ISSN 1005-2763
CN 43-1215/TD
矿业研究与开发 第44卷 第4期
MINING R & D, Vol.44, No.4
2024年4月
Apr. 2024

基于PPRR理论的岩爆应急管理能力评估模型研究*

向韫

（长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012）

摘要：针对深部矿山岩爆应急管理能力评估具有复杂性、模糊性、未确知性的特点，为进一步提升评估的可靠性，建立了基于改进可拓云的综合评价模型。首先，根据PPRR（Prevention，Preparation，Response，Recovery）危机管理理论，结合岩爆事故的特点，构建了多层次的岩爆应急管理能力评价指标体系；其次，借助序关系分析法（G1法）-反熵权法（A-EWM法）和组合赋权法（CW法）确定指标综合权重；引入了盲数理论，建立盲数矩阵对定性指标数据处理，改进了传统可拓云模型专家直观打分的赋权模式，基于可拓云模型原理，通过计算不同等级下的综合云关联度，按照最大隶属度判别要求，综合分析和评估应急管理能力等级。最后，应用所建立的评价模型对3座矿山岩爆应急管理能力进行实例分析，并与模糊数学和随机Petri网（SPN）评价模型结果相比较。结果显示：3座矿山应急能力均为Ⅳ级，与专家现场调研结论相符合，且3种评价模型评估结果基本一致，验证了本模型在岩爆应急管理能力评估方面具有适应性和有效性。该评价模型可以为危机管理能力的量化评估提供一种切实可行、合理有效的方法。

关键词：巷道岩爆；应急管理能力；可拓云；盲数理论

中图分类号：TD324 **文献标识码：**A

文章编号：1005-2763(2024)04-0185-10

0 引言

矿山深部开采处于高地应力的复杂环境，在巷道掘进过程中，部分硬脆岩体积聚的弹性应变能会突然释放，从而引发岩爆事故[1]。岩爆作为常见的地质灾害之一，具有突发性、破坏性、随机性等特点，严重威胁着井下作业人员的生命安全，应急管理面临巨大挑战。提高深部矿山岩爆应急管理能力，及时采取有效措施防控岩爆，是挽回经济损失和减少人员伤亡的重要举措。因此，科学合理地开展巷道岩爆应急管理能力评估，对于矿山安全生产具有重要意义。

在应急管理能力评估方面，LIU Ying等[2]考虑了矿山事故复杂、突发、多变等特点，基于神经网络算法，建立了矿山企业应急管理能力动态评价模型，能够有效识别安全管理危险因素；田水承等[3]基于WSR理论，在构建多层次的煤矿应急管理能力评价体系基础上，应用组合赋权-物元模型进行应急管理能力评价，可以为改进应急管理工作提供参考；陆军平等[4]建立了基于区间关联函数-物元可拓理论的矿井火灾应急能力评估模型，克服了评估过程中的模糊性、主观性强的缺陷，提高了评估结果的可信度；周瑞雪[5]引入CMM理论，基于突变级数法确定煤矿应急管理成熟度，为应急管理能力评估提供了新方法；耿兴银等[6]利用SEM模型分析了矿山应急管理能力影响因素，认为机制保障、应急预防能力是突发事件应急处置效果的重要影响因素，为应急管理能力评估提供了理论依据；杨三军等[7]建立了矿山应急救援管理能力TOPSIS模型，实现了应急管理能力评估的量化分析；CHENG Linpan等[8]针对非煤矿山安全评价的不确定性特点，建立基于未确知的非煤矿山应急系统评估模型，通过实例验证了模型的有效性。巷道岩爆应急管理能力评估属于多属性综合决策过程，涉及内容较多，指标体系复杂，且主要为定性指标，具有一定模糊性和不确定性。对比发现，现有的科研成果没有充分考虑岩爆事故特征和应急管理的复杂性，在指标数据处理时往往采取专家直观打分的赋值方式，评估过程带有盲目性和主观任意性，评估结果并不完全合理可靠。

鉴于此，本文基于PPRR理论，在选取典型性指标构建评价体系的基础上，借助G1法-AEWM法-CM法确定指标综合权重，引入盲数理论，建立盲数矩阵进行指标数据处理，改进传统定性概念

* **收稿日期：**2023-08-24
作者简介：向韫（1984—），女，湖南长沙人，硕士，工程师，主要从事矿山安全技术研究，E-mail：14912827@qq.com。

专家主观赋值方式,建立岩爆应急管理能力评估的改进可拓云模型。最后,以3座矿山为例,验证模型适用性,以期丰富应急管理能力评估理论。

1 评价体系及分级标准

构建系统、合理的评价指标体系是开展深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估的基础。在指标选取时,需要统筹考虑深部开采环境特点、岩爆事故发生特征、岩爆应急体系建设和现场处置等,并遵循科学、全面、可测等原则。1986年,美国研究专家史蒂芬·芬克提出了"预防-准备-爆发-恢复"的PPRR危机管理理论,是应急管理领域的经典理论[9]。通过梳理国内外相关文献[10-11],总结现有的岩爆应急管理指标体系,依据相关行政法规,在实地调研和广泛征求行业专家意见基础上,选取18个因素,构建了深部矿山巷道岩爆应急管理能力综合评价指标体系,见图1。

本文参照《生产安全事故应急预案管理办法》[12]等安全规范,并借鉴已有的相对固定和成熟的应急管理指标分级研究成果,将岩爆应急管理能力划分为Ⅰ级至Ⅴ级5个等级。其中,Ⅰ级代表应急管理能力极好,表示该矿山已经拥有强大的应急能力,建立了完善的应急管理架构,能够不断发现和弥补应急管理缺陷,安全管理文化氛围浓厚,指标量化取值[90,100);Ⅱ级代表应急管理能力较好,表示该矿山已经制定了较为详细的岩爆应急管理预案,能够有效识别和主动控制岩爆,岩爆发生时能够实现有效处置,指标量化取值[80,90);Ⅲ级代表应急管理能力一般,表示该矿山岩爆应急管理制度体系相对完善,应急保障到位,能够及时分析总结安全管理经验,岩爆事故发生率和破坏性降低,指标量化取值[70,80);Ⅳ级代表应急管理能力较差,表示该矿山在岩爆应急管理方面处于初级阶段,只是建立了基本的应急管理制度,安全管理架构不健全,队伍配置和能力有限,应急处置经验不足,存在一些隐患点,指标量化取值[60,70);Ⅴ级代表应急管理能力极差,表示该矿山没有建立有效的岩爆应急制度,应急管理机构不健全,现场管理灵活性较差,无法有效保障作业人员和设备安全,指标量化取值[0,60)。

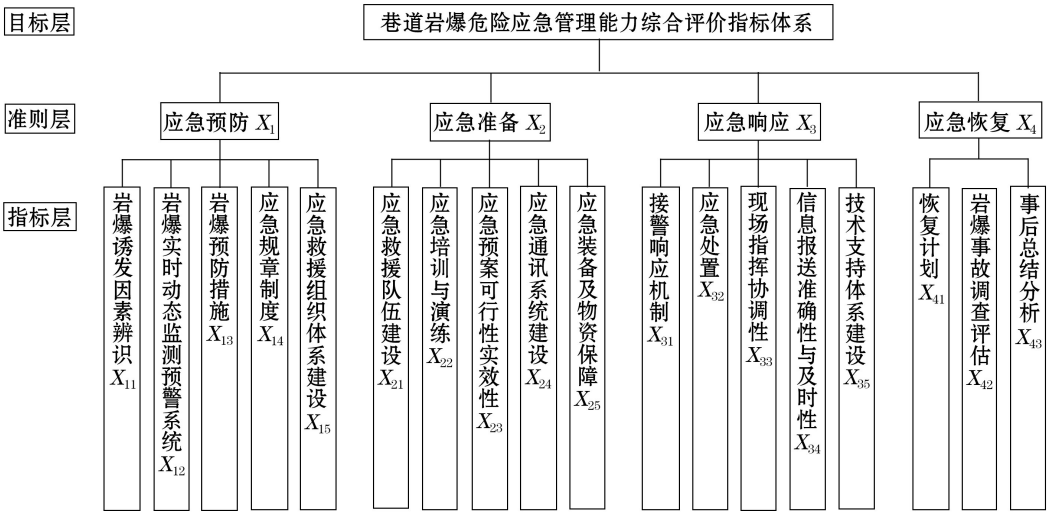

图1 评价体系

Fig.1 Evaluation system

2 理论基础

可拓云模型和物元可拓理论是定性分析、定量计算的两大经典模型。可拓云模型是两大模型的互为补充和融合,能够充分发挥两大模型在分析处理模糊性、随机性问题的突出优势,理论性、逻辑性和科学性更强,已经广泛应用于质量评估、安全评价等多个领域。盲数理论在盲信息、灰信息问题分析时,通过构建盲数矩阵,将不确定性信息准确表达,实现了定性指标全量化处理,降低了定性指标量化的主观任意性。深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估属于定性评价范畴,常规的可拓云模型主要采取专家打分方式进行定性指标赋值。然而,专家主观经验和对事物认知的差异性,以及应急管理能力评估的复杂性,使专家难以全面、准确、客观地掌握应急管理的真实状况,在数据处理方面存在一定盲从性。因此,本文建立了深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估的改进可拓云模型。具体流程如图2所示。

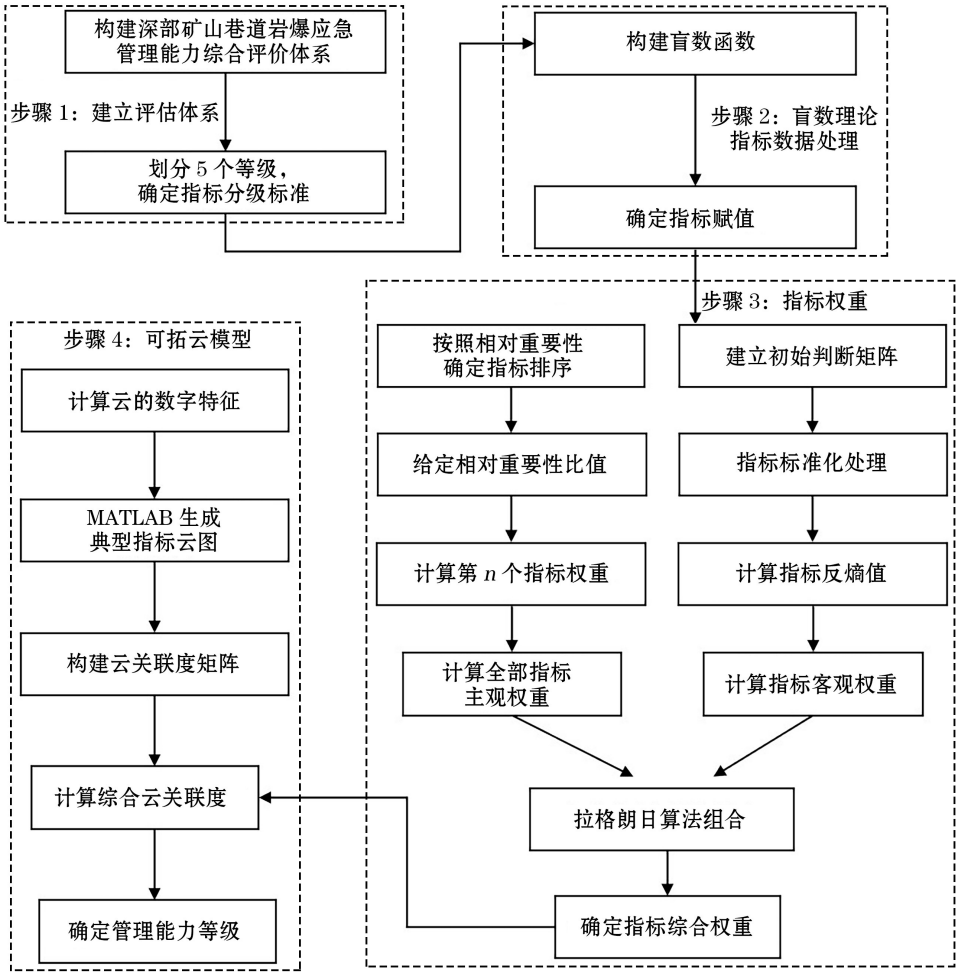

图 2　岩爆应急管理能力评估实现过程

Fig.2　Realization process of rockburst emergency management capability assessment

2.1　数据处理

2.1.1　盲数理论

王光远教授以未确知理论为基础，提出了盲数概念，该理论以区间灰数和区间可信度反映待评对象的不确定性，为分析处理具有灰度、模糊性问题提供了理想模型。具体定义如下[13]。

假设 G 为区间型灰数集，$a_i \in G$，$f(x)$ 为在 G 上的灰函数。若 $a_i \in [0,1](i=1,2,\cdots,n)$，且：

$$f(x)=\begin{cases}\alpha_i, \text{且 } x=\alpha_i(i=1,2,\cdots,n) \\ 0, \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

当 $i \neq j$ 时，$x_i \neq x_j$ 且 $\sum_{i=1}^{n}\alpha_i=\alpha \leqslant 1$，则称函数 $f(x)$ 为盲数。用 $\{[x_1,x_n],f(x)\}$ 表示，其中 x_1 为 x 的下限，x_n 为 x 的上限，称 α_i 为 x 在 x_i 的可信度，$\alpha=\sum_{i=1}^{n}\alpha_i$ 为 x 的总可信度。

2.1.2　盲数矩阵

为提高评估结果的准确性，减少专家的主观影响，由各位专家根据实际情况，对指标进行区间赋值，允许跨级打分。由于专家打分存在等级交叉，需要结合指标分级标准，重新确定等级可信度，构建盲数矩阵。

2.2　指标权重

2.2.1　G1 法赋权

传统层次分析法（Analytic Hierarchy Process，AHP）是目前应用较为广泛的主观赋权方式。研究发现，该方法对专家主观经验依赖性强，特别是在处理指标体系复杂、指标因素关联性强的问题时，权重结果计算精度不高、计算过程相对繁琐。郭亚军教授提出了 G1 法，计算步骤如下[14]。

（1）确定指标重要性顺序。由专家对两两指标之间相对重要性依次进行相互比较，最终给出按照相对重要性排序的指标序列集合（$X_1,X_2,\cdots,X_n$），相应的权重集合记为（$w_1,w_2,\cdots,w_n$）。

（2）确定相对重要性比值 r_j。r_j 体现了两两指标之间的相对重要性程度，是指标赋权的主要依据。取值描述见表 1。具体计算公式如下：

$$r_j=\frac{w_j}{w_{j-1}} \quad (j=2,3,\cdots,n) \tag{2}$$

表 1 重要性比值赋值依据

Table 1 Assignment basis of importance ratio

r_j	相对重要性情况	r_j	相对重要性情况
1.0	同样重要	1.2	稍微重要
1.4	明显重要	1.6	强烈重要
1.8	极其重要	1.1,1.3,1.5,1.7,1.9	介于上面情况之间

(3) 计算第 n 个指标主观权重。第 n 个指标主观权重计算公式为:

$$w_n=(1+\sum_{k=2}^{n}\prod_{j=k}^{n}r_j)^{-1} \tag{3}$$

(4) 计算剩余指标主观权重。其余指标主观权重计算公式为:

$$w_{j-1}=r_j w_j \tag{4}$$

2.2.2 A-EWM 法

熵权法是一种传统的客观赋权法,在实际操作过程中,容易出现部分指标权重过大或过小的极端状况。为克服上述弊端,考虑指标体系复杂性和强交互关联性特点,本文采用反熵权法(Anti-Entropy Weight Method, A-EWM),计算步骤如下[15]。

(1) 建立初始决策矩阵。根据工程实际,确定指标赋值,建立初始决策矩阵,对决策矩阵进行标准化处理。

(2) 计算反熵值 E_j,计算公式为:

$$E_j=-\sum_{i=1}^{m}P_{ij}\ln(1-P_{ij}) \tag{5}$$

$$P_{ij}=y_{ij}/\sum_{i=1}^{m}y_{ij} \tag{6}$$

(3) 计算指标客观权重。根据 E_j 计算结果,计算指标客观权重 w_j,计算公式为:

$$w_j=E_j/\sum_{j=1}^{n}E_j \tag{7}$$

2.2.3 CM 法赋权

将 G1 法赋权结果记为 α_i、A-EWM 法赋权结果记为 β_i,基于最小熵原理,计算指标组合权重 w_i,实现权重计算结果主、客观均衡化,基于拉格朗日算法,计算组合权重 w_i。

$$w_i=\frac{\sqrt{\alpha_i\times\beta_i}}{\sum_{i=1}^{n}\sqrt{\alpha_i\times\beta_i}} \tag{8}$$

2.3 可拓云模型

2.3.1 可拓云理论

物元可拓理论是通过构建一组有序数组 $R=(N,C,V)$,实现待评对象的量化分析。在本文中,N 代表岩爆应急管理能力,C 代表反映应急能力的指标体系,V 代表矿山应急能力指标量化数据。物元可拓经典模型 $\boldsymbol{R}_j$ 表示。

正态云模型是李德毅院士提出的定性概念与定量分析相互映射、转化的计算模型。该模型通过 3 个云的数字特征(E_x、E_n 和 H_e)反映定性概念的整体特征,采用云发生器实现定性概念的量化分析。在本文中,E_x 表示岩爆应急管理能力期望值,反映不同等级下应急能力评估中心点值;E_n 是熵值,反映应急管理能力评估的模糊性和随机性特征;H_e 是超熵,即熵的熵值,反映应急管理能力评估的不确定性。云的数字特征计算公式为:

$$\begin{cases}E_x=\dfrac{c_{\max}+c_{\min}}{2}\\ E_n=\dfrac{c_{\max}-c_{\min}}{6}\\ H_e=k\end{cases} \tag{9}$$

式中,$c_{\max}$、$c_{\min}$ 分别表示应急管理能力等级分级标准最大阈值和最小阈值;k 为常数,一般取 0.01。

可拓云模型是利用云的 3 个数字特征代替特征值 V,可拓云模型可以表示为 $\boldsymbol{R}$[16-17]:

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}N & c_1 & v_1\\ & c_2 & v_2\\ & \vdots & \vdots\\ & c_n & v_n\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}N & c_1 & (E_{x1},E_{n1},H_{e1})\\ & c_2 & (E_{x1},E_{n1},H_{e1})\\ & \vdots & \vdots\\ & c_n & (E_{xn},E_{nn},H_{en})\end{pmatrix} \tag{10}$$

由于岩爆应急管理能力评估是定性概念转为定量分析的过程,因此,采用正向云发生器实现定性与定量关系转换。正向云发生器实现过程如图 3 所示。通过计算单指标云联系度,建立云关联度矩阵。

2.3.2 计算综合云关联度

考虑到深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估为多属性综合决策过程,为全面、客观反映矿山岩爆应急管理能力,需要在单指标云联系度基础上计算不同等级综合云关联度,具体计算公式为:

$$U=\sum_{i=1}^{n}u_i w_i \tag{11}$$

式中,U 为综合确定度;w_i 为指标组合权重。

2.3.3 综合确定等级

基于最大隶属度判定准则,综合云关联度最大值所对应的等级为巷道岩爆应急管理能力等级。

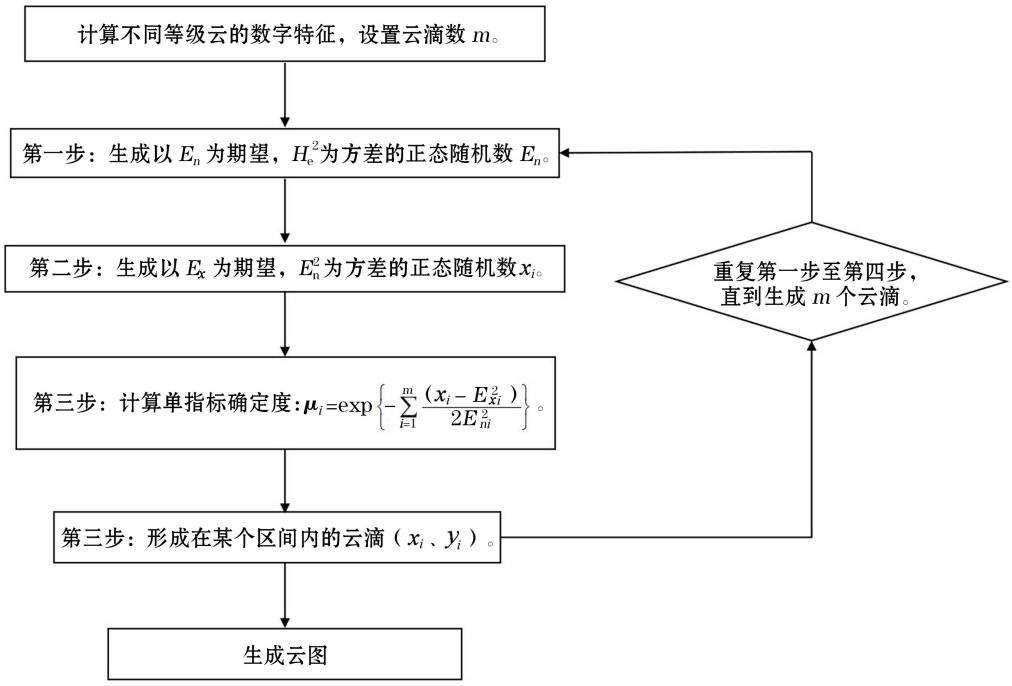

图 3　正向云发生器流程

Fig.3　Forward cloud generator process

3　工程应用

为验证本文所建立的改进可拓云综合评价模型在深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估方面的适应性和有效性，以云南省某铜矿（K_1）、山东省某金矿（K_2）、甘肃省某铜镍矿（K_3）为例，进行相关计算，综合分析评估各矿山应急管理能力水平。

为做好 3 座深部矿山巷道岩爆应急管理能力综合评估，保证整个评估过程的权威性和客观性，组建了专家组。由于专家之间存在认知和经验差异，考虑岩爆应急管理能力评估的模糊性和复杂性，引入了“专家可信度”概念[18]，进一步提升指标赋值的科学性。专家可信度具体判定准则见表 2。5 位专家基本情况与综合可信度见表 3。

表 2　专家可信度确定依据

Table 2　The basis of expert credibility determination

职称	可信度	从业年限/a	可信度	学位	可信度
高级工程师	[8,10]	＞15	[8,10]	博士	[8,10]
中级工程师	[4,7]	5～15	[4,7]	硕士	[6,7]
初级工程师	[1,3]	＜5	[1,3]	学士	[3,5]

表 3　专家基本情况及可信度

Table 3　Basic information and credibility of experts

序号	职称	从业年限/a	学位	综合可信度
Z_1	教授	18	博士	0.219
Z_2	教授	11	博士	0.189
Z_3	高级工程师	21	硕士	0.199
Z_4	高级工程师	16	博士	0.209
Z_5	高级工程师	13	硕士	0.184

3.1　数据处理

本文基于盲数理论改进传统指标赋值方式，由专家根据现场调研情况和应急管理工作实际，按照指标分级标准，对各指标进行跨区间、跨等级打分。以 K_1 矿山为例，5 位专家指标赋值情况见表 4。

由表 4 可知，5 位专家分别给出了各指标赋值区间，对各赋值区间重新排序，建立标准盲数矩阵。以指标 X_{11} 为例，专家组打分区间分别为 82～91，86～94，91～95，90～97，88～93，重新排列后无交叉得分区间为 82～86，86～88，88～90，90～91，91～93，93～94，94～95，95～97。重新计算各赋值区间可信度为：$\theta_1=0.0973$，同理，可得其他赋值区间可信度。具体计算结果为：$\theta_2=0.0959$、$\theta_3=0.1695$、$\theta_4=0.1146$、$\theta_5=0.2801$、$\theta_6=0.0734$、$\theta_7=0.0498$、$\theta_8=0.0299$。由此，得到指标 X_{11} 无交叉得分区间的初始盲数函数值依次为：0.0973，0.0959，0.1695，0.1146，0.2801，0.0734，0.0498，0.0299。

表 4 专家打分情况

Table 4 Scoring situation of experts

评价指标	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
X_{11}	82～91	86～94	91～95	90～97	88～93
X_{12}	75～82	82～87	83～88	79～86	84～91
X_{13}	76～82	82～87	79～85	77～85	77～83
X_{14}	72～77	73～78	72～75	72～80	78～83
X_{15}	81～86	85～92	88～91	85～88	83～90
X_{21}	75～80	75～85	80～84	77～85	79～88
X_{22}	80～85	80～83	85～90	80～83	85～91
X_{23}	81～85	78～85	80～89	77～86	85～91
X_{24}	82～94	85～92	90～93	88～95	90～95
X_{25}	85～95	88～94	92～95	88～95	91～96
X_{31}	85～90	88～93	87～89	81～88	79～89
X_{32}	81～85	85～93	85～96	79～86	87～95
X_{33}	88～91	85～88	88～94	80～87	85～93
X_{34}	80～84	88～93	77～86	75～88	75～85
X_{35}	75～85	78～84	76～85	78～83	78～85
X_{41}	83～87	85～93	85～95	82～88	88～93
X_{42}	85～91	85～93	88～95	85～88	87～95
X_{43}	83～87	80～85	85～90	82～88	88～95

结合岩爆应急管理能力评估指标分级标准,整理得到[0,60),[60,70),[70,80),[80,90),[90,100)的标准化盲数函数值依次为:0,0,0,0.363,0.637。

同理,计算其他指标盲数函数。根据盲数函数,构建盲数矩阵,具体计算结果见表 5。

表 5 K_1 矿山盲数矩阵计算结果

Table 5 The calculation results of blind number matrix for K_1 mine

评价指标	[0,60)	[60,70)	[70,80)	[80,90)	[90,100)
X_{11}	0	0	0	0.363	0.637
X_{12}	0	0	0.186	0.788	0.026
X_{13}	0	0	0.349	0.651	0
X_{14}	0	0	0.889	0.111	0
X_{15}	0	0	0	0.879	0.121
X_{21}	0	0	0.412	0.588	0
X_{22}	0	0	0	0.969	0.031
X_{23}	0	0	0.124	0.845	0.031
X_{24}	0	0	0	0.281	0.719
X_{25}	0	0	0	0.232	0.768
X_{31}	0	0	0.018	0.869	0.113
X_{32}	0	0	0.033	0.689	0.278
X_{33}	0	0	0	0.725	0.275
X_{34}	0	0	0.239	0.648	0.113
X_{35}	0	0	0.397	0.603	0
X_{41}	0	0	0	0.779	0.221
X_{42}	0	0	0	0.635	0.365
X_{43}	0	0	0	0.869	0.131

盲数矩阵反映了指标赋值落在某等级区间的概率,因此,可以基于插值法理论为指标进行赋值。根据指标分级标准,本文以分级标准上、下限均值记为区间插值点,各等级区间插值点分别按照 30,65,75,85,95 代入公式计算。以 K_1 矿山的指标 X_{11} 为例,根据盲数矩阵计算结果可知,指标 X_{11} 落在 5 个等级标准区间的概率分别为 0,0,0,0.363,0.637,则指标 X_{11} 最终的得分计算结果为:$b_{11}=91.37$。3 座矿山巷道岩爆应急管理能力评估指标赋值计算见表 6。

表 6 矿山各指标赋值情况

Table 6 The assignment of each index of the mines

矿山	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{21}	X_{22}	X_{23}	X_{24}
K_1	91.37	83.41	81.51	76.11	86.21	80.88	85.31	84.07	92.19
K_2	85.78	81.18	75.87	88.39	81.98	74.34	71.37	86.43	83.19
K_3	92.86	87.37	91.32	83.48	85.73	89.33	85.88	89.87	86.77
矿山	X_{25}	X_{31}	X_{32}	X_{33}	X_{34}	X_{35}	X_{41}	X_{42}	X_{43}
K_1	92.68	85.95	87.45	87.75	83.74	81.03	87.21	88.65	86.31
K_2	78.39	84.91	83.12	81.37	82.38	74.32	84.88	85.35	83.12
K_3	85.38	88.23	89.76	75.49	79.63	84.29	88.27	90.31	85.36

3.2 计算指标权重

(1) G1 法计算指标主观权重。如图 1 所示,本文构建了多层次的深部矿山巷道岩爆应急管理能力综合评价指标体系。以应急预防 X_1、应急准备 X_2、应急响应 X_3、应急恢复 X_4 这 4 个准则层指标为例,经专家研究讨论,确定指标相对重要性程度排序为:$X_3>X_1>X_2>X_4$,给定相对重要性比值 r_j 分别为:$r_1=1.4$,$r_2=1.3$,$r_3=1.8$。根据式(2)至式(4),得到对应的准则层指标主观权重分别为 $w_1=0.389$,$w_2=0.278$,$w_3=0.214$,$w_4=0.119$。整理后 X_1 至 X_4 指标主观权重为(0.278,0.214,0.389,0.119)。同理,计算准则层下二级指标主观权重,具体计算结果为:"应急预防 X_1"下 5 个二级指标 X_{11} 至 X_{15} 主观权重为(0.238,0.286,0.154,0.139,0.183);"应急准备 X_2"下 5 个二级指标 X_{21} 至 X_{25} 主观权重为(0.229,0.298,0.192,0.147,0.134);"应急响应 X_3"下 5 个二级指标 X_{31} 至 X_{35} 主观权重为(0.306,0.236,0.151,0.126,0.181);"应急恢复

X_4”下 3 个二级指标 X_{41} 至 X_{43} 主观权重为(0.412，0.343，0.245)。目标层指标 X_{11} 至 X_{43} 综合权重 W_1 为(0.066，0.081，0.043，0.039，0.051，0.049，0.064，0.041，0.031，0.029，0.119，0.092，0.059，0.049，0.071，0.049，0.041，0.027)。

(2) A-EWM 法计算指标客观权重。根据 A-EWM 法指标赋权原理,结合表 6 中各指标赋值情况,按照式(5)至式(7),得到指标 X_{11} 至 X_{43} 反熵值 E_j 为(0.714，1.061，1.049，0.789，0.699，0.940，0.694，0.981，0.994，0.878，1.156，0.761，0.888，0.753，0.751，0.745，0.755，0.740),指标 X_{11} 至 X_{43} 客观权重 W_2 为(0.047，0.069，0.068，0.051，0.046，0.061，0.045，0.064，0.065，0.057，0.075，0.050，0.058，0.049，0.049，0.049，0.049，0.048)。根据反熵权法计算结果,可得准则层指标应急预防 X_1、应急准备 X_2、应急响应 X_3、应急恢复 X_4 客观权重为(0.281，0.292，0.281，0.146),“应急预防 X_1”下 5 个二级指标的客观权重为(0.166，0.246，0.243，0.183，0.162);“应急准备 X_2”下 5 个二级指标权重为(0.209，0.155，0.218，0.222，0.196);“应急响应 X_3”下 5 个二级指标客观权重为(0.268，0.177，0.206，0.175，0.174),“应急恢复 X_4”下 3 个二级指标客观权重为(0.333，0.336，0.331)。

根据式(8),基于拉格朗日算法,确定准则层、目标层指标综合权重。其中,指标 X_1 至 X_4 综合权重为(0.282，0.252，0.333，0.133),目标层指标 X_{11} 至 X_{43} 综合权重为(0.057，0.076，0.055，0.045，0.049，0.056，0.055，0.052，0.046，0.041，0.097，0.069，0.059，0.050，0.060，0.050，0.046，0.038)。权重结果对比见图 4。

根据权重计算结果,准则层指标相对重要性排序由大到小依次为:应急响应 X_3、应急预防 X_1、应急准备 X_2、应急恢复 X_4。即应急响应权重最高,是最能体现应急管理水平的指标因素。因此,要提升岩爆应急管理能力水平,重点需要关注持续完善接警响应机制,不断提升岩爆应急技术支持,强化应急部门协调性等。

根据图 4 可以看出,在应急预防方面,应重点加强岩爆实时动态监测预警系统建设,通过监测地应力、围岩脆性变形等,提高岩爆诱发辨识能力;在应急准备方面,应重点加强应急队伍建设,打造素质过硬、能力较强的救援队伍,培养应急管理专家,着力提升应急处置能力、组织协调能力,加大应急队伍培训力度,广泛深入开展应急演练;在应急响应方面,应重点加强接警响应和应急处置;在应急恢复方面,应重点关注切实可行的恢复计划,减少经济损失和人员伤亡。

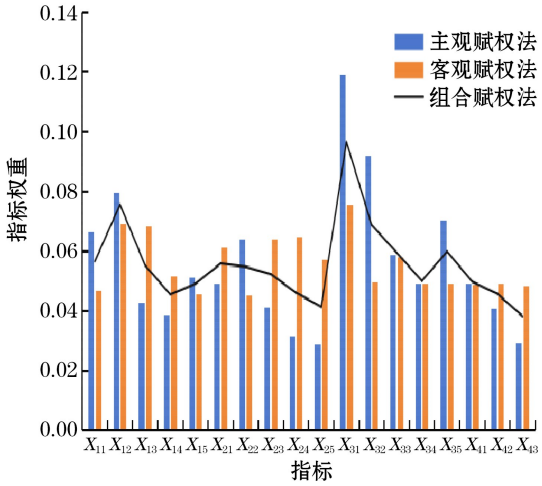

图 4　指标权重计算结果对比

Fig.4　Comparison of calculation results of index weight

3.3　评价指标标准云模型的确定

根据指标分级标准,按照式(9),计算云的数字特征,在 MATLAB 环境中,生成单指标云图(见图 5)。其中,不同等级云的数字特征计算结果见表 7。

表 7　不同等级云的数字特征

Table 7　Digital characteristics of clouds at different levels

评估等级	等级描述	数字特征
Ⅰ级	极好	(95,1.667,0.01)
Ⅱ级	较好	(85,1.667,0.01)
Ⅲ级	一般	(75,1.667,0.01)
Ⅳ级	较差	(65,1.667,0.01)
Ⅴ级	极差	(30,10,0.01)

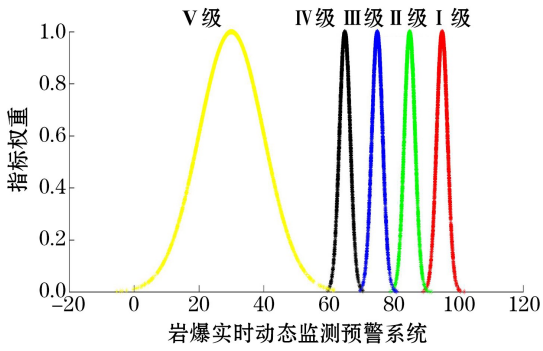

图 5　单指标云图

Fig.5　Single indicator cloud chart

3.4　计算云关联度

根据可拓云模型计算原理,结合单指标云图,利用 MATLAB 软件,计算不同指标各等级下的单指

标云关联度,以 K_1 矿山为例,单指标云关联度矩阵 $\boldsymbol{\mu}(K_1)$ 计算结果见表 8。

表 8 K_1 矿山单指标云关联度计算结果

Table 8 Calculation results of single index cloud connection degree for K_1 mine

评价指标	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
X_{11}	6.633E-09	0	1.148E-21	0.001	0.094
X_{12}	6.427E-07	0	3.061E-06	0.631	3.056E-11
X_{13}	1.733E-06	0	0.001	0.112	6.027E-15
X_{14}	2.417E-05	0	0.805	6.678E-07	1.309E-28
X_{15}	1.378E-07	0	1.514E-10	0.768	9.174E-07
X_{21}	2.393E-06	0	0.002	0.047	2.63E-16
X_{22}	2.275E-07	0	4.941E-09	0.983	4.608E-08
X_{23}	4.485E-07	0	3.725E-07	0.856	4.626E-10
X_{24}	3.997E-09	0	8.117E-24	9.182E-05	0.244
X_{25}	2.948E-09	0	3.755E-25	2.464E-05	0.379
X_{31}	1.594E-07	0	4.278E-10	0.851	3.987E-07
X_{32}	6.808E-08	0	7.725E-13	0.341	3.515E-05
X_{33}	5.728E-08	0	1.989E-13	0.257	7.812E-05
X_{34}	5.358E-07	0	1.074E-06	0.753	1.238E-10
X_{35}	2.219E-06	0	0.001	0.058	5.625E-16
X_{41}	7.818E-08	0	2.241E-12	0.415	1.815E-05
X_{42}	3.395E-08	0	2.758E-15	0.091	0.001
X_{43}	1.305E-07	0	1.011E-10	0.734	1.258E-06

根据式(11)计算云综合确定度,见表 9。根据最大隶属度判别准则,将各矿山综合云关联度最大值所对应的等级确定为最终的巷道岩爆应急管理能力等级。为进一步验证本文所建立的综合评价模型在巷道岩爆应急管理能力评估方面的准确性,将本文所选用模型与模糊数学和随机 Petri 网(SPN)评价模型的评估结果进行对比,见表 10。

表 9 综合确定度计算结果

Table 9 Calculation results of comprehensive certainty

矿山	不同等级综合确定度				
	Ⅰ级	Ⅱ级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
K_1	1.612E-06	0	0.037	0.407	0.032
K_2	1.916E-05	0	0.165	0.401	1.762E-05
K_3	2.241E-06	0	0.058	0.335	0.032

表 10 评估结果对比

Table 10 Comparison of evaluation results

矿山	本文模型	模糊数学[19]	SPN[20]	实际调查
K_1	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级
K_2	Ⅳ级	Ⅲ级至Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅳ级
K_3	Ⅳ级	Ⅳ级	Ⅴ级	Ⅳ级

由表 10 可知,基于改进可拓云综合评价模型的 3 座矿山巷道岩爆应急管理能力等级均为Ⅳ级,与专家现场调查结论相同,且 3 种评估模型评价结果基本一致,表明了本评估模型在深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估方面具有适应性,能够获得较为合理满意的评估结果,可以为应急管理能力评估提供一条准确、可靠的量化思路。

对比发现,模糊数学模型在 K_2 矿山应急管理能力评估方面难以准确量化和确定等级,K_2 矿山在岩爆预防措施、应急队伍建设、应急培训演练、应急装备及物资保障、技术支持体系建设方面表现相对较差,结合指标分级标准,应急管理能力等级为Ⅲ级,相应的指标权重累积之和仅为 0.267,其他指标均为Ⅳ级水平,因此,K_2 矿山应急管理能力水平确定为Ⅳ级比较合理。本文基于盲数理论进行指标数据处理,改进了模糊数学中专家直接打分的传统指标赋权方式,充分考虑了应急管理能力评估的模糊性、未确知性特点,减少了评估过程中的主观性,避免了模糊数学在实际操作中的超模糊弊端,因此,评估结果更符合实际。SPN 模型将 K_3 矿山应急管理能力等级确定为Ⅴ级,该矿山在岩爆诱发因素辨识、岩爆预防措施、岩爆事故调查评估等几个方面处于极好水平,相应的指标权重和为 0.112,其他指标均处于Ⅳ级水平,因此,综合来看,K_3 矿山的应急管理能力等级确定为Ⅳ级更为合理。这主要得益于可拓云模型在定性概念分析中能够有效反映应急管理的不确定性特点,而 SPN 模型结构庞大,在灰度、盲度信息传递过程中不明确,导致评估结果容易出现偏差。因此,基于盲数理论和组合赋权-可拓云模型在深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估方面更为严谨科学。

4 结论

(1) 为获得合理的指标权重,在构建多层次的深部矿山巷道岩爆应急管理能力综合评价指标体系基础上,借助 G1 法和 A-EWM 法-CM 法,确定指标综合权重,既兼顾了专家主观经验,又考虑了指标之间的交互影响,可以提高评估结果的可靠性。权重结果显示,岩爆实时动态监测预警系统、应急管理队伍建设及培训、接警响应等指标为提升应急管理能力的关键因素。

(2) 考虑到深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估影响因素多、评价指标体系以定性指标为主和评估本身复杂性、模糊性、未确知性特点的客观实际,

引入了盲数理论,改进了传统定性指标赋值方式,建立了盲数理论和组合赋权-可拓云的岩爆应急管理能力综合评价模型。以 3 座矿山为例,通过计算综合云关联度,综合评估应急管理能力等级。结果表明,本文模型评估结果科学、准确,与实际相符,验证了本文评估模型在深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估方面具有适用性,逻辑性、理论性更强,可以为类似评估工作提供新思路。

(3) 由于深部矿山巷道岩爆具有突发性、破坏性,当前应急管理工作基础薄弱,应急管理能力有待加强,相应的能力评估理论还不完善,评估指标体系还不统一,在后续研究中,还要进一步完善深部矿山岩爆应急管理能力综合评价指标体系,细化指标分级标准,提高模型可操作性。

参考文献(References):

[1] CHEN Long, WU Shunchuan, JIN Aibing, et al. Rockburst prediction and evaluation model for hard rock engineering based on extreme gradient boosting ensemble learning and SHAP value[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2023,41(7):3923-3940.

[2] LIU Ying, FAN Zhongqi, QI Hongliang. Dynamic statistical evaluation of safety emergency management in coal enterprises based on neural network algorithms[J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems,2020,39(4):1-14.

[3] 田水承,高玲,范彬彬,等.基于 WSR 方法论的煤矿突发事件应急管理能力评价[J].西安科技大学学报,2022,42(4):647-654.
TIAN Shuicheng, GAO Ling, FAN Binbin, et al. Capability evaluation of coal mine emergency management based on WSR methodology[J].Journal of Xi'an University of Science and Technology,2022,42(4):647-654.

[4] 陆军平,李一丁,武军虎,等.矿井火灾应急能力评价模型研究[J].消防科学与技术,2018,37(12):1742-1746.
LU Junping, LI Yiding, WU Junhu, et al. Study on mine fire emergency response assessment model[J]. Fire Science and Technology,2018,37(12):1742-1746.

[5] 周瑞雪.基于 CMM 的煤矿应急能力评价体系构建及应用研究[D].西安:西安科技大学,2021.
ZHOU Ruixue. Research onconstruction and application of coal mine subject emergency ability evaluation system based on CMM [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology,2021.

[6] 耿兴银,程根银.基于 SEM 的煤矿企业应急管理能力因素研究[J].煤炭工程,2021,53(1):184-188.
GENG Xingyin, CHENG Genyin. Factors of emergency management capability of coal mine enterprises based on SEM[J].Coal Engineering,2021,53(1):184-188.

[7] 杨三军,荆亚茹,姜润发.矿山救援队应急救援能力评价指标体系构建[J].中国安全科学学报,2021,31(8):180-188.
YANG Sanjun, JING Yaru, JIANG Runfa. Construction of evaluation index system for emergency rescue capabilities of mine rescue teams[J].China Safety Science Journal,2021,31(8):180-188

[8] CHENG Linpan, ZHEN Hongyang, XIAO Fanghe. Evaluation of non-coal mines safety emergency capacity based on unascertained measurement model[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,32(7):556-562.

[9] 王会权,刘璐,谢东方.PPRR 理论视角下自然灾害应急处置研究:以新乡市洪涝灾害处置为例[J].人民长江,2018,49(增刊 2):27-31+34.
WANG Huiquan, LIU Lu, XIE Dongfang. Research on natural disaster emergency response from the perspective of PPRR theory-taking the disposal of flood disasters in Xinxiang city as an example[J]. Yangtze River, 2018, 49(S2):27-31+34.

[10] WILLSON K A, FITZGERALD G J, LIM D. Disaster management in rural and remote primary health care: a scoping review[J]. Prehospital and Disaster Medicine,2021,36(3):1-8.

[11] 祁云,汪伟,陈淼,等.深部矿山巷道岩爆应急管理能力评估[J].安全与环境学报,2023,23(5):1407-1414.
QI Yun, WANG Wei, CHEN Miao, et al. Evaluation on emergency management ability of rock burst in deep mine roadway[J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(5):1407-1414.

[12] 中华人民共和国应急管理部. 生产安全事故应急预案管理办法[M].北京:应急管理出版社,2016.
Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. Management measures for emergency plans for production safety accidents [M]. Beijing: Emergency Management Press,2016.

[13] KOU Xiangyu, XIE Xuebin, ZOU Yi, et al. Research on Comprehensive Evaluation Model of a Truck Dispatching System in Open-Pit Mine[J]. Sustainability,2022,14(15):9062-9073.

[14] 赵彬.边坡稳定性评价的组合赋权博弈论云化物元模型[J].矿业研究与开发,2022,42(6):60-67.
ZHAO Bin. The combination weighting model of game theory and cloud matter-element for slope stability evaluation[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(6):60-67.

[15] 张官进,权玲,李新伟,等.基于组合赋权和云化物元模型的公路穿越采空区场地稳定性评价[J].采矿与岩层控制工程学报,2022,4(2):63-70.
ZHANG Guanjin, QUAN Ling, LI Xinwei, et al. Evaluation of site stability of highway passing through goaf based on combined weighting and the cloud matter-element model[J].Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022,4(2):63-70.

[16] 蒋英礼,崔杰,张兰峰,等.基于权重融合-改进可拓云模型的岩体质量评价方法与应用[J].矿业研究与开发,2023,43(8):84-90.
JIANG Yingli, CUI Jie, ZHANG Lanfeng, et al. Evaluation method and application of rock mass quality based on weight fusion-improved extension cloud model[J].Mining Research and Development,2023,43(8):84-90.

[17] 熊淦麟,王其虎,柯丽华,等.基于客观权重量化的可拓云尾矿库溃坝动态风险评价[J].矿业研究与开发,2023,43(4):139-146.
XIONG Ganlin, WANG Qihu, KE Lihua, et al. Dynamic risk assessment of dam failure of extension cloud tailings reservoir based on objective weight quantification[J].Mining Research and Development,2023,43(4):139-146.

[18] 辛酉阳,杨德磊,方前程.改进 GRA-TOPSIS 模型在装配式建筑施工风险评估中的应用[J].安全与环境学报,2023,23(7):2212-2222.
XIN Youyang, YANG Delei, FANG Qiancheng. Application of improved GRA TOPSIS model in risk assessment of prefabricated building construction[J].Journal of Safety and Environment,2023,23(7):2212-2222.

[19] HU Nan, LI Changhong, LIU Yang, et al. Fuzzy Mathematics Comprehensive Forecasting Analysis of Metal Mine Rockburst Based on Multiple Criteriahere[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632(2):22080-22091.

[20] 张蕾,吕伟,雷鹏.基于 SPN-MC 模型的城市地铁洪涝灾害应急响应流程效能分析[J].中国安全生产科学技术,2023,19(6):20-25.
ZHANG Lei, LYU Wei, LEI Peng. Efficiency analysis on emergency response process of urban subway under flood disaster based on SPN-MC model[J]. Journal of Safety Science and Technology,2023,19(6):20-25.

Evaluation Model of Rockburst Emergency Management Capability Based on PPRR Theory

XIANG Yun

(Changsha Institute of Mining Research, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: In view of the complexity, fuzziness and uncertainty of the evaluation of rockburst emergency management ability in deep mines, a comprehensive evaluation model based on improved extension cloud was established to further improve the reliability of the evaluation. Firstly, according to the PPRR (Prevention, Preparation, Response, Recovery) crisis management theory, combined with the characteristics of rockburst accidents, a multi-level evaluation index system for rockburst emergency management capability was constructed. Secondly, the order relation analysis method (G1 method) -anti entropy weight method (A-EWM method) and combination weighting method (CW method) were used to determine the comprehensive weight of the index. The blind number theory was introduced, and the blind number matrix was established to process the qualitative index data, which improved the weighting mode of the traditional extension cloud model that experts intuitive scoring. Based on the principle of extension cloud model, the comprehensive cloud correlation degree under different levels was calculated, and the emergency management ability level was comprehensively analyzed and evaluated according to the requirement of maximum membership degree discrimination. Finally, the established evaluation model was used to analyze the rockburst emergency management capacity of three mines, and the results were compared with those of fuzzy mathematics and stochastic Petri net (SPN) evaluation models. The results show that the emergency capacity of the three mines is grade IV, which is consistent with the field investigation conclusions of experts, and the evaluation results of the three evaluation models are basically the same, which verifies the adaptability and effectiveness of the model in the evaluation of rockburst emergency management capacity. The evaluation model can provide a practical, reasonable and effective method for the quantitative evaluation of crisis management capability.

Key words: Roadway rockburst, Emergency management capability, Extension cloud, Blind number theory