

短时空基线 PS-InSAR 在北京地面沉降监测中的应用

杜钊锋¹, 宫辉力¹, 王 洒^{1,2}, 任永强¹, 侯 婕¹

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048; 2. 河南城建学院测绘系, 平顶山 467044)

摘要: 短时空基线 PS-InSAR 采用同时控制时间基线和垂直基线的方法, 在一定程度上避免了时空失相关问题。文中采用短时空基线 PS-InSAR 的方法监测北京区域地面沉降, 分析了区域地面沉降中的时间序列演化特征, 以及抽取地下水、断裂带对地面沉降的影响。结果发现时间序列上的地面沉降存在明显的季节性变化特征, 抽取地下水作为导致地面沉降的主要原因, 在一定程度上还取决于断裂带的影响, 地面沉降中心区域并没有完全与地下水漏斗吻合, 这可能与可压缩土层的厚度有关。

关键词: 短时空基线; PS-InSAR; 地面沉降

中图分类号: P642. 26

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2012)05-0116-05

星载合成孔径雷达干涉测量(InSAR)的发展是对地观测技术的重大突破, 尤其在应对重大自然灾害方面的监测, 如地震同震形变场和震间缓慢的地表形变监测、矿区沉陷的动态监测、火山活动的监测、城市地区长时间序列的地面沉降的监测, InSAR 干涉测量显示出强大的应用潜力。

在探测快速形变方面, D-InSAR 通过差分干涉图的相位信息能够较好地提取地表形变。然而, D-InSAR 技术在实际应用中仍受时间、空间失相关和大气效应的影响和严重制约, 尤其在探测缓慢形变方面。Ferretti 等提出了永久散射体(PS)技术方法^[1]。该测量技术能够有效降低时间、空间去相干影响以及减弱大气延迟引起的误差组分。Hooper 等提出了一种新的 PS 点识别及相位组分分析的方法——StaMPS, 即采用幅度离散特征和干涉相位空间相关性特征建立 PS 识别算法, 用于识别永久散射体^[2], 该算法能够在非城区(郊区)识别出一些稳定的像素, 也适用于非稳定形变区, 即无需先验形变速率知识。在一定程度上克服了由于时间去相干引起的干涉问题, 提高了干涉

像对的可用数量和干涉的时间分辨率。

Hooper 等提出了将 PS 方法和短时空基线方法结合, 采用同时控制时间基线和垂直基线, 在一定程度上避免了时空失相关问题, 提高了差分干涉测量的效果^[3]。先后有学者将短时空基线 PS-InSAR 监测地表形变应用在各自的研究中, 并进行了时间序列的形变分析^[4~5]。唐攀攀等采用不同模型对 PS-InSAR 的结果进行了误差分析^[6]。

本文在此基础上研究短时空基线 PS-InSAR 在北京地面沉降中的应用研究, 分析了北京区域地面沉降中的时间序列演化特征, 以及抽取地下水、断裂带和土层结构对地面沉降的影响。

1 方法的理论基础和关键技术

选取某一地区 $K+1$ 幅时序 SAR 影像, 将所有影像配准并取样到同一影像空间。借助外部 DEM 进行差分干涉处理, 得到 K 幅差分干涉图。将所有满足时间、空间基线限制的影像自由组合, 确定 PS 点, 并在此基础上评估空间相关组分、非相关组分视角误差, 进行相位解缠, 评估残余相位组分, 进而提取形变信息。

1.1 短时空基线干涉对的组合

对覆盖同一地区 N 幅 SAR 影像, 两两自由组合, 干涉对的数量最多为 $N \cdot [(N-1)/2]$, 采用同时控制时间基线和空间基线的方法进行影像组合筛选, 得到满足条件的干涉对。

1.2 PS 点的处理过程

在长时间序列 SAR 影像上, 一般选取裸露的岩

收稿日期: 2011-11-14; 修订日期: 2012-02-15

基金项目: 国家基金重点项目(41130744/D0107); 国家自然科学基金资助项目(41171335/D010702); 水利部公益性行业科研专项经费项目(200901091); 北京市自然科学基金(重点)(8101002)

作者简介: 杜钊锋(1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为 InSAR 监测地面沉降。

E-mail: duzhaofeng1987@126.com

石、人工目标(建筑物、桥梁、道路等)来作为 PS 点,通过干涉处理来消除物体的散射相位,从而得到地表形变位移。目前 PS 点识别方法主要有:相关系数阈值法、振幅离差阈值法、相位离差阈值法。也有许多学者根据研究需要,提出新的探测方法,但是大多数改进算法都是在这几种方法的基础上进行二次筛选^[7]。文中采用改进的永久散射体方法—StaMPS,即首先采用幅度离差阈值法找出 PS 候选点,然后利用迭代的方法根据相位的稳定性来最终确定 PS 点。

2 数据的处理

2.1 研究区概况

研究区位于华北平原,是我国地面沉降比较严重的地区之一(图 1)。华北平原地势平坦,主要由大量泥沙长期淤积而成,冲积过程目前仍在进行中,因此第四系地层较为松散。华北平原地表水资源较为贫乏,主要依靠开采地下水资源,随着地下水开采量的增加,华北平原已成为世界上超采地下水最严重的地区之一,也是地面沉降漏斗最大、沉降覆盖面积最大的地区^[8]。

2.2 数据的选择

选取欧空局 Envisat ASAR 降轨数据 28 景,时间跨度为 2003 年 12 月到 2009 年 3 月,垂直基线变化超

过 1700m。同时选取荷兰 Delft 大学的精密轨道文件进行轨道信息的读取和图像的配准,采用 SRTM 90m 分辨率的 DEM 进行地形相位的剔除。

组合干涉对时,设空间基线阈值 240m,时间基线阈值 3a,得到符合条件的短时空基线干涉对 36 对。表 1 中列出了干涉对的成像日期、空间基线和时间基线,其中最大的时间基线 875d,最大的空间基线 231m。

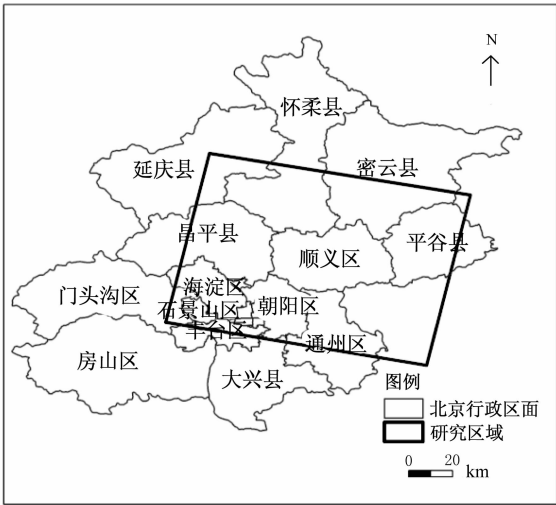


图 1 研究区域
Fig. 1 The study areas

表 1 短时空基线干涉像对组合、时间基线、垂直基线
Table 1 Combination of the small spatio-temporal baseline, the time baseline, the vertical baseline

编号	短时空基线干涉像对		时间基线 T (d)	垂直基线 B _⊥ (m)	编号	短时空基线干涉像对		时间基线 T (d)	垂直基线 B _⊥ (m)
	主影像	从影像				主影像	从影像		
1	20031210	20040218	70	-127	19	20071010	20080227	140	-37
2	20031210	20040707	210	167	20	20071010	20080924	350	22
3	20040114	20041229	350	-10	21	20071114	20080402	140	-35
4	20040114	20050309	420	-4	22	20071114	20090318	490	231
5	20040324	20060816	875	-220	23	20071219	20080227	70	97
6	20040428	20040707	70	-54	24	20080227	20080924	210	59
7	20040428	20040811	105	38	25	20080402	20080611	70	-126
8	20040707	20040811	35	92	26	20080402	20080716	105	-100
9	20040915	20060816	700	149	27	20080507	20080611	35	140
10	20041229	20050309	70	6	28	20080507	20081029	175	68
11	20050309	20051214	280	-167	29	20080507	20081203	210	-142
12	20051214	20070801	595	-141	30	20080507	20090107	245	17
13	20061025	20071219	420	20	31	20080611	20080716	35	26
14	20070801	20071010	70	-186	32	20080611	20081029	140	-72
15	20070801	20080507	280	47	33	20080716	20081029	105	-98
16	20070905	20071114	70	-14	34	20080924	20081203	70	68
17	20070905	20080402	210	-49	35	20081029	20090107	70	-51
18	20071010	20071219	70	-134	36	20081203	20090107	35	159

2.3 PS 点的选取结果

在研究区域内识别出的 PS 点目标共计 288426 个,平均每平方千米 42 个。文中以北部山区作为参考

区域,共计有 414 个 PS 点在参考区域内,并且认为山区没有较大的地表形变发生。北京地区的地面沉降主要分布在通州区和朝阳区,其中最大的年均沉降量

69.6 mm。图 2 表示了中心城区 PS 点的分布情况,其中浅色为 PS 点。



图 2 中心城区 PS 点的选取结果

Fig. 2 Result of selected PS points in the central city

3 结果分析

有关北京地面沉降的成因问题及其形成地质背景,一些研究单位和学者先后进行了一系列地质勘察、地球物理学方面的调查,提出北京地区的地面沉降主要由过量开采地下水导致^[9]。在此基础上本文研究了北京地面沉降的特征以及地下水对地面沉降的影响、断裂带对地面沉降的影响。

3.1 地面沉降的特征分析

根据时间序列形变提取的地面沉降的空间演化特征,以及分布规律,发现北京市的地面沉降很不均匀,五大漏斗区(东八里庄—大郊亭、昌平沙河—八仙庄、朝阳来广营、大兴榆堡—礼贤、顺义平各庄)已经连成一片,将 1955~2005 年累计沉降量等值线与实验结果叠加(图 3),发现地面沉降有东移的趋势。地面沉降较为严重的地区主要分布在通州、朝阳、顺义,伴随着空间分布不均匀外,北京地面沉降还存在明显的季节性变化特征。选取图 3 东城区、高碑店、天竺李桥、通州土桥 4 个点,以 ASAR 时间序列数据为基础绘制出其时间形变历史(图 4)。

从时间序列演化特征可以看出,地面沉降的季节性变化明显,这种变化与降雨对地下水的补给有很大关系:夏季降雨较多,地下水位呈上升趋势,地面沉降不明显;冬季降雨较少,地下水位呈下降趋势,地面沉降明显。

3.2 地下水对地面沉降的影响

北京处于冲积扇平原,地下结构多以砂层和具有弱透水性的粘性土层为主,根据太沙基原理,过量抽取地下水使粘性土层发生了塑性变形,从而成为地面沉降的主要贡献者。

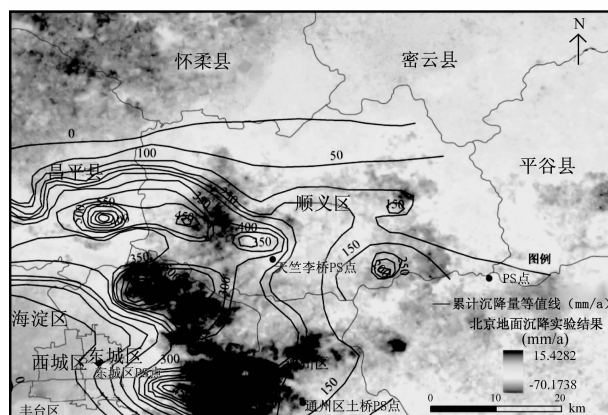


图 3 1955~2005 年累计沉降量等值线与实验结果叠加

Fig. 3 Superposition of 1955~2005 cumulative subsidence contours with experimental results

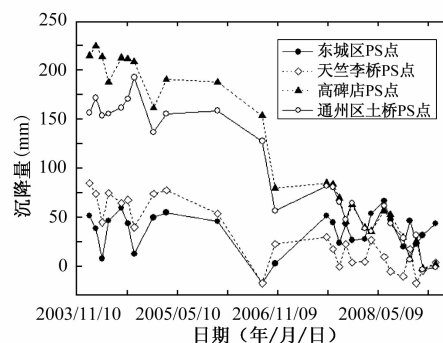


图 4 时间序列变化图

Fig. 4 Variation diagram in time series

图 5 分别展示了 2006 年和 2007 年末地下水水位等值线与地面沉降实验结果的对比,底图为 InSAR 技术监测的地面沉降结果,深色代表地面沉降较为严重,浅色代表代表地面沉降较小。从图中可以看出地下水漏斗区域与地面沉降严重区域在空间上具有较好的一致性,地下水水位低的区域越容易发生明显的地面沉降。然而地下水漏斗中心没有与地面沉降中心完全吻合,这在一定程度上是由于粘性土层分布的影响,有待后续研究。

3.3 断裂带对地面沉降的影响

研究区内地层岩性分布及各含水岩组结构特征是地面沉降产生的重要地质背景^[10]。图 6 中,背景图为 InSAR 技术监测的地面沉降量进行的分等定级,与北京市主要断层叠加分析,发现研究区内地面沉降分布范围及趋势受构造控制,如在西北沉降区主要受到良乡—顺义断裂、黄庄—高丽营断裂限制,形变主要沿平行于区域断裂系统的方向发展。西部区域地面沉降受

到南口—孙河断裂带的影响明显,东部区域地面沉降受到二十里长山断裂带和夏垫—马坊断裂带的影响明显。由此看出断裂带对地面沉降的空间分布特征具有一定的影响。

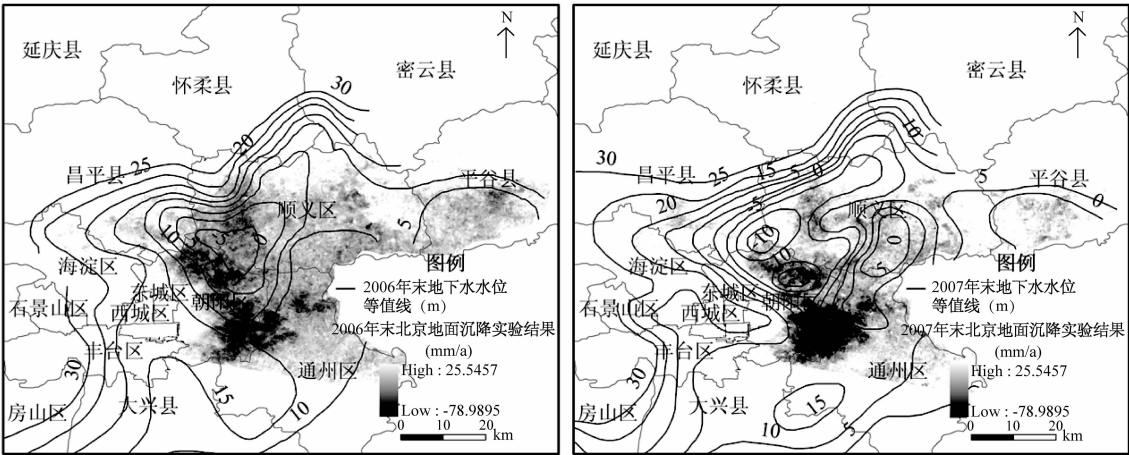


图 5 地下水水位等值线与地面沉降实验结果关系图

Fig. 5 Relationship between groundwater level contour and experimental results of land subsidence

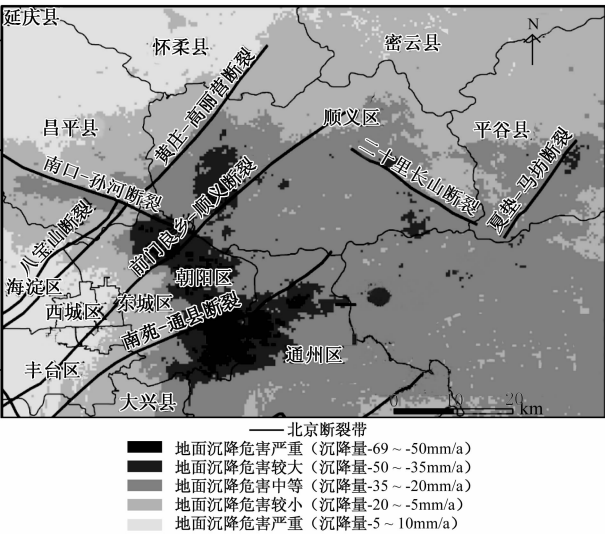


图 6 断裂带对地面沉降的影响

Fig. 6 Impact of fault zones on land subsidence

综合分析造成地面沉降的几大因素,地下水水位下降是造成地面沉降的主要原因,在宏观尺度上影响很大;但区域水文地质结构的差异决定着地面沉降的发育和发展趋势,粘性土层厚度越密的地方,随着地下水的抽取越容易发生地面沉降;断裂带对地面沉降的影响表现为线状的,在局部地区破坏性极大。

4 结论及建议

本文采用限制干涉对的时间基线和垂直基线,短时空基线 PS-InSAR 的方法监测北京区域地面沉降,抑

制了时空失相关的影响。研究区地面沉降的主要原因是过度抽取地下水造成地下水位降低,可压缩土层压密释水,同时地面沉降伴随着季节性的降雨变化而浮动,存在动态浮动和分布不均匀的特征。

针对北京地面沉降所存在的安全隐患,应尽可能地采取开源节流的措施。解决水源是根本性问题,南水北调工程的启动有望在近几年内解决北京地下水补给问题。对地面沉降严重的地区如朝阳东部、通州西北部应适度禁采地下水。线状断裂带的地方容易引发局部地面沉降以及次生地质灾害,而且破坏性极大,这些地区应适度控制施工建设,并对建筑设施采取相应的措施。

致谢:感谢荷兰 Delft 理工大学 Hooper 博士提供干涉软件 StaMPS 及咨询,美国 Stanford 大学提供的解缠软件,Delft 理工大学提供的 Doris 软件及精密轨道星历,北京市水文地质工程地质大队提供地下水水文数据及咨询!

参考文献:

[1] Ferretti C, Rocca F. Permanent scatters insar interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(1): 8-20.

[2] Hooper A, Zebker H, Segall P, et al. A new method for measuring information on volcanoes and other natural terrains using insar persistent scatterers[J]. GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2004, 31(23), 5, doi. 10. 1029/2004GL021737.

- [3] Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches [J]. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, 2008, 35, L16302, doi: 10.1029/2008GL034654.
- [4] WANG Teng, PERISSIN Daniele, ROCCA Fabio, *et al.* Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis[J]. *SCIENCE CHINA: Earth Sciences*, 2011, 54(5): 720 – 752, doi: 10.1007/s11430-010-4101-1.
- [5] 王宏宇. 短时空基线 PS-InSAR 技术在大同地区的形变监测研究 [D]. 西安: 长安大学, 2011. [WANG H Y. Research on Datong Surface Deformation Monitoring with Short Spatio-temporal Baseline PS-InSAR Technology[D]. Xi' an: Chang' an University, 2011. (in Chinese)]
- [6] 唐攀攀, 单新建, 王长林, 等. 形变观测中小数据集 PSInSAR 的误差分析与初步应用 [J]. *地震*, 2011, 31(3): 92 – 102. [TANG P P, SHAN X J, WANG C L, *et al.* Error Analysis and Preliminary Application of PS InSAR in Deformation Detection on Small Stacks [J]. *EARTHQUAKE*, 2011, 31(3): 92 – 102. (in Chinese)]
- [7] 侯建国, 祁晓明, 杨生成, 等. 基于 PS-InSAR 技术探测地表形变的实验研究 [J]. *自然灾害学报*, 2010, 19(1): 33 – 38. [HOU J G, QI X M, YANG C S, *et al.* Experimental study on detecting ground deformation based on PS-InSAR technogy [J]. *Journal of natural disasters*, 2010, 19 (1): 33 – 38. (in Chinese)]
- [8] 何庆成, 刘文波, 李志明. 华北平原地面沉降调查与监测 [J]. *高校地质学报*, 2006, 12(2): 195 – 209. [HE Q C, LIU W B, LI Z M. Land Subsidence Survey and Monitoring in the North China Plain [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12 (2): 195 – 209. (in Chinese)]
- [9] 贾三满, 王海刚, 赵守生, 等. 北京地面沉降机理研究初探 [J]. *分析研究*, 2007, 2(1): 20 – 26. [JIA S M, WANG H G, ZHAO S S, *et al.* A Tentative Study of the Mechanism of Land Subsidence in Beijing [J]. *Analysis and Research*, 2007, 2(1): 20 – 26. (in Chinese)]
- [10] 宫辉力, 张有全, 李小娟, 等. 基于永久散射体雷达干涉测量技术的北京地区地面沉降研究 [J]. *自然科学进展*, 2009, 19(11): 1261 – 1266. [GONG H L, ZHANG Y Q, LI X J, *et al.* Land Subsidence Research in Beijing Based on the Permanent Scatterers InSAR Technology [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(11): 1261 – 1266. (in Chinese)]

Application of small spatio-temporal baseline PS-InSAR to the study of land subsidence in Beijing

DU Zhao-feng¹, GONG Hui-li¹, WANG Sa^{1,2}, REN Yong-qiang¹, HOU Jie¹

(1. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467044, China)

Abstract: Small spatio-temporal baseline PS-InSAR technology controls the time baseline and the vertical baseline at the same time to avoid the loss of time and space related issues to a certain extent. This article uses the small spatio-temporal baseline PS-InSAR method to monitor land subsidence in the Beijing region, analyzes regional land subsidence in the evolution of time series and the impact of extraction of groundwater, and the fault zone to land subsidence. The results show that the ground subsidence in time series has a clear seasonal variation, reflecting the extraction of groundwater as the main reason leading to land subsidence. The ground subsidence also depends on the impact of faults. The central area of surface subsidence and depression cone of groundwater level are not completely match, which may has a close relationship with the thickness of the compressible soil.

Key words: small spatio-temporal baseline; PS-InSAR; land subsidence

责任编辑: 汪美华