

基于PS-InSAR技术的后海深槽地面及建筑物形变监测分析

莫莉, 王贤能

Monitoring and analysis of ground and building settlement of deep trough in Houhai based on PS-InSAR technology

MO Li and WANG Xianneng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测

Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection

潘建平, 邓福江, 徐正宣, 向淇文, 涂文丽, 付占宝 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 98-104

基于SBAS-InSAR的山东济阳矿区沉降监测与分析

潘光永, 陶秋香, 陈洋, 王珂 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 100-106+120

潘光永, 陶秋香, 陈洋, 王珂 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(4): 100-106+120

国产GB-InSAR在特大型水库滑坡变形监测中的应用

Application of GB-InSAR in deformation monitoring of huge landslide in reservoir area

郭延辉, 杨溢, 杨志全, 高才坤, 田卫明, 何玉童 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 66-72

CORS网和GNSS技术在地面变形监测中的应用

Application of CORS network and GNSS technology in ground deformation monitoring: Taking southeast Zhejiang Province as an example

王伟, 党亚民, 章传银, 杨强 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 73-77

联合升降轨InSAR与高分辨率光学遥感的滑坡隐患早期识别

Early identification of hidden dangers of landslides based on the combination of ascending and descending orbits InSAR and high spatial resolution optical remote sensing: A case study of landslides in Longde County, southern Ningxia

涂宽, 王文龙, 谌华, 李樵民, 耿丹, 王川, 郑健, 杨影 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 72-81

基于“3S”技术的地质灾害监测预警系统在我国应用现状

Review on geological disaster monitoring and early warning system based on “3S” technology in China

张凯翔 中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 1-11



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202110029

莫莉, 王贤能. 基于 PS-InSAR 技术的后海深槽地面及建筑物形变监测分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2023, 34(1): 68-74.

MO Li, WANG Xianneng. Monitoring and analysis of ground and building settlement of deep trough in Houhai based on PS-InSAR technology [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2023, 34(1): 68-74.

基于 PS-InSAR 技术的后海深槽地面及建筑物形变监测分析

莫莉, 王贤能

(深圳市工勘岩土集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 深圳市南山区后海片区为总部大厦基地, 莲花山断裂带和珠江口大断裂带在此交汇, 区域内基岩埋藏较深, 断层较发育, 存在巨厚的风化深槽, 地面高层建筑多采用超长桩基础。文中研究采用永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术对深圳市南山区后海片区南部东侧沿海部分的地面和建(构)筑物进行大范围、长时间形变监测。监测结果表明, 深槽上建筑物以及其他构筑物沉降相对稳定, 目前在后海巨厚深槽上的建筑桩基施工工艺安全有效。沉降量较大的区域为深圳湾公园草地及其周边区域, 主要由于填海造陆软土引起形变。经过与传统监测技术的对比, InSAR 技术监测精度满足规范要求。在大范围、低成本、高精度、高效率的形变监测需求方面, InSAR 技术具有优势。

关键词: 南山后海; 深槽; 永久散射体合成孔径雷达干涉测量; PS-InSAR; 沉降监测

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2023)01-0068-07

Monitoring and analysis of ground and building settlement of deep trough in Houhai based on PS-InSAR technology

MO Li, WANG Xianneng

(Shenzhen Geokey Group Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China)

Abstract: The Houhai area in Nanshan District of Shenzhen is the base of the headquarters building, where the Shenzhen fault zone and the Pearl River Mouth fault zone meet here. In this region, the bedrock is buried deeply, the faults are well developed, and there is huge thick weathered deep trough. Thus, overlength pile foundation is used in high-rise buildings. In this study, the permanent scatterers interferometric synthetic aperture radar technique was used to monitor the settlement of ground and structures in houhai Deep trough research area, Nanshan District, Shenzhen. The monitoring results show that the settlement of buildings and other structures on deep trough is relatively stable, and the pile foundation construction technology in Houhai research area is safe and effective at present. The grassland of Shenzhen Bay Park and its surrounding areas have a large amount of settlement, which is mainly caused by the settlement of soft land reclaimed from the sea. Compared with the traditional monitoring technology, the monitoring accuracy of InSAR technology meets the requirements. The InSAR technology has advantages for large-scale, low-cost, high-precision and high-efficiency deformation monitoring.

Keywords: Nanshan Houhai; deep groove; permanent scatterers interferometric synthetic aperture radar; PS-InSAR; subsidence monitoring

收稿日期: 2021-10-27; 修订日期: 2021-12-27

投稿网址: <https://www.zgdzzhyfzxb.com/>

基金项目: 重 20180213 断裂带的岩土特性及建筑桩基施工关键技术研发项目(JSGG20180504170317195)

第一作者: 莫莉(1975-), 女, 广东英德人, 水工结构专业, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土技术工作。E-mail: 99522998@qq.com

0 引言

地面形变作为一种缓变性地质灾害,主要具有缓变性、滞后性、区域性、差异性、长期性以及不可逆等特点,始终威胁着城市安全及经济社会的可持续发展^[1]。

传统的形变监测方法成本高、效率低、受天气影响,且需建立监测网,无法快速开展大面积监测^[2]。合成孔径雷达干涉测量技术(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)凭借其全天候、强穿透性、高精度获取连续覆盖地面高程和信息的突出优势,已在地表形变监测、滑坡监测、矿区沉降监测、危岩体监测等相关领域得到广泛应用^[3-9]。在此基础上发展起来的永久散射体合成孔径雷达干涉测量技术(Permanent scatterers interferometric synthetic aperture radar, PS-InSAR)^[10-11],有效消除了时空失相干引起的相位噪声,解决了大气效应难以消除的问题,适用于持续性、区域性地表微小形变监测^[12],已经广泛应用在城市地面形变监测。

本研究采用PS-InSAR技术对深圳市南山区后海的片区进行了大范围、长时间的地面和建(构)筑物沉降监测,获得巨厚风化深槽地区地面及采用桩基础施工工艺的建构筑物沉降特征和规律,为深圳后海巨厚深槽地质灾害的排查、防治工作提供基础。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

深圳市位于华南褶皱系中的紫金—惠阳凹褶断束的西南部、五华—深圳大断裂带南西段,高要—惠来东西向构造带中段的南缘地带。北东向莲花山断裂带与北西向珠江口大断裂带两条断裂在深圳南山后海片区



图1 研究区域范围

Fig. 1 Study area

交汇,对深圳、香港的地层稳定性均有影响^[13]。

南山区是全国百强区,后海片区是总部大厦基地。该片区原为滨海滩涂,被第四系覆盖,填海造陆区未进行过详细的地质调查。在工程建设中发现其下断层发育,基岩埋深70~130 m,形成了巨厚的风化深槽,上面建筑采用超长桩基础^[14]。

图1为本次研究区范围,为南山区南部东侧沿海区域。北至白石路,南至望海路,西至后海大道,东边沿沙河西路—望海路,面积约为11.0 km²。

1.2 数据源

采用2018年2月—2020年12月52期COSMO-SkyMed重复轨道SAR影像,InSAR数据的基本参数见表1。

表1 In-SAR数据基本参数

Table 1 Basic Parameters of In-SAR Data

参数	数值	监测日期
卫星类型	COSMO-SkyMed	2018-02-04、2018-03-08、2018-03-24、2018-04-09、2018-05-11
成像模式	StripMap(条带成像)模式	2018-06-12、2018-07-11、2018-09-13、2018-10-02、2018-10-18
数据波段	X波段(3.1cm)	2018-11-03、2018-11-19、2018-12-01、2019-01-06、2019-01-22
空间分辨率/m	3	2019-02-07、2019-02-19、2019-03-11、2019-03-27、2019-04-12
升降轨模式	降轨	2019-04-28、2019-05-10、2019-06-10、2019-06-26、2019-07-12
极化方式	HH极化	2019-07-28、2019-08-14、2019-08-29、2019-10-09、2019-10-25
中心入射角/(°)	32.55	2019-11-01、2019-12-03、2020-01-13、2020-02-05、2020-02-21
影像数量	52景	2020-03-24、2020-04-09、2020-04-25、2020-05-11、2020-05-27
数据级别	SLC数据(单视复)	2020-06-12、2020-06-28、2020-07-14、2020-07-30、2020-08-15
监测日期	2018-02-04—2020-12-21	2020-09-16、2020-10-11、2020-10-18、2020-11-03、2020-11-19
处理方法	PS-InSAR	2020-12-05、2020-12-21

2 基于 PS-InSAR 的结果分析

2.1 整体形变分析

本研究利用 PS-InSAR 技术,对 2018 年 2 月—2020 年 12 月的影像数据进行计算,获得 148 151 个有效 PS 点。

区域累计形变量为 $-79.1 \sim 37.5$ mm,累计形变量 $-8 \sim 8$ mm 的 PS 点占总数的 86%,累计形变量统计见图 2。区域平均形变速率为 $-26.9 \sim 11.6$ mm/a,形变速率在 $-3 \sim 3$ mm/a 的 PS 点占总数的 91%,超过 9 mm/a 的 PS 点共 1 106 个,占 0.8%。

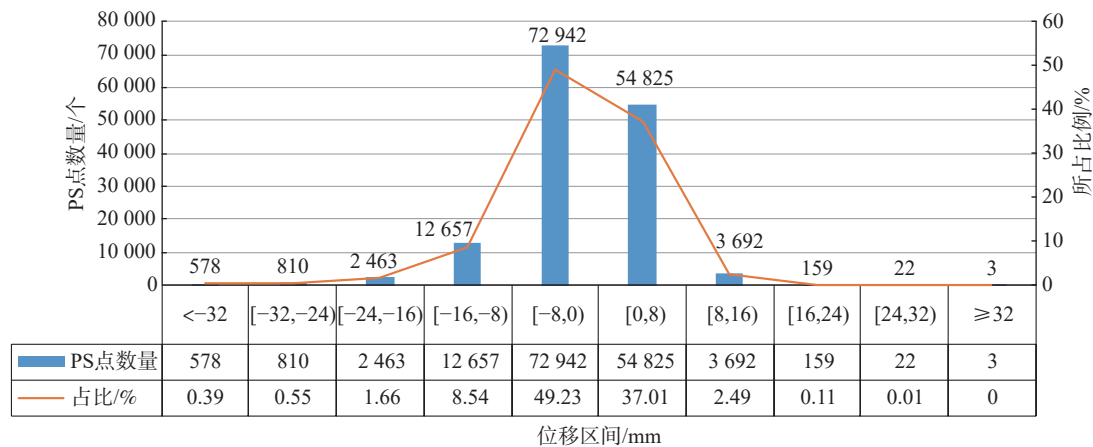


图 2 累计形变量统计

Fig. 2 Cumulative settlement statistics

2.2 重点监测点形变分析

在研究区域深槽上方选取 21 处(点 1—点 21)地面以及构(建)筑物作为重点形变监测特征点进行形变分析,监测特征点位置分布见图 3,监测特征点形变特点及曲线见表 2。

综上,研究区域处于比较稳定或整体缓慢形变,存在一处集中形变区域,位置在深圳湾公园周边。

3 InSAR 技术精度验证

InSAR 技术可快速、精确地获得区域垂向形变场,其在城区可获得毫米级地表形变^[15]。InSAR 形变监测结果能提供时间序列形变量,统计影像获取期内任意两期影像间的形变量,可以充分保障外业水准资料和 InSAR 数据获取形变量比对的时空一致性。

将研究区域 InSAR 形变监测结果与同一地区的蛇口文体中心基坑支护工程变形监测结果对比,结果见表 3。

根据《工程测量标准》(GB50026—2020)^[16],对同一目标点采用两种不同的监测手段,相同的监测时段内二者的实际误差为 ± 0.3 mm,小于观测中误差 ± 0.71 mm 和最大观测误差 ± 1.41 mm,监测精度满足规范要求。

由此可见,InSAR 技术可获取大面积、全天候、高精度和高分辨率的地表三维空间微小变化,在地表形变

监测方面显示出传统监测不具备的优越性。

4 形变原因分析

监测期间,深圳湾公园及周边区域累计形变量较大,因此在该区域选取了 5 个点(A1—A5)的勘察资料进行分析,位置分布见图 4。

4.1 A2 中建钢构大厦北侧

中建钢构大厦北侧草地累计形变量为 -62.1 mm,平均形变速率为 20.4 mm/a,形变—日期曲线见图 5。

该大厦勘察资料表明,场地内人工填土(Q^m)成分主要为翻填淤泥,多呈流—软塑状态,组分不均,堆填时间较短,属软弱土层;第四系全新统海相沉积层(Qh^m)淤泥以及第四系上更新统沼泽相沉积层(Qp^b)淤泥均呈流塑状态,含水量大,孔隙比大,具高压缩性、低强度等特征,属软弱土层,最厚达 15 m。场地受断裂构造影响,场地内基岩大部分蚀变严重,局部碎裂岩化特征明显,绿泥石化现象显著。各风化基岩起伏变化较大,块状强风化蚀变粗粒花岗岩顶板标高 $-41.44 \sim -18.49$ m,变化幅度达 22.95 m;中风化蚀变粗粒花岗岩顶板标高 $-48.14 \sim -22.84$ m,变化幅度达 25.30 m。

大厦桩基础采用了旋挖桩,平均桩长 30.2 m,最深 50.6 m,观测期间大厦整体形变稳定。而大厦北侧场地有均匀沉降趋势,沉降主要由填土及淤泥引起。

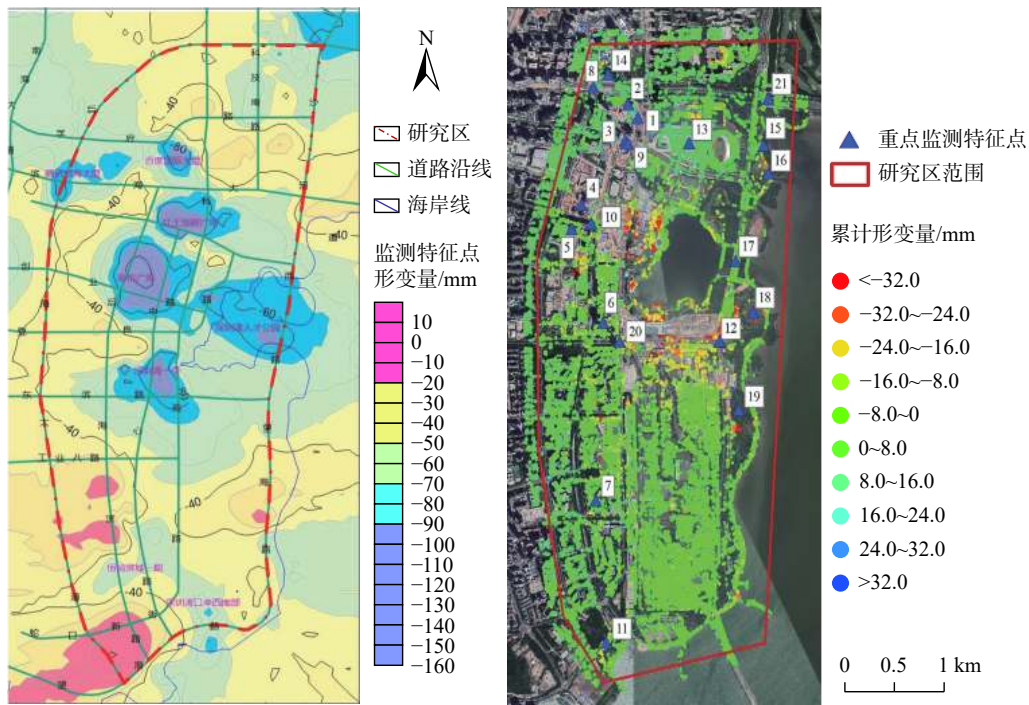


图 3 深槽分布图及重点监测特征点位置

Fig. 3 Deep trough distribution and location of key monitoring points

表 2 监测特征点形变特点及曲线

Table 2 Deformation characteristics and curves of feature points

监测特征点分类	监测特征点位置	沉降形变特点	典型形变—日期序列曲线
已有高层建筑	点2舜远金融大厦 点3大成基金总部大厦 点5海信南方大厦 点6深圳湾一号 点7卓越维港名苑	形变曲线总体均呈略有起伏的变化趋势, 整体形变稳定 见右侧点7卓越维港名苑形变—日期曲线图	
在建项目	点1红土创新广场 点4恒裕深圳湾	监测期间受施工影响, 形变曲线不规则, 或呈略有起伏上升趋势, 或呈略有起伏下降趋势 见右侧点1红土创新广场形变—日期曲线图	

续表 2

监测特征点分类	监测特征点位置	沉降变形特点	典型形变—日期序列曲线
桥梁	点8滨海海滨立交桥 点17桥梁 点21桥梁	形变曲线总体呈略有起伏的变化趋势,整体形变稳定 见右侧点17桥梁形变—日期曲线图	
道路	点9海德三道 点10创业路 点11望海路 点12望海路 点20东滨路	形变曲线总体呈略有起伏的变化趋势,整体形变稳定 见右侧点12望海路形变—日期曲线图	
公园草地	点14绿化草地 点13、点16、点18、点19深圳湾公园草地 点15大运会纪念碑广场	除了点18深圳湾公园草地形变曲线为均匀缓慢沉降趋势(见右侧点18形变—日期曲线图)外,其余形变曲线均为总体呈略有起伏的下降趋势,整体形变稳定	

注: PS为监测特征点的控制点, VEL为高程。

表 3 相同位置不同技术手段成果对比

Table 3 Comparison of results of different technical means in the same position

项目	蛇口文体中心基坑支护形变监测项目	后海断裂带项目
技术手段	S05级水准仪(134次)	InSAR(52期)
对应位置	点7附近 (深圳市育才舒曼艺术学校体育场)	点7 (卓越维港名苑)
监测时间	2019年2月—2020年4月	
累计形变/mm	-1.9	-1.6

4.2 点 A1、A3、A4、A5 深圳湾公园内草地

该 4 点累计形变量为 40.9 ~ 59.6 mm, 平均形变速率为 15.29 ~ 19.76 mm/a, 总体呈均匀沉降趋势。以 A5 深圳湾人才公园为例, 形变—日期曲线见图 6。

根据 A5 深圳湾人才公园勘察资料, 钻探深度范围内揭露的地层岩性特征自上而下见表 4。

该区域填土层及淤泥质软土层厚, 工程性质差, 承载力低, 易产生不均匀沉降。该区域草地沉降主要由填土及软土沉降引起。

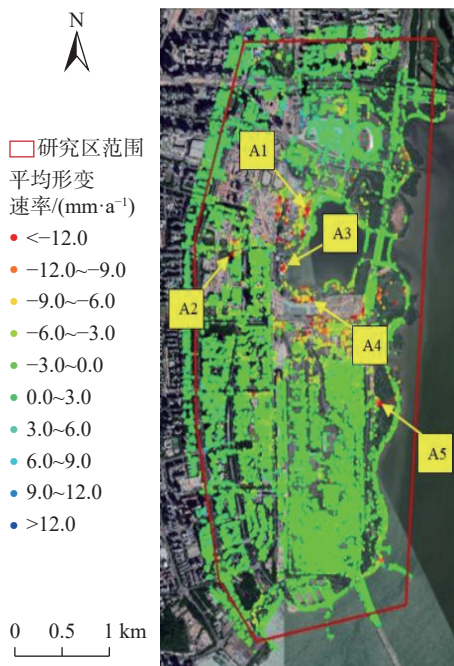


图 4 形变较大区域选取点
Fig. 4 Large deformation region

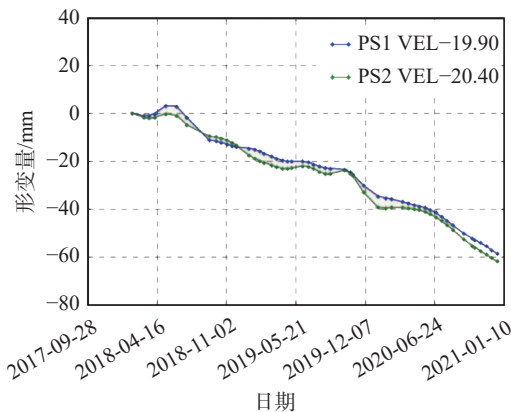


图 5 A2 中建钢构大厦北侧形变—日期曲线
Fig. 5 Deformation-time curve of A2

5 结论

(1)本研究基于长时间序列雷达数据,采用 PS-InSAR 技术对深圳前海片区进行了高精度连续形变监测与分析。通过与传统监测技术对比,监测精度满足规范要求。PS-InSAR 新技术能实现大范围、低成本、高精度、高效率的变形监测需求,体现出传统监测不具备的优越性。

(2)对监测结果进行统计分析,南山前海片区深槽上建(构)筑物的沉降相对稳定,沉降量较大的区域为深圳湾公园草地及其周边区域。研究表明,该区域沉降原因为软土沉降。目前在片区深厚深槽上已有的建筑物

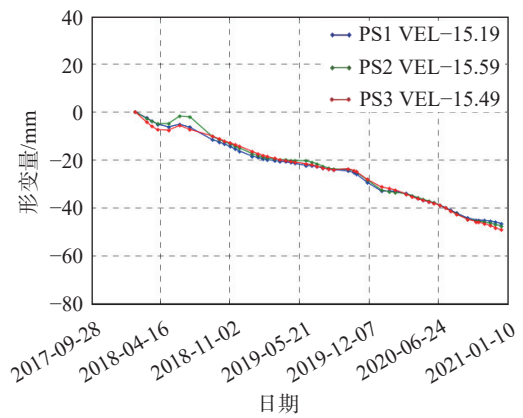


图 6 A5 深圳湾人才公园形变—日期曲线
Fig. 6 Deformation-time cure of A5

表 4 地层岩性特征

Table 4 Formation lithologic characteristics

地层岩性	地层岩性特征		
	液性指数	压缩指数/ MPa^{-1}	压缩模量/MPa
第四系人工填土层	0.45	0.5	4.0
主要为素填土,层厚1.2~26.9 m,呈松散~稍密状,物理力学性质不均匀,工程性质较差,承载力较低,在上部较大荷载长期作用下易产生沉降及不均匀沉降			
第四系海积冲积层	1.36	1.28	2.0
主要为淤泥软土层,层厚0.3~17.0 m,呈流塑状,含较多腐殖质、贝壳碎屑,承载力极低,灵敏度高			
第四系残积层及燕山四期侵入花岗岩	残积的砾质黏性土和全风化花岗岩、强风化花岗岩,粉粒含量高,受水浸湿或浸泡后,易软化变形,强度、承载力骤减		

桩基础是安全的。

(3)深圳湾公园草地均处于缓慢持续沉降状态,后续需重点关注。

(4)该片区巨厚深槽上在建的红土广场、华润深圳湾住宅等建筑。工程桩超长,建筑物的后期沉降值得持续关注。

(5)深槽区域的浅埋地下燃气、排污管网等管线的变形,本次研究未作深入,此类隐患的影响较大,值得深入关注。

参考文献(References):

- [1] 代志宏, 卢鹏, 张志芳, 等. 基于 PS-InSAR 技术的南宁地表沉降监测与分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(5): 491-496. [DAI Zhihong, LU Peng, ZHANG Zhifang, et al. Surface subsidence monitoring and analysis of Nanning based on PS-InSAR technology [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(5): 491-496. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 叶凯, 金典琦, 张勇, 等. 基于 PS-InSAR 技术的深圳北站

- 表面位移监测研究 [J]. 测绘地理信息, 2021, 46(3): 29-32. [YE Kai, JIN Dianqi, ZHANG Yong, et al. Surface deformation monitoring of Shenzhen north station using PS-InSAR technology [J]. Journal of Geomatics, 2021, 46(3): 29-32. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 李晓恩, 周亮, 苏奋振, 等. InSAR技术在滑坡灾害中的应用研究进展 [J]. 遥感学报, 2021, 25(2): 614-629. [LI Xiaoen, ZHOU Liang, SU Fenzhen, et al. Application of InSAR technology in landslide hazard: Progress and prospects [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(2): 614-629. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 潘光永, 陶秋香, 陈洋, 等. 基于SBAS-InSAR的山东济阳矿区沉降监测与分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(4): 100-106. [PAN Guangyong, TAO Qiuxiang, CHEN Yang, et al. Monitoring and analysis of sedimentation in Jiyang mining area of Shandong Province based on SBAS-InSAR [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(4): 100-106. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 魏纪成, 张红霞, 白泽朝, 等. 融合D-InSAR与PS-InSAR的神东矿区开采沉降监测方法 [J]. 金属矿山, 2019(10): 55-60. [WEI Jicheng, ZHANG Hongxia, BAI Zechao, et al. Integrated monitoring method of the mining subsidence of Shendong mining area based on D-InSAR and PS-InSAR technology [J]. Metal Mine, 2019(10): 55-60. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李军, 褚宏亮, 李滨, 等. 基于高分影像与InSAR解译的西藏林芝则隆弄高位链式地质灾害发育特征分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(3): 42-50. [LI Jun, CHU Hongliang, LI Bin, et al. Analysis of development characteristics of high-elevation chain geological hazard in Zelongnong, Nyingchi, Tibet based on high resolution image and InSAR interpretation [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(3): 42-50. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 潘建平, 邓福江, 徐正宣, 等. 基于轨道精炼控制点精选的极艰险区域时序InSAR地表形变监测 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 98-104. [PAN Jianping, DENG Fujiang, XU Zhengxuan, et al. Time series InSAR surface deformation monitoring in extremely difficult area based on track refining control points selection [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 98-104. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 洪兆阳, 金双根. 利用时序PS-InSAR监测青藏高原冻土区地表形变 [J]. 测绘通报, 2021(1): 35-40. [HONG Zhaoyang, JIN Shuanggen. Permafrost deformation in Qinghai-Tibet plateau time-series PS-InSAR [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(1): 35-40. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 许军强, 马涛, 卢意恺, 等. 基于SBAS-InSAR技术的豫北平原地面沉降监测 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(4): 1182-1191. [XU Junqiang, MA Tao, LU Yikai, et al. Land subsidence monitoring in north Henan plain based on SBAS-InSAR technology [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2019, 49(4): 1182-1191. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 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): 2202-2212.
- [11] FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. Permanent scatterers in SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.
- [12] 范军, 左小清, 李涛, 等. 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, 2018, 27(6): 50-58. [FAN Jun, ZUO Xiaoqing, LI Tao, et al. Analysis and comparison of PS-InSAR and SBAS-InSAR for ground subsidence monitoring in the main city of Kunming [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2018, 27(6): 50-58. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 《深圳地质》编写组. 深圳地质 [M]. 北京: 地质出版社, 2009. [Editorial group of Shenzhen Geology. Shenzhen Geological [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese)]
- [14] 雷斌, 李超, 童心, 等. 灌注桩钢筋笼箍筋自动弯箍施工技术 [J]. 建筑施工, 2020, 49(增刊1): 786-789. [LEI Bin, LI Chao, TONG Xin, et al. Construction technology of automatic bending hoop for reinforcing cage stirrup of cast-in-place piles [J]. Construction Technology, 2020, 49(Sup 1): 786-789. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 夏小裕, 王哲奇. PS-InSAR与DS-InSAR监测城市地面沉降的精度检验与分析 [J]. 海洋测绘, 2020, 40(4): 65-71. [XIA Xiaoyu, WANG Zheqi. Accuracy test and analysis of PS-InSAR and DS-InSAR monitoring urban land subsidence [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2020, 40(4): 65-71. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程测量标准: GB 50026—2020 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for engineering surveying: GB 50026—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)]