

# 生活垃圾焚烧发电碳足迹量化评估

刘含笑<sup>1,2,3,4,\*</sup>, 单思珂<sup>1,2</sup>, 梁丁宏<sup>1</sup>, 黄荣明<sup>1</sup>, 崔盈<sup>1</sup>,

林青阳<sup>5</sup>, 刘美玲<sup>1</sup>, 王帅<sup>1,3</sup>, 杨莉<sup>1</sup>, 刘小伟<sup>4</sup>

(1. 浙江菲达环保科技股份有限公司, 浙江 绍兴 311800; 2. 华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206; 3. 浙江省环保集团生态环保研究院有限公司, 浙江 杭州 310000; 4. 华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 5. 浙江大学 能源工程学院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:**近年来,垃圾焚烧发电已经成为处理生活垃圾的方法之一,产品碳足迹可以量化垃圾焚烧发电的温室气体排放。选取江西省一个典型生活垃圾焚烧厂为研究对象,计算了生活垃圾焚烧发电的产品碳足迹值,分析了垃圾焚烧发电的生命周期主要阶段,为降低垃圾焚烧厂的温室气体排放提供数据支撑。采用生命周期评价方法(LCA),以1 kW·h 上网电力为功能单位,确定了垃圾焚烧发电的电力产品的生命周期边界。结果表明,1 月份单位上网电力的碳足迹为 0.841 kg CO<sub>2</sub>e/(kW·h),单位垃圾碳足迹为 342.39 kg CO<sub>2</sub>e/t,碳足迹结果较低的原因是选取的垃圾热值较低。在各阶段中,垃圾焚烧阶段排放最高,占比达 78%。因此,对垃圾焚烧的碳减排工作应该以降低垃圾的直接燃烧碳排放为重点。在运行过程中,应尽可能地达到额定负荷,以降低单位碳足迹。此外,还可以通过推行垃圾分类以增加塑料组分回收率,以及推动柴油车改电车等方式实现碳减排。

**关键词:** 碳足迹; 全生命周期; 垃圾焚烧; 温室气体排放; 垃圾发电

中图分类号: X322

文献标识码: A

## Research on the quantitative assessment of the carbon footprint of domestic waste incineration power generation

LIU Hanxiao<sup>1,2,3,4,\*</sup>, SHAN Sike<sup>1,2</sup>, LIANG Dinghong<sup>1</sup>, HUANG Rongming<sup>1</sup>, CUI Ying<sup>1</sup>, LIN Qingyang<sup>5</sup>, LIU Meiling<sup>1</sup>, WANG Shuai<sup>1,3</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, LIU Xiaowei<sup>4</sup>

(1. Zhejiang Feida Environmental Science and Technology Co., Ltd., Shaoxing 311800, China; 2. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Zhejiang Environmental Protection Group Eco-Environmental Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 5. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** In recent years, waste incineration power generation has become one method for domestic waste treatment. The carbon footprint can provide a quantitative tool for evaluating greenhouse gas emissions from this process. A typical solid waste incineration plant in Jiangxi Province was chosen as the research object to calculate the carbon footprint and analyze the main stages of the life cycle of waste incineration power generation, aiming to reduce greenhouse gas emissions in such plants. The life cycle assessment (LCA) method was adopted, and the life cycle boundary of the power products generated by waste incineration was defined using 1 kW·h of grid power as the functional unit. The results showed that the carbon footprint per unit of grid power generation was 0.841 kg CO<sub>2</sub>e/(kW·h), and

收稿日期: 2024-01-14

修回日期: 2024-02-23

DOI: 10.20078/j.eep.20240303

基金项目: 浙江省“尖兵”计划资助项目(2022C03030); 国家重点研发计划资助项目(2022YFC3701501)

作者简介: 刘含笑(1987—), 男, 山东潍坊人, 高级工程师, 主要从事减污降碳关键技术研发工作。E-mail: gutouan@163.com

the carbon footprint of per unit waste was 342.39 kg CO<sub>2</sub>e/t. This relatively low carbon footprint might be attributed to the low calorific value of the selected garbage. The waste incineration stage had the highest emissions, accounting for 78% of the total. Therefore, efforts to reduce greenhouse gas emissions from waste incineration should primarily focus on minimizing direct carbon emissions from waste combustion. Operating the incineration plant at its rated load as much as possible is crucial to achieve this goal, along with increasing the recycling rate of plastic components and transitioning from diesel vehicles to electric vehicles.

**Keywords:** Carbon footprint; Full life cycle; Waste incineration; Greenhouse gas emissions; Waste power generation

## 0 引言

随着温室效应问题的日趋严重,以 CO<sub>2</sub>为代表的温室气体排放相关问题已引起全球性的关注。世界各国都提出了针对温室气体排放的设想和规划,我国也向全世界郑重做出了双碳目标的承诺<sup>[1]</sup>。目前全球用电量约为 27 000 TW·h,预计到 2035 年将达到 35 400 TW·h<sup>[2]</sup>。我国电力行业 CO<sub>2</sub>排放约占全国排放的 40%以上,年排放量超过 30 亿 t<sup>[3]</sup>。近年来我国生活垃圾生产量逐步提升,生活垃圾的生产总量超过 3.6 亿 t,中国已成为全球最大的垃圾生产国,传统的生活垃圾处理方法无法满足兼具经济性和环保性的要求。垃圾焚烧发电由于无害化、减量化和资源化的优点,已经逐渐成为主要的垃圾处理方式。在城市生活垃圾处理方式中,垃圾焚烧发电处理的占比超过 70%<sup>[4-5]</sup>。垃圾焚烧发电能够有效地处理生活垃圾,同时能够输出电力产品,具有较为可观的减排作用。

全生命周期的概念被广泛用于包括垃圾焚烧发电在内的各个行业研究中。碳足迹就是遵循全生命周期原理,对产品进行“从摇篮到坟墓”式的温室气体排放核算方法。目前碳足迹在生活垃圾

处理领域和火电领域均有应用<sup>[6]</sup>。然而垃圾焚烧发电的碳足迹研究方法和具体的计算流程与其他的生活垃圾处理以及火力发电方式有所区别。如何准确科学地进行生活垃圾焚烧发电的碳足迹量化评价是电力碳足迹体系建设以及垃圾处理环境影响评价必须解决的问题。为了核算垃圾焚烧发电过程中各阶段的温室气体减排效果,进一步地挖掘垃圾焚烧发电的全流程减排潜力,本文以江西省某垃圾焚烧发电项目为案例,研究垃圾焚烧发电的碳足迹计算方法和流程,基于碳足迹理论,采用全生命周期的评估方法,计算垃圾焚烧发电的电力产品碳足迹。

## 1 项目概况

垃圾焚烧法是将城市垃圾进行高温处理。在 800~1 000 °C 的焚烧炉中,生活垃圾的可燃成分与空气中的氧气发生剧烈化学反应并放热,生成高温的燃烧气和固体残渣,燃烧气可以作为热能回收利用,固体残渣可直接填埋<sup>[7]</sup>。垃圾焚烧工序包括垃圾炉接收、焚烧、烟气净化处理、灰渣收集处理、供水和余热利用系统等。垃圾焚烧发电的生产流程如图 1<sup>[8]</sup>所示。

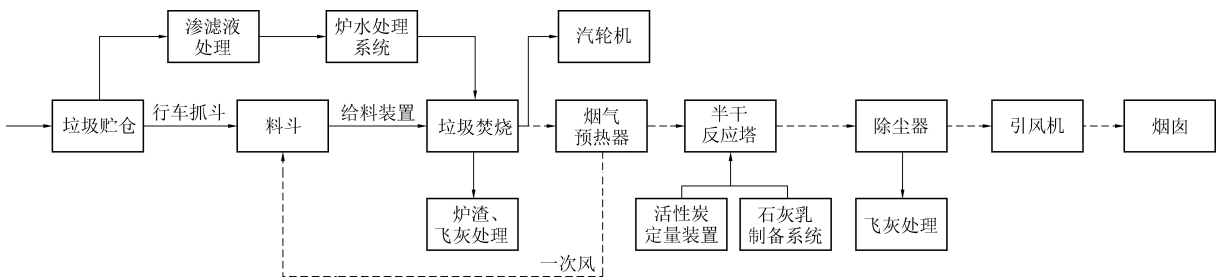


图 1 垃圾焚烧发电生产流程图

Fig. 1 Production flow chart of waste incineration for power generation

本项目以江西省某垃圾焚烧发电厂作为碳足迹量化与评价案例。该项目建设规模为 12 MW,采用 2 台规模 300 t/d 的中温次高压垃圾层燃炉

排炉和蒸发量 26.5 t/h 的余热锅炉,锅炉额定工作压力 6.4 MPa,额定蒸汽温度 450 °C,并配置 1 台 12 MW 纯凝式汽轮机及 12 MW 发电机,设计上

网电量  $70.506 \times 10^6 (\text{kW} \cdot \text{h})/\text{a}$ 。该电厂建造于垃圾填埋场附近,垃圾由附近居住区及填埋场生活垃圾两部分组成。垃圾渗滤液采用“预处理+UASB 厌氧反应器+A/O 工艺+UF 超滤系统+NF 纳滤膜系统+RO 反渗透”处理工艺。渗滤液处理站设计处理能力  $200 \text{ m}^3/\text{d}$ 。生活用水由市政自来水供给,生产用水取自电厂附近江河,生活污水经化粪池处理后进入厂区生活污水处理站。烟气处理系统采用“SNCR 脱硝+半干法+活性炭+干法+布袋除尘器+预留低温 SCR”的组合工艺,年运行不少于 8 000 h。全厂日处理垃圾 600 t,年处理生活垃圾 21.9 万 t,年发电量约 8 000 万  $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

对该项目案例的碳足迹评估包括所有生命周期评价边界内的内容,并依据生产数据计算该垃圾焚烧发电项目的单位产品碳足迹,选取  $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$  上网电力产品作为功能单位。该项目碳足迹评价的数据来源为企业的自测数据,为 2023 年 1 月至 8 月的月度生产数据,向发电企业调研取得,背景数据使用 IPCC 指南、PAS 2050 和国内外的相关文献缺省值。

## 2 垃圾焚烧发电碳足迹评价方法

### 2.1 生命周期评价法

碳足迹的评估方法包括生命周期评价法、投入产出分析法和混合生命周期评价法<sup>[9]</sup>,本文使

用生命周期评价法对垃圾焚烧发电项目生产过程进行计算。

生命周期评价法是一种“自下而上”式的碳足迹评估方法,具有全面、科学的特点,能够针对性地对产品和服务进行环境影响评价,是最常用的生态评价方法,主要包括 4 个步骤:目标与范围的定义、清单分析、影响评价和结果解释<sup>[10]</sup>。上世纪 90 年代,生命周期评价便开始应用到国内外生活垃圾处理方式的研究中<sup>[11]</sup>。国外基于全生命周期方法推出了一系列标准,包括 IPCC《国家温室气体清单指南》、GHG Protocol 和 ISO 14067 等。国内也推出了 GB 24040 和 GB/T 24044 等环境生命周期评价参考标准。生命周期的评价过程包括<sup>[12]</sup>:

- (1) 确定垃圾焚烧发电的生命周期流程边界;
- (2) 建立垃圾焚烧发电的生命周期流程清单;
- (3) 数据收集、计算和分配;
- (4) 数据结果审核和不确定性分析。

### 2.2 生命周期边界和功能单位

垃圾焚烧发电的生产流程与燃煤电厂大体相似。燃煤电厂相比,垃圾焚烧发电的生命周期不含燃料的生产环节,并且增加了垃圾贮存车间发酵去水产物渗滤液的处理过程。垃圾焚烧发电的生命周期边界中应该体现出上述 2 个特点,垃圾焚烧发电的生命周期边界如图 2 所示<sup>[13]</sup>。

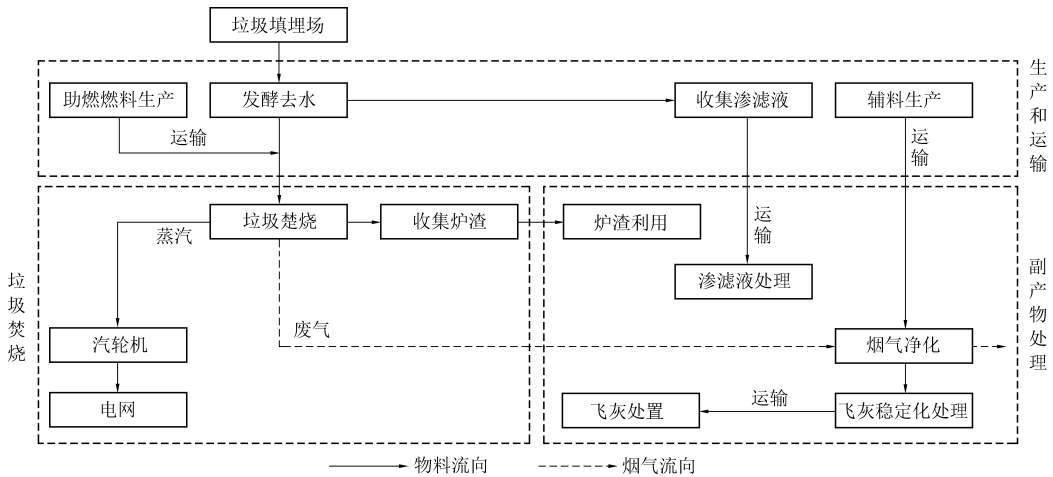


图 2 典型垃圾焚烧发电厂碳足迹评价边界

Fig. 2 Carbon footprint evaluation boundary of a typical waste incineration power plant

根据生命周期边界图,垃圾焚烧发电的碳足迹计算分为 3 个阶段:生产和运输阶段、垃圾焚烧阶段和副产物处理阶段。

在任何生命周期评价研究中,选择具有代表性的功能单元至关重要,因为它是定义和量化各自产品的物理和操作特性的统一基准<sup>[14]</sup>。本项

目以单位数量( $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ )的上网电力为功能单位。

## 3 垃圾焚烧发电碳足迹评价结果

### 3.1 生命周期清单计算

#### 3.1.1 生产和运输阶段

生产和运输阶段包括以下过程:垃圾的收集

和运输、有机工质的生产和运输、助燃剂的生产和运输、垃圾在贮存车间发酵去水的逸散排放以及辅料的生产和运输。生产和运输阶段的碳足迹  $E_1$  计算公式如下:

$$E_1 = E_{zrsc} + E_{ljzc} + E_{flsc} + E_{ylys} \quad (1)$$

式中:  $E_{zrsc}$  为助燃剂生产环节  $\text{CO}_2$  排放,  $\text{kg CO}_2\text{e}$ ;  $E_{ljzc}$  为垃圾贮存发酵的生物源逸散  $\text{CO}_2$  排放,  $\text{kg CO}_2\text{e}$ ;  $E_{flsc}$  为辅料生产环节的  $\text{CO}_2$  排放,  $\text{kg CO}_2\text{e}$ ;  $E_{ylys}$  为所有因运输导致的  $\text{CO}_2$  排放,  $\text{kg CO}_2\text{e}$ 。

助燃剂的生产采用排放因子法, 该项目中助燃剂种类为 0 号柴油, 排放因子采用文献提供的缺省值<sup>[15]</sup>, 取  $292.21 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{t}$ , 公式如下:

$$E_{zrsc} = F_{zrsc} M_{zj} \quad (2)$$

式中:  $F_{zrsc}$  为助燃剂生产的排放因子,  $\text{kg CO}_2\text{e}/\text{t}$ ;  $M_{zj}$  为进入焚烧炉的助燃剂消耗量,  $\text{t}$ 。

垃圾在贮存车间发酵去水逸散的温室气体通常采用在线监测法测量, 或取样后获得排放因子, 使用排放因子法测量<sup>[16]</sup>。该案例中, 通过设置措施封闭隔离相关设施, 并将臭气抽入炉膛内助燃, 使垃圾贮坑形成了负压, 臭气逸散量较少, 这部分不纳入计算。

辅料部分主要指垃圾焚烧尾气的烟气净化设备所用的辅料。烟气净化流程辅料包括消石灰、氨水、活性炭、布袋以及飞灰螯合时所用的飞灰螯合剂等<sup>[17]</sup>。辅料生产的碳排放因子由相关文献获得, 见表 1。

表 1 辅料排放因子

Table 1 Emission factors of auxiliary materials

辅料种类	排放因子/ ( $\text{t CO}_2\text{e}/\text{t}$ )	用途	文献
消石灰	2.108	脱酸	[18]
氨水	11.310	脱硝	[19]
活性炭	46.200	脱除重金属、二噁英	[19]
布袋	1.000	除尘	[19]

飞灰螯合剂的种类众多, 多为高分子化合物, 目前相关文献缺乏碳排放因子参考数据, 并且由于飞灰螯合剂用量相对很少, 根据计算原则, 该部分排放少于 1%, 不纳入计算。

生产和运输阶段涉及的运输过程作合并计算, 计算公式如下:

$$E_{ylys} = F_{rl} L_{yl} H_{hm} \quad (3)$$

式中:  $F_{rl}$  为燃料的排放因子,  $\text{kg CO}_2\text{e}/\text{kg}$ , 取  $3.29 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{t}$ ;  $L_{yl}$  为所有运输环节的总里程,  $100 \text{ km}$ ;  $H_{hm}$  为每百公里耗油量,  $\text{kg}/100 \text{ km}$ , 取

$72.3 \text{ kg}/100 \text{ km}$ <sup>[20]</sup>。

生产和运输阶段的碳足迹最终计算结果见表 2, 数据为该垃圾焚烧电厂 1~8 月份的排放总量。

表 2 生产和运输阶段碳足迹计算结果

Table 2 Results of carbon footprint calculation in raw material production and transportation stages

项目	碳足迹/ $\text{kg CO}_2\text{e}$
助燃剂的生产	9 271
垃圾贮存	0
辅料生产	966 393
运输	71 179
总计	1 046 843

由表 2 可知, 辅料生产过程在生产和运输阶段的碳足迹占比最大, 为 98%, 这是烟气净化辅料的种类众多、用量偏大导致的。其中, 辅料生产过程中的消石灰生产碳足迹结果占比较高, 为 38%, 原因是消石灰用量较大, 其次是活性炭生产碳足迹, 占比为 34%, 这是因为活性炭虽然用量较少, 但排放因子数值高, 导致结果偏大。

本项目垃圾和辅料的运输过程使用柴油卡车, 排放来自化石燃料的燃烧, 可以通过改变能源方式进行优化减排。分别假设使用柴油重卡、天然气重卡、混合动力重卡和纯电动重卡对运输过程的碳足迹进行重新计算<sup>[21]</sup>, 得到生产与运输阶段涉及运输部分的温室气体排放值如图 3 所示。

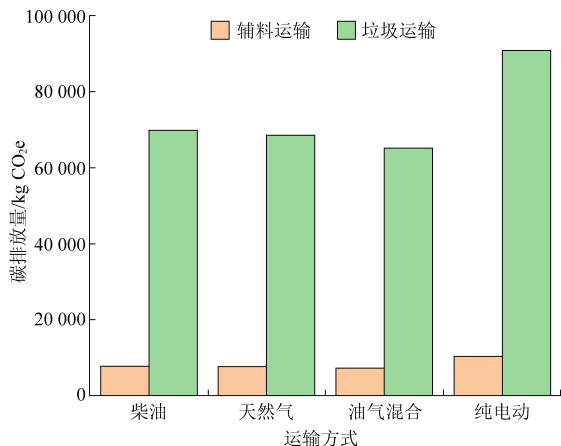


图 3 辅料及垃圾的公路运输碳排放

Fig. 3 Carbon emissions from road transportation of auxiliary materials and garbage

由图可看出, 辅料运输产生的碳排放所占的比例较少, 这是因为垃圾焚烧电厂的辅料单次运输路程长, 但运输频次少, 而生活垃圾运输频次多, 导致运输总距离长, 排放量高。

在 4 种公路运输方式中, 纯电动货运方式排

放量最高,这是由于我国电力组成中火电占比大,排放较高。天然气货运和油气混合比柴油货运方式排放更低,分别减少了2%和7%。由于电动重卡碳排放对电力碳排放因子具有极强的敏感性,电力碳排放因子每降低1 g/(kW·h),纯电动重卡全生命周期行驶里程碳足迹可减少1.74 t CO<sub>2</sub>e<sup>[22]</sup>。假设本项目中的垃圾运输及辅料运输均采用纯电动形式,并且电力使用垃圾焚烧发出的电力,在这种情形下,可以将运输的电耗并入场内用电。纯电动货运的电耗值取150 kW·h/100 km<sup>[21]</sup>,选用车型载重量29 t,综合计算得该月度因运输产生的电耗约为4.9×10<sup>4</sup> kW·h。根据本项目的最终计算结果,该部分纯电动货运运输碳足迹值约为5×10<sup>4</sup> kg CO<sub>2</sub>e,比柴油货运减少了29%。因此,采用纯电动货运运输垃圾和辅料,并且通过在电厂内安装充电桩的方式使纯电动货车的电力来源为垃圾焚烧发电,可以使运输碳足迹显著降低。

### 3.1.2 垃圾焚烧阶段

垃圾焚烧阶段包括以下过程:生活垃圾和助燃剂在焚烧炉内的燃烧、发电并网电力损耗以及有机工质的损耗和泄漏。垃圾焚烧阶段的碳足迹E<sub>2</sub>计算公式如下:

$$E_2 = E_{\text{ijrs}} + E_{\text{zrrs}} + E_{\text{nh}} \quad (4)$$

式中:E<sub>ijrs</sub>为生活垃圾在焚烧炉燃烧环节CO<sub>2</sub>排放,kg CO<sub>2</sub>e;E<sub>zrrs</sub>为助燃剂在焚烧炉燃烧环节CO<sub>2</sub>排放,kg CO<sub>2</sub>e;E<sub>nh</sub>为垃圾焚烧阶段因能耗造成的CO<sub>2</sub>间接排放,kg CO<sub>2</sub>e。

生活垃圾在经过贮存和预处理后进入焚烧炉内燃烧,其中仅计入化石碳的燃烧排放,生物碳排放不计入结果中。化石碳主要指垃圾中塑料、化纤等可溯源为化石燃料的部分,生物炭主要指厨余垃圾、纸类部分<sup>[23]</sup>。采用IPCC提供的排放因子和计算方法计算其碳排放,计算公式如下:

$$E_{\text{ijrs}} = F_{\text{ij}} Q_{\text{ij}} M_{\text{ij}} \varphi \quad (5)$$

式中:F<sub>ij</sub>为生活垃圾排放因子,kg/TJ,取为IPCC排放因子;Q<sub>ij</sub>为生活垃圾的湿基低位发热量,kJ/kg,一般在5 000 kJ/kg以上才可进入焚烧炉燃烧,本案例取5 000 kJ/kg;M<sub>ij</sub>为进入焚烧炉的生活垃圾消耗量,kg;φ为干垃圾的化石碳占比,取40%。

公式(5)中,垃圾的化石碳占比根据以下原则确定:一般化石碳在生活垃圾碳含量中的占比为1/3~1/2<sup>[24-25]</sup>,不同地区的生活垃圾组分差距较大,化石碳的比例因此也有较大跨度。本文选取

的垃圾焚烧电厂处于江西省,属于长江流域,根据相关研究,橡塑类、纺织类的含量接近20%<sup>[26]</sup>。又根据地区垃圾含水率约为40%~60%<sup>[27]</sup>,因此本文取干垃圾的化石碳占比为40%。

助燃剂在垃圾焚烧炉内的燃烧采用排放因子法,化石燃料燃烧的排放因子计算公式如下<sup>[28]</sup>:

$$F_i = Q_i C_i O F_i \frac{44}{12} \quad (6)$$

式中:F<sub>i</sub>为第i种化石燃料的排放因子,t CO<sub>2</sub>e/t;Q<sub>i</sub>为第i种化石燃料的平均低位发热量,GJ/t;C<sub>i</sub>为第i种化石燃料的单位热值含碳量,t C/GJ;O F<sub>i</sub>为第i种化石燃料的碳氧化率,%。

助燃剂排放因子的计算中,平均低位发热量、单位热值含碳量和碳氧化率采用《企业温室气体排放核算与报告指南发电设施》的缺省值,计算得助燃剂的排放因子为3.10 kg CO<sub>2</sub>e/kg。

因为该研究案例的垃圾焚烧电厂内辅助系统、烟气净化等系统没有设置单独表计,故缺少各过程的单独能耗数据。对电厂内的能耗部分合并计算,以厂用电率为基准计算厂用电量,并作为辅助系统、烟气净化系统及并网电耗等部分的总能耗,并根据总能耗计算间接排放。计算公式如下:

$$E_{\text{nh}} = P_{\text{fd}} \omega F_{\text{fs}} + P_{\text{wg}} F_{\text{dw}} \quad (7)$$

式中:P<sub>fd</sub>为垃圾焚烧电厂的月度发电量,kW·h;ω为厂自用电率,%;F<sub>fs</sub>为垃圾焚烧的缺省排放因子,kg CO<sub>2</sub>e/kg,取为400 kg CO<sub>2</sub>e/kg<sup>[29]</sup>;P<sub>wg</sub>为垃圾焚烧电厂的外购电量,kW·h;F<sub>dw</sub>为当地电网的排放因子,取0.570 3 t CO<sub>2</sub>e/(MW·h)<sup>[30]</sup>。

发电并网阶段包括以下过程:发电并网电力损耗、有机工质的损耗和泄漏。发电并网的电力损耗不等同于厂用电,而是发电机并入电网时因变压输送等产生的电能损耗,这与发电机端到变压器的功率损失有关<sup>[31]</sup>。对于有机工质的损耗和泄漏计算应根据实际工况使用相应的损耗和泄漏率<sup>[32]</sup>。本项目中并无单独电表测量,故该项排放和厂用电等能耗部分合并计算。在数据充分可得的情况下应尽可能地获得并网损耗数据,以充实排放来源种类,提高数据质量。

本项目中采用汽水循环,无工质损耗和泄漏的排放。

### 3.1.3 副产物处理阶段

副产物处理阶段包括以下过程:渗滤液处理、炉渣的运输和利用、烟气净化的能耗以及飞灰的处理和运输。因为本研究案例中烟气净化的能耗

部分已经在焚烧发电阶段归入能耗综合计算中,所以焚烧发电阶段的碳足迹  $E_3$  计算公式如下:

$$E_3 = E_{sty} + E_{lz} + E_{fh} \quad (8)$$

式中: $E_{sty}$ 为渗透液离开渗透液池后处理过程中的直接和间接排放,kg CO<sub>2</sub>e; $E_{lz}$ 为炉渣处理过程的直接和间接排放,kg CO<sub>2</sub>e; $E_{fh}$ 为飞灰处理过程的直接和间接排放,kg CO<sub>2</sub>e。

在本案例中,渗透液主要的排放源包括厌氧过程的 CH<sub>4</sub> 排放和两级 A/O 工艺中的 N<sub>2</sub>O 排放<sup>[33]</sup>。厌氧过程的 CH<sub>4</sub> 排放量  $E_{CH_4}$  计算公式如下:

$$E_{CH_4} = (B_0 F_{CH_4} - R) V \times GWP_{CH_4} \quad (9)$$

式中: $B_0$ 为厌氧过程中的化学需氧量(COD)平均浓度降低值,kg/L; $F_{CH_4}$ 为厌氧过程中的 CH<sub>4</sub> 排放因子,kg CH<sub>4</sub>/kg COD,取 IPCC 排放因子; $R$ 为甲烷回收量,kg CH<sub>4</sub>; $V$ 为渗滤液处理总体积,L; $GWP_{CH_4}$ 为 CH<sub>4</sub> 的温室气体 100 年内全球变暖潜势,kg CO<sub>2</sub>/kg CH<sub>4</sub>。

两级 A/O 工艺中的 N<sub>2</sub>O 排放量  $E_{N_2O}$  计算公式如下<sup>[34]</sup>:

$$E_{N_2O} = (N_0 F_{N_2O}) V \times GWP_{N_2O} \quad (10)$$

式中: $N_0$ 为两级 A/O 过程中含氮量平均降低值,kg/L; $F_{N_2O}$ 为两级 A/O 过程中的 N<sub>2</sub>O 排放因子,kg N<sub>2</sub>O/kg N,取为 0.016 kg CH<sub>4</sub>/kg<sup>[35]</sup>; $V$ 为渗滤液处理总体积,L; $GWP_{N_2O}$ 为 N<sub>2</sub>O 的温室气体 100 年内全球变暖潜势,kg CO<sub>2</sub>/kg N<sub>2</sub>O。

炉渣处理过程包括炉渣从渣池内运输至下游处理厂家和炉渣的综合化利用,本研究案例的炉渣综合化利用包括分拣金属回收和炉渣制砖。由于综合化利用无单独电表计,本身也不涉及直接排放,故对于炉渣处理过程仅计算其运输阶段的温室气体排放。飞灰处理方式为整合后填埋,也仅计算运输阶段温室气体排放,计算方法可参考公式(3)。

相比垃圾和辅料,垃圾焚烧发电的废弃物量虽然较少,但由于下游处理场地更远,总运输里程较长。通过纯电动货车替代柴油货车的方式,计算可得垃圾、辅料及副产物运输的总减排量约  $3.7 \times 10^4$  kg CO<sub>2</sub>e。

### 3.2 碳足迹计算结果

#### 3.2.1 单月度碳足迹计算结果分析

根据垃圾焚烧电厂的生产数据,使用全生命周期法对该垃圾焚烧电厂 1 月的产品电力进行碳足迹评价,计算出该垃圾焚烧发电项目单位垃圾碳足迹结果为 342.39 kg CO<sub>2</sub>e/t,以单位上网电力

为功能单位的产品碳足迹结果为 0.841 kg CO<sub>2</sub>e/(kW·h)。各阶段的碳足迹和相对于上网电力的单位碳足迹及对应比例见表 3 和如图 4 所示。

表 3 各阶段碳足迹计算结果

Table 3 Results of the carbon footprint calculation in each stage

项目	碳足迹/ kg CO <sub>2</sub> e	单位碳足迹/ (kg CO <sub>2</sub> e/(kW·h))
生产和运输	1 208 821	0.180
垃圾焚烧	4 415 919	0.656
副产物处理	35 431	0.005
总计	5 660 171	0.841

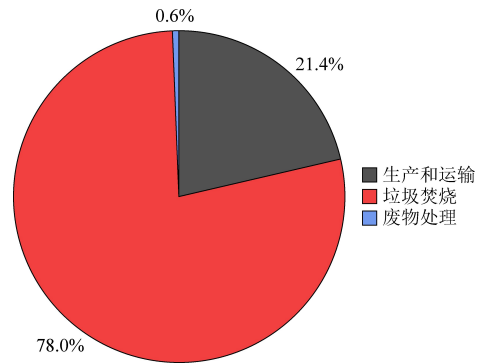


图 4 1 月份垃圾焚烧发电各阶段碳足迹

Fig. 4 Carbon footprint of each stage of waste incineration in power generation in January

根据该电厂 1 月份的垃圾焚烧发电各阶段碳足迹计算结果,可以得出该垃圾焚烧发电项目的碳足迹集中在垃圾焚烧阶段,主要碳排放环节为垃圾的燃烧直接碳排放,占总温室气体排放当量的 78.0%,其次是生产和运输阶段。因此,垃圾焚烧发电的碳减排重点应该放在直接燃烧排放。通过降低热损失<sup>[36]</sup>或采用新技术来提高热效率,如将富氧燃烧技术应用到垃圾焚烧发电中,碳足迹比使用了单乙醇胺进行碳捕集的焚烧炉更低,或者通过提高城市生活垃圾回收效率来降低垃圾处理的整体碳足迹。当垃圾中塑料组分的回收效率达到 5%时,城市生活垃圾处理部门几乎可以实现碳中和<sup>[37]</sup>。对塑料垃圾进行回收利用,不仅可以显著减少燃烧碳排放,还能够回收塑料产品,达到替代生产的效果,实现“零碳”甚至“负碳”排放,垃圾分类可以有效地提高垃圾中塑料组分的回收率。

#### 3.2.2 多月度碳足迹计算结果对比

根据电厂每个月度的生产数据,分别计算出 1~8 月的各月度碳足迹结果,与月负荷率进行比

对,得出结果如图 5 所示。

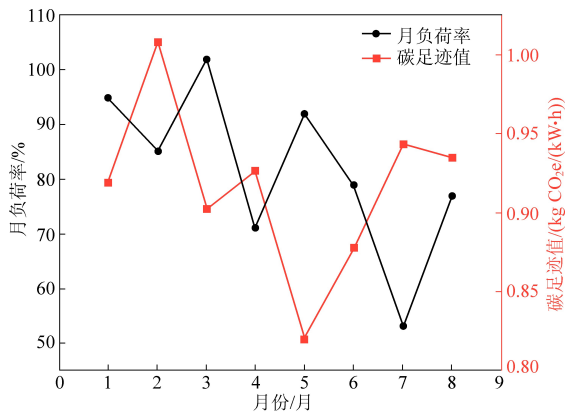


图 5 各月份垃圾焚烧发电碳排放与月负荷率情况

Fig. 5 Carbon emission and monthly load rate of waste incineration power generation in each month

图中可以看到,该垃圾焚烧发电的单位上网电力碳足迹在 0.820~1.008 kg CO<sub>2</sub>e/(kW·h) 之间,平均 0.916 kg CO<sub>2</sub>e/(kW·h),并且月负荷率与单位碳足迹值有着明显的线性相关,月负荷率增高则单位碳足迹值降低,在 3 月份月负荷率达到最高值 105.31%,此时单位碳足迹为最低值 0.820 kg CO<sub>2</sub>e/(kW·h)。因此,提高垃圾焚烧电厂的月负荷率,使锅炉负荷尽量接近额定负荷能够有效地降低碳足迹。月负荷率与垃圾入炉量有一定相关关系,如图 6 所示。

由图 6 可知,入炉垃圾量、单位垃圾发电量和月负荷率三者基本成正相关。入炉垃圾量之所以会导致单位垃圾发电量的提高,是因为该厂锅炉设计燃烧量为 18 000 t/月,入炉垃圾的燃烧量不达标,导致锅炉的参数达不到设计标准,降低发电效率<sup>[38]</sup>。因此垃圾焚烧发电厂保证入炉垃圾量接近设计值能够保证单位垃圾发电量和月负荷率保持在较高水平,并降低单位发电量碳足迹。

对图 5 和图 6 进一步分析可以发现该电厂 7 月和 8 月的月负荷率相差较大,但单位碳足迹相差较小。8 月份的渗滤液量是其余月份的 3~4 倍,增加了渗滤液处理时的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放,因此造成碳足迹提高了 1~2 倍。8 月份渗滤液量显著增加的原因是该月降雨量骤增,根据《生活垃圾卫生填埋处理技术规范》,渗滤液产生量主要由降雨入渗量和垃圾自身降解或压缩两部分组成。因此渗滤液量的月度性增加难以改变,这种情况下对副产物处理阶段的减排可以从减少渗滤液的有效厌氧和硝化处理成分着手。通过增加堆料高度,提升垃圾仓库容量,可以有效缩短垃圾发酵周期,

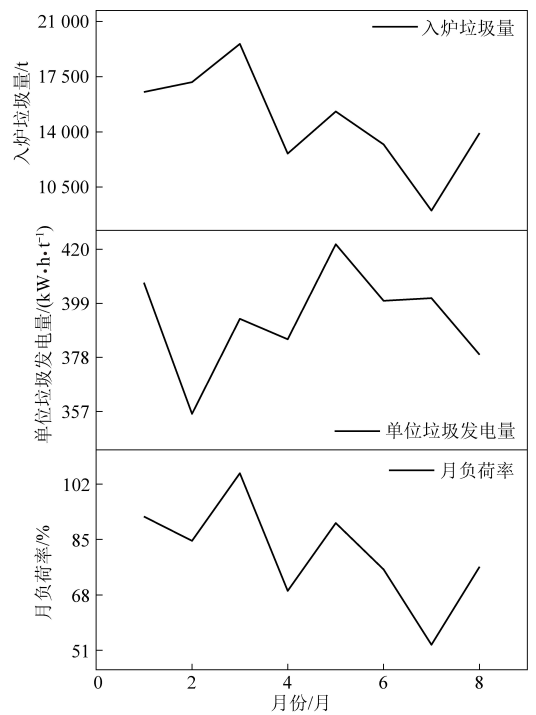


图 6 各月份入炉垃圾量、单位垃圾发电量与月负荷率对比  
Fig. 6 Comparison of furnace garbage amount, unit garbage power generation and monthly load rate in each month

从而减少渗滤液的有效厌氧和硝化处理成分,降低因此造成的温室气体排放。

### 3.3 文献对比与分析

文献中多采用单位垃圾的碳足迹作为计算结果,而非单位发电产品。本项目 1 月的单位垃圾碳足迹为 342.39 kg CO<sub>2</sub>e/t。

根据 AMIRHOSSEIN 等<sup>[39]</sup>使用 IPCC 指南法对马来西亚垃圾焚烧项目碳足迹的核算,垃圾焚烧发电的单位垃圾碳足迹为 646 kg CO<sub>2</sub>e/t,单位电力碳足迹为 1.01 kg CO<sub>2</sub>e/t。该项目日处理垃圾 2 500 t,垃圾来源基本为生活垃圾。与本项目相比,马来西亚案例的单位垃圾碳足迹显著更高,单位电力碳足迹却更低。这是因为马来西亚案例的垃圾组分中塑料含量较高,垃圾热值要比本案例高 50%左右,而热值对于垃圾焚烧的碳排放影响较大,会直接导致单位垃圾碳足迹的增加,但从产品的角度来说,热值的增加能够提升发电效率,降低单位电力碳足迹值。生活垃圾的低位热值与多种因素有关,最主要的影响因素为垃圾的组分构成,其中塑料组分的含量与低位热值呈正相关<sup>[40]</sup>,这进一步佐证了通过垃圾分类回收利用塑料组分可降低碳排放的可行性。

HAN 等<sup>[41]</sup>通过构建的全生命周期评估模型,

采用了3种不同的方法对上海某生活垃圾焚烧案例进行了碳足迹评估,包括使用CO<sub>2</sub>浓度、O<sub>2</sub>浓度和以IPCC指南为基础的方法,分析结果为11.2~622.4 kg CO<sub>2</sub>e/t之间。其中碳足迹结果的波动主要是由于垃圾组分的季度性变化,夏季厨余垃圾的比例高,因此碳足迹水平低,秋季塑料制品的比例显著增加,导致碳足迹结果出现峰值。高泽阳<sup>[42]</sup>在IPCC指南的基础上,采用物料平衡法,计算出典型生活垃圾焚烧发电厂温室气体排放量为614.38 kg CO<sub>2</sub>e/t。与本案例相比,该结果高出一倍。如此显著的差距来源于所选垃圾热值参数和垃圾焚烧锅炉系统的参数差异。该文献所选取的典型垃圾焚烧电厂具有上网发电量较低和垃圾热值极大的特点,同时该文献基于碳排放角度考虑,并未根据碳足迹的概念计算生物炭的扣减,因此结果与本案例计算的结果差距明显。

## 4 结 论

(1)本研究使用全生命周期评价法对某垃圾焚烧发电项目进行碳足迹评估,1月份单位上网电力碳足迹结果为0.841 kg CO<sub>2</sub>e/(kW·h),1~8月份平均单位上网电力碳足迹结果为0.916 kg CO<sub>2</sub>e/(kW·h)单位垃圾碳足迹为342.39 kg CO<sub>2</sub>e/t,碳足迹结果较低原因是选取的垃圾热值较低。

(2)对垃圾焚烧的碳减排工作应该以降低垃圾的直接燃烧碳排放为重点。运行过程中应尽量以设计参数为参考,尽可能地达到额定负荷,降低单位碳足迹,还可以通过垃圾分类来增加塑料组分的回收率减少垃圾处理的碳足迹,也可以通过减少热损失和采用富氧燃烧等新技术方法提高燃烧效率,减少碳足迹。

(3)生产和运输阶段以及副产物处理阶段造成的温室气体排放占比较少,但从总量上看依然相当可观。通过柴油车改电车并使用垃圾焚烧发电的方式可以减少运输环节的碳排放。

### 参考文献 (References) :

[1] 习近平. 继往开来,开启全球应对气候变化新征程——在气候雄心峰会上的讲话[EB/OL]. (2020-12-20)[2023-03-05]. [http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content\\_5570055.html](http://www.gov.cn/gongbao/content/2020/content_5570055.html).

[2] ANDRAE A S. Hypotheses for primary energy use, electricity use and CO<sub>2</sub> emissions of global computing and its shares of the total between 2020 and 2030[J]. Wseas Transactions on Power System, 2020, 15: 50-59.

[3] 中电联规划发展部. 电力行业碳达峰碳中和发展路径研究[EB/OL]. 北京:中国电力企业联合会(2021-12-27)[2023-03-16]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-305168>.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2022年中国城市建设状况公报[EB/OL]. (2023-10-11)[2024-02-04]. <https://www.mohurd.gov.cn/file/2023/20231012/7c6d9416-49d5-463a-b702-8a22f6c350b0.docx?n=2022年中国城市建设状况公报>.

[5] 李文娟. 基于生命周期评价的中国城市生活垃圾处理评价模型及软件的研究与开发[D]. 杭州:浙江大学,2012:2. LI Wenjuan. Research and development of evaluation model and software based on life cycle evaluation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 2.

[6] 王鸽. 超高参数二氧化碳燃煤发电系统全生命周期评价[D]. 北京:华北电力大学(北京),2019:5-9. WANG Ge. Full life cycle evaluation of ultra-high parameter carbon dioxide coal-fired power generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2019: 5-9.

[7] 何雪鸿. 富氧焚烧垃圾发电技术研究及烟气净化工艺模拟[D]. 北京:华北电力大学,2015:5-7. HE Xuehong. Research on oxygen-rich incineration waste power generation technology and simulation of flue gas purification process[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015: 5-7.

[8] 邵罗江,毛琨. 垃圾焚烧发电技术的应用与发展[J]. 能源与环境,2007,84(5):44-46. SHAO Luojiang, MAO Kun. Application and development of waste incineration power generation technology[J]. Energy and Environment, 2007, 84(5): 44-46.

[9] 刘含笑,吴黎明,林青阳,等. 碳足迹评估技术及其在重点工业行业的应用[J]. 化工进展,2023,42(5):2201-2218. LIU Hanxiao, WU Liming, LIN Qingyang, et al. Carbon footprint assessment technology and its application in key industries[J]. Chemical Progress, 2023, 42(5): 2201-2218.

[10] 计军平,马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济,2011(4):76-80. JI Junping, MA Xiaoming. Progress in the concept and accounting methods of carbon footprint[J]. Ecological Economy, 2011(4): 76-80.

[11] 王军. 葫芦岛城市生活垃圾处理系统生命周期评价[D]. 北京:清华大学,2012:2. WANG Jun. Life cycle evaluation of Huludao municipal solid waste treatment system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012: 2.

[12] 李楠. 产品碳足迹标准对比及其供应链上的影响研究[D]. 北京:北京林业大学,2019:10. LI Nan. Comparison of product carbon footprint standards and their impact on the supply chain[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019: 10.

[13] 中国工业节能与清洁生产协会. T/CIECCPA 039-2023 垃圾焚烧电力碳足迹量化与评价方法[S]. 北京:中国工业节能与清洁生产协会,2023:4-5.



- [14] GUINÉE J, HEIJUNGS R, HUPPES G, et al. Life cycle assessment: An operational guide to the ISO standards[D]. Leiden: Leiden University, 2012; 6.
- [15] 程冬茹. 汽柴油全生命周期碳排放计算[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 44.  
CHENG Dongru. Carbon culation of full life cycle of gasoline and diesel[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016: 44.
- [16] 刘海福. 基于全生命周期的生活垃圾焚烧处理过程环境影响评估[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019: 13-14.  
LIU Haifu. Environmental impact assessment of MSW based on incineration process[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2019:13-14.
- [17] 韩铮. 北方某生活垃圾焚烧厂大气污染防治措施及环境影响分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018: 31-37.  
HAN Zheng. Air pollution prevention measures and environmental impact analysis of a domestic waste incineration plant in northern China[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 31-37.
- [18] 罗智星. 建筑生命周期二氧化碳排放计算方法与减排策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016: 67-68.  
LUO Zhixing. Calculation method and emission reduction strategy of building life cycle[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016: 67-68.
- [19] 康建刚, 李俊杰, 魏进超. 基于生命周期评价的烧结烟气净化工艺碳足迹分析[J]. 烧结球团, 2017, 42(6): 11-15.  
KANG Jiangang, LI Junjie, WEI Jinchao. Carbon footprint analysis of sintering flue gas purification process based on life cycle evaluation[J]. Sintered Pellet, 2017, 42(6): 11-15.
- [20] 徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 等. 电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析[J/OL]. 环境科学: 1-14 [2023-12-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202305123>.  
XU Yuanyuan, GONG Dehong, HUANG Zhengguang, et al. Analysis of carbon emission reduction benefits of electric heavy truck replacing diesel heavy truck [J/OL]. Environmental Science: 1-14 [2023-12-07]. <https://doi.org/10.13227/j.hjks.202305123>.
- [21] 吕锦旭. 基于碳足迹原理的雄安新区绿色物流运输工具比选研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022: 48+94.  
LYU Jinxu. Comparison and selection of green logistics transportation vehicles in Xiongan New Area based on the principle of carbon footprint [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2022: 48+94.
- [22] 宜家贸易服务(中国)有限公司. 纯电动重型卡车在物流行业中的应用[J]. 交通节能与环保, 2022, 18(S1): 147-150.  
IKEA Trade Service(China) Co., Ltd. The application of pure electric heavy truck in the logistics industry[J]. Transportation Energy-saving and Environmental Protection, 2022, 18(S1): 147-150.
- [23] 朱松丽. 垃圾发电并非 100%碳中性,亟需调整统计口径[J]. 中国投资(中英文), 2023(Z8): 84-85.  
ZHU Songli. Waste power generation is not 100% carbon neutral, and the statistical caliber needs to be adjusted[J]. China Investment(Chinese and English), 2023(Z8): 84-85
- [24] 付凤英, 徐拥军, 夏金雨, 等. 垃圾分类下苏州市生活垃圾处理碳排放分析[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2023, 46(3): 133-140.  
FU Fengying, XU Yongjun, XIA Jinyu, et al. Carbon emission analysis of domestic waste treatment in Suzhou city under garbage classification[J]. Nanjing Normal University Daily (Natural Science edition), 2023, 46(3): 133-140.
- [25] 郭含文, 徐海云, 聂小琴, 等. 我国城乡生活垃圾处理温室气体排放清单研究[J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 286-290.  
GUO Hanwen, XU Haiyun, NIE Xiaoqin, et al. Study on greenhouse gas emission list of urban and rural household waste treatment in China[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 286-290.
- [26] 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: 7.
- [27] 杨娜, 邵立明, 何晶晶. 我国城市生活垃圾组分含水率及其特征分析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 1033-1038.  
YANG Na, SHAO Liming, HE Pinjing. Analysis of the water content and characteristics of MSW components in China[J]. Environmental Science in China, 2018, 38(3): 1033-1038.
- [28] 盖志杰, 王鹏辉. 燃煤电厂碳排放典型计算及分析[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 178-184.  
GAI Zhijie, WANG Penghui. Typical calculation and analysis of carbon emission from coal-fired power plants[J]. China Electric Power, 2017, 50(5): 178-184.
- [29] 张炳康, 李云玉, 张欣, 等. 垃圾焚烧发电项目碳排放核算与减排效应研究[J]. 环境保护科学, 2023, 49(1): 75-81.  
ZHANG Bingkang, LI Yunyu, ZHANG Xin, et al. Research on carbon emission accounting and emission reduction effect of waste incineration powergeneration project [J]. Environmental Protection Science, 2023, 49(1): 75-81.
- [30] 生态环保部. 关于做好 2023-2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知[EB/OL]. (2023-02-04) [2023-10-23]. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202302/t20230207\\_1015569.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html).
- [31] DUAN Zhengzhong. Study on loss reduction of power system power plant transformer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 2448(329): 248-251.
- [32] WANG Shukun, LIU Chao, REN Jingzheng, et al. Carbon footprint analysis of organic rankine cycle system using zeotropic mixtures considering leak of fluid[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118095-118110.
- [33] 秦浩. 生活垃圾焚烧电厂渗滤液处理的碳减排研究[J]. 清洗世界, 2023, 39(2): 47-49.  
QIN Hao. Research on carbon emission reduction of leach treatment of domestic waste incineration power plant [J].

- Cleaning the World, 2023, 39(2): 47-49.
- [34] 陈燕. 厌氧—好氧工艺处理垃圾焚烧厂渗滤液的效果分析及其碳排放核算[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 35.  
CHEN Yan. Effect analysis of the leachate treatment of anaerobic-aerobic process and its carbon emission accounting[D]. Wuxi; Jiangnan University, 2015: 35.
- [35] CHEN Jihong, BIAN Rongxing, ZHANG Tingxue, et al. Influence of the classification of municipal solid wastes on the reduction of greenhouse gas emissions; A case study of Qingdao City[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2995-3002.
- [36] 白江文. 垃圾焚烧发电工程热效率提升措施[J]. 中国设备工程, 2023(15): 203-205.
- [37] IOAN Robert Istrate, JOSE Luis Galvez Martos, VÁZQUEZ D, et al. Prospective analysis of the optimal capacity, economics and carbon footprint of energy recovery from municipal solid waste incineration [ J ]. Resources, Conservation and Recycling, 2023, 193: 106943-106953.
- [38] 宋景全. 垃圾焚烧发电厂发电效率的影响因素及提升措施[J]. 工程技术研究, 2023, 8(1): 127-129.  
SONG Jingquan. Influencing factors and improvement measures of power generation efficiency of waste incineration power plants[J]. Engineering Technology Research, 2023, 8(1): 127-129.
- [39] AMIRHOSSEIN Malakahmad, MOTASEM S Abualqumboz, SH-AMSUL Rahman M Kutty, et al. Assessment of carbon footprint emissions and environmental concerns of solid waste treatment and disposal techniques; case study of Malaysia[J]. Waste Management, 2017, 70: 282-292.
- [40] 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+118.  
SUN Yuqing, QIAN Yinfei, CHU Siqin. Effect of waste classification on carbon emissions in the incineration process in Suzhou city[J]. Environmental Health Engineering, 2023, 31(1): 104-111+118.
- [41] HAN Xiaoqu, CHANG Hongzhang, WANG Chuan, et al. Tracking the life-cycle greenhouse gas emissions of municipal solid waste incineration power plant; A case study in Shanghai [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 398: 136635-136646.
- [42] 高泽阳. 基于碳减排的生活垃圾焚烧策略与效益分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2023: 61.  
GAO Zeyang. Strategy and efficiency analysis of domestic waste incineration based on carbon emission reduction[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023: 61.