

文章编号: 1001-1986(2016)02-0019-05

# 基于灰熵法的深部煤层瓦斯含量影响因素分析及预测

周鑫隆<sup>1</sup>, 汤 静<sup>2</sup>, 石必明<sup>2,3</sup>, 吕 辰<sup>2</sup>

(1. 宁波工程学院安全工程学院, 浙江 宁波 315016; 2. 安徽理工大学能源与安全学院, 安徽 淮南 232001; 3. 煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 为了提高深部煤层瓦斯含量的预测精度, 提出了采用灰熵分析法对瓦斯含量影响因素进行研究, 以潘三矿深部 11-2 煤层为例, 根据灰熵关联度的大小选取不同的影响因素分别建立了 GM(1,3)、GM(1,4) 和 GM(1,5) 预测模型, 依据精度检验结果选择精度更高的瓦斯预测模型。研究结果表明, 影响潘三矿深部 11-2 煤层瓦斯含量的因素重要程度从大到小依次为: 主断层距离、煤层埋深、煤厚、顶板砂泥比、煤层倾角。由此建立的 3 个模型的预测精度都在合格以上, 其中 GM(1,4) 模型预测精度达到了 1 级, 平均相对误差为 5.063 6%, 可采用该模型对 11-2 煤层瓦斯含量进行预测, 为深部煤与瓦斯安全高效开采提供可靠依据。

**关 键 词:** 瓦斯含量; 灰熵分析法; 预测精度; GM(1,N)模型

中图分类号: P54 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2016.02.004

## Analysis and forecast of influential factors of gas content in deep coal seam on the basis of the grey entropy

ZHOU Xinlong<sup>1</sup>, TANG Jing<sup>2</sup>, SHI Biming<sup>2,3</sup>, LYU Chen<sup>2</sup>

(1. School of Safety Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China;  
2. School of Mining and Safety, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;  
3. Key Laboratory of Safety and High-efficiency Coal Mining, Ministry of Education,  
Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to improve the forecast precision of gas content in deep coal seam, taking deep coal seam No.11-2 in Pansan coal mine as example, grey entropy is proposed to research influencing factors of gas content. The GM(1,3), GM(1,4) and GM(1,5) gas content forecasting models are established to select an appropriate model with the highest forecasting precision according to the size of different influencing factors of grey entropy relation degree. The results show that the influencing factors of gas content in deep coal seam No.11-2 are in decreasing order the main fault distance, the buried depth of coal seam, coal seam thickness, the ratio of the sandstone and mudstone in coal seam roof and dip. The forecast precision of GM models is higher than the qualified level. What's more, the precision of GM(1,4) model reaches the first grade and average relative error is 5.0636%. In conclusion, GM(1,4) model can be adopted to accurately forecast gas content in deep coal seam No.11-2, which provides reliable references for safe and high-efficiency coal mining.

**Key words:** gas content; grey entropy; forecast precision; GM(1,N) model

瓦斯含量预测是瓦斯防治的基础, 也是瓦斯地质研究的主要方向<sup>[1]</sup>。随着我国煤炭需求量的不断增加, 矿井生产逐步朝着大深度、高瓦斯区域延伸, 进入 700~1 000 m 的深部开采阶段, 煤层瓦斯含量的准确预测也成为深部煤与瓦斯安全高效开采的一

个难题。

目前常用的瓦斯含量分析预测方法有建立在数理统计基础上的矿山统计法、线性回归分析法、神经网络分析法等。但由于深部环境的复杂性和不确定性, 实测数据量少, 瓦斯含量分布离散度高, 以

收稿日期: 2015-08-12

基金项目: 宁波工程学院校级科研项目(2015002)

Foundation item : The Scientific Research Project of Ningbo University of Technology(2015002)

作者简介: 周鑫隆(1989—), 男, 湖北襄阳人, 硕士, 从事安全工程方面工作。E-mail: mfk4vvf@163.com

引用格式: 周鑫隆, 汤静, 石必明, 等. 基于灰熵法的深部煤层瓦斯含量影响因素分析及预测[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(2): 19–23.

ZHOU Xinlong, TANG Jing, SHI Biming, et al. Analysis and forecast of influential factors of gas content in deep coal seam on the basis of the grey entropy[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(2): 19–23.

上方法并不完全适用于深部煤层瓦斯含量的准确分析预测。深部煤层瓦斯含量是各种复杂、不确定因素综合作用的结果，瓦斯含量及其影响因素实际上就是一个灰色系统<sup>[2-3]</sup>。相比于线性回归分析、神经网络分析法等更能够清晰、明确地反映瓦斯含量及其影响因素间的内在变化规律和动态变化过程<sup>[3]</sup>。因此，很多学者通过灰色关联分析的方法选择关联度较高的因素来构建灰色预测模型，但存在微观或宏观局部关联倾向、个性信息损失等缺点，预测模型精度不高<sup>[4-5]</sup>。为解决以上难题，本文提出了采用灰熵分析法对瓦斯含量影响因素进行研究，选取不同的影响因素构建多个灰色预测模型，寻求精度最高的模型进行瓦斯含量预测。

## 1 灰熵关联分析法

灰熵关联分析法是一种多因素统计分析方法，以各因素不完全或不确定的信息样本数据为依据，通过数据处理，提炼出影响系统的主要因素及主要特征和因素间对系统影响的差别。灰熵关联分析法对样本量少和样本数据离散均适用，通过对动态随机过程的发展趋势进行整体关联性分析，来揭示影响系统重要因素和各因素对系统影响的差异<sup>[6-7]</sup>。

### 1.1 原始数据变换

对一个灰色系统进行灰熵关联度计算时，首先确定分析序列<sup>[6]</sup>：一个因变量因素  $x_0^{(0)}$  和多个自变量因素  $x_i^{(0)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。

$$\begin{aligned} x_0^{(0)} &= (x_0^{(0)}(1), x_0^{(0)}(2), \dots, x_0^{(0)}(n)) \\ x_1^{(0)} &= (x_1^{(0)}(1), x_1^{(0)}(2), \dots, x_1^{(0)}(n)) \\ x_2^{(0)} &= (x_2^{(0)}(1), x_2^{(0)}(2), \dots, x_2^{(0)}(n)) \\ &\vdots \\ x_m^{(0)} &= (x_m^{(0)}(1), x_m^{(0)}(2), \dots, x_m^{(0)}(n)) \end{aligned}$$

由于各原始序列具有不同的量纲和数量级，需要进行无量纲化处理，得到具有可比性的新序列。常用的无量纲化方法有初值化、均值化和极差化等<sup>[8]</sup>，本文对原始序列进行均值化处理。均值化就是用每个序列数据除以该列数据的平均值，从而得到新序列  $x_0^{(1)}(k)$  和  $x_i^{(1)}(k)$ 。

### 1.2 计算灰关联系数

比较序列与参考序列间的灰关联系数<sup>[9]</sup>为：

$$\Delta_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{|x_0^{(1)}(k) - x_i^{(1)}(k)| + \zeta \Delta_{\max}} \quad (1)$$

式中  $\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$  分别为两级最大差和最小差，

$$\Delta_{\max} = \max_i \max_k |x_0^{(1)}(k) - x_i^{(1)}(k)| \quad (2)$$

$$\Delta_{\min} = \min_i \min_k |x_0^{(1)}(k) - x_i^{(1)}(k)| \quad (3)$$

$\zeta$  为分辨系数， $0 < \zeta < 1$ ，一般取 0.5。 $\Delta_{\max}$  反映着参考序列与比较序列的差异性，它的存在体现了系统对各影响因素与关联度的间接影响程度。在式(1)中， $\zeta$  相当于  $\Delta_{\max}$  的系数或权重， $\zeta$  的取值直接影响到系统的整体性。 $\zeta$  取值过小， $\Delta_{\max}$  对分析结果影响不大；取值过大，又不能正确反映序列的差异性。因此， $\zeta$  的取值要求既要体现出系统的整体性，又要能够抑制、降低序列中异常值的干扰<sup>[10-11]</sup>。分辨系数  $\zeta$  的确定方法为

$$\Delta_i = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n |x_0^{(1)}(k) - x_i^{(1)}(k)| \quad (4)$$

记  $\tau = \frac{\Delta_i}{\Delta_{\max}}$ ，则  $\zeta$  的取值区间为

$$\begin{aligned} \Delta_{\max} > 3\Delta_i, \quad \tau \leq \zeta \leq 1.5\tau \\ \Delta_{\max} \leq 3\Delta_i, \quad 1.5\tau < \zeta \leq 2\tau \end{aligned} \quad (5)$$

### 1.3 灰熵关联度

设  $P_i(k)$  为灰色关联系数分布映射密度值，其值<sup>[5]</sup>为：

$$P_i(k) = \frac{\delta_i(k)}{\sum_{i=1}^n \delta_i(k)} \quad (6)$$

则  $x_i$  的灰关联熵为：

$$H_i = -\sum_{i=1}^n P_i(k) \ln P_i(k) \quad (7)$$

则序列  $x_i$  的熵关联度为：

$$E_i(x_i) = \frac{H_i}{H_{\max}} \quad (8)$$

式中  $H_{\max} = \ln n$ ，代表由  $n$  个属性元素组成的差异信息列的最大熵。

## 2 深部煤层瓦斯含量影响因素灰熵分析

### 2.1 深部煤层瓦斯参数

煤层瓦斯含量的大小主要受煤层储气条件的影响，储气条件主要包括煤层的埋藏深度、煤层厚度、围岩的透气性、煤层倾角等因素<sup>[12]</sup>。表 1 为潘三矿 11-2 煤层矿井生产期间以及郑飞等<sup>[13]</sup>统计的部分瓦斯数据。

### 2.2 瓦斯含量影响因素灰熵分析

取表 1 中的瓦斯含量为参考序列  $x_0$ ，其他参数分别为  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$ 、 $x_5$ 。采用均值化对原始数据进行无量纲化处理得到新数列  $x_0^{(1)}(k)$  和  $x_i^{(1)}(k)$ ，得到的新序列数据代入式(1)–式(5)中，计算得出  $\Delta_{\max}=1.825325$ ， $\Delta_{\min}=0.006637$ ， $\zeta$  取值为 0.16。根据式(1)计算得出灰关联系数如表 2 所示。根据式(6)计算得出灰关联系数映射密度值如表 3 所示。

表 1 潘三矿 11-2 煤层瓦斯参数表  
Table 1 Gas parameters of coal seam No.11-2 in Pansan mine

钻孔编号	瓦斯含量/(m <sup>3</sup> ·t <sup>-1</sup> )	埋深(x <sub>1</sub> )/m	主断层距离(x <sub>2</sub> )/m	顶板砂泥比(x <sub>3</sub> )	煤厚(x <sub>4</sub> )/m	倾角(x <sub>5</sub> )/(°)
1	6.32	673.1	840.3	0.972	1.88	10
2	7.29	726.76	673.39	0.763	1.9	10
3	7.21	705.28	891.7	0.907	1.86	7
4	6.9	680.23	807.47	1.01	1.78	5
5	6.96	685.81	867.85	0.869	1.81	7
6	6.74	704.18	739.71	0.894	1.9	8
7	6.78	661.65	757.33	0.808	1.85	5
8	6.29	672.41	800.42	1.095	1.73	8
9	6.24	639.13	751.58	0.982	1.89	5
10	6.19	655.75	780.72	0.902	1.66	5
11	6.46	697.13	773.83	1.035	1.75	15
12	7.21	705.28	891.7	0.907	1.86	7

表 2 灰关联系数表  
Table 2 Grey relation coefficient

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\delta_1$	0.571	0.726	0.833	0.782	0.875	0.957	1.000	0.892	0.871	0.683	0.691	0.619
$\delta_2$	0.641	0.725	0.903	0.826	0.991	0.891	0.757	0.810	0.948	0.916	0.929	0.953
$\delta_3$	0.503	0.341	0.355	0.521	0.712	0.659	0.893	0.765	0.528	0.361	0.365	0.329
$\delta_4$	0.551	0.622	0.737	0.770	0.939	0.892	0.911	0.845	0.826	0.638	0.613	0.634
$\delta_5$	0.993	0.581	0.892	0.517	0.141	0.517	0.446	0.611	0.468	0.335	0.334	0.450

表 3 灰色关联系数分布映射密度值  
Table 3 Density mapped by the distribution of grey relation coefficient

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$P_1$	0.060	0.076	0.088	0.082	0.092	0.101	0.105	0.094	0.092	0.072	0.073	0.065
$P_2$	0.062	0.071	0.088	0.080	0.096	0.087	0.074	0.079	0.092	0.089	0.090	0.093
$P_3$	0.079	0.054	0.056	0.082	0.112	0.104	0.141	0.121	0.083	0.057	0.058	0.052
$P_4$	0.061	0.069	0.082	0.086	0.105	0.099	0.101	0.094	0.092	0.071	0.068	0.071
$P_5$	0.158	0.092	0.142	0.082	0.022	0.082	0.071	0.097	0.074	0.053	0.053	0.072

根据式(7), 计算得出灰关联熵, 结果如表 4 所示。由式(8)计算灰熵关联度, 各因素灰熵关联度如图 1 所示。

### 3 深部煤层瓦斯含量灰色预测

#### 3.1 GM(1,N)瓦斯含量预测模型

灰色系统预测主要是对贫信息、不确定性系统进行预测。灰色预测法基于灰色系统理论, 采用累加生成操作(AGO)等技术对原始数据进行“生成”变换, 削弱原始数据中的随机性和波动性, 利用具有较强规律性的新数列建立 GM 预测模型<sup>[14-15]</sup>。

GM(1,N)表示由 1 阶、N 个变量的线性微分方程导出的灰色预测模型<sup>[16]</sup>。该模型的建模步骤如下。

设原始数据序列  $x_i^{(0)}(k)$  有 n 个观察值, N 个原始数据序列,  $i=1,2,\dots,N$ ,  $k=1,2,\dots,n$ 。利用 1-AGO 技术作一次累加生成, 得出新序列  $x_i^{(1)}(k)$ 。对  $x_i^{(1)}(k)$  建立白化形式的微分方程<sup>[17]</sup>:

表 4 各影响因素灰关联熵

Table 4 Grey relation entropy of influential factors

影响因素	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
灰关联熵	2.471 4	2.477 6	2.426 9	2.470 1	2.393 7
灰熵关联度	1.535	1.540	1.508	1.532	1.485

由灰熵分析法的原理可知: 影响因素的显著性随着灰熵关联度的增大而增强。从图 1 可以看出, 影响深部煤层瓦斯含量的因素重要程度从小到大依次为: 主断层距离、煤层埋深、煤厚、顶板砂泥比、煤层倾角。

$$\frac{dx_1^{(1)}}{dt} + ax_1^{(1)} = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)} \quad (9)$$

根据最小二乘法参数列  $\hat{a} = [a, b_1, b_2, \dots, b_N]^T$  满足  $\hat{a} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{Y}_N$ , 其中

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(x_1^{(1)}(1) + x_1^{(1)}(2)) & x_2^{(1)}(2) & \cdots & x_N^{(1)}(2) \\ -\frac{1}{2}(x_1^{(1)}(2) + x_1^{(1)}(3)) & x_2^{(1)}(3) & \cdots & x_N^{(1)}(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x_1^{(1)}(n-1) + x_1^{(1)}(n)) & x_2^{(1)}(n) & \cdots & x_N^{(1)}(2) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{Y}_N = \begin{pmatrix} x_1^{(0)}(2) & x_1^{(0)}(3) & \cdots & x_1^{(0)}(n) \end{pmatrix}^T \quad (11)$$

GM(1,N)的灰色预测模型的预测方程<sup>[7]</sup>为

$$x_1^{(1)}(k+1) = (x_1^{(1)}(0) - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1)) e^{-ak} + \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1) \quad (12)$$

式中  $x_1^{(1)}(0)=x_1^{(0)}(1)$ , 则累减还原得出模拟值<sup>[7]</sup>为

$$x_1^{(0)}(k+1) = x_1^{(1)}(k+1) - x_1^{(1)}(k) \quad (13)$$

通过误差检验公式对模拟值进行精度检测, 若模拟值与实际值的误差满足精度要求, 则模型可用于系统预测<sup>[18]</sup>。检验公式见表 5。

其中,  $c$  和  $p$  两项指标的精度检验等级见表 6。

GM(1,3)模型预测方程:

$$x_1^{(1)}(k+1) = (6.42 + 0.002 556 x_2(k+1) - 0.006 465 x_3(k+1) - 1.843 9 x_4(k+1)) e^{-1.330 2k} - 0.002 556 x_2(k+1) + 0.006 465 x_3(k+1) + 1.843 9 x_4(k+1)$$

GM(1,4)模型预测方程:

$$x_1^{(1)}(k+1) = (6.42 - 0.001 22 x_2(k+1) - 0.002 44 x_3(k+1) + 3.385 17 x_4(k+1) - 3.807 82 x_5(k+1)) e^{-1.229 6k} + 0.001 22 x_2(k+1) - 0.002 44 x_3(k+1) + 3.385 17 x_4(k+1) - 3.807 82 x_5(k+1)$$

GM(1,5)模型预测方程:

$$x_1^{(1)}(k+1) = (6.42 - 0.003 59 x_2(k+1) - 0.001 97 x_3(k+1) + 3.154 72 x_4(k+1) - 3.181 15 x_5(k+1) + 0.028 053 x_6(k+1)) e^{-1.1692k} + 0.003 59 x_2(k+1) + 0.001 97 x_3(k+1) - 3.154 72 x_4(k+1) + 3.181 15 x_5(k+1) - 0.028 053 x_6(k+1)$$

### 3.3 GM(1,N)预测模型误差分析和精度分析

将潘三矿深部煤层瓦斯含量实测值与 GM 预测模型预测值进行分析比较(图 1), 以此计算出瓦斯含量实际值与预测值之间的残差、相对误差和平均相对误差值(表 7), 并根据表 5、表 6 对模型进行精度检验(表 8)。

从图 1 和表 7 中可以看出, 除了前 3 个点之外, 各预测模型的预测值与实测值误差非常小, 拟合曲线也非常吻合, GM(1,3)、GM(1,4) 和 GM(1,5)模型的相对误差分别为 5.018 2%、5.063 6% 和 4.836 4%。从表 8 中可以看出, GM(1,3) 和 GM(1,5) 预测模型的精度等级为 2 级, 且分析后验差检验比值  $c$  和平均相对误差可知后者相对于前者预测结果要准确。而

表 5 误差检验计算公式  
Table 5 Formulas for checking computation of residual errors

	残差	原始数据
均差	$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^{(0)}$	$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^{(0)}$
方差	$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^{(0)} - \bar{\varepsilon})^2$	$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i^{(0)} - \bar{X})^2$
后验差检验比值 $c$		$c = \frac{S_1}{S_2}$
小误差概率 $p$		$p = p \left\{  \varepsilon_i^{(0)} - \bar{\varepsilon}  < 0.6745 S_2 \right\}$

表 6 精度检验等级  
Table 6 Grade of accuracy check

预测精度等级	$p$	$c$
好(1级)	$>0.95$	$<0.35$
合格(2级)	$>0.8$	$<0.5$
勉强(3级)	$>0.7$	$<0.65$
不合格(4级)	$\leq 0.7$	$\geq 0.65$

### 3.2 潘三矿深部煤层瓦斯含量灰色预测

根据灰熵关联分析结果, 按照影响瓦斯含量因素的灰熵关联度从大到小的排序分别建立 GM(1,3) 模型、GM(1,4) 模型和 GM(1,5) 模型。运用 Matlab 软件计算出各模型的参数序列值分别为  $a_{13}=(1.330 2, -0.003 4, 0.008 6, 2.452 8)$ ,  $a_{14}=(1.229 6, 0.001 5, 0.003, -4.162 4, 4.682 1)$  和  $a_{15}=(1.169 2, 0.004 2, 0.002 3, -3.688 5, 3.719 4, -0.032 8)$ 。

将各参数代入式(12)得出模型预测方程分别为:

$$x_1^{(1)}(k+1) = (6.42 + 0.002 556 x_2(k+1) - 0.006 465 x_3(k+1) - 1.843 9 x_4(k+1)) e^{-1.330 2k} - 0.002 556 x_2(k+1) + 0.006 465 x_3(k+1) + 1.843 9 x_4(k+1)$$

$$x_1^{(1)}(k+1) = (6.42 - 0.001 22 x_2(k+1) - 0.002 44 x_3(k+1) + 3.385 17 x_4(k+1) - 3.807 82 x_5(k+1)) e^{-1.229 6k} + 0.001 22 x_2(k+1) - 0.002 44 x_3(k+1) + 3.385 17 x_4(k+1) - 3.807 82 x_5(k+1)$$

$$x_1^{(1)}(k+1) = (6.42 - 0.003 59 x_2(k+1) - 0.001 97 x_3(k+1) + 3.154 72 x_4(k+1) - 3.181 15 x_5(k+1) + 0.028 053 x_6(k+1)) e^{-1.1692k} + 0.003 59 x_2(k+1) + 0.001 97 x_3(k+1) - 3.154 72 x_4(k+1) + 3.181 15 x_5(k+1) - 0.028 053 x_6(k+1)$$

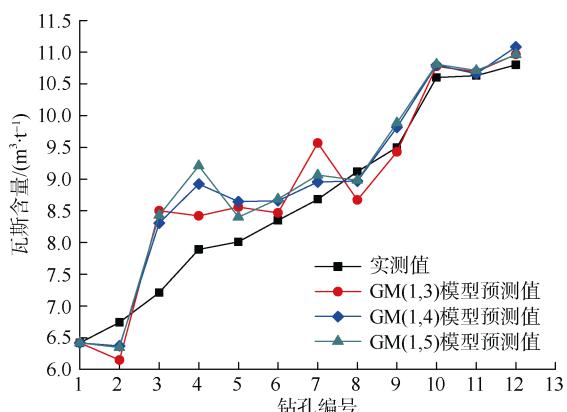


图 1 瓦斯含量实测值与预测值拟合曲线

Fig.1 Fitting curves of the measured and predicted gas content

表 7 GM(1,3)、GM(1,4)和 GM(1,5)预测模型误差分析  
Table 7 Error analysis for GM(1,3), GM(1,4) and GM(1,5) prediction models

钻孔编号	GM(1,3)模型		GM(1,4)模型		GM(1,5)模型	
	残差 $\varepsilon$	相对误差/%	残差 $\varepsilon$	相对误差/%	残差 $\varepsilon$	相对误差/%
1	0	0	0	0	0	0
2	0.590 8	0.08	0.395 3	0.05	0.370 9	0.05
3	-1.291 2	0.17	-1.218 1	0.16	-1.097 9	0.15
4	-0.530 6	0.06	-1.318 2	0.16	-1.033 2	0.13
5	-0.547 3	0.06	-0.391 3	0.04	-0.635 1	0.07
6	-0.118 9	0.01	-0.333 9	0.03	-0.307 0	0.03
7	-0.886 6	0.1	-0.384 3	0.04	-0.273 6	0.03
8	0.448 8	0.04	0.139 6	0.01	0.151 2	0.01
9	0.070 8	0.007	-0.384 8	0.04	-0.314 7	0.03
10	-0.173 8	0.01	-0.209 9	0.01	-0.196 5	0.01
11	-0.061 2	0.005	-0.079 0	0.007	-0.028 7	0.002
12	-0.164 2	0.01	-0.162 2	0.01	-0.285 9	0.02
平均值	0.050 182		0.050 636		0.048 364	

表 8 预测模型精度分析  
Table 8 Precision analysis of forecasting models

精度检验	GM(1,3)模型	GM(1,4)模型	GM(1,5)模型
$c$	0.350 22	0.290 55	0.330 41
$p$	0.917	1	0.917
精度等级	合格(2级)	好(1级)	合格(2级)

GM(1,4)预测模型的预测精度达到了1级，与实测值的变化规律更为接近。综合以上分析，潘三矿深部11-2煤层瓦斯含量预测以GM(1,4)模型最为精确。

#### 4 结论

a. 采用灰熵法分析了不同因素对潘三矿深部煤层瓦斯含量的影响显著程度，得出了各因素的灰熵关联度。分析结果表明影响深部煤层瓦斯含量的因素重要程度从大到小依次为：主断层距离、煤层埋深、煤厚、顶板砂泥比、煤层倾角。

b. 应用灰色理论的1-AGO技术，按照灰熵关联度大小排序依次选取3、4、5个影响因素分别建立了GM(1,3)、GM(1,4)和GM(1,5)微分方程预测模型，并求得了每个预测模型的深部煤层瓦斯含量预测方程。

c. 对3个模型的预测值和实测值分析比较及精度检验的结果表明，各预测模型的预测值与实测值的拟合曲线非常吻合，平均相对误差非常小，GM(1,3)和GM(1,5)预测模型的精度等级为2级，GM(1,4)模型则达到了1级。因此，在数据量少、信息不完全的情况下，可采用GM(1,4)模型对潘三矿深部11-2煤层进行瓦斯含量预测，为深部煤与瓦斯安全高效共采提供可靠依据。

#### 参考文献

- [1] 张子敏. 瓦斯地质学[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2009：134-140.
- [2] 周鑫隆，李军舰，石必明，等. 深部高瓦斯压力区域快速测压技术[J]. 煤矿安全，2015，46(4)：70-72.  
ZHOU Xinlong, LI Junjian, SHI Biming, et al. Quick pressure-testing technology in deep and high gas pressure area[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(4) : 70-72.
- [3] 杜志强，杨志远，吴艳，等. 煤层含气量评价中灰色关联分析与相关分析法对比[J]. 煤田地质与勘探，2012，40(1)：20-23.  
DU Zhiqiang, YANG Zhiyuan, WU Yan, et al. The association analysis of grey incidence and the correlation analysis in evaluation of influence factors of coalbed methane content[J]. Coal Geology & Exploration , 2012 , 40(1) : 20-23.
- [4] 刘永涛，李鹏，王辉俊，等. 智能煤层瓦斯含量快速预测系统[J]. 煤田地质与勘探，2013，41(3)：81-83.  
LIU Yongtao , LI Peng , WANG Huijun , et al. Intelligent coal seam gas content forecast system[J]. Coal Geology & Exploration , 2013 , 41(3) : 81-83.
- [5] 李胜，宁志勇，朱小强，等. 基于灰色理论预测五阳矿未受采动影响煤层瓦斯含量[J]. 科技导报，2012，30(32)：71-74.  
LI Sheng, NING Zhiyong, ZHU Xiaqiang, et al. Prediction of gas content in coal seam without being perturbed by mining influence in Wuyang Mine based on gray theory[J]. Science & Technology Review , 2012 , 30(32) : 71-74.
- [6] 张祎，杨春霞，栗保明. 基于灰熵分析法的电枢出口速度影响因素分析[J]. 弹道学报，2011，23(1)：93-96.  
ZHANG Yi , YANG Chunxia , LI Baoming. Analysis on factors influencing muzzle velocity of armature based on grey relation entropy method[J]. Journal of Ballistics , 2011 , 23(1) : 93-96.
- [7] 张岐山，郭喜江，邓聚龙. 灰关联熵分析方法[J]. 系统工程理论与实践，1996(8)：7-11.

- ZHANG Ruigang , XIANG Xiaojun , CHENG Jun , et al. Coalfield structural framework and coal controlling structure styles in Chongqing[J]. *Coal Geology & Exploration* , 2012 , 40(1) : 7–9.
- [5] 国家安全生产监督管理总局. 防治煤与瓦斯突出规定[M]. 北京 : 煤炭工业出版社 , 2009.
- [6] 张发林. 月亮田煤矿层滑构造对煤层厚度的影响[J]. *煤田地质与勘探* , 2000 , 28(5) : 17–20.
- ZHANG Falin. Bedding slipping structures in Yue Liangtian coalmine and their influence to coal seam thickness[J]. *Coal Geology & Exploration* , 2000 , 28(5) : 17–20.
- [7] 严家平 ,王定武. 利用煤田钻孔测井信息判识祁东煤矿构造煤的理论与实践[J]. *矿业安全与环保* , 2003 , 30(6) : 37–38.
- YAN Jiaping , WANG Dingwu. The theory and practice of constructing coal in Qidong coal mine by using coal field borehole logging information[J]. *Mining Safety & Environmental Protection* , 2003 , 30(6) : 37–38.
- [8] 苗霖田 ,姚建明 ,吕婷婷 ,等. 神木北部矿区 5-2 煤层厚度及其底板高程趋势分析[J]. *煤田地质与勘探* , 2008 , 36 (3) : 12–15.
- MIAO Lintian , YAO Jianming , LYU Tingting et al. Trend analysis of the No.5-2 coal thickness and it's bottom altitude in northern Shenmu mining area[J]. *Coal Geology & Exploration* , 2008 , 36(3) : 12–15.
- [9] 张艳伟 ,屠世浩 ,王沉 ,等. 基于趋势面分析的煤层厚度变化规律研究[J]. 西安科技大学学报 , 2015 , 35(1) : 21–27.
- ZHANG Yanwei , TU Shihao , WANG Chen , et al. Research on coal seam thickness changing law based on trend surface analysis [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology* , 2015 , 35(1) : 21–27.
- [10] 徐德金 ,胡宝林 ,汪宏志. 趋势面分析在岩浆岩体对煤层影响研究中的应用[J]. *煤炭科学技术* , 2009 , 37(2) : 108–110.
- XU Dejin , HU Baolin , WANG Zhihong. Application of trend surface analysis to magmatic rock affected to seam[J]. *Coal Science and Technology* , 2009 , 37(2) : 108–110.
- [11] 杜文凤 ,彭苏萍. 利用地质统计学预测煤层厚度[J]. *岩石力学与工程学报* , 2010 , 29 (增刊 1) : 2762–2767.
- DU Wenfeng ,PENG Suping. Coalseam thickness prediction with geostatistics[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* , 2010 , 29(S1) : 2762–2767.
- [12] 张瑞林 ,易俊 ,陈科. 趋势面拟合法在煤矿瓦斯预测中的应用[J]. *中国矿业* , 2006 , 15(9) : 59–61.
- ZHANG Ruilin , YI Jun , CHENG Ke. Forecasting the gas distribution law of coal mine applying trend face simulation method [J]. *China Mining Magazine* , 2006 , 15(9) : 59–61.

(责任编辑 晋香兰)

## (上接第 23 页)

- ZHANG Qishan , GUO Xijiang , DENG Julong. Grey relation entropy method of grey relation analysis[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice* , 1996(8) : 7–11.
- [8] 王天瑜 ,刘勇 ,徐德宇. 滴道矿立井 28#煤层瓦斯含量灰色关联分析[J]. *安全与环境学报* , 2014 , 14(1) : 13–16.
- WANG Tianyu , LIU Yong , XU Deyu. Grey relational analysis and forecast of the gas content in coal seam of No.28 shaft mine, Di-dao[J]. *Journal of Safety and Environment* , 2014 , 14(1) : 13–16.
- [9] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉 : 华中理工大学出版社 , 1990.
- [10] 陈勇刚. 基于灰熵分析法的航空公司维修安全质量影响因素分析[J]. *安全与环境学报* , 2013 , 13(1) : 267–270.
- CHEN Yonggang. Analysis of the influential factors of safety and quality maintenance of airline based on the grey relation entropy method[J]. *Journal of Safety and Environment* , 2013 , 13(1) : 267–270.
- [11] 陈勇刚 ,杨晓强. 基于模糊灰色关联的航空公司机队可靠性指标的优选[J]. *中国安全生产科学技术* , 2010 , 6(3) : 101–105.
- CHEN Yonggang , YANG Xiaoqiang. Optimization for index of airline fleet reliability based on fuzzy grey association[J]. *Journal of Safety Science and Technology* , 2010 , 6(3) : 101–105.
- [12] 舒龙勇 ,程远平 ,王亮 ,等. 地质因素对煤层瓦斯赋存影响的研究[J]. *中国安全科学学报* , 2011(2) : 121–125.
- SHU Longyong , CHENG Yuanping , WANG Liang , et al. Research on influence of geological factors on gas storage in coal seam[J]. *China Safety Science Journal* , 2011(2) : 121–125.
- [13] 郑飞 ,王来斌 ,沈金山 ,等. 基于逐回归分析的瓦斯含量预测研究[J]. *安徽理工大学学报(自然科学版)* , 2011 , 31(3) : 22–26.
- ZHENG Fei , WANG Laibin , SHEN Jinshan , et al. Coalbed methane content prediction based on stepwise regression analysis[J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)* , 2011 , 31(3) : 22–26.
- [14] 杨祯山 ,邵诚. 基于灰色 RBF 神经网络模型的电梯层间交通分布预测[J]. *信息与控制* , 2008 , 37(6) : 690–696.
- YANG Zhenshan , SHAO Cheng. Forecasting of elevator inter-floor traffic distribution based on grey RBF neural network[J]. *Information and Control* , 2008 , 37(6) : 690–696.
- [15] 刘思峰 ,谢乃强. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京 : 科学出版社 , 2008 : 427–432.
- [16] 邓聚龙. 灰预测与灰决策[M]. 武汉 : 华中科技大学出版社 , 2002.
- [17] 刘璐 ,肖泽南 ,李彦军 ,等. 农村火灾灰色预测模型及其应用[J]. *安全与环境学报* , 2010 , 10(2) : 162–165.
- LIU Lu , XIAO Zenan , LI Yanjun , et al. Renovated gray prediction model for fire damage in the rural area and its application[J]. *Journal of Safety and Environment* , 2010 , 10(2) : 162–165.
- [18] 伍爱友 ,田云丽 ,宋译 ,等. 灰色系统理论在矿井瓦斯涌出量预测中的应用[J]. *煤炭学报* , 2005 , 30(5) : 589–592.
- WU Aiyou , TIAN Yunli , SONG Yi , et al. Application of the grey system theory for predicting the amount of mine gas emission in coal mine[J]. *Journal of China Coal Society* , 2005 , 30(5) : 589–592.

(责任编辑 晋香兰)