



# 矿业科学学报

## JOURNAL OF MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY

融合概率积分法与SBAS-InSAR的开采沉陷计算方法

丁星丞, 李培现, 康新亮, 王明亮, 张涛, 郝登程

**Calculation method for mining subsidence combining probability integral method and SBAS-InSAR**

引用本文:

丁星丞, 李培现, 康新亮, 等. 融合概率积分法与SBAS-InSAR的开采沉陷计算方法[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(1): 48–56.

DING Xingcheng, LI Peixian, KANG Xinliang, et al. Calculation method for mining subsidence combining probability integral method and SBAS-InSAR[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2025, 10(1): 48–56.

### 您可能感兴趣的其他文章

#### 1. 基于改进HMM纠偏算法的露天矿车辆高精度定位方法

引用本文: 阮顺领, 李孟, 顾清华, 等. 基于改进HMM纠偏算法的露天矿车辆高精度定位方法[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 381–389.

#### 2. 基于多尺度卷积神经网络和LBP算法的浮选工况识别

引用本文: 蒋小平, 刘俊威, 王乐乐, 等. 基于多尺度卷积神经网络和LBP算法的浮选工况识别[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(2): 202–212.

丁星丞,李培现,康新亮,等.融合概率积分法与SBAS-InSAR的开采沉陷计算方法[J].矿业科学学报,2025,10(1):48-56. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024938

DING Xingcheng, LI Peixian, KANG Xinliang, et al. Calculation method for mining subsidence combining probability integral method and SBAS-InSAR [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1):48-56. DOI:10.19606/j.cnki.jmst.2024938

## 融合概率积分法与SBAS-InSAR的开采沉陷计算方法

丁星丞<sup>1,2</sup>,李培现<sup>1</sup>,康新亮<sup>3</sup>,王明亮<sup>1</sup>,张涛<sup>1</sup>,郝登程<sup>4</sup>

1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;
2. 中国矿业大学(北京)内蒙古研究院,内蒙古鄂尔多斯 017010;
3. 西山煤电(集团)有限责任公司地质处,山西太原 030053;
4. 中国资源卫星应用中心,北京 100094

**摘要:**针对开采沉陷概率积分法参数反演过程中存在容易陷入局部最优解、反演结果无法准确预计边缘沉降的问题,提出将蜣螂优化算法应用于概率积分法参数反演,结合SBAS-InSAR沉降监测值获取矿区整体沉降信息。首先依据SBAS-InSAR技术监测形变的梯度信息获取可靠的矿区小梯度形变区域沉降值;然后将寻优能力强、准确度高的蜣螂优化算法应用于概率积分法参数反演,计算获取矿区大梯度形变区域沉降值;最后基于距离平方加权法将概率积分法预计沉降值与SBAS-InSAR沉降监测值融合计算,得到开采沉陷变形信息。以山西省古交市马兰矿10604工作面作为研究对象,采用实地62个水准监测点数据与25景Sentinel-1A数据进行实验分析。结果表明,蜣螂优化算法参数反演结果优异,数据融合后可获取准确的沉降信息,计算精度相对于单独使用SBAS-InSAR和概率积分法分别提高59%与32%。

**关键词:**开采沉陷;概率积分法;蜣螂优化算法;SBAS-InSAR;数据融合

中图分类号:TD 325

文献标志码:A

文章编号:2096-2193(2025)01-0048-09

## Calculation method for mining subsidence combining probability integral method and SBAS-InSAR

DING Xingcheng<sup>1,2</sup>, LI Peixian<sup>1</sup>, KANG Xinliang<sup>3</sup>, WANG Mingliang<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>1</sup>, HAO Dengcheng<sup>4</sup>

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
2. Inner Mongolia Research Institute, China University of Mining and Technology-Beijing, Ordos Inner Mongolia 017010, China;
3. Geological Department, XiShan Coal Electricity Group Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030053, China;
4. China Centre for Resources Satellite Data and Application, Beijing 100094, China

**Abstract:** To address the issues of local optima and inaccurate edge subsidence predictions in the parameter inversion process of the mining subsidence probability integral method, the authors propose applying the dung beetle optimizer algorithm to invert probability integral method parameters and integrate SBAS-InSAR subsidence monitoring values to obtain comprehensive subsidence information for the mining area. The method first utilizes gradient information from SBAS-InSAR technology to obtain reliable subsidence values for areas with small deformation gradients in the mining area. It then applies to the

收稿日期:2024-02-23 修回日期:2024-05-15

基金项目:国家自然科学基金(52174160);河北省自然科学基金—生态智慧矿山联合基金(E2020402086);煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室开放基金(2021-CMCU-KF014)

作者简介:丁星丞(1999—),男,河北保定人,硕士研究生,主要从事矿山开采沉陷与岩层移动控制方面的研究工作。E-mail: sqf2200204080@student.cumtb.edu.cn

dung beetle optimizer algorithm, known for its strong optimization capability and high accuracy, to invert the parameters of the probability integral method and calculate subsidence values for areas with large deformation gradients. Finally, the subsidence values from the probability integral method and SBAS-InSAR monitoring are fused using a quadratic distance weighting method approach to derive the mining subsidence deformation information for the mining area. Using the 10604 working face of the Malan Mine in Gujiao City, Shanxi Province, as the study area, experimental analysis was conducted using data from 62 field leveling monitoring points and 25 Sentinel-1A images. The results indicate that the parameter inversion using the dung beetle optimizer algorithm is excellent, and accurate subsidence information can be obtained after data fusion. This approach improves accuracy by 59% compared to using SBAS-InSAR alone and by 32% compared to using the probability integral method alone.

**Key words:** mining subsidence; probability integral method; dung beetle optimizer algorithm; SBAS-InSAR; data fusion

我国是一个产煤大国,同时也是煤炭消费大国。2023年我国煤炭消费量,占一次能源消费总量55.3%,较2022年增长5.6%。随着煤炭消耗量的逐年增加,煤炭开采的范围和强度不断扩大。煤炭开采破坏周围区域的岩体原始应力平衡,在应力达到新平衡的过程中会产生崩塌、地面塌陷、地裂缝、滑坡和泥石流等地质灾害,威胁矿区周围环境和人民的生命财产安全<sup>[1-2]</sup>。为预防地质灾害,保护地表基础设施并确保矿区开采工作的正常进行,开展矿区地表沉降监测、预计工作很有必要<sup>[3-5]</sup>。

概率积分法(Probability Integral Method, PIM)是我国煤矿开采沉陷预计中较为成熟且应用最广泛的方法,其预计精度主要取决于所选参数的可靠性。这些参数受各种地质采矿因素影响,通过简单的函数计算无法准确表达<sup>[6-8]</sup>。随着机器学习的不断发展,许多学者通过智能优化算法进行参数反演研究。李靖宇等<sup>[9]</sup>将狼群算法引入概率积分法,成功获取了安徽省某矿区1414(1)工作面的预计参数。杨晓玉等<sup>[10]</sup>通过结合稳健估计与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)进行概率积分法参数反演,得到了更为稳健、准确的参数。刘阔等<sup>[11]</sup>在经典粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)的基础上,引入自适应惯性权重以及Metropolis准则,提出P-SA-PSO算法,获取了某工作面的预计参数,通过比较GA、PSO算法以及加入自适应惯性权重优化的粒子群算法P-PSO反演参数的结果,发现该算法精度更优。XUE等<sup>[12]</sup>提出了一种群智能优化算法,即蜣螂优化(Dung Beetle Optimizer, DBO)算法,模拟蜣螂的生物行为,具有寻优能力强、准确度高的特点。刘艺梦等<sup>[13]</sup>采用DBO算法优化BP神经网络模型的输入权重和阈值,构建根区温度预测模型,提高模型的预测性能。

董奕含等<sup>[14]</sup>为提高近地表横波速度计算精度,将DBO算法与瑞雷波勘探方法结合,有效获取了地层横波速度。

传统的矿区地表沉陷监测工作主要采用水准测量和全球定位系统(GNSS)等手段,对矿区特征点进行测量<sup>[15-16]</sup>。采用概率积分法进行参数反演,可以获取开采影响范围内任意点的沉降信息,再通过空间插值方法获取完整的沉降信息。然而概率积分法在沉降边缘处存在收敛过快的问题,导致模型无法准确预计沉降边缘的形变<sup>[17-18]</sup>。合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术是一种较为成熟的地表形变监测新技术,可用于提取地表小梯度形变,为矿区地表沉降监测提供了新的方法。王新龙等<sup>[19]</sup>利用永久散射体InSAR(Persistent scatterer InSAR, PS-InSAR)技术监测山西省某矿区地表沉降情况,通过与GPS实地监测数据对比,验证了监测结果的可靠性。王凤云等<sup>[20]</sup>采用小基线集InSAR(Small Baseline Subset InSAR, SBAS-InSAR)技术监测山东省某矿区地表形变,通过与水准数据对比发现,在沉降值较小的区域,SBAS-InSAR沉降监测精度较高。然而,煤矿开采引起的地表沉陷通常具有沉降速率快、沉降值大的特点,受制于SAR卫星影像的固有特性,在沉降中心的大梯度形变区域会出现严重的失相干现象,导致无法准确获取沉降中心的形变信息<sup>[21-22]</sup>。

基于上述问题,首先采用SBAS-InSAR技术获取小梯度变形范围内的沉降值;然后结合水准实测沉降值,利用DBO算法进行概率积分法参数反演,得到大梯度变形范围内的沉降值;最终在中间梯度形变区域,采用距离平方加权法将2种方法获取到的沉降值进行融合,得到完整的沉降信息。

## 1 基于 DBO 算法的概率积分法参数反演方法

### 1.1 概率积分模型

概率积分法是一种基于随机介质理论的数学模型, 用于预计煤矿开采引起地表沉陷。该方法

$$W(x, y) = \frac{1}{W_0} W^0(x) W^0(y) \quad (1)$$

$$\begin{cases} W^0(x) = \frac{W_0}{2} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\pi} \frac{q \tan \beta}{H_0}} e^{-u^2} du - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\pi} \frac{[x - (D_3 - S_3 - S_4)] \tan \beta}{H_0}} e^{-u^2} du \right\} \\ W^0(y) = \frac{W_0}{2} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\pi} \frac{q \tan \beta}{H_1}} e^{-u^2} du - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{\pi} \frac{[y - (D_1 - S_1 - S_2)] \frac{\sin(\theta + \alpha)}{\sin \theta} \tan \beta}{H_2}} e^{-u^2} du \right\} \\ W_0 = mq \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $W_0$  为地表最大下沉值,  $m$ ;  $W^0(x)$  为倾斜方向充分采动时走向主断面上地表点的下沉值,  $m$ ;  $W^0(y)$  为走向方向充分采动时倾向主断面上地表点的下沉值,  $m$ ;  $u$  为概率积分的开采单元;  $D_3$ 、 $D_1$  分别为工作面走向、倾向长度,  $m$ ;  $m$  为平均采高,  $m$ ;  $q$  为下沉系数;  $\alpha$  为煤层倾角,  $(^\circ)$ ;  $\beta$  为主要影响角,  $(^\circ)$ ;  $H_0$  为平均采深,  $m$ ;  $H_1$  和  $H_2$  分别为下山、上山开采高度,  $m$ ;  $\theta$  为开采影响传播角,  $(^\circ)$ ;  $S_1$  和  $S_2$  分别为下山、上山拐点偏移距,  $m$ ;  $S_3$  和  $S_4$  分别为左、右拐点偏移距,  $m$ 。

### 1.2 DBO 算法基本原理

DBO 算法主要来源于蜣螂的滚球、跳舞、觅食、偷窃和繁殖行为<sup>[12]</sup>。在没有障碍物时, 蜣螂受光照影响进行滚球行为, 滚球蜣螂的位置可以表示为

$$x_i(t+1) = x_i(t) + akx_i(t-1) + b\Delta x, \\ \Delta x = |x_i(t) - X^*| \quad (3)$$

式中,  $t$  为当前迭代次数;  $x_i(t)$  为第  $i$  只蜣螂在第  $t$  次迭代时的位置;  $k \in (0, 0.2]$  为挠度系数;  $b \in (0, 1]$  为定值;  $a$  为自然系数, 为  $-1$  或  $1$ ;  $X^*$  为全局最差位置;  $\Delta x$  为模拟光强的变化。

存在障碍物时, 蜣螂通过跳舞行为来重新定位。此时可以表示为

$$x_i(t+1) = x_i(t) + \tan \theta_0 |x_i(t) - x_i(t-1)| \quad (4)$$

式中,  $\theta_0 \in [0, \pi]$  为挠度角。

繁殖蜣螂选择产卵的区域, 可以表示为

$$\begin{aligned} Lb^* &= \max[X^*(1-R), Lb] \\ Ub^* &= \min[X^*(1+R), Ub] \\ R &= 1 - t/T_{\max} \end{aligned} \quad (5)$$

将采区划分为无数个微小单元, 单元开采引起的地表下沉视作随机事件, 用概率积分的方法预计开采引起的地表沉降值。工作面开采地表上任意点  $(x, y)$  的沉降值  $W(x, y)$  可根据式(1)、式(2)进行计算。

式中,  $X^*$  为当前局部最佳位置;  $Lb^*$  和  $Ub^*$  分别为产卵区下限和上界;  $T_{\max}$  为最大迭代次数;  $Lb$  和  $Ub$  分别代表优化问题的下界和上界。

在迭代过程中, 卵球的位置可以表示为

$$B_i(t+1) = X^* + \mathbf{b}_1 [B_i(t) - Lb^*] + \mathbf{b}_2 [B_i(t) - Ub^*] \quad (6)$$

式中,  $B_i(t)$  为第  $t$  次迭代时第  $i$  个卵球的位置;  $\mathbf{b}_1$  和  $\mathbf{b}_2$  为  $1 \times D$  的 2 个独立随机向量;  $D$  为优化问题的维数。

蜣螂出生后会出来觅食, 最佳觅食区域可以表示为

$$\begin{aligned} Lb^b &= \max[X^b(1-R), Lb], \\ Ub^b &= \min[X^b(1+R), Ub] \end{aligned} \quad (7)$$

式中,  $X^b$  为全局最佳觅食位置;  $Lb^b$  和  $Ub^b$  分别为最佳觅食位置的下界和上界。

此时, 觅食蜣螂的位置可以表示为

$$C_i(t+1) = C_i(t) + c_1 [C_i(t) - Lb^b] \\ + c_2 [C_i(t) - Ub^b] \quad (8)$$

式中,  $C_i(t)$  为第  $t$  次迭代时第  $i$  只觅食蜣螂的位置;  $c_1$  为一个服从正态分布的随机数;  $c_2$  为属于  $(0, 1)$  的随机向量。

有些蜣螂会从其他蜣螂那里偷粪球, 偷窃蜣螂的位置可以表示为

$$D_i(t+1) = X^b + Sg [|D_i(t) - X^*| + |D_i(t) - X^b|] \quad (9)$$

式中,  $D_i(t)$  为第  $i$  个偷窃蜣螂在第  $t$  次迭代时的位置;  $\mathbf{g}$  是一个  $1 \times D$  维的随机向量, 服从于正态分布;  $S$  为定值。

### 1.3 参数反演步骤

由式(1)、式(2)可知, 概率积分法预计开采沉

降过程中需要确定的参数有  $q$ 、 $\tan \beta$ 、 $\theta$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 。设开采后工作面某点  $(x, y)$  的实测沉降值为  $W_{xy}$ ，概率积分法预计沉降值为  $\hat{W}_{xy}$ ，以实测沉降值与预计沉降值之差平方和作为适应度函数：

$$f = \sum (W_{xy} - \hat{W}_{xy})^2 \quad (10)$$

主要步骤如下：

- (1) 初始化蝶群和 DBO 算法的参数。
- (2) 更新所有蝶的位置。
- (3) 更新当前最优解及其适应度值。
- (4) 重复上述步骤，直到满足迭代终止条件，输出全局最优解及其适应度值。

#### 1.4 模拟实验

模拟工作面采厚 2.0 m，煤层倾角 2°，倾向长 180 m，走向长 1 700 m，平均采深 430 m。概率积分法预计参数： $q = 0.8$ ， $\tan \beta = 2$ ， $\theta = 89.5^\circ$ ， $S_1 = 20.2$  m， $S_2 = 22.9$  m， $S_3 = S_4 = 21.5$  m。在开采区域上方设置走向观测线与倾向观测线，点间距均为 30 m，监测点均为 32 个，长度均为 930 m。模拟工作面及监测点如图 1 所示。

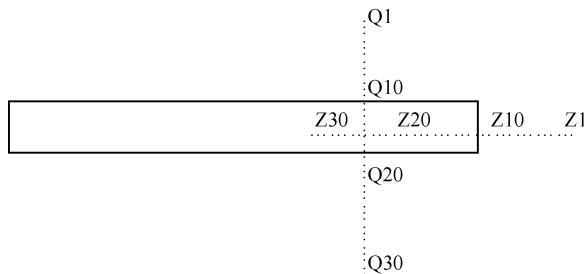


图 1 模拟工作面及监测点

Fig. 1 Simulated working face and simulated monitoring points

为检验 DBO 算法应用于概率积分法预计模拟沉降值的准确性，将其与经典的 PSO 算法和 GA 算法进行参数反演结果对比。为避免偶然误差的影响，在相同的实验条件下连续进行 10 次参数反演实验。种群数量设置为 300，迭代次数设置为 300。

表 1 为概率积分法模拟沉降值预计精度对比，表 2 为概率积分法参数反演结果对比，表 3 为概率积分法参数反演结果精度对比。由表 1、表 2 和表 3 可知，基于 DBO 算法的概率积分法预计的沉降值中误差为 1.15 mm，优于 PSO 算法和 GA 算法的反演结果，反演的  $q$ 、 $\tan \beta$  与  $\theta$  的相对误差不超过 1%，拐点偏移距对求参敏感度较低，相对误差不超过 10%。可见，DBO 算法模型适用于开采沉陷预计参数反演。

表 1 概率积分法模拟沉降值预计精度对比

Table 1 Comparison of accuracy of expected simulated subsidence values by PIM

方法	预计沉降值中误差/mm
PSO 算法	1.48
GA 算法	2.01
DBO 算法	1.15

表 2 概率积分法参数反演结果对比

Table 2 Comparison of parameter inversion results by PIM

参数	设计值	反演参数平均值		
		PSO 算法	GA 算法	DBO 算法
$q$	0.8	0.78	0.78	0.80
$\tan \beta$	2	2.02	2.01	2.00
$\theta/(\circ)$	89.5	89.50	89.52	89.58
$S_1/m$	20.2	18.99	19.39	20.90
$S_2/m$	22.9	20.56	20.28	22.24
$S_3/m$	21.5	20.31	20.46	21.67
$S_4/m$	21.5	19.68	18.75	23.52

表 3 概率积分法参数反演结果精度对比

Table 3 Comparison of accuracy of parameter inversion results by PIM

参数	反演参数相对误差/%		
	PSO 算法	GA 算法	DBO 算法
$q$	2.24	1.98	0.56
$\tan \beta$	0.76	0.74	0.13
$\theta$	0.01	0.02	0.09
$S_1$	6.01	4.00	3.47
$S_2$	10.23	11.43	2.90
$S_3$	5.53	4.82	0.80
$S_4$	8.48	12.80	9.40

## 2 融合原理介绍

### 2.1 InSAR 最大形变梯度理论

在干涉成像过程中，干涉条纹在地形起伏较小的区域比较稀疏，在地形起伏较大的区域则相对稠密。当某个区域在短时间内发生剧烈形变时，SAR 干涉影像中条纹过于密集，导致干涉图失相干，无法反映出真实的形变。这是 InSAR 技术可监测形变区域有限的原因，即形变梯度问题。

MASSONNET 等<sup>[23]</sup>发现雷达波长与像元边长之比的 1/2 刚好能被 InSAR 干涉图监测到。理想状态下 InSAR 能够监测的最大形变梯度为

$$d_{\max} = \lambda/2\mu \quad (11)$$

式中,  $d_{\max}$  为 InSAR 理论最大形变梯度;  $\mu$  为像元尺寸;  $\lambda$  为雷达波长。

在实际情况中, InSAR 常会受到几何失相干、时间失相干、雷达热噪声等影响, 最大形变梯度比理论值小<sup>[24]</sup>。BARAN 等<sup>[25]</sup>通过研究相干性对 InSAR 最大形变梯度的影响, 得出 InSAR 实际能够监测的最大形变梯度为

$$D_{\max} = d_{\max} + 0.002(\gamma - 1) \quad (12)$$

式中,  $D_{\max}$  为实际 InSAR 最大形变梯度;  $\gamma$  为相干性。

## 2.2 融合具体步骤

综合概率积分法与 SBAS-InSAR 方法的优势, 可以获取准确完整的矿区地表沉降信息。其具体步骤如下:

(1) 选取 SAR 影像, 获取矿区雷达视线 (Line of sight, LOS) 方向形变信息  $d_{\text{LOS}}$ 。为获取沉降信息, 需要将 LOS 向形变  $d_{\text{LOS}}$  转换为垂直向形变  $d_{\text{InSAR}}$ :

$$d_{\text{InSAR}} = d_{\text{LOS}} / \cos \theta \quad (13)$$

(2) 计算干涉对的平均相干系数  $\gamma$ , 得到  $N$  个

$$d = \begin{cases} d_{\text{InSAR}} \\ d_{\text{InSAR}} P_{\text{InSAR}} + d_{\text{PIM}} P_{\text{PIM}} \\ d_{\text{PIM}} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{InSAR}} = \frac{d_{\text{InSAR}}^2}{d_{\text{InSAR}}^2 + d_{\text{PIM}}^2} \\ P_{\text{PIM}} = \frac{d_{\text{PIM}}^2}{d_{\text{InSAR}}^2 + d_{\text{PIM}}^2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} d < d_{\text{theory}} \\ d_{\text{theory}} \leq d \leq d_{\text{real}} \\ d > d_{\text{real}} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $P_{\text{InSAR}}$  与  $P_{\text{PIM}}$  分别为  $d_{\text{InSAR}}$  与  $d_{\text{PIM}}$  在加权分配过程中的权重系数。

## 3 工程应用

### 3.1 研究区概况

山西省古交市马兰矿 10604 工作面采用长壁后退式综合机械化开采。工作面地面标高 1 297~1 411 m, 工作面标高 882.1~943.2 m, 盖山厚度 402~511 m, 平均 463 m, 走向长 1 709 m, 倾斜长 176 m, 面积 300 784 m<sup>2</sup>。煤层倾角为 1°~8°, 平均 2°; 厚度 1.66~2.69 m, 平均 2.25 m。布设 2 条观测线, 一条为走向观测线, 另一条为倾向观测线, 共 62 监测点, 工作面监测点布设如图 2 所示。

### 3.2 SBAS-InSAR 矿区沉降监测结果

采用 25 景 Sentinel-1A 数据进行 SBAS-InSAR 处理, 时间跨度为 2022 年 1 月至 12 月, 数据

干涉对能监测到的最大沉降值  $d_{\text{theory}}$ , 即

$$d_{\text{theory}} = \mu D_{\max} N \quad (14)$$

(3) 反演概率积分法参数, 建立矿区概率积分沉降模型。用克里金插值法, 获取连续的概率积分法预计沉降值  $d_{\text{PIM}}$ 。

(4) 以  $d_{\text{theory}}$  和实际 SBAS-InSAR 监测所获取的最大沉降值  $d_{\text{real}}$  作为融合的阈值, 沉降小于  $d_{\text{theory}}$  为小梯度形变区域, 最终沉降结果采用 SBAS-InSAR 沉降监测值; 沉降值大于  $d_{\text{real}}$  为大梯度形变区域, 最终沉降结果采用概率积分法预计沉降值; 沉降值介于二者之间为中间梯度形变区域, 在此区域中 SBAS-InSAR 监测到的沉降值  $d_{\text{InSAR}}$  与概率积分法所预计的沉降值  $d_{\text{PIM}}$  出现部分重合。重合部分将区域划分为两部分, 靠近沉降边缘的区域,  $d_{\text{InSAR}}$  更接近真实值; 靠近沉降中心的区域,  $d_{\text{PIM}}$  更接近真实值, 在进行加权融合时, 沉降值大的一方权重更大, 更符合实际情况<sup>[26]</sup>。在中间梯度形变区域, 采用距离平方加权法对 SBAS-InSAR 沉降监测值和概率积分法预计沉降值进行加权计算, 以获得最终的沉降计算值。融合原理公式为



图 2 10604 工作面及监测点

Fig. 2 The 10604 working face and monitoring points

更新周期为 12 d 或 24 d, 影像波长约为 5.6 cm。将 SBAS-InSAR 获取的矿区 LOS 向形变转换为垂直向形变。SBAS-InSAR 沉降监测值如图 3 所示。

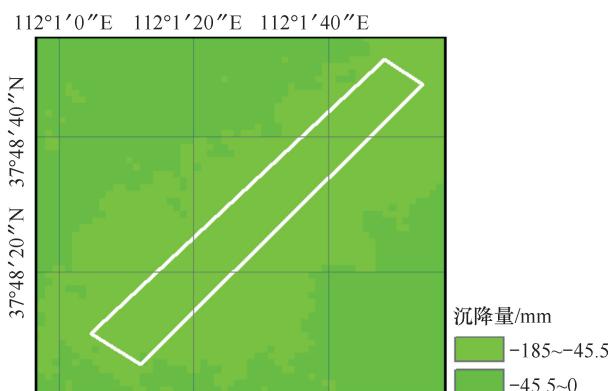


图3 SBAS-InSAR沉降监测值

Fig. 3 Monitored subsidence value calculated by SBAS-InSAR

为检验 SBAS-InSAR 在沉降边缘区域的精度, 分别使用水准实测沉降值、SBAS-InSAR 沉降监测值与概率积分法预计沉降值计算边界角, 计算结果分别为  $60.5^\circ$ 、 $59.4^\circ$ 、 $63.2^\circ$ , 证明概率积分法在沉降边缘区域收敛快, SBAS-InSAR 沉降监测值在沉降边缘区域精度更高。

### 3.3 概率积分法矿区预计沉降结果

基于 62 个水准实测沉降值, 应用 DBO 算法对 10604 工作面概率积分法参数进行 10 次反演, 计算得出各参数的平均值:  $q$  为 0.85,  $\tan \beta$  为 1.59,  $\theta$  为  $89.11^\circ$ ,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  分别为 30.02、28.93、10.01、27.08 m。运用概率积分法求取矿区等距离 10 000 个点的沉降值, 采用克里金插值获取矿区连续的概率积分法预计沉降值如图 4 所示。

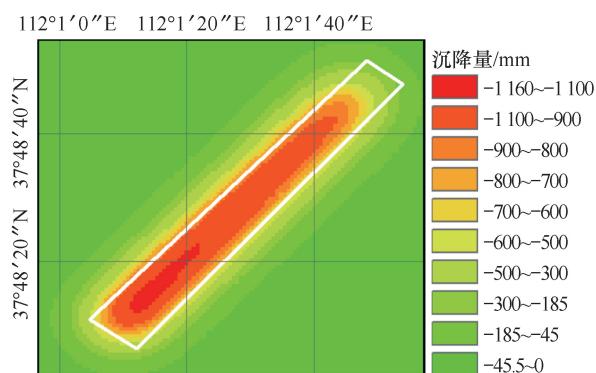


图4 概率积分法预计沉降值

Fig. 4 Predicted subsidence value calculated by PIM

为检验 DBO 算法应用于概率积分法预计沉降值的准确性, 在相同的实验条件下, 使用经典的 PSO 算法和 GA 算法进行概率积分法沉降预计。表 4 为概率积分法沉降值预计精度对比。由表 4 可知, DBO 算法准确性最高。

表4 概率积分法沉降值预计精度对比

Table 4 Comparison of accuracy of expected real predicted subsidence values by PIM

方法	预计沉降值中误差/mm
PSO 算法	104.73
GA 算法	97.82
DBO 算法	96.84

### 3.4 融合结果分析

采用 SBAS-InSAR 监测到的矿区地表最大沉降为 185 mm, 与实测矿区地表最大沉降 1 160 mm 相差很大。通过计算, 实验数据的平均相干性为 0.35, 结合 Sentinel-1A 的分辨率为  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ , 可监测到最大 45.5 mm 的形变。以 45.5 mm 和 185 mm 为阈值, 融合概率积分法与 SBAS-InSAR 的沉降计算值如图 5 所示。

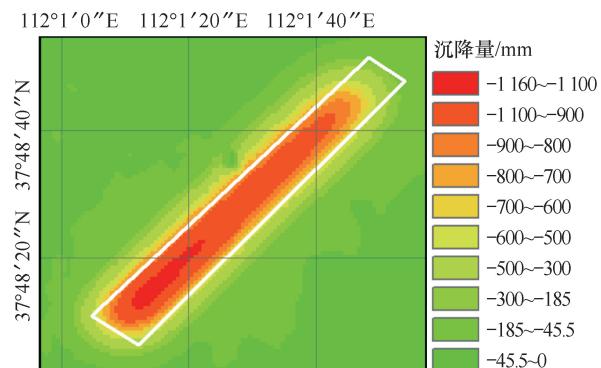


图5 融合概率积分法与 SBAS-InSAR 的沉降计算值

Fig. 5 Calculated subsidence value by PIM and SBAS-InSAR

为检验融合算法的计算结果精度, 提取 62 个水准点上的 SBAS-InSAR 沉降监测值、概率积分法预计沉降值、融合算法计算值与水准实测沉降值进行误差对比分析(表 5, 图 6)。由表 5、图 6 可知, 在小梯度形变区域, 概率积分法由于收敛过快, 预计沉降值与实测沉降值相差较大, SBAS-InSAR 沉降监测值与实测沉降值差异较小; 在中间梯度区域, 采用融合算法计算沉降值的平均相对误差为 27%, 相对于 SBAS-InSAR 提高 18%, 相对于概率积分法提高 59%; 在大梯度形变区域, SBAS-InSAR 的失相干现象, 导致其无法探测到真实的沉降信息, 而概率积分法预计沉降值与实测沉降值比较吻合。从整体区域来看, 融合算法计算沉降值的平均相对误差为 26%, 相对于 SBAS-InSAR 提高 59%, 相对于概率积分法提高 32%。

表5 误差分析  
Table 5 Error analysis

方法	中间梯度				整体区域	
	小梯度 形变区域	形变梯度		大梯度 形变区域	平均相 中误差/mm	平均相 对误差/%
		域中误 差/mm	中误差/ mm		域中误 差/mm	/mm
InSAR	12.30	79.35	33	713.14	526.32	64
PIM	25.65	101.20	66	107.65	96.84	38
融合 算法	12.30	68.71	27	107.65	88.03	26

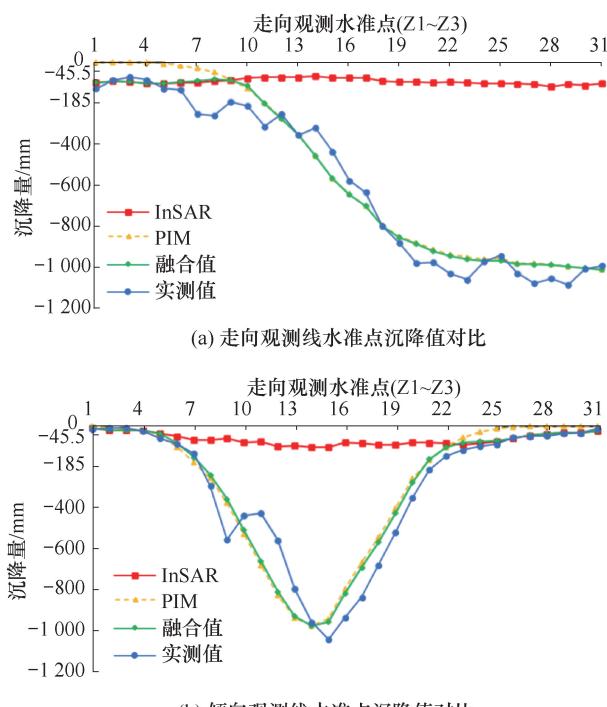


图6 观测线沉降值对比

Fig. 6 Comparison of subsidence values along observation lines

## 4 结 论

将蝶形优化算法应用于概率积分法参数反演,结合SBAS-InSAR技术获取山西省古交市马兰矿10604工作面沉降信息。对比分析了水准实测沉降值、SBAS-InSAR沉降监测值和概率积分法预计沉降值,得到如下结论:

(1) 提出基于DBO算法的概率积分法参数反演方法寻优能力强,反演结果相对误差不超过10%。使用该参数预计的开采沉陷沉降值中

误差为1.15 mm,优于PSO算法和GA算法的反演结果,可以应用于开采沉陷概率积分法参数反演。

(2) 构建基于形变梯度分区的融合算法。该算法基于SBAS-InSAR监测形变梯度的适用范围进行有效分区:对小梯度变形区域,采用SBAS-InSAR沉降监测值作为最终沉降结果,可以避免概率积分法预计沉降值收敛过快的缺陷;对大梯度范围,采用概率积分法预计沉降值,可以避免SBAS-InSAR失相干的问题;对于中间梯度形变区域,采用距离平方加权融合的算法,提高计算结果的可靠性。

(3) 以马兰矿地表移动观测站为例,采用融合算法,可以准确反映矿区沉降趋势。融合算法精度相对于SBAS-InSAR提高59%,相对于概率积分法提高32%。

## 参 考 文 献

- [1] 郭广礼,李怀展,查剑锋,等.平原煤粮主产复合区煤矿开采和耕地保护协同发展研究现状及对策[J].煤炭科学技术,2023,51(1): 416-426.  
GUO Guangli, LI Huaizhan, ZHA Jianfeng, et al. Research status and countermeasures of coordinated development of coal mining and cultivated land protection in the plain coal-cropland overlapped areas[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 416-426.
- [2] 孙文洁,李文杰,杨文凯,等.煤炭矿山水环境问题类型划分及治理模式[J].煤矿安全,2023,54(5): 35-41.  
SUN Wenjie, LI Wenjie, YANG Wenkai, et al. Classification of water environment problems in coal mine and treatment mode [J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54 (5): 35-41.
- [3] 谭志祥,杨嘉威,邓喀中.基于SBAS-InSAR的矿区全盆地开采沉陷求参方法研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1): 312-318.  
TAN Zhixiang, YANG Jiawei, DENG Kazhong. Study on method of mining subsidence parameters calculating for whole basin of mining area based on SBAS-InSAR[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 312-318.
- [4] 滕永佳,阎跃观,郭伟,等.不规则工作面开采地表沉陷线积分预计方法[J].矿业科学学报,2022,7(1): 82-88.  
TENG Yongjia, YAN Yueguan, GUO Wei, et al. Line integral method for predicting surface subsidence in irregular working face mining[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(1): 82-88.

- [5] 李培现,万昊明,许月,等. 基于地表移动矢量的概率积分法参数反演方法[J]. 岩土工程学报,2018,40(4): 767-776.  
LI Peixian, WAN Haoming, XU Yue, et al. Parameter inversion of probability integration method using surface movement vector[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(4): 767-776.
- [6] 郭立,赵尚民. 改进的WOA-BP算法在概率积分法参数预计中的应用[J]. 测绘科学,2023,48(6): 131-139.  
GUO Li, ZHAO Shangmin. Application of improved WOA-BP algorithm in parameter prediction of probability integral method[J]. Science of Surveying and Mapping, 2023, 48(6): 131-139.
- [7] 吴满毅,徐良骥,张坤. 基于SSA-BP神经网络的概率积分法预计参数求取研究[J]. 金属矿山,2022(8): 182-189.  
WU Manyi, XU Liangji, ZHANG Kun. Estimated parameter extraction research of probabilistic integration method based on SSA-BP neural network[J]. Metal Mine, 2022(8): 182-189.
- [8] 梅寒,陈炳乾,王正帅,等. 不同智能优化算法反演概率积分法参数的对比研究[J]. 金属矿山,2021(5): 149-159.  
MEI Han, CHEN Bingqian, WANG Zhengshuai, et al. Comparative study on the parameters of the inversion probability integral method with different intelligent optimization algorithms[J]. Metal Mine, 2021(5): 149-159.
- [9] 李靖宇,王磊,朱尚军,等. 基于狼群算法的概率积分法模型参数反演方法研究[J]. 中国矿业,2020,29(10): 102-109.  
LI Jingyu, WANG Lei, ZHU Shangjun, et al. Research on parameters estimation of probability integral model based on wolves pack algorithm[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(10): 102-109.
- [10] 杨晓玉,朱晓峻. 基于稳健遗传算法的矿山开采沉陷预计参数反演[J]. 金属矿山,2023(8): 237-244.  
YANG Xiaoyu, ZHU Xiaojun. Mining subsidence prediction parameter inversion based on robust genetic algorithm[J]. Metal Mine, 2023(8): 237-244.
- [11] 刘阔,张兆江,张丽媛,等. 基于P-SA-PSO算法的概率积分法参数反演[J]. 测绘与空间地理信息,2023,46(8): 21-25.  
LIU Kuo, ZHANG Zhaojiang, ZHANG Liyuan, et al. Parameter inversion of probability integral method based on P-SA-PSO algorithm[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2023, 46(8): 21-25.
- [12] XUE J K, SHEN B. Dung beetle optimizer: a new meta-heuristic algorithm for global optimization[J]. The Journal of Supercomputing, 2023, 79(7): 7305-7336.
- [13] 刘艺梦,丁小明,王会强,等. 基于蜣螂算法优化BP的冬夏生菜根区温度预测模型[J]. 农业工程学报,2024,40(5): 231-238.  
LIU Yimeng, DING Xiaoming, WANG Huiqiang, et al. Prediction model for winter and summer lettuce root zone temperature based on dung beetle algorithm to optimize BP[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(5): 231-238.
- [14] 董奕含,喻志超,胡天跃,等. 基于改进蜣螂优化算法的瑞雷波频散曲线反演方法[J]. 油气地质与采收率,2023,30(4): 86-97.  
DONG Yihan, YU Zhichao, HU Tianyue, et al. Inversion of Rayleigh wave dispersion curve based on improved dung beetle optimizer algorithm[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(4): 86-97.
- [15] 孙庆先,张勇,陈清通,等. 我国开采沉陷学70年研究综述及技术展望[J]. 中国矿业,2024,33(3): 86-99.  
SUN Qingxian, ZHANG Yong, CHEN Qingtong, et al. 70 year review and technical outlook on mining subsidence research in China[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(3): 86-99.
- [16] 林芳,冯晓九. 基于概率积分法的济宁某矿地表位移规律研究[J]. 金属矿山,2023(11): 198-204.  
LIN Fang, FENG Xiaojiu. Study on surface displacement law of a mine in Jining based on probability integral method[J]. Metal Mine, 2023(11): 198-204.
- [17] 刘金霖,谭志祥,范洪冬. 融合DS-InSAR与PIM的煤矿开采影响范围确定方法[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2023,5(6): 96-104.  
LIU Jinlin, TAN Zhixiang, FAN Hongdong. Method for determining the scope of coal mining impact by integrating DS-InSAR and PIM[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(6): 96-104.
- [18] 王志红,任金铜,游洪,等. InSAR结合概率积分法的矿区外围形变监测[J]. 测绘科学,2022,47(1): 84-94.  
WANG Zhihong, REN Jintong, YOU Hong, et al. Application of InSAR technology combined with probability integral method in deformation monitoring of mining area periphery[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, 47(1): 84-94.
- [19] 王新龙,车子杰,马飞,等. 基于PS-InSAR技术的晋城矿区地表形变监测及地质灾害风险预警[J]. 安全与环境工程,2024,31(2): 173-179,212.

- WANG Xinlong, CHE Zijie, MA Fei, et al. Surface deformation monitoring and geological hazard risk early warning of Jincheng mining area based on PS-InSAR technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2024, 31(2): 173–179, 212.
- [20] 王凤云, 陶秋香, 郭在洁, 等. 基于 SBAS-InSAR 技术的矿区地面沉降监测与分析 [J]. 中国科技论文, 2022, 17(5): 571–580.
- WANG Fengyun, TAO Qiuxiang, GUO Zajie, et al. Monitoring and analysis of land subsidence in mining area based on SBAS-InSAR technology [J]. China Science-paper, 2022, 17(5): 571–580.
- [21] 黄标, 张辉, 尹剑辉. 基于时序 InSAR 技术的工业园区地表形变监测 [J]. 测绘通报, 2024 (6): 157–163.
- HUANG Biao, ZHANG Hui, YIN Jianhui. Surface deformation monitoring of industrial parks based on temporal InSAR technology [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2024 (6): 157–163.
- [22] 彭一桂, 艾东, 曾斌, 等. 基于联合时序 InSAR 技术的矿区沉降隐患区识别 [J]. 自然灾害学报, 2024, 33(3): 191–201.
- PENG Yigui, AI Dong, ZENG Bin, et al. Identification of mining subsidence hazard areas based on joint time series InSAR technology [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(3): 191–201.
- [23] MASSONNET D, FEIGL K L. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface [J]. Reviews of Geophysics, 1998, 36(4): 441–500.
- [24] 陈洋, 陶秋香, 刘国林, 等. InSAR 与概率积分法联合的矿区地表沉降精细化监测方法 [J]. 地球物理学报, 2021, 64(10): 3554–3566.
- CHEN Yang, TAO Qiuxiang, LIU Guolin, et al. Detailed mining subsidence monitoring combined with InSAR and probability integral method [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(10): 3554–3566.
- [25] BARAN I, STEWART M, CLAESSENS S. A new functional model for determining minimum and maximum detectable deformation gradient resolved by satellite radar interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(4): 675–682.
- [26] 王志红, 刘吉波, 阎跃观, 等. SGI-based 法结合 PIM 的矿区全盆地下沉量计算方法 [J]. 地球物理学进展, 2023, 38(6): 2440–2450.
- WANG Zhihong, LIU Jibo, YAN Yueguan, et al. SGI-based method combined with PIM for subsidence calculation of the total basin in mining area [J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(6): 2440–2450.

(责任编辑:张彩艳)