

# 基于博弈 - 改进可拓理论对木结构建筑群火灾危险性评价

王娜<sup>1</sup>, 韦善阳<sup>1\*</sup>, 高布桐<sup>2</sup>, 储云云<sup>1</sup>, 赵鑫莉<sup>1</sup>

<sup>1</sup>贵州大学矿业学院, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>深圳市路桥建设集团有限公司第一工程公司, 广东 深圳

收稿日期: 2022年9月16日; 录用日期: 2022年10月5日; 发布日期: 2022年10月12日

## 摘要

为了科学合理的评价木结构建筑群火灾危险等级, 基于WSR理论从人员因素、消防安全管理、建筑群防火性能、消防安全设施和火灾危险源五个方面构建木结构建筑群火灾危险性评价指标体系。应用G1法计算指标的主观权重, 应用改进熵权法计算指标的客观权重, 引入博弈论的理论思想计算各指标的组合权重, 并应用非对称贴进度对可拓理论进行改进, 采用改进后的方法对木结构建筑群火灾危险性进行评价。结果表明: 应用博弈论对G1法和改进熵权法计算的权重进行拟合的方法, 具有一定的科学性。结合非对称贴进度改进可拓理论, 能够进一步明确其火灾等级的安全贴进度, 使得计算结果更加精确。综合评价得出该木结构建筑群火灾危险等级为III级偏向于II级符合当地实际情况, 证明该方法适用于木结构建筑群火灾危险性评价。

## 关键词

木结构建筑群, 博弈论, G1法, 改进熵权法, 非对称贴进度, 可拓理论

# Fire Hazard Assessment of Timber Structure Building Groups Based on Game Theory and Improved Extension Theory

Na Wang<sup>1</sup>, Shanyang Wei<sup>1\*</sup>, Butong Gao<sup>2</sup>, Yunyun Chu<sup>1</sup>, Xinli Zhao<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>The First Engineering Company of Shenzhen Road and Bridge Construction Group Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Sep. 16<sup>th</sup>, 2022; accepted: Oct. 5<sup>th</sup>, 2022; published: Oct. 12<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 王娜, 韦善阳, 高布桐, 储云云, 赵鑫莉. 基于博弈 - 改进可拓理论对木结构建筑群火灾危险性评价[J]. 应用数学进展, 2022, 11(10): 7039-7047. DOI: 10.12677/aam.2022.1110747

## Abstract

In order to scientifically and reasonably evaluate the fire hazard level of the wood structure building group, based on the WSR theory, the fire risk evaluation index system of wood structure buildings is constructed from five aspects: personnel factors, fire safety management, building fire performance, fire safety facilities and fire hazard sources. The G1 method was used to calculate the subjective weight of the index, and the improved entropy weight method was used to calculate the objective weight of the index. The combined weight of each index was calculated by introducing the theoretical thought of game theory, and the extension theory was improved by using asymmetric paste schedule, and the improved method was used to evaluate the fire risk of wooden structure buildings. The results show that the method of fitting the weights calculated by the G1 method and the improved entropy weight method by applying game theory is scientific. Combining with the improvement of the extension theory of the asymmetric post progress, it can further clarify the safety post progress of its fire level and make the calculation result more accurate. The comprehensive evaluation shows that the fire hazard level of the wood structure building group is III, and the deviation to level II conforms to the local actual situation, which proves that the method is suitable for the fire risk assessment of wood structure building groups.

## Keywords

Wood Structure Building Group, Game Theory, G1 Method, Improved Entropy Method, Asymmetric Posting Progress, Extension Theory

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

古镇建筑作为历史文化的产物，他们的存在使得现代学者能够更好的了解到古代历史文化和习俗。古镇中建筑密集且大多为木结构建筑，火灾载荷低于现代混凝土建筑。近年来，随着古镇旅游区的开发，使其旅游业迅速发展，导致人员大量聚集及电气设备的大量使用，导致古镇建筑群火灾频发，例如云南香格里拉独克宗古火灾[1]、巴黎圣母院大火、唐代古刹圆智寺千佛殿火灾、巴西国家博物馆火灾[2]等，造成了巨大的经济财产损失。因此为了减少古镇木结构建筑群火灾的发生，需要找出影响其火灾发生的加强其火灾风险评估。

古建筑火灾事故致因因素较多，需要多层次、多方位的开展分析评价。为了有效对古建筑的火灾危险等级进行评估，国内专家采用不同方法对其进行研究，例如 AHP 法[3]、物元分析法[4]、模糊综合评价法[5]、BP 神经网络[6]、G1 法[7]、古斯塔夫法[8]和直觉模糊集法[9]等方法，这些单一的方法计算指标权重时会造成较大的误差；对于火灾等级评价模型方面有社会力模型[10]等；熵权物元可拓模型[11] [12] [13]在煤矿火灾安全评价中应用较多，博弈论[14] [15] [16]多用于经济、管理学科中，在木结构建筑群火灾等级评价中应用较少。

本文以 WSR 方法论为指导，通过实地考察对木结构建筑群火灾危险性的影响因素进行深入分析，找出影响其火灾等级的主要因素。之后建立木结构建筑群火灾危险性评价模型，应用 G1 法和改进熵权法计算各指标的主客观权重，然后应用博弈论的方法计算组合权重，降低人的主观因素带来的影响，将各

指标权重带入改进的物元可拓模型之中, 对其火灾危险等级进行评价, 以期望得到更加科学性、合理性的评价结果, 同时使该方法广泛的应用在木结构建筑群火灾危险等级评价之中。

## 2. 模型的建立

从科学性和系统性的角度出发, 基于 WSR 理论, 从人理 - 物理 - 事理三个方面分析影响木结构建筑群火灾危险性的因素, 通过对古镇火灾事故调查分析、实地考察、专家咨询和文献调研等方式归纳了影响木结构建筑群火灾危险性的因素。最终从人员因素、消防安全管理、建筑群防火性能、消防安全设施和火灾危险源等 5 个方面选取 27 个指标, 建立木结构建筑群火灾危险性评价指标体系见表 1。

**Table 1.** Evaluation index system of fire hazard of wood structure building group

**表 1.** 木结构建筑群火灾危险性评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
木结构建筑群 火灾危险性 评价 A	人员因素 B <sub>1</sub>	人群密度 C <sub>11</sub> 人员行为能力 C <sub>12</sub> 工作人员消防技能 C <sub>13</sub> 工作人员 消防意识 C <sub>14</sub> 游客及居民安全素养 C <sub>15</sub>
	消防安全管理 B <sub>2</sub>	出警调度管理 C <sub>21</sub> 防火检查 C <sub>22</sub> 火灾应急预案 C <sub>23</sub> 全民安全教育 C <sub>24</sub> 消防人员专业技能培训 C <sub>25</sub>
	建筑群防火性能 B <sub>3</sub>	建筑之间的防火间距 C <sub>31</sub> 防火分区 C <sub>32</sub> 防火墙 C <sub>33</sub> 装修材料的耐火性 C <sub>34</sub> 防烟分区 C <sub>35</sub> 火灾荷载 C <sub>36</sub> 疏散通道净宽度 C <sub>37</sub> 建筑高度 C <sub>38</sub>
	消防安全设施 B <sub>4</sub>	火灾自动报警系统 C <sub>41</sub> 应急照明系统 C <sub>42</sub> 防排烟系统 C <sub>43</sub> 消火栓和 灭火器 C <sub>44</sub> 其他消防设施 C <sub>45</sub>
	火灾危险源 B <sub>5</sub>	用火情况 C <sub>51</sub> 用电情况 C <sub>52</sub> 雷击 C <sub>53</sub> 人为纵火 C <sub>54</sub>

## 3. 评价方法简介

### 3.1. G1 法

G1 法[17]是郭亚军教授在层次分析法的基础上提出来的, 是一种主观赋权法, 主要是通过专家对评价因素按照重要程度进行排序, 再进行理性赋值, 确定各个因素的权重。运用 G1 法[7]可快捷有效的计算出木结构建筑群火灾危险性评价指标地的主观权重, 能够高效的得出木结构建筑群火灾危险性的评价结果。首先各个专家需要根据工作经验和指标分析, 判断不同指标的重要程度, 判断结果可为  $x_1 = x_2$ ,  $x_1 < x_2$  或  $x_1 > x_2$ , 分别表示重要程度指标  $x_1$  “无差异”、“劣于”和“优于”指标  $x_2$ 。主要步骤如下:

#### 1) 确定序关系

设木结构建筑群火灾危险性评价对象中有  $n$  个经过一致性量纲化的评价指标:  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , 火灾领域的专家和现场消防工作人员依据相关工作经验和一定的准则对这些指标的重要程度进行排序并得到唯一的一组排序关系, 设排序的结果为:

$$x_1 > x_2 > \dots > x_n \quad (1)$$

#### 2) 相对重要程度比值判断

相邻指标重要性比值:

$$\frac{w_{q-1}}{w_q} = r_q \quad (q = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中:  $w_q$  表示为指标  $x_q$  的权重值;  $r_q$  的取值见下表 2。

**Table 2.** Value range of  $r_q$   
**表 2.**  $r_q$  的取值范围

$r_q$	关系
1.0	同样重要
1.2	稍微重要
1.4	明显重要
1.6	特别重要
1.8	极端重要

### 3) 权重计算

以主观理性判断为前提, 如果  $x_1, x_2, \dots, x_n$  具有一定的排序关系  $x_1 > x_2 > \dots > x_n$ , 同时满足

$r_{q-1} = \frac{1}{r_q} (q = 2, 3, \dots, n)$ , 则各指标权重为:

$$w_n = \left(1 + \sum_{q=2}^n \prod_{i=q}^n r_i\right)^{-1} \quad (3)$$

$$w_{q-1} = w_q \cdot r_q (q = n, n-1, \dots, 2) \quad (4)$$

根据上述公式(3)、(4)可以得出木结构建筑群火灾危险性评价指标的主观权重。

## 3.2. 改进熵权法

熵最开始在物理学领域中应用, 逐渐渗透进其他学科。应用熵权法计算各指标权重时, 能够避免人的主观判断对于计算结果的影响, 是一种客观的计算权重的方法, 计算时该指标熵值越大就表明其权重越小。设根据调查分析木结构建筑群火灾危险性时, 有  $p$  个待评价的样本和  $q$  个评价指标, 建立原始矩阵  $X = (x_{ij})_{p \times q}$ 。

通过下式(5)计算第  $j$  个指标下第  $i$  个项目的指标值比重  $h_{ij}$ , 由于  $h_{ij} = 0$  时, 使得  $\ln h_{ij} = 0$ , 为了避免这种情况, 对评价指标值处理后都加上 0.1, 对熵权法进行改进:

$$h_{ij} = \frac{y_{ij} + 0.1}{\sum_{i=1}^p (y_{ij} + 0.1)} \quad (5)$$

木结构建筑群火灾危险性评价指标这种第  $j$  个指标的熵值计算过程如下式(6)所示:

$$e_j = -\frac{1}{\ln p} \sum_{i=1}^p h_{ij} \ln h_{ij} \quad (6)$$

木结构建筑群火灾危险性评价指标权数的计算如下式(7)所示:

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^q (1 - e_j)} \quad (7)$$

## 3.3. 博弈论组合赋权法

首先通过  $L$  中方法计算指标权重, 组成权重集合  $S = (s_{k1}, s_{k2}, \dots, s_{kn})$  其中  $k = 1, 2, \dots, L$ , 其中  $L$  个向量的组合方法如下:

$$S = \sum_{k=1}^L a_k \cdot S_k^T, a_k > 0 \quad (8)$$

$S$  为  $L$  个权重集的一种综合权重向量。将  $L$  个权重向量  $a_k$  进行优化从而得出一个合理的权重值，从  $L$  个备选方案中选择最优组合赋权法使得  $S$  与  $s_k$  的差值最小化，即：

$$\min \left\| \sum_{j=1}^L s_j - s_k \right\|, k = 1, 2, \dots, L \quad (9)$$

由公式(9)可以推出：

$$\begin{bmatrix} s_1 \cdot s_1^T & s_1 \cdot s_2^T & \cdots & s_L \cdot s_1^T \\ s_2 \cdot s_1^T & s_2 \cdot s_2^T & \cdots & s_L \cdot s_2^T \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_L \cdot s_1^T & s_L \cdot s_2^T & \cdots & s_L \cdot s_L^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 \cdot s_1^T \\ s_2 \cdot s_2^T \\ \vdots \\ s_L \cdot s_L^T \end{bmatrix} \quad (10)$$

计算  $(a_1, a_2, \dots, a_L)$  的数值，然后进行归一化处理  $a_k^* = a_k / \sum_{k=1}^L a_k$ ，得到最终权重  $S_k^* = \sum_{k=1}^L a_k^* \cdot w_k$ 。

### 3.4. 改进物元可拓理论的计算步骤

#### 3.4.1. 确定经典域和节域

经典域表示各评价指标的实际取值范围，经典域物元  $R_j$  可表示为：

$$R_j = (N_j, C, V_j) = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & V_{j1} \\ & c_2 & V_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & V_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_j & c_1 & [a_{j1}, b_{j1}] \\ & c_2 & [a_{j2}, b_{j2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{jn}, b_{jn}] \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中： $N_j (j=1, 2, \dots, n)$  表示为根据实际情况所划分的木结构建筑群火灾等级； $c_1, c_2, \dots, c_n$  表示为  $n$  个木结构建筑群火灾危险性评价指标组合而成的指标集合； $V_{jn}$  表示为关于第  $n$  个指标的第  $j$  个火灾危险性研究等级的取值范围； $V_j = [a_j, b_j]$  表示为规定的量值范围， $a_{jn}$  为最小值， $b_{jn}$  为最大值。

节域  $R_p$  可表示为：

$$R_p = (N_p, C, V_p) = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & V_{p1} \\ & c_2 & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & [a_{p1}, b_{p1}] \\ & c_2 & [a_{p2}, b_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{pn}, b_{pn}] \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中：木结构建筑群火灾危险性等级  $p$  的待评价对象为  $N_p$ ； $V_{pi}$  表示为节域物元所取的量值范围， $a_{pi}$  为最小值， $b_{pi}$  为最大值。

计算待评物同征物元矩阵关于新的经典域数量至范围的距离  $M_i(v_j)$ 。

$$M_i(v_j) = \left| v_j - \frac{a'_{ji} + b'_{ji}}{2} \right| - \frac{1}{2}(b'_{ji} - a'_{ji}) \quad (13)$$

#### 3.4.2. 改进关联度计算

通过对比众多评价方法之后，发现判别的合理性对于最后等级的确定具有非常重要的作用，对于传统的可拓学方法应用最大隶属原则计算关联度，虽然计算较快但容易造成信息缺失而导致评价结果有所偏差。因此本文应用非对称贴进度[18]公式进行关联度计算。对公式整理得到：

$$F_i(N) = 1 - \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n M_i(v_j) S_k^* \quad (14)$$

式中： $F_i(N)$  为非对称贴进度， $S_k^*$  为各个火灾危险性指标权重。

### 3.4.3. 确定火灾等级

若  $F_i(N) = \max F_i(N)$ ，则  $i$  为火灾危险等级。因此：

$$\bar{F}_i(N) = \frac{F_i(N) - \min F_i(N)}{\max F_i(N) - \min F_i(N)}, i^* = \frac{\sum_{i=1}^m i \cdot \bar{F}_i(N)}{\sum_{i=1}^m \bar{F}_i(N)} \quad (15)$$

式中  $i^*$  为火灾等级的特征值，能够更加准确的表达其所在等级和偏向相邻等级的程度。

## 4. 工程应用示例

本文以位于贵州省的某木结构建筑群为例，采用博弈论组合赋权法与改进物元可拓模型相结合的方法对该木结构建筑群的火灾危险性进行评价。通过对现场环境的实地调查同时采用问卷调查的方法向当地居民了解情况，并寻求 20 名消防领域专家和当地消防管理人员对评价指标按照满分为 1 的标准进行匿名打分，分数越高表示安全性越好，反之安全性越差。各指标最终得分取其算数平均数作为最终的评分数值，该木结构建筑群各指标实际得分为 0.61、0.76、0.88、0.90、0.81、0.89、0.93、0.87、0.76、0.85、0.57、0.60、0.58、0.65、0.62、0.74、0.80、0.85、0.79、0.87、0.82、0.93、0.75、0.76、0.79、0.85、0.72。

根据调查所得的实际情况最终将火灾分为 5 个级别。火灾等级分别为安全(I 级)、轻度危险(II 级)、一般危险(III 级)、中度危险(IV 级)和高危险(V 级)，同时结合多名专家和现场安全管理人员确定其经典域和节域。木结构建筑群火灾危险性评价等级标准为(0.9~1)、(0.8~0.9)、(0.7~0.8)、(0.6~0.7)、(0~0.6)。

#### 1) 计算权重

应用公式(1)~(4)采用 G1 法并根据各指标之间得分的差距计算各指标的主观权重，应用公式(5)~(7)并带入指标评分和火灾危险等级分级评分标准计算客观权重，根据公式(8)~(10)将计算出的贵州省某木结构建筑群火灾危险性评价指标的主客观权重进行拟合得出最终的指标权重值组；计算结果如下表 3 所示。

#### 2) 改进可拓模型

根据上述公式(11)~(13)计算经典域和节域物元矩阵，然根据待评价物元矩阵，计算各指标在 5 个安全等级下的距离  $M_i(v_j)$ ，计算结果见下表 3。

最后通过公式(14)和(15)计算指标关联度并确定火灾等级，评价结果如下表 4 所示。

**Table 3.** Evaluation index level distance and weight  
**表 3.** 评价指标等级距离与权重

指标	G1 法	改进熵权法	权重	$M_1(v_j)$	$M_2(v_j)$	$M_3(v_j)$	$M_4(v_j)$	$M_5(v_j)$
C <sub>11</sub>	0.0511	0.0434	0.0511	0.29	0.19	0.09	-0.01	0.01
C <sub>12</sub>	0.0254	0.0312	0.0254	0.14	0.04	-0.04	0.06	0.16
C <sub>13</sub>	0.0254	0.0378	0.0253	0.02	-0.02	0.08	0.18	0.28
C <sub>14</sub>	0.0254	0.0401	0.0253	0	0	0.1	0.2	0.3
C <sub>15</sub>	0.0355	0.0325	0.0355	0.09	-0.01	0.01	0.11	0.21
C <sub>21</sub>	0.0426	0.0389	0.0426	0.01	-0.01	0.09	0.19	0.29
C <sub>22</sub>	0.0511	0.0426	0.0511	-0.02	0.02	0.12	0.22	0.32
C <sub>23</sub>	0.0426	0.0368	0.0426	0.03	-0.03	0.07	0.17	0.27
C <sub>24</sub>	0.0355	0.0312	0.0355	0.14	0.04	-0.04	0.06	0.16



Continued

C <sub>25</sub>	0.0511	0.0351	0.0512	0.05	-0.05	0.05	0.15	0.25
C <sub>31</sub>	0.0716	0.0515	0.0717	0.33	0.23	0.13	0.03	-0.03
C <sub>32</sub>	0.0426	0.0452	0.0426	0.3	0.2	0.1	0	0
C <sub>33</sub>	0.0426	0.0493	0.0426	0.32	0.22	0.12	0.02	-0.02
C <sub>34</sub>	0.0716	0.0375	0.0718	0.07	-0.03	0.03	0.13	0.23
C <sub>35</sub>	0.0211	0.0417	0.0210	0.28	0.18	0.08	-0.02	0.02
C <sub>36</sub>	0.0716	0.0314	0.0718	0.16	0.06	-0.04	0.04	0.14
C <sub>37</sub>	0.0211	0.0320	0.0210	0.1	0	0	0.1	0.2
C <sub>38</sub>	0.0150	0.0351	0.0149	0.05	-0.05	0.05	0.15	0.25
C <sub>41</sub>	0.0355	0.0317	0.0355	0.11	0.01	-0.01	0.09	0.19
C <sub>42</sub>	0.0355	0.0368	0.0355	0.03	-0.03	0.07	0.17	0.27
C <sub>43</sub>	0.0254	0.0330	0.0254	0.08	-0.02	0.02	0.12	0.22
C <sub>44</sub>	0.0355	0.0439	0.0355	-0.03	0.03	0.13	0.23	0.33
C <sub>45</sub>	0.0254	0.0313	0.0254	0.15	0.05	-0.05	0.05	0.15
C <sub>51</sub>	0.0211	0.0312	0.0210	0.14	0.04	-0.04	0.06	0.16
C <sub>52</sub>	0.0211	0.0317	0.0210	0.11	0.01	-0.01	0.09	0.19
C <sub>53</sub>	0.0150	0.0351	0.0149	0.01	-0.01	0.09	0.19	0.29
C <sub>54</sub>	0.0426	0.0320	0.0427	0.15	0.05	-0.05	0.05	0.15

**Table 4.** Fire hazard level of wood structure buildings  
**表 4.** 木结构建筑群火灾危险等级

火灾评价指标贴进度						$i_0$	$i^*$
I	II	III	IV	V	最大值		
0.999798103	0.999907134	0.999929801	0.999878507	0.999774547	0.999929801	III 级	2.82

根据表 3 中各个指标的等级距离可知各指标对于 5 个安全等级中最大值处于哪一个安全等级, 根据表中信息计算火灾评价指标的贴进度。根据表 4 中计算得出的各个火灾评价指标贴进度可以看出其最大值为 III 级, 通过公式(15)计算得出的  $i^*$  为 2.82, 故其火灾等级为 III 级略微偏向 II 级, 属于一般危险偏向于轻度危险, 是能够被人们所接受的危险性状况。从当地消防管理部门实际调查可知其木结构建筑群的火灾危险等级与上诉计算所得结果一致, 表明该方法具有一定的科学性和合理性。同时克服了其他计算权重方法中的绝对主观性和绝对客观性导致的评价结果出现误差的问题。

### 3) 改进措施

**人员因素:** 增加现场的工作人员, 定期对工作人员进行消防演练, 发生火灾时能够快速正确的引领人员进行疏散逃生, 防止踩踏事故的发生, 节假日时期控制个别景点的旅游人员数量, 降低人群密度。

**消防安全管理:** 对消防安全制度进行完善, 增加安全检查和次数, 同时定期对消防人员进行专业技能的培训与考察, 剔除不合格人员, 确保火灾发生时能够快速高效的进行灭火救援工作。

**建筑群防火性能:** 将防火涂料涂在建筑表面, 增加墙面的阻燃性, 在各个建筑之间防火间距较小的位置处增设防火墙, 室内外不要堆放无用的易燃物, 降低火灾载荷, 减少火灾发生的可能性; 对个别建

筑内部进行重新规划, 设置合理的防火分区和防烟分区。

消防安全设施: 定期检查室外消火栓和灭火器, 确保其能够正常使用, 对作为宾馆和饭店使用的建筑增加室内灭火器、自动喷淋系统、水幕墙等灭火及抑燃设施, 当发生火灾时能够减缓火焰的蔓延速度。

火灾危险源: 举行祭祀等活动时, 在旁边准备好水源或灭火设备如灭火器等, 在火焰蔓延并失控时能够及时进行扑救工作, 降低火灾造成的损失; 对室内、室外不合理布置的电线进行整理规划, 同时在人员聚集地设置禁止吸烟和禁止燃放烟花爆竹等的提示牌。

## 5. 结论

1) 针对木结构建筑群火灾危险性因素进行分析, 依据 WSR 理论建立的基于人员因素、消防安全管理、建筑群防火性能、消防安全设施和火灾危险源 5 个二级指标 27 个三级指标的木结构建筑群火灾危险性评价指标体系。

2) 应用博弈论将 G1 法和改进熵权法计算出的权重进行拟合, 即降低了指标权重在计算过程中的绝对主观性和绝对客观性, 使得计算结果更具科学性和可靠性。

3) 应用非对称贴近度改进的物元可拓模型, 对贵州省某木结构建筑群的火灾危险等级进行计算, 得出其火灾等级为 III 级偏向 II 级与当地实际情况相符, 这表明基于博弈论的改进可拓学理论方法适用于木结构建筑群火灾危险性评价。

## 基金项目

贵州省科技支撑项目(黔科合支撑[2019]2889 号)。

## 参考文献

- [1] 王秋华, 左宜晓, 单保君, 等. 独克宗古城火灾的外部火环境研究[J]. 消防科学与技术, 2015, 34(6): 802-804.
- [2] Araujo, A.L. (2019) The Death of Brazil's National Museum. *The American Historical Review*, **124**, 569-580. <https://doi.org/10.1093/ahr/rhz177>
- [3] 官钰希, 方正, 刘非. 层次分析法在古建筑群火灾风险评估中的应用——以湖北省古建筑群为例[J]. 消防科学与技术, 2015(10): 1387-1396.
- [4] 游温娇, 徐志胜, 刘顶立. 基于物元分析法的古建筑火灾风险评估[J]. 安全与环境学报, 2017(3): 873-878.
- [5] Yu, K. (2013) Fuzzy Comprehensive Evaluation of Fire Safety Risk of Historic Buildings Based on fuzzy Mathematics. *International Journal of Applied Mathematics and Statistics*, **50**, 396.
- [6] 郑蝉蝉, 肖泽南. BP 神经网络理论在西南地区传统村落消防安全评估中的应用[J]. 建筑科学, 2017, 33(1): 96-99+106.
- [7] 任龙, 阳晓剑. 基于 G1 法的高层建筑火灾应急能力评价[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(5): 724-727.
- [8] 杨黎仁, 商靠定, 刘静. 古斯塔夫法在电商物流仓库火灾风险评估中的应用研究[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(6): 2120-2125.
- [9] 王萍, 朱杰, 程友鹏. 基于直觉模糊集的高速列车乘客车厢火灾风险评估[J]. 安全与环境工程, 2019, 26(5): 128-131+138.
- [10] 邵荃, 唐志星, 白杨. 基于社会力模型的民用机场航站楼消防安全评价[J]. 计算机应用, 2012, 32(z2): 248-251.
- [11] 李希建, 华攸金, 陈刘瑜. 基于熵权物元可拓模型的煤矿安全评价及其应用[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(9): 93-99.
- [12] 赵永芳, 张凌云, 于丽雅. 基于熵权物元可拓模型的冲击地压安全评价[J]. 煤矿安全, 2019, 50(6): 213-218.
- [13] 徐会军, 赵宝峰, 周勇, 等. 基于熵权物元可拓模型的工作面顶板水害评价[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(1): 112-117.
- [14] 游鸽, 邓帅. 基于博弈论的小额信贷公司可持续经营策略研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2020, 54(6): 1022-1032.



- 
- [15] 苏士杰, 雷娜, 耿树海. 基于演化博弈论视角的中美贸易失衡、利益分配与政策选择[J]. 商业经济研究, 2020(20): 145-148.
  - [16] 皮武良. 基于博弈理论的国家医疗应急储备机制探究[J]. 财会通讯, 2020(18): 150-153.
  - [17] 王素萍. 基于 G1 法-变异系数法的可拓学原理在围岩等级分析中的应用[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(2): 111-114.
  - [18] 孙廷容, 黄强, 张洪波, 等. 基于粗集权重的改进可拓评价方法在灌区干旱评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 70-74.