doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2023.01.010

基于PS-InSAR的珠江口典型填海造地区 地面沉降时空特征研究

曾 敏¹,皮鹏程²,赵信文¹,陈 松¹,彭红霞²,侯清芹²,孙慧敏²,薛紫萱² ZENG Min¹, PI Peng-Cheng², ZHAO Xin-Wen¹, CHEN Song¹, PENG Hong-Xia², HOU Qing-Qin², SUN Hui-Min², XUE Zi-Xuan²

中国地质调查局武汉地质调查中心(中南地质科技创新中心),湖北武汉 430205;
 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院,湖北武汉 430074

1. Wuhan Center, China Geological Survey (Central South China Innovation for Greosciences), Wuhan 430205, Hubei, China;

2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:近年来,珠三角地区经济发展迅速,人类活动加剧,软土自固结作用诱发的地面沉降范围与程度逐渐扩大,严重制约城市建设,危害居民人身财产安全。本文以珠江口典型填海区为例,基于2015年12月至2016年12月的24幅Sentinel-1A SAR数据影像,应用PS-InSAR监测地面沉降状态,通过设置可靠PS点,计算沉降速率,提取地面沉降时序特征。结果表明,该时间段内研究区的地面沉降较为严重,整体年均沉降速率为-7.65 mm/a,其中鸡抱沙-孖沙垦区南部、万顷沙地区以及南朗横门三地尤为严重,相继出现四个典型沉降区,最大沉降量达117.48 mm;并通过实地监测数据验证其精度具备高可靠性,该研究可为珠江口城市建设合理规划、地面沉降防治工作提供科学依据。

关键词:填海造地区;PS-InSAR;地面沉降;时序特征;珠江口 中图分类号:P642.4 **文献标识码**;A

文章编号:2097-0013(2023)01-0116-11

Zeng M, Pi P C, Zhao X W, Chen S, Peng H X, Hou Q Q, Sun H M and Xue Z X. 2023. Spatial-temporal Characteristics of Land Subsidence in the Typical Reclamation area of Pearl River Estuary Based on PS-InSAR. *South China Geology*, 39(1): 116–126.

Abstract: In recent years, with the rapid economic development and rich human activities in the Pearl River Delta region, the scope and extent of land subsidence induced by self-consolidation of soft soil have expanded, which seriously restricts the urban construction and then endangers the life and property safety of residents. Taking the typical reclamation area in the Pearl River Estuary as example, we applied PS-InSAR to monitor the land subsidence status based on 24 Sentinel-1A SAR data images from December 2015 to December 2016, and obtained the space-time characteristics of land subsidence by setting reliable PS points and calculating the rate. The results showed that the land subsidence was serious in this period with an average -7.65 mm/a velocity in the researching area, including the most serious Jibaosha-Masha reclamation south area, Wanqingsha area and Nanlang-Hengmen area where four typical subsidence areas appeared successively and the maximum subsidence was 117.48 mm. The field monitoring data was applied to verify the accuracy of the

收稿日期:2022-5-17;修回日期:2022-11-10

基金项目:中国地质调查局项目(DD20221729)

第一作者:曾敏(1982—),男,高级工程师,主要从事水工环境地质与城市地质调查方面的研究,E-mail:zengmin1982@sina.com

results, providing a scientific basis for the rational planning of urban construction in the Pearl River Estuary and the prevention and control of land subsidence.

Key words: land reclamation area; PS-InSAR; land subsidence; Time-series characteristics; the Pearl River Estuary

地面沉降是由松散土体固结压缩而引起地面 标高降低的一种地质现象(李广宇等,2018;狄胜同 等,2020),其极易诱发地面塌陷、墙体开裂、交通轨 道变形以及地下管道破损等一系列地质灾害。据统 计,我国约有20多个省市遭受地面沉降影响,年均 造成经济损失高达数百亿元(张永红等,2016)。现 今,全球性气候变暖,海平面上升,地面沉降对地 势较低的沿海三角洲地区影响尤为严重(Syvitski et al., 2009)。珠江口三角洲软土大量分布,更是典 型填海造陆区,新成陆地未进行充分的自然压实 和固结,加剧了沿海平原的软基沉降灾害(姜守 俊,2013),已造成受灾区总面积高达60 km²,直接 经济损失超5亿元(余革森等,2017),成为影响珠 江口三角洲地区经济可持续发展的突出环境问题 之一(谢先明等,2021)。因此,在该地区开展地面 形变监测工作,掌握地区形变特征,对于防治地面 沉降诱发的地质灾害具有重要意义(高二涛等, $2019)_{0}$

水准测量、分层标测量、基岩标测量及 CNSS 等传统测量技术(张学东等,2012)都只能针对地面 离散点获取沉降信息,缺乏大面积的动态监测(罗 文林等,2015;邱志伟等,2016;张又又,2016),难以 为防灾减灾提供可靠依据。随后的 D-InSAR 技术引 入 DEM 数据,实现地形相位去除,但未能解决时空 失相干、大气、噪声和轨道对形变监测精度的影响 (Zebker,1992;朱建军等,2017)。为了进一步突破 技术限制,Ferretti et al.(2001)提出了永久散射体 干涉测量技术(PS-InSAR),将 InSAR 技术带入时 间序列研究阶段,一定程度上克服了时空失相干和 大气延迟效应的影响,对微小形变更具敏感性,达 到毫米级监测精度(Hanssen,2005;张永红等, 2012;Chen J et al.,2013)。

鉴于三角洲地区地面沉降的严峻形势,De Wit et al.(2021)通过PS-InSAR技术开展了湄公河 三角洲地面沉降研究,探讨建筑物桩基础与沉降速 率的量化关系; Aly et al. (2012)对尼罗河三角洲的 沉降时空特征进行分析, 了解到地下水的抽取是其 主要驱动因子; Liu P et al. (2015)通过 StaMPS 软件 分析得出, 黄河三角洲呈不均匀沉降分布, 沉降速 率平均可达30 mm/a; Yu Q B et al. (2020)在了解长 三角地区的地质特征基础上, 分析了崇明岛内陆与 海岸线沉降的差异。相比较而言, 珠三角地区 In-SAR 地面沉降研究成果较少。目前部分研究者已经 开展过整个珠三角地区大面积的地面沉降 InSAR 监测(张杏清, 2015; 高辉等, 2020), 广佛地区(王华 等, 2014; Ng et al., 2018)、珠江口东岸(Wang H et al., 2012)、珠海市(赖波等, 2021)等地陆续成为研 究对象, 但都属大范围监测, 且针对珠江口地面沉 降的详细监测数据验证及分析成果较少, 有待进一 步深入研究。

本文选用欧空局(ESA)Sentinel-1A卫星的 SAR影像(2015年12月—2016年12月)为原始数 据,日本宇航局(JAXA/EORC)的高程模型 AW3D30(ALOS World 3D-30m)作为数据支撑,采 用PS-InSAR技术对珠江口典型填海造地区进行地 面沉降监测,获取沉降速率以了解区域沉降特征, 利用时间序列开展时序分析,以期实现珠江口典型 填海造地区城市建设的可持续发展,为珠江三角洲 地面沉降诱发的地质灾害防治提供依据。

1研究区概况

研究区位于广州市南部南沙区及周边中山市 北部、东莞市西部,面积约720 km²。除南沙街、大岗 镇、虎门镇、黄阁镇、火炬开发区等地丘陵地貌发育 外,大部分区域属珠江口三角洲冲海积和人工堆积 平原。区内沉积软土岩性以淤泥、淤泥质黏性土为 主(王双等,2019;曾敏等,2022),具有高含水率、高 压缩性、触变性以及抗剪强度低、力学强度低和固 结系数小的不良工程特性(丁雷等,2011)。剧烈的 人类围垦活动与泥沙快速堆积形成了河口岸线大幅向海淤进、软土大范围扩张的现状。如表1、图1 所示,1965年万顷沙岸线在13涌处,1990年推进到 18涌,鸡抱沙被围垦;2000年万顷沙发展到21涌, 行沙、横门滩出现大面积围垦。据统计,1965年至 2008年该区共围垦滩涂造陆237.16 km²(姜守俊, 2013),其中万顷沙和鸡抱沙 – 孖沙地段分别围垦 54.04 km²、42.42 km²,整体平均发展速率达6.24 km²/a。现如今,珠江口软土平均厚度为20~40 m, 局部地段可达50m,为珠江三角洲平原软土最为 发育的地区。

经过多次海进和海退的沉积旋回以及人类围 垦活动,珠江口成为典型的填海造地区,软土深 厚。在全力打造"南沙自由贸易试验区"的背景下, 工程建设大规模开展,但由于软土的不良工程特 性,广泛分布的地下软土及其诱发的地面沉降问 题已经成为制约珠江口城市建设的重大环境地质 问题。

表1 研究区周边1965年以来填海造地面积统计表

Table 1	The statistics of Land	reclamation around	study area since 196	5
---------	------------------------	--------------------	----------------------	---

地段	1965-1990年		1990-2000年		2000-2003年		2003-2008年		1965-2008年	
	S(km ²)	$v(km^2 \cdot a^{-1})$								
万顷沙	37.78	1.51	16.26	1.63	—		—		54.04	1.42
鸡抱沙 – 孖沙	11.71	0.47	22.71	2.27	—		8.00	1.60	42.42	1.12
合计	49.40	1.98	38.97	3.90	—	—	8.00	1.60	96.46	2.54



图1 珠江口填海造陆地区岸线变迁及监测点分布图 Fig. 1 The map of coastline changes and distribution of monitoring point in the Pearl River Estuary

2 研究方法

PS-InSAR 是在差分干涉测量(D-InSAR)的基础上,提取高相干性且较为稳定的散射体,通常为人造建筑物及桥梁的金属角点等(易辉国等,2015)。其基本原理是借助PS点的强反射特性,通过稳定性分析获取高质量的PS点,并根据其振幅和相位的稳定特性,进行建模和解算,反演地表形变过程。

PS点的初选主要采用振幅离差法,通过相位 分析实现时间相干系数的解算。振幅离差法是利用 振幅离差和相位标准偏差的关系构建初始相干点 阈值提取,振幅离差指数公式为:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{\sigma_A}{\mu_A} = D_A \tag{1}$$

式中: σ_{φ} 、 D_A 为相位标准偏差和振幅离差, σ_A 、 μ_A 分别表示振幅的标准偏差和均值。

基于备选PS点,通过振幅离差指数分析相位 稳定性,筛选最佳PS点。下列式(2)表示第*i*幅干涉 条纹中第*x*个备选点的干涉相位公式:

 $\varphi_{x,i} = wrap(\varphi_{d,x,i} + \varphi_{a,x,i} + \varphi_{h,x,i} + \varphi_{n,x,i})$ (2) 式中: $\varphi_d \ , \varphi_a \ , \varphi_h \ , \varphi_n \$ 分别表示雷达视线形变相 位、大气延迟相位、高程相位、噪声相位。

相位有空间相关相位和空间不相关相位之分, 空间相关相位包含大气延迟相位、形变相位和高程 相位的大部分,唯独噪声相位为空间不相关相位, 在此利用低通滤波法获取形变、大气和高程三个分 量的相位和,并根据式(2)直接对备选PS点进行相 位滤波求解噪声相位。最终PS点提取的标准将依 照下列式(3)中时间相干系数阈值作为评价标准, 以 γ_x 为判定 PS点目标的质量辅助筛选出高质量 PS点。

$$y_{x} = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^{N} \exp\left\{ \sqrt{-1} \left(\varphi_{N,i}^{u} \right) \right\} \right|$$
(3)

式中,N为干涉对数,u为空间不相关部分。

随后根据相位差分关系对PS点线性形变和高 程误差进行反演,移除线性形变相位和高程误差相 位,并采用时空滤波实现非线性形变、大气和噪声 等残余相位的分离,在时间域上进行高通滤波,空 间域上采用低通滤波。最终运用MCF相位解缠算 法进行相位解缠,获得高精度的PS点形变速率(范 军等,2018)。具体数据处理流程见图 2。



图 2 PS-InSAR 数据处理流程图

Fig.2 Data processing flow chart of PS-InSAR technology

3 数据处理

3.1 数据概况

Sentinel-1卫星载有C波段合成孔径雷达,拥 有多种极化方式,重访周期较短,为12天,该数据 在地表形变监测中得到广泛使用,并取得较好成 果。因此,本文从欧空局(ESA)获取覆盖珠江口范 围的24景升轨Sentinel-1A单视复数影像作为实验 数据,对万顷沙区地表形变信息进行反演。获取影 像为Level-1SLC单视角双极化数据;时间跨度为 2015年12月12日至2016年12月30日,共计384 天,完整覆盖2016年度;成像模式为干涉宽幅模式 (IW)、升轨和VV极化,空间分辨率5m×20m,覆 盖幅宽250km,波长5.63 cm。由于原始影像覆盖幅 宽较大,本文只裁剪出典型填海造地区作为研究区域,如图3所示。此外,借助Sentinel-1A卫星精密定轨星历数据(precise orbit ephemerides)(定位精度优于5 cm)及JAXA/EORC发布的AW3DDEM(空间分辨率30 m,高程精度达5 m)数据来消除轨道误差和地形起伏的影响。

3.2 数据处理流程

(1)预处理:基于时间和空间基线最优选择,选取2016年6月9日 SAR影像为主影像,另外23幅为从影像,并将所有从影像依次配准重采样至主影像,生成连接图。空间基线分布在-65.3873 m~96.6945 m之间,时间范围为前180 d~后204 d。时空基线特征如表2、图4所示。

(2)干涉处理:从影像依次同主影像配准,实现 主辅影像间的干涉处理,生成23组干涉对。利用 Sentinel-1A精密轨道数据和AW3D30数字高差模 型对23组干涉对进行两次差分处理,模拟地形相 位,生成最终干涉图。

(3)形变速率反演:采用振幅指数法,进行稳定 散射目标的识别,获得稳定 PS 点,如图 5 所示。随 后,采用平差计算网络连接关系,得出线性形变结 果和高程残差。最后,通过时空滤波去除大气相位, 获得最终高精度 PS 点,实现地面沉降监测。

此次最终提取700654个PS点,由图5可知,人 类活动强烈的区域是PS点密集区,有明显的城镇、 建筑、桥梁、道路、堤坝边缘等信息。在填海造地区



图 3 珠江口典型填海造地区 Sentinel-1A影像及DEM覆盖范围 Fig. 3 The ground coverage of Sentinel-1A image the the Pearl River Estuary

域中,由于河涌和堤坝成条块状分布且养殖水塘密 布,水体不具备较强的后向散射特性,田地中的庄 稼和植被在时间上也不具备高相干性,因此探测到 的PS点集中分布在河涌堤坝上,水塘、田地中几乎 没有PS点分布。

4 结果分析

4.1 区域沉降空间特征分析

基于PS-InSAR 技术获得了珠江口典型填海造

序号	成像时间	时间 其线(4)	空间 基继(m)	轨道	序号	成像	时间 其华(4)	空间 基继(m)	轨道
		蚕线(u)	盔线(Ⅲ)	刀凹		11111	莖线(u)	莖线(Ⅲ)	刀凹
1	2015-12-12	-180	-16.3594	升轨	13	2016-06-09	0	0	升轨
2	2015-12-24	-168	96.6945	升轨	14	2016-07-03	24	-26.9102	升轨
3	2016-01-05	-156	32.8235	升轨	15	2016-08-20	72	-10.2974	升轨
4	2016-01-17	-144	-11.9552	升轨	16	2016-09-13	96	-10.0445	升轨
5	2016-01-29	-132	89.3000	升轨	17	2016-09-25	108	-65.3873	升轨
6	2016-02-10	-120	75.0729	升轨	18	2016-10-07	120	-31.6336	升轨
7	2016-03-05	-96	-33.1174	升轨	19	2016-10-19	132	47.9852	升轨
8	2016-03-29	-72	-51.9125	升轨	20	2016-10-31	144	29.1264	升轨
9	2016-04-22	-48	19.7382	升轨	21	2016-11-12	156	32.2671	升轨
10	2016-05-04	-36	26.7169	升轨	22	2016-11-24	168	-14.7108	升轨
11	2016-05-16	-24	-18.9275	升轨	23	2016-12-06	180	-47.2658	升轨
12	2016-05-28	-12	-17.0236	升轨	24	2016-12-30	204	-13.7134	升轨

表2	Sentinel-1A数据集
Table 2	Sentinel-1A dataset



图4 空间基线(左)和时间基线(右)图 Fig. 4 Spatial baseline (left) and temporal baseline (right) plots



图5 珠江口永久散射体(PS点)分布情况 Fig. 5 The distribution of permanent scatters

地区2015.12~2016.12地面沉降监测结果,如表3、 图6所示。研究区内地面沉降较为显著,整体年均 沉降速率为-7.65 mm/a,根据海岸线淤进历程显 示,近年来成陆区的鸡抱沙-孖沙垦区南部、万顷沙 地区以及南朗横门地面沉降相对严重,其中最为严 重的沉降区有南沙街道的滨海公园(A)、万顷沙垦 区的十四涌红港村(B)、鸡抱沙-孖沙垦区南部的南 沙港区(C)以及南朗街道横门(D)。A区年均沉降 速率为-27.78 mm/a,其中最大沉降速率达到-78.32 mm/a;B区年均沉降速率为-37.54 mm/a,其中最大 沉降速率达到-98.68 mm/a;C区年均沉降速率 为-23.93 mm/a,其中最大沉降速率达到-101.72 mm/a;D区年均沉降速率为-16.09 mm/a,其中最大 沉降速率达到-102.92 mm/a。四地已逐渐发展成沉 降重灾区,累计沉降量均达到80 mm以上,B区、C 区及D区的累计沉降值更是超过100 mm,最大值 达到117.48 mm。

参考以往南沙区已有监测成果(吴龙飞等, 2019;陈运坤等,2021),滨海公园、十四涌红港村与 南沙港区等处沉降速率较大,趋势较为明显,且局 部点的最大沉降速率超过-100 mm/a。珠江口填海 造地区沉降与软土厚度存在很大的关系,该区软土 厚度具有越靠近海岸线厚度越大的规律,滨海公 园、红港村、南沙港区及横门均处在海岸线处,软土 厚度相对较大,在软土自固结的作用下,地面沉降 较为严重。同时,人类高强度的工程活动,也是区内 沉降不断加速的驱动因子。A、B、C、D四区均有不 同程度的城区、港区发展项目,在重点项目开发过 程中,建筑物密度与高度逐渐增加,地表荷载对软 土层的压实作用不断增强,导致地基沉降灾害频 发。结合王双等(2019)的研究可知,珠江口典型填海 造地区沉降速率同软土厚度及人类活动密切相关。

4.2 区域沉降时序特征分析

提取研究区内8期沉降时间序列,进行地理编码,通过时序特征的变化过程来推理区内的沉降演化过程,如图7所示。

农3°坏/工口口////年中心:北川 数/// 农									
Table 3 Statistical data table for each sedimentation center in the Pearl River Estuary									
 沉降区	整体	А	В	С	D				
平均沉降速率(mm/a)	-7.65	-27.78	-37.54	-23.93	-16.09				
累积沉降最大值(mm)	-117.48	-82.51	-103.99	-117.48	-116.31				

丰3 珙江口夕沉降山心纮计粉捉丰



图 6 珠江口典型填海造地区地面沉降速率图 Fig. 6 Subsidence velocity distribution map of typical reclamation area of the Pearl River Estuary

从空间分布来看,珠江口典型填海造地区沉降 较为明显的区域主要分布于研究区东南部,最为明 显的沉降严重区出现在南沙区南部及横门地区。从 时间尺度来看,在近一年的时间里,该区内最大沉 降量达117 mm。从2015年12月到2016年3月,沉 降相对缓慢,无明显沉降区域和沉降趋势出现,区 域上只存在-20~20 mm的地表形变;2016年4月 至6月,由于十三五规划的推进,南朗街道现代服 务发展区、万顷沙交通枢纽以及南沙港区航运中心 的打造,使得人类活动加剧,相继出现3个小规模 的地面沉降区(B-十四涌红港村、C-南沙港区、D-横 门),PS点最大沉降量均达到40 mm以上;7月至9 月,随着海岸滨海景观带的建设以及旅游盛季到 来,动静态地表荷载增加,滨海公园(A)成为小规 模地面沉降区新增点,同时红港村、南沙港区及横 门三个重点沉降区范围局部扩大,沉降趋势逐渐明 显,整体空间分布上出现东南部大面积片状沉降。 随后10月-12月,4个重点沉降区趋势继续延伸,整 体沉降趋势逐渐稳定,累计沉降量随时间的推移达 到了80 mm以上,个别点累积沉降量超过100 mm。

4.3 区域沉降精度验证

PS-InSAR 技术监测为视线向监测,而本文用



图 7 研究区地面沉降时序特征 Fig. 7 Time series characteristics of land subsidence in study area

35'0"N

于验证的实地监测数据为钻孔监测数据,为垂直向 形变。为了验证PS-InSAR沉降精度,根据雷达成像 几何,将 PS-InSAR 监测结果除以 $\cos\theta(\theta)$ 为入射 角,不同PS点的入射角不同),实现PS-InSAR视线 向形变转换为垂直向形变。在此基础上,本文将通 过监测点及相应 PS 点的形变速率和时序沉降量进 行对比验证。

4.3.1 形变速率结果验证

22°35'0"N

根据上述时空特征分析结果,选择A、B两 个典型沉降区内的实地监测点(N10、N11、N15, 图 1)进行精度验证。依据实地监测点的位置选 取对应的PS监测点,获取两者在同时间段内的 形变速率进行比较,并引入均方根误差(RMSE) 进一步验证精度(何秀凤等,2021)。RMSE 计算 公式为:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \Delta v_i^2 / n}$$
(4)

式中, Δv, 为第 i 个实地监测点与相应 PS 点形变速 率之差; n 为监测点的个数。

经过形变转换,最终获取实地监测点N10、 N11、N15相应PS点的形变速率分别为-37.726mm/a、 -48.844 mm/a、-58.772 mm/a, 而 N10、N11、N15 三 点的实地监测数据为-43.136 mm/a、-52.538 mm/a、 -50.602 mm/a,可以看出,PS点同实地监测点的形 变速率最大偏差为8.170 mm/a,三个监测点误差均 未超过1 cm/a。根据公式(4)求得均方根误差为 6.046 mm/a,并作回归分析得到相关系数 R 为 0.773,表现出很好的一致性。

4.3.2 时序沉降对比验证

选取重叠时间段为参考时间,结合实地监测点

123

与PS点监测的时序沉降数据绘制散点图,并进行 线性拟合,对实地监测点缺失时间段进行模拟,进 一步验证监测精度,如图8所示。

分别获取各个实地监测点与其相应 PS 点的时 序沉降变化,统计得出监测点 N10 的累计沉降量误 差为 3.886 mm,线性拟合达到很好的一致性,而监 测点 N11、N15 的线性拟合具有一定差异,累计沉 降误差相对较大,为 5.962 mm 和 8.595 mm,但三个 监测点 N10、N11、N15 的误差均未超过 1 cm。同样 获取各监测点与 PS 点之间的时序沉降均方根误差 结果。其中,N15 的均方根误差为最大值 5.581 mm, 三点的平均均方根误差为 4.806 mm。从以上可以 看出,三点实际监测与时序沉降特征较为吻合,PS 点大致反映了实地监测点的真实形变情况,整体形 变趋势较为相近。

5 讨论

海陆交互作用下的三角洲地区,软土普遍分

布,其不良工程特性及结构特征是产生地面沉降的 重要地质背景,而外部人为因素更是加剧了沉降的 趋势。已有研究表明,华北平原、长江三角洲地区地 面沉降多发,诱发沉降最主要因素正是由于地区经 济增长、工业发展、人口剧增,用水需求量逐渐增 加,造成地下水开采过度,引起地下空间压缩,其中 以京津冀地区、上海及苏州最为典型(Shi X Q et al, 2011; Dong S C et al, 2014; Zhu J Y et al, 2020). 黄河三角洲油气资源蕴藏丰富,采油导致石油储 存减少,降低了油藏内部压力,孔隙压力降低的同 时增加了有效应力,致使储层收缩压实,诱发地面 沉降(Liu P et al, 2015;张金芝等, 2016)。而珠江口 典型填海造地区河网密布,降雨充沛,地表水资 源丰富,地下水超采现象并不常见(高磊等, 2020),只在万顷沙垦区南部存在水产养殖的地 下水开发利用,同时珠江口不属黄河三角洲类 型的油气开采区域,其欠固结软土的排水固结作 用、软土厚度及人类工程活动程度是其不均匀沉 降的主要因素。



图 8 滨海公园(左)与十四涌红港村(右)的地面沉降线性拟合 Fig. 8 The linear fit map of Land subsidence samples in Binhai Park(left) and Honggang village(right)

6结论

本文基于 PS-InSAR 技术,对 2015 年 12 月— 2016年12月珠江口典型填海造地区的地面沉降进 行了监测和分析,得出以下结论:

(1)珠江口典型填海造地区的地面沉降速率 较大,整体年均沉降速率为-7.65 mm/a。其中滨海 公园(A)、十四涌红港村(B)、南沙港区(C)及横 门(D)四地沉降最为严重,年均沉降速率 为-16.09~-37.54 mm/a,最大累计沉降量达到 117.48 mm。

(2)利用实地钻孔监测数据对 PS 监测结果进行验证,沉降速率误差均未超过1 cm/a,累计沉降 量误差最大值为8.595 mm,且时序沉降均方根误 差均值为4.806 mm,表现出很好的一致性,监测结 果与监测数据十分吻合。

(3)珠江口典型填海造地区软土的不良工程特 性是造成地面沉降的先决条件,而软土的排水固结 作用、软土厚度及人类活动是其不均匀沉降的主要 因素。

(4)本文的结果证实了 PS-InSAR 技术应用于 沉降监测的可行性,且能为确定地面沉降隐患位置 和分析重点沉降区发育特征提供依据,可为珠江口 典型填海造地区城市建设的可持续发展、珠江三角 洲的地面沉降诱发的地质灾害防治提供参考。

特别感谢欧空局(ESA)提供的 Sentinel-1A SAR数据,日本宇航局地球观测研究中心(JAXA/ EORC)提供的 AW3D30数据。本工作得到广东省 地质调查院胡飞跃高级工程师的指导和帮助,谨致 衷心感谢。

参考文献:

- 陈运坤,高磊,屈尚侠.2021.广州南沙区软土分布和地面沉 降特征分析[J].资源信息与工程,36(2):19-21.
- 狄胜同,贾超,张少鹏,丁朋朋,邵明,张永伟.2020.华北平原 鲁北地区地下水超采导致地面沉降区域特征及演化趋 势预测[J].地质学报,94(5):1638-1654.
- 丁 雷,江永建,陈多才,张先宇.2011.广州软土的力学特性及 相关性分析[J].铁道建筑,(10): 75-78.

- 范军,左小清,李涛,陈乾福.2018. PS-InSAR和SBAS-InSAR 技术对昆明主城区地面沉降监测的对比分析[J].测绘 工程,27(6):50-58.
- 高二涛,范冬林,付波霖,雍琦,兰艳萍.2019.基于 PS-InSAR 和 SBAS 技术监测南京市地面沉降[J].大地测量与地球 动力学,39(2):158-163.
- 高辉,罗孝文,吴自银,阳凡林.2020.基于时序InSAR的珠江 口大面积地面沉降监测[J].海洋学研究,38(2):81-87.
- 高 磊,陈运坤,屈尚侠,余革森.2020.广州南沙区软土地面沉 降特征及监测预警分析[J].人民长江,51(S2):94-97+ 154.
- 何秀凤,高壮,肖儒雅,罗海滨,冯灿.2021.多时相Sentinel-1A InSAR的连盐高铁沉降监测分析[J].测绘学报,50(5): 600-611.
- 姜守俊.2013.内伶仃岛以北海域填海造地活动及其引发的 环境地质问题探讨[J].广东水利水电,(5):16-19.
- 赖 波,江金进,刘 佳.2021.基于 PS-InSAR 技术的珠海市地面 沉降监测分析[J].资源环境与工程,35(2):241-244+259.
- 李广宇,张瑞,刘国祥,于冰,张波,戴可人,包佳文,韦博 文.2018. Sentinel-1A TS-DInSAR京津冀地区沉降监测 与分析[J].遥感学报,22(4):633-646.
- 罗文林,侯伟,韩煊,周宏磊.2015.北京东部区域地面沉降现 状及其发展趋势预测[J].湖南科技大学学报(自然科学版),30(2):52-59.
- 邱志伟,岳建平,汪学琴,岳顺,刘斌.2016.基于短基线集技术 的城市地表沉降监测研究[J].测绘通报,(7):25-29.
- 王华,喻永平,蒋利龙.2014.利用合成孔径雷达干涉监测广 州佛山地面沉降[J].测绘科学,39(7):67-71.
- 王 双,严学新,揭 江,杨天亮,吴建中,王红珊.2019.珠江三角 洲平原区地面沉降影响因素分析[J].中国地质灾害与 防治学报,30(5):98-104+112.
- 吴龙飞,陈凌伟,彭卫平.2019. PSInSAR 技术在广州市南沙 区地面沉降监测中的应用研究 [J]. 城市勘测,(3): 127-130.
- 谢先明, 王松, 李明, 周振钊, 吴丽霞. 2021. 珠江三角洲地区地 面沉降现状及成因分析[J]. 西部探矿工程, 33(8):8-10.
- 易辉国,张磊,李宁,熊文秀,许兵.2015.参照标准点探测 PS 法[J].大地测量与地球动力学,35(4):684-688.
- 余革森,李德洲,屈尚侠.2017.广州市软土地面沉降特征分 析[J].上海国土资源,38(2):22-25.
- 曾敏,赵信文,陈松,王晓晗,皮鹏程,侯清芹,孙慧敏.2022.基 于多源数据融合的广州南沙核心区三维工程地质建 模[J].华南地质,38(2):281-291.

张金芝,黄海军,毕海波,王权.2016. SBAS时序分析技术监

- 张学东,葛大庆,吴立新,张玲,王艳,郭小方,李曼,余小 红.2012.基于相干目标短基线 InSAR 的矿业城市地面 沉降监测研究[J].煤炭学报,37(10):1606-1611.
- 张杏清.2015.基于 InSAR 技术的珠三角地面沉降监测应 用[J].地理空间信息,13(4):123-126+15.
- 张永红,吴宏安,康永辉.2016.京津冀地区 1992-2014 年三阶 段地面沉降 InSAR 监测[J].测绘学报,45(9):1050-1058.
- 张永红,吴宏安,孙广通.2012.时间序列InSAR技术中的形变 模型研究[J].测绘学报,41(6):864-869+ 876.
- 张又又.2016.基于时序 InSAR 技术的天津郊区地面沉降监 测应用[J].城市勘测,(6): 65-69.
- 朱建军,李志伟,胡 俊.2017. InSAR 变形监测方法与研究进 展[J].测绘学报,46(10):1717-1733.
- Aly M H, Klein A G, Zebker H A, Giardino J R. 2012. Land subsidence in the Nile Delta of Egypt observed by persistent scatterer interferometry [J]. Remote Sensing Letters, 3(7): 621-630.
- Chen J, Wu J C, Zhang L N, Zou J P, Liu G X, Zhang R, Yu B. 2013. Deformation trend extraction based on Multi-Temporal InSAR in Shanghai [J]. Remote Sensing, 5(4): 1774-1786.
- De Wit K, Lexmond B R, Stouthamer E, Neussner O, Dörr N, Schenk A, Minderhoud, P S J. 2021. Identifying causes of urban differential subsidence in the Vietnamese Mekong Delta by combining InSAR and field observations [J]. Remote Sensing, 13(2): 189.
- Dong S C, Samsonov S, Yin H W,Ye S J, Cao Y R. 2014. Time-series analysis of subsidence associated with rapid urbanization in Shangha, China measured with SBAS In-SAR method [J]. Environmental Earth Sciences, 72(3): 677-691.
- Ferretti A, Prati C, Rocca F. 2001. Permanent scatterers In-SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1): 8-20.

- Hanssen R F. 2005. Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori assessment of feasibility and accuracy [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 6(3-4): 253-260.
- Liu P, Li Q Q, Li Z H, Hoey T, Liu Y X, Wang C S. 2015. Land subsidence over oilfields in the Yellow River Delta [J]. Remote Sensing, 7(2): 1540-1564.
- Ng A H M, Wang H, Dai Y W, Pagli C, Chen W B, Ge L L, Du Z Y, Zhang K. 2018. InSAR reveals land deformation at Guangzhou and Foshan, China between 2011 and 2017 with COSMO-Sky Med data [J]. Remote Sensing, 10(6): 1-23.
- Shi X Q, Fang R, Wu J C, Xu H X, Sun Y Y, Yu J. 2011. Sustainable development and utilization of groundwater resources considering land subsidence in Suzhou, China [J]. Engineering Geology, 124: 77-89.
- Syvitski J P M, Kettner A J, Overeen I,Hutton E W H, Hannon M T, Brakenridge G R, Day J, Vörösmarty C, Saito Y, Giosan L, Nicholls R J. 2009. Sinking deltas due to human activities [J]. Nature Geoscience, 2(10): 681-686.
- Wang H, Wright T J, YU Y P, Lin H, Jiang L L, Li C H, Qiu G X. 2012. InSAR reveals coastal subsidence in the Pearl River Delta, China [J]. Geophysical Journal International, 191(3): 1119-1128.
- Yu Q B, Wang Q, Yan X X, Yang T L, Song S Y, Yao M, Zhou K, Huang X L. 2020. Ground deformation of the Chongming East shoal reclamation area in Shanghai based on SBAS-InSAR and laboratory tests [J]. Remote Sensing, 12(6):1-21.
- Zhu J Y, Guo H P, Zang X S, Wang Y L, Fan G D. 2020. A Brief Analysis of Land Subsidence Control Effect in Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Earth and Environmental Science, 446: P052095.
- Zebker H A, Villasenor J. 1992. Decorrelation in interferometric radar echoes [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 30(5): 950-959.