

碳达峰下建筑材料全生命周期碳足迹核算与低碳路径优化

龚亦凡, 王洪雨

(南通市第一人民医院, 南通 226001)

摘 要: 为解决医疗建筑材料全生命周期碳排放核算边界模糊、隐性排放难量化及低碳路径针对性不足的问题, 以新建 360 000 m² 三级综合医院为研究对象, 基于 LCA 法构建 IPCC 碳排放系数法与物料衡算法耦合模型, 覆盖六大生命周期阶段, 围绕碳排放强度、阶段占比等核心指标, 开展实证分析与路径优化研究。结果表明: 医院建材碳排放呈显著阶段集中性, 使用维护阶段占比 54.3% 为核心源, 生产加工阶段占比 20.5% 次之, 手术室与住院楼合计占比超 50%; 防辐射混凝土碳排放强度最高 (3.2 tCO₂e/m³), 混凝土因用量大成为总排放第一来源 (32.1%), 资源化再生较掩埋处置减排率达 78.8%。绿色施工工艺较传统工艺减排 40.1%, “绿色施工+无菌优化” 复合工艺可降低碳排放 25% 以上, 成本增幅仅 5%~8%。最终构建四位一体低碳路径, 实现碳排放系统性降低, 为医疗建筑行业践行 “双碳” 目标提供理论与实践支撑。

关键词: 碳达峰; 建筑材料; 全生命周期碳足迹; 碳排放核算; 低碳路径优化; LCA 法

中图分类号: F426 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 05-0091-08

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.014

Carbon Footprint Accounting and Low-Carbon Path Optimization of the Whole Life Cycle of Building Materials under Carbon Peaking

GONG Yifan, WANG Hongyu

(Nantong First People's Hospital, Nantong 226001, China)

Abstract: To address the problems of ambiguous accounting boundaries, difficult quantification of hidden emissions, and insufficient pertinence of low-carbon paths in the whole life cycle carbon emission accounting of medical building materials, this study takes a newly-built 360 000 m² tertiary general hospital as the research object. Based on the Life Cycle Assessment (LCA) method, a coupled model combining the IPCC carbon emission coefficient method and the material balance method was constructed, covering six life cycle stages. Empirical analysis and path optimization research were carried out focusing on core indicators such as carbon emission intensity and stage proportion. The results show that the carbon emissions of hospital building materials present significant stage concentration: the operation and maintenance stage accounts for 54.3%, which is the core source, followed by the production and processing stage accounting for 20.5%; the operating rooms and inpatient buildings

项目来源: 南通市科技创新智库立项课题 (CXZK202527)。

作者简介: 龚亦凡 (1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 医院基本建设、后勤管理。

通信作者: 王洪雨 (1987—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 医院基本建设、后勤管理。

收稿日期: 2026-01-29

研究与应用

together account for more than 50% of the total emissions. Radiation-shielding concrete has the highest carbon emission intensity ($3.2 \text{ tCO}_2\text{e}/\text{m}^3$), and concrete ranks first in total emissions due to its large consumption (32.1%). The emission reduction rate of resourceful recycling and disposal reaches 78.8%. Green construction technologies achieve a 40.1% emission reduction compared with traditional technologies, and the composite technology of "green construction + sterility optimization" can reduce carbon emissions in special areas by more than 20% with a cost increase of only 5%–8%. Finally, a four-in-one low-carbon path was established to achieve systematic reduction of carbon emissions, providing theoretical and practical support for the medical construction industry to implement the "dual carbon" goals.

Key words: carbon peak; building materials; whole life cycle carbon footprint; carbon emission accounting; low-carbon path optimization; LCA

0 引言

在全球气候持续变暖以及我国“双碳”战略目标的共同驱动下,建筑行业作为碳排放的重要来源,其低碳转型已经逐步成为支撑国家可持续发展的关键工作^[1]。据统计,我国建筑全过程碳排放大约占全国碳排放总量的 50%,其中建筑材料在生产、运输以及使用阶段所带来的碳排放贡献超过 70%^[2]。

近年来,国内学者围绕建筑材料碳足迹已经开展了较为丰富的研究工作。卢昱杰等^[3]指出相较于现浇混凝土建筑,装配式钢结构以及预制混凝土建筑的平均减碳率能够达到 12.54%;夏文丽^[4]凭借碳排放因子法开展研究后表明,建筑涂料的碳足迹主要集中在原材料获取以及产品生产这两个阶段;张欣怡等^[5]在梳理现代木结构建筑碳足迹评价研究进展的过程中发现,国内外学者在研究范围以及评价方法上存在显著的不一致性;陈娟等^[6]指出我国目前缺乏系统且完善的碳足迹测算及评估体系,并基于混合生命周期评价方法构建了相应的计算体系;苏鹏宇等^[7]借助对现代木结构建筑全生命周期碳足迹的定量研究,发现其物化阶段的碳排放较传统钢筋混凝土结构以及钢结构更低;李静等^[8]运用 REVIT 软件构建 BIM 模型来获取建材消耗信息,建立起装配式混凝土建筑物物化阶段的碳足迹评价模型;张旺^[9]基于 PB-LCA 方法构建了湖南省宏观建筑碳足迹模型,发现建材准备和建筑运行是碳排放的主要阶段;张楠等^[10]通过梳理国内外建筑全生命周期碳足迹评价标准,厘清了各标准之间的逻辑关系,指出现行标准存在的不足;李慧等^[11]发现钢筋混凝土构造在使用与维护阶段的碳足迹,占全生命周期碳足迹的 34%~70%;李静等^[12]结合 BIM 技术建

立起物化阶段碳足迹快速评价模型,为碳足迹核算工作提供了系统化工具;肖雅心等^[13]对北京市住宅建筑 20 年生命周期碳足迹的研究表明,受能源系统与建材生产系统减排贡献的影响;王伟等^[14]构建了模块化钢结构学校建筑碳排放计算模型,证实模块化技术在物化阶段减碳以及循环利用方面具备优势;乔军等^[15]面向半地下变电站,对其全生命周期碳排放进行量化分析并提出多维度减碳策略。总体分析,现有研究虽然从多个角度推动了对建筑材料碳足迹的理解。从不同建筑类型、材料、阶段及方法等维度,揭示了建筑碳足迹的特性与影响因素,为建筑业低碳发展提供了多元理论支撑以及技术路径。

综上所述,虽有较多研究对建筑工程中的材料碳足迹进行分析,但对医院建筑材料全生命周期碳足迹研究与分析较少。因此,系统梳理医院建筑材料全生命周期碳足迹的核算方法以及影响因素,并结合我国建筑行业发展现状,构建多场景下的低碳化路径优化模型,以期减排实践提供相应的技术支撑。

1 工程概况与核算体系构建

1.1 工程概况

以某新建三级综合医院为研究案例,其建筑面积为 $360\,000 \text{ m}^2$,共 15 层(地上 13 层、地下 2 层)。建筑工程包括门诊、医技、手术室、住院楼和后勤辅助用房等功能。主要建筑材料包括混凝土、钢材、保温材料、抗菌板、防辐射材料、防水材料、门窗型材等。

1.2 生命周期界定

基于 LCA 法,将建筑材料全生命周期划分为六大阶段,各阶段核心内容见表 1。

研究与应用

表 1 生命周期阶段划分与碳排放来源
Table 1 Life cycle stages and carbon emission sources

阶段	碳排放来源
原料开采	开采设备能耗、原料运输能耗及生态破坏间接排放
生产加工	化石能源消耗（煤炭、天然气）、生产工艺排放及电力消耗
运输仓储	运输工具（货车、船舶）能耗及仓储设备能耗
施工装配	施工机械能耗、辅助材料（如外加剂）消耗及施工废料排放
使用维护	维护材料消耗、维护设备能耗及老旧建材替换产生的间接排放
废弃处置	设备能耗、填埋气体（CH ₄ ）排放及回收再加工能耗

1.3 核算边界与功能单位

核算边界采用“摇篮到坟墓”上述六大阶段，排除建材生产所需设备制造、厂房建设等间接排放（避免重复核算）。功能单位选取“1 t 成品建材”作为统一功能单位，确保不同材料碳排放强度具有可比性。

1.4 核算模型与参数选取

1.4.1 核算模型

IPCC 碳排放系数法，结合建筑材料的全生命周期“原料开采、生产加工、运输仓储、施工装配和使用维护以及废弃处置”6 个阶段，构建全生命周期碳足迹（LCFP）核算公式为：

$$LCFP = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^n M_{i,j} \times \alpha_{i,j} + \sum_{k=1}^m \Delta C_{i,k} \right) - \sum_{i=1}^n S_i \quad (1)$$

$$C = \sum_{j=1}^n M_j \times \alpha_j \quad (2)$$

式中：LCFP 为全生命周期碳足迹总量，tCO₂；M_{i,j} 为第 i 阶段第 j 种建筑材料的消耗量或排放量，t；α_{i,j} 为第 i 阶段第 j 种建筑材料对应的 IPCC 碳排放系数，tCO₂/t；ΔC_{i,k} 为第 i 阶段第 k 种物料转化过程中，通过建筑材料衡算法核算的隐性碳排放量，tCO₂；S_i 为第 i 阶段的碳汇量或碳回收量，tCO₂；C 为某阶段碳排放量，tCO₂；M_j 为第 j 种建筑材料的消耗量或排放量，t；α_j 为第 j 种建筑材料对应的碳排放系数，tCO₂/t。

1.4.2 模型参数选取

结合医院建设的实际案例：混凝土碳排放因素为 2.8 tCO₂e/m³、钢材碳排放因素为 1.9 tCO₂e/t、聚氨酯保温材料碳排放因素为 0.8 tCO₂e/m³、抗菌板为 0.35 tCO₂e/m²、防辐射混凝土碳排放因素为

3.2 tCO₂e/m³，运输阶段的碳排放因子采用柴油货车计算，具体数值为 0.000 28 tCO₂e/（km·t）。

1.5 核算流程

构建建筑材料全生命周期碳足迹核算与低碳路径优化流程图，明确核算逻辑、数据来源、图表分析与路径优化的关联关系，具体流程如图 1 所示。

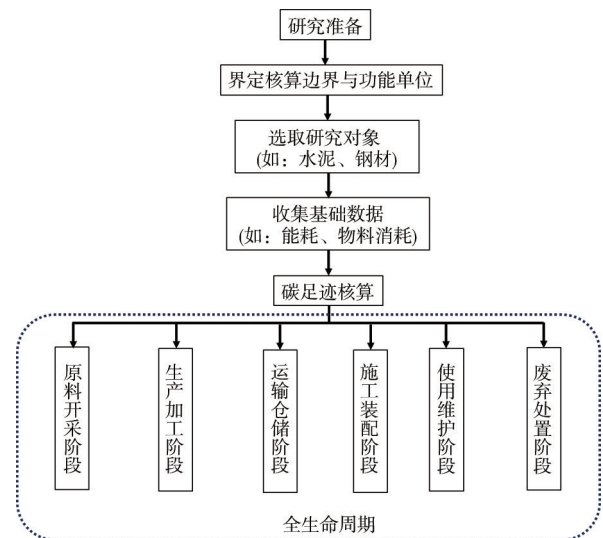


图 1 建筑材料全生命周期碳足迹核算流程

Fig. 1 Carbon footprint accounting process for building materials across the full life cycle

2 建筑材料全生命周期碳足迹核算

2.1 各阶段碳排放占比

基于式（1）的碳足迹计算公式，对全生命周期“原料开采、生产加工、运输仓储、施工装配、使用维护和废弃处置”6 个阶段碳排放占比进行统计，各阶段碳排放占比如图 2 所示。

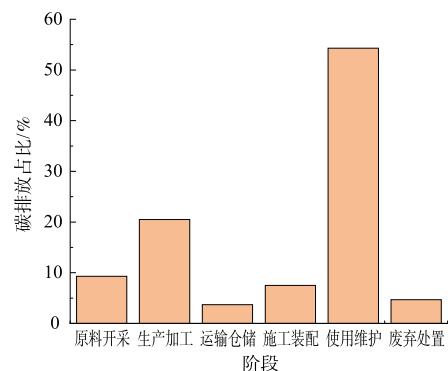


图 2 医院建筑材料全生命周期各阶段碳排放占比图

Fig. 2 Proportion of carbon emissions at various stages of the full life cycle for hospital building materials

研究与应用

医院建筑材料全生命周期的碳排放呈现出显著的阶段集中特性,其中使用维护阶段的碳排放占比最高,达到了54.3%,超过了其他阶段。主要原因在于医院作为24 h持续运营的场所,空调、通风以及消毒设备都需要保持持续运行的状态,并且手术室、ICU等区域还得维持恒定的温度(范围在22~25℃)与湿度(范围在50%~60%),这就使得保温、隔热材料因能耗关联产生的碳排放大幅增加。同时,建筑材料在运维阶段的修复与替换频率也更高,比如抗菌板会因频繁消毒而容易出现磨损,每年的修复替换率约为3%~5%,远高于普通建筑1%~2%的,进而进一步推高了运维阶段的碳排放。

生产加工阶段的碳排放占比第二,为20.5%,主要源于混凝土、钢材等核心材料的生产过程。其中,防辐射混凝土因添加了铅、钡等重金属骨料,其生产过程的能耗比普通混凝土高出30%以上,该材料的碳排放占生产加工阶段总排放的18.2%。且该材料主要应用在医院放射科,是医院特有的高碳排放材料。原材料开采阶段的占比为9.3%,运输仓储与废弃处置阶段的占比合计为3.7%,施工装配阶段占比7.5%,这部分碳排放主要源于施工机械的能耗以及材料切割产生的损耗。比如手术室的无菌施工需要开展精细化操作,其材料损耗率比普通区域高出2%~3%,间接增加了整体碳排放。

2.2 核心建筑材料生产加工阶段碳排放强度

基于新建三级综合医院在建设过程中,混凝土、钢材、保温材料、抗菌瓷砖、防辐射材料、防水材料 and 门窗型材等材料使用情况,利用式(1)、(2)计算出各建筑材料在全生命周期过程中的碳排放强度如图3所示。

防辐射混凝土的碳排放强度最高,达到了 $3.2 \text{ tCO}_2\text{e}/\text{m}^3$,其次分别是混凝土的 $2.8 \text{ tCO}_2\text{e}/\text{m}^3$ 以及钢材的 $1.9 \text{ tCO}_2\text{e}/\text{t}$,抗菌板的碳排放强度则最低,仅为 $0.35 \text{ tCO}_2\text{e}/\text{m}^2$ 。这一结果与材料本身的生产工艺、成分构成以及实际应用场景都密切相关。防辐射混凝土为了满足医院放射科、核医学科的防辐射使用需求,需要掺入大量高密度骨料,比如铅砂、钡砂等,这类骨料的开采与加工工作能耗极大程度上偏高,并且在生产过程中还需进行特殊配比,进而导致其碳排放强度明显高于普通混凝土。

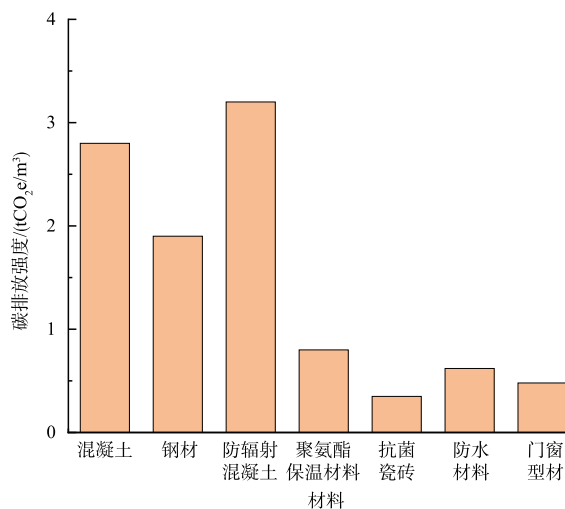


图3 医院核心建筑材料全生命周期碳排放强度
Fig. 3 Carbon emission intensity across the life cycle of key hospital building materials

为分析上述建筑材料在全生命周期碳排放占比,将材料用量与碳排放总量关联,对其在建筑施工中所占比例进行计算,如图4所示。

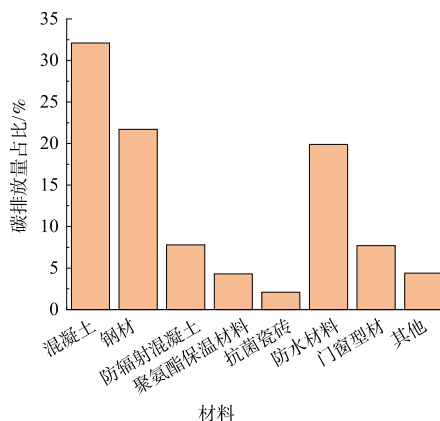


图4 各材料全生命周期碳排放占比
Fig. 4 Carbon emission share of various material across the life cycle

混凝土作为医院建筑的主导材料,用量达到了28 000 m³,尽管它的碳排放强度低于防辐射混凝土,但其总碳排放量占比却达到32.1%,是医院建筑材料碳排放的第一大来源;钢材的用量次之,为1 200 t,总碳排放占比为21.7%;防辐射混凝土的用量虽少,仅800 m³,不过鉴于其碳排放强度高,总碳排放占比依旧能达到7.8%。

2.3 运输仓储碳排放

由图5可知,运输距离在101~200 km区间的材料,其碳排总量达到最高水平,数值为102.3 tCO₂e,

研究与应用

占运输阶段总碳排放量的 26.7%。此类材料为本地无法生产的医疗专项材料,如进口抗菌洁净板、定制气密门,需要从周边省份进行调运;运输距离超过 500 km,碳排总量为 64.9 tCO₂e,占比 16.9%,主要涵盖特殊钢材以及防辐射骨料,运输方式选用铁路为主,单位距离的碳排放量低于公路运输方式;运输距离 0~50 km 的本地材料,碳排总量最低,仅为 49.3 tCO₂e,占比 12.9%,主要为普通混凝土、板材、瓷砖等常规类型材料。数据显示,运输距离以及运输方式对碳排放量的影响极为显著,优先选用本地及周边可生产的医疗专项材料,能够有效降低运输阶段的碳排放量。

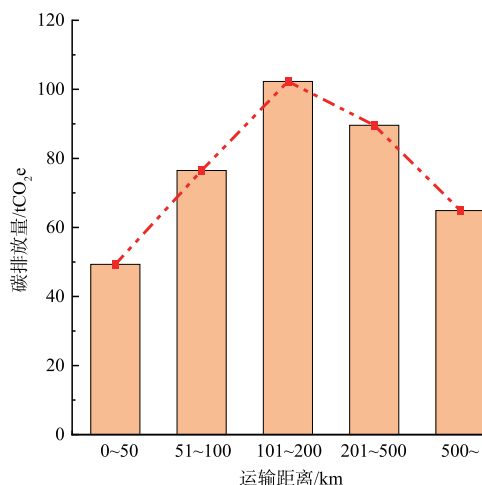


图5 不同材料对应运输距离的碳排量

Fig. 5 Carbon emissions corresponding to transportation distances for different materials

2.4 建筑施工碳排放总量对比

2.4.1 不同建筑区碳排放总量对比

由图6可知,住院楼区域建筑材料碳排放总量占比最高,达到 31.2%,其次是手术室区域,占比 23.5%,这两个区域合计占比超过 50%,是医院建筑材料碳排放的核心区域。住院楼区域碳排放占比偏高,主要原因是该区域建筑面积为 144 000 m²,占总建筑面积的 40%,材料用量也相应偏大,且在运维阶段还需持续保障室内温度与通风条件,保温材料能耗所关联的碳排放影响极为显著。同时,住院楼的墙体、地面材料需具备高耐久性 & 防菌性,混凝土、抗菌板的用量较大,导致该区域的碳排放总量最高。

手术室区域尽管建筑面积较小,总面积约

8 000 m²,但碳排放占比仍达 23.5%。诊疗楼区域、行政后勤区域以及机房车库等其他区域的碳排放占比,分别为 18.7%、12.1% 和 14.5%。这一结果表明,医院建筑的低碳建设重点在住院楼与手术室这两大区域,针对性地制定相应的优化策略。

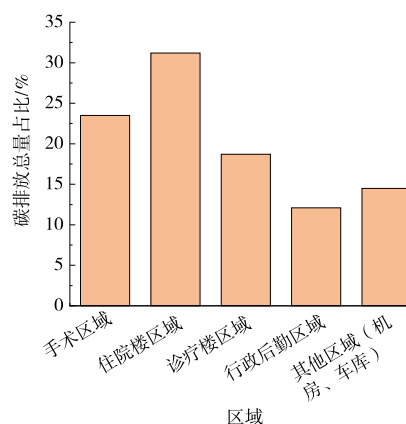


图6 医院不同区域建筑施工碳排放总量对比

Fig. 6 Comparison of total construction carbon emissions in different areas of the hospital

2.4.2 不同施工工艺碳排放对比

由图7可知,医院建筑在施工阶段,不同工艺所产生的材料碳排放差异极为显著。其中,无菌施工工艺的碳排放强度最高,达到了 142.3 tCO₂e/km²;原因在于无菌施工工艺主要应用在手术室、ICU 等特殊区域,为保障施工环境达到无菌标准,需要采取封闭式施工、高频次消毒以及精细化操作等方式,这就使得材料损耗率有所增加,比传统工艺高出 5%~8%,并且施工机械的运行时间也会相应延长,进而间接导致材料碳排放增加,这便是它碳排放偏高的核心缘由。传统浇筑工艺的碳排放强度次之,为 125.5 tCO₂e/km²,其碳排放主要源于现场搅拌混凝土所消耗的能耗、材料运输的往返过程,以及施工垃圾产生的碳排放。

预制装配工艺的碳排放强度可降至 89.4 tCO₂e/km²,相较于传统工艺可实现 28.7% 的碳减排。因为构件是在工厂内完成预制的,能够减少现场施工能耗及材料损耗量,同时预制构件的生产过程还可实现规模化低碳生产,缩短施工周期,减少临时仓储环节的能耗。绿色施工工艺即包含装配式施工、节能机械运用以及建筑垃圾回收的工艺,其碳排放强度最低,达 75.1 tCO₂e/km²,相较于传统工艺可实现

研究与应用

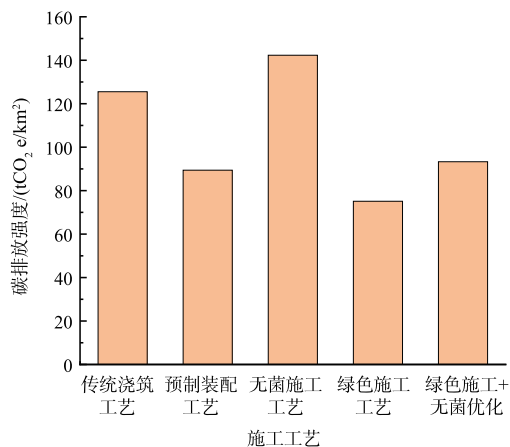


图7 医院建筑施工阶段不同工艺材料碳排放强度
Fig. 7 Carbon emission intensity of different processes and materials during the hospital construction phase

40.1%的碳减排。该工艺借助电动施工机械、对现场建筑垃圾进行回收再利用（如把废弃混凝土破碎成骨料重新利用），以及落实节水节电措施等方式，进一步降低与材料相关的碳排放。而采用“绿色施工+无菌优化”复合工艺后，碳排放强度可降至93.3 tCO₂e/km²，相较于传统工艺可实现25.7%的碳减排。

结合分析得知，施工工艺的优化工作，对医院建筑材料碳排放的减排量大约在12%~15%之间，并且投资成本的增加幅度较小，绿色施工工艺较传统工艺的成本仅增加5%~8%，适合在医院新建以及改造项目中推广运用。

2.5 使用维护

由图8可知，从第1年的1 280 tCO₂e增长至第30年的2 100 tCO₂e，30年间增长幅度达到64.1%，增长速率还呈现出阶段性加快的特性。第1~10年期间增长相对平缓，年均增长率维持在约2.7%，主要缘由是建筑材料处于稳定运行期，修复及替换的用量较少，与能耗相关联的碳排放也保持相对稳定；第10~20年的增长率提升至4.5%，鉴于部分材料开始进入老化阶段，比如保温材料老化会导致隔热性能下降，进而使空调能耗增加，同时地面、墙面材料的修复量也在逐年上升；20年后增长率进一步提高至5.8%，此时材料老化问题不断加剧，部分核心材料即门窗型材、防水材料需进行大面积替换，并且设备老化会导致能耗效率下降，间接提高了与材料相关联的碳排放。

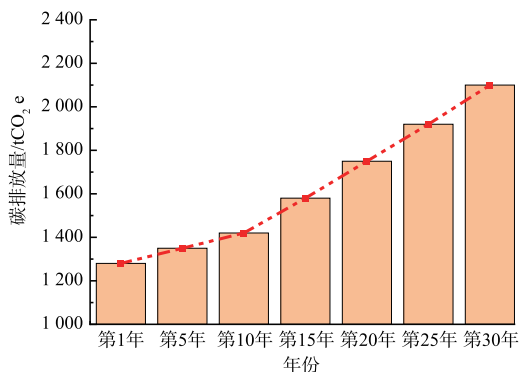


图8 运维阶段碳排放年度变化
Fig. 8 Annual variation in carbon emissions during the operational phase

2.6 废弃处置阶段

由图9可知，不同处理方式产生的碳排放存在极大程度上的差异，其中焚烧处置的碳排放强度最高，达到1.2 tCO₂e/t，资源化再生的碳排放强度则最低，仅为0.18 tCO₂e/t，回收再利用以及资源化再生这两种方式的减排效果都十分显著。

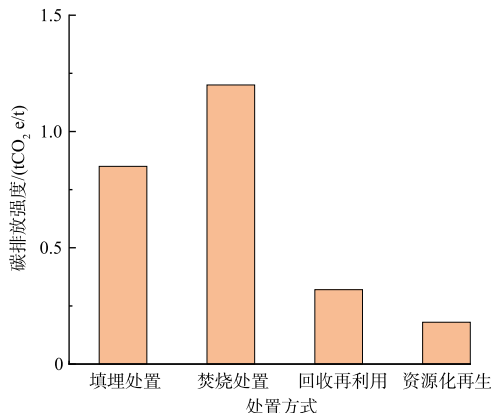


图9 不同处置方式单位质量碳排放强度
Fig. 9 Carbon emission intensity per unit mass for different disposal methods

焚烧处置碳排放较高，原因在于医院用部分建筑材料，比如保温材料、防水材料，在焚烧过程中会释放出大量温室气体。填埋处置的碳排放强度为0.85 tCO₂e/t，虽低于焚烧处置，但会占用宝贵的土地资源，并且部分材料在填埋后可能造成土壤污染，还需进行特殊处理，这会进一步增加碳排放。回收再利用的碳排放强度可降至0.32 tCO₂e/t，适用于钢材、门窗型材等可直接回收的材料。相较于掩埋处理，资源化再生减排率达78.8%。

3 建筑材料低碳化路径优化

3.1 材料选择优化

优先选用低碳、高耐久且功能性适配的绿色建材，针对不同医疗区域来开展分类施策工作。住院楼、行政区域可全面推广再生骨料混凝土、高强度低合金钢材、岩棉保温材料等绿色建材替代传统高碳排放材料；手术室、ICU 等特殊区域，选用经医疗认证的低碳抗菌材料，比如水性抗菌涂料、再生铝合金无菌地板，控制再生骨料混凝土的替代比例，确保材料的强度以及抗菌性能达标；放射科可用新型防辐射涂料替代部分防辐射混凝土，极大程度上降低碳排放强度，同时满足防辐射方面的需求。建立医院绿色建材准入清单，明确碳排放强度阈值与各项功能指标，严禁运用高碳排放、低耐久性的材料。

3.2 工艺优化

针对新建医院项目，优先采用预制装配结合绿色施工的复合工艺，以减少现场施工的能耗以及材料损耗量和缩短整体施工周期；在手术室等特殊区域采用“绿色施工+无菌优化”的工艺模式，借助封闭式施工、电动施工机械、现场垃圾回收等措施，降低碳排放总量。在既有医院改造项目时，鉴于材料老化相关数据，针对性采用模块化改造工艺，减少整体拆除作业与材料浪费情况，推广建筑垃圾资源化再生利用技术，比如将废弃混凝土加工为再生骨料进行回用。加强施工过程中的碳排放管控工作，建立施工阶段材料碳排放监测体系，实时调整施工方案内容。

3.3 运维管理优化

鉴于运维阶段碳排放占比最高这一特性，分阶段开展管控策略的实施工作。前期（1~10 年）强化材料的日常养护工作，定期对保温材料、防水材料的性能进行检查，及时对小范围损坏部分进行修复，延长材料的稳定使用周期；中期（11~20 年）更换老化材料时，优先选用高性能绿色建材，同时优化空调以及通风系统，提高能源利用效率，降低与材料能耗相关联的碳排放；后期（21 年以上）结合既有建筑改造工程，全面更新材料体系，推广智能化运维技术，实时监测材料性能及能耗数据，实现精

准管控目标。

3.4 完善使用与废弃处理优化

根据上述全生命周期碳排放核算，可知提升材料回收利用率是末端减排的关键。一是建立起医院建筑材料全生命周期台账，详细记录材料的使用情况、维护周期及废弃时间，为回收利用工作提供数据支撑。二是分类推进材料回收工作，对于钢材、铝合金等金属材料，建立专项回收机制，把回收利用率目标提高至 50% 以上；对于混凝土等无机材料，破碎后当作再生骨料运用到医院道路、停车场等附属设施建设当中；对于医疗专项材料，研发专用回收处理技术，降低回收成本，同时提高回收利用率。三是推广绿色维护理念，定期对建筑材料开展维护保养工作，延长其使用寿命，减少更换频率，进而降低使用阶段的碳排放。

4 结论

以新建 360 000 m² 三级综合医院为研究对象，基于 LCA 法来构建 IPCC 碳排放系数法与物料衡算法的耦合模型，覆盖了原料开采、生产加工、运输仓储、施工装配、使用维护、废弃处置这六大生命周期阶段，围绕碳排放强度、阶段占比、区域差异、工艺影响及处置方式等核心内容开展实证分析工作，进而对碳达峰目标下医院建筑材料全生命周期碳足迹的核算方法以及低碳路径优化策略进行研究。得出以下结论：

（1）医院建筑材料全生命周期的碳排放，呈现出显著的阶段集中性以及场景特殊性，使用维护阶段是核心排放来源，占比达到 54.3%。生产加工阶段则位居其次，占比为 20.5%。

（2）构建而成的 IPCC 碳排放系数法与物料衡算法耦合核算模型，能够有效覆盖建筑材料“摇篮到坟墓”的六大阶段，精准量化显性及隐性碳排放。

（3）医院核心建筑材料及处置方式的碳排放差异极大程度上存在：防辐射混凝土的碳排放强度最高，数值为 3.2 tCO₂e/m³；混凝土因用量大，成为总碳排放的第一来源，占比 32.1%。在废弃处置阶段中，资源化再生方式的减排效果最优，焚烧处置的碳排放强度最高，通过分类处置能实现末端的高效减排。

研究与应用

(4) 施工工艺优化拥有显著的减排潜力以及推广价值,绿色施工工艺相较传统浇筑工艺可减排 40.1%,预制装配工艺较传统工艺减排 28.7%,“绿色施工+无菌优化”复合工艺可排放降低 25%以上,且成本增幅仅为 5%~8%,契合医院新建与改造项目的经济性需求。

(5) 构建“材料选择-工艺优化-运维管理-废弃处置”四位一体的低碳化路径,借助推广低碳绿色建材、运用预制装配与绿色施工复合工艺、实施分阶段运维管控以及分类资源化处置,可实现医院建筑材料全生命周期碳排放的系统性降低,为医疗建筑行业践行“双碳”目标提供理论支撑以及实践范式。

参 考 文 献

- [1] 田靖,左嘉源,郝翠彩,等. “双碳”目标下零碳建筑电气化研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 125-129.
- [2] 王若晖,胡建辉,陈务军. 建筑膜材生命周期碳足迹分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2025, 57 (1): 31-40.
- [3] 卢昱杰,杨晓露,李佩娴,等. 基于元分析的预制装配式建筑隐含碳排放评估[J]. 建筑科学, 2024, 40 (12): 8-17.
- [4] 夏文丽. 基于碳排放因子法的建筑涂料碳足迹计算分析[J]. 涂料工业, 2025, 55 (2): 52-56.
- [5] 张欣怡,李灵芝,张磊,等. 现代木结构建筑全生命周期碳足迹评价研究进展[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2024, 46 (4): 387-396.
- [6] 陈娟,郑旺. 建筑废弃物资源化管理及碳足迹评价:方法与进展[J]. 生态经济, 2023, 39 (11): 213-221.
- [7] 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.
- [8] 李静,刘胜男. 装配式混凝土建筑物物化阶段碳足迹评价研究[J]. 建筑经济, 2021, 42 (1): 101-105.
- [9] 张旺. 基于 PB-LCA 的湖南省建筑碳足迹测算及其机理分析[J]. 科技导报, 2019, 37 (22): 133-142.
- [10] 张楠,杨柳,罗智星. 建筑全生命周期碳足迹评价标准发展历程及趋势研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51 (4): 569-577.
- [11] 李慧,邓权学,张静晓. 面向建筑类型的钢筋混凝土构造环境排放及其材料碳足迹研究[J]. 生态经济, 2019, 35 (3): 194-200.
- [12] 李静,包均培. 建筑物物化阶段碳足迹快速评价研究[J]. 人民长江, 2016, 47 (15): 91-95.
- [13] 肖雅心,杨建新. 北京市住宅建筑生命周期碳足迹[J]. 生态学报, 2016, 36 (18): 5949-5955.
- [14] 王玮,高宝虎,赵权,等. 深圳地区模块化学校建筑的全生命周期碳排放研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 132-136.
- [15] 乔军,郝翠彩,刘少亮,等. 半地下变电站建筑全生命周期碳排放与减碳策略研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (5): 94-100.

E-mail: fmhzhly@163.com