

文章编号: 1671-6612 (2023) 02-271-11

“双碳”目标下民用建筑 用能强度预测与节能技术路线研究

黄志锋¹ 陈淑琴² 王鹏苏³

刘先锋⁴ 孙智⁵ 杨仕超¹ 黄宇蕊² 吴培浩¹ 章文杰⁶

(1. 广东省建筑科学研究院集团股份有限公司 广州 510599;

2. 浙江大学 杭州 310058; 3. 中国城市规划设计研究院 北京 100044;

4. 重庆科技学院建筑工程学院 重庆 401331;

5. 住房和城乡建设部标准定额研究所 北京 100835; 6. 南京理工大学 南京 210094)

【摘要】 在我国承诺“2030年前碳达峰, 2060年前碳中和”的可持续发展目标背景下, 民用建筑的未来用能强度预测和节能技术路线研究对我国碳达峰、碳中和的实现有着重要影响。从公共建筑、城镇住宅、农村住宅、北方采暖等四个领域, 在分析了节能重点的基础上, 运用情景假设、数值模拟等方法, 对我国中长期民用建筑的未来用能强度进行了预测, 提出了相应的节能技术路线, 为实现我国建筑领域的碳达峰和碳中和提供理论和方法支持。

【关键词】 双碳目标; 民用建筑; 用能强度; 节能技术

中图分类号 TK01+8 文献标识码 A

Study on the Prediction for Energy Use Intensity and the Energy Saving Technology Route of Civil Building Under the Target of "Carbon Peak and Neutrality"

Huang Zhifeng¹ Chen Shuqin² Wang Pengsu³

Liu Xianfeng⁴ Sun Zhi⁵ Yang Shichao¹ Huang Yurui² Wu Peihao¹ Zhang Wenjie⁶

(1. Guangdong Provincial Academy of Building Research Group Co., Guangzhou, 510599;

2. Zhejiang University, Hangzhou, 310058; 3. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing, 100044;

4. School of Civil Engineering and Architecture, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing, 401331;

5. Research Institute of Standards and Norms Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing, 100835;

6. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, 210094)

【Abstract】 As China has committed to the sustainable development goals of "peak carbon before 2030 and carbon neutral before 2060", the prediction of the future energy intensity of civil buildings and the study of energy-saving technology routes have an important impact on the achievement of the goals. In this paper, based on the analysis of energy saving priorities in four areas, including public buildings, urban residential buildings, rural residential buildings, and northern heating plants, scenarios and numerical simulations are used to predict the future energy intensity of civil buildings in China in the medium and long term, and the corresponding energy saving technology routes are proposed to provide theoretical and methodological support for achieving

作者(通讯作者)简介: 黄志锋(1981-), 男, 博士研究生, 副高级工程师, Email: gdjky-ivanwong@foxmail.com

收稿日期: 2022-12-16

carbon peaking and carbon neutrality in China's building sector.

【Keywords】 carbon peaking and carbon neutrality goals; civil architecture; energy intensity; energy-saving technique

0 引言

气候变化是当今人类面临的重大挑战，应对气候变化已经成为全球共识。长期以来，我国积极参与全球治理。为应对气候危机，我国提出“2030年前碳达峰，2060年前碳中和”的目标。我国民用建筑领域的能源消费与碳排放是全社会能源消费与碳排放的重要组成部分，其碳达峰的时间点及峰值直接影响其实现碳中和的可用时间和需完成的节能减排体量，因此，如何在综合考虑不同气候区民用建筑的用能现状、用能需求、节能潜力等复杂背景下，提炼节能减排重点，预测中长期民用建筑用能强度，提出相应的节能技术路线，合理引导未来民用建筑能耗需求，是当前亟须解决的问题。

鉴于此，本文从公共建筑、城镇住宅、农村住宅和北方采暖这四个领域分析了我国民用建筑当前用能现状和特点，找出各领域的重点节能方向；在此基础上，设定了未来用能情景，建立了我国民用建筑用能强度预测方法，进行了我国民用建筑用能强度预测，并探讨了节能技术路线。

1 民用建筑节能重点

我国民用建筑当前能耗现状及节能方向分析是制定未来节能技术路线和用能强度限值的基础。本小节从公共建筑、城镇住宅、农村住宅及北方采暖四个领域，分别从我国民用建筑用能现状和特点、重点节能方向两个方面来分析我国民用建筑节能重点。

1.1 用能现状和特点

根据清华大学建筑节能研究中心^[1]建立的中国建筑能耗模型（China Building Energy Model，简称 CBEM）的研究结果，2001年至2019年间，我国建筑能耗总量及其中电力消耗量均大幅增长，其中公共建筑、城镇住宅、农村住宅及北方采暖四个用能分项分别占建筑总能耗的34%、24%、22%及20%。各分项的总量和强度变化如图1所示。从各类能耗总量上看，除农村用生物质能持续降低外，各类建筑的用能总量都有明显增长。

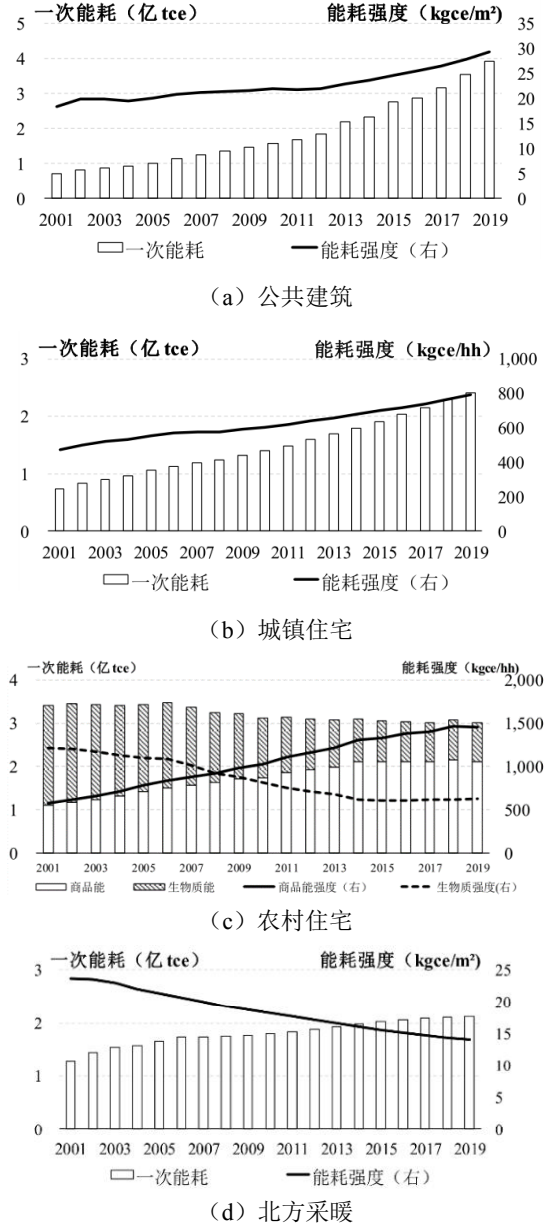


图1 建筑用能各分项总量和强度逐年变化 (2001年~2019年)^[1]

Fig.1 Year-by-year changes in the total amount and intensity of each sub-component of building energy use (2001~2019)^[1]

中国建筑节能协会^[2]发布数据显示，2018年公共建筑用能强度约为29.7kgce/m²，城镇住宅用能强度约为12.5kgce/m²，农村住宅用能强度约为10.0kgce/m²。进一步分析各类建筑能耗强度，发现

以下特点:我国公共建筑能耗总量近年来增幅显著,连续多年保持较高的增长率。因各类公共建筑服务需求的提升及智能控制水平的落后,终端用能需求(如空调、设备、照明等)的增长,公共建筑的能耗已经成为中国建筑能耗中比例最大的一部分。尤其是新建的一些大体量并应用大规模集中系统的建筑,能耗强度远超过平均能耗水平,节能潜力较大。

随着城镇居民生活水平的提高,生活热水、空调、家电等用能需求增加,城镇住宅户均能耗强度增长,且即使在相同气候条件、家庭人口及建筑面积的情况下,不同城镇家庭能耗差异较大。

农村住宅当前的室内环境质量差,服务水平低,因其较大的体型系数和较低的节能设计标准,存在住宅能耗强度较大、节能潜力巨大的特点。随着农村电力普及率的提高、农村收入水平的提高,以及农村家电数量和使用的增加,农村户均电耗呈快速增长趋势^[1]。随着北方地区“煤改电”工作的开展和推进,北方地区冬季采暖用电量和用电尖峰也出现了显著增长^[1]。

北方采暖能耗强度较大,近年来持续下降,显示了节能工作的成效^[1]。北方采暖的一次能耗总量呈现逐年增长的趋势,能耗强度相对呈现下降趋势的特点。

1.2 重点节能方向分析

根据当前已有的民用建筑能耗现状及节能措施的文献调研,结合课题组对公共建筑、城镇住宅、农村住宅、以及北方采暖的模拟研究,分析我国民用建筑的重点节能方向和技术措施发现:从建筑节能整体效果来看,提高建筑围护结构热工性能有助于建筑节能,但南北方的节能技术路线差异较大,随着人们生活水平的提高,夏热冬冷地区冬季的采暖需求也日渐增大。建筑墙体性能改善、屋顶性能改善、外窗性能改善等建筑单项节能技术在不同气候区的节能潜力不同,从各气候区的效果来看,严寒地区>寒冷地区>夏热冬冷地区>夏热冬暖地区。

公共建筑可从围护结构标准提升、用能设备能效提升、环境质量品质营造、人们生活需求方面采取措施进行节能,具体可包括如合理的建筑体型设计、提升围护结构材料保温性能、采用可再生能源系统及设备、推进设备能效标识制度、采用智能化控制系统等。

城镇住宅的节能方向主要为围护结构性能改善、用能设备性能提升和可再生能源利用,如推动既有建筑节能改造、推进设备能效标识制度、大力发展可再生能源等政策以及提升建筑围护结构性能和提升设备能效等技术措施。

农村住宅用能需要从改善农村住宅围护结构性能、推进农村清洁取暖和发展农村可再生能源利用等三个方面重点开展相关工作,如全面提升农村住宅围护结构热工性能、推广和普及光伏屋顶、推进生物质利用“一村一厂”发展模式和用能设备高效化、低碳化发展。

北方采暖的节能方向主要为围护结构性能改善、清洁供暖模式的利用和用能设备性能提升,如加大建筑围护结构性能提升力度、提升建筑围护结构性能、探索及推进因地制宜的清洁供暖模式、开展智慧热网系统试点建设、探索供热、售热分离机制模式、提高热电联产和工业余热利用效率等政策及技术方面的措施。

2 民用建筑长期用能强度预测方法

运用情景假设、数值模拟等方法,本小节从未来发展情景设定、新建建筑面积及既有建筑改造面积预测设定、既有建筑面积计算、新建建筑能耗强度计算及综合能耗强度计算五个方面阐述我国中长期民用建筑的长期用能强度的预测方法。

2.1 未来发展情景设定

(1) 公共建筑

公共建筑未来发展情景设定为既有建筑改造速度快,新建建筑执行近零能耗标准,设备能效较大提升。围护结构设定方面,未来所有新建建筑执行《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019^[3]。围护结构变化节能率的基准按照《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015^[4]设定并计算采暖空调能耗值,在此基础上进一步模拟使用不同性能围护结构下公共建筑能耗强度,与基准值比较得出节能率。再用节能率乘以2005年后的既有公建能耗强度即可得到相应的能耗强度。空调能效变化方面,综合考虑美国暖通空调工程师协会(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)制定的ASHRAE Standard 90.1^[5]和《冷水机组能效限定值及能效等级》GB 19577-2015^[6]两本标准对空调能效的3级

要求,并根据不同气候区空调系统能耗占建筑总能耗的比例,计算其节能比例。由 2020 年的既有建筑能耗乘以空调系统的节能比例分别求出 2025、2035 和 2050 年的新建建筑能耗强度。

(2) 城镇住宅

城镇住宅的未来发展情景下,新建建筑执行近零能耗标准,设备能效较大提升,2060 年设备能效达到或超过当前国际先进水平。根据下述方法进行情景设定,利用 design builder 软件进行模拟计算,获得各个气候区划下典型住宅的用能强度。围护结构设定方面,根据《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019^[3],结合各气候区实际情况,设定各气候区城镇住户围护结构参数。用能设备能效设定方面,综合考虑中国城镇住户家用设备能效当前平均能效水平及当前国内外先进水平按照能效水平线性增长趋势合理设定。同时,为考虑室内舒适度,用能行为的设定按照人员在室时间开启空调,即工作日客厅空调开启时间为 7 时-8 时和 18 时-21 时,工作日卧室空调开启时间为 22 时-6 时,周末客厅空调开启时间为 9 时-21 时,周末卧室空调开启时间为 22 时-8 时,满足住户对室内环境的舒适性要求。2025 年前空调的设定温度参照各气候区现行居住建筑节能标准中的室内环境参数要求,夏季设定为 26℃,冬季设定为 18℃;2025 年及之后空调的设定温度参照《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019^[3]中的室内环境参数要求,夏季设定为 26℃,冬季设定为 20℃。

(3) 农村住宅

农村住宅采暖和空调能耗与其围护结构密切相关,为了准确获取农村住宅的采暖和空调能耗指标,利用 dest-h 建立能耗模型,分别选取 5 个不同气候区的多个典型城市进行模拟分析,获得不同气候区的采暖和空调能耗指标。围护结构设定方面,依据《超低能耗农宅技术规程》T/CECS 739-2020^[7]

对围护结构性能的要求,对不同气候区新建农村住宅设置不同的围护结构参数;室内环境温度方面,夏季空调设定温度为 26℃,冬季考虑到农村生产生活空间重叠的影响,频繁出入房间导致农村居民的低温耐受性较强,相较于城镇住宅,农村住宅的冬季室内计算温度相对更低,因此冬季设定为 16℃。考虑到目前农村住宅部分时间部分空间的用能模式,农村住宅用能行为按照如下参数设置:卧室周一到周五开启时间为晚上 22 点到早上 6 点,周末全天开启,而客厅周一到周五开启时间为晚上 18 点到 23 点,周末开启时间为早上 8 点到晚上 23 点。炊事能耗呈现出气候差异,其中北方按照 280kgce/户,南方按照 230kgce/户考虑,热水能耗按照 50kgce/人考虑。

(4) 北方采暖

在未来发展情景下,预设原有采暖建筑面积执行旧节能标准《公共建筑节能设计标准》GB 50189-2015^[4],改造建筑面积及新建面积执行《近零能耗建筑技术标准》GB/T 51350-2019^[3]。根据《民用建筑能耗标准》GB/T 51161-2016^[8]我国建筑的设计需热量,假设设计需热量比实际需热量大 25%,考虑管网损耗率,从系统的角度考虑供暖全过程的能耗。

2.2 新建建筑面积及既有建筑改造面积预测设定

(1) 公共建筑

公共建筑节能改造是解决存量公共建筑节能的重要措施。“十三五”期间,国家继续推进公共建筑节能改造工作,计划公共建筑节能改造目标为 1 亿平方米。通过文献调研、统计报表与实测数据得到各省市公共建筑原面积的统计数据并推算各气候区未来各典型年份公共建筑改造面积,如表 1 所示。为达到 2030 年碳达峰以及 2060 年碳中和目标,设定到 2060 年,既有建筑改造率 100%。

表 1 各典型年份新建建筑及既有建筑改造面积 (亿 m²)

Table 1 Area of new buildings and renovation of existing buildings by typical years (billion m²)

地区	类型	2021~	2026~	2031~	2036~	2041~	2046~	2051~	2056~
		2025 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年	2055 年	2060 年
严寒地区	新建	3.20	2.70	2.56	2.37	2.18	1.91	1.79	1.63
	改造	0.50	0.56	0.61	0.64	0.66	0.66	0.65	0.64
寒冷地区	新建	9.63	8.12	7.71	7.14	6.57	5.74	5.39	4.90
	改造	1.49	1.70	1.84	1.93	1.99	1.99	1.96	1.92

续表 1 各典型年份新建建筑及既有建筑改造面积 (亿 m²)

地区	类型	2021~ 2025 年	2026~ 2030 年	2031~ 2035 年	2036~ 2040 年	2041~ 2045 年	2046~ 2050 年	2051~ 2055 年	2056~ 2060 年
夏热冬冷	新建	13.50	11.39	10.81	10.01	9.22	8.05	7.56	6.87
	改造	2.09	2.38	2.58	2.71	2.78	2.79	2.75	2.69
夏热冬暖	新建	4.16	3.51	3.33	3.08	2.84	2.48	2.33	2.12
	改造	0.64	0.73	0.79	0.84	0.86	0.86	0.85	0.83
温和地区	新建	1.50	1.27	1.20	1.11	1.03	0.90	0.84	0.77
	改造	0.23	0.27	0.29	0.30	0.31	0.31	0.31	0.30

(2) 城镇住宅

将 2020 年及之前建造的建筑作为需要改造的既有建筑, 根据国家“十二五”和“十三五”各气候区节能改造相关成果数据推算各气候区典型年份新建建筑面积及既有建筑改造面积, 如表 2 所

示。其中考虑到严寒地区和寒冷地区既有建筑改造体系已成熟, 设定严寒和寒冷地区到 2053 年应完成全部既有建筑改造, 各年份改造面积相同, 即上述地区每年分别完成 5547 万 m² 和 16730 万 m² 面积的改造。

表 2 各典型年份新建建筑及既有建筑改造面积 (亿 m²)

Table 2 Area of new buildings and renovation of existing buildings by typical years (billion m²)

地区	类型	2021~ 2025 年	2026~ 2030 年	2031~ 2035 年	2036~ 2040 年	2041~ 2045 年	2046~ 2050 年	2051~ 2055 年	2056~ 2060 年
严寒地区	新建	7.92	6.55	4.77	2.55	2.09	1.31	0.82	0.22
	改造	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24	2.24	1.35	-
寒冷地区	新建	23.83	19.70	14.36	7.69	6.28	3.95	2.45	0.67
	改造	6.77	6.77	6.77	6.77	6.77	6.77	4.06	-
夏热冬冷	新建	33.41	27.63	20.14	10.78	8.80	5.53	3.44	0.94
	改造	1.72	2.44	3.16	3.88	4.60	5.33	6.05	6.77
夏热冬暖	新建	10.29	8.51	6.20	3.32	2.71	1.70	1.06	0.29
	改造	0.10	0.14	0.18	0.23	0.27	0.32	0.36	0.41
温和地区	新建	3.72	3.08	2.24	1.20	0.98	0.62	0.38	0.10
	改造	0.03	0.05	0.07	0.08	0.10	0.12	0.13	0.15

(3) 农村住宅

围护结构保温是降低农村住宅围护结构传热系数、提升保温性能、改善冬季室内热环境的重要措施。为实现 2030 年建筑碳排放总量达峰目标, 可从以下两方面推进高性能农村住建设。推进超低能耗农村住宅建设。新建建筑形式以超低能耗农村

住宅为主, 占比达到 70%; 节能农村住宅为辅, 占比达到 30%。实施既有农村住宅节能改造。通过政策引导实施农村住宅节能改造, 改造规模逐年增加, 到 2060 年改造率提升至 1%。新建农村住宅规模及既有农村住宅改造规模如表 3 所示。

表 3 各典型年份新建建筑及既有建筑改造面积 (亿 m²)

Table 3 Area of new buildings and renovation of existing buildings by typical years (billion m²)

地区	类型	2021~ 2025 年	2026~ 2030 年	2031~ 2035 年	2036~ 2040 年	2041~ 2045 年	2046~ 2050 年	2051~ 2055 年	2056~ 2060 年
严寒地区	新建	0.14	0.74	0.32	0.23	0.25	0.89	1.39	1.98
	改造	0.00	0.22	0.43	0.51	0.56	0.60	0.64	0.71
寒冷地区	新建	0.43	2.22	0.96	0.68	0.76	2.67	4.19	5.97
	改造	0.00	0.67	1.30	1.54	1.69	1.80	1.94	2.14

续表 3 各典型年份新建建筑及既有建筑改造面积 (亿 m²)

地区	类型	2021~ 2025 年	2026~ 2030 年	2031~ 2035 年	2036~ 2040 年	2041~ 2045 年	2046~ 2050 年	2051~ 2055 年	2056~ 2060 年
夏热冬冷	新建	0.61	3.12	1.35	0.95	1.07	3.75	5.88	8.37
	改造	0.00	0.93	1.83	2.15	2.37	2.52	2.73	3.00
夏热冬暖	新建	0.19	0.96	0.42	0.29	0.33	1.15	1.81	2.58
	改造	0.00	0.29	0.56	0.66	0.73	0.78	0.84	0.92
温和地区	新建	0.07	0.35	0.15	0.11	0.12	0.42	0.66	0.94
	改造	0.00	0.10	0.20	0.24	0.27	0.28	0.31	0.34

(4) 北方采暖

由 2004~2019 年中国实际集中供热面积, 进行线性拟合, 并参考在 2011 年~2019 年间采暖改造、新增采暖、以及原有采暖每年的实际面积及占比,

根据“十二五”、“十三五”、“十四五”集中供暖建筑改造面积统计或计划的改造面积数据, 预测出 2025~2060 年未来我国北方城镇地区采暖面积值, 具体数值如表 4 所示。

表 4 各典型年份北方城镇地区供暖面积预测值 (亿 m²)

Table 4 Projected heating area in northern urban areas by typical year (billion m²)

	2025 年	2030 年	2035 年	2040 年	2045 年	2050 年	2055 年	2060 年
供暖面积	162.74	191.87	212.65	223.16	228.79	228.63	224.29	213.22

2.3 既有建筑面积计算

既有建筑面积按式 (1) 进行计算。

$$E_{i,t}^B = E_{i,2020}^B - CR_{i,t}^B \quad (1)$$

其中, $E_{i,t}^B$ 为 i 地区 t 年 (2020 年后) 既有建筑面积, m²; $E_{i,2020}^B$ 为 i 地区 2020 年建筑面积, m²; $CR_{i,t}^B$ 为 i 地区 t 年 (2020 年后) 累计改造面积, m²。根据调研结果, 2020 年公共建筑面积为 151.8 亿 m², 城镇住宅面积为 276.4 亿 m², 农村住宅面积为 253m², 北方采暖面积为 89 亿 m²。

2.4 新建建筑能耗强度计算

计算新建建筑能耗强度时, 转化为一次能源, 如式 (2) 所示:

$$N^e = (0.318 \times e + 1.330 \times g) / A \quad (2)$$

其中, N^e 为新建建筑能耗强度, kgce/m²; e 为总用电量, kWh; g 为总用气量, m³; A 为建筑面积, m²。

2.5 综合能耗强度计算

根据式 (3) 计算得到综合能耗强度:

$$e_{i,t} = \frac{CN_{i,t}^B \times N_{i,t}^e + E_{i,t}^B \times E_{i,t}^e + CR_{i,t}^B \times R_{i,t}^e}{S_{i,t}^B} \quad (3)$$

其中, $e_{i,t}$ 为 i 地区 t 年综合能耗强度, kgce/m²;

$CN_{i,t}^B$ 为 i 地区 t 年累计新增建筑面积, m²; $N_{i,t}^e$ 为 i 地区 t 年新增建筑能耗强度, kgce/m²; $E_{i,t}^B$ 为 i 地区 t 年既有建筑面积, m²; $E_{i,t}^e$ 为 i 地区 t 年既有能耗强度, kgce/m²; $CR_{i,t}^B$ 为 i 地区 t 年累计改造建筑面积, m²; $R_{i,t}^e$ 为 i 地区 t 年改造建筑能耗强度, kgce/m²; $S_{i,t}^B$ 为 i 地区 t 年总建筑面积, m²。

3 中长期民用建筑用能强度预测结果

运用中长期民用建筑用能强度预测方法, 本小节从新建建筑用能强度预测及综合建筑能耗预测两方面来分析我国中长期民用建筑的未來用能强度预测结果。

3.1 新建建筑用能强度预测

依据未来情景对围护结构和设备能效等方面的设定, 分别对公共建筑、城镇住宅农村住宅进行新建建筑用能强度模拟, 并分析预测结果。

(1) 公共建筑

图 2 为在不同气候区的新建公共建筑 2025~2060 年的新建能耗强度。预测得到的全国新建公共建筑能耗强度 2025 年为 29.5kgce/m²·a, 2060 年下降到 21.8kgce/m²·a。同一时段内, 夏热冬冷地区

能耗强度较其他地区高, 温和地区能耗强度最低, 高, 温和地区反之。这是因为该地区建筑制冷和采暖负荷较大, 能耗较

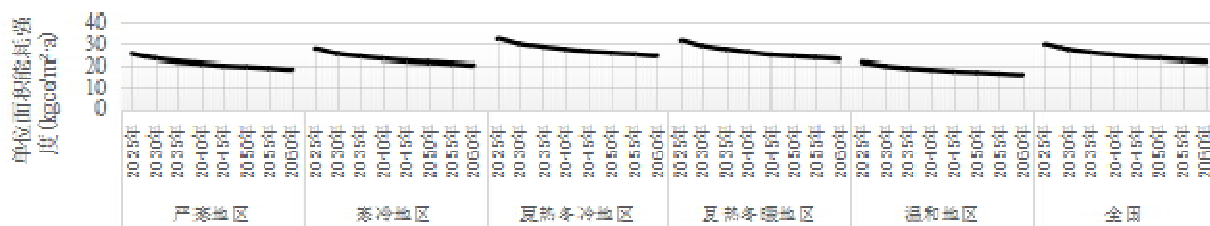


图 2 新建公共建筑能耗强度预测 (单位: kgce/m²·a)

Fig.2 Predicted energy consumption intensity of new public buildings (unit: kgce/m²·a)

(2) 城镇住宅

不同气候区的新建城镇住宅能耗强度预测如图 3 所示。预测得到的全国新建城镇住宅能耗强度 2025 年为 11.65kgce/m²·a, 2060 年下降到 9.33kgce/m²·a。五个气候区新建城镇住宅 (除北方

采暖)从 2025 年到 2060 年的能耗强度变化呈下降的总趋势。从能耗量来看, 因气候及用能行为差异, 寒冷地区新建城镇住宅的预测能耗强度最高, 紧接着是夏热冬冷地区, 其次是夏热冬暖地区与温和地区, 最低的是严寒地区。

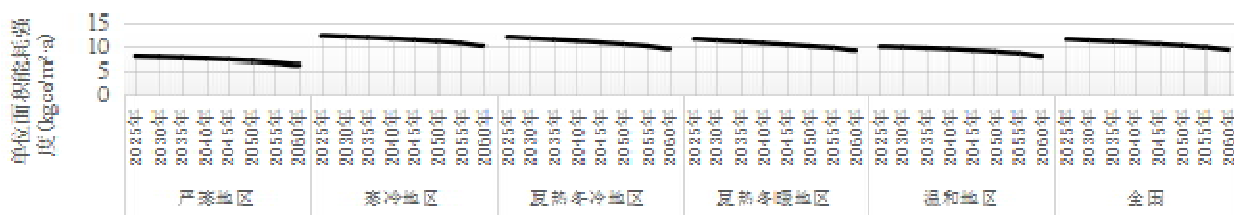


图 3 新建城镇住宅能耗强度预测 (单位: kgce/m²·a)

Fig.3 Predicted energy consumption intensity of new urban residential buildings (unit: kgce/m²·a)

(3) 农村住宅

综合考虑采暖、空调、热水、炊事和电力指标, 新建农村住宅能耗强度结果如图 4 所示。预测得到的全国新建农村住宅能耗强度 2025 年为 11.06kgce/m²·a, 2060 年下降到的 10.61kgce/m²·a。对于不同气候区而言, 新建农村住宅能耗存在较大

差异, 其中北方地区因为采暖能耗较大导致新建农村住宅整体能耗明显高于其它地区; 对于同一气候区而言, 随着农村消费水平提升以及电器设备保有量逐渐增加, 新建农村住宅能耗呈现逐年缓慢增长的趋势。

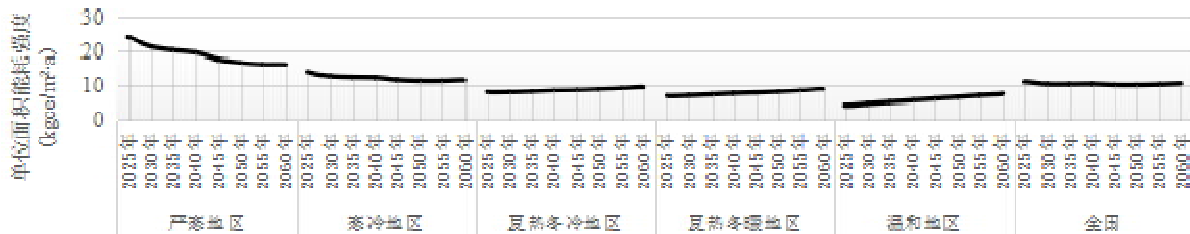


图 4 新建农村住宅能耗强度 (单位: kgce/m²·a)

Fig.4 Energy intensity of new rural houses (unit: kgce/m²·a)

3.2 民用建筑综合建筑能耗预测

结合既有建筑能耗强度、新建建筑能耗强度和未来新建及改造建筑面积的设定, 对公共建筑、城

镇住宅、农村住宅以及北方采暖的综合建筑能耗预测结果进行分析。

(1) 公共建筑

随着技术水平的提升,改造工作不断加强,新建建筑能耗不断降低,导致公共建筑综合能耗强度不断降低。各气候区公共建筑综合能耗强度预测值

如图 5 所示,总体呈逐年下降趋势。全国公共建筑综合能耗强度预测值到 2060 年达到最低值,为 23.72kgce/m²·a。

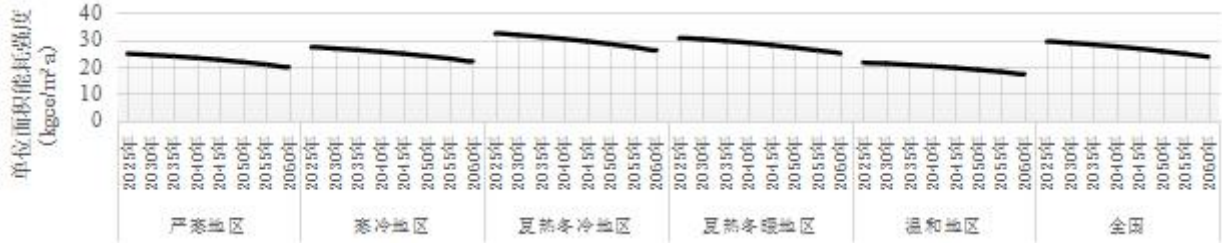


图 5 各气候区公共建筑综合能耗强度预测 (kgce/m²·a)

Fig.5 Predicted comprehensive energy consumption intensity of public buildings by climate zone (kgce/m²·a)

(2) 城镇住宅

根据公式计算得到各气候区城镇住宅综合能耗强度预测值如图 6 所示。全国综合能耗预测值从 2025 年的 12.81kgce/m²·a 下降到 2060 年的

9.39kgce/m²·a。各气候区城镇住宅综合能耗强度预测值从 2025 年到 2060 年变化均呈下降的总趋势,其中夏热冬冷地区下降速度最快。

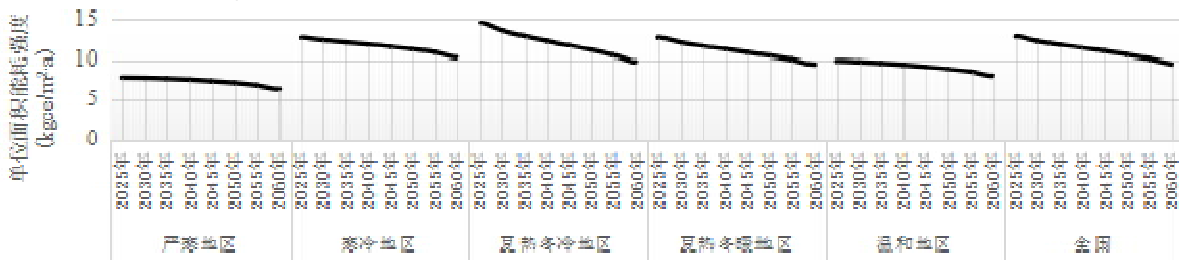


图 6 各气候区城镇住宅综合能耗强度预测 (kgce/m²·a)

Fig.6 Predicted comprehensive energy consumption intensity of urban housing by climate zone (kgce/m²·a)

(3) 农村住宅

根据农村既有农村住宅、改造节能农村住宅和新建超低能耗建筑建设规模,结合各类建筑能耗强度指标,测算我国农村住宅能耗强度指标如图 7 所示。2021 年至 2060 年期间,超低能耗农村住宅相

关标准、引导政策逐步完善,建设速度相对稳定,农村住宅能耗强度逐步下降。全国综合能耗预测值从 2025 年的 13.16kgce/m²·a 下降到 2060 年的 12.59kgce/m²·a。

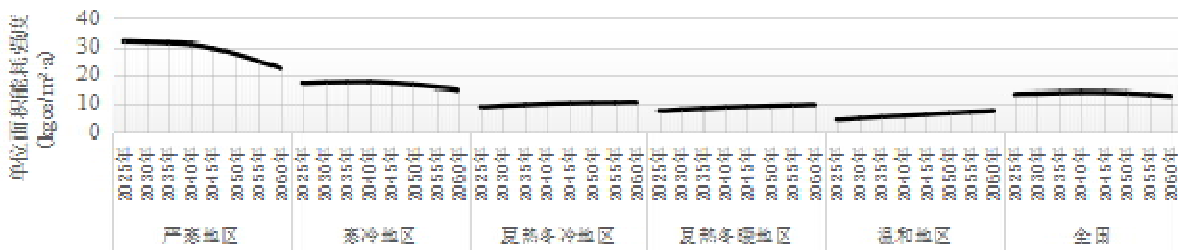


图 7 各气候区农村住宅综合能耗强度预测 (kgce/m²·a)

Fig.7 Predicted integrated energy consumption intensity of rural houses by climate zones (kgce/m²·a)

(4) 北方采暖

我国北方地区集中供暖面积迅速增加,但随着未来新供暖效率的提高,清洁能源利用率的增加,

预测能耗强度不断降低(见图 8)。北方城镇地区集中供暖能耗强度降低迅速,在 2035 年达到 17.64kgce/m²,2060 年降低至 15.06kgce/m²·a。

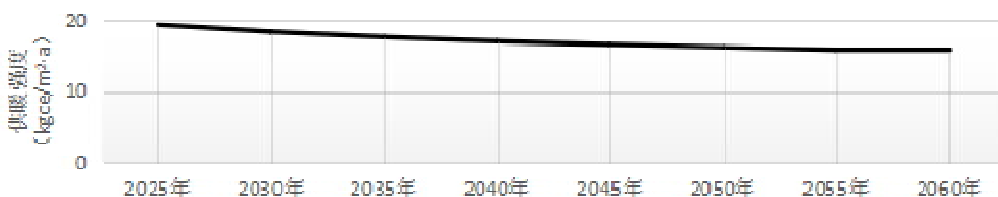


图 8 严寒及寒冷地区供暖建筑能耗强度预测 (kgce/m²·a)

Fig.8 Predicted energy consumption intensity of heating buildings in severe cold and cold regions (kgce/m²·a)

4 民用建筑节能技术路线

结合我国中长期民用建筑的未來用能强度预测结果, 本小节从节能标准执行、节能改造面积、能耗公示与能耗限额制度执行、主要用能设备能效提升、运营管理水平提升、可再生能源应用比例提升、因地制宜节能技术推广等多个方面提出不同气候区各类民用建筑的节能技术路线。

4.1 公共建筑节能技术路线

公共建筑的节能技术路线主要体现在建筑本体性能要求、用能设备效率提升、终端用能结构调整、智能绿色运营及能耗限额管理、既有建筑节能改造等五个方面, 如表 5 所示。关于建筑本体性能,

应采取围护结构性能“一步到位”的理念, 要求新建建筑按照现有最高节能标准进行规划设计, 减低节能改造的可能性, 避免大拆大建。对于主要用能设备, 可参考国外先进发达国家的碳达峰路线下的设备效率提升图谱, 确定我国建筑的用能设备的效率提升节奏。终端用能结构调整方面, 对于公共建筑主要是指可再生能源利用率的提升, 而智能绿色运营及能耗限额管理, 是建筑运行阶段重要的节能降碳举措。另外, 存量建筑能耗占比巨大, 因此对既有建筑的节能改造是降低社会建筑总体能耗的有效手段。

表 5 公共建筑节能技术路线

Table 5 Technical routes for energy saving in public building

	2021~2025	2026~2035	2036~2060
节能标准执行	(1) 《公共建筑节能设计标准》(GB50189-2015) (2) 《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB55015-2021) (3) 《近零能耗建筑技术标准》(GB/T51350-2019) 在新建建筑中的执行率逐年提升 6%~10%		新建建筑全面执行《近零能耗建筑技术标准》(GB/T51350-2019) 或更高要求的标准
节能改造面积 (亿 m ²)	5.0	11.8	32.5
能耗公示与能耗限额制度执行	夏热冬冷、夏热冬暖、经济发达地区率先执行		全国各地全面执行
主要用能设备能效提升	提升 3%	提升 6%	提升 9%
运营管理水平提升	提升运用管理团队专业性, 用能设备智能化、个性化调节, 实现“能耗随人走”		
可再生能源应用比例提升	1%~3%	3%~5%	5%~10%
因地制宜节能技术推广	重点针对夏热冬冷、温和地区开发和推广适宜性节能技术		全面开展不同气候区的适宜性节能技术开发与推广

4.2 城镇住宅节能技术路线

城镇住宅在建筑性能方面的节能技术路线主要涉及新建建筑节能标准执行和既有建筑改造两

方面, 如表 6 所示。建议在有条件的地区逐步提高近零能耗建筑强制性发展比例, 近期应加快住区节能建设, 加快各气候区近零能耗标准适宜性指标体

系的建立，并开展近零能耗住宅试点项目，2025 年 30% 的新建建筑执行近零能耗标准，其余新建建筑参照现行标准；中期大力推广近零能耗住宅，应实现至少 30% 新建建筑和改造建筑的建筑本体性能达到近零能耗住宅水平，2030 年 60% 的新建建筑执行近零能耗标准，其余新建建筑参照现行标

准；后期近零能耗技术体系发展成熟，应持续扩大近零能耗住宅的建设和改造规模，到 2035 年及之后全国新建城镇住宅整体上平均实现近零能耗。同时，北方城镇住宅既有建筑节能改造体系已经成熟，下一步需加大对夏热冬冷和夏热冬暖地区的节能改造力度。

表 6 城镇住宅节能技术路线

Table 6 Technical routes for energy saving in urban houses

热工分区		2021-2025 年	2026-2060 年
新建建筑/既有建筑改造标准	严寒和寒冷地区	《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB55015-2021)+地方标准	《近零能耗建筑技术标准》(GB/T 51350-2019)或更高要求标准
	温和地区		
	夏热冬冷地区		
	夏热冬暖地区		
既有建筑改造面积	严寒地区	2030 年完成 3.91 亿 m ² 面积的改造，2060 年完成 10.79 亿 m ² 面积的改造	
	寒冷地区	2030 年完成 11.78 亿 m ² 面积的改造，2060 年完成 32.68 亿 m ² 面积的改造	
	夏热冬冷地区	2030 年完成 2.96 亿 m ² 面积的改造，2060 年完成 16.18 亿 m ² 面积的改造	
	夏热冬暖地区	2030 年完成 0.14 亿 m ² 面积的改造，2060 年完成 0.81 亿 m ² 面积的改造	
	温和地区	2030 年完成 0.05 亿 m ² 面积的改造，2060 年完成 0.29 亿 m ² 面积的改造	

4.3 农村住宅节能技术路线

农村住宅在建筑性能方面的节能技术路线主要涉及建筑节能标准执行和技术措施推广两方面，如表 7 所示。在标准执行方面，推进节能农宅建设，2021-2025 年期间，新建农宅中节能建筑比例达到 10%，2026-2060 年期间，新建农宅中节能建筑比例达到 100%。节能农宅按照《农村居住建筑节能设计标准》(GBT 50824-2013) 要求进行建设。加快实施农村既有农宅节能改造。合理安排各年度既有农宅改造规模，改造后农宅达到《农村居住建筑节能设计标准》(GBT 50824-2013) 的要求，降低住宅采暖和空调能耗。强化农宅建设引导，建立节能审核补贴机制。针对既有农宅，依据不同气候区

特点制定合适的农宅围护结构改造方案，并出台农宅节能改造补贴政策，有计划推进既有农宅节能改造。在技术推广方面，引导农村绿色生活模式，推广节能灯具，普及率逐年提升，到 2035 年左右实现全面普及。有序推进农村清洁取暖政策落实和深化，引导土暖气等采暖设施向型煤、电采暖(热泵)和燃气等清洁设备转化。提升用能效率，引导农村开发利用本地可再生能源。优先引导发展生物质炊事炉和采暖炉、农宅一体化光伏、太阳能热水和采暖等清洁高效能源技术；可再生资源不足地区，发展热泵等高效用能设备，实现农村能源结构的低碳化转型全面实施散煤替代。

表 7 农村住宅节能技术路线

Table 7 Technical routes for energy saving in rural houses

	2021~2025	2026~2035	2036~2050
既有农宅节能改造规模 (亿 m ²)	0.5	8	20
新建建筑为节能建筑比例	10%	100%	100%
新建建筑为超低能耗农宅比例	0	0	0
清洁取暖	土暖气等采暖设施向型煤、电采暖(热泵)和燃气等清洁设备转化，发展生物质、太阳能等可再生能源采暖		
绿色照明	80%	90%	100%
其他用能设备	用电水平提升，用电设备多样化，引导农村开发利用本地可再生能源满足炊事、生活热水需求		

4.4 北方采暖节能技术路线

(1) 全面推广清洁能源供热和智慧热网建设

按照“集中为主,分散为辅”、“宜气则气,宜电则电”原则,推进燃煤供暖设施清洁化改造工作。充分考虑地区能源特点,因地制宜实施清洁采暖。从2021年开始,逐步提升清洁采暖率,全面淘汰35蒸吨以下燃煤锅炉,至2030年,清洁采暖率达到90%,至2040年,清洁采暖率达到100%。自2021年开始,持续完善能源结构体系,增加热电联产和工业余热利用承担的供暖面积,提高能源利用效率,到2040年,热电联产供热能力利用率达到80%。

“十四五”期间开展智慧热网试点建设工作,发展基于数字孪生的智慧热网调控技术,推广基于大数据挖掘、高速网络通信和高智能算法的热负荷预测和调控技术,推广热网自动控制系统、无人值守热力站等节能技术措施。2026~2035年,进一步扩大智慧热网试点规模,完善智慧热网技术。2036年开始,加快供暖系统智能化建设,进入智能运行维护、供需精细匹配调节的智慧阶段。

同时,自2021年起,加速提升热源制热效率及供热管网输配效率,至2035年,实现供热管网热损失率小于3%。水泵电耗满足《民用建筑能耗标准》(GB/T 51161-2016)引导值的要求。燃煤锅炉效率不低于《锅炉节能技术监督管理规程》目标值。燃气锅炉效率不低于98%。自2036年开始,进一步提升热源制热效率及供热管网输配效率,供热管网热损失率小于1.5%。水泵电耗满足《民用建筑能耗标准》(GB/T 51161-2016)引导值的50%的要求。同时,供暖能耗满足《民用建筑能耗标准》(GB/T 51161-2016)引导值的要求。

(2) 变革供热收费模式

发挥政府主导作用,加强供热计量宣传工作,提高居民节能意识,积极参与供热计量收费改革。2021~2030年期,积极开展供热计量收费试点工作,探索供热、售热分离机制模式,在条件较好的省市地区试点成立售热服务公司,探索售热服务模式,

培育市场参与主体,建立市场竞争模式。2031年开始,全面执行供热计量收费制度,供热输配公司借助不断提升的供热节能技术不断优化和降低自身供热成本,售热服务公司不断优化技术服务水平,通过设置末端计量调节装置降低末端用热量,提升室内环境舒适度的同时降低能源消耗。

5 结论

在我国承诺“2030年前碳达峰,2060年前碳中和”的可持续发展目标背景下,本文从公共建筑、城镇住宅、农村住宅、北方采暖等四个领域,考虑到围护结构性能、用能设备能效、用能行为方式及可再生能源对能耗强度的影响,运用情景假设、数值模拟等方法,对我国中长期民用建筑的未來新建建筑和综合建筑用能强度进行了预测,并提出了相应的节能技术路线,为实现我国建筑领域的碳达峰和碳中和提供理论和方法支持。

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] 中国建筑节能协会.中国建筑能耗研究报告2020[R].2020.
- [3] GB/T 51350-2019,近零能耗建筑技术标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [4] GB 50189-2015,公共建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [5] ASHRAE90.1-2013,Energy Standard Buildings Except Low-Rise Residential Buildings[S].2013.
- [6] GB 19577-2015,冷水机组能效限定值及能效等级[S].北京:中国质检出版社,2016.
- [7] T/CECS 739-2020,超低能耗农宅技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2020.
- [8] GB/T 51161-2016,民用建筑能耗标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [9] JGJ 134-2003,夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2003.