

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2026.01.004

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:肖一歌,陈思源,苗斯媛.城乡融合背景下农村地区空气源热泵供暖能耗与碳减排潜力评估[J].西安理工大学学报,2026,42(1):36-46.

Xiao Yige, Chen Siyuan, Miao Siyuan. Assessment on energy consumption and carbon reduction potential of rural air source heat pump heating in the background of urban-rural integration[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2026, 42(1): 36-46.

城乡融合背景下农村地区空气源热泵 供暖能耗与碳减排潜力评估

肖一歌, 陈思源, 苗斯媛

(华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

摘要: 在城乡融合发展与“双碳”目标的双重驱动下,农村建筑供热系统的低碳转型成为重要举措。为系统探究不同融合程度对农村空气源热泵(ASHP)能耗与碳减排效果的影响机制,本文聚焦 ASHP 供暖系统,采用 EnergyPlus 构建建筑能耗模型,并基于保温性能、人均占有面积和舒适温度三大因素,创新性地设置了高、中、低三种城乡融合情景。通过模拟 2015—2024 年农村地区热负荷与能耗特征,结合华北电网碳排放因子计算碳减排量。研究发现:①不同城乡融合情景下 ASHP 热负荷差异显著,中度融合情景整体更高,且卧室等居住空间占比突出,体现功能区供暖需求异质性;②中度融合情景因处于建筑与能源系统优化关键期,多元减排路径协同,成为碳减排最优情景;③影响因素敏感性排序为舒适温度>保温性能>人均占有面积,为改造措施优先级的制定提供了科学依据。研究得出的结论不仅为农村清洁供暖技术路径选择提供了量化参考,更从能源系统优化的角度推动了城乡一体化发展理论的实践应用。

关键词: 城乡融合; 空气源热泵; 供暖能耗; 碳减排潜力

中图分类号: F299, F32

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2026)01-0036-11

Assessment on energy consumption and carbon reduction potential of rural air source heat pump heating in the background of urban-rural integration

Xiao Yige, Chen Siyuan, Miao Siyuan

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Driven by the dual development of urban-rural integration and the goal of “dual carbon”, the low-carbon transformation of rural building heating systems has become the key. In order to systematically explore the influence mechanism for different degrees of integration on the air source heat pump(ASHP) energy consumption and carbon emission reduction effect, this paper focuses on the rural ASHP heating system, uses EnergyPlus to construct a building energy consumption model, and innovatively sets up three urban-rural integration scenarios: high, medium and low based on three factors: thermal insulation performance, per capita occupied area and comfortable temperature. By simulating the heat load and energy consumption characteristics of rural areas from 2015 to 2024, the carbon emission reduction is calculated in combination with the

收稿日期: 2025-09-05; 网络首发日期: 2025-12-12

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1294.n.20251212.1008.002>

基金项目: 国家自然科学基金项目(72104021); 北京社会科学基金项目(24GLC050); 中央高校基金项目(JB2024027)

第一作者: 肖一歌, 女, 硕士生, 研究方向为建筑供暖与低碳转型。E-mail: xyg_5221@163.com

通信作者: 陈思源, 女, 博士, 副教授, 硕导, 研究方向为新能源技术、能源经济与系统建模。E-mail: chensiyuan@ncepu.edu.cn

carbon emission factors of the North China power grid. The results show that: ① the combined effects of ASHP heat load on climate and building energy efficiency are significantly different under different urban-rural integration scenarios, the overall moderate integration scenario is higher, and the proportion of living space such as bedrooms is prominent, reflecting the heterogeneity of heating demand in functional areas. ② The moderate integration scenario is the optimal scenario for carbon emission reduction because it is in the critical period of building and energy system optimization, and the multiple emission reduction paths are coordinated. ③ The sensitivity of the influencing factors was ranked as comfortable temperature > insulation performance > per capita area, providing a scientific basis for the priority formulation of transformation measures. The conclusions drawn by this study not only provide a quantitative reference for the selection of rural clean heating technology, but also promote the practical application of the theory of urban-rural integrated development from the perspective of energy system optimization.

Key words: urban-rural integration; air source heat pump(ASHP); heating energy consumption; carbon reduction potential

在我国“双碳”目标与“乡村振兴”战略的双重驱动下,农村居民建筑供热系统低碳转型已成为推进能源现代化的重要任务。空气源热泵(air source heat pump, ASHP)作为一种低碳高效的室内供暖技术,自2016年起在我国北方多地推广应用^[1]。然而,需要注意的是,清洁供暖的大规模推广高度依赖财政补贴,这虽然在短期内提升了清洁能源的市场竞争力,但也导致政府财政压力增加,并可能削弱长期可持续性^[2]。因此,如何在补贴逐步减少的背景下,提升空气源热泵等清洁供暖技术的经济可行性,成为亟需研究的重要议题。另一方面,在城乡融合背景下,ASHP在农村地区的应用面临显著的技术适用性障碍,主要体现在农村住宅围护结构保温性能普遍较差,例如墙体厚度不足、门窗气密性较低、缺乏有效保温层等,造成设备能耗显著增加、运行效率下降,严重影响用户体验,形成“买得起、用不起”的困境。除此之外,由于对ASHP供暖技术的认知有限,部分农村居民对其实际节能效益与减排潜力仍存疑虑。因此,系统研究适应农村建筑的ASHP能耗与减排潜力,具有重要的现实意义与紧迫性。

为丰富农村建筑供热系统低碳转型的实现路径,学界已探索并验证了多种清洁供暖方式在中国北方农村地区的可行性。其中,太阳能主动供暖系统因其展现出的显著优势而备受关注。相关研究表明,该系统不仅能够在极端严寒条件下有效提升室内热环境质量,而且在光照条件充足时,其供热能力可完全覆盖建筑热负荷,实现接近“零能耗”的运行模式^[3]。与此同时,生物质作为煤炭替代燃料的潜力也在多项实地试验中得到验证,其碳排放水平接近零排放。在资源储量、价格稳定性以及技术成熟

度的综合考量下,生物质锅炉在可持续性和经济性方面均展现出较强优势^[4-5]。此外,ASHP因其良好的运行性能和区域适应性,逐渐成为研究焦点。已有研究指出,ASHP不仅能够有效满足华北地区的供暖需求,甚至严寒地区,如哈尔滨等北方农村,在满足居民室内热舒适需求方面同样表现出可行性和稳定性^[6-7]。

针对ASHP的运行特性,现有文献已展开较为系统的研究。ASHP的突出优势在于其运行的灵活可调性,这一特征不仅有助于实现室内热舒适与能耗的平衡,还能够通过间歇运行等调控模式显著降低整体能耗^[8-9]。此外,针对因热泵运行导致电力消耗显著增加的问题,研究表明,通过合理调节热泵出口温度可有效抑制能耗上升,从而实现更优的节能效果^[10]。在环境适应性方面,ASHP在应对极端低温及不同海拔条件时均表现出良好的稳定性与低碳效益^[11]。从经济性角度出发,与多种清洁供暖技术方案的综合比较结果显示,ASHP在运行成本方面通常具有明显优势,因而在长期应用过程中展现出较强的经济竞争力与推广潜力^[7]。

与此同时,ASHP的碳减排潜力亦受到学界的广泛关注。其通过取代高碳排放的化石燃料供暖系统,直接减少了燃烧过程中产生的二氧化碳,对PM₁₀和PM_{2.5}浓度的降低有很强的影响^[6]。尤其是在电力来源逐步向风能、太阳能等可再生能源转型的背景下,ASHP的碳排放可降至近乎零,真正实现清洁供暖。伴随电网脱碳进程的推进,预计到2030年,热泵将在多种供暖方案中实现最大的健康与碳协同效益^[7]。更为具体的量化研究也进一步印证了这一趋势。Wan等^[10]的研究表明,若中国北方

所有家庭都采用热泵供热,每天可节省 281 GWh 的电力,减少 171 kt 二氧化碳排放;Wang 等^[12]的研究则预测,通过强化可再生能源应用、加大热泵推广以及引导居民绿色行为,碳排放可减少 41.2%~76.2%。此外,Lin 等^[13]的实证研究揭示,建筑位置在确定 ASHP 相关碳排放量方面发挥着至关重要的作用,研究中北方城市碳排放量明显高于南方城市。因此本研究选择以北方农村为评估案例,分析其碳减排潜力。

为充分考虑农村建筑的工热特性,本研究采用 EnergyPlus 来模拟计算农村建筑的热负荷和能耗。该模型具有以下显著优势:首先,EnergyPlus 在计算建筑负荷和系统能耗时,创新性采用了同步求解,即将建筑热平衡计算与 HVAC(heating ventilation air conditioning)系统运行计算结合,这一方式更符合现实情况,增加了结果的准确性;其次,EnergyPlus 庞大的模型库使其在处理标准建筑几何方面的结果更优。与 DeST 和 TRNSYS 等模型相比,EnergyPlus 所包含的 PCM(相变材料)参数更准确^[14-15];最后,EnergyPlus 有很强的兼容性和普适性,可以满足不同规模、不同类型建筑在能源研究方面的需求。无论是普通房屋建模优化,还是净零房屋这种对能源系统要求极高的建筑类型,都能通过 EnergyPlus 开展相关的能耗特性研究。因此,已有学者采用 EnergyPlus 研究 ASHP 的能耗特性。例如,Ling 等^[16]使用 EnergyPlus 找到 ASHP 更好的间歇加热运行模式,在保证室内热舒适性的同时实现建筑节能;Ma 等^[17]使用 EnergyPlus 对房屋进行建模,并优化关键的被动设计参数,提高 ASHP 的 COP,并发现太阳能耦合 ASHP 可使总能耗减少 0.3%~0.6%。

然而,上述研究多侧重于 ASHP 技术性能本身,尚未充分考虑社会经济动态因素对其能耗与减排潜力的系统性影响。基于此,本文立足于城乡融合不断深入的现实背景,以我国北方农村住宅为研究对象,采用 EnergyPlus 建筑能耗模拟方法,对 ASHP 供暖系统的能耗特性与碳减排效应进行定量分析。本文的创新点主要包括:①构建了融合程度导向的情景分析方法,基于舒适温度、围护结构保温性能与人均占有面积三项关键变量,将城乡融合程度划分为高、中、低三类情景,系统揭示城乡融合

进程中社会经济与建筑物理参数的协同演变对 ASHP 能效与减排效益的作用机制;②针对北方农村建筑围护结构薄弱、气密性差等特征,整合实测气象数据与多融合情景参数,基于 EnergyPlus 平台实现建筑动态热负荷计算与 ASHP 运行特性的模拟;③量化了舒适温度、保温性能与人均占有面积对 ASHP 能耗与减排效果的影响程度,可为推进农村节能改造与低碳供暖提供区分优先级的科学依据。

1 模型与方法

1.1 EnergyPlus 的简介

EnergyPlus 软件是美国能源部和劳伦斯·伯克利国家实验室开发的建筑能耗模拟软件,能够用于模拟分析建筑的采暖、制冷、照明以及其他能源消耗。该软件将建筑能耗计算分解为四个相互关联又相对独立的子系统:负荷模块、系统模块、设备模块和经济模块。负荷模块负责处理建筑与外部环境的热交换过程;系统模块主要模拟空气处理系统及暖通空调系统的制冷、制热和除湿功能;设备模块专注于冷热源设备的性能模拟;经济模块则负责能耗成本分析与投资回报评估^[18](见图 1)。本文研究的建筑模型由 Sketch Up 三维画图软件构建,房屋构造见图 2,来源于北京市《新农村住宅设计图集》。

1.2 能耗计算模型

ASHP 建筑能耗 E_h 由建筑取暖热负荷、运行时间与热泵平均制热性能系数构成^[19],见式(1);其中,建筑取暖热负荷由四个部分组成,见式(2)。

$$E_h = Q \cdot H / C_{COP} \quad (1)$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (2)$$

式中, Q 为建筑采暖热负荷,单位为 W; Q_1 为热区内扰发热量,单位为 W; Q_2 为来自热区表面的对流换热,单位为 W; Q_3 为热区内空气混合换热量,单位为 W; Q_4 为室外新风渗透传热量,单位为 W; H 为运行时间,单位为 h; C_{COP} 为计算周期内 ASHP 的平均制热性能系数。

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{N_{SL}} Q_i \quad (3)$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{N_{surface}} h_i A_i (T_{si} - T_z) \quad (4)$$

$$Q_3 = \sum_{i=1}^{N_{zone}} m_i C_p (T_{zi} - T_z) \quad (5)$$

$$Q_4 = m_{inf} C_p (T_\infty - T_z) \quad (6)$$

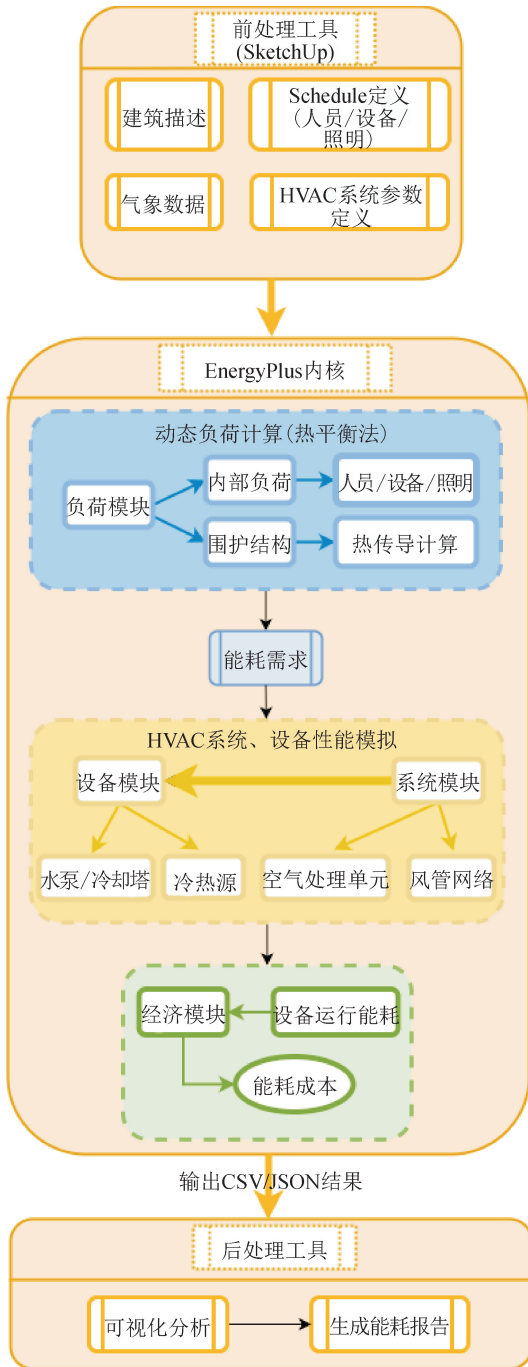


图1 EnergyPlus 应用流程图
Fig.1 EnergyPlus application flow chart diagram

相关参数含义见表1。

1.3 碳减排效应

1) 碳排放量计算

本研究中 ASHP 供暖的碳排放 C_h 由能耗与电力碳排放因子 γ_g 计算得出, γ_g 如图3所示。由于仅有2010—2012年和2022年的碳排放因子数据,其余年份是采用直接插值法的估计值。

$$C_h = E_h \cdot \gamma_g \quad (7)$$

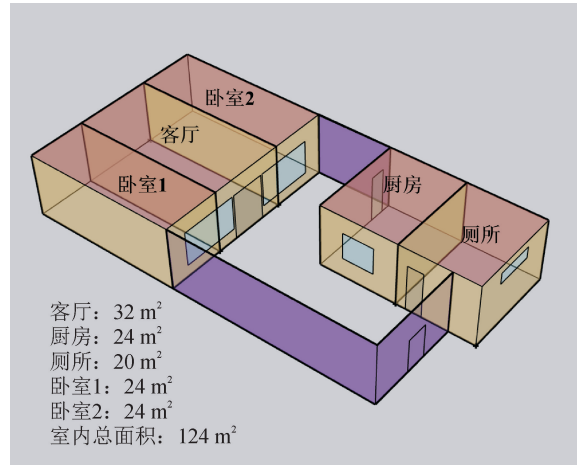


图2 建筑模型图
Fig.2 Building model diagram

表1 符号含义

Tab.1 Symbol reference

符号	定义	单位
N_{st}	内扰类型数量	/
Q_i	单个内扰源的发热量	W
$N_{surface}$	热区围护结构表面数量	/
h_i	围护结构表面的对流换热系数	W/(m² · °C)
A_i	围护结构表面的面积	m²
T_{si}	墙面内表面温度	°C
T_z	热区内空气温度	°C
N_{zone}	相邻热区数量	/
m_i	热区间渗透质量流量	kg/s
m_{inf}	渗透新风质量流量	kg/s
C_p	空气的定压比热容	kJ/(kg · °C)
T_{zi}	相邻热区的空气温度	°C
T_{∞}	室外空气温度	°C

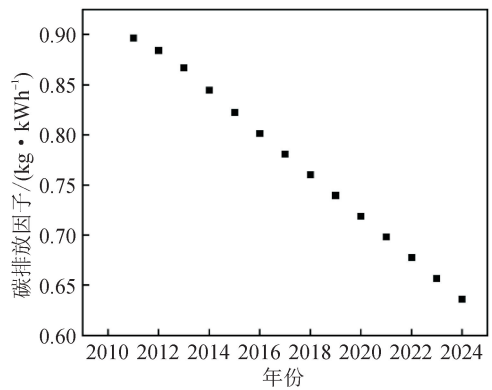


图3 2010—2024年华北电网碳排放因子
Fig.3 North China power grid carbon emission factor (2010—2024)

传统燃煤系统碳排放 C_c 由煤炭消耗量 M_c 与碳排放因子直接计算:

$$C_c = M_c \cdot \gamma_c \quad (8)$$

传统燃煤锅炉的煤炭消耗量需考虑锅炉热效率 η_c (通常取 60%~70%, 本研究取 65%), 由此可得:

$$M_c = \frac{Q}{8.14 \cdot \eta_c} \quad (9)$$

式中, 8.14 为标准煤热值, 单位为 kWh/kg 标煤。根据国家标准 GB/T 2589—2020 综合能耗计算通则中的标准煤热值换算得出。

2) 碳减排量

两种系统的碳排放差值即为 ASHP 的碳减排量 ΔC :

$$\Delta C = C_c - C_h \quad (10)$$

1.4 情景设置

随着城乡融合进程的持续推进, 农村居民收入水平不断提高, 对室内热舒适的需求日益增强, 并具备购买更优质保温材料经济能力^[20-21]。与此同时, 农村产业的集聚与发展以及交通条件的改善, 显著缩短了城乡之间的心理距离, 吸引更多人返乡创业^[22-23], 进而对农村建筑的人均占有面积产生影响。除此之外, 在关键指标的选取上, 室外气象参数属于客观、不可控的自然变量, 其变化具有随机性与周期性, 难以通过人为干预进行系统性的敏感性分析; 室内设备的配置与使用即使在同一城乡融合情景下, 不同家庭的室内设备数量及使用时长也可能存在显著差异, 数据获取难度高。因此, 本研究选取舒适温度、保温性能和人均占有面积三个关键指标, 构建了高、中、低三种城乡融合程度情景, 每种情景进一步细分为 6 种子情景(见表 2)。其中, 保温性能作为衡量城乡建筑能效差异的核心要素, 依据内墙、外墙及保温材料的不同, 划分为良好与较差两类(见表 3)。

表 2 城乡融合情景划分

Tab. 2 Urban-rural integration classification

情景	情景 细分	舒适 温度/°C	保温 性能	人均占有 面积/m ²
高城乡融合 情景	H ₁	24	良好	15
	H ₂	24	良好	25
	H ₃	20	良好	15
	H ₄	20	良好	25
	H ₅	16	良好	15
	H ₆	16	良好	25

表 2 (续)

情景	情景 细分	舒适 温度/°C	保温 性能	人均占有 面积/m ²
中城乡融合 情景	M ₁	24	良好	30
	M ₂	20	良好	30
	M ₃	24	较差	15
	M ₄	24	较差	25
	M ₅	20	较差	15
	M ₆	20	较差	25
低城乡融合 情景	L ₁	24	较差	30
	L ₂	20	较差	30
	L ₃	16	良好	30
	L ₄	16	较差	15
	L ₅	16	较差	25
	L ₆	16	较差	30

表 3 不同保温性能参数

Tab. 3 Different thermal parameter

保温性能	内墙材料	外墙材料	保温材料
良好	两排孔轻集料 混凝土空心砌块 (0.53)	三排孔轻集料 混凝土空心砌块 (0.53)	胶粉聚苯颗粒 保温浆料 (0.06)
	建筑隔墙用 轻质条板 (2.0)	三排孔混凝土 空心砌块 (0.75)	水泥聚苯板 (0.09)

注: 数据来源于 GB50176—2016 民用建筑热工设计规范, 括号内的数据为导热系数, 单位为 W/(m·K)。

2 实例分析

2.1 基础环境参数

本文选取北京农村地区作为案例, 该地区正处于城乡融合发展的典型过渡阶段, 既体现出城市辐射带来的建筑能效提升与居住理念更新, 又保留传统农村居住分散和能源使用习惯等特征, 能够全面映射高、中、低不同城乡融合情景。为此, 本文搜集了北京地区典型年份供暖期内太阳辐射强度与日平均气温数据(见图 4), 二者共同构成影响 ASHP 运行的关键环境因素, 气温决定热泵制热需求, 太阳辐射影响热泵集热效率; 二者动态交互, 为分析城乡融合情景下 ASHP 能耗与减排规律, 提供了贴合实际气候特征的研究基础。

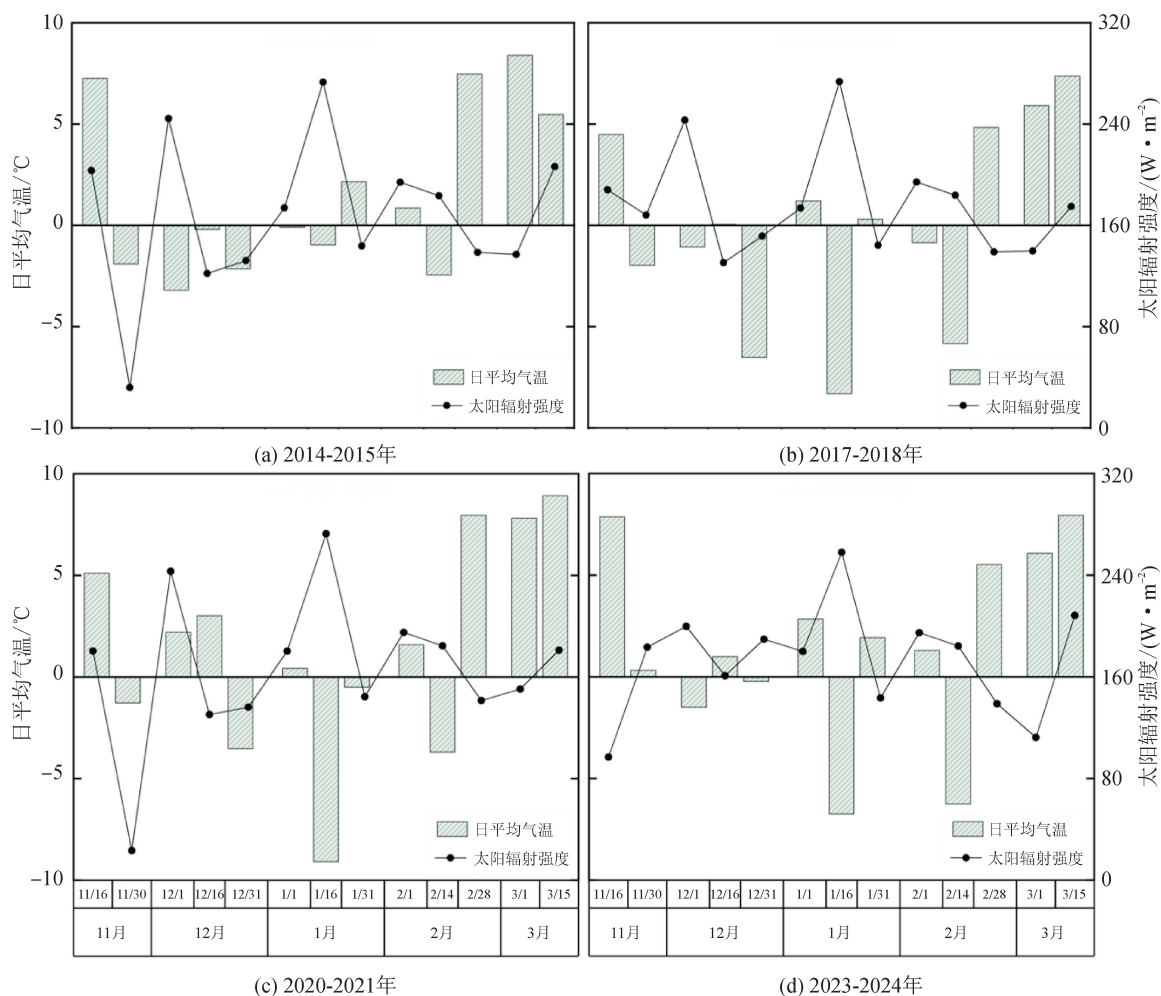


图4 典型年份北京太阳辐射强度和日平均气温走势

Fig. 4 Solar radiation intensity and daily average temperature of Beijing in typical years

2.2 供暖热负荷时空特征

基于上述气候数据,本文针对不同城乡融合情景下热负荷展开模拟(见图5)。以高度融合情景为例,1月热负荷约达6 kW,2月约为5 kW,均明显高于其余月份,直观反映出气候条件对供暖需求的直接驱动作用。高度融合情景与低度融合情景峰值相近,但是造成一致的原因并不相同。在高度融合情景中,1月是冬季气温极低时段,由于建筑保温好、热损失少,需较少热量供热。而在低度融合情景,虽然建筑围护结构差,热损失持续且量大,但是舒适温度较低,热量需求低。中度融合情景热负荷呈现相对更高值,源于气候与建筑保温性能的综合作用。对比高度融合,中度融合建筑保温性能弱,热量散失快,迫使热泵补热。对比低度融合,又需维持更高舒适温度。

从空间分布特征审视,客厅、卧室等大空间且高频使用区域,热负荷占比相对较高,合计占比约60%;反观厕所这类小面积、低频使用区域,热负荷占比较低,约40%,清晰呈现出空间功能属性与使用频率对热负荷分配的影响规律。

2.3 供暖能耗分布特性

图6呈现高、中、低三种城乡融合情景下各子情景供暖季能耗特征。在高度融合情景中,由于建筑保温性能良好,能耗中位数集中于20~40 kWh区间,相较中度融合情景较低,且数据波动范围窄,源于高度融合下形成的标准化体系,让能耗控制更精准稳定,且居民用能习惯与建筑节能设计适配,无需以牺牲舒适为代价,从“硬件减耗+需求适配”双向实现低能耗,真正体现城乡深度融合对建筑能效与节能的系统性提升。

中度融合情景里,ASHP能耗中位数分布于20~50 kWh区间,以M₃、M₄子情景为例,其中位数超40 kWh。这是由于该情景处于城乡融合过渡阶段,建筑特征混杂:既有老旧建筑因围护结构差、热损失大,需高能耗补热;也有新建建筑能效标准不统一,设备、施工存短板,进一步推高能耗。同时,居民既追求一定室内舒适性,又未形成高度融合“靠技术降能耗”的成熟模式,用能习惯难精准匹配节能需求。

低度融合情景能耗呈现“数值偏低但波动显著”

特征,如 L_3 、 L_4 子情景,能耗约 20 kWh,低于中度融合情景 M_3 、 M_4 子情景 40 kWh 以上的水平。究其原因,该情景下居民受收入水平限制,对室内舒适性诉求较低,且为控制采暖成本,会主动缩减设备运行时长或降低室内温度设定标准,使得能耗“被动”降低。这种低能耗并非源于建筑能效的实质性提升,而是以牺牲室内舒适性与设备高效运行状态为代价,难以形成可持续的节能模式。

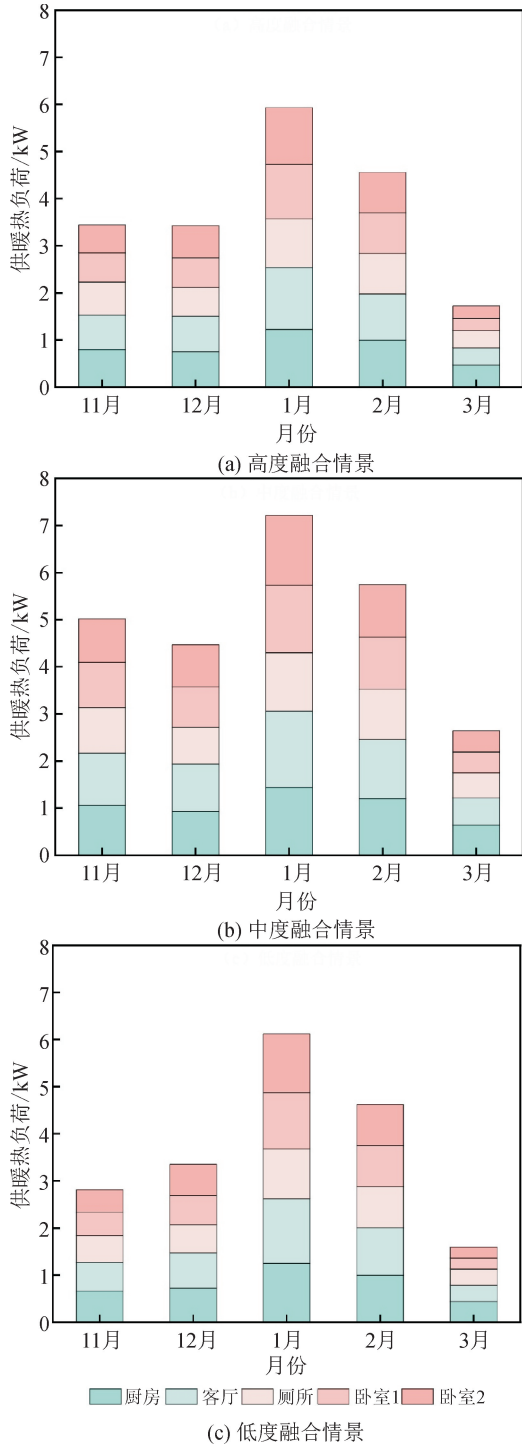


图 5 不同情景下分房间热负荷均值

Fig. 5 The heat load of the room under different scenarios

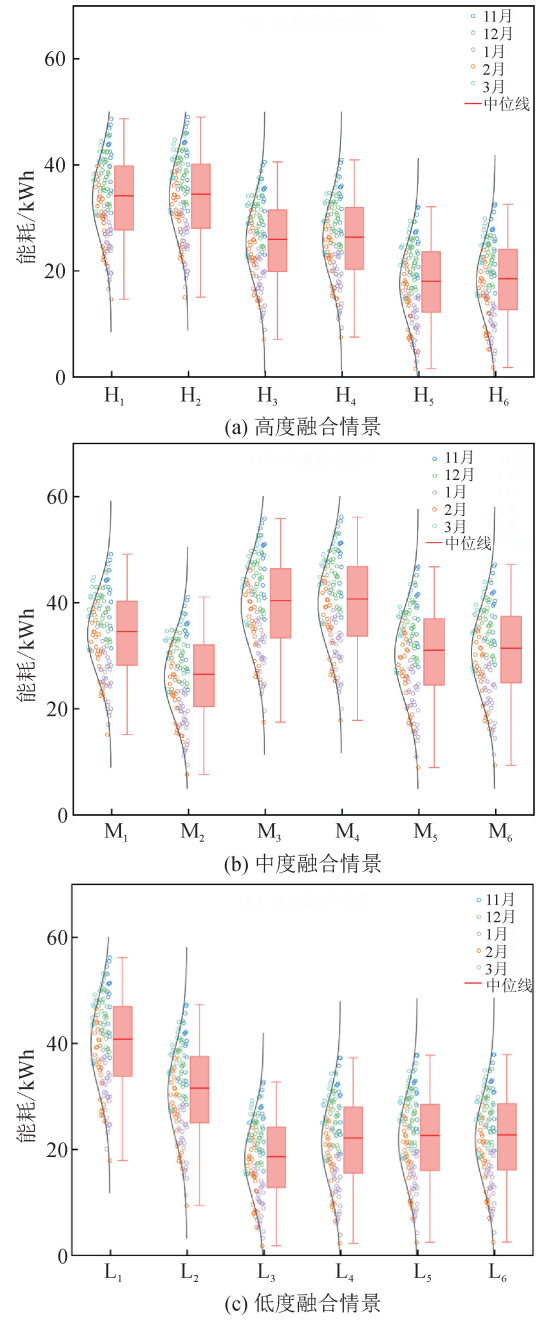


图 6 不同情景下空气源热泵能耗量

Fig. 6 Energy consumption of ASHP under different scenarios

2.4 碳减排潜力

图 7 揭示了不同城乡融合情景下 ASHP 的碳减排潜力,结果显示各情景下 ASHP 碳减排量均呈现总体上升趋势。具体来看,高度融合情景中,以 H_1 子情景为例,2015 年碳减排量约为 4.3 t,至 2024 年升至约 5.2 t;中度融合情景下 M_1 子情景 2015 年碳减排量 5.1 t,2024 年达到约 6.1 t;低度融合情景里, L_1 子情景 2015 年碳减排量约 5.1 t,2024 年增至约 6.2 t。上述数据表明,随着城乡协同发展进程的推进与能源利用效率的提升,ASHP 碳减排效果总体呈增强态势。

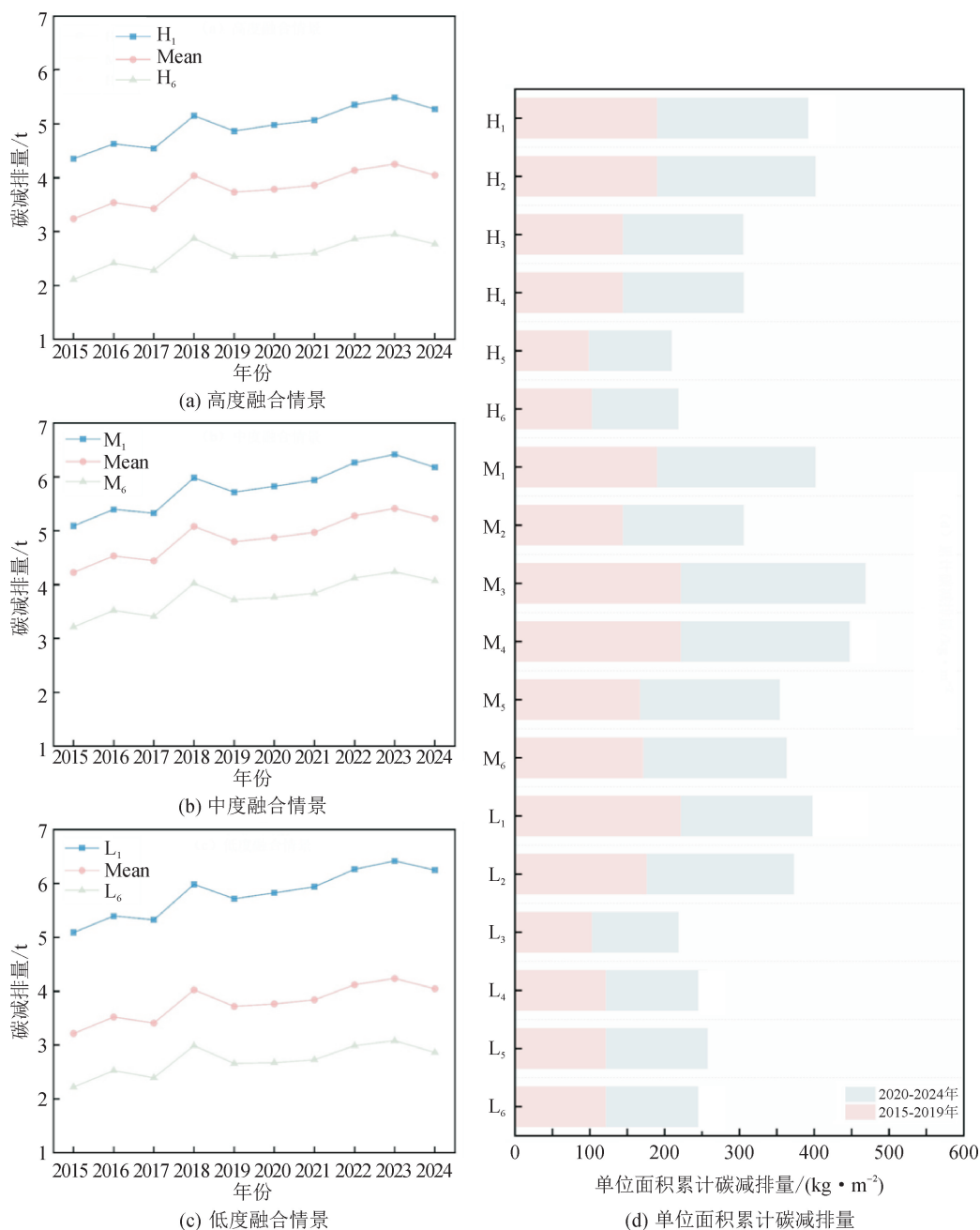


图7 不同情景下碳减排量与单位面积累计碳减排量

Fig. 7 Carbon emission reduction and cumulative carbon emission reduction per unit area under different scenarios

进一步分析各情景差异可知,图7(b)展示了2015—2019年与2020—2024年不同情景的单位累计碳减排量特征:高度融合情景碳减排量看似“略低”,以H₁情景为例,2015—2024年累计碳减排量约380 kg/m²,实则处于“高效稳定态”。该情景下建筑保温性能、能源系统配置已达到较高技术水平,碳减排空间相对收窄,虽整体波动幅度较小,但始终维持在合理区间内,这一特征充分体现城乡深度融合后ASHP碳减排效能的稳定性。低度融合情景虽碳减排起点较低,以L₃情景为例,2015—2024年碳减排量仅不到250 kg/m²,这是因为该区域建

筑老旧、保温差,ASHP初始能耗高、减排空间小。但后续通过贴简易保温板、封门窗缝隙等低成本改造,以及清洗设备、优化运行参数等基础操作,逐步降低建筑热损失与设备能耗,推动减排量稳步增长。其中L₁子情景因多年持续改进,叠加可能靠近城镇、优先获得基础节能支持的局部优势,累计减排量最终接近中度融合情景的峰值,体现了低融合区域通过简易措施实现可观减排的可行性。

2.5 关键影响因素敏感性分析

图8进一步探究了保温性能、舒适温度与人均占有面积对农村地区ASHP供暖碳减排量的边际

影响。

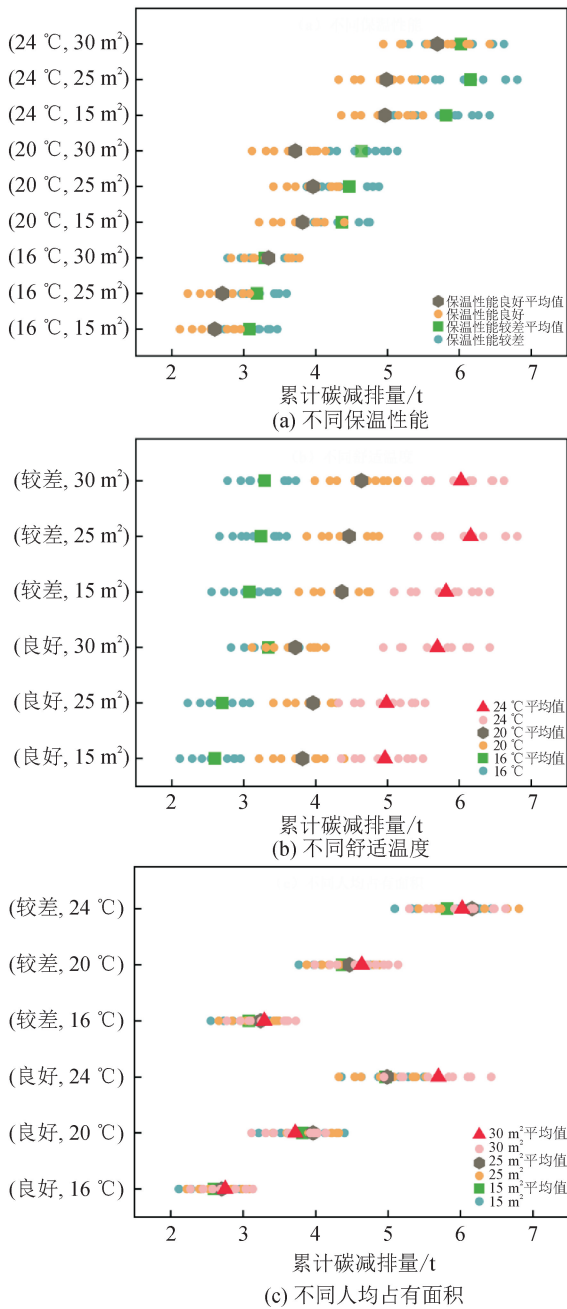


图 8 各因素碳减排边际效应比较
Fig. 8 Comparative analysis of marginal effects of carbon emissions reduction across factors

在图 8(a)中,农村建筑保温性能对碳减排量的作用呈现显著“阈值效应”:保温性能“良好”与“较差”两组的碳减排量均值线存在明显分离,其中“良好”组在 24 °C、30 m² 场景下,累计碳减排量稳定处于 5~6 t 区间;“较差”组为 16 °C、15 m² 场景,累计碳减排量则波动于 2.5~3.5 t 范围。同时,“良好”组内不同温度、面积组合下的碳排放量波动幅度更小,多数情况下波动范围控制在 1 t 以内,这表明当建筑保温性能达到特定阈值后,可有效抑制碳排放

的无序波动;而“较差”组碳排放量波动范围最大可达 2 t,反映出保温性能不足时,其他影响因素对碳排放的干扰更易突破约束边界,印证了保温性能是农村 ASHP 供暖碳排放的基础性约束条件。

舒适温度对碳排放的影响强度在三者中最为突出,不同舒适温度对应的碳减排量均值存在显著差异。由图 8(b)可见,24 °C 工况下的碳减排量普遍高于 16 °C 工况,且随舒适温度升高,数据离散程度呈扩大趋势,24 °C 工况下部分数据点的碳排放量差值超过 2 t。这一结果表明,舒适温度上升会直接推动碳排放量显著增加,且在较高温度区间内,会进一步放大保温性能、人均占有面积等因素的个体差异对碳排放的影响,进一步验证了舒适温度作为农村 ASHP 供暖碳排放核心影响变量的关键地位。

相比之下,人均占有面积对碳减排量的影响效应相对最弱。从图 8(c)数据分布来看,不同人均占有面积对应的碳减排量均值重叠度较高,以保温“良好”、20 °C 工况为例,三种面积条件下的累计碳减排量均集中在 3~4.5 t 区间,且数据点分布更为密集。这表明人均占有面积是农村 ASHP 供暖碳排放的相对不敏感因素,其对碳排放的影响需依附于保温性能、舒适温度等条件才能得以体现。

综上,通过对三者边际影响效应的量化对比可知,农村 ASHP 供暖碳排放的敏感性排序为:舒适温度>保温性能>人均占有面积。该结论为农村 ASHP 供暖碳减排实践提供了明确的优先级指引:在碳减排策略制定中,应优先通过合理调控舒适温度、强化建筑保温性能,可更高效地实现碳排放量降低;而人均占有面积的优化,可作为长期协同性策略,与前两项措施配合推进,形成系统性碳减排方案。

3 结论和建议

本研究基于 EnergyPlus 建筑能耗模拟平台构建分析模型,通过设置高度、中度、低度三类城乡融合情景,系统探究农村地区 ASHP 供暖系统的能耗特性与碳减排效应,研究结论如下。

首先,不同城乡融合情景下,建筑各功能房间热负荷存在显著差异。其中,中度融合情景下系统整体热负荷水平相对更高,最高可超 7 kW,且客厅、卧室等核心居住空间占比突出,这一特征充分反映了不同功能区域供暖需求的异质性,也间接体现了城乡融合阶段建筑功能布局对供暖系统运行的影响。

其次,农村 ASHP 供暖碳减排效应呈现明显的阶段性特征。各情景减排量均呈上升趋势,其中中

度融合情景减排效益最优,单位面积累计减排最高可达 460 kg/m²;高度融合情景因系统已达优态,2015—2024 年的减排量均值在 3~4 t 的区间;低度融合情景则通过基础改造释放潜力,减排量逐步逼近中度情景峰值。

最后,敏感性分析表明,各因素影响排序为:舒适温度>保温性能>人均占有面积。舒适温度起主导作用,温差变化可导致碳排放波动超 2 t;保温性能敏感性次之,排放波动在 1 t 左右;而人均占有面积的敏感性相对较低,其对系统能耗与碳减排的调控作用需依托前两类因素的优化方可充分发挥。

基于上述结论,提出以下建议。

一是在研究框架层面,需将城乡融合的社会特征转化为技术模型的可量化参数:如居民收入提升对应“舒适温度”变量、居住观念转变对应“人均占有面积”变量、基础设施完善对应“保温性能”变量,为跨维度研究奠定数据基础。

二是在影响机制层面,需综合考量城乡融合进程对技术运行边界的影响:城乡融合推动的人口返乡集聚可提升 ASHP 负荷率、电网改造能保障供电稳定性、政策普及可降低技术准入门槛,从运行环境到需求端为技术高效应用创造条件。

三是在效应传导层面,依托 ASHP 的技术特性支撑城乡融合核心目标:替代燃煤供暖减少碳排放以助力“双碳”与生态宜居,降低供暖成本以改善民生、促进共同富裕,带动相关产业下沉以推动乡村产业振兴,实现技术效应向社会价值的转化。

最终在策略落地层面,为低度融合区域优先完善电力基建并推广低成本机型,将高度融合区域的 ASHP 纳入城乡基础设施一体化规划,实现社会性与技术性研究的双向赋能。

参考文献:

- [1] Xu Shuxue, Wang Yueyue, Niu Jianhui, et al. “Coal-to-electricity” project is ongoing in north China[J]. *Energy*, 2020, 191: 116525.
- [2] Chen Siyuan, Xue Mengtian, Wang Zhaohua, et al. Exploring pathways of phasing out clean heating subsidies for rural residential buildings in China[J]. *Energy Economics*, 2022, 116(10):106411.
- [3] Wang Gang, Feng Guohui, Li Xiangli, et al. Design optimization integrating energy, economic, and environmental evaluation of a hybrid solar heating system for detached buildings in rural China[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 73: 106692.
- [4] Deng Yun, Ran Xueling, Yu Yaohong, et al. Energy-based sustainability analysis and comprehensive evaluation of individual heating systems: a case study from rural northern China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, 512: 145491.
- [5] Zhao Juan, Liu Rui, Zhou Botao, et al. Field survey, measurement and economic evaluation of the rural house heating systems in Shaanxi, China[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 274: 126719.
- [6] Xu Zhaowei, Liu Fang, Xu Wei, et al. Atmospheric air quality in Beijing improved by application of air source heat pump (ASHP) systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120582.
- [7] Zhou Mi, Liu Hongxun, Peng Liqun, et al. Environmental benefits and household costs of clean heating options in northern China[J]. *Nature Sustainability*, 2021, 5:329-338.
- [8] Zhang Dong, Qu Boyi, Wang Chunlong. Energy-saving evaluation and control optimization of an ASHP heating system based on indoor thermal comfort[J]. *Solar Energy*, 2019, 194: 913-922.
- [9] Chen Xiaoyi, Li Ziqiao, Dai Longkang, et al. Characteristics of intermittent heating by air source heat pump in rural areas of northern China based on indoor temperature effective guarantee rate[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 95: 110196.
- [10] Wan Zhihao, Wang Zhaoying, Lü Guowei, et al. Energy-saving potential by regulating heat pump heating systems in rural areas with latent class analysis[J]. *Applied Energy*, 2025, 397: 126371.
- [11] Yang Caiqing, Lu Dongyang, Shan Ming, et al. assessing climate adaptability and low-carbon efficiency of air source heat pumps in China’s diverse climates[J]. *Journal of Building Engineering*, 2025, 99: 111584.
- [12] Wang Manyu, Wei Chu. Toward sustainable heating: assessment of the carbon mitigation potential from residential heating in northern rural China[J]. *Energy Policy*, 2024, 190: 114141.
- [13] Lin Zhe, Li Xueli, Lin Musong, et al. Analysis of carbon emission associated with composite air source heat pumps in buildings[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2025, 69: 106033.
- [14] 简毅文,王瑞锋. EnergyPlus 与 DeST 的对比验证研究[J]. *暖通空调*, 2011, 41(3): 93-97.
- [15] Jian Yiwen, Wang Ruifeng. Comparison of thermal model between EnergyPlus and DeST [J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2011, 41(3): 93-97.
- [15] Mazzeo D, Matera N, Cornaro C, et al. EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and

- without a PCM module[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 212: 109812.
- [16] Ling Jihong, Tong Hui, Xing Jinchun, et al. Simulation and optimization of the operation strategy of ASHP heating system; a case study in Tianjin[J]. *Energy and Buildings*, 2020, 226: 110349.
- [17] Ma Li, Ge Hua, Wang Lin, et al. Optimization of passive solar design and integration of building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) system in northern housing[J]. *Building Simulation*, 2021, 14(5): 1467-1486.
- [18] 张率,刘衍,侯立强,等. 北方采暖地区居住建筑节能计算方法对比[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(10):178-185.
- Zhang Shuai, Liu Yan, Hou Liqiang, et al. Comparative study on energy efficiency calculation methods of residential buildings in central heating areas of Northern China[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(10): 178-185.
- [19] 张少良,刘淑丽. 不同气候特征下太阳能-空气源热泵结合方式对复合供暖系统性能的影响研究[J]. *暖通空调*, 2024, 54(12):162-170.
- Zhang Shaoliang, Liu Shuli. Influence of solar-air-source heat pump combination methods on performance of composite heating systems under different climatic characteristics[J]. *Heating Ventilating & Air Conditioning*, 2024, 54(12): 162-170.
- [20] 魏后凯,刘金凤,年猛. 面向中国式现代化的城乡融合发展:障碍、目标与长效机制[J]. *财贸经济*, 2025, 46(1):8-29.
- Wei Houkai, Liu Jinfeng, Nian Meng. Integrated urban-rural development oriented toward the Chinese modernization: obstacles, goals, and long-term mechanisms[J]. *Finance & Trade Economics*, 2025, 46(1): 8-29.
- [21] Gao Xiaoxiao, Luo Xi, Liu Xiaojun. Thresholds to rural energy transition; the multistage effects of urbanization on the rural household energy consumption structure[J]. *Energy*, 2025, 319: 135121.
- [22] 陈丹,张越. 乡村振兴战略下城乡融合的逻辑、关键与路径[J]. *宏观经济管理*, 2019(1):57-64.
- [23] 孙九霞,张凌媛,罗意林. 共同富裕目标下中国乡村旅游资源开发:现状、问题与发展路径[J]. *自然资源学报*, 2023, 38(2):318-334.
- Sun Jiuxia, Zhang Lingyuan, Luo Yilin. Development of rural tourism resources in China under the goal of common prosperity: current situation, problems and the development path[J]. *Journal of Natural Resources*, 2023, 38(2): 318-334.

(责任编辑 王卫勋)