doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.01.016

基于SBAS-InSAR技术的广安村滑坡形变监测分析

牛敏杰[1,2]，师　芸[1,2]，吕　杰[1,2]，赵　侃[1,2]，石龙龙[1,2]
（1. 西安科技大学 测绘科学与技术学院，陕西 西安 710054；
2. 自然资源部煤炭资源勘察与综合利用重点实验室，陕西 西安 710021）

摘　要：2017-10-21重庆市巫溪县大河乡广安村发生高位山体滑坡，针对滑坡后坡体稳定性差、监测难度大的问题，基于覆盖广安村滑坡（2017-10-31—2018-10-26）的31景Sentinel-1A数据，利用SBAS-InSAR技术提取了滑坡时序形变信息，并与光学影像形变特征进行对比分析，进一步证明了SBAS-InSAR技术在滑坡监测与稳定性分析方面的技术优势。结果表明，2017-10-31—2018-10-26广安村滑坡垂向形变速率为-140～60 mm/a，最大累积形变量为-150 mm，位于潜在滑源区2中部，在滑移区和潜在滑源区内可见明显形变，滑移区前缘坡体呈现持续蠕动形变。

关键词：广安村滑坡；SBAS-InSAR；形变监测；光学遥感
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）01-0079-06

Landslide Deformation Monitoring Analysis of Guang'an Village Based on SBAS-InSAR Technology

NIU Minjie[1,2], SHI Yun[1,2], LYU Jie[1,2], ZHAO Kan[1,2], SHI Longlong[1,2]
(1. College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;
2. Key Laboratory of Coal Resources Exploration and Comprehensive Utilization, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710021, China)

Abstract: On October 21, 2017, a high-level landslide occurred in Guang'an village, Dahe Township, Wuxi County, Chongqing City. Aiming at the problems of poor slope stability and difficult monitoring after the landslide, based on Sentinel-1A data of 31 scenes covering Guang'an village landslide (from October 31, 2017 to October 26, 2018), we used SBAS-InSAR technology to extract the temporal deformation information of the landslide, and compared with the deformation characteristics of optical images. The results show that from October 31, 2017 to October 26, 2018, the vertical deformation rate of Guang'an village landslide is between -140 ~ 60 mm/a, and the maximum cumulative deformation is -150 mm, which is in part 2 of the potential slip source area. Obvious deformation can be seen in the slip area and the potential slip source area, and the slope at the front edge of slip area presents continuous creep deformation. It is further proved that SBAS-InSAR has good technical advantages in landslide monitoring and stability analysis.

Key words: Guang'an Village landslide, SBAS-InSAR, deformation monitoring, optical remote sensing

滑坡是我国发生最频繁的地质灾害之一，2020年我国共发生地质灾害7 840起，其中滑坡4 810起，占比为61.35%，直接经济损失为50.2亿元[1]。滑坡是指斜坡体上覆岩土在自然或人为因素诱发下受自身重力影响沿着滑动面做剪切运动[2-3]。2017-10-21凌晨，重庆市巫溪县大河乡广安村发生大型滑坡，造成9人遇难，滑坡前缘S301省道中断，西溪河被堵塞形成堰塞湖，严重威胁了当地群众的生命和财产安全[4-5]。广安村滑坡为岩质滑坡，剪切口位置高，具有隐蔽性强、危险性大、突发性强的特点，在有利地形和持续降雨的条件下易发生滑动[4-5]，时刻威胁居民生命和财产安全，因此加强对滑坡的监测与分析具有重要意义。

小基线集技术[6]（SBAS）设置了时空基线阈值，将已有SAR影像组合成若干差分干涉序列子集，改进了长基线导致的失相干问题，提高了时间采样率，增加了数据利用效率，并通过SVD分解得到真实LOS向时序形变信息，在复杂山区地质灾害识别与监测方面具有很大优势[7-10]。2017-06-24四川省茂县新磨村突发高位山体滑坡，造成83人死亡，新磨村被掩盖，殷跃平[11]、许强[12]等通过现场调查，综合光学遥感、InSAR、无人机等多手段对滑坡成因进行了分析，认为地形地貌条件和持续降雨是诱发高位山体滑坡的重要因素，应联合多技术手段，实现滑坡隐患的早期排查和监测。2018-10-11和2018-11-03金沙江白格村发生两次大规模山体滑坡，造成严重堵江事件，对金沙江下游沿岸居民生活造成严重影响，很多学者结合

收稿日期：2021-11-17。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41874012）。

SBAS-InSAR、PS-InSAR、光学遥感等多种技术对白格滑坡运动特征以及金沙江流域滑坡隐患进行了识别与分析，为该流域滑坡防治提供了重要的参考资料[8,13-15]。近年来，SBAS-InSAR技术已被广泛应用于震后滑坡识别、黄土地区滑坡监测以及蠕滑状态单体滑监测等方面，取得了丰富成果，为滑坡识别和监测预警提供了重要的数据和技术支撑，在滑坡监测中的优势已得到广泛肯定[16-19]。

广安村滑坡对周边坡体的影响较大，目前利用InSAR技术对广安村滑坡进行监测的研究较少，本文采用SBAS-InSAR技术获取广安村滑坡后的形变信息，综合SAR影像、Sentinel光学影像分析了滑坡形变特征，更全面地反映了滑坡特征和滑坡后的稳定情况，为当地滑坡防治与监测预警提供了数据参考。

1 研究区概况与实验数据

1.1 研究区概况

广安村滑坡位于重庆市巫溪县大河乡广安村，西溪河北岸，距离大宁河约1 km。滑坡中心位于109°36′40.35″ E、31°32′28.06″N，概况如图1所示。广安村滑坡范围广、高差大，滑移方量达到6×10^6 m^3，最大滑动距离为1 200 m[5]，所在斜坡高程介于275～1 800 m之间（图2）。研究区属亚热带季风性暖温气候，受东南季风影响，区域内气候温和、雨量丰富，多年平均年降雨量为1 333 mm，平均温度为14.7℃[4,20]。

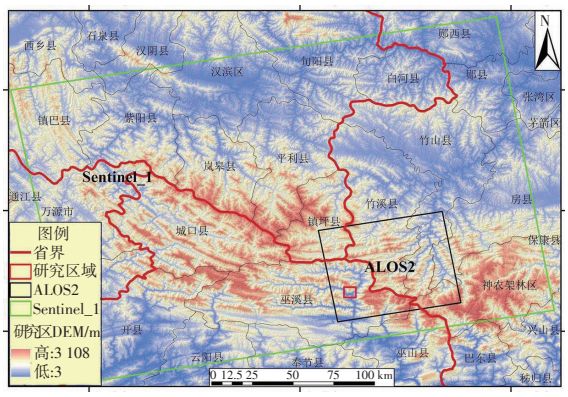


图1 研究区位置概况图

滑坡区域由上至下的主要地层为第四系、三叠系、二叠系和志留系；岩性以强溶蚀性灰岩和页岩为主[4-5]。滑坡表面土质主要由第四系崩坡积层块石土、黄褐色粉质粘土、灰岩碎石和页岩碎石组成；上部灰岩溶蚀现象明显，裂隙发育，岩体破碎，力学性质低；下部层状页岩岩体破碎。受地下孔隙水和降雨下渗等软化作用的影响，易形成上硬下软地层状态，使上部岩体在重力作用下沿页岩内部剪出滑移[4-5,20]。参考文献[4]根据现场调查和监测，将广安村滑坡分为滑移区、4个潜在滑源区和两个潜在铲刮区，如图2中滑坡等值线所示，4个潜在滑源区位于滑移区上方，两个潜在铲刮区位于滑移区左右两侧；滑移区周围地层结构较相似，在长期降雨、灰岩溶蚀以及人类活动的影响下，有再次发生滑移的可能性，对周边居民、道路和河流的危害性较大，因此必须加强对滑坡体稳定性的监测分析。

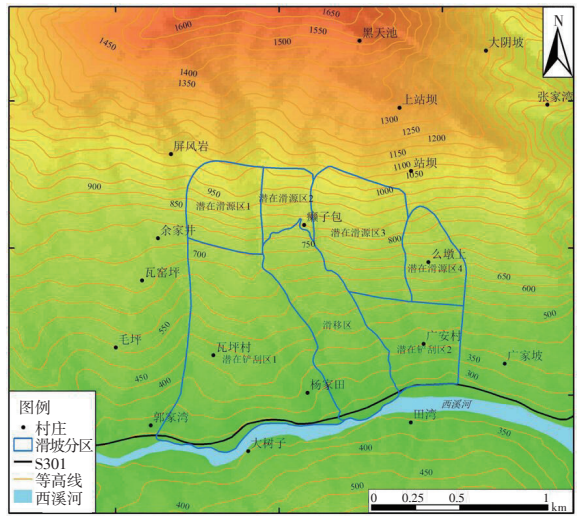


图2 广安村滑坡DEM等值线图

1.2 实验数据

本文获取覆盖研究区的31景Sentinel-1A升轨数据，时间跨度为2017-03-31—2018-10-26，以2017-10-31影像为主影像进行影像配准，挑选干涉图，最终获得41组质量较好的干涉图，时空基线如图3所示。在数据处理过程中，首先对干涉图进行平地相位、地形相位去除，再进行滤波、相位解缠等处理，获取精密基线信息进行基线精化处理，并对地形相位残差和大气相位进行分离去除。其中外部DEM采用美国航天局发布的30 m分辨率SRTM DEM产品进行地形相位去除；并下载Sentinel-1A卫星POD精密轨道

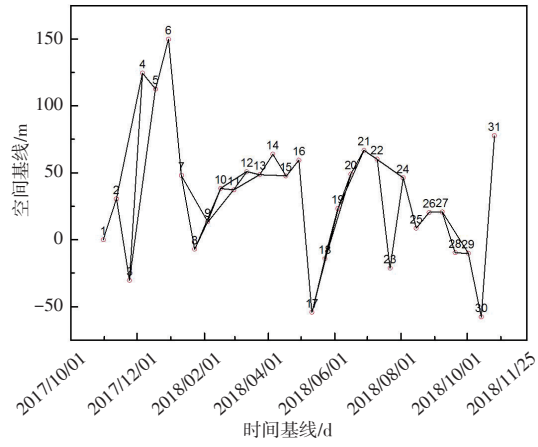


图3 时空基线信息图

数据对SAR影像进行轨道精化，以减小轨道误差的影响，提高数据处理质量和形变相位精度。

2　实验方法

SBAS-InSAR技术是由Berardino提出的一种多主影像时序InSAR技术。SBAS-InSAR技术设置了时空基线的阈值，通过组成的若干个短时空基线子集来反演形变信息[6]。SBAS-InSAR技术基于阈值组合成不同的干涉子集，相当于对地表同一散射体进行多次重复轨道观测，构成冗余观测值，以提高形变相位与其他相位成分之间的分离精度，特别是在植被覆盖茂密地区，可减弱失相干的影响，监测结果更具可靠性[8,21]。

假设在同一区域选取 $t(t_0, t_1, t_2, \cdots, t_n)$ 时间段的 $N+1$ 景SAR影像，选择主影像、设置时间和空间基线阈值后生成 M 个干涉对，其满足的条件为[7-8]：

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

以重复轨道干涉测量为例，InSAR干涉相位可表示为：

$$\phi_{\text{int}} = \phi_{\text{fla}} + \phi_{\text{top}} + \phi_{\text{def}} + \phi_{\text{noi}} + \phi_{\text{atm}} \tag{2}$$

去除平地相位、地形相位后，生成干涉图的相位近似表达式为：

$$\delta_{\phi_i} = \phi_{t_a} - \phi_{t_b} \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_{t_a} - d_{t_b}) + \Delta\phi_i^{\text{topo}} + \Delta\phi_i^{\text{atm}} + \Delta\phi_i^{\text{noi}} \tag{3}$$

式中，t_a、t_b 分别为组成干涉对的两景SAR影像的获取时间；d_{t_a} 和 d_{t_b} 分别为 a、b 时刻相对于参考影像在雷达视线方向的形变量；$\Delta\phi_i^{\text{topo}}$ 为地形残差相位；$\Delta\phi_i^{\text{atm}}$ 为大气延迟相位；$\Delta\phi_i^{\text{noi}}$ 为噪声相位成分；λ 为雷达波长。

去除地形相位残差、大气相位和噪声相位后，形变相位可近似表示为：

$$\delta_{\phi_i} = \phi_{t_a} - \phi_{t_b} \approx \frac{4\pi}{\lambda}(d_{t_a} - d_{t_b}) \tag{4}$$

形变相位的矩阵表示形式为：

$$\boldsymbol{A}\phi = \delta_\phi \tag{5}$$

在每个基线集合中，利用最小二乘法计算地表时序形变，利用SVD连接不同基线子集，获取最终的时序形变[7]。

3　实验结果分析

3.1　形变速率分析

首先对Sentinel-1A数据进行处理，得到LOS向形变结果；再分解为垂直方向，获取滑坡后（2017-10-31—2018-10-26）垂向年均形变速率图（图4），可以看出，在对应监测时间段，形变速率范围在-140～60 mm/a之间，形变速率最大值位于潜在滑源区2中部，达到-137 mm/a；滑移区左侧边界和前缘位置有明显形变，最大形变速率位于滑移区中部，达到-127 mm/a，说明滑坡后该区内仍处于不稳定状态；在潜在滑源区1、2、3、4中均存在明显形变趋势，滑移区发生滑动后，上部坡体的应力平衡被打破，在应力重新分布的过程中会持续发生形变；潜在滑源区2、3与滑移区上缘部分接壤，滑移区滑动后，导致接触部分的岩体失稳并受上部岩体挤压发生形变，形变量大于两侧的潜在滑源区1、4。滑坡出露岩层以灰岩和薄层状页岩为主，灰岩溶蚀现象严重，岩体裂隙发育；灰岩受雨水侵蚀较严重，在长期溶蚀作用下易失稳发生滑坡[4]，因此在持续降雨的情况下应密切关注滑坡体前缘和后缘潜在滑源区2的稳定状况。

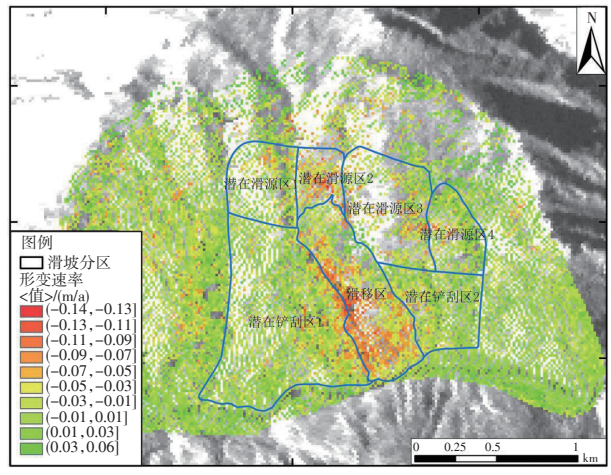


图4　广安村滑坡年均形变速率图

3.2　时序累积沉降结果分析

本文选取2017年10月—2018年10月部分时间节点的累积沉降图绘制广安村滑坡后时序形变图（图5），可以看出，滑坡发生后坡体存在明显形变，随着时间的推移，滑移区前缘坡体红色明显加深，范围扩大，说明该区域累积形变量在增加，处于不稳定状态。根据文献资料，在铲刮区1右侧与滑移区交界处有自然冲沟，冲沟内常年有水，水量与地下水和自然降雨有关[4]，因此在时序图中可发现滑移区左侧边界形变较明显，说明滑坡发生后，前缘坡体处于缓慢蠕滑阶段，同时受到地下水和自然降水的影响。滑坡后缘4个潜在滑源区内均可见明显的形变特征，在滑坡后缘区内出现多条贯通型拉张裂缝[4]，易受降雨下渗的影响，不断侵蚀软化发生缓慢形变。广安村滑坡发生后局部坡体仍处于蠕滑状态，一方面大量滑移物

堆积在滑坡前缘区域，形成松散堆积体，在河水侵蚀和持续降雨下易发生形变；另一方面，由于滑移区周围出现多条裂缝，在雨水下渗和地下水侵蚀作用下会发生缓慢形变。

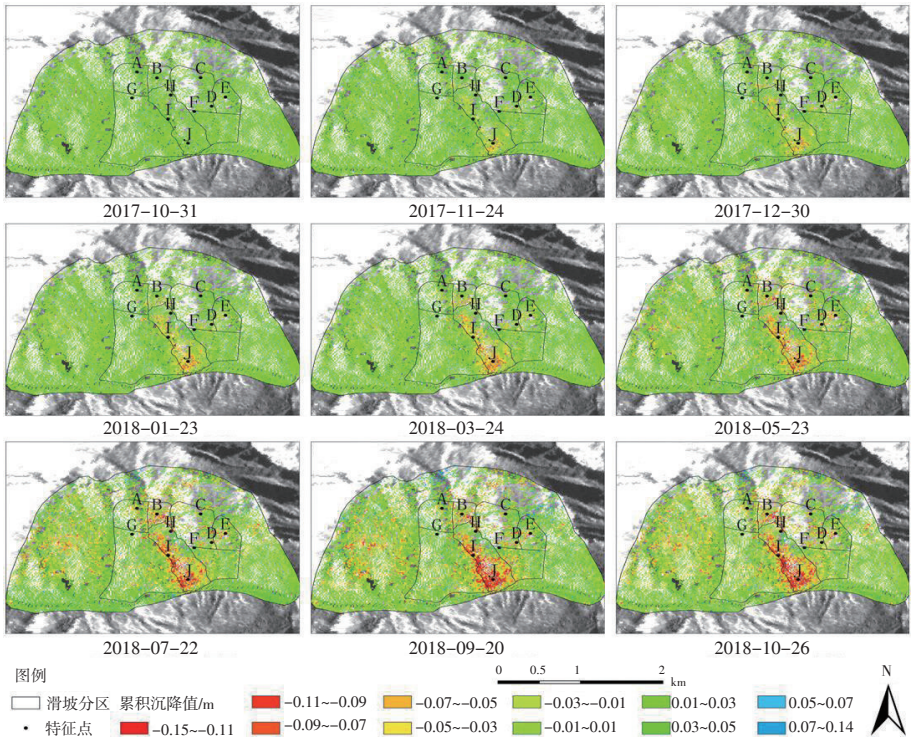


图5　广安村滑坡时序形变图

4　广安村滑坡形变分析

4.1　特征点时序累积形变分析

为了进一步分析形变特征，在滑移区、潜在滑源区和铲刮区选择对应特征点，共10个点，编号为A~J，如图5所示。广安村滑坡发生后对周边山体造成严重影响，在灰岩溶蚀、雨水下渗以及临空条件等因素作用下易发生小规模滑动，因此本文提取对应特征点的时序形变信息，绘制时序形变曲线，如图6所示。

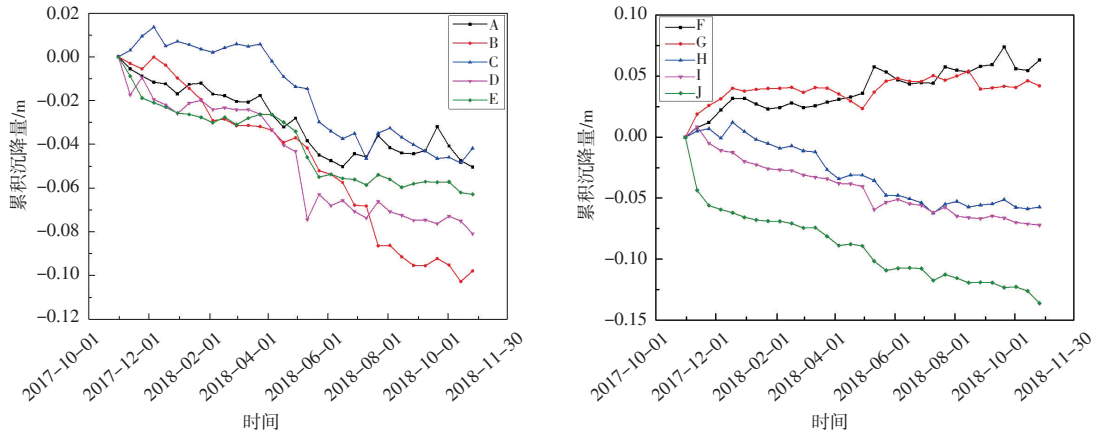


图6　特征点时序形变曲线

1）潜在滑源区1。A点位于潜在滑源区1后部，2017-10-31—2018-04-05一直缓慢下沉，累积沉降量达到-27 mm；2018-04-05—2018-07-10累积沉降曲线明显变陡，累积沉降量增大，达到-46 mm；截至2018-10-26，最终累积沉降量为-50 mm。

2）潜在滑源区2。B点位于潜在滑源区2中部，下沉趋势明显，累积沉降量最大为-98 mm。潜在滑源区2位于滑移区正上方，滑坡发生后，在滑移区后侧形成高约30 m的岩质陡壁[4]，相当于形成自然切坡，滑坡后缘坡体凸出部就形成临空条件，在恢复力学平衡过程中易受降雨侵蚀、灰岩溶蚀作用发生形变。

3）潜在滑源区3。C、D两点位于潜在滑源区3，C点形变曲线先明显上升，2018-04-01开始呈下降趋势，最终累积沉降量为-42 mm，C点位于潜在滑源区3后侧，易受上方坡体的推挤；D点在2017-10-31—2018-05-11下沉较快，累积沉降量达到了-74 mm，2018年5月以后形变趋势变缓，最终累积沉降量为-81 mm。

4）潜在滑源区4。潜在滑源区4没有直接与滑移区接壤，但在滑坡发生后，区域中部出现贯通性拉张裂缝[4]。E点位于潜在滑源区4中部，存在明显形变，时序累积沉降量达到-63 mm。

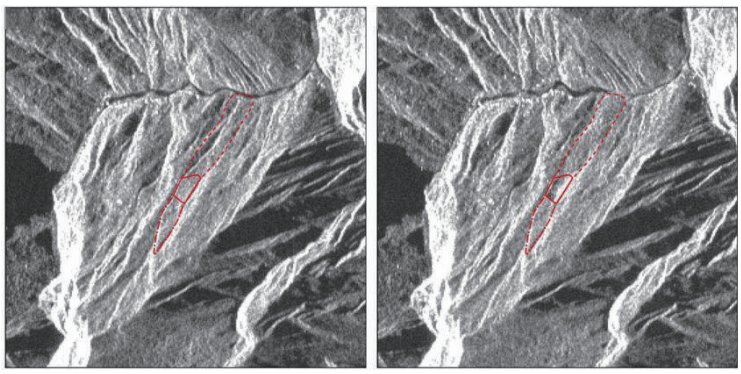
5）铲刮区。F和G点分别位于两侧铲刮区，受后部坡体变形影响，在铲刮区后部出现挤压变形，形成裂缝。F和G点的时序形变曲线呈上升趋势，F点的最终形变值为63 mm，G点的形变值为42 mm。

6）滑移区。H、I和J点位于滑移区，H点在滑移区后部，累积沉降量为-57 mm；I点在滑移区中部，累积沉降量为-72 mm；J点在滑移区前部，累积沉降量为-136 mm，说明滑坡发生后滑移区内仍存在局部滑动，在滑移区左侧和前缘区域变形较活跃。

4.2　SAR强度影像与光学影像的对比分析

滑移区后缘高程约为850 m，滑坡发生后上部岩体蕴藏着高重力势能，在推挤和冲击作用下，引起下部不稳定岩体发生滑移，使滑坡规模扩大、破坏程度增强。滑坡前后的SAR强度影像和Sentinel-2光学影像如图7所示。从SAR卫星视角观察，图7a、7b中红色实线部分在滑坡前后变化显著，可见明显断裂痕迹；红色点划线部分岩体位于断裂处正上方，下部岩体发生滑移后，导致上部岩体处于临空状态，相对应的特征点B处的累积沉降量达到-98 mm，增加了再次滑动的风险，必须进行密切关注；红色虚线部分为SAR影像上的滑移范围，进一步说明了上部岩体在高海拔和高势能的作用下，发生滑坡的冲击力和破坏力更强，滑坡范围更广。光学影像可直观反映滑坡的范围边界特征，滑坡后缘坡体发生滑动后，在滑移区中部造成堆积，同时进一步推挤前缘的坡体发生滑动。由滑坡前后的光学影像可知，滑坡造成后缘盘山道路中断，前缘西溪河堵塞，河道明显变宽，积水增加，形成堰塞湖，给群众生命财产安全和抢险救灾工作造成一定困难。

由此可见，高位滑坡一方面由于蕴藏着高势能，滑坡范围广、危害性强；另一方面滑坡发生后，造成后部岩体临空，处于不稳定状态，将经常性发生小规模滑动，使得滑坡后壁不断向后扩张，必须采取一定监测措施，防止突发性滑动对滑坡前缘的破坏。



a 滑坡前Sentinel-1A影像　　b 滑坡后Sentinel-1A影像



c 滑坡前Sentinel-2A影像　　d 滑坡后Sentinel-2A影像

图7　广安村滑坡前后SAR强度影像与光学影像

5 结 语

本文利用SBAS-InSAR技术获取了广安村滑坡后的时序形变信息，并综合研究区SAR强度影像和光学影像对形变特征进行了分析。分析结果表明，广安村滑坡在滑坡后存在明显形变趋势，处于缓慢形变状态，2017-10-31—2018-10-26垂向形变速率在-140～60 mm/a之间；4个潜在滑源区存在明显形变特征，其中B点累积沉降量达到-98 mm；滑移区左侧形变较活跃，前部J点累积沉降量达到-136 mm。微波信号对地表植被有一定的穿透性，SAR强度影像能清楚反映地表形态起伏状况，对地表纹理结构的表达更加清楚，在滑坡识别分析中，可以更好地辅助光学影像进行解译。针对地形条件复杂的滑坡监测，SBAS技术可有效提高时空相干性，保证监测结果的可靠性。综合上述分析，广安村滑坡局部坡体仍处于缓慢形变状态，建议应在雨季加强对滑坡后缘稳定性的监测。

参考文献

[1] 邓云涛. 基于InSAR技术的岷江上游滑坡早期识别[D]. 绵阳:西南科技大学,2021

[2] 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

[3] 张路,廖明生,董杰,等. 基于时间序列InSAR分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别:以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2018,43(12):2 039-2 049

[4] WANG L Q, YIN Y P, HUANG B L, et al. Formation and Characteristics of Guang'an Village Landslide in Wuxi, Chongqing, China[J]. Landslides, 2019, 16(1): 127-138

[5] 李浩,乐琪浪,孙向东,等. 巫溪县西溪河北岸高位高危碎屑流滑坡特征与机理研究[J]. 水文地质工程地质,2019,46(2):13-20

[6] 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):2 375-2 383

[7] 闫怡秋,郭长宝,张永双,等. 基于SBAS-InSAR技术的西藏雄巴古滑坡变形特征[J]. 地质学报,2021,95(11):3 556-3 570

[8] 陆会燕,李为乐,许强,等. 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[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(9):1 342-1 354

[9] 张佳佳,高波,刘建康,等. 基于SBAS-InSAR技术的川藏铁路澜沧江段滑坡隐患早期识别[J]. 现代地质,2021,35(1):64-73

[10] 王尚晓,李士垚,牛瑞卿. 木鱼包滑坡形变特征的InSAR监测分析[J]. 长江科学院院报,2022,39(4):77-84

[11] 殷跃平,王文沛,张楠,等. 强震区高位滑坡远程灾害特征研究:以四川茂县新磨滑坡为例[J]. 中国地质,2017,44(5):827-841

[12] 许强,李为乐,董秀军,等. 四川茂县叠溪镇新磨村滑坡特征与成因机制初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,2017,36(11):2 612-2 628

[13] 王群,张蕴灵,范景辉,等. 基于PS-InSAR和offset tracking技术的金沙江白格滑坡形变监测[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(4):340-345

[14] 杨成生,董继红,朱赛楠,等. 金沙江结合带巴塘段滑坡群InSAR探测识别与形变特征[J]. 地球科学与环境学报,2021,43(2):398-408

[15] 朱赛楠,殷跃平,王猛,等. 金沙江结合带高位远程滑坡失稳机理及减灾对策研究:以金沙江色拉滑坡为例[J]. 岩土工程学报,2021,43(4):688-697

[16] 史绪国,张路,许强,等. 黄土台塬滑坡变形的时序InSAR监测分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):1 027-1 034

[17] 蔡杰华,张路,董杰,等. 九寨沟震后滑坡隐患雷达遥感早期识别与形变监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1 707-1 716

[18] 朱同同,史绪国,周超,等. 利用2016—2020年Sentinel-1数据的三峡库区树坪滑坡稳定性监测与分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1 560-1 568

[19] ZHAO F M, MENG X M, ZHANG Y, et al. Landslide Susceptibility Mapping of Karakorum Highway Combined with the Application of SBAS-InSAR Technology[J]. Sensors,2019,19(12):2 685

[20] 孙莹洁,邓兵,乐琪浪. 大宁河上中游地质灾害发育特征及对比研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(1):69-75

[21] ZHAO C Y, KANG Y, ZHANG Q, et al. Landslide Identification and Monitoring Along the Jinsha River Catchment (Wudongde Reservoir Area), China, Using the InSAR Method[J]. Remote Sensing,2018,10(7):993

第一作者简介：牛敏杰（1995—），硕士研究生，主要研究方向为InSAR数据处理与分析。