

煤层气藏地面勘探开发选区灰色模糊评价

陈天宇¹, 冯夏庭^{1,2}, 梁冰³, 孙维吉³

(1. 东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖南 武汉 430071; 3. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 采用灰色关联分析方法确定了评价指标的权重, 利用多级和梯形隶属度函数确定了指标的单因素评价, 建立了煤层气资源地面开发选区模糊综合评价模型. 利用 Matlab 编制了 CBMES (coal bed methane evaluation system) 对辽宁省 7 个主要煤田煤层气地面开发可行性进行了模糊综合评价. 根据评价结果, 各评价指标中煤层渗透率和含气量所占权重较大, 其他指标权重由大到小依次为: 煤层厚度、煤级、资源量、资源丰度、煤层压力、埋深. 辽宁省各煤田煤层气开发可行性为: 阜新煤田 > 铁法煤田 > 抚顺煤田 > 红阳煤田 > 沈北煤田 > 康平煤田 > 南票煤田, 评价结果与实际开发情况吻合较好, 证明了所建立模糊综合评价模型的合理性.

关键词: 煤层气; 地面开发; 选区; 灰色分析; 模糊综合评价

中图分类号: TP 028.8 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2013)03-0429-05

Grey Fuzzy Evaluation of CBM Development and Area Selection

CHEN Tian-yu¹, FENG Xia-ting^{1,2}, LIANG Bing³, SUN Wei-ji³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. School of Mechanics & Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China. Corresponding author: CHEN Tian-yu, E-mail: chen_tianyu0526@163.com)

Abstract: The weights of evaluation indexes were confirmed by grey correlation analysis. Single-factor fuzzy evaluation was determined by multi-stage and trapezoid membership function. Fuzzy comprehensive evaluation model for the feasibility study of CBM development was established. Based on the fuzzy comprehensive evaluation model CBMES (coal bed methane evaluation system) was developed by using Matlab, and it was employed to evaluate the CBM development feasibilities of seven main coalfields in Liaoning Province. According to the evaluation results, the weights of coal permeability and methane content are higher. Other indices, such as thickness of coal bed, coal rank, resource capacity, resources abundance, coal bed pressure, and burial depth are ranked in descending weight order. The feasibility of CBM development ranked in descending order is: Fuxin coal field, Tiefa coal field, Fushun coal field, Hongyang coal field, Shenbei coal field, Kangping coal field, and Nanpiao coal field. The results are in agreement with the in situ condition, which shows the rationality of fuzzy comprehensive evaluation model for the CBM development feasibility.

Key words: CBM (coal bed methane); ground development; area selection; grey analysis; fuzzy comprehensive evaluation

我国煤层气地面勘探始于 20 世纪 90 年代初, 经过 20 年的发展, 勘探开发工作取得了一定进步, 并实现了小规模商业化生产. 我国煤层气远景资源量比美国多 $15.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 而年实际产量

收稿日期: 2012-09-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB201206); 国家自然科学基金青年基金资助项目(50904033); 辽宁省自然科学基金资助项目(20102090).

作者简介: 陈天宇(1986-), 女, 河南新乡人, 东北大学博士研究生; 冯夏庭(1964-), 男, 安徽潜山人, 东北大学教授, 博士生导师; 梁冰(1962-), 女, 辽宁盘锦人, 辽宁工程技术大学教授, 博士生导师.

仅为 $7.5 \times 10^8 \text{ m}^3$, 仅是美国的 1.4%^[1], 其原因之一是对煤层气前期勘探开发选区的研究程度不够。

近年来, 国内外许多学者对煤层气勘探开发选区评价开展了大量的研究, 并取得了较丰富的研究成果. Langenberg, Beaton, Boyer, Nolde 分别利用地质参数、GIS 对煤层气潜力进行了综合评价^[2-5]. Yao, Cai, 王起新分别利用层次分析法、模糊数学方法、多层次模糊数学方法预测了煤层气靶区^[6-8]. 熊德华等运用层次分析法和灰色聚类法对煤层气开发潜力进行了综合评价^[9]. 前人所做的研究中, 往往依靠专家打分法确定影响因素的权重, 受人为影响较为严重. 使用数学方法优选煤层气区块, 应尽量依据评价数据进行分析, 避免主观因素给综合评价带来干扰。

基于此, 本文修正了煤层气资源开发选区模糊综合评价模型中权重确定方法, 对辽宁省各煤田进行选区评价, 从而更客观地为辽宁省煤层气勘探开发和选区部署提供依据, 对增强勘探的主动性、降低风险性和盲目性有重要意义。

1 煤层气模糊综合评价模型

1.1 煤层气开采勘探开发选区模糊综合评价指标

在评价煤层气勘探开发选区时, 首先将煤层气资源富集因素指标体系包含在内. 结合中华人民共和国地质矿产行业标准《煤层气资源/储量规范》, 选取煤层厚度、含气量、资源丰度、资源量、埋深 5 个指标^[10]. 同时要考虑煤储层因素, 选取煤阶、储层渗透率、储层压力 3 个指标, 而煤体结构、镜质组含量、灰分、裂隙等其余储层因素可以通过煤阶、储层渗透率、储层压力指标表达出来. 根据指标选取中的逻辑关系, 选取这 3 个指标是合理的. 本评价方法中不考虑保存因素, 因为已采用地质统计法和体积法对资源量进行了详细准确的计算, 且保存因素并不是本评价方法需重点考虑的指标。

评价前首先需要区分指标极性, $p_{oL}(\max)$ 表示极大值极性, 即样本值越大越接近目标; $p_{oL}(\min)$ 表示极小值极性, 即样本值越小越接近目标; $p_{oL}(\text{men})$ 表示适中值极性, 即样本值适中才接近目标. 本评价方法的具体指标划分见表 1 和表 2。

表 1 煤层气勘探开发可行性评价中性指标级别划分
Table 1 Neutral indicia classification of CBM development feasibility evaluation

参数	I 级	II 级	III 级
煤层中部埋深/m	< 500	500 ~ 1 000	> 1 500
煤阶	褐煤 ~ 1/2 中黏煤	气煤 ~ 瘦煤	贫瘦煤 ~ 无烟煤

表 2 煤层气勘探开发可行性评价极大性指标级别划分
Table 2 Maximal indicia classification of CBM development feasibility evaluation

参数	I 级	II 级	III 级	IV 级
含气量/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	< 3	3 ~ 8	8 ~ 12	> 12
煤层厚度/m	< 3	3 ~ 5	5 ~ 8	> 8
煤层气地质储量/(10^8 m^3)	< 30	30 ~ 300	300 ~ 3 000	> 3 000
地质储量丰度/($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	< 0.5	0.5 ~ 1.0	1.0 ~ 3.0	> 3.0
煤层渗透率/mD	< 0.01	0.01 ~ 0.1	0.1 ~ 1	> 1
煤层压力/MPa	< 1	1 ~ 5	5 ~ 10	> 10

1.2 灰色关联分析确定权重

采用灰色关联分析确定模糊综合评价模型中各指标的权重, 以各指标的实际数据为依据, 分析各指标的发展态势, 根据客观数据确定权重。

根据制高点原则, 进行初值化, 建立差值序列. 令 $\Delta_{oi}(k)$ 为 $x_0(k)$ 与 $x_i(k)$ 两点间的绝对差, x_0 为参考序列, x_i 为比较序列, 由此构建差异信息空间 LY_{gr} ,

$$LY_{gr} = \{ \Delta_{oi}(k) \mid \forall \Delta_{oi}(k) \in [\min_i \min_k \Delta_{oi}(k), \max_i \max_k \Delta_{oi}(k)] \}.$$

计算关联系数, 考虑其“邻域性”与规范区间性, 灰关联度系数的算式为

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{x(\min) + \zeta x(\max)}{\Delta_{oi}(k) + \zeta x(\max)}. \quad (1)$$

式中: $x(\min) = \min_i \min_k \Delta_{oi}(k)$ 是 LY_{gr} 中下环境参数; $x(\max) = \max_i \max_k \Delta_{oi}(k)$ 是 LY_{gr} 中上环境参数; $\zeta \in [0, 1]$ 为分辨系数, 本评价方法中按最少信息原理取为 0.5, 即 $\zeta = 0.5$ 。

计算关联度, 聚集关联度系数 $\gamma(x_0(k), x_i(k))$ 在各点 $k = 1, 2, \dots, n$ 的值, 得灰关联度算

式如式(2):

$$\gamma(x_0, x_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)). \quad (2)$$

根据关联度由式(3)计算权重:

$$w_i = \gamma(x_0, x_i) / \sum_{i=1}^n \gamma(x_0, x_i). \quad (3)$$

1.3 隶属函数的选取

隶属函数是模糊集的重要组成部分,本评价方法中隶属函数分两类确定:对于评价指标中的中性指标煤层埋深,采用梯形隶属度函数;对于评价指标中的极大值性指标:煤层含气量、煤层厚度、煤层资源量、煤层资源丰度,按照其参数划分等级采用多级隶属度函数。

极大值性指标采用多级隶属度函数计算。

一级隶属度计算:

$$\mu_1(r) = \begin{cases} \frac{r}{r_1} & 0 \leq r < r_1; \\ \frac{r_2 - r}{r_2 - r_1} & r_1 < r < r_2; \\ 0 & r \geq r_2. \end{cases} \quad (4)$$

二级隶属度计算:

$$\mu_2(r) = \begin{cases} 0 & r \leq r_1; \\ \frac{r - r_1}{r_2 - r_1} & r_1 < r \leq r_2; \\ \frac{r_3 - r}{r_3 - r_2} & r_2 < r < r_3; \\ 0 & r \geq r_3. \end{cases} \quad (5)$$

三级隶属度计算:

$$\mu_3(r) = \begin{cases} 0 & r \leq r_2; \\ \frac{r - r_2}{r_3 - r_2} & r_2 < r < r_3; \\ 1 & r \geq r_3. \end{cases} \quad (6)$$

对于中性指标采用梯形隶属度函数处理指标:

$$\mu(r) = \begin{cases} \frac{r}{r_1} & 0 \leq r < r_1; \\ 1 & r_1 < r < r_2; \\ \frac{r_3 - r}{r_3 - r_2} & r_2 < r \leq r_3. \end{cases} \quad (7)$$

式中 r_i 为各指标的划分参数。

各指标的隶属分布构成评判矩阵 R :

$$R = \begin{bmatrix} r_{1,1} & r_{1,2} & \dots & r_{1,m} \\ r_{2,1} & r_{2,2} & \dots & r_{2,m} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{n,1} & r_{n,2} & \dots & r_{n,m} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

利用 Matlab 将上述数学模型编制成 CBMES (coal bed methane evaluation system)。

2 辽宁煤层气地面开发可行性灰色模糊综合评价

表 3 为辽宁省各煤田评价指标参数,根据制高点原则,将煤储层和资源因素参数分为两个层次,分别进行初值化。

表 3 辽宁省各煤田评价指标参数
Table 3 Indicial parameters for the evaluation of Liaoning province coal fields

煤田	煤级	渗透率 mD	煤层压力 MPa	埋深 m	煤层厚度 m	资源量 (10^8 m^3)	资源丰度 ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	含气量 ($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)
红阳煤田	SM,FM,WY	0.12	8.96	700	3.22	40	0.23	11.06
沈北煤田	HM	0.03	3.3	530	11.82	10	0.38	2.94
铁法煤田	CY	0.23	6.62	400	3.67	100	0.69	7.81
康平煤田	CY	0.19	2.6	470	8.93	5	0.12	1.47
阜新煤田	CY	0.41	7.24	630	8.75	80	0.57	5.81
抚顺煤田	QM	1.89	3.77	830	44	50	0.56	12.97
南票煤田	QM	0.43	0.51	740	8.8	2	0.03	2.63

将处理后的各指标建立差值序列,构建差异空间,由 Matlab 分别计算各指标的权重分配,计算结果如图 1 所示,各指标的权重由大到小依次为:渗透率、煤级、煤层压力、埋深。

同理计算得到煤资源量因素各指标如图 2 所示,各指标的权重由大到小依次为:含气量、煤层厚度、资源量、资源丰度。

对两个层次的各指标权重进行折减,得到勘探开发选区评价体系的各指标权重如图 3 所示。

将辽宁省煤层气勘探开发选区评价分为三个等级,评级集为 $V = (\text{好}, \text{中}, \text{一般})$ 。影响煤层气勘探开发选区可行性的指标属于好与坏的程度构成一个模糊集合。

根据评价指标权重和各级隶属度,由模糊评

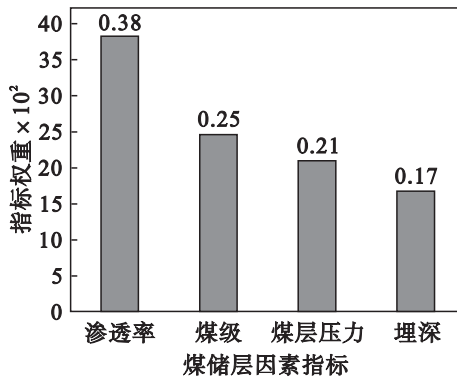


图 1 煤储层因素各指标权重
Fig. 1 Weights of coal reservoir indices

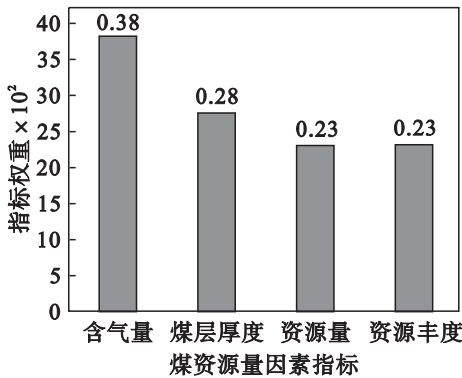


图 2 煤层气资源量因素各指标权重
Fig. 2 Weights of CBM resource indices

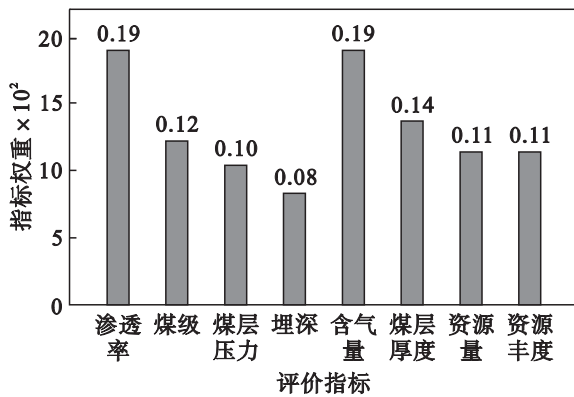


图 3 辽宁省煤层气勘探开发可行性评价指标权重
Fig. 3 Indicial weights of Liaoning CBM development feasibility evaluation

价计算得到评价结果,并由最大隶属度原则确定最终各煤田评价等级和所在等级的分数。

以红阳煤田为例,根据指标的极性和隶属度函数,红阳煤田煤层气勘探开发选区指标各级隶属度,即单因素评价结果见表 4。

辽宁省各煤田煤层气勘探开发选区可行性评价结果(见图 4)如下:

根据评价结果,阜新煤田在好、中、一般三个评价等级中,属于好、中、一般的程度分别为 32%、29%、30%,因此阜新煤田的勘探开发选区

评价为好。同理得到辽宁省各煤田的勘探开发选区为:阜新煤田 > 铁法煤田 > 抚顺煤田 > 红阳煤田 > 沈北煤田 > 康平煤田 > 南票煤田。

表 4 红阳煤田煤层气勘探开发选区可行性指标隶属度
Table 4 Indicial memberships of Hongyang CBM development feasibility

评价指标	好	中	一般
渗透率/mD	0.02	0.98	0.00
煤级	0.00	0.60	0.00
煤层压力/MPa	0.79	0.21	0.00
埋深/m	1.00	0.00	0.00
煤层厚度/m	0.00	0.04	0.96
资源量/(10 ⁸ m ³)	0.00	0.01	0.99
资源丰度/(10 ⁸ m ³ ·km ⁻²)	0.00	0.00	0.46
含气量/(m ³ ·t ⁻¹)	0.77	0.24	0.00

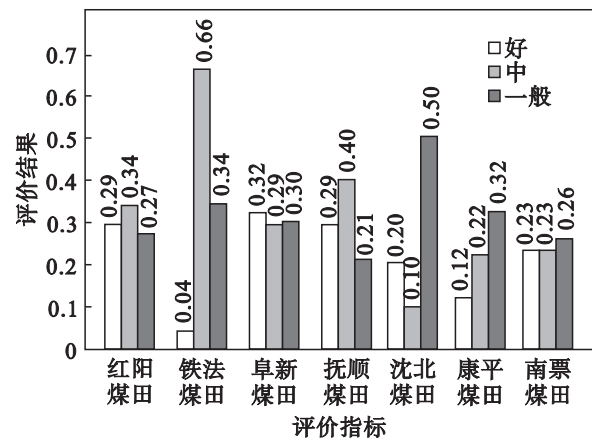


图 4 辽宁省各煤田煤层气勘探开发选区综合评价结果
Fig. 4 Comprehensive evaluation results of Liaoning CBM development feasibility

根据辽宁省目前已进行的煤层气地面勘探及开采情况,阜新煤田、铁法煤田和抚顺煤田煤层气地面开采效果较好,均已形成工业气流,而红阳煤田、沈北煤田已打了先导试验井,证明了本文所建立的综合评价模型的合理性。

3 结 论

1) 建立了煤层气勘探开发选区模糊综合评价模型,优选出主要煤层气资源因素:煤层厚度、含气量、资源丰度、资源量、埋深 5 个指标以及煤储层因素:煤级、储层渗透率、储层压力 3 个指标作为评价指标。

2) 采用灰色关联分析方法,以辽宁省各煤田实际参数为基础,得出煤层气勘探开发选区模糊综合评价体系中各指标的权重,其中煤含气量和渗透率两个指标的权重较大,其他指标权重由大

到小依次为: 煤层厚度、煤级、资源量、资源丰度、煤层压力、埋深。

3) 采用多级隶属度函数和梯形函数分别确定辽宁省各煤田中各评价指标的隶属度函数, 根据最大隶属度原则, 得到辽宁省各煤田的勘探开发可行性依次为: 阜新煤田 > 铁法煤田 > 抚顺煤田 > 红阳煤田 > 沈北煤田 > 康平煤田 > 南票煤田, 评价结果与实际吻合较好。

参考文献:

- [1] 赵庆波, 李贵中, 孙粉锦, 等. 煤层气地质选区评价理论与勘探技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 3 - 14.
(Zhao Qing-bo, Li Gui-zhong, Sun Fen-jin, et al. CBM geological selection evaluation theory and exploration technique [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 3 - 14.)
- [2] Langenberg C W, Beaton A, Berhane H. Regional evaluation of the coal bed-methane potential of the foothills/mountains of Alberta, Canada [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 65(1/2): 114 - 128.
- [3] Beaton A, Langenberg W, Pană C. Coal bed methane resources and reservoir characteristics from the Alberta Plains, Canada [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2006, 65(1/2): 93 - 113.
- [4] Boyer C M, Bai Q. Methodology of coal bed methane resource assessment [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1/2/3/4): 349 - 368.
- [5] Nolde J E, Spears D. A preliminary assessment of in place coal bed methane resources in the Virginia portion of the central Appalachian Basin [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 38(1/2): 115 - 136.
- [6] Yao Y B, Liu D M, Tang D Z, et al. Preliminary evaluation of the coal bed methane production potential and its geological controls in the Weibei coalfield, Southeastern Ordos Basin, China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78(1): 1 - 15.
- [7] Cai Y D, Liu D M, Yao Y B, et al. Geological controls on prediction of coal bed methane of No. 3 coal seam in Southern Qinshui Basin, North China [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 88(2/3): 101 - 112.
- [8] 王起新, 孙维吉, 梁冰, 等. 阜新盆地煤层气资源可采性模糊数学评价 [J]. 天然气工业, 2008, 28(7): 39 - 42.
(Wang Qi-xin, Sun Wei-ji, Liang Bing, et al. Fuzzy mathematics-based assessment of recoverability of coal bed methane in the Fuxin basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(7): 39 - 42.)
- [9] 熊德华, 唐书恒, 朱宝存, 等. 晋陕蒙地区煤层气勘查潜力综合评价 [J]. 天然气工业, 2011, 31(1): 32 - 36.
(Xiong De-hua, Tang Shu-heng, Zhu Bao-cun, et al. Comprehensive evaluation of coalbed methane exploration potential in the Jin-Shan-Meng area [J]. *Natural Gas Industry*, 2011, 31(1): 32 - 36.)
- [10] DZ/T 0216—2002. 煤层气资源/储量规范 [S]. 北京: 地质出版社, 1993.
(DZ/T 0216—2002. CBM resources/reserves standard [S]. Beijing: Geological Publishing House, 1993.)
- [9] Greca M C, Emiliano J V, Segadães A M. Revised phase equilibrium relationships in the system $Al_2O_3 - ZrO_2 - SiO_2$ [J]. *Journal of European Ceramic Society*, 1992, 9: 271 - 283.
- [10] 陈魁. 试验设计与分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 78 - 121.
(Chen Kui. Experiments design and analysis [M]. Beijing: Publisher of Tsinghua University, 2005: 78 - 121.)
- [11] Sindo K. Welding metallurgy [M]. J N Hoboken: Wiley-Interscience, 2003: 145 - 167.
- [12] Bernard S A, Balla V K, Bose S, et al. Direct laser processing of bulk lead zirconate titanate ceramics [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2010, 172(1): 85 - 88.
- [13] 余明清. 氧化锆-氧化铝复相陶瓷的结构、性能与磨损机理的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002: 30 - 46.
(Yu Ming-qing. Research on structure, properties and wear mechanism of ZrO_2 and Al_2O_3 multi-phase ceramics [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2002: 30 - 46.)

(上接第 420 页)