calculation of Deformation Rate by Mean Offset-Tracking

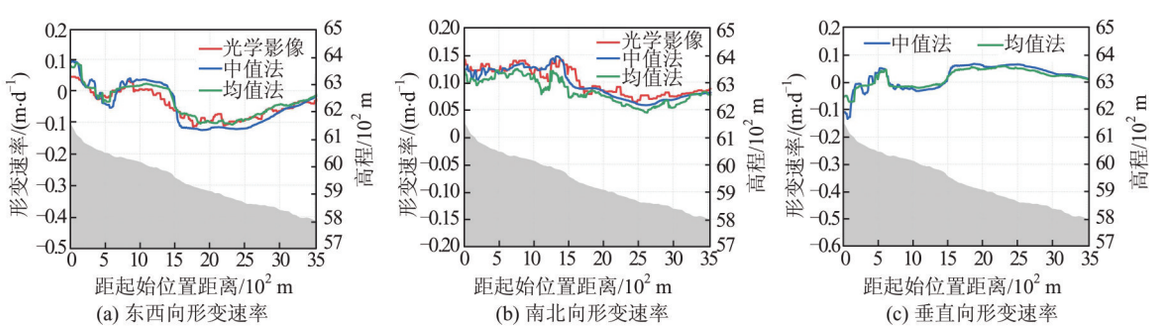
算的最大形变速率分别为0.085 m/d和0.084 m/d。垂直分量上，该冰川以沉降为主，在距离起始位置1 300 m处，位移速率达到峰值，中值法和均值法解算最大形变速率分别为−0.042 m/d和−0.043 m/d。AA'和BB'剖线形变速率显示，冰川上部主要向东、北方向运动，呈逐渐退缩趋势；中部主要向西、北方向移



(a) 东西向形变速率　　(b) 南北向形变速率

图11　Sentinel-2光学偏移量平均形变速率

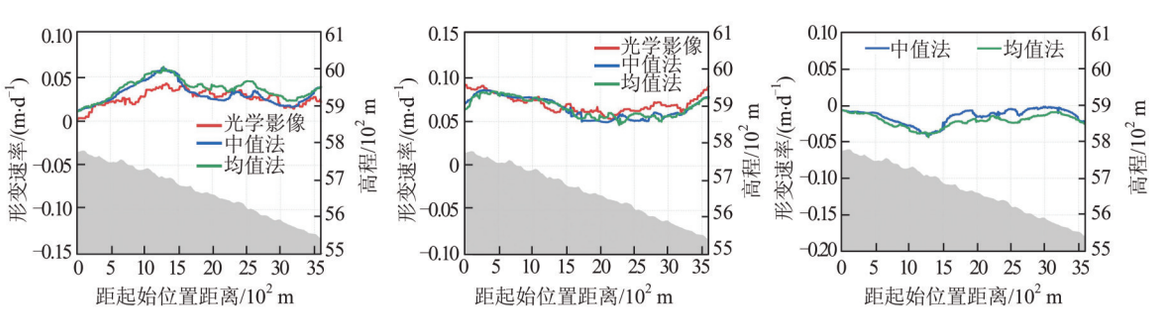
Fig. 11　Deformation Rate of Sentinel-2 Optical Offset-Tracking



(a) 东西向形变速率　(b) 南北向形变速率　(c) 垂直向形变速率

图12　AA'剖线形变速率

Fig. 12　Deformation Rate of AA' Profile



(a) 东西向形变速率　(b) 南北向形变速率　(c) 垂直向形变速率

图13　BB'剖线形变速率

Fig. 13　Deformation Rate of BB' Profile

动,冰川物质逐渐积累;下部主要向东、北方向运动,表现为退缩,但3个方向运动速率相对较缓。

本文对不同方法解算的东西方向和南北方向偏移量速率结果进行内符合精度评定,将不同分辨

率的速率结果统一重采样至相同空间尺度后，在图 1 粉色框区域内统计位移速率标准差，以评估结果的稳定性与精度(图 14)。基于 Helmert 方差分量估计方法，联合 LT-1 数据与 Sentinel-1A 数据，采用中值法进行解算，得到东西向形变速率标准差为 0.003 63 m/d，南北向形变速率标准差为 0.000 96 m/d，形变速率标准差明显降低，显著小于 Sentinel-2 中值法解算结果的标准差，表明联合解算结果精度更高。

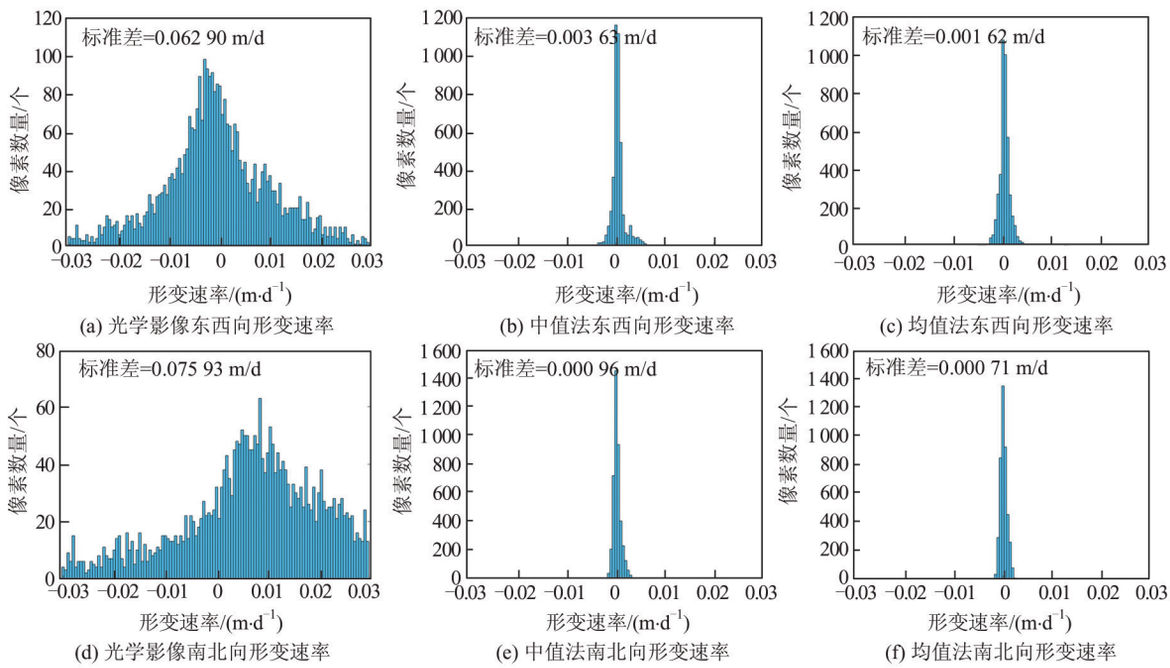


图 14　东西向和南北向偏移量形变速率标准差对比

Fig. 14　Comparison of Standard Deviation of Displacement Deformation Rate in East-West Direction and North-South Direction

4　讨　论

图 5 展示了 LT-1 和 Sentinel-1A 在方位向和 LOS 向上的中值法和均值法解算的偏移量结果精度均比常用的 128×128 像素窗口解算的偏移量结果精度提升了 10% 以上。同时，由于 LT-1 数据的分辨率高于 Sentinel-1A 数据，因此在方位向和 LOS 向上的所有窗口解算精度中，LT-1 数据均优于 Sentinel-1A 数据。这表明，利用偏移量技术监测冰川时，LT-1 数据的效果更佳。

根据图 8 可以看出，从 2022-04-01—2022-09-25，Sentinel-1A 数据方位向上点 1 和点 2 累积形变量分别约为 10.6 m 和 6.9 m，LT-1 数据方位向上点 1 和点 2 累积形变量分别为 10.32 m 和 6.34 m。Sentinel-1A 数据 LOS 向上点 A 和点 B 累积形变量分别约为 −4.8 m 和 4.3 m，LT-1 数据 LOS 向上点 1 和点 2 累积形变量分别为 −5.58 m 和 4.27 m，两种数据在两个方向上的累积形变量相近，表明两种数据解算的时序变化较为一致，从而体现了 LT-1 卫星数据可用于获取冰川时序形变的可行性。

图 15 展示了 2022 年错朗玛冰川降水量和气温变化情况，4 月气温逐渐升高，10 月之前持续降雨，12 月气温降低到 −10.7 ℃。气温变化和持续降水可能会导致冰川物质积累状态和退缩状态之间的转变，因此在图 8 中方位向累计形变量出现了部分反向累积的现象。

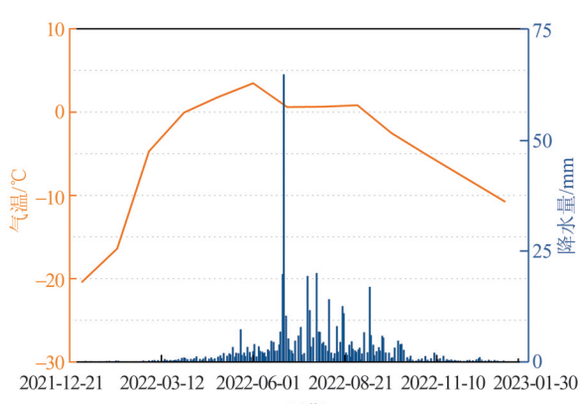


图 15　2022 年错朗玛冰川降水量和气温变化图

Fig. 15　Precipitation and Temperature Variation Chart of the Cuolangma Glacier in 2022

图 12 和图 13 显示，利用 Sentinel-2 光学影像和两种 SAR 数据对错朗玛冰川解算的偏移量形变速率在数值上存在一定差异。这主要是由于

偏移量解算结果对影像空间分辨率较为敏感。Sentinel-2数据分辨率为10 m,LT-1数据方位向和LOS向的分辨率均为3 m,而Sentinel-1A数据方位向和LOS向的分辨率分别为5 m和20 m。不同空间分辨率会影响冰川表面特征匹配的精细程度,从而导致偏移量解算结果在数值上存在一定差异。另外,3种数据的获取时间略微不同也会影响偏移量解算结果,但形变速率整体的变化趋势呈现出一致性。

5 结 语

本文分别利用13对Sentinel-1A 2022年影像和8对LT-1 2022-04—2022-06影像,采用中值法和均值法分别获取了错朗玛冰川的偏移量位移结果,并进行了内符合精度评定。分析表明,中值法和均值法均能很好地还原冰川形变特征,精度较常规窗口更高,但均值法易受奇异值影响,中值法效果更优。实验还显示,LT-1数据比Sentinel-1A数据具有更高的偏移量解算精度和空间分辨率。此外,利用时序SAR偏移量追踪技术获取了错朗玛冰川2022年的时序结果。利用Helmert方差分量估计联合两类数据获取的冰川三维形变速率表明,该冰川在2022-04—2022-09期间,东西向、南北向和垂直向最大形变速率分别达到−0.125 m/d、0.147 m/d和−0.134 m/d,即冰川顶部和下部主要向东和北方向运动,逐渐退缩。冰川中部主要向西和北方向移动,冰川物质逐渐积累。研究表明了根据LT-1数据利用偏移量追踪技术监测冰川的可行性,可为西藏地区高海拔区域的冰川三维监测提供参考。

当前LT-1卫星已完成在轨测试,各项性能已经达到规定的技术指标,其生产的数据可有效应用于地质灾害监测,但其转入业务化生产时间较短,目前获取的数据较少。随着时间的推移,LT-1卫星的存档数据将持续增加,该卫星将在中国地质灾害监测中发挥重要作用,为国家的自然资源管理、灾害监测和城市规划等方面提供有力支持。

参 考 文 献

[1] 何正枫. 青藏高原山地冰川SAR影像监测研究:以珠峰区域为例[D]. 兰州:兰州交通大学, 2021.
HE Zhengfeng. Research on SAR Image Monitoring of Mountain Glaciers in Tibetan Plateau: Take the Everest Region as an Example[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiatong University, 2021.

[2] 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.

[3] 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.
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.

[4] 何思宇. 基于多源遥感数据的喜马拉雅山积雪范围遥感监测[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2022.
HE Siyu. Remote Sensing Monitoring of Snow Cover in the Himalayas Based on Multi-source Remote Sensing Data[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.

[5] 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.
LIU Guoxiang, ZHANG Bo, ZHANG Rui, et al. Monitoring Dynamics of Hailuogou Glacier and the Secondary Landslide Disasters Based on Combination of Satellite SAR and Ground-Based SAR[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 980-995.

[6] FARINOTTI D, IMMERZEEL W W, DE KOK R J, et al. Manifestations and Mechanisms of the Karakoram Glacier Anomaly[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(1): 8-16.

[7] 黄磊, 李震. 光学遥感影像的山地冰川运动速度分析方法[J]. 冰川冻土, 2009, 31(5): 935-940.
HUANG Lei, LI Zhen. Mountain Glacier Flow Velocities Analyzed from Satellite Optical Images[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(5): 935-940.

[8] DELACOURT C, ALLEMAND P, CASSON B, et al. Velocity Field of the "La Clapière" Landslide Measured by the Correlation of Aerial and QuickBird Satellite Images[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(15): 2004GL020193.

[9] 王乐洋, 邹阿健. 结合SAR和光学数据检索凯库

拉 Mw 7.8地震三维形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(2): 303-312.
WANG Leyang, ZOU Ajian. Retrieving 3D Coseismic Deformation of 2016 Mw 7.8 Kaikoura Earthquake Using SAR and Optical Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(2): 303-312.

[10] 杨成生, 李晓阳, 张勤, 等. 基于InSAR技术的尼泊尔辛杜帕尔乔克区震后滑坡监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(10): 1684-1696.
YANG Chengsheng, LI Xiaoyang, ZHANG Qin, et al. Monitoring and Analysis of Post-Earthquake Landslide in Sindhupalchowk District, Nepal Based on InSAR Technology[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1684-1696.

[11] 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.
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.

[12] 杨红磊, 彭军还, 康志忠, 等. InSAR技术原理及实践[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
YANG Honglei, PENG Junhuan, KANG Zhizhong. Principle and Practice of InSAR Technology[M]. Beijing: Science Press, 2021.

[13] 刘晓杰. 星载雷达遥感广域滑坡早期识别与监测预测关键技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
LIU Xiaojie. Research on Key Technologies for Early Identification, Monitoring and Forecasting of Wide-Area Landslides with Spaceborne Radar Remote Sensing[D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.

[14] 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.

[15] STROZZI T, KOURAEV A, WIESMANN A, et al. Estimation of Arctic Glacier Motion with Satellite L-Band SAR Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(3): 636-645.

[16] 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.

[17] 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.
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.

[18] 苗朝霞, 白林, 李振洪, 等. 阿尼玛卿冰川表面流速与地质灾害隐患点监测[J]. 测绘科学, 2022, 47(8): 240-246.
MIAO Zhaoxia, BAI Lin, LI Zhenhong, et al. Monitoring Glacier Velocity and the Potential Geological Hazards of A'nyemaqen Glacier[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(8): 240-246.

[19] SHI Y L, CHE T, BAO J W, et al. Glacial Lakes Control Ice Flow: New Insights from Satellite SAR PO-SBAS Observations in Duiya Glacier, Southern Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2024, 17(1): 2365964.

[20] CASU F, MANCONI A, PEPE A, et al. Deformation Time-Series Generation in Areas Characterized by Large Displacement Dynamics: The SAR Amplitude Pixel-Offset SBAS Technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(7): 2752-2763.

[21] 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.

[22] SAMSONOV S, TIAMPO K, CASSOTTO R. SAR-Derived Flow Velocity and Its Link to Glacier Surface Elevation Change and Mass Balance[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 258: 112343.

[23] 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.

[24] 张双成, 王杰, 李涛, 等. 陆地探测一号卫星用于干涉测量精度验证与分析: 以大同市为例[J]. 武汉大

学学报(信息科学版), 2025, 50(11): 2187-2197.
ZHANG Shuangcheng, WANG Jie, LI Tao, et al. Accuracy Verification and Analysis of the Interferometry of Lutan-1 Satellite: A Case Study of Datong [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2187-2197.

[25] 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.
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.

[26] 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.
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.

[27] 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.

[28] 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.