

· 专题一：双清论坛“建筑碳中和的关键前沿基础科学问题” ·

寒区建筑碳中和的瓶颈问题与应对策略^{*}

梅洪元^{1,2} 陈玉婷² 史小蕾² 高枫^{2,3} 费腾^{2**}

1. 哈尔滨工业大学 建筑学院, 哈尔滨 150001
2. 哈尔滨工业大学 建筑设计研究院有限公司, 哈尔滨 150090
3. 哈尔滨理工大学 建筑工程学院, 哈尔滨 150006

[摘要] 寒区建筑因碳排放总量大、强度高、能源结构落后, 成为我国建筑领域实现碳中和亟需攻坚的主战场之一。其碳中和进程受困于城乡建成环境差异大与自然资源分布不均衡导致的减碳路径不一、减碳框架复杂以及因冬季长时间低温导致的建材消耗量大、建设施工周期长、采暖能耗占比高等现实瓶颈。为应对寒区建筑碳中和的瓶颈问题, 本文从建筑全过程碳排放特征与机理出发, 建立整体统筹的碳中和理论体系, 形成分段控制的减碳方法体系与重点场景的降碳技术体系, 以实现寒区建筑碳中和的全局考量与科学决策。

[关键词] 寒区; 建筑碳中和; 瓶颈问题; 应对策略

1 寒区建筑碳中和的战略意义

自第一次工业革命以来, 受益于煤炭、石油等化石能源的广泛使用, 全球经济发展速度空前, 与此相伴的是工业化带来的全球碳排放总量持续升高, 导致温室效应加剧, 海平面持续上升, 高温、干旱、暴雨等极端天气频发。2015年, 在第21届联合国气候变化大会缔约方会议上, 包括中国在内的195个国家联合签署了《巴黎协定》, 确立“将全球温度升幅控制在相对工业化前水平 2°C , 并努力将气温升幅限制在 1.5°C 以内”^[1]。作为全球碳排放量最大的发展中国家, 2020年习近平主席在第75届联合国大会上向世界郑重承诺: “中国力争在2030年前 CO_2 排放达到峰值, 2060年前实现碳中和”。从碳达峰到碳中和, 发达国家有60年到70年的过渡期, 而我国只有30年, 时间更紧、困难更多、任务更重。碳中和不仅是为了全人类的福祉, 更作为一种地缘政治博弈手段, 具有重大且深远的战略意义。

建筑作为能源消耗和碳排放的五大部门之一(电力、工业、交通、建筑、农业), 约占碳排放总量的



梅洪元 哈尔滨工业大学教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 全国工程勘察设计大师, 美国建筑师协会荣誉会士, 中国建筑学会副理事长, 寒地建筑学术委员会主任委员。长期从事建筑设计及其理论研究, 主要研究方向为寒区城市与建筑、体育建筑、校园建筑、地外建筑等。创建了寒区城市建筑协同设计理论和建筑一体化设计方法体系, 创作了100余项重大工程项目, 设计作品获国际、国家、行业等各级专业设计奖项50余项。主持多项中国工程院、科技部、国家自然科学基金委等科技项目, 获得多项国家和省部级科技奖励。



费腾 哈尔滨工业大学教授级高级工程师, 博士生导师, 中国建筑学会会员, 中国建筑学会适老性建筑学术委员会委员。长期从事建筑设计及理论相关研究工作, 面向“碳达峰、碳中和”国家重大战略与国际学术前沿, 围绕寒区建筑碳中和、智慧化碳管理、冰上体育建筑低碳设计等领域开展了系列基础理论与关键技术研究, 并将研究成果应用于工程实践或产业转化。主持并参与多项中国工程院、科技部、国家自然科学基金委等科技项目, 获得华夏奖、黑龙江省科技奖等各级科技奖励。

16%^[2], 成为我国实现碳中和目标的重要一环。

收稿日期: 2023-05-12; 修回日期: 2023-06-09

* 本文根据第326期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: feiteng@hit.edu.cn

本文受到国家自然科学基金重点项目(52238002), 黑龙江省重点研发计划项目(2022ZX01A33)的资助。

2022 年,住房和城乡建设部、国家发展和改革委员会联合印发《城乡建设领域碳达峰实施方案》,指出“2030 年前城乡建设领域碳排放达峰,2060 年前城乡建设方式全面实现绿色低碳转型”^[3]。当下,“十四五”作为我国建筑行业实现碳中和的“窗口期”,必须牢牢抓住主要矛盾和中心任务,以重点地区、重要领域和关键环节带动全局工作,建筑行业的减碳工作刻不容缓。

寒区(严寒及寒冷地区)约占我国国土总面积的三分之二,覆盖东北、华北、西北和部分西南地区^[4],共计 149 个城市,承载我国近 41% 的人口,建筑运行碳排放 11.8 亿吨 CO₂,占全国碳排放总量的 57%^[5](图 1)。其中,集中供热占建筑运行碳排放的 26% 左右^[6]。除气候环境外,地理位置、经济水平与资源能源分布的差异性造成了寒区建筑体量大、用材多,建设周期长、管理水平差,能耗比重大、能源利用效率低等问题。因此,如何落实我国碳中和的战略部署,从建筑学科自身的角度,聚焦学科本质、综合学科优势,从基础理论、技术突破与落地应用等方面,解决寒区建筑碳中和实现过程中的“卡脖子”难题,成为寒区建筑当下亟需面对的重大课题。

2 寒区建筑碳中和的瓶颈问题

建筑碳排放受地区生产总值及所处气候区、人口数量、用能结构等因素影响。我国寒区冬季寒冷漫长,传统的能源结构和巨大的供暖需求造就了寒区建筑碳排放占比高、行业发展与碳排放脱钩难度大的现

状^[7]。本节总结寒区建筑碳中和的地域瓶颈、发展瓶颈和行业瓶颈,系统分析其中的重点、难点及关键问题,为寒区建筑实现碳中和目标提供强有力支撑。

2.1 地域瓶颈:地理跨度广,区域发展不均衡

我国寒区地域广袤,横贯版图东西两端,覆盖范围包括黑龙江省、吉林省、辽宁省等 15 个省(自治区、直辖市),受气候条件、人口数量、城镇化率、地区生产总值、用能结构、产业结构、市场需求等因素的影响,各地的减碳发展路径多元,技术难点不一。

华北地区作为京津冀经济圈的重要经济腹地,无论建筑总量还是发展水平均处于我国第一方阵,是引领北方地区建筑发展的重要增长级,虽然城市总体低碳发展水平较高,但碳排放、能源利用和发展指数亦有待加强^[8];西北地区作为“一带一路”的重要桥头堡,能源优势显著,但存在城镇化水平较低、人均生产总值不高、经济发展水平落后、能源利用效率低且生态基础薄弱、环境质量与治理水平较差等突出问题^[9];东北地区作为我国老牌重工业基地,经济底蕴深厚,但发展严重依赖化石能源,高耗能、高排放行业集中,落后的能源结构使得东北三省的碳排放量居高不下,由此带来的一系列生态问题严重阻碍了城市发展。为扭转这种局面,如何在加快经济增长的同时控制与减少碳排放成为关键。

2.2 发展瓶颈:资源禀赋高,能源结构不合理

在碳中和目标下,寒区能源保供与减碳矛盾日益突出。溯其原委,“富煤、贫油、少气”的资源禀赋^[10]决定了煤炭在寒区的基础能源地位,以煤炭为主的能源结构短期内难以改变,部分地区能源消耗较高、节能减排技术推广缓慢,低碳发展与能源保障协调难度显著增大。

受资源禀赋影响,寒区形成了“高碳型”的能源和产业结构^[11],面临巨大的节能减排压力。从供给侧来看,寒区作为我国最大的能源产区(图 2),蒙东、陇东等地煤炭、石油储量充沛,内蒙古高原地区风能资源丰富,青藏高原地区太阳能、地热能开发潜力巨大,但现阶段寒区能源结构仍以煤炭为主,清洁能源、可再生能源开发利用尚不充分;从需求侧来看,寒区建筑建造阶段原材料开采、建材生产、运输以及施工的碳排放达 25% 以上,运行期间的热力碳排放维持在 21%~24% 之间^[6],且比例呈每年增长趋势,对此应统筹推进寒区建筑能源结构调整,健全相关政策体系、监管机制和技术标准,从顶层设计、生产、建造、运行等全过程降低能源消费强度,提升能源产出效率,加速能源结构绿色低碳转型。

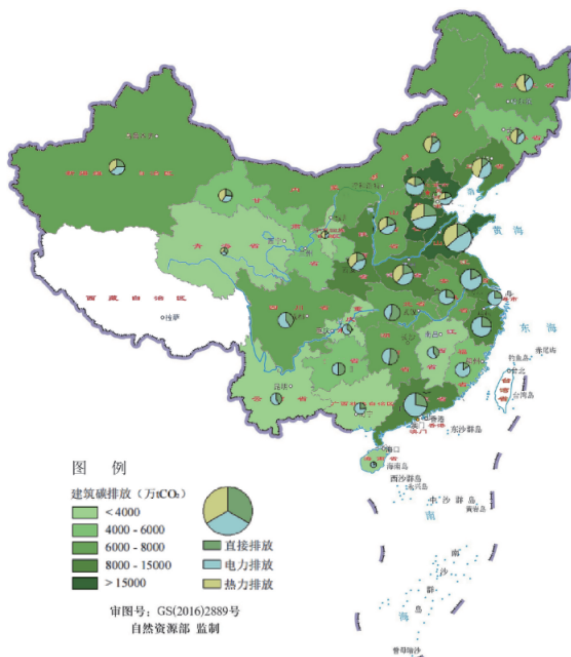


图 1 我国各省建筑碳排放总量统计^[5]

2.3 行业瓶颈:减碳难度大,实施路径不清晰

寒区建筑碳中和是一项复杂的系统性工程,作为一项长期工作,应在发展初期科学制定时间表和路线图,确保寒区建筑碳中和工作沿着正确轨道、科学有序实施,避免因过度减碳引起行业发展“失速”“脱轨”甚至“失衡”。

当下,寒区建筑碳中和的实现路径和具体目标不清晰,缺乏有效的实施方法和手段,导致实施效果存在较大问题。从盘活存量的角度,“十三五”期间,严寒及寒冷地区节能与绿色建筑取得重大进展,城镇新建居住建筑节能达到75%,累计建设超低能耗、近零能耗建筑近0.1亿平方米^[14],但建筑质量良莠不齐,普遍存在形式片面、技术堆砌的现象,标准化程度低、人才供给短缺、技术质量参差、过程管理匮乏,导致设计与建造、运行阶段脱节严重,不仅造成了高额投资成本,也带来了不必要的资源与能

源浪费;从控制增量的角度,“十三五”期间寒区建筑改造工作初见成效,完成既有居住建筑节能改造5.14亿平方米、公共建筑节能改造面积1.85亿平方米^[14],但从目前的改造效果来看,多数以围护结构中的外墙节能改造为主,供热热源、管网和配套设施等未纳入改造范畴,随着减碳要求提升,上述建筑或将实施更高标准的二次改造,重复施工势必会造成人力、物力浪费和成本增加。

3 寒区建筑碳中和的应对策略

为保障碳中和目标的实现,需对寒区建筑碳中和进行总体部署和系统谋划。在此,提出8个应对策略(图3),通过理论引导、方法整合、技术创新,为寒区建筑制定碳中和整体目标以及设计、建造和运行阶段措施,减少因建材生产、运输和建造产生的直接碳排放以及电力、热力导致的间接碳排放,推动行业由量变向质变转化。

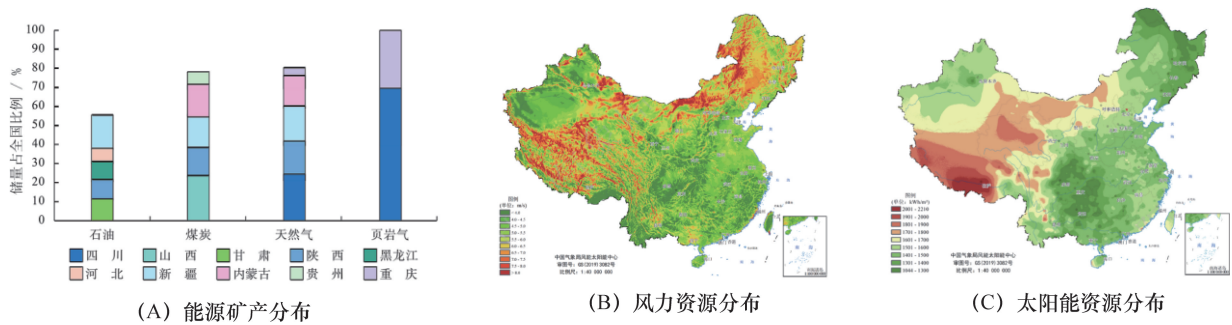


图2 我国常规能源及清洁能源分布^[12,13]

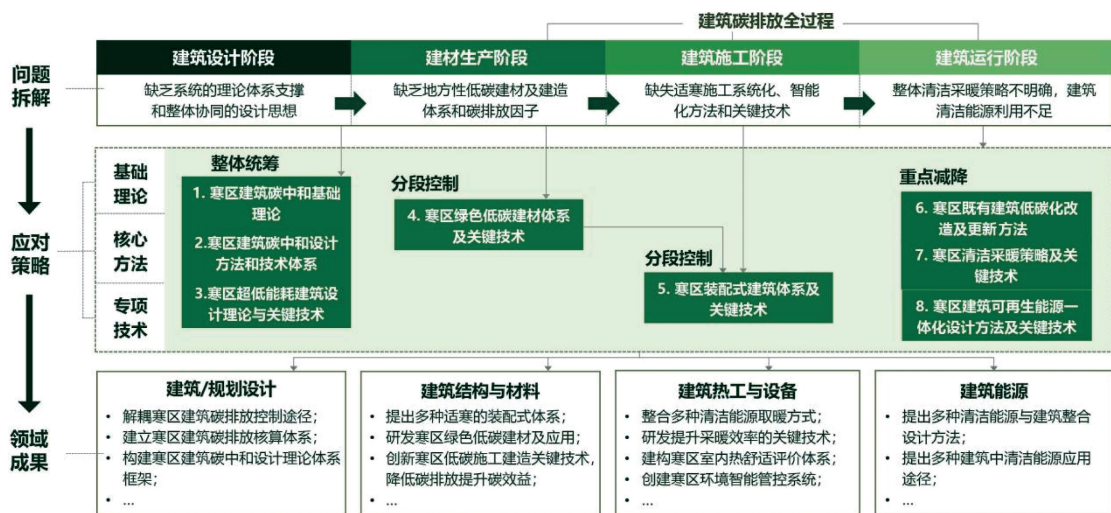


图3 寒区建筑碳中和的应对策略

3.1 加强顶层设计, 理论实践统筹兼顾

(1) 寒区建筑碳中和基础理论: 碳中和视角下的寒区建筑设计需要完整把握、准确理解、全面落实碳足迹理论, 将其贯彻到寒区建筑的全周期, 结合城市规划、建筑设计及其理论、建筑技术科学等相关学科知识, 实现由理论到策略、方法再到实践的系统性变革。具体包括:

寒区建筑碳中和总体目标与重难点研究, 以尽早实现碳达峰为短期目标、快速减排为中期目标、全面实现碳中和为终极目标, 着重解决寒区建筑地方性绿色低碳建材体系问题、冬季清洁采暖问题以及可再生能源利用问题^[15]; 寒区建筑碳中和重点任务研究, 从“源头控碳、增量脱碳、存量减碳、末端降碳”等方面着手, 科学谋划寒区建筑的碳中和重点任务(图 4), 通过战略统筹引导用能方式、平衡用能需求, 通过综合施策确定项目能效水平、分类提效达标, 多措并举加快推进寒区建筑低碳可持续发展; 寒区建筑碳中和发展路径与实施框架研究, 充分汇聚高等院校、科研院所、设计机构等资源优势, 跨平台、跨领域开展寒区建筑碳中和基础研究与技术攻关, 为实现寒区建筑高质量发展提供支撑。

(2) 寒区建筑碳中和设计方法和技术体系: 以碳中和作为目标导向, 探索寒区建筑碳中和的驱动要素、内在机理和实现机制, 推动以设计为主导的寒区建筑方法技术创新^[16], 实现建筑全生命周期的碳排放总量控制与设计、建造、运行、拆除阶段的碳排放权额分配。具体包括:

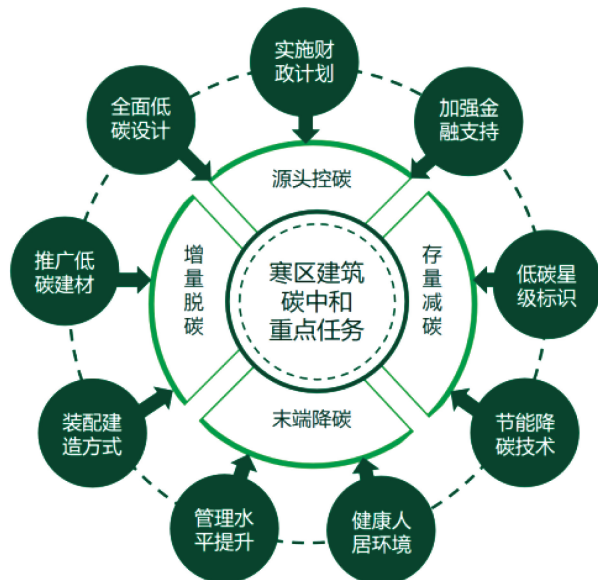


图 4 寒区建筑碳中和重点任务

寒区建筑零碳设计原理与方法研究, 以解耦寒区建筑碳中和为目标, 研究寒区不同类型建筑的碳排放影响因素、减排机制、管控措施等, 挖掘建筑减排潜力, 以最低的社会成本和最快速度实现碳中和; 寒区建筑低碳营造方法与关键技术研究, 定向研发寒区建筑低碳材料技术, 降低生产、运输能耗, 推广装配式、全装修等绿色建造方式, 有效降低建筑材料的资源消耗水平; 寒区建筑负碳运行方法与关键技术研究, 研究碳负排技术与减缓和适应气候变化之间的协同关系, 通过循环设计、碳捕捉、利用和封存技术(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)、能源梯级利用等方式实现负碳效果; 寒区建筑碳中和体系与关键技术验证, 开展符合寒区地域特征的“设计—建造—运行”协同的工程应用, 并汇合过程中的数据跟踪及客户反馈, 对全生命周期碳中和设计体系与关键技术进行调整与优化, 为寒区建筑领域实现碳中和提供标准和范例。

(3) 寒区超低能耗建筑设计理论与关键技术: 作为实现寒区建筑碳中和的重要前置阶段, 综合建筑学、建筑气候学和环境工程学原理实现人居环境绿色、健康、协调可持续发展, 通过适宜的设计理论和节能技术, 保障寒区建筑超低能耗与高性能表现的动态平衡。具体包括:

寒区超低能耗建筑理论体系与方法研究, 基于寒区建筑在自然条件、城市形态等方面的客观差异性, 在短期传统生态经验延续、节能技术推广和中长期高耗能建筑改造、消费减量、能源替代等方面尝试创新突破; 寒区建筑高性能围护结构关键技术研究, 通过技术引进、工程作法创新等手段提升围护结构的热工性能, 实现光、声、空气环境调节, 最大限度的节约能源; 寒区建筑超低能耗运行系统研究(图 5), 在运行过程中采用智能监测与控制系统实现能源高效利用, 保障健康、舒适、节能的建筑室内环境, 是降低建筑能耗最具生态属性的技术途径。

3.2 锚定核心任务, 关键阶段提质增效

(1) 寒区绿色低碳建材体系及关键技术: 面对寒区建材生产碳排放高的现实困境, 应优先选用本土化、高性能的建筑材料, 减少运输距离, 并实施生产工艺深度脱碳, 生产长寿命、耐久性好、可循环使用的建筑产品, 利用先进工艺提高建筑热工性能、降低隐含碳排放。具体包括:

寒区木结构建筑设计原理与关键技术研究, 东北寒区具有丰富的森林资源, 为低成本、低碳化的木结构发展提供了可能性(图 6), 其中正交胶合木

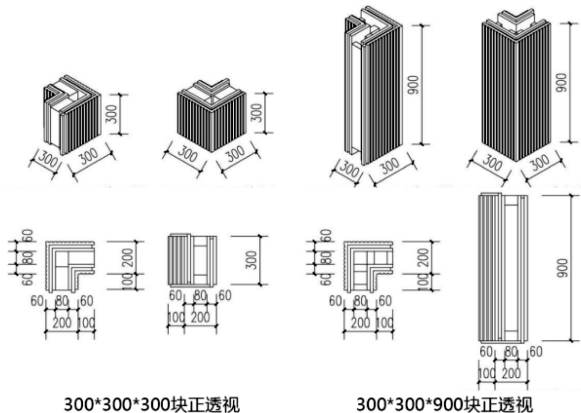
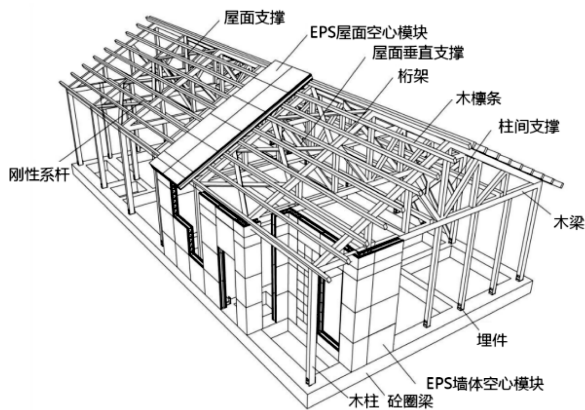


(A) 能耗信息统计



(B) 智慧环境控制

图5 寒区建筑超低能耗运行系统



300*300*300块正透视

300*300*900块正透视

图6 东北严寒地区林区绿色村镇木结构住宅^[17]

(Corss Laminated Timber, CLT)具有优越的强度和刚度特性,制造过程无需烧结、保温性能好,属于典型的负碳材料;寒区地域性建材研究,研制新型低碳保温材料,包括以秸秆、木屑作为主要原料制备的固废基新型保温材料以及泡沫玻璃陶瓷复合保温材料、多孔隙陶瓷复合保温材料等,在冬季防止室内热量散失、夏季隔绝室外热空气,明显改善室内热环境;此外,绿色高性能混凝土、高强度钢材等也在资源循环、固碳储碳方面表现出了良好的生态效益。

(2) 寒区装配式建筑体系及关键技术:面对寒区冬期施工的特殊性及复杂性,采用装配式建筑体系有效解决寒区建筑设计、生产、施工相脱节和施工工期短、项目建设周期长的问题,推进装配式建筑上、下游产业链协同发展,实现寒区建筑的建造标准化、规范化、低碳化。具体包括:

寒区装配式建筑设计建造一体化体系及关键技术研究,寒区建筑施工目前尚处于高耗能、低技术、弱管理的阶段,应优先开展寒区建筑“设计—加工—装配”技术体系研究,采用标准化设计对接施工图纸与预制构件库,通过工业化方法预制建筑部品及构配件,通过智能化、信息化、机械化技术手段现场组装,有助于优化资源配置、控制建设成本;寒区装配式建筑施工管理关键技术研究,采用 BIM 与 RFID 技术实现寒区装配式建筑设计、制造、运输、进场、吊装的全过程覆盖^[18],根据实际工程状况、造价控制及技术水平等客观因素,对建筑施工过程中的各类数据信息(如安全信息、人员信息、现场信息、物料信息、设备信息等)进行实时记录、数据追踪与统计分析,并结合实际情况及时调整进度计划,从而有效缩短施工周期、提升施工品质,降低施工过程中的直接碳排放和隐含碳排放。

3.3 夯实底层技术,重点场景减污降碳

(1) 寒区既有建筑低碳化改造及更新方法:“十三五”期间寒区既有建筑改造工作初见成效,但下一阶段 3.5 亿平方米的改造任务依然艰巨^[14],建议推行先东后西、先城市后农村的渐进式减碳方法,以试点工程为载体,形成具有寒区特色的低碳化发展长效机制,为寒区建筑改造与更新提供支持。具体包括:

寒区城市既有公共建筑建筑低碳化改造策略与方法研究,以北京为例,碳排放较高的公共建筑集中于办公、商业、酒店等类型,主要能耗类型为电力,单位面积能耗指标较高,通过建立智慧化碳排放监测和管理平台,实现建筑采暖、空调、通风、照明与各类

服务设施的节能效益最大化；寒区城市既有居住建筑延寿和功能提升路径研究，目前多数北方采暖地区的居住建筑改造标准偏低，普遍存在改造内容不全面、室内热舒适度差以及居民热费支出高的问题，因此，应将改造内容由外围护结构（墙体、屋顶、门窗）节能改造拓展至室内温度调控与供热计量改造、管网更新及清洁能源替代等方面，实现建筑延寿与综合性能提升；寒区农村既有居住建筑低碳化改造关键技术研究，针对东北严寒地区村镇住宅保温性能差、门窗密闭性不足等问题，积极利用本土化、被动化的技术措施改善外围护结构的热工性能，并将红外成像、无损检测技术应用于建筑改造之中（图 7），为现场节能检测提供依据。

（2）寒区清洁采暖策略及关键技术：我国寒区供暖总面积 211 亿平方米，其中城镇供暖面积占比 66.8%，农村供暖面积占比 33.2%^[19]。应从寒区采暖的“质”和“量”上审视其降碳潜力，注重“开源”和“节流”并行，因地制宜的开发可再生能源、科学规划采暖方案和运行模式，尽快形成高效供暖的能源发展新格局。具体包括：

寒区供暖低碳发展路线研究，寒区人均碳排放量 2.09 吨 CO₂，是非寒区的近 2 倍^[5]，应根据不同区域冬季差异化的采暖需求，制定分区供热的具体路线，其中华北地区调整能源结构、大力发展热电联产集中供热方式，西北地区着力整合供热资源、拓展集中供热覆盖范围，东北地区积极推广先进的节能减排技术、推进“煤改清洁能源”供暖设备部署；寒区建筑清洁采暖策略与关键技术，针对东北、华北和西

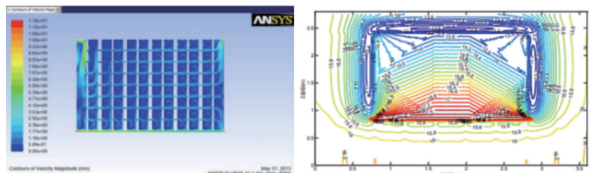
北可再生能源优势地区，重点研发分布式多能互补供需互动系统^[20]、“光储直柔”能源系统^[21]、太阳能高效低成本光热转化系统、空气源热泵采暖系统等，通过供暖系统的科学选型、性能测算与评估，实现清洁能源的高效转化利用；寒区建筑智慧采暖策略及关键技术研究，积极对接寒区各省智慧供热平台建设，利用智能终端对供暖设备进行集中管理和远程控制（图 8），通过分室、分时、按需供暖，实现室内热环境精准监测与灵活调控。

（3）寒区建筑可再生能源一体化设计方法及关键技术：寒区能源结构传统、能源效率低是造成建筑碳排放高的主要原因，应充分利用寒区能源禀赋，在建筑端改变能源结构、减少对电力能源的依赖，深入探索针对不同地区的能源综合利用方法，减轻城市能源系统负担。具体包括：

寒区光伏建筑一体化体系研究（Building Integrated Photovoltaic, BIPV）^[22]，在西藏等太阳能资源丰富的地区，建立“集成式光伏电站”，将光伏产品及相关设备与建筑屋顶、立面、悬挑、遮阳构件等建筑外围护体系有机结合，结合分布式并网光伏发电系统，将太阳能转换为电能供给建筑并将剩余电能输入城市电网，减轻高峰时段电网负担，有效降低用电成本的同时带来额外收入；寒区热泵与建筑一体化关键技术研究，在东北地区采用空气源热泵结合喷气增焐等系统，将空气中的低品味热能转化为高品位热能，实现超低温条件下的建筑高效供热并提高室内热舒适性；寒区风力发电与建筑一体化关键技术研究，新疆、内蒙古等地区风能和太阳能资源丰富，采用分散式开发、社区风电、智能微网等风电项目和建筑相结合的开发模式，与光伏发电系统



(A) 外墙性能测试



(B) 夹心墙窗洞口性能测试

图 7 改造后的东北严寒地区村镇住宅性能模拟

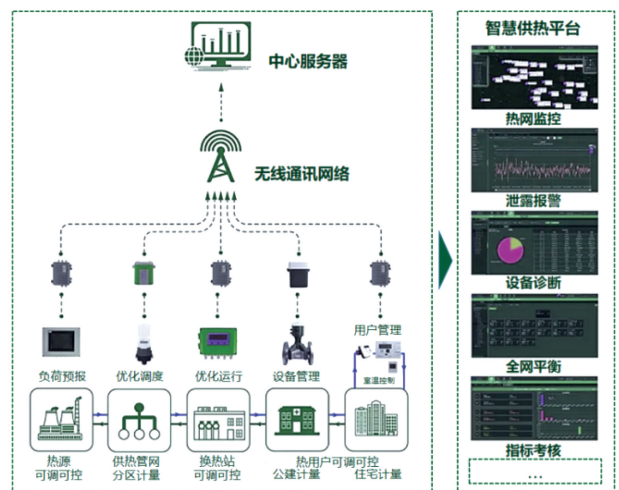


图 8 寒区智慧供热系统及平台构成

互为补充,可以有效解决边远农牧区的生活、生产用能;寒区生物质热电联产项目关键技术研究,响应国家政策,支持东北、华北地区有条件的县域、乡镇、工业园区开展以秸秆、稻壳、生活垃圾以及废旧木材、树根等为原料,建设生物质热电联产、生物质成型燃料产业园区,有效解决社会用电、用热等带来的环境污染问题。

4 总 结

在寒区全面践行碳中和的背景之下,建筑行业更应紧跟时代步伐、响应国家需求,为建筑学与相关学科部署全新发展方向。本文面向寒区建筑碳中和过程中的瓶颈问题,从基础理论、核心方法、专项技术三个层面提出应对策略。其中,建立寒区建筑碳中和设计理论、方法及技术体系,为碳中和提供基础保障;以寒区建筑材料选择、生产、运输和建造为调整重点,为资源整合、节约和充分利用提供方法媒介;通过建立寒区建筑运行阶段的新型用能体系,实现能源高效管理,为碳排放总量和强度双控提供技术支持。

在寒区建筑碳中和研究的过程中,将实现三重突破:(1)强调整体协同思想、明确效果导向的理论突破,科学拆解寒区建筑碳中和中的关键问题,实现碳中和理论基础的多专业协同、理论研究的全过程协同、理论应用的全周期协同;(2)鼓励学科交叉、综合优化的方法突破,打破学科壁垒,促使建筑学、城市规划、建筑结构与材料、建筑热工与设备、建筑能源等学科交叉融合;(3)强调效益深化、重点环节革新的技术突破,集中优势加快碳中和领域关键核心技术攻关,积极探索高校、科研院所与企业合作机制,促进科技成果快速转化。最后,期望领域成果可以为我国寒区建筑实现碳中和做出更大贡献。

参 考 文 献

- [1] United Nations. The Paris Agreement. (2015-12-12)/[2023-06-01]. <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change. AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023. (2023-3-10)/[2023-06-01]. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- [3] 住房和城乡建设部,国家发展改革委. 城乡建设领域碳达峰实施方案. (2022-06-30)/[2023-06-01]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/13/content_5700752.htm.
- [4] 梅洪元. 寒地建筑. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [5] 中国建筑节能协会能耗与碳排放数据委员会. 2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告. (2022-12-30)/[2023-06-01]. <https://www.cabee.org/site/content/24021.html>.
- [6] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年底发展研究报告 2022(公共建筑专题). 北京:中国建筑工业出版社,2022.
- [7] International Energy Agency. An Energy Sector Roadmap to Carbon Neutrality in China. (2021-09-30)/[2023-06-01]. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9448bd6e-670e-4cfd-953c-32e822a80f77/AnenergysectorroamaptocarbonneutralityinChina.pdf>
- [8] 陈祖海,雷朱家华. 中国环境污染变动的时空特征及其经济驱动因素. 地理研究, 2015, 34(11): 2165—2178.
- [9] 孙勇凯,罗西,王登甲,等. 西北地区能源生产消费特征与发展路径研究. 中国工程科学, 2022, 24(6): 38—51.
- [10] 谢克昌等. 中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究. 北京:科学出版社,2014.
- [11] 王利伟,窦红涛. 积极应对“双碳”目标实施对南北协调发展的挑战与对策建议. 中国经贸导刊, 2023(1): 55—57.
- [12] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告 2022. (2022-09-21)/[2023-06-01]. https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkcybg/202209/t20220921_2759600.html.
- [13] 中国气象局风能太阳能中心. 中国风能太阳能资源年景公报(2022年). (2023-04-21)/[2023-06-01]. https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202304/t20230421_5454513.html.
- [14] 住房和城乡建设部. “十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划. (2022-03-11)/[2023-06-01]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/202203/20220311_765109.html.
- [15] 梅洪元,张向宁,林国海. 东北寒地建筑设计的适应性技术策略. 建筑学报, 2011(9): 10—12.
- [16] 林波荣. 建筑行业碳中和挑战与实现路径探讨. 可持续发展经济导刊, 2021, 22(Z1): 23—25.
- [17] 付本臣,张宇,魏景山,等. 东北严寒地区林区绿色村镇木结构装配式住宅定型化设计图集. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [18] Du Q, Pang QY, Bao TN, et al. Critical factors influencing carbon emissions of prefabricated building supply chains in China. Journal of Cleaner Production, 2021, 280: 124398.
- [19] 清洁供热产业委员会. 中国清洁供热产业发展报告 2020. (2021-01-13)/[2023-06-01]. <http://www.chic.org.cn/Home/Index/detail? id=960>.
- [20] 曲建升,陈伟,曾静静,等. 国际碳中和战略行动与科技布局分析及对我国的启示建议. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 444—458.
- [21] 江亿. 光储直柔——助力实现零碳电力的新型建筑配电系统. 暖通空调, 2021, 51(10): 1—12.
- [22] Yang TT, Athienitis AK. A review of research and developments of building-integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 66: 886—912.

Barriers and Strategies of Building Carbon Neutral in Cold Regions

Hongyuan Mei^{1, 2} Yuting Chen^{2*} Xiaolei Shi² Feng Gao^{2, 3} Teng Fei^{2*}

1. School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001

2. Architectural Design and Research Institute of Harbin Institute of Technology Co., LTD, Harbin 150090

3. School of Architecture and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150006

Abstract In the process of achieving carbon neutrality in China, buildings in cold regions have the problems of large amount and high intensity of carbon emissions and outdated energy structure. There is a series of bottlenecks and barriers in the process of carbon neutral, which include not only the different paths and the complex framework of carbon reduction due to the great differences of urban and rural built environment and the unbalanced distributions of natural resources, but also the large material consumption, the long period of construction and the high energy consumption for heating caused by low temperature in winter. In order to break the bottlenecks of carbon neutral in architecture and provide scientific decisions, this paper establishes an overall theoretical system of carbon neutral, proposes a method system of carbon reduction sectional controlling and builds a technology system of carbon reduction in main scenes from the view of the characteristics and mechanism of the whole building life-cycle carbon emissions in cold regions.

Keywords cold region; building carbon neutral; bottleneck problems; coping strategies

(责任编辑 崔国增 张强)

* Corresponding Author, Email: feiteng@hit.edu.cn