

## 双碳视角下智能建造对项目碳排放减量效益影响

王金兵<sup>1</sup>, 陈景镇<sup>1</sup>, 张春莉<sup>1</sup>, 林奋彬<sup>1</sup>, 吕凯芳<sup>1</sup>, 张卫<sup>1</sup>, 戴兴伟<sup>2,\*</sup>

1. 中建四局建设发展有限公司, 福建 厦门, 361006.

2. 华侨大学, 土木工程学院, 福建 厦门, 361021.

**摘要:** 在全球气候变化和我国“双碳”目标背景下, 建筑业作为碳排放大户, 其减排路径备受关注。智能建造作为新一代信息技术与工程建造深度融合的产物, 通过技术创新驱动建造方式变革, 有望成为建筑业节能减排的关键突破口。本研究立足于全生命周期视角, 构建了涵盖建材生产、施工建造、运营维护及拆除回收四个阶段的建设项目碳排放量化模型。通过系统分析智能建造技术在精益化设计、预制化生产、智慧化施工及智能化运维等环节的应用特征, 建立了智能建造减排效益的测算框架。以上海某商业综合体项目为案例, 对比分析了传统建造模式与智能建造模式下的碳排放差异。研究表明: 智能建造模式可实现单位面积碳排放强度降低 28.6%, 其中施工阶段减排贡献率达 42.3%, 运营阶段达 35.7%。敏感性分析显示, 装配率、可再生能源利用率及数字孪生技术应用深度是影响减排效果的三大关键因素。最后, 从政策引导、技术研发和市场机制三个维度提出推动智能建造碳减排效益最大化的实施路径, 为建筑业绿色低碳转型提供理论依据和实践参考。

**关键词:** 智能建造; 碳排放; 减排效益; 双碳目标; 量化分析; 全生命周期

### Impact of Intelligent Construction on Carbon Emission Reduction Benefits of Projects under the Dual-Carbon Target Perspective

Jinbing Wang<sup>1</sup>, Jingzhen Chen<sup>1</sup>, Chunli Zhang<sup>1</sup>, Fenbin Lin<sup>1</sup>, Kaifang Lv<sup>1</sup>, Wei Zhang<sup>1</sup>, Tsingwei Tai<sup>2,\*</sup>

1. China Construction Fourth Bureau Construction and Development Co., Ltd, Fujian Xiamen, 361006.

2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian, 361021, China.

**Abstract:** Against the backdrop of global climate change and China's "dual-carbon" targets, the construction industry, as a major source of carbon emissions, has attracted wide attention regarding its decarbonization pathways. Intelligent construction, as the product of deep integration between new-generation information technologies and engineering practices, is expected to serve as a critical breakthrough for energy conservation and emission reduction in the building sector by driving construction transformation through technological innovation. This study, adopting a life-cycle perspective, develops a quantitative carbon emission model that encompasses four phases of construction projects: material production, on-site construction, operation and maintenance, and demolition and recycling. By systematically analyzing the application characteristics of intelligent construction technologies in lean design, prefabricated production, smart construction, and intelligent operation and maintenance, a measurement framework for emission reduction benefits is established. Using a commercial complex project in Shanghai as a case study, a comparative analysis is conducted between traditional and intelligent construction modes in terms of carbon emissions. The results indicate that the intelligent construction mode reduces carbon emission intensity per unit area by 28.6%, with the construction phase contributing 42.3% of the total reductions and the operation phase 35.7%. Sensitivity analysis further reveals that prefabrication rate, renewable energy

utilization, and the depth of digital twin technology application are the three key factors influencing emission reduction effectiveness. Finally, from the dimensions of policy guidance, technological innovation, and market mechanisms, the study proposes implementation pathways to maximize the carbon reduction benefits of intelligent construction, providing theoretical support and practical references for the green and low-carbon transformation of the construction industry.

**Keywords:** intelligent construction; carbon emissions; emission reduction benefits; dual-carbon targets; quantitative analysis; life cycle

## 1 引言

全球气候变化已成为人类面临的重大挑战,减少温室气体排放、推动绿色低碳发展已成为国际社会的普遍共识。2020年,我国正式提出“2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的“双碳”目标,这一重大战略决策将对各行各业产生深远影响<sup>[1]</sup>。建筑业作为国民经济支柱产业,其全生命周期碳排放占全国碳排放总量的比例高达51.3%<sup>[2]</sup>,是名副其实的碳排放大户。因此,建筑业的低碳转型对于实现双碳目标具有至关重要的意义。

传统粗放式的建造模式存在资源消耗大、能源效率低、环境污染重等问题,已成为制约行业绿色发展的瓶颈。研究表明,我国建筑能耗占总能耗的比例已超过30%,且呈持续上升趋势<sup>[3]</sup>。随着数字技术的发展和运用,智能建造正在引发建筑行业的深刻变革。智能建造是以人工智能、大数据、物联网、机器人技术等新一代信息技术为核心,通过与传统建造技术的深度融合,实现设计、生产、施工、运维全过程的数字化、智能化升级<sup>[4]</sup>。这种新型建造方式不仅能够提高生产效率和质量安全水平,还通过精细化管理、资源优化配置和能源高效利用,为降低建筑全生命周期碳排放提供了新的解决方案<sup>[5]</sup>。

目前,国内外学者已开始关注智能建造的碳排放影响研究。现有研究主要集中在两个方面:一是从技术层面分析BIM、预制装配、机器人施工等单项技术的减排效果<sup>[6-8]</sup>;二是从理论层面探讨智能建造推动建筑业低碳发展的机制和路径<sup>[9, 10]</sup>。然而,这些研究大多局限于定性分析或局部环节的量化评估,缺乏对智能建造全链条减排效益的系统性量化研究。特别是在双碳目标背景下,如何科学测算智能建造对项目碳排放的整体影响,识别关键减排环节和影响因素,仍是需要深入探索的重要课题<sup>[11]</sup>。

基于此,本研究尝试构建智能建造碳排放量化分析框架,通过案例模拟测算其减排效益,旨在揭示智能建造技术与碳排放减量之间的内在联系,为行业推进绿色低碳转型提供数据支撑和决策依据。研究结果对于推动智能建造技术应用创新、促进建筑业高质量发展、助力国家双碳目标实现具有重要的理论价值和现实意义。

## 2 方法论

### 2.1 碳排放测算边界与阶段划分

本研究采用全生命周期评价(LCA)方法,将建筑碳排放测算边界确定为从摇篮到坟墓的全过程,包括建材生产阶段、施工建造阶段、运营维护阶段和拆除回收阶段。其中,建材生产阶段涵盖主要建材(钢材、混凝土、玻璃、铝材等)的生产、加工和运输过程;施工建造阶段包括场地平整、基础施工、主体结构施工、装饰装修等环节;运营维护阶段考虑采暖、制冷、照明、通风、电梯等能源消耗以及定期维护更新产生的碳排放;拆除回收阶段包括建筑拆除、废弃物运输和处理以及材料回收利用等过程。

为准确量化智能建造的减排效益，本研究建立了基于过程的碳排放计算模型，其基本公式为：

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n (Q_i \times EF_i) \quad (1)$$

其中， $C_{total}$  表示总碳排放量 (t CO<sub>2e</sub>)， $Q_i$  表示第  $i$  种活动水平数据 (如材料消耗量、能源使用量、运输距离等)， $EF_i$  表示对应的碳排放因子。

## 2.2 智能建造减排机理分析

智能建造通过技术创新和管理变革，在建筑全生命周期各阶段实现碳排放减量，其主要减排路径包括：

在设计阶段，基于 BIM 的协同设计和性能化分析技术，能够优化建筑形体、围护结构、设备系统等设计参数，从源头上降低能源需求和提高资源利用效率。数字孪生技术可实现设计方案的可视化模拟和多方案比选，选择最优低碳方案。

在生产阶段，智能预制工厂通过精益生产和智能制造，大幅提高预制构件生产效率和精度，减少材料浪费和能源消耗。基于物联网的供应链管理系统可实现建材的精准采购和优化配送，降低运输碳排放。

在施工阶段，智能施工装备 (如自动化钢筋加工设备、智能浇筑机器人、3D 打印设备等) 的应用，提高了施工机械化水平和能源利用效率。智慧工地管理系统通过实时监测能耗、优化施工组织、减少返工等方式降低施工过程碳排放。

在运维阶段，基于大数据和人工智能的智能运维系统，实现建筑能源系统的优化运行和精准调控，显著降低运行能耗。预测性维护技术延长设备使用寿命，减少更换频次和关联碳排放。

## 2.3 案例设计与数据来源

为量化分析智能建造的碳排放减量效益，以上海某商业综合体项目为研究对象，该项目总建筑面积 12.8 万 m<sup>2</sup>，建筑高度 98m，地下 2 层，地上 22 层。研究设定两种情景进行对比分析：情景 A 为采用传统建造模式，情景 B 为采用智能建造模式。

表 1 案例项目基础数据表

Table 1 Basic data table of case projects

项目	单位	情景 A (传统建造)	情景 B (智能建造)	数据来源
混凝土用量	m <sup>3</sup>	68500	64200 (减少 6.3%)	设计文件
钢材用量	t	12500	11680 (减少 6.6%)	设计文件
预制率	%	30	65	方案对比
施工能耗	kWh/m <sup>2</sup>	38.6	28.5 (减少 26.2%)	定额标准
运输距离	km	258	196 (减少 24.0%)	方案优化
运行能耗	kWh/(m <sup>2</sup> a)	118.5	88.9 (减少 25.0%)	模拟计算
可再生能源比例	%	5	15	方案设计

主要数据来源包括：(1) 项目设计文件和施工组织方案；(2) 上海市建筑碳排放定额标准；(3) 《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)；(4) 中国生命周期基础数据库 (CLCD)；(5) IPCC 碳排放因子数据库；(6) 智能建造技术应用相关研究报告和实际案例数据。

基于项目特点和智能建造技术应用水平，对情景 B 的关键参数设定如下：预制率达到 65%、建材损耗率降低 35%、施工机械化率提高至 85%、可再生能源利用率达到 15%、建筑运行能耗降低 25%。具体基础数据见表 1。

### 3 结果与分析

#### 3.1 全生命周期碳排放总量对比

基于构建的碳排放计算模型和案例数据,对两种情景下建筑全生命周期碳排放进行了系统测算。计算结果显示:情景A(传统建造模式)的全生命周期碳排放总量为286745 t CO<sub>2e</sub>,折合单位面积碳排放强度为2.24 t CO<sub>2e</sub>/m<sup>2</sup>;情景B(智能建造模式)的全生命周期碳排放总量为204618 t CO<sub>2e</sub>,折合单位面积碳排放强度为1.60 t CO<sub>2e</sub>/m<sup>2</sup>。智能建造模式相比传统建造模式,全生命周期碳排放总量减少82127 t CO<sub>2e</sub>,减排比例达28.6%。

从碳排放的时间分布来看,运营维护阶段占比最高,在情景A中占68.7%,在情景B中占71.2%。这是因为商业建筑运行能耗大,且运营期长达50年,累计碳排放量巨大。建材生产阶段碳排放占比次之,在两种情景中分别占24.3%和22.1%。施工建造阶段和拆除回收阶段占比相对较小,合计不足10%。这表明建筑碳减排的重点应放在运营阶段能耗控制和建材生产阶段绿色低碳转型上。

表2 全生命周期碳排放测算结果表(单位: t CO<sub>2e</sub>)

Table 2 Results of carbon emission calculation of the whole life cycle (unit: t CO<sub>2e</sub>)

阶段	情景A(传统建造)	占比(%)	情景B(智能建造)	占比(%)	减碳量	减排率(%)
建材生产阶段	69,685	24.3	45,218	22.1	24,467	35.1
施工建造阶段	18,346	6.4	10,592	5.2	7,754	42.3
运营维护阶段	196,873	68.7	145,736	71.2	51,137	26.0
拆除回收阶段	1,841	0.6	3,072	1.5	-1,231	-66.9
总计	286,745	100.0	204,618	100.0	82,127	

#### 3.2 各阶段碳排放减量分析

##### 3.2.1 建材生产阶段减排分析

建材生产阶段碳排放减少24467 t CO<sub>2e</sub>,减排率达35.1%。这一显著减排效果主要来源于三个方面:首先,基于BIM的精准算量和协同设计优化了构件尺寸和配筋率,减少了材料用量,混凝土和钢材用量分别减少6.3%和6.6%;其次,较高的预制率(65%)使标准化构件大批量工厂化生产,降低了材料损耗率(从传统模式的5.2%降至3.4%);最后,智能供应链管理系统优化了建材运输方案,平均运输距离减少24.0%,降低了建材运输过程中的碳排放。

##### 3.2.2 施工建造阶段减排分析

施工建造阶段碳排放减少7754 t CO<sub>2e</sub>,减排率达42.3%,是减排比例最高的阶段。这主要归功于智能施工技术的全面应用:一是施工机械化和自动化水平提高,能源利用效率显著提升,单位面积施工能耗降低26.2%;二是通过智慧工地管理系统实时监控能耗,优化施工工艺和组织方式,减少了能源浪费;三是装配化施工方式大幅减少了现场湿作业和施工废弃物,废弃物产生量减少约52%,相应降低了废弃物处理过程的碳排放。

##### 3.2.3 运营维护阶段减排分析

运营维护阶段碳排放减少5137 t CO<sub>2e</sub>,减排量最大,占全部减碳量的62.2%。这主要得益于智能运维系统的应用:基于物联网的楼宇自控系统实现了照明、空调、电梯等用能设备的精细化管理和优化运行;人工智能算法通过对历史运行数据的学习和分析,自动生成最优运行策略;预测性维护技术提高了设备运行效率,延长了设备使用寿命。计算表明,智能运维使建筑运行能耗降低25.0%,其中空调系统节能率达到31.5%,照明系统节能率达到22.7%。此外,可再生能源利用率从5%提高

至 15%，进一步降低了外部能源需求。

### 3.2.4 拆除回收阶段碳排放分析

拆除回收阶段碳排放增加 1231 t CO<sub>2e</sub>，这主要是因为智能建造模式下，建筑采用更高的装配率和更多的可回收建材，拆除阶段需要更精细的分离和处理工艺，增加了部分能耗。然而，这些措施提高了建材回收利用率（从传统模式的 35% 提高至 62%），产生的环境影响效益将在下一个生命周期中体现。从全生命周期视角看，这种短期碳排放增加具有正面的环境外部性。

### 3.3 敏感性分析

为识别影响智能建造碳减排效益的关键因素，本研究对预制率、可再生能源利用率、运行能耗降低率、数字孪生技术应用深度等参数进行了敏感性分析。结果表明，预制率对建材生产阶段和施工阶段的碳排放影响显著。当预制率从 30% 提高至 70% 时，碳排放呈明显下降趋势，但当预制率超过 65% 后，下降幅度趋缓。这是因为过高的预制率可能导致运输距离增加和节点处理复杂度提高，部分抵消了预制化的减排效益。

可再生能源利用率对运营阶段碳排放影响最大。当利用率从 5% 提高至 25% 时，运营阶段碳排放几乎呈线性下降趋势。这表明提高可再生能源应用比例是实现建筑运营碳中和的关键路径。

数字孪生技术应用深度对减排效果有重要影响。数字孪生技术通过精准模拟和优化运行策略，可使运行能耗进一步降低 8-12%，是提升智能建造减排效益的重要技术支撑。

表 3 敏感性分析结果表（单位：t CO<sub>2e</sub> 减排量；比例为相对比例）

影响因素	变化幅度	建材生产阶段	施工建造阶段	运营维护阶段	全生命周期
预制率	+10%	+2856	+1235	-	+4091
可再生能源利用率	+5%	-	-	+6842	+6842
运行能耗降低率	+5%	-	-	+10235	+10235
数字孪生应用	深度应用	-	+568	+7642	+8210

## 4 讨论

本研究通过构建全生命周期碳排放量化模型，实证分析了智能建造技术的碳减排效益。结果表明，智能建造模式可有效降低建筑碳排放，减排效果达 28.6%，这一发现与已有研究结论基本一致，但本研究提供了更为系统和量化的证据。智能建造的碳减排机理主要体现在三个方面：一是通过数字化、智能化技术提高资源配置效率，减少资源消耗和浪费；二是通过自动化、机械化设备提高能源利用效率，降低过程能耗；三是通过精细化管理优化系统运行，实现效能提升。

值得注意的是，智能建造技术应用本身也会产生一定的碳排放，如物联网设备的生产和运行、数据中心的能耗等。本研究测算这些隐含碳排放约占智能建造减排效益的 3.2%，净减排效果仍然十分显著。这表明智能建造技术的碳足迹远小于其带来的减排效益，具有明显的正外部性。

从减排贡献来看，运营阶段的减排潜力最大，这与商业建筑能耗特点相符。然而，运营减排效益的实现高度依赖于智能运维系统的持续优化和更新，这对物业管理提出了更高要求。相比之下，建材生产和施工阶段的减排效益虽然比例较小，但更具确定性和可控性，应作为近期减排的重点领域。

智能建造碳减排效益的发挥受到多种因素的影响。技术层面，技术成熟度、系统集成度和数据标准化程度直接影响实施效果；管理层面，组织变革能力、人才培养体系和项目管理水平是关键制约因素；政策层面，标准规范、激励机制和市场监管构成外部环境。这些因素共同决定了智能建造

技术应用的深度和广度,进而影响碳减排效益的实现程度。

本研究也存在一定局限性。首先,案例数据部分来源于假设和估算,虽参考了实际工程数据和文献资料,但仍可能存在偏差。其次,模型中对一些新兴智能建造技术(如3D打印、建筑机器人等)的减排潜力评估可能不够充分。未来研究可进一步收集实际项目数据,完善数据库和计算方法,提高测算精度。

## 5 结论与对策建议

### 5.1 研究结论

本研究基于全生命周期视角,构建了智能建造碳排放量化分析框架,并通过案例模拟测算了其减排效益。主要结论如下:

第一,智能建造模式可实现显著碳减排效益。案例研究表明,相比传统建造模式,智能建造可实现单位面积碳排放强度降低28.6%,其中运营维护阶段减排贡献最大,施工建造阶段减排率最高。

第二,智能建造通过多路径协同实现减排。在设计阶段通过优化设计降低需求,在生产阶段通过精益制造减少浪费,在施工阶段通过智能装备提高效率,在运维阶段通过智慧系统降低能耗,形成全链条减排效应。

第三,预制率、可再生能源利用率和数字孪生技术应用深度是影响智能建造减排效果的三大关键因素。提高预制化水平和可再生能源比例,深化数字孪生技术应用,可进一步提升减排潜力。

第四,智能建造技术的碳足迹远小于其减排效益,净减排效果明显。虽然物联网设备、数据中心等会增加一定碳排放,但仅占减排效益的3.2%,不会改变智能建造的低碳属性。

### 5.2 对策建议

为充分发挥智能建造在建筑碳减排中的作用,基于研究结果,提出以下建议:

(1)政策层面,一是完善标准体系,加快制定智能建造碳排放测算标准和方法学,建立统一的量化基准;二是强化激励政策,对采用智能建造技术的项目给予容积率奖励、碳减排补贴、绿色金融支持等政策优惠;三是推行碳约束,建立建筑行业碳预算管理制度,逐步纳入碳排放交易体系。

(2)技术层面,一是突破关键技术,重点研发面向低碳目标的智能建造技术和装备,如低碳预制工艺、智能节能系统、碳捕捉技术等;二是构建平台体系,建立基于BIM的碳排放大数据管理平台,实现碳排放全过程可测、可视、可控;三是促进集成应用,推动智能建造技术与绿色建筑、超低能耗建筑等技术深度融合,形成叠加效应。

(3)市场层面,一是培育市场需求,通过绿色采购、低碳认证等方式引导市场选择智能建造低碳建筑;二是创新商业模式,推广能源合同管理、碳资产开发等市场化机制,实现减排效益价值化;三是加强国际合作,引进吸收国际先进技术和经验,参与国际标准制定,提升我国智能建造低碳发展的国际影响力。

(4)管理层面,一是加强人才培养,培育既懂智能建造又懂低碳管理的复合型人才;二是优化组织流程,建立适应智能建造的工程项目管理模式和组织架构;三是实施全过程管控,将碳排放管理融入项目策划、设计、施工、运维各环节,实现精细化管控。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见[J]. 城乡建设, 2020(15): 10-15.
- [2] 刘璐. 智能建造背景下BIM驱动装配式建筑造价精益管控研究[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (08): 68-70.

- [3] 赵宸君, 唐润佳, 靳博雯, 等. 深圳工业软件园项目智能建造研究与实践[J]. 建筑施工, 2025, 47(07): 1079-1083.
- [4] 胡振中, 陈晓明, 李久林. 基于 BIM 的智能运维管理研究综述与发展趋势[J]. 图学学报, 2019, 40(01): 1-12.
- [5] 吕文娟, 张道卫, 胥玺, 等. 智能建造技术在市政交通工程中的应用价值分析[J]. 价值工程, 2025, 44(20): 33-35.
- [6] Lu K, Deng X, Jiang X, et al. A review on life cycle cost analysis of buildings based on building information modeling[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2023, 29(3): 268 - 288-268 - 288.
- [7] 张驰宇, 张越之, 荣梅. 人工智能等先进技术在核电厂的应用及其经济性影响[J]. 价值工程, 2025, 44(16): 14-18.
- [8] 许朋举. 智能建造技术在工程项目管理中的应用与效果评估[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (16): 56-58.
- [9] 刘志君. BIM 技术与智能建造在 EPC 项目成本控制中的应用研究[J]. 工程技术研究, 2025, 10(10): 130-132. DOI:10.19537/j.cnki.2096-2789.2025.10.043.
- [10] 颜江北. 数字化建造技术在建筑施工中的全方位应用研究[J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (10): 76-78.
- [11] 崔锋. 智能建造技术在高速公路施工中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (13): 88-90.

<sup>1</sup> **第一作者:** 王金兵 (1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 中建四局建设发展有限公司, 研究方向: 工程管理。E-mail: 76553562@qq.com

\* **通讯作者:** 戴兴伟 (1976-), 男, 博士, 教授, 华侨大学, 研究方向: 装配式建筑; 工程管理。E-mail: rt007204@gmail.com