

# 基于灰色聚类模型的绿色建筑可持续性评价研究

翟亚兰

武汉工程大学, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年3月21日; 录用日期: 2026年4月20日; 发布日期: 2026年4月28日

## 摘要

绿色建筑作为推动建筑业可持续发展的重要载体, 对其开展综合评价具有重要的理论价值与现实意义。针对当前绿色建筑评价体系尚不完善的现状, 构建了涵盖环境、经济、社会与制度四个维度的绿色建筑可持续性评价指标体系, 并明确了相应的评价等级标准。在权重确定方面, 结合层次分析法(AHP)以体现专家经验判断, 利用熵权法反映数据内在差异, 通过组合赋权方式得到最终权重。在此基础上, 构建基于中心点三角白化权函数的灰色聚类模型, 实现定性分析与定量计算的有机结合, 从而科学判定可持续性等级。通过具体案例验证, 该评价模型具备良好的有效性与适用性, 可为绿色建筑可持续性评价提供新的思路与方法参考。

## 关键词

绿色建筑, 可持续性, 灰色聚类, 组合赋权

# Research on Green Building Sustainability Evaluation Based on Grey Clustering Model

Yalan Zhai

Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: March 21, 2026; accepted: April 20, 2026; published: April 28, 2026

## Abstract

As an important carrier for promoting the sustainable development of the construction industry, green building warrants comprehensive evaluation for its theoretical significance and practical value. In view of the current inadequacies in green building evaluation systems, this paper establishes a sustainability evaluation index system covering four dimensions—environment, economy,

society, and institution—and defines corresponding evaluation grade standards. In terms of weight determination, the analytic hierarchy process (AHP) is applied to incorporate expert judgment, while the entropy weight method captures inherent data variability, and combined weighting is employed to determine final weights. Based on this, a grey clustering model using the central-point triangular whitenization weight function is developed to integrate qualitative analysis with quantitative calculation, enabling a scientific determination of sustainability levels. A case study verifies the effectiveness and applicability of the proposed model, offering new insights and methodological references for sustainability assessment of green buildings.

## Keywords

Green Building, Sustainability, Grey Clustering, Combined Weighting

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

20 世纪 70 年代以来，全球范围内出现了环境保护和可持续发展的运动和组织，人们开始认识到人类活动对地球的影响，并提出了可持续发展的理念和目标[1]，全球范围内对资源的过度开发与消费也引发了严峻的资源危机[2]。同时能源危机促使社会各界更加关注可再生能源利用与能效提升。发展失衡进一步加剧了社会不公与贫困现象。在此背景下，可持续发展理念逐步形成并获得广泛认同。围绕这一战略框架，世界各国相继出台多项重大政策与行动计划，涵盖《联合国 2030 年可持续发展议程》及可持续发展目标(SDGs)，以及各国制定的环境法律法规与政策等[3]，旨在推进全球可持续发展，维护生态环境，促进经济绿色转型、社会包容发展与环境有效保护，最终实现可持续发展目标。绿色建筑研究聚焦于降低建筑资源消耗、推动可再生能源应用，从而助力建筑能源自给与减排目标实现。伴随全球城市化进程加快，城市可持续发展逐渐成为重要议题[4]。有关绿色建筑研究开始关注建筑与城市规划的一体化设计，探索如何通过绿色建筑来促进城市的可持续发展[5]。国际层面也陆续涌现出多种绿色建筑倡议与评价体系，如美国的 LEED、法国的 HQE 等，为绿色建筑实践提供了指导与标准，推动相关研究不断深入[6]。但他们还存在着不足之处，如表 1 所示。基于此，本文提出基于灰色聚类模型的绿色建筑可持续性评价体系，综合运用案例研究、文献综述与专家访谈等方法，归纳形成绿色建筑可持续发展评价指标体系，以期为我国绿色建筑发展提供参考与借鉴。

Table 1. Main evaluation system

表 1. 主要评价体系

评价体系	核心优势与特征	关键不足
LEED (美国)	侧重能源优化：在节能与大气影响方面得分权重高，对推动建筑能效提升效果显著。	权重失衡与指标重叠：研究表明，LEED 的 9 个评分类别中，有 4 个类别在认证中被“忽视”或权重不足；且部分指标存在重叠，可能导致得分虚高。
BREEAM (英国)	全生命周期整合：作为最早的体系，对建筑全生命周期的环境影响考量较全面，尤其是在管理流程上。	地域适应性不足：虽然框架全面，但将其直接应用于不同气候、资源与政策环境的地区时，可能存在“水土不服”的问题。
WELL (美国)	聚焦健康与福祉：强调室内环境质量与用户健康，填补了传统体系对“人本”关注不足的空白。	能耗过高：为达到严格的室内舒适度标准，WELL 认证建筑的能耗可能比普通建筑高出 30% 以上。

续表

中国《绿色建筑评价标准》注重均衡评价：相较于 LEED 对能源指标的侧重，适用性与更新滞后；面对新技术、新材料以及“好房子”等新理念的快速迭代，评价指标和权重的更新速度有时难以跟上行业发展需求。中国标准在节地、节能、节水、节材、室内环境等多个方面力求平衡，更符合国内实际情况。

### 1.1. 文献综述

目前我国关于绿色建筑的研究，对“绿色建筑”和“节能建筑”的定义还处于概念性的阶段，对其进行评价的难度较大，且缺乏统一的规范。如何达到节能减排，促进可持续发展，提升建筑综合品质，是目前世界各国学者的研究热点。从综合性能的角度出发，他们不仅关注建筑的安全性、舒适性和功能性，还强调建筑的环境效益、经济效益和社会效益。为此，我们要不断完善绿色建筑评价系统，研发新的评价标准和方法，以更加全面、准确地评价建筑的综合性能。在建筑本身方面，新型绿色建筑材料的研究也是研究的重点之一。通过使用这些材料，可以有效降低建筑的环境影响，提高建筑的能效和耐久性。此外，建筑经济也是绿色建筑评价中不可忽视的一部分。研究者们着重考虑了建筑的生命周期成本和使用期总成本，以期在保证建筑性能和质量的前提下，达到最大的经济效益。虽然我国在绿色建筑可持续方面的研究才刚刚开始，但是，随着国家越来越多的关注和学者的不断努力，我们完全可以预见，我国在这方面的研究一定会取得更大的成绩。

### 1.2. 评价指标体系构建

依据不同分类标准，评价指标可划分为多个方面。本文在系统梳理绿色建筑可持续发展相关文献的基础上，邀请相关领域专家进行咨询与研讨，最终确定环境、经济、社会与制度四个维度的一级评价指标，并设 12 个二级指标，具体内容见表 2。

**Table 2.** Green building sustainability evaluation index system

**表 2.** 绿色建筑可持续性评价指标体系

目标层	一级指标	二级指标
绿色建筑可持续性评价研究 E	社会可持续性 A	社会适应性 A1
		社会满意度 A2
		社会环境影响 A3
	经济可持续性 B	财务净现值 B1
		投资回收期 B2
		全寿命周期费用 B3
	环境可持续性 C	绿色施工 C1
		空气质量 C2
		环境承载力 C3
	制度可持续性 D	优惠政策 D1
		标识管理制度 D2
		经济激励政策 D3

在研究绿色建筑时，应以可持续发展原则中的社会、生态环境、经济、制度这 4 个方面作为研究的起点，在整个项目的生命周期中都有明确的体现，如项目的选址、整体规划与设计、施工过程以及日常运营管理等各个方面。其中最重要的就是绿色建筑的规划设计阶段和建设过程中。因此，在选取可持续

发展指标时，既要考虑绿色建筑的独特性，又要从可持续发展的视角选取指标。

#### (1) 社会可持续性

① 社会适应性：弥补了通用标准对地域文化、气候、使用习惯的忽视。绿色建筑必须与当地社区融合，而非孤立的“技术展品”。

② 社会满意度：回应了 WELL 标准关注健康但忽略用户主观感受的不足。直接度量使用者的舒适度、健康感与归属感，是衡量建筑是否“宜居”的最终标尺。

③ 社会环境影响：考量建筑对周边社区的光污染、风环境、交通拥堵及空间压迫感的影响。将评价视野从“红线内”扩展到“红线外”，体现了建筑的社会责任。

#### (2) 经济可持续性

① 财务净现值：作为动态评价指标，解决了静态投资回报率忽略资金时间价值的问题，能更科学地衡量绿色技术的长期盈利能力。

② 投资回收期：直接回应开发商最关心的“增量成本回收”问题。即使技术再绿色，如果回收期过长，市场推广阻力也会很大。

③ 全寿命周期费用：这是核心指标。它直击现有体系(如 LEED)重“运营节能”、轻“隐含碳”与“维护成本”的缺陷。将初投资、运营、维护、甚至拆除成本统一核算，能有效避免“为了节能而选用高隐含碳材料”的伪绿色行为。

#### (3) 环境可持续性

① 绿色施工：针对现有评价体系多集中在设计阶段和运营阶段，对施工过程的扬尘、噪声、废弃物等环境影响监管不足的问题。这是实现“从摇篮到大门”低碳的关键一环。

② 空气质量：虽然常见于现有体系，但在此将其与“环境承载力”并列，强调的是室内外空气质量的联动治理，而非单一的设备加分。

③ 环境承载力：这是一个前瞻性指标。它评价项目开发对区域水资源、能源供应、市政基础设施的负荷压力。避免了单个建筑“绿色”，但聚集后导致区域超载的“公地悲剧”。

#### (4) 制度可持续性

① 优惠政策：土地出让、容积率奖励、税收减免等。这是目前推动绿建最有效的杠杆，将其设为指标，能衡量政策支持力度的强弱。

② 标识管理制度：针对当前“一考定终身”的弊端。强调对绿建标识的动态管理、运行标识与设计标识的区别、以及事后监管。没有这一环，前三个维度的性能很容易在运营几年后衰减。

③ 经济激励政策：区别于“优惠政策”(侧重前端)，这里侧重后端激励，如绿色信贷利率优惠、碳交易收益、绿色保险等。通过市场化的金融手段，将绿色建筑“外部性”转化为可量化的“内部收益”。

## 2. 组合赋权确定权重

### 2.1. 层次分析法(AHP)法权重计算

梳理评价系统中各项指标，将其分解为若干层次，并对同一层次内不同指标按重要性准则进行两两比较，构建判断矩阵，进而计算各指标权重。具体步骤如下：

(1) 运用 AHP 方法分析评价问题时，必须深入剖析问题，并将其分解为目标层、准则层和方案层，比较各因素的重要程度。

(2) 构建如式(1)所示的判断矩阵，比较底层指标与上层指标之间的显著性，通常采用 1~9 标度法确定重要程度，详见表 3。

$$P = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \cdots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & \cdots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n1} & u_{n2} & \cdots & u_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

**Table 3.** Scale table of judgment matrix  
**表 3.** 判断矩阵标度表

标度	含义
9	两者相比，前者尤为重要
7	两者相比，前者的重要性要大于后者
5	两者相比，前者的重要性显然大于后者
3	两者相比，前者的重要性略大于后者
1	两者相比，前者的重要性是一样的
2、4、6、8	中间值代表上一相邻判决倒数

(3) 根据式(1)计算最大特征值  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量，并按式(2)进行一致性检验。

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

(4) 计算一致性比值  $CR$ 。

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

$\lambda_{\max}$  ——最大特征根；

$n$  ——判断矩阵阶数；

$CR$  ——随机一致性比值；

$RI$  ——平均随机一致性指标。

## 2.2. 熵权法权重计算

假设共有  $n$  个对象， $m$  个评价指标，原始矩阵为  $Y = [y_{ij}]_{n \times m}$ ， $y_{ij} \geq 0$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $j = 1, 2, \dots, m$ )。这里取  $y_{ij} \geq 0$  是为了保证数据经过归一化处理取值范围在  $[0, 1]$  内。具体步骤如下：

(1) 对数据进行标准化处理，正向与负向指标分别采用相应公式。

正向标准化公式：

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

负向标准化公式：

$$y_{ij} = \frac{\max(y_{ij}) - y_{ij}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (5)$$

(2) 为满足熵值取值范围  $[0, 1]$  的要求，对原始数据进行归一化处理，得到判断矩阵  $P = (p_{ij})_{mm}$ ，( $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, 3, \dots, n$ ;  $m$  代表指标的个数， $n$  代表对象个数)，公式如下：

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{j=1}^m y_{ij}} \tag{6}$$

(3) 求得各指标的熵值  $E_i$ ,

$$E_i = -k \sum_{j=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \tag{7}$$

其中,  $k$  为常数, 一般取  $k = (\ln n)^{-1}$ 。

(4) 求变异系数  $D_i$ , 第  $i$  个指标的权重  $W_i$  计算公示分别如下:

$$D_i = 1 - H_i \tag{8}$$

$$W_i = \frac{D_i}{\sum_{i=1}^m D_i} \tag{9}$$

### 2.3. 综合权重确定

鉴于 AHP 与熵权法各有优劣, 为充分发挥各自优势并弥补不足, 采用线性组合方式将权重  $W_i^a$  和  $W_i^s$  有效地结合, 组合权重计算公式如下:

$$W = aW_i^a + (1-a)W_i^s \tag{10}$$

其中,  $W$  为由 AHP-熵权法确定的组合权重;  $W_i^a$  为运用 AHP 计算出的权重;  $W_i^s$  为运用熵权法计算出的权重。

为实现  $W_i^a$ 、 $W_i^s$  与  $W$  两者偏差平方和最小, 建立函数如下:

$$\min W = \sum_{i=1}^n \left[ (W_i - W_i^a)^2 + (W_i - W_i^s)^2 \right] \tag{11}$$

联立两个公式, 得出解  $a = 0.5$ , 将其代入组合权重公式后得到最终组合权重:

$$W = 0.5W_i^a + 0.5W_i^s \tag{12}$$

### 3. 绿色建筑灰色聚类评价模型

考虑到评价指标所需信息具有不完全性与不确定性, 且绿色建筑可持续性评价涉及多类影响因素, 属典型灰色系统。为此, 本文采用基于混合中心点白化权函数的方法, 确定聚类对象所属灰类, 进而对绿色建筑可持续性进行评价。该函数可更准确地反映复杂系统评价, 并克服传统上下限测度白化权函数存在的“悬崖”效应。设定存在  $n$  个灰类中心点, 分别为  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , 两端端点取为  $k_0, k_{n+1}$ , 各个评价指标取值范围为  $[a_1, a_n]$ , 各个因素得分区间分别为  $[a_1, a_2, \dots, a_{n-1}, a_n]$ 。具体表达式表 4 所示:

**Table 4.** Gray whitening weight function

**表 4.** 灰色白化权函数

名称	函数区间	函数公式
端点灰类灰数	$[k_0, k_1, k_2]$	$f^1(x) = \begin{cases} 1 & x \in [k_0, k_1] \\ \frac{k_2 - x}{k_2 - k_1} & x \in [k_1, k_2] \\ 0 & x \notin [k_0, k_2] \end{cases}$

续表

中间点灰类灰数	$[k_{m-1}, k_m, k_{m+1}]$	$f^m(x) = \begin{cases} \frac{x - k_{m-1}}{k_m - k_{m-1}} & x \in [k_{m-1}, k_m] \\ \frac{k_{m+1} - x}{k_{m+1} - k_m} & x \in [k_m, k_{m+1}] \\ 0 & x \notin [k_{m-1}, k_{m+1}] \end{cases}$
终点灰类灰数	$[k_{n-1}, k_n, k_{n+1}]$	$f^n(x) = \begin{cases} \frac{x - k_{n-1}}{k_n - k_{n-1}} & x \in [k_{n-1}, k_n] \\ 1 & x \in [k_n, k_{n+1}] \\ 0 & x \notin [k_{n-1}, k_{n+1}] \end{cases}$

## 4. 基于灰色聚类法的绿色建筑可持续评价模型计算

### 4.1. 划分等级标准

本文设置四个评价等级：“一般好、好、非常好、极好”。对应分值区间分别为[0, 2]、[2, 5]、[5, 8]、[8, 10]。请 5 名专家对表 2 中的二级指标进行打分，构建灰色样本矩阵  $D_i = [d_{ijq}]$ ， $d_{ijq}$  为专家  $q$  对指标  $i$  下的分指标  $j$  的赋值。

### 4.2. 计算灰色聚类权矩阵

$X_{ij}$  隶属  $e$  灰类的聚类系数为  $X_{ije} = \sum_{q=1}^p f(d_{ijq})$ ，聚类总系数  $X_{ij} = \sum_{e=1}^4 f(X_{ije})$ ，得到聚类权重向量  $r_{ije} = \frac{X_{ije}}{X_{ij}}$  则灰色聚类权矩阵为：

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \cdots & r_{i14} \\ r_{i21} & r_{i22} & \cdots & r_{i24} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & \cdots & r_{ij4} \end{bmatrix}$$

### 4.3. 合成聚类的评估矩阵

将权向量与灰色聚类权矩阵进行运算，以获得聚类评估：

$$B = W \times R \quad (13)$$

### 4.4. 最终得分计算

由  $F = [1, 3.5, 6.5, 9]$ ，则被评判对象的最终得分为

$$K = B \times F \quad (14)$$

## 5. 案例分析

济宁市公共卫生中医医疗中心(市中医院新院区)项目位于济宁市太白湖新区火炬路东、渔皇路南、东赵路北。总建设用地 168 亩，建筑总面积约 26.1 万  $m^2$ ，总投资 32.3 亿元，床位 1300 张，停车位 2000 个。结构形式主要为框架抗震墙结构。项目为国家级区域医疗中心，主要建设内容门诊医技及急诊楼、病房楼、传染楼、制剂楼、国医堂、科研教学和行政办公、康养楼等。项目主要采用复合式地源热泵系统、温湿度独立控制空调系统等节能措施提高能源利用效率和室内环境舒适度。

### 5.1. 层次分析法确定权重

#### (1) 一级指标确定权重

为提升结果可靠性，邀请 5 名建筑业专家依据表 2 对表 1 进行打分，形成判断矩阵。专家 1 对一级指标构建的判断矩阵如下：

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

按照第三章所述公式，求得权重、最大特征值等。具体见表 5，表 6。

**Table 5.** Calculation results of primary indicator weights

**表 5.** 一级指标权重计算结果

AHP 层次分析结果				
一级指标	权重值	最大特征值	CI 值	CR 值
社会可持续性	0.233			
经济可持续性	0.141	4.046	0.020	0.022
环境可持续性	0.394			
制度可持续性	0.233			

**Table 6.** Random consistency *RI*

**表 6.** 随机一致性 *RI*

判断矩阵阶数 <i>n</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>RI</i> 值	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

注： $CR < 0.1$  一致性检验通过。

同理可得其他一级指标的权重值，结果如表 7 所示。

**Table 7.** Summary table of weights for primary indicators

**表 7.** 一级指标权重总表

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	均值
A	0.233	0.269	0.278	0.323	0.250	0.271
B	0.141	0.121	0.108	0.130	0.111	0.122
C	0.394	0.417	0.354	0.261	0.417	0.381
D	0.233	0.193	0.261	0.224	0.222	0.226

#### (2) 二级指标确定权重

根据上述方法确定二级指标权重，结果如表 8 所示：

**Table 8.** Summary table of secondary weights

**表 8.** 二级权重汇总表

指标	专家 1	专家 2	专家 3	专家 4	专家 5	均值
A1	0.613	0.568	0.343	0.423	0.557	0.501

续表

A2	0.118	0.098	0.082	0.093	0.123	0.103
A3	0.269	0.334	0.575	0.484	0.320	0.396
B1	0.123	0.158	0.211	0.159	0.110	0.152
B2	0.557	0.655	0.548	0.589	0.627	0.595
B3	0.320	0.187	0.241	0.252	0.263	0.253
C1	0.472	0.493	0.557	0.619	0.633	0.555
C2	0.151	0.139	0.123	0.096	0.106	0.123
C3	0.377	0.368	0.320	0.284	0.260	0.322
D1	0.525	0.484	0.737	0.532	0.639	0.583
D2	0.142	0.093	0.077	0.102	0.087	0.100
D3	0.334	0.423	0.186	0.366	0.274	0.317

## 5.2. 确定客观权重

对数据进行标准化处理后,按上述公式计算熵值、差异系数及权重,结果见表9。

**Table 9.** Summary table of objective weights of indicators

**表 9.** 指标客观权重汇总表

指标	熵值	差异系数	权重
A	0.766	0.234	0.267
B	0.719	0.281	0.321
C	0.817	0.183	0.209
D	0.823	0.177	0.202
A1	0.814	0.186	0.067
A2	0.783	0.217	0.079
A3	0.717	0.283	0.102
B1	0.746	0.254	0.092
B2	0.801	0.199	0.072
B3	0.827	0.173	0.063
C1	0.753	0.247	0.089
C2	0.774	0.226	0.082
C3	0.778	0.222	0.080
D1	0.707	0.293	0.106
D2	0.708	0.292	0.105
D3	0.826	0.174	0.063

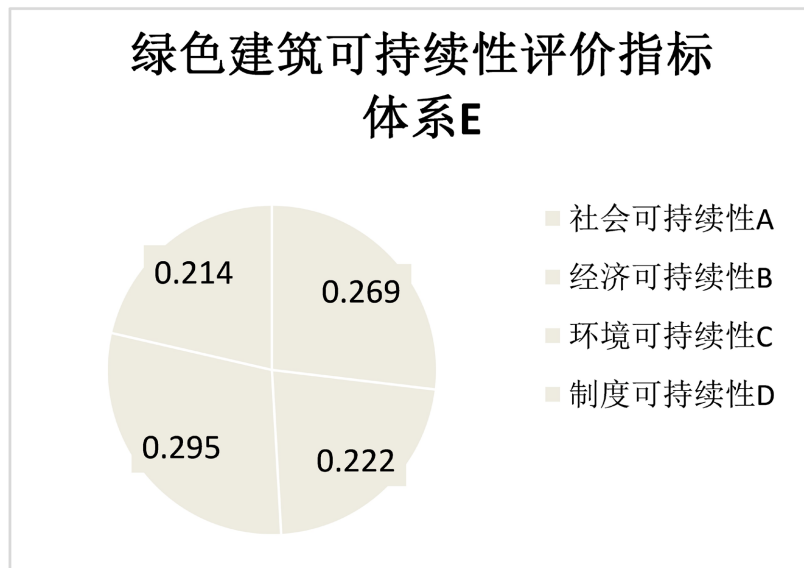
## 5.3. 确定组合权重

综合一、二级指标主客观权重,运用式(12)计算组合权重,结果见表10。

**Table 10.** Summary table of indicator combination weights  
**表 10.** 指标组合权重汇总表

指标	AHP 权重	熵值权重	组合权重
A	0.271	0.267	0.269
B	0.122	0.321	0.222
C	0.381	0.209	0.295
D	0.226	0.202	0.214
A1	0.501	0.067	0.284
A2	0.103	0.079	0.091
A3	0.396	0.102	0.249
B1	0.152	0.092	0.122
B2	0.595	0.072	0.334
B3	0.253	0.063	0.158
C1	0.555	0.089	0.322
C2	0.123	0.082	0.103
C3	0.322	0.080	0.201
D1	0.583	0.106	0.345
D2	0.100	0.105	0.269
D3	0.317	0.063	0.222

一级指标的权重如图 1 所示。



**Figure 1.** Sector diagram showing the weight distribution of green building sustainability evaluation indicators

**图 1.** 绿色建筑可持续性评价指标权重分布扇形图

二级指标的权重如图 2 所示。

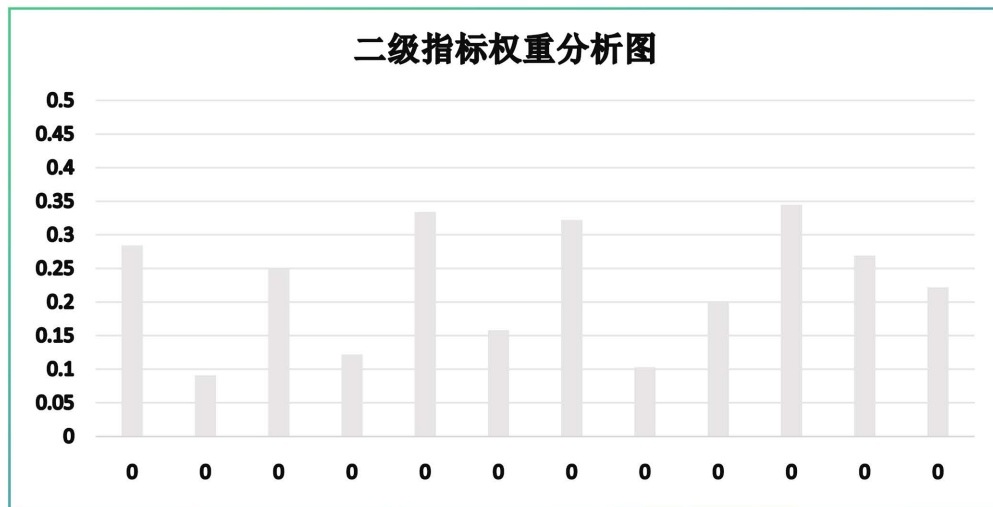


Figure 2. Weight analysis chart of secondary indicators  
图 2. 二级指标权重分析图

## 5.4. 基于灰色聚类模型的绿色建筑可持续评价计算

### 5.4.1. 构建灰色样本矩阵

依据评价指标量化范围，二级指标语言描述集分为“一般好、较好、好、极好”四个等级，对应得分1~10，分为[0~2]一星，(2~5]二星，(5~8]三星，(8~10]四星，一共四个等级，邀请5位专家评分，评分结果构成矩阵  $D$ 。

$$D = \begin{bmatrix} 5 & 7 & 4 & 5 & 3 \\ 5 & 7 & 5 & 3 & 6 \\ 7 & 3 & 6 & 5 & 7 \\ 7 & 6 & 5 & 3 & 5 \\ 3 & 8 & 6 & 6 & 7 \\ 6 & 4 & 3 & 7 & 8 \\ 4 & 8 & 7 & 8 & 7 \\ 7 & 8 & 7 & 9 & 5 \\ 8 & 7 & 8 & 7 & 8 \\ 6 & 9 & 8 & 9 & 10 \\ 7 & 7 & 7 & 5 & 6 \\ 8 & 10 & 9 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$

### 5.4.2. 构建白化权函数

采用基于中心点的白化权函数，设定4个灰类，分别用( $m=1, 2, 3, 4$ )表示“一星级”到“四星级”4个灰色区间，灰类区间转折点  $k_1=1, k_2=3.5, k_3=6.5, k_4=9$ ，由此得出各灰类的白化权函数表达式。

(1) 第一灰类:

$$f_j^1(X) = \begin{cases} 0 & x \in [0, 1) \\ \frac{3.5-x}{3.5-1} & x \in [1, 3.5] \\ 0 & x \notin (0, 3.5) \end{cases}$$

(2) 第二灰类

$$f_j^2(X) = \begin{cases} \frac{x-1}{3.5-1} & x \in [1, 3.5) \\ \frac{6.5-x}{6.5-3.5} & x \in [3.5, 6.5] \\ 0 & x \notin (1, 6.5) \end{cases}$$

(3) 第三灰类

$$f_j^3(X) = \begin{cases} \frac{x-3.5}{6.5-3.5} & x \in [3.5, 6.5) \\ \frac{9-x}{9-6.5} & x \in [6.5, 9] \\ 0 & x \notin (3.5, 9) \end{cases}$$

(4) 第四灰类

$$f_j^4(X) = \begin{cases} \frac{x-6.5}{9-6.5} & x \in [6.5, 9) \\ 1 & x \in [9, 10] \\ 0 & x \notin (6.5, 10) \end{cases}$$

### 5.4.3. 构建灰色聚类权矩阵

由上述白化权函数及公式，结合二级指标的评分灰色矩阵，计算得到各二级指标的灰色权矩阵，结果见表 11。

Table 11. Evaluation matrix of each indicator

表 11. 各指标评价矩阵

指标	评价矩阵
A	$R_A = \begin{bmatrix} 0.040 & 0.527 & 0.393 & 0.040 \\ 0.040 & 0.393 & 0.527 & 0.040 \\ 0.040 & 0.293 & 0.587 & 0.080 \end{bmatrix}$
B	$R_B = \begin{bmatrix} 0.040 & 0.393 & 0.527 & 0.040 \\ 0.040 & 0.227 & 0.573 & 0.160 \\ 0.040 & 0.360 & 0.440 & 0.160 \end{bmatrix}$
C	$R_C = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.167 & 0.513 & 0.320 \\ 0.000 & 0.100 & 0.500 & 0.400 \\ 0.000 & 0.000 & 0.560 & 0.440 \end{bmatrix}$
D	$R_D = \begin{bmatrix} 0.000 & 0.033 & 0.247 & 0.720 \\ 0.000 & 0.133 & 0.747 & 0.120 \\ 0.000 & 0.000 & 0.080 & 0.920 \end{bmatrix}$

### 5.4.4. 一级指标综合评结果

(1) 社会可持续性综合评价计算：

$$\begin{aligned}
 B_A &= W_A \times R_A \\
 &= [0.284 \quad 0.091 \quad 0.249] \times \begin{bmatrix} 0.040 & 0.527 & 0.393 & 0.040 \\ 0.040 & 0.393 & 0.527 & 0.040 \\ 0.040 & 0.293 & 0.587 & 0.080 \end{bmatrix} \\
 &= [0.025 \quad 0.258 \quad 0.306 \quad 0.035]
 \end{aligned}$$

(2) 经济可持续性综合评价计算:

$$\begin{aligned}
 B_B &= W_B \times R_B \\
 &= [0.122 \quad 0.334 \quad 0.158] \times \begin{bmatrix} 0.040 & 0.393 & 0.527 & 0.040 \\ 0.040 & 0.227 & 0.573 & 0.160 \\ 0.040 & 0.360 & 0.440 & 0.160 \end{bmatrix} \\
 &= [0.025 \quad 0.181 \quad 0.325 \quad 0.084]
 \end{aligned}$$

(3) 环境可持续性综合评价计算:

$$\begin{aligned}
 B_C &= W_C \times R_C \\
 &= [0.322 \quad 0.103 \quad 0.201] \times \begin{bmatrix} 0.000 & 0.167 & 0.513 & 0.320 \\ 0.000 & 0.100 & 0.500 & 0.400 \\ 0.000 & 0.000 & 0.560 & 0.440 \end{bmatrix} \\
 &= [0.000 \quad 0.064 \quad 0.329 \quad 0.233]
 \end{aligned}$$

(4) 制度可持续性综合评价计算:

$$\begin{aligned}
 B_D &= W_D \times R_D \\
 &= [0.345 \quad 0.269 \quad 0.222] \times \begin{bmatrix} 0.000 & 0.033 & 0.247 & 0.720 \\ 0.000 & 0.133 & 0.747 & 0.120 \\ 0.000 & 0.000 & 0.080 & 0.920 \end{bmatrix} \\
 &= [0.000 \quad 0.047 \quad 0.288 \quad 0.485]
 \end{aligned}$$

#### 5.4.5. 目标层综合评价

根据公式  $B = W \times R$ ，目标层综合评价结果为

$$\begin{aligned}
 B_E &= W_E \times R_E \\
 &= [0.269 \quad 0.222 \quad 0.295 \quad 0.214] \times \begin{bmatrix} 0.025 & 0.258 & 0.306 & 0.035 \\ 0.025 & 0.181 & 0.325 & 0.084 \\ 0.000 & 0.064 & 0.329 & 0.233 \\ 0.000 & 0.047 & 0.288 & 0.485 \end{bmatrix} \\
 &= [0.012 \quad 0.139 \quad 0.313 \quad 0.201]
 \end{aligned}$$

计算最终得分，确定出评价等级

$$\begin{aligned}
 K &= B_E \times F^T \\
 &= [0.012 \quad 0.139 \quad 0.313 \quad 0.201] \times [1 \quad 3.5 \quad 6.5 \quad 9]^T \\
 &= 4.338
 \end{aligned}$$

## 5.5. 项目结果评价

该得分落在“好”等级区间(4~7分),表明该项目在绿色建筑可持续性方面表现良好,具备一定示范价值与推广意义。项目在节能环保措施、社会适应性、经济可行性等方面均有突出表现,尤其在绿色施工与节能系统设计等领域优势明显。

## 6. 结论与展望

围绕绿色建筑可持续性评价问题,构建了涵盖环境、经济、社会、制度四个维度的评价指标体系,提出了基于 AHP-熵权法组合赋权与灰色聚类模型的综合评价方法,并通过实际案例验证了其可行性与有效性。尽管文章在绿色建筑可持续性评价方面进行了较为系统的研究,但仍存在一些不足之处,指标体系可进一步扩展,未来可结合地域差异、建筑类型、使用功能等因素,进一步丰富和细化评价指标,提高评价的针对性和适应性。并进一步探讨如何将评价结果与政策激励、市场机制相结合,推动绿色建筑的规模化发展与可持续转型。

## 参考文献

- [1] Cao, Y., Xu, C., Kamaruzzaman, S.N., *et al.* (2022) A Systematic Review of Green Building Development in China: Advantages, Challenges and Future Directions. *Sustainability*, **14**, 12293. <https://doi.org/10.3390/su141912293>
- [2] Guo, K., Li, Q., Zhang, L., *et al.* (2021) BIM-Based Green Building Evaluation and Optimization: A Case Study. *Journal of Cleaner Production*, **320**, Article 128824. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128824>
- [3] 任锦康. 绿色建筑对环境的影响、意义、发展方向[J]. 绿色环保建材, 2019(3): 30-31.
- [4] 时乐. 双碳目标背景下绿色建筑推广影响因素及对策研究[D]: [硕士学位论文]. 张家口: 河北建筑工程学院, 2024.
- [5] 王丞. 我国绿色建筑和低碳建筑评价体系的发展比较及优化建议[J]. 建筑科学, 2023, 39(2): 235-244.
- [6] Liu, W., Huang, X.H., He, Z., *et al.* (2022) Input-Output Benefit Analysis of Green Building Incremental Cost Based on DEA-Entropy Weight Method. *Buildings*, **12**, 2239. <https://doi.org/10.3390/buildings12122239>