

工程设计中不同阶段建筑建材物化碳排放核算方法研究

仓玉洁, 罗智星

(西安建筑科技大学建筑学院, 陕西西安 710055)

摘要: 以全球变暖为代表的气候变化日益成为当前世界最重要的环境问题之一。建筑业的高能耗、高碳排意味着节能减排的潜力大, 是当前节能减排关注的重点。建筑碳排放集中的物化阶段是生命周期中不可忽视的部分。因此, 定量核算建筑物化碳排放、针对性的节能减排尤为重要。本文以工程设计阶段为导线, 研究了适用不同设计阶段的碳排放核算方法, 以便定量地指导低碳建筑设计, 促进城市建筑低碳可持续发展。

关键词: 设计阶段; 物化碳排放; 核算方法

[中图分类号] TU111.195; TU-023

[文献标识码] A

Study on Accounting Methods of Embodied Carbon Emissions of Building Materials in Different Stages of Engineering Design

Cang Yujie, Luo Zhixing

(College of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an Shaanxi 710055, China)

Abstract: Climate change, represented by global warming, has increasingly become one of the most important environmental problems in the world. The building with high energy consumption and high carbon emissions means that it has great potential for energy-saving and emission reduction, which is the focus of current energy saving and emission reduction. The embodied stage of building carbon emission concentration is a part that cannot be ignored in the life cycle. Therefore, it is particularly important to quantitatively calculate the embodied carbon emission of the building and conduct targeted energy-saving and emission reduction. This paper takes the engineering design stage as the clue and studies the carbon emission calculation methods suitable to different design stages so as to quantitatively guide low-carbon building design and promote low-carbon sustainable development of urban buildings.

Key words: design stage; embodied carbon emissions; accounting methods

以全球变暖为主的气候变化已成为当前世界最重要的环境问题之一。根据联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的统计数据, 建筑部门占全球能源使用总量的1/3以上, 占能源相关碳排放量的19%以上^[1]。《中国建筑节能年度发展研究报告2019》显示, 2017年中国建筑业建造相关的碳排放总量高达43.8亿t, 接近我国碳排放总量的1/2^[2]。建筑业的高能耗、高碳排意味着节能减排的潜力大, 是当前节能减排关注的重点。

建筑生命周期包括物化阶段、使用阶段及生命终止阶段。虽然物化阶段贡献了建筑生命周期碳排放量的20%左右^[3], 但其以排放时间集中、排放强度大而成为生命周期中不可忽视的部分, 也是建筑节能减排不可忽略的关键环节。

1 建筑生命周期碳排放核算方法

目前, 现有的关于建筑生命周期碳排放的核算方法有
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51908441)。桂林市智慧低碳型绿色园区关键共性技术与示范(Z20190014)。

作者简介: 仓玉洁(1992-), 女, 博士研究生在读。研究方向: 建筑碳足迹。

通讯作者: 罗智星(1988-), 男, 博士, 副教授。研究方向: 绿色建筑与建筑碳足迹。邮箱: allexa@qq.com。

三种: 基于过程的生命周期清单分析法(P-LCA)、投入产出法(IO-LCA)及混合生命周期核算方法(H-LCA)。

每种方法都有其优缺点及适用范围: 一方面, 在具备详细的工程量清单的情况下, 可以用基于过程的生命周期清单分析法。这种自下而上的方法在计算建筑物化碳排放时, 需要基于比较全面的建筑材料碳排放因子来计算每一种建材, 因此这种方法多用于个体案例研究和产品具体过程的碳排放计算, 不适用于大规模的建筑碳排放的计算^[4-6]。另一方面, 在具备投入产出表的情况下, 可以用投入产出法。它采用自上而下的线性宏观经济方法, 以产业结构中的货币交易来描述复杂的产业间关系^[7]。换言之, 国家经济结构内的所有能源交易都可以得到确认和记录, 这些可以用来评估能源的投入和产出^[8]。与传统的基于过程的生命周期清单分析法相比, 投入产出法的数据提高了生命周期数据的完整性和可靠性, 从而提高了LCA的可靠性^[9]。投入产出法基于经济部门评估了上游的碳排放^[10,11], 因此, 这种方法更多地适用于计算建筑部门宏观碳排放。为了使评估更精确, 一些学者用混合生命周期核算方法去定量核算碳排放^[12,13]。这种方法不仅结合了基于过程的生命周期清单分析法的优势, 还延伸了投入产出法的系统边界^[14]。虽然混合生命周期核算方法的计算结果较准确, 但计算复杂, 计算量大。因此, 研究人员只有根据研究目的选取合适的方法, 才能得到有针对性的研究结果。

2 建筑工程设计

建筑工程设计一般可分为方案设计、初步设计和施工图设计三个阶段^[15]。方案设计、初步设计和施工图设计的区别主要有：设计深度不同，施工图设计更加具体，更加具有可行性；方案设计工作作为设计的最初阶段，为初步设计、施工图设计奠定了基础；初步设计是施工图设计编制的依据，施工图设计阶段可以修正和完善初步设计中的问题；初步设计阶段对应编制的是投资概算，而施工图设计阶段对应编制的是施工图预算。

鉴于以上不同工程设计阶段的特点，我们选用对应阶段合适的碳排放核算方法。

2.1 方案设计阶段碳排放核算

方案设计阶段确定了建筑的结构与选材，也就决定了建筑的物化碳排放。因此，在建筑设计之初，方案确定之源头，就能够从根本上及时有效地控制建筑物化碳排放。那么，如何在建筑方案设计阶段快速精确化定量预测物化碳排放成为当务之急。

但是，在建筑方案设计初期，没有建筑的工程量清单或投入产出表，我们如何运用这些方法计算建筑碳排放？

近年来，建筑信息技术的发展，尤其是建筑信息模型（BIM）技术的出现，弥补了在设计初期建筑信息获取困难的缺憾。项目复杂程度较高时，BIM及其配套的各种优化工具提供了对其进行优化的可能。应用于设计阶段的建模软件 Autodesk 公司的 Revit 软件，是实现 BIM 理念的工具之一，其主要功能是整合设计信息及建筑属性数据信息。在 Revit 模型中，所有图纸和 2D、3D 视图及明细表都是用于展现同一基础建筑模型数据库中的信息。基于 Revit 建立的模型可以自动列出明细表进行计算，更可以依照个别参数要求和数据信息自行修改或输入明细表的视图。此外，明细表视图的变更也会自动反映到每个视图。简单来说，明细表是 Revit 模型的另一种检测方式。使用 Revit 导出明细表功能可以导出各建筑部件的三维设计尺寸、体积、数量等数据，为概预算提供资料，资料的准确程度同建模的精确度成正比。那么，这些获取的各建筑部件数据是否可以直接应用于碳排放的计算中？

传统的基于过程的生命周期清单分析法物化碳排放计算所采用的清单有两点值得注意，首先，工程量清单只有在施工图设计完成之后才可获得，所以这种方法更多的是面向施工图设计阶段，在早期设计阶段很难适用。其次，建筑设计过程中很难统计清单所含的建筑材料的数量，设计期间统计建筑材料的使用量是不现实的。Revit 弥补了这一不足。Revit 通过系统族建模，系统族中对应的是建筑部件，各部件可能由多种材料组成，虽然建筑各材料的用量不能从明细表中直接获取，但是 Revit 导出的明细表是关于各部件的尺寸、体积、数量等信息。如前文所述，在早期设计阶段，通过 Revit 建立的模型信息统计，可以进行方案之间的优化对比，进而实现节能减排的设计目的。既然如此，在早期设计阶段，为什么不直接通过 Revit 平台建模来获取建筑部件的工程量，将其作为核算基本单元来计算碳排放？

因此，建立基于 BIM 的建筑物化碳排放核算方法，达

到建筑早期设计阶段实时快速定量计算碳排放，优化设计方案及指导低碳建筑设计的目的。

基于以上计算流程，我们可以得到基于 BIM 的建筑物化碳排放的计算公式^[16]：

$$QC_M = \sum_{i=1}^n CB_{C_i} \times b_{C_i} \quad (1)$$

式中， QC_M 为建筑物化的温室气体排放当量， $kg-CO_2e$ ；

CB_{C_i} 为第 i 种建筑构造的碳足迹因子， $kg-CO_2e/$ 单位；

b_{C_i} 为第 i 种建筑构造的使用量，单位。

2.2 施工图设计阶段碳排放核算

在施工图设计完成后，我们可以获得建筑工程量清单，所以基于过程的生命周期清单分析法更多的是面向施工图设计阶段。这种方法能够满足单个产品的评估^[17]。目前，已有一些基于过程的物化阶段碳排放的研究，如 Sim 针对建筑材料的碳排放或者环境影响进行研究^[18]；也有一些关于不同结构建筑碳排放的对比研究，如 Sandanayake 针对木结构和混凝土结构的建筑进行案例碳排放对比研究^[19]。研究建筑碳排放的目的是进行建筑的节能减排，Abanda 针对设计阶段运用 BIM 软件进行碳排放定量评估的研究^[20]，这些评估结果可以作为方向性的指导设计方案。任何一栋建筑物都可能包括 60 多类基本材料和大约 2 000 件单独的产品^[17,21]。如果对每一类建筑材料都进行统计核算，将会消耗大量的时间和人力。因此，如果有一种简化的方法寻找主要的建筑材料，简化非实质性排放源，将会大大提高评估碳排放的速度。这种方法的基本公式为^[17]：

$$Q = \sum_{i=1}^n R_i \times C_i \quad (2)$$

式中， Q 为建筑材料的“建筑物化”的温室气体排放当量， $kg-CO_2e$ ；

C_i 为第 i 种建筑材料的碳足迹因子， $kg-CO_2e/$ 单位；

R_i 为第 i 种建筑材料的消耗量，单位。

根据笔者之前的研究，这里确定所占比例 99% 以上的 10 种建材为主要的碳排放建筑材料。只要统计 10 种建筑材料的消耗量即可核算该建筑建材物化碳排放。这种方法简称“基于十类主要建材清单的建筑物化阶段碳排放计算方法”^[16,22]。

主要公式如下：

$$QC_{wh} = \left(\sum_{i=1}^n CM_{ri} \times m_i \right) \div 99\% \quad (3)$$

式中， QC_{wh} 为建筑物化阶段建材生产加工产生的温室气体排放当量， $kg-CO_2e$ ；

m_i 为第 i 种建材的使用量；

CM_{ri} 为不考虑回收再利用的第 i 种建材生产过程的碳排放因子， $kg-CO_2e/$ 单位；

n 为 10；

i 为 1~10，分别为钢、商品砼、墙体材料、砂浆、铜芯导线电缆、建筑陶瓷、PVC 管材、保温材料、门窗和水性涂料这 10 种建材。

3 结语

本文以建筑工程设计为导线,基于现有的碳排放核算方法的可行性、精确性,分析提出了适用于不同设计阶段的建筑物碳排放核算方法。

在建筑方案设计阶段,建立基于BIM的建筑物碳排放核算方法,能够在建筑早期设计阶段实时快速定量计算碳排放,指导优化设计方案,适用于低碳建筑设计。在施工图阶段,在具备工程量清单条件下,统计占建筑物化阶段总建材碳排放量的99%的十类建材,就能预测碳排放量。

这些核算方法的提出有利于在建筑设计的不同阶段选择对应的核算方法,以定量预测不同精确度要求的碳排放,同时也为合理选择低碳建材和优化设计提供了参考。

参考文献

- [1] IPCC Climate Change 2007: Synthesis Report[C]//Contribution of Working Groups iii and iii to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007.
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告(2019)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [3] Weon, Y.H. A Study of Life-Cycle Energy Consumption and Basic Unit of CO₂ Emission of Prototype Office Building[D]. The Graduate School of Kwangwoon University, Seoul, the Republic of Korea, 2013: 87 - 91.
- [4] Chang Y, Ries R J, Lei S. The Embodied Energy and Emissions of a High-rise Education Building: A Quantification Using Process-based Hybrid Life Cycle Inventory Model[J]. Energy & Buildings, 2012, 55(6):790-798.
- [5] Luo Z, Liu Y, Liu J. Embodied Carbon Emissions of Office Building: A Case Study of China's 78 Office Buildings[J]. Building & Environment, 2016(95):365-371.
- [6] Shao L, Chen G Q, Chen Z M, et al. Systems Accounting for Energy Consumption and Carbon Emission by Building[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2014, 19(6):1859-1873.
- [7] Lenzen M, Murray S A, Korte B, et al. Environmental Impact Assessment Including Indirect Effects—A Case Study Using Input-output Analysis[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2003, 23(3):263-282.
- [8] Omar W M S W, Doh J H, Panuwatwanich K, et al. Assessment of the Embodied Carbon in Precast Concrete Wall Panels Using a Hybrid Life Cycle Assessment Approach in Malaysia[J]. Sustainable Cities and Society, 2014, (10):101-111.
- [9] Crawford R H. Validation of a Hybrid Life-cycle Inventory Analysis Method[J]. Journal of Environmental Management, 2008, 88(3):496-506.
- [10] Dixit M K. Embodied Energy Analysis of Building Materials: An Improved IO-based Hybrid Method Using Sectoral Disaggregation[J]. Energy, 2017(124):46-58.
- [11] Jonas N?ss é n, Holmberg J, Wadeskog A, 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.
- [12] Acquaye A A, Duffy A P, Basu B. Stochastic Hybrid Embodied CO₂-eq Analysis: An Application to the Irish Apartment Building Sector[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(6):1295-1303.
- [13] Guan J, Zhang Z, Chu C. Quantification of Building Embodied Energy in China Using an Input-output-based Hybrid LCA Model[J]. Energy and Buildings, 2016(110):443-452.
- [14] Mattila T J, Pakarinen S, Sokka L. Quantifying the Total Environmental Impacts of an Industrial Symbiosis - A Comparison of Process-Hybrid and Input-Output Life Cycle Assessment[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(11):4309-4314.
- [15] 中南建筑设计院股份有限公司. 建筑工程设计文件编制深度规定[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2017.
- [16] 仓玉洁. 建筑物化阶段碳排放核算方法研究[D]. 西安建筑科技大学, 2018.
- [17] 罗智星. 建筑生命周期二氧化碳排放计算方法与减排策略研究[D]. 西安建筑科技大学, 2016.
- [18] Sim J, Sim J. The Air Emission Assessment of a South Korean Traditional Building During its Life Cycle[J]. Building & Environment, 2016(105):283-294.
- [19] Sandanayake M, Lokuge W, Zhang G, et al. Greenhouse Gas Emissions During Timber and Concrete Building Construction—A Scenario Based Comparative Case Study[J]. Sustainable Cities & Society, 2017(38):91-97.
- [20] Abanda F H, Oti A H, Tah J H M. Integrating BIM and New Rules of Measurement for Embodied Energy and CO₂ Assessment[J]. Journal of Building Engineering, 2017(12):288-305.
- [21] Kohler N, Moffatt S. Life-cycle Analysis of the Built Environment[J]. Industry & Environment, 2003, 26(2):17-21.
- [22] 仓玉洁, 罗智星, 杨柳, 等. 城市住宅建筑物化阶段建材碳排放研究[J]. 城市建筑, 2018(17): 17-21.