

杨悦, 杨丹, 陈孝国, 等. 基于梯形 Vague 集熵权法的煤矿应急救援能力评价研究[J]. 灾害学, 2018, 33(3): 156–160.  
[YANG Yue, YANG Dan, CHEN Xiaoguo, et al. Research on Coal Mine Emergency Rescue Capability Evaluation Based on Trapezoidal Vague Sets Entropy Method[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(3): 156–160. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.03.030.]

# 基于梯形 Vague 集熵权法的煤矿应急救援能力评价研究\*

杨悦<sup>1,2</sup>, 杨丹<sup>3</sup>, 陈孝国<sup>2,3</sup>, 王存权<sup>2</sup>, 张红芬<sup>4</sup>

(1. 黑龙江科技大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083;  
3. 黑龙江科技大学 理学院, 黑龙江 哈尔滨 150022; 4. 华北科技学院 建筑工程学院, 河北 廊坊 065201)

**摘 要:** 为进一步完善煤矿应急救援能力评价方法并提高其可靠性, 提出基于梯形 Vague 集熵权法的煤矿应急救援能力的效用值评价模型。针对不同指标的梯形 Vague 值评价信息, 首先利用熵权公式求出专家及各指标权重, 其次采用梯形 Vague 集成算子进行有效融合, 然后根据效用值越大越优的原则进行排序。最后将上述评价模型在同煤集团中进行应用。该项研究不仅丰富了煤矿应急救援能力评价基本方法, 而且也与其他相关领域的救援能力评价提供参考。

**关键词:** 煤矿应急救援; 梯形 Vague 数; 能力评价; 熵权法; 效用值函数

**中图分类号:** X43; U458; CP34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2018)03–0156–05

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2018.03.030

随着煤矿向纵深开采的逐步发展, 使得开采条件更加恶劣, 虽然我国对煤矿的安全重视程度在不断提高, 但与发达国家相比, 因救援不当, 救援不及时而导致的煤矿事故仍然居高不下<sup>[1]</sup>。为降低煤矿事故的伤亡率, 国家安监部门要求各煤矿必须做好安全措施, 从源头避免事故的发生, 做到预防为主, 对应急识别、应急措施、应急预案等要求更为严格。事故一旦发生, 应急救援能力在一定程度上会决定伤亡人数和经济损失的大小, 为此, 一些学者对煤矿应急救援能力的评价方法进行了广泛研究, 并取得若干有效成果。岳宁芳<sup>[2]</sup>在分析我国煤矿近几年安全现状的基础上, 指出了重大灾害事故的主要特点, 并阐述了煤矿重大灾害事故应急救援能力内涵。韩晋平<sup>[3]</sup>等将模糊评价方法用于煤矿应急救援综合能力评价中。汪滨琳<sup>[4]</sup>等人从事前监测准备能力、事中应急响应能力和事后恢复总结能力三方面设置了煤矿应急能力评估指标体系。朗坤<sup>[5]</sup>等采用可变集理论对灾害应急物资合理分配进行了决策研究, 属性权重根据模糊标度法计算。杨力等<sup>[6]</sup>构建了基于网络模糊层次分析法的煤矿应急救援能力评价模型, 借助超级决策软件和专家打分制实现各评价指标的赋权, 并据此对不同煤矿应急救援能力进行评价。陈孝国<sup>[7–9]</sup>等建立了基于直觉模糊集的煤矿应急救援能力评价模型, 重点探讨了指标参数

的变换、信息表述及合成运算等。杨力<sup>[10]</sup>在指出主观赋权法的弊端后, 提出熵权法确定不同指标的新量化方法, 并建立熵权修正的煤矿应急救援能力模型。

上述研究成果为煤矿应急救援能力的评价奠定了坚实的基础, 但在指标体系的确定上依然不够完善, 多数属于单决策, 可靠性不高。同时对于指标属性值的确定, 受客观环境因素的影响, 信息量不够。基于此, 本文建立梯形 Vague 数效用值煤矿应急救援能力群决策模型, 首先将各个指标属性值用梯形 Vague 数进行表示, 然后根据熵权理论对专家及指标权重进行求解, 并借助群集结运算, 提高结果可靠度, 最后将模型理论应用于同煤集团相关矿井。

## 1 煤矿应急救援能力评价影响因素分析

煤矿应急救援能力评价过程中, 指标体系的构建至关重要, 只有构建科学合理的指标体系, 才能保证后续工作的有效性及评价结果的可靠性。本文在构建煤矿应急救援能力评价指标体系时, 查阅大量研究成果并根据专家意见, 对比分析后,

\* 收稿日期: 2017–10–29 修回日期: 2018–03–19

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(QC2015055); 黑龙江省省属高校基本科研业务费专项基金项目(2017); 河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2017314); 中央高校基本科研业务费资助项目(3142017070)

第一作者简介: 杨悦(1979–), 女, 河南省虞城人, 讲师, 博士, 研究方向为矿山复杂决策理论。E-mail: kjdxexg@sohu.com

将从矿井安全生产系统、预警与危险监测能力、应急准备能力、应急处置与减控能力、事后恢复能力五个方面进行选取。

### 1.1 矿井安全生产系统

不同的煤矿所处的自然环境不同,对所选矿井进行应急救援能力评价时,需要掌握该矿井的总体情况,进而分析影响整个安全生产系统的各个因子。了解煤矿所处环境的气象情况及地理位置特点是展开应急救援工作的基础,关系着救援行动中所采取的措施和方法的有效性及其适用性,以求做到因地制宜;煤矿企业若具有一定预警能力可以降低灾害发生的概率,减少损失;煤矿灾害中瓦斯及煤尘爆炸多是由于通风能力不足引起的,因此良好的通风能力有助于提高整个生产系统的安全性;对于一些采用炮采形式的矿井,需对其危险性物品的管理及使用进行严格的监控,以提高系统的安全性;井下巷道合理开采、废弃巷道及时封闭都会对矿井生产系统的安全性产生直接影响。矿井安全生产系统主要从气象与地理位置、预防灾害的能力、通风能力、所涉及的危险物质和生产性质、巷道系统等5个方面来分析。

### 1.2 预警与危险监测能力

煤矿一旦发生事故,会对企业运营、国家财产乃至人民生命安全造成不可挽回的损失,因此煤矿应该具备预警与危险监测能力,做到防患于未然。监测设备是否先进,安全检查是否严格,对危险源的控制和辨识是否有效和准确,安全信息的报告与处理是否及时等都会影响煤矿预警与危险监测的能力。预警与危险监测能力主要从辨识与控制危险源、监测设备、监测煤矿重大危险源、安全检查、事故隐患与预警能力、信息报告与处置等6个方面来分析。

### 1.3 应急准备能力

具备预警与危险监测能力能够降低事故发生的可能性,却不能完全避免事故的发生。因此煤矿企业还应做好事故发生前的准备工作。相关规章制度是否完善,是否制定了合理的应急预案,是否经常组织工作人员进行应急培训与演练,应急场所及设施是否健全,救援队伍、物资是否充足等都会影响企业应急准备能力。应急准备能力主要从相关规章制度、应急场所及设施、应急预案的制定、救援队伍、应急培训与演练、有关宣传与教育、应急指挥、应急救援物资、应急避难场所等9个方面来分析。

### 1.4 应急处置与减控能力

煤矿事故发生后,为了及时且有效的防止势态的扩大,煤矿需要具有较强的应急处置与减控能力。在救援过程中,首先要尽快识别出所发生事故的类型及情况,从而选择并实施合适的应急预案,做到对症下药。在救助时,救援人员具有较快响应速度及高效医救能力都会更大限度的降低伤亡数量。同时为保证救援的顺利进行,应与外界及时沟通,得到专家的技术指导,以求应对

突发状况,最大限度的控制事故的蔓延,并降低生命财产的损失。应急处置与减控能力主要从灾情的识别与分析,应急响应能力,应急预案的实施,医疗救护能力,救援人员的响应,实际减灾能力,专家技术支持,事故控制的能力等8个方面来分析。

### 1.5 事后恢复能力

在完成救援工作后,相关部门应尽快采取行动使煤矿恢复正常的生产运行,对事故进行善后处理,如对事故中受害的工作人员进行安抚、慰问并进行合理的赔偿;对整个救援过程进行总结,分析救援中的不足,并对其进行改善,从而更新已有的应急预案等,进一步提高煤矿的应急救援能力。煤矿事后恢复能力主要从善后处理、恢复生产、分析与总结和应急预案的修订等4个方面来分析。

## 2 梯形 Vague 数相关理论

定义 1<sup>[11]</sup> 设论域为  $U$ ,  $A$  为论域  $U$  上的 Vague 集合,  $\tilde{\alpha}$  是  $A$  中的一个 Vague 数,其隶属度函数为:

$$t_{\tilde{\alpha}}(u) = \begin{cases} \frac{u-a}{b-a}t_{\tilde{\alpha}}, & a \leq u \leq b; \\ t_{\tilde{\alpha}}, & b \leq u \leq c; \\ \frac{d-u}{d-c}t_{\tilde{\alpha}}, & c \leq u \leq d; \\ 0, & \text{其它。} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_{\tilde{\alpha}}(u) = \begin{cases} \frac{b-u+(u-a_1)f_{\tilde{\alpha}}}{b-a_1}, & a_1 \leq u \leq b; \\ f_{\tilde{\alpha}}, & b \leq u \leq c; \\ \frac{u-c+(d_1-u)f_{\tilde{\alpha}}}{d_1-c}, & c \leq u \leq d_1; \\ 0, & \text{其它。} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $0 \leq t_{\tilde{\alpha}} \leq 1$ ,  $0 \leq f_{\tilde{\alpha}} \leq 1$ ,  $t_{\tilde{\alpha}} + f_{\tilde{\alpha}} \leq 1$ , 且  $a_1 \leq a \leq b \leq c \leq d \leq d_1$ , 则称

$$\tilde{\alpha} = \langle ([a, b, c, d]; t_{\tilde{\alpha}}), ([a_1, b, c, d_1]; 1-f_{\tilde{\alpha}}) \rangle \quad (3)$$

为梯形 Vague 数。

为研究方便,本文中梯形 Vague 数取  $[a, b, c, d] = [a_1, b, c, d_1]$ , 即  $\tilde{\alpha} = ([a, b, c, d]; t_{\tilde{\alpha}}, 1-f_{\tilde{\alpha}})$ 。

定义 2<sup>[12]</sup> 设  $\tilde{\alpha}_1 = ([a_1, b_1, c_1, d_1]; t_1, 1-f_1)$ ,  $\tilde{\alpha}_2 = ([a_2, b_2, c_2, d_2]; t_2, 1-f_2)$  为两个梯形 Vague 数, 则

$$(1) \tilde{\alpha}_1 + \tilde{\alpha}_2 = ([a_1 + a_2, b_1 + b_2, c_1 + c_2, d_1 + d_2]; t_1 + t_2 - t_1 t_2, 1 - f_1 f_2)。 \quad (4)$$

$$(2) \lambda \tilde{\alpha}_1 = ([\lambda a_1, \lambda b_1, \lambda c_1, \lambda d_1]; 1 - (1 - t_1)^\lambda, (1 - f_1)^\lambda), \lambda \geq 0。 \quad (5)$$

$$(3) \tilde{\alpha}_1 \tilde{\alpha}_2 = ([a_1 a_2, b_1 b_2, c_1 c_2, d_1 d_2]; t_1 t_2, 1 - f_1 - f_2 + f_1 f_2)。 \quad (6)$$

$$(4) (\tilde{\alpha}_1)^\lambda = ([a_1^\lambda, b_1^\lambda, c_1^\lambda, d_1^\lambda]; t_1^\lambda, (1 - f_1)^\lambda), \lambda$$

$\geq 0$ 。(7)

定义 3<sup>[13]</sup> 梯形 Vague 数  $\tilde{\alpha}_1$  和  $\tilde{\alpha}_2$  距离为

$$d(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2) = \frac{1}{8}(|(t_1 + 1 - f_1)a_1 - (t_2 + 1 - f_2)a_2| + |(t_1 + 1 - f_1)b_1 - (t_2 + 1 - f_2)b_2| + |(t_1 + 1 - f_1)c_1 - (t_2 + 1 - f_2)c_2| + |(t_1 + 1 - f_1)d_1 - (t_2 + 1 - f_2)d_2|)。(8)$$

定义 4 设  $\tilde{\alpha}_i = ([a_i, b_i, c_i, d_i]; t_i, 1 - f_i) (i = 1, 2, \dots, n)$  为一组梯形 Vague 数,  $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)$  是  $\tilde{\alpha}_i$  对应的权重集,  $0 \leq w_i \leq 1$ , 且  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ , 则

称  $f_w(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_n) = \sum_{i=1}^n w_i \tilde{\alpha}_i$  为  $\tilde{\alpha}_i$  的加权算术平均算子。

定理 1 设  $\tilde{\alpha}_i = ([a_i, b_i, c_i, d_i]; t_i, 1 - f_i) (i = 1, 2, \dots, n)$  为一组梯形 Vague 数, 则按定义 4 运算的结果仍为梯形 Vague 数, 且

$$f_w(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_n) = ([\sum_{i=1}^n w_i a_i, \sum_{i=1}^n w_i b_i, \sum_{i=1}^n w_i c_i, \sum_{i=1}^n w_i d_i]; 1 - \prod_{i=1}^n (1 - t_i)^{w_i}, 1 - \prod_{i=1}^n f_i^{w_i})。(9)$$

证明 下面利用数学归纳法进行证明。

当  $n=2$  时, 由定义 2 中(2)知

$$w_1 \tilde{\alpha}_1 = ([w_1 a_1, w_1 b_1, w_1 c_1, w_1 d_1]; 1 - (1 - t_1)^{w_1}, 1 - f_1^{w_1});(10)$$

$$w_2 \tilde{\alpha}_2 = ([w_2 a_2, w_2 b_2, w_2 c_2, w_2 d_2]; 1 - (1 - t_2)^{w_2}, 1 - f_2^{w_2})。(11)$$

由定义 2 中(1)知

$$w_1 \tilde{\alpha}_1 + w_2 \tilde{\alpha}_2 = ([w_1 a_1 + w_2 a_2, w_1 b_1 + w_2 b_2, w_1 c_1 + w_2 c_2, w_1 d_1 + w_2 d_2]; 1 - (1 - t_1)^{w_1} + 1 - (1 - t_2)^{w_2} - (1 - (1 - t_1)^{w_1})(1 - (1 - t_2)^{w_2}), 1 - f_1^{w_1} f_2^{w_2}) = ([\sum_{i=1}^2 w_i a_i, \sum_{i=1}^2 w_i b_i, \sum_{i=1}^2 w_i c_i, \sum_{i=1}^2 w_i d_i]; 1 - \prod_{i=1}^2 (1 - t_i)^{w_i}, 1 - \prod_{i=1}^2 f_i^{w_i})。(12)$$

所以当  $n=2$  时, 定理 1 成立。

假设  $n=k$  时, 定理 1 成立, 即

$$f_w(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_k) = ([\sum_{i=1}^k w_i a_i, \sum_{i=1}^k w_i b_i, \sum_{i=1}^k w_i c_i, \sum_{i=1}^k w_i d_i]; 1 - \prod_{i=1}^k (1 - t_i)^{w_i}, 1 - \prod_{i=1}^k f_i^{w_i})。(13)$$

则当  $n=k+1$  时,

$$\begin{aligned} f_w(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_n) &= f_w(\tilde{\alpha}_1, \tilde{\alpha}_2, \dots, \tilde{\alpha}_k) + w_{k+1} \tilde{\alpha}_{k+1} = \\ &([\sum_{i=1}^k w_i a_i + w_{k+1} a_{k+1}, \sum_{i=1}^k w_i b_i + w_{k+1} b_{k+1}, \sum_{i=1}^k w_i c_i + w_{k+1} c_{k+1}, \\ &\sum_{i=1}^k w_i d_i + w_{k+1} d_{k+1}]; 1 - \prod_{i=1}^k (1 - t_i)^{w_i} + 1 - (1 - t_{k+1})^{w_{k+1}} - \\ &(1 - \prod_{i=1}^k (1 - t_i)^{w_i})(1 - (1 - t_{k+1})^{w_{k+1}}), 1 - \prod_{i=1}^k f_i^{w_i} \cdot f_{k+1}^{w_{k+1}}) \\ &= ([\sum_{i=1}^k w_i a_i, \sum_{i=1}^k w_i b_i, \sum_{i=1}^k w_i c_i, \sum_{i=1}^k w_i d_i]; 1 - \prod_{i=1}^k (1 - t_i)^{w_i}, \\ &1 - \prod_{i=1}^k f_i^{w_i})。(14) \end{aligned}$$

即当  $n=k+1$  时也成立。所以由数学归纳法知定理 1 是成立的。

### 3 基于梯形 Vague 数的群决策模型

#### 3.1 群决策方法

群决策问题中, 设  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_l\}$  为专家集,  $l$  为专家个数;  $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$  为方案集,  $m$  为方案个数; 设煤矿应急救援能力因素集  $A = \{B_1, B_2, \dots, B_n\}$ , 共  $n$  个影响指标。

$\tilde{F}_k = (\alpha_{ij}(k))_{m \times n}$  为  $p_k$  给出的决策矩阵, 其中  $\alpha_{ij}(k) (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, l)$  是第  $k$  个专家针对煤矿  $Y_i$  中第  $j$  个指标给出的梯形 Vague 数。

首先计算专家  $p_k$  的熵值  $E(p_k)$

$$E(p_k) = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{1 - (t_{\alpha_{ij}(k)} - f_{\alpha_{ij}(k)})^2 + 2\pi_{\alpha_{ij}(k)}^2}{2 - (t_{\alpha_{ij}(k)} - f_{\alpha_{ij}(k)})^2 + \pi_{\alpha_{ij}(k)}^2}。(15)$$

然后按照

$$w(kp_k) = \frac{1 - E(p_k)}{\sum_{k=1}^l (1 - E(p_k))}。(16)$$

确定专家  $p_k$  的权重。

指标权重的确定,  $\tilde{F} = (\alpha_{ij})_{m \times n}$  中第  $j$  个指标对应的 Vague 熵按照

$$E_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1 - (t_{\alpha_{ij}} - f_{\alpha_{ij}})^2 + 2\pi_{\alpha_{ij}}^2}{2 - (t_{\alpha_{ij}} - f_{\alpha_{ij}})^2 + \pi_{\alpha_{ij}}^2}。(17)$$

计算。然后按照

$$w(j) = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)}。(18)$$

确定第  $j$  个指标的权重。

设煤矿  $Y_i (i = 1, 2, \dots, m)$  对应指标  $B_j$  的梯形 Vague 数为  $\tilde{\alpha}_{ij} = ([a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}]; t_{\alpha_{ij}}, 1 - f_{\alpha_{ij}})$ 。称  $\Delta(\alpha_{ij}) = \frac{a_{ij} + b_{ij} + c_{ij} + d_{ij}}{4} (1 - t_{\alpha_{ij}} - f_{\alpha_{ij}})$  为未知度,  $\sigma(\alpha_{ij}) = \frac{a_{ij} + b_{ij} + c_{ij} + d_{ij}}{4} (1 - |t_{\alpha_{ij}} - f_{\alpha_{ij}}|)$  为模糊度,  $r(\alpha_{ij}) = \Delta(\alpha_{ij}) + \sigma(\alpha_{ij})$  为不确定度。

$$\text{称 } u(\alpha_{ij}) = \frac{1}{1 + e - \frac{a_{ij} + b_{ij} + c_{ij} + d_{ij}}{4} (t_{\alpha_{ij}} - f_{\alpha_{ij}}) \cdot (1 - r(\alpha_{ij}))}$$

为  $\alpha_{ij}$  的实际效用函数,  $v(\alpha_{ij}) = \frac{1}{1 + e - \frac{a_{ij} + b_{ij} + c_{ij} + d_{ij}}{8} \cdot (1 - 2f_{\alpha_{ij}}) \cdot (t_{\alpha_{ij}} + f_{\alpha_{ij}} | t_{\alpha_{ij}} - f_{\alpha_{ij}} |)}$  为  $\alpha_{ij}$  的机会效用函数,  $m(\alpha_{ij}) = u(\alpha_{ij}) + v(\alpha_{ij})$  为  $\alpha_{ij}$  的效用函数。

3.2 群决策步骤

(1) 利用式(16)计算各个专家权重  $w_i$ ;

(2) 将不同专家  $p_k (k = 1, 2, \dots, l)$  给出的评价矩阵按照集成算子公式(9)进行集结运算;

(3) 利用式(18)确定各个指标属性权重  $w_j$ ;

(4) 利用梯形 Vague 数效用函数计算各个方案在不同指标下的效用值  $m(\alpha_{ij})$ ;

(5) 根据加权求和法计算每个矿井的效用值, 并按越大越优的原则进行排序。

## 4 实例分析

对同煤集团的四个子矿  $Y_i (i=1, 2, 3, 4)$  的应急救援能力进行评价, 依据 5 个属性指标  $B_j (j=$

1, 2, 3, 4, 5) 来考查各煤矿, 其中  $B_1$  为矿井安全生产系统、 $B_2$  为预警与危险监测能力、 $B_3$  为应急准备能力、 $B_4$  为应急处置与减控能力、 $B_5$  为事后恢复能力。三名专家  $P_k (k=1, 2, 3)$  对上述四矿属性指标评价结果用梯形 Vague 数形式给出, 见表 1 至表 3。

利用式 (16) 可得专家权重向量  $w = (0.284, 0.329, 0.387)$ , 再依据式 (9) 进行集成运算得到各煤矿的综合梯形 Vague 数评价信息, 结果见表 4。

表 1  $P_1$  对各煤矿的梯形 Vague 数评价信息

	$B_1$	$b_2$	$B_3$	$b_4$	$B_5$
$Y_1$	$([1, 2, 3, 8]; 0.1, 0.5)$	$([2, 3, 4, 5]; 0.5, 0.6)$	$([2, 3, 5, 6]; 0.1, 0.6)$	$([2, 3, 5, 6]; 0.2, 0.5)$	$([3, 4, 5, 6]; 0.2, 0.4)$
$Y_2$	$([2, 3, 5, 7]; 0.3, 0.7)$	$([3, 5, 7, 8]; 0.4, 0.6)$	$([1, 3, 4, 7]; 0.2, 0.3)$	$([1, 3, 4, 7]; 0.1, 0.9)$	$([1, 3, 5, 7]; 0.5, 0.6)$
$Y_3$	$([1, 4, 6, 8]; 0.4, 0.7)$	$([1, 2, 3, 4]; 0.5, 0.8)$	$([2, 3, 4, 6]; 0.5, 0.8)$	$([3, 4, 5, 6]; 0.3, 0.8)$	$([2, 3, 4, 6]; 0.3, 0.6)$
$Y_4$	$([1, 2, 3, 6]; 0.2, 0.3)$	$([1, 4, 5, 7]; 0.5, 0.8)$	$([1, 3, 4, 6]; 0.1, 0.4)$	$([1, 2, 3, 6]; 0.2, 0.3)$	$([1, 3, 5, 7]; 0.2, 0.4)$

表 2  $P_2$  对各煤矿的梯形 Vague 数评价信息

	$B_1$	$b_2$	$B_3$	$b_4$	$B_5$
$Y_1$	$([1, 2, 3, 4]; 0.2, 0.7)$	$([1, 4, 6, 7]; 0.4, 0.6)$	$([2, 4, 5, 6]; 0.3, 0.6)$	$([1, 2, 4, 5]; 0.3, 0.5)$	$([1, 3, 5, 6]; 0.1, 0.5)$
$Y_2$	$([2, 3, 4, 6]; 0.3, 0.5)$	$([2, 3, 4, 5]; 0.4, 0.7)$	$([1, 2, 3, 5]; 0.2, 0.5)$	$([2, 4, 5, 6]; 0.7, 0.8)$	$([2, 3, 4, 6]; 0.1, 0.6)$
$Y_3$	$([3, 4, 6, 7]; 0.1, 0.7)$	$([2, 3, 4, 5]; 0.6, 0.8)$	$([1, 3, 4, 6]; 0.3, 0.8)$	$([1, 3, 5, 6]; 0.6, 0.8)$	$([1, 2, 3, 7]; 0.2, 0.7)$
$Y_4$	$([1, 2, 4, 5]; 0.4, 0.7)$	$([1, 4, 5, 6]; 0.5, 0.7)$	$([2, 3, 4, 6]; 0.2, 0.5)$	$([2, 3, 4, 6]; 0.2, 0.4)$	$([1, 4, 5, 6]; 0.1, 0.8)$

表 3  $P_3$  对各煤矿的梯形 Vague 数评价信息

	$B_1$	$b_2$	$B_3$	$b_4$	$B_5$
$Y_1$	$([2, 3, 4, 5]; 0.5, 0.6)$	$([4, 5, 6, 7]; 0.4, 0.5)$	$([1, 5, 7, 8]; 0.1, 0.3)$	$([1, 2, 3, 4]; 0.4, 0.6)$	$([3, 4, 5, 6]; 0.3, 0.9)$
$Y_2$	$([1, 3, 4, 6]; 0.2, 0.3)$	$([3, 4, 5, 7]; 0.8, 0.9)$	$([2, 3, 4, 5]; 0.4, 0.6)$	$([1, 4, 5, 6]; 0.4, 0.5)$	$([2, 3, 4, 6]; 0.5, 0.6)$
$Y_3$	$([2, 3, 5, 7]; 0.2, 0.7)$	$([3, 4, 5, 7]; 0.5, 0.8)$	$([1, 4, 5, 6]; 0.2, 0.6)$	$([1, 2, 3, 5]; 0.2, 0.7)$	$([1, 2, 3, 4]; 0.5, 0.8)$
$Y_4$	$([1, 2, 4, 5]; 0.4, 0.6)$	$([2, 3, 4, 5]; 0.6, 0.8)$	$([2, 4, 6, 7]; 0.3, 0.8)$	$([2, 4, 5, 8]; 0.4, 0.7)$	$([1, 2, 5, 6]; 0.4, 0.8)$

表 4 各煤矿的综合梯形 Vague 数评价信息

	$B_1$	$b_2$	$B_3$	$b_4$	$B_5$
$Y_1$	$([1.39, 2.39, 3.39, 5.52]; 0.310, 0.612)$	$([2.45, 4.10, 5.43, 6.42]; 0.430, 0.564)$	$([1.61, 4.10, 5.77, 6.77]; 0.171, 0.503)$	$([1.28, 2.28, 3.90, 4.90]; 0.315, 0.541)$	$([2.34, 3.67, 5.6]; 0.210, 0.718)$
$Y_2$	$([1.61, 3.4, 4.28, 6.28]; 0.263, 0.507)$	$([2.67, 3.96, 5.24, 6.63]; 0.608, 0.787)$	$([1.39, 2.67, 3.67, 5.57]; 0.284, 0.495)$	$([1.33, 3.72, 4.72, 6.28]; 0.464, 0.766)$	$([1.72, 3.4, 4.67, 6.28]; 0.393, 0.600)$
$Y_3$	$([2.05, 3.61, 5.61, 7.28]; 0.234, 0.700)$	$([2.10, 3.10, 4.10, 5.49]; 0.535, 0.800)$	$([1.28, 3.39, 4.389, 6]; 0.330, 0.738)$	$([1.57, 2.90, 4.23, 5.61]; 0.387, 0.766)$	$([1.28, 2.28, 3.28, 5.56]; 0.358, 0.722)$
$Y_4$	$([1.2, 3.72, 5.28]; 0.349, 0.573)$	$([1.39, 3.61, 4.61, 5.90]; 0.541, 0.771)$	$([1.72, 3.39, 4.77, 6.39]; 0.214, 0.631)$	$([1.72, 3.10, 4.10, 6.77]; 0.284, 0.521)$	$([1.2, 2.94, 5.6, 6.28]; 0.349, 0.688)$

利用式 (18) 可得各属性值权重向量  $w = (0.196, 0.193, 0.203, 0.185)$ , 再根据梯形 Vague 数效用值公式  $m(a_{ij})$  求出各指标因素的效用值, 结果见表 5。

表 5 各煤矿梯形 Vague 数效用值评价信息

	$B_1$	$B_2$	$B_2$	$B_4$	$B_5$
$Y_1$	0.122	0.126	-0.067	0.132	0.144
$Y_2$	0.212	0.132	0.147	0.104	0.105
$Y_3$	0.158	0.121	0.102	0.105	0.099
$Y_4$	0.118	0.119	0.232	0.205	0.101

针对每个矿井, 将各个指标对应的效用值进行加权求和, 可得与煤矿应急救援能力相应的梯形 Vague 数综合效用值:

$m(Y_1) = 0.458$ ,  $m(Y_2) = 0.700$ ,  $m(Y_3) = 0.585$ ,  $m(Y_4) = 0.775$ 。

显然  $m(Y_1) < m(Y_3) < m(Y_2) < m(Y_4)$ 。根据效用值越大越优的原则, 可得  $Y_4$  矿最优。

## 5 结论

考虑到对煤矿应急救援能力的评价研究越来越受人们的关注, 本文提出了一种新的基于梯形 Vague 数效用函数的评价方法。并结合同煤集团的四个子矿进行合理有效的应用分析, 研究表明梯形 Vague 数的效用值函数信息相对于模糊信息量的表述更加全面, Vague 熵确定专家及指标权重更加合理, 集结运算使决策结果更加可靠。上述研究进一步丰富并完善了已有煤矿应急救援能力评价

模型及方法。

## 参考文献:

- [1] 张军波, 郭德勇, 王立兵. 煤矿应急救援组织结构模式研究[J]. 煤炭学报, 2012, 28(4): 664-668.
- [2] 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]. 西安科技大学学报, 2009, 28(2): 3-5.
- [3] 韩晋平, 毕永华, 侯金玲, 等. 基于灰色-模糊综合法的煤矿应急救援能力评价研究[J]. 西安科技大学学报, 2011, 31(2): 146-152.
- [4] 汪滨琳, 史波, 周莹. 煤矿企业应急能力评估指标体系的构建[J]. 煤炭经济研究, 2009, 12(4): 67-70.
- [5] 朗坤, 张明媛, 袁永博. 基于可变集的地震灾害应急物资分配模型[J]. 灾害学, 2014, 29(1): 201-206.
- [6] 杨力, 董一平, 刘程程. 基于网络层次分析法的煤矿应急救援能力评价[J]. 安徽理工大学学报, 2015, 41(3): 114-118.
- [7] 陈孝国, 徐慧, 徐源, 等. 基于直觉模糊集的煤矿应急救援能力评价研究[J]. 大连大学学报, 2015, 36(6): 33-36.
- [8] 陈孝国, 母丽华, 杜红, 等. 煤矿突发事件应急救援的群决策方法[J]. 灾害学, 2015, 30(1): 167-170.
- [9] 陈孝国, 杜红. 区间三角模糊软集及其动态决策方法[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(5): 1111-1115.
- [10] 杨力, 刘程程, 宋利, 等. 基于熵权法的煤矿应急救援能力评价[J]. 中国软科学, 2013(11): 185-192.
- [11] Gau WenLung, Buehrer Daniel J. Vague sets[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1993, 23(2): 610-614.
- [12] Burillo P, Bustince H. Vague sets are intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 79(3): 403-405.
- [13] Atanassov K, Gargov G. Interval valued intuitionistic fuzzy sets[J]. Fuzzy Sets and Systems, 1989, 31(3): 341-34.

## Research on Coal Mine Emergency Rescue Capability Evaluation Based on Trapezoidal Vague Sets Entropy Method

YANG Yue<sup>1,3</sup>, YANG Dan<sup>2</sup>, CHEN Xiaoguo<sup>2,3</sup>, WANG Cunquan<sup>3</sup> and ZHANG Hongfen<sup>4</sup>

(1. College of Civil Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;

2. College of Science, Heilongjiang University of Science & Technology, Harbin 150022, China;

3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

4. Architectural Engineering College, North China Institute of Science & Technology, Langfang 065201, China)

**Abstract:** In order to further improve the coal mine emergency rescue capability evaluation method and improve its reliability, we put forward the utility value evaluation model of coal mine emergency rescue capability based on the trapezoidal Vague set entropy weight method. For the evaluation information which is trapezoidal Vague value of different indicators, at first we calculate the weights of experts and indicators by entropy weight formula, then we integrate them effectively by using the trapezoidal Vague integration operator, next we make a sequence according to the principle that it will be better if the utility value is greater. At last we apply the evaluation model in Datong Coal Mine Group. The study not only enriches the basic method of coal mine emergency rescue capability evaluation, but also provides reference for the rescue capability evaluation for other related areas.

**Key words:** mine emergency rescue; trapezoidal vague value; capability evaluation; entropy weight method; utility value function