建筑碳排放理论研究

建筑全生命周期理论

碳排放计算模型

碳排放因子清单

综合体类建筑碳排放特点

市政综合体全生命周期碳排放预测

国际路市政综合体项目简介

建筑全生命周期碳排放量计算

建筑碳排放特点分析

节能技术节能减碳潜力评估

被动式建筑技术

HVAC技术

可再生能源技术

节能管理技术

市政综合体减碳路径

总结

311.902m2每年可提供1762.05m3的热水量

5.65m3/m2

建筑全生命周期评价理论

确定碳排放核算的时间边界并对周期内不同阶段进行合理划分，是建筑碳排放核算的重要基础。生命周期理论是目前建筑碳排放核算中应用最广泛的评价方法，本节内容将从生命周期评价定义以及建筑生命周期阶段划分两方面构建建筑全生命周期评价的理论框架。

1. 全生命周期评价理论

全生命周期评价(Life Cycle Assesment,LCA)理论是一系列用于评估产品在“由摇篮到坟墓”的过程中对环境带来影响的工具。自20世纪60年代首次提出以来,已经在经济评估、工业生产、环境治理等领域中应用超过50年。其最大的特点在于要求对产品从原料开采、生产、使用直至销毁过程中的全流程环境影响进行详细评估，这使得该理论能够全面反映产品带来的显性与潜在影响，帮助决策者更有效地制定环保策略。

从1960年代末美国可口可乐公司对用于产品包装的易拉罐进行原材料消耗调查开始，全生命周期评价理论经历了诞生、缓慢发展、停滞再到快速发展的多个阶段。目前，全生命周期评价的理论研究已非常成熟，并且形成了完整的规范标准。20世纪90年代，环境化学和毒理学会(SETAC)召集相关专家首先就全生命周期评价的标准进行讨论，并于1993年公布了《生命周期评价纲要指南》，在该指南性文件中第一次定义了全生命周期评价的技术路径，即首先确定目标的定义与范围，其次对评价目标进行清单汇总、影响评估并提出改善措施。

进入21世纪后，全生命周期评价理论的标准化工作进一步推进。国际标准化组织（ISO）先后颁布了ISO-14040与ISO-14044两部国际标准。其中，生命周期评价被分为四个主要阶段：1） 目标范围与定义；2） 清单分析；3） 影响评价；4）结果解释与直接应用。

在第一阶段，需要对评价对象的生产性质进行定义，并划分其系统及边界，该阶段需要明确产品的生产流程，预测可能带来的环境影响并确定评估的详细程度与数据量；在第二阶段，评估者需要根据上一阶段给出的产品定义及范围构建产品的资源消耗计算模型，设计流程图，并搜集各流程输入输出数据，计算单位产品带来的资源消耗与环境影响；在第三阶段，需要根据清单分析结果对环境影响进行评价，并根据评价结果对清单进行分级；在最后一阶段需要根据评价结果说明产品的生产行为将会如何影响环境，并找出影响环境最大的因素提出有针对性的改进措施。

生命周期评价为全面评估产品的直接与潜在环境影响提供了有力的工具，但在其实际应用过程中往往存在着许多不便。首先，由于生产方或监督管理者未提出相关要求，产品从原材料至报废销毁过程中的清单原始数据不易获取且准确性不能保证，这为产品清单分析的实现带来阻力；此外，全生命周期评价要求的数据量非常大，且数据构成十分复杂，难以通过常规方法进行快速计算，影响了生命周期评价在实际生产过程中的进一步应用。为了规范数据搜集过程，提高数据准确度及计算便捷性，许多国家推出了全生命周期清单数据库以及全生命周期评价工具，如美国推出的环境可持续建筑(BEES)[1]、荷兰的SimaPro以及德国的GaBi[2]。

1. 建筑全生命周期碳排放评价

作为人类文明发展的见证，自人类诞生之日起建筑就开始发挥其重要的作用，到了现代社会建筑的制造与使用维护维护已经形成了一套完整的产业链，实现了商品化生产。与其他商业产品相比较，建筑有着生命周期长，生产规模大，消耗资源多等特点。在建筑生产与使用过程中伴随着大量温室气体的排放，在全球气候变化形势愈发严峻的情况下，评价建筑全生命周期的温室气体排放量成为了一项必要的任务。建筑全生命周期碳排放的核算包括了建筑从准备建造至建筑报废期间各种活动所产生的的温室气体排放，并将其折算为当量二氧化碳排放量。

根据1997年《联合国气候变化框架公约》下签署的《京都议定书》，明确被定义为温室气体的物质共有6种，分别为二氧化碳(CO2)、甲烷(CH4)、氧化亚氮(N2O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫（SF6）。由于不同的温室气体对环境会带来不同程度的温室效应，若采取分项计量的方法统计建筑生命周期内的温室气体排放将会十分复杂，且难以比较。目前国际上通行的方法是根据气体的全球变暖潜值(Global Warming Potential,GWP)，将各温室气体的排放量等效换算为统一的计量单位，各温室气体的GWP数值见表1。由于二氧化碳是排放量最大的温室气体，且具有着相对成熟的计量方法，因此研究中多将二氧化碳定为统一的度量气体，比如，据表中数据，一吨甲烷的GWP为25，一吨二氧化碳的GWP为1，其可等效为气体排放100年内一吨甲烷产生的温室效应等效于25吨二氧化碳。基于此，采用建筑生命周期碳排放量对建筑在生命周期过程中各活动的温室气体排放程度进行评价。

表 常见气体的全球变暖潜值

以上部分将任务目标定为建筑生命周期碳排放。根据全生命周期评价的定义，需要考察其由“摇篮”至“墓地”的全过程活动碳排放。从广义上讲，对于一栋建筑自项目立项起就开始了其生命历程，历经设计、建造、使用、维护、拆毁至最终的材料处理为终止都可算作其生命周期范围。但对于建筑碳排放核算来说，只有与建筑相关的实际耗能项目才会产生碳排放，而其他的过程比如建筑的勘探、设计过程虽然也会产生一定的能源消耗，但该部分的能耗占建筑生命周期的比例很小，而且此种活动很难获得活动量清单，存在难以统计的问题，因此目前多数研究并不将此种活动纳入建筑碳排放考察的范围。故对于建筑全生命周期碳排放评估来说，其生命周期的范围应定义为：由建材生产至建材回收处理。

1. 建筑生命周期的划分

根据建筑生命周期评价的定义，其考察范围为由建材生产至建材回收处理阶段。然而建筑的生命周期长，其经历的各阶段耗能活动特点以及碳排放特点具有很大差异，因此需要根据建筑不同的能耗活动类型以及时间特征将建筑生命周期划分为若干阶段，从而有针对性地研究建筑碳排放特征。

国内外关于建筑生命周期阶段划分的研究已经在1.2.1部分进行了详细阐述，在此不再赘述。在本研究中，生命周期的划分主要根据GB/T51366-2019 《建筑碳排放计算标准》中的相关规定进行。标准将建筑生命周期划分为运行阶段、建造及拆除阶段以及建材生产及运输阶段，但由于拆除阶段与建造阶段时间间隔过长，且标准中并未涉及材料回收等过程的碳排放，因此宜将建筑拆除阶段与材料回收阶段合并，形成建筑生命周期的最后一阶段。基于此，本研究将建筑生命周期分为下述四阶段：建筑材料生产阶段、建筑施工阶段、建筑运营阶段以及建筑拆除及材料回收阶段。

[1］ＴｅｃｈｎｏｌｏｇｙＮＩＯＳ．ＦｒｅｅＳｔａｎｄａｒｄＲｅｆｅｒｅｎｃｅＤａｔａｂａｓ巧［ＥＢ／０。．

ｈｔｔｐ：／／ｗｗｗ－ｎｉｓｔ．ｇｏｖ／ｓｒｄ／ｏｎｌｉ打ｅｌｉｓｔ．ｃｆｉｎ．２０１４．

[2] Herrmann I T , Moltesen A . Does it matter which Life Cycle Assessment (LCA) tool you choose? – a comparative assessment of SimaPro and GaBi[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 86:163-169.

Mao等人研究了现浇注建筑与半预制建筑在建造阶段的温室气体排放差异，并对位于深圳的两栋分别采用现浇柱与半预制方式建造的建筑进行案例研究，结果表明半预制方式建造的建筑单位面积碳排放量较传统现浇建筑低3.2%，二者差异并不明显，其原因可归结为案例中的装配式建筑预制率低，仅为10.5%且建造年份较早，建筑部件预制技术尚不成熟导致的。

排放因子法由IPCC首先提出并大规模推广的生产活动碳排放计算方法，其亦是当前世界范围内应用最广的碳排放计算方法，其基本计算思路是根据生产活动中产生碳排放的活动清单，整理出具体活动的工程量以及单位工程量碳排放因子，将二者相乘之后得到相关活动的碳排放预测值。

碳排放因子一般通过能源的消耗量及碳排放量 统计数据计算获得，准确的碳排放因子则根据试验 测定。由于不同国家和地区的能源结构和生产方式 均具有较大差异，对于基础排放因子数据的选择，本 研究遵循以下优先等级次序：1)国内成熟的数据 库；2)国内文献中现有的研究成果；3)国外数据库 及研究成果。

[1] C C M A B , B Q S , C L S A , et al. Comparative study of greenhouse gas emissions between off-site prefabrication and conventional construction methods: Two case studies of residential projects - ScienceDirect[J]. Energy and Buildings, 2013, 66(5):165-176.

[尽管作为人类历史上最古老的一种工业，建筑的制造与生产还沿用着一种相当古老的手工建造方法，即大量利用人工在施工地点使用原材料进行堆砌，即使在最近的四十年内，也很少有革命性的生产方式被真正应用于大规模的建筑生产中，因此一种集约化、自动化程度更高的建筑生产方式应该受到人们重视]

装配式建筑是一种新型建筑工业化生产方式，其利用“搭积木”的建造思路，将特定工厂生产的建筑预制件运送至现场，进行现场组装，最终形成完整的建筑。相较于传统的现浇式建筑，预制建筑的建筑构件由于统一在工厂内生产，可以实现更高效的材料利用与污染控制，并且现场施工时只需要进行构件安装，而无需再进行建筑部件的二次生产，因此省去了大量的施工机械台班用量与工人工作时间，有效降低了建筑在施工建造阶段的耗能，并显著提升建筑的建造效率。相较于现浇式建筑，装配式建筑的建造可分为三个阶段：生产制造阶段、运输阶段、现场安装阶段。其中生产制造阶段是装配式建筑所独有，该阶段的碳排放包括原材料的生产以及生产线上机器运行。这一阶段的碳排放量计算可依照下式：

其中为装配式建筑在构件生产制造阶段的碳排放量；为构件的类型；、、分别为生产第种构件所消耗的柴油、汽油以及电能；、、分别为柴油、汽油、电能的碳排放因子。

据文献调研结果，装配式建筑主要分为三种类型：1） 半装配式建筑；2）综合装配式建筑；3）整体建造式建筑；[1]半装配式建筑即实现部分建筑构件的工厂化生产并在现场组装而其余部分则在现场施工生产；综合装配式建筑实现了全部建筑构件的工厂化生产，并且建筑整体在现场装配完成；整体建造式建筑则实现建筑整体的工厂内生产，最后整体运输至现场。然而考虑到实际应用过程中的结构、强度以及可操作性等问题，目前的装配式建筑基本为半装配式建筑。为了量化建筑整体使用装配式构件的情况，引入预制率，其计算方法为[]：

其中，P为单体建筑预制率；为建筑标高±0.000以上部分结构构件采用预制件的体积；为建筑标高±0.000以上部分结构构件采取现浇混凝土形式构造的体积。

在对市政综合体进行考察时分别采取30%的预制率与50%的预制率，探究其建造阶段的碳排放情况。装配式构件仅涉及基础以上的混凝土钢筋结构以及砌体结构。由于该市政综合体尚处于规划阶段，无法获得详细的建筑构件消耗量，故根据文献资料提供的装配式建筑相较于现浇式建筑的减碳量对市政综合体采用装配式建筑后的减碳量进行估计。

朱宋煜,王勇. 装配整体式剪力墙结构预制率计算探讨[J]. 建筑技术,2016,47(z1):104-106. DOI:10.3969/j.issn.1000-4726.2016.z1.036.