

# 国产涪城一号/神启号 SAR 卫星冰川流速监测及与 Sentinel-1 卫星对比分析

温柠玲<sup>1</sup>, 戴可人<sup>1,2,3</sup>, 周浩<sup>4</sup>, 刘晨<sup>5</sup>, 任维佳<sup>6</sup>, 杜健<sup>7</sup>, 冉伟杰<sup>6</sup>

1. 成都理工大学 地球与行星科学学院, 成都 610059;

2. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 成都 610059;

3. 国网西南电力研究院, 成都 610041;

4. 成都理工大学 地理与规划学院, 成都 610059;

5. 中国地质大学(武汉) 地球物理与空间信息学院, 武汉 430074;

6. 长沙天仪空间科技研究院有限公司, 长沙 410205;

7. 张掖星座空间科技有限公司, 张掖 734000

**摘要:** 涪城一号作为中国首颗具备干涉测量能力的商业 SAR 卫星, 与神启号卫星作为星座协同运行, 可为冰川与地质灾害的高精度监测提供新的技术途径, 目前其冰川流速监测能力分析评估较为缺乏。本研究基于 2023 年 10—11 月涪城一号与 2025 年 1—3 月神启号获取的西藏自治区林芝市色东普沟流域 SAR 数据, 结合同期 Sentinel-1 影像, 采用像素偏移追踪 POT (Pixel Offset Tracking) 方法和 DInSAR 技术提取不同场景下的冰川表面流速, 并开展系统性对比分析。POT 监测结果表明: 涪城一号与神启号凭借其高空间分辨率, 在小尺度冰川 POT 位移监测中显著优于 Sentinel-1, 成功识别出 6 处冰川运动信号, 最大运动速率达 90 cm/d。而低分辨率的 Sentinel-1 数据采用满足小尺度冰川窗口无法提供足够的信息来准确识别偏移。在 DInSAR 干涉测量中, 神启号卫星影像的重轨干涉对空间基线仅为 13.89 m, 远低于同期 Sentinel-1 基线长度, 结合其高分辨率特性, 表现出更优的干涉效果。但在冰川缓慢运动时期, 采用短基线的 Sentinel-1 数据干涉效果有提升空间。在典型冰川流速监测中, 涪城一号与神启号所获边界清晰度与位移特征均更符合实际冰川动态, 表明了其在冰川运动精细化监测方面具有较大潜力。本研究系统评估了涪城一号与神启号在冰川监测中的综合性能, 证实了其在冰川运动精细监测中的有效性与应用潜力, 为发展高精度冰川遥感监测体系提供了重要依据。

**关键词:** 涪城一号, 神启号, Sentinel-1, 冰川流速, 色东普, 像素偏移追踪

**中图分类号:** P2

**引用格式:** 温柠玲, 戴可人, 周浩, 刘晨, 任维佳, 杜健, 冉伟杰. 2026. 国产涪城一号/神启号 SAR 卫星冰川流速监测及与 Sentinel-1 卫星对比分析. 遥感学报, 30(4): 861-879

Wen N L, Dai K R, Zhou H, Liu C, Ren W J, Du J and Ran W J. 2026. Glacier velocity monitoring with domestic Fucheng-1/Shenqi SAR satellites and comparative analysis with Sentinel-1 satellite missions. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 861-879 [DOI: 10.11834/jrs.20265385]

## 1 引言

青藏高原冰川的动态变化是全球气候变化最敏感和显著的指示器之一。随着全球变暖加剧, 亚洲高山区的冰川近年来整体上呈现加速的减薄趋势 (周玉杉等, 2024), 与此同时, 在特定区域 (如喀喇昆仑或喜马拉雅部分地区), 跃动型冰川失稳频率

增加, 剧烈跃动现象日益显著 (郭万钦等, 2022)。这些冰川动力学过程的变化极易诱发冰湖溃决、冰川泥石流等典型的次生灾害, 对区域生态安全与人类活动造成难以估量的影响。冰川表面流速是研究冰川动力学与物质平衡的关键参数 (Wen 和 Wang, 2025)。然而, 青藏高原冰川多分布于高海拔、高陡地形及极端寒冷的高山无人区, 传统地

收稿日期: 2025-09-25; 预印本: 2026-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42371462), 四川省自然科学基金杰出青年科学基金(编号:2023NSFSC1909)

第一作者简介: 温柠玲, 研究方向为冰湖溃决灾害。E-mail: wenningling@stu.cdut.edu.cn

通信作者简介: 戴可人, 研究方向为地质灾害智能感知与风险防控。E-mail: daikerren17@cdut.edu.cn

面观测手段(如钻孔仪、全站仪和测距仪)在监测冰川物质变化与运动速度方面面临巨大困难,且观测设备在恶劣环境下的维护极具挑战。随着雷达遥感技术的发展,利用差分干涉测量(DInSAR)、多孔径干涉技术MAI(Multiple Aperture Interferometry)及像素偏移追踪POT(Pixel Offset Tracking)等方法从遥感影像中提取冰川运动信息,已成为当前主流技术手段(Pritchard等,2005;Strozzi等,2002;Feng等,2023;Jung等,2009,2015;Yasuda和Furuya,2013;冉有华等,2025)。

近年来,多颗先进SAR卫星相继发射,如L波段的陆探一号(LT-1)和NISAR,C波段的GF-3、涪城一号与神启号等,为冰川运动监测提供了更为丰富的数据源与技术可能性。在利用SAR卫星进行冰川运动监测方面,不同波段传感器的干涉性能存在显著差异。L波段因其较长波长,表现出更优的时间相干性以及在大位移的高敏感性(Zhou等,2011),适用于长时间间隔干涉和剧烈运动区域的监测,能在干涉过程中保持完整干涉条纹(Strozzi等,2006)。另一方面,POT技术的位移监测精度在很大程度上受SAR影像像素尺寸的影响(Wang等,2020)。高分辨率SAR卫星,如GF-3、LT-1卫星影像能够显著提升偏移量估计的精度,有效识别更细微的冰川运动特征(张瑞宇等,2025;刘泽伟等,2025;王群等,2020);而Sentinel-1、ERS-1/2等中低分辨率数据则更侧重于用于大尺度范围内的冰川流速监测(Friedl等,2021)。

在此背景下,涪城一号和神启号作为具备干涉能力的国产商业SAR卫星,凭借高频次重复周期和高空间分辨率的特点,在冰川、滑坡等地表形变的精细化监测方面极具应用潜力(戴可人等,2025b)。2024年9月发射的天仪41星(神启号)与涪城一号可构成双星重轨干涉组合,可提升数据的时间分辨率,捕捉短期的冰川运动特征。色东普沟是新兴卫星在发射早期阶段少数覆盖青藏高原典型冰川的区域之一,其选择主要基于早期数据的可获性。在此类重点冰川上开展新卫星监测能力的验证,对未来开展精细化与应急监测具有重要的先行示范意义。目前,涪城一号与神启号卫星在冰川流速监测、干涉性能评估及复杂地形适用性等方面仍缺乏系统性评估,深入开展其在冰川监测中的适用性评价具有重要的研究价值,未来若获取覆盖更大规模冰川的数据,可进一步拓展相关分析。

因此,本文基于不同卫星数据在冰川流速监测、干涉性能、观测能力及对冰川边界与运动特征的识别能力4个方面,系统评估了涪城一号与神启号卫星在冰川运动监测中的综合能力。研究结果旨在为高寒复杂地区冰川遥感监测的数据选择与多源SAR协同应用提供科学依据与技术参考。

## 2 研究区概况与数据

### 2.1 研究区域概况

研究区位于青藏高原东南部,全域约900 km<sup>2</sup>,最高点位于加拉白垒山脉主峰7294 m,最低点位于色东普沟2746 m。研究区位于喜马拉雅山脉和念青唐古拉山脉之间,板块构造运动强烈,在川藏交通廊道发育多处断层(王伶俐,2021;南希等,2022;王中根,2022),常发生泥石流、滑坡、地震等自然灾害(刘志成,2020;童立强,2020)(图1(a))。研究区内沟深谷远,地貌类型多样,以冰蚀地貌和河谷侵蚀剥蚀强烈的高山峡谷地貌为主。流域内支沟发育,中下游主沟道狭窄,且具有多源支沟的特点(图1(c)、(d))。该区域位于板块交界处,地震多发,岩石破碎,松散物质多,该处以冰川发育为主,主要有7处冰川(图1(b)蓝色边界线,其中I号—VII号冰川的GLIMS ID分别为G094849E29824N、G094906E29855N、G094940E29811N、G094976E29846N、G095015E29849N、G095018E29682N、G095018E29637N),以II号岗普冰川与III号色东普冰川为典型冰川(图1(c)、(d)),沟内冰碛物物源丰富,高差大,冰川融水,降水充分等特点给引发新的冰崩—碎屑流提供发育条件。

### 2.2 数据介绍

涪城一号卫星是天仪首颗面向InSAR业务的卫星,载有C波段合成孔径雷达,具备全天时、全天候的InSAR干涉成像功能,精密定轨精度优于10 cm,最高分辨率1 m×0.5 m。涪城一号卫星具备高频次重访能力,能够获取高分辨率SAR图像和微波遥感数据。其轨道重复周期为11 d,入轨后可实现四川全省1周覆盖成像1次。卫星重轨干涉关键技术已达到与Sentinel-1等主流SAR卫星相当的水平,基于涪城一号数据可实现对地表毫米级的长时间序列形变监测。

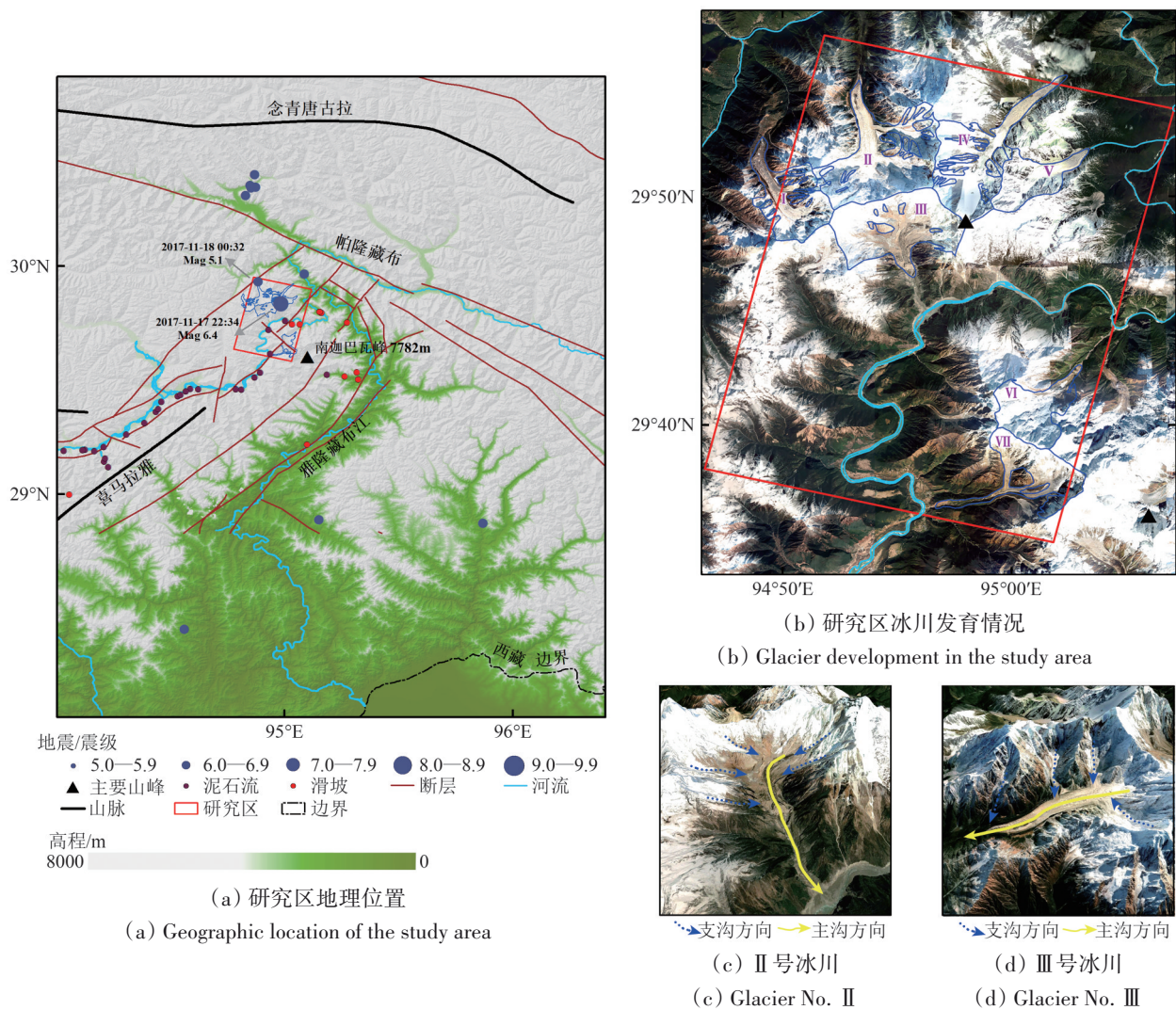


图1 研究区域概况

Fig. 1 Study area overview

天仪41星（神启号）SAR卫星是国内首颗全面业务化的C波段InSAR商业卫星，其首批成像数据在分辨率、信噪比、模糊度控制及信息丰富度等多项关键指标较涪城一号影像均有所优化。该卫星控轨稳定，可通过分时分布式组网方式与涪城一号SAR卫星实现最短4 d的双星重轨干涉成像周期（神启号与涪城一号单星重复周期均为11 d），监测频次提升275%。

欧洲航天局（ESA）发射的Sentinel-1卫星，由A、B两颗卫星组成，搭载C波段SAR传感器，连续提供所有天气条件下中等或高分辨率的影像。Sentinel-1卫星轨道重复周期为12 d，具有4种工作模式。

本研究采取“POT捕捉大尺度位移与DInSAR精细提取形变场”协同监测策略，根据卫星重复

周期与不同场景下冰川动力学特征确定影像时间选取准则。针对冰川运动速率较高且失相干严重的场景，选用影像时间间隔较长的影像（涪城一号2023-10-08—2023-11-21，间隔44 d；神启号2025-01-27—2025-03-01，间隔33 d）开展POT分析。由于此类影像对的时间基线长且存在剧烈失相干，在物理上难以满足DInSAR的干涉要求。相比之下，DInSAR方法适用于在冰川运动缓慢且地表无积雪覆盖的冬季短基线场景（重复周期<12 d）中提取微小位移量。加之涪城一号在本次实验中获取有限，因此主要基于神启号和Sentinel-1数据开展DInSAR分析，各类数据具体参数见表2。此外，涪城一号、神启号与Sentinel-1卫星定轨精度分别优于10 cm（Han等，2025）、10 cm及5 cm（Potin等，2016），均保证其在传统亚像元级配准方法下

的干涉精度。值得注意的是，涪城一号与神启号卫星几何参数高度一致，本文以哨兵数据为基准，旨在验证国产卫星监测冰川动态的一致性与准确性。影像覆盖范围见图2。

表1 本研究所使用的卫星参数

Table 1 The satellite parameters used in this study

	涪城一号	神启号	Sentinel-1
轨道类型	太阳同步轨道	太阳同步轨道	太阳同步轨道
重复周期	11	11	12
极化方式	VV	VV	VV, HH HH+HV, VV+VH
定轨精度/cm	<10(Han等,2025)	<10(与涪城一号相近)	<5(Potin等,2016)
NESZ/dB	<-22(Han等,2025)	<-22(与涪城一号相近)	<-22(Qi等,2022)

表2 数据参数信息

Table 2 Data Parameter Information

	涪城一号	Sentinel-1	神启号	Sentinel-1	神启号
成像时间	2023-10-08— 2023-11-21	2023-10-23—2023-11-28/ 2025-02-14—2025-03-10	2025-01-27— 2025-03-01	2025-02-26— 2025-03-10	2025-03-01— 2025-03-12
处理技术	POT	POT	POT	DInSAR	DInSAR
视线方向	左视	右视	左视	右视	左视
轨道方向	降轨	升轨	降轨	升轨	降轨
重复周期	11	12	11	12	11
方位向分辨率/m	1.80	13.96	1.80	13.96	1.80
距离向分辨率/m	1.25	2.33	1.36	2.33	1.36
时间基线/d	44	36/24	33	12	11

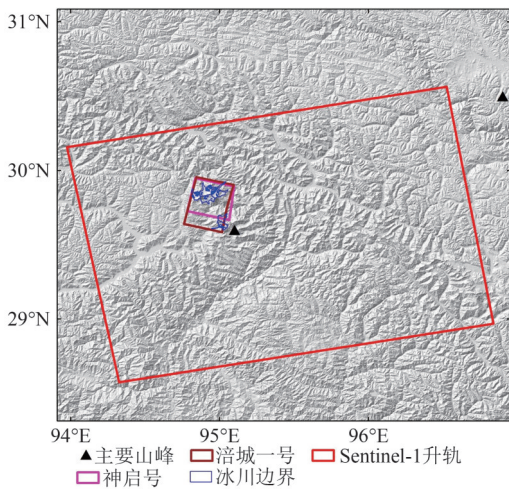


图2 影像覆盖范围

Fig. 2 Image coverage range

### 3 研究方法

本文主要包括监测冰川位移和评价涪城一号、神启号和Sentinel-1数据在该研究区内冰川监测适用性。首先获取覆盖同一区域的涪城一号、神启号与Sentinel-1卫星SAR数据，同时通过数字高程模型(DEM)、断层、河流等辅助数据摸清研究区域(图3 I)。再采用偏移量追踪技术(POT)连续获取地表二维形变信息，本研究基于GAMMA软件

平台，采用基于频率域的强度互相关算法进行计算。首先，通过傅里叶变换将主从影像从空间域变换到频率域，并计算主从影像频谱共轭乘积，得到相关功率谱(式(1))。后将相关功率谱通过傅里叶逆变换将结果转换回空间域得到式(2)，此时在非零处的行列坐标值即是主从影像像元间的偏移量。但此时偏移量是影像像元的整数倍大小，为获取非整数像素大小的形变信息，对互相关峰值进行过采样处理，从而实现像元间的偏移量达到亚像元级(Strozzi等, 2002; Werner等, 2005)。

$$\frac{G_m(\xi, \eta)G_s^*(\xi, \eta)}{|G_m(\xi, \eta)G_s^*(\xi, \eta)|} = e^{-j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)} \quad (1)$$

$$G^{-1}\{e^{-j2\pi(\xi x_0 + \eta y_0)}\} = \delta(x - x_0, y - y_0) \quad (2)$$

式中， $G_m$ 表示傅里叶变换后的主影像， $G_s$ 表示傅里叶变换后的从影像， $G_s^*$ 表示 $G_s$ 的共轭复数(图3(b))。利用POT技术获得的形变结果，其监测精度在很大程度上取决于影像像元尺寸(Wang等, 2020)，同时受到匹配窗口大小、时间基线等外部因素影响。目前该技术可以实现的最小像元变化探测度为1/10—1/20个像素(陈强等, 2015; Haemmig等, 2014)。此外，POT方法的测量精度与空间分辨率之间存在固有的权衡关系，其关键在于匹配窗口的尺寸选择(Cai等, 2022)。为避免因

窗口过大导致局部变形信号被平滑，窗口过小因噪声干扰而降低匹配精度，窗口的尺寸应根据观测目标的特征尺度进行设定。基于高分辨率的涪城一号与神启号数据，采用 3 : 3 (距离向 : 方位向) 多视处理，128 (距离向) × 128 (方位向) 窗口；而对中低分辨率的 Sentinel-1 数据，则采用 4 : 1 (距离向 : 方位向) 多视处理，64 (距离向) × 64 (方位向) 窗口。其余参数统一设置为：步长 1、过采样因子 4、互相关系数阈值 0.15。其中，多视处理旨在抑制斑点噪声并提高计算效率；而通过对互相关峰值的过采样，确保了在多视影像上仍能

获取亚像素级的位移提取精度。POT 结果的可靠性通过 4 方面进行评估：基于式 (3) 统计研究区域内结果标准差、位移场信号是否与已有研究结论空间特征相符、不同数据源位移场的空间一致性以及是否完整反映冰川边界形态。同时，进一步将提取的冰川位移与冰川运动学基本规律进行一致性分析，从物理机理层面佐证 POT 结果的合理性。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{N}} \quad (3)$$

式中， $\mu$  表示整体平均值， $N$  表示计算的位移像元个数。

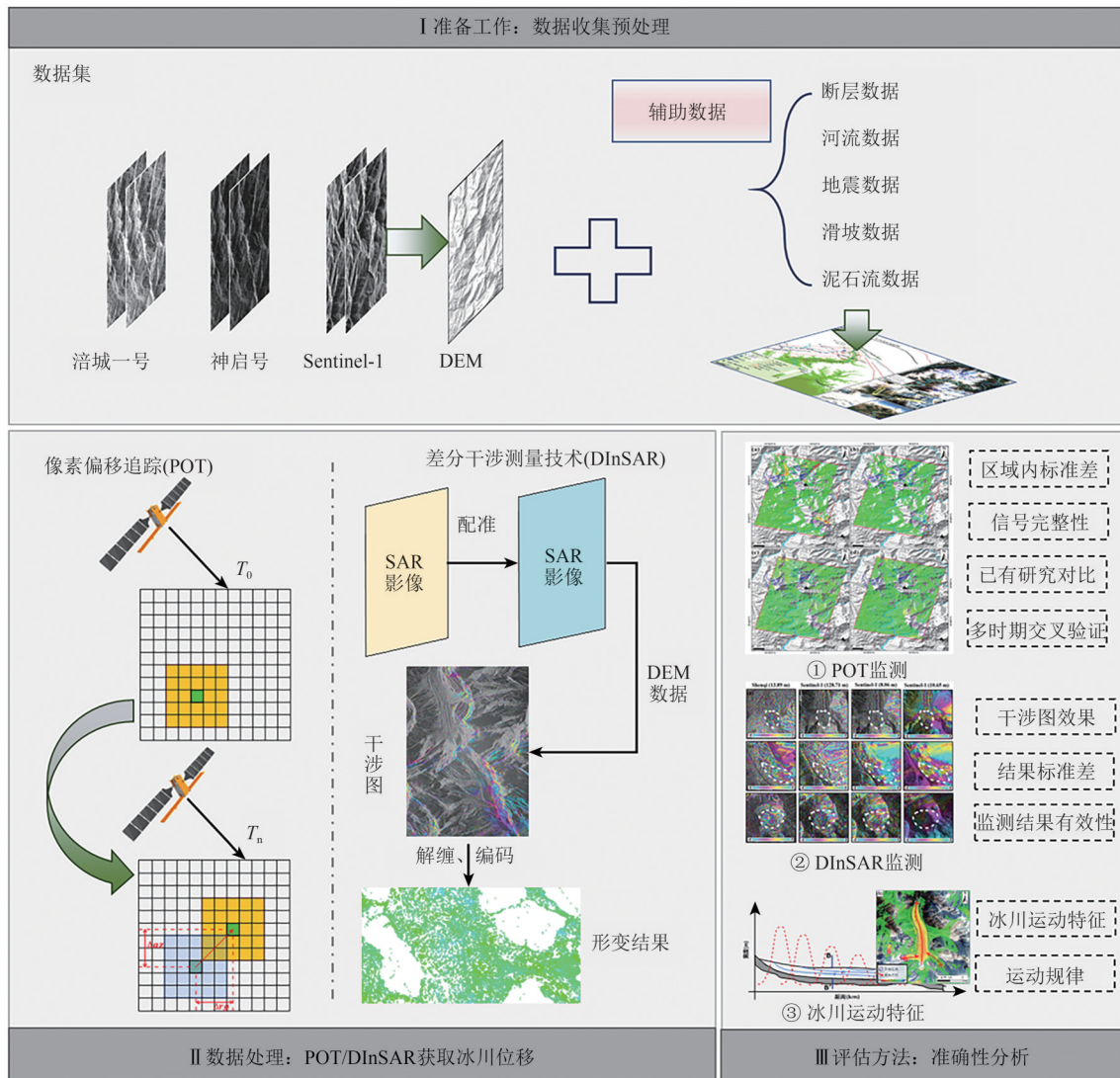


图3 技术流程图

Fig. 3 Technical flowchart

POT 的方位向观测虽可弥补 InSAR 对南北向形变不敏感的缺陷，但由于南北向分量在三维解算中对观测几何不敏感，其结果相较垂直向和东西向精度仍然较低 (朱建军 等, 2022)。本研究在利用强度

信息的基础上，引入相位信息以获取微小量级的形变场 (图 3 II)。具体而言，利用差分干涉测量 (DInSAR) 技术对影像进行精配准、干涉等处理，生成差分干涉图，进而提取更高精度的地表形变信

息(戴可人等, 2025a; Deng等, 2025)。考虑各方面影响, 干涉图中任意干涉相位 $\varphi_{\text{int}}$ 可以表示为

$$\varphi_{\text{int}} = W \{ \varphi_{\text{orb}} + \varphi_{\text{dem}} + \varphi_{\text{dis}} + \varphi_{\text{atm}} + \varphi_{\text{noise}} \} \quad (4)$$

式中,  $W\{\cdot\}$ 为缠绕运算; 干涉相位主要包括轨道差异引起的相位分量 $\varphi_{\text{orb}}$ 、地形起伏 $\varphi_{\text{dem}}$ 、地表形变 $\varphi_{\text{dis}}$ 、大气相位延迟 $\Delta\varphi_{\text{atm}}$ 和噪声分量 $\Delta\varphi_{\text{noise}}$ (Wen等, 2024)。其具体处理包括采用Goldstein滤波与Delaunay MCF相位解缠算法, 相干系数阈值设为0.1。为提升位移场精度, 引入12.5 m分辨率的DEM数据校正地形起伏引起的偏移分量, 并采用多项式模型拟合去除趋势误差, 再结合滤波以抑制噪声。但目前InSAR测量结果定量评估受相位解缠误差、大气延迟效应及几何畸变等因素影响(Chen等, 2021), 加之冰川快速运动导致的失相干限制, 本研究重点针对几何畸变问题, 基于DEM与卫星轨道参数(Kropatsch和Strobl, 1990)计算的几何畸变范围, 量化其适宜观测范围, 确保监测结果的有效性。通过统计其研究区域内监测结果的标准差量化位移的有效信息监测质量; 并结合卫星NESZ等系统参数、影像分辨率、垂直基线3方面定量评估其干涉效果。

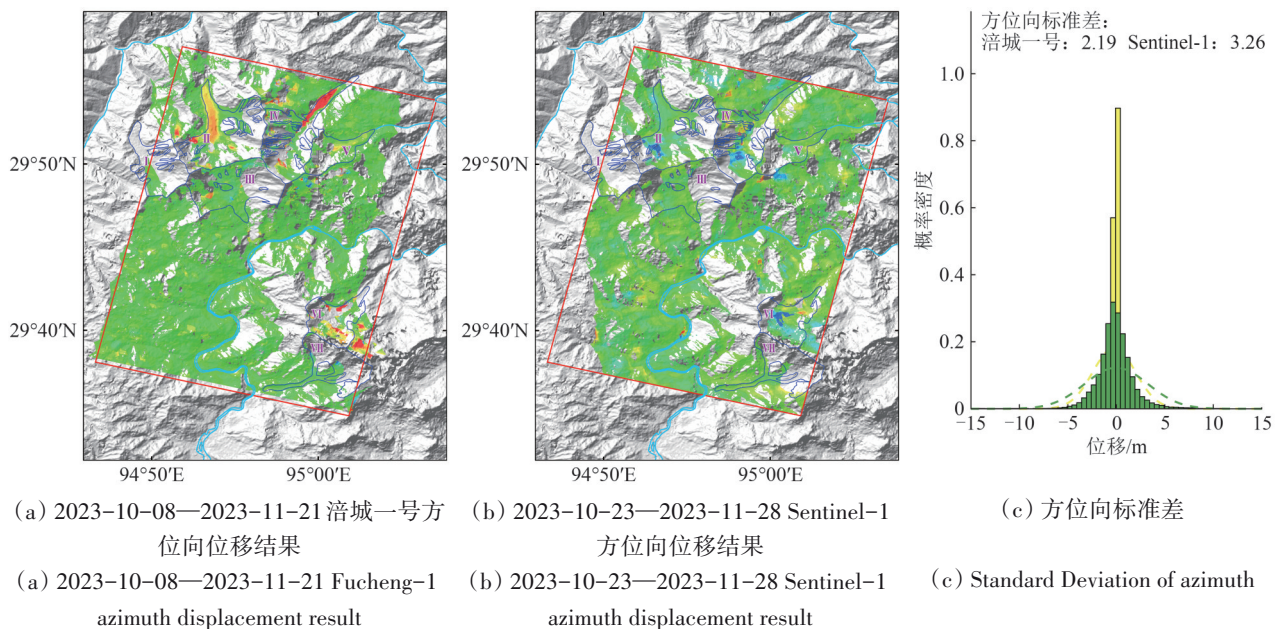
## 4 多源SAR影像监测结果

### 4.1 基于POT的冰川监测结果

采用POT方法对2023年10—11月的涪城一号和Sentinel-1 SAR卫星数据进行冰川流速运动监测, 结果如图4所示。其中红色代表运动信号远离卫星

视线向方向, 蓝色代表运动信号靠近卫星视线向的方向。图3结果表明涪城一号在共识别6处明显的冰川运动信号, 分别位于II号冰川、III号冰川、IV号冰川、V号冰川、VI号冰川和VII号冰川。II号冰川冰舌呈南北走向, 对方向向位移敏感, 位移场空间分布特征与已有研究一致(董继红等, 2021), 从主峰至冰舌5 km的距离内具有典型的多源支沟流向冰川主支, 此段位移达6 m, 流速约13 cm/d, 后向冰舌末端逐渐减小。II号冰川上游积累区支沟位移达14 m, 流速约31 cm/d。在涪城一号方位向识别出最大位移在IV号冰川靠近上游积累区达35 m左右, 流速达79 cm/d。距离向能探测的II号冰川南北主沟量级较小, 约2—3 m。其余冰川支沟方向主要呈现偏东或者偏西, 在方位向和距离向均有位移信号, 且位移量级相似。

通过对比分析发现, 在冰川积累区, 涪城一号和Sentinel-1影像对测量的冰川位移空间分布差异较大, 尤其是加拉白垒主峰附近(图4(a)、(b))。Sentinel-1位移信号主要集中在冰川累积区, 冰舌处仅识别到满足冰川运动特征的较小位移信号(图4(b)、(e))。此外, 2023年10—11月期间, 涪城一号与Sentinel-1基于POT技术获取的该区域位移结果成正态分布, 在方位向的标准差分别为2.19 m、3.26 m, 距离向分别为2.50 m、4.46 m。该统计结果表明, Sentinel-1结果的离散程度显著大于涪城一号(图4(c)、(f)), 反映出其位移场中存在更多噪声或不确定性, 整体可解释性较低(图4(b)、(e))。



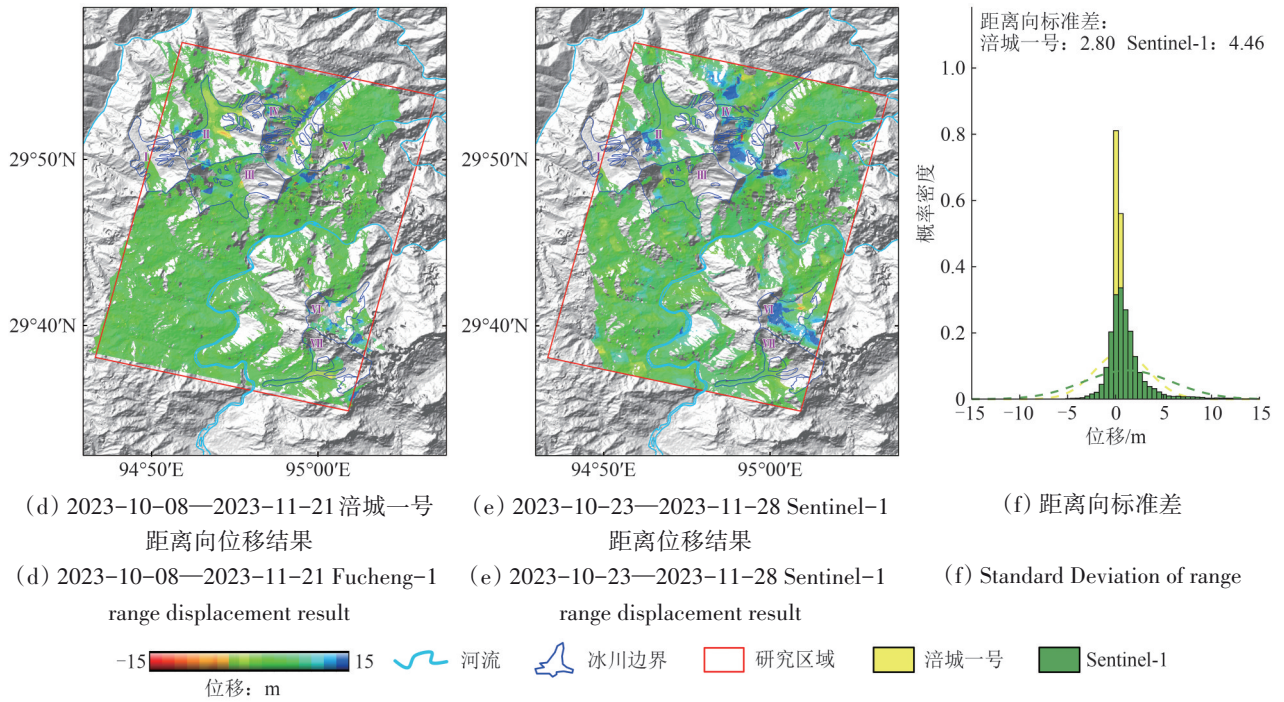
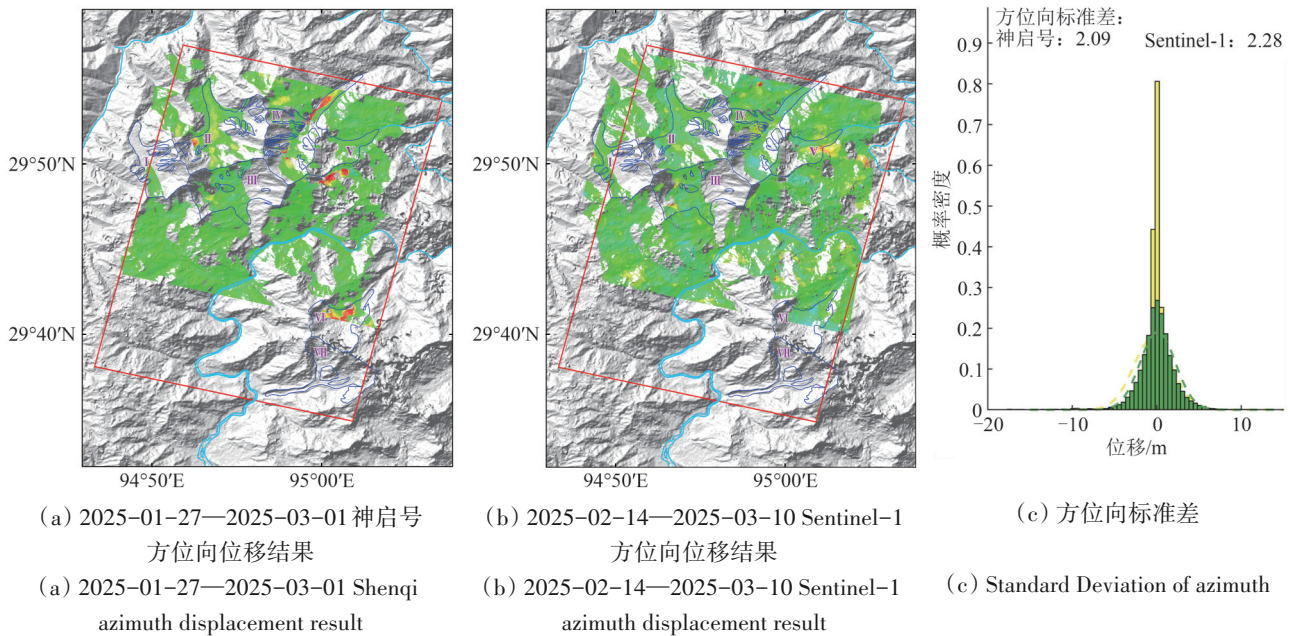


图4 涪城一号与 Sentinel-1 POT 广域识别结果

Fig. 4 Fucheng-1 and Sentinel-1 POT wide-area identification result

同时, 对 2025 年 1 月—3 月的神启号卫星与同时段的 Sentinel-1 数据对冰川表面流速进行监测。由于卫星成像差异, 神启号卫星数据未覆盖到研究区域下方的南迦巴瓦峰, 后续以神启号卫星图幅大小为主。在 2025 年 1 月—3 月 II 号冰川主沟流速约 12 cm/d, 上游支沟的流速可达 33 cm/d (图 5 (a)、(d))。此外, 除南北走向的 II 号冰川外, 其余方向

支沟在方位向与距离向均有探测, IV 号冰川的运动流速最大达 90 cm/d。Sentinel-1 卫星在冰川累积区有位移信号, 冰舌处仍然有较小的位移信号。同上所述, 2025 年 1—3 月期间, 神启号与 Sentinel-1 数据基于 POT 技术获取的该区域位移结果也成正态分布, 在方位向标准差分别为 2.09 m、2.28 m, 距离向分别为 3.42 m、3.17 m。



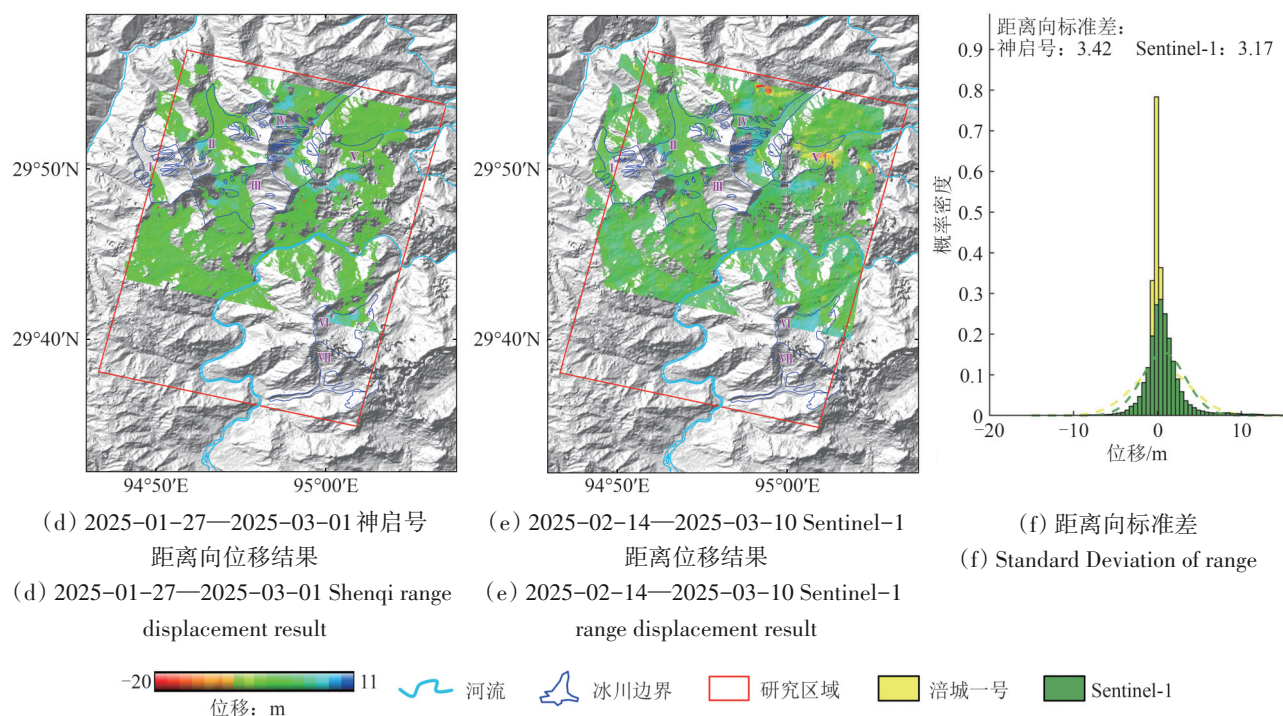


图5 神启号与Sentinel-1 POT广域识别结果

Fig. 5 Shenqi and Sentinel-1 POT wide-area identification result

涪城一号与神启号的高空间分辨率使其能够清晰识别冰裂隙等冰川表面纹理特征, 这种丰富的空间细节增强了影像匹配的可靠性, 从而有效提升了位移提取的精度。相比之下, Sentinel-1 受限于其较低的空间分辨率, 在相同窗口内所包含的独立散射体数量较少, 易受噪声(如窗口内多个冰裂隙散斑噪声、热噪声)影响降低相关性, 导致相关峰不明显、偏移量估计精度降低, 甚至出现错误的偏移量。在形变梯度较小的区域, 中低分辨率影像的小窗口可能不足以提供足够的信息来准确识别偏移 (Debella-Gilo 和 Käab, 2011; Li 等, 2021)。因此, 涪城一号卫星(斜距成像分辨率: 方位向 1.8 m×距离向 1.25 m)与神启号卫星(成像分辨率: 方位向 1.8 m×距离向 1.36 m)的高空间分辨率, 为利用 POT 技术实现冰川流速的精确监测提供关键数据支撑; 而 Sentinel-1 卫星(斜距成像分辨率: 方位向 13.96 m×距离向 2.33 m)受限于相对较低的分辨率, 采用较小窗口对该区域内中小尺度冰川运动形变无法实现准确探测或低估。

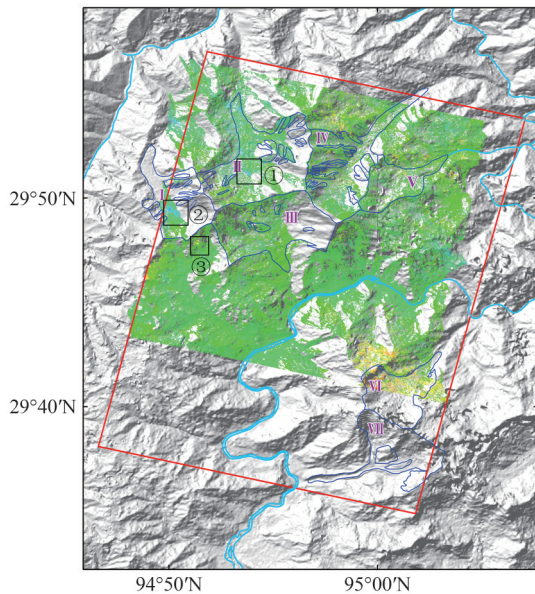
#### 4.2 神启号重轨干涉冰川监测结果

本研究选取 2025 年 3 月 1 日和 2025 年 3 月 12 日神启号影像采用 DInSAR 技术对色东普流域开展时间跨度为 11 d 的冰川表面流速监测。两景影像的平均相干系数 0.29, 整体相干性较低, 但仍通过 DInSAR 技术提取出局部冰川运动信号。研究区内适宜观测面积占比达到 59.24%, 掩膜几何畸变后的结果标准差为 0.019 mm, 表明监测结果具有较稳定的质量。位移信号主要分布于 I 号、II 号及 VI 号冰川, 在卫星视线向上, 最大位移量达 90 mm (图 6 (a))。相比之下, 使用同期 Sentinel-1 影像得到的适宜观测面积占比为 52.14%, 其监测结果的标准差为 0.027 mm。现已有研究表明, InSAR 结果的失相干由基线条件、地物特性、时间间隔及系统参数等多因素共同影响 (Han 等, 2025)。由于神启号和 Sentinel-1 数据在系统参数上(表 2)基本一致, 因此二者干涉效果的差异主要由空间分辨率及垂直基线导致。在数据的选择上, 本文遵循时间同步原则, 选取了 2025-02-26—2025-03-10 期间的 Sentinel-1 右视升轨(垂直基线 128.71 m)

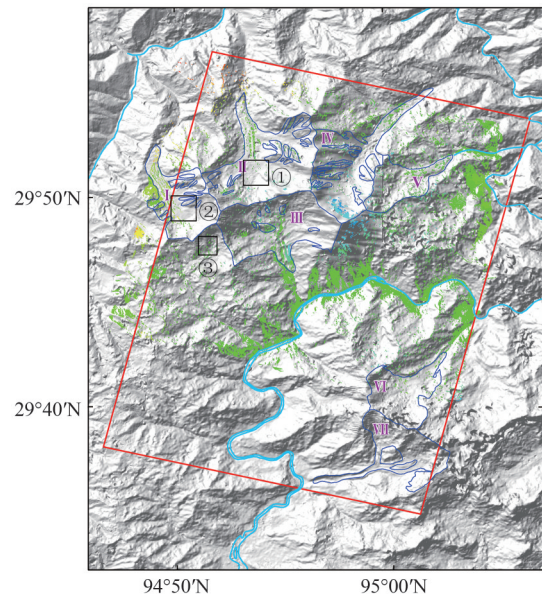
与右视降轨 (2023-03-05—2025-03-17, 垂直基线 86.21 m) 干涉对, 与同期的神启号左视降轨数据进行对比。其中, 神启号数据垂直基线 (13.89 m) 较短, 且具有更高的空间分辨率, 虽有助于抑制空间失相干, 但研究区域的冰川运动仍导致了明显的失相干。而 Sentinel-1 不仅垂直基线较长 (128.71 m), 且本身空间分辨率较低, 二者叠加进一步放大了冰川运动引起的失相干, 导致其相干性显著下降, 干涉图中有效相位信息严重损失, 有效观测点密度极低 (图 6 (b)、(e)、(f)、(i)、(j)、(m)、(n))。通过引入不同观测几何与中长基线的对比组, 进一步排除几何关系对干涉效果的干扰, 图 7 结果表明, 在相似时间尺度下, 具备短基线与高空间分辨率特征的神启号表现出优于

Sentinel-1 的干涉效果。值得指出的是, 若选用时空基线均较短的 Sentinel-1 影像对, 其干涉效果有望提升。然而, 当时空基线差异不显著时, 冬季积雪覆盖引起的地表失相干, 则成为制约干涉效果的主要因素 (图 7 (c)、(h)、(m)); 图 7 (d)、(i)、(n))。未来如能获得同一时期、时空基线相近的多源数据, 将有助于更客观评估不同卫星数据的监测能力。此外, 若将涪城一号与神启号联合构建 4 d 重复周期的双星观测体系, 将显著提升对冰川运动的高频探测与动态识别能力。

综上, 神启号卫星凭借其高分辨率、短基线与短重复周期特性, 在短时间间隔下的冰川运动形变场监测中具有较高的应用潜力。

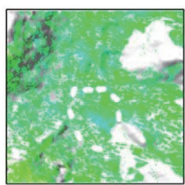


(a) 2025-03-01—2025-03-12 神启号 DInSAR 形变结果

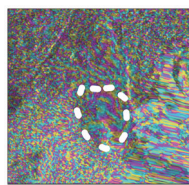


(b) 2025-02-26—2025-03-10 Sentinel-1 DInSAR 形变结果

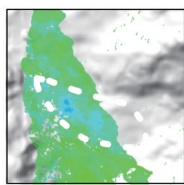
(a) 2025-03-01—2025-03-12 Shenqi DInSAR deformation result (b) 2025-02-26—2025-03-10 Sentinel-1 DInSAR deformation result



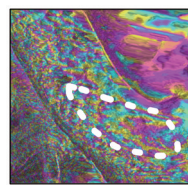
(c) ①区域神启号 DInSAR 形变结果  
(c) Shenqi DInSAR deformation for area ①



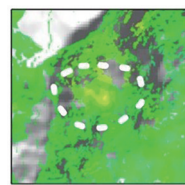
(d) ①区域神启号 DInSAR 干涉图  
(d) Shenqi DInSAR interferogram for area ①



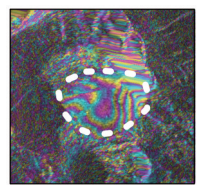
(g) ②区域神启号 DInSAR 形变结果  
(g) Shenqi DInSAR deformation for area ②



(h) ②区域神启号 DInSAR 干涉图  
(h) Shenqi DInSAR interferogram for area ②



(k) ③区域神启号 DInSAR 形变结果  
(k) Shenqi DInSAR deformation for area ③



(l) ①区域神启号 DInSAR 干涉图  
(l) Shenqi DInSAR interferogram for area ①

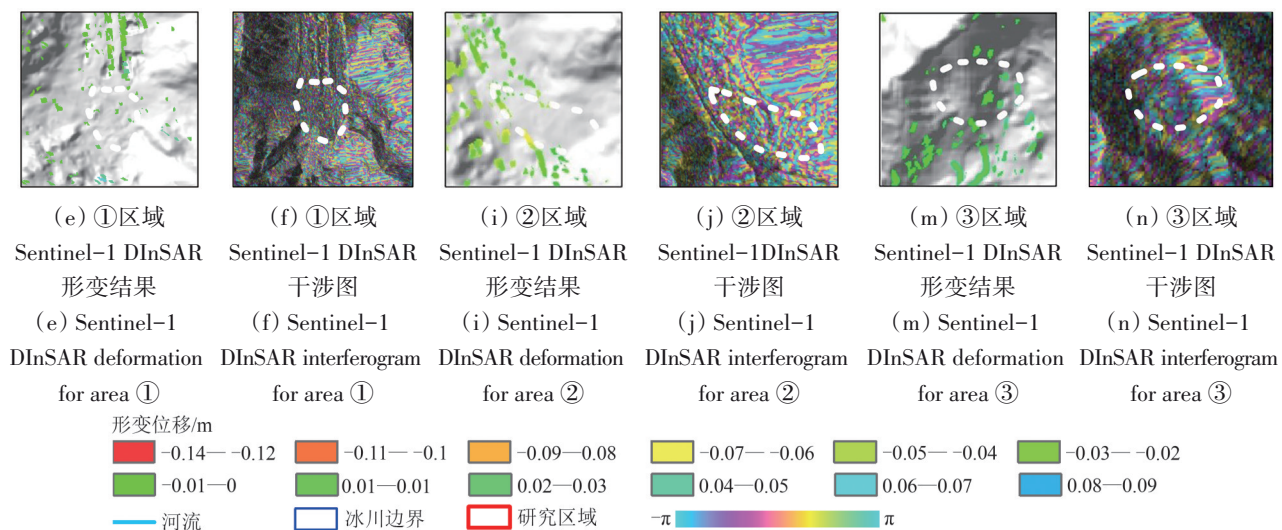


图6 不同SAR影像干涉结果

Fig. 6 Interferometric result of different SAR data

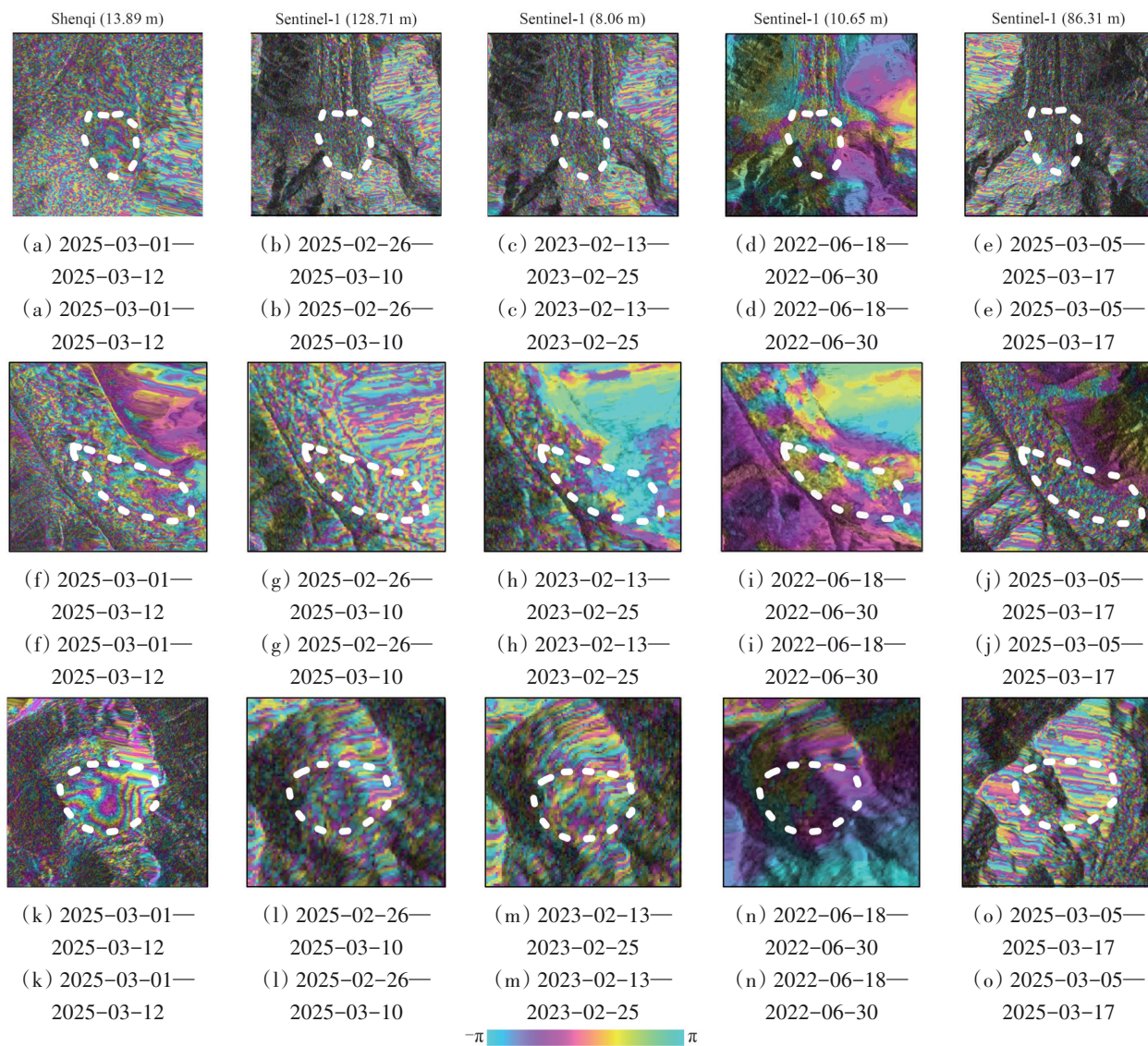


图7 不同SAR影像干涉图对比结果

Fig. 7 Comparison results of different SAR image interferograms

### 5 典型冰川流速监测对比分析

为进一步分析涪城一号、神启和 Sentinel-1 数据在冰川监测方面的优势, 本文在涪城一号广域监测结果中选取典型的两个多源支沟冰川, 即 II 号冰川 (岗普冰川) 和 III 号冰川 (色东普冰川) 进行对比分析。图 8 是 Sentinel-1 和涪城一号对 II 号岗普冰川位移监测结果, 由于 II 号冰川主沟走向为南北向, 所以方位向具有明显的信号。在方位向上, 涪城一号数据探测的结果具有明显的条状特征、且更符合冰川冰舌边界, Sentinel-1 则特

征相对不明显 (图 8 (a)、(b))。在距离向上, 涪城一号数据对 II 号冰川的东西向支沟位移监测具有补充作用 (图 8 (d))。而受影像分辨率影响, Sentinel-1 位移结果大部分靠近冰川累积区, 冰舌处显示部分位移信号 (图 8 (a)、(c))。III 号色东普主沟与支沟坡面方向各异, 各支沟大致以东西向为主, 因此距离向比方位向探测的结果更为明显 (图 9 (b)、图 9 (d)), 且理论上对朝东的坡向更适宜观测 (Dai 等, 2022)。Sentinel-1 结果在色东普主沟的东西两侧位移信号空间分布与涪城一号相似 (图 9 (a)、图 9 (c))。

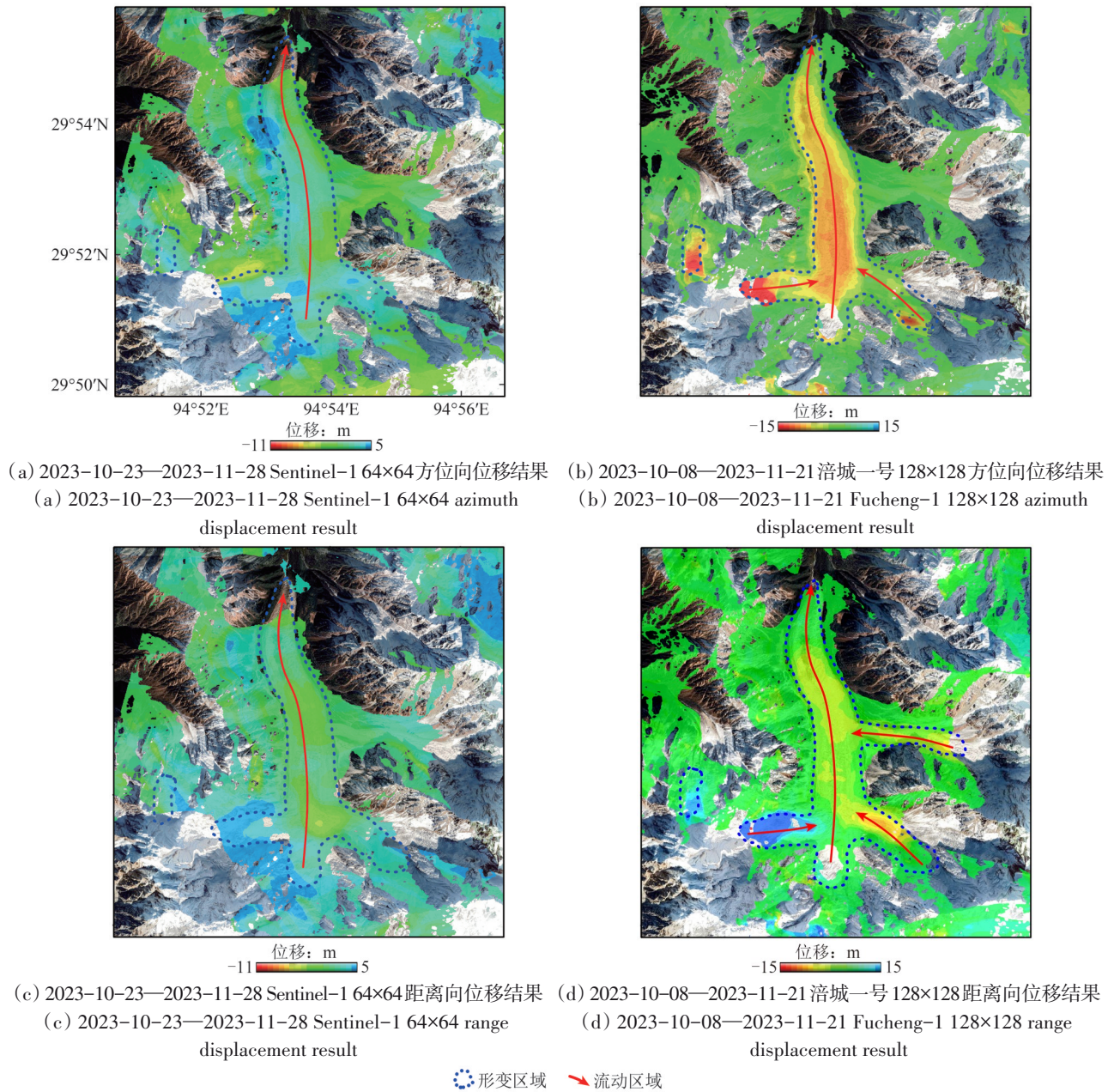


图 8 Sentinel-1 和涪城一号数据 II 号冰川对比结果

Fig. 8 Comparison of Sentinel-1 and Fucheng-1 data for Glacier No. II

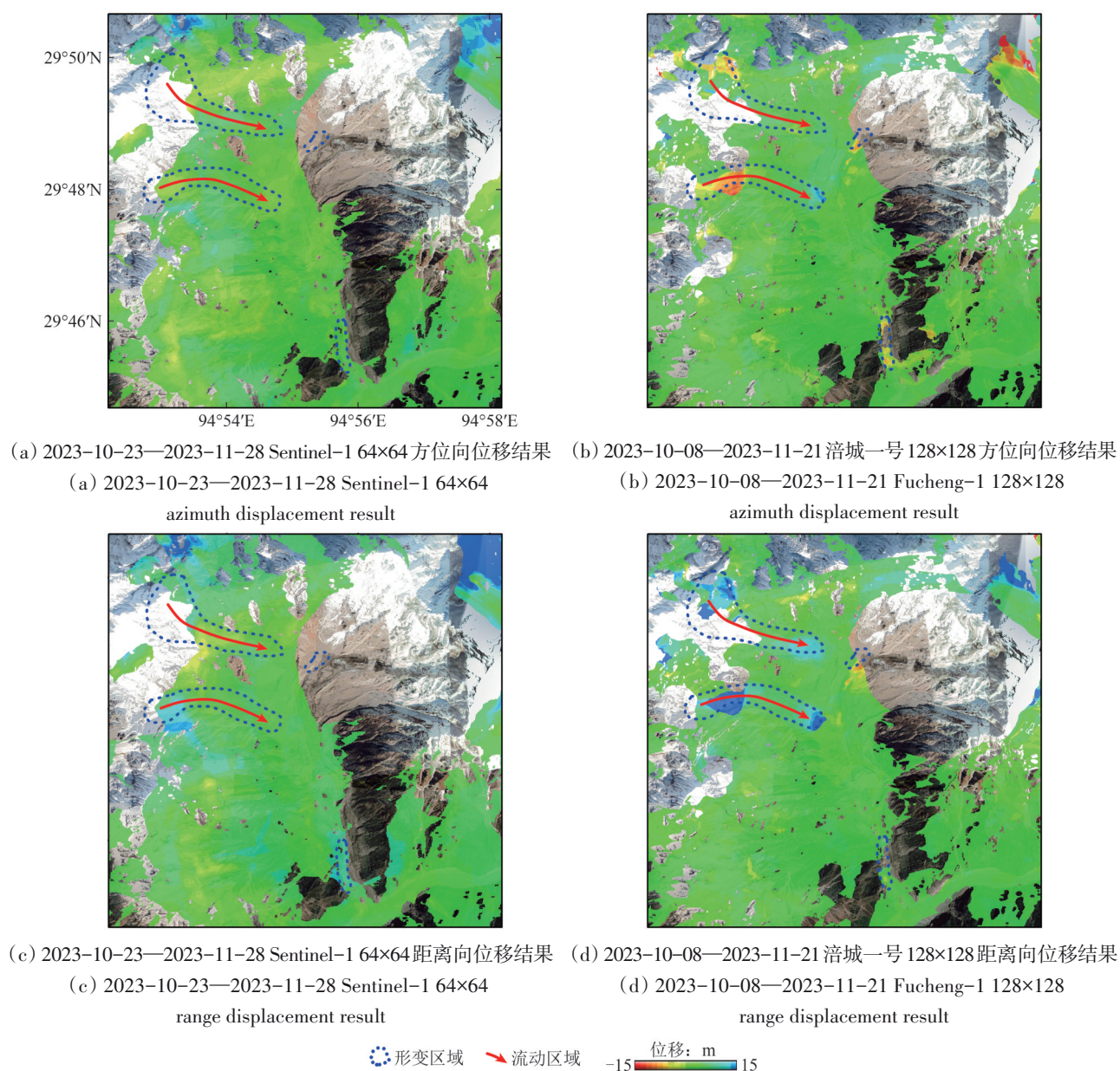


图9 Sentinel-1和涪城一号数据Ⅲ号冰川对比结果

Fig. 9 Comparison of Sentinel-1 and Fucheng-1 data for Glacier No. III

同时,在神启数据广域监测结果中选择自西南向东北走向的Ⅳ号冰川,在方位向上,神启数据显示冰川靠近积累区存在显著位移信号,表明该区域存在较强的南北向运动分量,最大位移达到30 m,流速90 cm/d(图10(b));距离向位移则反映出东西向运动(图10(d)),位移量级在冰川积累区达11 m左右。而Sentinel-1方位向和距离向结果在冰舌处显示出部分运动信号(图10(c))。整体上,神启号卫星的监测结果在位移量值、空间细节及流向(红色箭头所示)方面均呈现良好的解译性,证实了神启号卫星数据在高山冰川区

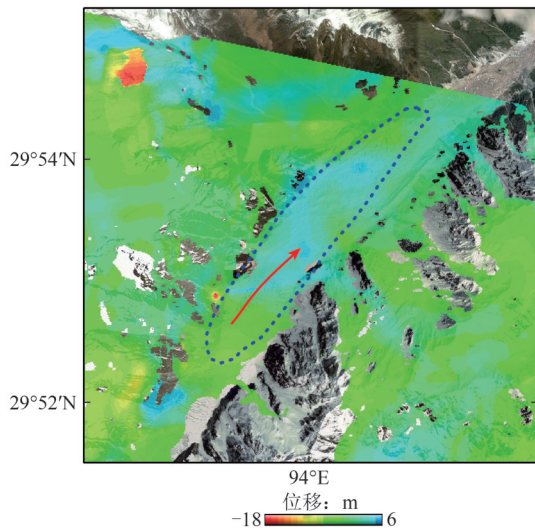
表面位移监测中具备明显优势。

综上,在识别冰川边界清晰度与准确度上及探测冰川运动形变梯度方面,定性说明涪城一号数据与神启数据监测效果明显优于Sentinel-1数据。且位移量级与空间分布形态在涪城一号和神启号两源数据间高度吻合(图4)。

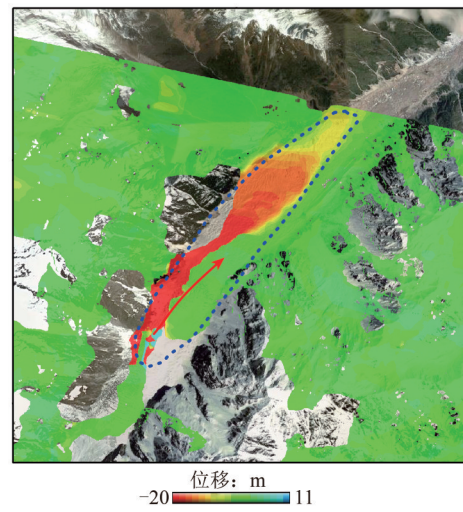
另一方面,基于有效点覆盖完整,以及冰川多源支沟特点的原则选取Ⅱ号冰川方位向结果进行涪城一号和Sentinel-1对比,选取Ⅳ号冰川方位向结果进行神启号和Sentinel-1对比(图11(a)、(b))。根据冰川运动特点,冰舌纵向上位移运动

信号满足逐渐减少的趋势, 横向上满足中间高, 两边低的特征 (张生鹏 等, 2020)。在 II 号岗普冰川在主沟方向选取 A-A' 纵剖面线及 B-B' 横剖面线。在 A-A' 纵剖面线上, 涪城一号监测的最大位移量约 6 m, 而 Sentinel-1 监测最大位移量约 5 m。两种数据监测位移整体上呈现位移量逐渐降低的趋势, 一定程度上符合冰川运动特征; 同时, 在该冰川剖面线 2.5 km 附近的支沟处, 涪城一号监

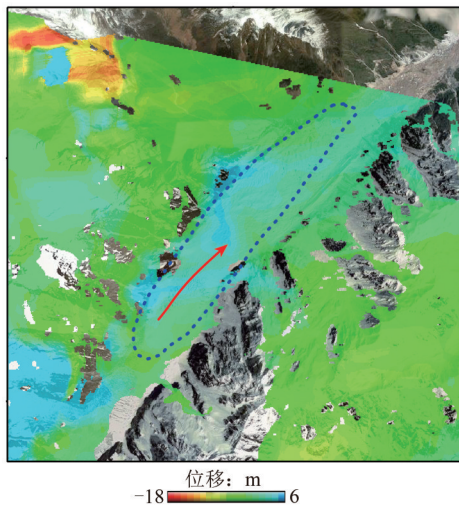
测结果有明显的位移峰值, 其主要由于上游冰碛物堆积及右侧支流冰川汇集到冰川主流上, 与已有研究变化相符 (董继红 等, 2021) (图 11 (a)、(c))。在 B-B' 横剖面, 涪城一号监测的最大位移量约 3.5 m, 结果均呈现出明显的波谷特征, 符合冰川横向中间大于两侧的运动特征; 而此处 Sentinel-1 监测最大位移量约 3 m, 但呈现逐渐减小趋势, 冰川横向运动特征不明显 (图 11 (d))。



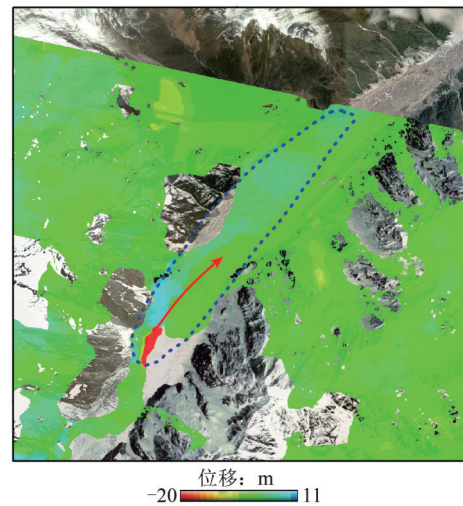
(a) 2025-02-14—2025-03-10 Sentinel-1 64×64 方位向位移结果  
(a) 2025-02-14—2025-03-10 Sentinel-1 64×64 azimuth displacement result



(b) 2025-01-27—2025-03-01 神启号 128×128 方位向位移结果  
(b) 2025-01-27—2025-03-01 Shenqi azimuth 128×128 displacement result



(c) 2025-02-14—2025-03-10 Sentinel-1 64×64 距离向位移结果  
(c) 2025-02-14—2025-03-10 Sentinel-1 64×64 range displacement result

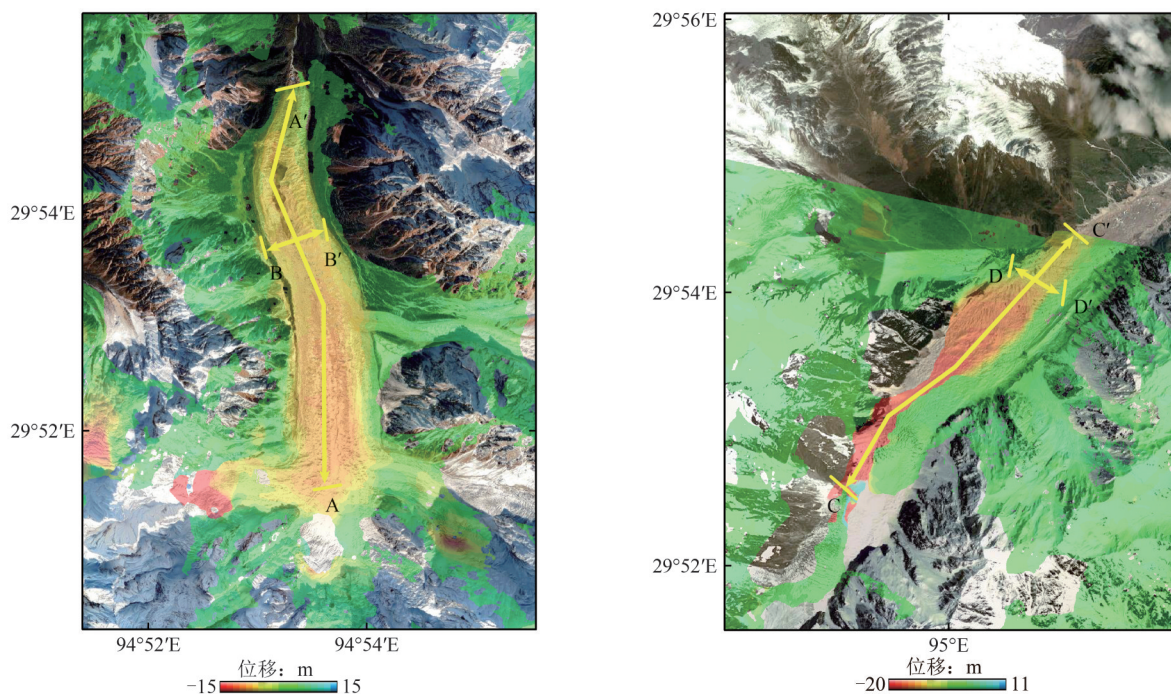


(d) 2025-01-27—2025-03-01 神启号 128×128 距离向位移结果  
(d) 2025-01-27—2025-03-01 Shenqi 128×128 range displacement result

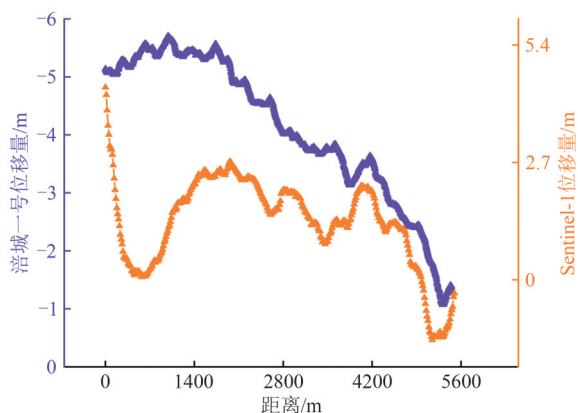
● 形变区域    → 流动区域

图 10 Sentinel-1 和神启号数据 IV 号冰川对比结果

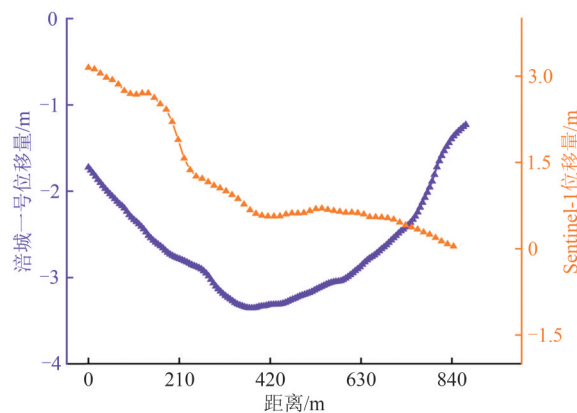
Fig. 10 Comparison of Sentinel-1 and Shenqi data for Glacier No. IV



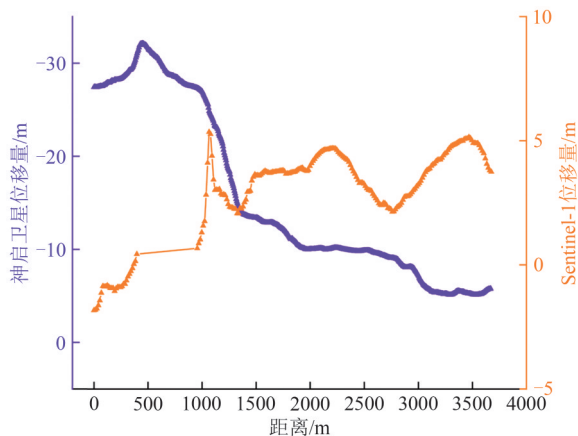
(a) 涪城一号卫星 2023-10-08—2023-11-21 POT 方位向结果 (b) 神启号卫星 2025-01-27—2025-03-01 POT 方位向结果  
 (a) 2023-10-08—2023-11-21 Fucheng-1 azimuth displacement (b) 2025-01-27—2025-03-01 Shenqi azimuth displacement result



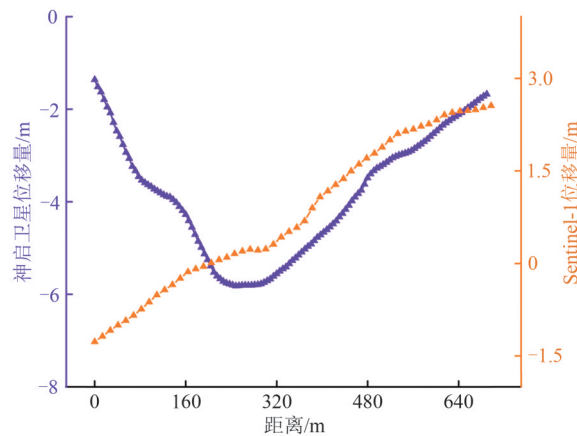
(c) A-A' 剖面线结果  
 (c) A-A' profile line result



(d) B-B' 剖面线结果  
 (d) B-B' profile line result



(e) C-C' 剖面线结果  
 (e) C-C' profile line result



(f) D-D' 剖面线结果  
 (f) D-D' profile line result

图 11 剖面线特征对比结果

Fig. 11 Profile line feature comparison result

在神启号和 Sentinel-1 对比结果中, 位移变化趋势上神启号定性的满足冰川纵向与横向位移运动特征, 在 C-C' 纵向上最大达 30 m, 而 Sentinel-1 结果在纵向上出现明显的波动 (图 11 (e))。在 D-D' 处横向剖面线中呈现线性特征, 冰川横向运动的“漏斗”特征不明显 (图 11 (f))。

此外, 涪城一号与神启号卫星因数据获取原因在时间上无法对齐, 但在空间上有重叠观测, 其整体结果从图 4 (a) 和图 5 (a) 可以看出, 其冰川位移主要分布在 II 号冰川、III 号冰川、IV 号冰川、V 号冰川、VI 号冰川和 VII 号冰川, 空间分布特征高

度一致。其中, V 号冰川在两星的 POT 结果监测中均呈现出明显的位移运动信号, 尽管涪城一号与神启号所监测到的冰川运动速率在数值上较为接近, 但需注意两者数据获取时段存在显著差异 (图 12), 涪城一号数据来自 2023 年 10 月—11 月, 时间间隔为 44 d; 而神启号数据取自 2025 年 1 月—3 月, 时间间隔为 33 d。不同季节的气温条件可能对冰川运动机制产生影响, 在时段更近、间隔更短的神启号观测中仍能维持相近的高流速值, 这可能表明该区域冰川运动在近年呈现加速趋势, 但仍需结合更多时序观测结果予以进一步验证。

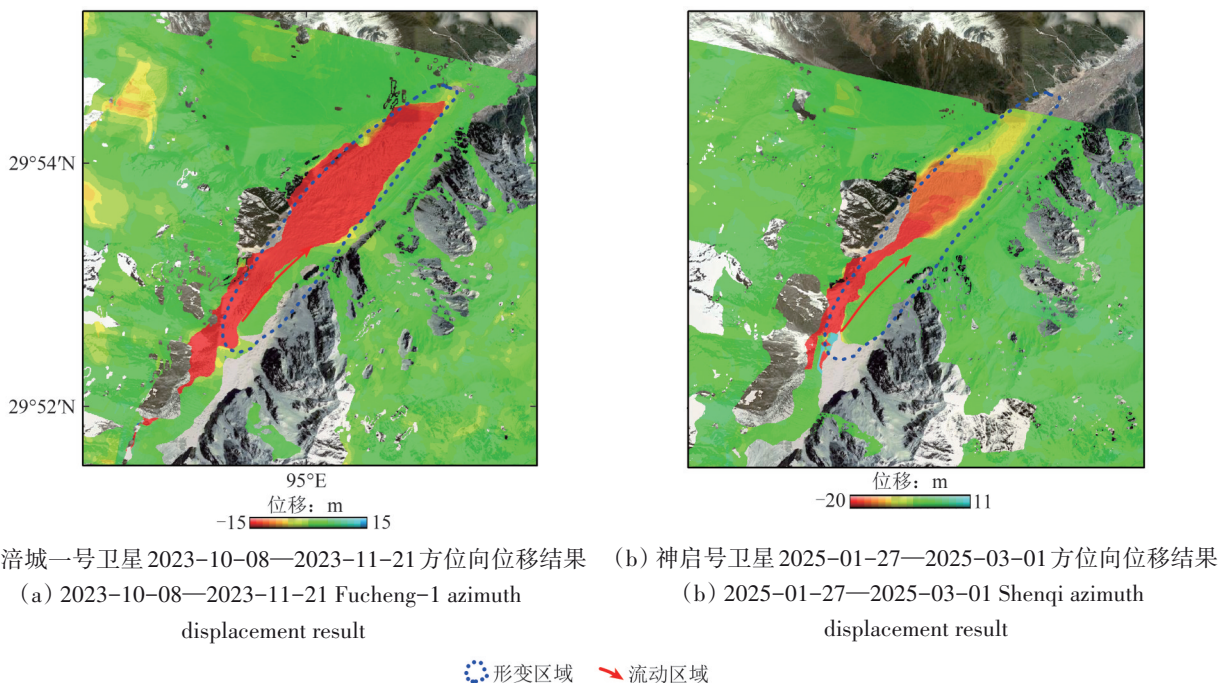


图 12 涪城一号与神启号 V 号冰川结果对比

Fig. 12 Comparison of Fucheng-1 and Shenqi data for Glacier No. V

综上, 通过冰川监测结果的边界特征、剖面线相对位置的位移变化特征及两星监测结果相互佐证均表明涪城一号与神启号数据结果符合冰川运动监测。

## 6 结论

本文主要基于 2023 年 10—11 月的涪城一号与 Sentinel-1, 以及 2025 年 1—3 月的天仪 41 星 (神启号) 与同期 Sentinel-1 SAR 影像, 采用像素偏移追踪 (POT) 技术和 DInSAR 技术分别提取了不同场景下的色东普流域周边冰川的表面位移场。POT 监测结果表明, 涪城一号与神启号数据凭借影像高分辨率, 在不同时间段均识别出 6 处明显的冰川

运动信号, 且空间分布一致。涪城一号数据在方位向监测的最大位移量达 35 m, 平均速率约 79 cm/d。神启号卫星在方位向监测的最大位移量达 30 m, 平均速率约 90 cm/d, 而 Sentinel-1 受限于空间分辨率较低, 仅在冰川运动较大的累积区有效识别出显著运动信号。在 DInSAR 方面, 神启卫星数据具备高分辨率、短空间基线, 在冬季冰川局部消融区生成完整清晰的干涉条纹, 表现出优于 Sentinel-1 的干涉效果。典型冰川分析显示, 涪城一号与神启号数据的冰川监测结果特征更符合冰川实际运动特征。

本研究以色东普沟冰川为例, 探讨了国产高分辨率 SAR 数据在高动态、小规模冰川监测中的适

用性。结果表明,相较于 Sentinel-1 等宽幅数据,“涪城一号”等高分辨率 SAR 影像在捕捉小尺度冰川的精细形变方面具有明显优势,尤其适用于喜马拉雅等地区密集分布的小型冰川的精确监测。“神启号”星座凭借高分辨率、短基线、短重复周期特性,使得该数据在探测冰川跃动、冰崩等快速动态过程方面展现出显著潜力。针对高速运动冰川, POT 技术优于 DInSAR 技术,尤其在强消融期, DInSAR 易因表面变化导致失相干,此时 POT 结合国产高分辨率数据构成更可靠的技术路径。而中低分辨率卫星数据(如 Sentinel-1)若采用较小窗口探测小尺度冰川,难以保证足够的信噪比与匹配可靠性,而窗口过大又会平滑局部变形信号,无法真实反映冰川运动的细节特征。因此, Sentinel-1 更适用于大尺度冰川动态的宏观监测与区域普查任务,其在空间覆盖与数据获取成本方面具备综合优势。综上,国产 SAR 数据更适用于重点区域的冰川精细化动态的监测。

本研究初步评估了国产商业 SAR 卫星在小尺度冰川运动监测中的应用潜力。涪城一号与神启卫星凭借较短的空间基线与更高的分辨率,表现出优于 Sentinel-1 的基于 POT 技术的位移提取精度与干涉效果,适用于冰川时空变化规律的细节捕捉及其对气候变化响应机制的研究,为冰冻圈遥感提供了重要的数据支持。

**志 谢** 此次实验国产 SAR 数据获取得到了长沙天仪空间科技研究院有限公司和张掖星座空间科技有限公司的支持,在此表示衷心的感谢!文中相关国产 SAR 数据可登录官网查询 <http://data.spacety.com>。

## 参考文献(References)

- Cai J H, Zhang L, Dong J, Wang C C and Liao M S. 2022. Polarimetric SAR pixel offset tracking for large-gradient landslide displacement mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 112: 102867 [DOI: 10.1016/j.jag.2022.102867]
- Chen Q, Luo R, Yang Y H and Yong Q. 2015. Method and accuracy of extracting surface deformation field from SAR image coregistration. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 44(3): 301-308 (陈强, 罗容, 杨莹辉, 雍琦. 2015. 利用 SAR 影像配准偏移量提取地表形变的方法与误差分析. *测绘学报*, 44(3): 301-308) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130782]
- Chen Y, Yu S W, Tao Q X, Liu G L, Wang L Y and Wang F Y. 2021. Accuracy verification and correction of D-InSAR and SBAS-InSAR in monitoring mining surface subsidence. *Remote Sensing*, 13(21): 4365 [DOI: 10.3390/rs13214365]
- Dai K R, Deng J, Xu Q, Li Z H, Shi X L, Hancock C, Wen N L, Zhang L L and Zhuo G C. 2022. Interpretation and sensitivity analysis of the InSAR line of sight displacements in landslide measurements. *GIScience and Remote Sensing*, 59(1): 1226-1242 [DOI: 10.1080/15481603.2022.2100054]
- Dai K R, Liang R B, Wang X, Li Z J, Han Y K and Xu Q. 2025a. Methods for qualitative evaluation of DInSAR for monitoring displacement of geological hazards. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 52(6): 1072-1083 (戴可人, 梁茹冰, 王鑫, 李洲江, 韩亚坤, 许强. 2025a. 地质灾害 DInSAR 形变监测结果质量评估与判别方法. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 52(6): 1072-1083) [DOI: 10.12474/cdlgz-rkx.2024112602]
- Dai K R, Xu Q, Deng J, Zhuo G C, Chen Y D, Han Y K and Li Z H. 2025b. Review on large-scale identification of potential landslides with InSAR. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 50(8): 1469-1482 (戴可人, 许强, 邓晋, 卓冠晨, 陈有东, 韩亚坤, 李振洪. 2025b. 滑坡隐患 InSAR 广域识别研究综述. *武汉大学学报(信息科学版)*, 50(8): 1469-1482) [DOI: 10.13203/j.whugis20250204]
- Debella-Gilo M and Käab A. 2011. Sub-pixel precision image matching for measuring surface displacements on mass movements using normalized cross-correlation. *Remote Sensing of Environment*, 115(1): 130-142 [DOI: 10.1016/j.rse.2010.08.012]
- Deng J, Dai K R, Han Y K, Wen N L, Zhuo G C and Xu Q. 2025. Robust retrieval of slope-parallel landslide displacements from single-track InSAR observations: a line of sight (LOS) sensitivity correction framework. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 63: 5212811 [DOI: 10.1109/TGRS.2025.3570129]
- Dong J H, Yang C S, Zhang B H and Zhao C Y. 2021. Typical glacier displacement monitoring of Gyala Peri based on SAR offset tracking technology. *Journal of Gansu Sciences*, 33(2): 1-7 (董继红, 杨成生, 张本浩, 赵超英. 2021. 基于 SAR 偏移量跟踪技术的加拉白垒峰典型冰川位移监测. *甘肃科学学报*, 33(2): 1-7) [DOI: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2021.02.001]
- Feng X M, Chen Z Q, Li G, Ju Q, Yang Z B and Cheng X. 2023. Improving the capability of D-InSAR combined with offset-tracking for monitoring glacier velocity. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113394 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113394]
- Friedl P, Seehaus T and Braun M. 2021. Global time series and temporal mosaics of glacier surface velocities derived from Sentinel-1 data. *Earth System Science Data*, 13(10): 4653-4675 [DOI: 10.5194/essd-13-4653-2021]
- Guo W Q, Zhang Z, Wu K P, Liu S Y, Shanguan D H, Xu J L, Jiang Z L and Wang X. 2022. A review on the advances in surge-type glacier study. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 44(3): 954-970 (郭

- 万钦, 张震, 吴坤鹏, 刘时银, 上官冬辉, 许君利, 蒋宗立, 王欣. 2022. 跃动冰川研究进展. 冰川冻土, 44(3): 954-970 [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0091]
- Haemmig C, Huss M, Keusen H, Hess J, Wegmüller U, Ao Z G and Kulubayi W. 2014. Hazard assessment of glacial lake outburst floods from Kyagar glacier, Karakoram mountains, China. *Annals of Glaciology*, 55(66): 34-44 [DOI: 10.3189/2014AoG66A001]
- Han Y K, Dai K R, Deng J, Wen N L, Ren W J, Chen X F, Du J and Wang H. 2025. Fucheng-1, high-resolution Chinese interferometric SAR: first DInSAR result for landslides monitoring. *Measurement*, 247: 116876 [DOI: 10.1016/j.measurement.2025.116876]
- Jung H S, Won J S and Kim S W. 2009. An improvement of the performance of multiple-aperture SAR interferometry (MAI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2859-2869 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2016554]
- Jung H S, Yun S H and Jo M J. 2015. An improvement of multiple-aperture SAR interferometry performance in the presence of complex and large line-of-sight deformation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(4): 1743-1752 [DOI: 10.1109/JSTARS.2015.2399249]
- Kropatsch W G and Strobl D. 1990. The generation of SAR layover and shadow maps from digital elevation models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(1): 98-107 [DOI: 10.1109/36.45752]
- Li S Y, Leinss S and Hajnsek I. 2021. Cross-correlation stacking for robust offset tracking using SAR image time-series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 4765-4778 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3072240]
- Liu Z C. 2020. Seismic zonation map of western Asia (1960-2019)[EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. [2025-09-12]. <https://data.tpd.ac.cn/zh-hans/data/b49af392-d41e-4c24-badd-473d5b136305> (刘志成. 2020. 西亚地区地震区划图(1960-2019)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. [2025-09-12]. <https://data.tpd.ac.cn/zh-hans/data/b49af392-d41e-4c24-badd-473d5b136305>)
- Liu Z W, Yang C S, Li T, Wei C R, Zhou L X, Lyu S and Zhu S N. 2025. Joint monitoring glacier displacement of the Cuolangma glacier based on LuTan-1 and Sentinel-1A imageries with SAR offset tracking. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 1-19 (刘泽伟, 杨成生, 李涛, 魏春蕊, 周临轩, 吕森, 朱赛楠. 2025. 联合 LuTan-1 和 Sentinel-1A 应用 SAR 偏移量技术的错朗玛冰川位移监测. 武汉大学学报(信息科学版), 1-19) [DOI: 10.13203/j.whugis20240076]
- Nan X, Li A N and Deng W. 2022. Data set of "Digital Mountain Map of China" (2015) [EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. [2025-09-12]. <https://www.tpd.ac.cn/zh-hans/data/efa1dc3f-5f2d-4e60-8bf7-3ea4c6ec1929/> (南希, 李爱农, 邓伟. 2022. "中国数字山地图"数据集(2015)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. [2025-09-12]. <https://www.tpd.ac.cn/zh-hans/data/efa1dc3f-5f2d-4e60-8bf7-3ea4c6ec1929/>) [DOI: 10.11888/Terre.tpd.272523]
- Potin P, Rosich B, Grimont P, Miranda N, Shurmer I, O'Connell A, Torres R and Krassenburg M. 2016. Sentinel-1 mission status// *Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar*. Hamburg: VDE: 1-6
- Pritchard H, Murray T, Luckman A, Strozzi T and Barr S. 2005. Glacier surge dynamics of Sortebrae, east Greenland, from synthetic aperture radar feature tracking. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 110(F3): F03005 [DOI: 10.1029/2004JF000233]
- Qi L, Wang M H, Hu C M and Holt B. 2022. On the capacity of Sentinel-1 synthetic aperture radar in detecting floating macroalgae and other floating matters. *Remote Sensing of Environment*, 280: 113188 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113188]
- Ran Y H, Li X, Che T, Feng M, Zhu J B, Zhou Y S, Hui F M, Qiu Y B, Dou T F, Li Y Z, Zheng D H and Jin R. 2025. Recent progress and emerging frontiers in China's cryosphere remote sensing research. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(6): 1831-1847 (冉有华, 李新, 车涛, 冯敏, 朱金彪, 周玉杉, 惠凤鸣, 邱玉宝, 窦挺峰, 李宜展, 郑东海, 晋锐. 2025. 中国冰冻圈遥感近期研究进展与若干前沿问题探讨. 遥感学报, 29(6): 1831-1847) [DOI: 10.11834/jrs.20255066]
- Strozzi T, Luckman A, Murray T, Wegmüller U and Werner C L. 2002. Glacier motion estimation using SAR offset-tracking procedures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2384-2391 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.805079]
- Strozzi T, Wiesmann A, Sharov A, Kouraev A, Wegmüller U and Werner C. 2006. Capabilities of L-band SAR data for arctic glacier motion estimation// *Proceedings of IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing*. Denver: IEEE: 3816-3819 [DOI: 10.1109/IGARSS.2006.978]
- Tong L Q. 2020. Statistical data set of major geological disasters in Himalayas[EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. [2025-09-12]. <https://www.tpd.ac.cn/zh-hans/data/a2128e3f-a913-40ba-a7b1-3318cb4031d5/> (童立强. 2020. 喜马拉雅山地区重大地质灾害统计数据集[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. [2025-09-12]. <https://www.tpd.ac.cn/zh-hans/data/a2128e3f-a913-40ba-a7b1-3318cb4031d5/>) [DOI: 10.11888/Disas.tpd.271000]
- Wang L X. 2021. Fault distribution data of Sichuan Tibet traffic corridor (2020)[EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. [2025-09-12]. <https://data.tpd.ac.cn/zh-hans/data/023d4a3d-334d-4b0b-bfd3-8afd3120918d/> (王丽璇. 2021. 川藏交通廊道断层分布数据(2020)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. [2025-09-12]. <https://data.tpd.ac.cn/zh-hans/data/023d4a3d-334d-4b0b-bfd3-8afd3120918d/>) [DOI: 10.11888/Geo.tpd.271624]
- Wang L Y, Deng K Z and Zheng M N. 2020. Research on ground deformation monitoring method in mining areas using the probability integral model fusion D-InSAR, sub-band InSAR and offset-tracking. *International Journal of Applied Earth Observation and*

- Geoinformation, 85: 101981 [DOI: 10.1016/j.jag.2019.101981]
- Wang Q, Zhang Y L, Fan J H and Fu Y H. 2020. Monitoring the motion of the Yiga glacier using GF-3 images. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(3): 460-466 (王群, 张蕴灵, 范景辉, 傅宇浩. 2020. 利用高分三号影像监测依嘎冰川表面运动. *武汉大学学报(信息科学版)*, 45(3): 460-466) [DOI: 10.13203/j.whugis20190036]
- Wang Z G (2022). Himalayan river system network data (2018)[EB/OL]. National Tibetan Plateau/Third Pole Environment Data Center. [2025-09-12]. <https://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/94ff9838-c5c7-4904-9325-4feda0380121> (王中根. 2022. 喜马拉雅山区水系网数据(2018)[EB/OL]. 国家青藏高原科学数据中心. [2025-09-12]. <https://www.tpdc.ac.cn/zh-hans/data/94ff9838-c5c7-4904-9325-4feda0380121>) [DOI: 10.11888/Terre.tpdc.272451]
- Wen M L and Wang T. 2025. Review of SAR imaging geodesy for glacier velocity monitoring. *Geodesy and Geodynamics*, 16(3): 262-274 [DOI: 10.1016/j.geog.2024.08.004]
- Wen N L, Dai K R, Deng J, Liu C, Liang R B, Yu B and Feng W K. 2024. Periodic displacement accurate extraction of reservoir active slopes through InSAR observation and independent component analysis-based wavelet transform. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 130: 103919 [DOI: 10.1016/j.jag.2024.103919]
- Werner C, Wegmuller U, Strozzi T and Wiesmann A. 2005. Precision estimation of local offsets between pairs of SAR SLCs and detected SAR images//*Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Seoul: IEEE: 4803-4805 [DOI: 10.1109/IGARSS.2005.1526747]
- Yasuda T and Furuya M. 2013. Short-term glacier velocity changes at West Kunlun Shan, Northwest Tibet, detected by synthetic aperture radar data. *Remote Sensing of Environment*, 128: 87-106 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.09.021]
- Zhang R Y, Jiang M, Li G, Zhong M and Cheng X. 2025. Monitoring of Siachen glacier thickness change through integration of Gaofen-3 and Sentinel-1/2. *Chinese Journal of Geophysics*, 68(3): 802-812 (张瑞宇, 蒋弥, 李刚, 钟敏, 程晓. 2025. 高分三号和 Sentinel-1/2 融合监测锡亚琴冰川厚度变化研究. *地球物理学报*, 68(3): 802-812) [DOI: 10.6038/cjg2024R0407]
- Zhang S P, Zhou Z Z, Zhao L J and Zhang Y Y. 2020. Extraction of Gangnalou glacier velocity based on SAR migration tracking method. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (11): 33-38 (张生鹏, 周中正, 赵利江, 张永荣. 2020. 基于 SAR 偏移量跟踪法提取岗纳楼冰川流速. *测绘通报*, (11): 33-38) [DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0350]
- Zhou J M, Li Z, Li X W, Liu S Y, Chen Q, Xie C and Tian B S. 2011. Movement estimate of the Dongkemadi Glacier on the Qinghai-Tibetan Plateau using L-band and C-band spaceborne SAR data. *International Journal of Remote Sensing*, 32(22): 6911-6928 [DOI: 10.1080/01431161.2010.517225]
- Zhou Y S, Li X, Zheng D H, Ren S S, Wang Y Z and Li Z W. 2024. Data, methods and perspectives of optical stereo and bistatic SAR satellites for monitoring glacier thickness change in high-mountain Asia. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(5): 779-800 (周玉杉, 李新, 郑东海, 任姗姗, 汪赢政, 李志伟. 2024. 亚洲高山区冰川厚度变化光学立体和双基 SAR 卫星监测数据、方法与展望. *测绘学报*, 53(5): 779-800) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230260]
- Zhu J J, Hu J, Li Z W, Sun Q and Zheng W J. 2022. Recent progress in landslide monitoring with InSAR. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(10): 2001-2019 (朱建军, 胡俊, 李志伟, 孙倩, 郑万基. 2022. InSAR 滑坡监测研究进展. *测绘学报*, 51(10): 2001-2019) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2022.20220294]

## Glacier velocity monitoring with domestic Fucheng-1/Shenqi SAR satellites and comparative analysis with Sentinel-1 satellite missions

WEN Ningling<sup>1</sup>, DAI Keren<sup>1,2,3</sup>, ZHOU Hao<sup>4</sup>, LIU Chen<sup>5</sup>, REN Weijia<sup>6</sup>, DU Jian<sup>7</sup>, RAN Weijie<sup>6</sup>

1. College of Earth and Planetary Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
3. State Grid Southwest Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, China;
4. College of Geography and Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;
5. School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;
6. Changsha Tianyi Space Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Changsha 410205, China;
7. Zhangye Constellation Space Technology Co., Ltd., Zhangye 734000, China

**Abstract:** Fucheng-1, China's first commercial SAR satellite with interferometric capability, can operate in constellation with the Shenqi satellite, providing a new technical approach for high-precision monitoring of glaciers and geohazards. However, systematic evaluations of its velocity monitoring capability remain limited. This study utilizes Synthetic Aperture Radar (SAR) data acquired by Fucheng-1 (October-

November 2023) and Shenqi (January-March 2025) over Sedongpu Valley in Nyingchi City, Tibet Autonomous Region, in combination with concurrent Sentinel-1 imagery. The Pixel Offset Tracking (POT) method and the differential SAR interferometry (DInSAR) technique are employed to extract glacier surface velocity in different scenarios and conduct a systematic comparative analysis. POT monitoring results indicate that because of their high spatial resolution, Fucheng-1 and Shenqi substantially outperform Sentinel-1 in POT displacement monitoring of small-scale glaciers, successfully identifying six glacier movement signals with a maximum velocity of up to 90 cm/day. By contrast, low-resolution Sentinel-1 data fail to provide sufficient information for accurate offset identification when a window suitable for small-scale glaciers is used. In terms of DInSAR, the spatial baseline of Shenqi satellite imagery's repeat-pass interferometric pair is only 13.89 m, which is much lower than the concurrent Sentinel-1 baseline length; given its high-resolution characteristic, it exhibits superior interferometric quality. However, during periods of slow glacier movement, interferometric performance can still be improved when short-baseline Sentinel-1 data are employed. In typical glacier velocity monitoring, the boundary clarity and displacement characteristics obtained by Fucheng-1 and Shenqi are consistent with actual glacier dynamics, indicating their remarkable potential for refined monitoring of glacier movement. This study systematically evaluates the comprehensive performance of Fucheng-1 and Shenqi in glacier monitoring and confirms their effectiveness and application potential in fine glacier movement monitoring. This work provides an important basis for the development of high-precision glacier remote sensing monitoring systems.

**Key words:** Fucheng-1, Shenqi, Sentinel-1, glacier velocity, Sedongpu, pixel offset tracking

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 42371462); Distinguished Young Scholars of the Sichuan Provincial Natural Science Foundation (No. 2023NSFSC1909)