

基于组合赋权法的古建筑火灾风险评价

储云云¹, 韦善阳^{1,2*}

¹贵州大学, 矿业学院, 贵州 贵阳

²复杂地质矿山开采安全技术工程中心, 贵州 贵阳

收稿日期: 2022年7月26日; 录用日期: 2022年8月19日; 发布日期: 2022年8月29日

摘要

古建筑的火灾风险评估对文物建筑的保护具有重要意义。本文通过实地调研和查阅文献确定风险评价因素, 从火灾危险源、建筑特征、消防安全设施、消防安全管理及火灾处理能力5个准则层指标和17个目标层指标建立了古建筑群火灾危险性评价指标体系。基于层次分析法和熵权法组合赋权法确定各个指标的权重排序, 采用定性定量相结合的方法确定火灾主要风险因素。应用该模型对贵州某木结构古建筑火灾风险等级进行评价, 危险等级为IV级, 消防情况较差, 存在较多危险因素。根据评价结果从火灾危险源、建筑特征、消防安全设施、消防安全管理及火灾处理能力五个方面提出完善木结构古建筑风险的实际性措施。

关键词

古建筑, 层次分析法, 熵值法, 模糊综合评价

Fire Risk Assessment of Ancient Buildings Based on Combination Weighting Method

Yunyun Chu¹, Shanyang Wei^{1,2*}

¹School of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou

²Engineering Center for Safe Mining Technology under Complex Geologic Condition, Guiyang Guizhou

Received: Jul. 26th, 2022; accepted: Aug. 19th, 2022; published: Aug. 29th, 2022

Abstract

The fire risk assessment of ancient buildings is of great significance to the protection of cultural relics. This paper determines the risk assessment factors through field investigation and literature review, and establishes the fire hazard of ancient buildings from five criterion-level indica-

*通讯作者。

tors and 17 target-level indicators from fire hazard sources, building characteristics, fire safety facilities, fire safety management and fire handling capabilities, Evaluation System. Based on the combined weighting method of analytic hierarchy process and entropy method, the weight ranking of each index is determined, and the method of combining qualitative and quantitative is used to determine the main fire risk factors. This model is used to evaluate the fire risk level of an ancient wooden structure in Guizhou. The risk level is IV, the fire protection situation is poor, and there are many risk factors. According to the evaluation results, practical measures to improve the risks of ancient wooden buildings are proposed from five aspects.

Keywords

Ancient Buildings, Analytic Hierarchy Process, Entropy Method, Fuzzy Comprehensive Evaluation

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

近年来景区文物古建筑的消防安全形势日益严峻,古建筑由于自身布局、结构、材质以及使用和周边环境等因素的影响,存在着许多火灾风险因素[1][2]。尤其是贵州省木质结构建筑群及少数民族村寨多以单层、单体建筑为主,呈现出成组、成群的格局,具有建筑密度大,防火间距小,火灾荷载大、耐火等级低的特点更容易形成热辐射、飞火等造成火灾蔓延扩大,火烧连营的轰燃[3][4][5]。火灾一旦发生,由于消防设备和火灾扑救能力的限制,造成难以估量的经济损失和社会影响。因此构建古建筑火灾风险指标评价体系对预防文物古建筑火灾事故具有重要意义。

目前,国内外研究学者在古建筑火灾危险性评价方面取得了很多有益成果:殷杰利用模糊综合评判法对福建土楼进行风险评估[6];官钰希等采用层次分析法进行火灾风险评估,确定古建筑群火灾风险等级[7]。马砺等人通过引入主、客观偏好系数,基于AHP和熵权法构建古建筑火灾风险评价体系对西安市回民街进行评估[8];张葭伊等人结合熵权法和可拓学理论建立了基于熵权物元可拓理论的古建筑火灾风险等级评价模型,实现了对古建筑火灾风险等级的客观评价[9]。

本文基于层次分析法对古建筑群火灾致灾因素进行分析和权重计算,并运用熵权法客观赋值方法对权重值进行修正[10][11]。运用线性加权模型[12]进一步确定火灾主要风险等级,根据评价结果提出预防措施和建议,对文物古建筑火灾风险评价提供方法参考。

2. 构建火灾危险性评估指标体系

2.1. 风险指标体系建立

根据案例分析和查阅文献对古建筑致灾因素进行分析,基于《古建筑消防管理规则》,确定火灾危险源、建筑特征、消防安全设施、消防安全管理及火灾处理能力5个一级指标指标和18二级指标,建立古建筑火灾危险性评价体系。古建筑火灾危险性评价指标体系如图1所示。

2.2. 确定评估指标权重

2.2.1. 层次分析法确定权重

层次分析法是一种定性与定量相结合的系统层次化的科学决策方法,根据专家经验确定指标权重。

指古建筑火灾风险评价的各个元素分解成方案层、目标层和准测层[13][14]。使用层次分析法解决问题的时候, 分为以下四个步骤:

1) 构造判断矩阵如表 1 所示, 并按照专家打分 1~9 标度法进行为 b_{ij} 赋值。

Table 1. Judgment matrix

表 1. 判断矩阵

A	B_1	B_2	B_3	...	B_j	...	B_n
B_1	1	b_{12}	b_{13}	...	b_{1j}	...	b_{1n}
B_2	b_{21}	1	b_{23}	...	b_{2j}	...	b_{2n}
B_3	b_{31}	b_{32}	1	...	b_{3j}	...	b_{3n}
...
B_i	b_{i1}	b_{i2}	b_{i2}	...	b_{ij}	...	b_{in}
...

2) 层次单排序及一致性检验

用方根法确定权重具体的 Excel 计算 AHP 的步骤如下: $F1 = \text{PRODUCT}(B1:E1)$, $G4 = \text{POWER}(G4, 1/4)$, $G5 = \text{SUM}(G1:G4)$, $H1 = G1/\$G \5 , $I1 = B1 * \$H\$1 + B2 * \$H\$2 + B3 * \$H\$3 + B4 * \$H\4 , 复制 J4 公式至 I7 单元格, $J1 = I1/H1$, $\lambda_{\max} = \text{AVERAGE}(J1:J4)$ 。一级指标层次分析法矩阵计算见表 2。

Table 2. AHP matrix in excel

表 2. 层次法矩阵 excel 计算表

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
建筑特征	火灾荷载	防火间距	耐火等级	建筑面积	行乘积	开 n 次方	权重	AW	
火灾荷载	1	3	2	5	30.00000	2.3403	0.4503	1.8922	4.2022
防火间距	1/3	1	1/2	5	0.83333	0.9354	0.1838	0.7549	4.1065
耐火等级	1/2	2	1	7	7.0000	1.6266	0.3130	1.2761	4.0774
建筑面积	1/5	1/5	1/7	1	0.0057	0.2749	0.0529	0.2244	4.2426
								λ_{\max}	4.1572

计算判断矩阵最大特征根 λ_{\max} , 即:

$$\lambda_{\max} = (AW)_i / W \tag{1}$$

式中: $(AW)_i$ 表示向量 AW 的第 i 个分量。表示向量 AW 的第 i 个分量[15]。

3) 为检验其一致性, 首先计算一致性指标 CI [12]:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \tag{2}$$

4) 当 $CI < 0.1$ 时, 判断矩阵满足一致性, 否则需要重新修改判断矩阵。

2.2.2. 熵值法确定权重

熵值法是指利用熵值来判断某个指标的离散程度的数学方法[15][16]。离散程度越大, 该指标对综合评价的影响越大。

1) 依据火灾危险性评价的 18 个底层的指标数据和火灾危险等级构建原始数据矩阵。

具体火灾危险性等级区间划分如表 3 所示。

Table 3. Fire risk classification

表 3. 火灾危险性等级

等级	级数	取值
安全	I 级	(8.5, 10)
较安全	II 级	(6.5, 8.5)
一般安全	III 级	(4.5, 6.5)
较危险	IV 级	(2.5, 4.5)
危险	V 级	(0, 2.5)

2) 构造评价矩阵

① 根据 18 个二级指标建立 $1 \times n$ 的矩阵 $P = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n}]$, 其中, 评价指标为 l 个专家打分结果的平均值

$$x_{0j} = \sum_{k=1}^l x_{kj} / 10l, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

② 根据 $m-1$ 个可靠节点构造矩阵 Q , Q 为 $(m-1) \times n$ 的矩阵, 即

$$Q = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m-1,1} & x_{m-1,2} & \dots & x_{m-1,n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

③ 将 P 矩阵和 Q 矩阵结合构成决策矩阵 X 。 X 表示如下:

$$X = \begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0n} \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m-1,1} & x_{m-1,2} & \dots & x_{m-1,n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

④ 利用线性比例变换得到标准化矩阵 Y

$$e_j = -\lambda \sum_{i=1}^m y_{ij} \ln y_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

其中: $\lambda = \frac{1}{\ln m}$ 。

⑤ 计算指标的差异系数, 利用熵值法对指标赋值并计算指标权重大小。

$$y_{0j} = x_{ij} / \sum_{k=1}^i x_{kj}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

差异系数公式:

$$u_j = 1 - e_j \quad (8)$$

利用熵值法对指标赋权, 指标的权重向量 $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ 。

$$w_j = u_j / \sum_{j=1}^n u_j \tag{9}$$

3) 指标权重的综合。

层次分析法反应评价者的主观偏好, 并不能完全体现评价的客观性, 为了把主观因素的影响尽可能降到最小程度, 把熵权法与 AHP 法获得的权重结合起来, 采用线性加权的方法确定评价指标的综合权重。计算方法为:

$$w_i = \alpha w'_i + (1-\alpha) w''_i, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \tag{10}$$

其中 α 人为主观偏好系数, 取值为 $0 \leq \alpha \leq 1$, 决策者根据偏好给出具体数值, 本研究取 0.5。

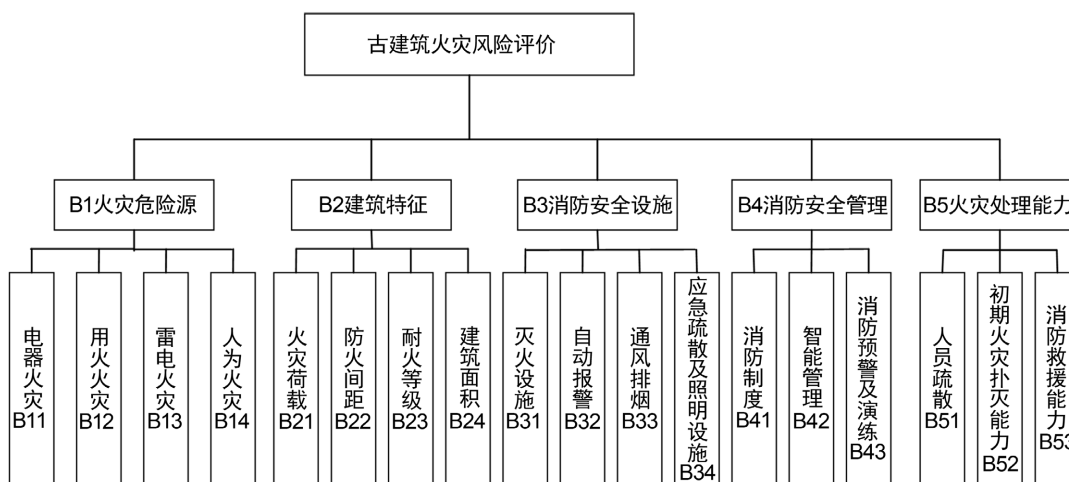


Figure 1. Fire risk assessment index system of wood structure buildings
图 1. 古建筑火灾危险性评价指标体系

3. 实例应用

3.1. 数据来源

选取贵州省某木结构古建筑村寨作为评价对象, 根据现场调查, 建筑防火间距不到 4 m 且相邻建筑体间少有防火墙分隔。室内电缆线路铺设不规范, 有乱拉电线的现象。仅有少数典型古建筑铺设了感烟探头和自动喷淋装置, 大多数建筑为两到三层木结构建筑或砖木结构, 平均荷载密度约为 1231 MJ/m², 是普通二层民居建筑荷载密度的 2 倍。建筑内部火灾荷载较大, 引火源众多。

通过邀请古建筑消防专家对火灾风险二级指标进行打分, 最后取平均分作为层次分析法权重赋值参考标准和熵权法 $1 \times n$ 的 P 矩阵。

3.2. 火灾风险评估

基于熵权法和层次分析法火灾评价体系确定火灾风险因素权重大小。火灾风险因子权重值大小如表 4 所示。火灾风险利用二级指标专家打分得到的平均分值和对应的综合权重, 采用线性加权模型计算古建筑火灾风险等级

$$R = \sum R_i F_i \tag{10}$$

其中 R 为古建筑风险等级, R_i 为对应的二级指标综合权重, F_i 为二级指标对应的专家打分平均值。经计

算得到贵州某木质古建筑火灾的风险等级为 IV 级, 消防安全情况较差, 存在较多的危险因素。一级指标综合风险评价等级得分见表 5。

Table 4. Index weight coefficient
表 4. 指标权重系数

评价目标	一级指标	一级指标权重系数	二级指标	二级指标权重系数	二级指标相对评价目标权重	信息熵	熵权	综合权重
古建筑火灾风险	火灾危险源	0.184	电器火灾	0.5423	0.0997	0.7928	0.0553	0.0775
			用火火灾	0.2516	0.0463	0.8088	0.0512	0.0486
			雷电火灾	0.0604	0.0111	0.8235	0.0473	0.0292
			人为火灾	0.1457	0.0268	0.8099	0.0510	0.0389
	建筑特征	0.216	火灾荷载	0.5112	0.1104	0.7597	0.0644	0.0874
			防火间距	0.1802	0.0341	0.7704	0.0615	0.0478
			耐火等级	0.2548	0.0550	0.7665	0.0626	0.0588
			建筑面积	0.0539	0.0116	0.8099	0.0510	0.0313
	消防安全设施	0.200	灭火设施	0.5990	0.1198	0.7689	0.0620	0.0909
			自动报警	0.1339	0.0269	0.7985	0.0540	0.0404
			通风排烟	0.1339	0.0269	0.7985	0.0540	0.0404
			应急疏散及照明	0.0668	0.0134	0.8041	0.0525	0.0330
	消防安全管理	0.185	消防制度	0.2631	0.0487	0.8120	0.0504	0.0496
			智能管理	0.5731	0.1060	0.7967	0.0545	0.0803
			消防预警及演练	0.1638	0.0303	0.8172	0.0489	0.0396
	火灾处理能力	0.215	人员疏散	0.3262	0.0701	0.7734	0.0607	0.0654
初期火灾扑救能力			0.5241	0.1126	0.7689	0.0619	0.0873	
消防救援能力			0.1498	0.0322	0.7900	0.0563	0.0443	

Table 5. Index evaluation score
表 5. 指标评估分数

指标	火灾危险源	建筑特征	消防安全设施	消防安全管理	火灾处理能力	总分
评分得分	0.7494	0.4670	0.5632	0.6526	0.4207	2.8529

3.3. 结果评价

对各种风险因素进行分析可得, 火灾影响因素一级指标火灾危险源 A1、建筑特征 A2、安全设施 A3、消防安全管理 A4、火灾处理能力 A5 的权重大小排列顺序为(A2 > A5 > A3 > A4 > A1)。二级指标火灾危险源每层 A (A11 > A12 > A14 > A13), B (B11 > B13 > B12 > B14), C (C11 > C12 = C13 > C14), D (D12 > D11 > D13), E (E12 > E11 > E13)。结合现场调查和木结构村寨火灾事故案例分析, 火灾荷载大、耐火等级低的木结构建筑, 消防设施失效严重, 室内电缆线路铺设不规范、安全管理不到位是引起古建筑火灾发生的主要风险因子。

1) 火灾危险源: 古建筑火灾的火灾危险源主要是电器火灾和生产作业用火, 这就要求当地居民注意用火用电, 管理部门应该统一规划供电系统, 提高用电安全。

2) 建筑特征: 古建筑的建筑特征的风险评价等级为较危险等级, 这是因为火灾荷载大、耐火等级风险因子在风险评估中占较大权重。可在木材料表面涂抹防火阻燃材料增加耐火等级, 新建建筑应尽可能的减少火灾荷载, 关键防火部位如防火墙采取砖木混合结构, 降低火灾的蔓延速度。

3) 消防安全设施: 消防安全设施的评价等级中度危险, 根据评价结果周围环境的火灾危险性等级为中度危险。完善古建筑供水系统装备完善消防供水站的布置。完善火灾隐患排查以及消防巡检制度, 及时更换已失效的消防设施。保证救援时水源的补给, 以便救援时能够迅速扑灭火灾, 防止轰然现象的发生。

4) 消防安全管理: 火灾危险性等级为中度危险。加强安全宣传教育, 古建筑管理单位应积极开展宣传教育工作, 增强从业人员、游客的消防安全意识和防火灭火能力并定期组织大家进行消防预警防火疏散演练。

5) 火灾处理能力: 设置自动消防设施如细水雾自动灭火系统, 增强及时发现及扑救初期火灾的能力。由于古建筑村寨复杂的地势, 完善的安全疏散通道设置和标识设置可以提高紧急疏散能力。同时可购置消防摩托车来补充消防救援力量。

4. 结论

1) 通过组合赋权法对木结构古建筑火灾风险指标体系及其权重进行确定, 以贵州省某少数民族村寨为研究对象, 构建火灾风险评价模型。弥补了单独采用层次分析法带来的主观性, 提高了权重确定的准确性, 评估结果的合理性。

2) 结合实例运用该模型对贵州某少数民族村寨的火灾危险性等级进行综合评价, 经计算得到贵州某木结构古建筑群火灾的风险等级为 IV 级, 综合得分为 2.8529。与实际情况相符, 证明的评价模型的有效性。一级指标火灾危险源的权重大小排列顺序(A2 > A5 > A3 > A4 > A1)。火灾风险影响因素中权重最大的是火灾灭火设施, 占比 0.0909, 其次时火灾荷载密度, 占比 0.0874, 说明预防火灾最紧急的任务是减少可燃物的堆积, 尽可能的减少火灾荷载密度, 提高建筑的主动灭火能力。另外需要完善消防设施的设置, 完善火灾隐患排查以及消防巡检制度, 保证救援时水源的补给, 提高古建筑火灾被动防火能力。

基金项目

贵州省科技计划项目黔科合支撑[2019]2889 号。

参考文献

- [1] 吕静. 景区古建筑防火对策研究[J]. 今日消防, 2020, 5(10): 31-33.
- [2] 刘鹏梁. 刍议我国古建筑消防安全管理[J]. 今日消防, 2020, 5(4): 63-64.

- [3] 刘石明. 关于古建筑消防安全管理的思考[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2020(16): 86-87.
- [4] 马万学. 古建筑消防安全分析评估及防火对策探讨[J]. 消防技术与产品信息, 2015(6): 12-16.
- [5] 韦善阳, 石美, 孙威, 杨欢, 高布桐, 曲日红. 木结构建筑群火灾危险性综合评价[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(4): 1440-1447.
- [6] 殷杰, 郑向敏, 董斌彬. 景区古建筑火灾风险模糊综合评价研究——以福建土楼为例[J]. 龙岩学院学报, 2014, 32(4): 19-26.
- [7] 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, 34(10): 1387-1396.
- [8] 马砺, 刘晗, 白磊. 基于 AHP 和熵权法的古建筑火灾风险评估[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(4): 537-543.
- [9] 张葭伊, 吕淑然, 张宇栋. 基于 WSR-熵权物元可拓模型的古建筑火灾风险等级评价[J]. 安全与环境工程, 2020, 27(2): 126-131.
- [10] 吕玉乾. 基于层次分析法对木结构古建筑的消防安全评价[J]. 消防技术与产品信息, 2016(2): 18-21.
- [11] 王丽. 集成 AHP/熵权法的煤矿工业广场火灾风险评估方法研究[J]. 煤炭工程, 2018, 50(8): 177-180.
- [12] 刘蕾, 马军, 马树华, 肖红. 基于熵值法和线性加权模型的承德市新型城镇化路径研究[J]. 高师理科学刊, 2017, 37(4): 10-14.
- [13] 刘晨, 宗若雯, 陈海燕, 吴超鹏. 基于层次分析法的热塑性聚氨酯及其纳米复合材料火灾危险性综合评价[J]. 火灾科学, 2019, 28(3): 177-184.
- [14] 徐帅, 郭小东, 黄瑞乾, 王耀国, 付体彪. 基于层次分析法的古建筑木结构安全性评估方法[J]. 工业建筑, 2016, 46(12): 180-183.
- [15] 段傲文, 向华, 李奎, 尹志勇. 基于熵权法的行人事故多刚体仿真参数优化研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 62-70.
- [16] 殷杰, 郑向敏, 董斌彬. 基于熵权可拓模型的古建筑火灾风险测评——以丽江古城为例[J]. 重庆文理学院学报(社会科学版), 2016, 35(2): 40-45.