引文格式：康利军,魏长婧,李昊,等. 运用InSAR技术识别郑州西部山区地质灾害隐患[J]. 地理空间信息, 2026, 24(3): 67-70. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2026.03.014

运用InSAR技术识别郑州西部山区地质灾害隐患

康利军[1,2]，魏长婧[1,2*]，李　昊[1,2]，李叶繁[1,2]，孙金烨[1,2]，秦　琪[1,2]
（1. 河南省地质局地质灾害防治中心，河南 郑州 450000；
2. 河南省地质环境保护与生态修复工程技术研究中心，河南 郑州 450000）

摘　要：郑州西部山区地质条件复杂，地质灾害类型多样且分布密集。基于合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术，利用时间序列分析对研究区地质灾害隐患进行了大范围、长时序的精准识别与监测，获取了研究区2017—2023年地表形变速率分布和时间序列形变信息，识别出375处地质灾害隐患点，包括滑坡69处、崩塌222处、泥石流2处、地面塌陷2处、地面沉降80处。研究表明，InSAR技术在复杂山区大范围、长时序地表形变监测中具有良好的精度与适应性，能为地质灾害隐患识别与防治提供高效、可靠的数据支持，有助于提高区域地质灾害的早期识别与应急管理能力。

关键词：InSAR技术；地质灾害；地表形变；隐患识别
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）03-0067-04

Potential Geological Hazards Identification in the Western Mountainous Areas of Zhengzhou City Based on InSAR Technology

KANG Lijun[1,2], WEI Changjing[1,2], LI Hao[1,2], LI Yefan[1,2], SUN Jinye[1,2], QIN Qi[1,2]
(1. Geological Hazard Prevention Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450000, China;
2. Henan Engineering Research Center for Geo-environment Protection and Ecological Restoration, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The geological conditions in the western mountainous areas of Zhengzhou City are complex, with diverse types of geological hazards are densely distributed. Based on interferometric synthetic aperture radar (InSAR) technology, we used time series analysis to identify and monitor potential geological hazards in the study area on a large scale and over a long time series, obtained the distribution of surface deformation rates and time series deformation information in the study area from 2017 to 2023, and identified 375 potential geological hazard sites, including 69 landslides, 222 collapses, 2 debris flows, 2 ground collapses, and 80 ground subsidence. Research result shows that InSAR technology has good accuracy and adaptability in large scale, long time series surface deformation monitoring in complex mountainous areas, which can provide efficient and reliable data support for the identification and prevention of potential geological hazards, contributing to the improvement of early identification and emergency management capabilities of regional geological hazards.

Key words: InSAR technology, geological hazard, surface deformation, potential hazard identification

地质灾害是指由自然因素或人为活动引发的危害人民生命和财产安全的山体崩塌、滑坡、泥石流、地面塌陷、地面沉降、地裂缝等与地质作用相关的灾害[1]。我国疆域辽阔，地质环境复杂多变，叠加频繁多样的人为工程活动，导致我国成为地质灾害高发的国家之一[2-3]。传统地质灾害隐患数据主要通过地方巡查员上报或政府组织的区域性统一排查获取，存在一定的局限性：①工作量庞大，地形复杂或偏远地区易存在排查盲区；②统一排查周期较长，难以及时发现地物的细微变化和新出现的地质灾害隐患点[4]；③受巡查员主观判断和经验差异影响，可能导致部分隐患点识别不准确或存在漏报现象[5]。部分学者[6-9]基于InSAR技术开展了地质灾害隐患点的识别和监测，结果表明InSAR技术具有广泛的适应性和较高的准确性。为全面掌握郑州西部山区地质灾害隐患的分布特征，本文利用InSAR技术对研究区地质灾害隐患进行了大范围、长时序的精准识别与监测，揭示了研究区地质灾害隐患点分布的空间特征与成因机制，有助于提高区域地质灾害早期识别与应急管理能力。

1　研究区概况与数据来源

本文选取的研究区地处中原腹地，地形地貌类型丰富，包括构造侵蚀地貌、河流堆积地貌和风成地貌。受嵩阳、中岳、少林等多次造山运动以及不同期

项目来源：河南省地质局2023年度局管地质科研类资助项目（202303）。
第一作者简介：康利军（1989—），硕士，工程师，主要从事地质测绘和地质灾害监测防治工作，E-mail：1129828189@qq.com。
通信作者：魏长婧（1986—），硕士，工程师，注册测绘师，主要从事地质灾害监测预警和防治工作，E-mail：644046284@qq.com。

次构造作用的叠加影响，区域内构造形态复杂、格局多样。尤其是西部山区生态地质环境脆弱，降水时空分布不均，地质灾害诱发因素复杂，灾害发生频率高，危害严重。上述因素导致郑州市地质灾害类型发育齐全，主要包括崩塌、滑坡、泥石流和地面塌陷等[10-11]。2021年郑州“7·20”特大暴雨破坏了西部山区和黄土区原有的地质平衡状态，且近年来极端天气事件频发，新增地质灾害隐患点呈快速增长趋势。研究区涵盖登封、新密、巩义、荥阳和上街5个区市，总面积为4 261 km^2，常住人口约为320万人，行政区划包括67个镇和1 363个行政村与社区。多年平均气温为14.25℃，年均风速为2.95 m/s，年均降水量为683.54 mm。根据郑州市2023年地质灾害隐患点台账，郑州市地质灾害隐患点共计429处，包括滑坡64处，占比为14.92%；崩塌322处，占比为75.06%；泥石流11处，占比为2.56%；地面塌陷31处，占比为7.23%，地裂缝1处，占比为0.23%。其中，西部山区5市区地质灾害隐患点共计395处，占全市地质灾害隐患总数的92.07%，包括滑坡61处，占全市滑坡的95.31%，占全市灾害总数的15.44%；崩塌292处，占全市崩塌的90.68%，占全市灾害总数的73.92%；泥石流11处，占全市泥石流的100%，占全市灾害总数的2.78%；地面塌陷31处，占全市地面塌陷的100%，占全市灾害总数的7.85%。

本文以2017年3月—2023年8月194景Sentinel-1A卫星数据为雷达数据源，选取轨道参数相近且具备干涉条件的高质量影像数据，以满足InSAR数据处理需求；以SRTMGL1V003产品为DEM数据，收集2022年全年亚米级影像、2023年一季度2 m级影像以及全年覆盖的2023年亚米级影像数据，共计63景。在数据处理方面，选取Sentinel-1A卫星IW模式影像作为数据源，采用干涉点目标分析（IPTA）方法进行数据处理，获得覆盖整个研究区的年均地表形变速率图和各点位的时间序列形变信息[12]。在已有数据集及其处理结果的基础上，若有新数据加入，则保留现有干涉图，仅生成与新影像相关的干涉图。基于更新后的干涉图集检验已有永久散射体（PS）和分布式散射体（DS）点的有效性，更新其位置和观测值；再联合PS和DS点重新构建三角网，进行相位解缠，将原数据集处理结果中的DEM误差、轨道误差、大气误差等误差项作为初值，重新估计与更新各相位误差项，分离形变信号，实现形变信息在时空维上的快速更新[13]；最后通过分析从重复轨道观测获取的多时相雷达数据集中提取的具有稳定散射特性的PS和DS点上的时序相位信号，反演研究区地表形变平均速率和时间序列形变信息[14-15]。

2 研究方法与技术路线

2.1 研究方法

1）IPTA技术基于D-InSAR原理，结合小基线集干涉技术（SBAS）对雷达干涉图进行时间序列分析，获取地表形变的时间序列信息和年均形变速率。该技术通过提取PS和DS点，对城镇和非城镇区域进行地表形变监测。

2）相干散射体InSAR（PS-InSAR）技术是一种通过时间序列SAR影像精准监测地表形变的干涉测量方法。相较于传统D-InSAR技术，它能有效克服大气延迟、轨道误差和时间去相干等问题，实现毫米级精度的形变监测。其基本观测方程为：

$$\phi_{\{i,j\}} = \phi_{\{\{\mathrm{def}\},i,j\}} + \phi_{\{\{\mathrm{atm}\},i,j\}} + \phi_{\{\{\mathrm{orb}\},i,j\}} + \phi_{\{\{\mathrm{topo}\},i,j\}} + \phi_{\{\{\mathrm{noise}\},i,j\}}$$

式中，$\phi_{\{i,j\}}$为第i次观测中第j个像素点的总观测相位；$\phi_{\{\{\mathrm{def}\},i,j\}}$、$\phi_{\{\{\mathrm{atm}\},i,j\}}$、$\phi_{\{\{\mathrm{orb}\},i,j\}}$、$\phi_{\{\{\mathrm{topo}\},i,j\}}$、$\phi_{\{\{\mathrm{noise}\},i,j\}}$分别为地表形变、大气延迟效应、轨道误差、高程误差、其他噪声源引起的相位变化。

PS-InSAR的核心思想是识别长时间序列影像中具有高度相位稳定性的像素点，即PS点，并利用这些点的相位信息进行形变估计。

InSAR算法在复杂地形和城镇区域中具有较高的精度和适用性，有效解决了D-InSAR技术在时空去相干问题上的不足。本文利用该算法对郑州西部山区进行了地表形变监测与分析，为地质灾害隐患点识别提供了技术支持和科学依据。

2.2 技术路线

本文基于Sentinel-1A卫星影像，采用InSAR技术进行地表形变监测，并结合高分辨率光学影像进行地质灾害隐患点的识别与验证。具体技术路线包括：

1）数据收集与预处理。首先对Sentinel-1A卫星影像和高分辨率光学影像进行辐射校正、几何校正和配准处理，确保影像的精度；再将校正后的影像生成干涉图，为后续分析提供可靠的基础数据。

2）IPTA时间序列分析。基于SBAS和PS-InSAR技术，结合改进的IPTA方法，提取地表形变的时间序列信息，并计算年均形变速率。对PS和DS点进行时间序列分析，能深入研究地表形变的空间分布特征，进一步揭示形变的动态过程。

3）形变阈值设定与隐患点识别。根据地表形变监测成果，设定形变速率阈值为8 mm/a，结合高分辨率光学影像的解译结果，识别得到可能存在的地质灾害隐患点，并对这些隐患点进行分类汇总。通过阈值

的设定，能高效筛选出具有较大形变速率的区域，为灾害防控与风险预警提供可靠依据。

4）结果验证与评价。为验证InSAR技术提取的地表形变结果的可靠性，本文通过实地踏勘与现场数据采集的方式评估识别结果的时空分布特征和监测精度，进一步验证了InSAR在地质灾害监测中的应用效果和精确度。

3　研究结果与分析

3.1　InSAR识别结果

本文利用InSAR技术获取了研究区2017年3月—2023年8月的地表形变速率。由研究区形变监测图（图1）可知，InSAR技术可有效识别郑州西部山区地表形变情况；南部登封、新密境内嵩山—箕山—五指岭一带受强烈南北向断层、褶皱构造影响，且存在煤矿开采区，该地区地表形变速率快；北部巩义、荥阳受“7·20”特大暴雨、“8·22”暴雨叠加影响，黄土山体遭到扰动破坏，形成地表形变集中区。

基于上述监测结果，以8 mm/a为稳定点的形变速率阈值，结合亚米级光学影像解译，圈出疑似新增地质灾害隐患点375处，其中滑坡69处、崩塌222处、泥石流2处、地面塌陷2处、地面沉降80处（图2）。研究区地质灾害隐患数量多、密度大，地域性明显，识别结果与InSAR监测形变结果较一致。研究区灾害规模以中小型为主，崩塌数量多，分布范围广，以黄土崩塌为主，大多分布在东部的荥阳市和登封市南部；滑坡主要发育于南部的登封市，基本力学模式简单，处于临界平衡状态；地面塌陷主要位于登封市南部和新密一些地面沉降采空区。

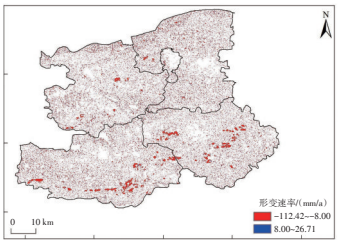


图1　研究区地表形变集中区

审图号：GS(2019)1822

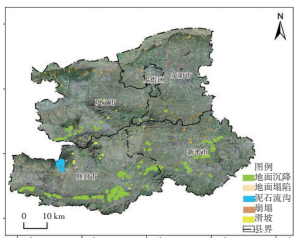


图2　研究区新增地质灾害隐患点分布

审图号：GS(2019)1822

3.2　地质灾害类型时空分布特征分析

通过综合分析InSAR监测与高分辨率影像解译结果，得到研究区不同类型地质灾害隐患点的空间分布特征。

1）滑坡隐患点主要集中于巩义市、荥阳市与登封市的山地区域。这些地区多位于断裂构造带附近，地势起伏剧烈，地质环境脆弱。结合InSAR监测结果发现，滑坡区域的形变速率较快，局部区域形变速率达−25~−45 mm/a，呈现明显的阶段性加速现象，表明滑坡活动受降雨、断裂活动和人为工程扰动因素影响显著。

2）崩塌隐患点数量最多，占比为59.2%，广泛分布于巩义市、荥阳市和登封市一带的陡坡地段。崩塌体以岩石碎屑和土体为主，具有小规模、高频次的特点，受降雨和风化作用的影响较大，且部分区域的崩塌体与人为活动（如公路建设和采矿）密切相关。

3）地面塌陷点主要集中在南部登封市、新密矿区，塌陷区域多与地下煤矿开采和采空区分布重叠，形成明显的线性分布特征。地面塌陷形变速率较快，最快可达30 mm/a，呈持续性的累积沉降趋势。

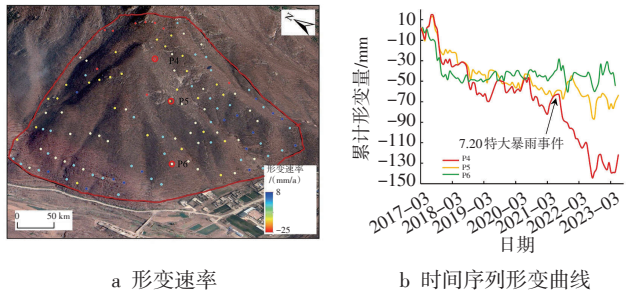
4）地面沉降隐患点主要分布于登封矿区和新密市南部一带，受煤矿深度开采的影响较显著。时间序列分析显示，沉降过程具有持续性加速趋势，部分区域存在多期沉降叠加现象，表明该区域的地质结构稳定性较差，易引发次生灾害。

整体来看，研究区地质灾害隐患呈现显著的空间集聚性和区域差异性，特别是山区的滑坡和崩塌活动频繁，矿区周边的地面沉降和塌陷问题突出，表明人为工程活动与自然因素共同作用导致区域内地质环境持续恶化。因此，加强这些区域的长期监测和风险防控具有重要的现实意义。

3.3　隐患点时空演化特征

本文对研究区内3个典型地质灾害隐患点2017—2023年InSAR监测数据进行时间序列分析，以揭示研究区地质灾害隐患点的时空演化特征。

1）登封市唐庄镇王河村的地灾隐患点分析。该隐患点位于太室山北麓，地形复杂且地质环境较脆弱，滑坡和崩塌隐患分布密集。由形变速率空间分布（图3）可知，区域内散射点形变速率差异明显，尤其以P4、P5、P6监测点最为突出。这3个监测点的形变表现出明显的季节性波动规律，特别是在2021年郑州“7·20”特大暴雨事件后，形变趋势发生明显变化，P4点形变量急剧增大，累计形变量迅速降至−140 mm左右，体现了强降雨对地质灾害隐患点的显著触发作



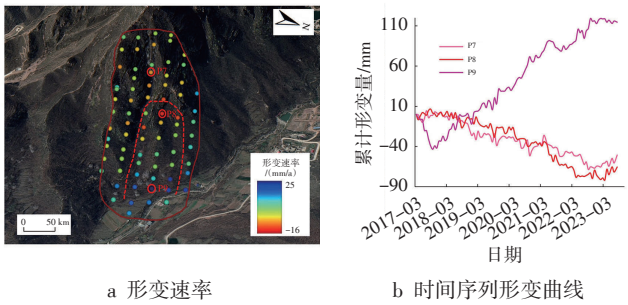
a 形变速率　　b 时间序列形变曲线

图3　登封王河地质灾害隐患点形变速率分析

用，P5和P6点的形变量亦在暴雨事件后显著增加，但幅度较小，累计形变量分别约为−70、−50 mm，说明不同位置的滑坡或崩塌隐患点在降雨触发作用下的响应强度不同。整体上，研究区地灾隐患点的形变与降雨事件具有高度相关性，尤其是极端降雨对滑坡与崩塌事件具有显著的触发效应。研究结果强调了山区脆弱的地质环境在强降雨条件下的灾害敏感性，未来应持续加强对该类地区地质灾害的监测与防治工作。

2）新密市尖山乡下寺沟村的地灾隐患点分析。以P7、P8、P9为典型监测点，区内的地表形变速率呈现明显的区域差异性（图4），其中靠近坡体顶部的P7点形变速率以正值为主，表现为持续上升趋势；位于坡体中部至坡脚的P8、P9点则以负值为主，呈显著下降趋势。P7点的累计形变量持续增加，2023年约为100 mm，表明坡体顶部区域可能发生了明显的隆升或膨胀性形变，推测与地下水变化或地表土体的膨胀作用有关；P8点累计形变量逐渐减小，整体呈缓慢下降趋势，累计下降约−50 mm，说明该区域可能处于持续缓慢的沉降状态；P9点的形变量下降幅度最剧烈，累计形变量2023年约为−80 mm，说明该区域地质环境更脆弱，可能存在显著的滑坡或塌陷隐患。从整体空间形变特征分析，该区域表现出典型的上下差异性形变模式，这可能与坡体内部应力变化、地下水活动、地质结构和人工扰动有关。此外，2021年前后区域内形变趋势变化明显，特别是P9点加速沉降趋势更显著，说明可能受到该时期强降雨或人为活动扰动的共同影响。综上所述，该区域地质灾害隐患表现出典型的空间差异化特征，尤其需关注坡脚处的潜在灾害风险，应强化监测预警和防治措施，避免潜在灾害的发生。

3）荥阳市广武镇王沟村的地灾隐患点分析。由图5可知，该区域的形变速率变化较剧烈，尤其是在“7·20”特大暴雨事件后，P10和P11点的形变速率急剧增加，说明该区域的地质灾害隐患不仅与气候因素（降雨）相关，也与矿区开采活动密切相关；P10、P11、P12点位于矿区，形变速率的波动与矿区开采活动密切相关，暴雨后矿区的地下水位变化可能导致岩

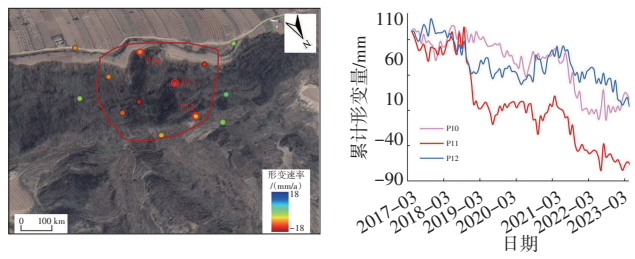


a 形变速率　　b 时间序列形变曲线

图4 新密下寺沟地质灾害隐患点形变速率分析

体的不稳定，进而引发地面沉降或塌陷现象。P10、P11、P12点的时间序列曲线显示，在“7·20”特大暴雨后，P10和P11点的形变速率持续加快且波动较大，这可能是由于暴雨导致地下水流动改变了矿区岩体的稳定性，进一步加剧了地面沉降或塌陷。该区域整体表现为坡体的缓慢沉降，坡体中下部区域更明显，这可能与坡体物质结构松散、坡体下方地下水活动以及持续的人为工程活动密切相关。结合监测数据可以推测，该区域可能存在一定程度的滑坡或缓慢沉降隐患，未来应持续进行重点监测和预防性治理，以防范可能发生的地质灾害风险。

综上所述，在南部山区（P4、P5、P6点），强降雨导致滑坡和崩塌隐患点形变速率急剧增加，暴雨是主要诱因；在南部矿区（P7、P8、P9点），人为活动是引发地质灾害隐患的主要原因，形变速率在2020年有所增加；在北部丘陵区（P10、P11、P12点），矿区开采和降雨共同作用，导致该区域的形变速率波动较大，地质灾害隐患较严重。这些分析有助于更好地理解地质灾害隐患点的时空演化规律，为灾害预警和防治工作提供支持。



a 形变速率　　b 时间序列形变曲线

图5 荥阳王沟地质灾害隐患点形变速率分析

4 结 论

本文利用InSAR技术对郑州西部山区地质灾害隐患进行长时序、大范围的动态监测。

1）利用InSAR技术获取了研究区2017—2023年的地表形变速率空间分布和时间序列形变特征，识别出375处地质灾害隐患点，包括滑坡69处、崩塌222处、泥石流2处、地面塌陷2处、地面沉降80处，揭示了隐患点分布的空间特征与成因机制。

2）研究区内地质灾害隐患具有明显的空间集聚性与多样化特点，北部巩义、荥阳以滑坡和崩塌为主，南部登封、新密一带地面沉降与塌陷突出。区域内灾害的发生与发展受断裂构造活动、强降雨事件和人为工程活动等因素的综合影响。

3）InSAR技术在大范围、长时间地表形变监测中

（下转第83页）