

基于 AHP-FCE-TOPSIS 的乡村消防安全智慧检查与分级排序模型研究

黄俊豪 杜俊言 陈亮 张彬 何俊霖

重庆科技大学 安全科学与工程学院, 重庆 401321

[摘要]针对乡村消防检查对象分散、基层监管力量有限及检查结论易受经验影响等问题, 构建 AHP-FCE-TOPSIS 乡村消防安全智慧检查与分级排序模型。模型建立 5 个一级指标、23 个二级指标的评价体系, 采用 AHP 确定权重、FCE 量化专家评定、TOPSIS 计算安全贴近度并形成检查优先级, 并以某市 6 个乡村进行验证。结果表明, 火灾危险源管控和消防设施与救援条件是影响乡村消防安全水平的主要因素; 模型可将检查对象划分为红色优先、橙色重点、黄色常规和蓝色正常四类, 两种评价路径排序完全一致 ($|\rho|=1.000$, $p<0.01$), 可为分级派单和差异化检查提供依据。

[关键词]乡村消防安全; 层次分析法; 模糊综合评价; TOPSIS; Spearman 秩相关

DOI: 10.33142/sca.v9i6.19812

中图分类号: X925

文献标识码: A

Research on the Intelligent Inspection and Grading Model of Rural Fire Safety Based on AHP-FCE-TOPSIS

HUANG Junhao, DU Junyan, CHEN Liang, ZHANG Bin, HE Junlin

School of Safety Science and Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing, 401321, China

Abstract: In response to the problems of scattered inspection objects, limited grassroots supervision forces, and susceptibility to experience in inspection conclusions, an AHP-FCE-TOPSIS rural fire safety intelligent inspection and grading ranking model is constructed. Establish an evaluation system with 5 primary indicators and 23 secondary indicators, using AHP to determine weights, FCE to quantify expert evaluations, TOPSIS to calculate safety proximity and form inspection priorities, and validate it in 6 villages in a certain city. The results indicate that the control of fire hazards and the provision of fire-fighting facilities and rescue conditions are the main factors affecting the level of rural fire safety; The model can divide the inspection objects into four categories: red priority, orange emphasis, yellow routine, and blue normal. The two evaluation paths are sorted in exactly the same order ($|\rho|=1.000$, $p<0.01$), which can provide a basis for grading and differentiated inspection.

Keywords: rural fire safety; analytic hierarchy process; fuzzy comprehensive evaluation; TOPSIS; Spearman rank correlation

引言

随着乡村振兴推进, 乡村生产生活、建筑形态与能源结构显著变化, 消防安全呈现隐患点多、分布散、基础薄弱等特征。乡村建筑多自建, 防火间距不足、耐火等级低、线路老化、可燃物随意堆放等问题普遍; 居民消防意识薄弱、设施匮乏、火灾损失大。近两年全国乡村火灾累计约 175.2 万起^[1,2], 占总数的 59%。乡村消防检查目前以人工巡查和经验判断为主, 面临对象分布广、基层力量不足、隐患信息更新滞后等困境^[3-5], 智慧消防技术的发展为风险识别与精准监管提供了新路径^[6], 但面向乡村日常消防检查的量化评价与优先级排序研究仍显不足。

现有火灾风险评估研究多采用 AHP、FCE、TOPSIS 等方法, 相关成果已广泛应用于村镇火灾风险、矿井火灾和传统村落等不同场景。例如, 张涵涵等^[7]采用 AHP-熵

值法组合赋权, 有效克服了单一赋权方法带来的偏差。Habibi 等^[8]运用 FRAME-TOPSIS 方法确定预防措施优先级, 为消防措施的最优配置提供了决策支持。针对大型商业与高层建筑, Xu 等^[9]利用模糊 AHP 和耦合修正法, 使评估结果更贴近实际的火灾风险状况; 在矿井火灾风险评估方面, 姚瑞等^[10]采用 AHP-EWM-TOPSIS 方法进行危险性评价, 有助于确定重点防控区域和环节。赵越^[11]系统分析了乡村火灾特点及民房火灾扑救措施, 为村镇火灾风险识别与防控提供了参考。上述研究分别验证了 AHP 在权重分配、FCE 在模糊信息量化、TOPSIS 在多对象相对排序上的有效性, 但三类方法多被独立或两两组合使用, 尚未在乡村消防检查场景中形成完整的评价闭环。本文将 AHP、FCE 与 TOPSIS 进行系统耦合, 可同时兼顾指标权重的合理分配、定性判断的定量转化以及多对象间的优先

级排序, 弥补单一方法或简单两两组合在评价链条上的断裂, 为乡村消防检查提供“指标赋权-综合评分-相对排序”的完整技术路径。

然而, 现有研究大多侧重于判定区域整体综合风险等级或单一场所的安全状况, 对同一辖区内多个检查对象之间“谁更需要优先检查”的排序问题关注不足。对于监管资源有限的乡村地区而言, 检查优先级比单一评分更具管理价值。

基于此, 本文构建 AHP-FCE-TOPSIS 组合模型: 以 AHP 确定指标权重, FCE 将定性评定转化为量化得分, TOPSIS 进一步计算不同乡村与安全理想解的相对距离并

形成检查优先级, 同时采用 Spearman 秩相关系数检验两条评价路径的一致性^[12,13]。研究旨在为乡村消防安全智慧检查系统提供可嵌入、可排序的核心算法框架。

1 指标体系构建

遵循科学性、可获得性、可量化性和可操作性原则, 结合村镇火灾风险评估、建筑火灾评估和传统村落火灾风险评估研究成果^[14,15], 本文从现场可观察、可询问、可判定的检查要素出发, 构建由基础信息与环境特征、建筑防火条件、火灾危险源管控、消防设施与救援条件、消防安全管理状况 5 个一级指标和 23 个二级指标组成的乡村消防安全智慧检查指标体系。

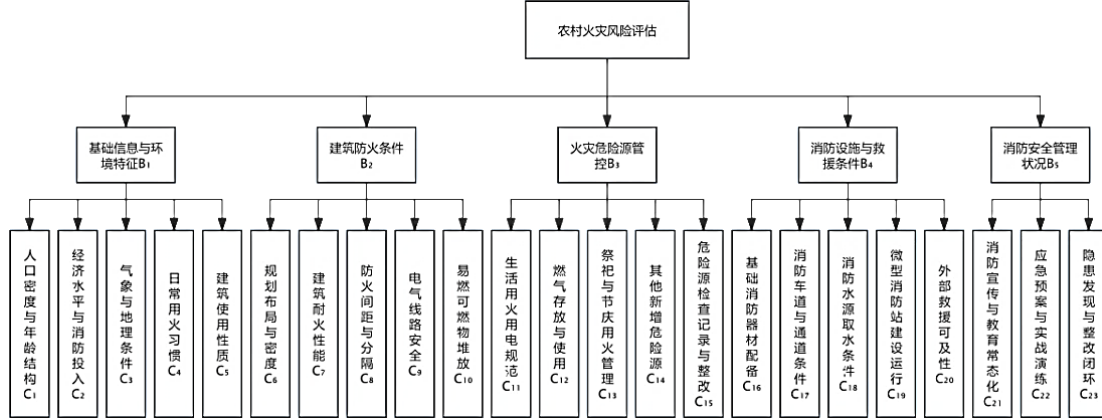


图 1 乡村消防安全智慧检查指标体系

2 AHP-FCE-TOPSIS 关联分析的乡村安全评价模型

2.1 AHP 权重确定

AHP 通过构造判断矩阵来反映同一层级指标之间的相对重要性^[16]。本文邀请 5 位消防安全领域专家采用 1~9 标 2 度法对指标进行两两比较, 对专家判断结果取几何平均值, 形成群体判断矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$, 其中, 1、3、5、7、9 分别表示同等、稍重要、明显重要、强烈重要和极端重要, 2、4、6、8 为中间值, 反向比较取倒数。其次, 对判断矩阵进行归一化处理, 求得权重向量, 并计算一致性指标 CI、一致性比例 CR。

2.2 模糊综合评价

乡村消防检查中包含大量定性指标, 如“消防宣传与教育常态化”“外部救援可及性”等。为降低主观判断的离散性, 本文采用模糊综合评价法将专家等级评定转化为隶属度矩阵^[17]。设评语集为 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}=\{\text{安全, 较安全, 一般, 较危险, 危险}\}$, 对应分数集为 $S=\{5, 4, 3, 2, 1\}$, 分值越高表示消防安全状态越好。

对某一级指标 B_k 下的 m 个二级指标构造隶属度矩阵 R_k , 结合该一级指标下二级指标权重向量 W_k , 可得到

一级指标模糊评价向量和去模糊化得分:

$$D_{B_i} = W_{B_i} \cdot R_{B_i} \quad P_{B_i} = D_{B_i} \cdot S^T \quad (1)$$

各一级指标得分再与一级指标权重加权求和, 得到检查对象的综合得分:

$$P = \sum_{i=1}^5 W_i \times P_{B_i} \quad (2)$$

2.3 TOPSIS 排序与分级

TOPSIS 通过比较评价对象与正、负理想解之间的距离实现优劣排序^[18]。以各乡村 5 项一级指标得分构成初始矩阵 $X=(x_{ij})$, 经向量归一化后得到 $r=(r_{ij})$, 再引入 AHP 一级权重形成加权归一化矩阵 $U=(v_{ij})$:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}, \quad i = 1, \dots, m; \quad j = 1, \dots, n \quad v_{ij} = w_j \cdot r_{ij} \quad (3)$$

对 U 的每一列, 取最大值形成正理想解 U^+ , 取最小值形成负理想解 U^- , 计算第 i 个乡村到正、负理想解的欧氏距离 D_i^+ 、 D_i^- :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - S_j^+)^2} \quad D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - S_j^-)^2} \quad (4)$$

进一步计算安全贴近度 C_i :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}, \quad 0 \leq C_i \leq 1 \quad (5)$$

由于本文评价指标均为效益型指标， C_i 越大表示乡村越接近安全理想状态，消防安全状况越好； C_i 越小表示风险越高，检查优先级越靠前。参考安全风险分级管控中“红、橙、黄、蓝”四色管理思想，并结合 TOPSIS 贴近度的取值范围，本文采用等距划分法确定分级阈值，将检查对象划分为四类：红色优先[0,0.25]、橙色重点[0.25,0.50]、黄色常规[0.50,0.75]、蓝色正常[0.75,1.00]。

2.4 Spearman 秩相关一致性检验

为验证 AHP-FCE 综合得分排序与 AHP-TOPSIS 贴近度排序之间的一致性，采用 Spearman 秩相关系数进行检验：

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (6)$$

考虑到 FCE 综合得分排序表示“安全程度由高到低”，而本文 TOPSIS 排序表示“检查优先级由高到低”，两者方向相反，因此以 $|\rho|$ 衡量排序一致程度。当 $|\rho|$ 通过显著性检验时，说明两条评价路径具有稳定一致的评价指向。

3 实证研究

3.1 数据来源

为验证模型适用性，本文随机选取某市 6 个乡村作为

评价对象，编号为 V_1 至 V_6 。样本乡村以砖木结构建筑为主，老幼群体占比较高，消防安全基础相对薄弱。由 5 位消防安全领域专家依据 23 个二级指标开展现场检查，并按“安全、较安全、一般、较危险、危险”五级给出评定，对应分值为 5、4、3、2、1，用于验证模型计算、排序和分级结果。

3.2 权重计算结果

以一级指标为例，5 位专家两两比较判断经几何平均后得到判断矩阵，如表 1 所示。经方根法计算，最大特征值 $\lambda_{\max}=5.0683$ ， $CI=0.0171$ ， $RI=1.12$ ， $CR=0.0153<0.10$ ，满足一致性要求。

表 1 一级指标判断矩阵

准则层	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
B ₁ 基础信息与环境特征	1	1/2	1/4	1/3	1/2
B ₂ 建筑防火条件	2	1	1/3	1/2	1
B ₃ 火灾危险源管控	4	3	1	2	3
B ₄ 消防设施与救援条件	3	2	1/2	1	2
B ₅ 消防安全管理状况	2	1	1/3	1/2	1

同理，按照上述方法依次求得各层级指标的权重及一致性检验结果，得分情况如表 2 所示。

表 2 各级指标权重及一致性检验结果

准则层	一级权重	CR	方案层	二级权重	综合权重
B ₁ 基础信息与环境特征	0.0783	0.0093	C ₁ 人口密度与年龄结构	0.2973	0.0233
			C ₂ 经济水平与消防投入	0.1578	0.0124
			C ₃ 气象与地理条件	0.0893	0.0070
			C ₄ 日常用火习惯	0.2973	0.0233
			C ₅ 建筑使用性质	0.1578	0.0124
B ₂ 建筑防火条件	0.1437	0.0071	C ₆ 规划布局与密度	0.0848	0.0122
			C ₇ 建筑耐火性能	0.2970	0.0427
			C ₈ 防火间距与分隔	0.1605	0.0231
			C ₉ 电气线路安全	0.1605	0.0231
			C ₁₀ 易燃可燃物堆放	0.2970	0.0427
B ₃ 火灾危险源管控	0.3572	0.0053	C ₁₁ 生活用火用电规范	0.3487	0.1245
			C ₁₂ 燃气存放与使用	0.1847	0.0660
			C ₁₃ 其他用火管理	0.1847	0.0660
			C ₁₄ 其他新增危险源	0.0971	0.0347
			C ₁₅ 消防器材配备	0.1847	0.0660
B ₄ 消防设施与救援条件	0.2851	0.0053	C ₁₆ 消防车道与通道条件	0.3487	0.0994
			C ₁₇ 微型消防站建设运行	0.1847	0.0527
			C ₁₈ 外部救援可及性	0.1847	0.0527
			C ₁₉ 消防知识普及与培训	0.1847	0.0527
B ₅ 消防安全管理状况	0.1357	0.0030	C ₂₀ 消防安全网格化管理	0.0971	0.0277
			C ₂₁ 消防宣传与教育常态化	0.3108	0.0422
			C ₂₂ 应急预案与实战演练	0.1958	0.0266
			C ₂₃ 隐患发现与整改闭环	0.4934	0.0669

由表 2 可见,火灾危险源管控权重最高为 0.3572,消防设施与救援条件次之为 0.285,表明乡村消防安全治理的关键在于控制日常用火用电、燃气存放、可燃物堆放等直接致灾因素,同时提升消防车道、水源、器材和微型消防站等基础救援条件。

3.3 模糊综合评价结果

以 V_1 村为例,5 位专家分别对 23 个二级指标进行五级评定,并将各等级人数占专家总数的比例作为对应隶属度,由此形成模糊评价矩阵。由于专家原始评定统计数据主要用于模型计算过程说明,为避免正文表格过多,本文不再逐项列出该统计表,而直接给出 6 个乡村各一级指标模糊评价得分及综合得分。

表 3 6 个乡村各一级指标模糊评价得分及综合得分

乡村	B_1	B_2	B_3	B_4	B_5	综合得分	安全排序
V_1	3.2416	2.6496	2.1772	2.0608	2.2724	2.2956	4
V_2	2.8274	2.1066	1.6481	1.7825	1.9013	1.8657	6
V_3	3.9162	3.5547	3.5018	3.4261	3.5826	3.5428	1
V_4	3.2415	2.8132	2.5869	2.7143	2.8892	2.7182	2
V_5	2.6183	2.0189	1.9235	1.9568	2.0114	2.0123	5
V_6	3.0946	2.5913	2.3557	2.4189	2.5063	2.4746	3

从表 3 可见,综合得分由低到高为 $V_2 < V_5 < V_1 < V_6 < V_4 < V_3$,其中 V_3 村综合得分最高为 3.5428, V_2 村最低为 1.8657。 V_2 村在火灾危险源管控、消防设施与救援条件、消防安全管理状况等维度得分均较低,说明其风险短板具有多维叠加特征。

3.4 TOPSIS 排序与分级结果

以表中 4 项一级指标得分构成初始矩阵,经向量归一化、AHP 一级权重加权和理想解距离计算,得到安全贴适度与检查优先级,见表 4。

表 4 TOPSIS 评价结果及风险分级

乡村	D_i^+	D_i^-	安全贴适度 C_i	检查优先级	风险等级
V_1	0.1165	0.0430	0.2698	3	橙色重点
V_2	0.1370	0	0	1	红色优先
V_3	0	0.1370	1.0000	6	蓝色正常
V_4	0.0710	0.0698	0.4958	5	橙色重点
V_5	0.1278	0.0202	0.1366	2	红色优先
V_6	0.0968	0.0508	0.3442	4	橙色重点

由表 4 可知,安全贴适度由低到高为 $V_2 < V_5 < V_1 < V_6 < V_4 < V_3$,对应检查优先级由高到低依次为 V_2 、 V_5 、 V_1 、 V_6 、 V_4 、 V_3 。其中, V_2 和 V_5 村划分为红色优先对象; V_1 、 V_4 、 V_6 村划分为橙色重点对象; V_3 划分为蓝色正常对象。

上述分级结果与各村原始得分数据的风险特征吻合,验证了 AHP-FCE-TOPSIS 组合模型在乡村消防检查优先级排序中的有效性。

3.5 Spearman 一致性检验

将 FCE 综合得分安全排序与 TOPSIS 检查优先级排序进行 Spearman 秩相关检验,结果见表 5。

表 5 Spearman 秩相关检验结果

乡村	FCE 得分	FCE 安全秩次	TOPSIS C_i	TOPSIS 优先秩次	d_i	d_i^2
V_1	2.2956	4	0.2698	3	1	1
V_2	1.8657	6	0	1	5	25
V_3	3.5428	1	1.0000	6	-5	25
V_4	2.7182	2	0.4958	5	-3	9
V_5	2.0123	5	0.1366	2	3	9
V_6	2.4746	3	0.3442	4	-1	1

检验结果显示, FCE 综合得分的安全排序与 TOPSIS 贴适度对应的检查优先级排序呈完全反向一致关系, $|\rho|=1.000$,且在 0.01 水平上显著。反映出两种评价路径虽然计算机理不同,但在本样本中的风险识别指向高度一致,验证了组合模型的稳健性。

4 结论

(1)构建了涵盖 5 个一级指标与 23 个二级指标的乡村消防安全智慧检查指标体系,将 AHP、FCE 与 TOPSIS 进行系统耦合,形成“指标赋权-模糊量化-相对排序-分级管控”的完整评价链条。

(2)采用 AHP-FCE 与 AHP-TOPSIS 评价模型对六个随机乡村进行分析评价,验证了 V_2 和 V_5 的乡村火灾风险等级最高; V_1 、 V_4 、 V_6 次之, V_3 的乡村火灾风险等级最低。

(3)本文通过 Spearman 秩相关检验表明 AHP-FCE 与 AHP-TOPSIS 排序结果完全一致 ($|\rho|=1.000$, $p<0.01$),验证了组合评估模型的可靠性与稳健性。同时各村所得评价等级与其实际消防安全状况一致,说明本文构建的指标体系与排序方法在乡村场景下具有较好的适用性。

支持项目:国家级大学生科技创新训练计划项目乡村安全智能眼(202411551001)。

[参考文献]

- [1]何元生,于冉,贾洪琛,等.2024 年全国火灾与警情总体情况[J].消防科学与技术,2025,44(12):1857-1859.
- [2]邢丹.2025 年火灾形势总体平稳基层消防工作迎八大转变[N].中国工业报,2026-3-23(20).
- [3]郭明山.农村消防工作中存在的薄弱环节及对策分析[J].

江西化工,2017(5):169-170.

[4]林修建,张星景.农村火灾分析与预防措施[J].低碳世界,2017(30):271-272.

[5]霍星铭.基层消防监管模式现状与优化改进探析[J].城市与减灾,2024(2):62-64.

[6]岳清春.“智慧消防”视域下的社会消防安全管理研究[J].消防科学与技术,2020,39(1):126-129.

[7]张涵涵,万杰.基于 AHP-熵值法组合赋权的村镇火灾风险评估[J].工业安全与环保,2025,51(4):85-90.

[8]Habibi E, Mousavi S M, Nakhaeipour M, et al. FRAME-TOPSIS Methods as a Technique for Fire Risk Assessment and Prioritizing Preventive Measures: A Case Study in the Isfahan School of Health Library[J]. International Journal of Environmental Health Engineering, 2024,13(5):20.

[9]Xu M, Peng D. Research on the fire safety assessment of high building with intuitionistic fuzzy TOPSIS method[J]. International Journal of Knowledge-based and Intelligent Engineering Systems,2021,25(4):405-411.

[10]姚瑞,詹辛慧,祁云,等.基于 AHP-EWM-TOPSIS 的矿井火灾危险性评价[J].沈阳理工大学学报,2026,45(1):88-96.

[11]赵越.农村火灾特点及民房火灾扑救措施研究[J].消防

界(电子版),2024,10(1):117-119.

[12]Enyi Zhou, Lu Tan, Jinrong Hu.城市建筑物消防安全评估[J]. 中国安全科学学报,2024,34(3):179-185.

[13]李刻钢,杨保华.动态环境下城市公共安全风险模型的逆序现象及其改进研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(1):16-22.

[14]程方明,王琛琛,邱静雯,等.基于组合赋权-物元可拓的建筑施工安全管理水平评价[J].西安科技大学学报,2023,43(3):466-475.

[15]刘少海,赵天忠,李塞波.基于直觉模糊集 TOPSIS 决策方法的森林防火勤务方案综合评价[J].林业资源管理,2017(3):62-68.

[16]彭磊,韦雪江.基于 AHP 层次分析法的高职院校火灾风险评估研究[J].消防界:电子版,2024,10(19):79-81.

[17]董寅申,熊浩雄,曾飞,等.基于火灾风险评估的乡镇消防安全治理研究——以中部某县为例[J].城市与减灾,2023(4):50-55.

[18]Su Lei, Shen Yu, Yang Fan, et al. Two-level assessment method for electrical fire risk of high-rise buildings based on interval TOPSIS method[J].电测与仪表,2024,61(11):91-98.

作者简介:黄俊豪(2005—),男,汉族,重庆忠县人,本科。