张婧怡,李金惠,张妮妮,等.生活源固体废物处理减碳路径分析——以成都市为例 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6954-6962.
Zhang J Y, Li J H, Zhang N N, et al. Carbon Reduction Pathways for Municipal Solid Waste Management: A Case Study of Chengdu [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6954-6962.

# 生活源固体废物处理减碳路径分析——以成都市为例

张婧怡,李金惠,张妮妮,刘丽丽* (清华大学环境学院,北京 100084)

**摘要:** 本研究基于成都市生活源固废处理现状,模拟量化不同策略下的碳减排潜力,提出协同减碳的路径优化机制.当前成都市固废处理面临前端分类效能低、源头减量缺位,中端资(能)源化利用率不足,后端高能耗工艺推高系统碳排放的问题.研究设置八大情景模拟不同策略协同减碳效果:资源化率提升(S4)在短期内减排效果最显著,源头减量(S2)具备长期“滚雪球”效应,综合路径(S7)在多数固废类型中表现最优,验证“全链条协同治理”的系统优势.不同策略在不同时期主导减排:短期(2020~2027 年),“全量焚烧”策略降低碳排放量从 4169ktCO$_2$-eq 降至 1314.7ktCO$_2$-eq,贡献同期 95.4%的减排量;中期(2028~2035 年)源头减量策略持续发力,实现碳排放稳步下降;长期(2035 年后)通过优化焚烧工艺、污泥协同处理和高值化资源利用,实现深度脱碳和碳汇增效.此外,研究还识别了不同固废类型的策略敏感性差异,提出分类精准施策的城市固废低碳转型路径建议.

**关键词:** 生命周期评价；碳减排策略；固体废物处理；成都市
**中图分类号:** X703.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)12-6954-09

**Carbon reduction pathways for municipal solid waste management: A case study of Chengdu.** ZHANG Jing-yi, LI Jin-hui, ZHANG Ni-ni, LIU Li-li* (School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6954~6962

**Abstract:** This study evaluates the carbon mitigation potential of municipal solid waste (MSW) management strategies in Chengdu by integrating multi-scenario simulations with a refined classification-based accounting framework. The existing system faces compounded challenges, including inadequate source separation, limited source reduction, low resource recovery rates, and a high-emission treatment structure dominated by landfilling and energy-intensive technologies. The results demonstrate that different strategies prevail at distinct stages of the transition. In the short term (2020~2027), a full-incineration strategy reduces net emissions from 4169 to 1314.7kt $CO_2$-eq, accounting for 95.4% of cumulative reductions. In the midterm (2028~2035), source reduction increasingly alleviates downstream treatment pressure. In the long term (post-2035), system optimization—through improved incineration performance and sludge co-treatment—enhances synergies and carbon sink effects. Among individual strategies, enhanced resource utilization (S4) yields the most immediate mitigation effect, whereas source reduction (S2) generates substantial long-term cumulative benefits. The integrated strategy (S7) outperforms all single-strategy options across most waste categories, underscoring the need for full-chain, coordinated governance. Overall, the findings highlight the importance of differentiated, time-phased, and waste-type-specific policy interventions to enable a low-carbon transition in urban MSW systems.

**Key words:** life cycle assessment；carbon reduction strategies；solid waste management；Chengdu

城市固体废物处理减排具有显著的乘数效应:固废系统每减少(以 $CO_2$_eq 计)1t 排放,可带动上游产业减少 3~5t[1].制定有效的碳减排策略是实现“双碳”目标的重要环节[2-3],碳核算是制定减排策略的基础[4-5],然现有核算体系存在局限,当前国际主流固体废物处理温室气体排放评价工具主要有 WARM 模型(美国环境保护署)[6-7]、EASEWASTE 模型(丹麦技术大学)[8]、SWM-GHG 计算器(IFEU 研究所)[9]和 CO2ZW 计算器(西班牙巴塞罗那自治大学)等,主要采用全生命周期评价方法[10-11],将已有研究中各类废物处理的碳排放强度汇总,从而实现完整的系统排放核算.在核算边界上,现有核算体系仅考虑末端处理环节,未考虑前端源头减量的碳效益(除 WARM).同时 SWM-GHG 与 $CO_2$ZW 在计算回收环节碳排放时采用 IPCC 核算方法,存在前后核算方法不一致的问题[9].

当前研究大多采用 IPCC 法核算城市固废处理系统碳排放现状,王育宝等[12]基于 IPCC 法对陕西省

**收稿日期:** 2025-03-06
**基金项目:** 国家重点研发计划(2024YFC3909405);清华大学-丰田研究中心资助
* 责任作者, 研究员, liulili@tsinghua.edu.cn

城市废弃物进行碳核算,结果显示 2015 年陕西省每吨固体废物处理碳排放产生 1105kg.毕珠洁等[13]采用 IPCC 法,对上海市 2005 至 2015 年生活垃圾处理碳排放强度进行计算,发现每千克垃圾处理碳排放量略有下降.刘跃廷等[14]对重庆市“无废城市”建设前后的碳减排潜力进行了分析,结果显示无废城市政策实施前后,碳减排总量分别为 22.9Mt 和 27.5Mt.然而,现有的研究大多集中于混合垃圾的整体核算,较少考虑不同废物组分的处理处置差异,且多以现状评估为主,缺乏基于预测对处理策略的碳减排潜力的量化和策略优化建议的提出.

综上,当前研究在核算边界选择、方法一致性及动态预测上存在缺陷,且多聚焦于混合垃圾的整体核算,缺乏对分质处理碳效的精细刻画.基于此本研究创新性体现在三方面:1)首次整合“源头减量—循环利用—末端处置”三阶段的核算边界,构建了八大类生活源固废分质核算体系;2)突破传统模型方法的割裂局限,系统构建覆盖全环节的统一排放因子数据库;3)开发多情景动态预测模块,实现不同处理策略的碳减排贡献度解析与实施路径优化.研究成果可为成都市生活固废系统精准减碳提供方法学支撑与决策依据.

## 1　方法与数据

### 1.1　活动水平数据获取与预测

**1.1.1　现状数据调研**　通过调研历年国家统计年鉴、成都市生态环境状况公报、《成都省人口发展规划(2035 年)》[15]及《“十四五”成都省城镇生活垃圾无害化处理设施建设规划》[16]等相关文献,收集了成都市固体废物处理的现状数据(如生活垃圾产生量、无害化处置率等)及未来预测信息(如人口与房地产开发规划等).

**1.1.2　产生量预测**　本文选取了八大类典型生活源固体废物(包括生活垃圾、厨余垃圾、塑料废物、生活垃圾焚烧飞灰、有害垃圾、建筑垃圾、市政污泥、动力电池)旨在分析不同类别固体废物的碳排放情况.

对于生活(其他)垃圾,选取成都市人口数量、地区生产总值为生活垃圾产生量影响因子,基于 2006~2022 年成都市生活垃圾产生量为历史数据,采用向量机 SVR 模型和多元线性回归方程两个方法对生活垃圾产生量进行预测并交叉验证.厨余垃圾、有害垃圾、生活垃圾焚烧飞灰:通过公式 1 进行计算,本研究中对于基线情景预测,均假设 2022~2035 年分出率不变.

其中,$W_{R,y}$ 为第 $y$ 年生活垃圾产生量,$W_{i,y}$ 为第 $y$ 年类别 $i$ 类固体废物产生量,$k_i$ 为对应废物与生活垃圾相比产生比例,对应厨余垃圾取分出率 7%[17],有害垃圾取 0.001%,生活垃圾焚烧飞灰取 3%[18].

建筑垃圾预测基于向量机 SVR 模型,以成都市建筑施工面积为自变量对成都市建筑垃圾产生量(采用 AMIRA 模型)进行预测;对于市政污泥,根据《成都市污泥处置规划(2016~2025 年)》,通过“市政污泥产生量=市政污水产生量×产泥系数”,其中取产泥系数为 23%[19];废塑料与废动力电池基于《再生资源统计年鉴》中全国废塑料、退役动力电池产生量预测,依据成都 GDP 占全国比重得到对应产生量.

### 1.2　清单分析

**1.2.1　收集与运输环节**　运输分为收集运输(产废社区-中转站)与设施运输(中转站-末端设施).为简化计算处理,研究假设各类生活垃圾在收运阶段均使用 3t 车辆,在中转站到设施的路途中采取 8t 车辆进行运输.对于设施运输,成都不同区对应的收集运输距离和设施运输距离(通过 Arcmap 获取)与年均运输量如表 1 所示.

**表 1　成都市生活垃圾运输距离与运输量**

Table 1　Transportation distance and volume of municipal solid waste in Chengdu

| 废物类型 | 运输流程说明 | 路径计算工具 | 指定处理设施 |
|---|---|---|---|
| 生活垃圾 | 分为收集运输(社区/街道至中转站)和设施运输(中转站至处理设施) | Arcmap 与百度地图 | 依据成都市实际分布情况定 |
| 厨余垃圾 | 直接从产生地运输至处理设施,无需中转站 | 百度地图 | 1. 成都市中心城区餐厨垃圾无害化处理项目(一期)2. 成都市中心城区餐厨垃圾无害化处理项目(二期)3. 成都市中心城区餐厨垃圾无害化处理项目(三期) |

续表 1

| 废物类型 | 运输流程说明 | 路径计算工具 | 指定处理设施 |
|---|---|---|---|
| 有害垃圾 | 直接从产生地运输至处理设施,无需中转站 | | 1. 成都市万兴环保发电厂(一期)2. 成都市万兴环保发电厂(二期) |
| 市政污泥 | 从污水处理厂运输至焚烧厂进行干化焚烧 | | 1. 成都万兴环保发电厂(二期)2. 宝林环保发电厂 3. 成都简阳环保发电厂 4. 成都邓双环保发电厂 |
| 生活垃圾焚烧飞灰 | 固化后运输至填埋场分区填埋 | | 成都长安垃圾填埋场(三期) |
| 建筑垃圾 | 直接从产生地运输至填埋场,无需中转站 | | 成都市建筑垃圾处理点位 |
| 废塑料 | 经分拣后运送至再生资源回收利用基地 | | 1. 大邑县再生资源回收利用基地 2. 彭州市再生资源回收利用基地 |
| 废动力电池 | 堆存 | – | – |

1.2.2 处理处置环节 本研究通过实地调研成都市生活源固体废物处理处置企业以及相关环境评估报告,结合 Gabi 软件和 Eco invent 数据库,计算了成都市固体废物处理处置过程的碳排放因子.Gabi 软件的计算主要基于各环节的能耗、水耗、材料投入等数据[20-21],结合生命周期评价方法,最终得出成都市生活源固体废物处理过程的环境排放清单汇总表(表 2)

**表 2 成都市生活源固体废物处理处置碳排放清单**

Table 2 Carbon emission inventory of municipal solid waste treatment and disposal from domestic sources in Chengdu

| 类型 | 处理方法 | $EF_0$ ($kgCO_2$-eq/t) |
|---|---|---|
| 其他垃圾 | 焚烧 | 56.42 |
| | 卫生填埋 | 1236.0345 |
| | 堆肥 | 183.38 |
| 厨余垃圾 | 焚烧 | 0 |
| | 厌氧消化 | −19.79 |
| | 好氧堆肥 | 183.38 |
| | 三相分离 | −0.46 |
| 市政污泥 | 干燥 + 焚烧 | 1072.07 |
| | 热水解 + 厌氧消化 | 551.65 |
| | 堆肥 + 深层脱水 | 521.58 |
| 建筑垃圾 | 回收透水砖 | −52.19 |
| | 填埋 | 0 |
| 有害垃圾 | 焚烧 | 55.26 |
| 焚烧飞灰 | 固化填埋 | 0.22 |
| | 水泥窑共处理 | 42.98 |
| | 外包处理 | 0 |
| 废塑料 | 外包处理 | 0 |
| | 机械回收 | −921.53 |
| 废动力电池 | 存储 | 0 |
| | 回收 | 2800 |
| | 级联利用 | 624 |

1.3 碳排放量测算

在确定主要类别废物的产生量、处理处置方式及对应碳排放因子后,不同处理结构下生活垃圾处理环节的碳排放水平计算如式 2 所示.

$$E_y = \sum_i E_{\text{trans},i} + \sum_i E_{\text{treat},i} = \sum_i \text{EF}_{\text{trans},i} \times W_{i,y} + \sum_i \text{EF}_{\text{treat},i} \times W_{i,y} \quad (2)$$

式中:$E_y$ 为第 $y$ 年成都市生活源固体废物处理碳排放量,$E_{\text{trans},i}$ 为 $i$ 类生活源固体废物收运环节碳排放量,$E_{\text{treat},i}$ 为 $i$ 类生活源固体废物处理处置环节碳排放量,$\text{EF}_{\text{trans},i}$ 类生活源固体废物收运环节碳排放因子,$\text{EF}_{\text{treat},i}$ 为 $i$ 类生活源固体废物处理处置碳排放因子.

## 2 结果与分析

2.1 现状分析:成都市生活源固体废物物质流与碳排放

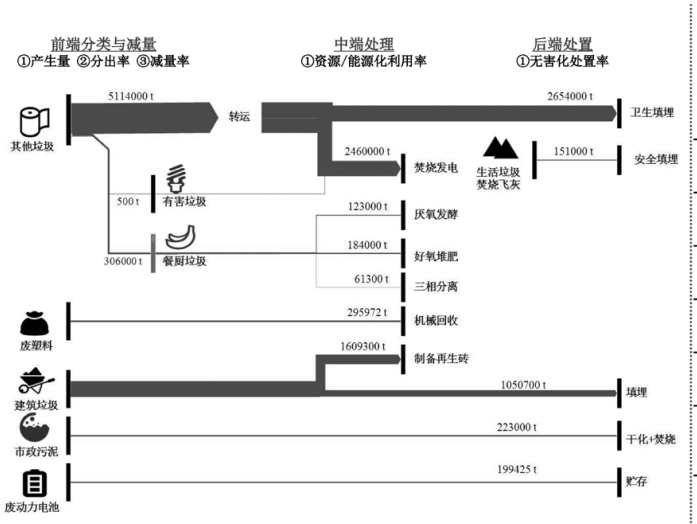
本研究将成都市固体废物管理体系划分为前端垃圾分类与减量、中端处理与资源化利用、末端处置三个主要环节(图 1).

对于前端垃圾分类与减量环节,2020 年成都市的生活垃圾产生总量达到 $511.4\times10^4$t,但由于垃圾分类工作尚未全面普及和有效落实,居民厨余垃圾和可回收物的分类收集率仍较低,当前厨余垃圾主要来自餐饮行业,年产生量约 $80\times10^4$t,废塑料产生量约为 $29.6\times10^4$t,废动力电池产生量约 $19.9\times10^4$t.

对于中端处理与资源化利用环节,成都市面临资源化利用设施处理能力不足的问题.2020 年,全市生活垃圾焚烧量为 $246\times10^4$t,焚烧率仅为 48.1%,焚烧设施处理能力明显不足.同时,餐厨垃圾资源化利用设施的处理能力也存在缺口,其中餐厨垃圾厌氧发酵处理 $12.3\times10^4$t,好氧堆肥处理 $18.4\times10^4$t,三相分离处理 $6.13\times10^4$t,仍有 $43.2\times10^4$t(占餐厨垃圾总量的 54%)未能实现高值化资源利用而送入焚烧厂进一步占据焚烧设施处理能力.此外,建筑垃圾中约 $160.9\times10^4$t 实现资源化利用,主要用于再生砖生产,

资源化利用率为 60.5%,剩余部分填埋处置.具体来看,其他垃圾、市政污泥和废动力电池的资源化利用率明显较低甚至为零,造成了资源浪费,同时也加剧了末端处置设施的负担.

在后端处置环节,2020 年成都市生活垃圾无害化处置率达到99%,仍有$265.4\times10^4$t生活垃圾以填埋方式处理,占生活垃圾总量的 52%.市政污泥未实现资源化利用,2020 年产生的$88.3\times10^4$t 污泥全部经过干化后焚烧处理,生活垃圾焚烧飞灰的产生量为$15.1\times10^4$t,全量填埋处置.




物质流参数分析

| 固体废物类别 | 前端 ①产生量/t | 前端 ②垃圾分出率(%) | 中端 ①资源/能源化利用率(%) | 后端 ①无害化处置率(%) |
|---|---|---|---|---|
| 其他垃圾 | 5114000 | - | 48.1 | 99 |
| 有害垃圾 | 0.5 | 0 | 0 | 99 |
| 餐厨垃圾 | 800300 | 15.6 | 100 | 99 |
| 市政污泥 | 883000 | - | 0 | 99 |
| 建筑垃圾 | 2660000 | - | 60.5 | 99 |
| 生活垃圾焚烧飞灰 | 151000 | - | 0 | 99 |
| 废塑料 | 295972 | - | 100 | 99 |
| 废动力电池 | 199425 | - | 0 | - |

图 1　2020 年成都市生活源固废物质流分析

Fig.1　Material flow analysis of municipal solid waste from residential sources in Chengdu City (2020)

2020 年成都市生活源固体废物处理净碳排放总量(以 $CO_2$_eq 计)为 3197.67kt,图 2 展现了不同生活源固体废物处理的净碳排放量.其中其他垃圾的碳排放最高,为 3523.5kt(卫生填埋与焚烧的碳排放量分别为 3173.1kt 和 350.4kt),市政污泥次之为946.6kt(主要处理技术为干化焚烧),其中废塑料破碎造粒形成再生塑料[22]和建筑垃圾制备再生砖[23]的资源化处理环节碳排放分别为−272.7 与−84.0kt,再生产品抵消了原生塑料粒子与砖生产过程的碳排放,具有碳减排效益.

基于对成都市生活源固体废物处理物质流与碳排放现状的分析,2020 年成都市生活源固体废物处理存在的主要问题包括:①前端垃圾分类尚未有效普及和落实,可回收物与厨余垃圾的分类分出率偏低,导致大量生活垃圾混合收集后直接进入中后端焚烧或填埋环节,阻碍资源化效率提升;②前端源头减量实施力度不足,2020~2035 年生活源固体废物产生量呈持续增长趋势,进一步加剧中后端设施的处理压力;③中端资源化处理设施能力明显不足,生活垃圾能源化利用率仅为48.1%,餐厨垃圾中仍有 54%未实现高值化资源利用,废动力电池、生活垃圾焚烧飞灰、市政污泥等多类固废未实现资源化利用;④后端处置设施能耗高碳排放高,其他垃圾填埋、市政污泥干化焚烧为主要碳排放源.

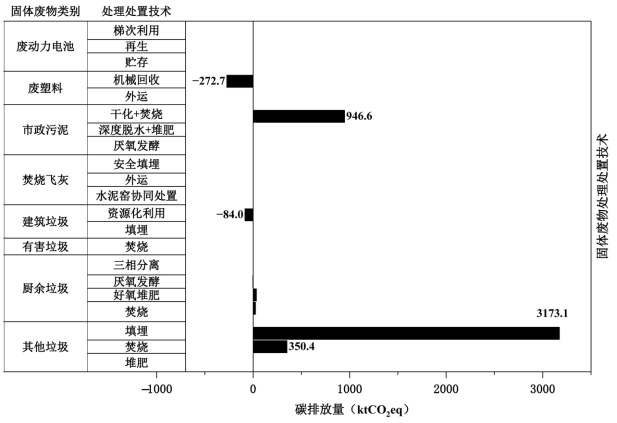



图 2　2020 年成都市固体废物处理分固体废物类型净碳排放量

Fig.2　Net carbon emissions by waste type in Chengdu municipal solid waste management system (2020)

## 2.2　单一策略:提升资源化利用率的协同减碳效果

基于现状分析,本研究设置了 8 个情景模拟不同政策措施下,成都市 2020~2035 年固体废物处理的物质流动与碳排放情况,分析不同策略对应的协同减碳效益,具体为基线情景、四个单策略情景(与以上四个问题相对应)、三个综合情景,不同情景介绍与参数如表 3 所示.

不同情景对应的系统碳排放量和达峰时间如图 3 所示,结果显示 2020~2035 年累计减碳量(减碳量=单策略情景下累计碳排放量−基线情景下累计碳排放量):提升资源化利用率策略 S4>设施升级低碳化 S5>垃圾分类策略 S1>源头减量策略 S2.基线情景的累计碳排放量为 67.5Mt,S4、S5 情景下碳排放量分别为 32.2、48.4Mt,S1、S2 高达 63.3、64.1Mt.中后端优化策略的减碳量是前端优化策略的 1.3~2.0 倍,中后端策略的减碳显著效果较好,其主要原因是,成都市生活源固废碳排放主要由生活垃圾填埋和市政污泥干化焚烧贡献,通过提高中端资源化利用率,降低后端高碳排处置量(即减少生活垃圾填埋率与市政污泥干化焚烧率)可以显著削减系统碳排放.

**表 3 成都市生活源固体废物处理路径优化情景**

Table 3 Optimization scenarios for municipal solid waste management pathways in Chengdu

| 情景 | 名称 | 固体废物类型 | 描述 | 数据来源 |
|---|---|---|---|---|
| S0 | 基线情景 | – | 假设没有措施干预,基线情景 | – |
| S1 | 垃圾分类 | 厨余垃圾 | 2020~2030 年垃圾分类分出率 7%→25%,2030~2035 线性外推 | 《“十四五”城镇生活垃圾分类和处理设施发展规划》 |
| | | 有害垃圾 | 2020~2030 年 0.1%→1%,2030~2035 线性外推 | |
| S2 | 源头减量 | 生活(其他)垃圾 | 绿色生活行为减量,减量率逐年递增,2020~2030 渗透率 0→15% | 《成都市“无废城市”建设实施方案》 |
| | | 厨余垃圾 | 光盘行动减量,减量率逐年递增,2020~2035 渗透率 0→15% | |
| | | 建筑垃圾 | 提高处理效率,减量率逐年递增, 2020~2035 渗透率 0→15% | |
| S3 | 前端综合 | | S1 和 S2 结合 | |
| S4 | 提高资源化利用率 | 生活(其他)垃圾 | 填埋率、焚烧率:2025 年生活垃圾零填埋,全量焚烧 | 《成都市“十四五”城市综合处理规划》 |
| | | 建筑垃圾 | 2020~2030 年建筑垃圾资源化利用率 22.1%→95%,2030~2035 线性外推 | 《成都市“无废城市”建设实施方案》 |
| | | 生活垃圾焚烧飞灰 | 2020~2030 年资源化利用率 0~50%,2030~2035 线性外推 | 依据现有处理处置情况与现场调研 |
| S5 | 处理处置设施升级 | 厨余垃圾 | 2020~2030 年提升厌氧发酵比率:15%→45% | 假设根据每类设施的碳排放因子,提高碳排放因子低或为负值的处理率(更多的垃圾流向低碳技术进行处理处置) |
| | | 生活(其他)垃圾 | 焚烧:节能降耗,厂区自用电从 20%降低至 15%<br>填埋:填埋气直接排放升级至填埋气收集并能源化利用 | 依据现有处理处置情况与现场调研 |
| | | 厨余垃圾 | 厌氧消化:沼气直接排放升级至沼气收集后燃烧 | |
| | | 市政污泥 | 干化焚烧:节能降耗降低助燃料投入比例,同时升级至副产品建材化利用 | |
| | | 建筑垃圾 | 资源化利用:破碎后土地利用升级至制备建材再生砖 | |
| S6 | 中后端综合 | | S4 和 S5 结合 | |
| S7 | 综合 | | S4 和 S6 结合 | |

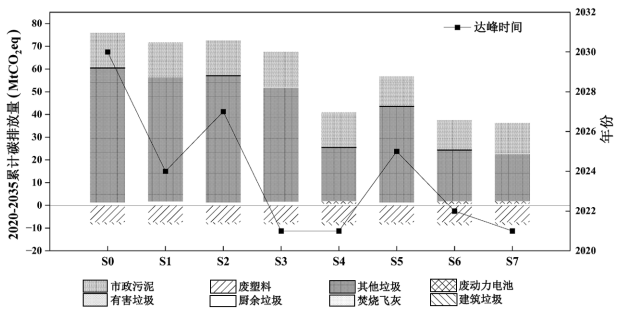



图 3 八大情景对应碳排放量与行业碳达峰时间

Fig.3 Carbon emissions and industry peaking time under eight scenarios

与基线情景相比,在 2020~2025 年间,S4 策略可以大幅削减生活源固体废物处理碳排放,行业净碳排放量从 2020 年的 4169kt,下降到 2027 年 1314.7kt,是短期内最有效的碳排放削减策略(图 4B).通过对不同固体废物拆解分析,大幅的二氧化碳排放下降主要得益于生活垃圾“零填埋”、“全量焚烧”策略[24],使得其他垃圾的碳排放量从 2020 年的 3523.5kt,下降到 2025 年 776.1kt.同时建筑垃圾和厨余垃圾的资源化利用.然而在 S4 策略下,2025 和 2035 年的碳排放量基本维持稳定未见明显下降(如图 4.B),中长

期的角度看,减碳潜力较小.

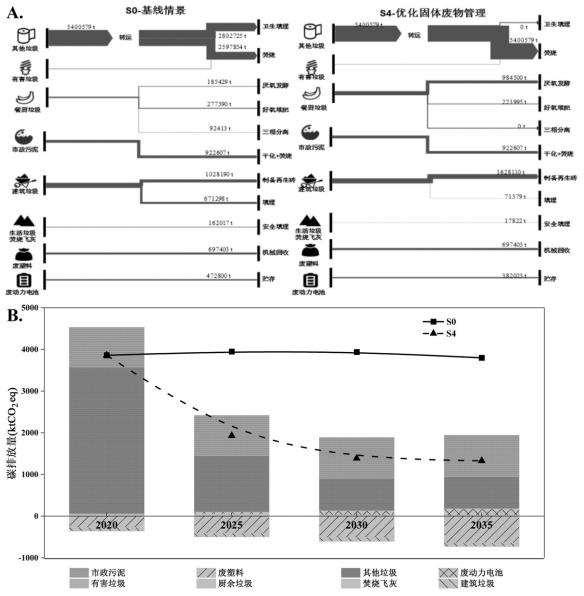



图 4　提升资源化利用率情景(S4)物质流动与碳排放情况

Fig.4　Material flows and carbon emissions under the enhanced resource utilization scenario (S4)

## 2.3　综合策略:各类型固废在不同时期的协同减碳效果

本研究以生活源固体废物收运为节点,将固体废物处理分为前、中、后端,并设置相应综合情景拟模拟作用在固体废物处理不同环节的处理策略对系统物质流与碳排放的影响.研究发现,与基线情景相比,综合情景 S7 的累计碳减排量为 40Mt$CO_2$eq,在 8 大情景中碳减排效益最好,体现了在生活源固体废物处理中,多策并举的重要性.

不同类型废物在排放结构、减排潜力及策略路径上存在显著差异.从策略共性来看,中端处理优化与资源化利用提升(对应 S4 策略)是多类废物实现减排的关键路径.例如,其他垃圾通过全量焚烧策略可减排约 60.2%;若提升厌氧发酵比例至 45%,厨余垃圾可实现 45.6%的减排.另一方面,后端技术升级路径(对应 S5 策略)对高碳强度固废(如市政污泥、其他垃圾)具有普遍适应性.市政污泥基通过干化焚烧系统升级节能与副产品建材化利用可实现 14.5%的减排.表明后端技术升级具备高减碳潜力,提升废物高附加值利用效率是未来的新兴方向.

从差异性来看,不同固废在减排路径上的优先顺序与减碳潜力各不相同.在综合策略下,具有资源属性的固废(如厨余垃圾、废塑料和废动力电池)通过高值化资源利用已实现碳减排,例如废塑料通过机械回收在 S4–S7 情景下稳定减排 742.1×$10^4$t 以上.建筑垃圾在基线下已实现 985.4×$10^4$t 减排,若资源化率提升至 95%则可进一步提升减排幅度至 38.1%.相反,其他垃圾、市政污泥等处理处置刚性高未能实现高值化资源利用,碳排放仍为正值.2035 年在 S7 情景下预测市政污泥、其他垃圾碳排放分别 429.7、243.4kt,对于此类废物应考虑前端减量协同中后端技术优化最大化减碳效果,实现碳中和目标.

作用固废处理不同环节的策略主导了不同时期的碳减排进程.2020~2027 年间 S4 策略的累计碳减排量达 38.8Mt,占该时期综合策略 S7 总减排量的 95%.提高生活垃圾焚烧发电率、餐厨垃圾好氧堆肥与厌氧发酵量在中短期内发挥了主导作用.前端策略(垃圾分类 S1 和源头减量 S2)的碳排放削减速率从 2025 年 15%提升至 2030 年 20.1%,呈逐步增加趋势.源头减量策略作用于生活垃圾产生源,通过减少生活垃圾产生稳步降低系统碳排放量[27].总体而言,中后端策略在中短期内快速削减系统碳排放,而前端策略在中长期内通过源头控制持续优化减排效果.两者的协同作用,确保了成都市生活源固体废物处理系统碳排放量的持续下降.

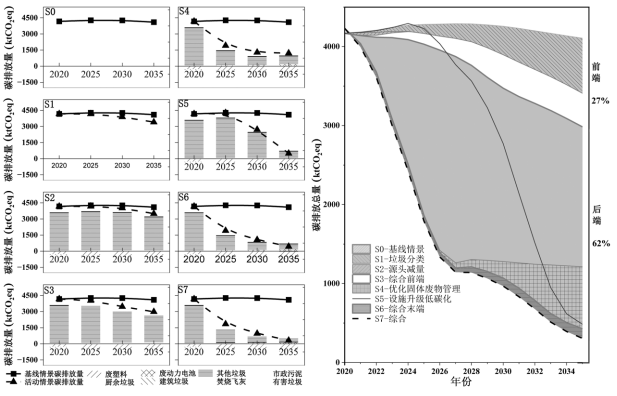



图 5　2020~2035 年成都市生活源固废处理碳减排路径

Fig.5　Carbon emission reduction pathways for municipal solid waste management in Chengdu City (2020~2035)

S7 情景对应 2035 年成都市生活源固体废物处理系统碳排放量降至 313kt,其中市政污泥处理环节碳排放量最高(429.7kt),其他垃圾次之(243.4kt),而建筑垃圾和废塑料分别实现 642.7kt 和 85.2kt 的碳减排(图 5).为实现行业碳中和目标,需重点突破其他垃

圾焚烧与市政污泥处理的减排瓶颈,同时进一步增加建筑垃圾和废塑料回收利用产生的碳效益.

## 3 讨论

基于研究结果,本研究为不同时期、不同类型成都市生活源固体废物管理提供政策建议.从时间维度看,相关部门应结合不同时期的碳排放情况精准施策以最大化碳减排效益:

2020~2027 年:发力中端处理,推进生活垃圾“全量焚烧”.在基线情景下,其他垃圾 2020~2035 年累计碳排放达 5914.9×10$^4$t,填埋处理占比近 90%,通过“全量焚烧”策略(S4),依托现有焚烧发电厂并结合成渝双城经济圈[28],探索跨区域协同焚烧机制,预计可减排约 60.2%,是短期内减排最直接有效的路径.对于焚烧过程中产生的飞灰应实施协同处置路径,虽碳减排效益有限,但在“污染防控—碳减排”协同治理中具有结构性价值.

2028~2035 年:聚焦前端,强化以源头减量为主的管理策略. 随着中后端技术替代措施逐步完成(如焚烧设施覆盖率超过 95%),其边际碳减排效益趋于递减,减排贡献呈现非线性衰退趋势,年均减排增量降幅可达 7.5 倍.相比之下,源头减量在此阶段的碳减排潜力逐步显现,至 2035 年,其年减排量可达 69.1×10$^4$t,是 2025 年水平的 6.5 倍,呈现出显著的“滚雪球效应”.前端减量与中后端优化策略在时间上实现错位协同,有效支撑成都市固体废物领域碳排放持续稳步下降.

2035 年后:前中后端协同,建立排放端深度脱碳与碳汇系统增效机制.结果表明,至 2035 年,其他垃圾与市政污泥仍为生活源固废碳排放的主要来源,实现碳中和目标需聚焦该类废物的深度减排,并通过提升资源化利用环节的效益强化减碳成效.在排放端,应推进协同焚烧灰渣的建材化利用,延伸处置链条至末端资源化[29],有效降低焚烧处理过程中的碳排放强度;在碳汇端,应以资源回收技术升级为抓手,推动建筑垃圾向道路基层材料、装配式建筑构件等高附加值产品转化,同时拓展再生产品的应用场景,提升回收利用率并激活全链条回收体系,从而释放更大碳汇潜力,支撑生活固废系统向“减排—资源化—碳汇增效”协同路径演进.

从固体废物分类治理维度看,固体废物碳减排应坚持“分质识别-分类施策”.不同类型废物在排放结构、减排潜力及策略路径上存在显著差异.根据研究结果,按固体废物是否具备高值化资源利用潜力从而实现负碳效益,成都市生活固废可分为两类:对于其他垃圾、市政污泥未实现负碳排放等固废,应在中后端处理处置优化与技术升级基础上,协同实施前端减量策略.就其他垃圾而言,应优先增大焚烧设施的处理能力,成都市目前已建成投运 6 座大型生活垃圾焚烧发电厂,集中于龙泉驿、青白江、双流等工业集中区及交通枢纽站[28],未来可以依托成渝双城经济圈规划,探索跨区域垃圾焚烧协同处理,保障全量焚烧策略的实施,在此基础上推动源头减量措施实施,根源上减少垃圾产生以降低碳排放量[30];对于市政污泥处理,应推进污泥干化-焚烧协同处置系统建设,同时协同推进污泥减量化措施,在污水处理环节防止污泥膨胀,实现污泥的减量化、稳定化[31].

对具备资源属性的废物(如厨余垃圾、建筑垃圾等)应加快资源化利用与回收场景拓展,进一步提高碳减排效益.在厨余垃圾处理方面,当前成都市仍有约 52%的餐厨垃圾未进入资源化利用体系,直接送至焚烧发电厂处理,未实现其有机质和能量的高值化回收.为此,应大幅提高厌氧发酵等低能耗生物处理技术的设施覆盖率和处理能力,推动厨余垃圾资源化向“能源+有机肥料”双回收路径发展;对于建筑垃圾而言,在现有以制备再生砖为主的资源化利用体系基础上,应进一步拓展其高值化利用路径.目前建筑垃圾再生砖利用率可提升至 95%,对应碳减排效益约 1361.2×10$^4$t,较基线提升 38.1%.然而,再生砖在实际市场中的应用场景有限,建议推进工艺技术升级,将建筑废弃物进一步加工为道路基层材料、再生混凝土骨料、装配式构件[32]等附加值更高的建材产品.

## 4 结论

4.1 研究发现,提高资源化利用(S4)在短期减排效果最显著;源头减量(S2)具备长期滚雪球效应;综合路径(S7)整体表现最优,前端减量与中后端优化形成时间错位的协同减排效应.

4.2 不同固废类型在策略响应上存在差异:碳排放高、处理路径单一的固废(如其他垃圾、市政污泥)

对资源化利用提升(S4)更敏感,应优先提升现有设施处理能力,同时协同前端减量(S2)根源上削减处理环节碳排放;具备资源化潜力与碳效益、多路径处理的固废(如厨余垃圾、建筑垃圾、废塑料)则在中后端协同优化(S6)时减排效益最佳,应同时推进资源化能力与设施技术升级,推动回收体系建设进一步扩大处理碳效益.

### 4.3　建议成都市实施“分阶段推进—分类精准施策”的固废减碳体系,短期聚焦中后端设施优化,中期加强源头减量,长期实现前后端深度协同与碳汇增效.上述成果为成都市构建分质管理、分类核算与各环节策略协同的固废减碳路径提供了方法支撑与决策依据.

**参考文献：**


[1] You D M, Zhang Y, Yuan B L. Environmental regulation and firm eco-innovation: Evidence of moderating effects of fiscal decentralization and political competition from listed Chinese industrial companies [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,1072−1083.

[2] 孔祥娟.生活垃圾卫生填埋技术全生命周期评价体系研究 [J]. 建筑经济, 2009,(8):115−118.
Kong X J. Study on life cycle assessment system of sanitary landfill technology for municipal solid waste [J]. Construction Economy, 2009,(8):115−118.

[3] 李　丹,陈冠益,马文超,等.中国村镇生活垃圾特性及处理现状 [J]. 中国环境科学, 2018,38(11):4187−4197.
Li D, Chen G Y, Ma W C, et al. Characteristics and treatment status of rural domestic waste in China [J]. China Environmental Science, 2018,38(11):4187−4197.

[4] 张琦峰,方　恺,徐　明,等.基于投入产出分析的碳足迹研究进展 [J]. 自然资源学报, 2018,33(4):696−708.
Zhang Q F, Fang K, Xu M, et al. Progress of carbon footprint research based on input-output analysis [J]. Journal of Natural Resources, 2018,33(4):696−708.

[5] 陈红敏.国际碳核算体系发展及其评价 [J]. 中国人口·资源与环境, 2011,21(9):111−116.
Chen H M. Development and evaluation of international carbon accounting systems [J]. China Population, Resources and Environment, 2011,21(9):111−116.

[6] U.S. Environmental Protection Agency. Waste reduction model (WARM) [EB/OL]. [2022-05-16]. https://www.epa.gov/warm.

[7] Kirkeby J T, Birgisdottir H, Hansen T L, et al. Environmental assessment of solid waste systems and technologies: Easewaste [J]. Waste Management & Research, 2006,24(1):3−15.

[8] Bhander G S, Christensen T H, Hauschild M Z. EASEWASTE—Life cycle modeling capabilities for waste management technologies [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2010,15(4):403−416.

[9] ifeu gGmbH. Tool for Calculating Greenhouse Gases in Solid Waste Management [EB/OL]. [2022-05-14]. https://www.ifeu.de/en/project/tool-for-calculating-greenhouse-gases-ghg-in-solid-waste-management-swm/.

[10] 黄春林,张建强,沈淞涛.生命周期评价综论 [J]. 环境技术, 2004,(1):29−32.
Huang C L, Zhang J Q, Shen S T. A review on life cycle assessment [J]. Environmental Technology, 2004,(1):29−32.

[11] 郑秀君,胡　彬.我国生命周期评价(LCA)文献综述及国外最新研究进展 [J]. 科技进步与对策, 2013,30(6):155−160.
Zheng X J, Hu B. Review of LCA research in China and latest progress abroad [J]. Science & Technology Progress and Policy, 2013,30(6):155−160.

[12] 王育宝,何宇鹏.城市废弃物处理温室气体排放的影响机制研究 [J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2018,38(1):60−70.
Wang Y B, He Y P. Study on the impact mechanism of greenhouse gas emissions from urban waste treatment [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2018,38(1):60−70.

[13] 毕珠洁,郎　俊,王　川.上海生活垃圾处理碳排放现状与预测研究 [J]. 环境卫生工程, 2023,31(5):1−8.
Bi Z J, Tai J, Wang C. Current situation and prediction of carbon emissions from municipal solid waste treatment in Shanghai [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2023,31(5):1−8.

[14] 刘跃廷,张　强,原晓红,等.重庆市“无废城市”建设前后碳减排潜力分析 [J]. 环境科学, 2025,46(1):88−99.
Liu Y T, Zhang Q, Yuan X H, et al. Analysis of carbon reduction potential before and after the construction of “Zero−Waste City” in Chongqing [J]. Environmental Science, 2025,46(1):88−99.

[15] 四川省人民政府.四川省人口发展规划(2035 年) [R]. 成都:四川省人民政府办公厅, 2023.
Sichuan Provincial People's Government. *Sichuan Population Development Plan* (2035) [R]. Chengdu: General Office of Sichuan Provincial People's Government, 2023.

[16] 成都市人民政府.成都市“十四五”城市综合处理规划 [R]. 成都:成都市人民政府办公厅, 2021.
Chengdu Municipal People's Government. 14th Five-Year Plan for Urban Comprehensive Treatment of Chengdu [R]. Chengdu: General Office of Chengdu Municipal People's Government, 2021.

[17] 杨森林,王科林,吴善荀,等.餐厨垃圾处置设施规划中对餐厨垃圾产生量的预测 [J]. 环境卫生工程, 2018,26(3):87−90.
Yang S L, Wang K L, Wu S X, et al. Prediction of kitchen waste generation in the planning of disposal facilities [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018,26(3):87−90.

[18] 黄文博,刘　菲,段立哲,等.生活垃圾焚烧飞灰水洗盐产生量预测及其对资源可持续利用的影响分析 [J]. 环境工程学报, 2023,17(8):2728−2735.
Huang W B, Liu F, Duan L Z, et al. Prediction of washing salt generation from MSW incineration fly ash and its impact on sustainable resource utilization [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2023,17(8):2728−2735.

[19] 黄业翔,徐荣乐,刘　凯,等.广西市政污水处理厂污泥产生及处理处置现状研究 [J]. 环境科学与处理, 2022,47(6):86−89,104.
Huang Y X, Xu R L, Liu K, et al. Study on sludge generation and treatment status in municipal wastewater treatment plants in Guangxi

[J]. Environmental Science and Processing, 2022,47(6):86-89,104.

[20] Sevigné Itoiz E, Gasol C M, Farreny R, et al. $CO_2$ ZW: Carbon footprint tool for municipal solid waste management for policy options in Europe—Inventory of Mediterranean countries [J]. Energy Policy, 2013,56:623-632.

[21] 刘在文.关于“无废城市”中固废大数据挖掘及全生命周期管控新技术研究 [J]. 清洗世界, 2024,40(3):157-159.
Liu Z W. Research on new technologies for solid waste big data mining and life cycle management in “Zero-Waste Cities” [J]. Cleaning World, 2024,40(3):157-159.

[22] 王 月,赵秦峰,张占全,等.碳中和背景下国内外废塑料裂解法回收进展 [J]. 化工进展, 2022,41(3):1470-1478.
Wang Y, Zhao Q F, Zhang Z Q, et al. Progress of waste plastic pyrolysis recycling under the background of carbon neutrality [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022,41(3):1470-1478.

[23] 吴 茜,陈强强.甘肃省行业碳排放影响因素及脱钩努力研究 [J]. 干旱区地理, 2023,46(2):274-283.
Wu Q, Chen Q Q. Study on influencing factors and decoupling efforts of industrial carbon emissions in Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2023,46(2):274-283.

[24] 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.
Li Y, Wu X, Sun C S, et al. Optimization of municipal solid waste treatment mode in Beijing based on low-carbon development [J]. Resources Science, 2021,43(8):1574-1588.

[25] 潘 岳,朱继业,叶懿安.江苏省碳排放影响驱动因素分析——基于STIRPAT模型 [J]. 环境污染与防治, 2014,36(12):104-109.
Pan Y, Zhu J Y, Ye Y A. Analysis on influencing factors of carbon emissions in Jiangsu Province—Based on STIRPAT model [J]. Environmental Pollution & Control, 2014,36(12):104-109.

[26] 姜玲玲,丁 爽,刘丽丽,等.“无废城市”建设与碳减排协同推进研究 [J]. 环境保护, 2022,50(11):39-43.
Jiang L L, Ding S, Liu L L, et al. Study on coordinated promotion of “Zero-Waste City” construction and carbon reduction [J]. Environmental Protection, 2022,50(11):39-43.

[27] 叶 岚,陈奇星.城市生活垃圾处理的政策分析与路径选择——以上海实践为例 [J]. 上海行政学院学报, 2017,18(2):69-77.
Ye L, Chen Q X. Policy analysis and path selection of urban domestic waste treatment—Taking Shanghai as an example [J]. Journal of Shanghai Administration Institute, 2017,18(2):69-77.

[28] 蒲 灵,马又琳,毕朝文,等.成都平原经济区固体废物产生量与经济增长的关系及驱动因素分析 [J]. 环境污染与防治, 2021,43(2):266-270.
Pu L, Ma Y L, Bi C W, et al. Relationship and driving factors between solid waste generation and economic growth in Chengdu Plain Economic Zone [J]. Environmental Pollution & Control, 2021,43(2):266-270.

[29] 陈 亮.低碳城市评价指标体系构建及多元系统耦合协调评价分析研究 [D]. 成都:成都理工大学, 2020.
Chen L. Construction of low-carbon city evaluation index system and coupling coordination analysis of multiple systems [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2020.

[30] 张 黎.德国生活垃圾减量和分类处理对我国的启示 [J]. 环境卫生工程, 2018,26(6):5-8.
Zhang L. Enlightenment of German waste reduction and classification treatment to China [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018,26(6):5-8.

[31] 李雄伟,李 俊,李 冲,等.我国污泥处理处置技术应用现状及发展趋势探讨 [J]. 中国给水排水, 2016,32(16):26-30,35.
Li X W, Li J, Li C, et al. Current status and development trend of sludge treatment and disposal technology in China [J]. China Water & Wastewater, 2016,32(16):26-30,35.

[32] 骆艳杰,赵 薇.建筑垃圾资源化利用及其生命周期评价的研究进展 [J]. 环境污染与防治, 2024,46(6):901-907.
Luo Y J, Zhao W. Research progress on resource utilization and life cycle assessment of construction waste [J]. Environmental Pollution & Control, 2024,46(6):901-907.

**作者简介:** 张婧怡(2001-),女,广东广州人,硕士研究生,主要从事固体废物管理与资源化研究.z-jy22@mails.tsinghua.edu.cn.