

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.02.017

基于 SBAS-InSAR 技术的青岛地铁 1 号线 西海岸新区段地表沉降监测与分析

李红梅¹, 郭在洁², 刘庆施¹, 党彦¹

1. 青岛滨海学院 建筑工程学院, 山东 青岛 266555; 2. 山东科技大学 测绘科学与工程学院, 山东 青岛 266590

摘要: 基于小基线集技术(SBAS-InSAR)对青岛市地铁1号线西海岸新区段的29景 Sentinel-1A 影像数据进行处理, 获取了2018年5月至2020年5月该区段沿线的地面沉降速率及累计沉降量等形变信息, 监测结果表明主要沉降区域位于安子站至安子站北侧及附近, 最大沉降速率达到约 -49 mm/a, 最大累积沉降量约 -103 mm, 其他区域的沉降速率为 $-5\sim 0$ mm/a; 在 $0\sim 1\ 000$ m段以及安子站至安子站东段, 沉降速波动较大. 结合 Logistic 函数模型预测安子站至安子站东段的路段地面沉降, 发现其2020年后地面沉降逐渐趋于稳定. 沉降监测信息不仅能够为西海岸新区在地铁建设施工及运行过程中制定地表安全预案及合理开发地下空间提供数据决策依据, 而且有利于完善相关理论.

关键词: 青岛地铁1号线西海岸新区段; 沉降监测; Sentinel-1A; 基于小基线集技术

中图分类号: P642.26 文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)02-0146-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Monitoring of Land Subsidence of Metro Line 1 in the New District of West Coast of Qingdao Based on SBAS-InSAR

LI Hongmei¹, GUO Zaijie², LIU Qingshi¹, DANG Yan¹

1. College of Architectural Engineering of Qingdao Binhai University, Qingdao Shandong 266555, China;

2. College of Geomatics of Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266590, China

Abstract: Based on SBAS-InSAR technology, the 29 sentinel-1 aimage data of metro line 1 in the new district of west coast of Qingdao was processed, and the information of land subsidence along the section from May 2018 to May 2020 including deformation rate and accumulative land subsidence was obtained. The monitoring results showed that the main subsidence area was located in Anzi station to the north of Anzi east station and nearby region. The maximum ground subsidence velocity reached to about -49 mm/a, and the maximum accumulated settlement was about -103 mm. The ground subsidence velocity in other areas was $-5\sim 0$ mm/a. The ground subsidence velocity fluctuated greatly in the $0\sim 1\ 000$ m section and the section from Anzi station to Anzi east station. Combined with logistic function model to predict the land subsidence between Anzi east station and Anzi station indicated that the land subsidence will gradually become stable after 2020. The settlement monitoring information can not only provide the data of decision-

收稿日期: 2020-10-28

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目 (J18KB091).

作者简介: 李红梅, 硕士, 副教授, 主要从事地表变形监测的研究.

making basis for making the surface safety plan and reasonable development of underground space in the construction and operation process of nearsubway lines in the new district of West Coast of Qinddao, but also help to improve the related theory.

Key words: Qingdao metro line 1 in the west coast of Qingdao new district; land subsidence; Sentinel-1A; SBAS-InSAR

修建地铁是缓解城市地面交通压力、提高市民出行质量、彰显城市文化及魅力的重要举措。地铁大部分位于地面以下,由于施工的原因会对周围土体产生不同程度的影响,可能造成地面塌陷、建筑或构筑物出现不同程度沉降变形,严重的甚至影响地铁施工安全以及地面建筑物或构筑物的使用安全,因此施工中必须对地铁沿线地表沉降进行实时监测。

目前,地铁沿线地表变形监测的主要手段为水准测量和地形测量,但是在大规模的测区中,传统测量方法受到很大限制。合成孔径干涉雷达测量作为一种新型测量技术,因其精度高、测绘速度快、覆盖范围广等优点在矿山测量、滑坡监测、地表形变测量等方面发挥着至关重要的作用^[1-4]。国内外许多学者利用 InSAR 技术对地表形变展开监测和研究,如 Chen W F 等^[5]利用 28 景 Radarsat-2 数据,基于 PS-InSAR 技术获取了北京地铁 6 号线 2010 年 4 月至 2013 年 9 月期间部分路段的沉降信息,并结合熵值法分析沉降分布的稳定性;范雪婷等^[6]利用 30 景 COSMO-Sky Med 数据获取了南京市的地表沉降信息,并分析了南京市地铁网络的形变特征;谢文斌等^[7]利用 17 景 Sentinel-1 数据获取抚顺地区的沉降信息,并结合信息熵对沉降区域的稳定状态进行了评价;刘琦等^[8]利用 85 景 Sentinel-1 数据,获取了佛山市 2015—2018 年的地表形变信息,并结合 Logistic 函数模型预测沉降变化情况。总体来讲,InSAR 技术监测区域多以块状区域监测研究为主,线状区域监测相对较少。

青岛地铁 1 号线是国内最深且最长的地铁海底隧道,沿线共穿越 4 组 14 条断裂带。受地质条件及施工影响,2019 年 6 月至 7 月发生 2 次塌方,造成一定的人员伤亡及财产损失,其他在建地铁线路沿线也屡有沉降现象发生。青岛地铁工程目前多采用传统方法进行监测,利用 InSAR 技术对青岛地铁沿线的形变信息监测相对较少。随着青岛地铁工程的密集建设与发展,对地铁工程沿线地表进行快速、广泛、高效地形变监测极为重要。

本文利用青岛地铁 1 号线西海岸新区段的 29 景 Sentinel-1A 影像数据,采用小基线集技术(SBAS-InSAR)进行处理,获取了 2018 年 5 月至 2020 年 5 月青岛地铁 1 号线西海岸新区路段的沉降信息,对沉降重点区域进行了分析。

1 研究区概况和数据来源

1.1 研究区概况

青岛市轨道交通远景年线网共规划 16 条线路,目前已经通车的有 2 号线、3 号线、11 号线、13 号线,在建的有 1 号线、4 号线、6 号线和 8 号线,未来 5 年还将有 5 号线、7 号线、9 号线、14 号线、15 号线相继开工。青岛地铁 1 号线于 2016 年 3 月全线开工,是一条跨越胶州湾的海底地铁线路,全长约 60.14 km,连接西海岸新区和市南区、市北区、李沧区、城阳区 5 个辖区,总体呈南北走向,划分为南段、中段和北段。西海岸新区处于北纬 $35^{\circ}35' - 36^{\circ}08'$ 、东经 $119^{\circ}30' - 120^{\circ}11'$,该区位于胶州湾西岸,断裂构造密度相对较低,但北部和东南部断裂分布较密集,北东向断裂主要分布在新区东南部薛家岛—灵山卫一带,多为胶东半岛上若干规模较大的断裂(如郭城—即墨断裂、王哥庄断裂、沧口断裂等)在胶州湾西岸的延伸,均具有正断层性质,并伴有一定左旋走滑特征,对于地铁建设和运营产生了极大的威胁^[9-10]。本文选择青岛地铁 1 号线西海岸新区段作为研究对象(图 1),该段隧道已于 2020 年 3 月全线贯通,尚未通车。

1.2 数据来源

Sentinel-1A 是欧洲空间局哥白尼计划于 2014 年发射的第一颗环境监测 C 波段卫星,空间分辨率为 $5\text{ m} \times 20\text{ m}$,Sentinel-1B 于 2016 年发射,单颗卫星的重访周期为 12 天,2 颗卫星协同工作,重访周期可缩短为 6 天;其数据具有覆盖范围广、重访周期短、多极化等特点^[7]。本文获取了 2018 年 5 月至 2020 年 5 月期间青岛市地铁 1 号线西海岸新区段的 29 景 Sentinel-1A 影像数据,详细卫星数据参数见表 1。此外本文还采用美国国家航空航天局 30 m 的 DEM 消除地形相位引起的偏差。

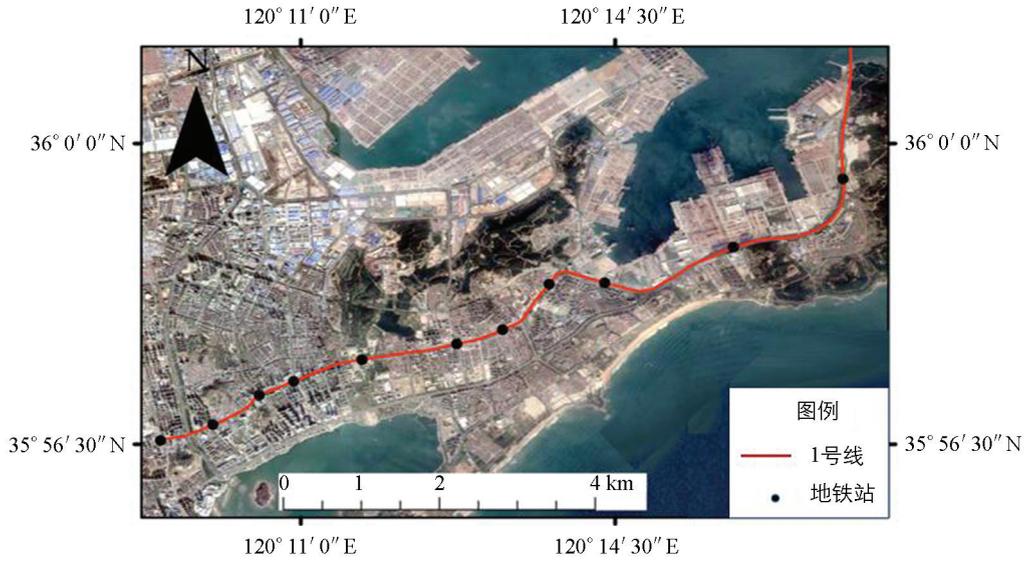


图 1 青岛地铁 1 号线西海岸新区段地理位置

表 1 Sentinel-1A 卫星数据参数信息

时 间	时间基线/d	空间基线/m	时 间	时间基线/d	空间基线/m
2018-05-16	0	-27.183 6	2019-07-10	420	-21.019 5
2018-06-09	24	-25.736 9	2019-08-03	444	-38.323 7
2018-07-03	48	20.162 3	2019-08-27	468	-36.124 5
2018-07-27	72	0	2019-09-20	492	-14.748 2
2018-08-20	96	-23.912 4	2019-10-14	516	22.595 3
2018-09-13	120	-12.364	2019-11-07	540	-47.911 3
2018-10-19	156	19.128 7	2019-12-01	564	55.823 4
2018-12-06	204	92.859	2019-12-25	588	109.766
2018-12-18	216	-16.300 3	2020-01-18	612	-49.804 1
2019-02-04	264	135.836	2020-02-11	636	86.813 9
2019-03-12	300	-54.778 7	2020-03-06	660	37.613 5
2019-04-05	324	94.594 3	2020-03-30	684	-47.284 1
2019-04-29	348	60.261 5	2020-04-23	708	42.785 7
2019-05-23	372	12.885 8	2020-05-17	732	-56.018 6
2019-06-16	396	61.785 4			

2 SBAS-InSAR 数据处理流程

2.1 小基线集技术(SBAS-InSAR)原理

小基线集技术(SBAS-InSAR)是 2002 年由 Berardino 等^[11]提出的一种新的 InSAR 时间序列分析方法,它克服了传统 D-InSAR 中存在的时间、空间失相干和大气效应的限制性因素,有效提高了时空的相关性以及去除大气延时相位的影响。通过对差分干涉图的多视处理降低相位噪声,提取高相干像元,应用奇异值分解法求得影像序列间地表相变速率的最小范数最小二乘解^[12-15]。其基本原理如下:

假设研究区内有 $N+1$ 幅雷达影像,获取的时间依次为 t_0, t_1, \dots, t_N , 选择其中一幅影像作为公共主影像,都能至少与其他一幅影像进行干涉,得到 M 幅干涉图,满足:

$$\frac{N+1}{2} \leq M \leq N \cdot \frac{N+1}{2} \quad (1)$$

假设在 t_A 和 t_B 时刻获得的 2 景 SAR 影像, 并已去除地形相位, 且 $t_A < t_B$, 最后生成 j 个干涉对, 则像素点 (x, r) 的干涉相位为:

$$\delta\varphi_1(x, \gamma) = \varphi(t_B, x, r) - \varphi(t_A, x, r) \approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, x, r) - d(t_A, x, r)] \quad (2)$$

其中: λ 表示雷达波长; $d(t_A, x, r)$ 和 $d(t_B, x, r)$ 分别为 t_A 和 t_B 时刻像元 (x, r) 相对于初始时刻 t_0 的方向地表 LOS 形变, 则有:

$$\varphi(t_A, x, \gamma) = \frac{4\pi}{\lambda} (t_A, x, r) \quad (3)$$

$$d(t_0, x, r) = 0$$

如果 $IE = [IE_1 \cdots IE_M]$ 和 $IS = [IS_1 \cdots IS_M]$ 分别为干涉数据处理时按时间顺序排列的主影像序列, 并且满足

$$IE_j > IS_j \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

则所有的差分干涉图相位可以组成如下观测方程

$$\delta\varphi_j = \varphi(t_{IE_j}) - \varphi(t_{IS_j}) \quad (5)$$

将公式(5)转换成线性方程

$$\mathbf{A}\varphi = \delta\varphi \quad (6)$$

式中, \mathbf{A} 为 $m \times n$ 维矩阵. 矩阵 \mathbf{A} 的形式取决于图的组织形式, 当所有的 SAR 影像都被分在一组, 即 $L = 1$ 时, 有 $M \geq N$, 矩阵 \mathbf{A} 的秩为 N , 对公式(6)采用最小二乘法即可求解出 φ 的估计值 $\hat{\varphi}$

$$\hat{\varphi} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \delta\varphi \quad (7)$$

2.2 数据处理过程

青岛地铁 1 号线西海岸新区段地表沉降 SBAS-InSAR 影像处理流程如图 2. 首先将所获得的 Sentinel-1A 原始数据转换成 SLC 数据, 并对数据进行裁剪预处理, 本次试验数据的跨度为 2 年, 将时间基线阈值设置为 90 d, 选择 2019 年 7 月 27 日的影像作为超级影像, 共生成 76 个干涉对(图 3); 采用二轨法进行差干涉, 采用 Goldstein 滤波方法设置相位解缠相干系数为 0.35, 并利用 Delaunay 方法进行相位解缠; 在解缠后的干涉图中选择 20~30 相干性较好的点, 采用轨道精炼多项式估算相位偏移量, 并基于控制点对所有的数据进行重去平, 其中部分干涉图和相干系数图如图 4(a)和 4(b)所示, 采用 SVD 方法解算得到研究区的形变速率信息和高程. 利用估计的残余地形对干涉图进行去平, 并重新解缠和轨道精炼, 优化解缠结果, 如图 4(c)所示; 在第一次估算形变速率基础上进行定制的大气滤波, 从而估算和去除大气相位, 得到更加纯净的时间序列上的最终位移结果, 最后将结果编码到 WGS-84 坐标系的下, 得到平均形变速率图.

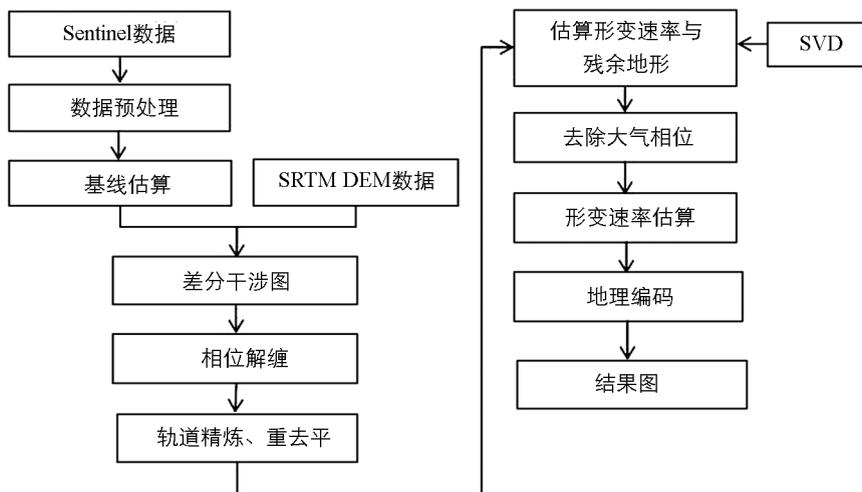


图 2 SBAS-InSAR 技术流程图

3 结果分析

3.1 地铁沿线的沉降监测分析

本文选择青岛地铁 1 号线西海岸新区路段作为主要研究对象,并对沿线两侧构建的 600 m 的缓冲区域进行分析.从图 5 整体看来,沉降主要集中在地铁站附近,大部分地区的沉降速率为 $-5 \sim 0$ mm/a.沉降严重区域路段的主要沉降区域位于安子站至安子东区间及附近(白色虚线矩形框内),最大沉降速率达到 -49 mm/a,另外本文在 29 期累积沉降图中选取了 6 个时间点的累积沉降图,

安子站至安子东区间隧道已于 2018 年 10 月全线贯通,从图 6 中可以看出在 2018 年 10 月 19 日,研究区的沉降量最大不超过 -20 mm,后期随着时间的推移,安子东东北侧与西北侧的沉降量逐渐增大,可能是由该段的地质情况(该地段位于构造剥蚀区,滨海堆积区^[9])和建筑物施工建设所引起,其中安子东附近的土质大部分为粉质黏土,地铁施工有可能加剧了该地区的地面沉降,但是由地铁建造所引起的大规模沉降的可能性较小.利用 SBAS-InSAR 技术获取的青岛地铁 1 号线西海岸新区段地表沉降监测结果,与传统水准测量监测结果以及地铁 1 号线西海岸新区部分地段地表沉降现场实勘(如图 7,其中 a, b 为现场实勘图, c 图是获取的谷歌影像图)基本一致.

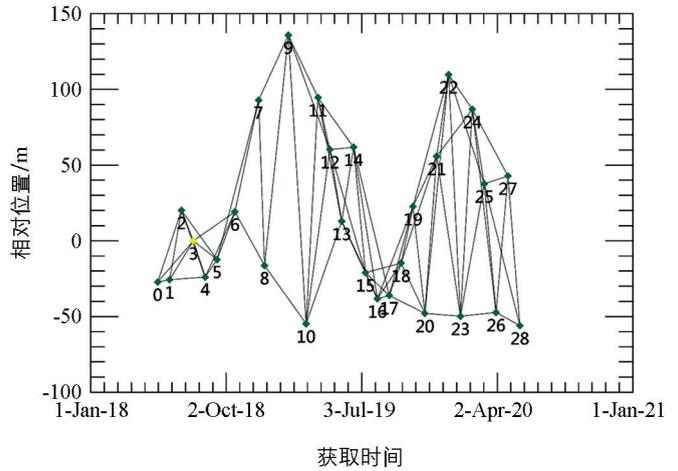


图 3 时空基线图

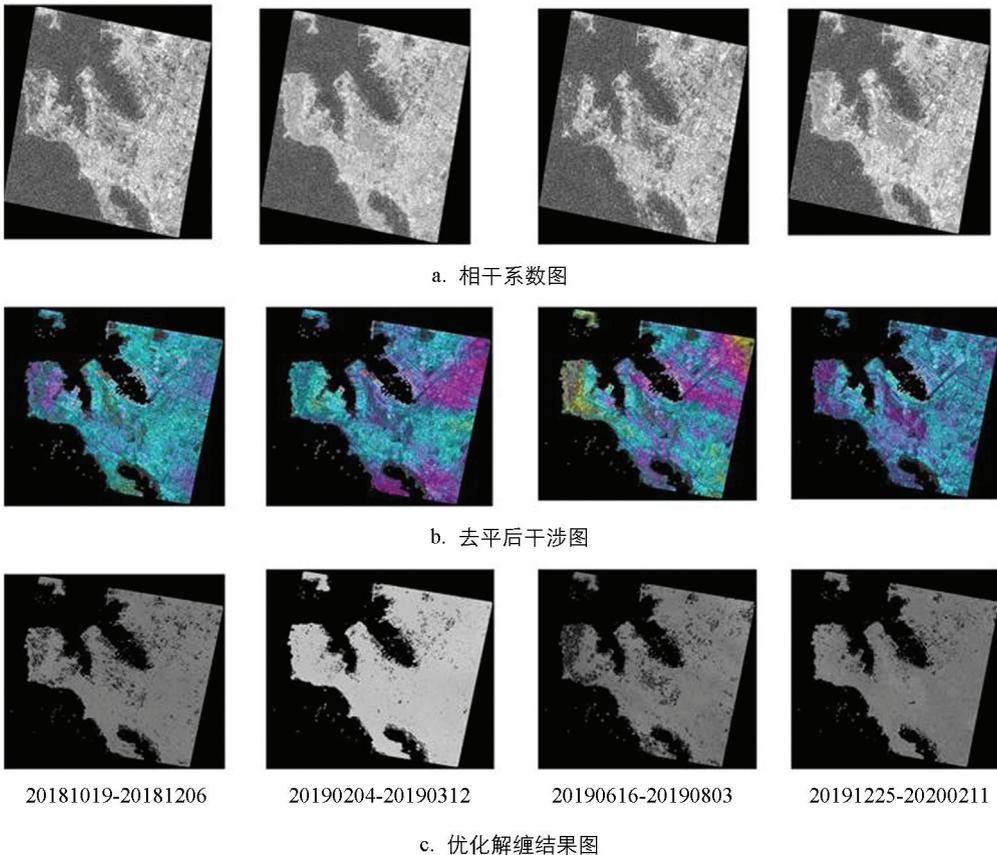


图 4 部分相干系数图、去平后干涉图及最终相位解缠结果图

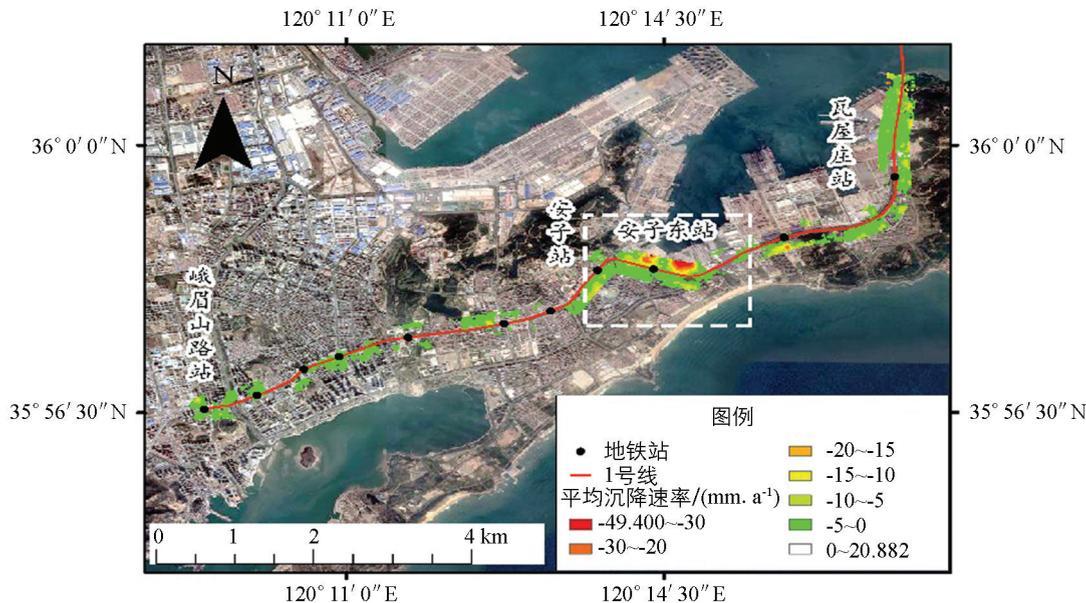


图 5 安子站及安子东路站区间沉降速率

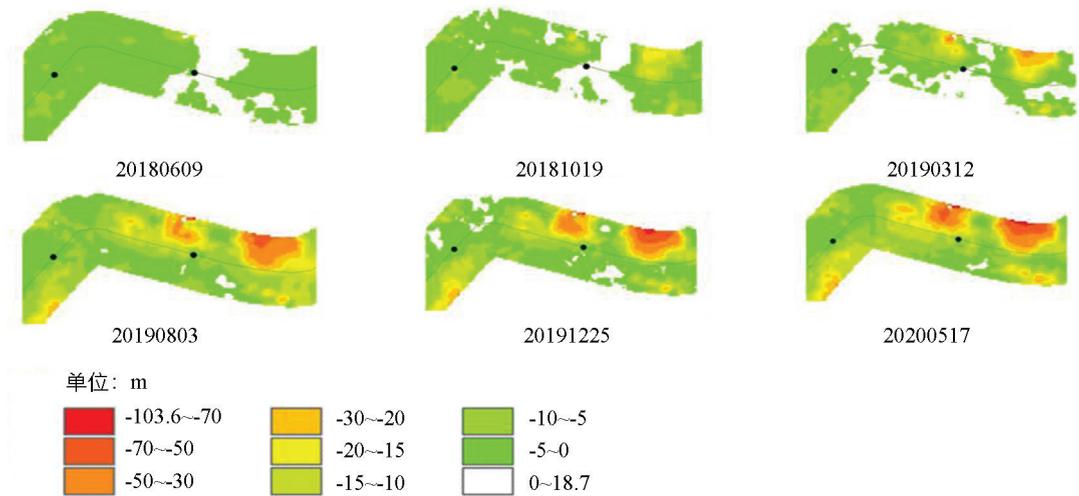


图 6 安安区间 6 个时间节点的累积沉降沉降图

3.2 地铁沿线沉降剖面分析

在地铁运行的过程中无论地面沉降还是抬升, 都会对轨道的结构产生影响, 从而影响到地铁稳定的运营。为进一步分析地铁沿线的沉降变化情况, 本文绘制了从过海处至峨眉山路站地铁中心线的沉降速率剖面图(图 8), 从图中可以得出, 0 点到 1 000 m 处, 沉降速率出现较大波动, 变化极快, 最大沉降出现在起点位置, 沉降速率超过 -10 mm/a ; 其次在安子站至安子东路站附近, 沉降呈现出“W”型波动, 起伏比较大。整体来看, 青岛地铁 1 号线西海岸新区段除几处沉降稍显著外, 整体沉降比较平稳。

3.3 地铁沿线的沉降预测

为更好地为青岛西海岸新区地铁施工建设及运行期间制定地表安全预案以及合理开发地下空间提供数据依据, 本文利用 Logistic 函数模型预测地铁 1 号线西海岸新区段地面沉降趋势。在隧道开挖完后, logistic 函数曲线可以较好地反映地铁隧道沉降的发生、发展及逐渐稳固的长期动态变化过程。

$$\omega_t = \frac{b}{1 + ae^{-ct}} \quad (8)$$

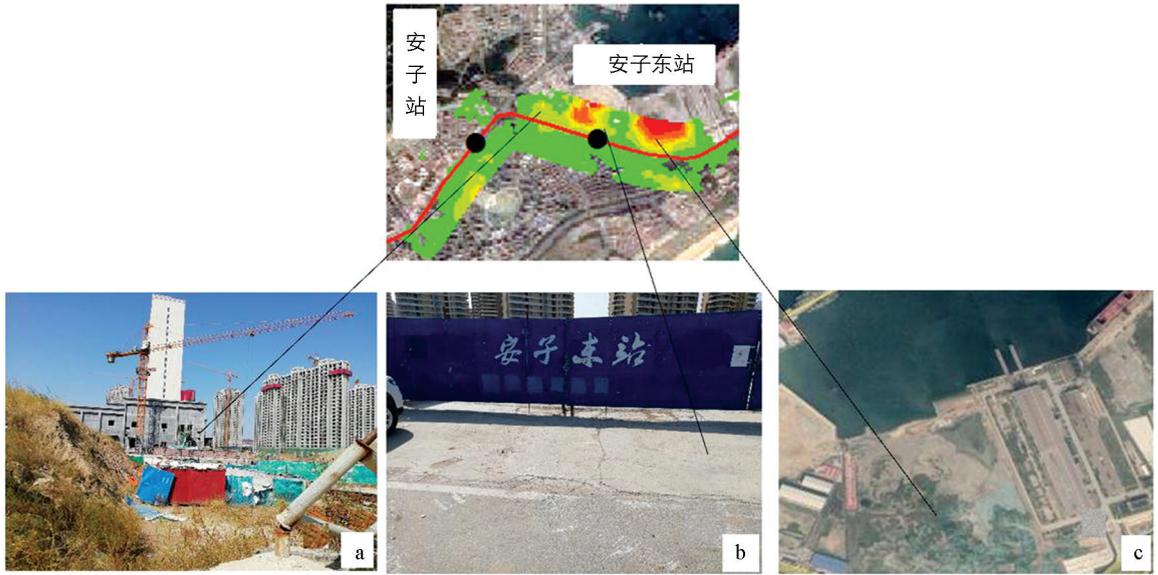


图 7 地铁 1 号线西海岸新区部分地段地表沉降现场实测

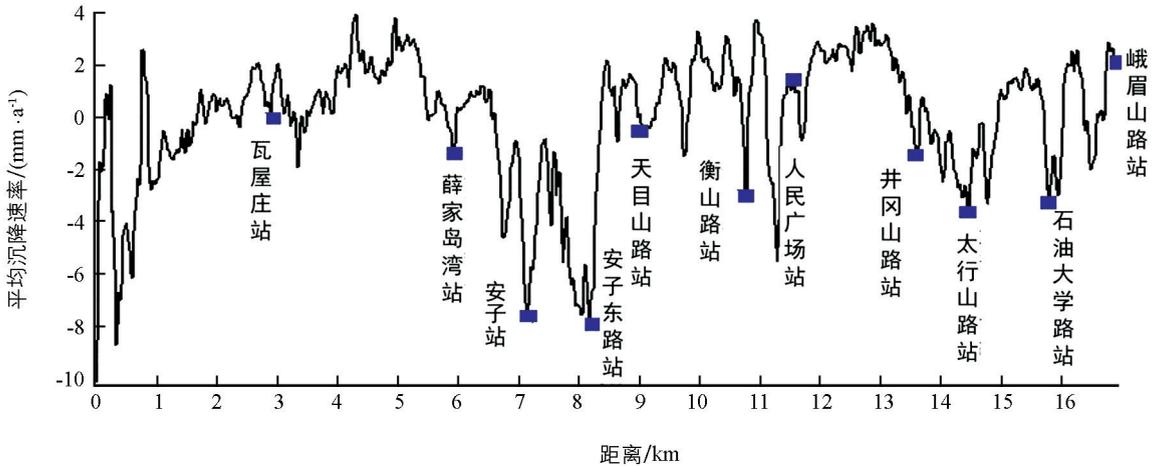


图 8 地铁 1 号线西海岸新区段沉降速率

其中： w_t 表示时刻 t 的沉降值；参数 a 和 c 是模型的 2 个比例因子； b 表示沉降区稳定时最大的沉降值^[16]。本文在安子站至安子东路站区间段选择沉降较为严重的点作为预测对象，该区间段于 2017 年 11 月下旬动工，于 2018 年 10 月实现双线贯通，利用 Logistic 函数模型对该区间地表沉降趋势作出预测。从图 9 可以看出，自监测日期开始至 2020 年该点一直处于持续下沉状态，2019 年下半年开始，沉降速率开始下降，2020 年后沉降逐渐趋于稳定。

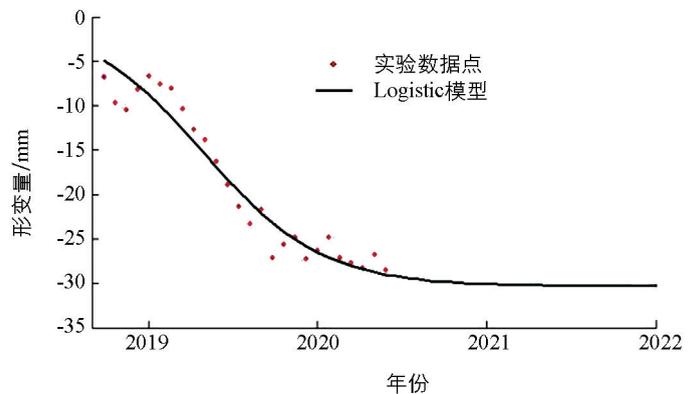


图 9 Logistic 函数对地铁 1 号线沉降预测曲线

4 结束语

本文采用 29 景 Sentinel-1A 遥感卫星影像数据，利用 SBAS-InSAR 技术获取了 2018 年 5 月至 2020

年5月青岛市地铁1号线西海岸新区段的形变信息,发现该路段的主要沉降区域位于安子站至安子站北侧及附近,最大沉降速率达到约 -49 mm/a ,最大累积沉降量达到约 -103 mm ;其他区域的沉降速率为 $-5\sim 0\text{ mm/a}$;在 $0\sim 1\ 000\text{ m}$ 段以及安子站至安子站段,沉降速波动较大,究其原因与地铁工程施工、地质环境及附近在建工程有必然联系.结合 Logistic 函数模型预测安子站至安子站的路段地面沉降会在2020年后逐渐趋于稳定.SBAS-InSAR技术在青岛地铁1号线西海岸新区段地表形变监测中的成功应用,可以为青岛在建地铁工程及未来规划线路的建设提供有效支持,为城市地下空间开发和运营提供数据辅助决策.

致谢:感谢山东科技大学陶秋香教授和苏宝胜教授的讨论.

参考文献:

- [1] 姜德才,张永红,张继贤,等.天津市地铁线不均匀地表沉降 InSAR 监测 [J]. 遥感信息,2017,32(6):27-32.
- [2] DANIELEP, WANG Z Y, LIN H. Shanghai Subway Tunnels and Highways Monitoring Through Cosmo-SkyMed Persistent Scatterers [J]. IISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 73(9): 58-67.
- [3] 莫莹,朱煜峰,江利明,等.基于 Sentinel-1A 的南昌市时间序列 InSAR 地面沉降监测 [J]. 大地测量与地球动力学,2020,40(3):270-275.
- [4] 刘凯斯,宫辉力,陈蓓蓓.基于地面沉降监测的地铁运营危险性评价——以北京地铁6号线为例 [J]. 地理与地理信息科学,2018,20(1):128-137.
- [5] CHEN W F, GONG H L, CHEN B B, et al. Spatiotemporal Evolution of Land Subsidence around a Subway Using InSAR Time-Series and the Entropy Method [J]. GIScience & Remote Sensing, 2017, 54(1): 78-94.
- [6] 范雪婷,李明巨,潘九宝,等.南京地铁沿线地面沉降监测与危险性评价 [J]. 测绘通报,2019(10):123-126,141.
- [7] 谢文斌,左小清,刘玉忠,等.利用 Sentinel-1A 数据监测抚顺市地表形变 [J]. 大地测量与地球动力学,2019,39(12):1270-1276.
- [8] 刘琦,岳国森,丁孝兵,等.佛山地铁沿线时序 InSAR 形变时空特征分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):1099-1106.
- [9] 胡秋媛,马遵青,李萧,等.黄岛地区 NW 向断裂特征及其地质环境意义的探讨 [J]. 科技通报,2017,33(6):58-62.
- [10] 孙肖,胡秋媛,杨建磊,等.黄岛地区北西向断裂特征及构造物理模拟实验 [J]. 科学技术与工程,2019,19(13):25-32.
- [11] BERARDINO P, FORNARO G, LANARI R, et al. New Algorithm for Surface Seformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2002, 40(11): 2375-2383.
- [12] 于胜文,王志伟,刘国林,等. InSAR 技术在沂沭断裂带地表形变监测中的应用研究 [J]. 测绘科学技术学报,2016,33(2):150-156.
- [13] 徐祥云,胡云飞,高福军,等.青岛地铁1号线安安区间盾构隧道地表沉降研究 [J]. 铁道勘察,2018,44(6):63-67.
- [14] 梁泽浩,王晋,李广雪.基于时序 InSAR 的即墨市区地表形变监测 [J]. 测绘与空间地理信息,2021,44(1):77-81.
- [15] 叶萍萍.基于 SBAS-InSAR 的城市地表形变监测技术研究——以兰州新区城区为例 [J]. 矿山测量,2020,48(6):80-83.
- [16] 陈霞,肖岚. Logistic 模型的改进与中国人口预测 [J]. 成都信息工程大学学报,2020,35(2):239-243.