

基于多级可拓的绿色公建项目技术经济性评价

李辉山, 穆 超

(兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050, E-mail: 444267523@qq.com)

摘 要: 为有效促进我国西部地区资源节约在绿色公共建筑中的应用, 从 4 个方面细分, 对 17 项技术措施进行分析, 选择投资回收期、增量成本与增量效益作为经济评价指标, 通过定性信息定量化的方式, 构建经济评价指标体系, 交叉利用区间层次分析法和物元可拓理论, 建立绿色公共建筑项目资源节约的经济评价模型。使用区间层次分析法测算出评价指标的综合权重, 运用多级可拓法对评价指标的经典域、节域和待评价物元综合分析, 构建关联函数, 客观全面地得出绿色公共建筑资源节约技术经济评价等级, 并在实际案例对该模型的可行性和实用性进行验证。

关键词: 绿色公共建筑; 资源节约; 区间层次分析法; 多级可拓法; 经济评价

中图分类号: TU201.5 文献标识码: A 文章编号: 1674-8859(2020)02-078-06 DOI: 10.13991/j.cnki.jem.2020.02.015

Technical and Economic Evaluation of Green Public Building Based on Multilevel Extension

LI Hui-shan, MU Chao

(School of Architecture and Construction, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China,

E-mail: 444267523@qq.com)

Abstract: To effectively promote the application of resource conservation in green public buildings in western China, 17 technical measures are analyzed from four aspects in this paper. The investment recovery period, incremental cost and incremental benefit are selected as economic evaluation indicators. The economic evaluation index system is constructed by quantifying the qualitative information. The economic evaluation model of resource conservation in green public building projects is established by combining cross-utilizing interval analytic hierarchy process and matter-element extension theory. The interval analytic hierarchy process is used to calculate the comprehensive weight of the evaluation index, and the multi-level extension method is used to comprehensively analyze the classical domain, the domain and the object to be evaluated. The constructed correlation function can objectively and comprehensively obtain the technical and economic evaluation level of green public building resource conservation. The feasibility and practicability of the model are verified in an actual case.

Keywords: green public building; resource conservation; interval analytic hierarchy process; multi-level extension method; economic evaluation

随着我国城镇化建设的速度加快,“十三五”规划纲要提出到 2020 年,城镇新建建筑能效水平较 5 年前提升 20%,城镇中新建的绿色建筑比重达到总建筑面积的一半,绿色建材的使用比例提升超过 40%^[1]。但是由于全国各地气候差异大,经济发展不平衡,导致各地公共建筑在资源节约方面差

异明显,经济市场因素带来的差异驱动成为阻碍绿色建筑发展的因素之一。近年来我国绿色建筑在管理制度、技术改造、评价体系上不断完善,但从实际情况来看,缺乏对于绿色公共建筑的经济效益研究,市场上对绿色建筑的增量成本和增量效益的概念还过于笼统和单一。

学术界一直在努力的研究和探索,紧跟国家政策的变化,以标准为先导,推动绿色建筑向前发展的理念是国际上普遍认可的。其中德国可持续建筑

收稿日期: 2019-11-18.

基金项目: 住房和城乡建设部开发项目(K92018148);

甘肃省住房和城乡建设厅科研项目(JK2018-34).

协会 (DGNB) 所编制的第二代“绿色建筑评价体系”针对不同使用功能的建筑建立了评价体系模块, 在量化评分和标准值的设置方面侧重点不同, 是德国多年来可持续建筑实践经验的总结和升华, 适用于欧盟标准, 注重生态品质的提升, 坚持一体化设计^[2]。美国 LEED V4 版本针对不同地区的气候环境制定了区域优先指标, 并且强调在早期设计时关注相关能耗性能数据, 致力于促进使用 LCA 工具和基于 LCA 的决策, 从而促进市场转型和提高数据库质量, 结果将创建的建筑物模型和建筑物本身应用的改进措施进行分析比较^[3]。

我国于 2019 年 3 月正式发布了《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019), 从安全耐久、健康舒适、生活便利、资源节约、环境宜居五大评价指标和提高创新加分项等 70 项小评分项对绿色建筑进行综合评价, 增加基础级等级, 在满足全部控制项要求达到基础级之后, 每一类评分项得分不小于其评分项满分的 30% 才满足一、二、三星级的评判标准, 总得分逐级增加。随着建筑工业化、海绵城市、健康建筑等新领域和新方向的不断发展, 2014 年版的绿色建筑评价标准已经不再适应, 新版标准以“以人为本”为核心, “四节一环保”为约束, 从规划、设计、施工、运营、拆除等全寿命周期, 考量了各个地区之间的气候、环境、资源、经济等多方面的因素, 这些都是我国绿色建筑从无到有的不断总结和发展的产物^[4]。

1 公建项目资源节约评价体系的建立

1.1 资源节约的技术分类

根据 (GB/T 50378-2019)《绿色建筑评价标准》的规定, 参考以往众多学者^[5-9]对绿色建筑的研究, 细化技术分类指标。

节地与土地利用准则项主要利用的技术有集约利用土地技术、地下空间利用技术、多体系停车占地使用技术; 节能与能源利用准则项主要分为围护结构优化技术、暖通空调利用技术、暖通降耗技术、电气设备节能技术、可再生能源利用技术 (结合当地自然条件); 节水与水资源利用主要使用的技术分为高效率清洁用具使用、环境功能设施节水技术、雨水多功能综合利用技术、生态水处理与循环利用技术、非传统水源使用技术; 节材与绿色建材准则项主要分为设计装修一体化、材料与构件合理选择、工业化内装部品使用、可循环利用材料合理选择、绿色建材利用。

1.2 评价指标的选定

以微观经济学的价值理论来评估资源节约技术的成本和效益, 对有关的外在成本和效益进行内在化计算, 通过对一系列效益指标的分析, 确定项目资源节约技术的可行性^[10]。以往是选择净现值、折现率、各阶段增量成本、节能增量效益为指标, 而本文选择增量投资回收期、增量投资内部收益率 (ΔIRR) 对绿色公共建筑资源节约的各项技术效益进行综合性评价。

投资回收期指以投资项目的净收益抵偿全部投资 (固定资产投资和流动资金投资) 所需要的时间; 一般以“年”为单位, 通常以建设开始年算起, 若从投产时间开始算, 需要特别说明; 绿色建筑的增量成本是为了达到某一水平的绿色建筑标准而可能要在“基准成本”下额外增加的成本投入, 可分为增量设计成本、增量建设成本、全过程增量咨询成本及增量运营和维护成本^[11]。绿色公共建筑在全生命周期的增量效益可分为增量经济效益、增量环境效益和增量社会效益, 对其进行数据的量化, 可直观地反映出建造绿色公共建筑的意义, 所产生的经济效益和社会效益让消费者 (开发商、租客、直接使用人等) 对绿色公共建筑的经济价值进行评估, 尤其是在环境条件脆弱的西部地区, 往往受经济因素的影响, 人们对绿色建筑的认识还处于一个模糊的阶段, 最直接的方式就是通过其经济效益让大众直观感受到绿色建筑带来的好处, 不断消除公众对新一代公共建筑的偏见和误解。

1.3 多层次评价体系

经济评价体系由于对指标选取的不同, 所能体现的性能也不尽相同, 需要遵循繁简始终、可度量性、全寿命周期的原则, 全面、科学、客观地反映绿色公共建筑全寿命周期资源节约的经济性。通过对资源节约技术的梳理和对评价指标的选定, 根据区间层次分析法的基本原理, 本文确定的经济评价体系, 如图 1 所示。

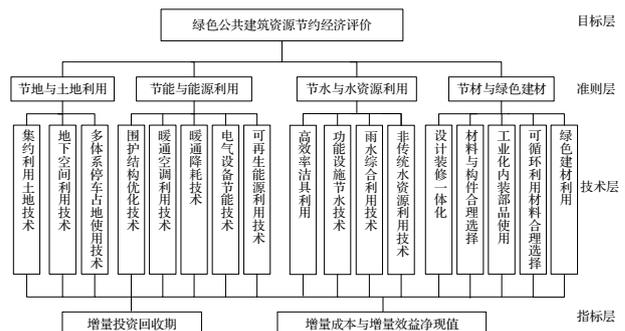


图 1 经济评价指标体系结构

2 区间层次分析法与多级可拓法交叉模型

2.1 评价指标权重的确定

2.1.1 构造区间判断矩阵

为弱化每一层元素的人为主观性，对同一层次的元素，以上一层元素为基准，进行两两比较，构造两两判断矩阵 A ，如下：

$$A = \begin{bmatrix} [1,1] & [a_{12}^-, a_{12}^+] & \dots & [a_{1n}^-, a_{1n}^+] \\ [a_{21}^-, a_{21}^+] & [1,1] & \dots & [a_{2n}^-, a_{2n}^+] \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ [a_{ni}^-, a_{ni}^+] & [a_{n2}^-, a_{n2}^+] & \dots & [1,1] \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中， a_{ij}^- 和 a_{ij}^+ 表示第 i 个元素和第 j 个元素相对于目标重要值的上下限，可参照层次分析法确定其比值。 $i, j=1, 2, \dots, n$ 。

2.1.2 技术层根据指标计算区间权重

利用特征向量法分别求 A 和 A^+ 的最大特征值所对应的具有正分量的归一化特征向量 X 和 X^+ ，然后计算特征向量负分量系数 α 和正分量系数 β 。

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}}} \quad (2)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^-}}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{\sum_{i=1}^n a_{ij}^+}}} \quad (3)$$

最后计算得出评价指标区间形式的权重向量 $W = [\alpha X^-, \beta X^+]$ 。

2.1.3 一致性检验

计算一致性检验指标 CI ，式中 n 表示判断矩阵的阶数。其中， $(AW)_i$ 表示 $A\omega$ 矢量的第 i 个分量。

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$A_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{\omega_i} \quad (5)$$

当 $CI=0$ ，其数据具有完全一致性，所产生的矩阵成立；当 $CI \neq 0$ ，则需要通过 $CR = \frac{CI}{RI}$ 计算，重新

对矩阵的一致性进行查验。

2.2 无量纲化处理指标数据

由于原始指标存在隐含的增量信息，静态问题无量纲化处理显然不合理，故采取指标问题一致化处理的方法，对指标极值化处理， $X_{ij} \in [0, 1]$ ，最大值为 1，最小值为 0^[12]。

$$r_j = \begin{cases} 1, & x_j > x_j^{max} \\ \frac{x_j - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}}, & x_j^{max} > x_j > x_j^{min} \\ 0, & x_j < x_j^{min} \end{cases} \quad (6)$$

$$r_j = \begin{cases} 1, & x_j > x_j^{max} \\ \frac{x_j^{max} - x_j}{x_j^{max} - x_j^{min}}, & x_j^{max} > x_j > x_j^{min} \\ 0, & x_j < x_j^{min} \end{cases} \quad (7)$$

无量纲化的目的就是消去不同单位、量级上的信息差异。根据《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019)对绿色建筑评价等级的划分，当满足所有控制项时，绿色建筑达到基础级，在满足基础级的基础上，每类指标的评分项不应小于其评分项满分值的 30%才将其评为一、二、五星级。其中资源节约指标总分 200 分，在评价指标项目中占分最多，足以显示出资源节约对绿色建筑评价的重要意义，对其进行经济评价，从经济的角度向开发商、消费者以及建设单位传达绿色公共建筑的经济效益价值；各等级之间的得分区间按照换算为：一星级区间为 [57, 85)，二星级区间为 [85, 129)，三星级区间为 (129, 200]，对其评价等级的数据进行无量纲化处理，则一星级为 [0, 0.196)，二星级为 [0.196, 0.503)，三星级为 [0.503, 1.000]。

2.3 多级可拓评价

2.3.1 确定经典域、节域和待评价物元

(1) 经典域指标的确定。当 N_j 为标准事物，其关于特征向量 c_j 所确定的限制区间 $\langle a_{otj}, b_{otj} \rangle$ 时，经典域则表示为：

$$R_{ot} = (N_{ot}, C_j, V_{otj}) = \begin{bmatrix} N_{ot} & C_1 & \langle a_{ot1}, b_{ot1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{ot2}, b_{ot2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{otn}, b_{otn} \rangle \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中， R_{ot} 为经济评价指标层的经典域物元； N_{ot} 为资源节约技术指标类别； C_j 为 N_{ot} 的单个技术指标。

(2) 节域指标的确定。各个技术层的因素都会成为影响资源节约经济评价的节域物元，节域可表示为：

$$R_p = (N_p, C_j, V_{pj}) = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中， R_p 为经济评价指标层的节域物元； N_p 为资源节约经济评价类别个体； V_{pj} 为节域指标的值域。

(3) 待评价物元的确定。各个准则层所关联的技术层就是可拓模型中所对应第一等级的可拓目标，根据所计算出的特征值对待评物元的物质单位进行评价。

$$R_i = (N, C_j, V_i) = \begin{pmatrix} N_i & C_1 & V_1 \\ & C_2 & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & V_3 \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中, N 为资源节约经济评价的指标层的待评指标; V_i 为关于特征值 C_j 的取值。

2.3.2 关联函数的建立和计算

根据关联函数的相关公式和定义, 计算待评价事物关于各分控制层指标类别的等级关联度, 若设 $K_j[V_i(x)]$ 表示待评物元第 i 个指标值 $V_i(x)$ 属于经典域 V_{oj} 的关联度, 则有:

$$K_j[V_i(x)] = \begin{cases} \frac{-\rho(x, V_{oj})}{|a_{o1} - b_{o1}|} & x \in x_0 \\ \frac{\rho(x, V_{oj})}{\rho(x, v_p) - \rho(x, v_{oj})} & x \notin x_0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\rho(x, V_{oj}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{o1} + b_{o1}) \right| - \frac{1}{2}(b_{o1} - a_{o1}) \quad (12)$$

$$\rho(x, V_{pj}) = \left| x_i - \frac{1}{2}(a_{p1} + b_{p1}) \right| - \frac{1}{2}(b_{o1} - a_{o1}) \quad (13)$$

然后通过式 (7) 来计算待评事物关于等级 j 的关联度:

$$K_j(t) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_j[V_i(x)] \quad (14)$$

式中, ω_i 为各指标的权重系数, 且有 $\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$ 。

对每一项技术按照指标层所得出的数据进行计算, 得到技术层的关联度矩阵:

$$C_n = (K_j(c_j)) = \begin{pmatrix} K_1(c_1) & K_2(c_1) & \dots & K_j(c_1) \\ K_1(c_2) & K_2(c_2) & \dots & K_j(c_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_1(c_i) & K_2(c_i) & \dots & K_j(c_i) \end{pmatrix} \quad (15)$$

2.4 多级可拓评价模型的计算

将运用区间层次分析法所计算的各技术层指标的权重和可拓学所计算的关联度矩阵相结合^[13], 计算得出指标层关联矩阵, 再对其进行评价等级计算, 过程如下:

(1) 技术层的可拓评价。由技术层指标的权重向量 $W_i=(\omega_{ijk})$ 与其对应各等级的关联度矩阵 $K_j(c_{ijk})$ 相乘, 计算出技术层关联度矩阵 $C_m(i, j, k, m=1, 2, \dots, n)$, 即 $C_m = W_i \times K_j = (c_{ijk})$ 。

$$C_m = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in}) \begin{pmatrix} K_1(c_{i1}) & K_2(c_{i1}) & \dots & K_n(c_{i1}) \\ K_1(c_{i2}) & K_2(c_{i2}) & \dots & K_n(c_{i2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_1(c_{in}) & K_2(c_{in}) & \dots & K_n(c_{in}) \end{pmatrix} \quad (16)$$

(2) 准则层的可拓评价。由准则层指标的权

重向量 $W_i=(\omega_{ik})$ 与其对应技术层的关联度矩阵 C_m 相乘, 计算出技术层关联度矩阵 $B_m(i, k, m=1, 2, 3, \dots, n)$, 即 $B_m = W_i \times C_m$ 。

$$B_m = (\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in}) \begin{pmatrix} K_1(c_{i1}) & K_2(c_{i1}) & \dots & K_n(c_{i1}) \\ K_1(c_{i2}) & K_2(c_{i2}) & \dots & K_n(c_{i2}) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_1(c_{in}) & K_2(c_{in}) & \dots & K_n(c_{in}) \end{pmatrix} \quad (17)$$

(3) 目标层的可拓评价。由目标层指标的权重向量 $W_i=(\omega_k)$ 与其对应准则层的关联度矩阵 B_m 相乘, 计算出技术层关联度矩阵 $A_m(i, k, m=1, 2, 3, \dots, n)$, 即 $A_m = W_i \times B_m$ 。

$$A_m = (\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n) \begin{pmatrix} K_1(c_1) & K_2(c_1) & \dots & K_j(c_1) \\ K_1(c_2) & K_2(c_2) & \dots & K_j(c_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_1(c_i) & K_2(c_i) & \dots & K_j(c_i) \end{pmatrix} \quad (18)$$

(4) 确定评价等级。根据最大隶属原则, 绿色公共建筑针对目标层经济评价的关联矩阵 A_m 中, 关联度最大值所对应的等级就是其建筑资源节约的评价等级, 即当 $K_{\max}(S) = K_j(A_m)$ 时, 则评价对象的绿色等级为 j 级, 对其数据进行规范化处理。

对于同一技术层的指标而言, 需计算所处等级的偏向特征值 J^* , 根据 J^* 的值, 可以对评价指标择优选择, J^* 的值越大, 表示该评价指标所属的等级越高。

$$J^* = \frac{\sum_{j=1}^n \overline{JK_j}(C_i)}{\sum_{j=1}^n \overline{K_j}(C_i)} \quad (19)$$

式中, n 表示评级星级的种类数; $\overline{JK_j}(C_i)$ 为目标层的关联矩阵; $\overline{K_j}(C_i)$ 为其指标被规范化处理的值, 则:

$$\overline{K_j}(C_i) = \frac{K_j(C_i) - \min K_j(C_i)}{\max K_j(C_i) - \min K_j(C_i)} \quad (20)$$

3 案例分析

陕西西安某绿色公共建筑, 总用地面积 9478.44 m² (14.22 亩)。其中建设用地面积 7603.30 m² (11.41 亩), 代征道路用地 1875.14 m² (2.81 亩)。拟建建筑为二类高层公共建筑, 建筑耐火等级地上二级、地下一级, 屋面防水等级为 I 级, 地下室防水等级为一级, 结构安全等级二级, 建筑物设计使用年限为 50 年, 抗震设防烈度为 8 度。本文以其中主建筑为研究对象, 地上 5 层, 地下 1 层。

3.1 增量成本与增量效益分析

根据该绿色公共建筑资源节约准则层的分类,

对其所采用的技术措施按照类别进行分析, 分别对每一项技术措施所产生的效益成本比 BCR 进行计算, 如表 1 所示。

表 1 指标经济数据汇总表

准则层	资源节约技术措施	增量成本	增量效益 (年)	效益周期 (年)	效益成本比 (BCR)
节地	增大公共建筑的容积率	65.12	2.25	50	0.579
	增大地下建筑面积	33.68	2.00	50	0.337
	建立多功能地下停车体系	45.29	10.95	50	0.083
节能	优化围护结构的热工性能	35.53	15.20	50	0.047
	暖通空调能效优化	3.42	1.01	15	0.226
	暖通输配和末端系统改造	4.50	0.70	20	0.321
	节能型电气设备及控制	2.03	1.73	20	0.059
	太阳能、地热能的能蓄改造利用	7.59	0.65	20	0.584
节水	高效率节水用具使用	6.54	1.07	15	0.407
	绿色灌溉及空调冷却用水设备	14.82	2.63	15	0.376
	雨水综合利用营造室外景观水体	3.65	1.85	15	0.132
节材	使用非传统水源	1.05	2.56	20	0.021
	土建装修一体化设计及施工	12.20	1.50	50	0.163
	合理选用结构材料与构建	5.88	0.93	50	0.126
	选用工业化内装部品	10.45	2.85	20	0.183
	选用可循环利用材料	6.97	1.33	30	0.175
	选用绿色建材	15.87	1.25	30	0.423

3.2 计算技术层指标权重

根据区间层次分析法的基本原理, 结合表 1 所计算的指标经济数据计算指标权重 (见表 2)。

表 2 准则层评价指标权重数据表

准则层	技术层	指标层	
		T_i	效益比 (CBR _i)
节地与土地	集约利用土地技术 B_1 (0.5842)	28.942	0.579
	利用技术 A_1 地下空间利用技术 B_2 (0.3033)	16.840	0.337
节能与能源	(0.1723) 多体系停车占地使用技术 B_3 (0.1125)	4.136	0.083
	围护结构优化技术 B_4 (0.3055)	2.338	0.047
利用技术 A_2	暖通空调高效利用技术 B_5 (0.1805)	3.386	0.226
	(0.2482) 暖通降耗技术 B_6 (0.1543)	6.429	0.321
节水与水资源利用 A_3	电气设备节能技术 B_7 (0.2041)	1.173	0.059
	可再生能源利用技术 B_8 (0.1556)	11.677	0.584
节材与绿色建材 A_4	高效率洁具利用 B_9 (0.3466)	6.112	0.407
	(0.2387) 功能设施节水技术 B_{10} (0.2303)	5.635	0.376
	雨水综合利用技术 B_{11} (0.2456)	1.973	0.132
	非传统水资源利用技术 B_{12} (0.1775)	0.410	0.021
	设计装修一体化 B_{13} (0.3313)	8.133	0.163
	材料与构建合理选择 B_{14} (0.1870)	6.323	0.126
	(0.3408) 工业化内装部品使用 B_{15} (0.1578)	3.667	0.183
	可循环利用材料合理利用 B_{16} (0.2195)	5.241	0.175
	绿色建材利用 B_{17} (0.1044)	12.696	0.423

3.3 指标权重无量纲化处理

由于评级指标具有不同的量纲单位和量纲, 故

根据无量纲化公式对表 2 中的数据进行处理, 如表 3 所示。

表 3 指标数据无量纲化

指标	无量纲化数据	指标	无量纲化数据	指标	无量纲化数据	指标	无量纲化数据
T_1	0.000	T_2	0.424	T_3	0.869	T_4	0.932
BCR_1	1.000	BCR_2	0.973	BCR_3	0.779	BCR_4	0.582
T_5	0.896	T_6	0.789	T_7	0.973	T_8	0.605
BCR_5	0.942	BCR_6	0.970	BCR_7	0.674	BCR_8	1.000
T_9	0.800	T_{10}	0.817	T_{11}	0.945	T_{12}	1.000
BCR_9	0.984	BCR_{10}	0.980	BCR_{11}	0.875	BCR_{12}	0.000
T_{13}	0.729	T_{14}	0.793	T_{15}	0.886	T_{16}	0.831
BCR_{13}	0.906	BCR_{14}	0.868	BCR_{15}	0.920	BCR_{16}	0.915
T_{17}	0.569						
BCR_{17}	0.986						

3.4 指标层可拓评价

根据指标层的物元、技术层的节域和准则层的待评价物元式 (8)~式 (10), 得出指标层的待评价物元 $R_i, i=1, 2, \dots, 17$ 。

$$R_1 = (N, C_1, V_{1i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 0.000 \\ C_{12} 1.000 \end{bmatrix}; R_2 = (N, C_2, V_{2i}) = \begin{bmatrix} NC_{21} 0.424 \\ C_{22} 0.973 \end{bmatrix};$$

$$R_3 = (N, C_3, V_{3i}) = \begin{bmatrix} NC_{31} 0.869 \\ C_{32} 0.779 \end{bmatrix}; R_4 = (N, C_4, V_{4i}) = \begin{bmatrix} NC_{41} 0.932 \\ C_{42} 0.582 \end{bmatrix};$$

$$R_5 = (N, C_5, V_{5i}) = \begin{bmatrix} NC_{51} 0.869 \\ C_{52} 0.942 \end{bmatrix}; R_6 = (N, C_6, V_{6i}) = \begin{bmatrix} NC_{61} 0.789 \\ C_{62} 0.970 \end{bmatrix};$$

$$R_7 = (N, C_7, V_{7i}) = \begin{bmatrix} NC_{71} 0.973 \\ C_{72} 0.674 \end{bmatrix}; R_8 = (N, C_8, V_{8i}) = \begin{bmatrix} NC_{81} 0.605 \\ C_{82} 1.000 \end{bmatrix};$$

$$R_9 = (N, C_9, V_{9i}) = \begin{bmatrix} NC_{91} 0.800 \\ C_{92} 0.984 \end{bmatrix}; R_{10} = (N, C_{10}, V_{10i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 0.817 \\ C_{12} 0.980 \end{bmatrix};$$

$$R_{11} = (N, C_{11}, V_{11i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 0.945 \\ C_{12} 0.875 \end{bmatrix}; R_{12} = (N, C_{12}, V_{12i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 1.000 \\ C_{12} 0.000 \end{bmatrix};$$

$$R_{13} = (N, C_{13}, V_{13i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 0.729 \\ C_{12} 0.906 \end{bmatrix}; R_{14} = (N, C_{14}, V_{14i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 0.793 \\ C_{12} 0.868 \end{bmatrix};$$

$$R_{15} = (N, C_{15}, V_{15i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 0.886 \\ C_{12} 0.920 \end{bmatrix}; R_{16} = (N, C_{16}, V_{16i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 0.831 \\ C_{12} 0.915 \end{bmatrix};$$

$$R_{17} = (N, C_{17}, V_{17i}) = \begin{bmatrix} NC_{11} 0.569 \\ C_{12} 0.986 \end{bmatrix}$$

由式 (11)~式 (15) 建立关联函数, 计算指标层等级关联矩阵:

$$\rho(x_1, v_{011}) = 0.000, \quad \rho(x_1, v_{012}) = 0.196, \quad \rho(x_1, v_{013}) = 0.503,$$

$$\rho(x_1, v_{11}) = 0.000, \quad K_1[V_1(x)] = 0.000, \quad K_1[V_2(x)] = -1.000,$$

$$K_1[V_3(x)] = -1.000, \quad \rho(x_1, v_{021}) = 0.804, \quad \rho(x_1, v_{022}) = 0.497,$$

$$\rho(x_1, v_{023}) = 0.000, \quad \rho(x_1, v_{21}) = 0.000, \quad K_2[V_1(x)] = -1.000,$$

$$K_2[V_2(x)] = -1.000, \quad K_2[V_3(x)] = 0.000$$

关联矩阵:

$$C_1 = (K_1) = \begin{bmatrix} 0.000 & -1.000 & -1.000 \\ -1.000 & -1.000 & 0.000 \end{bmatrix}$$

同理, 根据评价指标隶属于第 t 个评价等级的关联度, $\rho(x, V_{0t})$ 与点 x_i 和区间 $[V_t(x)]$ 的距, 可得出关联度矩阵。

$$\begin{aligned}
 C_2 = (K_2) &= \begin{bmatrix} -0.349 & 0.229 & -0.157 \\ -0.966 & -0.946 & 0.054 \end{bmatrix}; C_3 = (K_3) = \begin{bmatrix} -0.837 & -0.736 & 0.264 \\ -0.725 & -0.555 & 0.445 \end{bmatrix}; \\
 C_4 = (K_4) &= \begin{bmatrix} -0.915 & -0.863 & 0.137 \\ -0.480 & -0.159 & 0.233 \end{bmatrix}; C_5 = (K_5) = \begin{bmatrix} -0.871 & -0.791 & 0.209 \\ -0.928 & -0.884 & 0.117 \end{bmatrix}; \\
 C_6 = (K_6) &= \begin{bmatrix} -0.738 & -0.576 & -0.424 \\ -0.963 & -0.940 & 0.060 \end{bmatrix}; C_7 = (K_7) = \begin{bmatrix} -0.967 & -0.946 & -0.054 \\ -0.595 & -0.344 & -0.344 \end{bmatrix}; \\
 C_8 = (K_8) &= \begin{bmatrix} -0.509 & -0.205 & -0.205 \\ -1.000 & -1.000 & 0.000 \end{bmatrix}; C_9 = (K_9) = \begin{bmatrix} -0.751 & -0.598 & -0.402 \\ -0.980 & -0.968 & 0.040 \end{bmatrix}; \\
 C_{10} = (K_{10}) &= \begin{bmatrix} -0.772 & -0.632 & -0.368 \\ -0.975 & -0.959 & 0.033 \end{bmatrix}; C_{11} = (K_{11}) = \begin{bmatrix} -0.932 & -0.890 & -0.110 \\ -0.844 & -0.748 & 0.252 \end{bmatrix}; \\
 C_{12} = (K_{12}) &= \begin{bmatrix} -1.000 & -1.000 & 0.000 \\ 0.000 & -1.000 & -1.000 \end{bmatrix}; C_{13} = (K_{13}) = \begin{bmatrix} -0.663 & -0.455 & -0.455 \\ -0.883 & -0.810 & -0.190 \end{bmatrix}; \\
 C_{14} = (K_{14}) &= \begin{bmatrix} -0.742 & -0.583 & -0.417 \\ -0.836 & -0.735 & -0.265 \end{bmatrix}; C_{15} = (K_{15}) = \begin{bmatrix} -0.858 & -0.770 & -0.230 \\ -0.901 & -0.840 & -0.160 \end{bmatrix}; \\
 C_{16} = (K_{16}) &= \begin{bmatrix} -0.789 & -0.659 & -0.341 \\ -0.894 & -0.828 & -0.172 \end{bmatrix}; C_{17} = (K_{17}) = \begin{bmatrix} -0.464 & -0.134 & -0.134 \\ -0.983 & -0.972 & -0.028 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

3.5 评价等级计算

由指标层、技术层、准则层、目标层的权重向量 W_i 与其对应关联度矩阵 C_m 相乘, 根据式 (16) ~ 式 (18), 依次对技术层、准则层、目标层进行可拓评价。

$$\begin{aligned}
 A_m &= W_i \times B_m \times C_m \\
 &= [0.1723, 0.2482, 0.2387, 0.3408] \begin{bmatrix} 0.069 & 0.016 & 0.030 \\ 0.050 & 0.042 & 0.071 \\ 0.038 & 0.021 & 0.009 \\ 0.014 & 0.008 & 0.062 \end{bmatrix} \\
 &= [0.038, 0.021, 0.046]
 \end{aligned}$$

3.6 确定目标层所属等级

对于目标层而言, 由于指标属于最终一级, 须对其偏向特征值进行计算, 当 $K_j(C_i) = \max_{j=1} K_j(C_i)$, $J=1, 2, 3$, 由计算指标得知, 目标层的星级等级为三星级, 即本绿色公共建筑项目资源节约的经济性星级为三星级。根据式 (19) ~ 式 (20) 计算其偏向特征值:

$$J^* = \frac{\sum_{j=1}^n \overline{JK_j(C_i)}}{\sum_{j=1}^n \overline{K_j(C_i)}} = \frac{0.218}{0.105} = 2.08$$

印证了整个指标计算的正确性, 特征值 $J^* > 2$, 故所属等级为三星级。说明该绿色公共建筑在资源节约方面达到了国家标准要求的三星级, 绿色程度高, 为地区发展绿色公共建筑提供的切实可行的参考意见。

4 结语

本文将已建成的某公共建筑项目作为目标, 从资源节约的角度出发, 将绿色公共建筑的投资回收期 and 效益成本比 (CBR) 作为指标, 对于公共建筑所利用的各项技术和各种绿色能源材料进行测算,

为节地、节能、节水、节材分目标层提供数据参考, 为推动西部地区发展绿色建筑提供了真实的案例参考依据。构建 IAHP-多级可拓模型, 在减轻人为因素干扰的前提下, 测算各区间层级的关联度及关联矩阵, 减轻了传统方法中一个指标评判总目标的不合理性, 并且通过偏向特征值验证所测算数据的有效性和合理性。

参考文献:

- [1] 黄群慧, 李晓华. 中国工业发展“十二五”评估及“十三五”战略[J]. 中国工业经济, 2015 (9): 5-20.
- [2] András Reith, Melinda Orova. Do green neighbourhood ratings cover sustainability?[J]. Ecological Indicators, 2015, 48.
- [3] Vigovskaya Alina, Aleksandrova Olga, Bulgakov Boris. Life Cycle Assessment (LCA) of a LEED certified building[J]. 21st International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering Construction-The Formation of Living Environment (FORM), 2018: 25-27.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T50378-2019, 绿色建筑评价标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [5] 韩亚坤, 陈汉利. 基于层次分析—可拓学的绿色建筑节能技术经济评价[J]. 工程管理学报, 2018, 32(5): 18-23.
- [6] 李静, 田哲. 绿色建筑全生命周期增量成本与效益研究[J]. 工程管理报, 2011, 25(5): 487-492.
- [7] 闫辉, 张磊. 基于全生命周期的公共建筑节能净收益测算模型建立[J]. 土木工程学报, 2012(S2): 272-276.
- [8] 李楠楠. 绿色建筑全生命周期增量成本的综合效益分析[D]. 东北财经大学, 2012.
- [9] 田哲. 绿色建筑全生命周期增量成本与增量效益研究[D]. 大连理工大学, 2011.
- [10] Stewart Douglas O, De Marco Joseph P. Evaluating the Harm Principle and the Best Interest of the Child: A Case Resolved Using Standard Microeconomics Principles[J]. The American journal of bioethics: AJOB, 2018, 18(8).
- [11] 叶祖达, 李宏军, 宋凌. 《中国绿色建筑技术经济成本效益分析》解读[J]. 建设科技, 2013(6): 44-45.
- [12] Bin Yang, Tong Xu, Longyu Shi. Analysis on sustainable urban development levels and trends in China's cities[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 141.
- [13] 贾宏俊, 高鹏, 元培鑫. 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.

作者简介:

李辉山 (1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 建设项目管理, 工程造价;

穆超 (1997-), 通讯作者, 男, 硕士研究生, 研究方向: 绿色施工。