

doi: 10.6046/zrzyyg.2023241

引用格式: 杨辰, 金源, 邓飞, 等. 基于 SBAS InSAR 技术的叙古高速沿线滑坡识别与监测[J]. 自然资源遥感, 2025, 37(1): 161-168. (Yang C, Jin Y, Deng F, et al. Detection and monitoring of landslides along the Xuyong-Gulin Expressway using SBAS InSAR [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2025, 37(1): 161-168.)

# 基于 SBAS InSAR 技术的叙古高速沿线滑坡识别与监测

杨辰<sup>1,2</sup>, 金源<sup>3</sup>, 邓飞<sup>4</sup>, 史绪国<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院岩溶地质研究所/自然资源部广西岩溶动力学重点实验室, 桂林 541004; 2. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心/岩溶动力系统与全球变化国际联合研究中心, 桂林 541004; 3. 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430078; 4. 广东省佛山地质局, 佛山 528000)

**摘要:** 叙永—古蔺高速公路(叙古高速)位于四川盆地南缘, 线路周边地质条件复杂, 其安全运营受到地质灾害威胁, 因此, 叙古高速沿线地质灾害的识别分析具有十分重要的意义。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)技术具有全天时全天候、覆盖范围大和毫米级地表形变监测的优势, 在广域滑坡识别监测中发挥了重要作用。基于此, 采用小基线集(small baseline subset, SBAS)InSAR 技术对 2017 年 2 月—2020 年 9 月 Sentinel-1 升降轨数据集进行处理分析, 获取叙古高速沿线地表形变速率, 共探测到包括集美滑坡等在内的 18 处滑坡体, 分析发现滑坡形变主要与人为活动相关。结果同时表明, 升降轨数据结合有助于更准确地识别灾害点分布。随着数据的积累与技术的不断发展, InSAR 技术可以在地质灾害防治中发挥越来越重要的作用。

**关键词:** 滑坡探测; 合成孔径雷达干涉测量; 叙古高速; 小基线数据集

**中图法分类号:** TP 79; P 236 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2025)01-0161-08

## 0 引言

滑坡是指在斜坡上的岩体土体, 当受流水冲刷、降雨冲刷、地下水运动及地震等因素的影响时, 在重力作用下失稳而沿斜坡向下滑动的自然现象<sup>[1]</sup>。滑坡是我国分布最为广泛、数量最为庞大、危害最为严重的灾种之一<sup>[2]</sup>。根据自然资源部统计, 2020 年全国共发生地质灾害 7 840 起, 其中滑坡 4 810 起, 占比 61.35%<sup>[3]</sup>; 2021 年, 全国共发生地质灾害 4 772 起, 其中滑坡 2 335 起, 占比 48.93%<sup>[4]</sup>。1949—2011 年间, 我国由滑坡引起的死亡人数保守估计超过 25 000 人, 年均超过 400 人, 年均经济损失大约为 5 000 万美元<sup>[5]</sup>。山体滑坡和泥石流对人的生命和建筑物、高速公路等人工基础设施构成了极大的威胁, 严重危害人们的生命财产安全。为了减少滑坡带来的巨大损失, 亟需对大面积的坡体进行识别监测, 为滑坡防治提供支撑。

传统滑坡监测方法一般采用水准观测技术以及全球导航卫星系统(global navigation satellite system,

GNSS)共同构建的形变监测网对滑坡体进行长时间持续观测, 这 2 种方法可以得到高精度的形变监测结果<sup>[6]</sup>, 但一般适合监测已知滑坡, 对于地形陡峭的高山地区, 布设难度大、成本高。近景摄影测量方法和三维激光扫描技术能够获得滑坡体高精度的三维形变信息<sup>[7-8]</sup>, 比较直观地展现滑坡体的形态信息, 但是容易受到山区复杂地形环境的影响, 且监测工作受天气以及植被覆盖等因素限制。

合成孔径雷达干涉测量技术(interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)可以全天时全天候地对地表进行大范围长时间的观测, 获取厘米级或毫米级精度地表形变监测结果, 可以有效弥补常规滑坡监测方法的缺点, 因此 InSAR 技术在获取滑坡的时空形变特征和研究滑坡运动特征方面受到广泛关注<sup>[9]</sup>。然而传统的 InSAR 技术容易受到时间、空间失相关和大气延迟效应等因素的影响。时序 InSAR 技术通过利用 SAR 影像中的长时间保持相干或一定时间内保持相干的像素解决时空失相关等问题, 有效消除大气扰动带来的影响, 获得地表微小形变, 得到长时间序列的地表形变场。常见的时序 In-

收稿日期: 2023-08-02; 修订日期: 2023-11-06

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“云平台地质调查岩溶所节点运行维护与网络安全保障”(编号: DD20230720)和中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费重大项目“岩溶地质数据集成管理与共享服务系统”(编号: 2021004)共同资助。

第一作者: 杨辰(1989-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩溶地质信息化、岩溶区地质灾害识别监测。Email: ychen@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 金源(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事星载雷达干涉测量方法与应用研究。Email: jyuan@cug.edu.cn。

SAR 技术包括永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术(persistent scatterers InSAR, PS-InSAR)和小基线集合成孔径雷达干涉测量技术(small baseline subset InSAR, SBAS InSAR)<sup>[10-12]</sup>。相较于 PS-InSAR, SBAS InSAR 技术采用多主影像的组合方式,可以充分利用场景中的永久散射体和一定时间内保持相干的目标,更加适用于自然场景中形变监测<sup>[13-14]</sup>。

叙永—古蔺高速公路(叙古高速)沿线地势险峻,地质条件复杂,地质灾害多发。尤其是随着叙古高速的修建,沿线多处坡体出现形变迹象<sup>[15]</sup>,如集美隧道滑坡等。本文利用 SBAS InSAR 技术对 2017—2020 年 Sentinel-1 卫星升降轨数据进行分析,识别叙古高速周边滑坡分布信息,分析滑坡的形变特征,为叙古高速安全运营提供支撑。

## 1 研究区概况及数据源

研究区位于四川省泸州市古蔺县境内(E105°37'48"~105°51'36", N28°00'00"~28°07'12"),东西长约 22.6 km、南北宽约 13.2 km,面积近 300 km<sup>2</sup>。其中叙古高速位置如图 1 中紫线所示,全长为

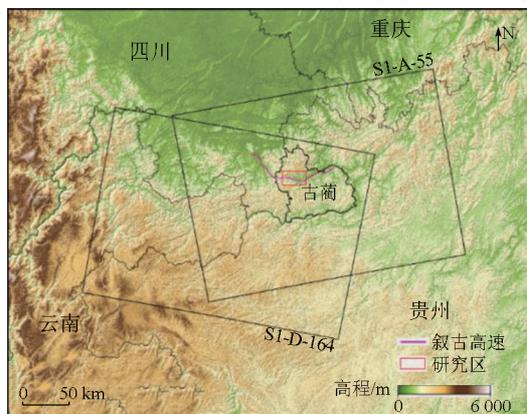
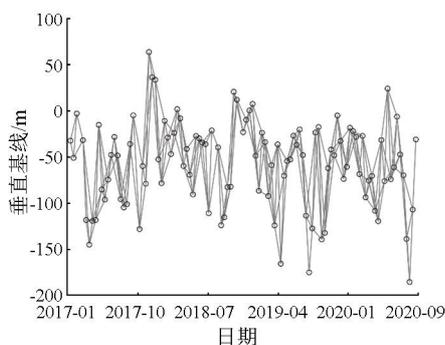


图 1 研究区示意图

Fig.1 Map of the study area



(a) 升轨

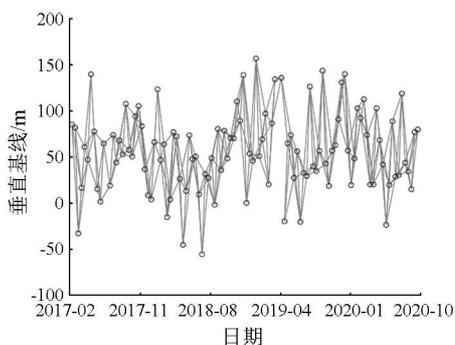
66.617 km,呈东西走向,贯穿整个研究区。研究区处于四川盆地最南缘,在四川盆地与云贵高原过渡带乌蒙山系大娄山西段北侧,境内海拔在 410~1 829 m 之间,高差起伏大,区域内地质、地形情况十分复杂,区域气候复杂多变,滑坡等地质灾害频频发生。根据已有的野外调查资料显示,研究区内存在多处地质灾害<sup>[16]</sup>,对叙古高速的安全运行以及周边居民生命财产安全造成严重威胁,阻碍了地方经济发展。

作为哥白尼全球对地观测项目中的重要组成部分, Sentinel-1 卫星分别于 2014 年 4 月 3 日和 2016 年 4 月 25 日发射升空,以干涉宽条带模式(interferometric wide swath, IW)为主要工作模式,距离向和方位向分辨率分别为 5 m 和 20 m,单星重访周期为 12 d,覆盖范围可达 250 km。本研究获取了 2017 年 2 月—2020 年 9 月期间覆盖研究区的 Sentinel-1 卫星 107 景升轨数据和 108 景降轨数据,2 组数据由欧洲空间局免费提供,基本信息如表 1 所示。本文将影像与时间最近的 2 幅影像进行组合形成如图 2 所示的升降轨数据干涉网络。本文获取了日本宇宙航空研究开发机构 AW3D 30 m 数字地表模型进行差分干涉图生成和地理编码。

表 1 Sentinel-1 数据基本信息

Tab.1 Basic information about Sentinel-1 data

轨道方向	升轨	降轨
轨道号	55	164
方位角/(°)	-12.6	-167.5
入射角/(°)	33.3	31.6
影像数量/景	107	108
时间跨度	2017-02-07— 2020-09-19	2017-02-26— 2020-09-26
参考影像日期	2018-12-23	2018-12-18



(b) 降轨

图 2 干涉对组合

Fig.2 Interferometric combinations

## 2 时序 InSAR 分析方法

Sentinel-1 IW 模式获取的 SAR 数据一般由 3 个子幅组成,且一般每个子幅包含 9 个 burst,覆盖范围约 250 km。由于 SAR 数据获取过程中卫星天线大幅摆动,每个 burst 内部的多普勒参数剧烈变化,要求相邻 burst 间在方位向的配准精度需达 0.001 像素。本文利用 AW3D 数字地表模型和精密轨道辅助的增强谱分析的方法,将数据集中的影像配准至表 1 所示的参考影像,干涉形成小基线数据集(图 2)。

本文采用振幅离差与时间相干性相结合的方式提取干涉图中的相干像素以及短时间内保持相干的像素。其中振幅离差指数  $D_A$  通过振幅标准差  $\sigma_A$  与振幅均值  $\mu_A$  计算得到<sup>[11]</sup>,即

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (1)$$

本文将  $D_A$  阈值设置为 0.6,当  $D_A$  小于设置的阈值时,该点纳入候选点集。相位的时间相干性可以利用缠绕相位进行估计。其中缠绕相位中的地表形变、部分高程误差、大气延迟及轨道误差在空间上是相关的,可以利用带通滤波估计,高程误差相位则通过基线与高程误差之间的线性关系估计。把上述 2 种分量从缠绕相位中移除,相位的时间相干性  $\gamma$  可以用相位残差  $\Phi_r$  估计,即

$$\gamma = \frac{1}{N} \left[ \sum_{i=1}^N \exp(j \cdot \Phi_r) \right] \quad (2)$$

式中:  $N$  为干涉图数量;  $j$  为虚数。本文将相干性阈值设置位置 0.3,大于 0.3 的像素被纳入最终像素集合,进行时间序列分析,并进行三维相位解缠<sup>[17]</sup>。任意像素的解缠相位  $\Phi$  可以表示为:

$$\Phi = \Phi_{\text{topo}} + \Phi_{\text{disp}} + \Phi_{\text{orb}} + \Phi_{\text{atm}} + \Phi_n \quad (3)$$

式中  $\Phi_{\text{topo}}$ ,  $\Phi_{\text{disp}}$ ,  $\Phi_{\text{orb}}$ ,  $\Phi_{\text{atm}}$  和  $\Phi_n$  分别为由高程误差、地表形变、轨道误差、大气和噪声引起的相位分量。干涉图中轨道误差是由星历信息不准确导致的,可通过式(4)二次多项式进行估计移除,即

$$\Phi_{\text{orb}} = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \quad (4)$$

式中:  $a_i (i=0, 1, \dots, 5)$  为二次多项式系数;  $x$  和  $y$  分别为方位向和距离向行列号。对于高程误差项,本文通过最小二乘构建基线和高程误差之间的线性方程获取,即

$$\Phi_{\text{topo}} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B}{R \sin\theta} \Delta h \quad (5)$$

式中  $B$ ,  $\Delta h$ ,  $\lambda$ ,  $R$  和  $\theta$  分别为垂直基线、高程误差、波长、斜距和入射角。本文采用时空滤波的方式估计大气。在移除上述误差分量后,时间序列形变以及速率可以通过最小二乘的方法获取。

## 3 结果与分析

### 3.1 叙古高速沿线平均形变速率

利用 Sentinel-1 数据和 SBAS InSAR 技术获取的叙古高速沿线雷达视线向的年平均形变速率如图 3 所示,图 3(a) 中升轨数据共选取到 311 497 个相干点目标,点密度约为 1 039 个/km<sup>2</sup>; 图 3(b) 中降轨数据共选取到 258 759 个相干点目标,点密度约为 863 个/km<sup>2</sup>。图 3 中,红色表示视线向形变为负值,表示该点沿远离卫星方向移动;蓝色表示视线向形变为正值,表示该点沿靠近卫星方向移动。通过对比升降轨 2 组结果,在大部分的形变区域,2 组数据的探测结果较为一致,但受到卫星拍摄角度以及研究区地形因素等影响,部分形变区域的视线向形变结果存在差别。考虑到监测误差的影响,设置形变速率阈值为 10 mm/a<sup>[18]</sup>,当形变速率绝对值大于 10 mm/a 时,将被识别为地质灾害点。根据设

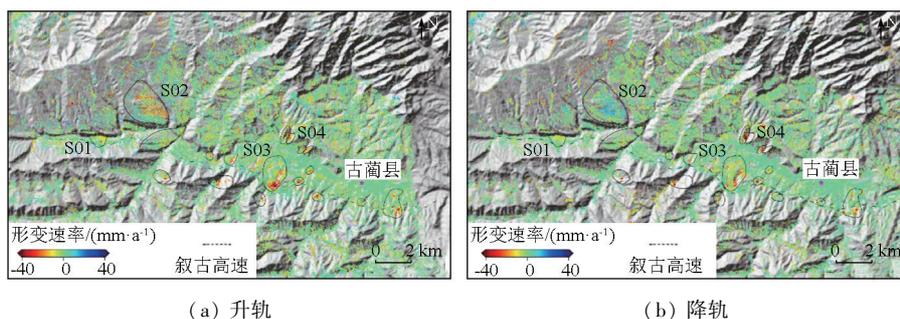


图 3 研究区形变速率

Fig.3 Mean displacement rate of the study area

置的形变速率阈值对升降轨数据集结果进行分析,在叙古高速周围共识别圈定了 18 处地质灾害点,如图 3 所示。并对其中的典型形变区进行编号,其中集美隧道滑坡 S01 位于一处古滑坡处;滑坡体 S02 位于德耀镇凤凰村,探测到的形变区域面积最大,约为 2.6 km<sup>2</sup>;滑坡体 S03 位于古蔺县客运站,形变最明显,升降轨雷达视线向最大形变速率分别为 -64 mm/a 和 -45 mm/a;滑坡体 S04 位于城区北侧

的山谷。

根据谷歌地球光学影像对 InSAR 的识别结果进行核验,部分区域 InSAR 识别结果与光学影像的对比如图 4 所示,使用红色虚线划定了 InSAR 结果中形变范围,对照光学影像发现,划定的形变范围与光学影像上坡体的裸露范围相吻合,裸露的坡体存在继续形变的隐患,需要加强地面调查监测,预防滑坡地质灾害的发生。

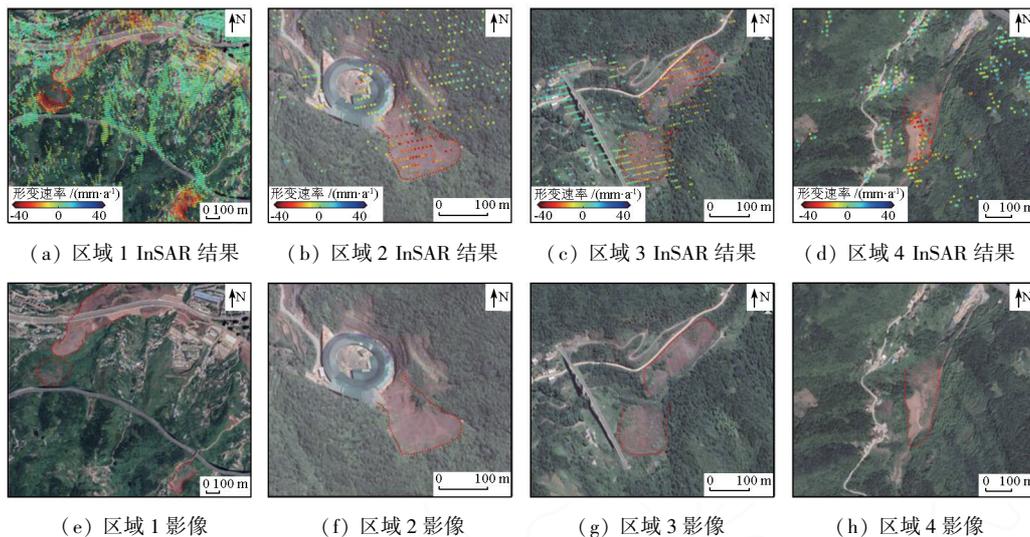


图 4 InSAR 识别结果与光学影像对比

Fig.4 Comparison between InSAR results and optical images

### 3.2 典型滑坡时序形变特征分析

滑坡体 S01 位于古蔺县德耀镇集美村的集美隧道,经地质调查发现,该坡体属于古滑坡,总坡度约为 21°,呈阶梯状,滑坡长约 550~980 m,宽约 400~900 m。集美隧道位于古滑坡体后方,在隧道通过滑坡时,由于隧道开挖形成临空面,引起隧道右侧土体变形、地表开裂,以及隧道开裂变形。形变主要集中在滑坡体后缘,2015 年 1—10 月间,后缘最大位移达到了 57.9 cm<sup>[15]</sup>。2016 年,对滑坡采用分级清方、

分级支挡等加固措施,以确保隧道顺利开通运行<sup>[19]</sup>。图 5 所示为加固措施之后的形变结果,滑坡体后缘已经趋于稳定,形变主要集中在滑坡的前缘,说明加固措施对滑坡的形变起到了减缓作用。形变区域呈现扇形,升降轨数据集探测到的最大形变分别为 -34 mm/a 和 -28 mm/a。图 6 给出了滑坡体前缘 P1 点的时序形变,发现升降轨数据探测到的形变趋势一致,均呈现衰减趋势,表明集美隧道滑坡前缘形变区域的形变出现减缓趋势。

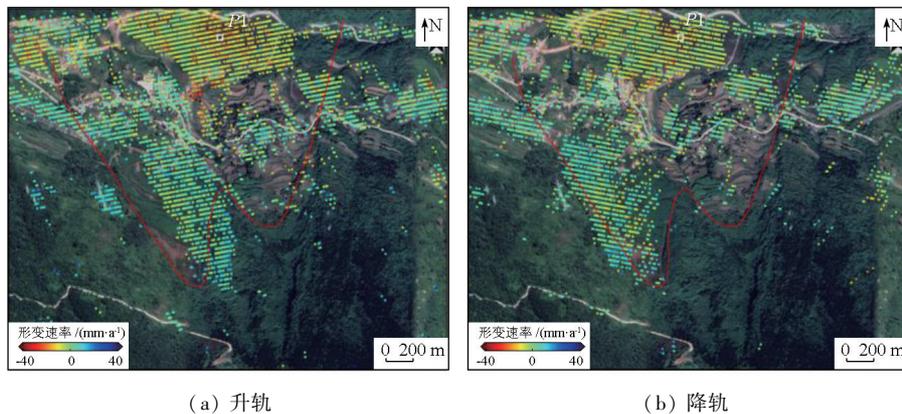


图 5 集美隧道滑坡形变速率

Fig.5 Mean displacement rate of Jimei tunnel landslide

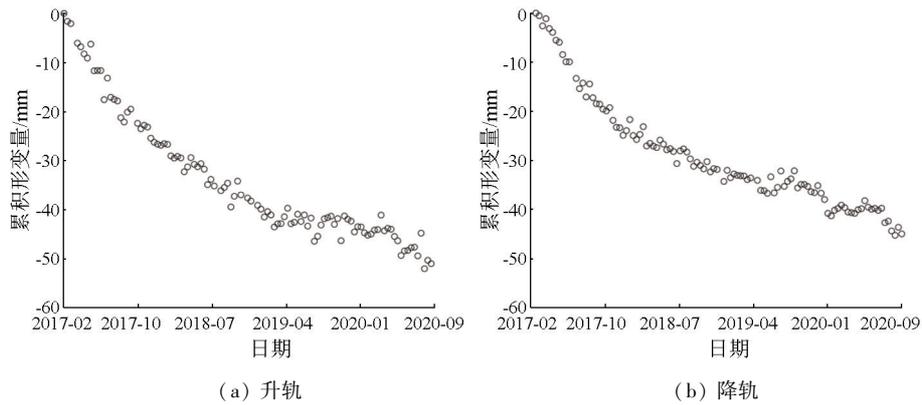


图6 集美隧道滑坡 P1 点时序形变结果

Fig.6 Time-series displacement at P1 of Jimei tunnel landslide

滑坡体 S02 位于古蔺县德耀镇东北部凤凰村,在叙古高速北面,坡体呈东西走向,整体西高东低,平均坡度为  $14^\circ$ ,获取的形变速率结果如图 7 所示,形变主要集中在滑坡体中部。滑坡体朝向东侧,在升轨结果中,视线向形变结果为负值,呈远离卫星方向运动,最大形变速率达到  $-43 \text{ mm/a}$ ,而在降轨道结果中,视线向形变结果为正值,呈靠近卫星方向运

动,最大形变速率达到  $29 \text{ mm/a}$ 。图 8 给出了凤凰村滑坡 P2 点的时序形变结果,升轨结果为负值,累积形变量达到了  $-100 \text{ mm}$ ,降轨结果为正值,累积形变量达到了  $63 \text{ mm}$ ,表明该处坡体主要沿东方向滑动。坡体上村落聚集,需要对其进行定期观测,预防潜在的地质灾害。

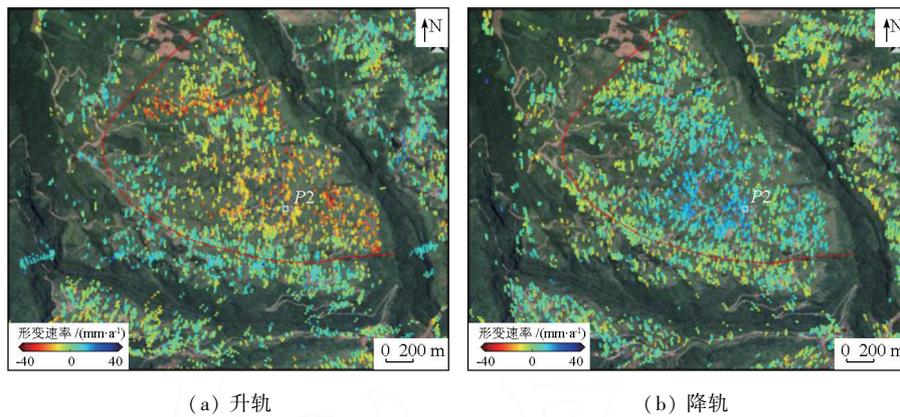


图7 凤凰村滑坡形变速率

Fig.7 Mean displacement rate of Fenghuang Village

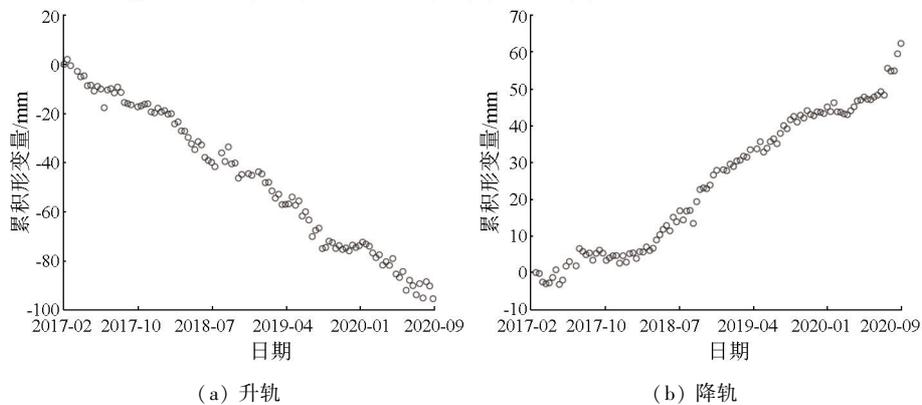


图8 凤凰村 P2 点时序形变结果

Fig.8 Time-series displacement at P2 of Fenghuang Village

滑坡体 S03 位于叙古高速北侧,是一处南北走向的坡体,形变结果如图 9 所示,升降轨视线向最大

形变速率分别达到  $-64 \text{ mm/a}$  和  $-45 \text{ mm/a}$ ,形变区域主要集中在古蔺县西区客运站周围。获取该处区

域 P3 点的时序形变结果如图 10 所示,受到观测角度的影响,升降轨数据获取的视线向累积形变值分别为-160 mm 和-90 mm。同时,升降轨时序形变显

示该区域在 2019 年存在加速现象,这与客运站建设运行的时间相吻合,推测客运站的建设以及后续持续增加的人类活动,加剧了该处边坡的形变。

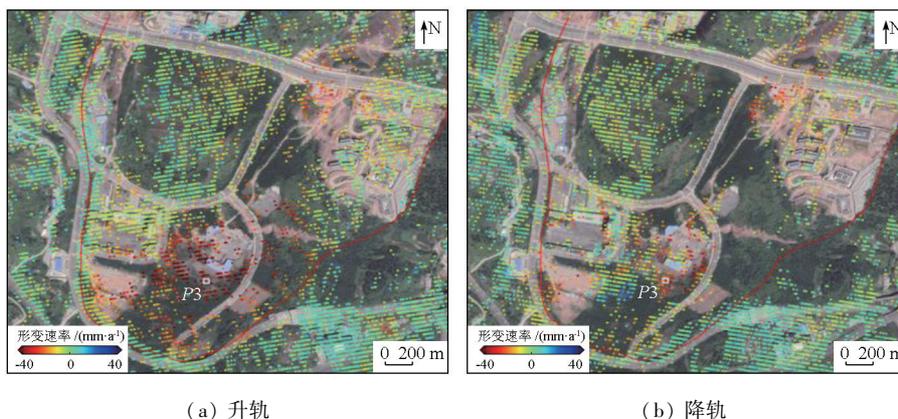


图 9 客运站滑坡形变速率

Fig.9 Mean displacement rate of passenger station landslide

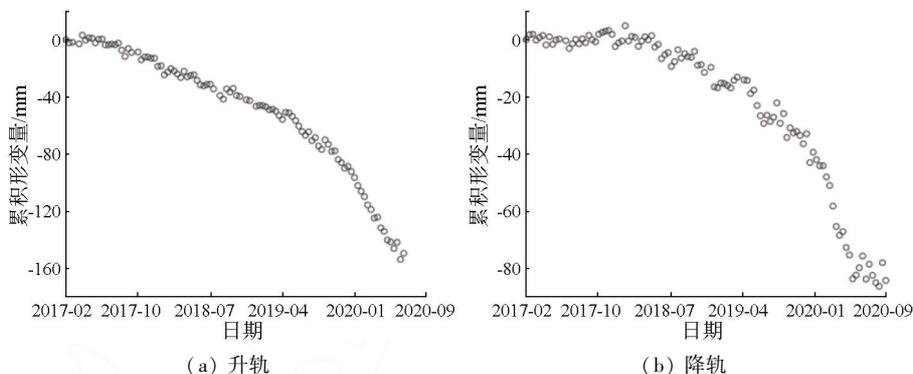


图 10 客运站滑坡 P3 点时序形变结果

Fig.10 Time-series displacement at P3 of passenger station landslide

滑坡体 S04 位于古蔺县城北部的官地嘴,在其东南侧的小坪子也检查到形变,形变结果如图 11 所示,2 处形变点(P4,P5)均位于山谷,山谷大体呈东北—西南走向,在 2 处山谷的东西两侧探测到形变,由于山谷的地形特点,升轨结果中主要探测到山谷东侧的形变,而降轨结果主要探测到山谷西侧的形变。升降轨探测结果中,官地嘴处坡体的视线向最

大形变速率分别为-43 mm/a 和-85 mm/a;小坪子处坡体在视线向最大形变速率分别为-37 mm/a 和-50 mm/a。图 12 展示的这 2 处形变点(P4,P5)的时序结果表明 2 处坡体在持续发生形变,2 处坡体北高南低,南侧坡脚紧邻古蔺县城区,需要进一步监测,预防潜在的地质灾害。

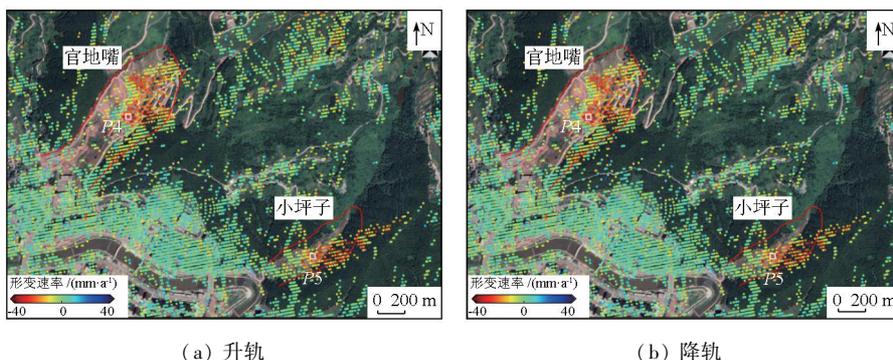


图 11 官嘴地与小坪子滑坡形变速率

Fig.11 Mean displacement rate of Guandizui and Xiaopingzi

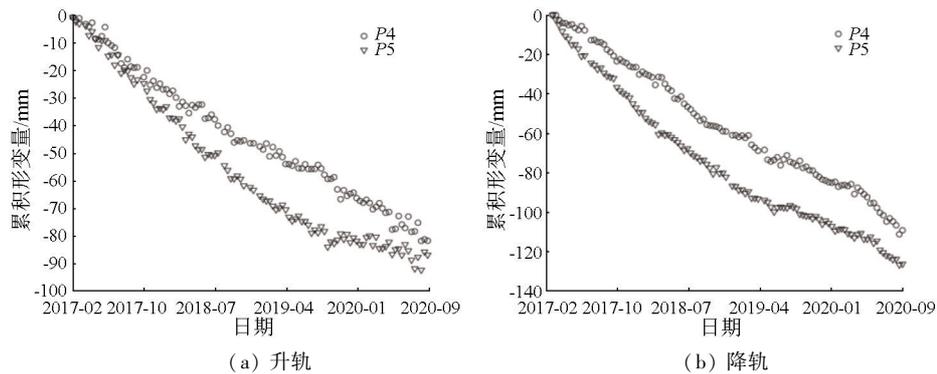


图 12 官嘴地 P4 点与小坪子 P5 点时序形变结果

Fig.12 Time-series displacement at P4 of Guandizui and P5 of Xiaopingzi

## 4 结论

本文利用 SBAS InSAR 方法分别分析了覆盖叙古高速沿线的 Sentinel-1 升降轨数据集,获取了沿线形变速率,并据此探测出 18 处滑坡。研究发现滑坡体多为裸露的坡体,主要与道路建设和村落扩张等人类活动相关。其中集美隧道处滑坡经过治理,形变集中在滑坡前缘,且形变处于减缓趋势;客运站处滑坡体在 2019 年存在明显加速现象,主要与客运站的建设和运行有关。对比升降轨形变结果可以发现,单轨道的探测结果容易受到自身拍摄角度和地形影响,升降轨数据结合能获得更好的探测结果。同时,结合光学影像以及相关资料,发现识别到的滑坡体多为裸露的坡体,需要进一步的监测,预防潜在的地质灾害。本文的研究表明,不断积累的 InSAR 数据可为大范围地质灾害识别监测提供重要保障。

### 参考文献 (References):

- [1] 郭澳庆,胡俊,郑万基,等.时序 InSAR 滑坡形变监测与预测的 N-BEATS 深度学习法——以新铺滑坡为例[J].测绘学报, 2022, 51(10): 2171-2182.  
Guo A Q, Hu J, Zheng W J, et al. N-BEATS deep learning method for landslide deformation monitoring and prediction based on InSAR: A case study of Xinpu landslide[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2022, 51(10): 2171-2182.
- [2] 孙倩.多基线、多时相和多平台 InSAR 滑坡监测研究[J].地理与地理信息科学, 2018, 34(1): 127.  
Sun Q. Investigation of landslides with multi-baseline, multi-temporal and multi-sensor InSAR[J]. Geography and Geo-Information Science, 2018, 34(1): 127.
- [3] 中国地质调查.2020 年全国地质灾害灾情及 2021 年趋势预测 [EB/OL]. (2021-01-14) [2023-11-03]. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzUzNjA0NTkzNg=&mid=2247501863&idx=2&sn=6e5cbb29e28a88dc69f35b29b9590b0&chksm=fafeb838cd89312e140bd2c2070f4f864eca1d90e0080dd7c4ad19bb35ae14d9415236eebb3c&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUzNjA0NTkzNg=&mid=2247501863&idx=2&sn=6e5cbb29e28a88dc69f35b29b9590b0&chksm=fafeb838cd89312e140bd2c2070f4f864eca1d90e0080dd7c4ad19bb35ae14d9415236eebb3c&scene=27).

Geological Survey of China. National geological hazard disasters in 2020 and trend forecast for 2021 [EB/OL]. (2021-01-14) [2023-11-03]. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzUzNjA0NTkzNg=&mid=2247501863&idx=2&sn=6e5cbb29e28a88dc69f35b29b9590b0&chksm=fafeb838cd89312e140bd2c2070f4f864eca1d90e0080dd7c4ad19bb35ae14d9415236eebb3c&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzUzNjA0NTkzNg=&mid=2247501863&idx=2&sn=6e5cbb29e28a88dc69f35b29b9590b0&chksm=fafeb838cd89312e140bd2c2070f4f864eca1d90e0080dd7c4ad19bb35ae14d9415236eebb3c&scene=27).

- [4] 自然资源部.2021 年全国地质灾害灾情及 2022 年地质灾害趋势预测 [EB/OL]. (2022-01-13) [2023-11-03]. [http://news.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202201/t20220113\\_2717375.html](http://news.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202201/t20220113_2717375.html).  
Ministry of Natural Resources. National geological hazard disasters in 2021 and forecast of geological hazard trends in 2022 [EB/OL]. (2022-01-13) [2023-11-03]. [http://news.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202201/t20220113\\_2717375.html](http://news.mnr.gov.cn/dt/ywbb/202201/t20220113_2717375.html).
- [5] 徐淑梅,肖琳,李程程,等.我国两种典型地质灾害区划技术发展现状述评[J].自然灾害学报, 2017, 26(2): 22-31.  
Xu S M, Xiao L, Li C C, et al. Status review on two kinds of typical geological hazard zoning techniques in China [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(2): 22-31.
- [6] 李海洋,聂桂根.西山村大型滑坡体 GPS 监测数据处理与预测模型建立[J].测绘地理信息, 2019, 44(6): 117-119.  
Li H Y, Nie G G. Coordinate model analysis of GPS monitoring for large landslide in Xishan Village [J]. Journal of Geomatics, 2019, 44(6): 117-119.
- [7] 王庆国,赵海,李健平.地面激光点云与航空影像相结合的滑坡监测[J].测绘通报, 2019(4): 99-102.  
Wang Q G, Zhao H, Li J P. Landslide monitoring by merging ground laser point cloud and aerial image [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(4): 99-102.
- [8] 赵瑞英.三维激光扫描技术在滑坡检测中的应用研究[D].兰州:兰州交通大学, 2017.  
Zhao R Y. Research about 3D laser scanning technology in landslide monitoring [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2017.
- [9] Qu T, Xu Q, Liu C, et al. Radar remote sensing applications in landslide monitoring with multi-platform InSAR observations: A case study from China [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2019, XLII-2/W13: 1939-1943.
- [10] Berardino P, Fornaro G, Lanari R, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote

- Sensing, 2002, 40(11): 2375–2383.
- [11] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry [C]//IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2002: 1528–1530.
- [12] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture Radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos [J]. Journal of Geophysical Research; Solid Earth, 2007, 112(B7): B07407.
- [13] 代 聪, 李为乐, 陆会燕, 等. 甘肃省舟曲县城周边活动滑坡 InSAR 探测 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2021, 46(7): 994–1002.
- Dai C, Li W L, Lu H Y, et al. Active landslides detection in Zhouqu County, Gansu Province using InSAR technology [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7): 994–1002.
- [14] 石固林, 徐 浪, 张璇钰, 等. 西山村滑坡时序形变的 SBAS-InSAR 监测 [J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 93–98, 105.
- Shi G L, Xu L, Zhang X Y, et al. Monitoring time series deformation of Xishancun landslide with SBAS-InSAR [J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(2): 93–98, 105.
- [15] Wang Z F, Shi F G, Li D D, et al. Tunneling-induced deep-seated landslides: A case study in Gulin County, Sichuan, China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(19): 1039.
- [16] 温 鑫, 范宣梅, 陈 兰, 等. 基于信息量模型的地质灾害易发性评价: 以川东南古蔺县为例 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 290–299.
- Wen X, Fan X M, Chen L, et al. Susceptibility assessment of geological disasters based on an information value model: A case of Gulin County in Southeast Sichuan [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 290–299.
- [17] Hooper A, Zebker H A. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series [J]. Journal of the Optical Society of America A – Optics Image Science and Vision, 2007, 24(9): 2737–2747.
- [18] 易邦进, 黄 成, 傅 涛, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的中缅边境山区地质灾害隐患探测 [J]. 自然资源遥感, 2023, 35(4): 186–191. doi: 10.6046/zrzyyg.2022261.
- Yi B J, Huang C, Fu T, et al. Detecting potential geological hazards in mountainous area close to the China–Myanmar border using time series InSAR technology [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(4): 186–191. doi: 10.6046/zrzyyg.2022261.
- [19] 泸州市交通运输局. 叙古高速公路集美隧道变形综合处治方案专家评审会在成都召开 [EB/OL]. (2016-01-14) [2023-11-03]. [https://jtj.luzhou.gov.cn/gzdt/jtxw/content\\_264526](https://jtj.luzhou.gov.cn/gzdt/jtxw/content_264526).
- The Bureau of Communications and Transportation in Luzhou. Xu-Gu expressway Jimei tunnel deformation comprehensive treatment plan expert review meeting held in Chengdu [EB/OL]. (2016-01-14) [2023-11-03]. [https://jtj.luzhou.gov.cn/gzdt/jtxw/content\\_264526](https://jtj.luzhou.gov.cn/gzdt/jtxw/content_264526).

## Detection and monitoring of landslides along the Xuyong–Gulin Expressway using SBAS InSAR

YANG Chen<sup>1,2</sup>, JIN Yuan<sup>3</sup>, DENG Fei<sup>4</sup>, SHI Xuguo<sup>3</sup>

(1. Institute of Karst Geology, CAGS/ Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin 541004, China; 2. International Research Centre on Karst under the Auspices of UNESCO/National Center for International Research on Karst Dynamic System and Global Change, Guilin 541004, China; 3. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China; 4. Bureau of Foshan Geological Survey, Guangdong Province, Foshan 528000, China)

**Abstract:** The Xuyong–Gulin (Xugu) Expressway, located along the southern margin of the Sichuan Basin, faces complex geological conditions, with its safe operation threatened by geologic hazards. Therefore, the identification and analysis of geologic hazards along the expressway holds great significance. Interferometric synthetic aperture Radar (InSAR) technique enjoys the advantages of all-weather, all-time observation capabilities, wide coverage, and mm-scale surface deformation monitoring, playing an important role in wide-field landslide detection and monitoring. Based on this, this study processed the Sentinel-1 ascending and descending datasets from February 2017 to September 2020 using the small baselines subset (SBAS) InSAR technique. As a result, the surface deformation rates along the expressway were determined, and 18 landslides were identified. The analysis indicates that the deformations of landslides are related to anthropogenic activities. The analytical results also reveal that the combination of ascending and descending datasets allows for more accurate identification of landslide distribution. With the continuous data accumulation and technological development, InSAR is expected to play an increasingly important role in the prevention and control of geologic disasters.

**Keywords:** landslide detection; interferometric synthetic aperture Radar; Xugu Expressway; small baseline subset (责任编辑: 陈 庆)