

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.09.012

“效益—产量”视角下绿色建筑灰色关联评价模型

叶堃晖^a, 刘 瑞^b, 申立银^c

(重庆大学 a.建设经济与管理研究中心;b.管理科学与房地产学院;c.可持续建设国际研究中心,重庆 400045)

摘要:在当前大力应用并发展绿色建筑的背景下,科学合理量化绿色效益已成为政府制定节能减排政策和企业拟定竞争战略的基石。文中通过识别多维的评价指标,构建由实物及货币指标组成的“效益—产量”模型,采用组合权重的灰色关联分析法,对建筑工程项目的绿色效益进行多方量化评比。通过 3 个中国实例测算对比发现:“效益—产量”视角下灰色关联评价模型比灰色聚类评估、数据包络分析等方法更加稳定、可靠、有效,也更能反映绿色建筑的多维含义。

关键词:绿色计算;实物指标;组合权重;灰色关联

中图分类号:TU023

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)09-105-09

A benefit-output model for measuring the performance of green buildings using grey relational algorithm

YE Kunhui^a, LIU Rui^b, SHEN Liyin^c

(a. Research Center for Construction Economics and Management;

b. School of Management Science and Real Estate;

c. International Research Center for

Sustainable Construction of Environment, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: Recent years have witnessed a wide application of green buildings in the world. Properly measuring the performance of green building projects has been the cornerstone of governmental policy-making on energy saving and carbon reduction, and it has been playing a crucial role in the formulation of business competitive strategies. In this study, multidimensional evaluation indicators are identified. A benefit-output model composed of physical and currency indicators is proposed using gray relational algorithm to make quantitative evaluation of multiple schemes for green benefit of construction projects. Through the comparison of three cases in China, the proposed model is found to be more stable, reliable, and effective than others including grey cluster evaluation and data envelope analysis, presenting a multi-dimensional concept of green buildings and offering a useful framework for application in other contexts.

Keywords: green computing; physical indicator; combination weight; gray relation

节能减碳是当前世界各国共同的议题,建筑业碳排放是全社会减排的重中之重^[1-2]。在中国,每新增 1 m² 的建筑面积排放 CO₂ 约为 0.8 t^[3]。近 20 年来,全国房屋竣工面积高达 440 亿 m²^[4],碳排放规模十分

收稿日期:2019-01-26

基金项目:国家哲学社科基金重大项目(17ZDA062)。

Supported by the Major Projects of National Philosophy and Social Science Foundation (17ZDA062).

作者简介:叶堃晖(1978—),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为可持续建设、工程项目管理,

(E-mail) Kunhui_YE@cqu.edu.cn。

庞大。此外,与建筑相关的能源消耗占能源总量的近 50%^[5]。如此巨大的建筑能耗成为我国国民经济的负担,量化建筑绿色效益并有效比较绿色方案非常必要。

围绕量化建筑绿色效益问题,Gabay 等^[6-8]构建了全生命周期增量成本与增量效益模型。然而,类似用货币效益的多少量化绿色效益,将绿色效益评价与经济利益挂钩的做法难免受到质疑。立足现有绿色建筑评价指标体系,侯玲^[9]主张利用灰色聚类评估法提升绿色效益的计算结果,因评价方法的主观性使量化结果不具客观性。Vyas 等^[10-11]利用数据包络分析技术创新现有的评价方法,王丽娜等^[12]从价值工程的角度对比分析增量成本与增量效益现值,但因评价指标过多或分级复杂而扩大随机偏差。对此,安玉华等^[13]强调通过创立价值工程与模糊数学的投资决策模型予以解决。总之,无论计算过程还是计算结果,绿色效益量化的主观性依然未得到根本性消除。

文中提出改进现有的评价指标体系,构建基于实物量指标的绿色效益测算模型,采用基于组合权重的灰色关联分析法,以提升货币及实物指标的统计分析。研究给出的评价模型在弥补现有研究不足的同时,也能为量化绿色效益提供更加有效的分析工具和决策支持。

1 模型构建

1.1 基于全寿命周期的三维度评价体系

绿色建筑是一个包罗万象而又蕴含不同学科知识的词汇。它着眼于资源与能源的高效利用、施工技术的环保节能、使用材料的经济无害和居住环境的舒适可持续性。绿色建筑的多维度和包容性对绿色效益评价提出诸多挑战,要求构建科学、全面的评价指标体系。对此,学术界不少有益的研究,如表 1 所示。

表 1 绿色效益评价典型指标
Table 1 Typical benefits indicators for green buildings

| 指标 | 施建刚 | 王芳 | 马素珍 | 夏立明 | 马晓国 | 刘宏雷 | 高雷 | Kats | Yudelson | Moris | Nalewaik |
|--------------------|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|------|----------|-------|----------|
| 节地 | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | ✓ | | | | |
| 节能 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 节水 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 节材 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | |
| 延长建筑物寿命, 降低维修成本 | ✓ | | | | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| CO ₂ 减排 | | | | | ✓ | | ✓ | | | | ✓ |
| 室内外生态环境改善 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | | | ✓ | |
| 绿化系统 | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | |
| 居民宜居福利 | | | | | ✓ | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 城市排污及设施费 | | | | | | | | | | | |

在上述研究的基础上,结合中国最新绿色建筑评价标准^[14],可将指标体系设计为“总目标(绿色效益)—次目标(经济效果、环境效果、社会效果)—分目标—总则”4 个层次。分目标由一系列影响指标构成,总则是根据每一分目标所要达到的绿色目的而确定的影响因素。考虑“绿化系统”主要指绿色植物净化大气从而改善生态环境,故将“室内外生态环境改善”指标并入“绿化系统”指标中,如图 1 所示。

1.2 “效益—产量”计算模型

绿色效益指标可细分为货币量形式的效益指标和实物量形式的产量指标。前人的研究仅采用指标的货币形式进行计算^[15],而忽略了因资金时间价值带来的偏差。为此,引入以实物量指标为主的“效益—产量”模型。引入该模型旨在解决现有评价模型存在的不足,避免实物量指标向货币量指标转换带来的不准确。

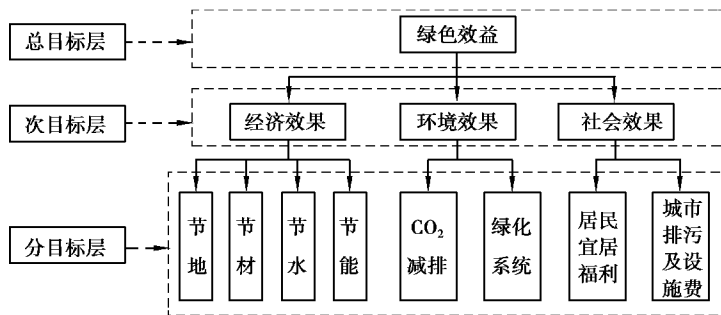


图 1 绿色效益评价指标体系

Fig. 1 A benefits indicator system for green buildings

1) 模型构成

① 节地效益 (A_1)

包括节省土地面积而引起的土地购置费的节约及提高土地利用率。比如,合理规划绿色用地,合理开发利用地下空间^[14]等,分别用 $S_{土地购置}$ 和 $S_{土地利用率}$ 表示。

$$A_1 = S_{土地购置} + S_{土地利用率}。 \tag{1}$$

② 节能产量 (A_2)

参照伍倩仪等对节能的测算,将节能确定为外围护结构、可再生能源系统、智能系统照明节电及提高能源使用效率等方面^[16]。从能源消耗方面计算节能所带来的产量增值,由于耗热量与燃煤量关系紧密,故将节煤量当作节能产量实物指标。

a. 外围护结构节产量^[17]

绿色建筑单位耗煤量指标为

$$q_c = 24D(Q + q_\eta) / H_c \eta_1 \eta_2, \tag{2}$$

式中: D 表示冬季采暖天数,参考全国各地冬季采暖天数^[18]; Q 表示住宅采暖耗热指标,取 42 W/m^2 ^[19]; q_η 代表居住活动热量增加值,取 3.8 W/m^2 ; H 代表标准煤热值,取 $8.14 \text{ kW} \cdot \text{h/kg}$ (标煤); η_1 表示锅炉房供热效率; η_2 表示供热系统输送热效率。

绿色建筑相对基准建筑的节煤率为

$$\Delta b = 1 - q_c / \Delta B, \tag{3}$$

式中, ΔB 代表某地区采暖平均耗煤标。

外围护结构总节煤产量为

$$A_{节煤量} = A_{单位面积节煤量} \times S_{建筑面积} = \Delta B \times \Delta b \times S_{建筑面积}。 \tag{4}$$

b. 可再生能源节产量

中国有丰富的太阳能资源,全国 2/3 以上地区全年太阳能辐照量大于 $5\,700 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,全年日照时数大于 $2\,200 \text{ h}$ ^[20]。因此,可再生能源系统主要考虑太阳能热水系统的利用。太阳能热水系统每年可节约的电量为 $\Delta Q(\text{kW} \cdot \text{h})$,根据标准煤热值将节热量换算成节煤量

$$A_{热水系统} = \Delta Q / H_c。 \tag{5}$$

c. 智能系统照明节电产量

$$A_{智能系统节电} = \Delta Q / H_c。$$

综合上述 3 个方面的测算,可得出节能产量实物指标计算式,具体如下

$$A_2 = A_{节煤量} + A_{热水系统} + A_{智能系统节电}。 \tag{6}$$

③ 节材效益 (A_3)

主要包括可循环、高性能、环保等材料选用^[14]、装饰性建材节约的费用^[20]和维修维护成本的节约。由于绿色生态环境可以减少大气污染物对建筑物的侵蚀使得建筑材料维护降低,将维修维护成本节约归入节材效益计算中。

$$A_3 = A_{\text{建筑材料选用}} + A_{\text{装饰性材料节约}} + A_{\text{维修维护成本节约}} \quad (7)$$

④节水产量(A_4)

绿色建筑中常见的节水技术包括供水系统节水技术、中水循环利用系统、自然降水收集系统^[17]。节水技术的使用不但减少建筑自来水消耗,还可以通过收集装置将建筑排水和生活废水经处理后再用于灌溉植物、冲洗卫浴等,节水产量可用 A_4 表示。

⑤CO₂减排(A_5)

CO₂排放贯穿项目全寿命周期。参照姜凤^[17]对 CO₂减排产量的计算,在此主要考虑节能技术产生的 CO₂排放的减少量。由②可知节能技术由 4 部分构成。

$$A_5 = (A_{m1} + A_{m2} + A_{m3} + A_{m4})Q, \quad (8)$$

式中: A_{m1} 表示绿色建筑全寿命周期外围护结构节约能耗; A_{m2} 表示绿色建筑全寿命周期可再生能源系统节约能耗; Q 表示每吨煤排放的 CO₂,通常取 2.66~2.72^[21]。

⑥绿化系统节产计算(A_6)

绿化系统主要从绿色植物净化大气的角度出发,即绿色植物通过光合作用吸收 CO₂释放 O₂。在光合作用下,每年 1 hm²阔叶林吸收 CO₂量约为 365 t,释放 O₂量约为 266.45 t。

$$A_6 = \Delta S \times M, \quad (9)$$

式中: A_6 代表 CO₂吸收量; ΔS 代表小区绿化面积; M 代表每公顷所吸收的 CO₂量,单位:t/hm²。

⑦居民宜居福利(A_7)

绿色建筑注重与生态融合,保持环境质量,提升居住舒适性,以带给居民医疗、休闲、心情愉悦等多方面的人文福利。该指标根据居民为实现以上福利而愿意为其支付费用的多少计量,可用 A_7 表示。

⑧城市排污效益(A_8)

绿色建筑采取节水措施后,增加雨污水回用率,减少污染物排放,最终达到降低项目排污费的目的^[21]。

$$A_8 = \sum P_{\text{排污费}_t} \times Q_{\text{非传统水源量}} \times \eta_{\text{减排}}, \quad (10)$$

式中: $A_{\text{减排}}$ 代表非传统水源利用节约的排污费,元; $Q_{\text{非传统水源量}}$ 表示第 t 年每吨生活污水的排污费,元/t; $\eta_{\text{减排}}$ 表示非传统水源减排相对污水减排的折减系数,根据使用的非传统水源污染物浓度可取值 0.4~1.0。

2) 模型参数

该模型共有 2 个参数:评价周期(t)、折现率(r)。根据民用住宅建筑及公共建筑的特点,可将建筑使用年限当作绿色建筑的评价周期。如混凝土、砖混结构的住宅设计,使用年限选 50 年作为基准线^[21], $T=50$ 年。考虑到资金的时间价值,绿色建筑全寿命周期效益用净现值(NPV)来反映,折现率可采用行业基准收益率。

2 基于组合权重的灰色关联分析法

数值收集与处理是开展“效益—产量”模型应用的关键。为充分利用客观数据,这里选用组合权重的灰色关联分析法,用以量化并比较项目的绿色效益值。

2.1 灰色关联系数计算

1) 收集指标数据,假定评价对象有 q 个,评价指标有 m 个,任取参考数列为 $A_0 = \{A_0(k) | k=1, 2, \dots, m\}$, 比较数列为 $A_i = \{A_i(k) | k=1, 2, \dots, m\}, i=1, 2, 3, \dots, m$ 。

2) 构成指标矩阵,对原始矩阵数据进行标准化处理。

3) 结合上述参考数列和比较数列计算灰色关联系数^[22]

$$\xi_i(k) = \frac{\min_s \min_t |A_0(t) - A_s(t)| + \rho \max_s \max_t |A_0(t) - A_s(t)|}{|A_0(k) - A_i(k)| + \rho \max_s \max_t |A_0(t) - A_s(t)|}, \quad (11)$$

其中, $\rho \in [0, 1]$ 为分辨系数, $\min_s \min_t |A_0(t) - A_s(t)|$ 、 $\max_s \max_t |A_0(t) - A_s(t)|$ 分别为两级最小差及两级最大差。

2.2 “熵权—层次分析法”权重计算

与灰色关联系数相对应的是各指标权重。传统上,常采用平权处理或使用层次分析、专家打分等主观性较强的方法^[23],而熵权法可能会使重要程度很高的准则信息丢失^[24]。为此,文中采用“熵权—层次分析法”,既考虑评定分目标时主观评价与客观数据结合,也考虑不同准则下分目标相对重要程度的要求,求得的权重能更准确地反映各指标对绿色效益的贡献率。各指标的权重为: $w'' = \{w''_1, w''_2, \dots, w''_m\}$ 。

1) 设共有 c 个次目标, m 个分目标,由层次分析法可得次目标权值 $B = \{\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_c\}$,各分目标权重值为 $\xi = \{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_m\}$;

2) 利用熵权法求得各分目标的权重^[25], $A = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m\}$;

3) 将熵权法求得的权重 A 与层次分析法所求分目标权重 ξ 综合,求得子准则综合权重 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 。其中, r_j 的计算式为

$$r_j = \alpha_j \times \xi_j / \left(\sum \alpha_j \times \xi_j \right)。$$

4) 参照次目标层和分目标层对应关系,将 $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 转换为 $R_{ij} = \{r_{11}, r_{12}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{cm}\}$, r_{ij} 表示第 i 个次目标下第 j 个分目标的权重。再对其进行归一化处理

$$w_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^m r_{ij}。$$

其中, $i=1, 2, 3 \dots c, m$ 表示在第 i 次目标下分目标的数量,可得 $w = \{w_{11}, w_{12}, w_{13}, \dots, w_{cm}\}$;

5) 将次目标权重 B 与所求得的综合权重 w 对应相乘得到 $w' = \{w'_{11}, w'_{12}, \dots, w'_{cm}\}$, 其中, $w'_{ij} = \beta w_{ij}$, $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, k$;

6) 对所有指标同步归一化处理: $w''_{ij} = w'_{ij} / \sum_{i=1, j=1}^{i=c, j=m} w'_{ij}$, 可得 $w'' = \{w''_{11}, w''_{12}, \dots, w''_{ij}, \dots, w''_{cm}\}$ 。

2.3 加权灰色关联系数

根据灰色加权关联度的大小,对各个评价对象(各个方案)进行排序。关联系数越大,评价结果越好。

$$r_i = \sum_{k=1}^m w''_i \xi_i(k), \quad (12)$$

其中, r_i 为第 i 个评价对象(评价方案)的加权灰色关联系数。

3 案例分析

考虑到样本分布性与数据可得性等要求,研究选取不同地域、不同背景、不同体量且均有数据资料作为研究支撑的3个绿色建筑项目,以进一步验证上述评价模型和评价方法的有效性。

3.1 样本选取

案例1:辽宁省大连市某建设项目。该建设项目为高层、电梯洋房、联排别墅组成的住宅群,工程总占地7.7万 m^2 ,建筑面积16.88万 m^2 ,可容纳居住人口1295人。工程在节地、节能、节水及生态保护等方面采取相应的措施,从治污、节约空间及绿化角度改善了住宅的居住环境,满足绿色建筑二星级评价标准,曾被评为大连市优秀节能环保住宅项目并进行推广。

案例2:中新天津某住宅项目。该项目充分考虑建筑的能源、植物、水环境等方面的合理配置。项目用地面积为26204 m^2 ,建筑面积为72104 m^2 ,总投资为10014.44万元,居住人口约为1236人。项目打造一个宜居、绿色、低碳的现代型建筑,充分考虑建筑的能源、植物、水环境等方面的合理配置。同时,该项目整合应用22项绿色建筑技术,均能从项目整体出发在相关文献收集数据。

案例3:西安市某综合楼。该综合楼建筑面积12000 m^2 ,使用人数峰值约为500人,充分利用水源地热等再生能源,安装地热采暖系统,收集雨水废水再利用,采用节能门窗等节能技术,楼内具有生态绿化区,根据植物供氧和吸收二氧化碳的不同能力,选择多种绿色植物,全方位采用节能技术,是西安市最具特色的绿色建筑。

3.2 数据计算

1) 计算绿色效益指标

通过查找文献对案例进行数据采集,由已有资料及相关数据^[17,20,26]可直接得出各案例节地效益、节材效

益、节水产量及居民宜居福利;利用“效益—产量”模型可计算各案例节能产量,CO₂节排产量,绿化系统产量及城市排污节约费。节能产量由式(2)~式(4)计算,根据《住宅小区“三位一体”系统节能模式的实践及效果》取 $\eta_1=0.83, \eta_2=0.9264$ 。由式(8)计算CO₂减排产量, Q 取2.69^[20]。绿化系统产量根据公式(9)计算,取 $M=365\text{ t}^{[20]}$ 。计算城市排污节约费时各地区用水定额取值分别为大连市135 L/人·天^[19],天津市150 L/人·天^[22],由于非传统水源主要是中水,故3个案例取 $\eta_{\text{排水}}=1.0$,除此以外,各省市排污费也不相同,经过调研当地收费状况取 $P_{\text{大连市}}=0.7\text{ 元/m}^3, P_{\text{天津市}}=0.7\text{ 元/m}^3, P_{\text{西安市}}=0.6\text{ 元/m}^3$,由式(10)计算可得3个案例节约的城市排污费。经计算,3个案例最终绿色效益指标计算结果如表2所示。

表 2 绿色效益指标计算结果

Table 2 Results of green benefit indicators calculation

| 指标 | 单位 | 样本 | | |
|---------------------------------------|-------------------|----------|-----------|----------|
| | | 案例 1 | 案例 2 | 案例 3 |
| 节地效益(A ₁) | 万元 | 104.0 | 756.57 | 15.4 |
| 节能产量(A ₂) | t/年 | 1 041.17 | 242.97 | 114.51 |
| 节材效益(A ₃) | 万元 | 202.6 | 338.36 | 57.71 |
| 节水产量(A ₄) | M ³ /年 | 46 833.0 | 28 413.8 | 36 500.0 |
| CO ₂ 节排产量(A ₅) | t/年 | 2 800.75 | 3 617.243 | 308.03 |
| 绿化系统产量(A ₆) | t/年 | 1 909.6 | 644.8 | 297.6 |
| 居民宜居福利效益(A ₇) | 万元 | — | 18.69 | 9.97 |
| 城市排污(A ₈) | 万元 | 41.21 | 39.38 | 64.8 |

2) 基于灰色关联分析法的绿色效益评价

表 2 的计算数据可转换为 3 组数列,即

$$x_1 = \{104, 1041.17, 202.6, 46\ 833, 2\ 800.75, 1\ 909.6, 0, 41.21\},$$

$$x_2 = \{756.57, 242.97, 338.36, 28\ 413.8, 3\ 617.243, 644.8, 18.69, 39.38\},$$

$$x_3 = \{15.4, 114.51, 57.71, 36500, 308.03, 297.6, 9.97, 64.8\}.$$

对以上数据进行标准化处理,结合式(11)计算,可得 $\xi_i(k)$ (见表 3),其中 $\rho=0.5$ 。

表 3 关联系数

Table 3 Correlation coefficients

| 评价指标 | 样本 | | |
|----------------|---------|---------|---------|
| | 案例 1 | 案例 2 | 案例 3 |
| A ₁ | 1.000 0 | 0.333 3 | 0.362 2 |
| A ₂ | 0.367 3 | 0.333 3 | 1.000 0 |
| A ₃ | 1.000 0 | 0.333 3 | 0.508 3 |
| A ₄ | 0.333 3 | 0.471 3 | 1.000 0 |
| A ₅ | 1.000 0 | 0.333 3 | 0.669 6 |
| A ₆ | 0.389 2 | 0.333 3 | 1.000 0 |
| A ₇ | 1.000 0 | 0.517 3 | 0.333 3 |
| A ₈ | 0.333 3 | 1.000 0 | 0.350 1 |

为简化处理且注意到分目标中的经济效果、环境效果、社会效果关系紧密,权重取值为 $B = \{0.33, 0.34, 0.33\}$;经计算,次目标层指标均满足一致性检验,各指标权重为 $\xi = \{0.093, 0.256, 0.055, 0.074, 0.152, 0.204, 0.122, 0.044\}$ 。结合案例所得数据,由熵权法对绿色效益指标权重进行评估,得到各指标权重为 $A = \{0.143\ 3, 0.140\ 1, 0.107\ 7, 0.110\ 1, 0.110\ 3, 0.128\ 7, 0.107\ 4, 0.152\ 4\}$ 。按照“熵权—层次分析法”计算分目标层指标的综合权重,结果如表 4 所示。最终,可得到 3 个案例的绿色效益系数,如表 5 所示。

表 4 分目标层指标综合权重

Table 4 Comprehensive weights of indicators at the sub-objective level

| | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | A_5 | A_6 | A_7 | A_8 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| γ | 0.013 | 0.036 | 0.006 | 0.008 | 0.017 | 0.026 | 0.013 | 0.007 |
| W_{11} | 0.106 | 0.284 | 0.047 | 0.065 | 0.133 | 0.208 | 0.104 | 0.053 |
| W'_{11} | 0.035 | 0.094 | 0.016 | 0.021 | 0.045 | 0.071 | 0.034 | 0.018 |
| W''_{11} | 0.105 | 0.282 | 0.046 | 0.064 | 0.136 | 0.212 | 0.103 | 0.053 |

表 5 绿色效益系数

Table 5 Benefit coefficients for the three cases

| 项目名称 | 加权关联系数 |
|------|--------|
| 案例 1 | 0.615 |
| 案例 2 | 0.397 |
| 案例 3 | 0.763 |

将上述模型与方法在 3 个案例背景下反复检验,计算各案例的绿色效益系数,分别为 0.615、0.397、0.763。尽管 3 个案例的体量不同、背景不同、功能不同,但均能得到测算结果,说明文中构建的模型与方法具有通用性与稳定性。

3) 模型对比与验证

为进一步验证模型和方法的有效性,再选取另外 4 种评价方法,分别计算 3 个案例的绿色效益值,如表 6、表 7 所示。

表 6 多方法测评结果

Table 6 Multi-method evaluation results

| 编号 | 评价方法 | 计算公式 | 案例 | | |
|----|------------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | | | 案例 1 | 案例 2 | 案例 3 |
| A | 增量成本和增量效益模型 | SE—LCC | 168.99/万元 | 2 443.03/万元 | 708.90/万元 |
| B | 灰色聚类评估法 | σ^k | — | — | — |
| C | 数据包络分析法 | DEA | 0.4 | 1 | 0.928 |
| D | 基于价值工程的增量成本与增量效益模型 | IB_p/IC_p | 1.044 | 2.828 | 5.319 |
| F | “效益—产量”视角下绿色建筑灰色关联评价模型 | $W_i\xi_i$ | 0.615 | 0.397 | 0.763 |

表 7 不同计算方法下绿色效益值
Table 7 Green benefit value by different calculation methods

| 模型 编号 | 案例 | | | 优点 | | | | |
|----------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 案例 1 | 案例 2 | 案例 3 | 全面性 | 客观性 | 稳定性 | 可靠性 | 通用性 |
| A | 3 | 1 | 2 | | ✓ | | | ✓ |
| B | — | — | — | | | ✓ | | |
| C | — | 1 | — | | ✓ | | | ✓ |
| D | 3 | 2 | 1 | | ✓ | ✓ | | ✓ |
| F | 2 | 3 | 1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | |

由表 6、表 7 可知,模型 A 直接利用货币差最大化比较各方案绿色效益,结果缺乏可靠性与稳定性。模型 B 主观性强,误差较大,评价不同背景、不同区域的案例需分别咨询不同专家意见打分,计算过程繁杂,通用性和客观性不足。模型 C 和 D 计算过程均将实物指标转化为货币指标,削弱结果的可靠性。相比之下,基于“效益—产量”视角下绿色建筑灰色关联评价模型在指标体系上更为全面,通过直接使用货币量化指标可以减少计算误差,利用客观数据的灰色关联分析法确保计算结果更加准确。

4 结束语

依据现有研究和我国最新绿色建筑评价标准,构建绿色效益评价体系,引入实物量指标的“效益—产量”评价模型,运用组合权重的灰色关联分析法对实物指标数据进行计算,解决了过往以货币指标为衡量标准进行绿色效益测评及绿色方案优选问题。研究发现,相较于灰色聚类、数据包络分析等评价方法,文中提出的评价模型和方法兼具全面、可靠、稳定、客观等优点,3 个不同体量的现实案例也进一步佐证该方法的优越性。

参考文献:

- [1] Choi C. Removing market barriers to green development: principles and action projects to promote widespread adoption of green development practices[J]. *Journal of Sustainable Real Estate*, 2009(1): 107-138.
- [2] Kibert C J. *Sustainable construction: green building design and delivery*[M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc. Hoboken, 2012.
- [3] 泉水.绿色建筑“三步曲”[J].*企业文明*,2012(6):44.
QUAN Shui. Green Building “Three Steps”[J]. *Corporate civilization*, 2012(6):44. (in Chinese)
- [4] 中国城市统计年鉴:2017[M].北京:中国统计出版社,2017.
China Urban Statistics Yearbook: 2017[M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese)
- [5] 陈曼英.基于全寿命周期的建筑节能管理研究[J].*科技进步与对策*,2012,29(18): 137-139.
CHEN Manying. Research on building energy saving management based on life cycle[J].*Science & Technology Progress and Policy*, 2012,29(18): 137-139. (in Chinese)
- [6] Liu Y M, Guo X, Hu F L. Cost-benefit analysis on green building energy efficiency technology application: a case in China[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 82: 37-46.
- [7] Mao Y H, Yang G H. Sustainable development drivers for green buildings: incremental costs-benefits analysis of green buildings[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 374: 76-81.
- [8] Gabay H, Meir I A, Schwartz M, et al. Cost-benefit analysis of green buildings: an Israeli office buildings case study[J]. *Energy and Buildings*, 2014, 76: 558-564.
- [9] 侯玲.基于灰色聚类法的绿色建筑全寿命周期评价[J].*安徽农业科学*,2011,39(16):9939-9941.
HOU Ling. Life cycle assessment of green buildings based on grey clustering method[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(16): 9939-9941. (in Chinese)
- [10] 丁孜政.绿色建筑增量成本效益分析[D].重庆:重庆大学,2014.
DING Zizheng. Analysis of incremental costs and incremental benefits in green buildings[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014. (in Chinese)
- [11] Vyas G S, Jha K N. Benchmarking green building attributes to achieve cost effectiveness using a data envelopment analysis[J].

- Sustainable Cities and Society, 2017, 28: 127-134.
- [12] 王丽娜,袁永博.基于价值工程的绿色建筑投资决策研究[J].价值工程,2011,30(1):26-27.
WANG Lina, YUAN Yongbo. Research in investment decision of green buildings based on the value engineering[J]. Value Engineering, 2011, 30(1): 26-27. (in Chinese)
- [13] 安玉华,杨海龙.基于价值工程及模糊数学理论的绿色建筑投资决策研究[J].吉林建筑大学学报,2015,32(3):84-88.
AN Yuhua, YANG Hailong. Green building investment decision-making research based on the value engineering and fuzzy mathematics theory[J]. Journal of Jilin Jianzhu Chiversity, 2015, 32(3): 84-88. (in Chinese)
- [14] 绿色建筑评价标准:GB/T 50378—2014[S].北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2014.
Assessment standard for green building: GB/T 50378—2014 [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2014. (in Chinese)
- [15] Gabay H, Meir I A, Schwartz M, et al. Cost-benefit analysis of green buildings: An Israeli office buildings case study[J]. Energy and Buildings, 2014, 76: 558-564.
- [16] 伍倩仪.基于全寿命周期成本理论的绿色建筑经济效益分析[D].北京:北京交通大学,2011.
WU Qianyi. Economic benefit analysis of green buildings based on life-cycle theory [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)
- [17] 姜凤.绿色建筑项目的经济与环境效益分析-以X绿色建筑项目为例[D].北京:首都经济贸易大学,2016.
JIANG Feng. Economic and environmental benefit analysis of green building projects - Taking X green building project as an example[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2016. (in Chinese)
- [18] 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分):JGJ26-95[S].北京:中国建筑科学研究院,1996.
Energy conservation design standard for new heating residential buildings: JGJ26-95 [S]. Beijing: China Academy of Building Research,1996. (in Chinese)
- [19] 城市热力网设计规范:CJJ34-2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
Design code of district heating network: CJJ34-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2002. (in Chinese)
- [20] 田哲.绿色建筑全生命周期增量成本与增量效益研究[D].大连:大连理工大学,2011.
TIAN Zhe. Research on incremental cost-benefit of green building in the whole life cycle[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese)
- [21] 民用建筑设计通则:2005GB[S].北京:中国建筑工业出版社,2005.
Codefor Design of Civil Buildings: 2005GB[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese)
- [22] 司守奎.数学建模算法与应用习题解答[M].北京:国防工业出版社,2015.
SI Shoukui. Mathematical modeling algorithm and application exercises[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015. (in Chinese)
- [23] 陈立荣,郭继伟,王敬敏,等.基于熵权的灰色关联分析在电力企业竞争力评价中的应用[J].电力学报,2005,20(4):359-361.
CHEN Lirong, GUO Jiwei, WANG Jingmin, et al. Application of the gray relevant analysis based on entropy in evaluating competition of power enterprises[J]. Journal of Electric Power, 2005, 20(4): 359-361. (in Chinese)
- [24] 谷丽丽,曹翠芬,崔利华,等.浅析供应商选择中熵权法的不足与改进[J].物流技术,2009,28(1):95-96,111.
GU Lili, CAO Cuifen, CUI Lihua, et al. Weakness and improment of entropy weight in supplier selection[J]. Logistics Technology, 2009, 28(1): 95-96,111. (in Chinese)
- [25] 王元华,曾凤章.基于熵值法的顾客满意度测评[J].商业研究,2004(22):11-13.
WANG Yuanhua, ZENG Fengzhang. An evaluation method of customer satisfaction degree based on information entropy[J]. Commercial Research, 2004(22): 11-13. (in Chinese)
- [26] 侯玲.基于费用效益分析的绿色建筑的评价研究[D].西安:西安建筑科技大学,2006.
HOU Ling. The research of green building assessment based on cost effectiveness analysis[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2006. (in Chinese)