陈孝国，黄鸿辉，杨悦，等. 长斜井煤矿 TBM 施工灾害风险预警模型[J]. 灾害学，2019，34(3)：146 – 149. [CHEN Xiaoguo, HUANG Honghui, YANG Yue, etal. Disaster risk warning model of TBM construction in long Inclined-shaft coalmine[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(3): 146 – 149. doi: 10.3969/j.issn.1000 – 811X.2019.03.027.]

长斜井煤矿 TBM 施工灾害风险预警模型*

陈孝国[1,2,3]，黄鸿辉[2]，杨 悦[3,4,5]，刘纪峰[3,4]，张会芝[3,4]

（1. 三明学院 信息工程学院，福建 三明 365004；2. 黑龙江科技大学 理学院，黑龙江 哈尔滨 150022；3. 工程材料与结构加固福建省高等学校重点实验室(三明学院)，福建 三明 365004；4. 三明学院 建筑工程学院，福建 三明 365004；5. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院，北京 100083）

摘 要：为提高长斜井煤矿 TBM 施工风险分析模型可靠度，实现动态预警。首先构建风险评估指标体系，确立一般风险、显著风险、高度风险、极其危险四个等级分类标准。然后利用中智集、熵权法和加权集成算子建立灾害风险预警分析模型。最后对神华集团相关长斜井煤矿 TBM 施工风险进行实例分析。该项研究对进一步丰富长斜井煤矿 TBM 施工风险预警方法起到一定的促进作用。

关键词：单值中智集；斜井 TBM 施工；风险分析；得分函数；熵权法

中图分类号：O319.56；X43；X45；X915.5 **文献标志码**：A **文章编号**：1000 – 811X(2019)03 – 0146 – 04

doi：10.3969/j.issn.1000 – 811X.2019.03.027

煤炭是我国主要能源之一，目前浅层煤矿资源已基本采完，深部开采将是今后发展的主要趋势。而传统的立井已经不能满足深部开采的需要，因此我国的一些大型煤矿都在尝试采用 TBM(盾构)进行斜井开挖[1]。TBM 具有高效、快速、优质、安全等优点，其掘进速度是一般方法的 4 ~ 10 倍。所以越来越多的施工单位开始采用斜井 TBM 施工。但 TBM 对不良工程地质条件的适应性较差，且对施工人员素质要求较高，同时施工中面临的不确定性风险因素较多，若不进行有效的风险评估与控制，将会导致各种工程事故的发生。因此，对煤矿长斜井 TBM 施工的风险进行分析与评估具有重要工程实践价值。侯公羽等将集对分析的方法引入长斜井煤矿 TBM 施工风险评估中，并进行了实例分析[2]。美国 Eistein 教授对隧道工程进行了风险分析并建立数学评估模型[3]，后来 Nilsen 等提出了更为复杂地层条件下海底隧道工程分析的框架[4]。Sturk 等建立了 TBM 施工风险决策和分析系统[5]。Kampmann 等对哥本哈根地铁工程进行风险类型的识别，提出应对风险的措施，并采用蒙特卡洛方法建立了风险模型[6]。贺志军提出了山岭铁路隧道施工风险评估模式及铁路隧道施工事故后果分类方式[7]。杨悦对岩体隧道施工安全风险进行支护结构力学预警分析[8]。何发亮等提出用模糊成本重要度的指标来评价盾构隧道施工中各风险对总成本的影响大小[9]。上述研究成果普遍存在风险指标值定性评价较多，权重确定不精确，无法实现动态预警等缺点。

本文将中智集理论引入长斜井煤矿 TBM 施工风险评估中，通过查阅资料和咨询专家构建风险评估指标体系，并利用熵权法和加权算子来研究风险值矩阵的融合，通过双参数得分函数实现对风险等级的动态预警。

1 长斜井煤矿 TBM 施工风险识别

通过对长斜井煤矿 TBM 施工风险的分析，本文确立了施工中常见的 27 个因素，建立了二级风险评估指标体系，如表 1 所示。一级风险评估指标中考虑了长斜井煤矿 TBM 施工过程中最有可能导致事故发生的 6 个因素，分别是自然因素、地质因素、技术因素、设备因素、内在因素和事故因素。二级风险评估指标是在已有研究的基础之上加入冲击地压因素，塌方因素，岩爆因素，TBM 卡机，有害气体中毒因素。根据《铁路隧道风险评估若干问题探讨》将长斜井煤矿 TBM 施工风险分为 4 级(表 2)[9]。

* 收稿日期：2019 – 02 – 28 修回日期：2019 – 04 – 14
基金项目：国家自然科学基金项目(51105135)；黑龙江省自然科学基金项目(QC2015055)；福建省交通运输科技项目(201813)；三明学院引进高层次人才科研启动项目(19YG01)
第一作者简介：陈孝国(1978 –)，男，黑龙江省克东人，教授，博士，主要从事煤矿安全方面研究. E-mail：kjdxcxg@sohu.com

表 1　煤矿长斜井二层风险评估指标体系

目标层	一级指标	二级指标
煤矿应急救援能力评价指标体系 A	自然因素 B_1	滑坡 C_{11}
		洪水 C_{12}
		雨季 C_{13}
		冲击地压 C_{14}
	地质因素 B_2	塌方风险 C_{21}
		涌水风险 C_{22}
		围岩塑性形变 C_{23}
		岩爆风险 C_{24}
		特殊地段 C_{25}
	技术因素 B_3	斜井轴线定位偏差太大 C_{31}
		注浆参数控制不当 C_{32}
		排水问题 C_{33}
		通风问题 C_{34}
		新技术的应用 C_{35}
	设备因素 B_4	盾构机损坏 C_{41}
		TBM 卡机 C_{42}
		TBM 选型不当 C_{43}
		电机设备安装维护不当 C_{44}
		设备调试出错 C_{45}
	内在因素 B_5	管理人员资格不够 C_{51}
		生产管理制度不完善 C_{52}
		材料短缺 C_{53}
		施工设计不合理 C_{54}
		材料价格发生变化 C_{55}
	事故因素 B_6	火灾 C_{61}
		瓦斯爆炸 C_{62}
		有害气体中毒 C_{63}

表 2　风险等级分级表

风险等级	对工程的影响
一级风险	有轻微风险发生，危险较低
二级风险	风险较高，对项目有一定影响，需要采取防范措施
三级风险	风险水平很高，会对工程造成严重破坏
四级风险	风险水平最高，会对工程造成毁灭性破坏

2　单值中智集理论

定义 1[10]　设 X 为一个论域，$A=\{x,<T_A(x), I_A(x), F_a(X)>|x\in X\}$ 称为中智集，其中 $T_A(x)$，$I_A(x)$，$F_A(x)$ 分别表示 X 中元素 x 属于集合 A 的隶属度，犹豫度，及非隶属度。对于 $\forall x\in X$，$T_A(x)$，$I_A(x)$，$F_A(x)\in[0,1]$，$0\leqslant T_A(x)+I_A(x)+F_A(x)\leqslant 3$。当 $T_A(x)$，$I_A(x)$，$F_A(x)$ 均取 $[0,1]$ 中的常数 t，i，f 时称 $\alpha=<t, i, f>$ 为单值中智数。

定义 2[11]　设两个单值中智数 $\alpha_1=<t_1, i_1, f_1>$ 和 $\alpha_2=<t_2, i_2, f_2>$，若 $t_1<t_2$，$i_1>i_2$，$f_1>f_2$，则称 $\alpha_1<\alpha_2$。

定义 3[11]　设两个单值中智数 $\alpha_1=<t_1, i_1, f_1>$ 和 $\alpha_2=<t_2, i_2, f_2>$，则：

(1) $\alpha_1\cup\alpha_2=<\max(t_1, t_2), \min(i_1, i_2), \min(f_1, f_2)>$；

(2) $\alpha_1\cap\alpha_2=<\min(t_1, t_2), \max(i_1, i_2), \max(f_1, f_2)>$。

定义 4[12]　设 $\alpha=<t, i, f>$ 是一个中智数，则 α 的补集为 $\alpha^c=<f, 1-i, t>$。且满足 $(\alpha^c)^c=\alpha$。

定义 5[13]　设两个单值中智数 $\alpha_1=<t_1, i_1, f_1>$ 和 $\alpha_2=<t_2, i_2, f_2>$，常数 $k>0$，则

(1) $\alpha_1+\alpha_2=<t_1+t_2-t_1t_2, i_1i_2, f_1f_2>$；

(2) $\alpha_1\times\alpha_2=<t_1t_2, i_1+i_2-i_1i_2, f_1+f_2-f_1f_2>$；

(3) $k\alpha_1=<1-(1-t_1)^k, (i_1)^k, (f_1)^k>$；

(4) $(\alpha_1)^k=<(t_1)^k, 1-(1-i_1)^k, 1-(1-f_1)^k>$。

3　动态风险级别评判方法

3.1　中智数集成算子

若 $\tilde{\alpha}_j=(t_j, i_j, f_j)$，$(j=1, 2, \cdots, n)$ 为一组中智数，则称下式为中智加权平均算子：

$$IIFWA_w(\tilde{\alpha}_1,\tilde{\alpha}_2,\cdots,\tilde{\alpha}_n)=\left(1-\prod_{j=1}^{n}(1-t_j)^{w_j},\prod_{j=1}^{n}i_j^{w_j},\prod_{j=1}^{n}f_j^{w_j}\right)。\tag{1}$$

式中：$w=(w_1,w_2,\cdots,w_n)^T$ 为 $\tilde{\alpha}_j(j=1,2,\cdots,n)$ 的权重向量，且 $w_j\in[0,1]$，$\sum_{j=1}^{n}w_j=1$。

3.2　指标因素权重的确定

设中智集 $A=\{x, <T_A(x_i), I_A(x_i), F_A(x_i)>|x_i\in X\}$。中智熵不仅来自直觉性还来自自身的模糊性，设论域 $X=\{x_1, x_2, \cdots, x_m\}$，称

$$E(A)=1-\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(T_A(x_i)+F_A(x_i))\left|I_A(x_i)-I_A^c(x_i)\right|\tag{2}$$

为中智熵。利用公式(2)可以计算出评价矩阵中每个中智数所对应的熵值 E_{ij}，然后通过

$$\omega_j=\frac{1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}E_{ij}}{\sum_{j=1}^{n}\left(1-\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}E_{ij}\right)},\tag{3}$$

$(i=1, 2, \cdots, m; j=1, 2, \cdots, n)$ 确定因素权重。

3.3　带有参数的得分函数

设 $\tilde{\alpha}=(t, i, f)$ 为一个中智数，则称

$$s(\tilde{\alpha})=t-f+\lambda_1\lambda_2 i-\lambda_1(1-\lambda_2)i\tag{4}$$

为 $\tilde{\alpha}$ 的得分函数，参数 λ_1 和 λ_2 分别为犹豫度的可转化率和支持度转化比率，且满足 $0\leqslant\lambda_1\leqslant 1$，$0\leqslant\lambda_2\leqslant 1$。

3.4　评价步骤

步骤一：利用式(3)求解各个二级指标权重 $W_j^{(k)}(j=1, 2, \cdots, n; k=1, 2, \cdots, l)$；

步骤二：将各二级指标的评价矩阵 $\tilde{R}=$

$(\tilde{r}_{ij}^{(k)})_{m\times n}$（$i=1, 2, \cdots, m$；$j=1, 2, \cdots, n$；$k=1, 2, \cdots, l$）进行融合，得到融合矩阵 $\tilde{R}=(\tilde{r}_i^{(k)})_{m\times 1}$，

$$\tilde{r}^{(k)} = IIFWA_w(\tilde{r}_{ij}^{(k)}, \tilde{r}_{ij}^{(k)}, \cdots, \tilde{r}_{ij}^{(k)}) = \left(1-\prod_{j=1}^{n}(1-t_j)^{w_j}, \prod_{j=1}^{n} i_j^{w_j}, \prod_{j=1}^{n} f_j^{w_j}\right), \tag{5}$$

其中 $\tilde{r}_{ij}^{(k)}=(t_{ij}^{(k)}, i_{ij}^{(k)}, f_{ij}^{(k)})$。

步骤三：利用式（3）求解各一级指标权重 W_k（$k=1, 2, \cdots, l$）。

步骤四：将各一级指标的评价矩阵 $\tilde{R}=(\tilde{r}_i^{(k)})_{m\times 1}$进行融合，得到融合矩阵 $\tilde{R}^*=(\tilde{r}_i^*)_{m\times 1}$，

$$\tilde{r}_i^* = IIFWA_w(r_i^{(1)}, r_i^{(2)}, \cdots, r_i^{(k)}) = \left(1-\prod_{j=1}^{n}(1-t_j)^{w_j}, \prod_{j=1}^{n} i_j^{w_j}, \prod_{j=1}^{n} f_j^{w_j}\right), \tag{6}$$

其中 $\tilde{r}_{ij}^{(k)}=(t_{ij}^{(k)}, i_{ij}^{(k)}, f_{ij}^{(k)})$。

步骤五：利用式（4）确定方案 x_i 的得分函数 $s(\tilde{x}_i)$（$i=1, 2, \cdots, m$）。

步骤六：根据 $s(\tilde{x}_i)$ 值的大小进行风险评估。

4 实例分析

根据长斜井煤矿 TBM 施工风险评估指标体系（表1），对神华集团某相关煤矿进行施工风险评估分析。查阅施工资料并询问专家意见得到了全部指标对应的中智数，近而构建了六个一级指标评价矩阵 $\tilde{R}^{(1)}$，$\tilde{R}^{(2)}$，$\tilde{R}^{(3)}$，$\tilde{R}^{(4)}$，$\tilde{R}^{(5)}$，$\tilde{R}^{(6)}$。

自然因素评价矩阵 $\tilde{R}^{(1)}$：

$$\tilde{R}^{(1)} = \begin{pmatrix} (0.5, 0.4, 0.7) & (0.5, 0.3, 0.6) & (0.4, 0.6, 0.5) & (0.3, 0.6, 0.5) \\ (0.7, 0.3, 0.5) & (0.6, 0.6, 0.2) & (0.5, 0.6, 0.5) & (0.3, 0.6, 0.4) \\ (0.6, 0.4, 0.6) & (0.7, 0.3, 0.2) & (0.2, 0.3, 0.7) & (0.2, 0.2, 0.7) \\ (0.5, 0.7, 0.3) & (0.3, 0.6, 0.3) & (0.6, 0.7, 0.2) & (0.6, 0.7, 0.1) \end{pmatrix}。 \tag{7}$$

地质因素评价矩阵 $\tilde{R}^{(2)}$：

$$\tilde{R}^{(2)} = \begin{pmatrix} (0.4, 0.5, 0.1) & (0.3, 0.6, 0.2) & (0.6, 0.7, 0.5) & (0.1, 0.2, 0.1) \\ (0.5, 0.6, 0.3) & (0.7, 0.5, 0.2) & (0.4, 0.7, 0.2) & (0.3, 0.4, 0.1) \\ (0.6, 0.6, 0.2) & (0.6, 0.4, 0.3) & (0.6, 0.2, 0.4) & (0.5, 0.3, 0.4) \\ (0.6, 0.6, 0.1) & (0.6, 0.4, 0.3) & (0.7, 0.5, 0.2) & (0.6, 0.9, 0.5) \\ (0.7, 0.7, 0.3) & (0.7, 0.7, 0.3) & (0.7, 0.6, 0.4) & (0.6, 0.8, 0.3) \end{pmatrix}。 \tag{8}$$

技术因素评价矩阵 $\tilde{R}^{(3)}$：

$$\tilde{R}^{(3)} = \begin{pmatrix} (0.6, 0.3, 0.5) & (0.7, 0.3, 0.1) & (0.4, 0.5, 0.1) & (0.7, 0.7, 0.1) \\ (0.6, 0.2, 0.4) & (0.6, 0.2, 0.3) & (0.3, 0.2, 0.7) & (0.6, 0.6, 0.4) \\ (0.6, 0.3, 0.1) & (0.7, 0.2, 0.1) & (0.5, 0.3, 0.2) & (0.3, 0.4, 0.6) \\ (0.6, 0.3, 0.1) & (0.7, 0.2, 0.1) & (0.5, 0.3, 0.2) & (0.3, 0.4, 0.6) \\ (0.7, 0.2, 0.1) & (0.6, 0.6, 0.1) & (0.4, 0.6, 0.4) & (0.7, 0.9, 0.5) \end{pmatrix}。 \tag{9}$$

设备因素评价矩阵 $\tilde{R}^{(4)}$：

$$\tilde{R}^{(4)} = \begin{pmatrix} (0.4, 0.6, 0.3) & (0.1, 0.6, 0.7) & (0.6, 0.3, 0.3) & (0.3, 0.6, 0.3) \\ (0.5, 0.5, 0.5) & (0.6, 0.2, 0.4) & (0.5, 0.6, 0.4) & (0.2, 0.6, 0.6) \\ (0.7, 0.3, 0.2) & (0.7, 0.1, 0.3) & (0.3, 0.5, 0.5) & (0.4, 0.5, 0.5) \\ (0.4, 0.3, 0.2) & (0.4, 0.6, 0.5) & (0.3, 0.6, 0.7) & (0.3, 0.7, 0.6) \\ (0.6, 0.4, 0.5) & (0.8, 0.2, 0.4) & (0.5, 0.3, 0.7) & (0.5, 0.3, 0.5) \end{pmatrix}。 \tag{10}$$

内在因素评价矩阵 $\tilde{R}^{(5)}$：

$$\tilde{R}^{(5)} = \begin{pmatrix} (0.6, 0.6, 0.1) & (0.7, 0.5, 0.6) & (0.5, 0.7, 0.6) & (0.5, 0.6, 0.5) \\ (0.7, 0.5, 0.2) & (0.8, 0.4, 0.3) & (0.7, 0.7, 0.5) & (0.3, 0.7, 0.3) \\ (0.5, 0.4, 0.3) & (0.5, 0.3, 0.4) & (0.6, 0.3, 0.5) & (0.2, 0.7, 0.4) \\ (0.6, 0.6, 0.3) & (0.6, 0.7, 0.5) & (0.5, 0.6, 0.4) & (0.4, 0.5, 0.6) \\ (0.8, 0.6, 0.3) & (0.9, 0.4, 0.6) & (0.5, 0.5, 0.2) & (0.6, 0.4, 0.5) \end{pmatrix}。 \tag{11}$$

事故因素评价矩阵 $\tilde{R}^{(6)}$：

$$\tilde{R}^{(6)} = \begin{pmatrix} (0.4, 0.5, 0.5) & (0.1, 0.5, 0.7) & (0.7, 0.5, 0.5) & (0.5, 0.6, 0.7) \\ (0.5, 0.6, 0.5) & (0.4, 0.6, 0.5) & (0.7, 0.6, 0.5) & (0.6, 0.5, 0.5) \\ (0.4, 0.6, 0.6) & (0.3, 0.6, 0.6) & (0.6, 0.6, 0.7) & (0.3, 0.5, 0.5) \end{pmatrix}。 \tag{12}$$

长斜井煤矿 TBM 施工风险评估步骤如下。

步骤一，根据式（3）确定各二级指标权重为：

$\omega_{B1}=(0.20987. 0.26749, 0.30864, 0.21399)$； (13)

$\omega_{B2}=(0.127413, 0.092664, 0.250965, 0.227799, 0.301158)$； (14)

$\omega_{B3}=(0.156522, 0.237681, 0.176821, 0.176812, 0.252174)$； (15)

$\omega_{B4}=(0.139286, 0.092857, 0.171429, 0.285744, 0.310714)$； (16)

$\omega_{B5}=(0.16895, 0.205479, 0.273973, 0.182648, 0.16895)$； (17)

$\omega_{B6}=(0.16, 0.4133, 0.42667)$。 (18)

步骤二：根据式（1）对 $\tilde{R}^{(1)}$，$\tilde{R}^{(2)}$，$\tilde{R}^{(3)}$，$\tilde{R}^{(4)}$，$\tilde{R}^{(5)}$，$\tilde{R}^{(6)}$ 进行融合得矩阵 $\tilde{R}$。

$$\tilde{R} = \begin{pmatrix} (0.5928, 0.1474, 0.5088) & (0.5676, 0.3122, 0.2746) & (0.4273, 0.5006, 0.4559) & (0.3528, 0.4417, 0.3703) \\ (0.6056, 0.614, 0.1834) & (0.6164, 0.5089, 0.2501) & (0.6433, 0.4519, 0.3295) & (0.5059, 0.5049, 0.2844) \\ (0.6279, 0.2459, 0.1788) & (0.6545, 0.2811, 0.1298) & (0.4164, 0.3514, 0.2878) & (0.5665, 0.5356, 0.3931) \\ (0.5381, 0.3788, 0.3063) & (0.6546, 0.2117, 0.4066) & (0.4346, 0.4257, 0.5574) & (0.3782, 0.4899, 0.4989) \\ (0.6437, 0.5171, 0.2292) & (0.722, 0.4252, 0.4503) & (0.5765, 0.5097, 0.4240) & (0.3398, 0.5834, 0.4378) \\ (0.4435, 0.5827, 0.5404) & (0.3162, 0.5827, 0.5703) & (0.6608, 0.5827, 0.5772) & (0.4736, 0.5148, 0.5276) \end{pmatrix}。 \tag{19}$$

步骤三，根据式（3）确定一级指标的权重：

$\omega_A=(0.155789, 0.079175, 0.275163, 0.285256, 0.096572, 0.145133)$。 (20)

步骤四：根据公式（1）对 $\tilde{R}$ 进行融合，得到新的融合矩阵 $\tilde{R}^*$

$\tilde{R}^*=(0.589636, 0.375414, 0.277386)$，$(0.624902, 0.304864, 0.275779)$，$(0.512852, 0.429325, 0.413819)$。$(0.463586, 0.49029, 0.413889)$ (21)

步骤五，根据式（4）确定得分函数如下。

$S(a_1)=0.624902-0.275779+0.304864\lambda_1\lambda_2-\lambda_1(1-$

$\lambda_2)0.304864$；　　(22)

$S(a_2)=0.589636-0.277386+0.375414\lambda_1\lambda_2-\lambda_1(1-\lambda_2)0.375414$；　　(23)

$S(a_3)=0.51285-0.\ \ 413819+0.429325\lambda_1\lambda_2-\lambda_1(1-\lambda_2)0.429325$；　　(24)

$S(a_1)=0.463586-0.413889+0.49029\lambda_1\lambda_2-\lambda_1(1-\lambda_2)0.49029$。　　(25)

步骤六，利用 MATLAB7.0 作图，不同风险等级对应的得分函数分布如图 1 所示。

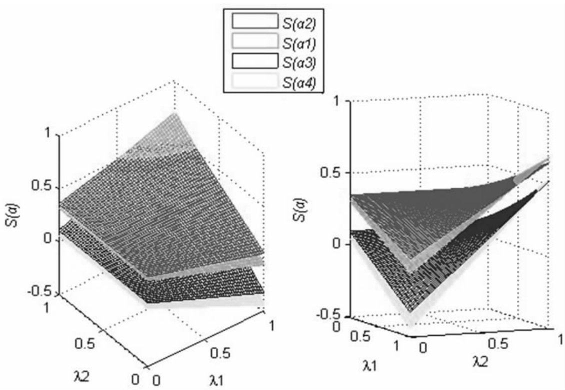

图 1　λ_1，λ_2 取[0，1]上任意值时得分函数分布

由图 1 可以看出 λ_1，λ_2 在[0，1]上绝大部分取值都有 $S(a_2)>S(a_1)>S(a_3)>S(a_4)$ 成立，由最大隶属度原则可知神华集团该煤矿长斜井 TBM 施工风险属于二级风险。但值得注意的是当 λ_1，λ_2 都十分接近 1 时，有 $S(a_1)>S(a_2)>S(a_3)>S(a_4)$，即风险等级由二级演变为一级，因此，应该提前做好防护措施，避免灾害的发生。

5　结论

本文构建了煤矿长斜井 TBM 施工风险分析的两层评价指标体系，特别是将冲击地压因素、塌方因素、岩爆因素、TBM 卡机及有害气体中毒因素融入二级指标中。利用中智集理论建模，熵权法确定权重和加权算子融合可以有效提高模型精度，同时借助双参数得分函数实现了动态预警分析。实例分析表明，神华集团某长斜井煤矿 TBM 施工风险预测结论为二级风险等级，这与实际施工情况勘测结果相吻合，但模型的智能化决策与预测还需进一步研究。

参考文献：

[1] 张方哲. 中国煤矿资源评估与开发可行性研究[D]. 北京：中国地质大学(北京)，2010.

[2] 侯公羽，梁荣，龚砚芬，等. 煤矿长斜井 TBM 施工安全风险分析与趋势预测[J]. 岩土力学，2014，35(S2)：325－331.

[3] 尹俊涛，尚彦军，傅冰骏，等. TBM 掘进技术发展及有关工程地质问题分析和对策[J]. 工程地质学报，2005(3)：389－397.

[4] NILSEN B A，STILLE P H. Quality control of a sub seatunnel project in complex ground conditions[C]// Proceedings of ITA World Tunnel Congress 99. Oslo：[s. n.]，1992：137－145.

[5] STURK R，OLSSON L，JOHANSSON J. Risk and decision analysis for large underground projects as applied to the stock ring road tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology，1996，2：157－164.

[6] 陈孝国. 模糊软集决策理论扩展研究及其在矿业工程中的应用[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2016.

[7] 贺志军. 山岭铁路隧道工程施工风险评估及其应用研究[D]. 长沙：中南大学，2009.

[8] 杨悦. TBM(盾构)施工斜井管片和锚喷衬砌结构力学特性研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2015.

[9] 何发亮. 铁路隧道风险评估若干问题探讨[J]. 现代隧道技术，2011，48(1)：78－81.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 韩莉莉，魏翠萍. 基于单值中智集 Choquet 积分算子的群决策方法[J]. 运筹学学报，2017，21(02)：110－118.

[13] 陈孝国，杜红. 单值中智软集及其相关性质[J]. 黑龙江科技大学学报，2018，21(2)：110－118.

Disaster Risk Warning Model of TBM Construction in Long Inclined-shaft Coalmine

CHEN Xiaoguo[1,2,3], HUANG Honghui[2], YANG Yue[3,4,5], LIU Jifeng[3,4], ZHANG Huizhi[3,4]

(1. *School of Information Engineering*, *Sanming University*, *Sanming* 365004, *China*; 2. *College of Science*, *Heilongjiang University of Science and Technology*, *Harbin* 150022, *China*; 3. *Key Laboratory of Engineering Material & Structure Reinforement* (*Sanming University*), *Samming*, *Fujian* 365004, *China*; 4. *College of Architecture and Civil Engineering*, *Sanming University*, *Sanming* 365004, *China*; 5. *School of Mechanics and Civil Engineering*, *China University of Mining & Technology*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In order to improve the reliability of TBM construction risk analysis model of long inclined shaft coalmine and realize dynamic warning. Firstly, the risk assessment index system was constructed to establish the classification criteria of general risk, significant risk, high risk and extreme risk. Then, a disaster risk early warning analysis model is established by using neutrosophic set, entropy weight method and weighted integration operator. Finally, the instance analysis the construction risk of TBM in the long inclined-shaft coalmine of shenhua group. This study will play a certain role in promoting the further enrichment of TBM construction risk warning methods in the long inclined-shaft coalmine.

Key words: single-valued neutrosophic set; inclined shaft TBM construction; risk analysis; scoring function; entropy weight method