

垃圾焚烧发电项目碳排放核算与减排效应研究

张炳康^{1,2}, 李云玉², 张欣², 王诗颖², 周霖², 吕石磊¹

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350;

2. 中节能工程技术研究院有限公司, 北京 100082)

摘要: 采用 IPCC 国家温室气体清单指南法计算了合肥市某生活垃圾焚烧发电项目的碳排放, 分析了项目碳减排效应, 并给出了垃圾焚烧的减排路径。结果表明, 该生活垃圾焚烧发电项目碳排放强度为 398.89 kgCO₂e/t, 其中焚烧过程碳排放为 384.7 kgCO₂e/t, 占比 96.44%。塑料等含化石碳组分垃圾的碳排放占整个焚烧项目碳排放的 92% 以上, 是主要排放源。项目通过替代垃圾填埋基准线排放为 557.75 kgCO₂e/t, 替代燃煤发电的基准线排放为 385.73 kgCO₂e/t, 综合净减排量为 544.59 kgCO₂e/t, 表明生活垃圾焚烧发电项目具有很好的减排效益。通过系统规范核算了焚烧发电项目温室气体排放的基础数据, 为垃圾焚烧发电行业摸清碳排放底数、参与碳排放交易等提供支撑。

关键词: 垃圾焚烧; 国家温室气体清单指南法; 碳排放; 减排效应

中图分类号: X705

文献标志码: A

DOI: [10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022050014](https://doi.org/10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022050014)

Carbon emission calculation and reduction effects of municipal solid waste incineration power generation project

ZHANG Bingkang^{1,2}, LI Yunyu², ZHANG Xin², WANG Shiyong², ZHOU Lin², LYU Shilei¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Engineering Technology Research Institute Co. Ltd. of CECEP, Beijing 100082, China)

Abstract: The carbon emission of the municipal solid waste (MSW) incineration power generation project in Hefei is calculated by using the IPCC national greenhouse gas inventory guidance method, and the carbon emission reduction effect is also analyzed. Moreover the emission reduction path for MSW incineration is also clarified. The results show that the carbon emission intensity of the MSW incineration power generation project is 398.89 kgCO₂e/t in total, and the carbon emission during incineration is 384.7 kgCO₂e/t, accounting for 96.44%. Plastics and other wastes containing fossil carbon components account for more than 92% of the carbon emissions of the whole incineration project, which is the main emission source. The baseline emission of the project through the alternative landfill is 557.75 kgCO₂e/t. And the baseline emission of the alternative coal-fired power generation is 385.73 kgCO₂e/t. The comprehensive net emission reduction is 544.59 kgCO₂e/t, indicating that MSW incineration has great benefits for carbon emission reduction. Through the standardized calculation of the basic data of carbon emission of MSW incineration projects, it provides support for the industry to find out the base data of carbon emission and participate the carbon emission trading.

Keywords: MSW incineration; national greenhouse gas inventory guidance method; carbon emission; reduction effect

CLC number: X705

随着我国碳达峰、碳中和目标的提出, 摸清温室气体排放现状是当前各行业开展“双碳”工作最紧迫最根本的任务, 也是制定行业碳达峰、碳中和有关行动方案的基础。废弃物处理作为联合国政

府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 温室气体排放清单中温室气体排放 5 个主要来源之一, 其排放量不容忽视^[1-2]。根据《中华人民共和国气候变化第二次两年更新报

收稿日期: 2022-05-12

录用日期: 2022-06-27

基金项目: 国家重点研发计划“固废资源化”专项(2020YFC1908600)

作者简介: 张炳康(1989-), 男, 博士研究生、高级工程师。研究方向: 固废资源化技术及产业发展研究。

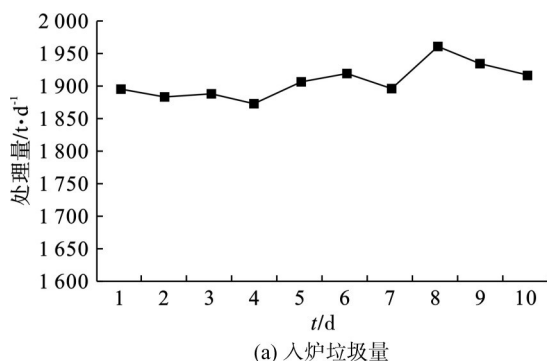
E-mail: zhangbingkang@126.com

引用格式: 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.

告 2018》显示,2014 年中国废弃物处理温室气体排放约 1.95 亿吨 CO₂ 当量,其中固体废弃物处理排放 1.04 亿吨 CO₂ 当量,占 53.2%;废水处理排放 0.91 亿吨 CO₂ 当量,占 46.8%;固体废弃物处置在废弃物处理温室气体排放中占比最大。

生活垃圾作为典型的城乡固体废弃物,随着我国经济社会快速发展,特别是垃圾分类、无废城市等政策的推广,产生量不断增大。2020 年全国生活垃圾无害化处理 23 452 万吨,其中卫生填埋处理 7 771 万吨,占比约 33%;焚烧处理 14 607 万吨,占比约 62%;其他处理方式 1 073 万吨,占比约 4.6%。截至目前,全国共有垃圾焚烧厂 510 座,焚烧炉 1 126 个,焚烧处理能力每天达 56.78 万吨^[3]。从处理量和处理能力来看,垃圾焚烧处理已成为当前占比最高的处置方式。

因此,核算清楚生活垃圾焚烧发电过程产生的温室气体排放和减排量成为一个亟待解决的问题。然而,由于国内外学者关于生活垃圾焚烧碳排放核算采用的核算方法不统一,核算的边界不一致,基础数据来源不清晰,计算过程不规范,导致垃圾焚烧项目的碳排放计算结果相差较大,行业内关于垃圾焚烧减排说法不一的现状^[4-8]。为规范核算我国垃圾焚烧发电项目碳排放的数据,本研究以合肥市某生活垃圾焚烧发电厂为研究对象,确定项目碳排放核算边界,识别焚烧过程碳排放源,采用 IPCC 国家温室气体清单指南法准确核算焚烧过程的碳排放,并提出垃圾焚烧的减排路径,最后给出垃圾焚烧发电项目基于替代简易填埋和替代燃煤发电排放的碳减排效应,从而为垃圾焚烧发电行业参与碳交易、支撑“双碳”战略实现提供参考。特别指出,文章所指的碳排放泛指温室气体排放,温室气体类型包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等。



(a) 入炉垃圾量

1 研究对象和边界

1.1 研究对象

合肥市位于我国中东部地区,是长三角城市群副中心,常住人口突破 937 万人,城镇化率达 82.3%,选取合肥市某生活垃圾发电项目为研究对象,具有一定的代表意义。该项目于 2020 年建成投产,日处理生活垃圾 2 000 t。项目新建了 4 台 500 t/d 机械炉排炉,余热锅炉采用 5.4 MPa、450 °C 的中温次高压蒸汽参数,配套建设 2×25 MW 凝汽式汽轮发电机组,焚烧炉和锅炉系统的热效率达 80% 以上。烟气净化采用“SNCR+半干法+干法(NaHCO₃)+活性炭吸附+袋式除尘器+SCR”的组合工艺,高效环保。该项目设计时所在地生活垃圾热值及成分分析,见表 1 和表 2。

表 1 生活垃圾热值及组成(设计取值)

Table 1 Calorific value and composition of domestic waste (Design Value)

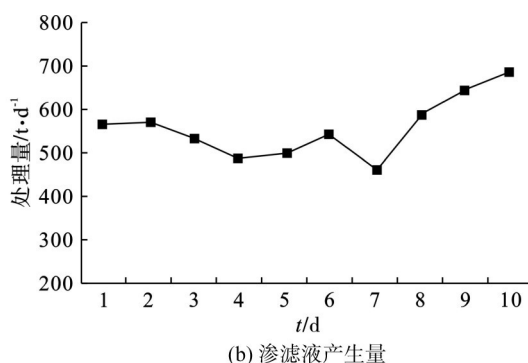
垃圾类型	低位发热量/kJ·kg ⁻¹	水分/%	可燃分/%	灰分/%
低热值垃圾	4 606	57	17	26
设计点垃圾	7 116	48	15	37
高热值垃圾	8 374	45	14	41

表 2 生活垃圾元素组成(可燃基)

Table 2 Element composition of domestic waste (Combustible Basis)

垃圾类型	C	H	O	N	S	Cl
低热值垃圾	13.00	2.18	10.14	0.52	0.03	0.13
设计点垃圾	19.24	3.14	13.69	0.67	0.11	0.15
高热值垃圾	21.32	3.77	14.89	0.74	0.12	0.16

采集项目连续 10 d 运行数据,见图 1。



(b) 渗滤液产生量

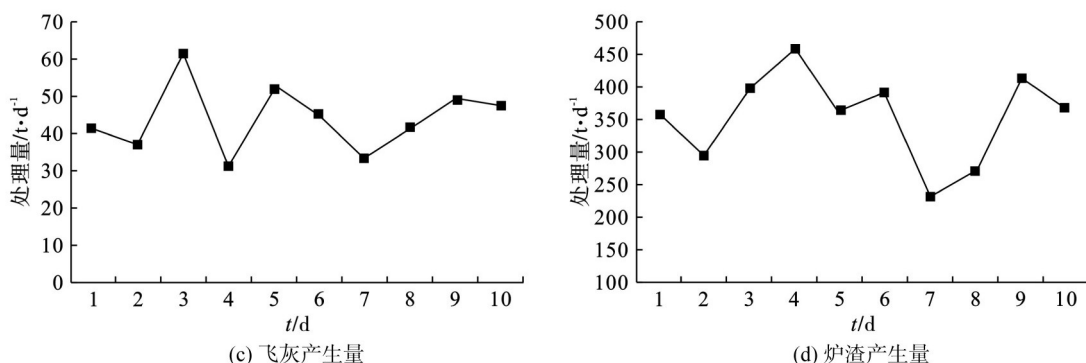


图 1 某垃圾焚烧发电项目运行数据

Fig. 1 Operation data of a waste incineration power generation project

得到该项目入炉垃圾日平均处理量为 1 907.5 t, 垃圾渗滤液日产生量为 556.1 t, 飞灰日产生量为 43.9 t, 炉渣日产生量为 352.1 t。

1.2 核算边界

垃圾焚烧发电全链条涉及前端环卫系统收集、转运、入炉焚烧、余热发电、渗滤液处置和炉渣飞灰处置等配套系统, 各处置环节都涉及温室气体排放。因此, 首先必须明确垃圾焚烧发电项目温室气

体排放的核算边界。根据有关研究表明, 收集转运过程的温室气体排放量约占整个处置过程的 0.53% ~ 1.45%, 与终端处置环节相比可忽略不计^[9]。因此, 考虑到回收转运环节的不确定性, 文章不考虑收集、转运过程中所产生的碳排放, 主要研究垃圾进入焚烧厂卸料大厅开始到最终处置过程中的碳排放, 具体核算边界, 见图 2。

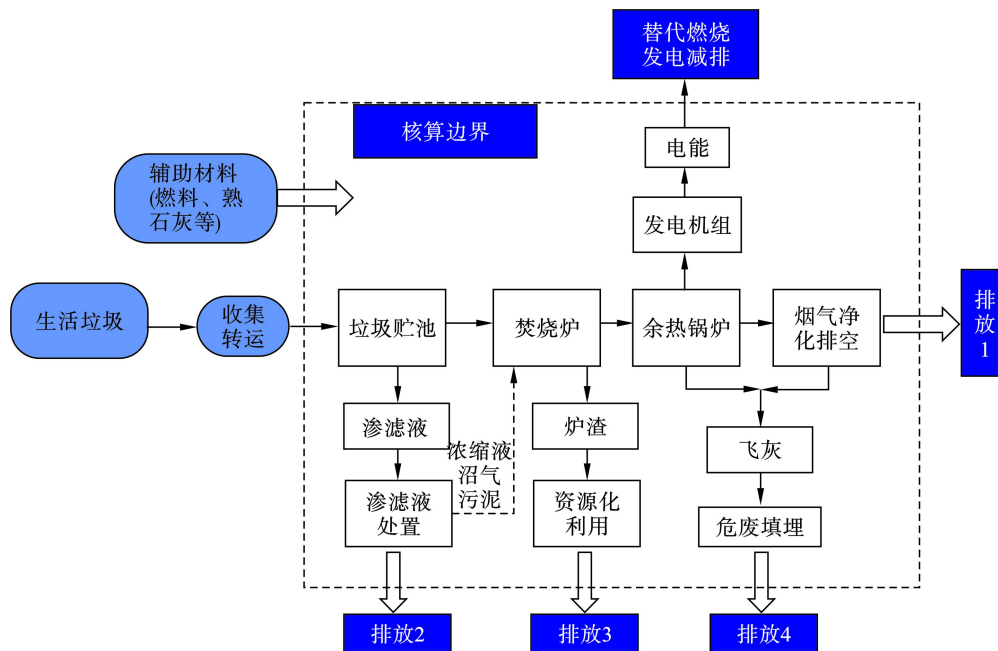


图 2 垃圾焚烧温室气体排放核算边界及排放源

Fig. 2 Accounting boundary and emission of greenhouse gas emissions from waste incineration

其次是确定核算边界内的碳排放源。通常生活垃圾经环卫车收运后, 经过转运站统一送入焚烧厂。由于我国生活垃圾普遍存在热值低、含水率高等特点, 入厂垃圾卸料后进入垃圾池, 一般会堆存 3 ~ 5 d, 以导出渗滤液提高入炉垃圾热值^[6-7]。随后垃圾进入焚烧炉燃烧, 产生的热能经过余热锅炉发电, 部分电能供厂区设备和办公自用, 其余电能并

入电网。垃圾池排出的渗滤液经调节池+厌氧反应器+膜生物反应器处理后达标排放, 过程中产生的污泥和浓缩液送入焚烧炉掺烧。烟气经过烟气净化工艺后经烟囱向大气排放。焚烧产生的炉渣转至炉渣综合利用工厂资源利用, 产生的飞灰运至专门的危险废物填埋场进行后续处置。

从上述分析可得, 垃圾焚烧工艺碳排放源主要

包括 4 个方面: 垃圾焚烧过程中产生的碳排放、垃圾渗滤液处置过程产生的 CH_4 和 N_2O 等、炉渣资源化利用过程中的碳排放和飞灰处置过程中的碳排放^[10]。

2 核算方法

综合国内外有关碳排放核算方法的研究进展, 给出目前应用于垃圾焚烧发电项目碳排放的几种计算方法^[11-12]。

2.1 直接测量法

直接测量法, 即在垃圾焚烧项目现场进行气体采集、监测, 得到排放气体浓度、流量等指标数据, 据此计算出排放 CO_2 的量。当前垃圾焚烧厂一般都安装有烟气在线监测系统, 通过对尾气排放的成分进行监测分析后可得到。该方法存在的问题是气体监测误差较大, 获取数据难度和成本较高, 特别是一些面源碳排放(如气体泄漏)无法做到全覆盖, 仅能对集中烟气排放进行监测。

2.2 IPCC 国家温室气体清单指南法

IPCC 国家温室气体清单指南法, 也叫排放因子法, 是根据不同层次的数据来源, 核算、评估某一个具体过程的碳排放。针对垃圾填埋、焚烧等过程, 清单都提出了核算评估的活动数据、排放因子等。2019 年 5 月, IPCC 通过了修订版的国家温室气体清单指南, 该指南在 2006 年版的基础上进行了优化, 为世界各国计算温室气体排放提供了新的参考^[11,13]。

根据 IPCC 提供的碳排放核算公式, 垃圾焚烧项目碳排放计算见式(1):

$$E_{\text{CO}_2} = \sum (\text{IM}_i \times \text{CCW}_i \times \text{FCF}_i \times \text{EF}_i \times 44/12) \quad (1)$$

式中: E_{CO_2} 指 CO_2 排放当量; i 分别表示生活垃圾中不同类型废弃物; IM_i 指第 i 种类型废弃物的焚烧量; CCW_i 指第 i 种类型废弃物中的碳含量比例; FCF_i 指第 i 种类型废弃物中化石碳在碳总量中比例; EF_i 指第 i 种类型废弃物的燃烧效率; 44/12 指碳转换成 CO_2 的转换系数。通常情况下上述取值为实测值或 IPCC 推荐值。

该方法存在的问题是核算过程中的一些数据选取存在个性化, 包括垃圾组分、干物质含量、干物质中的碳含量和化石碳含量等在不同国家、不同地区都是不一样的, 相应的碳排放核算结果也会有

较大差异。

2.3 质量平衡法

质量平衡法是根据质量守恒定律计算碳排放的方法, 即用输入物质的含碳量减去输出物质中的含碳量进行平衡计算, 最终得到 CO_2 排放当量的计算方法。该方法是由奥地利 Fellner 团队开发建立的适合焚烧厂碳排放核算的方法, 在欧洲一些国家的焚烧厂中有广泛的应用^[10,14]。该方法将化石源组分对应的碳排放视为直接碳排放, 通过联立元素、质量、能量等平衡方程组解的方式进行核算, 见式(2):

$$E_{\text{CO}_2} = \left[\sum (M_i \times C_i) - \sum (M_j \times C_j) \right] \times \omega \times \text{GWP} \quad (2)$$

式中: E_{CO_2} 为 CO_2 排放当量; M_i 为输入物质的量; C_i 为输入物质的碳含量; M_j 为输出物质的量; C_j 为输出物质的碳含量; ω 为输入碳元素质量转化为 CO_2 时的转化系数; GWP 为全球变暖趋势。

该方法的缺点是数据收集难度较大, 计算过程较为复杂。

2.4 全生命周期评价法

全生命周期评价法 (Life Cycle Assessment, LCA) 是从生命周期的角度核算了不同对象的碳排放过程, 具体衡量某种产品全生命周期或某活动过程中直接和间接相关的碳排放量。该方法相对更为准确, 缺点是获取数据的难度较大, 核算边界确定也较为复杂, 导致计算的结果存在一定偏差^[7-8]。

除此之外, 目前查阅的文献中还介绍了包括清洁发展机制法和上游-操作-下游表格法, 实际上可以认为是基于 IPCC 指南方法和全生命周期评价方法的简化或综合^[6,12]。

以上几种碳排放核算方法分别适用于不同的场景, 文章从计算数据的准确性和可获得性出发, 采用 IPCC 国家温室气体清单指南法来计算垃圾焚烧发电项目的碳排放。

3 结果与分析

3.1 计算结果

根据项目核算边界内的 4 个碳排放源, 分别计算如下。

3.1.1 垃圾焚烧过程碳排放 通过采用现场采样方法与清单指南推荐值相结合的方式, 对焚烧厂垃圾的成分进行了分析, 确定有关排放因子。将本项

目现场垃圾分为以下 9 种：厨余垃圾、纸张类、塑料、纺织物、竹木、渣石、玻璃、金属和其他垃圾，见表 3。其中，生物源碳排放由于参与大气生物循环，不计入项目碳排放，化石源碳排放是项目主要排放源，因此第 i 种成分中化石碳含量占总碳的比例尤为关键。此外，焚烧炉燃烧效率取值为 0.95。

表 3 垃圾组分有关数据取值

Table 3 Relevant data values of domestic waste components

垃圾组分	组分比例 (湿基)	%		
		干物质含量 占湿重	总碳含量 占干重	化石碳 占总碳
厨余垃圾	58.27	30	48	0
纸张类	5.86	85	46	1
塑料	14.39	99	75	100
纺织物	4.15	80	48	20
竹木	6.48	85	49.6	0
渣石	5.26	85	24.3	0
玻璃	1.69	98	0.5	0
金属	0.92	99	4.5	0
其他垃圾	3.01	99	1.2	50
总计	100	/	/	/

该项目焚烧过程的碳排放计算结果，见表 4，项目焚烧过程每日碳排放量为 733.78 tCO₂，换算为吨垃圾碳排放强度为 384.70 kgCO₂。

表 4 生活垃圾焚烧项目单日碳排放计算结果

Table 4 Calculation results of daily carbon emission of domestic waste incineration power generation project

垃圾组分	日处理量/t	碳排放量/t	碳排放占比/%
厨余垃圾	1 111.44	0.00	0.00
纸张类	111.77	1.52	0.21
塑料	274.47	709.90	96.74
纺织物	79.16	21.18	2.89
竹木	123.60	0.00	0.00
渣石	100.33	0.00	0.00
玻璃	32.24	0.00	0.00
金属	17.55	0.00	0.00
其他	57.41	1.19	0.16
总计	1 907.47	733.78	100

此外，焚烧炉配备 2 台辅助燃烧器，用于焚烧炉点火以及当垃圾热值过低，或不能保证炉膛内的

温度在 850 ℃ 以上时，辅助燃烧器自动投入运行，燃烧时产生碳排放。点火系统采用 0 号轻柴油作为辅助燃料，排放因子为 3.096 kgCO₂/kg。按照每年单台炉子检修停工 1 次计算，耗油量每炉次为 26 吨；燃烧器自动投入运行柴油消耗量折合为 0.89 t/d。计算得到该焚烧项目 t 垃圾约消耗柴油 0.632 kg，产生碳排放 1.956 kgCO₂/t。

3.1.2 渗滤液处理过程碳排放

(1) CH₄ 排放计算

根据 IPCC 温室气体清单污水处理过程 CH₄ 排放计算，见式(3)：

$$\text{CH}_4\text{排放} = (\text{生化需氧量 (BOD)} \times \text{CH}_4\text{排放因子}) - \text{CH}_4\text{回收量} \quad (3)$$

本项目垃圾渗滤液处理站设计规模为 1 000 m³/d，实际处理 556.1 t/d，平均进口 COD 为 43 096 mg/L，平均出口 COD 为 157 mg/L，COD 消减 42 939 mg/L；BOD/COD 转换系数取 0.43；CH₄ 排放因子为 0.099；CH₄ 回收量为 0。计算得到该焚烧项目渗滤液处理每日 CH₄ 排放量为 1 016.31 kg，折合吨垃圾碳排放为 0.533 kgCH₄。

(2) N₂O 排放计算

渗滤液中的氮会引起 N₂O 排放，根据 IPCC 温室气体清单污水处理过程 N₂O 排放计算方法：

$$\text{N}_2\text{O 排放} = \text{污水中的氮含量} \times \text{排放因子} \times 44/28$$

本项目渗滤液平均进口总氮为 1 501 mg/L，渗滤液总氮含量为 762.11 kg/d，排放因子默认值为 0.005。计算得到项目 N₂O 排放量为 5.98 kg/d，折合吨垃圾碳排放为 3.14 gN₂O。

3.1.3 飞灰处理过程碳排放 项目飞灰采用水泥及有机螯合剂或磷酸盐的稳定化处理法，稳定化后运至园区指定填埋场。涉及碳排放的包括飞灰输送系统、搅拌系统及控制系统的用电、汽车运输等过程。其中设备用电由焚烧厂自身发电提供，在计算上网电量时已扣除，不涉及外来电力碳排放，这里仅考虑飞灰运输过程的碳排放。

项目飞灰填埋场和焚烧项目位于同一园区，按照运输距离 1 km，采用载重量为 12.5 t 货车，汽车排放因子为 2.925 tCO₂/t。计算得到该焚烧项目飞灰处理过程涉及的碳排放为 3.51 kgCO₂/d，折合为吨垃圾排放量为 1.84 gCO₂。

3.1.4 炉渣处理过程碳排放 项目焚烧炉排渣和

余热锅炉积灰经落渣管进入出渣机,由出渣机输送至振动输送机并最终排至渣池,渣池内的炉渣被渣吊抓入运渣车后送至炉渣综合利用厂。同样不考虑设备用电过程的碳排放,只计算炉渣运输过程碳排放。

项目每日炉渣产生量为 352.1 t,运输距离约为

4 km,可以计算得到该焚烧项目炉渣处理过程碳排放为 122.85 kgCO₂/d,折合为吨垃圾碳排放量为 64.4 gCO₂/t。

3.1.5 项目碳排放结果合计 综上,该焚烧发电项目碳排放计算结果,见表 5。

表 5 垃圾焚烧发电项目碳排放合计

Table 5 Total carbon emissions of waste incineration power generation project

排放类型	气体类型	排放量/kg	变暖潜势值	CO ₂ 当量值/kg·t ⁻¹	排放占比/%
焚烧过程排放	CO ₂	384.70	1	384.70	96.44
点火系统排放	CO ₂	1.96	1	1.96	0.49
渗滤液处理排放	CH ₄	0.53	21	11.19	2.81
	N ₂ O	3.14E-03	310	0.97	0.24
飞灰处理排放	CO ₂	1.84E-03	1	1.84E-03	0.00
炉渣处理排放	CO ₂	6.44E-02	1	6.44E-02	0.02
合计	/	/	/	398.89	100

表 5 中,CH₄、N₂O 根据全球变暖潜势值折算为 CO₂ 当量值,其中 CH₄ 为 21, N₂O 为 310。该垃圾焚烧项目核算边界内的碳排放为 398.89 kgCO₂e/t,其中焚烧过程碳排放为 384.70 kgCO₂e/t,占总碳排放的 96.44%,而塑料等化石源垃圾燃烧的碳排放又占焚烧过程总排放的 96.74%;其次渗滤液处理过程的碳排放为 12.17 kgCO₂e/t,占比 3.05%;其他处置过程碳排放合计仅占约 0.5%。

按照 2020 年全国生活垃圾焚烧处理量 14 607.6 万吨计算,我国仅垃圾焚烧一年碳排放达 5 826.83 万 t CO₂ 当量。

3.2 减碳路径分析

为有效降低垃圾焚烧发电项目的碳排放,建议从以下几个方面入手^[14]。

(1) 积极推行垃圾分类,实现分类垃圾循环利用,特别是塑料、金属等可再生资源的循环利用,减少垃圾中塑料制品比例,可以大幅减少焚烧过程碳排放。

(2) 建立厨余垃圾分类收集、分类运输、集中处理的运行机制,减少入厂垃圾中厨余垃圾的比例,从而减少由于大量瓜果蔬菜、食物残渣等有机成分导致渗滤液产量增加,产生 CH₄ 等温室气体。

(3) 用充分发酵的方式提高入炉垃圾热值,并将渗滤液处理产生的沼气回用至焚烧炉,并减少辅助燃料(柴油)等的使用,从而减少渗滤液处理、点火系统等产生的碳排放。

(4) 建设多源固废集约化协同处置产业园,将炉渣、飞灰和厨余垃圾等处置项目与焚烧项目集聚化协同,发挥设施共享、能源梯级利用等优势,减少废物处置过程的碳排放。

4 减排效应研究

垃圾焚烧发电是参与碳排放交易最重要的细分领域之一,其主要通过 2 种方式实现温室气体减排:替代填埋方式处理生活垃圾,避免了垃圾填埋产生以 CH₄ 为主的温室气体排放;利用垃圾焚烧产生热能发电,替代燃煤发电,减少燃煤产生的温室气体排放,属于可再生能源发电项目。为分析垃圾焚烧发电项目的减排效应,需要先明确上述 2 种基准线排放,即替代垃圾填埋产生的碳排放以及替代燃煤发电相同电量产生的排放^[15-16]。

4.1 替代填埋的基准线排放

计算垃圾填埋产生 CH₄ 排放量的情境为:在垃圾焚烧发电项目实施之前,生活垃圾均采用填埋处置方式,且填埋场没有沼气收集利用装置。需要说明的是,由于不同地区的温度和湿度差异,会影响到填埋场微生物的活性,进而对生活垃圾的降解速率产生显著差异,不同地区计算填埋场基准碳排放会有一定差别。

本文根据 IPCC 温室气体清单编制指南,按照非管理—浅埋(<5 m)处置方式,无 CH₄ 回收装置,相关排放因子采用默认值。计算得到日处理 1 907.5 t

的垃圾填埋场 CH_4 排放量为 50.66 t, 折合为吨垃圾碳排放量 557.75 $\text{kgCO}_2\text{e/t}$ 。

4.2 替代燃煤发电的基准线排放

根据焚烧厂运行并网数据, 除去厂区自用电 (占比约 16%) 外, 吨垃圾上网电量为 487.46 kWh。根据安徽省电网排放因子 0.7913 $\text{kgCO}_2/\text{kW}\cdot\text{h}$, 计算得到替代燃煤发电的碳排放基准线, 折合为吨垃圾碳排放量 385.73 kgCO_2 。

4.3 减排效应分析

根据上述分析, 垃圾焚烧减排量定义如下。

垃圾焚烧减排量=替代简易填埋排放+替代燃煤发电排放-垃圾焚烧实际排放

综上, 该垃圾焚烧发电项目通过替代简易填埋排放和替代燃煤发电排放合计为 943.48 $\text{kgCO}_2\text{e/t}$, 项目实际碳排放为 398.89 $\text{kgCO}_2\text{e/t}$, 因此项目实际减排量为 544.59 $\text{kgCO}_2\text{e/t}$ 。按照该焚烧厂年处理生活垃圾 73 万吨计算, 年度碳减排可达 39.75 万吨。

5 结论

运用 IPCC 国家温室气体清单指南法对合肥市某 2 000 t/d 生活垃圾焚烧发电项目碳排放进行了计算和减排分析。

(1) 垃圾焚烧发电项目碳排放源主要包括垃圾焚烧过程的碳排放、垃圾渗滤液处置过程产生的 CH_4 和 N_2O 等、炉渣资源化利用过程中的碳排放以及飞灰处置过程中的碳排放。

(2) 该生活垃圾焚烧发电项目碳排放强度为 398.89 $\text{kgCO}_2\text{e/t}$, 其中焚烧过程碳排放为 384.7 kg/t , 占总碳排放的 96.44%, 而塑料组分垃圾焚烧是主要碳排放源; 其次是渗滤液处理过程造成的 CH_4 排放, 约为 11.19 $\text{kgCO}_2\text{e/t}$, 占比 2.81%。

(3) 垃圾焚烧发电项目替代垃圾填埋基准线排放为 557.75 $\text{kgCO}_2\text{e/t}$, 替代燃煤发电基准线排放为 385.73 $\text{kgCO}_2\text{e/t}$, 项目综合减排量为 544.59 $\text{kg CO}_2\text{e/t}$, 表明生活垃圾焚烧发电项目具有很好的碳减排效益。

(4) 通过垃圾分类, 减少塑料、厨余垃圾和辅助燃料投用, 建设多源固废集约化协同处置园区等多

种方式, 可以有效降低垃圾焚烧发电项目碳排放。

参考文献

- [1] 胡艳麟, 朱齐艳. 《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南》(2019 年修订版) 废弃物卷修订浅析[J]. 低碳世界, 2021, 11(9): 49-50.
- [2] WANG L A, HU G, GONG X, et al. Emission reductions potential for energy from municipal solid waste incineration in Chongqing[J]. Renewable Energy, 2009, 34(9): 2074-2079.
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2020 年城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [4] 仲璐, 胡洋, 王璐. 城市生活垃圾的温室气体排放计算及减排思考[J]. 环境卫生工程, 2019, 27(5): 45-48.
- [5] 卢鹏, 彭莉, 丁社光, 等. 城市生活垃圾处理处置过程的碳排放核算模型[J]. 广东化工, 2019, 46(20): 72-74.
- [6] 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.
- [7] GUO Y, GLAD T, ZHONG Z, et al. Environmental life-cycle assessment of municipal solid waste incineration stocks in Chinese industrial parks[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 139: 387-395.
- [8] 王思元. 碳排放约束下的城市固废处理系统研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2019.
- [9] HUA T, HE P, YI Z, et al. Performance evaluation of circulating fluidized bed incineration of municipal solid waste by multivariate outlier detection in China[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(6): 4-15.
- [10] BOONNORAT J, HONDA R, PANICHNUMSIN P, et al. Treatment efficiency and greenhouse gas emissions of non-floating and floating bed activated sludge system with acclimatized sludge treating landfill leachate[J]. Bioresource Technology, 2021, 330(12): 124952.
- [11] 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.
- [12] 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, 2021: 297-303.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 杨国栋, 颜枫, 王鹏举, 等. 生活垃圾处理的低碳化研究进展[J]. 环境工程学报, 2022, 16(3): 714-722.
- [16] 周莉莉, 车越, 邵俊, 等. 国外垃圾填埋场全生命周期管理经验及其启示[J]. 环境卫生工程, 2013(3): 9-14.