

迈向“双碳”研究系列报告

《生物调和燃料替代餐厨传统燃料的减碳效益 与分层替代经济性研究》

(C 系列-2026C01)

中国石油大学（北京）中国油气产业发展研究中心
中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院

2026 年 8 月 8 日

生物调和燃料替代餐厨传统燃料的减碳效益与 分层替代经济性

核心摘要

在“双碳”目标与城市“无煤化”政策约束下，燃气管网未覆盖区域的餐厨用能长期依赖煤基白油与液化石油气（LPG），存在碳排放强度高、本质安全性差、废弃油脂非法回流等问题。本研究构建“安全准入—资源边界—减碳价值—经济阈值”四维耦合评估框架，对一代脂肪酸甲酯（FAME）与二代加氢植物油（HVO）按 B10、B20、B30 三种体积比与白油调和形成的六个方案逐维度量化其替代可行性。结果表明：调和燃料各组分均属丙类液体，可将潜在事故形态由空间爆燃降级为局部燃点，年供应潜力下限 23.38 万吨标准煤当量（tce）高于 9.76 万~10.78 万 tce 的行业需求，安全性与资源供给均不构成障碍；生物质组分能量占比达 5.57% 时碳排放强度低于 LPG，达 19.53% 时超越 LNG，B20 为环境价值质变点；全面推广 B30 方案年 CO₂ 减排量约 5.6 万~6.3 万吨，但在 91.8 元/吨碳价下各方案综合成本（203.53~208.56 元/GJ）仍全面高于白油基准（201.36 元/GJ），且掺混比越高成本越高，呈现“减排越多、经济性越差”的逆向激励；替代白油临界碳价 423~448 元/吨，处于政策可干预区间，替代 LPG 需 6 443 ~10 973 元/吨、替代 LNG 需 1.8 万~1.9 万元/吨，均不具备现实可行性。据此提出“白油替代优先”的分层实施策略，构建“碳收益+专项差价补贴”双轨补偿机制，同步强化废弃油脂收运特许经营与二代技术攻关。

1. 研究背景

推动能源结构清洁低碳转型是实现“双碳”目标的关键路径。2025 年《政府工作报告》首次将“绿色燃料”写入年度任务，并将“未来能源”列为首位培育的未来产业，发展自主可控的绿色能源体系已上升至国家战略高度。这一部署为生物质燃料的规模化应用提供了明确的政策导向。

在城市能源体系中，餐厨行业是一个长期被低估的减排单元。该行业能源消费具有分布广、密度高、监管难的特点，且随着大型点源污染治理日趋完善，分散式能源消费的减排压力日益凸显。北京市自 2013 年起推行“无煤化”政策，逐步淘汰高污染、高碳排放燃料，但在市政燃气管网未覆盖区域，大量餐饮门店仍依赖 LPG 与煤基白油。这两类燃料各自存在难以回避的短板。

LPG 的核心问题是本质安全性。其闪点低至 -74°C ，属《建筑设计防火规范》中危险性最高的甲类气体，常温下即可形成易燃易爆环境；密度大于空气、爆炸下限低、最小点火能量小，在“后厨空间小、明火密、油污多”的场景中，泄漏后极易在低洼处积聚形成爆炸性混合物。《全国燃气事故分析报告》显示，2022 年 LPG 事故占燃气事故总量的 56.1%，2023 年仍达 48.9%。

白油的核心问题是监管缺位与碳强度。市场流通的白油主要为煤基费托合成液体燃料，虽具有高闪点、无色无味等优点，但至今缺乏统一的行业质量标准与准入门槛，终端燃烧设备适配性参差不齐，实际应用中常因不完全燃烧产生黑烟与积炭。同时，作为煤基化石燃料，其碳排放强度在所有备选燃料中最高。

以餐厨废弃油脂为原料生产的生物柴油，为破解这一困境提供了可能。其价值不仅在于可再生与低碳属性，更在于构建“餐厨废

油回收—能源化利用—回用于餐厨”的绿色闭环，从源头阻断“地沟油”回流餐桌，兼具废弃物资源化与食品安全治理的双重效益。将生物柴油与白油按一定比例调和形成生物调和燃料，可在完全不改变现有储运设施与燃烧器具的前提下降低燃料碳强度，是技术门槛最低的替代路径。

然而，技术可行性并不能自然转化为市场驱动力。现有研究多集中于上游生产工艺优化或下游发动机应用，宏观资源潜力估算亦难以直接转化为对特定城市、特定行业的有效供应能力判断；更关键的是，缺乏将安全准入、资源保障、减碳价值与经济阈值统一在同一分析框架内的系统评估。决策者因而无法回答三个递进的问题：能不能用？有没有料？值不值得、又该怎么推？

本研究即针对上述断层展开。研究以生物柴油与煤基白油的调和路线为对象，区分一代 FAME 与二代 HVO 两条技术路径，设置 B10、B20、B30 三个掺混梯度，从安全性、供应可靠性、减碳效益与经济性四个维度逐层校验其替代可行性，并求解驱动市场化替代所需的碳价阈值，为分层替代策略的制定提供量化依据。

2. 研究思路与方法

2.1 评估框架结构

四个维度并非并列比较，而是构成一条递进的判定链：安全性与供应可靠性回答“能否替代”，二者成立后方进入价值判断；减碳效益回答“替代的价值几何”，确立环境基准；经济性分析回答“如何推动替代”，求解政策阈值并导出分层实施路径。

框架的核心计算内核是燃料 CO₂ 排放因子（EF）。EF 同时进入减碳效益核算与综合成本核算两条支路：在减碳支路中，EF 决定临界掺混比与减排总量；在经济支路中，EF 通过碳价转化为环境收

益，进而决定综合成本与临界碳价。这一设计避免了两套模型各自独立带来的参数不一致。

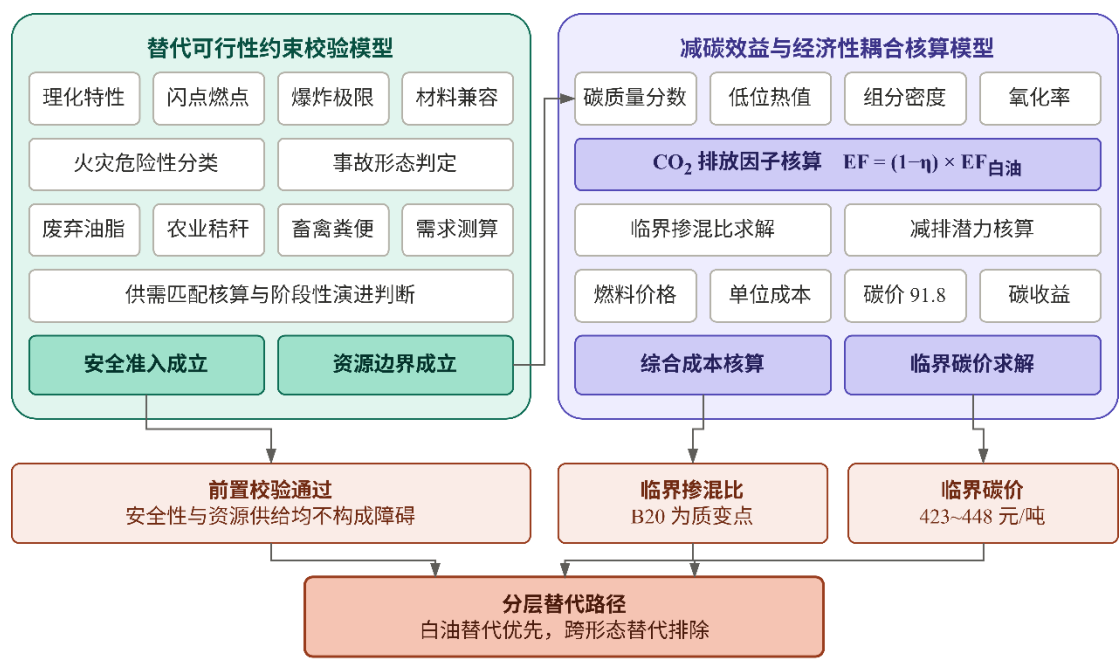


图 1 生物调和燃料替代可行性评估模型框架

2.2 研究对象与调和方案设计

基准燃料选取。本研究选取 LNG、LPG 与煤基白油作为对照基准，覆盖终端用能场景中的主流燃料类型。LNG 氢碳比最高，被视为化石能源清洁性的“金标准”，但受限于管网覆盖范围，难以服务分散用能点位；LPG 具备高能量密度与部署灵活性，但碳密度较高且储运安全风险突出；煤基白油是当前非管网区域液态燃料的主流选择，具有高闪点、燃烧产物纯净等特性，是生物柴油理想的基础调和载体。

生物质组分选取。区分一代与二代两条技术路线。FAME 主要成分为脂肪酸甲酯，由废弃油脂与甲醇经酯交换反应制得，闪点极高但含氧结构导致热值偏低，且长期使用可能溶胀橡胶密封件；HVO 经加氢脱氧工艺完全脱氧，转化为与白油同质的饱和烷烃结

构，热值显著提升并具备优异的低温流动性与材料兼容性，但生产成本与技术门槛更高。

方案设计。按体积比 10%、20%、30% 设置三个掺混梯度，形成六个方案。由于 FAME (0.880 g/cm^3) 与 HVO (0.780 g/cm^3) 密度不同，相同体积比下二者的能量贡献占比存在差异，需通过能量等值法换算。各方案参数见表 1。

表 1 生物调和燃料方案设计与基础参数

方案	生物质体积分数	生物质能量占比 η	综合低位热值/(MJ $\cdot$ kg ⁻¹)
白油（基准）	0	0	44.20
B10-FAME	10%	9.63%	43.80
B20-FAME	20%	19.34%	43.39
B30-FAME	30%	29.14%	42.98
B10-HVO	10%	9.42%	44.18
B20-HVO	20%	18.95%	44.16
B30-HVO	30%	28.62%	44.14

注：LPG 与 LNG 低位热值分别为 45.50 MJ/kg 与 48.60 MJ/kg。FAME、HVO、白油密度分别取 0.880 、 0.780 、 0.830 g/cm^3 ，低位热值分别取 40.0、44.0、44.2 MJ/kg。

两条路线的差异在此已初步显现：HVO 路线在三个掺混梯度下综合热值几乎不衰减（44.18→44.14 MJ/kg），而 FAME 路线随掺混比提高热值持续下降（43.80→42.98 MJ/kg）。这一“热值稀释效应”将在后续经济性分析中转化为成本劣势。

2.3 核算模型

（1）CO₂ 排放因子。为消除不同燃料在物理形态、密度与能量

密度上的差异，采用产生单位热值的 CO₂ 排放量作为量化基准, EF 的计算式见式（1）：

$$EF_i = \frac{C_i \times \rho \times \frac{44}{12}}{LHV_i} \times 10^3 \quad (1)$$

式中，C 为燃料的碳元素质量分数；α 为氧化率，基于餐饮燃烧器特性统一取 99%；LHV 为低位热值。

生物质组分的燃烧阶段 CO₂ 排放按“碳中性”原则取零。这一处理有两点依据：其一，生物质燃烧排放的 CO₂ 与其生长阶段从大气中固定的 CO₂ 基本持平，在生命周期尺度上实现大气碳库净平衡；其二，这是国际通行的核算惯例，欧盟《可再生能源指令》明确规定废弃食用油基生物柴油及 HVO 路径的默认值均为 0 g CO₂ eq/MJ，IPCC《国家温室气体清单指南》亦作同样规定。

（2）调和燃料排放因子。生物质组分的能量贡献占比 η 及调和燃料排放因子分别为：

$$\eta = \frac{V_{\text{生物}} \cdot \rho_{\text{生物}} \times LHV_{\text{生物}}}{V_{\text{生物}} \cdot \rho_{\text{生物}} \times LHV_{\text{生物}} + V_{\text{白油}} \cdot \rho_{\text{白油}} \times LHV_{\text{白油}}} \quad (2)$$

由此可知，调和燃料排放因子随 η 线性下降，当 η 为 100% 时 EF 归零。

（3）单位热值成本。

$$C_{\text{unit}} = \frac{P}{LHV} \times 1000 \quad (3)$$

式中 P 为燃料价格（元/吨），采用 2024 年市场平均价格；LHV 数据来源于《综合能耗计算通则》。

（4）碳收益与综合成本。在碳成本内部化后，评价燃料经济性的指标不再是单纯市场价格，而是扣除环境收益后的综合成本：

$$C_{\text{comp}} = C_{\text{unit}} - (EF_{\text{ref}} - EF_{\text{fuel}}) \times P_{\text{carbon}}$$

式中 P_{carbon} 取 91.8 元/吨，参考 2024 年全国碳市场配额平均价格。

（5）临界碳价。使生物调和燃料与基准燃料综合成本持平的碳

价水平：

$$P_{critical} = \frac{(C_{bio} - C_{ref})}{(EF_{ref} - EF_{bio})} \times 1000$$

该式的适用前提是调和燃料排放强度确实低于基准燃料，即分母为正。若某方案排放强度与基准燃料相当或更高，则边际减排效益趋近于零，临界碳价指标不再适用，需转由排放强度本身作出判断。

3. 研究结果

3.1 替代可行性的前提校验

3.1.1 本质安全性：从空间爆燃降级为局部燃点

燃料的固有安全特性是决定其在餐厨场景下风险水平的根本因素。生物调和燃料各组分与传统燃料的关键安全指标对比见表 2。

表 2 生物调和燃料组分与传统燃料关键安全特性对比

项目	一代生物柴油	二代生物柴油	白油	LPG	LNG
主要成分	脂肪酸甲酯	烷烃	正异构烷烃	丙烷、丁烷	甲烷（≥75%）
爆炸极限/%	0.6~7.5	0.6~6.5	—	5~33	5~15
闪点/℃	164~174	60~100	60~130	-74	-218
燃点/℃	320~350	200~230	210~250	426~537	537
常温状态	液态	液态	液态	气态	液态（低温）
火灾危险性	丙类液体	丙类液体	丙类液体	甲类气体	甲类气体

对比揭示出一个具有决定意义的分类差异：调和体系的全部组分——无论一代、二代生物柴油还是作为载体的白油——在火灾危险性上均属丙类液体，而被替代的 LPG 与 LNG 均属甲类气体。这一差异并非程度之别，而是事故形态的根本转换。

具体而言，一代生物柴油闪点高达 164~174 ℃，较 LPG 高出逾

230℃，在储存与运输过程中表现出极佳的热稳定性；二代组分闪点虽降至 60~100℃ 区间，但仍远高于 LPG，且与传统石油基柴油相近。更重要的是，一代组分因极性分子结构，饱和蒸气压极低；二代组分挥发性虽略强，常温下自然挥发浓度仍远低于其爆炸下限。这意味着在密闭或半密闭的餐厨空间中，调和燃料的物理性状不具备发生空间爆炸的条件，潜在事故形态由 LPG 的高强度空间爆燃降级为低风险的局部燃点。

需要指出的是，调和燃料并非没有技术风险，但风险性质发生了转移。一代组分因含酯基官能团，对天然橡胶、丁腈橡胶等密封材料具有溶胀作用，且冷滤点较高，低温下易结晶堵塞滤芯；二代组分则对生产环节的加氢工艺稳定性提出更高要求。这些属于可预测的技术适配性问题而非燃料的固有缺陷：材料溶胀可通过选用氟橡胶（FKM）密封件解决，低温流动性可通过添加抗凝剂或提高二代组分与白油配比改善。相应地，安全管理重心也应从“防范瞬间灾难事故”转向“建立覆盖全过程的精细化操作规范”，具体风险点识别与管理建议详见附录 A、附录 B。

3.1.2 供应可靠性：资源总量充足，瓶颈在转化效率

采用热值等值替代原则测算行业需求，即生物调和燃料提供的总能量应与被替代传统燃料持平。基于北京市 2024 年实际消费数据，餐饮行业 LPG 年消费量约 0.4 万吨，白油年消费量约 6 万~6.67 万吨（其终端用户中餐饮占比超过 99%）。测算结果见表 3。

表 3 北京市餐厨行业生物质燃料需求量测算

燃料种类	消费量/(万 t · a ⁻¹)	低位热值/(MJ · kg ⁻¹)	热量当量/(万 GJ · a ⁻¹)	需求量/(万 tce · a ⁻¹)
LPG	0.4	45.50	18.2	0.63

燃料种类	消费量/(万 t · a ⁻¹)	低位热值/(MJ · kg ⁻¹)	热量当量/(万 GJ · a ⁻¹)	需求量/(万 tce · a ⁻¹)
白油	6~6.67	44.20	265.2~294.8	9.13~10.15
合计	—	—	283.4~313.0	9.76~10.78

注：标准煤热值取 29.0376 MJ/kg。为确保供应链韧性，后续分析取上限 10.78 万 tce 作为年需求基准。

供应侧评估三条渠道：废弃油脂因与餐饮业直接关联、技术成熟且政策导向明确，为优先渠道；农业秸秆（华北玉米、小麦秸秆）资源丰富且邻近北京，虽收集成本高、季节性强，但中长期价值突出；畜禽粪便来自周边规模化养殖场，作为多元化补充。林业剩余物因分布偏远、运输成本高，暂不纳入。三条渠道面向北京市餐厨行业的年供应潜力测算结果见表 4。

表 4 供需匹配分析

项目	数值/(万 tce · a ⁻¹)	与需求上限之比
行业年需求（上限）	10.78	100%
废弃油脂供应潜力	10.48~19.65	97%~182%
农业秸秆供应潜力	9.98~20.79	93%~193%
畜禽粪便供应潜力	2.92~3.65	27%~34%
三渠道潜力下限合计	23.38	217%

从总量看，三条渠道潜力下限合计约 23.38 万 tce，是需求上限的 2.17 倍，资源保障能力充足。从结构看，废弃油脂与农业秸秆处于同一量级，构成供应体系的两大支柱；畜禽粪便潜力约为前两者的 1/5~1/3，受限于能源化利用比例与餐厨行业在沼气产品中的分配份额，宜定位为分布式补充。

值得注意的是，废弃油脂单渠道的潜力下限（10.48 万 tce）略

低于需求上限（10.78 万 tce），缺口约 0.3 万 tce。这意味着在保守情形下，单纯依靠废弃油脂渠道尚不足以完全覆盖行业峰值需求，需辅以秸秆渠道补充。这一判断较“废弃油脂可独立支撑”的乐观预期更为审慎，也为多元化供应体系的必要性提供了直接依据。

从时间维度看，供应可靠性呈现清晰的阶段性演进特征：短期依托废弃油脂构建“定向收集—转化—应用”行政闭环，供应可靠性较高；中期随全国重点城市推广，华北秸秆可能成为多省市竞争对象，推高原料成本，需从行政主导转向“供应链优化+京津冀区域协同”；长期全国市场趋于成熟，北京作为资源输入型城市的成本优势减弱，核心竞争力应转向燃料品质与碳核算等“北京标准”的输出，以质量门槛反向吸引优质供应链资源。

3.2 减碳效益与临界掺混比

3.2.1 排放因子测算

传统燃料与各调和方案的 CO₂ 排放因子测算结果见表 5。

表 5 各燃料 CO₂ 排放因子

燃料类型	碳质量分数/%	生物质能量占比 η	EF/(kg · GJ ⁻¹)
白油	84.61	0	69.49
LPG	82.25	0	65.62
LNG	74.87	0	55.92
B10-FAME	—	9.63%	62.80
B20-FAME	—	19.34%	56.05
B30-FAME	—	29.14%	49.24
B10-HVO	—	9.42%	62.94
B20-HVO	—	18.95%	56.32
B30-HVO	—	28.62%	49.60

传统燃料内部呈现清晰的梯度：白油碳排放强度最高（69.49 kg/GJ），LPG 因氢碳原子比更高而低 5.57%，LNG 最低但仍达 55.92 kg/GJ。这一结果明确了餐厨行业深度脱碳的技术边界：单纯依靠化石燃料内部的“以气换油”式结构调整，减排空间上限约为 19.5%；若要突破这一理论极限，必须引入具有“碳中性”属性的生物质组分。

3.2.2 两个临界替代点

基于末端燃烧核算体系，以 LPG 与 LNG 的排放因子为参照坐标，可求解调和燃料实现减碳超越所需的最低生物质掺混比例。

LPG 替代点：当生物质组分能量占比达到 5.57% 时，调和燃料碳足迹低于 LPG。对应 FAME 路线体积分数 5.79%，HVO 路线 5.93%——即生物柴油体积分数约 6% 即可超越 LPG。

LNG 替代点：当生物质组分能量占比达到 19.53% 时，实现对 LNG 的全面超越。对应 FAME 路线体积分数 20.19%，HVO 路线 20.60%——即生物柴油体积分数需超过 20%。

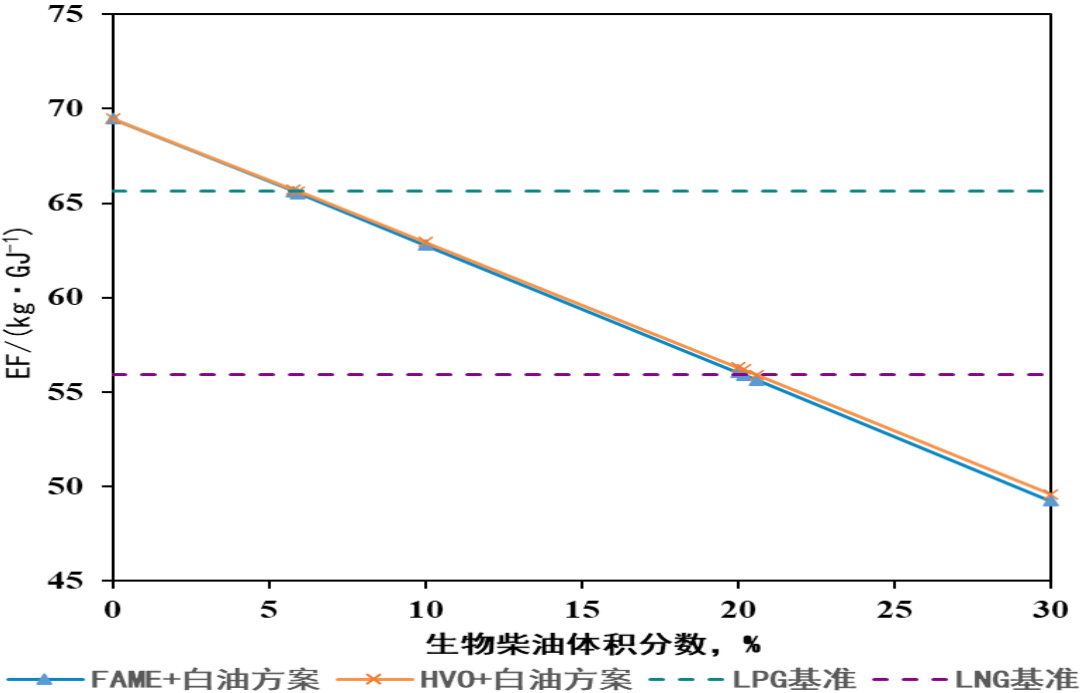


图 2 不同调合方案的 EF

这一结果确立了 B20 作为环境价值质变点的关键地位：在此比例之下，调和燃料仅优于白油与 LPG；达到并超过此比例后，其碳排放强度全面低于包括 LNG 在内的所有化石燃料基准。其政策含义是明确的——在市政管网未覆盖区域推广 B20 及以上级别的调和燃料，即可在不改变现有燃烧设施的前提下，实现与管道天然气几乎等同的脱碳效益。

3.2.3 减排潜力测算

将上述模型应用于北京市餐厨行业实际用能规模（白油 265.2 万~294.8 万 GJ，LPG 18.2 万 GJ），假设传统燃料全部替换为对应调和方案，各方案年 CO₂ 减排量测算结果见表 6。

表 6 各调和方案年 CO₂ 减排量测算

方案	相对白油减排率/(kg · GJ ⁻¹)	相对 LPG 减排率/(kg · GJ ⁻¹)	年减排量/(kt · a ⁻¹)
B10-FAME	6.69	2.82	18.2~20.2
B20-FAME	13.44	9.57	37.4~41.4
B30-FAME	20.25	16.38	56.7~62.7
B10-HVO	6.55	2.68	17.9~19.8
B20-HVO	13.17	9.30	36.6~40.5
B30-HVO	19.89	16.02	55.6~61.6

结果显示，全面推广 B30 方案，年 CO₂ 减排量可达 5.6 万~6.3 万吨。按 91.8 元/吨碳价折算，对应年碳资产价值约 510 万~576 万元。减排量随掺混比近似线性增长，B30 方案的减排量约为 B10 方案的 3.1 倍。两条技术路线的减排效果差异微小（FAME 路线略优约 2%），主要源于 HVO 密度较低导致相同体积比下能量占比略低。

3.3 经济性分析：成本分层与碳收益的有限性

3.3.1 单位热值成本的结构性分层

各燃料单位热值成本对比见表 7。

表 7 各燃料单位热值成本对比

燃料类型	价格/(元·t ⁻¹)	热值/(GJ·t ⁻¹)	单位热值成本/(元·GJ ⁻¹)	较白油	较 LNG
LNG	4 390.00	48.60	90.33	— 55.14%	—
LPG	4 772.00	45.50	104.88	— 47.91%	+16.11%
白油	8 900.00	44.20	201.36	—	+122.92%
B10-FAME	8 949.07	43.80	204.32	+1.47%	+126.19%
B20-FAME	8 996.65	43.39	207.38	+2.99%	+129.58%
B30-FAME	9 042.64	42.98	210.42	+4.50%	+132.94%
B10-HVO	9 018.75	44.18	204.13	+1.38%	+125.98%
B20-HVO	9 139.50	44.16	206.93	+2.77%	+129.08%
B30-HVO	9 262.25	44.14	209.86	+4.22%	+132.33%

成本呈现显著的三层结构：气态燃料层（LNG 90.33、LPG 104.88 元/GJ）、液态化石燃料层（白油 201.36 元/GJ）、生物调和燃料层（204.13~210.42 元/GJ）。

第一层与第二层之间 122.92% 的巨大落差，并非简单的市场价格波动所致，而是由能源基础设施的形态特征决定。气态燃料通过高压或低温液化实现高效远距离运输，并依托管网或罐装体系形成高度规模化的终端配送网络；液态燃料的供应链则涉及炼厂—油库—油罐车—终端储油设备多个环节，每个环节均需独立投资且规模经济效应较弱，当终端用能点分散时单位配送成本随距离快速上升。

这一结构性特征导出一个对全报告至关重要的前提约束：任何以液态燃料替代气态燃料的尝试，都必须在克服燃料本身价格差异之外，额外承担由“形态转换”带来的基础设施成本。反之，第二层与第三层之间的差距仅为 1.38%~4.50%——生物调和燃料与白油同属液态、同一配送体系，其价差是纯粹的原料成本溢价，量级完全不同。

3.3.2 碳收益内部化后的综合成本

引入 91.8 元/吨碳价，将碳减排效益货币化为环境收益，各燃料综合成本见表 8。

表 8 碳价 91.8 元/吨时各燃料综合成本对比（以白油为基准）

燃料类型	单位热值成本 /(元·GJ ⁻¹)	碳排放强度 /(kg·GJ ⁻¹)	碳收益/(元·GJ ⁻¹)	综合成本	排名
LNG	90.33	55.92	1.246	89.08	1
LPG	104.88	65.62	0.356	104.52	2
白油	201.36	69.49	0	201.36	3
B10-HVO	204.13	62.94	0.601	203.53	4
B10-FAME	204.32	62.80	0.614	203.71	5
B20-HVO	206.93	56.32	1.209	205.72	6
B20-FAME	207.38	56.05	1.234	206.15	7
B30-HVO	209.86	49.60	1.826	208.03	8
B30-FAME	210.42	49.24	1.859	208.56	9

结果显示，即便计入环境收益，全部六个调和方案的综合成本（203.53~208.56 元/GJ）仍全面高于白油基准（201.36 元/GJ）。以减排潜力最大的 B30-HVO 为例，其单位热值成本较白油高 8.50 元/GJ，而碳收益仅 1.826 元/GJ，仅能对冲价差的 21.5%。

进一步分析碳收益构成可发现，生物调和燃料具有较高的“减

排杠杆”效应——B30 方案碳收益（1.826~1.859 元/GJ）是 LPG 碳收益（0.356 元/GJ）的 5 倍以上。但这种高减排效益在巨大的初始采购价差面前仍显杯水车薪。

3.3.3 “减排越多、经济性越差”的逆向激励

表 8 中隐含着一个值得单独提出的现象：随着掺混比例由 B10 提升至 B30，碳收益大幅增加（增幅超过 200%），但综合成本非但没有下降，反而持续上升。

FAME 路线综合成本由 203.71 元/GJ 升至 208.56 元/GJ，HVO 路线由 203.53 元/GJ 升至 208.03 元/GJ。这意味着在当前价格体系与碳价水平下，企业每提高一个掺混梯度，减排量增加的同时经济负担同步加重，市场机制非但不能激励高比例掺混，反而形成了明确的逆向激励。

这一现象的成因是双重的：一方面，生物组分单价显著高于白油，掺混比提高直接抬升采购成本；另一方面，FAME 路线还叠加了“热值稀释效应”——综合热值由 43.80 MJ/kg 降至 42.98 MJ/kg，意味着等能量替代下需消耗更多燃料质量，进一步放大成本。HVO 路线因热值几乎不衰减而略优，但仍未能扭转趋势。

这一发现的政策含义是直接的：单纯依靠碳定价机制，不仅无法驱动行业主动提高掺混比例，反而会锁定在最低合规掺混水平。任何以高比例掺混为目标的政策设计，都必须包含与掺混比正相关的差异化补偿机制，而非仅依赖统一碳价。

3.4 临界碳价的量级分化与分层替代路径

3.4.1 临界碳价测算

求解使生物调和燃料与各基准燃料综合成本持平的碳价阈值，结果见表 9。

表 9 各调和方案临界碳价测算结果（元/吨 CO₂）

方案	替代白油	替代 LPG	替代 LNG
B20-FAME	447.9	10 711	—
B30-FAME	447.4	6 443	17 978
B20-HVO	422.9	10 973	—
B30-HVO	427.4	6 553	18 913

注：B20 方案排放强度与 LNG 相当，边际减排效益趋近于零，临界碳价指标不适用，故以“—”表示。

3.4.2 三个量级，三种政策含义

测算结果呈现出跨越两个数量级的清晰分化，每个量级对应截然不同的政策判断。

第一量级——替代白油：423~448 元/吨，政策可干预区间。

这一区间有两个值得注意的特征。其一，数值稳定：六个方案的临界碳价高度集中，FAME 路线 447~448 元/吨，HVO 路线 423~427 元/吨，几乎不随掺混比变化。这是因为在同形态替代场景中，成本增量与减排增量近似同比例增长，二者之比保持恒定。其含义是积极的——提高掺混比例并不会抬高所需的政策补贴强度，B30 与 B20 所需的单位碳价支持基本相同。

其二，HVO 路线临界碳价反而低于 FAME 路线。这与“二代技术成本更高”的直觉相反，原因在于 HVO 无热值稀释效应，等能量替代下的实际成本增幅小于 FAME，即在“每单位减排量所需补偿的成本”上具有更高效率。这提示在具备供应条件时，HVO 是更具政策成本效率的技术路线。

当前全国碳市场价格 91.8 元/吨，约为该临界值的 1/5。缺口虽然存在，但处于财政补贴可以合理填补的范围——按 B30 方案年减排 5.6 万~6.3 万吨、缺口约 330~360 元/吨计算，全行业年补贴需求

约 1 900 万~2 200 万元，对一个特大城市的专项资金而言完全可承受。

第二量级——替代 LPG：6 443~10 973 元/吨，经济上不可行。

该量级较第一量级高出一个数量级以上，且随掺混比提高而下降（B20 方案约 1.1 万元/吨，B30 方案降至约 6 500 元/吨）。其根本原因在于生物调和燃料与 LPG 之间存在约 102~105 元/GJ 的巨大成本差，而两者的碳排放差距仅为 9~16 kg CO₂/GJ——成本差巨大而减排差有限，导致临界碳价被急剧放大。

第三量级——替代 LNG：约 1.8 万~1.9 万元/吨，且仅 B30 方案适用。

LNG 在气态燃料中同时具备最低的碳排放强度（55.92 kg CO₂/GJ）与最低的单位热值成本（90.33 元/GJ），构成了极难跨越的双重优势。B30 方案虽实现了对 LNG 的排放超越，但所需临界碳价仍高达 1.8 万~1.9 万元/吨，是当前碳价的 200 倍。而 B20 方案的排放强度与 LNG 基本相当，边际减排效益趋近于零，临界碳价指标已不适用——这意味着在 B20 水平下，生物调和燃料相对 LNG 并不具备可供碳定价机制补偿的环境优势。

3.4.3 分层替代路径

上述量级分化为政策资源配置提供了精准的量化指引，可归纳为三条路径判断。

优先突破口：白油同形态替代。临界碳价 423~448 元/吨处于政策可干预区间，且不随掺混比抬升；替代对象白油本身存在标准缺失、监管薄弱、燃烧污染等问题，替代具有减污降碳与规范市场的双重效益；技术上无需改造燃烧设施，推广阻力最小。这一场景应成为政策资源集中投放的领域。

审慎定位：LPG 替代场景。所需碳价 6 443~10 973 元/吨，纯经济手段不可行。但考虑到 LPG 在餐厨环境中的本质安全缺陷（见 3.1.1），该场景的替代驱动力应来自安全监管而非碳定价——即通过消防安全规范限制高密度城区瓶装 LPG 使用，以行政准入而非经济激励实现替代。

明确排除：LNG 替代场景。无论从排放强度还是经济性判断，均不具备可行性。生物调和燃料在气态能源市场中的角色，应定位为特定场景（无管网且 LPG 使用受限）下的补充选项或技术示范，而非对管道天然气的替代。

这一分层逻辑的本质是：绿色溢价能否被政策工具跨越，取决于替代是否发生在同一能源形态之内。跨形态替代所附加的基础设施成本，远超碳定价机制的补偿能力。

4. 结论与政策建议

4.1 主要结论

（1）安全性与资源供给不构成替代障碍，二者为可行性提供了必要前提。生物调和燃料全部组分均属丙类液体，闪点较 LPG 高出 130℃ 以上，可将潜在事故形态由空间爆燃降级为局部燃点；其技术风险（材料溶胀、低温流动性）属可预测的适配性问题，可通过氟橡胶密封件、抗凝剂等成熟手段解决。资源侧三条渠道潜力下限合计 23.38 万 tce，为行业需求上限（10.78 万 tce）的 2.17 倍；但废弃油脂单渠道潜力下限（10.48 万 tce）略低于需求上限，多元化供应体系具有必要性。

（2）B20 是环境价值的质变点，生物质组分是突破化石能源减排极限的唯一路径。化石燃料内部“以气换油”的减排空间上限约 19.5%；引入生物质组分后，能量占比达 5.57% 即可超越 LPG，达

19.53% 实现对 LNG 的全面超越。全面推广 B30 方案，北京市餐厨行业年 CO₂ 减排量约 5.6 万~6.3 万吨。

(3) 碳定价可内化部分环境收益，但存在“减排越多、经济性越差”的逆向激励。在 91.8 元/吨碳价下，各方案综合成本

(203.53~208.56 元/GJ) 仍全面高于白油 (201.36 元/GJ)，B30-HVO 碳收益 (1.826 元/GJ) 仅能对冲其与白油价差 (8.50 元/GJ) 的 21.5%；且综合成本随掺混比单调上升，市场机制自发地将行业锁定在最低合规掺混水平。

(4) 临界碳价呈现跨数量级分化，分层替代是理性路径。替代白油临界碳价稳定于 423~448 元/吨且不随掺混比抬升，处于政策可干预区间；替代 LPG 需 6 443~10 973 元/吨；替代 LNG 需 1.8 万~1.9 万元/吨，且仅 B30 方案存在有意义的指标。绿色溢价的可跨越性取决于替代是否发生在同一能源形态之内。

(5) HVO 路线的政策成本效率优于 FAME。尽管 HVO 单位价格更高，但因无热值稀释效应，其替代白油的临界碳价 (423~427 元/吨) 反而低于 FAME 路线 (447~448 元/吨)。在供应条件具备时，HVO 是更具政策效率的技术选择。

4.2 政策建议

(1) 实施“白油替代优先”的分层替代战略。将政策资源集中投向液态燃料同形态替代场景，明确不将 LNG 替代作为政策目标。建议制定地方性标准，要求辖区内销售的餐厨液体燃料生物柴油体积分数不低于 20%，既确立环保门槛，又通过技术规范压缩非法非标白油的流通空间。

(2) 构建“碳收益 + 专项差价补贴”双轨补偿机制，并使补贴强度与掺混比正相关。鉴于当前碳价约为临界值的 1/5，建议设立

“绿色液体燃料发展专项基金”，按实际碳减排量给予吨级补贴，填补 330~360 元/吨的价格缺口。关键在于补贴须随掺混比递增设计，以对冲 3.3.3 节识别的逆向激励；否则企业将稳定选择最低合规比例。同时推动废弃油脂基生物燃料纳入 CCER 机制，建立专属核算方法学，将原料收运与末端燃烧环节的减排效益合并计算。

（3）以安全监管而非碳定价驱动 LPG 替代。鉴于 LPG 替代场景在经济上不可行，但其本质安全缺陷显著，建议在高密度城区、地下或半地下餐饮空间等高风险场景，通过消防安全规范逐步限制瓶装 LPG 使用，以行政准入实现替代。这一路径的社会总成本远低于经济补偿路径。

（4）强化废弃油脂收运的特许经营与原料平准制度。收运体系不健全是绿色溢价的重要来源。建议推行废弃油脂收运处置特许经营，建立“原料平准基金”，在国际油脂价格大幅波动时对生产企业给予成本补偿，将调和燃料终端价格锚定在白油成本合理范围内（如不超过 10%）；同时严厉打击废弃油脂非法外流，保障原料可及性与成本稳定。

（5）推动二代技术攻关，并在中长期布局秸秆渠道。HVO 的政策成本效率优势与“即用型”特性使其具备长期潜力，建议设立专项科技资金支持加氢脱氧催化剂国产化、模块化异构反应器研发；结合国家能源局“绿色液体燃料技术攻关和产业化试点”工作，在具备条件的示范区开展全产业链示范。同时，鉴于废弃油脂单渠道潜力下限已接近需求上限，应提前布局华北秸秆收储运体系，牵头建立京津冀区域产业协作机制，将中期可能出现的资源竞争转化为协同。

（6）完善全链条碳足迹监测与环保信用激励。将生物调和燃料

使用情况纳入企业环保信用评价体系，与绿色认证、融资优惠挂钩，对使用 **B20** 及以上掺混比例的用户给予信用加分。建立覆盖原料收运、生产、调和、终端使用的全链条碳足迹监测机制，为碳收益核算提供数据基础。

附录

附录 A 生物调和燃料全生命周期安全风险识别清单（四阶段、十一类风险点）

表 A1 生物调和燃料全生命周期安全风险识别清单

阶段	安全事件	主要触发条件	潜在结果
原料收集	收集容器破损或泄漏	容器老化、腐蚀或被蓄意破坏	环境污染、增加城市管网堵塞风险
	废油被恶意掺假/替换	缺乏溯源机制；非法利益驱动	影响后续工艺（如二代加氢对杂质更敏感）；合规风险
	易燃化学品泄漏	管道/阀门故障；一代（甲醇）/二代（氢气）工艺助剂操作失误	人员中毒；火灾、爆炸风险
生产制造	反应器/储罐破裂	一代（强碱腐蚀）/二代（高温高压控制失效）	设备破坏；人员伤亡；大规模泄漏
	废弃物违规排放	废水/废渣处理系统效率低	水体/土壤污染；监管罚款
	大规模运输泄漏	交通事故；极端天气引发车辆失控	环境污染；交通中断
运输与储存	储罐区火灾	呼吸阀故障导致蒸汽积聚；存在静电或动火点	财产损失；影响周边社区安全
终端应用	厨房意外着火	产品闪点不合格（一代残留甲醇/二代轻组分过多）	威胁人员安全；引发厨房火灾
	厨房内储存不当	使用不合格容器；靠近火源或高温设备	燃料泄漏污染；火灾风险增加
	燃烧烟气危害健康	燃烧设备与燃料不匹配导致雾化不良	室内空气质量恶化；设备积碳
	系统故障/油路堵塞	一代（低温凝固/橡胶溶胀）/二代（杂质过滤不当）	燃料中断；设备维修成本增加
	燃烧器回	点火程序错误；喷嘴维护不当	操作人员烧伤；燃烧室损

附录 B 各阶段安全管理规范建议（原料溯源与联单管理、生产工艺安全与危化品管控、储运防泄漏与防火设计、终端准入抽检与操作培训）

B1 原料收集阶段：建立溯源监管体系，严防"地沟油"回流与掺假

生物质调和燃料在上游原料收集阶段的核心风险集中于收集容器泄漏与人为恶意掺假两方面。这不仅影响产品质量，更可能造成环境污染和食品安全隐患。平顶山正铎生物能源科技有限公司的违法案件深刻凸显了这一供应链漏洞。该企业在前端收集环节完全未真实记录废油来源，而是通过伪造物流单据以及虚构跨省采购记录等隐蔽手段，将低价化工白油与工业石蜡等非生物基原料违规冒充合规餐厨废油进行非法牟利。案件最终以虚开增值税专用发票罪定性，企业实际控制人依法被判处有期徒刑并处以 40 万元罚金。对此，借鉴危险废物运输管理和可持续认证体系的溯源机制，提出以下管理建议。

（1）建立强制溯源与联单管理制度。参考《关于加快推进本市餐厨垃圾和废弃油脂资源化处理工作方案》[21]的要求，建立从餐饮单位到预处理中心的电子联单制度，确保废油来源清晰、去向。

（2）规范收集容器与运输要求。收集容器须符合耐腐蚀、密闭性要求。运输车辆应逐步配备紧急切断阀和防滴漏装置，参照《道路危险货物运输管理规定》对相关油品的要求。容器材质应耐腐蚀，并定期进行泄漏检查。

（3）实施第三方审核与供应商黑名单制度。引入第三方机构对回收企业进行定期和不定期飞行检查，对掺假、造假行为实行"零容忍"，建立行业黑名单制度。此举可有效遏制经济利益驱动下的原料

质量问题，确保生物柴油原料的可靠供应。

B2 生产制造阶段：强化工艺安全与环保监管，实现本质安全

生物质调和燃料的生产制造环节涉及多种危险化学品与高压反应设备，安全风险高度集中。该阶段的核心安全逻辑在于构建设备状态监控、现场操作防护规范以及危险化学品严控的三位一体管理模式。2022 年 5 月西班牙拉里奥哈自治区某生物柴油厂发生的爆炸事故导致 2 人死亡，尽管事故的具体诱因尚无定论，但其惨痛教训深刻揭示了设备本质安全管理的极端重要性。为了有效防范类似生产事故，行业应当积极借鉴石油化工与天然气领域成熟的安全作业规范，针对调和燃料生产全过程提出系统化的安全管理改进建议。

（1）设备完整性管理是预防重大事故的关键。对反应器、甲醇储罐等压力容器，建立安全技术档案，严格执行年度检验和壁厚监测（如最小壁厚不低于设计壁厚 80%）。关键设备应设置安全联锁系统，在异常情况下自动切断进料或紧急泄压。

（2）危险化学品管控尤为重要。甲醇储罐区应设置围堰，安装可燃气体浓度检测报警仪，并与紧急切断阀联动。确保与生物柴油储罐保持规范的安全间距。对于强酸、强碱等腐蚀性化学品，应专区存放、双人双锁管理，使用防泄漏托盘和专用防护装备。

（3）环保合规运行不可或缺。确保废水处理系统稳定运行，关键指标（如 COD、BOD）在线监测。废水排放台账按规定保存不少于 5 年，以备核查。生产废渣应分类处置，危险废物应交由有资质的单位处理，防止二次污染。

B3 运输与储存阶段：规范物流操作，确保储运安全

生物质调和燃料在物流与暂存环节面临渗漏及火灾风险，核心在于实现运输隐患规避与储存区域防火的双重保障。《危险货物运

输管理规定》要求生物柴油运输车辆需取得压力容器使用登记证，每月开展罐体气压试验，驾驶员持危险货物运输从业资格证，连续驾驶不超 4 小时。储存环节需符合《建筑设计防火规范》

（GB50016-2014）2014 年 9 月 27 日，华阳新能源公司储油罐破裂引发火灾，泄漏的生物柴油及甲醇蒸汽燃烧起火。事后分析得知储罐长期使用后腐蚀穿孔，企业未建立壁厚监测台账。甲醇作为原料，其储罐与生物柴油储罐间距不足，违反 GB50160《石油化工企业设计防火标准》关于甲类液体储罐防火间距的规定。借鉴液化石油气和天然气的储运管理经验，提出以下建议。

（1）在运输安全方面，运输车辆需取得相应资质，驾驶员持证上岗，严格执行连续驾驶时限规定。定期对罐体进行检测，确保安全阀、紧急切断阀等安全附件完好有效。运输路线应避开人口密集区 and 环境敏感区，减少事故后果放大效应。

（2）在储存安全设计上，餐饮场所的储罐应设置在独立、通风良好的区域，远离明火和高温设备。储罐上设置阻火呼吸阀，附近配备消防砂、泡沫灭火器等应急器材。储存区应设置防泄漏围堰，容积不小于储罐总容量的 110%，防止泄漏扩散。

（3）防泄漏检测是关键预防措施。定期对储罐和管线进行泄漏检查，鼓励使用在线泄漏监测系统。对于地下储罐，应采用双壁罐或设置渗漏检测井，防止土壤和地下水污染。储存区应明示安全标识，包括危险特性、应急处置措施等信息。

B4 终端应用阶段：规范用户操作，保障使用安全

终端应用作为生物质调和燃料风险管理的最后一环，其储存安全需针对性解决闪点不合格导致的着火、燃料泄漏火灾以及冬季粘稠堵塞等实际问题。该环节的核心逻辑在于通过可落地的操作规

范，确保终端使用过程安全可控。例如 2024 年某省快餐店曾因使用未经过抽检的低闪点生物柴油，且燃料储存位置距离高温灶台过近，导致燃料受热引燃并引发厨房局部火灾。事故教训表明，终端用户对燃料理化特性的忽视及布局不当是火灾主因。为此，本研究借鉴燃气燃烧器具安全管理规则，针对生物质调和燃料的用户端安全管理提出以下改进建议。

(1) 建立燃料准入与抽检制度。餐饮单位采购时须查验产品合格证和闪点检测报告。市场监管部门应定期对市售生物柴油进行抽检，确保闪点等安全指标合格。产品标签应明确标注生物柴油混合比例、适用设备和安全注意事项。

(2) 规范专用储存与限量要求。必须使用专用密闭金属容器储存，严禁使用普通塑料桶。储存量应严格限制，满足"即用即购"原则，减少现场存量。储存容器应远离灶具、电器等热源，避免阳光直射。

(3) 加强设备维护与操作培训。燃烧器需定期清理积碳，更换过滤器。操作人员必须经过专项安全培训，熟练掌握点火前预吹扫、紧急情况处理等规程。设备上应张贴安全操作规程，明确正常操作和异常情况处置步骤。

(4) 制定现场应急处置方案。餐饮单位应制定简单的泄漏、火灾现场处置方案，并配备必要的应急物资（如吸附材料、灭火器等）。员工应熟悉应急报告程序，定期开展应急演练，提高初期应急处置能力。

附录 C 供应潜力测算模型与参数取值（废弃油脂 IEA 法、农业秸秆 FAO 法、畜禽粪便欧洲沼气协会法）

（1）废弃油脂渠道

废弃油脂制备生物柴油是技术最成熟的路径之一，其面向北京2024年的有效供应潜力采用国际能源署（IEA）推荐的公式进行估算，具体计算公式下：

$$PWCO = Q_{edible} \times f_{gen} \times (1 - L_{loss}) \times \eta_{conv} \times f_{alloc} \times f_{util} \times (Q/29.0376)$$

其中， $PWCO$ 为面向北京市场的理论供应潜力； Q_{edible} 为食用油消费量； f_{gen} 为废弃油脂产生系数，取 0.3（参考欧盟标准和中国业内报告）； L_{loss} 为不可收集损失率，据报告外推取 0.78； η_{conv} 为废油脂转化为生物柴油的技术转化效率，参考技术规范与 SRCA 工艺文献，取 0.95， f_{alloc} 为调配到北京市场的供应比例，结合北京先行区定位与欧盟经验，取 10%~15%； Q 为生物柴油低位热值，取 37 MJ/kg； f_{util} 为生物柴油在目标市场的消纳比例，考虑试点政策推动与先行区基础，本文取 0.8。

北京市废弃油脂制生物柴油主要服务于 B10 车用燃料、机场、环卫及物流车队，未来可拓展至航空燃料。相较之下，餐厨行业应用更具优先性，兼具碳减排与食品安全治理价值，依托“产生—收集—加工—回用”闭环，可从源头阻断废弃油脂回流餐桌。鉴于其突出作用，建议北京餐厨行业供应潜力分配比例设为 40%~50%，以保障资源定向利用，提升区域公共安全韧性。

（2）农业废弃物（秸秆）渠道

秸秆制备生物液体燃料技术可行，可通过气化合成、水解发酵等工艺生产，国内已有产业化应用。本文采用 FAO 推荐的农作物残余物评估方法，公式如下：

$$P_{straw} = \sum (Crop_{Area} \times Yield \times RPR \times CF \times EF \times NCV \times \eta) / 29.0376$$

$$P_{catering} = P_{straw} \times E \times \theta$$

其中， P_{straw} 为 2024 年全国秸秆生物液体燃料理论总潜力； $Crop_{Area}$ 为全国粮食作物总播种面积； $Yield$ 为平均单位面积产量，取

5.92t/hm²; RPR 为草谷比, 参考《农作物秸秆资源台账建设工作通知》中华北区域默认值, 取 1.1; CF 为可收集系数, 取 0.74; EF 为秸秆能源化利用比例, 参考相关报告并结合利用趋势, 设定为 15%~20%; NCV 为秸秆净热值, 取 15MJ/kg; η 为能源转化效率, 为 0.7。 $P_{catering}$ 为北京餐厨行业的有效供应潜力; E 为区域调配系, 基于北京先行区定位, 设定为 8%~10%; θ 为餐厨行业分配系数, 考虑“收集—转化—就地消纳”闭环在清洁替代与食品安全方面的显著效益, 取 40%~50%。

(3) 畜禽粪便渠道

畜禽粪便制备生物液体燃料技术已成熟, 主流路径包括厌氧发酵制生物天然气, 以及水热液化等热化学转化工艺。本文采用欧洲沼气协会标准化方法评估 2024 年第 j 类动物 (生猪、牛、羊、家禽) 的理论供应潜力, 公式如下: $P_{manure, j} = \sum (Number_j \times VS_j \times BMP_j \times \eta_j \times f) \times Q_m / 29.0376 \times 10^{-4}$

$$P_n = P_{manure} \times E \times \theta$$

其中, $P_{manure, j}$ 为第 j 类动物粪便渠道所提供的理论供应潜力; $Number_j$ 为第 j 类畜禽年末存栏量; VS_j 为挥发性固体含量, 参考《畜禽粪尿产生量及主要成分参数》默认值; BMP_j 为产甲烷潜力, 取 0.25m³/kg/VS; η_j 为转化效率, 取 35%; f 为能源化利用比例, 取现有报告文献均值 12%; Q_m 为甲烷低位热值, 取 35.9MJ/m³; P_n 为北京餐厨行业的供应潜力; E 为区域调配系, 设定为 8%~10%; 餐厨行业分配系数 θ 设定为 5%~10%, 后者综合考虑了粪便能源化产品在车用、工业、民用等领域的竞争性分配, 以体现餐厨替代的优先地位。

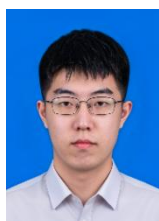
关于作者

系列报告总协调人：王建良

本报告主笔人：



陈守海，经济法学硕士，石油工程管理博士，律师，仲裁员，中国石油大学(北京)经济管理学院讲师，油气政策与法律研究中心主任，研究领域为能源政策与立法，先后承担国家发改委、国家能源局、北京市等多个立法研究项目及企业发展研究项目，发表论文 20 余篇，著作有《天然气产业政策系统研究》等。



李毅锐，中国石油大学（北京）经济管理学院能源系统与碳管理专业硕士研究生在读，研究方向为温室气体排放核算、温室气体减排路径、低碳路径与减排公平性研究。



蒋卓翔，中国石油大学（北京）经济管理学院硕士在读研究生。主要研究领域为能源经济管理，温室气体减排治理评价。现已发表 5 篇高水平论文，其中以第一作者或通讯作者在 SCI/CSCD/北大核心等期刊发表文章 3 篇。在校期间，多次参与学科竞赛和科研实践项目，先后获得过三下乡社会实践国家级立项，全国大学生数学竞赛省级一等奖，全国大学生高校 BIM 毕业设计大赛国家级三等奖等国家级荣誉 4 项，省级 9 项。

本报告校对人：

报告引用：陈守海，蒋卓翔，李毅锐.生物调和燃料替代餐厨传统燃料的减碳效益与分层替代经济性研究，中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院, 2026 II01, 2026 年 9 月 27 日。



中石大碳能院
ICED-CUPB

中国石油大学（北京）碳中和与能源创新发展研究院

Institute of **C**arbon Neutrality and Innovative **E**nergy **D**evelopment, **C**hina **U**niversity
of **P**etroleum, **B**eijing (ICED-CUPB)

联系电话：010-89733072 邮箱：iced-cupb@cup.edu.cn

微信公众号：ICED-CUPB

地址：北京市昌平区府学路 18 号

Add: No. 18, Fuxue Rd., Changping District, Beijing, 102249, China

