

# 基于 AHP-FCE 法的煤矿瓦斯灾害危险源定量评价

廖文德<sup>1</sup>, 钟勇林<sup>2</sup>, 叶俊杰<sup>3</sup>, 周志强<sup>4</sup>

(1. 江西省煤炭工业科学研究所, 江西 南昌 330029; 2. 江西省安泰煤矿安全技术开发中心, 江西 南昌 330029;  
3. 湖南科技大学 管理学院, 湖南 湘潭 411201; 4. 湖南省新型工业化研究基地, 湖南 湘潭 411201)

**摘要:** 为了有效克服我国煤矿瓦斯灾害重大危险源评价方面使用模糊综合评判法, 所存在的指标权重由专家根据经验给出带来的主观性等问题, 采用层次分析法与模糊综合评判法相结合对煤矿重大危险源安全指标体系进行优化, 构建了一种新的煤矿重大危险源安全评价方法, 即 AHP-FCE 法。并利用湖南省 60 家煤矿企业的实际数据, 通过自主开发的原型系统对该方法进行了验证。结果表明: 使用 AHP-FCE 方法确定的指标体系和权重与理论分析完全吻合, 且具有定量和可解释性强的优点, 在实际煤矿瓦斯灾害重大危险源定量评价中具有较好的效果, 使用 AHP-FCE 方法识别的重大危险源与专家给出的结果一致。

**关键词:** 安全评价; 瓦斯灾害; 危险源; AHP-FCE 法

**中图分类号:** TD743 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)06-0085-06

## Quantitative evaluation method of mine gas disaster hazard sources based on AHP-FCE Method

Liao Wende<sup>1</sup>, Zhong Yonglin<sup>2</sup>, Ye Junjie<sup>3</sup>, Zhou Zhiqiang<sup>4</sup>

(1. Jiangxi Provincial Coal Industry Science Research Institute, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Provincial Antai Mine Safety Technology Development Center, Nanchang 330029, China; 3. School of Management, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 4. Hunan Provincial Research Base of New Type Industrialization, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** In order to effectively overcome the index weight provided with subjectivity based on experiences of the experts existed in the fuzzy comprehensive evaluation method applied to the high hazard source evaluation of the coal mine gas disaster in China, the AHP Method and the fuzzy comprehensive evaluation method were combined and applied to the optimization of the mine high hazard source safety index system and to establish a new safety evaluation method AHP-FCE Method of the mine high hazard sources. With the application of the actual evaluation data of 60 coal mine enterprises in Hunan Province, a self developed prototype system was applied to verify the method. The results showed that the index system determined with the AHP-FCE Method could fully fit with the weighting and theoretical analysis and could have the good effect of the quantitative and high explanation advantages in the quantitative evaluation of the mine actual gas disaster hazard sources. The high hazard sources distinguished with AHP-FCE Method was same to the results provided by the experts.

**Key words:** safety evaluation; gas disaster; hazard sources; AHP-FCE Method

## 0 引言

煤矿多发的重大瓦斯事故, 给煤炭工业持续、稳定发展造成了重大影响。2013 年, 瓦斯事故占煤矿事故的 73%, 造成的伤亡占特大事故伤亡人数的 86%, 瓦斯爆炸伤亡事故位居煤矿伤亡事故之

首<sup>[1]</sup>。普遍认为, 防治瓦斯灾害的关键在于建立科学合理的危险源评价方法。现有研究主要应用神经网络、灰色理论和模糊数学等, 建立了一系列的煤矿安全评价方法, 比如: 魏建平等<sup>[2]</sup>应用 BP 神经网络安全评价方法对煤层瓦斯含量进行了预测, 田云丽等<sup>[3]</sup>利用改进的 BP 神经网络模型对煤与瓦斯突出

收稿日期: 2014-12-28; 责任编辑: 曾康生 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2015.06.016

基金项目: 湖南省哲学社会科学基金资助项目(13JD20, 11TD27)

作者简介: 廖文德(1966—), 男, 江西万载人, 高级工程师, 国家一级安全评价师, 注册安全工程师。E-mail: llwwdd4788@sina.com

引用格式: 廖文德, 钟勇林, 叶俊杰, 等. 基于 AHP-FCE 法的煤矿瓦斯灾害危险源定量评价[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(6): 85-90.

Liao Wende, Zhong Yonglin, Ye Junjie et al. Quantitative evaluation method of mine gas disaster hazard sources based on AHP-FCE Method[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(6): 85-90.

的危险性进行了预测;孙斌<sup>[4]</sup>应用灰色关联分析法进行瓦斯灾害事故危险源评价研究;曹树刚等<sup>[5]</sup>应用模糊综合评价方法对矿井瓦斯爆炸危险源进行动态风险评价;韩玉建等<sup>[6]</sup>应用模糊综合评价方法对瓦斯爆炸安全状况进行评价。以上方法的应用一定程度提高了煤矿瓦斯风险评价的效率,但由于煤矿瓦斯灾害重大危险源数据的收集难,同时煤矿属于复杂非线性系统,具有随机性、模糊性和不确定性等特征。因此,相比而言,应用模糊综合评价方法能取得传统数学模型难以替代的效果。然而该方法也存在不足,各指标权重由专家根据经验给出,带有个人主观性。而层次分析法是一种定量和定性相结合,具有适应环境变化的“相对标度”,同时又充分利用了专家的经验 and 判断,并能对其误差做出估计,尽量减少个人主观臆断所带来的弊端。基于此,笔者综合层次分析法(AHP: Analytical Hierarchy Process)和模糊综合评价法(FCE: Fuzzy Comprehensive Evaluation)的优点,构建出一种新的煤矿重大危险源安全评价方法,即 AHP-FCE 法,对瓦斯灾害重大危险源进行定量评价,即构建瓦斯灾害重大危险源评价指标体系,确定各种危险因素在评价系统中的相对权重及煤矿企业在瓦斯防治方面的安全等级,对其进行量化,从而实现对瓦斯灾害重大危险源的分级控制,为我国煤矿瓦斯风险评价效率提升提供帮助。

## 1 瓦斯灾害重大危险源评价指标体系

### 1.1 指标体系构建

煤矿重大危险源是指可能导致煤矿重大事故的设施或场所。根据能量物质的差异通常将煤矿重大危险源划分为瓦斯事故、水灾、火灾、顶板、煤尘爆炸等 5 类,也有将瓦斯事故重大危险源再细分为瓦斯爆炸重大危险源和煤与瓦斯突出 2 类,并加上运输事故(如跑车事故)构成 7 类。近年来煤矿重特大事故中,瓦斯事故是煤矿重大事故中发生频率最高,而且是事故后果最为严重的<sup>[1]</sup>。

若将瓦斯灾害重大危险源定义为在矿井各个运行系统中所存在的可能造成瓦斯事故的因素,则瓦斯灾害的因素主要与安全设备和安全操作有关,如瓦斯局部集聚、风量不足、井下工人吸烟,而煤与瓦斯突出的因素主要与地质构造等有关,如顶底板类型、围岩透气性等。煤矿瓦斯灾害危险源系统是一个多目标、多准则、多因素、多层次的复杂系统,是由人-机-环境构成的动态、复杂系统。根据 3 类危险

源划分理论,其中,第 I 类危险源是指能量载体或危险物质,第 II 类危险源包括物的故障、物理性的环境因素等可能导致或诱发瓦斯灾害的风险因素,第 III 类危险源是指不符合安全的组织因素(组织程序、组织文化、规则、制度等),包含组织、人的不安全行为和失误等。这 3 类危险源在时间维、空间维上相互交织,当这些因素相遇发生交互作用时就可能发生事故。3 类危险源之间相互联系,相互影响,共同组成了煤矿瓦斯灾害危险源系统。

参考文献[7-16],并结合笔者对瓦斯灾害危险源的研究与调研,以全面体现煤矿瓦斯爆炸和煤与瓦斯突出的因素为原则,通过对煤矿瓦斯爆炸和煤与瓦斯突出事故的 3 类驱动因子的归纳与分解,建立初步的煤矿瓦斯灾害重大危险源定量评价指标体系见表 1。

表 1 煤矿瓦斯灾害危险源风险因素评价指标体系

Table 1 Risk evaluation index system of coal mine gas disaster hazard

类型	名称	指标名称	编号	单位	变量类型
I	危险 因素	断层平均落差	P <sub>11</sub>	m	定量
		单位面积断层数	P <sub>12</sub>	条/km <sup>2</sup>	定量
		顶底板类型	P <sub>13</sub>	—	定性
		构造因素	P <sub>14</sub>	—	定性
		自然发火期	P <sub>15</sub>	月	定量
		煤层瓦斯压力	P <sub>16</sub>	Pa	定量
		相对瓦斯涌出量	P <sub>17</sub>	m <sup>3</sup> /t	定量
		煤层瓦斯含量	P <sub>18</sub>	m <sup>3</sup> /t	定量
		绝对瓦斯涌出量	P <sub>19</sub>	m <sup>3</sup> /min	定量
II	诱 发 因 素	平均风速	P <sub>21</sub>	m/min	定量
		100 m 风筒漏风率	P <sub>22</sub>	%	定量
		风流供需比	P <sub>23</sub>	%	定量
		设备完好率	P <sub>24</sub>	%	定量
		设备安全可靠率	P <sub>25</sub>	%	定量
		煤尘爆炸指数	P <sub>26</sub>	%	定量
		瓦斯抽采率	P <sub>27</sub>	%	定量
		机械化水平指数	P <sub>28</sub>	%	定量
III	组 织 因 素	管理人员管理水平	P <sub>31</sub>	—	定性
		技术人员技术水平	P <sub>32</sub>	—	定性
		工人技能和经验	P <sub>33</sub>	—	定性
		安全措施实施水平	P <sub>34</sub>	—	定性
		员工的职业责任感	P <sub>35</sub>	—	定性
		规程标准化执行水平	P <sub>36</sub>	—	定性
		员工避灾熟悉程度	P <sub>37</sub>	—	定性

注:顶底板类型指伪顶(底)、直接顶(底)、基本顶(底);构造因素指泥炭沼泽基地不平、河流的同生冲蚀、煤系内的后生冲蚀;组织因素中各指标的评分为 1~100 分。

### 1.2 指标的获得方法及标准化处理和信度检测

不同指标数据的获取采用的方法不同,本项目

各指标数据获得的方法有仪器测量、专家打分、计算等。因此数据的性质也不全相同,为使这些数据能通过 AHP 方法进行分析,必须先对各指标的数据进行标准化处理。如表 1 中绝大部分指标为定量变量,只有  $P_{13}$ (顶底板类型)和  $P_{14}$ (构造因素)及组织因素为定性变量,处理时可以由专家根据不同类型顶底板或构造发生瓦斯灾害的危险性大小给予一定数值来代替。为了标准化量纲的统一,比值和得分指标均以百分比或百分制,除此之外的指标可采用通用的标准处理技术将取值投影到 0~100 内,具体方法视具体指标的取值情况灵活选取。

通过问卷调查和实地访谈的方式获得湖南省属煤矿共 65 份样本,对其中 60 份有效样本计算克隆巴赫(Cronbach's)信度系数  $\alpha$  为 0.702~0.836,满足信度检测要求。

## 2 基于 AHP-FCE 瓦斯灾害危险源评价模型

采用层次分析法构建比较矩阵,将组成的比较矩阵的特征向量作为安全评价的权重,并采用模糊综合评价法对每个评价因子进行综合评价,从而确定评价因子的影响力排序。

### 2.1 基于 AHP 方法的指标权重确定

层次分析法是美国运筹学家托马斯·萨蒂于 20 世纪 70 年代提出的一种决策方法。针对具体问题,应用层次分析法分析煤矿瓦斯灾害重大危险源评价指标权重的主要步骤可概括为建立层次结构模型、建立判断矩阵、计算相对重要性(即权重)三步。

通过对煤矿瓦斯灾害致因因素的分析,按照层次分析法的基本步骤,针对评价系统的目的、评价项目等要素,构造出煤矿瓦斯灾害重大危险源评价层次结构模型,共分 3 层(图 1):①第 1 层为目标层(O):煤矿瓦斯灾害;②第 2 层为准则层(C),为相关条件,共 3 个因素对应第 I 类(危险物质)、第 II 类(诱发因素)、第 III 类(组织因素);③第 3 层为措施层(P),共有 24 个子因素,判断矩阵的建立以及相对重要性(即权重)的计算具体参考文献[17]。

### 2.2 基于 FCE 方法的评价因子影响力排序

多级模糊综合评判法是对一般模糊综合评判法的改进,在实践中被广泛使用<sup>[18-19]</sup>,将其与 AHP 方法结合使用是一个新的亮点<sup>[20]</sup>。使用模糊综合评判法进行煤矿瓦斯灾害重大危险源评价的步骤为:①确定因素及其层次。根据煤矿瓦斯灾害危险性分析,寻找煤矿瓦斯灾害事故的引发因素之间的逻辑

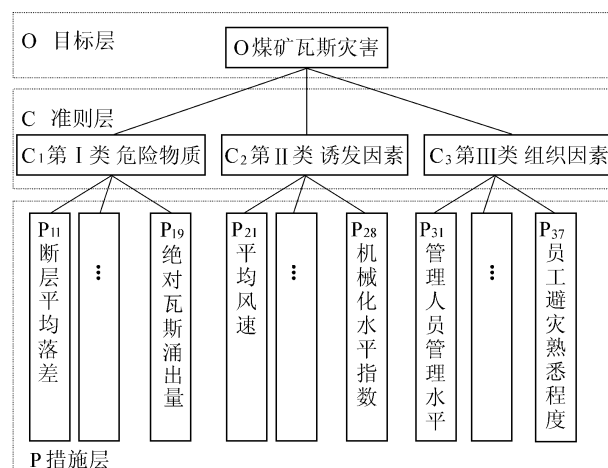


图 1 层次结构模型

Fig. 1 Hierarchical structure model

关系,进而得到煤矿瓦斯灾害重大危险源评价的层次结构模型;②建立权重集。建立权重集,即确定各因素的权重向量。通过第 2.1 节层次分析法可以得到合理有效的权重集;③建立评价集。针对每个 1 级因素,考虑所有 24 个 2 级因素,得到 3 个 24 维的判断矩阵。在进行适当的规范化和标准化后即为评价矩阵。根据数学模型中的公式,即可求得各影响因素的评估分和综合评估分,便可依此对各影响因素进行排序和管理。具体数学公式和计算过程参考文献[20]。

## 3 实例分析

为了验证方法的可行性和有效性,通过问卷调查和实地访谈的方式获得湖南省属煤矿共 65 份样本,剔除缺失值较多和问卷填写不认真的样本,最终选出其中 60 份有效样本。

### 3.1 基于 AHP-FCE 方法确定因子的影响力排序

经严格按照 AHP 法实施要则,建立如图 1 和表 1 所示的煤矿瓦斯重大危险源定量评价指标体系,然后对该系统中的各要素进行量化分析。邀请江西、湖南、贵州、广西、山西等省(区)25 名专家和 50 名一线工程技术人员进行了深度访谈,获得第一手的 3 个因素 24 个子因素的相对重要的权重,通过对权重的初步分析,一致性非常好,限于篇幅,具体数据从略,并于 2013 年第一季度对湖南金竹山等多家煤矿进行了现场考察验证。

据 AHP-FCE 方法进行求解,得到煤矿瓦斯灾害重大危险源评价系统准则层中  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  各评价因素的权重分别为  $W_1^{(1)} = 0.29$ 、 $W_2^{(1)} = 0.39$ 、 $W_3^{(1)} =$

0.32。并求得相对于各一级指标的二级指标权重,即措施层(P)对准则层(C)中 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ 的权重见表2,据权重表计算各因素的影响力得分分别为 $u_{1i}$ 、 $u_{2m}$ 、 $u_{3n}$ ( $i$ 为 $C_1$ 因素数量, $i=1\sim 9$ ;  $m$ 为 $C_2$ 因素数量, $m=1\sim 8$ ;  $n$ 为 $C_3$ 因素数量, $n=1\sim 7$ )。据模糊综合评判模型计算影响力得分,将得到的3个权重进行规范化,得到影响力评价集 $u=\{u_{1i}, u_{2m}, u_{3n}\}=\{2.32, 2.03, 1.74, 1.45, 3.77, 2.90, 5.06, 3.29, 6.45, 4.80, 5.78, 5.00, 4.83, 4.54, 4.18, 8.12,$

$3.95, 2.88, 3.59, 4.23, 6.47, 2.56, 5.83, 4.23\}$ 。

据集合 $u$ 所得的各因素影响得分对各因素进行排序,即有 $u_{27}>u_{34}>u_{19}>\dots>u_{14}$ 。结果表明图1和表1所示的煤矿瓦斯重大危险源定量评价指标体系基本合理,其中瓦斯抽采率因素 $P_{27}$ 的影响力得分 $u_{27}$ 最高,安全措施实施水平因素 $P_{34}$ 的影响力得分 $u_{34}$ 居第2位,而构造因素 $P_{14}$ 等影响力得分较低。只有煤尘爆炸指数因素 $P_{26}$ 是属于第I类还是第II类指标值得商榷。

表2 措施层各因素对准则层权重

Table 2 Weight of alternatives layer factors to criteria layer

准则层	各因素的权重																										
	P <sub>11</sub>	P <sub>12</sub>	P <sub>13</sub>	P <sub>14</sub>	P <sub>15</sub>	P <sub>16</sub>	P <sub>17</sub>	P <sub>18</sub>	P <sub>19</sub>	P <sub>21</sub>	P <sub>22</sub>	P <sub>23</sub>	P <sub>24</sub>	P <sub>25</sub>	P <sub>26</sub>	P <sub>27</sub>	P <sub>28</sub>	P <sub>31</sub>	P <sub>32</sub>	P <sub>33</sub>	P <sub>34</sub>	P <sub>35</sub>	P <sub>36</sub>	P <sub>37</sub>			
C <sub>1</sub>	0.08	0.07	0.06	0.05	0.13	0.10	0.15	0.10	0.16	0.02	0	0	0.01	0	0.05	0	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0		
C <sub>2</sub>	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.03	0.10	0.14	0.12	0.10	0.10	0.07	0.20	0.07	0	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0.01		
C <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.09	0.10	0.12	0.19	0.08	0.17	0.12	0.12		

### 3.2 数据预处理

对数据进行检查,对部分问卷中存在的填写量纲错误和明显不符合常识的数据进行人工修正。然后对存在三级指标的因素和需要将名义数据转换成度量数据的因素进行计算,主要指标计算方法。

1) 设备完好率:若未填写设备完好率而分三级指标填写了设备完好台数与设备总台数,则根据各类设备的完好率来推算总的设备完好率。

2) 管理人员管理水平、技术人员技术水平、工人的技能和经验情况、安全措施实施水平4个指标是由多个三级指标合成的,进行指标合成时一般采用算术平均,但需根据经验对权重进行调整。

3) 顶底板类型和构造因素为名义变量,实际计算时由专家根据不同类型顶底板或构造发生瓦斯灾害的危险性大小给予1个数值来代替。本示例中取值分别为:伪顶(底)0.8,直接顶(底)0.5,基本顶(底)0.2,有多个选项的取平均,然后将顶板和底板加成;构造因素则统计容易带来煤层厚度变化的构造因素出现的次数来赋值,若存在构造因素则为1,否则为0.5。在实际应用时可考虑通过对历史数据的分析总结给出更科学合理的取值。

所有指标的缺失值一般取平均值代替,或者以该指标国家规范要求,如有取值范围,取最常见值或均值来代替。

### 3.3 综合评价结果

预处理后得到60个样本24个变量的标准数据

集,使用SPSS21计算的各变量描述统计见表3。

表3 变量描述统计

Table 3 Descriptive statistics of variables

指标名称	样本数	最小	最大	均值	标准差
断层平均落差/m	60	0.50	230.00	49.596	50.574
$N/(\text{条} \cdot \text{km}^{-2})$	60	0	7.00	2.283	1.132
顶/底板类型	60	0.20	0.65	0.480	0.080
构造因素	60	0.50	1.00	0.667	0.238
自然发火期/月	60	1.50	24.00	5.400	2.774
煤层瓦斯压力/Pa	60	0.03	110.00	3.541	15.158
$V_1/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	60	0.11	201.00	71.479	411.285
$q/(\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	60	0.20	45.73	13.977	12.099
$V_2/(\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1})$	60	0.08	175.28	9.747	26.165
$v/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	60	0.80	7.83	3.339	1.748
100 m 风筒漏风率/%	60	0.20	129.00	10.004	20.263
风量供需比/%	60	60.00	250.00	103.367	24.746
设备完好率/%	59	0	100.00	91.688	22.815
设备安全可靠率/%	60	80.00	100.00	94.150	7.633
煤尘爆炸指数/%	60	1.00	50.00	24.283	8.585
瓦斯抽采率/%	60	10.00	100.00	41.483	19.419
机械化水平指数	60	10.00	90.00	43.567	15.615
管理人员管理水平	60	6.00	93.00	47.100	18.300
技术人员技术水平	60	3.00	97.00	29.500	19.800
工人的技能和经验	60	35.00	76.00	51.600	10.300
安全措施实施水平	60	28.00	83.00	60.100	15.300
员工的职业责任感	60	60.00	100.00	84.533	10.560
规程标准化执行	60	60.00	100.00	85.833	9.571
员工避灾熟悉程度	60	62.00	100.00	88.467	10.308

注: $N$ 为单位面积断层数; $V_1$ 为相对瓦斯涌出量; $q$ 为煤层瓦斯含量; $V_2$ 为绝对瓦斯涌出量; $v$ 为平均风速。

1) 所有指标进行归一化,映射到(0,1)区间。这里各指标统一采用如下公式: $y=(x-x_{\min})/(x_{\max}-$

$x_{\min}$ ) ,其中:  $y$  为因素归一化值;  $x$  为因素量化值;  
 $x_{\min} \sim x_{\max}$  分别为因素量化最小值和最大值。

2) 所有指标按正向影响煤矿瓦斯灾害危险性来处理,负向指标按  $y=1-x$  的公式转换。负向指标包括: 自然发火期、风流供需比、风流供采比、设备完好率、设备安全可靠率、瓦斯抽采率、机械化水平指数、管理人员管理水平、技术人员技术水平、工人的技能和经验、安全措施实施水平、员工的职业责任感、规程标准化执行水平、员工对避灾的熟悉程度等。

3) 根据已求得的  $W_1^{(1)} = 0.29$ 、 $W_2^{(1)} = 0.39$ 、 $W_3^{(1)} = 0.32$ 和表 2 的权重来合成最评估终影响力综合得分和各准则层因素的影响力得分。评估综合得分结果见表 4。

表 4 综合评估影响力得分

Table 4 Scores of comprehensive assessment influence

煤矿 影响力得分					煤矿 影响力得分				
编号	综合	I	II	III	编号	综合	I	II	III
1	55.79	0.36	0.53	0.77	31	38.13	0.24	0.46	0.41
2	54.71	0.39	0.57	0.66	32	37.98	0.28	0.38	0.46
3	50.78	0.34	0.45	0.73	33	37.68	0.29	0.30	0.55
4	49.63	0.29	0.59	0.57	34	37.58	0.28	0.39	0.45
5	47.29	0.29	0.49	0.62	35	36.59	0.24	0.47	0.35
6	45.80	0.26	0.45	0.65	36	36.41	0.29	0.40	0.38
7	45.09	0.35	0.63	0.32	37	36.35	0.36	0.38	0.34
8	44.60	0.28	0.53	0.49	38	36.19	0.28	0.31	0.50
9	44.24	0.35	0.65	0.28	39	36.12	0.35	0.38	0.35
10	43.73	0.35	0.41	0.55	40	36.04	0.25	0.27	0.57
11	43.48	0.28	0.50	0.50	41	35.27	0.30	0.39	0.36
12	43.14	0.26	0.44	0.57	42	34.90	0.37	0.32	0.36
13	43.13	0.27	0.51	0.48	43	34.74	0.27	0.37	0.40
14	43.06	0.46	0.32	0.53	44	34.42	0.25	0.39	0.37
15	42.51	0.36	0.42	0.49	45	34.12	0.24	0.45	0.30
16	42.13	0.24	0.46	0.54	46	33.82	0.26	0.25	0.52
17	41.81	0.24	0.45	0.53	47	33.53	0.25	0.35	0.40
18	41.53	0.30	0.45	0.48	48	33.49	0.24	0.41	0.33
19	41.40	0.40	0.45	0.38	49	32.64	0.27	0.38	0.32
20	40.99	0.24	0.43	0.55	50	32.56	0.25	0.37	0.33
21	40.93	0.28	0.45	0.48	51	31.88	0.38	0.39	0.18
22	40.31	0.28	0.38	0.54	52	31.25	0.26	0.42	0.24
23	40.28	0.33	0.36	0.52	53	31.20	0.28	0.35	0.29
24	40.15	0.25	0.46	0.47	54	30.97	0.30	0.30	0.34
25	40.07	0.36	0.42	0.42	55	30.95	0.29	0.32	0.32
26	39.91	0.27	0.41	0.50	56	29.58	0.21	0.41	0.23
27	39.60	0.26	0.46	0.44	57	29.32	0.19	0.34	0.33
28	39.49	0.31	0.39	0.48	58	28.66	0.27	0.24	0.36
29	39.08	0.24	0.38	0.53	59	26.90	0.29	0.37	0.12
30	39.06	0.28	0.41	0.47	60	24.71	0.25	0.26	0.23

注: 此表是按照综合影响力得分从大到小排列, 其中综合影响力得分已换算成百分制。

按照前述处理方法,容易知道综合影响力得分越大代表其发生瓦斯灾害的可能性(危险性)越大。分别计算综合影响力得分(百分制)和第 I、第 II、第 III 类危险源因素得分的均值  $\mu$  与标准差  $\sigma$ ,结果见表 5。若按照综合得分大于  $\mu+2\sigma$ 、小于  $\mu+2\sigma$  但大于  $\mu+\sigma$ 、小于  $\mu+\sigma$  但大于  $\mu$ 、小于  $\mu$  但大于  $\mu-\sigma$ 、小于  $\mu-\sigma$  但大于  $\mu-2\sigma$ 、小于  $\mu-2\sigma$  分别对应 6 个安全等级,可分别定为非常危险、危险、需要改进、比较安全、安全、非常安全。

表 5 综合评分统计及分类标准

Table 5 Comprehensive scores statistics and classification standard

	样本	最小	最大	平均	$\sigma$	$\mu-\sigma$	$\mu+\sigma$	$\mu-2\sigma$	$\mu+2\sigma$
综合评价	60	24.71	55.79	38.46	6.35	32.11	44.81	25.77	51.16
第 I 类	60	0.19	0.46	0.29	0.05	0.24	0.34	0.19	0.39
第 II 类	60	0.24	0.65	0.41	0.08	0.33	0.50	0.24	0.58
第 III 类	60	0.12	0.77	0.44	0.13	0.31	0.57	0.18	0.70

按照上述标准煤矿 1 和煤矿 2 处于非常危险范围,而煤矿 60 则表现优异属于非常安全范围。综合得分大于 44.81% 小于 51.16% 的有 5 家煤矿(除掉),属于危险区域,小于 32.11% 大于 25.77% 的则有 9 家,属于安全区域,其他煤矿则以 38.46% 为标准划分为比较安全和需要改进 2 类,分别有 20 家和 23 家。

若进一步分析第 I、第 II、第 III 类因素的得分,可以为煤矿提供整改的方向。比如排名第 1 的煤矿 1 其 3 类的影响力得分分别为 0.36、0.53、0.77,其中第 III 类得分为 0.77 大于  $\mu+2\sigma$ ,即 0.70,属于非常危险,而第 I 类、第 II 类属于一般危险,所以应该优先调整组织因素,加强安全投入和安全规章制度的执行等。相比煤矿 60 则在客观环境方面并不是最好,其第 I 类得分 0.25 大于  $\mu-\sigma$ ,即 0.24,只属于安全范畴,但其第 II 类和第 III 类指标的得分分别为 0.26 和 0.23,均小于 0.33 和 0.31,显非常安全标准。

4 结 语

在研究现有文献基础上,结合实践调研,创新性地构建了煤矿瓦斯灾害危险源风险评价指标体系,包括危险物质因素(第 I 类)、诱发因素(第 II 类)、组织因素(第 III 类)3 类因素,共计 24 个子因素。进一步根据煤矿瓦斯灾害的实践特征,构建了一种新

的煤矿危险源安全评价方法,即 AHP-FCE 方法,该方法综合了 AHP 方法和 FCE 方法的优点,避免了二者的缺点。笔者将模糊数学的思想应用于煤矿重大危险源评价领域,并引入系统危险等级模糊特征量的概念和计算方法,它可以保证安全等级隶属度向量的离散化,能从根本上解决最大隶属度原则可能导致评价结果失真的问题。通过实例分析结果表明: AHP-FCE 方法在实际煤矿瓦斯灾害重大危险源定量评价方法中具有应用可行性和较好的应用效果。

#### 参考文献:

- [1] 事故快报—煤矿事故 [EB/OL]. 国家安监总局. [http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/sgkb/sgkb\\_mksg.htm](http://www.chinasafety.gov.cn/newpage/sgkb/sgkb_mksg.htm).
- [2] 魏建平,郝天轩,刘明举.基于构造复杂程度定量评价的瓦斯含量预测 BP 模型[J].煤炭学报,2009,34(8):1090-1094.  
Wei Jianping, Hao Tianxuan, Liu Mingju. BP model of gas content prediction based on quantitative assessment of geological structure complexity [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1090-1094.
- [3] 田云丽,周利华.基于 BP 神经网络的煤与瓦斯突出预测方法的研究[J].系统工程理论与实践,2005,25(12):102-106.  
Tian Yunli, Zhou Lihua. Study on the methods for predicting coal or gas outburst based on BP Neural Network [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2005, 25(12): 102-106.
- [4] 孙斌.应用灰色关联分析法评价瓦斯爆炸事故危险源[J].煤炭科学技术,2005,33(12):61-64.  
Sun Bin. Gray related analysis method to assess risk of gas explosion accident dangerous source [J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(12): 61-64.
- [5] 曹树刚,王艳平,刘延保,等.基于危险源理论的煤矿瓦斯爆炸风险评价模型[J].煤炭学报,2006,31(4):470-474.  
Cao Shugang, Wang Yanping, Liu Yanbao, et al. Risk assessment model of gas explosion in coal mine based on the hazard theory [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(4): 470-474.
- [6] 韩玉建,陈建宏,周智勇.基于心态指标的煤矿瓦斯爆炸区间数模糊评价[J].中国安全科学学报,2010,20(2):83-88.  
Han Yujian, Chen Jianhong, Zhou Zhiyong. Fuzzy assessment method of interval number for gas explosion coal mines based on index of attitude [J]. Journal of China Safety Science, 2010, 20(2): 83-88.
- [7] 王莉,李红霞,田生,等.瓦斯爆炸3类危险源评价指标优化[J].西安科技大学学报,2011,31(6):693-697.  
Wang Li, Li Hongxia, Tian Sheng, et al. Optimization for three types of gas explosion hazard evaluation index [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2011, 31(6): 693-697.
- [8] 王爽英,吴超,左红艳.中小型煤矿生产安全模糊层次分析评价模型及其应用[J].中南大学学报:自然科学版,2010,41(5):1918-1922.  
Wang Shuangying, Wu Chao, Zuo Hongyan. Fuzzy analytic hierarchy process assessment model of safety production for small and medium coal mines and its application [J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2010, 41(5): 1918-1922.
- [9] 陈红,祁慧,宋学锋,等.煤矿重大事故中管理失误行为影响因素结构模型[J].煤炭学报,2006,31(5):689-696.  
Chen Hong, Qi Hui, Song Xuefeng, et al. Structural model of affecting factors of management misconduct in coal mine fatal accidents in China [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(5): 689-696.
- [10] 孔留安,李武.影响我国煤矿安全的本质因素分析[J].煤炭学报,2006,31(3):320-323.  
Kong Liuan, Li Wu. Analysis of the intrinsic factors affecting coal mine safety [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(3): 320-323.
- [11] 孙宏才,田平,王莲芬.网络层次分析法与决策科学[M].北京:国防工业出版社,2011.
- [12] Paula P S, Maiti J. The role of behavioral factors on safety management in underground mines [J]. Safety Science, 2007, 45(4): 449-471.
- [13] Son K S, Melchers R R, Kal W M. An analysis of safety control effectiveness [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2000, (26): 351-368.
- [14] Wirth O, Sigurdsson S O. When workplace safety depends on behavior change: Topics for behavioral safety research [J]. Journal of Safety Research, 2008, 39(6): 589-598.
- [15] Hickman J S, Geller E S. A safety self-management intervention for mining operations [J]. Journal of Safety Research, 2003, 34(3): 299-308.
- [16] Kotze R L M, Visser J K. An analysis of maintenance performance systems in the South African mining industry [J]. South African Journal of Industrial Engineering, 2012(3): 13-29.
- [17] 李树砖,田水承,郭彬彬.基于层次分析法的煤矿瓦斯爆炸致因研究[J].陕西煤炭,2011,30(4):38-41.  
Li Shuzhuan, Tian Shuicheng, Guo Binbin. Research on the cause of mine gas explosion by the analytic hierarchy process [J]. Shaanxi Coal, 2011, 30(4): 38-41.
- [18] 罗磊,李跃华,栾英宏,等.基于改进权重模糊综合评判的目标识别方法[J].探测与控制学报,2009,31(3):68-72.  
Luo Lei, Li Yuehua, Luan Yinghong, et al. Target recognition based on fuzzy comprehensive evaluation using improved weight [J]. Journal of Detection & Control, 2009, 31(3): 68-72.
- [19] 叶俊杰,刘业政.采用模糊 C 均值聚类改进模糊综合评判模型[J].计算机工程与应用,2011,47(16):246-248.  
Ye Junjie, Liu Yezheng. Using fuzzy C-means clustering to improve fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(16): 246-248.
- [20] 李金明,李润.基于 AHP-FCE 法的煤矿安全管理系统的研究[J].计算机应用与软件,2010,27(4):227-229.  
Li Jinming, Li Run. Study on coal mine safety management system based on AHP-FCE [J]. Computer Applications and Software, 2010, 27(4): 227-229.