DOI:10.13203/j.whugis20190025　　文章编号:1671-8860(2019)07-1099-08

佛山地铁沿线时序 InSAR 形变时空特征分析

刘　琦[1]　岳国森[2]　丁孝兵[2]　杨　坤[2]　冯光财[1]　熊志强[1]

1　中南大学地球科学与信息物理学院,湖南 长沙,410083
2　佛山市测绘地理信息研究院,广东 佛山,538000

摘　要:佛山作为中国珠三角地区经济和城市化高速发展的城市,由于其脆弱的地质水文条件,长期遭受地面沉降灾害的影响。同时,该区域地铁作为缓解城市交通压力的重要工具,其施工和运行所导致的地面沉降也影响了人们的生命财产安全。但目前针对佛山地区相关的系统研究不多,对地铁沿线的沉降规律认识不足。利用 Sentinel-1 数据监测了 2015-06 至 2018-09 间佛山市的形变信息,结果表明,佛山市地表形变呈零星分布,未出现大范围的沉降漏斗,形变速率为－20～5 mm/a,局部区域的沉降速率超过－30 mm/a。地面沉降主要与不稳定的地质结构、地下水抽取和局部区域工程施工有关。基于获得的形变结果,对佛山市地铁沿线的形变情况进行了研究,并对 2018 年佛山市地铁坍塌事故路段的沉降情况进行了详细分析,阐述了在空间分布上地铁沿线沉降差异的成因,并在时间上对地铁沿线的形变进行了模型参数反演。研究工作为今后当地政府开展地表形变普查、沉降灾害预警提供了参考,并为地铁正常运行与维护的安全监测提供了理论依据。

关键词:佛山;PS-InSAR;形变监测;地铁沉降

中图分类号:P237　　**文献标志码**:A

佛山是中国珠三角城市群的重要交通枢纽和工业制造基地。城市各区域间的合作往来日益密切,交通线路快速发展,地铁建设已成为推动城市发展的重要手段。然而,珠三角地区脆弱的水文地质条件给各种大型基建工程施工带来了重大挑战和潜在的地质灾害。2018-02-07,佛山市地铁 2 号线湖涌站至绿岛湖站盾构区间的隧道及路面发生坍塌,造成 11 人死亡、1 人失踪、8 人受伤,直接经济损失约 5 323.8 万元[1]。佛山市位于珠三角西南部,几乎整个市区均位于软土和潜伏溶岩区[2],特殊的地质条件、地面荷载以及人类活动的影响导致地面沉降、塌陷等相关灾害频繁发生[3],严重危及当地群众的生命财产安全。

合成孔径雷达干涉测量(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)技术具有观测范围大、精度高(毫米级)和空间分辨率高的优势,逐渐成为城市地表沉降监测和地质灾害普查的有效手段[4-5]。针对该研究区域,Alex 等[1]、王华等[6]分别通过 ENVISAT 和 COSMO-SkyMed 数据得到了不同时间广州和佛山部分区域的形变监测结果;Wang 等[7]利用 ALOS-1/PALSAR 和 ENVISAT 数据分析了 2006－2011 年间广州和佛山的形变特征,并反演了地铁隧道开挖后的形变模型;在其他区域也有类似的研究,秦晓琼等[8]、王茹等[9]使用 TerraSAR 影像分别监测了上海市 2013－2014 年和 2016－2017 年的地表沉降信息,分析了道路网的沉降特征和成因。段光耀等[10]利用 36 景 ASAR 影像获取了京津城际铁路沿线的地面沉降场,并分析了其演化特征。前期的研究成果已经证明了 InSAR 技术监测城市形变的优势,但目前还没有针对佛山区域最新沉降结果的系统研究,缺少相应的地质灾害普查结果,现有研究成果的时间距今相隔较远,不能反映近年来的沉降情况。另外,地铁施工过程中,地表土壤固结会引起地铁沿线部分区域遭受一定程度的地表沉降,这是很合理的过程。但地铁沿线沉降在多长时间之后能够稳定,满足何种沉降模型,当前尚不清楚。因此,对地铁沿线的沉降周期及形变规律需要进行更加深入的研究。

本文以佛山市作为研究区,利用 Sentinel-1 数据得到了 2015-06 至 2018-09 期间 85 个时间点的佛山市形变结果,并对佛山市重点沉降区

收稿日期:2019-02-20
项目资助:中南大学中央高校基本科研业务费专项资金(2017zzts774);国家自然科学基金(41574005)。
第一作者:刘琦,硕士生,主要研究方向为 InSAR 数据处理与分析。165012110@csu.edu.cn
通讯作者:冯光财,博士,副教授。fredgps@csu.edu.cn

域的沉降成因进行了系统分析。针对2018年佛山地铁的坍塌灾害事故，利用PS-InSAR（persistent scatterer InSAR）技术对佛山市所有地铁沿线的沉降进行了观测，探究了地铁沿线的沉降规律，为城区的沉降灾害普查提供了指导意见。

1 研究区域

佛山市位于广东省中南部，地处珠江三角洲西北部腹地，研究区域如图1所示，范围为东经112°22′～113°23′，北纬22°38′～23°34′。地形相对平坦，大部分区域的海拔高度小于20 m。佛山地区多为第四系松散沉积物覆盖，厚度在20 m左右，软土分布广泛，具有含水量高、压缩性高、承载力低及抗剪强度低等不良工程地质特点。佛山属于亚热带季风性湿润气候，夏季高温高湿，冬季凉爽干燥；年平均气温约为22 ℃～23 ℃，年降雨量约为1 700 mm。在季风期间，城市经常发生洪涝灾害[11]。

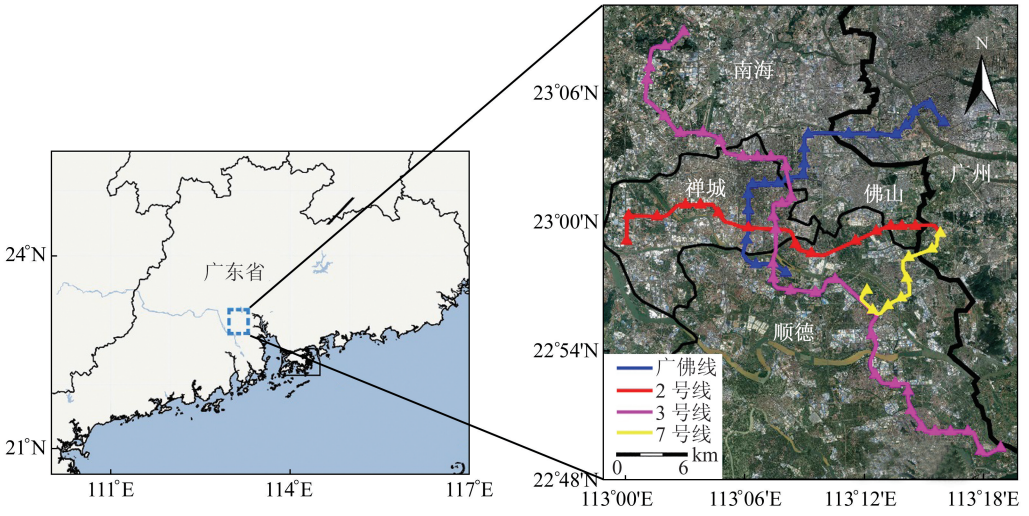


图1 佛山市位置信息及地铁覆盖信息

Fig. 1 Location Information and Metro Coverage Information in Foshan

截至2019年，佛山市已开通运营广佛线，另外还有多条线路（如2、3号线以及7号线西延段等）处于施工建设阶段，预计2020年开始陆续运营。目前佛山地铁总长约为150 km，共78座车站（详细信息见表1）。佛山市地铁网络仍在积极扩展中，除了上述地铁外，另外还有4条地铁线路在规划建设中，总里程将达到240 km以上。

表1 佛山市地铁建设时间表

Tab. 1 Foshan Subway Construction Schedule

线路		年份															站点数目	长度/km
		2002	…	2006	…	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		
2号线																	17	32.4
3号线																	36	66.5
7号线																	7	13.3
广佛线	主线路																14	32.2
	延伸线																4	6.6

注：绿色表示地铁线路的建设期（正在修建的地铁完工时间暂定2020年），蓝线表示本文的SAR数据覆盖时间

2 改进的PS-InSAR方法

PS-InSAR是通过长时间稳定的反射点（即PS点，如人工建筑、裸露的岩石等）获取地表形变信息的一种技术，能够得到比较可靠的地物形变细节信息[12-13]。传统的PS-InSAR方法在非建筑等区域能够选取的点目标较少，同时本文研究区内植被覆盖范围广，永久散射点目标稀疏，无法选取密度足够的PS点来测量地表形变。为了更好地监测佛山城区和地铁的地表形变，提高PS-InSAR技术监测大量级地表形变的能力，本文提出一种改进的PS-InSAR方法。在传统的PS选点环节增加了选取的点目标数目。除了传统的PS选点外，将单视复数影像作多视处理后生成差分干涉对，通过差分干涉图的相干性选择PS点，并且与传统PS-InSAR选取的PS点合并后作后续处理。数据处理流程图如图2所示。

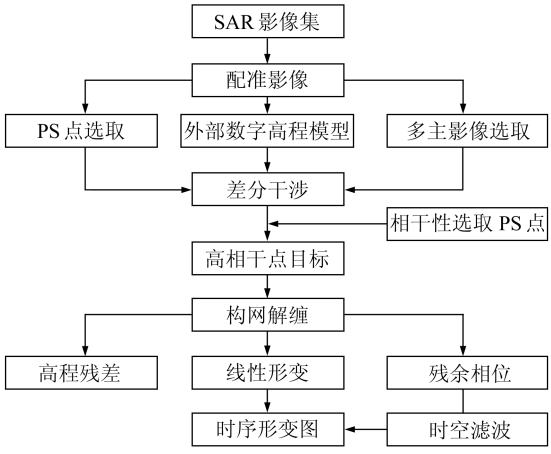


图 2　改进的 PS-InSAR 技术流程图

Fig. 2　Flowchart of Improved PS-InSAR Technology

本文将 2015-06-15 至 2018-09-15 期间采集的 85 景 Sentinel-1 图像进行二轨差分干涉处理生成差分干涉图。影像配准的精度优于 0.1 个像素，选取美国宇航局提供的 30 m 分辨率的 SRTM（shuttle radar topography mission）数字高程模型来模拟地形相位。在常规方法选取高质量的 PS 点后，将合成孔径雷达（synthetic aperture radar，SAR）影像按距离向和方位向 5×1 作多视处理[14]。通过任意 1 景影像至少与时间上相连两景影像的匹配策略生成干涉对，计算差分干涉对的时间相干性，相干性大于给定阈值（0.38）的像素作为 PS 点。将差分干涉图得到的 PS 点通过行列号转换到多视前的原始 SAR 图像上（多视数为 5×1 时，差分干涉图 1 个像素对应原始 SAR 图像的 5 个像素，转换到原始 SAR 图像时选择对应的第 1 个像素），并将这种方法获取的 PS 点与常规方法选取的 PS 点一起构网处理。由于多视处理后的信噪比更高，两种方法获取的点目标若出现重合，以差分干涉图获取的 PS 点为准。接着将这些 PS 点按照传统 PS-InSAR 方法进行处理，该方法所获取的 PS 点数目更多，较好地提高了点目标密度。

两个相邻的点目标 i、j 所对应的差分相位 $\delta\varphi_{i,j}$ 可表示为：

$$\delta\varphi_{i,j}=\frac{4\pi}{\lambda}t\Delta v_{i,j}+\frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_{\perp}\Delta z_{i,j}}{R\sin\theta}+\Delta\varphi_{i,j,\mathrm{res}} \quad (1)$$

式中，$\Delta v_{i,j}$ 为两点目标间的线性形变速率；$\Delta z_{i,j}$ 为两点目标间的高程残余；t 为时间间隔；R、$B_{\perp}$、θ、λ 为卫星的轨道参数；$\Delta\varphi_{i,j,\mathrm{res}}$ 为两点目标间的残余相位之差，主要包括两点间的大气相位之差、噪声相位之差和非线性形变相位之差。本文采用解空间搜索法求解模型参数[15]，并根据大气相位和噪声的时空特性，利用时空滤波分离出非线性形变相位。通过点目标对应的线性形变和非线性形变相加来获取最终的形变速率和时间形变序列[16]。

3　佛山市形变监测结果与分析

3.1　佛山市 InSAR 形变结果及分析

通过上述方法得到的佛山市平均形变速率如图 3 所示，形变量级为－20～5 mm/a，局部区域的沉降速率大于 30 mm/a。佛山市沉降区域主要分布在禅城区的西部区域和顺德区的北部区域（如图 3 中的红色虚线所示），而城区基本处于稳定状态，没有大面积的沉降漏斗，其他地方零星分布着一些小范围的沉降区。考虑到缺少外部的实测资料验证，本文利用内符合精度验证监测结果的可靠性。结果显示，不同时间 SAR 影像测量值得到的形变速率标准差大部分都在 1 mm/a 以内，表明监测结果可靠。

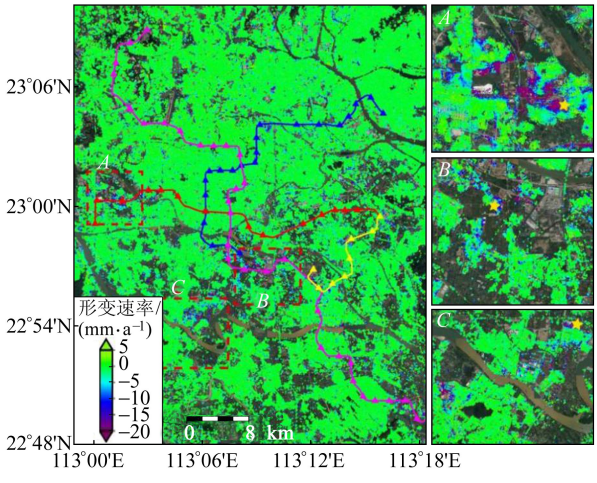
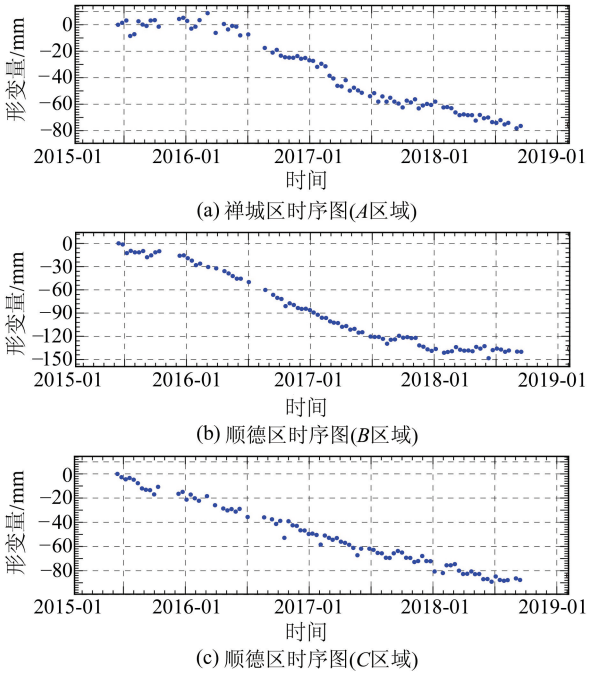


图 3　佛山市形变结果及重点沉降区域

Fig. 3　Deformation Results and Key Subsidence Area in Foshan

图 3 中的 A 区域为禅城区西部区域的沉降图，从图 3 中可以看出，沉降区域的沉降速率大多都已超过－20 mm/a，主要包括季华西路、绿岛湖等区域。图 4(a)为该地区的时序形变图（时序点为图 3 中的黄色星形所在区域），由图 4(a)可知，2015－2018 年间，该区域累计形变量高达 8 cm，并且从 2016-06 后开始下沉，这可能与当地地铁隧道施工有关。由于该地区是湿地开垦后形成的区域，不稳定的软土层可能是导致沉降的主要因素。图 3 中的 B、C 区域是佛山市最大的沉降区域，主要发生在顺德区的北边，沉降区域分布在农田区域及农田区域与城市交接处。图 3 中的 B

区域包括上陈、荷村、莘田坊、小涌村等区域，形变速率为－40～5 mm/a，而严重区域的累计形变量达到了15 cm(见图4(b))。图3中的C区域包括东元、槎涌、黎湖、龙江镇等区域，累计形变量达9 cm，并且呈线性沉降趋势(见图4(c))。考虑到图3中的B、C所在区域位于农业灌溉和鱼虾养殖区，推测这些区域的地面沉降是由于当地抽取地下水导致土层固结引起的。



(a) 禅城区时序图(A区域)

(b) 顺德区时序图(B区域)

(c) 顺德区时序图(C区域)

图4 佛山市重点沉降区域时序形变图

Fig. 4 Time Series Deformation Diagrams of the Key Subsidence Areas of Foshan

3.2 佛山地铁沿线地面沉降分析

地铁是城市之间资源、物流、人口相互交流的重要方式，保障地铁的正常施工和运营是推进城市化顺利发展的重要措施。然而在地铁施工和运营过程中导致的地面沉降给其周边建筑物和人们的安全带来了巨大威胁。为了研究与地铁相关的沉降，避免和预防由此引起的灾害，根据收集到的佛山地铁路线分布图，选择地铁沿线600 m缓冲区内的PS点目标进行分析，并分别对每条地铁线路的沉降区域作介绍。

3.2.1 广佛线沿线地面沉降

广佛线可以划分为2010年完工的主路线(燕岗站到魁奇路站)和2012－2016年修建的延伸路段(魁奇路站到新城东站)。为了更加全面地分析广佛线沿线的形变特征，本文对不同时期地铁沿线的形变进行了监测。图5是Sentinel-1数据监测的2015－2018年期间广佛线沿线的形变，黄色矩形所示为PALSAR数据获取的2006－2011年广佛线沿线的形变。通过不同时间段的对比可以看到，2006－2011年间，广佛线沿线的沉降分布在魁奇路站和祖庙站之间以及金融高新区站和龙溪站之间，沉降速率超过8 mm/a。2015－2018年期间，魁奇路站到祖庙站地铁沿线的沉降已保持基本稳定，除了金融高新区等站的局部区域还在沉降以外。而金融高新区等站的沉降更可能是由建筑施工导致的，受地铁的影响较小。目前，广佛线沿线的沉降区域集中在世纪莲站和新城东站之间，推测是由于该区间建成通车时间不长、地表还未固结稳定导致的，还需要对该路段的沉降进行持续监测。

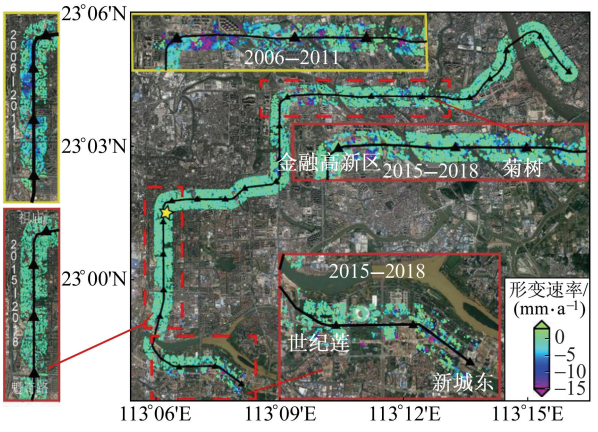


图5 2015－2018年及2006－2011年广佛线沿线沉降图

Fig. 5 Deformation Map Along the Guangfo Line from 2015 to 2018 and 2006 to 2011

3.2.2 地铁2号线沿线地面沉降

除了广佛线外，佛山市的其他地铁都是在2014年以后开始修建的，本文只对这些地铁沿线2015－2018年的形变特征进行分析。图6是佛山2号线沿线的沉降区域，主要分布在绿岛湖区域以及登洲站到仙涌站这段区域(图6中红色矩形区域)。登洲站到仙涌站的沉降相对较小，沉降区域的形变速率在－10 mm/a左右。佛山2号线沉降最严重的区域发生在绿岛湖附近，图7为该路段的沉降速率图，2018年的佛山地铁坍塌事故发生在这段路线，并造成了巨大的人员伤亡和经济损失。坍塌事故的直接原因是盾构机穿越该地段时发生透水涌砂涌泥导致了坍塌，本文对该路段事故前后时间内的形变情况进行了重点分析。从图7中可以看出，从绿岛湖站到湖涌站的区间和桥头有显著沿地铁线分布的沉降区域(白色虚线矩形框所示区域)，最大沉降速率大于30 mm/a，而中间立交桥区域因为受地铁挖掘的影响小，形变稳定。红色星形所在地为坍塌事故地点，该地区的形变速率大约为－25 mm/a。从时

序形变图(所选时序点在红色星形区域附近)可以看出，2016-08 后，该区域快速沉降，到 2018 年后，沉降达到最大并趋于稳定。通过调研了解到，该区域从 2015-11 至今仍处于施工阶段，在 2018-02 事故发生后，地铁盾构停止了施工。从时序图上可以看到该区域地铁沿线所对应的沉降趋势，并监测到在事故之后地面有微小的抬升，可能与地下水位的回升有关。通过分析推测，地铁隧道挖掘可能是引起该路段地面沉降的重要因素[7]。

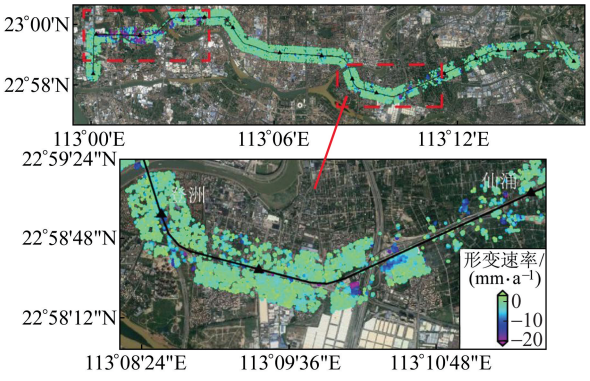
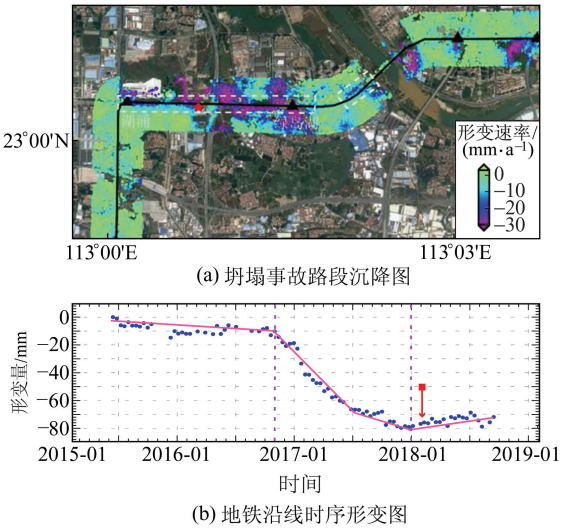


图 6　地铁 2 号线沿线形变图

Fig. 6　Deformation Map Along Metro Line 2



(a) 坍塌事故路段沉降图

(b) 地铁沿线时序形变图

说明：白色虚线矩形表示地铁引起的线性沉降区域，红色星形为坍塌事故所在地，黑三角为时序点所在地

图 7　地铁 2 号线部分路段沉降图与时序图

Fig. 7　Subsidence Map and Time Series Map of Partial Section of Metro Line 2

3.2.3　地铁 3 号线沿线地面沉降

图 8 为地铁 3 号线沿线的形变图，整体来说，地铁沿线有 3 段沉降区域，分别是东平站到北滘站、北滘新城站到北滘工业园站以及东乐站到顺德学院路站(图 8 中红色矩形区域)。东平站到北滘站位于顺德北边大的沉降漏斗区，地铁站点处地表沉降明显，沉降速率达 20 mm/a。由于该区域失相关严重，获取的 PS 点相对较少。通过了解可知，该区域主要是农田分布区，整体性的沉降量都很大。地铁等重要交通设施受到该沉降区的影响发生了沉降，因此针对该类型的地铁路段可提前利用 InSAR 所监测出的沉降结果做好规划，避免软土区域对交通线路带来的重大危害。北滘新城站到北滘工业园站地铁沿线的沉降受地铁修建的影响相对比较大，局部建筑物的沉降速率超过了 15 mm/a，需要重点预防该区域由地铁施工导致的沉降灾害。东乐站到顺德学院路站与东平站到北滘站的沉降特征类似，猜测同样是由不稳定的软土地质所导致的，沉降速率为 10～20 mm/a。

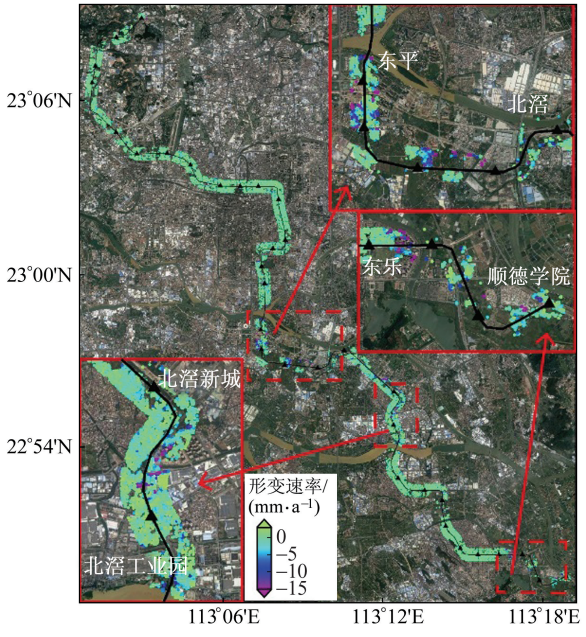


图 8　地铁 3 号线沿线形变图

Fig. 8　Deformation Map Along Metro Line 3

3.2.4　地铁 7 号线沿线地面沉降

图 9 为地铁 7 号线沿线的沉降图，沉降主要发生在南涌站到美的大道这段区间以及陈村站附近。地铁 3 号线与 7 号线在这一段重叠，目前这两条地铁还在施工建设中，由于地铁穿过城区，隧道挖掘对周围建筑物安全产生的危害更大。从图 9 中能看出，地铁沿线的建筑物出现不同程度的下沉，严重的区域已经超过 20 mm/a。该区域也成为沉降灾害危险的重点关注区域，Alex 等[1]的研究也提及到这一点。

3.3　地铁沉降模型

地铁施工后沉降的原因主要有土壤固结造成的下沉、交通荷载等[17]。获取地铁沉降规律并进行精确预测，对施工沉降监测和后期的安全运营

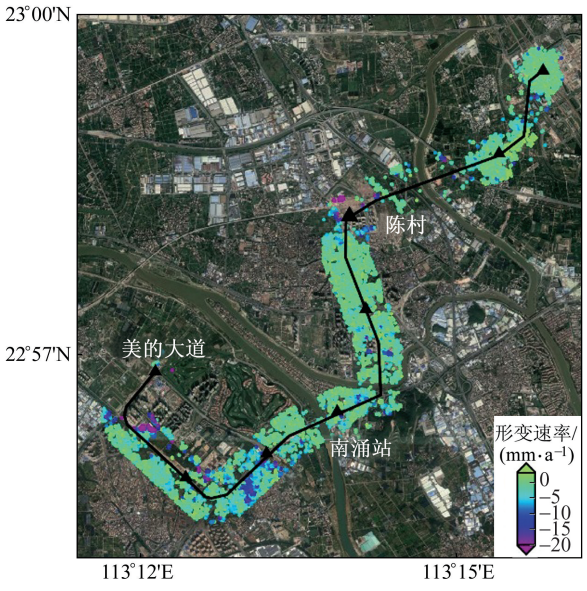


图9 地铁7号线沿线形变图

Fig. 9 Deformation Map Along Metro Line 7

具有重要意义。因此,有必要采用一套有效的沉降模型反演地铁的沉降周期,为控制地铁施工后的沉降提供一定的理论依据,这对地铁建设具有十分重要的指导意义。

为了反映地铁开挖引起的地表沉降动态变化,本文结合ALOS-1/PALSAR所得到的广佛线2008—2011年的时序形变和本文获得的形变结果(由于研究的地铁路段是从2008年开始修建的,因此本文模型的时间选择从2008年算起),利用logistic时间模型拟合地铁开挖后的沉降模型,将求解出的模型反演出地铁后期的沉降变化规律,再利用2015—2018年Sentinel-1所获取的相同位置后期的时序形变与logistic模型反演的结果进行对比验证。logistic时间模型可以表示为[7,18]:

$$S_t = \frac{b}{1 + a\,\mathrm{e}^{-ct}} \tag{2}$$

式中,S_t表示t时刻的沉降值;参数a和c表示模型的两个比例因子;b表示沉降区域稳定时最大的沉降值。图10为本文从地铁开挖沉降到后期运营的全周期沉降形变图(所选参考点为图5黄色星形所在地)以及通过logistic模型反演得到的地铁沉降参数。结论表明,该区域的最长持续沉降时间大约为3~5 a,即到2015年左右,该地铁段的地表沉降将会趋于稳定。Sentinel-1数据重返周期短,能探测到的地铁线沿线的沉降变化细节更多。本文从2015年开始利用Sentinel-1数据对该区域监测得到的结果表明该区域沉降已经稳定,形变量在±4 mm范围内,并呈现周期性的波动,与logistic模型所反演的结论一致。

利用InSAR技术高空间分辨率和长时间序列的巨大优势,有助于监测地铁施工和运行期间的潜在地质灾害,评估可能发生的与沉降相关的事故风险。logistic模型很好地符合地铁的全周期沉降特征,为今后开展InSAR技术反演地铁相关模型的工作提供了参考。

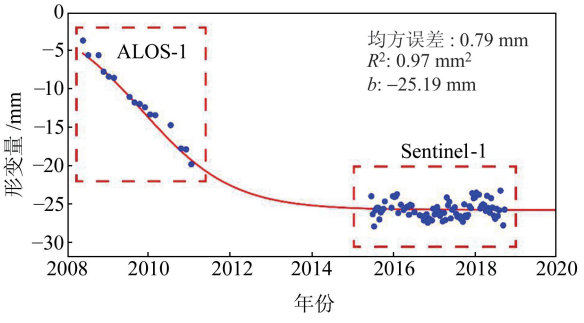


图10 logistic时间模型拟合地铁沿线的地表沉降动态变化结果

Fig. 10 Dynamic Change of Subsidence Along Subway Using Logistic Time Model Fitting

4 结 语

本文应用2015-06至2018-09的85景Sentinel-1影像获取了佛山市地表形变,利用改进的PS-InSAR技术研究了佛山市的重点沉降区域和沉降成因,并对佛山地铁沿线沉降的空间分布进行了探讨,对沉降的时间变化特征作了重点分析。形变分析结果表明:佛山市形变速率为−20~5 mm/a,沉降区域主要分布在禅城区的西部区域和顺德区的北部区域,局部区域的沉降速率超过−30 mm/a,大部分城区处于稳定。沉降与软土地质结构有关,并且受到局部地区工程施工以及灌溉和鱼虾养殖抽水的影响。通过对佛山地铁沿线的沉降分析,地铁沿线的沉降也集中在佛山市的重点沉降区,且不稳定的地质条件是引起相关区域沉降的主要原因。在时间上,通过分析广佛线2008—2011年以及2015—2018年的时序形变,验证了logistic时间模型符合地铁沿线的沉降规律,且地铁沿线在开挖后的3~5 a内沉降趋于稳定。

本文证明了InSAR技术监测城市地铁沿线形变的优势,为此地铁沿线沉降变化的研究提供了参考。而由于水文工程地质、地铁埋深、地面建构筑物载荷等条件的不同,地铁开挖导致的变形存在差异,研究不同情况下地铁开挖导致的地

面变形规律和预测方法,为评价不同条件下地铁开挖的安全性提供技术支撑,将是下一步的研究方向。

参 考 文 献

[1] Alex N, Wang H, Dai Y W, et al. InSAR Reveals Land Deformation at Guangzhou and Foshan, China Between 2011 and 2017 with COSMO-SkyMed Data[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6):813-836

[2] Dong Haogang, Huang Changsheng, Chen Wenzhu, et al. Analysis of Environmental Geological Control Factors and Problems in the Pearl River Delta[J]. *Chinese Geology*, 2012, 39(2): 539-549(董好刚,黄长生,陈雯珠,等.珠江三角洲环境地质控制性因素及问题分析[J]. 中国地质, 2012, 39(2):539-549)

[3] Yi Shunmin, Liang Chisheng. Geological Hazards and Prevention in Guangdong Province[M]. Beijing: Science Press, 2010(易顺民, 梁池生. 广东省地质灾害及防治[M]. 北京:科学出版社, 2010)

[4] Feng G C, Li Z W, Xu B, et al. Coseismic Deformation of the 2015 Mw6.4 Pishan, China, Earthquake Estimated from Sentinel-1A and ALOS2 Data[J]. *Seismological Research Letters*, 2016, 87(4): 800-806

[5] Du Y N, Feng G C, Peng X, et al. Subsidence Evolution of the Leizhou Peninsula, China, Based on InSAR Observation from 1992 to 2010[J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(5):466-484

[6] Wang Hua, Yu Yongping, Jiang Lilong. Using Synthetic Aperture Radar Interferometry to Monitor Land Subsidence in Foshan, Guangzhou[J]. *Surveying and Mapping Science*, 2014, 39(7): 67-71(王华, 喻永平, 蒋利龙. 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, 2014, 39(7): 67-71)

[7] Wang H Q, Feng G C, Xu B, et al. Deriving Spatio-Temporal Development of Ground Subsidence Due to Subway Construction and Operation in Delta Regions with PS-InSAR Data: A Case Study in Guangzhou, China[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(10):1 004-1 016

[8] Qin Xiaoqiong, Yang Mengshi, Liao Mingsheng, et al. Exploring Temporal-Spatial Characteristics of Shanghai Road Networks Settlement with Multi-temporal PSInSAR Technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 170-177(秦晓琼, 杨梦诗, 廖明生,等. 应用 PSInSAR 技术分析上海道路网沉降时空特性[J]. 武汉大学学报・信息科学版, 2017, 42(2): 170-177)

[9] Wang Ru, Yang Tianliang, Yang Mengshi, et al. Attribution Analysis on Deformation Feature of the Shanghai Elevated Highway by Persistent Scatterer SAR Interferometry[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2 050-2 057(王茹, 杨天亮, 杨梦诗,等. PS-InSAR 技术对上海高架路的沉降监测与归因分析[J]. 武汉大学学报・信息科学版, 2018, 43(12): 2 050-2 057)

[10] Duan Guangyao, Liu Huanhuan, Gong Huili, et al. Evolution Characteristics of Uneven Land Subsidence Along Beijing-Tianjin Inter-City Railway[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(12):1 847-1 853(段光耀, 刘欢欢, 宫辉力,等. 京津城际铁路沿线不均匀地面沉降演化特征[J]. 武汉大学学报・信息科学版,2017, 42(12): 1 847-1 853)

[11] Yao Yantao, Zhan Wenhuan, Liu Zaifeng, et al. Neotectonics in the Pearl River Delta and Its Relationship with Delta Evolution[J]. *South China Earthquake Research*, 2008, 28(1): 29-40(姚衍桃,詹文欢,刘再峰,等. 珠江三角洲的新构造运动及其与三角洲演化的关系[J]. 华南地震, 2008, 28(1):29-40)

[12] Xu B, Feng G C, Li Z W, et al. Coastal Subsidence Monitoring Associated with Land Reclamation Using the Point Target Based SBAS-InSAR Method: A Case Study of Shenzhen, China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(8):652-670

[13] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. *Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-20

[14] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Improved Filtering Parameter Determination for the Goldstein Radar Interferogram Filter[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2008, 63(6):621-634

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

[16] Zhang Lu, Liao Mingsheng, Dong Jie, et al. Early Detection of Landslide Hazards in Mountainous Areas of West China Using Time Series SAR Interferometry—A Case Study of Danba, Sichuan[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(12): 2 039-2 049(张路, 廖明生, 董杰,等. 基于时间序列 InSAR 分析的西部山区滑坡灾害隐患早期识别——以四川丹巴为例[J]. 武汉大学学报・信息科学版, 2018, 43(12): 2 039-2 049)

[17] Wu Bo. Research on Ground Settlement of Urban Subway Tunnel Construction Under Complicated Conditions[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003(吴波. 复杂条件下城市地铁隧道施工地表沉降研究[D]. 成都:西南交通大学,2003)

[18] Yang Z F, Li Z W, Zhu J J, et al. Deriving Dynamic Subsidence of Coal Mining Areas Using InSAR and Logistic Model[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 125-142

Temporal and Spatial Characteristics Analysis of Deformation Along Foshan Subway Using Time Series InSAR

LIU Qi[1] *YUE Guosen*[2] *DING Xiaobing*[2] *YANG Kun*[2] *FENG Guangcai*[1] *XIONG Zhiqiang*[1]

1 School of Geosciences and Info-physics, Central South University, Changsha 410083, China

2 Foshan Surveying Mapping and Geoinformation Research Institute, Foshan 538000, China

Abstract: As a city with rapid economic development and urbanization in China's Pearl River Delta region, Foshan has been affected by land subsidence disasters for a long time due to its fragile geological and hydrological conditions. At the same time, the subway in the region is an important tool to alleviate the traffic pressure of the city. The ground subsidence caused by its construction and operation affects the safety of people's lives and property. However, there are not many systematic studies on this aspect in Foshan, and there is insufficient understanding of the settlement law along the subway. This paper uses fixed-point data to monitor the deformation information of Foshan from June 2015 to September 2018. The results show that the surface deformation of Foshan is sporadic, and there is no large-scale settlement funnel. The deformation rate is between 5 mm/a and −20 mm/a, and the settlement rate of local area is over −30 mm/a. Land subsidence is mainly related to unstable geological structures, groundwater extraction and local area construction. Based on the obtained deformation results, this paper also studies the deformation along the subway in Foshan city, and analyzes the settlement of the collapse section of Foshan subway in 2018, and expounds the cause of the difference in the space along the subway. In the time, the model parameters are inversed in the deformation along the subway. This paper provides a reference for the local government to carry out the survey of surface deformation and the early warning of subsidence disasters. And it provides a theoretical basis for the safety monitoring of the normal operation and maintenance of the subway.

Key words: Foshan; PS-InSAR; deformation monitoring; subway settlement

First author: LIU Qi, postgraduate, specializes in InSAR data processing and analysis. E-mail: 165012110@csu.edu.cn

Corresponding author: FENG Guangcai, PhD, associate professor. E-mail: fredgps@csu.edu.cn

Foundation support: The Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University, No. 2017zzts774; the National Natural Science Foundation of China, No. 41574005.