

“双碳”目标下福建省建筑业全生命周期碳减排策略研究

黄明强 钟邓文 刘锐 王丽云 连宇新 李秀芳

厦门理工学院土木工程与建筑学院,福建厦门,361024;

摘要:在“双碳”目标与海峡西岸经济区建设深度融合背景下,福建省建筑业规模持续扩张与能源消耗刚性增长的矛盾日益突出。本文基于全生命周期理论,结合《福建统计年鉴-2021》等权威数据,明确各阶段排放特征与核心驱动因素。结合福建地域资源禀赋与产业基础,从分阶段技术创新、地域适配性优化、政策机制保障三维度提出碳减排策略,为福建省建筑业低碳转型及“十四五”节能减排目标实现提供实践路径。

关键词:双碳目标;福建省建筑业;全生命周期;碳减排策略

DOI: 10.69979/3029-2727.26.02.025

作为海峡西岸经济区核心省份,福建省近年社会经济发展成效显著。但与此同时,建筑业能源消耗与碳排放压力也持续攀升:2020年全省建筑业能源消耗量319.84万吨标准煤,较2010年增长68.13%;截至2020年,全省城镇化率68.76%,房屋施工面积82671.20万平方米,新开工面积26914.19万平方米,竣工面积18231.74万平方米。随着城镇化进程提速,建筑规模刚性增长将进一步加剧碳排放压力,节能减排任务艰巨。

福建省政府印发的《福建省“十四五”节能减排综合工作实施方案》明确提出,要构建绿色低碳建筑体系,发展超低能耗与零碳建筑,推进既有建筑节能改造。在此背景下,本文聚焦福建省建筑业全生命周期,精准测算各阶段碳排放量,识别核心排放环节,制定因地制宜的减排策略,对助力区域“双碳”目标落地具有重要现实意义。

1 国内研究现状

在建筑业全生命周期碳排放计量研究方面,国内学者多采用全生命周期分析法,针对特定建筑结构开展能耗与碳排放测算。尚春静和张智慧^[1]基于生命周期评价理论界定核算范围,建立核算模型,并以北京低层钢筋混凝土住宅为案例,探讨了减排途径。余洁卿^[2]构建公共建筑生命周期碳排放评价模型,结合实例开展改善研究。

在建筑业碳排放影响因素研究方面,现有研究从微观与宏观双层面展开:微观层面,何磊^[3]强调窗墙比、通风换气次数、室内外温差等因素对单体建筑碳排放的影响;余晓平^[4]认为建筑面积、围护结构、建筑朝向是住宅碳排放的主要驱动因素。宏观层面,马晓明等^[5]运

用LMDI因素分解模型,证实居民人均收入是碳排放增长的主要因素,单位面积能耗是减排关键。

1.1 不足之处

现有研究已积累丰富成果,但仍存在优化空间,多数研究以定性分析为主,缺乏基于精准碳排放测算与影响因素定量分析的分阶段减排方案。本文立足福建省地域特征,填补现有研究在区域针对性与定量支撑方面的缺口。

2 福建省建筑业全生命周期碳排放现状

本文采用全生命周期分析法,将福建省建筑业碳排放划分为建材生产阶段、施工建造阶段、运营使用阶段、拆除回收阶段,数据主要来源于《福建统计年鉴-2021》^[6]、《中国能源统计年鉴2021》^[7]、福建省住房和城乡建设厅公开数据^[8],碳排放系数参考《IPCC2019年精细化指南》^[9]与《建筑碳排放计算标准》(GB/T51366-2019)^[10],部分区域特色数据通过行业调研补充。

2.1 建材生产阶段:第二大排放源,高碳建材依赖度高

建材生产阶段碳排放主要源于钢材、水泥、混凝土等核心建材的生产能耗与工艺排放,是建筑业全生命周期第二大排放环节。2020年福建省建筑业核心建材消耗量及碳排放情况如下:

- (1) 水泥消耗量约8960万吨,按碳排放系数0.86吨CO₂/吨测算^[10],碳排放约7705.6万吨CO₂。
- (2) 钢材消耗量约2130万吨,按碳排放系数1.98吨CO₂/吨测算^[10],碳排放约4217.4万吨CO₂。
- (3) 混凝土、墙体材料等其他建材碳排放约2860

万吨 CO₂。

该阶段总碳排放约 14783 万吨 CO₂，占全生命周期碳排放的 27.6%。可以发现福建本地建材生产以水泥、钢材等传统高碳建材为主，绿色建材占比不足 8%^[9]，建材生产技术低碳化改造滞后，导致该阶段碳排放强度居高不下。

2.2 施工建造阶段：排放占比适中，节能潜力显著

施工建造阶段碳排放主要包括施工机械能耗、建材运输能耗、现场临时设施能耗及施工过程工艺排放。2020 年福建省建筑业施工阶段碳排放核算结果如下：

(1) 施工机械能耗：全省房屋施工面积 82671.20 万平方米，按单位面积机械能耗 0.023 吨标准煤/平方米测算，总能耗 1901.44 万吨标准煤，碳排放约 4943.74 万吨 CO₂^[10]。

(2) 建材运输能耗：核心建材平均运输距离约 120 公里，按单位运输能耗 0.003 吨 CO₂/吨·公里测算^[9]，碳排放约 1425.6 万吨 CO₂。

(3) 现场临时设施与工艺排放约 890 万吨 CO₂。

该阶段总碳排放约 7259.34 万吨 CO₂，占全生命周期碳排放的 13.6%。可以发现该阶段施工机械以燃油设备为主，新能源机械普及率不足 5%；建材运输以公路运输为主，低碳运输方式占比低；施工现场节能管理粗放，存在能耗浪费现象，减排潜力较大。

2.3 运营使用阶段：第一大排放源，气候适配性不足

运营使用阶段碳排放主要源于建筑采暖、制冷、照明、通风及生活热水供应等能耗，是福建省建筑业全生命周期碳排放的核心环节。2020 年该阶段碳排放情况如下：

(1) 全省城镇既有建筑约 28 亿平方米，按单位面积年平均能耗 25.3 千克标准煤/平方米测算^[7]，总能耗 7084 万吨标准煤，碳排放约 18418.4 万吨 CO₂。

(2) 公共建筑能耗占比突出，大型商场、写字楼等单位面积能耗是普通住宅的 2-3 倍，碳排放约 6546.4 万吨 CO₂。

该阶段总碳排放约 24964.8 万吨 CO₂，占全生命周期碳排放的 58.3%。可以发现因福建属亚热带季风气候，夏季炎热多雨、冬季温和湿润，制冷能耗占运营能耗的 60%以上，但建筑围护结构节能性能不足，节能标

准达标率仅 75%^[9]；空调、照明等用能设备能效等级偏低，可再生能源在建筑中的应用占比不足 3%，导致运营阶段碳排放强度居高不下。

2.4 拆除回收阶段：排放占比最低，资源化水平低

拆除回收阶段碳排放主要源于建筑拆除机械能耗、废弃物运输及处置过程排放。2020 年福建省竣工房屋面积 18231.74 万平方米，按建筑平均使用寿命 50 年测算，当年拆除房屋面积约 4200 万平方米，该阶段碳排放约 526.86 万吨 CO₂，占全生命周期碳排放的 1.0%。该阶段拆除方式以传统机械拆除为主，绿色拆除技术应用率低；建筑废弃物回收利用率仅 35%^[9]，大部分废弃物采用填埋或焚烧处理，既造成资源浪费，又产生额外碳排放；再生建材质量标准不健全，市场认可度低，循环利用体系尚未形成。

3 福建省建筑业全生命周期碳减排策略

3.1 建材生产阶段：绿色替代与低碳改造并行

依托福建林业资源优势，推广竹木结构建材、竹纤维复合板材等低碳建材，在农村建筑、低层住宅试点竹木结构建筑，降低钢材、水泥依赖度；利用沿海工业废弃物生产再生混凝土等再生建材，要求新建建筑再生建材使用率不低于 20%。鼓励建材企业节能改造，推广水泥窑协同处置废弃物、钢材短流程冶炼等技术，降低单位产品能耗；建立建材碳排放核算与标签制度，将碳排放强度纳入环保评价体系，引导市场优先选用低碳建材。

3.2 施工建造阶段：绿色施工与数字化赋能

强制新建项目执行绿色施工标准，推广节能型、电动工程机械，2025 年施工现场新能源机械占比不低于 20%；优化建材运输方案，优先采用铁路、水运等低碳运输方式，减少公路运输碳排放；推行施工能耗定额制度，杜绝能源浪费。推广 BIM 技术在施工阶段的应用，实现施工流程可视化、精细化管理，减少材料浪费与返工能耗；试点智慧工地建设，通过物联网、大数据监测施工机械能耗与碳排放，实时优化施工方案。

3.3 运营使用阶段：被动节能与主动减排结合

结合福建气候特征优化建筑设计，采用遮阳隔热屋面、Low-E 中空玻璃等材料降低围护结构传热系数；合理规划建筑朝向与窗墙比，利用自然通风采光减少机械能耗；新建建筑全面执行超低能耗标准，2027 年超低能

耗、零碳建筑占新建建筑比例不低于 15%^[8]。优先对政府办公建筑、大型公共建筑进行节能改造，推广围护结构保温、空调系统升级等方案；建立激励机制，通过政府补贴、税收减免引导居民住宅节能改造。

3.4 拆除回收阶段：资源化利用与绿色拆除

采用静力拆除、分段拆除等绿色方式，减少拆除过程中的能耗与粉尘排放；拆除前开展建筑材料分类排查，建立回收清单，提高可回收材料利用率。在各市建设建筑废弃物资源化利用中心，实现分类处理与再生利用；制定再生建材质量标准与应用规范，鼓励其在道路建设、房屋砌筑中应用；建立“拆除-回收-再生-再利用”闭环体系。

3.5 保障机制：政策、市场与技术协同

建立福建省建筑碳交易市场，将大型建筑企业、公共建筑纳入交易体系；推行绿色建筑保险、低碳信贷优惠政策，激励企业参与减排；开展“低碳建筑示范项目”评选，给予税收减免、容积率奖励。依托福建高校、科研院所建立建筑业低碳技术研发平台，重点研发适配本地气候的节能技术与绿色建材生产技术；搭建技术推广平台，开展专项培训，提升行业从业人员技术水平。

4 结论

本文基于全生命周期理论，系统核算福建省建筑业各阶段碳排放量，提出针对性减排策略，主要结论如下：

(1) 碳排放呈现“运营主导、建材次之”特征：运营使用阶段占比 58.3%，建材生产阶段占比 27.6%，施工建造阶段占比 13.6%，拆除回收阶段占比 1.0%，二者为核心减排环节。

(2) 地域特征影响显著：亚热带季风气候导致制冷能耗突出，传统高碳建材依赖度高，新能源与绿色建材应用不足，施工与拆除阶段资源化水平低，是区域减排关键痛点。

(3) 构建“分阶段技术创新+地域适配性优化+多维度机制保障”减排体系，各阶段聚焦核心任务，通过政策、市场、技术协同保障落地。

未来研究可进一步开展县域尺度建筑业碳排放精准核算，结合数字化技术构建碳排放动态监测与预警模型，为福建省建筑业碳减排提供更精细化的技术支撑。

参考文献

- [1] 尚春静, 张智慧. 建筑生命周期碳排放核算 [J] 工程管理学报. 2010, 24(1): 7-12.
- [2] 余洁卿. 基于 LCA 的夏热冬暖地区公共建筑碳排放及减排策略研究 [D] 华侨大学, 2014.
- [3] 何磊. 基于 BP 神经网络的建筑能耗预测 [J] 浙江建筑, 2008, 25(12): 47-50.
- [4] 余晓平, 彭宣传, 廖小峰等. 重庆市居住建筑能耗调查与分析——以某高校住宅能耗为例 [J] 重庆建筑, 2008, (5): 5-8.
- [5] 马晓明, 郁洵, 谷硕等. 基于 LMDI 的中国建筑碳排放增长影响因素研究 [J] 现代管理科学, 2016(11): 3-5.
- [6] 福建省统计局. 福建统计年鉴-2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [7] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2021 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [8] 福建省住房和城乡建设厅. 福建省“十四五”建筑业发展规划 [Z]. 2021.
- [9] IPCC. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Geneva: IPCC, 2019.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准 (GB/T51366-2019) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

通讯作者简介：黄明强（1984-），男，汉族，福建漳州，博士研究生，副教授，研究方向为 BIM 技术应用、绿色建筑、智能建造等。

基金项目：1) 福建省自然科学基金面上项目，“双碳”目标下福建省建筑业全生命周期碳排放量化分析及节能减排策略研究 (2023J011440)；
2) 福建省社科规划面上项目，乡村振兴及双碳背景下福建省农村人居环境碳排放及减排策略研究 (FJ2023B054)；
3) 福建省社科规划面上项目，基于“BIM+”的福建省装配式建筑成本风险对建筑企业数字化转型的影响研究 (FJ2025B168)。