

张 勤,赵超英,丁晓利等. 利用 GPS 与 InSAR 研究西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征. 地球物理学报,2009,52(5): 1214~1222,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.010

Zhang Q, Zhao C Y, Ding X L, et al. Research on recent characteristics of spatio-temporal evolution and mechanism of Xi'an land subsidence and ground fissure by using GPS and InSAR techniques. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(5):1214~1222,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.010

利用 GPS 与 InSAR 研究西安现今地面沉降 与地裂缝时空演化特征

张 勤¹,赵超英¹,丁晓利²,陈永奇²,王 利¹,
黄观文¹,杨成生¹,丁晓光¹,马 静¹

1 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 710054

2 香港理工大学土地测量与地理资讯系 香港

摘 要 西安孕育严重的地面沉降及地裂缝灾害,严重制约着城市的现代化发展,本文采用 GPS 精密定位和 InSAR 遥感差分技术对西安地面沉降和地裂缝进行变形监测与分析,获取了西安地面沉降与地裂缝整体变形现状的珍贵信息,通过对这些变形信息的研究分析,揭示了西安现今地面沉降与地裂缝时空演化特征和机理:随着停止或限采地下水,西安地面沉降量级由 20 世纪 90 年代中期的最大年沉降速率 20~30 cm/a 减少到不足 10 cm/a,且超过 60% 的沉降区域的年沉降速率已由 90 年代中期的 5~8 cm/a 减少到不足 2 cm/a;原有的沉降中心大部分已不存在或大大减小;地裂缝在时空活动与分布上与地面沉降存在明显的关联性;地面沉降和地裂缝随着西安高新区的建设向南、西南、东南逐步扩展。

关键词 地面沉降与地裂缝,GPS 与 InSAR,变形监测,时空演化特征

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.010

中图分类号 P227

收稿日期 2008-03-18,2009-03-10 收修定稿

Research on recent characteristics of spatio-temporal evolution and mechanism of Xi'an land subsidence and ground fissure by using GPS and InSAR techniques

ZHANG Qin¹, ZHAO Chao-Ying¹, DING Xiao-Li², CHEN Yong-Qi², WANG Li¹,
HUANG Guan-Wen¹, YANG Cheng-Sheng¹, DING Xiao-Guang¹, MA Jing¹

1 School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Shaanxi 710054, China

2 Department of Land Surveying and Geo-Informatics, Hong Kong Polytechnic University

Abstract Xi'an city, one of the famous historical cities in China, has been suffering serious land subsidence and ground fissure historically and even recently, which greatly restrict the modernization of this city. This study focuses on the monitoring and analysis of Xi'an land subsidence and ground fissure by applying the GPS and InSAR techniques. On the one hand, we achieved precious information of the overall deformation caused by both land subsidence and ground fissure. Based on the information, on the other hand, we studied the characteristics of spatio-temporal evolution and mechanism of the land subsidence and ground fissure, and obtained the following main conclusions. Firstly, owing to the effective controlling of underground water

withdrawal, the maximum annual subsidence rate has decreased greatly from 20~30 cm/a in the mid-1990 s to less than 10 cm/a recently. Meanwhile the mean land subsidence rate of approximately 60% subsidence areas has decreased from 5~8 cm/a to 2 cm/a. Secondly, most of the original subsidence cones have disappeared or greatly reduced. Thirdly, we discovered obvious spatio-temporal correlations between ground fissure and land subsidence. Lastly, the land subsidence and ground fissure have gradually extended to south, southwest, and southeast suburbs of the city along with the expanding of the Xi'an Hi-tech zones construction.

Keywords Land subsidence and ground fissure, GPS and InSAR, Deformation monitoring, The characteristics of the spatio-temporal evolution

1 引 言

受区域构造活动和城市建设,特别是过量开采承压水引起水位大幅度下降导致开采层失水压密的影响,西安从 20 世纪 70 年代末期以来出现了严重的地面沉降与地裂缝,给城市的资源利用、环境保护、经济发展、市政设施和城市建设及人民生活造成很大危害.因此长期以来,特别是 20 世纪 80、90 年代许多专家、学者对其形成机制,发展趋势进行了大量研究^[1~4].

从已掌握的研究资料来看,西安地面沉降及地裂缝发展经历了几个阶段:西安地面沉降发现于 1959 年,从那时到 1972 年的十几年里总沉降量不超过 70 mm,大部分地区沉降速率小于 3 mm/a;1972~1978 年沉降速率平均加快 3~6 倍,总沉降量超过 100 mm 面积达到 85 km²,局部地区沉降量超过 300 mm,该阶段地面沉降最为突出的特点是在沉降区内形成了数条地形陡变带,这些陡变带的最大梯度位置与地裂缝主裂缝位置基本吻合,地面沉降中心均位于陡变带南侧;1978~1983 年是地面沉降快速发展时期,总沉降量超过 100 mm 的面积已达 127 km²,超过 300 mm 的面积扩大到 50 km²;1983 年后沉降仍在加快,1983~1997 年总沉降量超过 100 mm 的面积为 168 km²,大于 300 mm 的面积 93 km²,而且在南郊电子城与八里村小区,由于承压水开采量增加较快,地面沉降速率猛增 1~2 倍,最大沉降速率达到 191 mm/a;90 年代末由于采取了黑河引水,逐步减少自备井的开采量,大部分地区承压水位趋于稳定,部分地区水位有明显回升,地面沉降速率和地裂缝的发展均有所减缓.图 1 为截止 1992 年的西安地面沉降与地裂缝图^[2],图中显示了累积沉降等值线,承压水等值线和 11 条地裂缝的位置.

长期以来,有关西安地面沉降的发展过程和沉降特征的变形资料主要是通过大面积精密水准和少量分层标监测孔、承压水位监测点获得的,但是自 20 世纪 90 年代中后期以来,特别是 2000 年后,由于种种因素西安就再没有开展过大范围的连续精密水准监测,仅在个别地裂缝带两侧实施了短剖面水准测量和对点测量、若干组承压水位监测点、DSJ 断层活动监测仪和分层标监测孔各一组,因此,难以全面掌握现今西安地面沉降、地裂缝的发展状况、规律和特征,而这种现状的存在严重制约着城市建设用地和城市建设规划以及城市经济发展,特别是对高层建筑、地下管线、交通设施、以及正在建设的城市地铁构成重大的灾害隐患.因此,迫切需要运用现代监测手段和信息技术对西安市地面沉降及地裂缝灾害进行监测,研究和掌握现今西安地面沉降及地裂缝现状、分布特征、成因机理及发展规律,进而对西安市城市建设的科学、合理规划提供基础地质资料和科学依据.

本文分别利用现代空间监测技术——合成孔径雷达干涉测量(InSAR)和全球卫星定位系统(GPS)对西安地面沉降和地裂缝进行了监测研究,在西安市区布设了由 24 个高精度 GPS 监测点组成的地面沉降监测网,于 2005~2007 年期间对其进行了 4 次监测,同时收集购买了 20 世纪 90 年代至今的 37 景各类 SAR 数据影像,并针对 GPS、InSAR 技术用于城市地面沉降垂向变形监测的理论技术方法进行了研究,利用 GPS 获取了西安 2005.6~2007.6 两年间的地面沉降和地裂缝变形量,而由 InSAR 不但获取了西安 90 年代初和中后期的沉降信息,而且还获得了 2005~2007 两年间西安地区整体的地面沉降变形图.通过这些成果的分析对比,不但获取了西安地区现今地面沉降及地裂缝的变形现状,而且还研究获取了西安地面垂直变形场的时空演化特征及其成因规律.

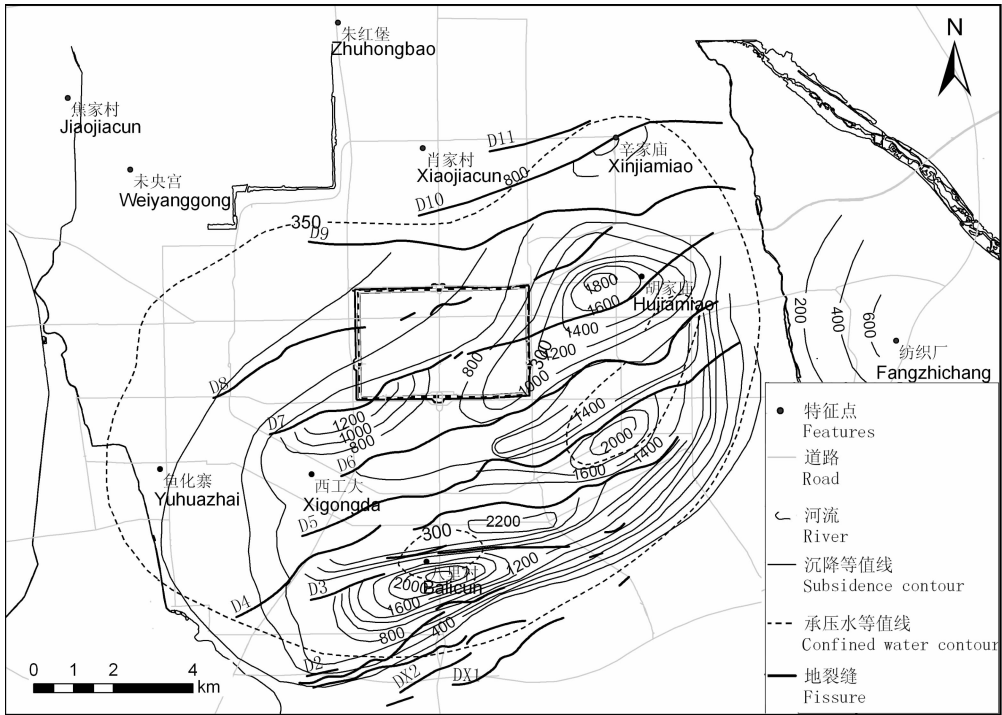


图1 西安市1960~1992年地面沉降图

Fig. 1 The land subsidence map in Xi'an during 1960 to 1992

2 差分 InSAR 技术及其在西安地面沉降的监测

2.1 差分 InSAR 用于地面沉降监测的基本原理方法

合成孔径雷达 SAR(Synthetic Aperture Radar) 是一种现代高分辨率对地观测技术,具有全天候、全天时和一定的对地穿透力等优势,为获取地形、地壳变形和隐伏地物等地球空间信息提供了重要技术手段.而合成孔径雷达干涉测量(InSAR)则是利用相位差图像来提取地面目标三维信息的技术,其应用领域遍及资源调查、环境监测、灾害预报和军事侦察等.

InSAR 利用空间上分开的两副天线或同一天线在重复飞行的轨道上在 A 、 A_1 两个不同位置上对同一区域进行两次成像,如图 2 所示, P 点为椭球高为 h 的地面任一点,至卫星的斜距分别为 R 和 R_1 , H 为雷达高度, θ 为雷达侧视角, B_1 为卫星在 A 、 A_1 点的空间基线,其平行分量和垂直分量分别为 $B^{||}$ 和 B^{\perp} .对分别获取的两幅复图像,经配准后生成相位差图像(干涉条纹图),并减去由于轨道不重合产生的地平效应,则得到仅由地形起伏引起的干涉相位^[5]

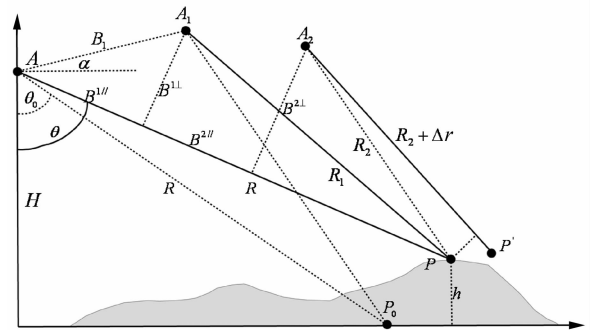


图2 差分 InSAR 干涉原理示意图

Fig. 2 The sketch of different InSAR

$$\begin{aligned} \phi_{\text{flat1}} &= \phi_1 - \phi_{10} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} B_1 \cos(\theta - \alpha) \delta\theta \\ &= \frac{4\pi h}{\lambda R \sin(\theta_0)} B^{\perp}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 ϕ_{10} 为位于椭球面且距卫星 A 的距离也为 R 的一点,其对应的雷达侧视角为 θ_0 , λ 为雷达波长.

如果在两次成像期间地表存在变形位移,地面点 P 移动到 P' ,那么位移引起的相位也会进入干涉相位,如图 2 假设在两次成像期间地表沿视线方向的变形为 Δr ,那么在主图像与第二幅副图像构成的第二幅干涉图中, P' 点的干涉相位为:

$$\phi_{\text{flat}} \approx -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B \cos(\theta_0 - \alpha)}{R \sin(\theta_0)} h + \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r, \quad (2)$$

其中 B_2 为 A 、 A_1 之间的空间基线,其平行基线分量和垂直基线分量分别为 $B^{2//}$ 和 $B^{2\perp}$. 两幅干涉图中的高程分量仅仅存在尺度差,因此将第 1 幅干涉图乘上比例因子后便可从第 2 幅干涉图中减去高程项,而由差分干涉图中求得在雷达射线上的投影位移分量为:

$$\frac{4\pi}{\lambda}\Delta r = \left(\phi_{\text{flat},2} - \frac{B_2^\perp}{B_1^\perp} \phi_{\text{flat},1} \right), \quad (3)$$

为求得绝对位移量还需要进行 InSAR 结果的后处理,包括必要的先验知识和其他的附加条件和手段,获取地理坐标系下形变量以及确定形变的位置. InSAR 技术在国内已对上海和西安等地面沉降进行了初步应用研究^[6,7].

2.2 西安 InSAR 数据处理与结果

2.2.1 研究区域与数据源

研究区域选在西安市区的主要沉降区域(见图 3),覆盖面积为 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$. 获取了欧空局 20 世纪 90 年代 ERS1/2 的 17 景数据,以及 90 年代西安地面沉降的历史资料,同时还获取了 Envisat 卫星 2004 年到 2007 年的 17 景数据,分别以 2005~2006 年和 2006~2007 年间数据进行配对组成干涉像对组合,研究 2005~2006、2006~2007 年间西安地面沉降现状.

2.2.2 InSAR 监测数据处理主要措施与成果

由 2.1 节中差分 InSAR 用于地面沉降监测原理可知,InSAR 进行地面变形监测主要应消除地平效应相位和高程分量相位的影响,本文主要采用二轨法进行差分干涉^[8],即采用外部 DEM 来消除高程效应影响,分别采用了美国地调局 3 弧秒的 SRTM DEM^[9] 和当地 1:5 万地形图中 25m 分辨率的 DEM;而对于地平效应采用 DELFT 精密的卫星轨道数来求解消除该项影响^[10].

除此之外,干涉图中还会存在噪声误差,该误差有时很严重,因此要对干涉图进行滤波处理,以减弱噪声的影响,本文采用频域自适应滤波^[11~13],根据区域噪声的强弱调整滤波强弱因子,以保持相位分辨率不至于受滤波影响太大. 通过调整基线参数并拟合整个区域的残差相位来减弱可能存在的轨道效应残差^[14].

相位解缠是差分 InSAR 正确获取变形量中关键的一步,尤其对于形变量较大的区域,相位解缠是必需的步骤. 在相位解缠中对于相干性低的区域,相位解缠的可靠性也很低,直接影响形变信息的提取. 针对这一问题,本文采用相干图引导下的最小费用

网络流算法^[15].

为与地面水准结果和 GPS 成果进行比较,对 InSAR 地理编码后的成果,分别选取同一参考点进行绝对形变的求取,并将其归算求出各监测阶段的年沉降速率.

分别采用上述数据处理的方法对 20 世纪 90 年代以及 050618-060325、060429-070318 的 SAR 干涉数据进行了差分处理,获取了不同年代的形变年速率,图 4,5 给出了 2005~2006 年和 2006~2007 年西安 InSAR 沉降速率. 图中黑色矩形框为西安市城墙所在位置,图中的 13 条粉红色曲线为西安地区最新的地裂缝的位置,图中色标由蓝到红表示沉降速率逐渐增加,单位为 cm/a .

3 西安地面沉降与地裂缝的 GPS 监测

3.1 GPS 布网与监测

针对西安地面沉降及地裂缝变形,在该地区布设建立了相应的高精度 GPS 监测网,由 24 个带有强制对中的 GPS 观测墩组成,观测墩的地下埋深为 2 m,除了保证监测墩的稳定性外,还要使监测墩底部基础与地面原状土结合. 针对西安市地质地貌的特殊性,本监测网采取三级布网方式构网,包括 GPS 监测基准网、地面沉降监测的基本网和地裂缝变形的监测网. 西安地裂缝十分发育,地裂缝变形与地面沉降存在一定内在联系;在变形特征上存在较大区别,地裂缝两侧不但存在垂向变形差异,还存在水平拉张扭曲及变形差异,因此,针对地裂缝所具有的以上特征,采用布设 GPS 对点的形式构建地裂缝变形监测网,以监测发现地裂缝两侧三维形变差异. 图 4,5 显示了西安地区 GPS 监测点的分布.

利用西安地面沉降 GPS 监测网,分别于 2005 年 11 月、2006 年 6 月、2006 年 11 月和 2007 年 6 月进行了 4 期监测,其中 XIAA 点和 XANY 点为 GPS 连续跟踪站点. 施测时采用 6 台双频 GPS 接收机以静态相对定位模式同步观测,并以网连式构网方式进行观测. GPS 外业观测时间为每天早上 8:00 点到第二天早上 7:00 点,保证每一时段(每天)的观测时间不少于 23 h,且每个监测点的观测均保证有 2~3 个时段.

3.2 GPS 数据处理与监测结果

西安地面沉降 GPS 监测网的起算点(已知点)为 XIAA 和 XIAN,为了获得其高精度的点位坐标,通过与中国及周边地区共 6 个 IGS 国际跟踪站进

行连续 5 天的同步观测,以每天 24 h 的连续观测数据为一个时段,采用 GAMIT 软件和 IGS 精密星历进行解算,获得 XIAA 和 XANY 在 ITRF00 坐标框架下的精确坐标^[16].

在基线解算中,卫星钟差改正采用国际 IGS 站提供的卫星钟差参数;根据伪距观测值,计算出接收机钟差,进行钟差的模型改正;卫星星历采用 IGS 提供的卫星精密星历;电离层折射延迟用 LC 观测值消除;利用实测干湿温和气压数据作为依据,改善对层模型;接收机天线相位中心改正采用 GAMIT 软件中的设定值;所有各期基线最大中误差不大于 $\pm 2.5 \text{ mm}$,相对精度均好于 10^{-7} .

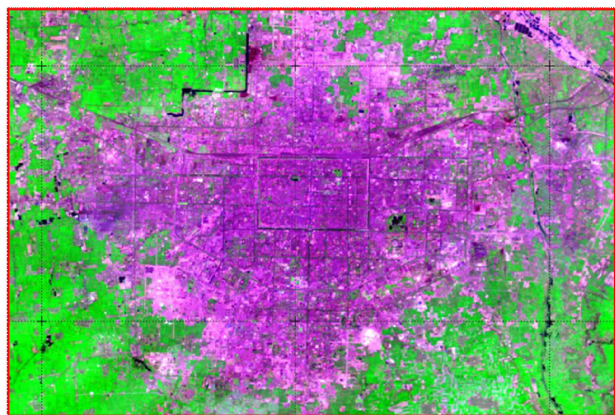


图 3 西安地区 LandsAT 影像图
Fig. 3 The LandsAT image of Xi'an city

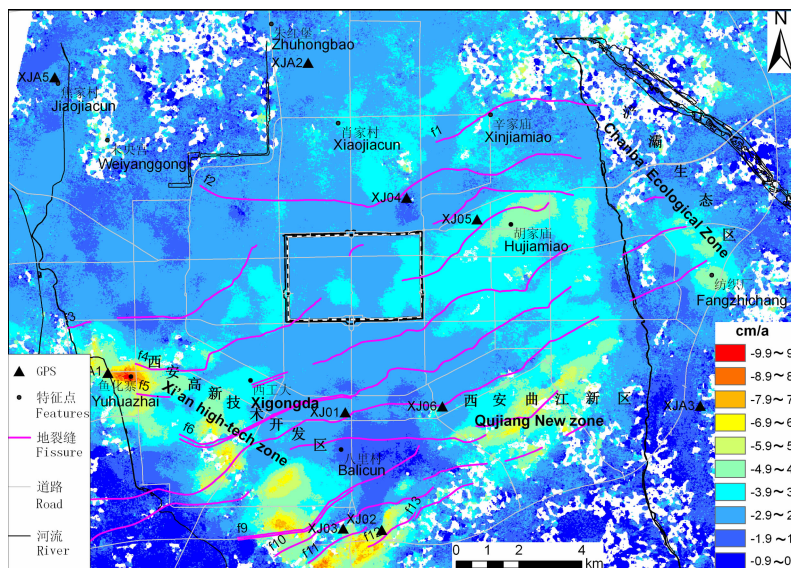


图 4 西安地区 2005~2006 年 InSAR 监测年沉降速率
Fig. 4 Velocity map of Xi'an subsidence between 2005 and 2006 by InSAR

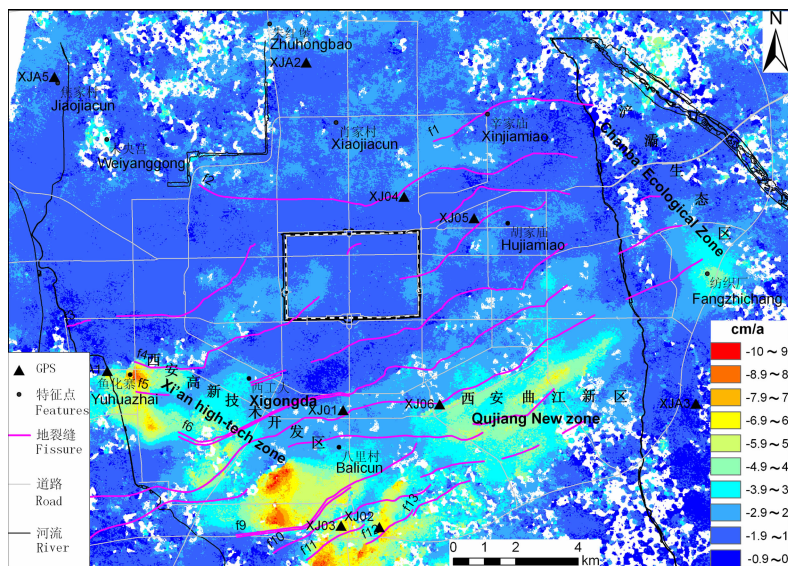


图 5 西安地区 2006~2007 年 InSAR 监测年沉降速率
Fig. 5 Velocity map of Xi'an subsidence between 2006 and 2007 by InSAR

GPS 网平差采用专门编制的 GPS 监测网平差软件 HPGPSADJ1.0 对监测基线网进行平差,本数据处理采用拟稳平差基准^[17,18],以消除基准点不一致造成的网的扭曲变形;在平差中还考虑了各期网间可能存在的系统差异问题,并进行了稳健估计^[19],以剔除或削弱粗差影响.表 1 列出各期网平差的高程点位精度,由表中可以看出,本 GPS 监测具有相当高的精度,完全能满足监测±1cm 沉降变形的精度要求.表 2 为由 GPS 监测获得的各地面沉降 GPS 监测点 2005~2007 年间的年均沉降量及其精度,表 3 为地裂缝上 4 对 GPS 监测点的三维变化量.

表 1 GPS 地面沉降监测网高程点位精度统计表

Table 1 The height precision of GPS monitoring

监测时间 (年/月)	平均中误差 (mm)	最小中误差 (mm)	最大中误差 (mm)
2005-1	2.0	1.3	4.6
2006-6	2.6	2.0	3.7
2006-11	3.4	2.3	5.1
2007-6	2.9	2.4	3.3

表 2 西安地面沉降 GPS 监测点年均沉降量(2005~2007 年)

Table 2 Annual subsidence rate of GPS bench marks in Xi'an during 2005 to 2007

点名	沉降量 (cm/a)	精度(mm)	点名	沉降量 (cm/a)	精度(mm)
XJ01	-0.9	2.3	XJA1	-7.6	2.5
XJ04	-1.0	2.4	XJA2	-1.2	4.3
XJ05	-3.7	3.5	XJA3	-1.5	2.3
XJ06	-2.6	2.6	XJA4	-2.1	2.6
XJ08	-1.8	2.6	XJA5	-0.9	2.6
XJ09	-5.7	3.0	XJA6	-0.8	2.2
XJ13	-3.2	2.4	XJ14	-3.8	2.1

表 3 地裂缝三维年度变形量

Table 3 Three dimensional deformation of Xi'an ground fissure

点位	水平位移(cm/a)		垂直位移(cm/a)	
	ΔX	ΔY	ΔH	对点垂向 位移差异
XJ02	-0.86	-0.22	-4.53	-2.38
XJ03	+0.20	-0.29	-2.15	
XJ07	1.23	-0.11	0.33	0.79
XJ08	0.67	-0.18	-0.46	0.77
XJ10	-0.27	0.28	0.70	
XJ11	+0.15	0.05	-0.07	0.90
XJ11	+0.15	0.05	-0.07	
XJ12	0	0.18	-1.07	

4 西安沉降 InSAR 与 GPS 监测成果对比与现今变形特征分析

4.1 InSAR 与 GPS 监测成果对比分析

为了对 InSAR 与 GPS 这两项新型监测技术手段进行相互验证,同时也为了更好地研究西安现今地面变形特征,在 InSAR 获得的 2005~2006 年形变图(图 4)上选取与 GPS 相同点位的沉降年速率与表 2 中的 GPS 结果进行比较,结果列于表 4,从表中可以看出,80%以上点的 GPS 与 InSAR 监测结果的互差均不大于 1 cm,说明两者整体上具有很好的—致性.

表 4 GPS 和 InSAR 监测成果比较表

Table 4 Comparison of subsidence results between GPS to InSAR techniques

序号	点位	GPS 年速率 (cm/a)	InSAR 年速率 (cm/a)	互差 (cm/a)
1	XJ01	-0.9	-1.9	1.0
2	XJ04	-1.0	-2.0	1.0
3	XJ05	-3.7	-3.9	0.2
4	XJ06	-2.6	-3.3	0.7
5	XJ08	-1.9	-2.7	0.8
6	XJ09	-5.7	-2.9	-2.8
7	XJ13	-3.2	-2.0	-1.2
8	XJ14	-3.8	-2.0	-1.8
9	XJA1	-7.6	-8.0	0.4
10	XJA2	-1.2	-1.3	0.1
11	XJA3	-1.5	-1.3	-0.2
12	XJA4	-2.1	-2.2	0.1
13	XJA5	-0.9	-0.9	0.0
14	XJA6	-0.8	-0.7	-0.1

将 InSAR 变形图(图 4,5)和表 2 的 GPS 监测点的年沉降量进行对比,可以发现,GPS 监测点除西南郊鱼化寨的 XJA1 点年沉降量为 7.6 cm,南郊明德门点的年沉降量为 5.7 cm,其余点年均沉降量均小于 4 cm,而 InSAR 沉降图也显示只有少量区域的沉降量大于 4 cm.

为了验证 GPS 监测沉降的精度与准确性,在地裂缝的 GPS 点上同时还布置了对应的水准点,从 2006 年 6 月开始,在 GPS 对应的监测时间段内采用一等精密水准观测了地裂缝两侧的沉降差异,将其与 GPS 获得的对应的沉降差异进行对比,结果列

表 5 2006-6~2006-11 GPS 和水准对点观测获得的地裂缝垂直变形对比

Table 5 Comparison of vertical deformation in ground fissure areas between GPS and spirit leveling, 2006-6~2006-11

点 位	2006-6~2006-11			2006-11~2007-6			
	GPS 沉降差异 (cm)	水准沉降差异 (cm)	两者沉降差异 的互差(cm)	GPS 沉降差异 (cm)	水准沉降差异 (cm)	两者沉降差异 的互差(cm)	
交警总队地裂缝	XJ02 XJ03	1.3	1.0	0.3	1.4	1.3	0.1
污水处理厂	XJ07 XJ08	0.6	0.0	0.6	0.1	0.0	0.1
长安立交地裂缝(f6)	XJ10 XJ11	0.1	0.0	0.1	0.6	0.1	0.5
长安立交地裂缝(f6')	XJ11 XJ12	0.0	0.0	0.0	1.0	0.1	0.9

于表 5,由表 5 中也可以看出,GPS 和水准监测的成果也有着较好的一致性。

4.2 西安现阶段地面沉降及地裂缝变形特征

由文献[1~3]知,西安地面沉降到 20 世纪 90 年代中期已形成西起鱼化寨,东到纺织城,南抵三爻村,北至辛家庙面积约为 145.5 km² 的沉降区,在区内已形成东八里村、大雁塔什字、沙坡村、胡家庙等 7 个沉降漏斗中心,并且沉降区域主要分布在城东郊、南郊、东北郊及部分城区,且漏斗水平扩展多限于两条地裂缝之间,呈 NNE 走向的狭长椭圆形沉降槽。综合分析 2005~2007 的 InSAR 沉降图(图 4,5)及同期的 GPS 监测可以发现,进入 2000 年后,特别是 2000 年中期,西安的地面沉降和地裂缝在变形的量级、分布及沉降中心等时空特征上均发生了较大变化,主要包括以下几个方面。

(1) 沉降量级与沉降漏斗中心的特征变化

从图 4,5 的 InSAR 变形图上看出,约有大于 60% 的沉降区域的沉降量为 1~2 cm/a,而相应的 GPS 监测点中也有 2/3 的点的年沉降速率小于 2 cm/a。因此西安地区现今的年沉降量级较 20 世纪 90 年代中期已大为减缓,从 90 年代初年沉降速率 5~8 cm/a^[1,2]减小为当年的 1~2 cm/a,同时最大沉降量由 90 年代初的 20~30 cm^[2]减少到当年的 8~10 cm;原来的沉降漏斗中心区域现已大大缩小,甚至不再存在,而且沉降中心的量级也大为减小。

(2) 沉降时空区域分布特征的变化

截至 20 世纪末,西安主要的沉降区域多分布在城市的旧城区及东北、南郊,而沉降中心主要位于南郊和东郊。从现今的 InSAR 变形图、并辅以 GPS 监测成果可以看到,现今西安主要沉降区域已向南、向西、向东移动,形成南以绕城高速以南的三爻村为中心,西到鱼化寨,东到西影路以南向东延伸到长乐东

路、纺织城,形同飞翔的大雁形状的沉降带,这个沉降带的沉降量在 3.5~6 cm/a 间,最大沉降量可达 10 cm(见图 5)。原有西安最大的沉降中心一小寨(截止 20 世纪 90 年代初总沉降量 285 cm,最大沉降速率 19 cm/a^[1,2]),由建在该处的 GPS 点 XJ01 可知,现今的沉降速率为 0.9 cm,从 InSAR 图上也反映该区域的年沉降速率仅为 1 cm,因此该区域的地面沉降大大减小,已不再是一个沉降中心。

(3) 地面沉降与地裂缝的时空分布关系

截止到 20 世纪 90 年代中期,西安共出现 13 条地裂缝带,总延伸长度超过 120 km,出露长度 85 km 以上,呈 NEE 展布,把沉降区分割成同走向的条块,且地面沉降中心多限于两条地裂缝之中。从 InSAR 形变图(图 4,5)中可以看到,现今西安的主要沉降区域仍然呈 NEE 展布,与地裂缝延伸具有相同的方向,而且沉降量较大的区域也是地裂缝发展和活动较明显的地区,因此,地面沉降与地裂缝在时空活动与分布上仍存在明显的内在联系。同时,从 InSAR 图上所标出的地裂缝位置可以看到,在地裂缝活动较明显的地段多存在明显的沉降量的色斑差异,这说明 InSAR 具有监测地裂缝变形的能力。结合 InSAR 90 年代的形变图,在此图上可以观测到许多以地裂缝为界的沉降差异图斑,而在 2004~2006 的形变图上的地裂缝形成的色彩差异图斑已明显缩短,说明随着城市地面沉降量级的减弱,地裂缝变形也随之减弱,但却有向西南延伸的态势,在原本没有地裂缝的西南区域(高新开发区)也出现了地裂缝。

(4) 地裂缝时空变化特征

从 InSAR 图 5 中可以观测到地裂缝三维变形,位于南郊和西郊的 f6-f6'、f7、f8、f9-f9'、f10、f11 等地裂缝有明显的分段异常活动,且 f7 和 f8 两条地

裂缝的西端已继续向西延伸至皂河东岸.从表 3 中也可以看到,位于南郊绕城的省交警总队地裂缝 f11 上南、北两侧的 GPS XJ02、XJ03 点的年沉降速率分别为 4.5 cm/a 和 2.2 cm/a,地裂缝两侧的沉降差异达 2.6 cm/a,从 InSAR 形变图(图 4,5)中可以看到该段地裂缝位于沉降中心区域边缘.位于南二环长安立交的 f6、f6' 的主、次地裂缝在 20 世纪 90 年代活动十分剧烈,目前根据建在该处主、次级裂缝两侧的 GPS 对点(XJ10-XJ11、XJ11-XJ12)和水准对点的监测数据,表明该处的地裂缝处于稳定期,除了整体随地面沉降有 1~2 cm 的沉降外,不存在明显的差异沉降,从 InSAR 形变图上也可看到该地区地面沉降量级较小(1~2 cm/a),不存在沉降色斑差异.同时位于南郊污水处理厂的活动也不十分明显.

(5) 地面沉降与地裂缝成因

20 世纪 80~90 年代初,由于大面积抽取地下水,导致西安城市地面沉降与地裂缝发展加速,最大年沉降速率达 20~30 cm;自 90 年代中后期将黑河水引入城市,成为城市的主要用水源,并逐步关停了绝大部分自备抽水井,城市的地面沉降与地裂缝得到有效控制,最大沉降量已降到不足 10 cm,且超过 60% 的沉降区域的年沉降速率减少到不足 2 cm;随着地面沉降的减小,原主要沉降区的地裂缝的活动也有所减弱;因此,抽取地下水是导致地面沉降和地裂缝发展的主要原因之一,而且现有的几个沉降较大的地面区域仍还存在不同程度的抽取地下水的问题.

另外,大规模施工建设也是引起地面沉降和地裂缝发展的重要原因,例如,在原来没有沉降与地裂缝的城西南区域,即现今的高新开发区,现已出现了较明显的地面沉降与地裂缝,而且随着高新开发区建设逐步向西南扩展,地面沉降与地裂缝也逐步向西南扩展,两者之间存在很强的关联性.同时 90 年代末,长安立交刚建成不久,位于该处的地裂缝活动剧烈,由于不均匀沉降拉张而造成路面塌陷破坏,而随着时间的推移,该处地裂缝活动已逐渐减小,进一步说明城市建设对地裂缝发展存在一定影响.

5 结 论

自 2004 年开始对西安地面沉降和地裂缝的 GPS 和 InSAR 监测,已取得了显著进展. GPS 技术本身具有观测效益高,费用低,获取信息速度快,监测自动化程度高等特点,在地面沉降与地裂缝监测中, GPS 具有监测变形位置定位准确,获取变形量

精度高,可连续获得变形信息等优点,特别是用于地裂缝监测,采用布设 GPS 监测对点的方法,不仅可以获取地裂缝两侧的相对沉降差异,而且还可以获得各自的绝对沉降量、水平位移拉张和扭曲等三维变形信息.在本监测研究中,通过采用高精度地面沉降和地裂缝变形监测作业技术方法,严格的数据处理理论方法,使监测数据精度可达 5 mm,高精度地获取了 2005~2007 年间各 GPS 点上的年沉降速率和地裂缝的空间三维变形信息.

InSAR 技术作为城市地面沉降监测是一种有效的技术手段,它不但可以高精度高分辨率快速经济地获取城市面状形变,而且可以利用历史存档 InSAR 数据获取历史变形信息,因而具有从时间和空间上获取整个监测面上的变形信息,实现研究发现形变发展过程与变形时空发展特征的特点.

本文通过 GPS 和 InSAR 技术相结合并辅以精密水准观测,获取了西安地面沉降的时空演化特征,并初步分析研究了地面沉降与地裂缝机理,随着停止限采地下水,西安地面沉降已整体减弱减小,由 20 世纪 90 年代中期的最大年沉降速率 20~30 cm/a 减小到 10 cm/a,且超过 60% 的沉降区域的年沉降速率已由 90 年代中期的 5~8 cm/a 减少到不足 2 cm/a;原有的 7 个沉降中心大部分已不存在或大大减小,地裂缝在时空活动和分布与地面沉降存在明显的关联性;现今西安地面沉降和地裂缝随着城市建设的发展向南、西南、东南逐步扩展.

参考文献(References)

- [1] 闫文中.西安地面沉降成因分析及其防治对策.中国地质灾害与防治学报,1998,9(2):27~32
Yan W Z. Analysis on the origin of land subsidence and its countermeasures of control in Xi'an. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*. (in Chinese), 1998,9(2): 27~32
- [2] 陶 红.西安市区地面沉降图.西安地区环境地质图集.西安:西安地图出版社,1999
Tao H. Map of Land Subsidence in Xi'an City. Atlas of Environment and Geology in Xi'an Areas(in Chinese). Xi'an: Xi'an Mapping Press, 1999
- [3] 姜规模.西安市地面沉降与地裂缝研究.城市勘测,2005,3:53~63
Jiang G M. Research of Xi'an land subsidence and land fissure. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying* (in Chinese), 2005,3:53~63
- [4] 祝意青,王庆良,徐云马等.西安市地面沉降时空演化特征及机理研究.地球学报,2005,26(1):67~70
Zhu Y Q, Wang Q L, Xu Y M, et al. A study of space-time

- chang characteristics of ground subsidence in Xi'an and their mechanism. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2005, **26** (1):67~70
- [5] 廖明生,林 晖. 雷达干涉测量——原理与信号处理基础. 北京:测绘出版社,2003
Liao M S, Lin H. Radar Interferometry—Basic Theory and Signal Processing (in Chinese). Beijing:Mapping Press,2003
- [6] 陈 强,刘国祥,丁晓利等. 永久散射体雷达差分干涉应用于区域地表沉降探测. 地球物理学报,2007, **5**(3):737~742
Chen Q, Liu G X, Ding X L, et al. Radar differential interferometry based on permanent scatterers and its application to detecting regional ground subsidence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(3):737~743
- [7] 赵超英,张 勤,丁晓利等. 基于 InSAR 的西安地面沉降与地裂缝发育特征研究. 工程地质学报,2009, **17**(3):389~393
Zhao C Y, Zhang Q, Ding X L, et al. Study of Xi'an land subsidence and ground fissures evolution based on SAR interferometry. *Journal of Engineering Geology* (in Chinese), 2009, **17**(3):389~393
- [8] Massonnet D, Feigl K L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.*, 1998, **36**:441~500
- [9] Marschall U, Roth A, Eineder M, et al. Comparison of DEMs derived from SRTM/X- and C-Band, Geoscience and Remote Sensing Symposium. In: IGARSS '04. Proceedings. 2004. 4531~4534
- [10] Scharroo R, Visser P N A M. Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(4):8113~8127
- [11] Goldstein R M, Werner C L. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letter*, 1998, **25**:4035~4038
- [12] Baran I, Stewart M P, Kampes B M, et al. A modification to the goldstein radar interferogram filter. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, **41**(9):2114~2118
- [13] Li Z W, Ding X L, Huang C, et al. Filtering method for radar interferogram with strong noise. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**:2991~3000, doi: 10.1080/01431160500522692
- [14] Atlantis Scientific Inc. EV-InSAR Version 3. 0. User's Guide. Atlantis Scientific Inc. Ontario, Canada, 2003. 257
- [15] Chen C W, Zebker H A. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization. *J Opt Soc Amer.*, 2001, **18**:338~351
- [16] 施 闯. 大规模高精度 GPS 网平差与分析理论及其应用. 北京:测绘出版社,2002
Shi C. Analytic Theories and Applications of GPS Networks Adjustment Cosmically and High-Precision (in Chinese), Beijing: Mapping Press, 2002
- [17] 刘大杰,陶本藻. GPS 监测网形变分析基准和检验:GPS 卫星定位的应用与数据处理. 上海:同济大学出版社, 1994. 92~102
Liu D J, Tao B Z. The Datum of the Deformation Analyses in the GPS Monitoring Network and Its Testing: "The Application and Data Processing of GPS Satellite Positioning". Shanghai: Tongji University Press, 1994. 92~102
- [18] 张 勤,黄观文,王 利等. 附有系统参数和附加约束条件的 GPS 城市沉降监测网数据处理方法研究. 武汉大学学报(信息科学版),2009, **34**(3):269~272
Zhang Q, Huang G W, Wang L, et al. The datum design study of GPS height monitoring network with systemic parameters and constraints. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2009, **34**(3):269~272
- [19] 陶本藻. 自由网平差与变形分析. 武汉:武汉测绘科技大学出版社, 2001
Tao B Z. Adjustment and Deformation Analysis of Free Network. Wuhan: Wuhan University Press, 2001

(本文编辑 胡素芳)