

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.04.012



# 基于支付意愿法的建筑物化环境影响量化研究

朱建君<sup>1</sup>, 陈雪艳<sup>1</sup>, 王栋华<sup>1</sup>, 左剑<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 南京 210037;

2. 阿德莱德大学 自然与建筑环境学院, 澳大利亚 阿德莱德 5005)

**摘要:**以建筑的物化环境影响分析为出发点,对该过程所消耗的资源、能源及有毒物质所造成的环境影响进行定量研究。论文界定了建筑物化环境影响内涵,根据国际环境毒理和化学学会环境影响评价体系确定12种环境影响要素,依据BEES (Building for Environment and Economic Sustainability)软件计算出建筑全生命周期的环境影响清单,基于支付意愿理论构建了建筑物化环境影响量化模型,并确定江苏地区各环境影响要素的货币值。最后,计算出江苏省某住宅建筑单位面积上环境影响货币值。

**关键词:**环境影响;物化环境影响;建筑材料;支付意愿理论;BEES

**中图分类号:**TU023 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)04-0072-06

## Quantitative analysis on the embodied environmental impact of buildings based on WTP

Jianjun Zhu<sup>1</sup>, Xueyan Chen<sup>1</sup>, Donghua Wang<sup>1</sup>, Jian Zuo<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, P. R. China;

2. School of Architecture and Built Environment, the University of Adelaide, Adelaide 5005, Australia)

**Abstract:** The embodied environmental impact of buildings, and environmental impacts caused by a large amount of resources, energy and toxic substance during this process was analyzed. The connotation of the embodied environmental impact of buildings was defined. According to the international Society for Environmental Toxicology and Chemistry, twelve factors of environmental impact were determined. The building environmental impact list in the full life cycle was calculated from the BEES (Building for Environment and Economic Sustainability). The value of environmental factors in Jiangsu province was obtained by the Willingness-To-Pay in Environmental Economics. Finally, combined with a residential building in Jiangsu province, society WTP for the environmental impact was figured out.

**Keywords:** environmental impact; embodied environmental impact; building materials; willingness-to-pay; BEES

随着中国现代化和城市化的不断发展,环境污染和能源消耗的问题日益严重。据国家统计局数

据,中国2014年建筑业房屋施工面积已达1 249 826.35万m<sup>2</sup>,这不仅消耗大量的能源,同时也

收稿日期:2016-03-17

基金项目:江苏省建设系统科技项目(2012JH03)

作者简介:朱建君(1969-),女,教授,博士,主要从事绿色建筑研究,(E-mail)jjzhu@njfu.edu.cn.

Received:2016-03-17

Foundation item:Jiangsu Construction Science & Technology Program(No. 2012JH03)

Author brief:Zhu Jianjun(1969-), professor, PhD, main research interest: green building, (E-mail)jjzhu@njfu.edu.cn.

产生大量的温室气体、氮氧化物和粉尘等,其中建筑材料的影响占有很大的比重<sup>[1-2]</sup>,所以,对建筑的物化环境影响的研究至关重要。以往对于建筑物化环境影响的研究,多以碳排放作为衡量标准。黄一如等<sup>[3]</sup>讨论了物化阶段的碳排放对总体碳排放的重要性,罗智星等<sup>[4]</sup>构建了办公建筑物化阶段 CO<sub>2</sub> 排放的计算模型。刘毅等<sup>[5]</sup>综合运用生命周期评价和情景分析方法,从能源消耗、用水量和氮氧化物排放量等6个环境影响要素研究了中国城镇住宅的物化环境影响。目前常用的环境影响量化的方法有目标距离法、货币化法和专家打分法<sup>[6]</sup>,其中目标距离法一般只考虑生态系统的破坏,专家打分法操作方便但不确定性较大,货币化法即支付意愿法可以将环境影响与经济影响相结合。肖君等<sup>[7]</sup>运用支付意愿法着重研究了建筑保温板的使用和失效阶段的环境影响。笔者在对建筑的物化环境影响进行分析时,运用了支付意愿理论来确定江苏省各环境影响要素的货币值,从 BEES 软件中获得环境影响要素的影响潜值,得出对于建筑物化环境影响的社会支付意愿。

## 1 建筑物化环境影响要素分析

### 1.1 建筑物化环境影响的概念界定

建筑的全生命周期包括决策阶段、规划与设计阶段、施工阶段、使用阶段以及拆除回收阶段。设计阶段决定了建筑物所有材料的组成;施工阶段是建筑规划、设计实现的过程,在这个过程中会消耗大量的资源和能源;使用阶段也就是建筑的运营与维护阶段,这个阶段主要包括建筑运营时,采暖、空调、热水供应、燃气生产和供应、照明等设备的能耗,以及建筑维护时的维护、翻修和设备更换过程中涉及到的资源、能源的消耗<sup>[8-9]</sup>。拆除与回收阶段则涉及到建筑物解体拆除,废旧建筑材料的运输、处理、再利用和无用废弃建筑材料的处理<sup>[10]</sup>。

从生命周期评估(Life Cycle Assessment, 即 LCA)角度,构成建筑设计的所有材料经历了从材料与构建生产(含原材料的开采)、规划与设计、建造与运输、运行与维护直到拆除与处理(废弃、再循环和再利用等)的全循环过程。

建筑的物化环境影响考虑的是建筑设计阶段,构成建筑设计的所有材料,基于 LCA 角度,从原材

料的生产开始,经历中间产品的生产、材料的运输、材料在建筑的使用阶段以及最后材料的拆除回收阶段对环境产生的直接或间接的影响。

### 2.2 环境影响要素确定

国际环境毒理和化学学会(Society Environmental Toxicology and Chemistry, 即 SETAC)环境影响评价体系和美国标准和技术研究院共同开发的 BEES(Building for Environment and Economic Sustainability)软件确定出了12种环境影响要素,即为全球变暖、臭氧层破坏、酸化(雨)、水体富营养化、化石能源消耗、水资源消耗、标准空气污染、光化学烟雾、生态毒性、人类健康、室内空气质量以及动植物生存地改变。这12类环境影响要素几乎包括了建筑对环境所造成的所有可能影响,并且所涉及的数据也较为容易获取,所以,本文在对建筑物化环境影响进行研究时,就从这12个方面展开。BEES软件是美国标准和技术研究院开发的,是一种建筑的环境及经济可持续性综合评价的软件,并且受到了美国环境保护协会和美国政府的支持。从2002年发布 BEES1.0 版本以来,软件一直在更新功能和数据库,并对评价框架和环境影响指标都加以改进,设计了建设项目中结构材料、室内外装饰材料、墙体填充材料等各方面的230多种材料,可以全面地对建设项目的各种材料进行环境影响评价。

## 2 基于支付意愿法的建筑物化环境影响量化模型构建

### 2.1 环境影响要素潜力系数的确定

每个环境影响要素中的污染物质的潜力系数与该污染物的污染能力和排放总量有关,每一类环境影响中造成一种环境影响污染物种类很多,但是由于统计局数据的局限,本文对每一类环境影响只选取几种典型的污染物,如酸化只选择 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、NH<sub>3</sub>。每类环境影响要素中污染物质的影响潜力系数计算方法如下:

$$e_{ij} = \frac{f_{ij} \cdot a_{ij}}{\sum_j (f_{ij} \cdot a_{ij})} \quad (i, j = 1, 2, 3 \dots) \quad (1)$$

式中: $e_{ij}$ 为第*i*类环境影响因素的第*j*种污染物质的影响潜力系数, $f_{ij}$ 为第*i*类环境影响因素的第*j*种污染物质的单位影响潜力, $a_{ij}$ 为第*i*类环境影响因

素的第  $j$  种污染物质的年均排放量。

## 2.2 基于支付意愿法的环境影响要素的货币化计算

### 2.2.1 支付意愿法

支付意愿是指消费者接受一定数量的消费物品或劳务所愿意支付的金额。在环境质量公共物品的需求分析和环境经济影响评价中支付意愿被广泛应用。根据边际效用递减规律,消费者在一定收入水平下,对享有环境质量的边际支付意愿也符合递减规律。支付意愿法(Willingness-To-Pay,即 WTP)的理论基础是各个环境影响要素间的轻重程度可用货币来衡量,赋予了环境评价以经济意义。社会支付意愿对于环境影响而言,体现在降低当前环境污染水平而付出的代价上,因此,针对污染者和资源开采者的环境税在一定程度上反映了社会支付意愿,可以作为衡量各个环境影响的货币因子。中国在 2003 年出台的《排污费征收使用管理条例》,规定直接向环境排放污染物的单位和个人工商户应当依照本条例缴纳排污费;而排污费应当全部专项用于环境污染防治,任何单位和个人不得截留、挤占或者挪作他用<sup>[9]</sup>,这体现了中国社会对环境污染的支付意愿。最新的环境税方案已于 2013 年 12 月 2 日上报至国务院,正在按程序审核中。就目前来说,在确定中国社会对环境污染的支付意愿时,可以将环境税通过社会折现率折算出来。比如,根据《排污费征收使用管理条例》,每排放 1 kg SO<sub>2</sub> 需要征收 0.63 元排污费(每 1.11 kg 的 SO<sub>2</sub> 为 1 污染当量,收费标准为 0.7 元/1.11 kg),再将 0.63 元通过 8%<sup>[12]</sup> 的社会折现率折算到进行环境影响量化的当量,即获得 SO<sub>2</sub> 的货币因子。

2.2.2 环境影响货币化计算 把对环境影响转换成货币,是一个相对的概念,是每一个环境影响要素的不同侧面的重要程度的定量分配,对各环境影响要素对环境的影响的作用进行区别对待。每一类的环境影响都是由多种污染物共同作用产生的,因此,一个影响要素的货币值是指该类别中所有污染物质的环境税税率的加权平均值。每类环境影响要素的货币值计算方法如下:

$$m_i = \sum (e_{ij} \cdot c_{ij}) \quad (2)$$

式中: $m_i$  为第  $i$  类环境影响要素的货币值, $c_{ij}$  即为第  $i$  类环境影响因素的第  $j$  种污染物质的货币因子, $e_{ij}$  为第  $i$  类环境影响因素的第  $j$  种污染物质的影响潜力系数。

## 2.3 基于 BEES 软件的环境影响清单计算

BEES 软件在选定一种建筑材料并确定运距之后,便可以得到该种材料在全寿命周期中的环境影响清单,即在原材料的获取(Raw Materials)、制品(Manufacturing)、运输(Transportation)、使用(Use)和废弃回收(End of Life)这 5 个阶段上对各个环境影响清单,再分别将每一种材料在 5 个阶段的各类环境影响清单汇总,得到一个建筑的总体环境影响清单,计算方法为

$$r_{ik} = R_{ik} + M_{ik} + T_{ik} + U_{ik} + E_{ik} \quad (3)$$

$$r_i = \sum_k r_{ik} \quad (4)$$

式中: $r_i$  是 BEES 软件中输出的第  $i$  类环境影响要素的环境影响清单, $r_{ik}$  是指第  $k$  种建筑材料在第  $i$  类环境影响要素的全寿命周期中的环境影响清单, $R_{ik}$ 、 $M_{ik}$ 、 $T_{ik}$ 、 $U_{ik}$ 、 $E_{ik}$  分别是第  $k$  种建筑材料在第  $i$  类环境影响要素中原材料这 5 个阶段中的环境影响清单。

## 2.4 建筑的物化环境影响量化模型

不同的建筑所使用的材料和材料的使用量都不相同,可以通过 BEES 软件中获得建筑物化阶段在各个环境影响要素上的影响清单,最后就可得到建筑单位面积上的社会为了弥补对环境产生的影响愿意支付的金额,如式(5):

$$M = \frac{\sum \left\{ \sum \left[ \frac{f_{ij} \cdot a_{ij}}{\sum (f_{ij} \cdot a_{ij})} \right] \cdot c_{ij} \right\} \cdot r_i}{s} \quad (5)$$

( $i, j = 1, 2, 3, \dots$ )

式中: $M$  为单位面积上社会为了弥补对环境产生的影响愿意支付的金额, $r_i$  是 BEES 软件中输出的第  $i$  类环境影响要素的环境影响清单, $s$  为建筑的建筑面积。

## 3 建筑物化环境影响量化计算案例分析

### 3.1 环境影响要素货币化计算

#### 1) 全球性环境影响要素货币化计算

全球气候变暖与臭氧层破坏都是全球性的环境影响要素,中国在这些环境影响下所产生的经济损失或者是为了治理这些环境破坏所投入的金钱可以看做是中国的支付意愿。全球气候变暖对中国经济造成的影响的准确数值很难获得,因全球变暖对中

国经济的损失约占中国当年 GDP 的 4.7%<sup>[6]</sup>,所以本文按照其设定的气候变暖占 GDP 的比例 4.7%,以 2014 年为基准年,按不变价格计算,2011—2014 年气候变暖对中国经济造成的损失约为 26 348 亿元人民币,中国这 4 年 CO<sub>2</sub> 的年均排放量约为 93 763 亿 t<sup>[14]</sup>,每当量 kg CO<sub>2</sub> 损失为 0.28 元。

氟氯烃物质(CFC s)是造成臭氧层损耗的主要污染物质,发展中国家排放的 CFC s 占全球 CFC 消耗的 83%。根据统计,截至 2014 年,中国先后一共投入了 202 074 170 美元,对 123 个项目的臭氧层消耗物质进行削减,共计削减 115 564.77 t ODS<sup>[15]</sup>,即中国社会愿意支付相应的金钱以避免臭氧层损耗的发生,通过计算可得中国针对每 ODP kg 的 ODS,投入了 16.24 元人民币(以 2014 年汇率为准),此为臭氧层损耗影响要素的货币值。

2)江苏省环境影响要素货币化计算

引起酸化(雨)的主要污染物有 SO<sub>2</sub>、氮氧化物和氮氨等,根据国家统计局、江苏省统计局以及 EPS 数据平台的数据算出江苏省 2011 年至 2014 年的年均排放量(见表 1),运用支付意愿法计算得到江苏省酸化环境影响要素的货币值为 1.71 元/kg(SO<sub>2</sub> 当量)。

表 1 酸化环境影响要素的货币值

Table 1 Society WTP for the environmental impact of acidification

污染物	酸化潜力 <sup>[13]</sup> (SO <sub>2</sub> 当量) f/ (kg · kg <sup>-1</sup> )	年均排 放量 <sup>[14-16]</sup> a/ (kt · a <sup>-1</sup> )	影响潜 力系数 e	货币因子 <sup>[11]</sup> (SO <sub>2</sub> 当量) c/ (元 · kg <sup>-1</sup> )
SO <sub>2</sub>	1.00	973.05	0.44	1.590
NO <sub>x</sub>	0.70	1 396.49	0.44	2.270
NH <sub>3</sub>	1.88	150.05	0.12	0.088

酸化(雨)、水体富营养化、化石能源消耗、水资源消耗、标准空气污染、光化学烟雾、生态毒性、室内空气质量和人类健康根据公式(1)和(2)得出,本文不赘述。

动植物生存地改变影响是指由于人类占用土地对受威胁和濒危物种的影响。2014 年江苏省财政安排生态补偿资金 15 亿元,但并不能从中分离出对动植物栖息地改变做出的投入,本文中也暂且将这一类环境影响要素的货币值设为 0 元。

3)环境影响要素货币化计算汇总表

将这 12 类影响因素的货币值汇总得到表 2。

表 2 江苏省建筑物化环境影响货币化汇总

Table 2 Summary of the society WTP for Embodied environmental impact of building in Jiangsu Province

环境影 响要素	全球气 变暖/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	酸化/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	水体富 营养化/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	化石能 源消耗/ (元 · t <sup>-1</sup> )	室内空 气质量/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	动植物 栖息地 改变/元	水资源 消耗/ (元 · m <sup>-3</sup> )	标准空 气污染/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	光化学 烟雾/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	生态毒 性/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	臭氧层 破坏/ (元 · kg <sup>-1</sup> )	人类 健康/ (元 · kg <sup>-1</sup> )
货币值	0.28	1.71	1.71	5.73	11.64	0	1.39	0.69	8.75	13.25	16.24	11.42

3.2 工程概况

所采用的案例是江苏某项目的一栋住宅楼。该工程地点位于该项目所在地的新城区之中,为民用住宅项目。工程结构类型为框架剪力墙结构,基础类型为筏板基础,结构抗震等级为三级。地下一层,地上九层,层高 2.9 m,建筑檐高 26.1 m。总建筑面积为 4 890.06 m<sup>2</sup>,其中,地上建筑面积 4 379.18 m<sup>2</sup>,地下建筑面积 510.88 m<sup>2</sup>,该项目所消耗的主要材料如表 3 所示。其中,主要楼地面做法中,电梯、公共走道、入户大堂和楼梯间是铺设快料楼地面,水泥浆一道,20 mm 厚 1:3 干硬性水泥砂

浆结合层,撒素水泥浆面,10 mm 厚地砖并用水泥浆擦缝;在客厅、卧室、书房、餐厅等部位刷素水泥浆一道,并用 20 mm 厚 1:2.5 水泥砂浆找平抹光。在主要墙面的做法中,一层楼梯间前室和一层电梯厅采用素水泥浆(或界面剂)一道,12 mm 厚 1:1:6 混合砂浆打底扫毛或划出纹道,5 mm 厚 1:0.3:3 混合砂浆结合层,8 mm 釉面瓷砖以及白水泥擦缝;在客厅、卧室、书房和餐厅部位刷素水泥浆一道,12 mm 厚 1:1:6 水泥石灰膏砂浆打底,5 mm 厚 1:0.3:3 水泥石灰膏砂浆粉面,白水泥批腻子二度。

表 3 江苏某民用住宅楼主要建筑材料用量

Table 3 The amount of main materials used in a residential building in Jiangsu Province

材料名称	用量
钢筋混凝土梁 C25	80.56 m <sup>3</sup>
钢筋混凝土梁 C30	17.63 m <sup>3</sup>
钢筋混凝土板 C30	469.58 m <sup>3</sup>
钢筋混凝土墙 C30	68.00 m <sup>3</sup>
钢筋混凝土柱 C25	130.11 m <sup>3</sup>
水泥砂浆	1 287.973 t
聚合物砂浆	13 928.04 kg
加气砼块 600 mm×240 mm×150 mm	20 375.241 块
同质地砖	779.246 m <sup>2</sup>
超细玻璃棉	228.806 m <sup>2</sup>
复合木模板	3 290.867 m <sup>2</sup>
乳胶漆	726.975 kg
水泥基渗透结晶防水材料	1 678.545 kg
生石灰	3.837 5 t
滑石粉	6 192.001 3 kg
FWB 聚苯乙烯挤塑板	25.032 8 m <sup>3</sup>
XPS 聚苯乙烯挤塑板	88.512 6 m <sup>3</sup>

### 3.3 BEES 软件的应用

BEES 软件导出的数据即为每种材料在原材料获取、制品和施工、运输、使用和废弃过程中的 12 类

环境影响清单。根据该工程的工程量清单数据以及相关资料,并设定材料的运输距离为 300 km。以钢筋混凝土梁为例,首先在 BEES 软件中选择对应强度等级以及种类的混凝土材料进行计算,如 C30 的普硅水泥钢筋混凝土梁就是相当于软件中 5KSI 普硅水泥钢筋混凝土梁,随后设定好运距,即上文统一规定的 300 km,最后所输出的就是 0.028 3 m<sup>3</sup> 的环境影响清单。最后根据工程量,经计算得出该工程中钢筋混凝土梁的各生命周期阶段的环境影响潜值总量,结果如表 4 所示。

虽然在钢筋混凝土梁中生产、使用及废弃阶段对环境的影响都为 0,但这并不意味着所有的材料在这些阶段对环境没有影响,所以,每一种材料都要在 BEES 软件中分别完成环境影响潜值计算。然后再按各环境影响要素的货币值及公式计算,就得到了该工程社会要支付相应的货币来弥补这个过程中所造成的环境损失,详见表 5,合计为 5 009 605.45 元,最后得出对于这栋住宅楼社会愿意支付 1 143.96 元/m<sup>2</sup> 来弥补其的物化环境影响。

表 4 钢筋混凝土梁的各生命周期阶段环境影响清单

Table 4 The environmental impact list of reinforced concrete beam in the full life cycle

环境影 响要素	全球变暖 CO <sub>2</sub> /g	酸化 (H <sup>+</sup> )/mg	富营养化 (N)/g	化石燃料 消耗(MJ)	室内空 气质量 (VOC)/g	动植物生 存地改变 (T&E)	水资源 消耗/L	标准空 气污染 (micro DALY)	光化学烟 雾(NO <sub>x</sub> )/g	生态毒性 (2,4-D)/g	臭氧层 破坏 (CFG-11)/g	人类健康 (C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )/g
Raw Materials	38 619 267.858 7	10 452 053.731 5	9 555.207 2	22 172.597 8	0.000 0	0.000 0	54 615.813 1	10 921.740 3	183 522.786 0	283 228.788 7	284.457 4	7 886 980 559.977 7
Manufacturing	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
Transportation	5 421 471.402 0	1 799 841.080 3	1 828.776 4	9 384.248 3	0.000 0	0.000 0	0.000 0	253.451 5	49 246.396 0	7 050.560 1	0.000 0	1 793 386.173 9
Use	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
End of Life	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0

表 5 各类环境影响要素货币值总计

Table 5 Monetary value of all kinds of environmental impact factors

环境影响要素	各材料环境影响潜值总量	货币值	货币值总计
全球变暖	841 681 154.863 4 (g CO <sub>2</sub> )	0.28 元/kg	235 670.722
酸化	296 371 027.963 4 (mg H <sup>+</sup> )	1.71 元/kg	7.917 3
富营养化	5 233 749.245 1 (g N)	1.71 元/kg	8 949.712 5
化石燃料消耗	853 569.777 2 (MJ)	5.73 元/t	166 892.610 3
室内空气质量	15 101.305 9 (g VOC)	11.64 元/kg	175.764
动植物生存地改变	0.000 0 (T&E)	0.0 元	0.0
水资源消耗	2 780 985.538 2 (L)	1.39 元/m <sup>3</sup>	3 865.576 1
标准空气污染	235 315.890 9 (micro DALY)	0.69 元/kg	162.370 8
光化学烟雾	4 718 590.550 3 (g NO <sub>x</sub> )	8.75 元/kg	41 287.662 5
生态毒性	9 468 108.247 2 (g 2,4-D)	13.25 元/kg	125 452.457 5
臭氧层破坏	923.109 2 (g CFG-11)	16.24 元/kg	14.940 8
人类健康	120 053 230 396.123 0 (g C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> )	11.42 元/kg	4 427 125.715
	合计		5 009 605.45

## 4 结 论

基于国际环境毒理和化学学会(SETAC)环境影响评价体系中12类环境影响要素进行分析,统计江苏省的污染物排放量,并且使用支付意愿法计算得到各种适应江苏实情的环境影响要素的权重。最后,结合了江苏某住宅楼这一案例,经计算得出社会在该工程建设过程中所愿意支付的金额来弥补对环境产生的影响,把建筑的物化环境影响进行了货币化,这一货币值可以看出所使用的材料是否环保,得出环境的损失值,可为决策者在经济与环境进行选择时提供一个更为可靠的决策依据,也为绿色建筑的发展提供理论支持。但是,本文还是存在一些不足的,在对于动植物生存地改变这类环境影响的货币化上,还有待国家出台相关政策之后再进一步量化。另外,BEES软件中虽然包括了两百多种建筑材料,但是还不能对建筑材料进行全面覆盖,并且中美两国在建筑材料上还是存在差异的,所以,在中国研发出本国的建筑材料全寿命周期环境影响的软件之后,其结果可以更加精确。

### 参考文献:

- [1] ONDOVA M, ESTOKOVA A. Environmental impact assessment of building foundation in masonry family houses related to the total used building materials[J]. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 2016;35(4):1113-1120.
- [2] YIN Z Q, SHANG C J, CHU C L, et al. Analysis of the embodied environmental impact of building project based on the ecological footprint [C]// ICCREM 2014: Smart Construction and Management in the Context of New Technology-Proceedings of the 2014 International Conference on Construction and Real Estate Management, 2014:442-448.
- [3] 黄一如,张磊.产业化住宅物化阶段碳排放研究[J]. *建筑学报*, 2012(8):100-103.  
HUANG Y R, ZHANG L. Carbon emission in the materialization stage of housing industrialization [J]. *Architectural Journal*, 2012(8):100-103. (in Chinese)
- [4] 罗智星,杨柳,刘加平.办公建筑物化阶段 CO<sub>2</sub> 排放研究[J]. *土木建筑与环境工程*, 2014,36(5):37-43.  
LUO Z X, YANG L, LIU J P. Carbon dioxide emissions of office building at embodied stage[J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2014,36(5):37-43. (in Chinese)
- [5] 刘毅,何小赛.基于生命周期分析的中国城镇住宅物化环境影响评价[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2015,55(1):74-79.
- LIU Y; HE X S. Embodied environmental impact assessments of urban residential buildings in China based on life cycle analyses[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2015, 55(1):74-79. (in Chinese)
- [6] 吴星,张智慧,肖厚忠.北京市多层住宅建筑的物化环境影响研究[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2005,45(6):121-125.  
WU X, ZHANG Z H, XIAO H Z. Environmental impact of multi-story residential buildings in Beijing[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, 45(6):121-125. (in Chinese)
- [7] 肖君,赵平,刘睿劼.建筑保温板生命周期环境影响研究[J]. *安全与环境学报*, 2013,13(2):138-141.  
XIAO J, ZHAO P, LIU R J. Influence of the exterior insulating building board on the environment health from the point of view of its life circle [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2013,13(2):138-141. (in Chinese)
- [8] 吴晓红,杨祖贵,李颖谦.基于全生命周期的建筑节能研究[J]. *建筑节能*, 2011,34(10):75-77.  
WU X H, YANG Z G, LI Y Q. Building energy-saving research based on life cycle [J]. *Building Energy Efficiency*, 2011,34(10):75-77. (in Chinese)
- [9] 陈力莅,丁太威,耿化民.低碳建筑全生命周期碳排放影响因素分析[J]. *四川建筑*, 2012,32(5):79-82.
- [10] 龚健冲,杨雪玲.基于全生命周期理论的住宅建筑能耗计算与分析[J]. *四川建筑科学研究*, 2011,37(5):313-316.  
GONG J C, YANG X L. Calculation and analysis on energy consumption of residential buildings based on the whole life cycle theory [J]. *Sichuan Building Science*, 2011,37(5):313-316. (in Chinese)
- [11] 国家发展与改革委员会,国家财政部,国家环保总局和国家经济贸易委员会.排污费征收使用管理条例,国务院令 第369号[Z]. 2003-01-02.
- [12] 国家发展改革委,建设部.建设项目经济评价方法与参数[M].北京:中国计划出版社,2006.
- [13] 杨建新,徐成,王如松.产品生命周期评价方法及应用[M].北京:气象出版社,2002.
- [14] 江苏省统计局,国家统计局江苏调查总队.江苏省统计年鉴-2014[EB/OL]. <http://www.jssb.gov.cn/2014nj/indexc.htm>.
- [15] 中华人民共和国国家统计局.国家数据[DB/OL]. <http://data.stats.gov.cn/>.
- [16] EPS全球统计数据/分析平台[DB/OL]. <http://www.epsnet.com.cn>.