

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0809

夏热冬冷地区绿色建筑碳排放计算及碳减排潜力研究

——以宁波大学科技服务大楼为例

孙杰威, 严晓东*

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为研究我国夏热冬冷地区绿色建筑的全生命周期碳排放, 选取宁波大学科技服务大楼作为绿色建筑案例, 采用基于过程方法与投入产出法相结合, 计算全生命周期碳排放, 得出其碳排放总量为 23 992.799 tCO_{2e}, 碳排放指标为 38.51 kgCO_{2e}·(m²·a)⁻¹. 同时, 为探究各类绿色建筑技术的碳减排潜力, 提出了基于屋顶、外墙、外窗和空调系统的碳排放计算方法, 并分别对屋顶增加光伏板、改变外墙材料、采用不同传热系数外窗, 以及改变地源热泵 4 类技术进行模拟计算. 与原绿色建筑碳排放强度相比发现, 地源热泵、太阳能光伏板可以提升建筑碳减排潜力, 分别能减少 8.02% 和 12.56% 的碳排放量; 考虑外墙材料隐含碳后, 材料的选择对碳排放的影响较大, 而外窗传热系数的变化对碳排放影响不明显.

关键词: 绿色建筑; 碳减排潜力; 生命周期评价; DeST 模拟

中图分类号: TU201.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2024) 02-0057-08

我国提出“双碳”目标后, 住房和城乡建设部印发的《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》明确提出, 在“十四五”期间, 我国将大力推进绿色建筑建设. 到 2025 年, 城镇新建建筑将全面建成绿色建筑. 潘毅群等^[1]指出建筑业的碳排放几乎占碳排放总量的 40%. 李岳岩等^[2]对普通建筑与低碳建筑进行了全生命周期碳排放的计算与对比分析, 得出低碳建筑较普通建筑的碳排放量下降明显, 并提出了具体的建筑全生命周期减碳策略. Wu 等^[3]研究发现, 绿色商业建筑比普通商业建筑的碳排放量低 32%. 肖旭东^[4]提出了绿色建筑碳排放和成本测算方法, 为今后在绿色建筑评估体系中纳入建筑物碳排放和经济效益的量化指标提供了借鉴. Robati 等^[5]对澳大利亚一座六星级绿色建筑进行了研究, 发现太阳能光伏电池板、带铝框架的双层玻璃窗、混凝土和隔热材料是碳减排中的关键参数. Wang 等^[6]进一步提出绿色建筑并不总意味着

低碳建筑, 特别在考虑建筑的全生命周期方面. 综上所述可知, 研究绿色建筑的碳减排潜力意义重大.

我国幅员辽阔, 可分为严寒地区、寒冷地区、温和地区、夏热冬冷地区和夏热冬暖地区, 各分区设计指标和设计原则有所不同, 因而各分区建筑碳排放特征不同. Kang 等^[7]研究了寒冷地区翻新办公室的碳减排潜力, 得出超低能耗建筑全生命周期碳减排潜力为 42.6%, 高于绿色建筑的 17.6%. 彭卓等^[8]对天津某绿色建筑进行了减碳潜力研究, 发现太阳能技术的利用、节能照明以及绿化系统的减碳效果较好. 相关研究更多关注严寒地区和寒冷地区的建筑碳排放, 对夏热冬冷地区的研究报道相对较少.

杜星璇^[9]指出夏热冬冷地区包括我国 16 个省、自治区、直辖市, 人口超过 5 亿, 国内生产总值占全国约 48%, 相比其他地区, 该地区政治和经济地位较高. Su 等^[10]对夏热冬冷地区被动式建筑的碳

收稿日期: 2023-08-18.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家社会科学基金 (19BJL041).

第一作者: 孙杰威, 硕士研究生, 主要研究方向: 绿色建筑碳排放. E-mail: 392883450@qq.com

*通信作者: 严晓东, 副教授, 主要研究方向: 工程管理与信息化. E-mail: yanxiaodong@nbu.edu.cn

排放进行了评估,得出被动式建筑的全生命周期碳排放量比传统建筑低 22.7%,但未深入研究碳减排潜力和措施. Dong 等^[11]对夏热冬冷地区的净零能耗建筑进行了性能研究,发现当光伏电池板的安装面积超过屋顶面积的 108%时,可以实现全生命周期零排放.因此,夏热冬冷地区的绿色建筑具有较大的碳减排潜力.

本文提出了一种基于绿色建筑技术的碳排放计算方法,并与碳排放一般计算方法相结合,探究夏热冬冷地区绿色建筑全生命周期的碳排放以及各类绿色建筑技术的碳减排潜力.同时,以宁波大学科技服务大楼为例,根据本绿色建筑的特点,分别对其屋顶、外墙、外窗以及地源热泵 4 类技术进行模拟,通过改变单个技术后的单位面积年均碳排放指标与原绿色建筑指标进行对比,得到碳排放的变化率,以此表征各类技术的碳减排潜力,以期为今后建造绿色建筑与降低建筑业碳排放提供参考.

1 研究方法

1.1 功能单位与系统边界

碳排放计算以整栋建筑为功能单位,碳排放量以 tCO_2e 为计量单位,碳排放指标以 $\text{kgCO}_2\text{e}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 为计量单位.

本文对建筑的全生命周期进行碳排放计算.系统边界包含建材生产与运输阶段、建造阶段、运行阶段和拆除处置阶段.建材生产与运输阶段包括建材生产、运输所产生的碳排放.建造阶段包括施工现场的机械运行、临时用能和废物运输所产生的碳排放.运行阶段包括建筑物的采暖、制冷、照明和电梯所产生的碳排放,以及绿色植物的固碳量和可再生能源的减碳量.拆除处置阶段包括建筑拆除活动和废物运输产生的碳排放,以及可循环材料的减碳量.

1.2 碳排放一般计算方法

根据《建筑碳排放计算标准》GB/T 51366—2019(以下简称“碳排放计算标准”)规定,采用基于过程的碳排放计算方法,部分阶段利用投入产出法进行计算^[12],前者适合碳排放的详细分析,后者适合宏观研究^[13].具体方法如下.

建筑材料的生产与运输阶段的碳排放量计算

公式为^[12]:

$$C_s = \sum_i Q_i F_i + \sum_i Q_i D_i T_i, \quad (1)$$

式中: C_s 为建材生产与运输的碳排放量; Q_i 为建材 i 的消耗量; F_i 为建材 i 的碳排放因子; D_i 为建材 i 的平均运输距离, km; T_i 为建材 i 单位重量运输距离的碳排放因子.

对于碳排放因子未知的材料,采用投入产出法计算.建材运输距离根据本地建筑材料使用比例计算书中的运输距离.对于按照运费估算碳排放的材料,运费为材料价格的 5%,运输部门的隐含碳排放强度为 $0.211 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{元}^{-1}$ ^[12].

建造阶段的碳排放量是机械运行、施工废物运输和其他临时用能所产生的碳排放量之和,计算公式为^[12]:

$$C_z = \sum_j Q_j F_j, \quad (2)$$

式中: C_z 为建造阶段所产生的碳排放量; Q_j 为能源 j 的消耗量; F_j 为能源 j 的碳排放因子; 能源 j 包括机械运行、施工废物运输和其他临时用能所产生的柴油、汽油和电力.

运行阶段的碳排放包括建筑物的日常使用、维护、加固改造所产生的碳排放,以及可再生能源的减碳量和建筑碳汇的固碳量.其计算公式为^[12]:

$$C_y = T \sum_k Q_k F_k - C_r - C_p, \quad (3)$$

式中: C_y 为运行阶段的碳排放量; T 为建筑使用寿命; Q_k 为能源 k 的消耗量; F_k 为能源 k 的碳排放因子; 能源 k 包括运行阶段的电力、燃气等; C_r 为可再生能源的减碳量; C_p 为建筑碳汇的固碳量.其中绿色建筑中较易获取暖通空调、生活热水、照明与电梯系统的能耗数据,因此采用实际能耗对该部分进行计算.

拆除处置阶段碳排放包括建筑拆除活动和建筑废物运输的碳排放.由于本文选取的案例未到需要拆除阶段,故按照文献[12]估算拆除活动所产生的碳排放,具体计算公式为^[12]:

$$C_{ch} = 10^{-3} \sum_i O_i F_i + C_{dw} - C_{re}, \quad (4)$$

式中: C_{ch} 为拆除处置阶段的碳排放量; O_i 为各部分工作量; F_i 为各部分碳排放因子; C_{dw} 为废弃物运输所产生的碳排放量; C_{re} 为可循环材料的减碳量.

1.3 基于绿色建筑技术的碳排放计算方法

(1) 屋顶绿色建筑技术改变后的碳减排量计算公式为:

$$C_{R1} = (A_1 e_1 - A_2 e_2)T + \left[\sum_{l=1}^n (P_1 - P)(1 - \lambda)^{(l-1)} \right] \cdot F_e \frac{T}{n} - (R_1 - R_2) \frac{T}{n} (F_{mat} + F_{tra} + F_{co} + F_{re}), \quad (5)$$

$$C_{Ra} = (A_1 e_1 - A_2 e_2)T, \quad (5-1)$$

$$C_{Rb} = \left[\sum_{l=1}^n (P_1 - P)(1 - \lambda)^{(l-1)} \right] F_e \frac{T}{n} - (R_1 - R_2) \frac{T}{n} (F_{mat} + F_{tra} + F_{co} + F_{re}), \quad (5-2)$$

式中: C_{R1} 为屋顶绿色建筑技术改变后的碳减排量; C_{Ra} 为绿色屋顶绿化改变后的碳减排量; C_{Rb} 为屋顶光伏系统改变后的碳减排量; A_1 为绿色屋顶改变后的种植面积; e_1 为绿色植物改变后的年固碳量; A_2 为原绿色屋顶种植面积; e_2 为原绿色植物的年固碳量; P_1 为光伏系统改变后的首年发电量; P 为原光伏系统的首年发电量; λ 为光伏系统发电年退化比, 取 $1\%^{[11]}$; l 为光伏系统运行的年数; F_e 为电力碳排放因子; n 为光伏系统寿命; R_1 为光伏系统改变后的额定峰值功率; R_2 为原光伏系统的额定峰值功率; F_{mat} 为光伏系统材料生产的碳排放因子, 取 $1\,320.80\, \text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{kW}^{-1}(\text{峰值})^{[14]}$; F_{tra} 为光伏系统运输碳排放因子, 取 $37.26\, \text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{kW}^{-1}(\text{峰值})^{[14]}$; F_{co} 为光伏系统建造的碳排放因子, 取 $369.39\, \text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{kW}^{-1}(\text{峰值})^{[14]}$; F_{re} 为光伏系统拆除回收阶段的碳排放因子, 取 $332.95\, \text{kgCO}_2\text{e} \cdot \text{kW}^{-1}(\text{峰值})^{[14]}$.

当屋顶不设光伏系统时, 用式(5-1)计算; 当屋顶无绿色植物时, 用式(5-2)计算; 当屋顶同时设有绿色植物和光伏系统时, 用式(5)计算。

光伏系统运行碳变化量为:

$$\left[\sum_{l=1}^n (P_1 - P)(1 - \lambda)^{(l-1)} \right] F_e \frac{T}{n}.$$

光伏系统隐含碳变化量为:

$$(R_1 - R_2) \frac{T}{n} (F_{mat} + F_{tra} + F_{co} + F_{re}).$$

(2) 外墙材料改变后的碳减排量计算公式为:

$$C_{R2} = (E_{q1} - E_{q2})TF_e - \sum_i \sum_m Q_i (F_m - F_i), \quad (6)$$

式中: C_{R2} 为外墙改变后的碳减排量; E_{q1} 为外墙改变后建筑模拟年耗电量; E_{q2} 为原绿色建筑模拟年耗电量; Q_i 为外墙中第 i 种材料消耗量; F_m 为替换第 i 种材料的第 m 种材料的碳排放因子; F_i 为原外墙中第 i 种材料的碳排放因子。

外墙改变后运行碳变化量为:

$$(E_{q1} - E_{q2})TF_e.$$

外墙改变后隐含碳变化量为:

$$\sum_i \sum_m Q_i (F_m - F_i).$$

(3) 外窗玻璃改变后的碳减排量计算公式为:

$$C_{R3} = (E_{c1} - E_{c2})TF_e - (Q_{c1}F_{c1} - Q_{c2}F_{c2}), \quad (7)$$

式中: C_{R3} 为外窗改变后的碳减排量; E_{c1} 和 E_{c2} 为外窗改变后建筑和原建筑的模拟年耗电量; Q_{c1} 和 Q_{c2} 为外窗改变后和原建筑外窗玻璃的消耗量; F_{c1} 和 F_{c2} 为外窗玻璃改变后和原建筑外窗玻璃的碳排放因子。

外窗玻璃改变后运行碳的变化量为:

$$(E_{c2} - E_{c1})TF_e.$$

外窗玻璃改变后隐含碳的变化量为:

$$(Q_{c1}F_{c1} - Q_{c2}F_{c2}).$$

(4) 空调系统改变后碳减排量计算公式为:

$$C_{R4} = [(E_s / E_{ER2} - E_s / E_{ER1}) + (E_w / C_{OP2} - E_w / C_{OP1})] \eta F_e, \quad (8)$$

式中: C_{R4} 为空调系统改变后的碳减排量; E_s 为空调系统全年制冷需求量; E_w 为空调系统全年供热需求量; E_{ER1} 和 E_{ER2} 为空调系统改变后和原空调系统的制冷能效比; C_{OP1} 和 C_{OP2} 为空调系统改变后和原空调系统的制热性能系数; η 为空调系统改变量占比。

改变绿色建筑技术后, 建筑单位面积年均碳排放指标计算公式为:

$$C_{ra} = C_{ER} / (A \cdot T), \quad (9)$$

$$C_1 = C / (A \cdot T), \quad (10)$$

$$C_2 = C_{ra} + C_1, \quad (11)$$

式中: C_{ra} 为单位面积年均碳排放指标减少值; C_{ER} 为碳减排量; A 为总建筑面积; C 为建筑生命周期碳排放量; C_1 为原建筑单位面积年均碳排放指标; C_2 为某项绿色建筑技术变化后的单位面积年均碳排放指标。

2 案例碳排放的计算与分析

2.1 案例介绍

选取宁波大学科技服务大楼，一座夏热冬冷地区的三星级绿色建筑，总建筑面积 12 461.6 m²，地上 9 层，地下室 1 层，设计合理使用年限 50 a。本绿色建筑设计包括绿色屋顶、地源热泵、光伏发电等，是可再生能源建筑应用技术开发、集成和应用的示范工程。

屋顶设有绿色屋顶和太阳能光伏电池板，绿色屋顶的种植面积为 650 m²，种植植物为低茎草植物。太阳能光伏电池板选用峰值功率为 265 W 的多晶硅太阳能组件，每块光伏组件均由 60 片电池片组成，屋面布置光伏组件 36 块。多晶硅电池片效率 19.06%，组件效率 16.19%，占地面积 60 m²，额定峰值功率 9.54 kW。根据浙江省年平均日照量和日照时数估算，全年可以折算成约 1 000 h 的峰值发电量，故本绿色建筑太阳能全年发电量为 9 540 kW·h。

本绿色建筑 1~2 层空调用普通风冷多联机空调系统，其制冷、供热综合性能系数符合《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015—2021)的相关规定值，分别取 3.6 和 2.6。三层及以上房间空调采用地源热泵型水冷多联机空调系统。室外机的综合性能系数为 5.20。地源热泵的比例为空调系统的 53.1%，可灵活满足各层调节。

2.2 建材生产与运输阶段碳排放结果

主要材料的消耗量和碳排放量数据见表 1。碳排放因子取自碳排放计算标准以及文献[12]。部分用量较小或相应碳排放因子不详的材料取该类材料所属生产部门的隐含碳排放强度。

从表 1 可知，在各类建筑材料生产碳排放中，除其他材料外，混凝土和钢铁占比位列前二，分别为 27.81%和 24.51%，保温及防水材料的占比不高，不足 1%。

对建材的运输阶段，本绿色建筑运输距离根据实际绿色建筑中的 500 km 以内生产建筑材料使用占比计算书得到，未说明建材运输距离的取最大运输距离(100 km)，碳排放量总计 117.624 tCO_{2e}。结合建材生产的碳排放量，建材生产与运输阶段的碳排放量为 9 065.523 tCO_{2e}。

表 1 主要建筑材料消耗量及碳排放量

分类	消耗量	碳排放量/ (tCO _{2e})	合计/ (tCO _{2e})
钢铁	钢筋 903.077 t	2 113.200	2 185.00
	钢丝 9.364 t	22.240	
	型钢 3.950 t	9.125	
	钢板 10.555 t	25.332	
	圆钉 3.156 t	6.060	
	镀锌铁丝 3.190 t	7.497	
	预埋铁件 0.807 t	1.549	
水泥	水泥(32.5 MPa) 505.752 t	371.728	395.92
	水泥(42.5 MPa) 32.910 t	24.187	
砖与砌块	混凝土实心砖 111 931 块	34 083	568.83
	烧结煤矸石普通砖 44.200 m ³	1.008	
砂浆	加气混凝土砌块 1 976.570 m ³	533.739	293.02
	混合砂浆(M5) 2.892 m ³	0.683	
	混合砂浆(M7.5) 44.754 m ³	10.696	
	混合砂浆(M10) 22.511 m ³	5.268	
	水泥砂浆 95.288 m ³	22.107	
混凝土	抹灰砂浆 892.160 m ³	254.266	2 478.97
	商品混凝土(C10) 12.14 m ³	2.088	
	商品混凝土(C15) 549.07 m ³	97.734	
	商品混凝土(C20) 699.38 m ³	185.336	
	商品混凝土(C25) 1 513.39 m ³	443.423	
	商品混凝土(C30) 1 525.22 m ³	481.970	
	商品混凝土(C35) 2 727.00 m ³	989.901	
	商品混凝土(C40) 679.30 m ³	278.513	
原材料	砂子 74.32 t	0.187	342.78
	碎石 855.00 t	1.864	
	塘渣 6 242.00 t	16.790	
	木材 1 726.75 m ²	307.362	
	大白粉 2.44 t	0.366	
	腻子粉 35.35 t	14.140	
	水 12 163.22 m ³	2.068	
保温和防水材料	石油沥青油毡 3 224 m ²	1.644	28.57
	SBS 防水卷材 1 808.84 m ²	0.977	
	自黏聚合物改性沥青防水卷材 4 042.85 m ²	1.294	
	岩棉毡 0.770 t	1.525	
	聚苯乙烯泡沫板 0.075 t	0.377	
玻璃及门窗	挤塑聚苯板 3.717 t	22.749	292.82
	玻璃(通用)198.926 t	236.722	
	Low-E 玻璃 5.854 t	11.767	

续表			
分类	消耗量	碳排放量/ (tCO _{2e})	合计/ (tCO _{2e})
玻璃及 门窗 装饰装 修材料	钢化玻璃 12.132 t	21.716	132.09
	防火门 180.920 m ²	22.615	
	瓷砖 1 037.530 m ²	19.921	
	地砖 776.810 m ²	14.915	
	石膏板 846.690 m ²	3.725	
	轻钢大龙骨 978.590 m ²	3.719	
	乳胶漆 11.221 t	46.231	
	涂料、油漆 12.447 t	43.565	
	环氧树脂 0.004 t	0.011	
	钢支撑 13.071 t	30.194	
施工 辅材	钢模板 0.366 t	0.878	149.60
	木模板 88.240 m ³	15.707	
	零星卡具 10.924 t	25.235	
	脚手架钢管 12.200 t	30.866	
	钢脚手板 0.656 t	1.535	
	竹脚手片 37.640 m ³	34.252	
	安全网 2 954.350 m ²	10.931	
	其他金属制品 212.163 万元	708.285	
其他 材料	其他塑料制品 157.225 万元	395.940	2 046.84
	胶黏剂 6.735 万元	20.675	
	布 1.684 万元	3.231	
	其他水泥制品 156.089 万元	918.709	

2.3 建造阶段碳排放结果

施工过程中施工机械的台班单位能耗源自文献[15]。施工废物运输和其他临时用能的碳排放量根据施工现场单据等对机械耗油量和耗电量进行统计,具体结果见表 2。

2.4 运行阶段碳排放结果

运行阶段碳排放包括空调采暖和制冷、照明与电梯系统、建筑碳汇和可再生能源的减碳量。根据建筑施工图,采用 DeST 2.0 软件建立建筑模型,模拟建筑负荷,估算本绿色建筑正常运行阶段的碳

排放量,结果采暖为 3 295.687 tCO_{2e}、制冷 4 613 tCO_{2e}、照明与电梯 14 038.548 tCO_{2e}、建筑碳汇固碳量 4 706.038 tCO_{2e}、可再生能源减碳量 258.913 tCO_{2e}、运行阶段总碳排放量 16 982.284 tCO_{2e}。

2.5 拆除处置阶段碳排放结果

根据实际绿色建筑中可循环材料利用率计算书,得到建筑拆除建材的总重量为 19 559.104 t,可循环材料 2 176.368 t,由于部分材料减排碳排放因子缺失,本文只计算已知减排碳排放因子的可循环材料^[16]。最终得到拆除处置阶段的碳排放量为 241.233 tCO_{2e},估算可循环材料减碳量 2 544.696 tCO_{2e}。

2.6 全生命周期碳排放总量

计算结果表明,本绿色建筑全生命周期碳排放总量为 23 992.799 tCO_{2e},碳排放指标为 38.51 kgCO_{2e}·(m²·a)⁻¹,其中运行阶段占比最高,达 63.99%,其次是建材生产与运输阶段,占比 34.16%,建造阶段和拆除处置阶段(不考虑可循环材料减碳量),占比分别为 0.94%和 0.91%。由于绿色建筑中存在各种绿色建筑技术,使运行阶段的碳排放量相比普通建筑降低明显,但运行阶段碳排放量占比依旧最高。建材生产与运输阶段的碳排放量也需重点关注,尤其是建材生产阶段。可循环材料的碳减量达到本建筑生命周期碳排放的 10.61%,减碳量明显。未来应深入研究废弃建材的再利用,使绿色建筑更加低碳且可持续。

3 碳减排潜力分析

根据案例绿色建筑特点,选取屋顶、外墙、外窗和地源热泵 4 类绿色建筑技术,通过模拟对比分析了各类绿色建筑技术改变后的单位面积年均碳排放指标与原绿色建筑指标的差异。

3.1 屋顶

案例建筑采用的是绿色屋顶,种植面积为 650

表 2 建造阶段碳排放量

项目	碳排放因子	消耗量	碳排放量/(tCO _{2e})	总计/(tCO _{2e})
机械用电	0.703 5 kgCO _{2e} ·(kW·h) ⁻¹	251 972.037 kW·h	177.262	248.455
机械汽油	2.936 kgCO _{2e} ·kg ⁻¹	3 877.12 kg	11.383	
机械柴油	3.107 kgCO _{2e} ·kg ⁻¹	11 636.118 kg	36.153	
临时用电	0.703 5 kgCO _{2e} ·(kW·h) ⁻¹	33 182.438 kW·h	23.344	
施工废弃物运输	0.179 kgCO _{2e} ·(t·km) ⁻¹	1 750 t·km	0.313	

m^2 , 种植植物基本为低茎草植物. 根据文献[17]中植物固碳量, 可估算出本建筑绿色屋顶生命周期减碳量为 $11.375 \text{ tCO}_2\text{e}$, 可见其减碳量并不明显.

根据碳排放计算标准中数据, 华东区域电网碳排放因子为 $0.7035 \text{ kgCO}_2\text{e} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$, 可得本绿色建筑太阳能光伏系统 50 a 发电量的减碳量为 $258.913 \text{ tCO}_2\text{e}$. 由于本建筑使用的光伏电池板面积仅为 60 m^2 , 碳减排量不大, 因此通过增加光伏电池板面积(增加的光伏板面积由原种植面积提供)来提升屋顶的减碳量. 分别计算面积为 60、190、320、450、580、 710 m^2 光伏系统的碳减排量, 并以没有太阳能光伏系统情况为基准, 比较单位面积年均碳排放指标和变化率, 结果见表 3.

表 3 太阳能光伏系统碳排放结果

太阳能光伏 系统面积/ m^2	碳排放指标/ $\text{kgCO}_2\text{e} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	变化率/ %
0	38.92	—
60	38.51	-1.05
190	37.61	-3.37
320	36.72	-5.65
450	35.82	-7.97
580	34.92	-10.28
710	34.03	-12.56

从表 3 可知, 本绿色建筑中 60 m^2 光伏电池板相较于未使用光伏系统的碳排放变化较小, 随着光伏系统面积的增加, 单位面积年均碳排放指标呈下降趋势. 当绿色植物种植面积(710 m^2)全部替换为光伏系统时, 屋顶的碳减排量最大, 较基准值变化率达 12.56%.

3.2 外墙

本绿色建筑外墙采用抗裂砂浆(5.0 mm)+无机轻集料保温砂浆 B 型(20.0 mm)+水泥砂浆(10.0 mm)+加气混凝土砌块(240.0 mm)+无机轻集料保温砂浆 C 型(20.0 mm)+抗裂砂浆(5.0 mm), 传热系数为 $0.59 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$. 本研究将保温性能较好的加气混凝土砌块分别替换成常见的普通材料红黏土砖和混凝土砖后, 再进行模拟计算. 在模拟时考虑材料变换后碳排放因子的变化, 以此得出材料变换后隐含碳排放结果. 再结合运行碳排放变化, 最终得到建筑生命周期碳排放结果(表 4). 从表 4 可见, 将原建筑中外墙材料加气混凝土砌块更换

为红黏土砖与混凝土砖后, 建筑单位面积年均碳排放指标有所提高, 可见加气混凝土砌块碳减排效果较好.

表 4 外墙材料变化后模拟结果

材料	导热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	碳排放指标/ $\text{kgCO}_2\text{e} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	变化率/ %
加气混凝土砌块	0.16	38.51	—
红黏土砖	0.43	40.75	5.82
混凝土砖	0.74	41.48	7.71

3.3 外窗

本绿色建筑体型系数为 0.27, 外窗总面积为 2644.17 m^2 , 外墙总面积为 8393.34 m^2 , 窗墙比为 0.32, 东、南、西、北窗墙比分别为 0.35、0.31、0.27、0.32, 外窗气密性均为 6 级, 外窗传热系数 $2.7 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 满足《公共建筑节能设计标准》(GB 50189—2015)中夏热冬冷地区外窗传热系数不大于 $3.0 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 的设计要求. 将本绿色建筑外窗传热系数与《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350—2019)中外窗传热系数比较发现, 标准中夏热冬冷地区公共建筑外窗传热系数不大于 $2.2 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 与本绿色建筑外窗传热系数 $2.7 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 相差较大, 因此分别将外窗传热系数设置为 1.8、2.1、2.4、 $3.0 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 进行模拟计算, 并与原建筑的外窗传热系数对比, 以传热系数 $3.0 \text{ W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$ 为基准值, 计算结果见表 5.

表 5 外窗传热系数变化后模拟结果

外窗传热系数/ $\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	碳排放指标/ $\text{kgCO}_2\text{e} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	变化率/ %
3.0	38.72	—
2.7	38.51	-0.54
2.4	38.31	-1.06
2.1	38.10	-1.60
1.8	37.90	-2.12

从表 5 可见, 随着外窗传热系数的降低, 建筑的碳排放量相应减少, 但效果不明显.

3.4 地源热泵

为研究地源热泵的碳减排潜力, 将原建筑中 53.1%地源热泵换成普通空调后进行碳排放指标模拟计算, 并与原建筑进行比较, 结果见表 6. 从表 6 可知, 地源热泵相较于普通空调碳排放更少, 其原因是地源热泵的综合性能系数更高, 能高效利用

能源. 本绿色建筑碳排放相较于基准值减少了 8.02%. 因此夏热冬冷地区可采用地源热泵或其他高能效比空调, 以减少建筑的碳排放.

表6 地源热泵碳排放计算结果

类别	碳排放指标/ $\text{kgCO}_2\text{e}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	变化率/%
普通空调	41.87	-
53.1%地源热泵	38.51	-8.02

4 讨论与分析

采用本文提出的基于绿色建筑技术的碳排放计算方法, 可便捷得到碳减排结果. 从计算结果可知, 绿色屋顶的植物固碳量受限于植物类型(多为低茎植物), 固碳量不明显. 若将屋顶中的植物种植面积置换为太阳能光伏板, 减碳率可达 12.56% (此结果仅适用本绿色建筑). 由于大多数建筑的光伏板安装于屋顶, 因此对不同楼层的建筑, 其屋顶碳减排效果各不相同. 在屋顶面积不变的情况下, 低层建筑比高层建筑在屋顶增加光伏板面积后减碳率更高, 碳减排效果更好, 但具体建造还需考虑安装太阳能光伏板的成本. 由此可见, 屋顶具有较大的碳减排潜力.

本绿色建筑的外墙碳排放较普通建筑明显减少, 这是由于较低的传热系数外墙材料能使墙体有更好的隔热保温性, 让建筑的室内温度更稳定. 但在碳排放计算中要考虑材料隐含碳的变化, 以往研究很少考虑这个因素. 本绿色建筑采用的加气混凝土砌块, 其碳排放因子为 $270 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于红黏土砖和混凝土砖的 $295 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $336 \text{ kgCO}_2\text{e}\cdot\text{m}^{-3}$, 因此这部分隐含碳较普通建材隐含碳减少明显. 综合建筑能耗与隐含碳的变化可知, 本绿色建筑外墙碳减排量明显. 今后在新建绿色建筑时, 外墙可采用如加气混凝土砌块这种轻质多孔、强度高的新型建材, 以降低建筑碳排放.

外窗的碳减排潜力与其传热系数的关系不大, 这可能与夏热冬冷地区窗墙比较大、绿色建筑通风设计有关, 空气流动一定程度上削弱了外窗的保温隔热作用, 使得能耗没有随外窗传热系数变化产生明显变化, 从而使碳排放变化较小. 后续应注重外窗在遮阳等其他技术的碳减排潜力研究.

采用地源热泵的建筑碳排放相较于普通建筑

更少. 夏热冬冷地区空调在冬季和夏季长时间运行, 因此空调系统的节能效果对建筑生命周期碳排放影响较大. 本绿色建筑采用 53.1%地源热泵, 综合性能系数为 5.20, 碳排放量相较于基准值减少了 8.02%. 鉴于本绿色建筑地源热泵的节能效果仅相较于普通空调较为明显. 随着科技的进步, 综合性能系数高的空调会不断涌现, 若使用这类空调, 用电量少, 碳排放也将更少.

5 结论

(1)绿色建筑全生命周期中碳排放量占比最高的是运行阶段, 为 63.99%. 其次是建材生产与运输阶段, 占比 34.16%. 运行阶段碳排放占比较普通建筑有所降低, 这与绿色建筑中各类绿色建筑技术有关, 如地源热泵、太阳能光伏板等. 此外, 建筑碳汇和可循环材料的减碳量有较大作用.

(2)在夏热冬冷地区, 地源热泵、太阳能光伏板具有较好的碳减排效果. 拥有低导热系数和低碳排放因子的外墙材料可使碳减排潜力更大. 外窗传热系数的变化对建筑碳排放的影响不大.

(3)基于案例建筑的 4 类绿色建筑技术碳减排潜力的分析, 提出了碳减排的建议和措施. 后续研究应考虑成本, 以提高建筑全生命周期碳减排潜力分析的全面性和综合性.

参考文献:

- [1] 潘毅群, 魏晋杰, 梁育民, 等. 绿色建筑节能技术在典型公共建筑运行中碳减排潜力评估[J]. 暖通空调, 2022, 52(4):83-89, 131.
- [2] 李岳岩, 张凯, 李金璐. 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(自然科学版), 2021, 53(5):737-745.
- [3] WU X Y, PENG B, LIN B R. A dynamic life cycle carbon emission assessment on green and non-green buildings in China[J]. Energy and Buildings, 2017, 149:272-281.
- [4] 肖旭东. 绿色建筑生命周期碳排放及生命周期成本研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [5] ROBATI M, DALY D, KOKOGIANNAKIS G. A method of uncertainty analysis for whole-life embodied carbon emissions ($\text{CO}_2\text{-e}$) of building materials of a net-zero energy building in Australia[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 225:541-553.
- [6] WANG T, SEO S, LIAO P C, et al. GHG emission

- reduction performance of state-of-the-art green buildings: review of two case studies[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 56:484-493.
- [7] KANG Y T, XU W, WU J L, et al. Study on comprehensive whole life carbon emission reduction potential and economic feasibility impact based on progressive energy-saving targets: a typical renovated ultra-low energy office[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 58:105029.
- [8] 彭卓, 郭春梅, 汪磊磊, 等. 绿色建筑全生命周期 CO₂ 排放敏感性与减碳潜力研究[J]. *天津城建大学学报*, 2021, 27(6):436-441.
- [9] 杜星璇. 夏热冬冷地区绿色建筑围护结构节能体系优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2019.
- [10] SU X, TIAN S C, SHAO X L, et al. Embodied and operational energy and carbon emissions of passive building in HSCW zone in China: a case study[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 222:110090.
- [11] DONG Z, ZHAO K, LIU Y Q, et al. Performance investigation of a net-zero energy building in hot summer and cold winter zone[J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 43:103192.
- [12] 张孝存, 王凤来. 建筑工程碳排放计量[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [13] 张孝存, 郑荣跃, 王凤来. 清单选择对乡村建筑物碳排放的影响分析[J]. *工程管理学报*, 2020, 34(3):51-55.
- [14] XU L, ZHANG S F, YANG M S, et al. Environmental effects of China's solar photovoltaic industry during 2011–2016: a life cycle assessment approach[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170:310-329.
- [15] 浙江省建设工程造价管理总站. 浙江省建设工程施工机械台班费用定额[M]. 北京: 中国计划出版社, 2018.
- [16] WANG J Y, WU H Y, DUAN H B, et al. Combining life cycle assessment and Building Information Modelling to account for carbon emission of building demolition waste: a case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 172:3154-3166.
- [17] 聂梅生, 秦佑国, 江亿. 中国绿色低碳住区技术评估手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

Analysis of carbon emission and carbon reduction potential of green buildings in hot summer and cold winter zone: a case of the Science and Technology Service Building of Ningbo University

SUN Jiewei, YAN Xiaodong

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: An existing green building is selected as case study to study the life cycle carbon emissions of green buildings in hot summer and cold winter zone in China. The total life cycle carbon emissions of 23 992.779 tCO_{2e} and the average annual carbon emission index per unit area of 38.51 kgCO_{2e}·(m²·a)⁻¹ are obtained by combining the process-based method and input-output method. In order to explore the carbon emission reduction potential of various green building technologies, a calculation method for carbon emission reduction of green building technologies based on roof, exterior wall, exterior window and air conditioning system was proposed. The simulations were carried out from four aspects: adding photovoltaic panel roof, changing exterior wall material, adopting exterior window with different heat transfer coefficient, and replacing in situ source heat pump with ordinary air conditioning. The carbon emission intensity of those simulations was compared with that of the original green building. The results show that ground source heat pump and solar photovoltaic panel have better carbon emission reduction potential, which can reduce carbon emissions by 8.02% and 12.56% respectively. Considering the carbon implied by the external wall material, the selection of the material has a great influence on carbon emission, while the change of the heat transfer coefficient of the external window has no obvious influence on carbon emission.

Key words: green buildings; carbon reduction potential; life cycle assessment; DeST simulation

(责任编辑 史小丽)