

基于LT-1 SAR卫星的念青唐古拉山脉冰缘地貌形变监测研究

张雪光¹, 王倩雯^{2,3}, 张雪飞³

1. 云南建投第一勘察设计有限公司, 昆明 650032;

2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054;

3. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048

摘要: 冰缘地貌是由寒冻风化和冻融作用形成的一种独特地表形态, 广泛分布于青藏高原的高寒冰缘环境冻土区。冰缘地貌的地表变化不仅是青藏高原气候变化的指示器, 还是冰缘环境中滑坡等地质灾害的重要来源。研究冰缘地貌的时空形变特征, 对于深入理解其形变的物理机制和动力学过程、识别潜在的地质灾害风险, 以及提升次生灾害的预防能力具有重要意义。时序InSAR技术是冰缘地貌形变监测的有效手段, 但应用多集中在短时序、中分辨率观测, 无法精细捕捉石冰川、岩屑坡等地貌表面结构形变差异和长时序变化特征。2022年初, 中国成功发射全球首组以地表形变监测为核心任务的高分辨率L波段差分干涉SAR科研卫星陆地探测一号(LT-1)星座, 为冰缘地貌形变监测研究提供了新的高时空分辨率数据源。因此, 本文以青藏高原念青唐古拉山脉的典型石冰川、岩屑坡两种冰缘地貌为研究对象, 利用LT-1双星3 m分辨率条带模式1数据, 通过Stacking-InSAR、时序InSAR方法提取石冰川、岩屑坡地貌高分辨率形变, 并通过与同时段Sentinel-1A数据进行形变对比分析。研究结果表明, LT-1获得的形变结果与Sentinel-1A数据结果具有较高一致性; 利用LT-1获得研究区内石冰川年际累积形变量为0.06—0.16 m, 岩屑坡年际累积形变量为0.01—0.09 m, 且呈现出明显的季节性变化特征; LT-1在复杂地形气候环境区域具有较好的干涉相干性保持能力, 但一定程度上受叠掩和阴影影响, 通过升降轨联合观测能够提升冰缘地貌的观测效能。综上, LT-1卫星有助于提升石冰川、岩屑坡地表时空形变监测水平, 在冰缘地貌形变监测方面具有应用潜力。

关键词: 石冰川, 岩屑坡, LT-1, 时序InSAR, 形变监测, 青藏高原

中图分类号: P2

引用格式: 张雪光, 王倩雯, 张雪飞. 2025. 基于LT-1 SAR卫星的念青唐古拉山脉冰缘地貌形变监测研究. 遥感学报, 29(12): 3508-3524

Zhang X G, Wang Q W and Zhang X F. 2025. Monitoring of periglacial landform deformation on the Nyainqêntangla range via the LT-1 SAR satellite. National Remote Sensing Bulletin, 29(12): 3508-3524 [DOI: 10.11834/jrs.20255074]

1 引言

冰缘地貌主要发育在无冰川覆盖的气候严寒地区, 包括多年冻土区以及部分季节冻土区, 有石冰川、岩屑坡、石海与石河、构造土、冻胀丘和冰椎、热融地貌等(秦大河, 2016)。典型冰缘地貌中, 石冰川是以冰岩混合物为基础形成的一类具有舌状或叶状堆积纹理的由寒冻风和冻融作用形成的独特地表形态, 其形成和活动与气候变

化紧密相关, 在高山冰缘环境中具有重要的气候和水文指示作用(Giardino等, 2011; 刘锦波等, 2024)。岩屑坡是主要由重力作用、风化作用和区域气候作用所形成的非地带性地貌形态, 广泛分布于高山冰缘环境, 如落基山脉、阿尔卑斯山脉、安第斯山脉、南阿尔卑斯山脉、内华达山脉兴都库什山脉、念青唐古拉山脉以及喜马拉雅山脉等地区。岩屑坡的形成主要是长期的岩石坠落事件,

收稿日期: 2025-03-06; 预印本: 2025-05-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42301160)

第一作者简介: 张雪光, 研究方向为测绘工程技术管理及工程形变。E-mail: 374253971@qq.com

通信作者简介: 王倩雯, 研究方向为InSAR地表形变监测应用。E-mail: wqw0707@chd.edu.cn

但往往会受到由多种单一或复合因素引发的坡面滑坡过程的影响。在多年冻土环境中, 这些过程包括雪崩、泥石流、冻融作用、冻土蠕动以及雪崩沉积物的位移。在气候变化的背景下, 冰缘地貌的气候、水文和灾害效应受到越来越多的关注 (Kääb, 2022)。研究和监测冰缘地貌的时空动态变化规律, 对于分析冰缘环境气候变化、挖掘的水资源应用潜力、评估灾害风险都有非常重要的意义 (Cai 等, 2024; 周玉杉 等, 2024)。

传统冰缘环境地表形变信息监测主要 GNSS (Global Navigation Satellite System)、LiDAR 等实地观测设备 (Rouyet 等, 2017; 张亚迪 等, 2019), 由于石冰川、岩屑坡冰缘地貌通常发育于高寒冰缘环境, 位置偏远且气候环境恶劣, 使得传统监测手段存在监测成本高、范围小、难以广泛实施等限制。随着合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 卫星观测体系不断丰富, 为冰缘环境研究提供快速、持续的 SAR 数据支持。同时, 干涉合成孔径雷达 InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) 技术也在快速发展, 基于 InSAR、时序 InSAR 技术的冰缘地貌形变监测表现出了较好的应用潜力 (Zhang 等, 2024a)。

针对石冰川地貌, 研究人员利用 DInSAR (Differential InSAR)、时序 InSAR 等方法对发育在阿尔卑斯山 (Barboux 等, 2014)、安第斯山脉 (Zalazar 等, 2020) 以及天山山脉 (Wang 等, 2017)、喜马拉雅山脉 (Zhang 等, 2021)、念青唐古拉山脉 (Zhang 等, 2024a; Reinosch 等, 2021; Cai 等, 2024) 等不同冰缘环境的石冰川开展形变监测研究, 并取得初步成果。一些区域根据国际冻土协会制定的标准, 成功实现了包含标准活动性属性信息的石冰川编目, 极大地提升了对石冰川活动性的理解 (Bertone 等, 2022; 蔡佳欣 等, 2023)。

目前, 冰缘环境针对岩屑坡的系统性研究多数集中在形态学、沉积物厚度测定及岩石风化等地球物理学调查, 基于 InSAR 技术的岩屑坡运动学研究较为稀少 (Bhattacharya 和 Mukherjee, 2017)。已有研究中, Imaizumi 等利用 3 景 PALSAR 数据基于 InSAR 技术分析了瑞士南阿尔卑斯山 38 个岩屑坡在不同地形的形变特征 (Imaizumi 等, 2018)。喜马拉雅山岩屑坡运动监测研究中, Dini 等利用 SBAS 技术获得了喜马拉雅山脉不丹西北部

2007 年—2010 年部分岩屑坡形变速率, 由于 SAR 数据时间采样问题, 并未有效获得岩屑坡季节形变规律 (Dini 等, 2019)。作为冰缘地貌系统重要组成部分, 岩屑坡相较于石冰川地表活动演变过程更为复杂多样 (Barboux 等, 2014), 因此, 针对岩屑坡地貌开展运动学研究, 有助于进一步提高对冰缘地貌景观的认识。

近年来, SAR 卫星遥感取得显著进展, 国际上先后发射了搭载 SAR 传感器的 Sentinel-1、ALOS-2/4、COSMO-SkyMed、TerraSAR 和 Radarsat-2 等系列卫星, 为 InSAR 冰缘地貌地表形变监测提供了丰富的数据源 (李晓恩 等, 2021)。时序 InSAR 技术虽为冰缘地貌形变监测提供了有效手段, 但当前研究仍存在显著局限性。首先, 现有中分辨率 SAR 数据 (如 Sentinel-1A, 分辨率 5×20 m) 难以精细解析石冰川表面结构异质性导致的局部形变差异; 其次, 商业高分辨率 SAR 数据 (如 TerraSAR-X, 分辨率 1 m) 受限于重访周期 (11 d)、波段穿透性弱 (X 波段) 及高昂成本, 难以实现长时序连续观测。这导致现有研究多集中于区域尺度年均形变速率估算, 缺乏对典型冰缘地貌单元 (如石冰川前缘/侧缘/岭脊、岩屑坡活动区) 精细形变特征的捕捉, 难以更有效揭示其与冻融循环耦合的周期性形变规律 (Zhang 等, 2024b)。因此, 当前利用 SAR 卫星的冰缘地貌形变监测研究, 在兼顾高分辨率、长时序、高频次观测方面存在明显不足。当前, 青藏高原冰缘地貌地表形变监测多集中在利用 Sentinel-1A 等数据的短时序、中分辨率观测, 无法精细捕捉冰缘地貌表面结构形变差异和长时序变化特征, 对石冰川时空运动机制的认识仍然存在较大不足。

2022 年初, 中国成功发射全球首组以地表形变监测为核心任务的高分辨率 L 波段差分干涉 SAR 科研卫星 (LT-1), 该卫星是国家民用空间基础设施中长期发展规划首个立项的科研卫星工程, 其成功发射及应用, 将实现中国差分干涉 SAR 数据的自主可控, 极大改善冰冻圈遥感应用对国外 SAR 数据的依赖现状, 为冰缘环境灾害风险研究带来了新的机遇。LT-1 SAR 卫星同时具备多飞行模式 (跟飞、绕飞)、强穿透性 (L 波段)、高分辨率 (3 m)、高重访性 (单星 8 d, 双星组网 4 d) 等特点 (李涛 等, 2023; Li 等, 2023; 刘斌 等, 2024), 这是国内外其他现有卫星所不具备的优

势。卫星L波段强穿透性，能够极大抑制冰缘地貌形变估计过程中雪动态变化、时空失相干等因素干扰，3 m 高分辨率观测能力，能够提升冰缘地貌时空形变细节捕捉能力，将为石冰川、岩屑坡等地貌精细时空尺度地表形变特征提取和挖掘提供新的数据支撑（Zhang等，2023，2024a）。

综上所述，当前基于InSAR技术的冰缘形变监测研究仍面临失相干、中等分辨率SAR卫星对冰缘地貌形变细节捕捉能力不足等问题。LT-1卫星为冰缘地貌高分辨率形变提取提供了新的解决方案，但是其应用能力有待验证。针对以上问题，本研究以青藏高原念青唐古拉山脉典型石冰川、岩屑坡为研究对象，利用LT-1卫星高分辨率、长波长观测优势，构建了融合Stacking-InSAR快速筛查与MT-InSAR精细反演的技术框架，并结合升降轨联合观测策略，克服单一轨道几何局限，实现了石冰川、岩屑坡两种典型冰缘地貌的时空形变高精度提取。本研究验证了LT-1卫星冰缘地貌形变监测的应用能力，为推动国产SAR卫星在复杂冰冻圈的量化应用提供了方法支撑和经验参考。

2 研究方法与数据

本文分别利用Stacking InSAR和多基线永久散射体网络多时相InSAR（MT-InSAR）方法，开展石冰川和岩屑坡地貌地表形变提取和分析。具体流程如图1所示。

2.1 DInSAR 处理

LT-1卫星DInSAR数据处理流程包括：数据预处理、精轨数据更新、图像配准和重采样、多视、干涉图生成、差分干涉地形和平地相位去除、相位滤波、相位解缠，基线及相位校正。LT-1卫星详细预处理流程可参考Ji等（2023）的研究。

2.2 Stacking-InSAR

Stacking-InSAR方法最早由Sandwell等（Sandwell和Price，1998）提出。该方法通过对一组解缠后的差分干涉图进行线性叠加，以获取研究区域的平均形变速率。其核心假设为研究区域的形变速率近似呈线性变化。研究区的石冰川在冬季也具有明显形变，因此通过Stacking-InSAR方法检测石冰川冰川的形变是合理的（Zhang等，2024a）。基于这一假设，Stacking-InSAR方法可以有效减少大气延迟的影响（李思慧等，2023），并

获得准确的平均形变速率。具体计算公式如下：

$$\bar{V} = \frac{\sum_{i=1}^M d_i \cdot \Delta T_i}{\sum_{i=1}^M \Delta T_i^2} \quad (1)$$

$$\sigma^2(\bar{V}) = \frac{\sum_{i=1}^M (d_i - \bar{V}\Delta T_i)^2}{\Delta T_i^2} \quad (2)$$

$$d_i = -\frac{\lambda}{4\pi} \phi_{\text{def}} \quad (3)$$

式中， $\bar{V}$ 表示沿视线方向（LOS）的平均位移速率， M 表示参与计算的差分干涉图数量， d_i 表示第 i 个差分干涉图的形变场， ΔT_i 表示第 i 个干涉图的时间间隔， $\sigma^2(\bar{V})$ 表示平均形变速率的标准， ϕ_{def} 表示像素点（ x, y ）的解缠差分干涉相位。

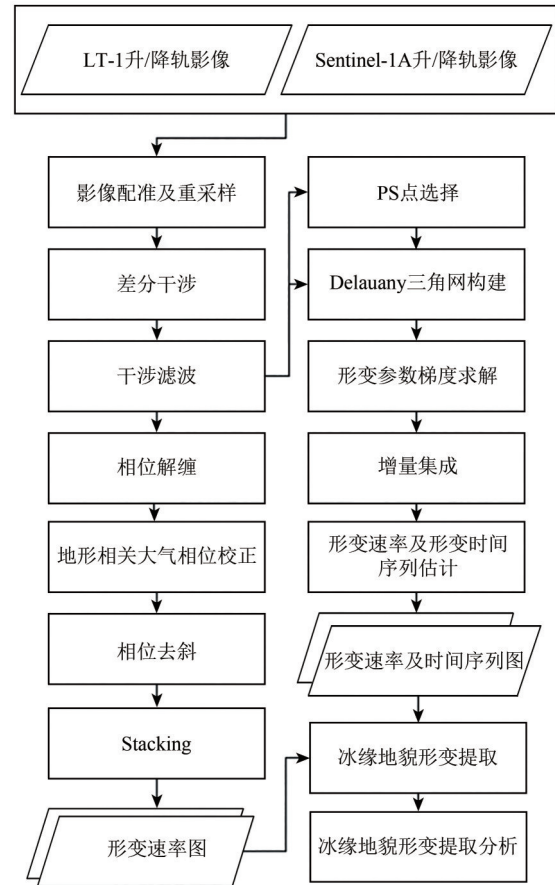


图1 总体技术路线图

Fig. 1 Overall technical workflow diagram

在Stacking-InSAR实现过程中，首先对时序SAR影像进行DInSAR处理，为了降低干涉相位误差，采用高度—相位相关拟合方法去除地形相关大气相位噪声（Zhang等，2024b）。在原始的LT-1 SAR图像中，由于2023年2月以前获取的影像存在分幅问题，导致不同时期的SAR图像覆盖区域

存在差异。如果将所有的干涉对都被用于堆叠计算，在 M 个干涉对中，只要存在一个无效值，就无法为该点计算出有效结果，导致可监测区域缩小。为保证结果准确的同时最大化监测区域，对每个监测点设置了干涉对的选择阈值，仅选择每个目标点的有效干涉对，当有效干涉对满足设定阈值时，保留该点结果。

2.3 MT-InSAR

2.3.1 PS点形变参数梯度求解

首先根据多基线对干涉相干系数计算结果，利用相干系数阈值法获得PS候选点，对PS候选点构建 Delaunay 三角网。在该网络中，为了提高时间相关性，建立网络连接中相邻PS候选点相关性干涉连接权重具体计算公式如下：

$$x_n(p_k, p_l) = |\gamma_n(p_k) + \gamma_n(p_l)| \quad (4)$$

式中， $x_n(p_k, p_l)$ 为由 p_k 和 p_l 组成的相位连接权重， $\gamma_n(p_k)$ 和 $\gamma_n(p_l)$ 为第 n 个干涉图中PS点 p_k 和 p_l 的相干性， $x_n(p_k, p_l)$ 为由 p_k 和 p_l 组成的相位连接权重。Delaunay 三角网中每条连接边PS点的形变速率和高程误差梯度的具体计算公式如下：

$$\sum_{k=1}^N x_k \cdot \exp[j(\Delta\varphi_{\text{phase}}^k - \Delta\varphi_{\text{model}}^k)] / \sum_{k=1}^N x_k \quad (5)$$

式中， N 表示干涉图的数量， x_k 是干涉图 k 连接边相干性（式（4））， $\Delta\varphi_{\text{phase}}^k$ 和 $\Delta\varphi_{\text{model}}^k$ 分别表示第 k 个连接节点之间的实测干涉相位差和模型干涉相位差。式（5）可由 Nelder-Mead 方法求解（Zhang 等，2021）。为了提升相对参数计算精度，引入 M-Estimator 进行三角网边相对参数重新估计，提升相对参数计算精度（Zhang 等，2021）。

2.3.2 增量集成

每个弧段的相对参数被解算出来后，对连接边的参数梯度利用网络平差增量集成，获得形变速率和DEM误差结果。集成通过对最大连通网络使用基于岭估计的加权最小二乘法进行。具体计算式如下：

$$S = (G^T W G + \sigma I)^{-1} G^T W H \quad (6)$$

式中， S 为弧段节点（监测点）的形变速率和DEM误差结果， G 是调整矩阵，由元素-1、0和1组成。 W 表示权重矩阵，考虑了时间相干性。 H 含弧段的估计相对形变参数， H 是单位矩阵。与传统最小二乘估计相比，基于岭估计的加权最小二乘法，引

入了岭估计调节参数 σ ，该规则通过减少条件数来改善转移矩阵的条件，实现求解优化。最优调整参数 σ 可以通过 L-曲线计算得到（Zhang 等，2021）。

2.3.3 形变时间序列估计

计算线性形变参数后，计算残余相位中非线性形变参数及大气相位组分，可以由残余相位中利用滤波分离计算大气相位和非线性形变参数。由于残余相位为缠绕相位，无法直接对其进行滤波操作，在进行滤波操作之前需要对残余相位进行解缠。大气相位与非线性形变相位可以利用解缠后的残余相位频率特征分离。通常大气相位组分在时间上表现为高通，空间上为低频，在 1 km 范围内具有相关性。而非线性形变相位在空间上相关性低，而在时间上具有低通特征，因此对残余相位在时间上进行高通滤波，在空间上低通滤波获得大气相位组分，最后实现形变时间序列估计。

2.4 活动型石冰川及岩屑坡提取

国际冻土协会于2020年制定了石冰川运动编目指南，旨在系统地将基于 InSAR 技术获得的定量形变信息整合到石冰川编目中，以此来表征石冰川活动性状态。通常石冰川轮廓内的活动性区域与稳定区域存在明显形变差异，本研究参考指南中利用 InSAR 形变信息确定石冰川活动区域的经验，采用目视解译的方式，判定石冰川轮廓内是否明显形变，进而确定石冰川是否为活动型石冰川（Bertone 等，2022）。对于岩屑坡地貌，目前尚无标准的活动性分类准则，本研究参考石冰川活动性判定方式对岩屑地貌的活动性进行目视解译。

2.5 研究区概况

研究区位于中国青藏高原东南部，雅鲁藏布江中游（图2）。该区域地形高耸，山脉重叠，其中海拔超过 5000 m 的山峰有 180 座。河流切割深谷，地貌复杂多样，呈现高山与深切峡谷并存的特征。两岸斜坡陡峻，斜坡坡度为 40° — 65° ，河谷呈“V”型谷，谷底宽度较窄，最窄处仅约 200 m（马腾霄 等，2022），河谷高差较大，最大高差可达 2200 m。

研究区属于高原温带半干旱季风气候区，具

有阳光充足、辐射强烈、昼夜温差大、降雨集中、冬春干燥多风的气候特征。年平均气温为8.9℃，年平均降水量约为490 mm，降雨主要集中在5月。该区域位于雅鲁藏布江中游，水系发达，湖泊众多。主要湖泊包括拉姆拉错、拥错、江斯拉错等，

共有大小湖泊160个。这些湖泊面积较小，主要由滑坡、泥石流、冲积沉积物以及山体崩塌阻塞河谷形成，属于堰塞湖。因此，该区域地质灾害多发，冰缘地貌广泛分布，构成了滑坡和泥石流灾害的重要源区。

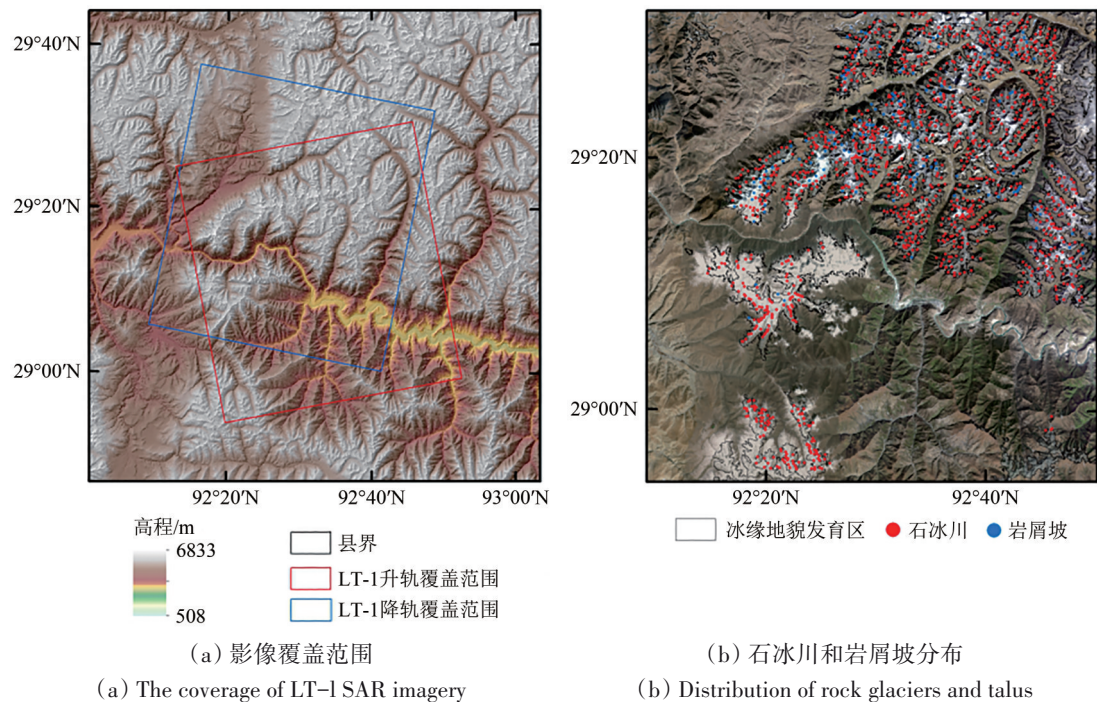


图2 研究区概况
Fig. 2 Overview of the study area

目前关于石冰川的调查研究表明，在念青唐古拉山脉中南部地区广泛存在多种类型的石冰川，主要包括冰川型和岩屑坡型。岩屑坡在该区域也广泛分布（刘勇等，2024；Zhang等，2024b）。基于石冰川的定义及其独特的形态特征（徐瑾昊等，2020），利用GF-2高分辨率光学遥感影像，共识别解译石冰川1094条（Zhang等，2024b）。由于岩屑坡形态多样，目前尚无标准的岩屑坡地貌解译指南。为解决这一问题，我们参考了关于岩屑坡地貌的形态学研究（Wu等，2021；陈国祥等，2022；Luckman，2013；Hendrickx等，2020；Kaushik等，2022；Qing等，2020），利用GF-7影像划定其边界，最终识别出148条岩屑坡。

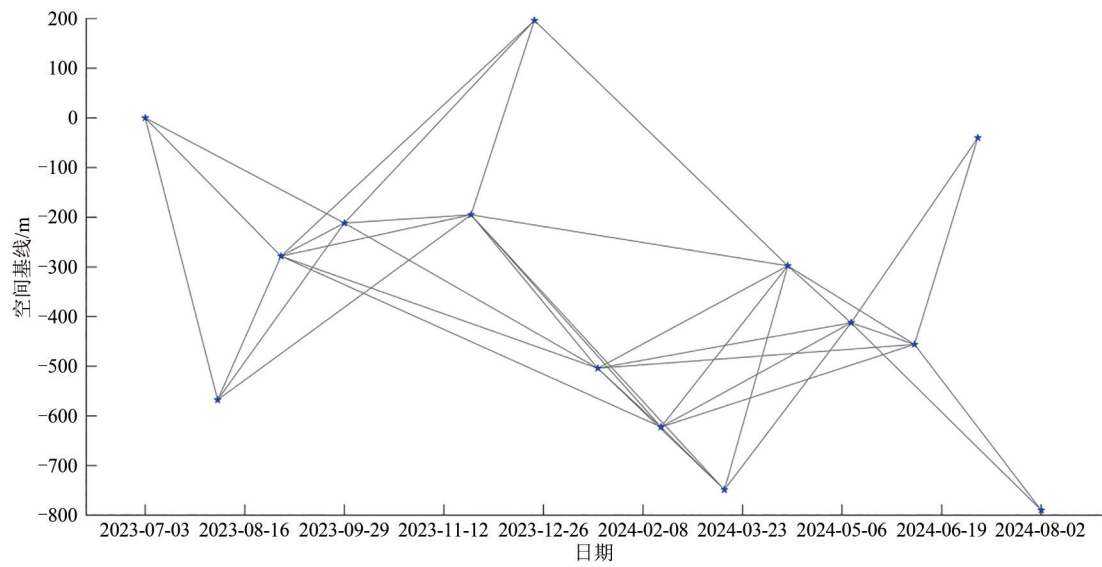
2.6 LT-1数据选取及处理

LT-1由两颗相同的卫星组成，即LT-1A和LT-1B。共支持6种成像模式，其中条带模式1成像分辨率为3 m，幅宽为50 km，条带模式2成像分辨率为12 m，幅宽为100 km。卫星单星严格回

归重访周期为8 d，双星跟飞模式下重访周期为4 d。28 d可实现中国陆域95%以上覆盖。LT-1卫星数据详细相关信息可通过自然资源卫星遥感云服务平台查询（<http://sasclouds.com/>〔2025-03-06〕）。

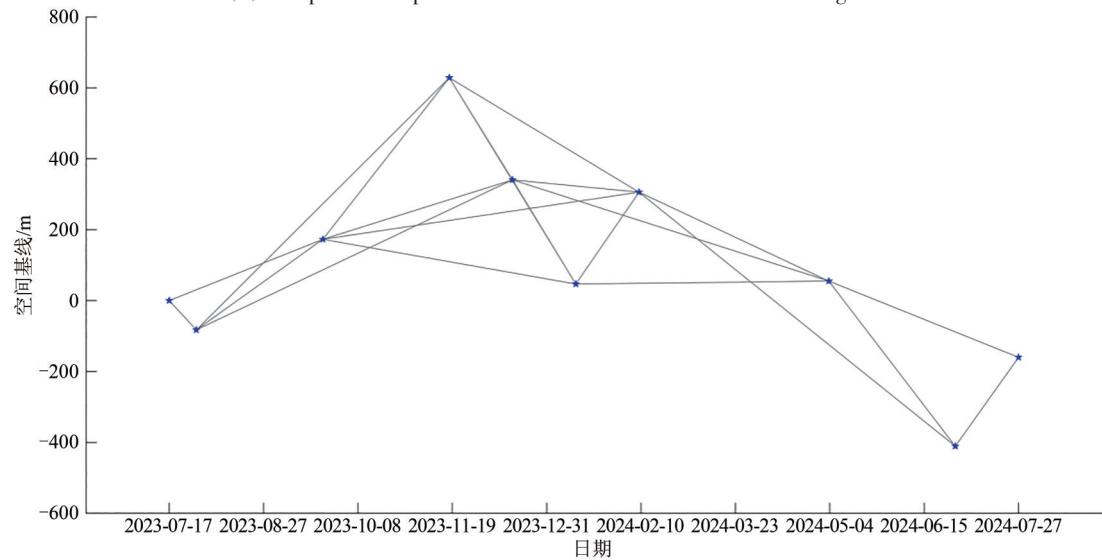
在本研究共选取了24景覆盖研究区的LT-1双星绕飞条带模式1数据，其中包含14景升轨和10景降轨数据；同时选取了60景Sentinel-1A数据，其中包含32景升轨和28景降轨数据。这些数据的时间跨度为2023年7月—2024年8月。本研究使用的影像详细信息见表1，DInSAR空间基线组合信息见图3。

表1 影像数据参数					
Table 1 Image data parameters					
数据类型	轨道方向及轨道号	波段	极化模式	平均入射角/(°)	影像数量
LT-1A/B	升轨/8680	L	HH极化	26.47	14
	降轨/8003			22.39	10
Sentinel-1A	升轨/143	C	VV极化	33.92	32
	降轨/77			33.92	28



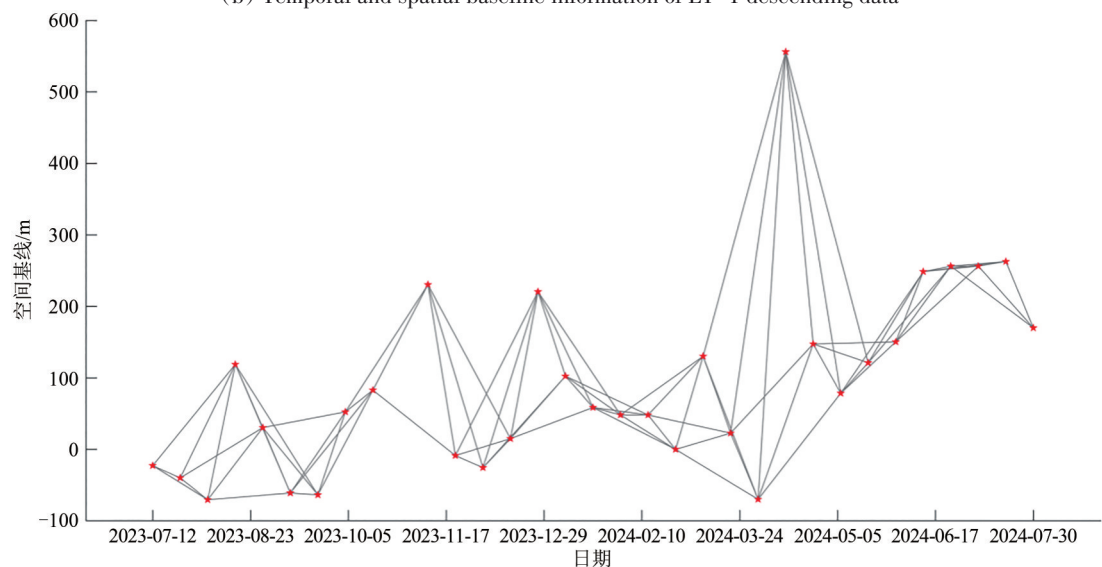
(a) LT-1 升轨数据时空基线

(a) Temporal and spatial baseline information of LT-1 ascending data



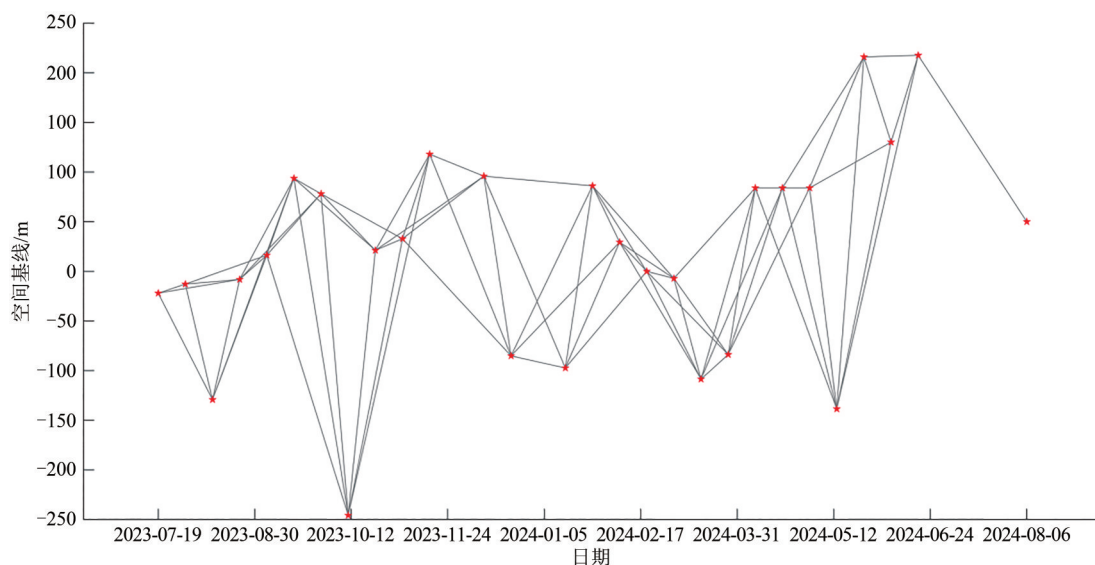
(b) LT-1 降轨数据时空基线

(b) Temporal and spatial baseline information of LT-1 descending data



(c) Sentinel-1A 升轨数据时空基线

(c) Temporal and spatial baseline information of Sentinel-1A ascending data



(d) Sentinel-1A 降轨数据时空基线

(d) Temporal and spatial baseline information of Sentinel-1A descending data

图3 LT-1 和 Sentinel-1A 数据时空基线信息

Fig. 3 Temporal and spatial baseline information of LT-1 and Sentinel-1A data

首先,对图3中的LT-1干涉组合进行DInSAR处理。在处理流程中,多视处理比例为2:4(距离向:方位向),地理编码后地距分辨率可达5 m,并采用最小费用流方法进行相位解缠,解缠前设置相干系数为0.3以生成掩膜文件,用于掩膜干涉相位中由于失相干产生的噪声区域,并选取相干系数 >0.9 的稳定点作为解缠参考点。

在Stacking-InSAR处理过程中,对每个点的相干性进行评估,若干涉相干性 >0.3 则干涉相位值保留,并设置干涉对的选择阈值(式(1)中参数 M),当有效干涉对数量 >6 ,则该监测点结果保存。

在MT-InSAR处理过程中,数据预处理及相位噪声处理与Stacking-InSAR相同,本研究使用的MT-InSAR方法基于缠绕相位解算,因此在进行MT-InSAR处理前需对解缠相位进行重缠绕处理。

3 结果与分析

3.1 不同方法形变速率对比

分别利用Stacking-InSAR和MT-InSAR方法,本研究分别获得了研究区LT-1卫星和Sentinel-1A卫星升降轨LOS形变速率(图4,图5)。可见LT-1卫星和Sentinel-1A均能有效提取石冰川和岩屑坡活动区域,证明了其在冰缘地貌地表形变监测中的应用能力。通过对比LT-1卫星与Sentinel-1A数

据升降轨观测数据,发现在复杂山区升降轨联合观测能够有效降低山体叠掩效应和地形阴影的干扰。同时Stacking-InSAR方法相比MT-InSAR具有更高的监测点密度,受时空失相干影响更小。鉴于LT-1卫星的L波段长波长特性在理论上具备一定优势,但由于数据量较少,采用Stacking-InSAR方法得到的结果在整体表现上并未超越Sentinel-1A卫星,在非叠掩区域的监测结果与Sentinel-1A保持一致;而采用MT-InSAR方法得到的结果则优于Sentinel-1A卫星。为了进一步挖掘LT-1卫星在冰缘地貌形变监测领域的潜力,本文后续分析将主要依托LT-1卫星数据,并借助Sentinel-1A卫星数据进行精度验证。

对比Stacking-InSAR和MT-InSAR方法形变监测结果,两种方法获得的石冰川和岩屑坡的活动区域具有较好的空间一致性,Stacking-InSAR相比MT-InSAR方法具有更高的监测点密度,受时空失相干影响更小。由于LT-1卫星L波段长波长属性,在石冰川和岩屑坡目标监测区域,MT-InSAR也具有较好的监测效果。因此,Stacking-InSAR和MT-InSAR联合应用是冰缘地貌形变监测应用较好的选择,Stacking-InSAR能够快速提取石冰川和岩屑坡活动区域,确定目标靶区,随后可利用MT-InSAR方法更精细提取石冰川和岩屑坡时空序列形变。

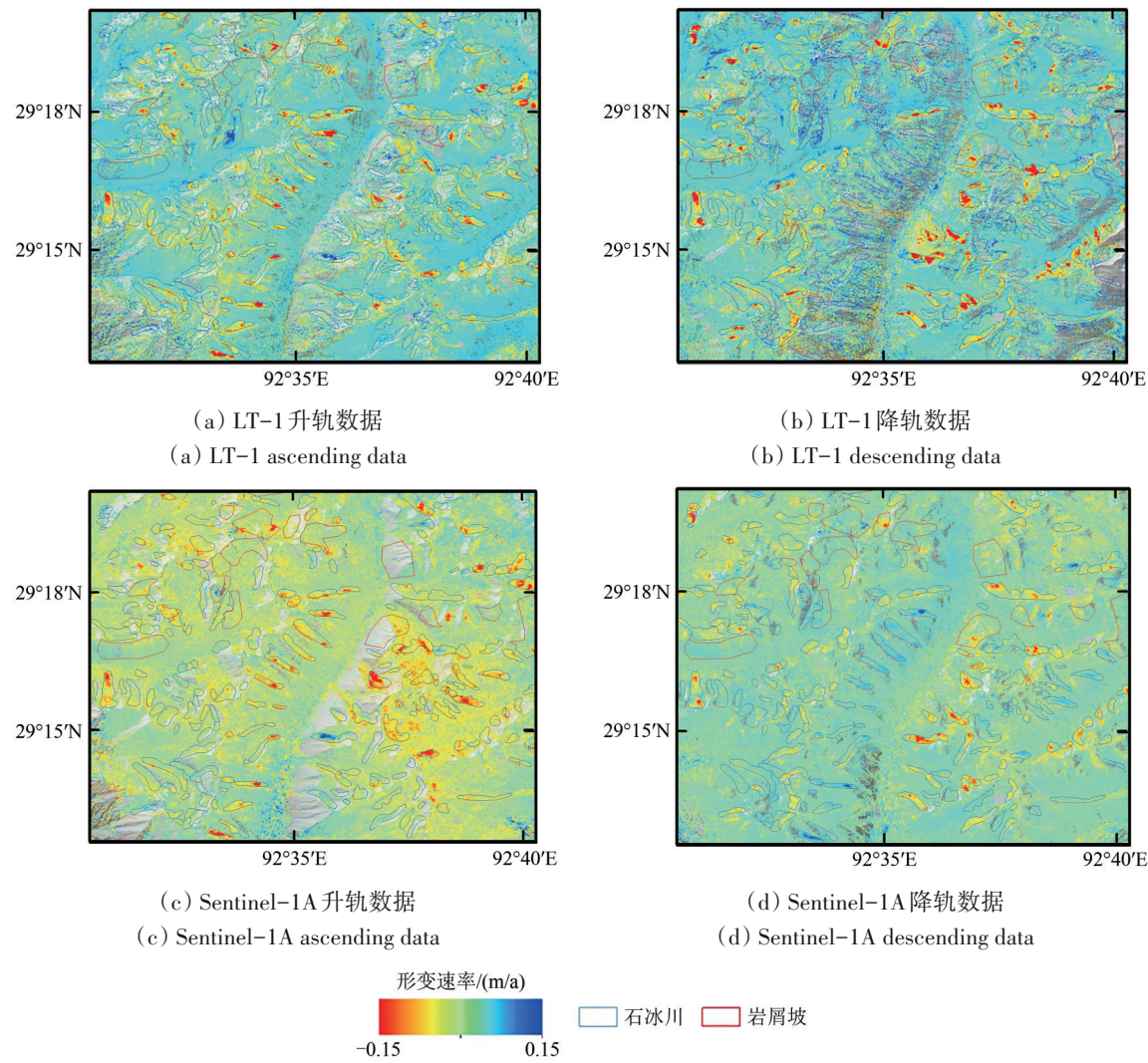
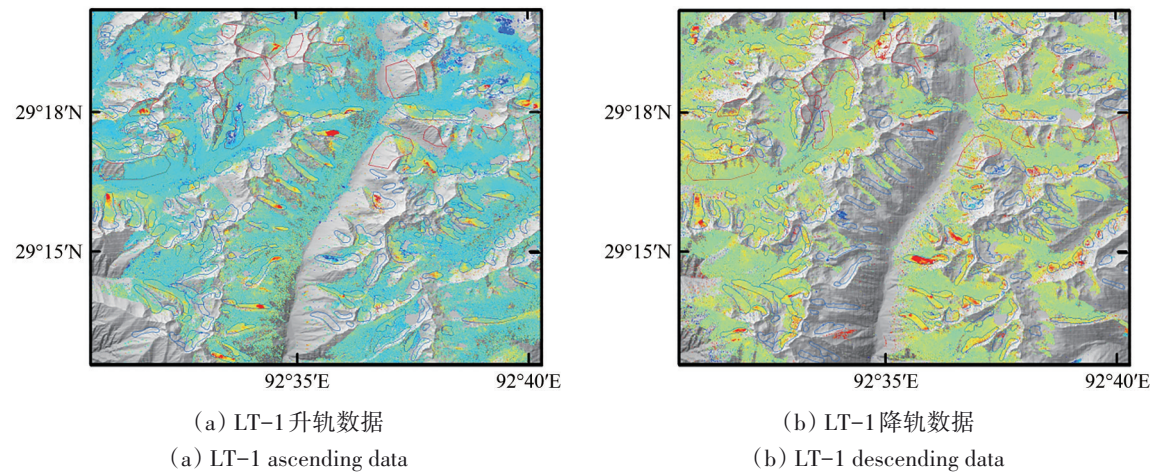


图 4 LT-1 和 Sentinel-1A 升降轨数据 Stacking-InSAR LOS 形变速率对比

Fig. 4 Comparison of LOS deformation velocities between LT-1 and Sentinel-1A ascending and descending data using Stacking-InSAR



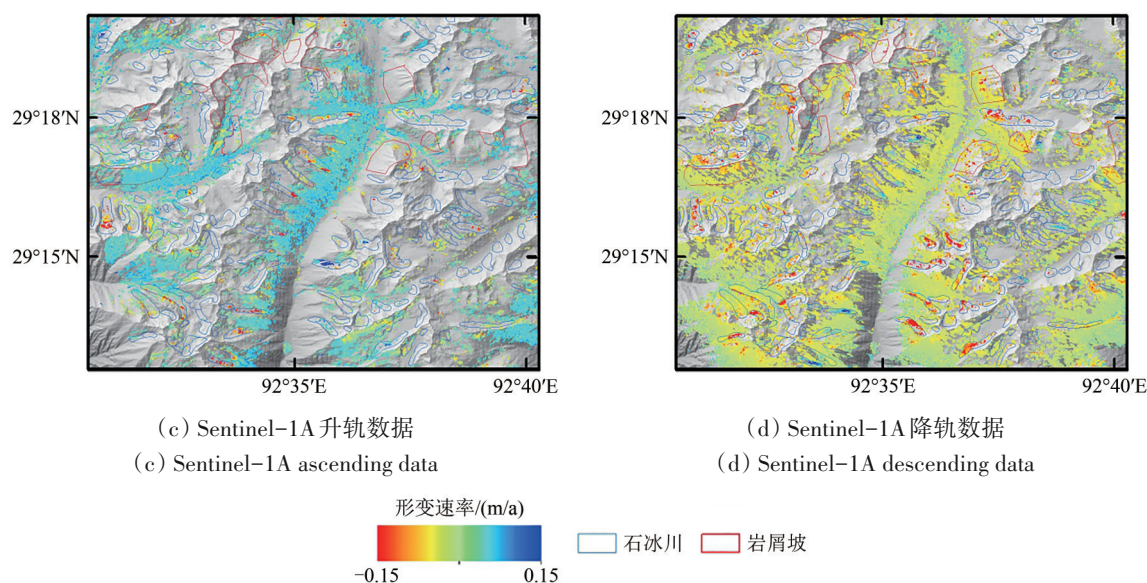


图5 LT-1 SAR 卫星和 Sentinel-1A 卫星升降轨数据 MT-InSAR LOS 形变速率对比

Fig. 5 Comparison of MT-InSAR LOS deformation velocities between LT-1 SAR and Sentinel-1A ascending and descending data

3.2 石冰川活动性分析

Zhang 等 (2024a) 研究以每条石冰川轮廓内形变上分位数代表石冰川活动情况, 本文以每条石冰川 MT-InSAR 结果的 LOS 形变速率上分位数作为石冰川活动性表示, 统计分析研究区内 650 条石冰川升轨、662 条石冰川降轨结果的形变速率分布, 结果见图 6。可见: 石冰川形变速率主要分布在 0.05—0.06 m/a。形变超过 0.06 m/a 的石冰川升轨 60 条, 降轨 162 条, 活动型石冰川的比例分别

为 9.0%, 24%。由于叠掩和阴影等因素造成的失相干的影响, 升降轨获得的结果存在一定差异, 降轨数据获得的结果形变速率略高于升轨数据结果。为了进一步分析石冰川活动性特征, 本文通过目视解译的方式定量统计分析 Stacking-InSAR 和 MT-InSAR 方法获得的 LT-1 升轨、降轨及升降轨联合的石冰川的活动性, 详见表 2。可见在覆盖在 Stacking-InSAR 结果范围内的石冰川升轨 1094 条, 降轨 791 条。

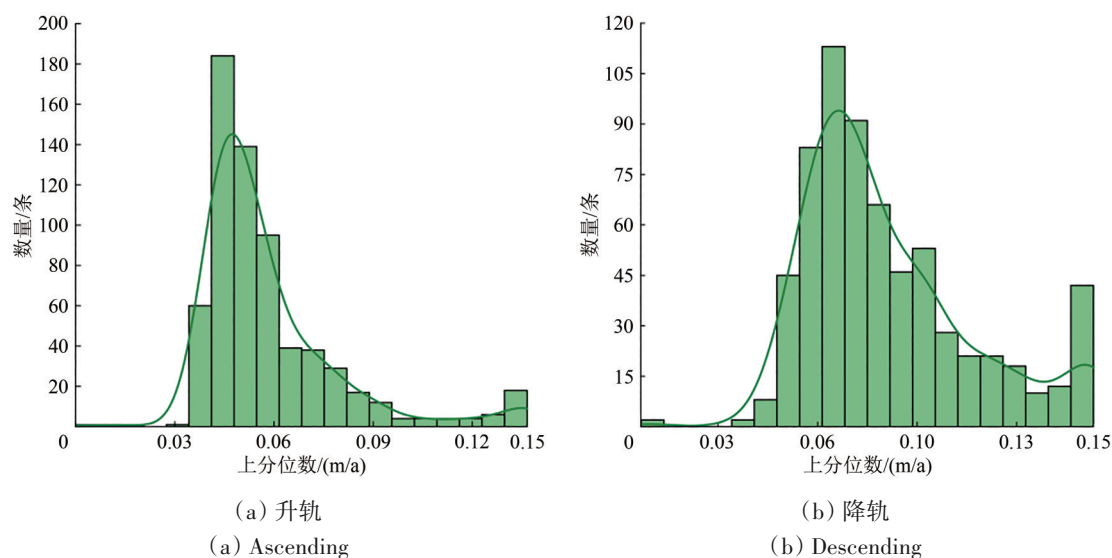


图6 升轨和降轨下石冰川 MT-InSAR LOS 形变速率统计分析结果

Fig. 6 Statistical analysis of LOS deformation velocities of recognized rock glaciers using MT-InSAR method

表2 石冰川活动性统计
Table 2 Statistics on rock glaciers activity

轨道方向	石冰川活动类型	Stacking InSAR	MT-InSAR
升轨	可监测	1094	705
	活动型	642	343
	失相干	345	282
降轨	可监测	791	751
	活动型	420	319
	失相干	329	374
联合	可监测	666	552
	活动型	560	398
	失相干	10	41

分别剔除失相干石冰川，升轨结果中，85%的石冰川存在活动区域，降轨结果中，90%的石冰川存在活动区域，将升降轨联合，85.3%的石冰川为活动型石冰川，升降轨联合能够有效降低失相干石冰川的比例（表2）。由图5可见由于每个监测点必须满足基线网络，因此，升降轨可监测石冰川分别为705条和751条，在这些石冰川中，升降轨活动型石冰川比例分别为81%和76.4%，升降轨联合后，活动型石冰川比例为77.8%。对比 Stacking-InSAR 和 MT-InSAR 结果，两者获得的活动区域一致性较好，MT-InSAR 的结果获得活动型石冰川比例有所降低，这是由于 Stacking InSAR 结果中一些区域存在相位噪声，影

响了结果的准确性。

3.3 岩屑坡活动性分析

与石冰川统计方法相同，分别统计分析研究区内148条岩屑坡升降轨结果的形变速率分布，结果见图7。可见：同样以上分位数作为岩屑坡活动性表示，升轨结果形变速率主要分布在0.045—0.055 m/a；降轨结果形变速率集中在0.065—0.075 m/a。由形态面积较大，因此利用上分位数代表岩屑坡活动性，无法完全定量反映岩屑坡的活动性状态。因此，与石冰川地貌相同，本文也通过目视解译的方式定量统计分析石冰川活动性分布（表3）。结果显示，在覆盖在 Stacking InSAR 结果范围内的岩屑坡升轨133条，降轨110条，剔除失相干岩屑坡，升轨结果中，81.2%的岩屑坡存在活动区域，降轨结果中，65.9%的岩屑坡存在活动区域，将升降轨联合，80.8%的岩屑坡存在活动区域。MT-InSAR 结果中，升降轨可监测岩屑坡分别为99条和109条，分别去除失相干岩屑坡，升降轨活动型岩屑坡比例分别为64.5%和88.3%，升降轨联合后，活动型石冰川比例为72%。与石冰川监测结果相同，MT-InSAR 结果获得的活动型岩屑坡比例更低。对于岩屑坡地表形变监测研究，Stacking-InSAR 更适合快速的形变筛查，对于定量活动性分析，MT-InSAR 是必不可少的手段。

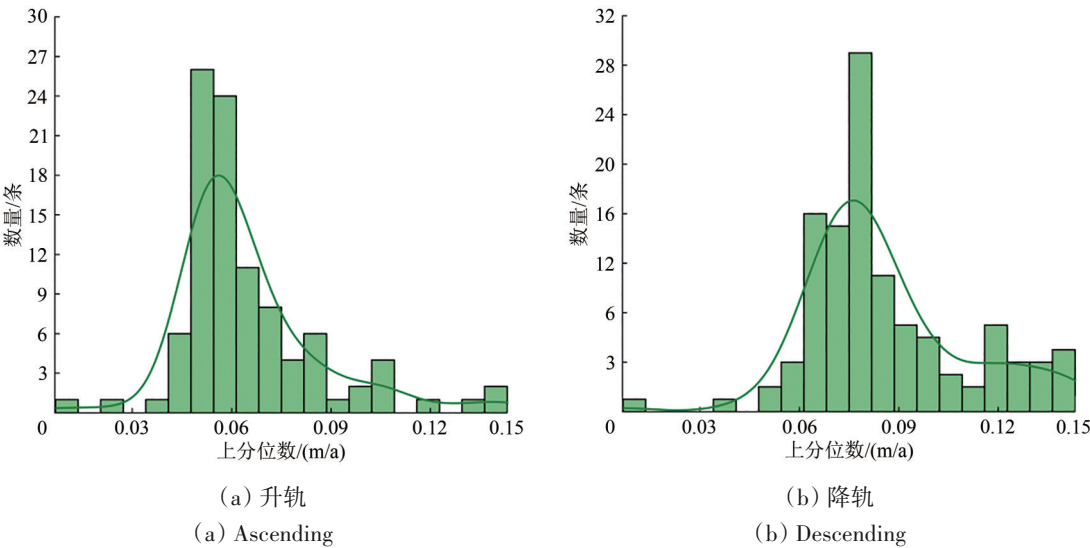


图7 岩屑坡 MT-InSAR LOS 形变速率统计分析

Fig. 7 Statistical analysis of LOS deformation velocities of recognized talus using MT-InSAR method

表3 岩屑坡活动性统计
Table 3 Statistics on talus activity

轨道方向	石冰川活动类型	Stacking InSAR	MT-InSAR
升轨	可监测	133	99
	活动型	69	29
	失相干	48	54
降轨	可监测	110	109
	活动型	54	38
	失相干	28	66
联合	可监测	133	110
	活动型	101	67
	失相干	8	17

3.4 石冰川时序形变分析

为了分析活动型石冰川时空运动特征，随机选择存在明显形变的8条石冰川（RG-01—RG-

08），利用升轨 MT-InSAR 结果，对其活动区域进行时空分析形变速率，结果见图8。可见在空间上，石冰川活动性表现出空间多样性，发育在相同环境的石冰川活动性差异较大，石冰川活动型石冰川活动区年际累积形变量为0.06—0.16 m/a，这与石冰川的坡度、内部含冰量及表碛覆盖物厚度有关。

石冰川在时序上表现出了连续变化特征，与气温表现出了明显的相关性，夏季形变速率（2023年7月—2023年9月、2024年6月—2024年9月）明显高于冬春季（2023年10月—2024年4月）（图9），这表明温度是影响石冰川运动的重要因素，夏季石冰川内部冰融化引起的表碛覆盖物失稳是石冰川加速运动的主要原因，冬季石冰川运动则主要由重力作用引起。

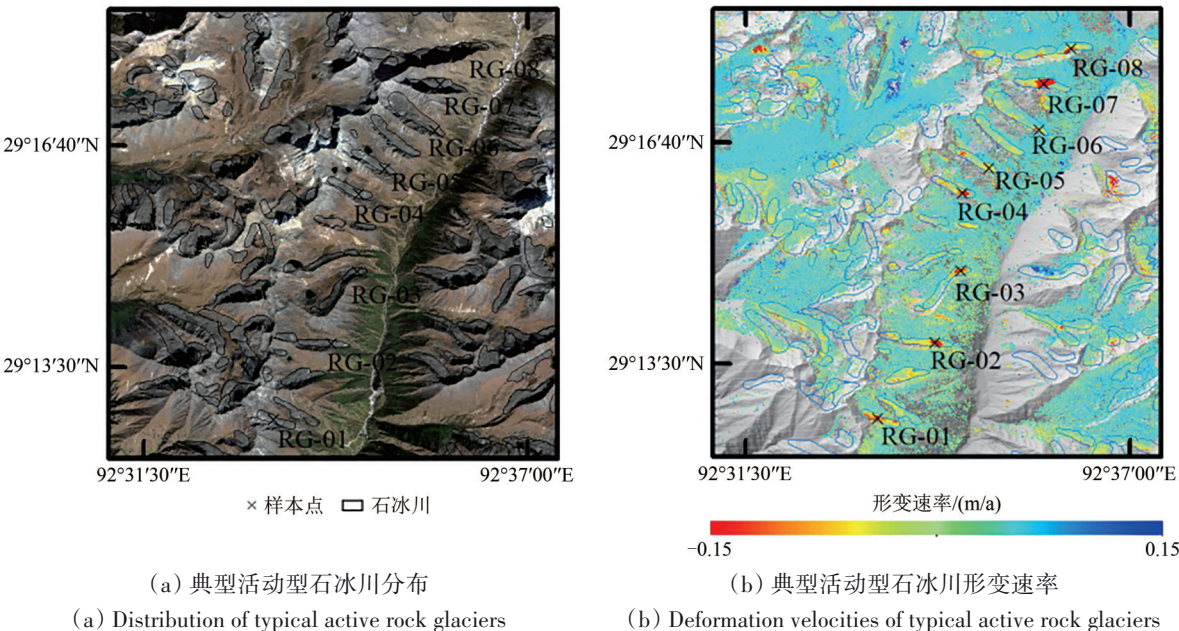


图8 典型活动型石冰川分布及形变速率
Fig. 8 Distribution and deformation velocities of typical active rock glaciers

3.5 岩屑坡时序形变分析

与石冰川相同，利用 LT-1 升轨 MT-InSAR 结果对研究区内5条岩屑坡进行时空形变特征分析（图10、图11）。在石冰川发育区，岩屑坡也广泛发育，可以看出岩屑坡活动性明显低于石冰川，且活动区域分布在局部较小区域。岩屑坡年际累积形变量在0.01—0.09 m/a（图11）。岩屑坡与石冰川不同，石冰川内部含冰量更低，且差异较大，

这是岩屑坡活动性低于石冰川的重要原因。时间上，岩屑坡时序形变表现出了较大差异性，一些岩屑坡与石冰川表现出了明显的季节性特征（T03—T05）（图10、图11），一些岩屑坡（T-01）表现出了与冻土地表类似的季节性冻融特征。

形变速较大的岩屑坡 T-02，则呈现出了连续快速的形变特点。岩屑坡的多样性主要是由于其复杂的地表形态、内部含冰量和表碛覆盖物丰度导致。

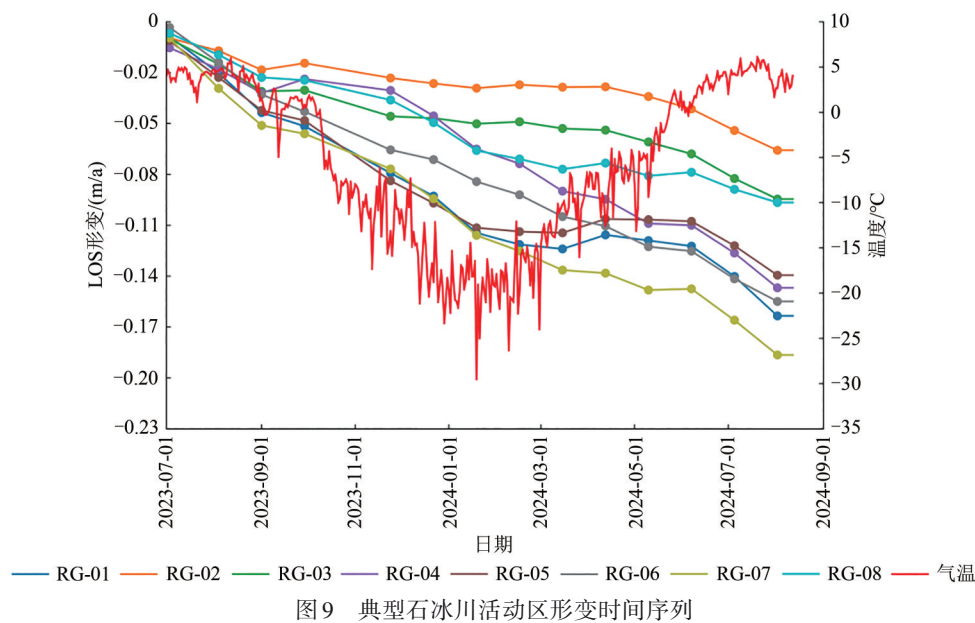


图9 典型石冰川活动区形变时间序列

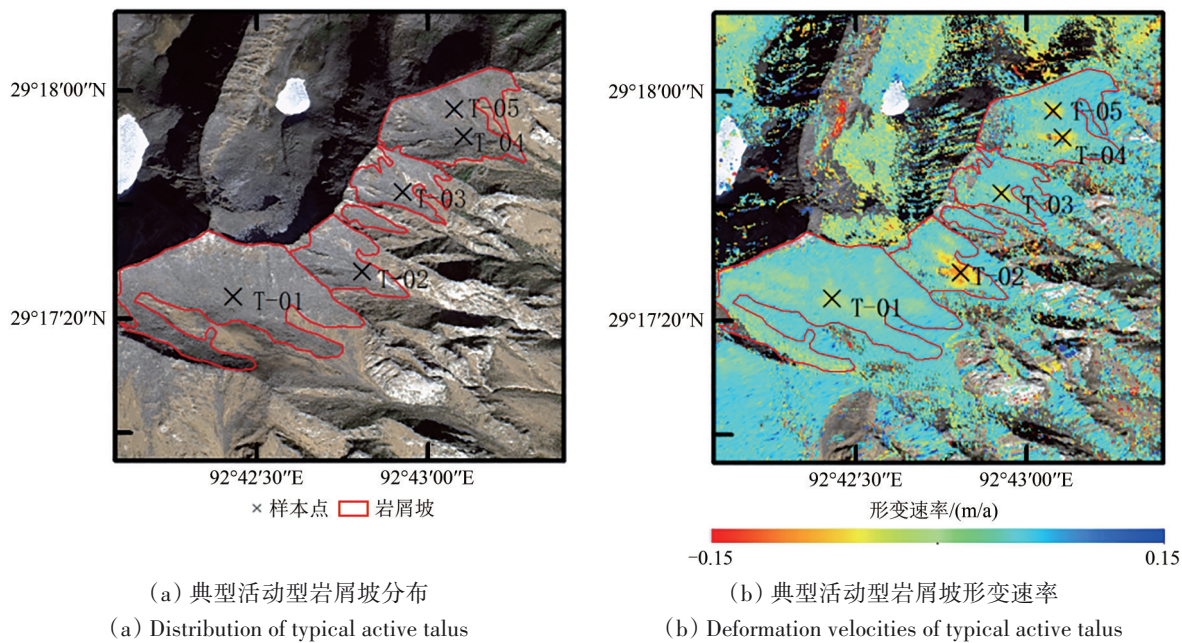


图10 典型岩屑坡分布及形变速率

3.6 基于不同卫星监测结果的精度分析

为确保上述形变特征分析的可靠性，本研究进一步通过多源数据交叉验证方法对石冰川和岩屑坡监测结果进行定量评估。选取涵盖冰川型、岩屑坡型、舌状、叶状的形变明显的石冰川20条（rg01—rg20）与发育在不同区域的10个岩屑坡（t01—t10）进行LT-1卫星与Sentinel-1卫星时间序列对比分析（图12）。可以看出利用LT-1和Sentinel-1A卫星获得的时间序列形变均能捕捉到不同季节地表形变差异，说明了本研究所应用

方法的有效性。针对rg01—rg20条石冰川，同步提取LT-1与Sentinel-1A升轨数据的形变时间序列（图12(a)），通过对两者形变监测结果的相关性分析，计算得到各监测点的相关系数 R^2 值。结果表明，所有监测点均呈现显著的相关性，其中 $R^2>0.9$ 的监测点被判定为高一致性。在这20条石冰川中，共有16条满足高一致性标准，进一步验证了LT-1在石冰川监测中的有效性和可靠性。针对t01—t10个岩屑坡，本研究采用了与石冰川相同的方法框架。结果表明，岩屑坡的监测结果呈现出较大

程度的空间异质性。部分岩屑坡（如 t04 和 t10）表现出较高的相关性，相关系数分别达到 0.97 和 0.94；然而，部分岩屑坡（如 t06 和 t08）的相关性有所降低， R^2 为 0.65 和 0.72。这种差异可能与岩屑坡的物质组成和地形特征有关，岩石的破碎度和

滑动特性可能增加了数据的复杂性，导致 LT-1 和 Sentinel-1A 之间的监测结果存在一定偏差。尽管岩屑坡的整体相关性低于石冰川，但 80% 监测点的相关性仍在 0.8 以上，这表明 LT-1 在岩屑坡监测的应用能力。

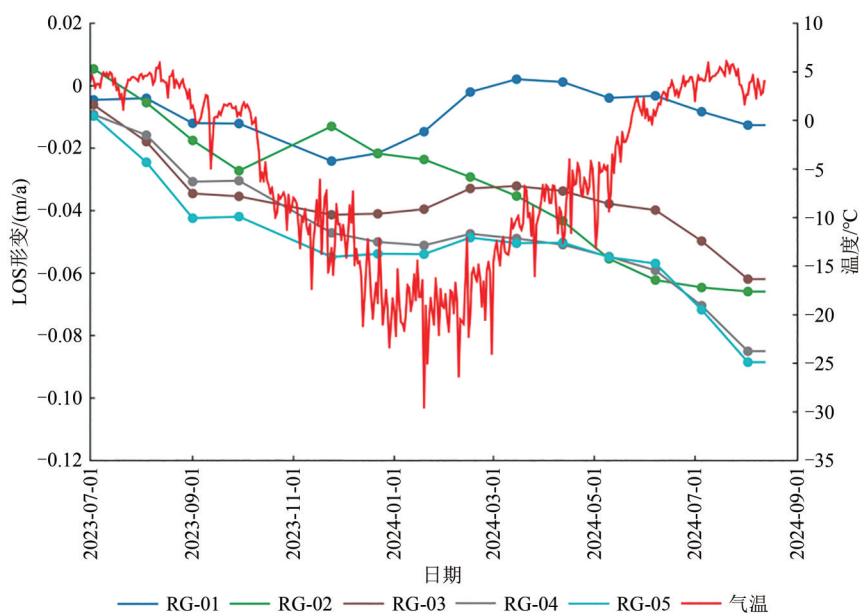
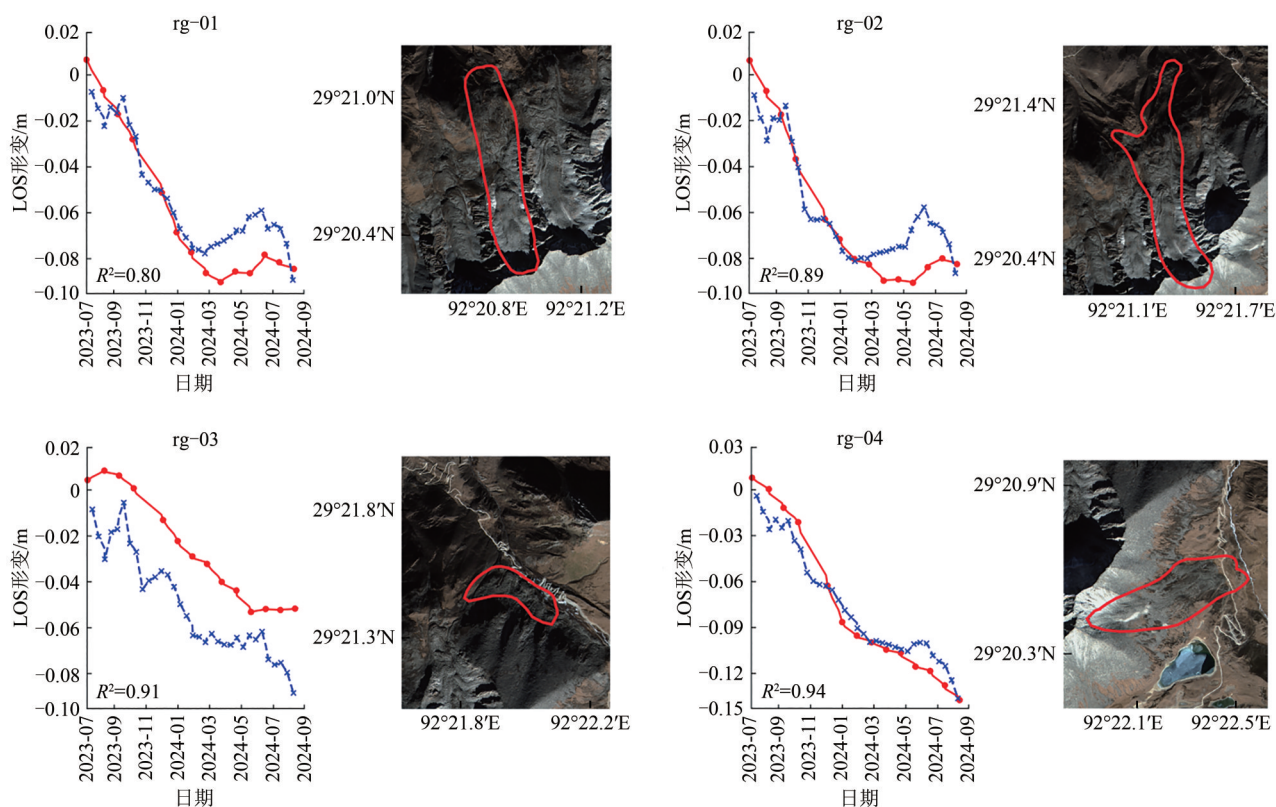


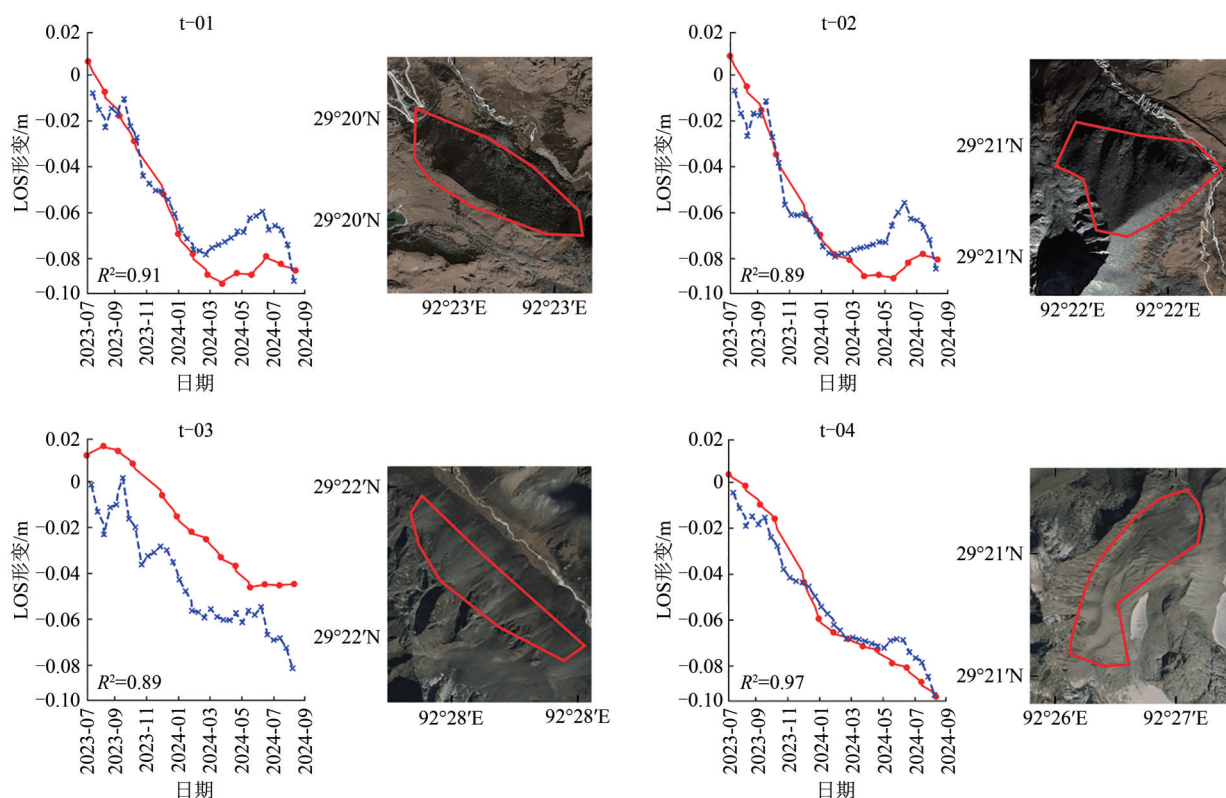
图 11 典型岩屑坡活动区形变时间序列

Fig. 11 Time series deformation of typical talus over active region



(a) 石冰川(rg01—rg04)

(a) Rock glaciers (rg01—rg04)



(b) 岩屑坡(t01—t04)

(b) Talus (t01—t04)

—●— LT-1 - - - × - - - Sentinel-1

图 12 基于不同卫星监测的典型石冰川与岩屑坡形变时间序列结果相关性分析(本图展示基于不同卫星监测的 4 个代表性石冰川与 4 个代表性岩屑坡的形变时间序列相关性分析结果。上述样本均从更大范围的典型石冰川与岩屑坡数据集中选取,可反映该类地貌的整体特征)

Fig. 12 Correlation analysis of deformation time series results for typical rock glaciers and talus slopes based on different satellite monitoring (This figure displays the correlation analysis results of deformation time series for four representative rock glaciers and four representative talus slopes, selected from a larger dataset of typical rock glaciers and talus, based on different satellite monitoring)

4 结 论

本研究为了提升青藏高原冰缘地貌形变监测水平,利用国产 LT-1 SAR 卫星数据,基于 Stacking-nSAR 和 MT-InSAR 方法对发育在青藏高原念青唐古拉山脉的典型石冰川、岩屑坡开展时空形变分析,并与 Sentinel-1A 卫星结果进行对比。主要结论如下:

(1) LT-1 卫星在复杂冰缘环境表现出了较好的应用能力,能够有效提取石冰川、岩屑坡地貌时空形变。LT-1 卫星在复杂地形条件下在一定程度上会受地形叠掩和阴影的影响,在沿卫星视线一侧坡度较陡的区域无法有效监测,通过卫星升降轨联合观测能够克服该影响。

(2) Stacking-InSAR 可稳健、快速圈定石冰川

与岩屑坡的活动范围,其形变速率与 MT-InSAR 结果具有一致性,相较于 MT-InSAR 受时间失相干影响更小,在石冰川和岩屑坡轮廓内有较高的监测密度。得益于 LT-1 卫星 L 波段长波长对冰雪介质的强穿透能力,MT-InSAR 在石冰川与岩屑坡区仍可维持高相干目标密度,从而保证石冰川和岩屑坡活动性特征准确估计。

(3) 研究区内岩屑坡的活动性比石冰川活动性更低,石冰川和岩屑坡的时序运动具有异质性,一些典型活动型石冰川呈现出季节变化特点,夏季运动速率高,春冬季较稳定。

(4) 本研究基于念青唐古拉山脉的部分区域开展,该区域在冰缘地貌演化和环境背景方面具有一定的代表性,能够为青藏高原具有相似环境特征的冰缘地貌形变监测提供应用参考。

(5) 本文研究区主要聚焦于冰雪覆盖的冰缘环境应用,对于植被高度覆盖的高山峡谷区,LT-1卫星的应用能力需要在后续研究中进一步探索。随着LT-1 SAR卫星数据的不断积累,在整个青藏高原开展大区域、长时序冰缘地貌的形变监测,将进一步深化对不同区域冰缘地貌活动性的认识,拓展国产SAR卫星应用效能,提升国产SAR卫星应用水平。

志 谢 本研究所用LT-1卫星数据由自然资源部国土卫星遥感应用中心提供,岩屑坡、石冰川遥感识别得到了中国科学院青藏高原研究所冯敏研究员、姜德才博士的技术支持,在此一并感谢!

参考文献(References)

- Barboux C, Delaloye R and Lambiel C. 2014. Inventorying slope movements in an Alpine environment using DInSAR. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(15): 2087-2099 [DOI: 10.1002/esp.3603]
- Bertone A, Barboux C, Bodin X, Bolch T, Brardinoni F, Caduff R, Christiansen H H, Darrow M M, Delaloye R, Etzelmüller B, Humlum O, Lambiel C, Lilleøren K S, Mair V, Pellegrin G, Rouyet L, Ruiz L and Strozzi T. 2022. Incorporating InSAR kinematics into rock glacier inventories: insights from 11 regions worldwide. *The Cryosphere*, 16(7): 2769-2792 [DOI: 10.5194/tc-16-2769-2022]
- Bhattacharya A and Mukherjee K. 2017. Review on InSAR based displacement monitoring of Indian Himalayas: issues, challenges and possible advanced alternatives. *Geocarto International*, 32(3): 298-321 [DOI: 10.1080/10106049.2016.1140820]
- Cai J X, He Y J, Wang X W and Liu G X. 2023. Inventorying and characterizing rock glaciers in the southern Daxue Shan by combining time-series InSAR and optical image interpretation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 45(2): 774-785 (蔡佳欣, 何昱君, 王晓文, 刘国祥. 2023. 联合时序InSAR和光学遥感解译的大雪山南段石冰川编目与分布特征分析. *冰川冻土*, 45(2): 774-785) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0059]
- Cai J X, Wang X W, Wu T T, Wu R Z and Liu G X. 2024. Characterizing the kinematics of active rock glaciers in Daxue Shan, south-eastern Tibetan plateau, using SAR interferometry and generalized boosted modeling. *Remote Sensing of Environment*, 313: 114352 [DOI: 10.1016/j.rse.2024.114352]
- Chen G X, Dong Z B, Liang A M, Shi W K, Liu X K, Nan W G, Bai Z Y and Chi Z. 2022. Research progress on geomorphology of talus slopes. *Advances in Earth Science*, 37(8): 786-797 (陈国祥, 董治宝, 梁爱民, 石唯康, 刘小棣, 南维鸽, 白子怡, 池政. 2022. 倒石堆地貌研究进展. *地球科学进展*, 37(8): 786-797) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2022.041]
- Dini B, Manconi A and Loew S. 2019. Investigation of slope instabilities in NW Bhutan as derived from systematic DInSAR analyses. *Engineering Geology*, 259: 105111 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.04.008]
- Giardino J R, Regmi N R and Vitek J D. 2011. Rock glaciers//Singh V P, Singh P and Haritashya U K, eds. *Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers*. Dordrecht: Springer: 943-948 [DOI: 10.1007/978-90-481-2642-2_453]
- Hendrickx H, De Sloover L, Stal C, Delaloye R, Nyssen J and Frankl A. 2020. Talus slope geomorphology investigated at multiple time scales from high-resolution topographic surveys and historical aerial photographs (Sanetsch Pass, Switzerland). *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(14): 3653-3669 [DOI: 10.1002/esp.4989]
- Imaizumi F, Nishiguchi T, Matsuoka N, Trappmann D and Stoffel M. 2018. Interpretation of recent alpine landscape system evolution using geomorphic mapping and L-band InSAR analyses. *Geomorphology*, 310: 125-137 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.03.013]
- Ji Y N, Zhang X, Li T, Fan H D, Xu Y Z, Li P Z and Tian Z M. 2023. Mining deformation monitoring based on Lutan-1 monostatic and bistatic data. *Remote Sensing*, 15(24): 5668 [DOI: 10.3390/rs15245668]
- Kääb A. 2022. Rock glaciers//Elsevier, ed. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Amsterdam: Elsevier [DOI: 10.1016/B978-0-323-99931-1.00013-1]
- Kaushik S, Singh T, Bhardwaj A, Joshi P K and Dietz A J. 2022. Automated delineation of supraglacial debris cover using deep learning and multisource remote sensing data. *Remote Sensing*, 14(6): 1352 [DOI: 10.3390/rs14061352]
- Li S H, Dong J, Zhang L and Liao M S. 2023. Time-series InSAR tropospheric atmospheric delay correction based on common scene stacking. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(10): 2406-2417 (李思慧, 董杰, 张路, 廖明生. 2023. 时序InSAR对流层大气延迟改正的相位堆叠方法. *遥感学报*, 27(10): 2406-2417) [DOI: 10.11834/jrs.20221736]
- Li T, Tang X M, Li S J, Zhou X Q, Zhang X and Xu Y Z. 2023. Classification of basic deformation products of L-band differential interferometric SAR satellite. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 52(5): 769-779 (李涛, 唐新明, 李世金, 周晓青, 张祥, 许耀宗. 2023. L波段差分干涉SAR卫星基础形变产品分类. *测绘学报*, 52(5): 769-79) [DOI: 10.11947/j.AGCS.20220050]
- Li T, Tang X M, Zhang X, Zhang X F, Lu J, Qiao X H, Chen T and Zhu N N. 2023. First application demonstrations of Lu Tan-1 SAR satellites//*Proceedings of the SAR in Big Data Era (BIG-SAR DATA)*. Beijing: IEEE: 1-4 [DOI: 10.1109/BIGSAR-DATA59007.2023.10294711]
- Li X E, Zhou L, Su F Z and Wu W Z. 2021. Application of InSAR technology in landslide hazard: progress and prospects. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 614-629 (李恩晓, 周亮, 苏奋振, 吴文周. 2021. InSAR技术在滑坡灾害中的应用研究进展. *遥感*

- 学报, 25(2): 614-629 [DOI: 10.11834/jrs.20209297]
- Liu B, Zhang L, Ge D Q, Li M, Zhou X L, Guo Z C, Shi P Q, Zhang L, Jin D J, Wan X X, Wang Y and Wang Y. 2024. Application of InSAR monitoring large deformation of landslides using Lutan-1 constellation. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(10): 1753-1762 (刘斌, 张丽, 葛大庆, 李曼, 周小龙, 郭兆成, 石鹏卿, 张玲, 金鼎坚, 万祥星, 王宇, 王艳. 2024. 陆地探测-1 号卫星滑坡大变形 InSAR 监测应用. 武汉大学学报(信息科学版), 49(10): 1753-1762) [DOI: 10.13203/j.whugis.20230478]
- Liu J B, Zhang Y, Liu S Y, Wang X and Jiang Z L. 2024. Research on the identification, ice volume, and dynamic processes of rock glaciers in the Tibetan Plateau and surrounding regions. *Advances in Earth Science*, 39(4): 391-404 (刘锦波, 张勇, 刘时银, 王欣, 蒋宗立. 2024. 青藏高原及周边石冰川识别、冰储量及动力学过程研究进展. 地球科学进展, 39(4): 391-404) [DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2024.030]
- Liu Y, Zhang W and Wei L S. 2024. Developmental characteristics and potential disaster mechanism of rock glaciers in the middle reaches of the Yarlung Zangbo River. *Northwestern Geology*, 57(1): 44-54 (刘勇, 张文, 魏良帅. 2024. 雅鲁藏布江中游石冰川发育特征及潜在成灾机制分析. 西北地质, 57(1): 44-54) [DOI: 10.12401/j.nwg.2023136.]
- Luckman B H. 2013. Permafrost and periglacial features | Talus Slopes//Elias A S and Mock C J, eds. *Encyclopedia of Quaternary Science*. Amsterdam: Elsevier: 566-573 [DOI: 10.1016/B978-0-444-53643-3.00090-X]
- Ma T X, Yang W G, Zhu L D, Zhang H L, Zhong Y, Xie L, Mai Y J, Luo L and Cao Z C. 2022. Geomorphologic significance in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 49(4): 502-512 (马腾霄, 杨文光, 朱利东, 张洪亮, 钟瑶, 解龙, 麦源君, 罗璐, 曹志超. 2022. 雅鲁藏布江中游地貌参数特征及其构造地貌意义. 成都理工大学学报(自然科学版), 49(4): 502-512) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-9727.2022.04.11]
- Qin D H. 2016. *Glossary of Cryospheric Science*. Beijing: Meteorological Press (秦大河. 2016. 冰冻圈科学辞典. 北京: 气象出版社)
- Qing F, Zhao Y, Meng X M, Su X J, Qi T J and Yue D X. 2020. Application of machine learning to debris flow susceptibility mapping along the China - Pakistan Karakoram highway. *Remote Sensing*, 12(18): 2933 [DOI: 10.3390/rs12182933]
- Reinosch E, Gerke M, Riedel B, Schwalb A, Ye Q H and Buckel J. 2021. Rock glacier inventory of the western Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau, supported by InSAR time series and automated classification. *Permafrost and Periglacial Processes*, 32(4): 657-672 [DOI: 10.1002/ppp.2117]
- Rouyet L, Kristensen L, Derron M H, Michoud C, Blikra L H, Jaboyedoff M and Lauknes T R. 2017. Evidence of rock slope breathing using ground-based InSAR. *Geomorphology*, 289: 152-169 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.07.005]
- Sandwell D T and Price E J. 1998. Phase gradient approach to stacking interferograms. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 103 (B12): 30183-30204 [DOI: 10.1029/1998JB900008]
- Wang X W, Liu L, Zhao L, Wu T H, Li Z Q and Liu G X. 2017. Mapping and inventorying active rock glaciers in the northern Tien Shan of China using satellite SAR interferometry. *The Cryosphere*, 11(2): 997-1014 [DOI: 10.5194/tc-11-997-2017]
- Wu J L, Ma C, Yang W T, Lyu L Q and Miao L. 2021. Recent expansion of talus slopes in the northern Taihang Mountain Range, China: an example from the Xiaowutai Region. *Landslides*, 18(9): 3027-3040 [DOI: 10.1007/s10346-021-01715-4]
- Xu J H, Feng M, Wang J B, Ran Y H, Qi Y, Yang L A and Li X. 2020. Automatically identifying rock glacier based on Gaofen Satellite image and deep learning—preliminary application in west Nyainqentanglha Mountains. *Remote Sensing Technology and Application*, 35(6): 1329-1336 (徐瑾昊, 冯敏, 王建邦, 冉有华, 祁元, 杨联安, 李新. 2020. 基于高分遥感数据和深度学习的石冰川自动提取研究——以念青唐古拉山西段为例. 遥感技术与应用, 35(6): 1329-1336) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2020.6.1329]
- Zalazar L, Ferri L, Castro M, Gargantini H, Gimenez M, Pitte P, Ruiz L, Masiokas M, Costa G and Villalba R. 2020. Spatial distribution and characteristics of Andean ice masses in Argentina: results from the first National Glacier Inventory. *Journal of Glaciology*, 66(260): 938-949 [DOI: 10.1017/jog.2020.55]
- Zhang X F, Feng M, Li T, Chen J Y, Jiang D C, Xu J H, Yan D Z, Zhou X Q, Zhang X and Lu J. 2024a. High-resolution detection of periglacial landforms deformation using radarsat-2 and GF-7 stereo optical imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 10862-10876 [DOI: 10.1109/JSTARS.2024.3407791]
- Zhang X F, Feng M, Xu J H, Yan D Z, Wang J, Zhou X Q, Li T and Zhang X. 2023. Kinematic inventory of rock glaciers in the Nyainqentanglha Range using the MT-InSAR method. *International Journal of Digital Earth*, 16(1): 3923-3948 [DOI: 10.1080/17538947.2023.2260778]
- Zhang X F, Feng M, Zhang H, Wang C, Tang Y X, Xu J H, Yan D Z and Wang C L. 2021. Detecting rock glacier displacement in the central Himalayas using multi-temporal InSAR. *Remote Sensing*, 13(23): 4738 [DOI: 10.3390/rs13234738]
- Zhang X F, Li T, Zhang X, Zhou X Q, Lu J, Hu L R and Zhang X G. 2024b. First study of LT-1 SAR satellite for rock glacier deformation monitoring over Tibetan Plateau periglacial environment. *IET Conference Proceedings*, 2023(47): 227-231 [DOI: 10.1049/icp.2024.1081]
- Zhang X F, Li T, Zhang X, Zhou X Q, Lu J and Zhang X G. 2024c. Rock glacier topography mapping and deformation monitoring over Tibetan Plateau periglacial environment using Lutan-1 SAR satellite constellation//Proceedings of the IGARSS 2024-2024 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Athens: IEEE: 11091-11094 [DOI: 10.1109/IGARSS53475.2024.10642516]

Zhang Y D, Li Y D, Dong J, Fan Q, Che B, Zhang L, Zhou Y and Liao M S. 2019. Landslide hazard detection in Markam with time-series InSAR analyses. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 23(5): 987-996 (张亚迪, 李煜东, 董杰, 范强, 车彬, 张路, 周杨, 廖明生. 2019. 时序 InSAR 技术探测芒康地区滑坡灾害隐患. 遥感学报, 23(5): 987-996) [DOI: 10.11834/jrs.20198025]

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]

Monitoring of periglacial landform deformation on the Nyainqêntanglha range via the LT-1 SAR satellite

ZHANG Xueguang¹, WANG Qianwen^{2,3}, ZHANG Xuefei³

1. Yunnan Construction Investment First Survey Design Co. Ltd., Kunming 650032, China;

2. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

3. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China

Abstract: Periglacial landforms are distinctive surface features shaped by frost weathering and freeze-thaw cycles, and they are commonly found in the permafrost regions of the cold periglacial zones on the Tibetan Plateau. Changes in these landforms serve as key indicators of climate change on the plateau and are substantial contributors to geological hazards, such as permafrost landslides, in periglacial environments. Rock glacier and talus are typical types of periglacial landforms. Studying the spatiotemporal deformation characteristics of periglacial landforms is crucial for understanding the physical mechanisms and dynamic processes of their deformation, identifying potential geological hazard risks, and enhancing the ability to prevent secondary disasters. In early 2022, China successfully launched a high-resolution L-band differential interferometric SAR (LT-1) satellite constellation, with surface deformation monitoring as its core mission. This satellite is a new source of data with high spatiotemporal resolution for research on periglacial landform deformation. This study focused on deformation detection of two typical periglacial landforms (rock glaciers and talus) developed in the Nyainqêntanglha mountains on the Tibetan Plateau and used newly acquired ascending and descending LT-1 SAR data. An inventory of rock glaciers and talus was compiled using high-resolution optical imagery from Gaofen-2 (GF-2) and Gaofen-7 (GF-7) satellites, and 1,094 rock glaciers and 148 talus slopes were identified. A total of 15 ascending and 10 descending scenes of 3-meter-resolution Stripmap1-mode data from the LT-1 SAR satellite constellation, acquired between July 2023 and August 2024, were used for the analysis. Surface deformation across the study area was detected using stacking-InSAR and multitemporal InSAR (MT-InSAR) methods. Then, the actively moving areas within the identified rock glaciers and talus were delineated on the basis of the stacking InSAR and MT-InSAR deformation results. Comparative deformation analysis using Sentinel-1A data from the same period as LT-1 was conducted to validate the deformation results acquired by LT-1 SAR. The deformation interpretation results acquired by LT-1 from stacking-InSAR show that 83% of the rock glaciers in the study area are active, and 80.8% of the taluses exhibit active regions. The MT-InSAR results indicate that 77.8% of the rock glaciers are active, and 72% of the taluses contain active regions. The active regions extracted by stacking-InSAR and MT-InSAR show fine consistency. The annual cumulative deformation of rock glaciers within the study area ranges from 0.06 m to 0.16 m, and that of taluses ranges from 0.01 m to 0.09 m, indicating that taluses are less active than rock glaciers. The temporal movement of both landforms exhibits heterogeneity characterized primarily by seasonal variation, with high movement rates in summer and stability in winter. The research findings indicate that the deformation results obtained from LT-1 are consistent with those derived from Sentinel-1A data, demonstrating the accuracy of the LT-1 satellite results. The LT-1 satellite demonstrates fine application capabilities in complex periglacial environments, effectively extracting the spatiotemporal deformation of rock glaciers and taluses. Stacking InSAR can effectively, accurately, and quickly identify active areas of rock glaciers and taluses, allowing for the assessment of their activity. The MT-InSAR method can provide accurate quantitative analysis of the deformation time series for rock glaciers and taluses.

Key words: rock glacier, talus, LT-1, MT-InSAR, deformation monitoring, Tibetan Plateau

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42301160)