

碳达峰后阶段生物柴油减排贡献:以广州为例

夏莹^{1,2}, 段逸品¹, 张子豪¹, 肖前^{1*}, 蔡国田²

(1. 广州海关技术中心, 广东 广州 510623; 2. 中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640)

摘要: 为助力广州市碳达峰后5年内碳排放下降7%~10%的目标, 该研究通过核算餐饮垃圾制生物柴油生命周期碳排放, 并设置多情景评估其替代传统柴油的减排贡献。结果表明: 生物柴油碳足迹较传统柴油降低47.6%。至2035年, 生物柴油产能受现有设计能力或餐饮垃圾处理规模制约; 通过引入境外酸化棕榈油, 碳达峰后合计相对减排率最高达40.4%。研究认为, 在生物柴油生产设计产能充足阶段, 应优先优化餐饮垃圾回收体系, 并适度引入棕榈酸化油替代部分传统柴油; 在生产能力受限时, 则需着力发展生物柴油生产制备能力, 以系统提升其减排贡献。该研究为科学识别餐饮垃圾制备生物柴油在碳达峰后阶段的减排路径提供了决策依据。

关键词: 生物柴油; 碳足迹; 减排贡献; 生产能力

中图分类号: O657; U473.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4957(2026)10-0001-07

Multi-Scenario Analysis of Biodiesel's Contribution to Emission Reduction after the Achievement of Carbon Peak: A Case Study of Guangzhou, China

XIA Ying^{1,2}, DUAN Yi-pin¹, ZHANG Zi-hao¹, XIAO Qian^{1*}, CAI Guo-tian²

(1. Guangzhou Customs Technology Center, Guangzhou 510623, China; 2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To support Guangzhou's goal of reducing carbon emissions by 7%~10% within five years after reaching its carbon peak, this study accounts for the life-cycle carbon emissions of biodiesel produced from food waste and sets up multiple scenarios to evaluate its contribution to emission reductions when substituting conventional diesel. The results show that the carbon footprint of biodiesel is 47.6% lower than that of conventional diesel. By 2035, biodiesel production capacity will be constrained either by the existing design capacity or treatment capacity of food waste; with the introduction of imported acidified palm oil, the total relative emission reduction rate after the carbon peak could reach up to 40.4%. This study suggests that during periods with sufficient design production capacity for biodiesel, priority should be given to optimizing the food waste collection system and moderately introducing palm acid oil to replace a part of the conventional diesel; when production capacity is limited, efforts should be focused on developing the biodiesel production capacity to systematically enhance its emission reduction contribution. This research provides a decision-making basis for scientifically identifying the emission reduction pathways of biodiesel from food waste in the post-carbon-peak phase.

Key words: biodiesel; carbon footprint; emission reduction contribution; production capacity

第30届联合国气候变化大会上, 中国政府提交的第三轮国家自主贡献目标中提出“碳达峰后5年时间全经济范围温室气体净排放量比峰值下降7%~10%”的新目标^[1-2]。生物柴油作为清洁能源的重要组成部分, 是推动绿色转型的关键路径之一^[3], 有助于广州市达成碳达峰后阶段减排目标。

全生命周期碳排放分析(LCA)通过量化生物柴油从原料获取、加工生产、运输配送、燃烧使用至废弃处理的整个生命周期内能源消耗、温室气体排放等关键环境指标, 为生物柴油产业的绿色发展提供科学依据。邓蕙菁等^[4]通过全面梳理生物柴油全生命周期的环境影响研究成果, 发现废弃油脂和油

收稿日期: 2026-06-30; 修回日期: 2026-08-17

基金项目: 海关总署科研项目(2025HK243)

* 通讯作者: 肖前, 硕士, 研究员, 研究方向: 再生资源环境风险识别与碳排放评估研究, E-mail: xiaq@iqtenet.cn

料作物作为生物柴油原料, 相对传统柴油具备突出的碳减排效益。邢爱华等^[5]针对以菜籽油、麻风树油和地沟油为原料制取生物柴油全过程生命周期的评价分析发现, 相对菜籽油为原料, 麻风树油生产 1 MJ 生物柴油所需的化石能源消耗量约为后者的 74.4%。相较于麻风树, 由东南亚地区海运入境的棕榈酸化油是油脂精炼过程的副产物^[6], 以入境的酸化棕榈油为原料生产的生物柴油^[6-7], 考虑到海运、贮存和运输泄露等外部因素, 生命周期碳排放约为 3.07 kgCO₂/kg, 较传统柴油实现 3.8% 的碳减排贡献, 可以作为维持生物柴油稳定供应的有效补充。废弃油脂作为生物柴油原料, 可有效降低燃料的生命周期碳排放^[8-9]。

在集体供餐单位、餐饮服务场所以及居民日常生活中产生的餐饮垃圾废弃油脂含量占总体物料的 3% 左右, 其回收体系在国内大中型城市逐步完善^[10], 预处理后可获得约 95% 的毛油脂, 通过酯化/酯交换反应, 可加工制备生物柴油。

当前, 对于餐饮垃圾回收和处理方面的研究着重于处理方式的优化选择^[8, 11-12], 少有提及下游资源化利用的情况。为研究生物柴油在碳达峰后阶段碳减排的贡献, 需要量化生物柴油全生命周期碳排放情况, 并结合生物柴油的生产处理能力进行合理分析。当前, 餐饮垃圾制备生物柴油的碳排放研究多集中于餐饮垃圾处置方式评价等环节, 缺乏对餐饮垃圾制备生物柴油过程中“供应能力预测-生命周期碳排放-碳减排贡献”的量化分析。

本研究综合考虑餐饮垃圾产生量、处理方式及生物柴油处理能力等因素, 构建人口增长-生产能力预测模型, 结合餐饮垃圾制备生物柴油的生命周期碳足迹数据分析, 系统评估其碳排放水平; 并通过引入酸化棕榈油的方式, 多情景探讨减排背景下典型区域(广州)生物柴油相较于传统柴油的碳减排潜力, 为科学识别餐饮垃圾等再生资源制备生物柴油的碳减排贡献提供数据支持与决策依据。

1 实验部分

1.1 系统边界与核算方法

基于 LCA 的餐饮垃圾制备生物柴油碳足迹核算的系统边界如图 1 所示。主要考虑上游的油料作物生产、中游的餐饮垃圾收集提油和生物柴油精炼以及下游的生物柴油燃烧过程^[13]。由于数据可获得性和数据质量的限制, 去除土地占用、废弃物处理等对本研究影响微弱的过程。本研究中所有数据均折算为制备 1 吨生物柴油的标准计算。

依据 GB/T 24067-2024^[14]中产品碳足迹的计算方法:

$$L_{\text{CEF, bio}} = \frac{\sum (AD_{\text{mi}} \times EF_{\text{min}} \times \text{GWP}) + \sum (AD_{\text{mi}} \times L_{\text{CEF, i}}) + \sum (R_n)}{\text{LHV}_{\text{bio}} \times 1000} \quad (1)$$

$L_{\text{CEF, bio}}$ 表示以餐饮垃圾为原料制备生物柴油的生命周期碳足迹, AD_{mi} 表示系统边界内活动的碳排放相关数据, EF_{min} 表示其对应的碳排放系数, GWP 表示 CO₂ 全球变暖潜值。碳足迹核算范围涵盖系统边界内所有相关的物料与能源输入输出, 并计入物料回收过程碳排放。收集各工艺环节的能源与物质消耗数据, 构建餐饮垃圾制备生物柴油全过程的生命周期清单。在涉及多产物输出时, 采用质量分配法对碳排放进行分配。质量分配法的选择主要依据 GB/T 24067-2024 及 ISO 14067 中关于优先采用物理关系进行分配的原则^[14-15]。在本系统中, 质量作为最基础、可测的物理量具有明确的代表性。相较于易受市场价格波动影响的经济价值分配, 以及受热值定义及低位发热量取值差异干扰的能量分配, 质量分配法在单一化学转化路径的简单联产系统中具有更好的稳健性与可重复性。同时, 物料衡算可直接提供客观的质量数据(每吨生物柴油约副产 0.11~0.13 吨甘油), 无需依赖外部经济指标, 保证了核算结果的客观性与可追溯性。

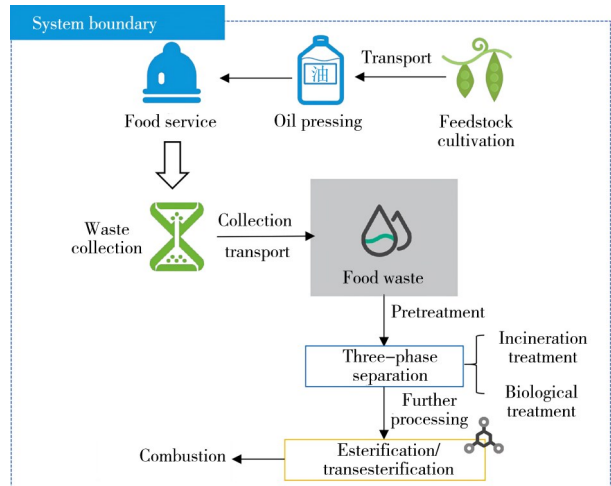


图 1 餐饮垃圾制备生物柴油的生命周期过程
Fig. 1 Life-cycle flowchart for biodiesel production from food waste

1.2 基于生物柴油制备过程的活动数据

参考我国食用油消费结构的文献数据追溯原料影响和油料作物榨油率^[16-18]，生产 1 吨餐饮废油所对应的上游油料作物需求量为 3.86 吨，其中大豆 2.25 吨、菜籽 0.65 吨、花生 0.96 吨。

生化处理的餐饮垃圾预处理后获得的毛油脂，其主要成分是 95% (wt) 的长碳链甘油三酯和游离脂肪酸^[19-20]。毛油脂加热脱胶并深度提纯至 99%；随后以酸、碱为催化剂，甲醇为溶剂，经酯化和酯交换反应，转化为脂肪酸甲酯和甘油；最终通过分馏直接得到生物柴油，甲醇冷凝后回收。生产 1 吨生物柴油约需消耗 0.99 吨餐饮废油作为原料。

1.3 生物柴油生产能力的影响分析

生物柴油的生产，与餐饮垃圾的产生量、处理方式和生物柴油的生产能力有关。为计算生物柴油的产量 ($\sum_k \varphi_{j,k,t}$)，构建餐饮垃圾生化处理能力和生物柴油产量计算模型，如式(2)、式(3)所示：

$$\sum_k \varphi_{j,k,t} = \eta \times \left(A_k \times \sum_j \varphi_{i,j,t} \right) \quad (2)$$

$$\sum_j \varphi_{i,j,t} = \begin{cases} \sum_j (Z_j \times CP_{j,t}) & CP_{j,t} < \sum_i X_{i,t} \\ \sum_j (Z_j \times \sum_i X_{i,t}) & CP_{j,t} \geq \sum_i X_{i,t} \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\sum_i X_{i,t}$ 表示回收到的餐饮垃圾， $\sum_j \varphi_{i,j,t}$ 表示毛油脂的生产能力。 Z_j 为 1 时，表示回收的餐饮垃圾用于生物柴油生产，反之赋 0； A_k 为 1 时，代表所处理的餐饮垃圾用于生物柴油制备，反之赋 0。 $CP_{j,t}$ 表示可用于制备毛油脂的最大设计能力；当 $CP_{j,t} < \sum_i X_{i,t}$ 时，处理能力是毛油制备能力的主要限制因素；当 $CP_{j,t} \geq \sum_i X_{i,t}$ 时，餐饮垃圾的分类回收能力成为主要制约条件。

参考文献[13]和实际调研情况，餐饮垃圾中油脂含量约 3%，油脂转化为生物柴油的效率约 100.7%，由此综合质量转化率 η 取值 3.0%。当前广州市现状，当餐饮垃圾采用厌氧消化工艺处理时， A_k 设定为 1。

1.4 生物柴油生产能力预测模型

基于餐饮垃圾产生量、处理方式及生物柴油生产能力等关键影响因素，构建人口增长-供应能力预测模型，并针对餐饮垃圾产生量及其供应能力设定 9 种发展情景，以系统研究生物柴油供应能力的长期发展趋势。

1.4.1 餐饮垃圾产生量预测 根据行业标准 CJ/T 106-2016《生活垃圾产生量计算及预测方法》^[21]，餐饮垃圾产生量与人口增速、经济发展速度、垃圾产生量历史数据等相关。利用人均指标法，构建垃圾产生量预测模型，如式(4)所示：

$$\sum_i X_{i,t} = \frac{m_0 \times (1 + r_1)^t \times R}{1000} \quad (4)$$

式中： $\sum_i X_{i,t}$ 表示餐饮垃圾总量； m_0 表示餐饮垃圾人均产生量； R 是年常住人口数量； r_1 表示垃圾人均产生量的年平均增长率； t 是年限值。据此预测广州市餐饮垃圾的产生量和处理能力。对于到 2035 年前的人口增长模式，设置基础增速情景、优化增速情景、理想增速情景模型，如表 1 所示。人口数量以 2015~2023 年常住人口数据为主要参考，数据来源于广州统计年鉴^[22]及广州市相关行业报道。

表 1 广州市人口增速预测情景设置

Table 1 Projection scenarios for Guangzhou's population growth rate

Scenario	Average annual growth rate	Population (projected to 2035)
Baseline rate(基础增速)	与十四五前三年阶段保持一致	2 000 万
Optimized rate(优化增速)	符合《广州市国土空间总体规划(2021-2035 年)》中对常住人口数量要求 ^[23]	2 200 万
Ideal rate(理想增速) ^b	人口增速与十三五与十四五前三年平均增速保持一致	2 500 万

a: Permanent resident population refers to registered residents and migrants who have resided in the area for more than six months (with a target of keeping it within 22 million by 2035); b: The ideal growth rate is extrapolated based on the average growth rate of the actual permanent resident population during the period from the last two years of the 13th five-year plan to the first three years of the 14th five-year plan (a: 常住人口是指居住半年以上的户籍及外来人口(2035 年控制在 2 200 万人以内); b: 理想增速根据实际常住人口在十三五后两年到十四五前三年的平均增速递推得出)

1.4.2 生物柴油生产能力预测 依据餐饮垃圾产生量、处理方式占比、生物柴油生产能力等变量,将生物柴油生产能力划分为7种情景(见表2)。人均餐饮垃圾产生量的赋值与历史平均水平保持一致。

表2 不同情境下生物柴油生产能力情景参数设置

Table 2 Parameter settings for biodiesel supply capacity under different scenarios

Scenario	Description	Settings
BAU(基础情景)	生化处理占比保持现有水平, 生物柴油生产能力受原料供应能力影响	(1)人口保持基础增速; (2)生化处理占比保持2023年水平; (3)生物柴油生产能力: 最大生产能力是2023年的设计产能
A1(人口优化情景)	在BAU基础上, 提高人口增长率	(1)人口保持优化增速; (2)生化处理占比保持2023年水平; (3)生物柴油生产能力: 同BAU
A2(处理能力优化情景)	在BAU基础上, 生化处理能力逐年增加, 五年后达到最大设计产能	(1)人口保持基础增速; (2)生化处理量: 逐年增加, 2028年即达到2023年时的最大设计产能; (3)生物柴油生产能力: 同BAU
A3(人口-处理能力优化情景)	在A2基础上, 提高人口增长率	(1)人口保持优化增速; (2)生化处理方式占比同A2; (3)生物柴油生产能力: 同A2
A4(处理能力发展情景)	A3基础上, 生化处理后餐饮垃圾均可全部转化为生物柴油	(1)人口保持优化增速; (2)生化处理量与A3保持一致; (3)生物柴油处理能力: 所有生化处理的餐饮垃圾均可用于生物柴油的生产
A5(处理能力理想情景)	在A4基础上, 增加生化处理能力, 垃圾生化处理方式的占比逐年提升, 比逐年提高至100%; (3)生物柴油处理能力: 同A4 2035年达到100%	(1)人口保持优化增速; (2)生化处理方式占比: 至2035年, 占比逐年提高至100%; (3)生物柴油处理能力: 同A4
A6(人口-处理能力理想模型)	在A5基础上, 进一步提高人口增长率	(1)人口保持理想增速; (2)生化处理方式占比: 同A5; (3)生物柴油处理能力: 同A5

1.5 数据来源

广州市人口、餐饮垃圾产生量、生化处理能力等数据来源于国家、广东省、广州市统计年鉴、政府规划等公开文件或统计资料, 部分数据来源于广州市相关政府部门、企业等一手调研数据以及权威数据库信息。

当数据难以获得或存在明显异常时, 采用其他年份、或相近数据予以替代。化石能源、高温蒸汽等碳排放因子采用《IPCC 国家温室气体清单指南(第三卷)》^[24]的数据, 产品碳足迹主要采用 Simapro 9.0 模型软件进行核算。

2 结果与讨论

2.1 供应能力的影响因素分析

餐饮垃圾产生量、餐饮垃圾处理能力和生物柴油生产能力是计算生物柴油生产能力的关键。图2A显示, 2015年~2023年(十三五至十四五前三年)人均餐饮垃圾产生量历史均值处在0.15 t/a, 与文献报道相符^[7]。2018年起, 生化处理能力逐年提升, 占比在2023年后跃升至52.0%, 逐步成为主导的处理方式。

图2B显示, 预处理-厌氧发酵处理能力在2019年后的占比迅速提升, 年均增长率达到32.0%, 成为生化处理中增长最快的技术路线。处理能力的升级, 直接推动了生物柴油产量的增长, 截至2023年, 年生产能力达到3.26万吨。

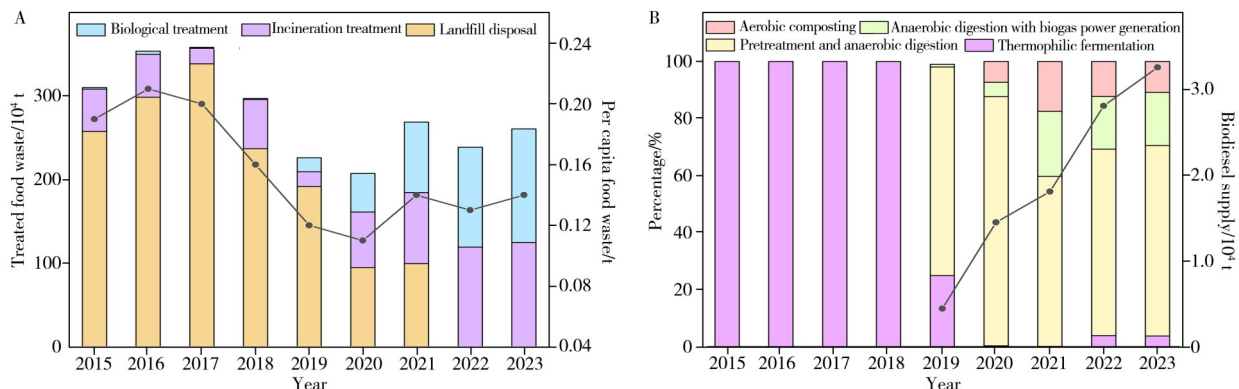


图2 餐饮垃圾对生物柴油供应能力的影响因素分析(2015–2023年)

Fig. 2 Analysis of factors influencing biodiesel supply capacity from food waste (2015–2023)

2.2 生物柴油生命周期清单分析

为系统评估餐饮垃圾制备生物柴油的生命周期碳足迹，本研究基于对系统边界内各工艺单元能源与物料消耗的核算，构建生命周期清单数据，如表3所示。系统边界内，生产过程中的电力碳排放系数依据全国电力平均碳足迹因子(2023年)确定。

表3 生物柴油全生命周期碳排放清单
Table 3 Life-cycle carbon emission inventory of biodiesel

Process(Bill of materials)		Material consumption	Unit	Carbon emissions/t	Transport	Distance/km	Carbon emissions/t
Feedstock cultivation	Crops	3.86	t	-3.62	Diesel truck/(25 t)	600	0.06
	Fertilizers	0.34	t	0.92			
	Harvesting	3.86	t	0.05			
Pressing & recovery	Electricity	115.7	kWh	0.07	Diesel truck/(25 t)	200	0.02
	Fuel oil	0.01	t	0.00			
Pretreatment & separation	Industrial water	0.04	t	0.00	Diesel truck/(25 t)	100	0.01
	Steam	1.17	t	0.25			
	Electricity	33.5	kWh	0.02			
Biodiesel production	High-temperature steam	3.12	t	0.78	Diesel truck/(25 t)	400	0.05
	Diesel	0.03	t	0.10			
	Methanol	0.18	t	0.00			
	Sulfuric acid	0.04	t	0.00			
	Sodium hydroxide	0.06	t	0.15			
Biodiesel combustion		1	t	2.80	-	-	-

结果显示，生物柴油生命周期碳足迹核算值为1.67 kgCO₂/kg，处于废弃油脂基生物柴油碳足迹的合理区间内。如表4所示，与已有研究对比，核算的碳足迹值(1.67 kgCO₂/kg)处于废弃油脂基生物柴油碳足迹的合理区间内。数据核算的差异主要源于系统边界的扩展与工艺水平的统计差距等。与以“废弃油脂收集”为起点的研究(约0.36 kgCO₂/kg)相比，差异主要源于系统边界扩展至上游油料作物种植阶段；与聚焦工艺对比的研究(减排60.1%)相比，降幅在方向上表现一致，差异主要源于功能单位、核算边界及区域电网碳排放因子的不同。

表4 生物柴油生产碳足迹核算方法与结果比较
Table 4 Comparison of carbon footprint accounting methods and results for biodiesel production

Object	System boundary	Carbon footprint/(kgCO ₂ ·kg ⁻¹)	Difference	Reference
餐饮垃圾制生物柴油(生物酶法)	废弃油脂收集→生物柴油生产，不包括上游油料作物种植	减排60.1%	减排趋势一致；差异源于系统边界和功能单位的不同	[15]
巴西生物燃料(HEFA、ATJ等路线)	农作物生产→燃料生产→燃烧使用	因原料和工艺路线而异	原料类型和工艺路线对碳足迹结果影响显著	[18]
餐饮垃圾制生物柴油	废油脂收集→生物柴油生产，以1吨生物柴油为功能单位	约0.36 kg CO ₂ /kg	差异源于系统边界：研究排除了上游油料作物种植	[25]

与石化柴油全生命周期碳排放比较，碳排放降低了47.6%(柴油生命周期碳排放因子按照0.074 1 kgCO₂/MJ计算，单位热值按照43 MJ/kg计算，相当于3.19 kgCO₂/kg)。结合生物柴油生产能力计算，2023年餐饮垃圾制备生物柴油的能力达到3.26万吨，相对传统柴油实现碳减排达4.9万吨，凸显了生物柴油的显著碳减排贡献。

2.3 不同情景下生物柴油的生产能力与减排贡献预测分析

为分析生物柴油生产能力自传统柴油消费碳达峰后至2035年的长期演变趋势，构建了生物柴油生产能力模型，结果如图3所示。

BAU情景下，生物柴油的生产能力相对2023年提升11.7%，年平均增长率保持0.9%，与人口增长这一主要影响因素的年均增长率相符合，未受到CP_{J, i}约束。相对

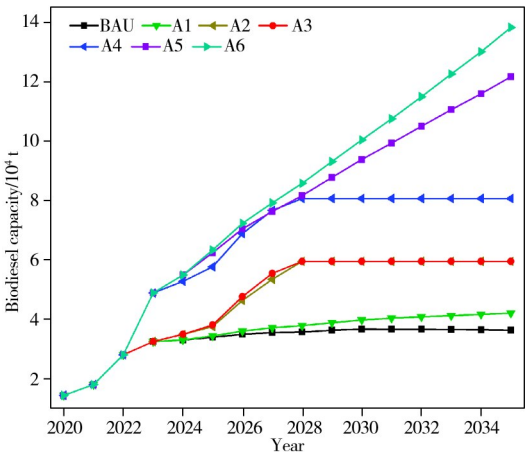


图3 不同情景下广州市生物柴油生产能力预测(2020~2035年)

Fig. 3 Projection of Guangzhou's biodiesel production capacity under different scenarios (2020~2035)

BAU, A1 情景下, 2035 年生物柴油生产能力预计提升 15.7%; 相对传统柴油生命周期碳排放量降低 6.4 万吨, 此时生产能力处于 2023 年设计产能约束范围之内。A2 情景下, 2028 年餐饮垃圾的生化处理量达到 $CP_{j,t}$ 的上限, 相对传统柴油生命周期碳排放量降低 9.0 万吨。A4 情景下, 2028 年后生物柴油生产能力受到餐饮垃圾处理方式的显著推动, 此时所有餐饮垃圾的生化处理方式, A_k 赋值均为 1。相较 A3, 2035 年生物柴油生产能力提升 35.6%, 相对传统柴油生命周期碳减排贡献达到 12.3 万吨。A5 和 A6 情景下, 人口增长率成为关键影响因素。人口年平均增速提升 1.1%, 生物柴油产量则提升 13.6%。

因此, 碳减排能力取决于系统的核心约束条件: 原料处理能力未被充分利用时, 提高餐饮垃圾的生化回收处理占比驱动碳减排; 当约束条件为生产能力时, 需通过提升生物柴油的生产设计能力释放碳减排潜力。

2.4 入境酸化棕榈油对达峰后阶段减排的贡献

入境酸化棕榈油作为生物柴油的补充原料, 其碳排放表现需纳入系统评估。结合文献数据^[7-8], 入境棕榈酸化油制生物柴油的生命周期碳排放约为 $3.07 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$, 其核算边界涵盖棕榈种植及油脂提取阶段的碳排放、东南亚至中国华南港口的国际海运碳排放, 以及生物柴油生产阶段的能源消耗碳排放。相较于传统柴油生命周期碳排放 ($3.19 \text{ kgCO}_2/\text{kg}$), 可实现约 3.8% 的碳减排贡献, 尽管减排幅度不及餐饮垃圾基生物柴油 (47.6%), 但作为原料供应的有效补充, 有助于缓解餐饮垃圾回收量波动对生物柴油产量的制约, 系统提升碳达峰后阶段的总体减排效益。

需指出的是, 上述碳排放数值的不确定性主要来源于以下方面: 棕榈种植阶段的土地利用变化碳排放因产地 (马来西亚、印度尼西亚等) 而异, 海运距离及船型选择对运输碳排放的影响, 以及不同工艺路线下生产阶段能耗的差异。本研究取文献报道的中值进行估算。

为进一步评估碳达峰后阶段, 生物柴油相对传统柴油的碳减排贡献, 对 7 种情景下引入酸化棕榈油作为替代原料的减排能力进行分析, 结果如图 4 所示。A3 情景下, 2020~2035 年内引入棕榈酸化油作为补充原料共 20.7 万吨, 相对传统柴油累计降低碳排放 38.1%。A4 相对 A3, 扩大了生物柴油的生产能力, 2020~2035 年共计引入 19.9 万吨棕榈酸化油作为补充原料, 相较于传统柴油共计降低碳排放 40.4%。A5、A6 情景下, 设计产能自 2029 年后达到 2035 年餐饮垃圾处理能力要求, 累计碳减排比例相对 A4 情景继续下降。这一现象可归因于生物柴油生产设计能力的扩张虽有效提升了减排总量, 但引发减排贡献的边际效益递减。因此, 原料结构优化与工艺碳强度协同调控是最大化碳减排效益的路径。

3 结论

为推进广州市碳达峰后阶段 5 年内排放量下降 7%~10% 的目标, 本研究以广州市 2015~2023 年餐饮垃圾产生量和生化处理能力数据为基础, 多情景预测生物柴油在碳达峰后阶段相对传统柴油的碳减排贡献。研究旨在为科学识别餐饮垃圾生产制备生物柴油的碳减排贡献提供数据支持与决策参考。主要结论如下: (1) 生物柴油可有效替代传统柴油, 其生产能力随人口增长、生化垃圾处理能力增长得以提升, 生物柴油生命周期碳足迹相对传统柴油降低 47.6%。(2) 人口-垃圾处理优化情景下, 广州市生物柴油生产能力受到现有设计能力约束; 处理能力发展情景下, 生物柴油的最大生产能力依赖于生化处理能力; 通过引入酸化棕榈油作为原料供应的补充, 到 2035 年, 相对碳减排比例合计达到最大值 40.4%。(3) 要提升生物柴油的碳达峰后阶段碳减排贡献, 一是在设计产能充足阶段, 优化餐饮垃圾回收方式, 同时考虑适度引入棕榈酸化油等替代原料; 二是在产能受限时, 考虑发展生化处理的餐饮垃圾用于生物柴油生产的能力。

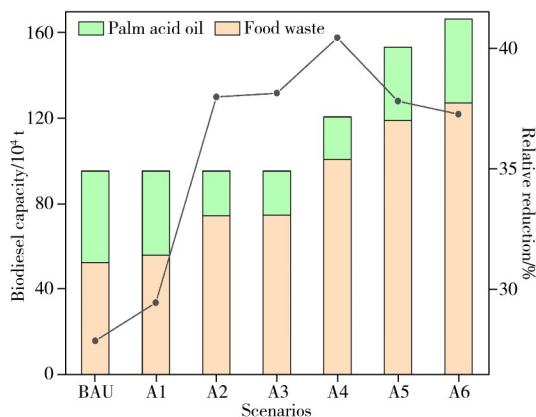


图4 不同情景下广州市生物柴油相对传统柴油碳减排的比例(2020~2035年)

Fig. 4 Carbon emission reduction ratio of biodiesel relative to traditional diesel in Guangzhou under different scenarios (2020-2035)

参考文献:

- [1] China Embarks on a New Journey to Address Climate Change(我国开启应对气候变化新征程). [2025-9-27]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202509/content_7042502.htm.
- [2] Ministry of Ecology and Environment. *Interpretation: China Embarks on a New Journey in Tackling Climate Change and Leads the Global Low-Carbon and Resilient Transition*(生态环境部.解读:开启中国应对气候变化新征程 引领全球低碳韧性转型). [2025-10-27]. https://www.mee.gov.cn/zcwj/zcjd/202509/t20250926_1128347.shtml.
- [3] Wang G Y, Liu P, Li X Q, Li Y L, Sun T L, Huhe T L, Zheng B G, Lei T Z. *Adv. New Renew. Energy*(王庚益, 刘鹏, 李学琴, 李艳玲, 孙堂磊, 呼和涛力, 郑宾国, 雷廷宙. 新能源进展), **2025**, 13(2): 128-137.
- [4] Deng H J, Miao J Y. *Energy Res. Manag.*(邓蕙菁, 苗菁芸. 能源研究与管理), **2025**, 17(2): 90-100.
- [5] Xing A H, Ma J, Zhang Y H, Wang Y, Jin Y. *Chin. J. Process Eng.*(邢爱华, 马捷, 张英皓, 王垚, 金涌. 过程工程学报), **2010**, 10(2): 314-320.
- [6] Canabarro N, Silva-Ortiz P, Nogueira L, Cantarella H, Maciel-Filho R. *Renewable Sustainable Energy Rev.*, **2023**, 171(1): 113019-113035.
- [7] Wahyono Y, Hadiyanto H, Budihardjo A M, Adiansyah J S. *Energies*, **2020**, 13(2): 3248-3273.
- [8] Liu R J, Jin H, Xiao L Q, Yin H B, Zhang L. *Environ. Sanit. Eng.*(刘荣杰, 金红, 肖丽祺, 尹寒冰, 张蕾. 环境卫生工程), **2025**, 33(4): 28-37.
- [9] Han J J, Guo Y Y, Guo Z T, Yang Y B, Zhang M Q. *China Oils Fat.*(韩建军, 郭妍妍, 郭志涛, 杨雅冰, 张梦琪. 中国油脂), **2024**, 49(8): 87-91.
- [10] Lü F, Zhang H, Shao L M, He P J. *Environ. Sanit. Eng.*(吕凡, 章骅, 邵立明, 何晶晶. 环境卫生工程), **2017**, 25(1): 1-9.
- [11] Li S, Li X D, Xia S P, Guan D H, Zhao K. *Adv. New Renew. Energy*(李帅, 李晓东, 夏声鹏, 管东辉, 赵坤. 新能源进展), **2024**, 12(5): 511-519.
- [12] Zhang H, Chi Y, Wang L X, Tang Y J, Zhou Z Z. *Chin. J. Environ. Eng.*(张慧, 池涌, 王立贤, 汤元君, 周昭志. 环境工程学报), **2022**, 16(6): 2088-2098.
- [13] Chen J H. *Carbon Footprint and Emission Reduction Potential of Different Waste Disposal Modes under the Background of Waste Classification: A Case Study of Qingdao City*. Qingdao: Qingdao University of Technology(陈纪宏. 垃圾分类背景下不同垃圾处置模式碳足迹及减排潜能分析. 青岛: 青岛理工大学), **2023**.
- [14] GB/T 24067-2024. Greenhouse Gases-Carbon Footprint of Products-Requirements and Guidelines for Quantification. National Standards of the People's Republic of China(温室气体 产品碳足迹 量化要求和指南. 中华人民共和国国家标准).
- [15] ISO 14067: 2018. Greenhouse Gases-Carbon Footprint of Products-Requirements and Guidelines for Quantification. International Organization for Standardization.
- [16] Li J Y, Ren X L, Wang X Y, Lai J L. *Environ. Sanit. Eng.*(李剑颖, 任晓灵, 王晓燕, 赖金丽. 环境卫生工程), **2024**, 32(5): 48-54.
- [17] Cai L L, Nie H, Wu H, Yu B, Xie Z Z, Li N, Qu H L. *Pet. Process. Petrochem.*(蔡立乐, 聂红, 吴昊, 于博, 解增忠, 李娜, 渠红亮. 石油炼制与化工), **2023**, 54(10): 110-116.
- [18] Wei K H. *Life-Cycle Assessment and Techno-economic analysis of Bio-Jet Fuel*. Tianjin: School of Transportation Science and Engineering(韦克衡. 生物航空燃料全生命周期评价及技术经济分析. 天津: 中国民航大学), **2023**.
- [19] Capaz R S, John A P, Patricia O, Joaquim E. *Resour. Conserv. Recycl.*, **2021**, 166(3): 105260-105276.
- [20] Chen Y F, Zeng J L, Du Z X, Zhao M, Wu F Q. *China Oils Fat.*(陈艳凤, 曾建立, 杜泽学, 赵敏, 吴芳青. 中国油脂), **2024**, 49(4): 83-87.
- [21] CJ/T 106-2016. Calculation and Forecasting Methods for Municipal Solid Waste Generation Quantity. Industry Standard of the People's Republic of China for Urban Construction(生活垃圾产生量计算及预测方法. 中华人民共和国城镇建设行业标准).
- [22] Guangzhou Municipal Bureau of Statistics. *Guangdong Statistical Yearbook*. 1st ed. Beijing: China Statistics Press(广州市统计局. 广州统计年鉴. 第一版. 北京: 中国统计出版社), **2024**: 48-59.
- [23] Guangzhou Municipal People's Government. Notice of the Guangzhou Municipal People's Government on Issuing the Guangzhou Territorial Spatial Master Plan (2021-2035)(广州市人民政府. 广州市人民政府关于印发广州市国土空间总体规划(2021-2035年)的通知). [2024-11-06]. https://www.gz.gov.cn/zwgk/fggw/szfwj/content/post_9960352.html.
- [24] IPCC. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 3. 3rd ed.* Hayama: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), **2006**.
- [25] Hu Z Y, Shen J Y, Tan P Q, Lou D M. *Energy*, **2025**, 320(135318): 1-10.

(责任编辑: 盛文彦)