

利用时序 InSAR 技术反演塘沽地区沉降历史

祝传广¹ 范洪冬¹ 邓喀中¹ 张继贤²

1 中国矿业大学国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室,江苏 徐州,221116

2 中国测绘科学研究院,北京,100036

摘要:以塘沽区为研究对象,对 1992~1998 年间的 19 景 ERS-1/2 影像,采用时序 InSAR 技术反演其由过量开采地下水引起的沉降历史。采用三次多项式模拟实际沉降模型,精确获取 SAR 成像时间点的下沉值,与反演值对比验证,结果表明,时序 InSAR 技术反演的历史累积沉降信息与水准数据一致,两者的平均沉降速率之差在 5 mm/a 以内;研究区域以 20~50 mm/a 的速率在整体下沉,西部地区下沉最为严重。

关键词:差分干涉;失相干;时序 InSAR;沉降反演;地下水

中图法分类号:P237.9

文献标志码:A

因地下水、煤炭等开采而引起的地面沉降已成为普遍现象。目前,我国已有近百个城市出现不同程度的地面沉降^[1-2]。资料显示^[3],天津市塘沽区由于持续的过量开采地下水,在 1990~2007 年间,区域内平均下沉速率达 8~35 mm/a。Gabriel^[4]等论证了 D-InSAR(differential interferometric synthetic aperture radar)技术可以探测亚 cm 级的地面形变。相对于水准与 GPS 等测量方法,D-InSAR 技术具有全天候、广覆盖等优点,但其受限于时/空基线失相干、大气效应等影响,难以进行长时间跨度的地面沉降监测。

针对上述缺陷,Ferretti^[5-6]等提出了单主影像 PS-InSAR 技术:基于时间序列上幅度变化特性,提取时空散射特性稳定的点,即永久散射体(permanent scatterer, PS),以减弱失相干、大气效应等影响。Berardino^[7]等提出了小基线集(small baselines subsets, SBAS)算法,使用多主影像构成更多的干涉对,并采用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)求解由短时空基线组成的干涉对方程。Hooper^[8-10]等也提出了 PS-InSAR 及 SBAS 算法。上述时序 InSAR 技术在长的时间跨度上,对散射特性稳定的像素进行分析,并提取出形变信息,具有较高的可靠性^[11-14]。本文采用文献[10]中的算法,研究了塘沽地区在 1992~1998 年间的沉降信息。

1 时序 InSAR 技术

单主影像的时序 InSAR 技术组成的干涉对数目有限,且无法保证所有的干涉对均具有最优的时间与空间基线。本文采用的 SBAS 算法可以按照时间/空间基线以及相干性组成更多的干涉对,并能保证干涉对的质量,因而更适用于长时间跨度的形变反演。该算法中,被选中的像素需要满足:在短的时间内,滤波后的相干性变化很小,即失相干现象表现缓慢^[15](slowly-decorrelating filtered phase, SDFP)。然后,对选取出的 SDFP 像素的相位进行时空分析,获取地表形变信息。虽然 SDFP 像素是基于相位信息进行筛选的,但是基于振幅信息的算法快捷简单,因此,可以设置宽松的阈值,首先利用振幅信息选取出几乎全部的 SDFP 像素。本文首先利用幅度差值离差法选取出候选 SDFP 像素。幅度差值离差 $D_{\Delta A}$ 定义为^[16]:

$$D_{\Delta A} \approx \frac{\sigma_{\Delta A}}{\mu_A} \quad (1)$$

1.1 SDFP 像素的相位模型

干涉对 i 上第 x 个 SDFP 像素,其去除地形相位后的干涉相位 $\varphi_{x,i}$ 可记为^[9]:

$$\varphi_{x,i} = w\{\phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \Delta\phi_{S,x,i} +$$

收稿日期:2013-05-15

项目来源:江苏高校优势学科建设工程资助项目(SZBF2011-6-B35);国家自然科学基金资助项目(41272389,41071273)。

第一作者:祝传广,博士,从事 InSAR 技术的理论及应用研究。E-mail:zhuchuangang@163.com

通讯作者:范洪冬,讲师,博士。E-mail: cumtfanhd@163.com

$$\Delta\phi_{\theta,x,i} + \phi_{N,x,i} \} \quad (2)$$

式中, $\phi_{D,x,i}$ 是最关键的部分, 但是 $\phi_{D,x,i}$ 与其他几个相位混叠在一起, 并且是缠绕的, 因此, 式(2)是一个非线性系统求解问题。

1.2 模型解算

根据式(2)中各相位的特性, 做合理的假设: 在一定的空间距离内, $\phi_{D,x,i}$ 、 $\phi_{A,x,i}$ 、 $\Delta\phi_{S,x,i}$ 具有强空间相关性, $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ 具有部分空间相关性, $\phi_{N,x,i}$ 在时间与空间上均表现为随机噪声相位。对式(2)采用以下步骤, 分离出各种相位:

1) 根据影像的分辨率设定空间格网大小, 在每个格网中使用自适应带通滤波器, 去除式(2)中的空间相关相位 $\tilde{\varphi}_{x,i}$:

$$\tilde{\varphi}_{x,i} = \phi_{D,x,i}^c + \phi_{A,x,i}^c + \Delta\phi_{S,x,i}^c + \Delta\phi_{\theta,x,i}^c \quad (3)$$

式中, 上标 c 表示空间相关部分。

2) 从式(2)去除空间相关相位后, 则有:

$$\omega\{\varphi_{x,i} - \tilde{\varphi}_{x,i}\} = \omega\{\Delta\phi_{\theta,x,i}^u + \phi_{N,x,i}^u + \delta_{x,i}\} \quad (4)$$

式中, 上标 u 表示空间非相关部分; 残存相位 $\delta_{x,i} = \phi_{D,x,i}^u + \phi_{A,x,i}^u + \Delta\phi_{S,x,i}^u$ 的值很小。视角误差中空间非相关部分相位 $\Delta\tilde{\varphi}_{\theta,x,i}^u$ 与噪声 $\phi_{N,x,i}^u$ 及残存项 $\delta_{x,i}$ 不相关, 因此, 可以通过空间搜索法估计出 $\Delta\tilde{\varphi}_{\theta,x,i}^u$;

3) 将估计出的 $\Delta\tilde{\varphi}_{\theta,x,i}^u$ 从式(3)中去除, 得:

$$\omega\{\varphi_{x,i} - \tilde{\varphi}_{x,i} - \Delta\tilde{\varphi}_{\theta,x,i}^u\} = \omega\{\phi_{N,x,i}^u + \delta'_{x,i}\} \quad (5)$$

式中, $\delta'_{x,i} = \delta_{x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i}^u - \Delta\tilde{\varphi}_{\theta,x,i}^u$, 在准确估计出 $\Delta\tilde{\varphi}_{\theta,x,i}^u$ 后, 式(4)中的相位主要由噪声支配。因此, 可以定义 γ_x 作为判断像素 x 是否是真正 SDFP 的准则:

$$\gamma_x = \frac{1}{N} \left| \sum_{i=1}^N \exp(j(\varphi_{x,i} - \tilde{\varphi}_{x,i} - \Delta\tilde{\varphi}_{\theta,x,i}^u)) \right| \quad (6)$$

式中, γ_x 主要由噪声支配, 可以通过 γ_x 判断出受噪声影响较大的伪 SDFP 像素。通过迭代算法精细化 SDFP, 以相邻两次 γ_x 之差小于 0.005 作为迭代终止条件。

4) 精细化后的 SDFP 像素的相位, 去除平地与地形相位后进行三维解缠有:

$$\phi_{x,i} = \phi_{D,x,i} + \phi_{A,x,i} + \Delta\phi_{S,x,i} + \Delta\phi_{\theta,x,i} + \Delta\phi_{N,x,i} + 2k_{x,i}\pi \quad (7)$$

式中, 存在模糊度 $2k_{x,i}\pi$, 并且 $\phi_{D,x,i}$ 混叠在几个相位之中, 因此, 需要对 SDFP 像素建立差分网络, 通过相邻 SDFP 像素求差, 去除模糊度:

$$\begin{aligned} \Delta_{x1}^2 \varphi_{x,i} &= \Delta_{x1}^2 \phi_{D,x,i} + \Delta_{x1}^2 \phi_{A,x,i} + \Delta_{x1}^2 \Delta\phi_{S,x,i} + \\ &\Delta_{x1}^2 \Delta\phi_{\theta,x,i} + \Delta_{x1}^2 \Delta\phi_{N,x,i} \end{aligned} \quad (8)$$

对式(8)进行时空域滤波, 分离出 $\Delta_{x1}^2 \phi_{D,x,i}$, 然后根据 γ_x 选取一个噪声最小的 SDFP 像素作

为参考点, 即可求解出所有 SDFP 像素的相对形变信息 $\phi_{D,x,i}$ 。

2 实验研究

为验证时序 InSAR 技术的可行性及精度, 本文以塘沽区为研究对象, 采用时序 InSAR 技术反演其在 1992~1998 年间的历史形变信息, 然后利用实测资料对其精度进行验证。

2.1 研究区域概况

研究区域自 20 世纪六七十年代开始大量抽取地下水资源, 年开采量达 1.2 亿 m^3 。1983 年, 通过引滦入津, 减少了地下水的开采, 1990 年降到了 0.29 亿 m^3 , 2007 年降到了 0.14 亿 m^3 。不同的开采量, 导致地下水位也出现波动^[3]。

2.2 数据准备

实验选取 1992-05~1998-12 年间的 19 景 ERS-1/2 影像, 时空基线参数见表 1。精密轨道数据(orbital data records, ODR)由 Delft 大学空间研究中心提供。研究区域有 6 个水准点^[3], 记录了 1990~2004 年间 15 期的地表变形信息, 可以作为地面控制点(ground control point, GCP)研究时序 InSAR 技术的可靠性与精度。

表 1 ERS-1/2 影像参数

Tab. 1 Parameters of ERS-1/2

| 序号 | 获取时间 | 时间基线 /d | 垂直基线 /m | 序号 | 获取时间 | 时间基线 /d | 垂直基线 /m |
|----|------------|---------|---------|----|------------|---------|---------|
| 1 | 1992-05-14 | 0 | 0 | 11 | 1995-08-05 | 1 178 | 426 |
| 2 | 1992-06-18 | 35 | -99 | 12 | 1995-09-09 | 1 213 | -895 |
| 3 | 1993-02-18 | 280 | 601 | 13 | 1995-12-23 | 1 318 | 709 |
| 4 | 1993-03-25 | 315 | 279 | 14 | 1996-03-02 | 1 388 | 683 |
| 5 | 1993-04-29 | 350 | 970 | 15 | 1996-03-03 | 1 389 | 676 |
| 6 | 1993-06-03 | 385 | -772 | 16 | 1996-08-25 | 1 564 | -643 |
| 7 | 1993-10-21 | 525 | 833 | 17 | 1997-06-01 | 1 844 | -249 |
| 8 | 1995-04-22 | 1 073 | -49 | 18 | 1997-09-14 | 1 949 | 151 |
| 9 | 1995-05-27 | 1 108 | -7 | 19 | 1998-12-13 | 2 404 | -792 |
| 10 | 1995-07-01 | 1 143 | -851 | | | | |

2.3 数据处理

为形成可靠的干涉对, 以垂直基线距 700 m、时间基线 1 500 d、干涉对间的相干系数 0.25 作为阈值, 并且要求形成的干涉对应相互连接成一个网络, 不能存在孤立的线或环。本次实验组合得到 40 个干涉对。由于研究区域海拔较低, 为避免外部 DEM 数据的误差, 实验中没有去除地形相位, 而是将其作为高程误差进行了估计。

为降低运算量, 首先采用幅度差值离差法选取候选 SDFP 像素。为减弱噪声的影响, 采用 Gol-

dstein 算法在方位向与距离向进行滤波。实验中, $D_{\Delta A}$ 设为 0.6 时,共选取出 456 494 个候选 SDFP 像素。将所有的候选 SDFP 像素采样到格网中,格网大小取决于影像的分辨率。对于本实验中选用的 ERS-1/2 数据,格网大小可设为 50 m×50 m。对格网内的所有 SDFP,使用自适应带通滤波器分离出空间相关相位,然后采用空间搜索法估计由视角误差引起的空间非相关项并去除,通过迭代不断精化候选点的 γ_x ,以 γ_x 的两次差值小于 0.005 作为迭代终止条件,最终选出 15 774 个 SDFP 像素,平均 1 km² 约含 47 个 SDFP 像素。

采用时空三维解缠算法进行相位解缠^[9]:首先在时间维上解缠,然后在空间维上采用 Snaphu 算法解缠。对 SDFP 构建差分网络去除模糊度,根据大气、形变、噪声在时空域上的不同特性进行分离:通过空间域上的高通滤波获取大气延迟、失相干等造成的误差;在时间域上低通滤波计算雷达视线方向上的形变相位。

3 结果分析

时序 InSAR 技术获取的形变量是相对值,需要在 GCP 中选取一个作为参考点,以获取地表的绝对形变信息。本文采取的策略为:首先,根据雷达波入射角视角将视线方向上的形变投影成地面在垂直方向上的形变;其次,求出参考 GCP 与周围 SDFP 的形变差值;最后,所有 SDFP 的形变值均减去这个差值,即可获得地表相对于参考 GCP 的垂直向形变。

实验中,GCP 的水准记录时间为 1990~2004 年,共 15 期记录。虽然包含了整个研究时间的跨度,但是水准数据记录时间与 SAR 影像获取时间并不完全吻合,因此,需要通过插值求得对应于 SAR 获取时间上的水准数据。线性形变模型难以拟合真实世界中的形变,因此,本文采用三次多项式进行拟合,获取 SAR 成像时间点的下沉值,以便与时序 InSAR 结果进行对比。考虑到 GCP12 的三次多项式拟合值与实际水准数据最为匹配(见图 1),所以选取 GCP12 作为参考点。

3.1 形变场的空间分析

将参考到 GCP12 后的 15 774 个 SDFP 像素在 1992-05~1998-12 间的平均沉降速率叠加到强度图上(图 2,为便于观察,方位向进行 5 倍的多视)。可以看出,研究区域在该段时期内,整体都在下沉,自东北部向西南部,平均下沉速率逐渐增大,平均沉降速率在 10~50 mm/a 之间。平均

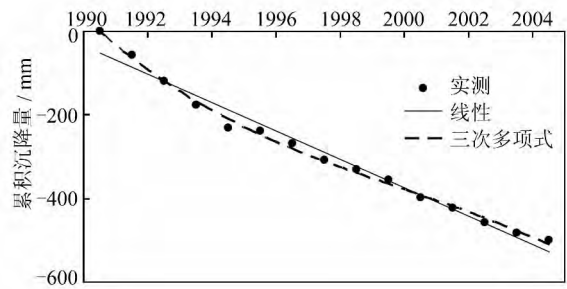
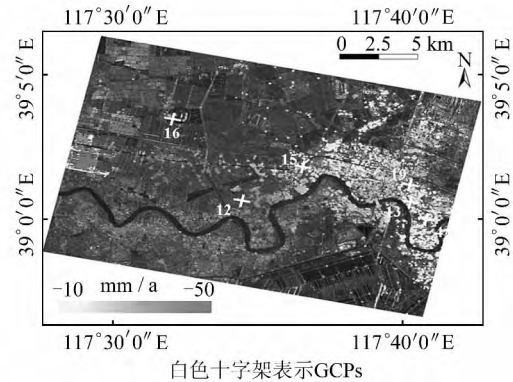


图 1 GCP12 的累积沉降量以及线性与三次多项式拟合结果

Fig. 1 Accumulative Subsidence, and the Linear and Cubic Polynomial Curve of Which in GCP12



白色十字架表示GCPs

图 2 SDFP 的平均沉降速率

Fig. 2 Mean Velocity of SDFP

下沉速率最大的地方发生在研究区域西南部,超过 40 mm/a。东部地区下沉较小,平均沉降速率约为 20 mm/a,但是相较于该地区平均海拔在 3 m 左右,这个沉降速率也是非常大的。

3.2 形变场的历史演化

选取出的 SDFP 像素与 GCP 不能完全重叠,故以 GCP 为中心,以 100 m 为半径,分析该区域内所有 SDFP 像素的历史形变信息。GCP 与其周围的 SDFP 像素的累积沉降对比如图 3 所示。可以看出,水准数据与时序 InSAR 结果相互吻合,并且随着时间的推移,研究区域累积沉降量都在逐渐增大。而且,位于研究区域东部的 GCP4、GCP13 与 GCP19 的累积沉降量大致相同,约为 130 mm,位于研究区域西北部的 GCP16 累积沉降达到 180 mm,而位于中南部的 GCP12 累积沉降最大,达到 250 mm。虽然在 1996~1998 年间,GCP4 与 GCP13 处的时序 InSAR 结果与水准数据存在一个最大约 20 mm 的偏差,但两者的累积沉降趋势是一致的。

3.3 反演精度分析

为了评价时序 InSAR 技术反演结果的精度,分析了 GCP 与其周围 SDFP 像素的平均沉降速

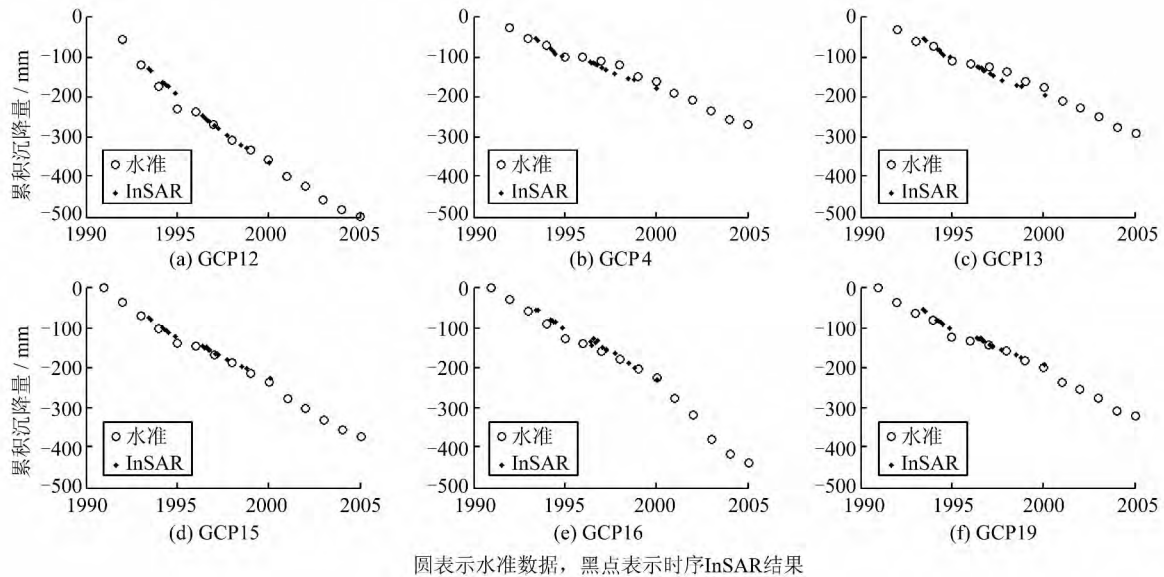


图 3 时序 InSAR 技术与水准数据获取的累积沉降对比

Fig. 3 Comparison of Accumulative Subsidence Derived from Temporal InSAR

率之间的关系,见表 2。其中,水准数据的平均速率计算自 1991~1999 年间。由表 2 可以看出,时序 InSAR 技术反演的平均沉降速率信息与实测水准数据相一致,除了 GCP13 以外,两者误差在 ±2 mm/a 附近,而 GCP13 处的误差也不超过 ±5 mm/a。这说明,时序 InSAR 技术反演的历史形变信息精度较高。

表 2 时序 InSAR 技术与水准数据获取的平均沉降速率对比

Tab. 2 Comparison of Mean Velocity Derived from Temporal InSAR and Leveling

| GCP 点号 | 100 m 内 SDFP 点数 | 水准数据 / (mm/a) | InSAR / (mm/a) | 差值 / (mm/a) |
|--------|-----------------|---------------|----------------|-------------|
| 4 | 9 | -16.9 | -18.9 | -2.0 |
| 12 | 2 | -37.4 | -35.5 | 1.9 |
| 13 | 20 | -17.8 | -21.5 | -3.7 |
| 15 | 4 | -25.1 | -22.8 | 2.3 |
| 16 | 2 | 24.3 | -26.3 | -2.0 |
| 19 | 11 | -20.4 | -20.7 | -0.3 |

时序 InSAR 技术在塘沽地区的形变监测效果较为理想,分析其成功的原因主要有:① 地面建筑物较多,利于 SDFP 像素点的选取;② 地面沉降由于过量开采地下水引起,沉降速率较为缓慢,呈现区域性整体缓慢下沉现象。

另外,时序 InSAR 技术也有其自身的不足之处:① 主要利用各种相位不同的时空相关性进行分离,而有时这些相位的时空特性并不一定非常明显,如一些噪声相位在时空域上可能存在一定的相关性;② 大气相位主要受对流层中的水汽影响,因而可能存在季节性变化;③ SDFP 像素集

中在建筑物较多的区域,而在村庄、农田区域则很少。这些不足之处也是下一步工作的重点。

致谢:感谢欧洲空间局(European Space Agency, ESA)为本文提供 ERS-1/2 数据(C1P. 8371, C1P. 10185),感谢代尔夫特大学提供 ODR 数据。

参 考 文 献

[1] Cai Wenxiao. Research on Relationship Between Deep Groundwater Exploitation and Land Subsidence in Dezhou[D]. Changchun: Jilin University, 2009 (蔡文晓. 德州市深层地下水开采与地面沉降关系研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009)

[2] He Xiufeng, Zhong Haibei, He Min. Ground Subsidence Detection of Nantong City Based on PS-InSAR and GIS Spatioal Analysis[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2011, 39(1): 129-134(何秀凤, 仲海蓓, 何敏. 基于 PS-InSAR 和 GIS 空间分析的南通市地面沉降监测[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(1): 129-134)

[3] Dong Guofeng. Study on Forecasting Model of Land Subsidence and Its Application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2006(董国凤. 地面沉降预测模型及应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2006)

[4] Gabriel A K, Zebker H A, Goldstein R M. Mapping small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B7): 9 183-9 191

[5] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nolinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry[J]. *IEEE Transac-*

- tions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38 (5): 2 202-2 212
- [6] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1):8-20
- [7] Berardino A. New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baselines Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40 (11): 2 375-2 383
- [8] Hooper A, Zebker H, Segall P, Kampes B. A New Method for Measuring Deformation on Volcanoes and other Natural Terrains Using InSAR Persistent Scatterers[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(L23611): 1-5
- [9] Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcan Alcedo, Galapagos [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(B07407): 1-21
- [10] Hooper A, Bekaert D, Spaans K, et al. Recent Advances in SAR Interferometry Time Series Analysis for Measuring Crustal Deformation [J]. *Tectonophysics*, 2012: 1-13
- [11] Colesanti C, Mouelie S L, Bennani M, et al. Detection of Mining Related Ground Instabilities Using the Permanent Scatterers Technique—A Case Study in the East of France[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(1): 201-207
- [12] Perissin D, Parizzi A, Prati C, et. al. Monitoring Tianjin Subsidence with the Permanent Scatterers Technique[J]. *Dragon Programme Mid-Term Results*, 2006, 611:393-398
- [13] Tomas R, Herrera G, Cooksley G, et al. Persistent Scatterer Interferometry Subsidence Data Exploitation Using Spatial Tools: The Vega Media of the Segura River Basin case study[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400:411-428
- [14] Hung W C, Hwang C, Chen Y A, et al. Surface Deformation from Persistent Scatterers SAR Interferometry and Fusion with Leveling Data: a Case Study over the Choushui River Alluvial Fan, Taiwan[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115:957-967
- [15] Hooper A. Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation[D]. California:Stanford University, 2006
- [16] Hooper A. A Multi-temporal InSAR Method Incorporating both Persistent Scatterer and Small Baselines Approaches [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(L16302): 1-5

Inversion of Subsidence Based on Temporal InSAR Method in Tangu Area

ZHU Chuanguang¹ FAN Hongdong¹ DENG Kazhong¹ ZHANG Jixian²

¹ China University of Mining and Technology, Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, Xuzhou 221116, China

² China Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China

Abstract: The temporal InSAR technique overcomes the temporal/spatial decorrelation with the slow decorrelating filtered phase (SDFP) pixels identified by phase stability. In this paper, the Tangu area has been selected as study area, where the subsidence information due to groundwater overexploitation from May 1992 to December 1998 has been inverted by processing 19 ERS-1/2 acquisitions using the temporal InSAR method. The subsidence in time of the SAR imaging has been estimated accurately using cubic polynomial model. And the result derived from temporal InSAR was consistent with the level data which was regarded as GCPs with a little difference that less than 5 mm/a. Besides, the result also showed that the whole study area has suffered subsidence with a mean rate 20~50 mm/a during 1992 to 1998, and the subsidence is severity in the eastern.

Key words: DInSAR; decorrelation; temporal InSAR; subsidence reversion; groundwater

First author: ZHU Chuanguang, PhD candidate, specializes in the theory and application of InSAR. E-mail: zhuchuanguang@163.com

Corresponding author: FAN Hongdong, lecturer. E-mail: cumtfanhd@163.com

Foundation support: The Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions, No. SZBF2011-6-B35; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41272389, 41071273.