

城市住区低碳评价指标体系建构

高涛, 王建平, 刘晴

(中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 从城市住区的低碳评价的目标单一性、评价量化性等特点出发,对城市住区低碳评价体系的目标进行设计.确定规划设计阶段、施工(竣工验收)阶段和运行使用阶段作为进行城市住区评价的三个主要时期,同时选取住区生命周期、各阶段、各主要能源系统共计 10 个低碳评价对象,并设定相应的低碳指数作为评价指标.在对各个评价指标的分析中,确定各个评价对象碳排放的模拟预测值或实际值的计算方法,同时明确相应基准排放值的确定方法,完成相应低碳指标的计算.最后,以构建的基准值作为分界点,将相关评价对象的低碳评价分级划分成七个梯度.

关键词: 城市住区;碳排放;评价体系;低碳指数

中图分类号: X820.2; X321

文献标志码: A

联合国环境规划署(UNEP)于 2009 年发布的《建筑与气候变化》报告指出,在全球范围内,建筑消耗了全球能源的 40%左右,并造成了 30%左右碳排放.全球的所有建筑中,住宅建筑所占的比例占 60%以上,消耗的能源和产生的碳排放约占能源消耗总量和碳排放总量的 20%^[1]. 在我国的城镇住房的建设型式中,住区型式占有很大比例,新建的城市房屋建筑中约 60%是以住区型式建设的^[2],巨大的保有量和建设量意味着巨大的能源消耗和碳排放,使城市住区成为实现建筑领域节能减排、低碳发展的重要领域.如何对城市住区碳排放情况进行合理可靠的评价,是城市住区低碳发展研究中的重要问题.本文以城市住区为研究对象,构建城市住区低碳评价的方法和体系.

1 城市住区低碳评价指标框架的设计

城市住区低碳评价体系的要素包括低碳评价指标和评价标准.城市住区因所处环境不同,其能源资源消耗量及相应的标准也不同,在进行住区低碳评价时,应该根据城市住区所处地域环境等,设立不同的评价指标和基准.同时,住区因其建设规模、建筑类型、使用年限等不同,导致碳排放量也不大相同.所以,对城市住区相关评价对象进行低碳评价需要在相同的评价基准上进行.

文中选择各评价对象的单位面积年平均碳排放量作为相关评价对象低碳评价的基准,采用低碳指数作为评价指标进行相关低碳评价.即在三个不同的评价时期采用各个评价对象的模拟、预测或实际碳排放量与相应的评价标准进行比较,利用评价对象碳排放基准值与模拟、预测或实际碳排放量的差值与基准值的比值方式进行确定.城市住区低碳评价各对象的低碳指数 L 为

$$L = \frac{E_B - E_A}{E_B} \times 100\%.$$

式中: L 为住区低碳评价对象的低碳指数; E_A 和 E_B 分别为住区低碳评价对象单位面积年碳排放的模拟值(预测值或实际值)和基准值, $\text{kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$.

选取生命周期低碳指数、建材生产低碳指数、建设施工低碳指数、运行使用低碳指数、用水低碳指数、绿化固碳指数、用能低碳指数、采暖低碳指数、制冷低碳指数、照明低碳指数作为住区生命周期、各个阶段和各碳源碳汇系统的低碳评价指标.城市住区低碳评价体系评价时期及评价指标,如图 1 所示.

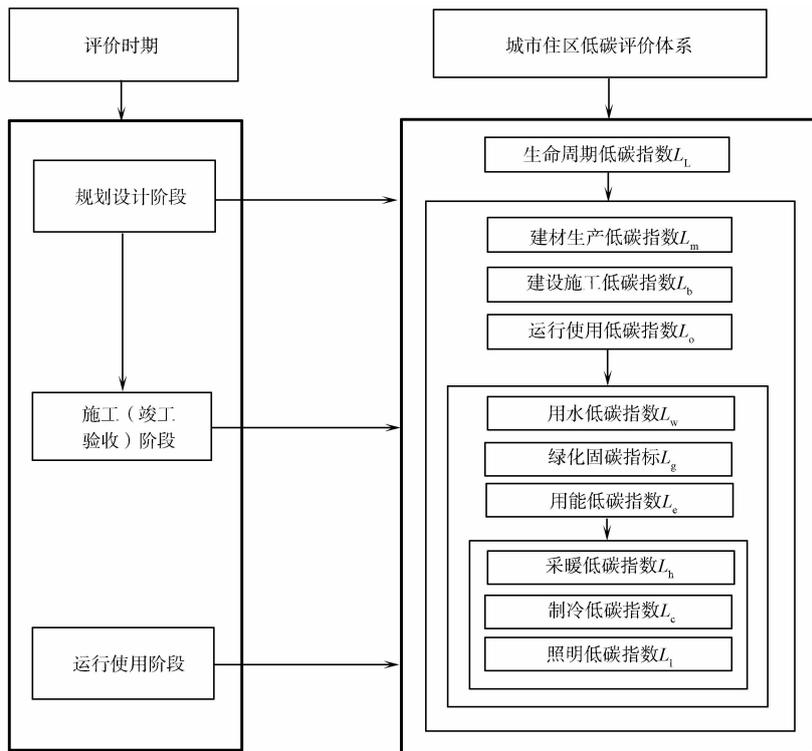


图 1 城市住区低碳评价体系评价时期及评价指标框架

Fig. 1 Evaluation period and evaluation index of urban residential district carbon evaluation system

2 城市住区生命周期碳排放分析

城市住区的碳排放包含在城市住区生命周期的各个阶段和各个功能系统中, 根据对城市住区评价指标分析, 作如下 4 个假定:

- 1) 生命周期碳排放主要由包括建材生产、建设施工和运营使用碳排放构成;
- 2) 运营使用碳排放主要包括给排水系统、用能系统和绿化系统固碳;
- 3) 给排水系统碳排主要包括给水系统和污水系统碳排放;
- 4) 用能系统碳排放主要包括采暖系统、制冷系统和照明系统碳排放。

由此可得城市住区生命周期、各阶段及个碳源碳汇系统单位建筑面积年碳排放量关系, 分别为

$$\begin{cases} E_L = E_m + E_b + E_o, & E_o = E_w + E_g + E_e, \\ E_w = E_s + E_d, & E_e = E_h + E_c + E_l. \end{cases}$$

式中: $E_L, E_m, E_b, E_o, E_w, E_g, E_e, E_s, E_d, E_h$ 和 E_c 分别为生命周期、建材生产、建设施工、运行使用、给排水系统、绿化固碳、用能系统、给水系统、污水系统、采暖系统和制冷系统的单位建筑面积年碳排放量, $\text{kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$ 。

3 城市住区施工低碳指数分析

3.1 建材生产低碳指数分析

建材碳排放量受建材生产厂家的制约, 不同的生产工艺和技术会造成建材生产碳排放量的不同, 即

$$L_m = \frac{\sum E_{m,B,i} - \sum E_{m,i}}{\sum E_{m,B,i}} = \frac{\sum W_i \times [f_{i,B}(1 - \alpha_i) + \alpha_i f_{i,B,r}] - \sum W_i \times [f_i(1 - \alpha_i) + \alpha_i f_{i,r}]}{A_0}$$

式中: $E_{m,B,i}, E_{m,i}$ 分别为第 i 种建材生产过程中碳排放量基准值和实际碳排放量, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; W_i 为住区

建筑第 i 种建材使用总量, kg ; $f_{i,B}, f_{i,B,r}$ 分别为第 i 种建材生产过程和回收过程中的碳排放因子基准值, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; α_i 为第 i 种建材的回收率, $\%$; $f_i, f_{i,r}$ 分别为第 i 种建材实际生产过程和回收过程中的碳排放因子, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; A_0 为住区建筑总面积, m^2 .

建材生产过程中, 碳排放系数可通过厂商提供的实际数据或由相关研究结论^[3-5]获得, 而建材生产碳排放基准值、回收率及再生产碳排放因子, 可参考《中国绿色地碳住区技术评估手册》^[6]和相关研究结论^[7-8]进行设定. 部分建材的生产碳排放因子基准值($f_{i,B}$)、回收率(α_i)及再生产碳排放因子(f_{re}), 如表 1, 2 所示.

表 1 部分建材的生产过程碳排放因子基准值

Tab. 1 Carbon emission factor benchmark value of some building materials during production process

建材	钢材	铝材	水泥	玻璃	混凝土 C30	混凝土 C35	混凝土 C40	加气混凝土砌块
$f_{i,B}/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.00	9.50	0.73	1.40	0.27	0.29	0.31	0.17

3.2 建设施工低碳指数分析

一般住区建筑施工的能源消耗中, 电力资源约占能源消耗总量的 75% 以上^[9-10]. 为实现对建筑施工能耗和碳排放的控制, 国内部分省市, 如上海, 江苏、湖南等地区均以电力消耗量为控制指标. 因此, 文中采用建设施工阶段由电力使用引起的碳排放量作为建设施工低碳指标 L_b 的评价措施, 即

$$L_b = \frac{E_{b,B} - E_c}{E_{b,B}} = \frac{Q_{b,B}f_b/(a \cdot A_0) - Q_b f_b/(a \cdot A_0)}{Q_{b,B}f_b/(a \cdot A_0)} = \frac{Q_{b,B} - Q_b}{Q_{b,B}}$$

式中: $E_{b,B}, E_b$ 分别为建设施工用电引起的单位建筑面积年碳排放量基准值和实际值; $Q_{b,B}, Q_b$ 分别为单位建筑面积建设施工用电量基准值和实际值, $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$; f_b 为电力能源碳排放因子, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$; a 为建筑使用年限, a .

对于建设施工用电引起的单位建筑面积年碳排放量基准值, 可以根据各地公布的建设施工能耗用电限制确定. 如, 湖南长沙规定的房屋建筑施工用电能耗为 $100 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{万元}^{-1}$, 根据中国统计年鉴查询长沙市 2014 年住宅平均造价约为 $2\,519 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-2}$, 由此确定长沙市住宅单位建筑面积建设施工用电量基准值约为 $25.19 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$.

4 运行阶段低碳指数分析

4.1 用水系统低碳指数分析

假设生活污水排水量和生活用水量相同的, 二者的基准值也相同, 故用水低碳指数可以用给水系统或污水系统碳排放量的模拟值和基准值计算. 以给水系统为例, 可得

$$L_w = \frac{(E_{s,B} + E_{d,B}) - (E_s + E_d)}{(E_{s,B} + E_{d,B})} \times 100\% = \frac{E_{s,B} - E_s}{E_{s,B}} \times 100\%$$

式中: L_s 为给水系统低碳指数; $E_{s,B}, E_s$ 分别为给水系统引起的单位建筑面积年碳排放量基准值和模拟值(或实际值); $E_{d,B}, E_d$ 分别为污水系统引起的单位建筑面积年碳排放量基准值和模拟值(或实际值).

由于生活中炊事、洗衣等用水量难以确定, 文中主要考虑洁具用水量及其污水排水量. 因此, 住区住宅给水和污水排水量分别为

$$W_s = W_d = \frac{Q_z n_z D_z}{1\,000 \cdot A_0}$$

式中: W_s, W_d 分别为单位建筑面积年生活用水的用水量和污水排水量, $\text{m}^3 \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$; Q_z 为各卫生器具日均用水量, $\text{L} \cdot (\text{人} \cdot \text{d})^{-1}$; n_z 为住区居住人数, 人 ; D_z 为年用水天数, 可取 $D_z = 365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$. 由此, 可以计算得出给水系统的单位面积年碳排放量为

$$E_s = W_s \times f_s$$

表 2 部分建材的回收率及再生产碳排放因子基准值

Tab. 2 Carbon emission factors of recovery rate and the benchmark value of reproduction of some building materials

参数	钢材	铝材	玻璃
$\alpha_i/\%$	95	95	80
$f_{re}/\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0.80	0.57	0.49

式中: W_s 为住宅单位面积年生活用水的用水量, $\text{m}^3 \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$; f_s 为给水系统的碳排放因子, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [6].

《建筑给水排水设计规范》中根据不同的建筑类别和卫生器具设置给出了不同的用水定额 $W_{s,B}$,由此可以计算出住宅建筑给水量基准值。需要注意的是,卫生器具用水约占建筑给水总量的 21% 左右[11]。所以,计算给水系统用水基准值时,需要按照此比例对相关规范和标准给出的基准值进行修正,即 $E_{s,B} = 0.21 \times W_{s,B} f_s$,此时,则有

$$L_w = \frac{E_{s,B} - E_s}{E_{s,B}} \times 100\% = \frac{0.21 \times W_{s,B} f_s - W_s f_s}{0.21 \times W_{s,B} f_s} \times 100\% = \frac{0.21 \times W_{s,B} - W_s}{0.21 \times W_{s,B}} \times 100\%.$$

4.2 绿化固碳指数分析

绿化是住区生命周期中重要的碳汇形式,可以调节空气湿度、滞留粉尘、提高住区环境质量。绿化固碳量及绿化固碳指数主要受绿化面积、绿植种类、栽种方式等因素影响[12-13],即有

$$L_g = \frac{S_g - S_{g,B}}{S_{g,B}} \times 100\%.$$

式中: $S_g, S_{g,B}$ 分别为住区单位建筑面积年绿化固碳量及其基准值, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

参考《中国绿色低碳住区技术评估手册》住区不同栽种方式植物 40 a 绿化固碳量,即

$$S_g = \frac{\sum S_i \cdot X_i}{40 \cdot A_0}.$$

式中: S_i 为不同栽种方式的植物面积, m^2 ; X_i 为单位面积不同栽种方式植物 40 a 的 CO_2 固定量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$.

我国《绿色建筑评价标准》中规定,住区的绿地率不得低于 30%,人均公共绿地面积不低于 1 m^2 。同时,根据《中国绿色低碳住区技术评估手册》,绿化 40 a 对 CO_2 的固定量基准值为 $600 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,即每年绿化对 CO_2 的固定量应为 $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。所以,住区单位建筑面积年绿化固碳量基准值为

$$S_{g,B} = 0.3 \times 15 \times S_0 / A_0 = 4.5 \times S_0 / A_0.$$

式中: S_0 为住区用地面积, m^2 .

4.3 用能低碳指数分析

4.3.1 采暖系统低碳指数分析 采暖系统是住区使用阶段中能耗和产生碳排放量较大的系统之一,尤其是严寒和寒冷地区。采暖系统能耗、碳排放量及低碳指数主要受住区所处的气候环境、住区建筑围护结构性能、采暖系统效率等因素影响,即有

$$L_h = \frac{E_{h,B} - E_h}{E_{h,B}} \times 100\% = \frac{Q_{h,B} f_{h,B} - Q_h f_h}{Q_{h,B} f_{h,B}} \times 100\%.$$

式中: $E_{h,B}, E_h$ 分别单位建筑面积年采暖系统碳排放基准值和模拟值(或实测值); $Q_{h,B}, Q_h$ 分别为单位建筑面积年采暖系统耗能量基准值和模拟值(或实测值), $\text{kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$; $f_{h,B}, f_h$ 分别为采暖系统能耗基准值和实际值所采用的能源碳排放因子, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

采暖系统能耗量主要受住区所处的气候环境、住区建筑围护结构的设计等因素影响,可以通过相关计算、软件模拟和实测确定采暖系统能耗的模拟值和实际值。结合相应能源的碳排放因子,可以得出采暖系统的单位面积年碳排放量。对于采暖系统能耗量基准值,可以根据国家和各省市地区颁布的针对不同气候区域的居住建筑节能设计规范等文件,如《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》等,选择规定的采暖系统能耗限值作为对不同地区采暖系统能耗量基准值。

4.3.2 制冷系统低碳指数分析 制冷系统也是住区能耗和碳排放量较大系统之一、尤其是南方地区。与采暖系统类似,制冷系统能耗、碳排放量及低碳指数主要受住区所处的气候环境、住区建筑围护结构性能、制冷系统效率等因素影响,即有

$$L_c = \frac{E_{c,B} - E_c}{E_{c,B}} \times 100\% = \frac{Q_{c,B} f_{c,b} - Q_c f_c}{Q_{c,B} f_{c,b}} \times 100\%.$$

式中: $E_{c,B}, E_c$ 分别为单位建筑面积年制冷系统碳排放基准值和模拟值(或实测值); $Q_{c,B}, Q_c$ 分别为单位建筑面积年制冷系统耗能量基准值和模拟值(或实测值), $\text{kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}$; $f_{c,b}, f_c$ 分别为制冷系统能耗

基准值和实际值所采用的能源碳排放因子, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

制冷系统能耗量也可以通过相关计算、软件模拟和实测确定制冷系统能耗的模拟值和实际值, 结合相应能源的碳排放因子, 可以得出制冷系统的单位面积年碳排放量. 与采暖系统不同, 在我国发布相关节能设计标准中对居住建筑制冷系统能耗量的基准值并未进行直接给出相关的规定. 其中:《严寒、寒冷地区居住建筑节能设计标准》将制冷系统的基准值设定忽略, 而《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》、《夏热冬暖地区居住建筑节能设计标准》则均提出建立与拟评价居住建筑完全相同, 并符合节能设计标准相关要求的参考建筑模型. 通过计算或计算机模拟等手段确定参考建筑的空调制冷耗电量, 此时的耗电量即为住宅空调制冷耗能量的基准值.

4.3.3 照明系统低碳指数分析 照明系统的能耗、碳排放及其低碳指数, 主要受到灯具的功率、光通、流明等性能影响^[14], 则有

$$L_1 = \frac{E_{1,B} - E_1}{E_{1,B}} \times 100\%.$$

式中: L_1 为照明系统低碳指数; E_1 为单位面积照明系统年碳排放量模拟值或实测值; $E_{1,B}$ 为单位面积照明系统年碳排放量基准值.

由 GB 50034-2004《建筑照明设计标准》并结合相应的碳排放因子, 可以计算得出照明系统的单位面积年碳排放量为

$$E_1 = 365 \times 10^{-3} \times n \cdot \text{LPD} \times f_1.$$

式中: n 为每日照明时间, h; LPD 为照明功率密度, $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$; f_1 为电力碳排放因子, $\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$.

GB 50034-2004《建筑照明设计标准》中, 将居住建筑照明功率密度目标值设定为 $6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. 因此, 在满足照度标准值的前提下, 假设照明时间 $n = 8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$, 电力碳排放因子为 $f = 0.81 \text{ kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, 则照明系统单位面积年碳排放量基准值为

$$E_{1,B} = 0.81 \times (8 \times 6 \times 365 \times 10^{-3}) = 0.81 \times 17.52 = 14.25 \text{ kg} \cdot (\text{a} \cdot \text{m}^2)^{-1}.$$

通过对采暖系统、制冷系统和照明系统碳排放量的分析, 用能低碳指数可以通过这三个系统的碳排放总量与三个系统碳排放量的基准值总量进行比较获得. 因此, 用能低碳指数为

$$L_e = \frac{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B}) - (E_h + E_c + E_1)}{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B})} \times 100\%.$$

同样的, 通过对用水系统、用能系统和绿化系统的碳排放和固碳情况分析, 运行阶段低碳指数可以通过采暖系统碳排放、制冷系统碳排放、照明系统碳排放、给排水系统碳排放, 绿化固碳量与相应的基准值总量进行比较获得. 因此, 用能低碳指数为

$$L_o = \frac{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B}) - (E_h + E_c + E_1 + E_s + E_d - S_g)}{(E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B})} \times 100\%.$$

5 城市住区生命周期低碳指数分析

通过对住区建材生产、建设施工和运行使用碳排放情况的分析, 给出了住区相关阶段和相关系统的碳排放模拟值、实际值, 以及住区相关阶段和相关系统碳排放基准值的确定方法. 由此进一步可以得出城市住区生命周期低碳指数为

$$L_L = \left(1 - \frac{\sum E_{m,i} + E_b + E_h + E_c + E_1 + E_s + E_d - S_g}{\sum E_{m,B,i} + E_{c,B} + E_{h,B} + E_{c,B} + E_{1,B} + E_{s,B} + E_{d,B} - S_{g,B}} \right) \times 100\%.$$

6 城市住区低碳评价结果的应用

在对住区生命周期、各阶段及各主要能耗系统等对象碳排放情况的进行分析评价, 得到确定结果后, 可以对结果经过分级控制或达标控制来对城市住区的低碳程度进行认证. 分级范围或是达标与否, 无法通过评价体系自身界定, 必须经由评价体系设计者决定.

由于城市住区的低碳评价对象众多, 需要根据不同情况对评价对象设置不同评级标准. 文中采用分

级方式直观地反映住区各评价对象的低碳程度,将不同评价对象的低碳等级分为差级($L < -30\%$)、较差($-30\% \leq L < -15\%$)、次级($-15\% \leq L < -5\%$)、合格($-5\% \leq L \leq 5\%$)、良好($5\% < L \leq 15\%$)、优良($15\% < L \leq 30\%$)、优秀($L > 30\%$)共7个梯度,简洁直观地表现评价对象的低碳程度。

目前国内关于城市住区低碳评价的相关研究较少,文中构建的城市住区低碳评价体系还是一个初步的框架。对于该评价体系未来的发展与应用,可考虑将相关的评价对象进一步扩展,使城市住区低碳评价进一步完善。同时,可以考虑将该评价体系与城市住区的绿色、生态、可持续等评价体系结合,促进城市住区实现低碳、绿色、可持续发展。

参考文献:

- [1] 中国城市科学研究会. 绿色建筑(2010)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:3-4.
- [2] 王静. 城市建筑绿色评估体系的应用与优化[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:16-17.
- [3] 罗智星,杨柳,刘加平,等. 建筑材料 CO₂ 排放计算方法及其减排策略研究[J]. 建筑科学,2011,27(4):1-8.
- [4] 张涛,姜裕华,黄有亮,等. 建筑中常用的能源与材料的碳排放因子[J]. 中国建设信息,2010(23):58-59.
- [5] 张涛,吴佳洁,乐云. 建筑材料全寿命期 CO₂ 排放量计算方法[J]. 工程管理学报,2012,26(1):23-26.
- [6] 聂梅生,秦佑国,江亿. 中国绿色低碳住区低碳技术评估手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:78-79.
- [7] 李兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012:138-139.
- [8] 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,2011:44-45.
- [9] 鲍安红,彭力. 重庆高层住宅建筑施工用电控制指标研究[J]. 西南大学学报:自然科学版,2014,36(4):169-172.
- [10] 孙邦君,连健. 建筑施工现场用电量及其节能潜力分析[J]. 建筑电气,2011(2):47-51.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50555-2010 民用建筑节能设计标准[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010:8-9.
- [12] 宋华伟,丰剑利. 绿色住宅的固碳技术与应用[J]. 华中建筑,2011(6):77-79.
- [13] 郭新想. 居住区绿化植物固碳能力评价方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2010:10.
- [14] 史典阳,黄晖,任艳,等. 三种电光源生命周期环境影响分析[J]. 照明工程学报,2014,25(5):120-123.

Study on Low Carbon Evaluation Index System of Urban Residential District

GAO Tao, WANG Jin-ping, LIU Qing

(School of Mechanical and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Based on the characteristics of single goal, quantization of low-carbon evaluation of urban residential district, goals of low carbon evaluation system was designed. The planning and design stage, construction (final acceptance) stage and the operational stage are selected as three major evaluate stages of urban residential district evaluation system. Meanwhile, select life cycle, each stage, the main energy system etc. are selected as 10 evaluate object, and set the appropriate low-carbon index is set for them. The method of simulation value and actual value of carbon emissions of each object is built, and each low carbon index is calculated. Based on the cut-off point established, the low carbon evaluation is divided to seven gradients.

Keywords: urban residential district; carbon emissions; evaluation system; low-carbon index

(责任编辑:黄仲一 英文审校:方德平)