引文格式：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. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2023.10.017

基于InSAR的武汉地区2016—2021年地面沉降监测

魏以宽[1]，闵　天[2]，邹崇尧[1]，邓连生[3]，陈　华[4]
（1. 湖北省测绘工程院，湖北 武汉 430074；2. 湖北省航测遥感院，湖北 武汉 430074；
3. 湖北理工大学 电气与电子信息工程学院，湖北 黄石 435003；4. 湖北珞珈实验室，湖北 武汉 430079）

摘　要：利用2016年1月—2021年12月的89景哨兵一号雷达影像，采用相干点目标分析合成孔径雷达干涉测量技术（IPTA-InSAR）进行数据处理，获取了武汉地区的地面沉降信息，并联合GNSS基准站观测成果对InSAR监测的形变进行分析。结果表明2016—2021年期间，武汉市主城区形成了汉口、沙湖北和白沙洲3个较为明显的沉降中心，地面沉降呈连片化发展趋势。汉口地区的地面沉降速率最高，部分区域沉降超过10 mm/a，典型沉降区的地面沉降过程伴随有一定的波动特征，其中下沉趋势在不同年间会有区别，2016—2020年间特征点缓慢下沉，2018年开始加速下沉，至2020年下沉速度再次放缓。GNSS与InSAR特征点沉降分析表明2种技术的监测结果整体上具有很好的一致性。

关键词：地面沉降；InSAR；冷热点分析；GNSS
中图分类号：P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）10-0069-04

Land Subsidence Monitoring in Wuhan from 2016 to 2021 Based on InSAR

WEI Yikuan[1], MIN Tian[2], ZOU Chongyao[1], DENG Liansheng[3], CHEN Hua[4]
(1. Hubei Institute of Surveying and Mapping Engineering, Wuhan 430074, China;
2. Hubei Institute of Photogrammetric and Remote Sensing, Wuhan 430074, China;
3. School of Electrical and Electronic Information Engineering, Hubei Polytechnic University, Huangshi 435003, China;
4. Hubei Luojia Laboratory, Wuhan 430079, China)

Abstract: By using 89 scenes of Sentinel-1 radar images from January 2016 to December 2021, we adopted interferometric point target analysis-interferometry synthetic aperture radar(IPTA-InSAR) technique for data processing to obtain land subsidence information in Wuhan area, and analyzed deformation monitored by InSAR combined with the observations from GNSS reference stations. The results indicate that from 2016 to 2021, the main urban area of Wuhan City formed three prominent subsidence centers, such as Hankou, Shahu North and Baishazhou. Land subsidence showed a trend of continuous development with a widespread pattern. The highest subsidence rate was Hankou area, with some areas experiencing subsidence exceeding 10 mm/a. The land subsidence process in typical subsidence areas was accompanied by certain fluctuation characteristics, among which the subsidence trend varied from different years. From 2016 to 2020, the characteristic points showed a slow sinking trend while it started to accelerate in 2018 and slowed down again in 2020. The analysis of land subsidence using GNSS and InSAR feature points indicates a good consistency between the monitoring results of these two techniques.

Key words: land subsidence, InSAR, hot and cold spot analysis, GNSS, Wuhan

地面沉降又称为地面下沉或地陷，是在人类工程经济活动影响下，由于地下松散地层固结压缩，导致地壳表面标高降低的一种局部的下降运动（或工程地质现象）。城市地面沉降是我国常见的城市地质灾害之一，它可能会导致建筑物、桥梁、道路等基础设施的破坏，危及人民生命财产安全[1]。常规地面沉降监测与分析方法（如水准测量、GNSS、加速度传感器等）受空间分辨率低、目标监测点布设困难、作业成本高等因素限制，难以实现大空间尺度与高空间分辨率的变形监测与分析[2-4]。合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术能够提取地表微小形变信息，且具有受天气影响小、覆盖范围大、成本低、测量精度高等特点，弥补了传统形变监测的不足，已经在众多城市地面沉降监测中进行了应用[5-6]。

本文选取覆盖武汉地区2016年1月—2021年12月的89景Sentinel-1A影像，采用相干点目标分析合成孔径雷达干涉测量技术（IPTA-InSAR）获取武汉地区的地面形变速率，对典型沉降区域进行时序分析，并

收稿日期：2023-06-01。
第一作者简介：魏以宽（1989—），工程师，研究方向为导航与位置服务、CORS系统建设与运维、GNSS数据处理，E-mail：wei1kuanx@gmail.com。

结合GNSS观测成果对InSAR监测的精度进行了验证分析。

1 研究区概况与实验数据

1.1 研究区域

武汉市地处江汉平原东部、长江中游，是国际湿地城市，市内江河纵横、百湖密布，水域面积占全市总面积的1/4。武汉市地貌属鄂东南丘陵经汉江平原东缘向大别山南麓低山丘陵过渡地区，中间低平，南北丘陵、岗垄环抱，北部低山林立。

1.2 GNSS数据

本文同时收集了研究区域内的7个CORS基准站2016—2022年的观测数据，利用GAMIT10.71软件对观测期间的数据进行了基线解算，解算时将中国境内及周边的部分IGS基准站纳入组网解算，基线处理策略如表1所示。获取基线解文件后，利用GLOBK软件进行平差处理，进而获取各基准站统一参考框架下的坐标。

表1 基线处理策略

策略设置	内容
卫星轨道	IGS精密轨道产品
卫星钟差	采用IGS精密钟差产品作为初值，作为随机参数逐历元估计
接收机钟差	伪距观测值计算初值，作为随机参数逐历元估计
电离层延迟	无电离层组合观测值消除
对流层延迟	根据标准大气模型用萨斯坦莫宁（Saastamoinen）模型改正干分量延迟，采用分段常数的方法估计剩余部分延迟
卫星和接收机天线相位中心改正（PCO和PCV）	采用IGS发布的igs14.atx文件中标定值
潮汐改正	各测站施加潮汐改正
对流层延迟	SAAS模型改正，残差部分作为参数，每2 h估计一组
模糊度	固定双差模糊度
截止高度角	7°
采样率	历元间隔30 s
先验方差	伪距观测值先验方差0.6 m 载波观测值先验方差3 mm

1.3 InSAR数据处理方法

本文收集覆盖武汉地区的2016年1月—2022年9月的101景哨兵一号SAR数据，成像模式为宽幅干涉模式（IW）的单视复数（SLC）影像，数据的基本信息如表2所示。本文采用相干点目标分析合成孔径雷达干涉测量技术（IPTA-InSAR）来进行数据处理。IPTA技术是GAMMA软件提出的干涉点目标分析技术，它将覆盖研究区的多景SAR影像进行统计回归分析得到相位和幅度信息，能够有效识别建筑，裸露的岩石、人工角反射器等大量的点目标[7-8]。本文经过公共主影像的优化选取、SAR影像配准、差分干涉处理、相干点目标提取、IPTA相位解缠、大气相位等残余相位分离、形变速度场解算等步骤，获取了基于InSAR监测的武汉市地表沉降信息。

表2 SAR数据基本信息

参数	参数值
数据卫星	Sentinel-1A
成像模式	宽幅干涉模式（IW）的单视复数（SLC）影像
轨道方向/极化方式	升轨/VV
影像数量	101景
观测时间	2016年1月—2022年9月
InSAR处理方法	IPTA

2 结果分析

2.1 研究区域总体变化特征

本文通过IPTA技术对哨兵一号数据进行处理，进而获取了影像覆盖地区的形变监测速度。整体而言，2016—2021年研究区域的地面沉降呈平稳态势，年均形变速率在-5~5 mm/a的地面形变点数量占总地面形变点数量的98.28%（负值代表地面沉降、正值代表地面抬升，下同），年均形变速率在-5 mm/a以下的地面形变点数量占总地面形变点数量的1.71%，表明监测区存在部分区域处于地面沉降状态。

进一步选择武汉主城区为研究对象，对城市地面沉降进行分析。武汉主城区分割后得到3 442 256个点位，其中形变速率在-10 mm/a到-5 mm/a的地面形变点数量占总地面形变点数量的1.4%；形变速率在-5 mm/a到0 mm/a的地面形变点数量占总地面形变点数量的33.80%。年均形变速率在0 mm/a以上的地面形

变点数量占总地面形变点数量的64.39%；年均形变速率在+5 mm/a以上的地面形变点数量，还存在0.43%的点位形变速率在−10 mm/a以上。表明监测区内存在一定数量的地面沉降趋势，其中还有少部分区域沉降趋势极为明显。

在监测周期内，部分地区沉降量呈逐渐增加的趋势，沉降量较大的区域范围呈逐渐扩大并有连成一片的趋势。截至2021年12月，武汉市主城区形成3个较为明显的沉降中心，即汉口地区、沙湖北部地区和白沙洲地区，而地面抬升的区域主要分布在武汉市主城区的东南部和西南部。从沉降空间分布上看，地面沉降速率较高（<−5 mm/a）的区域主要是长江左岸的汉口地区和长江右岸的沙湖北部地区、白沙洲大道附近地区。其中，汉口地区的地面沉降速率最高，部分区域的地面沉降速率超过10 mm/a，沉降明显区域连片分布，沉降面积最大。其次是沙湖北地区，沉降明显区域由沙湖北部连绵至长江天兴洲段南岸；除部分沉降突出的区域外，白沙洲地区的地面沉降速率较汉口地区和沙湖北部地区偏低，其分布沉降明显区域集聚程度低于汉口地区和沙湖北部地区。

2.2　典型沉降区特征点分析

为了分析地表沉降随时间的演变，选取了分布在不同沉降区的沉降特征点对重点地区（后湖公园及周边地区、洪山区青菱河路白沙洲农副产品大市场、白沙州大道张家湾社区及周边地区、天河机场、汇丰企业天地、青山公园、北湖项目部、严东湖、玖通达物流园、中央水景公园）进行分析，具体位置如图1中红色圆点所示，各特征点沉降序列结果如表3所示。2016—2017年期间，汇丰企业、武商、后湖公园累计沉降量呈稳定波动；2017—2018年期间，除青山公园，汇丰企业园累计沉降量呈稳定波动外，其他特征点累计沉降量呈现波动下降趋势，其中后湖公园累计沉降量呈断崖式下降波动趋势；2018—2020年期间，所选特征点累计沉降量呈波动下降趋势，白沙洲市场特征点下降最为严重，在整个研究期间持续下沉；2020—2021年期间，除白沙洲市场特征点、张家湾特征点累计沉降量呈波动下降趋势外，其他特征点累计沉降量呈稳定波动。在2016—2021年期间，白沙市场特征点下降最为突出，累计沉降量达到−160 mm，与其同为洪山区的张家湾特征点累计沉降量也达到−80 mm，两地的沉降速率分别达−29.26 mm/a和−15.28 mm/a。总体而言，选择的沉降区特征点均具有明显的下降趋势，且下降过程伴随有一定的波动特征，其中下沉趋势在不同年间会有区别，2016—2020年间多数特征点下沉速度较慢，2018年前后开始加速下沉，至2020年下沉速度开始放缓。

表3　特征点位置及沉降信息

位置	经度/(°)	纬度/(°)	沉降速率/(mm/a)
青山公园	114.39	30.64	−8.01
汇丰企业	114.19	30.61	−10.09
白沙洲市场	114.25	30.46	−29.26
后湖公园	114.32	30.66	−17.31
张家湾区	114.28	30.50	−15.28
天河机场	114.20	30.75	−7.34
中央水景	114.22	30.50	−10.68
玖通达物流	114.07	30.63	−14.60
邦瑞街区	114.32	30.62	−17.21
武商奥莱	114.36	30.62	−11.63

地质构造背景、地下水状况、地面荷载、地下空间开发、工程施工等因素均会对地面沉降产生影响。武汉地区存在碳酸盐岩条带，高危险区为第Ⅰ型地质结构分布区主要位于：白沙洲条带（L3）和汉南条带（L6）长江两岸全新统地层覆盖区，粉细砂直接位于碳酸盐岩地层之上。本区约占碳酸盐岩分布面积的3.6%。由于全新统粉细砂的凝聚力很小或等于零，很容易在重力和渗透力作用下进入下伏的岩溶通道中，从而产生岩溶地面塌陷。初步推测白沙洲大市场、张家湾社区所发生的地面沉降与白沙洲条带（L3）南岸地质构造碳酸盐岩条带有一定的相关性。

2.3　主城区地面沉降自相关与冷热点分析

利用ArcGIS空间分析工具，对主城区地面沉降空间集聚特征进行分析。武汉市主城区2016—2021年间地面沉降速率的莫兰指数值是0.763 3，通过了显著性检验（Z>1.96，P<0.05)。空间自相关分析结果表明2016—2021年武汉市主城区地面沉降存在空间正相关性，空间集聚分布明显。进一步对武汉主城区地面沉降进行冷热点分析，结果如图1所示。

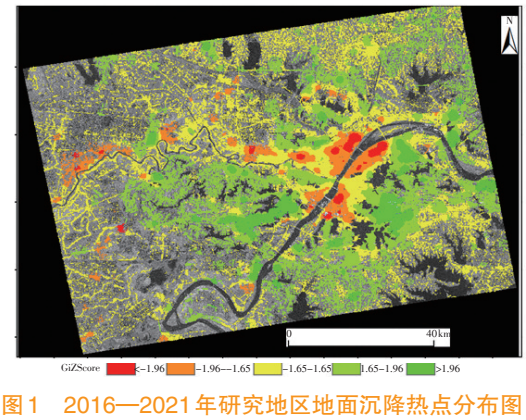


图1　2016—2021年研究地区地面沉降热点分布图

武汉市主城区地面沉降热点区域主要是青山区、江岸区、江汉区、武昌区沙湖公园部分区域。2016—2021年武汉市主城区地面沉降热点区域面积较大，地面沉降呈连片化发展。汉口区域的地面沉降热点区域遍布汉口城区，沙湖北部的地面沉降区域也有连片趋势，青山区及江岸区三环线地区沉降明显增多。同时在洪山区白沙洲大道及汉阳四新地区沉降分布也具有连片化特征。

2.4 InSAR处理成果与GNSS站点结果的精度评价

为了对GNSS和InSAR两项监测技术进行相互验证，同时也为了更好地研究武汉地区的地表变形特征，本文进一步比较了GNSS监测点的垂直形变与对应InSAR IPT点结果的一致性，如表4所示。从表中可以看出，所有站点的GNSS与InSAR监测结果的互差均不大于5 mm/a，互差绝对值的平均值为2.35 mm/a，说明两者整体上具有很好的一致性。

通过功率谱分析可知，周年和半周年变化是GNSS基准站主要的周期特征，同时U方向的振幅要显著大于水平方向。垂向的周年振幅范围为1.63（W005）至8.66 mm（W003），振幅平均值4.17 mm；半周年振幅相对较小，振幅范围为0.64（W001）至1.72 mm（W005），平均振幅1.03 mm；相对于周年振幅而言，半周年振幅仅为周年振幅的25%。南北方向的周年振幅范围为0.40（W006）至2.36 mm（W002），振幅平均值1.10 mm；半周年振幅相对较小，振幅范围为0.34（W001）至1.04 mm（W002），平均振幅0.56 mm；半周年振幅为周年振幅的51%，GNSS基准站所在地整体处于相对稳定的状态。

从GNSS基准站坐标时间序列与InSAR形变序列的对比可以看出（为了更好地比较2种监测技术得到形变结果的区别，2种序列进行了标准化处理），GNSS结果除了反映趋势项，还能反映出周期性的变化特征，InSAR相比较而言对于速度变化的结果可以较好地反映出来，但是周期特征不显著。

表4 GNSS和InSAR监测成果比较/(mm/a)

基准站	垂直速度	InSAR形变速度
W001	0.65	−3.16
W002	−0.76	−2.54
W003	−1.53	−0.41
W004	−0.33	−3.03
W005	−2.21	1.11
W006	−0.26	0.31
W007	3.45	0.31

3 结 语

本文利用IPTA技术对武汉地区2016—2021年间89景哨兵一号SAR数据进行了处理，获取了研究区域的地面沉降信息，并联合GNSS数据对结果进行了验证。结果表明从沉降空间分布上看，地面沉降速率较高（<−5 mm/a）的区域主要是长江左岸的汉口地区和长江右岸的沙湖北部地区、白沙洲大道附近地区。通过冷热点分析可知，武汉市主城区地面沉降热点区域主要是青山区、江岸区、江汉区、武昌区沙湖公园部分区域，2016—2021年武汉市主城区地面沉降热点区域面积较大，地面沉降呈连片化发展。通过沉降特征点时间序列变化分析表明，选择的沉降区特征点均具有明显的下降趋势，且下降过程伴随有一定的波动特征，其中下沉趋势在不同年间会有区别，2016—2020年间多数特征点下沉速度较慢，2018年前后开始加速下沉，至2020年下沉速度开始放缓。最后联合GNSS监测点的垂直形变对InSAR结果进行了验证，所有站点的GNSS与InSAR监测结果的互差均不大于5 mm/a，互差绝对值的平均值为2.35 mm/a，说明两者整体上具有很好的一致性。

参考文献

[1] 袁铭,白俊武,秦永宽. 国内外地面沉降研究综述[J]. 苏州科技学院学报(自然科学版),2016,33(1):1-5

[2] 刘国祥,陈强,罗小军. InSAR原理与应用[M]. 北京:科学出版社,2019

[3] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. IEEE Transactionson Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2 202-2 212

[4] 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

[5] 潘超,江利明,孙奇石,等. 基于Sentinel-1雷达影像的成都市地面沉降InSAR监测分析[J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(2):198-203

[6] 许才军,何平,温扬茂,等. InSAR技术及应用研究进展[J]. 测绘地理信息,2015,40(2):1-9

[7] 张力彪,闫若鹏. 基于IPTA-InSAR技术的太原市地面形变监测[J]. 山西建筑,2023,49(1):4-6

[8] 王心雨. 高分辨率数据用于西安市表面位移的InSAR监测研究[D]. 西安:长安大学,2015