

# 基于组合赋权-云模型的绿色建筑微观 风险评价研究

洪文霞, 鹿乘<sup>\*</sup>, 赵德凤, 李蓓蓓

(青岛理工大学 管理工程学院, 山东 青岛 266520)

**摘要:**为了客观全面地分析评价绿色建筑项目在微观层面的风险,在建立绿色建筑微观风险指标体系的基础上,使用AHP-熵权模型对指标进行组合赋权,通过构建基于云理论绿色建筑微观风险的云评价模型,得到风险标准云图和综合评价云图,从而确定风险等级。选取郑州经济开发区的“双零楼”项目为案例进行微观风险评价,结果表明,该项目处于低风险和较低风险等级之间,并确定出关键风险因素。为绿色建筑相关建设主体提供了新的风险管理思路,对绿色建筑的健康长远发展意义重大。

**关键词:**绿色建筑;微观风险;AHP-熵权法;云模型

**中图分类号:** TU201.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1008-7192(2021)04-0072-08

绿色建筑又称生态建筑、生态化建筑、可持续建筑,是指在建筑的全生命周期内,最大限度地节约资源(节能、节地、节水、节材)、保护环境和减少污染,为人们提供健康、适用和高效的使用空间,与自然和谐共生的建筑<sup>[1]</sup>。随着2017年在北京成功举办第十三届绿色建筑与建筑节能大会,2019年3月发布《建筑节能与绿色建筑发展“十三五”规划》,绿色建筑越来越成为当下投资的热点,中石油大厦、中海油大厦、中关村展示中心、海林大楼、中国节能绿色建筑科技馆(杭州)和杭州低碳科技馆等都是典型的绿色建筑代表。

但是在绿色建筑投资过程中,各方面的风险成为限制开发商选择绿色建筑的主要原因。目前国内绿色建筑的研究大多停留在激励政策、增量成本、绿色技术、绿色运营等方面,鲜有关于绿色建筑风险的研究,现有的风险研究侧重于风险的发生概率和风险危害方面的研究,研究内容比较局限。关于绿色建筑项目微观层级风险研究更是少之又少,而绿色建筑项目风险管理问题是成功实现绿色建筑项目的关键点。王景慧等<sup>[2]</sup>基于承包商视角,根

据系统动力学理论建立了绿色建筑项目风险识别反馈模型图,分析了项目目标风险与各风险因素之间的相互关系以及风险来源;秦旋等<sup>[3]</sup>对专家发放调查问卷,对我国绿色建筑风险的重要性和分担偏好作出了调查,探讨了25项重点风险的分担与管理建议;万欣等<sup>[4]</sup>建立绿色建筑目标体系的理论模型,归纳了绿色建筑风险因素并将绿色建筑风险分为微观、中观和宏观三个风险层级,分析了风险因素如何影响绿色建筑目标的实现;万欣等<sup>[5]</sup>识别出与我国绿色建筑项目相关的62项风险因素,采用问卷调查和统计分析的方法对我国绿色建筑项目风险的发生概率、危害程度和重要性进行了评估;秦旋等<sup>[6]</sup>基于全生命周期内的56项风险因素对专家发放风险发生概率和风险危害程度的问卷,对调查问卷数据使用spss软件进行描述性统计分析和推论性统计分析;马晓国等<sup>[7]</sup>建立了灰色线性规划模型对绿色建筑项目融资风险分担机制进行研究;秦旋等<sup>[8]</sup>将绿色建筑项目的全生命周期划分为决策阶段、设计阶段、施工阶段、试运行阶段和运营维护阶段5个阶段,基于经济、环境和社会三个角度作为

收稿日期:2020-12-01

基金项目:国家自然科学基金项目“参与方个体视角下大型工程项目融资风险动态评价体系研究”(71471094);“十三五”山东省高等学校人文社会科学研究平台项目“智慧城市建设管理研究中心”(新型智库)

作者简介:洪文霞(1964-),女,青岛理工大学管理工程学院教授,硕士生导师,研究方向为工程造价管理;鹿乘(1996-),男,青岛理工大学管理工程学院硕士研究生,研究方向为工程管理。E-mail:734256936@qq.com

<sup>\*</sup>通信作者:鹿乘。E-mail:738235185@qq.com

绿色建筑项目评价体系建立了我国绿色建筑项目的风险测度与评价假设模型。蔡久顺等<sup>[9]</sup>基于模糊多层次灰色法对绿色建筑设计风险方面进行了研究;王娟等<sup>[10]</sup>提出了投资风险决策以及评估指标权重的决策确定方法,为开发商开发绿色节能建筑提供了一种可以指标量化、科学合理的风险投资决策理论模型方法;秦旋等<sup>[11]</sup>识别出绿色建筑全寿命周期的风险因素,采用社会网络分析法辨识风险因素间的相互关系;黄定轩<sup>[12]</sup>建立了绿色建筑需求侧演化博弈模型,分析表明绿色建筑收益和风险对开发商和业主的博弈产生影响,进而影响绿色建筑的演化结局;王淋等<sup>[13]</sup>基于绿色建筑项目参与方的视角,采用网络分析技术研究绿色建筑项目的风险关联关系;陶雨等<sup>[14]</sup>采用 AHP - 熵权法对各指标进行组合赋权,从多角度对绿色建筑全寿命周期风险进行评价并提出风险应对的方法策略。

综上,关于绿色建筑风险的研究大多是投资决策阶段和全寿命周期的研究,缺乏对绿色建筑微观层级方面的研究。在此基础上,本文主要根据 Li B 等<sup>[15]</sup>的风险层级归纳方法和文献阅读法从绿色建筑微观风险层面建立绿色建筑微观风险指标体系,

基于 Rough-set 理论,在层次分析法(AHP)权重和熵权法权重间寻找平衡,确定评价指标的组合权重。考虑到评价过程的随机性、模糊性和定性定量转换的科学性,运用云模型对绿色建筑微观风险进行综合评价,通过计算风险的云数字特征确定项目微观风险等级,将建立的模型应用到郑州“双零楼”项目当中,验证模型的可行性。

### 一、建立绿色建筑微观风险指标体系

与传统建筑相比,绿色建筑对生态环境、建造技术、系统集成等要求更加严格,不仅要求绿色建筑项目的参与方具有绿色经验,还需要各参与方之间更多的合作,强调建筑物全生命周期内的性能,因此绿色建筑比传统建筑面临更大的挑战和风险。在此背景下,本文结合大量国内外绿色建筑研究文献,将重复的指标和当下无意义的指标合并或者删除,基于微观风险角度,确定了 6 个一级指标和 21 个二级指标(表 1)。

表 1 绿色建筑风险指标体系

一级指标	二级指标	参考文献
设计风险 A <sub>1</sub>	与设计单位协调配合风险 A <sub>11</sub>	[4-6][11][16]
	缺少集成设计经验风险 A <sub>12</sub>	
	对业主的绿色设计要求理解不足导致的违约 A <sub>13</sub>	
施工风险 A <sub>2</sub>	业主对施工过程中的不合理干涉 A <sub>21</sub>	[4-6][11][16]
	缺少有绿色施工经验的施工人员 A <sub>22</sub>	
	对合同中绿色施工要求认识不足导致的违约 A <sub>23</sub>	
管理风险 A <sub>3</sub>	物业管理能力差 A <sub>31</sub>	[4-6][11][16-17]
	缺乏有绿色施工经验的管理人员 A <sub>32</sub>	
	人员流动性大 A <sub>33</sub>	
	对分包商工作范围定义不明确 A <sub>34</sub>	
	分包环境意识差 A <sub>35</sub>	
监理风险 A <sub>4</sub>	分包商管理能力差 A <sub>36</sub>	[4-6][11][16]
	缺少有绿色监理经验的监理人员 A <sub>41</sub>	
	监理对绿色建筑认识不足 A <sub>42</sub>	
	监理能力差 A <sub>43</sub>	
成本风险 A <sub>5</sub>	监理行为不规范 A <sub>44</sub>	[4-6][11][16-17]
	未达到绿色要求引起的索赔 A <sub>51</sub>	
	不为人员和主要设备购买保险 A <sub>52</sub>	
其他风险 A <sub>6</sub>	保修风险 A <sub>53</sub>	[4][6][17]
	业主代表的低效率 A <sub>61</sub>	
	绿色认证责任划分不清 A <sub>62</sub>	
	绿色建筑评审专家失职 A <sub>63</sub>	
	申报绿色建筑所需资料准备不足 A <sub>64</sub>	
	配合业主试运行 A <sub>65</sub>	

## 二、建立组合赋权-云模型评价模型

### 1. 层次分析法(AHP)确定主观权重

运用层次分析法(AHP)分析指标间的重要程度,具体步骤如下:1)邀请相关专家对各层级指标进行两两比较,确定判断矩阵。2)计算判断矩阵的特征向量,进行层次单排序。计算  $CR$ , 当  $CR \leq 0.1$  判断矩阵通过一致性检验,否则需调整判断矩阵。层次总排序,得到权重。

(1)构造判断矩阵。对于  $n$  个元素,根据 Saaty 标度法两两比较得到判断矩阵:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2)计算权重。设  $B$  矩阵特征向量:  $C = [C_1, C_2, C_3, \dots, C_n]$ , 以及其最大特征根为  $\lambda_{\max}$ 。统计判断矩阵后,进行一致性检验。一致性指标:

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

一级指标数量为 6 个,输入六阶矩阵。将  $CI$  与  $RI$  值代入一致性指标计算公式:

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

若  $CR \leq 0.1$ , 则说明该矩阵满足要求,  $B$  矩阵的特征向量即为各个指标权重  $W_i$ 。

### 2. 熵值法确定客观权重

信息论中,熵值表示系统内在的紊乱程度,熵值代表某一指标的变异不确定程度。某项指标数值相差越大,则其信息熵越小,参数不确定性越小,那么该指标蕴含的信息量就越大,因此该参数权重也越大<sup>[18]</sup>。

(1)对指标进行标准化处理。

$$K_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (4)$$

(2)计算各指标比重。由于指标的标准化处理会出现 0 值,为了消除 0 的影响,所以公式进行非负平移 0.1,得到以下公式:

$$P_{ij} = (0.1 + x_{ij}) / \sum_{i=1}^m (0.1 + x_{ij}) \quad (5)$$

(3)计算第  $j$  项指标熵值和差异性系数。

$$\begin{cases} e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \\ g_j = 1 - e_j \end{cases} \quad (6)$$

(4)确定第  $j$  项指标熵权。

$$W_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (7)$$

### 3. Rough-set 理论组合赋权

根据 Rough-set 理论对绿色建筑微观风险指标进行组合赋权,由层次分析法得到的主观权重  $W_i$ , 根据熵值法确定的客观权重  $W_j$ , 则两种方法计算得到的复合权重距离函数:

$$d(W_i, W_j) = \left[ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (W_i - W_j)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

根据下述公式求解相应的组合权重系数  $W$ , 即:  $W = \alpha W_i + \beta W_j$ ,  $\alpha, \beta$  分别为权重分配系数,且  $d(W_i, W_j)^2 = (\alpha - \beta)^2$  和  $\alpha + \beta = 1$ , 即:

$$\begin{cases} W = \alpha W_i + \beta W_j \\ d(W_i, W_j)^2 = (\alpha - \beta)^2 \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (9)$$

### 4. 云模型基本原理

(1)云模型定义。云模型可以实现定量数据和定性语言之间的相互转换,使得定量数据通过定性的语言表达,定性概念也可以转化为定量数据,可有效应用于风险评价中的模糊性和不确定性问题。

设一定量论域为  $U, x \in U$ 。定量论域  $U$  与之对应的定性概念  $C$  都存在一个有稳定倾向的随机数与  $x$  对应,意义是  $x$  对  $C$  所表达的定性语言的隶属度为  $A$  且在论域上的分布称为云,每一个  $x$  称为一个云滴,此数学表达:

$$A: U \rightarrow [0, 1]; x \in U; x \rightarrow A(x) \quad (10)$$

从定性到定量的映射过程是云的数字特征产生云滴,经过数量累积汇聚为云,主要通过期望  $Ex$ 、熵  $En$  和超熵  $He$  来表示,记为  $P = G(Ex, En, He)$ 。其中,期望  $Ex$  表示对定性概念的基本确定性度量,是最具代表性的定性表达;熵  $En$  权衡定性语言不确定性程度,反映云滴中可被期望概念接受的确定度大小和云滴的离散程度;超熵  $He$  是  $En$  的不确定性度量,取决于熵的不确定性和模糊性,体现概念

被接受的概率有多大<sup>[19]</sup>。

(2) 云模型算法。主要采用的是逆向云发生器算法进行计算,公式如下:

$$Ex = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (11)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (12)$$

$$\begin{cases} Ex = \bar{x} \\ En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \\ He = \sqrt{s^2 - En^2} \end{cases} \quad (13)$$

正向云算法是将定量数值转化为定性概念,本研究主要生成评价云滴,首先生成随机数值  $En \sim N(En, He^2)$ ,生成随机数  $X \sim N(Ex, En^2)$ ,求云滴  $(X, \theta(X))$ ,且  $\theta(X) = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2(En^2)}}$ 。参考文献[20]、[21]采用综合运算,即将不同类别的云整合到一起,以  $A_{11}$  综合云计算为例,按照逆向云公式计算最低分和最高分云数字特征  $(ExA_{11}^{\min}, EnA_{11}^{\min}, HeA_{11}^{\min})$ 、 $(ExA_{11}^{\max}, EnA_{11}^{\max}, HeA_{11}^{\max})$ ,计算二级指标综合云数字特征公式如下:

$$\begin{cases} ExA_{11} = \frac{ExA_{11}^{\max} EnA_{11}^{\max} + ExA_{11}^{\min} EnA_{11}^{\min}}{EnA_{11}^{\max} + EnA_{11}^{\min}} \\ EnA_{11} = EnA_{11}^{\max} + EnA_{11}^{\min} \\ HeA_{11} = \frac{HeA_{11}^{\max} EnA_{11}^{\max} + HeA_{11}^{\min} EnA_{11}^{\min}}{EnA_{11}^{\max} + EnA_{11}^{\min}} \end{cases} \quad (14)$$

根据二级指标云数字特征和组合权重,进行加权计算得到一级指标云数字特征,计算公式如下:

$$\begin{cases} ExA_i = \frac{\sum_{j=1}^n ExA_{ij} W_{A_{ij}}}{\sum_{j=1}^n W_{A_{ij}}} \\ EnA_i = \frac{\sum_{j=1}^n EnA_{ij} W_{A_{ij}^2}}{\sum_{j=1}^n W_{A_{ij}^2}} \\ EnA_i = \frac{\sum_{j=1}^n EnA_{ij} W_{A_{ij}^2}}{\sum_{j=1}^n W_{A_{ij}^2}} \end{cases} \quad (15)$$

根据二级指标云数字特征和组合权重加权运算得到绿色建筑微观风险综合评价云数字特征,计算公式如下:

$$\begin{cases} Ex = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n ExA_{ij} W_{A_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{A_{ij}}} \\ En = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n EnA_{ij} W_{A_{ij}^2}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{A_{ij}^2}} \\ En = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n EnA_{ij} W_{A_{ij}^2}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{A_{ij}^2}} \end{cases} \quad (16)$$

## 5. 项目安全风险评价具体流程

基于组合赋权-云模型的绿色建筑微观风险评价具体流程如图1所示。

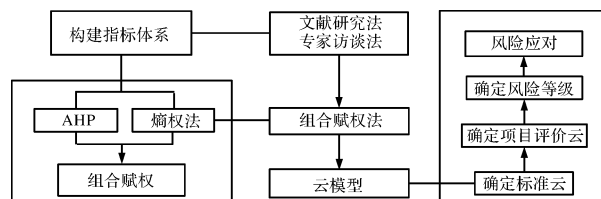


图1 绿色建筑微观风险评价流程

## 三、算例分析

### 1. 工程概况

位于郑州经济开发区的“双零楼”是国内第一座可再生能源技术与建筑完美结合的示范工程<sup>[22]</sup>,建筑面积6 100平方米,为河南省第一座绿色环保建筑,同时也是国家住建部绿色建筑示范工程。该项目采用了外墙保温技术、沼气利用技术、太阳能热水和光伏技术、热压通风技术、雨污水回收系统等,可实现“能源零消耗、污水零排放”,其建筑成本高出周围楼房价格1倍。

### 2. 评价过程

邀请10名绿色建筑专家对该项目在[0-10]区间内对各风险进行打分,并取整数均值,从而得到指标判断矩阵  $B$ ,如式(17),进而根据式(2)、式(3)确定主观权重  $(CR=0.0194 < 0.1)$ ,通过一致性检验;由10名绿色建筑专家对该项目各微观风险发生概率、危害程度及其他危险影响因素进行[0-10]区间标度赋值并取均值,根据式(4)对原始数据进行标准化处理(表3),并根据式(6)计算指标熵值和差异性系数,根据式(7)计算指标客观权重。联立式(9)可解得  $\alpha=0.458, \beta=0.542$ ,根据上述算法算出组合权重(表2)。

表 2 二级指标组合权重

二级指标	主观权重	风险发生概率	风险危害程度	其他影响因素	客观权重	组合权重
$A_{11}$	0.020 1	1	1	1	0.037 6	0.029 6
$A_{12}$	0.040 3	0.442 2	0	0.203 7	0.043 6	0.042 1
$A_{13}$	0.040 3	0.298 7	0.333 3	0	0.043 2	0.041 9
$A_{21}$	0.026 1	0.7072	0.137 9	0.611 1	0.041 3	0.034 3
$A_{22}$	0.086 1	0.011 7	0.046 0	0.351 9	0.044 3	0.063 4
$A_{23}$	0.047 4	0.367 5	0.528 7	0.963 0	0.040 0	0.043 4
$A_{31}$	0.063 0	0.600 3	0.046 0	0.1667	0.043 1	0.052 2
$A_{32}$	0.155 5	0	0.103 4	0.351 9	0.044 0	0.095 1
$A_{33}$	0.033 7	0.654 5	0.298 9	0.481 5	0.041 0	0.037 7
$A_{34}$	0.063 0	0.553 4	0.092 0	0.277 8	0.042 6	0.052 0
$A_{35}$	0.033 7	0.139 1	0.172 4	0.370 4	0.043 2	0.038 8
$A_{36}$	0.033 7	0.5329	0.218 4	0.444 4	0.041 7	0.038 0
$A_{41}$	0.125 2	0.096 6	0.149 4	0.351 9	0.043 5	0.080 9
$A_{42}$	0.041 7	0.348 5	0.114 9	0.388 9	0.042 7	0.042 3
$A_{43}$	0.041 7	0.335 3	0.046 0	0.407 4	0.043 1	0.042 4
$A_{44}$	0.041 7	0.292 8	0.206 9	0.500 0	0.042 2	0.042 0
$A_{51}$	0.032 0	0.420 2	0.747 1	0.833 3	0.039 6	0.036 1
$A_{52}$	0.016 0	0.654 5	0.425 3	0.963 0	0.039 7	0.028 8
$A_{53}$	0.016 0	0.953 1	0.402 3	1	0.039 1	0.028 5
$A_{61}$	0.007 1	0.699 9	0.137 9	0.611 1	0.041 3	0.025 6
$A_{62}$	0.014 3	0.726 2	0.241 4	0.796 3	0.040 5	0.028 5
$A_{63}$	0.007 1	0.685 2	0.574 7	0.703 7	0.039 6	0.024 7
$A_{64}$	0.007 1	0.672 0	0.103 4	0.685 2	0.041 4	0.025 7
$A_{65}$	0.007 1	0.364 6	0.344 8	0.425 9	0.041 7	0.025 8

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/4 & 1/3 & 2 & 3 \\ 2 & 1 & 1/3 & 1/2 & 3 & 4 \\ 4 & 3 & 1 & 2 & 5 & 6 \\ 3 & 2 & 1/2 & 1 & 4 & 5 \\ 1/2 & 1/3 & 1/5 & 1/4 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1/4 & 1/6 & 1/5 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

3. 生成风险等级评价云图

参考文献[23]将风险等级分成五个级别,采用黄金分割率的方法对绿色建筑微观风险评语集进行分区,相邻评语等级的云模型参数之间的倍数为0.618,以区间[0,1]的中心点0.5为中间评语等级(三级为中风险),其云模型数字特征为(0.500, 0.039, 0.005),其他评语级的云模型参数如表3所示。

表 3 评语云数字特征值

风险等级	评价等级	云数字特征
一级	低风险	(0.000、0.103、0.013)
二级	较低风险	(0.309、0.064、0.081)
三级	中风险	(0.500、0.039、0.005)
四级	较高风险	(0.691、0.064、0.008)
五级	高风险	(1.000、0.103、0.013)

通过 Matlab 得到标准评语云云图(图 2)。

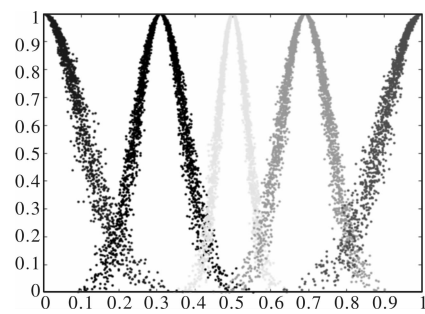


图 2 评语云云图

4. 计算二级指标云数字特征

根据表1中已确定的绿色建筑风险指标体系,以函件的方式向高等院校、设计单位、建设单位、监理单位、施工企业和咨询公司共计6位对绿色建筑领域有丰富经验和对“双零楼”项目有过研究的专家进行征询,通过对问卷进行回收整理,在[0,1]区间内对该项目的绿色建筑微观风险进行双边约束打分,即进行最大值和最小值打分,通过对问卷进行回收整理,根据式(11)~(14)得到二级指标云数字特征,打分情况和云数字特征值如表4所示。

表 4 绿色建筑风险评价

二级 指标		专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	专家 6	$Ex$	$En$	$He$	$ExA_{ij}$	$EnA_{ij}$	$HeA_{ij}$
$A_{11}$	min	0.15	0.18	0.12	0.14	0.15	0.17	0.151 7	0.027 6	0.017 4	0.201 4	0.063 0	0.020 2
	max	0.24	0.26	0.20	0.28	0.23	0.23	0.240 0	0.035 4	0.022 3			
$A_{12}$	min	0.24	0.25	0.30	0.27	0.19	0.24	0.248 3	0.044 3	0.025 0	0.313 5	0.079 8	0.024 3
	max	0.38	0.35	0.40	0.40	0.42	0.42	0.395 0	0.035 4	0.023 4			
$A_{13}$	min	0.18	0.21	0.30	0.24	0.27	0.22	0.236 7	0.059 1	0.040 3	0.325 7	0.147 7	0.053 2
	max	0.50	0.35	0.35	0.35	0.42	0.34	0.385 0	0.088 6	0.061 8			
$A_{21}$	min	0.10	0.14	0.18	0.16	0.20	0.12	0.150 0	0.053 2	0.037 8	0.187 5	0.082 7	0.031 5
	max	0.28	0.27	0.26	0.26	0.24	0.22	0.255 0	0.029 5	0.020 1			
$A_{22}$	min	0.38	0.32	0.21	0.38	0.35	0.28	0.320 0	0.088 6	0.059 1	0.415 0	0.200 9	0.071 2
	max	0.43	0.50	0.60	0.40	0.45	0.56	0.490 0	0.112 3	0.080 8			
$A_{23}$	min	0.23	0.25	0.28	0.20	0.22	0.23	0.235 0	0.035 4	0.022 5	0.302 5	0.070 9	0.023 7
	max	0.36	0.33	0.36	0.38	0.40	0.39	0.370 0	0.035 4	0.024 8			
$A_{31}$	min	0.11	0.15	0.10	0.16	0.18	0.20	0.150 0	0.053 2	0.036 2	0.199 6	0.084 7	0.030 6
	max	0.28	0.26	0.32	0.28	0.26	0.30	0.283 3	0.031 5	0.021 1			
$A_{32}$	min	0.33	0.28	0.32	0.34	0.30	0.38	0.325 0	0.044 3	0.027 8	0.397 2	0.083 7	0.027 1
	max	0.48	0.51	0.50	0.46	0.49	0.43	0.478 3	0.039 4	0.026 4			
$A_{33}$	min	0.08	0.05	0.06	0.02	0.10	0.04	0.058 3	0.038 4	0.025 7	0.113 1	0.088 6	0.031 8
	max	0.20	0.14	0.12	0.19	0.12	0.16	0.155 0	0.050 2	0.036 5			
$A_{34}$	min	0.16	0.12	0.13	0.18	0.10	0.15	0.140 0	0.041 4	0.029 5	0.201 8	0.100 4	0.034 0
	max	0.25	0.30	0.17	0.22	0.28	0.25	0.245 0	0.059 1	0.037 2			
$A_{35}$	min	0.02	0.04	0.10	0.05	0.03	0.07	0.051 7	0.039 4	0.026 4	0.095 6	0.067 0	0.023 1
	max	0.16	0.18	0.13	0.16	0.18	0.14	0.158 3	0.027 6	0.018 5			
$A_{36}$	min	0.04	0.03	0.05	0.08	0.07	0.03	0.050 0	0.029 5	0.020 8	0.105 0	0.062 0	0.021 2
	max	0.14	0.15	0.17	0.16	0.12	0.19	0.155 0	0.032 5	0.021 6			
$A_{41}$	min	0.20	0.30	0.33	0.38	0.19	0.36	0.293 3	0.116 2	0.083 4	0.410 1	0.234 4	0.083 3
	max	0.63	0.52	0.50	0.44	0.62	0.44	0.525 0	0.118 2	0.083 3			
$A_{42}$	min	0.13	0.14	0.18	0.21	0.19	0.17	0.170 0	0.041 4	0.028 1	0.206 5	0.074 8	0.025 6
	max	0.28	0.28	0.12	0.25	0.23	0.25	0.251 7	0.0335	0.022 5			
$A_{43}$	min	0.20	0.15	0.18	0.12	0.14	0.13	0.153 3	0.0433	0.030 5	0.201 3	0.078 8	0.028 3
	max	0.24	0.27	0.24	0.30	0.24	0.27	0.260 0	0.0354	0.025 6			
$A_{44}$	min	0.13	0.15	0.18	0.17	0.16	0.19	0.163 3	0.029 5	0.020 1	0.208 1	0.070 9	0.025 6
	max	0.28	0.25	0.20	0.22	0.26	0.23	0.240 0	0.041 4	0.029 5			
$A_{51}$	min	0.30	0.28	0.24	0.29	0.25	0.27	0.271 7	0.032 5	0.022 8	0.318 1	0.069 9	0.024 8
	max	0.34	0.35	0.40	0.35	0.38	0.33	0.358 3	0.037 4	0.026 5			
$A_{52}$	min	0.20	0.14	0.17	0.14	0.19	0.11	0.158 3	0.050 2	0.036 7	0.202 6	0.095 5	0.034 2
	max	0.22	0.25	0.24	0.28	0.22	0.30	0.251 7	0.045 3	0.031 5			
$A_{53}$	min	0.14	0.11	0.18	0.15	0.21	0.17	0.160 0	0.047 3	0.032 2	0.208 9	0.114 2	0.039 9
	max	0.28	0.32	0.20	0.24	0.23	0.19	0.243 3	0.067 0	0.045 4			
$A_{61}$	min	0.08	0.07	0.09	0.10	0.04	0.06	0.073 3	0.029 5	0.020 1	0.114 2	0.070 9	0.024 9
	max	0.10	0.15	0.14	0.12	0.18	0.17	0.143 3	0.041 4	0.028 4			
$A_{62}$	min	0.20	0.13	0.12	0.08	0.17	0.18	0.146 7	0.065 0	0.047 3	0.207 1	0.132 9	0.048 9
	max	0.24	0.30	0.32	0.29	0.24	0.20	0.265 0	0.067 9	0.050 5			
$A_{63}$	min	0.05	0.08	0.04	0.10	0.12	0.07	0.076 7	0.041 4	0.028 4	0.118 2	0.076 8	0.027 2
	max	0.15	0.20	0.19	0.15	0.14	0.17	0.166 7	0.035 4	0.025 9			
$A_{64}$	min	0.03	0.02	0.04	0.05	0.07	0.09	0.050 0	0.035 4	0.024 0	0.100 0	0.070 9	0.024 0
	max	0.17	0.18	0.16	0.15	0.13	0.11	0.150 0	0.035 4	0.024 0			
$A_{65}$	min	0.10	0.06	0.03	0.05	0.04	0.05	0.055 0	0.047 3	0.032 9	0.094 7	0.088 6	0.031 6
	max	0.11	0.13	0.18	0.17	0.12	0.13	0.140 0	0.041 4	0.030 2			

根据式 (15) 计算一级指标云数字特征值 (表 5)。通过正向云发生器算法,使用 Matlab 生成 6 个一级指标云图 (图 3),绿色建筑微观风险中的施工

风险( $A_2$ )的期望值最大,表明该风险的风险程度最高,监理风险( $A_4$ )风险的熵值和超熵最大,表明风险不确定性最大,并且风险最不稳定,应该对施工

风险和监理风险保持持续关注。

表5 一级指标云特征值

一级指标	$Ex$	$En$	$He$
$A_1$	0.288 8	0.103 5	0.035 0
$A_2$	0.325 1	0.146 7	0.052 0
$A_3$	0.225 1	0.083 6	0.028 2
$A_4$	0.285 1	0.162 6	0.057 8
$A_5$	0.249 1	0.089 3	0.031 6
$A_6$	0.128 6	0.090 2	0.032 2

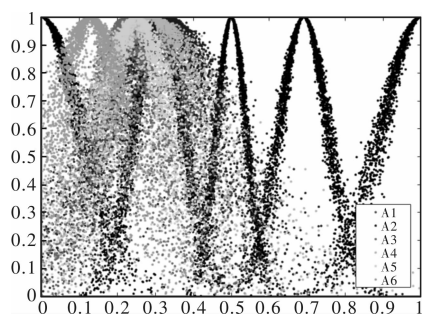


图3 一级指标云图

### 5. 计算项目微观风险评价等级

根据式(16)得项目微观风险综合指标评价云数字特征为(0.248 5、0.114 7、0.040 0),通过正向云发生器,使用 Matlab 生成云图(图4)。结果表明,该项目的微观风险等级处于低风险和较低风险之间,更接近较低风险,通过综合云看出,缺少有绿色施工经验的施工人员( $A_{22}$ )、缺乏有绿色施工经验的管理人员( $A_{32}$ )和缺少有绿色监理经验的监理人员( $A_{41}$ )位于较低风险和中风险之间,需要重点关注。

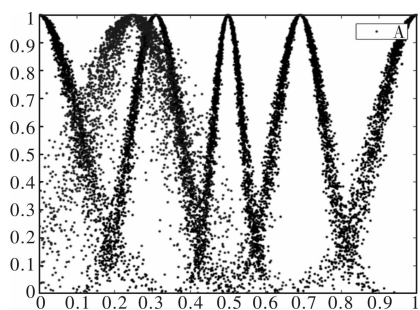


图4 微观风险综合评价云图

## 四、结论与建议

### 1. 结论

研究从绿色建筑微观层级风险研究入手,识别出影响我国绿色建筑项目成功的21项微观层级风险因素。采用 AHP 确定各指标主观权重,熵权法确定客观权重,再进行组合赋权,以云理论为基础,构建绿色建筑微观风险云评价模型,通过案例分析得

出项目微观风险等级及风险较大因素,验证了绿色建筑微观风险评价模型的科学性和适用性。结论如下。

(1)我国绿色建筑项目微观层级中发生概率大的风险可归纳为缺少绿色建筑经验造成的风险。危害程度严重的风险主要是缺少有绿色施工经验的施工人员、缺乏有绿色施工经验的管理人员和缺少有绿色监理经验的监理人员。

(2)综合考虑二级风险指标风险程度和不确定性,得出一级风险指标的风险程度和不确定性程度。其中风险程度最高的是施工风险,风险不确定性最高的是监理风险,表明识别出的绿色建筑微观风险具有代表性,值得深入探讨和研究。

### 2. 建议

目前“双零楼”项目建设成本较高,风险较其他绿色建筑项目更为突出。研究表明,“双零楼”项目主要是缺乏有绿色建筑经验的施工人员、管理人员和监理人员,项目开展过程可能会在施工、组织管理和监管等环节出现因经验不足引起的一系列问题。三点建议如下。

(1)增加有绿色施工经验的施工人员数量。绿色施工技术的应用是保证绿色建筑项目顺利建造的重要基础,而有绿色施工经验的施工人员可以采用有效的广告和培训方法来加强其他施工人员的绿色技能和节能环保意识,指导其他施工人员应用节能技术绿色施工,并提高施工质量。

(2)增加有绿色施工经验的管理人员数量。为确保绿色建筑达到设计绿色标准,有绿色施工经验的管理人员需要结合工程特点对工程绿色施工管理进行详细策划,并建立绿色施工管理体系和有效的节能管理机制,对管理人员进行详细的任务分工,并制定各项新技术的实施进度计划。

(3)增加有绿色监理经验的监理人员数量。保证绿色建筑质量达到绿色设计要求,积极推动绿色施工,并探索建立针对各参与主体的绿色建筑施工质量管理激励机制,提高施工各方对绿色建筑施工质量管理的积极性。

### 参 考 文 献

- [1] 韩立红,陶盈盈,孙建伟. 基于博弈论与神经网络的绿色建筑评价[J]. 青岛理工大学学报,2016,37(5):81-89.
- [2] 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.
- [3] 秦旋,万欣. 我国绿色建筑项目的风险分担与管理研究[J]. 施工技术,2012,41(21):19-24,45.

- [4] 万欣,秦旋,李启明.我国绿色建筑项目的风险影响分析[J].施工技术,2013,42(3):4-10.
- [5] 万欣,秦旋.基于实证研究的绿色建筑项目风险识别与评估[J].建筑科学,2013,29(2):54-61.
- [6] 秦旋,荆磊.绿色建筑全寿命周期风险因素评估与分析:基于问卷调查的探索[J].土木工程学报,2013,46(8):123-135.
- [7] 马晓国,熊向阳,曲映,等.绿色建筑项目融资风险分担机制研究[J].技术经济与管理研究,2014(6):24-27.
- [8] 秦旋,莫懿懿,王景慧.绿色建筑项目风险测度与评价假设模型研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2014,46(5):706-715.
- [9] 蔡久顺,张执国,师鹏,等.基于模糊多层次灰色法的绿色建筑设计风险评价研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(7):968-972,983.
- [10] 王娟,王兴科,赵佩龙.基于信息熵模型的绿色节能建筑投资风险决策应用[J].施工技术,2016,45(12):110-114.
- [11] 秦旋,李怀全,莫懿懿.基于SNA视角的绿色建筑项目风险网络构建与评价研究[J].土木工程学报,2017,50(2):119-131.
- [12] 黄定轩.基于收益-风险的绿色建筑需求侧演化博弈分析[J].土木工程学报,2017,50(2):110-118.
- [13] 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.
- [14] 陶雨,冯丹丹,李娜,等.基于组合赋权的绿色建筑项目全生命周期主要风险评价[J].价值工程,2019(20):62-65.
- [15] LI B, AKINTOYE A, EDWARDS P J, et al. The allocation of risk in PPP/PFI construction projects in the UK [J]. International Journal of Project Management, 2005, 23(1):25-35.
- [16] REBECCA J Y, PATRICK X W, WANG J Y. Modelling stakeholder-associated risk networks in green building projects [J]. International Journal of Project Management, 2016, 34(1).
- [17] B G Hwang, M SHAN, NNB Supa' At. Green commercial building projects in Singapore: critical risk factors and mitigation measures [J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 30:237-247.
- [18] 黄鑫沛,宋斐,樊林玉,等.基于组合赋权法的海外基建环境综合评估研究[J/OL]. [2021-01-19]. 工业工程与管理, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1738.t.20200422.1022.002.html>.
- [19] 李亮.基于AHP-云模型的PPP项目风险评价研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [20] 邹凝.基于ANP-云模型的赣州快速路施工风险研究[D].赣州:江西理工大学,2020.
- [21] 张逢雨.基于云模型的EPC装配式混凝土建筑供应链风险评价研究[D].赣州:江西理工大学,2020.
- [22] 司洋洋,裴廉杰.国内绿色建筑发展及建筑实例[J].居业,2017(2):85-86.
- [23] 李林波,郭晓凡,傅佳楠,等.基于云模型的城市轨道交通乘客满意度评价[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(3):378-385.

## A Research on the Micro-risk Assessment of Green Building Based on Combination Weighting Method and Cloud Model

HONG Wen-xia, LU Cheng, ZHAO De-feng, LI Bei-bei

(School of Management Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

**Abstract:** In order to analyze and evaluate the micro-level risks of green building projects objectively and comprehensively, the paper establishes a green building micro-risk indicator system. The AHP-entropy weight model is used to combine and weight the indicators, and a cloud evaluation model is constructed based on cloud theory to assess the green building micro risk. The risk level is to be determined according to the risk standard cloud diagram and comprehensive evaluation cloud diagram obtained. "The Double Zero Building" project (zero conventional energy consumption, zero sewage discharge) in Zhengzhou Economic Development Zone was taken as a case of micro-risk assessment. The results show that the risk level of the project is between the low and the lower, and the key risk factors are identified consequently. The research provides new ideas of risk management for the main body of related green building constructions, and is of great significance to the healthy and long-term development of green buildings.

**Key words:** green building; micro-risk; AHP-entropy method; cloud model

【编辑 高婉炯】