

智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价算法

彭奕博

南加州大学，洛杉矶，美国

摘要：基于绿色低碳效率与空间活力内在作用机制复杂且存在的非线性、滞后性等特征，对智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价算法进行了研究。通过层次分析法（AHP）建立智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价指标体系，应用改进熵权法计算评价指标权重值，建立智慧园区空间活力耦合评价模型。研究结果表明该方法的耦合评价价值与实际耦合评价价值更为接近，且决定系数始终高度接近1，证明了研究方法能够为园区规划提供准确可靠的依据。

关键词：智慧园区；绿色低碳效率；空间活力耦合；评价算法

Coupling Evaluation Algorithm for Green and Low-Carbon Efficiency and Spatial Vitality of Smart Parks

Yibo Peng

University of Southern California, Los Angeles, USA

Abstract: Due to the complex internal mechanism between green low-carbon efficiency and spatial vitality, which involves nonlinear and lagging characteristics, a study was conducted on the coupling evaluation algorithm for green low-carbon efficiency and spatial vitality in smart parks. The analytic hierarchy process (AHP) was used to establish a coupling evaluation index system for green low-carbon efficiency and spatial vitality in smart parks. The improved entropy weight method was applied to calculate the weight values of the evaluation indicators, and a coupling evaluation model for spatial vitality in smart parks was developed. The research results show that the coupling evaluation values obtained by this method are closer to the actual coupling evaluation values, and the coefficient of determination remains highly close to 1. This demonstrates that the research method can provide accurate and reliable references for park planning.

Keywords: Smart Park Green and low-carbon efficiency; Spatial vitality coupling; Evaluation algorithm

1 引言

当前许多园区在追求技术节能与低碳管理的同时，往往忽视了空间使用效率、人文体验与社会互动，导致生态效益与空间活力之间存在割裂甚至矛盾[1,2]。部分园区过度强调硬件智能化与能耗管控，却缺乏对公共空间布局、人群活动特征以及环境舒适性的系统考量，造成资源利用效率不高、空间吸引力不足等问题。在此背景下，如何协调绿色低碳目标与空间活力提升，成为智慧园区高质量发展的核心议题[3]。

在电力园区空间规划中，环境影响评价是确保可持续发展的重要环节。文献[4]基于电网规划特性，识别了其在实施过程中可能涉及的各类环境影响要素，构建了涵盖自然与生态等多维度的基础性评价指标体系，并借助熵权法计算指标权重，从而建立电网规划环评模型，最终输出评价结论。然而，该方法在确定权重时，容易受到数据可获取性与质量等因素制约，一定程度上影响了评价结果的准确性。另一方面，文献[5]则从电网工程数字化设计的实际需求出发，围绕功能性、可靠性等核心维度设立评估指标，引入灰类白化权函数，将观测值按“高”“低”等灰类进行划分，通过计算各指标在对应灰类中的白化权值，结合层次分析法构建判断矩阵以确定权重向量，并依据聚类系数判定样本所属灰类，以实现更精细的评估。尽管该方法提升了分类和评估的粒度，但其判断矩阵的构建仍依赖专家经验，主观因素的介入可能导致矩阵不一致和权重偏差，进而影响最终评价的可信度。

2 智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价算法设计

2.1 评价指标体系建立

通过层次分析法（AHP）构建起一个结构清晰、层次分明的评价模型，该模型不仅通过了逻辑一致性检验，更在若干代表性智慧园区中进行了试评价与反馈修正，从而保证了其科学性、客观性与可操作性。

构建的智慧园区空间活力耦合评价指标体系具

体如表1所示。

表1. 智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价指标体系

一级指标	二级指标	三级指标
能源与资源利用效率	能源低碳化	可再生能源使用比例 区域冷热电联供系统覆盖率
	资源循环化	单位GDP综合能耗 非传统水源利用率
		固体废弃物资源化利用率
	环境与生态质量	环境健康度
地表水水质达标率		
生态和谐度		环境噪声达标区覆盖率 绿化覆盖率与三维绿量
		本地植物种类占比 透水地面面积比例
智慧管理与数字赋能	基础设施智能化	智能传感器覆盖率与密度 数据平台互联互通程度
	管理功能智慧化	建筑能耗智能监控与优化率
		智慧市政管理覆盖率

如表1所示，对比上述评价指标中，可以通过评分值对其进行量化处理。首先对获取的智慧园区空间数据进行预处理。其预处理的过程如下所示：

$$\begin{cases} Q = X \cdot \left(E + \frac{g \cdot h}{1 + g} \right) \\ Z = \frac{Q - \bar{Q}}{Q'} \end{cases} \quad (1)$$

式中， Q 表示智慧园区空间数据噪声去除的结果， X 表示原始的智慧园区空间数据， E 表示智慧园区空间数据的属性值， g 表示去噪参数， h 表示智慧园区空间数据中的噪声值， Z 表示智慧园区空间数据的规范化处理结果， \bar{Q} 表示智慧园区空间数据的均值， Q' 表示智慧园区空间数据的标准差。

基于上述计算公式，更好地获取大量的符合需求的智慧园区空间数据，从而进一步完善对智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价指标体系的构建。

2.2 改进熵权法下评价指标权重值计算

本节应用改进熵权法来完成评价指标权重值的计算。该方法依据各指标数据自身的变异程度客观赋权，能有效避免人为主观因素的干扰；通过对熵值计算的优化，如极端值处理、数据离散度调整，它能够更灵敏地识别出指标间的差异性，从而确保权重分配更能真实反映绿色低碳效率与空间活力

各维度在实际耦合关系中的相对重要性，提升了评价结果的科学性和准确性。基于表1构建的评价体系，设定评价指标的评价矩阵。其具体如下所示：

$$A_{mn} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中， A_{mn} 表示基于评价指标的评价矩阵， a_{mn} 等表示评价指标的量化值。

为减少后续设计过程中的计算量，需要先对评价矩阵进行归一化处理。其具体计算过程如下所示：

$$R_{mn} = \frac{A_{mn} - A_{mn}^{\min}}{A_{mn}^{\max} - A_{mn}^{\min}} \quad (3)$$

式中， R_{mn} 表示归一化处理后的评价矩阵， A_{mn}^{\min} 表示评价指标的最小值， A_{mn}^{\max} 表示评价矩阵的最大值。

在评价矩阵的基础上，利用改进熵权法，计算评价指标的权重值。一级指标和二级指标的熵权值计算过程如下所示：

$$S = (1 - \bar{F})R_{mn} + c \cdot \bar{F} \cdot R_{mn} \quad (4)$$

$$V = \frac{a(1 + \bar{F})}{\sum_{i=1} a_i(1 + \bar{F})} \cdot \chi \quad (5)$$

式中， S 表示一级指标的熵权值， \bar{F} 表示初始信息熵均值， a_i 表示第 i 个熵权值的改进系数， c 表示熵值改进倍数， V 表示二级指标的熵权值， χ 表示不同熵权值的占比系数。

1.3 智慧园区空间活力耦合评价模型建立

在上述设计的基础上，建立智慧园区空间活力耦合评价模型，如图1所示。

如图1所示，基于建立的智慧园区空间活力耦合评价指标体系，及上述确定的加权规范矩阵的最优解和最劣解，计算评估对象与理想解之间的贴近度，基于此，计算出相应的综合耦合评价价值，从而输出相应的耦合评价结果。在上述过程中，耦合评价结果与实际的耦合程度贴近度的计算公式如下所示：

$$K = \frac{D(P^+)}{D(P^+) + D(P^-)} \quad (7)$$

式中， K 表示耦合评价对象与理想解的贴近度， $D(P^+)$ 表示耦合评价对象到最优解的距离， $D(P^-)$ 表示理想解到最劣解的距离。

基于上述内容，计算出智慧园区空间活力的综合耦合评价价值，实现对智慧园区空间活力的耦合评价。

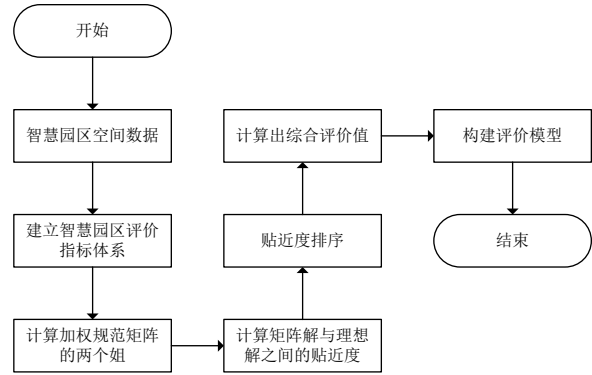


图1. 智慧园区空间活力耦合评价模型建立的具体过程

3 实验测试

以某智慧园区为环境完成智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价算法的验证。该园区深度融合了地热、光伏等可再生能源，其光伏屋顶铺设面积达8917平方米，总装机容量2.15MWp，年均发电量超过220万度，可再生能源利用率高达68%。收集该智慧园区中能源低碳化、资源循环化、环境健康度、生态和谐度、基础设施智能化、管理功能智慧化这6个二级指标，分别命名为A、B、C、D、E、F，在改进熵权法的应用下，计算多个评价指标的权重值。其计算的权重值如图2所示：

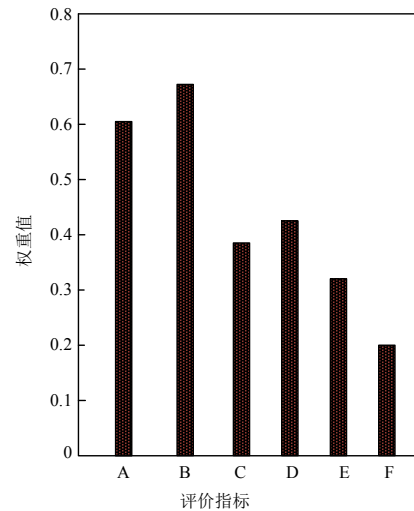


图2. 评价指标权重值

如图2所示，基于评价指标的权重值，利用研究方法、文献[4]方法以及文献[5]方法完成智慧园区域完成绿色低碳效率与空间活力的多次耦合评价，每100次评价统计一次评价价值，结果如表2所示：

表2. 三种方法的耦合评价结果

评价次数	实际耦合评价价值	文献[4]方法	文献[5]方法	研究方法
100	0.92	0.96	0.91	0.92
200		0.95	0.95	0.92
300		0.82	0.963	0.92
400		0.83	0.93	0.91
500		0.82	0.84	0.91
600		0.87	0.92	0.91
700		0.82	0.92	0.93
800		0.81	0.94	0.93
900		0.83	0.93	0.93

如表2所示，研究方法在不同评价次数下表现极为稳定，且耦合评价价值与实际耦合评价价值较为接近。从评价次数100次到900次，其耦合评价价值始终保持在0.91-0.93的狭窄区间内。相比之下，文献[4]方法的评价价值波动相对较大，在0.81-0.96范围内波动；文献[5]方法虽整体波动幅度小于文献[4]方法，但也存在一定的起伏，如评价次数为300次时达到0.963，而在500次时降至0.84。这说明研究方法能够更准确地反映绿色低碳效率与空间活力的真实耦合情况，且该方法在多次评价中能够提供更为一致和可靠的结果，具有较高的稳定性。

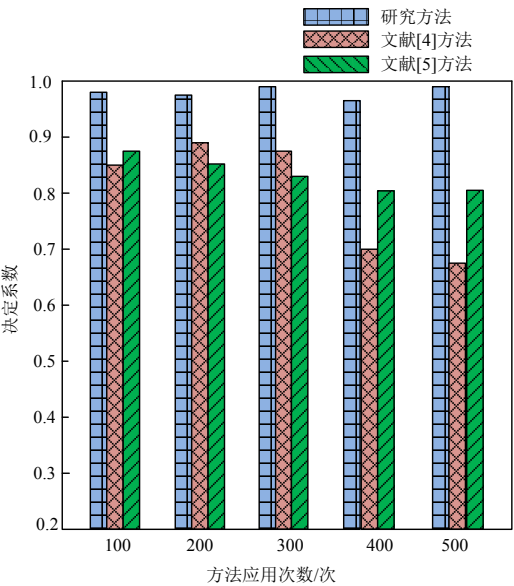


图3. 三种方法的决定系数对比

为进一步验证本文智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价算法的性能，以决定系数为评价指标，对比三种方法的评价系数。决定系数反映了模型对目标变量变异性的解释能力。在验证智慧园区绿色低碳效率与空间活力耦合评价算法性能时，决定系数越接近1，说明算法输出结果与真实观测值的吻合度越高，模型的解释力和预测准确性越强；反之，若决定系数偏低，则表明算法存在较大偏差或未能有效捕捉数据中的关键变化规律。具体评价结果如图3所示。

如图3所示，研究方法在多应用次数下，决定系数始终高度接近1，明显优于文献[4]方法和文献[5]方法。这表明研究算法输出结果与真实观测值吻合度极高，能够精准地反映智慧园区绿色低碳效率与空间活力的耦合关系，展现出强大的模型解释力和预测准确性。而文献[4]方法和文献[5]方法由于性能上的不足，在实际应用中的可靠性和有效性相对较弱。

4 结束语

本研究通过构建基于AHP-改进熵权法的耦合评价模型，成功实现了对智慧园区绿色低碳效率与空间活力协同发展水平的量化评估。研究成果不仅验证了该评价体系在复杂系统耦合分析中的科学性和可靠性，更创新性地建立了多维度协同发展的评估范式。该研究为智慧园区的规划建设提供了重要的理论依据和实践指导，能够有效推动园区在保持空间活力的同时实现绿色低碳转型，对促进城市可持续发展具有重要的现实意义。

参考文献

- [1]张宏,彭恂,丛静.功能异质性视角下我国海外园区空间布局指标体系构建与合理性研究[J].统计研究,2023,40(01):76-89.
- [2]罗仁泽,田长远,李福映,等.“四链”融合视角下的创新园区空间规划策略与实践[J].规划师,2025,41(05):83-91.
- [3]许仁宗,雷志刚.公园城市语境下科创园区空间转型与规划策略——以湖南林业科技产业园规划为例[J].规划

- 师,2024,40(S1):241-246.
- [4]张体强,李金阳,杨丹,等. 基于基本指标模式的电网规划环境影响评价 [J]. 环境影响评价, 2022, 44 (03): 62-67.
- [5]李洪江,钱富君,冉启鹏. 基于灰色聚类 and 层次分析法的电网工程数字化设计质量评价 [J]. 云南电力技术, 2021, 49 (06): 48-51.

