

基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹测算及其机理分析

张旺^{1,2}

1. 湖南工业大学城市与环境学院, 株洲 412007

2. 湖南省绿色工业与城市低碳发展研究基地, 株洲 412007

摘要 基于PB-LCA方法,以湖南省为例构建了省区层面的宏观建筑碳足迹模型,定量测度和比较2004—2016年建筑各个阶段的碳足迹及其变化情况,采用地理探测器技术分析了建筑碳足迹的影响机理。分析表明:建筑碳足迹整体上呈现波动增长之势,建材准备和建筑运行是产生碳足迹的两个主要阶段,而建造施工和建筑拆除阶段的碳足迹比重则较小;建材准备阶段的碳足迹主要来自钢材和水泥,公共建筑碳足迹处于波动上升的趋势,而居住建筑碳足迹则出现波动式下降之势;建筑业发展度、能源结构和第三产业比重是建筑碳足迹的3个主要影响因素。提出了减少建材特别是钢材和水泥的消耗量、降低建造施工和建筑运行阶段的煤炭类消费比重、实行公共建筑能耗和碳排放限额等3个建筑节能减碳的主要技术方向。

关键词 PB-LCA方法;建筑碳足迹;地理探测器技术;湖南省

随着城市化和工业化的快速发展,建材准备、建筑建造、使用和拆除过程中对能源和资源的消耗及固体废弃物的处理将带来巨大的温室气体排放量。联合国环境规划署报告指出,全球建筑物每年产生86亿t当量CO₂,预计到2030年,这一数字将增至156亿t当量CO₂,据悉中国建筑能耗约占全社会总能耗的33%^[1]。近年来,随着中国城镇化和工业化进程的加快,建筑碳排放量位居国民经济各部门之首,且呈刚性增长之势^[2]。中国总建筑面积预

计到2030年将达910亿m²,如果不发展低碳建筑,中国建筑业能源消耗所产生的温室气体排放总量将达51亿t,这些数据凸显了中国建筑低碳减排的迫切性^[3]。据调研,在能源供应、运输、建筑、工业、农业、林业、废物处理及其他行业中,建筑领域是温室气体减排效果最好、成本最低、投资收益最高的行业^[2],因而建筑行业低碳发展及研究具有重要的现实意义。由于不同热工分区的建筑碳足迹各有特点,减碳措施也各不相同,因此开展区域层面的

收稿日期:2019-01-18;修回日期:2019-07-16

基金项目:湖南省哲学社会科学基金项目(17YBA129)

作者简介:张旺,副教授,研究方向为低碳城市、可持续发展经济学等,电子信箱:zhangwang0902@163.com

引用格式:张旺. 基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹测算及其机理分析[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 133-142; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2019.22.015

宏观建筑碳足迹核算并研究其减碳策略很有必要。

湖南省作为典型的夏热冬冷区域,随着城乡居民生活水平的日益提高,采用空调等电器控温改善建筑热环境的城乡居民也越来越多,建筑能耗与碳排放也越来越大。笔者就本研究进行了前期统计和核算可得:2016年湖南民用建筑运行能耗碳足迹高达6535万t,其中公共建筑高达3074万t,占民用建筑运行能耗碳足迹总量的47%;户均电能消费也已远超家居照明、娱乐等方面的电能消费;2016年民用建筑电耗碳足迹高达4000万t,其中公共建筑的高达1541万t,占比也达39%,因此,建筑领域的节能减碳刻不容缓。本文基于生命周期分析方法(life cycle assessment, LCA)对湖南省的建筑碳足迹进行核算,明确其核算方法、现状基础数据及影响机理,并探讨相应的建筑节能减碳的技术方法。

1 建筑生命周期碳足迹研究概述

近年来,国内外一些学者对建筑生命周期碳足迹核算进行了初步探索,已取得了一些研究成果。鞠颖等^[4]基于建筑全生命周期理论的建筑碳排放计算方法,分析了中国近17年来在建筑碳排放计算方法方面的成果。从建筑领域基于LCA的碳足迹核算方法来看,按数学模型不同可分为以过程分析法为基础发展而来的过程生命周期评价法(process-based life cycle assessment, PB-LCA)和以投入产出法为基础发展而来的经济投入产出生命周期评价法(economic input-output life cycle assessment, EIO-LCA)两类。对于过程生命周期评价法(PB-LCA),国内外在一些局部系统生命周期的定性评价基础上^[5-7],定量评价也日渐丰富和成熟^[2,8-12]。PB-LCA的计算结果针对性强、精确度高,方便在产品之间进行比较,多用于建筑材料、施工过程和特定建筑物的环境影响研究。从基于LCA的建筑碳足迹核算区域来看,刘兵等^[13]采用PB-LCA构建模型,以厦门市学生宿舍、居民住宅及公共建筑为案例进行实证研究,总结这3类夏热冬暖地区建筑碳排放的共性,进而提出不同功能建筑的

减排策略;王松庆等^[14]基于过程全生命周期模型,结合居住建筑物自身的特点,对严寒地区居住建筑的生命周期能耗进行了计算和分析。除此之外,其他绝大部分研究关注更多地是整个国家尺度^[15-17]。

纵观国内外研究发现,虽然在建筑生命周期碳足迹的研究方面积累了不少研究成果与经验,但是由于PB-LCA研究边界的不统一、计算模型的差异,且来源于不同地域及时间的数据,最终导致了建筑碳足迹计算结果的差异性。此外,对微观单体或国家层面的建筑碳足迹研究较多,而针对不同热工分区的宏观层面建筑碳足迹进行详尽分析的研究还较少。由于不同国家和地区的气候特点和能源结构不同,建筑碳足迹的区域差异较大,不同时期的数据差异也较大,因而基于PB-LCA方法,以典型的夏热冬冷地区湖南省为例,构建省区层面的宏观建筑碳足迹模型,分析其影响机理,既可扩展建筑碳足迹的研究层面,又能定量测度和比较建筑各个阶段系列年份的碳足迹及其变化情况,从而为建筑全产业链角度的节能减碳提供数据参考和行动指南。

2 研究方法与数据来源

2.1 研究方法

2.1.1 基于PB-LCA的建筑碳足迹核算模型

基于PB-LCA的建筑碳足迹是指将建筑整个生命周期过程当作一个整体,从整个投入产出链进行全面考虑,其中由于物质和能量的消耗而导致的CO₂排放,确定系统边界,将建筑碳足迹划分为4个阶段:建材准备、建造施工、建筑运行和建筑拆除^[18](图1)。由于消费是碳足迹产生的最终驱动力,因而基于消费侧对建筑碳足迹进行测算,即将建材准备、火力发电等产生的CO₂计入其中。

1) 建材准备阶段的碳足迹核算方法。

建材种类繁多,消耗量大,获得建材碳排放因子工作比较复杂。本文主要采取对各个机构公布建筑中常用材料的碳排放因子^[19]进行算术平均(表1)。此外,在计算钢材、铝材这两种可回收建材时,按照未回收的消耗量计算,它们的回收系数分别是

0.8、0.85^[20]。由于木材在生长过程中是碳源,因而其排放因子是负数。

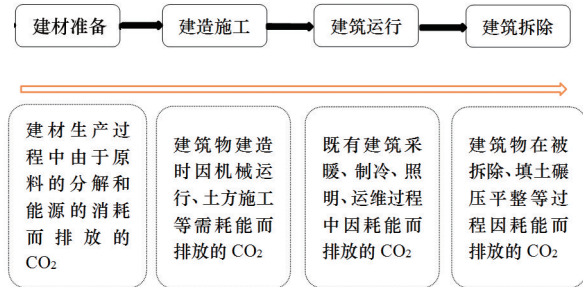


图1 基于PB-LCA的建筑碳足迹核算概念模型

Fig. 1 A conceptual model of construction CO₂ footprint accounting based on PB-LCA

表1 5种常用建材的CO₂排放因子

Table1 CO₂ emission factors for 5 kinds of common building materials

建材种类	钢材 (t/t)	木材 (t/m ₃)	水泥 (t/t)	玻璃 (t/t)	铝材 (t/t)
CO ₂ 排放因子	1.789	-0.843	0.822	0.966	2.600

因此,建材准备阶段的碳足迹核算的计算公式为:

$$E_{Manuf} = \sum_{j=1}^5 M_j \cdot \beta_j \cdot (1 - \varepsilon_j) \quad (1)$$

式中, E_{Manuf} 为建材生产准备阶段的碳足迹, M_j 为第 j 种建材的使用量, β_j 为第 j 种建材的 CO₂ 排放因子, ε_j 为第 j 种建材的回收系数。

2) 建造施工阶段的碳足迹核算方法。

建筑施工阶段的 CO₂ 足迹是房屋建筑项目在施工过程中因能耗而产生的 CO₂ 排放。从宏观角度来看,建造施工主要在建筑业,因而为便于统计分析,使用建筑业能耗数据作为建筑业建筑施工阶段的能耗量,并测算出原煤、洗精煤、汽油、煤油、柴油、天然气和电力等 15 种能源品种的排放因子(由于近年来湖南 60% 的电量来自火电,所以本文在计算电力碳足迹时会乘以火电比例系数,即 $u=0.6$,下同)。计算公式如下。

$$E_{Erect} = \sum_{i=1}^{15} C_j \cdot \alpha_i \cdot f_i \quad (2)$$

式中, E_{Erect} 为建造施工阶段的碳足迹, C_i 为第 i 种能耗量, α_i 为第 i 种能源的平均低位发热量, f_i 为第 i 种能源燃烧的 CO₂ 缺省排放因子。

3) 建筑运行阶段的碳足迹核算方法。

为计算湖南建筑运行阶段中的碳足迹,首先要计算建筑运行过程中的能耗,再乘以各种能源碳排放系数进行综合汇总。根据诸大建等^[21]提出的运用归类与合并的方法,建筑能耗主要包含批发零售与住宿餐饮业和其他类及生活消费除油品类外的能源消耗。在保证研究数据的可得性和准确性的前提下,只计算民用建筑运行过程中的能耗。民用建筑主要包括公共建筑和居住建筑。每类建筑能耗又由电耗和热耗组成,其能耗构成及数据来源如下。

(1) 公共建筑电耗。历年《中国能源统计年鉴》中湖南地区能源平衡表或《湖南统计年鉴》中的分行业能耗,是以下 3 项之和:交通运输、仓储和邮政业消耗的电力;批发零售业和住宿餐饮业消耗的电力;其他(包括办公、学校及事业单位)消耗的电力。

(2) 公共建筑热耗。历年《中国能源统计年鉴》中湖南地区能源平衡表或《湖南统计年鉴》中的分行业能耗,是以下 3 项之和:交通运输、仓储和邮政业消耗的原煤、型煤、液化石油气、天然气和热力;批发零售业和住宿餐饮业消耗的原煤、型煤、液化石油气、天然气和热力;其他(包括办公、学校及事业单位)消耗的原煤、型煤、液化石油气、天然气和热力。

(3) 居住建筑电耗。历年《中国能源统计年鉴》中湖南地区能源平衡表或《湖南统计年鉴》中的生活消耗电力。

(4) 居住建筑热耗。历年《中国能源统计年鉴》中湖南地区能源平衡表或《湖南统计年鉴》中的生活消耗原煤、型煤、液化石油气、天然气和热力。

$$E_{Occup} = \sum_{i=1}^n F_i \cdot E_i \quad (3)$$

式中, E_{Occup} 为建筑运行阶段的 CO₂ 足迹; F_i 为第 i 种燃料的 CO₂ 排放因子; E_i 为第 i 种燃料消耗量; n 为建筑运行阶段中相关 CO₂ 排放部门(或行业)总共消耗的 n 种燃料。

4) 建筑拆除阶段的碳足迹核算方法。

由于湖南建筑拆除的宏观数据十分缺乏,本研究中建筑拆除阶段的碳足迹参考国内已有研究成果^[11],建筑拆除阶段的碳足迹按建造施工阶段碳足迹的10%计算,计算公式为:

$$E_{Demol} = E_{Erect} \cdot 10\% \quad (4)$$

综上所述,可以得到基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹核算的总公式为

$$E_{P-LCA} = E_{Manuf} + E_{Erect} + E_{Occup} + E_{Demol} \quad (5)$$

2.1.2 基于PB-LCA的建筑碳足迹机理模型

本研究采用地理探测器技术探究建筑碳足迹的影响机理大小。地理探测器是王劲峰、徐成东开发出用来探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,擅长于因变量 Y 为数值量(如碳排放)、自变量 X 为类型量(如土地利用图)的分析^[22]。当因变量 Y 和自变量 X 均为数值量,对 X 离散化转换为类型量后,运用地理探测器建立的 Y 和 X 之间的关系将比经典回归更加可靠,尤其当样本量 <30 时^[23]。地理探测器软件自被开发后,已被广泛应用于自然科学、社会科学、环境科学和人类健康等方面。根据前人^[9,11,16]的研究基础,本研究定义:基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹为因变量 Y ,建筑业技术装备率 X_1 、建筑业发展度(湖南省建筑业增加值占当年GDP值的比重) X_2 、城镇化率 X_3 、能源结构 X_4 (基于PB-LCA的煤炭类消费量占总能耗的比重)、居民消费水平 X_5 、第三产业比重 X_6 为6个自变量。按照地理探测器的运行要求,先对数值型的6个自变量按照等间距法进行离散化处理,从而转换成类型量。

地理事物的分异性,通常受到自然环境或经济社会的深刻影响,探究其形成机理及分析其影响因素大小很有意义。地理探测器技术首次应用于探析地方性疾病的形成原因^[24],其模型公式如下:

$$P_{D,U} = 1 - \frac{1}{n\delta_U^2} \sum_{i=1}^m n_{D,i} \delta_{U,i}^2 \quad (6)$$

其中, $P_{D,U}$ 为基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹影响因素探测力指标; $n_{D,i}$ 为次一级类型样本数; n 为整个类型样本数; m 为次级类型个数;整个类型 δ_U^2 为碳足迹的方差; $\delta_{U,i}^2$ 为次一级类型的方差。

假设 $\delta_{U,i}^2 \neq 0$,模型成立, $P_{D,U}$ 的取值区间为 $[0, 1]$, $P_{D,U}=0$ 时,表明碳足迹分布呈随机分布, $P_{D,U}$ 值越大,说明类型因素对碳足迹的影响越大。本研究选取建筑业技术装备率、建筑业发展度、城镇化率、能源结构、居民消费水平、第三产业比重这6个因素,分别探测各项指标对碳排放量的影响机理大小。

2.2 数据来源

每年建筑业企业的建材消耗数据、房屋建筑施工面积、建筑业技术装备率均来自于《中国建筑业统计年鉴》(2005—2017);建筑业、建筑运行阶段的能耗数据来自于对应年份的《中国能源统计年鉴》和《湖南统计年鉴》;建筑业发展度、城镇化率、居民消费水平、第三产业比重来自于对应年份的《湖南统计年鉴》;15种能源燃烧的缺省 CO_2 排放因子来自于《2006年IPCC国家温室气体清单指南目录》;15种能源平均低位发热量则来自于《综合能耗计算通则(GB/T 2589—2008)》。

3 计算结果分析

3.1 基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹核算分析

3.1.1 建材准备阶段的碳足迹核算

根据式(1)计算出湖南省2004—2016年建材准备阶段的碳足迹,如表2所示。

从表2可以看出,湖南省建材准备阶段的碳足迹主要来自钢材和水泥,而木材则是主要的减碳来源。因为钢材和水泥本身在生产过程的 CO_2 排放因子比较大,与此同时,它们在建筑业中的消耗量巨大,导致在建材准备阶段的碳足迹也很大。伴随着湖南城乡建设的规模日益加大,房屋建筑施工面积从2004年的1.2523亿 m^2 增加到2016年的5.032亿 m^2 。正是由于房屋建筑施工面积的逐年增加,建筑业中建材消耗量相应增加,建材准备阶段的碳足迹也随之增大,从2004年的4542.64万t增加到了2016年的5999.72万t,12年间增加了32.08%,年均增长率为2.35%。

3.1.2 建造施工阶段的碳足迹核算

根据式(2)计算出湖南省2004—2016年建造施工阶段的碳足迹(图2)。

表2 湖南省2004—2016年建材准备阶段的碳足迹(万t)

Table 2 CO₂ footprint of building materials preparation stage in Hunan province in 2004—2016 year (10 thousand tons)

年份	钢材	木材	水泥	铝材	玻璃	合计
2004	276.43	-677.44	4907.98	26.50	9.18	4542.64
2005	212.47	-315.77	2689.02	14.07	8.24	2608.03
2006	276.52	-405.85	3379.24	16.29	10.04	3276.23
2007	328.59	-448.10	3605.39	16.07	13.19	3515.14
2008	328.59	-436.53	4027.36	18.76	13.60	3951.77
2009	416.35	-507.54	4834.55	18.32	13.30	4774.98
2010	542.46	-590.33	5180.86	24.10	13.36	5170.45
2011	608.73	-854.58	4884.69	43.49	21.72	4704.05
2012	662.60	-929.23	5691.60	37.63	38.71	5501.30
2013	701.00	-813.22	5969.98	35.89	48.11	5941.76
2014	731.85	-739.21	6215.34	36.68	57.49	6302.14
2015	1024.15	-935.06	6165.47	92.20	50.28	6397.04
2016	1263.00	-2048.95	6608.94	129.83	46.91	5999.72

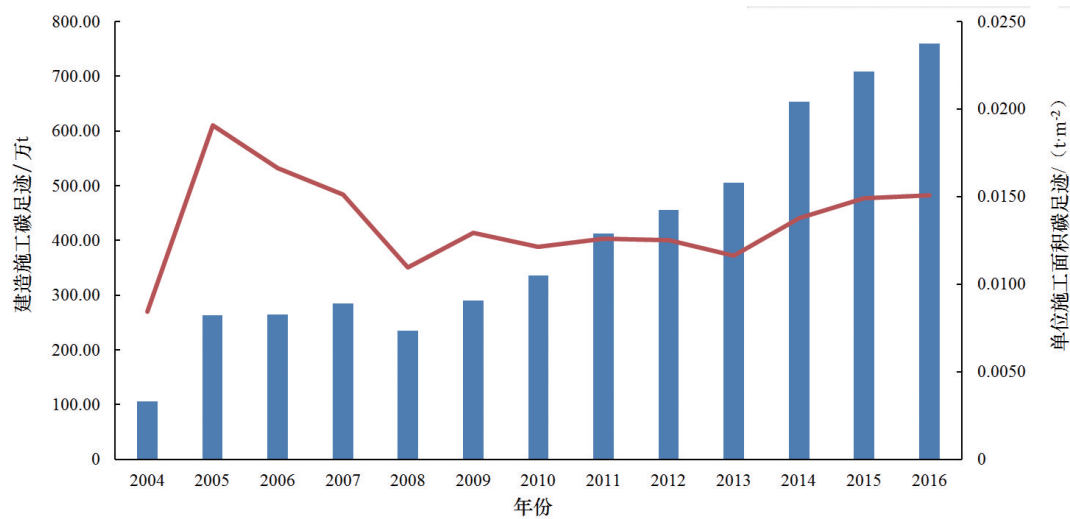


图2 湖南省2004—2016年建造施工阶段和单位施工面积的碳足迹

Fig. 2 CO₂ footprint of construction stage and unit construction area in Hunan province from 2004 to 2016

从图2可看出,在2004—2016年间,湖南省建造施工阶段的碳足迹除2008年有所下降外,其他年份均一直处于逐年攀升趋势。从2004年的105.51万t,增加到了2016年的759.62万t,12年间年均增加率达17.88%。而单位施工面积的碳足迹则呈波状变化,从2004年的0.0084 t/m²增到2005年的0.0191 t/m²,随后2005—2008年则又逐年下降,2009—2016年再次波动式上升,2004—2016年之间的年均增长率为2.35%。

3.1.3 建筑运行阶段的碳足迹核算

根据式(3)计算出,湖南省2004—2016年建筑运行阶段公共建筑和居住建筑的电耗、热耗共4个部分的碳足迹(图3)。

从图3可看出,2004—2016年间,湖南省建筑运行阶段的碳足迹整体上呈快速增长之势,从2004年的1550.31万t增加到了2016年的6535.37万t,12年间增长了3.22倍,年均增加率达12.74%。再分别从公共建筑和居住建筑的电耗、

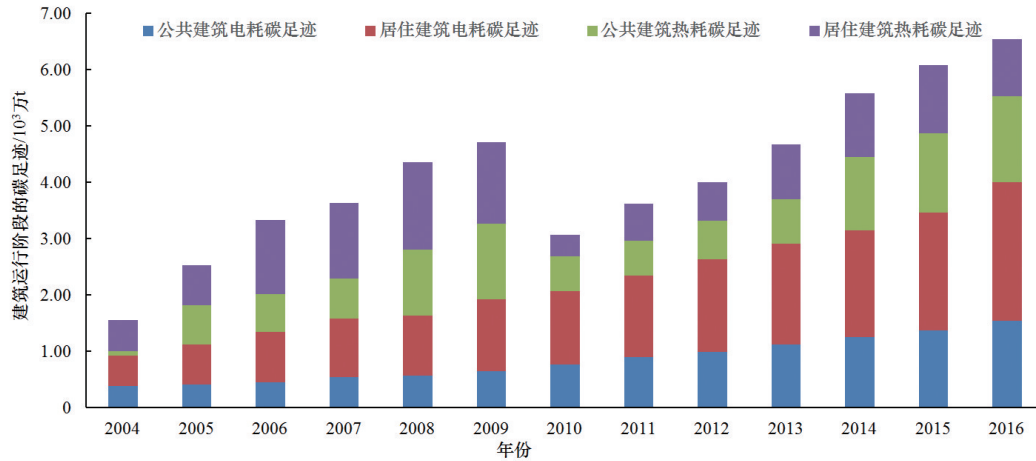


图3 湖南省2004—2016年建筑运行阶段及其4个部分的碳足迹

Fig. 3 CO₂ footprint of construction operation stage and its four parts in Hunan province from 2004 to 2016

热耗碳足迹情况来看,公共建筑和居住建筑的电耗碳足迹一直处于稳定增长趋势,但公共建筑和居住建筑的热耗碳足迹却在2009—2010年间均出现了一个大幅下降,主要是由于此时公共建筑和居住建筑的煤炭类能耗大幅减少所致。在2010年以后,公共建筑和居住建筑的热耗碳足迹又出现平稳上升之势。最后从公共建筑和居住建筑的碳足迹时间变化来看,公共建筑碳足迹处于波动式上升的趋势,而居住建筑碳足迹则出现波动式下降之势。

3.1.4 建筑拆除阶段的碳足迹核算

根据式(4)计算出,湖南省2004—2016年建筑拆除阶段的碳足迹,如图4所示,其变化趋势与建造施工阶段碳足迹的相同。

3.1.5 基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹核算

根据式(5)计算出基于PB-LCA的湖南省2004—2016年建筑碳足迹,如图5所示。

从图5可看出,2004—2016年间,基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹整体上呈现波动式增长

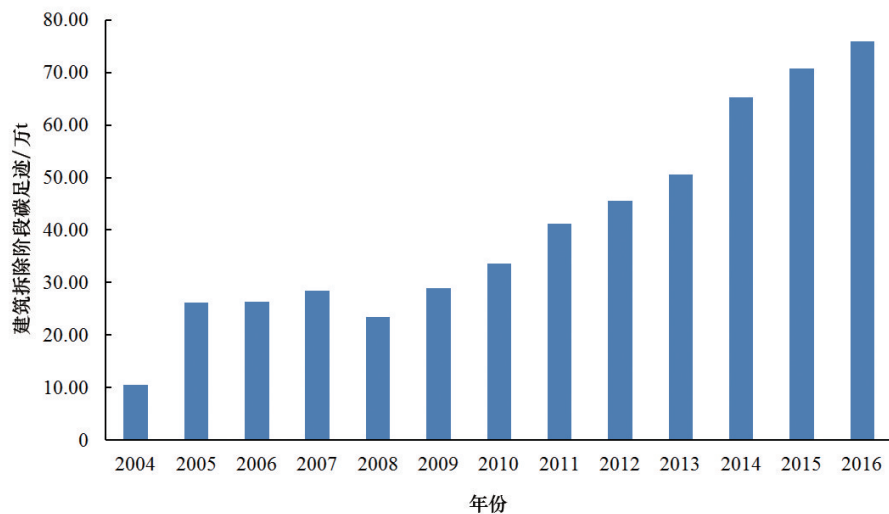


图4 湖南省2004—2016年建筑拆除阶段的碳足迹

Fig. 4 CO₂ footprint of construction demolition stage in Hunan province in 2004—2016 year

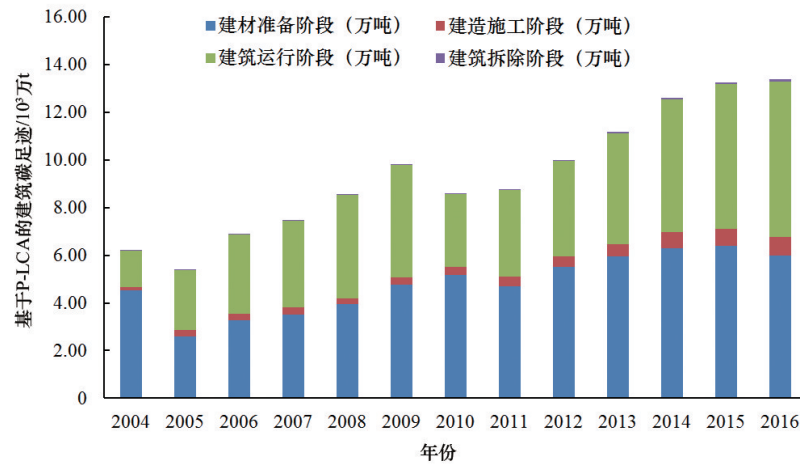


图5 基于PB-LCA的湖南省2004—2016年建筑碳足迹

Fig. 5 CO₂ footprint of construction based on PB-LCA in Hunan province in 2004–2016 year

的态势,从2004年的6209.02万t增加到了2016年的13370.67万t,年均增长率为6.60%。其中除2004—2005年和2009—2010年间有所减少外,其余年份的建筑碳足迹都是平稳增长。2004—2005年的碳足迹下降,主要受同期建材准备阶段碳足迹突降的影响,2009—2010年的碳足迹下降,则主要受同期建筑运行阶段碳足迹突降的影响。再从建筑碳足迹的总量构成来看,4个阶段中以建材准备和建筑运行两个阶段的比重较高,除2004年外,前者的比重在44%~60%之间,后者的比重在36%~51%之间。而建造施工和建筑拆除阶段的碳足迹比重则较小,除2004年外,分别在2.7%~5.7%和

0.27%~0.57%之间。

3.2 基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹机理分析

3.2.1 建筑碳足迹各变量之间的相关性分析

采用皮尔逊相关系数来考察基于PB-LCA的湖南省建筑碳足迹这个因变量Y,以及建筑业技术装备率 X_1 、建筑业发展度 X_2 、城镇化率 X_3 、能源结构 X_4 、居民消费水平 X_5 、第三产业比重 X_6 这6个自变量两两之间的相关关系。结果表明(表3):因变量与自变量之间,建筑碳足迹Y与城镇化率 X_3 、居民消费水平 X_5 、建筑业技术装备率 X_1 的相关系数分别为0.971、0.967、0.840,相关性较高,且都在0.01水平(双侧)显著相关;自变量与自变量之间,建筑业

表3 相互独立变量之间的相关性检验结果

Table 3 The result of the correlation test between the independent variables

	Y	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
Y	1.000						
X_1	0.840**	1.000					
X_2	0.274	0.110	1.000				
X_3	0.971**	0.895**	0.134	1.000			
X_4	-0.168	-0.328	0.135	-0.308	1.000		
X_5	0.967**	0.918**	0.175	0.990**	-0.310	1.000	
X_6	-0.150	-0.202	0.372	-0.275	0.639**	-0.182	1.000

注:**在0.01水平(双侧)显著相关,**在0.05水平显著(双侧)相关。

技术装备率 X_1 与居民消费水平 X_5 、城镇化率 X_3 的相关系数分别为 0.918、0.895, 城镇化率 X_3 与居民消费水平 X_5 的相关系数为 0.990, 能源结构 X_4 与第三产业比重 X_6 的相关系数为 0.639, 它们两两之间的相关性也较大, 都在 0.01 水平(双侧)显著相关。除了上述 6 组自变量之间的相关性较高外, 其余 6 个自变量两两之间的相关性都在 0.33 以下, 属于相对较低的相关性, 因而它们适合采用多变量的地理探测器模型。

3.2.2 基于地理探测器的建筑碳足迹机理分析

按照地理探测器技术, 对 6 个自变量进行等间距离散化处理, 再利用公式(6), 计算出各要素对建筑碳足迹的影响力系数(表 4), $P_{D,U}$ (影响力系数)各要素值按照从大到小的顺序依次为: 建筑业发展度 X_2 (0.9544)、能源结构 X_4 (0.9141)、第三产业比重 X_6 (0.2959)、建筑业技术装备率 X_1 (0.0437)、城镇化率 X_3 (0.0123)、居民消费水平 X_5 (0.0001)。由此可见, 建筑业发展度、能源结构和第三产业比重这 3 项是基于 PB-LCA 的湖南省建筑碳足迹的主要影响因素。其主要原因在于: 建筑业发展度越高, 建筑规模和面积就越大, 因而建材耗费和施工能耗就越大, 碳足迹也就越大; 近年来煤炭类消耗占建造施工和建筑运行二者能耗之和的比重都在 57.5% 以上, 其碳排放因子较大, 因而碳足迹也较大; 第三产业发生的碳足迹主要在公共建筑领域, 第三产业的发展必将导致公共建筑碳足迹的增加, 而湖南省公共建筑碳足迹呈波动上升之势, 这与第三产业比重在 2004—2016 年间波动式上升的趋势是一致的。

表 4 基于 PB-LCA 的湖南省建筑碳足迹影响因素的地理探测器分析结果

Table 4 Geographical detector analysis results of influencing factors about CO₂ footprint of construction based on PB-LCA in Hunan province

影响因素	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
$P_{D,U}$	0.0437	0.9544	0.0123	0.9141	0.0001	0.2959

4 结论

基于 PB-LCA 方法测算了典型夏热冬冷地区湖南省 2004—2016 年的建筑碳足迹, 并用地理探测器技术分析了其影响机理, 结论如下。

1) 建筑碳足迹整体上呈现波动增长之势, 建材准备和建筑运行是产生碳足迹的两个主要阶段, 而建造施工和建筑拆除阶段的碳足迹比重则较小。

2) 建材准备阶段的碳足迹主要来自钢材和水泥, 公共建筑碳足迹处于波动式上升的趋势, 而居住建筑碳足迹则出现波动式下降之势。

3) 建筑碳足迹与城镇化率、居民消费水平、建筑业技术装备率之间相关系数较大; 建筑业技术装备率与居民消费水平、城镇化率, 城镇化率与居民消费水平, 能源结构与第三产业比重之间的相关系数都较大。

4) 建筑业发展度、能源结构和第三产业比重是建筑碳足迹的三个主要影响因素。

因此, 建筑节能减碳的主要技术方向是: 减少建材特别是钢材和水泥的消耗量, 降低建造施工、建筑运行阶段的煤炭类消费比重, 实行公共建筑能耗和碳排放限额。

由于 PB-LCA 方法只能测算建筑直接排放和系统边界(即生命周期)内有限单元过程的间接碳足迹, 而无法对所有全过程完全追溯, 也就无法穷尽单元过程, 因而会存在一定的截断误差。为解决这一问题, 后续研究将基于经济投入产出生命周期评价法(EIO-LCA)来核算基于部门间生产需求关系的生产链碳足迹。另外, 对建筑碳足迹的核算仅解决了技术层面的问题, 而建筑的节能减碳还涉及到市场、政策等方面, 故实现区域宏观建筑碳减排从粗放型控制向精细化控制的转变就需要多角度的综合性研究。

参考文献(References)

- [1] UN Report: Promoting energy conservation in buildings is expected to significantly reduce carbon emissions[EB/

- OL]. [2009-12-11]. <http://www.un.org/chinese/News/story.asp?news ID=12675>.
- [2] 高源, 余宁秀, 刘丛红. 城市建筑生命周期碳排放核算模型构建与应用[J]. 建筑节能, 2014, 42(10): 75-79.
Gao Yuan, Yu Ningxiu, Liu Conghong. Development and application of urban buildings'CO₂ accounting model[J]. Building Energy Efficiency, 2014, 42(10): 75-79.
- [3] McKinsey and Company. China's green revolution[R]. USA: McKinsey & Company, 2009.
- [4] 鞠颖, 陈易. 全生命周期理论下的建筑碳排放计算方法研究: 基于1997—2013年间CNKI的国内文献统计分析[J]. 住宅科技, 2014(5): 32-37.
Ju Ying, Chen Yi. Research on the building carbon emission calculation method in compliance with the theory of full life cycle: Based upon statistical analysis of CNKI's domestic literature dated between 1997-2013[J]. Housing Science, 2014(5): 32-37.
- [5] Monahan J, Powell J C. A comparison of the energy and carbon implications of new systems of energy provision in new build housing in the UK[J]. Energy Policy, 2011, 39(1): 290-298.
- [6] 张智慧, 尚春静, 钱坤. 建筑生命周期碳排放评价[J]. 建筑经济, 2010(2): 44-46.
Zhang Zhihui, Shang Chunjing, Qian kun. The life cycle assessment on carbon emission of building construction economics, 2010(2): 44-46.
- [7] 张磊, 黄一如, 黄欣. 基于标准计算平台的建筑生命周期碳评价[J]. 华中建筑, 2012(6): 32-34.
Zhang Lei, Huang Yiru, Huang Xin. Assessment of building life cycle carbon emission based on standard calculation platform[J]. Huazhong Architecture, 2012(6): 32-34.
- [8] Blengini G A, Carlo T D. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in LCA of low energy building[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(6): 869-880.
- [9] 杨艳芳, 李慧凤, 郑海霞. 北京市建筑碳排放影响因素研究[J]. 生态经济, 2016, 32(1): 72-75.
Yang Yanfang, Li Hui Feng, Zheng Haixia. Research on factors of Beijing's building carbon emissions[J]. Ecological Economy, 2016, 32(1): 72-75.
- [10] 陈伟珂, 罗方. 基于全生命周期理论的建筑能耗问题研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(10): 23-28.
Chen Weike, Luo Fang. Research on building energy consumption based on whole life cycle theory[J]. Building Science, 2008, 24(10): 23-28.
- [11] 林波荣, 刘念雄, 彭渤, 等. 国际建筑生命周期能耗和CO₂排放比较研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(8): 22-27.
Lin Borong, Liu Nianxiong, Peng Bo, et al. Comparative study on energy consumption and CO₂ emission in international building life cycle[J]. Building Science, 2013, 29(8): 22-27.
- [12] 周燕, 龚光彩. 基于分析和生命周期评价的既有建筑围护结构节能改造[J]. 科技导报, 2010, 28(23): 99-103.
Zhou Yan, Gong Guangcai. Exergy analysis of the building envelope energy efficiency retrofit based on the life cycle assessment[J]. Science & Technology Review, 2010, 28(23): 99-103.
- [13] 刘兵, 祁神军, 张云波, 等. 夏热冬暖地区建筑生命周期碳排放及减排策略研究[J]. 建筑经济, 2016, 37(1): 84-87.
Liu Bing, Qi Shenjun, Zhang Yunbo, et al. Study on carbon emission and emission reduction strategies of buildings life cycle in hot summer and warm winter zone[J]. Construction Economics, 2016, 37(1): 84-87.
- [14] 王松庆, 王威, 张旭. 基于生命周期理论的严寒地区居住建筑能耗计算和分析[J]. 建筑科学, 2008, 24(4): 58-61.
Wang Songqing, Wang Wei, Zhang Xu. Calculation and analysis on energy consumption of residential buildings in severe cold region based on life cycle theory[J]. Building Science, 2008, 24(4): 58-61.
- [15] Utama A, Gheewala S H. Life cycle energy of single landed houses in Indonesia[J]. Energy and Buildings, 2008, 40(10): 1911-1916.
- [16] 刘立秋, 马家军, 孙鹏程. 基于投入产出方法的中国建筑业完全能耗影响因素分析[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2015, 17(2): 41-45.
Liu Liqiu, Ma Jiajun, Sun Pengcheng. Analysis of influencing factors on the complete energy consumption of construction industry based on input-output analysis[J]. Journal of Social Sciences Edition, 2015, 17(2): 41-45.
- [17] 刘秀丽, 汪寿阳, 杨翠红, 等. 基于投入产出分析的建筑节能经济——环境影响测算模型的研究和应用[J]. 系统科学与数学, 2010, 30(1): 12-21.
Liu Xiuli, Wang Shouyang, Yang Cuihong. Model based on input-output analysis to measure the impact of building energy efficiency[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2010, 30(1): 12-21.
- [18] 李祥立, 任志勇, 端木琳. 区域建筑能源系统生命周期能耗及碳排放量的测算模型[J]. 建筑科学, 2014, 30(4): 15-20.
Li Xiangli, Ren Zhiyong, Duan Mulin. Measurement and

- counting model on life-cycle energy consumption and carbon emission of regional building energy system[J]. Building Science, 2014, 30(4): 15-20.
- [19] 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]. 中国建设信息化, 2010(23): 58-59.
Zhang Tao, Jiang Yu Hua, Huang Youliang, et al. Carbon emission factors for energy and materials commonly used in buildings[J]. Informatization of China Construction, 2010(23): 58-59.
- [20] 李兆坚. 我国城镇住宅空调生命周期能耗与资源消耗研究[D]. 北京: 清华大学, 2007.
Li Zhaojian. Study on the life cycle consumption of energy and resource of air conditioning in urban residential buildings in China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2007.
- [21] 诸大建, 陈飞. 上海建设低碳经济型城市的研究[M]. 上海: 同济大学出版社, 2010.
Zhu Dajian, Chen Fei. Study on the construction of low carbon economy city in Shanghai[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2010.
- [22] Wu R N, Zhang J Q, Bao Y H, et al. Geographical detector model for influencing factors of industrial sector carbon dioxide emissions in Inner Mongolia, China[J]. Sustainability, 2016, 8(2): 149-160.
- [23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(10): 116-134.
Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
- [24] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the He shun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1): 107-127.

Accounting of construction CO₂ footprint and its mechanism analysis based on PB-LCA in Hunan province

ZHANG Wang^{1,2}

1. College of Urban and Environmental Sciences, Hunan University of Technology Zhuzhou 412007, China
2. Research Base for Green Industry and Low Carbon Development of City in Hunan Province, Zhuzhou 412007, China

Abstract Based on PB-LCA method, taking typical hot summer and cold winter areas of Hunan province as an example, this paper sets up a macro-construction CO₂ footprint model at the provincial level, quantitatively measures and compares CO₂ footprints and their changes in each stage of the construction during 2004-2016, and uses geographical detector technology to analyze the influence mechanism of construction CO₂ footprint. Main conclusion is as follows. The construction CO₂ footprint was the trend of the overall fluctuating growth; building materials preparation and construction operations were the two major stages of the construction CO₂ footprint, while the CO₂ footprint of construction and construction demolition stage was relatively small; the CO₂ footprint of building materials preparation stage mainly came from steel and cement, and the CO₂ footprint of public buildings was on the rise. But the CO₂ footprint of residential buildings had a tendency of fluctuating drop. The construction development degree, energy structure and tertiary industry proportion were the three main influencing factors of construction CO₂ footprint. Thus, reducing consumption of building materials, especially steel and cement, reducing the proportion of coal consumption during construction and construction operation, and implementing limits of energy consumption and CO₂ emission on public buildings are the main technical directions of energy-saving and CO₂ reduction in construction.

Keywords PB-LCA method; construction CO₂ footprint; geographical detector technology; Hunan province ●



(责任编辑 卫夏雯)