

文章编号:1674-2974(2016)05-0151-06

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*

王立平^{1,2†} 龚光彩¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院建环系, 安徽 合肥 230009)

摘要:建筑生命周期内,尤其是建材准备阶段的能耗和碳排放统计数据相对较少,缺乏精度高且可操作性强的模型.将非等间距灰色系统预测模型应用于合肥地区住宅建筑建材准备阶段能耗和碳排放的分析预测,获得住宅建筑建材准备阶段能耗和碳排放的预测公式,经后验差检验显示预测结果具有足够的精度水平.在此基础上,提出以标准煤作为参考指标的单位碳排放条件下能源利用能力的评价指标.通过对比发现,建材准备阶段单位碳排放条件下的能源利用能力具有较大的提升空间.

关键词:能源消耗;建材准备阶段;住宅建筑;非等间距灰色模型;碳排放

中图分类号:TU111,TK123

文献标识码:A

Energy Consumption and Carbon Emission Analysis of Residential Building Materials Preparation Stage Based on Grey System Theory ——A Case Study of Hefei

WANG Li-ping^{1,2†}, GONG Guang-cai¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. School of Civil Engineering, Hefei Univ of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: The statistics of energy consumption and carbon emission of building during the whole life have the characteristics of poverty and great fluctuation in China, especially during the preparing stage of building materials. Further, analysis models to predict the energy consumption and carbon emission with high-accuracy and operability have not yet been developed. In the present study, the unequal interval grey model was introduced for the analysis and prediction of the energy consumption and carbon emission of the residential building materials at preparation stage in Hefei City. The test results with sufficient accuracy were obtained according to the posterior-variance-test. An evaluation index selecting the standard coal as the reference was proposed on the basis of the proposed model to express the energy utilization ability under unit carbon emission. The prediction results show that the energy utilization ability of building materials at preparation stage is still much lower, which can be improved considerably by comparing with the reference index. The proposed method can be employed to evaluate the energy utilization carbon emission in other building form as well as the unfinished deserted building and vacant house.

Key words: energy consumption; building materials preparation stage; residential building; unequal interval grey model; carbon emission

* 收稿日期:2015-07-11

基金项目:国家国际科技合作资助项目(2010DFB63830)

作者简介:王立平(1982-),男,河北隆化县人,湖南大学博士研究生,合肥工业大学讲师

† 通讯联系人, E-mail:lpwang@hfut.edu.cn

住宅建筑是建筑业的主要组成部分,通过历年统计数据可以发现,无论是开工面积、施工面积还是竣工面积均占当年房地产开发比例的70%以上,个别年份甚至达到80%。我国的建筑能耗约占全社会总能耗的30%,而如果考虑建材生产过程中的能耗,这一比例将增加到46.7%^[1]。随着经济发展和人们生活水平的提高,住宅建筑能源消耗也逐渐呈现上升趋势,污染物排放也相应的增长。

目前,针对建筑产品和建设活动的能源利用和环境影响分析主要集中在应用LCA理论从宏观和微观两个角度对建筑生命周期内的环境影响进行研究,宏观方面通过对建筑系统的生命周期能耗进行研究,得出建筑生命周期能源利用和环境影响总量,并考察能源消耗和环境影响在各阶段间的关系;微观层面通过对典型建筑的分析,获得单位建筑面积建筑在其生命周期的能源利用和环境影响及在建筑生命周期各阶段的分布状况^[2-4]。

根据生命周期理论,建筑生命周期划分为建材准备阶段、运输和施工阶段、运行(维护)阶段、拆除阶段和废弃物处理阶段^[5]。建材准备阶段是指从原材料开采、运输、加工直至最终形成建材产品的整个过程。文献[3]中指出住宅建筑建造能耗与50a运行及供暖能耗之比为1:2:4,其中运输能耗仅占3%~5%。文献[4]中得出马鞍山市某12层住宅30a生命期中运行阶段与建造阶段碳排放的所占比例分别为72.26%和20.77%。以上皆为从总量的角度分析,若考虑到时间因素,则建材准备阶段的能耗和碳排放的强度远远高于其他阶段。但建材准备阶段由于种类多、数量大、涉及范围广等因素,导致统计数据相对较少,数据差异较大,缺乏具有高精度和可操作性的模型。

灰色系统理论是一种研究少数据、贫信息、不确定性问题的新方法。其主要研究内容是在少数据和不确定性背景下的数据处理、现象分析、数学模型建立、发展趋势预测、事物决策、系统控制与状态评估等。马卓越^[6]建立了公共建筑能耗的正负残差非等间隔残差预测模型,进行了短期能耗预测,其结果符合能耗增长的趋势;曾获^[7]应用灰色系统理论和灰色关联度分析方法确定了民用建筑运行能耗与各影响因素间的关联度,证明民用建筑运行能耗与指标体系中的各宏观影响因素间均具有比较高的关联度;郭俊杰^[8]利用灰色系统理论建立了空气源热泵热水装置的家庭热水消耗和能耗模型,预测和实测对比表明,模型预测精度良好;Y Bai^[9]等将灰色预测模型与神经网络方法相结合,大幅度提高了对建筑能耗的预测精度。

本文应用非等间距灰色GM(1,1)模型对合肥地区不同区域内近年建设的住宅建筑在建材准备阶段的能源消耗和碳排放进行分析,提出建立基于建筑面积和层数的预测模型,并从单位碳排放的角度对建材准备阶段的能源利用能力进行评估。结果表明灰色模型在建材准备阶段能耗和碳排放预测中能达到较高的精度,具有一定的科学性和参考价值。

1 灰色系统理论简介

灰色GM(1,1)模型的基本思路如下,对原始序列 $X^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$,累加生成得到 $X^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))$ 。其基本形式为:

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b. \quad (1)$$

式中: a, b 分别为发展系数和灰作用量(内生变量), $z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)]$ 。式(1)的最小二乘估计参数列满足 $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y$,则 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$ 为模型的白化方程。

其中:

$$\begin{aligned} \hat{a} &= [a, b]^T, Y = |X^{(0)}(k)|^T, \\ B &= |-Z^{(1)}(k), 1|, k = 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (2)$$

上述为等间距序列的GM(1,1)模型,而在样本中无论是建筑面积还是建筑层数都是非等间距的。因此,依据非等间距GM(1,1)模型定义能耗序列和碳排放序列分别为 $Q^{(0)} = \{q^{(0)}(k_i)\}$, $C^{(0)} = \{c^{(0)}(k_i)\}$,其生成序列分别为 $Q^{(1)} = \{q^{(1)}(k_i)\}$, $C^{(1)} = \{c^{(1)}(k_i)\}$ 。

$$\begin{cases} x^{(1)}(k_1) = x^{(0)}(k_1), \\ x^{(1)}(k_i) = \sum_{j=1}^i x^{(0)}(k_j) \Delta k_j. \end{cases} \quad (3)$$

其还原值和原始序列的预测值分别为:

$$\hat{x}^{(1)}(k_i) = \left(x^{(0)}(k_1) - \frac{b}{a}\right) e^{-a \langle k_i - k_1 \rangle} + \frac{b}{a}, \quad (4)$$

$$\hat{x}^{(1)}(k_i + 1) - \hat{x}^{(1)}(k_i) = \hat{x}^{(0)}(k_{i+1}) \Delta k_{i+1}. \quad (5)$$

式中: $\hat{x}^{(1)}$ 和 $\hat{x}^{(0)}(k_{i+1})$ 分别为 $\hat{x}^{(1)}(k_{i+1})$ 和 $\hat{x}^{(0)}(k_{i+1})$ 在节点 k_{i+1} 的预测值。通过对 $X^{(1)}$ 做累减还原得到:

$$\begin{aligned} \hat{x}^{(0)}(k_{i+1}) &= \frac{1}{\Delta k_{i+1}} (x^{(0)}(k_1) - b/a) \times \\ &\quad (1 - e^{-a \Delta k_{i+1}}) e^{-a(k_{i+1} - k_1)}. \end{aligned} \quad (6)$$

为了准确评估预测的效果,利用后验差检验来进行评估,各评估参数和预测误差如下:

$$C = \frac{S_2}{S_1}, p = \{ |\varepsilon(k_i) - \bar{\varepsilon}| < 0.76745 S_1 \}, \quad (7)$$

$$S_1^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x^{(0)}(k_i) - \bar{x})^2, \quad (8)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x^{(0)}(k_i), \quad (8)$$

$$S_2^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\varepsilon(k_i) - \bar{\varepsilon})^2, \quad (9)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon(k_i), \quad (10)$$

$$\varepsilon(k_i) = x^{(0)}(k_i) - \hat{x}^{(0)}(k_i), \quad (10)$$

式中: C 为均方差比值, p 为小概率误差,二者的精度等级均分为4个等级,见表1。

表1 均方差比值和小概率误差的精度等级划分
Tab.1 Accuracy classification of variance ratio and small probability error

精度等级	精确	良好	合理	不准确
p	$p \geq 0.95$	$0.80 \leq p < 0.95$	$0.70 \leq p < 0.80$	$p < 0.70$
C	$C \leq 0.35$	$0.35 < C \leq 0.50$	$0.50 < C \leq 0.65$	$C > 0.65$

任何建设项目所需要的人工、材料、机械等的消耗量都可以根据国家颁布的定额标准来计算。建筑工程定额是指在正常的施工条件下,完成一定计量单位的合格产品所必须消耗的劳动力、材料、机械台、班的数量标准。这种量的规定,反映出建筑工程中的某项合格产品与各种消耗之间特定的数量关系。因此,以建筑工程定额作为建筑建设阶段的建材、能源、人力消耗的统计依据,方法科学、标准统一、具有普适性。通过工程定额确定工程项目在建材准备阶段所消耗的主要建材种类和数量,进而获得该建筑在建材准备阶段的物化能耗和碳排放数据,即为该系统的观测系列。该数据序列会受到多种因素的影响,如设计师设计经验、设计思想、甲方经营理念、营销模式等多种因素影响,具有明显的灰色系统的显著特征。应用灰色预测理论淡化或消除冲击扰动对该数据序列的影响,获得住宅建筑建材阶段能耗和碳排放的真实行为序列。

2 数据统计

建材准备阶段的能源消耗和污染排放主要来自于原材料的开采、运输和加工过程中的能源消耗和污染排放。由于涉及建材种类众多、数量不一,环境影响种类众多、影响过程复杂、权重确定等方面因

素,本文暂以能耗和CO₂排放作为评价依据。

2.1 能耗和碳排放的统计

在建筑产品施工过程中,使用的建材种类繁多,数量不一。因此,统计所有建材的数据是不切实际的。以往研究中也仅关注主要建筑材料。但是,对于单位能耗量较高或可能产生重大环境影响的小部分建材,忽略不统计会导致结果错误。经过对多分样本的材料消耗统计进行分析,最终确定进入建材准备阶段能耗和碳排放分析范围的建筑材料,并对其单位含能和碳排放进行逐项统计。所谓含能是指单位产品从自然界原始材料的掘取经过运输、加工、组装直至成品出厂前的所有相关过程的能耗总和。要得到建筑材料和燃料、动力的含能和CO₂排放量数据,需要大量的调研工作。本文的数据主要来源于文献[11-15],如表2所示。

2.2 能碳比(QCR)

随着建筑等级和规模的提高,能量消耗必然逐渐增加,随之而来的各种环境问题也在逐渐增加。在有效利用各种形式能量的同时,如何降低对环境的影响是我们所需要关注的。基于此,若以碳排放作为环境影响的一个参考指标,则可以利用能碳比(energy-carbon ratio, QCR)来对建筑或建设活动中能源消耗(Q)与碳排放(C)之间关系进行评价。所谓能碳比(QCR)是指在建设活动或建筑生命周期内消耗总能量(Q)与碳排放量(C)之比,即

$$QCR_i = \frac{Q_i}{C_i}, \text{ MJ/kgCO}_2. \quad (11)$$

其单位为MJ/kgCO₂。意为单位碳排放的情况下利用能量的能力。该数值越大,说明在能源利用过程中产生的负面环境影响(以碳排放计)越小或单位碳排放条件下的能量利用能力越高。

2.3 参考指标

单纯的能碳比(QCR)数值无法评价其实际意义。为便于分析比较,可选择一有代表性的指标作为参考标准(以下标0表示),其他过程的QCR与该指标相比获得无量纲的参数即相对能碳比(relatively energy-carbon ratio, RQCR)。

$$RQCR = \frac{QCR}{QCR_0}. \quad (12)$$

建筑材料的生产、运输和施工过程涉及到冶金、化工、交通、机械等社会各个行业,建设活动的能源消耗和环境影响能够从总体上反映社会各行业的总体状况。因此,参考指标的选取需要具有普遍意义。煤炭在中国一次能源生产中的比例接近77%,在一

次能源消费中的比例为70%左右,发电消耗原煤占国内煤炭消费总量的50%左右^[16],同时煤炭作为一种矿产资源在工业生产中扮演着重要角色.以标准煤作为参考指标既具有普遍意义,又便于扩展及在工程中进行应用.根据文献^[17]标准煤的碳排放

为2.54 t CO₂/tce,计算得到QCR的参考指标为11.54 MJ/kgCO₂.RQCR大于1则显示该过程单位碳排放条件下能源利用能力相对较高,反之则代表该过程能源利用能力仍有一定的提升空间.

表2 主要材料单位含能和单位CO₂排放量
Tab.2 Embodied energy and carbon emission per unit mass of major building materials

材料物理量	单位	单位含能 MJ/单位	单位CO ₂ 排放 kG/单位	材料物理量	单位	单位含能 MJ/单位	单位CO ₂ 排放 kG/单位
混凝土体积	m ³	2841.1	551	P. I. 525 质量	kg	4.46	0.400
中小型材质量	kg	25.0	3.589	其他水泥制品体积	m ³	3.97	0.792
线材质量	kg	46.0	3.000	实心粘土砖数量	10 ³ 块	6 857.6	504.000
铁质量	kg	23.6	1.010	空心粘土砖数量	10 ³ 块	5 685.4	418.000
铝质量	kg	19.3	1.020	混凝土砌块体积	m ³	1 339.0	195.000
木材体积	m ³	1735	73.90	加气混凝土砌块体积	m ³	1 979.5	291.000
砂石质量	kg	0.1	0.008	挤塑板质量	kg	87.10	3.830
石灰质量	kg	4.5	1.200	涂料质量	kg	23.70	1.652
P. S. 32.5 质量	kg	3.0	0.270	建筑陶瓷面积	m ²	205.90	16.900
P. O. 42.5 质量	kg	3.97	0.360	建筑玻璃质量	kg	33.10	2.910
PVC 质量	kg	5.3	0.750				

3 实例分析

以合肥地区不同区域的15栋住宅建筑为例,建筑面积从5 000~18 900 m²不等,总建筑面积约21万m²,项目建设时间在2009—2014年.对样本建筑进行观察发现,近年来新建住宅建筑多为高层建筑,超高层建筑和多层建筑所占比例相对较低.因此,在

选择计算建筑时以高层建筑为主.通过对前述灰色系统GM(1,1)模型分析, $x^{(0)}(k_1)$ 的数值对于预测结果有一定影响.因此,在多层建筑中选择相对有代表性并且数据齐全的一栋4层住宅.

通过对样本建筑预(决)算中所消耗的前述建材进行统计,得到各个建筑土建部分主要建材的能源消耗和碳排放情况见表3.表3中 x 为建筑层数,部分建筑层数相同,结果取其平均值.

表3 合肥地区住宅建筑建材准备阶段单位面积能耗和碳排放统计表
Tab.3 Statistics of energy consumption and carbon emission per unit floor area of residential building

参数	x								
	4	6	11	15	16	18	31	34	41
Q/(10 ³ MJ)	2.359	4.243	4.558	4.753	4.808	5.161	6.264	5.469	8.092
C/(10 ² kg)	1.970	3.686	4.827	4.991	5.151	5.381	6.647	5.753	7.378

表4 单位面积能耗和碳排放预测结果的精度等级评估
Tab.4 Accuracy classification of prediction results of energy consumption and CO₂ emission per unit area of residential buildings

参数	S ₁	S ₂	C	结果	ρ	结果
Q	1.503	0.514	0.342	精确	0.889	良好
C	1.490	0.392	0.263	精确	1.000	精确

建材准备阶段的能耗与建筑功能、建筑规模、建筑结构等因素有直接关系,建筑面积越大则建材使用种类和数量越多;建筑层数则决定了建材的规格和数量.应用前述非等间距GM(1,1)模型并借鉴文

献^[20]中的预测公式构成模式,以合肥地区上述建筑能耗和碳排放数据重新进行分析,根据式(1)~(6),可以计算得到单位面积能耗和碳排放的预测公式分别为:

$$Q^{(0)}(x_{i+1}) = A \frac{a_E}{\Delta x_{i+1}} (1 - e^{-b_E \Delta x_{i+1}}) e^{b_E(x_{i+1}-n)} \text{ MJ},$$

$$i = n, n+1, n+2, \dots \quad (13)$$

$$\hat{C}^{(0)}(x_{i+1}) = A \frac{a_C}{\Delta x_{i+1}} (1 - e^{-b_C \Delta x_{i+1}}) e^{b_C(x_{i+1}-n)} \text{ kg},$$

$$i = n, n+1, n+2, \dots \quad (14)$$

式中: x 为建筑层数, A 为建筑面积, a , b 和 n 为相关参数, 下标 E 和 C 分别为达标能耗和碳排放. 以上述数据为基础计算得到 $a_E = 2.43 \times 10^5$, $b_E = 0.017$, $a_C = 2.92 \times 10^4$, $b_C = 0.015$, $n = 4$.

应用式(7)~(10), 对上述计算结果进行评估, 其结果见表 4. 从评估结果可以看出, 两个预测值的均方差比值均处于第一等级, 而小概率误差均为第二等级, 都满足精度要求. 预测结果见图 1 和图 2.

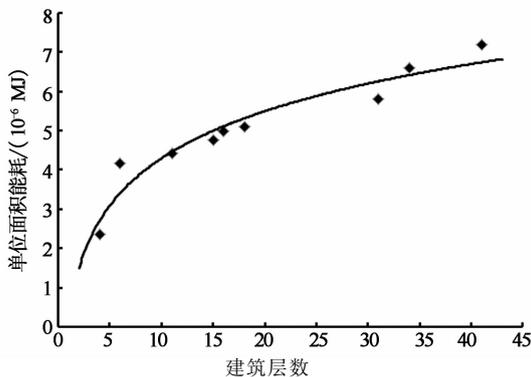


图 1 合肥地区住宅建筑建材准备阶段单位面积能耗与建筑层数关系图

Fig. 1 Relationship on energy consumption per unit area with the layer numbers of residential buildings in Hefei during the materials preparation stage

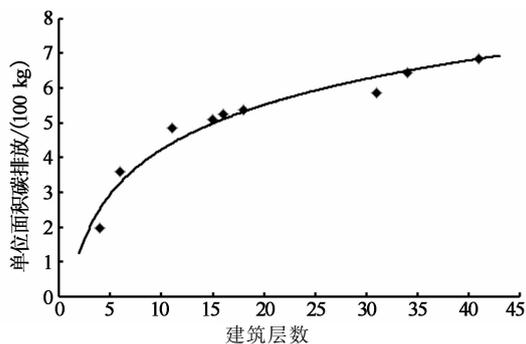


图 2 合肥地区住宅建筑建材准备阶段单位面积碳排放与建筑层数关系图

Fig. 2 Relationship on carbon emission per unit area with the layer numbers of residential buildings in Hefei during the materials preparation stage

由图 1 和图 2 可以发现, 住宅建筑建材准备阶段单位面积无论是能耗还是碳排放都随着建筑的层数增加而逐渐增加, 但增速逐渐降低, 建筑层数达到 30 以上时, 曲线逐渐趋于平缓. 根据式(10)~(11)

和预测结果式(12), 式(13), 得到合肥地区住宅建筑建材准备阶段能耗和碳排放的关系为:

$$QCR(i+1) = \frac{8.34 \exp(0.002(x_{i+1}-4))(1 - \exp(-0.017\Delta x_{i+1}))}{1 - \exp(-0.015\Delta x_{i+1})} \quad (15)$$

$$RQCR(i+1) = \frac{0.723 \exp(0.002(x_{i+1}-4))(1 - \exp(-0.017\Delta x_{i+1}))}{1 - \exp(-0.015\Delta x_{i+1})} \quad (16)$$

根据图 3 和图 4, 合肥地区住宅建筑建材准备阶段的能碳比(QCR)的大小在 9~12 之间, 即每利用 9~11 MJ 能量需要向环境排放 1 kgCO₂, 相对能碳比(RQCR)的预测值约为 0.82~0.84, 也即建材准备阶段的能碳比仅为标准煤燃烧能碳比的 82%~84%, 单位碳排放条件下的能源利用能力偏低, 究其原因可能是混凝土、金属型材等主要建筑材料的能碳比较低所导致.

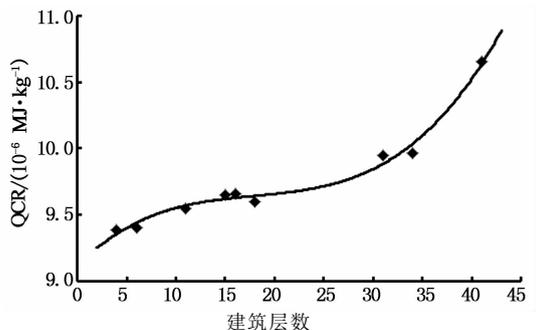


图 3 合肥地区住宅建筑建材准备阶段能碳比(QCR)分布

Fig. 3 Distribution of energy-carbon ratio (QCR) of energy residential buildings during the materials preparation stage in Hefei

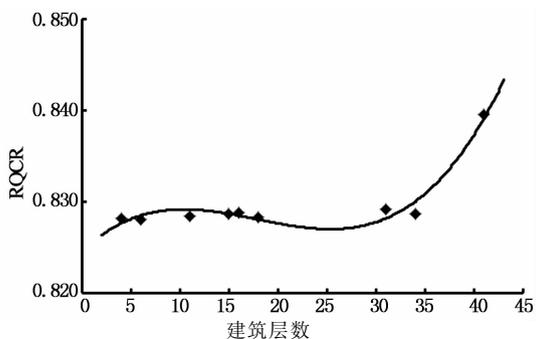


图 4 合肥地区住宅建筑建材准备阶段相对能碳比(RQCR)与建筑层数关系图

Fig. 4 Relationship on relative energy-carbon ratio (RQCR) with the layer numbers of residential buildings in Hefei during the materials preparation stage

4 总 结

应用非等间距灰色 GM(1,1)模型对合肥地区不同区域 14 栋 2009—2014 年间建设的住宅建筑建材准备阶段的能耗和碳排放进行分析,得到该地区以 4 层为起点的住宅建筑建材准备阶段能耗和碳排放的预测方法,通过后验差检验显示其具备足够的精度水平. 样本建筑单位碳排放条件下能源利用能力偏低,具有较大的提升空间. 该方法可应用于烂尾楼和空置房的研究,同时对于其它类型建筑的能源利用和环境影响的研究有一定参考价值.

参考文献

- [1] 高喜红. 建筑节能性能对建筑能耗及室内环境影响分析[J]. 建筑节能, 2014, 42(3): 79—83, 102.
GAO Xi-hong. Influence of architectural energy performance on energy consumption and indoor environment[J]. Building Energy Efficiency, 2014, 42(3): 79—83, 102. (In Chinese)
- [2] 仲平. 建筑生命周期能源消耗及其环境影响研究[D]. 成都: 四川大学建筑与环境学院, 2005: 16—20.
ZHONG Ping. Study of building life cycle energy use and relevant environmental impacts[D]. Chengdu: Sichuan University, College of Architecture and Environment, 2005: 16—20. (In Chinese)
- [3] 顾道金, 谷立静, 朱颖心, 等. 建筑建造与运行能耗的对比分析[J]. 暖通空调, 2007, 37(5): 58—60.
GU Dao-jin, GU Li-jing, ZHU Ying-xin, et al. Comparison between construction and operation energy consumption of buildings[J]. HV&AC, 2007, 37(5): 58—60. (In Chinese)
- [4] 黄志甲, 赵玲玲, 张婷, 等. 住宅建筑生命周期 CO₂ 排放的核算方法[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(S2): 103—105.
HUANG Zhi-jia, ZHAO Ling-ling, ZHANG Ting, et al. The assessment method of life-cycle CO₂ emission for residential buildings[J]. Journal of Civil Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(S2): 103—105. (In Chinese)
- [5] NIKLUATS K, SBEASTIAN M. Life cycle analysis of building environment [J]. Industry and Environment, 2004, 26(2): 17—21.
- [6] 马卓越. 基于灰色系统理论的公共建筑能耗预测[D]. 长沙: 湖南大学土木工程学院, 2014: 38—54.
MA Zhuo-yue. Public building energy consumption prediction based on grey system theory[D]. Changsha: Hunan University, College of Civil Engineering, 2014: 38—54. (In Chinese)
- [7] 曾荻. 我国民用建筑运行能耗预测方法及其应用研究[D]. 北京: 北京交通大学土木建筑工程学院, 2012: 70—76.
ZENG Di. The prediction method and Its application of civil building energy consumption in China[D]. Beijing: School of Civil Engineering Beijing Jiaotong University, 2012: 70—76. (In Chinese)
- [8] 郭俊杰. 空气源热泵热水装置优化分析与运行策略研究[D]. 上海: 上海交通大学机械与动力工程学院, 2013: 53—72.
GUO Jun-jie. Research on optimization and operation safety of air source heat pump water heater[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, School of Mechanical Engineering, 2013: 53—72. (In Chinese)
- [9] QING Yan -bai, CHANG Yan -bai, HONG Chang-ren, et al. The analysis of combined prediction model of building energy consumption with grey theory and RBF neural network[J]. Advanced Materials Research, 2011, (10): 90—93.
- [10] TSAI S B. Using grey models for forecasting China's growth trends in renewable energy consumption[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2015, 18(2): 1—9.
- [11] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京: 清华大学经济管理学院, 2004: 47—97.
GONG Zhi-qi. A quantitative method to the assessment of the life cycle embodied environmental profile of building materials [D]. Beijing: Tsinghua University, School of Economics and Management, 2004: 47—97. (In Chinese)
- [12] 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, 2004, 44(9): 1209—1213.
GONG Zhi-qi, ZHANG Zhi-hui. Quantitative assessment of the embodied environmental profile of building materials[J]. J Tsinghua Univ, 2004, 44(9): 1209—1213. (In Chinese)
- [13] 杨倩苗. 建筑产品的全生命周期环境影响定量评价[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2009: 90—114.
YANG Qian-miao. Quantificational life cycle assessment of environmental impact of construction productions[D]. Tianjin: Tianjin University, School of Civil Engineering, 2009: 90—114. (In Chinese)
- [14] 燕艳. 浙江省建筑全生命周期能耗和 CO₂ 排放评价研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2011: 26—45.
YAN Yan. Research of energy consumption and CO₂ emission of buildings in Zhejiang Province based on life cycle assessment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, School of Civil Engineering and Architecture, 2011: 26—45 (In Chinese)
- [15] 马岩, 曹磊, 周才华, 等. 典型化工产品生命周期环境影响评价研究——以水性涂料产品为例[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(11): 189—193.
MA Yan, CAO Lei, ZHOU Cai-hua, et al. Environmental impact assessment of typical chemical product using life cycle assessment-based on water-based paint[J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(11): 189—193. (In Chinese)
- [16] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011: 1—5.
National Bureau of Statistics of China Energy Statistics Division. China energy statistical yearbook 2011 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2011: 1—5. (In Chinese)
- [17] 涂华, 刘翠杰. 标准煤二氧化碳排放的计算[J]. 煤质技术, 2014, (2): 57—60.
TU Hua, LIU Cui-jie. Calculation of CO₂ emission of standard coal[J]. Coal Quality Technology, 2014, (2): 57—60. (In Chinese)