

**雄安新区白洋淀码头游客服务中心
木结构建筑全生命周期碳排放
研究报告**

2022 年 3 月

作者

高颖

教授，北京林业大学材料科学与技术学院

李瑜

硕士研究生，北京林业大学材料科学与技术学院

梅诗意

硕士研究生，北京林业大学材料科学与技术学院

孟鑫淼

讲师，北京林业大学水土保持学院

秦亦可

加拿大 BC 省林业创新投资署中国代表处华北区代表

李士帅

加拿大 BC 省林业创新投资署中国代表处雄安新区代表

版权声明

本报告由北京林业大学木结构建筑研究与检测中心与加拿大 BC 省林业创新投资署中国代表处共同编制。本报告的所有图片、表格及文字内容的版权属报告编写单位所有。其中，部分照片在标注有照片来源的情况下，版权归属原单位。转载、转帖或引用本报告时须注明“信息来源：《雄安新区白洋淀码头游客服务中心木结构建筑全生命周期碳排放研究报告》”。

目录

1 研究背景	1
2 项目介绍	2
2.1 项目概况	2
2.2 计算边界	2
2.2.1 系统边界	2
2.2.2 阶段计算边界	2
3 全生命周期碳排放计算	4
3.1 建材生产及运输阶段	4
3.1.1 计算方法	4
3.1.2 碳排放因子	4
3.1.3 整体建筑的建材生产及运输阶段碳排放	5
3.1.4 地上建筑部分的建材生产阶段碳排放	7
3.2 建造及拆除阶段	7
3.2.1 计算方法	7
3.2.2 碳排放因子	7
3.2.3 建造及拆除阶段碳排放	8
3.3 运行阶段	8
3.3.1 计算方法	8
3.3.2 运行阶段碳排放	9
4 木结构建筑全生命周期碳排放分析	10
4.1 全生命周期碳排放对比	10
4.2 木制建材与非木制建材生产阶段碳排放对比	10
4.3 分部工程碳排放对比	12
4.4 小结	13
5 木结构与等效钢混结构建筑碳排放对比分析	14
5.1 等效钢混结构建筑碳排放计算说明	14
5.2 等效钢混结构建筑碳排放计算结果	14
5.3 木结构与等效钢混结构建筑全生命周期碳排放对比	14
5.4 木结构与等效钢混结构地上建筑部分建材生产阶段碳排放对比	15
5.5 小结	16
6 总结	17
参考文献	17
附录 1 游客服务中心 A、B、C 建材生产及运输阶段碳排放因子说明	19
附录 2 游客服务中心 A、B、C 运行阶段碳排放计算细则	22

1 研究背景

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,建筑行业碳排放量约占社会总排放量的 38%^[2],存在资源消耗大、污染排放高等问题。由于木材具有固碳特性,以木制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”战略目标指导下,木结构建筑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》,特别强调“研究指定新区建筑领域碳达峰碳中和实施路径...探索研究建立建筑行业低碳发展、建筑碳排放报告、核查以及碳交易等工作机制”。

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 等碳排放软件^[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]等人从建筑几何参数、结构体系、建筑用材以及木材固碳等不同角度对木结构建筑碳排放都进行了深入的研究。相比于国外,国内相关研究才刚刚起步,徐霖^[9]、胡佳航^[10]、徐洪澎^[11]等人对轻型木结构、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具有低碳优势。张时聪等人^[3]对我国七栋现代木结构建筑的全生命期碳排放进行计算,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。

但上述研究并未系统考虑木制建材固碳效应对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,由于木结构建筑的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分析有一定干扰。

本报告根据 GB/T 51366-2019《建筑碳排放计算标准》,采用全生命周期评价法,在考虑木材固碳特性及建筑外形质量等效的基础上,对位于河北省雄安新区安新县白洋淀码头的三栋木结构建筑进行建筑全生命周期碳排放计算,并与等效钢筋混凝土建筑碳排放对比,评估木结构建筑的减碳效果。

2 项目介绍

2.1 项目概况

白洋淀码头占地面积约 9.8 万平方米，建筑面积 10550 m²，由生态科技展示馆（一苇阁）、游客服务中心 A（抚水轩）及游客服务中心 B、C（芦舫 1、2）四个建筑构成。其中，游客服务中心 A、B、C 为木结构为主建筑（图 1），建筑面积与结构形式如表 1 所示。游客服务中心 A 包括地下一层和地上一层，建筑面积共 2565 m²，为钢木框架-混凝土剪力墙混合结构体系；游客服务中心 B、C 地上一层，建筑面积 680 m²，为木框架-混凝土框架混合结构体系。游客服务中心 A、B、C 三栋木建筑所用木材为花旗松锯材，由加拿大运至中国并在国内胶合制作集成材与胶合板。屋顶覆盖有芦苇。



图 1.雄安新区白洋淀码头游客服务中心木结构建筑

（图片来源：北京城建集团有限责任公司）

表 1 游客服务中心建筑面积与结构形式

建筑对象		建筑面积（m ² ）	结构形式
游客服务中心 A	一层	1350	钢木框架-混凝土剪力墙
	地下一层	1215	
游客服务中心 B	一层	680	木框架-混凝土框架
游客服务中心 C	一层	680	木框架-混凝土框架

2.2 计算边界

2.2.1 系统边界

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全生命周期的碳排放中。本报告中三栋建筑的设计使用年限为 50 年。

2.1.2 阶段计算边界

根据 GB/T 51366-2019《建筑碳排放计算标准》（以下简称国标）规定，建筑的全生命周期碳排放计算可划分为建材生产及运输阶段、建造及拆除阶段、运行阶段。本研究计算的各阶段具体内容即计算边界如表 2 所示。

表 2 各阶段计算边界

阶段划分		具体内容
建材生产 及运输阶 段	建材	建筑主体结构、维护结构、建筑构件和部品等主要建材在原材料开采、运输和生
	生产	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	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
	运输	
建造及拆 除阶段	建造	建筑建造过程中完成各分部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

3 全生命周期碳排放计算

3.1 建材生产及运输阶段

3.1.1 计算方法

根据国标规定，建材生产及运输阶段单位建筑面积的碳排放量按下式计算：

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

$$C_{sc} = \sum_{i=1}^n M_i F_i \quad (2)$$

$$C_{ys} = \sum_{i=1}^n M_i D_i T_i \quad (3)$$

式中： C_{IC} ，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 ，建筑面积， m^2 。

C_{sc} ，建材生产阶段碳排放， $\text{kg CO}_2\text{e}$ ；

C_{ys} ，建材运输过程碳排放， $\text{kg CO}_2\text{e}$ ；

M_i ，第 i 种主要建材的消耗量， t ；

F_i ，第 i 种主要建材的碳排放因子， $\text{kg CO}_2\text{e}/\text{单位建材数量}$ ；

D_i ，第 i 种建材平均运输距离， km ；

T_i ，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 $[\text{kg CO}_2\text{e}/(\text{t}\cdot\text{km})]$ 。

主要建材消耗量及其运输需求根据项目的《分部分项工程量清单》与建筑施工图纸确定。据国标规定，主要建材的运输距离宜优先采用实际的建材运输距离，已知木制建材由上海运输至白洋淀，运输距离为 1130 km。非木制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。

3.1.2 碳排放因子

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 种木制建材，以及混凝土、水泥、钢材等 35 种非木制建材，共计 39 种。建材碳排放因子(F_i)首先依据国标进行确定，标准中未列出的木材、芦苇等建材碳排放因子则参考国内外标准和文献专著。建材运输碳排放因子(T_i)依据国标进行选择。本研究采用的碳排放因子清单见附录 1。

本项目采用的花旗松锯材进口自加拿大，其木制建材碳排放因子参考加拿大环境产品声明 (Environmental Product Declaration, EPD) 进行计算，得出的木制建材碳排放因子如表 3 所示，计算范围如图 1 所示。其中， F_{i1} 为根据国标规定计算的木制建材碳排放因子，包括加拿大软木锯材的全球变暖潜值(Global Warming Potential, GWP)、锯材从加拿大运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的单位体积碳排放，未考虑木材固碳量。但木材固碳特性对木结构建筑碳排放的影响不容忽视，因此，设定木制建材碳排放因子 F_{i2} ，在国标基础上计算木材固碳量。定向刨花板(Oriented Strand Board, OSB)碳排放因子参考林科院学者根据我国目前四种 OSB 类型以及多种生产线计算的碳排放均值。

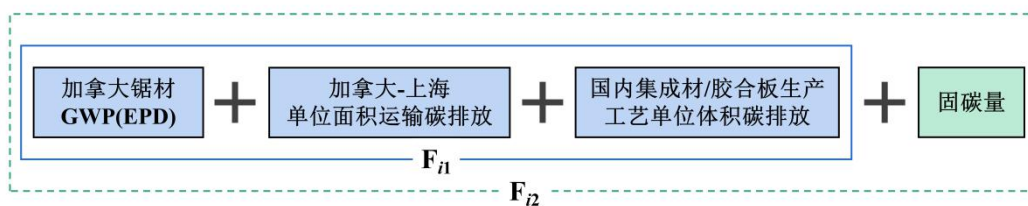


图 1 木制建材碳排放因子计算范围

表 3 木制建材碳排放因子

建材类别	碳排放因子 F_{11}	碳排放因子 F_{12}
OSB（定向刨花板）	347 kg CO ₂ e/m ³	-811 kg CO ₂ e/m ³
花旗松锯材	133.92 kg CO ₂ e/m ³	-709.74 kg CO ₂ e/m ³
花旗松集成材	237.32 kg CO ₂ e/m ³	-625.58 kg CO ₂ e/m ³
花旗松胶合板	266.77 kg CO ₂ e/m ³	-576.89 kg CO ₂ e/m ³

3.1.3 整体建筑的建材生产及运输阶段碳排放

根据《分部分项工程量清单》计算三栋建筑的建材用量,包括运行过程中建材更替的用量。结合计算公式及碳排放因子,计算建材生产与运输阶段碳排放。计算结果如表 4-8 所示,从表 4-6 中可得,建材生产和运输阶段的主要碳排放来源分别是金属材料、混凝土、其他建材、水泥、木制建材,运输阶段碳排放很低。表 7 为建材更替产生的碳排放,可见本项目中的建材更替对建材生产及运输阶段的碳排放影响较小,占比仅 0.1%左右,因此,后续碳排放计算未考虑建材更替的影响。表 8 为三栋建筑的建材生产及运输阶段的碳排放计算结果。

表 4 游客服务中心 A 建材生产及运输阶段碳排放

建筑材料	质量 (t)	体积 (m ³)	体积占比 (%)	建材生产阶段 碳排放(t CO ₂ e)	建材运输阶段 碳排放(t CO ₂ e)	合计 (t CO ₂ e)
木制建材 (计算固碳)	230.05	410.52	6.76	103.87 (-279.69)	17.09	120.96 (-262.60)
混凝土	9411.76	3934.25	64.79	1411.93	48.58	1460.51
水泥	196.36	63.86	1.05	144.32	7.66	151.98
砂浆	164.56	82.28	1.36	33.12	6.42	39.54
砌块	134.00	223.34	3.68	49.11	10.85	59.96
金属材料	558.48	71.16	1.17	1364.89	21.78	1386.67
其他	381.39	1286.66	21.19	602.21	24.15	626.36
合计 (计算固碳)	11076.59	6072.06	100	3709.45 (3325.89)	136.53	3845.98 (3462.42)

表 5 游客服务中心 B 建材生产及运输阶段碳排放

建筑材料	质量 (t)	体积 (m ³)	体积占比 (%)	建材生产阶段 碳排放 (t CO ₂ e)	建材运输阶段 碳排放 (t CO ₂ e)	合计 (t CO ₂ e)
木制建材 (计算固碳)	102.69	181.88	8.63	46.45 (-126.17)	7.34	53.79 (-118.83)
混凝土	2470.99	1031.96	48.95	366.76	12.75	379.51
水泥	124.00	40.33	1.91	91.14	4.84	95.98
砂浆	69.73	34.86	1.65	13.78	2.72	16.5
砌块	11.30	18.83	0.89	4.09	0.73	4.82
金属材料	282.78	36.03	1.71	669.69	11.03	680.72
其他	199.04	764.47	36.26	331.33	9.71	341.04
合计 (计算固碳)	3260.53	2108.36	100	1523.24 (1350.62)	49.12	1572.36 (1399.74)

表 6 游客服务中心 C 建材生产及运输阶段碳排放

建筑材料	质量 (t)	体积 (m ³)	体积占比 (%)	建材生产阶段 碳排放 (t CO ₂ e)	建材运输阶段 碳排放 (t CO ₂ e)	合计 (t CO ₂ e)
木制建材 (计算固碳)	102.69	181.88	8.89	46.45 (-126.17)	7.34	53.79 (-118.83)
混凝土	2339.86	977.32	47.76	344.47	12.07	356.54
水泥	120.00	39.02	1.91	88.20	4.68	92.88
砂浆	69.73	34.87	1.70	13.78	2.72	16.50
砌块	11.30	18.83	0.92	4.09	0.73	4.82
金属材料	237.05	30.20	1.48	561.99	9.26	571.25
其他	198.99	764.39	37.35	330.92	9.71	340.63
合计 (计算固碳)	3079.62	2046.51	100	1389.91 (1217.28)	46.50	1436.41 (1263.78)

表 7 建材更替产生的建材生产及运输阶段碳排放

建筑	建材更替体积 (m ³)	建材更替碳排放 (t CO ₂ e)	建材更替碳排放占比 (%)
游客服务中心 A	1461.14	-2.93	0.08
游客服务中心 B	966.94	-1.55	0.10
游客服务中心 C	966.94	-1.55	0.11

表 8 三栋木结构建筑建材生产及运输阶段碳排放

建筑	碳排放 (t CO ₂ e)		单位面积碳排放 (t CO ₂ e/m ²)	
	不计固碳	计算固碳	不计固碳	计算固碳
游客服务中心 A	3845.98	3462.42	1.50	1.35
游客服务中心 B	1572.36	1399.74	2.31	2.06
游客服务中心 C	1436.41	1263.78	2.11	1.86

3.1.4 地上建筑部分的建材生产阶段碳排放

由于基础及地下室构造含有大量的钢筋和混凝土建材,碳排放较高且排放量不受木制建材的影响,因此对地上建筑木质建材为主部分的建材生产阶段碳排放进行了单独计算分析。结合《分部分项工程量清单》、建筑施工图、三维模型图等计算三栋建筑地上部分建材用量,从而计算地上部分建材在生产阶段的碳排放,建材用量及碳排放如表 9 所示。不计木材固碳时,地上部分建材在生产阶段的单位面积碳排放量为 0.96~1.03 t CO₂e/m²; 计算木材固碳时为 0.70~0.74 t CO₂e/m²。

表 9 三栋建筑地上部分建材质量及建材生产阶段碳排放

建筑	建材质量 (t)	碳排放 (t CO ₂ e)	单位面积碳排放 (t CO ₂ e/m ²)
游客服务中心 A	2579.69	1387.72 (1004.17)	1.03 (0.74)
游客服务中心 B	778.9	674.26 (501.64)	0.99 (0.74)
游客服务中心 C	745.85	649.46 (476.84)	0.96 (0.70)

3.2 建造及拆除阶段

3.2.1 计算方法

根据国标规定,建筑建造和拆除阶段单位建筑面积的碳排放量按下式计算:

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

式中: C_{JZ} , 建筑建造阶段单位建筑面积的碳排放量, kg CO₂/m²;

$E_{jz,i}$, 建筑建造阶段第 i 种施工机械单位台班的能源用量, kg 或 kWh;

X_i , 第 i 种施工机械的总工作量, 台班;

EF_j , 第 j 类能源碳排放因子, kg CO₂/kg 或 kg CO₂/kWh;

A , 建筑面积, m²。

根据项目《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。结合国标、《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。

3.2.2 碳排放因子

施工机械所使用的能源包括汽油、柴油和电，其中汽油和柴油采用崔鹏学者^[12]的研究数据，电能碳排放因子选择华北区域电网碳排放因子，源自中华人民共和国生态环境部发布的《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》^[13]，如表 10 所示。

表 10 能源碳排放因子

能源类型	碳排放因子	单位
汽油 ^[12]	3.5	kg CO ₂ / kg
柴油 ^[12]	3.67	kg CO ₂ / kg
华北区域电网 ^[13]	0.9419	kg CO ₂ / kWh

3.2.3 建造及拆除阶段碳排放

游客服务中心 A、B、C 建造及拆除阶段碳排放如表 11 所示。

表 11 建造及拆除阶段碳排放

建筑	建造阶段碳排放 (t CO ₂ e)	拆除阶段碳排放 (t CO ₂ e)	建造及拆除阶段 碳排放 (t CO ₂ e)	建造及拆除阶段单位面积 碳排放 (t CO ₂ e/m ²)
游客服务中心 A	107.00	10.73	117.73	0.046
游客服务中心 B	62.41	4.83	67.24	0.099
游客服务中心 C	60.00	4.66	64.66	0.095

3.3 运行阶段

3.3.1 计算方法

根据国标规定，建筑运行阶段单位面积的碳排放量按下式计算：

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

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

式中：C_M，建筑运行阶段单位面积的碳排放量，kg CO₂/m²；

E_i，建筑第 i 类能源年消耗量；

EF_i，第 i 种能源的碳排放因子；

E_{ij}，j 类系统的第 i 类能源年消耗量；

ER_{ij}，j 类系统消耗由可再生能源系统提供的第 i 类能源量；

i，建筑消耗终端能源类型，包括电力、燃气、石油、市政热力等；

j，建筑用能系统类型，包括暖通空调、照明及电梯、生活热水等系统；

y，建筑设计寿命，a；

A，建筑面积，m²。

本项目中，暖通空调系统能耗根据项目资料的《绿色建筑设计专篇（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14h。照明系统能耗根据国标中规定的建筑物运行特征计算,电梯系统能耗根据《方案设计说明》中的电梯参数表进行计算。根据《绿色建筑设计专篇(给排水)》中的说明,本项目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。游客服务中心A、B、C在运行阶段的碳排放计算细则见附录2。

3.3.2 运行阶段碳排放

游客服务中心A、B、C运行阶段碳排放如表12所示。

表12 建筑运行阶段各用能系统碳排放(单位: t CO₂e)

建筑用能系统		游客服务中心 A			游客服务中心 B	游客服务中心 C
		地上一层	地下一层	总计		
暖通空调系统	采暖	3880.54	905.27	4785.81	988.81	988.81
	制冷	4609.07	1859.82	6402.07	1268.57	1268.57
照明及电梯	照明	2307.13	1599.49	3906.62	1283.86	1283.86
	电梯	—	—	262.23	—	—
生活热水	生活热水	0	0	0	0	0
可再生能源	生活热水					
	光伏发电	—	—	—	—	—
碳排放总量		10796.74	4364.58	15356.73	3541.24	3541.24
单位面积碳排放 (t CO ₂ e/m ²)		8.00	3.59	5.99	5.21	5.21
年均碳排放 (t CO ₂ e/a)		215.93	87.29	307.13	70.82	70.82

4 木结构建筑全生命周期碳排放分析

4.1 全生命周期碳排放对比

三栋建筑全生命周期碳排放如表 13 所示，各阶段碳排放及占比图如图 2 所示。在不考虑木制建材自身固碳量的情况下，游客服务中心 A、B、C 全生命周期碳排放量分别为 19320.44 t CO₂e、5180.84 t CO₂e、5042.31 t CO₂e。其中，建造及拆除阶段碳排放占比较小，不超过 1.5%，建材生产阶段、运输阶段及运行阶段碳排放占比较大，约占 98%。其中，运行阶段碳排放占比分别为 79.48%、68.35%和 70.23%，其碳排放计算不受建材种类的影响。建材生产及运输阶段受建材种类影响较大，且建材生产阶段碳排放在建材生产及运输阶段占比高达 96%。与不计木材固碳相比，计算木材固碳后的碳排放占比，游客服务中心 A 由 19.91%降至 18.28%，降低 1.63%；游客服务中心 B 由 30.35%降至 27.95%，降低 2.40%；游客服务中心 C 由 28.49%降至 25.95%，降低 2.54%。

表 13 三栋建筑全生命周期碳排放（单位：t CO₂e）

建筑	建材生产及运输阶段		建造及拆除阶段	运行阶段	全生命周期碳排放	单位面积年均碳排放
	建材生产	建材运输				
游客服务中心 A	3709.45	136.53	117.73	15356.73	19320.44	0.151（0.148）
（计算固碳）	(3325.89)				(18936.88)	
游客服务中心 B	1523.24	49.12	67.24	3541.24	5180.84	0.152（0.147）
（计算固碳）	(1350.62)				(5008.22)	
游客服务中心 C	1389.91	46.50	64.66	3541.24	5042.31	0.148（0.143）
（计算固碳）	(1217.28)				(4869.68)	

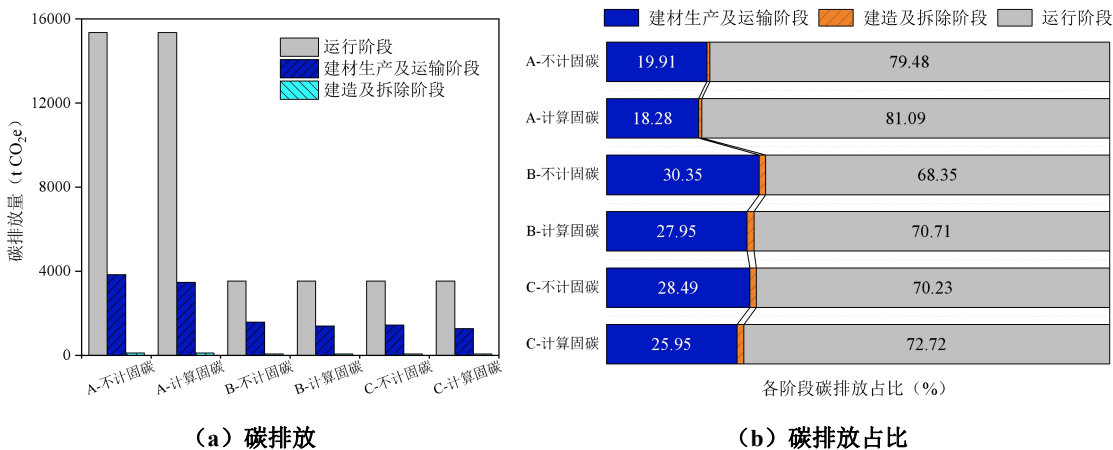


图 2 三栋建筑全生命周期碳排放及占比

4.2 木制建材与非木制建材生产阶段碳排放对比

三栋建筑的建材体积占比和碳排放占比如图 3(a-c)所示。在不考虑木制建材自身固碳量的情况下，游客服务中心 A、B、C 在建材生产阶段的碳排放量分别为 3709.45 t CO₂e、1523.24 t CO₂e、1389.91 t CO₂e。以游客服务中心 A 为例，混凝土体积占比达 64.79%，其碳排放量

为 1411.93 t CO₂e(38.06%)，金属材料体积占比为 1.17%，其碳排放量高达 1364.89 t CO₂e(36.79%)。由于其基础及地下室有大量钢筋和混凝土建材，建筑整体混凝土和金属材料的碳排放占比较高。木制建材体积占比为 6.76%，其碳排放量为 103.87 t CO₂e(2.80%)。与金属材料以及混凝土相比，木制建材用量较小，且木制建材生产碳排放因子较低，单位体积木材产生的碳排放相对较低。游客服务中心 B、C 亦同。

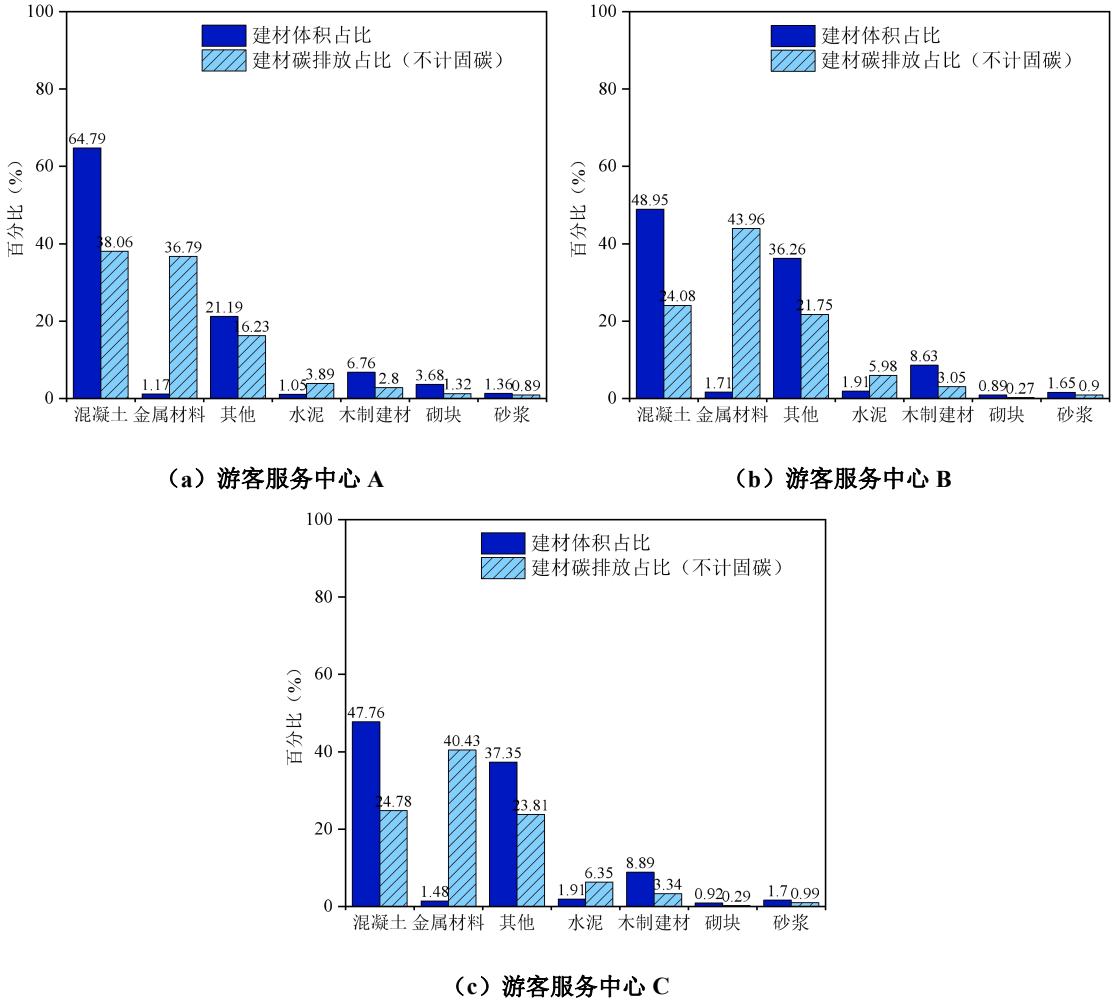


图 3 游客服务中心 A、B、C 建材体积占比及碳排放占比

受木材固碳特性的影响，木结构建筑使碳汇从森林转移到城市，增加了碳储存的形式，延长了碳循环的周期，同时降低了传统高排放建材的使用，能对环境产生较好的减碳效果。与不计木材固碳时得出的建筑整体建材在生产阶段的碳排放相比（图 4a），计算固碳后，三栋建筑建材生产阶段碳排放分别降低 10.34%、11.33%和 12.42%。与不计木材固碳时得出的建筑地上部分建材在生产阶段的碳排放相比（图 4b），计算固碳后，三栋建筑地上部分建材生产阶段碳排放分别降低 27.64%、25.60%和 26.58%。

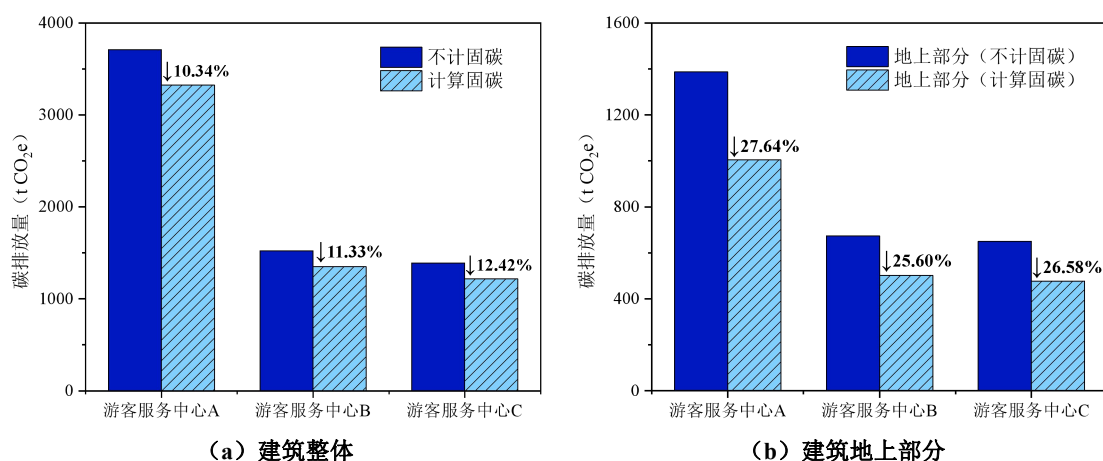
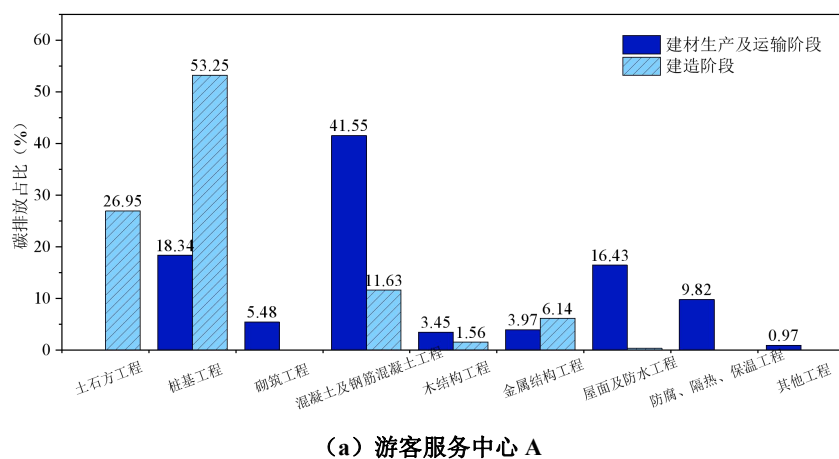
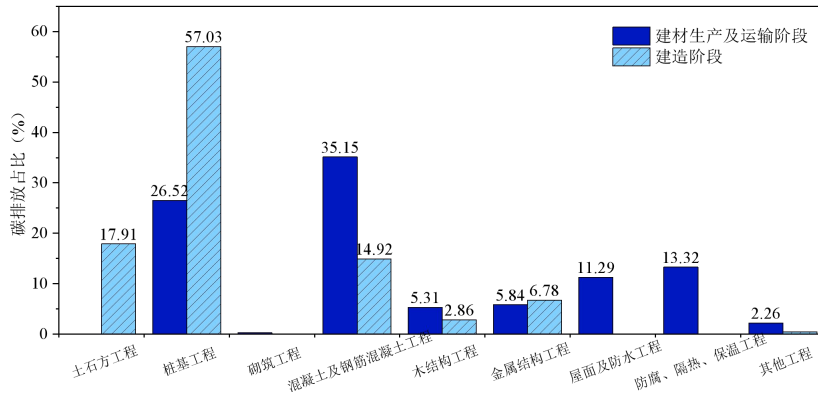


图4 木材固碳量对建材生产阶段碳排放的影响

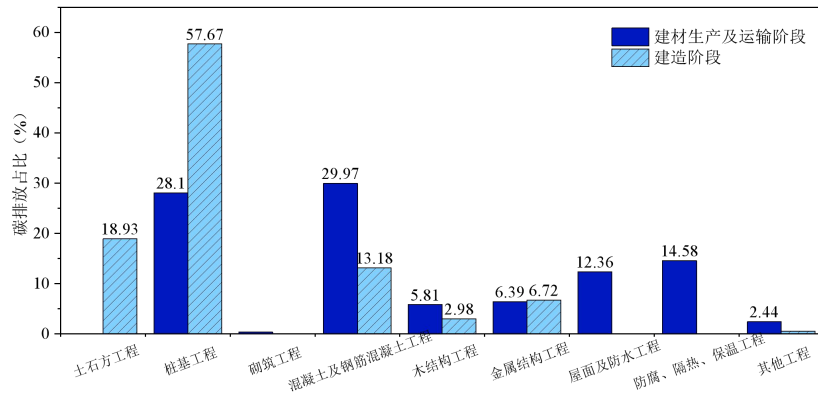
4.3 分部工程碳排放对比

图5(a-c)为三栋建筑在不计木材固碳的情况下，各分部工程建材生产及运输阶段、建造阶段碳排放占比图。以游客服务中心A为例，在建材生产及运输阶段，混凝土及钢筋混凝土工程碳排放占比最高，为41.55%，桩基工程碳排放占比次之，为18.34%。木结构工程建材生产及运输阶段碳排放量较小，为132.59 t CO₂e，仅占3.45%，其中53.90 t CO₂e来源于其中的金属构件。在建筑建造阶段，桩基工程、土石方工程、混凝土及钢筋混凝土工程碳排放占比最高，分别为53.25%、26.95%、11.63%，木结构工程仅占1.56%，主要由木结构工程中金属连接件的安装产生。木结构工程建造阶段对施工机械的需求小，具有节能环保的优势。此外，相对于钢筋和混凝土建材，木制建材强重比较高，木结构的应用能降低对基础的要求，从而降低建材生产和运输、建造阶段桩基工程等高能耗工程的碳排放。





(b) 游客服务中心 B



(c) 游客服务中心 C

图 5 三栋建筑不同分部工程建材生产及运输阶段与建造阶段碳排放占比图

4.4 小结

(1) 三栋建筑全生命周期单位面积年均碳排放量为 $0.14-0.15 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2\text{a}$ 。在建筑全生命周期中,建材生产及运输阶段、运行阶段碳排放占 98%以上。其中,运行阶段约占 70-80%,不受建材种类的影响;建材生产及运输阶段约占 20-30%,受建材种类影响较大;

(2) 建材生产及运输阶段的主要碳排放来源分别是:金属材料、混凝土、其他建材、水泥、木制建材。建材生产阶段碳排放在建材生产及运输阶段占比高达 96%;

(3) 不考虑木材固碳的情况下,三栋建筑单位面积建材生产及运输阶段碳排放量分别为 $1.50 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ 、 $2.31 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ 、 $2.11 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$,地上部分为 $0.96-1.03 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$;考虑木材固碳的情况下,三栋建筑单位面积建材生产及运输阶段碳排放量分别为 $1.35 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ 、 $2.06 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ 、 $1.86 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$,地上部分为 $0.70-0.74 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$;

(4) 在考虑木材固碳的情况下,整体建筑建材生产阶段的碳排放下降约 11%,地上建筑部分的建材生产阶段碳排放下降约 26%。木结构建筑具有显著的低碳优势;

(5) 各分部分项工程中,建材生产及运输阶段,混凝土及钢筋混凝土工程、桩基工程的碳排放最高,占比约 35%与 24%。建造阶段桩基工程的碳排放最高,占约 55%,木结构工程占比仅约 2%。同时木结构的应用能降低对基础的要求,从而减小建材生产及运输阶段、建造阶段等高耗能工程的碳排放。

5 木结构与等效钢混结构建筑碳排放对比分析

5.1 等效钢混结构建筑碳排放计算说明

根据 Cordier 等人^[14]与 Milaj 等人^[15]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（按热轧碳钢钢筋计）与 3.81 t 混凝土（按 C30 混凝土计）。将木梁、木柱等承重构件以及屋檐板、屋面板等木制围护构件等效为钢筋和混凝土建材，等效钢混结构建筑的建材用量如表 14 所示。建材生产及运输阶段、建造及拆除阶段的碳排放均根据等效后的建材用量进行计算。运行阶段碳排放则设定为与木结构相同。

表 14 三栋等效钢混结构建筑建材用量

	游客服务中心 A	游客服务中心 B	游客服务中心 C
建材用量 (t)	11942.62	3647.88	3466.98

5.2 等效钢混结构建筑碳排放计算结果

三栋等效钢混结构建筑全生命周期碳排放如表 15 所示。

表 15 三栋等效钢混结构建筑全生命周期碳排放（单位：t CO₂e）

建筑	建材生产及运输阶段		建造及拆除阶段	运行阶段	全生命周期碳排放	单位面积年均碳排放
	建材生产	建材运输				
游客服务中心 A 等效建筑	4166.84	130.55	119.78	15356.73	19773.91	0.154
游客服务中心 B 等效建筑	1695.03	50.40	66.87	3541.24	5353.54	0.157
游客服务中心 C 等效建筑	1534.4	47.78	63.49	3541.24	5186.91	0.153

5.3 木结构与等效钢混结构建筑全生命周期碳排放对比

木结构与等效钢混结构建筑全生命周期碳排放和建材生产及运输阶段碳排放如表 16 所示，图 6(a-b)为对比图。由表 16 可见，与等效钢混结构建筑相比，不计木材固碳时，三栋木结构建筑全生命周期碳排放分别能降低 2.29%、3.22%和 2.79%；计算木材固碳时，分别能降低 4.23%、6.45%和 6.12%。由图 6(a)可得，木结构建筑全生命周期碳排放有所下降，但由于运行阶段碳排放占比较大，下降趋势不明显，且木结构建筑减碳量多集中在建材生产及运输阶段。与等效钢混结构建筑相比，不计木材固碳时，三栋木结构建筑建材生产及运输阶段碳排放分别能降低 10.50%、9.92%和 9.21%；计算木材固碳时，分别能降低 19.43%、19.81%和 20.12%。建材生产及运输阶段，木结构建筑的碳排放下降趋势显著。

表 16 三栋建筑全生命周期碳排放和建材生产及运输阶段碳排放对比表

		全生命周期碳排放		建材生产及运输阶段碳排放	
建筑		碳排放 (t CO ₂ e)	降低百 分比 (%)	碳排放 (t CO ₂ e)	降低百分比 (%)
游客服务 中心 A	等效钢混结构	19773.91	-	4297.4	-
	木结构（不计固碳）	19320.44	2.29	3845.98	10.50
	木结构（计算固碳）	18936.88	4.23	3462.42	19.43
游客服务 中心 B	等效钢混结构	5353.54	-	1745.43	-
	木结构（不计固碳）	5180.84	3.23	1572.36	9.92
	木结构（计算固碳）	5008.22	6.45	1399.74	19.81
游客服务 中心 C	等效钢混结构	5186.91	-	1582.18	-
	木结构（不计固碳）	5042.31	2.79	1436.41	9.21
	木结构（计算固碳）	4869.68	6.12	1263.78	20.12

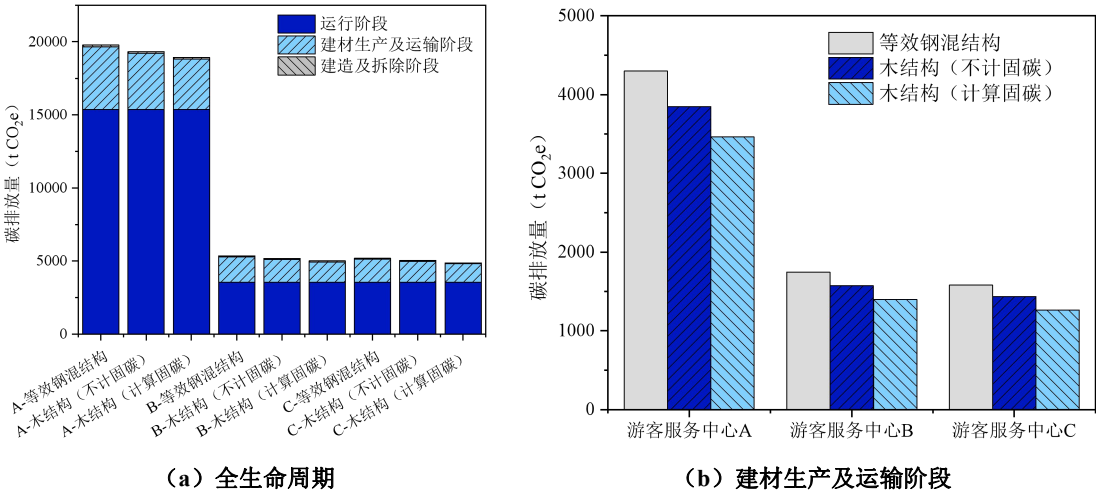


图 6 三栋建筑全生命周期碳排放和建材生产及运输阶段碳排放对比图

5.4 木结构与等效钢混结构地上建筑部分建材生产阶段碳排放对比

表 17 为三栋建筑地上部分建材生产阶段碳排放对比表，图 7 为对比图。与等效钢混结构建筑相比，不计木材固碳时，三栋木结构地上建筑部分建材在生产阶段的碳排放分别能降低 24.79%、20.30%和 18.20%；计算木材固碳时，分别降低 45.58%、40.71%和 39.94%。地上建筑部分建材生产阶段碳排放更能突显木结构建筑的低碳优势。

表 17 三栋建筑地上部分建材生产阶段碳排放对比表

建筑		建筑地上部分建材生产阶段碳排放	
		碳排放 (t CO ₂ e)	降低百分比 (%)
游客服务中心 A	等效钢混结构	1845.12	-
	木结构 (不计固碳)	1387.72	24.79
	木结构 (计算固碳)	1004.17	45.58
游客服务中心 B	等效钢混结构	846.05	-
	木结构 (不计固碳)	674.26	20.30
	木结构 (计算固碳)	501.64	40.71
游客服务中心 C	等效钢混结构	793.96	-
	木结构 (不计固碳)	649.46	18.20
	木结构 (计算固碳)	476.84	39.94

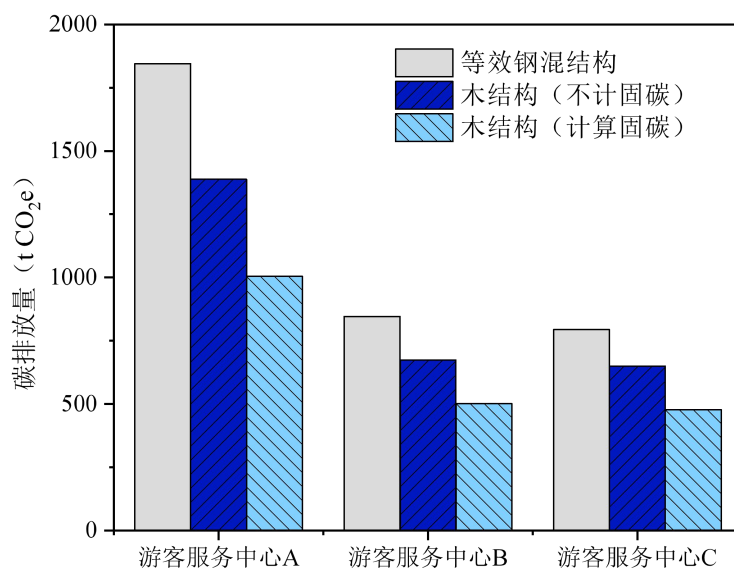


图 7 三栋建筑地上部分建材生产阶段碳排放对比图

5.5 小结

(1) 与等效钢混结构建筑相比,木结构建筑全生命周期碳排放有所降低,但由于运行阶段碳排放占比约 70%-80%,因此下降趋势不明显,仅降低约 4%。木结构建筑在建材生产及运输阶段减碳效果明显;

(2) 与等效钢混结构建筑相比,木结构建筑的建材生产及运输阶段碳排放下降约 10%。考虑木材固碳后,下降趋势更显著,约 19%;

(3) 地上建筑部分的建材生产阶段碳排放对比更能突出木结构建筑的低碳优势,与等效钢混结构建筑相比,木结构建筑地上建材生产阶段碳排放下降约 18-25%,考虑木材固碳后,下降约 40-46%。

6 总结

(1) 不考虑木材固碳的情况下，三栋木结构建筑单位面积建材生产及运输阶段碳排放量分别为 $1.50 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ 、 $2.31 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ 、 $2.11 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ ，地上部分为 $0.96\text{-}1.03 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ ；考虑木材固碳的情况下，三栋木结构建筑单位面积建材生产及运输阶段碳排放量分别为 $1.35 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ 、 $2.06 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ 、 $1.86 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ ，地上部分为 $0.70\text{-}0.74 \text{ t CO}_2\text{e/m}^2$ ；若将木材固碳量计算在建筑碳汇中，建筑整体的建材生产阶段碳排放将下降约 11%；仅考虑地上部分建材，碳排放将下降约 26%。木制建材具有显著的低碳优势；

(2) 各分部分项工程中，建材生产及运输阶段，混凝土及钢筋混凝土工程、桩基工程的碳排放最高，建造阶段桩基工程的碳排放最高。木结构工程对施工机械的需求小，其建造阶段碳排放占比约 2%。同时木结构的应用能降低对基础的要求，从而减小建材生产及运输阶段、建造阶段等高耗能工程的碳排放；

(3) 在建筑全生命周期中，木结构建筑建材生产及运输阶段、运行阶段碳排放占 98% 以上。其中运行阶段约占 70-80%，不受建材种类的影响；建材生产及运输阶段约占 20-30%，受建材种类影响较大；

(4) 与等效钢混结构建筑相比，木结构建筑在建材生产阶段碳排放下降约 10%，考虑木材固碳后，下降约 19%；不考虑为钢筋混凝土结构的基础和地下室部分，木结构建筑地上部分建材生产阶段碳排放下降约 18-25%，考虑固碳后，下降约 40-46%。木结构建筑的减碳优势显著。

致谢

感谢北京城建集团有限责任公司提供数据、图片、资料等支持，同时感谢报告编制过程中各位专家对改进本报告提供的宝贵建议。

参考文献

- [1] Global Carbon Project. Global Carbon Budget 2020[R]. GCP, 2020.12.
- [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 2021[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021:第 1 章.
- [3] 张时聪, 杨芯岩, 徐伟. 现代木结构建筑全寿命期碳排放计算研究[J]. 建设科技, 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, R Solnosky, 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 _ _ _ ife 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]. 北京林业大学, 2018.
- [10] 胡家航, 姬晓迪, 代倩, 郭明辉. 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(06):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(03):324-328.
- [12] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D]. 东南大学, 2015.
- [13] 2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子. 中华人民共和国生态环境部.
- [14] Cordier Sylvain, Robichaud François, Blanchet Pierre, Amor Ben. 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.
- [15] Milaj, K., Sinha, A., Miller, T.H., Tokarczyk, J.A., 2017. Environmental utility of wood substitution in commercial buildings using life-cycle analysis. Wood Fiber Sci. 43, 21.

附录 1 游客服务中心 A、B、C 建材生产及运输阶段碳排放因子说明

游客服务中心 A、B、C 使用的主要建材共 39 种。包括 4 种木制建材以及 35 种非木制建材。在确定建材碳排放因子时，按照先国标，再文献的原则，并优先考虑发布日期较近、公认度较高的的研究文献。

（1）木制建材碳排放因子

为研究木材固碳量对整个生命周期的影响，除了按照国标进行计算的建材碳排放因子 F_{i1} 外，还设置了在国标基础上将固碳量计算在内的建材碳排放因子 F_{i2} 。《分部分项工程量清单》中的 OSB（定向刨花板）视作国产 OSB。参考林科院学者^[1]根据我国目前四种 OSB 类型（OSB1、OSB2、OSB3、OSB4）以及多种生产线的碳排放计算均值，OSB 建材碳排放因子 F_{i1} 为 $347 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ ， F_{i2} 为 $-811 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ 。

花旗松相关木质建材经过三段运输后在上海进行加工，后运至建造地点。因此建材碳排放因子为加拿大 EPD 中软木锯材全球变暖潜能值（GWP）数值、运输阶段单位体积碳排放量、以及建材加工阶段产生的单位体积相应碳排放^[2-3]之和，具体数值如表 1.1 所示。花旗松锯材碳排放因子 F_{i1} 为 $133.92 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ ，花旗松集成材碳排放因子 F_{i1} 为 $237.32 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ ，花旗松胶合板碳排放因子 F_{i1} 为 $266.77 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ 。考虑木材固碳量后，花旗松锯材 F_{i2} 为 $-709.74 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ ，花旗松集成材 F_{i2} 为 $-625.58 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ ，花旗松胶合板 F_{i2} 为 $-576.89 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^3$ 。

表 1.1 木制建材碳排放因子（单位： $\text{kg CO}_2\text{e/m}^3$ ）

阶段	花旗松锯材	花旗松集成材	花旗松胶合板	OSB（定向刨花板）
软木锯材 GWP	63.12	63.12	63.12	-
锯木厂至温哥华港口运输	26.70	26.70	26.70	-
温哥华港口至中国太仓港运输	41.57	41.57	41.57	-
太仓港至上海胶合工厂运输	2.53	2.53	2.53	-
建材加工	0	84.16	132.85	-
建材碳排放因子 F_{i1}	133.92	237.32	266.77	347
建材碳排放因子 F_{i2}	-709.74	-625.58	-576.89	-811

（2）非木制建材碳排放因子

非木制建材碳排放因子如表 1.2 所示。除《分部分项工程量清单》可以明确对应的建材，其余建材碳排放因子的选取包括五种方式。一是未明确构件大小尺寸的按市场平均值计算，如未明确直径的直螺纹套筒取全直径均值；二是未明确材料具体类型的按目前市场使用最多的建材计算，如木材防水涂料按聚氨酯防水涂料计算；三是将木结构中常使用的保温防潮等材料视作相似构效的材料，如将聚丙烯薄膜隔汽层视作无规共聚聚丙烯管、将 LC5.0 轻骨料混凝土视作国标中碳排放较低的 C30 混凝土、将外贴式止水带视作 SBS 改性沥青防水卷材等；四是按建材原材料等效计算，如将泡沫玻璃保温板视作其原材料平板玻璃；五是等效折算，如屋面及防水工程中芦苇的建材碳排放因子参考湿地芦苇固碳值 $0.82\sim1.65\text{kgCO}_2\text{e/m}^2$

的均值 1.235kgCO₂e/m²。

表 1.2 非木制建材碳排放因子

材料种类	建材名称	建材单位	碳排放因子 F_i (kg CO ₂ e/单位)	数据来源
混凝土	泵送商品混凝土 C20	m ³	252.924	II
	普通 C20 混凝土	m ³	234.637	II
	泵送商品混凝土 C25	m ³	291.067	II
	C30 混凝土	m ³	295	I
	现场搅拌防水抗渗混凝土 C30	m ³	310.987	II
	现场搅拌防水抗渗混凝土 C35	m ³	362.146	II
	普通 C40 混凝土	m ³	363.032	II
	泵送商品混凝土 C40	m ³	430.651	II
	现场搅拌防水抗渗混凝土 C40	m ³	403.759	II
水泥	普通硅酸盐水泥（市场平均）	t	735	I
砂浆	混合砂浆 M5	m ³	186.203	II
	1:2 水泥砂浆	m ³	482.769	II
	1:2.5 水泥砂浆	m ³	426.606	II
	1:3 水泥砂浆	m ³	393.65	II
	1:0.5:3 混合砂浆	m ³	335.251	II
砌块	加气混凝土砌块	m ³	219.87	III
	烧结粉煤灰实心砖	m ³	134	I
	热轧碳钢钢筋	t	2340	I
金属	热轧碳钢无缝钢管	t	3150	I
	焊接直缝钢管	t	2530	I
	碳钢热镀锌板卷	t	3110	I
	冷轧碳钢板卷	t	2530	I
	普通碳钢（市场平均）	t	2050	I
	铝合金型材	t	253.7	IV
其他	石膏板	m ²	77.84	V
	硬泡聚氨酯板	t	5220	I
	SBS 改性沥青防水卷材	m ²	2.37	VI
	涂料	kg	2.6	VI
	聚氨酯	t	1200	VII
	丙烯酸酯乳液水泥防水涂料	m ²	0.73	VI
	乳胶漆	m ²	5.06	V
	聚苯乙烯泡沫板	t	5020	I
	岩棉板	t	1980	I

平板玻璃	t	1130	I
湿地芦苇	m ²	-1.235	VIII

注：（1）数据I源于国标；
（2）数据II源于吴淑艺[4]的研究；
（3）数据III源于曾杰[5]的研究；
（4）数据IV源于沈丹丹[6]的研究；
（5）数据V源于李兵[7]的研究；
（6）数据VI源于崔鹏[8]的研究；
（7）数据VII源于王玉[9]的研究；
（8）数据VIII源于李博[10]的研究。

（3）建材运输碳排放因子

按照国标规定，本研究将建材运输方式设定为柴油汽车公路运输，建材碳排放因子如表1.3所示。

表 1.3 建材运输碳排放因子

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

参考文献

- [1] 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]. 中国林业科学研究院, 2017.
- [2] 代倩, 胡家航, 姬晓迪, 郭明辉. 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(04): 46-50.
- [3] 王珊珊, 张寒, 杨红强. 中国人造板行业的生命周期碳足迹和能源耗用评估[J]. 资源科学, 2019, 41(03): 521-531.
- [4] 吴淑艺. 基于工程量清单的建筑工程碳排放研究[D]. 福建农林大学, 2017.
- [5] 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(01): 17-19.
- [6] 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.
- [7] 李兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 华中科技大学, 2012.
- [8] 崔鹏. 建筑物生命周期碳排放因子库构建及应用研究[D]. 东南大学, 2015.
- [9] 王玉. 工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放研究[D]. 东南大学, 2016.
- [10] 李博, 刘存歧, 王军霞, 张亚娟. 白洋淀湿地典型植被芦苇储碳固碳功能研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2603-2607.

附录 2 游客服务中心 A、B、C 运行阶段碳排放计算细则

根据 GB/T 51366-2019《建筑碳排放计算标准》的规定，建筑运行阶段碳排放计算范围应包括暖通空调系统、生活热水系统、照明及电梯系统、可再生能源系统和建筑碳汇系统。在游客服务中心 A 中，主要计算暖通空调系统和照明及电梯系统。游客服务中心 B、C 为单层建筑，未使用电梯系统，主要计算暖通空调系统和照明系统。

（1）暖通空调系统：根据项目资料中的《绿色建筑设计专篇（供暖通风与空气调节）》和《暖通空调负荷计算书》计算暖通空调系统的能耗和碳排放量。其中，制冷期设定为 6 月 1 日至 9 月 1 日，采暖期设定为 11 月 15 日至次年 3 月 15 日，日工作时间设定为 8:00-22:00。

（2）照明及电梯系统：根据项目资料中的建筑图纸和国标的规定计算照明及电梯系统的能耗和碳排放量，其中照明房间的类型和电梯使用信息为设定值。

生活热水系统主要通过太阳能热水系统供应，由于本项目的可再生能源系统仅有太阳能热水系统，生活热水系统和可再生能源系统供需平衡，不计算碳排放量。国标中的建筑碳汇定义为建筑红线范围内的绿化植被对二氧化碳的吸收产生的减碳量，该部分减碳量计算复杂，不确定性较大，且国标中未提供明确的计算方法，因此在本项目中忽略不计。游客服务中心 A、B、C 在运行阶段碳排放明细如表 2.1-2.2 所示，标有“*”的内容为计算设定值。

表 2.1 游客服务中心 A 运行阶段碳排放

暖通空调系统						
制冷期*	6月1日-9月1日 (90日)	工作时间*	8:00-22:00 (14h)	冷热源主机设备	涡旋式风冷热泵机组	
计算区域	冷负荷 (kW)	额定制冷量 (kW)	配电功率 (kW)	每小时制冷耗电量 (kWh)	总耗电量 (kWh)	碳排放 总量 (t)
地上1层	198.07	136.00	40.00	58.25	4893370.59	4609.07
地下1层	79.92	136.00	40.00	23.51	1974541.31	1859.82
整体建筑	275.12	136.00	40.00	80.92	6796972.66	6402.07
采暖期*	11月15日-次年3月15日 (120日)	工作时间*	8:00-22:00 (14h)	冷热源主机设备	涡旋式风冷热泵机组	
计算区域	热负荷 (kW)	额定制热量 (kW)	配电功率 (kW)	每小时制热耗电量 (kWh)	总耗电量 (kWh)	碳排放 总量 (t)
地上1层	-166.76	136.00	40.00	49.05	4119906.25	3880.54
地下1层	-38.90	136.00	40.00	11.44	961106.01	905.27
整体建筑	-205.66	136.00	40.00	60.49	5081012.26	4785.81
生活热水系统		采用太阳能热水系统				
照明及电梯系统						
计算区域	照明房间类型	房间面积 (m ²)	月照明 时数 (h)	照明功率密度 (w/m ²)	总耗电量 (kWh)	碳排放 总量 (t)
地上1层	多功能厅*	1215	420	8	2449440.00	2307.13
	婴儿室	10.90	315.00	5.00	10300.50	9.70
	洗手间	125.00	165.00	6.00	74250.00	69.94
地下1层	门诊办公室	28.00	468.00	5.00	39312.00	37.03
	办公室	36.30	294.00	13.50	86444.82	81.42
	多功能厅*	738.02	420.00	8.00	1487848.32	1401.40
地下1层合计					1698155.64	1599.49
整体建筑					4147595.64	3906.62
电梯数量 (台)	1	电梯速度 (m/s)	1	电梯载重量 (Kg)	1000	中等使用 强度*
运行时间 (h)	待机时间 (h)	运行能量 性能等级	待机能量 性能等级	电梯日耗电量 (kWh)	总耗电量 (kWh)	碳排放 总量 (t)
1.5*	22.5*	4*	4*	15.26	278403.75	262.23
可再生能源系统		仅有太阳能热水系统, 供需平衡				
建筑碳汇系统		忽略不计				

表 2.2 游客服务中心 B、C 运行阶段碳排放

暖通空调系统						
制冷期*	6月1日-9月1日 (90日)	工作时间*	8:00-22:00 (14h)	冷热源主机设备	涡旋式风冷热泵机组	
计算区域	冷负荷 (kW)	额定制冷量 (kW)	配电功率 (kW)	每小时制冷耗电量 (kWh)	总耗电量 (kWh)	碳排放 总量 (t)
地上 1 层	54.51	136	40	16.03	1346817.46	1268.57
采暖期*	11月15日-次年3月15日 (120日)	工作时间*	8:00-22:00 (14h)	冷热源主机设备	涡旋式风冷热泵机组	
计算区域	热负荷 (kW)	额定制热量 (kW)	配电功率 (kW)	每小时制热耗电量 (kWh)	总耗电量 (kWh)	碳排放 总量 (t)
地上 1 层	-42.49	136	40	12.48	1049800.87	988.81
生活热水系统		采用太阳能热水系统				
照明及电梯系统		仅有照明系统, 未使用电梯系统				
计算区域	照明房间类型	房间面积 (m ²)	月照明 时数 (h)	照明功率密度 (w/m ²)	总耗电量 (kWh)	碳排放 总量 (t)
	休息室	9.7	420	11	26888.40	25.33
	洗手间	20	165	6	11880.00	11.19
地上 1 层	酒吧、茶座	61.1	393	9	129666.42	122.13
	办公室	18.6	294	13.5*	44294.04	41.72
	多功能厅*	570.6	420	8	1150329.60	1083.50
合计					1363058.46	1283.86
可再生能源系统		仅有太阳能热水系统, 供需平衡				
建筑碳汇系统		忽略不计				