

# 利用 InSAR 技术监测徐州市矿区地表变形

郭炳跃<sup>1</sup>, 何敏<sup>2</sup>, 刘建东<sup>1</sup>

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

**摘要:**徐州煤矿资源丰富, 煤矿的开采和利用, 在产生巨大经济和社会效益的同时, 却造成了大规模的地面沉陷, 区内大量的农田、建筑物、道路等受到影响和破坏。InSAR 测量技术的差分干涉图用于监测厘米级甚至更微小的地面形变, 具有全天候、大面积监测地面沉陷的优势。以徐州地面沉陷监测为例, 介绍了 InSAR 测量技术在矿区地面沉陷监测领域中的实际应用。

**关键词:**地面沉陷; InSAR 技术; 江苏徐州

**中图分类号:** TP79; TD325.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-3636(2012)01-0099-05

## 0 引言

徐州煤矿资源丰富, 煤矿的开采和利用, 在产生巨大经济和社会效益的同时, 却造成了大规模的地面沉陷, 区内大量的农田、建筑物、道路等受到影响和破坏, 严重影响社会的可持续发展。因此, 急需对徐州地面沉陷灾害进行监测、治理和修复。

传统的地表沉降监测主要采用重复精密水准测量方法, 通过布设一、二等水准网后采用严密的平差程序, 最终提取出每一期的微小地面沉降变化值。这种方法野外作业周期长, 而且需要耗费大量的人力、物力, 测量精度也有限, 因此这种方法被作业周期短、精度高、布网迅速的 GPS 所替代。但无论是 GPS 还是水准测量, 都只能获得观测点的地表形变而无法获得整个区域的沉降趋势, 而且对于监测网的维持每年也需要消耗大量的人力、财力。随着空间对地技术的发展, 尤其是合成孔径雷达干涉测量技术(InSAR)的发展, 为区域性的地表沉降监测带来了新的技术支持。利用 InSAR 技术进行区域性地表沉降监测相对于传统的点监测具有低成本、覆盖广和分辨率高等优点(陈强等, 2007; 罗小军等, 2009; 张诗玉等, 2008)。

## 1 InSAR 技术原理

所谓合成孔径雷达干涉测量(InSAR), 就是利用两幅来自同一照射点的雷达回波信号, 分两次观测传感器高度、雷达波长、波束视向及天线基线距之间的几何关系, 利用复图像经过干涉处理后形成的干涉条纹图, 得到斜距向上的点与两天线之间的距离差, 从而精确地测量出图像上每一点的三维位置 and 变化信息。目前, 根据所获得两幅 SAR 图像的方式, 可以将 InSAR 的工作方式分为沿轨道干涉测量、垂直轨道干涉测量和重复轨道干涉测量 3 种模式。笔者所采用的 ERS-2 和 ENVISAT 星载数据就是采用重复轨道干涉测量。

通常, 重复轨道 InSAR 观测的集合关系如图 1 所示。 $A_1$ 、 $A_2$  为两次观测时天线的位置,  $H$  为  $A_1$  的高度,  $P$  为目标点,  $h$  为目标点  $P$  的高程,  $\theta$  为  $A_1$  的入射角,  $B$  为两天线间的距离, 即基线,  $\alpha$  为基线  $B$  相对于水平方向的夹角,  $\rho$  为  $A_1$  到  $P$  的斜距,  $\rho + \delta\rho$  为  $A_2$  到  $P$  的斜距。

地面目标点  $P$  的高程  $h$  为:

$$h = H - \rho \cos \theta \quad (1)$$

由于

$$(\rho + \delta\rho)^2 = \rho^2 + B^2 + 2\rho B \sin(\alpha - \theta) \quad (2)$$

所以

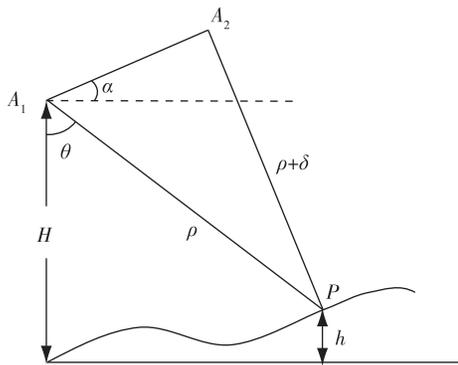


图1 InSAR技术的基本原理

$$\rho = \frac{\delta\rho^2 - B^2}{2B\sin(\alpha - \theta) - 2\delta\rho} \quad (3)$$

如果  $A_1$ 、 $A_2$  对  $P$  的测量相位差  $\varphi$  为:

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}\delta\rho \quad (4)$$

其中,  $\lambda$  为雷达信号波长, 则

$$\delta\rho = \frac{\lambda\varphi}{4\pi} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)后再代入式(1), 得

$$h = H - \frac{\left(\frac{\lambda\varphi}{4\pi}\right)^2 - B^2}{2B\sin(\alpha - \theta) - \frac{\lambda\varphi}{2\pi}} \cos\theta \quad (6)$$

由式(6), 只要天线高度  $H$ 、相位差  $\varphi$ 、基线  $B$ 、两天线的相对定向角度  $\alpha$ 、天线的入射角  $\theta$  精确可知, 就可以计算出地面目标点  $P$  的高程  $h$ 。需要说明的是,  $\varphi$  是解缠后的相位, 而干涉雷达测量得到的相位值只在主值范围内, 即是模糊的, 必须经过相位解缠后才能获得真实相位以及得到目标的高程信息 (Ferretti et al, 2001, 2002; Werner et al, 2003)。

## 2 矿区地面沉陷概况

大屯中心区位于江苏沛县北部与山东微山接壤部分的微山湖畔, 是上海大屯煤电公司的办公、生活及辅助生产企业所在地, 东距微山湖 5 km。徐州大屯中心区从 1976 年开始观测地面沉降, 1988 年建立了地面沉降观测系统, 分别沿区内主要线路布设  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  共 4 条观测线, 建立了比较完整的地面沉降观测系统, 各线路控制点均远离中心区抽水井, 地表结构相对稳定, 整个观测线路总长 30 km, 各线路

的高程控制点均为矿区三等水准网中的点 (张茂永等, 2007)。沉降量均为以 1976 年为起始高程计算的结果。据 1988 年—2006 年的系统观测资料 (表 1) 显示, 徐州在屯中心区地面沉降在逐年加剧, 沉降速率有较大波动。根据历年观测数据, 利用绘图软件 Surfer 8.0 绘制 1998 年、2005 年的沉降观测等值线 (图 2)。可以看出, 中心区在 1998 年形成以沉降观测点  $A10$  和刘总 3 为中心的两大沉降漏斗, 最大累计沉降量 330 mm。此后, 沉降区域逐渐扩大, 沉降漏斗面积逐年增加, 到 2005 年, 形成以铁 6 井为中心的一个大沉降漏斗, 沉降区的走向为北东, 最大累计沉降量 600 mm, 累计沉降量大于 100 mm 的区域达到 11.57 km<sup>2</sup>。利用 1988 年—2005 年的观测数据, 绘制了中心区 2010 年的地面沉降等值线图 (图 3) (张茂永等, 2007)。从图 3 可以看出, 2005 年形成的沉降漏斗与 2010 年形成的以  $A6$  点为中心的漏斗连成一个大的沉降区, 沉降区边界等值线 500 mm, 累计沉降量大于 100 mm 的区域面积达到了 32.86 km<sup>2</sup>, 最大沉降量为 753 mm。

表 1 1988 年—2006 年徐州大屯中心区系统观测数据

年份	累计沉降量 /mm	沉降速率 / (mm/a)	最大速率 / (mm/a)	平均速率 / (mm/a)
1988	329.0	14.5		
1989	259.0	36.7		
1990	412.0	53.0		
1991	436.0	24.0		
1992	456.0	20.0		
1993	499.0	43.0		
1994	518.5	19.5		
1995	550.0	31.5		
1996	582.0	32.0		
1997	605.0	23.0	53.0	27.0
1998	627.9	22.9		
1999	658.4	30.5		
2000	686.5	28.5		
2001	715.1	28.2		
2002	746.0	30.9		
2003	750.0	4.0		
2004	771.6	21.6		
2005	803.5	31.9		
2006	821.0	17.5		

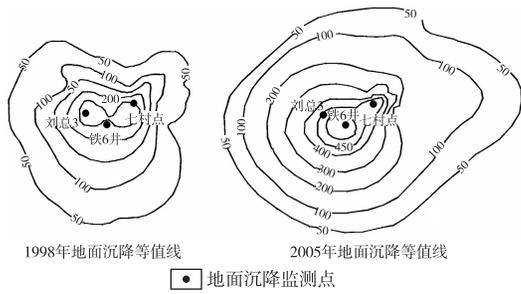


图 2 中心区地面沉降区域的空间演化

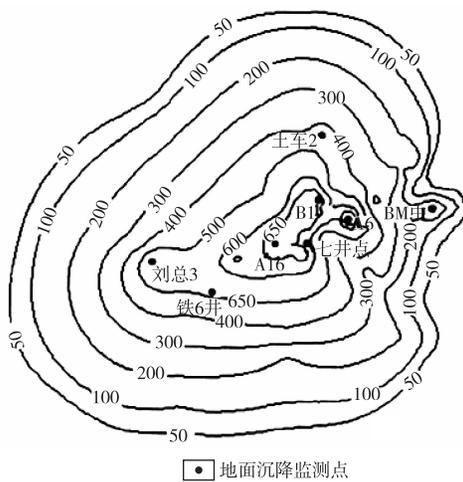


图 3 大屯中心区预测 2010 年沉降等值线

### 3 实验数据类型

用欧洲太空局 ENVISAT-1 卫星的 ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) 合成孔径雷达传感器获取的徐州地区的两景影像数据进行两通差分 (两通法)。所谓两通法就是利用形变前后成像的两幅 SAR 影像和一个高精度的 DEM。首先,利用两幅 SAR 成像时的几何关系,将 DEM 反演成只含地形信息的干涉图并将其投影到 SAR 影像坐标系下。然后与由两幅 SAR 图像得到的含有地表形变信息的干涉图做差分,从而求得形变信息。由上分析可知,获取精度满足要求的 DEM 数据是两通法的关键。2000 年 2 月,美国进行了航天飞机测图任务 (SRTM),该任务对北纬 60°—南纬 54°间的广大区域进行了干涉测量,可以提供分辨率 30 m、高程精度优于 16 m、覆盖陆地表面 80% 的 DEM 数据。SRTM DEM 数据的发布为两通差分干涉测量的广

泛应用提供了数据保证。所以本次所用数据为 ASAR 数据产品中成像模式的 0 级原始数据,产品代码为 ASA\_IM\_OC,以及 SRTM DEM 数据提供的高程数据(表 2)。

表 2 高程数据

序号	数据名称
1	ASA_IM_0CNPDE20090120_022105_000000642075_00404_36029_9461. N1
2	ASA_IM_0CNPDE20070327_022114_000000792056_00404_26510_1403. N1
3	N34E116. hgt
4	N34E117. hgt

从 ASAR 数据的文件名可以看出,这两景数据都是 N1 格式文件,两景影像获得的时间分别是 2009 年 1 月 20 号和 2007 年 3 月 27 号,轨迹号都是 404,第一个轨道号是 36029,第二个轨道号是 26510。通过 GAMMA 软件处理,把 2009 年 1 月 20 号和 2007 年 3 月 27 号的 0 级产品处理成单视复图像 (SLC),获得两景影像的垂直基线为 271.95 m、时间基线 665 d。在 SLC 上截取所需要的实验区域,进行数据的处理来获得区域形变量。

### 4 InSAR 测量技术处理结果

#### 4.1 徐州市区

截取徐州市区范围为 N 34°11'7.58"—34°24'0.34", E 117°23'1.19"—117°17'48.62",以 2009 年 1 月 20 号的影像为主影像,2007 年 3 月 27 号的影像为副影像以及外部 DEM 进行两通法。

由相干系数图(图 4)看,整体的相干性比较好,大部分地区的相干系数都大于 0.5,由沉降图(图 5)可知,徐州市区存在地面沉降,沉降量达到 10 mm 左右,有的区域达到 38 mm 左右。从沉降分布来看,市中心区的沉降比较小,主要分布在市中心的外围地区,这与徐州煤矿的地理分布情况相符合。

在图 5 中的 ① 处出现了较大的沉降量,达 38 mm,该附近有大型矿井——庞庄煤矿,该煤矿由庞庄、张小楼 3 对井口组成,井田面积 18.3 km<sup>2</sup>,工业广场面积 1.36 km<sup>2</sup>。张小楼新大井成功改扩建以后深度为 -1 025 m,为华东地区第一深井。年采

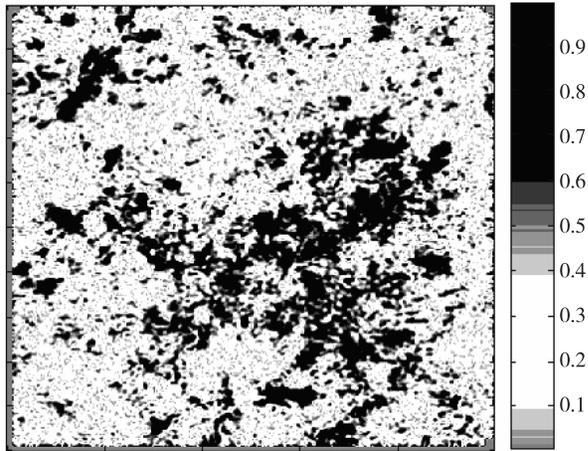


图4 徐州市区相干系数示意图

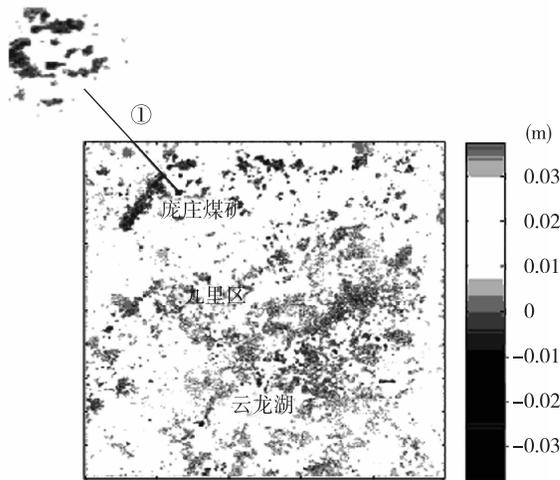


图5 徐州市区沉降示意图

煤达260万t。可能是由于每年采煤以及不断开采地下水,导致所在地及周围区域出现了地面沉降的现象。从图5中还可以看出,呈现出东北沉降的趋势,庞庄煤矿一带的沉降量比市区中心地带的沉降量明显大许多。

#### 4.2 大屯镇

大屯镇是徐州“十强镇”之一,是沛县工业强镇,煤电资源十分丰富。已探明煤炭含量24亿t,能均衡开采100年,年产原煤1200万t,大屯煤电集团公司坐落在镇区腹地,拥有龙东煤矿、姚桥煤矿、徐庄煤矿和孔庄煤矿。所以大屯中心区是作为煤矿城市徐州的一个典型的区域。大屯中心区的范围为N 34°45'56.78"—34°53'58.23", E 116°51'23.46"—117°0'3.27",由于龙东煤矿不在SLC上,所以,截取的

范围只包括其他3座煤矿。在强度图(图6)上可以看到明显的煤矿区,其相干系数很好,矿区的相干系数一般大于0.6(图7),利用两通差分得到大屯中心区的形变图(图8)。



图6 大屯中心区强度图

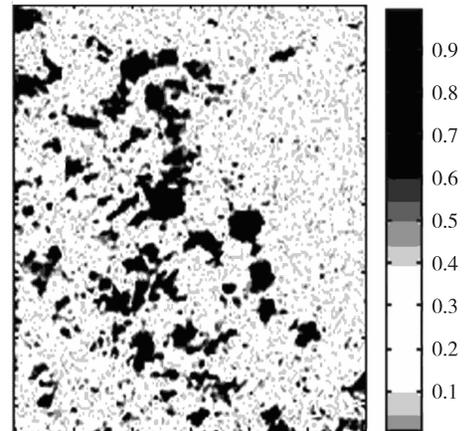


图7 大屯中心区相干系数示意图

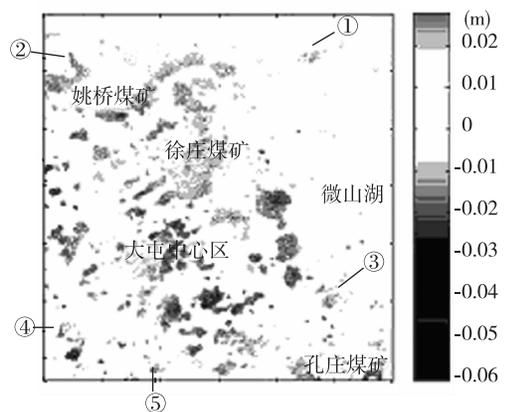


图8 大屯中心区沉降示意图

图8显示,沉降区域的分布与矿区的分布大致相同,存在着明显的相关性,并且新发现5个沉陷区(图8①—⑤)。2007年3月27日—2009年1月20日这段时间内,大屯中心区的大部分地区沉降量大于30 mm,该区沉降漏斗的沉降量达到61 mm,与水准测量地面沉降预测趋势大致相同。大屯中心区的沉降量远远超过了徐州市的沉降量,整个区域的平均沉降量都达到3 mm。

## 5 结 论

利用 InSAR 技术不仅可以获得矿区地面形变图像,还新发现了5个发生地表变形的沉陷区,并能精确监测到沉陷幅度(精度到厘米级)、指明矿区沉降范围、沉陷幅度,提出大屯沉降的区域分布与矿区的分布大致相同的观点。通过水准测量和 InSAR 两种技术对徐州地区进行地面沉降监测的结果对比,InSAR 测量技术处理成果真实、可靠,能很好地应用于城镇地区地面沉降和采矿沉陷监测。

徐州市区和大屯镇 InSAR 测量技术处理结果显示,矿区沉降量比未采矿地区沉降量大很多,这也证明了开采固体矿产是引起徐州地面沉降的主要因素之一,所以,要合理进行采煤,控制地面沉降。徐州应合理地进行矿区塌陷地生态修复规划,才能落实好国务院对徐州市城市的总体规划,建成一个可持续发展的城市。

## 参考文献:

- 陈强,刘国祥,丁晓立,等.2007.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,50(3):737-743.
- 罗小军,黄丁发,刘国祥.2009.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,(4):4-8.
- 张茂永,孟磊,王传林,等.2007.徐州大屯中心区地面沉降趋势预测[J].地质灾害与环境保护,18(3):11-13.
- 张诗玉,李陶,夏耶.2008.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,33(8):850-853.
- WERNER C, WEGMULLER U, STROZZI T, et al. 2003. Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping [C]//IGARSS'03. Toulouse, France:IEEE International, 7: 4362-4364.
- FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1): 8-19.
- FERRETTI A, PRATI C, ROCCA F. 2002. Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(5): 2202-2212.
- ZAO QING, LIN HUI,JIANG LIMING, et al. 2009. A Study of Ground Deformation in the Guangzhou Urban Area with Persistent Scattered Interferometry [J]. Sensors, 9: 503-518.

## Surface deformation monitoring with InSAR technology in Xuzhou

GUO Bing-yue<sup>1</sup>, HE Min<sup>2</sup>, LIU Jian-dong<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Provincial Research Institute of Geology and Mineral Resources, Nanjing 210018, China; 2. Department of Measurement Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The coal resource in Xuzhou was rich. When the coal exploitation and utilization brought enormous economic and social benefits to the local people, it caused severe ground subsidence as well, affected the farmland, and damaged the buildings and roads. The radar image of differential interferometry technology (InSAR) could be able to detect the crustal deformation at centimeter scale or even more accurate. It had the advantages of all weather and wide area in monitoring settlement of subsidence of mine. Based on the monitoring of ground subsidence in Xuzhou mine, the authors introduced the application of InSAR technology in ground subsidence.

**Keywords:** Ground subsidence; InSAR technology; Xuzhou, Jiangsu