

doi: 10.6046/zrzyyg.2022190

引用格式: 姜德才,郑向向,王宁,等. 时序 InSAR 技术在珠三角地区地质灾害隐患识别中的应用[J]. 自然资源遥感,2023,35(3):292–301. (Jiang D C, Zheng X X, Wang N, et al. Application of the time-series InSAR technology in the identification of geological hazards in the Pearl River Delta region[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(3):292–301.)

时序 InSAR 技术在珠三角地区地质 灾害隐患识别中的应用

姜德才^{1,2,3}, 郑向向^{2,3,4}, 王 宁³, 肖春蕾³, 朱振洲³

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院,兰州 730000; 2. 中国科学院大学,北京 100049; 3. 中国自然资源航空物探遥感中心,北京 100083; 4. 中国科学院空天信息创新研究院,北京 100094)

摘要: 针对珠三角地区广泛分布的地表水、植被易造成合成孔径雷达干涉(interferometry synthetic aperture Radar, InSAR)技术失相干和多云多雾多雨高湿的气候易造成严重的 InSAR 大气延迟“噪声”的问题,以珠三角东南部的深圳市龙岗区为研究区,采用干涉相干性最优原则生成小基线集技术(small baseline subset InSAR, SBAS InSAR)干涉像对连接图,使用 35 景 Sentinel-1A 影像获取了 2019 年 9 月—2020 年 11 月龙岗区的地表形变信息,而后与永久散射体 InSAR 技术(persistent scatterer InSAR, PS InSAR)反演结果进行对比,最后分析、推断了地表形变成因。结果表明: ①SBAS InSAR 和 PS InSAR 反演的地表形变场基本一致,SBAS InSAR 在大形变量区域的相干点密度远大于 PS InSAR,说明干涉相干性最优原则的 SBAS InSAR 反演结果准确、可靠,反演完整形变场更具优势; ②龙岗区及周边的地表形变成因主要有持续强降雨触发的岩溶塌陷或斜坡失稳,工业采排水导致的地下水地质环境变化,地下施工引发的采空沉降,新建高层建筑施加的地基静荷载等。研究技术路线可为珠三角地区地质灾害隐患 InSAR 早期识别的自动化、工程化应用提供借鉴。

关键词: 干涉相干性最优; 珠江三角洲; 龙岗区; InSAR

中图法分类号: TP 237 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2023)03-0292-10

0 引言

珠江三角洲地区自 1986 年成为沿海经济开放区后,经济飞速发展,带动了城市建设的高速发展,现已经成为世界知名的加工制造业中心。在城建高速发展过程中,大规模的土体开发尤其是坡体坡脚的开挖、回填等改造活动破坏了斜坡体稳定状态,如果未得到及时防护治理,就会留下地质灾害隐患^[1],尤其是暴雨或持续降雨发生后,雨水不断入渗坡体内部,改变坡体内力学性质以及地下水动力环境,致使地质灾害发生。因此,全面摸清珠江三角洲地区地质灾害风险隐患,提升区域抵御地质灾害的综合防治能力是珠江三角洲地区各级政府践行《第一次全国自然灾害综合风险普查试点》的工作要求^[2]。近几十年来,合成孔径雷达干涉(interferometry synthetic aperture Radar, InSAR)技术在城市

大区域地面沉降监测或基础设施高精度形变监测中已得到了广泛应用^[3-5],同时在地质灾害隐患(如滑坡、崩塌和泥石流等)的早期识别方面也已有较多应用研究成果^[6-9]。因此,InSAR 技术已成为城市交通网、建(构)筑物群不均匀沉降及风险(分析)排查的有效手段。然而珠江三角洲地区地理位置纬度较低,属亚热带海洋季风气候,每年 4—9 月为雨季,高温潮湿,雨量充足,河网密度高,水资源丰富,林地和农耕地占比大。地表植被、河湖和池塘等易造成 InSAR 失相干。对流层中水汽产生的严重大气延迟“噪声”是 InSAR 干涉相位的主要误差源之一^[10-11]。小基线集技术(small baseline subset InSAR, SBAS InSAR)^[12-13]可适用于低相干场景的地表形变监测,能够同时较好地解决时间失相干、空间失相干和大气效应问题。

SBAS InSAR 一般通过设置时间-空间基线阈值生成干涉像对连接图和干涉图集,而后通过人工

收稿日期: 2022-05-09; 修订日期: 2022-08-30

基金项目: 中国地质调查局项目“全国国土空间生态风险综合调查与区划”(编号: DD20221772)资助。

第一作者: 姜德才(1990-),男,博士研究生,主要从事 InSAR, TomoSAR 理论和工程化应用研究。Email: jiangdc_rs@126.com。

通信作者: 肖春蕾(1987-),女,博士,高级工程师,主要从事遥感地质应用方面的研究。Email: xiaoc@radi.ac.cn。

目视挑选出质量较好的相干图集和干涉图集,舍弃相干性和干涉质量较差的干涉对,但此过程费时费力且对 InSAR 数据处理经验要求高。也有学者通过使用长波段合成孔径雷达 (synthetic aperture Radar, SAR) 数据 (如 ALOS-2 PALSAR-2) 提高地物目标干涉相干性或使用高重访的 SAR 卫星星座数据 (如 Cosmo SkyMed) 有效去除大气相位的影响^[14-16],但这些 SAR 数据价格昂贵,大规模工程化应用成本太高。

为了兼顾提升时间序列 InSAR 数据处理效率和降低 SAR 数据成本,使用干涉相干性最优原则^[5]生成 SBAS InSAR 干涉像对连接图,从技术上有效提升了相干图集的整体干涉相干性,同时实现无需人工干预的高质量干涉像对自动组合连通。选取位于珠江三角洲东南部的深圳市龙岗区为研究区,龙岗区具有珠江三角洲的典型地貌气候特征,区内有 5 个森林公园,森林覆盖率为 50.2%; 该区有 50 多条河流,40 多个水库; 云、雨天气较多,年平均相对湿度为 80% 左右,属于“潮湿地区”。使用基于干涉相干性最优原则的 SBAS InSAR 和免费的时间序列 Sentinel-1A 数据集提取地表形变信息,而后与永久散射体技术 (persistent scatterer InSAR, PS InSAR)^[17-19]反演的地表形变结果进行对比,最后结合 Google Earth 影像初步分析了研究区地表形变成因。

1 研究区及其数据源

1.1 研究区概况

研究区为珠江三角洲东南部的深圳市龙岗区,如图 1 所示。龙岗区地理坐标为 E114°02′~114°23′,N22°34′~22°50′,属亚热带海洋季风气候,气候湿润,雨量丰沛,年平均降雨日达到 140 d; 地貌以低山、丘陵为主,间有平缓台地,地形西南高东北低,最大高程为 876 m,最低高程为 27 m; 研究区地处莲花山断裂带的西南侧,构造、岩浆岩活动和变质作用频繁,地层的缺失、不连续现象严重^[1],境内出露的地层有元古宇长城系、蓟县系-青白口系,古生

界泥盆系、石炭系,中生界侏罗系、白垩系,新生界古近系、第四系,地下水主要有松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、碳酸盐岩类裂隙溶洞水,降雨是其主要补给源; 工业企业规模大、人口密集、经济发达,近年来城市建设工程活动频繁。地质环境条件、多雨天气、工业企业抽排水和城建工程活动都是龙岗区滑坡、崩塌和岩溶地面塌陷等地质灾害隐患的潜在成因。2019 年 12 月 5 日,龙岗区龙岗街道龙园路龙河路口东侧一带出现地表下沉、河道冒泥浆水等险情,最大下沉量达到 38 cm。

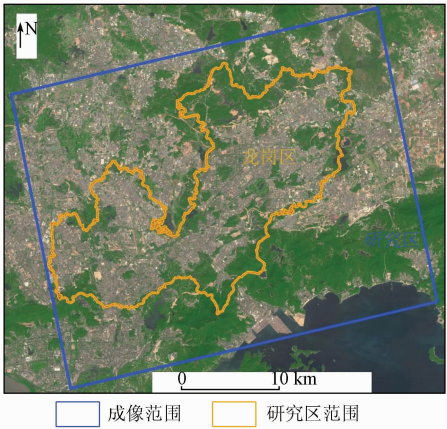


图 1 研究区地理位置
(GF-1 B3(R), B2(G), B1(B) 真彩色合成影像)
Fig. 1 Geographical location of the study area

1.2 数据源

本研究使用了 35 景时间序列 Sentinel-1A 渐进扫描 (terrain observation by progressive scans, TOPS) 成像模式单视复数据 (single look complex, SLC) 及精轨数据,像元大小为 13.95 m (方位向) × 2.33 m (侧视向),雷达波中心入射角约为 38.94°。升轨第 113 轨第 71 帧。

Sentinel-1A 时间跨度为 2019 年 9 月—2020 年 11 月,从 http://tianqi.2345.com/wea_history/72039.htm 获取了这一时段内 Sentinel-1A 成像日期 (共 35 d) 的龙岗区历史天气状况,阴、多云、雨天气共计 32 d,占比 91.4%,如表 1 所示。为了降低斑点噪声,增加相干性,提高配准精度,同时使得像

表 1 Sentinel-1A 成像日期龙岗区天气状况

Tab.1 Weather conditions in Longgang District on Sentinel-1A imaging date								
ID	成像日期	天气状况	ID	成像日期	天气状况	ID	成像日期	天气状况
1	20190905	大雨转雷阵雨	13	20200127	多云	25	20200713	多云转晴
2	20190917	雷阵雨	14	20200208	多云	26	20200725	阴转多云
3	20190929	晴	15	20200303	多云转小雨	27	20200806	阴转阵雨
4	20191011	晴转多云	16	20200315	多云	28	20200818	中雨转暴雨
5	20191023	多云	17	20200327	多云转雷阵雨	29	20200830	暴雨转多云
6	20191104	晴	18	20200420	阴转多云	30	20200911	小雨转雷阵雨
7	20191116	多云	19	20200502	多云	21	20200923	阴转雷阵雨

(续表)

ID	成像日期	天气状况	ID	成像日期	天气状况	ID	成像日期	天气状况
8	20191128	多云	20	20200514	多云	32	20201005	阴
9	20191210	晴	21	20200526	大雨转阵雨	33	20201017	多云
10	20191222	多云	22	20200607	暴雨	34	20201029	阴转多云
11	20200103	阴转多云	23	20200619	阴转晴	35	20201110	阴转多云
12	20200115	多云	24	20200701	大雨转雷阵雨			

元地面分辨率长宽大体一致,干涉处理过程对 SLC 数据做了 1 m(方位向)×4 m(距离向)多视处理,多视后像元大小为 13.95 m(方位向)×14.83 m(距离向)。另外,从美国国家航空航天局网站搜集了 30 m 空间分辨率的 SRTM DEM 数据,用于去除地形相位和地理编码。

2 研究方法

本研究总体技术方法流程如图 2 所示。首先介绍干涉相干性最优原则生成 SBAS InSAR 像对连接图方法,采用此方法生成的去平干涉图集和 SBAS

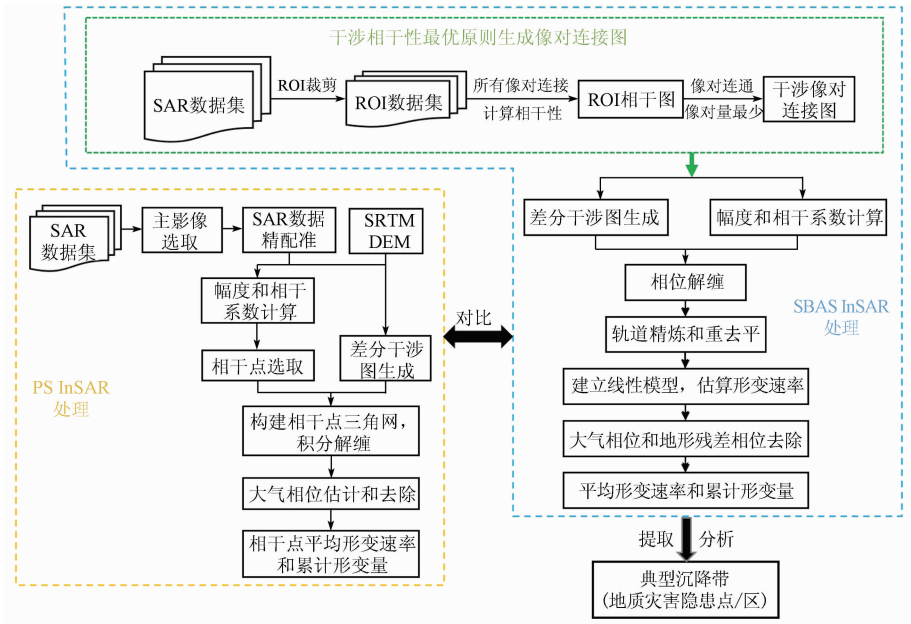


图 2 总体技术方法流程
Fig.2 Overall technology and method flow

InSAR 技术反演研究区地表形变信息;而后与 PS InSAR 反演的研究区地表形变结果进行对比;最后,使用 SBAS InSAR 地表形变结果提取了研究区主要沉降带,作为 InSAR 普查出的研究区滑坡、崩塌和地面塌陷等地质灾害风险的隐患点(区),并分析、推断了地表形变成因。

2.1 相干性最优生成连接图

为了优选干涉相干性较高的像对组建像对连接图,张永红等^[5]综合影像集时空基线分布状况、像对连通性和干涉相干性,提出了干涉相干性最优原则。针对研究区多云多雨高湿引发的 InSAR 干涉相干性降低和失相干现象,本研究使用干涉相干性最优原则生成 SBAS InSAR 像对连接图,干涉相干性最优原则流程如图 2 中绿色虚线矩形框所示。干涉相干性最优原则具体步骤为:①选择 SAR 影像研究区内 400 像元×400 像元的感兴趣区(region

of interest,ROI),生成 ROI 全部连接像对以及相干图集,均为 $N(N-1)/2$ 个, N 为影像个数。ROI 的选取可遵循高相干地物(如建筑物、道路、桥梁)和低相干地物(如植被、裸地、湿地)各占 50% 且避开陡峭斜坡的原则;②对所有 ROI 相干图集按照相干平均值(ROI 相干图 16 000 像元的平均值)由高到低排序;③以步骤②确定的顺序依次递增选择干涉像对,直到所有干涉像对连通为止,形成 M 个干涉像对组建的像对连接图,即 $M[N(N-1)/2]$ 。

2.2 SBAS InSAR

为了解决由于时空基线过长引起的失相干问题,Berardino 等^[12]提出了 SBAS InSAR 技术。SBAS InSAR 不需要较多 SAR 影像个数,可显著增加有效干涉像对个数;有效利用覆盖场景内的分布式相干点,一定程度上可用于非城区的自然场景。SBAS InSAR 需要对每个干涉图进行相位解缠,而如果相

邻像元存在相位不连续或相位周跳则将产生局部相位解缠误差。

从 N 景影像中选择一景影像为超级主影像,其余同轨影像都与之精配准。采用干涉相干性最优原则生成的像对连接图作为 SBAS InSAR 的像对连接图,如图 2 中蓝色虚线框所示,并且使像对连接图中干涉像对互相精配准,基线估计。设置多视参数,幅度计算和相干计算,结合 DEM 数据去除平地相位和地形相位,生成 M 个差分干涉图并滤波,使用最小费用流技术进行相位解缠。使用 DEM、相干图和解缠相位图选择控制点,对所有差分干涉图进行基线精化。重新去除平地相位与地形相位,生成 M 个新的差分干涉图。对差分干涉图进行滤波,得到滤波后差分干涉图。

t_A 和 t_B 时刻的 2 景影像生成的第 i 幅滤波后差分干涉图中 (x,y) 像元的差分干涉相位表示为:

$$\Delta\varphi_i(x,y) = \varphi(t_B,x,y) - \varphi(t_A,x,y) \approx \frac{4\pi}{\lambda}\Delta\varphi_{\text{disp}}(t_{B-A}^i,x,y) + \frac{4\pi}{\lambda}\frac{b_{\perp,i}\Delta d}{r(t_{B-A}^i)\sin(\theta^i)} + \frac{4\pi}{\lambda}\Delta\varphi_{\text{atm}}(t_{B-A}^i,x,y), \quad (1)$$

式中: $i=1,2,\cdots,M$; $\Delta\varphi_{\text{disp}}$ 为形变相位差; t_{B-A} 为 t_A 和 t_B 时刻的 2 景影像的时间基线; λ 为电磁波波长; r 为雷达传感器到目标直线距离; θ 为雷达入射角; $b_{\perp}$ 为垂直基线; Δd 为高程残差; $\Delta\varphi_{\text{atm}}$ 为大气相位差。

通过设定平均相干系数阈值、幅度离差阈值和平均幅度阈值,选取了高相干点目标。通过局部 Delaunay 三角网连接所有高相干点目标, t_A 和 t_B 时刻的 2 景影像生成的第 i 幅滤波后差分干涉图中三角网上的任一条边,其 2 顶点 m 和 n 之间的相位模型为:

$$\Delta\varphi_{m,n}(t_{B-A}^i) = \frac{4\pi}{\lambda}t_{B-A}^i\Delta v_{m,n} + \frac{4\pi}{\lambda}\frac{b_{\perp,i}t_{B-A}^i}{r(t_{B-A}^i)\sin(\theta^i)}\Delta\xi_{m,n} + \Delta\beta_{m,n} + \Delta\alpha_{m,n} + \Delta n_{m,n}, \quad (2)$$

式中: $\Delta\varphi_{m,n}$ 为 2 个相邻高相干点 m 和 n 之间的相位差; Δv 和 $\Delta\xi$ 分别为形变速率和高程误差增量; $\Delta\beta$ 为非线性形变相位项; $\Delta\alpha$ 为大气影响相位项; Δn 为噪声相位项。设置大气影响相关距离为 1.2 ~ 1.5 km (经验值),当三角网 2 个相邻高相干点间距在大气影响相关距离内时,可认为 $\Delta\alpha$ 为 0。而非线性形变相位和噪声相位都是随机信号,积分值接近 0。而后式(1)可以简化为:

$$B\psi = \Delta\psi, \quad (3)$$

式中 B 为 $M \times N$ 矩阵; ψ 为未知形变相位向量。用 2 个时刻之间的平均速率 v 代替其中的未知相位,得到:

$$Bv = \Delta\psi. \quad (4)$$

矩阵 B 是秩亏矩阵,所以使用奇异值分解方法对 B 进行伪逆运算,得到 v 的广义逆解。对各时段内的形变速率进行积分就可得到时间序列形变量。

2.3 PS InSAR

Ferretti 等^[17-18] 首次提出了 PS InSAR 技术。PS InSAR 通过选择长时间序列后向散射较强且相位较稳的相干点目标以提高干涉相干性,并基于这些相干点目标反演和表征影像覆盖场景内地表形变信息。PS InSAR 在城市高分辨率地面沉降尤其重点基础设施的高分辨率形变监测中已得到广泛应用,但 PS InSAR 对同区域同轨 SAR 影像数量需求较多(一般应多于 25 景),并且大量相干点的迭代回归或网平差导致运算效率降低。

从 N 景影像中选择一景影像作为主影像,其余同轨影像作为辅影像。将所有辅影像与主影像进行精配准,同名点配准标准差通常应小于 0.25 个像元,估计基线。设置多视参数,计算幅度和相干系数,结合 DEM 和空间基线,从 $N-1$ 幅干涉相位图相位中减去平地相位和地形相位,即可获得 $N-1$ 幅差分干涉图相位。

通过设定平均相干系数阈值、幅度离差阈值和平均幅度阈值,选取相干点。第 i 幅差分干涉图中相干点 (x,y) 的相位可表示为:

$$\varphi^i(x,y) = \left[\frac{4\pi}{\lambda}t_{B-A}^iv(x,y) + \varphi_{\text{non-linear}}^i(x,y) \right] + \frac{4\pi}{\lambda}\frac{b_{\perp,i}}{r(t_{B-A}^i)\sin(\theta^i)}\xi(x,y) + \varphi_{\text{atm}}^i(x,y) + \varphi_{\text{noise}}^i(x,y), \quad (5)$$

式中: ξ 和 v 分别为高程误差和线性形变速率; $\frac{4\pi}{\lambda}tv$ 和 $\varphi_{\text{non-linear}}$ 分别为线性形变和非线性形变相位; $\frac{4\pi}{\lambda}\frac{b_{\perp}}{r(t)\sin\theta}$ ξ 为 DEM 引起的高程误差相位; φ_{atm} 和 φ_{noise} 分别为大气相位和噪声相位。

通过局部 Delaunay 三角网连接所有相干点,小于设定距离阈值(一般为 1.2 ~ 1.5 km)的相干点大气相位近似相等。因此对于三角网上的任一条边,其 2 顶点 m 和 n 之间的相位差为线性模型为:

$$\Delta\varphi_{m,n}(t_{B-A}^i) = \frac{4\pi}{\lambda}t_{B-A}^i\Delta v_{m,n} + \frac{4\pi}{\lambda}\frac{b_{\perp,i}t_{B-A}^i}{r(t_{B-A}^i)\sin(\theta^i)}\Delta\xi_{m,n}. \quad (6)$$

采用整体相位相干系数法求取 Δv 和 $\Delta \xi$ 。而后对三角网的每条可靠连接边进行积分得到解缠的形变相位^[20],使用时空滤波器估计和去除形变相位中的大气相位,最终得到每个相干点的平均形变值和累计形变量。

3 结果与分析

首先对研究区 Sentinel-1A 数据开展 SBAS InSAR 处理。按照图 2 流程,使用干涉相干性最优原则生成了 595 个 ROI 全部连接图(图 3(a))以及相干图,对所有 ROI 相干图集按照相干平均值由高到

低排序,按照每间隔 5 个列出排序前 101 个 ROI 相干图平均值,见表 2,最终形成了 84 个干涉像对(图 3(b))。选择 2020 年 3 月 3 日(影像 ID: 15)作为 SBAS InSAR 超级主影像,其他 34 景影像都与之精配准,连接图中干涉像对互相精配准,设置 1 m(方位向)×4 m(距离向)多视参数生成干涉图。连接图中 84 个像对的去平干涉图按照每间隔 5 个列出,见表 3,表中白框为 ROI,表 3 序号与表 2 序号含义相同。由表 3 可知,随着像对相干性降低,去平干涉图的干涉质量逐渐下降,但第 84 个去平干涉图仍有较多的相位信息,因此本实验后续地表形变信息 SBAS InSAR 反演未考虑删除影像,而是决定使用这

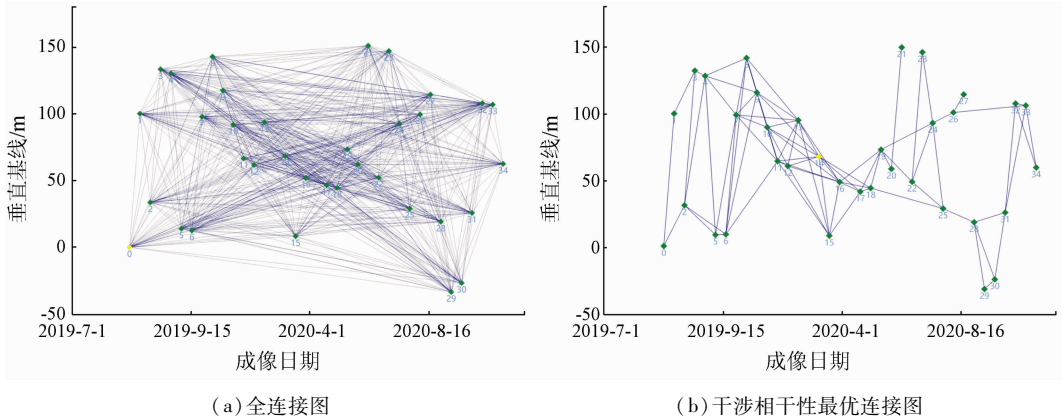


图 3 干涉像对连接图

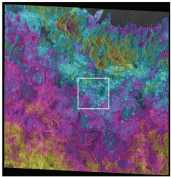
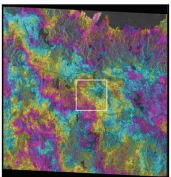
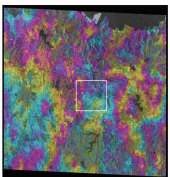
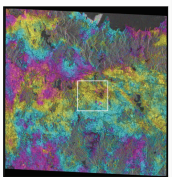
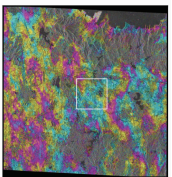
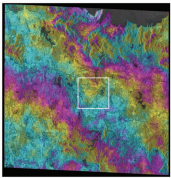
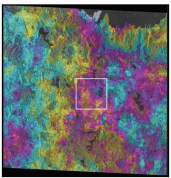
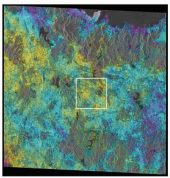
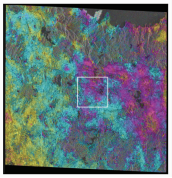
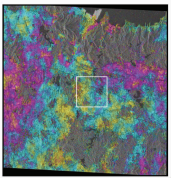
Fig.3 Connection diagram of the interferogram pairs

表 2 ROI 相干图平均值降序排列

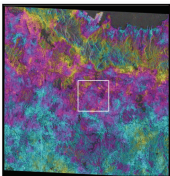
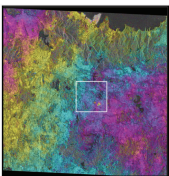
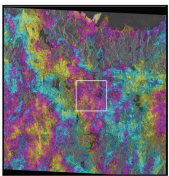
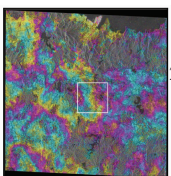
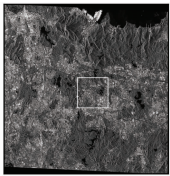
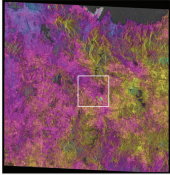
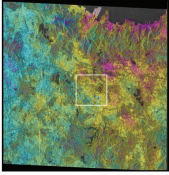
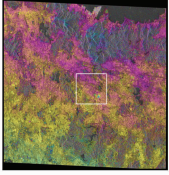
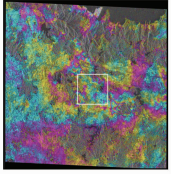
Tab.2 Average values of ROI coherence graph arranged in descending order									
序号	ID1	ID2	相干均值	构连接图	序号	ID1	ID2	相干均值	构连接图
1	12	13	184.15	是	36	9	13	162.93	是
6	5	6	173.33	是	41	28	29	162.10	是
11	11	12	171.34	是	46	14	18	161.52	是
16	10	13	168.49	是	51	17	19	160.50	是
21	16	17	166.98	是	56	7	13	159.51	是
26	29	30	165.00	是	61	10	16	159.00	是
31	10	14	164.06	是	66	6	11	158.71	是
序号	ID1	ID2	相干均值	构连接图	序号	ID1	ID2	相干均值	构连接图
71	24	26	158.33	是	76	31	33	157.93	是
81	19	24	157.43	是	86	8	14	156.96	否
91	10	15	156.21	否	96	6	10	155.59	否
101	6	12	155.01	否					

注: 由于篇幅原因,此表按照每间隔 5 个列出排序前 101 个 ROI 相干图平均值。

表 3 连接图中去平干涉图

Tab.3 Flattening interferogram in connection diagram									
序号	去平干涉图	序号	去平干涉图	序号	去平干涉图	序号	去平干涉图	序号	去平干涉图
1		21		41		61		81	
6		26		46		66		84	

(续表)

序号	去平干涉图	序号	去平干涉图	序号	去平干涉图	序号	去平干涉图	序号	去平干涉图
11		31		51		71		20190905 幅度图	
16		36		56		76			

84 个像对。平均相干系数阈值为 0.6、幅度离差阈值为 0.3 和平均幅度阈值为 1.5,选取了 182.3 万个相干点。小于设定距离阈值 1.2 km 的局部 Delaunay 三角网相干点按式(2)进行相位差积分,使用时空滤波器去除每个相干点的大气相位,按式(3)—(4)进行 SBAS InSAR 反演,得到平均形变值和累计形变量。SBAS InSAR 技术获取了研究区 2019 年 9 月—2020 年 11 月平均形变速率如图 4 所示。

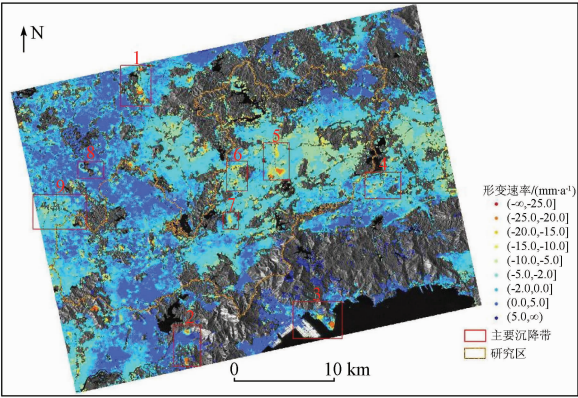


图 4 研究区 2019 年 9 月—2020 年 11 月地表形变 SBAS InSAR 反演结果

Fig.4 SBAS InSAR surface deformation field from September 2019 to November 2020 in the study area

而后采用 PS InSAR 按照图 2 流程对研究区 Sentinel-1A 数据进行了处理。选择 2020 年 5 月 14 日影像(影像 ID: 20)作为 PS InSAR 主影像,其他 34 景影像作为辅影像。将 34 景辅影像与主影像进行精配准,同名点配准标准差小于 0.2 个像元。通过设定平均相干系数阈值为 0.6、幅度离差阈值为 0.3 和平均幅度阈值为 1.5,选取了 115.5 万个相干点。小于设定距离阈值 1.2 km 的局部 Delaunay 三角网相干点按式(6)进行相位差积分,使用时空滤波器去除每个相干点的大气相位,得到平均形变值和累计形变量。PS InSAR 技术获取的研究区 2019 年 9 月—2020 年 11 月平均形变速率如图 5 所示。

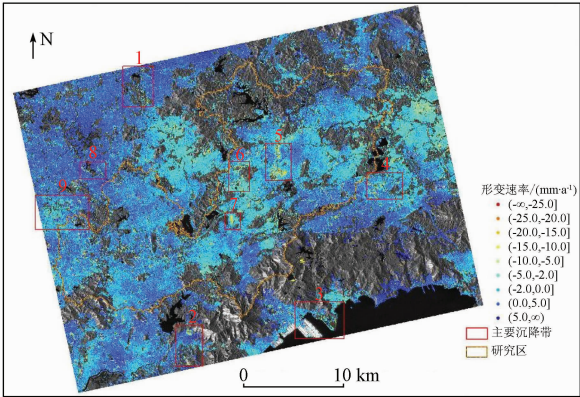


图 5 研究区 2019 年 9 月—2020 年 11 月地表形变 PS InSAR 反演结果

Fig.5 PS InSAR surface deformation field from September 2019 to November 2020 in the study area

在图 4 和图 5 中,正值代表地表抬升,负值代表地表沉降。SBAS InSAR 反演的研究区地表形变分布和范围与 PS InSAR 反演结果大体一致,验证了 SBAS InSAR 获取的研究区地表形变信息是准确、可靠的。而在低山和丘陵地带,较大地形起伏造成了相位突变,反演结果出现了少数个稀疏、离散的伪形变点。

最后基于 SBAS InSAR 反演结果,提取了研究区连接成片的 9 个主要沉降带,地理位置和形变速率如表 4。研究区内各沉降带沉降漏斗形变速率都

表 4 沉降带位置和形变速率
Tab.4 Location and deformation rate of subsidence zone

序号	位置	经度/(°)	纬度/(°)	形变速率/(mm·a ⁻¹)
1	塘实公司	114.124	22.789	-30.2
2	仙湖山庄	114.168	22.556	-29.7
3	深圳市天地东建混凝土有限公司	114.282	22.583	-27.5
4	坪山区中心广场	114.344	22.703	-26.2
5	龙岗街道龙园路	114.248	22.724	-31.5
6	大围工业区	114.212	22.711	-21.7
7	红棉四路	114.206	22.672	-20.9
8	腾龙工业区	114.080	22.718	-21.4
9	神力工业园	114.052	22.679	-20.6

在 -20 mm/a 以上;最大形变速率为 -31.5 mm/a ,位于龙岗街道龙园路沉陷区,该地区属于岩溶塌陷地质灾害易发区。

4 讨论

9 个主要沉降带的 SBAS InSAR 和 PS InSAR 反演地表形变结果对比见图 4—5 和表 4,对比 SBAS InSAR 和 PS InSAR 反演结果可知:①基于干涉相干性最优原则的 SBAS InSAR 反演的主要沉降带形变分布和范围与 PS InSAR 结果一致,说明 SBAS InSAR 反演的研究区形变信息准确、可靠,该结论与文献[5]结论较为一致;②在大形变量区域,SBAS

InSAR 相干点密度远大于 PS InSAR,说明 SBAS InSAR 能够提升干涉图集的干涉相干性,提取了更多相干点,该结论与文献[4,21]观点或结论较为一致;③结果表明在反演长时间序列大形变区域的完整形变场方面,SBAS InSAR 技术更具优势。

主要沉降带 SBAS InSAR 反演结果及相应地理位置的 Google Earth 影像图及其历史影像图见表 5,结合《深圳市地质灾害易发程度分区图(1:50 000)》^[22]和《全国 1:20 万地质图》^[23]以及地表沉降常见成因,初步分析研究区内主要沉降带的地质岩性、结构、构造和地质灾害易发类型,推断引起主要沉降带发生地表沉降的主要原因,如表 6。由表 5 和表 6 可知,主要沉降带大都位于工业园区、大型地上地下

表 5 主要沉降带 SBAS InSAR 与 PS InSAR 反演结果及影像

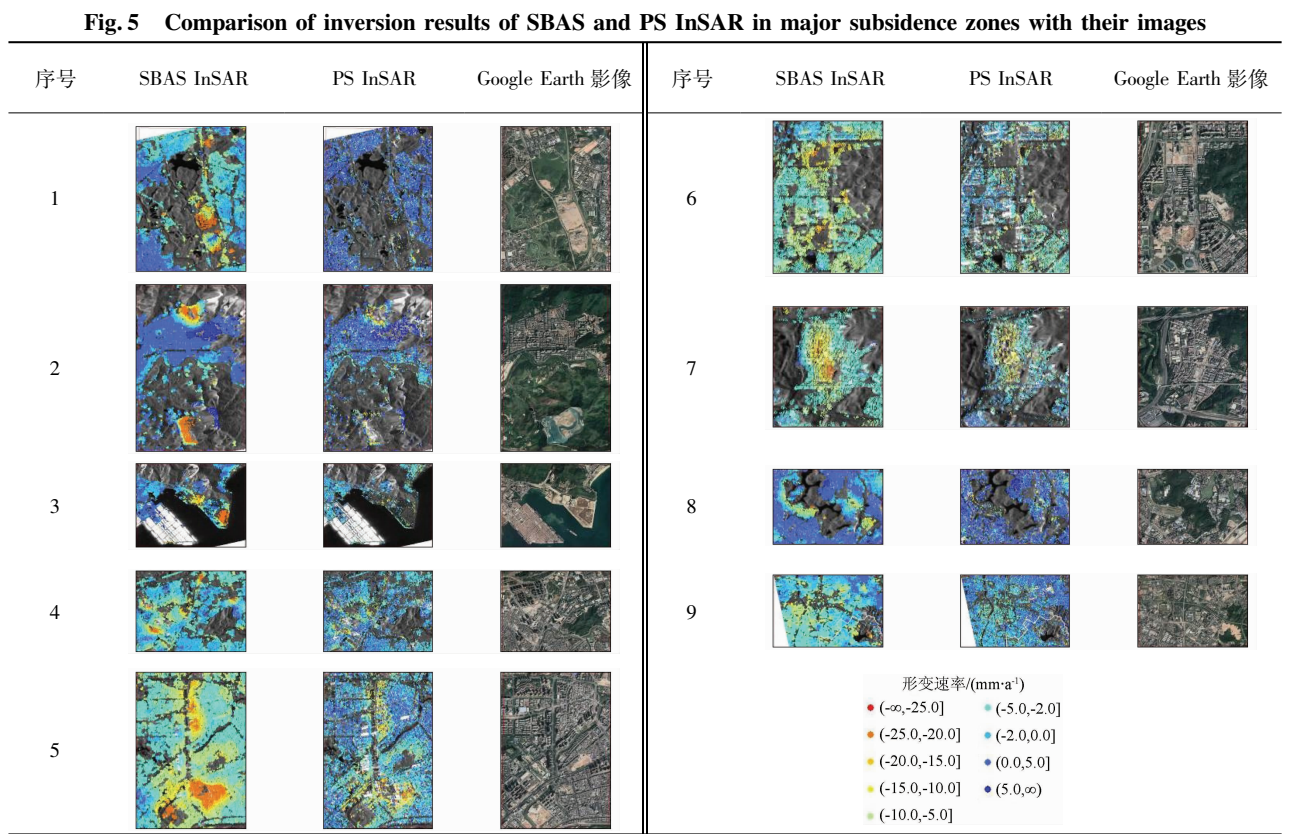


表 6 各沉降带沉降漏斗分布、地质岩性和结构构造

Tab. 6 Location distribution, geology, lithology and structure of sedimentation funnel in each subsidence zone				
序号	位置	沉降带各沉降漏斗位置	地质岩性和地质灾害易发类型	结构构造
1	塘实公司	横塘工业区南 200 m 的泥料搅拌厂; 凤凰钓鱼场南边的新建工厂	以砂岩-凝灰质粉砂岩为主,间有细砂岩-页岩	砂状结构-火山、沉积碎屑结构-泥质结构,层状构造
2	仙湖山庄	仙湖山庄别墅区; 宠物浩园北边	以砂质砾-砂-粉砂-泥为主,间有碳质页岩-石英砂岩	泥质结构-砂状结构,层状构造
3	深圳市天地东建混凝土有限公司	深圳市天地东建混凝土有限公司	以砂岩-碳质页岩为主	砂状结构-泥质结构,层状构造
4	坪山区中心广场	燕子岭东北边地铁 4 号线; 坪山区中心广场; 坪山游泳馆东边的中国石化加油站; 在建地铁 16 号线深圳开放大学附近	以坪山岩体(花岗岩类)为主,间有砂岩-泥岩	细粒结构-中粒结构-砂状结构-泥质结构,块状构造为主,间有层状构造

(续表)

序号	位置	沉降带各沉降漏斗位置	地质岩性和地质灾害易发类型	结构构造
5	龙岗街道龙园路	龙岗街道龙园路; 龙城大道与在建的地铁 16 号线交汇处; 南龙工业园, 原为密集的厂房和居民区, 2015—2017 年拆迁, 2018 年开始建设施工	以屯洋岩体(花岗岩类)为主, 岩溶塌陷地质灾害高易发区	中粒结构 - 斑状结构, 块状构造
6	大围工业区	大围工业区; 中海凯骊酒店, 26 层高, 位于在建的地铁 16 号线正西方向约 200 m; 龙城公园西门的地区, 2018 年 2 月—2019 年 7 月为新建厂房, 占地面积约为 3 300 m ²	地质岩性以砂岩 - 碳质页岩为主	砂状结构 - 泥质结构, 层状构造
7	红棉四路	位于在建的地铁 14 号线	以石灰岩 - 砂岩为主, 间有碳质页岩, 崩塌、滑坡地质灾害中易发区	生物碎屑结构 - 砂状结构 - 泥质结构, 层状构造
8	腾龙工业区	腾龙工业区	以砂岩 - 凝灰质粉砂岩为主, 崩塌、滑坡地质灾害高易发区	砂状结构 - 火山、沉积碎屑结构, 层状构造
9	神力工业园	无明显沉降漏斗, 沉降带分布较为广泛, 分布有较多工业园, 分别为联丰泰工业园、大力神工业园、神力工业园、卓越工业园、胜立工业园、亚洲工业园等	以吕山顶岩体、茜坑岩体为主, 间有白芒岩体、砂岩 - 凝灰质粉砂岩	砂状结构 - 火山、沉积碎屑结构 - 中粒结构 - 斑状结构, 块状构造

城建区和岩溶塌陷地质灾害易发区, 因此推断引起研究区地表沉降的主要原因有: ①工业采水和排水导致的地下水文环境和地质条件发生变化, 如“1 塘实公司”、“5 龙岗街道龙园路”和“8 腾龙工业区”; ②新建密集、大型、高层建筑群对地基施加的静荷载, 使地基土体发生压密变形, 如“2 仙湖山庄”和“6 大围工业区”; ③地下工程建设引发的采空沉降, 如“4 坪山区中心广场”、“5 龙岗街道龙园路”和“7 红棉四路”; ④持续强降雨触发岩溶塌陷地质灾害或触发斜坡体失稳而发生滑移, 如“5 龙岗街道龙园路”。

5 结论

针对研究区广泛分布的地表水、植被造成的 InSAR 干涉失相干和多云多雨高湿天气引起的严重大气相位延迟噪声, 采用干涉相干性最优原则生成干涉像对连接图, 使用了成像日期在 2019 年 9 月—2020 年 11 月的 35 景 Sentinel - 1A 影像进行了 SBAS InSAR 干涉处理, 得到了研究区周期内的地表形变信息, 而后, 通过使用 PS InSAR 反演得出的研究区地表形变信息对比了 SBAS InSAR 获取的研究区地表形变监测结果, 最后, 提取了研究区 9 个主要沉降带, 初步分析了这些沉降带的地物特征及引起沉降的主要原因。得出以下结论:

1) 与设置时间 - 空间基线阈值生成像对连接图方法相比, 干涉相干性最优生成干涉像对连接图的优点是无需 InSAR 干涉图挑选经验, 降低 InSAR 数据处理难度, 能够自动化生成, 节省人力, 时间效率高。

2) 相比 PS InSAR 技术, SBAS InSAR 在反演出长时间序列大形变速率方面更具优势: 一是通过干涉相干性最优进行像对组合, 保证高质量的干涉对用于 SBAS InSAR 处理; 二是高密度的相干点目标能够表现更完整的地表形变场。

3) 反演了 2019 年 9 月—2020 年 11 月龙岗区及周边地表形变信息, 提取的主要沉降带大都位于工业园区、大型地上地下城建区和岩溶塌陷地质灾害易发区, 沉降原因主要是与地下水文环境的改变、建筑群对地基的压实、地下工程建设、岩溶塌陷地和斜坡体失稳的持续强降雨触发等因素有关。获取的龙岗区及周边地表形变信息时效性较新, 可为该区地质灾害隐患早期识别和防治提供科学支撑。

志谢: 感谢欧洲航天局提供 Sentinel - 1A 数据! 感谢美国国家航空航天局提供的 SRTM DEM 产品!

参考文献 (References):

[1] 刘 飞. 基于 GIS 的地质灾害风险性评价——以龙岗区为例 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.

Liu F. Risk assessment of geological hazards based on GIS: A case study of Longgang District [D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[2] 徐 娜. 深圳龙岗: 主动作为勇于创新打造风险普查特色模式 [J]. 中国减灾, 2021, 7(5): 30 - 33.

Xu N. Shenzhen Longgang: Take the initiative to create a risk census characteristic mode as the courage to innovate [J]. Disaster Reduction in China, 2021, 7(5): 30 - 33.

[3] 葛大庆. 区域性地面沉降 InSAR 监测关键技术研究 [D]. 北

- 京:中国地质大学(北京),2013.
- Ge D Q. Research on the key techniques of SAR interferometry for regional land subsidence monitoring[D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing),2013.
- [4] 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.
- Zhu J J,Li Z W,Hu J. Research process and method of InSAR for deformation monitoring[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):1717–1733.
- [5] 张永红,刘冰,吴宏安,等. 雄安新区2012—2016年地面沉降 InSAR 监测[J]. 地球科学与环境学报,2018,40(5):152–162.
- Zhang Y H,Liu B,Wu H A,et al. Ground subsidence in Xiong'an New Area from 2012 to 2016 monitoring by InSAR techniques[J]. Journal of Earth Sciences and Environment,2018,40(5):152–162.
- [6] Lu Z,Zhang J X,Zhang Y H,et al. Monitoring and characterizing natural hazards with satellite InSAR imagery[J]. Geographic Information Sciences,2010,16(1):55–66.
- [7] 葛大庆,戴可人,郭兆成,等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):4–11.
- Ge D Q,Dai K R,Guo Z C,et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2019,44(7):4–11.
- [8] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1651–1659.
- Xu Q. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2020,45(11):1651–1659.
- [9] 廖明生,董杰,李梦华,等. 雷达遥感滑坡隐患识别与形变监测[J]. 遥感学报,2021,25(1):332–341.
- Liao M S,Dong J,Li M H,et al. Radar remote sensing for potential landslides detection and deformation monitoring[J]. National Remote Sensing Bulletin,2021,25(1):332–341.
- [10] 唐伟,廖明生,张丽,等. 基于全球气象再分析资料的 InSAR 对流层延迟改正研究[J]. 地球物理学报,2017,60(2):527–540.
- Tang W,Liao M S,Zhang L,et al. Study on InSAR tropospheric correction using global atmospheric reanalysis products[J]. Chinese Journal of Geophysics,2017,60(2):527–540.
- [11] 朱邦彦. InSAR 对流层延迟校正及其在地表沉降监测中的应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.
- Zhu B Y. Research on tropospheric delay correction of SAR interferometry and its application in land subsidence monitoring[D]. Wuhan: Wuhan University,2017.
- [12] 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.
- [13] Casu F,Manzo M,Pepe A,et al. SBAS – DInSAR analysis of very extended areas:First results on a 60 000 – km² test site[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters,2008,5(3):438–442.
- [14] Baek W K,Jung H S. Precise three – dimensional deformation retrieval in large and complex deformation areas via integration of off-set – based unwrapping and improved multiple – aperture SAR interferometry:Application to the 2016 Kumamoto earthquake[J]. Engineering,2020,6(8):927–935.
- [15] Ding J,Zhao Q,Tang M,et al. On the characterization and forecasting of ground displacements of ocean – reclaimed lands[J]. Remote Sensing,2020,12(18):2971.
- [16] 王国强,陈仁琛. 基于 InSAR 技术的流域库岸地质灾害监测研究[J]. 中国农村水利水电,2020,458(12):212–216.
- Wang G Q,Chen R C. Research on the monitoring of geological hazards on the bank reservoir based on InSAR technology[J]. China Rural Water and Hydropower,2020,458(12):212–216.
- [17] Ferretti A,Prati C. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2000,38(5):2202–2212.
- [18] Ferretti A,Prati C,Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2001,39(1):8–20.
- [19] Kim J S,Kim D J,Kim S W,et al. Monitoring of urban land surface subsidence using PSInSAR[J]. Geosciences Journal,2007,11(1):59–73.
- [20] Zhang L,Ding X L,Lu Z. Modeling PSInSAR time series without phase unwrapping[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2011,49(1):547–556.
- [21] 侯安业,张景发,刘斌,等. PS – InSAR 与 SBAS – InSAR 监测地表沉降的比较研究[J]. 大地测量与地球动力学,2012,32(4):125–128.
- Hou A Y,Zhang J F,Liu B,et al. Comparative study on monitoring surface subsidence with PS – InSAR and SBAS – InSAR[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2012,32(4):125–128.
- [22] 深圳市规划和自然资源局. 深圳市地质灾害防治规划(2016—2025年)[EB/OL]. (2018–07–13)[2022–05–08] http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/ghjh/csggh/zxgh/content/post_1317024.html.
- Planning and Natural Resources Bureau of Shenzhen Municipality. Plan for prevention and control of geological hazards of Shenzhen Municipality (2016–2025) [EB/OL]. (2018–07–13)[2022–05–08] http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/ghjh/csggh/zxgh/content/post_1317024.html.
- [23] 中国地质调查局. 地质云 3.0 [DB/OL]. (2021–03–11)[2022–05–08] <http://geocloud.cgs.gov.cn>.
- China Geological Survey. Geocloud 3.0 [DB/OL]. (2021–03–11)[2022–05–08] <http://geocloud.cgs.gov.cn>.

Application of the time – series InSAR technology in the identification of geological hazards in the Pearl River Delta region

JIANG Decai^{1,2,3}, ZHENG Xiangxiang^{2,3,4}, WANG Ning³, XIAO Chunlei³, ZHU Zhenzhou³

(1. Northwest Institute of Eco – Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China Aero Geophysical Survey and
Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 4. Aerospace Information Research
Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In the Pearl River Delta (PRD) region, widespread surface water and vegetation are liable to cause interferometric synthetic aperture Radar (InSAR) interference decoherence, and the cloudy, foggy, rainy, and humid climates frequently cause severe atmospheric delay noise in InSAR data. Accordingly, targeting the Longgang District of Shenzhen City in the southeastern PRD, this study generated the connection graph of interference image pairs using the small baseline subset and InSAR (SBAS InSAR) technique based on interference coherence optimization. This study also obtained the surface deformation information of Longgang District from September 2019 to November 2020 based on 35 scenes of Sentinel – 1A images. It then compared the surface deformation information with the inversion results obtained using the persistent scatterer InSAR (PS InSAR) technique. Finally, this study deduced the causes of surface deformation. The results are as follows: ① The inversion results of SBAS InSAR and PS InSAR yielded almost the same surface deformation fields. SBAS InSAR exhibited a much higher coherent point density than PS InSAR in the region with high – amplitude deformation. This indicates that the SBAS InSAR based on the optimal interference coherence can yield accurate and reliable inversion results, enjoying more advantages in the inversion for a complete deformation field. ② The primary causes of surface deformation in Longgang District and its surrounding areas include unstable Karst collapse or slope triggered by continuous heavy rainfall, the changes in the underground hydrogeological environment caused by industrial mining and drainage, the subsidence of mining gob induced by underground construction, and static foundation load imposed by new high – rise buildings. The technical route of this study can provide a reference for the automation and engineering application of InSAR in the early identification of geological hazards in the PRD region.

Keywords: interference coherence optimization; Pearl River Delta; Longgang District; InSAR

(责任编辑: 张 仙)