

文章编号: 1004—5589 (2025) 01—0142—10

张剑, 王明常, 王伟, 等. 基于时序 InSAR 的路面坍塌监测方法研究 [J]. 世界地质, 2025, 44 (1): 142–151. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.011.

ZHANG J, WANG M C, WANG W, et al. Research on monitoring methods for pavement collapse based on time-series InSAR [J]. World Geology, 2025, 44 (1): 142–151. DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.011.

基于时序 InSAR 的路面坍塌监测方法研究

张剑¹, 王明常^{1*}, 王伟², 王典¹, 韩复兴¹, 丁庆¹, 霍燕平¹

1. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 长春 130026;
2. 吉林省大安市自然资源局, 吉林 大安 131300

摘要: 城市化速度不断加快, 传统监测手段难以实时获取路面坍塌隐患点。高效监测路面坍塌成为当前道路安全领域的关键挑战。针对这一难题, 笔者提出了一种结合时序 InSAR 和小波变换的方法, 通过分析沉降点的变化周期获取路面形变信息, 进而提取地面沉降的时空演化特征。对于时空演变特征明显的区域, 进一步使用微动探测地震仪验证 InSAR 监测结果的准确性。我们选取 2022 年 3 月至 2023 年 11 月期间的 52 景 Sentinel-1A 影像, 通过时序 InSAR 方法获取长春市中心城区的路面沉降结果。结果表明, 研究区内最大形变速率为 -30.58 mm/a, 最大累计沉降为 -73.3 mm。选取标志性形变区域南湖大路进行分析, 该区域内的最大形变为 -28.44 mm/a, 最大日均形变为 -0.93 mm/d, 最大累计沉降为 -56.4 mm。针对沉降值显著点位, 基于小波变换获取其沉降演变过程。结果证实, 沉降严重区域同时受多个不同程度和层次的周期变化影响, 这些周期性的时间尺度中还嵌套着影响沉降具体发展趋势的局部小周期。利用微动探测地震仪采集时空演变特征明显区域的实地数据, 获得了南湖大路的地质剖面图。由剖面图可知, 沉降显著点位发生泥浆灌入现象, 进一步验证了沉降监测结果的准确性。最终, 对比南湖大路地铁施工区域的坍塌事件与本研究获取的沉降监测结果, 验证了所提出方法在实际应用中的可行性和准确性。

关键词: 路面坍塌; InSAR; 小波变换; 微动探测地震仪

中图分类号: P237 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1004-5589.2025.01.011

Research on monitoring methods for pavement collapse based on time-series InSAR

ZHANG Jian¹, WANG Mingchang^{1*}, WANG Wei², WANG Dian¹, HAN Fuxing¹, DING Qing¹, HUO Yanping¹

1. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China;
2. Bureau of Natural Resources of Da'an City, Jilin Province, Da'an 131300, Jilin, China

Abstract: As urbanization continues to accelerate, it is difficult to acquire real-time data on potential pavement collapse hazards utilizing traditional methods. At present, efficient monitor pavement collapse has become a key challenge in the field of pavement safety. For this problem, the authors propose a method which combines time-series InSAR with wavelet transform. This method analyzes the change cycle of the subsidence point to obtain the deforma-

收稿日期/Received: 2024-07-04; 修订日期/Revised: 2025-01-08; 出版日期/Published: 2025-02-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (42330607); 吉林省教育厅科学技术研究项目 (JKH20231181KJ)

第一作者: 张剑 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事遥感数据处理与应用方面的研究。E-mail: jianz22@mails.jlu.edu.cn

* 通信作者: 王明常 (1975—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事遥感与地理信息系统研究。E-mail: wangmc@jlu.edu.cn

© Editorial Office of World Geology. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license.

tion information, and extract the temporal and spatial evolution characteristics of ground subsidence. For those areas with obvious spatial and temporal evolution characteristics, the accuracy of the InSAR results will be further verified by using the microtremor detection seismograph. We selected 52 Sentinel-1A images captured between March 2022 and November 2023 to obtain the surface subsidence results in the central urban area of Changchun by the time-series InSAR method. The results showed that the maximum deformation rate was -30.58 mm/a, and the maximum cumulative subsidence was -73.3 mm in the study area. A detailed analysis of the representative deformation area, Nanhu avenue, revealed a maximum deformation rate of -28.44 mm/a, a maximum daily average deformation rate of -0.93 mm/d, and a maximum cumulative subsidence of -56.4 mm. The analysis of significant subsidence points based on wavelet transform uncovered their subsidence evolution processes. The development of surface subsidence in severely affected areas was influenced by multiple periodic variations of different magnitudes and levels, with nested local cycles within these periodic time scales that affect the specific trends of subsidence development. Using microtremor detection seismograph to collect data from regions with obvious evolutionary characteristics, the authors generated a geological profile of Nanhu avenue. According to the profile, significant subsidence points exhibited a phenomenon of slurry infiltration. This further validated the accuracy of the subsidence monitoring results. Finally, by comparing the actual pavement collapse incident in the Nanhu avenue metro construction area to the subsidence results monitored in this study, the feasibility and accuracy of the proposed method in practical applications were validated.

Keywords: pavement collapse; InSAR; wavelet transform; microtremor detection seismograph

0 引言

路面坍塌是一种严重的地质灾害^[1], 近年来在全球范围内频发, 对道路安全和人员生命造成了极大威胁^[2]。随着城市化进程的加快和地下空间开发利用的不断增长, 路面坍塌事故呈快速增长态势^[3], 造成重大经济损失, 已成为威胁城市安全的重要因素。研究路面坍塌的成因、监测预警方法和防治措施, 不仅具有重要的理论意义, 还对保障城市道路和人员安全具有现实意义^[4]。因此, 路面坍塌的研究已成为当前地质灾害研究的热点课题^[5]。

坍塌存在隐蔽性、突发性、群发性、复发性和严重性等特点^[6], 这些特征使得现有的监测方法在预警和风险评估方面面临诸多挑战。现有的路面坍塌监测方法主要有现场勘察和定期巡检以及 InSAR 监测技术。现场勘察和定期巡检主要依赖人工进行^[7]。现场勘察通常包括对地表进行目视检查, 记录明显的裂缝、沉降或其他异常现象, 并使用测量仪器如水准仪、激光测距仪等进行详细测量^[8]。定期巡检则安排专业技术人员按照预定路线和时间间隔, 对道路进行系统性的观察和记录, 可以发现潜在的隐患。现场勘察和定期巡检的优点在于其直观性和灵活性, 能够直接获取道路异常情况^[9]。然而, 这些方法存在工作量大、效率低、难以实现实时监测以及覆盖范围有限等问题^[10-12],

无法满足大规模城市监测需求^[13]。近年来, 随着遥感技术的快速发展, 特别是合成孔径雷达干涉测量 (interferometric synthetic aperture radar, InSAR) 技术的出现^[14], 为道路坍塌隐患的监测预警提供了新的思路和方法^[15]。InSAR 技术在监测精度和范围上具有优势, 可以实时快速地对潜在坍塌区域进行监测^[16-17]。其中, 基于时间序列的相干点干涉合成孔径雷达 (persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR) 技术, 基于长时间跨度内的连续监测, 利用时间序列中的沉降趋势, 精确识别地表的长期沉降或上升变化^[18], 能够高精度地监测长时间跨度内的地表沉降, 尤其适用于复杂城市环境中的地面变形监测。因此, 通过 InSAR 手段进行路面坍塌监测, 可以实现对道路坍塌隐患的高效、实时监测和预警^[19]。

微动探测地震仪作为一种高灵敏度的地震监测设备, 因其能够捕捉到地表细微的振动变化, 近年来在城市路面坍塌监测中得到广泛应用。通过分析这些微小的地震波信号, 可以识别出地下空洞和异常地质活动。利用微动探测地震仪监测路面坍塌具有实时性强、灵敏度高、覆盖范围广的优势, 能够获取更为精确的地质剖面信息, 从而监测潜在的坍塌隐患。

本研究基于时间序列 InSAR 技术, 利用 52 景 Sentinel-1A 影像, 采用 PS-InSAR 方法对长春市

心城区进行地表沉降监测, 获得沉降结果。进一步应用小波变换对沉降显著点位进行分析。研究表明, 长春市南湖大路人民大街至亚泰大街路段的沉降效应显著。通过微动探测地震仪验证, 确认该区域为脱空沉降区, 存在坍塌风险。对长春市时序沉降监测, 可为城市道路坍塌隐患的早期发现提供科学依据, 同时也为未来相关研究提供参考和借鉴。本研究不仅为城市基础设施的安全管理和评估提供精确的数据支持, 也为城市道路安全预警系统的建设提供重要的技术保障。

1 研究区域

长春市地理范围 $124^{\circ}18' \sim 127^{\circ}05'E$ 、 $43^{\circ}05' \sim 45^{\circ}15'N$ 之间 (图 1), 属于中纬度北温带地带, 处于中国东北地区的地理核心位置^[20]。长春市地质构造相对稳定, 其主要地貌类型为低山丘陵, 分布于市区东南部, 属大黑山脉的一部分, 海拔大部分在 250 ~ 350 m 之间, 相对高度 50 ~ 100 m。长春市年均降水量 570.3 mm 左右, 年均降水日数为 98.7 d, 降水时间主要集中在 6 至 8 月^[21]。长春市土层结构以杂填土、粉质黏土、强风化及全风化砂岩泥岩为主, 杂填土由各种不同粒径的土壤和碎石组成, 其孔隙度较高, 容易滞水。

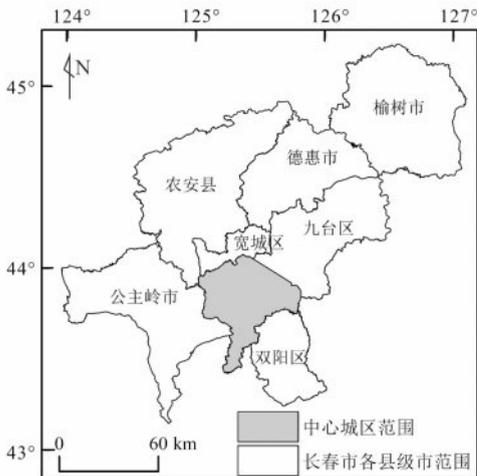


图 1 长春市概况

Fig. 1 Overview of Changchun City

2 数据与研究方法

2.1 数据获取与预处理

本文利用 Sentinel-1A 卫星的 52 景干涉宽幅模式单视复合 C 波段影像数据, 影像数据选自该

卫星的下降轨道, 覆盖时间范围从 2022 年 3 月 16 日至 2023 年 11 月 6 日。研究区域的 Sentinel-1A 影像具有约 39.14° 的入射角, 分辨率在斜距方向为 2.7 ~ 3.5 m, 方位向分辨率为 22 m。卫星的重复访问周期为 12 d。利用 InSAR 技术, 通过地形观测拓扑实现了宽视场覆盖和较高的空间分辨率。为了提高影像配准的精度, 采用精密轨道文件对影像进行轨道精炼处理。

为了消除地形相位对地表变形结果的影响^[22], 采用美国地质调查局 (USGS) 提供的 30 m 分辨率 SRTM 数字高程模型 (DEM) 数据。此外, 本研究还使用了全球大气校正服务 (generic atmospheric correction online service, GACOS) 提供的大气延迟数据, 对所有时相的干涉结果进行大气校正。通过综合应用 SRTM DEM 和 GACOS 数据, 本研究实现了更准确的地表形变信息提取, 显著提高了 InSAR 技术在地表沉降监测中的精度和可靠性。

2.2 方法原理

InSAR 是对 SAR 技术的一种扩展。它通过对同一区域在不同时间或不同视角下获取的多幅复数值影像进行相干处理, 从而提取地表形变和三维地形信息。InSAR 通过分析影像间的相位差, 能够精确测量地表的微小形变。星载合成孔径雷达差分干涉测量 (differential interferometric synthetic aperture radar, D-InSAR) 是在传统 InSAR 技术基础上发展起来的一种先进遥感技术。D-InSAR 利用同一地区不同时刻获取的 SAR 数据, 通过差分干涉处理去除两次观测相位中的共有量 (如平地效应、地形相位和大气延迟等), 从而提取形变相位信息。为精确消除干涉中的地形相位, D-InSAR 引入 DEM 数据, 最终获取高精度的差分干涉图和地表形变信息^[23], 但其精度受大气延迟效应与时间去相干因子影响较大。在此基础上以 PS-InSAR 技术为代表的时序列合成孔径雷达干涉测量技术应运而生。PS-InSAR 利用多时相 SAR 影像, 结合时域的高通滤波和空间域的低通滤波技术, 有效去除大气延迟误差, 适用于长期和广域的地表形变监测^[24]。

PS-InSAR 技术利用覆盖同一区域的多幅单视影像, 通过处理多时相 SAR 影像, 选取具有稳定幅度和相位信息的永久散射体目标。然后, 利用这些 PS 目标进行精确的相位解缠和差分干涉, 以消除大气、地形等误差。通过时间序列分析, 可以从

SAR 影像中提取永久散射体的形变信息。该技术多用于监测城市化地区的地表沉降和地面稳定性。

在 PS-InSAR 处理过程中, 需使用 $N + 1$ 幅 (通常大于 20 幅) 相同轨道的 SAR 影像, 设定时间基线为 150 d, 空间基线为 180 m。选取其中差分干涉效果最好一幅为主影像, 其余 N 幅影像作为辅影像对其余影像进行配准。确定主影像后, 将其与每幅辅影像逐一组合进行干涉处理, 生成 N 幅干涉图。利用 SAR 卫星精密轨道数据和高精度的 DEM 数据来去除干涉图中的地形相位和平地相位, 但 DEM 数据中的高程误差仍会在干涉图中引入一定程度的地形相位残留。

PS-InSAR 的关键在于对 PS 点的相位进行解析。假设在 t_1 和 t_2 两个时期获取的两个 SAR 影像上, 对于第 i 个 PS 点, 其相位变化可以表示为:

$$\Delta\varphi_i = 4\pi\left(\frac{\beta}{\lambda}\right)(\bar{v}_i(t_2) - \bar{v}_i(t_1)) + \Delta\varphi_{\text{atm}} + \Delta\varphi_{\text{topo}} \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi_i$ 是 PS 点的相位变化; β 是两次 SAR 观测之间的基线; λ 是雷达波长; $\bar{v}_i(t_1)$ 和 $\bar{v}_i(t_2)$ 分别是 PS 点在 t_1 和 t_2 时刻的相位; φ_{atm} 是大气相位改变的影响; $\Delta\varphi_{\text{topo}}$ 是地形相位的影响。

通过 PS 点的相位变化, 可以估计地表的形变。假设 PS 点的位置不变, 则相位变化可以表示为地表形变的贡献加上噪声项:

$$\Delta\varphi_i = 4\pi\left(\frac{\beta}{\lambda}\right)\Delta v_i + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中: Δv_i 是 PS 点的地表形变; ε_i 是噪声项。

形变反演即通过 PS 点的相位变化反推地表形变。可以采用最小二乘法等对 PS 点的相位变化进行拟合, 从而估计地表形变^[25-27]。

所有连接像对中, 最长的空间基线为 169.79 m, 最短空间基线为 7.25 m, 平均空间基线为 85.51 m。在生成连接像对后, 将每一对干涉像对进行配准和干涉差分处理^[28]。同时利用 DEM 数据进行地形去平处理以消除地形相对对干涉相对影响, 去除后的干涉相对主要反映地表形变, 能更好地提取地表形变信息^[29]。同样将多视参数设置成距离向为 4, 方位向为 1。为了定量评估干涉图的质量, 需计算干涉图的相干系数和相位稳定性等指标^[30-31]。结果显示, 相干系数达到 0.9 以上, 相位稳定性良

好, 说明干涉图质量较高。

3 形变结果分析

通过对干涉图进行基线估计和相位解缠, 提取出地表的形变信息 (图 2)。总体来看, 长春市中心城区东北方向沉降趋势明显, 南部区域严重沉降区域较少。从形变结果可得, 长春市中心城区监测期间内最大平均形变速率为 -30.58 mm/a , 最大累计沉降为 -73.3 mm 。

从行政区域划分的角度进一步分析长春市中心城区的地表沉降结果, 绿园区、宽城区、九台区地表沉降最为显著, 呈现出大面积高沉降数值的密集分布。相比之下, 二道区与朝阳区的沉降趋势相对缓和, 主要集中在 $-5 \sim 0 \text{ mm/a}$ 之间。南关区的沉降结果较为轻微, 表现为零星分布, 数值较小。

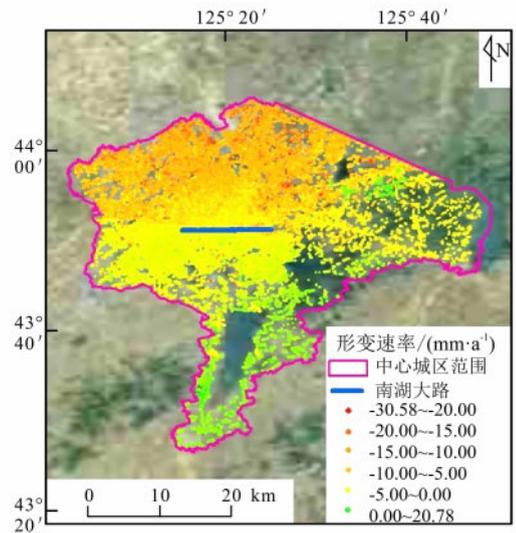
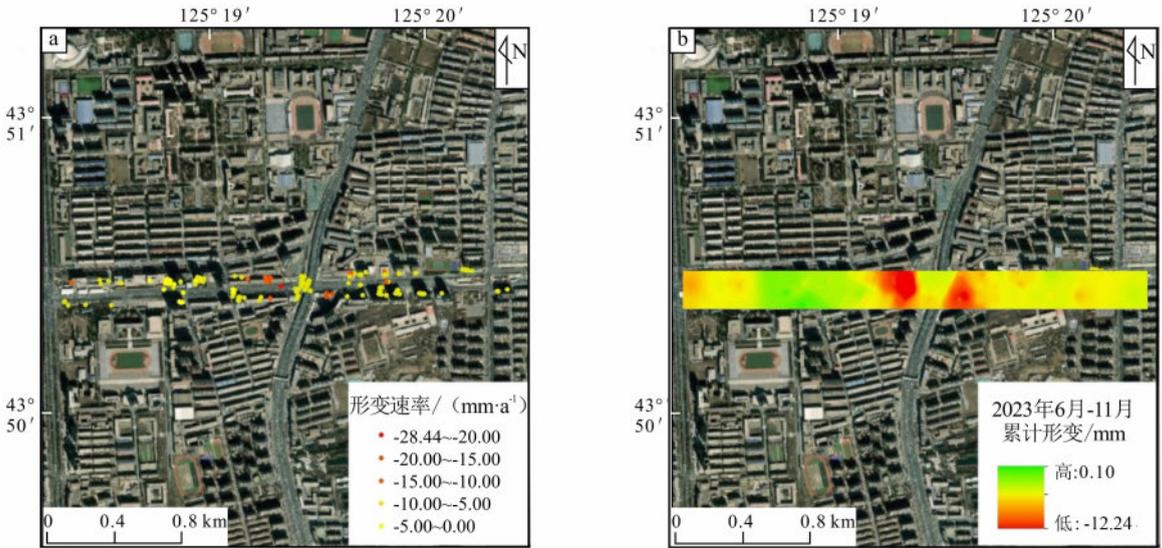


图 2 长春市中心城区 2022 年 3 月至 2023 年 11 月平均形变速率

Fig. 2 Average deformation rate in central urban area of Changchun City from March 2022 to November 2023

从形变结果可以看出, 南湖大路地区在监测期间沉降趋势较为明显, 沉降数值较大点位分布较为集中, 如图 3 (a) 所示位于南湖大路人民大街至亚泰大街路段, 形变速率最大可达 -28.44 mm/a , 监测期间内半年最大累计沉降为 -12.24 mm , 最小沉降速率 -4.08 mm/a 。通过插值方法能更清晰地揭示南湖大路地区整体沉降趋势, 如图 3 (b) 所示该区域沉降较为集中且沉降数值较大。



a. 该路段 PS 点形变速率图; b. 该路段半年内累计形变。

图3 南湖大路人民大街至亚泰大街路段 PS-InSAR 结果

Fig. 3 PS-InSAR results of Nanhu avenue section from Renmin street to Yatai street

对南湖大路人民大街至亚泰大街路段进行时序沉降分析表明, 2022年3月16日至2023年5月3日南湖大路人民大街至亚泰大街路段区域已经发生沉降, 沉降速率约为 -0.094 mm/d , 累计沉降为 -4.5 mm , 但是沉降趋势较为平稳。2022年12月29日至2023年11月18日下沉趋势较为明显, 沉降速率逐渐递增, 速率为 -0.145 mm/d , 累计沉降为 -49.6 mm 。

根据形变速率分布进行统计分析, 如图4所示, 南湖大路人民大街至亚泰大街路段形变主要分

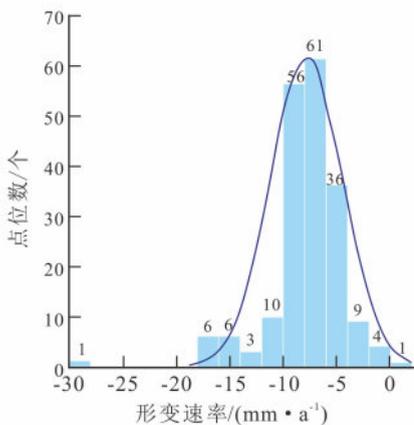


图4 形变速率分布图

Fig. 4 Deformation rate distribution

布在 -10 mm/a 至 -5 mm/a 区间内, 平均值为 -7.852 mm/a , 沉降趋势较为明显, 且沉降速率分布较为均匀。

4 时空演变规律分析

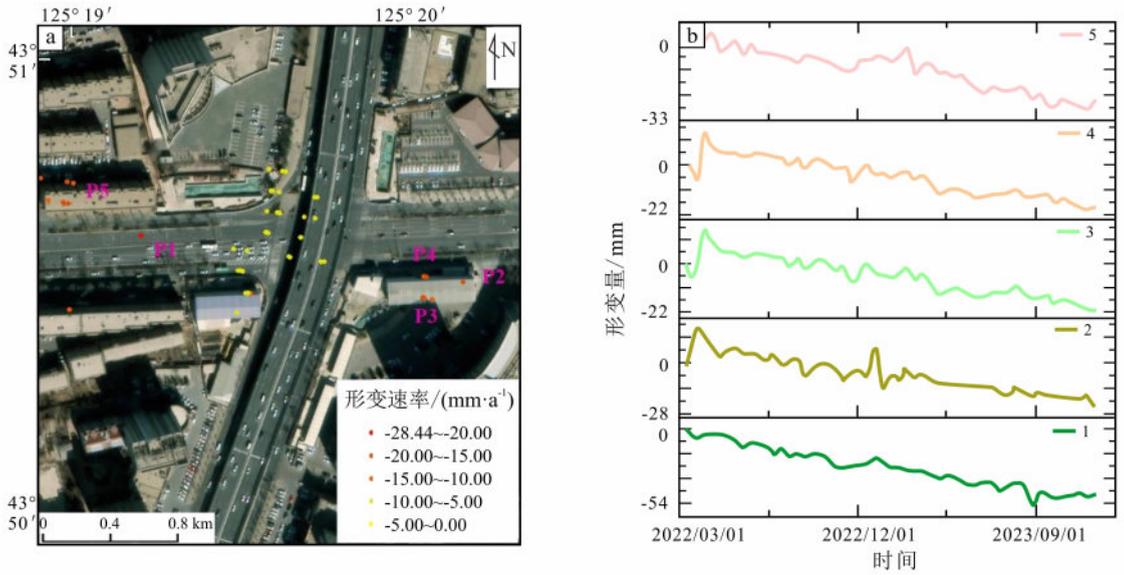
4.1 沉降特征分析

根据 PS-InSAR 结果, 提取其中沉降特征明显的 5 个点进行分析, 其中形变速率最大可达 -28.44 mm/a , 最大形变量可达 -56.4 mm 。其余 4 个点形变速率均大于 -16.57 mm/a , 一年内累计形变最低也达到 -19.88 mm 。通过图5对形变量变化进行分析, 可以看出自2023年2月15日开始加速沉降, 至2023年8月26日累计达到 -35.1 mm 。

4.2 小波变换

作为一种有效的信号处理工具, 小波变换被广泛应用于分析地面沉降和形变等动态过程。其独特的时频分析能力能够在不同时间尺度上同时捕捉信号的变化特征^[32], 从而为地质灾害的监测和预警提供更加精细和准确的依据。通过对上文中提及的 5 个监测点进行小波变换分析, 进而对地面沉降的时序演变特征进行解析和揭示。

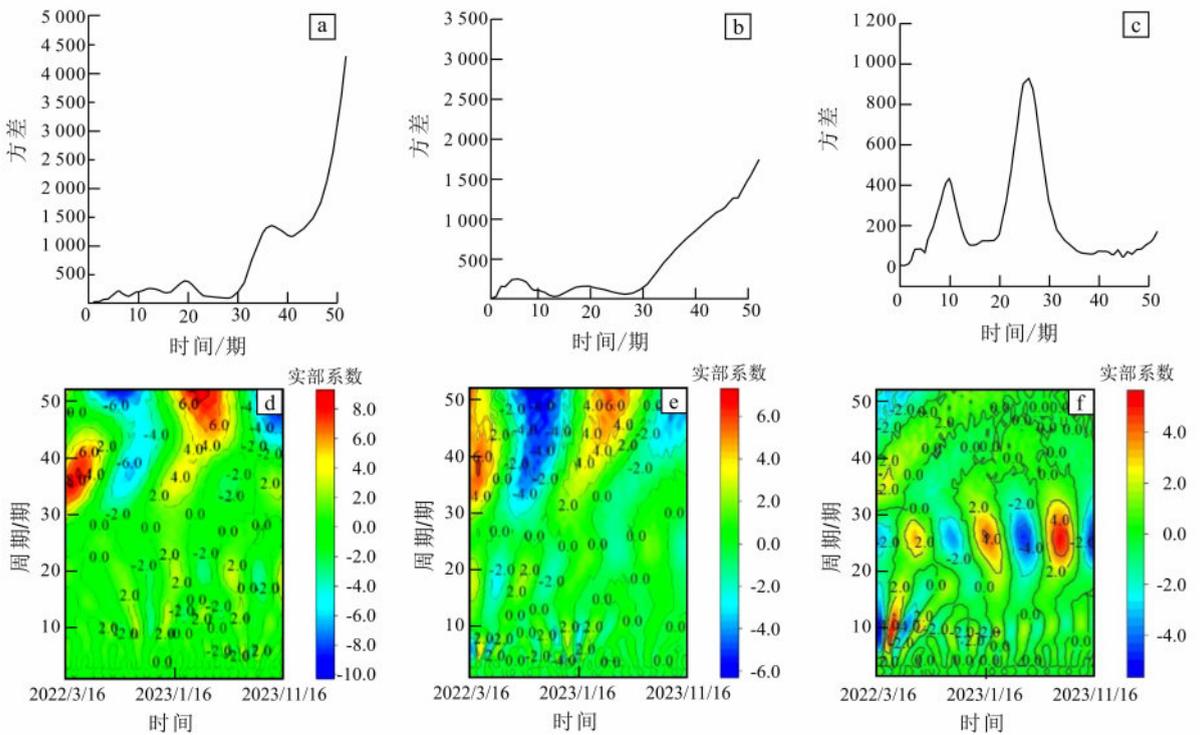
图6中 P1 点位出现 2 个峰值, 其中时间尺度



a. 监测期间平均形变速率; b. 特征点位累计形变量分析。

图 5 南湖大路人民大街至亚泰大街路段部分点位沉降分析

Fig. 5 Subsidence analysis of selected points in Nanhu avenue section from Renmin street to Yatai street



a. P1 点小波系数方差结果; b. P2 点小波系数方差结果; c. P3 点小波系数方差结果; d. P1 点小波实部等值线结果; e. P2 点小波实部等值线结果; f. P3 点小波实部等值线结果。

图 6 P1、P2、P3 点小波系数方差 (a - c) 和实部等值线结果图 (d - f)

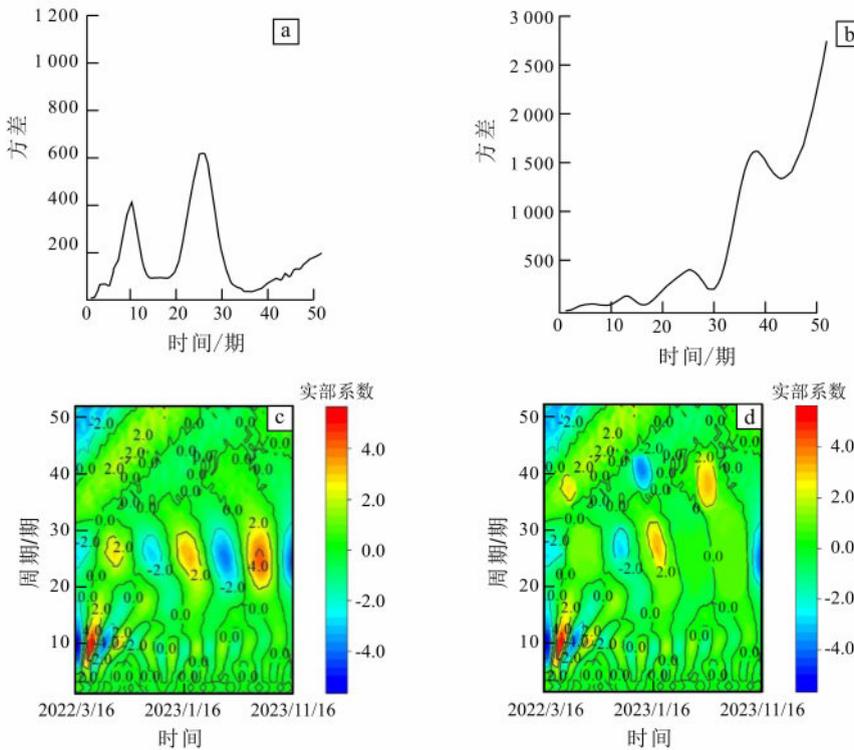
Fig. 6 Wavelet coefficient variance (a - c) and contour plot of real part (d - f) for points p1, p2 and p3

位于 37 T 为主周期, 其振荡周期最为强烈。20 T 为第二周期, 平均周期为 13 T。可以看出从 20 T 开始地面沉降加速, 在 37 T 即 2023 年 6 月 3 日沉降演化达到峰值, 结合实部等值线可以看出, 出现正负交替趋势。由 InSAR 监测结果可知, 近一个月日均沉降速率达 -0.21 mm/d 。沉降趋势较为明显, 出现了快速沉降。P2 点出现 2 个峰值, 时间尺度分别为 6 T 和 19 T, 平均周期为 13 T。由于 P2 点处的方差趋势并不明显, 也侧面反映了 2 个周期的波动变化对于该点处地面沉降在时间域上的演化特征影响较小。P3 点出现 2 个峰值, 分别为 10 T 和 26 T, 平均周期为 17 T。26 T 处为控制 3 号点地面沉降变化特征的主周期, 10 T 为第二周期。通过实部等值线结果图 (图 6) 可以看出 27 T 出现明显正负交替。根据 PS-InSAR 结果进行分析位于 26 T 时近一个月日均沉降速率达 -0.19 mm/d , 沉降趋势较为明显。

对 P4、P5 点位进行分析 (图 7), P4 点位出

现 2 个峰值, 时间尺度为 10 T 和 26 T, 平均周期为 15 T。其中 26 T 为第一周期, 10 T 为第二周期。通过实部等值线结果可以看出从 8 T 和 14 T 出现较为明显的正负交替, 说明该点处地面沉降在时间域演化特征影响较大。对 PS-InSAR 结果进行分析, 其最大日均沉降速率达 -0.32 mm/d 。沉降趋势较为明显, 出现快速沉降, 有较大坍塌风险, P5 点出现 3 个峰值, 分别为 5 T、25 T 和 38 T, 平均周期为 14 T, 在其对应周期的实部等值线结果图也出现了较为明显的正负交替, 该点处地面沉降在时间域上的演化特征影响较大。根据 PS-InSAR 结果计算 28 T 前后最大日均沉降速率可达 -0.93 mm/d 。沉降速率极大。

结合小波系数、实部等值线结果以及 PS-InSAR 计算的沉降速率综合考虑, 发现 P1、P3、P4、P5 号点位沉降速率较大, 沉降演化影响严重, 等值线图出现正负交替趋势。



a. P4 点小波系数方差结果; b. P5 点小波系数方差结果; c. P4 点小波实部等值线结果; d. P5 点小波实部等值线结果。

图 7 P4、P5 点位小波系数 (a-b) 和实部等值线 (c-d) 结果图

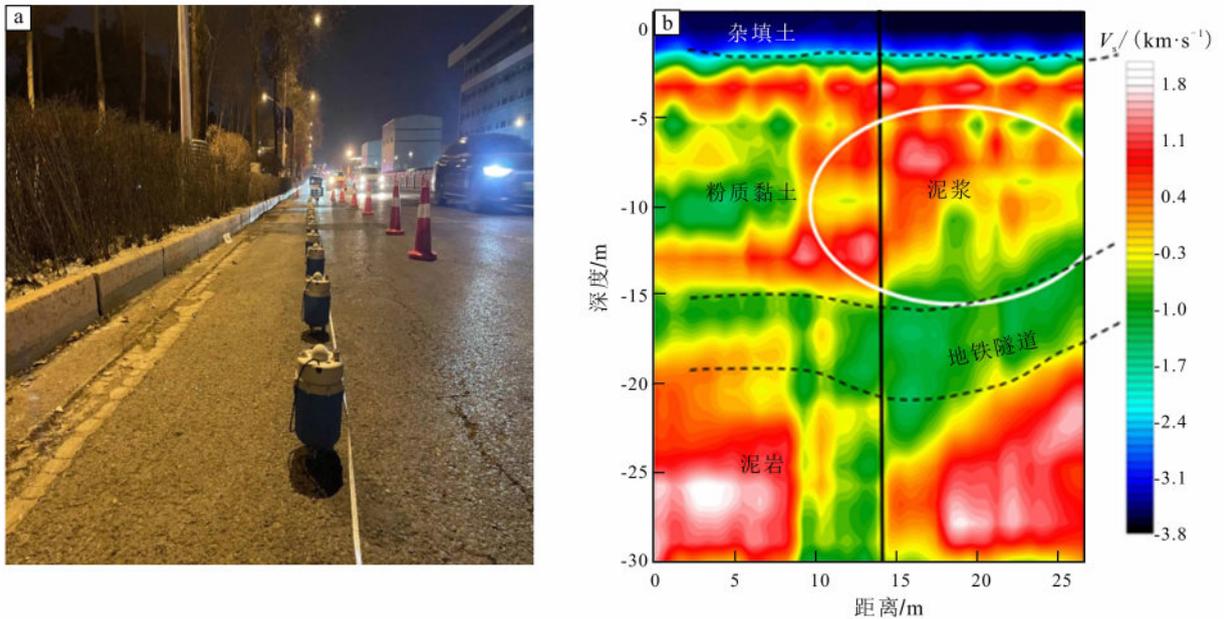
Fig. 7 Wavelet coefficient variance (a-b) and contour plot of real part (c-d) for points p4 and p5

4.3 验证

基于时序 InSAR 与小波变换的处理结果, 对显著沉降区域进行了微动探测地震仪勘测。结果显示 (图 8), 该区域的沉降特征明显, 并且沉降点呈现出较为一致的空间分布, 该区域下方的杂填土层中存在地下水沉积现象。地下水在该层的沉积作用与地质条件的交互作用可能是导致路面沉降的关键因素。具体而言, 地下水的渗透和流动可能导致土壤颗粒的重排和不均匀沉降, 从而加剧了该区域

的沉降现象。

2023 年 11 月 26 日, 长春市南湖大路人民大街至亚泰大街路段发生了严重的路面坍塌事故。事故发生后, 运用微动探测地震仪对事故发生地区进行勘测, 根据微波震动反应分析地下土质分层情况。从探测结果可见, 坍塌区域已被泥浆注满, 地铁施工对周围土层的扰动导致土层松动, 进而引发泥浆流动与地下积水区域的相互作用, 最终导致地表路面发生坍塌。



a. 微动探测地震仪布置; b. 微动探测地震仪所勘测地质分层剖面图 (V_s 为瑞雷面波反演中 S 波速度)。

图 8 微动探测地震仪勘测地质剖面

Fig. 8 Geological profile surveyed by microtremor detection seismograph

5 结论

(1) 采用时序 InSAR 方法, 获取了长春市中心城区的地面形变信息, 由长春市中心城区沉降分布特征可知, 长春市南湖大路沉降发育较为严重。在 2022 年 3 月至 2023 年 11 月期间, 南湖大路形变发生较为严重, 最高形变速率为 -28.44 mm/a , 最大累计沉降为 -56.4 mm 。

(2) 通过小波变换可以有效显示 PS 点位的沉降演化特征, 尤其是在沉降严重的区域, 这些特征更为明显。地面沉降在时间尺度上受多层次周期变化的影响, 不同大小的周期变化影响着沉降的发育趋势。在周期变化的时间尺度下, 存在影响沉降发

展趋势的局部小周期, 这些周期变化在时间域上的显著程度影响着预期沉降的特征。

(3) 在坍塌事故发生后运用微动探测地震仪获取了地质分层剖面图, 结果表明在施工前事故区域已形成地下积水, 因施工影响产生了地下土壤松动使得泥浆流动到地下水区域, 二者共同作用最终引起了事故区域的地面坍塌。这一发现强调了在城市建设中, 对地质环境的细致监测和合理保护的重要性, 以确保道路安全及畅通。

参考文献:

- [1] HU C, DONG B, SHAO H, et al. Toward purifying defect feature for multilabel sewer defect classification

- [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1–11.
- [2] 胡聿涵, 白玉川, 徐海珏. 近10年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析 [J]. *公路*, 2016, 61 (9): 130–135.
HU Y H, BAI Y C, XU H J. Analysis of causes and prevention countermeasures of urban road collapse in China in recent ten years [J]. *Highway*, 2016, 61 (9): 130–135.
- [3] 吴远斌, 殷仁朝. 城市路面塌陷类型与防治对策 [J]. *中国矿业*, 2023, 32 (1): 117–120.
WU Y B, YIN R C. Types and countermeasures of urban pavement collapse [J]. *China Mining Magazine*, 2023, 32 (1): 117–120.
- [4] 余满仓, 吕敦玉, 孟舒然, 等. 城市地面塌陷灾害风险评估研究 [J]. *地质与勘探*, 2024, 60 (1): 63–75.
YU M C, LV D Y, MENG S R, et al. Research on risk assessment of urban ground collapse disaster [J]. *Geology & Exploration*, 2024, 60 (1): 63–75.
- [5] NING Z, SUN S, WANG X, et al. Blockchain-enabled intelligent transportation systems: a distributed crowdsensing framework [J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2021, 21 (12): 4201–4217.
- [6] DU J, WU F, XING R, et al. An automated approach to coastline simplification for maritime structures with collapse operation [J]. *Marine Geodesy*, 2021, 44 (3): 157–195.
- [7] YUAN Y D, WEI W Z, HAO Y L, et al. Dynamics of soil erosion due to underground pipeline fractures: a transparent soil study under varied hydraulic conditions [J]. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, 2024, 24 (4/5): 2429–2445.
- [8] XIAO Y Z, YI C R, WEI H X, et al. Risk assessment and spatial regulation on urban ground collapse based on geo-detector: a case study of Hangzhou urban area [J]. *Natural Hazards*, 2023, 118 (1): 525–543.
- [9] CHEN Y A, TANG R, FANG J, et al. Analysis on spatial-temporal law and causation of urban road collapse in China from 2014 to 2018 [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51 (7): 108–116.
- [10] GUO L F, CHAI S Q, DONG J Y, et al. A statistical analysis of urban road collapse accidents in China [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2020, 34 (2): 49–54.
- [11] WANG X W, XU Y S. Investigation on the phenomena and influence factors of urban ground collapse in China [J]. *Natural Hazards*, 2022, 113 (1): 1–33.
- [12] ZHENG C, HE P, WANG G, et al. Analysis of progressive collapse disaster and its anchoring effectiveness in jointed rock tunnel [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2024, 48 (16): 3876–3908.
- [13] XIAO Y X, WAN X X, ZHANG J, et al. Application of geophysical exploration method in preventing road collapse [J]. *North China Earthquake Sciences*, 2020, 38 (2): 68–71, 77.
- [14] LI S, XU W, LI Z. Review of the SBAS InSAR time-series algorithms, applications, and challenges [J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2022, 13 (2): 114–126.
- [15] YANG Z, LI Z, ZHU J, et al. Use of SAR/InSAR in mining deformation monitoring, parameter inversion, and forward predictions: a review [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8 (1): 71–90.
- [16] SURIBABU D, DUMKA R, KOTHYARI G, et al. Identification of crustal deformation in the Saurashtra region, western India: insights from PSI and GNSS derived investigation [J]. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 2022, 57 (4): 639–659.
- [17] 李晓恩, 周亮, 苏奋振, 等. InSAR技术在滑坡灾害中的应用研究进展 [J]. *遥感学报*, 2021, 25 (2): 614–629.
LI X E, ZHOU L, SU F Z, et al. Application of InSAR technology in landslide hazard: progress and prospects [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25 (2): 614–629.
- [18] XU G, GAO Y, LI J, et al. InSAR phase denoising: a review of current technologies and future directions [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8 (2): 64–82.
- [19] WANG Y, LUO J, DONG J, et al. Sequential polarimetric phase optimization algorithm for dynamic deformation monitoring of landslides [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2024, 218: 84–100.
- [20] WANG C, FU L C, WEI Z, et al. Sequential PSInSAR approach for the deformation monitoring of the Nanjing Ming dynasty city wall [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022, 25 (12): 2381–2395.
- [21] 李晶, 刘志生, 薛喜权, 等. 长春市降雨特征及雨型分析研究 [J]. *中国给水排水*, 2015, 31 (5): 100–104.

- LI J, LIU Z S, XUE X Q, et al. Study of rainfall characteristics and pattern in Changchun City [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31 (5): 100–104.
- [22] KIM T, HAN H. Analysis of surface displacement of oil sands region in Alberta, Canada using Sentinel-1 SAR time series images [J]. *Korean Journal of Remote Sensing*, 2022, 38 (2): 139–151.
- [23] 朱建军,李志伟,胡俊. InSAR 变形监测方法与研究进展 [J]. *测绘学报*, 2017, 46 (10): 1717–1733.
- ZHU J J, LI Z W, HU J. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10): 1717–1733.
- [24] 林琿,马培峰,王伟玺. 监测城市基础设施健康的星载 MT-InSAR 方法介绍 [J]. *测绘学报*, 2017, 46 (10): 1421–1433.
- LIN H, MA P F, WANG W X. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture radar interferometry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10): 1421–1433.
- [25] SUN D. Land subsidence susceptibility mapping in urban subsidences using time-series PS-InSAR and random forest model [J]. *Gondwana Research*, 2024, 125: 406–424.
- [26] JIANG H, BALZ T, CIGNA F, et al. Land subsidence in Wuhan revealed using a non-linear PSInSAR approach with long time series of COSMO-SkyMed SAR data [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13 (7): 1256.
- [27] 冯文凯,顿佳伟,易小宇,等. 基于 SBAS-InSAR 技术的金沙江流域沃达村巨型老滑坡形变分析 [J]. *工程地质学报*, 2020, 28 (2): 384–393.
- FENG W K, DUN J W, YI X Y, et al. Deformation analysis of Woda village old landslide in Jinsha river basin using SBAS-InSAR technology [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2020, 28 (2): 384–393.
- [28] LE H M, VAN T A. Analyzing of land subsidence by Sentinel-1 time-series images using PSInSAR method; a case study of Thai Nguyen, Vietnam [J]. *Journal of Mining and Earth Sciences*, 2022, 63 (6): 92–103.
- [29] YAZICI B V, TUNC G E. Investigating persistent scatterer InSAR (PSInSAR) technique efficiency for landslides mapping; a case study in Artvin dam area, in Turkey [J]. *Geocarto International*, 2022, 37 (8): 2293–2311.
- [30] KANDREGULA R S, KOTHYARI G C, SWAMY K V, et al. Estimation of regional surface deformation post the 2001 Bhuj earthquake in the Kachchh region, western India using radar interferometry [J]. *Geocarto International*, 2022, 37 (18): 5249–5277.
- [31] 刘琦,岳国森,丁孝兵,等. 佛山地铁沿线时序 InSAR 形变时空特征分析 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44 (7): 1099–1106.
- LIU Q, YUE G S, DING X B, et al. Temporal and spatial characteristics analysis of deformation along Foshan subway using time series InSAR [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44 (7): 1099–1106.
- [32] OTHMAN G, ZEEBAREE D Q. The applications of discrete wavelet transform in image processing; a review [J]. *Journal of Soft Computing and Data Mining*, 2020, 1 (2): 31–43.