

· 专题一:双清论坛“建筑碳中和的关键前沿基础科学问题”·

建筑碳中和的关键前沿基础科学问题*

庄惟敏^{1,6**} 刘加平² 王建国³ 梅洪元⁴ 纪军⁵
林波荣¹ 苗志坚⁶ 耿阳¹ 祝贺⁵

1. 清华大学建筑学院,北京 100084
2. 西安建筑科技大学建筑学院,西安 710055
3. 东南大学建筑学院,南京 210018
4. 哈尔滨工业大学建筑学院,哈尔滨 150006
5. 国家自然科学基金委工程与材料科学部,北京 100085
6. 清华大学建筑设计研究院有限公司,北京 100084

[摘要] 我国建筑全过程碳排放已占我国碳排放总量的50%以上,持续稳定的降低建筑碳排放将是我国实现碳中和目标的重要支撑。本文基于国家自然科学基金委员会第326期双清论坛总结了面向碳中和的建筑学科领域的研究现状、发展趋势及面临的挑战,凝练出未来5~10年建筑碳中和涉及的关键科学问题与技术前沿。

[关键词] 建筑碳中和;低碳建筑技术;多因素耦合机制;科学机理

1 我国建筑碳中和的重大意义

2020年9月,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上向世界做出实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和(以下简称“双碳目标”)的中国承诺。实现碳达峰、碳中和是中国高质量发展的内在要求,也是中国对国际社会的庄严承诺。我国碳排放量全球第一,面临总量大、时间短、影响广等巨大挑战,急需全方位、系统性的科技创新。

建筑承载着为人民提供美好生活环境和公共服务的功能,同时也是碳排放的主要部门之一。根据国际能源署对全球建筑领域碳排放的核算结果,全生命周期建筑碳排放超过工业、交通等领域,是第一碳排放大户。截至2020年底,建筑全过程的碳排放已占到我国碳排放总量的50%以上(图1)^[1],其中建筑运行碳排放占22%,建材(含基础设施)生产和施工产生的碳排放约占29%。我国建筑如何高效地实现从现有的工程和标准导向的绿色技术、节能技术的工程应用,转向探索以全寿期碳中和为目标



庄惟敏 中国工程院院士,清华大学建筑学院教授、清华大学建筑设计研究院有限公司院长、总建筑师,中国建筑学会副理事长。长期从事建筑设计及其理论研究,率先在我国提出建筑策划与后评估理论方法体系。主持“十三五”“十四五”国家重点研发计划项目,参与完成“我国碳达峰碳中和战略及路径研究”等中国工程院重大咨询项目。主持完成中国国家版本馆中央总馆等100余项重大工程设计项目,获得国家优秀工程设计奖金奖、银奖和国际奖等十余项。

的低碳发展技术路径,是落实我国全社会双碳目标的关键。

1.1 背景

碳达峰碳中和实质上是二氧化碳排放与经济发展的关系问题,受规模效应、结构效应、技术效应和要素替代效应的复合影响^[2]。国际上,麦肯锡咨询公司、英国和日本等国政府发布的碳中和技术报告,均指出建筑业是科技创新实现减碳效益(投入产出比)最高的行业之一,并可带来促进使用者健康舒适、改善人居环境、增加就业等社会福祉。

收稿日期:2023-05-17;修回日期:2023-06-06

* 本文根据第326期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email:zhuangwm@tsinghua.edu.cn

与发达国家不同,我国还面临人居密度大、建筑室内环境健康舒适需求不断增长、极端冷热气候频发、城市更新量大等挑战。具体体现在:一是随着我国城市向全面提质增效发展,建筑与城市空间环境应匹配人民生活质量提高的新需求;二是后疫情时代,建筑室内环境对人体健康和舒适的影响成为一段时间内研究学者和工程师集中攻克的重点;三是近年来全球极端气候频发,我国极端气候天数也屡创新高,对能源供应和低碳转型带来巨大挑战。此外,党的二十大报告中指出的“未来 5~10 年我国高密度城区大量的既有建筑更新改造”也对建筑碳减排提出新的更高的要求。为此,亟需结合国情重新辨识和揭示面向碳中和的建筑理论和方法创新的内在科学机理。

1.2 我国建筑实现双碳目标的路径

为了实现双碳目标,不能直接照搬国外发达国家的经验,必须探索一条适合我国国情的可持续发展路径,我国建筑领域需要持续从学理阐释、路径分析不断深入凝练并达成行业共识。

建筑实现双碳目标的路径,核心是协调建筑物及其环境与自然系统的关系,使以建筑为主的物质载体顺应自然系统的演化规律,促进二者的良性互动。其中,建筑物及其环境指全尺度和全寿期两个维度,全尺度空间包括建筑单体、建筑群、街区、组团等等;全寿期涵盖策划、设计、建造、运维、更新等。而融合以上两大系统涉猎能源系统、市政交通系统、材料科学、数字信息技术、碳交易,以及双碳政策机制等诸多方面。基于整个双碳系统的全面发展,建筑的双碳路径仍然需要重大社会需求推动,现阶段可在特殊区域和特定场合进行情景推演与技术应用示范,方能于 2030 至 2060 年间实现城市局域地区和特定建筑类型碳中和。

因此,实现建筑碳中和目标是一个正向递推和反

向递归的双向耦合过程。从现在到 2030 年,世界各国纷纷完善各自的相关标准,应对气候变化的双碳绿色建筑与生态社区开展实验、试点,以及成规模实施。2030 至 2060 年间,国家层面双碳目标阶段性实现,实现建筑业基本转型,形成“1+N”政策体系和碳中和标准,实验与试点样本充分。对 2030 至 2060 年碳中和过程可控的不确定性基本明确,达到可预见、可清晰描述、可国际比较的建筑碳达峰目标,形成一批部分近零碳、零碳、负碳建筑,以及一批减碳过程中的建筑。到 2060 年前,我国双碳目标全面实现,能源结构、能源消费和人为固碳三端共同发力。负碳建筑和零碳建筑成为主体,碳交易市场完善,建筑物及其环境、分布式储能单元相对闭环,并联方式组成的城乡区域。

2 研究进展与挑战

2.1 研究进展

国际能源署指出,建筑总碳排放是碳排放强度、建筑空间、使用时间、系统能效以及不同能源碳排放因子的函数,受室外气候、建筑形式、空间体量、围护结构性能、室内环境参数、机电能源系统和运行模式等多参数影响^[8]。

与传统建筑不同,碳中和建筑在尺度、构成、科学原理等方面的要求存在巨大差异。具体不同体现在:一是从时间尺度和空间尺度上,要求全生命期全过程降低运行和建材碳排放,突破单一建筑碳排放的点特征,实现从建筑—建筑群和社区的多尺度融合减碳;二是从构成上,要求突破传统的水泥、玻璃、钢筋与一次化石能源,实现低碳建材、空间、环境控制、蓄能和分布式可再生能源的重新组合和全过程创新;三是在科学原理方面,更注重减碳导向的空间、建筑构造与设备系统的全过程一体化设计;以人为本的室内环境品质提升策略。因此,针对 2030 碳达峰/2060 碳中和建筑行业碳减排目标倒逼,亟需面

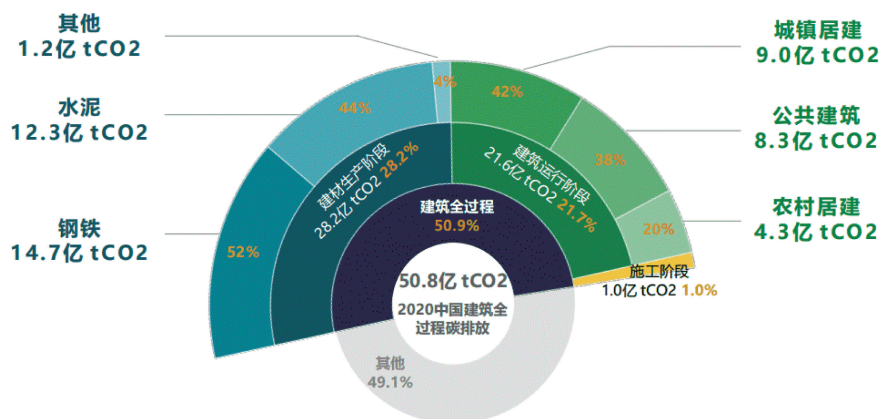


图 1 2020 年中国建筑全过程能耗与碳排放总量及占比情况 (图片来源:《2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告》^[1])

向碳中和的建筑理论、方法和范式的创新。

2.2 面临的挑战

目前我国建筑领域响应碳中和目标,面临的主要挑战是理论、方法和范式三个维度的创新挑战。

一是传统建筑学理论的系统创新面临挑战。我国缺乏公认的、统一标准的建筑碳排放模型,建筑碳排放为面源排放,时空特征不明确;碳排放受到碳绩效考核、人口密度、建筑密度和经济密度等多因素影响,内在关联机理认知不清。亟需明晰不同气候区不同类型建筑碳排放时空特征,揭示室内环境健康舒适性能提升与碳减排多因素耦合机理和关键驱动机制,形成源头高效减碳的建筑理论。

二是传统建筑学方法的集成创新面临挑战。亟需构建建筑空间形态控碳与建材—环境—系统综合减碳的动态耦合模型,形成“空间—材料—系统”融合、设计与技术科学协同高效减碳的新方法。目前,建筑领域仍然以正向空间形态设计为主,尚未建立实际性能反馈设计机制,缺少空间—建材—系统多专业协同。

三是传统建筑学研究范式的根源创新面临挑战。亟需积极应对对室内环境健康舒适性能不断提升、高密度城区城市更新和极端冷热气候等多重挑战,建立融合“设计智能—建材碳谱—环境健康—用能柔性—运维智慧”的一体化、智能化减碳新范式。现有建筑实践中,落实绿色低碳思想,技术堆砌仍然是普遍现象。简单应用低碳技术,而忽视了过程与集成效应,导致实际运行效果并非理想。

3 实现建筑碳中和目标的关键研究方向

3.1 学理难题

碳达峰、碳中和是围绕低碳、零碳乃至负碳技术创新与应用展开的竞争。尽管引进、模仿、学习低碳技术的成本远小于创新成本,在一段时间内具有后发优势。然而,全球尚未出现高度工业化后实现碳中和的经济体,关键技术面临创新和风险不确定性等挑战。政策驱动型碳达峰的技术需求和与之适配的制度环境与发达经济体在相同经济阶段时存在差异,无法照搬现有经验。引导原始创新、自主创新是始终要坚持的原则。同时,降低技术成本,推动低碳、零碳、负碳技术的商业运行和终端应用是碳中和建筑的技术创新的长远目标。

基于我国建筑行业发展现状和学科科技创新需求,我们认为,面向建筑碳中和目标,急需突破三大难题:

难题一:建筑碳排放时空特征及多因素耦合影响机制不清

面临的具体挑战包括:在建筑碳排放时空特征

上,面源式空间特征与长周期性时间特征认知难度大,难以构建区域协同碳减排机制;在驱动因素上,建筑碳排放影响因素多,行为及碳轨迹复杂,因果不明,不同地区碳排放结构差异大;在耦合影响机制上,建筑碳排放时空格局和多因素驱动机制不明,分析模型缺失。

难题二:碳中和建筑空间原型与技术原型高效智能协同机理缺失

面临的具体挑战有:传统设计方法设计要素单一,各环节、各专业彼此脱节,缺乏协同;空间形态设计控碳(正向)与技术减碳(反向)之间缺少高效智能协同机制,难以实现双向互动控碳。此外,建筑碳中和还要求空间原型和技术原型需要从单一空间向多空间、单一要素向多要素的耦合求解,这是一个 $(X * Y)^n$ 次方的非线性、高维数学问题。传统方法难以为继,急需数据与机理驱动的人工智能方法支撑。

难题三:复杂需求场景特征和极端冷热气候条件下,融合空间—构造—环境—系统的高效减碳技术新范式缺乏

面临的具体挑战有:高密度城区城市更新、极端气候条件等场景下环境营造挑战巨大;实现兼顾整体性能和有效控碳的碳中和建筑技术瓶颈突出;缺乏建筑融合多因素、多专业、全过程一体化减碳新范式;缺乏数据驱动+机制融合的反馈优化机制。

3.2 关键科学问题

在国家各方面科技项目的支持下,国内目前已形成节能建筑设计理论与营建方法,以及绿色建筑设计方法、关键技术和标准体系等。但既有成果主要是点状创新,还不足以支撑面向碳中和的建筑理论—建造—运维体系的建立。根据目前我国建筑发展的阶段和状态,面向建筑碳中和需要聚焦的工程问题需求包括:

(1) 低碳技术前置化

如何全面提升建筑低碳技术效果,实现系统性提升?研究形成的共识是,绿色低碳技术应当从目前的绿色、低碳技术专项设计前置建筑策划环节(图2)。这样的好处是,无论新建项目、改造更新项目在做好设计前期科学决策的同时,都纳入低碳需求和目标,达到在低碳目标与设计、技术、施工、运维全程深入落实的目的。同时,项目前期科学决策对整个项目成本的影响也是至关重要的(图3)。

(2) 建筑碳中和标准规范化

2023年4月1日,国家标准化管理委员会等部门发布了《碳达峰碳中和标准体系建设指南》。进一步明确:为贯彻落实党中央、国务院关于碳达峰碳中和重大战略决策,深入实施《国家标准化发展纲要》,

根据《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》相关要求,加快构建结构合理、层次分明、适应经济社会高质量发展的碳达峰碳中和标准体系。

据统计,我国当前直接支撑碳达峰碳中和工作的国家标准已有 1 800 余项、行业标准 2 300 余项。但与实现碳达峰碳中和目标的需求相比,“双碳”标准化工作还存在差距,主要表现在标准的领域和范围需要进一步扩大,标准的数量和质量需要提高,协调推进力度需要加大等^[6]。因此,建立实现建筑碳中和目标的碳中和建筑标准体系并与国际接轨,也是建筑领域有待完善的方面。

(3) 极端气候和环境需求下的低碳技术集成化

“十二五”“十三五”时期,针对我国大面积不同气候区开展的绿色低碳节能技术已经取得丰硕成果;进入“十四五”时期,随着全球和我国极端冷热气候频发,以提升城市韧性、实现建筑高质量发展为目标,需要进一步针对气候和环境需求提出更有针对

性的低碳技术解决方案。这样不仅可以完善我国建筑低碳技术体系,同时为在特定地域气候条件下的代表类型建筑提供低碳排放乃至零碳的技术支撑。

基于上述科技难题和工程需求,我们认为,要实现适宜成本下高效建筑碳中和,从设计源头出发营造健康舒适的室内环境,须解决以下三方面科学问题:

- 1) 揭示建筑碳排放时空特征及多因素耦合影响机制,实现认知正确;
- 2) 构建建筑空间原型与技术原型智能高效协同减碳机理,支撑设计精确;
- 3) 建立复杂条件下数据与机理融合减碳途径与机制,实现减碳准确。

3.3 研究内容

针对以上科学问题,拆解解决问题的具体研究路径,可形成四个明确的研究内容,分别是:(1) 建筑全寿期碳排放时空特征与多因素耦合减碳原理;(2) 建筑多因素多尺度高效智能协同减碳设计理论与方法;(3) 室内环境健康保障与一体化高效减碳新技术;(4) 复杂场景和极端气候条件下碳中和建筑技术新范式。

研究内容(1) 重点聚焦建筑碳排放关键驱动因素及其耦合作用机制、建材碳谱系构建及其组合控碳原理、城市/建筑多尺度碳排放时空特征预测分析模型。研究内容(2) 重点包括长耐久建材—构造组合下的全寿期减碳设计原理、空间—性能融合的建筑智能减碳优化模型、性能导向、数据驱动的高效减碳设计方法。研究内容(3) 包括低碳/零碳导向的室内环境健康舒适性能营造原理,“时空适变、人因智调”的低碳环境营造技术与方法,以及融合构造—设备—系统的新型建筑柔性用能系统。研究内容(4) 包括高密度城区更新型碳中和建筑关键技术路径与范式;极端气候条件下的碳中和建筑关键技术路径与范式;数据与机理融合驱动的智慧运维减碳方法和技术路径。

预期成果包括创建多因素时空动态协同的源头控碳设计新理论,突破面向碳中和建筑的高效营建新技术和新方法,建立典型地域全过程一体化的碳中和建筑营建新范式。最终在基础理论、设计方法、空间构造、环境营造、能源系统和智慧运维等方面形成系列原创成果,完成一批新产品原型;完成 2~3 栋碳中和建筑,形成服务工程的系列技术标准;在高水平国内外期刊发表一批有重要影响力的论文,授权一批发明专利;培养一支具有国际前沿水平的创新人才队伍。

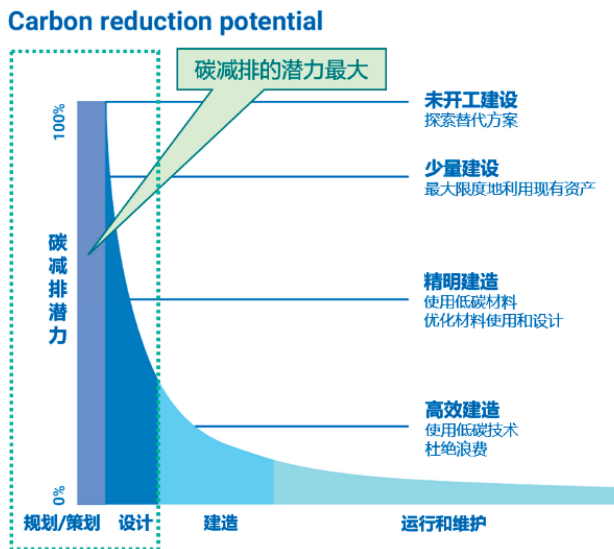


图 2 建筑碳减排潜力(图片来源:改自[4])

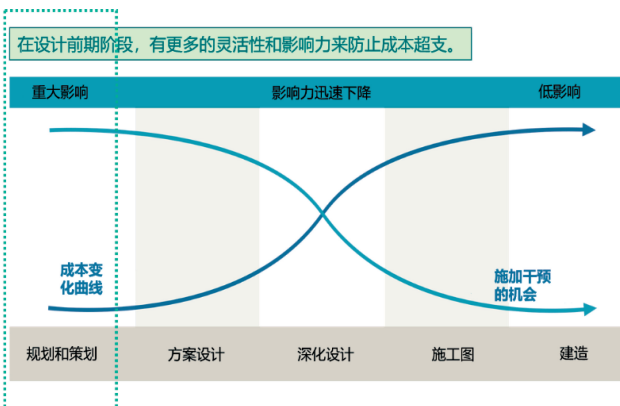


图 3 不同阶段决策对项目成本的影响(图片来源:改自[5])

4 结语

我国是全球碳排放第一大国,2030 碳达峰/2060 碳中和是我国对国际社会的承诺,面临总量大、时间短、核心技术缺乏等挑战,急需科技创新。建筑行业高效实现碳中和,可为其他领域碳中和创造更多时间和空间。急需攻克现有建筑设计、建造、运维在碳中和领域的技术瓶颈,引领建筑设计“节能—绿色—近零碳—零碳”的范式变革。

为此,急需从全寿命期建筑实现碳中和的目标出发,重新辨识和揭示面向碳中和的建筑学科本质性内在科学机理,全新建构相关的科学理论和关键技术体系;聚焦华北、东部、西北和寒地等特殊气候地域,从设计源头突破现有建筑基础理论、设计方法、环境营造、能源系统和运维模式等方面的技术瓶颈,探索适应气候、面向碳中和的建筑设计、营建和运维的“新理论、新方法、新范式”;以建筑领域 2030 年前达峰为时间节点,为建筑行业从 2030 碳达峰到 2060 碳中和的未来 30 年发展路径给出战略性科学判断和引领。

参考文献

- [1] 中国建筑节能协会. 2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告. 重庆:中国建筑节能协会, 2022.
- [2] 庄贵阳, 窦晓铭, 魏鸣昕. 碳达峰碳中和的学理阐释与路径分析. 兰州大学学报(社会科学版), 2022, 50(1): 57—68.
- [3] IEA, IEA-EBC Annex 82-Energy Flexible Buildings Towards Resilient Low Carbon Energy Systems. [2023-05-17]. <https://annex82.iea-ebc.org>.
- [4] HM Treasury, Infrastructure UK, Department for Business, et al. Infrastructure Carbon Review. (2013-11-25)/[2023-05-17]. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/260710/infrastructure_carbon_review_251113.pdf.
- [5] The foraker group. Architectural programming. [2023-05-17]. <https://www.forakergroup.org/predevelopment/resources/architectural-programming/>.
- [6] 国家市场监督管理总局. 市场监管总局市场监管总局标准技术司有关负责同志就《碳达峰碳中和标准体系建设指南》答记者问. (2023-04-21)/[2023-05-17]. https://www.samr.gov.cn/zw/zfxxgk/fdzdgknr/xwxc/art/2023/art_85c3fa5e0a334357a26d55f8a3d28998.html.

Key Frontier Basic Scientific Issues in Building Carbon Neutrality

Weimin Zhuang^{1, 6*} Jiaping Liu² Jianguo Wang³ Hongyuan Mei⁴ Jun Ji⁵
Borong Lin¹ Zhijian Miao⁶ Yang Geng¹ He Zhu⁵

1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084

2. School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710005

3. School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210018

4. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006

5. Department of Engineering and Material Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085

6. Architectural Design and Research Institute of Tsinghua University Co., LTD, Beijing 100084

Abstract The carbon emissions throughout the whole life cycle of buildings have accounted for more than 50% of the total carbon emissions in China. The continuous and stable reduction of building carbon emissions will be an important support for China to achieve the goal of carbon neutrality. Based on the 326th Shuangqing Forum, this paper summarizes the current research status, development trend and challenges in the field of carbon-neutral architecture, and concludes the key scientific issues and technological frontiers involved in carbon-neutral architecture in the next 5~10 years.

Keywords building carbon neutrality; low carbon building technology; multi factor coupling mechanism; scientific mechanism

(责任编辑 崔国增 张强)

* Corresponding Author, Email: zhuangwm@tsinghua.edu.cn