

基于组合赋权 - 云模型的绿色建筑 项目全寿命周期风险评价

陈 妍, 徐水太

(江西理工大学 经济管理学院, 江西 赣州 341000)

摘要: 绿色建筑项目建设投资大、技术集成高、影响因素广, 为全面客观评价绿色建筑项目面临的风险, 提出了基于组合赋权和云模型耦合的风险评价模型。文章从全寿命周期的决策、设计、施工至运行维护 4 个时间维度出发, 建立了风险评价指标体系; 采用 AHP - CRITIC 组合赋权法计算风险权重, 并结合云模型理论, 以标准云为判定依据确定风险等级。以某绿色建筑项目进行实例验证, 结果表明: 该项目总体风险处于较低风险等级, 其中施工阶段风险最高, 其余依次为运行维护、决策和设计阶段, 与实际情况基本相符, 验证了模型的适用性, 并据此提出针对性的管理措施。研究结果可为绿色建筑项目全寿命周期风险评价提供一定的参考依据。

关键词: 绿色建筑; 全寿命周期; 组合赋权; 云模型; 风险评价

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 8993(2025)05 - 0086 - 09

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.05.066

Risk evaluation of whole life cycle of green building projects based on combination weighting-cloud model

CHEN Yan, XU Shuitai

(School of Economics and Management, Jiangxi University of Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: The green building project construction investment is large, the technology integration is high, and the influencing factors are wide, in order to comprehensively and objectively evaluate the risks faced by the green building project, a risk evaluation model based on the combination of empowerment and cloud model coupling is proposed. A risk evaluation index system is established from the four time dimensions of decision-making, design, construction to operation and maintenance of the whole life cycle; the risk weight is calculated by using the AHP - CRITIC combination assignment method, and combined with the cloud model theory, the risk level is determined based on the standard cloud. The results show that the overall risk of the project is at a lower risk level, with the construction phase having the highest risk, and the remaining phases being operation and maintenance, decision-making and design, which is basically in line with the actual situation, verifying the applicability of the model and proposing targeted management measures accordingly. The results of the study can provide a certain reference basis for the whole life cycle risk evaluation of green building projects.

Key words: green building; whole life cycle; combination weighting; cloud model; risk evaluation

随着经济发展与科技创新的持续推进, 人民生活水平得到不断改善, 这一进程也面临着能源

消耗的急剧增长和环境问题的日益恶化所构成的对可持续发展的双重挑战。据《中国建筑能耗与

收稿日期: 2024 - 08 - 02

作者简介: 陈妍(1999—), 女, 硕士研究生, 从事工程项目管理研究。

通信作者: 徐水太(1978—), 男, 副教授, 从事工程项目管理研究。

碳排放研究报告(2023 年)》, 2021 年全国建筑全过程能耗总量占全国能源消耗总量的 44.7%, 碳排放总量占全国能源相关碳排放的 47.1%^[1], 可见, 建筑业作为我国能耗与碳排放的主要领域, 发展绿色建筑已成为其实现绿色转型和高质量发展的必由之路。绿色建筑是在全寿命期内, 节约资源、保护环境、减少污染, 为人们提供健康、适用、高效的使用空间, 最大限度地实现人与自然和谐共生的高质量建筑^[2]。相较于传统建筑, 绿色建筑在建筑物设计、建设实施及责任落实等方面设有更高的标准, 强调环保、节能与健康舒适等核心理念的同时, 也相应增加了项目建设过程中的风险挑战。因此, 加强绿色建筑项目的风险评价研究, 对于确保项目顺利实施和促进建筑行业的持续健康发展具有重要意义。

在风险研究方面, 国内学者主要关注风险因素间的相互关系或特定阶段内的风险分析。刘曾珍等^[3]从开发商视角出发, 运用 SEM 探究绿色建筑开发建设过程中风险因素的相互关系; 王景慧等^[4]以承包商视角, 基于 SD 理论构建绿色建筑项目的风险识别反馈模型, 分析目标风险与因素间的相互关系及其来源; 王淋等^[5]基于绿色建筑项目各利益相关者视角, 运用网络分析技术评估项目的风险关联关系; 刘进^[6]引入奖惩并举的局部变权原理结合 FCE, 量化评估绿色建筑决策阶段风险; 王凯等^[7]采用 FDM 和 FAHP 对绿色建筑设计风险因素进行量化分析, 以确定关键风险并综合评估项目风险; 胡庆国等^[8]运用五元联系数集对分析法, 对绿色建筑施工安全风险进行势态分析, 实现动态与静态评价有效结合。目前, 针对

全寿命周期风险研究相对较少, 既有文献中的风险分析方法多采用单一赋权法, 且一些评价模型未能充分考虑评价过程中的不确定性而存在一定的局限。

鉴于此, 本文从全寿命周期视角出发, 建立绿色建筑项目风险评价指标体系, 运用 AHP-CRITIC 组合赋权法计算指标的综合权重, 并引入云模型理论进行风险评价, 通过云图对比法和相似度法确定风险等级, 将构建的模型应用于实际项目中, 验证模型的适用性, 以期为绿色建筑项目全寿命周期风险评价提供参考。

1 风险评价指标体系建立

根据工程项目基本建设程序, 结合绿色建筑特点与发展现状, 将绿色建筑项目全寿命周期划分为决策、设计、施工以及运行维护 4 个阶段。通过参考相关文献^{[9]~[11]}对各阶段的风险指标进行初步筛选, 共得到 27 个风险指标, 为确保其合理有效, 进一步结合专家访谈, 将收集到的 10 位业内专家对初筛指标的反馈数据, 采用特征筛选-相关系数法^[12]进行指标修正和优化。以决策阶段为例, 初步筛选出的风险指标包括政策变动风险、行政审批风险、法律更新风险、目标设定风险、市场认知风险和资金筹措风险, 利用 SPSS 软件对 10 位专家的反馈数据进行特征筛选, 处理类型选择相关系数法, 结果表明法律更新风险需剔除, 其他应予以保留, 如表 1 所示。同理, 进行其他阶段下的指标筛选, 最终形成包括 4 个时间维度的一级指标和 23 个二级指标的绿色建筑项目全寿命周期风险评价指标体系, 如图 1 所示。

表 1 决策阶段指标筛选的反馈数据及结果

指标	不同专家对指标重要程度的打分情况										结果
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
政策变动风险	4	1	3	3	1	2	3	3	1	5	保留
行政审批风险	2	2	5	3	4	2	4	4	1	1	保留
法律更新风险	1	4	3	3	3	5	1	4	2	2	移除
目标设定风险	4	2	4	1	4	1	4	4	1	2	保留
市场认知风险	2	4	1	4	5	3	3	3	5	5	保留
资金筹措风险	5	4	5	4	1	2	2	2	2	5	保留

注: 1~5 表示指标对绿色建筑项目风险评价的重要程度: 1 为不重要; 2 为次重要; 3 为一般重要; 4 为比较重要; 5 为非常重要。

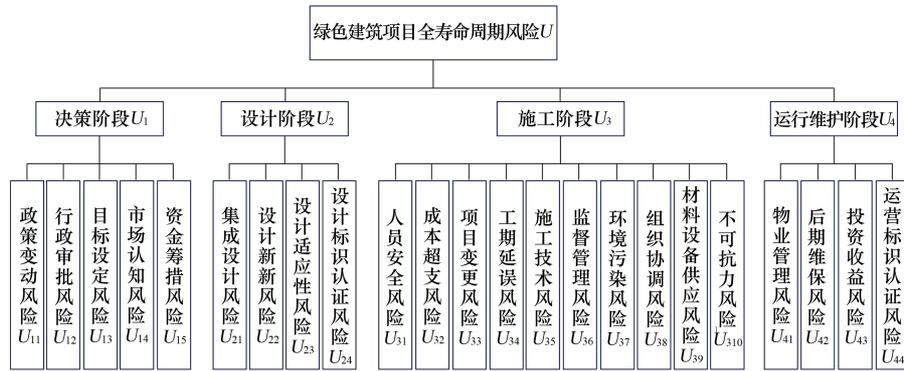


图 1 绿色建筑项目全寿命周期风险评价指标体系

2 组合赋权 - 云模型的风险评价模型构建

在绿色建筑项目全寿命周期风险评价过程中, 指标权重的确定是关键步骤, 各风险指标权重大小反映了其对项目风险影响程度的不同。为实现对研究对象的科学评价, 在赋权方法上采用 AHP 法和 CRITIC 法确定指标权重。AHP 法可将专家基于个人经验及专业知识对风险指标重要性的主观判断转化为具体的权重值, 且该方法与建立的风险评价指标体系的层次结构相契合; 而 CRITIC 法则通过分析风险指标间的数据关系, 客观反映各指标在评价体系中的重要性。为了使赋权结果同时兼具专家的主观判断与数据的客观特性, 依据最小信息熵原理, 运用拉格朗日乘子法进行组合赋权计算, 以优化权重的确定。同时, 考虑到风险评价过程中存在的模糊性和随机性, 引入云模型作为评价方法。该模型根据风险指标的权重和评价标准, 对绿色建筑项目的风险进行综合评价, 能够有效解决因指标模糊性和随机性所导致的数据不准确性问题, 实现风险指标定性与定量的转换, 直观展示风险等级^[13], 使得风险评价结果更加直观易懂, 便于决策者进行风险管理和控制。评价模型的具体实现步骤如下。

2.1 层次分析法

层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP) 是一种将复杂决策问题分解为多个层次, 通过定性和定量分析来确定各元素相对重要性的决策方法。其步骤如下:

(1) 构造判断矩阵。对于 n 个评价指标, 根据 Saaty 的 1-9 标度法进行两两比较, 形成判断矩阵:

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: a_{ij} 表示第 i 个指标相比第 j 个指标的重要程度, 且 A 中元素满足 $a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1 (i, j = 1, \dots, n)$ 。

(2) 计算各指标权重。运用 MATLAB 软件求解判断矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 及其对应的特征向量 $[a_1, a_2, \dots, a_n]^T$, 并对求出的特征向量进行归一化, 即可得到各指标权重 $W'_j = (W'_1, W'_2, \dots, W'_n)$ 。

(3) 一致性检验。通过判断矩阵 A 的最大特征值 λ_{\max} 计算一致性指标 σ_{CI} :

$$\sigma_{CI} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

根据矩阵阶数 n 查找相应的平均随机一致性指标 σ_{RI} ^[14], 进而计算一致性比例 σ_{CR} :

$$\sigma_{CR} = \frac{\sigma_{CI}}{\sigma_{RI}} \quad (3)$$

当 $\sigma_{CR} \leq 0.1$ 时, 认为判断矩阵 A 的一致性是可以接受的, 当 $\sigma_{CR} > 0.1$ 时, 认为判断矩阵 A 的一致性不满足要求, 需进行调整和修正。

2.2 CRITIC 权重法

CRITIC 权重法是基于指标的内部变异性和指标间的冲突性来综合衡量评价指标的客观权重。其步骤如下:

(1) 构造评价矩阵。设有 m 个参评专家, n 个评价指标, 形成评价矩阵:

$$\mathbf{B} = (b_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{m1} & b_{m2} & \cdots & b_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: b_{ij} 为第 i 个专家对第 j 个指标的评价值。

(2) 无量纲化处理。为消除量纲差异对评价结果的影响, 需对评价矩阵 \mathbf{B} 进行正向化或逆向化处理, 得到无量纲化矩阵 $\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n}$ 。

对于正向指标 (指标值越大越优):

$$x_{ij} = \frac{b_{ij} - \min(b_j)}{\max(b_j) - \min(b_j)} \quad (5)$$

对于逆向指标 (指标值越小越优):

$$x_{ij} = \frac{\max(b_j) - b_{ij}}{\max(b_j) - \min(b_j)} \quad (6)$$

式中: $\max(b_j)$ 、 $\min(b_j)$ 分别为指标序列 b_{ij} 最大、最小值。

(3) 计算各指标标准差 S_j :

$$\begin{cases} \bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \\ S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m-1}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: \bar{x}_j 为第 j 个指标的均值。

(4) 计算相关系数 r_{jk} :

$$r_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (8)$$

(5) 计算指标所包含的信息量 C_j :

$$C_j = S_j \sum_{k=1}^n (1 - r_{jk}) \quad (9)$$

(6) 计算各指标权重 W''_j :

$$W''_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (10)$$

2.3 拉格朗日乘子法组合赋权

拉格朗日乘子法是一种求解在约束条件下的多元函数最优值问题的方法。运用拉格朗日乘子法组合赋权, 其基本思想如下:

结合 AHP 权重 W'_j 和 CRITIC 权重 W''_j , 确定综合权重 $W_j = W'_j W''_j / \sum_{j=1}^n W'_j W''_j$, 为使综合权重在空间分布上最大限度地接近 AHP 权重和 CRITIC 权

重, 根据最小信息熵原理建立目标函数 $\min F = \sum_{j=1}^n W_j (\ln W_j - \ln W'_j) + \sum_{j=1}^n W_j (\ln W_j - \ln W''_j)$, 运用拉格朗日乘子法求解上述优化问题, 可得综合权重计算式为

$$W_j = \frac{\sqrt{W'_j W''_j}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{W'_j W''_j}} \quad (11)$$

2.4 云模型理论

云模型是一种基于概率论和模糊集理论的数学模型, 用于处理定性概念与定量表示之间的不确定性转换, 通过期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 这 3 个数字特征来描述语言值的数学属性。其中期望 E_x 为云滴在论域空间的中心位置, 是最能够代表定性概念的点; 熵 E_n 是定性概念的不确定性度量, 反映云滴分布的模糊性和随机性; 超熵 H_e 是熵的不确定性度量, 其大小间接表示云的厚度。云模型算法是通过云发生器来实现, 其工作原理如图 2 所示。

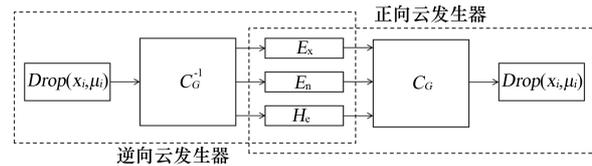


图 2 云发生器原理

逆向云发生器是实现定量数据到以数字特征 (E_x, E_n, H_e) 表示的定性概念的转换, 而正向云发生器则是根据云的数字特征 (E_x, E_n, H_e), 生成代表该定性概念的定量值 (云滴), 每个云滴映射定性概念的具体实现。运用云模型评价步骤如下:

(1) 确定标准云。定义评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, 分别为低风险、较低风险、中等风险、较高风险、高风险五个等级, 每个等级对应的评语取值范围按照论域 $[0, 1]$ 等分为 5 个子区间, 通过黄金分割率法^[15] 来确定评语集的云数字特征, 如表 2 所示。

表 2 标准云数字特征

评语等级	区间划分	云数字特征 (E_x, E_n, H_e)
低风险	[0, 0.2)	(0.000, 0.103, 0.013)
较低风险	[0.2, 0.4)	(0.309, 0.064, 0.008)
中等风险	[0.4, 0.6)	(0.500, 0.039, 0.005)
较高风险	[0.6, 0.8)	(0.691, 0.064, 0.008)
高风险	[0.8, 1]	(1.000, 0.103, 0.013)

基于评语集的云数字特征,通过 MATLAB 软件实现正向云发生器算法,生成标准云图,如图 3 所示。

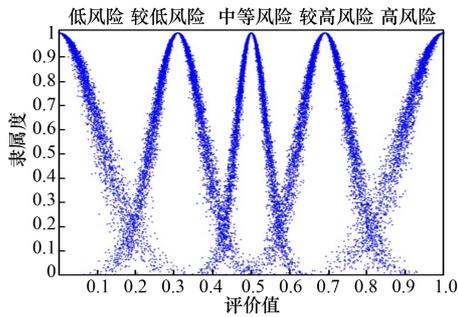


图 3 标准云图

(2) 确定评价云。通过逆向云发生器对二级指标的评价数据进行运算,得出其评价云数字特征,公式如下:

$$\begin{cases} E_x = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i \\ E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |x_i - E_x|} \\ H_e = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_i - E_x)^2 - E_n^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: x_i 为输入的样本点。

(3) 确定综合云。将二级指标的评价云数字特征与相应的权重向量进行加权运算,以确定一级指标的综合云数字特征,同理可计算出目标层的综合云数字特征,公式如下:

$$\begin{cases} E_x = \frac{\sum_{j=1}^n W_j E_{x,j}}{\sum_{j=1}^n W_j} \\ E_n = \frac{\sum_{j=1}^n W_j^2 E_{n,j}}{\sum_{j=1}^n W_j^2} \\ H_e = \frac{\sum_{j=1}^n W_j^2 H_{e,j}}{\sum_{j=1}^n W_j^2} \end{cases} \quad (13)$$

(4) 确定风险等级。通过 MATLAB 软件根据综合云和标准云的数字特征生成对比云图,以初步判定风险等级,在此基础上,引入相似度法,计算综合云和标准云之间的相似度,并根据最大隶属度原则来最终确定风险等级,算法如下:

1) 运用 MATLAB 软件在综合云中生成正态随机数 $x_i \sim N(E_n, H_e^2)$, $y_i \sim N(E_x, x_i^2)$, 在标准云中生成正态随机数 $z_i \sim N(E_{n,q}, H_{e,q})$ 。

2) 计算 y_i 在标准云的相似度:

$$u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e^{-[(y_i - E_{x,q})^2 / (2\sigma_i^2)]} \quad (14)$$

式中: n 为云滴数。

3 实例分析

3.1 项目概况

以某市某绿色建筑项目为例,该项目建设类型为居住建筑,规划用地面积为 40 722.07 m²,总建筑面积为 130 819.90 m² (地上建筑面积为 102 645.33 m²,地下建筑面积为 28 174.57 m²),容积率为 2.5,绿地率达 30%,由 6 栋高层住宅及商业配套构成。该项目已获得一星级绿色建筑标识,主要采用围护结构保温系统、雨水回用系统、智能化控制系统等绿色建筑节能技术。

3.2 评价指标权重计算

邀请 10 位绿色建筑领域的专家,采用 Saaty 的 1-9 标度法对评价指标的重要性进行两两比较,通过几何平均处理专家打分以形成判断矩阵,根据式(2)、(3)计算出各指标 AHP 权重;基于风险指标难以量化问题,引入韧性定义进行描述,依据指标对韧性的影响程度,将其划分为 5 个等级:Ⅰ(强)、Ⅱ(较强)、Ⅲ(一般)、Ⅳ(较弱)、Ⅴ(弱),以专家组采用百分制法(即 $U = [90 - 100]$ 、 $[80 - 90]$ 、 $[70 - 80]$ 、 $[60 - 70]$ 、 $[0 - 60]$)对指标进行等级评定作为评价矩阵,根据式(6)~(10)计算出各指标 CRITIC 权重;再由式(11)计算出各指标的综合权重,结果如表 3 所示。

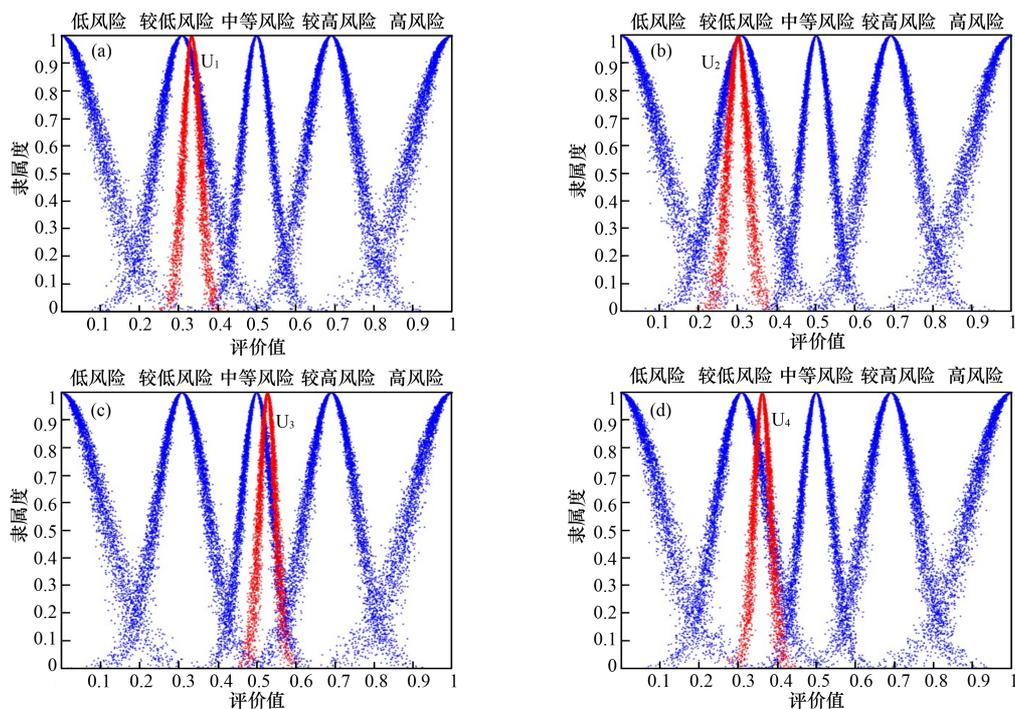
3.3 云模型综合评价

邀请该项目设计单位、施工单位等 6 位建设主体代表组成专家小组,在 $[0, 1]$ 区间内遵循“分值越低,风险越小”原则对二级指标进行评分,根据式(12)计算出其评价云数字特征,再结合相应的综合权重,根据式(13)进行加权运算,以确定一级指标的综合云数字特征。经验证,各指标的云数字特征均满足条件 $H_e < E_n/3$,说明各评价价值有效,结果如表 4 所示。

将一级指标的综合云数字特征输入 MATLAB 软件的正向云发生器算法中,生成该项目各阶段综合云图,并与标准云图进行对比,如图 4 所示,为保证结果的可靠性,根据式(14)计算综合云与标准云各等级之间的相似度,如表 5 所示。

表3 风险指标权重

一级指标	AHP 权重	CRITIC 权重	综合权重	二级指标	AHP 权重	CRITIC 权重	综合权重
U_1	0.277 3	0.219 5	0.248 2	U_{11}	0.153 2	0.048 7	0.092 2
				U_{12}	0.034 3	0.041 9	0.040 5
				U_{13}	0.019 1	0.039 6	0.029 3
				U_{14}	0.012 0	0.050 2	0.026 2
				U_{15}	0.058 7	0.039 2	0.051 2
U_2	0.113 1	0.178 2	0.142 8	U_{21}	0.054 8	0.051 9	0.056 9
				U_{22}	0.009 3	0.037 5	0.020 0
				U_{23}	0.017 3	0.043 2	0.029 2
				U_{24}	0.031 7	0.045 6	0.040 6
U_3	0.463 0	0.435 9	0.451 9	U_{31}	0.092 4	0.045 5	0.069 2
				U_{32}	0.030 8	0.039 8	0.037 3
				U_{33}	0.055 5	0.042 8	0.052 0
				U_{34}	0.050 1	0.044 3	0.050 3
				U_{35}	0.133 7	0.050 2	0.087 5
				U_{36}	0.023 4	0.041 4	0.033 2
				U_{37}	0.019 3	0.043 9	0.031 0
				U_{38}	0.023 3	0.040 1	0.032 6
				U_{39}	0.022 0	0.044 9	0.033 5
				U_{310}	0.012 5	0.043 1	0.024 8
U_4	0.146 6	0.166 4	0.157 1	U_{41}	0.046 0	0.042 7	0.047 3
				U_{42}	0.060 0	0.043 2	0.054 3
				U_{43}	0.025 9	0.045 4	0.036 6
				U_{44}	0.014 7	0.035 1	0.024 3



(a) 决策阶段; (b) 设计阶段; (c) 施工阶段; (d) 运行维护阶段

图4 项目各阶段风险对比云图

表 4 风险指标云数字特征

一级指标	综合云数字特征			二级指标	评价云数字特征		
	E_x	E_n	H_e		E_x	E_n	H_e
U_1	0.333 8	0.021 6	0.004 4	U_{11}	0.431 7	0.018 8	0.004 1
				U_{12}	0.273 3	0.034 8	0.003 8
				U_{13}	0.255 0	0.023 0	0.004 7
				U_{14}	0.230 0	0.020 9	0.006 0
				U_{15}	0.303 3	0.022 3	0.005 5
U_2	0.299 6	0.025 2	0.005 3	U_{21}	0.428 3	0.023 0	0.005 6
				U_{22}	0.226 7	0.025 1	0.006 5
				U_{23}	0.195 0	0.041 8	0.002 2
				U_{24}	0.230 0	0.020 9	0.006 0
				U_{31}	0.641 7	0.011 1	0.003 5
U_3	0.527 9	0.020 4	0.004 3	U_{32}	0.505 0	0.031 3	0.005 6
				U_{33}	0.625 0	0.027 2	0.003 5
				U_{34}	0.541 7	0.018 1	0.005 6
				U_{35}	0.665 0	0.023 0	0.004 7
				U_{36}	0.421 7	0.018 8	0.004 8
				U_{37}	0.323 3	0.027 9	0.003 3
				U_{38}	0.371 7	0.015 3	0.004 7
				U_{39}	0.473 3	0.016 7	0.003 5
				U_{310}	0.208 3	0.023 0	0.003 0
				U_4	0.361 8	0.021 0	0.004 5
U_{42}	0.441 7	0.015 3	0.004 7				
U_{43}	0.338 3	0.018 8	0.004 8				
U_{44}	0.221 7	0.023 7	0.004 9				

表 5 项目各阶段风险相似度对比

阶段	风险等级				
	低风险	较低风险	中等风险	较高风险	高风险
U_1	0.005 2	0.927 6	0.000 1	1.70×10^{-7}	0
U_2	0.014 6	0.989 2	1.86×10^{-6}	1.00×10^{-8}	0
U_3	1.98×10^{-6}	0.002 9	0.774 2	0.038 9	2.74×10^{-5}
U_4	0.002 1	0.711 5	0.001 9	1.80×10^{-6}	0

同理，可计算得出目标层的综合云数字特征为(0.421 0, 0.021 0, 0.004 4)，据此绘制该项目总体风险对比云图，如图 5 所示，相似度计算结果如表 6 所示。

表 6 项目总体风险相似度对比

风险等级	低风险	较低风险	中等风险	较高风险	高风险
相似度	0.000 2	0.216 2	0.128 6	0.000 1	$1.40e - 07$

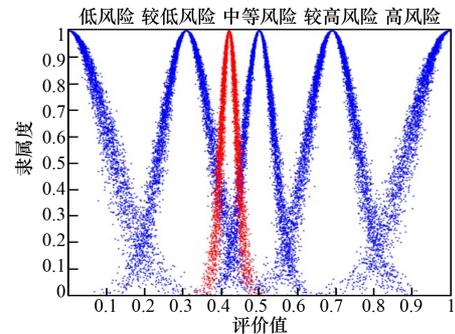


图 5 项目总体风险对比云图

3.4 结果分析与措施建议

3.4.1 结果分析

由图5可知,该项目总体风险综合云图位于较低风险与中等风险之间,更倾向于较低风险,表6数据显示,其与较低风险标准云图的相似度最大,为0.216 2,根据最大隶属度原则,该项目总体风险等级为较低风险。此外,熵 E_n 为0.021 0,超熵 H_n 为0.004 4,两者数值均较小,表明该评价结果具有较高的可信度和稳定性,项目总体风险处于可控范围内,但其潜在影响仍不容忽视。

进一步分析该项目全寿命周期各阶段的风险状况,发现施工阶段的风险最高,如图4(c)所示,综合云图与中等风险基本吻合,且期望 E_x 为0.527 9,落在中等风险论域区间内,结合表5数据,综合云与标准云最大的相似度为0.774 2,与云图判断结果相一致,可综合判定施工阶段的风险等级为中等风险。通过对比表4中的评价云数字特征与表2中的标准云数字特征,可以识别出引起该阶段风险高的主要因素包括人员安全风险、项目变更风险和施工技术风险,期望值均落在较高风险区间,且高于该阶段的整体风险水平。从表3的风险综合权重也可看出,上述3个风险因素在该阶段所占权重较大。在该项目实际施工中,由于缺乏有效的前期规划与沟通、安全措施不到位以及对新技术掌握不足,导致施工阶段的风险水平最高。因此,应加强关注权重较大且风险等级较高的因素,是降低风险的关键所在。

同样地,通过对相关图表的分析,可知决策、设计和运行维护阶段的风险等级均为较低风险,面临的主要风险因素分别是政策变动风险、集成设计风险和后期维保风险,均属于中等风险,风险评价结果与项目所面临的实际风险情况基本符合,验证了模型的适用性。

3.4.2 措施建议

(1) 针对较低风险建设阶段的关键风险因素,可采取的措施:1) 加强政策研究与趋势分析,预测可能的政策变化及其对项目的影响;建立与政府相关部门的有效沟通机制,及时了解政策制定背景和意图,争取政府对项目的理解和支持,确保项目决策与政策导向同步。2) 组建跨学科设计

团队,促进建筑、环境等领域专业知识有效融合,形成统一的绿色设计理念;利用BIM技术创建三维数字模型集成多源设计数据,实现信息共享与动态更新,提高设计决策的透明度和效率。3) 制定全面的维保计划,明确维护周期和检查项目,确保建筑系统和设备的稳定运行;定期对维护人员进行专业培训,提升其专业技能和应急响应能力,以有效应对突发维护需求。

(2) 针对中等风险建设阶段的关键风险因素,可采取的措施:1) 加强安全教育与培训,确保施工人员熟练掌握安全操作规程,提升安全意识;定期组织安全演练,预防高空坠落、机械伤害等事故;同时,应用监控技术进行实时监测,以便及时发现并纠正不安全行为。2) 建立规范的变更管理流程,明确审批权限与步骤,以保障变更决策过程合理高效;加强项目各方沟通协作,确保变更信息及时传递;此外,利用项目管理软件跟踪变更执行,灵活调整项目计划以应对变化。3) 预先评估绿色施工技术的可行性,确保其既符合绿色建筑标准,又满足实际施工需求;加强技术培训和现场指导,提升施工人员对绿色施工技术的理解与应用能力;以及运用BIM等信息技术进行施工模拟,优化施工方案,预防技术实施中的问题。

4 结论

(1) 立足于绿色建筑项目从决策到运行维护阶段的全寿命周期过程,通过文献研究与专家访谈,并采用相关系数法,建立了包含4个一级指标和23个二级指标的风险评价指标体系。

(2) 基于AHP-CRITIC组合赋权和云模型理论,构建了绿色建筑项目全寿命周期风险评价模型。采用拉格朗日乘子法优化主、客观赋权,有效避免了单一赋权法的局限性,同时,结合云模型理论通过其算法解决了评价过程中的随机性和模糊性问题,实现了定性定量之间的转换,使得评价结果直观可靠。

(3) 以某绿色建筑项目为例进行实证分析,评价结果与实际情况基本相符,并进一步分析了二级指标,针对各阶段的关键风险因素提出了措

施建议。

(4) 鉴于绿色建筑项目风险管理的动态性和风险影响因素的多变性,实际操作中需不断根据具体情况调整指标,以进一步优化和完善评价指标体系。

参考文献:

- [1] 中国建筑能耗与碳排放研究报告(2023年)[J]. 建筑,2024(2):46-59.
- [2] 王清勤,叶凌.《绿色建筑评价标准》GB/T50378-2019的编制概况、总则和基本规定[J]. 建设科技,2019(20):31-34.
- [3] 刘曾珍,王月明.基于SEM的绿色建筑开发建设风险分析[J]. 绿色建筑,2023,15(5):27-32.
- [4] 王景慧,秦旋,万欣.绿色建筑项目的风险因素识别与风险路径分析[J]. 施工技术,2012,41(21):30-34.
- [5] 王淋,马力,于洋.基于复杂网络分析的绿色建筑项目关键风险研究[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(6):50-56;100.
- [6] 刘进.基于变权原理的绿色建筑决策阶段风险评价[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2017,39(2):168-171;196.
- [7] 王凯,江昔平.基于FDM与FAHP的绿色建筑设计风险因素评价研究[J]. 河南城建学院学报,2023,32(5):61-69.
- [8] 胡庆国,田学泽,何忠明.基于五元联系数集对分析模型的绿色建筑施工安全风险评价[J]. 安全与环境学报,2021,21(5):1880-1888.
- [9] 贾宏俊,高鹏,亓培鑫.基于AHP-多级可拓模型的绿色建筑全生命周期风险评价[J]. 项目管理技术,2019,17(5):56-61.
- [10] 李强年,魏欢,马岷成.基于熵权法的绿色建筑项目风险因素评估[J]. 建筑节能,2020,48(6):112-116.
- [11] 孙玉峰,代霞,郭硕.绿色建筑项目全寿命周期风险评价方法探析[J]. 山东工商学院学报,2021,35(5):52-60.
- [12] 杜晓燕,高勤跃,刘秀玉.基于相关系数-熵-二维云模型的装配式建筑施工风险测度[J]. 安全与环境工程,2024,31(3):120-127.
- [13] 谢晓东,苏宁川,莫细喜.基于云模型的EPC项目招标风险评价研究[J]. 工程建设,2022,54(5):49-54.
- [14] 洪志国,李焱,范植华,等.层次分析法中高阶平均随机一致性指标(RI)的计算[J]. 计算机工程与应用,2002(12):45-47;150.
- [15] 李振强,曹琦,孟庆军.基于指数标度AHP-黄金分割率法云模型的军事设施建设项目风险评价[J]. 军事运筹与评估,2023,38(2):23-29.