

灰色 Logistic I/II 模型在煤矿开采沉降预测中的应用

罗文柯^{1,2}, 施式亮^{1,2}, 刘影³, 周赞祥⁴

1. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083
2. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南湘潭 411201
3. 安徽工业大学建筑工程学院, 安徽马鞍山 243032
4. 金竹山矿业公司土珠煤矿, 湖南冷水江 417501

摘要 地下煤炭资源被人工采出以后, 因上覆岩层的失稳、垮落、重新密实而使地表出现开裂、塌陷和变形等地质灾害。传统的研究煤矿开采沉陷的方法主要有地质法、实地监测法、物理和数值模拟法等, 这些方法耗费大量人力、物力、财力, 且部分参数的获取十分困难。为了获得在煤矿开采区域内地表沉降情况的准确信息, 本文利用采动卸压原理和“三带”模型, 以湖南省金竹山矿业公司的土珠煤矿开采沉降实况为研究背景, 分析其地下采煤时地表裂缝与沉降的发生机制与特征。提出在开采垂直裂缝最大估算高度直接影响地表浅部的 2 煤层和 3 煤层时, 应根据理论分析和实地观测的方法进行沉降预测, 适时提供有效的安全预警信息; 在开采垂直裂缝最大估算高度不影响地表的深部煤层时, 可根据实际观测的历史数据建立灰色 Logistic I/II 模型进行地面沉降预测, 无须再进行实际监测。通过实践验证和模型精度检验表明, 灰色 Logistic I/II 模型预测精度高, 预测值与实际值拟合度高, 能准确提供有效信息, 为地表环境的复垦规划提供重要参考依据。

关键词 灰色理论; 地表沉降; 预测; 灰色 Logistic I/II 模型

中图分类号 TD173

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)11-0074-05

Application of Gray Logistic I/II Models in Subsidence Prediction in Mine Exploitation

LUO Wenke^{1,2}, SHI Shiliang^{1,2}, LIU Ying³, ZHOU Zanxiang⁴

1. School of Resource and Safety Engineering, Central Southern University, Changsha 410083, China
2. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan Province, China
3. School of Architecture and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, Anhui Province, China
4. Tuzhu Coal Mine of Jinzhushan Coal Mine Company, Lengshuijiang 417510, Hunan Province, China

Abstract After the exploitation of underground coal resources, the cracking, subsidence, deformation and other geological disasters may occur in the surface because of the instability of overlying strata, the collapse and the re-compacting. The traditional methods to deal with coal mine subsidence include geological methods, field monitoring, physical and numerical simulations and others, but they are often costly and time consuming, and some parameters are very difficult to identify. In order to obtain accurate information about the ground subsidence in coal mining, the mining-induced stress-relief principle and the "three-zone" model are applied in this paper, and the coal mining subsidence in Tuzhu Coal Mine of Jinzhushan Mining Company is studied. The occurrence mechanism and characteristics of surface cracks and settlement in underground coal mining are analyzed. It is suggested that: (1) when exploiting the shallow coal seams with a large estimate of vertical cracks which would directly affect the surface, one should make settlement prediction on the basis of theoretical

收稿日期: 2009-11-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50774033); 教育部科学技术研究项目 (206100); 国家安全生产监督管理局安全生产科技发展规划项目 (08-203, HN08-19, 06-394, 03-103); 湖南省自然科学基金项目 (06JJ2069); 湖南省教育厅科学研究项目 (05A013, G20504); 湖南省教育科学“十一五”规划课题 (XJY08BGD027); 湖南省高校科技创新团队支持计划项目

作者简介: 罗文柯, 高级工程师, 研究方向为采矿、岩土和安全技术, 电子信箱: hkdllwk@tom.com

analysis and field observation methods, to obtain timely effective security warning information; (2) when exploiting the deep coal seams with a large estimate of vertical cracks which do not affect the surface, one should, on the basis of the actual observation data, establish gray Logistic I/II models to predict the land subsidence, and without the need to carry out the practical monitoring. Practical verification and model accuracy test show that the Grey Logistic I/II models can make accurate predictions, with a good agreement between the predictive value and actual value. It can provide effective and accurate information, and also can provide an important reference for the reclamation planning of surface environment.

Keywords grey theory; ground subsidence; forecast; grey Logistic I/II model

0 引言

当前全球能源种类主要为石油、天然气、煤炭、核能、水电,其中石油、煤炭、天然气呈现出三足鼎立态势。中国是一个富煤缺油少气的国家,据1981年完成的第二次煤田预测表明,煤炭资源远景总量为 $7.06 \times 10^{10} \text{t}$,其中埋深在1000m内的浅部煤炭总储量达到 $2.6 \times 10^{10} \text{t}$;距地表下2000m内,在地壳表层范围内的约 $5.06 \times 10^{10} \text{t}$ 。根据“BP Statistical Review of World Energy June 2009”统计报告^[1],2008年度中国煤炭探明储量为 $1.145 \times 10^{10} \text{t}$,占世界煤炭探明储量的13.9%,居全世界第三;石油的探明储量是 1.55×10^{10} 桶,占全球的1.2%;天然气的探明储量为 $2.46 \times 10^{10} \text{m}^3$,仅占全球的1.3%。由此可见,煤炭资源的开发与利用对中国经济持续发展起着至关重要的作用,煤炭在我国短期内无法被其他能源所取代。据专家预测,到2020年在能源消费结构中煤炭的比重仍超过55%。因此,在今后相当长时间内,仍然需要保持煤炭行业的高产和稳产,以满足中国经济持续发展的需求。

然而,地下煤炭资源被人工采出以后,对环境的破坏也是灾难性的。如煤层被采出以后,采空区周围岩体的自然应力状态及上覆岩层内部的原始应力平衡状态便将遭受破坏,岩层内部的应力经重新分布以达到新的应力平衡,从而导致上覆岩层的移动与变形,最终产生地表沉降^[2-3]。为了保护地面建(构)筑物和人类活动免受开采的有害影响,以及防止水体溃入采空区淹没矿井,常常在井下留设大量矿柱^[4],造成大量煤炭资源不能开采。同时,开采沉陷对耕地的破坏亦十分严重,有些矿区平均开采1万t煤炭要破坏耕地3000~4000m²,图1所示的金竹山矿业公司土珠煤矿开采引起的地面破坏就是典型的实证之一。为此,采矿工程师自19世纪20年代比利时列日市发生大面积的地表移动而引起建筑物破坏以后,便开始了大量开采沉降的研究工作,经过近百年实践特别是近20多年的研究,煤矿开采的沉降问题已逐渐发展成为采矿和岩体力学学科中一个相对独立的分支学科,其研究内容、基本理论和技术方法被概括为矿山开采沉陷工程。主要研究方法包括地质研究法、室内岩块的物理力学性质测试法、现场实测研究法、结构力学分析法、物理模拟分析法、过程辨识法和综合分析法等^[5]。实践表明,这些方法往往既花费大量的人力、物力和财力,也无法为地面人类活动提供准确的安全预警信息。在这种情况下,探索一条能够准确预测地表沉降量发展趋势的全新途径势在必行^[6]。



图1 金竹山矿业公司土珠煤矿地表塌陷图

Fig. 1 Ground subsidence in Tuzhu coal mine of Jinzhushan Mining Company

1 土珠煤矿采动卸压原理分析与实际观测

1.1 土珠煤矿概况

土珠矿井位于金竹山矿区南部中段,西南起于石子岭断层及1[#]勘探线西200m,与一平硐相邻;东南至39[#]勘探线与托山相接,东北至88[#]勘探线与石湾井田相接,深部至-300m标高,走向长东南翼为4.4km,西北翼为2.9km,倾向宽为3.4km。分2个水平开采,一水平采用平硐、暗斜井开拓,开采标高为-50m以上,已经采毕。二水平采用暗斜井延伸,开采标高-50~-250m,现正在开采的是21采区和23采区,21采区已采至-85m标高。井田从上至下含煤7层。其中1煤、6煤与7煤为不可采煤层,2煤和4煤为局部可采煤层,3煤和5煤为主采煤层。煤层倾角为5°~70°,其中东南翼倾角平均为35°,西北翼平均为75°,向斜中部平均倾角为25°。5煤层存在有较多分支构造煤。矿井2、3、4煤均为无突出危险煤层,5煤及其构造煤为突出危险煤层,其地层构造状况(括号内为煤层厚度)是:地表—石英砾岩(3.5m)—砂泥岩互层(含1煤煤线,2.0m)—2煤(1.0m)—泥岩(2.1m)—石英砂岩(3.0m)—砂质泥岩(2.0m)—3煤(2.0m)—泥岩(4.0m)—细砂岩(3.0m)—4煤(0.8m)—砂岩(4.6m)—砂质泥岩(2.5m)—5煤(1.37m)—砂质泥岩(3.6m)—砂岩(10.35m)—泥岩(5.56m)。

1.2 采动卸压原理分析

采动破坏的造缝作用在采空区上方垂直方向上形成“三带”:冒落带、裂隙带和弯曲下沉带,煤层开采在上覆岩层中形成的采动裂缝垂直裂缝分带模型如图2所示。

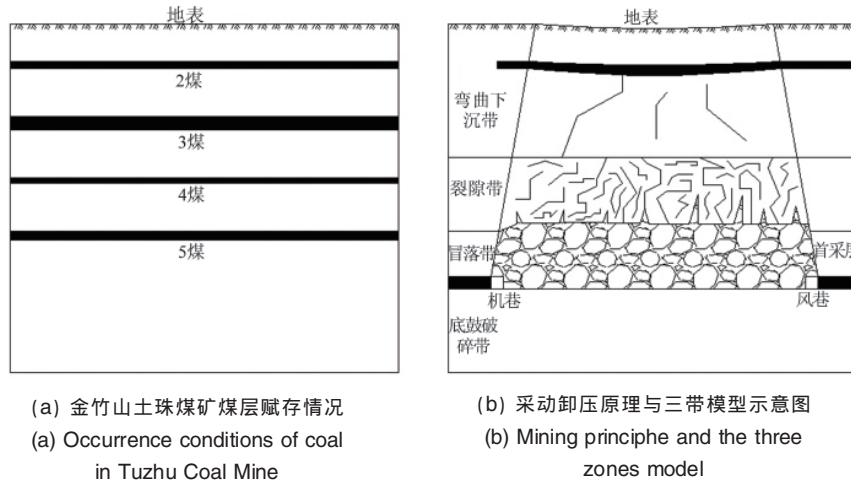


图2 采动裂缝垂直分带模型
Fig. 2 Vertical zoning model of fissures caused by underground mining

1) 冒落带(形成贯通采场的空洞与裂缝网络通道,是地表裂缝和沉降产生的直接原因)是指用全部垮落法管理顶板时,回采工作面放顶后引起煤层顶板岩层产生冒落破坏的范围,是引起地表沉降和裂缝的直接原因。冒落带内的岩层破坏特性有:①随着煤层的开采,顶板岩层在自重的作用下,发生弯曲、断裂、破碎成块而冒落。冒落岩块大小不一,无规则地堆积在采空区内;②冒落岩石具有一定的碎胀性,冒落岩石的体积大于冒落前的原岩体积,是使冒落能自行停止和减少地表沉降量的根本原因;③冒落岩石具有可压缩性,冒落岩块的空隙随着上覆岩层下沉和压力的增大,在一定程度上可得到压实,但永远不会恢复到原岩体的体积;④冒落带的高度主要取决于采出煤层厚度、上覆岩石的碎胀系数和倾角等,通常为采出厚度的3~5倍,生产实践可用下式近似估算冒高:

$$H_{\text{冒}} = \frac{100M}{6.2M+32} + 1.5 \quad (1)$$

式中 M 为煤层采高, m。

由式(1)计算可得土珠煤矿2煤、3煤、4煤、5煤开采引起的近似冒高分别是4.12、6.01、3.67和4.88m。

2) 裂隙带(形成层向与垂直裂缝网络通道,是地表裂缝产生的间接原因)是指在采空区上覆岩层中产生裂缝、离层及断裂,但仍保持层状结构的那部分岩层及所属的空间范围,通常位于冒落带和弯曲下沉带之间,其破坏特征是:岩层不仅产生顺层理面的离层,而且产生大量垂直于层理面的裂缝或断裂,有的裂缝直接与地表沟通,严重影响地表的建(构)筑物,直接威胁地面人类的生产活动。裂隙带的高度一般为采高的10~30倍,影响裂隙带高度的最主要因素是上覆岩层的性质,其次是煤层开采厚度、开采方法、工作面长度、工作面推进速度和煤层倾角。其最大高度估算公式为

$$H_{\text{裂}} = \frac{100M}{3.1M+5} + 4.0 \quad (2)$$

由式(2)计算可以得出土珠煤矿2煤、3煤、4煤和5煤开采引起的最大裂隙高度分别是16.35、21.86、14.70和18.82m。

3) 弯曲下沉带(形成层内层向裂缝网络通道,是引起地表沉降的直接原因)位于裂隙带之上直至地面,是煤矿开采引起地面沉降和塌陷的直接表现者。其岩层的移动特点有:①岩层在自重力的作用下产生层面法向弯曲,在水平方向处于双向受压缩状态;②弯曲带内岩层的沉降过程是连续而有规律的,并保持其整体性和层状结构,不存在或极少存在离层裂缝;③弯曲带的高度主要受开采深度的影响,当采深很大时,弯曲带的高度可大大超过冒落带和裂隙带的高度之和。此时开采形成的裂隙带不会达到地表,地面的移动和变形相对比较平缓。

根据上述计算结果看出,土珠煤矿2煤、3煤、4煤、5煤的冒落带与裂隙带加和之最大高度分别是20.47、27.87、18.37和23.7m,对比各煤层的赋存情况可以看出,当开采2煤和主采3煤时,其冒落带和裂隙带的最大高度均可直达地表。故在开采2煤和3煤时,应对地面建筑物内人员组织安全撤离,且加强对地表的变形观测。

1.3 开采2煤和3煤时地表位移的实际观测

根据采动卸压的“三带”模型分析可知,开采2煤和3煤时,冒落带和裂隙带的最大高度均可直达地表,为了给地表人类活动提供有效的安全预警信息,土珠煤矿于2003年开始分别在矿区中心区域的走向线设置了1#~10#共10个观测点,在倾向方向设置了11#~21#共11个观测点,进行实地观测,观测频率是每月2次。就观测的历史数据而言,每个单测点的高程变化波动性较大的发生时间是在该测点下的2煤和3煤的采煤活动阶段,在开采4煤和5煤时地表沉降量很小,与“三带”分析结论相同。为后面灰色预测需要,现取21#观测点2007年1—8月实际观测的记录如表1所示。

表 1 土珠煤矿 2007 年 1-8 月 21# 观测点高程实测值
Table 1 Height value of no. 21 observation point in Tuzhu Coal
Mine from Jan. to Aug. in 2007

实际观测时期	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月
21# 测点实际高程/m	239.429	239.426	239.427	239.425	239.424	239.426	239.421	239.419

2 开采 4 煤和 5 煤时地表沉降的灰色预测

灰色预测是从灰色系统的建模、关联度及残差辨识的思想出发,获得关于预测的新概念、观点和方法。一般可分为灰色生成、参数计算以及精度检验^[7],GM(1, 1)是典型的灰色预测模型,其突出优点在于:“贫”信息情况下能获得较好的预测效果。然而预测实践表明,利用 GM(1, 1)模型进行预测,有时效果甚佳,有时却出现很大偏差,甚至完全失效^[8-12]。煤矿开采沉降受煤层赋存条件、上覆岩层的性质、开采方法、水文地质条件等诸多因素影响,一些信息已知,一些信息未知或不确定,符合灰色系统的建模条件。为了对土珠煤矿开采 4 煤和 5 煤时能提供有效的安全预警信息,宜选用同小军等^[14]提出的灰色 Logistic I/II 模型进行后期开采的地表沉降量的预测,以便为复垦规划和建筑物的修复提供重要参考依据。为体现灰色 Logistic I/II 模型的优越性,在实证计算时,同时计算 GM(1,1)的预测值。

2.1 灰色 Logistic I/II 模型的建立与计算步骤

令原始数据为 $Y^{(0)}, y^{(0)}(i) > 0$ 。对 $Y^{(0)}$ 采用倒数变换进行生成处理为 $X^{(0)}$, 即令 $x^{(0)}(i) = 1/(y^{(0)}(i)) (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

对于原始数据序列 $x^{(0)}(i) = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$, 一般利用下列方程组的最小二乘解

$$\begin{bmatrix} x^{(1)}(2)+x^{(1)}(3) & 2 & 1 \\ x^{(1)}(3)+x^{(1)}(4) & 3 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x^{(1)}(n-1)+x^{(1)}(n) & n-1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n-1) \end{bmatrix} - 2 \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) \\ x^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n-1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)解得 p_2 后,再根据 $p_2 = -e^a$ (e 为自然数),则可解得参数 a_1 ,此法即为 Logistic I 型法。

对于具有相对误差的原始数据序列 $x(0) = \{x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0\}$, 一般利用下列方程组的最小二乘解

$$\begin{bmatrix} x^{(1)}(3) & 2 & 1 & 1 \\ x^{(1)}(4) & 3 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x^{(1)}(n) & n-1 & f(n-1) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n-1) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x^{(1)}(2) \\ x^{(1)}(3) \\ \vdots \\ x^{(1)}(n-1) \end{bmatrix} \quad (4)$$

由式(4)求得 p_2 后,再根据 $p_2 = -e^{2a}$,解得参数 a_{II} ,称为 Logistic II 型法。

利用 $x^{(0)}(k) = be^{-ak} + c$,通过线性拟合得到参数 b, c ,从而得灰色 Logistic I/II 模型的还原模型为

$$\hat{y}^{(0)}(k) = \frac{1}{c + be^{-ak}}$$

2.2 灰色 Logistic I/II 模型的精度检验

对上述求得的各种模型进行精度检验。检验公式为

$$q^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k) \quad \varepsilon(k) = \frac{q^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)}$$

式中, $q^{(0)}(k)$ 为残差; $\varepsilon(k)$ 为相对误差, $k = 1, 2, \dots, n$ 。

用后验差检验。检验步骤如下:

- 1) 求 $x^{(0)}(k)$ 的平均值 $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x^{(0)}(k)$;
- 2) 求残差 $q^{(0)}(k)$ 的平均值 $\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q^{(0)}(k)$;
- 3) 求 $x^{(0)}(k)$ 的方差 $S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [x^{(0)}(k) - \bar{x}]^2$;
- 4) 求残差 $q^{(0)}(k)$ 的方差 $S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [q^{(0)}(k) - \bar{q}]^2$;
- 5) 求后验差比值 $c = \frac{S_2}{S_1}$;
- 6) 求小误差概率 $p = \{ |q_i - \bar{q}| < 0.6745 S_1 \} (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

一个好的预测模型要求 c 越小越好,按 p 与 c 的大小,可将预测精度分为 4 个等级,如表 2 所示。

表 2 预测精度等级
Table 2 Prediction accuracy level

预测模型等级		小误差概率	后验差比值
1 级	好	$p > 0.95$	$c < 0.35$
2 级	合格	$0.85 < p \leq 0.95$	$0.45 < c \leq 0.35$
3 级	勉强	$0.70 < p \leq 0.85$	$0.65 < c \leq 0.45$
4 级	不合格	$p \leq 0.70$	≥ 0.65

2.3 灰色 Logistic I/II 预测的实证计算

为计算方便,取各测量高程的小数点后数字作为 $Y^{(0)}$,根据式(3)和式(4),利用 Matlab 软件计算得灰色 Logistic I/II 预测模型的辨识参数分别为: $a_I = -0.733761$ 和 $a_{II} = -0.8703$; 再由其背景函数: $x^{(0)}(k) = be^{-ak} + c$,利用 Originpro 软件作图得到其线性拟合参数: $b_I = 1.31384 \times 10^{-4}$, $c_I = 2.34397$; $b_{II} = 4.32026 \times 10^{-5}$, $c_{II} = 2.34532$ 。故灰色 Logistic I 和 II 预测模型分别为

$$\begin{aligned} \hat{y}_I^{(0)} &= 1 / (2.34397 + 1.31383 \times 10^{-4} e^{0.733761k}) \\ \hat{y}_{II}^{(0)} &= 1 / (2.34532 + 4.32026 \times 10^{-5} e^{0.8703k}) \end{aligned} \quad (5)$$

由式(5)计算其预测值并进行精度检验,如表 3 所示。

由表 3 可以看出,在开采 4 煤和 5 煤及采煤活动后阶段,利用灰色 Logistic I 和 Logistic II 模型预测地表沉降量时,其预测精度高、数据可靠,能适时提供有效安全预警信息,减少实际观测所需人力、物力和财力,且为煤矿地表的复垦规划提供重要数据信息。

表 3 21[#] 观测点采煤活动的灰色 Logistic 模型预测技术与精度检验

Table 3 Grey Logistic model prediction technology and precision test in coal mining of no. 21 observation point

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	
实际观测值 $Y^{(0)}(239+)$	0.429	0.426	0.427	0.425	0.424	0.426	0.421	0.419	
倒数变换处理得 $X^{(0)}$	2.331	2.3474	2.3419	2.3529	2.3585	2.3474	2.3753	2.3866	
累加生成得 $(1-AGO)Y^{(0)}$	2.331	4.6784	7.0203	9.3732	11.7317	14.0791	16.4544	18.841	
Logistic I 预测值 $\hat{Y}_I^{(0)}$	0.4266	0.4265	0.4264	0.4262	0.4257	0.4247	0.4226	0.4183	
Logistic II 预测值 $\hat{Y}_{II}^{(0)}$	0.4264	0.4263	0.4263	0.4261	0.4258	0.4249	0.4229	0.4182	
精度 检 验	I 型相对误差 $\varepsilon_I^{(0)}$	0.0024	-0.0005	0.0006	-0.0011	-0.0017	0.0013	-0.0016	0.0007
	II 型相对误差 $\varepsilon_{II}^{(0)}$	0.0026	-0.0003	0.0007	-0.0011	-0.0018	0.0011	-0.0019	0.0008
	$x^{(0)}(k)$ 平均值 $\bar{x}$	2.3551							
	$x^{(0)}(k)$ 方差 S_I^2	0.0000289 ($S_I=0.0017$)							
	残差平均值 $\bar{q}$	$\bar{q}_I=0.0000125, \bar{q}_{II}=0.0000125$							
	Logistic I 预测等级	$S_I^2=0.0000019$		$c=0.081<0.35$		$p=1>0.95$		1 级 (好)	
	Logistic II 预测等级	$S_{II}^2=0.0000021$		$c=0.085<0.35$		$p=1>0.95$		1 级 (好)	

注:下标 I、II 分别表示 Logistic I 和 Logistic II 预测模型。
Notes: Subscripts I and II denote, respectively, Logistic I and Logistic II prediction models.

3 结论

- 1) 根据采动“三带”理论分析得知土珠煤矿的 2 煤与 3 煤开采时,因采空区顶板的垮落使垂直裂缝直达地表,对地表建筑设施和人类活动威胁很大,故在此采煤活动阶段应组织专业人员进行实地观察,并及时提供安全预警信息。
- 2) 因冒落带岩石的碎胀性,使之地表的沉降量远小于 2 煤与 3 煤采高之和。
- 3) 采煤活动引起的地表沉降受诸多已知和非已知或不确定因素影响,具备灰色系统理论特性。
- 4) 利用灰色系统理论,根据开采 2 煤与 3 煤时实际观测各点的历史数据建立灰色 Logistic I/II 预测模型,对 4 煤和 5 煤开采和采煤活动后阶段进行灰色预测,通过残差精度检验发现,灰色 Logistic I/II 预测模型均属一级(好)模型,预测结果与实际观测结果拟合度高,为地面提供了有效的安全预警信息,且能为地表环境的复垦规划提供重要参考依据。
- 5) 欲获准确煤矿开采地表沉降信息,应采取理论分析、实地观察和灰色预测综合措施。

参考文献 (References)

[1] BP Statistical Review of World Energy June 2009 [M/OL]. 2009, http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2008/STAGING/local_assets/2009_downloads/statistical_review_of_world_energy_full_report_2009.pdf.

[2] 段丽丽, 朱明. 矿区地面沉降的危害及其防治 [J]. 河北理工学院学报, 2007, 2(1): 122-124.
Duan Lili, Zhu Ming. *Journal of Hebei Institute of Technology*, 2007, 2 (1): 122-124.

[3] 刘毅. 确定大江大河防洪堤高度应考虑地面沉降因素 [J]. 上海地质, 1998(3): 6-12.
Liu Yi. *Shanghai Geology*, 1998(3): 6-12.

[4] 王东飞. 综采放顶煤开采技术对土地塌陷的影响研究 [D]. 北京: 中国农业大学资源与环境学院, 2004.
Wang Dongfei. The study on the effects of surface subsidence by the techniques of fully mechanized mining with sublevel coal coving [D].

Beijing: College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, 2004.

[5] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉降工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
Zou Youfeng, Deng Kazhong, Ma Weimin. *Mining subsidence engineering* [M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 2003.

[6] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1987.
Deng Julong. *The primary methods of grey system theory* [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.

[7] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1992.
Fu Li. *Grey system theory and application* [M]. Beijing: Scientific and Technological Literature Publishing House, 1992.

[8] 罗文柯, 施式亮, 胡筱斌. 基于混沌、灰色理论模型, 预测煤矿生产中安全状况的对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2008, 10(10): 34-39.
Luo Wenke, Shi Shiliang, Hu Xiaobin. *China Safety Science Journal*, 2008, 10(10): 34-39.

[9] 刘金海, 冯涛, 谢东海. 煤层突出危险性预测的可拓方法[J]. 湖南科技大学学报: 自然科学版, 2008, 23(3): 28-31.
Liu Jinhai, Feng Tao, Xie Donghai. *Journal of Hunan University of Science & Technology: Natural Science Edition*, 2008, 23(3): 28-31.

[10] 李学全, 李春生. 一种改进的模糊变权重组合预测方法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2003, 34(6): 708-709.
Li Xuejin, Li Chunsheng. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2003, 34(6): 708-709.

[11] 吴大志, 李夕兵, 蒋卫东. 灰色理论在公路堤沉降预测中的应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2002, 33(3): 230-233.
Wu Dazhi, Li Xibin, Jiang Weidong. *Journal of Central South University of Technology: Science and Technology*, 2002, 33(3): 230-233.

[12] 徐志胜, 白国强, 冯凯. 灰色预测理论在火灾损失预测中的应用[J]. 湘潭矿业学院学报, 2004, 19(1): 24-26.
Xu Zhisheng, Bai Guoqiang, Feng Kai. *Journal of Xiangtan Mining Institute*, 2004, 19(1): 24-26.

[13] 熊和金, 徐化中. 灰色系统控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
Xiong Hejin, Xu Huazhong. *Grey system control* [M]. Beijing: Defense Industry Press, 2005.

[14] 同小军, 张洪林. 两种灰色模型的对比与分析[J]. 武汉工业学院学报, 2003, 22(4): 101-104.
Tong Xiaojun, Zhang Honglin. *Journal of Wuhan Polytechnic University*, 2003, 22(4): 101-104.

(责任编辑 岳臣)