

引用格式: Lin Guangkun, Wu Zhifeng, Cao Zheng, *et al.* Land Subsidence Monitoring in Reclamation Area based on SBAS-InSAR Technique[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(6): 1358-1367. [林广坤, 吴志峰, 曹峥, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的围填海区域地面沉降监测[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(6): 1358-1367.] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2021.6.1358

## 基于 SBAS-InSAR 技术的围填海区域 地面沉降监测

林广坤, 吴志峰, 曹 峥, 关文川

(广州大学 地理科学与遥感学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**以围填海活动为代表的沿海快速城市化过程,是引起地面沉降的重要影响因素之一。研究聚焦沿海围填海活动热点区域广州市南沙区,使用2015年6月~2018年4月共34景 Sentinel-1 数据,应用 SBAS-InSAR 技术,揭示了南沙区在研究时段内地面沉降的时空变化格局及演变特征。结果表明:①南沙区整体呈现持续沉降的趋势,沉降速率分化严重,平均沉降速率达到 3.2 mm/a,圈层分析法显示中心圈层平均沉降速率为 2.6 mm/a,最外层平均沉降速率为 26.8 mm/a;②该区地面沉降在空间上呈现出异质性,主要分布在东部和南部,其中南部万顷沙、龙穴岛地面沉降最为严重,最大年沉降速率达到 72.2 mm/a,在 2015 年 6 月~9 月还出现地面沉降回弹现象,可能是台风天气带来季节性强降水变化影响。③基于不同极化方式的 Sentinel-1 数据进行交叉验证,VV 极化、VH 极化监测结果平均值分别为 2.09 mm 和 1.01 mm,均方根误差分别为 1.12 mm 和 2.65 mm。结果表明:SBAS-InSAR 技术在提取围填海区域的地面沉降信息方面是有效可靠的,能更好地为监测沿海地区的地面沉降情况提供科学依据。

**关键词:**围填海; Sentinel-1; SBAS-InSAR; 地面沉降; 时空演变

**中图分类号:**P237; P642.26 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2021)06-1358-10

### 1 引 言

地面沉降归属于地表形变的范畴,它是指在自然和人类活动作用下,土壤压实固结,地面标高缓慢降低的一种渐进性地质灾害<sup>[1]</sup>。在快速城市化过程中,地面沉降是城市面临的主要地质灾害问题之一。2012 年国务院批复的《2011 年—2020 年全国地面沉降防治规划》指出,我国发生地面沉降灾害的城市超过 50 个,地面沉降量超过 200 mm 的地区达到 7.9 万 km<sup>2</sup>。随着填海造陆、围垦滩涂等方式的围填海活动不断开展,沿海城市的地面沉降现象更加频繁。Kooi<sup>[2]</sup>认为沉积地层的压实可能是沿海三角洲地面沉降的主要原因。沿海低地由于人口稠

密与城市化发展,对土地资源的需求不断增加,大量的围填海活动严重破坏了地下空间的稳定性,为地面沉降灾害提供发育基础。围填海活动热点区域天津、广州、香港、澳门等地面沉降现象都比较严重,但大多数人并没有意识到缓慢的地面沉降过程带来的危害<sup>[3-4]</sup>。未来,在沿海气候特征及海陆交互作用的影响下,并伴随着城市化的土地需要,围填海活动还会进一步加剧,地面沉降的风险正在提升。因此,对围填海热点地区进行快速、有效、及时和准确的地面沉降监测是十分必要的。

近年来,合成孔径雷达干涉技术(Interferometric Synthetic Aperture Radar Technology, InSAR)<sup>[5]</sup>逐渐被广泛应用于地面沉降监测。传统的地面沉

收稿日期:2020-07-30;修订日期:2021-09-12

基金项目:国家自然科学基金重点项目“粤港澳大湾区湿地资源遥感监测及其生态功能评估研究项目”(U1901219)资助。

作者简介:林广坤(1995—),男,广东汕头人,硕士研究生,主要从事 InSAR 技术和地表形变监测。E-mail:zfwu@gzhu.edu.cn

通讯作者:吴志峰(1969—),男,湖南湘潭人,教授,主要从事城市遥感与陆地生态遥感等研究。E-mail:zfwu@gzhu.edu.cn

降监测方法一般基于稀疏点的监测,例如水准测量、GPS、分层标等。虽然精度较高,但是重复监测时间周期长,一般具有滞后性,测量范围有限,难以满足城市大范围地面沉降检测的需要。InSAR技术是一种基于微波遥感的对地观测技术,它可实现高精度、低成本和大尺度的地面观测,用于研究地表形变。小基线集干涉技术(Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)<sup>[6]</sup>是目前主要应用的时序InSAR技术之一。基于微波对地表的穿透特性,将同一区域的不同时间多景SAR影像进行小基线组合,接着进行干涉处理,得到形变相位,再将形变相位转化为地表形变信息。Sentinel-1是欧洲航天局(European Space Agency, ESA)2014年发射的C波段SAR传感器。因为其免费、开源和容易获取的特性,成为地面沉降监测广泛使用遥感数据源。随着计算机性能的提升,为了满足准确反演地表形变的需要,运用InSAR技术充分挖掘存量的数据源中的形变信息已经成为一种可能。

SBAS-InSAR技术为研究地面沉降提供一种新的观测手段,前人在利用SBAS-InSAR技术监测特殊区域地面沉降方面已有众多成果。Gao等<sup>[7]</sup>采用SBAS-InSAR技术对北京东部平原的地面沉降演变和发展情况进行长时序监测;李珊珊等<sup>[8]</sup>利用ENVISAT卫星获取的21景ASAR影像数据监测青藏高原季节性冻土形变,揭示该地区地面沉降与冻土层冻融变化的周期性规律;陈继伟等<sup>[9]</sup>以SBAS时序分析方法提取了黄河三角洲地区2015年5月~2016年4月的持续沉降范围和速率。周吕等<sup>[10]</sup>利用Sentinel-1A合成孔径雷达对深圳围填海区域进行3年的持续监测,发现地面沉降的季节性变化规律。然而,目前将InSAR技术应用在围填海区域的研究文献还比较少,对其地面沉降的时空演变特征和影响因素还不清楚。这一方面因为沿海地区比较多降水和云雾,植被覆盖度高,大气效应对监测结果的影响比较大,另一方面填海造陆是频繁的工程性活动,容易导致地表形态、反射特性发生改变,造成监测目标失去相干性,无法识别出地面沉降。卢旺达等<sup>[11]</sup>基于24景Sentinel-1A影像数据,利用永久散射体干涉(Persistent Scatter InSAR, PS-InSAR)技术<sup>[12]</sup>对2015年4月~2018年2月的天津城区进行有效地监测,不过PS-InSAR技术对SAR影像数量的要求比较高。它通过提取时序影像中相位稳定的永久散射点去除大气效应的

影响,适用于城区等人工建筑物较多的高相干区域。不过,在低相干的围填海区域仍然有其应用局限性。随着近年来不断发射周期更短、覆盖全球的开放SAR数据,基于小基线组合的思想发展出了SBAS-InSAR技术。它主要通过小的时间基线和空间基线原则,对多个数据子集进行干涉处理。联立多个干涉像对子集组合求解时序形变。不仅提高了干涉像对时间采样频率,而且能够提取高密度和高质量的干涉图相位信息,从而更好的拟合围填海区域地面沉降的整体趋势面和分析其形变规律。

因此,本文主要研究在沿海三角洲背景下,围填海活动引起的地面沉降时空演变特征。首先利用SBAS-InSAR技术对围填海热点地区广州市南沙区进行了长期地面沉降观测,得到年平均沉降速率图和地面沉降累计量时间序列图,然后利用不同极化方式SAR数据来评估SBAS-InSAR技术监测结果的准确性。最后,基于GIS空间分析方法对地面沉降的时空特征进行了描述和分析,发现潜在的地面沉降风险,为沿海地区的地面沉降灾害防治提供依据。

## 2 研究区和数据来源

### 2.1 研究区概况

南沙区位于粤港澳几何中心,地处珠江入海口,覆盖范为112.4°~113.4 E°, 22.5°~23.5° N。如图1所示,北部以及西北部为珠江三角洲冲积平原的一部分,南部以及东部紧邻海洋,受流水动力作用逐渐淤积形成广泛分布的软土,万顷沙十七涌以南的地区广泛分布厚度大于40 m的软土,最厚处可达55 m<sup>[13]</sup>。地势整体平缓,区内最高点黄山鲁山海拔295 m,由西北向东南倾斜。南沙区有典型的亚热带季风气候,年平均降水量约为951~1 352 mm,受台风天气影响,季节性降水比较多。

南沙区行政区划总面积约803 km<sup>2</sup>,海域面积占了1/4。2018年常住人口为72.79万,城镇化率为72.9%。根据广州市贯彻落实“广东省地质灾害防治三年行动方案”(2020~2022年)的实施方案,截止2019年12月31日,南沙区在册地质灾害隐患点共36处,其中大部分属于中低风险点,而在大岗镇则有一处高风险点。该区历史上就曾进行大量的滩涂围垦活动,明清时期最盛<sup>[14]</sup>。改革开放以来,围填海面积不断扩大。1989~2014年,南沙区约有46.3 km<sup>2</sup>的土地由围填海开发而来,其中2004~2014年围填海活动进一步加剧,围填海面积达到

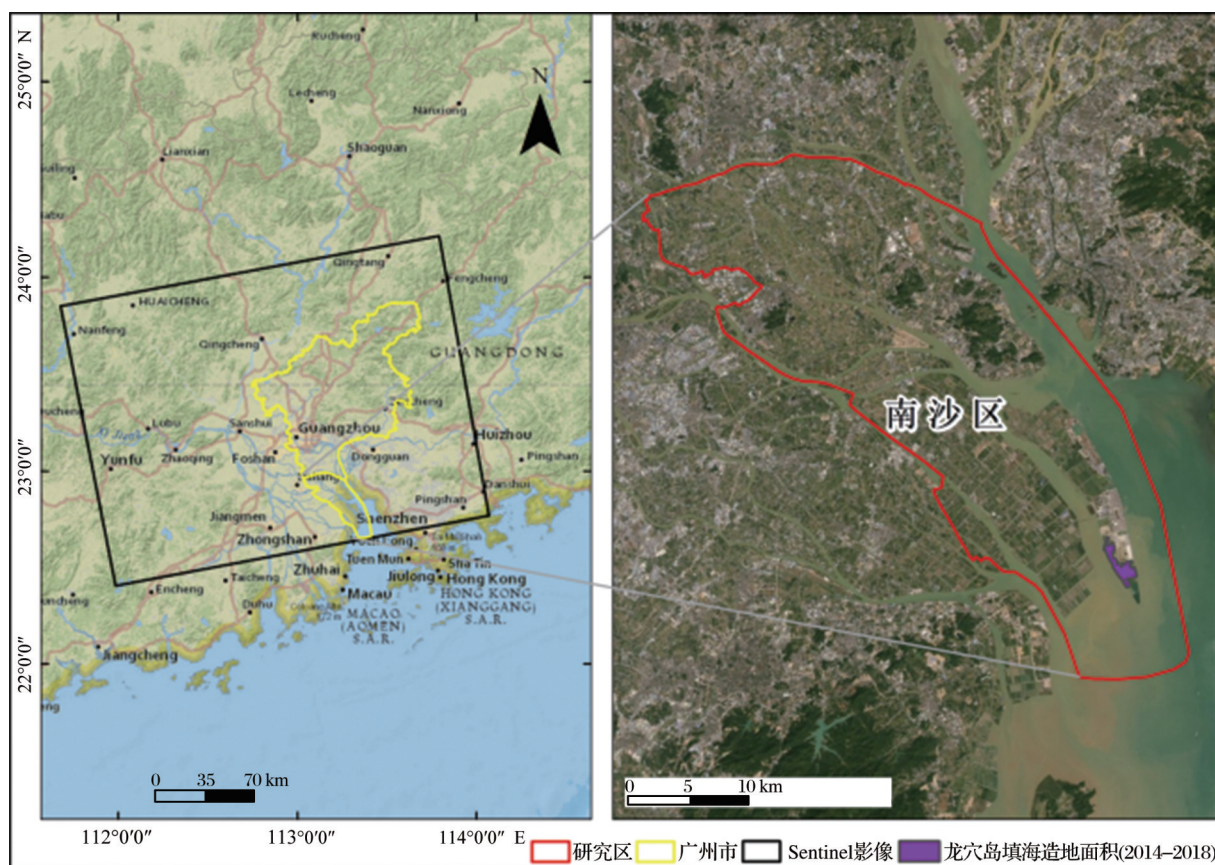


图1 研究区位置示意图

审图号:粤S(2020)01-005

Fig.1 Location diagram of study area

16.2 km<sup>2</sup>;且主要发生在万顷沙和龙穴岛<sup>[15]</sup>。所以,南沙区存在地面沉降的自然发育基础且人为活动干扰强烈,更容易发生严重地面沉降。

## 2.2 数据来源

实验选取了欧空局34景Sentinel-1干涉宽幅IW模式影像,干涉宽幅模式影像的像素分辨率为5 m(方位向)×20 m(距离向),重访周期为12 d,幅宽250 km,分为3个子条带。实验研究范围如图1所示,选取同向VV极化模式下Sentinel-1数据用于地面沉降监测。图1中黑色框为Sentinel-1数据所选burst覆盖范围,黄色框为广州市覆盖范围,红色框表示研究区域南沙区。轨道定位采用POD精密定轨星历数据,这是目前针对Sentinel-1最精确的轨道数据,定位精度优于5 cm,用于去除因轨道误差引起的系统性误差;参考数字高程模型DEM采用SRTM 30 m空间分辨率数据,用于去除地形对干涉相位造成的误差。表1列举了所用研究数据的详细说明,而表2则重点突出Sentinel-1A干涉像对的关键参数。主影像时间为2016年5月4日,垂直基线最大为98 m。

## 3 研究方法

### 3.1 SBAS-InSAR技术原理

SBAS-InSAR技术相对D-InSAR技术在干涉像对的数量和质量上都有所提升<sup>[16]</sup>。在干涉图数量上,它主要是通过短基线连接SAR影像形成若干个小基线组合,从而增加干涉像对数量。而要从每组差分干涉图中提取可靠的地表形变信息,关键在将时间序列上保持良好的相干性和稳定的散射点作为研究对象,从而提高干涉像对的质量。首先将所有干涉像对,依据时空基线最短原则,从中选取合适的干涉像对生成时空基线网络连接图,降低时空失相干的影响;其次通过干涉处理逐步分解各个相干目标点上的相位组成;为了充分利用多时相SAR数据的优势,使用3D解缠方法来解决研究区可能出现的低相干问题。解缠方法默认为德罗尼最小费用流法(Delaunay Minimum Cost Flow, Delaunay MCF)。在最小费用方法的基础上,仅考虑德罗尼三角形格网内相干性大于阈值的部分,只有对相干性高的部分进行解缠,不受低相干像元的影响,减小了相干性过低带来的相位突变影响<sup>[17]</sup>;接

表 1 研究数据说明表

Table 1 Research data description table

数据类型	名称	来源	参数		描述
SAR 数据集	Sentinel-1A	ESA	轨道方向	升轨	
			数据类型	斜距单视复图像(SLC)	
			极化方式	垂直发射垂直接收(VV);垂直发射水平接收(VH)	
			成像方式	干涉宽幅模式IW	
			分辨率	方位向、距离向分别为20 m、5 m	
DEM	SRTM	USGS	相对水平精度	15 m	
			相对高程精度	10 m	
			分辨率	30 m×30 m	
轨道定位数据	POD	ESA	定位精度	优于5 cm	
			覆盖时间	26 h	

表 2 实验区 SAR 数据相关参数表

Table 2 Relevant parameters of SAR data in the experimental area

编号	日期	空间基线 /m	编号	日期	空间基线 /m
0	2015-6-15	-41	17	2016-11-12	19
1	2015-7-21	-75	18	2016-12-18	-60
2	2015-8-2	-39	19	2017-1-11	25
3	2015-9-7	-98	20	2017-2-28	38
4	2015-9-19	-58	21	2017-3-12	-14
5	2015-10-1	-15	22	2017-4-29	-14
6	2016-1-17	-34	23	2017-5-11	-67
7	2016-2-10	52	24	2017-6-28	-31
8	2016-3-5	-58	25	2017-7-10	25
9	2016-3-29	-77	26	2017-9-8	22
10	2016-5-4	0	27	2017-10-2	-43
11	2016-5-16	-47	28	2017-11-7	16
12	2016-6-9	-26	29	2017-12-1	59
13	2016-7-3	-51	30	2018-1-6	22
14	2016-8-20	-35	31	2018-1-30	46
15	2016-9-13	-33	32	2018-2-11	-28
16	2016-10-31	15	33	2018-4-24	-27

着利用奇异值分解法(Single Value Decomposition, SVD)第一次估算形变速率和残余地形误差,再根据大气在时空上分布特点,进一步去除大气的影响,获得可靠的形变相位信息和构建地面形变趋势面。由公式(1)可知,需要移除平地效应、地形误差、大气误差和噪声引起的相位变化,最后通过相位转换、地理编码得到地面沉降情况<sup>[18]</sup>。

$$\varphi = \varphi_{flat} + \varphi_{top} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (1)$$
其中: $\varphi$ 表示原始干涉相位; $\varphi_{flat}$ 表示平地相位; $\varphi_{top}$ 表示地形相位; $\varphi_{atm}$ 表示大气延迟相位; $\varphi_{noise}$ 表示其他噪声影响。

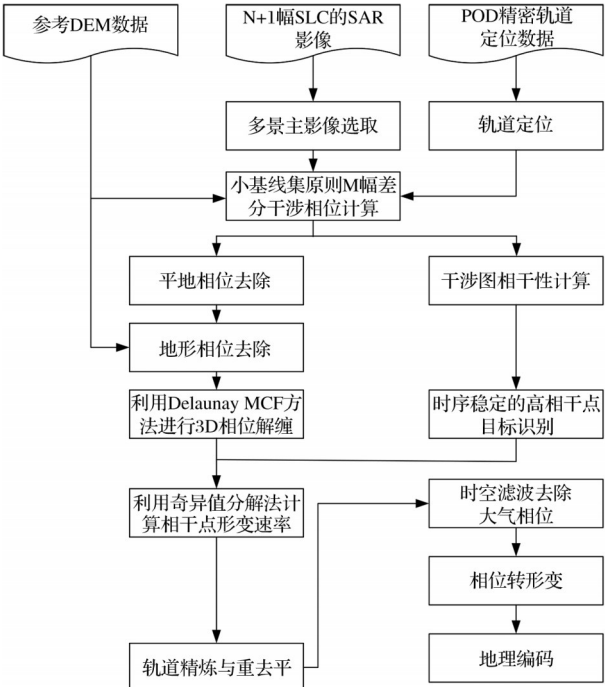


图 2 SBAS-InSAR 技术流程图

Fig.2 Flow chart of SBAS-InSAR

3.2 精度检验方法

为进一步分析地面沉降监测结果,需要对 SBAS-InSAR 技术监测结果进行精度检验。目前常用的验证方法有两种,一是直接验证方法,通过选取同期一定邻近距离范围内的水准测量数据,常用的邻近距离为 100 m,将 InSAR 监测结果的沉降速率与验证点沉降速率互差检验<sup>[19]</sup>。但是水准测量点一般分布在局限范围内,数量也有限,并且围填海区域往往很难找到同期的水准测量点。另外一种是在观测时间同步的情况,利用多波段、多极化、升降轨的 SAR 影像观测模式差异,获取同一目标的地面沉降结果进行交叉验证<sup>[20]</sup>。实验采用第

二种检验方式。首先统计监测结果地面沉降速率的分布趋势,与实际的地面沉降情况对比,其次利用不同极化方式的 Sentinel-1 数据对南沙区地面沉降监测结果进行互相检验。考虑到观测点沉降速率会因参考点的差异而不同,因而基于两组监测结果的相关性进行检验。首先保持影像、方法、参数阈

$$\rho = \frac{n \sum_{i=1}^n dL_i dI_i - \sum_{i=1}^n dL_i \cdot \sum_{i=1}^n dI_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n dL_i^2 - (\sum_{i=1}^n dL_i)^2} \cdot \sqrt{n \sum_{i=1}^n dI_i^2 - (\sum_{i=1}^n dI_i)^2}} \quad (2)$$

其中: $N$ 为样本点数量; $dL_i$ 和 $dI_i$ 一样本点 $i$ 对应的 VH、VV 极化 InSAR 的观测值

南沙区大部分相干性阈值高于 0.5,从中挑选成像时间在不同季节的 3 组干涉像对,从左到右分别为滤波后干涉、相干性、解缠结果图。20170228-20170511、20170710-20170908、20180106-20171002 干涉像对条纹显示存在一定的大气效应,不过像对时间基线都在在一个季相之内,保持了良好的相干性,3D 解缠结果也有利于研究区的形变信息的提取。微波波段的穿透性受云层含水量的削弱作用,并且 C 波段(约 5.6 cm)会与植被冠层相互作用,在植被覆盖度高的区域无法到达地面,所以考虑到南沙区季节性降水和高植被覆盖率的特点,大气效应将会是主要的误差来源之一,因此要设置更小的大气高通、大气低通窗口进行时空滤波,空间窗口设为 800 m,时间窗口 120 d。

## 4 结果与分析

### 4.1 精度检验结果

南沙区地面沉降总体趋于稳定状态,部分区域发生地面沉降,沉降速率在零值偏左附近,符合南沙区地面沉降情况的判断(如图 4(a)所示)。在 1 000 组数据中,有部分数据缺失对应值,一共提取了有效值 908 组。如图 4(b)所示,比较了两组 InSAR 测量值的相关系数图,虽然  $R^2$  值还不够高,但可以看出两次的结果的相关系数较高。选取研究区域内同周期的水准点进行直接验证是常用方法,但较难获得水准测量数据。同极化(HH/VV)相比交叉极化(VH/HV)的穿透能力强,对于形变信息提取更好,不同极化方式的监测仍能在一定程度上相互印证。在保持参数一致的情况下,基于 Sentinel-1 数据的 SBAS-InSAR 技术,VV、VH 极化方式的分别提取了 184 278 个、155 963 个相干点,主要差别是在植被覆盖区域,VV 极化增加地物目标的相干信息。VH、VH 极化监测结果的平均值分别为

值等的一致,将参考点统一为相同的几何坐标,其次在两次监测结果中随机产生 1 000 组邻近距离为 100 m 的相干点目标进行比较。最后参考《中国地质调查局地质调查技术标准》检验标准,利用平均值、均方根、相关系数指标检验 SBAS-InSAR 技术监测结果的准确性。相关系数  $\rho$  的计算公式为:

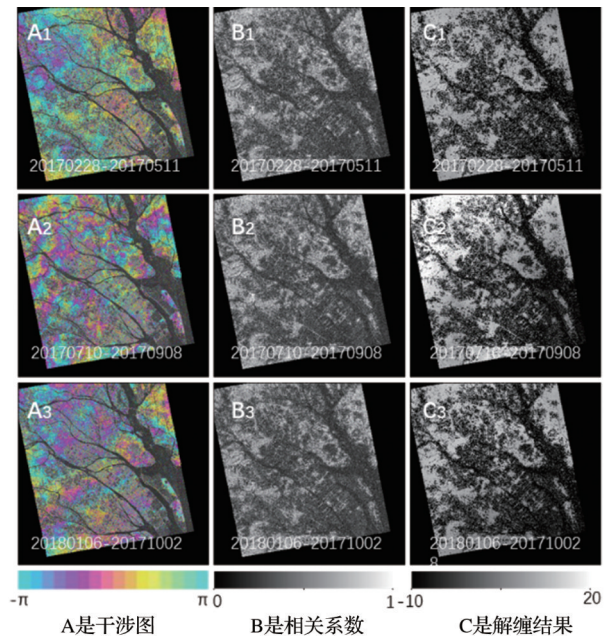


图3 不同时段干涉像对

Fig.3 Interference image pairs at different time periods

2.09 mm 和 1.01 mm,均方根误差分别为 1.12 mm 和 2.65 mm。由于缺乏同期的水准测量数据,所以利用该区域历史水准数据进行补充验证整体的形变趋势,补充了 2019 年 3 月 26 日~6 月 11 日大岗镇编号为 JYQ1- JYQ4 的 4 处建筑物沉降连续观测水准数据,使用仪器为索佳 SDL1X 电子水准仪,观测间隔约为一周。大岗镇有效相干点为 9 362 个,平均点密度为 90 个/ $\text{km}^2$ ,2017 年 3 月~6 月,SBAS-InSAR 技术监测到区域内持续沉降,相干点平均累计沉降 11.5 mm,与图 5(a)累计沉降量大致相同。为了更好地验证地面沉降结果,进行实地验证。图 5(b)在某教学楼发现地面开裂,可能是因为工程建设活动扰动造成建筑物不均匀沉降的。高磊等<sup>[21]</sup>在南沙区五涌渡口地面沉降监测点也发现了工程建设活动导致的持续地面沉降。该处位于研究区北侧,附近正在进行路面修整等工程建设活动,建筑物周围相干点表明地面沉降速率在 15~20 mm/a。这些

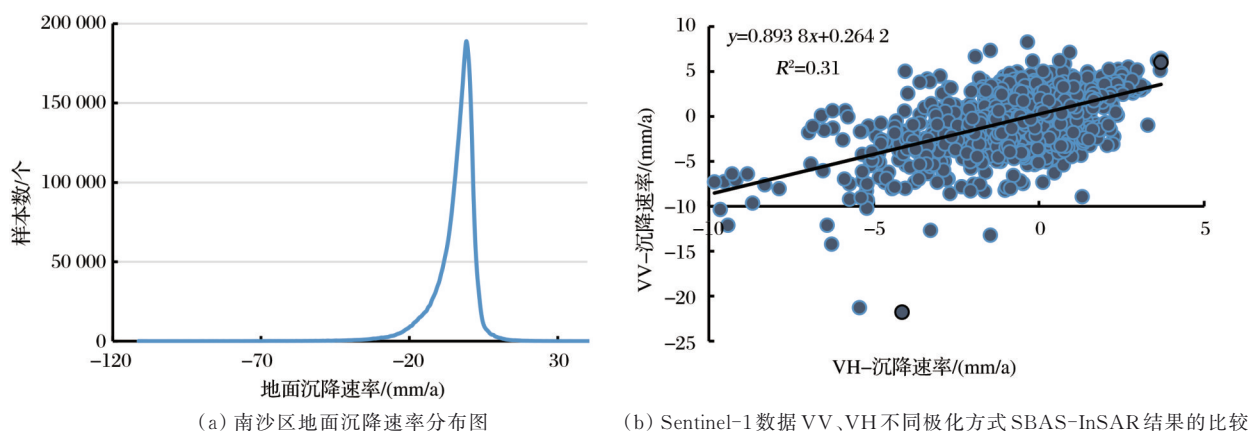


图4 地面沉降速率统计学检验

Fig.4 Statistical test of land subsidence rate

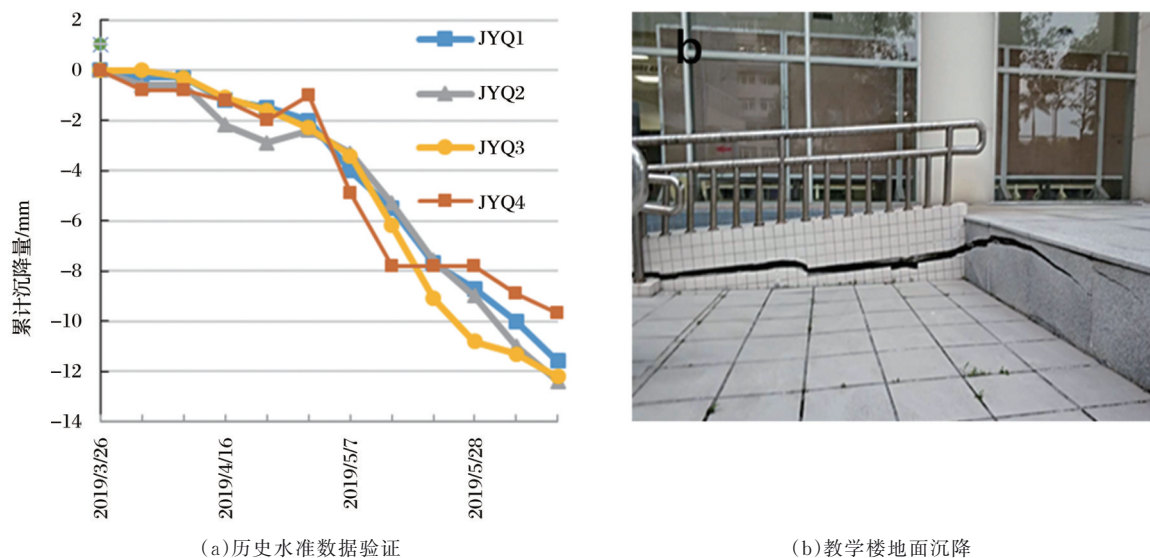


图5 地面沉降率实地检验

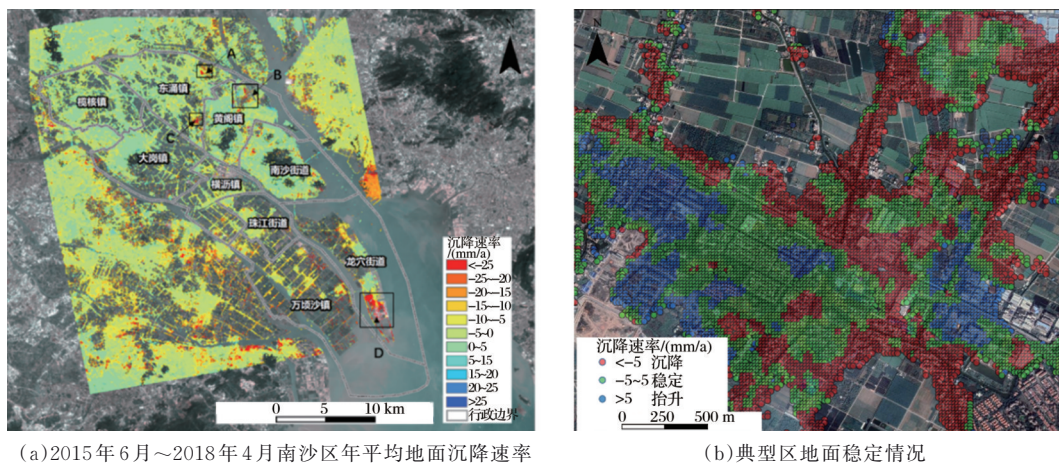
Fig.5 Field test of land subsidence rate

结果比较表明SBAS-InSAR技术在提取围填海区域的地面沉降信息方面是准确和可靠的。

#### 4.2 整体地面沉降时空格局

在提取相干点目标上,如图6(a)所示SABS方法有效提取了一定密度的相干点目标,保持了地面监测的连续性,基于高密度相干点的遥感监测方法有助于南沙区建立由点到面的监测体系。区域内有效相干点的数量有184 278个,平均点密度为229个/ $\text{km}^2$ 。相干点的形变速率分为正、负值,分别代表地面抬升和地面沉降。该地区超过60%的相干点平均形变速率为负值,即为地面沉降发生区域;Qing等<sup>[22]</sup>认为对于广州市而言,地面沉降高于5 mm/a更有可能对其上的基础设施和构筑物等造成危害。按照该分级方法(如图6(b)),南沙区地面沉降速率高于5 mm/a占比为14.3%。

从监测结果来看,南沙地面沉降速率分布呈现南部高于北部的特点。东部和南部出现几处沉降明显的区域。利用GIS空间分析中的圈层分析法,进一步探究南沙区地面沉降空间分布的“中心—外围”趋势。如图7所示,以南沙区的几何中心为中心点,以等距离向外进行圈层推移。如图8所示,中心圈层平均形变速率为-2.6 mm/a,最外层平均形变速率为-26.8 mm/a。整体地面沉降趋势表现出内部城区向外围沿海方向逐渐增大的趋势,越靠近海洋的区域沉降越严重。如图8所示,中心圈层平均形变速率为-2.6 mm/a,最外层平均形变速率为-26.8 mm/a。主要沉降区域集中在东部和南部,其中小虎岛、龙穴岛的沉降趋势最严重,在雷达视线向上的最大地面沉降速率为120 mm/a。可能是中心圈层附近为黄山鲁等丘陵,基底多为花岗岩,岩



(a) 2015年6月~2018年4月南沙区年平均地面沉降速率

(b) 典型区地面稳定情况

图6 地面沉降速率空间分布

审图号:粤S(2020)01-005

Fig.6 Spatial distribution of land subsidence

性坚硬,相对稳定。而外部圈层沉降严重,一方面是在自然条件下河口三角洲,该区域接受陆相、海相两种沉积物,地面承载力有所差异。另一方面在人为因素下,南沙区作为广州城市发展战略“南拓”的重点扩张区域,不断向海推进填海造地活动,逐渐扩展到万顷沙外围。新填海造陆区相对老填海造陆区域的地下空间更不稳定。在此基础上不断修建的高层建筑加重地面荷载,造成地面沉降的速率和强度不断提升。因此,南沙区地面沉降与围填海活动具有相关性。Li等<sup>[23]</sup>对上海地区地面沉降特征进行研究,发现土层沉降是城市地面沉降的主要原因。有学者研究认为湄公河三角洲经过10年后,地面荷载对地面沉降速率的影响才可能忽略不计,逐渐达到稳定状态<sup>[24]</sup>。

#### 4.3 重点区域地面沉降分析

从地面沉降的严重区域来看,InSAR监测的地面沉降严重区与大型线状基础设施在空间位置和分布趋势上具有一致性。这表明现有的地面沉降防治区需要充分考虑高速公路、铁路、地铁等大型线状基础设施的沉降风险。在地面沉降速率大于10 mm/a的位置,用字母A到D标记地面沉降严重的区域进一步分析。如图6所示可知形变最严重的区域D为龙穴岛上的南沙港务大厦周边区域,平均地面速率为37.9 mm/a;与南沙区其他区域相比,该地区形变的空间变化较大,最大沉降速率为72.2 mm/a,最小沉降速率为6.7 mm/a。区域A、B、C基本都位于大型线状基础设施附近,比如地铁、高速公路。A区位于广州地铁4号线东涌地铁站附近,该点采用高架铺设轨道,在东涌大道、丰茂路与京珠高速公路三条道路交叉围合出的三角地块内,B区位于小

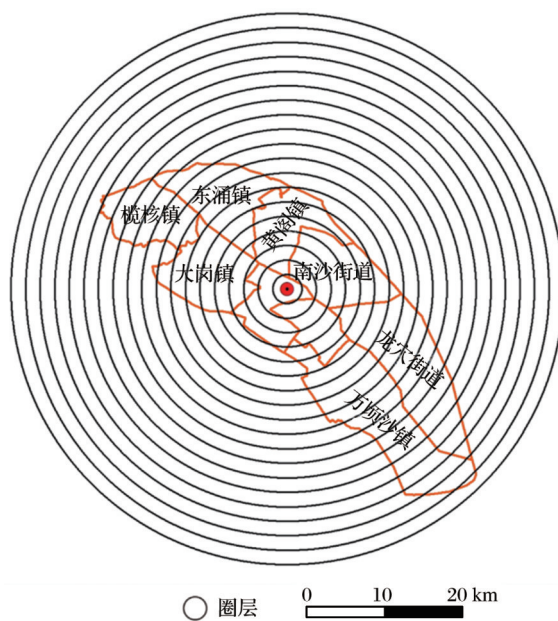


图7 圈层划分示意图

Fig.7 Diagram of circle division in Nansha district

虎岛上火力发电站附近,虎沙大道与黄沙路在此处交汇。C区位于长莫公路中段;B区形变速率分布更为均匀,在-47.1~4.7 mm/a之间。在A和C点也发现了类似的地面沉降速率。从时间上看,如图9所示,研究时段内A、B、C、D4地一直处于持续沉降的趋势,累计沉降量的峰值出现在2018年4月份,达到121 mm。A、C两地在2015年6月~9月出现地面沉降回弹,抬升数值为6 mm,这两处的工业用水和生活用水需求旺盛,可能是季风气候带来的强降水补充了地下水资源,使地下水位上升。D处则在2016年1月~2月出现加速下沉现象,下沉数值为25 mm,当时该地正处于广州港南沙港区码头建设期间,大型基础设施在开挖过程中,容易破坏

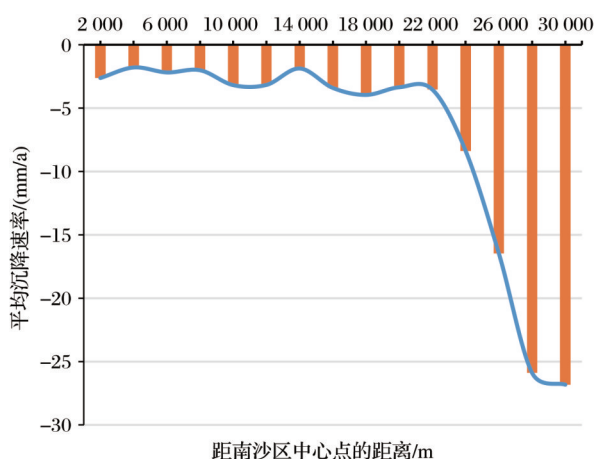


图8 南沙区中心点向外圈层平均沉降速率

Fig.8 The average settling rate of the central point outwards in Nansha district

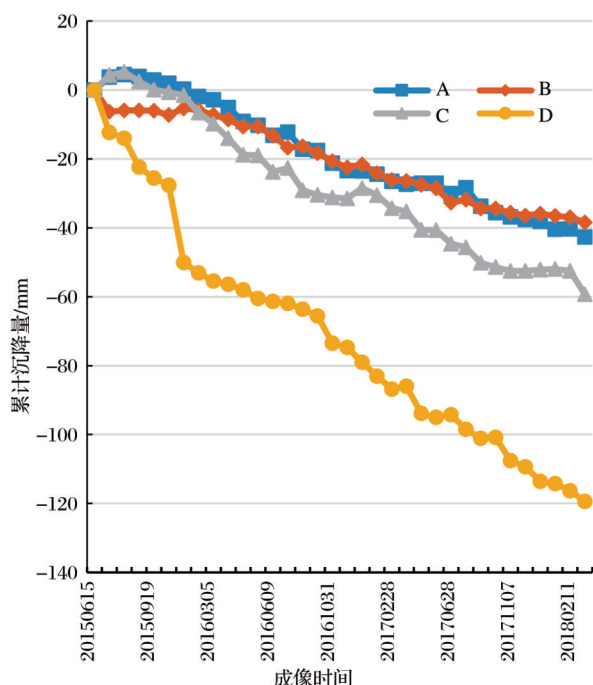


图9 重点区域A、B、C、D地面沉降时间序列

Fig.9 Land settlement time series of key areas A, B, C and D

基坑周边构筑物的稳定性,并且在建成后不断增加的建筑物荷重也对软土地基起到进一步压实作用,加剧地面沉降趋势。

## 5 结 论

实验将SBAS-InSAR技术应用于沿海围填海活动的地面沉降监测。选取围填海活动热点区域广州市南沙区作为研究区域,利用34景合成孔径雷达数据Sentinel-1卫星影像、时间从2015年6月~2018年4月的合成孔径雷达Sentinel-1数据开展小

基线组合差分干涉测量试验,通过逐步分离平地效应、地形影响、大气延迟等误差,得到可靠的南沙区地面沉降速率图和累计沉降量图,在研究时段内实验结果显示:

(1)南沙区地面沉降分布呈现南部高于北部的特点,并且有中心城区向沿海发展的趋势。南部的万顷沙、龙穴岛部分沉降最为严重,最大年平均沉降速率值达到37.9 mm/a;除龙穴岛南沙港务大厦附近外,还识别出小虎岛、东涌镇、黄阁镇3个重点沉降区域。

(2)南沙区在2015年6月~2018年4月整体呈现持续沉降趋势,但在2015年6月~9月有部分抬升,抬升数值为6 mm。

(3)利用同一方法不同极化方式数据对监测结果进行交叉验证,VV极化、VH极化监测结果平均值分别为2.09 mm、1.01 mm,均方根误差分别为1.12 mm、2.65 mm,表现出较好的一致性。

本研究的结果证实了SBAS-InSAR技术应用于围填海区域地面沉降监测的可行性,并描述和分析围填海区域地面沉降空间分布特征和时空演变规律。不过由于研究区植被覆盖和水系发达,人工地物密度比较低。在SBAS-InSAR技术提取地表形变过程中,出现一些干涉相位未解缠绕的空白区,下一步可以通过气象数据模拟大气相位误差或通过空间插值方法得到连续的沉降情况。

## 参考文献(References):

- [1] Yin Yueping, Zhang Zuochen, Zhang Kaijun, Land subsidence and countermeasures for its prevention in China[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Control, 2005, 16(2): 1-8.[殷跃平,张作辰,张开军.我国地面沉降现状及防治对策研究[J].中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 1-8.]
- [2] Kooi H. Land subsidence due to compaction in the coastal area of the Netherlands: the role of lateral fluid flow and constraints from well-log data[J]. Global and Planetary Change, 2000, 27(1): 207-222. DOI: 10.1016/S0921-8181(01)00067-4.
- [3] Yang Mengshi, Liao Mingsheng, Qin Xiaoqiong, et al. Analysis of capabilities of C and L-band SAR data to detect newly-reclaimed area[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(9): 1300-1305.[杨梦诗,廖明生,秦晓琼,等.C和L波段SAR数据在填海新区的应用及特性分析[J].武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1300-1305.]
- [4] Takagi H, Esteban M, Mikami T, et al. People's perception

- of land subsidence, floods, and their connection: a note based on recent surveys in a sinking coastal community in Jakarta [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2021, 211: 105753. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105753.
- [5] Zhu Jianjun, Li Zhiwei, Hu Jun. Research progress and methods of InSAR for deformation monitoring[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46 (10) : 1717-1733.[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.]
- [6] 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) : 2375-2383. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792
- [7] Mingliang G, Huili G, Beibei C, *et al.* Regional land subsidence analysis in eastern Beijing Plain by InSAR time series and wavelet transforms[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(3) : 365.DOI: 10.3390/rs10030365.
- [8] Li Shanshan, Li Zhiwei, Hu Jun, *et al.* Monitoring of seasonal frozen soil deformation on the Qinghai-Tibet Plateau using SBAS-INSAR technology [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(5) : 1476-1486.[李珊珊, 李志伟, 胡俊, 等. SBAS-InSAR 技术监测青藏高原季节性冻土形变[J]. *地球物理学报*, 2013, 56(5):1476-1486.]
- [9] Chen Jiwei, Zeng Qiming, Jiao Jian, *et al.* SBAS time series analysis technique based on Sentinel-1A TOPS SAR images: a case study of Yellow River Delta[J]. *Remote Sensing For Land & Resources*, 2017, 29(4) : 82-87.[陈继伟, 曾琪明, 焦健, 等. Sentinel-1A 卫星 TOPS 模式数据的 SBAS 时序分析方法——以黄河三角洲地区为例[J]. *国土资源遥感*, 2017, 29(4): 82-87.]
- [10] Zhou Lü, Shi Xianjian, Ren Chao, *et al.* Monitoring of land subsidence in Shenzhen reclamation area based on Sentinel-1aA interferometric synthetic aperture radar [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21( 21) : 8765-8769.[周吕, 施显健, 任超, 等. 哨兵-1A 合成孔径雷达的深圳围填海区域地面沉降监测[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(21) : 8765-8769.]
- [11] Lu Wangda, Han Chunming, Yue Xijuan, *et al.* Land subsidence monitoring in Tianjin with PS-InSAR technique based on Sentinel -1 data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(2) : 416-423.[卢旺达, 韩春明, 岳昔娟, 等. 基于 Sentinel-1A 数据的天津地区 PS-InSAR 地面沉降监测与分析[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(2):416-423.]
- [12] Moreira A, Prats-Iraola P, Younis M, *et al.* A tutorial on synthetic aperture radar [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Magazine*, 2013, 1 (1) : 6-43. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
- [13] Yu Jie, Chen Zuozhi, Xu Shannan. Effects of reclamation on wetland resources and biological resources in Nansha of the Pearl River Estuary [J]. *Chinese Fishery Science*, 2016, 23 (3) : 661-671.[于杰, 陈作志, 徐姗楠. 围填海对珠江口南沙湿地资源与生物资源的影响[J]. *中国水产科学*, 2016, 23 (3):661-671.]
- [14] Du Haiyan, Zheng Zhuo. New theory on Guangdong geology [M]. Beijing: Geology Press, 2012:17-21.[杜海燕, 郑卓. 广东地质新论[M]. 北京:地质出版社, 2012: 17-21.]
- [15] Chen Xiaoyue. Surface subsidence characteristics of soft land in Nansha District, Guangzhou and suggestions on urban disaster prevention and mitigation[J]. *Geological Hazards and Environmental Protection*, 2018, 29(2) : 17-22.[陈小月. 广州市南沙区软土地面沉降特征及城市防灾减灾的建议[J]. *地质灾害与环境保护*, 2018, 29(2):17-22.]
- [16] Zhou C, Gong H, Chen B, *et al.* Land subsidence response to different land use types and water resource utilization in Beijing-Tianjin-Hebei, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(3) : 457. DOI:10.3390/rs12030457.
- [17] Cheng Pu, Xu Caijun, Wang Hua. Research on phase unwrapping algorithm of InSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2007, 27(3) : 50-55.[程璞, 许才军, 王华. InSAR 相位解缠算法研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2007, 27 (3):50-55.]
- [18] Lin Hui, Ma Peifeng, Wang Weixi. Urban infrastructure health monitoring with spaceborne multi-temporal synthetic aperture radar interferometry [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10) : 1421-1433.[林珏, 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.]
- [19] Xiao Liang, He Yueguang, Xing Xueming, *et al.* Time series subsidence analysis of drilling solution mining rock salt mines based on Sentinel-1 data and SBAS-InSAR technique [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(3) : 501-513.[肖亮, 贺跃光, 邢学敏, 等. Sentinel-1 和 SBAS-InSAR 分析钻井水溶岩盐矿山时序沉降[J]. *遥感学报*, 2019, 23(3) : 501-513.]
- [20] Ge Daqing, Yin Yueping, Wang Yan, *et al.* He subsidence and ground water level changes monitoring by using coherent target InSAR technique: a case study of Dezhou, Shandong [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, 26(1) : 103-109.[葛大庆, 殷跃平, 王艳, 等. 地面沉降一回弹及地下水位波动的 InSAR 长时序监测——以德州市为例[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(1):103-109.]
- [21] Gao Lei, Chen Yunkun, Qu Shangxia, *et al.* Analysis of land subsidence about soft characteristics and monitoring in Nansha District, Guangzhou[J]. *Yangtze River*, 2020, 51(S2) : 94-97.[高磊, 陈运坤, 屈尚侠, 等. 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*, 2020, 51(增刊2):94-97, 154.]
- [22] Zhao Q, Lin H, Jiang L, *et al.* A study of ground deformation in the Guangzhou urban area with persistent scatterer interferometry [J]. *Sensors (Basel)*, 2009, 9 (1) : 503-518. DOI: 10.3390/s90100503.
- [23] Li J, Zhou L, Ren C, *et al.* Spatiotemporal inversion and mechanism analysis of surface subsidence in Shanghai area based on time-series InSAR[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11

- (16): 7460. DOI:10.3390/app11167460.
- [24] Van Der Horst T, Rutten M M, Van De Giesen N C, *et al.*  
Monitoring land subsidence in Yangon, Myanmar using Senti-

nel-1 persistent scatterer interferometry and assessment of  
driving mechanisms [J]. *Remote Sensing of Environment*,  
2018, 217: 101-110. DOI:10.1016/j.rse.2018.08.004.

## Land Subsidence Monitoring in Reclamation Area based on SBAS-InSAR Technique

Lin Guangkun, Wu Zhifeng, Cao Zheng, Guan Wenchuan

(School of Geographic Science and Remote Sensing, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The reclamation activities of rapid urbanization process is a significant factor to cause land subsidence. This study has focused on land subsidence along with the coastal reclamation activity over Nansha district in Guangzhou city. A total of 34 Synthetic Aperture Radar (SAR) images acquired by Sentinel1 between June 6, 2015 and April 2018 are used to monitor the surface deformation and find the spatial and temporal variations of land subsidence by employing a small baseline subset Interferometric Synthetic Aperture Radar (SBAS-InSAR) technique. The results show that: (1) the Nansha district shows a trend of continuous subsidence of the whole, but the land subsidence rate is highly polarization. The average settlement rate is 3.2 mm/a, while the center layer and the outermost layer are 2.6 mm/a and 26.8 mm/a, respectively; (2) The land subsidence shows spatial heterogeneity. The mainly distributed in the east and south, which Wanqingsha area and Longxue-Island in the south have the most serious land subsidence, with the maximum annual subsidence rate exceeding 60 mm/a (up to -68.9 mm/a). And the land subsidence rebound phenomenon also is found from June to September, 2015. (3) Cross-validation was conducted with different Sentinel-1 polarization modes. The average values of VV polarization and VH polarization monitoring results were 2.09 mm and 1.01 mm, respectively, and the root-mean-square errors are 1.12 mm and 2.65 mm, respectively. The results show that SBAS-InSAR technology is effective and reliable in extracting land subsidence information in the reclamation area and provides scientific basis for better monitoring land subsidence in coastal areas.

**Key words:** Reclamation; Sentinel-1; SBAS-InSAR; Land subsidence; Spatial and temporal variations