

垃圾分类下苏州市生活垃圾处理碳排放分析

付凤英¹, 徐拥军¹, 夏金雨², 朱水元², 王宇彤², 姚凤根², 黄 嵘²

(1. 江苏现代低碳技术研究院, 江苏 苏州 215000)

(2. 苏州市环境卫生管理处, 江苏 苏州 215000)

[摘要] 以苏州市 5 个主城区为研究对象, 采用联合国政府间气候变化专门委员会 (intergovernmental panel on climate change, IPCC) 发布的国家温室气体清单指南 (简称 IPCC 清单指南), 并结合碳排放因子法, 对垃圾分类后苏州市生活垃圾处理碳排放情况进行分析。结果表明, 苏州市开展垃圾分类后, 生活垃圾处理碳排放总量波动幅度较小, 年碳排放量 155 万 t 左右。其他垃圾焚烧处理碳排放强度最大, 可回收物资源化利用表现为负碳排放, 处理每吨可回收物减碳 369.9 kg, 碳减排效应显著。苏州市生活垃圾处理碳排放强度由分类前 870.46 kg/t 下降至 410.17 kg/t, 表明持续推进垃圾分类工作、提高厨余 (餐厨) 垃圾和可回收物的资源化利用率是目前减少生活垃圾处理碳排放的有效途径。

[关键词] 生活垃圾处理, 碳排放核算, 碳减排, 资源化利用, 苏州市

[中图分类号] X705 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1001-4616(2023)03-0133-08

Carbon Emissions Analysis of Municipal Solid Waste Treatment in Suzhou After Waste Classification

Fu Fengying¹, Xu Yongjun¹, Xia Jinyu², Zhu Shuiyuan², Wang Yutong², Yao Fenggen², Huang Rong²

(1. Jiangsu Modern Low-Carbon Technology Institute, Suzhou 215000, China)

(2. Suzhou Environmental Sanitation Admition Administration Agency, Suzhou 215000, China)

Abstract: To study the situation of carbon emissions of municipal solid waste treatment in Suzhou after waste classification, this paper explores the five main urban areas of Suzhou with the method of carbon emission factor and the National Greenhouse Gas Inventory Guidelines from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The results show that the total carbon emissions of municipal solid waste treatment fluctuate fractionally, and the annual carbon emissions are around 1.55 million tons. Other waste incineration has the highest carbon emission intensity, while the recycling and utilization of recyclable materials represent negative carbon emissions. The carbon reduction of 369.9 kg per ton of recyclables is significant. Based on a slump from 870.46 kg/t to 410.17 kg/t of the carbon emission intensity of municipal solid waste treatment in Suzhou after waste classification, continuing to promote waste classification and improve the recycling efficiency of kitchen waste and recyclables is currently a prominent approach to the decrease of carbon emissions of municipal solid waste treatment.

Key words: municipal solid waste treatment, carbon emission calculation, carbon emission reduction, resourceful utilization, Suzhou

随着我国城市化进程的加快, 城市垃圾产量逐年递增。据《中国统计年鉴 2021》报告, 2020 年, 我国城市生活垃圾清运量已达 23 511.7 万 t^[1]。垃圾收运处置过程中排放的二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄) 等温室气体已成为引起气候变化的重要因素之一^[2]。据世界资源研究所 (WRI) 统计^[3], 由污水处理 (1.3%) 与固体废弃物处理 (1.9%) 组成的废物处理行业已跃升为第五大碳排放行业, 占全社会总碳排放量的 3.2%, 垃圾处理碳排放研究势在必行。

目前, 垃圾处理碳排放核算方法主要有以下几种: IPCC 清单指南法、全生命周期评价法 (life cycle assessment, LCA) 和上游—操作—下游 (upstream-operation-downstream, UOD) 表格法。IPCC 清单指南法主

收稿日期: 2022-12-05.

基金项目: 苏州市市级科技计划项目 (SS202001).

通讯作者: 徐拥军, 硕士, 高级经济师, 研究方向: 双碳政策、能源互联网. E-mail: xyj@jslowcarbon.com

要根据联合国政府间气候变化专门委员会提供的碳排放源分类及垃圾处理碳排放计算方法进行核算. 2019 年,IPCC 出版了《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》,提供了大量的缺省值,基本覆盖所有碳排放源,可为世界各国用于核算碳排放,由于其在实际核算过程中的简便性及可靠性,IPCC 清单指南法在碳排放核算中备受青睐^[4]. LCA 法可较为全面地考虑垃圾处理全过程的碳排放^[5],但由于在核算的过程中诸多数据难以获取,系统边界条件存在较大不确定性,故难以作为权威的碳排放核算方法. UOD 表格法通过对碳排放活动的基础数据收集整理,可以比较不同来源数据的结构性差异^[6],然而目前相关案例研究较少,核算过程较为复杂,在实际应用中存在较多的困难. 近年来国内学者也逐步聚焦垃圾处理碳排放研究领域,大多是基于不同的垃圾处置模式对碳排放的影响,如垃圾焚烧、填埋处理及餐厨垃圾好氧堆肥、厌氧发酵处理过程中产生的碳排放分析^[7-9],由于采用的核算方法、核算边界范围、垃圾组分及工艺参数等不同,核算结果差异较大. 2020 年我国开始全面推行垃圾分类制度,各大城市多措并举开展垃圾分类行动,垃圾分类在有效减少垃圾产量的同时提高了资源化利用率.

2020 年 6 月,苏州市开始实行新的《苏州市生活垃圾分类管理条例》,并全面建成生活垃圾分类投放、收集、运输、处置体系. 目前,苏州市生活垃圾的回收利用率已达到 35%、集中处理率超过 95%^[10],垃圾分类工作位列全国 46 个重点城市第一档. 基于苏州市良好的垃圾分类工作成效,本文以苏州市为例,采用 IPCC 清单指南针法,并结合碳排放因子法,核算在垃圾分类大背景下苏州市生活垃圾处理过程中碳排放量,明确分类后生活垃圾处理碳减排路径,以期垃圾分类协同碳减排提供思路及方法.

1 材料与方法

1.1 系统边界

研究区覆盖苏州市姑苏区、吴中区、高新区、相城区和工业园区,依据分类后的生活垃圾处理现状,以 1 t 生活垃圾作为核算单位,本研究只针对生活垃圾进行测算,不涉及危险废弃物、污泥等.

1.2 核算方法

1.2.1 其他垃圾焚烧处理碳排放

1.2.1.1 核算单元

目前,苏州市生活垃圾中的其他垃圾以苏州市光大生活垃圾焚烧发电厂统筹处理为主,碳排放核算单元如图 1 所示.

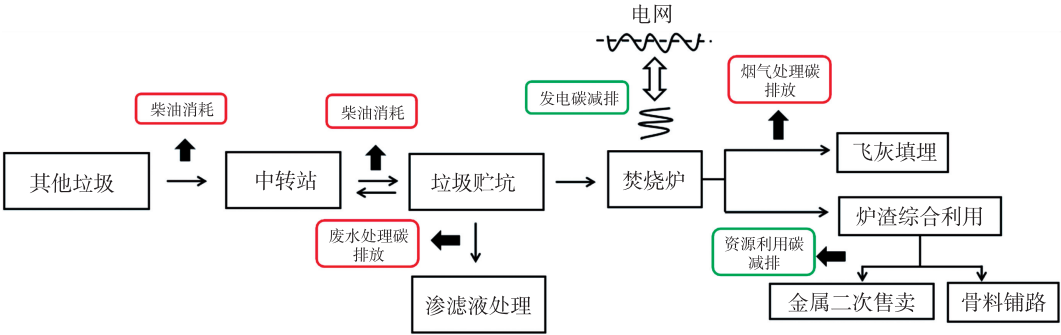


图 1 其他垃圾焚烧碳排放核算单元

Fig. 1 Carbon emission accounting unit of other waste incineration

1.2.1.2 收集中运转运输碳排放

苏州市区其他垃圾采用“收集设施+转运站+运输车”模式,碳排放主要来自运输车辆的油耗. 计算公式如下:

$$C_{\text{收运}} = D_{\text{柴油}} \times E_{\text{柴油}}, \tag{1}$$

$$C_{\text{转运}} = 2 \times L_{\text{转运}} \times \lambda_{\text{转运}} \times E_{\text{柴油}} / T_{\text{转运}}, \tag{2}$$

式中, $C_{\text{收运}}$ 为垃圾收集运输过程产生的碳排放, kg/t; $C_{\text{转运}}$ 为垃圾转运过程产生的碳排放, kg/t; $D_{\text{柴油}}$ 为其他垃圾收运车辆单位油耗, 取 3.91 L/t^[11]; $E_{\text{柴油}}$ 为柴油 CO₂ 排放因子, 取 2.63 kg/L^[11]; $L_{\text{转运}}$ 为转运站至终端处理之间的距离, 实际调研, 取均值 20 km; $\lambda_{\text{转运}}$ 为转运车辆单位距离油耗, 实际调研, 取均值 0.58 L/km;

$T_{\text{转运}}$ 为转运车辆单位车次载荷,实际调研,取均值 11 t/次;2 为转运车辆按往返计算。

1.2.1.3 渗滤液处理碳排放

其他垃圾经收运后送至垃圾贮坑停放。在贮坑停放期间,收集到的渗滤液处理过程中 COD 的削减对应产生 CH_4 、TN 的削减会产生 N_2O ,碳排放主要为生化处理阶段产生的 CH_4 和 N_2O 。根据 IPCC 公布的数据, CH_4 全球变暖潜势(global warming potential,GWP)在 100 年内是 CO_2 的 25 倍, N_2O 的 GWP 是 CO_2 的 298 倍。渗滤液处理过程产生的碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{焚烧渗滤液}} = C_{\text{焚烧渗滤液CH}_4} + C_{\text{焚烧渗滤液N}_2\text{O}}, \quad (3)$$

其中:

$$C_{\text{焚烧渗滤液CH}_4} = F_t \times \text{COD}_{\text{Cr}} \times \text{COD}_d \times E_{\text{焚烧渗滤液CH}_4} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4}, \quad (4)$$

$$E_{\text{焚烧渗滤液CH}_4} = B_0 \times \text{MCF}_{\text{渗滤液}}, \quad (5)$$

$$C_{\text{焚烧渗滤液N}_2\text{O}} = F_t \times \text{TN}_{\text{进水}} \times \text{TN}_d \times E_{\text{焚烧渗滤液N}_2\text{O}} \times \text{GWP}_{\text{N}_2\text{O}}, \quad (6)$$

式中, $C_{\text{焚烧渗滤液}}$ 为垃圾焚烧过程中渗滤液处理产生的碳排放,kg/t; $C_{\text{焚烧渗滤液CH}_4}$ 为垃圾焚烧过程中渗滤液处理 CH_4 产生的碳排放,kg/t; $C_{\text{焚烧渗滤液N}_2\text{O}}$ 为垃圾焚烧过程中渗滤液处理 N_2O 产生的碳排放,kg/t; F_t 为垃圾焚烧渗滤液产生率,经调研,分类前取 22%,分类后取 18%; COD_{Cr} 为焚烧厂渗滤液进水水质 COD,取 36 000 mg/L; $\text{TN}_{\text{进水}}$ 为焚烧厂渗滤液进水水质 TN,取 1 600 mg/L; COD_d 为 COD 去除率,取 99%; TN_d 为 TN 去除率,取 99%; $E_{\text{焚烧渗滤液CH}_4}$ 为渗滤液处理 CH_4 排放因子,kg CH_4 /kg COD; B_0 为污水中有机物可产生最大 CH_4 排放量,取 0.25 kg CH_4 /kg COD(IPCC 2006); $\text{MCF}_{\text{渗滤液}}$ 为污水处理领域 CH_4 修正因子,取 0.8(IPCC 2006); $E_{\text{焚烧渗滤液N}_2\text{O}}$ 为渗滤液处理 N_2O 排放因子,取 0.016 kg N_2O /kg TN(IPCC 2006)。

1.2.1.4 焚烧发电碳排放

其他垃圾焚烧发电碳排放核算包括垃圾中有机碳焚烧产生的直接碳排放和净购入电力产生的间接碳排放,计算公式如下:

$$C_{\text{焚烧}} = C_{\text{直接}} + C_{\text{间接}}, \quad (7)$$

其中:

$$C_{\text{直接}} = \sum (P_i \times \text{CCW}_i \times \text{FCF}_i \times \alpha_i) \times (44/12), \quad (8)$$

式中, $C_{\text{焚烧}}$ 为垃圾焚烧过程中产生的碳排放,kg/t; $C_{\text{直接}}$ 为垃圾中有机碳焚烧产生的碳排放,kg/t; $C_{\text{间接}}$ 为垃圾焚烧厂净购入电力产生的碳排放,kg/t; i 为进入终端处理的其他垃圾组分; P_i 为生活垃圾中组分 i 占比,%,见表 1; CCW_i 为第 i 种组分中碳含量比例,‰^[12]; FCF_i 为第 i 种组分中矿物碳含量比例,‰^[12]; α_i 为第 i 种组分完全燃烧效率,取 100%;44/12 为 CO_2 与 C 的分子量比率。

表 1 其他垃圾各组分占比

Table 1 Proportion of other waste components

其他垃圾组分 i	纸类	塑料	竹木	布类	厨余	果类	金属	玻璃	渣石
分类前占比	9.80	20.05	1.20	4.25	59.30	3.00	0.60	1.50	0.30
分类后占比	11.80	35.69	1.69	5.70	40.65	1.33	0.89	1.61	0.64

净购入电力产生的间接碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{间接}} = A_{\text{外购电力}} \times E_{\text{电网排放因子}} - A_{\text{发电}} \times E_{\text{电网排放因子}}, \quad (9)$$

式中, $A_{\text{外购电力}}$ 为生活垃圾焚烧外购的电量,MW·h; $A_{\text{发电}}$ 为生活垃圾焚烧上网发电量,MW·h; $E_{\text{电网排放因子}}$ 为电力 CO_2 排放因子,取 0.581 0 t/MW·h^[13]。

1.2.1.5 烟气处理碳排放

烟气处理产生的碳排放主要为处理设备产生的部分电耗,具体设施能耗如表 2 所示:

表 2 烟气处理设备能耗

Table 2 Energy consumption of flue gas treatment equipment

装置	旋转雾化器	风机	布袋除尘器	控制、运输、照明系统	合计
功率	74	5.5	61.1	100	240.6

1.2.1.6 炉渣资源再利用碳排放

经调研,生活垃圾焚烧后产生的炉渣运送至炉渣处理厂筛选出可回收金属及再生骨料,其中可回收金

属占 1.8%,再生骨料占 75%,因此炉渣资源再利用碳排放核算主要考虑再生骨料产生的碳减排,计算公式如下:

$$C_{\text{炉渣}} = -(\eta \times \gamma / \rho) \times E_{\text{骨料}}, \tag{10}$$

式中, $C_{\text{炉渣}}$ 为炉渣资源再利用产生的碳排放,kg/t; η 为炉渣率,取 22%; γ 为炉渣中再生骨料占比,取 75%; ρ 为骨料密度,取 2 500 kg/m³^[14]; $E_{\text{骨料}}$ 为再生骨料碳排放因子,取 219 kg/m³^[14].

1.2.2 其他垃圾填埋处理碳排放

1.2.2.1 核算单元

生活垃圾填埋处理以场区为边界,碳排放核算单元包括:收集中转运输、填埋场区、填埋气发电、渗滤液处理 4 个部分.

1.2.2.2 收集中转运输碳排放

同 1.2.1 其他垃圾焚烧处理收运中转过程.

1.2.2.3 填埋场区碳排放

计算公式如下:

$$C_{\text{填埋}} = C_{\text{甲烷}} \times \text{GWP}_{\text{CH}_4}, \tag{11}$$

其中

$$C_{\text{甲烷}} = (W_{\text{填埋量}} \times L_0 - R) \times (1 - \text{OX}) / W_{\text{填埋量}}, \tag{12}$$

$$L_0 = \text{MCF} \times \text{DOC} \times \text{DOC}_f \times F \times (16/12), \tag{13}$$

式中, $C_{\text{填埋}}$ 为其他垃圾填埋过程中产生的碳排放,kg/t; $C_{\text{甲烷}}$ 为其他垃圾填埋过程中产生的甲烷排放,kg/t; $W_{\text{填埋量}}$ 为垃圾填埋量,t; L_0 为垃圾填埋场甲烷产生潜力; R 为填埋气中甲烷回收量,t; OX 为甲烷氧化因子^[12]; MCF 为垃圾填埋场甲烷修正因子,取 0.9^[15]; DOC 为可降解有机碳比例^[12]; DOC_f 为填埋场垃圾可降解有机碳在有机碳中的占比,取 0.5^[16]; F 为垃圾填埋气体中 CH₄ 的占比,取 33.5%;16/12 为 CH₄ 与 C 的分子量比率.

1.2.2.4 填埋气发电碳排放

垃圾填埋产生的甲烷气体以发电、热能利用、提纯后制取清洁能源等多种方式进行能源回收利用^[17-19]. 苏州市七子山垃圾填埋场将产生的填埋气进行了回收发电,填埋气发电碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{填埋气发电}} = -(A_{\text{填埋气发电}} \times E_{\text{电网排放因子}}) / W_{\text{填埋量}}, \tag{14}$$

式中, $C_{\text{填埋气发电}}$ 为生活垃圾填埋处理过程中发电碳排放,kg/t; $A_{\text{填埋气发电}}$ 为生活垃圾填埋过程中回收的填埋气上网发电量,MW·h.

1.2.2.5 渗滤液处理碳排放

计算公式同公式(3)-(6),其中填埋场渗滤液产生率为 20%,进水水质 COD 为 3 500 mg/L、TN 为 2 000 mg/L,COD 和 TN 去除率为 99%.

1.2.3 厨余(餐厨)垃圾处理碳排放

1.2.3.1 核算单元

苏州市厨余(餐厨)垃圾处理碳排放核算单元包括:直运过程、油脂回收处理、厌氧处理、厌氧发酵产沼发电/提纯天然气、残渣和沼渣焚烧发电、沼液污水处理 6 个部分. 如图 2 所示.

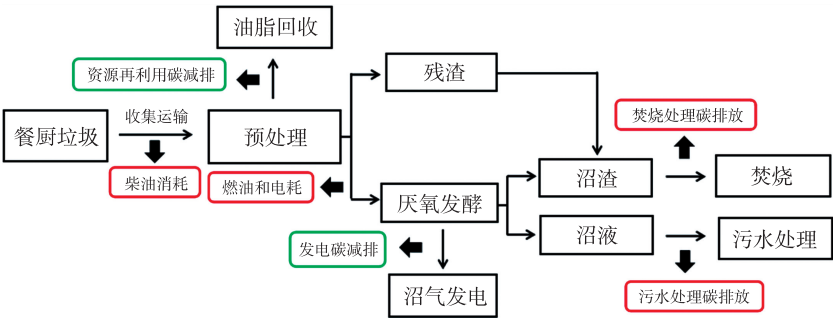


图 2 厨余(餐厨)垃圾处理碳排放核算单元

Fig. 2 Carbon emission accounting unit of kitchen waste disposal

1.2.3.2 收集运输碳排放

苏州市区厨余(餐厨)垃圾采用直运方式,此阶段产生的碳排放计算公式同式(1)。

1.2.3.3 油脂回收处理碳排放

每吨厨余(餐厨)垃圾可获得 30~50 kg 的废油脂,经预处理、预酯化、酯交换、蒸馏分离、甲醇回收等环节,可以制成生物柴油。生物柴油替代柴油作为汽车燃料可以减少化石燃料的使用,该过程所造成的碳减排按照热值来评估为 40 g/MJ,油脂回收过程所造成的碳排放计算公式为:

$$C_{\text{油脂回收}} = -m_{\text{粗油脂}} \times \xi \times C_{\text{生物柴油}} \times q, \quad (15)$$

式中, $C_{\text{油脂回收}}$ 为厨余(餐厨)垃圾油脂回收利用所造成的碳排放,kg/t; $m_{\text{粗油脂}}$ 为厨余(餐厨)垃圾中粗油脂含量,取 40 kg/t; ξ 为粗油脂转化率,取 90%; $C_{\text{生物柴油}}$ 为生物柴油替代柴油所造成的碳减排量,取 0.04 kg/MJ^[20]; q 为生物柴油热值,取 37.99 MJ/kg^[20]。

1.2.3.4 厌氧处理碳排放

厨余(餐厨)垃圾厌氧发酵采用密封方式,主要分析设备电耗和油耗引起的碳排放,计算公式如下:

$$C_{\text{厌氧电耗}} = E'_{\text{电耗}} \times E_{\text{电网排放因子}}, \quad (16)$$

$$C_{\text{厌氧燃油}} = D'_{\text{柴油}} \times E_{\text{柴油}}, \quad (17)$$

式中, $C_{\text{厌氧电耗}}$ 、 $C_{\text{厌氧燃油}}$ 为厨余(餐厨)垃圾厌氧处理过程产生的碳排放,kg/t; $E'_{\text{电耗}}$ 为厨余(餐厨)垃圾处理过程中设备电耗,取 25 kW·h/t; $D'_{\text{柴油}}$ 为加热保温过程产生的柴油消耗,取 0.3 L/t^[11]。

1.2.3.5 厌氧发酵产沼碳排放

苏州市 5 个主城区餐厨垃圾处理设施中七子山餐厨垃圾处理厂、高新区和相城区餐厨垃圾处理厂均以厌氧发酵产沼发电进行资源再利用,工业园区餐厨垃圾处理厂则以厌氧发酵产沼提纯后直接并入天然气管网进行资源再利用,不进行发电,故厌氧发酵产沼碳排放核算以 2 种方式进行。

厌氧发酵产沼发电碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{产沼发电}} = -\mu \times r \times \beta \times E_{\text{电网排放因子}}, \quad (18)$$

式中, μ 为沼气产率,取 90 m³/t; r 为甲烷提纯率,取 60%; β 为沼气发电效率,取 1.8 kW·h/m³^[20]。

厌氧发酵产沼提纯天然气碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{产沼提纯天然气}} = -\nu \times r \times \rho' \times (44/16), \quad (19)$$

式中, ν 为工业园区餐厨垃圾处理厂甲烷产率,取 90 m³/t; ρ' 为甲烷密度,取 0.7 kg/m³;44/16 为 CO₂ 与 CH₄ 的分子量比率。

1.2.3.6 残渣和沼渣焚烧发电碳排放

厨余(餐厨)垃圾经厌氧发酵后的残渣及沼渣送至光大生活垃圾焚烧发电厂进行焚烧,残渣和沼渣占比 20%,碳排放核算同其他垃圾焚烧碳排放。

1.2.3.7 沼液污水处理碳排放

厨余(餐厨)垃圾经厌氧发酵后的沼液经污水处理系统处理后达到城镇污水处理厂纳管标准后排放,经调研,沼液占比取 76%,碳排放核算同其他垃圾焚烧渗滤液处理碳排放。

1.2.4 可回收物处理碳排放

可回收物指生活垃圾中未经污染、适宜回收循环利用的废物,主要包括废塑料、废纸张、废玻璃、废金属、电子废弃物等,将可回收组分进行资源化回收可代替部分物质产生的碳排放。采用碳排放因子法,可回收物处理碳排放计算公式如下:

$$C_{\text{可回收物}} = -M_i \times E_i, \quad (20)$$

式中, $C_{\text{可回收物}}$ 为可回收垃圾处理产生的碳排放,kg/t; M_i 为可回收物中组分 i 占比,%,见表 3; E_i 为可回收物中组分 i 的碳排放因子^[21]。

表 3 可回收物各组分占比

Table 3 Proportion of recyclable components

可回收物组分 i	废纸	废塑料	废金属	废玻璃	电子废弃物	其他
占比	63	13	5	16	1	2

2 结果与分析

2.1 垃圾分类下生活垃圾处理碳排放分析

2.1.1 碳排放强度分析

垃圾分类后苏州市生活垃圾处理碳排放强度如表 4 所示.

表 4 苏州市垃圾分类处理碳排放强度

Table 4 Carbon emission intensity of municipal solid waste treatment in Suzhou after waste classification				
垃圾类别	处理方式	处理环节	碳排放强度/(kg/t)	核算来源
其他垃圾	焚烧	收集中转运输	15.83	1.2.1.2
		渗滤液处理	33.44	1.2.1.3
		焚烧发电直接碳排放	980	1.2.1.4
		焚烧发电间接碳排放	-276.25	1.2.1.4
		烟气处理	0.37	1.2.1.5
		炉渣资源再利用	-14.45	1.2.1.6
	小计		738.94	—
	填埋	收集中转运输	15.83	1.2.2.2
		填埋场区碳排放	804.84	1.2.2.3
		填埋气发电间接碳排放	-158.72	1.2.2.4
		渗滤液处理	5.36	1.2.2.5
		小计	667.31	—
厨余(餐厨)垃圾	厌氧发酵	收集运输	10.28	1.2.3.2
		油脂回收处理	-54.71	1.2.3.3
		厌氧处理	15.31	1.2.3.4
		厌氧发酵产沼发电	-56.47	1.2.3.5
		厌氧发酵产沼提纯天然气	-103.95	1.2.3.5
		残渣和沼渣焚烧发电	147.79	1.2.3.6
		沼液污水处理	25.41	1.2.3.7
		厌氧发酵产沼发电处理碳排放小计	87.61	—
		厌氧发酵产沼提纯天然气处理碳排放小计	40.13	—
可回收物	回收资源化利用		-369.90	1.2.4

从表 4 中可以看出,不同的垃圾处理方式碳排放强度不同,并且存在较大差异. 其他垃圾焚烧、填埋处理,厨余(餐厨)垃圾厌氧发酵处理,均为正碳排放;可回收物资源化利用为负碳排放,碳减排量达 369.9 kg/t,碳减排效应显著.

对比其他垃圾焚烧、填埋 2 种处理方式可发现,焚烧处理和填埋处理碳排放强度相当. 苏州市原生垃圾进入“全量焚烧,零填埋”时期,填埋场以应急填埋为主,填埋量较少,温室气体甲烷排放量逐年减小,碳排放强度将逐年下降. 焚烧处理碳排放与生活垃圾组分密切相关,垃圾分类之后进入焚烧厂的厨余组分下降,塑料组分显著上升,而塑料中的矿物碳是影响焚烧碳排放的主要因素^[22],焚烧处理碳排放强度达 738.94 kg/t,焚烧处理碳排放强度占据主导地位.

苏州市厨余(餐厨)垃圾处理方式基本都是以厌氧发酵技术为主,厌氧发酵产沼发电碳排放强度为 87.61 kg/t,约为提纯天然气资源化利用方式的 2 倍,提纯天然气的方式更减碳. 然而由于实际操作运行层面的问题,全面推行厨余(餐厨)垃圾厌氧发酵产沼提纯天然气处理进行碳减排仍存在一定难度.

2.1.2 碳排放总量分析

垃圾分类之后,苏州市生活垃圾处理总量及碳排放总量汇总核算结果如表 5 所示. 2021 年苏州市生活垃圾产量达 315.29 万 t,其中其他垃圾产量稳定在 210 万 t 左右,厨余(餐厨)垃圾及可回收物增长较快,表明苏州市垃圾分类工作成效显著.

从碳排放总量上看,虽然垃圾产量在逐年上升,但垃圾处理产生的碳排放量波动幅度较小,年碳排放量约为 155 万 t 左右^[23],主要原因是垃圾分类后厨余(餐厨)垃圾产量上升,但厨余(餐厨)垃圾厌氧发酵处理碳排放相对较小,同时可回收物资源化利用可减少部分碳排放,因此苏州市垃圾处理碳排放总量并没有随着垃圾产量的上升而增长,表明垃圾分类可有效减缓垃圾处理碳排放.

2021 年苏州市可回收物达 27 万 t,碳减排量达 10 万 t,由此可见在生活垃圾分类处理过程中,可回收物回收效率对垃圾处理碳排放起着关键作用. 加大可回收物的资源再利用,在实现物质循环利用的同时可有效减少垃圾处理碳排放^[24].

表 5 苏州市垃圾处理碳排放总量						
Table 5 Total carbon emissions of municipal solid waste treatment in Suzhou						
垃圾类别	处理方式	2020 年垃圾 处理量	2021 年垃圾 处理量	2020 年垃圾 处理碳排放量	2021 年垃圾 处理碳排放量	垃圾处理 碳排放量均值
其他垃圾	焚烧	2 015 662.00	2 048 326.00	1 489 453.28	1 513 590.03	1 501 521.65
	填埋	107 290.00	112 062.00	71 595.69	74 780.37	73 188.03
	小计	2 122 952.00	2 160 388.00	1 561 048.97	1 588 370.40	1 574 709.69
厨余(餐厨)垃圾	厌氧发酵产沼发电	208 559.00	549 999.00	18 271.89	48 185.41	33 228.65
	厌氧发酵产沼提纯天然气	93 773.00	164 388.00	3 763.11	6 596.89	5 180.00
	小计	302 332.00	714 387.00	22 035.00	54 782.30	38 408.65
可回收物	资源化利用	66 022.26	278 146.92	-24 415.03	-102 858.73	-63 636.88
合计		2 491 306.69	3 152 922.37	1 558 668.94	1 540 293.98	1 549 481.46

2.2 垃圾分类前后碳排放对比分析

苏州市开展垃圾分类前,生活垃圾 60%焚烧处理,40%填埋处理,苏州市生活垃圾处理产生碳排放达 870.46 kg/t^[25]。垃圾分类后苏州市生活垃圾处理碳排放明显下降(见表 6),表明垃圾分类有助于进一步减少城市生活垃圾处理碳排放,加大城市生活垃圾资源回收利用率可降低城市生活垃圾处理系统的总碳排放量,助力苏州市固废处理领域碳达峰。

表 6 苏州市垃圾分类前后碳排放对比			
Table 6 Comparison of carbon emissions before and after waste classification in Suzhou			
垃圾分类	处理方式	处理方式占比/%	碳排放强度/(kg/t)
垃圾分类前	焚烧	60	870.46
	填埋	40	
垃圾分类后	其他垃圾焚烧	73	410.17
	其他垃圾填埋	4	
	厨余(餐厨)垃圾厌氧发酵产沼发电	13	
	厨余(餐厨)垃圾厌氧发酵产沼提纯天然气	4	
	可回收物资源化利用	6	

3 结论

(1)不同的垃圾处理方式碳排放强度不同,苏州市实行垃圾分类之后,其他垃圾焚烧处理碳排放强度最大,可回收物资源化利用表现为负碳排放,处理每吨可回收物可减碳 369.9 kg,具有一定的碳减排效应。

(2)苏州市城市化进程较快,生活垃圾增量明显,但垃圾分类处理产生的碳排放量波动幅度较小,年碳排放量 155 万 t 左右。

(3)垃圾分类之后,由于厨余(餐厨)垃圾的分出及可回收物的资源化利用,苏州市生活垃圾处理碳排放强度由分类前 870.46 kg/t 下降至 410.17 kg/t,表明垃圾分类有助于进一步减少碳排放,加大生活垃圾资源回收利用率可加快苏州市固废处理领域碳达峰。

生活垃圾低碳化、资源化路径可从垃圾处理的各个环节着手,通过对每个环节的精细化管控可大大降低生活垃圾处理的碳排放。(1)源头减量。将源头减量、重复使用、回收利用置于垃圾处理的优先位次,建立涵盖生产、流通、消费等领域的生活垃圾源头减量工作机制。(2)进一步提升源头分类,加强垃圾资源回收利用。加快建立与城市生活垃圾分类投放、收集、运输相匹配的分类处理系统,满足城市生活垃圾分类处理需求。(3)加快体系建设,优化收运(转运)系统。合理规划垃圾中转站,完善收运队伍,在保证收运效果的同时减少温室气体的排放。

[参考文献]

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2021[M]. 北京:中国统计出版社,2021.
[2] 陆莹莹,赵旭. 家庭能源消费研究述评[J]. 水电能源科学,2008(1):187-191.
[3] HANNAH R. Climate watch,the world resources institute(2020)[EB/OL]. [2023-01-12]. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector#waste-3-2>.

- [4] GROODE T A, HEYWOOD J B. A methodology for assessing MIT's energy use and greenhouse gas emissions[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [5] ASSAMOI B, LAWRYSHYN Y. The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion[J]. Waste management, 2012, 32(5): 1019-1030.
- [6] MANFREDI S, TONINI D, CHRISTENSEN T H, et al. Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions[J]. Waste management and research, 2009, 27(8): 825-836.
- [7] 王龙, 李颖. 北京市生活垃圾焚烧发电厂温室气体排放及影响因素[J]. 环境工程学报, 2017, 11(12): 6490-6496.
- [8] 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.
- [9] 李欢, 周颖君, 刘建国, 等. 我国厨余垃圾处理模式的综合比较和优化策略[J]. 环境工程学报, 2021, 15(7): 2398-2408.
- [10] 上海环境卫生工程设计院有限公司. 苏州市环境卫生专项规划(2021—2035)[R]. 上海: 上海环境卫生工程设计院有限公司, 2021.
- [11] 边潇, 宫徽, 阎中, 等. 餐厨垃圾不同“收集-处理”模式的碳排放估算对比[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 449-456.
- [12] EGGLESTON S, BUENDIA L, MIWA K, et al. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Kanagawa: IGES, 2006.
- [13] 生态环境部办公厅. 关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知[EB/OL]. [2022-03-15]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202203/t20220315_971468.html.
- [14] 徐萌琦. 特大城市装修垃圾的生命周期评价与碳足迹研究[D]. 上海: 上海大学, 2021.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 贾学智, 金珍, 刘昌盛. 城市垃圾厂填埋气发电技术应用与分析[J]. 中国新技术新产品, 2016(18): 115-116.
- [18] 王琛, 孙治国, 付友先, 等. 填埋场产甲烷影响因素及减排技术研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(16): 104-106.
- [19] 张相锋, 肖学智, 何毅, 等. 我国垃圾填埋气发电项目利用清洁发展机制的可行性研究[J]. 太阳能学报, 2007, 28(9): 1045-1048.
- [20] 陈海滨, 刘金涛, 钟辉, 等. 厨余垃圾不同处理模式碳减排潜力分析[J]. 中国环境科学, 2013, 33(11): 2102-2106.
- [21] 中国城市温室气体工作组. 中国产品全生命周期温室气体排放系数集(2022)[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.
- [22] 林成森, 陈丽君, 吴洁珍. 生活垃圾分类对固体废弃物和温室气体协同减排的影响研究——以浙江省为例[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 90-94.
- [23] 李颖, 武学, 孙成双, 等. 基于低碳发展的北京城市生活垃圾处理模式优化[J]. 资源科学, 2021, 43(8): 1574-1588.
- [24] 陈纪宏, 卞荣星, 张听雪, 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.
- [25] 张涛, 乐云, 黄有亮, 等. 城市垃圾处理的碳排放核算与分析——以苏州市为例[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(9): 102-105.

[责任编辑: 丁 蓉]