

围护结构或被动式建筑的绿色性评价方法*

龚光彩[†],傅沐书,蔡立群,王平

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:以湖南地区5栋公共建筑为研究对象,基于全寿命期理论以及焓方法,分别计算了其全寿命期(即从围护结构形成阶段到拆除全过程)的建筑能耗、焓耗、二氧化碳排放量以及成本.在此基础上,引入各个建筑的焓能比和绿色性两项指标.采用层次分析法,得到建筑的绿色性指标,并对各个建筑的绿色性指标进行对比分析,结果表明,办公建筑的绿色性明显优于商业建筑.两个指标的交叉对比结果表明,焓能比存在一个最优的范围.焓能比反映建筑对优质能源的利用或消费程度,绿色性指标综合考虑了建筑全寿命期的资源消耗、成本投入和环境影响,因而这两项指标可作为现有可持续建筑评价体系中被动式节能条款的补充,具有一定合理性.

关键词:围护结构;被动式建筑;焓能比;绿色性;可持续建筑评价体系

中图分类号:TU111.4

文献标志码:A

Greenness Evaluation Method for Building Envelope or Passive Buildings

GONG Guangcai[†], FU Mushu, CAI Liqun, WANG Ping

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The energy consumption, exergy consumption, CO₂ emissions and cost of five public buildings in Hunan area in its life cycle were calculated based on life cycle theory and exergy method, taking into account the formation of building envelope. On this basis, two indicators including the building exergy-energy ratio and greenness were introduced. The greenness of each building was obtained by analytical hierarchy process. The comparison of the greenness indicators shows that office buildings are much better than commercial buildings in terms of greenness. Comprehensive comparison of the two indicators illustrates that there is an optimal range for exergy-energy ratio. The greenness indicator takes into account the building life cycle resources consumption, cost input and environmental impacts, and the exergy-energy ratio demonstrates the use of high quality energy. Therefore, these two indicators can serve as a supplement to the passive energy saving clauses in the existing sustainable building assessment systems.

Key words: building envelope; passive building; exergy-energy ratio; greenness; sustainable building assessment system

* 收稿日期:2016-11-11

基金项目:湖南省科技重大专项资助项目(2010FJ1013), Science and Technology Major Project of Hunan Province (2010FJ1013); 国家国际科技合作项目(2010DFB63830), Key International Science and Technology Cooperation Projects (2010DFB63830); 国家科技支撑计划项目(2015BAJ03B00), National Key Technologies Research and Development Program (2015BAJ03B00)

作者简介:龚光彩(1965—),男,湖南澧县人,湖南大学教授,博士生导师

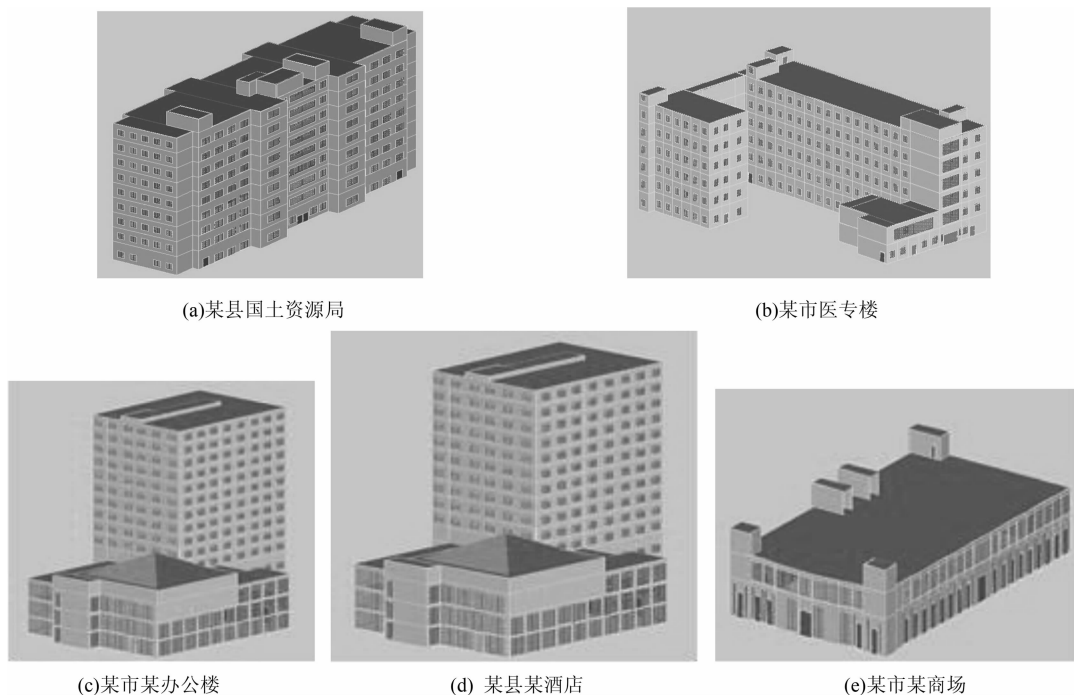
[†] 通讯联系人, E-mail: gcgong@hnu.edu.cn

建筑节能是解决能源短缺问题的关键.近年来被动式建筑的推广,为建筑节能提供了新的理念.被动式节能技术中很重要的一个环节是对围护结构的设计,然而受当前条件制约(如难以获得完整的建筑生产各环节的详细信息),对于被动式建筑或围护结构的评价存在着一定的环节缺失.例如,2014年出版的国家标准《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378—2014)^[1],LEED既有建筑分册^[2]等都有针对能耗的评价条款,然而其大多为后阶段性的,即仅考虑了建筑的运行能耗,而忽略了建筑材料生产、运输、施工以及拆除的能耗,即围护结构形成、维护以及拆除阶段的能耗.同时仅分析建筑的运行能耗,且仅考虑能量的数量而暂时未考虑能量的品质,未能全面考察建筑的节能性.近年来,国内外也有相关建筑计算的研究.例如,刘猛^[3]基于焓分析方

法建立了建筑生命周期环境影响评价模型.Gonçalves等^[4]基于一次能源的使用、CO₂排放量以及焓方法建立了建筑能效评价指标,并进行了实例计算.本文由此出发,将建筑全寿命期的能耗、焓耗、CO₂排放量以及成本进行综合考虑,得到了焓能比和绿色性两个指标,为被动式建筑或围护结构的评价提供了新的思路.

1 研究方法

本文选取湖南地区5栋公共建筑为研究对象,其建筑结构为钢筋混凝土框架结构,设计运行年限为50年.通过对全寿命期能耗、焓耗、成本、二氧化碳排放量的计算,全面综合地考察了建筑的热力学性能,各建筑模型如图1所示.



(a)某县国土资源局

(b)某市医专楼

(c)某市某办公楼

(d) 某县某酒店

(e)某市某商场

图1 建筑模型

Fig.1 Building model

建筑全寿命期的各个阶段看似相互独立,实则互相影响,并通过围护结构与外界热环境构成建筑物的能量系统,如图2所示.建筑围护结构与建筑冷热源主要通过负荷平衡进行衔接以维持室内热舒适性,本文的研究就是以负荷平衡为基础展开的,并遵循“负荷平衡、整体节能、分块寻优”的分析策略^[5].

1.1 能耗以及焓耗计算

建筑全寿命期能耗和焓耗的计算考虑建材生产、建筑建造、建筑运行、建筑维护和拆除共5个

阶段.

本文中建材生产阶段仅考虑主要建材的能耗和焓耗,包括标准砖、空心黏土砖、混凝土、钢材、石灰、玻璃和水泥.本阶段计算方法已形成具体算法,不赘述.下文中使用的质量含能和碳排放数据是经过阅读和筛选国内文献^[5-7]得到,数据整理后列于表1.质量含焓由各类建材的能源消耗清单^[6-8]、能源高位发热量^[3,9]以及含焓系数计算得到.不同形态的燃料含焓系数不同,本文中气体燃料、液体燃料、固体燃料的含焓系数分别取0.95,0.975和1.00^[10].

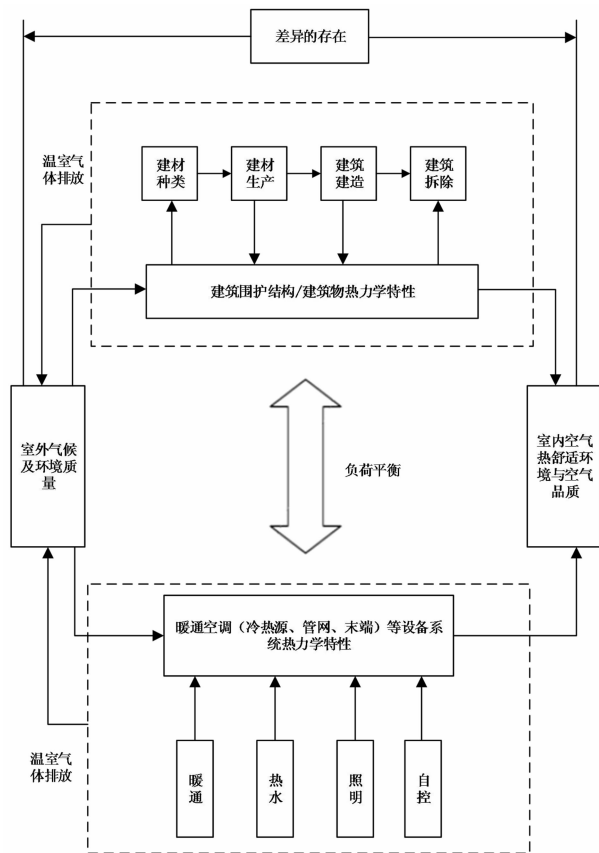


图 2 建筑能量系统与环境(热)基本关系图
Fig.2 Basic relationship between building energy system and thermal environment

表 1 主要建筑材料质量含能及碳排放因子
Tab.1 Embodied energy and Carbon emission factors of major building materials

建材	质量含能	碳排放因子
标准砖	6 857.6 MJ/千块	504 kg/千块
空心黏土砖	5 685.4 MJ/千块	418 kg/千块
混凝土	2 499.8 MJ/m ³	551 kg/m ³
钢材	28.1 MJ/ kg	8.2 kg/kg
石灰	6.2 MJ/ kg	1.2 kg/kg
玻璃	33.06 MJ/ kg	2.91 kg/kg
水泥	7.85 MJ/ kg	0.574 kg/kg

$$E_c = \sum m_j \times e_{nf,j} \quad (1)$$

$$E_{xc} = \sum m_j \times e_{xf,j} \quad (2)$$

式中: E_c 表示建筑建造阶段能耗, MJ; E_{xc} 表示建筑建造阶段能耗, MJ; m_j 表示第 j 种能源的消耗量, kg; $e_{nf,j}$ 表示第 j 种能源的内含能, MJ/单位; $e_{xf,j}$ 表示第 j 种能源的内含焓, MJ/单位. 主要能源的内含能、内含焓见表 2.

建筑运行阶段能耗占建筑全寿命期能耗的很大一部分, 本文采用 DeST-C 软件对建筑全年能耗

进行动态模拟, 得到建筑的夏季耗冷量和冬季耗热量. 已知建筑的耗冷量和耗热量便可通过机组的 COP 计算耗电量, 进而计算运行阶段的能耗和焓耗.

表 2 电、汽油及柴油的内含能、内含焓^[7,11]
Tab.2 Embodied energy and exergy of electricity, gasoline and diesel

电		汽油		柴油	
内含能 /(MJ· kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	内含焓 /(MJ· kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	内含能 /(MJ· kg ⁻¹)	内含焓 /(MJ· kg ⁻¹)	内含能 /(MJ· kg ⁻¹)	内含焓 /(MJ· kg ⁻¹)
10.50	8.24	43.10	42.02	42.65	41.58

目前对建筑维护和拆除阶段的能耗、焓耗并没有形成具体的算法, 对于建筑维护阶段, 取建材生产阶段能耗、焓耗的一定比例进行计算, 本文取 12%^[12]; 对于建筑拆除阶段, 由于其性质与建筑建造阶段类似, 因而取建筑建造阶段能耗、焓耗的 90%进行计算^[13].

1.2 二氧化碳排放量计算

建筑物在全寿命期内向外界排放了大量温室气体, 其环境影响不可忽视. 例如王立平^[14]采用灰色预测模型对住宅建筑建材生产阶段的能耗、碳排放进行了分析. 然而由于目前对建筑物维护阶段及拆除阶段二氧化碳排放的研究较少, 因而本文仅考虑建材生产阶段、建筑建造阶段和建筑运行阶段二氧化碳排放. 建筑全寿命期的二氧化碳排放量可表示为:

$$M_{CO_2,LC} = M_{CO_2,P} + M_{CO_2,C} + M_{CO_2,ua} \times N. \quad (3)$$

式中: $M_{CO_2,LC}$ 表示建筑全寿命期 CO₂ 排放量, kg; $M_{CO_2,P}$ 表示建材生产阶段二氧化碳排放量, kg; $M_{CO_2,C}$ 表示建筑建造阶段二氧化碳排放量, kg; $M_{CO_2,ua}$ 表示建筑运行阶段年度二氧化碳排放量, kg/年; N 表示建筑的运行年限, 年. 建筑全寿命期消耗的主要能源的碳排放因子见表 3.

表 3 电、汽油及柴油的碳排放因子^[5-7]

Tab.3 CO₂ emission factors of electricity, gasoline and diesel

电排放因子/ (kg·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	汽油排放因子/ (kg·kg ⁻¹)	柴油排放因子/ (kg·kg ⁻¹)
0.954	3.07	3.16

1.3 成本计算

目前, 人们普遍认为采用新型节能技术、可再生能源的建筑就是绿色建筑, 而忽略了建筑的成本

投入与生态品质平衡问题,本文将建筑全寿命期的成本作为资源投入因素列入评价模型中,即引入经济性分析.本文中建筑全寿命期的成本包括建材生产阶段、建筑建造阶段以及建筑运行阶段成本,维护阶段和拆除阶段所占比例较小,不予考虑.

建筑全寿命期的成本可表示为:

$$C_{LC} = C_m + C_c + C_{un} \times N. \quad (4)$$

式中: C_{LC} 表示建筑全寿命期成本,元; C_m 表示建材生产阶段成本,元; C_c 表示建筑建造阶段成本,元; C_{un} 表示建筑运行阶段年度成本,元/年; N 表示建筑运行年限,年.

2 建筑绿色性评价

根据上述方法,本文分别对湖南地区 5 栋公共建筑全寿命期能耗、烟耗、二氧化碳排放量以及成本进行了计算,结果见表 4.为了深入分析建筑的热力学性能,本文引入两个指标:烟能比和绿色性.

表 4 建筑全寿命期各因素计算结果

Tab.4 Life cycle results of every factor

建筑	单位建筑 面积能耗/ (MJ·m ⁻²)	单位建筑 面积烟耗/ (MJ·m ⁻²)	单位建筑 面积成本/ (元·m ⁻²)	单位建筑 面积 二氧化碳排放 量/(kg·m ⁻²)
A	15 319.68	11 921.11	2 212.53	1 872.18
B	32 815.83	25 642.96	4 316.07	3 515.65
C	23 520.77	18 383.53	3 142.82	2 615.83
D	34 010.65	25 976.58	4 155.81	3 394.67
E	21 326.59	16 740.27	2 744.50	2 626.47

2.1 烟能比

烟能比是指建筑全寿命期或建筑某阶段或某种建材生产阶段烟耗与能耗的比值^[15],可用下式表示:

$$EQR = \frac{E_x}{E_n}. \quad (5)$$

式中: E_n 表示建筑全寿命期或建筑某阶段或某种建材生产阶段能耗, MJ; E_x 表示建筑全寿命期或建筑某阶段或某种建材生产阶段烟耗, MJ.

烟能比从宏观的角度诠释了建筑对优质能源的利用程度,烟能比越高表示建筑对优质能源的利用越高,即建筑消耗了大量的高品质能源;烟能比越低表示建筑对优质能源的利用越低,即建筑消耗的高品质能源较少.本文中 5 栋公共建筑全寿命期的烟能比计算结果见表 5.

表 5 各建筑全寿命期烟能比

Tab.5 Exergy-energy ratio of every building

A	B	C	D	E
0.778	0.782	0.784	0.781	0.764

用 MATLAB 软件对建筑的能耗和烟耗数据进行一元多项式拟合,可得到能耗 E_n 与烟耗 E_x 的一元二次回归方程,如下:

$$E_x = f(E_n) = -3.166 \times 10^{-6} E_n^2 + 0.9218 E_n - 1477. \quad (6)$$

则烟能比 EQR 可用式(7)表示.

$$EQR = \frac{f(E_n)}{E_n} = -3.166 \times 10^{-6} E_n + 0.9218 - \frac{1477}{E_n}. \quad (7)$$

分析式(7)可知单位建筑面积能耗为 21 600 MJ/m²时,烟能比存在一个最大值 0.785.即在一元二次回归方程分析下,存在临界最大烟能比, $EQR_{max} = 0.785$.

建筑烟能比与能耗的关系如图 3 所示.从图中可看出当能耗超过临界值 21 600 MJ/m²后,建筑的烟能比随能耗的增加而下降,即烟耗降低.

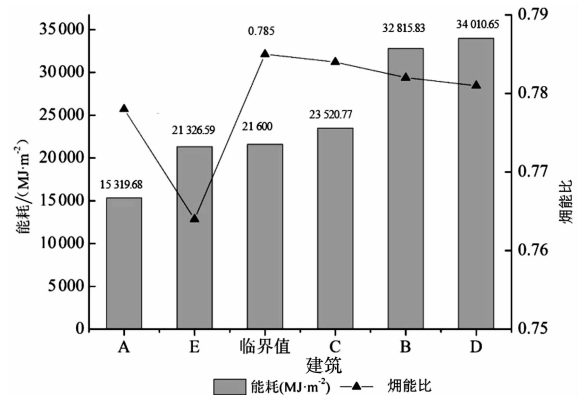


图 3 建筑烟能比与能耗的关系

Fig.3 Relationship between exergy-energy ratio and energy consumption

2.2 绿色性指标

本文采用层次分析法^[16]对 5 栋建筑的 4 个指标,即全寿命期的能耗、烟耗、二氧化碳排放量以及成本进行了评判,并得到了各个建筑的绿色性指标.绿色性指标综合考虑了建筑全寿命期的资源消耗、成本投入和环境影响,可以较为全面、科学地评判可持续建筑的绿色度.

层次分析法的第一步是建立层次结构模型,即将与评价相关的元素分解成目标层、准则层和方案层.本文中,目标层为决策目标,即公共建筑绿色综

合评价; 准则层为各个影响因素, 包括单位建筑面积能耗、能耗、成本和二氧化碳排放量; 方案层是文中选取的湖南地区 5 栋公共建筑, 层次结构模型如图 4 所示。

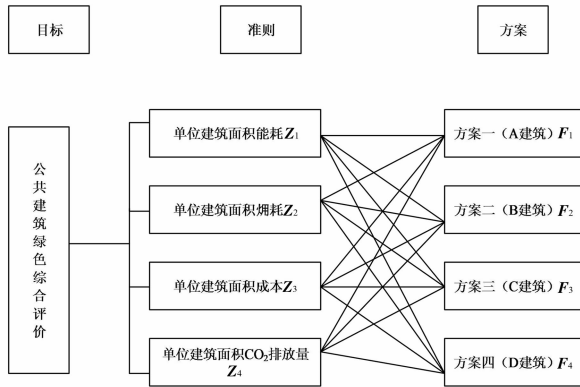


图 4 层次结构模型

Fig.4 Hierarchical structure model

第二步是根据 Santy 的 1~9 比率标度方法构造两两比较判断矩阵。对各层评价目标的重要性进行两两比较, 确定各层次各因素之间的相对权重。由于各指标的重要性判定与建筑类型有一定关系, 本文咨询了 10 个包括建筑、土木、暖通、电气专业在内的专家以及工程设计人员对各项指标的权重进行确定, 并构造两两判断矩阵, 包括准则层对目标层 M 以及方案层对准则层 $Z_1 \sim Z_4$ 共 5 个判断矩阵, 见表 6~表 10。

表 6 准则层对目标层 M 的判断矩阵

Tab.6 Judgment matrix of criteria layer to target layer M

M	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
Z_1	1	2	4	3
Z_2	1/2	1	4	3
Z_3	1/4	1/4	1	1/3
Z_4	1/3	1/3	3	1

表 7 方案层对准则层 Z_1 的判断矩阵

Tab.7 Judgement matrix of schematic layer

to criteria layer Z_1

Z_1	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
F_1	1	3	3	5	5
F_2	1/3	1	1	4	5
F_3	1/3	1	1	5	5
F_4	1/5	1/4	1/5	1	2
F_5	1/5	1/5	1/5	1/2	1

表 8 方案层对准则层 Z_2 的判断矩阵

Tab.8 Judgement matrix of schematic

layer to criteria layer Z_2

Z_2	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
F_1	1	3	3	5	5
F_2	1/3	1	1	3	3
F_3	1/3	1	1	4	4
F_4	1/5	1/3	1/4	1	1
F_5	1/5	1/3	1/4	1	1

表 9 方案层对准则层 Z_3 的判断矩阵

Tab.9 Judgement matrix of schematic

layer to criteria layer Z_3

Z_3	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
F_1	1	3	1	5	5
F_2	1/3	1	1/3	4	4
F_3	1	3	1	5	5
F_4	1/5	1/4	1/5	1	1/2
F_5	1/5	1/4	1/5	2	1

表 10 方案层对准则层 Z_4 的判断矩阵

Tab.10 Judgement matrix of schematic

layer to criteria layer Z_4

Z_4	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
F_1	1	3	3	4	4
F_2	1/3	1	1	3	3
F_3	1/3	1	1	3	3
F_4	1/4	1/3	1/3	1	1/2
F_5	1/4	1/3	1/3	2	1

第三步是层次单排序及其一致性检验。将各个判断矩阵进行归一化处理并计算最大特征向量, 即为权重向量。由于指标间的相互影响和其他主观因素的作用, 所构造的矩阵不可能都有完全的一致性, 为保证合理性须进行一致性检验。各判断矩阵的一致性检验结果见表 11。其中 CI 为一致性指标, CI 越接近 0 表示一致性越好, 从表 6~表 10 中可看出 5 个判断矩阵的一致性均较好。CR 为一致性比率, $CR < 0.1$ 时认定判断矩阵满足一致性要求, 否则需要重新构造判断矩阵。本例中均符合要求。

表 11 各判断矩阵的一致性检验

Tab.11 Consistency check of each judgement matrix

判断矩阵	$Z-M$	$F-Z_1$	$F-Z_2$	$F-Z_3$	$F-Z_4$
CI	0.008	0.058	0.025	0.047	0.042
CR	0.009	0.052	0.023	0.042	0.037

第四步是层次总排序。在对各判断矩阵进行层次单排序后, 再计算方案层对总目标的权重, 得到层次总排序, 从而比较各方案的优劣。层次总排序的结果见表 12。表 12 中最右一列方案层最终权重即为各建筑的绿色性指标。

表 12 层次总排序结果
Tab.12 Hierarchy ranking results

	Z_1a_1 =0.466	Z_2a_2 =0.277	Z_3a_3 =0.096	Z_4a_4 =0.161	方案层最 终权重 $W_i =$ $\sum_{j=1}^4 a_j \cdot b_{ij}$
F_1 (A 建筑)	0.438	0.455	0.350	0.435	0.433
F_2 (B 建筑)	0.213	0.189	0.174	0.200	0.201
F_3 (C 建筑)	0.226	0.218	0.350	0.200	0.231
F_4 (D 建筑)	0.071	0.069	0.054	0.070	0.069
F_5 (E 建筑)	0.052	0.069	0.072	0.095	0.066

2.3 交叉比较

为了分析焓能比与绿色性的关系,将两个指标的计算结果制成折线图,可得到图 5.

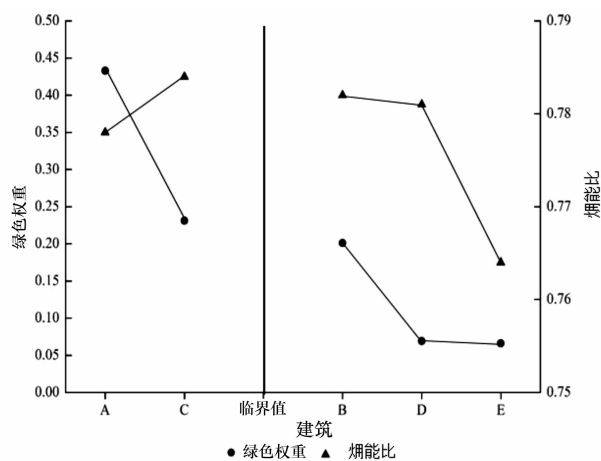


图 5 焓能比与绿色性的关系

Fig.5 Relationship between exergy-energy ratio and greenness

从图 5 临界值左边部分可看出, A 建筑的绿色性优于 C 建筑,且绿色权重与焓能比成反比关系,即当建筑单位面积能耗低于 21 600 MJ/m²时,焓能比较小的建筑,绿色性更好.从图 5 临界值右边部分可看出, B, D, E 的绿色性排序为 B>D>E,且绿色权重与焓能比成正比关系,即当建筑单位面积能耗高于 21 600 MJ/m²时,焓能比较大的建筑,绿色性较好.

3 结论

本文计算了湖南地区 5 栋公共建筑的全寿命期能耗、焓耗、二氧化碳排放量以及成本,并在此基础上计算了建筑的焓能比,采用层次分析法深入分析了建筑的热力学性能,得到了建筑的绿色权重,对 5 栋建筑的分析结果如下:

1) 采用一元多项式回归模型分析能耗与焓耗的

关系,可知当单位建筑面积能耗达到 21 600 MJ/m²时,焓能比达到最大值 0.785.当能耗超过 21 600 MJ/m²时,焓能比随能耗的增加而下降,即焓耗降低.焓能比反映建筑对优质能源的利用或消费程度,因而焓能比不是越高越好,也不是越低越好,而是应该存在一个最优范围.

2) 本文计算的 5 栋建筑中,办公建筑的绿色性明显优于商业建筑.因此,要提高公共建筑的绿色性,需要从商业建筑着手,其节能潜力较大,环境影响较为严重.

3) 各建筑的绿色性排序为 A>C>B>D>E,焓能比的排序为 C>B>D>A>E.从图 5 中可看出,存在一个能耗的临界值,即由 2.1 部分得到的 21 600 MJ/m².临界值左边绿色权重与焓能比呈反比关系,即焓能比越高绿色性越差;临界值右边绿色权重与焓能比呈正比关系,即焓能比越高绿色性越好.根据这一结果,可初步得到,当全寿命期单位建筑面积能耗低于 21 600 MJ/m²时,焓能比小的建筑,能耗水平更高,资源消耗更多,环境影响相对更严重;当单位建筑面积能耗高于 21 600 MJ/m²时,可初步判断焓能比小的建筑,耗能水平更低,资源消耗更少,环境影响相对更小.

4) 本文提出的焓能比和绿色性指标,可为可持续建筑中的被动式节能条款提供一定的补充,弥补现有体系的不足.然而受建筑数量以及地域局限性的影响,绿色性指标以及焓能比的最优范围仍需进一步研究.除此之外,影响焓能比的因素较多,其与参考环境的选取有关,不同的参考环境下,焓能比的计算结果会有差别(会存在加和一致性问题),如何将围护结构形成阶段与建筑运行阶段的热力学基准统一起来仍有待后续研究.

参考文献

- [1] GB/T 50378—2014 绿色建筑评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2014:9—11.
GB/T 50378—2014 Assessment standard for green building [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014: 9—11. (In Chinese)
- [2] USGBC. LEED 2012 second public comment draft [DB/OL]. (2014-01-15) [2016-05-21]. <http://www.usgbc.org/resources>.
- [3] 刘猛. 建筑生命周期环境影响评价研究[D]. 重庆: 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2008: 53—68.
LIU M. Research on building life cycle environmental impacts [D]. Chongqing: College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, 2008: 53—68. (In

- Chinese)
- [4] GONÇALVES P, GASPAR A R, SILVA M G D. Energy and exergy-based indicators for the energy performance assessment of a hotel building[J]. *Energy & Buildings*, 2012, 52: 181–188.
- [5] 龚光彩. 冷凝热回收与冷热源优化的理论及方法[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 9–15.
GONG G C. Methods and application of condensing heat recovery and optimization of cooling and heating sources [M]. Beijing: Science Press, 2013: 9–15. (In Chinese)
- [6] 龚志起, 张智慧. 建筑材料物化环境状况的定量评价[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(9): 1209–1213.
GONG Z Q, ZHANG Z H. Environmental quantified evaluation embodied environmental profile for building material [J]. *Journal of Tsinghua University: Natural Science*, 2004, 44(9): 1209–1213. (In Chinese)
- [7] 燕艳. 浙江省建筑生命周期能耗和 CO₂ 排放评价研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2011: 26–45.
YAN Y. Life cycle building energy consumption and CO₂ emissions assessment of Zhejiang province[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University 2011: 26–45. (In Chinese)
- [8] 杨倩苗. 建筑产品的全生命周期环境影响定量评价[D]. 天津: 天津大学建筑学院, 2009: 47–60.
YANG Q M. Life cycle quantified evaluation of environmental impacts for construction products[D]. Tianjin: College of Architecture, Tianjin University, 2009: 47–60. (In Chinese)
- [9] 赵冠春, 钱立伦. 焓分析及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1984: 97–98.
ZHAO G C, QIAN L L. Exergy analysis and its application [M]. Beijing: High Education Press, 1984: 97–98. (In Chinese)
- [10] 傅秦生. 能量系统的热力学分析方法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2005: 93–94.
FU Q S. Thermodynamic analytic method of energy system [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2005: 93–94. (In Chinese)
- [11] 王志轩, 张建宇, 潘荔, 等. 中国电力减排研究 2012[M]. 北京: 中国市场出版社, 2013.
WANG Z X, ZHANG J Y, PAN L, *et al.* Study on emission reduction of power industry in China 2012 [M]. Beijing: China Market Press, 2013. (In Chinese)
- [12] THORMARK C. A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential[J]. *Building and Environment*, 2002, 37(4): 429–435.
- [13] 杨健. AB 活性污泥法的生命周期能耗分析[J]. 四川环境, 2002, 21(1): 23–26.
YANG J. Life cycle energy analysis for AB activated sludge process [J]. *Sichuan Environment*, 2002, 21(1): 23–26. (In Chinese)
- [14] 王立平, 龚光彩. 住宅建筑建材准备阶段能耗和碳排放灰色分析——以合肥地区为例[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2016, 43(5): 151–156.
WANG L P, GONG G C. Energy consumption and carbon emissions gray analysis of residential buildings in building materials production phase—taking Hefei area as an example[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2016, 43(5): 151–156. (In Chinese)
- [15] 龚光彩, 龚思越, 韩天鹤, 等. 建筑围护结构建造过程能源消耗分析评价[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2014, 41(4): 101–106.
GONG G C, GONG S Y, HAN T H, *et al.* Exergy analysis of building envelope production phase[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(4): 101–106. (In Chinese)
- [16] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988: 128–135.
XU S B. Principle of analytic hierarchy process [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988: 128–135. (In Chinese)