

魏引尚,高群,王睿德.基于ANP和多级可拓的煤矿应急管理体系脆弱性研究[J].矿业安全与环保,2018,45(6):97-102.  
文章编号:1008-4495(2018)06-0097-06

# 基于 ANP 和 多级可拓的煤矿应急管理体系脆弱性研究

魏引尚<sup>1,2</sup>,高群<sup>1,2</sup>,王睿德<sup>1,2</sup>

(1. 西安科技大学 安全科学与工程学院,陕西 西安 710054;  
2. 教育部西部矿井开采及灾害防治重点实验室,陕西 西安 710054)

**摘要:**为全面系统地评价煤矿应急管理体系脆弱性,首先构建了由4个准则、20个具体指标组成的脆弱性评价指标体系;因其各指标因素间相互依赖、相互影响,引入网络层次分析法(ANP)构建判断矩阵以此确定权重。然后划分脆弱性等级,建立煤矿应急管理体系脆弱性评价的经典域与节域,构建评价指标与脆弱性等级的关联函数。最后,综合考虑各指标权重影响,结合多级可拓评价方法,确定煤矿应急管理体系脆弱性等级。运用该模型对陕西何家塔煤矿的应急管理体系进行脆弱性评价,结果显示该模型可行有效。

**关键词:**煤矿;应急管理体系;脆弱性;网络层次分析法;多级可拓  
**中图分类号:**TD79;X913.4 **文献标志码:**A

## Study on the Vulnerability of Coal Mine Emergency Management based on ANP and Multi-level Extension

WEI Yinshang<sup>1,2</sup>, GAO Qun<sup>1,2</sup>, WANG Ruide<sup>1,2</sup>

(1. College of Safety Science and Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054;  
2. Key Laboratory of Western Mine Exploration and Hazard Prevention, Ministry of Education, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To comprehensively and systematically evaluate the vulnerability of coal mine emergency management system, firstly, the vulnerability assessment indexes system consisting of four guidelines and twenty specific indexes was constructed; because of the mutual dependence and mutual influence of each indicator factor, the analytic network process (ANP) was introduced to construct the judgment matrix to determine the weight. Secondly, the vulnerability was classified, the classic domain and section domain of vulnerability evaluation of coal mine emergency management system were established, the correlation function between the evaluation index and vulnerability level was constructed. Finally, the vulnerability grade of mine emergency management system was determined by taking into account the influence of each index weight and the multi-level extension evaluation method. The evaluation model was used to evaluate the vulnerability of emergency management system of Hejiata Coal Mine in Shaanxi. The result shows that the model is feasible and effective.

**Keywords:** coal mine; emergency management system; vulnerability; analytic network process; multi-level extension

煤矿事故的发生给社会和企业的长治久安和经济发展带来极大冲击,而合理有效的应急管理体系能在很大程度上保证企业稳定运行。煤矿应急救援是一项复杂的系统工程,在各种因素的扰动下,应急救援系统可能会突然瓦解。随着应急救援规模的扩大,子系统之间的关系也会变得更加复杂,这种应急

救援系统突然瓦解的情况也会更加显著,这种特性就称为脆弱性<sup>[1]</sup>。脆弱性评估是应用于煤矿应急管理的一个新概念,应急准备是通过政府、企业部门和非政府组织之间的协调,来识别风险、确定其脆弱性所需要的资源<sup>[2]</sup>。煤矿应急管理体系脆弱性评价从科学理论上答复“判定应急准备是否充沛”。因而,对煤矿应急管理体系进行有效评估及预测是很有必要的,能够有效辨识应急救援体系中的薄弱部分,并针对性地进行整改预测,积极应对事故风险,增强应急系统的稳健性,保证煤矿安全有序地生产,有利于提高整个煤炭企业的应急能力。

收稿日期:2017-09-25;2018-08-27 修订

作者简介:魏引尚(1966—),男,陕西富平人,教授,研究方向为安全科学与工程、矿井通风与安全技术。E-mail: 947638750@qq.com。

在应急管理评价方面,岳宁芳<sup>[3]</sup>通过各因素风险构建了重大灾害事故应急管理风险评价指标体系,来评价煤矿应急能力;史波<sup>[4]</sup>运用改进的 AHP 方法并结合灰色系统理论来确定煤矿应急能力评价指标权重,最终建立煤矿应急能力评价模型;王汉斌等<sup>[5]</sup>采用 AHP-RS 相融合的方法确定了各因素指标权重,从而建立煤矿应急能力评价模型;齐琪<sup>[6]</sup>采用三角模糊数理论的方法,构建了煤矿应急管理指标体系及综合评价模型;王金凤等<sup>[7]</sup>采用博弈论和数值仿真方法构建了煤矿应急救援中多主体协作的行为博弈模型;Inuiguchi M 等<sup>[8]</sup>研究了关于煤炭应急管理能力的因素,利用相关支持向量机理论和算法构建模型,提高了对小样本数据的处理能力和结果预测能力。

以上理论方法对矿山应急管理评价有一定的参考意义,但并未将影响其各因素的内在联系考虑进去,在建立脆弱性指标体系时,大多都忽略了各因素之间互相独立的客观事实。笔者引入网络层次分析法(ANP)<sup>[9]</sup>,利用网络化的建模方法呈现各因素间的互不独立关系,从而确定煤矿应急管理体系脆弱性指标的权重,精确反映各评价指标因素之间的关系;并在物元可拓的基础上建立多级可拓模型,确定各级指标及目标脆弱性的关联度。物元理论是多级可拓模型的核心思想,物元是以事物、特征及事物关于该特征的量值三者所组成的三元组,记为  $R = (\text{事物}, \text{特征}, \text{量值}) = (N, C, V)$ ,这与各级指标和评价目标之间的映射关系的思维是一致的<sup>[10-12]</sup>。该方法不仅能表达被评价对象状态等级的关联度,而且能反映被评价对象质量变化的动态过程,有效地解决了一些模糊评价中的极值隐藏难题。

## 1 脆弱性评价模型

### 1.1 脆弱性评价指标

煤矿应急管理体系脆弱性评价的影响因素多重复杂、互相交错,按照煤矿应急管理脆弱性评价指标的系统性原则、科学性原则、重要性原则和实用性原则,结合各脆弱性指标的完备性和独立性,根据事故构成 4M 要素法和层级结构分析,构建煤矿应急管理体系脆弱性评价指标<sup>[13]</sup>,如表 1 所示。

### 1.2 指标权重确定

根据煤矿应急管理体系复杂性和非线性的特征,煤矿应急管理体系脆弱性受“人—机—环—管”4 因素的影响。在整个指标体系中,各个指标(影响

表 1 煤矿应急管理体系脆弱性评价指标

目标层	一级指标	二级指标
煤 矿 应 急 管 理 体 系 脆 弱 性	人员脆弱性 $B_1$	安全意识 $C_1$
		生理及心理状况 $C_2$
		技术能力 $C_3$
		组织管理能力 $C_4$
		应急素质 $C_5$
	物资脆弱性 $B_2$	事故监测及报警系统 $C_6$
		消防设施 $C_7$
		个人防护装置 $C_8$
		应急装备和物资 $C_9$
		医疗、卫生救护设备 $C_{10}$
		资源布局 $C_{11}$
	环境脆弱性 $B_3$	应急通信装置 $C_{12}$
		微气候环境 $C_{13}$
		单元布局结构 $C_{14}$
		地理条件 $C_{15}$
		地质水文 $C_{16}$
管理脆弱性 $B_4$	应急对策及法规 $C_{17}$	
	应急演练及培训 $C_{18}$	
	应急预案及咨询 $C_{19}$	
	应急机构及分工 $C_{20}$	

因素)并非彼此独立,而是相互影响、相互依赖的,且具有反馈的特点。为了更全面、系统地描述各指标之间的相互依赖关系,应用 ANP 方法来确定权重,构成一个非独立的层次递阶结构模型,网络层中的各元素可能相互影响、相互依赖。因而,各因素之间的关系能用网络结构更精确地描述出来。ANP 的典型结构是由目标层、控制层及网络层 3 部分构成的,如图 1 所示。

笔者利用超级决策(Super Decision)<sup>[14]</sup>软件,邀请煤矿应急管理方面专家对煤矿应急管理体系脆弱性进行判断打分,构建判断矩阵模型,如图 2 所示。最终求得煤矿应急管理体系脆弱性评价指标的权重,如表 2 所示。

### 1.3 物元可拓模型分析

物元可拓模型基于物元理论和可拓集合理论,通过经典域、节域、待评物元的建立,构建关联函数并确定评价等级。依据物元评价的相关数据计算待评物元关于评定等级的关联度,从而确定评价对象的水平。

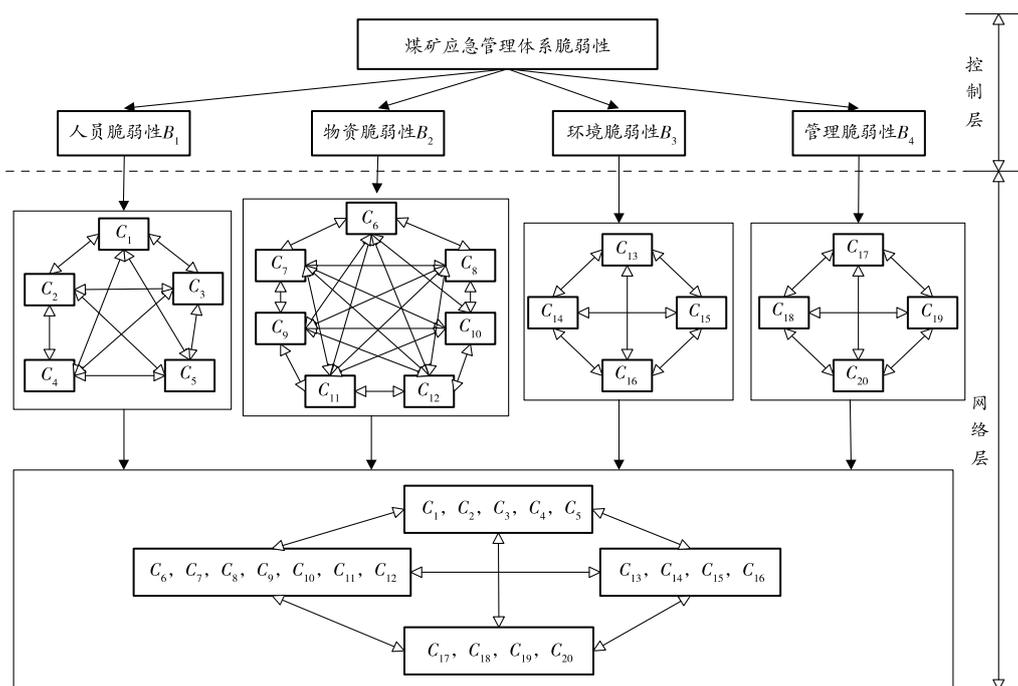


图1 煤矿应急管理体系脆弱性评价指标的ANP结构模型

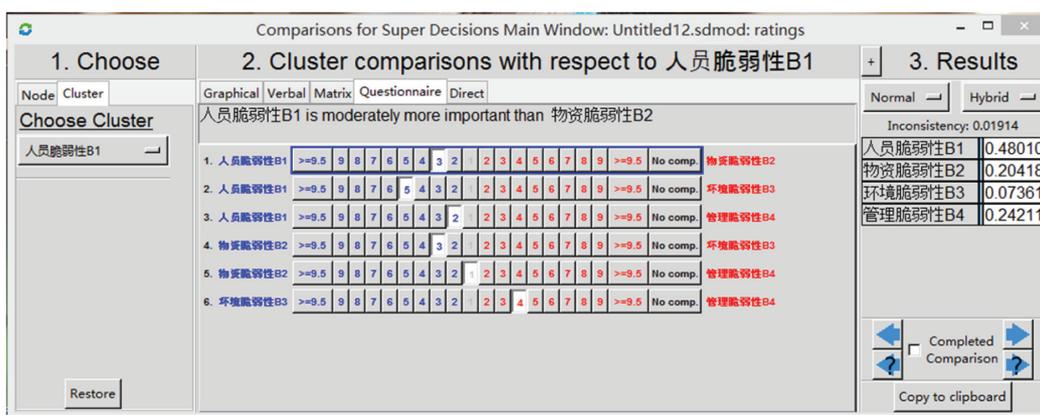


图2 超级决策软件判断矩阵模型图

表2 煤矿应急管理体系脆弱性评价指标权重

一级指标	权重	二级指标	权重
B <sub>1</sub>	0.480	C <sub>1</sub>	0.141
		C <sub>2</sub>	0.056
		C <sub>3</sub>	0.525
		C <sub>4</sub>	0.092
		C <sub>5</sub>	0.186
B <sub>2</sub>	0.204	C <sub>6</sub>	0.360
		C <sub>7</sub>	0.085
		C <sub>8</sub>	0.275
		C <sub>9</sub>	0.079
		C <sub>10</sub>	0.043
		C <sub>11</sub>	0.039
		C <sub>12</sub>	0.119

表2(续)

一级指标	权重	二级指标	权重
B <sub>3</sub>	0.074	C <sub>13</sub>	0.095
		C <sub>14</sub>	0.160
		C <sub>15</sub>	0.278
		C <sub>16</sub>	0.467
		C <sub>17</sub>	0.086
B <sub>4</sub>	0.242	C <sub>18</sub>	0.299
		C <sub>19</sub>	0.141
		C <sub>20</sub>	0.474

### 1.3.1 确定经典域和节域

用  $U_j (j = 1, 2, 3, 4, 5)$  表示煤矿应急管理体系脆弱性指标中的5个评定等级,  $C_n$  为各等级  $U_j$  表现的

特征;  $V_{jn}$  为  $U_j$  关于特征  $C_n$  的量值, 经典域  $R_j$  为准则  $U_j$  对应的评价指标所取的量值范围  $(a_{jn}, b_{jn})$ , 则:

$$R_j = (U_j, C_n, V_{jn}) = \begin{pmatrix} U_j & C_1 & V_{j1} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_{jn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_j & C_1 & (a_{j1}, b_{j1}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{jn}, b_{jn}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

节域为:

$$R_U = (U, C_n, V_{Un}) = \begin{pmatrix} U & C_1 & (a_{U1}, b_{U1}) \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & (a_{Un}, b_{Un}) \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中:  $U$  表示脆弱性评价等级的全体;  $V_{Un}$  为评价指标集  $C_n$  关于全部等级  $U$  所规定的取值范围即  $(a_{Un}, b_{Un})$ 。

### 1.3.2 确定待评物元

用  $R_0$  表示待评物元矩阵,  $N$  为待评煤矿应急管理体系脆弱性程度,  $V_1, V_2, \dots, V_n$  表示事物  $N$  关于指标  $C_1, C_2, \dots, C_n$  的量值, 即待评事物相对各级指标的具体取值, 则待评物元  $R_i$  ( $i$  表示指标的级数) 为:

$$R_i = \begin{pmatrix} N & C_1 & V_1 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_n \end{pmatrix} \quad (3)$$

### 1.3.3 构建关联函数

煤矿应急管理体系脆弱性的待评指标  $c_i$  关于第  $j$  个级别的关联函数为:

$$K_j(c_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, V_{ji})}{|V_{ji}|}, & v_i \in V_{ji} \\ \frac{\rho(v_i, V_{ji})}{\rho(v_i, V_U) - \rho(v_i, V_{ji})}, & v_i \notin V_{ji} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \rho(v_i, V_{ji}) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{ji} + b_{ji}) \right| - \frac{1}{2}(b_{ji} - a_{ji}) \\ i = 1, 2, \dots, n \\ \rho(v_i, V_U) = \left| v_i - \frac{1}{2}(a_{Ui} + b_{Ui}) \right| - \frac{1}{2}(b_{Ui} - a_{Ui}) \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $V_{ji}$  为准则  $U_j$  关于对应的评价指标所取的量值范围  $(a_{ji}, b_{ji})$ ;  $V_U$  为评价指标集  $C_i$  关于全部等级  $U$  所规定的取值范围  $(a_{Ui}, b_{Ui})$ ;  $v_i$  表示所选评价单元对应评价指标的具体取值。

## 1.4 多级可拓评价

### 1.4.1 一级评价

一级评价的评价对象为二级指标。考虑二级指标权重的影响, 将二级指标的权重向量  $w_i = (w_{ik})$  与

其针对各脆弱性等级的关联度矩阵  $K(c_{ik}) = (k_j(c_{ik}))$  相乘, 计算各一级指标针对各脆弱性等级的关联度矩阵  $K(c_i)$ :

$$K(c_i) = (k_j(c_i)) = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ip}) \cdot \begin{pmatrix} k_1(c_{i1}) & \dots & k_m(c_{i1}) \\ \vdots & & \vdots \\ k_1(c_{ip}) & \dots & k_m(c_{ip}) \end{pmatrix} \quad (6)$$

### 1.4.2 二级评价

二级评价的评价对象为一级指标。将各个一级指标组成的的权重向量  $w = (w_j)$  与其针对各脆弱性等级的关联度矩阵  $K(C) = (K(c_i))$  相乘, 计算待评目标针对各脆弱性等级的关联度矩阵  $K(N)$ :

$$K(N) = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{pmatrix} k_1(c_1) & \dots & k_m(c_1) \\ \vdots & & \vdots \\ k_1(c_n) & \dots & k_m(c_n) \end{pmatrix} \quad (7)$$

### 1.4.3 脆弱性等级确定

若  $k_j(N) = \max_{j=1,2,\dots,m_i} k_j(N)$ , 则待评对象  $N$  的脆弱性等级隶属于  $j$ :

$$k_j(N) = \frac{\min_j k_j(N)}{1 - \max_j k_j(N) + \min_j k_j(N)} \quad (8)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \cdot \bar{k}_j(N)}{\sum_{j=1}^m \bar{k}_j(N)} \quad (9)$$

式中  $j^*$  为煤矿应急管理体系脆弱性的级别变量特征值, 即属于某脆弱性级别的程度。通过  $j^*$  能够判别待评目标与其邻近等级的偏差程度。

## 2 实例分析

以陕西何家塔煤矿为例, 对其应急管理体系脆弱性进行多级可拓评价, 以确定其脆弱性等级<sup>[15]</sup>。将煤矿应急管理体系脆弱性分为 I ~ V 共 5 个等级, 其取值范围为  $[0, 1.0]$ , 各级脆弱性的取值范围如表 3 所示。

表 3 煤矿应急管理体系脆弱性分级标准

等级	状态	取值范围
I	极高	(0.8, 1.0]
II	很高	(0.6, 0.8]
III	较高	(0.4, 0.6]
IV	较低	(0.2, 0.4]
V	很低	[0, 0.2]

### 2.1 经典域、节域、待评物元

基于物元可拓模型,根据式(1)~(3),煤矿应

急管理体系脆弱性评价的经典域、节域、待评物元分别为:

$$R_j = (R_1, R_2, R_3, R_4) = \begin{pmatrix} \text{极高} & \text{很高} & \text{较高} & \text{较低} & \text{很低} \\ C_1 & (0.8, 1.0] & (0.6, 0.8] & (0.4, 0.6] & (0.2, 0.4] & [0, 0.2] \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_{20} & (0.8, 1.0] & (0.6, 0.8] & (0.4, 0.6] & (0.2, 0.4] & [0, 0.2] \end{pmatrix},$$

$$R_U = \begin{pmatrix} C_1 & [0, 1.0] \\ \vdots & \vdots \\ C_{20} & [0, 1.0] \end{pmatrix}, R_1 = \begin{pmatrix} C_1 & 0.19 \\ \vdots & \vdots \\ C_{20} & 0.25 \end{pmatrix}。$$

### 2.2 待评物元二级指标关联度计算

根据式(4)和式(5),确定二级指标关联度,得到煤矿应急管理体系脆弱性评价二级指标取值,如表4所示。

表4 煤矿应急管理体系脆弱性评价二级指标取值及关联度

一级指标		二级指标		实际分值	关联度				
指标	权重	指标	权重		j=1	j=2	j=3	j=4	j=5
B <sub>1</sub>	0.480	C <sub>1</sub>	0.141	0.19	-0.762	-0.683	-0.525	-0.050	0.050
		C <sub>2</sub>	0.056	0.08	-0.909	-0.867	-0.800	-0.600	0.400
		C <sub>3</sub>	0.525	0.05	-0.937	-0.916	-0.900	-0.750	0.250
		C <sub>4</sub>	0.092	0.24	-0.700	-0.600	-0.400	0.200	-0.143
		C <sub>5</sub>	0.186	0.12	-0.850	-0.800	-0.700	-0.400	0.400
B <sub>2</sub>	0.204	C <sub>6</sub>	0.360	0.21	-0.738	-0.650	-0.475	0.050	-0.045
		C <sub>7</sub>	0.085	0.15	-0.812	-0.750	-0.625	-0.250	0.250
		C <sub>8</sub>	0.275	0.06	-0.925	-0.900	-0.850	-0.700	0.300
		C <sub>9</sub>	0.079	0.18	-0.775	-0.700	-0.550	-0.100	0.300
		C <sub>10</sub>	0.043	0.05	-0.937	-0.916	-0.900	-0.750	0.250
		C <sub>11</sub>	0.039	0.23	-0.712	-0.617	-0.425	0.150	-0.115
		C <sub>12</sub>	0.119	0.15	-0.812	-0.750	-0.625	-0.250	0.250
B <sub>3</sub>	0.074	C <sub>13</sub>	0.095	0.05	-0.937	-0.916	-0.900	-0.750	0.250
		C <sub>14</sub>	0.160	0.15	-0.812	-0.750	-0.625	-0.250	0.250
		C <sub>15</sub>	0.278	0.10	-0.875	-0.833	-0.750	-0.500	0.500
		C <sub>16</sub>	0.467	0.10	-0.875	-0.833	-0.750	-0.500	0.500
B <sub>4</sub>	0.242	C <sub>17</sub>	0.086	0.10	-0.875	-0.833	-0.750	-0.500	0.500
		C <sub>18</sub>	0.299	0.30	-0.625	-0.500	-0.250	0.500	-0.250
		C <sub>19</sub>	0.141	0.10	-0.875	-0.833	-0.750	-0.500	0.500
		C <sub>20</sub>	0.474	0.25	-0.688	-0.583	-0.375	0.250	-0.167

### 2.3 一级评价

根据式(6),计算煤矿应急管理体系脆弱性一级指标对各脆弱性等级的关联度,结果见表4。

### 2.4 二级评价

根据式(7),将各个一级指标组成的权重向量

$w = (w_j)$  与其对应各脆弱性等级的关联度矩阵  $K(C) = (K(c_i))$  相乘,进行二级评价,计算待评目标对于各脆弱性等级的关联度。目标层多级可拓评价结果见表5。

表5 目标层多级可拓评价结果

一级指标	权重	关联度					所属等级
		$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	
$B_1$	0.480	-0.872	-0.829	-0.758	-0.490	0.221	V
$B_2$	0.204	-0.814	-0.753	-0.630	-0.259	0.147	V
$B_3$	0.074	-0.870	-0.827	-0.744	-0.483	0.436	V
$B_4$	0.242	-0.711	-0.614	-0.422	0.154	-0.040	IV
目标层		-0.821	-0.761	-0.649	-0.286	0.158	V

### 2.5 等级评定

根据表5可以得出  $\max_{j=\{1,2,\dots,5\}} k_j(N) = k_5(N)$  目标层即煤矿应急管理体系的总体脆弱性为V级,脆弱性较低,容易引起轻伤事故,可以接受,但需尽快整改。同时求得  $j^* = 4.711$ 。

### 2.6 结果分析

通过计算得出的各指标权重表明,人员脆弱性对煤矿应急管理体系的影响最大,管理脆弱性次之,其后是物资和环境脆弱性,应加强对人员的安全意识、应急素质及技术能力进行培训,平时应加强应急演练。

计算结果表明,该煤矿应急管理体系总体脆弱性水平介于IV级和V级之间,更偏向于V级,可被接受,但需整改,这个评价结果符合该煤矿实际生产运营情况。

由表5可知,该煤矿应急管理体系中的人员、物资、环境脆弱性均为V级,其脆弱性水平很低。但管理脆弱性为IV级,脆弱性水平较低,容易发生重伤事故,是整个应急管理体系的薄弱环节,应该加强管理。其中,组织管理能力、事故监测及报警系统、资源布局、应急演练及培训脆弱性都为IV级,应根据现状评价的原则,对这些子系统需限期整改的部分制订合理的计划按期完成整改。

## 3 结论

1)为有效合理评价煤矿应急管理体系脆弱性,构建了由4个准则和20项具体指标组成的评价指标体系。引入ANP确定各级指标的权重大小,克服所建立指标体系中各指标因素之间的相互依赖影响关系。

2)将多级可拓模型应用于具体实例煤矿应急管理体系脆弱性水平的评价中,并结合各级指标脆弱性的关联度和权重,建立了煤矿应急管理体系脆弱

性的多级可拓评价模型。模型最终得出煤矿应急管理体系总体脆弱性水平介于IV级和V级之间,更偏向于V级,即可被接受,但需整改,这个结果符合该煤矿实际生产运营情况。

3)实例分析表明,多级可拓评价方法有效可行,适用于煤矿应急管理体系脆弱性评价,其评价结果可为剖析煤矿应急管理体系的薄弱环节、提高应急体系的管理水平提供依据,从而做到有针对性地改善企业的应急管理体系状况。由于煤矿应急管理体系涉及面广、影响因素复杂,其多级可拓评价方法还需要在实践中不断修正与完善。

### 参考文献:

- [1] 韦琦,金鸿章,郭健.复杂系统崩溃的脆性致因的研究[J].系统工程,2003,21(4):1-5.
- [2] 石英,孟玄喆.基于轨迹交叉理论的制造业生产安全问题研究[J].工业工程与管理,2014,19(4):129.
- [3] 岳宁芳.煤矿重大灾害事故应急能力评估指标体系的构建[J].煤炭技术,2009,28(2):3-5.
- [4] 史波.煤矿企业应急管理系统构建与应急能力评价研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2008.
- [5] 王汉斌,高翔.煤矿企业脆弱性评估的AHP-RS组合权重法[J].中国安全生产科学技术,2012,8(3):170-173.
- [6] 齐琪.煤矿应急管理评价及提升研究[D].西安:西安科技大学,2014.
- [7] 王金凤,常禾雨,翟雪琪,等.煤矿应急协作的演化博弈及仿真分析[J].矿业安全与环保,2017,44(4):110-114.
- [8] INUIGUCHI M, YOSHIOKA Y, KUSUNOKI Y. Variable-precision dominance-based rough set approach and attribute reduction [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2009, 50(8):1199-1214.
- [9] 王莲芬.网络分析法(ANP)的理论与算法[J].系统工程理论与实践,2001,3(3):44-50.

(下转第107页)

现差距,这与实际复垦效果不符。优化指标体系曲线变化幅度相对较大,将1~4号、5~6号,以及两者之间差异体现的比较明显,也符合实际。所以优化后指标体系的评价结果更科学、合理。

### 3 结论

1)采用相关分析与灰色关联分析相结合的方法优化了矸石山复垦适宜性评价指标体系。其中,运用相关分析筛选了相关关系密切程度高的的重复指标,通过灰色关联分析进一步筛选对系统影响低的次要指标,确保指标体系中没有重复和干扰信息。

2)通过对初始矸石山复垦适宜性指标体系进行优化处理,得到最终的优化指标体系,包括4项准则层,及其以下的11项底层指标。

3)通过对屯兰矿矸石山8个评价单元的模糊综合评价结果分析表明,基于相关分析与灰色关联分析相结合的指标体系优化方案是可靠的,不仅极大地简化了初始指标体系,而且使评价结果更加科学、合理。

### 参考文献:

[1] 张紫昭,郭瑞清,周天生,等.新疆煤矿土地复垦为草地的适宜性评价方法与应用[J].农业工程学报,2015(11):278-286.  
[2] 崔艳,白中科,张继栋,等.露天矿区农用地复垦适宜性评价的方法与应用[J].农业工程学报,2008(S1):181-184.  
[3] 王壬,陈莹,陈兴伟,等.区域水资源可持续利用评价指标体系构建[J].自然资源学报,2014,29(8):1441-1452.  
[4] 迟国泰,曹婷婷,张昆.基于相关—主成分分析的人的全面发展评价指标体系构建[J].系统工程理论与实践,

2012(1):111-119.  
[5] 张昆,迟国泰.基于相关分析—粗糙集理论的生态评价指标体系构建[J].系统工程学报,2012,27(1):119-127.  
[6] 张恒巍,韩继红,张健,等.基于灰关联分析的指标约简与权重分配算法[J].计算机工程与设计,2015(4):1027-1031.  
[7] 龙萍,许立坤,李庆芬,等.均匀设计 RuIrSnLa/Ti 氧化物涂层的回归与灰色关联分析[J].化学学报,2009,67(12):1325-1330.  
[8] 黄友兰,余颜.基于灰色关联度分析的电子信息产业集群综合竞争力提升研究——以重庆为例[J].科技管理研究,2014,34(3):180-183.  
[9] 刘思峰,蔡华,杨英杰,等.灰色关联分析模型研究进展[J].系统工程理论与实践,2013(8):2041-2046.  
[10] 宋明顺,黄佳,张士朋,等.多指标正交试验设计去量纲准则及方法研究[J].工业工程与管理,2014,19(1):41-46.  
[11] 李宁,王李管,贾明涛.基于层次分析法的矿井六大系统模糊综合评价[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(2):631-637.  
[12] 吴德建,周福宝,钱新明.煤矿火区安全启封的模糊数学综合评价方法[J].采矿与安全工程学报,2011(1):56-60.  
[13] 张明磊,张益东,季明,等.基于模糊可拓综合评价方法的巷道支护参数优化[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6):972-978.  
[14] 曹利军,王华东.可持续发展评价指标体系建立原理与方法研究[J].环境科学学报,1998,18(5):526-532.  
[15] 严家平,陈孝杨,蔡毅,等.不同风化年限的淮南矿区煤矸石理化性质变化规律[J].农业工程学报,2017(3):168-174.

(责任编辑:陈玉涛)

=====

(上接第102页)

[10] 杨春燕,蔡文.可拓工程[M].北京:科学出版社,2007:38-43.  
[11] 蔡文.物元模型及应用[M].北京:科学技术文献出版社,1998:21-25.  
[12] 牛晓旭,陈沅江.山区高等级公路路侧安全物元可拓评价研究[J].安全与环境学报,2012,12(6):232-236.  
[13] 杨立兵,程运材,杨海洋,等.企业应急管理脆弱性分

析[J].中国安全科学学报,2008,18(4):76-81.  
[14] 刘睿,余建星,孙宏才,等.基于 ANP 的超级决策软件介绍及其应用[J].系统工程理论与实践,2003,8(8):141-143.  
[15] 苏飞,张平宇.阜新市社会系统脆弱性评价[J].资源与产业,2008,10(4):1-5.

(责任编辑:逢锦伦)