

协同卫星与地基 InSAR 的川藏交通廊道综合监测应用

张瑞, 江航, 阎超, 吕继超, 刘国祥

西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756

摘要: 川藏交通廊道地质环境复杂、边坡灾害点多面广, 给公路、铁路工程的建设、运营构成重大安全风险。为满足交通基础设施在勘察、建设与运维各阶段的多元化信息感知需求, 本文提出联合卫星与地基 InSAR 构建立体、动态的综合观测方案, 以实现不同空间尺度(廊道一区段—工点)与时间频率(年度普查—季度巡检—连续监测)下的形变信息精准解析; 重点构建了融合多轨道时序 InSAR 观测数据的三维形变解算框架与无迹卡尔曼滤波坡向形变精准提取模型, 旨在结合卫星广域覆盖能力与地基雷达高精度、高采样优势, 提升复杂山区交通工程灾害早期识别与风险防控的信息支撑与技术保障能力。为验证技术方案的可行性, 围绕川藏交通廊道内的 318 川藏公路和在建重大铁路工程沿线区域, 利用多种卫星时序 InSAR 方法配合开展线路廊道的地表形变时序监测和潜在边坡病害体解译识别, 并在 9·5 泸定地震震中廊道区段重点开展了次生滑坡的解译判识和时序监测; 针对关键桥隧工程的灾害防治需要, 围绕金沙江桥址区上下游的高风险边坡开展了三维时序形变信息提取, 并协同地基 InSAR 对重要隧址区的边坡蠕滑开展了多尺度监测应用与验证分析。相关研究和实践验证表明, 卫星与地基 InSAR 应用于微小形变的监测具有时空尺度和视角的优势互补性, 本文提出的综合观测方案及川藏交通廊道多尺度应用验证结果, 可为西部艰险山区的基础地质调查及防灾减灾相关研究提供参考。

关键词: 卫星 InSAR, 地基 InSAR, 川藏交通廊道, 综合监测方案, 地质灾害, 三维形变, 卡尔曼滤波

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 张瑞, 江航, 阎超, 吕继超, 刘国祥. 2026. 协同卫星与地基 InSAR 的川藏交通廊道综合监测应用. 遥感学报, 30(4): 1025–1044

Zhang R, Jiang H, Yan C, Lv J C and Liu G X. 2026. Comprehensive Monitoring of the Sichuan–Tibet Transportation Corridor by Collaborative Satellite and Ground–Based InSAR. National Remote Sensing Bulletin, 30(4): 1025–1044 [DOI: 10.11834/jrs.20265517]

1 引言

川藏交通廊道是连通内地与西藏自治区的公、铁线路走廊, 对地缘战略、区域经济整合与国土安全具有重大战略意义(李洪梁等, 2022a; Lv 等, 2025b)。廊道东起成都、西至拉萨, 穿越横断山脉与青藏高原东缘等复杂地质地形单元, 线路全长逾 1543 km、桥隧比约 92%, 工程条件严苛。该区域处于构造活跃带, 高烈度地震频发, 崩塌、滑坡、泥石流等多模态灾害密集发育并易形成灾害链, 叠加生态敏感区约束, 使其成为极具挑战性的超级工程之一(彭建兵等, 2020; Zhang 等, 2024b; 吕继超等, 2025; 杨云杰等, 2025)。同

时, 区域水汽充沛、常年多云雨雪, 光学遥感成像受限; 深切峡谷与茂密植被导致地形遮蔽与冠层遮挡显著, 监测盲区突出, 传统工程防护与经验性运维难以满足持续动态感知与应急响应需求。

InSAR 技术凭借微波穿透性与毫米级形变感知能力, 可在川藏廊道的多云与植被覆盖条件下实现大范围地表稳定性监测(朱建军等, 2017)。随着星载 SAR 数据丰富与算法迭代(范洪冬等, 2010), InSAR 应用已由地形测绘、地震形变监测扩展到滑坡监测等多个领域(秦小芳等, 2018; Dai 等, 2019; 李晓恩等, 2021; 李媛茜等, 2021; 廖明生等, 2021; 李振洪等, 2022b; 苏晓军等, 2024)。技术体系也由 DInSAR 发展为时序 InSAR (MT-

收稿日期: 2025-09-10; 预印本: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(编号: U22A20565, 42371460); 国家重点研发计划(编号: 2023YFB2604001); 四川省重大科技专项项目(编号: 2023ZDZX0030); 中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划重大课题(编号: K2024G004)

第一作者简介: 张瑞, 研究方向为合成孔径雷达干涉与灾害遥感。E-mail: zhangrui@swjtu.edu.cn

通信作者简介: 刘国祥, 研究方向为合成孔径雷达干涉理论与应用。E-mail: rsgxliu@swjtu.edu.cn

InSAR) (许兵等, 2024) 系列方法: PS-InSAR 实现高精度监测 (Ferretti 等, 2000); SBAS 等方法可获取时间序列并刻画非线性形变 (Berardino 等, 2002); SqueeSAR 等融合 PS/DS 优势提高监测密度 (Ferretti 等, 2011)。此外相位梯度堆叠等方法有效抑制了大气噪声, 适用于山区大气不均匀条件 (Sharov 等, 2004; Zhang 等, 2024a)。

面对川藏廊道的极端复杂环境, 单一技术存在局限, 地基 InSAR (GB-InSAR, Ground Based Interferometric Synthetic Aperture Radar) (曾涛等, 2019) 作为星载 InSAR 的一种补充, 可通过在局部区域的单一视角高频次连续重复观测, 获取精度高达亚毫米级的连续形变监测结果。地基 InSAR 技术在空间分辨率与时间分辨率优势巨大, 有助于弥补星载 InSAR 观测重访周期久、空间分辨率低、成像几何受限的短板, 在露天矿开采边坡监测、山体滑坡监测 (Noferini 等, 2007, 2008) 和桥梁振动测量等方面已展现出良好的应用前景。

公路、铁路工程在廊道勘察—建设—运营全周期中, 对遥感观测的空间范围、重访周期与精度呈显著差异。勘察阶段侧重数百公里廊道尺度的构造识别与宏观稳定性评估, 依托卫星 InSAR 面状覆盖开展不稳定体普查, 为地质评价与选线提供依据; 建设阶段聚焦线路区段, 关注施工扰动下边坡与临时设施安全, 针对带状或点状隐患开展动态巡检, 强调时效性; 运营阶段面向既有设施长期运维与风险预警, 突出桥梁、隧道、高边坡等关键工点的精细化监测, 要求短周期甚至实时的高频、高精度观测。整体需求呈现由“区域普查”向“工点精监测”的尺度递进。

在进藏交通基础设施建设与运维背景下, 上述多层次、高标准需求已超出单一观测技术能力。卫星 InSAR 具备广域覆盖与周期观测优势, 适用于区域长期调查与年度筛查, 但受分辨率与重访周期限制, 难以满足施工期动态跟踪和运营期精细化监测; 地基 InSAR 可实现局部区域和单体工程的高频、高精度观测, 却难以支撑广域离散灾点监测。因此, 有必要融合卫星广域周期观测与地基高频精测, 构建多视角、多尺度综合监测体系, 支撑全生命周期的动态感知与风险响应。

针对上述问题, 本文提出协同卫星与地基 InSAR 构建一套立体、动态的长大交通廊道综合观测方案, 利用多种卫星时序 InSAR 技术和地基

InSAR 高精度连续观测方法, 选取 318 川藏公路和在建重大铁路工程沿线区域为典型应用验证场景, 综合开展交通廊道全域、重要工程区段、关键病害工点三级空间尺度的地表形变探测、潜在边坡病害体解译识别、高风险隐患三维时序形变解析、以及典型工程病害的高精度现场实时监测分析, 旨在探索和验证星地 InSAR 协同观测的技术途径对复杂艰险山区交通廊道的动态观测和应急响应能力水平。

2 技术方法

面向进藏交通基础设施建设运维背景下不同工程主体部门的多元化需求牵引, 单一空间对地遥感观测途径难以满足差异化需求。为此, 本文提出协同卫星与地基 InSAR 构建立体、动态的综合观测方案。该方案以交通工程所处的勘察期、建设期、运营期需求导向为牵引, 按照不同工程阶段对廊道全域、线路区段、设施单体 3 个应用尺度做区分, 按照地质要素和结构要素监测不同的时空分辨率和精度需求, 细化匹配了 DInSAR、Stacking-InSAR、SBAS-InSAR、三维形变监测 InSAR、PS-InSAR、DS-InSAR 等卫星 InSAR 技术的适用范围, 并适度区分了建设期和运营期应用地基 InSAR 开展边坡蠕滑监测和结构设施监测的精度和时空分辨率差异, 具体如图 1 所示。

2.1 廊道—区段—工点三级尺度观测技术路线

为匹配勘察设计—建设施工—运营维护 3 个工程阶段不同主体的差异化需求, 本文将针对长大交通廊道、重要工程区段、关键病害工点三级空间尺度的 InSAR 监测, 侧重于年度 InSAR 广域灾害隐患排查、季度—月度风险源巡检、到病害边坡或结构体高精度连续监测的典型需求, 开展技术路线设计。具体包括 3 个循序渐进的过程:

(1) 廊道尺度广域 InSAR 地灾隐患排查。我们利用历史存档影像数据较为齐全的卫星 SAR 数据资料, 结合 Stacking-InSAR、SBAS-InSAR 等方法, 在多年的时间尺度上探测存在蠕滑和地表位移的滑坡、崩塌等不良地质隐患, 并利用相位梯度堆叠等技术强化存在显著形变梯度的区域, 排查边坡灾害隐患的空间分布。

(2) 区段尺度 InSAR 时序监测与灾害体精细解译判识。在广域排查的基础上, 一方面选择重点区段持续开展高精度的时序 InSAR 监测与新增

隐患排查; 同时, 进一步利用升/降轨三维形变反演的方法, 解析崩塌、滑坡等边坡灾害体的沿坡

向形变时序演化, 重点监测工程建设期间由于工程扰动诱发的边坡失稳和成灾隐患。

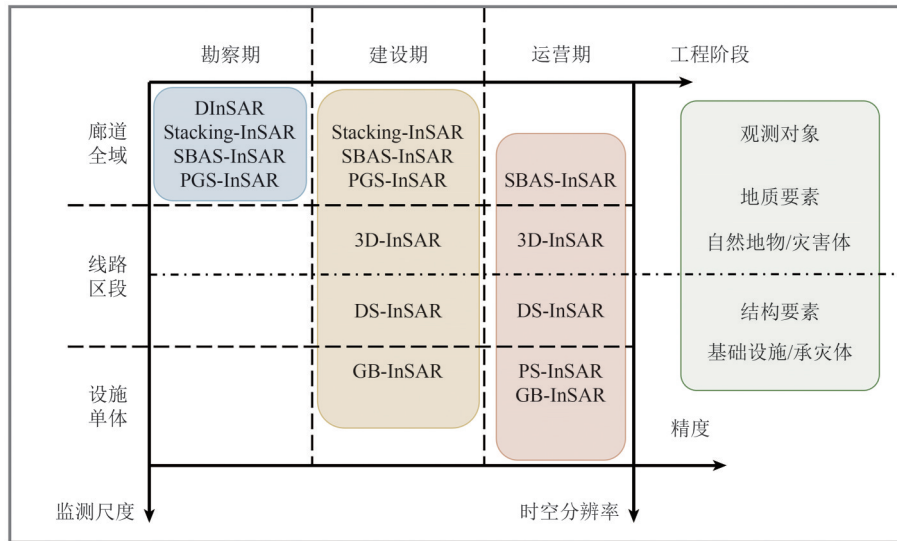


图1 协同卫星与地基 InSAR 的交通廊道综合观测方案

Fig. 1 Collaborative space-ground InSAR-based technical scheme for comprehensive monitoring of transportation corridors

(3) 工点尺度病害边坡地基 InSAR 高精度实时监测。在精细解析边坡形变演化与灾害风险的基础上, 针对隧道口边坡、桥隧结合部等关键结构位置的监测复核与病害治理, 通过部署地基 InSAR 实施现场监测, 此外还引入了一种联合三重阈值算法与 BP 神经网络的地基 InSAR 非均质大气效应智能识别与精确校正模型来消除地基 InSAR 监测中受大气湿度、温度、气压分布不均导致的非均质大气相位误差问题, 最后结合实时连续观测获取的形变信息预判边坡蠕滑的发展态势, 规避失稳垮塌事故影响工程建设和安全运营。

2.2 融合多角度、多频次 InSAR 观测数据的三维时序形变解算模型

(1) 三维形变解算框架

为了在真实的空间坐标系下恢复滑坡的变形状态, 采用地表平行位移假设, 结合上升轨道和下降轨道时间序列干涉合成孔径雷达 (InSAR) 技术, 得到三维变形解 (Lv 等, 2025a), 上升和下降卫星轨道观测到的视线变形与地基滑坡点之间的几何关系可表示为

$$D_{\text{LOS}} = D_u \cos \theta - D_E \cos \varphi \sin \theta + D_N \sin \varphi \sin \theta \quad (6)$$

式中, D_{LOS} 表示视线变形分量; D_u 、 D_E 和 D_N 分别表示垂直、东西和南北方向的变形分量; θ 和 φ 分别表示雷达卫星的入射角和方位角。

基于地表平行位移假设, 将地表坡度作为先验知识, 在此假设下, 垂直形变分量可以用东西向和南北向形变分量表示, 因此, 卫星上升和下降轨道的视线形变与三维形变分量之间的关系如下:

$$\begin{bmatrix} D_{\text{LOS}_A} \\ D_{\text{LOS}_D} \\ 0 \end{bmatrix} = [a \ b \ c] \begin{bmatrix} D_E \\ D_N \\ D_U \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, D_{LOS_A} 和 D_{LOS_D} 分别表示上升和下降轨道的 LOS 变形分量; a 、 b 和 c 分别表示垂直、东西和南北变形系数。这些系数可以从式 (6) 和在表面平行位移假设下建立的关系推导出。

三维形变解算提供了地表运动的“完整矢量信息”, 而不再是单一方向的投影。这对于理解灾害机理、保障工程安全至关重要。

(2) 基于无迹卡尔曼滤波的多平台坡向形变时序融合模型

无迹卡尔曼滤波作为一种非线性滤波方法, 采用卡尔曼滤波经典框架, 引入无迹变换思想实现卡尔曼滤波中协方差矩阵和均值非线性传递。而融合不同卫星轨道的形变监测序列可以提升 InSAR 监测滑坡点的时间分辨率, 为滑坡预警及滑坡发育评估提供近乎准实时的滑坡监测数据。

卡尔曼滤波的关键在于构造状态方程和观测方程。对于滑坡表面上的特定地面点, 在监测时间 k 处, 其位移 S_k 和 v_k 可表示为

$$\begin{cases} S_k = S_{k-1} + v_{k-1}\Delta t + \frac{u\Delta t^2}{2} \\ v_k = v_{k-1} + u\Delta t \end{cases} \quad (8)$$

监测时间 k 的状态可以用矩阵表示:

$$\begin{bmatrix} S_k \\ v_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{k-1} \\ v_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^2}{2} \\ \Delta t \end{bmatrix} u \quad (9)$$

式中, S_k , v_k , S_{k-1} 和 v_{k-1} 分别表示监测时间节点 k 和 $k-1$ 的位移值和速度, 时间 k 的状态是基于时间 $k-1$ 预测的估计值; u 表示两次监测时间区间 Δt 内的加速度, 此外卡尔曼滤波方程可以表示为

$$\begin{cases} \hat{X}(k|k-1) = F\hat{X}(k-1) \\ P_{(k|k-1)} = FP_{(k|k-1)}F^T + Q \\ G_{(k)} = P_{(k|k-1)}H^T(HP_{(k|k-1)}H^T + R)^{-1} \\ \hat{X}(k) = \hat{X}(k|k-1) + G_{(k)}[Z_{(k)} - H\hat{X}(k|k-1)] \\ P(k) = (I - G_{(k)}H)P_{(k|k-1)} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\hat{X}(k|k-1)$ 表示基于时间 $k-1$ 的状态预测值, $\hat{X}(k-1)$ 是时间 $k-1$ 状态的最优估计, F 是状态转移矩阵, $P_{(k|k-1)}$ 是时间 $k-1$ 处的预测协方差矩阵, Q 是预测模型的过程噪声; $G_{(k)}$ 是增益矩阵, H 是观测矩阵, R 是观测噪声; $\hat{X}(k)$ 是校正后时刻 k 状态的最优估计, $Z_{(k)}$ 是时间 k 的实际观测值, $P(k)$ 是更新后的协方差矩阵, I 是单位矩阵。

基于上述卡尔曼滤波器优化自回归模型, 通过优化预测值和测量值的权重, 可以从多个不同传感器收集的监测数据中提取时间 k 时更准确的估计值。

针对 InSAR 监测轨道的形变监测, 本文提出

的卡尔曼滤波通过迭代校正多源数据边坡形变融合, 能够实现密集的监测事件节点。通过在同一时间段内增加监测节点数量, 从而实现提升形变监测时间分辨率的目的。

2.3 地基 InSAR 大气相位误差校正模型

针对地基 InSAR 监测中受大气湿度、温度、气压分布不均导致的非均质大气相位误差问题, 利用 BP 神经网络学习大气误差在距离向与方位向的空间分布规律, 进而实现对干涉相位场中任意位置大气误差的精准预测与剔除。该系统凭借近乎为零的空间基线和短周期重复观测, 有效克服时空失相干问题, 现已成为滑坡、大坝及露天矿等高精度形变监测的有效手段。

3 研究区与数据

3.1 研究区概况

川藏交通廊道位于青藏高原东南缘, 横跨四川与西藏, 区内矿产和水电资源丰富, 为区域经济的可持续发展提供了巨大潜力。该廊道地处北纬 29.2°N — 31.6°N 、东经 93.6°E — 103.5°E 之间, 覆盖面积约 29万 km^2 , 东西延伸约 1076 km , 南北宽约 254 km , 海拔在 450 — 7464 m 之间, 具体如图 2 所示。由于欧亚板块与印度板块的持续碰撞, 该地区地质构造极为复杂, 伴随频繁的断裂与强烈的地壳运动。受此影响, 山体滑坡等地质灾害高发, 边坡灾害分布广泛, 对公路与铁路的建设和运行带来了严重的安全隐患 (Lv 等, 2024)。

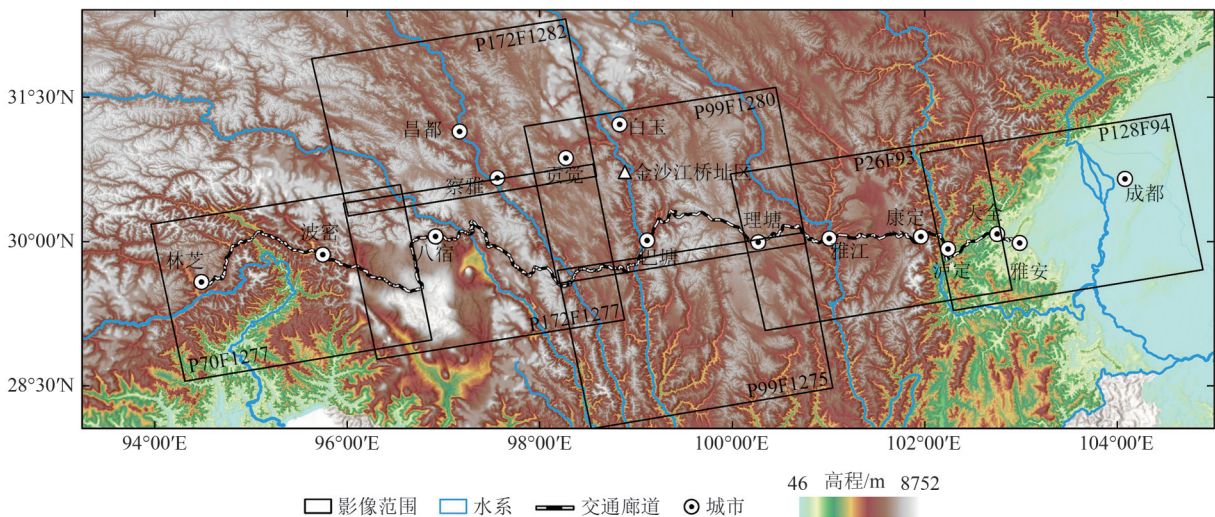


图2 研究区概况及SAR影像覆盖范围

Fig. 2 Overview of the study area and coverage of SAR imagery

3.2 SAR数据集

欧洲航天局 Sentinel-1 卫星以其完整历史存档数据、覆盖范围广、重返周期短且免费开源获取等特点, 同时为满足长大交通廊道和重点工程区段的监测需求, 针对交通廊道全线本文选取了 2022 年 1 月至 2024 年 5 月期间覆盖全线的 7 个轨道的升轨 Sentinel-1 卫星 SAR 数据。此外针对泸定地震震中廊道区段联合升降轨次生滑坡解译与时序监测研究中, 进一步选取了 9.5 泸定震后 2023 年 1 月至 2024 年 5 月期间 27 景升轨和 31 景降轨 Sentinel-1 卫星 SAR 数据。以及针对金沙江桥址区上下游高风险边坡的三维时序形变监测研究, 选取了 2022 年 1 月至 2024 年 5 月期间的 53 景升轨和 68 景降轨 Sentinel-1 卫星 SAR 数据, 针对隧址边坡工点区域, 选取了 2022 年 1 月至 2024 年 1 月期间的 43 景升轨和 58 景降轨 Sentinel-1 卫星 SAR 数据, 详细参数如表 1 所示。此外, 本文还使用了欧空局的精密轨道数据和美国宇航局的 SRTM30m 数字高程模型 (DEM) 来校正轨道误差和地形相位误差。

表 1 SAR 影像及具体参数

Table 1 Basic parameters of SAR datasets

研究区	卫星平台	轨道方向	影像数量	监测时间
交通廊道全线	Sentinel-1A	升轨	389	2022-01—2024-05
大渡河重点区段	Sentinel-1A	升轨	27	2023-01—2024-04
		降轨	31	2023-01—2024-04
金沙江重点区段	Sentinel-1A	升轨	53	2022-01—2024-05
		降轨	68	2022-01—2024-05
隧址边坡工点	Sentinel-1A	升轨	43	2022-01—2024-01
		降轨	58	2022-01—2024-01

4 结果与分析

4.1 交通廊道全线监测结果

川藏交通廊道地质环境复杂多变, 边坡灾害点多面广, 为保障川藏交通廊道沿线及边坡建设与运营安全, 有必要开展川藏交通廊道尺度广域 InSAR 地表形变监测与边坡地质隐患排查。本文联合 SBAS-InSAR 技术和 InSAR 相位梯度堆叠技术, 提取了广域交通廊道全线的地表形变结果 (图 3) 以及梯度形变结果 (图 4)。川藏交通廊道形起伏显著, 横跨多条大江流域及高海拔雪山。从地表形变结果可以看出, 雅安地区受复杂山地地貌与密集植被的共同影响, 表现出较强的低相干特性。结合地表形变与梯度形变结果发现, 川藏交通廊道及周边还存在多处地质灾害隐患风险, 在线路廊道共识别存在形变 (2022 年 1 月至 2024 年 5 月期间) 的不稳定斜坡体 263 处, 其中以金沙江与大渡河流域附近更为集中。例如图 5 所示的滑坡不良地质体, 其位于川藏交通廊道金沙江区段上游沿江边坡, 坡面存在多处不同程度的形变特征。其中在 SBAS-InSAR 提取的地表形变结果中可见林芝波密区呈现出显著的大范围抬升错误形变, 考虑为由于残余轨道误差引入时序反演中所导致的系统性偏差, 而非真实区域性抬升信号。

SBAS-InSAR 与 InSAR 相位梯度堆叠结果均表明该边坡仍存在显著的持续形变趋势, 其中相位梯度堆叠结果进一步强化了对形变范围及边界的刻画。表明联合两者 InSAR 技术能更全面更完整探测存在蠕滑和地表位移的滑坡等不良地质隐患。

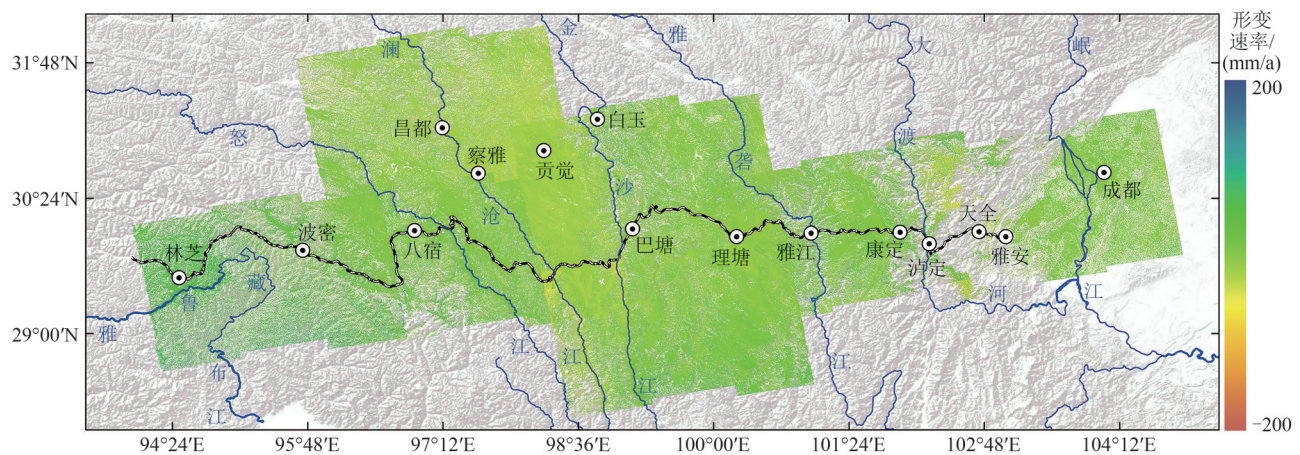


图 3 川藏交通廊道 SBAS-InSAR 平均形变速率

Fig. 3 Average deformation rate of the Sichuan-Tibet Transportation Corridor

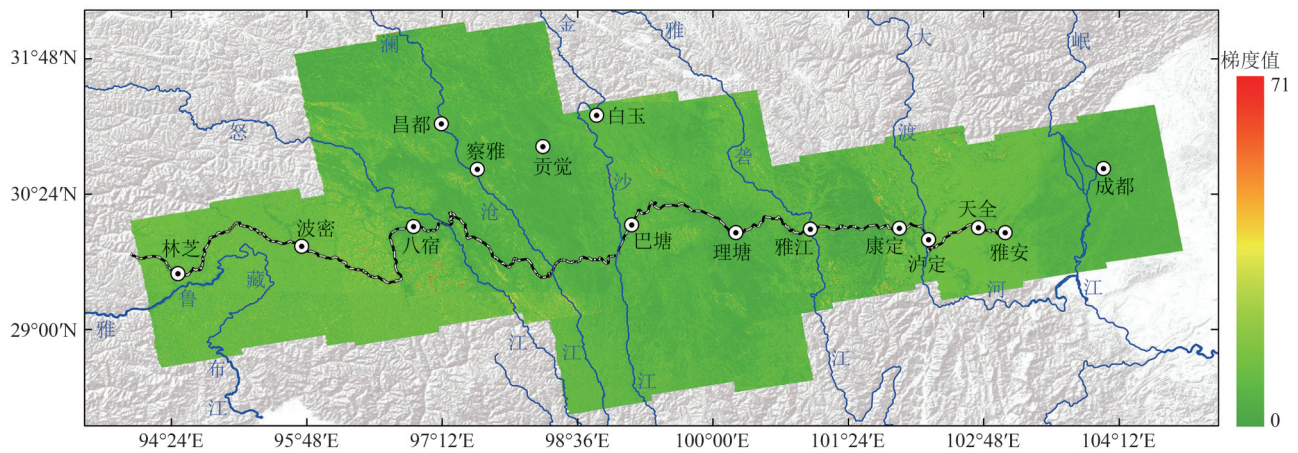
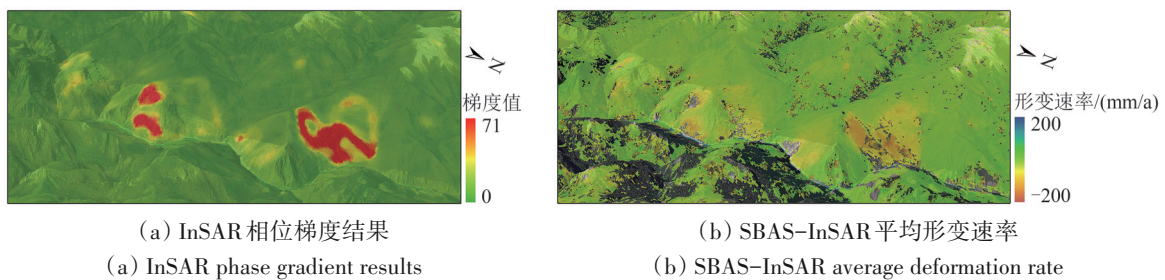


图4 川藏交通廊道相位梯度堆叠结果

Fig. 4 Phase gradient stacking results of the Sichuan-Tibet Transportation Corridor



(a) InSAR 相位梯度结果
(a) InSAR phase gradient results

(b) SBAS-InSAR 平均形变速率
(b) SBAS-InSAR average deformation rate

图5 典型滑坡不良地质隐患

Fig. 5 Typical landslide geological hazard

在整体形变分布识别的基础上，沿线区域的形变监测对于保障川藏交通廊道建设与运营安全尤为关键。因此，有必要对沿线范围开展更精细的地表形变分析，以揭示其空间分布特征和变化规律。本文提取了交通廊道沿线 10 km 半径缓冲区，其中缓冲区起点为林芝，终点为雅安。2022 年 1 月至 2024 年 5 月期间监测数据表明，存在临近线路的边坡隐患点 23 处。图 6 (a) 为交通廊道地表形变速率 10 km 形变结果，图 6 (b) 为缓冲区沿线形变剖面结果，图 6 (c) 为缓冲区范围地表形变结果的直方图分布，结果表明，前 300 km 里程林芝至八宿可见形变速率波动较大，在 950 km 里程后泸定至雅安段可见形变速率波动显著，且相干性差，受地形、植被环境影响显著，此外在缓冲区范围的形变直方图中可见年平均形变速率主要集中在 -25—0 区间，整体沿线形变趋势较为稳定，其中形变速率为正的贡献主要来源于林芝段，考虑为多冰雪覆盖导致的形变异常。

通过 SBAS-InSAR 与相位梯度堆叠技术的联合应用，实现了对川藏交通廊道全线的年度地表形

变监测，有效揭示了交通廊道形变空间分布特征。该方法不仅提升了地质灾害调查与隐患识别的精度，也为交通廊道沿线工程建设与运营中的灾害防治提供了科学支撑，并能够满足多源化工程监测与长期风险评估的需求。

4.2 泸定地震及周边关键桥址区段边坡病害体解译

受 9·5 泸定地震影响，大量古滑坡与同震滑坡被重新激活，导致震中交通廊道区段次生滑坡灾害严重。为此，本文在交通廊道全线广域监测排查的基础上，基于 InSAR 相位梯度堆叠技术与 SBAS-InSAR 技术，利用震后获取的升降轨 Sentinel-1 数据，重点针对泸定地震震中廊道区段开展了次生滑坡的解译判识与时序监测。图 7 展示了基于 InSAR 相位梯度堆叠技术提取的梯度形变结果。为更准确反映相位梯度中的形变信号，本文对相位梯度堆叠值进行了归一化处理，并将其缩放至 [0, 1] 区间。

在升轨与降轨的相位梯度堆叠结果中，多数

区域呈现较低的相位梯度值, 表明其处于相对稳定状态, 并无显著形变; 而部分异常抬升且具有空间聚集特征的区域, 与周边稳定背景形成鲜明对比, 构成识别潜在滑坡隐患区的重要依据。基于此, 本文对归一化相位梯度值大于 0.1 且具有明显空间聚集特征的区域进行了潜在滑坡边界圈画。其中, 在升轨数据结果中共识别出 16 处滑坡, 编

号为 A1—A16; 在降轨数据结果中共识别出 15 处滑坡, 编号为 D1—D15, 表 2 统计了识别出的所有滑坡的空间位置、地形高程与坡向的相关信息。此外, 结合升降轨相位梯度堆叠结果与滑坡隐患识别结果可见复杂山区环境下几何畸变影响显著, 进一步凸显了在此类复杂环境下开展升降轨多源数据联合监测的必要性。

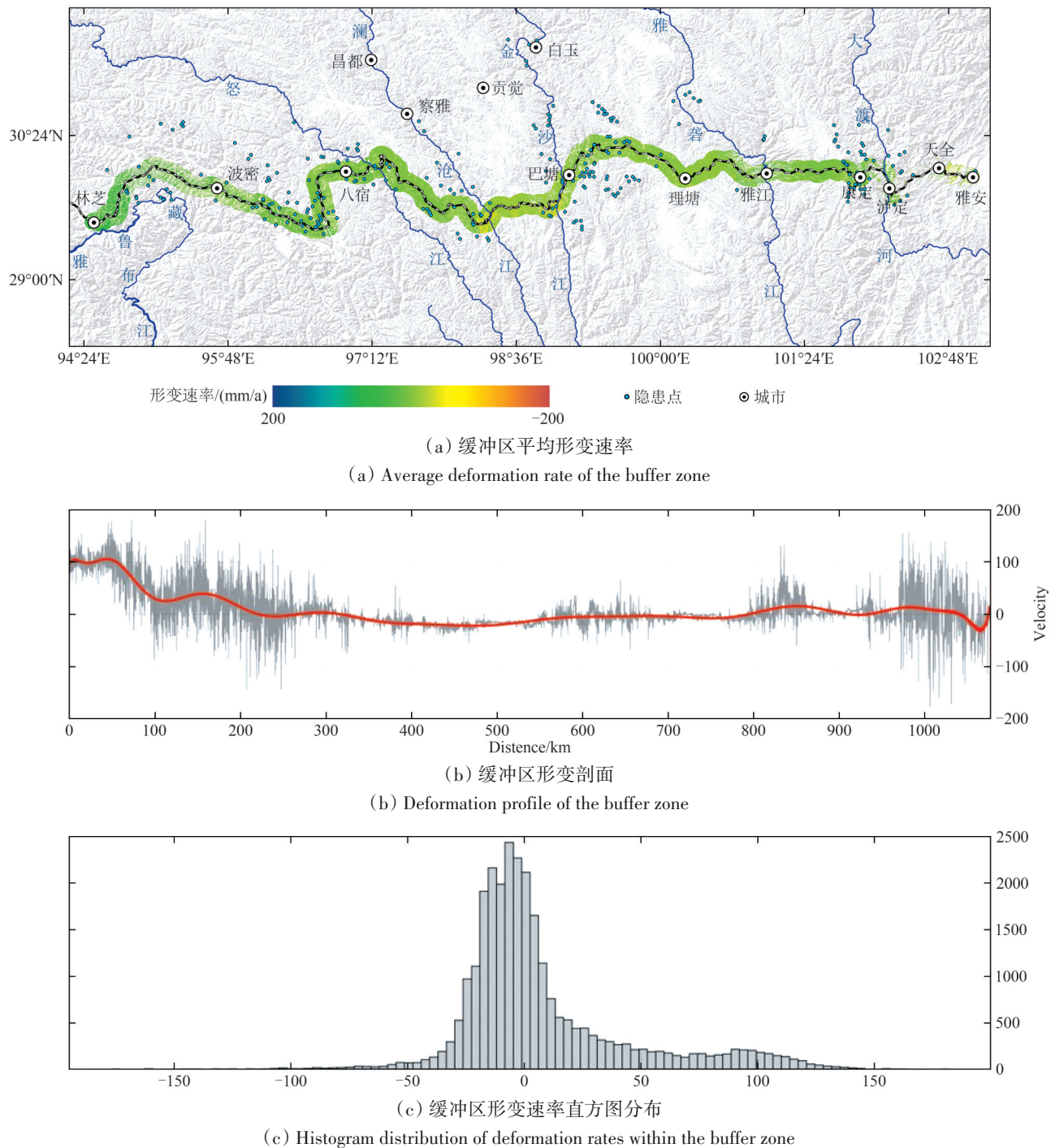


图 6 交通廊道 10 km 半径缓冲区结果

Fig. 6 Results within a 10 km buffer zone of the Sichuan-Tibet Transportation Corridor

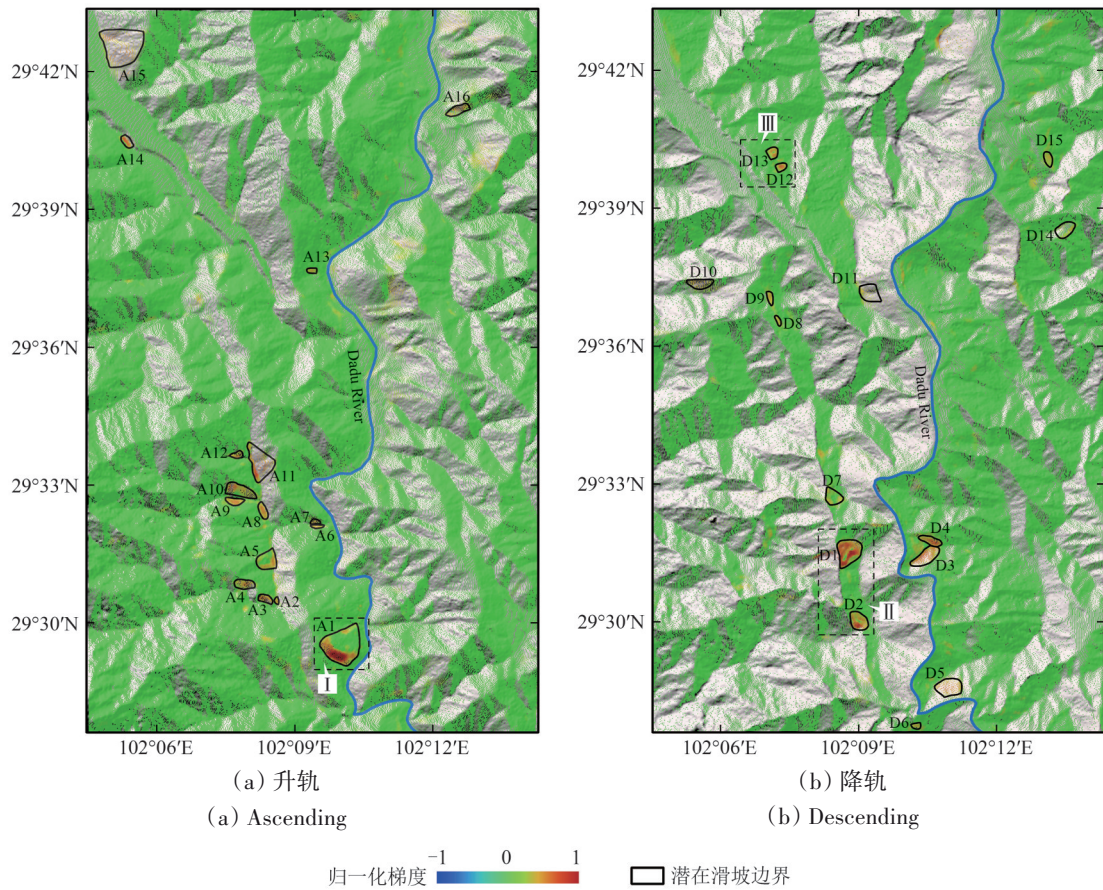


图7 泸定地震区重点区段InSAR相位梯度堆叠结果
 Fig. 7 InSAR phase gradient stacking results of the key section in the Luding earthquake area

表2 滑坡编目统计

Table 2 Landslides Catalog Statistics

滑坡	经度	纬度	坡向	海拔/m	滑坡	经度	纬度	坡向	海拔/m
A1	102.159	29.492	E	2070	D1	102.151	29.527	E	1720
A2	102.142	29.508	E	1628	D2	102.152	29.497	NW	2152
A3	102.139	29.511	S	1871	D3	102.177	29.526	S	1731
A4	102.129	29.515	S	2186	D4	102.177	29.527	N	1748
A5	102.136	29.521	E	1878	D5	102.181	29.479	SE	1648
A6	102.157	29.534	N	1216	D6	102.171	29.461	N	1405
A7	102.157	29.537	S	1304	D7	102.144	29.544	W	1826
A8	102.136	29.541	NE	1472	D8	102.121	29.609	SW	1992
A9	102.127	29.542	N	1818	D9	102.118	29.618	SW	1985
A10	102.128	29.551	S	2130	D10	102.092	29.621	N	2491
A11	102.142	29.558	W	2167	D11	102.151	29.619	E	1788
A12	102.131	29.562	N	2091	D12	102.123	29.665	SW	2381
A13	102.154	29.627	E	1560	D13	102.121	29.671	SW	2293
A14	102.087	29.673	NE	1858	D14	102.227	29.642	NW	1850
A15	102.095	29.714	SW	2991	D15	102.219	29.669	W	1911

本文还对升降轨的相位梯度堆叠结果识别的31处潜在滑坡进行了可视化展示，将相位梯度堆叠结果叠加在三维视角的Google地图上，红实线表示勾画的潜在滑坡形变边界，如图8所示。结果

表明大部分圈定的潜在滑坡区域在Google地球上都存在较为明显的滑坡迹象，表明这些滑坡区域仍处于不稳定的蠕变变形阶段，存在较高的滑坡风险。

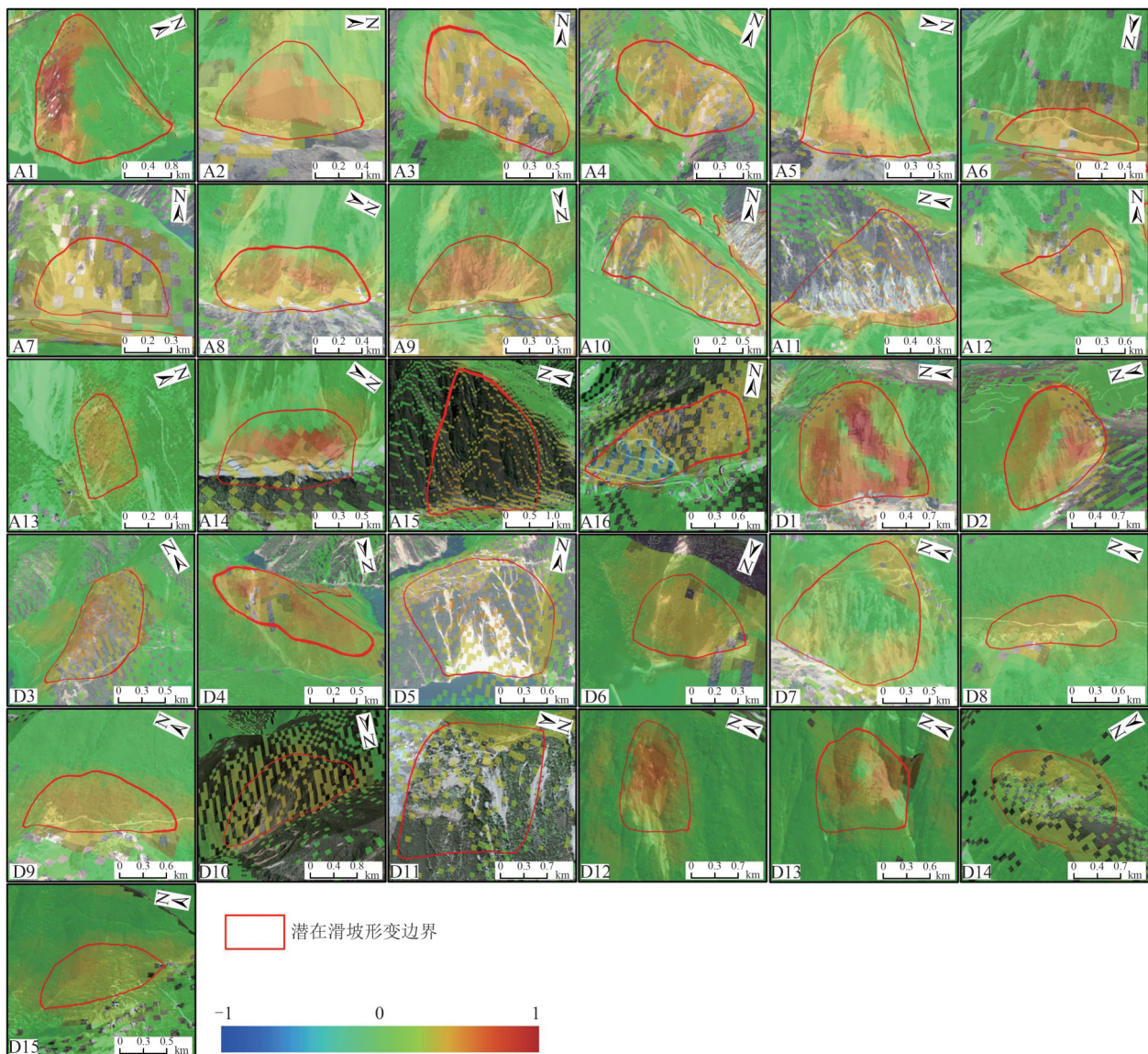


图8 震后潜在滑坡隐患点结果

Fig.8 Results of potential landslide hazard points after the earthquake

此外针对泸定震后滑坡影响显著的3处典型区域(图7中I、II、III),本文结合SBAS-InSAR技术开展了验证分析与时序监测,分别对应A1、D1、D2、D12和D13这5处潜在滑坡(图9)。其中,A1滑坡为郑家坪滑坡,从光学影像可清晰辨识滑坡边界,其相位梯度堆叠结果与SBAS-InSAR形变结果在形变范围上基本一致,且相位梯度堆叠结果在边界刻画方面更为突出。在II和III区域,光学影像显示大范围且显著的滑坡迹象,SBAS-InSAR结果也揭示出明显的形变趋势,与相位梯度堆叠结果基本一致,表明相位梯度堆叠能够有效反映滑坡特征。值得注意的是,在II、III区域的部分滑坡边界,相位梯度堆叠结果显示存在较高的相位梯度值,提示

这些边缘区仍存在持续滑动并向外扩张的趋势。

为进一步揭示潜在滑坡的形变规律与时空演化特征,本文选取典型监测点开展时序分析。结果显示,在A1滑坡中,特征点整体形变趋势一致,最大累计沉降超过160 mm,并在2023年3—6月期间出现明显加速,随后趋于减缓。在D1滑坡中,最大累计沉降约150 mm,且自2023年8月起形变趋势出现显著波动。D2滑坡的特征点主要分布在侧缘边界处,最大累计形变约140 mm,并在2023年12月后表现出逐渐加速趋势,表明其具有向外扩张的可能性。在D12和D13滑坡中,特征点在2023年10月前均存在不同程度的形变趋势,而在11月后整体趋于稳定。

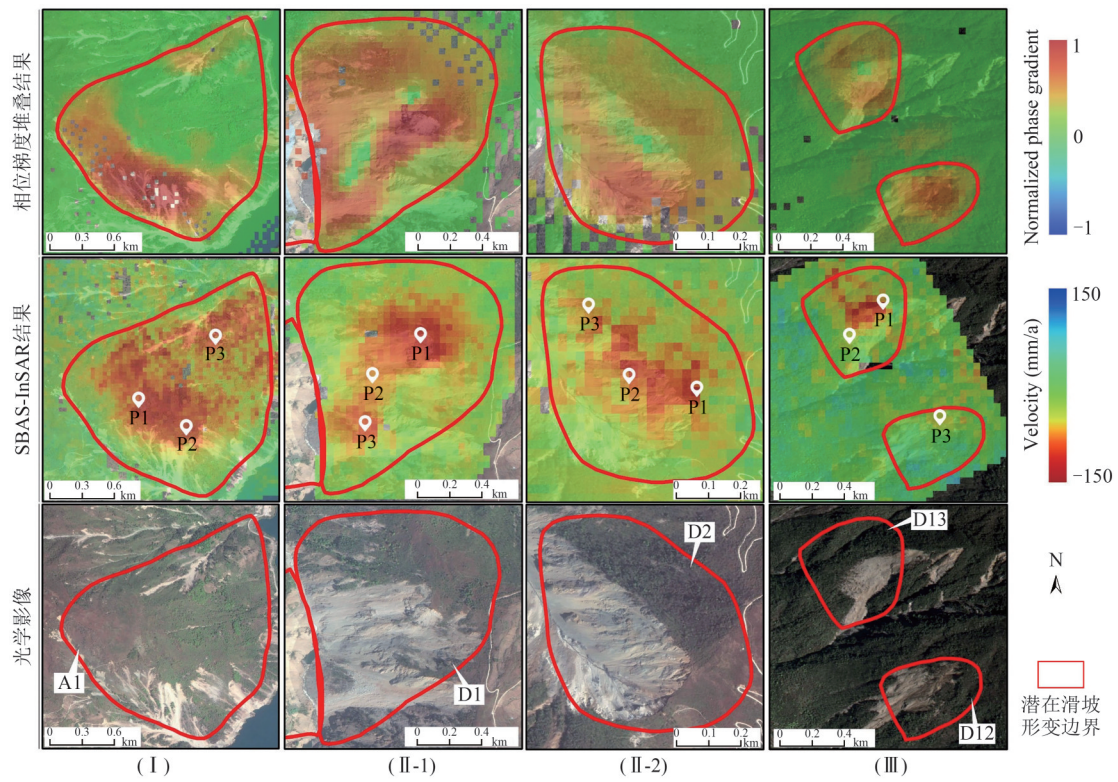


图9 典型潜在滑坡形变结果

Fig. 9 Deformation results of typical potential landslides

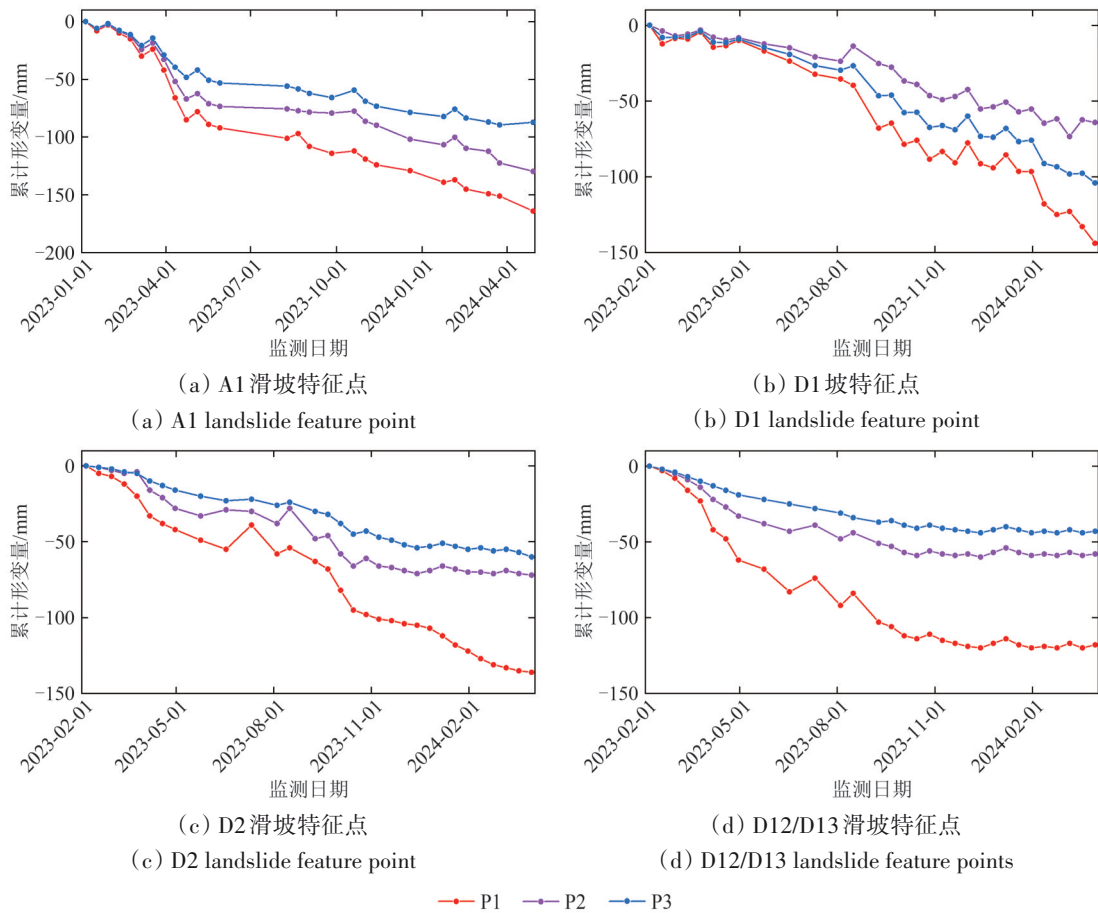


图10 滑坡特征点时序形变

Fig. 10 Time-series deformation of landslide feature points

4.3 金沙江高风险边坡三维时序解译

在川藏交通廊道全线的地表形变监测结果可见金沙江流域滑坡等地质灾害盛行, 尤其以金沙江西岸的雄巴滑坡和色拉滑坡两处大型古滑坡为典型高风险边坡, 不仅威胁沿岸居民生命财产, 还对包括川藏交通廊道的跨江桥址与周边水电站基础设施构成重大风险, 因此针对金沙江桥址重点区段上下游高风险边坡开展三维时序形变监测, 深入分析高风险边坡形变演化趋势和失稳成因尤为重要。

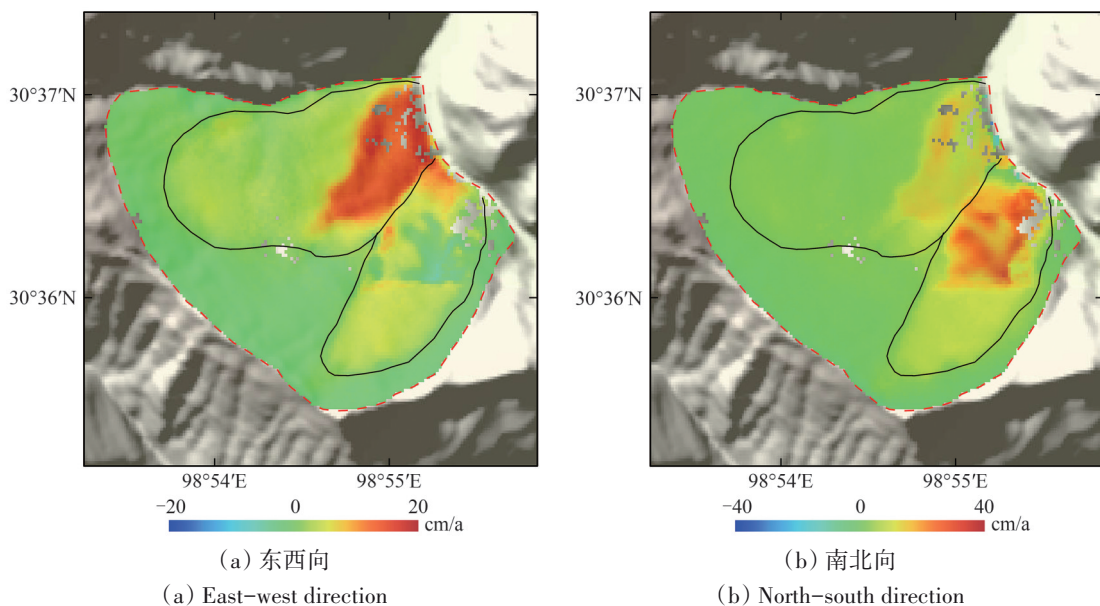
针对金沙江高风险边坡形变监测中, 本研究使用 SBAS-InSAR 技术, 利用研究区域内升轨和降轨 SAR 图像计算 LOS 变形。此外, 考虑到由于升轨和降轨轨道成像几何变化导致的监测结果不一致问题, 本研究将雷达 LOS 转换为基于表面平行位移假设和赫尔默特方差分量估计的三维真实空间位移。

图 11 展示了 2022 年 1 月至 2024 年 5 月雄巴滑坡的三维形变速度场, 基于升轨和降轨卫星数据计算获得。其中, 图 11 (a) 为东西向变形速度场 (正值表示向东运动), 图 11 (b) 为南北向变形速度场 (正值表示向北运动), 图 11 (c) 为垂直变形速度场 (正值表示向上运动), 图 11 (d) 为由东北—垂直三维变形率合成的速度场。监测结果表明, 雄巴滑坡在东西向、南北向和垂直方向的最大变形率分别为 19.81 cm/a、39.57 cm/a 和 19.07 cm/a, 矢量合成后最大变形速率为 43.81 cm/a, 大部分坡

面点的变形速率约为 25 cm/a。整体上, 滑坡在三维空间主要向东、向北和向下运动, 与实际运动方向一致。图中还揭示了两个显著的次生变形带, 主要分布于边坡中下部, 并表现出牵引型运动特征。其中, 左侧次生变形带的南北与垂直变形速率明显高于右侧, 呈现出块状滑动特性。

图 12 展示了雄巴滑坡合成的三维矢量累积变形结果。整体上, 滑坡变形具有显著的空间非均质性, 尤其在中下部的两个次生变形区表现突出。监测期内最大累积变形达 112 cm, 左侧变形区点位普遍约 60 cm, 右侧约 40 cm, 差异可能与滑坡内部复杂的水文地质条件有关。其中, 靠近河流的区域受冲刷作用更强烈, 变形幅度更大。次生区累积变形的差异亦反映了滑坡内部应力分布不均, 可能受到局部地下水活动、边坡结构和降水入渗等因素影响, 加剧了形态结构的不稳定。时间上, 雄巴滑坡变形在 2022 年 10—12 月开始活跃, 首先出现在左侧变形区, 并逐渐向右扩展。至 2023 年 11 月, 滑坡内已形成两个明显的次生变形带, 中心区累积位移呈持续增加趋势。

通过联合升轨和降轨数据的时序 InSAR 技术, 对金沙江重点桥址区段的雄巴高风险边坡滑坡开展三维时序形变监测, 进一步解析了高风险滑坡灾害体形变时序演化特征, 结果表明雄巴仍存在相当明显的形变趋势, 仍有必要持续开展高风险边坡的三维形变监测, 以此保障交通廊道的运营与安全防治。



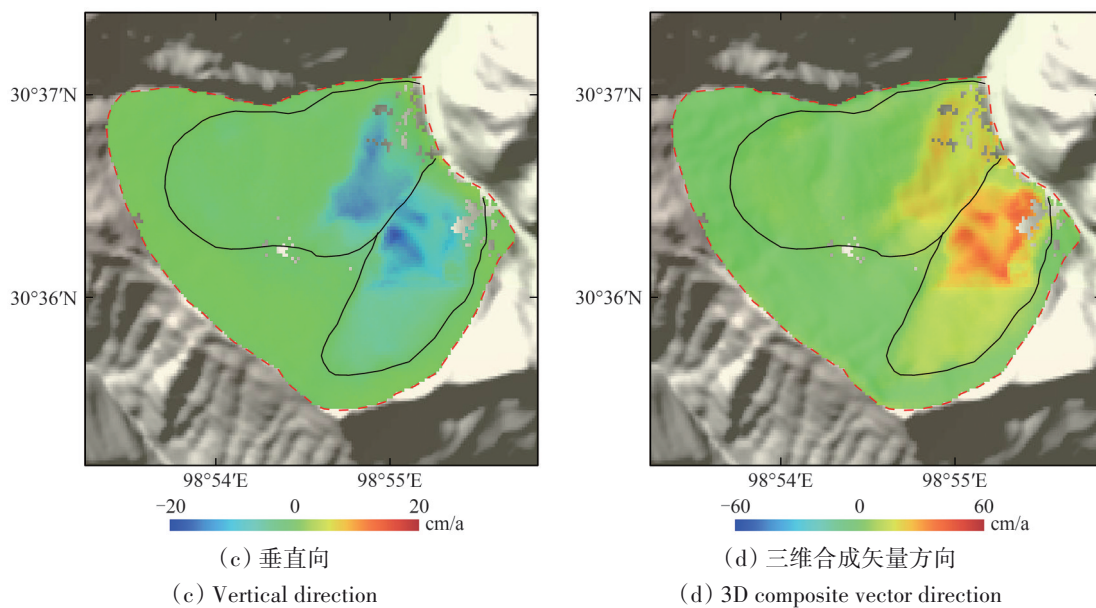


图 11 雄巴滑坡三维形变速率
Fig. 11 Three-dimensional deformation rates of the Xiongba landslide



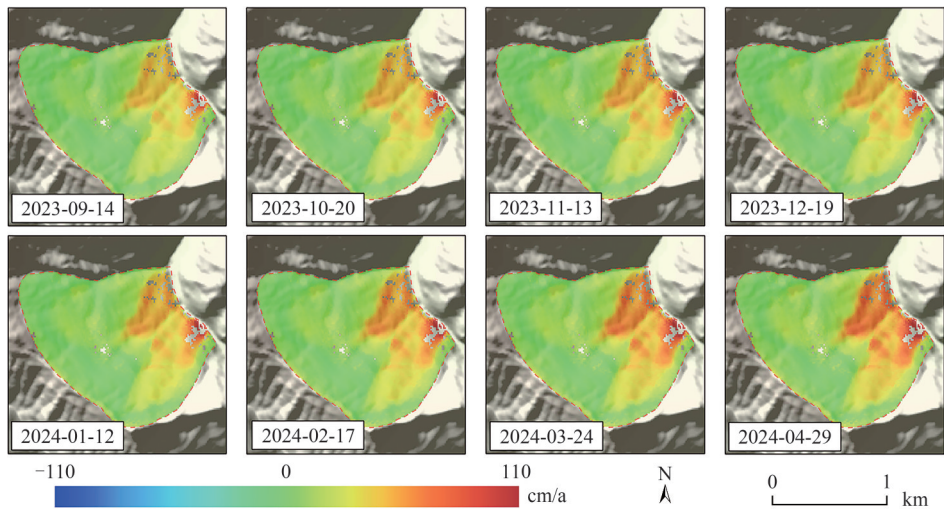


图 12 雄巴滑坡累计位移

Fig. 12 Cumulative displacement of the Xiongba landslide

4.4 重大交通工程边坡病害监测

针对关键病害工点的星载与地基 InSAR 高精度、高频次形变监测研究, 本文选取了一处在建重大铁路工程沿线区域的一处在建隧道口边坡作为典型应用验证场景, 概括如图 13 所示。

试验选取 2022 年 1 月至 2023 年 12 月覆盖该区域的升轨和降轨 Sentinel-1 卫星数据, 基于地表平行位移假设, 解算了隧道边坡的三维形变场。图 14

展示了升降轨多轨道数据解算的隧道边坡三维形变速率场, 以及显著形变区域的 P1、P2、P3 特征点。结果表明, 监测期间隧道边坡在东西向、南北向及垂直向最大形变速率分别为 19 mm/a、13 mm/a 和 -9 mm/a。在空间分布上, 边坡整体表现出显著的东向位移趋势, 南北向形变场呈分异特征, 其中 P1 表现为向南位移趋势, P2、P3 表现为向北位移趋势; 垂直向形变主要呈现条带状分布特征。



图 13 在建隧址典型应用验证区域概况

Fig. 13 Overview of the typical application and validation area at the tunnel construction site

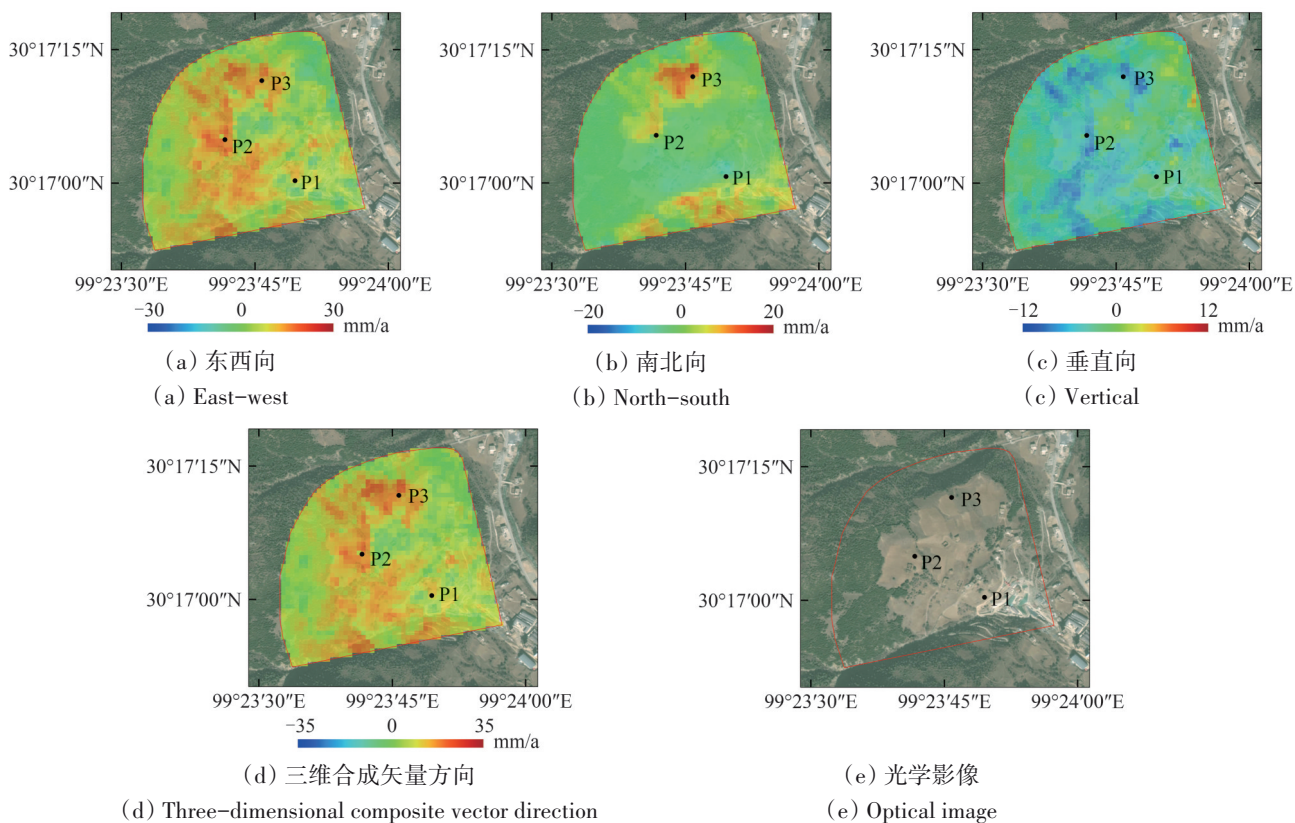


图14 隧道边坡InSAR三维形变速率

Fig. 14 Three-dimensional InSAR deformation rates of the tunnel slope

图15展示了隧道边坡的三维累计位移时空演化结果。监测期内共识别出两处显著变形区：一处位于边坡顶部，表现为显著的面状变形，最大累计位移达52 mm；另一处位于边坡中上部，整体呈带状分布，最大累计位移达30 mm。

隧道边坡的三维形变结果显示监测期间边坡整体呈现显著的东向位移趋势及南北向分异特征。针对该工点高精细化监测需求，本研究进一步开展了基于无迹卡尔曼滤波的多轨道坡向高时间分辨率形变融合与监测。首先将升降轨的LOS向形变解算投影转换为沿坡向形变，再利用无迹卡尔曼滤波多源数据融合模型对多平台数据进行时序同化。

基于SBAS-InSAR技术获取的升降轨LOS向形变速率场如图16所示，结果显示升轨与降轨形变趋势差异明显，其中升轨结果在隧道边坡中上部呈现较为显著变，最大形变达到34 mm/a，降轨结果整体形变较小。

融合后的特征点坡向形变序列如图17所示。结果表明，卡尔曼滤波融合曲线不仅有效集成了升、降轨数据反映的主体线性形变趋势，保留了

局部形变波动特征，更显著提升了监测的时间维度表现。从监测结果可以看出整体形变趋势相似，在2023年之前呈现出较为稳定的形变趋势；在2023年1月至7月期间，整体形变速率有所减缓；在2023年7月之后又呈加速形变趋势。通过对多轨道坡向卡尔曼滤波融合，形变监测的时间分辨率在原有单轨12 d的基础上提高了一倍，从而实现了边坡形变动态演化过程的更精确捕捉。

在地基InSAR高精度监测方面，本研究使用了MIMO式R/HYB2000地基合成孔径雷达系统采集形变数据，设备安装在隧道口对面的桥墩上，距隧道口约300 m。监测时间为2022年8月29日0:00至9月1日0:00，时间间隔约为2 min。

其中针对隧道边坡病害监测研究中地基InSAR干涉相位场中非均质大气效应沿距离向与方位向均不同质的分布特性，本研究采用了一种联合三重阈值算法与BP神经网络的地基InSAR非均质大气效应智能识别与精确校正模型，来实现高精度地基InSAR形变监测。

通过将该方法大气校正后的累计形变图按时

间间隔 3 h 分时段进行展示, 从图 18 中可以看出, 虽然对该隧道口边坡的形变监测总时长较短, 但

随着时间推移, 在该隧道口附近的某些边坡表面上仍然逐渐产生了一些微小形变。

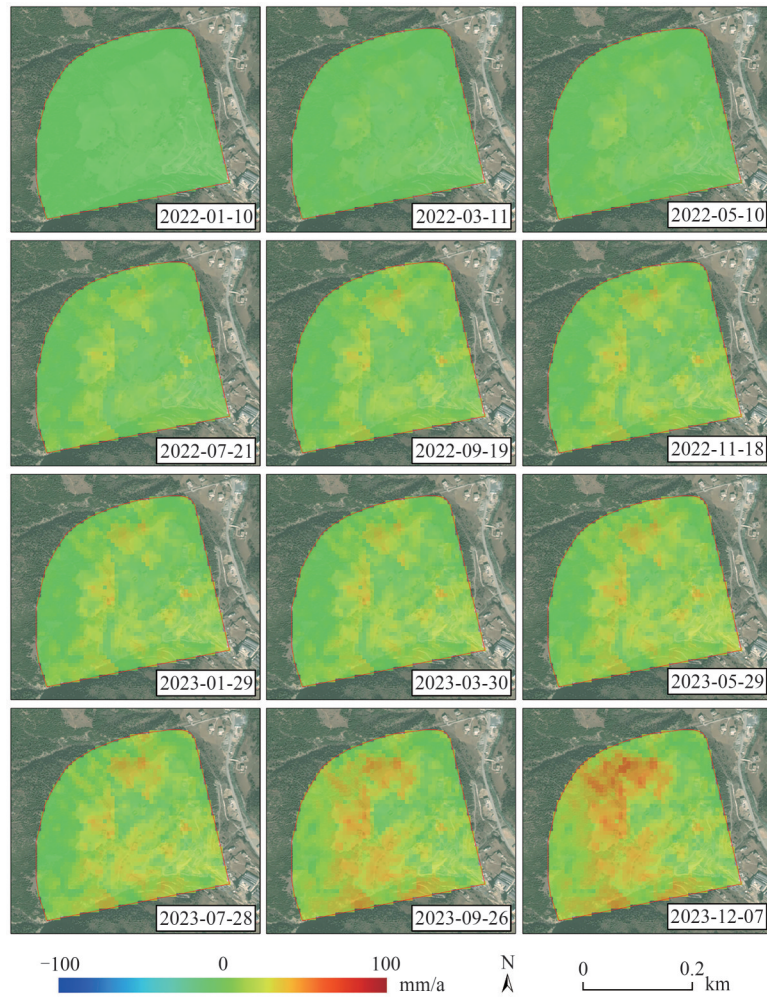


图 15 隧道边坡累计位移

Fig. 15 Cumulative displacement of the tunnel slope

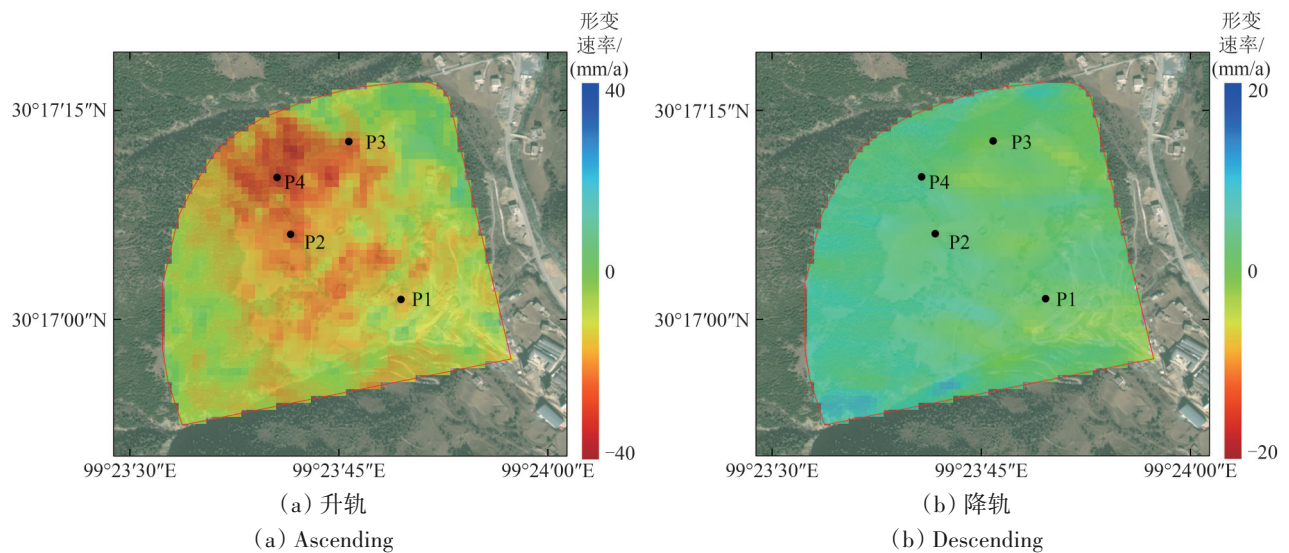


图 16 隧道边坡 LOS 向形变速率

Fig. 16 LOS deformation rates of the tunnel slope

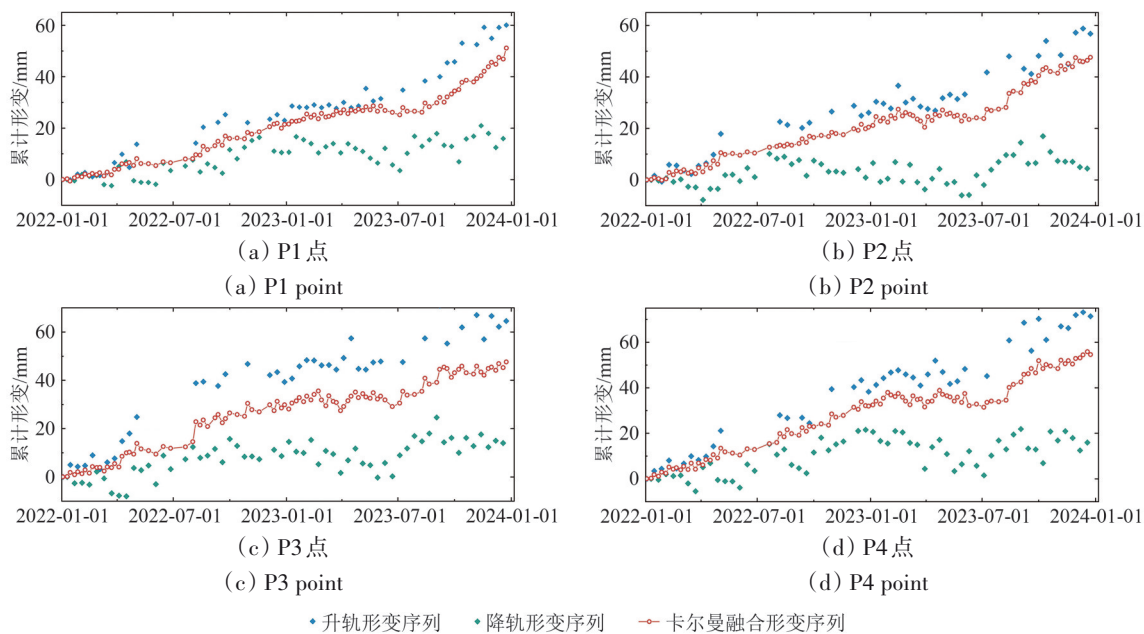


图 17 隧道边坡变形特征点卡尔曼滤波融合坡向时序形变

Fig. 17 Kalman filter-fused slope-oriented deformation time series of characteristic points on the tunnel slope

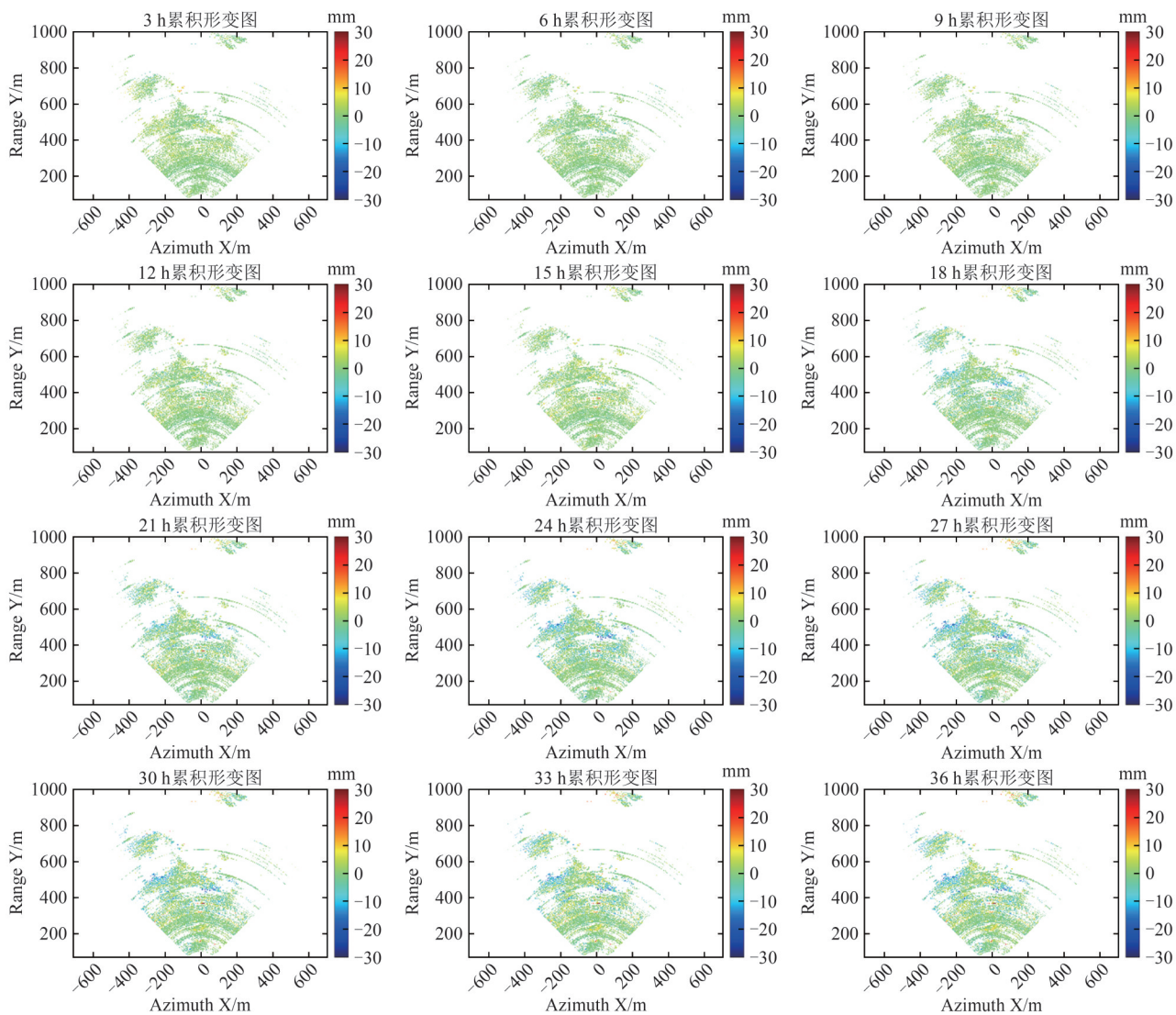


图 18 地基InSAR监测分时段累计形变图

Fig. 18 Ground-based InSAR cumulative deformation maps for different periods

通过该方法大气校正后的地基 InSAR 高精度形变监测结果中可见, 在地面监测点位未覆盖的高位区域发现 3 处变形区, 且受巴塘当地夜间降雨的影响持续蠕滑, 具体如图 19 所示。其中区域 1 位于隧道口上方的山体边坡, 区域 2 与区域 3 位于隧道口下方边坡, 地基 InSAR 监测结果可见区域 1 与区域 3 呈较为集中且显著的形变, 区域 2 呈条带状形变。

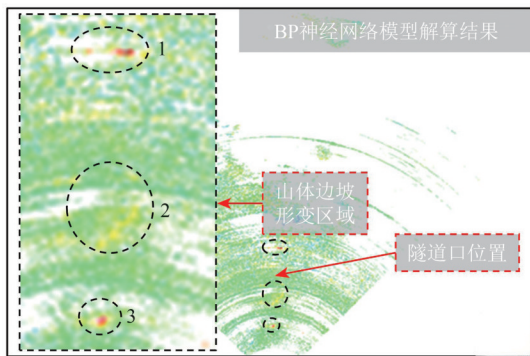


图 19 BP神经网络模型时序大气校正后监测结果
Fig. 19 Monitoring results after time-series atmospheric correction using the BP neural network model

图 20 表示 3 处变形区域的累计时序形变, 结果表明, 形变区域 1 自 8 月 29 日开始监测到 8 月 30 日 20:30 形变变化较慢, 沿坡向形变量未超过 40 mm, 自 8 月 31 日开始, 短时间内形变速度加快, 沿坡向形变量激增。在形变区域 2 形变结果可见, 自 8 月 29 日开始监测到 8 月 31 日形变发展较慢, 基本处于稳定状态。在 2022 年 8 月 31 日后呈加速形变趋

势。在形变区域 3 与区域 2 的形变趋势较为相似, 均是在 8 月 31 日后呈加速形变趋势, 且最大累计形变超过 100 mm。

此外本研究还选取了空间位置重叠的区域开展; 联合分析, 其中 InSAR 监测的特征点 1 区域与地基 InSAR 监测的区域 1 位于重叠区域, 且特征点 1 在经过卡尔曼滤波融合的形变时间序列的坡向形变与地基 InSAR 监测的形变方向同为沿坡向形变, 因此本研究针对特征点 1 区域联立星载 SAR 与地基 SAR 开展了隧道边坡形变监测与分析。图 21 展示了该区域的星地联合分析监测结果, 在 2022 年 8 月 26 日至 2022 年 9 月 7 日的重点监测时段内, 两者结果呈现显著差异: 星载融合序列显示的累计坡向位移约为 2 mm, 而同期的地基 InSAR 监测结果显示沿坡向位移高达约 120 mm。分析认为, 造成这一巨大偏差的主要原因是该时段内边坡发生了短时剧烈变形, 其形变梯度超出了星载 InSAR 的最大可探测阈值。这也说明在面临边坡加速形变阶段重点关注区域, 仅依靠星载 InSAR 极易造成形变信息的漏判或误判。这进一步凸显了将星载 InSAR 的大范围宏观视野与地基 InSAR 的高频次微观观测相结合的必要性。

值得一提的是, 地基 InSAR 监测结果在地面测量未覆盖的区域发现了病害区, 体现了 InSAR 面状监测的空间分辨率优势。相关结果及时提交工程部门, 为边坡工程病害整治工作提供了关键参考。

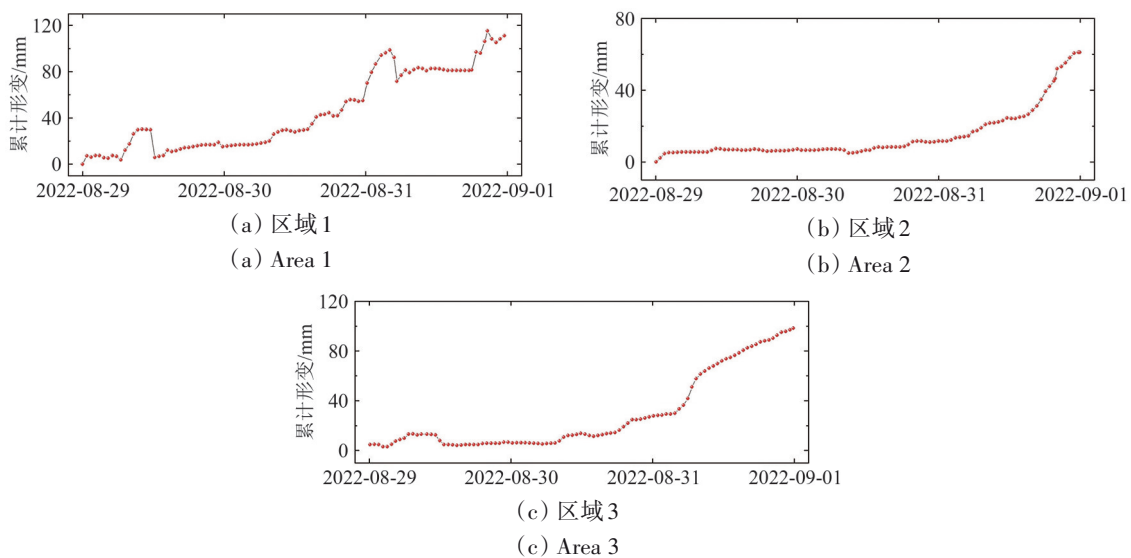


图 20 形变区时序监测结果

Fig. 20 Time series monitoring results of the deformation areas

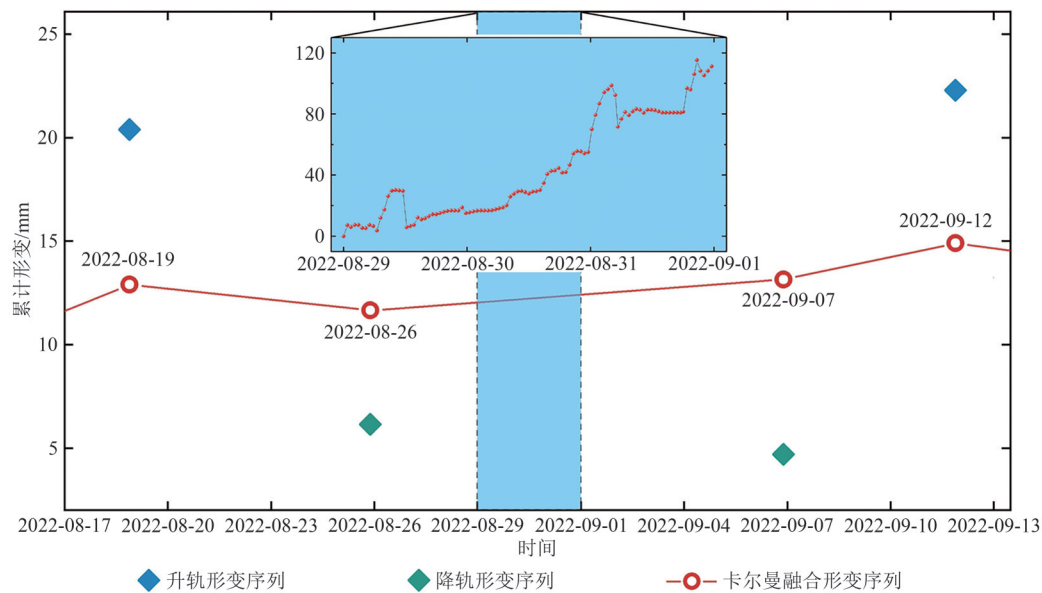


图21 隧道边坡卫星与地基InSAR联合监测结果

Fig. 21 Joint spaceborne and ground-based InSAR monitoring results of the tunnel slope

5 结论

面向交通工程勘察—建设—运维多重差异化的需求牵引, 本文联合卫星与地基 InSAR 构建了立体、动态的综合观测方案, 以满足不同工程主体方对地表形变及地灾隐患监测的多元化信息保障需求。选取川藏交通廊道内的318川藏公路和在建重大铁路工程沿线区域作为典型研究场景, 利用多种卫星时序 InSAR 方法配合开展线路廊道、区段、工点的多尺度地表形变时序监测和潜在边坡病害体解译识别, 具体结果如下:

(1) 廊道尺度广域 InSAR 地灾隐患排查发现, 在线路廊道存在形变(2022年1月至2024年5月期间)的不稳定斜坡体264处, 包括临近线路的边坡隐患点23处。

(2) 针对泸定地震及周边关键桥址区开展区段尺度 InSAR 时序监测与灾害体精细解译判识, 共发现31处震后次生滑坡。利用升/降轨三维形变反演的方法解析金沙江桥址区上下游的高风险边坡(雄巴滑坡和色拉滑坡)的三维形变时序演化, 揭示了显著的坡体的次生变形带分布、牵引型转移模式及块体的精细滑动特征。

(3) 工点尺度病害边坡的星载与地基 InSAR 协同高精度联合监测中, 针对病害工点所在坡体, 首先利用无迹卡尔曼滤波实现多轨道坡向形变融合与变化趋势分析, 得到隧道口边坡整体沿坡向

位移的精细时空演化。在此基础上, 基于地基 InSAR 高精度实时监测, 揭示了3处边坡局部滑移点位及其受降雨影响的逐日蠕变特征, 为边坡病害整治及工程稳定性评估提供了数据支撑。

本次综合观测和工程实践表明, 卫星与地基 InSAR 应用于微小形变的监测具有时空尺度和视角的优势互补性, 两种技术手段的长时序深度融合具有重大的研究意义和应用前景。本文提出的技术方法和相关结果数据可为长大交通廊道及西部山区的基础地质调查及防灾减灾提供参考。

参考文献(References)

- Berardino P, Fornaro G, Lanari R and Sansosti E. 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383 [DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792]
- Dai K R, Xu Q, Li Z H, Tomás R, Fan X M, Dong X J, Li W L, Zhou Z W, Gou J S and Ran P L. 2019. Post-disaster assessment of 2017 Catastrophic Xinmo Landslide (China) by spaceborne SAR interferometry. *Landslides*, 16(6): 1189-1199 [DOI: 10.1007/s10346-019-01152-4]
- Fan H D. 2010. Study on Several Key Algorithms of InSAR Technique and Its Application in Land Subsidence Monitoring. Xuzhou: China University of Mining and Technology (范洪冬. 2010. InSAR 若干关键算法及其在地表沉降监测中的应用研究. 徐州: 中国矿业大学)
- Ferretti A, Prati C and Rocca F. 2000. Nonlinear subsidence rate esti-

- mation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5): 2202-2212 [DOI: 10.1109/36.868878]
- Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F and Rucci A. 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9): 3460-3470 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465]
- Li H L, Huang H, Li Y L, Zhang J J, Wang L and Li B X. 2022a. Geohazard effect of plate suture zone along Sichuan-Tibet traffic corridor. *Earth Science*, 47(12): 4523-4545 (李洪梁, 黄海, 李元灵, 张佳佳, 王灵, 李宝幸. 2022a. 川藏交通廊道沿线板块缝合带地质灾害效应. *地球科学*, 47(12): 4523-4545) [DOI: 10.3799/dqkx.2022.263]
- 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 (李晓恩, 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]
- Li Y X, Zhang Y, Su X J, Zhao F M, Liang Y W, Meng X M and Jia J. 2021. Early identification and characteristics of potential landslides in the Bailong River Basin using InSAR technique. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 677-690 (李媛茜, 张毅, 苏晓军, 赵富萌, 梁懿文, 孟兴民, 贾俊. 2021. 白龙江流域潜在滑坡 InSAR 识别与发育特征研究. *遥感学报*, 25(2): 677-690) [DOI: 10.11834/jrs.20210094]
- Li Z H, Han B Q, Liu Z J, Zhang M M, Yu C, Chen B, Liu H H, Du J, Zhang S C, Zhu W, Zhang Q and Peng J B. 2022b. Source parameters and slip distributions of the 2016 and 2022 Menyuan, Qinghai earthquakes constrained by InSAR observations. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 47(6): 887-897 (李振洪, 韩炳权, 刘振江, 张苗苗, 余琛, 陈博, 刘海辉, 杜静, 张双成, 朱武, 张勤, 彭建兵. 2022b. InSAR 数据约束下 2016 年和 2022 年青海门源地震震源参数及其滑动分布. *武汉大学学报(信息科学版)*, 47(6): 887-897) [DOI: 10.13203/j.whugis20220037]
- Liao M S, Dong J, Li M H, Ao M, Zhang L and Shi X G. 2021. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 332-341 (廖明生, 董杰, 李梦华, 敖萌, 张路, 史绪国. 2021. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测. *遥感学报*, 25(1): 332-341) [DOI: 10.11834/jrs.20210162]
- Lv J C, Zhang R, Bao X, Wu R Z, Hong R K, He X and Liu G X. 2025a. Time-series InSAR landslide three-dimensional deformation prediction method considering meteorological time-delay effects. *Engineering Geology*, 350: 107986 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2025.107986]
- Lv J C, Zhang R, He X, Hong R K, Sha M A G and Liu G X. 2025. Multi-branch network assessment and dynamic change analysis of wide-area landslide susceptibility. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 54(1): 104-122 (吕继超, 张瑞, 何旭, 洪瑞凯, 沙马阿各, 刘国祥. 2025. 广域滑坡易发性多分支网络评估及动态变化分析. *测绘学报*, 54(1): 104-122) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2025.20240014]
- Lv J C, Zhang R, Shama A, Hong R K, He X, Wu R Z, Bao X and Liu G X. 2024. Exploring the spatial patterns of landslide susceptibility assessment using interpretable shapley method: mechanisms of landslide formation in the Sichuan-Tibet region. *Journal of Environmental Management*, 366: 121921 [DOI: 10.1016/j.jenvman.2024.121921]
- Lv J C, Zhang R, Wu R Z, Bao X and Liu G X. 2025b. Landslide detection based on pixel-level contrastive learning for semi-supervised semantic segmentation in wide areas. *Landslides*, 22(4): 1087-1105 [DOI: 10.1007/s10346-024-02425-3]
- Noferini L, Pieraccini M, Mecatti D, Macaluso G, Atzeni C, Mantovani M, Marcato G, Pasuto A, Silvano S and Tagliavini F. 2007. Using GB-SAR technique to monitor slow moving landslide. *Engineering Geology*, 95(3/4): 88-98 [DOI: 10.1016/j.enggeo.2007.09.002]
- Noferini L, Takayama T, Pieraccini M, Mecatti D, Macaluso G, Luzi G and Atzeni C. 2008. Analysis of ground-based SAR data with diverse temporal baselines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(6): 1614-1623 [DOI: 10.1109/TGRS.2008.916216]
- Peng J B, Cui P and Zhuang J Q. 2020. Challenges to engineering geology of Sichuan-Tibet railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377-2389 (彭建兵, 崔鹏, 庄建琦. 2020. 川藏铁路对工程地质提出的挑战. *岩石力学与工程学报*, 39(12): 2377-2389) [DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2020.0446]
- Qin X F, Zhang H C, Zhang H, Wang Y and Liu H Y. 2018. A high precision DEM generation method based on ascending and descending pass TerraSAR-X/TanDEM-X BiSAR data. *Journal of Radars*, 7(4): 487-497 (秦小芳, 张华春, 张衡, 王宇, 刘华有. 2018. TerraSAR-X/TanDEM-X 升降轨双基干涉模式获取 DEM 方法研究. *雷达学报*, 7(4): 487-497) [DOI: 10.12000/JR18022]
- Sharov A I, Gutjahr K and Pellikka P E. 2004. Phase gradient approach to the evaluation and mapping of glacier rheology from multipass SAR interferograms// *Proceedings of the Second International Workshop on the Multitemp 2003. Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images*. Ispra: Joint Research Centre: 154-165 [DOI: 10.1142/9789812702630_0017]
- Su X J, Zhang Y, Meng X M, Mohib Ur R, Zainab K, Zhao F M, Yue D X, Guo F Y and Zhou Z Q. 2024. Potential landslides identification and development characteristics analysis in Hunza valley, along China-Pakistan Economic Corridor based on SBAS-InSAR. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(4): 885-899 (苏晓军, 张毅, 孟兴民, Mohib Ur R, Zainab K, 赵富萌, 岳东霞, 郭富赞, 周自强. 2024. 中巴经济走廊洪扎段潜在滑坡 SBAS-InSAR 早期识别及发育特征分析. *遥感学报*, 28(4): 885-899) [DOI: 10.11834/jrs.20221536]
- Xu B, Zhu Y, Li Z W, Yi H W, Hu M W, Chen Q, Han K and Du X. 2024. Analysis of InSAR time-series deformation monitoring accuracy of domestic satellite. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(10): 1930-1941 (许兵, 朱焱, 李志伟, 易辉伟, 胡妙文, 陈琦, 韩焜, 杜洵. 2024. 国产卫星时序 InSAR 形变监测精度分析. *测绘学报*, 53(10): 1930-1941) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230572]

- Yang Y J, Zhang R, Jiang H, Zhang B, Song Y F and Liu G X. 2025. Landslide susceptibility assessment of the Luding 9.5 earthquake area by fusing LT-1 ascending and descending ground deformation observations. *National Remote Sensing Bulletin*, 29(11): 3079-3094 (杨云杰, 张瑞, 江航, 张博, 宋云帆, 刘国祥. 2025. 融合LT-1升降轨地表形变观测的泸定9.5地震灾后滑坡易发性评价. *遥感学报*, 29(11): 3079-3094) [DOI: 10.11834/jrs.20254324]
- Zeng T, Deng Y K, Hu C and Tian W M. 2019. Development state and application examples of ground-based differential interferometric radar. *Journal of Radars*, 8(1): 154-170 (曾涛, 邓云开, 胡程, 田卫明. 2019. 地基差分干涉雷达发展现状及应用实例. *雷达学报*, 8(1): 154-170) [DOI: 10.12000/JR18115]
- Zhang D X, Zhang L, Dong J, Wang Y A, Yang C S and Liao M S. 2024a. Improved phase gradient stacking for landslide detection. *Landslides*, 21(8): 1829-1847 [DOI: 10.1007/s10346-024-02263-3]
- Zhang R, Lv J C, Yang Y J, Wang T Y and Liu G X. 2024b. Analysis of the impact of terrain factors and data fusion methods on uncertainty in intelligent landslide detection. *Landslides*, 21(8): 1849-1864 [DOI: 10.1007/s10346-024-02260-6]
- Zhu J J, Li Z W and Hu J. 2017. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1717-1733 (朱建军, 李志伟, 胡俊. 2017. InSAR变形监测方法与研究进展. *测绘学报*, 46(10): 1717-1733) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170350]

Comprehensive Monitoring of the Sichuan – Tibet Transportation Corridor by Collaborative Satellite and Ground-Based InSAR

ZHANG Rui, JIANG Hang, YAN Chao, LV Jichao, LIU Guoxiang

Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: The Sichuan-Tibet Transportation Corridor has a complex geological environment and widespread slope hazards, posing significant safety risks to the construction and operation of highways and railways.

In response to the multitiered and differentiated demands for survey, construction, and maintenance in transportation engineering, this study proposes an integrated space-ground Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)-based monitoring scheme designed to provide stereoscopic and dynamic observation capabilities. This approach aims to address the diverse information needs of various stakeholders across three spatial scales—corridor zones, critical engineering sections, and key hazard sites—and temporal scales ranging from annual surveys and quarterly inspections to continuous monitoring. Specifically, a 3D deformation calculation framework that combines multitrack time-series InSAR data and a precise slope deformation extraction model based on the unscented Kalman filter were constructed. These models aim to combine the wide-area coverage of satellites with the high precision and high sampling rate of ground-based radar, thereby enhancing information support and technical assurance for early identification and risk prevention of engineering hazards in complex mountainous areas.

To validate the scheme's feasibility, we applied multiplatform satellite time-series InSAR methods along the G318 Highway and under-construction railway routes within the corridor to conduct large-area deformation monitoring and identify potential slope hazards. Particular attention was given to the Luding earthquake (M_w 6.6) epicentral area for interpretation and time-series monitoring of secondary landslides. For disaster mitigation at key bridge and tunnel engineering sites, we extracted 3D time-series deformation patterns for high-risk slopes near the Jinsha River bridge site and jointly employed ground-based InSAR to conduct multiscale monitoring applications and verification analysis on slope creep in critical tunnel portal areas.

Results demonstrate that satellite and ground-based InSAR exhibit complementary advantages in spatiotemporal coverage and perspective for monitoring subtle deformations. The proposed comprehensive observation scheme and the multiscale application results in the Sichuan-Tibet Transportation Corridor provide a reference for basic geological surveys and disaster prevention and reduction research in the rugged mountainous regions of Western China.

Key words: satellite-based InSAR, ground-based InSAR, Sichuan-Tibet Transportation Corridor, comprehensive monitoring scheme, geological hazard, three-dimensional deformation, Kalman Filter

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U22A20565, 42371460); National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFB2604001); Sichuan Science and Technology Program (No. 2023ZDZX0030); Major Scientific Research Project of China State Railway Group (Grant No. K2024G004)