

文章编号: 1006-4362(2011)04-0103-05

利用 PS-InSAR 技术监测南通市区地面沉降

郭炳跃¹, 何敏², 刘建东¹

(1. 江苏省地质矿产调查研究所, 南京 210018; 2. 河海大学测量工程系, 南京 210098)

摘要: 以南通市区 2006 年至 2007 年的 SAR 影像为数据源, 利用 PS-InSAR 技术对南通市区进行地面沉降研究。结果显示, 南通市区存在多个沉降漏斗, 但沉降量不大, 大部分区域的线性沉降速率不超过 11 mm/a。

关键词: PS-InSAR 技术; 遥感监测; 地面沉降; 南通市

中图分类号: P642.26 **文献标识码:** A

1 引言

过渡开采含水层和城市建设引发的地面沉降灾害正影响着社会的发展。非常明显的地质现象是, 大面积地区的地面在多年内持续出现几毫米甚至几米的垂向位移。地面变形对城市的发展而言是非常重要的一个问题, 地面沉降常常能够破坏基础设施, 引发严重的经济损失。据估计, 全世界有 150 多个城市出现了因地下水过量开采而引发的严重的地面沉降问题^[1~4]。

本文将利用 PS-InSAR 技术方法与 ERS 和 ENVISAT 装载的 SAR 传感器获得的图像, 重点分析发生南通市区的地面沉降。利用不同时期的干涉测量时间序列数据对地面沉降进行分析, 以显示其在监测地面沉降发展方面的潜力。

2 地质背景

南通市位于新长江三角洲平原, 地形平坦, 地面高程 4 m 左右, 沿江一带地势较高, 地面高程 5 m 左右。地层为全新世亚粘土或亚砂土, 成陆时间距今约 2~4 ka。覆盖层为第四系的河流冲积与滨海相松散沉积物, 松散沉积物厚度很大。从岩土工程角度来看, 这些新近沉积物的压缩性很高, 处于欠固结状态, 问题最大。

南通市地下水类型主要是松散孔隙水, 含水层

比较多, 各含水层的变化也比较复杂, 由上到下分别为潜水含水层组、第 I 承压水、第 II 承压水、第 III 承压水、第 IV 承压水和第 V 承压水。其中潜水含水层组由第四系全新统地层组成, 含水层为亚砂土、粉砂, 水位埋深 0.3~3.5 m, 水位变化受降水控制, 地层富水性较差。第 I 承压水由上更新统海、陆交替相沉积物组成, 含水层为亚粘土与粉砂互层, 富水性较差, 单井涌水量 50~60 m³/d。第 II 承压水由中更新统地层组成, 含水层以粉、细砂为主, 厚 15~85 m, 含水层顶板埋深 80~120 m, 变化较复杂。受沉积环境影响, 富水性差异较大, 一般单井涌水量 500~1 000 m³/d。第 III 承压水由下更新统河湖相地层组成, 含水层为粉砂、细砂及含砾砂, 单井涌水量一般为 2 000 m³/d 左右, 高的可达 4 000 m³/d, 含水层富水性较好, 是南通市主要开采含水层。第 IV 承压水由上新统(N₂)河湖相地层组成, 含水层为粘性土夹粉砂、细砂, 底部含少量砾石, 厚度 25~40 m, 富水性较好, 单井涌水量一般为 2 000 m³/d^[5]。

3 IPTA 方法原理及处理流程

IPTA 方法是基于 PS 技术的, 可以说是 PS 技术思路的一种实现。假设有覆盖同一地区的 K+1 幅 SAR 影像, 选择其中一幅影像作为主影像, 其余的所有影像都配准并采样到主影像像素空间, 这样

$K+1$ 幅 SAR 影像总共可形成 K 个干涉对。IPTA 方法仅跟踪成像区域内雷达散射特性较为稳定的目标,而放弃那些失相关严重的分辨率单元,这些目标几乎不受失相关噪声影响,即使在多年时间间隔的干涉对中,仍能保持较高的干涉相关性,因此被称为永久散射体(PS)。基于光谱离差小,后向散射强度大,不同时间 SAR 影像上的幅度差距小等原则,选取出候选 PS 点目标,对 K 个干涉对上的 PS 点目标逐一进行干涉处理,再与外部 DEM 进行差分,得到每个候选 PS 点的差分干涉相位。每个点目标的差分干涉相位 φ_{dint} 包括:DEM 高程误差导致的相位项 φ_{dem} ,沿 LOS 方向的地表形变相位 φ_{def} ,大气影响相位 φ_{atm} ,及噪声相位 φ_{noise} [6~9]。

$$\varphi_{dint} = \varphi_{dem} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (1)$$

其中:

$$\varphi_{dem} = \frac{4\pi \cdot B}{\lambda \cdot R_m \cdot \sin\theta} \delta_H = K_1 \cdot B_{\perp} \quad (2)$$

$$\varphi_{def} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot v \cdot t + \varphi_{def_nl} = K_2 \cdot t + \varphi_{def_nl} \quad (3)$$

式(2)中, λ 为雷达波长; R_m 为主影像成像时雷达至地面目标的斜距; θ 为雷达入射角; B_{\perp} 为干涉对垂直基线; δ_H 为 DEM 高程改正。式(3)将地表形变分成线性和非线性两部分; v 为地表线性形变速率; t 是干涉对时间基线。将式(2)、式(3)代入式(1)中,则

$$\varphi_{dint} = K_1 \cdot B_{\perp} + K_2 \cdot t + \varphi_{res} \quad (4)$$

式(4)就是 IPTA 方法的相位模型,式中 φ_{res} 包含 3 种成分:大气影响、地表非线性形变及噪声,称之为残余相位。 K_1 与 DEM 高程改正 δ_H 成正比, K_2 与 LOS 方向地表线性形变速率成正比,因此求出式(4)的系数 K_1 、 K_2 便可得到 DEM 高程改正及地表线性形变速率。

IPTA 方法对干涉对垂直基线 B_{\perp} 及时间基线 t 进行回归分析,求得公式(4)的系数,具体处理流程如图 1 所示。首先将所有影像配准、采样到同一像元空间,基于配准后的 SLC 影像,挑选出候选 PS 点目标,当研究区内的 SAR 影像足够多(>25 幅)时,以后向散射的稳定性为准则确定候选 PS 点目标;当 SAR 影像较少(<25 幅)时,以后向散射强度及光谱离差为准则。然后计算各干涉对候选 PS 点目标的差分干涉相位,对各 PS 点目标的差分干涉相位时间序列进行回归分析,求得相位模型(公式(4))中的系数 K_1 、 K_2 。回归模型计算得到的相位值标准差表征了回归模型的精度,并根据此精度更新候选点目标,剔除回归模型精度较低的目标。回归

分析的结果包括:高程改正,线性形变速率,解缠相位,回归模型精度及残余相位,利用这些结果对 DEM 高程、线性形变速率、基线长、大气影响等不断更新,使用更新后的差分干涉相位重新进行回归分析。如此迭代,不断精化相位模型,直至得到满意的结果,最终结果为 PS 点目标改正后的高程、线性形变速率、形变历史及精度信息 [10,9]。

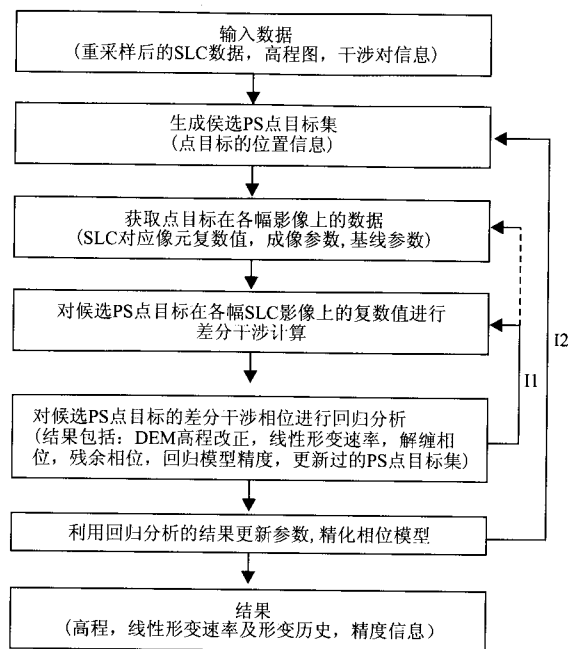


图 1 IPTA 方法实现流程图

Fig. 1 Flow chart of IPTA

4 南通地面沉降监测数据

采用欧空局 ENVISAT 卫星 C 波段雷达传感器 ASAR 从 2006 年到 2007 年获得的覆盖南通地区的 15 幅 SAR 影像为源数据,这些影像均为单视复数影像(Single Look Complex, SLC)。根据使所有干涉对的时间基线及空间基线都尽量小的原则,选取 2007 年 8 月 5 日获得的影像作为主影像,其余的 14 幅影像为从影像,形成 14 个干涉对。表 1 列出了所有影像的成像日期及相对于主影像的垂直基线 B_{\perp} 和时间基线 T 。

实验所需的 ENVISAT 卫星精密轨道数据由荷兰 Delft 大学空间研究中心(DEOS)提供,轨道径向精度达到 $5\sim 6$ cm,法向精度优于 20 cm [12],DEM 数据使用 SRTM-3 数据。从 SAR 影像中截取以南通市区为中心,覆盖范围约为 $68\text{ km}\times 57\text{ km}$ 的区域进行处理,包括整个南通市区及通州,还覆盖了海门、如皋、如东部分区域,图 2 中方框所围区域即为 SAR 影像截取范围。

表 1 南通地区 ASAR 影像数据和基线参数

Table 1 ASAR image data and baseline parameters for Nantong

编号	成像时间	垂直基线/m	时间基线/d
1	2006-01-22	-910	-560
2	2006-02-26	-203	-525
3	2006-05-07	230	-455
4	2006-09-24	-671	-315
5	2006-10-29	-280	-280
6	2006-12-03	12	-245
7	2007-03-18	428	-140
8	2007-04-22	41	-105
9	2007-05-27	32	-70
10	2007-07-01	71	-35
11	2007-08-05	0	0
12	2007-09-09	270	35
13	2007-10-14	85	70
14	2007-11-18	328	105
15	2007-12-23	-313	140

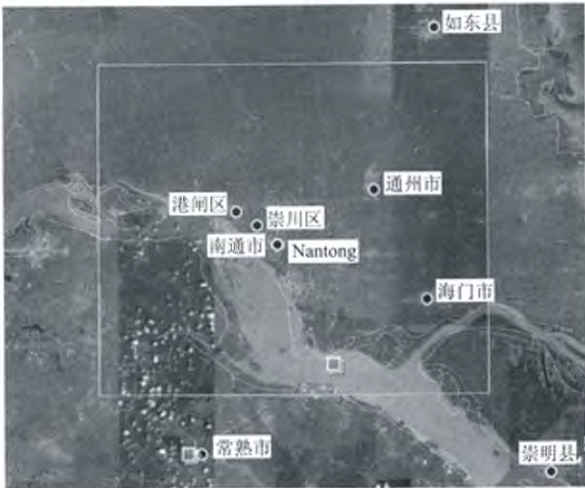


图 2 进行 IPTA 处理的 SAR 影像覆盖范围

Fig. 2 SAR imaging coverage under IPTA processing

5 处理结果

5.1 IPTA 处理结果

利用 IPTA 技术对表 1 中列出的 ASAR 数据进行处理,得到研究区域(图 2)的地表形变速率,如图 3 所示,一个圆点表示一个 PS 点目标,圆点的颜色表示线性形变速率的大小,各种颜色表示的具体值域见图示,形变量的单位是 mm/a,负值表示沉降,正值表示抬升,颜色偏红的地区即为沉降速率相对较大的地区。图 4 为 PS 点目标线性形变速率的分布直方图,横坐标为线性形变速率区间,纵坐标为落在各区间内的 PS 点个数。

由图 4 可知,在所选研究区域内,共探测出 25 047 个 PS 点目标,区域内最大的形变速率为 -16.821 mm/a,平均形变速率为 -4.155 6 mm/a。

从图 3 中可看出 PS 点目标多分布在市区(南通市区、通州区、海门市区),而在其他乡村范围内 PS 点则分布非常稀疏,且南通市区及海门地区的沉降速率相对较大。

5.2 PS 点目标线性形变速率空间分析结果

由于 Kriging 插值需要满足正态分布及二阶平稳的前提假设,为保证插值的准确性,在 ArcGIS 中选取 PS 点分布较密集、年沉降速率较大的南通市区进行 kriging 插值。通过直方图检验,南通市区内 PS 点目标的线性形变速率近似服从正态分布,且不存在全局离群值。南通市区内 PS 点目标的聚类 Voronoi 图如图 5 所示,灰色多边形包围的 PS 点目标与其周围所有 PS 点目标的线性形变速率均不在同一级区间内,则认为此 PS 点为局部离群值,利用相邻 PS 点目标线性形变速率的平均值代替其原始值。为检验减弱离群值影响方法的有效性,将南通市区的 PS 点分割成两部分,75%的点用来空间结构建模及生成表面,25%的点用来验证预测的质量,称为测试数据。分别对局部离群值处理前后 PS 点目标的线性形变速率进行内插,测试数据的精度结果如表 2 所示,可见以相邻点的均值代替局部离群值的方法有效减弱了局部离群值对空间插值的影响,提高了内插精度。

表 2 消除离群值影响前后插值结果比较

Table 2 Comparison between interpolations before and after removing outliers

测试数据精度	原始数据	消除离群值影响的数据
误差均值	-0.022 08	0.012 21
均方根误差	1.931	1.639
平均标准误差	1.814	1.58

数据分析完成后,利用 ArcGIS 地统计分析向导工具进行 Kriging 插值,插值结果如图 6 所示,不同颜色代表了不同的线性形变速率区间,可见南通市区有多个沉降漏斗,沉降速率基本上都小于 11 mm/a。图中以星号为中心的沉降漏斗,覆盖范围及沉降量相对较大。区域 1 主要覆盖了港闸区的南通船舶配套集中工业区,区域 2 为唐闸镇街办区域,区域 4 在港闸区政府区域,区域 5 覆盖了以南通城市博物馆为中心的区域,区域 6 是以紫琅医院为中心的区域。南通地区地面沉降主要是由于地下水开采引起地下水位下降,导致地层内部压力失衡,含水层本身及顶、底板粘性土层失水压密而引起的。图 6 中星号标定的区域是工业园区,这些地方都是地下水开采最为集中的区域,所以沉降也就最为严重。

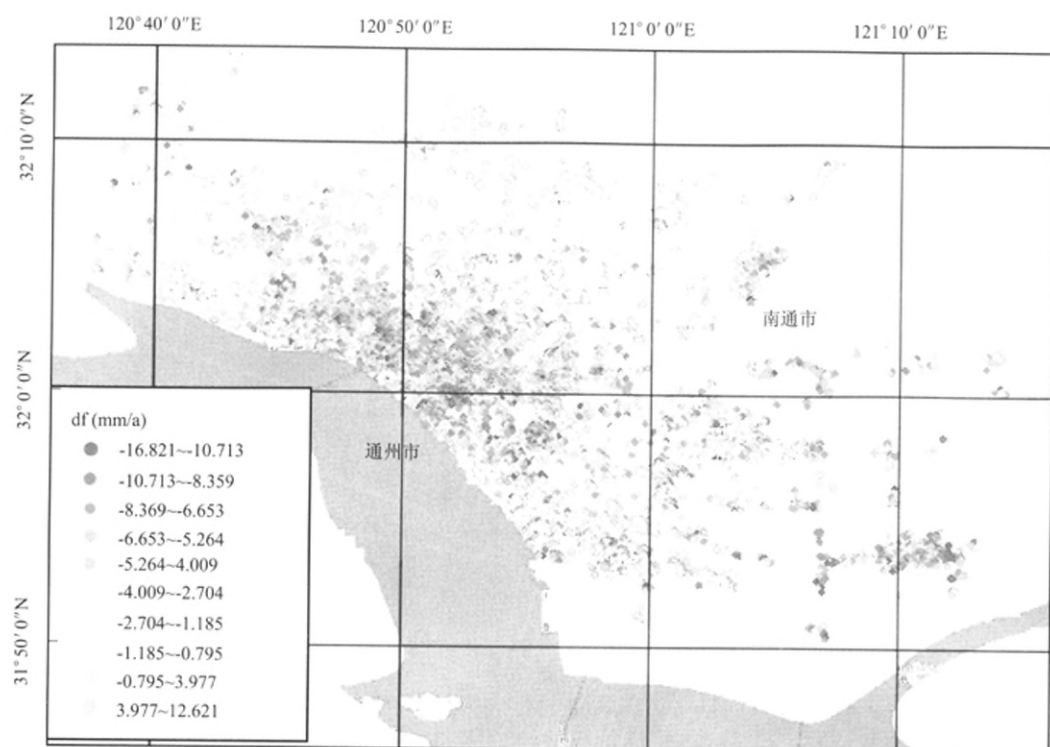


图 3 地表线性形变速率图

Fig. 3 Surface linear deformation rate

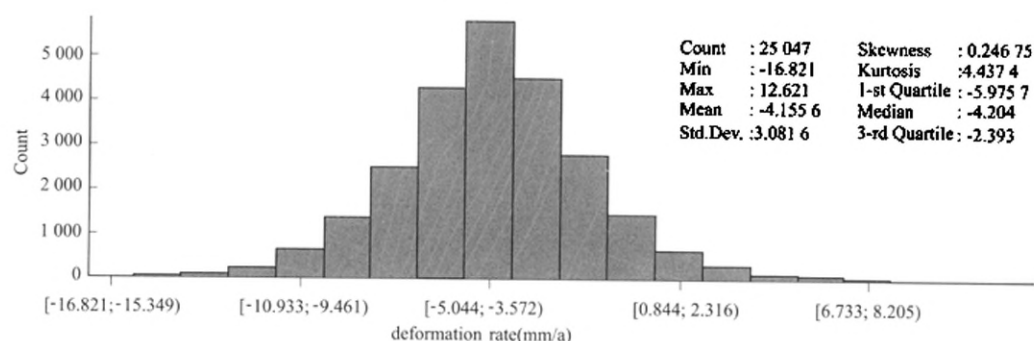


图 4 PS 点目标线性形变速率分布直方图

Fig. 4 Linear deformation rate distribution for PS point targets

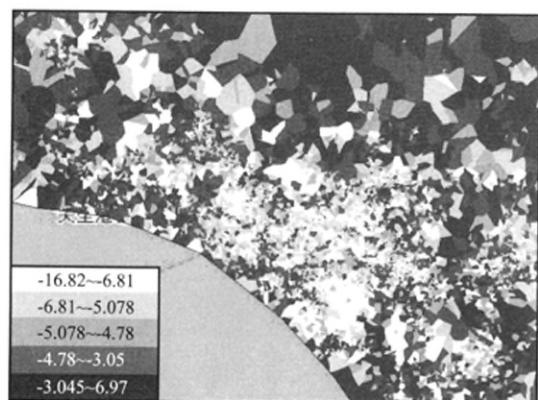


图 5 利用 ArcGIS 生成的南通市 PS 点目标线性形变速率聚类 Voronoi 图

Fig. 5 Linear deformation rate clustering Voronoi of PS point targets produced with ArcGIS

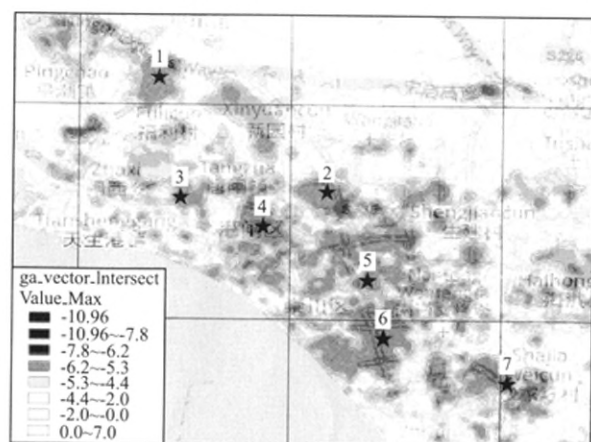


图 6 南通市地表形变速率图

Fig. 6 Surface deformation rate for Nantong City

6 结论

本文利用永久散射体雷达差分干涉测量技术提取地表线性形变速率的方法,以南通地区 2006~2007 年的 SAR 影像研究了南通市区的地面沉降。在此获取南通市区沉降监测数据的基础上,利用 ArcGIS 地统计分析模块对 PS 点的线性形变速率进行空间分析,识别出其中的离群值并对其进行处理,有效地减弱了离群值对空间插值的影响;选用 Kriging 方法对线性形变速率进行内插,获得了南通市区高分辨的形变速率图。研究结果显示,南通市区存在多个沉降漏斗,但没有出现沉降量非常大的沉降漏斗,在 2006~2007 年间大部分地区的线性沉降速率不超过 11 mm/a。

参考文献

[1] Farr T G , Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data[J]. EOS, TRANSACTIONS, American Geophysical Union, 2000, 81(48):583-585.

[2] 张诗玉,李陶,夏耶. 基于 InSAR 技术的城市地面沉降灾害监测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008, 33(8): 850-853.

[3] 罗小军,黄丁发,刘国祥. 基于永久散射体雷达差分干涉测量的

城市地面沉降研究——以上海地面沉降监测为例[J]. 测绘通报, 2009, (4): 4-8.

[4] 罗海滨,何秀凤. 基于 DInSAR 方法检测南京地表沉降的结果与分析[J]. 高技术通讯, 2008, 18(4): 418-421.

[5] 田立,钱宇红. 南通市地下水开采现状及开发利用研究[J]. 地下水, 2008, 30(3): 66-68.

[6] 陈强,刘国祥,丁晓立,李永树. 永久散射体雷达差分干涉应用于区域地表沉降探测[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3): 737-743.

[7] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 8-19.

[8] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatters in differential SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 38(5): 2202-2212.

[9] Charles Werner, et al.. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping [C]. IGARSS ' 03, Toulouse, France, 2007, July: 4362-4364.

[10] Qing Zhao, Hui Lin, et al.. A Study of Ground Deformation in the Guangzhou Urban Area with Persistent Scatterer Interferometry[J]. *Sensors*, 2009, 9(1): 503-518.

[11] 汤国安,杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京:科学出版社, 2006.

[12] 陈强,刘国祥,李永树. 粗/精轨道数据对卫星 InSAR DEM 精度影响的对比分析[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 475-481.

MONITORING THE GROUND SUBSIDENCE IN NANTONG CITY
WITH THE PS-INSAR TECHNOLOGY

Guo Bing-yue¹, He Min², Liu Jian-dong¹

(1. Jiangsu Institute of Geology and Mineral Survey, Nanjing 210018, China;
2. Department of Measuring Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The ground subsidence in Nantong city is studied by using the PS-InSAR technology and the SAR image data from 2006 to 2007. The result reveals several subsidence funnels with small settlements and the linear settling velocity of no more than 11 mm/a in most regions.

Key words: PS-InSAR; remote sensing; ground subsidence; Nantong

作者简介: 郭炳跃(1980—),男,硕士,工程师,从事地质环境与地质灾害防治研究工作。