引文格式:陈博,宋闯,李振洪,等.四川筠连县金坪村滑坡灾前地貌变化和形变特征研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(11):2154-2162.DOI:10.13203/j.whugis20250036

Citation:CHEN Bo,SONG Chuang,LI Zhenhong,et al.Pre-Failure Deformation Mechanism and Geomorphological Change of the Jinpingcun Landslide,Junlian,Sichuan[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(11):2154-2162.DOI:10.13203/j.whugis20250036

四川筠连县金坪村滑坡灾前地貌变化和形变特征研究

陈 博[1,2,3,4] 宋 闯[1,2,5] 李振洪[1,2,5] 李永生[6] 刘海辉[1,2,3] 余 琛[1,2,5]
李素菊[7] 刘 明[7] 陈 毅[1,2,3] 张 林[8] 彭建兵[1,2,5]

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054
2 黄土科学全国重点实验室,陕西 西安,710054
3 长安大学地学与卫星大数据研究中心,陕西 西安,710054
4 阿利坎特大学,西班牙 阿利坎特,03080
5 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054
6 应急管理部国家自然灾害防治研究院,北京,100085
7 应急管理部国家减灾中心,北京,100124
8 中铁一局集团有限公司,陕西 西安,710054

摘 要:2025-02-08 11时50分,中国四川省宜宾市筠连县沐爱镇金坪村发生山体滑坡灾害,造成10人死亡,19人失踪,引起国内外广泛关注。基于多源遥感影像,包括C波段哨兵一号(Sentinel-1)卫星升轨、C波段涪城一号(Fucheng-1)卫星升轨、L波段陆探一号(Lutan-1)卫星降轨影像及多时相光学卫星遥感影像,初步揭示了滑坡失稳前地貌变化与形变特征,并识别了周边区域斜坡变形区。研究结果表明,金坪村滑坡在2011-06-28—2014-08-05曾发生面积约2.4×10^4 m^{2}的小规模坡体失稳事件;2024-09-27—2024-12-31期间,滑坡坡体地貌发生变化,疑似滑坡体复活;Sentinel-1、Fucheng-1和Lutan-1影像获取的地表形变时间序列均显示,金坪村滑坡在2024年10月—11月呈现加速变形特征(最大形变速率达−166 mm/a),与同期光学影像识别的地貌演化时间节点高度一致。该研究揭示当前地质灾害调查手段难以有效识别此类高隐蔽性滑坡隐患。因此,亟需构建基于合成孔径雷达干涉测量技术的常态化监测体系,针对中国地质灾害易发区实施周期性广域探测与滑坡隐患点的持续监测,为提升滑坡隐患早期识别能力与滑坡防控提供技术支撑。

关键词:金坪村滑坡;多源遥感;InSAR;灾前形变;地貌变化

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2025-02-17

DOI:10.13203/j.whugis20250036 **文章编号**:1671-8860(2025)11-2154-09

Pre-Failure Deformation Mechanism and Geomorphological Change of the Jinpingcun Landslide, Junlian, Sichuan

CHEN Bo[1,2,3,4] *SONG Chuang*[1,2,5] *LI Zhenhong*[1,2,5] *LI Yongsheng*[6] *LIU Haihui*[1,2,3]
YU Chen[1,2,5] *LI Suju*[7] *LIU Ming*[7] *CHEN Yi*[1,2,3] *ZHANG Lin*[8] *PENG Jianbing*[1,2,5]

1 College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2 State Key Laboratory of Loess Science, Xi'an 710054, China
3 Big Data Center for Geosciences and Satellites (BDCGS), Chang'an University, Xi'an 710054, China
4 Department of Civil Engineering, University of Alicante, Alicante 03080, Spain
5 Key Laboratory of Western China's Mineral Resource and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China
6 National Institute of Natural Hazards, Ministry of Emergency Management of China, Beijing 100085, China
7 National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100124, China
8 China Railway First Group Co. Ltd, Xi'an 710054, China

Abstract: **Objectives**: On 8 February 2025 at 11:50 a.m. local time, a catastrophic landslide occurred in

基金项目:国家重点研发计划(2020YFC1512000);陕西省地学大数据与地质灾害防治创新团队(2022);长安大学青年学者学科交叉团队建设项目(300104240914);欧洲空间局-科技部国家遥感中心龙计划6项目(95355)。

共同第一作者:陈博,博士生,主要从事影像大地测量与滑坡灾害研究。bo.chen@chd.edu.cn
宋闯,博士,副教授,主要从事影像大地测量与地质灾害研究。chuang.song@chd.edu.cn

通信作者:李振洪,博士,教授。zhenhong.li@chd.edu.cn

Jinpingcun, Mu'ai Town, Junlian County, Yibin City, Sichuan Province, China, resulting in 10 fatalities and 19 missing persons, attracting widespread national and international attention. **Methods:** This study preliminarily reveals the pre-failure deformation mechanism and geomorphic evolution of the landslide based on multi-source remote sensing imagery, including C-band Sentinel-1 ascending, Fucheng-1 ascending, L-band Lutan-1 descending synthetic aperture radar (SAR) imagery, and multi-temporal optical remote sensing images. Additionally, actively deformation slopes in the surrounding area were detected. **Results:** A small-scale slope failure event (about 2.4 × 10^4 m^2) occurred at the Jinpingcun landslide site between 28 June 2011 and 5 August 2014. Between 27 September and 31 December 2024, significant geomorphic changes were observed in the landslide body, suggesting possible reactivation. Time-series surface deformation derived from Sentinel-1 ascending, Fucheng-1 ascending and Lutan-1 descending imagery consistently shows an acceleration deformation trend in the Jinpingcun landslide from October to November 2024, with a maximum deformation rate of −166 mm/a, closely aligning with the geomorphic changes revealed by optical imagery. **Conclusions:** This study highlights the limitations of current geohazard investigation methods in effectively identifying such highly concealed landslide. Therefore, it is imperative to establish a routine monitoring system based on interferometric synthetic aperture radar technology to enable periodic wide-area detection and continuous monitoring of potential landslides in geohazard-prone areas. Such a system would enhance the early detection of potential landslides and provide technological support for landslide prevention and mitigation.

Key words: Jinpingcun landslide; multi-source remote sensing; InSAR; pre-failure deformation; geomorphic change

北京时间 2025-02-08 11 时 50 分,中国四川省宜宾市筠连县沐爱镇金坪村 2 组突发山体滑坡(以下简称金坪村滑坡),截至 2025-02-17,此次山体滑坡导致 10 户民房及 1 户生产用房被掩埋,造成 10 人遇难、19 人失联、2 人受伤的重大灾情,引起了国内外的高度关注。中国作为全球地质灾害最为频发的国家之一,自 20 世纪 90 年代实施系统性地质灾害普查以来,累计识别地质灾害隐患点逾 33 万处[1-2]。然而统计数据显示,近年来约 80% 造成严重损失的突发性地质灾害均发生在既有地质灾害数据库之外[2-3],这不仅揭示出地质灾害的隐蔽性与复杂性特征,更凸显出传统调查手段在灾前形变信息的识别方面存在技术瓶颈。

地质灾害前兆形变信息的识别是灾害预警的核心环节,尽管基于全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)、倾斜仪、裂缝计等原位传感器的滑坡预警系统已被广泛应用[4-6],但高昂的布设及维护成本使其难以覆盖所有滑坡隐患点,这成为区域滑坡风险管理的重要制约因素。星载重复轨道合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术凭借亚厘米级形变监测精度、大范围覆盖能力及近 30 年连续观测数据积累等优势,为难以抵达区域的地质灾害探测提供了革命性技术手段,在滑坡前兆形变信息的识别和形变持续监测方面具有常规手段不可替代的作用[7-9]。典型滑坡案例回溯显示,2017-06-24 四川茂县新磨村滑坡事件中,国内外学者通过 InSAR 技术成功识别到失稳前 5 个月的持续形变异常[10-11];2018 年 10 月和 11 月发生的金沙江白格滑坡事件中,众多学者通过综合遥感技术手段(InSAR 技术、像素偏移量技术和光学影像解译)识别到滑坡发生前的形变信息和地貌变化[12-13];2024-01-22 发生的云南镇雄县凉水村滑坡事件,文献[14]结合 InSAR 与综合标准化变形指数模型,可实现对该滑坡事件临滑阶段的快速预警响应;文献[15]对中国西部 2016—2021 年间发生的 30 处典型滑坡的灾前形变追溯研究表明,基于 C 波段哨兵一号(Sentinel-1)影像的 InSAR 技术可识别 36.67% 的滑坡在失稳前的加速变形信号。以上滑坡事件的回溯研究均表明,利用 InSAR 技术可实现部分滑坡灾前形变信号的识别。

为查清 2025-02-08 发生的金坪村滑坡灾前是否存在形变迹象,本文联合多平台雷达卫星时序影像与多时相光学遥感影像,采用 InSAR 技术和历史遥感影像解译技术,揭示了该滑坡孕育阶段的地表形变过程与地貌演化规律,并对周边斜坡变形区进行识别。

1 研究区域概况

筠连县地处四川盆地与云贵高原的过渡带,区域内山高坡陡,沟谷纵横,地形起伏较大,地形整体呈现南高北低,区内地质构造复杂,属构造剥蚀地貌,亚热带湿润季风气候(图1(a))。2017年的地质灾害调查显示,筠连县由各种原因引起的地质灾害有291处,其中滑坡有130处[16]。

金坪村位于两条“人字形”山脊底部,2025-02-08发生的金坪村滑坡体位于西侧山脊处,所处地层岩性主要为三叠系飞仙关组和二叠系宣威组,根据应急管理部工程应急救援勘察队利用无人机获取的影像,可以清晰看到该滑坡坡面呈沉积岩特征(图2(b))。金坪村滑坡受影响面积约1.8×10^5 m^2,长约1.2 km,宽约0.3 km(图1(b))。该滑坡崩塌区地形陡峭(50°~70°),高差约229 m,高位山体发生崩塌后转化为碎屑流,以极快的速度掩埋了10处民房及1户生产用房,受地形影响,在运动约530 m后,90°转向冲毁了一大片地势较低的梯田,最终形成L形的滑坡堆积体(图2(a))。根据现场调查人员调查显示,该滑坡体堆积物以石块为主,滑坡体厚约10~20 m,滑坡方量达10万余m^3。

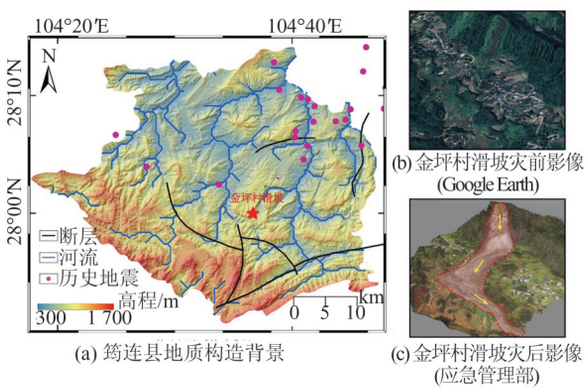
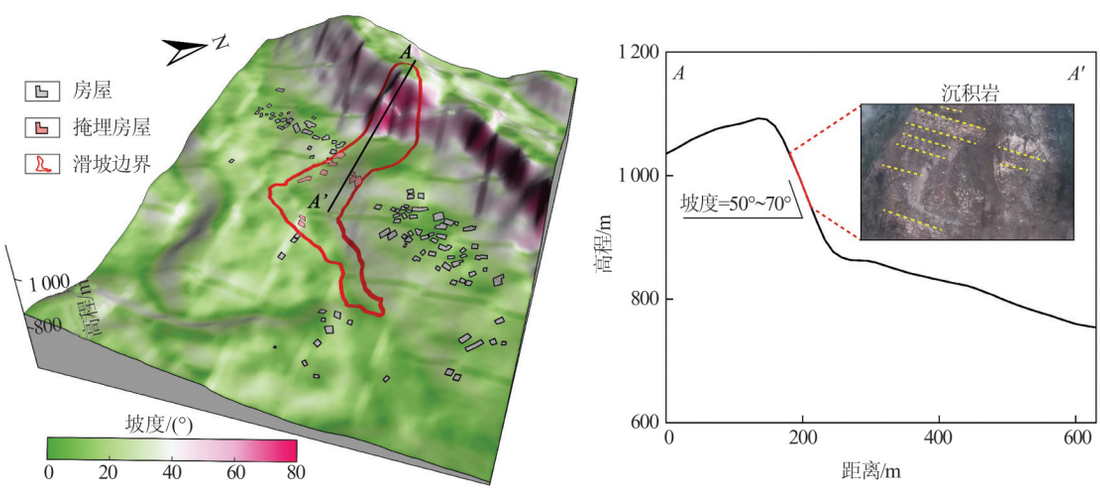


图1 研究区域位置及金坪村滑坡灾前、灾后影像

Fig. 1 Study Area Location and Pre- and Post-Disaster Images of the Jinpingcun Landslide



(a) 金坪村滑坡三维地形 (b) 金坪村滑坡地形剖面

图2 金坪村滑坡地形特征

Fig. 2 Topographic Features of the Jinpingcun Landslide

2 研究数据与研究方法

2.1 研究数据

本文主要使用的数据为雷达卫星影像和光学卫星影像。雷达卫星影像包括C波段Sentinel-1、C波段涪城一号(Fucheng-1)和L波段陆探一号(Lutan-1),其中Sentinel-1卫星是由欧洲空间局发射运营的两颗对地观测卫星组成,单颗卫星重访周期为12 d,两颗为6 d,空间分辨率2.3 m×13.9 m[17];Lutan-1合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)卫星星座是中国民用空间基础设施的核心组成部分,采用双星协同观测架构(A/B双星),分别于2022-01-26与2022-02-27成功发射升空。单轨道重访周期为8 d,双星联合可达4 d,数据空间分辨率为3~30 m,搭载的L波雷达(0.24 m)可有效提高植被覆盖区的干涉测量精度,已广泛应用于地震和滑坡的地表形变监测和自然灾害的应急响应[18];Fucheng-1是天仪研究院研制的C波段商业SAR卫星,于2023-06-07发射升空,具备11 d重访周期和1~20 m的空间分辨率,可用于滑坡等地质灾害的形变监测[19]。

用于回溯滑坡地貌演变的光学卫星遥感影

像包括哨兵二号(Sentinel-2)和Google Earth存档影像,具体信息如表1所示。其中Sentinel-2含A、B两颗星,分别于2015-06-23和2017-03-07发射升空,空间分辨率10 m,双星联合重访周期为5 d;Google Earth存档影像主要集成了WorldView、QuickBird、GeoEye等亚米级空间分辨率的商业卫星影像,为滑坡地貌演化分析提供丰富的数据资源。

表1　研究区遥感影像

Table 1　Remote Sensing Images of the Study Area

类型	影像名称	时间	数量/景	影像空间分辨率
雷达影像	Sentinel-1	2021-01-10—2025-02-06	117	5 m × 20 m
	Fucheng-1	2024-05-03—2025-02-02	25	2 m × 1.2 m
	Lutan-1	2023-08-13—2025-01-26	18	12 m × 18 m
光学影像	Sentinel-2	2017-07-31—2025-01-05	56	10 m
	Google Earth	2021-06-05、2017-02-16、2014-08-05、2011-06-28、2011-04-18、2010-05-24、2009-09-28	7	<1 m

2.2　InSAR观测地表形变敏感性分析

由于SAR影像独特的侧视成像几何与电磁波传播特性,在地形起伏区获取的SAR影像会存在几何畸变现象[8, 20],主要包括透视收缩、叠掩和阴影。透视收缩现象发生在雷达波束入射方向与地形坡度相近区域,导致坡面成像压缩;叠掩则源于高差地物反射信号在斜距投影中的叠加效应,形成空间位置倒置的伪影;阴影是由陡峭地形阻挡雷达波束传播,形成无回波信号的盲区。

在利用InSAR技术开展地表形变监测前,定量评估不同SAR卫星系统对目标形变场的观测敏感性是卫星选择的重要依据。本文采用可定量反映InSAR观测敏感性的R指数[21-22]进行分析,计算公式如下:

$$R = -\sin(\arctan(\tan s \cdot \sin(a - h + 180)) - i) \tag{1}$$

式中,s为坡度;a为坡向;h为卫星局部方位角;i为卫星局部入射角。当R为正值时,值越大,表明滑坡的可观测性越好;当R为负值时,表明滑坡处于几何畸变区域,无法被有效观测。

2.3　滑坡失稳前兆形变信息识别

滑坡失稳前兆形变信息识别需综合使用地表年平均形变速率和位移时间序列,前者反映空间形变分布格局,后者记录形变动态演化过程,对揭示滑坡运动学机制具有重要价值。本文使用的地表年平均形变速率和位移时间序列主要在AI Earth平台(https://engine-aiearth.aliyun.com)和GAMMA软件[23]上处理,其中Sentinel-1影像在AI Earth平台处理。该平台提供在线InSAR处理服务,用户可通过交互式图形界面划定研究区,并设置以下关键参数:最大和最小时间基线、干涉图中相应点的有效值比率以及滤波参数[14, 24]。本研究设置时间最短基线为1 d,时间最长基线为48 d,高通滤波系数为1,低通滤波系数为200。数据处理主要包括以下6个步骤:(1)数据准备:自动下载雷达影像、精密轨道辅助文件和外部数字高程模型(digital elevation model, DEM);(2)差分干涉图生成;(3)影像裁剪:依据指定研究区域对干涉图进行裁剪;(4)相位滤波和相位解缠:利用统计均匀像素选择算法减少干涉图中的噪声,使用最小费用流算法(minimum cost flow, MCF)对干涉图进行相位解缠[25];(5)误差改正:改正轨道误差和与地形相关的大气延迟误差;(6)生成地表年平均形变速率和位移时间序列。

Lutan-1和Fucheng-1卫星影像使用GAMMA软件进行处理。首先预处理SAR原始数据获取单视复数影像,通过主、从影像批量配准和小基线集策略构建时空基线网络;接着利用30 m空间分辨率的Copernicus DEM数据去除地形相位生成差分干涉图,并利用自适应滤波消除斑点噪声保证解缠质量;然后使用MCF算法实现相位解缠[25],解缠阈值设为0.3,另外,数据处理中使用多项式拟合削弱差分干涉图中轨道残差的影响;最后,利用加权最小二乘算法构建形变时间序列反演模型,获取地表年平均形变速率和形变时间序列。

3　金坪村滑坡灾前地貌变化

利用2009—2025年多时相和多传感器光学卫星遥感影像,对金坪村滑坡的地貌变化进行判识(图3)。发现该滑坡在2009-09-28—2011-06-28期间地貌无变化,但在2011-06-28—2014-08-

05发生过一次坡体失稳事件,规模较小,面积约2.4×10^4 m^2,该事件导致约70 m的道路被淹没,部分农田被毁(图3(c))。受此次滑坡事件的影响,在2017—2021年,约20户居民整体搬迁。对比2017-02-16与2021-06-05的遥感影像发现,坡体植被逐渐恢复,可见裸露面积减少到9.6×10^3 m^2(图3(i)),此后至2024-09-27,该坡体未见明显地貌变化。但从2024-12-31的Sentinel-2影像可以清晰看到,金坪村滑坡物源区裸露地表较之前明显增加,在坡体右侧新增一处面积约7.0×10^3 m^{2}的裸露地表,坡体左侧新增一处面积约2.6×10^3 m^{2}的裸露地表(图3(g))。于2025-01-05,坡体中间和右侧裸露地表分别增加至1.4×10^4 m和7.9×10^3 m^2(图3(h))。总结来看,通过综合多时相光学卫星影像,可以判断金坪村滑坡灾前至少经历了失稳-植被恢复-复活3个状态(图3(i)),即2009—2011年处于无地貌变化状态,2011—2014年发生过一次小规模滑坡,2014-08-05至2024年9月期间处于植被恢复状态,2024-09-27—2025-01-05期间处于复活状态(图3(i)),在经历约134天的持续地貌变化后,最终于2025-02-08 11时50分发生整体失稳。

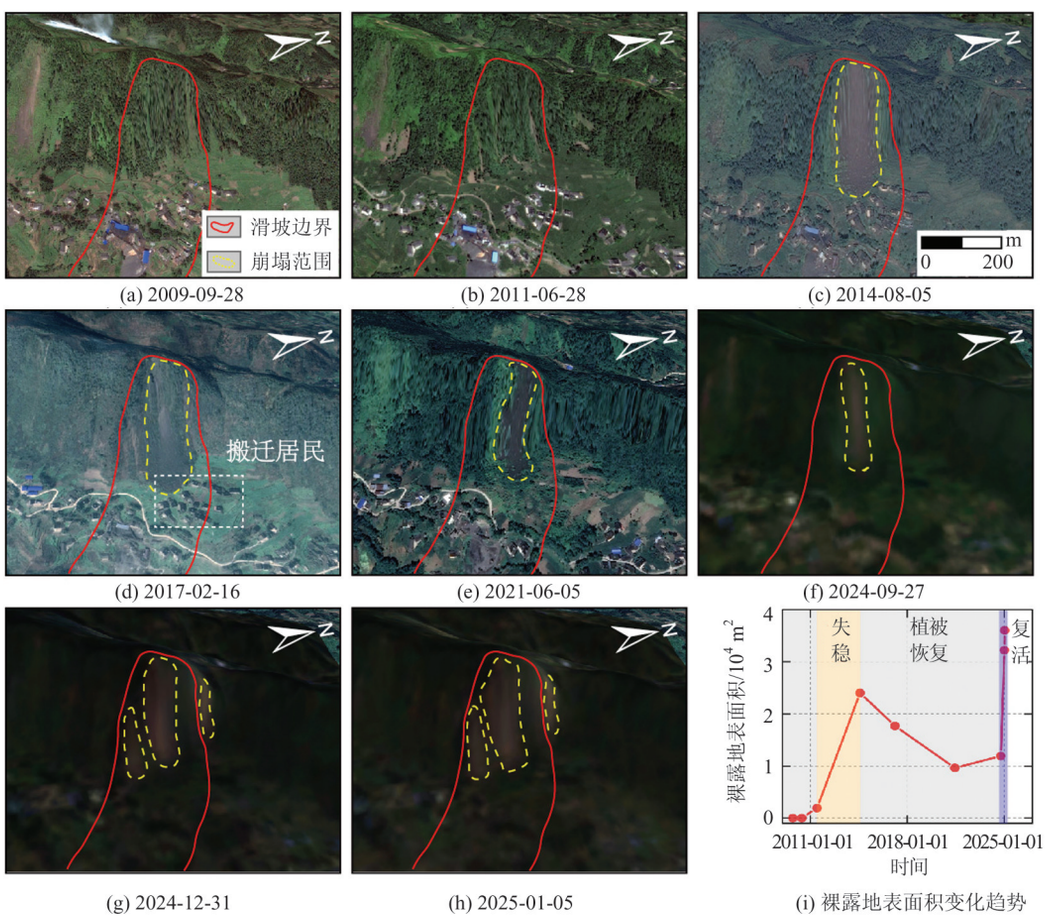


图3 滑坡地貌演变过程

Fig. 3 Landslide Morphological Evolution Process

4 金坪村滑坡灾前形变特征分析

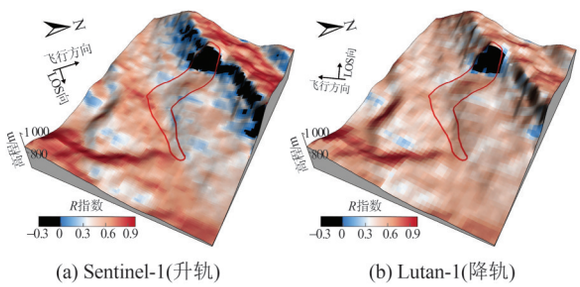
4.1 不同SAR卫星观测金坪村滑坡的敏感性分析

由于SAR影像固有的观测模式,在地形陡峭地区常受到几何畸变的影响,导致InSAR技术对滑坡形变监测受到限制。本文利用R指数对Sentinel-1升轨影像和Lutan-1降轨影像的观测敏感度进行分析,如图4所示。在金坪村滑坡区,Sentinel-1升轨影像的R指数最大值为0.82,平均值为0.42,最小值为-0.63,约1.9×10^4 m^{2}的面积处于几何畸变区域(图4(a));Lutan-1降轨影像R指数最大值为0.85,平均值为0.5,最小值为-0.3,约1.4×10^4 m^{2}的面积处于几何畸变区域(图4(b))。升降轨影像的几何畸变均处在滑坡地形最陡峭区域,滑坡后缘及两侧部分仍可有效观测。

4.2 Sentinel-1形变时序分析

利用117景Sentinel-1升轨影像获取了金坪村滑坡2021—2025年的年平均地表形变速率和形变

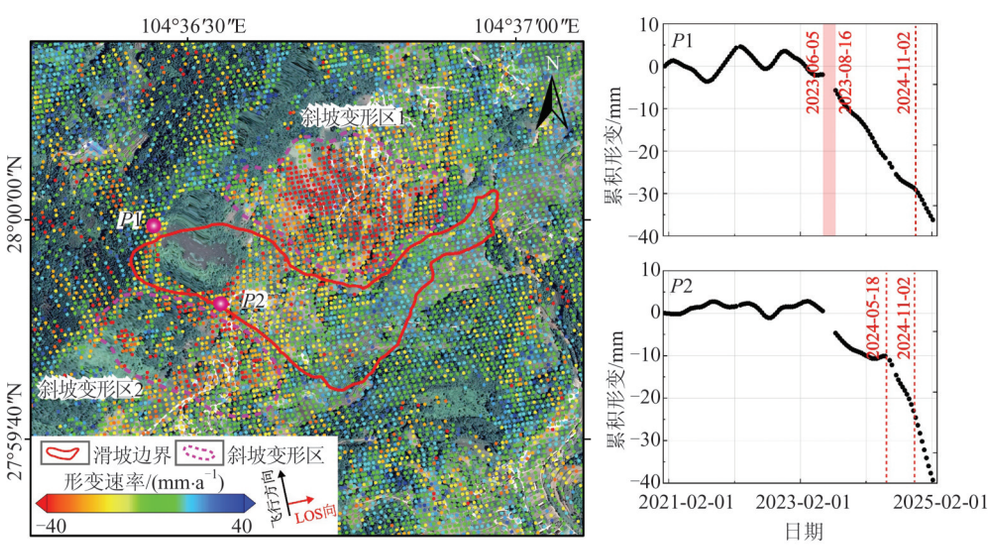
时间序列。需要说明的是,在本文中形变为正值,代表坡体朝向卫星运动(蓝色),形变为负值,则代表坡体远离卫星运动(红色)。如图5(a)所示,金坪村滑坡在2024-05-06—2025-02-06的形变速率均为负值,表明该滑坡失稳前存在远离卫星的运动,视线向(line of sight,LOS)最大地表年平均形变速率为−92.02 mm/a。提取金坪村滑坡后缘*P*1点和右侧*P*2点的形变时间序列见图5(b),发现该滑坡后缘*P*1点在过去4年经历了两次显著变形,首次发生于2023-06-05—2023-08-16期间(该时段Sentinel-1升轨卫星无影像,无法判断具体加速时间),随后在2024-11-02发生第二次加速变形,2021-01-01—2025-02-06期间LOS向累积形变为36.2 mm。滑坡右侧区域*P*2点的LOS向累积形变为39.3 mm,首次形变加速时间为2024-05-18,第二次加速时间为2024-11-02,与滑坡后缘*P*1点第二次加速时间一致。



(a) Sentinel-1(升轨)　　(b) Lutan-1(降轨)

图4　不同SAR卫星的*R*指数

Fig. 4　*R* Index of Sentinel-1 and Lutan-1 Satellites



(a) Sentinel-1升轨LOS向年平均地表形变速率(2024-05-06—2025-02-06)　　(b) *P*1和*P*2点的累积形变

图5　Sentinel-1升轨LOS向地表年平均形变速率及形变时间序列

Fig. 5　LOS Surface Annual Average Deformation Velocity Rates and Deformation Time Series Derived from Sentinel-1 Ascending-Track

4.3　Fucheng-1形变时序分析

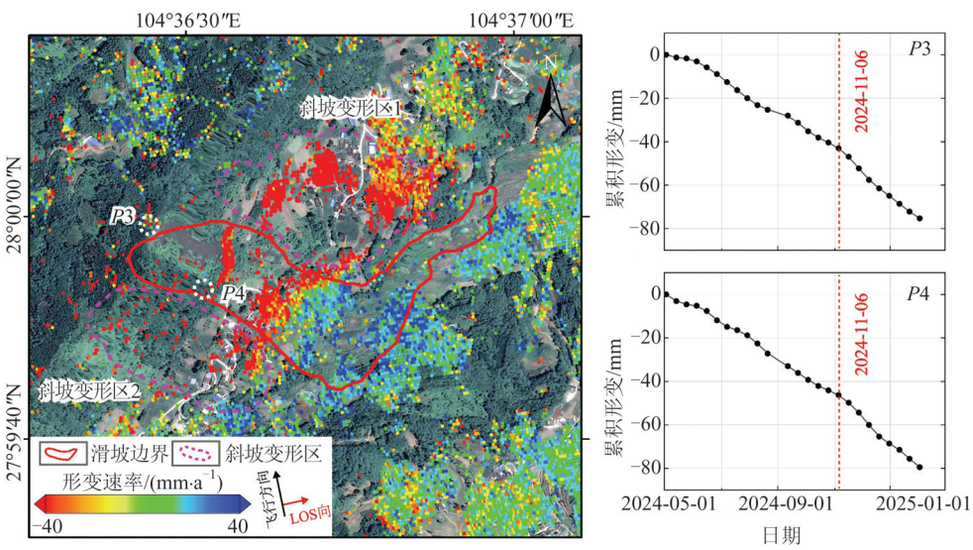
利用25景Fucheng-1升轨SAR卫星影像对金坪村滑坡2024-05-03—2025-02-02的地表形变进行分析(图6),发现金坪村滑坡在2024-05-03—2025-02-02的形变速率均远离卫星运动,与Sentinel-1年平均形变速率的运动方向一致,在此期间,最大地表年平均形变速率达−166 mm/a(图6(a)),滑坡后缘*P*3点和右侧*P*4点形变时间序列结果表明(图6(b)),该滑坡在2024-05-03—2024-11-06的运动速率基本保持恒定,但在2024-11-06之后,该滑坡形变加速,累积形变分别达−75.3 mm和−79.5 mm。值得注意的是,Fucheng-1升轨卫星识别的形变加速时间与Sentinel-1升轨卫星识别的加速时间存在4天时差,这一现象主要源于两种SAR卫星重访周期的差异。

4.4　Lutan-1形变时序分析

通过18景Lutan-1 SAR卫星影像对金坪村滑坡2023-08-13—2025-01-26的地表形变进行分析,获取了滑坡及周围区域年平均地表形变速率以及形变时序结果(图7)。结果发现,在此期间滑坡最大地表年平均形变速率达55 mm/a,滑坡后缘*P*5和滑坡右侧*P*6点的形变时间序列结果显示(图7(b)),该滑坡于2024-10-06—2024-11-03期间形变开始加剧,累积形变分别达50.2 mm和42.1 mm。

通过综合Sentinel-1、Fucheng-1和Lutan-1卫星的形变时序,可以确定金坪村滑坡在失稳前4个月左右形变开始加剧,这与多时相光学遥感影像解译地貌演化的时间节点基本一致。值得关注的是,Fucheng-1和Sentinel-1获取的相同时间段内的地表年平均形变速率结果均显示(图5(a)、6(a)),金

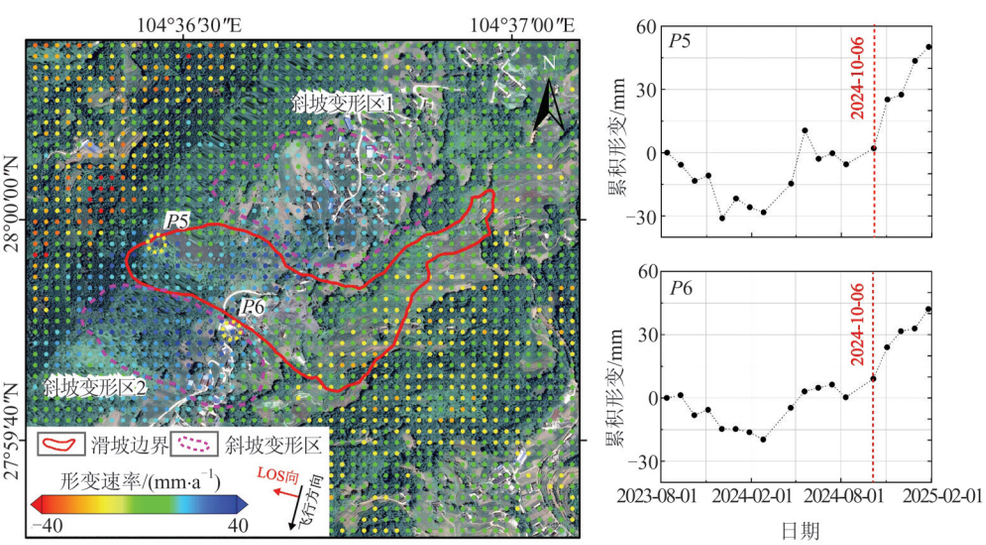
坪村滑坡对岸斜坡存在朝向卫星的形变特征(蓝色),表明在本次滑坡事件发生前,对岸坡体已呈现不稳定状态。此外,Sentinel-1、Fucheng-1和Lutan-1卫星的地表年平均形变速率均显示(图5(a)、6(a)和7(a)),金坪村滑坡周围存在两处斜坡变形区,斜坡变形区1和变形区2的面积分别达1.2×10^5 m^{2}和9.1×10^4 m^2,均大于金坪村滑坡源区面积。历史光学卫星影像也显示,在金坪村滑坡所在的山脊仍存在10处岩崩或小型滑坡形成的堆积体,表明该山脊坡体长期处于自我修正的不稳定状态,虽已有部分坡体植被恢复,但未来仍有发生滑坡的可能,其风险值得持续关注。



(a) Fucheng-1升轨LOS向年平均地表形变速率(2024-05-03—2025-02-02) (b) *P*3和*P*4点的累积形变

图6 Fucheng-1升轨LOS向地表年平均形变速率及形变时间序列

Fig. 6 LOS Surface Annual Average Deformation Velocity Rates and Deformation Time Series Derived from Fucheng-1 Ascending-Track



(a) Lutan-1升轨LOS向年平均地表形变速率(2023-08-13—2025-01-26) (b) *P*5和*P*6点的累积形变

图7 Lutan-1降轨LOS向地表年平均形变速率及形变时间序列

Fig. 7 LOS Surface Annual Average Deformation Velocity Rates and Deformation Time Series Derived from Lutan-1 Descending-Track

5 InSAR识别滑坡失稳前兆信息的前景和局限性

在2017年新磨村滑坡、2018年白格滑坡、2024年凉水村滑坡、2025年金坪村滑坡等地质灾害事件的回溯分析中[10, 13-15],InSAR技术均能成功捕捉到滑坡失稳前的异常形变信号,这对滑坡灾害的早期预警与风险管控具有重要启示。首

先,众多滑坡事件证实了InSAR技术在复杂地形区(如高山峡谷)具备识别缓慢变形的能力,表明InSAR技术可作为传统地质灾害调查方法的有效补充,尤其在人力难以抵达的区域。其次,异常形变信号的早期识别说明,若能将InSAR技术纳入到区域地质灾害常态化观测体系,结合地形地貌和灾害体环境参数,构建地学大数据多参数预警模型[26],可显著提升地质灾害预报的精准性。

然而,金坪村滑坡事件也暴露了InSAR技术在业务化应用中的局限性:尽管失稳前的前兆形变在灾害发生后被识别,但因缺乏自动化分析系统,该区域并没有被定期监测。此外,滑坡体局部陡峭地形、茂密植被导致的失相干可能掩盖了更细微的形变细节,而卫星重访周期(如Sentinel-1为12 d)限制了高频形变信号的捕捉。未来,需通过多平台卫星协同观测(如联合高低轨、升降轨、多波段SAR影像)缩短监测间隔,提高植被穿透能力,开发人工智能驱动的实时形变解译算法。同时,持续推动"空-天-地-体"一体化监测体系的建立,将InSAR前兆信息与地面巡查、社区预警机制联动,从而在类似金坪村滑坡的灾害场景中实现"探测-监测-预警-响应"的闭环,最大限度减少生命财产损失。

6　结　语

本文利用117景Sentinel-1升轨、25景Fucheng-1升轨和18景Lutan-1降轨影像快速获取了2025-02-08发生在四川筠连县金坪村滑坡的灾前形变时间序列,并结合多时相光学卫星影像对地貌演化进行分析。结果显示,此次滑坡所在坡体在2011-06-28—2014-08-05期间曾发生面积约2.4×10^4 m^{2}的小规模坡体失稳事件,于2024-09-27—2024-12-31期间坡体地貌发生变化,裸露地表增多,疑似滑坡体复活;Sentinel-1升轨、Fucheng-1升轨和Lutan-1降轨影像获取的最大地表年平均地表形变速率分别为−92.02 mm/a、−166 mm/a和55 mm/a,时间序列均显示该滑坡在2024年10月—11月呈现加速趋势,该时间节点与地貌变化时间高度吻合。

上述结果证实了多平台SAR卫星协同分析对滑坡失稳的前兆形变信息的有效捕捉能力,可突破传统人工排查的时空局限性。随着高分辨率SAR星座(如Lutan-1、NISAR)的组网运行与人工智能解译技术的发展,针对中国地质灾害易发区实施周期性广域探测与滑坡隐患点的持续监测将逐步实现业务化应用,为区域地质灾害风险防控提供全天候技术支撑。

致谢:感谢欧洲空间局提供的Sentinel-1雷达影像和Sentinel-2光学影像,天仪研究院提供的Fucheng-1数据,以及自然资源部国土卫星遥感应用中心提供的Lutan-1数据。

参　考　文　献

[1] 李振洪, 张成龙, 陈博, 等. 一种基于多源遥感的滑坡防灾技术框架及其工程应用[J]. 地球科学, 2022, 47(6): 1901-1916.
LI Zhenhong, ZHANG Chenglong, CHEN Bo, et al. A Technical Framework of Landslide Prevention Based on Multi-source Remote Sensing and Its Engineering Application[J]. *Earth Science*, 2022, 47(6): 1901-1916.

[2] 许强, 陆会燕, 李为乐, 等. 滑坡隐患类型与对应识别方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(3): 377-387.
XU Qiang, LU Huiyan, LI Weile, et al. Types of Potential Landslide and Corresponding Identification Technologies[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(3): 377-387.

[3] 葛大庆, 戴可人, 郭兆成, 等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 949-956.
GE Daqing, DAI Keren, GUO Zhaocheng, et al. Early Identification of Serious Geological Hazards with Integrated Remote Sensing Technologies: Thoughts and Recommendations[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 949-956.

[4] 张勤, 白正伟, 黄观文, 等. GNSS滑坡监测预警技术进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(10): 1985-2000.
ZHANG Qin, BAI Zhengwei, HUANG Guanwen, et al. Review of GNSS Landslide Monitoring and Early Warning[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 1985-2000.

[5] CASAGLI N, INTRIERI E, TOFANI V, et al. Landslide Detection, Monitoring and Prediction with Remote-Sensing Techniques[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4: 51-64.

[6] 许强, 董秀军, 李为乐. 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.
XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated Space-Air-Ground Early Detection, Monitoring and Warning System for Potential Catastrophic Geohazards[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957-966.

[7] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量学发展现状

与趋势[J]. 测绘学报, 2023, 52(11): 1805-1834.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Development Status and Trends of Imaging Geodesy[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(11): 1805-1834.

[8] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望[J]. 测绘学报, 2022, 51(7): 1485-1519.
LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar for Deformation Mapping: Opportunities, Challenges and the Outlook[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1485-1519.

[9] CHEN B, LI Z H, ZHANG C L, et al. Wide Area Detection and Distribution Characteristics of Landslides Along Sichuan Expressways[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(14): 3431.

[10] DONG J, ZHANG L, LI M H, et al. Measuring Precursory Movements of the Recent Xinmo Landslide in Mao County, China with Sentinel-1 and ALOS-2 PALSAR-2 Datasets[J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 135-144.

[11] INTRIERI E, RASPINI F, FUMAGALLI A, et al. The Maoxian Landslide as Seen from Space: Detecting Precursors of Failure with Sentinel-1 Data[J]. *Landslides*, 2018, 15(1): 123-133.

[12] FAN X M, XU Q, ALONSO-RODRIGUEZ A, et al. Successive Landsliding and Damming of the Jinsha River in Eastern Tibet, China: Prime Investigation, Early Warning, and Emergency Response[J]. *Landslides*, 2019, 16(5): 1003-1020.

[13] LIU X J, ZHAO C Y, ZHANG Q, et al. Deformation of the Baige Landslide, Tibet, China, Revealed Through the Integration of Cross-Platform ALOS/PALSAR-1 and ALOS/PALSAR-2 SAR Observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(3): e2019GL086142.

[14] LI B Q, LI Y S, NIU R Q, et al. Early Warning of Landslides Based on Statistical Analysis of Landslide Motion Characteristics and AI Earth Cloud InSAR Processing System: A Case Study of the Zhenxiong Landslide in Yunnan Province, China[J]. *Landslides*, 2024, 21(12): 3137-3148.

[15] ZENG P, FENG B, DAI K R, et al. Can Satellite InSAR Innovate the Way of Large Landslide Early Warning?[J]. *Engineering Geology*,2024,342: 107771.

[16] 贾娟. 粗糙集与支持向量机耦合模型滑坡易发性评价: 以筠连县为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.
JIA Juan. Landslide Susceptibility Assessment Using Rough Sets and Support Vector Machine—A Case of Junlian County[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.

[17] TORRES R, SNOEIJ P, GEUDTNER D, et al. GMES Sentinel-1 Mission[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 9-24.

[18] 李永生, 李强, 焦其松, 等. 陆地探测一号SAR卫星星座在地震行业的应用与展望[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(10): 1741-1752.
LI Yongsheng, LI Qiang, JIAO Qisong, et al. Application of Lutan-1 SAR Satellite Constellation to Earthquake Industry and Its Prospect[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(10): 1741-1752.

[19] HAN Y K, DAI K R, DENG J, et al. Fucheng-1, High-Resolution Chinese Interferometric SAR: First DInSAR Result for Landslides Monitoring[J]. *Measurement*, 2025, 247: 116876.

[20] CHEN B, LI Z H, SONG C, et al. Automatic Detection of Active Geohazards with Millimeter-to-Meter-Scale Deformation and Quantitative Analysis of Factors Influencing Spatial Distribution: A Case Study in the Hexi Corridor, China[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 131: 103995.

[21] NOTTI D, DAVALILLO J C, HERRERA G, et al. Assessment of the Performance of X-Band Satellite Radar Data for Landslide Mapping and Monitoring: Upper Tena Valley Case Study[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10(9): 1865-1875.

[22] DU J T, LI Z H, SONG C, et al. InSAR-Based Active Landslide Detection and Characterization Along the Upper Reaches of the Yellow River[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, 16: 3819-3830.

[23] WEGNÜLLER U, WERNER C, STROZZI T, et al. Sentinel-1 Support in the GAMMA Software[J]. *Procedia Computer Science*, 2016, 100: 1305-1312.

[24] YU Y, LI B Q, LI Y S, et al. Retrospective Analysis of Glacial Lake Outburst Flood (GLOF) Using AI Earth InSAR and Optical Images: A Case Study of South Lhonak Lake, Sikkim[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(13): 2307.

[25] CHEN C W, ZEBKER H A. Network Approaches to Two-Dimensional Phase Unwrapping: Intractability and Two New Algorithms[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2000, 17(3): 401-414.

[26] 彭建兵, 李振洪. 地学大数据可否助力地质灾害预报?[J]. 地球科学, 2022, 47(10): 3900-3901.
PENG Jianbing, LI Zhenhong. Can Geo-Big Data Help Geological Disaster Prediction? [J]. *Earth Science*, 2022, 47(10): 3900-3901.