

苏鹏宇,姚恩明,李 征.基于全生命周期的现代木结构建筑碳足迹研究 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6657-6666.

Su P Y, Yao E M, Li Z. Investigation into the carbon footprints of modern timber buildings based on life cycle assessment [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6657-6666.

基于全生命周期的现代木结构建筑碳足迹研究

苏鹏宇,姚恩明,李 征* (同济大学土木工程学院,上海 200092)

摘要: 选取代表性现代木结构建筑并对其全生命周期碳足迹开展了研究,提出将负碳建材碳排放拆分为生产过程碳排放和生物固碳值的方法,定量计算了结构生命周期各阶段的碳排放量,对木材在不同生命周期期间的再利用情况进行了分析.结合传统材料建筑全生命周期碳排放,对比分析了现代木结构建筑与传统材料建筑全生命周期碳排放特点.研究结果显示,本研究中的木结构建筑全生命周期碳排放为 $1.69 \times 10^7 \text{ kgCO}_2\text{e}$,其中物化阶段占比 15.56%、使用阶段占比 84.34%、拆除阶段占比 0.10%;其物化阶段的碳排放比传统钢筋混凝土结构和钢结构均有所降低.

关键词: 木结构建筑; 碳排放; 全生命周期; 负碳建材

中图分类号: X24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2023)12-6657-10

Investigation into the carbon footprints of modern timber buildings based on life cycle assessment. SU Peng-yu, YAO En-ming, LI Zheng* (College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China). *China Environmental Science*, 2023,43(12): 6657-6666

Abstract: This paper researched the building life cycle carbon footprint based on a representative modern timber building in China, and a method of splitting the carbon emission of negative carbon building materials into the carbon emission of the production process and the biological carbon sequestration value was proposed. The results showed that the carbon emissions of the life cycle of the modern timber office building were $1.69 \times 10^7 \text{ kgCO}_2\text{e}$, in which the product stage accounted for 15.56%, the use stage accounted for 84.34%, and the end-of-life stage accounted for 0.10%. The carbon emission in the product stage of timber building was lower than that of traditional reinforced concrete or steel buildings.

Key words: timber buildings; carbon emission; life cycle assessment; negative carbon building materials

“碳达峰碳中和”是我国重要的战略任务之一,建筑业作为我国第一大碳排放部门,其 2020 年度的碳排放占我国碳排放总量的 50.9%^[1],而我国作为发展中国家,每年仍有大量建筑开始建设和投入使用.因此,降低建筑业的碳排放是我国双碳战略能否实现的重要环节.

为提出行之有效的结构减碳建议,建立相关设计方法,首先需要量化建筑的碳排放.全生命周期分析(LCA)能从全生命周期的角度定量分析产品的碳足迹,已成为量化建筑碳排放的主要方法.目前研究通过 LCA 与物质和能量流结合,将建筑分为物化阶段、使用阶段和拆除阶段,同时提出了建筑碳足迹分析框架^[2].并且针对建筑的特定阶段也可以用 LCA 进行研究,Rabani 等^[3]对位于瑞典的一栋建筑的不同改造方案运用 LCA 进行了使用阶段的碳排放计算.同时基于 LCA,发展出了与成本结合的分析框架,通过对净零建筑进行全生命周期碳排放和成本分析,进一步扩大了 LCA 方法学在建筑中的应用^[4-5].

木材是一种生物质建筑材料,树木通过光合作用固定二氧化碳,然而,随着树木生长,其光合作用也逐渐减弱.相关研究分析了混龄南方针叶林的碳积累,结果表明大龄树木的碳积累量较大,但单位生物量的增长率较低^[6];并且对 9~40 年龄的灰赤杨林进行的生态系统净产量研究显示,老年灰赤杨林生态系统净产量为负值,说明大龄灰赤杨林从碳汇变为了碳排放源^[7].因此将大龄树木合理砍伐后运用于建筑当中可以将树木已固定的二氧化碳存储于建筑当中,同时种植新树木可以继续固定二氧化碳.并且使用结构木材可以减少钢材和混凝土的使用,不但能够实现木材的可持续利用,还可进一步减少建筑的碳排放.

21 世纪以来,随着我国国民经济发展与社会进

收稿日期: 2023-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52222802);上海市科技创新行动计划启明星项目(21QA1409300)

* 责任作者, 教授, zhengli@tongji.edu.cn

步,以及气候问题越来越受到关注,我国对绿色和可持续发展的重视程度越来越高.在建筑领域,对于可再生结构木材的利用越来越受到关注.木材及工程木制品在中国展现出巨大的发展潜力,木结构建筑进入了新一轮的发展阶段^[8-9].我国政府出台的相关政策明确指出要因地制宜发展木结构建筑,鼓励木结构建筑在低层公共建筑中的应用^[10-11].预计未来我国会有更多木结构中低层建筑投入使用.

针对于木结构建筑的碳足迹研究,目前国外的研究已基于 LCA 方法,考虑了木材的生物固碳.我国目前也有对于木结构全生命周期碳排放的研究^[12-13],但对于木材的生物固碳量的使用并不明确.以往对于木结构在结构中的应用已经比较充分^[14-15],本研究旨在对现代木结构建筑进行详细的考虑木材生物碳的全生命周期碳足迹分析,并对生物固碳量的使用进行讨论.

1 材料与方法

1.1 研究对象

本研究选择的研究对象是一栋位于江苏省无锡市某现代中低层木结构办公建筑,见图 1,占地面积 817.56m²,建筑面积 3350.94m²,结构为四层、高 17.0m,设计使用年限为 50a,结构形式为胶合木框架结构,此结构的结构体系、建筑面积及体量在我国现代木结构建筑中具有很好的代表性.建筑所在地无锡市属北亚热带季风湿润性气候,年平均气温 15.6℃,最热月份为七月,月平均气温 28.0℃,最冷月为 1 月,月平均气温 2.9℃.

1.2 建筑全生命周期分析

1.2.1 建筑全生命周期 建筑全生命周期可分为物化阶段、使用阶段、拆除阶段^[2,4-5,16],如图 1 所示.

建筑全生命周期的碳排放可由式(1)计算:

$$E_{lc} = E_p + E_u + E_e \quad (1)$$

式中: E_{lc} 、 E_p 、 E_u 、 E_e 分别为建筑全生命周期、物化阶段、使用阶段和拆除阶段的碳排放,kgCO₂e.

(1) 建筑物化阶段 建筑物化阶段包括建材生产与运输、施工现场机械能耗、施工现场临时设施能耗.

物化阶段的碳排放可由式(2)计算:

$$E_p = E_{p1} + E_{p2} + E_{p3} \quad (2)$$

式中: E_{p1} 、 E_{p2} 、 E_{p3} 分别为建材生产与运输、施工现场

机械能耗、施工现场临时设施能耗的碳排放,kgCO₂e.

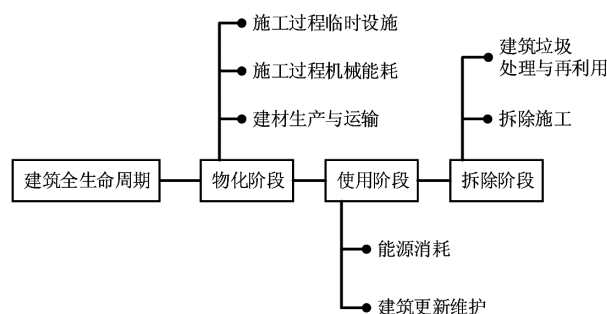


图 1 建筑全生命周期

Fig.1 The building life cycle

建材生产与运输的清单由项目的决算表整理得出.考虑了建材的最初来源地,对于产地缺失的按照规范《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)^[17]中的规定设置.建材生产与运输的碳排放可由式(3)计算:

$$E_{p1} = \sum_{i=1}^{n_p} \left(m_i \times EF_i + \frac{m_i}{c_i} \times S_i \times EF_{t_i} \right) \quad (3)$$

式中: n_p 是建材的总种类数; m_i 是 i 种材料的消耗总量,kg、m³、件等; EF_i 是 i 种材料的碳排放背景数据,kgCO₂e/m_i 单位; S_i 是 i 种材料的运输距离,km; EF_{t_i} 是 i 种材料的运输工具的单位运输距离碳排放背景数据,kgCO₂e/(kg·km).

施工现场的机械使用量通过决算单整理出各分部工程的工程量,并根据《江苏省建筑与装饰工程消耗量定额(2022 年)》^[18]中的单位工程量额定机械进行使用机械班次计算.根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)^[17]中的单位班次机械能耗计算出施工现场的机械能耗.施工现场机械能耗的碳排放可由式(4)计算:

$$E_{p2} = \sum_{i=1}^n \left(Q_{p2,i} \times EF_{p2,i} \right) \quad (4)$$

式中: $Q_{p2,i}$ 是 i 种机械的能源(电、柴油等)消耗总量,kW·h、kg; $EF_{p2,i}$ 是 i 能源的碳排放背景数据,kgCO₂e/ $Q_{p2,i}$ 单位.

施工现场的临时设施面积和空调使用时长由施工方提供,照明通过《建筑照明设计标准》(GB 50034-2013)^[19]进行计算.施工现场的临时设施的碳排放可由式(5)计算:

$$E_{p3} = \sum_{i=1}^n (Q_{p3,i} \times EF_{p3,i}) \quad (5)$$

式中: $Q_{p3,i}$ 是 i 电器(空调和照明)的能源消耗, $\text{kW}\cdot\text{h}$; $EF_{p3,i}$ 是 i 种能源的碳排放背景数据, $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

(2) 建筑使用阶段 建筑使用阶段包含建筑使用阶段能耗和使用阶段更新维护。使用阶段碳排放按式(6)计算:

$$E_u = E_{u1} + E_{u2} \quad (6)$$

式中: E_{u1} 和 E_{u2} 是使用阶段能耗和使用阶段更新维护的碳排放, kgCO_2e 。

建筑使用阶段能耗由 DeST-C 软件^[20]模拟计算, 并参考建筑实际用电量进行模拟调整, 使实际用电量与模拟用电量误差在 5% 以内, 对建筑使用 50a 的用电情况进行模拟。DeST 软件包含了中国的气象资料, 已被广泛地用来进行建筑能耗模拟^[21-22]。

建筑的用水量通过实际用水量和《城市公共用水定额及其计算方法》(DB31/T 680-2012)^[23]进行计算。

使用阶段能耗的碳排放按式(7)计算:

$$E_{u1} = \sum_{i=1}^n (Q_{u,i} \times EF_{u,i}) \quad (7)$$

式中: $Q_{u,i}$ 是 i 种能源(水、电)的消耗量, kg 、 $\text{kW}\cdot\text{h}$; $EF_{u,i}$ 是 i 种能源的碳排放背景数据, $\text{kgCO}_2\text{e}/Q_{u,i}$ 单位。

建筑使用阶段更新维护的材料更换量由决算单整理得出, 对于相关规范中有提到使用年限的保温工程^[24]、门窗工程^[25]和防水工程^[26]的材料都进行了计算。建筑使用阶段更新维护的碳排放按式(8)计算:

$$E_{u2} = \sum_{i=1}^{n_u} (m_i \times EF_i + \frac{m_i}{c_i} \times S_i \times EF_{t_i}) \quad (8)$$

式中: n_u 是替换建材的总种类数。

(3) 建筑拆除阶段 建筑拆除阶段包括建筑拆除工程和建筑物垃圾的处理与再利用。建筑拆除阶段的碳排放按式(9)计算:

$$E_e = E_{e1} + E_{e2} \quad (9)$$

式中: E_{e1} 和 E_{e2} 是建筑拆除阶段拆除施工和建筑垃圾处理与再利用的碳排放, kgCO_2e 。

建筑拆除施工的碳排放相关研究^[2,27]表明约为建筑建设施工机械碳排放的 0.9。建筑拆除施工的碳排放可按式(10)计算:

$$E_{e1} = 0.9 \times E_{p2} \quad (10)$$

对于建筑垃圾的处理与再利用的研究并不完善。建筑垃圾的回收率参考文献[28]。回收率信息见表 1。

表 1 建筑垃圾回收再利用情况
Table 1 Recycling of construction waste

建筑垃圾	回收率
废混凝土	0.7
废钢材	0.9
废合金混合	0.9

参考相关研究^[29], 建筑垃圾的平均运输距离为 25km。

为了使上下游过程都能从建筑垃圾再利用中受益, 设置价格质量系数, 即再生原料的环境收益对于下游过程不能全部免费获得, 对于上游过程不能全部抵扣。

建筑垃圾处理与利用的碳排放按式(11)~(13)计算:

$$E_{e2} = E_{ew} + E_{er} \quad (11)$$

$$E_{ew} = \sum_{i=1}^{n_e} [(1-k) \times w_i \times EFW_i + w_i \times S_{w,i} \times EFW_{t,i}] \quad (12)$$

$$E_{er} = - \sum_{i=1}^{n_e} (k \times r \times w_i \times EFW'_i) \quad (13)$$

式中: E_{ew} 是建筑垃圾处理的碳排放, kgCO_2e ; E_{er} 是建筑垃圾再利用的碳排放, kgCO_2e ; n_e 是建筑垃圾的总种类数量; k 是建筑垃圾的回收率; w_i 是 i 种垃圾的总量, kg ; EFW_i 是处理 i 种建筑垃圾的碳排放背景数据, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$; $S_{w,i}$ 是 i 种垃圾的运输距离, 取 25km; $EFW_{t,i}$ 是 i 种建筑垃圾的运输车辆的单位距离碳排放背景数据, $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{kg}\cdot\text{km})$; r 是价格质量系数; EFW'_i 是生产 i 种再生原料的碳排放背景数据, $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$ 。

1.2.2 全生命周期分析方法 根据 ISO14040^[30], LCA 分析包含目标与范围、生命周期清单分析、影响评估、解释评价。

(1) 目标与范围 系统边界为由摇篮到坟墓; 功能单位为一栋现代木结构办公建筑; 使用年限为 51a(包含建设 1a, 使用 50a)。

(2) 生命周期清单分析 使用 eFootprint 平台^[31]进行 LCA 建模, eFootprint 包含了中国本土化的 CLCD 数据库, 该平台和数据库已被广泛的用于 LCA 分析^[32-33], 建筑全生命周期各阶段的实景数据

计算方法见 1.2.1.生命周期模型包含了 100 多种材料和能源输入,包含生产、使用、废弃三大模块,涵盖了建筑“从摇篮至坟墓”的全生命过程,LCA 部分模型结构见图 2.

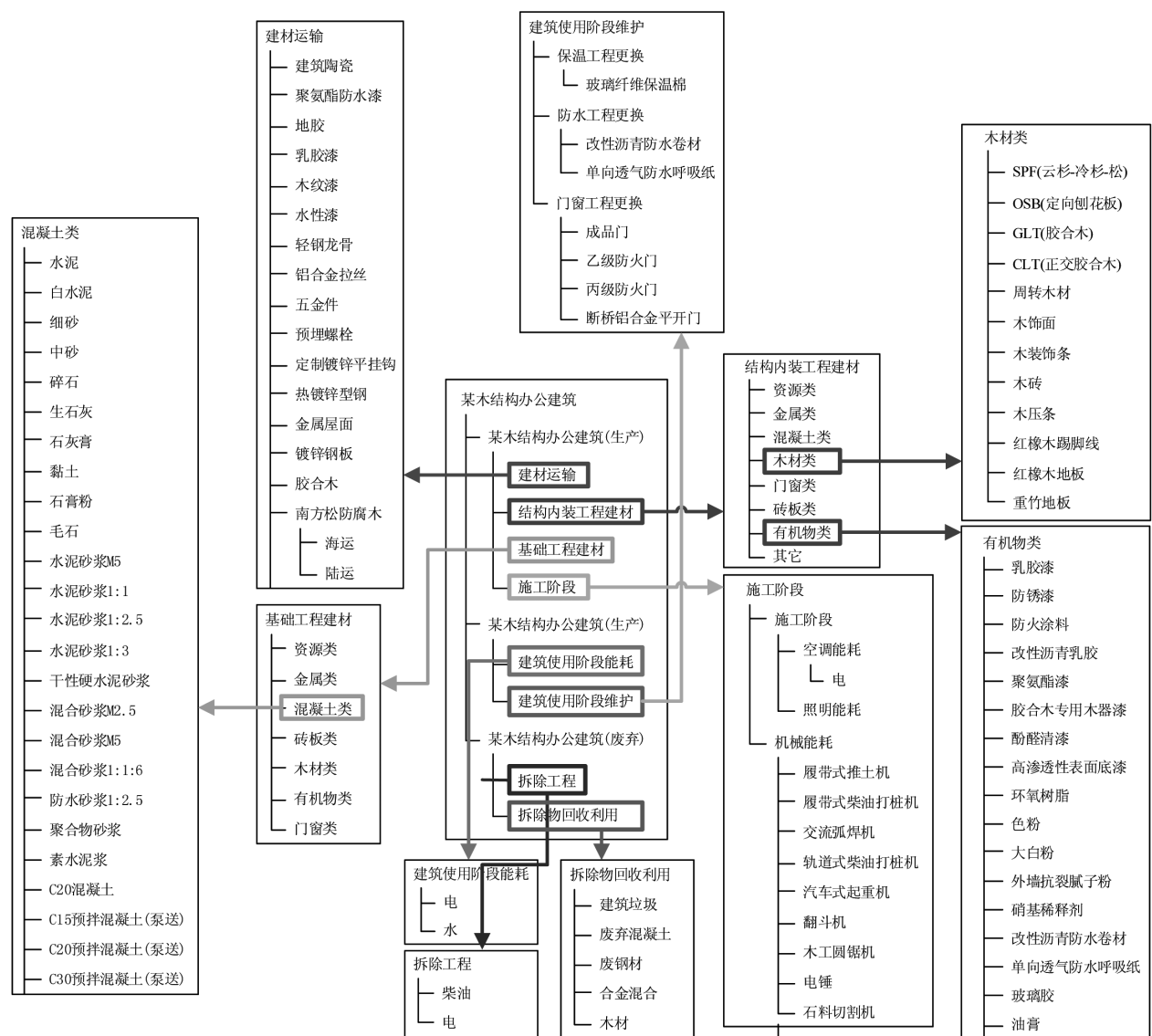


图 2 某木结构 LCA 模型部分结构
Fig.2 The partial LCA model drawing of the timber building

主要材料量见表 2.

表 2 主要材料与能源清单
Table 2 The inventory of main materials and energy consumption

阶段	材料与能源	总量
物化阶段	混凝土类(t)	4632.6
	钢材类(t)	389.3
	其他金属类(t)	10.7
	木材类(m³)	1123.1
使用阶段	电(kW·h)	18939461.0
	水(t)	68625.0

(3) 影响评估 CLCD 数据库包含 600 多种中国本土化的材料、能源、运输与废物处理的 LCI 数据集.选择的输出类别为全球变暖潜值(GWP,CO₂e).

(4) 结果分析 对研究对象进行碳足迹分析,计算全生命周期的碳排放与各阶段占比,按式(14)和(15)(16)计算单位面积碳排放强度(碳排放强度)和单位面积年碳排放强度(年碳排放强度),并与传统建筑的碳排放研究进行对比.

$$D_x = E_x / A \tag{14}$$

$$T_p = E_p / (A \times L_p) \tag{15}$$

$$T_u = E_u / (A \times L_u) \tag{16}$$

式中： D_x 为不同阶段的单位面积碳排放强度， $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ； E_x 为不同阶段的碳排放， kgCO_2e ； A 为建筑面积，共 3350.94m^2 ； T_p 为物化阶段单位面积年碳排放强度， $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ； L_p 为建筑建造时间，实际建设时间为 7 个月，取 1a； T_u 为使用阶段单位面积年碳排放强度， $\text{kgCO}_2\text{e}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ ； L_u 为建筑设计使用年限，为 50a。

1.2.3 木材生物碳 我国现代木结构建筑多为胶合木结构，生产胶合木的原木多为国外进口，并在国内进行生产。该建筑使用的胶合木其原材料来自加拿大，使用了加拿大雅典娜研究机构对于北美木材的研究报告^[34-37]，其中给出了每种木材的生物碳存储量见表 3。

目前缺少对于长时间生物碳储存的明确计算方法，英国规范 PAS2050^[38]对 2~25a 碳存储的按照存储时间和二氧化碳随时间的影响变化进行折减。Hawkins 等^[39]的研究表明，二氧化碳对温度变化的影响在排放初期较大，并在 40a 后趋于稳定。LCA 进行碳足迹分析时通常以 100a 的温室气体影响作为气候变化指标来确定不同温室气体的贡献^[40]。因此本研究仅考虑储存时间进行折减，即建筑设计使用年限与 100a 的比值 0.5 为折减因子。木材的碳排放背景数据按(17)计算：

$$EF_t = EF_{tp} - EF_{te} \times 0.5 \tag{17}$$

式中： EF_t 是木材的碳排放背景数据， $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ ； EF_{tp} 种是木材生产过程的碳排放量， $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ ； EF_{te} 是木材的生物固碳量， $\text{kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$ (表 3)。

表 3 常用结构用木材的生物固碳量($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$)

Table 3 biological carbon of commonly used timber ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^3$)

木材类型	生物固碳量
软木材	743.46
胶合板	784.7
OSB 板	1030.9
CLT(交叉层压木材)	764.56

2 现代木结构建筑全生命周期碳足迹分析

2.1 建筑全生命周期碳足迹

该结构建筑全生命周期部分环境指标见表 4。本研究主要讨论碳足迹，即 GWP 指标。

清单数据灵敏度是指清单数据单位变化率引起的相应指标变化率。灵敏度较大的数据清单为关键汇总过程(AP)，分析关键 AP 能找出改进的关键方向。

表 4 某木结构建筑全生命周期环境指标

Table 4 Environmental indicators for the life cycle of the timber building

指标名称	单位	总量
气候变化(GWP)	kgCO_2e	1.69×10^7
一次能源消耗(PED)	MJ	2.78×10^8
水资源消耗(WU)	kg	1.32×10^8
酸化(AP)	$\text{kg SO}_2\text{eq}$	5.87×10^4
可吸入无机物(RI)	$\text{kg PM}_{2.5}\text{eq}$	1.54×10^4
臭氧层消耗(ODP)	kg CFC-11eq	2.71×10^{-1}

由图 3 和表 5 可知，该建筑全生命周期的碳排放总量为 $1.69 \times 10^7 \text{kgCO}_2\text{e}$ ，其中物化阶段碳排放 $2.63 \times 10^6 \text{kgCO}_2\text{e}$ ，占比 15.56%，使用阶段碳排放 $1.42 \times 10^7 \text{kgCO}_2\text{e}$ ，占比 84.34%，拆除阶段碳排放 $1.63 \times 10^4 \text{kgCO}_2\text{e}$ ，占比 0.10%。由于建筑的长生命周期，使用阶段的碳排放依然是建筑全生命周期中碳排放最大的阶段，降低使用阶段的碳排放是降低建筑全生命周期碳排放的重要方向。

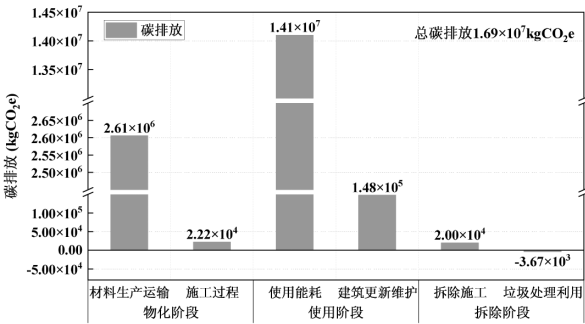


图 3 木结构建筑全生命周期碳排放分布

Fig.3 The carbon emissions in the life cycle of the timber building

建筑使用阶段的碳排放来源中电力为关键 AP。建筑使用过程中有大量的电力消耗，降低使用阶段的能耗是降低建筑全生命周期碳排放的重要方向，发展绿色建筑、节能建筑来降低使用阶段能耗依然是降低建筑全生命周期碳排放的重要手段。张^[41]对南京地区(北亚热带季风湿润性气候)的三栋传统材料办公楼建筑全生命周期碳排放进行分析，结果表明传统材料

建筑使用阶段碳排放占全生命周期碳排放的70%~80%,木结构建筑使用阶段碳排放占比结果相较于传统材料建筑较高^[42],本研究为84.34%,说明木材相对于传统材料建筑能减少物化阶段的碳排放,使得木结构建筑使用阶段的碳排放占比相较传统材料建筑较大.而随着一级能源逐渐脱碳,建筑物化阶段碳排放占比将逐渐增大,木材能将生物固定的碳储存于建筑中,并减少传统高碳材料钢材和水泥的使用,因此木结构建筑是建筑减排的理想方向之一.

表 5 木结构建筑全生命周期关键 AP
Table 5 The aggregated process in the life cycle of the timber building

过程名称	清单名称	上游数据类型	GWP 贡献(%)
某木结构办公楼	某木结构办公楼(使用)	实景	84.34
某木结构办公楼(使用)	建筑使用阶段耗能	实景	83.47
建筑使用阶段耗能	电(关键 AP)	背景	83.43
某木结构办公楼	某木结构办公楼(生产)	实景	15.56
某木结构办公楼(生产)	结构内装工程建材	实景	9.42
结构内装工程建材	金属类	实景	6.08

木结构建筑物化阶段关键 AP 及碳排放情况情况见表 6 和图 4.

表 6 木结构建筑物化阶段关键 AP
Table 6 The aggregated process in the product stage of the timber building

过程名称	清单名称	上游数据类型	GWP 贡献(%)
某木结构办公楼(生产)	结构内装工程建材	实景	60.57
结构内装工程建材	金属类	实景	39.06
某木结构办公楼(生产)	基础工程建材	实景	35.63
基础工程建材	混凝土类	实景	23.11
结构内装工程建材	木材类	实景	-16.53
结构内装工程建材	砖板类	实景	14.79
金属类	镀锌型钢(关键 AP)	背景	13.38
木材类	SPF(云杉-冷杉-松)(关键 AP)	背景	-12.72

由表 6 和图 4 可知,该木结构建筑物化阶段的碳排放主要集中在建材的生产上.建材运输的碳排放

相对较小,并且关键 AP 木材的固碳量较大,部分木材虽然为进口产品,运输距离较远,但木材的固碳效率远大于运输的碳排放,未来若有更多的国产工程木材投入使用,能进一步降低木结构建筑物化阶段的碳排放.

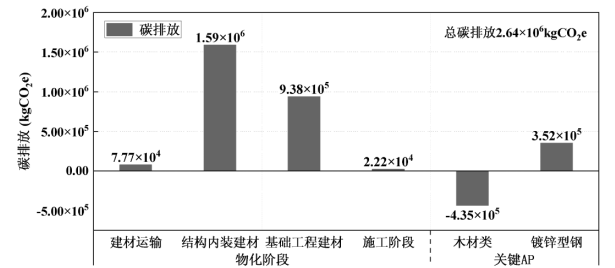


图 4 木结构建筑物化阶段碳排放分布
Fig.4 The carbon emissions in the product stage of the timber building

由图 5 可知,木结构拆除阶段的碳排放强度相对于全生命周期占比较小.加大废弃物的回收再利用率能降低处理建筑垃圾所产生的碳排放,并通过回收的环境效益减少两个生命周期期间上游过程拆除阶段的碳排放和下游过程生产材料的碳排放.

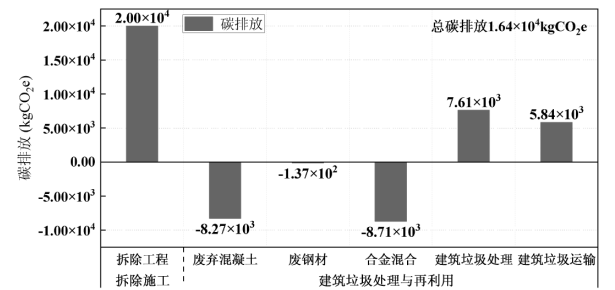


图 5 木结构建筑拆除阶段碳排放分布
Fig.5 The carbon emissions in the end of life stage of the timber building

回收部分未涉及木材.与其他建筑垃圾相比,回收钢材作为废钢再利用回扣上游过程的碳排放并不突出,该项使用 CLCD 0.8 的数据集废钢混合(中国).废钢材的再利用应该结合实际的利用过程,同时与使用的数据集(碳排放背景数据)情况进行更细致的研究.

2.2 建筑全生命周期碳排放强度分析

全生命周期各阶段的碳排放强度和单位面积碳排放强度见表 7.

表 7 某木结构全生命周期各阶段碳排放强度

Table 7 Carbon emission intensity at each stage of the life cycle of the timber building

阶段	碳排放强度 (kgCO ₂ e/m ²)	年碳排放强度 (kgCO ₂ e/m ² ·a)
全生命周期(取 51a)	5043.4	98.9
物化阶段(取 1a)	784.2	784.2
使用阶段(50a)	4267.5	85.4
拆除阶段	4.9	—

由表 7 可知,虽然从建筑全生命周期上来看使用阶段碳排放量大,但从同一时间段角度来讲,物化阶段的年碳排放强度大,为使用阶段的年碳排放强度的 9.2 倍。

现代木结构建筑在基础工程使用钢筋混凝土,在上部木构件的连接中使用较多金属连接件,在装饰工程中使用功能性有机物及无机物,使得木结构物化阶段年碳排放强度较使用阶段年碳排放强度依然较大。对于木结构结构体系的创新,减少传统材料的使用仍能帮助木结构减少碳排放,降低木结构建筑的碳排放强度。

建筑拆除阶段的碳排放占比和碳排放强度较低,但目前我国的建筑垃圾实际回收利用率低于本研究使用的回收利用率^[28],并且我国每年将产生大量的建筑垃圾,大约为我国日常生活产生的生活垃圾的 5 倍^[43],应从各个层面上加大对建筑垃圾再利用的要求,亦能促进建材的可持续发展。

2.3 不确定分析

木结构建筑种类较多,随着胶合木技术的发展有大跨度的木结构场馆类建筑投入使用;未来随着重型木结构的发展,也会有中高层木结构建筑投入使用。本研究无法覆盖所有的木结构建筑,但对木结构建筑物化阶段以及亚热带季风湿润性气候地区的木结构建筑全生命周期的碳排放有参考意义。

CLCD 方法对 LCA 模型中的清单数据,通过来源与算法、时间代表性、技术代表性、地理代表性等四个方面进行评估,并对关联背景数据库的消耗,评估其与上游背景过程匹配的不确定度。完成清单不确定度评估后,采用解析公式法计算不确定度传递与累积,得到 LCA 结果的不确定度^[44]。

对建筑全生命周期以及物化阶段的结果不确定度进行分析。该木结构建筑由 EFootprint 计算得出的结果的不确定度如表 8。

表 8 某木结构建筑碳足迹结果不确定度

Table 8 Uncertainty of carbon footprint results of the timber building

阶段	LCA 结果	结果不确定度(%)	95%置信区间
物化阶段	2.64e6	13.57	[2.27×10 ⁶ ,2.99×10 ⁶]
全生命周期	1.69e7	24.61	[1.27×10 ⁷ ,2.11×10 ⁷]

建筑物化阶段的不确定度主要由结构用材造成,其中云杉-冷杉-松(SPF)对结果不确定度的贡献最大,达 4.13%。建筑全生命周期的不确定度主要由使用阶段的电力消耗造成,其对结果不确定度贡献达 84.89%。由于模型设置的技术代表性为行业平均,而只有一个建筑的数据,导致技术代表性该项存在 25%的不确定度,传递至最后导致最终碳足迹结果不确定度较大。但如果仅是针对于该栋建筑碳核算,最终结果不存在技术代表性传递来的不确定度,结果是较为准确的。

为了尽量降低研究结果的不确定度,本研究的活动数据物化阶段所有材料及运输数据均来自于项目实际的预决算清单,机械等使用也都由预决算清单通过相关规范计算出。使用阶段能耗模拟也通过和实际情况对比保证可靠性。

对于部分无法计算的材料进行了忽略,所有忽略材料都符合 cut-off 规则,模型无未定义内容,所有缺失数据均来自于关联的背景数据集。

背景数据优先采用中国本土化的 CLCD 数据库中的数据,其次采用 Ecoinvent 数据库的数据,对于部分缺失的选择企业环评报告和文献以及 Efootprint 平台通过审核的用户创建的数据集,确保了数据的代表性以及结果的准确性。

2.4 生物碳讨论

Ubando 等^[45]在对生物质燃料进行研究时,认为通过生物固碳使得生物炭成为负碳材料。工程木材由于其光合作用固定的生物碳,其实也是一种负碳材料。目前对于包含生物碳的材料的使用方法并不明确。传统的 LCA 方法会在材料回收作为可再生材料再利用时,通过对正碳材料的碳排放背景数据添加负号完成对上游过程的回扣和下游过程的抵扣。若对包含生物碳的负碳材料使用该方法会出现回收后碳排放为正值。

因此,本研究将负碳材料的碳排放拆分为生产过程的正值和固定的生物碳的负值来使用,对

于生产过程的正值在回收阶段按照常规的正碳材料的分配过程分配,对于生物碳的负值则按照使用年限等折减因子直接在不同的循环过程中进行分配.

假定 1000m³ 木材(假设固定的生物碳总量为 1000kgCO₂e)经历如图 6 的三个生命周期:由图 6 中的分配过程可知,将木材的考虑生物固碳量的碳排

放拆分为实际生产过程的碳排放背景数据和木材的固碳量来使用,在涉及上下游两个生命周期的回收再利用阶段不会涉及固碳量的分配,不会出现回收阶段回收再利用材料是正值碳排放的情况.更加符合 LCA 模型不同生命周期之间处理的逻辑,并且每个阶段的 GWP 值只需将生产过程的碳排放值和生物固碳值进行相加,方便处理.

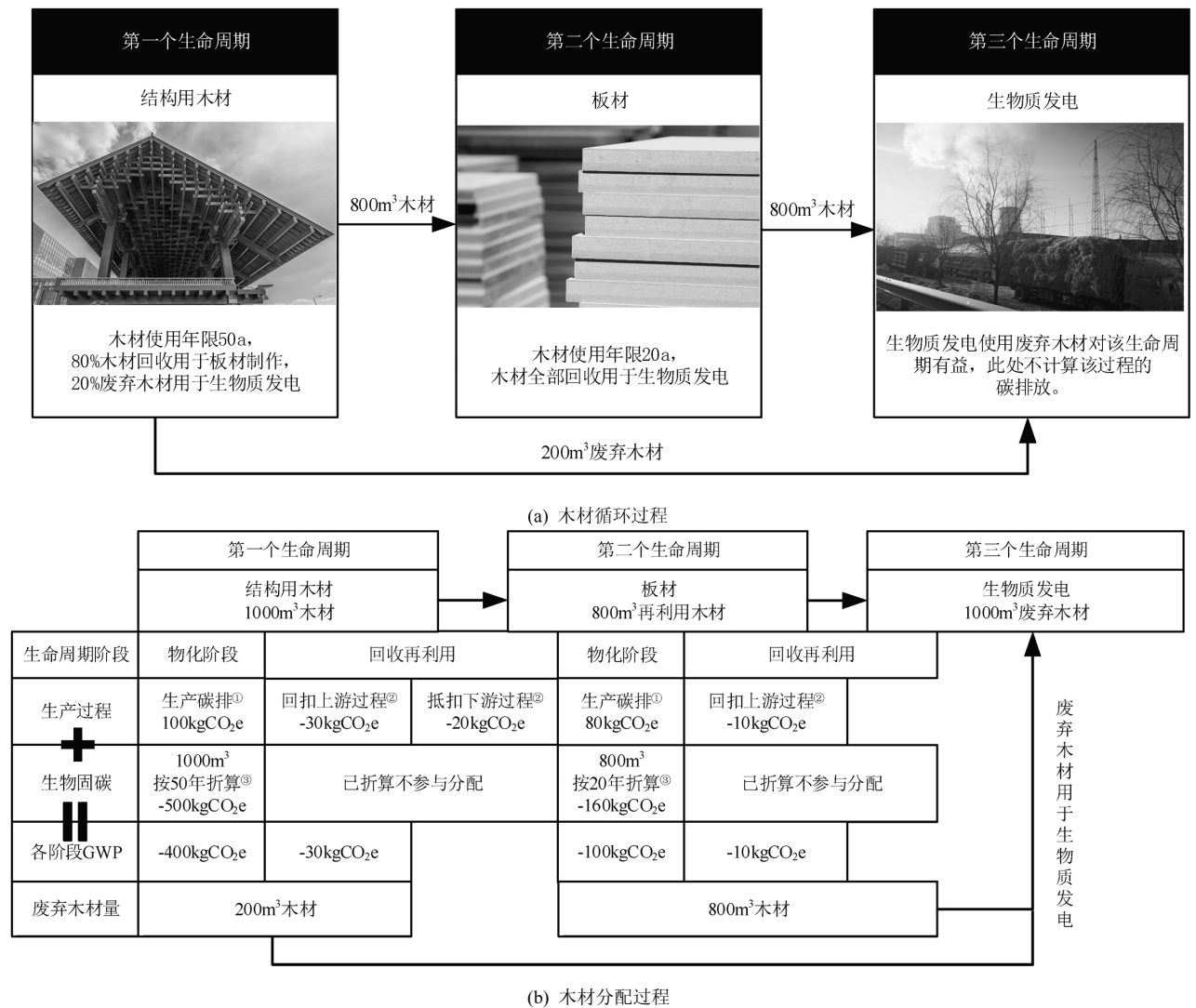


图 6 木材循环和分配过程

Fig.6 Wood recycling and distribution processes

①各过程的生产碳排放值为假定;②两个生命周期间的回收利用的上游回扣值和下游抵扣值为假设,具体数值和上下游生产过程以及废弃物再利用的质量价格比和再利用率有关;③木材生物碳的折算仅按相对于 100a 的时间折减因子

2.5 木结构建筑 LCA 研究讨论

本文通过对某现代木结构办公建筑进行详细的全生命周期分析,量化得出了木结构全生命周期和各阶段的碳排放,同时对生物的循环分配进

行了讨论.本文的研究结果显示木材的固碳量对于结果的影响比较显著,同时建筑 LCA 模型的完整性对结果的影响也较大,应根据研究目的确定木材生物碳的使用和模型的边界范围.后续也将

分析该建筑的经济性,并针对不同材料办公建筑进行对比研究。

3 结论

3.1 建筑在同一时间段内物化阶段碳排放强度很大,采用木结构能显著降低建筑物化阶段的碳排放。

3.2 从建筑全生命周期角度分析,该木结构建筑使用阶段的碳排放占建筑全生命周期碳排放的 84% 以上,降低使用阶段碳排放依然是降低建筑全生命周期碳排放的手段。

3.3 目前对于生物固碳量在 LCA 中的应用并不明确,在负碳材料的回收阶段存在问题,本研究提出基本的处理方法,将考虑生物碳的负碳材料的碳排放拆分为生产过程的碳排放和生物固碳值来使用,可实现在不同生命周期之间的循环。

3.4 对于木结构结构体系的创新,减少传统材料的使用仍能帮助木结构减少碳排放,降低木结构建筑的碳排放强度。

参考文献:

- [1] 建筑能耗与碳排放数据专业委员会.2022 年度中国城乡建设领域碳排放系列研究报告 [R]. 北京:中国建筑节能协会, 2023.
Professional Committee on Building Energy Consumption and Carbon Emission Data. 2022 China urban rural construction carbon emission series research report [R]. China Association of Building Energy Efficiency, 2023.
- [2] Zhang X, Wang F. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China [J]. Building and Environment, 2015,86:89-97.
- [3] Rabani M, Madessa H B, Ljungström M, et al. Life cycle analysis of GHG emissions from the building retrofitting: The case of a Norwegian office building [J]. Building and Environment, 2021,204: 108159.
- [4] Robati M, Daly D, Kokogiannakis G. A method of uncertainty analysis for whole-life embodied carbon emissions (CO₂-e) of building materials of a net-zero energy building in Australia [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,225:541-553.
- [5] Yu M, Robati M, Oldfield P, et al. The impact of value engineering on embodied greenhouse gas emissions in the built environment: A hybrid life cycle assessment [J]. Building and Environment, 2020,168: 106452.
- [6] Macinnis-Ng C, Wyse S V, Webb T, et al. Sustained carbon uptake in a mixed age southern conifer forest [J]. Trees, 2017,31:967-980.
- [7] Uri V, Kukumägi M, Aosaar J, et al. Carbon budgets in fertile grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench.) stands of different ages [J]. Forest Ecology and Management, 2017,396:55-67.
- [8] 何敏娟,何桂荣,梁 峰,等.中国木结构近 20 年发展历程 [J]. 建筑结构, 2019,49(19):83-90.
- [9] He M J, He G R, Liang F, etc. Development of timber structures in China during recent twenty years [J]. Building Structure, 2019,49(19): 83-90.
- [10] 杜 Q, Zhang R, Cai C, et al. Factors influencing modern timber structure building development in China [J]. Sustainability, 2021,13 (14):7936.
- [11] 王瑞胜,陈有亮,陈 诚.我国现代木结构建筑发展战略研究 [J]. 林产工业, 2019,56(9):1-5.
- [12] 尚春静,储成龙,张智慧.不同结构建筑生命周期的碳排放比较 [J]. 建筑科学, 2011,27(12):66-70.
- [13] 徐伟涛.基于 LCA 法的木结构建筑使用阶段碳排放探讨 [J]. 林产工业, 2021,58(2):36-38.
- [14] Li Z, Chen F, He M, et al. Experimental Investigation on Self-Centering Steel-Timber Hybrid Beam-Column Connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2023,149(3):04022256.
- [15] Sun X, He M, Li Z. Novel engineered wood and bamboo composites for structural applications: State-of-art of manufacturing technology and mechanical performance evaluation [J]. Construction and Building Materials, 2020,249:118751.
- [16] Schmidt M, Crawford R H, Warren-Myers G. Integrating life-cycle GHG emissions into a building's economic evaluation [J]. Buildings and Cities, 2020,1(1).
- [17] GB/T 51366-2019 建筑碳排放计算标准 [S].
GB/T 51366-2019 Standard for building carbon emission calculation [S].
- [18] 江苏省建筑与装饰工程消耗量定额 [Z]. 江苏:江苏省建设工程造价管理总站, 2022.
Consumption quota of construction and decoration engineering in Jiangsu Province [Z]. Construction Engineering Cost Management Station of Jiangsu Province, 2022.
- [19] GB 50034-2013 建筑照明设计标准 [S].
GB 50034-2013 Standard for lighting design of buildings [S].
- [20] DeST 团队. DeST-C User Manual [EB/OL]. 清华大学, 2008, <https://www.dest.net.cn/zy>.
- [21] 杨志伟,于 瑾,李奎波,等.基于 DeST-C 的通风对办公建筑能耗影响的模拟分析 [J]. 江西理工大学学报, 2015,36(5):67-73.
Yang Z W, Yu J, Li K B, et al. Numerical simulation research on the effects of ventilation on office building energy consumption based on DeST-C [J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology,

- 2015,36(5):67-73.
- [22] Zhang L, Hou C, Hou J, et al. Optimization analysis of thermal insulation layer attributes of building envelope exterior wall based on DeST and life cycle economic evaluation [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2019,14:100410.
- [23] DB31/T 680-2012 城市公共用水定额及其计算方法 [S].
DB31/T 680-2012 Urban public water-consumption and its calculation method [S].
- [24] JGJ 144-2019 外墙外保温工程技术标准 [S].
JGJ 144-2019 Technical standard for external thermal insulation on walls [S].
- [25] GB/T 8478-2020 铝合金门窗 [S].
GB/T 8478-2020 Aluminum windows and door [S].
- [26] GB 50345-2012 屋面工程技术规范 [S].
GB 50345-2012 Technical code for roof engineering [S].
- [27] Gong X, Nie Z, Wang Z, et al. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing: A comparative study [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2012,16(4): 576-587.
- [28] 李岳岩,张 凯,李金潞.居住建筑全生命周期碳排放对比分析与减碳策略 [J]. *西安建筑科技大学学报*, 2021,53(5):737-745.
Li Y Y, Zhang K, Li J L. Comparative analysis of carbon emission throughout the life cycle of residential buildings and carbon reduction strategy [J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2021,53(5):737-745.
- [29] 陈亚坤.基于数据融合的建筑垃圾运输节点管控研究 [D]. 北京:北京交通大学, 2021.
Chen Y K. Research on Management and Control of Construction Waste Transportation Node Based on Data Fusion [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [30] ISO. ISO 14040:2006/Amd 1:2020 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework — Amendment 1[S].
- [31] 亿科.在线 LCA 评价系统 [OL]. <http://v2.efootprint.net/#/home>.
IKE. Online LCA system [OL]. <http://v2.efootprint.net/#/home>.
- [32] Zhao H L, Liu F, Liu H Q, et al. Comparative life cycle assessment of two ceramsite production technologies for reusing municipal solid waste incinerator fly ash in China [J]. *Waste Management*, 2020,113: 447-455.
- [33] Lv L, Song G, Zhao X, et al. Environmental Burdens of China's Propylene manufacturing: Comparative life-cycle assessment and scenario analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,799: 149451.
- [34] Athena Sustainable Materials Institute. A Life Cycle Assessment of Cross-Laminated Timber Produced in Canada [Z]. Canada, 2013,<https://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2013/10/CtoG-LCA-Canadian-CLT.pdf>.
- [35] Athena Sustainable Materials Institute. A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Canadian Oriented Strand Board – OSB [Z]. Canada, 2018,<https://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2018/09/CtoG-LCA-of-Canadian-OSB.pdf>.
- [36] Athena Sustainable Materials Institute. A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Surfaced Dry Softwood Lumber Produced in British Columbia [Z]. Canada, 2021, <https://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2022/06/CtoG-LCA-of-BC-Surfaced-Dry-Softwood-Lumber.pdf>.
- [37] Athena Sustainable Materials Institute. A Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Glulam Produced in British Columbia [Z]. Canada, 2022,<https://www.athenasmi.org/wp-content/uploads/2022/06/CtoG-LCA-of-BC-Glulam.pdf>.
- [38] BSI. PAS 2050:2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services [S].
- [39] Hawkins W, Cooper S, Allen S, et al. Embodied carbon assessment using a dynamic climate model: Case-study comparison of a concrete, steel and timber building structure [C]// *Structures*. Elsevier, 2021,33: 90-98.
- [40] UNFCCC. Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013. Addendum. Part two: Action taken by the Conference of the Parties at its nineteenth session [Z]. 2013, <https://unfccc.int/documents/8106>.
- [41] 张华娣.南京地区办公建筑全生命周期碳排放测算 [J]. *建筑热能通风空调*, 2022,41(8):34-36,46.
Zhang H D. Carbon emission calculation in whole life cycle of office buildings in Nanjing [J]. *Building Energy & Environment*, 2022,41(8): 34-36,46.
- [42] Yang X, Zhang S, Wang K. Quantitative study of life cycle carbon emissions from 7 timber buildings in China [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2021,26(9):1721-1734.
- [43] Ma L, Zhang L. Evolutionary game analysis of construction waste recycling management in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2020,161:104863.
- [44] 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,(6):1529-1536.
Huang N, Wang H T, Xue C D, et al. LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 32(6):1529-153.
- [45] Ubando A T, Culaba A B, Aviso K B, et al. Fuzzy mixed-integer linear programming model for optimizing a multi-functional bioenergy system with biochar production for negative carbon emissions [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2014,16:1537-1549.

作者简介: 苏鹏宇(1998-),男,甘肃兰州人,同济大学硕士研究生,主要研究方向为建筑碳排放、生命周期评价及应用.ssshe@tongji.edu.cn.