

谢尊贤, 张李慧, 蔡二柱. 基于 G2 赋权-云模型的体育馆消防安全风险评价研究[J]. 智能计算机与应用, 2026, 16(3): 34-41. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.24042101

# 基于 G2 赋权-云模型的体育馆消防安全风险评价研究

谢尊贤<sup>1,2</sup>, 张李慧<sup>1</sup>, 蔡二柱<sup>3</sup>

(1 西安建筑科技大学 资源工程学院, 西安 710055; 2 西安建筑科技大学 高教研究所, 西安 710055;

3 中建八局第二建设有限公司, 济南 250100)

**摘要:** 为准确掌握体育馆消防安全风险状况, 有效预防和减少体育馆消防安全风险事故发生, 本文在综合分析影响体育馆消防安全风险因素的基础上, 运用 DEMATEL 方法创新性地构建了体育馆消防安全风险评价指标体系, 涵盖人员、管理、设备、疏散和建筑安全 6 个一级指标以及 29 个二级指标; 同时, 将 G2 赋权法和云模型有机结合, 构建了基于 G2 赋权-云模型的体育馆消防安全风险评价模型; 最后, 运用该模型对西安某大型体育馆的消防安全状况进行了实证研究。结果表明: 该体育馆消防安全风险等级为 I 级, 即“安全”的评价结果, 与实际情况相符。以云图的方式直观展示数据的分布和特征, 适应不同类型和规模的数据集, 有效分析小样本数据与大规模数据, 满足体育馆消防安全风险复杂多变的环境需求。验证模型科学合理、高度适用。为体育馆消防安全风险评价提供了一种方法。

**关键词:** 体育馆; 安全风险评价; 消防安全; G2 赋权; 云模型

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-2163(2026)03-0034-08

## Research on fire safety risk evaluation of gymnasiums based on G2 interval weighting-cloud model

XIE Zunxian<sup>1,2</sup>, ZHANG Lihui<sup>1</sup>, CAI Erzhu<sup>3</sup>

(1 School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2 Higher Education Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

3 China Construction Eighth Bureau Second Construction Co., Ltd., Jinan 250100, China)

**Abstract:** In order to accurately grasp the fire safety risk status of gymnasiums and effectively prevent and reduce the occurrence of fire safety risk accidents in gymnasiums, the article, on the basis of comprehensively analysing the risk factors affecting the fire safety of gymnasiums, innovatively constructs a gymnasium fire safety risk assessment index system consisting of 29 secondary indicators and 6 primary indicators covering the safety of personnel, management, equipment, evacuation and building. At the same time, the G2 assignment method and the cloud model are combined organically to construct a safety risk assessment model of the gymnasium based on the G2 assignment-cloud model; finally, the model is used to conduct an empirical study on the fire safety status of a large gymnasium in Xi'an. The results show that the fire safety risk level of the gymnasium is I, which means the assessment result of 'safety' is consistent with the actual situation. The distribution and characteristics of the data are visualised in the form of cloud diagrams, which can be adapted to different types and sizes of datasets, effectively analysing small-sample data and large-scale data, and meeting the needs of the complex and changing environment of the fire safety risk of the gymnasium. The validation model is scientific, reasonable and highly applicable. The fruits provides a method for fire safety risk assessment of gymnasiums.

**Key words:** gymnasiums; safety risk assessment; fire safety; G2 interval weighting; cloud model

## 0 引言

体育馆是开展体育赛事及相关活动的大型人员

密集型场所, 其消防安全出现问题, 就可能导致群死群伤的重大安全事故。近年来, 也会国内外体育馆因消防安全问题导致事故发生的案例, 造成了大量

**基金项目:** 陕西省社会科学重大理论与现实问题研究 2022 年度研究项目(2022ND0438); 陕西省体育局 2021 年常规课题(202107)。

**作者简介:** 谢尊贤(1966—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 安全科学与工程, 公共管理, 管理科学与工程等。Email: xzxie@foxmail.com;

张李慧(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 消防安全风险评价; 蔡二柱(1996—), 男, 硕士, 主要研究方向: 风险预警。

收稿日期: 2024-04-21

哈尔滨工业大学主办 ◆ 学术研究与应用

人员伤亡和财产损失。因此,加强体育馆消防安全管理,及时评价体育馆消防风险水平高低,整改安全风险隐患,对于预防和减少体育馆消防安全事故的发生至关重要。学者们对于体育馆消防安全方面的研究集中于仿真模拟:赵伟刚等学者<sup>[1]</sup>建立体育馆火灾场景判定消防设备安全性,第一次全面总结了体育馆消防安全策略。卢春艳等学者<sup>[2]</sup>以消防性能化分析法搭建体育馆火灾场景数值仿真,优化消防设计方案,为体育馆防排烟设计提供参考。虽然在体育馆消防安全评价方面也有学者进行了一定研究:徐一旻等学者<sup>[3]</sup>首次将体育馆动静态指标相结合,借助物联网传感器以获取体育馆设施设备的动态实时指标数据,结合AHP-FCE法实时评价体育馆的消防安全风险。尚明鹏等学者<sup>[4]</sup>改进模型算法提高对环境复杂大空间建筑工厂火灾的识别能力。Zhang等学者<sup>[5]</sup>通过疏散模拟程序重点识别火灾疏散距离和时间,提出了升级室内体育馆运行和建筑条件的方法。Liu等学者<sup>[6]</sup>使用计算机模拟程序,通过演示虚拟烟雾扩散和火灾行为,量化疏散完成时间和疏散阈值时间来提升消防系统性能。但目前尚未有研究文献从整体评价流程的系统性视角出发,同时针对评价指标体系的系统性和评价模型的系统性两方面深入优化,以对体育馆的消防安全风险进行全面综合的评价。

云模型以云图的方式直观展示数据的分布和特征,评价结果更直观易懂。戴剑勇等学者<sup>[7]</sup>采用了网络云模型法来评估尾矿库溃坝的安全性,成功挖掘出在较高风险层级下起决定性作用的风险指标。张鹏等学者<sup>[8]</sup>通过熵权云模型法对石拱桥的技术状况做出了风险评估,为石拱桥的维护工作提供了科学指导。Ju等学者<sup>[9]</sup>开创性地将灾害诱发因素纳入施工安全风险评估,结合博弈论和扩展云论的风险评估模型有效地监测施工安全风险,并提供早期预警。这些研究都表明,云模型作为一种将定性与定量相结合的有效方法,在风险评价中发挥着重要作用。特别是经过赋权优化后的云模型,能够更全面地揭示各种风险因素之间的内在联系与复杂性。因此,本文针对影响体育馆消防安全风险的因素复杂的特点,构建体育馆消防安全风险评价指标体系,运用决策实验室法筛选优化指标,并将客观性强的G2赋权法与结果可通过云图显示的所见即所得的定性定量相结合的云模型有机结合,构建基于G2赋权云模型的风险评价模型,首次应用于体育馆消防安全评价领域。以期通过系统评价体育馆消防

安全风险高低,判定其所处安全风险等级并提出针对性的提升改进措施,为提升体育馆消防管理水平提供参考。

## 1 体育馆消防安全风险评价指标体系构建及等级划分

### 1.1 体育馆消防安全风险评价指标体系构建

在实地调研、查阅文献及征求专家意见的基础上,初步构建出体育馆消防安全风险评价指标体系框架,借助决策实验室方法进一步细化和筛选指标,确立了由6个核心一级指标和29个二级指标组成的综合评价指标体系,详见表1。

### 1.2 体育馆消防安全风险评价等级划分

根据《体育场馆公共安全通用要求》、《体育场馆安全管理与服务规范》、《体育建筑设计规范》、《建筑设计防火规范》等国家及行业标准规范,在综合业内专家的意见和建议后,将体育馆的消防安全风险状态划分为5个层级,定义为集合 $L = \{L_1, L_2, L_3, L_4, L_5\} = \{\text{安全, 较安全, 中等, 较危险, 危险}\}$ <sup>[10]</sup>,具体等级划分见表2。

## 2 基于G2赋权-云模型的消防安全风险评价模型构建

### 2.1 云模型

云模型依托于模糊数学与计算机语言基础,实现定性描述与相应定量数据间的不确定性转换,引入“云”的理念。在此设定下,论域中的每个元素,都是对某一定性概念某次随机呈现的量化反映,而该元素对于这一概念的隶属程度,则表达为一个具有稳定趋向的随机数。简而言之,“云”代表了一种从论域到 $[0, 1]$ 区间的对应关系,其在数域中形成的分布形态,而其内每一点均可被视作一个云滴<sup>[11]</sup>。

云模型可通过3个数字特征值来量化表示,期望(Ex)、熵(En)和超熵(He),形式通常为 $(Ex, En, He)$ <sup>[12]</sup>。Ex反映了云模型中所有数据点的平均位置或中心倾向,对应于论域的某个定量值,代表该定性概念的核心信息,同时也是云图中隶属度最高的点,即云图的顶点;En体现定性概念的裕度,不仅能表示“云滴”的离散程度,又能表示“云滴”的取值范围;He是En的熵,反映了隶属度的不确定性<sup>[13]</sup>。以 $(0.5, 0.1, 0.1)$ 为云参数,1500个云滴为例生成的正态云图如图1所示。

表1 体育馆消防安全风险评价指标体系及相关计算值

Table 1 Gymnasium safety risk assessment index system and related calculated values

一级指标 $c_i$	权重 ( $w_i$ )	云模型参数 ( $Ex_i, En_i, He_i$ )	二级指标 $c_{ij}$	权重 ( $w_{ij}$ )	云模型参数 ( $Ex_{ij}, En_{ij}, He_{ij}$ )			
人员安全因素 $c_1$	0.157 8	(0.809 2, 0.066 5, 0.004 8)	管理人员安全意识 $c_{11}$	0.350 5	(0.800 1, 0.092 7, 0.002 9)			
			管理人员应急考核水平 $c_{12}$	0.349 8	(0.781 1, 0.057 7, 0.004 3)			
			消防控制室人员在岗情况 $c_{13}$	0.299 7	(0.852 8, 0.042 8, 0.007 9)			
管理安全因素 $c_2$	0.197 5	(0.833 6, 0.055 2, 0.010 2)	管理安全责任体系建设 $c_{21}$	0.160 2	(0.852 8, 0.042 8, 0.007 9)			
			安全管理制度 $c_{22}$	0.180 6	(0.806 2, 0.054 2, 0.016 2)			
			安全知识培训 $c_{23}$	0.140 9	(0.816 4, 0.046 7, 0.003 1)			
			设施设备检查与维护 $c_{24}$	0.182 5	(0.870 9, 0.056 5, 0.014 2)			
			安全应急预案与演练 $c_{25}$	0.173 2	(0.850 1, 0.038 2, 0.012 4)			
			安防体系完成性 $c_{26}$	0.161 7	(0.800 1, 0.092 7, 0.002 9)			
			设备安全因素 $c_3$	0.171 1	(0.966 1, 0.044 0, 0.011 6)	火灾探测报警系统 $c_{31}$	0.135 1	(0.989 5, 0.037 2, 0.011 2)
自动喷淋系统 $c_{32}$	0.146 4	(0.950 1, 0.035 2, 0.012 5)						
消火栓系统与灭火器 $c_{33}$	0.167 2	(0.980 9, 0.043 7, 0.010 1)						
声光报警设备 $c_{34}$	0.163 2	(0.974 9, 0.052 5, 0.013 8)						
排烟、通风系统 $c_{35}$	0.135 1	(0.970 9, 0.056 7, 0.014 1)						
应急照明设备 $c_{36}$	0.145 7	(0.972 8, 0.042 5, 0.008 1)						
设施设备耐火性能 $c_{37}$	0.106 2	(0.906 5, 0.034 5, 0.012 1)						
疏散安全因素 $c_4$	0.184 1	(0.989 6, 0.043 5, 0.009 4)				疏散指示标志设置 $c_{41}$	0.274 3	(0.992 5, 0.052 4, 0.008 2)
						广播疏散诱导系统 $c_{42}$	0.201 6	(0.982 4, 0.033 5, 0.010 9)
			安全疏散路线设计合理性 $c_{43}$	0.228 0	(0.992 5, 0.052 4, 0.008 2)			
			疏散通道与安全出口设置 $c_{44}$	0.296 1	(0.989 5, 0.035 2, 0.010 5)			
建筑安全因素 $c_5$	0.157 8	(0.988 5, 0.049 7, 0.011 3)	通道防火间距 $c_{51}$	0.197 1	(0.990 8, 0.054 5, 0.010 9)			
			地面、建筑材料耐火等级 $c_{52}$	0.167 9	(0.983 2, 0.042 6, 0.009 1)			
			看台、墙体牢靠性 $c_{53}$	0.226 3	(0.990 5, 0.042 1, 0.010 1)			
			火灾荷载密度 $c_{54}$	0.213 5	(0.980 2, 0.057 2, 0.013 1)			
			水平防火分区合理性 $c_{55}$	0.195 3	(0.997 5, 0.051 3, 0.012 8)			
环境安全因素 $c_6$	0.131 7	(0.900 0, 0.058 9, 0.010 9)	选址合理性 $c_{61}$	0.233 9	(0.913 5, 0.061 9, 0.011 1)			
			体育场地布置合理性 $c_{62}$	0.212 9	(0.915 4, 0.054 4, 0.012 9)			
			明火规范使用情况 $c_{63}$	0.276 7	(0.882 1, 0.071 7, 0.010 2)			
			消防救援队到达时间 $c_{64}$	0.276 5	(0.882 3, 0.045 9, 0.007 8)			

表2 体育馆消防安全风险等级划分

Table 2 Classification of fire safety risk in gymnasiums

风险等级	对应符号	安全等级	云模型参数 ( $Ex, En, He$ )	风险水平
I	$L_1$	安全	(1.000 0, 0.103 1, 0.026 2)	风险可忽略:消防水平处于安全状态
II	$L_2$	较安全	(0.691 0, 0.063 7, 0.016 2)	风险可接受:消防安全局部风险,需采取一定措施
III	$L_3$	中等	(0.500 0, 0.039 4, 0.010 0)	风险较大:消防安全风险一般,需及时整改
IV	$L_4$	较危险	(0.309 0, 0.063 7, 0.016 2)	风险极高:消防安全重大疏漏,需全面整改
V	$L_5$	危险	(0.000 0, 0.103 1, 0.026 2)	风险不可接受:消防安全严重威胁,需停业整改

云模型利用云发生器作为桥梁,连接定性与定量,进而实现二者转换。云发生器主要分为正向和逆向两类,正向云发生器负责将抽象的定性概念转化为具体的定量数据,也就是将概念性的内容转换

成一系列具体的“云滴”数据。其计算步骤如下:

(1) 确定正态随机数 ( $En'$ )。计算公式如下:

$$En' = randn(1)He + En \quad (1)$$

(2) 确定正态随机数 ( $x$ )。计算公式如下:

$$x = \text{randn}(1)En' + Ex \quad (2)$$

其中,  $x$  表示自然语言的定性概念在论域  $U$  中经过一次转换后所获得的具体数值。

(3) 确定隶属度 ( $T(x)$ )。计算公式如下:

$$T(x) = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En')^2}} \quad (3)$$

其中,  $T(x)$  表示该数值  $x$  隶属于相应语言值的程度。

(4) 重复  $N$  次: 本文取  $N = 1\,500$ , 即可得到其云模型图像。

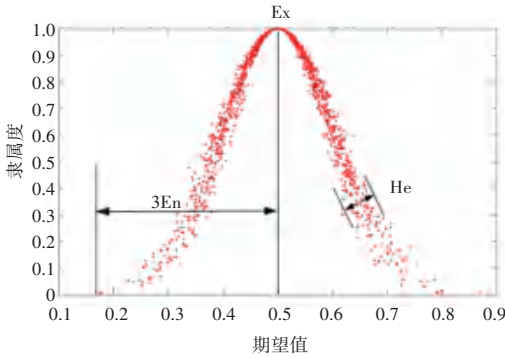


图1 正态云图模型图

Fig. 1 Normal cloud chart model diagram

逆向云发生器与正向云发生器的工作原理相反,通过对“云滴”数据进行统计分析,来推算云模型的  $Ex, En$  和  $He$ , 实现从定量数据到定性概念的转换。研究推得的公式为:

$$\begin{cases} \uparrow Ex = \bar{x} \\ \uparrow En = \frac{\sqrt{\pi/2}}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - Ex| \\ \uparrow He = \sqrt{s^2 - (En)^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $n$  表示云滴样本数量;  $s^2$  表示方差, 可由下式进行计算:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (5)$$

## 2.2 G2 赋权法指标权重确定

G2 赋权法<sup>[14]</sup>是一种贴近实际应用的区间映射权重分配方法。与其他赋权方法相比, G2 赋权法通过数据驱动确定各评价指标权重, 减少了人为因素在权重赋值过程中的影响, 能够适应不同类型和不同规模的数据集, 有效分析小样本数据与大规模数据<sup>[15]</sup>。

(1) 确定最不重要指标  $z_{ht}$ 。若专家组对评价指标集合中存在一致认为最不重要的指标, 将共同选定该指标, 并将其从原集合中移除, 形成新的评价指标集合  $\{z_{h1}, z_{h2}, \dots, z_{ht}\}$ 。

(2) 区间赋值。专家将按照 1~9 标度划分的相

对重要度赋值表<sup>[16]</sup>, 为各指标之间的相对重要度给出比值。研究将此比值记为  $a_g^{(l)}$ , 并根据该比值给出的区间赋值为  $D_g^{(l)} = [d_{1g}^{(l)}, d_{2g}^{(l)}]$ , 其中  $g = 1, 2, \dots, t; l = 1, 2, \dots, L$ 。据此, 可以为每个指标构造一个闭区间集, 具体表示为:

$$D_g = \bigcap_{l=1}^L D_g^{(l)} = [d_{1g}, d_{2g}] \quad (6)$$

其中,  $D_g \neq \phi$ ;  $d_{1g}, d_{2g}$  分别表示区间  $D_g$  的左端点和右端点, 对比可以表示为:

$$d_{1g} = \begin{cases} \max\{d_{1g}^{(l)}\} \\ 1 \leq l \leq L \end{cases}, d_{2g} = \begin{cases} \min\{d_{2g}^{(l)}\} \\ 1 \leq l \leq L \end{cases} \quad (7)$$

(3) 确定专家风险态度因子 ( $\lambda_g$ )。定义公式如下:

$$\lambda_g = \frac{1}{2L} \sum_{l=1}^L \frac{n(D_g^{(l)})}{n(D_g^*)}, g = 1, 2, \dots, t \quad (8)$$

其中,  $n(D_g^{(l)})$  表示赋值区间  $D_g^{(l)}$  的中点;  $n(D_g^*)$  表示赋值区间  $D_g^*$  的中点, 该赋值区间  $D_g^* = [d_{1g}^*, d_{2g}^*]$ , 区间  $D_g^*$  左右端点取值满足条件:

$$d_{1g}^* = \begin{cases} \min\{d_{1g}^{(l)}\} \\ 1 \leq l \leq L \end{cases}, d_{2g}^* = \begin{cases} \max\{d_{2g}^{(l)}\} \\ 1 \leq l \leq L \end{cases}; D_g^* \neq \phi \quad (9)$$

(4) 确定专家风险态度因子映射函数 ( $f_{\lambda_g}$ )。

记  $f_{\lambda_g}$  为  $\lambda_g$  的区间映射函数, 则有:

$$f_{\lambda_g}(D_g) = n(D_g) + \lambda e(D_g) \quad (10)$$

进一步可以推得:

$$n(D_g) = (d_{1g} + d_{2g})/2$$

其中,  $n(D_g)$  表示综合赋值区间  $D_g$  的中点。

同时推得:

$$e(D_g) = d_{2g} - d_{1g}$$

其中,  $e(D_g)$  表示  $D_g$  的区间长度。

(5) 确定评价指标权重 ( $w_g$ )。数学定义公式如下:

$$w_g = \frac{f_{\lambda_g}(D_g)}{\sum_{g=1}^t f_{\lambda_g}(D_g)} \quad (11)$$

## 2.3 云模型参数确定

(1) 二级指标的云模型参数确定。通过二级指标的最小和最大边约束的计算, 确定其云模型参数: 期望值、熵值和超熵值。用到的公式为:

$$\begin{cases} \uparrow Ex_{ij} = \frac{Ex_{ij(\min)} En_{ij(\min)} + Ex_{ij(\max)} En_{ij(\max)}}{En_{ij(\min)} + En_{ij(\max)}} \\ \uparrow En_{ij} = En_{ij(\min)} + En_{ij(\max)} \\ \uparrow He_{ij} = \frac{He_{ij(\min)} En_{ij(\min)} + He_{ij(\max)} En_{ij(\max)}}{En_{ij(\min)} + En_{ij(\max)}} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $Ex_{ij(\min)}, En_{ij(\min)}, He_{ij(\min)}$  分别表示二级指标双边约束最小边云模型的期望值、熵值和超熵值,

这里  $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n; Ex_{ij(\max)}, En_{ij(\max)}, He_{ij(\max)}$  则对应于最大边云模型的相应参数<sup>[17]</sup>。

(2)一级指标的云模型参数确定。通过综合各二级指标的云参数及权重,确定一级指标的云模型参数。对此可以表示为:

$$\begin{aligned} \uparrow Ex_i &= \frac{Ex_{i1}w_{i1} + Ex_{i2}w_{i2} + \dots + Ex_{in}w_{in}}{w_{i1} + w_{i2} + \dots + w_{in}} \\ \uparrow En_i &= \frac{w_{i1}^2}{w_{i1}^2 + w_{i2}^2 + \dots + w_{in}^2}En_{i1} + \\ &\frac{w_{i2}^2}{w_{i1}^2 + w_{i2}^2 + \dots + w_{in}^2}En_{i2} + \dots + \\ &\frac{w_{in}^2}{w_{i1}^2 + w_{i2}^2 + \dots + w_{in}^2}En_{in} \\ \uparrow He_i &= \frac{w_{i1}^2}{w_{i1}^2 + w_{i2}^2 + \dots + w_{in}^2}He_{i1} + \\ &\frac{w_{i2}^2}{w_{i1}^2 + w_{i2}^2 + \dots + w_{in}^2}He_{i2} + \dots + \\ &\frac{w_{in}^2}{w_{i1}^2 + w_{i2}^2 + \dots + w_{in}^2}He_{in} \end{aligned} \quad (13)$$

其中,对于某一级指标,其云模型参数分别为  $Ex_i, En_i, He_i$ , 这些参数是通过综合其下属各二级指标的云模型参数 ( $Ex_{i1}, Ex_{i2}, \dots, Ex_{in}, En_{i1}, En_{i2}, \dots, En_{in}, He_{i1}, He_{i2}, \dots, He_{in}$ ) 以及各二级指标的权重来得到的<sup>[18]</sup>。

(3)综合云模型参数确定。结合各一级指标的云参数和权重,可得体育馆消防安全风险综合云参数 ( $Ex, En, He$ )。研究推得的公式为:

$$\begin{aligned} \uparrow Ex &= \frac{Ex_1w_1 + Ex_2w_2 + \dots + Ex_mw_m}{w_1 + w_2 + \dots + w_m} \\ \uparrow En &= \frac{w_1^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_m^2}En_1 + \\ &\frac{w_2^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_m^2}En_2 + \dots + \\ &\frac{w_m^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_m^2}En_m \\ \uparrow He &= \frac{w_1^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_m^2}He_1 + \\ &\frac{w_2^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_m^2}He_2 + \dots + \\ &\frac{w_m^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_m^2}He_m \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $Ex, En, He$  表示通过综合考虑各个一级指标的云模型参数 (即  $Ex_1, Ex_2, \dots, Ex_m, En_1, En_2, \dots, En_m, He_1, He_2, \dots, He_m$ ) 以及各一级指标的

权重来得出的<sup>[19]</sup>。

### 2.4 安全风险等级确定

为了明确界定安全风险级别,在评价体育馆消防安全风险时,将评语集细分为双边约束和单边约束两类,分别对应图2中的  $L2, L3, L4$  区间和图2中的  $L1, L5$  区间<sup>[20]</sup>。通过计算来确定云模型的各项参数,计算公式如下:

$$\begin{aligned} \uparrow Ex'_s &= \frac{T_{s(\max)} + T_{s(\min)}}{2} \\ \uparrow En'_s &= \frac{T_{s(\max)} - T_{s(\min)}}{6} \\ \uparrow He'_s &= k \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $T_{s(\max)}$  表示双边约束中的上限;  $T_{s(\min)}$  表示双边约束的下限;  $s (s = 1, 2, \dots, p)$  表示安全风险等级个数;  $k$  表示常数,通常取值为  $(0.001 \sim 0.1)$ , 根据评语本身的模糊程度变化可以进行调整<sup>[21]</sup>。

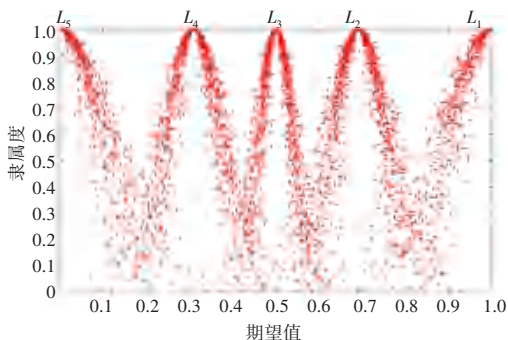


图2 评语集云模型图

Fig. 2 Comment model cloud diagram

为实现更加合理且精准的区间划分,运用黄金分割法,对评语集进行科学分区。选定论域  $[0, 1]$  的中心点 0.5, 以此代表中等安全风险评价状态, 即  $Ex'_3 = 0.5$ , 取  $He'_3 = 0.01$ 。基于此确定 II 级安全风险等级的云模型参数, 具体如下:

$$\begin{aligned} \uparrow Ex'_2 &= Ex'_3 + \frac{(1 - 0.618)(x_{\max} + x_{\min})}{2} = 0.691 \\ \uparrow En'_2 &= \frac{(1 - 0.618)(x_{\max} - x_{\min})}{6} = 0.0637 \\ \uparrow He'_2 &= \frac{He_3}{0.618} = 0.0162 \end{aligned} \quad (16)$$

其中,  $x_{\max}$  表示论域的上限,  $x_{\min}$  表示论域的下限。I 级“安全”风险等级和 V 级“危险”风险等级期望值分别对应  $Ex'_1 = 1, Ex'_5 = 0$ , 根据逻辑和计算方式, 求得其他安全风险等级的云模型参数, 见表 2。结合体育馆消防安全的云模型参数, 运用 Matlab 编写正向云发生器程序, 绘制包含  $N = 1500$  个“云滴”的云模型图, 见图 2。将此云图与评语集的云图进行对比分析, 从而

判定体育馆的安全风险等级。

### 3 实证研究

本文以西安某大型体育馆为实例,对该体育馆的消防安全风险状况进行了全面评价,并确定了其消防安全风险等级。

#### 3.1 评价指标权重确定

(1) 计算二级指标权重。特邀5位专家,对各项评价指标的重要度进行专业赋值。以“环境安全因素  $c_6$ ”一级指标为例,5位专家一致判定,“管理人员安全意识  $c_{62}$ ”在该类指标中相对重要性较低。因此,选用这一指标作为参照,对其他二级指标进行逐一比较与赋值。专家们对  $c_6$  中各二级指标  $c_{6j}$  的重要度赋值见表3。

表3 专家对  $c_6$  各二级指标的重要度赋值

专家	$c_{61}$	$c_{62}$	$c_{63}$	$c_{64}$
$e_1$	(1.0,1.1)	(1.0,1.0)	(1.0,1.3)	(1.0,1.4)
$e_2$	(1.0,1.1)	(1.0,1.0)	(1.0,1.3)	(1.1,1.4)
$e_3$	(1.0,1.2)	(1.0,1.0)	(1.1,1.4)	(1.0,1.5)
$e_4$	(1.0,1.2)	(1.0,1.0)	(1.1,1.4)	(1.1,1.5)
$e_5$	(1.0,1.1)	(1.0,1.0)	(1.0,1.3)	(1.0,1.3)

表4 专家对各一级指标的重要度赋值

Table 4 Experts' value of importance of each first-level indicator

专家	$c_1$	$c_2$	$c_3$	$c_4$	$c_5$	$c_6$
$e_1$	(1.0,1.2)	(1.2,1.5)	(1.1,1.4)	(1.2,1.5)	(1.0,1.2)	(1.0,1.0)
$e_2$	(1.0,1.3)	(1.3,1.6)	(1.1,1.3)	(1.3,1.7)	(1.0,1.3)	(1.0,1.0)
$e_3$	(1.1,1.3)	(1.2,1.5)	(1.2,1.4)	(1.2,1.4)	(1.1,1.3)	(1.0,1.0)
$e_4$	(1.1,1.4)	(1.3,1.6)	(1.2,1.5)	(1.2,1.5)	(1.1,1.4)	(1.0,1.0)
$e_5$	(1.0,1.3)	(1.2,1.5)	(1.2,1.5)	(1.3,1.7)	(1.0,1.3)	(1.0,1.0)

#### 3.2 云模型参数确定

(1) 二级指标的云模型参数确定。特邀10位业内专家,对指标进行1分制的区间赋分。为阐述指标云

表5 环境安全因素  $c_6$  各二级指标双边约束评分值

Table 5 Bilateral constraint scores of secondary indicators of environmental safety factor  $c_6$

指标专家	$c_{61}$		$c_{62}$		$c_{63}$		$c_{64}$	
	min	max	min	max	min	max	min	max
$e_1$	0.82	0.92	0.92	0.98	0.87	0.96	0.90	0.96
$e_2$	0.80	0.89	0.80	0.89	0.80	0.90	0.78	0.87
$e_3$	0.85	0.94	0.85	0.90	0.87	0.97	0.83	0.90
$e_4$	0.85	0.93	0.88	0.97	0.88	0.97	0.86	0.95
$e_5$	0.84	0.92	0.86	0.96	0.89	0.98	0.84	0.92
$e_6$	0.86	0.95	0.85	0.94	0.86	0.95	0.78	0.88
$e_7$	0.85	0.95	0.86	0.97	0.90	0.99	0.84	0.95
$e_8$	0.80	0.91	0.87	0.98	0.85	0.94	0.83	0.92
$e_9$	0.88	0.97	0.90	0.99	0.92	0.99	0.89	0.98
$e_{10}$	0.84	0.93	0.88	0.96	0.89	0.98	0.86	0.92

由式(3)并结合逆向云发生模拟器,可求解各指标的双边约束云模型参数值。以二级指标  $c_{61}$  为例,计算得出对应的最小边云参数为(0.853 3,

根据赋值,由式(12)计算指标  $c_{61}$  专家风险态度因子为:

$$\lambda_1 = \frac{1}{2 \times 5} \left\{ \frac{61/2(1.0 + 1.1)}{61/2(1.0 + 1.2)} + \frac{61/2(1.0 + 1.1)}{61/2(1.0 + 1.2)} + \dots + \frac{61/2(1.0 + 1.1)}{61/2(1.0 + 1.2)} \right\} = 0.486$$

同理,其它各指标的专家风险态度因子分别为:

$$\lambda_2 = 0.500, \lambda_3 = 0.496, \lambda_4 = 0.492.$$

通过式(13)确定专家风险态度因子的映射函数

$$f_{\lambda}: f_{\lambda_1} = \frac{1.0 + 1.1}{2} + 0.486 \times (1.1 - 1.0) = 1.0986.$$

同理,其它专家风险态度因子的映射函数为:

$$f_{\lambda_2} = 1.0000, f_{\lambda_3} = 1.2992, f_{\lambda_4} = 1.2984.$$

由式(14)可得人员风险指标  $c_1$  的各二级指标权重为:  $W_1 = (0.2339, 0.2129, 0.2767, 0.2765)$ 。

同理,其它一级指标的各二级指标的权重计算结果见表1。

(2) 计算一级指标权重。采用相同的方法,对各一级指标进行区间赋值,赋值结果见表4。

根据式(12)~(14)可计算出一级指标权重为:  $W = (0.1578, 0.1975, 0.1711, 0.1841, 0.1578, 0.1317)$ 。

模型参数的计算过程,以一级指标中的环境安全因素  $c_6$  为例进行说明。专家们为一级指标  $c_6$  下的各二级指标所赋的双边约束值(即区间分值)见表5。

0.035 1, 0.013 7); 而对应的最大边云参数为(0.965 1, 0.023 0, 0.007 7)。据此,由式(12)计算得出  $c_{61}$  的云参数为:  $Ex_{61} = 0.9028, En_{61} =$

0.066 1,  $He_{e_1} = 0.009 9$ 。按照相同计算步骤,其它各二级指标云参数结果详见表1。

(2)一级指标的云模型参数确定。由式(13)可求得,环境安全因素  $c_6$  一级指标的云模型参数为:  
 $Ex_6 = 0.900 0, En_6 = 0.058 9, He_6 = 0.010 9$ 。同理,其余各一级指标的云模型参数计算结果见表1。

(3)综合云模型参数确定。由式(14)并结合一级指标的权重及其云模型参数结果,可求得体育馆消防安全风险的综合云模型参数为:  
 $Ex = 0.914 3, En = 0.052 2, He = 0.009 7$ 。

### 3.3 安全风险等级确定与结果分析

(1)确定安全风险等级。通过 Matlab 实现了正向云发生器,定量分析该参数结果,得出的综合云模型图,如图3所示。由表4可知,体育馆消防安全风险期望值(0.914 3,0.052 2,0.009 7)对应风险状态为  $L_1$  等级,故该体育馆消防安全风险等级为 I 级,即“安全”。

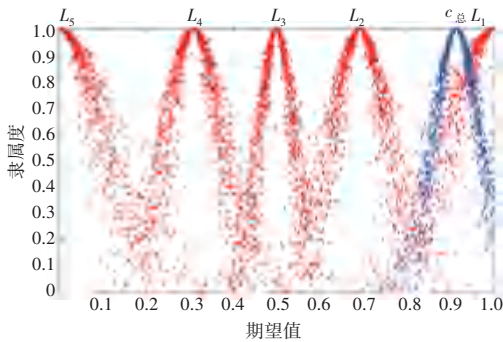


图3 该体育馆消防安全风险评价综合云模型图

Fig. 3 Comprehensive cloud model of the operational security risk assessment of the gymnasium

(2)评价结果分析。虽然该体育馆消防安全风险的评价结果为安全,但存在一定的消防安全隐患。为了精准地找出潜在问题,实施针对性的整改措施。通过正向云发生器程序对人员、管理、设备、疏散、建筑及环境六大安全因素进行定量化分析,得到对应云图分别如图4~图9所示。

由此可知,在6个一级指标中,疏散安全因素  $c_4$ 、建筑安全因素  $c_5$  的风险等级与  $L_1$  重合,表示其风险等级为 I 级,无消防安全风险。人员安全因素  $c_1$ 、管理安全因素  $c_2$ 、设备安全因素  $c_3$  和环境安全因素  $c_6$  的风险等级均处于  $L_1$  和  $L_2$  之间,其中,期望值  $c_6 = (0.900 0, 0.058 9, 0.010 9)$ ,风险状态为偏向于  $L_1$ ,即安全;期望值  $c_3 = (0.966 1, 0.044 0, 0.011 6)$ ,风险状态几乎与  $L_1$  重合,即安全;期望值  $c_1 = (0.809 2, 0.066 5, 0.004 8)$ 、 $c_2 = (0.833 62, 0.055 20, 0.010 20)$ ,风险状态均偏向于  $L_2$ ,即较安

全;但  $c_1$  熵值  $En_1$  更大,表明其离散度更高,更远离安全,需要引起高度重视。

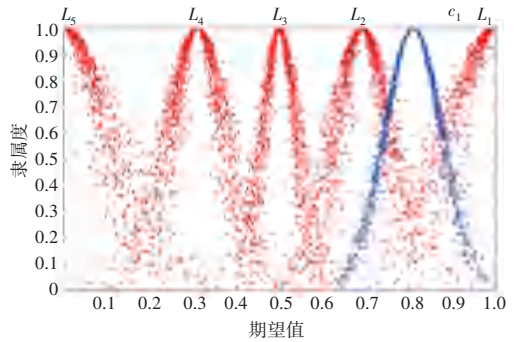


图4 人员安全因素云模型图

Fig. 4 Cloud diagram of personnel safety factor

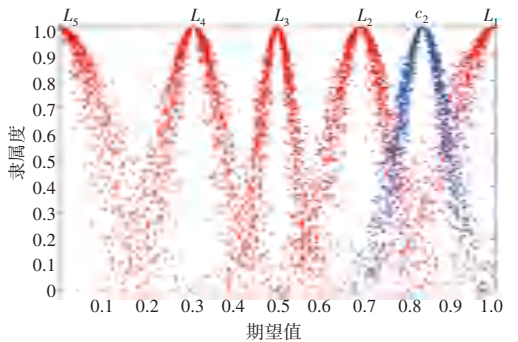


图5 管理安全因素云模型图

Fig. 5 Cloud diagram of safety management factor

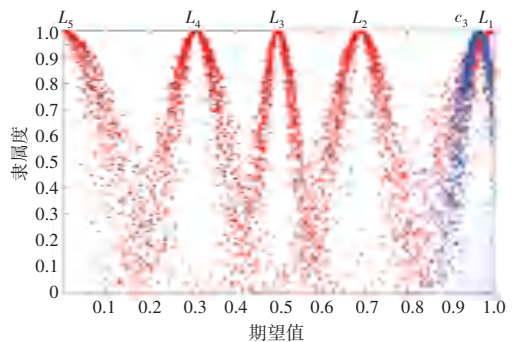


图6 设备安全因素云模型图

Fig. 6 Cloud model diagram of equipment safety factors

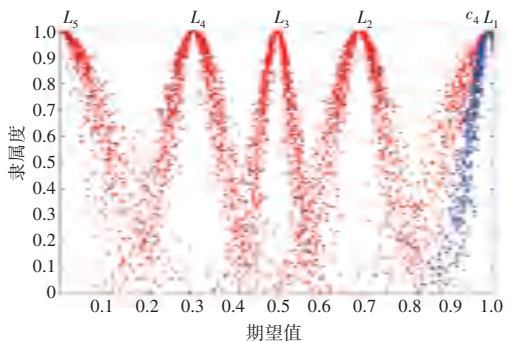


图7 疏散安全因素云模型图

Fig. 7 Cloud model diagram of evacuation safety factors

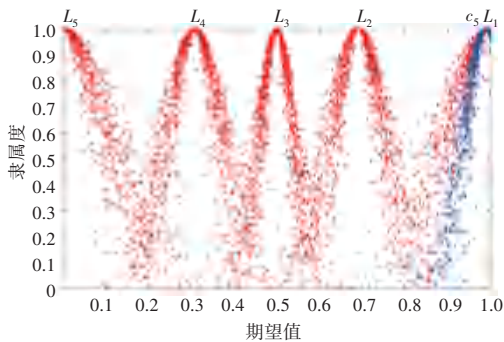


图8 建筑安全因素云模型图

Fig. 8 Cloud model of facility safety factors

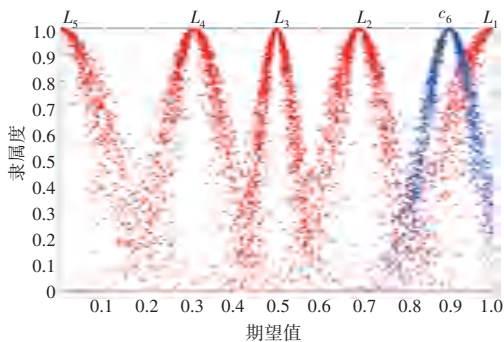


图9 环境安全因素云模型图

Fig. 9 Cloud model of environmental safety factors

因此,该体育馆在做好各方面安全工作的同时,重点要做好对人员安全因素、管理安全因素和环境安全因素方面的整改和管控。人员方面:一是开展全面的消防技能培训,定期考核岗位能力,提高工作人员的综合能力素养;二是设立专门的安全责任人,负责日常消防安全检查。管理方面:一是开展管理排查,制定精细化的多维度管理措施;二是定期开展消防安全演练,确保馆内动势符合行为规定。环境方面:一是合理利用场馆空间,按照类别及使用程度进行分区管理;二是及时协调外部应急机构开展合作联防,与当地消防、医疗等设立联防机制及时提供支持。

## 4 结束语

(1)本文聚焦体育馆消防安全,分析了人员、管理、设备、疏散、建筑及环境六大影响因素,建立了涵盖6个一级指标和29个二级指标的消防安全评价体系,全面研究体育馆的消防风险。

(2)创新性地将G2赋权法与云模型相结合,构建了体育馆消防安全风险评价模型,通过数据驱动量化风险,减少人为干扰,输出云图直观展示风险离散度,为消防风险评价提供新方法。

(3)以西安某大型体育馆为例,应用该评价体系和模型,结果显示其为I级、“安全”等级,与实际情况

相符,验证了评价体系与模型的实用性和可靠性。

## 参考文献

- [1] 赵伟刚,杨芳,姚浩伟,等.某体育馆消防设计分析及火灾风险评估[J].消防科学与技术,2019,38(4):502-504.
- [2] 卢春艳,李家民,杨鸿扬,等.大型体育文化场馆消防性能化设计[J].安全,2023,44(3):43-50.
- [3] 徐一旻,李津.基于物联网的体育馆消防安全评估研究[J].现代商贸工业,2020,41(21):212-215.
- [4] 尚明鹏,周敏,陈燕军,等.融合BiFPN与YOLO v5网络的工厂火灾检测[J].智能计算机与应用,2023,13(10):137-141.
- [5] ZHANG Guowei, ZHU Guoqing, YUAN Guanglin, et al. Quantitative risk assessment methods of evacuation safety for collapse of large steel structure gymnasium caused by localized fire [J]. Safety Science, 2016, 87: 234-242.
- [6] LIU Ying, YU Jiaqi, YIN Qing, et al. Impacts of human factors on evacuation performance in university gymnasiums [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 582: 126236.
- [7] 戴剑勇,王雯雯,黄晓庆.基于网络云模型的尾矿库溃坝安全评估[J].安全与环境学报,2022,22(1):1-7.
- [8] 张鹏,钟山,朱锐,等.基于熵权法-云模型的石拱桥技术状况评定[J].郑州大学学报(工学版),2022,43(1):69-75.
- [9] JU W, WU J, KANG Q, et al. A method based on the theories of game and extension cloud for risk assessment of construction safety: A case study considering disaster-inducing factors in the construction process [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 62: 105317.
- [10] 谢尊贤,蔡二柱,徐宝.基于云模型-模糊理论的养老机构火灾安全风险预警系统[J].安全与环境学报,2022,22(2):588-598.
- [11] LI F, ZHANG P, HUANG X, et al. Evaluation of water network construction effect based on game-weighting matter-element cloud model [J]. Water, 2023, 15(14): 2507.
- [12] 聂相田,范天雨,董浩,等.基于IOWA-云模型的长距离引水工程运行安全风险评价研究[J].水利水电技术,2019,50(2):151-160.
- [13] 贺佳伟,邵垒,杨文举,等.基于多指标评估云模型的车载动力电池火灾风险研究[J].科学技术与工程,2023,23(20): 8901-8906.
- [14] WANG Wei, QI Yun, JIA Baoshan, et al. Dynamic prediction model of spontaneous combustion risk in goaf based on improved CRITIC-G2-TOPSIS method and its application [J]. PloS One, 2021, 16(10): e0257499.
- [15] 谢尊贤,蔡二柱.基于云模型的智慧物流仓储安全评价研究 [J]. 物流科技, 2020, 43(3): 148-153.
- [16] 蔡二柱.养老机构火灾事故风险预警研究[D].西安:西安建筑科技大学,2020.
- [17] 柏羽珊,王志.基于云模型的大型客机火灾风险评估 [J]. 沈阳航空航天大学学报, 2020, 37(3): 68-75.
- [18] 陈莉,张海侠.基于熵权-云模型的我国绿色智慧城市评价 [J]. 系统仿真学报, 2019, 31(1): 136-144.
- [19] 凌峰,史静.含风力发电的配电网分时段动态无功优化 [J]. 电测与仪表, 2014, 51(24): 16-21.
- [20] 谢尊贤,杨彬,王芳,等.档案馆消防安全评估 [J]. 消防科学与技术, 2018, 37(5): 694-698.
- [21] 杨茗铠,李海霞,刘子睿,等.基于组合赋权与云模型的化工过程火灾爆炸风险评价方法研究 [J]. 化学工程与装备, 2023, (2): 241-243.