

# 应用 InSAR 技术测量矿山沉降与变化分析 ——以河北武安矿区为例

张景发<sup>1</sup>, 郭庆十<sup>2</sup>, 龚利霞<sup>1</sup>

(1 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085 2 河北省遥感中心, 石家庄 050021)

摘要: 卫星合成孔径雷达干涉 (InSAR) 技术, 已经发展成为一种测量地表微小形变的有力工具。河北省武安地区, 采矿活动造成多处矿山出现不同程度的地面形变, 引起较多的地质灾害, 测量沉降的位置和强度, 分析其变化趋势, 才能制定相关治理措施。本文利用 InSAR 技术处理了自 1992 年以来该地区积累的数十景 JERS-1 和 ENVISAT 雷达数据。经过对数据的时相、基线距等的参数分析, 选择了最优的像对组合, 确定了可行的处理方案, 获得了不同像对的差分干涉图像, 从而获得了不同时期采矿造成的地面沉降分布及幅度信息。以惠兰村为例分析了矿区沉降区域和沉降量的演变过程。通过测量河北武安矿山开采沉降的 InSAR 技术应用, 总结了干涉技术的处理流程及关键技术; 最后, 对干涉处理结果进行了评价分析。

关键词: InSAR; 地面沉降; 矿山开采

## 1 概述

河北省武安地区, 四面环山、丘陵起伏, 矿山资源十分丰富, 是河北省重要的煤、铁基地。该地区因采矿活动造成多处不同程度的地面沉降, 灾害频发。测量沉降的位置和强度, 分析其影响和趋势, 才能制定相关治理措施, 以保护地质环境和人民生命财产安全。

过去主要采用现场调查、访问等方式调查矿山开采沉降, 但周期长、花费大、精度低, 不能满足实际需要, 而利用干涉雷达技术测量矿山开采沉降具有效果好、成本低的优势。

与地震引起的同震形变相比, 地表沉降引起的形变周期更长, 变形量更小, 失相关的影响也就更大一些, 给 InSAR 处理带来一定的难度<sup>[1~6]</sup>。但是应用 InSAR 技术测量沉降变形的研究仍然有许多成功的实例, 如 1996 年 Camec 等利用差分技术测量地下煤矿开采造成的地面沉降, 瑞士的 Wegmüller、波兰的 Perski 以及 Stow 等人有较多这方面的著述<sup>[7]</sup>, 澳大利亚新南威尔士大学的葛林林博士一直致力利用 InSAR 和 GPS 结合起来进行矿山沉降研究<sup>[8~9]</sup>。然而国内对矿山沉降形变的

研究尚不多见。

本文利用 InSAR 技术, 进行了河北武安矿山沉降变形测量的实例分析。

## 2 数据采集与处理

### 2.1 数据选取

目前比较常用的卫星雷达影像有 ERS1/2、ENVISAT、JERS 以及 Radarsat。Radarsat 是一颗商用卫星, 数据昂贵; ENVISAT 与 ERS 参数基本一致, 频率稍有差别; JERS 与 ERS 总体性能相似, 主要区别是 ERS 的工作波段是 C 波段, 波长 5.66m, 而 JERS 的工作波段是 L 波段, 波长 23.5m<sup>[10]</sup>。考虑到数据积累与应用, 本文主要选择的数据如表 1 和表 2。

### 2.2 数据处理策略

数据像对差分处理主要有 2 次过境和 3 次过境法。2 次过境和 3 次过境差分各有优缺点。三次差分法可有效去除地形, 但相干性和相位解缠误差受到两个像对的影响, 增加了运算和分析的复杂性。另外, 同时得到条件合适的 3 幅影像比较

收稿日期: 2007-11-08 修回日期: 2008-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目: 永久散射干涉雷达测量当雄断裂活动性的关键技术研究 (40774023)。

作者简介: 张景发 (1962-), 江苏扬中市人, 博士, 研究员, 研究方向: 遥感及干涉雷达技术应用。

E-mail: zhangjingfa@hotmail.com

表 1 武安地区 JERS-1 数据列表

Tab 1 The JERS-1 SAR data list

NO	Sat	RSP	ROW	Date	Format
1	J1	103	239	930227	Raw
2	J1	103	239	930412	Raw
3	J1	103	239	940214	Raw
4	J1	103	239	950201	Raw
5	J1	103	239	950430	Raw
6	J1	103	239	960416	Raw
7	J1	103	239	960530	Raw
8	J1	103	239	960826	Raw
9	J1	103	239	970105	Raw
10	J1	103	239	970517	Raw
11	J1	103	239	971223	Raw
12	J1	103	239	980205	Raw
13	J1	103	239	980321	Raw
14	J1	103	239	980504	Raw
15	J1	103	239	980731	Raw
16	J1	103	239	980913	Raw

表 2 武安地区 ENVISAT 数据

Tab 2 The ENVISAT SAR data list

NO	Sat	Orbit	Track	Frame	Date	Format
1	ES	6828	261	2871	030621	Raw
2	ES	9333	261	2871	031213	Raw
3	ES	9834	261	2871	040117	Raw
4	ES	10836	261	2871	040327	SLC
5	ES	11337	261	2871	040501	SLC
6	ES	11838	261	2871	040605	SLC

困难, 能获得的形变图非常少。相比之下, 2次过境法对图像的要求宽松许多。考虑 SAR 数据质量及基线距和时间间隔、季节变化、建筑物分布、植被生长等影响因素, 确定最佳像对组合, 最终选定表 3 所示的 7 组像对, 前面六组为 JERS 像对, 最后一组是 ENVISAT 像对。这里图像都以获取时间命名。

## 2.3 处理流程分析

### (1) 理论分析

处理流程是从原始数据开始。首先将主从图像处理成相同的多普勒中心频率。手工选择公共多普勒中心, 一般是取主图像的多普勒或者两图的平均, 根据新的多普勒重新计算方位向分辨率。

用轨道星历参数确定主从图像间大致的偏移量, 将主从图像分成若干小块, 根据强度图的相

表 3 最佳像对的时间基线和垂直基线

Tab 3 The optimal pairs and its time and space interval list

编号	数据	主图像	从图像	时间间隔 (月)	垂直基线 距(米)
1	JERS1	930412	940214	10	238
2	JERS1	950201	980205	36	118
3	JERS1	960530	980504	24	458
4	JERS1	970105	970517	4.5	245
5	JERS1	980205	980321	1.5	289
6	JERS1	980321	980913	5.5	153
7	ENVISAT	031213	040117	1	453

关性自动配准, 确定一组偏移量(控制点), 用来拟合主从图像间的映射关系, 去掉误差太大的点, 重新拟合, 直到 RMS 小于 0.1 个像元。确定映射函数后, 对从图像重采样并生成干涉图。

去平处理需要准确的基线值, 否则去平处理后的干涉图仍有残余的条纹。有两种方法获得基线: 利用偏移量和轨道参数计算或者通过解缠相位和独立 DEM 计算。如果干涉图是为了得到地形, 而且已有均匀分布的地形高度数据, 就可以直接利用解缠相位计算基线。但是对于沉降就复杂许多, 失相关和沉降相位信号严重影响了基线计算<sup>[11]</sup>。但在武安地区, 相关相位点在全图均匀分布, 而沉降信号是孤立的, 可以将沉降造成的失相关信息方便地滤波掉, 从而可以解缠相位和计算基线。

如果通过偏移量计算基线, 去平后的干涉图往往会有残余相位斜纹, 表示基线还有误差。熟悉试验区的沉降模式将有助于主观辨认残余相位斜纹, 人工数出方位向和距离向的残余条纹数, 以此计算校正干涉图对应的反方向条纹。将校正条纹转化为等价的斜距, 应用于配准偏移量, 修正后的偏移量用来计算新的基线, 再对原始干涉图去平。计算距离波谱和方位波谱, 分辨出其中最主要的频率, 如果条纹频率的能量超过了给定的阈值, 就当做残余相位条纹去除。

干涉图去平后, 利用独立的 DEM 去除地形, 得到的差分干涉图滤波并且解缠, 选择合适的滤波参数(比如非线性滤波的权重, 或者中值滤波的窗口大小), 减少相位噪声的同时还要尽量保留细微的形变信息。试验不同的滤波参数, 观察对相位解缠的影响, 理解工作区的滤波特性, 以选择最好参数。滤波前后的相位标准差可作为滤波

参数好坏的度量。

通过相关性阈值来限制相位解缠, 试验不同的阈值, 只解缠相关性高于这个阈值的那些区域, 识别并统计解缠误差区来确定最合适的相关性阈值。

(2) 试验区数据处理

下面以一组 JERS 像对为例说明二次差分干涉的流程和技巧。

首先通过成像处理得到两图的 SLC (Single Look Complex, 单视复图像), 并处理成相同的多普勒。JERS 方位向分辨率是距离向分辨率的 1/3 左右, 所以得到的 SLC 图像方位行行数大约是距离向列数的 3 倍, 如图 1(a) 所示。为了看图方便, 可以通过多视处理得到 1(b) 所示的强度图, 但是干涉比较的是相位信息, 并不需要多视图。

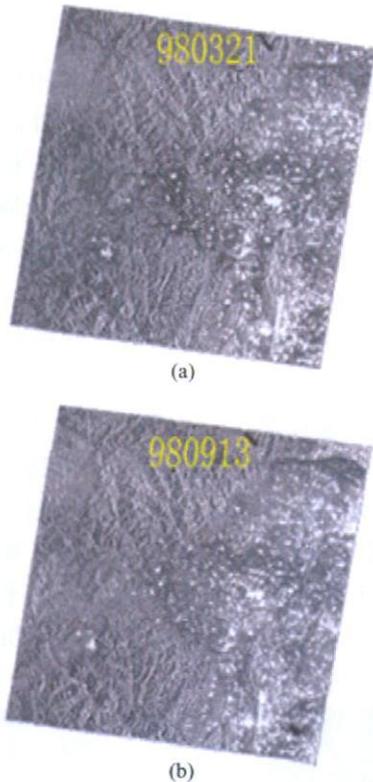


图 1 主从图像的强度图

Fig 1 The master and slave intensity images

主从图像配准后, 将从图像重采样到主图像的格网, 逐像元共轭相乘就能得到图 2 所示的干涉图, 很明显, 这张干涉图最主要的是轨道误差引起的条纹, 它遮盖了地形和相位信息。根据条纹的密度和方向改正干涉基线, 重新应用这个基线去除平地效应得到图 3 所示的去平干涉图。

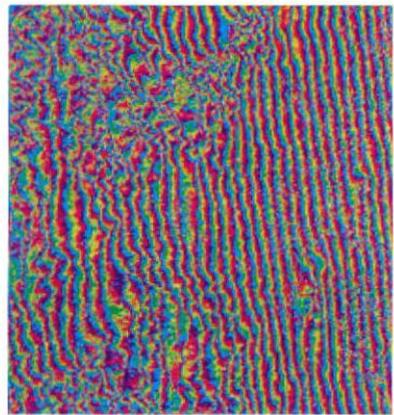


图 2 原始干涉图

Fig. 2 The absolute interferometric image

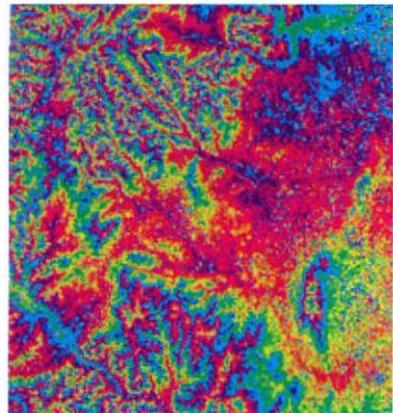


图 3 去平后的干涉图

Fig. 3 The interferometric image pattern

图 3 占主要地位的是地形相位, 比如右下角象树叶的形状是一个小山包, 对角线上几乎平行的两条线是马顶河与北洛河, 延伸到左边的山区。为了得到形变, 需要用 DEM 去除地形, 在此利用的是 SRTM 数据, 如图 4。

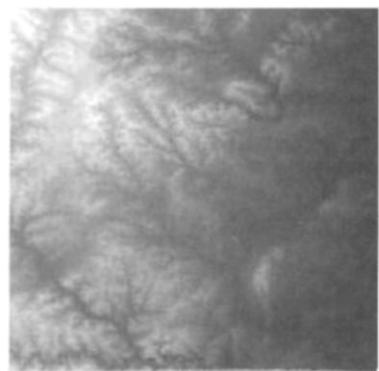


图 4 DEM 灰度图

Fig 4 The grey image of DEM

利用 DEM 模拟出干涉图, 与去平干涉图配

准,跟前面从图像重采样相同,模拟的干涉图也须重采样,以与主图像相匹配,两个干涉图像经差分处理得到差分干涉图,见图5。这张图中的部分工作区受到失相关的影响,可以看到,图5中绿色背景上的蓝色信号对应着图6中的低相关区。

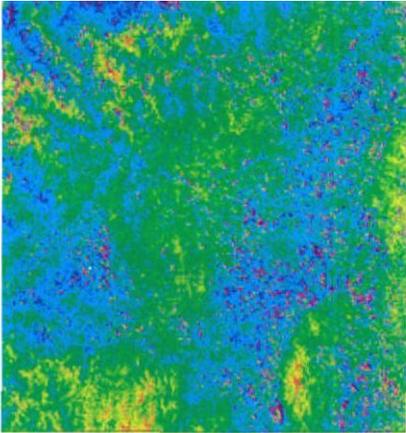


图5 差分干涉图  
Fig. 5 D-InSAR image

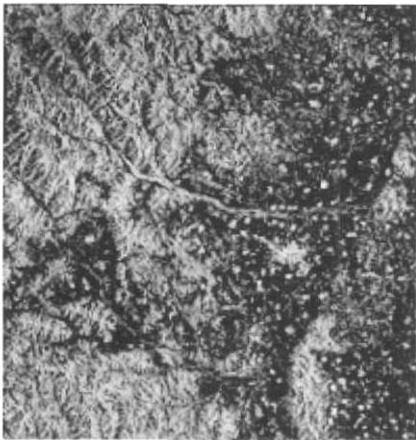


图6 相干图  
Fig. 6 The coherent image

最后的步骤是解缠差分,也要用到相干图,设定一些阈值,优先解缠相干性高的像元,相干性太低的不予解缠,用0值填充,解缠后的图像见图7。

### 3 矿山沉降测量结果分析

为了便于对比和验证,需对所有解缠相位图进行地理编码,以校正到统一地理坐标系中。

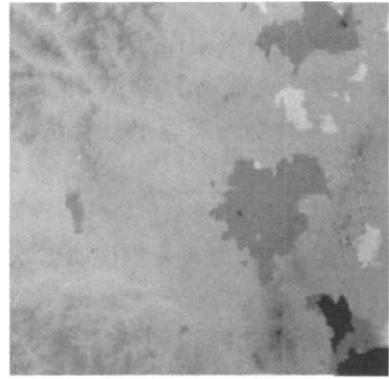


图7 解缠相位图  
Fig. 7 The unwrapped phase image

#### 3.1 形变图分析

解缠相位与斜距向形变之间存在如下关系  $\phi = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R$ , 雷达波长  $\lambda$  对于 L-波段是 23.5cm, 对于 C-波段是 5.66cm, 那么一个周期相位变化所对应的斜距向形变就分别是 11.75cm 和 2.83cm。本文假设形变是垂向的,考虑到 JERS 和 ENVISAT 的入射角分别是  $38^\circ$  和  $23^\circ$ , 那么一个周期对应的垂直沉降就分别是 15cm 和 3.1cm。表3列出的7组干涉像对的形变图。

针对不同噪声源,需采取不同的处理方法进行校正。对前两种影响,可以根据经验手工生成掩模来有效地消除噪声;而对于总体偏移,只需估计出偏移量,对全图减去这个偏移即可。根据地方测绘部门提供的矿点矿区分布图,选取不在矿山开采影响范围内的一小块区域,如图8中黄色矩形框所示,统计这个区域的像元平均值作为偏移量,表4列出了不同时期同一无沉降区对应的平均值和标准差。

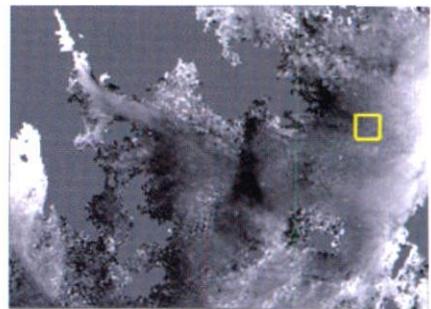


图8 0312-0401解缠相位  
(黄色矩形框表示没有沉降的区域)  
Fig. 8 The unwrapped phase image (pair 0312-0401)

表 4 各像对总体偏移参量

Tab 4 The whole displacement parameter list of every pair

像对	最小值 (米)	最大值 (米)	平均值 (米)	标准差 (米)
9304- 9402	- 0. 13	0. 12	0. 04	0. 03
9502- 9802	0	0. 16	0. 08	0. 02
9605- 9805	0	0. 33	0. 21	0. 06
9701- 9705	0. 16	0. 29	0. 22	0. 01
9802- 9803	- 0. 25	- 0. 15	- 0. 20	0. 01
9803- 9809	- 0. 14	0	- 0. 07	0. 01
0312- 0401	0. 002	0. 011	0. 006	0. 001

3.2 沉降形变图的可视化处理

经过上面的处理, 形变图中的噪声已经大致被消除。为了看图方便, 对形变图进行灰度分割, 也就是说不同的沉降量赋予不同的颜色, 再加上公里网, 生成图 9、10 所示的沉降示意图。

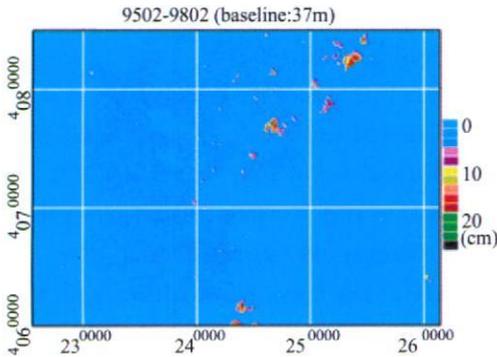


图 9 9502- 9802形变示意图

Fig. 9 The deformation map of pair (9502- 9802)

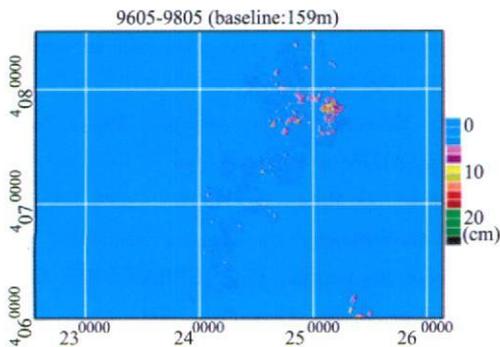


图 10 9605- 9805形变示意图

Fig. 10 The deformation map of pair (9605- 9805)

分析这些图可以认为: (1) 时间间隔越长, 总的沉降量越大, 像对 9502- 9802 时间间隔是 3 年, 沉降量远大于时间跨度 4 个月的像对 9701-

9705 (2) 沉降率呈增长趋势, 如 1993 年 10 个月地表发生的沉降量小于 1998 年 6 个月的沉降; (3) 沉降的地点随时间发生变化。

3.3 典型矿区沉降的时空演变分析

为了说明矿山开采沉降的演变, 选取武安惠兰村矿区进行比较分析。从图中可以看出不同时期的沉降量和面积都是变化的, 详细的统计资料见表 5。为了更直观地观察沉降位置随时间的变化, 历年的沉降范围用矢量勾勒出来, 叠加显示在图 12 中, 红色闭合线表示 9304- 9402, 蓝色代表 9605- 9805, 褐色代表 9803- 9809, 黄色代表 0312- 0401, 这些矢量的沉降中心逐渐沿对角线从右上角移动到左下角, 可以推测这些年惠兰村的矿山开采活动一直在往西南面移动。另外, 图 11 中的白色闭合线表示预测的形变范围, 由河北遥感中心的地质工作者实地考察武安相关矿区后提供, 与干涉处理得到的范围是一致的。由于缺少 GPS 和水准测量等实地资料, 无法进行精确的验证, 只能利用一些初步的测量资料进行粗略的对比, 但与有关单位掌握的主要沉降地区的沉降规模和幅度的资料相吻合, 说明结果是可信的。

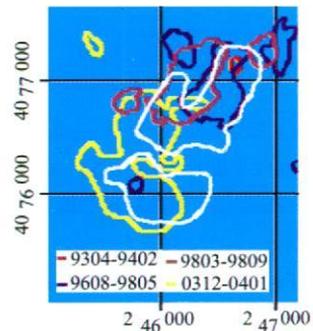


图 11 惠兰村各个时间段的沉降范围

Fig. 11 The subsidence extent of different period in Huilan village

表 5 惠兰村不同时期的沉降数据

Tab 5 The subsidence data of different periods in Huilan village

	9304- 9402	9502- 9802	9605- 9805	9701- 9705	9803- 9809	0312- 0401
面积 (m <sup>2</sup> )	10700	1371300	391500	0	138100	621200
最大沉降量 (cm)	2	20	14	0	12	1.4

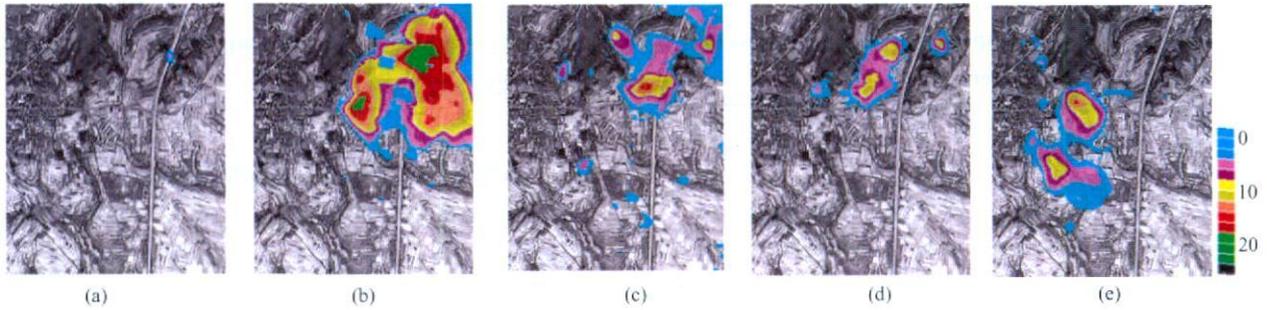


图 12 慧兰村历年的沉降示意图

Fig. 12 The subsidence evolution sketch map of Huilan village

注: 从图 a~ e依次对应: 9304- 9402, 9502- 9802, 9605- 9805, 9803- 9809, 0312- 0401, 0312- 0401 色标单位是 mm, 而其余图像对应的是 cm。

## 4 结语

本文以武安矿区为实例, 应用 InSAR 技术获得矿山开采沉降的流程和技术; 最后分析了慧兰村矿区沉降区域和沉降量的演变过程。

分别利用 JERS和 ENVISAT 数据获得不同时期的沉降图, 有助于了解这个地区的沉降模式, 并为制定矿山安全措施提供参考。不足之处是缺少 GPS和水准测量等实地资料, 无法相互比较和精确的验证, 只能利用一些初步的测量资料进行粗略的对比。

## 参考文献

- [1] Zhang Jingfa. To Measure the Cumulate Crustal Deformation of Important Faults System on the Western China by PS InSAR Technique. IGARSS 2004, Sep. Alaska, America, 2004.
- [2] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2202~ 2212.
- [3] J Allievi, C Ambrosi, M Ceriani, et al. Monitoring slow mass movements with the Permanent Scatterers Technique. IEEE TGARS, 2003, annals.
- [4] C Colesanti, A Ferretti, C Prati, et al. Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. Engineering Geology, 2003, 68(1- 2): 3~ 14.
- [5] Casu F, Manzo M, Lanari R. A Quantitative Assessment of the SBAS Algorithm Performance for Surface Deformation Retrieval from InSAR Data submitted to Remote Sensing of Environment Journal, 2006.
- [6] P Berardino, G Fornaro, R Lanari, et al. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 2002, 40.
- [7] Spreckels V, JM Usiedlak, U Wegmüller, et al. Detection of underground coal mining-induced surface deformation by differential InSAR data. ISPRS WG I/2, I/5, IV/7 Workshop on High Resolution Mapping from Space, Hannover, Germany, 19~ 21 Sep 2001.
- [8] Linlin Ge, Chris Rizoş, Shaowei Han, et al. Mining subsidence monitoring using the combined insar and GPS approach. www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/ge\_eta2001a.pdf.
- [9] Linlin Ge, Eric Cheng, Xiaojing Li, et al. Quantitative subsidence monitoring: The integrated InSAR, GPS and GIS approach. www.gmat.unsw.edu.au/snap/publications/ge\_eta2003a.pdf.
- [10] ALOS Research Announcement. [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/ra/ra\\_body.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/ra/ra_body.htm).
- [11] R Lanari, O Mora, M Manunta, et al. A differential SAR interferometry approach for monitoring urban deformation phenomena. Proc URBAN GRSS/ISPRS Joint Workshop, Berlin, Germany, 2003.

## Measuring Mining Induced Subsidence by Using InSAR Technique —— Taking Wuan Mining Area in Hebei as An Example

ZHANG Jingfa<sup>1</sup>, GUO Qinshi<sup>2</sup>, GONG Likun<sup>1</sup>

(1 Institute of Crustal Dynamics, CEA, Beijing 100085, China; 2 RS Center, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract** The InSAR technique has become one of the important tools to measure small surface deformation. In Wuan region of Hebei province, surface deformation occurs to different degrees due to mining activity, causing more geologic disasters. It is necessary to determine the scope and extent of surface subsidence and analyze the changing trend for working out actual resolved plan. In this paper, many pairs SAR data, JERS-1 and ENVISAT SAR data from 1992, were used in InSAR processing. The best SAR pairs were selected and feasible technique plan was determined and the different D-InSAR images were obtained according to the time and baseline of SAR pairs. Finally, the scope and extent information at different periods were acquired. Besides taking Huilan village as a example shows the mineral area subsidence evolution procedure. The process flow and key step of InSAR technique are summarized by the application of Wuan subsidence measurement. In the end, the result of InSAR application is evaluated.

**Key words** InSAR; subsidence; mining