

短基线集 InSAR 技术用于大同盆地地面沉降、地裂缝及断裂活动监测

杨成生¹ 张勤¹ 赵超英¹ 季灵运²

1 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安, 710054

2 中国地震局第二监测中心, 陕西 西安, 710054

摘要:大同盆地是我国地面沉降、地裂缝等地质灾害集中发育区之一。采用短基线 InSAR 方法对覆盖该地区的 40 景 Envisat SAR 数据进行了处理, 获取了大同盆地的地面沉降分布特征, 分析了典型沉降区的时间序列形变特征, 研究了盆地地面沉降、地裂缝及断裂活动之间的相互影响。研究表明, 大同市地面沉降受地下水开采影响明显, 同时其走向受断裂带控制。此外, 还分析了大同机车厂地裂缝的水平及垂直活动特征, 及其与降水量的关系。

关键词:地面沉降; 地裂缝; SBAS-InSAR; 大同盆地; 地下水; 断裂带

中图分类号: P228

文献标志码: A

大同盆地是汾渭盆地中遭受地面沉降、地裂缝以及断裂活动灾害十分严重的地区之一^[1]。从 20 世纪 80 年代起, 工农业的发展及城市居民用水的急剧增长, 导致了大同市地面沉降与地裂缝相继发生^[2-3], 目前已发现有十余条地裂缝, 总长度达 34.5 km^[4-6]。长期以来, 大同盆地缺乏大范围的地表形变监测, 地面沉降常由区域地下水位变化来推断, 断裂活动也以实地勘察为主, 因此, 利用现代空间对地观测技术对该区域进行大范围的监测, 对掌握该区域形变特征和区域构造活动具有重要的意义。

合成孔径雷达干涉测量 (Interferometric SAR) 作为一种空间对地大范围观测的有效手段, 可利用 SAR 影像中携带的相位信息获取地表高程信息及其变化^[7], 已广泛应用于许多物理现象的监测, 如地面沉降^[8]、地震^[9-10]、火山^[11]和冰川^[12]移动等地表形变。特别是短基线集干涉技术 (small baseline subset, SBAS) 的提出^[13-16], 对 InSAR 数据处理中大气延迟的影响进行了一定削弱^[17-20], 大大提高了 InSAR 的监测精度。

为此, 本文利用覆盖大同地区的 40 景 Envisat ASAR 数据, 并采用 SBAS InSAR 方法对其

进行了处理^[21-22], 获取了 2003~2010 年间该地区形变时间序列结果及平均年形变速率图, 并根据监测结果对地面沉降与地下水位之间的关系、地裂缝及断裂活动等进行了分析。

1 短基线集 InSAR 技术

为了提高 InSAR 监测形变的精度, 2002 年后, Berardino, Lanari 等人先后探讨了短基线干涉测量 (SBAS) 技术及其在地表形变中的应用^[13-16]。2006 年 Hooper 对短基线 InSAR 技术中的高相干点选取方法进行了优化。短基线集 InSAR 技术可表述为: 假定在时间 t_1, t_2, \dots, t_n 内获得同一区域 N 幅 SAR 影像, 根据干涉组合条件, 在短基线距的条件下形成 M 幅干涉条纹图, 且有 $N/2 \leq M \leq N(N-1)/2$ 。对于任意干涉图 i , 在去除平地及地形相位影响后, 第 x 个像素的干涉相位可表示为:

$$\delta\varphi_{x,i} = \varphi_{x,i}(t_B) - \varphi_{x,i}(t_A) \approx \delta\varphi_{\text{def},x,i} + \delta\varphi_{\varepsilon,x,i} + \delta\varphi_{a,x,i} + \delta\varphi_{n,x,i} \quad (1)$$

式中, t_A, t_B ($t_A < t_B$) 为 i ($i=1, 2, \dots, M$) 干涉图对应的 SAR 影像获取时间; $\delta\varphi_{\text{def},x,i}$ 为 $t_A \sim t_B$ 时刻对

收稿日期: 2013-11-07

项目来源: 国家自然科学基金资助项目 (41304016, 41274004, 41372375); 地震专项基金资助项目 (201208009); 精密工程与工业测量国家测绘地理信息局重点实验室开放基金资助项目 (PF2011-12)。

第一作者: 杨成生, 博士, 主要从事高精度 InSAR 地质灾害监测技术与方法研究。E-mail: ycsgps@163.com

通讯作者: 张勤, 教授, 博士生导师。E-mail: zhangqingle@263.net.cn

应的斜距向形变; $\delta\varphi_{\varepsilon,x,i}$ 为地形相位误差; $\delta\varphi_{a,x,i}$ 为大气相位误差; $\delta\varphi_{n,x,i}$ 为噪声误差。其中, 式(1)右端前三项可表示为:

$$\begin{cases} \delta\varphi_{\text{def},x,i} = \frac{4\pi}{\lambda} [d_{x,i}(t_B) - d_{x,i}(t_A)] \\ \delta\varphi_{\varepsilon,x,i} = \frac{4\pi B_{\perp,x,i} \Delta z}{\lambda R \sin\theta} \\ \delta\varphi_{a,x,i} = \varphi_{a,x,i}(t_B) - \varphi_{a,x,i}(t_A) \end{cases} \quad (2)$$

式中, λ 为雷达波长; R 为斜距; B_{\perp} 为垂直基线; Δz 为 DEM 高程差; θ 为入射角。假定不同干涉图间的形变速率为 $v_{j,j+1}$, 则 $t_A \sim t_B$ 间的累积形变可表示为:

$$\delta\varphi_{\text{def},x,i} = \frac{4\pi}{\lambda} \sum_{j=t_A}^{t_B-1} v_{k,k+1} (t_{k+1} - t_k) \quad (3)$$

对 M 幅干涉条纹图进行三维时空相位解缠即可求出不同 SAR 获取时间的形变速率。

2 数据处理

为了研究大同地区的地表形变状况, 本文收集了 40 景 Envisat ASAR 数据, Track 为 2 075, Frame 为 2 799, 时间跨度为 2003 年 8 月~2010 年 9 月。为了获取该地区可靠的地表形变监测结果, 选取时间间隔小于 700 d 和空间垂直基线分量小于 500 m 的差分干涉图进行处理, 在此基础上再对差分干涉图进行筛选, 最终选取了 97 个具有较高质量的差分干涉图进行短基线集时间序列分析处理。

同时, 将最大 DEM 误差预设设为 8 m 进行形变速率迭代解算。迭代解算过程中, 将预选取的高相干点相位标准差阈值设为 1.0, 即预选取的每一个像素的相位标准差都被计算, 若该像素在所有干涉对中最小的相位标准差大于 1.0, 则该像素点将被作为不稳定点舍弃^[23]。同时根据大气相位的时空特性, 对相干点上的大气延迟相位进行分离, 并将分离出的大气延迟相位从差分干涉图中去除, 最终得到大同盆地 2003~2010 年间的时间序列形变结果。

图 1 显示了由实验获取的大同盆地地面沉降年平均速率, 其中黑色虚线方框处为参考区域, 即大同市的老城区。同时, 也估算了各相干点速度的标准差, 见图 2。从图 2 中可以看出, 各相干点的速度标准差除了在大同煤田以外均很小, 平均标准差不超过 2 mm/a, 可见相干点上的形变速度较为稳定, 估算形变速度值可靠。大同煤田相干点速度的标准差可能是影像噪声导致, 或者该

处发生了非线性形变。

3 结果分析

3.1 地面沉降结果分析

由图 2 分析可得, 大同盆地的主要沉降中心分布在城北白马城、城南大同机车厂、经济技术开发区和怀仁县。这些地区除了经济技术开发区沉降中心外, 其余均为大同的主要水源地。其中经济技术开发区是 1992 年由山西省人民政府批准成立的省级开发区, 2000 年以后建设速度较快, 并于 2010 年经国务院批准为国家级经济技术开发区。该区域的地面沉降与城市建设有很大的关系。

为分析各主要沉降中心随时间变化的规律, 提取了盆地内 5 处典型区域的形变时间序列结果, 如图 3 所示, 分别位于白马镇、大同机车厂、经济技术开发区和怀仁县以及稳定参考区域, 具体位置分布见图 1。从图 3 的形变时间序列曲线的形变趋势分析, 在选取的 5 处典型区域中, 白马城区域的地表沉降最为严重, 在 2003~2010 年间, 累计沉降量达到 120 mm, 年平均沉降速率约为 17 mm/a。机车厂区域是大同盆地内另一处地面沉降较为严重的区域, 在 2003~2010 年间, 累计沉降量达到 90 mm, 年平均沉降速率约为 13 mm/a。经济技术开发区和怀仁县形变趋势基本相当, 7 a 内累计沉降量约为 70 mm, 年平均沉降速率约为 10 mm/a, 而稳定参考区基本稳定。

3.2 地面沉降与地下水的关系分析

地下水是维持土体应力平衡的一个重要因素, 大量开采地下水将会导致含水层的水头压力降低, 破坏土体原有的压力平衡和稳定状态。因此, 地下水开采往往是地面沉降和地裂缝等环境灾害发生的一个主要诱因。根据统计, 截至 2006 年, 大同盆地地下水较 1977 年损失了 39%, 河道变窄, 水库减少, 主要原因是不合理的农业灌溉和工业用水导致的过度开采地下水。对比 2005 年大同市地下水开采漏斗(如图 4 所示, 范围为图 2 中黑色虚线边框), 不难发现, 大同市地面沉降与地下水降落漏斗在空间分布上具有较好的对应关系。本文沿图 1 中剖面 $P4-P4'$ 位置分别提取了地下水水位和 2005 年地面沉降值, 结果如图 5 所示。由图 5 分析可知, 地下水位与地面沉降值之间存在较好的对应关系, 地面沉降发生区同时也是地下水位漏斗区, 这说明过量开采地下水是大同盆地地面沉降产生的一个主要原因。

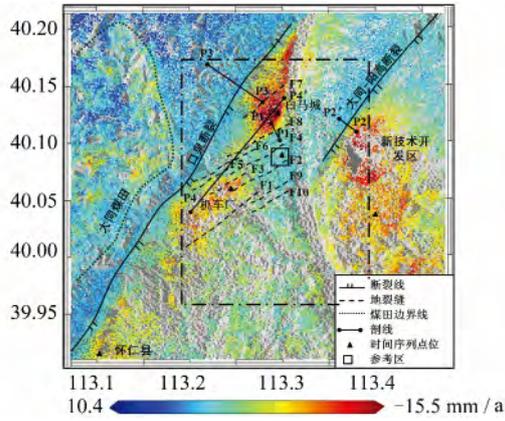


图 1 大同盆地 InSAR 时间序列形变年平均速率
Fig. 1 Mean Velocity of the Datong Basin Derived from InSAR Time Series

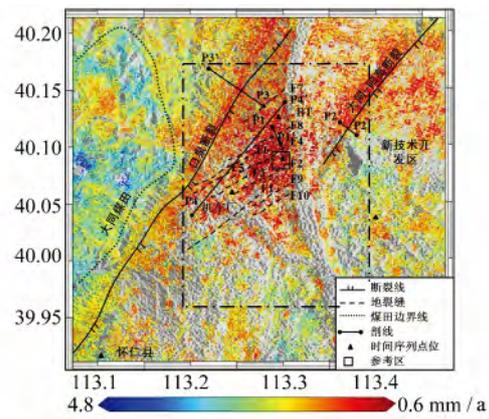


图 2 InSAR 时间序列平均速度标准差
Fig. 2 Standard Deviation of the Mean Velocity Derived from InSAR Time Series

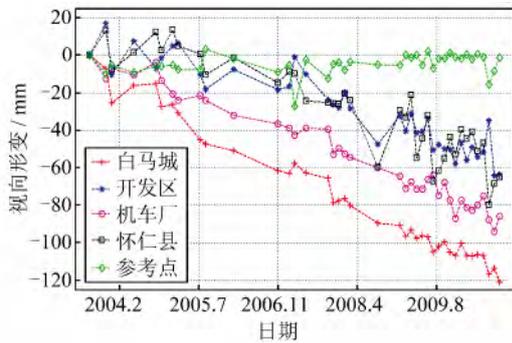


图 3 特征点累计形变时间序列
Fig. 3 Accumulation Subsidence Time Series Curves for Feature Points

3.3 地裂缝活动与构造活动、降水的影响分析

由于抽取地下水会引起含水层水平运动和土体水平应变,因此,若抽水过程中形成的径向拉张应变区范围内存在地裂缝或其下伏断层软弱结构面,可能加速对地裂缝或下伏断层活动。而地面

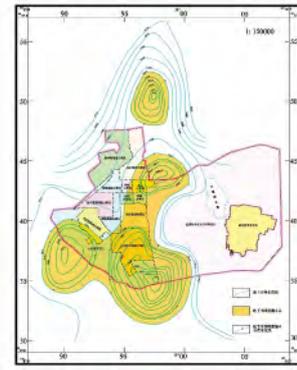


图 4 2005 年地下水开采漏斗^[24]
Fig. 4 Ground Water Mining Funnel in 2005^[24]

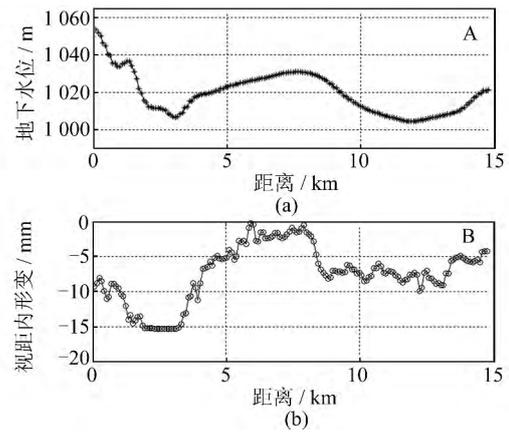


图 5 地下水与地面沉降剖面图
Fig. 5 Profile Lines of the Deformation and the Underground Water Level

降水是进行地下水位补充最有效的途径之一,因此降水对地裂缝活动具有一定的影响。

本文收集分析了大同机车厂跨地裂缝静力水准仪和水平蠕变仪的历年观测结果,发现地裂缝活动较大的年份分别对应了 1989 年大同阳高 6.1 级地震、1991 年大同阳高 5.8 级地震、1996 年张北 6.2 级地震、1999 年大同阳高 5.6 级地震和 2006 年文安 5.1 级地震,说明地震应变能的释放和地裂缝形变量的变化是同步进行的,大同地裂缝活动同时也受区域构造应力场的影响。为了研究地裂缝活动的季节性变化规律,将静力水准仪和水平蠕变仪的历年观测结果按月进行平均,各月份地裂缝垂直活动量和水平活动量计算结果如图 6(a)所示。不难发现,该处地裂缝水平活动呈拉张和挤压交替运动状态,而垂直活动量则与季节有明显的关系。同时,本文收集了大同盆地内各月份的平均降水量数据(见图 6(b)),分析可得该处地裂缝的垂直活动量与该地区的月平均降水量具有很好的时间对应关系,也就是说,降水对该地区地裂缝活动具有一定的影响。

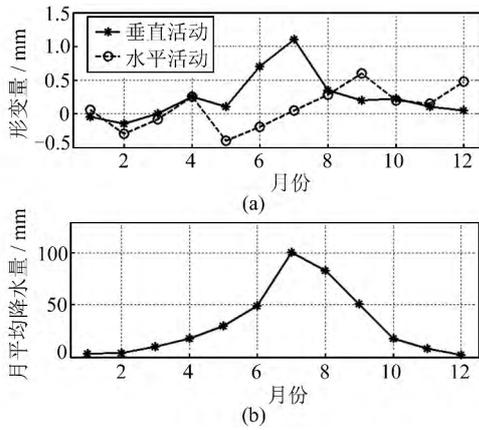


图6 大同机车厂地裂缝活动及月平均降水量关系图
Fig. 6 Month Mean Vertical and Horizontal Activity of the Datong Locomotive Plant Ground Fissure

3.4 地面沉降与地裂缝及构造活动的影响分析

随着地面沉降的发生,大同市地裂缝也相继出现。从地裂缝的分布上看,地裂缝在地面沉降中心区或边缘地带分布较集中,大致呈 N-E 走向,与地面沉降走向基本一致。这也说明了地面沉降与地裂缝活动之间存在相互影响关系。从图 1 中选取地面沉降与地裂缝活动相互影响明显的地裂缝 F8,作垂直于地裂缝的剖面,位置如图 1 中 P1-P1',结果见图 7(b)。同时沿 P1-P1'提取了该地区的地形信息(图 7(a))。从图 7 中可以明显看出,尽管该处的地形变化缓和,然而地表形变却发生了明显的错动,图 7 中虚线标出了形变发生错动的位置。由此可以判定,F8 地裂缝两侧约存在 6 mm/a 的差异沉降,地裂缝 F8 的影响宽度应在 200 m 以内。

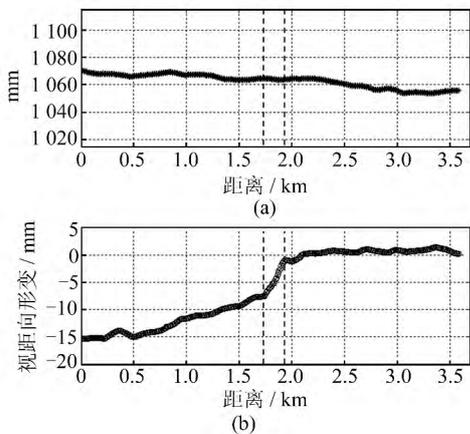


图7 垂直大同 F8 地裂缝活动剖面图
Fig. 7 Profile Line Perpendicular to the Ground Fissure F8

大同地面沉降与断裂位置的分布也存在较强的依附关系,如图 1 中新经济经济技术开发区北部大

同-阳高断裂和盆地西缘的口泉断裂。选取大同-阳高断裂和口泉断裂沿线地面沉降严重的两处作垂直于断裂带的剖面,剖面位置分别如图 1 中 P2-P2'和 P3-P3'所示,同时提取了剖面沿线的高程信息,结果见图 8 和图 9。分析图 8 可知,大同-阳高断裂在海拔 1 100 m 以上区域较为稳定,平均形变速率在 0 值附近;然而,在海拔 1 100 m 以下区域沉降开始发生,并逐渐加大,据此可以判断该处活动断裂在海拔 1 100 m 左右出露地面,这与实际地质资料相符合。同样,从图 9 的剖面分析中,也可以判断该处口泉活动断裂带活动的地表出露位置在海拔 1 200 m 左右。

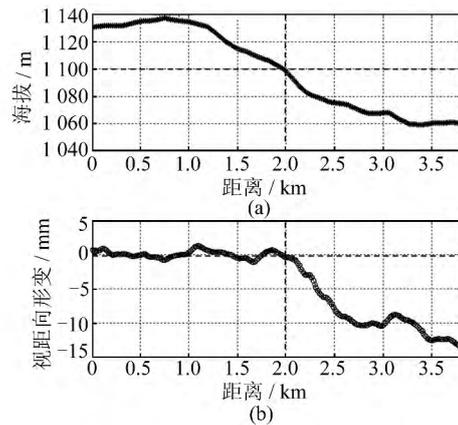


图8 垂直大同-阳高断裂活动剖面图
Fig. 8 Profile Line Perpendicular to the Datong-Yanggao Fault

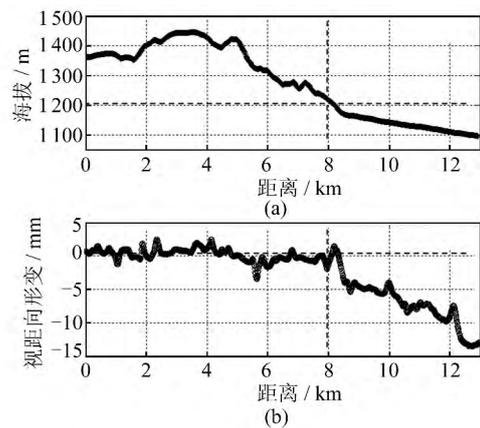


图9 垂直大同白马城附近口泉断裂活动剖面图
Fig. 9 Profile Line Perpendicular to the Kou-Quan Fault

4 结 语

本文利用 SBAS InSAR 技术对大同盆地的地面沉降、断裂活动及地裂缝活动进行了监测。通过本文研究得到如下结论。

1) 大同盆地地面沉降区主要集中在水源地,另外,随着新经济技术开发区的建设,新经济技术开发区也成为一个新的沉降中心。

2) 通过对机车厂地裂缝的监测数据分析发现,该处地裂缝垂直形变活动受地表降水的影响,有明显的季节变化特点,而地裂缝的水平拉张活动存在拉张与挤压交替活动现象。

3) 通过 InSAR 监测结果分析,大同白马城地裂缝 F8 两侧约存在 6 mm/a 的差异沉降,地裂缝的影响宽度在 200 m 以内。

4) 大同盆地地面沉降受地下水开采及构造断裂的影响明显,地面沉降多发生在地下水开采漏斗区,同时地面沉降在断裂两侧具有明显的差异性,并以断裂为界。

5) 大同地裂缝活动与地面沉降之间存在相互影响关系,地裂缝较集中地分布在地面沉降中心区或边缘地带,且两者具有大致相同的分布走向。

参 考 文 献

- [1] Peng Jianbing, Fan Wen, Li Xian, et al. Some Key Questions in the Formation of Ground Fissures in the Fen-Wei Basin[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(4): 433-440(彭建兵, 范文, 李喜安, 等. 汾渭盆地地裂缝成因研究中的若干关键问题[J]. *工程地质学报*, 2007, 15(4): 433-440)
- [2] Liu Yuhai, Chen Zhixin, Niu Fujun. Characteristics of Land Subsidence and Environmental Geology Effects Induced by Groundwater Exploration in Datong City[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1999, 9(2): 155-160(刘玉海, 陈志新, 牛富俊. 大同市地面沉降特征及地下水开采的环境地质效应[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1999, 9(2): 155-160)
- [3] Zan Yalin. Relation Between Ground Fissure Formation and Ground Water Mining in Urban Datong[J]. *Coal Geology of China*, 2006, 18(6): 26-29(竺雅玲. 大同市区地下水开采与地裂缝形成的关系[J]. *中国煤田地质*, 2006, 18(6): 26-29)
- [4] Li Shude, Yuan Renmao. The Formation Mechanism of Ground Fissure in Datong City[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2002, 38(1): 104-108(李树德, 袁仁茂. 大同地裂缝灾害形成机理[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(1): 104-108)
- [5] Lv Jifeng. The Influence on Ground Fissures Activities by Groundwater Exploitation[J]. *Neijiang Science and Technology*, 2004, 3: 79-80(吕继峰. 大同市地下水开采对地裂缝活动的影响[J]. *内江科技*, 2004, 3: 79-80)
- [6] Ren Jianguo, Gong Weiguo, Jiao Xiangju. Distribution Characteristics of Ground Fissure in Datong and Its Development Trend[J]. *Earthquake Research in Shanxi*, 2004, 118(3): 39-42(任建国, 龚卫国, 焦向菊. 山西大同市地裂缝的分布特征及其发展趋势[J]. *山西地震*, 2004, 118(3): 39-42)
- [7] Hanssen R. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis[M]. New York: Springer, 2001
- [8] Zhao Chaoying, Ding Xiaoli, Zhang Qin, et al. Monitoring of Recent Land Subsidence and Ground Fissures in Xi'an with SAR Interferometry[C]. ISPRS, Beijing, 2008
- [9] Massonnet D M, Rossi C C, Carmona C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry [J]. *Nature*, 1993, 364(8): 138-142
- [10] Zebker H A, Rosen P A, Goldstein R M, et al. On the Derivation of Coseismic Displacement Fields Using Differential Radar Interferometry: the Landers Earthquake[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(B10): 19 617-19 634
- [11] Lu Z, Patrick M, Fielding E J, et al. Lava Volume from the 1997 Eruption of Okmok Volcano, Alaska, Estimated from Spaceborne and Airborne Interferometric Synthetic Aperture Radar[J]. *IEEE Trans Geosci. Remote Sens*, 2003, 41: 1 428-1 436
- [12] Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B, et al. Satellite Radar Interferometry For monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream[J]. *Science*, 1993, 262(5 139): 1 525-1 530
- [13] Lanari R, Mora O, Manunta M, et al. A Small-baseline Approach for Investigating Deformations on Full-resolution Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42: 1 377-1 386
- [14] Lanari R, Casu F, Manzo M, et al. An Overview of the Small Baseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis [J]. *Pure Appl. Geophys*, 2007, 164 (4): 637-661
- [15] Berardino P. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms[J]. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40: 2 375-2 383
- [16] Usai S. A Least Squares Database Approach for SAR Interferometry Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41: 753-760
- [17] Li Z, Fielding E J, Cross P. Integration of InSAR

- Time-series Analysis and Water-vapor Correction for Mapping Postseismic Motion After the 2003 Bam (Iran) Earthquake[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2009, 47 (9): 3 220-3 230
- [18] Li Z, Fielding E J, Cross P, et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar Atmospheric Correction: GPS Topography-dependent Turbulence Model[J]. *J Geophys Res*, 2006, 111 (B2): B02404
- [19] Hanssen R, Feijt A. A First Quantitative Evaluation of Atmospheric Effects on SAR Interferometry [C]. Fringe 96' Workshop on ERS SAR Interferometry, Switzerland, 1996
- [20] Goldstein R M. Atmospheric Limitations to Repeat-track Radar Interferometry[J]. *Geophys Res Lett*, 1995, 22: 2 517-2 520
- [21] Hooper A. A Multi-temporal InSAR Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches[J]. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L16302
- [22] Hooper A, Zebker H A. Phase Unwrapping in Three Dimensions with Application to InSAR Time Series[J]. *J Opt Soc Am. A: Opt. Image Sci. Vis.*, 2010, 24 (9): 2 737-2 747
- [23] Hooper A, Spaans K, Bekaert D, et al. Stamps/MTI Manual[D]. Delft: Delft University of Technology
- [24] Geological Environment Monitoring Center of Shanxi Province. Ground Fissure Exploration Report for Datong City[R]. Shangxi: Geological Environment Monitoring Center of Shanxi Province, 2006 (山西省地质环境监测中心. 山西省大同市地裂缝勘查报告[R]. 山西: 山西省地质环境监测中心, 2006)

Small Baseline Subset InSAR Technology Used in Datong Basin Ground Subsidence, Fissure and Fault Zone Monitoring

YANG Chengsheng¹ ZHANG Qin¹ ZHAO Chaoying¹ JI Lingyun²

¹ College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, 710054, China

² Second Crust Monitoring and Application Center, CEA, Xi'an, 710054, China

Abstract: Datong basin is one of the geological hazards development zones where geological disaster has a high frequency, such as the ground subsidence, ground fissure and so on. In this paper, the small baseline subset (SBAS) InSAR technology was used to process 40 scenes of Envisat SAR data covering this area, and the surface deformation distribution characteristics were obtained. The time series deformation characteristics of the typical subsidence area were analyzed. The relationship among the regional ground subsidence, ground fissures and fault were also analyzed. The results show that the ground subsidence is influenced by groundwater exploitation and controlled by the faults. At the same time, the horizontal and vertical activity characteristics of the Locomotive Factory ground fissure were analyzed, and its relationship with precipitation.

Key words: ground subsidence; ground fissures; SBAS InSAR; Datong basin; groundwater; fault

First author: YANG Chengsheng, PhD, specializes in high precision InSAR techniques and methods for geological disaster monitoring. E-mail: ycsgps@163.com

Corresponding author: ZHANG Qin, PhD, professor. E-mail: zhangqinle@263.net.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41304016, 41274004, 41372375; China Earthquake Special Fund, No. 201208009; the Key Laboratory of the Precision Engineering and Industrial Measurement, No. PF2011-12.