

基于 PS-InSAR 技术的宁波市地面沉降监测研究

方海伦, 胡荣荣, 邱雨欣

(浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 宁波 315012)

摘要: 由大规模抽取地下水和工程建设引发的地面沉降广泛分布于世界各大平原, 地面沉降地质灾害使城市损失标高, 增加城市在洪涝灾害中的生命财产损失。基于 60 景 Sentinel-1 影像, 采用 PS-InSAR(永久散射体合成孔径雷达干涉测量)技术获取了宁波市 2017~2021 年平原区地表形变, 利用同期水准数据进行了精度和可靠性评定, 监测和分析结果表明工程建设是现阶段引发宁波市地面沉降的主要因素; 杭州湾新区为代表的沿海围垦区地面沉降与围垦和工程建设时间密切相关; 城市建成区地面沉降局限于近期的工程建设区域内, 且沉降衰减相对较快。

关键词: PS-InSAR; 地面沉降; 宁波

中图分类号: P642.26; P56; X87 **文献标识码:** A

STUDY ON LAND SUBSIDENCE MONITORING BASING ON PS-INSAR TECHNIQUE

FANG Hai-lun, HU Rong-rong, QIU Yu-xin

(Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co. LTD, Ningbo 315012, China)

Abstract: Due to the extraction of underground water and the engineering construction, land subsidence is widely distributed in the worldwide plains. The cities will lose their elevation because of the settlement which enlarge the economic damages and loss of lives in flood disasters. The surface deformation in Ningbo plain from 2017 to 2021 was obtained by using PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar) technique based on 60 pieces of Sentinel-1 images, the precision and reliability of the deformation were verified by the leveling data in the same period. The results showed the engineering construction was the major factor resulting in the land subsidence in Ningbo at the present stage. Besides, the settlement in coastal reclamation area such as Hangzhou Bay New Area was significantly related to the time of reclamation and engineering construction. At last, the land subsidence in urban built-up area was limited in the recent engineering construction area and the settlement rate would decelerate rapidly.

Key words: PS-InSAR; land subsidence; Ningbo

地面沉降是国内外沿海和三角洲城市普遍存在的地质环境问题, 国外如雅加达、胡志明市、曼谷、新奥尔良、东京等城市过去一个世纪累计沉降量达到

300~4 250 mm 不等, 除东京通过严格限制地下水开采、地下水人工回灌等措施有效控制了地面沉降外, 其它城市仍有 20~100 mm/a 的沉降速率^[1]。

国内地面沉降主要分布在长江三角洲、华北地区、汾渭盆地,其中长三角地区通过全面禁采地下水等防治工作有效控制了地面沉降^[2]。

在监测地面沉降方面,国内外除水准测量、GPS 及其他传统岩土量测仪器技术外,InSAR(干涉合成孔径雷达)技术已广泛应用多年。InSAR 技术由于其卫星搭载微波天线的特性,具有全天候、高精度、范围广、监测周期短、工作量小、成本低的特点。InSAR 技术兴起于 20 世纪 80 年代,根据两幅或多幅不同时间相同轨道获取的 SAR 图像相位差可以监测地表毫米级的形变。PS-InSAR(永久散射体合成孔径雷达干涉测量)则由 Ferretti 等人于 2000 年首次使用研究^[3],该技术通过搜寻能够稳定反射微波的地表物体,将多幅 SAR 影像进行时间序列分析得出地表物体的形变-时间曲线。由于城市中有较多房屋、道路、桥梁等能稳定反射微波的永久构筑物,PS-InSAR 能够被有效应用于城市地面沉降的监测。本次监测使用的 SAR 卫星数据来源为欧空局的 Sentinel-1A 卫星,该卫星搭载 C 波段 SAR 传感器,可获取全天候 SAR 影像,IW 模式单视复数分辨率 $5\text{ m}\times 20\text{ m}$,幅宽 250 km ,运行于以 12 d 为周期的准太阳同步轨道上^[4]。

本文以宁波地区为研究区,收集处理 2017~2021 年共 5 a 的 60 景 Sentinel-1A 卫星数据,监测频率为一个月,利用 PS-InSAR 方法获取该段时间

地表沉降数据,综合分析宁波地区沉降区域时空分布特征,并利用水准监测数据验证 PS-InSAR 的可靠性。

1 研究区概况及 PS-InSAR 方法

1.1 研究区概况

受第四纪中期多次海陆变迁的影响,宁波平原发育了一套复杂的海陆相沉积物(图 1):第四系厚度于市区一带约 90 m 增大至滨海约 120 m;其中 50 m 以上为软硬相间的海陆相粘性土互层(Q_4),包含第一软土层、第一硬土层、第二软土层、第二硬土层;50 m 以下为陆相堆积层(Q_3 和 Q_2),包含 I_1 含水层、第三硬土层、 I_2 含水层、第四硬土层、II 含水层、第五硬土层^[5]。

宁波市地面沉降始于 19 世纪 60 年代,由于城区第四系地下水超量开采引起深部承压水位下降导致第一软土层、第二软土层及第二、三和四硬土层产生弹塑性形变;1986~2002 年宁波市采用地下水控制开采、人工回灌等措施,各土层分层沉降向第一软土层单一土层沉降转移;2008 年地下水禁采至 2018 年,地下水开采引起的地面沉降比重逐渐减少,但城市扩张建设引起工程性地面沉降比重逐渐增大,第二软土层及第二、三和四硬土层出现微量压缩或回弹,仅第一软土层发生沉降^[5]。

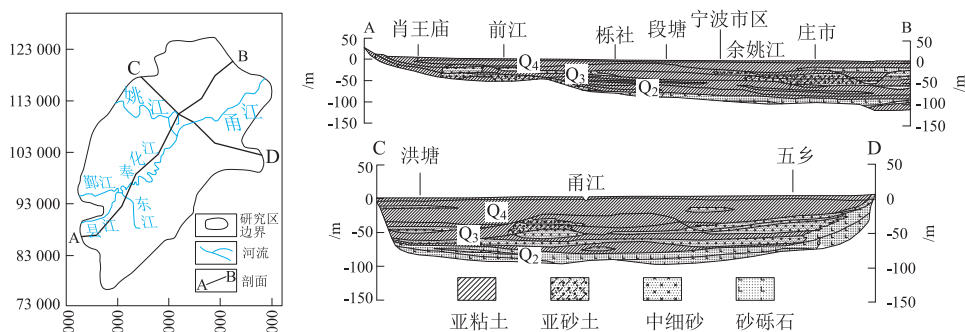


图1 宁波平原第四系松散层地质剖面图^[6]

宁波正以现代化滨海大都市作为总体框架,大力建设“全球海洋中心城市”,构建“一核、三湾、六片”的发展格局,其中包括对前湾新区、镇海北仑片区、象山港片区和三门湾片区的产业开发,这些地区分布较多沿海围垦区,需通过填海造地等措施解决土地资源问题,在未固结的泥沙填土上进行工程建设会引起地面沉降广泛发育^[7]。以往文章使用的监测数据以 2017 年及以前为主,对 2018 年及以后的监测结果记录较少,并且主要针对宁波市平原,对

余慈平原、鄞奉平原南部以及象山县和宁海县的诸多海岸平原分析较少。

1.2 PS-InSAR 方法

(1) SAR 图像预处理和差分干涉

由于宁波市正好位于南北两幅 SAR 影像交界处,单幅 SAR 影像无法覆盖整个研究区,将同轨道先后采集的两幅不同框架的 SAR 卫星进行镶嵌,之后根据宁波市边界进行裁剪。

本次差分干涉使用 2019 年 7 月 11 日采集的

SAR 影像作为主影像与其他 SAR 影像进行干涉处理(表 1),共生成 59 对干涉对,采用 4:1(距离向:方位向)的多视比,同时利用欧空局提供的精密轨道数据和精度为 30 m 的 ALOS DEM 去除轨道误差和地形相位的影响。该步骤会生成差分干涉图、SAR 平均强度图像和振幅离差指数。

表 1 SAR 影像参数、采集时间及数量

参数	影像采集日期	数量
传感器: Sentinel-1A	2017/01~2017/12	12
升轨方向	2018/01~2018/12	12
航向角: -10.8°	2019/01~2019/12	12
入射角: 36.6°	2020/01~2020/12	12
	2021/01~2021/12	12

(2) PS(永久散射体)点处理

PS 指在整个监测期内能够有较强后向散射雷达波能力并且在时序上较稳定的地物目标,如建筑屋顶、桥梁、道路、裸露基岩。在地物变化剧烈以及植被覆盖率高的区域如城镇新建区、滩涂、农田等,由于影像间相干性较弱,较难获得可靠 PS 点。根据差分干涉生成的差分干涉图、振幅离散指数选择可靠稳定的 PS 点,使用形变-时间的线性模型估算残余高度和形变速率等低通成分,将低通成分从去平干涉图中去除。之后同样用形变-时间的线性模型估算干涉图中的大气相位成分,干涉图去除大气相位成分后即得到最终形变结果。

通过上述反演步骤得到的最终形变为地表相对于传感器的相对位移,根据传感器的方位角和入射角视线将形变投影到垂直方向上得到地表沉降。由于相干性阈值设置过低会导致 PS 点数量过多,增加数据处理时间和难度,经多次试验本文利用 0.85 的相干性阈值剔除相干性较小的 PS 点,并提取出分布于平原区的 PS 点。

2 PS-InSAR 监测成果解译和分析

2.1 宁波市整体沉降分析

通过 SAR 影像数据处理,共得到 1 312 746 个 PS 点,平原区每 1 km^2 约 371 个 PS 点,基本满足 PS-InSAR 对地面沉降调查要求。将得到的 PS 点根据年平均沉降速率和 5 a 累计沉降量分别分颜色显示得到研究区地面沉降变化的空间分布图(图 2 和图 3)。为更直观地反映地面沉降分布特征,利用克里金插值法将 PS 点年平均沉降速率结果拟合为栅格面(图 4)。

根据 PS 点结果和拟合后的栅格图结合地质环境以及工程现状进行初步分析,宁波市现状地面沉

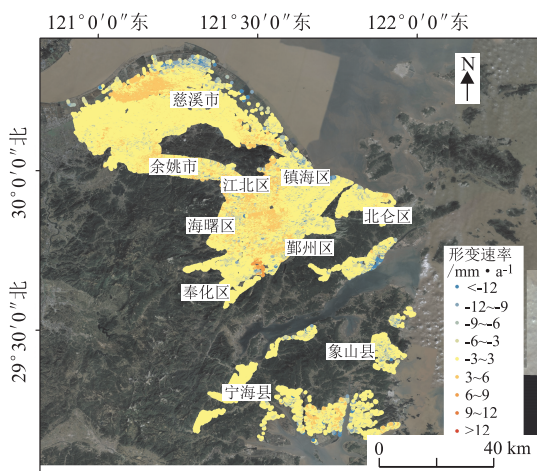


图 2 PS 点年平均沉降速率分布图

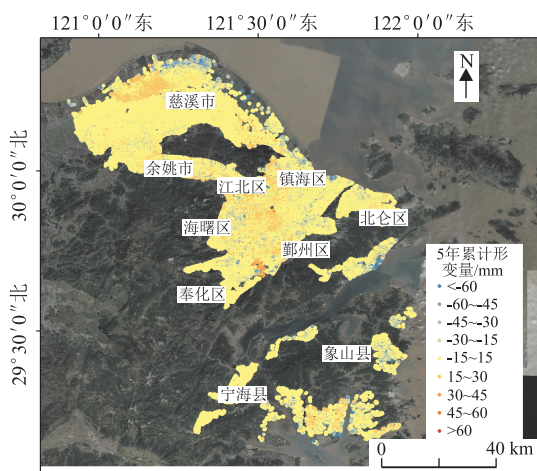


图 3 PS 点累计沉降量分布图

降大体分为两大类:以慈溪杭州湾新区北部、北仑梅山街道、象山白岩山城东工业区、宁海三门湾新区、慈东工业区-镇海港-北仑港沿岸为代表的沿海围垦区和港口工业区,以宁波市城区、奉化区和象山城区为代表的城市建设区。本次监测发现的沉降区域与《宁波市地质灾害防治“十四五”规划》中划分的地面沉降重点防治区相吻合。

本次分析结果表明上个世纪地下水超量开采对宁波市地面沉降的影响逐渐减少,中心城区沉降速率普遍控制在 3 mm/a 以内,部分地区如三江口核心区和慈溪庵东镇南部监测到速率约 $3\sim 4 \text{ mm/a}$ 的微量回弹;随着城市扩张和建设,工程性的地面沉降逐渐替代成为宁波市地面沉降的主要因素,大部分压缩变形集中于 20 m 深度内的浅土层^[7]。其中围垦区如杭州湾新区北部、梅山街道能够监测到 $15\sim 20 \text{ mm/a}$ 的形变速率,部分 PS 点沉降速率达 25 mm/a 及以上;城市建设区如东部新城、鄞州区、奉

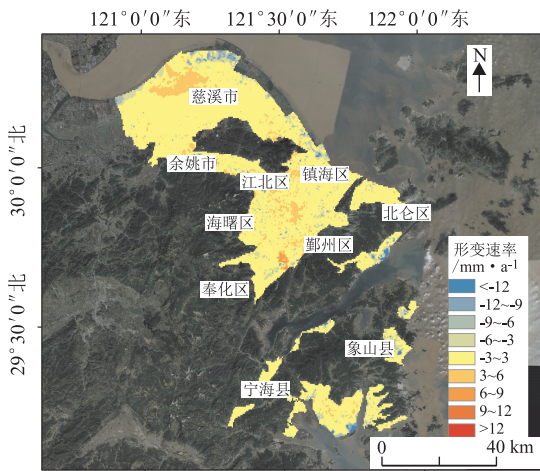


图4 年平均沉降速率栅格图

化区、象山城区的沉降主要呈小块状分布,沉降速率一般 $5 \sim 10 \text{ mm/a}$,沉降中心速率可达 $15 \sim 20 \text{ mm/a}$ 。

2.2 沿海围垦区和港口工业区沉降分析

基于城市发展的需要,缓解用地紧张的局面,宁波市于慈溪杭州湾新区、镇海沿海、宁海三门湾、象山沿海等地进行围垦造陆工程,大部分用于工业区和新城建设。造陆工程一般包含新建隔堤、疏浚吹填、软基加固等工程,松散的吹填砂土下为河口滨海相淤积形成的高饱和软土,具有承载力低压缩性高的特点,在负荷下容易固结变形产生大量沉降^[8]。

杭州湾新区自20世纪90年代开始大规模围垦至今,该部分新造陆地大部分用于工厂建设(图5)。其中大部分由黄色PS点覆盖的南侧工业区围垦于1998年以前,工厂兴建于2004年以前,现状地面沉降速率较小约 $0 \sim 6 \text{ mm/a}$;中部工业区围垦于2008年,工厂兴建于2009~2010年,大部分由淡蓝色PS点覆盖,现状地面沉降速率中等约 $6 \sim 15 \text{ mm/a}$;北部汽车工业区围垦于2009~2012年,工厂于2012年陆续建设至今,大部分由淡蓝色和深蓝色PS点覆盖,现状地面沉降速率较大约 $15 \sim 20 \text{ mm/a}$,无明显减缓趋势(图6);由于西北部工业区于近期进行建设,2017~2021年地表变化较大,无法提取稳定的PS点故无PS点分布。

由于该地区各地块围垦时间、建设时间不同,工业区自南向北沉降速率逐渐增大,不均匀沉降现象显著,围垦区土层经过十几年的固结压缩能够逐渐稳定,其地面沉降分布规律与其他填海造陆地区类似^[9]。

2.3 城市建成区沉降分析

宁波平原浅部软土层平均埋深约21 m,土质主

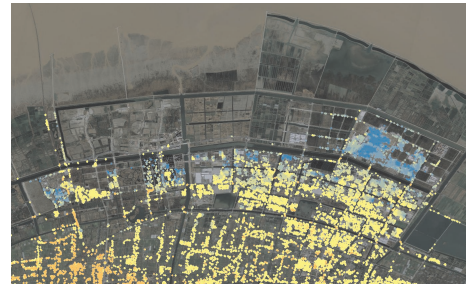


图5 杭州湾新区 PS 点年平均沉降速率分布图

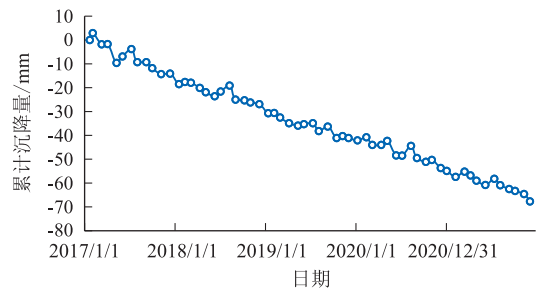


图6 北部汽车工业区 PS 点时序分析沉降量曲线

要为淤泥、淤泥质粘土和淤泥质粉质粘土,具有高饱和度、高压缩性、低抗剪强度和低渗透性的特点^[10],进行工程建设时软土层极易产生压缩变形。

2017~2021年连续5a的监测结果表明,地面沉降现状和2017年的监测成果有较大差别:2017年监测成果显示宁波市大规模的城市化建设使东部新城、鄞州中心区、潘火下应及东钱湖等沉降区连成一片形成较大的沉降漏斗,鄞州中心区沉降中心速率约 7.8 mm/a ,东部新城沉降中心速率约 13.5 mm/a ^[11];2017~2021年的监测结果表明这些沉降漏斗部分地区已稳定,部分地区仍有沉降,但以点状分布为主,沉降中心的沉降速率 $10 \sim 20 \text{ mm/a}$ 不等,并以地块为单元,连片趋势有所减小。除宁波城区外,余姚市、奉化区、北仑区和象山城区均分布有以地块为单元的沉降区,沉降中心沉降速率 $10 \sim 20 \text{ mm/a}$ 不等。此外本次监测未发现轨道交通建设引起的地铁沿线区域不均匀沉降迹象。

以鄞州区东钱湖镇某工业地块为例分析沉降区呈点状分布并以地块为单元的现象。工业地块A与工业地块B距离仅320 m,地质条件相似,且地上建筑均为无基坑开挖的浅基础工厂,负荷模式相近,两地块仅工厂建成时间不同:根据历史卫星图(图7),地块A内的工厂建成时间为2009年,地块B内的工厂建成时间约为2015年。根据监测数据,地块A的5a年均沉降速率不到 1 mm/a ,而地块B能够监测到 $7 \sim 17 \text{ mm/a}$ 的不均匀沉降(图8),PS点时序曲线(图9)显示地块B沉降中心沉降速率从2017

年的 18.9 mm/a 逐渐减小至 2021 年的 10 mm/a。据此可推测与该地块浅基础荷载模式类似的工程性地面沉降有随时间推移而逐渐稳定减小的趋势。

结合赵团芝等人^[5]根据实测资料得出有深大基坑的工程项目引发的地面沉降在 5 a 左右能恢复至施工前状态的结论。分析结果表明城市建设区的地面沉降常局限于近几年进行工程建设的地块内,并且由此引发的工程性地面沉降衰减过程较快。



(a) 2009年卫星图



(b) 2021年卫星图及PS点分布

图7 东钱湖镇某工业地块卫星图



(a) 地块B地面裂缝



(b) 地块B厂房裂缝

图8 东钱湖镇某工业地块B现场不均匀沉降现象

3 可靠性分析

为评价本次 PS-InSAR 监测结果的可靠性和精度,利用最临近法对 PS-InSAR 结果进行评价(图 10)。通过宁波市水准观测网中的 41 个水准点与距

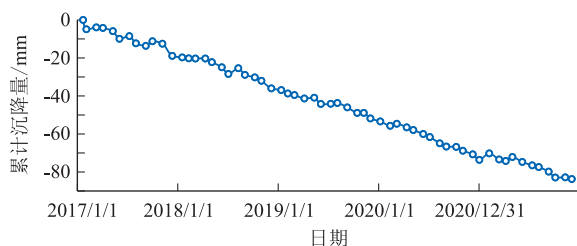


图9 东钱湖镇某工业地块B厂房屋顶PS点沉降量时序曲线

离小于 100 m 的临近 PS 点进行比较分析,二者差值绝对值最大为 4.89 mm/a,最小为 0.10 mm/a,均方根误差 RMSE 为 2.94 mm/a,满足《地面沉降调查与监测规范》中对 PS-InSAR 精度的要求。据此验证了 PS-InSAR 方法获取的宁波地区地面沉降结果的可靠性。

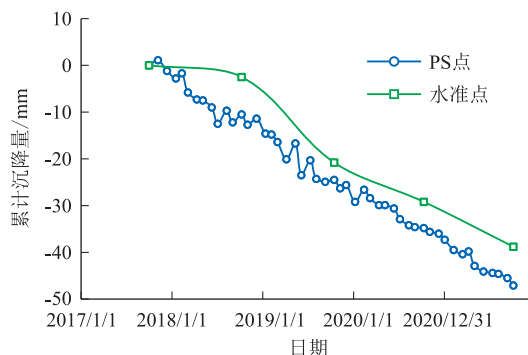


图10 某水准点与临近PS点沉降量时序曲线对比

4 结论与建议

本文基于 60 景 Sentinel-1 影像采用 PS-InSAR 方法研究了宁波市 2017~2021 年地面沉降,并利用水准网验证了 PS-InSAR 结果的精度和可靠性。2017~2021 年期间宁波地面沉降分布主要分布于以下区域:以慈溪杭州湾新区北部、北仑梅山街道、象山白岩山城东工业区、宁海三门湾新区、慈东工业区-镇海港-北仑港沿岸为代表的沿海围垦区和港口工业区;以宁波市城区、奉化区和象山城区为代表的城市建成区。并且工程建设是引发宁波市地面沉降的主要因素,其中围垦和工程建设时间越晚现状地面沉降越严重且围垦区地面沉降衰减较慢;城市建成区的地面沉降呈点状分布,常局限于近几年进行工程建设的地块内,并且由此引发的工程性地面沉降衰减过程较快。

根据宁波市已从抽水沉降为主转变为以工程性沉降为主的地面沉降现状和地面沉降主要集中在城市建成区和沿海围垦区的分布特点,在已有的地下

水开采利用严格监管的基础上,建议宁波市在现代
化滨海大都市建设中建立多部门联合的管理制度并
将管理贯穿于建设工程的项目立项、设计、施工、运
营全周期;同时完善对沿海围垦港口工业区的沉降
和地下水监测网络。

参考文献

- [1] Erkens G, Bucx T, Dam R, et al. Sinking coastal cities [J]. Proc. IAHS, 2015, 372: 189-198.
- [2] 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.
- [3] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry [J]. IEEE TGRS, 2000, 38(5): 2202-2212.
- [4] The European space agency. Sentinel-1 [EB/OL]. [2022-4-10]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>.
- [5] 赵团芝, 高峰, 侯艳声, 等. 宁波平原地面沉降时空分析与防治对策 [J]. 地质灾害与环境保护, 2021, 32(4): 39-44.
- [6] 张弘怀, 郑铄鑫, 唐仲华, 等. 宁波平原地面沉降全耦合数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(4): 77-87.
- [7] 赵团芝, 侯艳声, 胡新锋. 宁波城市化建设中地面沉降防治对策研究[R]. 浙江丽水: 浙江省地质学会, 2019.
- [8] 苑崑, 李佳琦. 填海造陆区域地面沉降预警系统工程实践[J]. 海河水利, 2017, 36(S1): 77-79.
- [9] 吕潇文, 牛文明, 罗立红, 等. 天津填海造陆地区地面沉降监测与防治研究[J]. 上海国土资源, 2016, 37(3): 55-59.
- [10] 赵团芝, 侯艳声, 胡新锋. 浙江宁波工程性地面沉降特征与风险区划[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(4): 36-42.
- [11] 李高山, 王劲松, 那云龙. 基于宁波市地面沉降监测成果的影响因素评价及其沉降特征分析[R]. 浙江杭州: 浙江省地质学会, 2018.

作者简介: 方海伦(1997—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事地质灾害防治及地质环境调查研究等方面工作。E-mail: 510037701@qq.com