

中文引用格式:陈娜,胡毅彤,袁英峰,等. 基于博弈论组合赋权-云模型的消防员训练损伤风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(4): 232-238.

英文引用格式:CHEN Na, HU Yitong, YUAN Yingfeng, et al. Risk assessment of firefighter training injury based on game theory combinatorial weighting and cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(4): 232-238.

基于博弈论组合赋权-云模型的消防员训练 损伤风险评估*

陈娜¹副教授, 胡毅彤¹, 袁英峰²工程师, 秦向南^{**3}副教授, 刘军⁴正高级工程师
(1 郑州大学 力学与安全工程学院, 河南 郑州 450001; 2 河南省消防救援总队,
河南 郑州 450004; 3 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001;
4 中国地震应急搜救中心, 北京 100049)

中图分类号: X913.4

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.04.1247

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3004405); 中国职业安全健康协会创新创业项目(CXCY-2021-01); 郑州大学基础研究培育基金资助(JC21532027)。

【摘要】 为降低消防员训练损伤发生率, 从个人因素、环境因素和组织管理因素3个方面, 提出包含19个指标的消防员训练损伤风险评估指标体系; 采用 Bonferroni 有序加权平均算子(BON-OWA 算子)修正层次分析法(AHP)的误差, 获得各指标的主观权重; 引用基于指标相关性的权重确定法(CRITIC)确定各指标的客观权重; 基于博弈论组合赋权法确定各指标的组合权重; 引入云模型理论, 建立消防员训练损伤风险评估模型, 并以河南省某消防救援大队消防员的训练为例, 验证该模型的科学性。结果表明: 训练装备的战技性能状况指标对消防员的训练损伤风险等级影响最大; 该风险评估模型通过数据处理, 可以确定消防员训练损伤风险等级; 案例中, 消防员在5种不同情景下的训练损伤风险等级均为一般风险, 这与模糊综合评价法所得结果一致。

【关键词】 博弈论组合赋权; 云模型; 消防员训练损伤; 风险评估; Bonferroni 有序加权平均算子(BON-OWA 算子)

Risk assessment of firefighter training injury based on game theory combinatorial weighting and cloud model

CHEN Na¹, HU Yitong¹, YUAN Yingfeng², QIN Xiangnan³, LIU Jun⁴

(1 School of Mechanics and Safety Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China; 2 Fire and Rescue Team in Henan Province, Zhengzhou Henan 450004, China; 3 School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450001, China; 4 National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to reduce the incidence of firefighter training injury, a firefighter training injury risk assessment index system containing 19 indexes was proposed from three aspects: individual factors, environmental factors and organizational management factors. The BON-OWA operator was used to correct

* 文章编号: 1003-3033(2024)04-0232-07; 收稿日期: 2023-10-20; 修稿日期: 2024-01-23

** 通信作者: 秦向南(1992—), 男, 湖北襄阳人, 博士, 副教授, 主要从事水工结构工程安全保障方面的教学与科研工作。Email: qin_xn2105@zzu.edu.cn。

the error of analytic hierarchy process(AHP) to obtain the subjective weight, and the criteria importance through intercriteria correlation(CRITIC) method was used to determine the objective weight. The game theory combinatorial weighting method was used to integrate the subjective weight and the objective weight to determine the combined weight. The risk assessment model of firefighter training injury was established based on the cloud model theory. The scientificity of the model was verified by the firefighter training in a fire rescue brigade in Henan province. The results show that the combat equipment performance condition index has the greatest impact on the risk level of firefighter training injury; The risk assessment model can determine the risk level of firefighter training injury by data processing. In the case, risk levels of firefighter training injury under five different scenarios are all general risk, which is consistent with the risk level obtained by the fuzzy comprehensive evaluation method.

Keywords: game theory combinatorial weighting; cloud model; firefighter training injury; risk assessment; Bonferroni-ordered weighted averaging(BON-OWA) operator

0 引言

消防员是事故应急救援处置的主要力量,为提高消防员综合素质,消防员需定期进行高强度训练,但是不科学的、高强度的训练容易导致消防员训练损伤,职业训练损伤成为影响消防员职业健康水平的主要因素^[1]。因此,探究消防员训练损伤的风险,对消防员职业健康具有重要意义。

国内外学者针对消防员训练损伤,开展了诸多研究。董凯等^[2]结合问卷调查法和因子分析法,得到影响消防员职业损伤的主因子;MARSH等^[3]采用调查问卷探究了消防员发生非致命伤害的现状,结果表明:扭伤和拉伤在消防活动中占主导地位;TRIVISONNO等^[4]采用表面肌电图研究了不同年龄的消防员训练后的恢复情况,发现年轻消防员比年长消防员表现出更高的恢复速度;JIMIKAYE等^[5]提出基于智能手机的生态瞬间评估方法,探究消防员工作期间的急性压力和疲劳,发现消防员在训练时的压力和疲劳水平最高;薛晓东等^[6]结合层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)和数据包络分析法,建立了一种消防员训练安全风险评估模型,提供了一种评估消防员的训练安全风险的方法。大多研究集中在消防员训练损伤的调查统计和训练中的体征监测层面,结合安全系统工程理论评估消防员训练损伤风险的研究较少。少数学者结合系统安全理论评估消防员训练损伤风险,但消防员训练损伤风险评估是一个多因素复杂系统,影响消防员训练损伤的因素存在模糊性和随机性,算法单一的模型难以得出客观结果。云模型考虑到复杂系统的随机性和模糊性问题,广泛应用于地铁运营安全^[7-8]等安全科学领域。

鉴于此,笔者拟从个人、环境、组织管理3方面出发,构建科学系统的风险评估指标体系,采用Bonferroni有序加权平均(Bonferroni-Ordered Weighted Averaging, BON-OWA)算子^[9]修正AHP法以及基于指标相关性的权重确定方法(Criteria Importance Through Intercriteria Correlation, CRITIC),同时引入博弈论组合赋权和云模型理论,评估消防员的训练损伤风险,以减少消防员训练损伤的发生。

1 消防员训练损伤风险评估指标体系

文中研究内容为消防员训练损伤风险评估,研究数据主要来源于河南省消防救援大队的调查问卷数据,以及来自河南省16个不同地区消防救援支队的专家打分数据和访谈记录数据。

结合安全系统工程理论,初步辨识和分析影响消防员训练损伤风险的因素。参考文献[2-3, 6, 10-11]及消防队战训科建议,构建消防员训练损伤风险评估指标体系,考虑3个一级指标:个人因素、环境因素和组织管理因素。在此基础上,又扩展19个二级指标,如图1所示。

2 消防员训练损伤风险评估模型

云模型是一种将定性概念与定量描述进行自然转换的模型,可以解决评估的随机性和模糊性^[7]。首先,采用BON-OWA算子修正AHP法的误差,得到指标的主观权重;然后,采用CRITIC法计算指标的客观权重,接着,基于博弈论组合赋权法计算指标的组合同权重,并引入云模型理论,建立消防员训练损伤风险评估模型(图2)。通过调查问卷和调研测量等方式获取目标数据,代入模型,处理目标数据,确定消防员训练损伤风险等级。

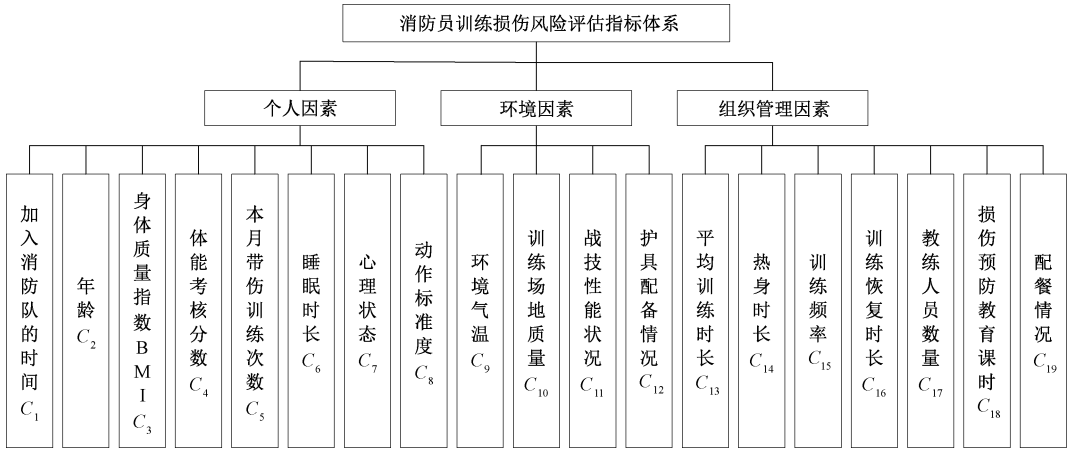


图1 消防员训练损伤风险评估指标体系

Fig. 1 Firefighter training injury risk assessment index system

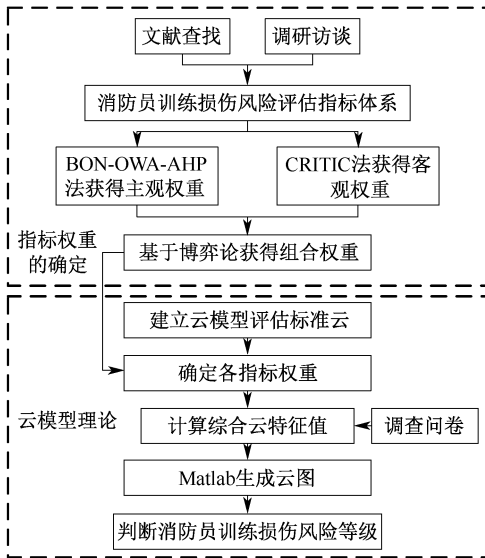


图2 消防员训练损伤风险评估模型

Fig. 2 Risk assessment model of firefighter training injury

2.1 BON-OWA-AHP 法确定主权重

AHP 法得出的权重数据主观性强,忽略了权重极值的影响。YAGER^[9] 结合 Bonferroni 算子,提出 BON-OWA 算子,并将其应用于多属性决策。BON-OWA 算子相较于传统的 OWA 算子,考虑指标间的相互影响,能更有效地削弱权重极值的影响。文中采用 BON-OWA-AHP 法确定主权重,步骤如下:

步骤 1: 设有评价指标 n 个,采用 AHP 法得到 r 位专家对第 1 个评价指标的权重集为 $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1r}$,将权重集按降序排列, t_i 为 $a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1r}$ 中第 i 个最大元素, $i = 1, 2, \dots, r$ 。

步骤 2: 结合 BON-OWA 算子修正 t_i , 计算绝对权重:

$$\bar{W}_1^B = B_p(t_1, t_2, \dots, t_r) = \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r t_i O_p(B^i) \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$O_p(B^i) = \sum_{j=1}^{r-1} w_j^b t_{i(j)}^b \quad (2)$$

式中: \bar{W}_1^B 为第 1 个评价指标 BON-OWA 算子修正后的绝对权重; B_p 为 BON-OWA 算子; O_p 为含参量的 OWA 算子; B^i 为不同维度降序排列的权重集, $B^i = (t_1, t_2, \dots, t_{i-1}, t_{i+1}, t_r)$; $t_{i(j)}^b$ 为 B^i 中第 j 个最大元素 ($j = 1, 2, \dots, r-1$); w^b 为与 BON-OWA 算子有关的权重向量, $w^b = (w_1^b, w_2^b, \dots, w_{r-1}^b)$, 其中, $w_j^b \in [0, 1]$, $\sum_{j=1}^{r-1} w_j^b = 1$, w_j^b 可由组合数^[12] 决定, 计算过程如下:

$$w_j^b = \frac{C_{r-2}^{j-1}}{\sum_{k=1}^{r-1} C_{r-2}^{k-1}}, j = 1, 2, \dots, r-1 \quad (3)$$

式中 C_{r-2}^{j-1} 为从 $r-2$ 个不同元素中取出 $j-1$ 个元素的组合数。

步骤 3: 计算指标的相对权重 W_1^B :

$$W_1^B = \frac{\bar{W}_1^B}{\sum_{i=1}^r \bar{W}_i^B} \quad (4)$$

优化完成第 1 个指标的主权重, 剩余指标重复上述步骤。经过 BON-OWA 算子优化后的指标主权重向量为 $W_1 = (W_1^B, W_2^B, \dots, W_n^B)$ 。

2.2 CRITIC 法确定客观权重

用 CRITIC 法综合指标间的关联性和冲突性来确定指标权重, 可提高权重的准确性。每个情景评估指标的数值组成初始矩阵 X , 正向化、归一化处理初始矩阵 X , 得到判断矩阵 D 。计算判断矩阵 D 中

的各指标的信息量,进而计算权重。

$$C_j = S_j \cdot \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (5)$$

$$w_{2j} = \frac{C_j}{\sum_{i=1}^n C_j} \quad (6)$$

式中: C_j 为第 j 个指标的信息量; S_j 为第 j 个指标的样本标准差; r_{ij} 为指标间的线性相关系数。

应用 CRITIC 法,最终计算出指标的客观权重向量为 $W_2 = (w_{21}, w_{22}, \dots, w_{2j})$ 。

2.3 基于博弈论组合赋权法确定组合权重

博弈论组合赋权法目的是寻找兼顾多者的最优解,避免主观和客观赋权的缺陷^[13]。步骤如下:

步骤 1:采用矩阵微分性质转变为最优化一阶导数条件的线性方程组,见下式:

$$\begin{pmatrix} W_1 W_1^T & W_1 W_2^T \\ W_2 W_1^T & W_2 W_2^T \end{pmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 W_1^T \\ W_2 W_2^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 a_1, a_2 为线性组合系数。

步骤 2:将 a_1, a_2 归一化,得到最优组合系数 a_1^*, a_2^* ,根据下式计算组合权重向量 W^* 。

$$W^* = a_1^* W_1^T + a_2^* W_2^T \quad (8)$$

其中, $a_1^* = \frac{a_1}{a_1 + a_2}; a_2^* = \frac{a_2}{a_1 + a_2}$ 。

2.4 云模型综合评估

云模型的数字特征用期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 表示,每个特征值通过定量的形式反映影响因素的特征^[7]。云模型综合评估步骤如下:

步骤 1:建立评估标准云。参考《消防训练安全要则》^[14]、文献[8,10-11],结合消防队战训科的建议,采用 5 级标定法划分评语论域,将消防员训练损伤风险等级划分为 5 个等级:高度风险、较高风险、中度风险、一般风险、稍有风险,对应的评语值范围设定为 [0,100]。根据分数越大、风险越小的原则量化评语分值区间,分别为高度风险 [0,25],较高风险 (25,50],中度风险 (50,75],一般风险 (75,90],稍有风险 (90,100]。

依据不同风险等级的区间 $[M_{\min}, M_{\max}]$,按下

式计算各个风险等级对应的标准云模型的特征值 $C_e(E_{xc}, E_{nc}, H_{ec})$ 。

$$\begin{cases} E_{xc} = \frac{M_{\min} + M_{\max}}{2} \\ E_{nc} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{6} \\ H_{ec} = kE_{nc} \end{cases} \quad (9)$$

式中 k 为熵和超熵的线性关系,取 $0.1^{[8]}$ 。

步骤 2:采用打分问卷获取目标数据,通过云发生器将专家的打分值 Z_{ij} 转化成二级指标的云模型特征值 $C_j(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej}), j = 1, 2, \dots, n$ 。

$$\begin{cases} E_{xj} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m Z_{ij} \\ E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |Z_{ij} - E_{xj}| \\ H_{ej} = \sqrt{|P_j^2 - E_{nj}^2|} \end{cases} \quad (10)$$

式中 P_j 为不同专家对第 j 个指标的风险状况打分值的标准差。

步骤 3:根据下式结合组合权重 W_j^* 和各二级指标的云模型特征值 $C_j(E_{xj}, E_{nj}, H_{ej})$,可得综合云模型特征值 $C(E_x, E_n, H_e)$ 。根据计算出的综合云模型特征值,使用 Matlab 软件生成综合云图,观察综合云图与标准云图的重合度,判断消防员训练损伤的风险等级。

$$\begin{cases} E_x = \sum_{i=1}^n (E_{xj} \cdot W_j^*) \\ E_n = \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_{nj}^2 \cdot W_j^*)} \\ H_e = \sum_{i=1}^n (H_{ej} \cdot W_j^*) \end{cases} \quad (11)$$

3 风险评估实例应用

3.1 指标权重的计算

选取河南省某消防救援大队 5 种不同的训练情景为例进行分析,以验证评估模型的合理性。5 种训练情景下 19 个指标的目标数据见表 1。

表 1 目标数据

Tab. 1 Target data

情景编号	个人因素								环境因素				组织管理因素						
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉	C ₁₀	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉
1	1	22	19.8	85	3	7.5	107	85	27	90	80	90	1.5	20	5	10	1	4	90
2	3	23	21.4	90	1	8	97	90	21	95	85	95	1	30	5	0	0	5	95
3	6	26	24.1	95	0	7.5	92	95	15	80	75	90	2.5	15	7	15	2	6	90

续表 1

情景编号	个人因素								环境因素				组织管理因素							
	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{14}	C_{15}	C_{16}	C_{17}	C_{18}	C_{19}	
4	0.5	20	19.5	75	5	8	97	70	25	92	90	95	1	10	5	5	0	1	90	
5	10	36	24.3	80	1	7	100	90	15	85	90	90	1	15	3	7	0	2	95	

邀请来自河南省 16 个不同地区的地市级消防救援支队一线指战员 40 位,通过填写指标重要度调查问卷,对 19 个指标的重要度进行打分,并且由打分构造的判断矩阵确保通过一致性检验。

采用 AHP 法获得初始权重,结合 BON-OWA 算子修正各评估指标的初始权重,AHP 法与 BON-OWA-AHP 法的主观权重对比结果如图 3 所示。由图 3 可以看出,由 BON-OWA 算子修正后的主观权重更为集中。

根据表 1 中数据,结合 CRITIC 法确定 19 个指标的客观权重。目标数据中,定性指标采用专家打分形式,心理状态通过 SCL90 症状自评量表^[15]的分数体现,其余指标通过实地调研获取。

基于博弈论组合赋权方法,确定指标的组合权重。由 BON-OWA-AHP 法确定的主观权重、CRITIC 法确定的客观权重、以及组合权重如图 4 所示。由图 4 可以看出,训练装备战技性能状况 C_{11} 、动作标准度 C_8 、训练场地质量 C_{10} 、护具配备情况 C_{12} 所

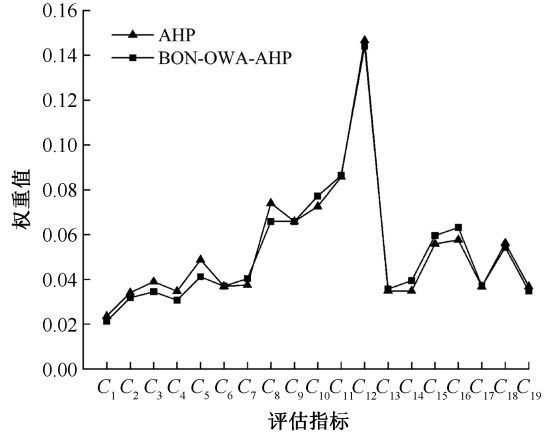


图 3 BON-OWA-AHP 和 AHP 的计算结果对比
Fig. 3 Comparison of calculation results of BON-OWA-AHP and AHP

占权重分别为 0.0934、0.0862、0.0834、0.0789,在 19 个评估指标中,所占权重较大,对消防员训练损伤风险等级的影响较大,可以多注意加强这 4 个方面的管理。

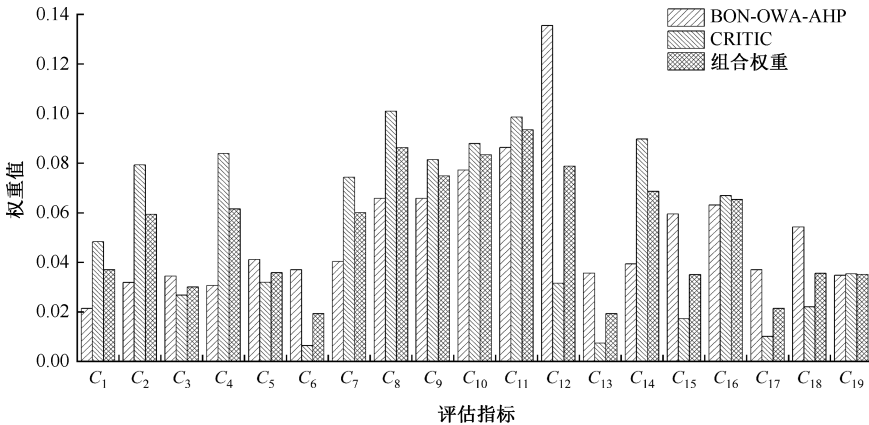


图 4 权重计算结果对比
Fig. 4 Comparison of weight calculation results

3.2 云模型运算

根据式(9)计算各等级区间相应标准云模型的特征值见表 2。根据标准云模型的特征值,利用 Matlab 生成标准云图,如图 5 所示。

表 2 风险等级及其对应的云模型

Tab. 2 Risk level and corresponding cloud model

风险等级	等级区间	云模型特征值
高度风险	[0,25]	(12.5,4.2,0.42)
较高风险	(25,50]	(37.5,4.2,0.42)

续表 2

风险等级	等级区间	云模型特征值
中度风险	(50,75]	(62.5,4.2,0.42)
一般风险	(75,90]	(82.5,2.5,0.25)
稍有风险	(90,100]	(95.0,1.7,0.17)

另外,由消防队一线指战员对 5 个训练情景下的指标风险状况分别打分,采取百分制,分数越低代表风险越高。按照式(10)计算指标的云模型特征值 $C_j(E_{x_j}, E_{n_j}, H_{e_j})$; 情景 1 的二级指标的云模型特

征值计算结果见表 3。

表 3 情景 1 的评估指标及其云模型

Tab. 3 Evaluation indexes and cloud model of scenario 1

评估指标	$C_j(E_{sj}, E_{nj}, H_{ej})$
C_1	(90.8, 2.45, 1.12)
C_2	(93.1, 3.60, 1.14)
C_3	(92.2, 3.55, 0.41)
C_4	(85.0, 1.75, 0.96)
C_5	(77.1, 2.93, 0.54)
C_6	(92.2, 4.01, 1.67)
C_7	(91.4, 1.60, 0.60)
C_8	(85.0, 2.50, 0.62)
C_9	(87.6, 3.01, 1.20)
C_{10}	(90.0, 1.75, 0.50)
C_{11}	(80.0, 1.00, 0.57)
C_{12}	(90.0, 1.75, 0.84)
C_{13}	(85.9, 3.88, 0.88)
C_{14}	(89.1, 1.43, 1.36)
C_{15}	(92.0, 3.78, 1.61)
C_{16}	(87.6, 3.61, 1.11)
C_{17}	(88.0, 1.75, 0.69)
C_{18}	(90.5, 2.26, 0.61)
C_{19}	(90.0, 1.50, 0.20)

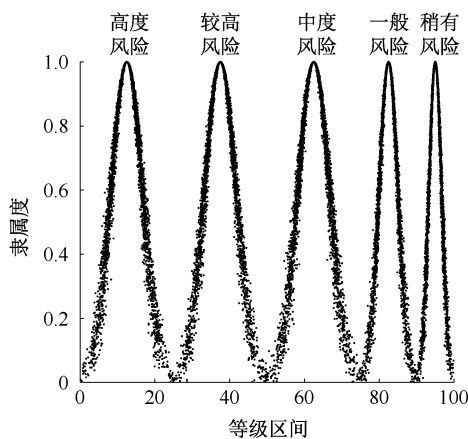


图 5 风险评估等级标准云图

Fig. 5 Standard cloud chart of risk assessment level

根据式(11),计算情景 1 下的消防员训练损伤风险评估的综合云特征值为 $C(87.9, 2.50, 0.89)$ 。使用 Matlab 生成综合云图,如图 6 所示。

由图 6 可知:情景 1 下消防员训练损伤的风险等级为一般风险。同时,采用模糊综合评判模型评估情景 1 下的消防员训练损伤风险等级,所得综合

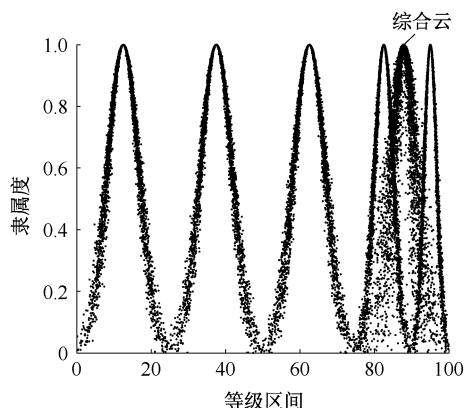


图 6 情景 1 的综合评估云图

Fig. 6 Comprehensive evaluation cloud chart of scenario 1

评价向量为 $(0, 0, 0.0415, 0.6770, 0.2815)$, 根据最大隶属度原则,消防员训练损伤风险等级也为一般风险,所得结果与云模型综合评估结果一致,证明该方法应用于消防员训练损伤风险评估,具备一定的科学性和有效性。

同理,计算出情景 2-5 的综合云特征值为 $(84.3, 3.17, 1.48)$ 、 $(87.5, 4.44, 1.32)$ 、 $(84.6, 5.06, 1.20)$ 、 $(86.5, 4.74, 1.59)$ 。利用 Matlab 软件生成云图,可判断出情景 2-5 对应的消防员训练损伤风险等级也均为一般风险,且都与采用模糊综合评判模型评估的结果一致。

4 结 论

1) 以 BON-OWA 算子和 AHP 法相结合来计算指标的主客观权重,考虑指标间的相互关系,有助于提高主客观权重的准确性。

2) 训练装备战技性能状况、动作标准度、训练场地质量护具配备情况所占权重分别为 0.093 4、0.086 2、0.083 4、0.078 9,在 19 个评估指标中,所占权重较大。在这 4 方面加强管理,可以降低训练损伤发生的风险。

3) 引用博弈论组合赋权法及云模型理论,构建消防员训练损伤风险评估模型,应用结果表明:5 种训练情景下消防员的训练损伤风险等级均为一般风险,所得结果与模糊综合评估结果一致,证明该模型具备一定的科学性。

参 考 文 献

[1] 张立安,王慧飞,欧珏,等. 消防员职业安全健康风险及保障措施研究现状与建议[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(2):163-168.

- ZHANG Li'an, WANG Huifei, OU Jue, et al. Research status and suggestions on occupational safety and health risks and safeguard measures of firefighters[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2021,38(2):163-168.
- [2] 董凯, 朱国庆, 宋春景, 等. 消防员职业损伤因子及对策研究[J]. *消防科学与技术*, 2022,41(6):851-855.
DONG Kai, ZHU Guoqing, SONG Chunjing, et al. Research on occupational injury factors of firefighters and countermeasures[J]. *Fire Science and Technology*, 2022,41(6):851-855.
- [3] MARSH S M, GWILLIAM M, KONDA S, et al. Nonfatal injuries to firefighters treated in U. S. emergency departments, 2003-2014[J]. *American Journal of Preventive Medicine*, 2018,55(3):353-360.
- [4] TRIVISONNO A J, LAFFAN M R, GIULIANI H K, et al. The influence of age on the recovery from worksite resistance exercise in career firefighters[J]. *Experimental Gerontology*, 2021,152:DOI:10.1016/j.exger.2021.111467.
- [5] COURTNEY J B, LIPSEY T, BRAUN B, et al. Using ecological momentary assessment to examine the effects of duty status on acute stress and tiredness in firefighters[J]. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 2020,62(10):859-870.
- [6] 薛晓东, 李振华. 消防业务训练安全风险评价指标体系构建[J]. *中国人民警察大学学报*, 2013,29(4):21-24.
XUE Xiaodong, LI Zhenhua. The construction of safety risk indicators system to evaluate the fire service training[J]. *Journal of China People's Police University*, 2013,29(4):21-24.
- [7] 张渺. G1-EW 组合赋权云模型下地铁运营安全风险评价[J]. *中国安全科学学报*, 2022,32(6):163-170.
ZHANG Miao. Risk assessment of metro operation based on G1-EW combination weighting cloud model[J]. *China Safety Science Journal*, 2022,32(6):163-170.
- [8] 刘杰, 马倩, 王婉青, 等. 基于组合赋权-云模型的地下矿山中毒窒息事故评估[J]. *昆明理工大学学报:自然科学版*, 2022,47(6):43-52.
LIU Jie, MA Qian, WANG Wanqing, et al. Cloud model evaluation of poisoning and suffocation accidents in underground mines based on combined weighting[J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology: Natural Science*, 2022,47(6):43-52.
- [9] YAGER R R. On generalized Bonferroni mean operators for multi-criteria aggregation[J]. *International Journal of Approximate Reasoning*, 2009,50(8):1 279-1 286.
- [10] 张哲. 消防员职业健康风险评估方法的研究与应用[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2018.
ZHANG Zhe. Research and application of occupational health risk assessment methods for firefighters[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2018.
- [11] 傅慧鸣. 军事教学训练活动安全风险综合评估问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2020.
FU Huiming. Research on the comprehensive assessment of safety risk in the military teaching and training activities[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2020.
- [12] 王煜, 徐泽水. OWA 算子赋权新方法[J]. *数学的实践与认识*, 2008,38(3):51-61.
WANG Yu, XU Zeshui. A new method of giving OWA weights[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2008,38(3):51-61.
- [13] 周英豪, 王文杰, 卢西洲, 等. 岩爆灾害博弈论组合赋权预测模型及应用[J]. *中国安全科学学报*, 2022,32(7):105-112.
ZHOU Yinghao, WANG Wenjie, LU Xizhou, et al. Combination weighting prediction model and application of rock burst disaster based on game theory[J]. *China Safety Science Journal*, 2022,32(7):105-112.
- [14] GA/T 967—2011, 消防训练安全要则[S].
GA/T 967-2011, Guide for fire training safety[S].
- [15] ZHAN Yejun, XUE Wei. Influence of swimming athletes' sports psychological fatigue on sports performance[J]. *Revista De Psicologia Del Deporte*, 2022,31(2):229-238.

作者简介: 陈娜 (1981—), 女, 河南南阳人, 博士, 副教授, 主要从事安全人机、应急管理等方面的研究。
E-mail: nchen@zzu.edu.cn。