引文格式：常德喜,焦永进,李兵,等. 分段加权赋参的地表动态沉陷预计模型构建方法[J]. 地理空间信息, 2026, 24(3): 1-6. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.03.001

# 分段加权赋参的地表动态沉陷预计模型构建方法

常德喜[1]，焦永进[1]，李　兵[2,3]，陈　晨[2,3]，徐燕飞[2,3]，苗　伟[3,4]，李　栋[1]
（1. 鄂尔多斯市华兴能源有限责任公司，内蒙古 鄂尔多斯 017000；2. 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室，安徽 淮南 232001；3. 煤矿生态环境保护国家工程实验室，安徽 淮南 232001；4. 煤炭开采国家工程技术研究院，安徽 淮南 232001）

**摘　要：**基于蒙西矿区典型工作面的地表移动实测数据，系统分析沉陷曲线的“陡前缓后”特征，提出分段加权赋参的Knothe时间函数模型，通过自适应权值分配耦合两段下沉过程，并在蒙西矿区某矿3个典型工作面进行实证检验。与Knothe时间函数、分段Knothe时间函数和幂指数Knothe时间函数等模型进行预测精度对比，结果表明：①蒙西矿区地表沉陷呈非对称演化规律；②该模型有效解决了传统模型对非对称沉陷过程表征不足的问题，多参数动态耦合机制可为矿区开采沉陷预测和生态修复提供精准的技术支持。

**关键词：**蒙西矿区；采煤工作面；采煤沉陷预计；Knothe时间函数；地表沉陷；加权函数
**中图分类号：**P258　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）03-0001-06

# Construction Method for Dynamic Subsidence Prediction Model of Ground Surface Based on Segmental Weighted Parameter

CHANG Dexi[1], JIAO Yongjin[1], LI Bing[2,3], CHEN Chen[2,3], XU Yanfei[2,3], MIAO Wei[3,4], LI Dong[1]
(1. Ordos Huaxing Energy Co., Ltd., Ordos 017000, China;
2. State Key Laboratory of Safe Mining of Deep Coal and Environmental Protection, Huainan 232001, China;
3. National Engineering Laboratory of Coal Mine Ecological Environment Protection, Huainan 232001, China;
4. National Institute of Engineering and Technology for Coal Mining, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Based on ground surface movement monitoring data from typical working faces in the Mengxi mining area, we systematically analyzed the “steep-front and gentle-rear” characteristics of subsidence curves, and proposed a Knothe time function model based on segmental weighted parameter, which coupled the two-stage subsidence process through adaptive weight allocation. We validated this model by using three typical working faces in a coal mine within the Mengxi mining area, and compared the prediction accuracy of model with the Knothe time function model, segmented Knothe time function model, and power-exponential Knothe time function model. The results demonstrate that ①the ground surface subsidence curves exhibit a significant “steep-front and gentle-rear” asymmetric characteristic. ②The proposed model can effectively resolve the inadequacy of traditional models in characterizing asymmetric subsidence processes. Its multi-parameter dynamic coupling mechanism provides precise technical support for subsidence prediction and ecological restoration in the mining area.

**Key words:** Mengxi mining area, coal mine working face, mining subsidence prediction, Knothe time function, ground surface subsidence, weighted function

蒙西矿区是典型的弱胶结岩矿区，煤炭资源主要埋藏于地质年代相对较晚的侏罗系与白垩系地层中。地层由泥岩、泥质砂岩等软弱岩层构成，具有结构松散、孔隙发育、水敏性强和易压实等特性[1-3]。蒙西矿区的弱胶结岩在物理力学性质上与东部地区的石炭二叠系地层具有显著差异[4]。近年来，众多学者[5-11]致力于探究蒙西矿区地表沉陷规律与特性，并取得了一系列研究成果。蒙西矿区开采沉陷主要受其独特地质条件与覆岩性质控制，普遍具有松散砂层厚度大、岩性强度低、弱胶结岩体中砂粒胶结性差以及顶板砂岩含水量高、呈碱性等特征[12-14]。实测数据显示，在相近的覆岩性质与采动条件下，蒙西矿区的地表下沉系数显著小于东部矿区[15]。随着开采活动的持续进行，采空区范围不断扩大，地表易出现剧烈失稳与快速沉陷现象。

在开采沉陷预测模型方面，常见的动态预计模型包括广义时间函数[16]、Knothe时间函数[17]、Sroka-Schober时间函数[18]等。广义时间函数与

项目来源：国家重点研发计划资助项目（2016YFC0501100）。
第一作者简介：常德喜（1974—），硕士，高级工程师，研究方向为矿山开采沉陷监测及矿区生态修复，E-mail：cdx19740213@163.com。

Sroka-Schober时间函数在实际生产中存在参数获取困难等问题[19]；Knothe时间函数虽广泛应用于采煤沉陷区地表动态变形预测，但其描述的下沉过程与实际情况存在偏差。根据形成机理可将地表点的下沉分为两个阶段[20]：从下沉速度为零增至最大值，再由最大值逐渐降至零，两个阶段形态基本对称。李德海[21]通过研究覆岩岩性与下沉速率的关系，揭示了传统模型对称性假设的局限性。在弱胶结岩广泛发育的蒙西矿区，地表沉陷常呈现非对称特征，导致难以直接采用传统及其改进形式的Knothe时间函数模型。因此，本文深入研究并建立了适用于弱胶结岩矿区的地表沉陷预测模型，对于煤炭资源的科学利用与煤矿的绿色安全生产具有重要意义，可为弱胶结岩矿区煤层开采和地表生态环境治理提供有力的技术支持。

## 1 Knothe时间函数及其改进模型

1）Knothe时间函数模型。其理论基础是地表点的瞬时下沉速率与该点的剩余下沉量（即最终下沉量与当前下沉量之差）成正比。Knothe时间函数模型用于描述和预测地下采矿或类似活动引起的地表沉陷随时间变化规律，基本表达式为[20-22]：

$$W(t)=W_0\left(1-e^{-c\times t}\right) \tag{1}$$

式中，$W(t)$、$W_0$为地表在$t$时刻的下沉量和最大下沉量（mm）；$t$为时间（d）；$c$为时间影响系数，与覆岩力学特性、工作面推进速度等开采条件密切相关。

2）分段Knothe时间函数模型。基于Knothe时间函数基本原理，常占强等[20]引入了分段建模思想，构建了分段Knothe时间函数模型。其模拟效果与实际情况一致性更高，基本表达式为：

$$W(t)=\begin{cases}0.5W_0\left[e^{-c(\tau-t)}-e^{-c\times\tau}\right] & 0<t\leqslant\tau\\ 0.5W_0\left[2-e^{-c(t-\tau)}-e^{-c\times\tau}\right] & \tau<t\leqslant T\end{cases} \tag{2}$$

式中，$\tau$为地表点最大下沉速度对应的时刻（d）；$T$为地表从开采到稳沉的总时长（d）。

3）幂指数Knothe时间函数模型。结合地表沉陷的动态特征，刘玉成等[23]构建了幂指数Knothe时间函数模型，可显著提升动态沉陷过程的描述精度，并模拟出下沉速度与加速度的完整变化曲线。幂指数Knothe时间函数模型的表达式为：

$$W(t)=W_0\left(1-e^{-c\times t}\right)^k \tag{3}$$

式中，$k$为待拟合参数。

## 2 时间函数适用性分析

基于蒙西矿区某矿61103、61208和61302工作面地表沉陷监测实测数据，本文验证了Knothe时间函数模型、分段Knothe时间函数模型、幂指数Knothe时间函数模型在蒙西矿区的适用性。

### 2.1 数据来源

蒙西矿区某矿采场分为1盘区、2盘区、3盘区，本文在3个盘区各选区一个典型工作面作为研究对象。61103工作面于2016年10月7日开采，2017年8月6日停采，走向长度为1 059 m，倾向长度为239 m，煤层底板标高为+776～+790 m；煤层平均倾角为2°，煤均厚10.3 m。61103工作面布设4条观测线，其中走向观测线长1 438 m，点间距为60 m，共布设24个观测点；倾向布设3条观测线，即位于切眼上方的倾向第一观测线、位于切眼以东455 m处的倾向第二观测线、位于切眼以东995 m处的倾向第三观测线，长度均为600 m，点间距为60 m，各布设10个观测点[24]。

61208工作面于2022年5月20日开采，2022年10月21日停采，走向长度为1 203 m，倾向长度为264 m，煤层底板标高为+774.2～+803 m；煤层平均倾角为2°，煤均厚9.5 m。61208工作面观测线布置与61103工作面类似，走向观测线长1 720 m，点间距为60 m，共布设29个观测点；倾向布设3条观测线，即位于切眼上方的倾向第一观测线，长度为520 m，点间距为60 m，布设9个观测点，位于工作面中心上方的倾向第二观测线，长度为780 m，点间距为60 m，布设13个观测点，位于收作线上方的倾向第三观测线，长度为520 m，点间距为60 m，布设9个观测点。

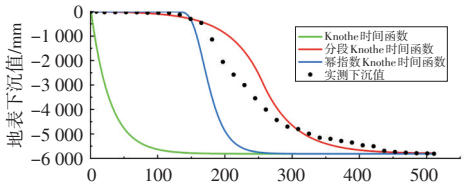
61302工作面于2022年10月22日开采，2023年11月9日停采，走向长度为1 991 m，倾向长度为240 m，煤层底板标高为+750～+775 m；煤层平均倾角为3°，煤均厚14.6 m。61302工作面走向布设1条观测线，长度为2 192 m，点间距为60 m，共布设37个观测点；倾向布设3条观测线，即位于切眼上方的倾向第一观测线、位于切眼以东1 000 m处的倾向第二观测线、位于切眼以东1 863 m处的倾向第三观测线，长度均为600 m，点间距为60 m，各布设10个观测点。

### 2.2 适用性分析

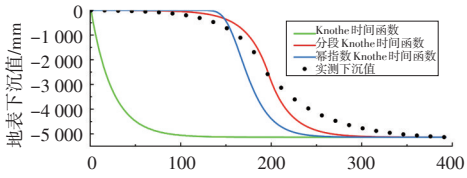
本文以上述3个工作面实测数据为参考值，验证Knothe时间函数模型、分段Knothe时间函数模型、幂

指数Knothe时间函数模型在蒙西矿区的适用性。根据各工作面的实测数据，采用拟合方法获取各模型参数。61103、61208、61302工作面Knothe时间函数模型的$W_0$分别为5 816.33、5 142.45、7 898.56 mm，$c$值分别为0.035、0.042、0.039；分段Knothe时间函数模型的$W_0$分别为5 816.33、5 142.45、7 898.56 mm，$c$值分别为0.035、0.042、0.039，$\tau(d)$分别为255、196、279；幂指数Knothe时间函数模型的$W_0$分别为5 816.33、5 142.45、7 898.56 mm，$c$值分别为0.035、0.042、0.039，$\tau(d)$分别为255、196、279，$k$值分别为4.51、5.52、5.12。

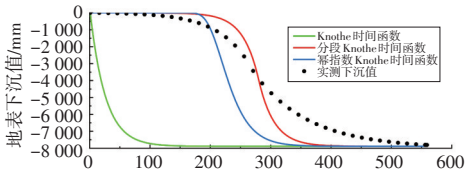
根据3种时间函数模型对应的工作面参数，开展地表沉陷预计研究，沉陷预测结果见图1，计算得到的预测均方根误差见表1，可以看出，Knothe时间函数模型的预测误差最大，无法准确描述地表沉陷演变过程；分段Knothe时间函数模型的精度最高，预测的地表下沉曲线变化趋势与实测基本相同，但预测结果与实测值差距仍较大。




a 61103工作面




b 61208工作面




c 61302工作面

图1　3个工作面沉陷预测与地表实测对比图

表1　3种时间函数模型的预测均方根误差/mm

| 工作面 | Knothe时间函数 | 分段Knothe时间函数 | 幂指数Knothe时间函数 |
|---|---|---|---|
| 61103工作面 | 2 818.13 | 583.31 | 865.91 |
| 61208工作面 | 3 195.97 | 321.38 | 986.58 |
| 61302工作面 | 4 804.16 | 273.88 | 1 482.52 |

分析实测下沉曲线变化趋势发现：蒙西矿区地表沉陷大致以$W_0$的1/2处（即拐点处）为分隔点，前期下沉曲线的变化速率较快，形态相对陡峭；而后期曲线则趋于平缓，呈现出不对称的分布特点。因此，本文基于蒙西矿区开采沉陷特征，优化分段Knothe时间函数模型，以提高蒙西矿区开采沉陷预测精度。

## 3　Knothe时间函数模型优化

### 3.1　分段加权优化

由于蒙西矿区地表沉陷预测存在下沉曲线两端精度较差、末端收敛过快等问题，因此预测模型优化的关键是如何通过控制参数解决下沉曲线两端收敛速度问题。$c$是控制下沉曲线形态的关键参数[25]。本文选取$c_1$、$c_2$，且$c_1<c_2$，绘制沉陷预计下沉曲线（图2），可以看出，$c$值与下沉发展的快慢正相关，即$c$值增大曲线形态趋陡，减小曲线形态趋缓。由于蒙西矿区煤矿采煤工作面地表下沉曲线以$W_0/2$为拐点，因此采用分段Knothe时间函数描述该矿区地表沉陷过程时，应以下沉值达到$W_0/2$为分段点，小于$W_0/2$的部分$c$值应较大，大于$W_0/2$的部分$c$值应较小（图2中红色圆圈标记部分）。

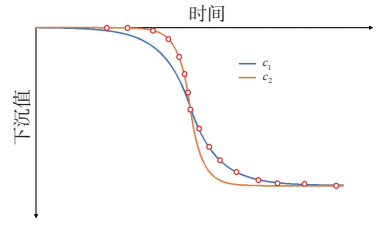



图2　分段Knothe时间函数模型曲线形态变化

综上所述，本文采用分段加权的方法优化分段Knothe时间函数模型，引入$p_1$、$p_2$权值和$c_1$、$c_2$时间系数，修正后的模型表达式为：

$$\begin{cases} W(t)=p_1W_1(t)+p_2W_2(t) \\ W_i(t)=\begin{cases} 0.5W_0\left[e^{-c_i(\tau-t)}-e^{-c_i\times\tau}\right] & 0<t\leqslant\tau \\ 0.5W_0\left[2-e^{-c_i(t-\tau)}-e^{-c_i\times\tau}\right] & \tau<t\leqslant T \end{cases} \end{cases} \tag{4}$$

式中，$W(t)$、$W_i(t)$为地表在$t$时刻对应的下沉值（mm），$i=1$、2；$c_i$为时间系数，$i=1$、2；$\tau=0.5T$；$p_1$、$p_2$为权值，表征弱胶结覆岩在沉陷前段（$W<W_0/2$）与后段（$W>W_0/2$）的压缩速率差异，前段岩体因胶结度低、孔隙率高，压缩速率较快（$c_1$值较大），后段受上覆应力重分布影响，压缩速率变缓（$c_2$值较小），二者通过弹性模量比（$E_1$、$E_2$）动态调整。

修正后的地表沉陷预测模型基于非对称变形机制

构建，通过引入动态调节参数表征蒙西矿区弱胶结砂岩—泥岩互层地层结构诱发的非对称沉陷特征。研究表明，该模型不仅适用于特定矿区的地质条件，更具有普适性：当地表呈现非对称沉陷特征时，可直接利用该模型进行精确预测；对于对称沉陷工况（$p_1=p_2=0.5$、$W_1(t)=W_2(t)$、$c_1=c_2$），模型将退化为经典对称预测模型。

这种参数自适应的建模方法有效统一了对称与非对称沉陷的预测理论框架，在保持传统模型物理意义的同时，拓展了工程适用边界。

### 3.2　自适应赋权模型设计

为使整体下沉曲线统一平滑，需为两段预测值分配权重。本文设计的自适应赋权模型为：

$$p_1=\begin{cases}1 & 0<t\leqslant\dfrac{T}{6}\\ -\dfrac{6c_2}{T(c_1+c_2)}t+\dfrac{c_1+2c_2}{c_1+c_2} & \dfrac{T}{6}<t\leqslant\dfrac{T}{3}\\ \dfrac{c_1}{c_1+c_2} & \dfrac{T}{3}<t\leqslant\dfrac{T}{2}\\ \dfrac{6(c_2-c_1)}{T(c_1+c_2)}t+\dfrac{4c_1-3c_2}{c_1+c_2} & \dfrac{T}{2}<t\leqslant\dfrac{2T}{3}\\ -\dfrac{6c_2}{T(c_1+c_2)}t+\dfrac{5c_2}{c_1+c_2} & \dfrac{2T}{3}<t\leqslant\dfrac{5T}{6}\\ 0 & \dfrac{5T}{6}<t\leqslant T\end{cases}\tag{5}$$

$$p_2=\begin{cases}0 & 0<t\leqslant\dfrac{T}{6}\\ \dfrac{6c_2}{T(c_1+c_2)}t-\dfrac{c_2}{c_1+c_2} & \dfrac{T}{6}<t\leqslant\dfrac{T}{3}\\ \dfrac{c_2}{c_1+c_2} & \dfrac{T}{3}<t\leqslant\dfrac{T}{2}\\ \dfrac{6(c_1-c_2)}{T(c_1+c_2)}t+\dfrac{4c_2-3c_1}{c_1+c_2} & \dfrac{T}{2}<t\leqslant\dfrac{2T}{3}\\ \dfrac{6c_2}{T(c_1+c_2)}t+\dfrac{c_1-4c_2}{c_1+c_2} & \dfrac{2T}{3}<t\leqslant\dfrac{5T}{6}\\ 1 & \dfrac{5T}{6}<t\leqslant T\end{cases}\tag{6}$$

自适应赋权模型的核心机制在于，依据线性函数的曲线特征，并针对地表沉陷的不同演化阶段动态调整 $p_1$ 和 $p_2$，从而实现预测模型曲线整体的平滑过渡。该模型的典型变化特征见图3。

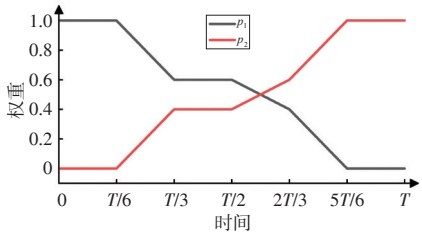



图3　自适应赋权模型变化曲线

### 3.3　时间因素影响系数求解

$c$ 与煤层上覆岩层力学性质相关，是开采深度 $H$ 和覆岩岩性参数 $\zeta_i$ 的函数[26]。研究表明，$\zeta_i$ 与松散层厚度 $h$ 和 $H$ 的比值成正比[27-29]。通过分析蒙西矿区地表实测资料，采用线性拟合方法获得 $\zeta_i$ 与 $h$ 和 $H$ 的关系模型，即

$$\zeta_i=270\sqrt{\frac{\gamma_i E_i}{\sigma_{ti}\mu_i}}+54\frac{h}{H}\tag{7}$$

式中，$\gamma_i$ 为覆岩密度（kg/m³）；$E_i$ 为覆岩弹性模量（MPa）；$\sigma_{ti}$ 为覆岩抗拉强度（MPa）；$\mu_i$ 为覆岩泊松比。

采用回归分析法获得 $c_i$ 与 $\zeta_i$ 和 $H$ 的关系模型，即

$$c_i=\frac{36(\zeta_i-120)}{H}\tag{8}$$

将式（7）代入式（8）可得：

$$c_1=\frac{360H^2}{270H\sqrt{\dfrac{\gamma_1E_1}{\sigma_{t1}\kappa_1}}+54h-120H}\tag{9}$$

$$c_2=\frac{360H^2}{270H\sqrt{\dfrac{\gamma_2E_2}{\sigma_{t2}\kappa_2}}+54h-120H}\tag{10}$$

式中，$\kappa_1$、$\kappa_2$ 为覆岩泊松比。

## 4　工程应用案例分析

基于分段加权赋参的Knothe时间函数模型，以蒙西矿区某矿的61103、61208和61302工作面作为研究对象，验证该模型在蒙西矿区地表沉陷预测中的适用性。根据工作面实测数据，求得该模型的各项参数（表2）。

表2　分段加权赋参的Knothe时间函数模型参数

| 工作面 | $W_0$/mm | $c_1$ | $c_2$ | $T$/d |
|---|---|---|---|---|
| 61103工作面 | 5 816.33 | 0.017 | 0.015 | 510 |
| 61208工作面 | 5 142.45 | 0.094 | 0.074 | 392 |
| 61302工作面 | 7 898.56 | 0.018 | 0.010 | 558 |

根据上述参数得到3个工作面的两套预计值 $W_1(t)$ 和 $W_2(t)$，再采用自适应赋权模型进行融合，获得最终的地表沉陷预测值。以实测值为真值，本文通过绝对误差和均方根误差评价模型精度，结果见表3~5，61103、61208、61302工作面的均方根误差分别为446.04、104.56、93.16 mm，可以看出，分段加权赋参的Knothe时间函数模型在蒙西矿区的沉陷预测结果更可靠，地表沉陷形态更加符合实际情况，其中

表3　61103工作面地表沉陷预测结果/mm

| 时间 | 预计值 | 实测值 | 绝对误差 |
|---|---|---|---|
| 2016-09-30 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2016-10-27 | -22.20 | -24.40 | 2.20 |
| 2016-11-13 | -74.96 | -24.00 | 50.96 |
| 2016-12-04 | -160.23 | -45.00 | 115.23 |
| 2017-01-16 | -298.04 | -50.00 | 248.04 |
| 2017-02-28 | -520.74 | -301.00 | 219.74 |
| 2017-03-31 | -880.64 | -1 139.00 | 258.36 |
| 2017-04-30 | -1 462.27 | -2 575.00 | 1 112.73 |
| 2017-05-31 | -2 402.23 | -3 537.90 | 1 135.67 |
| 2017-06-29 | -3 688.71 | -4 426.30 | 737.59 |
| 2017-07-31 | -4 521.42 | -4 797.20 | 275.78 |
| 2017-08-30 | -5 020.46 | -5 150.00 | 129.54 |
| 2017-09-30 | -5 319.54 | -5 287.60 | 31.94 |
| 2017-10-31 | -5 498.77 | -5 463.50 | 35.27 |
| 2017-12-14 | -5 606.18 | -5 685.13 | 78.94 |
| 2018-02-23 | -5 670.56 | -5 766.05 | 95.49 |
| 2018-04-25 | -5 709.14 | -5 794.37 | 85.23 |

表4　61208工作面地表沉陷预计结果/mm

| 时间 | 预计值 | 实测值 | 绝对误差 |
|---|---|---|---|
| 2022-04-28 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2022-06-21 | -36.80 | -14.51 | 22.29 |
| 2022-07-24 | -105.90 | -48.12 | 57.78 |
| 2022-08-30 | -235.63 | -125.97 | 109.66 |
| 2022-09-30 | -479.22 | -306.31 | 172.91 |
| 2022-10-31 | -936.60 | -724.04 | 212.55 |
| 2022-11-14 | -1 298.91 | -1 107.72 | 191.19 |
| 2022-12-16 | -2 475.64 | -2 580.39 | 104.75 |
| 2022-12-31 | -3 109.43 | -3 134.24 | 24.81 |
| 2023-01-31 | -3 965.57 | -3 973.42 | 7.86 |
| 2023-02-15 | -4 241.92 | -4 257.34 | 15.42 |
| 2023-03-15 | -4 606.02 | -4 647.84 | 41.82 |
| 2023-04-13 | -4 811.93 | -4 882.33 | 70.41 |
| 2023-04-30 | -4 878.39 | -4 961.67 | 83.28 |
| 2023-05-15 | -4 928.37 | -5 023.15 | 94.77 |
| 2023-06-12 | -4 965.96 | -5 070.79 | 104.83 |
| 2023-07-13 | -4 994.23 | -5 107.70 | 113.48 |

61103工作面的沉陷预测误差较大，因其受相邻工作面开采的叠加影响，但相较于Knothe时间函数模型、分段Knothe时间函数模型、幂指数Knothe时间函数模型精度分别提高了84.17%、23.53%、48.49%；61208、61302工作面的地表沉陷预测结果较准确，分别较Knothe时间函数模型、分段Knothe时间函数模型、幂指数Knothe时间函数模型精度提高了96.73%、98.06%，67.47%、65.99%，89.40%、93.72%。

表5　61302工作面地表沉陷预计结果/mm

| 时间 | 预计值 | 实测值 | 绝对误差 |
|---|---|---|---|
| 2022-10-11 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2022-11-12 | -18.64 | -15.69 | 2.95 |
| 2022-12-13 | -50.62 | -43.43 | 7.19 |
| 2023-01-14 | -105.50 | -92.48 | 13.02 |
| 2023-03-12 | -361.28 | -332.60 | 28.68 |
| 2023-04-13 | -638.59 | -603.81 | 34.78 |
| 2023-05-11 | -1 114.47 | -1 083.39 | 31.08 |
| 2023-06-11 | -1 931.07 | -1 931.41 | 0.34 |
| 2023-07-12 | -3 332.36 | -3 430.93 | 98.57 |
| 2023-08-11 | -4 875.45 | -4 749.35 | 126.09 |
| 2023-10-14 | -6 547.98 | -6 319.76 | 228.22 |
| 2023-11-12 | -6 983.72 | -6 791.96 | 191.77 |
| 2023-12-15 | -7 270.03 | -7 131.43 | 138.60 |
| 2024-01-16 | -7 458.14 | -7 375.48 | 82.66 |
| 2024-02-27 | -7 581.74 | -7 550.94 | 30.80 |
| 2024-04-23 | -7 662.95 | -7 677.08 | 14.13 |
| 2024-06-23 | -7 716.31 | -7 767.77 | 51.45 |

## 5　结　语

本文选取蒙西矿区某矿61103、61208、61302典型工作面开展了地表沉陷预计模型研究，得到以下结论：

1）蒙西矿区地表沉陷大致以$W_0$的1/2处（即拐点处）为分隔点，下沉值小于$W_0/2$的部分实测值较陡峭，大于$W_0/2$的部分实测值相对平缓，实测下沉曲线呈现不对称的分布特点。

2）针对蒙西矿区地表沉陷特征，本文提出采用分段加权的方法优化分段Knothe时间函数模型；通过构建自适应赋权模型，为两段预测值分配权重，使整体下沉曲线统一平滑，构建基于分段加权赋参的Knothe时间函数模型，解决了传统模型对非均质覆岩适应性不足的问题。

3）以61103、61208、61302工作面实测值为真值，验证了分段加权赋参的Knothe时间函数模型的适用性和优势。该模型在蒙西矿区沉陷的预测结果更可靠，地表沉陷形态更加符合实际情况。其中，61103、61208、61302工作面地表沉陷预计精度相较于Knothe时间函数模型、分段Knothe时间函数模型、幂指数Knothe时间函数模型分别提高了84.17%、96.73%、98.06%，23.53%、67.47%、65.99%，48.49%、89.40%、93.72%，可为西部弱胶结矿区生态

修复提供决策支持。

## 参考文献


[1] Lyu X Z, Du J J, Fu H, et al. Macro-micro Behaviors and Failure Mechanism of Frozen Weakly Cemented Mudstone[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024,16(4):1337-1347

[2] 张辉,党星海,李旺平,等. 基于Sentinel-1A数据的黑方台地区沉陷特征分析[J]. 地理空间信息,2023,21(3):52-58

[3] 熊威,孙志杰,郝晓阳. 基于SBAS-InSAR技术的阳城地区采空区地表沉陷分析[J]. 地理空间信息,2023,21(2):103-107

[4] Dong C Y, Zhou B, Huang F H, et al. Microscopic Sand Production Simulation and Visual Sanding Pattern Description in Weakly Consolidated Sandstone Reservoirs[J]. Petroleum Science,2022,19(1):279-295

[5] 李全生,任赵鹏,张村,等. 推进速度影响下的上湾煤矿高强度开采覆岩—地表移动特征[J]. 采矿与安全工程学报,2024,41(3):437-449

[6] 孙利辉,纪洪广,杨本生. 西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J]. 煤炭学报,2019,44(3):866-874

[7] 赵兵朝,同超,刘樟荣,等. 西部生态脆弱区地表开采损害特征[J]. 中南大学学报(自然科学版),2017,48(11):2990-2997

[8] Liu H, Deng K Z, Lei S G, et al. Mechanism of Formation of Sliding Ground Fissure in Loess Hilly Areas Caused by Underground Mining[J]. International Journal of Mining and Technology,2015(4):553-558

[9] Zhang G J, Yu C X, Li L, et al. Monitoring Sluice Health in Vibration by Monocular Digital Photography and a Measurement Robot[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019(23):2666-2678

[10] Zuo J P, Yu M L, Li C Y, et al. Analysis of Surface Cracking and Fracture Behavior of a Single Thick Main Roof Based on Similar Model Experiments in Western Coal Mine, China[J]. Natural Resources Research, 2020, 30(1):657-680

[11] He X, Zhang C, Han P H, et al. Overburden Damage Degree-based Optimization of High-intensity Mining Parameters and Engineering Practices in China's Western Mining Area[J]. Geofluids,2020(4):1-21

[12] Alexande V, Davide E, Douglas S. Role of Rock Mass Fabric and Faulting in the Development of Block Caving Induced Surface Subsidence[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2010,43(5):533-556

[13] Yang B, Yang T H, Xu Z H, et al. Numerical Simulation of the Free Surface and Water Inflow of a Slope, Considering the Nonlinear Flow Properties of Gravel Layers: A Case Study [J]. Royal Society Open Science,2018 5(2):172109

[14] 李回贵,李化敏,汪华君,等. 弱胶结砂岩的物理力学特征及定义[J]. 煤炭科学技术,2017,45(10):1-7

[15] Zhang G J, Guo G, Shen S T, et al. Numerical Simulation Study of the Strata Movement Rule of Deep Mining with the Super-thick and Weak Cementation Overburden: A Case Study in China[J]. Hindawi Limited,2021(1):1-20

[16] Kowalski A. Surface Subsidence and Rate of Its Increments Based on Measurements and Theory[J]. Archives of Mining Sciences,2001,46(4):391-406

[17] 李建. 红旗铁矿改进Knothe时间函数开采沉陷预计模型[J]. 金属矿山,2018(3):132-136

[18] Kwinta A, Hejmanowski R, Sroka A. A Time Function Analysis Used for the Prediction of Rock Mass Subsidence[J]. Mining Science and Technology,1996,15(10):419-424

[19] 彭小沾,崔希民,臧永强,等. 时间函数与地表动态移动变形规律[J]. 北京科技大学学报,2004,26(4):341-344

[20] 常占强,王金庄. 关于地表点下沉时间函数的研究:改进的克诺特时间函数[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(9):1496-1499

[21] 李德海. 覆岩岩性对地表移动过程时间影响参数的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(22):3780-3784

[22] 王礼,王凯伦,闫红波. 基于Weibull时间函数的采煤沉陷区地表动态沉陷预测模型[J]. 中国矿业,2024,33(增刊2):158-162

[23] 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

[24] 亓立壮. 蒙西矿区开采地表沉陷监测与机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2022

[25] 苗伟,安士凯,徐燕飞,等. 基于分段Knothe时间函数的开采沉陷预计模型优化及应用[J]. 金属矿山,2024(6):153-158

[26] 郭文兵,白二虎,赵高博. 高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展[J]. 煤炭学报,2020,45(2):509-523

[27] 李全生,李晓斌,张凯,等. 基于"空天地"一体化技术的岩层采动损伤监测与应用[J]. 煤炭学报,2023,48(1):402-413

[28] 王琦,张广学,马贺平,等. 矿区开采沉陷预计实现与可视化表达[J]. 地理空间信息,2015,13(4):132-134

[29] 李青青,徐良骥,翟应峰. 基于ArcGIS Engine的开采沉陷数据处理和可视化[J]. 地理空间信息,2015,13(2):126-129