



基于 PS-InSAR 技术的济南城区地表沉降监测与分析

乔燕英, 王新田, 李天鹤*, 陈建忠, 邱瑞

(山东省国土测绘院, 山东 济南 250102)

摘要:区域地表及建筑群的稳定情况是城市可持续发展的关键影响因素之一。为掌握济南主城区的地表形变发展特点, 本文分别采用 95 景和 48 景 Sentinel-1 SAR 数据基于永久散射体干涉测量技术, 对济南城区 2016 年 7 月至 2019 年 7 月、2023 年 6 月至 2025 年 3 月, 进行了两期地表广域沉降监测, 结果发现: 一期沉降主要在济南西北部的鲁西北堆积平原区, 呈现 4 个较大的沉降漏斗区, 最大沉降量在 218 mm, 总沉降面积 35.42 km², 其他区域地表基本稳定。在两期监测结果中, 4 个沉降区沉降情况得到极大缓解, 其中桑梓店沉降区由地面沉降转为抬升; 黄河沿岸两侧村庄及交通设施存在小面积持续沉降情况; 城区中部分交通枢纽设施、部分高层建筑及工厂存在沉降情况。研究成果可以为新型基础测绘提供支撑, 有助于提升城市地理实体安全管控及应用服务能力, 为济南市地面沉降精准防治及城市规划提供基础资料与数据支撑。

关键词: InSAR; 城市地区; 沉降监测; 济南市

中图分类号: P237

文献标识码: A

doi: 10.12128/j.issn.1672-6979.2025.10.009

0 引言

地面沉降已经对城市基础设施、线性轨道交通和地下空间开发利用形成重大威胁, 制约着经济和社会发展。快速、周期性的城市地表沉降监测与更新已成为城市持续性发展的迫切需要。目前针对大范围地面沉降监测的技术方法主要有水准测量、GPS 测量和 InSAR 技术等。这 3 种方法在精度、时间分辨率和空间分辨率各不相同, 精密水准测量技术精度最高, 可作为另外两种测量结果的验证手段; GPS 连续观测测量技术时间分辨率最高; InSAR 技术空间分辨率最高。前 2 种方法只能监测点状空间的沉降情况, 外业观测周期长, 投入人力物力成本较高, InSAR 技术可以提供覆盖大范围的地面沉降信息, 数据处理效率高, 时效性强^[1-7]。欧空局 Sentinel-1A 宽幅干涉模式 (interferometric wide swath, IW) VV 极化方式数据^[8] 分辨率 5 m×20 m, 幅宽 250 km×180 km, 满足大区域的城市区域普查式地表形变监测^[9-12]。本文以济南城区为例,

基于数据收集情况, 采用时间跨度较大, 能反映形变特征变化的 2016—2019 年、2023—2025 年 SAR 数据进行地面沉降监测, 分析不同时段济南主城区地表稳定性演变特征, 为城市地面沉降监测提供可靠数据支撑。

1 PS-InSAR 技术原理

假设有同一区域不同时相的 $N+1$ 幅 SAR 图像, 根据时间基线、空间基线和多普勒中心等条件选择其中一幅作为公共主影像, 将其它影像与主影像配准, 并干涉处理, 产生 N 幅干涉图, 基于轨道信息去除平地效应相位, 并引入外部 DEM 去除地形相位后, 获得时序差分干涉图集。第 i 幅差分干涉图的相位表示见公式(1)^[13-14]:

$$\Phi_i = \Phi_{def_i} + \Phi_{topo_i} + \Phi_{atm_i} + \Phi_{noise_i} \quad (1)$$

式中: Φ_{def_i} 为视线方向的形变相位; Φ_{topo_i} 为外部 DEM 误差引入的残余地形相位; Φ_{atm_i} 为大气延迟相位; Φ_{noise_i} 为噪声相位。

根据相邻 PS 点上空间自相关特性, 采用基于

收稿日期: 2025-03-14; 修订日期: 2025-08-18; 编辑: 武昕普

作者简介: 乔燕英(1967—), 女, 山东章丘人, 高级工程师, 主要从事工程测量工作; E-mail: 13573791717@163.com

* 通信作者: 李天鹤(1995—), 男, 山东莒南人, 工程师, 主要从事摄影测量工作; E-mail: 1015442216@163.com

相邻 PS 点相位差分模型有效削弱大气影响。在具体实现中,采用振幅离差阈值法提取 PS 候选点,采用 Delaunay 三角网构建网络。在只考虑线性形变的前提下,相邻 PS 点的形变速度增量和高程误差增量能够通过整体相位相干系数最大化模型来进行求解。在初始差分干涉图中将解算的每个 PS 点线性形变和高程误差减掉,即得到残余相位,主要包含了大气延迟相位,非线性形变相位和噪声相位。大气延迟相位在 1 km^2 范围内具有较强的空间相关性,可以在时间域上高通滤波,空间域上低通滤波分离大气延迟相位,得到每幅影像相对于主影像的大气延迟相位,同时分离非线性形变相位,从而获得形变相位,地面沉降信息也相应求得。PS-InSAR 数据处理流程如图 1 所示。

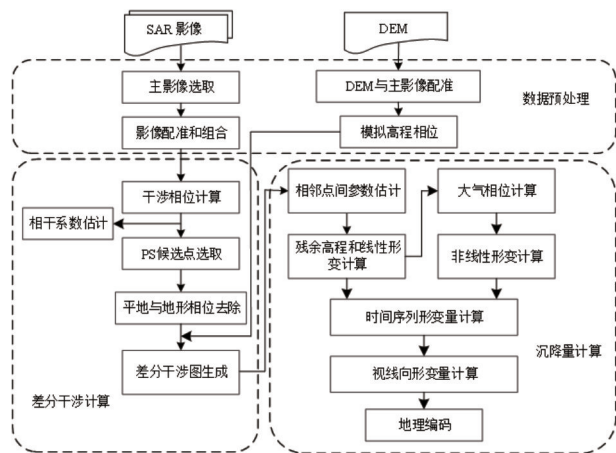


图 1 PS-InSAR 数据处理流程

2 研究区概况及数据处理

2.1 研究区地理概况

济南市城区位于泰山山脉脚下,北跨黄河流域,地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上,地势南高北低,依次为低山丘陵、山前倾斜平原和黄河冲积平原。本文分别获取了济南城区 2016—2019 年、2023 年 6 月至 2025 年 3 月共计 133 景 Sentinel-1A 影像数据、精密定轨星历数据和该区域 90 m SRTM DEM 数据^[15]。

2.2 数据处理及结果

首先对 201—2019 年及 2023—2025 年 SAR 影像进行裁剪与配准,结合 DEM 数据生成差分干涉图,将振幅离差指数设置为 0.75 提取反射强度较高且密度达到一定要求的 PS 点,采用 Delaunay 方法

进行 PS 点组合和模型解算,保证 PS 点相关性在 0.8~1.0 以内,精确拆分 PS 点的干涉相位中的形变、高程和大气等分量,最终得到 PS 点的累积形变量。

经统计,在 2016—2019 年,该区域共识别出高相干性 PS 点 88 762 个,平均密度每平方千米 43 个,2023—2025 年共识别出高相干性 PS 点 70 763 个,平均密度每平方千米 46 个,主要位于建筑及道路沿线,PS 点相对稳定,在一定程度上保障了监测结果的可靠性。运用 ARCGIS 软件的统计分析与空间分析,对形变监测点数据进行去噪、抽稀、裁剪、沉降速率转换等处理流程生成矢量点数据,最后对地表形变点数据及等值线数据进行分级设色、修饰、叠加地理省情数据,生成地表形变监测累积形变量点分布图、年平均形变速率图^[16](图 2、图 3)。

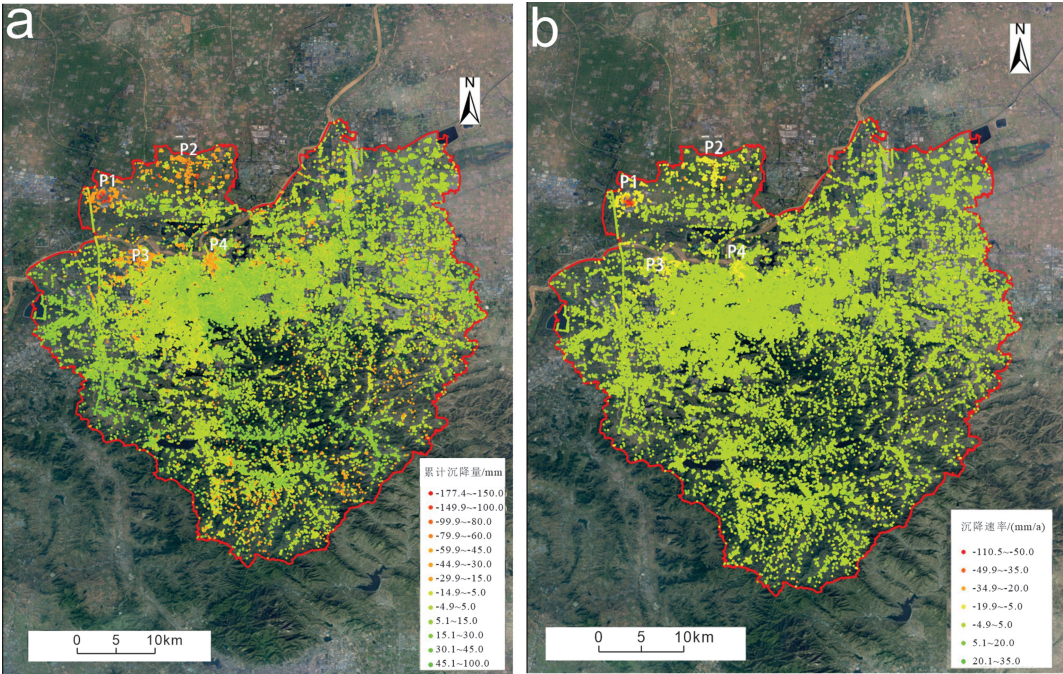
3 地表形变特征分析

根据监测结果,自 2016 年 7 月至 2019 年 7 月,济南城区地表整体稳定,沉降主要分布在城区西北部的桑梓店街道(P1)、大桥街道(P2)、药山街道(P3),华山街道(P4),形成 4 个大的沉降区,总沉降面积 35.42 km^2 ,桑梓店街道、大桥街道为中等程度沉降,沉降量大于 80 mm 的面积为 30.12 km^2 ,占沉降总面积 85%,最大累积沉降量位于桑梓店街道,沉降量为 -218 mm。

2023—2025 年,上期监测的 4 个沉降漏斗整体上未出现进一步扩大,其中桑梓店街道漏斗区存在小范围的地表持续沉降情况,但整体地表有抬升趋势,最大抬升速率约 12 mm/a ,表明该区域地表有恢复的趋势,采用多时相天地图影像进行对桑梓店街道目视解译,发现 2016—2019 年间出现大型化工企业扩张情况,于 2020 年工厂规模及数量趋于稳定。

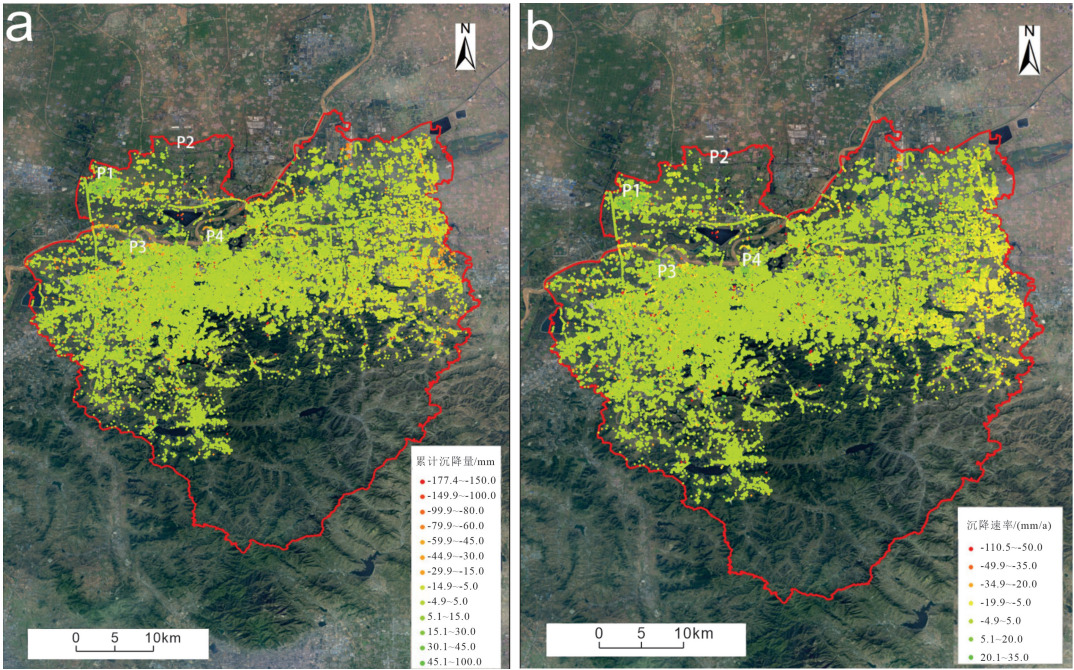
大桥街道 2019—2023 年呈现稳步下沉的趋势,最大累计形变量 -120 mm,在第二监测阶段,整体沉降趋势减缓,平均沉降量在 10 mm。融合时序光学影像考察验证,该区域主要是村庄,无大型化工企业。初步分析近年来城市化进程加速,村庄大量人口外迁,地下水开采量减少。

2016—2019 年,药山街道和华山街道沉降,沉降量大于 80 mm 的面积为 5.3 km^2 ,占沉降总面积 15%,为较低程度沉降,平均累计沉降量在 30 mm。



a—累计沉降量;b—沉降速率。

图 2 2016—2019 年济南市地面累计沉降量及沉降速率图



a—累计沉降量;b—沉降速率。

图 3 2023—2025 年济南市地面累计沉降量及沉降速率图

2023—2025 年,监测到的药山街道原沉降趋势明显减缓且面积大大缩小,沉降中心发生向东移动,主要集中在小鲁庄工业园和山东元易工业园。结合光学遥感影像发现 2023—2025 年药山街道原工业园进行了逐步大面积拆迁。

2016 年 7 月至 2019 年 7 月,华山街道存在

5.08 km² 的沉降漏斗,沉降量在 25~65 mm 之间,2023 年 6 月至 2025 年 3 月,该区域沉降情况得到缓解,监测其形变量在 0~12 mm 之间。通过时序光学影像考察验证,该区域主要地表设施为工厂,在两个监测期中地物面积及规模基本没有发生变化。

总体来看,2016—2019 年,济南市主要沉降区

分布在城区北部,该区域均属于鲁西北堆积平原区,该区域地质构造疏松,过度开采地下水会造成含水系统压密,导致地面沉降发生^[10]。2023—2025 年济南市整体的地面沉降趋缓,部分地表演变为抬升趋势,推测该现象产生原因一是与济南市转型升级发展中相当体量的工业园区搬迁有关,二是与济南市在推进节水型社会建设和地下水控采措施有关。

4 黄河沿线沉降分析

黄河流域地质疏松,过度开采地下水、不合理的土地利用(如农业灌溉、城市扩张)会导致地下水位变化,引发土壤压实和地面沉降。济南作为黄河流域重要城市,城市化进程加速,道路、建筑等基础设施建设增加地下空间负荷,沉降风险较大。

对流经济南城区的黄河沿线 50 km 范围地表进行形变分析,发现黄河流域附近的建筑均发生不同程度沉降。2016—2019 年,沉降最严重的区域为药山街道及华山的工业园区,最大沉降量为 -110 mm,沿线村庄的沉降范围在 20~50 mm,京沪高铁也发生了 10 mm 左右的沉降。在 2023—2025 期间,居民地及京沪高铁呈现继续沉降情况,累计沉降量分别为 20 mm、40 mm,新增沉降区为 2021 年建造的某跨黄河大桥,平均累计沉降量 50 mm,其他区域基本稳定。

5 重点建筑物沉降分析

当前,城市建筑物的安全问题日益凸显,一是大量房屋进入老龄化阶段,老房子设计建造标准低,维修保养资金短缺,住房安全问题频发;二是随着城市化发展,近年来兴建了大量的异形结构、特殊材料的建筑物,其稳定性需要动态持续监测;三是工厂驻地人口密度较大,但是建筑物大多结构较为简易,也是风险较高区域。

为提供城市安全韧性,保障住房安全,对 2023—2025 监测结果的 PS 点套合光学影像进行排查分析,发现 PS 点基本位于建筑物屋顶上,大多数建筑物形变量在 0 附近,监测到部分建筑物呈现持续下沉的现象,沉降速率在 25 mm/a 左右,最大沉降速率达 70 mm/a。结合光学影像对发生沉降的建筑物进行分析,主要是三类建筑物易发生沉降:一是房顶结构和材料几乎一致的会展中心、火车站等,

该类建筑的共同特点是具有无柱或者少柱的内部空间,结构体系一般是采用钢材及铝合金材料的空间网架和桁架结构,屋顶材料一般是高强合金、高强度镀层钢板、膜结构及 ETFE 气枕,特点为轻质高强、抗风揭性能强和适应大变形能力。对该类建筑物,从监测结果上不宜判定是建筑物结构的沉降还是屋顶材料的变形及损坏,下一步需结合常规水准测量结果判断产生沉降的位置及原因,进一步分析建筑物安全性;二是近几年兴建的高层住宅及写字楼,分析是由于在建成初期的地基自然下沉阶段,需持续进行 PS-InSAR 监测,若沉降速率超限,需及时上报有关部门。三是低矮、结构简易的工厂厂房,该类建筑物与火车站等建筑物相似,结构及材料有较大适应变形能力,需结合相关专业知识判定该沉降量下厂房是否安全。

6 结论

本文应用 Sentinel-1 影像数据,采用 PS-InSAR 方法获取了济南城区 2016—2019 年、2023—2025 年的时序沉降结果,通过对比 2 个时间段的地面沉降时空变化,得出以下结论:

(1)对比两期监测结果,2016—2019 年,呈现以桑梓店街道、药山街道为代表的 4 个典型沉降区,沉降量最大值 218 mm;2023—2025 年,济南市区域性地表沉降量及面积大大减少,结合遥感影像发现沉降区出现厂房拆除、村落搬迁的情况。推断地表沉降主要原因为过度开采地下水。

(2)黄河流域的村庄及交通设施更容易发生沉降,新建设施沉降速率更大,需要持续关注。

(3)通过对城市建筑物排查分析,发现沉降主要发生在火车站、会展中心、新建高层建筑物及厂房等地物。后续工作需持续监测此类地物并结合相关地物的安全规范进行综合分析其安全性。

(4)本研究对济南市不同地物进行了监测与分析,对城市安全进行了初步探索,为城市安全管理提供了一定借鉴意义,下一步根据监测数据,结合地质、地下水开采、建筑物结构等多方面因素进一步加强沉降特征分析细度及成因。

参考文献:

- [1] 杨梦诗,廖明生,常玲,等.城市场景时序 InSAR 形变解译:问题分析与研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48

(10):1643-1660.

[2] 蔡田露,龚绪龙,卢毅,等.江苏沿海地区 InSAR 精度评定与多源数据验证[J].遥感技术与应用,2020,35(6):1426-1435.

[3] 李更尔,周元华.InSAR、水准及 GPS 数据融合处理方法[J].测绘通报,2017(9):78-82.

[4] 王爱国.运用水准和 InSAR 的地面沉降监测数据融合方法[J].测绘科学,2015,40(4):121-125.

[5] 刘胜男,陶钧,卢银宏.地面沉降监测多源数据融合分析[J].测绘通报,2020(12):46-49.

[6] 周鑫城.不同地表覆盖对 InSAR 相干性的影响研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.

[7] 顾壮壮.植被覆盖度对哨兵 1 号 InSAR 异常形变区识别准确度影响研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.

[8] 熊佳诚,聂运菊,罗跃,等.利用双极化 Sentinel-1 数据监测城市地面沉降:以上海市为例[J].测绘通报,2019(11):98-102.

[9] 张金盈,崔靛,刘增珉,等.利用 Sentinel-1 SAR 数据及 SBAS 技术的大区域地表形变监测[J].测绘通报,2020(7):125-129.

[10] 胡在良,邹友一,简国辉,等.InSAR 技术在城市环境轨道交通设施沉降监测中的应用[J].铁道建筑,2023,63(7):144-148.

[11] 魏以宽,闵天,邹崇尧,等.基于 InSAR 的武汉地区 2016—2021 年地面沉降监测[J].地理空间信息,2023,21(10):69-72.

[12] 李佳豪,周吕,陈冠宇,等.基于时序 InSAR 的上海市地面沉降时空演变特征分析[J].测绘地理信息,2023,48(5):38-43.

[13] 朱邦彦,唐超,任志忠,等.基于 PS-InSAR 技术的珠海市地表形变监测与驱动力分析[J].测绘通报,2022(6):108-113.

[14] 范晓燕,甘政政,刘永建.基于 PS-InSAR 技术的北海市地表沉降监测与分析[J].南方自然资源,2022(5):63-67.

[15] 李杰.多源 DEM 对星载 InSAR 形变监测精度影响的对比研究[D].昆明:昆明理工大学,2023.

[16] 董传胜,王新田,陈菲,等.鲁西南矿区 PS-InSAR 沉降监测及分析[J].测绘与空间地理信息,2022,45(S1):211-214.

Monitoring and Analysis of Surface Subsidence in Jinan City Based on PS-InSAR Technology

QIAO Yanying, WANG Xintian, LI Tianhe, CHEN Jianzhong, QIU Rui

(Shandong Provincial Institute of Land Surveying and Mapping, Shandong Jinan 250102, China)

Abstract: The stability of regional surface and architectural complexes is one of the key influencing factors for urban sustainable development. In order to master the development characteristics of surface deformation in main urban areas of Jinan city, 95 scenes and 48 scenes of Sentinel-1 SAR data have been used to monitor the surface subsidence in Jinan from July 2016 to July 2019, and from June 2023 to March 2025 respectively. It is showed that the first stage of subsidence is mainly in the accumulation plain area in northwest Shandong province. It shows four large subsidence funnels. In the two monitoring results, the settlement of four subsidence areas has been greatly alleviated, among which the subsidence area of Sangzidian has changed from land subsidence to uplift. There is a small area of continuous subsidence in villages and traffic facilities on both sides of the Yellow River. Subsidence exists in some transportation hub facilities, some high-rise buildings and factories in the urban area. The research results can provide support for new basic surveying and mapping, help to improve the safety management and application service capabilities of urban geographic entities, and provide basic data and data support for accurate prevention and control of land subsidence and urban planning in Jinan city.

Key words: InSAR; urban area; settlement monitoring; Jinan city