

基于 LCA 的建筑全生命周期能耗研究*

王艳 冯群

(济南大学商学院, 山东 济南 250022)

摘要: 温室气体的排放导致全球气温不断升高, 而建筑业产生的能耗是温室气体排放的重要来源。为实现建筑业节能, 将建筑能耗分为建筑材料生产和加工阶段、施工阶段、建筑运行使用阶段及建筑的拆除处置阶段, 并采用全生命周期分析方法, 构建建筑全生命周期能耗模型, 统计 2000—2019 年建筑全生命周期能耗, 分析建筑全生命周期能耗的变化趋势, 为制定相关战略规划和节能减排政策提供参考。

关键词: 建筑全生命周期能耗; 生命周期评价; 建筑节能; 能耗分析

0 引言

建筑业是三大能源消耗产业之一, 也是导致全球持续变暖的温室气体排放的主要来源^[1]。随着全球气候条件的恶化和低碳经济的兴起, 世界各国越来越重视能源效率和能源减排。发达国家的经验表明, 随着工业技术的不断发展和生活水平的不断提高, 工业生产中消耗的能源占比会不断下降, 与此同时, 建筑业和交通业消耗的能源占比会持续上升。据统计, 近年来建筑业能耗占全球总能源消耗的 39%^[2]。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在第四次评估报告中指出, 到 2030 年, 全球建筑业的碳减排潜力可以达到每年 60 亿 t, 是所有产业中最高的。因此, 降低建筑业能耗是 2030 年实现碳达峰、2060 年实现碳中和目标的重要举措, 也是实现将全球温度上升控制在 1.5℃ 以内长期目标的关键组成部分。

2018 年, 我国建筑业的能源消耗达到 21.41 亿 t 标准煤, 二氧化碳排放量达到 49.32 亿 t, 占全国二氧化碳排放总量的 46%, 面临巨大的碳减排压力^[3]。然而, 目前相关领域对建筑能耗的认识差异很大, 缺少近 20 年我国建筑能耗的统一数据。对建筑能耗认知的差异, 主要源于建筑能耗

计算方法和统计口径不同, 导致计算结果差异较大。建筑能耗的统计口径可分为狭义与广义。狭义上的建筑能耗是指建筑物运行所需的能源, 包括现有建筑中使用的能源, 主要用于供暖、空调、照明、电器和烹饪设备等。而广义上的建筑能耗, 参考的是建筑的整个生命周期^[4], 包括建筑产品生命周期内的总能耗, 仅关注运行阶段的建筑能耗是不全面的。因此, 本文将建筑能耗分为建筑材料生产和加工阶段、施工阶段、建筑运行使用阶段及建筑的拆除处置阶段, 并采用全生命周期分析方法, 构建建筑全生命周期能耗模型, 计算并分析 2000—2019 年建筑全生命周期能耗^[3]。

1 建筑能耗模型

1.1 生命周期分析方法

生命周期分析也称为全生命周期评价 (LCA), 是对一个产品的整个生命周期从初始到结束的研究, 是从原材料采购、设计、制造到使用, 再到回收和最终处置全过程的研究^[5]。按照国际标准, LCA 主要包括 4 个相互关联的阶段, 其中目标和范围的定义是 LCA 的第一步, 需要明确指出 LCA 分析的目标、背景、理由等; 清单分析是计算产品整个生命

* 基金项目: 国家社科基金青年项目“建筑全生命周期多元主体能耗治理机制与政策研究”(21CJY027); 山东省自然科学基金面上项目“建筑全生命周期多元主体能耗治理研究——以山东省为例”(ZR2021MG049)。

周期的能源投入和资源消耗等,是目前 LCA 中发展最为完善的一部分,也是本文主要使用的部分;环境影响评估是指在清单分析的基础上对各种问题潜在影响的严重程度进行评价;结果解释则主要是指清单分析和影响评估、总结与建议^[6]。

20 世纪 90 年代初,西方学者将 LCA 方法引入建筑能耗研究,指出建筑能耗发生在建筑生命周期的每个阶段:建筑材料准备阶段、建筑建造阶段、建筑使用阶段、建筑拆除阶段和废旧建筑材料处置阶段^[7]。

1.2 建筑全生命周期能耗模型

基于 LCA 分析,本文将建筑能耗的整个生命周期分为 4 个阶段:建筑材料生产和加工阶段、建筑施工阶段、建筑运行使用阶段及建筑的拆除处置阶段。

(1) 建筑材料生产和加工阶段。该阶段产生的能耗主要包括挖掘原材料、进行原材料的处理加工以及运输建筑材料所消耗的能源。此阶段能耗的构成主要是生产加工及运输水泥、钢铁、铝、玻璃、塑料、石材等建筑材料产生的能耗。

(2) 建筑施工阶段。该阶段的能源消耗是指对建筑物进行施工时使用的能源,如使用的水和电等。

(3) 建筑运行使用阶段。该阶段产生的能耗是指在建筑物使用阶段消耗的能源,主要由各种终端设备耗能构成,其中包括为维持建筑环境所使用的能源,如供暖、制冷、通风、空调和照明,以及为建筑物内各种活动所使用的能源,如办公、厨房使用等。

(4) 建筑的拆除处置阶段。该阶段的能耗是指建筑在经过一定的使用年限后将其进行拆除并处置拆除废弃物所消耗的能源,主要包括拆除用水、拆除用电、垃圾处置等消耗的能源。

以上 4 个阶段的能耗也是本文的主要研究范畴。基于生命周期评价法,对建筑全生命周期的各阶段能耗进行全过程系统分析,能够更加准确地找出建筑能耗变化的真正原因。因此,基于全生命周期分析,可以得出建筑全生命周期能耗为

$$Q_{LCE} = Q_{ME} + Q_{CE} + Q_{UE} + Q_{DE}$$

式中, Q_{LCE} 为建筑全生命周期能耗; Q_{ME} 为建筑材

料生产和加工阶段能耗; Q_{CE} 为建筑施工阶段能耗; Q_{UE} 为建筑运行使用阶段能耗; Q_{DE} 为建筑的拆除处置阶段能耗。

其中,建筑施工阶段能耗与建筑的拆除处置阶段能耗在《中国能源统计年鉴》中被统一计算为建筑业能耗。为了与广义的建筑业能耗区分,本文将此两部分能耗统称为建筑建造施工阶段能耗,其能源消耗主要与建筑企业的生产有关。

从建筑物的生命历程,即原材料加工运输→建造施工→运行→拆除施工角度出发,建筑物的整个生命周期能耗可划分为三个主要阶段:与建筑材料的生产和运输有关的能源消耗,即建筑材料生产和加工阶段能耗;与建筑物的建造施工、拆除施工有关的能源消耗,即建筑建造施工阶段能耗;与建筑物的运行有关的能源消耗,即建筑运行使用阶段能耗。

2 建筑全生命周期能耗计算

2.1 建筑材料生产和加工阶段能耗

建筑材料类别众多,主要包括钢铁、铝、铜等金属材料,以及水泥、平板玻璃、石材、石灰和塑料等非金属材料。其中,由于钢材与铝材在金属材料中占比很高,且考虑到数据的可获得性,对金属建筑材料的生产能耗主要考虑钢材能耗与铝材能耗。考虑到水泥占非金属材料能耗的 70%,对非金属材料能耗主要以水泥能耗为主要统计条目,并根据所占比例推算建筑材料工业能耗^[8]。

本文主要采用实物消耗测算法进行建筑材料生产加工能耗的测算,其基本思路是根据当年建筑业主要建筑材料消费量及其能耗强度进行测算。测算公式如下

$$Q_{ME} = \sum A_i \times I_i$$

式中, Q_{ME} 表示建筑材料生产和加工阶段能耗; A_i 表示建筑材料产品 i 的消耗量; I_i 表示建筑材料产品 i 单位产品的能耗强度。

相关的建筑材料消费数据主要取自《中国建筑业统计年鉴》,建筑材料产品单位能耗强度数据主要取自《中国能源统计年鉴》中的建筑材料产品单位能耗数据。2000—2019 年建筑材料生产和

加工阶段能耗及所占比例如图1所示。

2.2 建筑建造施工阶段能耗

《中国统计年鉴》对建筑企业建造施工能耗进行了单独统计。2000—2019年全国建筑建造施工阶段能耗及所占比例如图2所示。

2.3 建筑运行使用阶段能耗

对建筑运行使用阶段能耗的计算,考虑到数据的可获得性和真实性,采用基于能源平衡表的测算方法。我国能源平衡表中终端能耗部门共有7类,而能源消费主要为建筑能耗的有批发零售餐饮业、其他、生活消费3个部门,因此选择这3个部门作为建筑运行能耗基础量进行下一步测算并考虑以下问题:①由于我国能源消费是按照行业进行统计的,在建筑运行能耗基础量中也统计了相关行业企业或者私人交通工具的用能;②其他

能耗部门中包含部分建筑运行能耗,如办公楼的运行等;③我国能源平衡表中对建筑集中供暖能耗的统计是明显偏低的,建筑能耗基础量中的热力消费相比建筑集中供暖能耗明显偏低,因此需要进行修正^[9]。

建筑物在运行使用阶段的能源消耗的计算公式可表示为

$$Q_{UE} = Q_{BV} - Q_T + Q_H + Q_M$$

式中, Q_{UE} 表示建筑物运行使用阶段能耗; Q_{BV} 表示建筑的能耗基础量; Q_T 表示交通能耗扣除量; Q_H 表示供暖能耗修正量; Q_M 表示其他部门的建筑能耗量。

建筑能耗基础量 Q_{BV} 由《中国统计年鉴》中批发零售餐饮业、其他、生活消费3个部门的能源消耗相加得出。交通运输扣除量 Q_T 根据商业和公共服务业(涉及基础量中批发零售餐饮业和其他

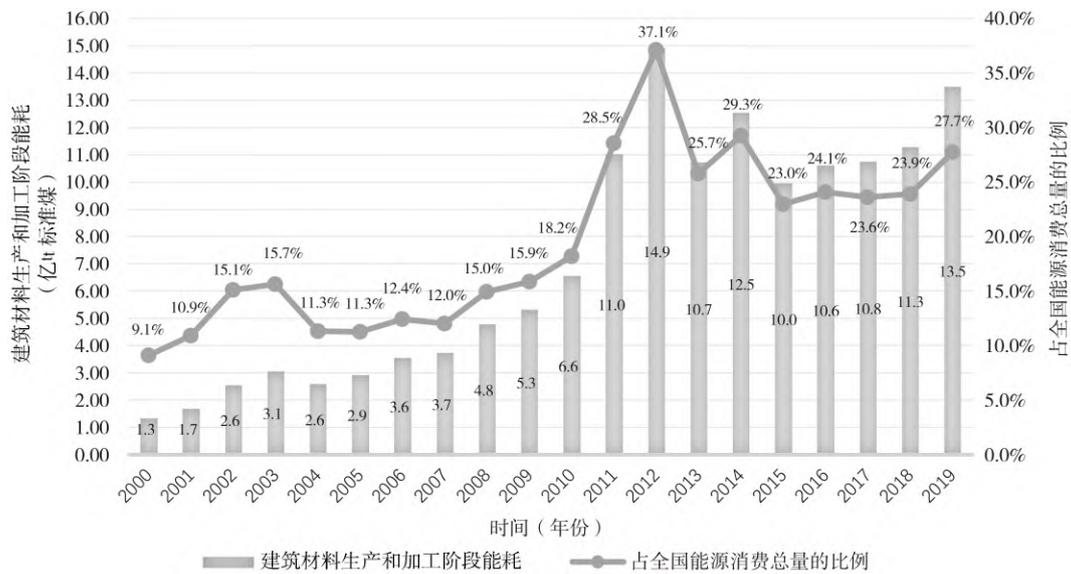


图1 2000—2019年建筑材料生产和加工阶段能耗及所占比例

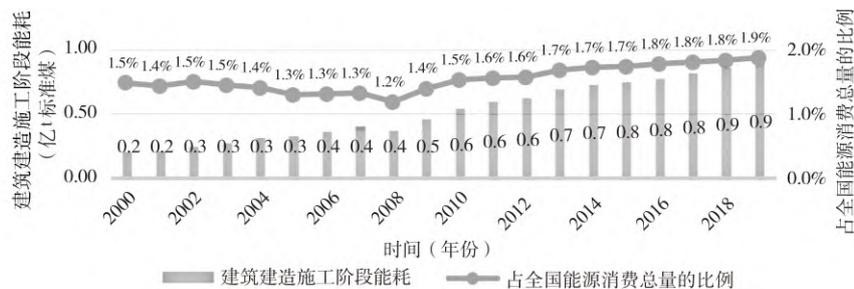


图2 2000—2019年全国建筑建造施工阶段能耗及所占比例

两个部门) 95% 的汽油、35% 的柴油用于交通运输, 居民生活和农业消费的全部汽油、居民生活消费的 95% 的柴油用于交通运输进行测算得到^[10]。供暖能耗修正量 Q_H 通过北方城镇集中供热能耗减去建筑能耗基础量中的热力消费得到^[11]。其他部门的建筑能耗 Q_M 通过交通运输、仓储和邮政业中的建筑能耗与工业、建筑业能耗中的建筑能耗相加得到, 其中交通运输、仓储和邮政业中建筑能耗由交通运输、仓储和邮政业的煤耗与交通运输、仓储和邮政业建筑用电量相加得到, 并假定工业、建筑业能耗中的建筑能耗与交通运输、仓储和邮政业中的建筑能耗相当^[12]。

2000—2019 年建筑运行使用阶段能耗及所占



图3 2000—2019 年建筑运行使用阶段能耗及所占比例



图4 2000—2019 年建筑全生命周期能耗及所占比例

比例如图3所示。

2.4 建筑物全生命周期能耗

将上述各阶段的能耗进行汇总后, 得出我国建筑物全生命周期能耗。2000—2019 年建筑全生命周期能耗及所占比例如图4所示。

3 建筑全生命周期能耗分析

3.1 建筑能耗周期变化分析

从整体上看, 2000—2019 年我国建筑全生命周期能耗的变化趋势主要分为4个阶段:

(1) 2000—2005 年, 建筑全生命周期能耗处于加速增长阶段, 年均增长率约为 12.6%。这一阶

段的增长主要是由基础设施建设和经济快速发展推动的。

(2) 2005—2010年,建筑能耗持续增长,特别是2008年以后,由于建筑材料生产能耗的快速增长,建筑全生命周期能耗增长速度尤为明显,年均增长速度约为10.6%。

(3) 2010—2015年,建筑能耗经过快速增长,在2012年达到自2000年以来的峰值,此后出现震荡下降趋势并趋于平稳。

(4) 2015—2019年,处于平稳增长阶段,年均增长速度约为6.5%。

3.2 建筑能耗结构变化分析

从建筑全生命周期能耗总量构成来看,建筑运行使用阶段能耗与建筑材料生产和加工阶段能耗占绝大部分比重,建筑建造施工阶段能耗所占比重较小且所占比例较为稳定,占建筑全生命周期能耗的3%~5%。其中,建筑运行使用能耗与建筑材料生产和加工能耗的主要变化阶段可以分为以下两个时间段:

(1) 2000—2010年,建筑运行使用能耗在2010年前是建筑全生命周期能耗的最大组成部分,占全生命周期能耗的50%~60%。在此时间段,建筑材料生产和加工阶段能耗占比相对于建筑运行使用阶段能耗略低,占建筑全生命周期能耗的30%~40%。

(2) 2010—2019年,建筑材料生产和加工阶段能耗所占比例开始逐渐高于建筑运行使用阶段能耗,建筑材料生产和加工阶段能耗所占比重为50%~60%,建筑运行使用能耗所占比重为30%~40%。

4 结语

通过对2000—2019年建筑全生命周期能耗进行分析发现,2019年全国建筑全生命周期能耗为24.79亿t标准煤。其中,建筑材料生产和加工阶段能耗为13.51亿t标准煤,占建筑全生命周期能耗的比例最高;建筑运行使用阶段能耗次之,为10.76亿t标准煤;建筑建造施工阶段能耗最低,为0.91亿t标准煤。自2010年开始,建筑材料生

产和加工阶段能耗所占比重为50%~60%,建筑运行使用阶段能耗所占比重为30%~40%,建筑材料生产和加工阶段能耗成为建筑全生命周期能耗的主要组成部分。因此,降低建筑材料生产和加工阶段能耗对于降低建筑全生命周期能耗具有重要意义。

参考文献

- [1] FAY R, TRELOAR G, IYER-RANIGA U. Life-cycle energy analysis of buildings: a case study [J]. Building Research & Information, 2000, 28 (1): 31-41.
- [2] ZHONG H, WANG J, JIA H, et al. Vector field-based support vector regression for building energy consumption prediction [J]. Applied Energy, 2019 (242): 403-414.
- [3] 中国建筑节能协会能耗专委会. 中国建筑能耗研究报告2020 [R]. 建筑节能(中英文), 2021, 49 (2): 1-6.
- [4] 胡倩. 城市居住建筑能耗分析——以重庆市居民住宅小区项目为例 [J]. 项目管理技术, 2021, 19 (11): 63-67.
- [5] 郑秀君, 胡彬. 我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展 [J]. 科技进步与对策, 2013, 30 (6): 155-160.
- [6] 孙启宏, 万年青, 范与华. 国外生命周期评价(LCA)研究综述 [J]. 世界标准化与质量管理, 2000 (12): 24-25, 31.
- [7] 王婧, 张旭, 黄志甲. 基于LCA的建材生产能耗及污染物排放清单分析 [J]. 环境科学研究, 2007 (6): 149-153.
- [8] 蔡伟光, 庞天娇, 郎宁宁, 等. 我国各省建筑能耗测算与分析 [J]. 暖通空调, 2020, 50 (2): 66-71, 116.
- [9] 程敏, 施霞君. 建筑节能的全生命周期研究 [J]. 生态经济, 2009 (7): 118-120, 123.
- [10] 王庆一. 中国建筑能耗统计和计算研究 [J]. 节能与环保, 2007 (8): 9-10.
- [11] 邹瑾, 刘秀丽. 基于IPAT理论的城镇建筑能耗测算模型和应用 [J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22 (S2): 82-85.
- [12] 李惠民, 童晶晶. 中国建筑部门碳排放的区域差异及其碳中和路径选择 [J]. 环境保护, 2021, 49 (Z2): 23-29. **PMT**

收稿日期: 2022-10-19

作者简介:

王艳(1996—),女,研究方向:管理科学与工程。

冯群(通信作者)(1986—),女,博士,副教授,研究方向:绿色治理。