

基于灰色理论预测五阳矿未受采动影响煤层瓦斯含量

李胜¹, 宁志勇¹, 朱小强¹, 杨永生²

1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 辽宁阜新 123000
2. 永城煤电控股集团有限公司, 河南永城 476600

摘要 采用邓氏关联度和广义综合关联度2种灰色关联分析方法对未受采动影响区域内煤层瓦斯含量的影响因素进行研究,并根据不同的影响因素分别建立了GM(1,7)、GM(1,6)和GM(1,5)瓦斯含量预测模型。研究表明,在五阳矿76、78采区未受采动影响的3#煤层中,30m底板砂泥岩比、地质构造、挥发分、灰分4个因素为影响其瓦斯含量的主要因素。由此建立的GM(1,5)模型瓦斯含量预测精度最高,可采用该模型对五阳矿76、78采区未受采动影响的3#煤层瓦斯含量进行预测。预测值能够为矿井瓦斯灾害的防治提供依据,对实现矿井的安全生产具有重要的现实意义。

关键词 瓦斯含量;邓氏关联度;广义综合关联度;GM(1,N)模型

中图分类号 TD712

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.32.011

Prediction of Gas Content in Coal Seam Without Being Perturbed by Mining Influence in Wuyang Mine Based on Gray Theory

LI Sheng¹, NING Zhiyong¹, ZHU Xiaoqiang¹, YANG Yongsheng²

1. College of Mining Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning Province, China
2. Yongcheng Coal Power Holding Group Co. Ltd., Yongcheng 476600, Henan Province, China

Abstract From the geology exploration borehole data in the mining areas 76 and 78 of Wuyang Mine, eleven reliable boreholes are selected, together with data related with five influencing factors of the gas content, including the buried depth of the coal-bed, the rock properties of the coal seam (the ratio of the sandstone to the mudstone in the 30m coal seam roof and floor), the coal thickness, the geological structure and the degree of the coal metamorphism (volatile matter and ash). Two kinds of gray relational analysis methods are used—the Deng's relational degree and the generalized relational degree—to study these influencing factors of the gas content in the coal seam under the condition of without mining, and the GM(1, 7), GM(1, 6) and GM(1, 5) gas content prediction models are established. The results show that, for the case without mining affecting the coal seam, in the mining areas 76 and 78 of No. 3 Wuyang Mine, the ratio of the sandstone to the mudstone in the 30m coal seam floor, the geological structure, the volatile matter and the ash are four main influencing factors of its gas content. The GM (1, 5) gas content prediction model built by the four factors enjoys the highest prediction accuracy, which can be used to predict the gas content in cases without mining affecting coal seam in the mining areas 76 and 78 of No. 3 Wuyang Mine. The predictive value can provide the basis for the prevention and the treatment of coal mine gas disasters, and also has important practical significance for the mine safe production.

Keywords gas content; Deng's relational degree; generalized relational degree; GM(1, N) model

0 引言

煤层瓦斯含量是评价矿井瓦斯资源的重要指标,也是预

测矿井瓦斯涌出量、煤与瓦斯突出,以及进行瓦斯抽放防治的重要依据^[1-2]。影响煤层中瓦斯含量的因素有已知的和未知

收稿日期:2012-06-25;修回日期:2012-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(51004063)

作者简介:李胜,教授,研究方向为矿山压力与矿井动力灾害防治和数字矿山,电子信箱:lisheng76@139.com

的,即有灰色的和白色的,而瓦斯含量是各因素综合作用的结果,其预测是一个灰色系统^[3-5]。较传统方法有定性比较分析、综合评价方法、线性回归分析法和神经网络预测方法等,而灰色系统理论能反映外延清晰、内涵不明确的内在变化规律;灰色系统建模预测方法能反映动态变化过程,具有原始数据少、不需要典型的分布规律、预测精度高、非线性等优点,特别是所需数据少的优点,很适合现有勘探程度下井田瓦斯含量的预测研究^[6]。

五阳煤矿主要开采沁水煤田 3[#]煤层,矿井现生产区域大部分位于 76 和 78 深部采区。76 和 78 采区是该矿现在以及今后相当长时间内的主要开采区域,其瓦斯绝对涌出量和相对涌出量分别高达 69.01m³/min 和 13.81m³/t,因此瓦斯含量的准确预测能为瓦斯灾害的防治提供依据。

针对五阳煤矿 3[#]煤层,本文分别采取邓氏关联度^[7]和广义综合关联度^[8]2 种灰色关联分析方法对未受采动影响区域内煤层瓦斯含量的影响因素进行研究,并选取主要影响因素

建立 GM(1,N)灰色瓦斯含量预测模型。

1 煤层瓦斯含量影响因素的灰色关联分析

1.1 煤层瓦斯含量影响因素

影响未采动煤层瓦斯含量的主要因素包括煤田地质史、煤层变质程度、煤层埋藏深度、煤厚、煤层围岩性质、地质构造和水文地质等。五阳煤矿 76、78 采区内水文地质条件简单,成煤时期一致,在收集整理五阳煤矿 76、78 扩区地质勘探钻孔的基础上,选取了 11 个可靠点,对各钻孔内 3[#]煤的煤层变质程度(灰分和挥发分)、煤层埋藏深度、煤厚、煤层围岩性质(30m 顶、底板砂泥岩比)、地质构造(不受地质构造影响赋 1,受开放型地质构造影响赋 2,受封闭型地质构造影响赋 3)进行量化(表 1)。其中,地质构造类型与分类条件见表 2。以瓦斯含量为主序列(X_0),以埋深(X_1)、煤厚(X_2)、30m 顶板砂泥岩比(X_3)、30m 底板砂泥岩比(X_4)、地质构造(X_5)、挥发分(X_6)、灰分(X_7)为子序列进行灰色关联分析。

表 1 3[#]煤钻孔瓦斯含量与其影响因素

Table 1 No. 3 coal drilling gas content and its influencing factors

孔号	瓦斯含量/(m ³ ·t ⁻¹)	埋深/m	煤厚/m	30m 顶板砂泥岩比	30m 底板砂泥岩比	地质构造	挥发分/%	灰分/%
701	6.09	617.80	5.50	0.64	2.01	1	11.65	11.12
3—7	7.0044	350.78	5.44	1.34	2.46	2	11.88	11.74
805	9.10	554.80	5.40	0.52	0.87	2	11.20	10.42
5—3	10.4509	458.40	5.25	2.76	3.71	2	11.31	12.82
807	10.61	516.70	5.77	0.45	1.13	2	10.93	25.52
604	11.02	715.80	4.74	1.54	7.14	1	11.19	11.54
402	11.18	432.60	4.65	2.89	3.27	2	12.55	14.88
602	11.29	630.50	5.46	1.72	2.21	1	12.24	9.64
806	13.14	623.30	4.35	0.47	0.76	3	21.85	10.75
404	14.19	442.70	5.11	2.63	4.13	3	10.52	39.87
802	17.51	767.56	5.40	0.62	2.22	1	11.10	19.15

表 2 地质构造类型分类

Table 2 Classifications of geological structure types

名称	封闭型(有利于封存瓦斯,煤层瓦斯含量高)	开放性(有利于排放瓦斯,煤层瓦斯含量低)
背斜	围岩封闭条件好(闭合与半闭合)的背斜轴部	围岩封闭条件差、透气性好的背斜
向斜	简单向斜的轴部及靠近轴部的两翼区域	向斜两翼的端部且煤层露头面积大
断层	(1) 围岩透气性差的压性、压扭性断层 (2) 煤层与落差大的断层的另一盘接触的岩层透气性差 (3) 构造盖层封闭型 (4) 正断层断块封闭型	(1) 张性、张扭性断层 (2) 煤层与落差大的断层的另一盘接触的岩层透气性好 (3) 断层规模大,与地表相通或与松散冲积层相连

1.2 邓氏关联度分析

邓聚龙教授提出的邓氏关联度,是利用序列的位移差来反映两序列的发展过程或量级的相近性^[7]。对瓦斯含量及其影响因素序列 $X_i(k)$ ($i=0,1,2,\dots,7;k=1,2,\dots,11$) 采用初值化方法进行无量纲化,得到序列 $X'_i(k)$,则灰色关联度即邓氏关联度 $\gamma(X_0, X_i)$ 为

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{11} \sum_{k=1}^{11} \gamma(x_0(k), x_i(k))$$

其中, $\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{m + \xi M}{\Delta_i(k) + \xi M}$; $\Delta_i(k) = |x'_0(k) - x'_i(k)|$; $M = \max_i \max_k \Delta_i(k)$; $m = \min_i \min_k \Delta_i(k)$; ξ 为分辨系数,取值范围为 $\xi \in (0, 1)$,本文取 $\xi = 0.5$ 。

1.3 广义综合关联度分析

刘思峰教授提出的广义关联度包括灰色绝对关联度、灰色相对关联度及灰色综合关联度^[8-9]。其中,灰色绝对关联度是按照序列折线的相似程度来计算两序列的关联度;灰色相对关联度是基于序列相对于始点变化率的接近程度计算关联度;灰色综合关联度是既考虑了序列折线的相似程度又考虑了序列相对于始点的变化率的接近程度的一种综合关联度,是较为全面地表征序列之间联系是否紧密的一个数量指标。设瓦斯含量及其影响因素序列 $X_i(k) (i=0,1,2,\dots,7;k=1,2,\dots,11)$ 和其初值像序列 $X_i'(k)$ 的始点零化像分别为 $X_i^0=(x_i^0(1),x_i^0(2),\dots,x_i^0(k))$, $X_i'^0=(x_i'^0(1),x_i'^0(2),\dots,x_i'^0(k))$, 则灰色绝对关联度 ε_{ij} 和灰色相对关联度 r_{ij} 为

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + |s_i| + |s_j|}{1 + |s_i| + |s_j| + |s_i - s_j|}, r_{ij} = \frac{1 + |s'_i| + |s'_j|}{1 + |s'_i| + |s'_j| + |s'_i - s'_j|}$$

$$\text{其中, } |s_i| = \left| \sum_{k=2}^{10} x_i^0(k) + \frac{1}{2} x_i^0(11) \right|, |s'_i| = \left| \sum_{k=2}^{10} x_i'^0(k) + \frac{1}{2} x_i'^0(11) \right|.$$

最后,由 ε_{ij} 和 r_{ij} 求得灰色综合关联度 ρ_{ij} 为

$$\rho_{ij} = \theta \varepsilon_{ij} + (1 - \theta) r_{ij}$$

其中, $\theta \in [0, 1]$, 本文取 $\theta = 0.5$ 。

运用 Matlab 软件计算出各影响因素的邓氏关联度和广义综合关联度值,见表 3。结果表明 $\gamma_{50} > \gamma_{40} > \gamma_{70} > \gamma_{60} > \gamma_{20} > \gamma_{10} > \gamma_{30}$, 且只有 γ_{30} (30m 顶板砂泥岩比) 小于 0.6, 达不到精度等级要求;综合关联度为 $\rho_{50} > \rho_{40} > \rho_{60} > \rho_{30} > \rho_{10} > \rho_{20}$, 其中 ρ_{10} (埋深) 和 ρ_{20} (煤厚) 小于 0.6, 达不到精度等级要求, 其余都符合要求。

表 3 影响因素的邓氏关联度和广义综合关联度

Table 3 Deng's relational degree and generalized relational degree of influencing factors

γ_{10} (埋深)	γ_{20} (煤厚)	γ_{30} (30m 顶板砂泥岩比)	γ_{40} (30m 底板砂泥岩比)	γ_{50} (地质构造)	γ_{60} (挥发分)	γ_{70} (灰分)
0.6217	0.6437	0.5566	0.6890	0.7113	0.6810	0.6887
ρ_{10} (埋深)	ρ_{20} (煤厚)	ρ_{30} (30m 顶板砂泥岩比)	ρ_{40} (30m 底板砂泥岩比)	ρ_{50} (地质构造)	ρ_{60} (挥发分)	ρ_{70} (灰分)
0.5130	0.5029	0.7231	0.7799	0.8777	0.7669	0.7413

2 煤层瓦斯含量预测

2.1 GM(1, N) 瓦斯含量预测模型求解

根据邓氏关联度和广义关联度分析结果,对五阳煤矿 76、78 采区内瓦斯含量及其影响因素分别建立 GM(1,7) 和 GM(1,6) 瓦斯含量多变量预测模型,此外还对 2 种分析方法中关联度值大于 0.6 且都有的前 4 个影响因素建立了 GM(1,5) 预测模型。

求原始数据 $X_i(k) (i=1,2,\dots,N;k=1,2,\dots,11)$ 的 1-AGO 序列 $X_i^{(1)}$ 和紧邻均值生成序列 $Z_i^{(1)}$, 则根据最小二乘法参数列 $\hat{a}=[a,b_1,b_2,\dots,b_N]^T$ 满足

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$$

$$\text{其中, } B = \begin{pmatrix} -z_1^{(1)}(2) & x_2^{(1)}(2) & \dots & x_n^{(1)}(2) \\ -z_1^{(1)}(3) & x_2^{(1)}(3) & \dots & x_n^{(1)}(3) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -z_1^{(1)}(n) & x_2^{(1)}(n) & \dots & x_n^{(1)}(n) \end{pmatrix}, Y = \begin{pmatrix} x_1^{(0)}(2) \\ x_1^{(0)}(3) \\ \dots \\ x_1^{(0)}(n) \end{pmatrix}.$$

将所求得的参数序列值代入 $x_i^{(0)}(k) + a z_i^{(1)}(k) = \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k)$, 即可求得瓦斯含量 GM(1, N) 多变量预测模型。模型瓦斯含量的模拟值为

$$\hat{x}_1^{(0)}(k+1) = (x_1^{(1)}(0) - \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1)) e^{-ka} + \frac{1}{a} \sum_{i=2}^N b_i x_i^{(1)}(k+1)$$

其中, $x_1^{(1)}(0)$ 取 $x_1^{(1)}(1)$ 。累减还原式为

$$\hat{x}_1^{(0)}(k+1) = \hat{x}_1^{(1)}(k+1) - \hat{x}_1^{(1)}(k)$$

运用 Matlab 软件计算出 GM(1,7) 模型、GM(1,6) 和

GM(1,5) 模型的参数序列值分别为 $a_{17}=(0.6100, 0.0142, -0.3046, -0.5806, 0.1062, 0.0158, 0.1649)^T$, $a_{16}=(0.6002, -0.3798, -0.0878, -1.4002, 0.5515, 0.2528)^T$ 和 $a_{15}=(0.6368, -0.2092, -1.7158, 0.5832, 0.2740)^T$, 将参数序列代入各模型即可进行瓦斯含量的预测。

2.2 GM(1, N) 预测模型误差分析和精度评价

将五阳矿瓦斯含量实测值与通过 GM(1,7)、GM(1,6) 和 GM(1,5) 预测模型计算所得的的瓦斯含量预测值进行分析比较(图 1), 并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 4)。

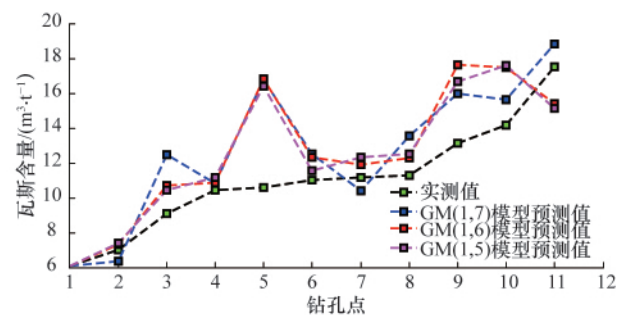


图 1 瓦斯含量实测值与预测值拟合曲线

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

从图 1 和表 4 中可以看出,除个别点外,各预测模型的预测曲线与实测曲线总体上吻合程度较好,其中 GM(1,7) 模型

表 4 GM(1,7)、GM(1,6)和 GM(1,5) 模型误差分析
 Table 4 Error analysis for GM(1,7), GM(1,6) and GM(1,5) models

钻孔号	GM(1,7)模型		GM(1,6)模型		GM(1,5)模型	
	残差 ε^0	相对误差 $q/\%$	残差 ε^0	相对误差 $q/\%$	残差 ε^0	相对误差 $q/\%$
701	0	0	0	0	0	0
3—7	0.6222	8.88	-0.3297	4.71	-0.4111	5.87
805	-3.3905	37.26	-1.6035	17.62	-1.3516	14.85
5—3	-0.3707	3.55	-0.4316	4.13	-0.7134	6.83
807	-6.1859	58.30	-6.2259	58.68	-5.8033	54.70
604	-1.5125	13.72	-1.2911	11.72	-0.5497	4.99
402	0.7811	6.99	-0.7206	6.45	-1.1622	10.40
602	-2.2622	20.04	-0.9838	8.71	-1.2398	10.98
806	-2.8393	21.61	-4.4779	34.08	-3.5146	26.75
404	-1.4542	10.25	-3.2955	23.22	-3.3893	23.89
802	-1.3020	7.44	2.0945	11.96	2.3766	13.57
平均值		17.09		16.48		15.71

的相对误差范围为 0—58.3%, 平均值为 17.09%; GM(1,6)模型的相对误差范围为 0—58.68%, 平均值为 16.48%; GM(1,5)模型的相对误差范围为 0—54.70%, 平均值为 15.71%。通过平均相对误差可知, 3 个模型的预测精度都为 4 级。

3 结论

(1) 实现了对煤层瓦斯含量影响因素地质构造(包括背斜、向斜和断层)的分类, 发现封闭型地质构造有利于封存瓦斯, 煤层瓦斯含量高; 开放性地质构造有利于排放瓦斯, 煤层瓦斯含量低。

(2) 采用邓氏关联度和广义综合关联度两种灰色关联分析方法, 确定了影响五阳煤矿 76、78 矿区内未受采动影响的 3# 煤层瓦斯含量的 4 个主要因素为 30m 底板砂泥岩比、地质构造、挥发分、灰分。这与五阳矿煤的变质程度高、地质构造复杂, 以及煤和围岩的透气性低导致瓦斯含量高的实际情况一致, 由此表明, 增加煤及围岩的透气性是今后五阳矿治理瓦斯和实现煤与瓦斯共采的关键。

(3) 选取影响煤层瓦斯含量的主要因素并分别建立了 GM(1,7)、GM(1,6)和 GM(1,5)灰色多变量瓦斯含量预测模型。对 3 个模型预测值与实际值的分析比较, 以及对其残差和相对误差的计算结果表明, 3 个模型的预测精度都合格, 其中 GM(1,5)模型的预测精度最高。因此, 可采用 GM(1,5)模型对五阳煤矿 76、78 矿区内未受采动影响的 3# 煤层进行瓦斯含量预测, 该预测值能够为矿井采掘工作面瓦斯涌出量预测, 以及为煤与瓦斯动力灾害的防治提供依据, 对实现矿井的安全生产具有重要的现实意义。

参考文献 (References)

[1] 张国枢. 通风安全学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2000.

Zhang Guoshu. Ventilation safety science [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2000.

[2] 沈金山, 王来斌, 许继影, 等. 基于灰色神经网络预测潘一东矿瓦斯含量[J]. 煤炭技术, 2011, 30(4): 90-92.

Shen Jinshan, Wang Laibin, Xu Jiying, et al. Coal Technology, 2011, 30(4): 90-92.

[3] 徐君. 基于 GM(1,1)模型的矿井瓦斯涌出量预测研究[J]. 矿业研究与开发, 2005, 25(3): 87-88.

Xu Jun. Mining R&G, 2005, 25(3): 87-88.

[4] 叶青, 林柏泉. 灰色理论在煤层瓦斯含量预测中的应用 [J]. 矿业快报, 2006(7): 28-30.

Ye Qing, Lin Boquan. Express Information of Mining Industry, 2006(7): 28-30.

[5] 李国祯, 李希建, 施天虎. 煤层瓦斯含量影响因素分析及灰色预测[J]. 工业安全与环保, 2011, 37(9): 53-55.

Li Guozhen, Li Xijian, Shi Tianhu. Industrial Safety and Environmental Protection, 2011, 37(9): 53-55.

[6] 杜卫新, 王永祥, 郝天轩. 基于灰建模的瓦斯含量多变量预测模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 41-45.

Du Weixin, Wang Yongxiang, Hao Tianxuan. China Safety Science Journal, 2008, 18(5): 41-45.

[7] 邓聚龙. 灰预测与灰决策 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.

Deng Julong. Grey prediction and grey decision [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.

[8] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用 [M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2010.

Liu Sifeng, Dang Yaoguo, Fang Zhigeng, et al. Grey system theory and its applications[M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2010.

[9] 党耀国, 刘思峰, 王正新, 等. 灰色预测与决策模型研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.

Dang Yaoguo, Liu Sifeng, Wang Zhengxin, et al. Grey prediction and decision model[M]. Beijing: Science Press, 2010.

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)