

doi:10.16112/j.cnki.53-1223/n.202506060001

引用格式: 聂久添, 王瑞亭, 喜文飞, 等. 极端暴雨下基于 PS-InSAR 技术的城市地铁沿线地表形变研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2026, 51(1): 94-101.

Citation: NIE Jiutian, WANG Ruiting, XI Wenfei, et al. Surface Deformation along Urban Subway Lines under Extreme Rainstorms: A Study Based on PS-InSAR Technology[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2026, 51(1): 94-101.

极端暴雨下基于 PS-InSAR 技术的 城市地铁沿线地表形变研究

聂久添¹, 王瑞亭², 喜文飞^{2*}, 张冰冰³, 杨坤武²

(1. 河南地矿职业学院, 河南 郑州 451464; 2. 云南师范大学 地理学部, 云南 昆明 650500;
3. 郑州美盛房地产开发有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 地铁沿线地表形变的监测与分析是保障轨道交通运营安全的关键环节。针对当前缺乏极端暴雨事件影响下城市地铁网络地表形变的专项研究这一空白, 以郑州市核心城区为研究区, 采用 PS-InSAR 技术对 Sentinel-1A 卫星数据进行时序分析, 获取研究区地表形变信息; 同时结合城市地铁线路分布图, 以及降雨量、土壤特性、洪水分布等多源数据, 系统分析地铁沿线地表形变特征与规律。结果表明: 研究区内地表形变速率范围为 -28.13 mm/a 至 26.88 mm/a, 累积形变量超过 40 mm, 存在明显的形变集中区域; 研究期覆盖 2021 年 7 月郑州特大暴雨事件, 受强降雨影响, 7—8 月研究区累积形变量呈显著上升趋势, 表现出明显的时滞性与持续性形变特征。研究成果可为郑州市地下工程运行安全评估、灾害预警及城市排水规划提供技术支撑与科学依据。

关键词: PS-InSAR 技术; 城市地铁; 地表形变; 监测

中图分类号: U231.94 文献标识码: A 文章编号: 1007-855X(2026)01-0094-08

Surface Deformation along Urban Subway Lines under Extreme Rainstorms: A Study Based on PS-InSAR Technology

NIE Jiutian¹, WANG Ruiting², XI Wenfei^{2*}, ZHANG Bingbing³, YANG Kunwu²

(1. Henan Geology Mineral College, Zhengzhou 451464, China; 2. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 3. Zhengzhou Meisheng Real Estate Development Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Monitoring and analyzing ground deformation along subway lines is important for keeping rail transit systems safe. Because there are still few studies that focus on how extreme rainstorms affect deformation across an urban subway network, this study selects the central urban area of Zhengzhou as the study site. We apply PS-InSAR to Sentinel-1A time-series data to derive surface deformation in the region. We then combine the subway line map with multi-source information, including rainfall, soil properties, and flood extent, to describe deformation patterns along the subway corridors. The results show that the surface deformation rate ranges from

收稿日期: 2025-06-06. 基金项目: 云南省重大科技专项(202202AD080010); 河南省科技攻关项目(252102320089).

作者简介: 聂久添(1989-), 男, 讲师. 主要研究方向: 遥感与地理信息系统、InSAR 形变监测. E-mail: 529855382@qq.com

通信作者: 喜文飞(1984-), 男, 博士, 副教授. 主要研究方向: 无人机图像处理, 三维模型构建, 变形监测.

E-mail: xiwenfei911@163.com

-28.13 mm/a to 26.88 mm/a. Cumulative deformation exceeds 40 mm, and several clear deformation clusters can be identified. The study period includes the extreme rainstorm that occurred in Zhengzhou in July 2021. After this event, cumulative deformation increases markedly from July to August, showing an obvious time lag and a deformation signal that persists for some time. These findings can support safety assessment for underground engineering in Zhengzhou, as well as disaster warning and urban drainage planning.

Keywords: PS-InSAR technology; urban subway; ground deformation; monitoring

0 引言

全球气候变化导致暴雨事件呈现频发化、极端化趋势。根据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第六次评估报告,气温每上升 1℃,强降水发生频率约增加 0.3 倍;自 1950 年以来,全球陆地极端降水事件的平均强度每 10 年增长 1.3%~2.5%。此类极端降水事件会对城市地表与地下系统造成显著影响^[1-2]。以 2021 年 7 月河南特大暴雨为例,郑州市日降雨量与小时降雨量均突破历史极值,引发严重城市内涝灾害^[3]。在地铁分布密集的核心城区,暴雨导致的地下水位波动与土体结构扰动,进一步加剧了地面形变过程,凸显出城市地下基础设施对极端气候事件的高度敏感性^[4]。因此,对地铁沿线区域开展地表形变监测,并探究其在极端气象事件后的形变特征,对优化城市基础设施建设与提升安全防范能力具有重要意义^[5-6]。

传统的形变监测方法(如水准测量、GPS 测量)精度较高,但监测范围有限,周期也较长,且成本高,难以适用于如今大范围、高频次、高精度的监测需求^[7-8]。合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术具有全天候、覆盖范围大、精度较高等优点,已经被广泛用于城市地质环境监测和地质灾害预警,并逐渐成为城市地表形变监测的重要方法^[9-10]。例如,刘浩^[11]采用 DS-InSAR 技术监测郑州地面沉降,获取了 2021 年郑州地区地表沉降信息;Zhou 等^[12]基于 MT-InSAR 与 XGBoost 模型,分析郑州市“7·20”特大暴雨事件前后的地面形变,发现暴雨后出现明显的沉降洼地和抬升区,沉降累积量也明显增加。在多种 InSAR 方法中,PS-InSAR 在传统 InSAR 基础上提高了精度和稳定性,适合对城市建筑、道路等稳定目标进行长期监测,精度可达到毫米级^[13-14]。Osmanoğlu 等^[15]使用 PS-InSAR 揭示了墨西哥城地铁在建设及运营阶段对地表沉降的影响;Han 等^[16]基于 PS-InSAR 监测武汉地表沉降,并分析了地铁沿线的沉降特征。该方法通过提取多时相 SAR 影像的相位信息,能够精准获取地表高程变化,在城市地表形变监测中具有广阔的应用前景^[17-19]。

本研究以郑州市核心城区作为研究区,在 Sentinel-1A 数据的基础上采用 PS-InSAR 对 2021 年 3 月至 11 月期间的地表形变进行监测;同时聚焦地铁沿线 600 m 范围区域,结合有关 2021 年 7 月特大暴雨相关数据、土壤特性数据和地铁运营资料,对地铁沿线地表在极端暴雨背景下的形变情况进行综合分析。研究结果可以为郑州市地下工程运行安全评估、灾害预警及城市排水规划提供技术支撑和科学依据。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区及地铁线路概况

本研究选取郑州市中心城区的二七区、管城回族区、惠济区、中原区和金水区 5 个行政区作为研究区,统称“郑州市核心城区”。郑州市地处河南省中北部,东临开封市,西接洛阳市,南邻许昌市,北靠新乡市,是国家重要的综合交通枢纽与国家中心城市之一。研究区位于黄河以南,属典型的温带大陆性季风气候,四季分明,年降水量 600~700 mm;地势呈西南高、东北低的阶梯状下降趋势。2021 年 7 月 20 日,郑州市遭遇极端强降雨天气,单日降水量达 624.1 mm,最大小时降水量高达 201.9 mm。其强度与影响范围均突破历史纪录,远超出城乡防洪排涝能力,导致全市城乡大面积受淹,城镇街道及洼地积涝严重(研究区概况见图 1)。

截至 2022 年 7 月,郑州地铁已开通 1 号线、2 号线、3 号线、4 号线、5 号线、14 号线及城郊线共 7 条线路,总里程达 215.4 km(图 2)。

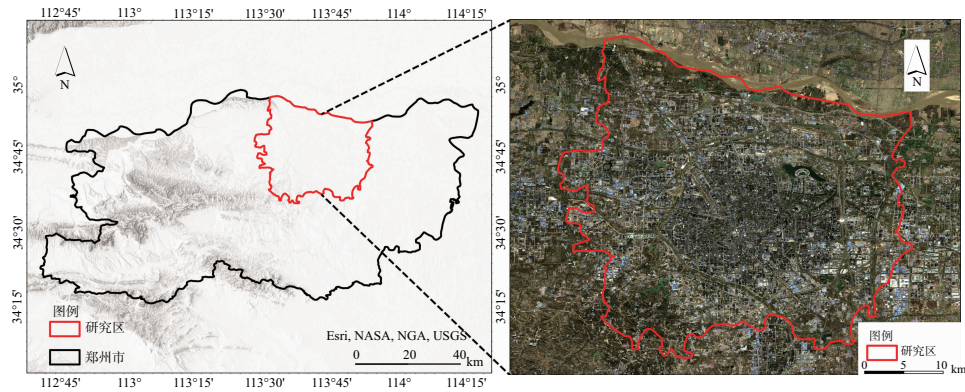


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the research area

1.2 数据源

本研究选用欧洲空间局(ESA)提供的2021年3月至2021年11月哨兵一号(Sentinel-1A)卫星影像,均为干涉宽幅模式(Interferometric Wide Swath, IW)、VV极化方式,覆盖整个郑州市域,经过裁剪处理后得到研究区影像.使用30 m分辨率的SRTM DEM数据进行影像配准与地形相位模拟计算.

本文中分析使用的郑州市土壤类型数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn>)提供的1:100万土壤类型数据集.2021年逐月降水数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>).

此外,通过Sentinel-1A影像提取洪涝淹没范围作为城市洪水分布的辅助信息,支撑城市形变与洪水分析.

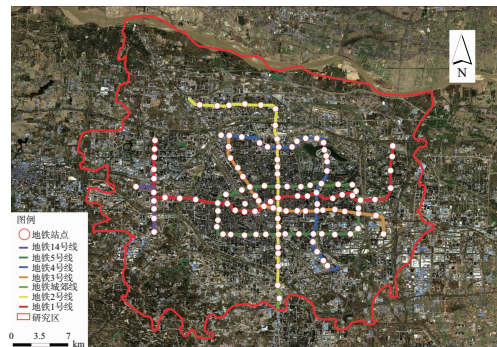


图 2 郑州地铁线路分布

Fig. 2 Distribution of Zhengzhou subway lines

2 研究方法

2.1 PS-InSAR 技术原理

PS-InSAR 技术是在传统 InSAR 技术基础上发展的一种高精度地表形变监测方法,采用单主影像干涉处理模式,通过提取时序稳定目标(永久散射体,简称 PS 点)抑制时间去相干与大气延迟的影响,并利用短时间基线、空间基线构建干涉图对,显著降低时间失相干与地形误差的干扰,理论测量精度可达毫米级^[20].其核心原理为:设研究区有 $N+1$ 幅经过配准的 SAR 影像,选取 1 幅作为主影像,其余 N 幅作为从影像,可构建 N 个干涉对;对相位稳定的 PS 点建模,通过构建空间网络并进行相位差分处理,最终解算相邻 PS 点之间的相位变化^[21].其中,单个 PS 点在第 i 次干涉图中的干涉相位 ϕ_i 可分解为多个分量,表达式为:

$$\phi_i = \phi_{\text{def},i} + \phi_{\text{topo},i} + \phi_{\text{atm},i} + \phi_{\text{orb},i} + \phi_{\text{noise},i} \quad (1)$$

式中: $\phi_{\text{def},i}$ 为地表形变引起的相位变化; $\phi_{\text{topo},i}$ 为地形残差引起的相位变化; $\phi_{\text{atm},i}$ 为大气延迟引起的相位变化; $\phi_{\text{orb},i}$ 表示卫星轨道误差引起的相位变化; $\phi_{\text{noise},i}$ 表示系统和环境噪声引起的随机相位误差项.干涉相位变化与地表沿 LOS 方向的位移关系为:

$$\phi_{\text{def},i} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot d_i \quad (2)$$

式中: λ 为雷达信号波长; d_i 为第 i 个时相与主影像之间沿 LOS 方向的地表位移.通过反演多组 ϕ_i ,得到位移序列 d_i ,即可获取高精度的地表形变信息.

2.2 PS-InSAR 技术流程

PS-InSAR 数据处理流程主要包括主影像选取、差分干涉处理、PS 点提取、相位解缠、大气相位校正

及形变结果反演等步骤^[22],具体如下:

(1)首先对多时相 Sentinel-1 影像做预处理,主要包括精确轨道校正、辐射校正和斜距相关处理,保证影像质量满足后续计算要求.然后,从全部影像中选取几何畸变较小、数据最完整的一景作为主影像,其余作为从影像.接着依据时间基线和空间基线来配对,建立干涉对.在时间间隔合适、基线分布较均匀的前提下,生成主影像与各从影像的干涉图.

(2)利用幅度稳定性指数(Amplitude Stability Index,ASI)和相干系数对像元进行统计,筛选散射特征稳定的 PS 点.ASI 的定义为:

$$ASI = \frac{\mu_A}{\sigma_A} \quad (3)$$

式中: μ_A 为多时相像素幅度均值; σ_A 为多时相像素幅度标准差.

(3)对各干涉图中的干涉相位进行时空二维相位解缠,消除相位模糊性.本研究采用最小费用流(Minimum Cost Flow,MCF)算法,核心目标是将模糊的包裹相位恢复为连续且物理意义明确的真实相位值,其表达式为:

$$\phi_{\text{unwrap}} = \phi_i + 2\pi k \quad (4)$$

式中: k 为整数倍的不连续跳跃.

相位解缠后需进行系统误差校正,以提升形变反演精度,主要包括轨道误差校正、大气延迟效应估计及地形残差修正.其中,大气相位延迟校正以对流层水汽影响为核心,采用 GACOS(Generic Atmospheric Correction Online Service for InSAR)提供的高分辨率对流层延迟数据^[23],通过反演获取时空匹配的总对流层延迟(Zenith Total Delay,ZTD),并构建模型进行估计与消除,校正公式为:

$$\phi_{\text{atm-corr}} = \phi_i - \frac{4\pi}{\lambda} \Delta ZTD_{\text{GACOS}}(x, y, t) \quad (5)$$

式中: λ 为雷达波长; $\Delta ZTD_{\text{GACOS}}(x, y, t)$ 表示数据在像元 (x, y) 和时刻 t 的对流层延迟差值.

(4)完成误差校正后,基于解缠相位序列建立时序形变反演模型,对各 PS 点进行时序形变反演计算,得到毫米级精度的地表形变量-时间趋势曲线,可直观反映地表形变的时序演化特征.结合地理坐标信息对反演结果进行空间插值处理,消除 PS 点离散分布的影响,最终生成研究区连续的地表形变分布图.

3 结果分析

3.1 PS-InSAR 结果

对郑州市核心城区 2021 年 3 月—2021 年 11 月的 Sentinel-1 雷达卫星影像进行处理,结合 GACOS 数据开展大气相位校正,并以相位标准差作为校正评价指标,评价结果如图 3 所示.

校正前干涉图的相位标准差整体偏高,经过 GACOS 校正后,干涉对的相位标准差降至 1.4 ~ 1.5 rad,平均值为 1.45 rad,显著优于校正前的 1.58 rad.利用 PS-InSAR 技术完成全流程处理后,获取研究区沿雷达视线方向(LOS)的地表形变时序分析结果;研究区域内地表形变速率范围为 -28.13 mm/a 至 26.88 mm/a,累积形变量范围为 -43.6 mm 至 41.3 mm.结果如图 4 和图 5 所示.

本研究时段覆盖郑州市“7·20”历史性极端暴雨事件及后续恢复期.此次暴雨降雨量突破历史极值,引发严重城市内涝与洪水灾害.结合城市内涝范围(图 6),地表形变空间分布与洪涝影响区域存在一定相关性,尤其在中心城区表现出明显的地表抬升现象.

3.2 地铁沿线地面形变速率空间特征分析

为探究郑州市地铁周边区域的地表形变特征,基于郑州地铁线路分布图,构建沿地铁线路 600 m 范围

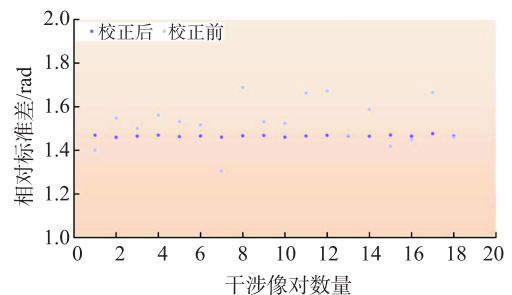


图 3 相位标准差

Fig. 3 Phase standard deviation

的缓冲区,并提取该范围内的形变监测数据.

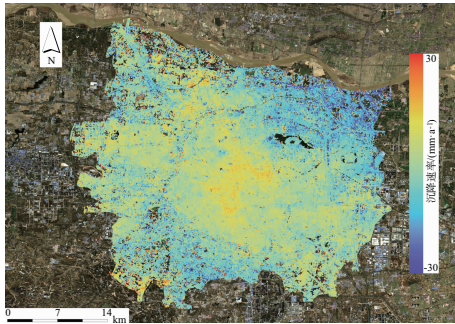


图 4 形变速率分布

Fig. 4 Deformation rate distribution

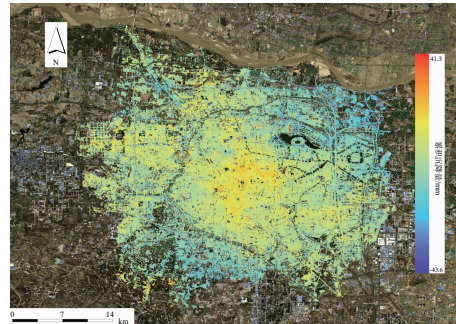


图 5 累积形变量分布

Fig. 5 Cumulative deformation distribution

为揭示地铁沿线不均匀形变的空分布规律,对形变速率剖面图进行可视化分析.由于原始 PS 点数据呈空间离散分布,需通过插值处理获取连续形变场.为此采用克里金插值法(Kriging Interpolation)对缓冲区内的 PS 点数据进行空间插值.克里金插值是基于地理统计理论的预测方法,其核心原理在于综合考虑样本点间的空间相关性及与待估点的位置关系,通过构建“线性无偏、方差最小”的最优估计模型,实现高可信度的空分布重构.

为验证克里金插值结果的可靠性,采用“留一”法进行交叉验证:每次插值过程中剔除 1 个样本点,以剩余点对其进行预测,逐次循环以评估整体模型性能.精度评价结果显示,插值结果的均方根误差(RMSE)为 4.31;平均绝对误差(MAE)为 1.59.地铁沿线形变速率分布见图 7.

结果表明,地铁沿线地表形变呈现显著区域性差异,抬升区主要集中于研究区中心城区.以地铁 5 号线(剖面 1、剖面 2)为例,其形变速率曲线如图 8 所示.5 号线整体形变呈双峰波动趋势:剖面 1 在距离起点 5~7 km 区间(月季公园站—姚砦·聂庄站)形变速率显著增大,最大速率达 14 mm/a;剖面 2 表现为“两端平稳,中部抬升”,在线路中段(市第二人民医院—冯庄站)出现明显抬升,速率变化梯度达 8 mm/a,形成局部隆起.3 号线形变特征表现为“前端抬升、后部稳定”:海滩寺站(起点附近)—二七广场站区间形变速率在 6 mm/a 左右波动,中段至东十里铺站区间速率基本趋于稳定;1 号线与 2 号线虽均呈显著起伏,但波动幅度与空间分布存在差异:2 号线前半段(0~6 km)起伏明显,最大速率约 9 mm/a,后半段速率趋于稳定;1 号线形变速率波动幅度较大,且多数时段呈正向增长(即地表处于抬升状态),如图 8 所示.

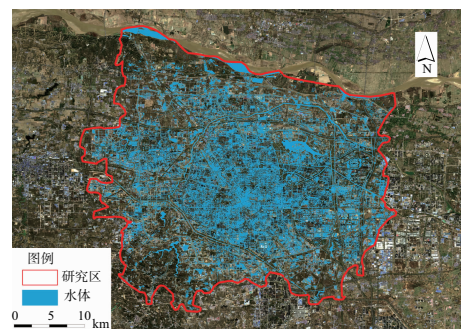


图 6 郑州市“7·20”特大洪水灾害范围

Fig. 6 Scope of the “7·20” extraordinary flood disaster in Zhengzhou

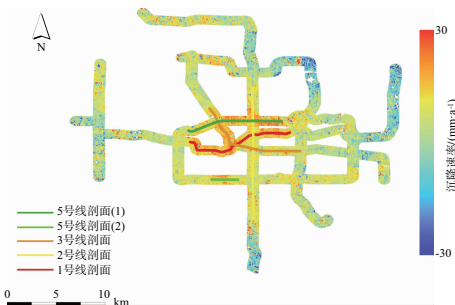


图 7 克里金插值结果及剖面分布

Fig. 7 Kriging interpolation results and profile distribution

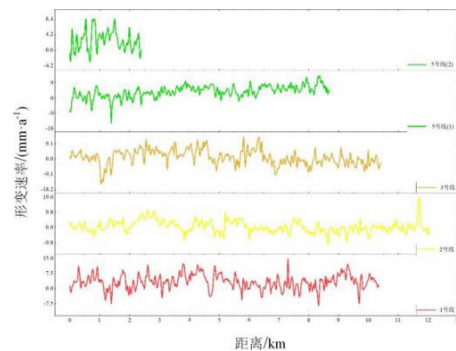


图 8 地铁沿线形变速率剖面图

Fig. 8 Deformation rate profile map along the subway line

3.3 地铁沿线地面累积形变量时间特征分析

基于沿地铁线路 600 m 缓冲区的 PS-InSAR 形变量结果,分析郑州市地铁沿线地表形变的时间演化规律.

结果表明,中心城区地铁沿线地表整体以抬升为主,累积形变量范围为 -40.3 mm ~ 35.3 mm. 根据地铁站点分布选取 P1 ~ P6 共 6 个典型区域,结合郑州市土壤数据与降雨量数据进行分析,如图 10、图 11 所示.

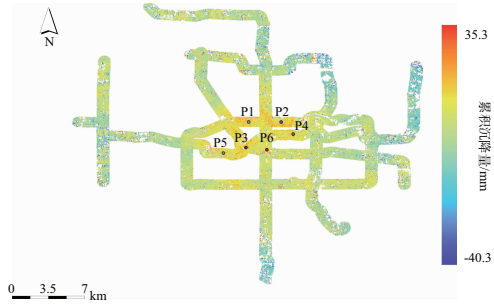


图 9 地铁沿线形变量时序变化

Fig. 9 Deformation variation of cumulative along the subway line



图 10 研究区土壤类型分布

Fig. 10 Soil type distribution in the study area

郑州市核心城区以潮土为主要土壤类型,该类土壤主要发育于黄河冲积形成的低缓平原地带,具有强保水性、可压缩性的特征,属于典型的湿敏性土壤;同时,潮土透水性差、排水不畅,在暴雨或强降水事件中易饱和且长时间保持高含水状态.而核心城区在高强度城市化进程中,地下空间的密集开发更加削弱了土壤的排水与水分调节能力.

分析表明,2021 年 7 月以后 6 个典型区域的地表形变量都明显增加,并在 8 月达到最大值.2021 年 7 月 17 日至 23 日,河南省遭遇罕见的特大暴雨,郑州市的日降雨量和小时降雨量都打破了历史记录,出现了严重内涝和洪水.强降雨使大量雨水在短时间内渗入地表,从而加快了地表形变.部分区域由于处在低洼或排水不畅的位置,洪水携带的泥沙容易堆积,形成较厚的淤积层,在短时间内造成地表轻微抬升.此外,地下水位的快速变化也会让形变加剧:短时间补水会让地下水位迅速升高,快速排水又会让水位骤降,反复变化会影响地下结构的平衡和稳定.

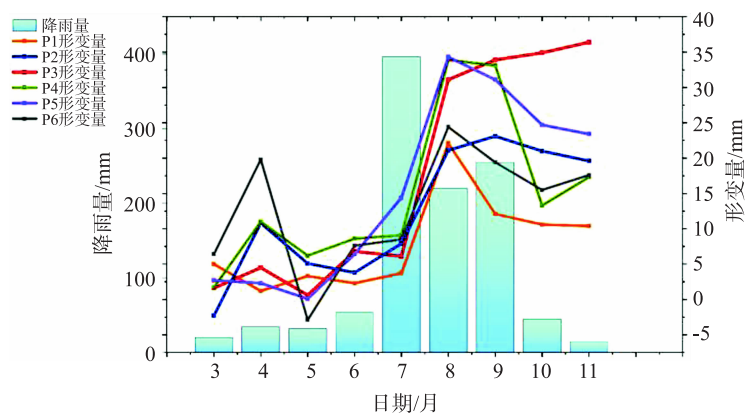


图 11 降雨量与典型区域形变量时序对比

Fig. 11 Temporal comparison of rainfall and deformation in typical areas

4 讨论与展望

本研究主要分析了地铁沿线区域的形变分布和随时间的变化情况,从以下 3 方面进行讨论,并提出展望:

1) 在形变监测方法的选择方面,PS-InSAR 是一种常用的 InSAR 方法,能够稳定提取长期稳定散射点的位移信息.但不同的 InSAR 方法(如 SBAS-InSAR 或传统差分 InSAR)在处理流程、点的筛选方式和噪声控制上存在区别,导致形变速率监测和异常点识别结果有差别.比如,SBAS 方法在不稳定区域更容易识别出形变,而 PS 方法对强散射体更敏感.虽然方法不同,形变的具体范围和形态有细微差异,但整体趋势和主要形变区的位置应保持一致.

2) 地表形变受自然和人为因素的共同影响,尽管遥感技术能提供高精度的形变信息,但单凭遥感数

据难以对成因机制进行解析. 后续需使用气象数据、地下水位变化、水文监测数据、地铁运行状态及建设工况等多源数据综合分析, 进一步探究地表形变的驱动因子; 并根据关键影响因子设置地铁的安全预警阈值, 提升极端事件发生时的判别和响应能力.

3) 数值模拟是研究城市地质灾害问题的重要方法, 未来可以选择地铁的典型区段结合地质勘探和水文监测数据建立数值模型并模拟地表形变演化过程, 与 InSAR 监测结果对比验证, 提高对区域形变机制的解释能力.

5 结论

本研究使用 PS-InSAR 技术获取 2021 年 3 月至 11 月郑州市核心城区的地表形变数据, 并结合“7·20”极端暴雨事件和地铁线路分布对形变结果加以分析, 得到以下结论:

1) 研究区地表形变速率范围为 -28.13 mm/a 到 26.88 mm/a, 累积形变量超过 40 mm. 在地铁沿线周边 600 m 缓冲区范围内存在多个形变高值区, 尤其在中心城区表现明显; 不同线路的形变幅度和空间分布存在差异.

2) 2021 年 7 月的“7·20”特大暴雨后, 地表形变速度明显加快; 同时洪水携带的泥沙淤积造成局部地表抬升. 观测点的累积形变量在 8 月达到峰值, 体现出极端暴雨事件对地表形变的明显影响.

综上所述, PS-InSAR 可以有效获取城市区域的高精度地表形变信息, 可用于突发灾害监测和地下工程安全评估. 本研究可为郑州市地表形变监测和城市规划提供参考, 也可为城市地质灾害防控以及地铁等基础设施安全管理提供依据.

参考文献:

- [1] 杨曷. 全球变暖背景下极端降水事件的变化特征及归因分析[J]. 自然科学, 2025, 13(3): 414-419.
YANG Z. Characteristics and attribution analysis of extreme precipitation events in the context of global warming[J]. Open Journal of Nature Science, 2025, 13(3): 414-419.
- [2] 周添红, 唐佐槐, 褚俊英, 等. 极端暴雨条件下城市内涝模拟研究进展与展望[J]. 人民长江, 2025, 56(5): 14-22+30.
ZHOU T H, TANG Z H, CHU J Y, et al. Progress and prospects of urban waterlogging simulation under extreme rainstorm conditions[J]. Yangtze River, 2025, 56(5): 14-22+30.
- [3] 任敏敏, 李志凌, 翟红, 等. 融合多源数据的郑州市洪涝灾害风险评估与分析[J]. 城市勘测, 2025(1): 185-189.
REN M M, LI Z L, ZHAI H, et al. Flood risk assessment and analysis of Zhengzhou by integrating multi-source data[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2025(1): 185-189.
- [4] 王开春, 王连接. 关于城市轨道交通站点出入口洪涝风险评价的思考[J]. 中国给水排水, 2025, 41(6): 34-40.
WANG K C, WANG L J. Reflections on flood risk assessment at the entrances and exits of urban rail transit stations[J]. China Water & Wastewater, 2025, 41(6): 34-40.
- [5] 肖波, 赵俊三, 周定义, 等. SBAS-InSAR 技术支持下的滇西北宾川断陷盆地沉降监测与预测[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2022, 47(3): 30-39.
XIAO B, ZHAO J S, ZHOU D Y, et al. Monitoring and prediction of land subsidence in Binchuan fault basin of northwest Yunnan supported by SBAS-InSAR[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2022, 47(3): 30-39.
- [6] 王杰燃. 地铁突发极端气象灾害应急管理的若干思考[J]. 人民公交, 2024(22): 79-81.
- [7] 陈顺, 郑南山, 祁云, 等. Offset Tracking 在煤矿沉陷区地表大变形监测中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2017, 43(6): 32-37.
CHEN S, ZHENG N S, QI Y, et al. Application research on Offset Tracking technology in monitoring of large surface deformation in coal mine subsidence area[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(6): 32-37.
- [8] 朱子林. 基于 SBAS-InSAR 技术的天津地区沉降时空演变分析[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2020.
ZHU Z L. Analysis on the spatial and temporal evolution of subsidence in Tianjin based on SBAS-InSAR technology[D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2020.
- [9] 李英会. 基于时间序列高分辨率 SAR 影像的地表形变监测技术研究[D]. 鞍山: 辽宁工程技术大学, 2012.
LI H Y. Ground Deformation monitoring technique based on time-series high resolution SAR images[D]. Anshan: Liaoning

- Technical University,2012.
- [10] 左小清,张荐铭,李勇发,等.典型山区InSAR地表形变监测与滑坡灾害识别[J].昆明理工大学学报(自然科学版),2024,49(4):89-104.
ZUO X Q,ZHANG J M,LI Y F,et al.InSAR surface deformation monitoring and landslide hazard detection in typical mountainous areas[J].Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science),2024,49(4):89-104.
- [11] 刘浩.基于DS-InSAR技术的郑州地区地面和交通路网沉降监测研究[D].湘潭:湖南科技大学,2023.
LIU H.Research on ground and traffic network subsidence monitoring in Zhengzhou based on DS-InSAR technology[D].Xiangtan:Hunan University of Science and Technology,2023.
- [12] ZHOU Z,HU J Y,WANG J Y,et al. Identifying spatiotemporal pattern and trend prediction of land subsidence in Zhengzhou combining MT-InSAR,XGBoost and hydrogeological analysis[J].Scientific Reports,2025,15:3848.
- [13] 张娅娣.基于PS-InSAR和DS-InSAR技术的滑坡监测案例分析[J].电子技术,2025,54(3):71-73.
ZHANG Y D. Case analysis of landslide monitoring based on PS-InSAR and DS-InSAR technologies[J].Electronic Technology,2025,54(3):71-73.
- [14] 廖夏宁.粤港澳大湾区地铁沿线PS-InSAR沉降监测及分析[D].深圳:深圳大学,2023.
LIAO X N. Monitoring and analyzing ground deformation along subway lines in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area using PS-InSAR[D].Shenzhen:Shenzhen University,2023.
- [15] OSMANOĞLU B,DIXON T H,WDOWNSKI S,et al. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2011,13(1):1-12.
- [16] HAN Y K,ZOU J G,LU Z,et al. Ground deformation of Wuhan,China,revealed by multi-temporal InSAR analysis[J].Remote Sensing,2020,12(22):3788.
- [17] 刘兵,黄地龙,肖在昌.浅析InSAR数据处理可视化技术[J].电脑与电信,2012(12):56-57+59.
LIU B,HUANG D L,XIAO Z C. Analysis visual technology in InSAR data processing[J].Computer & Telecommunication,2012(12):56-57+59.
- [18] 陈基伟.PS-InSAR技术地面沉降研究与展望[J].测绘科学,2008,33(5):88-90+80.
CHEN J W. Development and prospect of the permanent scatterers technique on landsubsidence[J].Science of Surveying and Mapping,2008,33(5):88-90+80.
- [19] 吴江.永久性散射体雷达干涉测量技术在城市地表形变监测中的应用[J].测绘与空间地理信息,2020,43(12):208-210.
WU J. Application of PS-InSAR technology in urban surface subsidence monitoring[J].Geomatics & Spatial Information Technology,2020,43(12):208-210.
- [20] FERRETTI A,PRATI C,ROCCA F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J].IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2202-2212.
- [21] 杨正荣.基于MT-InSAR和循环神经网络的库岸滑坡形变监测及预测研究[D].昆明:云南师范大学,2024.
YANG Z R. Research on reservoir bank landslide deformation monitoring and prediction based on MT-InSAR and recurrent neural networks[D].Kunming:Yunnan Normal University,2024.
- [22] 许兵,朱焱,李志伟,等.国产卫星时序InSAR形变监测精度分析[J].测绘学报,2024,53(10):1930-1941.
XU B,ZHU Y,LI Z W,et al. Analysis of InSAR time-series deformation monitoring accuracy of domestic satellites[J].Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2024,53(10):1930-1941.
- [23] XIAO R Y,YU C,LI Z H,et al. Statistical assessment metrics for InSAR atmospheric correction:Applications to generic atmospheric correction online service for InSAR (GACOS) in Eastern China[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2021,96:102289.

(编辑:王丽娟)