黄 珊,张羽成,龚天成,等.餐厨垃圾收运与处理全过程温室气体排放量核算方法研究及案例分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(9):5305-5314.
Huang S, Zhang Y C, Gong T C, et al. Greenhouse gas emission accounting methods and case study of whole process during collection-transport-treatment of food waste [J]. China Environmental Science, 2025,45(9):5305-5314.

餐厨垃圾收运与处理全过程温室气体排放量核算方法研究及案例分析

黄 珊[1],张羽成[1,2],龚天成[2],李艳萍[2],况 悦[2],张晓敏[3],李文譞[2],武欣童[2],杨天学[2*] (1.华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013；2.中国环境科学研究院,环境基准与风险评估国家重点实验室,北京 100012；3.北京智通博瑞科技发展有限公司,北京 100006)

摘要: 研究基于全生命周期方法,界定了餐厨垃圾收运与处理全过程核算边界,识别温室气体排放源和排放种类建立排放源清单,基于排放因子法构建了可拆分的餐厨垃圾收运与处理全过程温气体排放核算模型.研究结果发现,餐厨垃圾收运与处理全过程核算边界包含 9 个核算单元,温室气体排放源主要分为 7 类.相较于传统模型,该模型具有可拆分、可组合、模块化的特点,在核算精度、模型灵活性以及场景适应性上有显著优势;本研究以北京市朝阳区的餐厨垃圾收运与处理全过程为例进行核算.研究结果显示,垃圾投放点和车辆行驶环节的温室气体排放量较为突出,分别为 1.38 和 1.32tCO$_2$e/d,化石燃料燃烧是其主要的排放源占总排放量的 24.4%.在处理处置阶段,废水处理环节的温室气体排放量最高,达 4.05tCO$_2$e/d,占总排放量的 32.3%.碳补偿共减少了 53.2tCO$_2$e/d.敏感性分析结果显示餐厨垃圾量和沼气产量对温室气体排放的影响较为显著,而车辆行驶总公里数和电力因子的影响相对较小.

关键词: 餐厨垃圾；温室气体排放；核算方法
中图分类号: X705 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)09-5305-10

Greenhouse gas emission accounting methods and case study of whole process during collection-transport-treatment of food waste.

HUANG Shan[1], ZHANG Yu-cheng[1,2], GONG Tian-cheng[2], LI Yan-ping[2], KUANN Yue[2], ZHANG Xiao-ming[3], LI Wen-xuan[2], WU Xing-tong[2], YANG Tian-xue[2*] (1.School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiao Tong University, Nanchang 330013, China；2.State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China；3.Beijing Zhitong Borui Technology Development Co, Ltd, Beijing 100006, China).
China Environmental Science, 2025,45(9)：5305~5314

Abstract: This study adopts a life cycle assessment (LCA) framework to define the system boundary for greenhouse gas (GHG) emission accounting across the entire food waste collection, transportation, and treatment process. Emission sources and gas types were identified to establish a comprehensive emission inventory, upon which a modular and decomposable GHG emission accounting model was developed based on the emission factor method. The results indicate that the full-process system boundary encompasses nine accounting units and seven major categories of GHG emission sources. Compared to conventional models, the proposed model demonstrates distinct advantages in accounting accuracy, modularity, flexibility, and scenario adaptability. A case study was conducted for the Chaoyang District of Beijing to validate the model. The findings show that GHG emissions are particularly significant at the waste disposal sites and during vehicle transportation, with emission rates of 1.38 and 1.32 tCO$_2$e/d, respectively. Fossil fuel combustion was identified as the dominant emission source, contributing 24.4% of total emissions. In the treatment and disposal phase, wastewater treatment exhibited the highest emissions, reaching 4.05tCO$_2$e/d, or 32.3% of the total. Carbon offsetting efforts achieved a reduction of 53.2tCO$_2$e/d. Sensitivity analysis revealed that food waste generation volume and biogas yield have the most significant impact on total GHG emissions, while the influence of total vehicle kilometers traveled and electricity emission factors was comparatively minor.

Key words: food waste；greenhouse gas emissions；accounting methodology

随着全球气候变化问题的日益严峻,温室气体(Greenhouse Gases)排放已成为全球政府、科学界和公众关注的焦点.根据国际气候变化框架公约[1]和《巴黎协定》[2]的要求,各国必须采取有效措施以减少温室气体排放,减轻对气候的负面影响.在中国追求双碳目标的背景下,国务院办公厅于 2024 年 7 月

收稿日期: 2025-02-27
基金项目: 国家自然科学基金(42207159)和江西省自然科学基金(20232BAB214085)资助
* 责任作者, 研究员, yangtianxue17@163.com

发布了《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》,强调碳排放统计核算在实现碳达峰和碳中和目标中的基础性作用,并指出它是制定政策、推动工作、开展考核和履行国际承诺的关键依据[3].同年 11 月,国家发展改革委等部门发布了《完善碳排放统计核算体系工作方案》,进一步明确了完善重点行业领域碳排放核算机制,以及加快建立产品碳足迹管理体系的必要性[4].为履行应对气候变化的相关责任,以及落实政策需要,我国陆续发布了发电、钢铁、化工等 24 个重点行业的温室气体核算方法与指南[5-7].由此可见,构建与完善各行业温室气体核算方法核算体系已经成为亟待解决的问题.

我国固废在处置与管理上遵循“减量化”、“资源化”、“无害化”的基本原则[8],通过资源化技术将废弃物转化为再生原料,可以有效替代开采原生资源过程中产生的温室气体排放,有着显著的减排潜力[9-10].根据相关研究表明,通过对固废实施有效的管理措施、进行有效的资源化处置,可以在全球范围内减少 10%~15%的温室气体排放[11].其中餐厨垃圾作为典型固体废物具有巨大的减碳效应.餐厨垃圾产生量大,每年产量高达 9000 万 t[12],据联合国环境规划署(UNEP)的厨余垃圾指数报告,全球 8%~10%的温室气体排放与餐厨垃圾有关[13].根据相关研究结果表明[14],对 200t 餐厨垃圾采用厌氧消化处理,能够减少二氧化碳排放 16087kg.

众多学者对针对餐厨垃圾收运与处理过程,开展了大量碳排放核算研究工作.汪楚乔等[15]以投放点至处置点的收运过程为边界建立模型核算温室气体排放量.李欢等[16]重点考量了完整处理工艺并考虑碳减排效应.边潇等[17]仅以油耗量和资源化产品减排量为主要排放源核算温室气体排放量.付凤英[18]和邵志飞[19]以苏州市、天津市餐厨垃圾全流程处置为边界.Zhang[20]以生物处理过程、能源消耗量、以及资源回收过程的排放为主要排放源核算全过程排放量.此外,餐厨垃圾收运与处理过程的配套工程产生温室气体排放不可忽略,由于餐厨垃圾的高含水率特征[21],其废水处置量大,且处置过程也将释放一定量的 CH_4 和 N_2O[22].不同废水处理过程排放因子具有显著的工艺异质性,例如 UASB 工艺中 CH_4 排放相较于 MBR 工艺高了 266 倍[23].由于餐厨垃圾收运、处理模式复杂,导致研究过程在核算边界中关键排放源的识别上仍显不足,排放量核算可能存在较多不确定性.因此,亟需构建一套普适性强、覆盖全流程的核算方法体系,以适应不同情境与处置模式的餐厨垃圾温室气体排放评估需求.

在已有研究基础上,本文旨在建立具有普适性的餐厨垃圾全流程的温室气体排放核算模型,并分析影响排放量的主要因素,评估不同处理方式对温室气体减排的潜力,并以北京市朝阳区的餐厨垃圾全流程处理处置过程为例进行核算和分析,为餐厨垃圾环境管理和减排决策提供理论支持.

1 分析方法以及模型构建过程

1.1 餐厨垃圾温室气体排放量核算方法思路

在核算餐厨垃圾的排放量时,通常遵循以下步骤[24]:

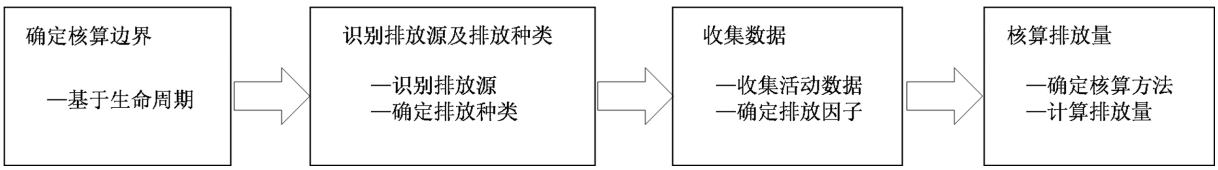


图 1 核算温室气体的基本思路

Fig.1 The basic approach to greenhouse gas accounting

1.2 核算边界

核算边界主要包括餐厨垃圾收运与处理全过程.通过调研餐厨垃圾收运现状,识别出餐厨垃圾收运流程主要分为 3 个阶段:投放点收集阶段,暂存点/中转站储存阶段,末端点卸载阶段;处理过程主要包括了预处理、垃圾资源化处理工艺,及其附属的沼渣与污水处理,餐厨垃圾收运与处理全过程温室气体核算边界见图 2.

1.3 排放源及种类识别

收运环节中,无论处于投放点、中转站还是行驶途中,汽车的排放主要源自化石燃料燃烧及尾气净化过程中的温室气体排放.相比之下,电动汽车的温

室气体排放主要源于其电耗.处理环节中,中转站的电力设施消耗也是温室气体排放的重要来源之一.

处理环节中,涉及大量电力设施其主要排放源包括电力消耗、以及餐厨垃圾处置工艺采用厌氧消化、好氧堆肥,沼渣处置、废水 COD 和 TN 处理过程中产生温室气体排放.而通过对餐厨垃圾的资源化处置,产生的沼气和生物油脂具有减碳效益,是减少温室气体排放的主要手段,详见表 1.

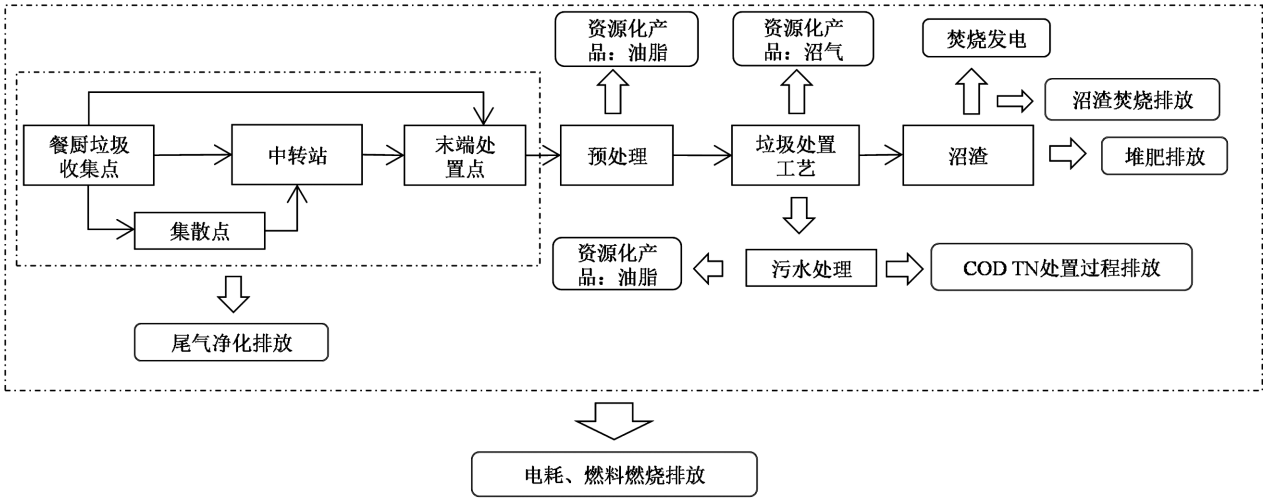


图 2　餐厨垃圾收运与处理全过程温室气体核算边界

Fig.2　The greenhouse gas accounting boundaries for the entire process of food waste collection and treatment

表 1　餐厨垃圾收运与处理全过程温室气体核算边界温室气体排放

Table 1　Greenhouse gas emissions across the entire process of food waste collection and treatment

环节		排放源	GHGs 种类	理由解释/说明
行驶过程		化石燃料燃烧/电车电耗	CO_2	行驶过程燃料消耗/电耗
		尾气净化过程排放	CO_2	运输车辆针对化石燃料燃烧使用尿素等尾气净化剂产生的 CO_2 排放
垃圾投放点		化石燃料燃烧/电车电耗	CO_2	车辆装载过程化石燃料消耗/电耗
		尾气净化过程排放	CO_2	运输车辆针对化石燃料燃烧使用尿素等尾气净化剂产生的 CO_2 排放
暂存点/中转站		中转站电力系统排放	CO_2	照明、除臭、压缩等设备
		尾气净化过程排放	CO_2	运输车辆针对化石燃料燃烧使用尿素等尾气净化剂产生的 CO_2 排放
		化石燃料燃烧/电车电耗	CO_2	装载、卸载过程化石燃料消耗/电耗
		尾气净化处理排放	CO_2	运输车辆针对化石燃料燃烧使用尿素等尾气净化剂产生的 CO_2 排放
末端处置厂/场		导致化石燃料燃烧/电车电能消耗	CO_2	车辆卸载过程化石燃料消耗/电耗
		尾气净化过程排放	CO_2	运输车辆针对化石燃料燃烧使用尿素等尾气净化剂产生的 CO_2 排放
预处理		化石燃料燃烧	CO_2	加热浆料的锅炉或蒸汽发生器等
		电能消耗	CO_2	破碎机、分选机、搅拌机等
垃圾处理处置	垃圾核心工艺	电能消耗	CO_2	砂水分离器、进料泵等
		化石燃料燃烧	CO_2	锅炉或蒸汽发生器等
		厌氧消化	CH_4	厌氧消化中,微生物分解有机物产生 CH_4[25-26]
		堆肥	N_2O	氧化亚氮(N_2O)的产生主要与微生物的硝化和反硝化过程有关[27]
	废水处置过程	处置 COD	CH_4	在生化处理阶段,如厌氧处理,COD 的削减往往伴随着甲烷的生成[28]
		处置 TN	N_2O	在氮的去除过程中(例如硝化和反硝化过程),尤其是在脱氮过程中,一氧化二氮可能作为副产物释放[29]
	沼渣处置过程	沼渣焚烧处置过程温室气体排放	CH_4	焚烧温度和氧气供应不足可能导致不完全燃烧,从而增加甲烷的排放[30]
			N_2O	高温和氮的氧化反应会导致 N_2O 的生成[31]
		沼渣堆肥处置过程温室气体排放	CH_4	当氧气供应不足时,微生物进行厌氧发酵导致 CH_4 的产生
			N_2O	含氮有机物在微生物作用下经历硝化和反硝化作用产生 N_2O
碳补偿产品		沼气	/	沼气替代天然气,减少化石燃料的使用,从而降低碳排放
		生物油脂	/	替代生物柴油,减少化石燃料的使用,从而降低碳排放
		有机肥料	/	替代部分化肥,减少化肥生产过程中的碳排放
		饲料原料	/	替代部分传统饲料,从而减少整个饲料生产链的碳排放
		垃圾焚烧	/	焚烧产生的热能用于发电或供热,替代部分化石燃料的使用,减少化石燃料燃烧产生的二氧化碳

1.4 温室气体核算模型

1.4.1 基于模型的温室气体排放量核算方法 目前温室气体排放量核算方法以排放因子法为主[32],生命周期法(LCA)、质量平衡法等方法也常被采用.生命周期法是一种全面评估产品或服务从摇篮到坟墓全过程环境影响的方法[33],尽管 LCA 能够提供全面的环境影响评估,但它在数据收集和处理方面需要大量的时间和资源,且对于数据的准确性要求极高.质量平衡法通过物质流的输入和输出来估算碳排放,这种方法在处理过程中的准确性较高,但它通常只关注特定物质的流动,可能忽视了其他间接排放源[34];此外,质量平衡法在处理复杂的生物化学反应和能量转换过程中可能不够精确.相比之下,排放因子法以其简便性和成本效益在碳排放核算中具有明显优势[35];排放因子法通过将排放因子与活动数据相乘以估算温室气体排放量,该方法易于实施且成本相对较低.因此,鉴于排放因子法具有较高的透明度和可比性,便于不同研究间的比较及为政策制定者提供参考.

在已建立的温室气体排放源清单内,餐厨垃圾餐厨垃圾收运与处理全过程的排放源可划分为以下 7 类:化石燃料燃烧、电力消耗、尾气净化处理、餐厨垃圾处置工艺、废水处置排放、沼渣处置排放、资源化过程排放.本文基于排放因子法对温室气体排放量核算并构建核算模型;排放因子法核心公式如下:

$$E = \mathrm{AD} \times \mathrm{EF} \tag{1}$$

式中:E 为温室气体的排放量;EF 为排放因子;AD 为活动水平或活动数据,如化石燃料的消耗量、使用消耗的电量等;

(1)化石燃料燃烧在垃圾收运及处理处置环节中,涉及化石燃料,排放量可根据公式(2)计算:

$$E_{\mathrm{ful}} = \sum_{i}^{n} Q_{\mathrm{fue},i} \times \mathrm{EF}_{\mathrm{ful},i} \tag{2}$$

其中:

$$\mathrm{EF}_{\mathrm{fue}} = \mathrm{NCV} \times \mathrm{CC} \times \mathrm{OF} \times 44/12 \tag{3}$$

式中:E_{fue} 为化石燃料燃烧的温室气体排放量,t;i 为化石燃料种类如柴油、天然气等;Q_{fue} 为化石燃料的消耗量,对固体或液体燃料,t;对气体燃料,$10^4\mathrm{Nm}^3$;CC 为化石燃料的单位热值含碳量,tC/GJ;$\mathrm{EF}_{\mathrm{fue}}$ 为该燃料的排放因子,tCO_2/t;NCV 为燃料的平均低位发热量,对固体或液体燃料,GJ/t;对气体燃料,GJ/$10^4\mathrm{Nm}^3$;OF 为化石燃料的碳氧化率,以%表示,通常为 98%[36];44/12 为二氧化碳与碳的分子量之比.

在收运过程中,在装卸载以及行驶过程化石燃料消耗量无法直接获得时,装卸载可以通过发动机的功率和运行时间、行驶过程可通过汽车行驶公里数来计算化石燃料的消耗量,计算公式[37]如下:

$$Q_{\mathrm{fue,\ 装卸载}} = P_1 T_1 d \eta \tag{4}$$

$$Q_{\mathrm{ful,\ 行驶}} = \mathrm{OC} \times k \tag{5}$$

式中:P_1 收运车发动机的功率,kW;T_1 为收运车完成一次装/卸载的所需平均时间,h;d 为装/卸载的次数;η 为收运车发动机燃油消耗率,t/(kW·h).OC 为汽车行驶每公里消耗的燃油量,L/km;k 为汽车行驶总公里,km.

(2)电力消耗餐厨垃圾的处理处置中电力消耗也是温室气体排放的主要来源,计算公式如下:

$$E_{\mathrm{ele}} = P_{\mathrm{ele}} \times \mathrm{EF}_{\mathrm{ele}} \tag{6}$$

式中:E_{ele} 用消耗的电力产生的温室气体排放总量,t;P_{ele} 为消耗的电力,MW·h;$\mathrm{EF}_{\mathrm{ele}}$ 为该地区电网供电平均 CO_2 排放因子,t/(MW·h).

电车消耗电量以及其他用电设备消耗的电量获取在获取困难时也可以通过下式计算:

$$p_{\mathrm{ele}} = \sum_{j}^{m} P_2 T_2 \tag{7}$$

式中:j 为餐厨垃圾处理处置过程中涉及的用电设备;P_2 为用电设备功率,MW;T_2 为使用时间,h;

(3)尾气净化处理根据尾气净化剂类型及工作原理,在尾气净化过程的中会产生 CO_2[38].车辆正常使用过程中因使用尿素添加剂净化尾气而产生的温室气体排放量的可按式(8)计算:

$$E_{\mathrm{exg}} = C_{\mathrm{exg}} \times \mathrm{EF}_{\mathrm{exg}} \tag{8}$$

其中:

$$\mathrm{EF}_{\mathrm{exg}} = 12/60 \times q \times 44/12 \tag{9}$$

式中:E_{exg}为车辆使用过程使用尿素添加剂作为尾气净化剂而产生的二氧化碳排放量,t;C_{exg} 为使用消耗的尿素添加剂的质量,t;q 为尿素添加剂中尿素的质量比例,%.

(4)餐厨垃圾处置工艺厌氧消化和好氧堆肥作为当前餐厨垃圾主流的处置方式[39],温室气体排放量计算公式如下:

$$E_{\mathrm{wdt}} = X_{\mathrm{wdt}} \times \mathrm{EF}_{\mathrm{wdt}} \times \mathrm{GWP}_s \tag{10}$$

式中:E_{wdt} 为垃圾不同的处置方式的温室气体排放量,t;X_{wdt} 为垃圾不同的处置方式的餐厨垃圾

量;EF_{wdt} 为垃圾不同的处置方式的温室气体排放量,t;GWPs 为排放源产生的温室气体种类对应的温室气体潜能值,CH_4,N_2O 分别为 27、273[40].

(5)废水处置排放废水处置的过程中 COD 和 TN 的降解是 CH_4 和 N_2O 的主要来源,排放量可按公式(11~13)计算:

$$E_{sew} = E_{sew,CH_4} + E_{sew,N_2O} \tag{11}$$

其中:

$$E_{sew,CH_4} = X_{sew,COD} \times EF_{CH_4} \times GWP_{CH_4} \tag{12}$$

$$E_{sew,N_2O} = X_{sew,TN} \times EF_{N_2O} \times GWP_{N_2O} \tag{13}$$

式中:E_{sew} 为垃圾废水处置过程中的温室气体排放总量,t; E_{sew,CH_4} 、 E_{sew,N_2O} 为垃圾废水处置过程中的 CH_4、N_2O 排放的二氧化碳当量,(tCO_2e);X_{sew},COD、ADsew,TN 为处置的 COD、TN 质量,t; EF_{CH_4} 、EF_{N_2O} 为分别为去除单位 COD、TN 对应的 CH_4 和 N_2O 排放因子,t/t;

(6)沼渣处置排放餐厨垃圾经过核心工艺处理后,剩余的沼渣通常采用焚烧、堆肥或填埋等方式进行处置[41].温室气体排放量可以通过公式(14)进行计算:

$$E_{dig} = X_{dig} \times EF_{dig} \times GWP_s \tag{14}$$

式中:E_{dig} 为处置沼渣产生的温室气体排放量,tCO_2e; X_{dig} 为沼渣的质量, t;EF_{dig} 为对应沼渣不同处置方式的排放因子,常见的处置方式为堆肥、填埋、焚烧.

(7)资源化产品碳补偿处置工艺中回收或者生产的产品,主要包括回收金属、生物油脂、沼气等,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,可回收物处理碳排放计算公式如下:

$$R_{pro} = \sum\nolimits_v^t P_{pro,v} \times EF_{pro,v} \tag{15}$$

式中:R_{pro} 为产生的资源化产品的替碳效应而产生的温室气体减排量;P_{pro} 为餐厨垃圾处置工艺中回收的资源化产物的量;EF_{pro} 为资源化产物的排放因子.

1.5　模型优化整合

基于上述的核算方法,本文从排放源层面建立温室气体排放量核算单元,那么无论是从整体的角度还是局部出发都可以核算温室气体排放量,其具有模块化的特点,最后优化整合构建餐厨垃圾全流程温室气体排放核算模型.该模型兼容了填埋、焚烧、厌氧消化等主流餐厨垃圾处置工艺,同时整合了废水处理与沼渣处置环节.其排放源覆盖从收运、处置到资源化产品回收的全流程,完整表征现有餐厨垃圾处理体系的核心要素,具有较高的适用性,可为多数具有餐厨垃圾工艺以及有温室气体排放量核算需求的区域提供指导.餐厨垃圾全流程温室气体排放总量计算方法见式(16);

$$TE = \sum_r (\sum_i^n (Q_{fue,i} \times EF_{fue,i}) + C_{exg} \times EF_{exg} + P_{ele} \times EF_{ele} + \sum_u^s X_u \times EF_u \times GWP_{u,s}) - \sum\nolimits_v^t P_{pro,v} \times EF_{pro,v} \tag{16}$$

式中:TE 为餐厨垃圾全流程温室气体排放总量;r 为餐厨垃圾收运与处理的各个环节;核算温室气体排放过程中的排放因子取值及参考来源如表 2 所示.

表 2　排放因子取值来源

Table 2　Source of emission factor values

排放源(能源/工艺类型)		排放因子		参考来源
能源	柴油	$3.1tCO_2e/t$		陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[42]
	天然气	$0.00216tCO_2e/nm^3$		
电力(部分地区)	全国	$0.5366tCO_2eq/(MW·h)$		2022 年电力二氧化碳排放因子[43]
	北京	$0.558tCO_2eq/(MW·h)$		
餐厨垃圾处置工艺	厌氧消化	CH_4:$1tCH_4e/t$	N_2O:$0tCO_2e/t$	IPCC 2006 年国家温室气体清单指南(2019 修订版)[44]
	好氧堆肥	CH_4:$4tCH_4e/t$	N_2O:$0.3tCO_2e/t$	
废水处置工艺	厌氧消化+回收 CH4	CH_4:$0.003tCO_2e/ta$	N_2O:$0.005tN_2Oe/tb$	a 蔡博峰等[45] b 省级温室气体清单编制指南(试行)
	厌氧工艺	CH_4:$0.044tCH_4e/ta$		
	好氧为主工艺	CH_4:$0.004tCH_4e/ta$		
	UASB	CH_4:$0.2tCH_4e/t$	/	杨清雯等[23]
	MBR	CH_4:$0.00075tCH_4e/t$	N_2O:$0.016tN_2Oe/t$	
沼渣处置工艺	焚烧	CH_4:$0.0002tCH_4e/t$	N_2O:$0.047tN_2Oe/t$	2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南(2019 修订版)
	好氧堆肥	CH_4:$4tCH_4e/t$	N_2O:$0.3tN_2Oe/t$	
碳补偿	沼气(天然气)	$0.00216tCO_2e/nm^3$		陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) 2022 年电力二氧化碳排放因子
	生物柴油	$3.1tCO_2e/t$		
	电力	根据地域水平而定		

1.6 敏感性分析

敏感性分析在温室气体排放量研究中能够识别关键因素,量化不同变量对温室气体排放量的影响,从而为精准制定减排策略提供理论支撑,敏感性系数越大,代表该因素对温室气体排放量的影响越大.敏感性系数具体计算公式如下:

$$S = \frac{\Delta E / E}{\Delta a / a} \tag{17}$$

式中:S 为敏感性系数;$\Delta E/E$ 表示温室气体变化率;$\Delta a/a$ 表示变量 a 变化率.

2 案例分析

2.1 数据来源

本研究以北京市朝阳区为研究对象,核算范围限定为餐厨垃圾从投放点到最终处置点的过程,不包括居民厨余垃圾、可回收垃圾和有害垃圾.通过对北京市朝阳区的实地调研,发现该区域的餐厨垃圾主要来源于 23 条街道和 19 个地区,平均每天产生 436.38t 餐厨垃圾且均采用直运方式运往餐厨垃圾处置点.每个分类投放点的装载时间约为 0.03h,餐厨垃圾车装载次数为 656 次,车辆行驶车次 126 次,直运至餐厨垃圾处理厂,卸载次数为 126 次,平均行驶里程为 26km,卸载时间平均为 0.05h.相关参数及活动数据分别整理于表 3 与表 4,活动数据均系通过实地调研所得,所示数值为 2024 年的平均值;数据显示出良好的代表性,能够有效反映研究对象的整体特征.

表 3 北京市朝阳区餐厨垃圾处置参数

Table 3 Parameters for food waste disposal in Chaoyang District, Beijing

参数		数值	来源
餐厨垃圾车发动机装载功率	P_1	154kW	实地调研
装载时间	T_1	0.03h	
行驶总公里	k	3276km	
发动机卸载功率	P_1	154kW	
卸载时间	T_2	0.05h	
燃油消耗率	η	0.000143t/(kW·h)	汪楚乔等[15]
尿素添加剂中尿素含量	q	40%	
尿素密度	ρ_1	1.335kg/L	
每消耗 1 升柴油使用的尿素添加剂	u	0.05L	
每公里燃油消耗量	OC	0.15L/km	
化石燃料的平均低位发热量	NCV	43.33GJ/t	陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)[42]
柴油密度	ρ_2	845kg/m^3	

表 4 北京市朝阳区垃圾收运与处理全过程餐厨垃圾活动数据

Table 4 Activity data of food waste collection, transportation, and treatment in Chaoyang District, Beijing

阶段			活动数据(AD)		单位
收运	垃圾投放点		化石燃料消耗量	0.43	t
			尾气净化	0.01	t
	车辆行驶		化石燃料消耗量	0.52	t
			尾气	0.01	t
	处置点卸载		化石燃料消耗量	6.01	GJ
			尾气净化	0.004	t
处理处置	预处理		电力消耗	4.38	MW·H
	垃圾处理处置	核心工艺	电力消耗	0.57	MW·H
			厌氧消化	沼气回收利用	m^3
		废水处置	废水 COD	2.23	t
			废水 TN	0.92	t
		杂质沼渣处置	焚烧	196.52	t
	资源化处置-碳补偿		沼气替代天然气	19637.10	m^3
			油脂替代生物柴油	3.48	t

2.2 结果分析

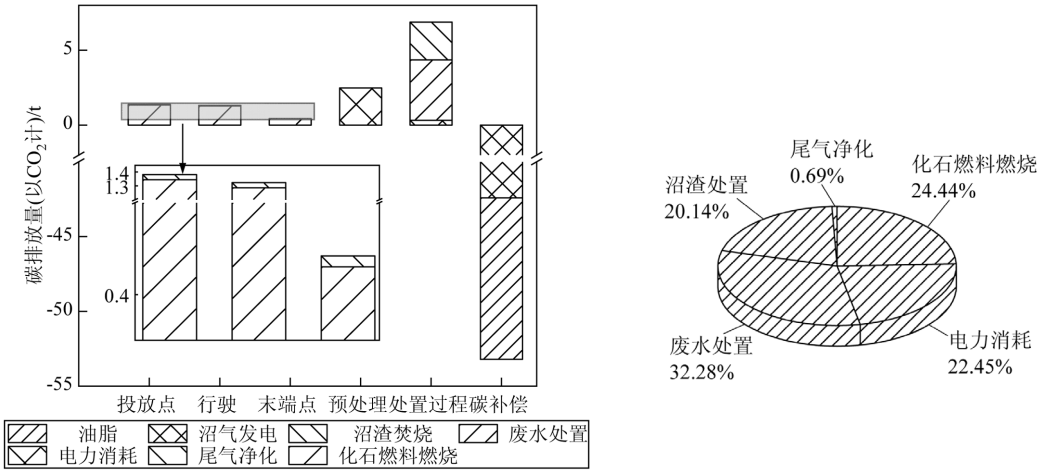
根据温室气体排放核算模型,并带入北京市朝

阳区的活动数据,对该区的温室气体排放量进行核算,结果如表 5 所示.

表 5　餐厨垃圾垃圾收运与处理全过程温室气体排放量

Table 5　Greenhouse gas emissions from the entire process of food waste collection, transportation, and treatment

阶段		碳排放量(以 CO_2e 计)/t		各环节温室气体排放(以 CO_2e 计)/t
收运	垃圾投放点	化石燃料消耗量	1.34	1.38
		尾气净化	0.04	
	车辆行驶	化石燃料消耗量	1.28	1.32
		尾气	0.04	
	处置点卸载	化石燃料消耗量	0.43	0.44
		尾气净化	0.01	
处理处置	预处理	电力消耗	2.44	2.44
	餐厨垃圾处置工艺	电力消耗	0.31	0.31
		厌氧消化	CH_4 回收处置	
	废水处置	废水 COD	0.05	4.05
		废水 TN	4.00	
	杂质沼渣处置	焚烧	2.52	2.52
	碳补偿	沼气	−42.42	−53.20
		生物油脂	−10.79	



(a)全过程温室气体排放量　　(b)排放源温室气体排放量占比(不含碳补偿)

图 3　全过程温室气体排放量分析

Fig.3　Analysis of total greenhouse gas emissions throughout the entire process

根据表 5 和图 3 的数据,朝阳区在餐厨垃圾收运与处理全流程中,收运阶段的垃圾投放点和车辆行驶环节的温室气体排放量显著,分别为 1.38 和 1.32tCO_2e/d,其中化石燃料燃烧是主要排放源.在处理处置阶段,废水处理环节的温室气体排放量最高,达到 4.05tCO_2e/d.图 3 进一步揭示了不同排放源的排放水平,其中废水处理的排放量占比最高,为 32.3%,其次是化石燃料燃烧(24.4%)、电力消耗(22.4%)和沼渣处置(20.1%),而尾气净化过程的排放量相对较小,仅占总排放量的 0.7%.通过资源化过程中的沼气发电和油脂替代生物柴油措施,实现了显著的碳补偿,总共减少了 53.2tCO_2e/d,其中沼气发电的减排效果尤为显著,贡献了 42.42tCO_2e/d 的减排量.在餐厨垃圾处理过程中,废水处理环节产生的温室气体排放量尤为显著,尤其是在处理总氮(TN)时,其排放量高达 4tCO_2e/d.这一现象主要是由于硝化和反硝化过程中产生的 N_2O,其全球变暖潜能(GWP)是二氧化碳(CO_2)的 273 倍,甲烷(CH_4)的 10 倍.

2.3　敏感性分析结果

利用温室气体排放核算模型,并结合朝阳区的具体活动数据,本研究进行了敏感性分析,旨在识别对餐厨垃圾处理系统全生命周期 GHG 排放结果具

有显著影响的关键参数.基于参数的重要性、数据不确定性及对系统主要阶段的覆盖性,选取了六个关键参数进行分析:餐厨垃圾处理量、车辆行驶总公里、电力因子、废水总氮(TN)排放因子、沼气产量及生物油脂产量.餐厨垃圾量作为核心输入,其变动系统性影响整体排放.车辆行驶总公里直接决定收运阶段的化石燃料消耗,且实际运营中弹性显著.电力因子表征电力的排放强度,其变化直接影响所有耗电环节的间接排放.废水 TN 排放因子则关联废水处理中单位总氮负荷可能产生的强效温室气体氧化亚氮(N_2O)排放.沼气产量和生物油脂产量作为主要资源化产品,其变动通过替代化石燃料的减碳效益,显著影响系统净 GHG 排放.本文对每个参数进行逐一分析,假设参数在±30%的区间内变动,以评估这些变化对全生命周期温室气体排放量的影响.敏感性分析的结果,如图 4 所示.

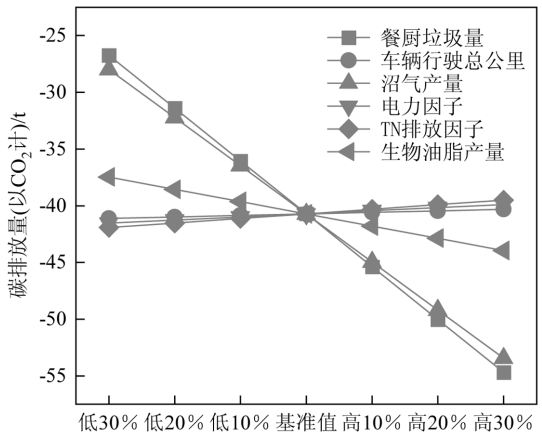


图 4 碳排放参数敏感性分析

Fig.4 Sensitivity analysis of carbon emission parameters

图 4 是敏感性分析结果,参数的斜率表示敏感性系数;餐厨垃圾量和沼气产量曲线相对更陡峭,说明对碳排放的影响较为显著;增加餐厨垃圾量可显著降低碳排放量,这一现象归因于餐厨垃圾后续处理过程资源化回收利用而产生的碳补偿效应,有效的抵消了碳排放量.提高沼气产量同样能显著降低碳排放,其影响与增加餐厨垃圾量相似,突显了沼气产量作为影响碳排放的关键因素,尽管生物油脂产量的提升同样有显著的减排效果,但是其敏感性不如沼气产量,这反映出资源化产品在碳补偿效率层面的差异性.电力因子的变化对碳排放的影响有限,这是由于本案例中涉及电力来源的机器设备不多;车辆行驶总公里数、电力因子和废水 TN 排放因子曲线相对更平缓,说明影响相对较小.但从局部来看,废水 TN 排放因子的敏感性高于电力因子和车辆行驶总公里,表现通过优化废水 TN 的处置工艺能有效的降低碳排放量;因此,减排策略应优先考虑餐厨垃圾处理工艺和高效的资源化途径.

2.4 讨论

2.4.1 活动水平数据不确定性活动水平数据的准确性是影响核算结果的关键,因此需要对本研究温室气体排放量核算过程中活动水平数据的不确定性来源作出说明,这对于提高核算结果的准确性至关重要.首先,不确定性可能源自数据的不精确性[46];本研究在垃圾收运阶段中,垃圾桶可能存在空置的现象导致实际收运点位低于核算值,导致投放点核算单元的排放量偏小,而收运车辆可能因路线优化不足产生多余行驶量,进而导致车辆行驶核算单元排放量偏大.其次,在处理处置阶段,生化需氧量(COD)和总氮(TN)等关键参数主要是依赖规范与指南推荐的产物系数核算进行核算,缺少实时监测数据支撑,规范和指南通常采用保守性估计[47],导致核算结果的偏大.

2.4.2 其他不确定性分析排放因子法因其核算过程简单且适用范围广泛而作为的温室气体排放核算主要方法,但核心参数排放因子的选择直接影响了核算结果的准确性.本研究所使用的排放因子来源于 IPCC 指南、国内编制清单以及相关文献,然而这类排放因子在时间维度上存在年份跨度较大,空间维度上缺少地域性的特点[48],这增加了核算结果的不确定性,具体表现在餐厨垃圾和废水的处置环节中,尽管已有研究根据不同的工艺测算了排放因子,但实际运行中因地域、工艺适应性调整或者水处理浓度有季节性波动[49],导致排放因子匹配度不足且存在时效性不强,如《IPCC 指南》2019 年才修订,而厌氧消化工艺随技术变革快速变化;相较而言,电力排放因子因具备全国各区域的排放因子,且更新周期较短,其不确定性水平相对较低.

通过对上述对不确定性的讨论,减少核算结果的不确定性可以从两方面进行优化,一是增加活动数据的精准度;二是增加对排放因子测算的频率以保证时效性,确保排放因子的工艺匹配度和地域性特征;针对前者,建议未来重点加强对数据的实时监测;对于后者,可结合具体生产工艺构建动态具有区

域性特征的排放因子库.

3　结论

3.1　餐厨垃圾收运与处理全过程核算边界包含行驶过程、垃圾投放点、预处理、废水处置过程等 9 个核算单元,温室气体排放源主要分为 7 类:包括化石燃料燃烧、电力消耗、尾气净化处理、餐厨垃圾处置工艺、废水处理排放和沼渣处置排放、资源化产品.

3.2　以北京市朝阳区为例的全流程核算结果显示,收运阶段中投放点、车辆行驶排放量较高分别为为 1.38 和 1.32tCO_2e/d,化石燃料燃烧为主要排放源.在处理处置阶段中,预处理和废水处理阶段排放量较为显著为 2.44 和 4.05tCO_2e/d.通过资源化过程实现的碳补偿总量为−53.20tCO_2e/d,包括沼气发电−42.42tCO_2e/d 和油脂替代生物柴油−10.78tCO_2e/d;各排放源占比为废水处理 32.3%、化石燃料燃烧 24.4%、电力消耗 22.4%、沼渣处置 20.1%、尾气净化 0.7%.敏感性分析结果表明餐厨垃圾量和沼气产量对温室气体排放影响较大,车辆行驶总公里数和电力因子影响较小.

参考文献：

[1] Breidenich C, Magraw D, Rowley A, et al. The Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change [J]. American Journal of International Law, 1998,92(2):315−331.

[2] Falkner R. The Paris Agreement and the new logic of international climate politics [J]. International Affairs, 2016,92(5):1107−1125.

[3] 国务院办公厅.关于印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》的通知 [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966080.htm, 2024-8-2.
General 0ffice of the State Council. Notice on issuing the "Work plan for accelerating the development of a dual control system for carbon emissions" [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202408/content_6966080.htm, 2024−8−2.

[4] 国家发展改革委.关于印发《完善碳排放统计核算体系工作方案》的通知 [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6983052.htm, 2024-10-8.
National Development and Reform Commission. Notice on issuing the"Work plan for improving the statistical accounting system for carbon emissions" [EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202410/content_6983052.htm, 2024−10−8.

[5] 国家发展改革委.关于印发首批 10 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知 [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html, 2013-11-1.
National Development and Reform Commission. Notice on issuing the first batch of 10 industry−specific guidelines for accounting and reporting of greenhouse gas emissions by enterprises (provisional) [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201311/t20131101_963960.html, 2013−11−1.

[6] 国家发展改革委.关于印发第二批 4 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)的通知 [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963759_ext.html, 2015-2-9.
National Development and Reform Commission. Notice on issuing the second batch of 4 industry−specific guidelines for accounting and reporting of greenhouse gas emissions by enterprises (provisional) [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201502/t20150209_963759_ext.html, 2015−2−9.

[7] 国家发展改革委.关于印发第三批 10 个行业企业温室气体核算方法与报告指南(试行)的通知 [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496_ext.html, 2015-11-11.
National Development and Reform Commission. Notice on issuing the third batch of 10 industry−specific guidelines for sccounting and reporting of greenhouse gas emissions by enterprises (provisional) [EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201511/t20151111_963496_ext.html, 2015−11−11.

[8] 姜艺婧,宋国君,习婧欣,等.基于源头分类的城市生活垃圾社会成本评估——以北京市为例 [J]. 中国环境科学, 2024,44(6):3442−3454.
Jiang Y J, Song G J, Xi J X, et al. Social cost assessment of municipal solid waste based on source classification: A case study of Beijing [J]. China Environmental Science, 2024,44(6):3442−3454.

[9] 郭慧娟,唐守娟,孔令强,等.技术要素耦合作用下我国退役风电设备资源化潜力研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2358−2368.
Guo H J, Tang S J, Kong L Q, et al. The resource utilization potential of decommissioned wind power equipment under the coupling of technical elements in China [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2358−2368.

[10] 刘　阳,靳晨生,张海亚,等.秸秆生物炭的固碳减排潜力及其环境影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(1):396−403.
Liu Y, Jin C S, Zhang H Y, et al. Carbon sequestration and emission reduction potential of straw biochar and its environmental impacts [J]. China Environmental Science, 2024,44(1):396−403.

[11] Ricardo Cepeda−Márquez. Waste to resources: An incredible opportunity to reduce GHG emissions and transform communities [EB/OL]. https://www.c40.org/news/waste−to−resources−an−incredible−opportunity−to−reduce−ghg−emissions−and−transform−communities/, 2017−4−26.

[12] El−Chakhtoura J, El−Fadel M, Rao H A, et al. Electricity generation and microbial community structure of air−cathode microbial fuel cells powered with the organic fraction of municipal solid waste and inoculated with different seeds [J]. Biomass and bioenergy, 2014,67:24−31.

[13] UNEP. UNEP food waste index report 2021 [EB/OL]. https://www.unep.org/resources/report/unep−food−waste−index−report−2021,2021−3−4.

[14] Guo X, Yang X. The economic and environmental benefits analysis for food waste anaerobic treatment: a case study in Beijing [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019,26:10374−10386.

[15] 汪楚乔,史晓凯,李艳萍,等.生活垃圾收运环节温室气体排放量核算方法研究 [J]. 环境科学研究, 2024,37(05):1127-1136.
Wang C Q, Shi X K, Li Y P, et al. Accounting method research for greenhouse gas emission in the collectionand transportation of municipal solid waste [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(5):1127−1136.

[16] 李　欢,金宜英,李洋洋.生活垃圾处理的碳排放和减排策略 [J]. 中国环境科学, 2011,31(2):259−264.
Li H, Jin Y Y, Li Y Y. Carbon emission and its reduction strategies during municipal solid waste treatment [J]. China Environmental Science, 2011,31(2):259−264.

[17] 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.
Bian X, Gong H, Yan Z, et al. Comparison of carbon emission estimation among different“collection−disposal”modesfor food waste [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019,13(2):449−456.

[18] 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 F Y, Xu Y J, Xia J Y, et al. Carbon emissions analysis of municipal solid waste treatmentin suzhou after waste classification [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2023,46(3):133−140.

[19] 邵志飞,呼和涛力,孟晓山,等.餐厨垃圾收运及处置一体化模式生命周期评价:以天津市为例 [J]. 环境工程学报, 2024,18(11):3260−3270.
Shao Z F, Hu H T L, Meng X S, et al. Life cycle assessments of the integrated model for collection, transportationand disposal of food wastes: A case study of Tianjin city [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2024,18(11):3260−3270.

[20] Zhang L, Li H, Yang L, et al. Carbon footprints of centralized and decentralized food waste utilization pathways [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025,208:115040.

[21] 周 俊,王梦瑶,王改红,等.餐厨垃圾资源化利用技术研究现状及展望 [J]. 生物资源, 2020,42(1):87-96.
Zhou J, Wang M Y, Wang G H, et al. Research status and prospect of food waste utilization technology [J]. Biotic Resources, 2020,42(1):87-96.

[22] 师旭军,马小蕾,李 建,等.基于城市污水 AB 法处理的碳减排量测算分析 [J]. 工程建设, 2025,57(4):74-80.
Shi X J, Ma X L, Li J, et al. Research on carbon reduction in wastewater treatment plants basedon AB method under the background of carbon neutrality [J]. Engineering Construction, 2025,57(4):74-80.

[23] 杨清雯,陈惠鑫,石 磊,等.渗滤液处理过程碳排放核算及减碳路径探索 [J]. 环境科学研究, 2024,37(11):2444-2452.
Yang Q W, Chen H X, Shi L, et al. Carbon emission accounting and carbon reduction path exploration in theprocess of leachate treatment [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(11):2444-2452.

[24] 刘 玲.我国石化行业温室气体排放变动分析及减排潜力研究 [D]. 东营:中国石油大学(华东), 2014.
Liu L. Research on greenhouse gas emissions change and reduction potential in china's petrochemical industry [D]. Dongying: Dongying China University of Petroleum (East China), 2014.

[25] 戴晓虎,张 辰,章林伟,等.碳中和背景下污泥处理处置与资源化发展方向思考 [J]. 给水排水, 2021,57(3):1-5.
Dai X H, Zhang C, Zhang L W, et al. Thoughts on the development direction of sludge treatment andresource recovery under the background of carbon neutrality [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021,57(3):1-5.

[26] 文昊深.城市生活垃圾高温好氧堆肥工艺优化研究 [D]. 重庆:重庆大学, 2004.
Wen H S. The optimizing study onthermorphilic aerobic compostingof municipal domestic refuse [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.

[27] Song C, Zhu J J, Willis J L, et al. Oversimplification and misestimation of nitrous oxide emissions from wastewater treatment plants [J]. Nature Sustainability, 2024,7(10):1348-1358.

[28] Sudiartha G A W, Imai T, Reungsang A. Syntrophic relationship among microbial communities enhance methane production during temperature transition from mesophilic to thermotolerant conditions [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024,12(6):114903.

[29] 周 晨,潘玉婷,刘 敏,等.反硝化过程中氧化亚氮释放机理研究进展 [J]. 化工进展, 2017,36(8):3074-3084.
Zhou C, Pan Y T, Liu M, et al. Advance of mechanism on N_2O emissions from biological denitrification [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017,36(8):3074-3084.

[30] 武俊尧,李向炜,丁 燕,等.餐厨垃圾沼渣制备生物炭回用促进厌氧消化产沼气工艺的碳排放特征研究 [J]. 环境科学学报, 2024, 44(3):227-236.
Wu J Y, Li X W, Ding Y, et al. Carbon emission characteristics of anaerobic digestion for biogas productionenhanced by reusing biochar prepared from food waste anaerobic digestionresidue [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024,44(3):227-236.

[31] 黄静颖,焦学军,龙吉生.垃圾焚烧发电项目碳排放计算对比 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2024,58(11):2338-2346.
Huang J Y, Jiao X J, Long J S. Comparison of carbon emission calculation for MSW incinerationpower generation project [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2024,58(11):2338-2346.

[32] 张雪纯.异质性环境规制工具的减污降碳协同效应研究 [D]. 太原:山西财经大学, 2024.
Zhang X C. Assessing the synergy effectiveness of heterogeneous environmental regulatory tools for controlling pollution and reducing carbon [D]. Taiyuan: Shanxi University of Finance & Economics, 2024.

[33] 于秀娟.工业与生态(第一版) [M]. 北京:化学工业出版社, 2003.
Yu X J. Industrial Ecology (1st ed.) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.

[34] Fiehn A, Kostinek J, Eckl M, et al. Estimating CH_4, CO_2, and CO emissions from coal mining and industrial activities in the Upper Silesian Coal Basin using an aircraft-based mass balance approach [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2020,2020:1-33.

[35] 曹俊文,周 丽.长三角地区物流业碳排放时空分布及其影响因素研究 [J]. 统计与决策, 2021,37(10):79-83.
Cao J W, Zhou L. Spatiotemporal distribution of carbon emissions from logistics industry in the Yangtze River Delta region and its influencing factors [J]. Statistics & Decision, 2021,37(10):79-83.

[36] 罗平滢.建筑施工碳排放因子研究 [D]. 广州:广东工业大学, 2016.
Luo P Y. Research on carbon emission factors of construction phase in construction engineering [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.

[37] 张子华,万绪同,杨 雪,等.基于 LCA 理论的典型饮品咖啡碳排放足迹分析研究 [J]. 农业与技术, 2023,43(1):71-75.
Zhang Z H, Wan X T, Yang X, et al. Research on carbon footprint analysis of typical coffee beverages based on LCA theory [J]. Agriculture and Technology, 2023,43(1):71-75.

[38] 孙志超.碳达峰背景下广东省班线客运企业二氧化碳排放核算方法研究 [J]. 交通节能与环保, 2022,18(5):60-64.
Sun Z C. Research on the accounting method of CO_2 emissions for line passenger transport enterprises in guangdong province under the background of carbon peaking [J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2022,18(5):60-64.

[39] 胡新军,张 敏,余俊锋,等.中国餐厨垃圾处理的现状、问题和对策 [J]. 生态学报, 2012,32(14):4575-4584.
Hu X J, Zhang M, Yu J F, et al. Food waste management in China: status, problems and solutions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(14): 4575-4584.

[40] IPCC. Climate change 2022: Mitigation of Climate Change [R]. 2022.

[41] 张 慧.基于全生命周期的厨余垃圾处置利用技术综合评价研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2022.
Zhang H. Study on comprehensive life cycle assessmentof kitchen waste treatment and utilizationtechnologies [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022.

[42] 国家发改委.陆上交通运输企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行) [R]. 2015.
National Development and Reform Commission. Guidelines for greenhouse gas emissions accounting and reporting by land transportation enterprises (provisional) [R]. 2015.

[43] 生态环境部.关于发布 2022 年电力二氧化碳排放因子的公告 [EB/OL].https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202412/t20241226_1099413.html, 2024-12-20.
Ministry of Ecology and Environment. Announcement on publishing the 2022 CO_2 emission factors for electricity generation [EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202412/t20241226_1099413.html, 2024-12-20.

[44] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2019 Refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [J]. Agriculture, forestry and other land use, 2019,4:824.

[45] 蔡博峰,高庆先,李中华,等.中国城市污水处理厂甲烷排放因子研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2015,25(4):118-124.
Cai B F, Gao Q X, Li Z H, et al. Study on the methane emission factors of wastewater treatment plants in China [J]. China Population, Resources and Environment, 2015,25(4):118-124.

[46] Donner P. Data inaccuracy quantification and uncertainty propagation for bibliometric indicators [J]. Research Evaluation, 2024,33:10.1093/reseval/rvae047.

[47] 于 航.化工厂区地下水环境影响预测研究——以天津鼎金聚苯乙烯化工厂为例 [J]. 地下水, 2024,46(4):35-38.
Yu H. Prediction of groundwater environmental impact in chemical plant areas——Taking Tianjin Dingiin polystyrene chemical plant as an example [J]. Ground Water, 2024,46(4):35-38.

[48] 付诗瑶.隐含碳控制目标下的小型装配式住宅减碳策略研究 [D]. 西安:西安建筑科技大学, 2023.
Fu S Y. Carbon reduction strategies for prefabricated residenceunder embodied carbon control targets——take the qijuseries experimental residence as an example [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023.

[49] 肖 茜,韩力慧,齐超楠,等.中国典型城市大气降水离子特性、来源及其对环境的影响 [J]. 中国环境科学, 2024,44(10):5329-5343.
Xiao X, Han L H, Qi C N, et al. Ionic characteristics and sources of atmospheric precipitation and its impacts on environment at typical cities in China [J]. China Environmental Science, 2024,44(10):5329-5343.

作者简介：黄 珊(1993-),女,江西吉安人,副教授,博士,主要从事微生物电化学技术与温室气体减排研究.发表论文 20 余篇. 18270911541@163.com.