

基于生命周期评价理论的施工碳排放研究

——以深圳大学新建学生宿舍为例

李昇翰 曹丹纶 吴松
(深圳大学土木工程学院)

【摘要】我国目前正处在城镇化高速发展时期,城镇化过程中的建筑工程施工活动产生了大量的温室气体,导致我国温室气体(GHG)的减排压力日益严峻。本文运用生命周期评价理论对施工过程中温室气体的排放情况进行分析,界定了生命周期内施工碳排放的核算范围,建立了施工碳排放的核算模型。选取深圳大学 10 栋新建宿舍,将建筑按照结构分为剪力墙结构、框架剪力墙、砖混结构三类不同结构进行案例研究,测算和分析施工过程碳排放。结果显示,这三类建筑结构住宅的主要碳排放因素都包含土石方工程、钢筋工程、混凝土工程和垂直运输,这四种主要分部工程累计碳排放占有比例为剪力墙结构 67%、框架剪力墙结构 60%、砖混结构 61%。未来可对这四种施工过程的碳排放行为作进一步探讨。

【关键词】可持续建设;生命周期评价;碳排放;分部工程

1 研究背景

习近平在《联合国气候变化框架公约》第二十一次缔约方大会讲话中重申了中国此前所做的承诺。中国将尽全力在 2030 年之前使二氧化碳排放达到峰值,2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比与 2005 年相比将下降 60%~65%。联合国环境署认为,建筑消耗了全球 40%左右的能源,排放了全球 1/3 的温室气体^[1]。中国作为温室气体排放大户,正面临着前所未有的挑战。据有关机构统计数据显示,我国每建成 1 平方米的房屋,碳排放量大约为 0.8 吨^[2]。我国城镇化发展迅速,拉动着建筑业规模不断增长。建筑业的蓬勃发展推动经济和社会的发展,同时也消耗了大量的资源,给环境造成巨大压力。《中国统计年鉴》显示全国房屋施工面积由 2006 年 410154.4 万 m² 增长到 2015 年 1239717.64 万 m²,增长了将近 4 倍(见图 1)。可以预见在未来很长时期内房屋建设规模将保持较高水平,施工面积将保持较快增长。

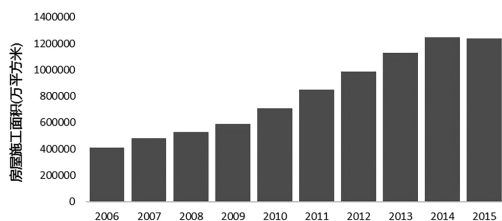


图 1 建筑业企业房屋施工面积(万平方米)

另一方面,建筑工程需要使用大量机械设备、运输

工具,这意味着各种材料及能源的消耗。随着城市人口的不断增长,以及越来越多的大型混合商业住宅社区在各城市建成,中国建筑业的能源消耗不断增加,造成的环境负荷也不断增大。而施工和安装过程中的温室气体排放是建筑物整个生命周期排放中最主要的组成部分。近年来,学者们已经意识到了建设阶段对于节能减排的重要性。为了实现有效降低能源使用和减少温室气体排放的协同效益,与施工阶段能源绩效相关的方方面面亟待解决。从目前的数据和研究可知,建筑行业虽然是中国社会能源消耗中的大户,却也是可塑性最强的行业,是可以最快最有效产生减低碳排放量的领域^[3]。

2 生命周期评价原理

20 世纪 60 年代,生命周期评价方法发源于美国以及欧洲。国际环境毒理与环境化学学会(Society of Environmental Toxicology and Chemistry, SETAC)、美国环保署(United States Environmental Protection Agency, USEPA)及北欧部长理事会(Nordic Council of Ministers)将这种方法广泛用于评估材料、产品、过程和服务当中的环境影响。1990 年国际环境毒理学和化学学会(SETAC)将这一系统化的分析工具^[4]定义为:一种用于量化和识别某一产品(或服务)相关生产工艺活动的物质、能量使用及造成的环境负荷和潜在影响的方法。生命周期评价从物质、能量消耗与转化和改善其环境影响的机会识别两方面对评价对象进行过程评

估,贯穿产品、工艺过程或活动的整个生命周期,即原材料的开采、加工,产品制造、运输和分配,使用、重新利用、维持、循环以及最终处理^[5]。

本文以生命周期评价分析作为面向产品的环境评估工具,通过将系统中物质与能量的投入和产出做成清单,了解整个过程涉及到的资源以及最终去向,从而发现全生命周期的潜在环境影响并最终做出结果解释。如果对不同系统的能量和物质的使用以及废弃物的排出进行量化比较,评估不同系统对环境的影响,可以识别出系统对环境造成影响的关键因素并提出相应的改善措施。

生命周期评价的技术框架主要是目标与范围的确定、清单分析、影响评价三者相互联系、重复进行的有机部分。如图 2。

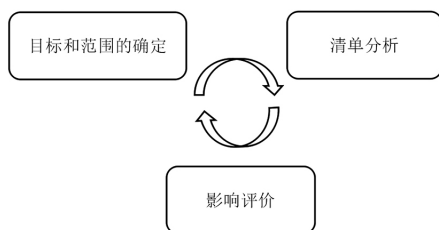


图 2 生命周期评价理论框架

确定目标和范围：明确实施的目的和原因,确定产品系统边界。汇编和评价生命周期中输入、输出及其潜在环境影响。

清单分析：根据评价的范围和目标,将研究对象划分为一系列过程或活动,收集单元过程或活动在整个生命周期中消耗的机械、材料和能源以及排放的温室气体、废弃物等输入输出数据,对清单进行整理和计算的过程。

影响评价：在清单分析的基础上,通过环境负荷数据定量地分析系统对环境的影响程度和相互关系。这一阶段是生命周期评价中最为关键的一步^[6,7]。

3 施工生命周期碳排放模型

3.1 建筑工程施工过程与生命周期

建筑工程施工的生命周期,是施工活动从“从摇篮到坟墓”的整个过程。本文界定为从施工活动动工开始一直到施工项目竣工的整个过程,主要包括:土方工程、地基与基础工程、主体结构、建筑装饰装修、屋面工程等主要施工过程^[8]。

3.2 施工生命周期碳排放核算范围与功能单位

计算施工活动过程中的碳排放需要把整个施工活动看成一个系统。形成建筑实体过程中会发生建筑材料的生产和运送、构配件的加工、施工设备的使用和运输,该系统的边界就是这些直至施工竣工验收所涉及的各种中间产品和单元过程流组成的集合。

由于建筑物规模和功能各异,施工过程中建筑材料的消耗和机械设备的使用有很大差别。所以仅计算施工碳排放总量,无法对各个项目进行横向的比较。本文以单位施工面积所产生的碳排放量作为施工碳排放功能单位,解决了由于建筑规模差异造成的比较结果不一致和不可比。

3.3 清单分析

清单分析是全生命周期内基本数据分析的一种表达^[9]。本文中的清单分析面向施工过程在整个生命周期阶段的资源、能源消耗和环境负荷(包括废气、废水和固体废物及其他环境释放物)^[10],包括建筑材料、构配件、辅助材料、施工机具和运输设备。大型机械的使用及材料设备的运输是建筑施工过程中向环境排放的主要来源,这部分主要计算能源燃烧供机械设备运转所造成的碳排放。考虑到设备的工作效率以及所用的能源类型有差异,应该以施工组织设计和现场调查为依据,对施工期内设备消耗能源的类型和用量进行详尽的统计计算^[11]。

研究建筑工程施工的碳排放是通过用施工过程的工程量与该完成过程工程量的碳排放因子相乘来计算。计算过程的碳排放量可根据单元工序清单分析和施工项目划分图的思路,在对施工项目分解细分基础上,量化施工各个过程的碳排放量。

施工机械、设备碳排放量化。

施工过程的碳排放主要来源之一是施工机械、施工设备,如推土机、挖掘机和泥浆泵等。本研究基于工序清单分析基础上,对施工过程机械、设备进行输入输出分析,构建一个单元工序碳排放量化模型,如式。

$$E_i = \sum M_i \times \mu_i \times EF_i \quad (\text{式 1})$$

式中:

E_i ——完成一个单元工序施工机械、设备所产生的碳排放当量;

M_i —— i 单元工序中工程量,是施工机械、设备消耗的电力、汽油、柴油等所需要完成的工程量;

μ_i ——第 i 类机械、设备工作台班定额;

EF_i ——使用 i 机械、设备的温室气体的排放因子^[12]。

主要建筑材料损耗碳排放量化。

建筑材料的碳排放属于间接源碳排放,从实质来说,不属于施工活动引起的排放。由于建筑材料的损耗与施工水平相关,建筑材料损耗部分的碳排放应纳入施工活动引起的碳排放当中,其碳排放量可以按照式 2 量化。

$$E_m = \sum_i MW_i \times r_i \times EF_i \quad (\text{式 2})$$

式 中:

E_m ——主要建筑材料损耗量的碳排放当量 $\text{kg CO}_2\text{eq}$;

MW_i ——第 i 类建筑材料的使用量;

r_i ——第 i 类材料的损耗率;

EF_i ——第 i 类材料的碳排放因子。

周转材料碳排放的量化。

周转材料不是属于一次性的消耗材料,它可以在不同的项目和不同施工段多次使用。在施工活动中,其使用不构成建筑结构实体。其碳排放的量化是从第一次使用直至废弃过程,计算其周转次数,它的碳排放折算均匀摊到每一次的使用当中。

$$E_o = \sum_i MO_i \times EF_i / C_i \quad (\text{式 3})$$

式 中,

E_o ——周转材料摊派到某施工过程的碳排放当量;

MO_i ——第 i 类材料的使用量;

EF_i ——第 i 类材料的碳排放因子;

C_i ——第 i 类材料的额定周转次数^[13,14]。

4 案例分析

为了探寻减低碳排放的合理路径,本文运用生命周期理论,从住宅建筑的结构类型、建筑面积、分部分项工程特点这三个方面对 10 栋深圳大学新建学生宿舍施工活动的碳排放情况进行分析。由于文章篇幅所限,在此仅列出 10 个案例依据上述方法计算出的最终结果。

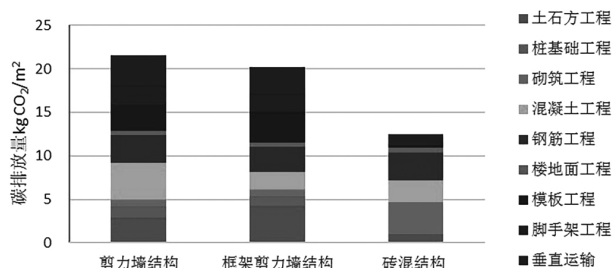


图 3 三类住宅施工碳排放对比
(单位 $\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{m}^2$)

根据模型计算,得到住宅碳排放结果为剪力墙结构 $21.53\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 、框架剪力墙结构 $20.87\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{m}^2$ 和砖混结构 $12.43\text{kg CO}_2\text{eq}/\text{m}^2$,不同结构类型的住宅其施工活动的碳排放存在着一些差异。本章节将对这些不同结构类型住宅施工活动碳排放构成进行分析。将各个施工过程按照碳排放量从大到小排序,对于构成累计占比百分数超过 90% 的施工过程,将其视作主要碳排放源进行重点分析^[15]。不同结构类型住宅的施工过程碳排放详细占比情况如图 4、图 5 和图 6 所示。

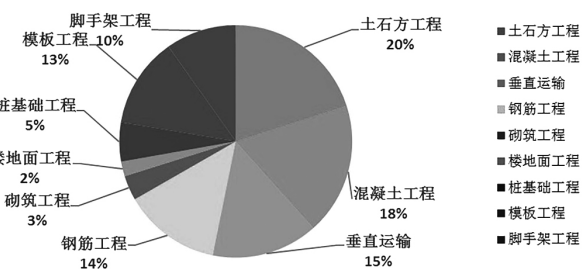


图 4 剪力墙结构施工各过程碳排放占比

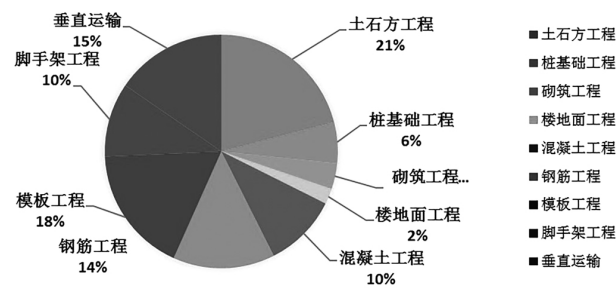


图 5 框架剪力墙结构施工各过程碳排放占比

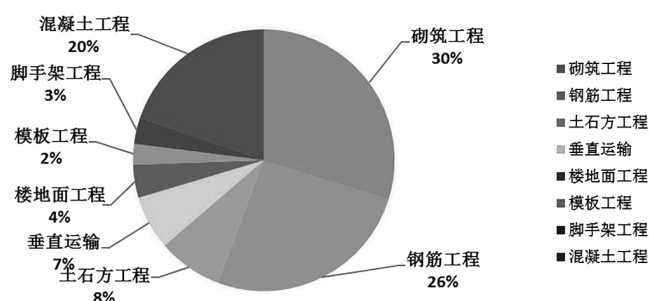


图 6 砖混结构施工各过程碳排放占比

从图 4 的施工案例的统计,我们可以发现剪力墙结构住宅案例的土石方工程、混凝土工程、垂直运输、钢筋工程、模板工程、脚手架工程为碳排放主要施工过程,分别占碳排放总量的 20%、18%、15%、14%、13%和 10%,合计占比为 90%,是剪力墙结构施工活动的主要温室气体排放源。

从图 5 的施工案例的统计,我们可以发现剪力墙结

构住宅案例的土石方工程、模板工程、垂直运输、钢筋工程、混凝土工程、脚手架工程、桩基础工程为碳排放产生的主要施工过程,分别占总量的 21%、18%、15%、14%、10%、10%和 6%,总计 94%,这些施工过程是框架剪力墙结构住宅施工活动的主要碳排放源。

从图 6 的施工案例的统计,我们可以发现砖混结构住宅案例中的砌筑工程、钢筋工程、混凝土工程、土石方工程、垂直运输工程是构成碳排放的主要施工过程,分别占总量的 30%、26%、20%、8%和 7%,合计占比为 91%,是框架剪力墙结构施工活动的主要碳排放源。

5 结论

通过对三类住宅施工碳排放构成的分析可以看出,三类住宅建筑结构主要碳排放因素都包含土石方工程、钢筋工程、混凝土工程和垂直运输^[16]。这四种分部工程在工程施工碳排放总量中占有的比例较高,且比重数值与建筑结构特点相关。剪力墙结构碳排放占有比高的分部工程有土方工程、混凝土工程和垂直运输,累计碳排放比达到 53%,加上钢筋工程累计碳排放可达 67%。框架剪力墙结构碳排放占有比高的分部工程是土石方工程、模板工程和垂直运输,累计碳排放比超过 50%,而四种分部工程累计碳排放比占 60%。砖混结构碳排放占有比高的分部工程是砌筑工程、钢筋工程和混凝土工程,累计碳排放比超过 70%,而四种分部工程累计碳排放比占 61%。从宿舍案例可以看出,对于不同建筑结构的住宅,四种主要分部工程累计碳排放占有比例都超过 50%。今后可以针对这几类施工过程的碳排放行为进行更深入的研究^[17-19]。●

【参考文献】

- [1] 曹小琳,屈婷.低碳建筑全生命周期费用估算模型研究建筑经济[J].建筑经济,2011(6):92-95.
- [2] UNEP SBCI(2009).Buildings and climate change:a summary for decision-makers. <http://www.unep.org/SB-Ci/pdfs/SBCi-BCCSummary.pdf>.
- [3] 陈康海.建筑工程施工阶段的碳排放核算研究[D].广东工业大学,2014.
- [4] Graedel T E B.R. A. industrial Ecology, 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall,2003.
- [5] 龚志起,张智慧.生命周期评价和管理与建筑业可持续发展[J].青海大学学报,2004(2) 26-29.
- [6] 李静,刘燕.基于全生命周期的建筑工程碳排放计算模型[J].工程管理学报,2015,29(04) 12-16.

- [7] 周峰.气候变化对建筑工程的影响研究[D].北京:北京交通大学,2009.
- [8] 吴玉萍,葛伟.健全建筑节能政策,推进我国建筑节能发展[J].中国建设信息供热制冷,2007(4):16-20.
- [9] 赵彤.建筑低碳化探索[M].北京:中国建筑工业出版社,2016.3.
- [10] 叶少帅.建筑施工过程碳排放计算模型研究[J].建筑经济,2012,354(4) 101-102.
- [11] 周春友,林占峰.基于全生命周期理论的住宅建筑能耗计算与分析[J].建材世界,2010,31(6) 62.
- [12] 燕艳.浙江省建筑全生命周期能耗和 CO₂ 排放评价研究[D].浙江大学硕士学位论文,2011,13.
- [13] 熊欢,刘建军.住宅建筑的全寿命周期能耗研究[J].建筑节能,2012,259,(40):60.
- [14] Shaik Sihabuddin, Samuel T. Ariaratnam. Quantification of Carbon Footprint on Underground Utility Projects [J]. 2009 Construction Research Congress. 2009 (5):49-55.
- [15] Hui Yan, Qiping Shen, Linda C.H, et al. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong [J]. Building and Environment. 2010(45):949-955.
- [16] Nassen, et al. Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: An input-output analysis [J]. Energy, 2007.32 (9): 1593-1602.
- [17] Tang, P., Cass, D., Mukherjee, A, 2013. Investigating the effect of construction management strategies on project greenhouse gas emissions using interactive simulation. [J]. J. Clean. Prod.54,78-88.
- [18] Jiang, P., Dong, W., Kung, Y., Geng, Y., 2013. Analysing co-benefits of the energy conservation and carbon reduction in China's large commercial buildings. [J]. Journal of Cleaner Production 58,112-120.
- [19] Hong, J., Shen, Q.G., Feng, Y., Lau, W.S., Mao,C., Greenhouse gas emissions during the construction phase of a building: a case study in China. [J] Journal of Cleaner Production. 2015.103,249-259.

致谢:此项研究由国家自然科学基金资助(NSFC:51478267)