

引用格式: 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.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2020.2.0416

基于 Sentinel-1A 数据的天津地区 PS-InSAR 地面沉降监测与分析

卢旺达^{1,2}, 韩春明¹, 岳昔娟¹, 赵迎辉¹, 周格仪¹

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 航空遥感中心, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为有效预防地面沉降带来的灾害, 利用 2015 年 4 月~2018 年 2 月天津地区的 24 景 Sentinel-1A 数据, 进行了永久散射体干涉测量处理, 并使用高精度轨道数据和 TanDEM-X DEM 修正残差相位, 提取了 3 a 的地面沉降结果, 结合土地利用类型、水文、地质和交通等数据, 分析了多处沉降地区的特征和形成原因, 最后和小基线集方法的监测结果进行对比分析。结果表明: 近 3 a 来天津城区沉降治理效果显著, 平均沉降速率在 8 mm/a 以内, 郊区沉降仍然严重, 沉降速率在 50~70 mm/a, 沉降最为严重的区域为武清区王庆坨镇, 3 a 累计沉降量超过 200 mm, 并且有和其他沉降漏斗连成片的趋势。地面沉降发生的区域与地下水漏斗形成的区域基本一致, 且两种方法得到的累积形变量差值 95% 在 5 mm 以内, 说明本研究结果可以为天津市地质灾害防治提供数据支撑和决策依据。

关键词: 地表形变; 地下水; 干涉测量; 永久散射体

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2020)02-0416-08

1 引言

地面沉降是城市的主要地质灾害之一。随着城市建设的不断加快, 许多城市开始出现地面沉降, 有些地区甚至出现明显的沉降漏斗^[1-4]。为了有效控制地面沉降的发展速度, 降低其带来的危害性, 地面沉降监测就起到了至关重要的作用。地面沉降监测是通过精确测量地表高程的变化情况, 从而研究地表微小形变的形成原因与发展趋势, 缓解沉降所带来的不利影响。传统测量地面沉降的方法包括水准测量、基岩标测量和分层标测量^[5]。但这些技术都只能获得地面离散点的沉降信息, 不能进行大范围地区的动态监测^[6-8]。时间序列合成孔径雷达干涉测量技术(Time Series InSAR, TS-In-

SAR)是近年来发展的新技术, 不受时间以及天气的影响, 能够在较大范围内实时监测地面的微小形变。Ferretti等^[9]提出的永久散射体干涉测量技术(Persistent Scatterer InSAR, PS-InSAR)是 TS-InSAR 中的一种, 对城市地区沉降监测效果较好, 监测精度可以达到毫米级。

Sentinel-1A 是欧空局 2014 年发射的 C 波段雷达卫星, Sentinel-1B 于 2016 年发射升空, 与 1A 卫星形成双星座, 6 d 即可覆盖全球。TOPS 成像模式是 Sentinel-1 卫星上默认的成像模式, 该模式是在成像过程中依次扫描各个测绘带, 通过牺牲方位向分辨率来提高测绘带宽, 成像幅宽可以达到 250 km, 是迄今为止可用来进行星载干涉处理的最大幅宽^[10]。随着 Sentinel-1A 发射时间越来越长, 数据积

收稿日期: 2018-11-01; 修订日期: 2020-03-16

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类)项目(XDA19030101)。

作者简介: 卢旺达(1993—), 男, 辽宁阜新人, 硕士研究生, 主要从事雷达干涉测量地表形变监测研究。E-mail: luwd@radi.ac.cn

通讯作者: 韩春明(1971—), 男, 吉林吉林人, 研究员, 主要从事雷达系统的研制以及雷达参数定标等研究。E-mail: hancm@radi.ac.cn

累量不断增大,但是研究人员对 Sentinel-1 TOPS 模式的长时序干涉分析较少。鉴于此,借助 Sentinel-1A 的精密轨道数据和最新公开的 TanDEM-X 高精度 DEM 数据,去除差分相位中的残余地形相位和轨道误差相位,进一步提高 PS-InSAR 地面沉降监测的精度。选取地面沉降严重的天津地区作为实验区^[11-13],采用 2015 年 4 月~2018 年 2 月的 Sentinel-1A 数据为数据源,得到了为期 3 a 的地面沉降监测结果,并结合水文、土地利用和交通线路等资料对沉降严重地区进行分析,最后使用小基线集方法(SBAS)对实验的可靠性进行验证。

2 研究方法

2.1 TOPS 模式干涉影像配准

Sentinel-1 卫星 TOPS 模式是在成像过程中依次扫描各个测绘带,通过牺牲方位向分辨率来提高影像的覆盖范围的一种新型技术。与传统的条带模式相比,TOPS 模式方位向多普勒中心频率是变化的,在干涉配准时使用常规的配准方法会在方位向产生相位跳变,严重影响干涉配准精度及后续形变反演^[14]。频移滤波及增强谱分集算法可以消除因同一位置上 burst 多普勒中心频率变化较大产生的相位跳变问题。每个 burst 的线性相位跳变都是不同的,跳变程度和多普勒中心频率有关,方位向失配准引入的 TOPS 干涉相位偏差公式为:

$$\varphi_{err} = 2\pi f_{dc} \Delta t \quad (1)$$

其中: f_{dc} 为多普勒中心变化量; Δt 为由配准误差引入的干涉信号的时间偏移。为避免这一问题影响后续处理的精度,首先将同一 burst 使用互相关方法进行强度数据配准,估算距离向和方位向的偏移量。最后使用频移滤波和增强谱分集算法迭代到相位跳变消失为止^[15]。

2.2 PS 点提取及分析方法

PS-InSAR 是在差分干涉测量(D-InSAR)的基础上,提取高相干性且较为稳定的散射体,通常为人工建筑物及桥梁的金属角点等^[16]。由于这些 PS 点受时空相干的影响小,研究这些稳定点的相位组成,利用各相位分量的各自的特性,将地形、平地、大气等相位分离出去,得到精确的地表形变相位,进一步解算出形变信息。首先假设有研究区域内时间序列上的 N 幅雷达影像,根据空间基线和时间基线的情况,选出主辅影像,将二者进行配准并进行干涉处理,同时使用轨道数据和地形数据去除平

地和地形相位后,得到时间序列差分干涉图。

其中,第 i 幅差分干涉图的相位 $\Delta\varphi_{diff_i}$ 表示为:

$$\Delta\varphi_{diff_i} = \varphi_{def_i} + \varphi_{topo_i} + \varphi_{atm_i} + \varphi_{orb_i} + \varphi_{noise_i} \quad (2)$$

其中: φ_{def_i} 代表雷达视线方向的形变相位, φ_{def_i} 是地形误差相位, φ_{atm_i} 是大气延迟相位, φ_{orb_i} 和 φ_{noise_i} 分别是轨道误差相位和噪声相位。

地形和大气相位在一定范围内是相关的,以 x 为中心,取一定半径范围内,所有相位的平均值可以表示为:

$$\bar{\varphi}_{x,i} = \bar{\varphi}_{orb} + \bar{\varphi}_{atm} + \bar{\varphi}_{dem} \quad (3)$$

将式(2)-(1)得到上述 3 个相位分量的残差记为 n ,要选择时间序列上稳定的像元,也就是 n 很小,可以采用评估相位噪声进行提取:

$$\gamma = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp \{ \sqrt{-1} (\varphi_i - \tilde{\varphi}_i - \hat{\varphi}_{topo_i}) \} \right| \quad (4)$$

其中: N 为干涉对数, $\tilde{\varphi}_i$ 为相位平均值, $\hat{\varphi}_{topo_i}$ 为残余地形相位的估计值, γ 为相位噪声评估。根据相位噪声,辅助筛选出稳定的 PS 点。常见的 PS 点提取方法有振幅阈值法,振幅离差阈值法,振幅和振幅离差双阈值法。确定 PS 点之后,利用最小二乘法求解模型中的高程和线性形变速率,最终获取最佳的地表形变速率和累积沉降量^[17]。具体的流程图如图 1 所示。

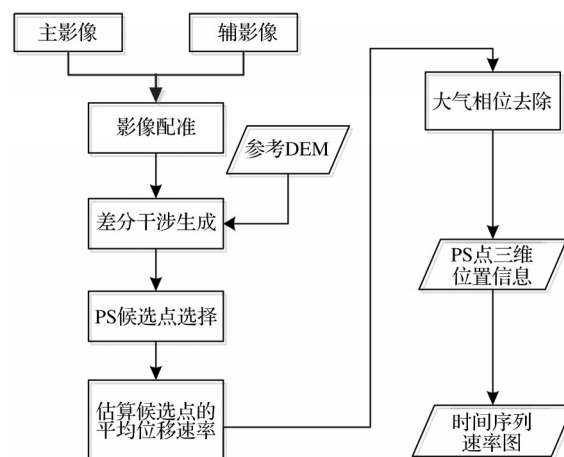


图1 PS-InSAR 算法流程图

Fig.1 Flow chart of PS-InSAR algorithm

3 数据处理

3.1 研究区概况

天津位于华北平原的东北部,地理位置十分优越,市内分布着多条高速铁路、公路和地铁。由于工业发展和基础建设较早,地下水超采现象十分严重,是我国比较严重的地面沉降地区。随着近年来

的有效治理,沉降情况得以改善。但市郊经济的发展和人口的流动,沉降趋势有所变化,呈现了市区相对稳定,郊区沉降连成片状等特点。本文的研究区为 116°51′~117°31′ E、38°52′~39°24′ N,如图 2 所示,覆盖了大部分天津地区,面积为 3 418 km²。研究区内地势平坦,海拔约 2 m^[18]。

表 1 Sentinel 1 卫星的参数

Table 1 Parameter of Sentinel 1

卫星参数	值
入射角/°	33.6
极化方式	VV
幅宽/km	250×170(地距向×方位向)
成像模式	宽幅干涉模式
标称分辨率/m	5×20(地距向×方位向)
实际像元大小/m	2.3×14.1(斜距向×方位向)
重访周期/d	12

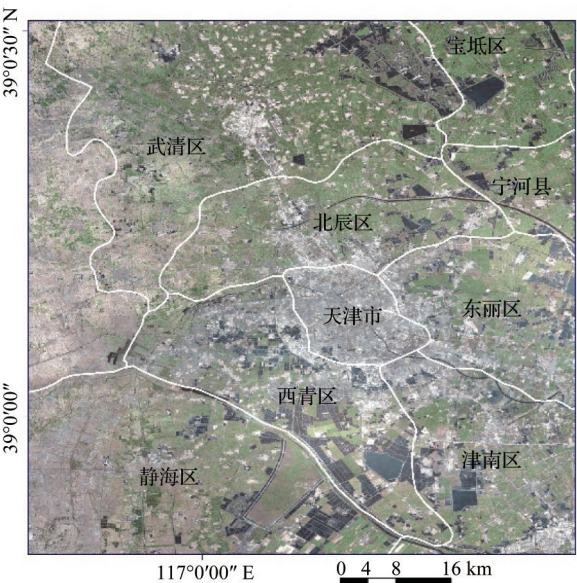


图 2 研究区域

Fig.2 Research area

3.2 数据情况介绍

利用 2015~2018 年的 24 景 Sentinel-1A 数据,成像模式为宽幅干涉模式(IW),主要参数详见表 1,其时间和空间基线如表 2 所示,时间基线最长为 3 a,空间基线绝对值在 150 m 以内。为了消除轨道误差和地形起伏带来的影响,使用欧空局提供的高精度轨道数据(定位精度优于 5 cm)及最新公开的 TanDEM-X DEM(90 m 分辨率,绝对高度误差约为 10 m)。地下水沉降漏斗数据来自天津市水资源公报。

3.3 数据处理流程

(1)预处理:获取时间序列上所有的可用 Senti-

表 2 Sentinel 1 数据集

Table 2 Data set of Sentinel 1

影像编号	成像时间	空间基线/m
1	2015-04-08	47.335 9
2	2015-05-02	137.977
3	2015-05-26	-39.325 1
4	2016-01-09	-92.200 6
5	2016-02-26	85.637 8
6	2016-05-08	-15.540 6
7	2016-06-01	-24.045
8	2016-07-19	6.800 89
9	2016-09-29	48.539 3
10	2016-10-23	32.034 8
11	2016-11-28	-66.825 2
12	2016-12-22	73.019 4
13	2017-01-27	-22.902 2
14	2017-03-04	36.904 2
15	2017-04-09	30.402 7
16	2017-05-15	-45.216 7
17	2017-06-08	0.000 0
18	2017-07-14	-62.347 5
19	2017-08-19	-13.959 7
20	2017-09-24	-14.087 1
21	2017-10-30	-17.429 3
22	2017-12-05	-54.201 5
23	2018-01-10	128.882
24	2018-02-15	27.402 3

nel-1 数据,在时间和空间基线最优的条件下,选择 2017-06-08 为主影像。

(2)干涉处理:将研究区的 23 景影像依次与主影像进行配准,配准和干涉处理时需采用外部 DEM 和精密轨道数据进行辅助,可以使 TOPS 模式配准精度达到千分之一像素。然后将配准好的主辅影像进行干涉处理,得到 23 对干涉图,根据空间基线参数和外部高精度 DEM 数据去除平地相位和地形相位。

(3)形变速率反演:将原始影像分块,每一块的面积为 30 km²,相邻两个影像块的重叠为 30%,根据振幅离差指数在每一块上计算出一个参考点作为 PS 候选点。假设每一个点的变化都是线性的,计算初步的形变速率。在 PS-InSAR 中,大气效应引起的相位延迟是限制测量精度的主要误差源之一,通过对时间上的高通滤波和空间上的低通滤波估算出大气相位并去除,最后得到高精度的地面沉降结果。

4 结果与分析

基于 PS-InSAR 技术获得了天津地区 2015~

2018年的地面沉降监测结果,结合水文、地质和交通等数据分析了地面沉降的形成原因及变化特点。

4.1 地形和轨道误差相位改正分析

根据前面 PS-InSAR 原理的差分相位组成,可以知道轨道相位误差,地形相位误差对差分干涉相位的准确性有很大影响。高精度的轨道数据和 DEM 数据可以辅助去除这些残余的相位,进一步提高沉降监测精度。图 3(a)和(b)分别为地形相位误差和轨道误差改正前后的干涉相位图。从结果可以看出,去除误差项之后的相位已有明显的改正。

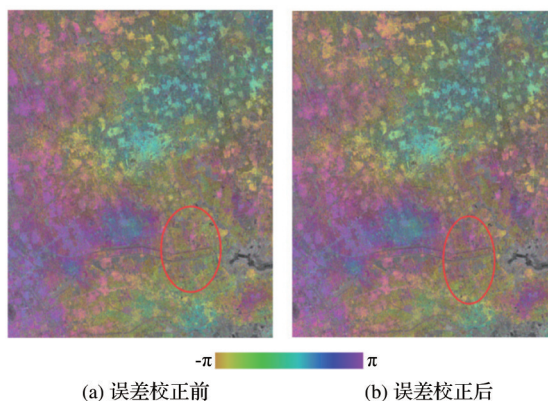


图3 差分相位改正

Fig.3 Differential phase correction

4.2 地面沉降现状分析

研究区 2015 年 4 月~2018 年 2 月的地面累积沉降结果如图 4 所示。结果表明,市辖区近 3 a 来地面沉降控制的比较好,沉降较小,平均沉降速率每年在 4~8 mm,是因为天津市对市辖区采取了地下水回灌措施^[19-20]。沉降较为严重的地区为包括王庆坨镇、双口镇和青光村、大寺镇、津南区 and 静海县大部分地区。这些地区的平均沉降速率每年 30 mm 左右,3 a 来最大沉降量可达 210 mm。结合已有的监测数据不难发现^[21-23],天津市辖区、滨海新区和津南区地面沉降得到有效的控制,是由于当地政府基本禁止开采地下水,而天津北部的郊区分布着许多的小型工厂,津南区近年来开展了许多大型工程,静海县近年来主要以发展农业为主,这些活动对地下水的需求依然很大,导致地面沉降并无改善。

根据本文研究区的结果,在这些沉降严重的地区内选出 6 个具有代表性的沉降点,绘制它们的时间序列曲线图并进行线性拟合,如图 5 所示。数据显示,各沉降点大体分布呈现线性规律。

4.3 典型区域沉降分析

为了详细研究沉降产生的原因,选取重点沉降

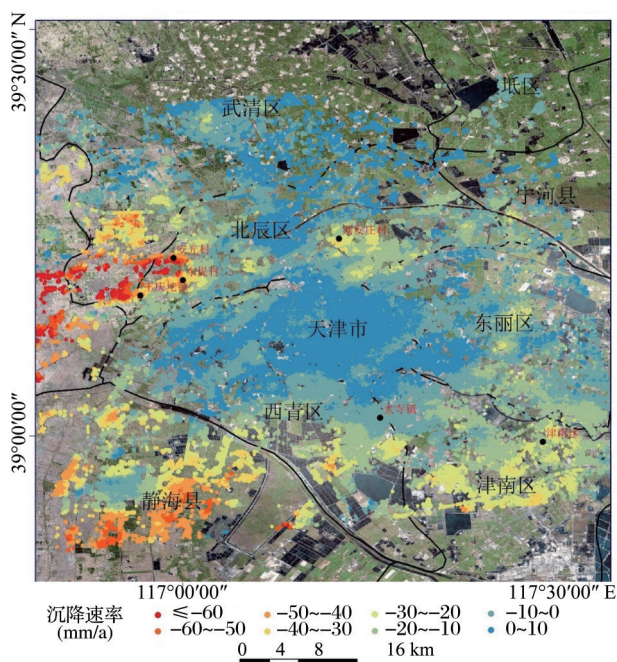


图4 天津市 2015~2018 年地面沉降速率图

Fig.4 Land subsidence rate map for 2015~2018 years in Tianjin

区域为典型研究区域,将沉降速率图与几何校正的 GoogleEarth 影像图进行叠加分析。从图 6(a)可以看出,王庆坨镇内主要分布着种植基地、密集的住宅区和工业园区。图中显示,该地区为工业园,区内主要有食品厂、机械工程公司、金属制品厂、锅炉厂以及其他生产企业。日常生活用水和工业生产的用水需求都比较大,地下水开采严重,导致该地区发生严重的下沉。而且位于沉降漏斗中心的地下水开采会致使周边区域的地下水产生补充性的侧向径流,这也是沉降中心周边区域发生地表沉降的原因之一。

如图 6(b)所示,津南区近 3 a 来地面沉降十分严重,资料显示^[24],津南区地面沉降的主要原因是由于工厂和大量农田对地下水的需求,导致地下水超采。津南区近年来地下水开采量超过 1 000 m³,比东丽区和塘沽区开采强度大。2015 年津南区浅层咸水较少开采利用,深层地下水补给较差,近年来水位以下降为主。收集到 2014 至 2016 年的地下水资料,将形变速率与第 II、III 承压含水组水位降落漏斗进行叠加分析,结果显示严重沉降区与承压含水层组水位漏斗基本吻合,尤其与第 III 承压含水层漏斗水位形态一致。分析沉降原因可知,十二五期间津南区开展了许多大型工程项目,包括小区住宅、学校和高架桥等工程,对该地区的

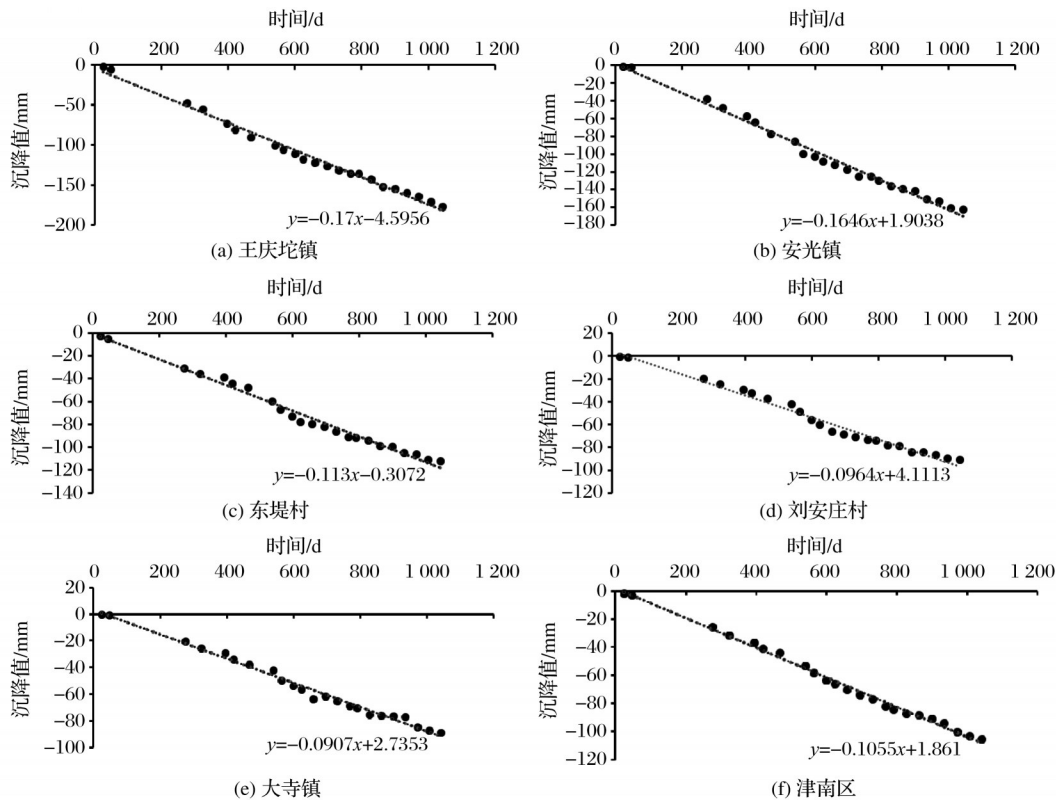


图 5 研究区域沉降特征

Fig.5 The settlement characteristics of the study area

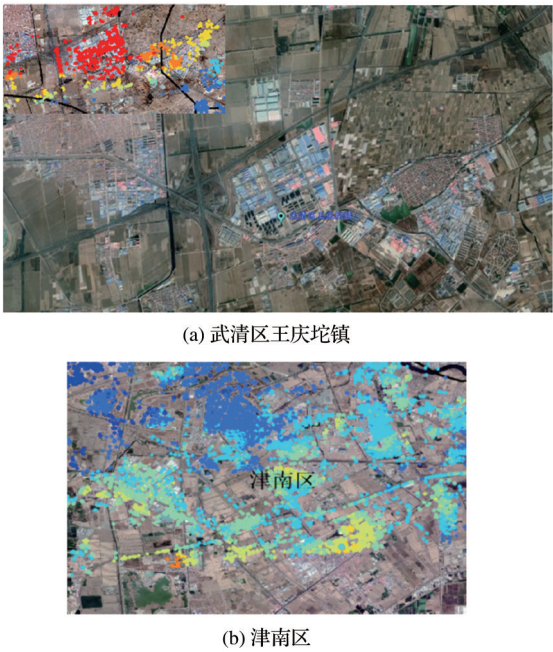


图 6 重点区域地面沉降速率及对应的土地利用类型

Fig.6 Land subsidence rate and corresponding land use types in key areas

地面沉降有一定的促进作用,这些大型工程建设对地面沉降影响的根本原因是工程建设中要不断地抽取地下水。

4.4 京沪高铁天津段沉降分析

图 7 为研究区内京沪高速铁路天津段 2015~2018 年沉降监测结果。可以看出 PS 点主要分布在铁路沿线建筑密集的城镇工业园区和居民区,沉降严重地段分别位于刘安庄村、静海区八里庄,为交通设施安全运行的隐患区,沉降速率在 40~50 mm/a,沿线其他地方沉降速率在 10 mm 左右,较为严重的八里庄村沉降区距离高铁路线为 1 km 以内,这些沉降区必然会对铁路工程安全造成影响。同时由于高铁线路经过居民聚集地,且近年来降水逐年减少,当地开采地下水来满足农作物的灌溉需求,导致周围区域沉降持续加剧;沿线的另一处沉降区为刘安庄村,村内分布着机械制造厂、金属加工厂等,这些工厂对地下水的需求量极大,这是导致该地区线路沉降的主要原因。如果这种不均匀沉降继续发展,有必要对高铁轨道的地基采取有效的检校维护,保证高速铁路的安全运营^[25]。

4.5 PS-InSAR 可靠性验证

由于实际测量的水准数据获取成本高,难度大,为了评价 PS-InSAR 方法的可靠性,采用小基线集 (Small Baseline Subset, SBAS) 方法对现有数据进行处理,得到沉降速率图,如图 8 所示。将两种方

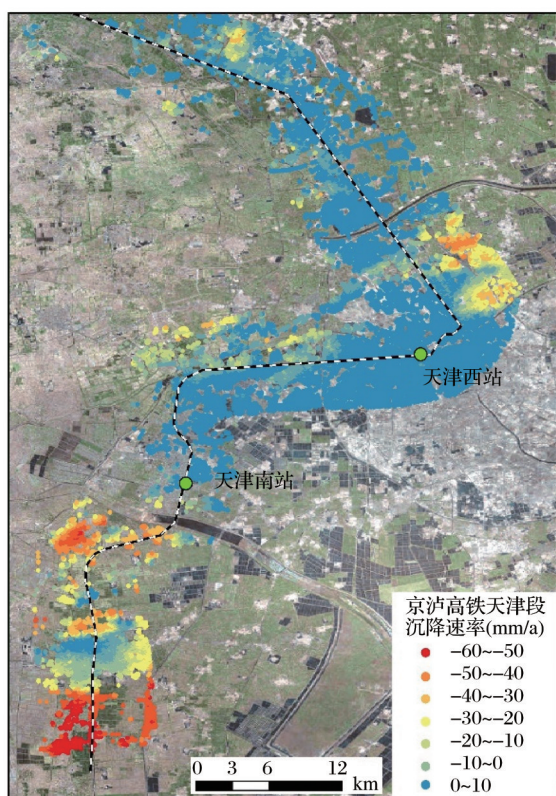


图7 京沪高铁天津段沉降监测速率图

Fig.7 Land subsidence rate map of Tianjin section of Beijing-Shanghai high speed railway

法得到的沉降结果进行对比得出,两种方法处理得到的结果基本一致。统计典型沉降区域内200个点的累积沉降量,绘制出散点图,如图9所示。可以看出,两种方法的得到的累计形变量误差的绝对值95%以上都在5 mm以内。基于已有文献对SBAS方法的研究^[25-27],可以验证本文PS-InSAR的实验结果是非常可靠的。

5 结 语

相比于传统的地面沉降监测手段,永久散射体时间序列干涉测量方法有着大范围、快速、自动化程度高等优势。本文利用2015年4月~2018年2月24景天津地区的Sentinel-1A TOPS模式数据,进行PS-InSAR地面监测实验,同时使用高精度的轨道数据和最新公开的TanDEM-X DEM辅助去除轨道误差相位和地形残差相位,得到3 a来地面沉降监测结果,并结合土地利用类型、水文数据、地质资料以及高铁线路数据,分析了重点沉降区域形成的原因并提出合理的解决方案,结论如下:

(1)近3 a天津市城区地面沉降治理效果显著,沉降得到明显改善,年平均沉降量在8 mm以内。

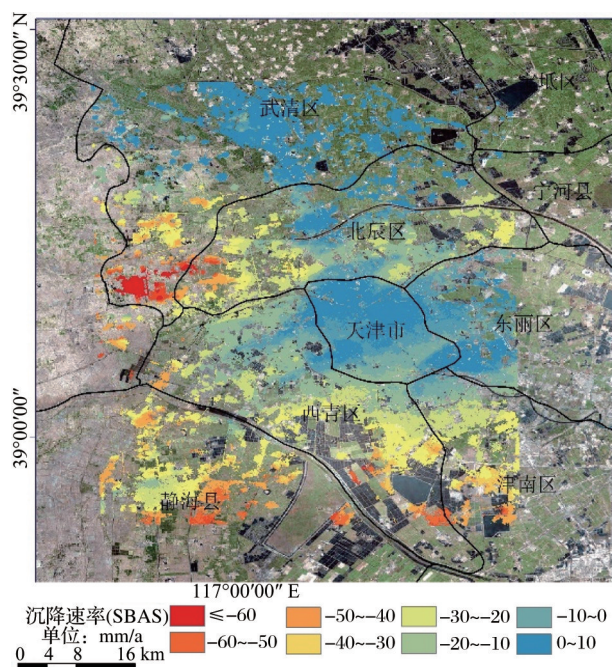


图8 实验区SBAS-InSAR沉降速率图

Fig.8 Land subsidence rate map of SBAS-InSAR Method for experimental area

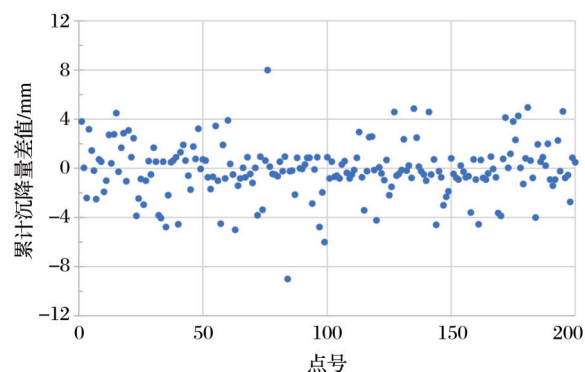


图9 两种方法相同测量点处的累积沉降量差值统计图

Fig.9 Cumulative deformation differences between the two methods in the common measurement points

(2)研究区内分布着较多的沉降漏斗,相邻的沉降漏斗有连成片的趋势。结合光学影像和地下水漏斗数据,不难发现,地面沉降主要原因是密集的工业园区和居民区过度开采地下水。

(3)津南区大面积沉降较为严重,并且该地区浅层水均为咸水,如果该地区不进行沉降治理,沉降会导致浅层咸水水位相对上升,渗透到浅层土壤中,势必会造成土壤的盐渍化,破坏生态平衡。为了防止研究区沉降的进一步发展,有效利用地下水资源和合理规划城市用地是缓解研究区持续沉降的办法。

(4)在监测结果中,发现京沪高铁天津段有两处严重沉降区,分别位于刘安庄村和静海区的八里

庄村,线路内沉降程度有很大的差异性,应当加强对铁路路基的维护保养。

(5)本文通过和PS-InSAR和SBAS两种方法对研究区进行地面沉降监测,得到累计形变量,发现两种方法的监测结果大致相同,差值不足5 mm,说明PS-InSAR方法能够有效地监测地面沉降。

参考文献(References):

- [1] Xie Rongan, Zhou Yuanhua, Hu Zheng. Application Research of Using SBAS to Monitor Ground Subsidence[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2015(8):70-73.[谢荣安,周元华,胡争.短基线集技术在地表形变监测中的应用研究[J].测绘通报,2015(8):70-73.]
- [2] Jiang Yuan, Yang Yan, Wang Haigang, *et al.* Distribution Characteristics and Influence Factors of Land Subsidence in Beijing Area[J]. Shanghai Land & Resources, 2016,43(6):2216-2228.[姜媛,杨艳,王海刚,等.北京平原区地面沉降的控制与影响因素[J].上海国土资源,2016,43(6):2216-2228.]
- [3] Ge Daqing. Research on Key Technologies of SAR Interferometry for Regional Land Subsidence Monitoring[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.[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.]
- [4] Wu Wenhao. Research on Ground Subsidence by InSAR Time Series[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(11):11-15.[吴文豪.利用雷达干涉时序分析方法研究地面沉降[J].测绘通报,2014(11):11-15.]
- [5] Zhang Xuedong, Ge Daqing, Wu Lixin, *et al.* Study on Monitoring Land Subsidence in Mining City based on Coherent Target Small-baseline InSAR[J]. Journal of Coal, 2012, 37(10):1606-1611.[张学东,葛大庆,吴立新,等.基于相干目标短基线InSAR的矿业城市地面沉降监测研究[J].煤炭学报,2012,37(10):1606-1611.]
- [6] Qiu Zhiwei, Yue Jianping, Wang Xueqin, *et al.* Research on Urban Surface Subsidence Monitoring based on SBAS[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2016(7):25-29.[邱志伟,岳建平,汪学琴,等.基于短基线集技术的城市地表沉降监测研究[J].测绘通报,2016(7):25-29.]
- [7] Luo Wenlin, Hou Wei, Han Xuan, *et al.* Status and Prediction of Land Subsidence in the Eastern Part of Beijing[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2015,30(2):52-59.[罗文林,侯伟,韩焯,等.北京东部区域地面沉降现状及其发展趋势预测[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2015,30(2):52-59.]
- [8] Zhang Youyou. Application of Ground Subsidence Monitoring in Tianjin Suburb based on Multi Temporal InSAR[J]. Urban Geotechnical Investigation and Surveying, 2016(6):65-69.[张又又.基于时序InSAR技术的天津郊区地面沉降监测应用[J].城市勘测,2016(6):65-69.]
- [9] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2001, 39(1):8-20.
- [10] Chan 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[J]. Remote Sensing for Land and 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.]
- [11] Lü Xiaowen, Song Li, Shao Xing, *et al.* The Suggestion and Application of Land Subsidence Monitoring in Tianjin[J]. Shanghai Land and Resources, 2017,38(2):26-30.[吕潇文,宋利,邵兴,等.天津市地面沉降监测技术应用及发展建议[J].上海国土资源,2017,38(2):26-30.]
- [12] Wang Miao, Lu Wang, Yi Changrong. Study on Land Subsidence Preventing Zonation in Tianjin[J]. Shanxi Architecture. 2015,41(11):56-57.[王淼,陆阳,易长荣.天津市地面沉降防治区划的研究[J].山西建筑,2015,41(11):56-57.]
- [13] Jin Zonghuang, Ding Shijun, Li Tao, *et al.* On Monitoring Tianjin Area Subsidence Funnel with Persistent Scatterers Interferometry[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(2):23-26.[金宗煌,丁士俊,李陶,等.天津地区沉降漏斗的监测研究[J].大地测量与地球动力学,2013,33(2):23-26.]
- [14] Zhang Xiaobo, Zhao Xuesheng, Ge Daqing, *et al.* Subsidence Monitoring of Huainan Coal Mine from Sentinel TOPS Images based on Stacking Technique[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2018,30(4):200-205.[张晓博,赵学胜,葛大庆,等.基于Sentinel TOPS模式Stacking技术监测淮南矿区沉降[J].国土资源遥感,2018,30(4):200-205.]
- [15] Wu Wenhao, Zhou Zhiwei, Li Tao, *et al.* A Study of Sentinel-1 TOPS Mode Co-registration[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017,46(9):1156-1164.[吴文豪,周志伟,李陶,等.精密轨道支持下的哨兵卫星TOPS模式干涉处理[J].测绘学报,2017,46(9):1156-1164.]
- [16] Yi Huiguo, Zhang Lei, Li Ning, *et al.* Method of Detecting Persistent Scatterers According to Standard Points[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2015, 35(4):684-688.[易辉国,张磊,李宁,等.参照标准点探测PS法[J].大地测量与地球动力学,2015,35(4):684-688.]
- [17] Li Guangyu, Zhang Rui, Liu Guoxiang, *et al.* Land Subsidence Detection and Analysis over Beijing-Tianjin-Hebei Area based on Sentinel-1A TS-DInSAR[J]. Journal of Remote Sensing, 2018,22(4):633-646.[李广宇,张瑞,刘国祥,等.Sentinel-1A TS-DInSAR京津冀地区沉降监测与分析[J].遥感学报,2018,22(4):633-646.]
- [18] Gao Junjie. Land Subsidence Mechanism and Countermeasures in Central Tianjin[D]. Beijing:China University of Geosciences (Beijing), 2017.[高俊杰.天津市中心城区地面沉降机理及防治对策[D].北京:中国地质大学(北京),2017.]
- [19] Yi Changrong. Latest Progress of Land Subsidence Control in Tianjin[J]. Haihe Water Resources, 2017(S1):42-43.[易长荣.天津市控制地面沉降工作最新进展[J].海河水利,2017

- (增刊1):42-43.]
- [20] Li Jiaqi, Li Xinjie, Liu Jie. Analysis on Land Subsidence Situation and Formation Reasons of Negative Land form Region in Tianjin. [J]. Jiangsu Science & Technology Information, 2017 (19): 68-70. [李佳琦, 李欣杰, 刘杰. 天津市低海拔地区地面沉降现状及成因分析[J]. 江苏科技信息, 2017(19): 68-70.]
- [21] Lei Kunchao, Chen Beibei, Gong Huili, *et al.* Detection of Land Subsidence in Tianjin based on PS-InSAR Technology [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40 (6): 106-111. [雷坤超, 陈蓓蓓, 宫辉力, 等. 基于 PS-InSAR 技术的天津地面沉降研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(6): 106-111.]
- [22] Wang Tao, Gu Lijuan, Zhan Huaming, *et al.* Research on Ground Subsidence Monitoring of Tianjin Area based on D-InSAR Technique [J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(6): 49-51. [王涛, 顾丽娟, 詹华明, 等. 基于 D-InSAR 技术的天津地区地面沉降监测[J]. 测绘科学, 2013, 38(6): 49-51.]
- [23] Dong Kegang, Wang Wei, Yu Qiang, *et al.* Ratio of Soil Loss to Groundwater-exploitation in the Tianjin Land Subsidence Area [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008, 35(5): 76-80. [董克刚, 王威, 于强, 等. 天津地面沉降区土水比论述[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(5): 76-80.]
- [24] Zhang Wanwan, Ke Yinghai, Deng Zeng, *et al.* Vertical Deformation Monitoring along Beijing-Tianjin Highspeed Railway (Beijing section) based on Multi-platform SAR Data [J]. China Sciencepaper, 2018, 13(2): 235-240. [张婉婉, 柯樱海, 邓曾, 等. 基于多源 SAR 数据的京津高铁北京段垂向形变监测[J]. 中国科技论文, 2018, 13(2): 235-240.]
- [25] Zhang Jinzhi, Huang Haijun, Bi Haibo, *et al.* Monitoring Ground Subsidence in the Modern Yellow River Delta based on SBAS Time-series Analysis [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2016, 41(2): 242-248. [张金芝, 黄海军, 毕海波, 等. SBAS 时序分析技术监测现代黄河三角洲地面沉降[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(2): 242-248.]
- [26] Luo Cheng. The Application of SBAS-InSAR Technology in Xi'an Land Subsidence Monitoring [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. [罗铖. 基于 SBAS-InSAR 的西安地表沉降监测[D]. 西安: 长安大学, 2012.]
- [27] Xu Wenbin, Li Zhiwei, Ding Xiaoli, *et al.* Application of Small Baseline Subsets D-InSAR Technology to Estimate the Time Series Land Deformation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(2): 452-461. [许文斌, 李志伟, 丁晓利, 等. 利用 InSAR 短基线技术估计洛杉矶地区的地表时序形变和含水层参数[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 452-461.]

Land Subsidence Monitoring in Tianjin with PS-InSAR Technique based on Sentinel -1 Data

Lu Wangda^{1,2}, Han Chunming¹, Yue Xijuan¹, Zhao Yinghui¹, Zhou Geyi¹

(1. Airborne Remote Sensing Center, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Land Subsidence is one of the most important geological hazards in many areas. In order to prevent disasters caused by land subsidence efficiently, 24 Sentinel-1A images covering area of Tianjin are choosed from 2015 to 2018. Based on Persistent Scatterers InSAR technique, the results of land subsidence for three years are extracted using the precise orbit data and TanDEM-X DEM and compared with the monitoring results of SBAS (Small Baseline Subset) method. Combined with land use types, hydrogeological and traffic data, the characteristics and formation reasons of several subsidence areas are analyzed. The experimental results show that: (1) In recent three years, the land subsidence in Tianjin urban area is relatively slow, with an average speed of less than 8 mm/a. However, suburban land subsidence is still serious with an average speed between 50 mm/a~70 mm/a. The most serious land subsidence area was Wangqingtu Town in Wuqing district, the total land subsidence was over 200 mm. And there is a trend of connectivity in these subsidence areas. (2) Land subsidence and the falling of groundwater levels have a very high spatial correlation and the difference between the cumulative shape variables obtained by the two methods of SBAS and PSInSAR is less than 5 mm. The results of this study can provide data support for the government of Tianjin.

Key words: Land subsidence; Groundwater; Interferometry; Persistent scatterer