

上海市建筑领域碳达峰路径研究

俞伟¹ 何流¹ 张蓓红² 范宏武²¹

(1. 上海市住房和城乡建设管理委员会 200003;

2. 上海市建筑科学研究院有限公司 200032)

【摘要】: 建筑领域是实现“双碳”目标的重点领域。本文分析了本市建筑领域碳排放现状、特点、影响因素和面临的挑战,在此基础上提出了建筑领域碳达峰目标和关键技术路径,主要包括在满足建筑环境品质的前提下降低能源需求、提升建筑能源利用效率、优化建筑能源结构、促进可再生能源应用等,以期早日实现建筑行业的发展与环境问题、与碳排放问题的脱钩,为全社会“双碳”目标的实现做出积极贡献。

【关键词】: 建筑领域 碳达峰 碳中和 路径

建筑是实现“双碳”目标的重要战略部门。《上海市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》中明确提出,实施能源消费总量和强度双控,确保在 2025 年前实现碳排放达峰。随着经济社会的发展和人民生活水平的提高,建筑领域的能源消费和碳排放总体呈逐年递增趋势,已成为全社会能源消费与排放的重要组成部分。

从全球看,建筑行业运行用能导致的碳排放占比 28%,全球建筑相关用能碳排放占比 40%(包含建筑建造)。根据《中国建筑节能年度发展研究报告 2021》,我国建筑碳排放总量整体呈现出持续增长趋势。2019 年,我国建筑行业运行碳排放(含直接碳排放和间接碳排放)约为 21 亿吨二氧化碳,占全国总量的 20%左右,较 2000 年 6.68 亿吨增长了约 3.14 倍,年均增长 6.96%。根据发达国家经验,伴随城镇化和经济水平的不断提升,建筑行业的运行碳排放比重越来越大。建筑行业如何快速实现碳排放达峰并实现深度减排,不影响人居环境品质的改善,是我国应对气候变化目标中的重要议题。

一、本市建筑领域碳排放现状和特点

根据《省级二氧化碳排放达峰行动方案编制指南》(环办气候函[2021]185 号),建筑领域二氧化碳排放主要指建筑运行碳排放和施工碳排放,包括直接排放和间接排放,直接排放是建筑使用的天然气、液化石油气等化石能源消费产生的排放,间接排放是建筑使用的电力和热力产生的排放。

“十二五”以来,本市民用建筑面积规模快速增长。统计数据显示,2019 年本市民用建筑面积达 11 亿平方米,其中居住建筑面积约 7 亿平方米,公共建筑面积 4 亿平方米,分别比 2015 年增加了 11%和 32%。本市建筑领域碳排放呈现如下特点:

从总量变化来看,建筑领域碳排放维持增长态势。“十三五”期间,本市民用建筑碳排放整体呈上升趋势。公共建筑碳排放较 2015 年增长了 18%,相较于 32%的面积规模增速,其单位面积碳排放强度的降低主要得益于燃油、燃煤等消费量大幅度减少带

¹作者简介:俞伟,上海市住房和城乡建设管理委员会建筑节能和建筑材料监管处副处长。

何流,上海市住房和城乡建设管理委员会建筑节能和建筑材料监管处主任科员。

张蓓红,教授级高级工程师,上海市建筑科学研究院有限公司。

范宏武,教授级高级工程师,上海市建筑科学研究院有限公司。

来的直接碳排放量降低；居住建筑碳排放较 2015 年增长了 20%，明显快于 11%的面积规模增速，说明随着居民生活水平的提高，人均能耗快速增长，住宅单位面积碳排放强度也在逐年上升。

从建筑类型来看，主要排放来源是公共建筑。2019 年本市民用建筑碳排放总量 3913 万吨，其中公共建筑碳排放 2160 万吨（占比 55%），居住建筑碳排放 1417 万吨（占比 36%），建筑施工碳排放（含市政交通和基础设施建设）336 万吨（占比 9%）。公共建筑以 36%的面积占比，贡献了 55%的碳排放量，其单位建筑面积的碳排放量约为 54kgCO₂，是居住建筑的 2.7 倍。

从能源品种来看，建筑领域碳排放主要来自电力间接排放。不同能源品种的碳排放因子不同，因此能源结构的变化对建筑碳排放产生重要的影响。从“十三五”发展情况来看，民用建筑电气化率在不断提高，油品及其他能源的使用逐步被电和天然气取代，直接碳排放量逐年减少，电力间接碳排放占比由 2015 年的 70%上升到 2019 年的 78%。

2019 年居住建筑电力间接碳排放 1029 万吨，占居住建筑碳排放总量的 73%；公共建筑电力间接碳排放 1833 万吨，占公共建筑碳排放总量的 85%。随着国家能源结构调整，市外绿电将逐步增加，本市电力碳排放因子将持续降低，导致间接碳排放量的减少，也将成为本市建筑领域碳达峰的主要贡献来源，将对建筑领域碳达峰时间和达峰总量产生重要影响。

二、本市建筑领域碳排放面临诸多挑战

综合以上分析，本市建筑领域要在城市建设持续高速发展的前提下实现碳达峰，并努力保持达峰后平台期碳排放稳中有降，将面临诸多挑战。

建筑规模总量不断攀升，碳排放量刚性增长。根据 2035 城市发展规划，未来几年上海市建设领域将发生如下变化：甲级商务办公建筑规模将达到历史新高；具有全球影响力的文体建筑数量将急剧增加；高端数据中心（IDC）建设达到规模化应用；社区性文化教育设施实现全年龄段公共服务；医院建设规模将实现快速发展。

随着五个新城、临港新片区、长三角一体化示范区等重点区域的城市开发建设，城市建筑规模将迅速攀升，民用建筑碳排放量仍将刚性上涨，在产业结构持续优化的背景下，本市建筑领域碳排放占比还将进一步提升。同时随着经济社会发展，人民对生活品质提出了新的需求，比如夏季供冷时间延长、居民住宅冬季供暖需求增加等，都将造成建筑单位面积碳排放强度的上升。如何合理控制土地开发和建设、确保城市建设规模的有序发展，同时将低碳理念落实到建筑建造、运行、维护各个环节，走出一条不同于发达国家的建筑高质量发展路径，是摆在我们面前的严峻挑战。

随着生活水平的提高，居民生活碳排放将较快增长。根据统计数据，2019 年本市人均用电量为 1010 千瓦时，户均天然气用量为 220 立方米。随着经济水平和人民群众对人居环境品质改善的需求不断提升，家用电器如洗碗机、烘干机等还将增加，居民住宅用电量会大幅上升。

从天然气消耗来看，上海居民燃气用能主要用于炊事、生活热水，但还有小部分采暖需求，这与日益提高的生活水平相关。随着天然气管网的全面覆盖，天然气将逐步替代液化石油气的使用，从过去十年的发展规律来看，本市天然气用户数呈线性增长，户均用气量总体也呈上涨趋势。综合以上两方面因素，本市居住建筑总体碳排放将较快增长。

公共建筑碳排放总量将随着建筑规模上涨，电力间接碳排放比例将进一步提高。自“十二五”以来，本市大力推动高耗能公共建筑节能改造，不断优化建筑节能监测和管理模式，取得了积极效果。从 2016 年开始，公共建筑单位面积年用电量保持在 105 至 110 千瓦时，综合燃气等其他能源品种的单位建筑面积年综合能耗保持在 34 至 35 公斤标煤的范围，远远低于发达国家平均水平。

综合考虑节能减碳工作效益和民生需求品质提升的共同作用，可以推测公共建筑碳排放总量将随着建筑规模线性上涨。此外，从历史发展趋势可以看出，液化石油气将逐步被天然气取代，同时锅炉改造等进一步助推了电气化率的提升，电力间接碳排放已达到公共建筑碳排放总量的 85%。为最终实现碳中和目标，需鼓励公共建筑进一步提高电气化率，如以热泵热水器替代燃气锅炉、集中供应蒸汽改为小型分散式电热蒸汽发生器等，不断优化能源结构，降低直接碳排放量。

基于本市民用建筑碳排放现状分析和发展趋势研判，在保障城市建设高质量发展和市民高品质生活空间的前提下，通过实施新建建筑节能降碳设计、既有建筑能效提升、可再生能源规模化应用等重点举措，本市建筑领域有望在 2030 年左右实现碳排放达峰，并努力实现达峰后平台期碳排放稳中有降。

三、目标约束下的建筑领域碳达峰关键路径

综合考虑本市城镇化发展需求、建筑领域节能技术发展水平、电力系统低碳发展前景等因素，在碳达峰碳中和目标约束的前提下，本市建筑领域实现碳达峰的关键路径，主要包括在满足建筑环境品质的前提下降低能源需求、提升建筑能源利用效率、优化建筑能源结构等方面，促进建筑领域绿色低碳转型。

（一）进一步提升建筑节能目标与评价方法，加快建立新建建筑能耗与碳排放限额管理体系

中共中央、国务院《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中明确指出，“大力发展节能低碳建筑，持续提高新建建筑节能标准，加快推进超低能耗、近零能耗、低碳建筑规模化发展。”即将正式实施的国家全文强制性规范《建筑节能与可再生能源利用通用规范》（GB55015）也提出了“新建的居住和公共建筑碳排放强度应分别在 2016 年执行的节能设计标准的基础上平均降低 40%”的要求。这预示着我国建筑节能工作即将迈入低碳、高质发展的新阶段，提升建筑节能标准的条件已经成熟。

本市建筑节能工作历经近二十年的发展，节能标准要求得到了不断提升。目前本市居住建筑和公共建筑均执行 65% 节能标准要求，评价方法为权衡判断法，主要用来控制建筑围护结构的综合热工性能。从工程实践中发现，由于每个建筑都采用各自的参照建筑模型作为基准，造成评价尺度不统一，评价结果并不能真实反映建筑的节能效果。同样符合 65% 节能标准的建筑，其实际能耗会有很大差别，节能效果无法量化，更无法与建筑运行阶段的实际能耗进行比较和评估，对全市建筑能耗与碳排放双控目标无法起到支撑作用。

国内外建筑节能发展趋势调研结果显示，采用建筑能耗限额管理已逐步成为行业共识，发达国家目前都已将建筑节能控制目标从原先的相对节能概念转向建筑能耗的绝对控制。我国也于 2019 年颁布实施《近零能耗建筑技术标准》（GB/T51350），明确提出了能耗限额设计指标。实施建筑能耗设计限额管理已成为大势所趋，建筑能耗限额设计及评价体系的建立应成为“双碳”目标约束下上海市建筑节能工作的发展重点。

全面落实建筑能耗限额管理标准体系，需要对标国际最新标准和发展水平，立足上海市建筑节能现状与发展需求，根据技术发展水平和建筑用能需求综合确定建筑能耗基准线水平，研究建立本市民用建筑用能限额设计体系相关关键性技术与管理措施，确定居住建筑和公共建筑用能限额基准。

开展基于用能限额目标的民用建筑性能化设计新方法研究，编制形成建筑用能限额设计标准，从居住建筑、办公建筑逐步扩展到不同类型建筑全覆盖，推动建筑节能从“相对节能”走向“绝对节能”，以可测量、可验证的能耗约束为目标，形成从设计、施工到运行的全过程建筑节能闭环管理体系，至“十四五”末新建建筑全面实施建筑用能和碳排放限额设计标准。

（二）切实突破既有建筑运营瓶颈，提升城市建筑高质量发展能级

“十二五”以来，本市公共建筑节能改造工作取得了很大进展，通过节能补贴政策的实施，对推动建筑节能改造产业发展起到了积极作用，主要类型公共建筑能耗指标持续呈下降趋势，取得了显著的经济、社会和环境效益。但同时也应该清楚地认识到，继续沿用现有节能改造模式来推进改造项目的实施难度在不断加大。

政策补贴扶持的初衷主要在于扶持改造产业和企业的发展，不应成为改造项目实施的主要依赖。作为节能改造市场机制的重要推动力，本市公共建筑能耗对标与公示推进仍然进展缓慢，数据的共享共建及信息披露对本市建筑节能改造的推动作用尚未显现，节能改造的市场驱动机制尚未形成。

目前本市公共建筑的节能改造主要是以用能设备的更替升级方式为主。随着本市既有建筑逐步进入存量化时代，“拉链式”缝缝补补的改造方式，已不能适应新时代高质量发展需求，改造适宜技术需要与精细化运营管理有机融合，实现高水平和高质量的建筑能效提升。

从建筑全寿命期的角度出发，既有建筑节能改造不仅仅与运营阶段相关，也受建设阶段决策和设计的影响和制约，目前建筑建设与运营分离的现状不利于实现建设项目全生命周期的增值。人们对美好生活的追求和向往，决定了上海市存量建筑将被赋予新的节能减排使命，节能建筑高质量发展势在必行。

信息技术的快速发展将带来城市精细化管理能级的快速提升，这种不可逆转的发展趋势必然会对传统建筑业造成巨大冲击，依托数据技术的建筑精细化运营管理将是信息技术在建筑领域的重要应用场景。目前，本市公共建筑能源管理绝大多数仍采用粗放式管理模式，能源精细化管理和智能化管理水平有限。公共建筑中普遍采用的楼宇自动控制(BA)系统绝大多数在运行中都不存在问题，部分甚至被废弃改为人工操控模式，基本上没有发挥应有的保障机电系统高效运行的作用，投入产出比非常低。

上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测平台自2010年开始建设，截至2020年底，全市累计共有2017栋公共建筑实现了与市级能耗监测平台的数据联网，覆盖建筑面积9208万平方米。作为推进本市建筑节能减排工作的重要载体，通过10年来的不断健全完善，上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测平台已建设成为集成了数据采集、分析、应用等功能的综合性大数据平台，研发成果为政府主管部门在节能领域内的服务、管理、分析、决策提供了重要支撑。

在国家和上海市碳达峰碳中和目标指引下，有必要将能耗监测平台升级建设为建筑碳排放智慧监管平台，聚焦建筑碳排放监测管理、能源与环境智能服务、可再生能源监测等核心要素和功能，实现从空间维度上覆盖上海全市建筑碳排放、大型公共建筑碳排放、公共机构建筑碳排放；从时间维度上覆盖建筑全过程管理，包括设计阶段、建设阶段、运营阶段，建立基于碳排放计算软件的公共建筑运行碳排放量地图。

同时，深入挖掘多维度、多层次数据的潜在价值，加快推动建筑运行阶段能耗和碳排放限额标准体系的构建，为高耗能建筑进行碳排放诊断。开展建筑全寿命期的“综合能效调适”，引导建筑由“人工运维”向“智能运维”的模式转变，提升建筑运维智能化水平。在“双碳”目标发展背景下，可以预见，建筑节能技术、低碳建筑技术、智慧建筑技术与信息化管理技术将迎来更高层次的融合，高品质生活、高质量发展、精细化管理、高能效等级将成为“双碳”目标下建筑节能发展的本底。

(三)进一步加强建筑节能科技创新工作，引领建筑领域深度脱碳

2018年10月8日，联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布报告称，如果全球气候以目前速度持续变暖，预计全球气温在2030-2052年间会比工业化之前水平升高1.5°C，而要将全球平均气温升幅控制在1.5°C之内，必须在2030年前将二氧化碳排放量减少至2010年的55%。

习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话中宣布：“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政

策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。”我国“双碳”目标的提出，意味着未来能够有更多的创新机会，可以预见，碳达峰、碳中和将带来一场由科技革命引起的经济社会环境的重大变革。

作为应对全球气候变化和能源安全的重要措施，发展超低能耗、近零能耗、净零能耗建筑已成为世界共识。住房和城乡建设部在《建筑节能与绿色建筑“十三五”规划》中已经对超低能耗建筑、近零能耗建筑提出了明确要求。为加快提高建筑节能标准，京津冀、长三角、珠三角等重点区域城市率先实施高于国家标准要求的地方标准，积极开展超低能耗建筑、近零能耗建筑建设示范，提炼规划、设计、施工、运行维护等环节共性关键技术，引领节能标准提升进程，在全国不同气候区结合气候条件和资源禀赋情况，探索实现超低能耗建筑的不同技术路径。

超低能耗建筑是现阶段实现近零能耗、低碳、零碳建筑的必由之路，其本质是通过提高建筑围护结构的性能，被动优先、主动优化，降低建筑的能耗。开发建设超低能耗建筑是利国利民的事情，其势必引领下一步建筑节能的发展与技术的提升，目前各省市都在积极开展相关理论研究与技术储备。

上海地处夏热冬冷地区，气候条件相对独特，相关超低能耗建筑试点示范工作刚刚起步，尚未形成完善的技术标准体系。为了加快推进超低能耗建筑规模化发展，必须结合本市气候区域特点，开展关键技术攻关，编制相关的技术标准、导则及图集，形成完善的超低能耗建筑技术应用标准体系。

同时，开展超低能耗建筑相关新技术、新材料、新设备、新工艺的研究和开发，不断提升自主创新能力，增强自主保障能力，降低建设成本，逐步形成符合本市实际情况的超低能耗建筑设计、施工及材料、产品支撑体系。面向建筑碳中和，应启动近零能耗建筑、零碳建筑、零碳社区技术体系研究，综合开展建筑光伏、蓄冷蓄热、电力调配等协同技术攻关，探索本市近零能耗建筑和零碳建筑关键技术措施和实施路径。

建筑要实现深度脱碳，除了推行全面电气化之外，可再生能源的应用，尤其是建筑光伏的推广应用也是本市建筑低碳发展的重点与难点。本市太阳能光伏发电的应用主要集中在建筑领域，但目前仅结合绿色建筑的建设需求有少量示范，成效不明显。在“双碳”目标指引下，如何结合自身条件，扩大建筑领域分布式光伏发电应用是需要解决的重点，这需要各相关方形成合力，充分发挥产、学、研、用、管集成攻关能力，加快部署研究建筑光伏一体化新型高效集成系统解决方案，包括新型构件标准化及装配、直流建筑供电、能源综合管控、智慧运维、综合性能测评等技术，建立光伏建筑一体化全过程建设技术标准、图集与工法，加快建立建筑可再生能源综合利用量核算标准和管理体系，全面提升太阳能光伏在建筑中应用的深度、广度与高度。

四、结语

能源与环境是人类发展的永恒主题。建筑行业在为人类提供舒适健康的生产和生活环境的同时，也消耗了 1/5 的社会终端能源，产生了 1/5 的温室气体排放，一方面在改善人类的生存环境，一方面也在影响人类的生存环境。要彻底解决此问题，就必须创新工作思路和方法，实现建筑行业的发展与环境问题、与碳排放问题的脱钩。“双碳”目标的提出，为建筑领域的发展赋予了新的使命和内涵。建筑领域可以主动作为、加快行动，不断提高建筑自身应对气候变化的韧性，为全社会整体“双碳”目标的实现做出积极贡献。

参考文献：

[1]清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2021 [M]. 北京：中国建筑工业出版社, 2021.

[2]林波荣. 建筑行业碳中和挑战与实现路径[J]. 可持续发展经济导刊, 2021 (3).

[3]2020 年上海统计年鉴: <https://tjj.sh.gov.cn/>.