

建筑生命周期环境影响焓分析通用模型及应用

刘 猛^{1,2}, 姚润明³

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400030; 3. 英国雷丁大学 建筑管理工程系, 英国雷丁)

摘要:针对现有建筑环境性能分析方法的主要不足, 基于客观环境和生命周期性环境影响观点, 应用焓方法分析建筑造成的3种环境影响: 能源消耗、资源消耗和污染排放。建立了建筑生命周期环境影响焓分析通用模型, 提出了用建筑环境影响焓足迹来评价建筑发展的环境可持续性。对重庆某住宅案例分析的结果表明, 建筑使用阶段环境影响占到88%, 能源消耗和能源消耗引起的环境问题分别占到约75%和24%, 该建筑在50年的生命周期中, 每m²建筑面积需要169m²的全球平均生产力的土地承担它造成的环境影响。

关键词:环境影响; 生命周期; 能源利用; 焓; 可持续性

中图分类号: TU624 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)03-0114-05

Generic Model and Application of Environmental Impacts Exergy Analysis for Building Life Cycle

LIU Meng^{1,2}, YAO Run-ming³

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China; 3. Department of Construction Management and Engineering, University of Reading, Reading RG6 6AW, UK)

Abstract: Based on the disadvantages of existing building environmental analysis methods, a generic model of exergy analysis on environmental impact of building life cycle is introduced, taking into consideration of previous models and focusing on natural environment as well as building life cycle. And three environmental impacts were analyzed, namely energy consumption, resource consumption and pollutant discharge respectively. The generic model of exergy assessment on environmental impact of building life cycle thus was formulated and building environmental sustainability was evaluated through exergy footprint of building environmental impacts. With a residential building in Chongqing for case study, it was found that environmental impacts in building operational stage accounts for 88% of building life cycle and in the breakdown, environmental impacts from energy consumption and related emission were the fundamental parts with the share of 75% and 24% respectively. And for sustainability analysis, about 169 m² earth areas with global average productivity was required to support the building's life cycle of one m² floor area.

Keywords: environmental impact; life cycle; energy utilization; exergy; sustainability

在能源危机和全球环境问题日益严峻的今天, “绿色建筑”作为可持续建筑发展的时代产物, 得到

收稿日期: 2009-02-20

基金项目: 国家“十一五”科技支撑重大项目课题(2006BAJ02A09; 2006BAS01A05-6; 2006BAJ01A13-02); 国家自然科学基金重点项目(50838009)

作者简介: 刘猛(1979-), 男, 重庆大学与剑桥大学联合培养博士, 主要从事建筑环境、低碳节能技术研究, (E-mail) liumeng2033@126.com

了世界各国的广泛重视,各国研究学者在建筑环境影响和环境性能评价上开展了大量的研究与实践^[1],从英国的 BREEAM 到中国香港的 HK-BEAM^[2-3],从日本的 CASEBEE^[4]到我国的绿色建筑评价标准^[5],这些方法的提出与应用对建筑的可持续发展起到了很好的促进作用。

对现有建筑环境性能分析方法分析和比较后发现,现有建筑环境影响分析方法的主要不足有:

1)对建筑的环境性能缺乏总体上的考虑与控制

建筑环境性能评价体系都是将环境性能分解,形成评价条款,虽然这些条款可以方便相关人员进行绿色建筑设计,但是缺乏一定总体上的评价指标,这样,可能存在将各种单个的绿色技术累积在一起,变成堆砌型“绿色”建筑,而如果从整体上看,实际上可能是一座伪“绿色”建筑。^[6-7]同时,如果没有从整体上考虑,有些评价条款可能存在重复计量。

2)环境影响中生命周期环境影响和非生命周期环境影响没有区别分析

生命周期理论已经广泛应用于建筑的环境影响评价,但现有研究方法中,并没有对环境影响的生命周期性能进行区分,根据 Barnthouse L 等人的研究成果,^[8]当应用生命周期理论分析环境影响生命周期的累积效应时,资源消耗、能源消耗、气候变暖等环境影响可以达到比较理想的理论精度,而生态毒性、光化学臭氧合成等环境影响由于效应的时间和空间尺度较小,其误差较大,不适合应用累积效应分析其造成的环境影响。^[7-8]

3)各种环境影响的综合评价问题

各种环境影响的综合评价一直是个难点,一般的思路是:将环境影响分类→特征化→加权→求和。目前,分类基本达成了一致,而在特征化和加权方面,差异较大,世界上有五、六十种特征加权方法,但是无论是基于主观评价的专家咨询法,还是基于地区环境的容积系数法,其不同类型之间的加权方法都是基于主观考虑或者地区特性的,这也是各个方法之间存在争论的原因。生态足迹和能值分析法提出了统一量化方法,但目前很多分析中,存在很多假设,很多结论给出的是方向性的分析,适合于较大范围,如国家、地区的生态环境系统分析。

4)环境影响分析缺乏从客观环境考虑

由于特征加权方法的主观性或者局部客观性,造成了对环境影响的最终评价无法从实际的客观生态环境的角度考虑,因而只能以现有建筑水平为客观参照的现状。虽然能够指出建筑可持续的发展方向,但也会得出一些误导性结论。环境影响的评价,不仅需要具有相对性的指标,也需要有基于客观生态环境的“绝对性”指标。^[7]

针对现有方法的不足,采用焓作为环境影响的量化指标。焓来源于热力学,定义为:在周围环境条件下任一形式的能量中理论上能够转变为有用功的那部分能量称为该能量的焓或有效能,^[9-10]它反映了物质在“量”和“质”上偏移客观环境的程度。运用泛化的焓分析法,结合生命周期理论,提出了建筑生命周期环境影响焓分析方法,分析建筑生命周期客观环境影响。

1 研究方法

1.1 建筑生命周期

建筑的生命周期(如图1)包括了原材料获取,建筑材料、能源的生产加工,建筑的修建,建筑运行和建筑拆除处理。能源、资源消耗以及伴随的污染物排放贯穿着建筑的全生命周期,从物质流的角度考虑,建筑全生命周期造成的环境影响主要来源于两部分,建筑能源利用和建筑材料使用,其造成的主要环境影响构成如图2。以下将运用建筑生命周期环境影响焓分析方法,分析能源消耗、资源消耗和污染排放环境影响,建立建筑能源利用环境影响焓分析通用模型和建筑材料使用环境影响焓分析通用模型,进而建立建筑生命周期环境影响焓分析通用模型。

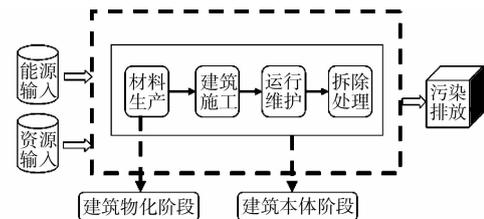


图1 建筑生命周期

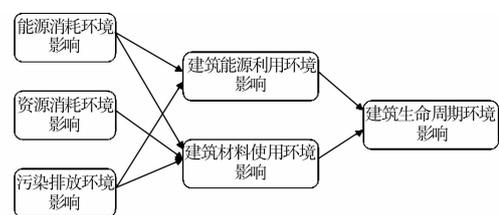


图2 建筑生命周期环境影响构成

1.2 能源消耗环境影响量化

(1) 能源的焓值

能源消耗环境影响采用能源焓值量化,能源的焓值反映了能源在“量”和“质”上的价值,其定义为:在标准状况的燃料(能源)和氧气一起稳定流经化学反应系统时,以可逆方式转变到完全平衡的环境状态所能作出的最大有用功。^[9]对于电力焓值,应根据电力来源以及电力输配确定电力综合值。其中,核电被认为是一种替代能源,与化石能源相比,可认为是暂时清洁的,但考虑到清洁的暂时性,其环境影

响取为能源值,即电力热量值,而大型水电,其对环境会造成一定影响,目前仍然处于研究之中,水电环境影响取为水电热量值。对于其它可再生能源,通常主动利用时,均会采用一定的设备,会对环境造成一定影响,同时考虑主动利用时通常是转化为电力进行利用,因此,可再生能源主动利用时环境影响取为电力热量值。

(2) 能源内含焓系数 α

能源进入用户侧利用之前,要经过开采、运输、加工、输送和分配等阶段,这些阶段统称为能源物化阶段。^[7, 11]能源物化阶段需要消耗一定的能源,这部分能源消耗中一部分增加了原能源的价值,反应在新能源产品的焓值增加上,当能源使用时,转化为对环境的影响;而另一部分是在生产加工过程中被消耗了,这部分没有形成焓,但同样增加了对环境的负面影响。因此,在采用焓方法时,能源消耗环境影响需要考虑能源物化过程带来的附加能源消耗,同时,在污染物排放环境影响分析中,也需要考虑这部分排放带来的环境影响。

考虑能源物化阶段能源消耗,提出能源内含焓系数 α ,量化能源物化阶段能源消耗。

设 $C = (X_{ij})$, 为直接消耗系数矩阵,完全消耗系数可由里昂列夫逆矩阵计算得到,即:

$$\alpha = (1 - C)^{-1} = (I + C + C \cdot C + C \cdot C \cdot C + \dots) \quad (1)$$

要准确计算各能源生产运输分配过程完全消耗,需要对能源系统进行完全循环迭代。为便于计算,需要进行一定的简化,得到各能源内含焓系数。

1.3 资源消耗环境影响量化

资源的环境价值,也就是使用资源造成的环境影响,采用资源的化学焓值量化资源消耗环境影响。化合物的化学焓值可根据组成物质在标准环境温度、压力和矿产资源在地球岩石圈、水圈和大气圈中的含量进行计算^[12]。结合资源的矿品位情况,则资源消耗环境影响,即资源化学焓(E_r),采用式(2):

$$E_r = \sum_i (E_{c,i} \times \rho_i / M_i) \quad (2)$$

式中, E_r 为资源消耗环境影响焓值, MJ/kg; $E_{c,i}$ 为资源中第 i 种资源标准化学焓, MJ/kmol; M_i 为资源中第 i 种资源摩尔质量, kg/kmol; ρ_i 为资源中第 i 种资源含量。

1.4 污染物排放环境影响

污染物排放环境影响采用“消除焓值 (Abatement Exergy Consumption)”评价^[13]。一种污染物的环境影响可以用“在现有技术条件下,将这种污染物处理到对环境中性过程的焓消耗”进行量化。

根据 Barnthouse 等人的研究成果^[8],当采用生

命周期理论分析环境影响时,全球性或区域性以及长期性的环境影响可以达到较高的理论精度,如全球气候变暖、酸雨酸化等,而局部的或者短暂的环境影响误差较大,如生物毒性、光化学烟雾影响等,该文的研究范围仅考虑造成全球气候变暖和酸雨酸化影响的污染排放物。全球气候变暖污染排放物包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 和 CO ; 酸雨酸化污染排放物包括 SO_2 和 NO_x 。

根据参考文献数据, CO_2 处理过程消耗为 5.86 MJ/kg, SO_2 、 NO_x 处理过程消耗分别为 57.0 MJ/kg、16.0 MJ/kg。^[14-16]建筑的生命周期通常为 50~70 年,其它全球气候变暖影响污染物的消耗可假设与污染物的全球变暖潜能指数 (GWP) (100 年)成正比。^[7-8]

2 模型建立

2.1 建筑能源利用环境影响焓分析通用模型

根据能源利用各生命周期阶段环境影响情况,建筑能源利用造成的环境影响来源于 2 部分:能源消耗和污染排放,提出用“累积焓消耗”(Cumulative Exergy Consumption)量化能源利用环境影响。

建筑能源利用环境影响焓分析模型可用式(3)表示

$$C_{ib} = \sum_i [(E_{em,i} + A_{f,i}) \times m_{f,i}] \quad (3)$$

式中, C_{ib} 为建筑能源利用累计焓消耗, kJ; $E_{em,i}$ 为第 i 种能源的内含焓, kJ/kg 或 KJ/kWh; $A_{f,i}$ 为第 i 种能源消耗消除焓值, kJ/kg 或 KJ/kWh; $m_{f,i}$ 为第 i 种能源消耗量, kg 或 kWh。

2.2 建筑材料环境影响焓分析通用模型

根据建筑材料使用各生命周期情况,建筑材料环境影响包括 3 部分:资源消耗、能源消耗和污染排放,建筑材料环境影响焓分析模型如式(4),模型主要包括 3 个模型元素:能源消耗环境影响、资源消耗环境影响和污染排放环境影响。

$$C_{mb} = (\sum E_{em} + \sum E_r + \sum A_f) \times m_{mb} \quad (4)$$

式中, C_{mb} 为某种建筑材料使用环境影响累计消耗, kJ; m_{mb} 为某种建筑材料使用量, t; 其他的同前。

2.3 建筑生命周期环境影响焓分析通用模型

在建筑生命周期中,主要包括建筑上游阶段、建造阶段、使用阶段和拆除阶段,环境影响来源于 2 个部分,建筑能源利用环境影响和建筑材料使用环境影响。建筑生命周期各阶段主要环境影响有:

1) 建筑上游阶段:建筑材料使用环境影响,建筑能源利用环境影响,这一生命周期阶段环境影响已经计算到建筑能源利用环境影响和建筑材料使用环境影响中。

2) 建造阶段:建筑能源利用环境影响,建筑材料

使用环境影响。

3)使用阶段:建筑能源利用环境影响,建筑材料使用环境影响。

4)拆除阶段:建筑能源利用环境影响,建筑材料使用环境影响。

由此,建筑生命周期环境影响焓评价模型为:

$$C_{LCb} = C_{fb,c} + \sum_i C_{mb,i,c} + (C_{fb,o} + \sum_j C_{mb,j,o}) \times t + C_{fb,dis} + \sum_k C_{mb,k,dis} \quad (5)$$

式中, C_{LCb} 为建筑生命周期环境影响焓值, kJ; $C_{fb,c}$ 为建筑建造阶段能源利用环境影响焓值, kJ; $C_{mb,i,c}$ 为建筑建造阶段第 i 种建筑材料使用环境影响焓值, kJ; $C_{fb,o}$ 为建筑使用阶段能源利用环境影响焓值, kJ; $C_{mb,j,o}$ 为建筑使用阶段第 j 种建筑材料使用环境影响焓值, kJ; $C_{fb,dis}$ 为建筑拆除阶段能源利用环境影响焓值, kJ; $C_{mb,k,dis}$ 为建筑拆除阶段第 k 种建筑材料使用环境影响焓值, kJ, 如果是建筑材料回收, 环境影响为正影响(“-”值); t 为建筑使用寿命, 年。

将建筑上游阶段环境影响分解到建筑能源利用和建筑材料使用生命周期中, 计算建筑生命周期环境影响时可直接计算建筑建造、建筑使用和建筑拆除阶段建筑能源利用量和建筑材料使用量。

2.4 建筑环境可持续发展指标

应用建筑生命周期环境影响焓分析方法, 评价地区建筑发展的环境可持续性, 根据生态承载力的观点, 采用全球平均生态系统生产力来衡量生态承载力。全球的焓产量为 $100 \text{ GJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ [17-18]。可用“建筑环境影响焓足迹”(式(6))来衡量建筑的环境可持续性。这个指标评价的是一定时期内、一定地区建筑发展环境可持续性, 其中的建筑生命周期并不是单个建筑生命周期, 而是这一时期、这一地区, 处于建筑各生命周期阶段的总和。

$$F_B = \frac{C_{fb,LC} + C_{mb,LC}}{E_{prod} S} \quad (6)$$

式中, E_{prod} 为地区单位土地焓产量, $\text{GJ}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; $C_{fb,LC}$ 为建筑各生命周期阶段能源利用环境影响焓值, GJ ; S 为地区土地面积, hm^2 ; F_B 为建筑环境影响焓足迹; $C_{mb,LC}$ 为建筑各生命周期阶段建筑材料使用环境影响焓值, GJ 。

“建筑环境影响焓足迹”指标反映了区域建筑资源能源利用的整体环境可持续性, 即建筑造成的环境影响引起的焓消耗与同一时期内该区域客观环境总焓产量之比。当 $F_B \leq F_{thred}$ (可持续阈值) 时, 该地区的建筑发展处于整体环境可持续发展状态。据估计, 建筑全生命周期消耗的资源能源约占全社会消耗的一半 [19], 因此, 在应用分析中, 暂时取阈值为 0.5, 即, 当 $F_B \leq 0.5$ 时, 该地区的建筑发展为环境可持续发展, 当 $F_B > 0.5$ 时, 该地区的建筑发展为环境

不可持续发展, 其消耗了过多的资源和能源。

当评价单个建筑时, 可采用“建筑环境可持续性指标”(S_{be}), 如

$$S_{be} = C_{LCb} / (100F \cdot t) \quad (7)$$

式中, F 为建筑面积, m^2 ; t 为建筑寿命, a 。

S_{be} 的含义为每 m^2 建筑面积需要多少 m^2 的全球平均生产力土地来维持它生命周期的能源利用和材料使用。

3 应用

重庆某住宅总建筑面积为 769.89 m^2 , 建筑生命周期各阶段建筑能源利用和建筑材料使用情况见参考文献 [20-22]。假设该住宅寿命为 50 年, 经计算 [23], 该住宅建筑生命周期环境影响分析如图 3-图 5。

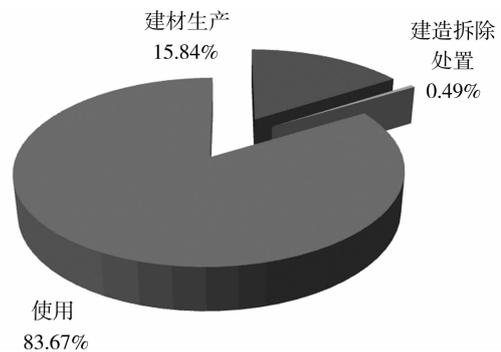


图 3 建筑生命周期能耗构成

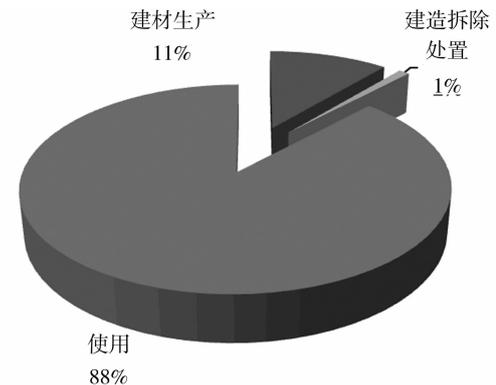


图 4 建筑生命周期阶段环境影响构成

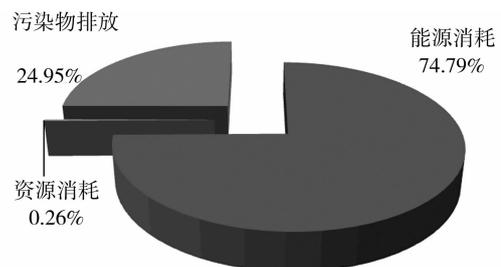


图 5 建筑生命周期环境影响构成

建筑能耗环境影响强度为 $84.209 \text{ GJ}/\text{m}^2$, 建筑使用阶段以及建筑材料生产阶段对于建筑生命周期

环境影响有着决定性作用。

从环境影响类型来看,能源消耗和能源消耗引起的环境问题是建筑造成的主要环境问题。

该建筑在 50 年的生命周期中,需要 13.03 hm²,即每 m² 建筑面积需要 169 m² 的全球平均生产力的土地承担它造成的环境影响。

4 小结

基于客观环境和生命周期性环境影响观点考虑,提出了建筑生命周期环境影响焓评价方法,应用焓评价方法评价建筑造成的 3 种环境影响,采用能源内含焓值评价能源消耗环境影响,资源化学焓值评价资源消耗环境影响,污染物消除焓值评价污染排放环境影响。通过对建筑生命周期环境影响构成分析,建立了建筑生命周期环境影响焓评价通用模型,该模型包括 2 个子模型:建筑能源利用环境影响焓评价通用模型和建筑材料使用环境影响焓评价通用模型。结合生态环境专家的观点,提出了用建筑能源利用环境影响焓足迹和建筑环境影响焓足迹来评价建筑发展的环境可持续性。应用该方法对建筑发展进行分析,可以反映建筑造成的客观环境影响大小,为建筑可持续发展提供客观分析指标。

参考文献:

- [1] ZHANG ZH, WU X, et al. BEPAS—a life cycle building environmental performance assessment model. [J]. Building and Environment 2006, 41(5): 669-675.
- [2] KANGHEE LEE, SUNGHO TAE, SUNGWOO SHIN, Development of a life cycle assessment program for building (SUSB-LCA) in South Korea [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009, 13(5): 879-890.
- [3] ZHEN CHEN A, DEREK CLEMENTS-CROOME, JU HONG, et al. A multicriteria lifespan energy efficiency approach to intelligent building assessment [J]. Energy and Buildings. 2006, 38: 393-409.
- [4] JAPAN SUSTAINABLE BUILDING CONSORTIUM, Comprehensive assessment system for building environmental efficiency(CASBEE)[M]. Tokyo: JSBC, 2008.
- [5] GB/T 50378-2006 绿色建筑评价标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2006.
- [6] 李百战. 绿色建筑概论[M]. 北京:化工出版社, 2007.
- [7] 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.
- [8] BARNTHOUSE L, FAVA J, HUMPHREYS K, et al. Life cycle impact assessment: the state-of-the-art [M]. 2nd ed. [s.l.]:SETAC Press, 1998.
- [9] 郑宏飞. 焓——一种新的方法论[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2004.
- [10] CIBSE. CIBSE Guide A: Environmental design [M]. London: CIBSE Press. 2006.
- [11] 黄志甲. 建筑物能量系统生命周期评价模型与案例研究[D]. 上海: 同济大学, 2003.
- [12] SZARGUT J. Chemical exergies of the elements[J]. Applied Energy. 1989, 32(3): 269-286.
- [13] WEIMIN WANG, RADU ZMEUREANU, HUGUES RIVARD. Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization[J]. Building and Environment. 2005, 40(11): 1512 - 1525.
- [14] BASHFORD, HOWARD H, ROBSON, et al. Defining the building green process [C]//ASCE Construction Congress Proceedings, 1995: 405-423.
- [15] CORNELISSEN RL. Thermodynamics and sustainable development—the use of exergy analysis and the reduction of irreversibility[D]. Enschede: Laboratory of Thermal Engineering, University of Twente. 1997.
- [16] HENRIK WENZEL, MICHAEL HAUSCHILD, LEO ALTING. Environmental assessment of products: Volume 1: Methodology, tools and case studies in product development [M]. London, New York : Chapman & Hall, 1997.
- [17] WACKERNAGLE M, REES W. Our ecological footprint[M]. [s.l.]: New Society Publishers, 1996.
- [18] OLGYAY V, HERDT J. The application of ecosystems services criteria for green building assessment[J]. Solar Energy. 2004, 77(4): 389-398.
- [19] WORLD WATCH INSTITUTE, A building revolution [M]. Washington: World Watch Institute. 1995.
- [20] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2007 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [21] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2008 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [22] 国家统计局. 中国统计年鉴(2007)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [23] LIU M, LI B, YAO R. Chongqing building energy consumption and its exergy assessment[J]. Journal of Central South University of Technology: English Edition. 2007, (S3): 1151-1156.

(编辑 胡英奎)