

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.069>



基于 SBAS-InSAR 技术的成汶高速汶川段滑坡易发区选线研究

刘沛源, 常 鸣*, 武彬彬, 罗超鹏, 周 超

成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川成都 610059

摘要: 西南山区地质构造复杂导致大量的滑坡分布。为了科学有效的指导西南山区道路选线, 提前规避地质灾害高风险, 滑坡灾害早期识别必不可少。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术因其全天候、多时相等特点被广泛应用于滑坡灾害的早期识别中。收集了 87 景 Sentinel-1A 降轨数据, 利用差分干涉测量短基线集时序分析(small baseline subset interferometric synthetic aperture radar, SBAS-InSAR)技术对成汶高速路汶川段进行形变区的识别与分析, 结果显示共识别出 10 处, 经野外复核均为处于持续变形中的滑坡, 有较好的一致性。根据早期识别结果, 对 3 个比选方案进行综合对比分析, 确定方案 B 为最优选择。SBAS-InSAR 技术能有效识别山区公路潜在滑坡隐患区, 为山区公路的准确选线提供科学依据。

关键词: 高速公路选线; 滑坡隐患; 差分干涉测量短基线集时序分析; 时序形变分析; 工程地质。

中图分类号: P642.23

文章编号: 1000-2383(2022)06-2048-10

收稿日期: 2021-11-07

Route Selection of Landslide Prone Area in Wenchuan Section of Chengdu-Wenchuan Expressway Based on SBAS-InSAR

Liu Peiyuan, Chang Ming*, Wu Binbin, Luo Chaopeng, Zhou Chao

State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: The complex geological structure in the southwest mountainous area leads to the distribution of many landslides. Early landslide identification is essential to guide road route selection scientifically and effectively and avoid the high risk of geological disaster in advance. Interferometry Synthetic Aperture Radar (InSAR) is widely used in the early identification of landslides due to its all-weather and multi-temporal characteristics. In this paper, 87 sentinel-1A orbital descent data are collected. The small baseline subset interferometric synthetic aperture radar (SBAS-InSAR) is used to identify and analyze the potential landslide hazard in the Wenchuan section of Chengwen expressway. 10 deformation areas were identified through the SBAS-InSAR, which after field validation are landslides under continuous deformation. This conclusion corresponds to the actual case. Based on early

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究任务(No.2021QZKK0201); 国家自然科学基金项目(Nos.U21A2032, 42077245); 四川省科技厅重点研发计划项目(No.2020YFS0387)。

作者简介: 刘沛源(1997—), 硕士研究生, 主要从事遥感与地质灾害早期识别研究。ORCID: 0000-0001-5409-2682. E-mail: liupeiyuan@scut.edu.cn

***通讯作者:** 常鸣, 副教授, 博士, 主要从事地质灾害早期识别与地质灾害防治研究工作。E-mail: changmxq@126.com

引用格式: 刘沛源, 常鸣, 武彬彬, 罗超鹏, 周超, 2022. 基于 SBAS-InSAR 技术的成汶高速汶川段滑坡易发区选线研究. 地球科学, 47(6): 2048–2057.

Citation: Liu Peiyuan, Chang Ming, Wu Binbin, Luo Chaopeng, Zhou Chao, 2022. Route Selection of Landslide Prone Area in Wenchuan Section of Chengdu-Wenchuan Expressway Based on SBAS-InSAR. *Earth Science*, 47(6): 2048–2057.

identification results, three schemes are compared and analyzed, and scheme B is optimal. SBAS-InSAR can effectively identify potential landslide hazard areas of mountain roads and provide scientific support for accurate route selection of mountain expressways.

Key words: highway route selection; potential landslides; SBAS-InSAR; time series deformation analysis; engineering geology.

0 引言

随着我国西南山区近年来的经济快速发展,工程活动愈加频繁,对地质环境的扰动加大,加之全球气候不断恶化,滑坡等地质灾害发生的频率逐年上升(殷坤龙等,2000;黄润秋,2007),不仅在山区人口聚集区地质灾害易发生,而且在许多山区道路旁地质灾害也是频发。2015年1月4日遵赤高速路段发生山体滑坡,造成重大损失;2020年6月3日兰海高速路段发生山体滑坡,导致多人受伤。诸如此类的事件还有很多,因此高速公路修建前期对滑坡灾害隐患的识别、排查,据此合理规划路线显得尤为重要,能有效减少灾害带来的损失(许强等,2019;孟晖等,2021)。

传统的监测手段主要分为两类,接触式形变监测(陈强等,2012;陶延林和张明,2019)和非接触式形变监测(Galarreta *et al.*, 2015;霍东平等,2015),如全站仪、水准仪、GPS、无人机倾斜摄影测量等(董秀军等,2019)。这些技术虽然对小范围内已知地质灾害有良好的监测效果,但其局限性也很明显,均需要现场测量,无法对大区域进行有效的形变监测,且每次监测工程需要消耗大量的人工和时间成本(Ma *et al.*, 2019)。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)作为一种空间对地观测技术,以其高精度、多时相、全天候、覆盖范围广的特点,大量应用于滑坡等地质灾害的形变监测中,取得良好的成效(Bürgmann *et al.*, 2000; Guo *et al.*, 2017)。早期基于干涉原理的D-InSAR(differential interferometry synthetic aperture radar)技术由于去相干因子和大气延迟效应这两个主要误差源的影响,使其精度限制在分米到厘米级,局限了该技术在地质灾害中的应用(王桂杰等,2010;朱建军等,2017;李达等,2018;师芸等,2019)。为了解决这一系列问题,多时相InSAR(multi-temporal interferometry synthetic aperture radar, MT-InSAR)技术应运而生(林晖等,2017),由Ferretti *et al.*(1999)提出的以单一影像为主影像的PS-InSAR以及由Berardino *et al.*(2002)提出的以多幅

影像为主的SBAS-InSAR均较好地抑制大气延迟、失相关噪声等误差。该技术方法在实际案例中得到了良好的应用,Chen *et al.*(2012)将MT-InSAR技术应用于青藏高原,监测其冻土沉降以及铁路的稳定性,并得出了两者之间的联系;刘筱怡等(2017)采用SBAS-InSAR技术获取了鲜水河断裂带内蠕滑型滑坡的形变特征,为后期防治工作提供了有效依据;冯文凯等(2020)利用SBAS-InSAR技术分析了金沙江沃达滑坡复活区整体和局部滑塌地表形变速率、累计位移变化趋势。同时遥感技术已成为道路选线及工程勘察设计的一种重要手段,吕希奎和陈进杰(2015)利用遥感技术和数字摄影测量技术建立三维真实地形及地理环境,虚拟道路选线;刘桂卫(2016)在铁路地质勘察中,将高分辨率遥感和三维遥感相结合,对不良地质现象进行解译圈定,为铁路地质选线提供了参考。

为了科学选择合理的高速线路,本文采用SBAS-InSAR技术,利用Sentinel-1A降轨雷达卫星影像对成汶高速汶川段的形变区进行探测,结合遥感影像以及野外复核验证,最终确定了滑坡隐患的位置及其发育特征,为高速公路科学选线提供重要参考依据。

1 研究区概况和实验数据

1.1 研究区概况

本次研究区位于四川省汶川县城附近,基本情况如图1所示,中心点坐标 $31^{\circ}28'36.19''N$, $103^{\circ}35'23.56''E$,面积 80.83 km^2 。研究区地处龙门山构造带,是四川盆地与青藏高原东部边缘的交接地带,构造活动极为复杂,由于汶川—茂县断裂带贯穿汶川,使其地形切割严重,山地发育,沟谷纵横(殷跃平等,2009;于明羽等,2021)。该区域属于亚热带湿润季风气候,受季风影响,夏季高温多雨,气候潮湿,多年平均降水量1400 mm以上。汶川地区的平均植被覆盖度为41.3%,属于中等植被覆盖度区域,采用的Sentinel-1A雷达数据波长为5.6 cm,适用于研究。区域内地层发育较为完整,岩性变化大,分布较为广泛的是第四系松散地层以及强风化岩浆岩

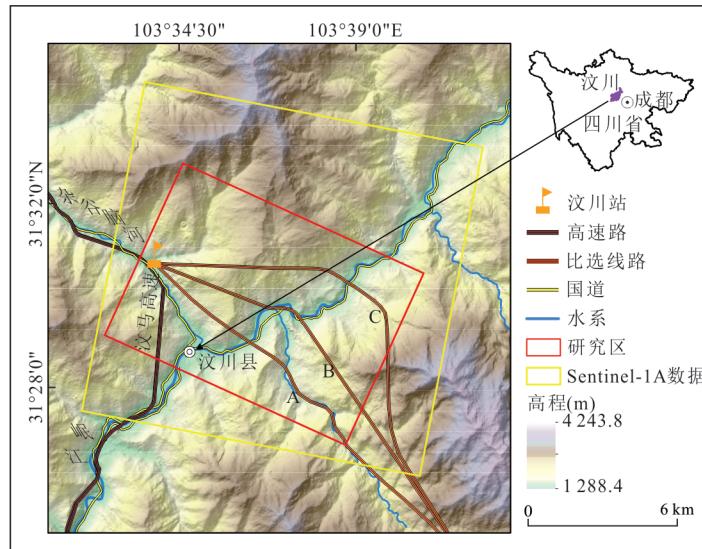


图 1 研究区域及 SAR 数据覆盖范围

Fig.1 Research area and coverage of SAR datasets

为代表的软弱岩土体(程思和易加强,2007).无论是地形地貌、地质构造、还是气象水文等,这些因素都为该区域滑坡灾害的发生提供了有利条件,使其成为我国滑坡灾害高发区域之一.

G4217都汶高速是目前成都市北向与阿坝州相连的唯一的高速公路,交通负荷日益严重.由于“5·12”大地震后的影响,映秀至汶川段滑坡、泥石流、水毁频发,断道现象时有发生,高速公路沿线抗灾能力不足,严重影响了都汶高速的通行能力.同时该走廊位于高山峡谷地段以及龙门山活动断裂带内,已布设有一条国家高速和普通国道,扩能改造极为困难,所以新建一条成都与汶川的高速公路通道是非常必要的.经过前期设计,拟建高速以成都市区为起点,过彭州城区后经牛圈沟、麦地沟,最后与都汶高速相连通.其中麦地沟至都汶高速段由于滑坡灾害隐患发育,为了选择合适的线路,初步设计了3种方案,具体路线见图1.

1.2 实验数据

本次 SBAS-InSAR 采用欧洲航天局发布的 Sentinel-1A 雷达数据,相关参数如表 1 所示,该系列卫星与其他卫星相比,较大的优点是时间间隔短且覆盖范围广.共选取了 87 景降轨 SAR 影像,时间跨度从 2018 年 3 月 22 日至 2021 年 2 月 22 日,最大时间间隔 1 068 d.研究中使用 30 m 分辨率的 STRM1-DEM,以消除干涉处理过程中的地形相位,以及后期进行地理编码.同时获取了该研究区的高分 2 号光学遥感影像,用于与 InSAR 处理结果相互验证.

表 1 研究区 SAR 数据参数

Table 1 SAR data parameters in the study area

轨道方向	成像模式	波段	波长(cm)	地面分辨率(m)	重访周期(d)	视角(°)	极化方式
降轨	IW	C	5.6	5×20	12	39	VV

2 数据处理

2.1 SBAS 数据处理过程

为了减少时间与空间去相干对 InSAR 处理结果的影响,SBAS-InSAR 技术以影像之间的时间和空间基线不同(Wang *et al.*, 2021),将所收集的 SAR 影像按短时空基线原则分成短基线子集.针对 Sentinel-1A 数据预处理时,因其精确的轨道控制且搭载较短波长的 C 波段 SAR,将时间基线阈值设置为 70 d,空间基线阈值设置为 2%,能保持较好的相干性,其空间基线连接结果如图 2 所示.每一个子集有单独的主影像,影像之间进行差分干涉处理,这样不仅增加了干涉对的数量而且增强了相干性.再对所得的干涉对进行差分解缠,用最小二乘法获得各个集合的地表形变序列.为了提高数据的采样分辨率,将各个小基线数据集连接起来,利用奇异值分解法求得形变值(王如意,2015;陆会燕等,2019;史绪国等,2019).采用时空滤波估计和去除大气延迟相位,得到地形高程误差和形变序列信息,从而获得最终的变形结果,处理流程如图 3 所示.

2.2 SBAS 处理结果

该区域整体形变速率为图 4 所示,形变速率为

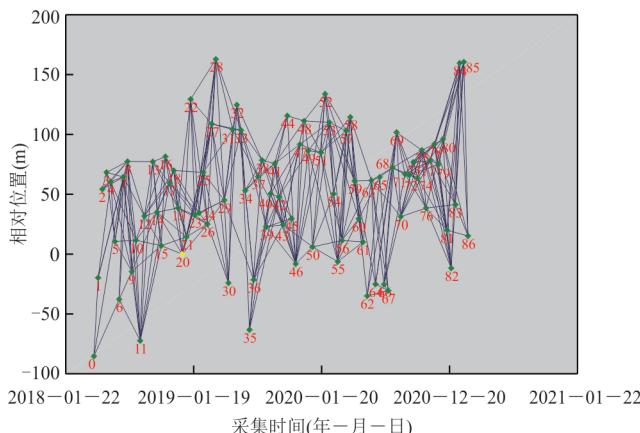


图2 影像采集时间与空间相对位置

Fig.2 The relative position of time and space of image acquisition

负值表示该点的运动方向沿视线向远离卫星,正值表示该点的运动方向沿视线向靠近卫星。通过 InSAR 技术共识别出 10 处变形区,结合遥感影像与野外现场验证,以上变形区均为滑坡地质灾害,图 4 为滑坡无人机全景照片,相关信息见表 2,本文重点对威胁及规模较大的两处滑坡进行分析。

2.3 典型滑坡分析

2.3.1 H4 月里村滑坡

月里村滑坡位于汶川县麦

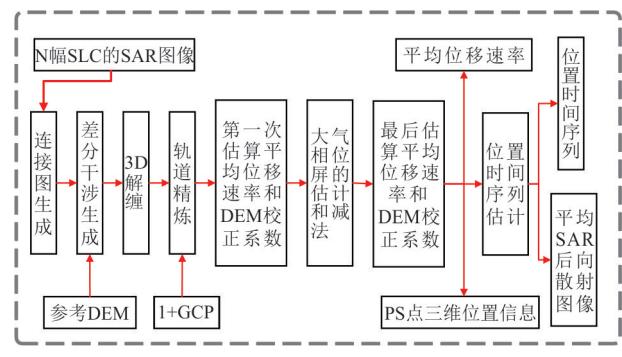


图3 SBAS-InSAR 处理流程

Fig.3 Processing flow chart of SBAS-InSAR technology

地沟右岸,呈典型的圈椅状,滑坡前缘高程为 1 469 m,后缘高程为 2 169 m,相对高差约 700 m,纵长约 2 km,横宽约 0.6 km,体积约 3 600 万 m³,主滑方向为 280°,为特大型岩质滑坡(图 5)。滑坡后缘为基岩陡壁,右侧以陡坎为界,左侧以冲沟为界,剪出口位于麦地沟沟道附近。滑体上部平坦,坡度 8°~12°,中部呈阶梯状,坡度 10°~20°,下部较缓,地形坡度 10°~15°。综合 InSAR 结果与现场调查,推测为一古滑坡体。在坡体的主剖面位置选取 3 个控制点进行现场复核,P₁ 处形变速率为 $-25.22 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,公路受上方整体滑动挤压导致

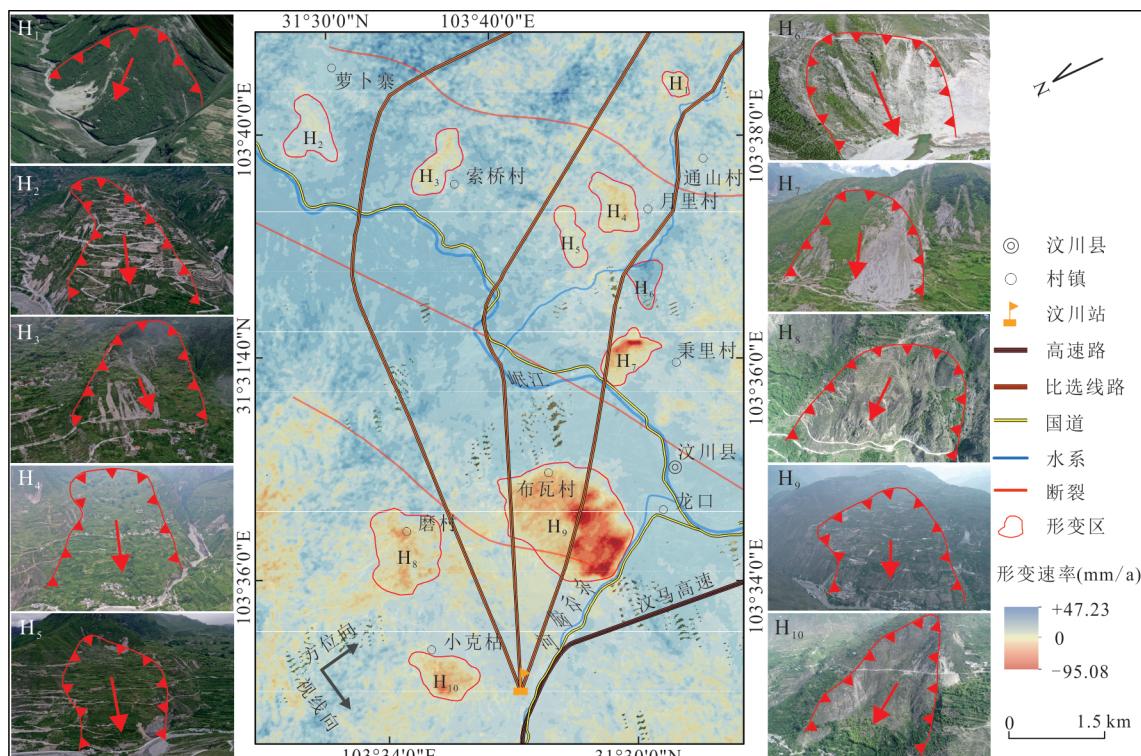


图4 研究区时序 InSAR 形变分布及野外复核照片

Fig.4 InSAR deformation distribution and field validation in the study area

表 2 基于 InSAR 技术识别的滑坡隐患基本特征信息

Table 2 Basic characteristics of potential landslides detected by InSAR

滑坡隐患编号	滑坡名称	经度	纬度	规模类型	滑坡方量($10^4 m^3$)	最大累计形变量(mm)
H1	通山村滑坡	103°38'55.69"	31°27'18.55"	大型土质滑坡	483.44	-125.13
H2	萝卜寨滑坡	103°40'02.64"	31°30'16.14"	特大型岩质滑坡	1 304.70	-98.454
H3	索桥村滑坡	103°39'06.88"	31°29'28.41"	特大型岩质滑坡	982.68	-115.38
H4	月里村滑坡	103°38'04.41"	31°28'16.24"	特大型岩质滑坡	3 641.67	-146.95
H5	月里村北侧滑坡	103°37'56.05"	31°28'40.74"	大型岩质滑坡	840.80	-89.64
H6	白水村滑坡	103°37'17.37"	31°28'13.55"	大型岩质滑坡	329.12	90.62
H7	秉里村滑坡	103°36'41.48"	31°28'37.77"	大型土质滑坡	613.43	-258.54
H8	磨村滑坡	103°35'46.77"	31°31'00.05"	特大型岩质滑坡	1 741.58	-178.52
H9	布瓦村滑坡	103°35'29.15"	31°29'37.59"	特大型岩质滑坡	4 412.04	-285.24
H10	小克枯滑坡	103°34'30.47"	31°31'06.42"	特大型岩质滑坡	1 317.93	-231.87

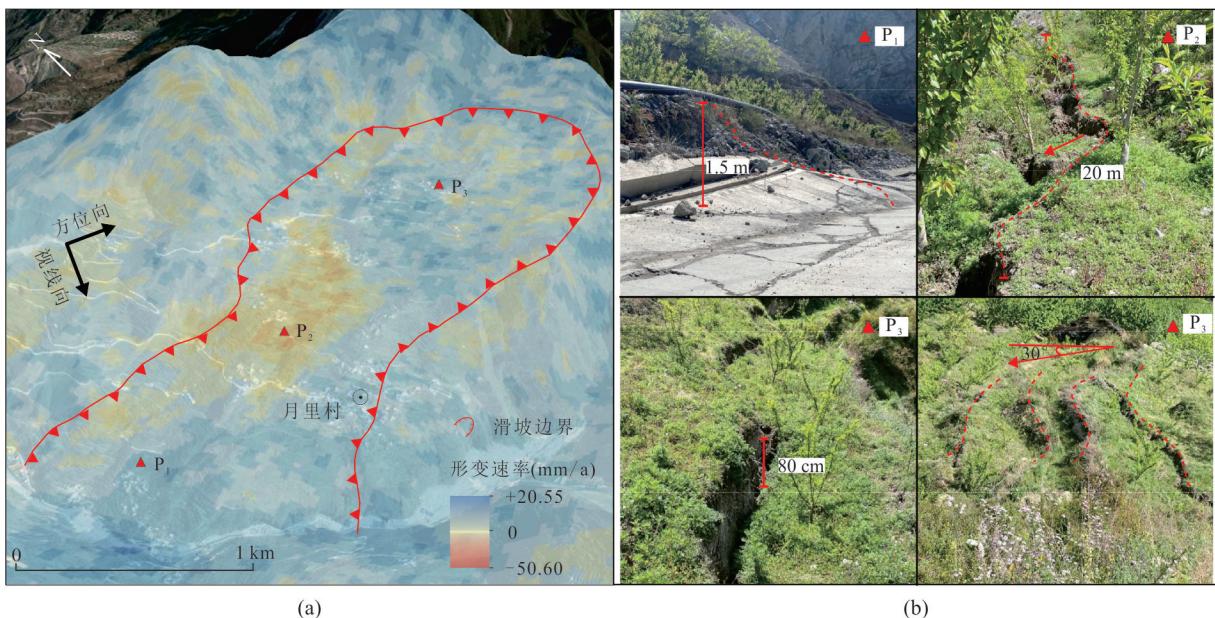


图 5 月里村滑坡年平均形变速率与野外复核照片

Fig.5 The annual average deformation and field validation of potential landslide in the Yueli Village
a.SBAS-InSAR 形变测量结果;b.控制点野外复核

前缘臌胀; P_2 处形变速率达 $-42.21 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 发育延长上百米的裂缝, 区域整体变形严重; P_3 处形变速率为 $-27.37 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 表层土体滑动, 多级下错台坎发育, 整体表现出阶梯状地形, 如图 5 所示。控制点累计形变量如图 6 所示, 滑坡右侧形变波动较大, 趋势逐渐变缓, 右侧形变仍然呈线性状态。其局部稳定性较差, 选线时应避开形变较为严重的区域或在滑动面以下以隧道的形式通过。

2.3.2 H9 布瓦村滑坡 布瓦村滑坡位于汶川县克枯乡布瓦村下方, 杂谷脑河左岸, 滑坡整体平面形态呈舌形, 前缘高程为 1 363 m, 后缘高程为 2 163 m, 相对高差 800 m, 纵长约 2 km, 横宽约

1.2 km, 滑坡体积约 200 万 m^3 , 主滑方向为 237° , 属于特大型岩质滑坡。滑坡后缘为基岩陡壁, 左右侧以陡坎为界, 剪出口位于杂谷脑河水面附近, 曾挤压河道。滑坡整体坡度在 $25^\circ \sim 35^\circ$, 中下部较为突出, 综合 InSAR 结果与现场调查, 推断其为一处古滑坡体(见图 7a)。滑坡体下方处于复活状态, 复活部分顺坡长约 1 km, 横宽约 0.75 km, 有 3 处强烈形变区域, 分布在滑坡中下部分, 形变速率均大于 $80 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 其上部形变速率则相对较缓, 在 $50 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下。在坡体的主剖面位置选取 4 个控制点进行现场复核, P_1 处形变速率高达 $-95.08 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 附近岩体破碎, 局部滑塌严重; P_2 处形变速率

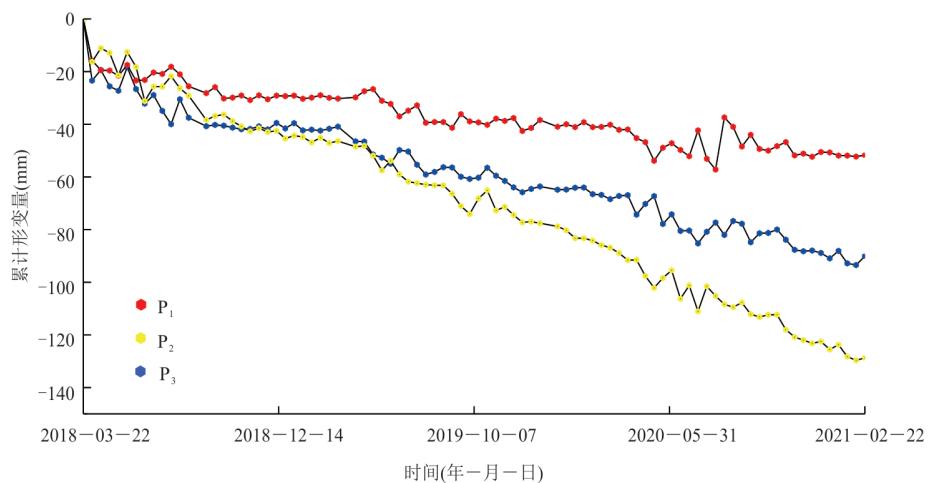


图6 月里村滑坡视线向累计形变曲线

Fig.6 Cumulative LOS displacements of potential landslide in the Yue Li Village

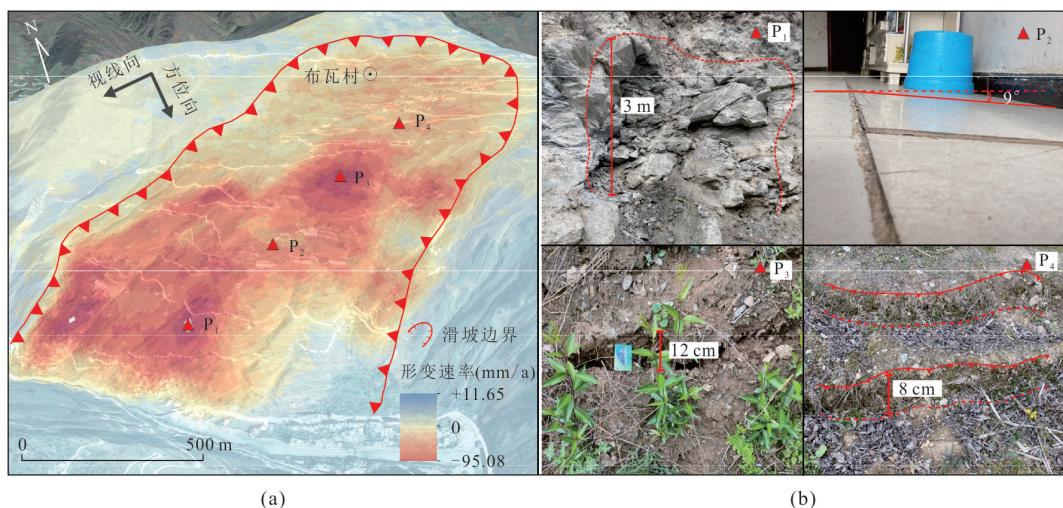


图7 布瓦村滑坡年平均形变速率与野外复核照片

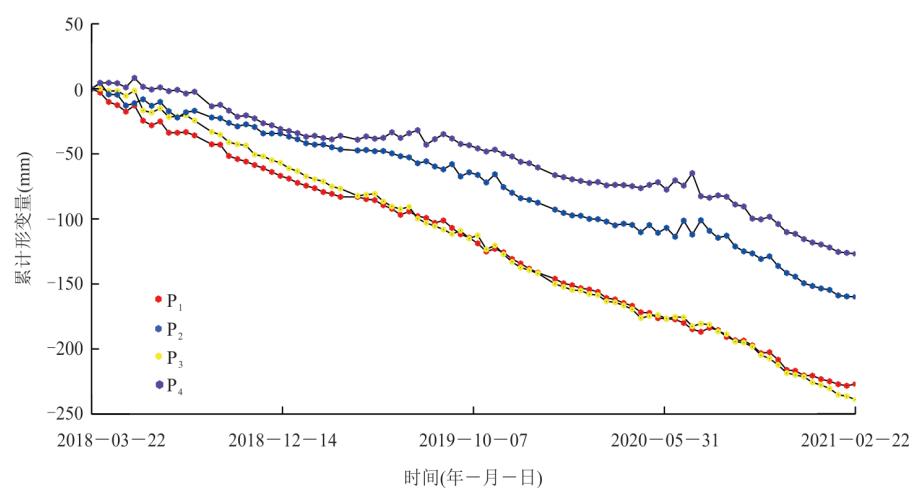
Fig.7 The annual average deformation and field validation of potential landslide in the Buwa Village
a.SBAS-InSAR形变测量结果;b.控制点野外复核

图8 布瓦村滑坡视线向累计形变曲线

Fig.8 Cumulative LOS displacements of potential landslide in the Buwa Village

为 $-58.10 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 较多居民房屋出现裂缝且有显著的不均匀下沉迹象; P_3 处形变速率为 $-94.22 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 形变较为强烈, 发现大量拉张裂缝; P_4 处形变速率为 $-49.11 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 多级下错台坎发育且有马刀树的存在, 推测其上部受下方强烈形变引起牵引式蠕滑, 见图 7b. 控制点累计形变量如图 8 所示, 滑坡整体呈线性形变趋势, 且由于古滑坡下部变形严重, 稳定性较差, 推荐选线时从其上部绕行或在合适的位置以隧道通过.

3 减灾选线方案分析

针对 3 条备选线路, 如图 9 所示, 结合 SBAS-InSAR 成果与野外复核作出以下分析.

方案 A: 该方案线路前段沿沟岸通行, 需对沿岸不稳定地质体进行治理, 施工难度、工程造价相对较小, 但尾端右侧月里村古滑坡处于持续形变状态, 且较难治理, 可能减短线路的生命周期; 中段以隧道的形式通过, 经过了两处形变区域边缘, 可能造成土体的扰动; 末段以隧道通过布瓦村古滑坡下

部, 由于变形量逐年加剧, 危险性较大.

方案 B: 该方案线路前段以隧道的形式避开了主要形变区域, 施工难度、造价相对加大, 但行车安全得到了有效保障; 中段沿河架桥从居民区边缘通过, 造价适中; 末段从布瓦村滑坡上部形变较小的区域且在滑面以下由隧道通行, 危险性降低, 对原始地貌环境的影响较小.

方案 C: 该方案路线前段同样以隧道通行, 未经过灾害体, 中段以桥梁的形式跨过岷江, 末段由长隧道直达站点, 虽然都有效避开了所有形变区, 但整体绕行路线较长, 工程造价最高且施工难度较大.

在 3 个比选方案中, 方案 B 不仅保证了线路的安全性, 整体路线长度也趋近合理, 工程造价相对适中.

4 结论与讨论

本文利用 SBAS-InSAR 技术对覆盖汶川县的多景降轨 Sentinel-1A 雷达影像数据进行处理, 获得了汶川县城周边活动滑坡的形变特征, 通过野外调查进行验证, 并根据识别结果对备用选线进行了分析选取, 主要得到以下结论.

(1) 采用 SBAS-InSAR 技术, 利用 Sentinel-1A 降轨雷达卫星影像对成汶高速路汶川段的活动滑坡进行探测, 结合遥感影像共识别出 10 处滑坡隐患. 通过 SBAS-InSAR 技术形变识别与野外复核验证, 识别结果与现场实际调查成果有着较好的一致性.

(2) 重点选取了月里村滑坡及布瓦村滑坡进行详细的调查分析, 两处滑坡均处于持续变形阶段, 最大形变速率分别为 $-50.60 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 及 $-95.08 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 稳定性较差, 选线时应注意避让.

(3) 综合 SBAS-InSAR 结果与野外调查, 对 3 个高速公路比选方案进行对比分析, 方案 A 经过了较多的形变区且不易治理, 危险性较高; 方案 C 整体工程造价高且施工难度大; 方案 B 在保证了风险最低的前提下, 整体规划合理、造价适中, 为最优方案.

SBAS-InSAR 技术能有效提取出山区公路潜在地质灾害隐患区, 有效节约人力物力, 为山区公路的准确选线提供科学依据. 但本文方法仍存在以下不足: 由于缺少高精度 DEM, 获取的地表变形信息有限; 此外, 仅根据 InSAR 识别结果判识研究区地质灾害具有一定的局限性, 后续工作中将采用“空一天一地”一体化的三查体系对研究区进行全

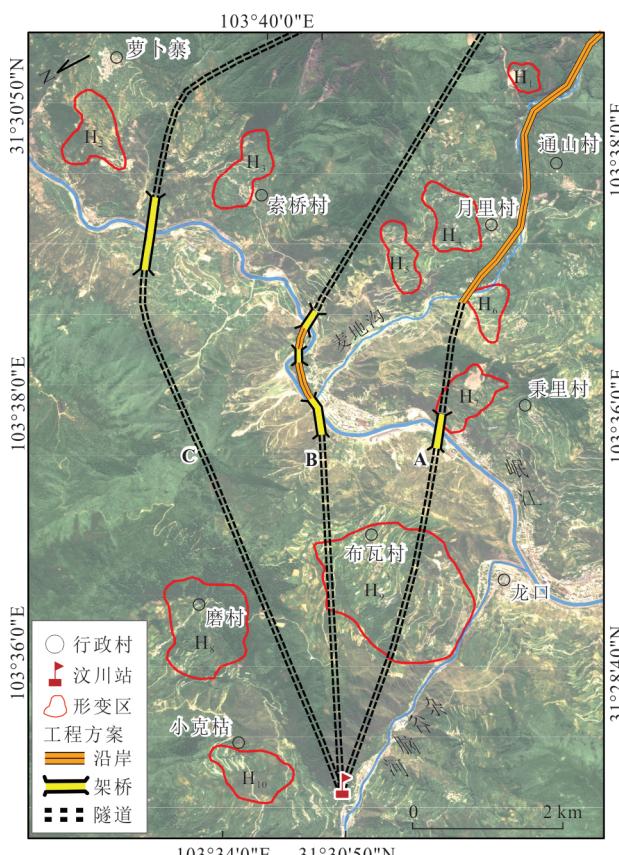


图 9 滑坡易发区选线设计方案

Fig.9 Design scheme of route selection for high susceptibility of landslide area

面的地质灾害隐患识别,从而更加准确为山区公路选线提供支撑。

References

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., et al., 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. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2002.803792>
- Bürgmann, R., Rosen, P., Fielding, E., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry to Measure Earth's Surface Topography and Its Deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 169—209. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
- Chen, F. L., Lin, H., Li, Z., et al., 2012. Interaction between Permafrost and Infrastructure along the Qinghai-Tibet Railway Detected via Jointly Analysis of C- and L-Band Small Baseline SAR Interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 123: 532—540. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.020>
- Chen, Q., Liu, G. X., Hu, Z. Q., et al., 2012. Mapping Ground 3-D Displacement with GPS and PS-InSAR Networking in the Pingtung Area, Southwestern Taiwan, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(10): 3248—3258(in Chinese with English abstract).
- Cheng, S., Yi, J. Q., 2007. Geological Hazards and Their Preventions in Wenchuan County, Sichuan Province. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 18(4): 1—6(in Chinese with English abstract).
- Dong, X. J., Wang, D., Feng, T., 2019. Research on the Application of Unmanned Aerial Vehicle Digital Photogrammetry in Landslide Disaster Investigation. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 30(3): 77—84(in Chinese with English abstract).
- Feng, W. K., Dun, J. W., Yi, X. Y., et al., 2020. Deformation Analysis of Woda Village Old Landslide in Jinsha River Basin Using SBAS-INSAR Technology. *Journal of Engineering Geology*, 28(2): 384—393(in Chinese with English abstract).
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. L., 1999. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *Remote Sensing. Proc SPIE 3869, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques II*. Florence, Italy, 139—145. <https://doi.org/10.1117/12.373150>
- Galarreta, J. F., Kerle, N., Gerke, M., 2015. UAV-Based Urban Structural Damage Assessment Using Object-Based Image Analysis and Semantic Reasoning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6): 1087—1101. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1087-2015>
- Guo, J. M., Hu, J. Y., Li, B., et al., 2017. Land Subsidence in Tianjin for 2015 to 2016 Revealed by the Analysis of Sentinel-1A with SBAS-InSAR. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11: 026024. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.11.026024>
- Huang, R. Q., 2007. Large-Scale Landslides and Their Sliding Mechanisms in China since the 20th Century. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26(3): 433—454(in Chinese with English abstract).
- Huo, D. P., Zhang, B., Peng, J. H., et al., 2015. Review and Prospective of Landslide Deformation Monitoring. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 43(8): 62—67(in Chinese with English abstract).
- Li, D., Deng, K. Z., Gao, X. X., et al., 2018. Monitoring and Analysis of Surface Subsidence in Mining Area Based on SBAS-InSAR. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(10): 1531—1537(in Chinese with English abstract).
- Lin, H., Ma, P. F., Wang, W. X., 2017. Urban Infrastructure Health Monitoring with Spaceborne Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 46(10): 1421—1433(in Chinese with English abstract).
- Liu, G. W., 2016. Application of Multi-Scale 3D Remote Sensing Technology for Geological Investigation in Railway. *Journal of Railway Engineering Society*, 33(8): 40—43, 99(in Chinese with English abstract).
- Liu, X. Y., Yang, Z. H., Guo, C. B., et al., 2017. Study of Slow-Moving Landslide Characteristics Based on the SBAS-InSAR in the Xianshuuhe Fault Zone. *Geoscience*, 31(5): 965—977(in Chinese with English abstract).
- Lu, H. Y., Li, W. L., Xu, Q., et al., 2019. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(9): 1342—1354(in Chinese with English abstract).

- Lü, X.K., Chen, J.J., 2015. Three-Dimensional Geological Environment Modeling Method for Digital Railway Alignment. *Journal of the China Railway Society*, 37(8):91—97(in Chinese with English abstract).
- Ma, P.F., Wang, W.X., Zhang, B.W., et al., 2019. Remotely Sensing Large- and Small-Scale Ground Subsidence: A Case Study of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China. *Remote Sensing of Environment*, 232:111282.<https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111282>
- Meng, H., Zhang, R.L., Shi, J.S., et al., 2021. Geological Environment Safety Evaluation. *Earth Science*, 46(10):3764—3776(in Chinese with English abstract).
- Shi, X.G., Xu, J.H., Jiang, H.J., et al., 2019. Slope Stability State Monitoring and Updating of the Outang Landslide, Three Gorges Area with Time Series InSAR Analysis. *Earth Science*, 44(12):4284—4292(in Chinese with English abstract).
- Shi, Y., Li, W.X., Tang, Y.M., et al., 2019. Time Series InSAR Measurement for Earth Environmental Monitoring and Resource Management: A Case Study of Jiaocheng-Qingxu Area. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(11):1613—1621(in Chinese with English abstract).
- Tao, Y.L., Zhang, M., 2019. Research on Mine Surface GPS Monitoring Based on Beidou System. *Mineral Exploration*, 10(12): 2990—2994(in Chinese with English abstract).
- Wang, G.J., Xie, M.W., Qiu, C., et al., 2010. Application of D-INSAR Technique to Landslide Monitoring. *Rock and Soil Mechanics*, 31(4):1337—1344(in Chinese with English abstract).
- Wang, R.Y., 2015. Research on High Resolution Land Subsidence Monitoring Technology Based on SBAS InSAR (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.M., Yin, J., Luo, M.H., et al. 2021. Active High-Latitude Landslides in Mao County: Early Identification and Deformational Rules. *Journal of Earth Science*. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1505-0>
- Xu, Q., Dong, X.J., Li, W.L., 2019. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 44(7): 957—966(in Chinese with English abstract).
- Yin, K.L., Han, Z.S., Li, Z.Z., 2000. Progress of Landslide Researches in the World. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 27(5):1—4(in Chinese with English abstract).
- Yin, Y.P., Pan, G.T., Liu, Y.P., 2009. Introduction to Wenchuan Earthquake Geology and Landslide Disaster. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Yu, M.Y., Yu, C.Q., Qu, C., et al., 2021. Deep Structural Characteristics of Pengguan Complex in Longmenshan Fault Zone Derived from Seismic Reflective Profile. *Earth Science*, 46(5): 1737—1748(in Chinese with English abstract).
- Zhu, J.J., Li, Z.W., Hu, J., 2017. Research Progress and Methods of InSAR for Deformation Monitoring. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*. 46(10): 1717—1733(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈强,刘国祥,胡植庆,等,2012.GPS 与 PS-InSAR 联网监测的台湾屏东地区三维地表形变场. 地球物理学报, 55(10):3248—3258.
- 程思,易加强,2007.四川省汶川县地质灾害的成因及防治对策. 地质灾害与环境保护, 18(4):1—6.
- 董秀军,王栋,冯涛,2019.无人机数字摄影测量技术在滑坡灾害调查中的应用研究. 地质灾害与环境保护, 30(3): 77—84.
- 冯文凯,顿佳伟,易小宇,等,2020.基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析. 工程地质学报, 28(2):384—393.
- 黄润秋,2007.20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力学与工程学报, 26(3):433—454.
- 霍东平,张彬,彭军还,等,2015.滑坡变形监测技术研究现状与展望. 工程勘察, 43(8):62—67.
- 李达,邓喀中,高晓雄,等,2018.基于 SBAS-InSAR 的矿区地表沉降监测与分析. 武汉大学学报(信息科学版), 43(10):1531—1537.
- 林珲,马培峰,王伟玺,2017.监测城市基础设施健康的星载MT-InSAR方法介绍. 测绘学报, 46(10):1421—1433.
- 刘桂卫,2016.多尺度三维遥感技术在某铁路地质勘察中应用. 铁道工程学报, 33(8):40—43, 99.
- 刘筱怡,杨志华,郭长宝,等,2017.基于 SBAS-InSAR 的鲜水河断裂带蠕滑型滑坡特征研究. 现代地质, 31(5): 965—977.

- 陆会燕,李为乐,许强,等,2019.光学遥感与InSAR结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别.武汉大学学报(信息科学版),44(9):1342—1354.
- 吕希奎,陈进杰,2015.铁路数字化选线三维地质环境建模方法.铁道学报,37(8):91—97.
- 孟晖,张若琳,石菊松,等,2021.地质环境安全评价.地球科学,46(10):3764—3776.
- 史绪国,徐金虎,蒋厚军,等,2019.时序InSAR技术三峡库区藕塘滑坡稳定性监测与状态更新.地球科学,44(12):4284—4292.
- 师芸,李伟轩,唐亚明,等,2019.时序InSAR技术在地球环境监测及其资源管理中的应用:以交城—清徐地区为例.武汉大学学报(信息科学版),44(11):1613—1621.
- 王桂杰,谢谟文,邱骋,等,2010.D-INSAR技术在大范围滑坡监测中的应用.岩土力学,31(4):1337—1344.
- 王如意,2015.基于SBAS-InSAR的高分辨率地面沉降监测技术研究(博士学位论文).北京:中国地质大学.
- 许强,董秀军,李为乐,2019.基于天—空—地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警.武汉大学学报(信息科学版),44(7):957—966.
- 殷坤龙,韩再生,李志中,2000.国际滑坡研究的新进展.水文地质工程地质,27(5):1—4.
- 殷跃平,潘桂棠,刘宇平,2009.汶川地震地质与滑坡灾害概论.北京:地质出版社.
- 于明羽,于常青,瞿辰,等,2021.从反射地震剖面认识龙门山断裂带彭灌杂岩深部结构.地球科学,46(5):1737—1748.
- 张明,2019.基于北斗系统的矿山地表GPS监测研究.矿产勘查,10(12):2990—2994.
- 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.