



基于InSAR时序形变的矿区 全盆地沉降时空演化规律分析

杨泽发^{1,2}, 易辉伟^{1,3}, 朱建军¹, 李志伟¹, 苏军明¹, 刘 奇¹

(1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;

2. 湖南科技大学 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室, 湘潭 411201;

3. 中南大学 湖南省普通高校精密工程测量及形变灾害监测重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 利用10景ALOS PALSAR影像获取山西云冈某矿区在2007年7月1日至2009年1月3日的地表时序沉降值, 并使用Logistic模型拟合该矿区全盆地时序沉降。结果表明: 通过交叉验证Logistic模型估计参数预测的时序沉降与InSAR监测值后发现, 两者吻合较好, 且其平均值和均方根误差分别为-0.4和2.5 cm, 表明在整个下沉盆地内, 各点的动态沉降均符合“S”型增长, 且Logistic模型能较好地描述该过程。统计该矿区全盆地Logistic模型形状参数 a 和 b 后, 发现参数 a 和 b 分别服从Weibull分布和随机分布, 且其数值变化较大, 表明利用少量离散地表监测数据拟合的Logistic模型参数预测的全盆地动态沉降结果可靠性不高。最后, 利用全盆地Logistic模型估计参数预测了该矿区2009年2月18日的地表沉降值, 该值与InSAR监测结果吻合较好, 均方根误差为2.15cm。

关键词: InSAR时序形变; 开采沉陷; 时空演化; Logistic模型; 遗传算法; Levenberg-Marquard算法

中图分类号: TD17; P23

文献标志码: A

地下开采容易破坏下沉盆地内的道路、桥梁、建筑物、地下管线以及其他基础设施。因此, 研究矿区全盆地沉降的时空演化规律是精确预计和评估地表建筑物潜在损坏、提高地下资源回采效率的关键。目前, 该研究的主要方法是建立可描述该过程的时空模型, 比较典型的有力学解析模型^[1]和时间函数模型^[2-6]。由于岩体具有非连续性且本构关系较为复杂, 因此, 力学解析模型及其预测精度还有待进一步研究^[5]。时间函数模型根据地表实测数据拟合得来, 是目前使用较为广泛的矿区沉降时空演化过程分析方法。

然而, 由于传统测量手段(如GPS、水准测量等)受到技术本身的制约, 很难提供覆盖整个下沉盆地的地表观测数据。因此, 已有的矿区沉降时空演化研究大都基于地表少量的离散监测点^[6], 并利用其拟合的参数预测全盆地的动态沉降值。然而, 矿区地表动态沉降过程是一个复杂的时空过程, 且受众多因素影响(如不均匀的工作面推进速度、非均衡的岩体破坏、非

均等的表土层覆盖等^[7]), 仅利用少量离散点的时空演化过程预测全盆地动态沉降是否可靠还有待研究。综上所述, 如何将传统沉降的时空演化研究由少量的“点”扩展到全盆地的“面”对于地表动态沉降精确预测及建筑物潜在破坏准确评估有着重要意义。

对于传统测量而言, 矿区沉降的时空演化过程研究由“点”到“面”的拓展意味着观测点必须覆盖整个下沉盆地, 从而大大地增加投入的人力、财力和物力。然而, 合成孔径雷达干涉测量(Interferometric synthetic aperture radar, InSAR)的出现为实现该研究提供重要条件^[8-12]。其全天候、全天时、大范围覆盖(如ALOS PALSAR的空间覆盖范围为70 km×90 km)的优势能在较为恶劣的气候条件下同时监测多个矿区。另外, 该技术能低成本地获取矿区全盆地的高精度、高时空分辨率的形变监测数据, 从而为研究矿区地表全盆地动态沉降规律提供较好的数据支持。然而, 国内外在利用InSAR时序形变分析矿区地表全盆地沉降的时空

基金项目: 国家高新技术研究发展计划资助项目 (2012AA121301); 国家自然科学基金资助项目(41474008); 湖南省杰出青年科学基金资助项目(13JJ1006); 煤炭资源清洁利用与矿山环境保护湖南省重点实验室开放基金资助项目(E21418, E21224); 中南大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014zzts051); 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金资助项目(SKLGED2013-2-1-E)

收稿日期: 2014-08-18; **修订日期:** 2016-04-29

通信作者: 易辉伟, 讲师, 博士; 电话: 0731-88660089; E-mail: yhw74@163.com

演化过程方面的研究几乎为空白。因此,本文作者将利用InSAR时序形变揭示矿区全盆地沉降的时空演化过程,分析其分布规律,为高精度地表动态沉降预测及建构筑物潜在损坏精确评估提供重要技术支撑。

1 InSAR矿区沉降时空演化规律分析方法

1.1 矿区地表时空演化函数模型

矿区地表沉降是一个复杂的时空过程,其基本过程分为3个阶段:初始沉降期、主要沉降期和残余沉降期。目前,描述该过程的时间函数模型主要有Knothe模型^[2]、Weibull模型^[3]、Richards模型^[5]、Logistic模型^[6]等。在众多模型中,Knothe模型形式最为简单,且其参数可通过经验公式估计,因此,在之前的矿区地表动态沉降预计中应用较为广泛。但由于采用该模型得到的沉降速度与加速度与地表实际情况有出入^[13-14],从而削弱了其预计精度。Richards模型虽然适应性较强,但相对于其他模型,其参数有所增加,加大了参数估计难度。Weibull模型由于对时间零点校正精度要求较高,限制了该模型的使用。根据文献^[6]的研究,Logistic模型为典型的“S”型增长曲线,与矿区时空变化3个过程吻合较好。因此,本文作者基于该模型分析矿区全盆地动态沉降规律,其形式为

$$W(t) = \frac{W_0}{1 + a \exp(-bt)} \quad (1)$$

式中: $W(t)$ 为 t 时刻地表的累计下沉值; W_0 为最大沉降值; a 和 b 分别为Logistic函数的形状参数; W_0 、 a 、 b 分别为Logistic模型的待估参数。

在待估参数中, W_0 主要影响“S”型曲线的最大沉降值,而 a 和 b 主要影响Logistic函数的形状,不同的参数值对其形状的影响不同。为了更直观地描述Logistic模型参数 a 和 b 对曲线形状的影响,首先,设置 $W_0=0.8$ m, $b=0.05$, a 分别为50、500、5000、50000、5000000,然后分别将3个待估参数值代入式(1),并绘制相应的时序沉降曲线(如图1(a)所示);然后,令 $W_0=0.8$ m, $a=1200$, b 分别为0.01、0.03、0.05、0.07、0.09,描述的Logistic曲线如图1(b)所示。

从图1中可以看出,参数 a 越大,地表点的起始下沉时间越长,达到最大下沉值的时间也越久,但各曲线的总体形状大致保持一致;然而,参数 b 值越大,地表点下沉速度越快,曲线形状之间差异也越大。

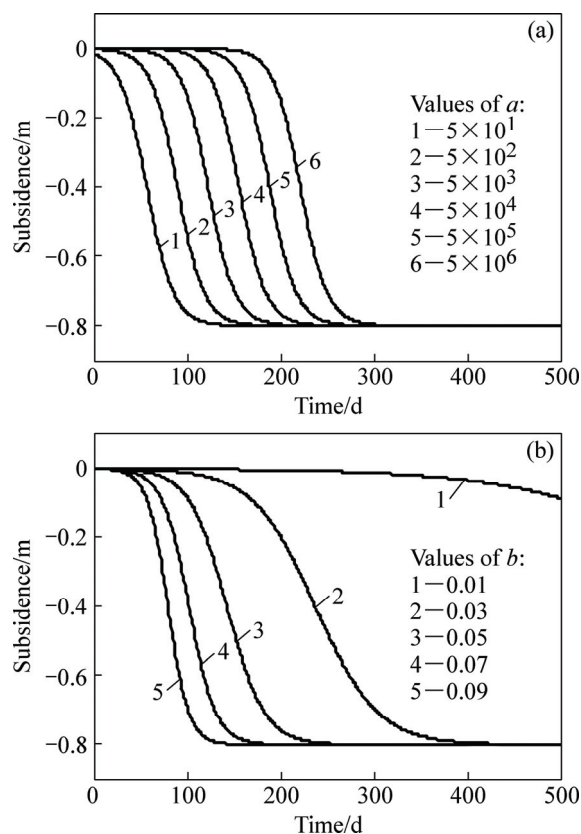


图1 参数 a 和 b 对Logistic曲线形状的影响

Fig. 1 Effects of parameters a (a) and b (b) on shape of Logistic curve

1.2 基于InSAR时序形变Logistic模型参数的估计方法

由于InSAR监测的是雷达视线方向(Line of Sight, LOS)的形变,其为地表真实三维变形按照雷达成像几何条件的合成^[15-16]。而矿区时间函数模型主要描述的是动态沉降的时空演化过程,因此,需将InSAR监测的LOS向时序形变转换为时序沉降。考虑到矿区地表以下沉降为主,且水平移动对LOS向的贡献远小于下沉值,因此,本文作者将忽略水平移动对LOS向的贡献,直接将LOS向形变 d_{LOS} 转换为沉降值 W ,即 $W=d_{\text{LOS}}/\cos\theta$ ^[17](式中 θ 为雷达入射角)。

设有 $n+1$ 景覆盖待研究矿区的SAR影像,获取时间分别为 $[t_0, t_1, \dots, t_n]$ 。以第一景SAR影像获取时间为参考基准,得到所有SAR影像的相对时间 $[T_0, T_2, \dots, T_n]=[0, t_1-t_0, \dots, t_n-t_0]$ 。在确定时间函数参数前,需估计全盆地各点的时间零点,考虑到差分InSAR(Differential InSAR, D-InSAR)技术的监测误差以及SAR数据的重访周期,本文作者以InSAR监测的时序沉降中第一个大于5 cm时刻的前一个观测时间 T' 作为Logistic模型的时间零点,后续时间均重新以该时

间为参考基准。因此, 经过时间零点校正后的Logistic模型为

$$\begin{cases} 0, T \leq T' \\ W(T) = \frac{W_0}{1 + a \exp(-b(T - T'))}, T \geq T' \end{cases} \quad (2)$$

由于式(2)中含有指数, 直接求解较为困难。同时, 考虑到遗传算法搜索结果中存在随机误差, 因此, 本文作者提出利用遗传算法(Genetic algorithm, GA)与Levenberg-Marquard(LM)算法串行求解模型参数。其具体步骤如下:

1) 设置遗传算法和LM算法的目标函数

$$[W, a, b]^T = \min \| W_{\text{InSAR}} - W_{\text{Logistic}} \| = \min \left\| W_{\text{InSAR}} - \frac{W_0}{1 + a \exp(-b(T - T'))} \right\|, T \geq T' \quad (3)$$

式中: W_{InSAR} 和 W_{Logistic} 分别表示利用InSAR监测的时序下沉和Logistic模型预计的时序下沉;

2) 利用GA估计Logistic模型参数的全局最优解;

3) 由于遗传算法搜索结果含有较大的随机误差, 因此, 本文作者将遗传算法搜索的模型参数全局最优解作为LM算法的初始值, 然后, 利用该算法精化模型参数, 从而得到高精度模型参数解。

1.3 全盆地沉降时空演化规律分析方法

大量研究表明矿区地表单点的时空演化过程符合“S”型增长, 因此, 本文作者首先基于典型的“S”型增长曲线模型——Logistic模型, 利用GA+LM算法拟合全盆地的InSAR时序沉降。然后, 比较拟合参数预计的SAR影像时刻的时序沉降值与InSAR监测值之差, 从而验证全盆地动态沉降是否符合“S”增长。之后, 对基于Logistic模型的拟合形状参数进行统计并绘制其直方图, 分析其分布规律, 并尝试利用全盆地Logistic模型参数预测后续动态沉降的可能性。

2 矿区InSAR时序沉降监测

选用山西云冈某矿区作为研究对象。该矿区位于大同市西北约17公里, 北临109国道。地表主要为黄土覆盖的低山丘陵, 植被较为稀疏。由于L波段合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)数据比C、X波段更适合监测矿区地表形变^[18], 因此, 本文作者选用10景覆盖研究区域的ALOS PALSAR影像(Frame: 790, Path: 454)作为实验数据(如表1所列)监测该矿区

表1 InSAR干涉对参数

Table 1 Parameters of InSAR pairs

Test No.	Master image time	Slave image time	Temporal baseline/d	Perpendicular baseline/m
1	2007-07-01	2007-08-16	46	87
2	2007-08-16	2007-10-01	46	380
3	2007-10-01	2008-01-01	92	170
4	2008-01-01	2008-02-16	46	578
5	2008-02-16	2008-04-02	46	280
6	2008-04-02	2008-05-18	46	143
7	2008-05-18	2008-07-03	46	-2022
8	2008-07-03	2008-10-03	92	-1793
9	2008-10-03	2009-01-03	92	480

时序沉降值, 影像的时间跨度为2007年7月1日至2009年1月3日。

由于该矿区地表形变速度较快、梯度较大, 而传统的时序InSAR技术(如小基线集、永久散射体技术等)只能监测形变量级较小的地表变形。因此, 将累加时间相邻InSAR干涉对监测的形变作为矿区地表时序沉降值。其具体方式如下: 1) 为了统一空间坐标系, 将所有SAR影像与2008年4月2日获取的影像配准; 2) 将时间相邻的两景SAR影像组成干涉对(参数如表1所列), 并利用标准“二轨法”差分干涉技术处理所有干涉对, 得到SAR影像时间间隔内的地表LOS向形变; 3) 将各干涉对相干性均高于0.3的像素的LOS向形变累加, 在忽略水平移动对LOS向的贡献后得到矿区地表时序沉降值。为了减少动态规律分析时的计算量, 将未受到该矿区地下开采影响的区域掩膜, 其时序沉降如图2所示。

从图2中可以看出, 该矿区从2007年7月1日至2008年1月1日(见图2(a)~(c))期间, 地表沉降较为缓慢。从2008年1月1日起, 地表形变逐渐增大, 至2009年初逐渐稳定, 最终累计下沉值约为1.30 m(见图2(i))。

3 矿区地表单点时空演化过程分析

3.1 矿区地表单点的Logistic模型参数估计

为了验证矿区地表全盆地内的单点时空演化过程是否符合“S”型增长, 本文作者获取基于InSAR监测的云冈某矿区2007年7月至2009年1月期间地表时序沉降, 并利用1.2节中描述的GA+LM算法估计了该矿区全盆地高相干点的Logistic模型参数值, 其结果如图3所示。

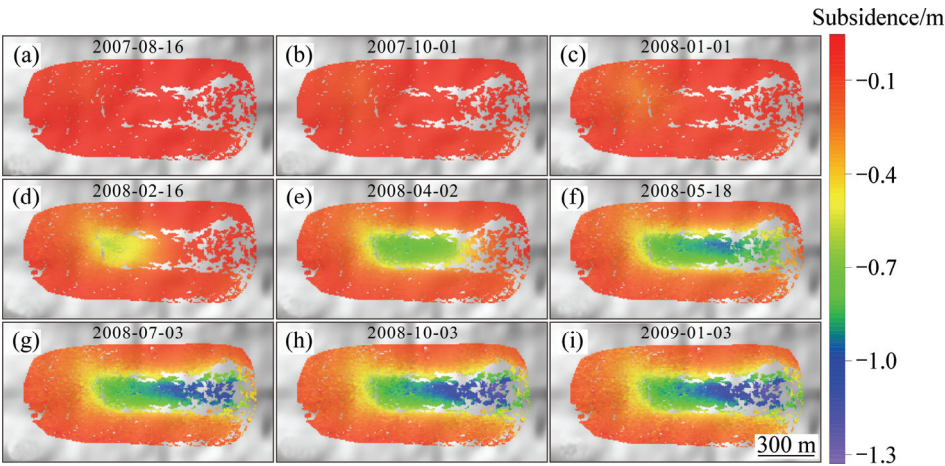


图2 InSAR监测的在SAR影像获取时间的地表累计时序沉降场(以2007-07-01为参考)

Fig. 2 InSAR-derived accumulated subsidence field of SAR acquisitions times (respect to 2007-07-01)

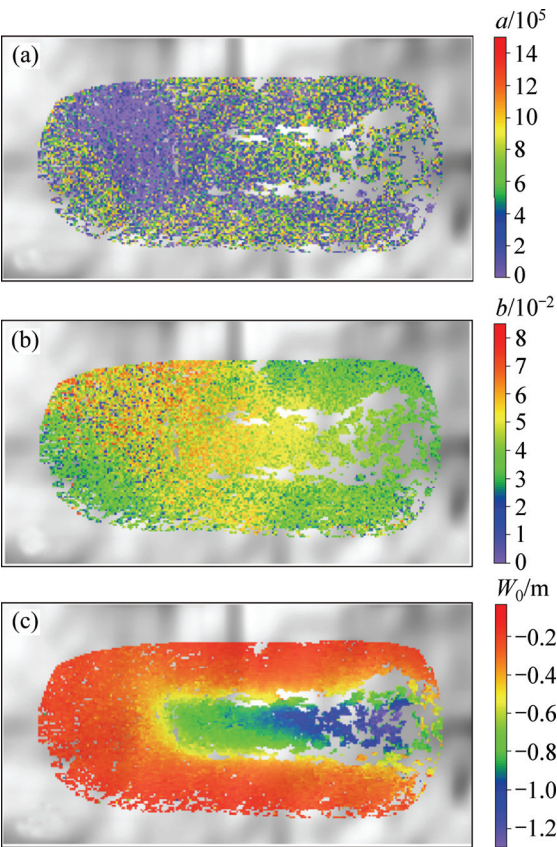


图3 云冈某矿区下沉全盆地Logistic模型参数 a 、 b 和 W_0

Fig. 3 Parameters a (a), b (b) and W_0 (c) of Logistic model of one mining area in Yungang city, China

3.2 Logistic模型的可靠性评估

为了验证Logistic模型能否很好地描述矿区全盆地内的单点沉降时空演化过程，首先利用拟合的Logistic模型参数估计SAR影像获取时刻全盆地高相干点处的时序沉降值，然后将预测的时序沉降值与

InSAR监测值进行交叉验证，其结果如图4所示。

为了定量分析估计的时序沉降值与InSAR监测值之间的差异，计算了两者之间的均值和均方根误差(Root mean square error, RMSE)，其结果如表2所示。

表2 预计沉降与InSAR监测值之间的RMSE与均值

Table 2 RMSE and mean between predicted subsidence and InSAR measured value

Time/d	RMSE/cm	Average RMSE/cm
46	2.0	-1.8
92	3.1	-1.6
184	2.8	-0.6
230	3.0	-0.1
276	3.3	-0.9
322	2.5	-1.4
368	1.6	-1.2
460	1.8	1.2
552	2.0	2.7

3.3 矿区地表单点时空演化过程分析

图4所示为SAR影像获取时间处InSAR监测的时序沉降值与模型预测结果的交叉验证图。从图4中可以看出，利用Logistic模型预测的46和92 d的时序沉降在极少部分高相干点上差异较大，且其主要集中在预计下沉为0的地方。出现该现象的主要原因为InSAR监测地表形变时受到各种噪声、大气延迟、解缠误差、时空失相关等因素的影响，因此其获取的形变存在误差。从图4中还可看出，大部分高相干点处估计的时序沉降与InSAR监测值之间吻合较好，且大部分点的误差小于2倍均方根误差(图4中红色虚线)。另外，从表2中可

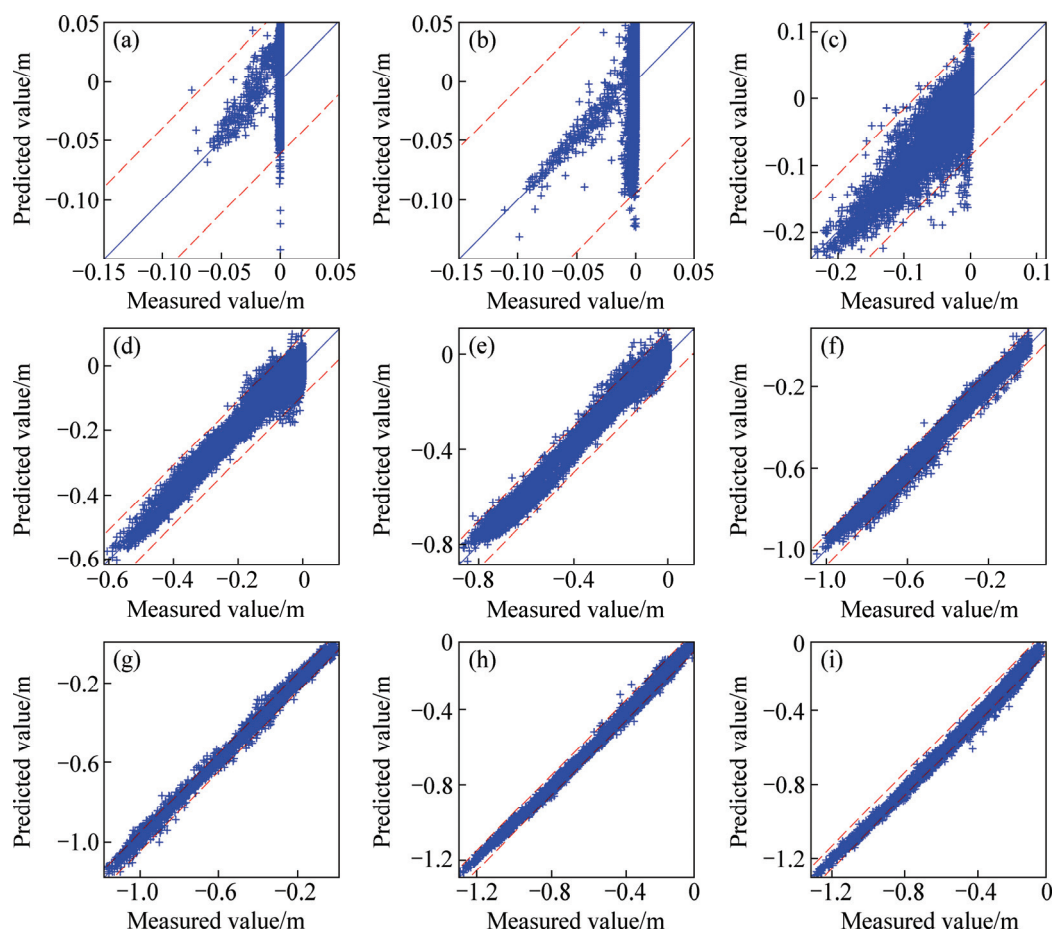


图4 SAR影像获取时间处InSAR监测的时序沉降值与模型预测结果的交叉验证图(蓝色实线表示预测值与监测值相等, 红色虚线表示各时间点正负2倍均方根误差)

Fig. 4 Cross-plots between predicted time-series subsidence and those of InSAR measured (Blue line denotes that both subsidence are equal, and red dash lines denote two times root mean square error)

以看出, 估计的时序沉降值与InSAR监测值之间的均方根误差在1.6和3.3 cm之间, 平均均方根误差为2.5 cm; 均值在-0.1和2.7 cm之间, 平均均值为-0.4 cm。结果表明: 矿区地表全盆地内的单点符合“S”型增长, 且Logistic模型能较好地描述该时空演化过程。

4 矿区全盆地沉降时空演化过程规律分析

以上研究表明, 矿区全盆地内的单点时空演化过程满足“S”型增长, 且Logistic模型能较好地描述该过程。但从图1中可以看出, 不同的Logistic模型参数对其形状影响较大, 特别是形状参数 a 和 b 。从图3中可以看出, 全盆地Logistic模型的最大下沉值 W_0 与2009年1月3日(即552天)的沉降值相似, 其值约为1.30 m。参数 a 在整个盆地中未呈现出明显的规律, 其值从0变化到1482000。同样, 参数 b 也未有明显的规律, 其值从0

变化到0.085。参照图1中不同的参数 a 与 b 对Logistic函数的影响可知, 该矿区全盆地内各高相干点的时间演化过程差异较大, 且在空间上没有明显的规律。结果表明: 利用少量地表离散点无法准确描述盆地内其他点的时间演化过程。因此, 利用少量地表离散点的监测数据拟合Logistic模型预计的全盆地动态沉降可靠性不高。

由于Logistic模型的最大下沉值 W_0 主要影响该点的最大沉降, 而其余两个参数 a 和 b 则主要影响Logistic函数的时间分布。因此, 这里将重点绘制云冈矿区全盆地Logistic模型参数值 a 和 b 的统计直方图, 并以此拟合两者的概率密度函数, 其结果如图5所示。

从图5中可以看出, 云冈矿区全盆地Logistic参数 a 服从Weibull分布(概率密度函数和曲线如图5(a)所示), 其尺度参数 $\lambda=301521$, 形态参数 $k=0.685$ 。参数 b 服从正态分布(概率密度函数和曲线如图5(b)所示), 其均值 $\mu=0.044$, 方差 $\sigma=0.0113$ 。该结果再一次证明: 矿区全

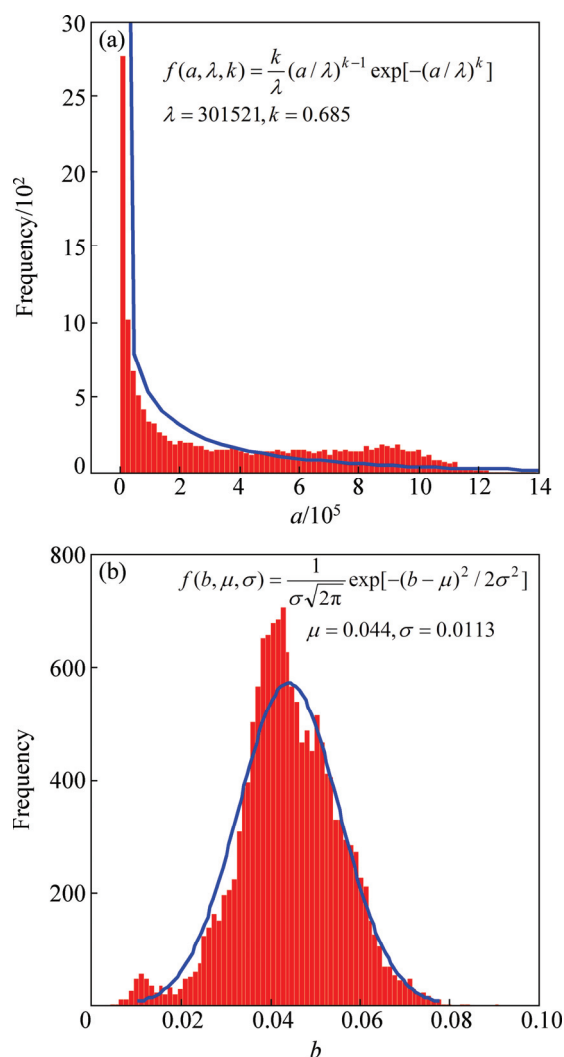


图5 全盆地Logistic参数 $a(a)$ 与 $b(b)$ 的统计直方图(蓝色曲线表示直方图拟合的概率密度曲线)

Fig. 5 Histograms of parameters a (a) and b (b) of Logistic model (Blue curves denote probability density curves fitted by histograms)

盆地Logistic模型参数 a 与 b 差异较大,利用单点的形变时空演化过程很难精确描述全盆地的其他地表点。

5 矿区地表动态沉降预测

研究矿区地表动态沉降规律主要是为了预测地下开采引起的地表变形,并以此评估和分析其对地表建构物的潜在破坏。但从之前的分析可知,传统的利用少量离散点的拟合的Logistic模型参数预测的全盆地动态沉降结果不可靠。考虑到Logistic模型能够较好地描述地表的时空演化过程,因此,若能够获取

矿区每个高相干点的Logistic模型参数,则能较准确地预测矿区全盆地动态沉降,从而实现全盆地地表建构物的精确评估。

为了验证该想法,本文作者首先利用两景获取时间分别为2009年1月3日与2月18日的PALSAR影像获取了该时间间隔内云冈某矿区地表下沉值,并与2009年1月3日的地表累计沉降相加,从而获得该矿区2009年2月18日的累计沉降值。然后,运用3.1节中估计的该矿区全盆地Logistic模型参数预测了相应时间的地表累计沉降值,并对两者进行交叉验证,其结果如图6所示。

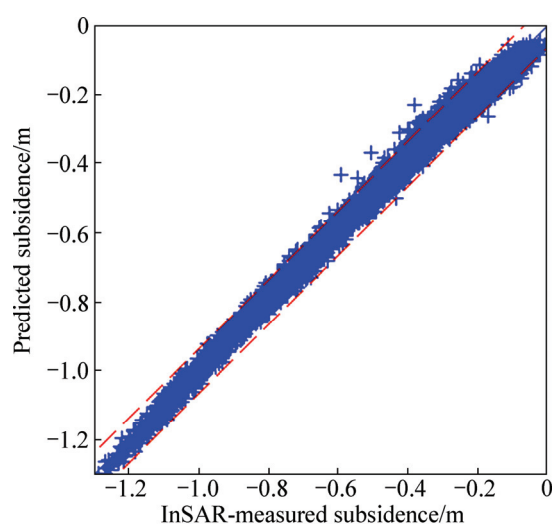


图6 预计的沉降值与InSAR监测值交叉验证图

Fig. 6 Cross-plot between predicted subsidence and those of InSAR-measured results

从图6中可以看出,预计沉降值与InSAR监测的时序沉降值吻合较好,其均值和均方根误差分别为0.34和2.15 cm。该结果表明:虽然表面上Logistic模型的参数变化较快,且表面未呈现明显的规律,但若利用全盆地内各点的Logistic模型参数预计后续动态沉降是可行和可靠的。

6 结论

1) 基于InSAR监测的云冈某矿区时序沉降值,并利用Logistic模型拟合该时序形变,通过交叉验证后发现:矿区地表全盆地内各点的时空演化过程符合“S”型增长,且Logistic模型能较好地描述该过程。

2) 通过对云冈矿区全盆地Logistic模型参数统计后发现:其形状参数 a 和 b 在全盆地内变化较大,且分

别服从Weibull分布和随机分布。若利用少量地表点拟合的时间函数模型参数预计地表全盆地动态沉降误差较大, 甚至获得错误的预计结果。

3) 使用全盆地的Logistic模型参数预计后续开采导致的地表动态沉降是可行和可靠的。

REFERENCES

- [1] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003: 134–151.
ZOU You-feng, DENG Ka-zhong, MA Wei-min. Mining subsidence engineering[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003: 134–151.
- [2] CUI Xi-min, WANG Jia-chen, LIU Yi-sheng. Prediction of progressive surface subsidence above longwall coal mining using a time function[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(7): 1057–1063.
- [3] 刘玉成. 基于Weibull时间序列函数的动态沉陷曲线模型[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2409–2413.
LIU Yu-cheng. Dynamic surface subsidence curve model based on Weibull time function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2409–2413.
- [4] DÍAZ-FERNÁNDEZ M E, ÁLVAREZ- FERNÁNDEZ M I, ÁLVAREZ-VIGIL A E. Computation of influence functions for automatic mining subsidence prediction[J]. Computational Geosciences, 2010, 14(1): 83–103.
- [5] 王正帅, 邓喀中. 采动区地表动态沉降预测的Richards模型[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1664–1668.
WANG Zheng-shuai, DENG Ka-zhong. Richards model of surface dynamic subsidence prediction in mining area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1664–1668.
- [6] 张文志, 邹友峰, 任筱芳. Logistic模型在开采沉陷单点预测中的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(4): 486–489.
ZHANG Wen-zhi, ZOU You-feng, REN Xiao-fang. Research on logistic model in forecasting subsidence single-point during mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(4): 486–489.
- [7] 于广明, 孙洪泉, 赵建锋. 采矿引起地表点动态下沉的分形增长规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 34–37.
YU Guang-ming, SUN Hong-quan, ZHAO Jian-feng. The fractal increment of dynamic subsidence of the ground surface point induced by mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 34–37.
- [8] 杨泽发, 朱建军, 李志伟, 汪长城, 汪云甲, 陈国良. 联合InSAR和水准数据的矿区动态沉降规律分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(10): 3743–3751.
LI Zhi-wei, YANG Ze-fa, ZHU Jian-jun, WANG Chang-cheng, WANG Yun-jia, CHEN Guo-liang. Analysis of law of kinematic mining subsidence by integrating InSAR and leveling measurements[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015, 46(10): 3743–3751.
- [9] UNLU T, AKCIN H, YILMAZ O. An integrated approach for the prediction of subsidence for coal mining basins[J]. Engineering Geology, 2013, 166: 186–203.
- [10] SAMSONOV S, DORETE N, SMETS B. Ground deformation associated with post-mining activity at the French–German border revealed by novel InSAR time series method[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23: 142–154.
- [11] FAN Hong-dong, GU Wei, QIN Yong, XUE Ji-qun, CHEN Bing-qian. A model for extracting large deformation mining subsidence using D-InSAR technique and probability integral method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(4): 1242–1247.
- [12] 朱建军, 邢学敏, 胡俊, 李志伟. 利用InSAR技术监测矿区地表形变[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(10): 2564–2576.
ZHU Jian-jun, XING Xue-min, HU Jun, LI Zhi-wei. Monitoring of ground surface deformation in mining area with InSAR technique[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(10): 2564–2576.
- [13] 刘玉成, 曹树刚, 刘延保. 可描述地表沉陷动态过程的时间函数模型探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 925–931.
LIU Yu-cheng, CAO Shu-gang, LIU Yan-bao. Discussion on some time functions for describing dynamic course of surface subsidence due to mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 925–931.
- [14] 崔希民, 赵英利. 论地表移动过程的时间函数[J]. 煤炭学报, 1999, 24(5): 453–456.
CUI Xi-min, ZHAO Ying-li. Discussion on the time function of time dependent surface movement[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24: 453–456.
- [15] LI Zhi-wei, YANG Ze-fa, ZHU Jian-jun, HU Jun, WANG Yun-jia, LI Pei-xian, CHEN Guo-liang. Retrieving three-dimensional displacement fields of mining areas from a single InSAR pair[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(1): 17–32.
- [16] HU Jun, LI Zhi-wei, DING Xiao-li, ZHU Jian-jun, ZHANG Lei, SUN Qian. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2014, 133: 1–17.
- [17] HANNSEN R F. Radar interferometry: data interpretation and error analysis[M]. Dordrecht/Boston/London: Kluwer academic publishers, 2001: 162–163.
- [18] 陶秋香, 刘国林, 刘伟科. L和C波段雷达干涉数据矿区地面沉降监测能力分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(11): 3681–3689.
TAO Qiu-xiang, LIU Guo-lin, LIU Wei-ke. Analysis of capabilities of L and C-band SAR data to monitor mining-induced subsidence[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2012, 55(11): 3681–3689.

Spatio-temporal evolution law analysis of whole mining subsidence basin based on InSAR-derived time-series deformation

YANG Ze-fa^{1,2}, YI Hui-wei^{1,3}, ZHU Jian-jun¹, LI Zhi-wei¹, SU Jun-ming¹, LIU Qi¹

(1. School of School of Earth Science and Geomatics Engineering,

Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and

Mine Environment Protection, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Key Laboratory of Precise Engineering Surveying and

Deformation Hazard Monitoring of Hunan Province, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: 10 ALOS PALSAR images were used to derive the mining ground time-series subsidence of one mining area in Yungang city, Shanxi Province, China, from July 1, 2007 to January 3, 2009, and the mining ground time-series subsidence was fitted with the Logistic model. The results show that the predicted time-series subsidence by the Logistic model has a good agreement with those of InSAR-measured with average mean and root mean square error of -0.4 and 2.5 cm, respectively, from the cross validation of both. The dynamic subsidence of all surface points in the whole basin agrees with S-shaped temporal evolution, and the Logistic model could describe this temporal evolution accurately. Subsequently, the shape parameters a and b of Logistic model are followed the Weibull and random distribution, respectively, and rapidly changes of parameters occur from their statistical histograms. This indicates that the predicted kinematic subsidence is unreliable if the parameters of Logistic model are yielded by the measurements of a few sparse observation points. At last, the subsidence of this mining area on February 28, 2009 was predicted, which have a good agreement with those of InSAR measured with root mean square error of 2.15 cm.

Key words: InSAR-derived time-series deformation; mining subsidence; spatio-temporal evolution; Logistic model; genetic algorithm; Levenberg-Marquard algorithm

Foundation item: Project(2012AA121301) supported by National High Technology Research and Development Program of China; Project(41474008) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project(13JJ1006) supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province, China; Project (E21224, E21418) supported by Hunan Province Key Laboratory of Coal Resources Clean-utilization and Mine Environment Protection, China; Project(2014zzts051) supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities of Central South University, China; Project (SKLGED2013-2-1-E) supported by State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, China

Received date: 2014-08-18; **Accepted date:** 2016-04-29

Corresponding author: YI Hui-wei; Tel: +87-731-88660089; E-mail: yhw74@163.com

(编辑 李艳红)