

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.243



开放科学(资源服务)标识码OSID:



建筑物化阶段CO₂排放及其不确定性分析

马骏

(中铁十八局集团第四工程有限公司,天津 300222)

摘要:CO₂是导致气候变暖的主要物质之一,而建筑行业的碳排放量占世界碳排放总量的25%左右。在建筑生命周期内,年均CO₂排放最多的阶段为物化阶段,对建筑物化阶段的碳排放进行量化具有重要的研究意义。考虑排放清单等数据受人因素及技术水平的限制,会出现一定的变异性,研究采用不确定性分析方法。将建筑按分部分项工程进行分解,结合具体的单元工序对物化阶段的CO₂排放进行量化建模,进而给出减排中最需关注的单元工序。通过案例分析发现,建筑物化阶段的碳减排重点是材料生产,其CO₂排放量占比达到93%;其次,在不同工序中,减排重点为土建工程,其碳排放占总体的85%;在碳排放量化过程中,对数据和情景两类不确定度进行计算。根据数据不确定度的结果可知,物化阶段CO₂排放总量的变异系数为0.3%,结果数据可信度较高。根据情景不确定度的结果可知,运输阶段改变运距及柴油类型可减排39%,施工阶段改变用电类型可减排27%。

关键词:物化阶段;CO₂排放;碳减排;生命周期评价;不确定性

中图分类号:X506

文献标志码:A

文章编号:2096-6717(2022)06-0209-10

Analysis of CO₂ emissions and uncertainties in the embodied stage of buildings

MA Jun

(China Railway 18th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300222, P. R. China)

Abstract: One of the main substance that contributes to climate warming is CO₂, and the construction industry accounts for about 25% of the world's total CO₂ emissions. During the life cycle of a building, the stage with the largest average annual CO₂ emissions is the embodied stage. Therefore, it is important to study CO₂ emissions from the embodied stage of buildings. At the same time, the uncertainty analysis method was used because of the partial variability of data such as emission inventories due to human factors and the limitations of the technology level. In this paper, we decompose the building by sub-projects, quantify the CO₂ emissions of the embodied stage by combining specific unit processes, and then give the unit processes that need the most attention in emission reduction. Through the case study, it is found that the focus of carbon emission reduction

收稿日期:2021-08-11

基金项目:中国铁建股份有限公司科技研究开发计划(2020-C64)

作者简介:马骏(1981-),男,高级工程师,主要从事城市轨道交通施工技术研究,E-mail: xiaohuiwygs@163.com。

Received:2021-08-11

Foundation items: Science and Technology Research and Development Program of China Railway Construction Co. (No. 2020-C64)

Author brief: MA Jun (1981-), senior engineer, main research interest: urban rail construction technology, E-mail: xiaohuiwygs@163.com.

in the embodied stage of the building is the material production phase, which accounts for 93% of CO₂ emissions. Next, among the different processes, the focus of emission reduction is civil engineering, whose carbon emissions account for 85% of the overall. Two types of uncertainties, data and scenario, are also calculated in the carbon emission quantification process. According to the results of data uncertainty, it can be seen that the coefficient of variation of the total CO₂ emissions in the embodied stage is 0.3%, and the confidence of the result data is high. According to the results of the scenario uncertainty, it is known that changing the distance and type of diesel fuel in the transportation stage can reduce carbon emissions by 39%, and changing the type of electricity used in the construction stage can reduce emissions by 27%.

Keywords: embodied stage; CO₂ emission; carbon emission reduction; life cycle assessment; uncertainty

根据政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第4次评估报告,到21世纪末,地球表面的平均温度将上升1.1~6.4℃,温室气体排放增加是导致气温升高的主要原因,而温室气体排放增加的主要原因之一是人类活动^[1]。这对人类的基本生存以及未来的可持续发展都是严峻挑战。

建筑业是最大的能源消耗行业之一,也是温室气体排放的主要来源^[2]。2019年,全球建筑行业的碳排放总量约为100亿t^[3],占全球能源相关碳排放总量的28%,若加上建材工业部分(整个工业中用于制造的建筑材料,如钢铁、水泥和玻璃等)的排放,这一比例将上升至38%。大力减少建筑领域相关过程中的碳排放,应从建筑设计、建材生产、运输与施工建造、运行维护以及拆除等环节重新思考,使整个领域产生革命性变化^[4]。目前,建筑运营阶段的碳减排是建筑节能减排的研究热点。虽然建筑使用阶段排放量达到总排放量的70%~80%,但建筑物化阶段的碳排放却占建筑前3年内排放总量的20%~30%^[5],建筑运营阶段年限较长,而物化阶段时间较短,若按年平均排放量计算,物化阶段碳排放量高于使用阶段。建筑物化阶段是指从建材的生产阶段到建筑完成建造交付使用之前的所有阶段,主要包括建材生产阶段、运输阶段、施工建造阶段。因此,要全面实现建筑行业的绿色化,需要对目前尚未充分研究的物化阶段进行细化研究。

此外,在以往的研究中,定量方法通常是确定性的,没有考虑输入参数的不确定性。但事实上,由于人为因素和技术因素的存在,搜集到的相关数据会显示出一定程度的不确定性。因此,有必要对量化过程中的各类不确定性进行计算,以便得到更加准确合理的量化结果。为了验证该方法,以已建成的北京市大兴区某栋装配式住宅项目为例进行

物化阶段碳排放计算,并对建材运输距离和施工能源结构设置不同情形,以进行不确定性量化研究。

1 LCA不确定性研究现状

2004年,Heijungs等^[6]给出了生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)不确定性的定义:LCA过程中不准确的测量、缺失的数据和不准确的假设对输出结果的影响称为LCA不确定性。分别为:1)由于内部变化、测量不准确或缺少数据引起的数值不确定性;2)构造LCA数学计算模型引起的不确定性;3)建立不同情景时,不同选择产生的不确定性。

限制LCA实践的难度主要是获取数据,因为数据是进行清单分析及评价特征模型应用的基础。参数的不确定性一直是学者们关注的焦点,目前已知的量化方法有DQI(Data Quality Indicator)方法、贝叶斯统计、模糊理论、解析不确定性传播和概率法^[7],其中,DQI应用最为广泛。

DQI方法由Weidema^[8]开发,莫华等^[9]、黄娜等^[10]调整了其汉化参数。Ecoinvent数据库还提供了每个数据点在单元过程层面基于DQI的不确定性信息^[11-12]。但在这个过程中仍存在一些局限,例如,数据的不确定性分布类型仅考虑了对数正态分布^[13]。Muller等^[14]提出了一种改进算法,使得新数据加入时可以更新相应的不确定性系数。

在量化所有原始数据的参数不确定性之后,有必要将该不确定性传播到量化结果中。目前传播的主要方法是蒙特卡洛模拟,但其计算量大,尤其需要对各种场景进行比较。目前,泰勒级数展开法是解决这一缺陷的主要方法。Imbeault-Tétreault等^[15]、Heijungs等^[16]都比较了这两种方法。Groen等^[17]比较了拉丁超立方抽样法、拟蒙特卡洛抽样法和模糊区间运算法等。目前,很多商业生命周期评价程序都倾向于使用蒙特卡洛抽样方法。

各类不确定性在经过传播后进入生命周期评价阶段,该阶段的主要任务包括分类及表征、标准化和权重。其中,对标准化系数的不确定性研究较为充分。根据ISO 14042标准,标准化系数是由产品和参照系统的比值得到的,由于缺少排放数据和表征系数,会导致标准化系数的偏差。一种解决方案是尽量完善数据库和表征系数,从而减少决定性偏差的风险^[18]。Benini等^[19]和Sala等^[20]给出了影响标准化系数的因素,提出了计算标准化系数不确定度的方法。Lautier等^[21]计算了加拿大和美国的标准化系数,并与欧洲现有的标准化系数进行了比较。

综上所述,目前对生命周期评价的不确定性研究主要集中在参数不确定性方面,情景分析通常考虑模型和情景的不确定性。Huijbregts^[22]通过分析规范或相关假设来罗列各类选择情景,以此分别量化结果的情景和模型的不确定性。Mendoza Beltran等^[23]也提出了一种可以应用于LCA计算机软件的方法,使其可以处理由于方法论选择而造成的不确定性。

在土木工程方面,Hong等^[24]考虑到建设期的基本特性,提出了一个基于概率方法的不确定分析框架;Zhang等^[25]对桥梁生命周期内各阶段LCA结果的变异系数及其影响因素进行了统计性分析。

2 建筑物化阶段CO₂排放计算及不确定性分析模型

2.1 模型边界

建设项目的全生命周期可分为物化阶段、使用阶段和拆除处置阶段。物化阶段是指建筑建造完成之前的所有阶段,其系统边界如图1所示,主要包括:1)材料生产阶段,包括原材料生产过程和生产过程中所需要的能量;2)运输阶段,包括物料运输过程中所耗能源的开采生产过程;3)施工阶段,包括施工区域内各种机械设备的能耗,以及办公区、生活区的照明、空调、办公设备、烹饪等能耗。

物质流体系的边界为施工过程中所需要的各种建材和辅助材料,以及由各种建筑材料预制而成的预制构件。其中,材料生产中使用的各种设备产生的材料损耗和环境影响不计入系统边界内。能源系统边界包括煤、天然气、汽油、柴油和电力。

2.2 模型构建

根据建设工程施工流程,结合工程概预算定额,实现建设项目的分解与集成。采用基于工程量清单的CO₂排放计算模式,以单元工序为基本单位,

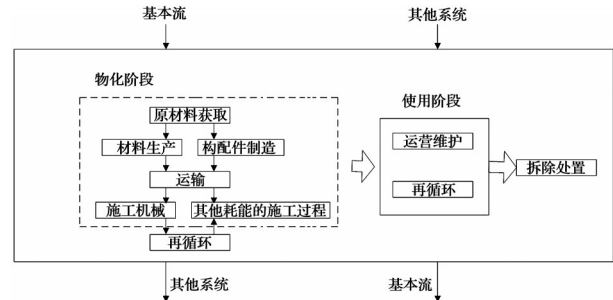


图1 建筑工程全生命周期系统边界

Fig. 1 Whole life cycle system boundary for construction project

构建各单元工序的CO₂排放清单和“综合CO₂排放系数”。这种计算模式的优点:一方面是基于建筑构件进行计算,便于相关设计人员更有针对性地控制CO₂排放;另一方面,在实际操作中,工程量清单的计算过程与概预算编制过程是一致的,可以有效地减少计算过程中所涉及的统计工作量。

各单元工序的碳排放系数计算公式见式(1)。

$$E_n = \sum p_i (W/w) EF_{mat,i} + \sum p_i L_i EF_{tra} + \sum (p_i \beta_i L_i EF_{tra} + p_i \beta_i EF_{dis,i} + q_j EF_{mach,j}) \quad (1)$$

式中: E_n 为单元工序 n 的CO₂排放系数,kg; p_i 为完成单元工序 n 消耗的第 i 种材料用量; W 为建筑设计使用寿命; w 为材料设计使用寿命; $EF_{mat,i}$ 为第 i 种材料的CO₂排放系数; L_i 为第 i 种材料的运输距离,km; EF_{tra} 为运输阶段的CO₂排放系数; β_i 为第 i 种材料的损耗系数; $EF_{dis,i}$ 为第 i 种材料垃圾处理的CO₂排放系数; q_j 为完成单位单元工序 n 消耗的第 j 种机械量,台班; $EF_{mach,j}$ 为第 j 种机械的CO₂排放系数。

以单位工程定额清单为基础,建立分项工程定额清单,并计算已完成分项工程的综合碳排放系数。分项工程碳排放系数计算方法见式(2)。

$$E_p = \sum_n Q_n E_n \quad (2)$$

式中: E_p 为单位分项工程 p 的CO₂排放系数; Q_n 为完成单位分项工程所需要的单元工序 n 的工程量。

建设项目按规模从大到小可分为单位工程、分部工程、分项工程。因此,通过各分项工程相加可得到整个建筑工程物化阶段的CO₂排放量。建筑工程物化阶段碳排放总量计算公式如式(3)所示。

$$E = \sum_r \sum_q \sum_p E_p \quad (3)$$

式中: E 为建筑工程物化阶段CO₂排放总量; r 为单位工程; q 为分部工程; p 为分项工程。

综上,建筑物化阶段中材料生产、运输和施工建造3部分的碳排放计算公式分别为:

1) 材料生产阶段

$$E_{\text{mat}} = \sum_r \sum_q \sum_p \sum_n p_i \times (W/w) \times EF_{\text{mat},i} \quad (4)$$

式中: E_{mat} 为材料生产阶段的 CO_2 排放量, kg; n 为单元工序。

2) 运输阶段

$$E_{\text{tra}} = \sum_r \sum_q \sum_p \sum_n p_i \times L_i \times EF_{\text{tra}} \quad (5)$$

式中: E_{tra} 为运输阶段的 CO_2 排放量, kg。

根据2017年《中国统计年鉴》数据^[26], 2016年中国公路货物运输的平均运输距离为183 km。建筑材料的主要运输方式是公路运输。因此, 运输距离均按全国公路平均运输距离计算, 后续会根据不同运输距离的取值情况分析不同情景。据李学东^[27]的研究, 公路运输的燃油消耗量为0.015 2 kg/(t·km), 则 $EF_{\text{tra}} = 0.055 6 \text{ kg}/(\text{t} \cdot \text{km})$ 。

3) 施工建造阶段 由于数据收集的局限性, 仅考虑施工现场内所有施工机械的能耗, 如式(6)所示。

$$E_{\text{con}} = \sum_r \sum_q \sum_p \sum_n q_j EF_{\text{mach},j} \quad (6)$$

式中: E_{con} 为施工建造阶段的 CO_2 排放量, kg。

建筑物化阶段的 CO_2 排放总量如式(7)所示。

$$E = E_{\text{mat}} + E_{\text{tra}} + E_{\text{con}} \quad (7)$$

2.3 排放因子

所需的各种材料 CO_2 排放因子主要以《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)^[28] 为依据, 部分排放因子选用 GABI 软件^[29] 中的数据库。GABI 软件是一款由德国开发的评价产品或服务潜在环境影响的常用工具, 受到学术界的广泛好评。

能源排放考虑了能源生产、运输和使用3个阶段。普通柴油、生物柴油、水力发电、风力发电的碳排放因子均来自 GABI, 其余材料的碳排放因子均来自《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366—2019)。

施工建造阶段的机械设备单位台班能耗按《全国统一施工机械台班费用定额》确定, 结合能源的碳排放系数, 可得到各机械设备单位台班的碳排放系数。

2.4 不确定性分析模型

2.4.1 不确定性的来源 建筑生命周期评价的不确定性包含3类, 分别是参数的不确定性、情景的不确定性和模型的不确定性。

1) 仅考虑不同材料和机械使用过程中产生的碳排放, 因此, 参数不确定性主要来源于清单分析阶段各数据的不确定性。

2) 对不同运距、能源类别的不同情景的选择作

为情景不确定性。

3) 模型不确定性指在环境影响计算过程中由于所用的各种数学模型本身不完善而产生的不确定性。在环境排放的特征化中, 如将CHA特征化为 CO_2eq 的过程, 由于是通过太阳辐射等效升温来考虑的特征化因子, 各地区、各国的实际条件对此的影响可以忽略不计, 因此认为此模型本身并不存在不确定性。在本文中, 只涉及将大气排放物当量为某一种特定物质的过程, 所以不考虑这种不确定性。

2.4.2 数据不确定性分析模型 采用DQI方法确定不确定度, 具体的计算过程如图2所示。根据黄娜等^[11]的研究, 可以得到适合中国国情的数据质量指标及不确定度。

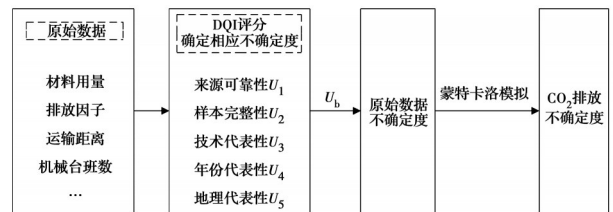


图2 DQI评价流程

Fig. 2 DQI evaluation process

工程量数据全部来自建设项目部预算清单, 排放因子数据来自多个数据库, 属于单一的数据来源。根据 Ecoinvent 数据库^[11] 中对数据分布形式的考虑, 选择对数正态分布的数据分布类型。此外, 将获取清单和数据库时原始数据的不确定度设为 U_b , 按 Ecoinvent 数据库^[11] 中提供的标准差来考虑此类。

综上所述, 数据不确定度的计算公式见式(8)、式(9)。

$$U_i = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2} \quad (8)$$

$$U_{d,i} = \sqrt{U_b^2 + U_i^2} \quad (9)$$

式中: $U_1 \sim U_5$ 为第 i 个数据的5个数据质量指标的不确定度; U_i 为第 i 个数据的质量不确定度; $U_{d,i}$ 为第 i 个数据的数据不确定度; U_b 为第 i 个数据的基本不确定度。

2.4.3 情景不确定性分析模型 在分析情景不确定性时, 首先确定碳排放量化过程中的不同情景, 然后根据每个情景的不同选择对结果的不确定性进行计算。

1) 运输距离 不同建材厂与施工地点之间的距离不同, 甚至相差很大, 因此, 选用不同的厂家时应对应选择不同的运输方案。运输距离分两种情景: 情景a, 取全国的平均运距183 km; 情景b, 建材

厂位于项目所在地周边,平均运距假定为 100 km。

2) 能耗种类 建筑物化阶段能源能耗很大,消耗的量化标的主要是油和电。对于燃油来说,存在普通柴油和生物柴油两种选择,情景 a 为普通柴油,碳排放因子 3.660 3 kg/kg;情景 b 为生物柴油,碳排放因子 2.381 6 kg/kg。对于电力来说,由于不同地区的发电模式构成不同,因此存在不同的电力结构。设情景 a 为电能来自项目所在地的电力结构,碳排放因子为 1.058 kg/kWh;情景 b 为电能来自水力发电,碳排放因子为 0.007 46 kg/kWh;情景 c 为电

能来自风力发电,碳排放因子为 0.015 2 kg/kWh。

由于案例为已经实际施工完成的项目,所以在计算 CO₂ 排放的过程中各数据的选择为确定情景。因此,有关情景部分的讨论针对物化阶段各减排手段的实际效果来展开,综合考虑项目所在地位置、建设成本、技术可行性等因素。运距的情景概率根据国家统计局提供的全国平均运距与项目自身所在地位置给出,能耗种类的情景概率根据国家统计局中的能源种类消耗统计给出。各情景发生的概率值见表 1。

表 1 不同情景分类及发生概率

Table 1 Classification of different scenarios and probability of occurrence

情景类别		情景序号	情景概率/%	情景序号	情景概率/%	情景序号	情景概率/%		
运输距离	全国平均运距	a	30	S1	40	S3	50		
	本地周边运距	b	70						
油耗	普通柴油	a	90	S4	80	S6	70		
	生物柴油	b	10					20	30
能耗种类	本地区电力结构	a	70	S7	80	S8	10		
	电能	水力发电结构	b					20	10
	风力发电结构	c	10					10	

假设不同类型的情景相互独立,则各情景的不确定度计算公式见式(10)。

$$U_{Si} = \sqrt{U_{Si_a}^2 + U_{Si_b}^2 + \dots} \quad (10)$$

式中: U_{Si} 为第 i 种情景类型的不确定度; U_{Si_a} 、 U_{Si_b} ... 为第 i 种情景类型下不同情景(a或b)的不确定度。

3 案例分析

3.1 工程概况

选取位于北京市大兴区的某栋住宅项目作为案例,该住宅楼为装配式混凝土剪力墙结构,建筑面积 8 420.29 m²,其中,地下 3 层,地上 17 层,建筑层高 3 m,建筑高度 52.5 m,该工程由中铁建设集团施工总承包。

3.2 CO₂ 排放计算结果

该项目可分解为不同的分项工程,如土建工程、装饰工程、电气工程、给排水工程、采暖工程、通风工程、消防工程等。根据建立的碳排放计算模型,每个单位工程内有不同的分部分项工程。

根据项目工程量清单及各分部分项工程的碳排放系数,得出各单位工程 CO₂ 排放量,见表 2。

表 2 中,不同分项工程的机械碳排放是建筑施工过程中使用的机械设备产生的碳排放,而材料碳排放表示生产建材及柴油过程中所产生的碳排放

量。每个分项工程施工过程中均存在材料生产、运输及施工建造 3 个阶段,因此,根据文中提到的模型进行计算,可得到表 3。

表 2 工程 CO₂ 排放量

Table 2 CO₂ emissions of projects

单位工程	单位工程 CO ₂ 排放/kg	
	机械	材料
土建工程	1.74×10 ⁵	6.55×10 ⁶
装饰工程	1.30×10 ²	3.16×10 ⁵
通风工程	5.68×10 ²	1.35×10 ³
给排水工程	8.60×10 ⁴	1.36×10 ⁴
采暖工程	3.37×10 ³	2.18×10 ³
消防工程	1.79×10 ³	8.85×10 ¹
电气工程	3.18×10 ⁴	2.75×10 ⁵

根据表 3 中的数据以及建筑总面积可知,物化阶段单位建筑面积的 CO₂ 排放量为 8.85×10² kg/m²,其中,土建工程、装饰工程、电器工程、给排水工程、采暖工程、通风工程和消防工程碳排放分别为 7.90×10²、3.84×10¹、3.82×10¹、1.66×10⁻¹、6.63×10⁻¹、3.52×10⁻¹、6.42×10⁻² kg/m²。

建筑物化阶段中材料生产、运输及施工建造阶段的 CO₂ 排放量分别为 7.00×10⁶、2.51×10⁵、2.01×10⁵ kg。各阶段单位建筑面积的 CO₂ 排放量

表3 建筑物化阶段CO₂排放量

单位工程	阶段	CO ₂ 排放量/kg	合计/kg
土建工程	材料生产阶段	6.39×10^6	6.65×10^6
	运输阶段	1.87×10^5	
	施工建造阶段	7.71×10^4	
装饰工程	材料生产阶段	3.16×10^5	3.23×10^5
	运输阶段	6.89×10^3	
	施工建造阶段	1.30×10^2	
电气工程	材料生产阶段	2.75×10^5	3.22×10^5
	运输阶段	1.49×10^4	
	施工建造阶段	3.18×10^4	
给排水工程	材料生产阶段	1.36×10^4	1.40×10^5
	运输阶段	4.07×10^4	
	施工建造阶段	8.60×10^4	
采暖工程	材料生产阶段	2.18×10^3	5.58×10^3
	运输阶段	3.19×10^1	
	施工建造阶段	3.37×10^3	
通风工程	材料生产阶段	1.35×10^3	2.96×10^3
	运输阶段	1.04×10^3	
	施工建造阶段	5.6×10^2	
消防工程	材料生产阶段	8.85×10^1	1.89×10^3
	运输阶段	1.46×10^1	
	施工建造阶段	1.79×10^3	
合计			7.45×10^6

分别为 8.31×10^2 、 2.98×10^1 、 2.38×10^1 kg/m²。

3.3 不确定性分析

3.3.1 数据不确定性分析 材料生产、运输和现场施工建造的不确定性计算结果如下:

1) 材料生产阶段 材料生产阶段的CO₂排放计算公式如式(4)所示,根据相关规定,认为建筑和材料寿命是常数。在进行蒙特卡洛模拟时,分别进行了500~20 000次抽样。抽样到10 000次时,标准差开始稳定。表4显示了材料生产阶段CO₂排放的不确定度及变异系数。

表4 材料生产阶段CO₂排放的数据不确定度

单位工程	CO ₂ 排放		
	均值	不确定度	变异系数/%
土建工程	6.55×10^6	1.97×10^3	0.03
电气工程	2.75×10^5	1.55×10^4	5.65
采暖工程	2.18×10^3	9.00×10^1	4.13
通风工程	1.35×10^3	4.39×10^1	3.25
装饰工程	3.16×10^5	2.21×10^2	0.07
给排水工程	1.36×10^4	5.60×10^2	4.12
消防工程	8.85×10^1	7.08×10^{-2}	0.08

2) 运输阶段 式(5)中材料及能源的碳排放因子的不确定度分别为0.035和0.043 3,根据相关论文及国家统计数据可知,运距和运输工具能耗的不确定度分别为0.347和0.351,则运输阶段CO₂排放不确定度如表5所示。

表5 运输阶段CO₂排放的数据不确定度

单位工程	CO ₂ 排放		
	均值	不确定度	变异系数/%
土建工程	1.87×10^5	3.74×10^3	2
电气工程	1.49×10^4	4.47×10^2	3
采暖工程	3.19×10^1	6.38×10^{-1}	2
通风工程	1.04×10^3	4.16×10^1	4
装饰工程	6.89×10^3	1.38×10^2	2
给排水工程	4.07×10^4	8.14×10^2	2
消防工程	1.46×10^1	2.92×10^{-1}	2

3) 施工建造阶段 式(6)为施工阶段碳排放计算公式,其中建筑面积及施工时间等为确定数据,不确定度为0。因此,施工建造阶段的碳排放数据不确定度见表6。

表6 施工建造阶段CO₂排放的数据不确定度

单位工程	CO ₂ 排放		
	均值	不确定度	变异系数/%
土建工程	7.71×10^4	1.54×10^3	2
电气工程	3.18×10^4	1.27×10^3	4
采暖工程	3.37×10^3	1.01×10^2	3
通风工程	5.68×10^2	1.14×10^1	2
装饰工程	1.30×10^2	2.60×10^0	2
给排水工程	8.60×10^4	1.72×10^3	2
消防工程	1.79×10^3	5.37×10^1	3

从表4~表6的数据不确定度和CO₂排放量来看,如图3所示,对物化阶段CO₂排放量影响较大的是土建及给排水工程,相应的数据不确定度也较小;其次是电气工程,虽然只占材料生产阶段CO₂排放的4%左右,但在施工阶段可以达到16%,虽然装饰、消防、通风和采暖工程数据的不确定度较大,但碳排放量占总排放量的比例不足1%,因此,其不确定度产生的数据对总排放量的影响可忽略不计。整个建筑物化阶段碳排放总量的变异系数为0.37%,由此可以判断,建筑物化阶段碳排放结果的数据可信度较高,结果较理想。

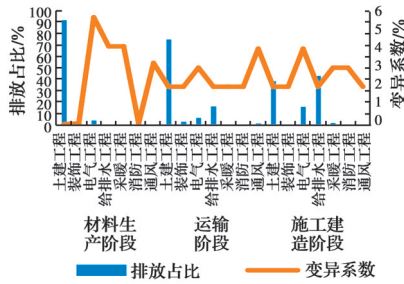


图 3 物化阶段 CO₂ 排放占比及变异系数

Fig. 3 Proportion and variation coefficient of CO₂ emission in embodied phase

3.3.2 情景不确定性分析 采用不同情景对运距和能源类型进行不同概率的排列组合,得到不同情景下相应的数据及不确定度,见表 7。

表 7 各情景下的排放参数均值及其不确定度

Table 7 Mean values of emission parameters and their uncertainties for each scenario

情景	情景参数	均值	不确定度
S1	运距	1.25×10^2	2.66×10^{-1}
S2	运距	1.33×10^2	2.52×10^{-1}
S3	运距	1.41×10^2	2.47×10^{-1}
S4	柴油排放因子	3.53×10^0	3.92×10^{-2}
S5	柴油排放因子	3.40×10^0	3.58×10^{-2}
S6	柴油排放因子	3.28×10^0	3.29×10^{-2}
S7	电排放因子	7.44×10^{-1}	3.16×10^{-2}
S8	电排放因子	8.49×10^{-1}	3.53×10^{-2}

图 4 为不同情景下运输阶段减排情况及变异系数变化比例,可以看出,单情景情况下,情景 S1 减排比例最高,为 32%,减排量为 7.96×10^4 kg;多情景情况下,S1+S6 情景发生时,则可减少 39% 的 CO₂ 排放,减排量为 9.75×10^4 kg。因此,通过改变运输距离和柴油使用的种类均可达到良好的减排效果。且运距改变时,CO₂ 排放的变异性系数均小于 10%。因此,在未来的施工运输过程中,可综合考虑运距及柴油类型来达到更好的减排效果。

图 5 为不同情景下建造阶段减排及变异系数变

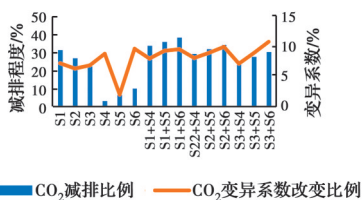


图 4 不同情景下运输阶段减排及变异系数变化比例

Fig. 4 Change ratio of emission reduction and variation coefficient in transport phase under different scenarios

化比例。由图 5 可知,在施工建造阶段,单情景情况下,S7 情景可以减排 27%,约 5.44×10^4 kg,其次是情景 S8,可以减排 18%,约 3.62×10^4 kg,而改变运距及柴油类型,减排均小于 1%,因此,混合情景模式下,运距及柴油类型对整体碳减排的影响可以忽略不计。综上可知,电力结构是施工建造阶段碳排放的主要影响因素,通过改变用电结构,可以大大减少施工建造阶段的碳排放量,因此,未来大力发展清洁能源(如风能、水能、太阳能)发电是很有必要的。

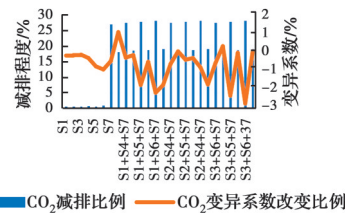


图 5 不同情景下建造阶段减排及变异系数变化比例

Fig. 5 Change ratio of emission reduction and variation coefficient in construction phase under different scenarios

3.4 建筑物化阶段 CO₂ 排放分析

根据计算结果,该案例在物化阶段的碳排放总量为 7.45×10^6 kg,而各阶段碳排放所占比例如图 6 所示。从不同阶段来看,材料生产产生的碳排放占到 93%,是物化阶段最主要的碳排放贡献阶段,主要是因为材料生产时耗费的钢筋混凝土等建材的内含能较大,而运输阶段和施工建造阶段的碳排放仅分别占整个物化阶段的 3% 和 4%。从不同施工工序来看,土建工程的碳排放占比最高,达到了 89%,其次是装饰工程及电气工程,均占 4%。因此可以看出,若想减少整个阶段的碳排放量,最重要

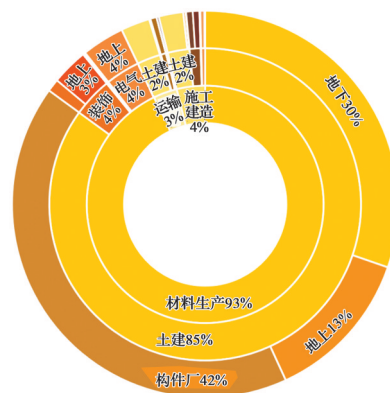


图 6 物化各阶段 CO₂ 排放比例

Fig. 6 Proportion of CO₂ emissions in each phase of embodied stage

的是减少土建施工过程中的碳排放。从不同施工部位来看,构件厂碳排放量占比为42%,地下部分占比为34%,而地上部分占比为16%。出现这种情况的主要原因是本案例为装配式建筑,其中预制构件的使用量较大,且主要用在地上部分,因此,地上部分有较多碳排放量计算到构件厂部分中。

为了对案例中各单位工程碳排放量有更清晰的了解,图7给出了各单位工程物化阶段的碳排放比例。从图7中可知,在物化阶段的所有单位工程中,土建工程、装饰工程、电气工程三者碳排放占比之和达到98%,而这3个单位工程中占比最高的均为材料生产,分别占各自部分的95%、85%、98%。此外,给排水工程、采暖工程和消防工程中,施工建造阶段产生的碳排放占主要贡献,分别为61%、60%、95%。对于通风工程来说,其材料生产阶段、运输阶段及施工建造阶段的碳排放占比较为均匀,分别为46%、35%、19%。



注：由于电气、给排水和采暖工程各物化阶段的比例均小于土建工程和装饰工程，故图中未按相应排放比例绘制各分项工程

图7 各分项工程物化各阶段CO₂排放比例

Fig. 7 Proportion of CO₂ emission in each embodied stage of each sub-project

根据上述分析可知,材料生产阶段产生的碳排放占比达到90%以上。因此,实现建筑物化阶段碳减排的重要方法之一是控制材料生产阶段的碳排放。而减少材料生产碳排放的方法主要有两种:一是建材生产厂商从源头进行减排,目前,很多水泥及钢材生产厂商均在减排改革,通过使用清洁能源以及碳捕捉、碳封存等技术来减少生产中的碳排放;二是通过利用建筑废料作为主要建材,如使用再生混凝土,提高废物利用率,可大大减少材料生产产生的碳排放。

施工现场的碳排放直接影响着项目周边的环

境,因此,单独考虑施工建造阶段的碳排放很有必要。项目建设阶段碳排放量随时间变化情况如图8所示。从图8中可知,从2016年3月到2016年8月,碳排放量呈线性增加,主要是因为主体结构的施工,大型机械的使用导致这阶段耗油、耗电量急剧增加,碳排放量也随之增加。而2016年8月之后,进行采暖工程、电气工程等施工,这一阶段所使用的机械能耗较小,产生的碳排放速率也大大减缓。

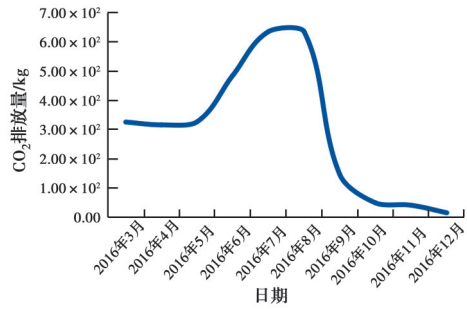


图8 CO₂排放量随时间变化图

Fig. 8 Change graph of CO₂ emission with time

4 结论

建立了建筑物化阶段的碳排放计算模型,并考虑了不同建材运输距离和施工能源结构情景下的不确定性;结合案例,确立了建筑碳排放计算框架。得到以下主要结论:

1)以某施工单位提供的工程概预算清单为基础,对建筑物化阶段不同施工工序的碳排放进行详细分析,发现土建工程施工碳排放占总体的85%,材料生产阶段碳排放占比达93%,均为碳排放控制重点,并给出了减排建议。

2)计算建筑物化阶段CO₂排放的数据和情景不确定度,给出各单位工程CO₂排放的变异系数,分析不同情景下的碳排放情况,并给出减排建议,运输阶段,改变运距及柴油类型可碳减排39%,施工阶段,改变用电类型可减排27%。

3)建立以工程概预算定额和实际工程量为基础的碳排放量化模型,并分析施工碳排放随施工进度的变化趋势,发现主体结构施工阶段及装饰阶段为碳排放主要贡献阶段。

建筑业是高耗能行业,随着资源环境约束的收紧和城镇化的推进,实现建筑节能减排变得越来越重要。虽然本文给出了建设阶段CO₂排放量的计算方法,但仍有大量工作有待进一步研究和完善:

1)受限于数据收集,本文未考虑施工现场办公区及生活区的碳排放,后续研究中将进一步探讨。

2)采用区域统计理论值进行计算分析。在后续计算中,如果可以采用企业实际施工水平的企业定额,结果会更加准确。

参考文献

- [1] 第四次评估报告综合报告撰写组. 气候变化2007综合报告[R]. 政府间气候变化专门委员会 IPCC, 2007.
- [2] Energy Transitions Commission. China 2050: A fully developed rich zero-carbon economy [R]. 2019.
- [3] Environment Programme UN. 2020 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector [R]. 2020.
- [4] 江亿, 胡姗. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1-13.
JIANG Y, HU S. Paths to carbon neutrality in China's building sector [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(5): 1-13. (in Chinese)
- [5] 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 B R, LIU N X, PENG B, et al. International comparative study on building life-cycle energy consumption and CO₂ emission [J]. Building Science, 2013, 29(8): 22-27. (in Chinese)
- [6] HEIJUNGS R, HUIJBREGTS M A J. A review of approaches to treat uncertainty in LCA [C]//PAHL-WOSTL C, SCHMIDT S, RIZZOLI AE, et al. Complexity and Integrated Resources Management; Transactions of the 2nd Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society. Switzerland: The International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) Press. 2004: 332-339.
- [7] HUIJBREGTS M A J, GILIJAMSE W, RAGAS A M J, et al. Evaluating uncertainty in environmental life-cycle assessment. A case study comparing two insulation options for a Dutch one-family dwelling [J]. Environmental Science & Technology, 2003, 37(11): 2600-2608.
- [8] WEIDEMA B P. Multi-user test of the data quality matrix for product life cycle inventory data [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 1998, 3(5): 259-265.
- [9] 莫华, 张天柱. 生命周期清单分析的数据质量评价[J]. 环境科学研究, 2003, 16(5): 55-58.
MO H, ZHANG T Z. Data quality assessment of life cycle inventory analysis [J]. Research of Environmental Sciences, 2003, 16(5): 55-58. (in Chinese)
- [10] 黄娜, 王洪涛, 范辞冬, 等. 基于不确定度和敏感度分析的LCA数据质量评估与控制方法[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6): 1529-1536.
HUANG N, WANG H T, FAN C D, et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(6): 1529-1536. (in Chinese)
- [11] WEIDEMA B P, BAUER C, HISCHIER R, et al. Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3 [R]. Swiss: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2013: 70-78.
- [12] CIROTH A, MULLER S, WEIDEMA B, et al. Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(9): 1338-1348.
- [13] HENRIKSSON P J G, GUINÉE J B, HEIJUNGS R, et al. A protocol for horizontal averaging of unit process data-including estimates for uncertainty [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(2): 429-436.
- [14] MULLER S, LESAGE P, SAMSON R. Giving a scientific basis for uncertainty factors used in global life cycle inventory databases: An algorithm to update factors using new information [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(8): 1185-1196.
- [15] IMBEAULT-TÉTREAULT H, JOLLIET O, DESCHÊNES L, et al. Analytical propagation of uncertainty in life cycle assessment using matrix formulation [J]. Journal of Industrial Ecology, 2013, 17(4): 485-492.
- [16] HEIJUNGS R, LENZEN M. Error propagation methods for LCA-A comparison [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(7): 1445-1461.
- [17] GROEN E A, HEIJUNGS R, BOKKERS E A M, et al. Methods for uncertainty propagation in life cycle assessment [J]. Environmental Modelling & Software, 2014, 62: 316-325.
- [18] HEIJUNGS R, GUINÉE J, KLEIJN R, et al. Bias in normalization: Causes, consequences, detection and remedies [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 12(4): 211-216.
- [19] BENINI L, SALA S. Uncertainty and sensitivity analysis of normalization factors to methodological assumptions [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016, 21(2): 224-236.
- [20] SALA S, BENINI L, MANCINI L, et al. Integrated assessment of environmental impact of Europe in 2010: Data sources and extrapolation strategies for calculating

- normalisation factors [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2015, 20(11): 1568-1585.
- [21] LAUTIER A, ROSENBAUM R K, MARGNI M, et al. Development of normalization factors for Canada and the United States and comparison with European factors [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 409(1): 33-42.
- [22] HUIJBREGTS M A J. Part I: A general framework for the analysis of uncertainty and variability in life cycle assessment [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1998, 3(5): 273-280.
- [23] MENDOZA BELTRAN A, HEIJUNGS R, GUINÉE J, et al. A pseudo-statistical approach to treat choice uncertainty: The example of partitioning allocation methods [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(2): 252-264.
- [24] HONG J K, SHEN G Q, PENG Y, et al. Reprint of: Uncertainty analysis for measuring greenhouse gas emissions in the building construction phase: A case study in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S420-S432.
- [25] ZHANG Y R, WU W J, WANG Y F. Bridge life cycle assessment with data uncertainty [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2016, 21(4): 569-576.
- [26] 国家统计局. 中国第三产业统计年鉴-2017 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- National Bureau of Statistics. *China Statistical Yearbook of The Tertiary Industry* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2017. (in Chinese)
- [27] 李学东. 铁路与公路货物运输能耗的影响因素分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- LI X D. *Analysis on factors affected rail/road freight transportation energy consumption* [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [28] 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- Standard for building carbon emission calculation: GB/T 51366-2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [29] 袁泽, 李琦. 基于LCA的工业过程碳排放建模和环境影响评价[J]. *测绘科学*, 2017, 42(5): 196-200.
- YUAN Z, LI Q. Modeling and environmental assessment of industrial carbon emissions based on LCA [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(5): 196-200. (in Chinese)

(编辑 黄廷)