

基于SBAS-InSAR技术的雅鲁藏布江下游高山峡谷区地表形变时空演化特征分析

赵文字^{1,2} 杨成业^{*1,2} 王文杰^{1,2} 多吉次旦³ 程铭楷⁴

(1.西藏大学工学院 西藏拉萨 850000 2.西藏大学青藏高原地质资源与能源研究院 西藏拉萨 850000

3.西藏自治区第三地质大队 西藏拉萨 850000 4.西藏自治区气象信息网络中心 西藏拉萨 850000)

摘要 雅鲁藏布江下游属于典型的高原冰川-峡谷区,地形地貌独特,垂直落差巨大,地质灾害频发。文章选取雅鲁藏布江下游核心高山-峡谷区(大拐弯-墨脱中部),采用SBAS-InSAR技术结合Sentinel-1A升轨数据(2020年1月12日至2025年7月8日)开展连续地表形变监测。基于时序形变发现近5年该区域发生了大量地表形变。研究表明,SBAS-InSAR技术能有效识别冰川-峡谷区域中形变特征与地质灾害隐患;在雅鲁藏布江下游河谷两岸共识别出34处隐患点;根据整体形变特征将形变区划分为3类:冰川U型谷形变区、河流V型谷形变区以及人类活动第四纪堆积边坡形变区;分别选取3类形变区中的一处典型隐患点进行形变特征分析,结果表明冰川融化、降雨量以及人类活动对隐患点的形变加速呈正相关。研究结果可为雅鲁藏布江下游高山冰雪区地质灾害监测与减灾防灾提供参考。

关键词 雅鲁藏布江下游;SBAS-InSAR;冰川-峡谷区;形变监测

DOI:10.16249/j.cnki.2096-4617.2026.03.007

中图分类号 P237

文献标识码 A

文章编号 2096-4617(2026)03-074-14

引言

雅鲁藏布江下游(以下简称“雅江下游”)是典型的高原冰川-高山峡谷区,第四纪地貌多样,新构造活动强烈,滑坡、泥石流等地质灾害频发^[1],对周围居民的生命、财产、重大基础设施产生巨大的威胁^[2]。同时,雅江下游水电工程作为我国重点工程项目,需充分考虑区域地质环境,规避地质灾害高风险地区 and 流域重大地质灾害链^[3],建设过程中需持续开展地质灾害监测和系统防控,不断提升流域灾害防治和应急处置能力^[4]。因此,对雅江下游高山冰雪区域进行全面、系统且长时间持续的地表形变监测是十分必要的。提前掌握该区域的地质灾害特征以及实时动态会对预判地质灾害的发生起到关键性的作用。

雅江下游区域多为连续的高山峡谷段且常年冰雪覆盖,传统人工地质灾害监测手段受地形、气候及通信等多方面影响,难以实现精准预警^[5]。合成孔径雷达干涉(Interferometric Synthetic Aperture Radar In-

收稿日期:2026-05-26

基金项目:西藏大学在职攻读博士学位科研资助项目(zdbs202311)。

第一作者简介:赵文字,男,汉族,四川宜宾人,西藏大学工学院硕士研究生,主要研究方向为地质灾害监测技术。

通讯作者简介:杨成业,男,汉族,河南南阳人,西藏大学工学院副教授,主要研究方向为地质工程及地质灾害监测技术。

SAR)测量是近年来发展起来的空间对地观测技术,是传统合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)遥感技术与射电天文干涉技术的结合,能计算出目标区域的地表形变量^[6-11]。常规InSAR技术受限于数据选取、相干条件(时间、空间失相干)、卫星轨道误差、大气延迟等因素,其应用受到显著制约,这促使了时序InSAR技术应运而生。小基线集合成孔径雷达干涉测量(Small Baseline Subset-InSAR, SBAS-InSAR),采用短基线分组形成短基线子集,降低了输入影像的数量,同时通过子集内的形变解算和子集间的联合解算,可以得到相邻时间段内的相位变化速率,通过积分得到形变值^[12-14]。与其他传统地质形变监测方法相比,SBAS-InSAR技术可以选择任意时间段对目标区域进行监测,并能有效抑制大气效应。该技术在时间维度上的高密度影像采集与空间维度上的高密度测量点分布,不仅能够有效消除大气效应相位,同时大幅度提升形变监测的空间分辨率^[15-17]。因此,SBAS-InSAR在地表形变监测、灾害探测、地震模拟等领域具有较为广泛的应用。

近年来,InSAR技术已逐步应用于雅江下游高位地质灾害识别和形变监测,相关研究经历了由典型沟谷灾害解译、单体灾害时序监测向流域尺度隐患识别及智能化制图发展的过程。李壮等^[18]结合野外调查、多时相关光学遥感影像和InSAR数据,对米林市色东普沟高位地质灾害进行解译,在沟内上部极高山区识别出3处确定变形体和2处疑似变形体,并分析了2018年高位冰崩-岩崩灾害的潜在物源区。赵超英等^[19]联合Sentinel-1和ALOS/PALSAR-2影像,采用多种时序InSAR及SAR偏移量跟踪技术,对雅江下游2014—2020年的高位地质灾害进行区域识别,共圈定260处地质灾害形变区,并重点分析了泽巴隆巴冰川沟岩崩变形体和达波古滑坡等典型隐患。张龙宇等^[20]将SBAS-InSAR与Offset-Tracking技术相结合,对色东普流域2018年冰崩灾害发生前的冰川和沟道进行反演,表明两种方法的联合应用能够兼顾毫米级缓慢形变和米级大梯度形变监测。随着智能识别方法的进一步发展,Li等^[21]融合InSAR相位梯度叠加与DeepLabv3模型,利用2017—2023年升降Sentinel-1数据在雅江下游识别出277处活动地质灾害,说明InSAR技术在低相干高山峡谷区的应用正向高密度测量与自动化隐患制图方向发展。

为全面掌握雅江下游高山冰雪区域地表形变时空演化特征,本文采用SBAS-InSAR技术,选取了升轨Sentinel-1A数据共130景,采集研究区2020年1月12日—2025年7月8日的地表形变信息,对雅江下游地区进行形变监测与地质灾害隐患识别,并选取色东普沟、玉米村以及帮辛乡3类典型形变区进行时空演化特征分析,为该区域下一步防灾减灾提供参考。

1 研究区概况

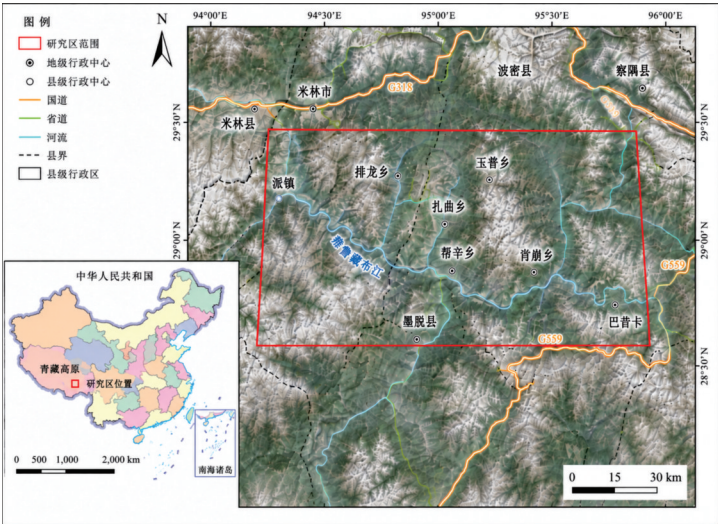
研究区位于西藏自治区林芝市雅鲁藏布江下游,西起米林市派镇附近,东至墨脱县巴昔卡一带,范围约为 $28^{\circ}35' \sim 29^{\circ}27'N$ 、 $94^{\circ}15' \sim 95^{\circ}55'E$ (图1)。该区域内地势起伏强烈,高山与深切河谷相间分布。南迦巴瓦峰、加拉白垒峰及其周缘山体构成区域主要地形骨架,雅江沿峡谷持续下切,形成谷深、坡陡、河道狭窄的地貌格局。高海拔地带现代冰川及季节性积雪较为发育,可见冰斗、刃脊、角峰和U型谷等冰川侵蚀地貌。支沟沟口、冰川谷出口及河流两岸还分布有冰碛、崩坡积、冲洪积和泥石流堆积物。由此形成了冰川侵蚀、河流切割与松散堆积相互叠置的地貌组合。

研究区处于东喜马拉雅构造结影响范围内,是区域构造变形较为强烈的地带。受印度板块与欧亚大陆持续碰撞作用影响,雅江缝合带及邻近区域经历了强烈的挤压、剪切和隆升过程。南迦巴瓦构造结边缘发育东久-米林断裂、阿尼桥断裂及多组次级断裂,内部同样存在明显的逆冲和剪切变形。构造隆升使雅江保持较强的河流下切能力,不断加大谷坡高差;断裂活动、节理裂隙发育及河谷卸荷又使局部岩体完

整性降低。高陡地形与破碎岩体同时存在,使边坡在重力、降雨、冰雪融水和河流冲刷作用下更容易产生松动、崩塌和滑移。因此,强烈的新构造活动不仅参与了峡谷地貌塑造,也构成研究区地质灾害发育的重要内在条件。

研究区岩性组成复杂,南迦巴瓦构造结内部以高级变质岩系为主,常见片麻岩、片岩、角闪岩、变粒岩、石英岩以及局部大理岩等;雅江缝合带附近还可见强变形岩体及相关混杂岩组合。与此同时,河谷、沟口和冰川谷内广泛保存第四纪松散堆积物,包括冰碛物、崩坡积物、冲洪积物及泥石流堆积物等。总体而言,研究区具有坚硬基岩、构造破碎岩体和第四纪松散堆积体共同分布的特点,为不同类型的地表形变和斜坡失稳提供了相应的物质基础。

研究区气候受西南季风和高山峡谷地形共同控制,水平和垂直分异均较明显。由派镇向墨脱方向,随着海拔降低以及印度洋暖湿气流沿雅江峡谷北上,区域总体呈现气温升高、降水增加的趋势。高海拔地带低温、积雪和冰川作用明显,而墨脱及其邻近河谷则具有较为突出的暖湿多雨特征。区域降水年内分配并不均匀,暖季降水相对集中,冬季较少。雅江下游径流则由降雨、冰雪融水和支流汇水共同补给。进入雨季后,河流及沟道水动力增强,坡面入渗和坡脚冲刷加剧,高山沟谷内原有冰碛物、崩坡积物等松散物源也更易发生再搬运。当集中降雨与冰雪消融共同作用时,易诱发滑坡、泥石流以及堵江等自然灾害。



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1829号的标准地图制作,底图无修改。
Notes: This map was produced using a standard map with review number GS(2019)1829, which was downloaded from the Ministry of Natural Resources' Standard Map Service website. The base map has not been modified.

图1 研究区位置示意图
Fig.1 The map of the study area

2 SBAS-InSAR 技术原理

SBAS-InSAR 技术通过对空间基线长度进行限制,即按照空间基线长度对参与计算的SAR影像进行分组,得到短空间基线差分干涉图,以此克服空间基线过大而导致的失相干现象^[22]。在求解形变速率时,采用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)法,并将被较长空间基线分开的SAR数据集连接起来,将短时间基线内的大量测点纳入计算中,以提高观测数据的时间采样率。

假设获得同一区域内不同时段 $N+1$ 景雷达数据,依据时空基线约束条件,从中筛选一景作为超级主影像,其余影像分别被配准至该主影像,并对雷达影像进行差分干涉处理,得到差分干涉图共 M 幅,则

M满足:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq \frac{N(N+1)}{2}$$

(1)

若两景SAR影像获取的时间分别为 T_a 、 T_b ,且 $T_b>T_a$,生成的差分干涉图为第 j 景,干涉相位公式如下:

$$\phi_j = \phi_{T_b} - \phi_{T_a} \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_{T_b} - d_{T_a}) + \Delta\phi_{top}^j + \Delta\phi_{atm}^j + \Delta\phi_{noise}^j$$

(2)

式中, $1\leq j\leq M$; d_{T_b} 、 d_{T_a} 分别为 T_a 、 T_b 时间相对于 T_0 时间雷达视线(Line-of-Sight, LOS)方向的累积形变量。 $\Delta\phi_{top}^j$ 、 $\Delta\phi_{atm}^j$ 、 $\Delta\phi_{noise}^j$ 分别为表示残余地形相位、大气延迟相位和噪声相位,去除 $\Delta\phi_{top}^j$ 、 $\Delta\phi_{atm}^j$ 、 $\Delta\phi_{noise}^j$ 后,将上式改写为:

$$\phi_j = \phi_{T_b} - \phi_{T_a} \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_{T_b} - d_{T_a})$$

(3)

假定相邻间隔时间内,地表形变速率是线性的,第 j 景干涉图的形变相位信息如下:

$$\Delta\phi_j = \sum_{k=T_{a,j}+1}^{T_{b,j}} (T_k - T_{k-1})v_k = Av$$

(4)

式中, A 为 $M\times N$ 的矩阵, v_k 表示第 k 个相邻时间区间内的 LOS 向平均形变速率, $T_k - T_{k-1}$ 为相邻影像的时间间隔; A 为由各干涉对起止时刻关系构成的 $M\times N$ 设计矩阵, v 为 N 个相邻时段形变速率组成的列向量。在干涉对生成过程中因对时空基线阈值进行了限制,可能造成不连续干涉图子集,此时矩阵 A 秩亏。为了解决孤立相对的问题,采用奇异值分解法对多个小基线集进行联合求解,进而通过最小二乘法求得各高质量相干点在最小范数下的形变量,最终得到时间序列^[23]。

SBAS-InSAR 技术采用多主影像处理策略,有效提升了 SAR 数据的利用率,进而增大了形变测量的时间采样频率。在符合设置的时间基线与空间基线的范围内,该技术可获取更多可利用的干涉对,保障干涉图的相干性。通过筛选误差影响小的干涉对,计算出形变速率与时间序列,在一定程度上也可以起到抑制大气延迟误差、限制地形误差的作用,使得监测精度得到提高^[24]。

3 试验数据参数及处理

本次试验采用欧洲航天局 Sentinel-1A 升轨单视复数影像(Single Look Complex, SLC)数据,卫星轨道号为 70-1277,升轨数据观测日期为 2020 年 1 月 12 日至 2025 年 7 月 8 日,共获取 130 景影像,成像模式为 IW,极化方式为 VV+VH(见表 1)。数据处理基于 gamma 软件,采用分辨率为 30 m 的 SRTM DEM 高程数据进行地形相位校正。最大时间基线设置为 120 d,最小时间基线为 12 d,升轨数据时空基线图见图 2。

表 1 试验数据及参数

Table 1 Experimental data and parameters

SAR 影像参数	数值	SAR 影像参数	数值
卫星类型	Sentinel-1A	数据级别	SLC 数据(单视复数影像)
飞行方向	升轨	极化方式	双极化(VV+VH)
轨道号	70-1277	景数	130 景
成像模式	IW	影像时间	2020 年 1 月 12 日—2025 年 7 月 8 日
波段	C 波段		

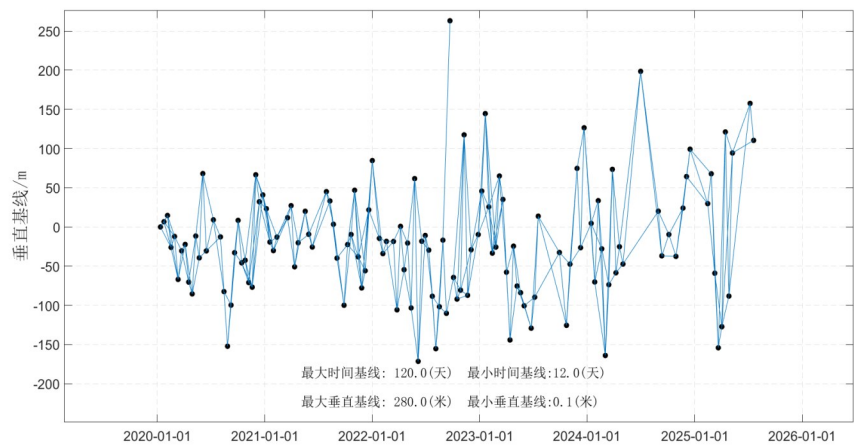


图2 升轨数据时空基线图
Fig.2 Spatiotemporal baseline of the ascending data

4 结果与分析

4.1 InSAR形变结果与分析

图 3 展示了基于 SBAS-InSAR 监测得到的 2020 年 1 月 12 日至 2025 年 7 月 8 日升轨数据中研究区的累积形变量,蓝色区域表示形变方向为朝向卫星运动方向,用正值表征,红色区域表示形变方向为背离卫星运动方向,用负值表征。在升轨数据中,研究区产生的最大正向形变量为 226 mm,最大负向形变量为 -378 mm。研究区内形变最显著的区域为色东普沟,其累积形变量达-370 mm。根据 2025 年 7 月 8 日累积形变图,围绕雅江下游河谷岸坡,从派镇到墨脱县,在雅江下游两岸共探测到 34 处潜在地质灾害隐患点,对识别出的隐患点按照自北向南,自西向东的顺序进行编号,即 X01-X34,如图 3 所示。

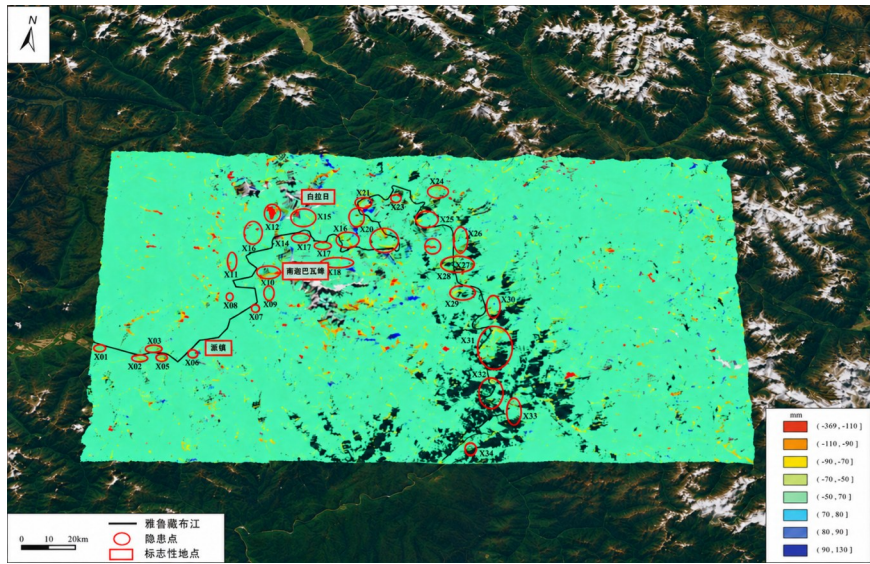


图 3 研究区 2025 年 7 月 8 日时序形变图
Fig.3 Time-series deformation map of the study area on July 8, 2025

受高山峡谷地形影响,本文 InSAR 监测结果仍存在一定局限。研究区河谷切割较深、边坡陡峭,部分坡面与雷达视线方向关系不利时会产生叠掩或雷达阴影,这些区域难以获取连续可靠的形变信息。因此,本文识别出的 34 处隐患点主要对应升轨 SAR 数据能够有效观测的区域,对于叠掩和阴影区仍可能存在漏检。另一方面,本文仅使用 Sentinel-1A 升轨数据,不同坡向的边坡在雷达视线方向上的可探测性并

不完全一致。后续可结合升、降轨SAR数据和更高分辨率DEM,对叠掩、阴影区域进行进一步识别,并辅以光学遥感和地面监测,以提高高陡峡谷地区形变识别的完整性。

4.2 典型区域时空演化特征分析

依据研究区形变结果并结合光学遥感影像,将所探测到的形变区域划分为冰川-U型谷形变区、河流-V型谷形变区和人类活动第四纪堆积边坡形变区,并分别选取色东普沟、玉米村滑坡和帮辛乡滑坡作为典型区域进行分析,其空间位置如图4所示。为进一步比较不同类型形变区的差异,根据SBAS-InSAR时序结果、降雨变化及光学遥感影像,对3类典型区域的形变速率、季节性响应及人类活动影响进行归纳,结果见表2。



图4 研究区3类典型形变区位置图

Fig.4 The map of three typical deformation zones in the study area

表2 3类典型形变区域形变特征及影响因素对比

Table 2 Comparison of deformation characteristics and influencing factors among three typical deformation zones

形变类型	典型区域	最大累积形变量(mm)	最大形变速率(mm·a ⁻¹)	形变速率量级	季节性敏感度	人类活动响应程度	主要形变响应特征
冰川U型谷形变区	色东普沟	-370	-73	高	强:夏季受冰雪消融和降雨共同影响	弱:未见明显响应	夏季存在短时形变波动,雨季后形变加速,冰川消融、冰碛物迁移和强降雨共同作用明显
河流V型谷形变区	玉米村滑坡	-193	-41	中	强:与雨季变化高度相关,并存在一定水文滞后性	弱:未见明显响应	位移呈阶梯状增长,强降雨后形变速率明显增加,主要受降雨和坡体重力控制
人类活动第四纪堆积边坡形变区	帮辛乡滑坡	-150	-26	较低	强:雨季加速、旱季趋缓特征明显	较强:居民点和坡耕地集中区存在明显形变	受降雨、人类活动及第四纪松散堆积物重力作用的共同影响,强降雨后持续形变明显

注:表中“季节性敏感度”和“人类活动响应程度”为基于本文时序形变曲线、降雨资料及光学遥感结果的定性比较。
Notes: The "seasonal sensitivity" and "degree of response to human activities" presented in the table are qualitative assessments based on the time-series deformation curves, precipitation data, and optical remote sensing observations analyzed in this study.

由表2可见,3类形变区在形变强度和主要响应因素上存在明显差异。色东普沟形变速率最大,其季节变化同时受到冰雪消融和降雨影响;玉米村滑坡形变速率次之,对降雨变化响应明显,并具有一定的滞后性;帮辛乡滑坡形变速率相对较低,但居民点和坡耕地等人类活动区域与部分明显形变区具有空间对应关系。上述差异表明,三类形变区虽然均受降雨影响,但其主要控制条件并不相同,下文分别对其时空演化特征进行分析。

4.2.1 冰川U型谷形变区(色东普沟)

色东普沟研究区域与特征点位置如图 5 所示。色东普沟选用升轨 InSAR 形变进行时空演化特征分析,初始影像时间为2020年1月12日,时序累积形变量如图 6 所示。色东普沟累积形变量为-370 mm,最大形变速率为-73 mm/a,形变中心位置从冰谷谷底区域向南朝雅鲁藏布江扩散。2020年1月至12月,色东普沟整体呈现平稳状态,并未发生较大形变,自2020年12月起,沟底开始出现形变,逐步形成形变中心。2020年12月至2021年9月,该形变中心形变量持续增大;2021年9月至2022年12月,形变区开始从中心向四周蔓延;2022年12月至2025年7月,形变主体部分趋于稳定,向四周的扩散减缓,转而向南缓慢扩散,且形变区形变量不断增大,最终形成滑坡体。



图 5 色东普沟研究区域与特征点位置

Fig.5 The map of the study area and feature points of the Sedongpu Gully

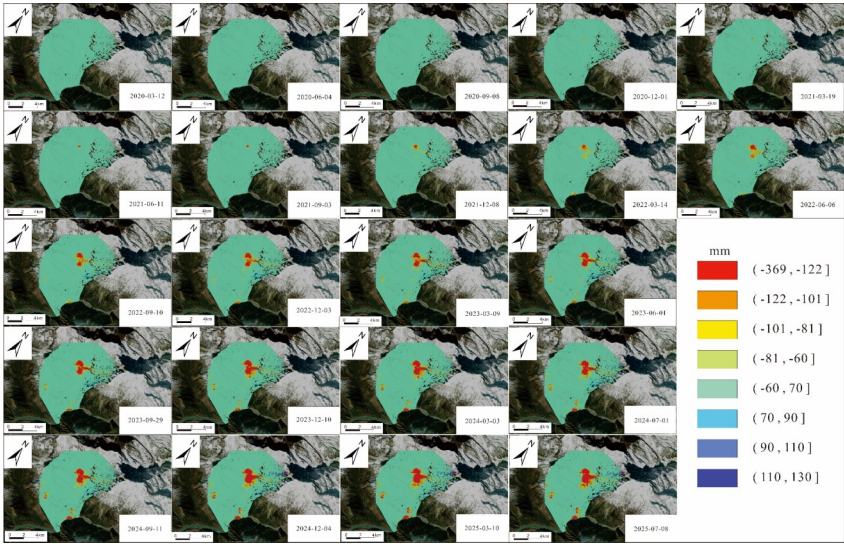


图 6 色东普沟 InSAR 时序累积形变结果图

Fig.6 The InSAR time-series accumulated deformation results of the Sedongpu Gully

色东普沟5年平均形变速率如图 7 所示。整体以低速形变为主,大部分区域速率集中在-30~20 mm/a 之间,而沟谷中上部出现较为集中的高速负形变区,最大负形变速率约为-73 mm/a。高速形变区主要呈斑块状集中分布,说明沟内不同部位的稳定性存在明显差异。结合该区域冰川发育、沟谷高差大及松散物源丰富等特点,局部高速形变可能与冰雪消融、冰碛物迁移以及降雨作用下的坡体物质运动有关。因此,沟谷中上部高速负形变区域应作为后续持续监测的重点。

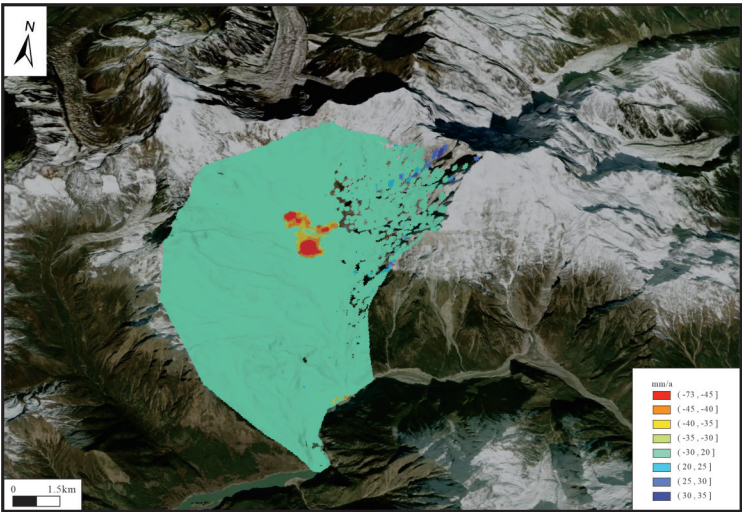


图7 色东普沟5年平均形变速率图

Fig.7 Five-year averaged deformation rate map of the Sedongpu Gully

基于图8所示的色东普沟特征点累积形变量曲线,可将监测期内的形变过程分为以下3个阶段:2021年5月前,形变速率较为稳定,形变量较小,为平稳期;2021年5月,4个特征点处的形变速率开始增加,形变量明显加剧,呈高速演化态势;2023年9月后形变速率逐渐放缓,进入平稳期。总体来看,4处特征点均保持负形变趋势,但每年夏季会出现短暂的上升形变。该现象可归因于夏季温度升高,冰峰积雪加速消融,冰碛物沿山峰坡面下沉至沟底,导致局部产生短暂的形变上升。在5年形变监测期内,地表形变速率呈现“低速-高速-趋缓”的3阶段演化特征,4处特征点的时序形变特征基本一致。因此,这些特征点能较好地反映整个色东普沟的形变特征。

2020—2024年色东普沟降雨量变化如图9所示。降雨的周期性波动呈现典型的季风气候响应,干湿季分明。其中,年初与年末降雨量稀少,年中夏季降雨集中并形成明显的降雨峰值,符合藏东南地区受西南季风控制,夏雨冬干的高原温带季风半湿润气候特征。结合图7特征点在雨季后形变速率显著加速的演化规律,证实降雨量是诱发色东普沟地质灾害的关键触发因子。2024年雨季,降雨量峰值高达650 mm,约为往年平均峰值的3倍,表明该区域遭遇了极端强降雨事件。色东普沟地形高差悬殊,源头冰川发育且沟道松散物源丰富,极端强降雨会对当地脆弱的地质环境产生显著的催化作用,降雨径流的持续冲刷与入渗侵蚀不仅会加速冰川融化,还会降低岩土体的整体稳定性,从而极易引发大规模高位碎屑流灾害。

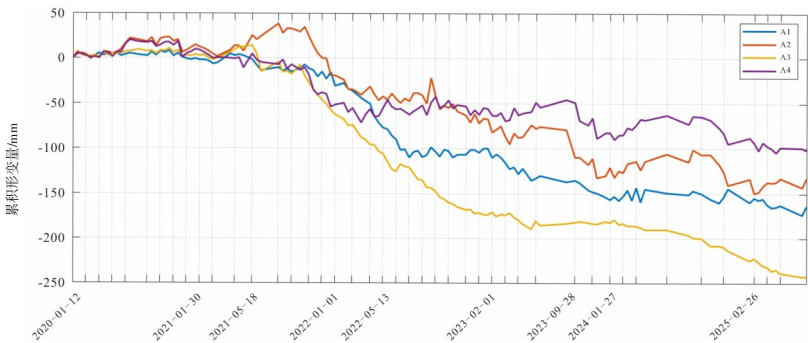


图8 色东普沟特征点累积形变量图

Fig.8 Accumulated deformation of feature points in the Sedongpu Gully

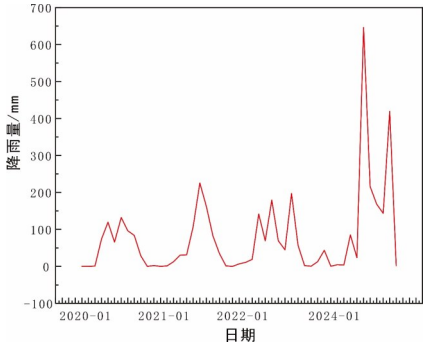


图9 2020—2024色东普沟降雨量

Fig.9 The variation of precipitation in the Sedongpu Gully from 2020 to 2024

根据色东普沟2020—2025年发生的堵江事件记载,色东普沟在此期间共发生5次堵江事件。第1次发生于2021年3月,类型为冰崩泥石流,造成堵塞雅鲁藏布江,形成堰塞湖,后自然漫顶泄流;第2次发生

于2022年5月11日,突发冰川泥石流;第3次为2023年9月28日突发岩崩-泥石流堵江;第4次发生于2024年4月,类型为冰川-泥石流堵江,此次堵江堰塞体规模较大;第5次发生于2024年5月,为继发性冰川-泥石流堵江,系短期内第二次堵江事件,反映该时段地质灾害活动较为活跃。上述5次堵江事件均为色东普沟发生冰川-泥石流或岩崩-泥石流所致。色东普沟作为典型的冰川U型谷区域,有高陡、极寒、山峰-沟底垂直高度落差大等特点,在气候变暖影响下,冰川发生消融导致山峰岩体结构被破坏,山体崩塌频发。色东普沟上游发生冰崩或岩崩后,冰碛物沿沟道向下游运移,途中带走大量岩块和松散土体,冰块、岩体以及泥土形成的泥石流最终冲出沟口,堵塞雅鲁藏布江。结合SBAS-InSAR时序结果图与特征点结果分析,色东普沟沟底持续发生形变的时间段是从2020年12月开始一直持续到2025年7月,色东普沟5次堵江事件均发生于该时间段内,说明该时段处于色东普沟地质灾害频发期。从时间和结果上看,SBAS-InSAR的试验结果与色东普沟的堵江事件吻合,充分证明了使用SBAS-InSAR进行雅江下游区域内形变探测的可行性。

4.2.2 河流V型谷形变区(玉米村滑坡)

玉米村滑坡研究区范围与特征点位置如图10所示,累积形变量如图11所示,观测时段为2020年3月12日至2025年7月8日。结合光学遥感影像与时序形变结果,共识别出两处明显滑坡点。玉米村滑坡最大形变处累积形变量达到-193 mm,最大形变速率为-41 mm/a,整体滑坡形变范围较大,共有两处形变区。自2022年6月起,负形变中心开始于山体上方形成,并随着时间推移缓慢向山体下方扩散,最终蔓延至大部分边坡,基本形成滑坡体。两处形变区均在山体上方形成负形变区域,同时负形变区域下方因降雨对边坡冲刷形成的物源堆积而产生正形变区域。玉米村滑坡特征点累积形变量折线如图11所示,2021年10月之前,4个特征点的形变特征大致相同;此后,B1、B2、B3点的负形变速率加快,B4点的正形变速率增大;至2024年4月,各点的形变速率变小,形变量变为缓慢增加。其中,B1、B2、B3处特征点整体形变趋势相同,B4特征点位于山体下方靠近雅鲁藏布江,大量山体流失的物源堆积导致B4呈正形变,且B4特征点结果与时序形变结果吻合,故4个特征点基本能反映玉米村滑坡的形变特征。因此,在2020—2025年的5年观测期内,玉米村研究区地表形变速率整体表现为“形变-高速-趋缓”3个形变阶段,且山体物源经崩滑后,在滑坡下方形成大规模的崩坡积物。



图 10 玉米村滑坡研究区域与特征点位置

Fig.10 The map of the study area and feature points of the landslide located in Yumi Village

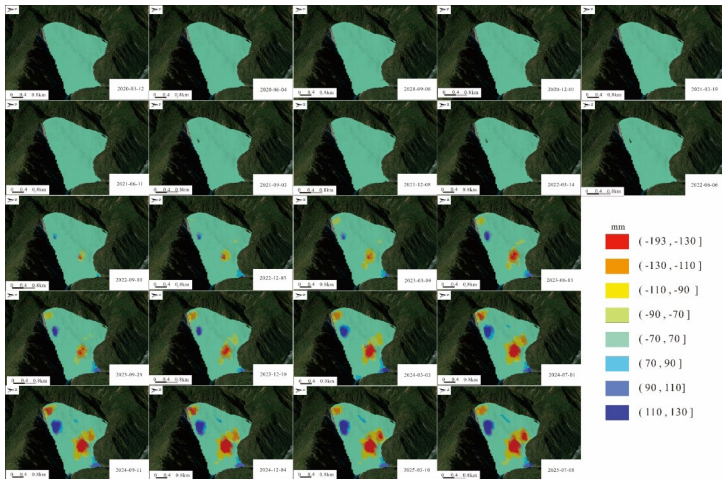


图 11 玉米村滑坡 InSAR 时序累积形变结果图

Fig.11 The InSAR time-series accumulated deformation results of the landslide located in Yumi Village

玉米村5年平均形变速率如图12所示。整体以低速形变为主,大部分区域形变速率集中在-15~20 mm/a。坡体中下部形变较为明显,并形成局部连续的负形变区,最大负形变速率约为-41 mm/a;坡体西侧局部出现正向形变,形变速率可达30~35 mm/a。不同部位形变速率存在明显差异,其中中下部为形变集中区域。结合后续时序形变结果,可进一步分析降雨及坡体重力作用对该区域形变发展的影响。

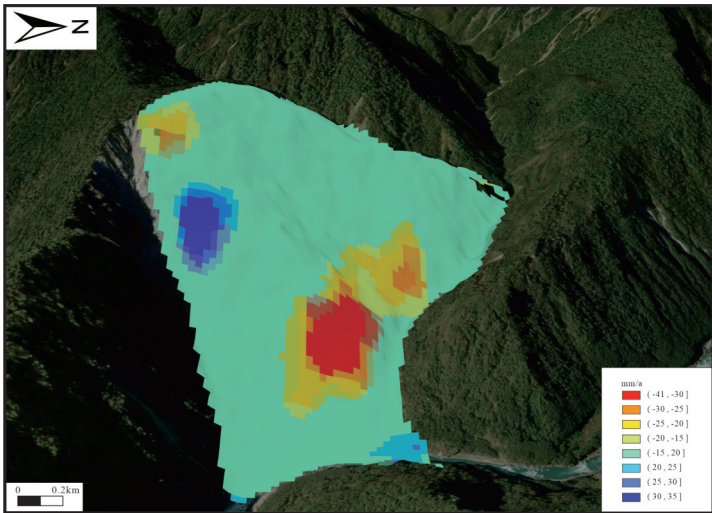


图 12 玉米村滑坡 5 年平均形变速率图

Fig.12 Five-year averaged deformation rate map of the landslide located in Yumi Village

如图13、图14所示,2020—2024年玉米村滑坡位移并未表现匀速发展态势,而是呈现出与降雨高度同步的“阶梯状突变特征”。2020年至2021年上半年,该区域年降雨量处于较低水平,对应监测点B1、B2、B3曲线走势平缓,累积位移量极小。2021年下半年雨季,玉米村滑坡降雨量突破了300 mm,在此次雨季后,B1、B2、B3点形变速率陡增,形变量加速增加,且表现出明显的水文滞后效应。2024年4月,玉米村滑坡遭遇了极端强降雨,降雨峰值接近1 000 mm,从图13可知这一时间点后B1、B2、B3三条曲线同时发生剧烈下滑。2025年以后,玉米村滑坡的形变速率虽暂缓,进入了雨季后的暂时稳定期,但极端降雨过程已对滑坡体内部结构造成严重的剪切损伤。随着下一轮雨季的到来,该滑坡发生高速滑移或诱发泥石流灾害的风险极高,应加强监测,防范地质灾害发生。

雅江下游峡谷两岸坡度陡峭,再者由于区域降雨量丰富,在重力与雨水的共同作用下不断侵蚀边坡,削弱边坡稳定性,使滑坡与边坡势能不断增加,诱发地质灾害。玉米村滑坡作为典型的高陡边坡区域,其

形变特征符合典型高陡边坡形变特征,形变与强降雨量相关。玉米村滑坡于2021年10月前,在常年雨水对陡坡的冲刷下,不断累积滑坡势能,当累积到足够的势能后于2022年6月开始形成大面积崩塌且持续到2025年3月,在雨季时形变波动更加明显。

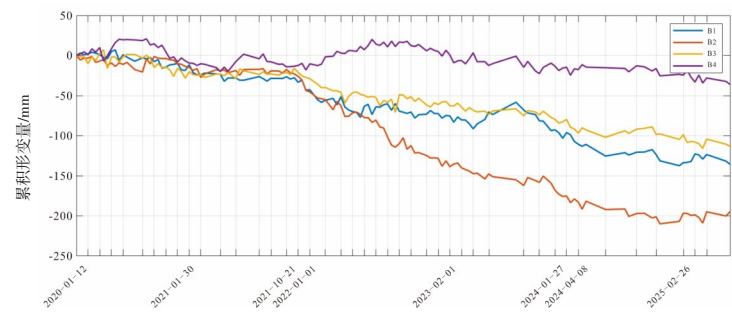


图 13 玉米村滑坡特征点累积形变量
Fig.13 Accumulated deformation of feature points of the landslide located in the Yumi Village

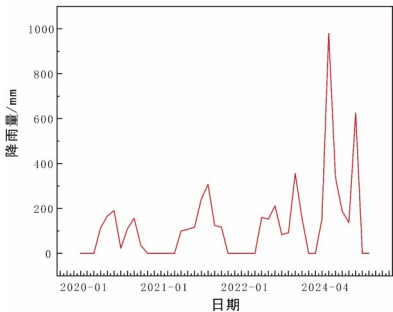


图 14 玉米村滑坡降雨量图
Fig.14 The precipitation variation of the land-slide located in Yumi Village from 2020 to 2024

4.2.3 人类活动第四纪堆积边坡形变区(帮辛乡滑坡)

帮辛乡滑坡研究区范围与特征点位置如图 15 所示,SBAS-InSAR 监测形变结果如图 16 所示。监测期内,该区域滑坡最大累积形变量为-150 mm。2020年12月开始出现形变;2021年12月至2024年3月形变加剧,开始出现大规模形变区域,且形变速率增加,形变区域大幅度扩散并形成滑坡体;2024年3月至2025年7月形变速率与范围均趋于稳定,扩散趋势减弱。



图 15 帮辛乡滑坡研究区域与特征点位置图
Fig.15 The map of the study area and feature points of the landslide located in Bangxin Township

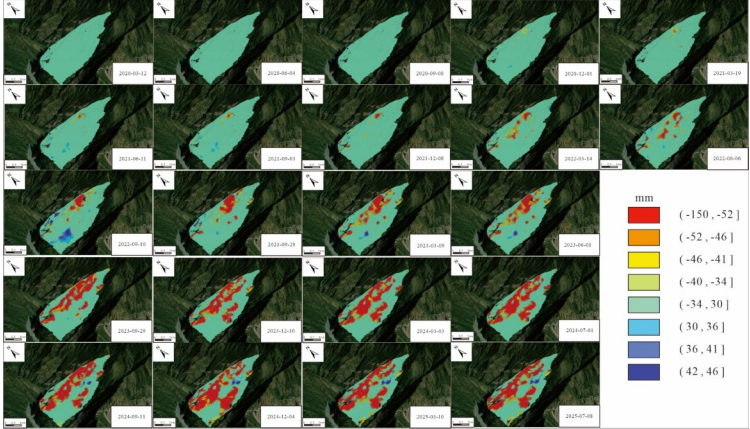


图 16 帮辛乡滑坡InSAR时序累积形变结果图
Fig.16 The InSAR time-series accumulated deformation results of the landslide located inBangxin Township

帮辛乡滑坡特征点累积形变量如图 17 所示,4 个特征点的整体形变趋势保持一致,表明 4 个特征点可以反映整个帮辛乡滑坡形变特征。在 2020 年 10 月之前,帮辛乡滑坡整体形变量较小,至 2020 年 10 月形变速率大幅增加,负形变量开始加速出现,截至 2025 年 7 月,负形变量仍在持续增加。在 2020—2025 年的 5 年观测期内,研究区地表形变速率表现为“低速形变-高速形变”两个阶段的演化特征,目前仍然处于高速形变阶段。因此,应持续加强该地区的地质灾害监测工作。

2020—2024 年帮辛乡滑坡降雨量如图 18 所示。结合特征点累积位移曲线(图 17)可知,在历年夏季雨季期间,4 个特征点位移曲线均同步表现出形变速率陡增、累积位移量加剧增加的特征;而进入冬季旱季后,曲线斜率趋于平缓,形变速率暂缓。2024 年,帮辛乡滑坡遭遇极端特大暴雨,单月最高降雨量峰值接近 1 900 mm,滑坡体累积位移量不断增加,直至 2025 年 7 月形变速率依旧维持高速失稳态势,表明极端水动力作用直接打破了滑坡体的临界平衡状态,进而触发了突发性的大幅滑移。

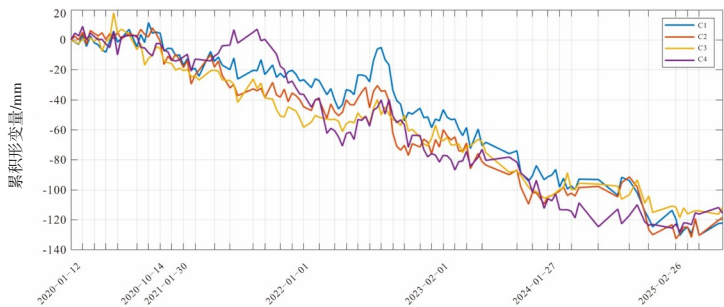


图 17 帮辛乡滑坡特征点累积形变量图
Fig.17 Accumulated deformation of feature points of the landslide located in Bangxin Township

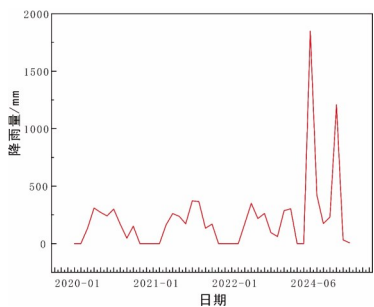


图 18 帮辛乡滑坡降雨量图
Fig.18 The precipitation variation over the landslide located in Bangxin Township from 2020 to 2024

帮辛乡形变速率图、人类活动区域及光学遥感影像如图 19 所示,其最大形变速率为 -26.0 mm/a 。从光学影像可以看出,帮辛乡坡体中下部集中分布有居民点与坡耕地,部分耕地沿坡面呈梯级分布;当地土地利用类型以居民建设和坡地耕作为主。坡地开垦与居民建设活动会对原有坡面产生一定扰动,同时改变局部排水和雨水入渗条件。从形变速率分布来看,部分人类活动密集区域同时存在较明显的地表形变,说明人类活动可能对帮辛乡边坡稳定性产生一定影响。此外,海拔较高的人类活动区域形变速率大于海拔较低区域,表明高陡地形条件下边坡形变更明显。因此,应加强对高山峡谷区居民点及农业活动集中边坡的持续监测。

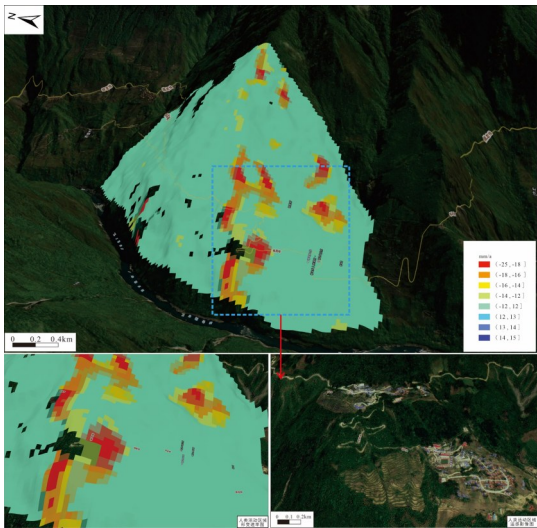


图 19 帮辛乡形变速率图
Fig.19 The map of deformation rate of Bangxin Township

5 结论

本研究基于SBAS-InSAR技术与Sentinel-1A升轨数据,获取雅江下游2020年1月12日至2025年7月8日的地表形变信息,并选取色东普沟、玉米村滑坡及帮辛乡滑坡3个典型形变区,开展地质灾害隐患识别和形变特征分析,主要结论如下:

(1)本文采用SBAS-InSAR技术结合遥感影像,对冰川-峡谷区域进行监测,结果表明SBAS-InSAR技术在冰川-峡谷地区的地质灾害隐患识别能力较高,有效弥补了雅江下游区域的人工监测难以到达的不足。

(2)基于升轨形变结果,在雅江下游两岸共识别出34处隐患点,可分为3种类型的形变区,分别为冰川-U型谷形变区、河流V型谷形变区以及人类活动第四纪堆积边坡形变区。

(3)通过对3类典型隐患点的形变特征分析表明:冰川-U型谷(色东普沟)形变主要受冰碛物堆积与冻融风化(物源)-冰川融化与雨雪(动力)及降雨的综合作用;河流V型谷形变区(玉米村滑坡)受降雨+自身重力影响产生缓慢形变;人类活动第四纪堆积边坡形变区(帮辛乡滑坡)主要受降雨、人类扰动及松散第四纪堆积体重力作用的共同影响。

(4)3类形变区的影响因素存在差异,监测预警重点也应有所区别。色东普沟应重点关注冰川消融期及强降雨期间的形变变化,同时加强沟道物源活动和堵江风险监测;玉米村滑坡应重点关注雨季及强降雨后的边坡形变,出现形变速率持续增大时应加强跟踪监测;帮辛乡滑坡则应加强居民点、坡耕地等人类活动集中区域的监测,强降雨期间适当提高监测频率。据此,针对不同形变类型确定相应的监测重点,可为雅江下游地质灾害预警提供参考。

参考文献

- [1] 邢明泽,左小清,张荐铭,等.基于SBAS-InSAR技术的西南山区滑坡稳定性监测[J].测绘通报,2024(2):63-68.
- [2] 薛翊国,渠敬凯,彭建兵,等.雅鲁藏布江下游主要不良地质条件与重大工程地质问题[J].现代地质,2026,40(1):1-30.
- [3] 李振洪,陈博,刘银鹏,等.青藏高原古巴滑坡长时序三维形变监测和风险评估[J].中国科学:地球科学,2025,55(10):3421-3437.
- [4] 杨成业,张鑫,李若铭,等.基于SBAS-InSAR技术的雅鲁藏布江色东普沟地质灾害发育特征与复活趋势分析[J].高原科学研究,2024,8(3):1-13.
- [5] 杨芳,丁仁军,李勇发.基于SBAS-InSAR技术的金沙江流域典型滑坡时空演化特征分析[J].测绘通报,2024(11):102-107.
- [6] 陈宏,江峻毅,纪成亮,等.基于SBAS-InSAR技术的高山峡谷区滑坡隐患早期识别[J].安全与环境工程,2024,31(3):206-216.
- [7] 余田田,李相宜,汪洁,等.基于SBAS-InSAR的尾矿库二维形变监测与分析[J/OL].水文地质工程地质,1-13.[2026-03-13].<https://link.cnki.net/urlid/11.2202.p.20250918.1006.002>.
- [8] 杨春宇,文艺,潘星,等.基于SBAS-InSAR的山体滑坡形变监测分析[J].测绘通报,2023(11):12-17.
- [9] 田峰,朱鸿鹄,叶霄,等.基于SBAS-InSAR的三峡库区新铺滑坡形变分析[J].工程地质学报,2025,33(6):2215-2226.
- [10] Zhu S. Interseismic deformation of the altyn tagh fault determined by Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Measurements[J]. Remote Sensing, 2016, 8(3):233.
- [11] Hung W C, Hwang C, Chen Y A, et al. Surface deformation from persistent scatterers sar interferometry and fusion with leveling data: a case study over the choushui river alluvial fan, Taiwan[J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(4):957-967.
- [12] 凌雨薇,郭长宝,杨为民,等.基于SBAS-InSAR的青藏高原东部波戈溪古滑坡变形机制与影响因素分析[J/OL].地质通报,1-17.[2026-03-14].<https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20251205.1848.003>.
- [13] 蒋亚楠,许强,汤明高,等.金沙江上游SBAS-InSAR滑坡三维形变监测与堵江影响分析[J].地球科学,2026,51(4):1189-1199.

- [14] 袁新霞,郭长宝,闫怡秋,等.基于斜坡单元与SBAS-InSAR地表形变速率的高山峡谷区滑坡危险性评价:以金沙江上游地巫乡段为例[J].地球科学,2026,51(4):1371-1387.
- [15] 秦友森,徐小波,李彦川,等.基于时序InSAR的海原断裂带震间形变监测[J].地震地质,2025,47(6):1688-1707.
- [16] 王倩雯,宋闯,陈博,等.黄土高原白草塬引洮工程前后17年InSAR时序形变监测与分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2213-2225.
- [17] 于冰,张椿雨,王金日,等.基于SBAS-InSAR的白鹤滩库区长时序形变监测与滑坡隐患识别[J].自然资源遥感,2025,37(6):156-168.
- [18] 李壮,李滨,高杨,等.雅鲁藏布江下游色东普沟高位地质灾害发育特征遥感解译[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(3):33-41.
- [19] 赵超英,刘晓杰,高杨,等.基于SAR/InSAR技术的雅鲁藏布江下游高位地质灾害早期识别[J].地质力学学报,2022,28(6):981-994.
- [20] 张龙宇,李素敏,禹孙菊,等.基于SBAS-InSAR与Offset-Tracking的色东普流域灾前形变探究[J].大地测量与地球动力学,2024,44(6):630-635.
- [21] Li B, Liu X J, Zhao C Y, et al. Deep learning-based InSAR phase gradient stacking method for mapping active geohazards in the Lower Yarlung Tsangpo, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2025, 99(5): 1477-1493.
- [22] 李文东,叶禹,李霞,等.融合SBAS-InSAR形变与机器学习模型的滑坡易发性评价[J].测绘通报,2025,(7):126-131+146.
- [23] 李珊珊,李志伟,胡俊,等.SBAS-InSAR技术监测青藏高原季节性冻土形变[J].地球物理学报,2013,56(5):1476-1486.
- [24] 张静,冯东向,慕巍,等.基于SBAS-InSAR技术的盘锦地区地面沉降监测[J].工程地质学报,2018,26(4):999-1007.

Spatiotemporal Evolution of Surface Deformation in the High-Mountain Gorge Region of the Lower Reaches of the Yarlung Tsangpo River Using SBAS-InSAR

ZHAO Wenyu^{1,2} YANG Chengye^{*1,2} WANG Wenjie^{1,2} Duoqi-Cidan³ CHENG Mingkai⁴

(1.College of Engineering, Xizang University, Lhasa 850000, China;

2.Tibetan Plateau Geological Resources and Energy Research Institute, Xizang University, Lhasa 850000, China;

3. The Third Geology Brigade of Xizang Autonomous Region, Lhasa 850000, China;

4.Meteorological Information and Network Center of Xizang Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

Abstract: The lower reaches of the Yarlung Tsangpo River are a typical plateau glacier-gorge region characterized by unique topography and geomorphology, steep vertical gradients, and frequent geological hazards. This study focuses on the core alpine-gorge region of the lower Yarlung Tsangpo River, extending from the Great Bend to central Medog, and uses the Small Baseline Subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) technique with Sentinel-1A ascending-orbit data acquired between 12 January 2020 and 8 July 2025 to study the surface deformation of this area. Time-series deformation analysis shows significant surface deformation in this region over the past five years. The results demonstrate that SBAS-InSAR technology can effectively identify deformation characteristics and potential geological hazards in glacier-gorge regions. A total of 34 potential geohazard sites were identified along both banks of the lower Yarlung Tsangpo River valley. Based on their overall deformation characteristics, the deformation zones were classified into three types: glacier-related U-shaped valley deformation zones, fluvial V-shaped valley deformation zones, and Quaternary depositional slope deformation zones affected by human activities. A typical hazard site was selected from each of the three deformation zones for detailed analysis. The results show a positive correlation between glacier melting, precipitation, as well as human activities and the acceleration of deformation at these sites. These findings can serve as a scientific reference for geohazard monitoring, mitigation, and prevention of geological hazards in the high-mountain cryospheric region of the lower Yarlung Tsangpo River.

Keywords: Lower reaches of the Yarlung Tsangpo River, SBAS-InSAR, glacier-gorge region, deformation monitoring

[责任编辑:索郎桑姆]