



# 碳中和背景下我国建筑领域发展的 新机遇





## 关于落基山研究所 (RMI)

落基山研究所(Rocky Mountain Institute, RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库,与政府部门、企业、科研机构及创业者协作,推动全球能源变革,以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所着重借助经济可行的市场化手段,加速能效提升,推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市及华盛顿特区和尼日利亚设有办事处。

# 作者与鸣谢

## 作者

李婷

李威

廖登峰

王广煦

王萌

## 其他作者

郝一涵

作者姓名按姓氏首字母顺序排列。

## 联系方式

李威, [wli@rmi.org](mailto:wli@rmi.org)

王萌, [mwang@rmi.org](mailto:mwang@rmi.org)

## 引用建议

李威, 王萌, 王广煦, 碳中和背景下我国建筑领域发展的新机遇, 落基山研究所, 2024

<https://rmi.org.cn/insights/unlocking-new-opportunities-for-carbon-neutrality-in-chinas-building-sector>

## 鸣谢

本报告特别感谢以下专家对报告撰写提供的洞见与建议。

李丛笑, 中国建筑集团双碳领导小组办公室副主任

林波荣, 清华大学建筑学院副院长

郝斌, 深圳市建筑科学研究院股份有限公司副总工程师

师海霞, 中国混凝土与水泥制品协会副秘书长

特别感谢 Quadrature Climate Foundation 对本报告的支持。

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构的观点。

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。

# 目录

前言 .....	5
<b>第一章 建筑领域碳中和的意义与进展 .....</b>	<b>6</b>
1.1 建筑领域碳中和的重要意义 .....	7
1.2 建筑双碳行动的进展 .....	8
<b>第二章 建筑用能灵活性提升与零碳供暖, 助力建筑运行阶段脱碳 .....</b>	<b>11</b>
2.1 我国建筑运行阶段用能的现状及脱碳挑战 .....	11
2.2 建筑运行阶段脱碳的路径 .....	13
2.3 建筑运行阶段脱碳的机遇 .....	14
2.3.1 挖掘建筑作为新型电力系统中灵活性资源的巨大潜力 .....	14
2.3.2 加速“余热利用+热泵”推广, 降低建筑供暖对化石能源的依赖 .....	19
<b>第三章 钢筋水泥降碳与竹木结构推广, 推动建筑隐含碳降低 .....</b>	<b>21</b>
3.1 我国建筑隐含碳排放现状及脱碳挑战 .....	21
3.2 建筑隐含碳降碳路径 .....	23
3.3 建筑隐含碳脱碳的机遇 .....	26
3.3.1 将低碳指标纳入绿色采购体系, 实现建筑工程广泛应用低碳建材 .....	26
3.3.2 加强现代竹木结构的技术研发、标准创新和市场化推广 .....	28
<b>第四章 新产品新技术配合新模式新机制, 驱动建筑领域价值增长 .....</b>	<b>31</b>
4.1 新建绿色建筑与既有建筑降碳改造是主要市场驱动力 .....	31
4.2 碳中和相关产品技术将成为建筑领域新的价值增长点 .....	32
4.3 产业链一体化、智能化、标准化和市场机制赋能建筑产业发展 .....	36
<b>第五章 以公平普惠为导向, 建筑领域碳中和惠及更多城乡居民 .....</b>	<b>39</b>
5.1 建筑碳中和进程将惠及更多城乡居民 .....	39
5.2 城乡住房碳中和进程中推动公平普惠的新机遇 .....	42
5.2.1 发挥保障性住房的绿色低碳引领作用 .....	42
5.2.2 因地制宜推进城镇老旧小区低碳改造 .....	44
5.2.3 利用可再生资源、围护结构改造、低碳建材实现零碳农房 .....	45
<b>第六章 把握新机遇, 推动建筑领域零碳转型 .....</b>	<b>48</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>51</b>

# 前言

建筑领域的二氧化碳排放占全球总二氧化碳排放的37%，是全球共同应对气候变化、实现气候目标的关键领域。我国是全球建筑存量最大的国家，现有总建筑面积存量约700亿平方米，每年新增建筑面积超过10亿平方米。2022年，我国建筑运行阶段产生的二氧化碳排放达22亿吨，建材生产、运输和施工阶段碳排放15亿吨，约占全国二氧化碳排放总量的32%。随着极端天气频发、快速城镇化和居民生活水平提升，建筑建造和用能相关的需求明显增长，由此导致的能源消费和碳排放持续增长。建筑领域节能降碳不仅与人民日益增长的生活需求息息相关，对于我国双碳目标的顺利实现也至关重要。

落基山研究所一直致力于推动全球建筑领域零碳转型。二十世纪八十年代，落基山研究所曾引领美国被动房的快速发展，九十年代推动绿色建筑规模化并参与相关认证体系如LEED体系的设计和推广，本世纪初设计并实施了纽约帝国大厦能效改造、北美创新中心净零能耗建筑等全球领先的典范项目。在我国双碳目标的指引下，为支持建筑领域脱碳和零碳建筑规模化发展，落基山研究所2017年在宁波梅山近零碳示范区推动了首个建筑全生命周期碳减排政策实践，发布了六维未来零碳建筑倡议，并积极参与我国零碳建筑标准体系建设、提供相关国际实践参照和技术支撑。

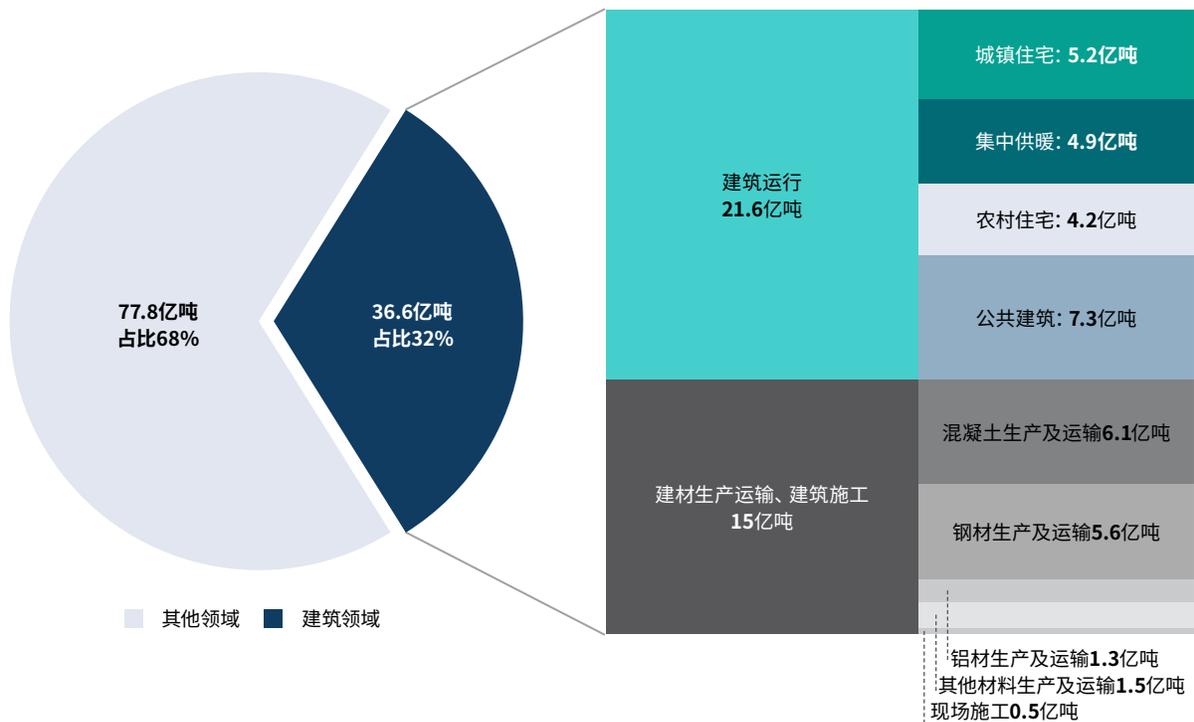
本报告旨在支持和推动我国建筑领域的碳中和转型，基于行业经验、政策解读、市场洞察，从建筑用能、建筑材料、建筑产业、公平普惠四个维度全面梳理了碳中和背景下建筑领域面临的新的发展机遇，并提出了针对性的行动建议。报告提出，碳中和背景下，建筑的主要发展趋势和机遇包括：建筑能源系统将通过提升建筑用能灵活性及零碳供暖实现用能脱碳；建筑用材将逐步低碳化，低碳混凝土、低碳钢筋、木材等低碳建材得到推广；建筑产业将形成碳中和驱动的新经济增长点；建筑碳中和将惠及低收入、城镇老旧小区和农村居民。

# 第一章 建筑领域碳中和的意义与进展

## 1.1 建筑领域碳中和的重要意义

我国自2020年提出“2030年前碳达峰，2060年前碳中和”的双碳目标以来，建筑一直是双碳行动的主要工作领域之一。据测算，2022年我国建筑领域二氧化碳排放总量达37亿吨<sup>i</sup>，占全国二氧化碳排放总量的32%<sup>ii</sup>。其中，来自建筑运行阶段的二氧化碳排放约为22亿吨，来自建材生产运输及建筑施工的二氧化碳排放约为15亿吨（图1）。过去10年来，随着城市建设的逐渐放缓，我国建筑领域的总碳排放量已经基本处于平台期，自2014年以来未有较大增长（图2）。但相比于发达国家，我国的人均建筑面积和用能水平仍有增长的空间，因此建筑领域的碳达峰与碳中和还需要兼顾需求的增长与碳排放的下降。

图1 2022年我国建筑领域二氧化碳排放

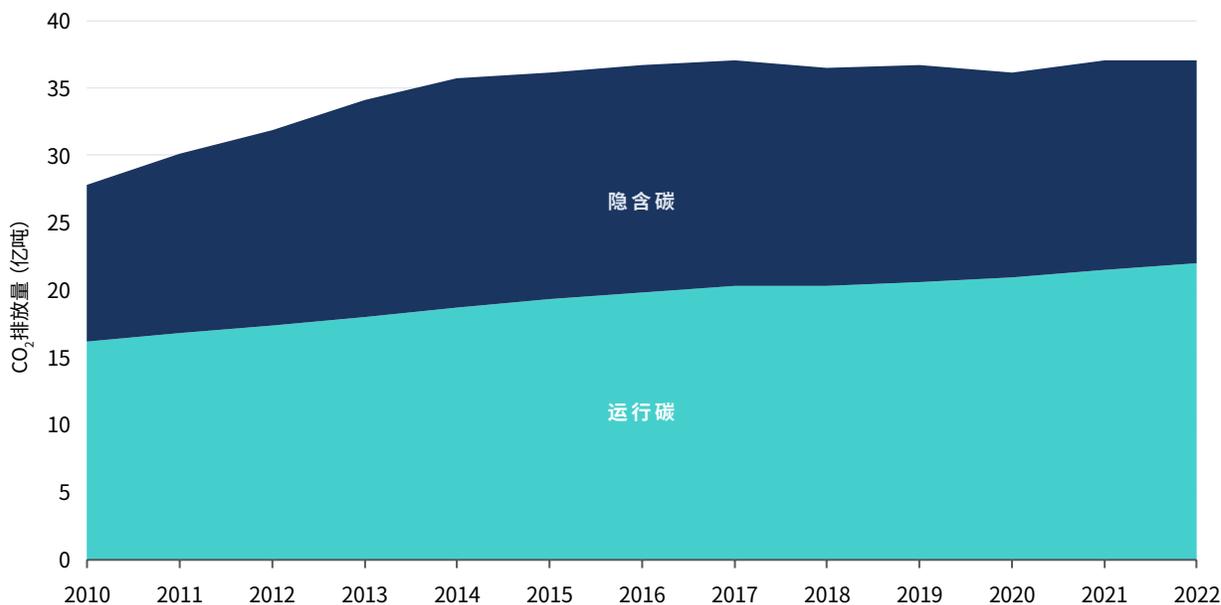


来源：落基山研究所

注：落基山研究所基于《中国建筑节能年度发展研究报告2024》国际能源署数据以及《2023中国建筑与城市基础设施碳排放研究报告》测算得出

- i “建筑”一词在不同语境下存在若干不同概念，主要有建筑领域、建筑部门、建筑业等。本报告的“建筑”指房屋建筑（对应英文“building”）及其上下游的产业链（包括建筑材料、建筑设计、建筑服务等）。按照我国行业分类，“建筑业”一词包括房屋建筑业、土木工程建筑业、建筑安装业、建筑装饰、装修和其他建筑业，涵盖了房屋建筑、基础设施及建筑服务类活动。本文中，“建筑业”与“建筑产业”具有相同的意义。“Building sector”一词有时翻译为“建筑部门”，但此词在官方表达中较少使用，且通常与政府部门设置挂钩，“建筑部门”通常不包括建材生产等活动。“建筑领域”一般指与建筑相关的领域，涵盖了建筑设计、施工、监理、建筑材料和设备、建筑服务，与本报告聚焦的建筑概念相同；且在政府发布的碳达峰碳中和相关政策中使用较多。因此，本文统一使用“建筑领域”一词。为行文方便，本报告会使用“建筑”代替“建筑领域”，例如“建筑脱碳”代替“建筑领域脱碳”等表述。
- ii 2022年全国二氧化碳排放为114.8亿吨，数据来自国际能源署。

图 2 2010-2022年我国建筑领域二氧化碳排放变化



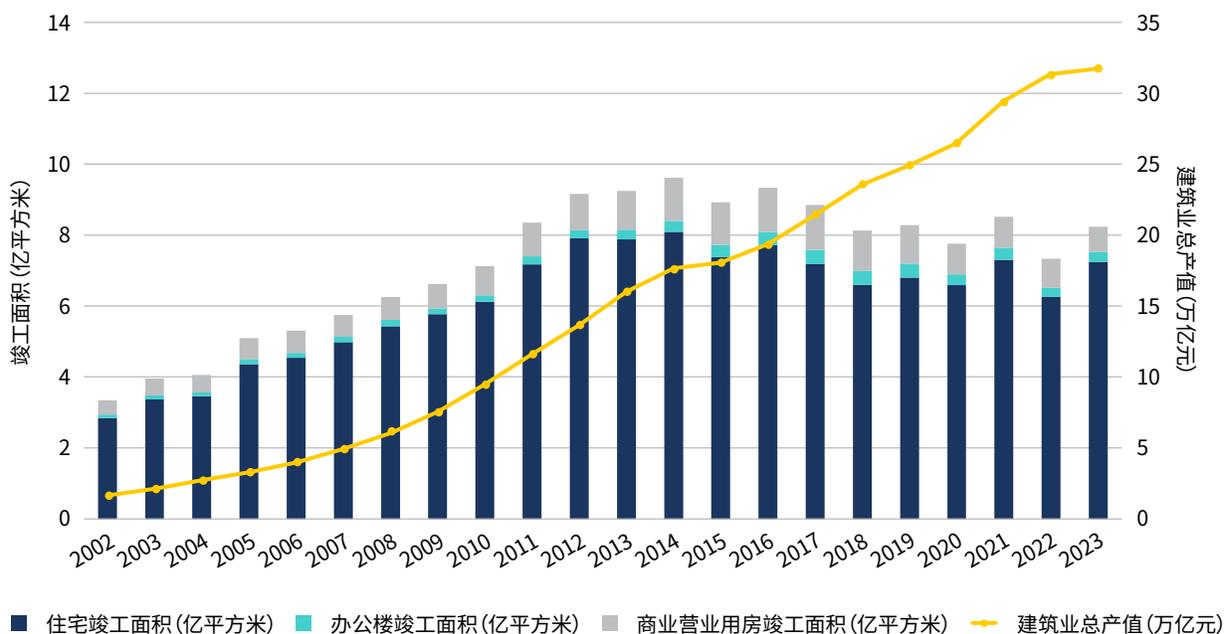
来源：落基山研究所基于清华大学的数据整理

建筑领域实现双碳目标还对其他相关部门的减排至关重要。首先，建筑是能源需求侧的主要领域之一。我国建筑运行用能占到全国终端能源消费的21%和终端电力需求的四分之一<sup>1</sup>。建筑行业的电气化率达到44.9%，在终端用能部门最高<sup>2</sup>。因此，电力系统的清洁化是建筑碳中和的必要前提，同时建筑也会成为新型电力系统中重要的灵活性资源发挥减排作用。其次，建筑是大宗工业原材料的最主要消费行业，我国建筑钢铁用量占全社会钢铁总产量的约37%，建筑水泥用量占全社会水泥总产量的约55%<sup>3</sup>。建筑材料在生产运输施工过程中的碳排放隐含在建筑中，被称为隐含碳。建筑领域降低隐含碳的措施将推动上游工业行业减排，培育低碳产品市场，产生协同减排效益。

建筑还是关乎民生的重要领域，建筑领域的双碳行动可以将更高效、智能、健康的居住环境惠及更广泛的社会群体。我国拥有全世界规模最大的保障房体系、规模最大的存量建筑以及数量仍然庞大的农村住宅。保障性住房、老旧小区、农村住宅三类住房总面积达到近350亿平方米，占全国住房面积比例56.5%，居民总量约7.5亿人。随着保障性住房建设、旧城更新与乡村振兴的推进，碳中和技术在这三类住房中的进一步推广将带动居民生活质量提升，有利推动共同富裕与社会公平。

双碳行动还意味着建筑领域从粗放式增长转变为高质量增长，将为行业可持续健康发展带来新的增长点。2000年以来我国建筑业增加值占国内生产总值的比重一直保持在6%以上，建筑业总产值到2023年已达31.6万亿元，并为全社会提供了超过5,000万个就业岗位<sup>4</sup>。但近年来，我国建筑市场的供求关系发生重大变化。我国建筑竣工面积在经历2014-2016年的峰值后已呈现缓慢下降趋势（图3）。受疫情、房地产市场供求关系变化等因素影响，新开工建筑面积也在近年下降，2023年仅为9.5亿平方米。依靠土地经济和大规模增量的粗放式发展模式将不再适用。双碳目标的出现对建筑提出了低碳、高效、智能等新要求，将促成一批新技术、新模式的应用推广，推动建筑领域向高质量和精细化管理发展。

图 3 2002-2023 年全国建筑业总产值及各类建筑竣工面积走势



来源：落基山研究所根据中国国家统计局数据绘制

## 1.2 建筑双碳行动的进展

为落实双碳目标，我国加速推动建筑领域节能降碳，国家层面建筑碳中和指导性文件陆续出台。2022年住房和城乡建设部、国家发展和改革委员会发布了《城乡建设领域碳达峰方案》，成为城乡建设领域高质量碳达峰的指导性文件。同时，围绕建筑领域碳达峰碳中和的重点工作方向，国家出台了建筑节能、可再生能源、建材、零碳建筑等相关方面的政策、标准和路线图，细化了建筑领域的脱碳行动（表 1）。

表 1 近年我国建筑领域双碳政策

时间	政策	意义	主要内容
2021.10	2030年前碳达峰行动方案	双碳战略顶层设计	推进城乡建设绿色低碳发展，加快提升建筑能效水平，优化建筑用能结构。
2022.03	“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划	提出建筑领域落实双碳战略的具体目标	到2025年，建设超低能耗、近零能耗建筑0.5亿平方米以上，装配式建筑占当年城镇新建建筑的比例达到30%，全国新增建筑太阳能光伏装机容量0.5亿千瓦以上，城镇建筑可再生能源替代率达到8%，建筑能耗中电力消费比例超过55%。
2022.04	建筑节能与可再生能源利用通用规范	首次将建筑碳排放纳入建筑节能国家标准体系	全文强制执行的建筑新标准，对于新建建筑碳排放计算做出了强制要求，提高了新建建筑热工性能限制、以及暖通空调系统效率和照明要求。
2022.06	城乡建设领域碳达峰实施方案	明确城乡建设领域碳达峰重点任务	2030年前城乡建设领域碳排放达到峰值，建设绿色低碳城市，打造绿色低碳县城和乡村。

接下页

时间	政策	意义	主要内容
2022.11	建材行业碳达峰实施方案	明确建材行业碳达峰重点任务	强化总量控制、推动原料替代、转换用能结构、加快技术创新、推进绿色制造，实现2030年前建材行业碳达峰。
2023.07	零碳建筑技术标准（征求意见稿）	首个针对零碳建筑的国家标准	零碳建筑应采用性能化设计方法，建筑冷热源和热水热源应优先选用太阳能光热系统、地源热泵、空气源热泵等；供电系统应优先选用光伏发电、风光互补等。
2024.03	加快推动建筑领域节能降碳工作方案	明确建筑领域节能降碳重点任务	到2025年，城镇新建建筑全面执行绿色建筑标准，新建超低能耗、近零能耗建筑面积比2023年增长0.2亿平方米以上，完成既有建筑节能改造面积比2023年增长2亿平方米以上，建筑用能中电力消费占比超过55%，城镇建筑可再生能源替代率达到8%。
2024.03	推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案	进一步巩固和发挥投资对优化供给结构的关键作用	到2027年，建筑等领域设备投资规模较2023年增长25%以上。加快更新不符合现行产品标准、安全风险高的老旧住宅电梯。有序推进供热计量改造，持续推进供热设施设备更新改造。以外墙保温、门窗、供热装置等为重点，推进存量建筑节能改造。
2024.05	建立碳足迹管理体系的实施方案	明确建立产品碳足迹管理体系的目标与任务	到2027年，碳足迹管理体系初步建立，制定出台100个左右重点产品碳足迹核算规则标准。到2023年，制定出台200个左右重点产品碳足迹核算规则标准。
2024.07	加快构建碳排放双控制度体系工作方案	建立能耗双控向碳排放双控全面转型新机制	完善建材等重点行业领域碳排放核算机制。制修订重点行业企业碳排放核算规则标准。在重点行业开展温室气体排放环境影响评价，强化减污降碳协同控制。组织相关行业协会、企业、科研单位等制定发布产品碳足迹核算行业标准或团体标准。
2024.08	关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见	首次系统部署加快经济社会发展全面绿色转型	推广绿色建造方式，优先选用绿色建材。建立建筑能效等级制度。加快既有建筑和市政基础设施节能节水降碳改造，推广先进高效照明、空调、电梯等设备。优化建筑用能结构，推进建筑光伏一体化建设，推动“光储直柔”技术应用，发展清洁低碳供暖。
2024.08	关于进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案（2024—2025年）的通知	细化部署“双碳”标准计量体系建设工作	加快推进建材、建筑等重点行业企业碳排放核算标准和技术规范的研究及制修订。开展建材等重点产品碳足迹标准研制。推动加强钢铁、水泥等重点行业和领域碳计量技术研究。组织各地区对建筑建材等传统行业以及数据中心、公共机构等重点领域开展能源计量审查。

同时，国家、地方政府及市场主体通过一系列规划、试点、工作方案、激励政策和具体的建筑项目逐步落实建筑领域的降碳行动。其中代表性的如北方地区冬季清洁取暖规划、政府采购支持绿色建材促进建筑品质提升试点、河南省超低能耗建筑奖励政策、北京市装配式建筑实施意见、广州市政府投资公共建筑执行近零能耗建筑标准政策等。这一系列工作方案和支持政策在建筑节能政策的基础上更加关注建筑降碳，推动了建筑领域碳中和进程（表2）。

**表 2 建筑领域国家、地方与企业双碳行动举例**

主体	时间	发文	行动内容
<b>国家层面行动</b>			
国家发改委等十部委	2017年	北方地区冬季清洁取暖规划	《规划》明确到2021年，北方地区清洁取暖率达到70%，替代散烧煤1.5亿吨，“2+26”城市城区全部实现清洁取暖，农村地区清洁取暖率达到60%以上。
财政部、住房和城乡建设部	2020年	关于政府采购支持绿色建材促进建筑品质提升试点工作的通知	形成绿色建筑和绿色建材政府采购需求标准，落实绿色建材采购要求，探索开展绿色建材批量集中采购。
中国银行保险监督管理委员会	2022年	关于银行业保险业支持城市建设和治理的指导意见	鼓励银行保险机构加大支持城市发展的节能、清洁能源、绿色建筑、超低能耗建筑等领域，大力支持气候韧性城市建设和气候投融资试点。
工业和信息化部办公厅等六部门	2023年	关于开展2023年绿色建材下乡活动的通知	在2022年已批复第一批试点地区的基础上，根据不同区域发展需求和实际，再选择第二批5个左右试点地区开展活动。
<b>地方层面行动</b>			
重庆市	2021年	重庆市绿色低碳建筑示范项目和资金管理办法	四类“绿色低碳建筑示范项目”的专项补助资金申报。
北京市	2022年	关于进一步发展装配式建筑的实施意见	新立项政府投资的地上建筑面积3000平方米以上的新建建筑应采用装配式建筑。
河南省	2024年	关于推荐2024年装配式建筑和超低能耗建筑奖补项目的通知	根据装配率确定奖补力度，明确量化目标。
广州市	2024年	关于政府投资公共建筑项目全面执行《近零能耗建筑技术标准》的通知	新立项的政府投资和以政府投资为主的新建公共建筑项目应满足超低能耗建筑技术要求与标准。
深圳市	2024年	深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施	推动建筑及园区智能化改造，支持加装智能控制终端，提升建筑楼宇响应能力。
<p><b>企业行动：</b>太古地产、新城控股、瑞安等房地产企业制定了科学碳目标，推行绿色采购打造绿色供应链体系等行动；阿拉善SEE等机构发起房地产行业绿色供应链行动，推选环境表现良好的供应商进入推荐采购名单。</p>			

# 第二章 建筑用能灵活性提升与零碳供暖，助力建筑运行阶段脱碳

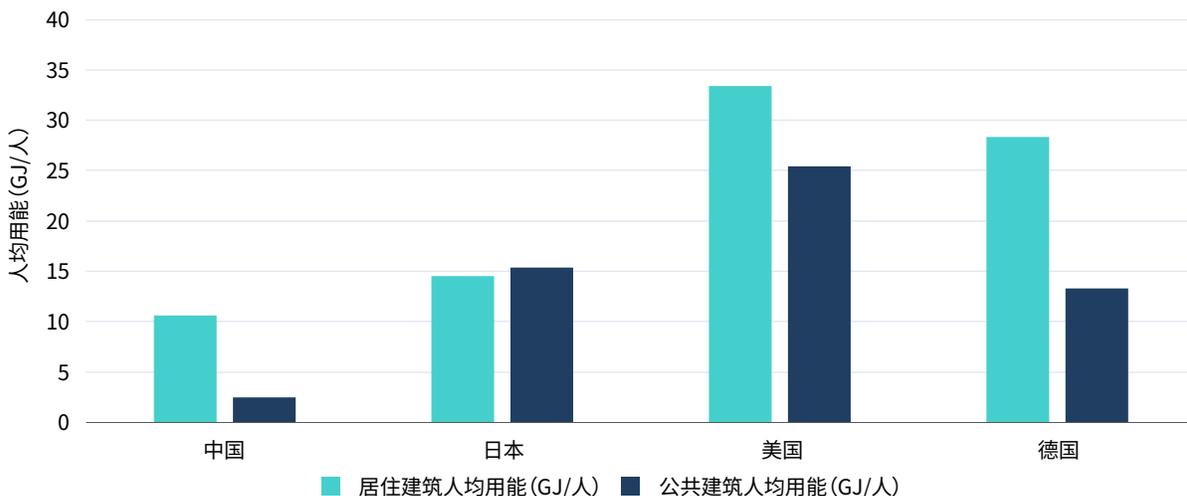
## 2.1 我国建筑运行阶段用能的现状及脱碳挑战

建筑运行阶段是建筑碳排放的最主要阶段之一，建筑运行阶段碳排放约占建筑全生命周期碳排放的59%<sup>4</sup>。建筑运行阶段的碳排放由两部分组成：一是用于分散式供暖、生活热水、炊事的化石燃料燃烧所造成的建筑内的直接碳排放，二是建筑用电和集中供热所造成的间接碳排放。2022年，我国建筑运行阶段的能源消费总量11.7亿吨标煤（tce），占我国能源消费总量的约21%，CO<sub>2</sub>排放达到22亿吨，占我国CO<sub>2</sub>排放总量的19.1%。从2010年到2022年，我国建筑运行阶段的能源消费总量增长超过85%，CO<sub>2</sub>排放总量增长约40%<sup>iii</sup>。

关于建筑运行阶段的能耗及二氧化碳排放，有三个主要趋势：

趋势一：建筑总体用能需求将持续高速增长。在过去的20年中，我国建筑运行阶段能源消费经历了飞速增长，从2000年的约3亿tce 增长至2022年的11.7亿tce，平均年增长率超过6.5%。然而，与欧美发达国家对比，我国的人均建筑用能还处于较低水平，随着经济发展与人民生活水平的提升，建筑用能需求还将面临进一步增长的趋势。

图 4 我国建筑人均用能与发达国家对比

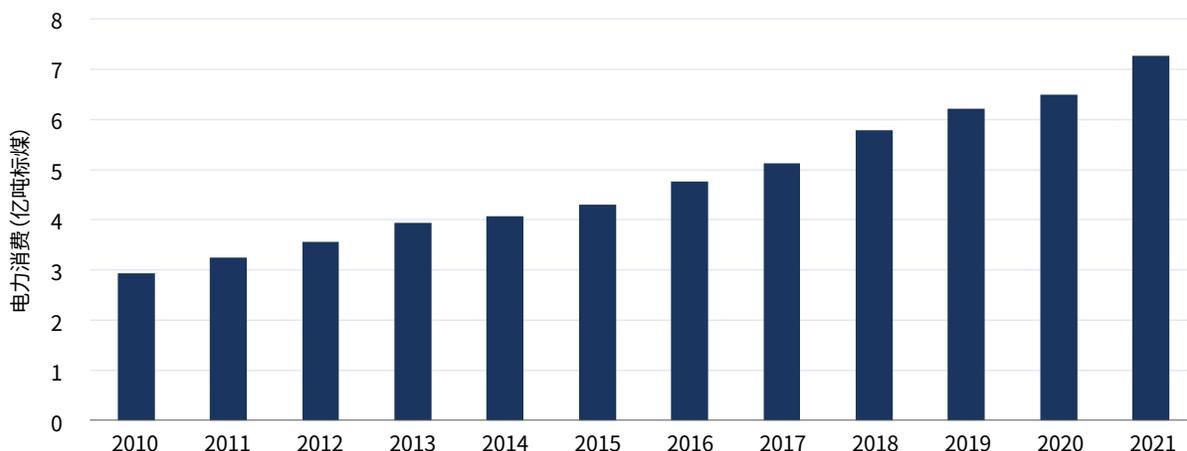


来源：落基山研究所基于IEA数据绘制

趋势二：建筑电力消费增长迅速，建筑用电负荷占电网峰值负荷比例越来越高。2021年，我国建筑运行阶段电力消费达到7.27亿tce，是2010年的近2.5倍（图5）。从全社会用电量占比来看，建筑用电比例也稳步攀升，达到了25%左右。建筑整体用能需求的增加以及公共建筑和农村住宅的电能替代是建筑运行阶段电力消费增长的主要原因。建筑电力消费增长的同时，以空调负荷为主的建筑用电峰值负荷也显著增长。浙江、湖北、四川等多个省份空调制冷负荷占最高用电负荷比重达到40–50%<sup>5</sup>。部分省级电网负荷曲线在冬夏季节呈现“双高峰”的形态，冬季用电负荷主要与供热设备电气化相关。由于气候变化的影响，极端高温、严寒天气增加，由制冷和供热导致的电力尖峰负荷更为突出。以上因素造成电网冬夏保供压力增大、调峰困难的问题。

iii 本段建筑领域能源消耗和碳排放数据取自《中国建筑节能年度发展研究报告-2024（农村住宅专题）》，除非明确标注，均为2022年数据。

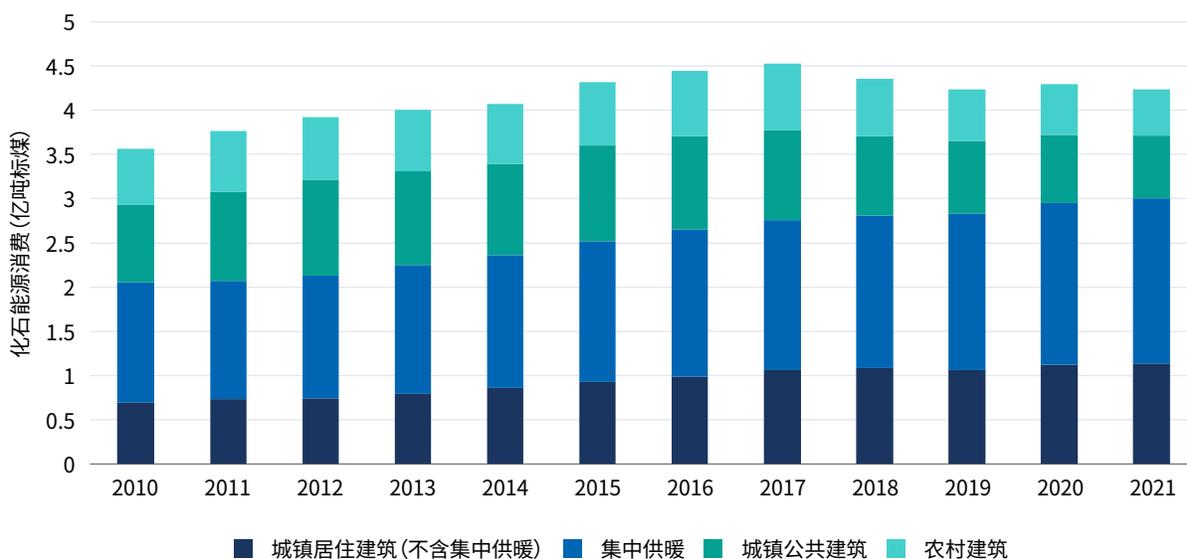
**图 5 全国建筑运行阶段电力消费(发电煤耗法计算)**



来源：落基山研究所基于建筑能耗与碳排放数据库<sup>6</sup>数据绘制

趋势三：建筑化石能源消费<sup>iv</sup>已实现达峰，但城镇居住建筑及集中供暖的直接化石能源消费仍持续增长。建筑领域的整体化石能源消费在2017年达到峰值，随后有缓慢下降的趋势（图6）。公共建筑与农村建筑的电气化转型是我国建筑运行阶段化石能源消费达峰并下降的主要原因。城镇的居住建筑以及集中供暖的化石能源消费<sup>v</sup>仍保持增长势头。建筑供暖是建筑化石能源消费最主要的来源，仅北方集中供暖占建筑化石能源消费的比例达到44%（图6）。随着城镇化进程的推进和散煤替代，北方城镇集中供暖覆盖面积持续增长，但目前集中供暖的热源仍以燃煤/燃气热电联产、区域燃煤/燃气锅炉为主，对燃煤和燃气的依赖度约为90%，导致北方城镇集中供暖碳排放占建筑运行碳排放的22.2%<sup>1</sup>。南方夏热冬冷地区的居民供暖需求也由于生活水平提高迅速增长，目前也大量依赖燃气锅炉等化石能源设备。

**图 6 全国建筑运行阶段化石能源消费**



数据来源：落基山研究所基于建筑能耗与碳排放数据库数据绘制

<sup>iv</sup> “建筑化石能源消费”不包含建筑用电的化石能源消费。

<sup>v</sup> 《中国建筑节能年度发展研究报告2023》指出，我国的集中供暖热源结构以燃煤热电联产、燃煤锅炉房、燃气热电联产以及燃气锅炉房为主，工业余热等其他热源占比仅2.1%，因此，本文将集中供暖的能源消费纳入化石能源消费范畴。

建筑运行阶段脱碳的具体实施面临着两大挑战：

- 建筑用电量与用电负荷双增长加剧电力系统保供和调峰压力，但建筑作为灵活性资源的潜力尚未充分挖掘。目前大多数建筑仍遵循“源随荷动”的传统思维，用能灵活性较差，在用电负荷高的时间发电侧需要增加化石能源电力满足建筑保供需求；由此导致的煤电发电量的增加会延后电力系统的脱碳时间，也会抬高建筑的间接碳排放。由于民用建筑供电优先级高且用能灵活性未得到充分挖掘，近年来，电力保供措施也影响到生产活动，造成了一定的经济损失<sup>7</sup>。
- 北方集中供暖和南方城镇居民供暖高度依赖化石能源设备，置换成本高成为减碳最大挑战。我国的北方集中供暖属于城镇基础设施，目前仍以燃煤和燃气热电联产为主，已经拥有较完备的基础设施和成本经济性，目前仍缺乏具备经济性且技术成熟的热源置换方案；在以长三角地区为代表的夏热冬冷地区，大量居民采用燃气壁挂炉作为家庭供暖设备，在没有额外经济激励的情况下，供暖设备的锁定效应<sup>vi</sup>使得该地区居民选择更低碳的供暖设备时存在选择上的延迟。因此供暖的低碳转型需要结合现有基础设施和市场情况，集中解决低碳技术的经济性问题。

## 2.2 建筑运行阶段脱碳的路径

建筑运行阶段脱碳的整体思路宜遵循“高效电气化+电网热网清洁化”。“高效电气化”即通过高能效的电气化设备取代建筑中的化石燃料，“电网热网清洁化”指使用零碳电力取代化石燃料发电，以及通过余热资源利用等手段实现热力系统的脱碳。

降低建筑用能需求、采用高能效的用电设备替代化石能源设备、发展多能互补的零碳供热系统、结合智能控制与分布式能源设施提升建筑用能的灵活性，将是未来建筑运行阶段脱碳的主要发展方向。

- 使用被动式设计降低建筑用能需求：我国建筑中超过50%的能源消耗与暖通空调及照明相关，部分地区的夏季空调负荷超过电网峰值负荷的40%。降低建筑用能需求的主要手段为应用被动式技术：1) 使用自然采光、自然通风以及热回收等技术；2) 提高建筑外围护结构性能，例如提升墙体和窗户的保温隔热性能、更好的气密性等。被动式技术可以降低建筑的冷暖用能需求和用电需求，还能够帮助建筑应对极端天气的影响，降低建筑的峰值负荷，缓解极端气候条件下电力供给紧张的情况。
- 采用高能效的用电设备替代化石能源设备：指采用热泵等能源利用效率高的电气化设备满足建筑的供暖制冷、生活热水、蒸汽、烹饪和衣物烘干等需求，一方面利用电气化降低化石燃料需求，另一方面高效的用电设备能减少建筑的用电增量，降低对电网的影响。据落基山研究所的估算，相比于燃气壁挂炉、电地暖等供暖设备，长三角地区居民采用热泵设备供暖可实现30%–70%的CO<sub>2</sub>排放降低<sup>8</sup>。
- 发展多能互补的零碳供热系统：北方城镇集中供暖占我国建筑运行阶段能耗的近1/4，也需要创新的技术和模式实现零碳转型。由于需求量巨大且涉及的供暖场景较复杂，北方城镇集中供暖无法通过单一的技术方案实现零碳。应因地制宜利用多种低碳技术，包括热电联产、工业余热、集中式热泵、生物质锅炉、跨季节蓄热、低温热网等技术实现。
- 结合智能控制与分布式能源设施提升建筑用能灵活性<sup>vii</sup>：伴随着电力系统的零碳转型以及建筑用电量与用电负荷的同步增长，建筑用能灵活性的提升愈发重要，不仅关乎建筑自身的运行阶段脱碳，也将减轻以可再生为主的新型电力系统的运行压力，从而助力电力系统的零碳转型。通过提升建筑用能灵活性措施的规模化落地，建筑将逐步实现从电力消费者向电力生产者与电力调节者的角色转变。

<sup>vi</sup> 供暖设备的锁定效应是指用户或者某一地区采取了某一类供暖设备/产品之后，会在未来很长一段时间内延续该设备的使用。

<sup>vii</sup> “提升建筑用能灵活性”一词在本文中包含了所有能够提供建筑用能灵活性的措施和手段，既包含了建筑通过智能控制、蓄能等措施实现自身负荷的柔性化调节，也包含通过安装屋顶光伏等分布式能源减少建筑对从公共电网输入的净负荷等措施。电网交互式节能建筑、光储直柔、需求侧响应均属于提升建筑用能灵活性的范畴。

## 2.3 建筑运行阶段脱碳的机遇

### 2.3.1 挖掘建筑作为新型电力系统中灵活性资源的巨大潜力

挖掘建筑作为灵活性资源的潜力对于在新能源系统中应对电力的供需波动以及建筑运行阶段脱碳都至关重要。建筑作为灵活性资源意味着建筑可以调节其用电负荷总量与分布情况，对于全国的能源转型有两方面意义。一方面，新型电力系统的核心特征是高比例新能源接入，由此对电力系统提出了更高的灵活调节能力的要求。在发电侧可调节资源有限的情况下，电力需求侧灵活性资源的开发势在必行<sup>9</sup>。另一方面，随着建筑用电量和负荷的增长，在发电侧需要增加化石能源电力满足建筑保供需求；由此带来的额外煤电供应会延后电力系统的脱碳时间，抬高建筑的间接碳排放。

建筑负荷是最优质的灵活性资源之一，与抽水蓄能、电化学储能电站等灵活性措施相比，其优势体现在三方面。首先，建筑负荷具有较高的灵活性。由于建筑的热惰性，可以在基本不影响建筑室内环境舒适性的前提下，通过负荷转移实现需求侧响应。例如，预冷以及“削峰填谷”策略在小体量办公建筑中可以减少高达35%的高峰时段冷负荷且不影响舒适性，在大体量建筑中尖峰负荷削减更加显著<sup>10</sup>。其次，作为建筑需求侧响应的主要形式，建筑蓄热具备较高的经济性和安全性。与电池储能等需求响应方式相比，储热设备价格更低。美国能源部的研究显示，储热系统的价格通常小于15美元/kWh<sup>11</sup>，而电化学储能尽管已经通过规模化大幅降本，其单位价格仍在100美元/kWh以上，储热的经济性优势明显。第三，建筑屋顶与立面可用面积广阔，在不过分占用土地的情况下为分布式光伏等分布式能源提供了安装场地。当前我国总建筑面积达660亿平方米，仅建筑屋顶就有超过100亿平方米可供安装屋顶光伏<sup>12</sup>，BIPV等技术的发展将继续增加了建筑可安装光伏的面积，进一步提升了建筑光伏潜力。有研究指出，我国有约超过1000GW的建筑光伏装机潜力，约占2050年我国电力总装机量的15%<sup>viii</sup>。建筑光伏不仅能降低建筑自身对于网电的需求，还可以向电网反向输出可再生电力，进一步提升建筑用能的灵活性。

近年来，我国建筑用能灵活性政策与技术条件经历了快速发展。政策上，需求侧灵活性逐渐成为受到政策关注的领域。2023年发改委等部门发布的《电力需求侧管理办法（2023年版）》提出了“提升需求响应能力，到2025年，各省需求响应能力达到最大用电负荷的3%–5%”的明确量化目标<sup>13</sup>。部分地方政府明确了发掘建筑作为灵活性资源潜力的要求，例如《江苏省电力需求响应实施细则》提出拥有空调、储能、冰蓄冷等具备可调节负荷的用户可通过独立户号、负荷聚合商或虚拟电厂运营商参与需求响应；《深圳市支持虚拟电厂加快发展的若干措施》提出，探索建筑楼宇智能化解决方案，鼓励楼宇积极接入市虚拟电厂管理平台，从而提升建筑楼宇响应能力。技术上，大数据、人工智能、物联网等数字化技术在建筑领域的加速落地应用，光伏、储能、建筑设备智能控制等技术的不断成熟和成本进一步降低，也为建筑用能灵活性的提升奠定了良好的基础。

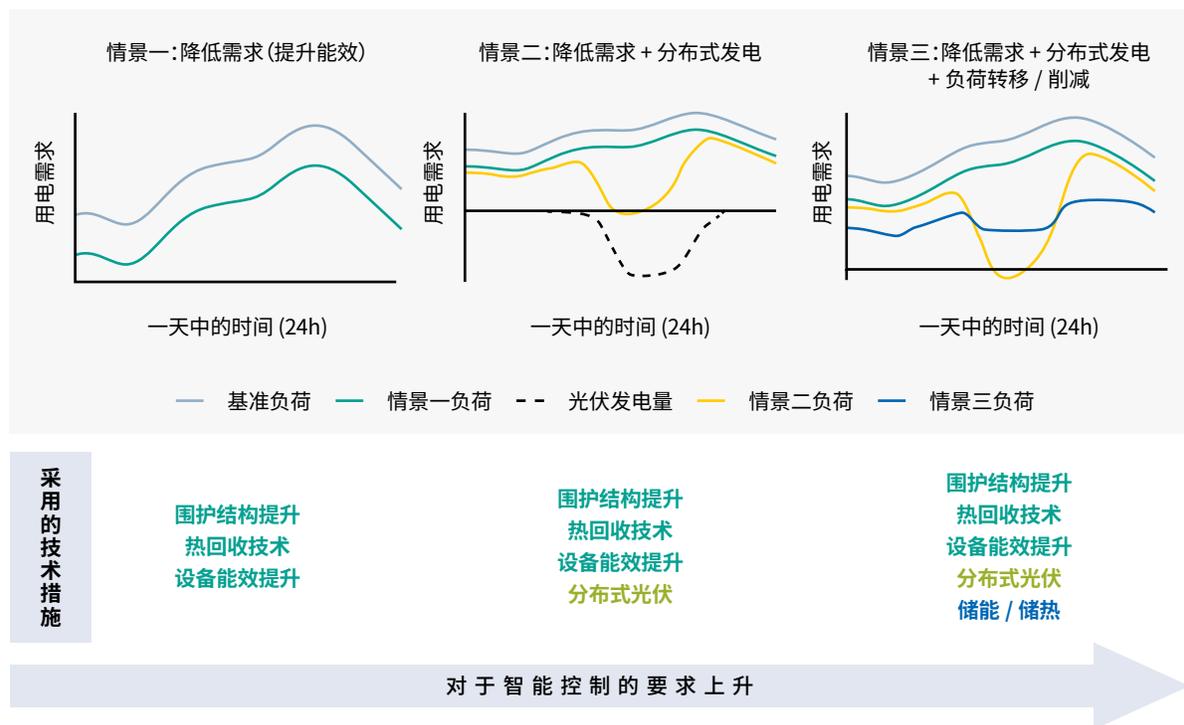
建筑用能灵活性的提升在我国具有巨大的减碳潜力以及经济效益。根据落基山研究所的预计，充分挖掘建筑用能的灵活性潜力能够实现全国至少10%的电网峰值负荷削减。在空调负荷占比更高的南方地区，如深圳，仅公共建筑用电峰值负荷就占电网峰值负荷的35%左右，提升建筑用能灵活性能够在该地区实现20%以上的电网峰值负荷削减，效果更加显著。另外，通过提升建筑用能灵活性的方式降低电网峰值负荷可以避免约5000亿元的电力系统建设额外投资（如新建煤电站），并实现至少2亿吨/年的CO<sub>2</sub>减排。建筑用能的灵活性的充分挖掘将转变建筑在能源系统中的角色，使建筑从传统能源系统中的“消费者”逐渐演变为能源的生产者、调节者和消费者，为整个能源系统的脱碳贡献力量。

viii 建筑光伏安装潜力预测来自 <https://database.caixin.com/2023-03-06/102005059.html>，我国2050年总发电装机预计为7100GW，来自落基山研究所报告《中国2050：一个全面实现现代化国家的零碳图景》

为了提升建筑用能的灵活性，可以从降低需求、负荷削减、负荷转移、调节、发电五个方面的技术措施着手。通过合理的技术组合能够显著提升建筑的需求响应能力，从而在大幅度降低建筑用电总量的同时降低建筑的峰值用电负荷（图7）。

- 降低需求指建筑通过围护结构性能提升、采用高效设备等措施降低建筑自身的用能（电）需求。建筑自身需求的减少能够直接减少电网的负荷，避免不必要的基础设施建设，是最为经济可行的节能降碳手段。
- 负荷削减指直接降低建筑内用电设备的运行功率或直接关停不必要的用电设备，从而实现降低电网负荷的目的。负荷削减的前提应该是不影响建筑的基本功能以及必要的舒适性，因此如何判断可以削减的负荷以及削减的程度是该手段实施需要考虑的关键，而对于对应设备的智能控制是实施该手段的技术基础。
- 负荷转移指将建筑内发生在电力供应紧张时段的负荷转移到电力供应充足的时段，建筑预冷及预热是最为常见的负荷转移措施。充分利用建筑自身蓄热能力，以及储能、储热设施配合智能控制是实现该功能的关键。
- 调节指利用电池和逆变器等设备对于电网以及负荷的瞬时波动（秒级到毫秒级）进行响应，以应对电网与负荷由于波动造成的不匹配。区别于负荷削减、负荷转移等大时间尺度上对于电力需求的调整，调节更关注极短时间尺度下需求侧对于供给侧的响应。
- 发电指充分利用建筑屋顶、立面等空间，安装光伏发电设施，为建筑自身或电网提供电力输出。储能和储热设备与可再生发电设备的智能配合是可以调节，转移负荷和输出多余电力的关键。

**图 7 建筑用能灵活性提升的技术组合下建筑的用电负荷变化<sup>ix</sup>**



来源：落基山研究所在美国能源部原图基础上绘制

<sup>ix</sup> 图片中横坐标为一天中的时间，纵坐标为建筑的用电需求。灰色曲线代表普通建筑（未使用节能减碳措施）的用电需求；其他颜色的曲线与下方罗列的技术对应，表示在应用了该技术后，建筑的用电需求；中间图的虚线代表了建筑分布式光伏的发电量。

为了进一步挖掘建筑负荷作为灵活性资源的潜力，在近中期可以做好以下工作：

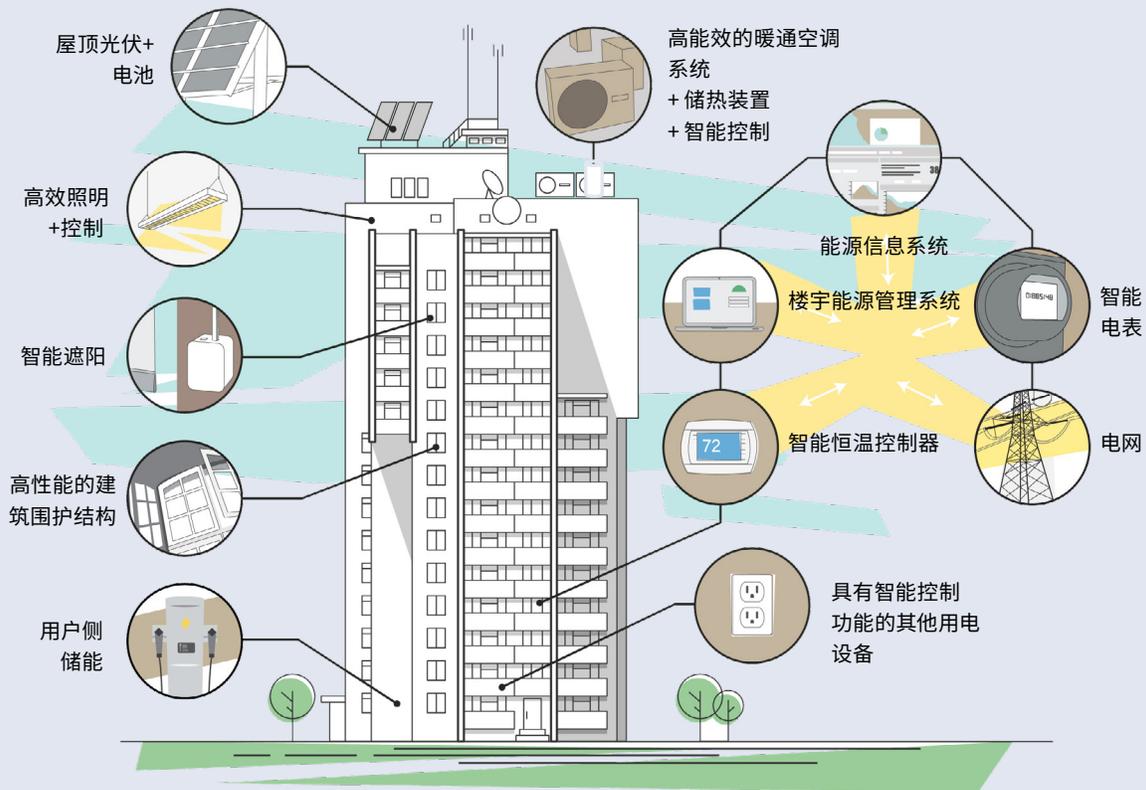
- 开发推广智能建筑关键技术，推动建筑用能灵活性提升措施的规模化应用。建筑智能化是建筑用能灵活性的提升的前提，这需要软件和硬件的深度结合。尽管分布式资源硬件以及智能控制软件的各自发展已经较为成熟，但其协同互动仍需进一步研究。利用建筑能碳管理平台与智能算法，将建筑内可调节的灵活性设施（光伏、空调、蓄能等）与各类传感器、执行器深度整合，使其能够对建筑内外部的各类信号及时响应（如电网需求响应邀约、电价信号、室内人员舒适度等），将成为进一步提升建筑用能灵活性的技术研发关键。可以从办公楼、商场等用能负荷较大，峰谷特征明显、且便于管理的公共建筑入手，推动其应用创新技术进行智能化改造，优先示范“光储直柔”等灵活性提升措施。另外，“电网-建筑-新能源汽车”交互融合技术成为需求侧响应的重要发展方向。2023年12月国家发改委等四部门发布了《关于加强新能源汽车与电网融合互动的实施意见》，提出“积极探索新能源汽车与园区、楼宇建筑、家庭住宅等场景高效融合的双向充放电应用模式”。建筑-电动车-建筑（BVB）技术把电动车和建筑这两个自身波动较大的负荷结合在一起，能够显著提升建筑能源系统的储能和调节能力。未来还需要做好“电网-建筑-新能源汽车”互动的核心技术攻关，以及加快建立“电网-建筑-新能源汽车”互动的交互接口、通信协议等关键技术标准制订。
- 创新商业模式和机制，聚合更多建筑主体参与建筑用能灵活性提升。建筑负荷的单体容量小、特性差异大、难以持续稳定，如何解决其碎片化特点是推广建筑负荷灵活性调节的关键。因此，通过负荷聚合商、电价激励等创新的模式和机制，激励居住建筑、公共建筑负荷、以及建筑与新能源车的负荷结合体等具备高用能灵活性潜力的主体积极参与需求侧响应，通过虚拟电厂等方式参与电网削峰填谷是重要的工作方向。目前这一领域已经取得了一些试点成绩。例如，湖州试点了“碳普惠机制下的居民空调负荷参与电网需求侧响应”项目<sup>5</sup>，通过为300个志愿者家庭安装支持Wi-Fi的空调伴侣，配合智能管理平台，住户可以根据自身制冷需求、电网调度预测信息、电价和积分奖励政策等因素主动控制空调的使用，实现了建筑峰值负荷的降低。

## 电网交互式节能建筑（Grid-Interactive Buildings, GEB）

电网交互式节能建筑作为提升建筑用能灵活性、降低电网运行压力的综合解决方案，近年来成为新兴的建筑发展理念。目前对于GEB较为通用的定义为：“能以连续整合优化的方式，主动利用智能技术和分布式能源设施，同时提供电网服务、满足用户需求以及降低用能费用的高能效建筑”<sup>14</sup>。

GEB覆盖了节能、网荷互动、产能等各个方面，因此，其实现需要多种技术的组合（图 8）。一方面，与传统的节能建筑类似，GEB也需要通过主动式和被动式技术融合的方式实现建筑能耗需求降低，例如更高性能的建筑围护结构、更高能效的建筑用能设备。另一方面，GEB则需要更多软硬件设施的相互配合，从而使其具备“电网交互”的能力。建筑能源管理系统（Building Energy Management System, BEMS）是GEB的大脑，对于传感器等硬件设备所收集的信息（如建筑人员活动情况、温湿度、电网负荷调控信号、电价信号等）进行整合和分析，并针对性的控制各功能性设备（空调、供暖、照明设备等）从而实现GEB舒适性、经济性、节能降碳等多维度的同步优化。另外，分布式光伏（屋顶光伏、BIPV等）、储能设施等分布式新能源设备在GEB中的应用将进一步提升建筑的网荷互动能力。

图 8 电网交互式节能建筑的关键技术



图片来源:美国能源效率经济委员会<sup>15</sup>

## “光储直柔”建筑案例：深圳建科院未来大厦

深圳建科院未来大厦定位为三星级绿色建筑和夏热冬暖地区净零能耗建筑。该项目通过采用天然采光、自然通风与遮阳、高效能源设备以及可再生能源与蓄能技术集成的“光储直柔”技术路线，成为国内第一个在实际工程中建成的全直流建筑。2020年8月到2021年8月的实测单位面积能耗为51.1kWh/m<sup>2</sup>，比2019年深圳市同类办公建筑平均年能耗水平（91.8kWh/m<sup>2</sup>）低44.3%，年CO<sub>2</sub>减排量达到1592吨。依托未来大厦的“光储直柔”系统的负荷柔性调节能力参与“虚拟电厂”的电网交互，在保障建筑正常运行、室内舒适度达标的情况下，削减了近50%的建筑用电负荷，并且协同建筑光伏、空调、照明和充电桩等柔性负荷实现了跟随峰谷电价24小时连续调节。该建筑2022年和2023年平均每度电价格分别降低到0.46元/kWh和0.455元/kWh，比同期深圳市工商业用户平均电价降低了40%以上，环境效益和经济效益显著。

图9 深圳建科院未来大厦实景照片



图片来源：广东省建筑节能协会

### 2.3.2 加速“余热利用+热泵”推广，降低建筑供暖对化石能源的依赖

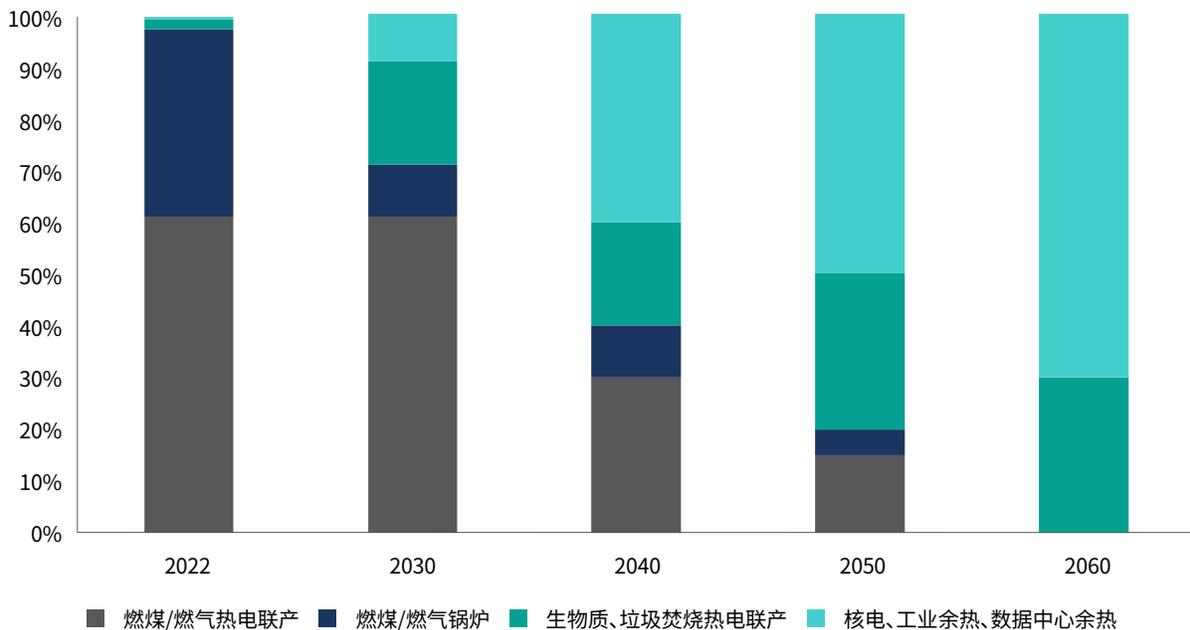
供暖系统的脱碳是建筑用能脱碳的又一重要领域。自2007年能源发展“十一五”规划指出分布式锅炉转变为集中供暖以来，建筑供暖脱碳成为建筑领域用能脱碳成绩最突出的方面之一，尤其是北方供暖的脱碳取得了较大成效。自双碳目标提出以来，国家进一步支持北方清洁取暖行动。据统计，截至2022年底，北方地区清洁供暖行动完成替代散煤（包括低效小锅炉用煤）1.5亿吨，其中农村完成了1.02亿吨的替代量<sup>16</sup>。南方夏热冬冷地区以电动热泵为代表的高能效供暖技术也日趋成熟，满足南方地区不断增长的供暖需求，居民中使用冷暖空调供暖的比例超过60%<sup>8</sup>。

北方集中供暖的脱碳机遇主要来自于余热资源利用。一方面，我国具有丰富的余热资源，来自热电厂、核电、工业、数据中心、污水处理的余热可直接利用或者通过热泵升温再利用。据估算，我国各种可利用余热超过200亿GJ，而北方城镇建筑供暖需求约54亿GJ，如果余热资源得到充分利用，将能满足北方城镇供暖的需求<sup>17</sup>。另一方面，我国大部分北方城镇拥有完善的热网基础设施，为余热高效经济地输送至建筑提供了基础条件。在现有集中供暖系统的技术上，结合热泵、储热、远距离输热等技术，能够构建基于余热利用的集中供暖系统，实现集中供暖系统脱碳。

目前，余热资源替代集中供暖热源已经获得明确的政策支持。2022年7月发布的《城乡建设领域碳达峰实施方案》指出推动建筑热源端低碳化，综合利用热电联产余热、工业余热、核电余热，根据各地实际情况应用尽用。2022年8月的《科技支撑碳达峰碳中和实施方案》提出，研究利用新能源、火电与工业余热区域联网、长距离集中供热技术，发展针对北方沿海核电余热利用的水热同产、水热同供和跨季节水热同储新技术，建立长距离工业余热低碳集中供热示范工程。

北方集中供暖的脱碳路径大体思路是短期内以热电联产替代燃煤锅炉，长期则加强余热利用和生物质热电联产替代化石燃料热电联产（图10）。目前热电联产是最具经济性的集中供热方式，近期内仍是集中供暖的主要形式。2030年前主要推动既有建筑节能改造，降低建筑耗热量；充分利用火电厂余热、生物质、垃圾焚烧等热电联产资源，发掘工业余热、核电余热、数据中心余热等的利用潜力，逐步替代集中燃煤、燃气锅炉。远期来看，为了实现余热接入集中供热管网，需要使余热资源与供暖需求在时间、空间及温度参数上匹配，因而跨季节储热、远距离输热及热泵技术的普及是完成北方集中供热零碳转型的主要任务。

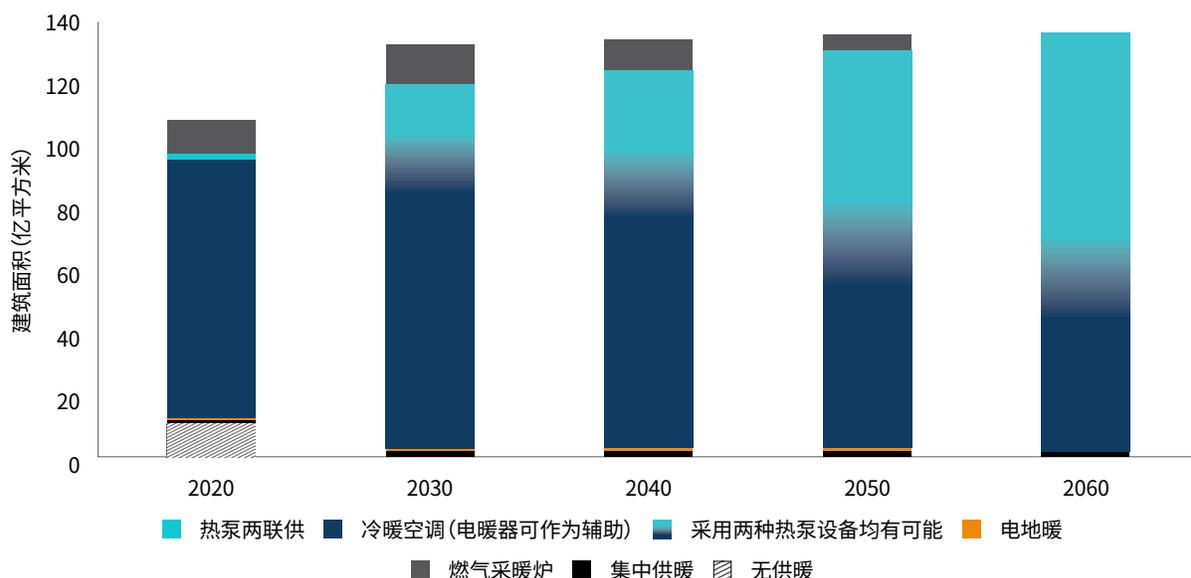
图 10 北方集中供暖系统零碳转型路径



来源：落基山研究所

南方夏热冬冷地区供暖的主要脱碳机遇是热泵等清洁供暖技术的推广。由于南方冬季时间短且间歇供暖需求多，以城市热网为基础的集中供热系统不适合在南方大规模发展。近年来，由于气候变化导致的极端天气频发以及夏热冬冷区冬季采暖需求提高，南方夏热冬冷地区供暖将面临规模大、增幅高的实质性转变。以长三角地区为例，到2030年，该地区超2000万居民将实现供暖设备从无到有，供暖需求将较2020年增加约40%；长期来看，超过100亿平方米的居住建筑将面临近乎刚需的供暖条件改善<sup>8</sup>。在供暖设备选择方面，与燃气炉、电暖气等相比，热泵具有高效低碳、兼具冷热功能、节省能源费用的优势，而且伴随电力系统脱碳其低碳优势更加突出。在南方建筑新装供暖设备以及既有供暖设备升级场景中，规模化应用热泵能够最大限度减少南方夏热冬冷地区供暖的碳排放，未来可分阶段逐步推广。近期主要推动新建建筑采用热泵供暖，确保燃气供暖不再进一步增长。中远期主要在既有建筑低碳改造中推广热泵，逐渐降低燃气供暖占比，到远期居民供暖完全“去燃气化”，低能效电气化供暖设备也被热泵取代，实现零碳居民供暖。

**图 11 夏热冬冷地区零碳供暖转型路径 (以长三角为例)**



来源：落基山研究所

为了推广清洁化供暖设施、降低建筑供暖对化石燃料的依赖，近中期应该做好以下工作：

- 加强长距离输热、跨季节储热技术研发。加快长距离输热和跨季节储热技术的研发和应用，解决余热在时间和空间上的不匹配问题，提升余热利用的灵活性和稳定性。在北方城镇开展长距离输热和跨季节储热试点项目，验证技术可行性和经济性。
- 建立跨部门的余热利用机制。在规划层面，全面评估余热资源的分布，进行分类管理与利用，根据供暖需求，匹配到最适宜的应用场景和需求端。建立智能化的供热系统，根据供暖需求灵活输送储存余热，充分发挥余热资源的供暖能力。全面综合考虑城镇热力供需平衡，构筑涵盖余热、电、可再生能源等多元能源形式的集中供暖布局。在实施层面，建立跨部门的余热利用协调小组，明确余热利用目标和责任分工，全面调查和评估城市周边的可利用余热资源，包括热电厂、核电、工业、数据中心和污水处理厂的余热，发布余热资源指导价格，协助热电厂与余热资源所有方进行对接，形成覆盖余热利用全流程的工作机制。
- 完善供热政策和市场机制。针对余热利用和热泵供暖，制定和完善相关政策与市场机制支持。制定专项财政补贴政策，对采用余热供暖技术和热泵的项目给予资金补助。出台税收优惠政策，对相关企业在税收方面给予一定的减免或优惠。建立用于绿色建筑的绿色金融机制，为相关项目提供低利率贷款等金融支持。制定强制性的余热利用标准和规范，推动行业规范化发展。对使用热泵等高效供暖设备的开发商或建设单位给予土地审批流程优化、容积率奖励等优惠政策，激励高效供暖设备的配套应用。

# 第三章 钢筋水泥降碳与竹木结构推广, 推动建筑隐含碳降低

## 3.1 我国建筑隐含碳排放现状及脱碳挑战

建筑隐含碳排放（即建筑材料生产运输和建筑施工过程产生的二氧化碳排放）是建筑领域脱碳的另一个重点。隐含碳约占建筑全生命周期碳排放的41%<sup>1</sup>。据测算，2022年我国建筑隐含碳排放总量约为15亿tCO<sub>2</sub><sup>1</sup>，约占全国总二氧化碳排放的13%。

结构材料占建筑隐含碳的比重大于60%，占建筑总碳排放的比重大于12%<sup>18</sup>。降低结构材料的碳排放是降低建筑隐含碳的重要方向。结构材料降碳主要取决于结构材料用量与结构材料选用。结构材料用量的主要决定因素是结构体系的选择和结构设计。建筑工程师可以通过在建筑形体以及结构体系的选择上进行一系列优化设计，减少结构材料用量，从而降低建筑隐含碳<sup>19</sup>。

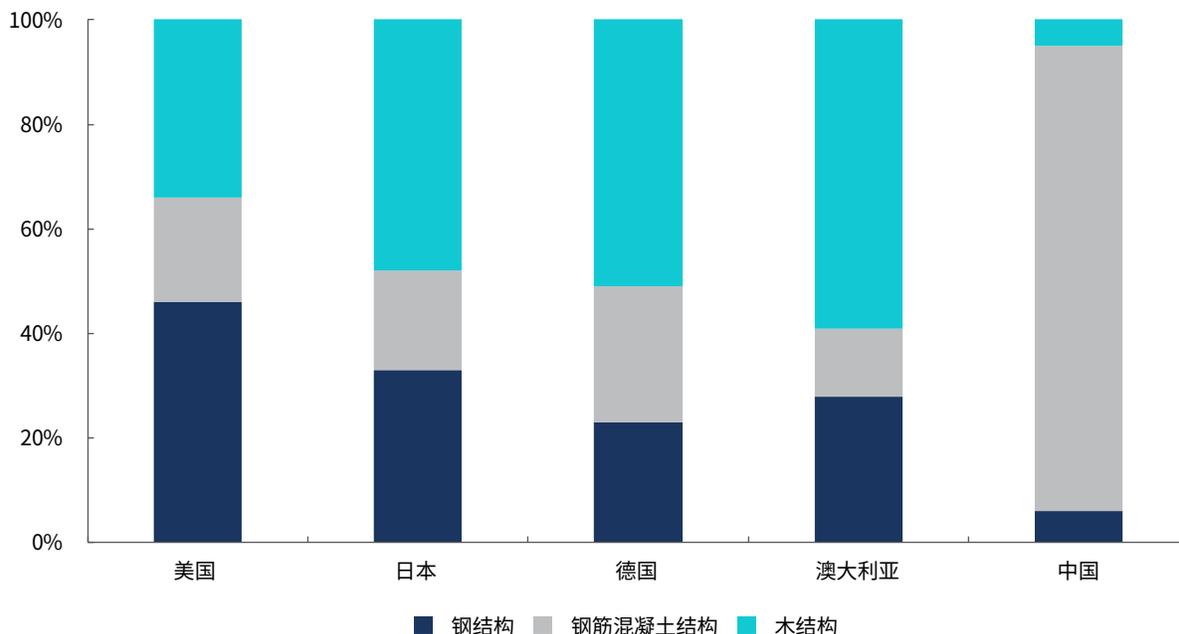
建筑结构材料的选择与结构形式直接相关，不同结构形式的建筑和用材在碳排放、技术成熟度和适用性上存在差异（表3）。目前我国，钢筋混凝土结构是最主要的建筑结构形式，相比美国、日本、德国等国家以木结构和钢结构为主，钢筋混凝土结构在我国占比达到民用建筑的80%以上；其次为钢结构，占5%（图12）。建筑钢材和水泥的碳排放分别占建材碳排放总量的36%和53%，合计约90%的碳排放，是建材碳排放的最主要来源（图13）<sup>20</sup>。

表3 主要建筑结构形式特征比较

	材料性质	施工过程	生产环节碳强度	应用范围	在我国建筑结构中占比
混凝土结构	材料强度高、耐火性强、耐久性强	难度低、成本低	295 kg CO <sub>2</sub> /t (C30混凝土) 385 kg CO <sub>2</sub> /t (C50混凝土) <sup>21</sup>	范围广(住宅、商业、公共建筑等)	90%
钢结构	材料强度高、轻量化、耐火性差、耐久性差	速度快、空间利用率高	1800 kg CO <sub>2</sub> /t (长流程钢) 680 kg CO <sub>2</sub> /t (电炉炼钢) <sup>22</sup>	大跨度、高层建筑、桥梁等	5%
木结构	材料强度低、耐火性很差、耐久性差	速度快	30 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> (木材加工的碳排放) (-) 1146 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> (人造板的CO <sub>2</sub> 储存量) <sup>23</sup>	范围小(别墅、民宿等小型建筑)	1%

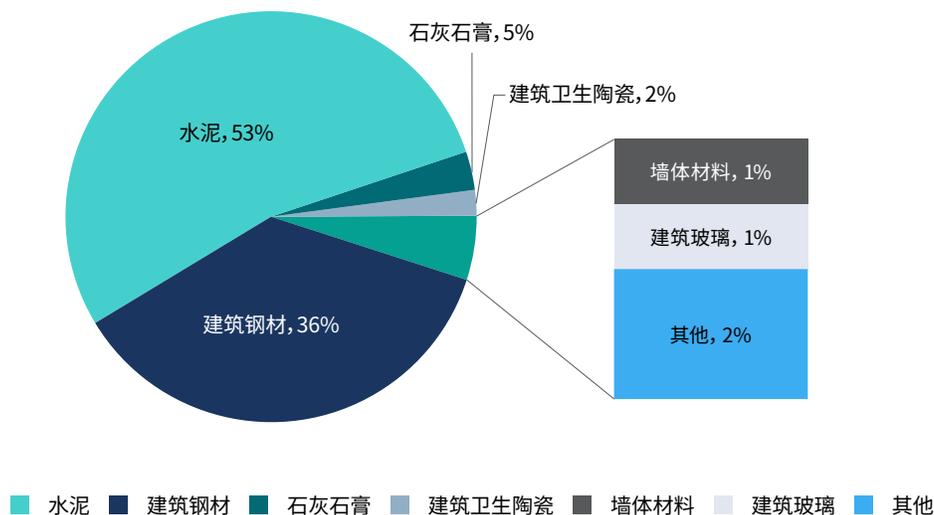
来源：落基山研究所基于建筑碳排放标准、中国钢铁工业协会等数据整理

图 12 中国与世界其他国家主要结构形式占比对比



来源：中国建筑材料联合会

图 13 2020 年建筑材料主要行业碳排放构成



来源：落基山研究所，中国建筑材料联合会

从建材生产过程来看，建筑隐含碳的最主要来源是生产过程中化石能源的使用和工艺过程产生的碳排放。水泥生产占建材行业（不含金属类建材）碳排放量80%以上。在水泥生产环节，大约40%的碳排放来自化石燃料的燃烧。我国主要以煤为燃料，一吨熟料生产的煤耗平均约为110千克标准煤，折合约290千克二氧化碳排放；其余60%来源于碳酸盐分解的化学反应。我国生产一吨熟料的过程排放量为538千克二氧化碳<sup>24</sup>。而我国钢铁产业结构特征是以长流程钢为主，基于“高炉-转炉”的长流程产量占到90%左右，高于全球平均的长流程占比（73%）。长流程炼钢的能源消耗以煤炭为主，吨钢综合能耗为550千克标准煤左右，吨钢碳排放约为2.0吨二氧化碳，是短流程钢的3倍多。综上工艺和能源原因造成我国钢铁的碳足迹仍较高<sup>25</sup>。因此，降低建筑隐含碳的根本仍在于从建材生产端降低能耗、使用清洁生产技术。

建筑隐含碳的脱碳目前仍面临两大主要挑战：

- 以混凝土及钢材为主体结构材料的现状较难改变，而钢铁、水泥的生产降碳仍面临技术成熟度、成本、投资等问题：相比美国、日本、德国等国家以木结构和钢结构为主，钢筋混凝土结构在我国占比达到民用建筑的80%以上，并且成为建筑隐含碳的最主要来源。由于我国建筑密度、人口密度、结构要求、施工体系成熟度、防火及耐久性性能的要求、成本等原因，以钢筋混凝土结构为主的局面将持续存在。由此对降低建筑隐含碳带来三方面挑战需要解决：1) 如何提升现有结构的耐久度、增加结构寿命，避免大拆大建带来的不必要隐含碳增加；2) 如何增加对钢铁、水泥等工业行业的减碳投入，解决工业企业减排面临的技术与经济性问题；3) 如何提升低碳混凝土及低碳钢材在建筑中的使用。
- 竹木等零碳建材的应用潜力未完全发掘：与传统建材相比，竹木结构建造速度快、接近零排放，但其强度、耐久性、耐火性仍需通过现代工艺改善，因此尚未在大型建筑中广泛使用。我国现行的现代木结构标准体系已经初步构建完成，涵盖了设计、施工验收、产品、技术、测试方法等，但木结构建筑距离广泛应用仍存在挑战。目前建筑领域对木竹结构建筑建材的认知和接受度还有限，应用领域还比较窄。对于现代木结构建筑技术体系及中高层木结构建筑还有待深入研究。同时，我国虽然有丰富的竹材资源，竹结构建筑目前仍主要用于民居、文化建筑、临时建筑等极有限的场景中。现代竹构件生产线、生产工艺对大跨度、大截面尺寸构件的制约，结构的耐久和防火问题等瓶颈问题尚需要破解。

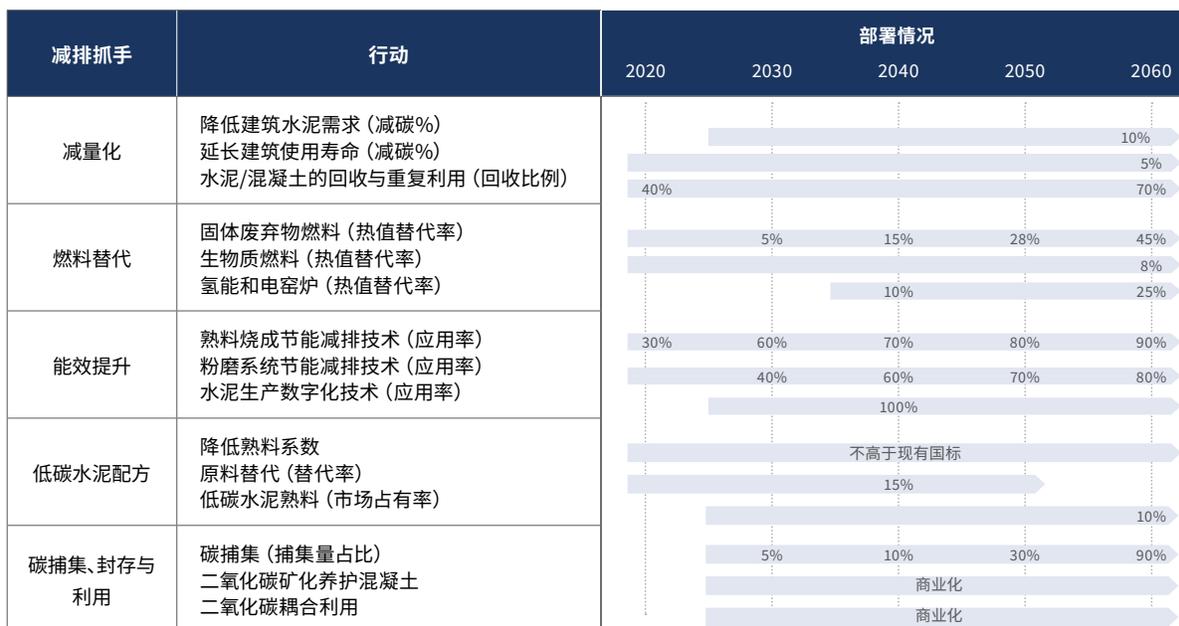
## 3.2 建筑隐含碳降碳路径

建筑隐含碳降碳的整体思路宜遵循“减量-替换-循环-固碳”的思路，在建筑全生命周期的各阶段降低隐含碳。“减量”指通过合理的设计减少不必要的材料冗余，通过标准化施工减少材料浪费，以及通过增加材料寿命降低年化的隐含碳排放。“替换”指大力推广碳足迹较低的传统建材（如低碳混凝土、低碳钢材等）和新型零碳建材（例如现代竹木材料等）以替代高碳的传统建材。“循环”指提升建筑固废垃圾的回收利用效率，加大废弃混凝土、废钢、废铝等废弃建材的回收和再利用。“固碳”指发掘建材吸附二氧化碳的能力，例如混凝土固碳、固碳石材等技术，开发将建材作为碳资产的潜力。

- 通过合理设计、标准化施工、提升材料寿命减少材料浪费：提升材料利用效率是建材量化的最重要手段。建筑设计的最初阶段应在满足功能性要求的同时减少隐含碳，包括对既有建筑的适应性再利用、减少项目的总占地面积、使用更高效的结构体系、使用预制系统或组件以及在设计上尽量减少浪费。尽量减少建筑中使用的材料总量，特别是混凝土、钢和石化基保温产品等高隐含碳材料，可以显著减少项目的整体隐含碳。避免大拆大建也是重要策略：研究表明，改造既有建筑相比于新建建筑，其隐含碳的影响低了50%至75%<sup>26</sup>。使用预制构件也能提升材料使用率从而降低碳排放，例如每立方米的预制混凝土相比现浇混凝土能降低碳强度达10%<sup>27</sup>。
- 推广使用低碳足迹的建材：一方面，对于传统大宗建材，应通过创新生产路径来降低其产品碳足迹。对于混凝土而言，可以使用掺合料减少水泥用量。通过优化调整混凝土原材料组成及配比、骨料颗粒级配和粒径分布，可以提高粉煤灰、矿渣等矿物掺合料的替代率，有效降低水泥的使用比例，从而降低混凝土的碳足迹。通过能效提升、燃料替代、开发低碳水泥品种、碳捕集技术等，可以实现水泥生产的降碳（图14）。对于钢材而言，在近期阶段内（2020-2030）主要废钢短流程的规模化发展实现碳减排，中期（2030-2040）以后氢冶金技术可以进入商业化阶段，将为市场提供更多的低碳钢材选择（图15）。另一方面，应增加竹木等可再生、零碳建材的推广利用率。研究针对大跨度、中高层的现代竹木结构体系，推广新型低碳、零碳的建材品种的使用。
- 提高废旧建材的回收与再利用：随着建筑进入生命周期末端，废旧建材如废钢筋、废铝、废混凝土等建筑固废可以经过回收、筛选、再利用过程形成再生材料，从而降低下一生命周期的材料生产的隐含碳。由废混凝土再生制成的再生骨料可用于公路路基、墙体的填充材料，也可生产多孔砖、空心板、空心砌块、水泥原料等产品；废木材可用于制造合成板材；建筑也是目前我国最大的存量钢铁资源，据估算在2016年长三角地区房屋建筑中钢铁总存量就达到6.77亿吨<sup>28</sup>，在建筑拆除后回收废钢将利于短流程钢的生产，大幅降低钢铁碳足迹。

- 挖掘建材固碳潜力：木材和混凝土是两种能在全生命周期内固化空气中二氧化碳的建筑材料，因此，挖掘建材的固碳潜力有利于建筑全生命周期的降碳。竹木材料（如层压竹材、重型木、切割木材）能封存约1.7-2.0吨CO<sub>2</sub>/吨材料<sup>29</sup>。二氧化碳养护混凝土是通过CO<sub>2</sub>与混凝土中的钙、镁组分之间的矿化实现混凝土强度和耐久性能的提高，可实现二氧化碳的长期、稳定封存，每立方米混凝土可吸收约70kgCO<sub>2</sub>。在碳市场成熟后，通过使用具有固碳能力的建材，建筑还能将减碳量变现为碳资产，产生经济效益。

图 14 我国水泥行业净零发展的抓手与部署预测



来源：落基山研究所，中国水泥协会

图 15 我国钢铁行业净零发展的抓手与发展预测



\*减排潜力在零碳电力的支持下将被完全达到。假设直接还原铁与电炉结合，熔融还原与转炉结合

来源：落基山研究所

● 规模化 ● 商业化试点 ● 试点 [Progress bar] 颜色加深表示技术需求的不断扩大

## CarbonCure 低碳混凝土的应用<sup>30</sup>

CarbonCure 低碳预制混凝土工作原理是矿化养护：在混凝土混合过程中将捕集的二氧化碳注入新拌混凝土中。这种工艺产生有两个好处：首先，二氧化碳永久性地矿化在混凝土中；其次，化学反应生成的纳米碳酸钙可提高粘结剂系统的效率，在达到传统混合料相同的设计强度的情况下减少5%–12%的水泥用量。

725 Ponce Street 是一座占地34400平方米的14层的创新办公楼，位于美国佐治亚州亚特兰大，该地属于副热带湿润气候区。为了建造这座建筑，托马斯混凝土公司（Thomas Concrete）浇筑了36700立方米由CarbonCure制成的混凝土，从大气中移除了680吨二氧化碳，相当于360公顷森林一年吸收的二氧化碳量。

图 16 725 Ponce Street



来源：CarbonCure官网

### 3.3 建筑隐含碳脱碳的机遇

#### 3.3.1 将低碳指标纳入绿色采购体系，实现建筑工程广泛应用低碳建材

在建筑工程中优先采购使用低碳建材是建筑降低隐含碳的重要机遇。近年来我国将绿色低碳建材采购作为公共采购推动绿色低碳转型的重要抓手。2003年颁布的《政府采购法》中便提到政府采购应当实现保护生态环境的政策目标，2020年10月财政部、住建部等部门在南京等6个城市开展“绿色建材促进建筑品质提升试点工作”，两年试点期内共开展209个试点工程项目，总金额达1025亿元。2022年，六部门继续开展绿色建材下乡活动，并开展第二批绿色建材试点项目，试点城市扩展到44个，推动建立绿色建筑和绿色建材政府采购标准、激励政策和实施工具。2024年5月6日，财政部发布消息，2024年试点城市将由48个扩大到100个，绿色建材政府采购需求标准涵盖的产品由75种增加至100种，进一步加大对绿色建筑和绿色建材推广应用的支持力度。

同时随着市场主体社会责任意识与绿色采购需求的不断提升，建筑建造以及房地产开发作为绿色建材的最主要下游用户，近年来也在不断从供应链端推进市场化绿色采购。例如阿拉善SEE生态协会等机构与企业共同发起的“中国房地产行业绿色供应链行动”，由第三方独立机构提供技术支持，推选环境表现良好的供应商进入推荐采购名单。房地产企业将根据制定的一系列绿色采购方案进行采购。得到了企业的积极响应与良好的社会效益。

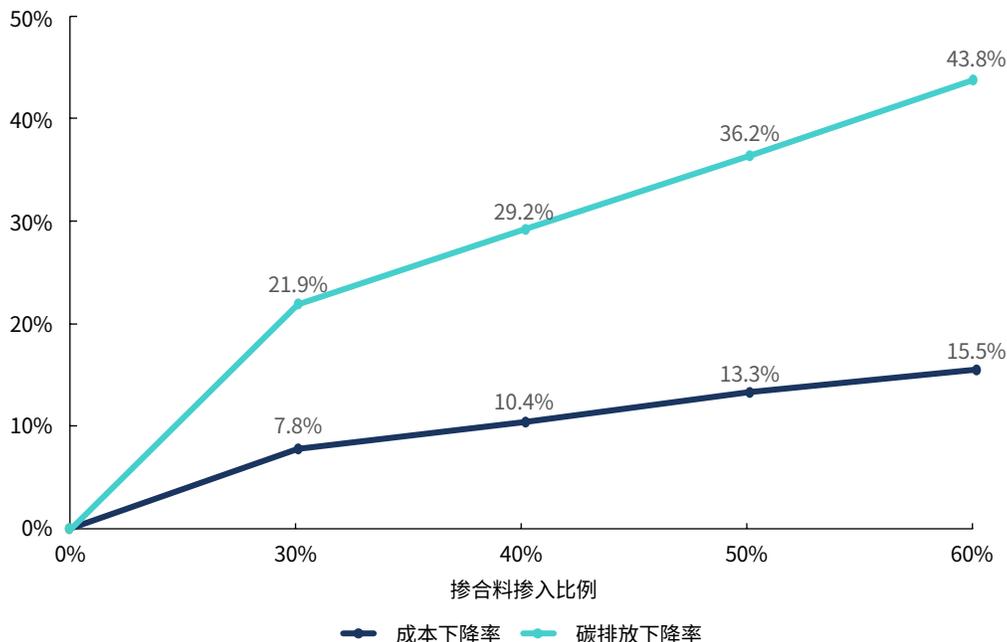
**图 17 我国近年来开展绿色建材推广的主要行动**

		2020年	2021年	2022年	2023年	2024年
支持政策		《关于政府采购支持绿色建材促进建筑品质提升试点工作的通知》	《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》	《六部门关于开展2022年绿色建材下乡活动的通知》 《组织申报政府采购支持绿色建材促进建筑品质提升试点城市》 《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》 《城乡建设领域碳达峰实施方案》 《工业领域碳达峰实施方案》 《原材料工业“三品”实施方案》 《建材行业碳达峰实施方案》 《有色金属行业碳达峰实施方案》		《关于全面开展绿色建材下乡活动的通知》
		选取首批6个绿色建材采购试点城市		第二批绿色建材采购试点城市开始申请，每省不超两个，共48个		2024年试点城市将由48个扩大到100个，绿色政府采购涵盖产品将由75种增加至100种
市场行动	绿色采购承诺	100+地产企业加入“中国房地产行业绿色供应链行动”				

来源：落基山研究所

通过建筑行业带动低碳建材的推广应用具有很大的减碳和市场潜力。据落基山研究所估算，我国建筑行业每年约消费钢3.5亿吨，水泥9.6亿吨。仅以低碳混凝土为例，如果在政府工程项目中广泛推动使用低碳混凝土，即混凝土中低碳掺合料的总体比例不低于30%，可以使混凝土碳排放降低22.5%，每年共减少1.9亿吨二氧化碳排放。如果低碳混凝土在所有建筑类工程中广泛推广，到2035年，会带来每年5.92亿吨二氧化碳减排的效益。同时，使用掺合料降低混凝土碳足迹还能带来降本的协同效果（图18）。如果混凝土的复合掺合料掺入比例能从30%进一步提高至50%，则每立方米混凝土还能实现5.5%的成本下降和14.4%的碳排放下降；在无筋混凝土或大体积混凝土等应用场景下，如果实现60%的掺入比例，则每立方米混凝土能进一步实现7.7%的成本下降和21.9%的碳排放下降。

图 18 不同掺合料比例下单位体积混凝土生产成本及碳排放下降率（以C30混凝土为例）



来源：落基山研究所

从目前的绿色建材推广政策向低碳建材转变，仍需做好几方面的工作：

- 促进政策方面，强制性规范以及激励性政策是最为常见且有效的手段。强制手段包括开展建材的产品碳核算和碳标签体系建设，形成建材行业碳排放数据库和采购平台。在建筑项目中规定隐含碳的限制，强制低碳建材的应用。激励措施则是针对应用低碳建材的项目提供财税优惠或其他非财政性激励，如容积率奖励等；除了对于需求侧提供奖励外，政府还可以为低碳建材生产商提供免税降费等政策优惠。此外，通过调整针对建材的产品标准，如对于混凝土产品发布“基于性能的标准”，也可以鼓励生产企业生产低碳建材的积极性并提升行业的创新能力。2023年11月发改委等部门发布的《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》和2024年6月生态环境部等部门发布的《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》为我国低碳建材核算、认证和应用指明方向，并带来新的市场机遇。2024年7月国务院印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》，要求按照急用先行原则，聚焦钢铁、水泥等重点产品，组织相关行业协会、企业、科研单位等制定发布产品碳足迹核算行业标准或团体标准。
- 政府采购试点方面，应着力推动低碳建材在政府主导的公共建筑（如政府办公楼、医院、学校等）以及基础设施项目中的规模化应用。通过将低碳建材纳入政府建设项目的采购要求，不仅可以直接提升这些材料的市场需求，还有助于生产企业达到经济规模，进而实现规模化生产的降本效应。同时，成功的政府试点项目还可以起到示范作用，提升低碳建材在市场上的信誉和认可度，鼓励更多的私营企业和公众接受并使用低碳建材。
- 市场层面，应用创新机制实现降本增效是推广低碳建材的关键市场化手段。EMPC（设计、制造、采购、施工）总包等模式可以帮助项目总包方优化建造项目的能碳管理，并同时降低项目成本。企业积极采纳这类模式将对于低碳建材的规模化应用起到积极意义。加强与建筑行业的协作，提供技术支持和专业培训，可以提升行业整体对低碳建材的接受度和应用能力。同时，政府应鼓励行业协会等机构尽快出台建材产品EPD及PCR，规范支持建材及工程项目碳核算及认证机构的发展，全方位促进低碳建材市场的良好有序发展。

### 3.3.2 加强现代竹木结构的技术研发、标准创新和市场化推广

竹木结构建筑的全生命周期碳排放和对环境的影响远优于钢结构和混凝土结构。研究表明，我国现代木结构建筑在50年使用期内，每年每平方米单位建筑面积碳排放24.6–31.1千克二氧化碳当量，每年每平方米平均28.8千克二氧化碳当量。相较于仅使用钢筋和混凝土的基准建筑，现代木结构建筑在建材生产阶段碳排放减少48.9%–94.7%，全生命周期碳排放减少8.6%–13.7%<sup>31</sup>。树木在生长期通过光合作用吸收二氧化碳起到固碳的作用，木基建材和构件的加工和运输过程能耗也更少。在使用过程中，木材保温隔热性能佳，还可降低运行阶段碳排放<sup>32</sup>。而竹材具有较高的纤维素含量，可以长期储存大量的碳，竹林生态系统的碳储量为每公顷94–392吨<sup>33</sup>。同时，竹木结构建筑还具有取材方便、梁架适用性强、较强抗震性能、加工方便、施工速度快等优点。

从竹木资源的角度看，我国拥有支撑现代竹木结构体系发展的林木资源。在合理控制采伐量和生长量平衡的条件下，木材可以成为可持续的低碳建材。2018年，我国森林蓄积量达到175.6亿立方米，森林面积达到2.2亿公顷，森林资源面积和蓄积量持续“双增长”。目前初步形成了国有林以公益林为主、集体林以商品林为主、木材供给以人工林为主的合理格局，为未来我国全面推广木结构建筑奠定了坚实资源基础。而竹子生长速度相较于普通木材更快，3–4年就可成材，并且每年都可以进行多次收割。2018年，我国竹林面积641.2万公顷，约占全球竹林面积的20%<sup>34</sup>。在保护天然林的基础上，国家同时进口俄罗斯落叶松和樟子松、北美的SPF规格材等木材。因此整体来看，原材料供给不会成为约束我国木结构建筑发展的主要条件<sup>35</sup>。

目前我国已发布了工程木制品相关的国家和行业标准，实现了一定规模的工业化生产，胶合木和正交胶合木构件已经在国内外中高层、大跨度木结构建筑中应用。我国现有胶合木生产线105余条，年产能累计达50万–70万立方米，年产量在20万–30万立方米；圆柱胶合木和弯曲胶合木生产线20余条，多轴加工中心30台（套）。2020年，我国颁发了第一张胶合木产品质量认证证书，标志着我国胶合木产品认证体系基本形成<sup>36</sup>。

随着现代竹结构工艺的创新发展，近年来我国加快了现代竹木结构的标准制定与项目实践。我国现行的现代木结构标准体系已经初步构建完成，涵盖了设计、施工验收、产品、技术、测试方法等。20世纪90年代中后期，我国引进一批低层轻型木结构住宅，将现代木结构建筑引入我国市场。随后的20多年间，我国相继建成一批现代木结构示范性建筑。2017年，住房和城乡建设部发布国家标准《装配式木结构建筑技术标准》（GB/T51233），标志着我国木结构建筑走向现代化、工业化。同时，在工程项目层面涌现了一批工程竹结构建筑，如昭君博物馆、牛背山青年旅社等。此外竹缠绕复合管道也已经应用于市政管道中，实现产业化。

表 4 我国推广竹木结构建筑的政策、标准与措施行动

时间	政策/标准	相关内容
2021年	《十部门关于加快推进竹产业创新发展的意见》	全面推进竹材建材化，推动新型竹质材料研发生产，因地制宜扩大其在园林景观、市政设施、装饰装潢和交通基建等领域的应用。在国家公园、国有林区、国有林场等区域内符合规定的地方，在满足质量安全的条件下，逐步推广竹结构建筑和竹质建材。
2017年–2021年	《多高层木结构建筑技术标准》、《木结构设计标准》、《装配式木结构建筑技术标准》、《胶合木结构技术规范》、《木结构工程施工质量验收规范》、《木结构通用规范》	基本上形成木结构设计验收领域较为完整的技术标准体系。
2022年	《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》	因地制宜发展木结构建筑，推广成熟可靠的新型绿色建造技术。
2022年	《城乡建设领域碳达峰实施方案》	鼓励有条件的地区使用木竹建材；在推进绿色低碳农房建设方面，鼓励就地取材和利用乡土材料，推广使用绿色建材，鼓励选用装配式钢结构、木结构等建造方式。
2023年	《加快“以竹代塑”发展三年行动计划》	可以利用竹篾生产竹缠绕管道，替代工程塑料和玻璃钢管道，广泛应用于水利输送、农业灌溉、林业工程、城市管网等领域。

现阶段我国木建筑中文旅类型项目占80%以上，公共建筑与居住建筑比例为7：1，木结构建筑市场规模不到200亿元，而2022年全球木结构建筑市场规模达到了215.8亿美元（1500亿元）<sup>37</sup>；未来，竹木结构建筑有望在新农村住宅、文旅建筑、商业综合体、高档住宅区等项目中产生更大的市场。例如随着2021年五大国家公园设施建设，木结构建筑将迎来机遇，新开工面积预计在400万平方米左右<sup>38</sup>。中国每年约有76万个自然村、约500万套农房新建或者重建，按平均每套30万造价计算，自建房可以构成一个万亿规模的市场<sup>39</sup>。据落基山研究所估算，如果每年新建的农房中10%为现代木结构建筑，将形成约1500亿元的木结构农宅市场；如果农房（以120平米砖混结构作为基准）采用木结构施工，可以降低隐含碳约18.24吨CO<sub>2</sub>/套农房，在全国范围可以避免456万吨CO<sub>2</sub>/年的排放。

为加快现代竹木结构建筑的推广，还需要行业内部加快对材料特性的研究，进而制订相关工艺标准，致力于构建完善的标准和激励体系<sup>40</sup>。

- 加强技术研发，重点推进木竹建筑建材定向培育、组装配套、技术创新、检验认证等关键技术提升<sup>41</sup>。研究制定满足大跨度、高密度、耐久性和防火性等现代建筑需求的竹木结构建筑设计、施工、验收标准体系，加快竹木建筑标准规范体系的制修订，加快建立和完善竹木结构建筑及建筑工程材料质量认证体系。同时吸收国外多层及高层木结构建筑技术经验，发展先进的木结构建筑部件的生产技术和机械装备，加快推进建筑材料加工机械装备的国产化。
- 在此基础上，完善和落实竹木结构建筑土地、税收、消防等相关政策，加快推进我国竹木结构建筑商品化、市场化。提升竹木结构建筑和建材产业发展战略，出台竹木结构建筑和建材专项规划，加快推进推广绿色建筑建材的相关政策落地实施，在有条件的地区和允许建设开发的各类自然保护区率先推广，以及在少数民族地区、地震多发区、旅游景区及发达地区农村重点发展。研究制定相关财政奖补、财税优惠、金融支持、建设用地等支持政策。加大宣传力度，提高公众和行业对竹木结构建筑和建材的认可度<sup>42</sup>。

## 现代竹木结构案例

成都天府农博园主展馆<sup>43</sup>项目位于四川成都天府新区，作农业展览馆使用。结合地域特色并兼顾农展馆建筑使用需求特色，项目采用了有顶室外展场的形式。主体建筑将外廊与遮阳、防雨棚架有机结合，通过适宜的被动式绿色建筑技术有效引导与组织气流，同时大幅削减了建筑供暖、空调和照明的服务空间和时间，实现了源头节能减碳。这种做法一方面通过营造出的舒适半室外活动空间，使得室内温度长时间处于适合人体的状态，塑造了人活动的舒适微气候环境。另一方面也降低了单位面积的空调能耗。

该建筑使用胶合木结构。胶合木为工厂加工现场拼装，精度高，减少了施工误差，可现场组装、施工周期短。同时，项目结构性能和防火性能良好，无需二次外立面装修，具有节能环保、污染少、能耗低的特点。项目还选用了 ETFE 膜作为顶层围护结构，其自重轻、透光性好、易着色、现场安装，与环境更加衬托，并可解决基本的遮阳挡雨需求。

图 19 成都天府农博园主展馆



来源：建筑杂志社

清迈生活建筑事务所为Panyaden国际学校设计的竹体育馆只使用竹子来维持低碳足迹。大厅面积782平方米，设有五人制足球场、篮球场、排球场、羽毛球场，以及可自动升降的舞台。舞台的背景是体育和戏剧设备储藏室的前墙。创新的结构设计基于新开发的预制竹桁架，跨度超过17米，没有钢筋或连接件。这些桁架是在现场预建的，并在起重机的帮助下吊装到位。竹堂的使用寿命预计至少有50年。竹子吸碳量远高于处理、运输和施工过程中的碳排放。

图 20 泰国 Panyaden 国际学校体育馆



来源：易美居

# 第四章 新产品新技术配合新模式新机制，驱动建筑领域价值增长

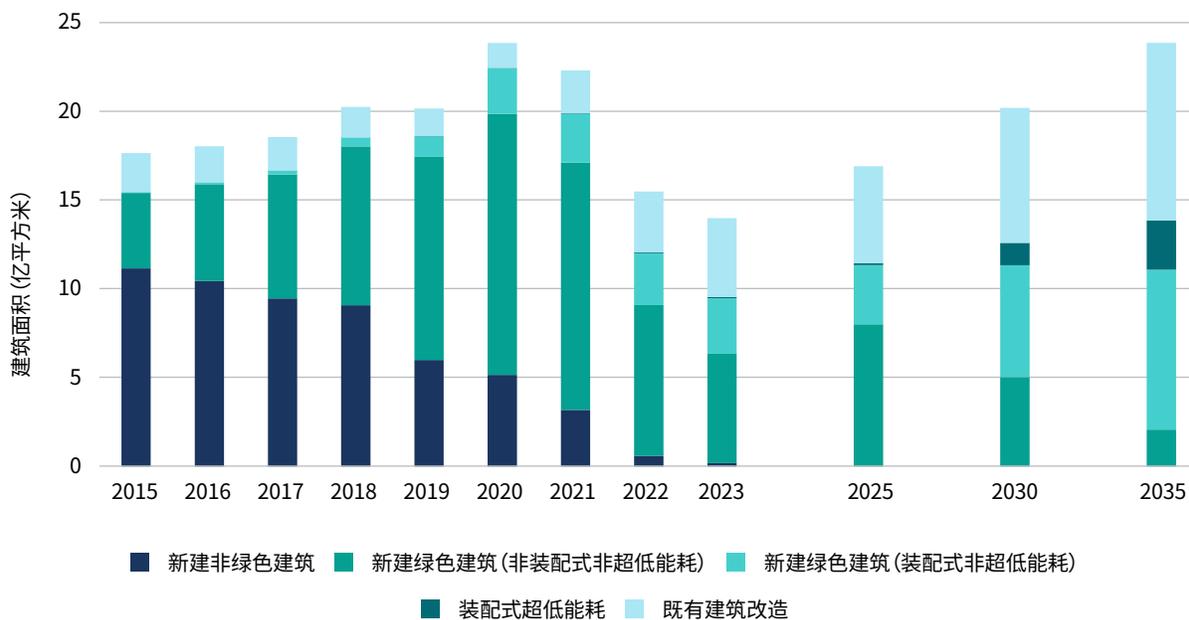
## 4.1 新建绿色建筑与既有建筑降碳改造是主要市场驱动力

自双碳目标提出以来，低碳发展成为建筑业及其上下游产业链的明确发展方向。由双碳目标带来的新建建筑及既有建筑碳中和发展将成为新的行业增长点。在政策层面，近年来我国已出台一系列政策明确建筑业低碳发展的方向、目标与主要行动，具体表现在：

- 新建建筑中进一步加大绿色建筑、装配式建筑、超低能耗建筑等低碳建筑比例。截至2022年上半年，我国新建绿色建筑面积占新建建筑的比例已超过90%，装配式建筑以及超低能耗建筑也在政策等因素的驱动下迅速增长。《城乡建设领域碳达峰实施方案》要求“到2025年，城镇新建建筑全面执行绿色建筑标准，新建政府投资公益性公共建筑和大型公共建筑全部达到一星级以上”。《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》提出“到2025年，新建超低能耗、近零能耗建筑面积比2023年增长0.2亿平方米以上。”
- 既有建筑及建筑设备的更新改造中强调节能降碳。2023年我国实施各类城市更新项目6.6万个，完成投资2.6万亿元。《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》提出“到2025年，完成既有建筑节能改造面积比2023年增长2亿平方米以上。”《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》以及《关于开展城市更新示范工作的通知》等政策进一步加大了对于既有设备能效提升以及老旧城区节能降碳改造的重视程度，推动城市基础设施和家电产品的能效更新升级。

在双碳目标引领下，新建绿色建筑与既有建筑节能降碳改造将成为未来十年建筑业发展的主要驱动力。新建建筑方面，随着我国疫情后的经济加速复苏以及房地产刺激政策的陆续推出，预计我国新建建筑面积将以每年3%的增长率保持增长，到2035年每年新建建筑面积约为13.8亿平方米，略低于2010年水平；新建建筑将实现100%绿色建筑，其中装配式建筑占比将达到85%，较当前水平增长5倍，超低能耗建筑占比也将增至20%，年新增量大于当前水平的10倍。既有建筑改造方面，考虑到建筑通常在使用年限达到20年即可开展节能降碳改造工作，我们预测，在2015年前建设的大量建筑将在未来十年内逐步到达改造年限，有必要开展节能降碳改造，到2035年，每年将有约10亿平方米的既有建筑节能降碳改造需求。总体来看，到2035年，我国每年新建建筑面积与既有建筑改造面积合计将接近24亿平方米，新建建筑占比从2020年的约95%降低至58%，既有建筑改造占比则显著升至42%，既有建筑改造将占据愈发重要的地位。

图 21 2015-2035 年我国新建建筑与既有建筑改造面积



来源：落基山研究所

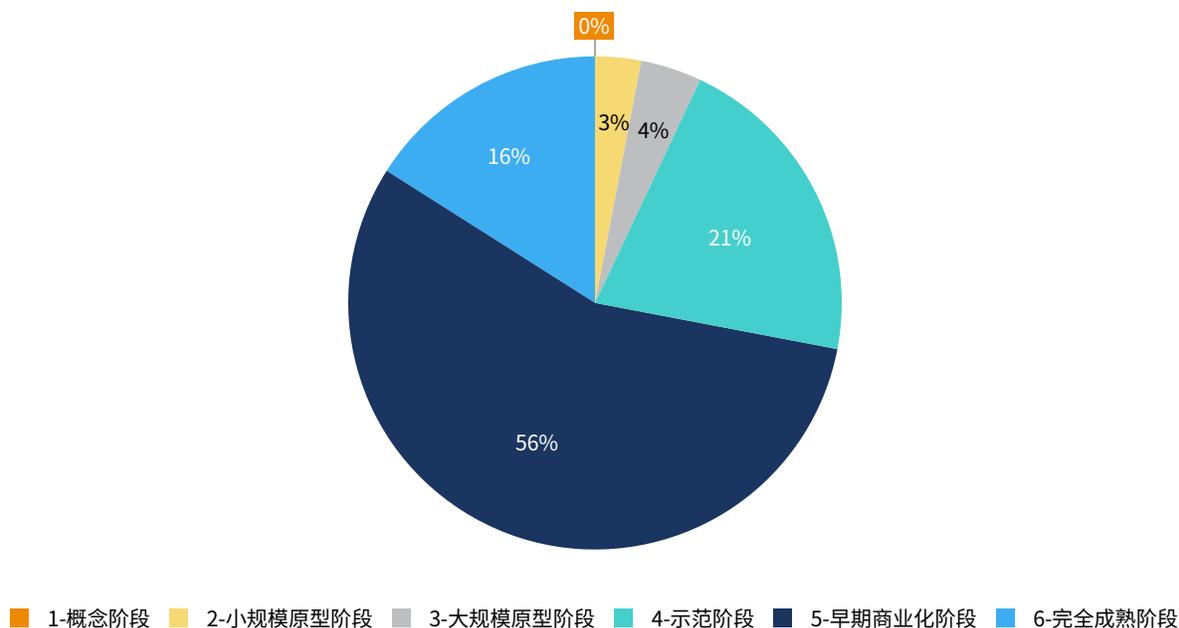
## 4.2 碳中和相关产品技术将成为建筑领域新的价值增长点

在建筑领域脱碳进程中，需要广泛应用低碳、零碳、负碳的技术与产品，这些产品与技术的研发、推广与规模化应用是碳中和背景下建筑产业的新价值增长点。实现建筑全生命周期脱碳需要8大类技术，包括低碳建材生产技术、低碳建造技术、被动式节能技术、建筑设备节能技术、可再生能源和储能技术、建筑数智化技术、建筑废弃物回收技术和固碳技术。8大类技术中最具代表性的76项建筑技术和成熟度如图22所示。



建筑碳中和关键技术的成熟度普遍较高，因此建筑碳中和技术的发展机遇将主要体现在技术的商业化推广与技术体系的集成。在分析的77项技术中，平均成熟度达到4.8分（以6分为完全成熟），关键技术中超过一半已经实现了商业化部署，超过90%达到商业化试点及以上的成熟度（图 23）。其中，被动式节能技术、可再生能源和储能技术的成熟度较高，而低碳建材、低碳建造、建筑废弃物回收和固碳技术的成熟度相对较低。有56%的技术已经达到早期商业化阶段，即已经实现商业化应用但应用场景有限、竞争力仍不足，达到完全市场化的技术只有16%，因此拓宽技术应用场景、提高成本竞争力是建筑碳中和技术未来发展的一大课题。此外，建筑碳中和需要多种技术的协同应用，例如，数字化信息模型（BIM）配合装配式、围护结构升级、高效建筑设备及可再生能源设施才能综合发挥降碳价值，因此，技术集成也是建筑碳中和技术未来发展的重要课题。

图 23 建筑领域碳中和关键技术成熟度分布



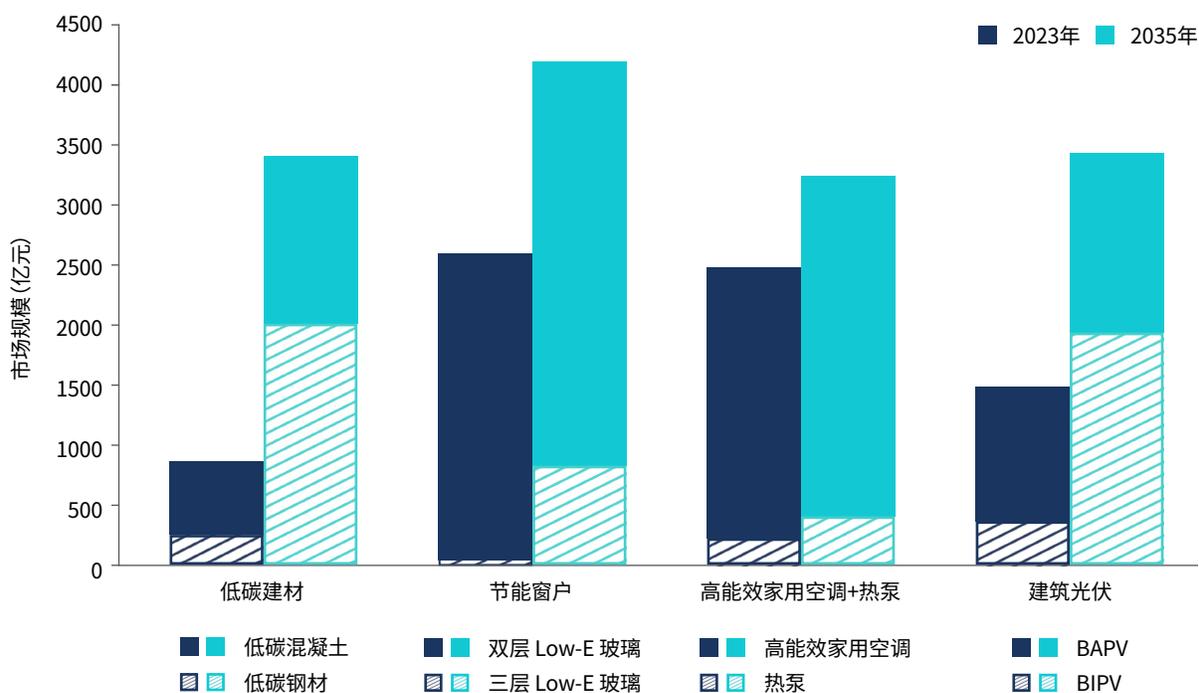
来源：落基山研究所

在8大技术类别中，低碳建材、被动式节能、建筑设备节能和可再生能源应用是对于建筑领域脱碳贡献最显著的四大类措施。我们分别选取低碳钢材和混凝土、节能窗户、高效空调和热泵、建筑光伏四类产品对其未来的市场规模增长做进一步分析：

- 低碳钢材以及低碳混凝土的规模化是降低建筑隐含碳的关键。在建筑的结构材料中，钢材和混凝土造成的碳排放最高。考虑到建筑密度、技术成熟度、用材来源等因素，混凝土结构和钢结构建筑仍将是未来最为主要的建筑结构材料。当前低碳钢材与低碳混凝土的应用仍处于规模化的初期，在生产路径、低碳产品认证、产品溢价、可得性、性能对比等方面仍有很多工作需要开展。2023年11月，国家发展改革委等部门发布《加快建立产品碳足迹管理体系的意见》，明确提出“适时将碳足迹管理相关要求纳入政府采购需求标准，加大碳足迹较低产品的采购力度”。2024年5月，生态环境部等部门发布《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》，要求“到2027年，碳足迹管理体系初步建立。制定出台100个左右重点产品碳足迹核算规则标准。”绿色建材中碳指标的制定工作也正在开展。从现有绿色建材政策向低碳建材发展已经成为逐步明晰的方向。随着废钢、工业废弃物掺合料等资源在建筑用材中推广使用，低碳建材将逐步解决可得性问题，在降低生产成本的同时降低产品碳足迹。落基山研究所预计2035年低碳钢材和低碳混凝土将分别实现较当前市场规模约2倍和8倍的增长，总市场规模达到约3500亿元。

- 节能窗户的应用能够显著降低建筑的冷热负荷，是提升建筑围护结构热工性能实现节能降碳的关键。美国能源署的数据显示，居住建筑中25%–30%的制冷供暖用能由窗户损失的能量造成<sup>44</sup>，采用高性能的节能窗户将显著降低建筑的用能需求以及运行阶段的碳排放。根据国家统计局数据推算，2023年节能窗户行业市场规模约2600亿元，双层low-E玻璃在新开工的新建以及改造项目中已经基本实现全面普及。落基山研究所预计近零能耗建筑是高性能节能窗户市场规模迅速增长的关键；到2035年，我国节能窗户市场规模超过4200亿元，其中能效更高的三玻两空窗户市场规模将达到830亿元，较2023年增长超25倍。
- 高能效的空调设备以及热泵是提升设备能效最受关注的两种建筑设备。我国家用空调市场已经十分成熟，2023年我国居民每百户空调拥有量达133.9台，每年国内空调市场规模接近2300亿元，一级能效空调销售占比接近80%。我们预测，随着生活水平提高及高温天气的增加，我国人均空调保有量可以在2035年进一步提升至200台/百户。国家对于家电产品以旧换新政策的推出将进一步推动高能效空调设备的市场规模<sup>45</sup>。供暖方面，热泵作为高能效的电气化供暖设备，其普及率在不断上升。我国南方地区居民供暖需求不断上升，以及北方农村地区煤改电政策范围的进一步扩大是热泵市场的主要增长动力。落基山研究所预计，暖通空调行业市场规模将稳步攀升，到2035年将合计超过3200亿元，复合年均增长率约2.2%，合计有超过30%的增长空间，其中高能效空调市场约为2850亿元，热泵市场规模将达到约400亿元。
- 建筑光伏是建筑侧可再生能源利用的最主要形式之一，以建筑光伏一体化（BIPV）和屋顶附加式光伏（BAPV）为技术形式。BAPV是当前建筑光伏的最主要形式。中国光伏行业协会的数据显示，2023年我国户用光伏装机量达到43.5GW，总市场规模约1500亿元，较2021年增长大于两倍，占全国分布式光伏比例达45.2%。与之相比，BIPV的发展仍较为初步，需要作为建筑的外围护结构，与建筑同步设计、同步施工、同步验收。未来，农村住宅的屋顶光伏以及BIPV将成为我国建筑光伏市场进一步增长的主要动力。随着整县光伏政策的持续推进、BIPV技术成熟和成本下降，落基山研究所预计，2035年我国建筑分布式光伏市场将接近3500亿元。BIPV由于可应用面积较大，其市场规模将接近2000亿元，较当前实现近5倍的增长。

**图 24 建筑领域低碳技术市场规模增长预测（2023–2035年）**



来源：落基山研究所

### 4.3 产业链一体化、智能化、标准化和市场机制赋能建筑产业发展

发展新模式与新机制对于低碳新产品新技术的规模化应用十分关键。在建筑碳中和与高质量发展双重要求下，我们认为产业链协同一体化、智能化和标准化能够有效整合建筑上下游产业链，实现降碳增效提质：

- 产业链一体化主要包括供应链上下游的打通与全生命周期设计。首先是供应链的上下游协同，材料供应商、施工单位与分包单位等企业将形成利益共同体，共享统一的减碳目标，构建供应链良好生态，下游企业可以通过提要求、定标准推动上游建材行业减碳。工程总承包模式EPC在 market 需求的演变中应运而生，它是指业主将项目实施的多阶段统一委托给总承包商的一种工程建设项目发包模式，EMPC是在EPC模式的基础上增加制造，实现了建筑工程从研发、设计、生产、物流到装配的全流程贯通。总承包商的统一管理不仅可以大幅提升项目效率，针对整个项目周期的统筹管理更是推动节能降碳的有效手段。其次是设计环节对建筑全生命周期碳排放的考量，在工程项目早期实现碳管理等。比如在工程设计环节开展装配式建筑协同设计以实现建筑全生命周期综合效益最大化，即把装配式建筑视为工业产品来进行全面精细化设计。
- 智能化技术的加速应用能够在助力建筑产业链节能降碳的同时带来建筑上下游产业链条的效率提升。2024年8月，国务院发布的《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》强调要“推进产业数字化智能化同绿色化的深度融合，实现数字技术赋能绿色转型”。在设计阶段，以BIM为核心的数字化的设计模式能为建筑全生命周期的能碳管理以及建筑参与碳市场等创新机制提供数据基础；在建造施工阶段，数字化施工管理系统（如BIM和物联网）使得施工过程更加智能和高效，通过实时监控和数据分析优化资源使用，减少能耗；在建筑的运维阶段，智能化能源管理系统（EMS）和物联网技术，可以实时监控和优化建筑的能耗，显著降低运营阶段的碳排放，建筑用能灵活性的提升更是需要通过智能化控制的手段实现对于建筑内外部的信号做出实时响应，并通过虚拟电厂等模式进一步降低建筑的运维成本。贯穿建筑全生命周期的数字化管理还能有效促进行业实现信息的互联互通，推动建筑业低碳发展的信息共享机制形成，进一步促进产业链一体化水平并推动整个建筑业的能碳管理。
- 建筑标准化是以规模化生产的形式提供模块化的部件提升建造效率并减少其过程排放，包括产品标准化、设计标准化以及评价体系标准化。建筑低碳产品需不断丰富标准化类别并降低成本；设计方面需坚持减少规格品类、丰富部品组合的原则，注重楼栋单元标准化、功能模块标准化以及部品部件标准化，在不同层级进行集成，形成多样化的建筑成品；评价体系方面需要建立建筑碳排放统计计量标准协调统筹机制，加强建筑领域基础标准的研究并优化标准供给，完善分类型建筑能耗及碳排放限额标准，构建完善的标准实施和监管体系。

表 5 建筑碳中和的主要机制保障与实现手段举例

建筑碳中和发展模式	目标	主要实现手段	减排潜力举例
产业链一体化	建筑产业链上下游形成统一、协调的降碳共识与目标，开展全生命周期设计和碳管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 全生命周期碳管理</li> <li>• 建筑企业范围三碳排放减排目标</li> <li>• 低碳采购、供应商筛选和管理</li> <li>• 工程总承包模式</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 重视建筑拆除废弃物的回收利用，在再生系统中由下游废物生产新的上游材料，可以减少约40%的碳排放<sup>46</sup>；</li> <li>• 美国清洁购买法案（Buy Clean Act）通过产品环境声明（EPD）促进建设企业采购和使用低碳建材，从而实现上下游协同减排<sup>47</sup>。</li> </ul>
智能化数字化	使用智能数字设备与系统实现行业、产品信息的互联互通，建筑智能化制造和管理，建筑产业链碳信息的智能管理	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 建筑信息模型（BIM）</li> <li>• 数字化施工管理系统</li> <li>• 智能化能碳管理系统（EMS）</li> <li>• 电网交互式节能建筑</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 通过BIM等技术的应用，中建交通建设集团在云南一项目中实现全周期减碳量约8212吨<sup>48</sup>；</li> <li>• 东莞市直机关办公楼合同能源管理综合节能改造项目应用中央空调节能优化管理控制系统，年总节约电量为345.94万kW·h，折合年节约标煤1124t，减排二氧化碳3116.3t/a<sup>49</sup>。</li> </ul>

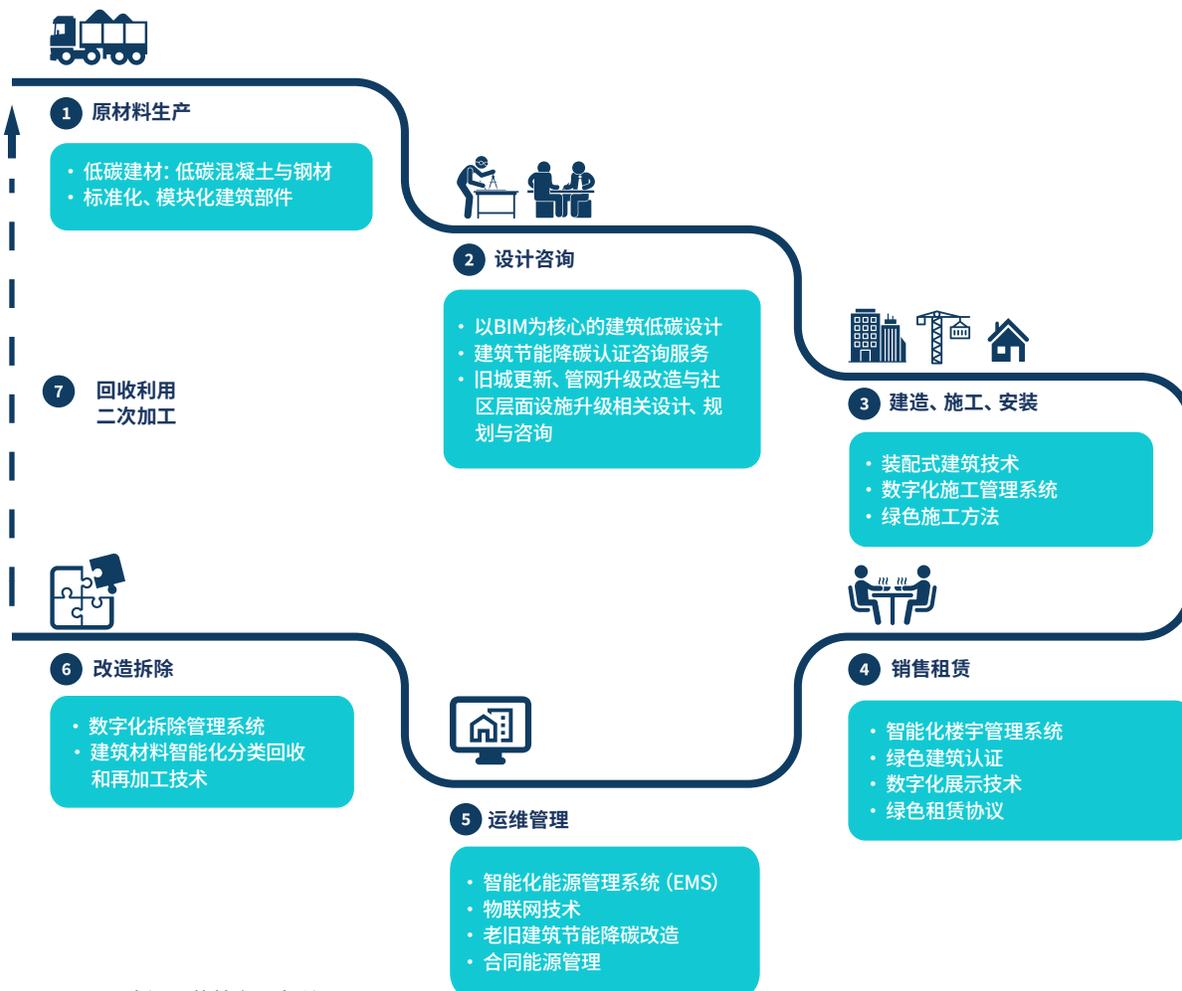
接下页

建筑碳中和发展模式	目标	主要实现手段	减排潜力举例
建筑标准化	建立和实现建筑碳管理有关标准, 促进构件的通用性和互换性, 实现建筑工业化, 以取得最佳经济和减排效果	<ul style="list-style-type: none"> <li>建筑低碳产品评价导则</li> <li>建筑低碳设计导则</li> <li>建筑碳排放统计核算标准协调统筹机制</li> <li>分类型建筑能耗及碳排放限额标准与监管体系</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>采用各类标准化装配式建筑相较于现浇建筑, 在建造阶段碳排放下降约20%<sup>50</sup>。</li> </ul>

同时, 创新市场机制能有效利用市场杠杆调动企业积极性, 激励企业主动增强节能减排的资金和技术投入。我国已逐步探索建筑业碳交易市场的开通, 以碳排放权交易将碳排放成本内部化, 激励建筑企业加快减排<sup>51</sup>; 探索创新绿色金融支持低碳建筑业发展的体制机制, 支持星级绿色建筑、装配式建筑、近零能耗建筑、既有建筑节能和绿色化改造项目, 灵活应用绿色信贷、绿色债券、绿色基金、绿色保险等产品, 在一定程度上解决低碳建筑领域的融资困难问题和期限错配问题, 实现良性循环<sup>52</sup>。

在碳中和背景下, 建筑产业链的各个环节和主体都面临新的发展机遇和主要行动。以碳中和为目标的新产品和新技术的应用以及新模式新机制的落实将驱动包括建筑原材料生产、设计、建造施工、装饰装修、销售租赁、运维管理、改造拆除与回收利用在内的建筑全产业链的价值共同增长 (图 25)。

图 25 建筑碳中和背景下建筑业产业链不同主体的行动



来源: 落基山研究所

## 融合数字化、标准化、一体化的高效建造模式: EMPC+BIM+装配式

近年来,随着BIM技术在建筑领域的设计、施工和管理中得到广泛的应用,以及装配式建筑与工程总承包模式协同所形成的EMPC模式的推广,建筑业诞生了“EMPC+BIM+装配式”的新型建造模式<sup>53</sup>。装配式建筑构建了工厂化、工业化的基础,BIM技术搭建了信息化、数字化的平台,而EMPC模式则有效衔接了设计、施工、运营等多个主体。“EMPC+BIM+装配式”的融合是建筑施工一体化、数字化、标准化的一个案例。

- BIM的功能在于实现精细化、数字化、可视化管理。它可以帮助实现建筑信息的集成,从建筑的设计、生产、施工、运维直至建筑全生命周期的信息闭环,在提高生产效率、节约成本和缩短工期方面发挥不可替代的重要作用。
- 装配式建筑材料生产的作用在于实现建筑部品部件标准化、集约化、工厂化、自动化。将传统建造方式中的大量现浇工作转移到工厂,标准化的部品部件由流水线生产制作,极大地减少现场建筑钢筋、水泥、砌块等建材用量;而且建设施工工业化程度高,节省工期一半以上,项目质量、安全和成本等方面均得到有效管控。
- EMPC模式的优势在于设计、生产、施工一体化闭环管理。在EMPC模式下,总包单位通过整体考量,打通工程项目全链条。从每个分项、每个阶段到每个流程,总承包单位和设计单位都可以充分考虑节能降碳、环保和资源利用等方面的要求。例如在设计阶段,通过选择环保材料和高效的预制构件,以及采用合理的建筑布局和绿色植被的运用,项目能够实现低能耗、低排放的目标。

目前“EMPC+BIM+装配式”建造模式已经在一些试点项目中成功应用。例如全国首个超130米超高层装配式混凝土结构住宅项目“长沙绿地城际空间站”。该项目为装配整体式剪力墙结构,地面建筑层数最高达43层,高度超130米,装配率为50.3%。项目采用了预制剪力墙+爬架、铝模井字支撑体系、BIM技术智慧工地应用、套筒灌浆等系列创新技术,在保证高效高质的同时以先进的绿色工艺实现施工优化。项目设计充分贯彻标准化原则,实现了户型标准化、构件规格标准化以及装修机电一体化设计,更加注重设计先导,将设计贯穿到工厂制造、现场装配、后期运维等各个阶段。

# 第五章 以公平普惠为导向，建筑领域碳中和惠及更多城乡居民

## 5.1 建筑碳中和进程将惠及更多城乡居民

建筑碳中和进程中以“公平普惠”为导向的政策和措施是指在相关政策、服务、资源分配等方面追求公平性和包容性，确保所有人——特别是社会弱势群体——能在建筑中获得平等的减碳、节能、生活品质提升的机会。尽管我国城镇新建建筑中绿色建筑占比已经超过90%，既有建筑中仍存在大量低于现行节能标准的建筑。目前建筑碳中和主要手段如高性能围护结构、高效建筑设备、建筑智能管理系统等只惠及部分城镇的新建建筑，老旧小区、农村住房等重点场景由于建设标准过时、基础设施配套不足、资金支持不足等原因，仍普遍较少应用到低碳技术。保障性住房、老旧小区、农村住房将是未来建筑碳中和过程中实现普惠的重要主体。据落基山研究所测算，我国上述三类住房总面积达到近350亿平米，占全国住房面积比例56.5%，推广低碳建筑技术将惠及居民8.5亿人（表6）。随着碳中和的推进与相关技术、标准成熟，城镇新建商品住房之外的其他住房类型将能够部署更多低碳技术，逐步实现建筑碳中和的公平普惠。

**表 6 保障性住房、城镇老旧小区、农村住房规模与碳排放情况**

		保障性住房	城镇老旧小区	农村住房	所有住房
		政府为中低收入住房困难家庭所提供的限定标准、限定价格或租金的住房	城镇地区建成于2000年以前、公共设施落后影响居民基本生活的住宅小区	农村村民在农村宅基地上修建的供农户居住的房屋	
规模	总套数 /万套	8,000	3,900	26,000	65,000
	总建筑面积 /亿m <sup>2</sup>	45	40	259	609
	占全国住房面积比例	7.4%	6.6%	42.5%	100%
	涉及居民人数 /亿人	2	1.2	5.3	14.1
碳排放	运行阶段年度碳排放量 /亿吨CO <sub>2</sub>	0.9	0.8	4.3	13.3
	占全国住房碳排放总量比例	6.8%	6.0%	32.3%	100%
	占全国建筑领域运行阶段年度碳排放总量比例 (总量为22亿吨CO <sub>2</sub> )	4.1%	3.6%	19.5%	60.5%

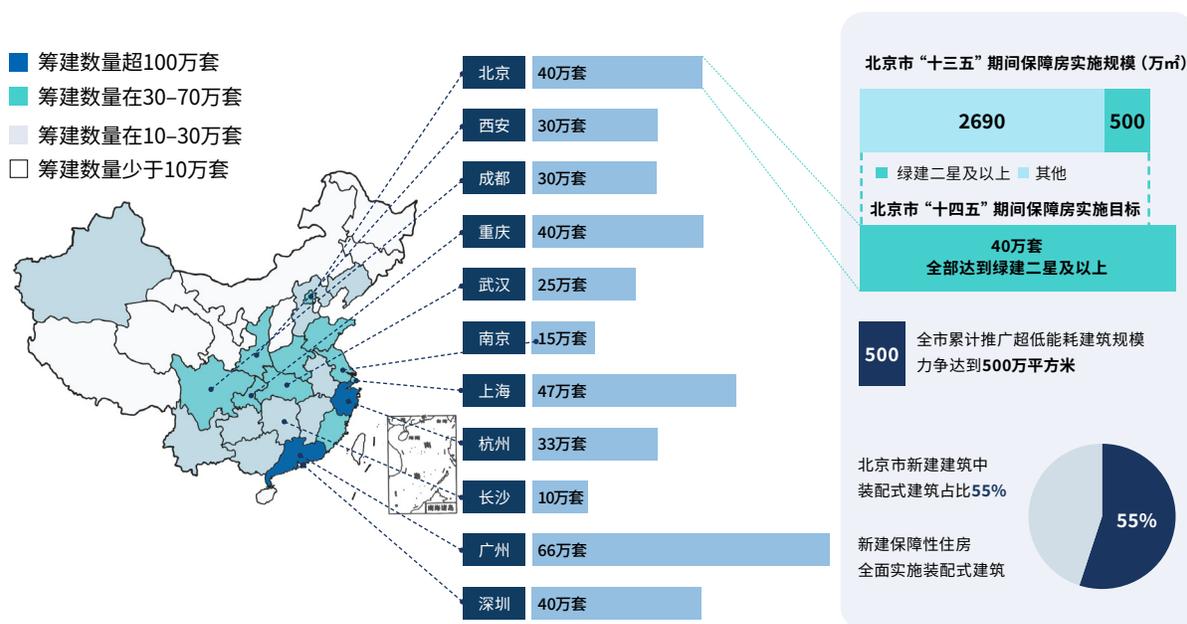
来源：落基山研究所基于住房和城乡建设部数据整理

以公平普惠为导向的建筑碳中和进程得到了国家政策的明确支持。在城镇老旧小区方面，《城乡建设领域碳达峰实施方案》要求加强节能改造鉴定评估，编制改造专项规划，对具备改造价值和条件的居住建筑要应改尽改，改造部分节能水平应达到现行标准规定。《推进建筑和市政基础设施设备更新工作实施方案》强调供热设施设备更新、建筑节能改造等重点工作，更新改造超出使用寿命、能效低、存在安全隐患且无维修价值的热泵机组、散热器、冷水机组、外窗（幕墙）、外墙（屋顶）保温、照明设备等。在农村住房方面，《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》提出提升农房绿色低碳水平的要求，以坚持农民自愿、因地制宜、一户一策原则推进绿色低碳农房建设，有序开展既有农房节能改造，推动农村用能低碳转型。

我国保障性住房率先全面实行绿建标准，对全社会推动低碳住房具有示范效应<sup>54</sup>。保障性住房是政府主导投资的项目，作为我国住房体系的重要组成部分，是满足基本住房需求的重要措施<sup>55</sup>。自2008年以来，全国累计建设各类保障性住房和棚改安置住房约8000万套，帮助2亿多困难群众改善住房条件，我国已经拥有世界最大的住房保障体系<sup>56</sup>。保障性住房中应用绿色低碳技术，不仅有利于建筑减碳，也有利于降低居民日常能耗开支，提升居住环境质量，是促进社会公平与普惠的体现。目前绿色建筑、超低能耗建筑、装配式建筑技术体系已经较为成熟，但受制于成本原因，这类技术标准在全国保障性住房中的应用仍然有限。

新建保障性住房是当下和未来全国城镇住房发展的重要组成部分。我国各省市级政府均确立了“十四五”期间保障性租赁住房建设套数目标。未来新建保障房将主要集中于京津冀经济圈、长三角经济圈、粤港澳大湾区和中部经济圈（图26）。部分领先城市已经明确保障性住房绿色低碳发展的政策要求并且取得阶段性成果。以北京为例，“十三五”期间保障房累计实施产业化规模3190万平方米，获得绿色建筑二星级及以上项目近500万平方米，并且开始探索超低能耗建筑技术在保障房中的应用，建成了焦化厂公租房等示范项目。“十四五”期间北京提出筹建保障性租赁住房40万套(间)的目标，新建保障性住房全面推行绿建二星标准，因地制宜落实绿建三星要求，全面实施装配式建筑和全装修成品交房<sup>57</sup>。但是全国范围内出台保障性住房绿色低碳发展政策的城市仍然有限，并且在保障性住房中对超低能耗、装配式技术等的普及目前大多没有定量目标，不利于绿色低碳技术进一步在保障性住房领域的普及。

**图 26 我国各省份及部分城市“十四五”期间新建保障性租赁住房发展目标及北京市保障性住房工作进展**

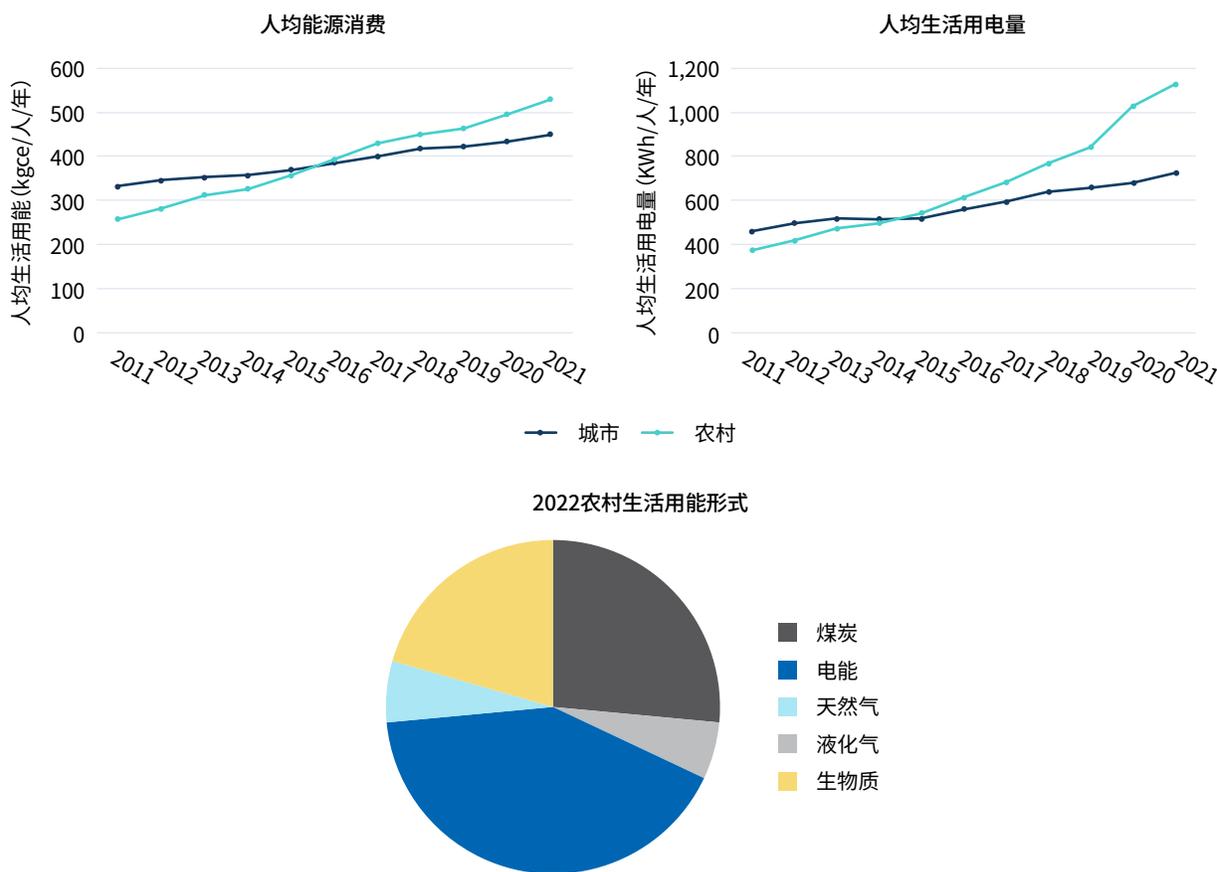


来源：落基山研究所基于各省市住房城乡建设部门文件整理

老旧小区与农村住房是降碳潜力最大、但现存挑战较多的两类住房。我国拥有2000年前建设的城镇老旧小区近16万个，涉及居民超过4200万户，建筑面积约为40亿平方米<sup>58</sup>。老旧小区普遍节能水平低、能耗较高，尤其是围护结构保温能力较差，散热损失严重。根据我国建筑节能标准的实行情况，1990年以前建成的城镇老旧小区基本没有节能措施，2000年底前建成的城镇老旧小区基本达不到节能50%标准，建筑能耗水平是新建居住建筑的2-4倍<sup>59</sup>。因此，处理好老旧小区建筑的降碳工作对建筑领域实现碳中和至关重要。由于各个气候区的不同年代建设的老旧小区建筑差异大，其低碳改造技术路径各自不同，而各地区老旧小区低碳改造技术标准不完善和监管执行力度不足，导致目前全国城镇老旧小区低碳改造整体有待提升。

农村住房用能问题与居住质量改善是影响建筑领域碳中和公平普惠的又一重要领域。我国拥有农村住房总面积约259亿m<sup>2</sup>，占全国住房面积总量的42.5%，涉及近5亿人口，CO<sub>2</sub>排放量约占建筑领域排放总量的20%<sup>60</sup>。经过四十多年的发展，农村住房规模和布局有所改善，农民人均住房面积由1978年底的8.1m<sup>2</sup>提高到了2018年底的45.8m<sup>2</sup>。未来5-10年，农村住房建设数量和需求仍将不断增加，每年新建农房的竣工面积约为6-7亿m<sup>2</sup>，占全国新建住宅总量的一半以上<sup>61</sup>。用能方面，农村居民生活用能经历了迅速的增长，人均能源消费已经超过了城镇居民。随着农村人民生活水平的迅速提升，以及家电下乡、北方清洁供暖等政策的实施，农村人均生活用电迅速上升，2022年农村人均生活用电量增长至城镇人均生活用电的150%，相比2011年水平增长了接近3倍。从用能形式来看，2022年农村生活用电占农村生活总用能比例达到42%，已经成为我国农村住宅最主要的用能形式，然而煤炭、天然气等化石能源仍占农村生活用能的37.6%，其中煤炭占比仍较高，且天然气应用有逐步增加的趋势，造成农村住宅具有较高的直接CO<sub>2</sub>排放。另外，尽管在“煤改电”等政策的推动下，农村电气化率迅速升高，然而由于农村住宅仍以自主建设为主，缺乏验收和监管，农村住宅的围护结构较为不足，且农村地区分布式能源发展仍处于初期阶段，这导致了农村住宅对于网电的需求迅速增长，将显著增加农村住宅的间接碳排放。

**图 27 农村生活用能历史发展及现状**



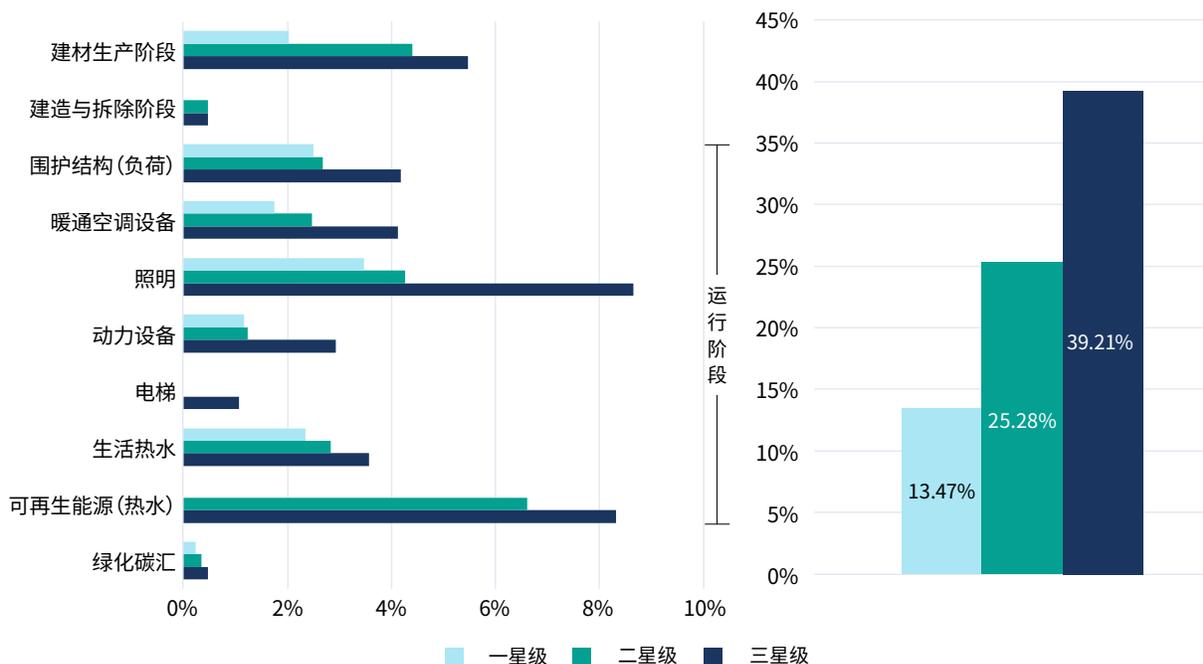
来源：落基山研究所基于《中国能源统计年鉴》与《中国建筑节能年度发展研究报告2024》数据整理

## 5.2 城乡住房碳中和进程中推动公平普惠的新机遇

### 5.2.1 发挥保障性住房的绿色低碳引领作用

未来保障性住房仍然具有较大建设规模，并且作为政府主导项目，相对其他住房类型具有资金支持优势。如果绿色建筑、超低能耗建筑、装配式建筑等技术能够在全国保障性住房中优先得到大规模普及，将会极大推动低碳技术的普惠进程。提高保障性住房绿色建筑星级标准既能够直接减少碳排放，又能够显著提升居住环境品质。总体而言，绿色建筑星级越高，全生命周期碳排放量越低：与普通节能居住建筑相比，各气候区一星级、二星级和三星级绿色居住建筑碳排放分别减少约12%–16%、23%–34%、32%–46%<sup>62</sup>。（图28）在健康舒适方面，住房和城乡建设部在2023年版的《绿色建筑评价标准》中新增了不同星级建筑对于空气质量的要求：一星级绿色建筑室内空气污染物浓度应比现行标准规定限值降低10%，二星级、三星级绿色建筑应降低20%<sup>63</sup>

图 28 绿色星级居住建筑全生命周期主要技术措施减排贡献(左)和总体碳排放降低比例(右)



来源：落基山研究所基于中国建筑科学研究院数据整理

装配式建筑与超低能耗建筑技术的综合应用能够使保障性住房进一步实现节能降碳。装配式技术的主要优势是在施工环节缩短工期，节省建材使用量及能耗，较传统施工方式单位面积可减少碳排放3.74kg<sup>64</sup>。而超低能耗建筑技术则主要是在运行阶段发挥节能优势：建筑物全年供暖供冷需求显著降低，严寒和寒冷地区建筑节能率达到90%以上，与现行国家节能设计标准相比，供暖能耗降低85%以上<sup>65</sup>。经案例测算分析，超低能耗建筑全生命周期碳排放强度比绿建一星建筑低9.04%，运行阶段碳排放强度低24.21%<sup>66</sup>。

装配式建筑在保障性住房中的占比仍有上升空间，且各省市差异较大，超低能耗技术尚未大规模应用。此前北京、上海、天津、浙江等地已陆续发布相关政策，引导保障性住房应用装配式建造方式，但量化指标仍然不够明确。据估算一二线城市“十四五”期间保障性租赁住房中装配式建筑面积占比为50%–70%<sup>67</sup>。其中北京作为保障性住房主要发展城市之一，要求新建地上建筑面积2万平方米以上的保障房项目采用装配式建筑<sup>68</sup>，但全国各地保障性住房政策中对装配式建筑要求仍不明确，执行力度不足，装配式技术尚未在保障房中高度普及。超低能耗建筑则处于规模化发展初期，全国的超低能耗、近零能耗建筑在保障性住房中的应用以试点为主，未来具有较高的普及潜力。

经落基山研究所综合测算，通过政府投资的适当带动，如果在全国保障性住房政策中提升绿建星级到二星级标准、全面实行装配式建筑，并因地制宜发展超低能耗建筑（占比20%），则保障性住房综合碳排放量将减少40%–50%，每年减少碳排放量约4000万吨，惠及1300万人，并能创造约1.8万亿规模市场，将真正成为率先引领建筑低碳发展的示范样板。

## 超低能耗装配式保障性住房案例<sup>69</sup>

位于北京市朝阳区垡头地区焦化厂公租房项目东北区域的三栋超低能耗公租房，建筑面积合计29026m<sup>2</sup>，总计560户，结构形式为装配式及现浇剪力墙结构。该项目是北京市具有代表性的装配式超低能耗公租房建设项目，属于北京市第一批超低能耗建筑示范项目，也是国内首批高层超低能耗建筑，取得了住房和城乡建设部科技与产业发展中心颁发的高能效建筑-被动式低能耗建筑质量标识。

建筑主要通过三方面手段实现了大幅度的节能降耗：首先，建筑优先采用了高效的外围护结构，包括大幅提升建筑的气密性、无热桥设计等，通过被动式技术实现节能降耗；其次，项目还将装配式与超低能耗充分结合，在国内首先研发装配式夹心外墙结合被动窗的新型安装方式，并验证达到气密性、水密性和抗风压相关技术参数；可再生能源利用也是项目的一大亮点，该项目充分利用焦化厂旧址污染土处理的基坑，设置地道风系统实现新风预冷预热，显著降低建筑能耗。

绿色低碳技术的综合应用可以在保障性住房全生命周期降低碳排放，焦化厂项目中的三栋高层公租房在能耗、碳排放、环境品质等方面均取得了良好结果：

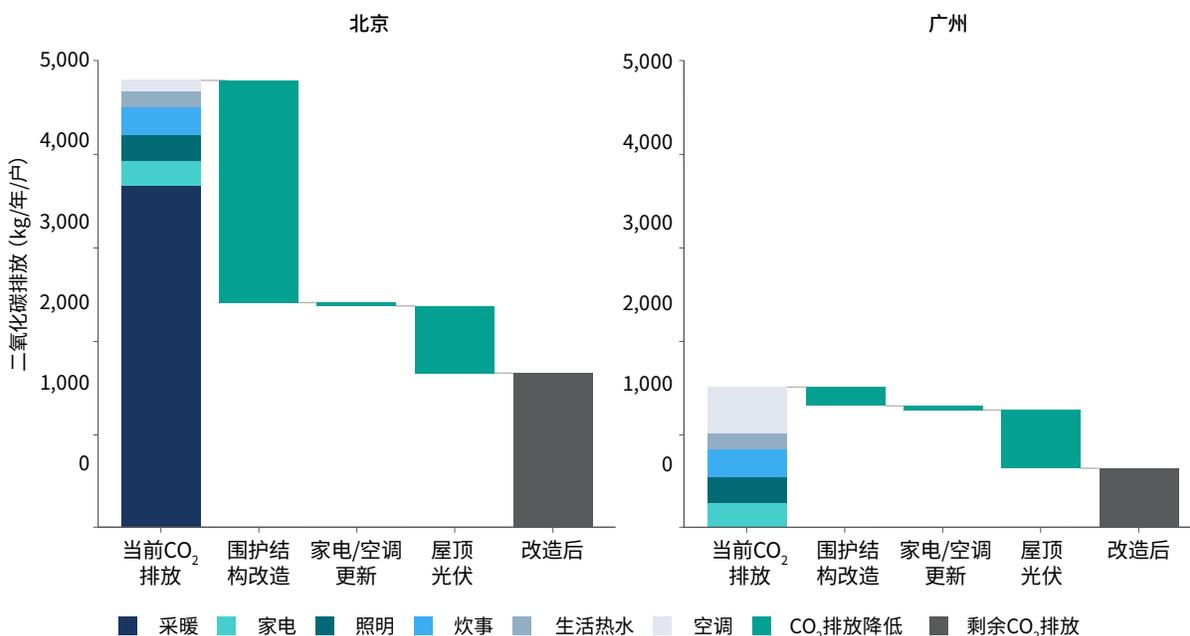
- 提升围护结构热工性能：该项目单体最高装配率达91%，为AAA级装配式建筑。在外围护设计中采用了装配式预制夹心外墙，集结构、保温、防火、装饰于一体。保温层采用聚氨酯复合真空板的新工艺，达到了超低能耗的技术要求。被动窗传热系数达到1.0W/(m<sup>2</sup>·K)，比普通居住节能建筑传热系数降低50%以上，隔声性能提升15%以上。
- 降低运行能耗与碳排放：地道风系统可以调节空气温度4–6℃，极大地降低建筑的运行能耗。仅采暖一项，三栋楼的全年节能量合计118.62tce，按照每公斤标煤产生2.77kg的CO<sub>2</sub>排放量计算，采暖期实现CO<sub>2</sub>减排328.58t。项目相较基准建筑达到了90%以上的节能率。
- 提高居住环境品质：建筑室内采用全装配式装修，结合超低能耗建筑特有的新风系统，可以保证室内较高的舒适度。室内温度控制在20–26℃，室内湿度控制在30%–60%，二氧化碳浓度控制在1000ppm以下。
- 减少居民能源账单支出：实测结果显示，项目的全年采暖耗电量仅达9.03kWh/m<sup>2</sup>，取消了集中供暖，最终折合每平米的采暖费用仅4.5元，相比于北京民用集中供暖费用降低80%以上<sup>70</sup>。

## 5.2.2 因地制宜推进城镇老旧小区低碳改造

在政策方面，城镇老旧小区节能改造已经成为我国各地城乡建设领域的重要项目，将有助于现有40亿m<sup>2</sup>城镇老旧小区建筑降低碳排放、减少运行费用、改善居住品质。住房和城乡建设部等部门印发的《关于扎实推进2023年城镇老旧小区改造工作的通知》提出“重点推进既有建筑节能改造，根据气候区特点，可选择外墙屋面保温隔热改造、更换外窗、增设遮阳等措施”。2024年财政部投入上亿资金支持石家庄、太原等15个城市实施城市更新行动，核心是城镇老旧小区改造。在标准规范方面，北京、山东、广东等地区将建筑节能改造一项列入老旧小区改造技术标准，例如广州市地方标准《老旧小区改造技术规范》中有明确的对于“建筑节能技术与绿色建筑技术”的要求<sup>71</sup>。在实践中，外墙保温、隔热、节能门窗、遮阳、建筑光伏等技术是老旧小区节能改造的推荐技术。

针对不同气候区、不同类型的城镇老旧小区，应发挥不同地域的气候特点、资源禀赋、技术条件，制定不同的建筑低碳改造技术路径，由此带来不同区域的不同减碳机遇。为了展现不同地区技术路径的差异，落基山研究所分别对北京和广州两个城市的典型老旧居住建筑各取一例开展初步分析。

图 29 北京、广州城镇老旧小区建筑低碳改造潜力分析（运行阶段）



来源：落基山研究所

注释：分析假设北京与广州的一处1980年代建设的典型6层板式住宅的降碳策略和效果

- 北方城市老旧小区建筑的主要减排机遇来自围护结构改造和屋顶光伏的使用，同时城市供暖系统的减碳对老旧小区建筑碳中和至关重要。以北京为例，其未改造住宅的碳排放77%由采暖造成，而采暖碳排放与建筑外围护结构保温性能直接相关，因此建筑外围护结构的改善是降低住宅碳排放的首要因素。通过改造外围护结构，能够实现降碳50%，同时提升室内温度2-3℃。利用屋顶40%面积安装太阳能光伏系统，发电量能够满足全楼（6层）的用电需求，降低家庭用电成本500-1000元。改造后的住宅比改造前降低65%的碳排放。剩余的碳排放主要来自集中供暖，若实现完全脱碳仍需集中供暖系统的脱碳。
- 南方城市老旧小区建筑的能耗水平比北方低，其主要减排机遇来自屋顶光伏的利用，同时设备节能降碳起到的作用更明显。以广州为例，其老旧小区住宅的碳排放强度明显低于北京。未改造住宅的碳排放中空调占比最高，围护结构改造与空调设备更新能够直接降低空调的碳排放，与北京相比，家电/空调更新的降碳效果更明显。如果利用屋顶40%的面积安装屋顶光伏，发电量能够满足全楼80%的用电需求。住宅改造后可实现降碳60%。剩余碳排放主要来自于炊事和生活热水。

因此，针对不同气候区和不同地域的老旧建筑低碳改造时，应注重其减碳策略和机遇上的差异，在开展城镇老旧小区低碳改造的同时加强节能降碳鉴定评估与监管验收，结合已完成改造项目经验形成方案库，并制订示范流程与工作指导方案，未来集合相似需求降低设备材料成本，有助于城镇老旧小区节能降碳改造规模发展。

## 创新融资合作模式助力保障性住房低碳改造

荷兰的能源之跃（Energiesprong）项目是以政府与社会资本合作方式（Public-Private Partnership, PPP）对上世纪七十年代的公益性排屋进行净零能耗改造的项目。由于采用“装配式外墙系统+电气化一体式建筑设备系统”解决方案，改造周期缩短到一周内，有效推动了公益性联排住房零碳改造项目的落地，在欧洲市场成功探索了面向零碳的建筑改造路径。目前，该项目已经促成五千多套多户住宅的建筑改造项目，未来将覆盖240万套公益性住房。

该项目的亮点之一是创新融资机制来激励建筑业参与建筑改造。在传统租房模式中，租户直接向能源公司支付用能费用，导致业主不愿为建筑节能或设备升级支付额外费用，因为业主无法获得节能产生的收益。在该项目中，租户直接向业主而不是能源公司支付用能费用，虽然业主承担了建筑的改造成本，但这部分投资也能从租户节约的用能费里收回。

美国加利福尼亚州和马萨诸塞州的多户经济适用房零碳改造中也创新了合作模式和融资模式。落基山研究所的零碳住宅工作组（REALIZE）在加州大规模部署多户经济适用房的零碳改造工作，利用加州政府的支持资金研究加州常见建筑类型，总结出三种常见的建筑类型——联排别墅、花园式公寓和走廊式公寓，并针对这三种常见建筑类型进行设计并发展出标准化改造模型。在此基础上，工作组与加州保障性公益住房业主建立了长久的合作关系，按照总结出的建筑类型整合业主需求促进批量采购，并通过建立本地承包商网络进一步降低成本。现已有超过65000套业主承诺采用该建筑零碳改造方案，在五年时间里完成了约2.8万平方米的改造示范项目<sup>72</sup>。

同时，该项目工作组将标准化改造模型配套融资服务，推动政府激励政策与私人资本为改造项目提供资金。在与加州的能源贷款计划（GoGreen）合作的基础上，团队也同时与绿色银行、州能源办公室、公用事业计划管理员和贷款机构等合作制定解决方案，以落实融资服务标准化，并在更多项目上推广复制。

## 5.2.3 利用可再生资源、围护结构改造、低碳建材实现零碳农房

与城市住宅相比，我国农村建筑密度低、屋顶空间大，能够为分布式可再生能源发展提供足够的空间。研究显示，我国农村生活总用电量不到3500亿kWh/年，而农村屋顶光伏发电量潜力高达2.9万亿kWh/年，能够在完全满足自身用电需求的同时向外输出巨量的零碳电力<sup>1</sup>。同时，农村具有丰富的生物质资源（薪柴、秸秆等），可以用于满足农村地区的取暖、炊事等生活用能需求。充分挖掘利用这两方面的资源禀赋，农村住宅具备率先实现碳中和的潜力，同时还能贡献于我国更大范围的碳中和转型。

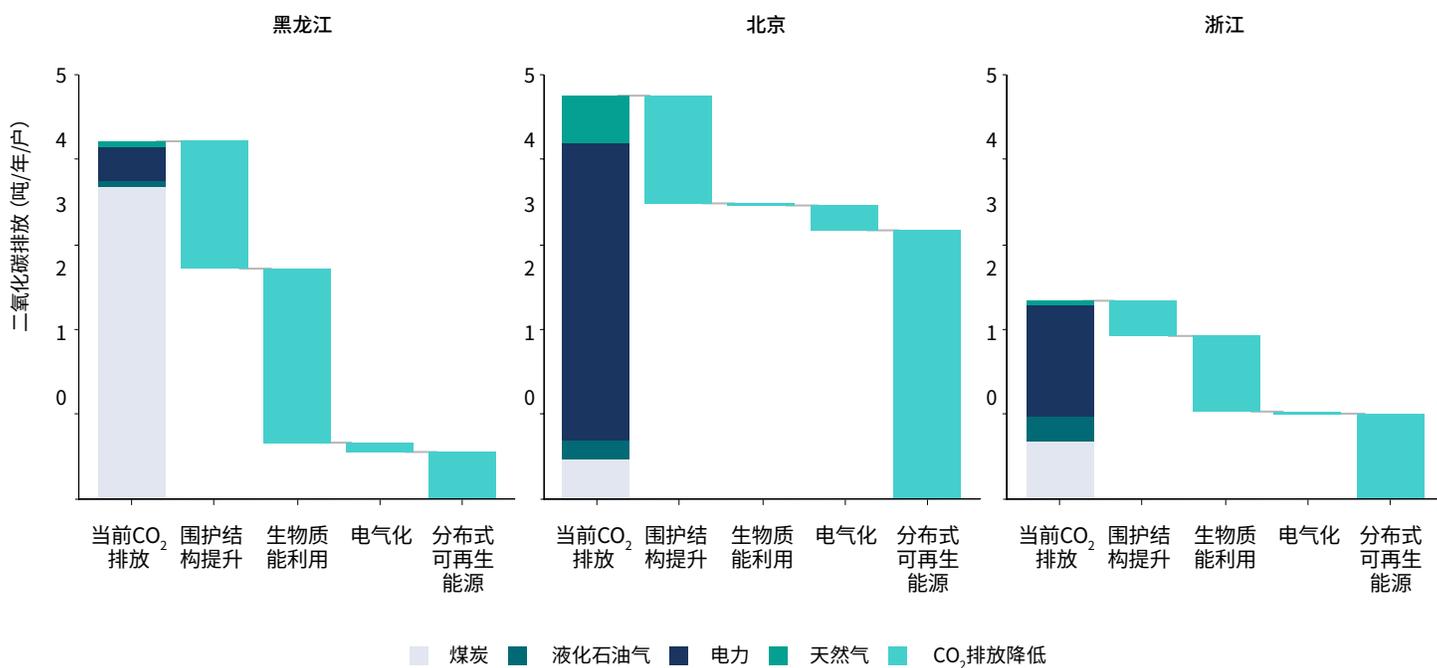
农村住宅是农村建筑改造的主体，其脱碳路径和机遇选择应基于本地气候条件、用能结构和资源条件，但整体而言农宅用能脱碳满足“节能-电气化-可再生能源”的策略。图30对比了我国东北（以黑龙江为例）、华北（以北京为例）、华东（以浙江为例）的农村住宅脱碳机遇。黑龙江是我国具有严寒气候、生物质资源丰富的地区；北

京代表我国“煤改电”政策推进迅速的以供暖能耗为主的寒冷地区；浙江则代表了我国以制冷能耗为主的南方地区。落基山研究所的初步分析发现，以供暖需求为主的北方地区农宅CO<sub>2</sub>排放是南方地区的两倍甚至更多。发展水平以及煤改电政策也极大地影响了北方地区的碳排放构成，北京农村住宅的CO<sub>2</sub>排放主要由用电造成，占比约为73.7%，而煤炭燃烧是当前黑龙江农村住宅最主要的CO<sub>2</sub>排放来源，占比接近90%。

农宅用能脱碳的机遇体现在围护结构改造、生物质、分布式可再生资源利用和电气化4个方面，但根据不同区域的资源禀赋和电气化水平不同，每一个措施的脱碳效果因地而异：

- 围护结构的提升是所有农村住宅均能显著降碳的机遇。在黑龙江、北京、浙江三个省市的典型农宅中，围护结构提升带来的降碳贡献率分别为35.7%，26.6%，17.8%。
- 供暖脱碳是北方农宅用能脱碳的最主要方面，以生物质和电气化为常见形式，其机遇受当地资源禀赋和政策措施影响显著。黑龙江地区农业发达，生物质资源丰富，因此利用生物质燃料替代煤炭进行供暖和炊事是最为有效的降碳措施，可以贡献农村住宅50%的CO<sub>2</sub>排放降低。而北京受到煤改电政策的影响，已经实现了大范围的供暖电气化改造，结合分布式可再生能源的发展实现农村住宅用电的脱碳是其最有效措施，可以贡献约66.7%的CO<sub>2</sub>排放降低。
- 南方农村住宅用能以制冷和炊事需求为主，分布式可再生能源和生物质能将是脱碳的主要机遇。由于制冷用电负荷较高，以屋顶光伏为主的分布式可再生能源发展是南方农村住宅脱碳最为重要的措施。另外以生物质能取代化石能源作为炊事燃料也可以贡献约38%的CO<sub>2</sub>排放降低。由于供暖需求较低，电气化对于脱碳的贡献并不明显。

图 30 我国不同地区农村住宅脱碳措施(运行阶段)



注：该模型以目标省份农村住宅的户平均用能以及碳排放情况作为农村住宅脱碳路径的基准值  
来源：落基山研究所

由于我国农宅的使用寿命比较短，未来将会有大量新建和改造需求，因此农宅也是绿色低碳建材推广的重要机遇，以此降低农村住宅隐含碳排放。据估计，我国每年约有76万个自然村、约500万套农房新建或者重建<sup>39</sup>。2022年以来，我国先后开展了多批绿色建材下乡活动，加快了节能低碳、安全性好、性价比高的绿色建材在农村地区推广应用。未来，结合装配式农宅、现代竹木结构等低碳建造手段，低碳建材将在农村住宅获得进一步的广泛应用，助力农村住宅的全生命周期脱碳。

### 近零能耗农房建筑改造案例<sup>73</sup>

“天友·零舍”是坐落于北京市近郊半壁店村内的一处农房改造项目。项目主要探索了装配式近零能耗农宅改造的技术可能性和建造的实现性，以提高乡村建筑的健康舒适度为核心，同时在节能和环境达到平衡状态。该项目主要通过应用被动式设计的策略实现最小的能源需求，并通过主动式技术优化，充分利用了可再生能源，实现了近零能耗。

- 被动式设计：传统农宅在冬夏季的热舒适性都比较欠缺，项目采用了性价比高的铝包塑钢材质的被动窗，高性能的围护结构大幅度改善了冬季室内温湿度，并用被动式太阳房和楼梯间风塔连接气密性单元，实现增强冬季热辐射和引导过渡季自然通风的作用。采光方面，传统农宅由于单侧开窗往往造成室内较暗，零舍在坡屋面的木屋架上根据采光模拟设置位置恰当的天窗，室内的照度和采光均匀度都得到了大幅提升。
- 主动式技术优化：项目采用了设置高效的新风热回收系统，进一步降低冬夏两季的采暖和制冷负荷；屋顶还设置了光伏瓦、彩色薄膜光伏和太阳能热水，充分利用可再生能源。该建筑能耗为29.3kWh/m<sup>2</sup>·a，光伏年发电7050度，折合17.6kWh/m<sup>2</sup>。相比中国北方农村农宅的124kWh/m<sup>2</sup>·a平均能耗，零舍节约了76.4%的能耗，并实现了60.2%的可再生能源利用率。
- 装配式技术：建造方式上，项目利用旧农宅改建的部分保留了原有的砖木结构，加建的部分采用了可循环利用的模块装配式和可循环材料的轻木结构，实现了资源节约和循环利用。项目平米造价控制在正常近零能耗建筑平米造价的65%左右，对我国农房低碳化改造与新建提供了参考。

# 第六章 把握新机遇，推动建筑领域零碳转型

碳中和背景下，建筑零碳转型将带动建筑的用能形式、建筑材料、技术与市场模式、公平普惠等各个方面的创新与发展，产生新发展机遇。建筑领域的零碳转型将推动能源系统的系统转型，带动产业链升级转型，为城乡居民提供更高品质的人居环境，推动实现“共同富裕”愿景。未来的5-10年是引领我国建筑领域迈向碳中和的关键时期。一方面，建筑领域需要确保实现高质量碳达峰，稳住目前碳排放总量基本处于平台期的现状，在建设量、人均能耗水平仍有上升空间的情况下不造成大规模的碳排放增加；另一方面需要加快引导建筑领域迈向碳中和，尽快推广碳中和关键技术 in 建筑领域的应用与集成，集中解决产业链、成本、市场接受度等核心问题，为争取早日实现建筑领域碳中和奠定基础。

为了更好抓住碳中和背景下建筑领域的发展机遇，本报告提出以下四个方面的行动建议。

## 1.提升建筑用能灵活性和供暖脱碳，加快建筑运行阶段脱碳

以建筑智能化和创新机制为切入点，挖掘建筑作为灵活性资源的巨大潜力。

- **开发推广智能建筑技术提升建筑用能灵活性：**推动智能控制、物联网技术在建筑暖通空调、照明等用电设备中的集成应用，通过能碳管理平台对于建筑中的设备深度整合，并基于大数据和人工智能技术开发和推广负荷转移、负荷削减等响应策略，形成楼宇智能化的综合性解决方案，实现精准的负荷管理，全面提升建筑能碳管理的精度和效率。加快推进“电网-建筑-新能源汽车”互动的核心技术攻关，加快“电网-建筑-新能源汽车”互动的交互接口、通信协议等关键技术标准的制订。
- **创新商业模式和激励机制，聚合更多建筑主体参与建筑需求侧响应：**通过创新的机制和模式，聚合居民建筑、公共建筑负荷参与需求侧响应、通过虚拟电厂等方式参与电网削峰填谷。探索建筑需求响应的各种激励方式，如电价激励、积分奖励等，鼓励用户积极参与。探索电动新能源汽车与园区、工商业建筑、家庭住宅等场景高效融合的双向充放电应用模式等。鼓励合同能源管理等商业模式与建筑用能灵活性提升的结合，激励更多市场主体参与建筑用能灵活性提升项目。

完善市场机制，加速“余热+热泵”在供暖脱碳中的应用。

- **加强长距离输热、跨季节储热技术研发：**加快长距离输热和跨季节储热技术的研发和应用，解决余热在时间和空间上的不匹配问题，提升余热利用的灵活性和稳定性。在北方城镇开展长距离输热和跨季节储热试点项目，验证技术可行性和经济性。
- **建立跨部门的余热利用机制：**建立跨部门的余热利用协调小组，明确余热利用目标和责任分工，全面调查和评估城市周边的可利用余热资源，包括热电厂、核电、工业、数据中心和污水处理厂的余热，发布余热资源指导价格，协助热电厂与余热资源所有方进行对接，形成覆盖余热利用全流程的工作机制。
- **完善供热政策和市场机制：**针对余热利用和热泵供暖，制定和完善的相关政策法规。国家层面出台相关鼓励政策，起草并逐步完善相关标准和规范体系，为余热、热泵大规模应用提供依据和指导。灵活应用非财政类激励政策和市场机制，如结合容积率奖励、碳交易机制，探索其在供热领域的应用，推动“余热+热泵”供暖的规模化应用。

## 2.以全生命周期碳管理为契机开展低碳建材采购与推广

以碳足迹管理和绿色采购为切入点，推动低碳建材采购和应用。

- **建立建材碳足迹管理与指标体系：**开展建材产品碳核算和碳标签体系建设，建立建材行业碳排放数据库和采购平台，行业协会出台建材产品EPD及PCR，规范建材和工程项目碳核算及认证，为低碳建材市场的有序发展提供基本保障。适时将低碳指标纳入绿色建材评价体系，在建筑工程的绿色评价体系中纳入建材碳排放的考核指标。
- **出台低碳建材激励措施：**为使用低碳建材的项目提供财税优惠或非财政性激励（如容积率奖励），并为低碳建材生产商提供免税降费等政策优惠。探索制定“基于性能的标准”以鼓励低碳建材生产，提升行业创新能力。
- **以现有绿色建材推广项目为基础发展低碳建材：**以现有绿色建材采购项目为基础，在政府主导的公共建筑和基础设施项目中规模化应用低碳建材，通过政府建设项目采购要求直接提升市场需求。利用成功的政府试点项目提升低碳建材的市场信誉和认可度。在此基础上，将低碳建材应用拓展到企业项目中。

攻克核心技术、标准，在新农村住宅、文旅建筑、商业综合体中推广现代竹木结构。

- **完善现代竹木结构标准体系：**根据不同地域、气候和生活习惯，制定满足大跨度、高密度、耐久性和防火性要求的竹木结构建筑的设计、施工和验收标准，推动材料、部件、设计、施工、验收、维护等标准规范的制修订。加快建立竹木结构建筑及建筑工程材料的质量认证体系，确保材料和施工质量的可靠性。重点推进木竹建筑建材定向培育、组装配套和技术创新，解决大跨度、大截面构件的生产制约以及结构耐久和防火问题。
- **出台激励政策鼓励竹木结构发展：**完善竹木结构建筑在土地、税收和消防等方面的政策，推动商品化和市场化发展。制定财政奖补、税收优惠和金融支持政策，鼓励竹木结构建筑的发展。

## 3. 推动建筑一体化、智能化、标准化，创新市场机制，加速建筑技术的集成与市场化推广

- **支持成熟度不高的碳中和关键技术研发与示范：**针对尚处于发展初期的产品如低碳建材生产、固碳技术等关键技术领域，加大研发投入，提供财政支持和税收优惠政策，鼓励创新技术的研发。对于有减碳潜力的早期技术，可以在保障性住房和公共建筑中率先示范。
- **创新市场机制，加速早期商业化技术的全面普及、成熟：**针对已经进入早期商业化的大量技术，如热泵、建筑光伏一体化等，应探索市场化机制加快市场化应用。加快发展绿色金融对低碳类建筑项目和技术的支持，解决融资困难问题。发布面向建筑领域碳中和转型的投资指南，提升金融机构对建筑项目长期环境影响的重视。
- **通过产业链一体化、智能化、建筑标准化，促进建筑技术集成应用：**推广产业链一体化，加强材料供应商、施工单位和分包单位的协同合作。推动EMPC总承包模式，实现项目全生命周期的碳管理，提升整体项目效率并减少碳排放。在设计阶段考虑建筑全生命周期的碳排放，推动装配式建筑协同设计。使用智能化管理技术提高技术集成和碳管理能力，鼓励建筑企业利用BIM和物联网技术、智能化能源管理系统、虚拟电厂等技术，优化建筑碳管理。推动建筑产品、设计和评价体系的标准化，提升模块化部件的通用性和互换性。制定低碳产品评价导则和碳排放统计核算标准，构建完善的标准实施和监管体系。

## 4. 推广低碳技术在保障性住房、老旧小区和农村住房中的应用，增进社会公平与技术普惠

- **提高绿建星级与低碳技术应用，发挥新建保障性住房的低碳引领作用：**在保障性住房中普及绿色建筑技术，提升建筑星级标准要求，提高绿建二星保障性住房比例。在保障性住房建设标准中明确装配式建造、超低能耗建筑等的量化指标，例如在新建保障性住房采用装配式建造方式，在严寒和寒冷地区保障性住房中率先试点和推广超低能耗建筑技术。
- **因地制宜采用围护改造、设备升级、可再生能源的不同技术组合推动老旧小区减碳改造：**不同气候区和建筑形式的老旧小区建筑宜制定最优的减碳路径，例如北方城市以围护结构改造和屋顶光伏的应用为重点，加强外墙保温和节能门窗的使用，并确保集中供暖系统的脱碳同步进行；南方城市以设备节能降碳和屋顶光伏为主要措施，更新高效空调设备，降低空调使用的能耗和碳排放。根据各地的具体情况，制定适用于不同气候区的建筑节能改造标准和规范。在重点城市和地区建设低碳改造示范项目。建立长期的监测机制，持续优化改造方案。结合已完成改造项目的经验，形成低碳改造方案库，并制订示范流程与工作指导方案。
- **以农村可再生能源、围护改造与低碳建材为抓手，打造首批零碳农宅建筑：**因地制宜在农村地区大力发展分布式光伏、现代生物质产业等可再生能源，替代煤炭供暖和炊事，并为农民创造新的产业和收入增长点。结合北方地区清洁供暖行动，优先提升农村住宅的围护结构性能，采用高效节能门窗和外墙保温提高能效水平。结合装配式农宅、现代竹木结构等先进建造手段，在新建和改造农村住宅中广泛应用节能低碳、安全性好、性价比高的绿色建材；持续推进绿色建材下乡活动，增加低碳建材在农村地区的应用。
- **创新政策、财政、金融支持体系：**出台专项政策明确低碳住房的建设目标和标准，确保低碳技术在保障性住房、老旧小区改造和农村住宅中的应用。在保障性住房和其他住宅项目中，实行绿色建筑认证激励政策，对达到一定绿色建筑星级标准的项目提供税收减免、土地优惠等支持，鼓励开发商和建筑公司采用超低能耗技术。在老旧小区改造和农村住房建设中，通过补贴政策减轻居民和开发商的经济负担。发展绿色金融对老旧小区、农房改造等低碳项目的支持，创新绿色债券、绿色基金、房地产投资信托等新型金融产品。

# 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. 2024: 农村住宅专题, 2024年
- 2 中国电力企业联合会, 中国电气化年度发展报告2022, 2023年
- 3 落基山研究所, 中国水泥协会, 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路, 2022年
- 4 中建三局, 观察: “粗放型”向“精细化”发展 建筑业如何实现精益建造? 2018年
- 5 郑坦, 崔圣, 案例 | 个人气候行动的新方式: 居民空调负荷需求侧响应助力节能降碳, 能源基金会, 2023年
- 6 重庆大学、中国建筑节能协会, 建筑能耗与碳排放数据库, 2022年
- 7 法制晚报, 拉闸限电损失大价格调节更稳妥, <https://news.sina.com.cn/o/2005-05-09/16125839908s.shtml>, 2005年
- 8 郝一涵, 王广煦, 王萌, 推动长三角地区居民供暖升级: 热泵开启供暖零碳转型之路, 落基山研究所, 2022年
- 9 直流建筑联盟, 深圳供电局, 从新型电力系统角度看建筑负荷资源的意义和价值, 2022
- 10 许鹏, 陈永保, 李为林等, 建筑需求响应控制及应用技术, 2020年
- 11 DOE, Thermal Storage R&D for CSP Systems, 2021年
- 12 张昕宇, 光电建筑实施路径探讨, <https://guangfu.bjx.com.cn/news/20211218/1194445.shtml>, 2021年
- 13 电力需求侧管理办法, 2023年
- 14 Neukomm, Monica, Nubbe, Valerie, & Fares, Robert. Grid-Interactive Efficient Buildings Technical Report Series: Overview of Research Challenges and Gaps, 2019年
- 15 ACEEE, Grid-interactive Efficient Buildings Are the Future, and Utilities Can Help Lead the Way, 2019年
- 16 周宏春, 赵文瑛, 中国清洁供热产业发展报告, 2023年
- 17 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2023: 城市能源专题, 2023年
- 18 赵彦革, 基于结构强度等级分析的结构板低碳设计, 2022年
- 19 建筑2030, 低碳建筑材料: 混凝土的减碳策略, 2021年
- 20 中国建筑材料联合会, 中国建筑材料工业碳排放报告(2020年度), 2021年
- 21 中华人民共和国住房和城乡建设部等, 建筑碳排放计算标准, GB/T 51366-2019, 2019年
- 22 中国钢铁工业协会, 我国电炉短流程炼钢发展从技术装备看我国电炉炼钢降碳潜力, [http://www.csteelnews.com/xwzx/djbd/202309/t20230912\\_79307.html](http://www.csteelnews.com/xwzx/djbd/202309/t20230912_79307.html), 2022年
- 23 劳万里, 段新芳, 碳达峰碳中和目标下木材工业的发展路径分析, 2021年
- 24 以勒碳中和, 水泥行业高耗能节能降碳措施分析, 2023年
- 25 落基山研究所, 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路, 2021年
- 26 Larry Strain, 10 Steps to Reducing Embodied Carbon, 2017年
- 27 Ya Hong Dong, Lara Jaillon, Peggy Chu, C.S. Poon, Comparing carbon emissions of precast and cast-in-situ construction methods – A case study of high-rise private building, 2015年
- 28 程春艳, 文博杰, 中国房屋建筑钢铁存量的历史演变分析: 以长三角地区为例, 2019年
- 29 Galina Churkina, Buildings as a Global Carbon Sink, 2020年
- 30 Carboncure, An Introduction to Low Carbon Concrete, 2024年
- 31 国家林业和草原局, 木材工业助力“双碳”目标大有可为, 2022年
- 32 境道竹构, 为何竹木结构建筑对减碳有天然优势? 发展竹木结构建筑会影响森林覆盖率吗? 2022年
- 33 国际竹藤组织, 可持续发展专家解析实现减碳目标多种“竹”径, 2024年
- 34 肖岩, 工程竹结构为生物质绿色建材开拓新赛道, 中国建材报, 2022年
- 35 国建教育, 我国现代木结构建筑现状调查, 2019年
- 36 中国建材报, 阐扬光大现代木结构建筑, 2022年
- 37 智研咨询, 一文读懂2023年中国装配式木结构行业现状及前景: 行业不断走向成熟, 2023年
- 38 易木供应链, 现代木结构产业发展质量近年有较大提升, 2022年
- 39 35斗, 万亿市场规模, 乡村自建房生意应该怎么做? 2019年
- 40 安吉竹建竹木建筑有限公司, 现代竹结构建筑设计使用竹子材料的优势, 2022年

- 41 中国建筑报, 大力发展中国特色的木结构建筑, 2018年
- 42 刘东生, 加快木竹结构建筑和建材产业发展, 2020年
- 43 建筑杂志社, 中国工程院院士崔愷: 现代木结构建筑应用现状分析及未来发展建议, 2022年
- 44 DoE, Update or Replace Windows, <https://www.energy.gov/energysaver/update-or-replace-windows>, 2021年
- 45 国务院, 《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》, 2024年
- 46 西交利物浦大学, 减少建筑翻新中拆建废物的碳排放对实现碳中和至关重要, 2022年
- 47 The Federal Government, Federal Buy Clean Initiative, 2021年
- 48 工人日报, 云南建筑行业推行绿色施工助力实现“双碳”目标, 2022年
- 49 工业和信息化部节能与综合利用司, 《国家工业节能技术应用指南与案例(2020)》之十二: 智慧能源管控系统节能技术, 2020年
- 50 澎湃新闻, 风口里的装配式建筑, 一条少有人注意的碳减“主线”, 2022年
- 51 中国建设新闻网, 将建筑业纳入碳排放权交易体系 是推动实现碳达峰、碳中和的必然, 2021年
- 52 腾讯研究院, 低碳科技创新与碳金融的协同逻辑, 2023年
- 53 掌上长沙, “EMPC+BIM+装配式”建造模式是建设工程降本增效、安全发展的必由之路, 2023年
- 54 宫玮、梁浩, 我国保障性租赁住房绿色低碳发展现状及建议, 2023年
- 55 中国政府网, 保障性住房建设量稳质升, 2023年
- 56 新华网, 我国建成世界上最大住房保障体系 努力实现全体人民住有所居, 2021年
- 57 北京市住房和城乡建设委员会, 北京市“十四五”时期住房保障规划, 2022年
- 58 住房和城乡建设部, 关于做好2019年老旧小区改造工作的通知, 2019年
- 59 吴景山, 我国建筑行业节能降碳已进入“存量与增量并重”阶段, 2023年
- 60 田恬、张永志、刘赞, 双碳目标下农村住宅节能及低碳路径研究, 2023年
- 61 北京钢结构行业协会, 我国农房规划建设管理现状及存在的问题, 2020年
- 62 王清勤, 孟冲, 朱荣鑫, 李嘉耘, 基于全寿命期理论的绿色建筑碳排放研究, 2022年
- 63 住房和城乡建设部, 绿色建筑评价标准(局部修订征求意见稿), 2023年
- 64 曹静等, 混凝土装配式与现浇住宅建筑碳排放分析与研究, 2020年
- 65 被动式低能耗建筑技术创新联盟, 被动式超低能耗建筑电气设计探讨, 2022年
- 66 苗纪奎, 陈亚楠, 基于LCA的住宅建筑碳排放测算分析研究, 2023年
- 67 西部证券研发中心, 保障性租赁住房建设进入快车道, 该如何成为绿色产业引领者? 2022年
- 68 北京市人民政府办公厅, 北京市人民政府办公厅关于进一步发展装配式建筑的实施意见, 2022年
- 69 北京工程勘察协会, 朝阳区垡头地区焦化厂公租房, 2022年
- 70 北京市人民政府, 《集中供热收费价格标准是什么?》 [https://www.beijing.gov.cn/fuwu/bmfw/bmzt/2022djgn/cjwt/cnsf/cggrsfbz/202211/t20221110\\_2855834.html](https://www.beijing.gov.cn/fuwu/bmfw/bmzt/2022djgn/cjwt/cnsf/cggrsfbz/202211/t20221110_2855834.html), 2022
- 71 广东省住房和城乡建设厅, 老旧小区品质提升关键技术研究, 2024年
- 72 Amy Egerter, Martha Campbell, 工业4.0背景下既有建筑的零碳改造技术, 落基山研究所, 2020年
- 73 主动式建筑国际联盟, 零舍——近零能耗乡居改造 | 2022年第三届 Active House Award中国区建筑竞赛一等奖, 2022年

李威, 王萌, 王广煦, 碳中和背景下我国建筑领域发展的新机遇, 落基山研究所, 2024

<https://rmi.org.cn/insights/unlocking-new-opportunities-for-carbon-neutrality-in-chinas-building-sector>

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。



**RMI Innovation Center**

22830 Two Rivers Road  
Basalt, CO 81621

[www.rmi.org](http://www.rmi.org)

© 2024年9月, 落基山研究所版权所有。  
Rocky Mountain Institute和RMI是落基山  
研究所的注册商标。