

文章编号: 1671-6612 (2025) 04-599-06

新型离子热空调的 技术经济性及温室气体排放分析

张金锐^{1,2} 杜玉吉¹ 梁彩华² 王立博²

钱辉金¹ 彭玉兰^{1,2} 林郁郁¹ 韩凤麟^{1,2} 汪郑强¹ 胡淑娴²

(1. 中节能城市节能研究院有限公司 常州 213032; 2. 东南大学 南京 210018)

【摘要】 研究旨在评估新型离子热空调相较于传统蒸汽压缩式空调在技术经济性及温室气体排放方面的优势。采用技术经济性分析 (TEA) 与全生命周期分析 (LCA) 对新型离子热空调的技术性能、经济可行性及全生命周期碳排放进行系统评估, 并与功能相同的传统蒸汽压缩式空调进行对比。结果表明, 新型离子热空调在全生命周期内的温室气体排放比传统蒸汽压缩式空调低 2518kgCO₂-eq, 且全生命周期成本仅增加 1622 元。这主要归因于其采用的制冷剂具有零温室气体效应。

【关键词】 离子热空调; 蒸汽压缩式空调; 技术经济性分析; 全生命周期分析; 温室气体排放
中图分类号 TK124 文献标志码 A

Techno-Economic and Greenhouse Gas Emission Analysis of Novel Ionocaloric Air Conditioner

Zhang Jinrui^{1,2} Du Yuji¹ Liang Caihua² Wang Libo²

Qian Huijin¹ Peng Yulan^{1,2} Lin Yuyu¹ Han Fenglin^{1,2} Wang Zhengqiang¹ Hu Shuxian²

(1. CECEP City Energy Conservation Co., Ltd, Changzhou, 213032; 2. Southeast University, Nanjing, 210018)

【Abstract】 This study aims to evaluate the advantages of novel ionocaloric air conditioning over conventional vapor-compression air conditioning in terms of techno-economic feasibility and greenhouse gas (GHG) emissions. Techno-economic analysis (TEA) and life cycle assessment (LCA) were employed to systematically assess the technical performance, economic viability, and life cycle greenhouse gas emissions of the ionocaloric air conditioning system, comparing it with a conventional vapor-compression system of the same functionality. The results indicate that the novel ionocaloric air conditioning system exhibits significantly lower life cycle GHG emissions (2518kgCO₂-eq) than the vapor-compression counterpart with only a slight increase in life cycle costs (1622Yuan). This is primarily due to the zero-global warming potential of its refrigerant.

【Keywords】 Ionocaloric air conditioning; Vapor-compression air conditioning; Techno-economic analysis; Life cycle assessment; Greenhouse gas emissions

0 引言

国际社会于 1992 年开始关注温室气体排放对全球气候的重要影响, 并推动联合国通过了《联合

国气候变化框架公约》, 旨在控制和稳定温室气体浓度。截至 2016 年, 已有 197 个国家加入了该公约。随后, 1997 年《京都议定书》加大力度推动

基金项目: 常州市领军型创新人才引进培育项目 (CQ20230025); 江苏省卓越博士后计划 (2023ZB425)

作者简介: 张金锐 (1992-), 男, 博士, 工程师, E-mail: zhangjinrui@seu.edu.cn

通讯作者: 杜玉吉 (1983-), 男, 博士, 正高级工程师, E-mail: 11927120@zju.edu.cn

收稿日期: 2025-02-27

减排承诺,规定发达国家在 2008 年至 2012 年期间将温室气体排放量在 1990 年的基础上平均减少 5.2%。到 2009 年,183 个国家正式成为缔约方。2016 年,全球对气候变化风险的认识提高,178 个国家签署了《巴黎协定》,强调采取迅速行动降低温室气体排放,并增强应对能力,提出要将全球气温升高幅度控制在 2℃ 以内,并努力控制在 1.5℃ 以内。这三项国际条约成为全球气候治理的重要里程碑^[1]。至 2020 年末,超过 130 个国家据此更新国家自主贡献方案,欧盟、中国等主要经济体更率先立法确立碳中和时间表,标志着气候治理进入强制履约新阶段。

随着社会经济的繁荣,人民生活水平的不断提高,建筑行业的能源消耗和温室气体排放也日益增长。2021 年,全球建筑领域的能源消耗占总量的 30%,同时产生了 27% 的温室气体排放^[2]。据有关机构预测,如不采取有效措施,2012 年至 2050 年全球建筑能源消耗量将增加 50%^[3]。中国是建筑能源消耗大国,2020 年消耗量接近全球总量的 20%^[2,4]。其中,制冷能耗需求持续增长,2000 年至 2017 年间年均增长率达到 13%^[5]。推动制冷产业向绿色高效转型,2019 年,国家发展改革委等七部门联合印发了《绿色高效制冷行动方案》^[6,7]。该方案明确:到 2030 年,我国大型公共建筑制冷能效将提升 30%,制冷总体能效水平提高 25% 以上,绿色高效制冷产品市场占有率达到 40% 以上,预计年节电量可达 4000 亿千瓦时左右。目前,制冷空调的用电量已占全国用电总量的 20% 以上。因此,提高空调能效是降低电力相关碳排放的有效途径之一。此外,不环保的制冷剂不仅会破坏臭氧层,还会产生温室效应,这也是碳排放的重要来源。因此,提升空调能效比和推广环保制冷剂是制冷空调实现节能减碳的关键举措。制冷空调在我国的节能减排工作中扮演着关键角色^[8]。

当前,传统的蒸汽压缩制冷循环依旧是最为广泛应用的制冷技术。然而,该技术所使用的制冷剂所带来的环境问题日益严重^[9]。因此,研发新型制冷技术以替代传统的蒸汽压缩制冷循环成为了行业的研究热点。在这些新技术中,基于热效应的固态冷却技术因其显著的发展潜力而受到广泛关注^[9]。Lilley 和 Prasher^[10]团队于 2022 年,成功开

发出基于离子热效应的制冷技术,这一突破性成果引起了学术界的广泛关注。现有研究主要围绕热泵与传统供暖制冷系统的全生命周期对比展开。Shah 等^[11]评估了三种住宅供暖和制冷系统的生命周期环境影响,分析了区域气候、能源结构等因素的作用,并指出提升设备效率和增加可再生能源比例可显著降低热泵系统的环境影响。Violante 等^[12]对比分析了地源热泵(GSHP)与空气源热泵(ASHP)的生命周期碳足迹,涵盖生产、安装、运行及报废阶段,结果表明 GSHP 具有更高的能源效率和更低的长期环境影响。Monfared 等^[13]通过生命周期评估比较了磁制冷冰箱与传统蒸汽压缩式冰箱的环境影响,发现磁制冷因稀土材料的使用导致更高的环境负担,并探讨了材料回收、设计优化及电力结构对其环境影响的潜在改善途径。然而,关于离子热效应的环境影响及经济可行性,当前缺乏系统性分析。基于此,本研究旨在通过技术经济性分析(TEA)和全生命周期分析(LCA),评估新型离子热空调在技术经济性及碳排放方面相较于传统蒸汽压缩式空调的优势。

1 方法和模型

本研究采用多维度分析方法对离子热空调与传统蒸汽压缩式空调系统进行综合对比。在相同工况下离子热空调与传统蒸汽压缩式空调的能耗依据文献数据^[10,14]进行计算。两种空调技术的经济性分析采用了全生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)^[15]评估,涵盖了初始投资成本、能源成本以及运行和维护成本。温室气体排放则基于全生命周期分析(LCA)方法学,按照 ISO 14040/44^[16,17]标准和 IPCC GWP100^[18]评价指标,全面考虑了设备制造过程、生产运行期间和废弃处理各阶段的温室气体排放,涉及从摇篮到坟墓的全过程。温室气体排放的 LCA 计算通过 Simapro 建立模型,并结合 Ecoinvent 3 数据库进行数据分析。

空调的能效是由公式(1)计算,性能系数 COP 是由制冷量 Q (MJ) 和耗电量 E (MJ) 决定的。全生命周期的温室气体排放是由公式(2)确定。

$$COP = \frac{Q}{E} \quad (1)$$

$$GHG = \sum_{i=1}^n (M_i \times EF_i) + \sum_{j=1}^m (E_j \times CI_j) + \sum_{k=1}^p (D_k) + \sum_{l=1}^q (R_l) \quad (2)$$

式中: M_i 为材料清单质量, kg; EF_i 为材料碳排放因子, kgCO₂e/kg; E_j 为能源消耗量, MJ; CI_j 为能源碳强度, kgCO₂e/MJ; D_k 为废弃处理阶段排放量, kgCO₂e; R_l 为废弃处理阶段回收的减排量, kgCO₂e。

$$C = C_{CapEx} + \sum_{t=1}^T \left(\frac{C_{OpEx,t} + C_{Maint,t}}{(1+r)^t} \right) \quad (3)$$

式中: C_{CapEx} 为初始投资成本, 元; $C_{OpEx,t}$ 为第 t 年能源消耗成本, 元; $C_{Maint,t}$ 为第 t 年设备维护成本, 元; r 为实际贴现率; T 为设备寿命周期。

2 计算参数

本研究选取 5kW 制冷量的空调系统作为功能单元进行全生命周期评价。系统运行工况设定为夏季环境温度 31±1℃、供冷温度 15±0.5℃ 的典型工况条件。Lilley 和 Prasher^[10]指出离子热空调有潜力达到和超越传统蒸汽压缩式空调。为确保对比不带有偏见, 两种空调能效比统一设定为 3.5。表格 1 总结了两种空调的主要参数^[19,20]。离子热空调和蒸汽压缩式空调的制冷剂分别为碳酸乙烯酯 (EC) 和碘化钠 (NaI) 工质对以及 R32。2025 年至 2050 年电力价格的预测综合考虑了未来电源结构演变、发电成本、燃料价格变动及电网投资需求等关键因素^[21,22]; 同期电力碳排放因子的预测则基于国际能源署在承诺目标情景下的碳排放数据^[23]。具体数据如图 1 所示。

表 1 蒸汽压缩式和离子热空调的主要参数

Table 1 The main parameters of ionocaloric and vapor compression air conditioners

蒸汽压缩式和离子热空调	单位	数量	参考文献
制冷量	kW	5	—
能效比	—	3.5	—
年运行天数	天	120	—
每天运行时长	小时	8	—
平均负荷率	%	70	—
设备寿命	年	20	[24]
设备维护成本占初始投资	%	2	[14]
贴现率	%	3	[14]

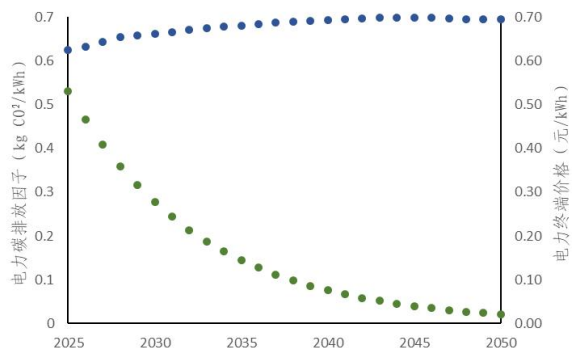


图 1 2025–2050 年中国电力碳排放因子和终端价格预测

Fig.1 Prediction of China's electricity carbon emission factors and terminal prices (2025-2050)

由于离子热空调的制冷剂 EC 的融化焓值为 204.6kJ/L^[10], 而蒸汽压缩式空调的制冷剂 R32 的蒸发焓值为 275.4kJ/L^[25], 单位体积制冷剂制冷量后者是前者的 1.35 倍。基于此, 在构建全生命周期分析模型时设定了以下关键假设: (1) 材料用量参数: 参照现有研究数据建立缩放模型, 确定离子热系统关键热交换组件 (包括换热器、循环风机、系统框架等) 以及辅助子系统 (管路、绝缘层、控制模块) 的总材料用量为传统系统的 140%。该系数源于: ①相变工质热导率差异导致的换热面积补偿; ②电渗析模块的附加结构需求; (2) 核心装置配置: 离子热驱动单元采用模块化电渗析堆栈, 由钛基电极组件、磺化聚醚醚酮离子交换膜组 (有效面积 2.2m²) 及循环泵组构成^[10]; (3) 成本估算方法: 鉴于离子热技术处于工程验证阶段, 其产业化成熟度差异导致电渗析模块 (约占总成本 43%) 暂按原型机制造成本核算。基于设备清单详表, 设定初始投资成本为传统系统^[26]的 150%。表格 2 和表格 3 分别列出了蒸汽压缩式和离子热空调的制造材料清单、估算的设备成本以及数据来源。

表 2 蒸汽压缩式空调制造材料清单

Table 2 The inventory of the vapor compression air conditioner production

蒸汽压缩式空调	材料	单位	数量	参考文献
压缩机	钢	kg	19.5	[12,27]
	低合金钢	kg	8.75	[12,27]
换热器和风机	铝	kg	4.25	[12,27]
	铜	kg	2	[12,27]
	高密度聚乙烯	kg	0.5	[12,27]

续表 2 蒸汽压缩式空调制造材料清单

Table 2 The inventory of the vapor compression air conditioner production

蒸汽压缩式空调	材料	单位	数量	参考文献
外壳和框架	ABS 塑料	kg	5	[12,27]
	钢	kg	6.5	[12,27]
管线和阀门	铜	kg	4.25	[12]
制冷剂	R32	kg	2.25	[27]
润滑油	聚醚酯油	kg	1.24	[27]
绝缘保温材料	聚氯乙烯	kg	0.3	[12]
	聚氨酯泡沫	kg	1.2	[12]
电子元件	混合材质	kg	0.2	Ecoinvent 3
制造能耗	电力	MJ	64	[27]
	天然气	MJ	160	[27]
设备成本		元	2500	[26]

表 3 离子热空调制造材料清单 (数据包含自行假设)

Table 3 The inventory of the ionocaloric air conditioner production (data including own assumption)

离子热空调	材料	单位	数量	参考文献
电渗析	钛	kg	0.6	[10]
	钢	kg	5.5	[10]
	磺化聚醚醚酮	kg	1.2	[10]
换热器和风机	低合金钢	kg	12.25	[12,27]
	铝	kg	5.95	[12,27]
	铜	kg	2.8	[12,27]
	高密度聚乙烯	kg	0.7	[12,27]
外壳和框架	ABS 塑料	kg	7	[12,27]
	钢	kg	9.1	[12,27]
管线和阀门	铜	kg	5.95	[12]
制冷剂	碳氯乙烯酯	kg	6.3	[10]
	碘化钠	kg	1.26	[10]
绝缘保温材料	聚氯乙烯	kg	0.42	[12]
	聚氨酯泡沫	kg	1.68	[12]
电子元件	混合材质	kg	0.28	Ecoinvent 3
制造能耗	电力	MJ	89.6	[27]
	天然气	MJ	224	[27]
设备成本		元	3750	[26]

在运行维护阶段和报废处置阶段,本研究基于以下量化假设进行分析:(1)传统蒸汽压缩式空调每年制冷剂泄露量为 6%^[27],而离子热空调在整个生命周期内需要更换一次离子交换膜组,这部分维护费用已包括在设备的维护成本中;(2)对金

属材料和制冷剂进行回收,其他材料按市政固废垃圾处理。其中钢、铜、铝和钛的回收率分别为 75%、61%、69%和 70%^[28],制冷剂的回收率为 50%^[27]。回收过程中所涉及的能耗及碳减排量参考 Ecoinvent 3 数据库进行分析计算。

3 全生命周期分析

蒸汽压缩式空调与离子热空调的全生命周期温室气体排放如图 2 所示。整个生命周期可分为三个主要阶段:生产制造、运行使用和废弃处理阶段。生产制造阶段的温室气体排放包括能源相关排放和材料相关排放;运行使用阶段则涵盖了电能消耗相关排放及耗材(如制冷剂泄露与膜材料更换)相关的排放;废弃处理阶段则包括处理相关的温室气体排放及回收过程中带来的温室气体减排。结果表明,离子热空调的温室气体排放量约为传统蒸汽压缩式空调的 62.0%。其中,消耗所导致的温室气体排放占比最大,分别占蒸汽压缩式空调和离子热空调整个生命周期温室气体排放的 58.3%和 94.0%。运行使用阶段的耗材所导致的温室气体排放分别占蒸汽压缩式空调(制冷剂泄露)和离子热空调(更换膜材料)整个生命周期温室气体排放的 27.7%和 0.4%。离子热空调相较于蒸汽压缩式空调总温室气体排放降低了 2518kgCO₂-eq。

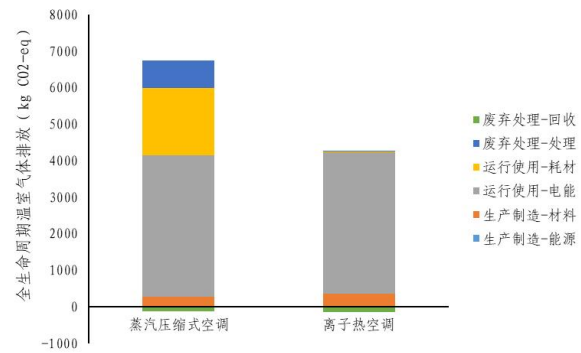


图 2 蒸汽压缩式和离子热空调的全生命周期温室气体排放
Fig.2 The life cycle GHG emissions of vapor compression and ionocaloric air conditioners

由于两者在电能消耗相关的温室气体排放相同,为了更直观地对比其他阶段的温室气体排放情况,图 3 展示了去除电能相关排放后的结果。在生产制造阶段,离子热空调的温室气体排放为传统空调的 132%。在运行使用阶段,耗材相关的温室气体排放,传统空调明显高于离子热空调,达到

1053%。在废弃处理阶段, 处理相关的碳排放, 传统空调也远高于离子热空调, 比例为 751%。这一差异主要是由于 R32 制冷剂的温室气体效应是 CO₂ 的 675 倍, 每年 6% 的泄漏以及处理过程中 50% 的泄漏导致了极高的温室气体排放。至于废弃处理回收阶段, 由于离子热空调的材料总量高于传统空调, 所以其回收带来的温室气体减排量也相应较高, 达到了传统空调的 127%。

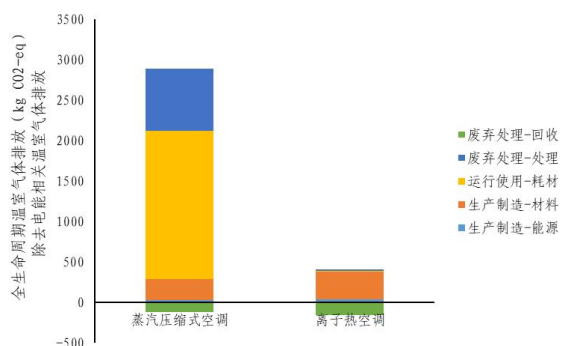


图 3 蒸汽压缩式和离子热空调的全生命周期温室气体排放-除去电能

Fig.3 The life cycle GHG emissions of vapor compression and ionocaloric air conditioners excluding electricity

制造过程中各部件的温室气体排放对比如图 4 所示。电渗析装置的温室气体排放略高于压缩机, 为 117%。在制冷剂相关温室气体排放方面, 离子热空调低于传统空调, 为 70.7%。然而, 由于离子热空调单位体积制冷剂的制冷量低于传统空调, 其他部件 (包括材料消耗和制造能耗) 的排放量均高于传统空调。最终, 离子热空调的制造相关温室气体排放为传统空调的 132%。

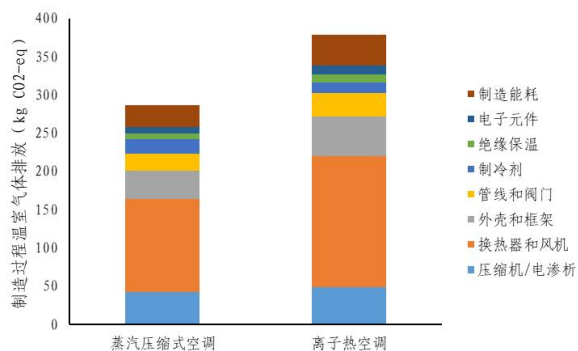


图 4 蒸汽压缩式和离子热空调的制造过程温室气体排放

Fig.4 The manufacturing GHG emissions of vapor compression and ionocaloric air conditioners

全生命周期成本的结果对比如图 5 所示。离子热空调的初始投资成本和维护成本为传统空调的

150%，而运行成本相同。综合全生命周期成本，离子热空调为传统空调的 104.4%。与传统空调相比，离子热空调的总成本增加了 1622 元，温室气体减排量为 2518kgCO₂-eq，温室气体减排成本为 0.64 元/kgCO₂-eq。

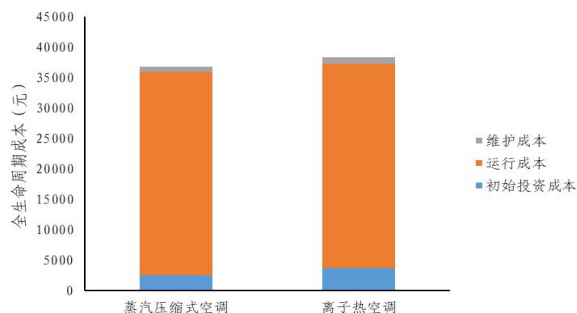


图 5 蒸汽压缩式和离子热空调的全生命周期成本

Fig.5 The life cycle cost of vapor compression and ionocaloric air conditioners

4 结论

本研究以传统蒸汽压缩式空调和新型离子热空调为研究对象, 采用全生命周期成本和全生命周期温室气体排放分析方法进行对比, 得出以下结论:

(1) 在制造阶段, 由于新型离子热空调制冷剂的单位体积制冷量低于传统空调, 导致各个部件需要更多材料制造, 因此新型离子热空调在制造阶段的温室气体排放高于传统空调, 达到了传统空调的 132%。

(2) 在运行使用和废弃处理阶段, 耗材相关的温室气体排放, 传统空调明显高于离子热空调, 达到 1053%。在废弃处理阶段, 处理相关的碳排放, 传统空调也远高于离子热空调, 比例为 751%。这一差异主要是由于 R32 制冷剂的温室气体效应是 CO₂ 的 675 倍, 而碳酸乙烯酯和碘化钠工质对是零温室气体效应的制冷剂。

(3) 与传统空调相比, 离子热空调的温室气体排放量约为传统蒸汽压缩式空调的 87.962%, 总成本增加了 1622 元, 但其温室气体减排量为 2518kgCO₂-eq, 温室气体减排成本为 0.64 元/kgCO₂-eq。

综上所述, 尽管离子热空调在制造阶段的成本和温室气体排放较传统蒸汽压缩式空调更高, 但由于其采用零温室气体效应的制冷剂, 在整个生命周期内, 离子热空调以较低的成本增加实现了显著的

温室气体减排。

参考文献:

- [1] Jiang J, Hu B, Wang R Z, et al. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022,161(November 2021):112106.
- [2] IEA. Buildings[EB/OL]. <https://www.iea.org/reports/buildings>, (2022)2023-05-31.
- [3] Tsinghua University, International Energy Agency. Building Energy Use in China Transforming Construction and Influencing Consumption to 2050[R]. Paris: IEA, 2015.
- [4] IEA. WORLD ENERGY BALANCES[EB/OL]. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>, (2022)2023-03-05.
- [5] Tsinghua University, International Energy Agency. The Future of Cooling in China Delivering on action plans for sustainable air conditioning[R]. Paris: IEA, 2019.
- [6] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.绿色高效制冷行动方案[R].北京:中华人民共和国国家发展和改革委员会,2019.
- [7] 中国制冷空调工业协会.制冷节能改造项目和技术调研报告[R].北京:能源基金会,2021.
- [8] 张朝晖,王若楠,刘慧成,等.绿色高效制冷空调产业发展分析与展望[J].*制冷与空调*,2020,20(1):1-6.
- [9] 张鑫,赵晓莉,杨晓伟.离子热循环:高效制冷技术的新突破[J].*科学通报*,2024(69):815-822.
- [10] Lilley D, Prasher R. Ionocaloric refrigeration cycle[J]. *Science*, 2022,378(6626):1344-1348.
- [11] Shah V P, DeBella D C, Ries R J. Life cycle assessment of residential heating and cooling systems in four regions in the United States[J]. *Energy and Buildings*, 2008,40(4):503-513.
- [12] Violante A C, Donato F, Guidi G, et al. Comparative life cycle assessment of the ground source heat pump vs air source heat pump[J]. *Renewable Energy*, 2022,188:1029-1037.
- [13] Monfared B, Furberg R, Palm B. Magnetic vs. vapor-compression household refrigerators: A preliminary comparative life cycle assessment[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014,42(June):69-76.
- [14] Du Y, Zhang J, Zhong W, et al. The potential of wastewater-source heat pump in decarbonising buildings sector of China[J]. *Environmental Technology*, 2024, 45(22):4467-4481.
- [15] Zhang J, Meerman H, Benders R, Faaij A. Techno-economic and life cycle greenhouse gas emissions assessment of liquefied natural gas supply chain in China[J]. *Energy*, 2021,224.
- [16] 彭小燕.ISO14040环境管理—生命周期评估—原则与框架[J].*世界标准化与质量管理*,1998,(4):4-9.
- [17] 刘忠文.ISO 14040 生命周期评价概述[J].*环境导报*,1998,(1):32-34.
- [18] Coelho Junior L M, de Lourdes da Costa Martins K, Carvalho M. Carbon footprint associated with firewood consumption in northeast Brazil: an analysis by the IPCC 2013 GWP 100y Criterion[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10(10): 2985-2993.
- [19] 国家能源局.国家能源局2023年一季度新闻发布会文字实录[EB/OL]. https://www.nea.gov.cn/2023-02/13/c_1310697149.htm,2025-02-24
- [20] 生态环境部,国家统计局,国家能源局.2023年全国电力碳足迹因子[R].北京:生态环境部, 2025.
- [21] 中国电力企业联合会.2024-2025年度全国电力供需形势分析预测报告[R].北京:中国电力企业联合会,2024.
- [22] 孙启星,张超,李成仁,等.“碳达峰、碳中和”目标下的电力系统成本及价格水平预测[J].*中国电力*,2023, 56(01):9-16.
- [23] IEA. World Energy Outlook 2024[R]. Paris: IEA, 2025.
- [24] 拓炳旭,王艳霞.西安某污水源热泵区域供能系统设计及节能环保分析[J].*制冷与空调*,2024,38(6): 870-875.
- [25] 邱琳祯,谷波,缪梦华.R32热力学性质计算模型及其分析[J].*化工学报*,2019,70(6):2075-2082.
- [26] 5kW空调价格-苏宁易购[EB/OL].<https://search.suning.com/1hpz95.html>, 2025-02-24.
- [27] Naumann G, Schropp E, Gaderer M. Life Cycle Assessment of an Air-Source Heat Pump and a Condensing Gas Boiler Using an Attributional and a Consequential Approach[C]. *Procedia CIRP*. Elsevier B.V,2022:351-356.
- [28] 中国物资再生协会.中国再生资源回收行业发展报告[R].北京:中国物资再生协会, 2024.