

DOI:10.12326/j.2096-9694.2022070

基于全生命周期评价法的雄安新区某木混结构建筑碳排放及其减碳效果研究

李瑜¹, 梅诗意¹, 孟鑫淼², 秦亦可³, 张鹏⁴, 高颖¹

(1. 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;
3. 林创咨询(上海)有限公司北京分公司, 北京 100020; 4. 北京城建集团有限责任公司土木工程总承包部, 北京 100088)



摘要: 为分析河北雄安新区白洋淀码头的3栋木混结构建筑较等效钢混结构建筑的减碳效果, 根据等效替换因子, 确定等效钢混结构建筑建材用量, 并依照GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》, 基于全生命周期评价法, 对3栋木混结构建筑及等效钢混结构建筑进行碳排放计算。

结果表明, 木混结构建筑的减碳效果主要体现在建材生产及运输阶段, 建造及拆除阶段碳排放差异较小。与等效钢混结构建筑相比, 木混结构建筑在建材生产阶段的碳排放下降约10%, 考虑木材碳固存量则下降约19%。木混结构建筑地上部分建材生产阶段的碳排放下降18%~25%, 考虑木材碳固存量则下降40%~46%。

关键词: 木结构建筑; 等效钢混结构; 碳排放; 碳固存; 全生命周期评价

中图分类号: TU366.2; X322 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694(2022)05-0063-08

Study on Carbon Emission and Its Reduction Effect of Timber-Concrete Constructions in Xiong'an New District Based on Life Cycle Assessment

LI Yu¹, MEI Shi-yi¹, MENG Xin-miao², QIN Yi-ke³, ZHANG Peng⁴, GAO Ying¹

(1. College of Material Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. FII Consulting (Shanghai) Ltd., Beijing Branch, Beijing 100020, China; 4. General Contracting Department of Civil Engineering, Beijing Urban Construction Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

Abstract: In order to study the effect of three timber-concrete constructions on the carbon reduction in Baiyangdian Wharf of Xiong'an new area in Hebei Province, it was compared with the equivalent steel-concrete constructions. In this paper, according to the equivalent replacement factor, the amount of building materials of equivalent steel-concrete constructions was determined. In accordance with GB/T 51366—2019 *Standard for building carbon emission calculation*, the carbon emission of three timber-concrete constructions and equivalent steel-concrete constructions were calculated by using the life-cycle assessment method. The results showed that the carbon reduction effect of timber-concrete constructions was mostly reflected in building material production and transportation period, and the carbon emission difference in construction and demolition period was relatively small. Compared with equivalent steel-

收稿日期: 2022-04-10; 修改日期: 2022-07-16

基金项目: 北京林业大学校级项目“许昌地区建筑碳排放强度与节能减排潜能研究”(2018FGC01)。

作者简介: 李瑜(1999—), 硕士研究生。Email: liyu3210785@bjfu.edu.cn

通讯作者: 高颖, 教授。Email: gaoying@bjfu.edu.cn

concrete constructions, the carbon emission of timber-concrete constructions decreased about 10% in material production period, and about 19% in terms of carbon sequestration of wood. Carbon emission of the above-ground timber-concrete constructions decreased about 18%~25% in material production period, and about 40%~46% after considering carbon sequestration.

Key words: timber constructions; equivalent steel-concrete constructions; carbon emission; carbon sequestration; life-cycle assessment

在全球碳排放量持续增长的背景下, 2005年至今, 中国碳排放总量一直处于世界第一^[1]。其中, 建筑行业碳排放量占社会总排放量的40%左右^[2], 存在资源消耗大、污染排放高等问题。由于木材具有碳固存能力, 以木质建材为主要建筑材料的木结构建筑具有低碳环保、绿色节能等天然优势^[3], 是建筑业碳减排的有效方案之一。在“2030年前实现碳达峰, 2060年前实现碳中和”的双碳目标指导下, 木材工业迎来重要发展机遇期。2022年3月11日, 住房和城乡建设部印发《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》, 提出因地制宜发展木结构建筑。2021年7月, 国家林业和草原局、国家发展和改革委员会联合印发了《“十四五”林业草原保护发展规划纲要》, 支持在有条件的地区优先推广使用木结构和木竹建材, 减少因生产使用钢材、水泥等高排放建材造成的碳排放。

2021年8月, 河北雄安新区管理委员会印发《雄安新区绿色建筑高质量发展的指导意见》, 要求建立研究制定新区建筑领域碳达峰碳中和实施路径, 以及探索研究建筑碳排放报告等工作机制。2021年竣工的雄安新区白洋淀码头改造提升工程项目, 是雄安新区规划的十大标志性建筑群之一, 按照绿建三星级标准设计及施工, 使用了加拿大的花旗松 (*Pseudotsuga menziesii*) 等木质材料, 为实现雄安新区打造绿色生态宜居新城, 建设国家生态文明试验区的目标提供了实践经验。

国外木结构建筑碳排放研究开始较早, 木结构相关碳排放因子库及建筑碳排放软件的开发相对成熟。瑞士的Ecoinvent、荷兰的SimaPro、德国的GaBi以及北美地区的BEES等软件^[4]均可系统地计算木结构建筑全生命周期碳排放。在此基础上, Zeitz^[5]、Hens^[6]、Robati^[7]、Hart^[8]等从建筑几何参数、结构体系、建筑用材以及木材碳固存等不同

角度对木结构建筑碳排放进行了深入的研究。相比于国外, 国内相关研究才刚刚起步, 徐霖^[9]、胡家航^[10]、徐洪澎^[11]等对轻型木结构、井干式木结构以及被动式木结构建筑进行了碳排放计算与分析, 研究结果均表明木结构建筑的低碳优势。张时聪等^[3]对我国7栋现代木结构建筑的全生命周期碳排放进行计算, 并与钢筋混凝土基准建筑进行对比, 发现木结构建筑可降低约10%的碳排放量。

我国现行标准GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[12]未考虑木质建材碳固存能力对木结构建筑碳排放的影响情况。国内在评估木结构建筑的减碳效果时, 等效钢混建筑的建材用量常参考钢筋混凝土建筑单位面积混凝土及钢筋消耗量的均值, 但该等效方法未考虑具体建筑外形, 有一定的局限性。此外, 由于木结构建筑基础及地下室有大量钢筋和混凝土建材, 其高碳排放量对木结构建筑总体碳排放影响较大, 对纯木结构建筑部分碳排放量的分析有一定干扰。

本研究采用全生命周期评价法, 在考虑木材碳固存能力及建筑外形质量等效基础上, 对位于河北雄安新区安新县白洋淀码头的三栋木混结构建筑及其等效钢筋混凝土建筑进行碳排放量计算, 评估木混结构建筑的减碳效果。

1 研究方法

1.1 等效钢混结构建筑设计

本研究选取位于河北雄安新区安新县白洋淀码头的三栋游客中心建筑为研究对象, 其中游客中心A的结构形式为钢木框架-混凝土剪力墙结构, 游客中心B和C为木框架-混凝土框架结构, 为由木结构与钢或混凝土结构混合承重, 但以木结构为主的木混结构。木混结构建筑俯视图及内部细节如图1所示, 建材体积占比见图2。为探究木混结构建筑较钢筋混凝土建筑的减碳效果, 在建筑

外形与功能不变的基础上，依据质量等效因子，将木质建材替换为混凝土及钢筋，得到等效钢混结构建筑的建材用量。质量等效因子参考Cordier^[13]与Milaj^[14]关于公共建筑等效设计的研究结果，确定木结构建筑与其等效钢筋混凝土建筑的建材质量

等效替换比例，即1 t木材等效为0.97 t钢筋与3.81 t混凝土。将木梁、木柱等承重构件以及屋檐板、屋面板等木质围护构件等效为钢筋和混凝土建材。木混结构与钢混结构建筑的建筑面积及建材质量列于表1。



图1 木混结构建筑研究对象

Fig.1 Research object of timber-concrete constructions

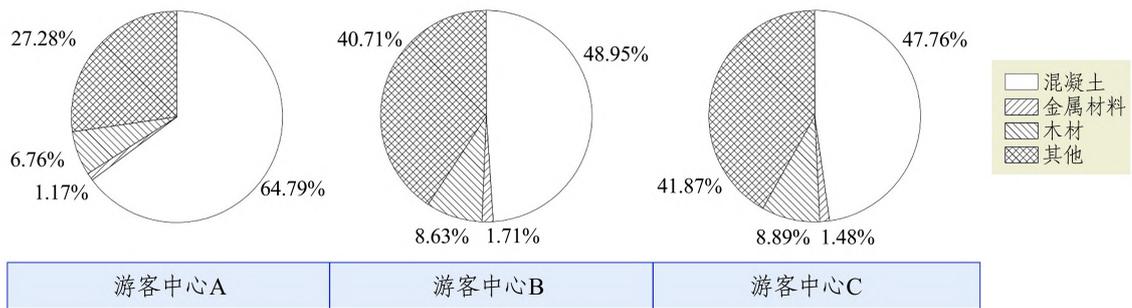


图2 木混结构建筑各类建材体积占比

Fig.2 Volume ratio of materials in timber-concrete constructions

表1 木混结构与等效钢混结构建筑面积及建材质量

Tab.1 Building area and construction material quality of timber-concrete and equivalent steel-concrete constructions

项目	面积/m ²	建材质量/t	
		木混结构建筑	等效钢混结构
游客中心A	一层	1 350	11 942.62
	地下一层	1 215	11 076.59
游客中心B	一层	680	3 647.88
游客中心C	一层	680	3 466.98

1.2 碳排放计算边界

1.2.1 建筑边界

本研究采用建筑建设工程规划许可证范围内，基础底部水平面到最高点水平面之间的假想封闭立体空间内的全生命周期作为系统边界。该范围内的材料和能源消耗产生的正碳排放以及可再生能源和材料带来的负碳排放，均计算在建筑碳排放量中。建筑的设计使用年限均为50年。

1.2.2 阶段计算边界

建筑全生命周期是指从建材原料开采到建筑拆除处置的全过程。根据GB/T 51366—2019规定，建筑碳排放计算可分建材生产及运输阶段、建造及拆除阶段、运行阶段，各阶段计算边界列于表2。

1.3 碳排放计算方法

按GB/T 51366—2019规定，分别计算各阶段的碳排放量。

1) 建材生产及运输阶段单位建筑面积的碳排放量，按式1计算。

$$C_{JC} = \frac{C_{sc} + C_{ys}}{A} \quad (1)$$

式中： C_{JC} 为建材生产及运输阶段单位建筑面积的碳排放量， $\text{kg CO}_2/\text{m}^2$ ； A 为建筑面积， m^2 ； C_{sc} 为建材生产阶段碳排放， $\text{kg CO}_2\text{e}$ ； C_{ys} 为建材运输过程碳排放， $\text{kg CO}_2\text{e}$ 。

表2 各阶段计算边界

Tab.2 Boundaries for each period

阶段划分	内容
建材生产及运输阶段	建材生产 建筑主体结构、围护结构、建筑构件和部品等主要建材在原材料开采、运输和生产加工过程产生的碳排放量,包含运行过程中建材更替所需的建材
	建材运输 建材从生产地运输至施工现场所耗能源在生产、使用过程中产生的碳排放量
建造及拆除阶段	建造 建筑建造过程中完成各部分分项工程施工与各项措施项目实施过程产生的碳排放量
	拆除 建筑拆除过程中人工拆除和机械设备拆除消耗的各种能源动力产生的碳排放量
运行阶段	暖通空调、生活热水、照明及电梯、可再生能源系统在建筑运行期间的碳排放量

C_{sc} 与 C_{ys} 分别按式2与式3计算。

$$C_{sc} = M_i F_i \quad (2)$$

$$C_{ys} = M_i D_i T_i \quad (3)$$

式中： M_i 为第*i*种主要建材的消耗量，t； F_i 为第*i*种主要建材的碳排放因子，kg CO₂e/建材计量单位。 D_i 为第*i*种建材平均运输距离，km； T_i 为第*i*种建材的运输方式下，单位质量运输距离的碳排放因子[kg CO₂e/(t·km)]。

主要建材消耗量及其运输需求根据承建单位提供的项目资料《分部分项工程量清单》与建筑施工图纸确定。GB/T 51366—2019规定，主要建材的运输距离宜优先采用实际的运输距离，已知加工后的木质建材由上海木材加工厂运输至白洋淀，运输距离设定为1 130 km。非木质建材的运输距离采用国标默认值，混凝土的默认运输距离值为40 km，其他建材的默认运输距离值为500 km。

2) 建筑建造和拆除阶段单位建筑面积的碳排放量，按式4计算。

$$C_{JZ} = \frac{\sum_{i=1}^n E_{JZ,i} X_i EF_j}{A} \quad (4)$$

式中： C_{JZ} 为建筑建造阶段单位建筑面积的碳排放量，kg CO₂/m²； $E_{JZ,i}$ 为建筑建造阶段第*i*种施工机械单位台班的能源用量，kg或kW·h； X_i 为第*i*种施工机械的总工作量，台班； EF_j 为第*j*类能源碳排放因子，kg CO₂/kg或kg CO₂/kW·h。

根据《分部分项工程量清单》和2019年《房屋建筑与装饰工程消耗量定额》，确定建筑建造阶段各分部分项工程所使用的施工机械及其台班工作量，并估算拆除阶段的施工机械台班工作量。结合GB/T 51366—2019、《全国统一施工机械台班费用定额2017》和《建设工程施工机械台班费用编制规则》中的常用施工机械台班能源用量，计算建筑建造阶段的碳排放。木混结构建筑中木结构工程建造的能耗均来自于金属连接件安装产生的能耗。

3) 建筑运行阶段单位面积的碳排放量，按式5计算。建筑消耗终端能源类型*i*，包括电力、燃气、石油、市政热力等；建筑用能系统类型*j*，包括暖通空调、照明及电梯、生活热水等系统。

$$C_M = \frac{\left[\sum_{i=1}^n E_i EF_i - C_p \right] y}{A} \quad (5)$$

式中： C_M 为建筑运行阶段单位面积的碳排放量，kg CO₂/m²； E_i 为建筑第*i*类能源年消耗量； EF_i 为第*i*种能源的碳排放因子； C_p 为建筑绿地碳汇系统年减碳量，kg CO₂/a； y 为建筑设计寿命，a。

E_i 按式6计算。

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (6)$$

式中： $E_{i,j}$ 为*j*类系统的第*i*类能源年消耗量； $ER_{i,j}$ 为*j*类系统消耗由可再生能源系统提供的第*i*类能源量。

本研究中，暖通空调系统能耗根据建筑项目资料《绿色建筑专篇（供暖通风与空气调节）》和《暖通空调负荷计算书》进行计算，冷热源为涡旋式风冷热泵机组，采暖期设定为11月15日至次年3月15日，制冷期设定为6月1日至9月1日，日均工作时长为14 h。照明系统能耗根据GB/T 51366—2019中规定的建筑物运行特征计算，电梯系统能耗根据项目资料《方案设计说明》中的电梯参数表进行计算。根据项目资料《绿色建筑专篇（给排水）》中的说明，本研究的生活热水需求通过太阳能热水系统实现，因此默认生活热水系统不产生碳排放。除生活热水系统外，无其他可再生能源系统。其中等效钢混结构建筑的运行阶段碳排放假定与木混结构建筑相同。

1.4 碳排放因子计算

1.4.1 建材生产及运输阶段

根据游客服务中心 A、B、C 的《分部分项工程量清单》，主要建材包括花旗松锯材、花旗松集成材、花旗松胶合板、定向刨花板等 4 种木质建材，以及混凝土、水泥、钢材等 35 种非木质建材，共计 39 种。

木混结构建筑采用的花旗松锯材进口自加拿大，其木质建材碳排放因子参考加拿大环境产品认证（environmental product declaration, EPD）进行计算，计算流程如图 3 所示，得到的木质建材碳排放因子列于表 3。

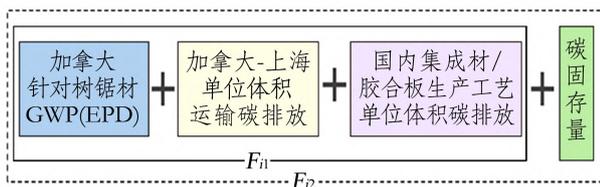


图3 4种木质建材的建材碳排放因子计算流程

Fig.3 Flow chart of carbon emission factor of 4 wood materials

表3 木质建材碳排放因子

Tab.3 Carbon emission factor of wood materials

建材种类	kg CO ₂ e/m ³	
	碳排放因子 F_{i1}	碳排放因子 F_{i2}
OSB	347.00	-811.00
花旗松锯材	133.92	-709.74
花旗松集成材	237.32	-625.58
花旗松胶合板	266.77	-576.89

其中， F_{i1} 为根据 GB/T 51366—2019 规定计算的木质建材碳排放因子，包括加拿大锯材的全球变暖潜值（global warming potential, GWP）、锯材从加拿大至上海的单位体积运输碳排放以及国内集成材与胶合板制作工艺^[15-16]的单位体积碳排放，未考虑木材碳固存量。与钢材、混凝土等化石基建材不同，木材在生长期能吸收 CO₂ 释放 O₂，具有天然的碳固存能力，在建筑中使用木质建材可以延长碳固存的时间，提升木结构建筑的减碳效果。木材碳固存能力对木结构建筑碳排放的影响不容忽视，因此，本研究设定了木质建材碳排放因子 F_{i2} ，在 GB/T 51366—2019 基础上加入了木材碳固存量的计算，木材碳固存量数据参考加拿大环境产品认证 EPD。定向刨花板（oriented

strand board, OSB）碳排放因子采用中国林业科学研究院学者对四种 OSB 类型计算的碳排放均值^[17]。本研究分别采用两种木质建材碳排放因子进行计算与分析。

本研究采用的非木质建材的碳排放因子及运输碳排放因子清单列于表 4、5。

1.4.2 建筑建造及拆除阶段

在建造及拆除阶段过程中，施工机械所使用的能源包括汽油、柴油和电。其中汽油和柴油的碳排放因子采用崔鹏^[22]的研究数据，取值分别为 3.50、3.67 kg CO₂/kg；电能碳排放因子选择华北区域电网碳排放因子，按生态环境部发布的《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》，取值 0.9419 kg CO₂/kW·h。

1.4.3 建筑运行阶段

运行阶段的碳排放源自暖通空调系统的照明系统以及电梯系统，因此，运行阶段所使用的能源为电能，选择华北区域电网碳排放因子 0.9419 kg CO₂/kW·h。

2 结果与分析

三栋木混结构建筑及等效钢混结构建筑的碳排放计算结果列于表 6，其中括弧内为计算木材碳固存时的碳排放量。

2.1 建筑碳排放对比分析

木混结构与等效钢混结构建筑碳排放量和建材生产及运输阶段碳排放量对比，如图 4 所示。

由表 4 数据可得出，三栋木混结构建筑碳排放总量与等效钢混结构建筑相比，不计木材碳固存时分别降低 2.29%、3.22% 和 2.79%；计算木材碳固存时分别降低 4.23%、6.45% 和 6.12%。由图 4a 可得，木混结构建筑碳排放总量有所下降，但由于两种建筑形式的运行能耗方案设定相同且运行阶段碳排放占比较高（70%~80%），下降趋势并不显著。若考虑木结构建筑保温防潮等节能特性，木混结构建筑的运行阶段碳排放将会有一定幅度的下降。木混结构建筑减碳多集中在建材生产及运输阶段。与等效钢混结构建筑相比，不计木材碳固存时，三栋木混结构建筑建材生产及运输阶段碳排放量分别能降低 10.50%、9.92% 和 9.21%；

表4 非木质建材碳排放因子

Tab.4 Carbon emission factor of other building materials

建材类别	建材名称	建材计量单位	F_i /(kg CO ₂ e/单位)	数据来源
混凝土	汞送商品混凝土 C20	m ³	252.924	文献18
	普通C20混凝土	m ³	234.637	文献18
	汞送商品混凝土 C25	m ³	291.067	文献18
	C30混凝土	m ³	295.000	GB/T 51366—2019
	现场搅拌防水抗渗混凝土 C30	m ³	310.987	文献18
	现场搅拌防水抗渗混凝土 C35	m ³	362.146	文献18
	普通C40混凝土	m ³	363.032	文献18
	汞送商品混凝土 C40	m ³	430.651	文献18
水泥	现场搅拌防水抗渗混凝土 C40	m ³	403.759	文献18
	普通硅酸盐水泥(市场平均)	t	735	GB/T 51366—2019
砂浆	混合砂浆 M5	m ³	186.203	文献18
	1:2水泥砂浆	m ³	482.769	文献18
	1:2.5水泥砂浆	m ³	426.606	文献18
	1:3水泥砂浆	m ³	393.650	文献18
	1:0.5:3混合砂浆	m ³	335.251	文献18
砌块	加气混凝土砌块	m ³	219.87	文献19
	烧结粉煤灰实心砖	m ³	134.00	GB/T 51366—2019
金属	热轧碳钢筋	t	2 340	GB/T 51366—2019
	热轧碳钢无缝钢管	t	3 150	GB/T 51366—2019
	焊接直缝钢管	t	2 530	GB/T 51366—2019
	碳钢热镀锌板卷	t	3 110	GB/T 51366—2019
	冷轧碳钢板卷	t	2 530	GB/T 51366—2019
	普通碳钢(市场平均)	t	2 050	GB/T 51366—2019
其他	铝合金型材	t	253.70	文献20
	石膏板	m ²	77.84	文献21
	硬泡聚氨酯板	t	5 220	GB/T 51366—2019
	SBS改性沥青防水卷材	m ²	2.37	文献22
	涂料	kg	2.60	文献22
	聚氨酯	t	1 200	文献23
	丙烯酸酯乳液水泥防水涂料	m ²	0.73	文献22
	乳胶漆	m ²	5.06	文献21
	聚苯乙烯泡沫板	t	5 020	GB/T 51366—2019
	岩棉板	t	1 980	GB/T 51366—2019
	平板玻璃	t	1 130	GB/T 51366—2019
湿地芦苇	m ²	-1.235	文献24	

表5 建材运输碳排放因子

Tab.5 Carbon emission factor of building material transportation

运输工具	T_i /kg CO ₂ e·(t·km) ⁻¹
轻型柴油货车运输(载重2 t)	0.286
中型柴油货车运输(载重8 t)	0.179
重型柴油货车运输(载重10 t)	0.162
重型柴油货车运输(载重18 t)	0.129
重型柴油货车运输(载重30 t)	0.078

计算木材碳固存时, 分别能降低 19.43%、19.81% 和 20.12%。建材生产及运输阶段, 木混结构建筑

的碳排放量下降趋势显著。如图2所示, 三栋木混结构建筑中木质建材的体积占比均不足10%, 木结构建筑相应的减碳效果不够显著。若增添木混结构建筑中木质建材的占比, 木结构建筑的减碳效果将更优异。

2.2 地上部分建材生产阶段碳排放对比分析

三栋建筑地上部分建材生产阶段碳排放对比, 如图5所示。由表4数据可知, 在不考虑木质建材自身碳固存量的情况下, 木混结构建筑地上部分建材生产阶段碳排放量约为 0.99 t CO₂e/m², 考虑

表6 三栋建筑碳排放量

建筑对象	建筑结构	Tab.6 Carbon emissions of three constructions				t CO ₂ e	
		建材生产及运输阶段碳排放量		建造及拆除阶段碳排放量	运行阶段碳排放量	碳排放总量	单位面积年均碳排放量
		建材生产	建材运输				
游客服务中心A	木混结构	3 709.45(3 325.89)	136.53	117.73	15 356.73	19 320.44(18 936.88)	0.151(0.148)
	等效钢混结构	4 166.84	130.55	119.78	15 356.73	19 773.91	0.154
游客服务中心B	木混结构	1 523.24(1 350.62)	49.12	67.24	3 541.24	5 180.84(5 008.22)	0.152(0.147)
	等效钢混结构	1 695.03	50.40	66.87	3 541.24	5 353.54	0.157
游客服务中心C	木混结构	1 389.91(1 217.28)	46.50	64.66	3 541.24	5 042.31(4 869.68)	0.148(0.143)
	等效钢混结构	1 534.4	47.78	63.49	3 541.24	5 186.91	0.153

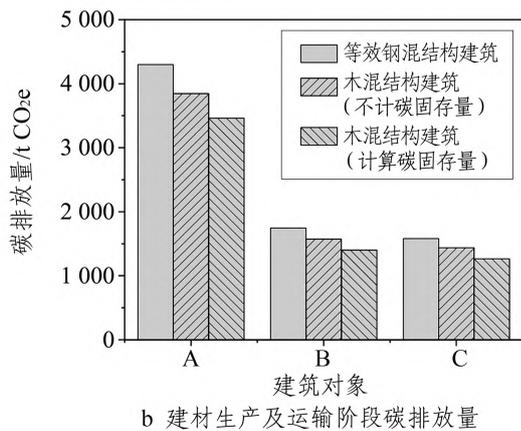
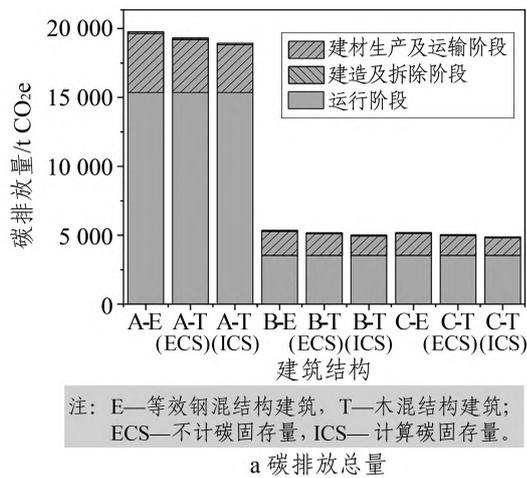


图4 三栋建筑碳排放总量及建材生产及运输阶段碳排放量对比

Fig.4 Comparison of total carbon emissions and building materials production and transportation carbon emissions of three constructions

碳固存时约为 0.73 t CO₂e/m²，等效钢混结构建筑地上部分单位面积建材生产阶段碳排放量约为 1.26 t CO₂e/m²。与等效钢混结构建筑相比，不计木材碳固存量时，3 栋木混结构建筑地上部分建材在生产阶段的碳排放量分别能降低 24.79%、20.30% 和 18.20%；计算木材碳固存量时，碳排放量分别

能降低 45.58%、40.71% 和 39.94%。这是由于钢筋、混凝土等高能耗建材碳排放因子较高，约为 340 kg CO₂e/m³ 与 2 340 kg CO₂e/t，而考虑木材碳固存能力，OSB、锯材、集成材、胶合板的碳排放因子分别为 -811、-709.74、-625.58、-576.89 kg CO₂e/m³，因此木质建材的碳固存能力使得木混结构建筑具备较显著的减碳效果。建筑地上部分建材生产阶段碳排放更能突显木混结构建筑的低碳优势。

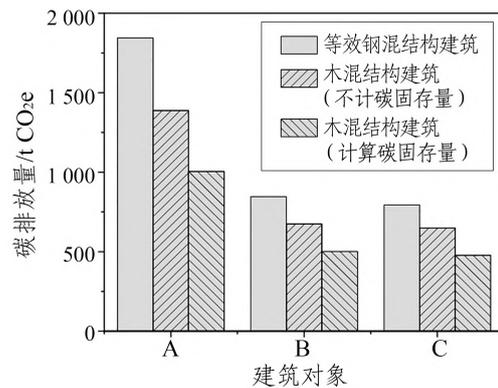


图5 三栋建筑地上部分建材生产阶段碳排放对比
Fig.5 Comparison of carbon emissions in building materials production period of the above-ground part in three constructions

3 结论

1) 以建筑设计使用年限为 50 年，依据 GB/T 51366—2019，在建材生产及运输阶段、建筑建造及拆除阶段、运行阶段内，河北雄安新区某三栋木混结构建筑在不考虑木质建材碳固存时碳排放量约 0.151 t CO₂e/m²/a，考虑碳固存时约 0.147 t CO₂e/m²/a。等效钢混结构建筑单位面积年均碳排放量约 0.155 t CO₂e/m²/a。

2) 与等效钢混结构建筑相比,木混结构建筑碳排放总量降低。其中运行阶段碳排放占70%~80%,因此下降趋势不明显,仅降低约4%;但在建材生产及运输阶段碳排放下降约10%,考虑木材碳固存量则下降约19%,减碳效果较为明显。若不考虑钢筋混凝土结构的基础和地下室部分,木混结构建筑地上木质建材为主部分的建材生产阶段碳排放下降18%~25%,考虑碳固存量时则下降40%~46%。

3) 本研究三栋木混结构建筑中木质建材体积占比不足10%,若在木混结构建筑中增添木质建材,将更能凸显木质建材的碳固存能力与木结构建筑的减碳效果。

4) 与 EN 15978: 2011 *Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method* 以及 ISO 21930:2017 *Sustainability in buildings and civil engineering works. Core rules for environmental product declarations of construction products and services* 等国外标准以及 Ecoinvent 等数据库相比,国内尚无明确计算木结构建筑碳排放的标准,且木质建材碳排放因子有待完善。由于木结构建筑建材具有绿色可回收特性,若 GB/T 51366—2019 增添回收处置阶段碳排放计算,其减碳效果将更明显,且全生命周期碳排放计算更全面。

参考文献:

- [1] BP Statistical Review of World Energy 2022[R]. London: BP, 2022
- [2] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告-2022-城镇住宅专题[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- [3] 张时聪, 杨芯岩, 徐伟. 现代木结构建筑全寿命碳排放计算研究[J]. 建设科技, 2019(18): 45-48.
ZHANG S C, YANG X Y, XU W. Study on life cycle carbon emission of modern wood building[J]. Construction Science and Technology, 2019(18): 45-48.
- [4] PAN W, TENG Y. A systematic investigation into the methodological variables of embodied carbon assessment of buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 141.
- [5] Zeitz A, Griffin C T, Dusicka P. Comparing the embodied carbon and energy of a mass timber structure system to typical steel and concrete alternatives for parking garages[J]. Energy and Buildings, 2019, 199 (SEP):126-133.
- [6] Hens I, SolnoskyR, Brown N. Design space exploration for comparing embodied carbon in tall timber structural systems-ScienceDirect[J]. Energy and Buildings, 2021, 244.
- [7] Robati M, Oldfield P, Nezhad A A, et al. Carbon value engineering: A framework for integrating embodied carbon and cost reduction strategies in building design[J]. Building and Environment, 2021, 192 (3):107620.
- [8] Hart J, D'Amico B, Pomponi F. Whole ... life embodied carbon in multistory buildings: Steel, concrete and timber structures[J]. Journal of Industrial Ecology, 2021, 25(2):403-418.
- [9] 徐霖. 轻型木结构建筑节能性能和碳排放分析研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [10] 胡家航, 姬晓迪, 代倩, 等. 基于生命周期评价的井干式木结构建筑环境影响研究[J]. 林业工程学报, 2017, 2(6): 133-138.
HU J H, JI X D, DAI Q, et al. Environmental impact of log house based on life cycle assessment[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(6): 133-138.
- [11] 徐洪澎, 李恺文, 刘哲瑞. 基于类型比较的严寒地区被动式木结构建筑碳排放分析[J]. 建筑技术, 2021, 52(3): 324-328.
XU H P, LI K W, LIU Z R. Carbon emission analysis of passive timber buildings in sever cold region based on type comparison[J]. Architecture Technology, 2021, 52(3): 324-328.
- [12] GB/T 51366—2019, 建筑碳排放计算标准[S].
- [13] Cordier S, Robichaud F, Blanchet P, et al. Regional environmental life cycle consequences of material substitutions: the case of increasing wood structures for non-residential buildings[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 328: 129671.
- [14] Milaj, Sinha, Miller, et al. Environmental utility of wood substitution in commercial buildings using life-cycle analysis[J]. Wood Fiber Sci, 2017, 49(3): 338-358.
- [15] 代倩, 胡家航, 姬晓迪, 等. 建筑用集成材制造技术的环境效能影响[J]. 林业工程学报, 2018, 3(4): 46-50.
DAI Q, HU J H, JI X D, et al. Environmental efficiency effect of building glulam manufacturing technology[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(4): 46-50.
- [16] 王珊珊, 张寒, 杨红强. 中国人造板行业的全生命周期碳足迹和能源耗用评估[J]. 资源科学, 2019, 41(03):521-531.
- [17] 张方文. 定向刨花板生命周期评价(LCA)及环境影响评价研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017.
- [18] 吴淑艺. 基于工程量清单的建筑工程碳排放研究: 以福建省为例[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
- [19] 曾杰, 俞海勇. 多层混凝土结构建材阶段引入碳排放研究[J]. 绿色建筑, 2019, 11(1): 17-19.
ZENG J, YU H Y. Study on carbon emission introduced in the stage of building materials for multi-story concrete structures[J]. Green Building, 2019, 11(1): 17-19.
- [20] 沈丹丹. 建筑全生命周期碳排放量计算模型[J]. 建筑施工, 2021, 43 (10): 2162-2166.
SHEN D D. Calculation model of carbon emission in full life cycle of buildings[J]. Building Construction, 2021, 43(10): 2162-2166.
- [21] 李兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [22] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [23] 王玉. 工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [24] 李博, 刘存歧, 王军霞, 等. 白洋淀湿地典型植被芦苇碳固碳功能研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2603-2607.
LI B, LIU C Q, WANG J X, et al. Carbon storage and fixation function by *Phragmites australis*, a typical vegetation in Baiyangdian Lake[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2603-2607.

(本文编校 向琴)