

城市生活垃圾处理碳排放核算

孙宁欣¹, 薛董明^{1,2}, 秦翰男^{1,2}, 薛天山², 石应杰², 沙雪华³, 朱玲^{1*}

(1.北京石油化工学院环境工程系,北京 102627; 2.中国环境科学研究院,北京 100012;
3.北京首创生态环保集团股份有限公司,北京 100144)

摘要:以国内某生活垃圾焚烧厂为例,通过 Kaya 恒等式和 LMDI 加和分解法,识别影响城市生活垃圾碳排放的关键因素,再利用公式法和 IPCC 国家温室气体清单指南法,分析垃圾处理全过程中的主要温室气体排放量,并用 SimaPro 软件计算 CO₂ 排放量验证核算结果。研究发现主要排放的污染气体为 CO₂、CH₄、N₂O,各个过程累计排放量为 439.047 7 kg,CO₂ 当量值共计 460.9 kg/t;对碳排放进行全生命周期分析发现焚烧过程碳排放占比最大,为 95.1%,其次是渗滤液处理过程,占比 4.89%。SimaPro 软件计算 CO₂ 累计排放 440 kg,2 种方法结果相近,对核算结果提供了可行性依据。最后根据垃圾处理各个环节的特点,从技术升级、工艺优化以及资源化和无害化处理等方面提出了相应的减排措施。

关键词:碳核算;双碳;城市生活垃圾处理场;焚烧技术;温室气体排放

中图分类号:X701

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)05-0197-07

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.05.033

Carbon emission accounting for municipal solid waste disposal

SUN Ning-xin¹, XUE Dong-ming^{1,2}, QIN Han-nan^{1,2}, XUE Tian-shan², SHI Ying-jie²,
SHA Xue-hua³, ZHU Ling^{1*}

(1.Department of Environmental Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102627, China;
2.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;
3.Beijing Capital Eco-Pro Group Co., Ltd., Beijing 100144, China)

Abstract: Taking a domestic waste incineration plant as an example, the key factors affecting the carbon emissions of municipal solid waste were identified through the Kaya identity and LMDI addition and decomposition method, and the main greenhouse gas emissions in the whole process of waste treatment were analyzed by reusing the formula method and the IPCC national greenhouse gas inventory guide method, and the CO₂ emissions were calculated by SimaPro software to verify the accounting results. The results showed that the main pollutant gases were CO₂, CH₄ and N₂O, and the cumulative emissions of each process were 439.047 7 kg, and the total CO₂ equivalent value was 460.9 kg·t⁻¹. The whole life cycle analysis of carbon emissions showed that the carbon emissions of the incineration process accounted for the largest proportion of carbon emissions, accounting for 95.1%, followed by the leachate treatment process, accounting for 4.89%. SimaPro software calculates the cumulative CO₂ emission of 440 kg, and the results of the two methods are similar, which provides a feasible basis for the calculation results. Finally, based on the characteristics of each stage of waste treatment, corresponding emission reduction measures were proposed from the aspects of technological upgrades, process optimization, and resource recovery and harmless treatment.

Key words: carbon accounting; double carbon; municipal solid waste disposal site; incineration technology; greenhouse gas emissions

自2020年9月中国提出“双碳”战略目标以来,城乡建设领域的低碳化进程加速推进。2022年6月,住房和城乡建设部联合国家发改委印发《城乡建设领域碳达峰实施方案》,明确提出将城镇污水处理和生活垃圾处理低碳化作为实现碳达峰的关键任务之一。与此同时,截至2024年底,我国常住人口城镇化率已达到66.16%^[1],城市生活垃圾产生量日益增多,垃圾无害化处理过程都会产生CO₂、

CH₄、N₂O等温室气体,因此统计不同处理方式中温室气体排放量,进而降低城市生活垃圾处理过程中的碳排是推进“双碳”工作的当务之急。

对于各种生活垃圾处理方式碳排放的核算,可依据《IPCC国家温室气体清单指南》^[2]、GB/T 24040—2008《环境管理生命周期评价原则与框架》^[3]、GB/T 32150—2015《工业企业温室气体排放核算和报告通则》^[4]、《温室气体排放核算方法与报

收稿日期:2025-07-14;修回日期:2026-03-10

基金项目:国家重点研发计划(2023YFC3708602)

作者简介:孙宁欣(2002-),女,硕士生;朱玲(1975-),女,博士,教授,研究方向为污染减排技术方面的研究,通讯联系人,zhuling75@bipt.edu.cn。

告指南《生活垃圾焚烧厂》^[5]、HJ 2035—2013《固体废物处理处置工程技术导则》^[6]等。本文中采用了应用较为广泛的 IPCC 国家温室气体清单指南法,即排放因子法^[7],针对某城市生活垃圾处理场垃圾处理过程中的碳排放进行核算与分析。

针对城市生活垃圾处理全过程碳排放核算的研究较少。胡梦等^[8]采用 LCA 方法,研究发现建筑(装修)垃圾经过二次售卖、再利用等资源化处理后减碳量明显,有良好的绿色减排效应;崔雯婧^[9]采用“IPCC2006 指南”的一阶衰减模型对中国 2004—2021 年城市生活垃圾碳排放进行量化,卫生填埋法是单位碳排放量最高的处理方式;高泽阳^[10]使用物料平衡法,建立了生活垃圾焚烧厂运行期间 CO₂、CH₄、N₂O 等温室气体的量化方法,并以某典型生活垃圾焚烧发电厂温室气体的各类排放量进行验证;姚雁彬^[11]结合 IPCC 指南、《省级温室气体清单编制指南》等方法,核算了 1980—2019 年期间卫生填埋、焚烧、堆肥、露天焚烧和露天堆砌 5 种生活垃圾处理方法,发现提高生活垃圾的焚烧率是最佳的减排方法;杨清雯等^[12]采用排放因子法,通过构建垃

圾渗滤液处理过程中的碳排放核算体系,针对渗滤液处理提出相应建议。

目前主要围绕垃圾处理某一环节的碳排放开展研究,针对全过程碳排放核算的研究较少。本文中根据 2003—2023 年全国城市垃圾处理的数据和相关人口经济数据,通过 Kaya 恒等式和 LMDI 加和分解法,识别影响城市生活垃圾碳排放的关键因素;基于现场原始数据,以某典型城市生活垃圾处理场为研究对象,通过对各处理环节合理归类,采用经验公式和清单法、SimaPro 软件对整个工艺流程进行系统核算,并从生活垃圾资源化利用和垃圾焚烧处理过程中的技术工艺提升等方面提出相应减排措施,为国内同类型生活垃圾处理厂全过程的碳减排提供数据支持。

1 影响城市生活垃圾处理碳排放的因素识别

1.1 数据来源

表 1 中本研究选取的 2003—2023 年城市生活垃圾相关数据来源于国家统计局《中国统计年鉴》^[13]、中华人民共和国住房和城乡建设部《中国城乡建设统计年鉴》^[14]。

表 1 2003—2022 年中国城市生活垃圾处理及经济数据

年份	人口/ 万人	人均 GDP/ 元	处理垃圾 总量/万 t	卫生填埋处理		焚烧处理		其他处理方式	
				总量/万 t	占比/%	总量/万 t	占比/%	总量/万 t	占比/%
2003	129227	10666	7490.7	6404.0	6.97	369.9	0.48	716.8	8.82
2005	130756	14368	7993.5	6857.1	7.46	791.0	1.02	345.4	4.25
2007	132129	20494	9317.8	7632.7	8.30	1435.1	1.85	250.0	3.08
2009	133450	26180	11099.4	8898.6	9.68	2022.0	2.60	178.8	2.20
2011	134916	36277	13089.6	10063.7	10.95	2599.3	3.35	426.6	5.25
2013	136726	43497	15394.0	10492.7	11.42	4633.7	5.97	267.6	3.29
2015	138326	49922	18013.0	11483.1	12.49	6175.5	7.95	354.4	4.36
2017	140011	59592	21034.1	12037.6	13.10	8463.3	10.90	533.2	6.56
2019	141008	70078	24012.8	10948.0	11.91	12174.2	15.68	890.6	10.96
2021	141260	81370	24839.3	5208.5	5.67	18019.7	23.21	1611.1	19.82
2023	140967	89358	25401.7	1892.6	2.06	20954.4	26.99	2554.7	31.43

根据表 1,随着国家加快新型城镇化建设和政策引导的消费升级,在统计周期国内城市生活垃圾产生量整体呈现上涨趋势。其中由于 2008 电商/外卖平台兴起和 2013 年外卖普及等消费转型、2019 年垃圾分类立法等政策节点因素,2007—2019 年生活垃圾总量持续快速增加。2008 年以来,中国密集出台了一系列全国性政策文件,多维度系统推进城市生活垃圾焚烧处理率,因此焚烧方式处理的生活

垃圾占比持续增加^[15-16]。

1.2 研究方法

根据文献[9],垃圾处理碳排放强度(EI)、垃圾处理结构效应(DS)、垃圾处理能耗效应(TC)、能源使用强度效应(EC)、经济效应(GDPPC)、城市化和人口效应(PE)均为影响城市生活垃圾碳排放强度的驱动因素。本研究运用 Kaya 恒等式分解 5 个驱动因素,即排放强度效应 EI(emission intensity)、处

理结构效应 TS (treatment structure)、产生强度效应 GI (generation intensity)、经济发展效应 ED (economic development) 和人口规模效应 PS (population scale)^[11], 应用 LMDI 加和分解法^[17] 计算碳排放量。

$$E_{\text{CHG},t} = \sum_i E_{i,\text{CHG},t} = \sum_i (E_{i,\text{CHG},t}/M_{i,t}) \times (M_{i,t}/M_t) \times (M_t/\text{GDP}_t) \times (\text{GDP}_t/\text{POP}_t) \times \text{POP}_t = \sum_i \text{EI}_{i,t} \times \text{TS}_{i,t} \times \text{GI}_t \times \text{ED}_t \times \text{PS}_t \quad (1)$$

式中, $E_{i,\text{CHG},t}$ 为 t 年以 i 方法处理的碳排放量, 处理方法包括一般焚烧、卫生填埋和其他处理方式; $M_{i,t}$ 为 t 年处理的垃圾量; M_t 为 t 年城市生活垃圾处理总量; GDP_t 为 t 年的国内生产总值; POP_t 为 t 年的人口数量。

上述 5 个因素对城市生活垃圾温室气体排放量影响效应的计算方法可参考文献[9]。

1.3 碳排放量 LMDI 分解结果分析

根据表 2 所示的 Kaya 恒等式计算结果, 可以观

表 2 2003—2022 年中国城市生活垃圾处理

碳排放各分解因素贡献率 %

因素年份	ΔEI 贡献率	ΔTS 贡献率	ΔGI 贡献率	ΔED 贡献率	ΔPS 贡献率
2003	0	0.1	-18.0	21.0	1.5
2005	0	-0.5	-18.0	6.0	7.0
2007	0	1.0	-9.5	12.0	-0.5
2009	0	0.5	-9.0	8.5	1.5
2011	0	-1.0	-9.0	9.0	4.5
2013	0	-1.0	-6.5	7.0	4.0
2015	0	-8.0	-14.5	25.5	17.0
2017	0	6.0	-18.0	21.0	5.0
2019	0	4.0	-8.5	16.0	-1.0
2021	0	-2.0	-7.5	10.0	1.5
2022	0	2.0	5.0	-4.0	-0.5

察到不同因素对碳排放贡献率的变化趋势。排放强度效应 ΔEI 的数值范围均低于 0.01%, 说明其对碳排放的影响较小。产生强度效应 ΔGI 和经济发展效应 ΔED 分别表现出最强的抑制作用和促进作用, 这表明经济发展在推动碳排放增长方面起到了显著作用, 而产生强度效应则有助于抑制碳排放的增加。人口规模效应 ΔPS 与人口增长正相关, 生活垃圾产生量和人均 GDP 总体均呈增加趋势, 这进一步推动了碳排放的增长。

处理结构效应 ΔTS 在不同阶段的贡献率存在差异, 尤其在 2017 年后整体呈现驱动作用。这一趋势与我国在“十三五”和“十四五”规划中继续提高垃圾焚烧比率的政策目标相吻合。通过选择最佳可行的处理技术, 可以有效降低碳排放。因此, 本文中在处理结构效应 TS 因素方面, 选择目前占比最大的焚烧技术, 进行整个处理过程中碳排放的计算, 以期减少碳排放提供科学依据和技术支持。

2 研究对象与研究边界

2.1 研究对象

本文中以某城市垃圾焚烧厂为核算对象, 规模为每日处理 1 000 t 垃圾, 垃圾焚烧采用 2 台单台处理能力为 500 t/d 的往复式炉排炉, 并均配置了余热锅炉。进入焚烧厂的比例渗滤液处理采用对“预处理+厌氧+MBR 系统+臭氧催化氧化”工艺^[18], 炉渣收集到渣坑内, 就近填埋; 焚烧飞灰经稳定化稳定后就近处理; 厨余垃圾以堆肥方法进行处理优先实现资源化利用。

根据《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》^[19], 本文将城市生活垃圾划分为厨余垃圾、纸张、塑料、纺织物、木材、灰石、玻璃、金属和其他垃圾 9 类物理组分, 结果见表 3。

表 3 某城市垃圾组分有关数据

序号 i	物理组分	日处理量 E_i/t	组分比例(湿基) $A_i/\%$	干物质含量占湿重 $B_i/\%$	总碳含量占干重量 $C_i/\%$	化石碳占总碳 $D_i/\%$	碳排放量 F_i/t	碳排放占比 $H_i/\%$
1	厨余垃圾	803.10	57.62	30	48.0	0	0.00	0.00
2	纸张类	210.88	15.13	85	46.0	1	2.87	0.47
3	塑料	228.44	16.39	99	75.0	100	590.83	97.16
4	纺织物	52.68	3.78	80	48.0	20	14.10	2.32
5	木竹	11.43	0.82	85	49.6	0	0.00	0.00
6	渣石	37.07	2.66	85	24.3	0	0.00	0.00
7	玻璃	28.99	2.08	98	0.5	0	0.00	0.00
8	金属	7.67	0.55	99	4.5	0	0.00	0.00
9	其他垃圾	13.52	0.97	99	1.2	50	0.28	0.05
	总计	1393.78	100.00	—	—	—	608.08	100.00

由于生物源碳排放参与的是大气生物循环,因此不计入项目碳排放,根据垃圾分类确定相关排放因子^[20]。

2.2 碳排放核算边界

确定碳排放核算边界可以有效避免核算工作重

复或者环节漏算。本研究的碳排放核算边界见图 1,主要涉及到的碳排放环节有排放途径 1 渗滤液处理排放,排放途径 2 焚烧过程排放和点火系统排放,排放途径 3 炉渣处理排放,排放途径 4 飞灰处理排放,以及贯穿整个处理过程中的电耗。

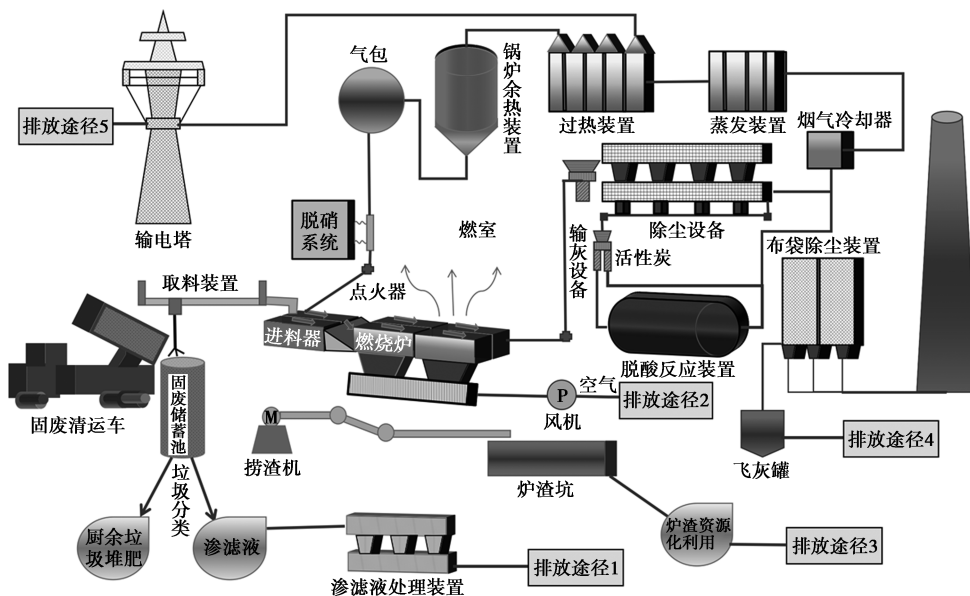


图 1 垃圾处理全周期流程

3 研究方法

3.1 碳排放核算方法

本文中采用经验公式法^[2]和 IPCC 温室气体清单法^[2],确定垃圾处理全过程碳排放计算公式如下:

$$\text{温室气体(GHG) 排放} = \text{活动数据(AD)} \times \text{排放因子(EF)} \quad (2)$$

式中,活动数据(AD)为产生温室气体排放的生产消费活动,如化石燃料的消耗量、石灰石原料的消耗量、净使用电量等;排放因子(EF)为用于确定与活动水平数据相对应的温室气体排放量,其中包括单位热值的含碳量或元素碳含量(%)、氧化率(%)等。

根据《省级能源活动化石燃料燃烧温室气体清单》计算化石燃料燃烧过程 CO₂ 排放量^[20]。采用计算公式如下:

$$E = \sum \sum \sum (EF_{i,j,k} \times \text{Activity}_{i,j,k}) \quad (3)$$

式中,E 为碳排放总量,kg;EF 为排放因子;Activity 为各项燃烧活动,kg;取各个燃烧环节的温室气体排放量,本文中垃圾焚烧过程排放量为 438.28 kg;渗滤液处理过程排放量为 0.692 9 kg;炉渣处理过

程排放量为 0.052 8 kg;飞灰处理过程排放量为 0.018 7 kg。

3.2 各环节碳排放计算方法

3.2.1 垃圾焚烧过程

垃圾焚烧设备每年处理垃圾 36.5 万 t,焚烧炉配备 2 台辅助燃烧器(0 号轻柴油),油耗为 160~735 kg/h,当处理的垃圾热值太低或者炉膛内温度低于 850℃时^[21]自动启动。垃圾焚烧过程总碳排放计算公式如下^[7]:

$$F_1 = F_B + F_F = \sum_i F_{C_i} + F_F = 3.37E_i B_i C_i D_i \eta_i + (M_F T_d I_D / N) \quad (4)$$

式中,F₁为垃圾焚烧过程总碳排放,t;F_B为垃圾焚烧炉碳排放量,t;F_F为点火系统碳排放量,t;E_i为日处理量,t,组分比例(湿基%)和总计日处理量(t)之积;B_i为干物质含量占湿重,%;C_i为总碳含量占干重量,%;D_i为化石碳占总碳,%;η_i为焚烧炉燃烧效率,取值 0.95;M_F为辅助燃烧器每小时耗油量,kg/h,取值 450 kg/h;T_d为每日工作时长,h/d,取值 2 h/d;I_D为柴油的碳排放因子,kg/kg,取值 3.096;N 为总计日处理量,t。

3.2.2 渗滤液处理过程

根据表 4 垃圾渗滤液进出口水质,化学需氧量

(COD)、生物需氧量(BOD)、氨氮等常规污染物浓度较高,处理过程中会产生大量的CO₂、CH₄和N₂O等温室气体。

表4 各主要部分进出水水质表

项目	COD _{Cr}	BOD	NH ₃ -N	TN	SS
焚烧发电厂来水(210 m ³ /d)	60000	35000	1500	2000	5000
餐厨垃圾处理来水(69 m ³ /d)	50000	30000	1000	1500	500
生活污水来水(10.1 m ³ /d)	350	200	30	40	200
医疗废物处理来水(16 m ³ /d)	200	100	40	50	200
市政污泥处理来水(71.3 m ³ /d)	500	300	50	70	100
出水	26.4	9.5	4.5	8.8	—
出水要求	≤60	≤10	≤10	—	—

污水处置过程CH₄排放计算方法如下:

$$F_m = \Delta_{\text{BOD}} \times Q \times I_{\text{CH}_4} \quad (5)$$

式中, F_m 为每日CH₄排放量,kg; Q 为处理水量,t/d,取值375 t/d; Δ_{BOD} 为BOD削减量,mg/L;BOD/COD转换系数取0.43,经表4数据计算取值为25 788.65 mg/L; I_{CH_4} 为CH₄排放因子,取值0.099。

污水处置过程N₂O排放计算方法如下:

$$F_N = 1.57 \Delta_N Q I_{\text{N}_2\text{O}} \quad (6)$$

式中, F_N 为每日N₂O排放量,kg; $I_{\text{N}_2\text{O}}$ 为N₂O排放因子;排放因子默认值为0.005; Δ_N 为总氮削减,mg/L,经表4数据计算取值为1 991.2 mg/L。

3.2.3 炉渣处理过程

炉渣处理过程碳排放量计算公式如下:

$$F_a = (\eta_2 + \eta_3) \times L_2 \times I_D \times (M_3/M_2) \quad (7)$$

式中, F_a 为炉渣处理过程碳排放,kg/d; I_D 为柴油的碳排放因子,kg/kg; L_2 为炉渣运输距离,km,取值10 km; η_2 为货车满载能耗,kg/km;采用载重量为12.5 t货车,满载时能耗值0.255 kg/km; η_3 为货车空返能耗,kg/km,取值0.153 kg/km; M_3 为日排放炉渣量,t/d,取值188 t/d; M_2 为货车载重,t,采用载重量为12.5 t货车。

3.2.4 飞灰处理过程

飞灰处理过程碳排放量计算公式如下:

$$F_b = (\eta_2 + \eta_3) \times L_1 \times I_D \times (M_1/M_2) \quad (8)$$

式中, F_b 为飞灰处理过程碳排放,kg/d; L_1 为飞灰运输距离,km;此垃圾处理厂飞灰填埋场项目和焚烧项目位于同一园区,运输距离为10 km; M_1 为日排放飞灰量,t,该处理场飞灰排放量25 t/d。

3.2.5 电力损耗

电力损耗碳排放量计算公式如下:

$$F_E = M_E \times I_E \times \text{GWP}_{\text{CO}_2} \quad (9)$$

式中, F_E 为电力消耗产生的排放量,t/a; M_E 为年用电量,MWh/a,根据台账数据,用电量为8.834 MWh; I_E 为CO₂电力排放因子,t/MWh,取值0.570 3 t/MWh^[22];GWP_{CO₂}为CO₂全球增温潜势值,取值为1。

3.3 碳排放标准化处理

通过转化为排放强度(g/t或kg/t)得到的标准化比较基准,根据变暖趋势值和CO₂当量值,对各环节产生的温室气体归一化处理^[23]。

4 研究结果与分析

4.1 碳排放核算结果

4.1.1 各环节碳排放核算结果

根据表3,采用公式(4),垃圾焚烧过程碳排放强度计算结果如表3所示,焚烧过程碳排放总量为608.08 t/d,垃圾碳排放强度为436.28 kg/t。

碳排放量进行标准化处理后结果见表5。从表5可以看出,塑料类垃圾的碳排放量最高达到590.83 t,占总碳排放量的97.16%,是焚烧过程中最主要的碳排放来源。加之燃烧器自动投入运行柴油消耗量折合为0.9 t/d,焚烧每吨垃圾约消耗柴油0.646 kg,产生碳排放2.0 kg/t,计入焚烧过程产生的碳排放。

表5 垃圾处理场碳排放强度核算汇总

排放类型	气体类型	气体排放量/kg	排放强度/(kg·t ⁻¹)	CO ₂ 当量值/(kg·t ⁻¹)	排放占比/%
焚烧过程排放	CO ₂	438.2800	438.2800	438.2800	95.10
渗滤液处理	CH ₄	0.6900	0.6962	20.7000	4.89
	N ₂ O	0.0062	—	1.8500	—
炉渣处理排放	CO ₂	0.0528	0.0528	0.0528	0.12
飞灰处理排放	CO ₂	0.0187	0.0187	0.0187	0.04
电力损耗排放	CO ₂	—	—	—	—
合计	—	—	439.0477	460.9000	—

需要说明的是,此垃圾处理厂总发电量为11 750万kWh。但由于台账中没有统计厂区耗电量,所以没有进行抵消,不计入表5中。

4.1.2 基于软件对生活垃圾焚烧过程分析

由于不同省市垃圾组分仍有差异,因此本文中进一步基于LCA的理论,运用SimaPro软件对生活

垃圾焚烧过程进行生命周期评价,根据台账中的原料和废弃物的原始数据,采用软件中的既有碳排放因子,计算焚烧处理 1 t 生活垃圾产生的温室气体

CO₂,结果见图 2。2 种方法计算所得垃圾焚烧过程碳排放基本接近,分别为 439.05、440.00 kg,也验证本文中所用方法和结果的准确性。

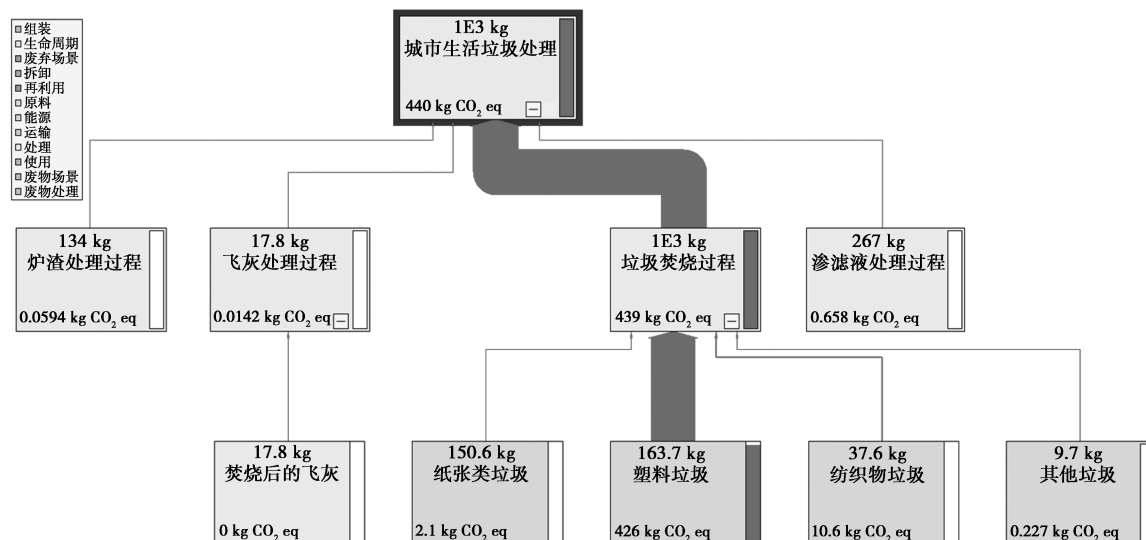


图 2 基于 SimaPro 软件的生活垃圾焚烧的二氧化碳排放量

4.2 碳排放核算结果分析与建议

经碳排放核算,在此垃圾处理过程中,碳排放量由高到低依次是垃圾焚烧过程、渗滤液处理过程、炉渣处理过程、飞灰处理过程。各个过程累计排放量为 439.047 7 kg,CO₂ 当量值共计 460.9 kg/t。

4.2.1 通过垃圾分类和资源化利用,减少焚烧过程碳排放

生活垃圾焚烧过程碳排放与其物理组分密切相关。中国《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》鼓励厨余垃圾优先资源化利用,减少进入焚烧厂的比例。在本项目中,塑料由石油基高分子化合物组成,焚烧过程碳排放量高;其次分别是纺织物和纸张类垃圾。因此通过垃圾分类,提高这些物质的利用处置率,减少垃圾焚烧量。

4.2.2 通过工艺优化和材料升级,减少渗滤液处理过程碳排放

渗滤液主要是焚烧发电厂来水和餐厨垃圾处理来水,渗滤液处理中排放气体主要是 CH₄ 和 N₂O,共计 CO₂ 当量值 22.55 kg/t,二者产生碳排放占比 4.89%。

在未来,可以通过利用新材料和新工艺实现资源循环利用来对垃圾渗滤液处理进行减排,以最终降低 CH₄ 的直接排放。Pasalari 等^[24]利用水果酶实现对垃圾渗滤液的绿色处理,从水果废料中产生的垃圾酶可以成为渗滤液预处理的可持续经济替代方案,并且可以被视为商业水解酶的有效替代品。

4.2.3 采用炉渣处理工艺,减少炉渣处理过程碳排放

炉渣处理排放过程主要产生的气体是 CO₂,CO₂ 当量值 0.052 8 kg/t,碳排放占比 0.12%。

垃圾焚烧炉渣综合处理的核心原则是优先开展“无害化”处理,如干式炉渣处理工艺、湿式炉渣处理工艺、干湿结合炉渣处理工艺、污泥压滤干化工艺避免填埋处理对土地资源、水资源的影响。其次采用“资源化”处理,获得炉渣处理的附加值,获得相应的经济效益^[25]。

4.2.4 通过资源化和无害化处理,减少飞灰处理过程碳排放

飞灰处理过程主要排放气体是 CO₂,CO₂ 当量值 0.018 7 kg/t,排放占比 0.04%。垃圾焚烧产生的飞灰中含有重金属 Zn、Cu、Cr、Pb 等元素,需进一步资源化和无害化处理^[26]。未来,我国应不断加强政府对飞灰处理的日常监管,不断创新飞灰资源化、无害化的工艺技术,实现节能减排战略目标。

4.2.5 采取节电措施,减少电力损耗碳排放分析

电力损耗是本研究所有环节都涉及到的问题。在实际应用中必须将研究重点放在技术改进和工作管理创新上,综合分析影响厂用电率的主要因素,采用主工艺节能、暖通节能、电气节能、仪器节能和建筑节能等技术手段,通过进一步完善技术系统来控制焚烧用电,降低用电率,来促进企业的长远发展^[27]。

5 结论

(1)通过 Kaya 恒等式和 LMDI 加和分解法,识别出处理结构效应是影响城市生活垃圾碳排放的关键因素,建议城市生活垃圾处理过程中需要增大焚烧处理的比例。

(2)采用 IPCC 国家温室气体清单指南法,计算得到累计碳排放 439.047 7 kg, CO₂ 当量值共计 460.90 kg/t。其中,焚烧过程排放占比最高,达 95.1%;其次是渗滤液处理,达 4.89%。

(3)根据 LCA 理论,用 SimaPro 软件计算 CO₂ 排放量 440 kg,与清单法计算结果大致相同,说明碳排放核算的各种方法存在共性相关,进一步验证了本文中碳排放核算结果的科学性和可行性。

(4)针对城市生活垃圾处理各个环节的特点、产生的污染物类型和污染物排放量,从工艺技术优化或者无害化、资源化处理等方面提出了相应的措施,以期实现生活垃圾绿色低碳处理。

参考文献

- [1] 王萍萍.人口总量降幅收窄人口素质持续提升[N].中国信息报,2025-01-22(1).
- [2] 朱松丽,蔡博峰,朱建华,等.IPCC 国家温室气体清单指南精细化的主要内容和启示[J].气候变化研究进展,2018,14(1):86-94.
- [3] 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.
- [4] 国家发展和改革委员会.GB/T 32150—2015.工业企业温室气体排放核算和报告通则[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [5] 住房和城乡建设部.GB/T 20241447-T-333.温室气体排放核算与报告标准 生活垃圾焚烧企业[S].北京:中国标准出版社,2024.
- [6] 生态环境部.HJ 2035—2013.固体废物处理处置工程技术导则[S].北京:中国环境出版社,2013.
- [7] 朱松丽.国家温室气体清单评审那些事儿[J].世界环境,2022,(5):10-12.
- [8] 胡梦,王仕,何晟,等.苏州市建筑(装修)垃圾处理全过程碳排放核算及减碳建议[J].黑龙江环境通报,2023,36(6):22-24.
- [9] 崔雯婧.中国城市生活垃圾碳排放时空演变特征与减排路径初探[D].北京:中国环境科学研究院,2024.
- [10] 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.
- [11] 姚雁彬.“碳中和”愿景下我国城市生活垃圾低碳管理研究:时空演化、驱动因素、减排路径[D].扬州:扬州大学,2022.
- [12] 杨清雯,陈惠鑫,石磊,等.渗滤液处理过程碳排放核算及减排路径探索[J].环境科学研究,2024,37(11):2444-2452.
- [13] 国家统计局.中国城市生活垃圾处理及经济数据[DB/OL].国家统计局数据库,2003—2022[2024-03-15].
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.中国城乡建设统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2022.
- [15] 国家发展和改革委员会,住房和城乡建设部.“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划[EB/OL].(发改环资[2021]642号),2021-05-13.[2024-03-15].
- [16] 国务院.关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL].国发[2021]23号,2021-10-24.[2024-03-15].
- [17] 姜向亚.基于 LMDI 模型的我国碳排放影响因素的区域分异研究[D].开封:河南大学,2013.
- [18] 许李,聂亚中,沈亮.浅析城市生活垃圾焚烧炉渣资源化利用现状[J].生态与资源,2024,(5):63-65.
- [19] 全国人民代表大会常务委员会.中华人民共和国固体废物污染环境防治法[Z].2020年修订.北京:中国法制出版社,2020.
- [20] 李捷,袁玮良,徐骄阳,等.生活垃圾转运站厨余垃圾渗滤液处理工程实践[J].中国给水排水,2024,40(8):125-129.
- [21] Guo Y, Glad T, Zhong Z, et al. Environmental life-cycle assessment of municipal solid waste incineration stocks in Chinese industrial parks, Resources, Conservation and Recycling[J]. Resources, Conservation & Recycling, 2018, 139:387-395.
- [22] 生态环境部办公厅.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[Z].环办气候函[2023]43号,2023-02-07.
- [23] 中国气象局气候变化中心.中国气候变化蓝皮书(2023)[M].北京:科学出版社,2023.
- [24] Pasalari H, Moosavi A, Kermani M, et al. A systematic review on garbage enzymes and their applications in environmental processes[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 277:116369.
- [25] 仲照福.焚烧炉渣的综合处理与资源化利用研究[J].低碳世界,2021,11(11):5-6.
- [26] 吴昊,刘宏博,田书磊,等.城市生活垃圾焚烧飞灰利用处置现状及环境管理[J].环境工程技术学报,2021,11(5):1034-1040.
- [27] 何敏仪.生活垃圾焚烧厂降低厂用电的技术措施[J].城市建设理论研究:电子版,2024,(27):19-21.■

《现代化工》欢迎广大作者踊跃投稿,投稿系统:<http://www.xdhg.com.cn>