

城中村火灾人员疏散安全评价与治理对策研究

——基于组合赋权 - 云模型的实证分析

常章玉¹, 张晨瑞², 尹继尧^{1,3*}, 季 斌³

¹深圳市城市公共安全技术研究院有限公司科技与信息中心, 广东 深圳

²武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉

³深圳城市安全监测预警科技有限公司应急事业部, 广东 深圳

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月17日; 发布日期: 2026年5月27日

摘 要

城中村建筑密度高、人口流动性大且消防基础设施薄弱, 火灾疏散安全形势严峻。科学、精准的安全评价是实施有效风险管控的前提。针对传统评价方法在权重分配和信息不确定性处理上的不足, 研究引入“组合赋权 - 云模型”集成方法, 对深圳市某典型城中村进行实证分析。首先, 基于事故致因理论, 构建了包含“人员因素”、“疏散设施状况”、“应急管理水平”及“场所环境安全”4个维度、18项指标的评价体系。其次, 采用层次分析法(AHP)与变异系数法分别获取主、客观权重, 并通过最小二乘优化模型求得综合权重。最后, 运用云模型处理专家评价中的模糊性与随机性, 生成综合评价云。实证结果表明: 该城中村火灾疏散安全综合云期望值(E_x)为63.2, 安全等级为“一般”; 其中, “疏散设施状况”与“场所环境安全”是风险短板, 权重高且得分低, 尤其是“电动自行车充电管理”与“疏散通道状况”问题突出。基于量化评价结果, 从工程改造、管理强化、意识提升三个层面提出了针对性的治理对策, 为同类区域的消防安全精准治理提供了决策依据。

关键词

城中村, 火灾疏散, 安全评价, 组合赋权, 云模型, 治理对策

Research on Safety Evaluation and Governance Countermeasures of Evacuation in Urban Village Fires

—An Empirical Analysis Based on Combined Weighting-Cloud Model

Zhangyu Chang¹, Chenrui Zhang², Jiyao Yin^{1,3*}, Bin Ji³

*通讯作者。

文章引用: 常章玉, 张晨瑞, 尹继尧, 季斌. 城中村火灾人员疏散安全评价与治理对策研究[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(3): 684-698. DOI: 10.12677/mse.2026.153067

¹Technology and Information Center, Shenzhen Urban Public Safety and Technology Institute, Shenzhen Guangdong

²School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

³Emergency Response Division, Shenzhen Urban Safety Monitoring and Early Warning Technology Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: April 25, 2026; accepted: May 17, 2026; published: May 27, 2026

Abstract

Urban villages are characterized by high building density, high population mobility, and inadequate fire protection infrastructure, resulting in a severe fire evacuation safety situation. Conducting scientific and accurate safety evaluations is the prerequisite for implementing effective risk management and control. Aiming at the shortcomings of traditional evaluation methods in weight distribution and information uncertainty processing, this study introduces the integrated “combined weighting-cloud model” method and conducts an empirical analysis on a typical urban village in Shenzhen City. First, based on the accident causation theory, an evaluation system containing 18 indicators across four dimensions, namely “human factors”, “status of evacuation facilities”, “emergency management capability”, and “site environment safety”, was constructed. Second, the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Coefficient of Variation Method were used to obtain subjective and objective weights, respectively, and the comprehensive weights were calculated through the least squares optimization model. Finally, the cloud model was adopted to address the fuzziness and randomness in expert evaluation, so as to generate the comprehensive evaluation cloud. The empirical results show that the expected value (E_x) of the comprehensive cloud for fire evacuation safety of the urban village is 63.2, corresponding to a safety rating of “Average”. Among the dimensions, “status of evacuation facilities” and “site environment safety” are the key risk weaknesses, with high weights but low scores; in particular, the problems of “electric bicycle charging management” and “evacuation passage conditions” are prominent. Based on the quantitative evaluation results, this study puts forward targeted governance countermeasures from three aspects: engineering renovation, management enhancement, and safety awareness improvement, which provide a decision-making basis for the precise fire safety governance of similar areas.

Keywords

Urban Village, Fire Evacuation, Safety Evaluation, Combined Weighting, Cloud Model, Governance Countermeasure

Copyright © 2026 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

随着城市化进程的深入，建筑密度高、人口流动性大、基础设施薄弱的复杂区域成为公共安全管理重点与难点。对此类区域进行科学、系统的安全风险评价，是识别隐患、优化资源配置、提升应急能力的前提。然而，现有评价方法在核心环节——指标权重的确定，面临主观与客观的二元困境。主观赋权法(如层次分析法[1]-[4]、德尔菲法[5]-[7])虽能融入专家经验，但易受个人认知与偏好影响；客观赋权法(如熵值法[8]-[10]、变异系数法[11]-[13])虽基于数据内在规律，却可能忽视安全工程的实际逻辑，尤其

在数据不充分时解释性较弱。单一赋权方法的应用难以保证评价结果的全面性与合理性。

为克服上述局限,组合赋权方法[14]通过数学手段融合主客观权重,已成为复杂系统评价的主流选择。它旨在兼顾专家经验的合理性与数据分布的客观性,使权重分配更为均衡。与此同时,安全评价过程中充斥着信息的模糊性(如“风险较高”)与随机性(如专家打分波动),传统方法难以同时有效处理这两种不确定性。云模型理论[15][16]通过期望、熵、超熵三个数字特征,能够统一描述定性概念的模糊性与随机性,为不确定性量化提供了有力工具。

鉴于此,本研究旨在构建一套普适性强、逻辑严谨的复杂区域安全风险评价方法框架。核心在于集成组合赋权与云模型:首先,采用 AHP 与变异系数法分别计算主、客观权重,并基于最小二乘优化求得综合权重;其次,运用云模型处理评价语义的模糊性与随机性,实现风险等级的量化表达与可视化分析。本文后续将系统阐述该方法论的理论基础、构建步骤、计算流程及其相较于传统方法的优势,以期为各类复杂区域的安全风险评估提供一套结构化的分析工具与决策参考。

2. 评估指标体系的构建

为全面、系统地评估城中村火灾疏散安全水平,本研究以事故致因理论[17][18]为依据,紧密结合城中村在建筑结构、人口构成、管理模式等方面的特殊性,从“人员因素(A)”、“疏散设施状况(B)”、“应急管理水(C)”及“场所环境安全(D)”四个核心维度,构建了一套包含 18 项具体指标的评价体系(见表 1)。该体系遵循系统性、科学性与可操作性原则,旨在全方位覆盖影响疏散安全的关键环节。下面逐一说明了各个维度的具体含义:

人员因素(A),该维度聚焦于城中村内居民、租户及商户的火灾安全素养与应急行为特征。具体包括:居民的消防安全意识与自救知识水平、弱势群体(老人、儿童、残障人士)的分布与关照情况、人员在紧急状态下的恐慌程度与从众行为倾向,以及日常消防宣传培训的覆盖面和效果。

疏散设施状况(B),该维度评估城中村内可用于火灾疏散的物理条件与设备配置。主要考察:公共疏散通道和安全出口的数量、有效宽度及畅通情况(是否被杂物、车辆占用);室内外消防栓、灭火器的配置密度与完好率;简易喷淋、独立式感烟火灾探测报警器的安装普及率;应急照明与疏散指示标志的设置合理性及完好性。

应急管理水(C),该维度关注基层社区组织的消防安全管理能力。涵盖:村委会或社区居委会的消防安全责任制落实、微型消防站或志愿消防队的建设与应急响应能力、火灾应急预案的针对性与可操作性、定期防火巡查检查与隐患整改机制,以及组织居民开展应急疏散演练的频次与实效。

场所环境安全(D),该维度分析城中村建筑与环境本身对疏散构成的固有风险。关键指标包括:建筑平面布局的复杂程度(“握手楼”间距、巷道弯折度、死胡同情况)、建筑耐火等级与违规使用易燃可燃材料情况、电气线路私拉乱接的老化火灾风险、电动自行车集中停放充电管理状况,以及区域周边消防车通道的畅通性。

Table 1. Safety evaluation index system for personnel evacuation in urban village fires

表 1. 城中村火灾人员疏散安全评价指标体系

一级指标	二级指标	指标说明
A. 人员因素	A1. 居民的消防安全意识与自救知识水平	评估城中村内居民、租户对火灾危害、预防措施、灭火器使用、疏散路线及自救互救方法的知晓程度。
	A2. 弱势群体的分布与关照情况	评估老人、儿童、残障人士等疏散困难人群在村内的分布密度,以及针对他们的特殊预警、帮扶措施是否到位。

续表

	A3. 紧急状态下的行为倾向	评估火灾发生时, 人员可能出现的恐慌、盲目从众、选择错误路径等非理性行为的风险程度。
	A4. 消防宣传培训的覆盖面和效果	评估面向全体居民的消防安全教育、演练活动的定期性、参与广度及实际效果。
B. 疏散设施状况	B1. 疏散通道与出口的状况	评估公共通道、楼梯、安全出口的数量、有效宽度是否符合要求, 以及是否保持畅通、无杂物车辆占用。
	B2. 消防器材配置与完好率	评估室内外消防栓、灭火器等基础消防设施的配置密度、位置合理性及日常维护完好状态。
	B3. 火灾报警装置普及率	评估独立式感烟火灾探测报警器、简易喷淋等初期火灾预警与抑制装置的安装普及情况。
	B4. 应急照明与指示标志	评估应急照明灯、疏散指示标志在巷道、楼梯间的设置密度、亮度、醒目度及完好性。
C. 应急管理水平	C1. 消防安全责任制落实	评估村委会、社区居委会等基层管理组织的消防安全职责是否明确并得到有效履行。
	C2. 微型消防站/志愿消防队建设	评估社区志愿消防力量的装备配置、人员训练水平及接到火警后的初期响应与处置能力。
	C3. 火灾应急预案的针对性	评估应急预案是否结合本村具体建筑、道路、人口特点制定, 流程是否清晰、可行。
	C4. 防火巡查与隐患整改	评估日常消防安全检查的频次、覆盖范围, 以及对发现隐患的跟踪整改效率。
	C5. 应急疏散演练的频次与实效	评估组织居民进行疏散演练的定期性、真实感及事后总结改进情况。
D. 场所环境安全	D1. 建筑平面布局复杂性	评估“握手楼”密度、巷道狭窄与弯折程度、是否存在死胡同等影响疏散和救援的布局风险。
	D2. 建筑耐火与材料风险	评估建筑主体结构的耐火等级, 以及违规使用易燃可燃夹芯板、装饰材料等情况。
	D3. 电气火灾风险	评估电气线路私拉乱接、老化、过载运行等引发火灾的潜在风险等级。
	D4. 电动自行车充电管理	评估电动自行车集中停放、充电设施的设置、管理情况, 及违规入户充电现象。
	D5. 消防车通道畅通性	评估通往城中村内部及周边的主要道路、巷道宽度能否满足消防车辆通行和作业要求。

3. 组合赋权与云模型理论

3.1. 评价指标权重计算

为克服单一赋权法的局限性, 实现主观经验与客观数据的平衡, 本研究采用组合赋权法确定指标权重。具体通过层次分析法(AHP)获取主观权重, 体现专家经验与安全工程逻辑; 通过变异系数法获取客观权重, 反映指标数据自身的离散性与区分度。最终, 基于最小二乘优化模型将二者融合, 得到兼顾合理性与客观性的综合权重。

3.1.1. 基于 AHP 的主观权重计算

层次分析法(AHP) [19]用于量化专家经验。首先, 根据已构建的评价指标体系, 邀请专家依据 1-9 标度法对各层指标进行两两重要性比较, 构造判断矩阵。其次, 采用方根法计算各指标的初始权重向量。最后, 必须进行一致性检验(计算一致性比率 CR), 若 $CR < 0.1$, 则判断矩阵通过检验, 所得权重即为有效的主观权重向量 $w_{主}$ 。此过程确保了专家判断的逻辑一致性。

3.1.2. 基于变异系数法的客观权重计算

变异系数法完全基于指标数据的内在统计规律进行赋权。其核心逻辑是: 某项指标的观测数据变异系数越大, 说明其在不同评价对象间的差异越显著, 所包含的区分信息越多, 故应赋予更高权重。计算步骤如下:

- 1) 对原始数据进行标准化处理以消除量纲;
- 2) 计算各指标标准化值的均值与标准差;
- 3) 计算各指标的变异系数(标准差/均值);
- 4) 对变异系数进行归一化处理, 即得到客观权重向量 $w_{客}$ 。

该方法避免了人为干预, 权重结果完全由数据驱动。

3.1.3. 组合赋权

首先, 本文通过层次分析法求得的主观权重向量, 记为 $w_{主} = (w_{主1}, w_{主2}, \dots, w_{主n})^T$; 通过变异系数法计算得到的客观权重向量, 记为 $w_{客} = (w_{客1}, w_{客2}, \dots, w_{客n})^T$ 。为了将这两种权重进行合理融合, 引入一个平衡系数 α , 其中 α 的取值范围是(0, 1), 并构建综合权重向量 $w_{综}$ 的线性组合公式, 具体如式(1)所示:

$$w_{综j} = \alpha w_{主j} + (1-\alpha)w_{客j} \quad (j=1,2,\dots,n) \tag{1}$$

其中, 平衡系数 α 主要用来反映对主观权重的偏好程度, 简单来说, α 的数值越大, 说明综合权重的确定越依赖专家经验(也就是主观权重的影响越大); 反之, α 的数值越小, 意味着更侧重数据驱动, 也就是客观权重对综合权重的影响更显著。同时, 综合权重 $w_{综j}$ 必须满足归一化条件, 即 $\sum_j^n w_{综j} = 1$, 这是权重分配的基本要求, 确保综合权重具有实际意义。

为了尽可能降低综合权重与主观权重、客观权重之间的整体偏差, 让融合后的权重更合理、更贴合实际, 建立了最小二乘优化模型, 具体形式如式(2)所示:

$$\min Q(\alpha) = \sum_{j=1}^n \left[(w_{综j} - w_{主j})^2 + (w_{综j} - w_{客j})^2 \right] \tag{2}$$

建立好优化模型之后, 将前面得到的线性组合公式代入这个目标函数 $Q(\alpha)$ 中, 然后对 $Q(\alpha)$ 关于 α 求导, 并且令导数等于 0, 以此求解最优的平衡系数 α , 具体的求导过程和等式如式(3)所示:

$$\frac{dQ}{d\alpha} = 2 \sum_{j=1}^n (w_{主j} - w_{客j})^2 [-2(1-\alpha) + 2\alpha] = 0 \tag{3}$$

通过对上述等式进行整理、求解, 最终可以得到最优平衡系数 α^* , 具体结果如式(4)所示:

$$\alpha^* = \frac{\sum_{j=1}^n (w_{主j} - w_{客j}) w_{主j}}{\sum_{j=1}^n (w_{主j} - w_{客j})^2} \tag{4}$$

最优解 α^* 能够使目标函数 $Q(\alpha)$ 取得最小值, 也就意味着, 此时得到的综合权重, 与主观权重、客观权重之间的总偏差最小, 从而保证了综合权重的合理性和可靠性, 为后续的评价工作提供有力支撑。

3.2. 云模型理论

3.2.1. 云模型的概念及特点

云模型是用来处理定性概念和定量数值之间不确定问题的一种数学工具，由李德毅等人[15] [16]提出。与传统的方法相比，其最突出的优势就是能将评价过程中存在的模糊性和随机性，都清晰、有效地描述出来，这恰好满足城中村火灾疏散安全评价的需求。在本研究中，将云模型应用于城中村火灾疏散安全评价中，主要借助期望(E_x)、熵(E_n)、超熵(H_e)这三个核心的数字特征，将城中村疏散安全的实际状态转化为可量化的数值进行表达。该方法有效克服了传统评价中主观性强、片面性突出的局限，使评价结果更加客观、可靠。

1) 云的概念

首先对云模型的基本概念进行界定。设城中村疏散安全评价的定量论域为 U ，例如安全评分区间[0, 100]，即可作为该论域； C 为论域 U 上对应的一个定性概念，如前文所述的“人员因素”即属此类概念。对于论域 U 中的任意一个元素 x ，也就是 $x \in U$ ，对于定性概念 C 的确定度 $\mu(x)$ ，其取值范围在[0, 1]之间，并且这个确定度并不是一个固定不变的数值，而是一个具有稳定倾向的随机数。这种映射关系可以表示为： $\mu: U \rightarrow [0, 1]$ ，对于 $\forall x \in U$ ，都有 $x \rightarrow \mu(x)$ 。将 $(x, \mu(x))$ 这样的组合称为云滴，而大量云滴聚集形成的集合，就构成了所说的云模型，这个云模型能够全面表征出定性概念 C 的整体特征，为后续的量化评价提供基础。

2) 云模型的性质

结合本文城中村火灾疏散安全评价的实际场景，云模型主要具备以下三个核心性质：

第一个是随机性与模糊性。针对安全评价中专家判断天然存在的概念边界模糊性、评分结果随机性，云模型通过兼具稳定倾向与随机特征的确定度 $\mu(x)$ ，在统一数学框架内集成描述两类不确定性，还原评价的真实认知状态。

第二个是整体性。不以单次评价对应的单个云滴定义定性概念，而是通过大量云滴的整体分布完整表征概念内涵，依托统计规律保障充足样本下评价结论的可靠性。

第三个特点是可量化性。通过期望 E_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 三个数字特征，将“安全状态”这类模糊定性概念转化为可运算分析的定量表达，打通定性评价经验到定量决策的转化路径。

3) 云模型的数字特征

云模型要实现对定性概念的定量刻画，核心就在于依靠三个关键数字特征：期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。这三个数字特征可以用形式化表达式 $C(E_x, E_n, H_e)$ 来表示云模型，简洁明了地展现出云模型的核心构成。三个数字特征之间的内在关联如下所述：

期望 E_x ：是定性概念在对应论域里的核心定位参数，反映认知主体对该概念的“重心”判断。从云模型的形态上看，其对应的就是隶属度云的峰值点，即隶属度等于 1，通过这个点，就能直观看出定性概念的核心内涵。

熵值 E_n ：在云模型中，主要起到衡量期望 E_x 不确定性的作用，相当于一个度量尺度，它的大小直接决定了云滴——也就是实际计算出的具体评价价值——的离散程度，以及这些评价值的取值范围。值得注意的是， E_n 并不是由单一因素决定的，而是由定性概念本身内在的模糊性和评价过程中存在的随机性，这两个因素共同作用、共同决定的。

超熵 H_e ：其核心作用是对熵 E_n 本身的不确定性进行度量，简单来说，可以把它理解成“熵的熵”，这样更容易理解其本质含义。从云模型的形态来看， H_e 决定了云滴在期望 E_x 已经确定的分布基础上，再次产生的离散程度，直观表现出来就是整个云的厚度—— H_e 越大，云看起来就越厚； H_e 越小，云就越集

中、越单薄。

云滴数 n : 云滴是定性概念在量化时, 一次随机得到的结果。换言之, 每一次将定性概念转化为定量数值时, 偶然得到的一个结果即为一个云滴。只有大量云滴聚集在一起, 才能共同形成一张云图, 这张云图才能完整、准确地把这个定性概念表现出来。需要特别指出的是, 云滴数量 n 的多少, 直接影响着整个云模型的统计显著性。具体而言, 如果 n 设置太少, 那生成的云图就不稳定, 也无法准确反映出定性概念的整体特点, 这时模型产生的随机误差就会比较大, 进而影响到评价结果的可靠性; 反过来, 如果 n 达到了一定的数量, 云图就能稳定地呈现出定性概念的特征, 也能保证模型的统计合理性, 从而使评价结果具有可信度。

总的来说, 云模型的三个数字特征——期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e , 并非各自独立发挥作用, 而是相互配合、协同作用, 共同表征定性概念所固有的模糊性、随机性及整体不确定性, 从而构建起一个完整的认知模型。基于此, 本研究成功实现了城中村火灾风险等级的定性描述与定量分析结果之间的双向转换, 也为后面的实证评价工作奠定了坚实的基础。

3.2.2. 云模型应用原理

云模型在安全评价中的应用, 核心是处理专家评判中的模糊性与随机性, 实现定性安全等级与定量数值之间的双向转换。其应用基于一个完整的流程: 首先构建评价指标体系(因素集)、划分安全等级(评语集)并确定指标权重(权重集), 随后通过以下三个关键步骤完成评价:

1) 逆向云发生器: 从定量打分到定性云参数

此步骤旨在将专家的定量打分数据, 转化为能够描述每个评价指标模糊状态的云模型数字特征。逆向云发生器[20]是完成这一“由定量到定性”归纳的工具。它的输入是专家组对某一指标的所有打分数据, 输出则是该指标对应的云模型数字特征, 即期望(E_x)、熵(E_n)和超熵(H_e)。

2) 正向云发生器与综合云合成: 从云参数到可视化云图

此步骤实现“从定性参数到定量云图”的转换与合成, 包含两个环节:

生成指标评价云: 将上一步得到的每个指标的云参数(E_x, E_n, H_e)输入正向云发生器[21]。该发生器以这些参数为控制变量, 通过特定的随机算法生成大量“云滴”。每个云滴代表一个可能的、带有隶属度的具体评价值, 大量云滴的集合便在图上形成一朵能够直观反映该指标风险分布状态的“云”。例如, 熵(E_n)大的指标, 其云图更为分散, 表明状态不确定性强。

合成综合评价云: 在获得所有底层指标云的基础上, 依据各指标的组合权重, 对它们的云模型数字特征进行加权计算, 得到代表整体安全状况的综合云数字特征(E'_x, E'_n, H'_e)。再将此综合参数输入正向云发生器, 即可生成代表该城中村整体火灾疏散安全水平的“综合评价云图”。

3) 基于标准云的等级判定

为进行最终判定, 需预先定义评价标准。根据划分的评语等级, 通过计算生成各级别的标准云。评价时, 将生成的“综合评价云图”与各级“标准云图”进行可视化叠加和相似度比较。依据“最大隶属度原则”, 若综合云与某等级标准云的重叠度最高、形态最相似, 则判定该样本属于该安全等级。

综上所述, 云模型的应用原理可概括为“数据→云参数→云图→比对判定”的闭环流程: 逆向云发生器将专家打分归纳为带不确定性的指标云参数; 正向云发生器则将参数转化为可视化的风险云, 并最终合成整体评价云; 通过将生成的综合云与预设的标准云对比, 完成从数据到等级的科学评价。这一过程不仅给出了一个等级结论, 还通过云的形态(熵、超熵)揭示了评价本身的分歧与稳定性, 提供了更丰富的决策信息。

4. 组合赋权云模型

在城中村安全风险评估中, 为量化各评价指标的相对重要性, 避免因单一指标权重设置不当而导致

评价结果产生偏差，本研究采用组合赋权法确定各指标的综合权重。该方法旨在融合主观赋权所蕴含的专家经验与客观赋权所反映的数据规律，兼顾权重的科学性与客观性，从而为后续精准、可靠的安全风险评价奠定坚实基础。在确定各指标综合权重后，本研究进一步引入云模型理论，将评价过程中模糊、抽象的评估语言——如专家对指标优劣的定性描述——转化为可量化的评价标准云与指标综合云。

接下来，通过对比评价标准云与指标综合云的形态特点、空间位置分布差异，深入分析两者之间的契合程度，进而实现对城中村安全风险水平的客观、精准评估，得出科学合理、具备实践指导意义的风险评价结论。本次研究的具体评价流程可参考图 1，借助该图示，能够更清晰地理清整个评价过程的先后顺序，明确各个核心环节的具体内容与衔接关系。

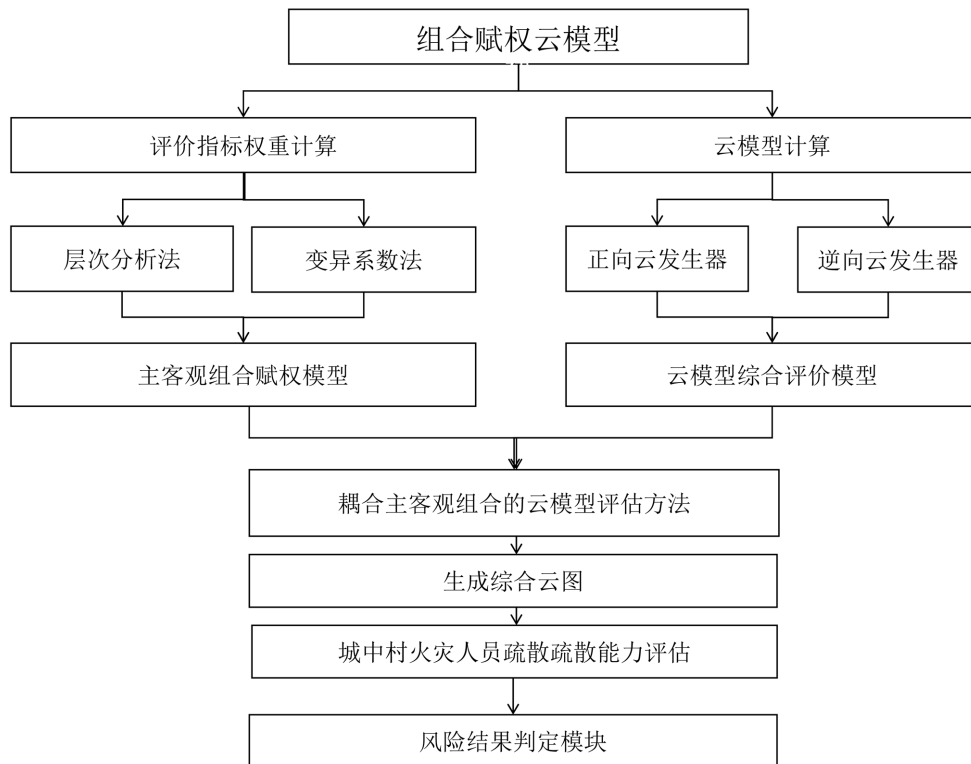


Figure 1. Flowchart of combined weighting-cloud model
图 1. 组合赋权云模型流程图

4.1. 计算评价指标权重

本研究针对所构建的城中村安全风险评价指标体系，首先分别运用层次分析法与变异系数法，计算出各指标的主观权重与客观权重。继而，通过组合赋权法对两类权重值进行综合，最终求得用于后续评价的组合权重值 $W = \{W_1, W_2, W_3, \dots, W_n\}$ 。

4.2. 建立云模型评语集及标准云

首先，为城中村安全评价建立一个包含五个等级的评语集：I级(危险)、II级(较差)、III级(一般)、IV级(良好)和V级(优秀)。随后，邀请专家依据专业经验，将各定性评语界定在对应的定量论域区间内。在此基础上，采用指标近似法，根据公式(5)计算出每一评语等级所对应的云数字特征 (E_x, E_n, H_e) 。最终，将这些数字特征输入正向云发生器，即可生成用于后续比对的标准云图。

$$\begin{aligned} (E_x)_i &= \frac{x_{\min}^i + x_{\max}^i}{2} \\ (E_n)_i &= \frac{x_{\max}^i - x_{\min}^i}{2\sqrt{2\ln 2}} \\ (H_e)_i &= k \end{aligned} \tag{5}$$

其中, x_{\min}^i 、 x_{\max}^i 为每个评价区间的最小值、最大值, k 为常数, 一般取值在 0.001~0.1 之间, 本文取值 0.1。

4.3. 建立指标评价云和综合云

基于专家打分数据与指标组合权重, 首先计算出各单项指标的评价云(E_x , E_n , H_e), 进而加权合成代表整体风险状况的综合云(E'_x , E'_n , H'_e)。通过将生成的综合云与预设的各级标准云进行相似度比对, 最终依据最大隶属度(或最大相似度)原则, 判定城中村的安全风险等级。指标评价云的计算公式(6)与综合云的计算公式(7)如下:

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m y_i \\ E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{m} \cdot \sum_{i=1}^m |y_i - E_x| \\ S^2 = \frac{1}{m-1} \cdot \sum_{i=1}^m (y_i - E_x)^2 \\ H_e = \sqrt{|S^2 - E_n^2|} \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} E'_x = W_1 E_{x,1} + W_2 E_{x,2} + \dots + W_n E_{x,n} \\ E'_n = \sqrt{W_1^2 E_{n,1}^2 + W_2^2 E_{n,2}^2 + \dots + W_n^2 E_{n,n}^2} \\ H'_e = \sqrt{W_1^2 H_{e,1}^2 + W_2^2 H_{e,2}^2 + \dots + W_n^2 H_{e,n}^2} \end{cases} \tag{7}$$

其中, y_i 为专家打分结果, m 为给该指标打分的专家人数, n 为城中村安全风险评价体系中评价指标数目。

5. 实例分析

为验证方法可行性, 选取深圳市某典型城中村作为实证对象。该村占地面积约 2.5 万平方米, 平均建筑层数 8 层, 楼间距狭窄, 常住与流动人口密度极高。通过邀请消防部门专家、社区安全负责人及高校研究人员共 10 人组成评价小组, 依据构建的指标体系进行打分。

5.1. 组合权重计算结果

通过计算求解得到最优平衡系数 $\alpha^* = 0.62$, 表明在本案例中, 专家经验(主观权重)的贡献略高于数据统计规律(客观权重)。最终计算得到各指标的组合权重 W 。

根据图 2 权重结果分析: 一级指标权重排序为: 疏散设施状况(B) (0.32) > 场所环境安全(D) (0.28) > 人员因素(A) (0.22) > 应急管理(C) (0.18)。这表明, 在该城中村的火灾疏散安全中, 硬件条件(设施与环境)是当前最关键的制约因素。在二级指标中, B1 疏散通道与出口的状况(0.092)和 D4 电动自行车充电管理(0.085)权重最高, 凸显了“生命通道”畅通性与新兴火灾风险源管理的重要性。

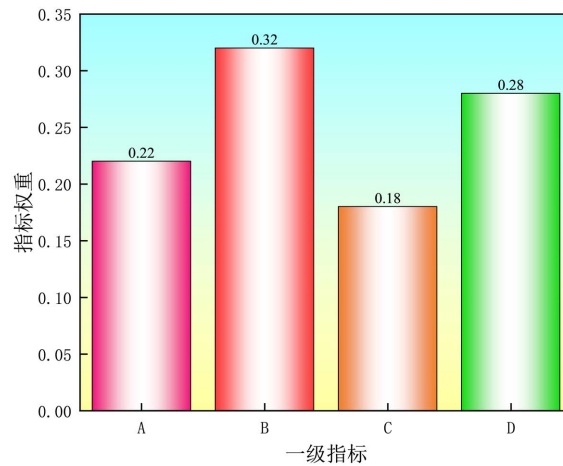


Figure 2. Weight diagram of first-level indicators
图 2. 一级指标权重图

5.2. 评价评语集与标准云计算

首先，为城中村安全评价建立一个包含五个等级的评语集：I级(危险，0~20分)、II级(较差，20~40分)、III级(一般，40~60分)、IV级(良好，60~80分)、V级(优秀，80~100分)。采用指标近似法计算各等级的标准云数字特征(表 2)，并通过正向云生成器生成标准云图(图 3)。

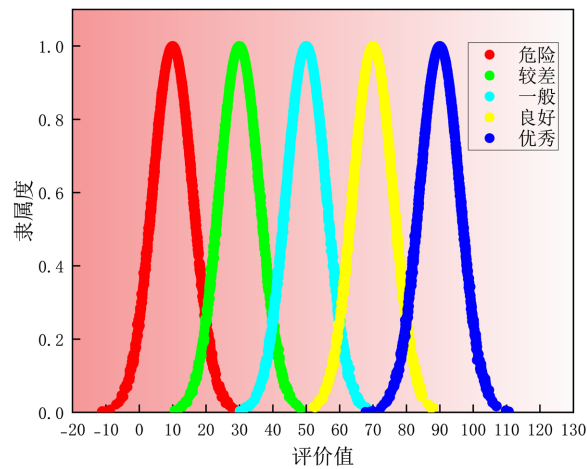


Figure 3. Standard cloud chart
图 3. 标准云图

Table 2. Cloud digital characteristics of each evaluation grade
表 2. 各评语的云数字特征表

评语	等级	区间	云数字特征(E_x, E_n, H_e)
危险	I	[0~20)	(10, 6.006, 0.1)
较差	II	[20~40)	(30, 6.006, 0.1)
一般	III	[40~60)	(50, 6.006, 0.1)
良好	IV	[60~80)	(70, 6.006, 0.1)
优秀	V	[80~100)	(90, 6.006, 0.1)

5.3. 评价结果与分析

基于专家打分数据，计算各二级指标的云参数，并生成准则层云图(图 4)和综合层云图(图 5)。云参数通过逆向云生成器导出，综合云参数通过加权聚合得到。

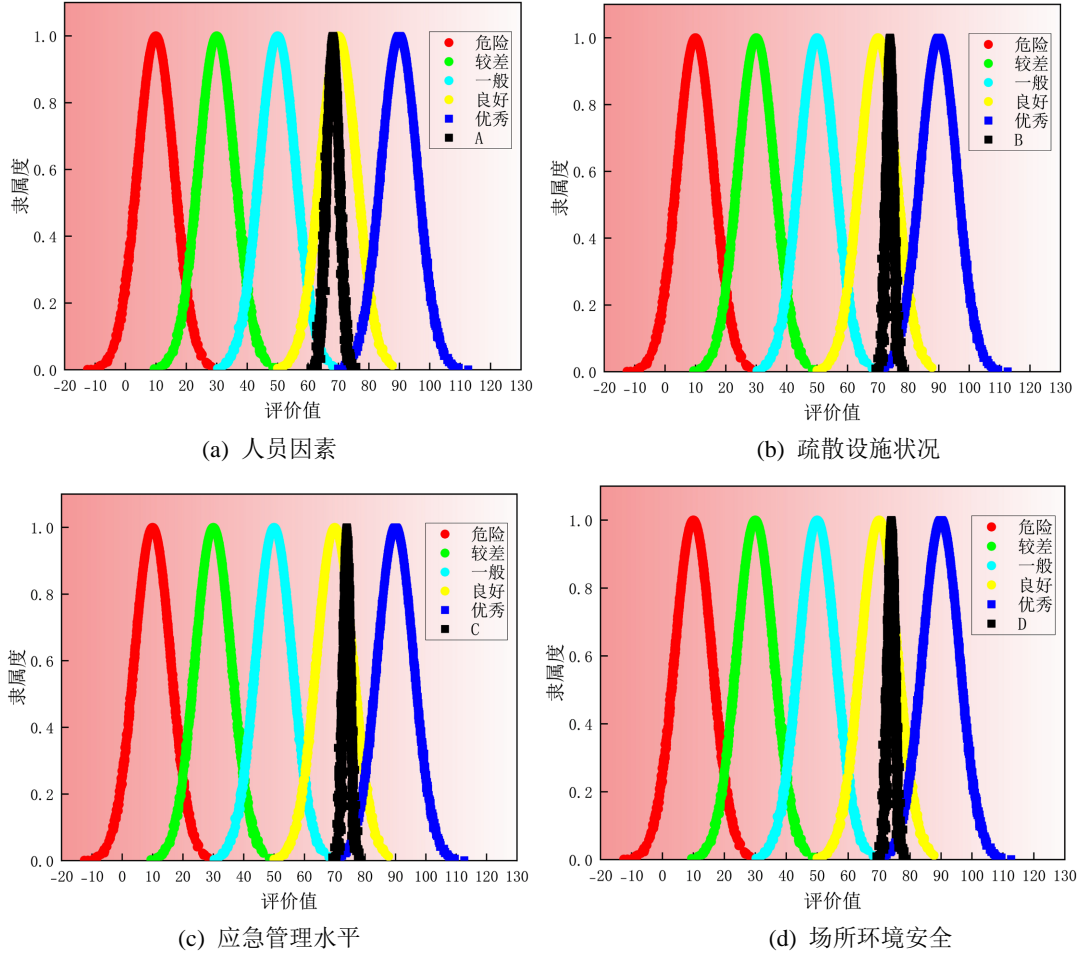


Figure 4. Criterion layer cloud chart
图 4. 准则层云图

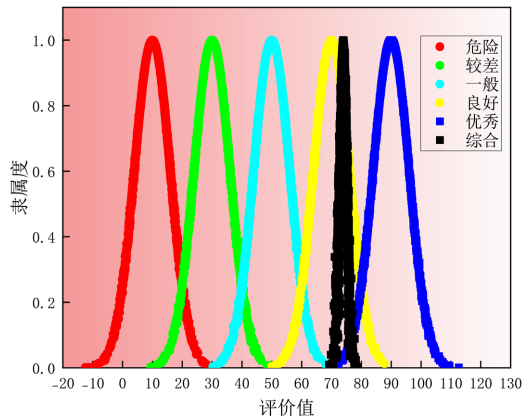


Figure 5. Comprehensive index cloud chart
图 5. 综合指标云图

1) 人员因素(A)维度

该维度期望值最高($E_x = 68.5$), 表明通过持续宣传, 居民普遍具备基础消防安全意识, 是当前工作的优势基础。然而, 得分仅处于“良好”等级下游, 反映“知晓”与“火灾中冷静正确行动”之间存在落差。其熵值($E_n = 7.2$)并非最低, 结合专家对 A3(紧急行为倾向)、A2(弱势群体关照)等指标打分的离散情况, 表明对居民真实心理承压能力及帮扶措施实效的评估存在分歧, 提示需从关注宣传“覆盖率”向提升培训“沉浸感”与措施“针对性”转变。

2) 疏散设施状况(B)维度

该维度是拉低整体评分的关键, 期望值($E_x = 58.1$)已落入“一般”等级, 直接对应疏散通道被占用、应急标识缺损等突出问题。其高熵值($E_n = 9.8$)与高超熵($H_e = 2.1$)尤为突出, 具有双重警示: 高熵值意味着专家对“设施状况多差”的看法极不一致, 可能源于村内不同区域状况差异巨大; 高超熵则表明这种评价分歧本身也极不稳定, 反映出设施损坏、遮挡等问题具有随机性和隐蔽性, 侧面印证了设施管理混乱、底数不清的现状。

3) 应急管理(C)维度

该维度期望值($E_x = 65.3$)显示消防安全责任制、预案、微型站等管理体系已初步建立, 但效能仅属中等。其得分瓶颈常源于 C5(应急演练实效)与 C4(隐患整改)等工作“重部署、轻落实”。相对较低的熵与超熵($E_n = 6.9, H_e = 1.4$)表明专家在此维度评价共识度最高, 这实际反映了专家一致认为管理效能处于一种“确定性低水平”状态, 揭示了系统性的管理能力瓶颈, 比硬件的不确定状态更值得警惕。

4) 场所环境安全(D)维度

作为权重第二高的维度, 其期望值($E_x = 60.8$)刚过“良好”线, 风险突出。其中, 电动自行车充电管理(D4)与电气火灾风险(D3)是典型动态风险源。该维度熵值与超熵值均为最高($E_n = 10.1, H_e = 2.3$), 深刻揭示了风险的复杂性: 最高熵值表明专家对“何种风险最致命”判断分歧最大(如建筑、电气、管理专家关注点不同); 最高超熵值意味着此种分歧极不稳定。这反映出各类隐患深度交织耦合, 难以从单一专业视角进行稳定评估, 要求治理必须采取系统性工程措施。

将综合云 C_{综合} (63.2, 8.5, 1.8)与各级标准云进行可视化比对(见图 5)。

综合云数字特征为(63.2, 8.5, 1.8)。其期望值 63.2 落入“良好”区间, 但紧邻“一般”等级上限; 同时, 较高的熵值与超熵值表明专家对整体安全水平的判断存在显著分歧且稳定性不足。通过云图可视化比对, 依据最大隶属度原则, 最终判定该城中村火灾疏散安全等级为 III 级(一般), 且正处于“一般”向“良好”过渡的临界状态。

云模型分析不仅给出了等级结论, 更通过“高熵”与“高超熵”揭示了风险认知的模糊性与不确定性, 这本身就是城中村安全风险复杂、多变本质的量化体现, 为精准治理指明了切入点。

6. 讨论

本研究通过“组合赋权 - 云模型”方法, 对深圳市某典型城中村进行了火灾疏散安全评价, 得出了其综合安全等级为“一般”($E_x = 63.2$)的结论, 并识别出“疏散设施状况”与“场所环境安全”为关键风险短板。本节旨在将这些具体发现置于更广阔的消防安全标准、政策实践与学术研究背景中进行审视, 以阐明本研究结论的实践意义、理论贡献及未来的改进方向。

本研究发现“疏散通道与出口的状况(B1)”和“应急照明与指示标志(B4)”得分低下, 是高权重风险点。这直接对标我国《建筑设计防火规范》等强制性标准中关于疏散宽度、距离、照明和指示系统的明确要求。评价结果揭示的核心问题并非标准缺失, 而是在城中村这一特殊建成环境中, 标准的执行与维护存在巨大“合规性差距”。建筑初建时可能就未达标, 后续的违章搭建、杂物堆放更是雪上加霜。这提

示我们,对于存量巨大的城中村,单纯依靠“新建建筑审批”的管控模式已不适用,治理重点必须转向“既有建筑改造”和“动态占用清理”,这需要更强有力的法规授权和常态化的执法机制作为支撑。

同样,在“建筑耐火与材料风险(D2)”和“消防车通道畅通性(D5)”方面,研究发现的风险也与国家标准形成鲜明对比。《建筑设计防火规范》对建筑构件的耐火极限、装修材料燃烧性能以及消防车道净宽、净高、承载力均有严格规定。本研究的低分评价(期望值低)和高不确定性(熵值高)表明,城中村建筑普遍存在耐火等级不足、违规使用易燃可燃材料(如聚氨酯泡沫彩钢板)、消防车道被严重占用等问题。这凸显了在土地产权复杂、建筑密度极高的城中村落实国家消防技术标准所面临的巨大现实挑战,也指明了工程性治理的必要性和紧迫性。

近年来,针对电动自行车火灾、消防“生命通道”堵塞等突出问题,国家及地方层面相继出台了一系列政策文件。本研究通过组合赋权,量化得出“电动自行车充电管理(D4)”是权重极高的核心风险指标(0.085),这从实证角度强有力地印证了当前政策焦点的正确性与紧迫性。此外,本研究通过云模型揭示了该指标评价的高熵值(E_n)与高超熵(H_e)。这不仅说明了风险存在的普遍性,更深刻反映了风险的复杂性与管理认知的不确定性——例如,不同专家对“集中充电设施覆盖率不足”、“入户充电屡禁不止”、“电池本质安全问题”等子问题的严重性排序存在分歧。这表明,下一步政策推进需超越“普遍号召”,走向“精准诊断”,例如利用本研究方法识别出区域内电动自行车风险的具体症结(是设施缺口、价格因素、还是监管乏力),从而制定更具针对性的解决方案。

已有大量研究基于事故致因理论(如 Reason 的“瑞士奶酪”模型)分析城中村火灾风险,普遍认同其是人员、设备、环境、管理等多因素耦合的结果。本研究构建的四维度指标体系(人员、设施、管理、环境)与此理论框架一脉相承。本研究的推进在于,通过组合赋权,不仅识别了因素,更量化了各因素在当前案例中的相对重要性(如硬件设施权重高于管理),为资源优先配置提供了数据依据。

更重要的是,云模型的引入,将风险评价从确定性的“分数”或“等级”,拓展到包含“模糊性”和“随机性”的认知描述。传统研究可能指出“管理能力薄弱”,而本研究发现“应急管理(C)”维度具有“低期望值、低熵值”的特点($E_x = 65.3, E_n = 6.9$),这说明专家对其“薄弱”的判断具有高度共识,风险状态相对“确定”。相反,“场所环境安全(D)”维度则表现出“高熵值、高超熵”($E_n = 10.1, H_e = 2.3$),这与文献中常描述的城中村风险“复杂性”、“耦合性”定性观点形成了定量呼应。它量化了不同专业背景的专家(如建筑、电气、社会管理)对何种环境风险最关键的判断存在显著且不稳定的分歧。这提示后续研究和管理实践,需要建立跨领域的风险沟通与联合诊断机制,以应对这种深层次的不确定性。

综上所述,本研究的贡献不仅在于提出了一套融合主客观权重的评价方法,更在于通过云模型将城中村火灾疏散安全的风险状态,从一个静态的等级结论,丰富为一个包含“核心水平”、“认知分歧”和“分歧稳定性”的多维画像。这使得治理对策的提出能够超越常规建议,实现更深层次的“精准”:

1) 针对“高权重-低得分-高不确定性”风险(如 D4 电动自行车管理): 治理需采取“工程改造(硬隔离与集中充电)+ 动态智慧管控(监测预警)+ 社区共治”的系统性组合拳,以同时应对风险的严重性和复杂性;

2) 针对“中权重-中得分-低不确定性”风险(如 C 应急管理): 治理重点应从“体系建设”转向“效能提升”,通过实战化演练、数字化流程闭环,解决“形式主义”这一确定性瓶颈;

3) 针对“优势但存在认知分歧”的领域(如 A 人员因素): 需从普及性宣传转向基于行为的精准干预,如针对弱势群体的“一对一”帮扶和情景化培训,将“知晓”优势转化为“能行”能力。

将本研究的发现与国家标准、现行政策及其他学术研究对比后可见,本方法及其结论,既验证了既有政策和研究的重点方向,又通过量化分析揭示了不同风险维度内在性质的差异,为推动城中村消防安全治理从“经验驱动”迈向“数据驱动、分类精准、系统韧性”的新模式,提供了更具操作性的决策支

持。

7. 结论与展望

本研究将组合赋权与云模型相结合，对深圳市某典型城中村进行了火灾疏散安全实证评价。结果表明：

1) 该方法能有效融合主客观信息，科学确定指标权重，其中“疏散设施”与“场所环境”是当前核心风险维度；

2) 云模型不仅给出了“一般”的安全等级结论($E_x = 63.2$)，还通过熵($E_n = 8.5$)和超熵($H_e = 1.8$)揭示了评价结果存在的较高模糊性与不稳定性，这比单一分数能提供更丰富的决策信息；

3) 基于量化结果提出的治理对策具有明确的针对性，实现了从“经验式”管理向“数据驱动、精准施策”的转变。

本研究验证了“组合赋权 - 云模型”方法在城中村这类复杂场景安全评价中的适用性与价值。未来研究可考虑引入实时监测数据(如物联网传感器)动态更新评价指标，或将该方法拓展应用于其他类型高风险区域的安全评估中。

基金项目

深圳市科技计划资助(项目编号：KCXFZ20230731093902005)。

参考文献

- [1] Saaty, T.L. (2013) Analytic Hierarchy Process. In: Gass, S.I. and Fu, M.C., Eds., *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Springer, 52-64. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1153-7_31
- [2] Darko, A., Chan, A.P.C., Ameyaw, E.E., Owusu, E.K., Pärn, E. and Edwards, D.J. (2019) Review of Application of Analytic Hierarchy Process (AHP) in Construction. *International Journal of Construction Management*, **19**, 436-452. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452098>
- [3] Podvezko, V. (2009) Application of AHP Technique. *Journal of Business Economics and Management*, **10**, 181-189. <https://doi.org/10.3846/1611-1699.2009.10.181-189>
- [4] Al-Harbi, K.M.A. (2001) Application of the AHP in Project Management. *International Journal of Project Management*, **19**, 19-27. [https://doi.org/10.1016/s0263-7863\(99\)00038-1](https://doi.org/10.1016/s0263-7863(99)00038-1)
- [5] Dalkey, N. and Helmer, O. (1963) An Experimental Application of the DELPHI Method to the Use of Experts. *Management Science*, **9**, 458-467. <https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.458>
- [6] Crisp, J., Pelletier, D., Duffield, C., Adams, A. and Nagy, S. (1997) The Delphi Method? *Nursing Research*, **46**, 116-118. <https://doi.org/10.1097/00006199-199703000-00010>
- [7] Fish, L.S. and Busby, D.M. (1996) The Delphi Method. In: Sprenkle, D.H. and Moon, S.M., Eds., *Research Methods in Family Therapy*, The Guilford Press, 469-482.
- [8] Shannon, C.E. (1948) A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, **27**, 379-423. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x>
- [9] de Boer, P., Kroese, D.P., Mannor, S. and Rubinstein, R.Y. (2005) A Tutorial on the Cross-Entropy Method. *Annals of Operations Research*, **134**, 19-67. <https://doi.org/10.1007/s10479-005-5724-z>
- [10] Jaynes, E.T. (1982) On the Rationale of Maximum-Entropy Methods. *Proceedings of the IEEE*, **70**, 939-952. <https://doi.org/10.1109/proc.1982.12425>
- [11] Wang, Y. and Elhag, T. (2008) An Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System for Bridge Risk Assessment. *Expert Systems with Applications*, **34**, 3099-3106. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.06.026>
- [12] Faber, D.S. and Korn, H. (1991) Applicability of the Coefficient of Variation Method for Analyzing Synaptic Plasticity. *Biophysical Journal*, **60**, 1288-1294. [https://doi.org/10.1016/s0006-3495\(91\)82162-2](https://doi.org/10.1016/s0006-3495(91)82162-2)
- [13] Eldridge, S.M., Ashby, D. and Kerry, S. (2006) Sample Size for Cluster Randomized Trials: Effect of Coefficient of Variation of Cluster Size and Analysis Method. *International Journal of Epidemiology*, **35**, 1292-1300. <https://doi.org/10.1093/ije/dyl129>

-
- [14] Zou, Z., Yun, Y. and Sun, J. (2006) Entropy Method for Determination of Weight of Evaluating Indicators in Fuzzy Synthetic Evaluation for Water Quality Assessment. *Journal of Environmental Sciences*, **18**, 1020-1023. [https://doi.org/10.1016/s1001-0742\(06\)60032-6](https://doi.org/10.1016/s1001-0742(06)60032-6)
- [15] Li, D., Cheung, D., Shi, X. and Ng, V. (1998) Uncertainty Reasoning Based on Cloud Models in Controllers. *Computers & Mathematics with Applications*, **35**, 99-123. [https://doi.org/10.1016/s0898-1221\(97\)00282-4](https://doi.org/10.1016/s0898-1221(97)00282-4)
- [16] Li, D., Liu, C. and Gan, W. (2009) A New Cognitive Model: Cloud Model. *International Journal of Intelligent Systems*, **24**, 357-375. <https://doi.org/10.1002/int.20340>
- [17] Reason, J. (1990) The Contribution of Latent Human Failures to the Breakdown of Complex Systems. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, **327**, 475-484. <https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0090>
- [18] Hollnagel, E. (2017) FRAM: The Functional Resonance Analysis Method: Modelling Complex Socio-Technical Systems. CRC Press.
- [19] Dai, L., Zhu, A.H. and Zhao, Y. (2013) Using AHP to Calculate Optimization Objective Weights of Transplanting Mechanism. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, **29**, 60-65.
- [20] Liu, Y., Ma, Y., Zhang, H., Li, D. and Chen, G. (2011) A Method for Trust Management in Cloud Computing: Data Coloring by Cloud Watermarking. *International Journal of Automation and Computing*, **8**, 280-285. <https://doi.org/10.1007/s11633-011-0583-3>
- [21] Wang, G., Xu, C., Zhang, Q. and Wang, X. (2012) A Multi-Step Backward Cloud Generator Algorithm. In: Yao, J., *et al.*, Eds., *Rough Sets and Current Trends in Computing*, Springer, 313-322. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32115-3_37