

刘晓菲, 邓喀中, 范洪冬 等. D-InSAR 监测老采空区残余变形的试验 [J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 467-472. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0229

Liu Xiaofei, Deng Kazhong, Fan Hongdong, et al. Study of old goaf residual deformation monitoring based on D-InSAR techniques [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(3): 467-472. doi: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.0229

D-InSAR 监测老采空区残余变形的试验

刘晓菲^{1,2}, 邓喀中^{1,2}, 范洪冬^{1,2}, 王江涛^{1,2}

(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. 中国矿业大学 江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘 要: D-InSAR 技术在区域地表微小形变监测方面应用越来越广泛,但是在相位梯度变化比较大的老采空区变形监测方面研究较少。在介绍差分合成孔径雷达(D-InSAR)技术的基本原理的基础上,结合具有较高距离向分辨率的 8 景 PALSAR 数据,通过差分干涉处理,获得了徐州某老采空区的地表形变场。同时,提取 1993 年老采空区上方的 6 个点为研究对象,分别对其进行回归分析,建立了稳健回归模型。监测结果显示该采空区残余沉降是缓慢、渐变的。试验研究表明,D-InSAR 技术可以应用于监测大面积的老采空区残余变形,同时稳健回归模型能降低预测计算的复杂度。

关键词: D-InSAR; 老采空区; PALSAR; 回归分析; 残余变形

中图分类号: TD173 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2014)03-0467-06

Study of old goaf residual deformation monitoring based on D-InSAR techniques

LIU Xiao-fei^{1,2}, DENG Ka-zhong^{1,2}, FAN Hong-dong^{1,2}, WANG Jiang-tao^{1,2}

(1. Key Laboratory for Land Environment and Disaster Monitoring of SBSM, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In recent years, the surface subtle changes in scope of application of D-InSAR measurements was further expanded, but the study of deformation monitoring based on the old goaf which phase gradient changes greatly is less. The basal principles of Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (D-InSAR) were described briefly, and 8 scene high range resolution PALSAR was used as experimental data. The deformation field of the surface was obtained by two-track differential interferometric processing. At the same time, six points on the top of the year 1993 old goaf were extracted as the research object, then regression analyses were used respectively to establish robust regression model. The results of monitoring show that old goaf residual deformation is slow and gradual. The studies show that the D-InSAR technique can be applied to monitor in a large area of the old goaf residual deformation, and robust regression model reduces the complexity of the forecast calculated.

Key words: D-InSAR; old goaf; PALSAR; regression analysis; residual deformation

地下开采结束后,虽然经过长期的自然压实,开 采后形成的地下空洞、岩体中的离层、裂缝和垮落岩 块的欠压密、孔隙中饱和水等现象仍将长期存在。在 采空区上方兴建建筑物、地震活动、邻区开采、多煤层

收稿日期: 2013-02-25 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41071273); 国土环境与灾害监测国家测绘局重点实验室开放基金资助项目(LED2011B07); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 刘晓菲(1989—),女,山东潍坊人,硕士研究生。E-mail: liuxiaofei8963@126.com。通讯作者: 邓喀中(1957—),男,四川资中人,教授,博士生导师,博士。E-mail: kzdeng@cumt.edu.cn

开采、强排地下水以及老采空区中围岩和矿柱的强度弱化等,都可能打破覆岩中原有的相对应力平衡状态,导致采空区及其覆岩的二次移动和变形,进而导致地面建筑物沉降、局部开裂、倾斜等破坏,突然性塌陷可能造成人员严重伤亡和财产损失。

随着矿业城市和矿区建设步伐的加快,建设用地紧张的问题日益突出,不可避免地将利用老采空区塌陷地进行建筑和兴建各种交通、电力通讯设施。老采空区上方建筑的关键是地基稳定性评价,采空区残余变形量大小是建筑地基稳定性评价的关键,遗憾的是老采空区残余变形监测数据很少,虽然国内外对老采空区残余变形预测进行了研究,但由于实测数据缺乏,目前的研究尚不能满足工程实践的需要,对老采空区残余沉降监测方法进行研究,进而获得老采空区残余变形规律,对于老采空区塌陷地建筑利用具有重要的理论和实际意义^[1-2]。

合成孔径雷达差分干涉测量(D-InSAR)技术可以通过存档数据,监测老采空区变形历史^[3],从而获得老采空区残余变形数据,为老采空区稳定性评价提供基础。本文以徐州某矿为研究对象,利用 8 景 PALSAR 数据,通过差分干涉处理,获得了该矿老采空区的地表形变场及残余变形规律,为该老采空区塌陷地建筑利用提供了基础^[4-6]。

1 差分合成孔径雷达(D-InSAR)原理

合成孔径雷达差分干涉测量技术(D-InSAR)是对 InSAR 技术的进一步扩展,它是以合成孔径雷达复数图像的相位信息获取地表变化信息的技术^[7]。其目的是从干涉图中分离地形和形变量。为了确定沉降成分,必须去除地形相位。根据地形信息去除方法的不同可以分为二轨法、三轨法和四轨法。

现以双轨法为例说明 D-InSAR 技术的基本原理。如图 1 所示,下标 m 和 s 分别表示主图像和辅图

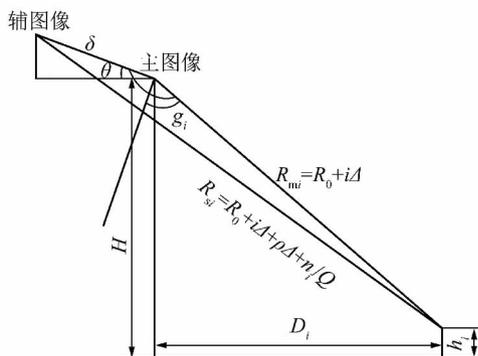


图 1 差分合成孔径雷达(D-InSAR)原理
Fig. 1 The principle of differential synthetic aperture radar(D-InSAR)

像。由图 1 可得

$$\sin g_i = \frac{R_{si}^2 - \delta^2 - R_{mi}^2}{2\delta R_{mi}} \quad (1)$$

式中 i 为像元数。

所有的长度都用像元的大小来表示。令

$$\Delta = \lambda Q/2 \quad (2)$$

式中 Q 为每个斜距像元所包含的半个波长的数目,则有

$$R_{si} = R_0 + i\Delta + p\Delta + n_i/Q \quad (3)$$

$$R_{mi} = R_0 + i\Delta \quad (4)$$

式中 R_0 为主图像第 1 列所对应的斜距长度; p 为主图像和辅图像在近距离的距离差; n_i 为条纹数。由式(1)得

$$\sin g_i = \frac{p\Delta + \lambda n_i/2}{\delta} + \frac{(p\Delta + \lambda n_i/2)^2}{2\delta(R_0 + i\Delta)} - \frac{\delta}{2(R_0 + i\Delta)} \quad (5)$$

在式(5)中,右边的第 1 项起决定性作用(接近 1),其他项一般在 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ 。在 i 处的条纹数就决定了高程 h_i 。定义高度模糊度 h_a (即条纹所造成的高度差)

$$h_a = dh_i/dn \quad (6)$$

$$\frac{dh_i}{dn} = R_m \frac{dg_i}{dn} \sin(g_i - \theta) = R_m \frac{d(\sin g_i)}{dn} \frac{\sin(g_i - \theta)}{\cos g_i} \quad (7)$$

如果条纹数的变化为 1,则上式近似为

$$\frac{d(\sin g_i)}{dn} \approx \frac{\lambda}{2\delta} \quad (8)$$

则式(7)近似表示为

$$h_a \approx \frac{\lambda}{2} \frac{\lambda R_0 + i\Delta + p\Delta + \lambda n_i/2}{\delta} \times (\tan g_i \cos \theta - \sin \theta) \quad (9)$$

如果 g_i 已知,则由式(5)可以推出:

$$n_i/Q = \sqrt{(R_0 + i\Delta)^2 + \delta^2 + 2\delta(R_0 + i\Delta) \sin g_i} - (R_0 + i\Delta + p\Delta) \quad (10)$$

2 试验结果及分析

2.1 数据处理流程

采用瑞士 GAMMA 公司开发的 GAMMA 雷达干涉处理软件,具体流程:① 获取干涉图,经配准、干涉、基线估计等步骤后得到干涉相位图;② SRTM DEM 模拟地形相位:由于缺乏该地区高分辨率 DEM,本文的外部 DEM 采用美国 NASA 公开的 SRTM DEM 来模拟地形相位,空间分辨率为 3 弧度

秒 约为 90 m, 首先将 SRTM DEM 与主影像进行配准, 转换到雷达坐标系下, 模拟地形相位; ③ 获取形变量: 从步骤①中获取的干涉图中减去地形相位, 得到差分干涉图, 经过相位解缠, 解缠相位到形变的计算, 地理编码, 最终获得形变量^[8]。

实验中, 采用 2007-02-20—2010-02-28 期间获取的徐州某老采空区的 8 景 ALOS 卫星 PALSAR 数据(表 1) 进行试验研究。为了获得不同时间段的残余沉降信息, 将 8 景数据组成 7 个干涉对, 各主影像确定后按照图 2 进行数据处理。

表 1 干涉对参数

Table 1 Parameters of interferogram

干涉对	获取时间	时间基线/d	垂直基线/m
1	2007-02-20 2008-01-08	323	1 432
2	2008-01-08 2008-02-23	45	656
3	2008-02-23 2008-04-09	45	424
4	2008-04-09 2009-01-10	277	-3 713
5	2009-01-10 2009-02-25	690	171
6	2009-02-25 2010-01-13	736	1 632
7	2010-01-13 2010-02-28	1 104	580

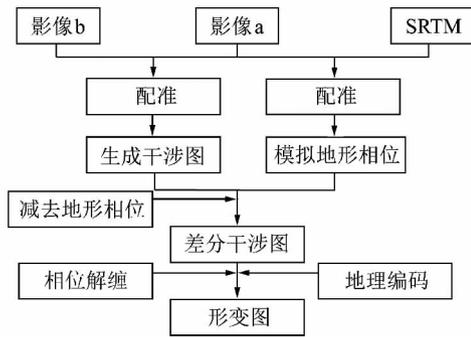


图 2 两轨法 D-InSAR 流程

Fig. 2 D-InSAR process of the two-track method

2.2 老采空区形变场的提取

试验中所涉及的老采空区工作面采煤方法主要采用走向长壁法, 部分采用倾斜分层法, 采用后退式综采和炮采, 顶板管理全部采用垮落法。本文研究的矿区位于图 3 中的 D 区域。

为了便于分析, 将所得到的 7 个形变图的形变量进行累加, 形成了 2007—2010 年期间的年度地表沉降场变化图, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, 老采空区一年的下沉量分布在 0~100 mm。其中, 红色区域

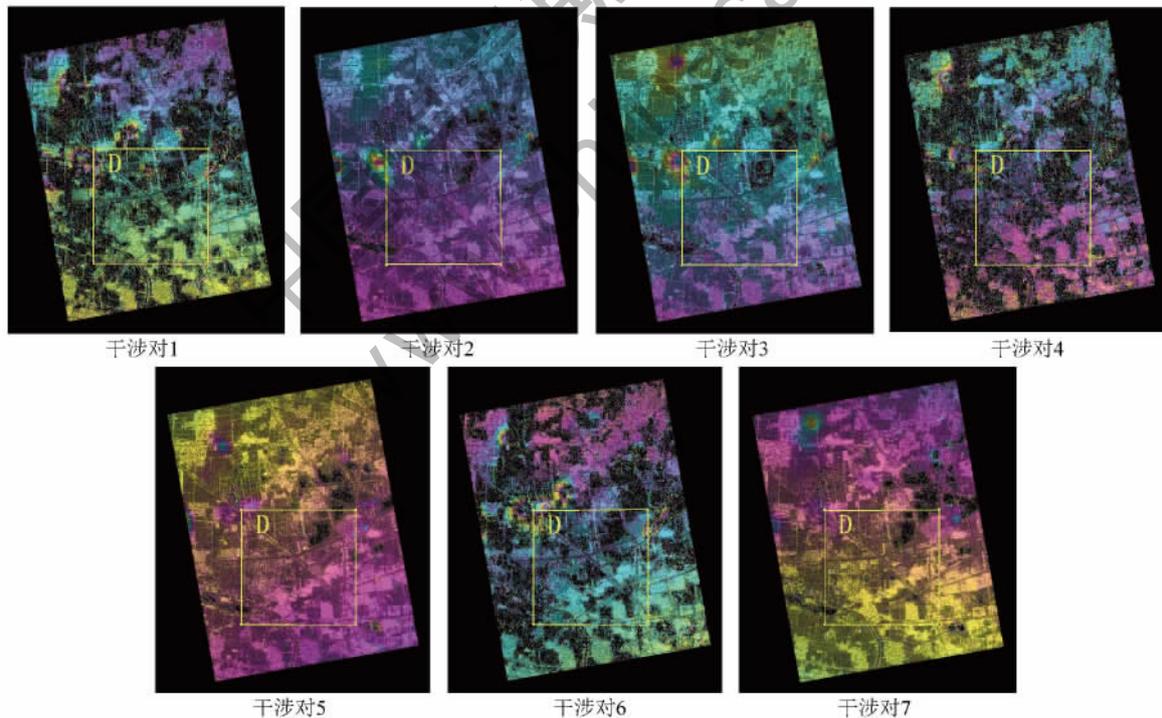


图 3 D-InSAR 处理得到的形变

Fig. 3 The deformation diagram based on D-InSAR

为正在开采的部分, 所以监测得到较大的下沉值。为了使研究的工作面尽量不受到周边开采的影响, 本文选取 1993 年的工作面进行重点研究, 提取其中 6 个点(A1, A2, A3, A4, A5, A6 与采空区边界的距离分别为 163, 249, 324, 340, 407, 472 m) 的连续时序的形变

值, 图 5 为工作面及观测点的具体位置及提取的 6 个观测点在 2007—2010 年期间累加的每年的下沉值。根据提取的 6 个监测点下沉值, 分析得到了 1993 年的工作面在 2007—2008 年期间的最大下沉值为 34.6 mm, 平均下沉值为 31.7 mm; 在 2008—2009 年

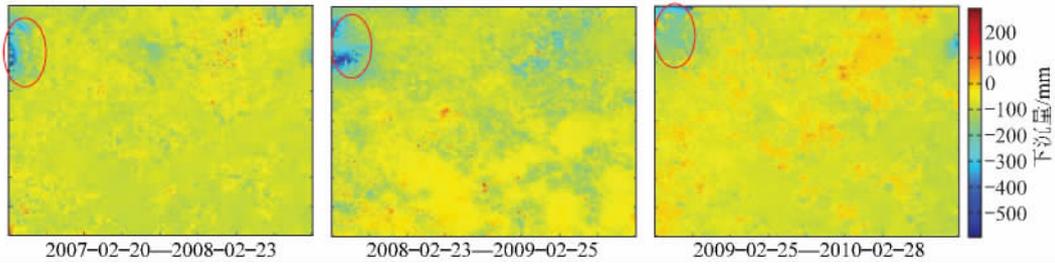


图 4 D 区域年度地表沉降场

Fig. 4 Distribution of annual subsidence of the D region

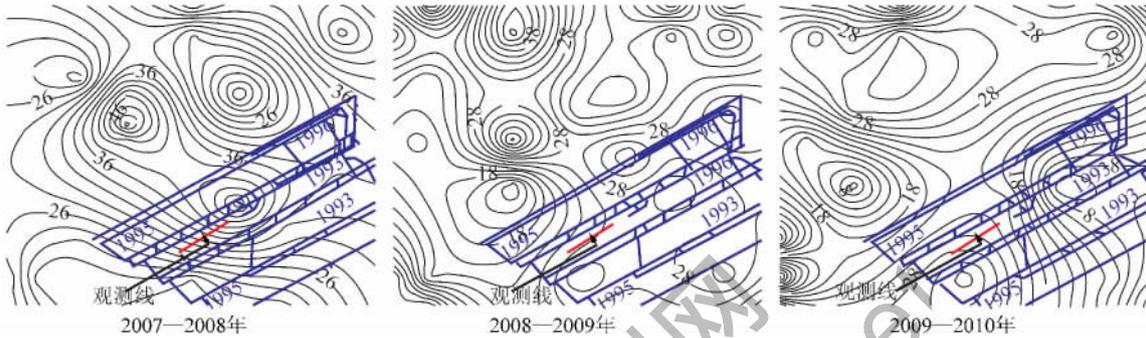


图 5 1993 年开采工作面与地表沉降场等值线关系

Fig. 5 Overlaying images of 1993 mining tunnels and land subsidence range

期间的最大下沉值为 30 mm, 平均下沉值为 26 mm; 在 2009—2010 年期间的最大下沉值为 27.9 mm, 平均下沉值为 26.4 mm(图 6)。从图 6 可见, 采空区边界残余下沉略大于采空区中心残余下沉, 这是残余变形的特殊性, 原因是采空区边界岩体破裂发育、空隙多, 后期沉陷空间大所致。

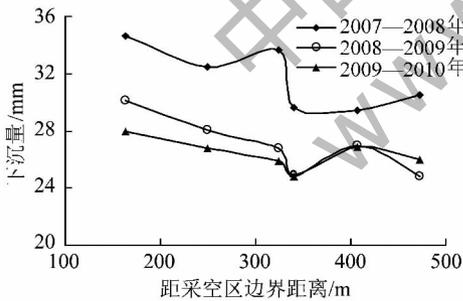


图 6 不同时间残余下沉与距采空区边界距离的关系

Fig. 6 The relationship between different time residual subsidence and the goaf boundary distance

根据观测数据, 得到最大下沉点与时间的关系如图 7 所示。从图 7 可见, 地表残余最大下沉量 w_m 与时间 T 成对数关系, 即

$$w_m = -53.492 \ln T + 179.11 \quad (11)$$

由上述关系可知, 在该地质采矿条件下, 地表移动稳定时间大约需要 28 a, 但该关系式是在受到周围开采影响情况下得出的, 不一定代表真实的移动时间, 但可以说明的是, 采空区残余沉降是非常漫长的过程。

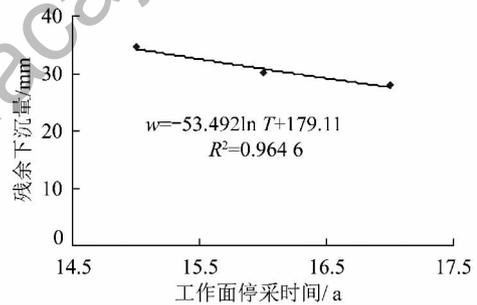


图 7 最大残余下沉量与时间关系

Fig. 7 The relation between maximum subsidence and mining time

图 8 给出了地表残余倾斜分布, 从图 8 中可见, 地表残余倾斜随着开采时间增加逐渐减小, 在工作面开采 15 a 后, 地表最大残余倾斜变化在 0.12 ~ 0.25 mm/m, 远小于建筑物临界倾斜值, 说明在该地质采

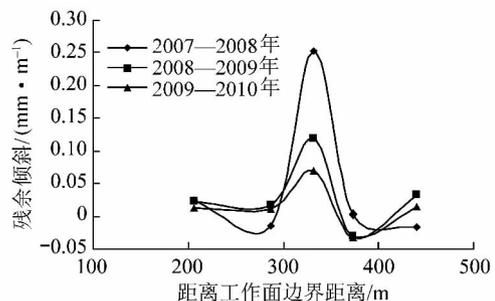


图 8 地表残余倾斜分布

Fig. 8 Map of surface residual tilt

矿条件下,采空区地表残余沉降是缓慢、渐变的,不会对其上方兴建建筑物造成影响。

2.3 残余沉降的稳健回归模型

稳健估计方法具备抗粗差干扰和异值定位的能力。其基本原理是在一般极大似然估计的基础上,通过一定原则选择影响函数,削弱异值点的影响,使估值达到稳健化的目的^[9]。老采空区进入残余沉降阶段后下沉趋势变得不显著,易受多种随机因素的影响,表现出随机性、模糊性和不确定性,是一个复杂的非线性动力学演化过程。稳健回归分析应用于老采

空区的沉降速率分析中,具有较好的抵抗异值或粗差干扰的能力。

本文将 6 个观测点的 7 个时序沉降速率进行分析,最终选取 3 次数学模型进行稳健回归(图 9),得到相关性较好的沉降回归模型,有力地说明在 2007—2010 年的时空演化过程中 6 个观测点的沉降速率存在周期性振荡(图 9),同一老采空区中的不同测点之间有着相等或近似相等的变化周期。同时验证了稳健回归模型可以用来进行老采空区残余沉降的数据处理和分析。

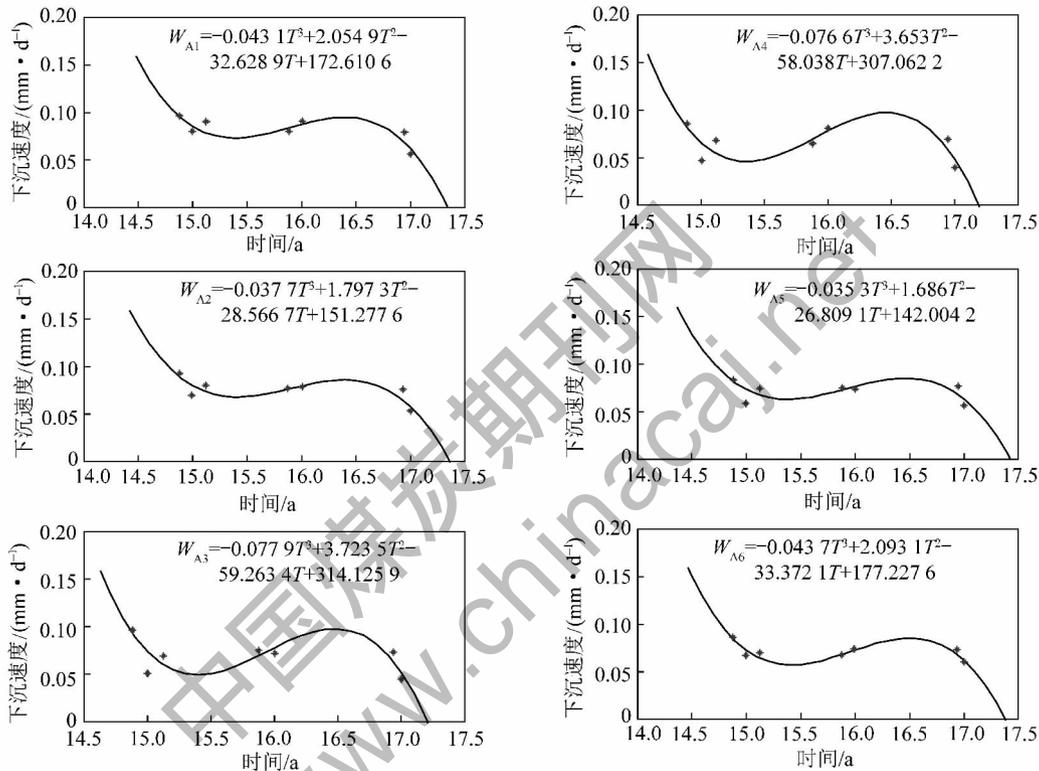


图 9 观测点稳健回归分析

Fig. 9 Robust regression analysis of the observation point

3 结 论

(1) 利用 2007—2010 年获取 ALOS 卫星的 PAL-SAR 数据,监测得到了期间某矿区的地表沉降场。同时分析了位于此矿区 1993 年老采空区的沉降情况。实验结果表明,利用 D-InSAR 技术可以快速、准确的监测大面积老采空区的残余变形。

(2) 实验表明,尽管地下工作面开采 15 a 以上,但由于邻区开采等的影响,地表尚有残余沉降,该沉降引起的地表倾斜小于 0.25 mm/m,说明在该地质采矿条件下,采空区残余沉降是缓慢、渐变的,不会对其上方兴建的建筑物造成影响。

(3) 尽管 D-InSAR 技术在地表形变监测方面具有传统技术手段难以比拟的优势,但是时空失相

关^[10-11]和大气效应^[12-16]这两项因素严重影响到其测量精度,尤其是老采空区沉降稳定后残余变形微小,将来有必要结合永久散射体和小基线集时序进行综合分析研究。

参考文献:

[1] 张宏贞,邓喀中,刘洪义.老采空区残余下沉系数的神经网络模型研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(3):322-326.
Zhang Hongzhen, Deng Kazhong, Liu Hongyi. Artificial neural network model for predicting residual subsidence coefficient of abandoned mine goaf[J]. Journal of Mining & Safety Engineering 2009, 26(3): 322-326.

[2] 王正帅,邓喀中.老采空区残余沉降的离散灰色预测模型[J].煤炭学报,2010,35(7):1084-1088.
Wang Zhengshuai, Deng Kazhong. Discrete grey prediction model of

- old goaf residual subsidence [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(7): 1084–1088.
- [3] 路 旭. 用 InSAR 作地面沉降监测的试验研究[J]. *大地测量与地球动力学* 2002(4): 66–70.
Lu Xu. Experiment on land subsidence monitoring by InSAR [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics* 2002(4): 66–70.
- [4] 芮勇勤, 陈佳艺, 丁晓利. 基于 InSAR 与 GPS 技术的公路采空区变形监测[J]. *东北大学学报(自然科学版)* 2010, 31(12): 1773–1776.
Rui Yongqin, Chen Jiayi, Ding Xiaoli. On the deformation monitoring based on integrating InSAR with GPS for Expressway/Goaf [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2010, 31(12): 1773–1776.
- [5] 范洪冬, 邓喀中, 薛继群, 等. 利用时序 SAR 影像集监测开采沉降的试验研究[J]. *煤矿安全* 2011, 42(2): 15–18.
Fan Hongdong, Deng Kazhong, Xue Jiqun, et al. An Experimental research on using time series SAR images to monitor mining subsidence [J]. *Safety in Coal Mines* 2011, 42(2): 15–18.
- [6] 胡 波, 汪汗胜. 二轨法 D-InSAR 监测城市地表沉降[J]. *测绘工程* 2010, 19(2): 37–41.
Hu Bo, Wang Hansheng. Urban land subsidence measurement by two-pass D-InSAR [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2010, 19(2): 37–41.
- [7] 何 敏, 何秀凤. 利用时间序列干涉图叠加法监测盐城地区地面变形[J]. *武汉大学学报(信息科学版)* 2011, 36(12): 1461–1465.
He Min, He Xiufeng. Ground subsidence detection of Yancheng city using time series interferograms stacking [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* 2011, 36(12): 1461–1465.
- [8] 张 红, 王 超, 刘 智. 获取张北地震同震形变场的差分干涉测量技术[J]. *中国图象图形学报* 2000, 5(6): 497–501.
Zhang Hong, Wang Chao, Liu Zhi. The differential radar interferometry technique to achieve coseismic displacement field of the Zhangbei earthquake [J]. *Journal of Image and Graphics* 2000, 5(6): 497–501.
- [9] 郭广礼. 老采空区上方建筑物地基变形机理及其控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2001: 94–95.
Guo Guangli. The deformation mechanism and control of the building foundation on the top of the old goaf [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press 2001: 94–95.
- [10] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30: 950–959.
- [11] 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): 19617–19634.
- [12] Zebker H A, Rosen P A, Hensley S. Atmospheric effects in interferometric aperture radar surface deformation and topographic maps [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B4): 7547–7563.
- [13] Hanssen R F, Weckwerth T M, Zebker H A, et al. High-resolution water vapour mapping from interferometric radar measurements [J]. *Science*, 1999, 283: 1295–1297.
- [14] Li Z, Muller J, Cross P. Comparison of precipitable water vapor derived from radiosonde, GPS, and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer measurements [J]. *Journal of Geophysical Research* 2003, 108(D20): H10–H11.
- [15] Li Z W, Ding X L, Liu G X. Modeling atmospheric effects on InSAR with meteorological and continuous GPS observations: algorithms and some test results [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 2004(66): 907–917.
- [16] Ding X L, Li Z W, Zhu J J, et al. Atmospheric effects on InSAR measurements and their mitigation [J]. *Sensors* 2008(8): 5426–5448.