



移动扫码阅读

石晓宇,魏祥平,杨可明,等.联合 DInSAR 的 3 种下沉时序模型关键点缺失问题研究[J].煤炭科学技术, 2022,50(4):236-245.

SHI Xiaoyu, WEI Xiangping, YANG Keming, *et al.* Research on key points deficiency of three subsidence time series models combined with DInSAR technology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 236-245.

联合 DInSAR 的 3 种下沉时序模型关键点缺失问题研究

石晓宇^{1,2}, 魏祥平³, 杨可明¹, 王 剑¹, 姚树一¹

(1.中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2.中国四维测绘技术有限公司,北京 100094;
3.淮北矿业股份有限公司通防地测部,安徽 淮北 235000)

摘 要:针对难以全面研究沉陷区下沉变形的动态过程和单一监测手段可能会错失地表沉降阶段某些关键点的问题,以局部地表面点为切入点,联合 InSAR 与水准数据分别建立幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型和 Weibull 模型,进而研究矿区地表动态沉降规律。通过模拟数据分析了沉陷区地表观测点下沉变形特征以及影响上述 3 种时间函数曲线拟合的各因素;并以淮北袁二煤矿某采区为试验区,采用合成孔径雷达差分干涉测量(DInSAR)技术获得各水准点 InSAR 时序形变值;最终联合 InSAR 和水准监测数据,对比分析基于多源或单一监测方式 2 种情况下 3 种模型拟合曲线的不同。试验结果表明:①各时间序列模型地表下沉待估参数的大小对曲线拟合形态有较大影响,保证一定的监测周期,可反演出合适的下沉参数,才能更准确地拟合沉陷区观测点下沉时间序列,均方根误差最大可提高 95.56%。②幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型和 Weibull 模型随时间序列变化的过程与地表沉陷区观测点物理下沉时序过程相符,均能较好地由地表面点下沉时间序列拟合出沉降曲线;3 种模型虽下沉曲线拟合效果差异不大,但下沉速度曲线的拟合有明显差异且拟合精度均有所提高,可见联合 InSAR 和水准测量的沉降时间序列对矿区地表动态沉降进行拟合有明显优势。③基于多源数据拟合的 3 种时间函数模型相较于仅基于单一水准数据的可靠性更高,对各模型的下沉曲线形态具有较好的收敛作用。

关键词:DInSAR;地表沉陷;时间序列模型;水准数据;关键点

中图分类号:TD327

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2022)04-0236-10

Research on key points deficiency of three subsidence time series models combined with DInSAR technology

SHI Xiaoyu^{1,2}, WEI Xiangping³, YANG Keming¹, WANG Jian¹, YAO Shuyi¹

(1.College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2.China Siwei Surveying and Mapping Technology Co., Ltd., Beijing 100094, China; 3.General Defense Geological Survey Department, Huaibei Mining Co., Ltd., Huaibei 235000, China)

Abstract: In view of the problem that it is difficult to comprehensively study the dynamic process of deformation in subsidence area and some key points may be missed by single monitoring method in the stage of surface subsidence, exponent Knothe model, Logistic model and Weibull model were established respectively by combining InSAR and leveling data of surface single point to analyze the dynamic subsidence law in mining area. The detailed steps can be described as follows. Firstly, the deformation characteristics of surface observation points in subsidence area and the factors affecting the fitting of the above three time function curves were analyzed by simulation data. Then, taking a mining area of Yuaner coal mine in Huaibei as an experimental zone, the deformation value time series of InSAR at each benchmark were obtained by differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) technology. Finally, the InSAR and leveling monitoring data were combined to compare and analyze the difference of the fitting curves of the three models based on the multi-source or single moni-

收稿日期:2021-10-02

责任编辑:常 琛

DOI:10.13199/j.cnki.cst.2020-0706

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41971401);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2020YJSDC02)

作者简介:石晓宇(1997—),女,江苏南通人,硕士。E-mail:2754087017@qq.com

通讯作者:杨可明(1969—),男,安徽马鞍山人,教授,博士。E-mail:ykm69@163.com

toring method. The test results show that: ① The parameters to be estimated for the surface subsidence of each time series model have a great influence on the curve fitting shape. Only by ensuring a certain monitoring period and inverting the appropriate subsidence parameters can the subsidence be fitted more accurately. For the subsidence time series of observation points in the area, the root mean square error can be increased by up to 95.56%. ② The changing process of the power exponent Knothe time model, Logistic model and Weibull model changing with time series is consistent with the time series process of the physical subsidence of the observation points in the surface subsidence area. Although the three models have little difference in the fitting effect of subsidence curve, there are obvious differences in the fitting of subsidence velocity curve and the fitting accuracy has been improved. It can be seen that the settlement time series combined with InSAR and leveling has the advantages in the fitting method of the dynamic settlement of the mining area surface. ③ The fitting three models based on multi-source measurement are more reliable than those based on single leveling data, and have a better convergence effect on the subsidence curve about each model.

Key words: DInSAR; surface subsidence; time series models; leveling data; key points

0 引言

地下煤炭资源的大规模开采,会危及采空区上方及周边基础建(构)筑物的安全,同时也会带来一系列新的衍生问题^[1]。因此,在开展地下采煤中,为控制采动损害等级和保护采区周围各类建(构)筑物免受或少受采动损害影响,需实时监测并提前预估煤炭开采导致的地表变形情况,以便分析和掌握矿区地表动态沉降规律。

目前,传统的各类开采沉陷预计方法只是针对地下采矿引起地表沉陷现象进行研究(不考虑全采工作面上覆岩层移动机理和过程)^[2],所以此类方法仅能较好地描述地表受采动影响稳定后的沉陷状态,并不能描述地表沉陷的动态过程。因此,众多学者以局部观测点作为切入点,建立沉陷区单点下沉量时间序列模型,从而描述矿区地表单点下沉随时间变化的趋势。已有的下沉时序模型包括 Knothe 模型、双曲线模型、Gompertz 模型、幂指数 Knothe 模型、Logistic 模型和 Weibull 模型等,其中幂指数 Knothe 模型、Logistic 模型和 Weibull 模型是 3 种常用的非线性时间函数模型,已有较多文献研究表明 3 种时间函数模型均能较好地描述矿山开采沉陷过程^[3-5]。此外,传统监测方式是以水准测量为代表,而近年来合成孔径雷达差分干涉测量(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar, DInSAR)技术成为了新兴的矿区地表形变监测手段^[6],2 种监测方法瑕瑜互见。前者监测精度较高,但易受观测环境以及观测人员的影响,获取的监测数据周期不稳定且时间跨度较大,从而致使矿区地表点动态沉降过程中的某些“关键点”(地表单点下沉曲线的拐点)未被测量,后者由于其固定的重访周期以及特别时间段(夏季)失相干严重等问题也会导致地表点下沉时间序列中某些关键点无监测数据。当前众多研究^[7-10]主要基于单一的水准测量数据建立时间

函数,分析矿区地表点动态形变趋势,然而某些时段“关键点”缺失,会导致预估的下沉曲线偏离真实下沉状态,导致不能准确地建立下沉时间序列模型来分析地表点动态沉降规律。因此,若联合水准测量与 DInSAR 技术,基于多源监测手段获取多源监测数据实现时间序列的加密,建立相应的预计时间函数,可提高拟合曲线与真实下沉曲线的吻合度,进一步提高沉陷预计精度。

为克服以上不足,选取幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型和 Weibull 模型,首先以仿真数据分析模型参数大小以及关键点缺失对 3 种模型拟合精度影响;之后,以淮北袁二煤矿某一采区为试验对象,采用 DInSAR 技术监测采区阶段的地表形变,获得各水准监测点 2017-11-04—2018-02-08 的 InSAR 时序监测值;最后,以 InSAR 监测值作为水准测量加密值,整合 InSAR 与水准数据作为原始观测序列,建立幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型和 Weibull 模型,结合矿区地表单点动态沉降规律,对比并分析基于多源和单一数据分别求解的 3 种模型的拟合结果差异。

1 沉陷区地表单点下沉特征与时间序列模型

1.1 沉陷区地表观测点下沉变形特征

地下采煤引起的采空区地表动态沉陷变形是一个随时间和空间变化的复杂四维问题^[11],随着回采工作面的推进,以下沉速度为划分大致可分为 3 个时段:下沉开始阶段(下沉速度 $v_1 \leq 1.67$ mm/d)、下沉活跃阶段(下沉速度 $v_2 > 1.67$ mm/d)和下沉衰退阶段(下沉速度 $v_3 \leq 1.67$ mm/d)^[12]。相应地,3 个时段也反映了沉陷区地表单点下沉量 W_t 与时间 t 函数曲线变化特征,下沉量随时间变化的曲线形态如图 1 所示。图 1 中,矿区地表单点下沉曲线最终近似呈“S 型”,每一阶段的跃迁都存在相应的拐点,这 3 个拐点由左往右分别为正最大加速度点、最大速

度点和负最小加速度点^[13],与下沉曲线的方向、斜率以及变化率密切相关,不仅对沉降曲线形态起约束作用,而且也是常用时间序列模型是否能较好拟合观测点下沉动态过程的3个关键点。

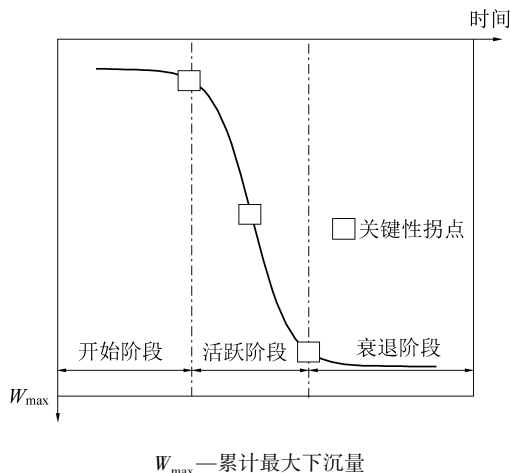


图1 矿区地表下沉随时间变化的3阶段

Fig.1 Three stages of surface subsidence varying with time in mining area

1.2 3种常用下沉量时间函数模型

现有文献[14-15]中已有较多代表性的时间函数模型被应用于研究矿区地表沉陷动态过程,常用的3种时间函数模型各有千秋,分别为幂指数Knothe时间模型、Logistic模型和Weibull模型。

1.2.1 幂指数Knothe时间模型

Knothe模型是波兰学者Knothe于1952年提出的可用于描述地表动态下沉的时间函数模型^[16],幂指数Knothe模型^[17]为修正的Knothe时间函数模型,其基本函数表达式为

$$W(t) = W_{\max} (1 - e^{-bt})^m \quad (1)$$

式中: $W(t)$ 为 t 时刻某地表沉陷点的瞬时下沉量; W_{\max} 为地表沉陷稳定后达到的最大下沉量; b 和 m 为Knothe模型待估参数,定义为影响地表下沉规律且与采场上覆岩层特性有关的参数。

对式(1)时间函数进行一阶和二阶求导运算,可得到下沉速度 v 以及下沉加速度 a 关于时间 t 的函数,函数表达式分别为

$$v(t) = W_{\max} b m e^{-bt} (1 - e^{-bt})^{m-1} \quad (2)$$

$$a(t) = W_{\max} [-mb^2 e^{-bt} (1 - e^{-bt})^{m-1} + m(m-1)b^2 e^{-2bt} (1 - e^{-bt})^{m-2}] \quad (3)$$

式中: $v(t)$ 为 t 时刻某地表沉陷点的瞬时下沉速度; $a(t)$ 为 t 时刻某地表沉陷点的瞬时下沉加速度。

1.2.2 Logistic模型

Logistic模型是荷兰数学家Verhulst于1938年最早提出的生物增长模型^[18],其“S型”增长曲线所

描述的某指标时间序列变化过程与矿区地表沉陷单点下沉的物理过程较相似。下沉量函数表达式 $W(t)$ 、下沉速度时间函数 $v(t)$ 以及下沉加速度时间函数 $a(t)$ 分别为

$$W(t) = \frac{W_{\max}}{1 + ce^{-dt}} \quad (4)$$

$$v(t) = \frac{W_{\max} c d e^{-dt}}{(1 + ce^{-dt})^2} \quad (5)$$

$$a(t) = -\frac{W_{\max} c d^2 e^{-dt} (1 - ce^{-dt})}{(1 + ce^{-dt})^3} \quad (6)$$

式中: c 和 d 为Logistic模型待估参数,定义为影响地表下沉规律且与采场上覆岩层特性有关的参数。

1.2.3 Weibull模型

Weibull模型是韦布尔于1951年提出的统计分布模型^[19],其时间函数可较准确地拟合和描述沉陷区地表观测点的下沉曲线形态。下沉量时间函数 $W(t)$ 、下沉速度时间函数 $v(t)$ 以及下沉加速度时间函数 $a(t)$ 的表达形式分别为

$$W(t) = W_{\max} (1 - e^{-f t^k}) \quad (7)$$

$$v(t) = W_{\max} f k t^{k-1} e^{-f t^k} \quad (8)$$

$$a(t) = W_{\max} f k e^{-f t^k} [(k-1)t^{k-2} - t^{2(k-1)} f k] \quad (9)$$

式中: f 和 k 为Weibull模型待估参数,定义为影响地表下沉规律且与采场上覆岩层特性有关的参数。

2 影响各时间函数模型曲线拟合的因素分析

2.1 时间序列模型地表下沉待估参数分析

1) 幂指数Knothe模型待估参数 b 和 m 。以模拟值研究幂指数Knothe模型中待估参数 b 和 m 对模型曲线的影响,首先假设式(1)中 $W_{\max} = -2\,000\text{ mm}$, $t = 0 \sim 100\text{ d}$, $m = 10$,则当 b 取值为0.08, 0.1, 0.15, 0.2时,幂指数Knothe模型随待估参数 b 变化的下沉曲线、下沉速度曲线以及下沉加速度曲线如图2a—图2c所示;同理假设式(1)中 $W_{\max} = -2\,000\text{ mm}$, $t = 0 \sim 100\text{ d}$, $b = 0.1$,当 m 取值为1、5、10、100时,幂指数Knothe模型随待估参数 m 变化的下沉曲线、下沉速度曲线以及下沉加速度曲线如图2d—图2f所示。由图2可知,随着参数 b 的增大,下沉曲线越来越陡,地表单点开始下沉至衰减阶段所需时间越来越短,最大下沉速度与加速度推前且大小变化明显;相反,待估参数 m 的增大只会致使地表下沉达到最大速度的时间延迟,而最大下沉速度与加速度的大小相差无几。

2) Logistic模型待估参数 c 和 d 。以模拟值研究Logistic模型中待估参数 c 和 d 对模型曲线的影响,首先假设式(4)中 $W_{\max} = -2\,000\text{ mm}$, $t = 0 \sim 200\text{ d}$, $c =$

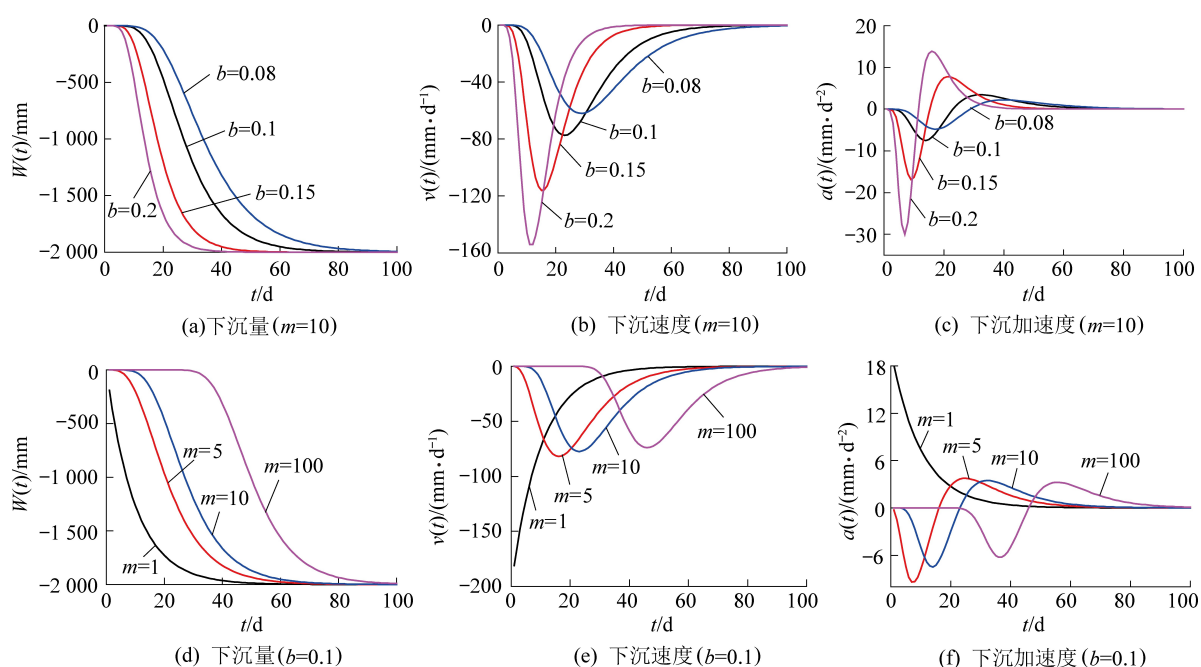


图 2 幂指数 Knothe 模型待估参数对下沉量、速度和加速度的影响

Fig.2 The influence of parameters in exponent Knothe model on sinking value, velocity and acceleration

1 000, 则当 d 取值为 0.08, 0.1, 0.15, 0.2 时, Logistic 模型随待估参数 d 变化的下沉曲线、下沉速度曲线以及下沉加速度曲线如图 3a—图 3c 所示; 同理假设式 (4) 中 $W_{\max} = -2\ 000\text{ mm}$, $t = 0 \sim 200\text{ d}$, $d = 0.1$, 当 c 取值为 1 000, 5 000, 8 000, 10 000 时, Logistic 模型随待估参数 c 变化的下沉曲线、下沉速度曲线以及下沉加速度曲线如图 3d—图 3f 所示。由图 3 中可

以看出, 参数 d 对各曲线 (图 3a—图 3c) 的形态以及数值上影响较显著, 最大下沉速度和加速度均存在时间滞后; 而参数 c 的变化只会致使各曲线 (图 3d—图 3f) 发生平移变换而无伸缩变换。

3) Weibull 模型待估参数 f 和 k 。以模拟值研究 Weibull 模型中待估参数 f 和 k 对模型曲线的影响, 首先假设式 (7) 中 $W_{\max} = -2\ 000\text{ mm}$, $t = 0 \sim 200\text{ d}$,

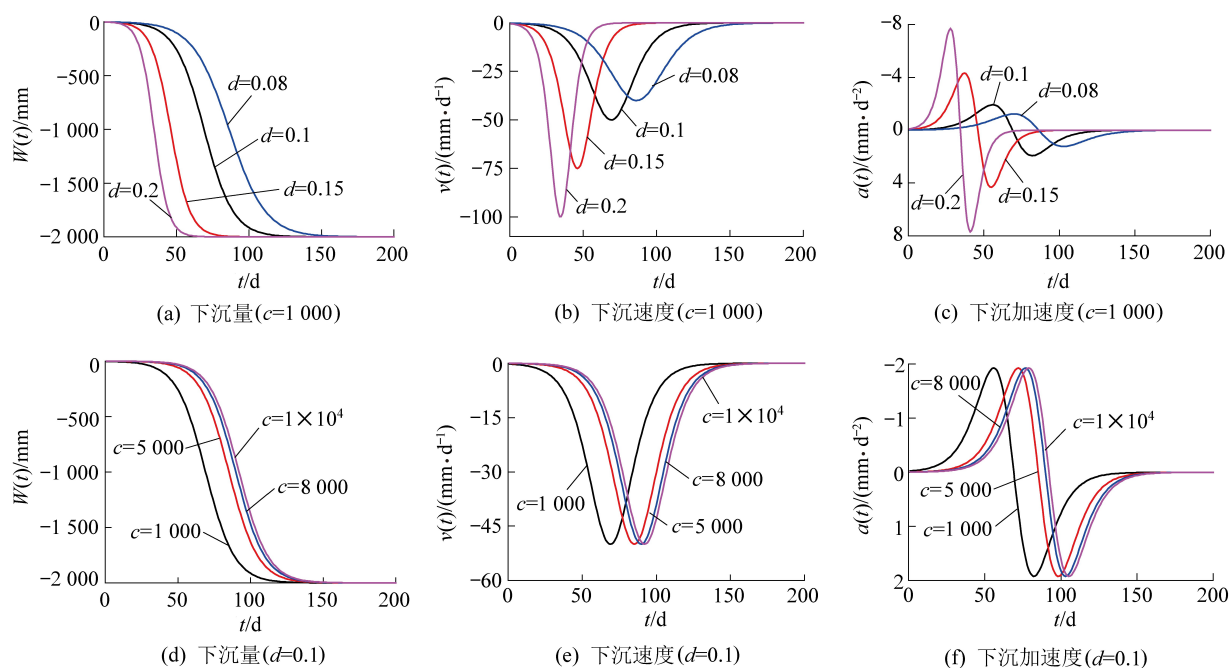


图 3 Logistic 模型待估参数对下沉量、速度和加速度的影响

Fig.3 The influence of parameters in Logistic model on sinking value, velocity and acceleration

$k=2.1$, 则当 f 取值为 0.95×10^{-4} , 3×10^{-4} , 5×10^{-4} , 1×10^{-3} 时, Logistic 模型随待估参数 f 变化的下沉曲线、下沉速度曲线以及下沉加速度曲线如图 4a—图 4c 所示; 同理假设式(7)中 $W_{\max} = -2\ 000\text{ mm}$, $t=0 \sim 200\text{ d}$, $f=1 \times 10^{-4}$, 当 k 取值为 2, 2.1, 2.2, 2.5 时, Weibull 模型随待估参数 k 变化的下沉曲线、下沉速度曲线以

及下沉加速度曲线如图 4d—图 4f 所示。由图 4 中可以看出, 随着参数 f 的减小, 地表单点沉陷的三阶段时期延长, 沉陷最大速度和加速度也随之减小; 随着 k 的增大, 地表下沉达到最大下沉速度和加速度的时间会推前, 沉陷稳定所需时间缩短。

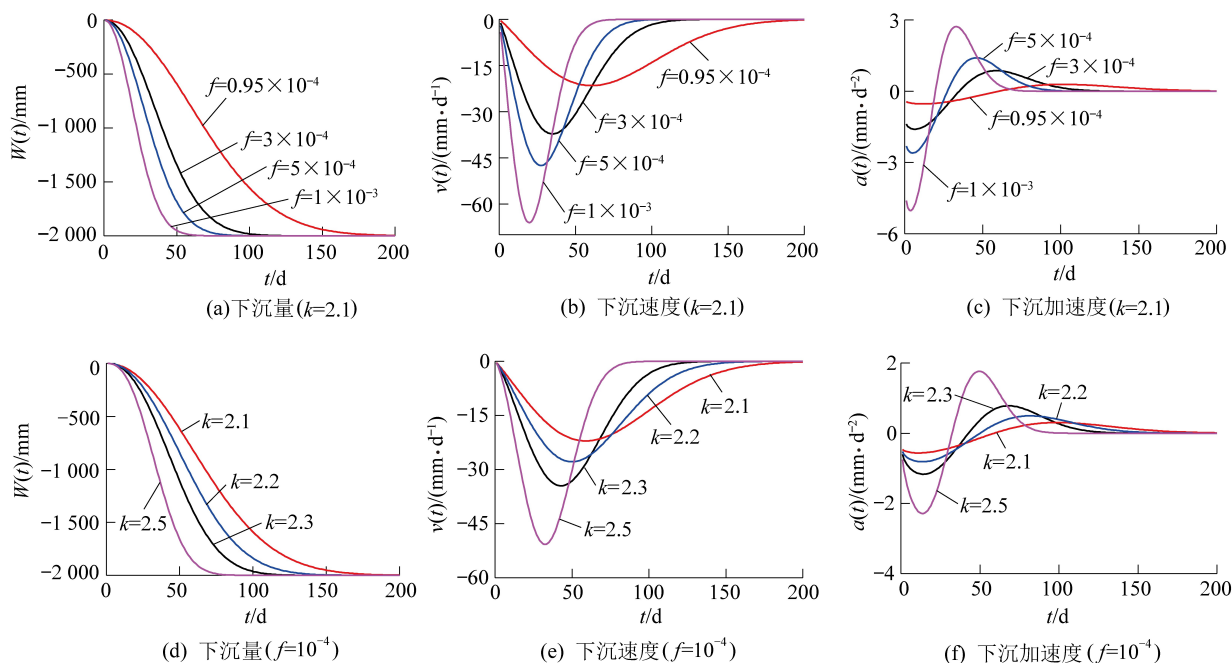


图4 Weibull 模型待估参数对下沉量、速度和加速度的影响

Fig.4 The influence of parameters in Weibull model on sinking value, velocity and acceleration

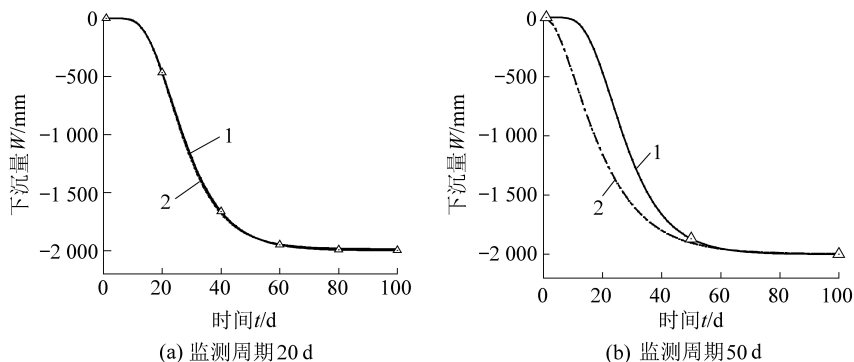
综上所述,各时间序列模型地表下沉待估参数的大小对曲线拟合形态有较大影响,需要选择合适的下沉参数才能更准确地拟合沉陷区观测点下沉时间序列。因此,综合考虑到3种时间函数模型的非线性特征以及算法求解难易程度,选用 LM (Levenberg-Marquard)^[20] 算法求解非线性最小二乘问题,求得待估参数最优值。

2.2 关键点缺失对各时间函数拟合的影响

依据上述模拟数据分析关键点缺失对3种时

间函数曲线拟合的影响,首先假定不同监测周期情况下,将各组模拟数据中加入正态随机误差,使其模拟环境更接近真实情况;然后采用 LM 算法求解各待估参数,以建立时间序列模型,最终将得到的最佳下沉参数拟合的曲线结果与模拟曲线进行对比,分析关键点缺失对曲线函数拟合的影响。

幂指数 Knothe 模型不同监测周期下(20、50 d)的拟合结果(图5)。



1—模拟曲线;2—拟合曲线;△—观测点

图5 幂指数 Knothe 模型不同监测周期下的拟合结果对比

Fig.5 Comparison of fitting results of exponent Knothe model under different monitoring periods

Logistic 模型不同监测周期(20、50、60、75 d)下的拟合结果如图 6 所示;Weibull 模型不同监测周

期(20、60、75 d)下的拟合结果如图 7 所示。

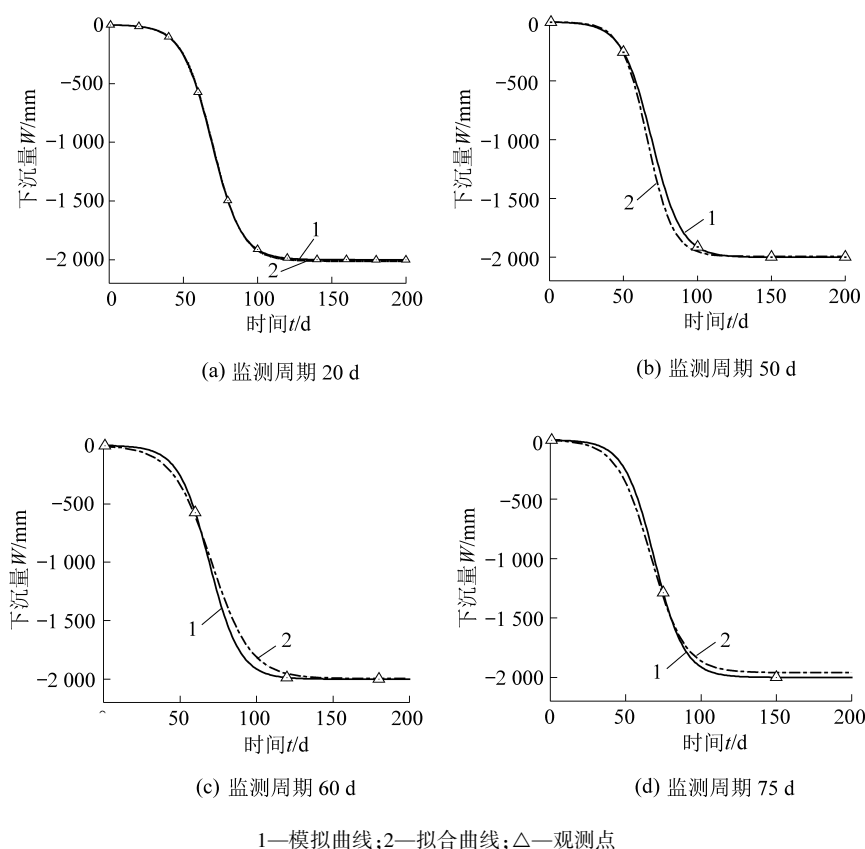


图 6 Logistic 模型不同监测周期下的拟合结果对比

Fig.6 Comparison of fitting results of Logistic model under different monitoring periods

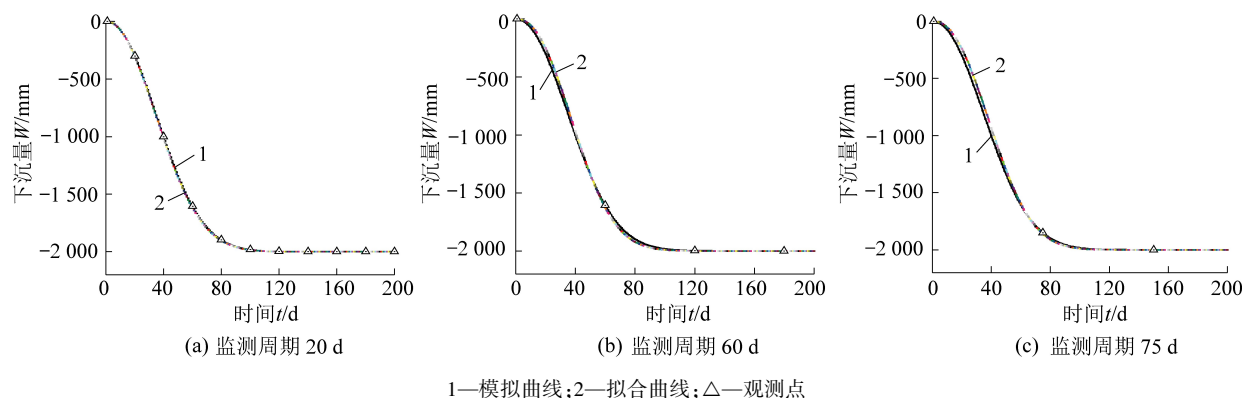


图 7 Weibull 模型不同监测周期下的拟合结果对比

Fig.7 Comparison of fitting results of Weibull model under different monitoring periods

结合图 5—图 7 可发现,当观测点几乎涵盖曲线上任意关键点且较均匀分布在动态下沉曲线上时(图 5a、图 6a 以及图 7a),监测周期为 20 d 的各模型拟合曲线与模拟曲线吻合度较高(最大均方根差约为 13 mm);然而,随着监测周期增大(图 5b、图 6b 和 6c),观测点未覆盖曲线特征点处,拟合曲线开始偏离模拟曲线,吻合度和精度相比监测周期 20 d 的拟合结果均较低,最大均方根差达 293 mm;此外,对比图 6b 和 6d 发现,监测周期为 75 d 的观测点个

数虽小于观测周期为 50 d 的监测次数,但前者相对于后者涵盖的特征点位置明显优于后者,所以其拟合结果也明显优于后者,就均方根误差而言,减少了 7 mm(75 d 的均方根误差约为 53 mm;50 d 的均方根误差约为 60 mm)。综上所述,矿区地表沉降监测周期是否涵盖下沉过程的关键点对时间函数模型的拟合结果有较大影响,因此,联合多源监测数据加密观测点监测周期,可提高各下沉时间函数曲线的拟合精度。

3 联合多源监测数据的矿区下沉时序模型试验

3.1 袁二矿区 DInSAR 监测

袁二煤矿位于安徽省涡阳县内,采区 7221 工作面上覆较多的人造水渠和农田,工作面走向长 544 m,倾向长 110 m,采高达 4.5 m,于 2017-12-06 开始回采。在开采工作面的同时,淮北矿业集团建立岩移观测站并布置走向倾向观测线(水准首次联测时间为 2017-10-08,监测周期不等),研究 7221 工作面开采对采区上方地表沉降变形以及周边建构物的影响。然而,这些水准点受地理位置以及自然环境的影响,监测数量、监测范围和监测周期都相对有限,因此,需要在该煤矿工作面回采阶段进行简便有效的 DInSAR 监测。选取袁二煤矿 7221 工作面开采期间 9 景 C 波段的哨兵 1 A 影像图(第 1 幅雷达影像为 2017-11-04,重访周期为 12 d),共形成 8 个干涉对,影像下载详细参数见表 1,干涉对详细参数见表 2。

表 1 影像下载参数

Table 1 The parameters of image

影像	波段	波长/cm	极化方式	工作模式	轨道号	分辨率/(m×m)
哨兵 1 A	C	5.6	VV	IW	142	5×20

表 2 干涉对详细参数

Table 2 The detail parameters of interference pairs

序号	日期		垂直基线/ m	时间基线/ d
	主影像	辅影像		
1	2017-11-04	2017-11-16	-21.928	12
2	2017-11-16	2017-11-28	-69.648	12
3	2017-11-28	2017-12-10	42.099	12
4	2017-12-10	2017-12-22	92.710	12
5	2017-12-22	2018-01-03	17.242	12
6	2018-01-03	2018-01-15	-60.407	12
7	2018-01-15	2018-01-27	-38.809	12
8	2018-01-27	2018-02-08	-62.156	12

结合研究区 DEM 数据(SRTM90),将 8 对干涉组合分别进行二轨法 DInSAR 差分处理,获取了 7221 工作面 2017-11-04—2018-02-08 地表时序沉降形变,2017-11-04—2018-02-08 的地表累计沉降形变如图 8 所示,并从 InSAR 时序形变图中提取工作面走向的剖面下沉序列曲线,如图 9 所示。为验证 DInSAR 技术测量的精度,将水准各观测线路与 DInSAR 监测的结果进行对比,由于两者时间基准不一致,故通过对水准测量时序值进行非线性插值拟合,获得干涉对研究时段的沉降值,以尽可能减少因时间间隔不统一而带来的误差,最终得到

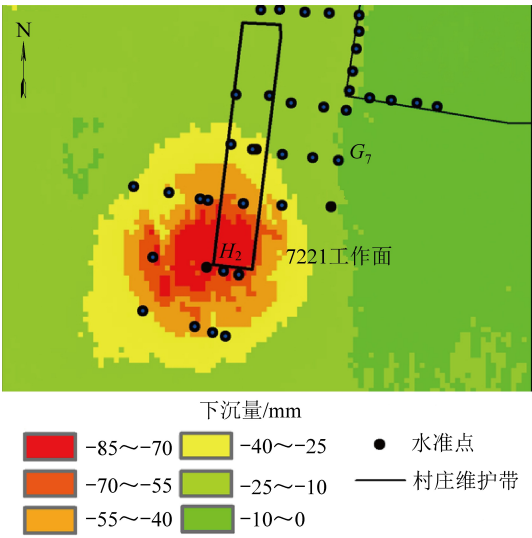


图 8 地表沉降形变

Fig.8 The deformation map of surface subsidence
RMSE 为 0.017 7 m,水准点 H_2 处的相对误差为 4.02%,水准点 G_7 处的相对误差为 6.80%。

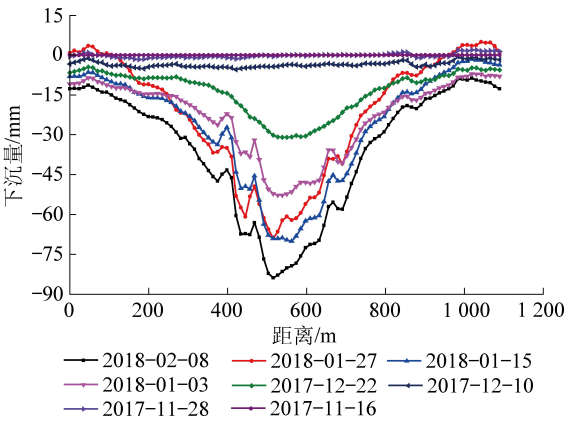


图 9 工作面走向剖面下沉时序图

Fig.9 Subsidence sequence diagram of working face strike section

3.2 联合 InSAR 与水准数据建立下沉时序模型

为验证基于多源监测数据建立的下沉时序模型,可提高曲线拟合精度,以上述基于 DInSAR 技术获取相应水准点的 InSAR 时序监测数据(2017-11-04—2018-02-08,监测周期 12 d)和岩移观测站联测的水准数据(2017-10-08—2018-07-22,前期监测周期为 1 个月,后期监测周期为 7 d)为联合对象,分别建立幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型和 Weibull 模型,并分析各曲线拟合结果。在 SAR 影像成像期间内,选取的试验水准点主要位于下沉开始和活跃阶段(结合图 9),因沿工作面走向剖面的北部各监测点沉降量均很小,并不能准确描述地表面点下沉三阶段的变形特征,故从获取的 7221 工作面地表沉降时序形变图上,选取邻近下沉盆地中

心 H 观测线上的水准点 H_2 和下沉盆地边沿 G 观测线上的水准点 G_7 作为试验对象(具体位置如图 8 所示),分别基于联合多源监测数据(水准和 InSAR 数

据)和仅基于单一监测数据(水准数据)建立了 3 种下沉量、下沉速度时间函数模型,2 种情况的对比结果如图 10、图 11 所示。

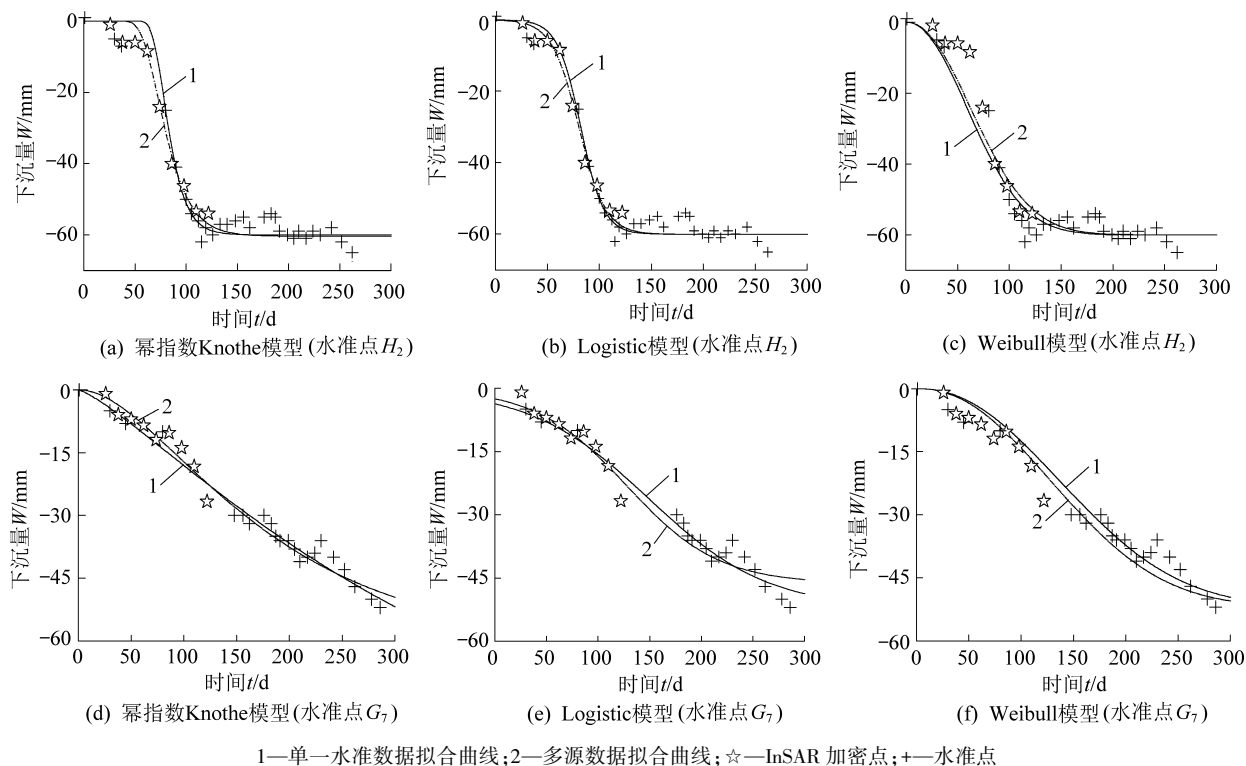


图 10 基于多源和单一数据拟合的下沉曲线结果对比

Fig.10 Comparisons of settlement curve results based on multi-source and single measurement

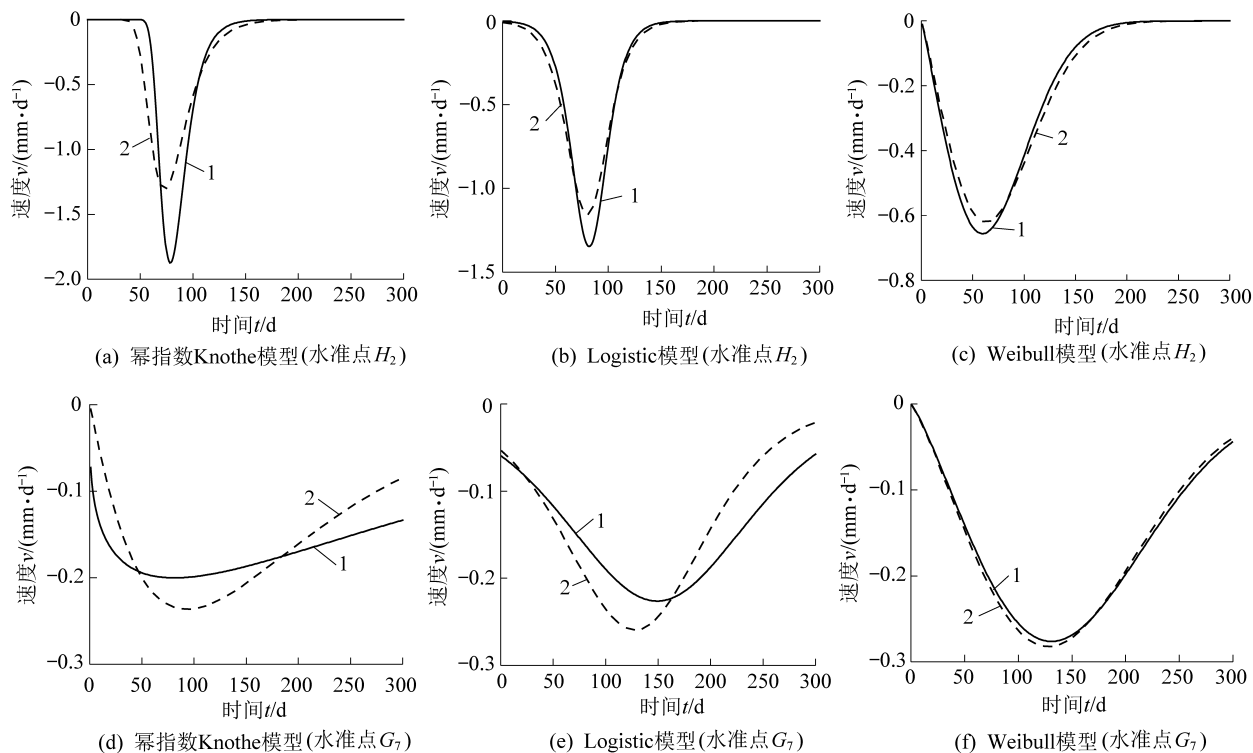


图 11 基于多源和单一数据拟合的速度曲线结果对比

Fig.11 Comparison of velocity curve results based on multi-source and single measurement

3.3 结果对比与分析

结合图 10 和图 11 试验水准点 H_2 和 G_7 建立的 3 种时间函数模型拟合结果作以下对比并分析:

1) 无论基于多源或单一监测数据而言,幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型和 Weibull 模型均能较好地拟合地表面点下沉的时间序列,以及较准确地描述沉陷区地表面点动态下沉三阶段(开始阶段、活跃阶段和衰退阶段),最大均方根误差约为 5.941 mm。下沉盆地中心试验水准点 H_2 下沉序列使用 Logistic 模型拟合效果最佳;下沉边沿水准点 G_7 下沉序列使用幂指数 Knothe 时间模型拟合均方根误差最小。

2) 图 10a、10b 中,水准点 H_2 下沉时间序列分别建立幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型,各时间函数模型拟合的曲线 1 和曲线 2 在时间段 100~300 d 上均无较大差异,吻合度较高,在时间段 0~50 d 上,由于加入的 4 期 InSAR 加密点,使得均方根误差相较于单一水准拟合分别减少了 10.22% 和 8.11%。而图 10c 中,Weibull 模型受基于多源和单一数据拟合结果影响较小,仅减少了 3.35%。图 11 中,曲线 1 和曲线 2 相比,虽最大沉降速度极值出现无明显差异,但出现最大沉降速度极值增大等问题,不利于评估地表动态破坏。试验对象点 H_2 的监测周期较好地涵盖了下沉三阶段中的各关键点,各水准点在下沉曲线上呈均匀分布状态,并未对各时间函数模型的曲线拟合造成较大影响。

3) 图 10d、图 10e 中,水准点 G_7 下沉时间序列基于 Logistic 和 Weibull 时间函数模型拟合的曲线 1 和曲线 2 吻合度较低,自时间轴上 100 d 后,二者出现一定偏离。其主要原因是:试验对象点 G_7 的监测周期变化较大(最长监测周期达 68 d),仅基于单一水准数据拟合的曲线 1 均出现最大下沉值、最大速度时间迟延现象(图 10、11e 和 11f),同样不利于评估地表受采动损害影响;相反,对于联合多源数据拟合的曲线 2 而言,加入的后 3 期 InSAR 加密点(2018-01-15—2018-02-08)对各模型的下沉曲线活跃阶段起到了较好的约束作用,拟合结果相比曲线 1 更确实。图 10d 中,幂指数 Knothe 模型相对于其他模型受关键点缺失影响较小,联合 InSAR 与水准的均方根误差较单一水准仅减少了 3.38%。

4 结 论

1) 针对难以全面研究沉陷区下沉变形的动态过程和单一监测手段可能会错失地表沉降阶段某些关键点的问题,通过模拟数据分析下沉待估参数以

及关键点缺失对幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型和 Weibull 模型 3 种时间函数曲线拟合的影响,发现随着监测周期间隔越长,曲线拟合精度越低,保证一定的监测周期,均方根误差最大可提高 95.56%。

2) 沉陷区观测点监测周期是否涵盖动态沉降中系列关键点对幂指数 Knothe 时间模型、Logistic 模型和 Weibull 模型拟合精度有较大影响,将 InSAR 监测数据作为加密点与水准监测数据整合,增加多余观测数据,生成新下沉时间序列建立下沉时间序列模型,可较好地约束模型曲线形态,提高曲线拟合精度和分析矿区地表动态沉降规律的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 许家林. 煤矿绿色开采 20 年研究及进展[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(9): 1-15.
XU Jialin. Research and progress of coal mine green mining in 20 years[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9): 1-15.
- [2] 胡炳南, 郭文砚. 我国采煤沉陷区建筑利用关键技术及其发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(4): 67-74.
HU Bingnan, GUO Wenyan. Key technologies and development directions of building utilization in coal mining subsidence areas in China[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(4): 67-74.
- [3] 陈磊, 赵学胜, 汤益先, 等. 结合 InSAR 的幂指数 Knothe 模型参数拟合与评估[J]. 岩土力学, 2018, 39(S2): 423-431.
CHEN Lei, ZHAO Xuesheng, TANG Yixian, et al. Parameters fitting and evaluation of exponent Knothe model combined with InSAR technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 423-431.
- [4] 杨泽发, 易辉伟, 朱建军. 基于 InSAR 时序形变的矿区全盆地沉降时空演化规律分析[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(7): 1515-1522.
YANG Zefa, YI Huiwei, ZHU Jianjun, et al. Spatio-temporal evolution law analysis of whole mining subsidence basin based on InSAR-derived time-series deformation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(7): 1515-1522.
- [5] 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 Yucheng. Dynamic surface subsidence curve model based on Weibull time function[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2409-2413.
- [6] NG A H M, CHANG H C, GE L L, et al. Assessment of radar interferometry performance for ground subsidence monitoring due to underground mining[J]. Earths, Planets and Space, 2009, 61(6): 733-745.
- [7] 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 Wenzi, ZOU Youfeng, REN Xiaofang. Research on logistic model in forecasting subsidence single-point during mining[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(4): 486-489.

- [8] 郭文兵,马志宝,白二虎. 我国煤矿“三下一上”采煤技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2020,48(9):16-26.
GUO Wenbing, MA Zhibao, BAI Erhu. Current status and prospect of coal mining technology under buildings, water bodies and linear structure, and above confined water in China[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(9):16-26.
- [9] 王军保,刘新荣,刘小军. 开采沉陷动态预测模型[J]. 煤炭学报,2015,40(3):516-521.
WANG Junbao, LIU Xinrong, LIU Xiaojun. Dynamic prediction model for mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 2015,40(3):516-521.
- [10] 魏 涛,王 磊,池深深,等. 开采沉陷动态精准预计的时效 Knothe 函数方法研究[J]. 金属矿山,2017,46(10):16-22.
WEI Tao, WANG Lei, CHI Shenshen, *et al.* Research on dynamic precise prediction method of mining subsidence based on aged Knothe Function[J]. Metal Mine, 2017,46(10):16-22.
- [11] 高延法,贾君莹,李 冰,等. 地表下沉衰减函数与塌陷区稳定性分析[J]. 煤炭学报,2009,34(7):892-896.
GAO Yanfa, JIA Junying, LI Bing, *et al.* The attenuation function of surface subsidence and stability analysis due to mining[J]. Journal of China Coal Society, 2009,34(7):892-896.
- [12] 刘宝琛,廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京:中国工业出版社,1965:97-99.
- [13] LI Z W, DING X L, ZHENG D W, *et al.* Least squares-based filter for remote sensing image noise reduction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(7):2044-2049.
- [14] 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 Zhengshuai, DENG Kazhong. Richards model of surface dynamic subsidence prediction in mining area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(6):1664-1668.
- [15] 王 一,张 凯. 采动地表动态下沉的时间函数模型研究[J]. 煤矿开采,2017,22(5):68-70.
WANG Yi, ZHANG Kai. Study of time function model of surface subsidence dynamic under mining [J]. Coal Mining, 2017, 22(5):68-70.
- [16] HU Q F, CUI X M, WANG G, *et al.* Key Technology of predicting dynamic surface subsidence based on Knothe time function[J]. Journal of Software, 2011,6(7):1273-1280.
- [17] 刘玉成,曹树刚,刘延保. 改进的 Konthe 地表沉陷时间函数模型[J]. 测绘科学,2009,34(5):16-17.
LIU Yucheng, CAO Shugang, LIU Yanbao. The improved Knothe time function for subface subsidenec [J]. Science of Surveying and Mapping, 2009,34(5):16-17.
- [18] 徐洪钟,李雪红. 基于 Logistic 增长模型的地表下沉时间函数[J]. 岩土力学,2005,26(S1):155-157.
XU Hongzhong, LI Xuehong. Time function of surface subsidence based on Logistic growth model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(S1):155-157.
- [19] LI S B, LU H J. Application of Weibull distribution in calculating ground deformation [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012(256-259):15-18.
- [20] 齐丽岩. 光滑和非光滑方程组的 Levenberg-Marquardt 型算法的研究[D]. 大连:大连理工大学,2018.
QI Liyan. Study on Levenberg-Marquardt-type Algorithms for solving Smooth and Nonsmooth Equations[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.