

DOI: 10.5846/stxb201504070695

肖雅心, 杨建新.北京市住宅建筑生命周期碳足迹.生态学报, 2016, 36(18): - .

Xiao Y X, Yang J X. Life cycle carbon footprint of residential buildings in Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(18): - .

北京市住宅建筑生命周期碳足迹

肖雅心, 杨建新*

中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

摘要:从生命周期角度看,建筑碳足迹与能源和建材生产系统具有密切关系。随着技术的进步和节能政策的推进,中国能源的生产和使用,以及建材生产过程中的环境排放都随着时间在持续降低,这将间接地影响到建筑的环境表现。依据 1990—2010 年期间每五年的中国能源与建材生命周期清单数据,对北京市 20 年间住宅建筑系统开展生命周期评价和碳足迹核算,以揭示北京市住宅建筑系统的环境负荷变化特征。结果表明,北京市住宅建筑生命周期碳足迹随时间推移呈现降低趋势,主要来自能源系统和建材生产系统的碳减排贡献。不同结构建筑的碳足迹尽管有差异,但也呈现了相似的下降趋势。从生命周期阶段看,建筑碳足迹主要体现在建筑使用阶段和建材生产阶段。尽管建筑使用阶段的节能对于降低建筑生命周期碳足迹具有重要贡献,但节能在经济成本及环境成本方面而言是有限度的。在可持续的环境政策管理制定中,应从生命周期角度,统筹考虑协调各行业减碳的协调发展。论文同时也验证了在生命周期评价中考虑时间变量将有助于更好地利用生命周期评价结果支持环境可持续管理。本文的结论对于城市规划的政策制定、量化环境表现是有益的。

关键词:住宅建筑;生命周期评价;碳足迹

Life cycle carbon footprint of residential buildings in Beijing

XIAO Yaxin, YANG Jianxin*

State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research center of Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

Abstract: The carbon footprint of buildings relates to the energy system and building material production system from the perspective of life cycle. With the advancement of innovations in technology and energy conservation policies, emissions related to energy production and use as well as the production of building materials have been reducing in China. Consequently, this will influence the environmental performance of buildings indirectly. In this study, the life cycle carbon footprint of residential buildings in Beijing was calculated for the past 20 years, based on life cycle inventory databases in the context of energy and building materials, to determine the change in environmental performance of residential buildings. The results show that the carbon footprint in Beijing exhibited a decreasing trend, mainly as a result of carbon reduction in the energy mix and improvements in the building material production system. The carbon footprints of different structures also exhibited decreasing trends, although they varied in numbers. Considering life cycle stages, the use phase of buildings dominated the carbon footprint profile, which is mainly attributed to energy use. Although energy saving in the use phase was strongly correlated to the reduction of the carbon footprint of buildings, it had a limit in context of both economic cost and environmental cost. The coordination of various industrial sectors, such as energy production and material production industries should be paid sufficient attention while making policies for carbon reduction. Furthermore, as shown by the results, it is necessary to integrate the time parameter in life cycle assessment more efficient sustainable environmental management. The conclusions drawn from this study will be helpful for measuring the environmental performance in the

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05140200)

收稿日期:2015-04-07; 网络出版日期:2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yangjx@rcees.ac.cn

polycymaking of urban planning.

Key Words: residential building; life cycle assessment; carbon footprint

全球 30%—40% 的初级能源消耗于建筑业及相关产业,产生了全球 40%—50% 的温室气体排放^[1]。从生命周期的角度,建筑碳足迹与整个能源系统和建材系统密切相关,也与建筑的使用过程和拆除过程相关。本研究针对北京市住宅建筑开展生命周期评价和碳足迹核算,分析能源系统和建材生产系统的变化对住宅建筑碳足迹的贡献,以期为建筑可持续性评估提供基础数据,为绿色建筑发展提供政策支持。

应用生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)方法开展建筑能源使用及环境影响评价的研究众多。主要包括 3 个方面:比较建筑材料的环境影响^[2-7],以支持绿色建材替代;评价建筑生命周期各阶段的能源使用效率和环境影响,进而提出优化方案^[8-10];对单体建筑^[11-12]或区域内建筑系统开展全生命周期评价^[13-15],着重于量化其环境影响,识别关键影响因素和提出政策建议。

在生命周期中引入时间变量,开展动态生命周期评价尚处于发展初期。已有学者开展了一些尝试。Amit^[16]等人利用动态物质流建模分析了美国水泥库存。William O. Collinge^[17]等人提出了建筑动态生命周期评价(DLCA)方法框架。并应用该方法对单体建筑进行了动态与静态评价,结果表明,动态评价在所有影响类型上都低于静态评价结果。Hu M^[18]等人应用物质流分析(MFA)方法,开展了北京城市住房系统的建设和拆除废弃物管理研究。

1 北京市住宅建筑生命周期评价

本文尝试基于不同时段的生命周期清单数据库,对北京市住宅建筑系统开展碳足迹动态评价,以期揭示能源系统和建材系统变化条件下北京市住宅建筑碳足迹的变化特征,从而寻求降低建筑碳足迹的优化策略。

研究遵循 ISO14040 系列标准,按照生命周期评价的步骤开展研究。在碳足迹的核算上,采用 SimaPro7.3 软件平台进行计算,碳足迹采用 kgCO₂eq 表征。

1.1 研究边界和功能单位

研究范围定义为北京市住宅建筑从建材生产,建材运输,建筑建设,使用到最终拆除处置的整个生命周期。重点关注能源消耗,材料消耗和温室气体排放(图 1)。功能单位定义为 100m²建筑面积/年。依据建设部《住宅建筑规范》要求,民用住宅建筑设计年限不得低于 50 年,因此本研究设定住宅建筑的使用寿命为 50 年。

1.2 碳足迹核算方法

建筑生命周期碳足迹主要来源是能源使用所导致排放的温室气体所产生的碳足迹。采用以下碳足迹计算模型:

$$C_T = C_M + C_C + C_U + C_D$$

其中, C_T 表示建筑生命周期碳足迹; C_M 是材料生产阶段碳足迹; C_C 代表建筑建设阶段碳足迹; C_U 是建筑使用阶段碳足迹; C_D 表示建筑拆除阶段碳足迹。其中,

建材生产阶段:

$$C_M = \sum_i (cm_{i1} + cm_{i2} + cm_{i3} + cm_{i4}) = \sum_i \left(\sum_j m_j * \alpha_j + \sum_k n_k * \beta_k + cm_{i3} + cm_{i4} \right)$$

其中, cm_{i1} 表示第 i 类建材生产工艺过程的碳排放量, cm_{i2} 表示第 i 类建材生产消耗化石燃料碳排放量, cm_{i3} 表示第 i 类建材生产消耗二次能源碳排放量, cm_{i4} 表示运输过程碳排放量; m_j 表示第 i 类建材生产消耗的第 j 类化石燃料量, α_j 表示对应化石燃料的单位碳排放当量, n_k 表示消耗的第 k 类二次能源量, β_k 表示对应二次能源的单位碳排放当量。

建筑建设阶段:

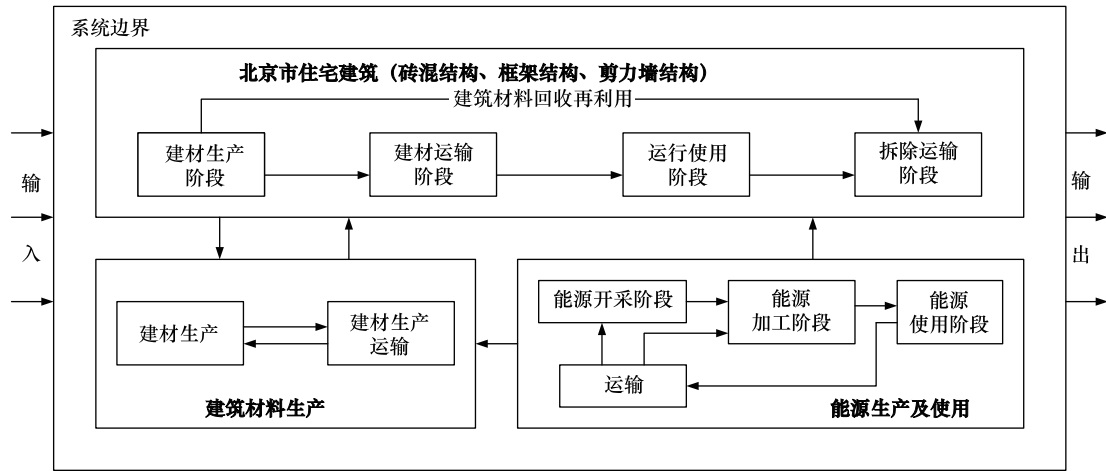


图1 北京市住宅建筑生命周期评价研究边界

Fig.1 The System Boundary of the LCA of Beijing Residential Buildings

$$C_C = cc_1 + cc_2 + cc_3 = \sum_j m_j * \alpha_j + \sum_k n_k * \beta_k + cc_3$$

式中, cc_1 表示建设过程中消耗化石燃料碳排放量, cc_2 表示建设过程中消耗二次能源碳排放量, cc_3 表示建设过程中运输碳排放量。

建筑使用阶段:

$$C_U = cu_1 + cu_2 + cu_3 = \sum_{j1} m_{j1} * \alpha_j + \sum_{j2} m_{j2} * \alpha_j + \sum_k n_k * \beta_k$$

式中, cu_1 表示使用过程中供暖消耗化石燃料碳排放, cu_2 表示使用过程中空调及照明等其他设备消耗化石燃料排放, cu_3 表示使用过程中空调及照明等其他设备消耗二次能源碳排放量; m_{j1} 是供暖消耗化石燃料用量, m_{j2} 是空调及照明等其他设备消耗化石燃料量。

建筑拆除阶段:

$$C_D = cd_1 + cd_2 + cd_3 = \sum_j m_j * \alpha_j + \sum_k n_k * \beta_k + cd_3$$

式中, cd_1 表示拆除过程中消耗化石燃料碳排放量, cd_2 表示拆除过程中消耗二次能源碳排放量, cd_3 表示拆除过程中运输碳排放量。

1.3 数据来源

研究选取 1990, 1995, 2000, 2005, 2010 年为节点, 主要基于文献和统计数据编制了能源和建材生产、运输、建筑建设和拆除的活动水平数据, 并采用中国科学院生态环境研究中心开发的 CAS-RCEES2012 数据库中的基础清单数据。能源包括了一次性能源如煤炭、油、天然气等, 也包括二次能源, 如电力、汽油等。能源生命周期过程包括了能源系统的开采生产(加工), 运输及使用三个阶段。建材生产主要考虑了相关能源消耗、运输和生产工艺排放。建材类型主要包括了钢材、水泥、木材、砖、石子、砂子、陶瓷、玻璃及保温材料等九类。

1.4 碳足迹核算模型参数确定

研究以北京市住宅建筑为对象, 按照建筑结构分为砖混结构、框架结构和剪力墙结构 3 类。生命周期过程设定为建材生产、建筑建设运输、建筑使用、建筑拆除运输 4 个阶段。不同结构建筑的建材消耗见表 1; 其他阶段能源消耗参数见表 2 及表 3。

建材生产阶段主要考虑不同结构在不同年代的建材用量变化; 使用阶段三种结构建筑采用相同清单, 主要考虑供暖及其他用途煤炭、燃料油、天然气和电力; 建设及拆除阶段主要考虑了建设及拆除用柴油机燃料油、建设工程耗电, 以及建设、拆除相关的建筑材料及废料运输, 其中工程耗能分为 2000 年之前和 2000 年

之后两个清单进行考虑。运输过程包括铁路、公路和水路运输^[19],并按照我国市场运输量设定为铁路 70%,公路 20%,水路 10%。

表 1 100 m²不同结构住宅建筑建材用量清单(t)

材料 Materials		Table 1 The inventory of materials for 100m ² of residential buildings								
结构 Structures	时间 Period	钢材 Steel	水泥 Cement	砖 Brick	木材 Wood	石子 Stone	砂子 Sand	建筑陶瓷 Architectural ceramics	玻璃 Glass	保温材料 Thermal insulation materials
砖混结构 Brick-concrete structure	1990	2.90	15.00	46.20	0.80	40.40	47.70	2.16	0.37	0.39
	1995	2.64	14.81	36.43	1.55	55.78	47.35	1.41	0.49	0.39
	2000	2.50	14.80	38.80	0.60	33.40	41.30	1.43	0.48	0.39
	2005	3.00	11.25	31.20	0.60	32.25	34.50	1.76	0.25	0.39
	2010	2.60	10.84	33.10	0.60	32.25	34.50	1.60	0.14	0.39
框架结构 Frame structure	1990	5.90	24.60	8.20	0.80	60.70	41.70	2.16	0.37	0.52
	1995	4.66	21.23	4.28	1.49	63.83	45.29	1.41	0.49	0.52
	2000	5.20	22.30	4.80	0.70	55.20	38.80	1.43	0.48	0.52
	2005	6.90	21.70	3.20	0.70	62.10	36.10	1.76	0.25	0.52
	2010	6.85	19.57	3.20	0.70	62.10	36.10	1.60	0.14	0.52
剪力墙结构 Shear wall structure	1990	9.71	28.57	1.40	1.30	120.48	57.90	2.16	0.37	0.63
	1995	9.71	28.57	1.40	1.30	120.48	57.90	1.41	0.49	0.63
	2000	8.48	28.57	—	1.30	110.20	74.90	1.43	0.48	0.63
	2005	8.48	30.20	—	1.30	110.20	74.90	1.76	0.25	0.63
	2010	8.30	20.86	—	1.30	110.20	67.90	1.60	0.14	0.63

1995 年数据主要来源于刘天星^[14]数据,2000 年数据来源于游方^[20],2005 年数据来源于赵艳华^[21],2010 年数据来源于谷立静^[22]。另外参考王上^[23]、王宇^[24]、刘晓明^[25]、阴世超^[26]数据对缺乏的数据进行了补全并对个别数据进行修正

表 2 100m²不同结构住宅建筑建设及拆除工程能耗

Table 2 The energy consumption of construction & demolition for 100m ² of residential buildings			
能源 Energy		建设用柴油/kg	建设用电/kWh
时间 Period	结构 Structures	Diesel for construction	Electricity for constructio
2000 年前 Before 2000	砖混 Brick-concrete structure	300.273	6409
	框架、剪力墙 Frame & shear wall structure	389.79	6455
2000 年后 After 2000	砖混 Brick-concrete structure	230.496	6729
	框架、剪力墙 Frame & shear wall structure	308.38	6345

建设及拆除工程能耗采用单元施工量消耗的能源与 100m²面积工程量乘积。相关参数参考游方^[19]、王婉莹^[27]、仲平^[28]、王霞^[29]等人论文数据

表 3 100m²住宅建筑 1 年的运行能耗

Table 3 The energy consumption of use of 100m ² residential buildings per year						
时间 Period		1990	1995	2000	2005	2010
能源用途 Energy usage patterns	能源 Energy					
供暖 For heating	煤 Coal/kg	2310	2245	1745	1240	998
	天然气 Natural gas/m ³	0	0	206	440	557
其他活动 For others	煤 Coal/kg	49	45	40	33	33
	燃料油 Fuel oil/kg	8	6.25	4.545	5.26	5
	天然气 Natural gas/m ³	56.2	78.6	105	123	145
	电 Electricity/kwh	1060	1252	1641.1	1768	1849.89

供暖数据参考凌浩怒^[30]、徐俊方^[31]等人的数据计算得到

1.5 碳足迹结果与解释

北京市住宅建筑 100m²的生命周期碳足迹反映了三种结构建筑的平均状况。按照三种结构的实际比例进行了几何平均处理。结果表明,北京市 100m²建筑面积的碳足迹呈现下降趋势(表 4)。1990 年,100m²建筑的生命周期碳足迹总量达到 8.68 t CO₂eq,到 2010 年下降为 6.51 t CO₂eq,下降了 25%。从生命周期阶段来看,主要碳足迹来源于使用过程,占 85.1%,其次是建材生产,占 12.5%,而建设阶段和拆除阶段所占比例极小。进一步从各生命周期过程碳减排的速度看,建材生产的减碳效果最为明显,下降了 44%,使用阶段碳足迹下降了 21.2%。

表 4 100m²住宅建筑生命周期碳足迹(kgCO₂eq/100m²·a)
Table 4 The life cycle carbon footprint of 100m² residential buildings in Beijing

碳足迹 Carbon footprint	1990	1995	2000	2005	2010	减碳比 Reduction ratio
建材生产 Material production	1457.97	1192.58	1142.63	1007.57	815.86	44.0%
建筑建设 Construction	174.18	176.05	153.03	149.29	138.11	20.7%
建筑使用 Operation	7034.10	7018.10	6549.60	5949.30	5551.90	21.1%
建筑拆除 Demolition	13.44	13.08	12.17	12.59	12.78	4.9%
合计 Total	8679.69	8399.81	7857.43	7118.75	6518.65	24.9%

从生命周期阶段看,碳足迹主要来源于建筑使用阶段和建材生产阶段。因此以下将重点分析使用阶段和建材生产阶段的主要贡献因子。

表 5 100m²住宅建筑 1 年运行的碳足迹(kgCO₂eq/100m²·a)
Table 5 The carbon footprint of use of 100m² residential buildings in Beijing per year

碳足迹 Carbon footprint		1990	1995	2000	2005	2010
供暖 Heating	总计 Total	5590.0	5360.0	4607.0	3930.0	3590.0
其他活动 Others	总计 Total	1444.1	1658.1	1942.6	2019.3	1961.9
其中 Among	天然气 Natural gas	138.0	190.0	253.0	295.0	340.0
	电 Electricity	1160.0	1340.0	1580.0	1630.0	1530.0
总计 Total	7034.1	7018.1	6549.6	5949.3	5551.9	

使用阶段历时较长,建筑碳足迹在生命周期各阶段中最高。自 1990—2010 年,建筑使用阶段减碳量约 21.2%。使用阶段的碳足迹主要来自于供热和其他用能。而从减碳的具体活动看,供暖减碳幅度约 35.8%,主要是由于北京市供暖天然气的用量比例不断增高,而其他活动的碳足迹在 1990—2005 年间处于上升的趋势,在 2005 年达到峰值后开始趋于降低。

表 6 100m²住宅建筑建材生产的碳足迹(kgCO₂eq/100m²·a)
Table 6 The carbon footprint of material production of 100m² residential buildings in Beijing

碳足迹 Carbon footprint		1990	1995	2000	2005	2010	减碳比 Reduction Ratio
总计 Total		1457.97	1192.58	1142.63	1007.57	815.86	44.0%
主要贡献材料	钢材 Steel	423.02	316.24	293.56	320.73	317.76	24.9%
Major contribution	水泥 Cement	465.33	399.22	396.60	358.04	284.30	38.9%
among all	砖 Brick	332.73	285.29	294.84	188.16	83.45	74.9%

建材生产阶段碳足迹主要来自钢材、水泥和砖的碳足迹贡献,占 83.8%—86.2%。建材生产碳足迹也呈现逐年降低的趋势。其中砖的碳足迹持续降低,且减碳比达到 74.9%,为建材生产的减碳量贡献最大,主要得益于 2008 年实心砖限制使用政策后砖混结构建筑建设量降幅巨大。水泥的减碳比达 38.9%,主要是因为水

泥生产的节能减排工作造成单位碳足迹降低。而钢材的碳足迹则在 2000 年时为最低峰值,之后有所升高,2010 年较 1990 年减碳比为 24.9%。尽管单位钢材生产的碳足迹在持续降低,但钢材的用量增加,抵消了一部分减碳效果。因此,建材行业的减碳要从工业优化和材料减量两个方面来考虑。

从北京市各类结构建筑的碳足迹贡献来看,各类结构建筑的碳足迹呈现不同变化趋势。图 2 呈现了不同结构建筑碳足迹的分布比例变化。在 1990 年,砖混结构建筑的碳足迹最高,为 3.88t CO₂eq. 之后持续下降,到 2010 年已经下降到 1.47 t CO₂eq.。而 1990 年碳足迹最低的剪力墙结构,1995 年以后却持续上升,到 2010 年成为三种类型中碳足迹最高的建筑。这种碳足迹结构上的变化主要是由不同结构所占的比例所影响的,尤其是建筑运行阶段的比例;砖混结构自 1990 至 2010 年间使用面积占比由近 50%降低至不到 25%,而剪力墙结构的使用面积占比在 1995 年仅占 15%左右,至 2010 年占比近 40%。

2 结论和讨论

(1) 由于能源系统和建材系统节能减排行动计划的推进,在过去 20 年里能源系统和建材生产的碳足迹总体上趋于降低。一定程度上影响了建筑生命周期碳足迹的变化。因此,在生命周期评价中引入时间变量是有意义的。

(2) 北京市 100m²建筑的碳足迹逐年降低。三种不同结构的建筑的碳足迹也呈现下降趋势,但三种结构之间的碳足迹相差不大,因此城市建筑结构的调整对城市建筑碳足迹的贡献有限,应着眼于挖掘三种结构内部的减碳潜力

(3) 北京市住宅建筑总碳足迹主要贡献来自建筑使用过程,其次为建材生产阶段。因此,未来建筑减碳的焦点应该关注建筑使用阶段的能源效率和建材生产阶段。

(4) 政府作为社会可持续发展的推动者和主要决策者,或通过强制的法律手段,或通过一定的经济措施及激励机制,要求生产者的清洁生产并引导消费者改变其消费行为,朝着可持续的目标前进。政府未来在制定关于建筑的节能减排政策时,应该考虑建筑的生命周期各阶段碳足迹变化的影响因素制定有效的政策,并综合实施,实现政策之间的协同作用,达成建筑业的低碳目标。

(5) 对能源业和建材生产业的节能减排会间接地影响建筑业的减排效果,因此政策制定时不应只着眼于建筑业,而应兼顾其它相关产业。一方面,应大力发展清洁技术,提倡使用新能源、清洁能源,在保证安全舒适的情况下,利用新技术、新方法减少建筑业及其相关产业的能源消耗及碳排放。另一方面,引导可持续的生活方式,动员所有人参与到节能减排的行动中,倡导适度消费、绿色消费,从而降低整个生产和消费链的碳足迹。

(6) 本研究是对生命周期动态评价的一个简单尝试,但是由于建立动态数据清单库的数据量大,数据精度不高,因此在未来如何加入时间因子建立动态模型进行评价还需要进一步探究。

参考文献 (References):

- [1] Asif M, Muneer T, Kelley R. Life cycle assessment; a case study of a dwelling home in Scotland. Building and Environment, 2007, 42(3): 1391-

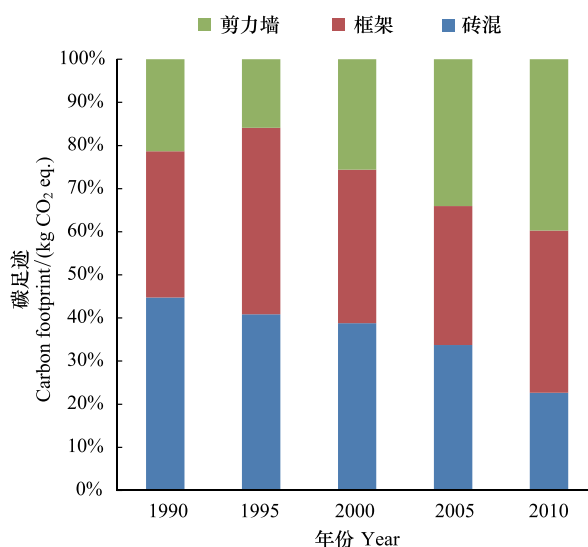


图2 北京市不同结构住宅建筑生命周期碳足迹变化

Fig.2 The carbon footprint of 100m² residential buildings by structure in Beijing

1394.

- [2] Su X, Zhang X, Gao J. Inventory analysis of LCA on steel- and concrete-construction office buildings. *Energy and Buildings*, 2008, 40(7): 1188-1193.
- [3] Wang W H, Liu T, Liu Y H, Guo S H. Evaluation on contribution of steel products to environmental improvement from life cycle assessment perspectives. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 2012, 17(3): 370-372.
- [4] Habert G, Roussel N. Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives. *Cement and Concrete Composites*, 2009, 31(6): 397-402.
- [5] Talukdar S, Islam S T, Banthia N. Development of a lightweight low-carbon footprint concrete containing recycled waste materials. *Advances in Civil Engineering*, 2011, 2011: Article ID 594270.
- [6] Crishna N, Banfill P F G, Goodsir S. Embodied energy and CO₂ in UK dimension stone. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011, 55(12): 1265-1273.
- [7] Cabeza L F, Barreneche C, Miró L, Morera J M, Bartolí E, Inés Fernández A. Low carbon and low embodied energy materials in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 23: 536-542.
- [8] Blengini G A. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. *Building and Environment*, 2009, 44(2): 319-330.
- [9] Basbagill J, Flager F, Lepech M, Fischer M. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment*, 2013, 60: 81-92.
- [10] Cho Y S, Kim J H, Hong S U, Kim Y. LCA application in the optimum design of high rise steel structures. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3146-3153.
- [11] Scheuer C, Keoleian G A, Reppe P. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy and Buildings*, 2003, 35(10): 1049-1064.
- [12] Wu H J, Yuan Z W, Zhang L, Bi J. Life cycle energy consumption and CO₂ emission of an office building in China. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2012, 17(2): 105-118.
- [13] Chang Y, Ries R J, Wang Y W. The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input-output LCA model. *Energy Policy*, 2010, 38(11): 6597-6603.
- [14] 刘天星. 城市住宅的生态代谢与环境影响分析——以建国后北京城市住宅为例[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2008. (未链接到本条文献信息)
- [15] 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.
- [16] Kapur A, Keoleian G, Kendall A, Kesler S E. Dynamic modeling of in-use cement stocks in the United States. *Journal of Industrial Ecology*, 2008, 12(4): 539-556.
- [17] Collinge W O, Landis A E, Jones A K, Schaefer L A, Bilec M M. Dynamic life cycle assessment: framework and application to an institutional building. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2013, 18(3): 538-552.
- [18] Hu M M, Van Der Voet E, Huppes G. Dynamic material flow analysis for strategic construction and demolition waste management in Beijing. *Journal of Industrial Ecology*, 2010, 14(3): 440-456.
- [19] 丁金学. 我国交通运输业碳排放及其减排潜力分析. *综合运输*, 2012, (12): 20-26.
- [20] 游芳. 基于 LCCE 模型的城市建筑代谢碳排放研究[D]. 北京: 中国科学院生态环境研究中心, 2010.
- [21] 赵艳华. 城市典型建筑代谢及生命周期评价研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2007.
- [22] 谷立静. 基于生命周期评价的中国建筑行业环境影响研究[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [23] 王上. 典型住宅建筑全生命周期碳排放计算模型及案例研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [24] 王宇. 基于设计方案的公共建筑全生命周期能耗分析与评价[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [25] 刘晓明. 基于生命周期评价的建筑碳减排对策研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- [26] 阴世超. 建筑全生命周期碳排放核算分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [27] 王婉莹. 建筑施工低碳化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [28] 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, 2005.
- [29] 王霞. 住宅建筑生命周期碳排放研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- [30] 凌浩怒, 谢静超, 杨威, 王皆腾, 朱尔玉, 江青文. 北京市住宅除采暖外能耗实测统计分析. *建筑科学*, 2012, 28(S2): 266-270.
- [31] 徐俊芳, 田昕, 江青文, 王皆腾, 杨威. 北京市住宅小区建筑全年能耗分析. *节能技术*, 2011, 29(3): 252-255.