

中芬居住建筑生命周期碳排放测算及环境影响对比研究

A Comparative Study of Carbon Emission Calculations and Environmental Impacts in the Life Cycle Assessment of Residential Buildings in China and Finland

齐新竹, 史立刚*, 卡琳·克罗克福斯, 周梦菲
Qi Xinzhu, SHI Ligang*, Karin Krokfors, ZHOU Mengfei

齐新竹

B.1995, 阿尔托大学硕士
哈尔滨工业大学建筑学院、寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室, 博士研究生

QI Xinzhu

B.1995, Master, Aalto University
PHD. Candidate, School of Architecture, HIT; Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology

史立刚* (通讯作者)

B.1978, 哈尔滨工业大学博士
哈尔滨工业大学建筑学院、寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室教授

SHI Ligang* (Corresponding Author)

B.1978, PHD., HIT
Professor, School of Architecture, HIT; Key Laboratory of Cold Region Urban and Rural Human Settlement Environment Science and Technology, Ministry of Industry and Information Technology
slg0312@163.com

卡琳·克罗克福斯

B.1970, 阿尔托大学博士
阿尔托大学建筑系副教授
Karin Krokfors
B.1970, PHD., Aalto University
Vice Professor, Department of Architecture, Aalto University

周梦菲

B.1997, 阿尔托大学硕士
上海市园林设计研究总院有限公司助理设计师
ZHOU Mengfei
B.1997, Master, Aalto University
Assistant Designer, Shanghai Landscape Architecture Design Institute

国家自然科学基金

项目编号: 51878200

本文图表均由齐新竹绘制

定稿日期: 2021-09-20

摘要: 在碳达峰和碳中和战略目标下, 低碳建筑研究愈加重要, 而我国当前对于建筑的碳排放定量研究尚相对薄弱。本文基于LCA理论, 通过引入ONE-CLICK LCA软件, 对中、芬两国代表性居住建筑进行了全生命周期碳排放计算和实证对比分析, 结果表明冬季清洁取暖、使用胶合木等环境友好的生态材料、延长建筑使用周期有利于降低建筑全生命周期碳排放。

Abstract: With the implementation of China's carbon peak and neutrality strategic goals, there is an urgent need to deepen the research on low-carbon buildings. In contrast, the quantitative analysis of carbon emissions from buildings in China is relatively insufficient. Based on the LCA theory, this paper calculates the carbon emissions of life cycle assessment (LCA) and conducts a comparative empirical analysis of two representative residential buildings in China and Finland through the software ONE-CLICK LCA. The results show that clean heating in winter, environmentally friendly materials such as CLT, and extended service life are conducive to reducing carbon emissions throughout the life cycle of buildings.

关键词: 生命周期评估, 碳排放, 居住建筑

Keywords: life cycle assessment, carbon emission, residential building

0 引言

面对温室效应带来的极端天气频发威胁, 全球主流力量正致力于遵循《巴黎协定》(2015), 将全球温度上升控制在低于 2°C 的范围内并努力将其限制在 1.5°C 以下的框架, 通过政策指引和技术创新实现减排目标和可持续发展。建筑业被认为是世界能源消耗和以 CO₂ 为主的温室气体排放的主要责任者, 其排放的 CO₂ 占全球 39%^[1]。同时随着世界城市化进程加速, 预计未来 40 年全球将相继新建成居住建筑超过 2.3×10^8 m²^[2], 建筑业将成为节能减排的首要对象。

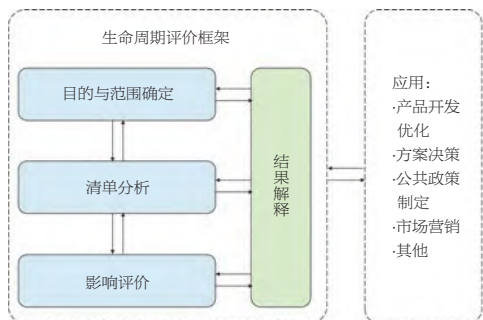
欧盟各国制定了一系列应对气候变化的措施, 包括零能耗建筑 (nZEB) 概念和标准^[3]。芬兰是欧洲人均森林面积最多的国家, 且森林资源逐年增加^[4]。基于木建筑配合相应的可持续法规^[5], 芬兰在低碳建筑领域实现了持续发展。在 2030 碳达峰和 2060 碳中和战略目标下, 尽管我国发展低碳建筑已卓有成效, 但在低碳建筑定量化研究方面还相对滞后^[6]。

1 建筑生命全周期碳排放测算

1.1 建筑生命周期评估的研究现状

生命周期评估指用于定量化评估产品和服务“从摇篮到坟墓”的过程中对环境的潜在影响的方法^[7], 自 1990 年被国际环境毒理学和化学学会 (SETAC) 提出至今, 在许多行业已得到广泛使用。我国《绿色建筑评价标准》中认为, 建筑物从规划设计到施工, 再到运行使用及最终的拆除, 构成一个全寿命期^[8] (图 1)。根据 ISO14040 标准定义, LCA 框架由目的与范围确定、

1 ISO生命周期评价理论框架^[9]



2 ONE-CLICK LCA软件计算流程

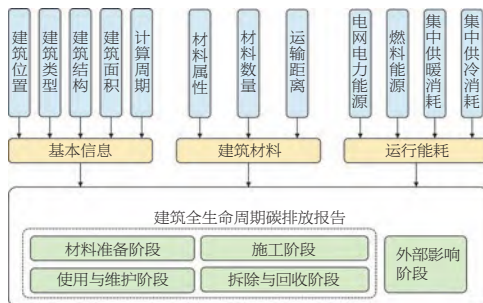


表 1 EN15978:2011 定义下的建筑生命周期阶段^[23]

A1-A3 材料准备阶段			A4-A5 施工阶段		B1-B7 使用和维护阶段				C1-C4 拆除与回收阶段				D 外部影响阶段			
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
原材料供应	运输	材料制造	运输到现场	施工及安装	使用	维护	修复	材料替换	翻新	能源使用	用水	解构拆除	运输	废物处理	回收	再利用、恢复和回收潜力 (不计入结果)

清单分析、影响评价和结果解释 4 个部分组成^[9]。其目的是通过考虑整个产品系统，在过程中识别产品对环境影响的关键阶段，从而实现源头优化管控^[10]。

目前欧盟国家建筑领域的生命周期评估已较为成熟，并已被纳入《可持续发展标准建筑》《建筑产品法规》和 LEED、BREEAM 等多项可持续建筑认证计划^[11-13]中。建筑的生命周期评估可量化评价建筑对环境的影响，也可在前期设计与施工过程中指导方案设计、材料选择及施工方法优化^[14]。其中罗尔夫·弗里施克内西 (Rolf Frischknecht)^[15] 领导了生命周期清单数据库 Ecoinvent 的开发；伯纳德特·苏斯特·韦尔达格 (Bernardette Soust Verdaguer)^[16] 等人探究了不同国家 LCA 标准差异的协调方法；亚历山大·霍尔贝格 (Alexander Hollberg)^[17] 等人针对 LCA 在意见指导过程的应用中提出了双重基准法。目前生命周期评估的应用还有待进行参数化及云运算转型^[18]。

我国低碳建筑研究主要集中于建筑节能领域定性阶段^[6]。近年在建筑生命周期评估方面的研究明显增加。其中于萍^[19]、张智慧^[20] 等人对生命评价周期进行了阶段划分，林波荣、刘念雄^[21] 等人进行了碳排放计算方法探究，蔡向荣^[22] 等人对生命评价周期过程进行了计算分析。由于生命评价周期的阶段及计算边界划分缺乏统一标准，且计算模型和数据库存在差异，导致不同建筑间的全生命周期评估结果缺乏参考性及对比性。因此通用性的建筑生命周期评估方法亟待深入研究，以期切实推动我国低碳建筑建设和碳排放测算发展。

1.2 建筑生命周期评估的计算边界确定

根据欧洲标准 EN15978:2011 的建筑生命周期阶段定义 (表 1)^[23]，材料准备阶段至拆除与回收阶段结果可用于计算全生命周期碳排放，外部影响阶段可用于建筑材料再利用潜力评估。

1.3 建筑生命周期评估的计算方法

尽管建筑生命周期评估已广泛投入使用，但由于数据库和边界差异，其计算方法在各国和地区间尚未统一。目前的生命周期评估软件可大致分为两种：丹麦的 LCAByg、德国的 Caala 和 eLCA、美国的 Gabi 等建筑行业相关软件，以及 Openlca、SimaPro、eBalance 等面向全社会的软件。其中芬兰 Bionova 公司开发的 ONE-CLICK LCA 软件具有以下优点：(1) 专业性：为建筑行业设计，涵盖生命周期评估、成本核算、早期碳优化、隐含碳计算等功能板块，可提供材料替换建议，并横向设置对比设计帮助工作者进行方案优化；(2) 普适性：符合中、美、英、欧盟等地区 40 多个主流认证方案和国家标准的要求，集成几乎所有可用的 EPD 平台数据，并可对缺失的地方性数据提供可行性补偿方法，在全球范围内广谱使用。因此本文以 ONE-CLICK LCA 软件进行测算 (图 2)。

2 中芬两居住建筑碳排放计算

2.1 芬兰某居住建筑基本信息

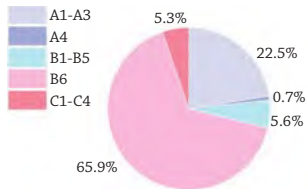
研究对象为独栋 3 层坡地建筑，总面积约为 90m²，位于赫尔辛基 (Helsinki)，北纬 60.1699°，一月平均温度为 -6℃，七月平均温度为 17℃。其中底层为半地下层，主要材料为混凝土，其余部分主要为胶合木等木质材料 (表 2)。该建筑可供 1~2 人居住，其设计使用寿命为 50 年。

2.2 中国某居住建筑基本信息

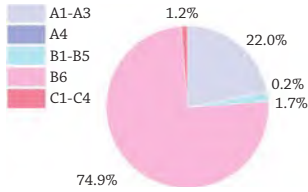
研究对象为独栋 3 层建筑，总建筑面积约为 365m²。设计使用寿命为 50 年。位于沈阳，北纬 41.8057°，一月平均温度为 -18.2℃，七月平均温度为 29℃。具体建筑材料及数量如表 3 所示。

由于缺乏材料运输信息，该过程以就近原则进行计算^[24]，即运输距离取距场地最近工厂与场地间的行车距离。运输工具依据材料种类选择软件默认交通工具。

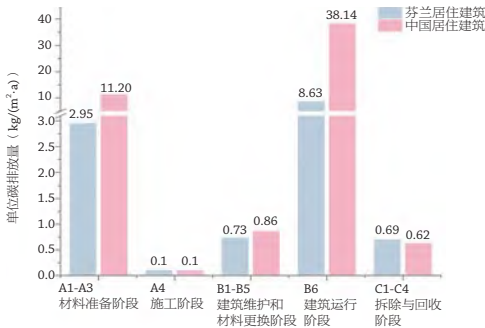
3 芬兰居住建筑全生命周期碳排放比例



4 中国居住建筑全生命周期碳排放比例



5 中芬两居住建筑全生命周期单位碳排放量



由于住宅项目使用者不同,其运行数据差异较大,且采暖能耗缺乏监控数据,因此本研究仅从宏观角度进行推算,即:该建筑为四卧室住宅,推测可居住4~8人,取中位数6人进行计算。通过《中国统计年鉴》^[25]可知,人均年生活用电为722kWh,人均年生活消耗天然气为33.6m³。且辽宁地区年供暖时长为148天,采暖期内单位建筑面积耗热量为16.71W/m²。由此推测该建筑年均耗电量约为4332kWh,年均消耗天然气约为201.6m³,年均供热消耗约为21,664.18kWh。

2.3 计算结果及对比分析

计算结果以CO₂当量(CO₂e)作为度量标准。结果表明,芬兰居住建筑全生命周期碳排放总量约为58,945.45kg,即13.10kg/(m²·a)(图3)。中国居住建筑全生命周期碳排放总量约为929,168.20kg,即50.91kg/(m²·a)(图4)。具体各阶段碳排放量如表4所示。

由此可见,中芬两建筑在施工阶段(A4)、建筑维护与材料更换阶段(B1-B5)、拆除回收阶段(C1-C4)的单位碳排放量相对持平,但在材料准备阶段(A1-A3)与运行阶段(B6)相差较大(图5)。

在材料准备阶段(A1-A3),中芬两建筑的单位碳排放量分别约为11.20kg/(m²·a)和2.95kg/(m²·a)。其中,芬兰建筑碳排放量较大的材料依次为木质材料、混凝土材料、石膏材料。而中国建筑碳

表2 芬兰某居住建筑主要材料和运行能耗清单

材料及能耗	数量	单位	运输距离 (km)	材料及能耗	数量	单位	运输距离 (km)
预制混凝土墙	6.06	m ³	70	岩棉保温板	104.12	m ²	70
空心混凝土板	2.77	m ³	70	塑料蒸汽控制层	48.60	m ²	110
预拌混凝土	26596	kg	70	胶合板	48.60	m ²	130
钢筋	87.20	kg	110	石膏板粘合剂	48.60	m ²	70
PVC-P防水膜	0.01	m ³	110	石膏板	198.18	m ²	70
防水找平漆	8.30	kg	150	锯材(松木或云杉)	4.38	m ³	130
岩棉保温板	123.50	m ²	70	单板层积材	6.72	m ³	130
钢制天花板层	0.03	kg	50	玻璃棉保温层	155.80	m ²	70
刨光木材(松木或云杉)	0.21	m ³	130	外木门	1	组	70
涂漆木地板	1.14	m ³	110	玻璃滑动门	2	组	60
桦木覆层胶合板	1.91	m ³	130	夹层安全玻璃	4.20	m ²	60
正交胶合板	28.48	m ³	130	年电网电力能耗	2300	kWh	
热镀锌钢板	34	kg	110	年燃料能耗	1300	MJ	
干燥木材(松木或云杉)	38.83	m ²	130	年集中供暖消耗	3350	MJ	

表3 中国某居住建筑主要材料清单

材料名称	数量	单位	材料名称	数量	单位
空心砖	101	m ³	防水找平漆	118.7	kg
预拌混凝土	182.5	m ³	供热管网	405	m ²
钢筋	28.8	t	沙子	74,667	kg
普通粉煤灰水泥	24,338	kg	室外木门	2	组
聚苯保温板	648	m ²	室内木门	14	组
丙烯酸乳液防水涂料	644	kg	玻璃滑动门	2	组
SBS沥青防水卷材	307	m ²	夹层安全玻璃	50.13	m ²
丙烯酸聚氨酯面漆	755	m ²			

表4 中芬两居住建筑碳排放环境影响对比

阶段	芬兰某居住建筑生命周期碳排放量 (kg)	芬兰某居住建筑生命周期单位碳排放量 (kg/(m ² ·a))	中国某居住建筑生命周期碳排放量 (kg)	中国某居住建筑生命周期单位碳排放量 (kg/(m ² ·a))
A1-A3材料准备阶段	13,267.93	2.95	204,410.62	11.20
A4-A5施工阶段	439.99	0.10	1799.53	0.10
B1-B5建筑维护和材料更换阶段	3299.42	0.73	15,676.63	0.86
B6运行阶段	38,827.00	8.63	695,967.69	38.14
C1-C4拆除与回收阶段	3111.11	0.69	11,313.73	0.62
D外部影响阶段 (不计总数)	-18,581.94	-4.13	-27,632.96	-1.51
总计	58,945.45	13.10	929,168.20	50.91

排放量较大的材料则依次为砖材、混凝土材料、金属材料（表5）。

在运行阶段（B6），中芬建筑的单位碳排放量分别约为 $38.14\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $8.63\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，差异主要体现在集中供暖能耗上，分别约为 $26.42\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 和 $2.14\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ，采暖能源分别为煤炭和天然气（表6）。

因此，在材料准备阶段中使用不同建筑材料及在运行能耗阶段使用不同集中供暖能源对建筑全生命周期碳排放的影响还有待进一步研究。此外由于存在使用和维护阶段，建筑年均碳排放量与使用周期并非简单的线性关系，不同使用周期对建筑全生命周期碳排放的影响仍需探究。

3 中芬两居住建筑碳排放对比分析

3.1 对照设计

为探究不同材料和运行周期对建筑全生命周期碳排放的影响，以中芬两居住建筑原有基础为原始设计，对材料清单合理修正，各设置两个对照设计。

对照设计1：针对材料变量，在不改变外观的前提下，在芬兰居住建筑中提高混凝土材料的使用数量以代替建筑材料中的木材，在中国居住建筑中增加胶合木等木材的使用数量以代替建筑材料中的部分混凝土和砌砖，同时将集中供暖材料从煤炭改为天然气（表7）；对照设计2：针对运行周期变量，保持其他参数不变，将中国和芬兰的居住建筑使用周期均从50年提升为70年。

3.2 计算结果分析

在芬兰居住建筑对照设计1中（图6），建筑全生命周期碳排放总量约为 $65,030.19\text{kg}$ ，即 $14.45\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。其中建筑运行阶段（B6）碳排放量保持不变，材料准备阶段（A1-A3）增加至约 $20,971.11\text{kg}$ ，材料运输阶段（A4）增加至约 741.97kg ，建筑维护和材料更换阶段（B1-B5）减少至约 2480.60kg ，拆除回收阶段（C1-C4）减少至约 2009.51kg 。

在对照设计2中（图7），建筑全生命周期碳排放总量约为 $75,363.59\text{kg}$ ，即 $11.96\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。其中材料准备阶段（A1-A3）、材料运输阶段（A4）及拆除回收阶段（C1-C4）保持不变，建筑维护和材料更换阶段（B1-B5）碳排放量增加为约 4186.76kg ，建筑运行阶段（B6）增加为约 $54,357.80\text{kg}$ 。

表5 中芬两居住建筑主要材料碳排放量

芬兰某居住建筑材料类别	生命周期碳排放量 (kg)	碳排放量占比 (%)	中国某居住建筑材料类别	生命周期碳排放量 (kg)	碳排放量占比 (%)
木质材料	6761.22	11.47	砖材	77,634.15	8.36
混凝土材料	5443.56	9.23	混凝土材料	54,477.56	5.86
石膏材料	3035.61	5.15	金属材料	38,457.94	4.14
复合地板材料	2092.02	3.55	水泥材料	21,978.46	2.37
保温材料	1794.59	3.04	保温材料	12,657.90	1.36
门	593.22	1.01	涂料和糊剂	12,265.85	1.32
塑料膜	192.60	0.33	屋面覆层	11,116.45	1.20
金属材料	151.91	0.26	玻璃	2527.89	0.27

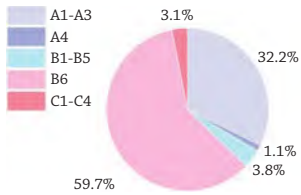
表6 中芬两居住建筑运行能耗碳排放量

能耗种类	芬兰某居住建筑运行能耗碳排放量 (kg)	芬兰某居住建筑运行能耗单位碳排放量 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)	中国某居住建筑运行能耗碳排放量 (kg)	中国某居住建筑运行能耗单位碳排放量 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)
集中供暖消耗	9615.30	2.14	482,137.73	26.42
电网电力能源	24,806.14	5.51	187,871.05	10.29
燃料能源	4405.56	0.98	25,958.91	1.42

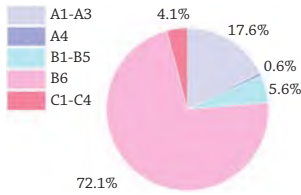
表7 替换材料清单

替换建筑	原始材料	位置	替换材料	数量
芬兰居住建筑	正交胶合板	楼板	预制钢筋混凝土板	252.9m^2
	单板层积材	墙面覆层	预制混凝土板	95.4m^2
	干燥木材（松木或云杉）	梁柱结构	钢筋	87.2kg
中国居住建筑	空心砖	墙面填充	单板层积材	800m^2
	预拌混凝土	楼板及梁柱结构	正交胶合板	160m^3
	钢筋			

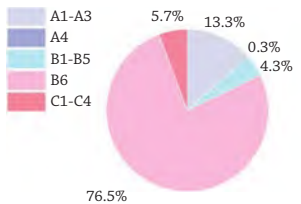
6 芬兰建筑对照设计1生命周期碳排放占比



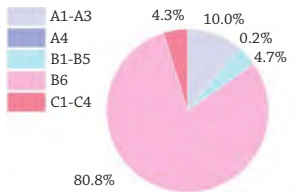
7 芬兰建筑对照设计2生命周期碳排放占比



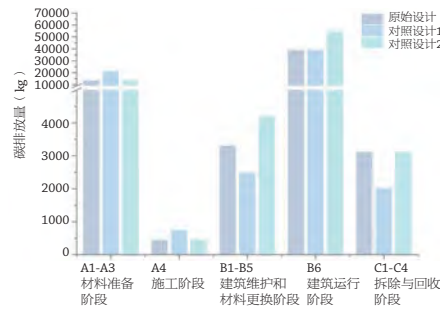
10 中国建筑对照设计1生命周期碳排放占比



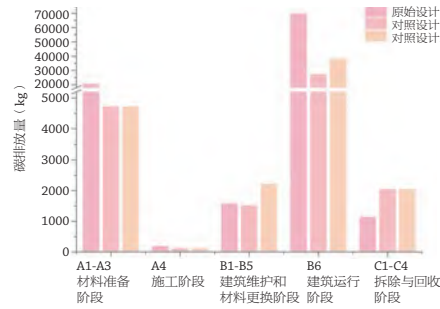
11 中国建筑对照设计2生命周期碳排放占比



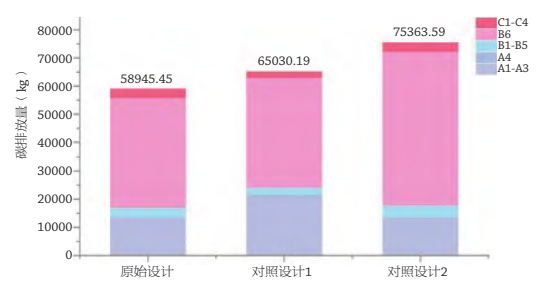
8 芬兰建筑与对照设计生命周期各阶段碳排放对比



12 中国建筑与对照设计生命周期各阶段碳排放对比



9 芬兰建筑全生命周期碳排放与对照设计对比情况



13 中国居住建筑全生命周期碳排放与对照组对比情况



相较芬兰原始设计（图 8、9），在对照设计 1 中，尽管建筑维护及更换阶段（B1-B5）和拆除回收阶段（C1-C4）碳排放量有所减少，建筑全生命周期碳排放总量仍增加约 6084.74kg，建筑单位面积碳排放量增加约 1.35kg/(m²·a)。在对照设计 2 中，当使用周期从 50 年提升为 70 年时，尽管建筑维护和材料更换阶段（B1-B5）及建筑运行阶段（B6）碳排放量有所增加，建筑单位面积碳排放量减少约 1.14kg/(m²·a)。

在中国居住建筑对照设计 1 中（图 10），建筑全生命周期碳排放总量约为 354,836.14kg，即 19.44kg/(m²·a)。其中，材料准备阶段（A1-A3）碳排放量减少为约 47,126.60kg，材料运输阶段（A4）减少为 1036.96kg，建筑维护和材料更换阶段（B1-B5）减少为约 15,081.69kg，建筑运行阶段（B6）减少为约 271,311.77kg，拆除回收阶段（C1-C4）增加为约 20,279.12kg。

在对照设计 2 中（图 11），建筑全生命周期碳排放总量约为 470,316.50kg，即 18.41kg/(m²·a)。其中材料准备阶段（A1-A3）、材料运输阶段（A4）及拆除回收阶段（C1-C4）碳排放量与对照设计 1 相同，建筑维护和材料更换阶段（B1-B5）增加为约 22,037.34kg，建筑运行阶段（B6）增加为约 379,836.48kg。

相较中国居住建筑原始设计（图 12、13），在对照设计 1 中，材料准备阶段（A1-A3）碳排放量大幅减少，共减少约 157,284.02kg。建筑运行阶段（B6）碳排放量减少约 424,655.92kg。在对照设计 2 中，尽管建筑维护和材料更换阶段（B1-B5）及建筑运行阶段（B6）碳排放量有所增加，建筑单位面积碳排放量与对照设计 1 相比减少约 1.03kg/(m²·a)。

4 结论

本研究基于 LCA 理论，通过对中芬两栋居住建筑的全生命周期碳排放情况进行对比实证分析，得到以下结论：

（1）我国典型居住建筑全生命周期的单位碳排放量约为芬兰的 4 倍，差异主要来源于材料准备阶段与运行维护阶段。因此，建筑全生命周期中的材料准备阶段及运行阶段是目前我国降低建筑碳排放量的关键。

（2）材料准备阶段使用胶合木等木质材料代替砌砖及混凝土，运行阶段将集中供暖能源从煤炭改为天然气均可有效降低建筑全生命周期碳排放量。此外，延长建筑使用周期也可降低单

位时间内建筑碳排放。

(3) ONE-CLICK LCA 计算软件可用于量化解析建筑在生命周期不同阶段的碳排放量,通过对照设计实验也可以对我国碳中和目标背景下的低碳建筑设计提供量化依据。随着清洁能源的进一步发展,建立更完善的建筑材料回收机制,并进一步推广可回收材料的生产和使用,可能成为发展低碳建筑的重要途径。

(4) 本文通过对中芬典型居住建筑全生命周期进行碳排放计算对比,尝试建构我国住宅建筑低碳发展的可行路径与策略。鉴于目前住宅建筑各项数据获取难度限制,本文未对中外居住建筑进行大规模对比分析,结论尚存在一定局限性,对于中外低碳建筑的发展规律的对比还需进一步研究,仅以本文抛砖引玉,期待更多建筑碳排放影响的深度研究,共同推动我国低碳建筑的发展。□(感谢房婷婷和 Matti Kuittinen 提供中芬居住建筑具体基础信息资料。)

参考文献

- [1] IEA(International Energy Agency).Technology roadmaps – Energy efficient buildings:Heating and Cooling equipment[R].Paris:IEA,2011.
- [2] MOSSIN N,STILLING S,BØJSTRUP T C,et al.An architecture guide to the UN17 sustainable development goals[M].1st ed.Danmark:KADK,2018.
- [3] ERHORN-KLUTTIG H,ERHORN H.Overview of national applications of the Nearly Zero-Energy Building (NZEB) definition Detailed report[R].EPOB, 2015.
- [4] LYYTIMÄKI J.Environmental protection in Finland [EB/OL].(2014-07)[2021-05-12].https://finland.fi/life-society/environmental-protection-in-finland/
- [5] KUITTINEN M,HÄKKINEN T.Reduced carbon footprints of buildings:new Finnish standards and assessments[J].Buildings and Cities,2020,1(1),182–197.
- [6] 王崇杰,薛一冰.节能减排与低碳建筑[J].工程力学, 2010(S2):42-47.
- [7] KLOPFER W,BIRGIT G.Life Cycle Assessment(LCA): A Guide to Best Practice[M].Germany:John Wiley & Sons,2014.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部.绿色建筑评价标准[S]GB/T 50378-2019.北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [9] International Organization for Standardization(ISO). ISO 14040,Environmental Management Life Cycle Assessment General Principles and Framework[S].
- [10] 翟一杰,张天祚,申晓旭,等.生命周期评价方法研究进展[J].资源科学,2021,43(3):446-455.
- [11] European Committee for Standardization,EN 15643, Sustainability of construction works-Sustainability assessment of buildings[S].
- [12] European Parliament,European Council.No.305/2011, Construction Products Regulation,Regulation(EU)[S].
- [13] BIRGISDÓTTIR H,RASMUSSEN F N.Introduction to LCA of buildings[M].Danmark:Danish Transport and Construction Agency,2016.
- [14] BRAUNE A,DURÁN C R,GANTNER J.Life Cycle Assessments-a guide on using the LCA[M].Germany: DGNB,2018.
- [15] KERRIGAN S. Dr. Rolf Frischknecht honoured with EDANA LCA Life Time Achievement Award[EB/OL]. (2020-05-07)[2021-06-17].https://www.edana.org/about-us/news/dr-rolf-frischknecht-honoured-with-edana-lca-life-time-achievement-award
- [16] HOLLBERG A,LÜTZKENDORF T,HABERT G.Top-down or bottom-up?-how environmental benchmarks can support the design process[J].Building and Environment,2019,153(April),148-157.
- [17] SOUST-VERDAGUER B,GARCÍA MARTÍNEZ A,LLATAS C,et al. Implications of using systematic decomposition structures to organize building LCA information: A comparative analysis of national standards and guidelines-IEA EBC ANNEX 72[C].IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2020,588(2).
- [18] ITTEN R,HISCHIER R,ANDRAE A S G,et al.Digital transformation-life cycle assessment of digital services, multifunctional devices and cloud computing[C].Int J Life Cycle Assess 25,2020,2093–2098.
- [19] 于萍,陈效述,马禄义.住宅建筑生命周期碳排放研究综述[J].建筑科学.2011,27(4):9-12.
- [20] 张智慧,尚春静,钱坤.建筑生命周期碳排放评价[J].建筑经济,2010(2):44-46.
- [21] 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(008):22-27.
- [22] 蔡向荣,王敏权,傅柏权.住宅建筑的碳排放量分析与节能减排措施[J].防灾减灾工程学报,2010,30(0z1): 428-431.
- [23] European Committee for Standardization, Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method,EN 15978-2011[S].
- [24] PENG C.Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling[J].Journal of Cleaner Production,2016,112 (JAN.20PT.1):453-465.
- [25] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京: 中国统计出版社,2020.