



城市生活垃圾焚烧发电碳减排效应及其影响因素

彭雪莲 蒋中莹 刘莉 兰青 宋明伟

Study on carbon reduction effects and influencing factors of municipal solid waste incineration power generation

PENG Xuelian, JIANG Zhongying, LIU Li, LAN Qing, SONG Mingwei

在线阅读 View online: <https://www.hjgcjsxb.org.cn/article/doi/10.12153/j.issn.1674-991X.20240787>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同管理阶段生活垃圾处理处置碳减排潜力研究

Carbon emission reduction potential of municipal solid waste treatment and disposal at different management stages: a case study of Xiamen City
环境工程技术学报. 2024, 14(4): 1206-1217. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20230866>

居民生活垃圾低值可回收物分类及处理处置的碳减排潜力研究

Research on carbon emission reduction potential of sorting, treatment and disposal of low-value recyclables from municipal solid waste
环境工程技术学报. 2025, 15(4): 1151-1160. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20240693>

天津市生活垃圾处理碳排放时间变化特征及影响因素

Temporal variation characteristics and influencing factors of carbon emissions from municipal solid waste treatment in Tianjin
环境工程技术学报. 2022, 12(3): 834-842. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210334>

北京市城市生活垃圾处理温室气体排放特征及减排策略

Greenhouse gas emission characteristics and emission reduction strategies of municipal solid waste treatment in Beijing
环境工程技术学报. 2022, 12(4): 1041-1047. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210820>

我国减污降碳协同效应的时空特征与策略

Spatiotemporal characteristics and strategies of synergistic effect of pollution and carbon reduction in China
环境工程技术学报. 2025, 15(2): 465-473. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20250051>

基于全生命周期的生物滞留设施碳排放核算及碳减排策略

Carbon emission accounting and carbon emission reduction strategy of bioretention facilities based on life cycle assessment
环境工程技术学报. 2025, 15(4): 1119-1126. <https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20250162>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

彭雪莲, 蒋中莹, 刘莉, 等. 城市生活垃圾焚烧发电碳减排效应及其影响因素 [J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(5): 1494-1501.

PENG X L, JIANG Z Y, LIU L, et al. Study on carbon reduction effects and influencing factors of municipal solid waste incineration power generation [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(5): 1494-1501.

城市生活垃圾焚烧发电碳减排效应及其影响因素

彭雪莲², 蒋中莹³, 刘莉^{1*}, 兰青¹, 宋明伟¹

1. 重庆大学资源与安全学院

2. 重庆大学环境与生态学院

3. 重庆长江行远绿色低碳科技创新研究院

摘要 焚烧已经成为我国城市生活垃圾主要处理方式, 厘清城市生活垃圾焚烧碳排放核算体系并揭示其影响因素, 对于推动生活垃圾焚烧处理低碳化转型具有重要意义。以重庆市某垃圾焚烧发电厂为研究对象, 基于清洁发展机制方法与改进的生命周期评价方法, 构建垃圾焚烧发电全生命周期碳减排核算体系, 评估垃圾焚烧各环节(含飞灰与炉渣资源化利用)碳排放量及减排量, 并通过 LMDI 因素分解与敏感性分析法识别主要影响因素, 比较不同城市与核算方法碳减排差异, 提出垃圾焚烧碳减排提升建议。结果表明: 基准线单位垃圾碳排放量为 0.575 t/t, 焚烧发电单位垃圾碳排放量为 0.262 t/t, 碳排放主要集中在垃圾焚烧阶段, 排放量为 0.250 t/t, 排放占比超过 95%; 与无填埋气回收的填埋方式相比, 该厂年均实现碳减排 28.400 万 t, 单位垃圾减排量为 0.313 t/t; 各因素对垃圾焚烧发电减排影响排序为垃圾处理量(1.000%)>化石碳比例(0.441%)>含水率(0.440%)>焚烧炉燃烧率(0.022%)。研究结果为城市生活垃圾低碳化管理政策提供实践参考和科学支撑。

关键词 垃圾焚烧发电; 碳减排; 清洁发展机制(CDM); LCA; 影响因素

中图分类号: X705 文章编号: 1674-991X(2025)05-1494-08 doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20240787

Study on carbon reduction effects and influencing factors of municipal solid waste incineration power generation

PENG Xuelian², JIANG Zhongying³, LIU Li^{1*}, LAN Qing¹, SONG Mingwei¹

1. School of Resources and Safety Engineering, Chongqing University

2. College of Environment and Ecology, Chongqing University

3. Chongqing Yangtze River Xingyuan Green and Low-Carbon Technology Innovation Research Institute

Abstract Incineration has become the main treatment method for municipal solid waste (MSW) in China. Clarifying the carbon emission accounting system for MSW incineration and identifying its influencing factors are crucial for promoting the low-carbon transformation of MSW incineration treatment. Taking a waste incineration power plant in Chongqing as the case study, we first developed a full life-cycle carbon emission reduction accounting system based on CDM methodology and an improved LCA approach. Subsequently, we assessed carbon emissions and reductions across various stages (including fly ash and slag utilization), identified key influencing factors using LMDI decomposition and sensitivity analysis, and compared carbon reduction differences among cities and methods. Finally, we proposed some suggestions for improving carbon emissions reduction from waste incineration. Results showed that the baseline unit emission was 0.575 t/t, while the unit emission from incineration power generation was 0.262 t/t, with over 95% concentrated in the incineration stage (0.250 t/t). The plant achieved an average annual carbon reduction of 284 000 t annually, with a unit reduction of 0.313 t/t compared to landfilling without landfill gas recovery. The ranking of the impact of various factors on the emission reduction of waste incineration power generation was as follows: waste treatment volume (1.000%) > fossil carbon ratio (0.441%) > moisture content (0.440%) > incinerator combustion efficiency (0.022%). This study offers practical reference and scientific support for low-carbon waste management policies targeting MSW.

收稿日期: 2024-12-03

基金项目: 重庆市生态环境局科技项目(CQS23C00479)

作者简介: 彭雪莲(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为固体废物资源化、碳减排, pxl1830@163.com

* 通信作者: 刘莉(1971—), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为固体废物处理、资源化利用及碳评价, zhiuli@cqu.edu.cn

Key words waste incineration power generation; carbon emission reduction; clean development mechanism (CDM); LCA; influencing factor

随着全球气候变暖加剧,人类经济、社会环境发展面临严峻挑战。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)报告显示,中国全年废物处理温室气体排放总量达 20 000 万 t^[1],且逐年上升,引起政府和学者关注。中国城市生活垃圾产量较大,据《中国统计年鉴》,2022 年全国垃圾清运总量为 24 444.7 万 t,2023 年大、中城市生活垃圾产生量为 28 262.5 万 t^[2]。结合中国科学院发展战略研究院(CASISD)开发的 PIC 模型等方法开展预测,随着城市经济水平的提升,预计到 2050 年,我国城市生活垃圾产生量将近 34 000 万 t^[3]。《2021 年重庆市固体废物污染环境防治信息》显示,重庆 2021 年生活垃圾总处理量为 907 万 t。作为人口基数最大的直辖市和“无废城市”建设试点地区,其生活垃圾处理数据既是衡量自身城市环境治理能力的重要指标,也为全国同类城市探索垃圾治理路径提供了实践参考。

我国城市生活垃圾处理主要依靠焚烧和填埋,其无害化处理方式占比 95% 以上,其中焚烧因占地小、减容效果好,在“十四五”期间被积极推广,其处理量在全国城市生活垃圾无害化处理总量中的占比已超 70%。2020 年我国垃圾处理产生的温室气体排放总量达 7 210 万 t^[4],减少城市生活垃圾处理碳排放量成为我国温室气体减排的重要方面^[5-7]。《“十四五”无废城市建设工作方案》强调固体废物全生命周期管理,推动生活垃圾循环利用。《重庆“十四五”循环经济规划》提出通过垃圾分类和焚烧发电促进碳减排。

目前,国内外学者主要集中于对垃圾填埋处理与垃圾焚烧发电技术的碳减排效果的研究,常用的垃圾处理利用技术碳减排量测算方法有生命周期评价(LCA)法、清洁发展机制(CDM)方法学和上游-操作-下游表格法(UOD)。LCA 法可对垃圾处理系统碳排放进行全面检测分析,减排量计算结果更为准确,但由于该法在我国起步较晚,目前仍未建立完整的碳排放因子数据库,故仅采用该法仍存在一定缺陷^[8-9]。CDM 方法在垃圾处理项目中提供了标准化的减排核算框架,其中包括各类碳排放的缺省值,便于计算。但其只适用于详细项目,实施复杂、成本较高,且基准线情景和额外性证明难度较大,在全生命周期过程中存在遗漏。UOD 表格法是一种用于比较不同数据来源结构差异的碳排放分析方法,常用于垃圾处理领域,评估各排放源的温室气体减排贡

献。其基本框架包括上游、操作和下游 3 个部分,能计算垃圾处理全过程的碳排放量,但各环节划分和核算较为复杂,且相关研究较少,对垃圾处理各阶段的准确划分存在困难。因此,本文将 LCA 法与 CDM 方法学相结合,改进生活垃圾填埋及焚烧处理全生命周期碳减排计算方法,以重庆市为例,分析城市生活垃圾焚烧处理利用方式全生命周期碳排放量,评估生活垃圾处理利用减排潜力,开展垃圾处理利用全生命周期碳排放影响因素分析,以期在城市生活垃圾的低碳化管理提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

本研究的垃圾焚烧发电厂位于重庆市巴南区丰盛镇,2012 年 6 月投产,日处理生活垃圾 2 400 t,占主城区总量的 1/3,是目前西南地区建设规模较大的现代化垃圾焚烧发电项目,年处理规模达到 87.6 万 t。该焚烧厂配置 4 台处理能力为 600 t/d 的炉排焚烧炉,具备垃圾进料、输送、推料及辅助燃烧等环节,同时配置垃圾预处理系统,包括垃圾卸料大厅、储坑和起重机等设备。垃圾焚烧产生的炉渣通过湿式除灰系统输送,飞灰固化后进行密闭处理,整个工艺实现垃圾高效焚烧、余热回收与污染物减排。烟气净化采用半干法处理工艺,配有喷雾吸附器、袋式除尘器、活性炭喷射及消石灰喷射设备,并通过 80 m 高的烟囱排放处理后的废气。发电系统配备 4 台余热锅炉[每台 58.39 t/h(以蒸汽量计)]和 3 台总发电能力为 48 MW 的汽轮发电机组(2 台 18 MW 和 1 台 12 MW),年上网电量超过 2.3 亿 kW·h,可满足约 20 万户居民 1 年的用电需求,充分实现资源全回收利用。

1.2 核算方法

垃圾处理利用技术碳减排量测算方法均存在优势与局限,综合考虑各方法的适用性、可行性及数据可获取性,结合 CDM 方法学对 LCA 法进行改进。在初金凤^[10]研究的基础上,综合 2 种方法的优点,既克服了原 LCA 法数据难获取的缺点,又解决了 CDM 方法学只计算了垃圾处理本身的排放,未覆盖全生命周期中关键环节的问题,有助于更全面地分析碳减排。

1.2.1 系统边界的确定

借助 ACM0022“可选择的垃圾处理工艺”CDM

方法学, 确定垃圾焚烧发电系统边界, 具体核算边界如图 1 所示。

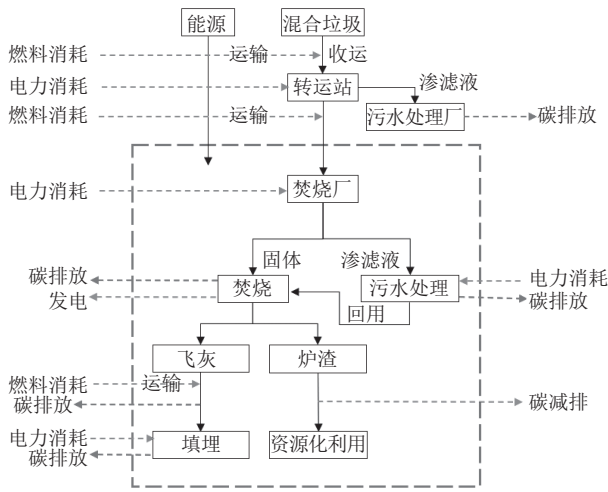


图 1 垃圾焚烧发电全生命周期系统边界

Fig.1 System boundaries of the full lifecycle of waste incineration power generation

1.2.2 基准线情景碳排放量

将基准线情景设定为生活垃圾填埋, 此情景碳排放量包含: 若不开展当前垃圾处理项目(如焚烧发电), 原本该项目处理的垃圾改作填埋时, 填埋场产生的 CH₄ 排放及填埋场耗电对应的电网碳排放。具体计算公式如下:

$$BE_y = BE_{CH_4} \times DF + BE_{EC} \quad (1)$$

$$BE_{CH_4} = \eta \times BE_{CH_4, SWDS, y} - (1 - OX) \times F_{CH_4, BL, y} \times GWP \quad (2)$$

$$BE_{CH_4, SWDS, y} = \varphi_y \times (1 - f_y) \times GWP \times (1 - OX) \times \frac{16}{12} \times F \times$$

$$DOC_{f, y} \times MCF_y \times \sum_{x=1}^y \sum_j [w_{j, x} \times DOC_j \times e^{-k_j(y-x)} \times (1 - e^{-k_j})] \quad (3)$$

$$BE_{EC, y} = EC_{BL, k, y} \times EF_{g, CM, y} \times (1 + TDL_{k, y}) \quad (4)$$

式中: BE_y 为基准线情景碳排放量, t; BE_{CH₄} 为垃圾填埋 CH₄ 基准线排放量, t; DF 为折减因子, 当禁止垃圾填埋时取 0, 未禁止垃圾填埋时取 1; BE_{EC} 为供电基准线排放量, t; η 为项目活动填埋气收集系统效率, 大中型垃圾填埋场取 0.8; OX 为氧化因子, 厌氧型取 0; F_{CH₄, BL, y} 为国家、地方性法规要求销毁的 CH₄ 排放量, t, 参考 EB 的 ACM0001 方法学; GWP 为 CH₄ 的全球变暖趋势, 依据《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》, 取值 25; φ_y 为模型修正因子, 取 1; f_y 为捕获的 CH₄ 比例, 排放基准线取值 0; 16/12 为垃圾中可降解有机碳的 CH₄ 转化因子, t/t; F 为填埋气中 CH₄ 的比例; DOC_{f, y} 为分解的可降解有机碳占比, 依据《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》取值 0.5; MCF_y 为沉积需氧分解

的 CH₄ 校正系数, 取 1; x 为废物处理年份; y 为 CH₄ 排放计入年份; j 为废物种类; k_j 为废物降解速率, %; w_{j, x} 为 x 年处理的第 j 类固体废物量, t; DOC_j 为第 j 类废物中可降解有机碳的比例, 推荐最小值为 5%, 最大值为 10%; EC_{BL, k, y} 为 y 年输入到电网或者取代化石燃料用于发电/热电联产自备电厂的电量, MW·h; EF_{g, CM, y} 为 y 年项目替代电量的排放因子, t/(MW·h), 选取华中区域 EF_{OM}(项目运营)与 EF_{BM}(项目基准)2 种排放因子的综合值 0.572 05 t/(MW·h); TDL_{k, y} 为 y 年项目平均电力损失, 与发电相关基准线损取 3%。

1.2.3 全生命周期碳减排测算

生活垃圾焚烧发电的全生命周期碳排放可以分为 3 个主要阶段: 生产运输阶段、垃圾焚烧阶段和二次废物处理阶段。

在生产运输阶段, 主要包括辅料生产使用和化石燃料运输消耗。辅料生产主要是指垃圾焚烧过程中烟气净化系统所需的辅助材料(如石灰、氨水、活性炭等), 其碳排放量(PE_{辅料})可通过以下公式计算:

$$PE_{\text{辅料}} = \sum_{j=1}^n (AD_j \times EF_j) \quad (5)$$

式中: AD_j 为 j 类辅料消耗量, t; EF_j 为 j 类辅料平均碳排放因子, kg/kg。表 1 列举了部分辅料生产使用的碳排放系数。

表 1 物耗碳排放系数

Table 1 Carbon emission coefficient of material consumption kg/kg

辅料名称	碳排放系数
石灰	0.940 0 ^[11]
熟石灰	0.747 0 ^[12]
氨水	0.210 0 ^[13]
活性炭	1.377 0 ^[14]
聚丙烯酰胺	1.500 0(经验值)
聚氯化铝	0.022 7 ^[15]
硫酸、盐酸	1.400 0 ^[16]
液碱	0.415 0(经验值)

化石燃料运输消耗指的是运输过程中所消耗的化石燃料, 其排放量(PE_{化石燃料})计算公式为:

$$PE_{\text{化石燃料}} = \sum_{i=1}^n (AD_i \times EF_i) \quad (6)$$

式中: AD_i 为 i 类化石燃料活动水平, GJ; i 为消耗化石燃料的种类, 如煤粉、柴油、重油等, 本研究生活垃圾焚烧发电过程中消耗化石燃料为柴油; EF_i 为 i 类化石燃料平均碳排放因子, t/GJ。

垃圾焚烧阶段包括垃圾焚烧化石碳排放和电力/热力消耗排放。垃圾焚烧过程中化石碳的排放量($PE_{\text{焚烧}}$)计算公式为:

$$PE_{\text{焚烧}} = \text{EFF}_{i,y} \times \text{FCC}_{i,y} \times \frac{44}{12} \times \sum_i Q_{i,c,t} \times \text{FCC}_{i,y} \quad (7)$$

式中: $Q_{i,c,t}$ 为 t 年 i 类生活垃圾焚烧的质量, 以湿重计, t ; $\text{EFF}_{i,y}$ 为垃圾燃烧率, %, 根据《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》, 垃圾燃烧效率取 100%; $\text{FCC}_{i,y}$ 为 i 类生活垃圾组分 LCA 湿基化石碳比例, %; $\text{FCC}_{i,y}$ 为 i 类生活垃圾组分含碳量, %。

对于电力或热力消耗产生的间接碳排放, 本文仅针对生活垃圾焚烧用于发电项目, 故不考虑热力消耗。若发电厂运行自用电均来自垃圾焚烧自身发电量, 则此处电力消耗产生的排放量为 0; 若项目存在外购电, 则购入电力产生的碳排放量($PE_{\text{电力}}$)计算方法如下:

$$PE_{\text{电力}} = EC_t \times \text{EF}_{\text{CM},t} \times (1 + \text{TDL}_{j,t}) \quad (8)$$

式中: EC_t 为 t 年消耗的电量, $\text{MW} \cdot \text{h}$; $\text{EF}_{\text{CM},t}$ 为 t 年电网对应的排放因子, $t(\text{MW} \cdot \text{h})$; $\text{TDL}_{j,t}$ 为 t 年供电输电配线平均损失; j 为电力来源。

在二次废物处理阶段, 飞灰和炉渣的处理利用会产生碳排放($PE_{\text{废物处理}}$)。采用文献^[17]推荐的碳排放因子法计算碳排放量, 飞灰运输处理碳排放系数为 0.051 kg/kg, 炉渣资源化利用碳排放系数为 0.022 kg/kg。

为了评估项目的碳减排效果, 需计算项目活动全生命周期的碳排放量, 并与基准线排放量进行对比, 全生命周期碳减排计算公式如下:

$$ER_y = BE_y - PE_y \quad (9)$$

$$PE_y = PE_{\text{生产运输}} + PE_{\text{焚烧}} + PE_{\text{废物处理}} \quad (10)$$

式中: ER_y 为 y 年垃圾焚烧发电碳减排量, t ; BE_y 为 y 年基准线排放量, t ; PE_y 为 y 年的项目活动全生命周期碳排放总量, t 。

1.2.4 社会经济因素分析

以 Kaya 恒等式为基本框架, 构建 LMDI 分解模型, 采用加法形式开展 2018—2023 年焚烧发电项目碳排放量影响因素分析, 以识别引起实际碳排放变化的关键驱动因素及作用机理。

结合《中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报》, 将生活垃圾不同处理利用方式产生的碳排放分解为以下因素: 能源消费结构、能源消费强度、技术水平以及人口密度^[18-19]。能源消费结构通过各能源(折算成标煤)占总能耗的比例表征。能源消费强度以单位国民生产总值的能源消耗量表示。技术水平用劳动生产率衡量, 而人口密度则反映地区常

住人口的集中程度。

基期到报告期碳排放变化总量表达式如下:

$$\Delta C = C^T - C^0 = \Delta C_{\text{CE}} + \Delta C_{\text{GE}} + \Delta C_{\text{TP}} + \Delta C_{\text{P}} \quad (11)$$

式中: C^T 、 C^0 分别为报告期和基期的碳排放量, t ; ΔC_{CE} 、 ΔC_{GE} 、 ΔC_{TP} 、 ΔC_{P} 分别为能源消费结构、消费强度、技术水平和人口密度 4 个因素引起的碳排放变化量, t 。

通过计算绝对贡献度来横向对比各因素对碳排放变化量的影响情况, 计算公式如下:

$$\text{ACD}_i = \frac{C_i}{\Delta E} \quad (12)$$

式中: ACD_i 为因素 i 总碳排放增量的绝对贡献程度, %; C_i 为因素 i 对碳排放增量的具体贡献量, 即该因素所引起的碳排放变化量, t ; ΔE 为总碳排放的变化量, 是所有因素共同作用下所导致的碳排放增量, t 。

2 研究结果

2.1 全生命周期碳减排计算结果

2.1.1 全生命周期项目活动排放量

在垃圾焚烧发电的全生命周期中, 碳排放量主要集中在几个阶段。

在生产运输阶段, 辅料的消耗产生了碳排放^[20], 综合表 1 列举的碳排放系数, 计算得到 2018—2022 年辅料消耗产生的碳排放总量分别为 7 934、7 528、7 252、7 311、5 885 t 。

垃圾焚烧发电所需的辅料运输过程中, 化石燃料主要以柴油为主, 其低位发热量取 43.33 GJ/t 或 GJ/(万 m^3), 单位热值含碳量取 0.020 t/GJ , 碳氧化率取 98%。根据式(6), 计算得到 2018—2022 年各年度化石燃料燃烧碳排放量分别为 2 054、1 513、1 322、1 266、686 t 。

在垃圾焚烧阶段, 焚烧炉燃烧过程中会产生大量的化石碳排放, 结合该焚烧发电厂 2018—2022 年入厂生活垃圾实际情况, 垃圾含水率取 50%, 参考式(7), 2018—2022 年垃圾焚烧直接碳排放量分别为 234 080、235 394、227 928、219 192、218 314 t 。

对于外购电的电力消耗排放, 根据项目上网电量和外购电基本情况, 计算得出 2018—2022 年外购电的碳排放量分别为 223、198、453、390、327 t 。

在飞灰和炉渣的处理阶段, 资源化利用过程中也会产生间接碳排放。詹咏等^[21]发现, 垃圾焚烧过程中飞灰产出比约为入炉垃圾的 2%, 炉渣产出比约 10%。结合厂内实际入炉生活垃圾量, 计算得到 2018—2022 年飞灰、炉渣处理碳排放总量分别为 2 504、2 518、2 438、2 344、2 335 t 。

根据垃圾焚烧发电各阶段碳排放量计算结果,垃圾焚烧发电的碳排放主要集中在焚烧发电阶段,占比为 95%,其中焚烧炉是主要来源,其次是生产运输阶段,如图 2 所示,各阶段碳排放量的占比直观地反映了这一分布趋势。由于重庆市生活垃圾组分中,橡塑、纺织品等化石碳含量高,促进了温室气体排放,今后应重点控制燃烧排放、提高垃圾分类效率、降低化石碳比例[垃圾中化石燃料(如塑料、橡胶等)所含碳的占比]。

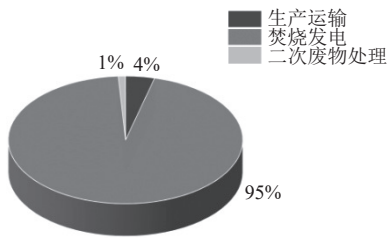


图 2 垃圾焚烧各阶段碳排放量占比

Fig.2 Proportion of carbon emissions at different stages of waste incineration

2.1.2 减排结果分析

垃圾焚烧发电减排量=基准线排放量-垃圾焚烧发电全生命周期碳排放量,从图 3 可以看出,基准线排放量较多,且以年均 42.8% 的增长率逐年上升,增长速率快,这是由于重庆市生活垃圾入厂数量大、厨余垃圾占比大、可降解组分含量高。

总体上,2018—2022 年垃圾焚烧减排量逐年上升,基准线排放量始终高于垃圾焚烧碳排放量,减排潜力显著,每吨垃圾减排潜力达 0.313 t。根据不同地区获得中国核证自愿减排量(CCER)认证的减排项目数据,每吨垃圾碳减排量范围为 0.1~0.5 t^[22-25],本研究结果处于该区间内。差异可能源于各地区垃

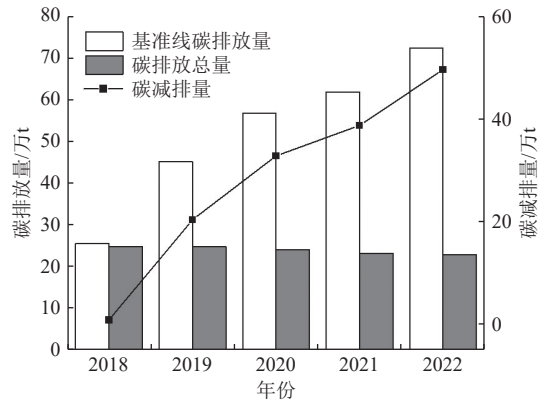


图 3 2018—2022 年垃圾焚烧碳排放量及减排量变化趋势

Fig.3 Trend of carbon emissions and reduction changes from 2018 to 2022

圾组分、热值及焚烧炉参数不同。

2.2 垃圾焚烧发电碳排放影响因素分析

通过对垃圾焚烧发电工艺流程的了解及全生命周期碳减排路径分析,结合已有文献^[26-27],影响碳排放的主要因素为社会经济因素、垃圾处理量、垃圾特性(含水率、可回收组分)、垃圾焚烧率。采用 LMDI 因素分解法及敏感性分析法对以上各因素进行分析,以探究其对垃圾焚烧发电碳排放及减排影响程度。

2.2.1 社会经济因素

逐年分解各因素对垃圾焚烧发电碳排放的影响,具体取值见表 2。可以看出,垃圾焚烧发电碳排放变化整体呈下降趋势,增量从 2018—2019 年的 158 011.87 t 下降至 2021—2022 年 16 609.13 t,低于研究期碳排放增长量平均值。

考虑整个分析期内的碳排放量变化,绘制垃圾焚烧发电各影响因素的全期贡献值和绝对贡献度,如图 4 所示。

表 2 垃圾焚烧发电全生命周期碳排放影响因素贡献

Table 2 Contribution of influencing factors to carbon emissions throughout the full life-cycle of waste-to-energy incineration

年份	能源消费结构	能源消费强度	劳动生产率	人口密度	总变化
2018—2019	14 182.13	-14 414.98	119 573.80	38 670.93	158 011.87
2019—2020	-4 611.15	-32 915.03	20 184.92	1 098.17	-16 243.09
2020—2021	-33 562.86	-36 160.47	-8 069.85	1 974.62	-75 818.57
2021—2022	-6 169.70	-11 404.50	12 105.48	22 077.85	16 609.13
2018—2022	-31 132.90	-94 200.19	138 821.19	63 029.06	76 517.15

影响生活垃圾处理利用方式碳排放的各经济因素中,劳动生产率、人口密度为正向驱动因素,能源消费强度、能源消费结构为负向抑制因素。其中,能源消费强度是关键抑制因素,全期绝对贡献度为

-123.11%,劳动生产率为主要的正向驱动因素,绝对贡献度为 181.42%。

2.2.2 垃圾处理量

以 2022 年为基准年,计算生活垃圾处理量减少

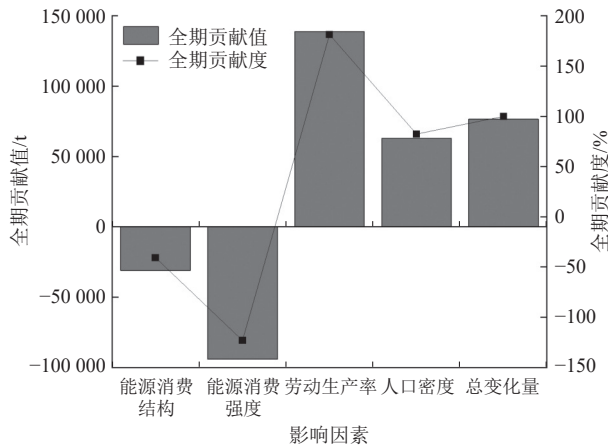


图4 各影响因素全期贡献值和绝对贡献度

Fig.4 Full-period contribution values and absolute contribution of each influencing factor

或增加 10%、20% 时对碳排放及减排的影响。根据全生命周期碳减排法,垃圾焚烧发电的碳排放与减排量均受垃圾处理量变化的正向影响,且二者变化程度与垃圾处理量变化相同,均为 1.000%。

2.2.3 垃圾特性

我国城市生活垃圾含水率 40%~60%^[28],其高低决定热值。以重庆市垃圾含水率 50% 为基准,含水率每变化 1%,碳排放增加 0.960%,减排量降低 0.440%。我国城市生活垃圾中厨余垃圾组分占比较大,导致含水率高,降低含水率可提高热值,有助于垃圾充分燃烧^[29]。何晶晶等^[30]认为,降低垃圾中的含水率,提高发电产能,对于实现生活垃圾焚烧发电温室气体排放源向汇的转换具有重要意义。

基于 2022 年,分别计算垃圾焚烧发电中生活垃圾化石碳比例减少或增加 10%、20% 对碳排放及减排的影响。化石碳比例每变化 1%,碳排放量变化 0.959%,减排量变化-0.441%。因此,减少垃圾组分中有机废料的产生,降低垃圾处理利用过程中化石碳成分比例,可有效减少碳排放量,提升碳减排潜力^[29]。

2.2.4 垃圾焚烧炉燃烧效率

为反映焚烧炉燃烧效率对垃圾焚烧发电碳排放及减排的影响,结合《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》推荐的燃烧效率值,分析基准年焚烧炉燃烧效率减 1%~5% 的情况。燃烧效率每变化 1%,碳排放量变化幅度为 0.950%,减排量变化为 0.022%。增大焚烧炉的焚烧容量一方面可以提升焚烧热效率,减小热损失,另一方面有助于提高垃圾的发电量,以提高减排潜力。

综上,垃圾处理量、垃圾焚烧炉的燃烧效率对垃圾焚烧发电的减排量具有正向促进作用,垃圾特性(含水率、化石碳比例)对减排量具有抑制作用。各

因素对垃圾焚烧发电减排影响排序为垃圾处理量(1.000%)>化石碳比例(0.441%)>含水率(0.440%)>焚烧炉燃烧率(0.022%)。

2.3 碳减排提升建议

2.3.1 强化垃圾分类准确度

垃圾处理量直接影响碳减排,但高含水率会降低其效果。我国厨余垃圾占比高且含水率高,分类不当增加了筛选成本,垃圾焚烧技术推广较晚。垃圾分类能降低含水率、提高热值,从而提升填埋气和焚烧发电的产能与减排潜力。重庆市在 2019 年实施了垃圾分类管理办法,但部分区县仍使用混合收集模式,分类效果差,2020 年实际回收率仅为 20%,远低于 50% 的理论值^[31]。提高可回收垃圾的分类比例有助于减少垃圾焚烧中的碳排放。

2.3.2 优选垃圾处理利用方式

随着经济发展,国家越来越注重环境效益。在“十四五”期间,推进垃圾焚烧技术,倡导“全焚烧,零填埋”。尽管垃圾焚烧初期投资较高,经济效益不如填埋,但其占地少、减容效果好、减排潜力大。焚烧发电碳减排潜力为 0.313 t/t,适用于大中城市。因此,未来应大力发展垃圾焚烧发电项目,关闭满库容量的垃圾填埋场,除了应急填埋场和部分扩容填埋场外,不再建设新的填埋场。

2.3.3 优选垃圾处理利用方式

垃圾焚烧发电的碳排放主要来源于焚烧过程,其占比超过 95%,其中化石碳比例决定了减排效果,对减排潜力具有负向抑制作用。为减少焚烧发电的碳排放,应降低垃圾中的化石碳比例和化石燃料的使用。通过采用先进的焚烧技术,提升炉排炉处理能力、热利用率和发电效率,达到低碳排放和高发电量的目标。欧洲已使用组合式高效垃圾发电工艺(WTE-GT)和再热循环技术,发电效率为 27%~44%,远超传统焚烧发电厂的 22%~25%^[32]。我国应推广此技术,实现经济与减排双赢。

2.4 案例差异对比

LCA 法与 CDM 方法学相结合的垃圾焚烧发电碳减排量的计算方法为基准线碳排放量减去项目活动全生命周期碳排放总量。本文案例焚烧发电厂年均焚烧处理 90.88 万 t 垃圾以及处理 9.05 万 t 飞灰与炉渣,相对于填埋碳减排量为 28.4 万 t,单位垃圾碳减排量为 0.313 t/t。本案例研究结果与其他案例存在差异(表 3),主要从以下 2 个方面进行对比。

一是城市间垃圾特性与处理条件的差异。桑春晖等^[37]对北京市某大型生活垃圾焚烧发电项目单位垃圾碳排放量核算的研究结果为 0.457 t/t,基准线单

表 3 不同核算方法与案例垃圾焚烧单位垃圾碳减排量对比

Table 3 Comparison of various accounting methods and carbon emission reduction per unit of waste in the case study

核算方法学	单位碳减排量/(t/t)	数据来源
LCA+CDM方法学	0.313	本研究
LCA方法学	0.062~0.230	文献[33]
CDM方法学	0.290	文献[34]
CDM方法学	0.160~0.220	文献[35]
CCER方法学	0.240	文献[36]

位垃圾碳排放量为 1.041 t/t, 单位垃圾碳减排量为 0.581 t/t, 减排结果略高于本研究结果。存在差异原因主要为: 1) 本文案例垃圾处理规模低于该案例, 高发电量提高了基准线排放量, 从而产生高碳减排量; 2) 北京市某大型生活垃圾焚烧发电项目垃圾热值高, 在焚烧过程中碳排放量更多, 对应着更高的基准线排放量和较高的碳减排量; 3) 基础数据来源于项目建设报告, 缺失数据根据国内已有研究经验概算, 园区项目核算的碳减排量存在一定误差。

二是碳排放核算方法学的差异。本案例研究结果与杨卫华等^[34]利用 CDM 方法所得结果相差不大。与陈纪宏等^[33]利用生命周期评价方法和孙雨清等^[35]及黄静颖等^[36]的研究案例结果相比, 本研究所得单位碳减排量略高。这主要归因于以下几方面: 1) 已有案例研究的时间较早, 当时的焚烧工艺相对落后, 如焚烧锅炉的燃烧效率低, 导致垃圾焚烧过程中的碳排放量较高, 进而影响了实际减排效果。2) 各地区垃圾成分构成存在显著差异, 垃圾热值及所采用的焚烧炉参数类型在不同地区间不尽相同, 这进一步导致了碳排放的差异。从电力市场的视角来看, 我国目前约 41% 的碳排放源于电力行业(主要为火力发电)。在此背景下, 非化石能源发电项目的推广与发展, 对实现“双碳”目标具有深远意义, 这不仅是减少碳排放的关键环节, 也是推动清洁能源转型的核心措施^[38]。

3 结论

(1) 基于 CDM 方法学和改进的 LCA 法, 构建了一种生活垃圾焚烧发电减排测算模型, 从基准线排放量、项目活动全生命周期碳排放总量 2 个方面, 综合分析了生活垃圾焚烧发电全生命周期减排效益, 年均减排量达 28.4 万 t, 吨垃圾减排潜力为 0.313 t/t, 其中, 垃圾焚烧阶段为主要碳排放源, 排放占比超过总量的 95%, 控制燃烧产生的直接排放应成为垃圾焚烧发电碳减排工作重点。

(2) 采用 LMDI 因素分解法和敏感性分析法探究了影响垃圾焚烧发电碳排放的主要因素, 劳动生产率是促进碳排放的关键因素, 而能源消费强度为关键抑制因素。垃圾处理量、焚烧炉燃烧率对垃圾焚烧发电减排具有正向促进作用, 垃圾特性(含水率、化石碳比例)对减排具有抑制作用。各因素对垃圾焚烧发电减排潜力影响排序为垃圾处理量>化石碳比例>含水率>燃烧率。

(3) 基于以上研究结果, 针对性提出强化垃圾分类准确度、优选垃圾处理利用方式、降低焚烧发电化石碳比例与改进工艺提高发电效率 3 种垃圾焚烧碳减排潜力提升策略。

参考文献

- [1] 中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告 [R/OL]. (2023-12-29)[2024-04-05]. <https://www.mee.gov.cn/ywtd/hjyw/news/202312/W020231229717236049262.pdf>.
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.
- [3] SHAPIRO-BENGTSEN S, ANDERSEN M F, MÜNSTER M, et al. Municipal solid waste available to the Chinese energy sector: provincial projections to 2050[J]. *Waste Management*, 2020, 112: 52-65.
- [4] 张听雪, 高淑丹, 滕晓, 等. 我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜能分析 [J]. *环境科学*, 2023, 44(11): 5946-5953.
ZHANG T X, GAO S D, TENG X, et al. Spatio-temporal change in city-level greenhouse gas emissions from municipal solid waste sector in China during the last decade and its potential mitigation[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(11): 5946-5953.
- [5] CHEN S S, HUANG J L, XIAO T T, et al. Carbon emissions under different domestic waste treatment modes induced by garbage classification: case study in pilot communities in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 717: 137193.
- [6] 张晨怡, 董会娟, 耿涌. 中国城市生活垃圾处理碳排放时空分布特征及减排潜力 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2024, 34(4): 23-35.
ZHANG C Y, DONG H J, GENG Y. Spatio-temporal distribution characteristics and reduction potentials of China's MSW-related GHG emissions[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2024, 34(4): 23-35.
- [7] 张智慧, 王媛, 柴立和, 等. 城市垃圾与污水污泥资源化处置方案对比: 基于两种生命周期影响评价方法 [J]. *资源科学*, 2022, 44(4): 860-870.
ZHANG Z H, WANG Y, CHAI L H, et al. Comparison of energy-based disposal schemes for municipal solid waste and sewage sludge: based on two life cycle assessment methods[J]. *Resources Science*, 2022, 44(4): 860-870.
- [8] TONG Y Q, LIU J F, LIU S Z. China is implementing "garbage classification" action[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259: 113707.
- [9] 于诗桐. 城市生活垃圾焚烧生命周期环境绩效评价及成本收益分析 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [10] 初金凤. 垃圾焚烧发电项目温室气体减排计算方法应用研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2014.
- [11] WU L, XIAO Q, WANG J, et al. Liming decreases the emission and temperature sensitivity of N₂O following labile carbon addition[J]. *Geoderma*, 2022, 425: 116032.
- [12] MALEK A A, HASANUZZAMAN M, RAHIM N A, et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment

- of a 10 MW biomass-based power plant in Malaysia[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 502-513.
- [13] JABARIVELISDEH B, JIN E Z, CHRISTOPHER P, et al. Model-based analysis of ammonia production processes for quantifying energy use, emissions, and reduction potentials[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2022, 10(49): 16280-16289.
- [14] IPCC. IPCC EFDB emission factor database[EB/OL]. (2016-07-18)[2023-12-20]. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php.
- [15] 蔡博峰, 朱松丽, 于胜民, 等. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》解读[J]. *环境工程*, 2019, 37(8): 1-11. CAI B F, ZHU S L, YU S M, et al. The interpretation of 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(8): 1-11.
- [16] 崔纪翠, 施娅俊, 陈冠益, 等. 中国垃圾焚烧时空变化及温室气体排放核算 [C]//2021 年全国有机固废处理与资源化利用高峰论坛论文集. 成都: 中国环境科学学会, 2021: 297-303.
- [17] 华佳, 柏双友, 瞿立新, 等. 城市生活垃圾处理中的碳排放及其评价模型研究[J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(11): 23-26. HUA J, BAI S Y, QU L X, et al. Review on carbon emission and its evaluation model during municipal solid waste treatment[J]. *Environmental Science and Management*, 2014, 39(11): 23-26.
- [18] 王育宝, 何宇鹏. 城市废弃物处理温室气体排放的影响机制研究[J]. *西安交通大学学报(社会科学版)*, 2018, 38(1): 60-70. WANG Y B, HE Y P. Study on greenhouse gas emission from urban waste disposal and influence mechanism[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences)*, 2018, 38(1): 60-70.
- [19] 王树文, 王京诚. 城市生活垃圾与经济增长的非线性关系: 基于环境库兹涅茨曲线的实证分析[J]. *中国人口·资源与环境*, 2022, 32(2): 63-70. WANG S W, WANG J C. Nonlinear relationship between municipal solid waste and economic growth: empirical analysis based on environmental Kuznets curve[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2022, 32(2): 63-70.
- [20] MAYA-ALTAMIRA L, BAUN A, ANGELIDAKI I, et al. Influence of wastewater characteristics on methane potential in food-processing industry wastewaters[J]. *Water Research*, 2008, 42(8/9): 2195-2203.
- [21] 詹咏, 黄嘉良, 罗伟, 等. 上海市试点小区湿垃圾源头减量前后垃圾处理处置全链条碳足迹分析[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(4): 1075-1083. ZHAN Y, HUANG J L, LUO W, et al. Full chain carbon footprint analysis of garbage disposal process before and after food waste *in situ* reduction treatment in Shanghai pilot communities[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(4): 1075-1083.
- [22] 王斌. 合肥市生活垃圾焚烧发电的温室气体减排研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [23] 张婷. 合肥市生活垃圾处理的温室气体排放及减排策略[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [24] 王文波, 张灿. 垃圾焚烧发电行业的碳减排效应浅析[J]. *中国有色冶金*, 2022, 51(3): 8-13. WANG W B, ZHANG C. Brief analysis of carbon emission reduction effect of waste incineration power generation industry[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2022, 51(3): 8-13.
- [25] 杨卫华, 初金凤, 吴哲, 等. 基于 LCA 和 CDM 方法学的垃圾焚烧发电过程中碳减排的计算研究[J]. *节能*, 2013, 32(11): 20-23. YANG W H, CHU J F, WU Z, et al. Based on the LCA and CDM methodology for Carbon emission reduction from MSW incineration for power generation processes[J]. *Energy Conservation*, 2013, 32(11): 20-23.
- [26] 林伯强, 蒋竺均. 中国二氧化碳的环境库兹涅茨曲线预测及影响因素分析[J]. *管理世界*, 2009(4): 27-36. LIN B Q, JIANG Z J. A forecast for China's environmental Kuznets curve for CO₂ emission, and an analysis of the factors affecting China's CO₂ emission[J]. *Management World*, 2009(4): 27-36.
- [27] 王锋, 吴丽华, 杨超. 中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究[J]. *经济研究*, 2010, 45(2): 123-136. WANG F, WU L H, YANG C. Driving factors for growth of carbon dioxide emissions during economic development in China[J]. *Economic Research Journal*, 2010, 45(2): 123-136.
- [28] 冯玮. 垃圾焚烧发电的温室气体减排潜力研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
- [29] 刘春红, 郝学军, 刘枫. 北京市城市生活垃圾处理温室气体排放特征及减排策略[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(4): 1041-1047. LIU C H, HAO X J, LIU F. Greenhouse gas emission characteristics and emission reduction strategies of municipal solid waste treatment in Beijing[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(4): 1041-1047.
- [30] 何晶晶, 陈森, 杨娜, 等. 我国生活垃圾焚烧发电过程中温室气体排放及影响因素: 以上海某城市生活垃圾焚烧发电厂为例[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(3): 402-407. HE P J, CHEN M, YANG N, et al. GHG emissions from Chinese MSW incineration and their influencing factors: case study of one MSW incineration plant in Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2011, 31(3): 402-407.
- [31] 常晓英, 蓝岚, 蔡洪英. “无废城市”建设背景下重庆市(主城区)生活垃圾处理现状、问题及建议[J]. *资源再生*, 2020(5): 33-35. CHANG X Y, LAN L, CAI H Y. The status, problems and suggestions of domestic garbage treatment in Chongqing(main urban area) under the background of "no waste city" construction[J]. *Resource Recycling*, 2020(5): 33-35.
- [32] POLETTINI A, POMI R, FORTUNA E. Chemical activation in view of MSWI bottom ash recycling in cement-based systems[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 162(2/3): 1292-1299.
- [33] 陈纪宏, 卞荣星, 张昕雪, 等. 垃圾分类对碳减排的影响分析: 以青岛市为例[J]. *环境科学*, 2023, 44(5): 2995-3002. CHEN J H, BIAN R X, ZHANG T X, et al. Influence of the classification of municipal solid wastes on the reduction of greenhouse gas emissions: a case study of Qingdao City, China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(5): 2995-3002.
- [34] 杨卫华, 李静, 戴本慧. 生活垃圾焚烧发电碳排放计算方法研究[J]. *能源环境保护*, 2011, 25(6): 5-7. YANG W H, LI J, DAI B H. A study on calculation method of carbon emission in power generation with msw incineration[J]. *Energy Environmental Protection*, 2011, 25(6): 5-7.
- [35] 孙雨清, 钱寅飞, 储思琴. 苏州市垃圾分类对焚烧过程碳排放的影响[J]. *环境卫生工程*, 2023, 31(1): 104-111. SUN Y Q, QIAN Y F, CHU S Q. The impact of waste classification on carbon emissions in the incineration process in Suzhou[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2023, 31(1): 104-111.
- [36] 黄静颖, 张浩, 谭钦怀, 等. 小型垃圾热解气化焚烧厂碳排放计算[J]. *环境卫生工程*, 2021, 29(4): 1-6. HUANG J Y, ZHANG H, TAN Q H, et al. Calculation of carbon emissions of a small scale waste pyrolysis-gasification incineration plant[J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(4): 1-6.
- [37] 桑春晖, 陈操操, 王坡, 等. 生活垃圾焚烧发电碳减排效应评估与分析[J/OL]. *环境科学*, 1-13. [2025-03-04]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202405249>. SANG C H, CHEN C C, WANG P, et al. Evaluation and analysis of carbon reduction effect of domestic waste incineration power generation[J/OL]. *Environmental Science*, 1-13. [2025-03-04]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202405249>.
- [38] 马丽娜, 章建明, 和晓东. 浅析电力市场与碳市场协同发展的必要性[J]. *电器工业*, 2022(9): 76-79. □