



航空零碳必由之路

下一代可持续航空煤油技术发展前景





关于落基山研究所（RMI）

落基山研究所(RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库。我们与企业、政策制定者、科研机构及创业者协作，识别并规模化推广能源系统转型解决方案，推动全球能源系统转型，践行1.5°C温控气候目标，创造清洁、繁荣的零碳共享未来。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰及华盛顿特区设有办事处。

作者与鸣谢

作者

李婷、刘琦宇、王喆、张翌晨、朱凌琪

作者姓名按姓氏首字母排列。

除非另有说明，所有作者均来自落基山研究所。

联系方式

刘琦宇, qliu@rmi.org

引用建议

落基山研究所，航空零碳必由之路——下一代可持续航空煤油技术发展前景，2023

鸣谢

(排名不分先后)

宁波市发展规划研究院

中国产业发展促进会生物质能产业分会

中国石化镇海炼化

宁波明州生物质

中国石化石油化工科学研究院

中国民航科学技术研究院

以及为本研究提供意见和建议的来自企业和研究机构的各位专家

摘要

自国家“碳达峰碳中和”目标提出以来，可再生能源继续得到大规模推广应用，清洁技术进一步快速发展，电力、工业、建筑、交通等主要行业在节能减排方面取得了长足进展。作为交通行业实现双碳目标的关键之一，航空业受到了越来越多的关注。相比其他行业，航空业的减排方案和减排路径可选方案较为有限，减排难度较大，又被称为“难减排”领域之一。而由于具备热值较高、零排放等特点，可持续航空煤油为航空业减排带来了新的可能性和前景。

国际可持续航煤产业正进入一个由缓慢加速到快速发展的阶段。我国的可持续航煤产业刚刚起步，得益于《“十四五”民航绿色发展专项规划》等政策的支持，2022年以来可持续航煤的需求与产能正在快速增加，相关市场也正在形成。统计数据显示，我国已建成的可持续航煤年产能达20万吨，已宣布的可持续航煤规划产能390万吨，随着空中客车、中国国际航空、国泰航空等航煤消费企业与航司的加入，我国的可持续航煤市场已初具雏形。

然而，受到当前可持续航煤生产技术的限制，原料供应和成本已成为我国可持续航煤产业加速发展的主要挑战。考虑到目前主流的第一代油脂加氢技术所需的“地沟油”原料在未来几年内将接近供应上限，以当前技术路径支持的可持续航煤产业即将面临原料短缺的困境。同时，伴随着市场供需关系的变化，“地沟油”的价格也在快速增长，逼近市场承受能力的极限。因此，为了确保扩大产能、降低成本，发展以秸秆等生物质为原料的下一代可持续航空煤油技术势在必行。

为了更好地促进我国可持续航煤产业的发展，落基山研究所对国内外航空业与生物质利用产业发展现状进行了系统性梳理，广泛开展了生物质燃料相关企业、航司、研究机构与业内专家的调研和访谈，结合已有文献与资料，对下一代可持续航煤技术的发展方向、技术特点和成本经济性等进行了深入研究。本报告主要结论及建议包括：

- 在以“减碳55 (Fit for 55)”、“通胀削减法案 (Inflation Reduction Act)”为代表的美欧立法和政策影响下，及早推动我国航空行业零碳转型是增强我国航空业国际竞争力、贡献国家双碳目标的关键之一。
- 发展可持续航煤是实现航空零碳转型的最主要方式。目前，油脂加氢 (HEFA) 技术仍是可持续航煤产业的主流技术方向。但由于原料不足的原因，HEFA技术难以作为充分满足市场需求的长期解决方案。气化-费托合成技术具备原材料充足、技术相对成熟等特点，因此更适用于作为航空行业脱碳的中远期解决方案。
- 秸秆作为我国产量最大的农业废弃物，是理想的可持续航煤原材料。为了实现秸秆的低成本、大规模利用，我国宜进一步建立和完善专业化、标准化、高效率的秸秆收集利用体系。
- 费托合成技术在我国已有数十年的发展历史，主要应用于煤制油领域。依托已有的煤制油技术与产业快速推动费托合成技术，有助于实现生产成本的降低。
- 为了支持产业发展，优化政策工具、建立市场机制和完善原料供应体系是加速可持续航煤产业发展的重要举措，其中，考虑逐步设定和实施强制掺混比例、建立和推广可持续航煤常态化加注试点、实行生产和消费企业财政补贴和税收优惠等政策措施是实现下一代可持续航煤技术能够得以长足发展和大范围推广的有力抓手。

目录

(一) 研究背景及意义	7
(二) 全球航空低碳转型与可持续航煤发展现状	9
2.1 可持续航煤简介与其减排潜力	9
2.2 欧美可持续航煤产业进展	10
2.3 欧美可持续航煤政策	12
(三) 我国可持续航煤产业发展趋势	15
3.1 国际政策影响下的我国可持续航煤市场	15
3.2 我国可持续航煤相关政策	16
3.3 我国可持续航煤的发展现状	17
(四) 下一代可持续航空煤油技术的路线选择	19
4.1 HEFA技术路线的局限性	19
4.2 下一代可持续航煤的三个技术方向	21
4.3 我国下一代可持续航煤技术选择	23
(五) 原料——利用秸秆拓高可持续航煤产能上限	24
5.1 我国秸秆利用现状	24
5.2 秸秆制可持续航煤的优势	26
5.3 秸秆利用难点	27
5.4 秸秆收集体系是降本增产的关键	28
(六) 成本——煤制油产业助力可持续航煤突破价格下限	29
6.1 费托SAF成本估算	29
6.2 与煤制油产业结合发展可促进费托SAF成本下降	31



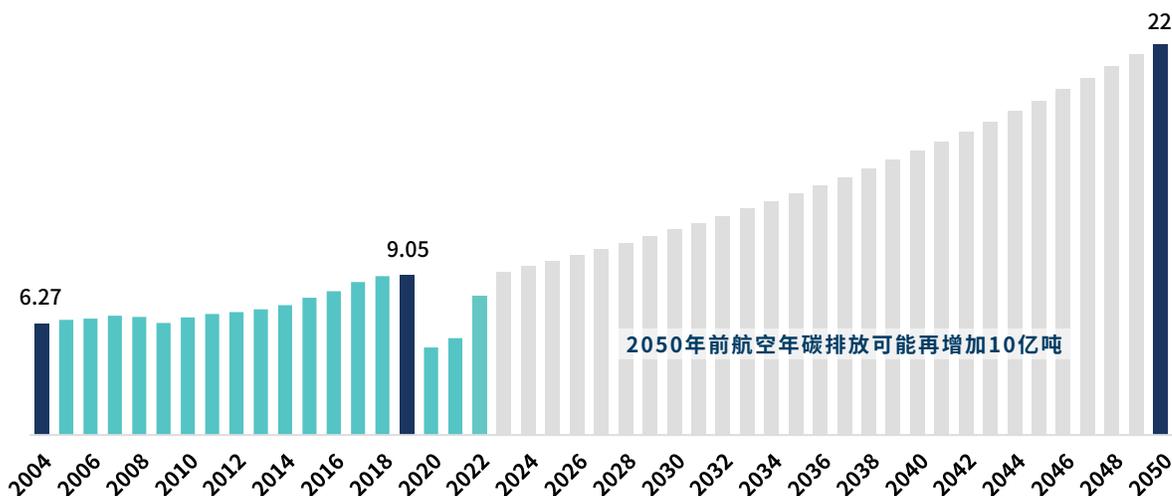
(七) 下一代可持续航煤推广手段	33
7.1 优化政策工具.....	33
7.2 建立市场机制.....	35
7.3 完善原料供应体系.....	37
参考文献	38

(一) 研究背景及意义

交通部门是全球第二大二氧化碳排放源，占碳排放总量的25%¹，仅次于电力。2021年，随着新冠疫情逐渐消退、世界经济逐步复苏，全球交通碳排放较前一年增长了8%，达到了将近77亿吨。²在我国，交通作为主要的耗能部门和碳排放源，2021年占总碳排放的10%。³随着十四五规划的逐步落实、中国经济的持续发展、国民生活水平的不断提高，我国交通运输碳排放仍在持续增长，是增速最快的部门之一。

而在交通部门中，航空是公认的“难脱碳”领域。过去二十年中，全球航空业的平均碳排放增速约为2.5%，2010至2018年间，航空业增速更是达到了每年4%⁴，远高于公路、铁路及航运等其他交通领域⁵。尽管目前航空业仅占全球碳排放的2.4%，但是根据国际民航组织（ICAO）预测，若保持现有排放水平，至2050年时航空碳排放将占到全球总碳排放的25%⁶。而世界经济论坛则预测到2050年时，航空碳排放可能增加到22亿吨/年。⁷

图表 1 IATA对全球航空业碳排放趋势的预测 (亿吨)



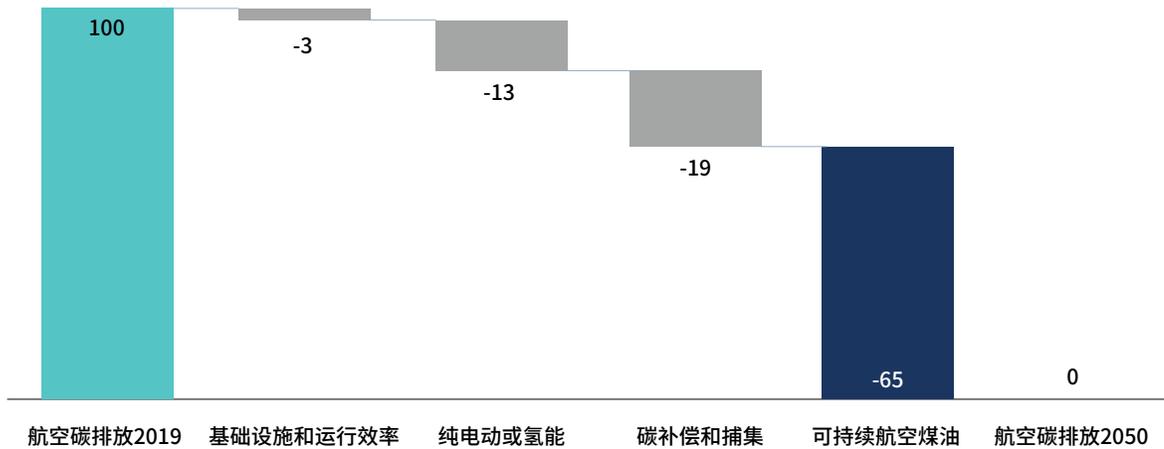
我国近年来的经济增长同样也驱动了航空出行需求的快速增加。据空客公司预测，在未来20年，中国的航空运输量将以每年5.3%的速度增长，大大高于3.6%的世界平均水平。这意味着2041年前，中国总共将需要购买8420架飞机，占未来20年全球约39500架新飞机总需求的20%以上⁸。照此发展，到2050年时，我国航空煤油消耗将超过每年1亿吨，产生碳排放3.5亿吨。可见，尽早推进航空业的低碳转型对碳中和目标的实现至关重要。

目前，航空行业的减排方式主要包括能效提升和清洁能源替代两种，其中能效提升是指通过提升机场管理、飞行路线、机队运营等环节的效率来降低不必要的能耗，进而实现节能降碳。由于航空领域本身的碳排放基数相对较大，依靠能效提升所能实现的碳减排相对有限，根据世界经济论坛预测，能效提升最多只能将航空碳排放降低5%，IATA则认为只有3%，对于航空业的整体减排的贡献相对较小。⁹

因此长期来看，航空行业的零碳转型仍然需要依靠清洁燃料的替代，根据IATA的减排图景预测，在2050年航空行业碳中和的情景下，可持续航煤将贡献航空领域高达65%的减排量。由于化学电池和氢燃料电池技术都尚不成熟，且能量密度方面难以和化石燃料相提并论，可持续航煤（Sustainable Aviation Fuel, SAF）成为了最具可行性的解决方案。可持续航煤是指所有利用清洁原料制造、能够实现减排且能够直接应用于传统航空发动机

的清洁燃料，原料来源有废弃油脂、城市废弃物、农林废弃物、能源作物以及可再生电力等等，与传统航空煤油相比可平均减少约80%的碳排放¹⁰。不仅如此，可持续航煤作为一种原位替代燃料（Drop-in Fuel）不需要对现有基础设施、飞机发动机和运行管理体系等进行大范围改造就可以直接加注使用，大大降低了减排成本。

图表 2 IATA对2050年时航空技术路径减排贡献的预测 (%)



在政策和技术进步的支撑下，我国已经初步建成了可持续航煤市场，当前已建成和已规划的产能总计达到了390万吨，行业正在进入快速发展的阶段。然而，除了快速增长的可持续航煤产业，我国的生物柴油产业同样需要废弃油脂进行生产，在多方竞争下，废弃油脂供应规模已经接近饱和，原材料价格也因此飙升。无论从原材料供应的角度，还是从生产成本的角度来看，当前的可持续航煤技术都无法满足未来的市场需求增长。

解决上述问题的唯一手段就是发展下一代可持续航煤生产技术。不同于第一代技术所需的“地沟油”，下一代技术将主要利用农业、林业废弃物等生物质原料来生产可持续航煤，相比于地沟油，这些原材料有丰富、廉价、相对易获得等特点，能够支持航空业的长期减排。

(二) 全球航空低碳转型与可持续航煤发展现状

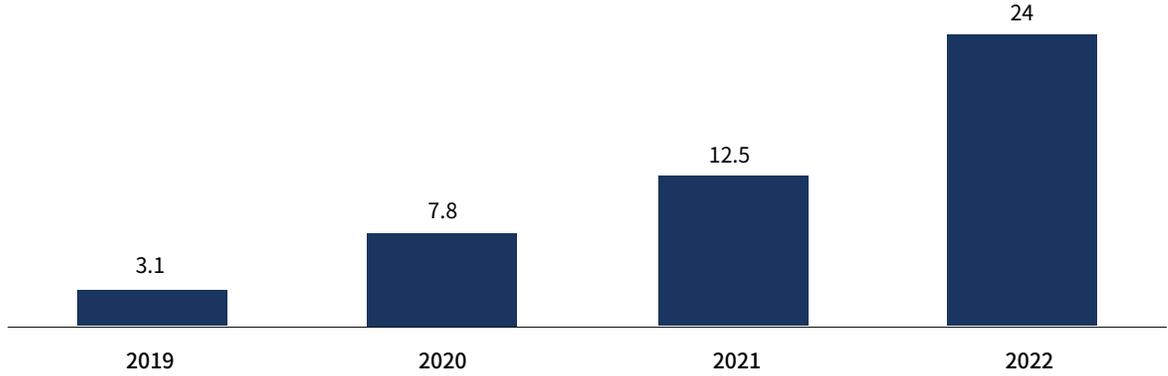
2.1 可持续航煤简介与其减排潜力

可持续航煤有四种主流生产技术路线，分别是油脂加氢（Hydroprocessed esters and fatty acids, HEFA）、气化-费托合成（Gasification/Fischer-Tropsch）、醇制油（Alcohol-to-Jet）和合成燃料（Power-to-Liquid）技术。当前大多数可持续航煤生产企业采用的都是HEFA路线，而其他三种新技术由于技术或产业链尚不成熟，只存在小规模或实验性的生产项目。

- 油脂加氢是第一代真正“可持续”的可持续航煤技术，目前已经实现规模化生产。HEFA主要使用废弃油脂或是专门种植的油料植物作为原材料，经过去除杂质、加氢脱氧、正构烷烃异构化等工序，最终产出与化石燃料类似的碳氢化合物。HEFA的转化率大约为90%，即1吨原料可以产出0.9吨产物。与传统航空燃油相比，HEFA最高能实现约80%的碳减排。
- 气化-费托合成（以下简称费托合成）目前只有小规模商业示范项目，可使用农业与林业废物、城市固体废物、种植的纤维素能源作物等作为原材料。费托合成的原理是将原料气化形成氢气和一氧化碳混合的合成气，再加入费托反应器，在催化剂的作用下形成碳氢化合物。费托合成的转化率大约为20%。据测算，费托合成最高能实现约90%的碳减排。
- 醇制油目前也尚在小规模商业示范项目阶段，目前全球年产量约为100吨左右，未实现规模化量产。醇制油的主要原料为任何可以转化为醇类物质的生物质原料，包括农林废弃物、玉米、甘蔗等。醇制油技术能够将醇类物质通过脱水、低聚、加氢转化以及蒸馏等一系列工艺流程最终转化为可持续航煤¹¹。该技术的转化率约为13%。醇制油的碳减排潜力约为90%。
- 受限于过高的成本，合成燃料技术还在技术发展初期，距离商业化应用距离较远。其主要原料为二氧化碳和使用清洁电力生产的绿氢，能够将绿氢与二氧化碳合成转化为碳氢化合物。规模化量产合成燃料需要廉价、充足的清洁电力作为基础，此外还要辅以成熟的碳捕捉技术，因此短期内很难实现。根据测算，合成燃料技术能达到接近99%的碳减排。¹²

目前全球可持续航煤的产量和使用量都在快速增长。各国的减排政策和市场对气候问题的关注是可持续航煤快速增长的主要驱动力，强化了航司的可持续航煤购买需求。根据IATA的数据，从2019年起全球可持续航煤产量几乎每年都会翻倍，2019年时全球产量为3.1万吨，而2022年时这一数字已经达到24万吨^{13,14}。

图表 3 全球可持续航煤产量 (万吨)



ICAO在此基础上预测，如果各国政策能够继续保持支持力度，2030年全球可持续航煤产能可达1700万吨。¹⁵而按照IATA的2050零碳目标的规划，至2050年可持续航煤需求量将超过3.5亿吨/年。¹⁶

2.2 欧美可持续航煤产业进展

欧美国家在可持续航煤领域内起步较早，在市场中占主导地位，产业发展阶段更成熟，产能和技术也相对领先，一定程度上代表了全球可持续航煤产业的最先进水平。因此，本节将重点梳理欧美国家的可持续航煤产业进展，以供参考。

欧盟产业

欧盟是国际航空市场的主要参与者，产生了全球约15%的航空活动¹⁷，在欧盟积极的减排政策引领下，欧洲的可持续航煤产量也在全球首屈一指。根据落基山研究所统计截至2023年6月，欧盟已建成投产产能约28.6万吨，其中除400吨为合成燃料路线外，其余均使用HEFA技术。另外，根据欧盟航空安全局（European Aviation Safety Agency）估算，如果欧洲所有生物质燃料工厂均调整工艺、最大化可持续航煤生产，那么理论上现有产能可以达到230万吨¹⁸。除了已有产能外，欧盟国家未来还将继续加大对可持续航煤的投资，根据落基山研究所统计截至2023年6月，欧盟境内已投产或已宣布的可持续航煤项目总共产能约400万吨，其中HEFA路线将承担其中280万吨的产能，其他三种新一代技术则将共同承担剩余120万吨产能。

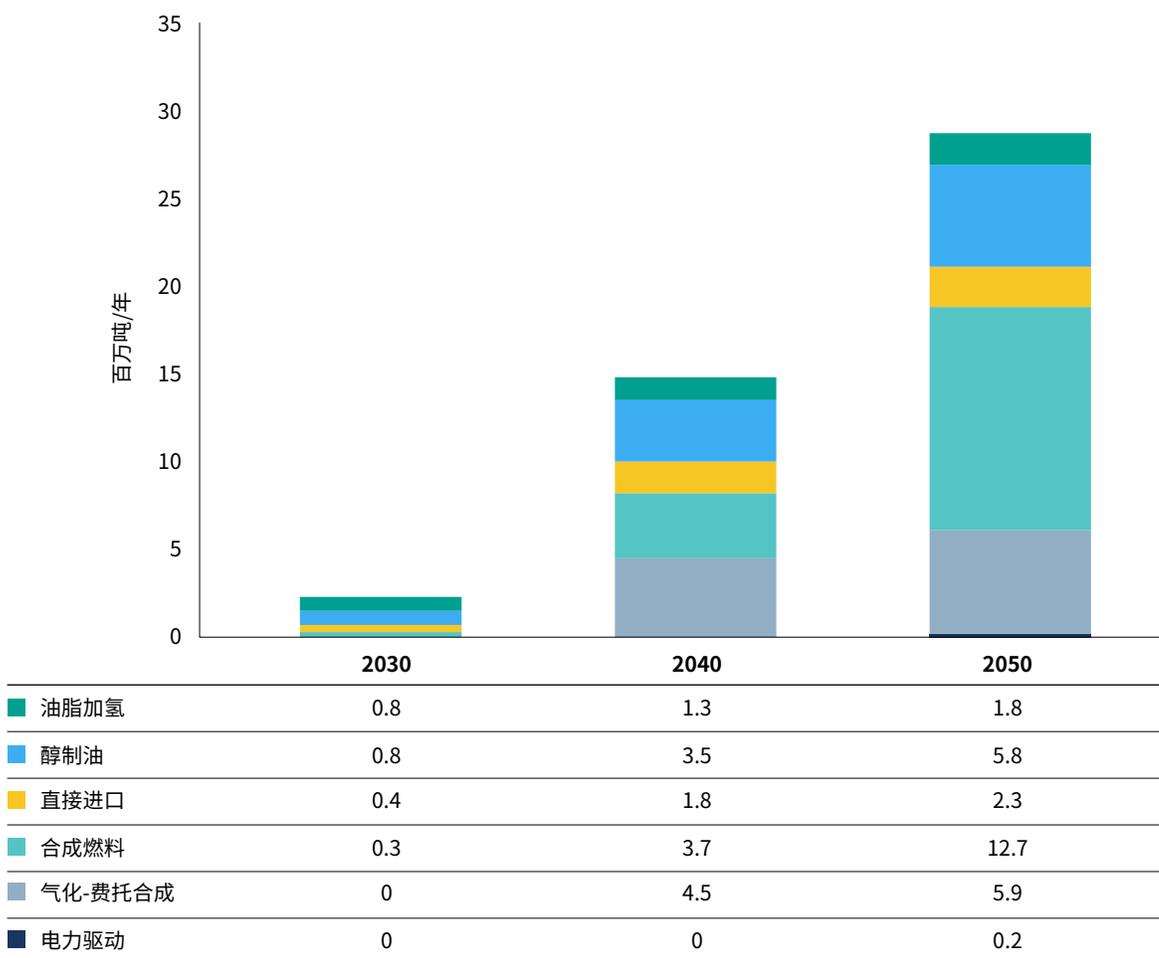
欧盟航空安全局根据欧盟2022年版ReFuelEU政策的预设目标推测，欧盟2030年可持续航煤的需求量将达到230万吨，2040年约为1480万吨，而2050年这一需求量将持续上涨到约2800万吨¹⁹，而在2023年9月ReFuelEU目标提高后，这一数字还会进一步提高。欧盟航空安全局还预测，从技术选择角度来看，HEFA和醇制油技术路线至2030年将满足60%的可持续航煤市场需求，至2040年可持续航煤的主要供应将来源于费托合成、合成燃料、醇制油技术。

图表 4 欧盟可持续航煤规划产能及技术路线 (万吨)



欧盟的可持续航煤生产企业主要是一些老牌化工企业。例如，道达尔能源（TotalEnergies）是欧洲最大的可持续航煤和生物柴油生产商之一，已运营三家可持续航煤工厂。其中最早的La Mède工厂估计年产能可达10万吨，主要使用棕榈树油和厨余油作为原料。与道达尔规模相当的纳斯特（Neste）目前在芬兰设有Porvoo工厂，年产能约10万吨。此外，纳斯特还积极在东南亚和欧洲布局，预计到2023年年底，其在荷兰和新加坡的工厂就将投产，分别为纳斯特带来40万吨和100万吨的新增产能，使其全球总产能达到150万吨。纳斯特使用的原料同样主要来自于棕榈油、厨余油和动物油脂。壳牌目前虽然还没有投产的可持续航煤工厂，但他们计划在2024年至2030年期间在全球范围内建设四家工厂。其中，荷兰和新加坡的工厂将使用厨余油作为原料，值得注意的是壳牌在德国和瑞典的工厂将采用合成燃料技术。以上这些案例表明欧盟的老牌化工企业已经具备一定的可持续航煤生产能力，同时也在积极扩大产能并尝试新一代技术。

图表 5 ReFuelEU预测可持续航煤供给路线图²⁰



美国可持续航煤产业

美国是全世界最大的航空市场，覆盖了全球25%的航空活动。美国的可持续航煤产业虽起步略晚于欧盟，但是在政策目标（将在下一节中介绍）的积极推动下正在迅速扩张，目前可持续航煤产量已经从2021年的1.5万吨跃升到了2022年的4.65万吨²¹。美国已投产的技术路线最为多样，醇制油和费托合成等下一代技术已经实现了小规模量产。全美范围内，已宣布的规划产能共计约520万吨，其中HEFA技术将承担400万吨的产能，剩余部分规划产能分别来源于费托合成和醇制油技术。

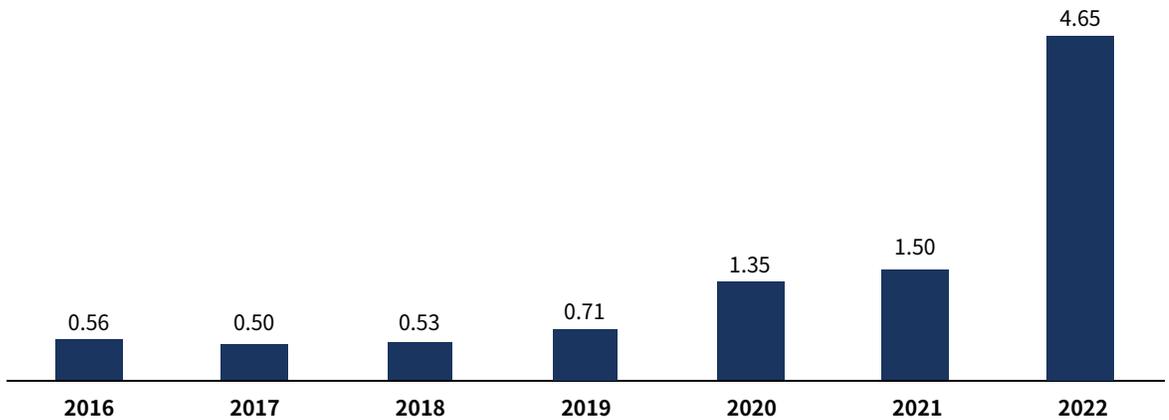
图表 6 美国可持续航煤规划产能及技术路线 (万吨)



不同于欧盟以老牌化工企业为主导的格局，美国的可持续航煤生产企业多为新兴生物质燃料企业，并且美国目前发展的技术路线与欧洲相比也更多元化。World Energy是北美最大可持续航煤生产企业，截至2022年底，其已投产的工厂仅有位于加州的一家，这家工厂使用霍尼韦尔授权的ecofining技术（HEFA），原料为动物脂肪和厨余油，年产能约为8万吨。目前，World Energy正在计划扩大加州工厂的产能并在休斯顿建设新厂，总规划产能可达80万吨。

美国企业在下一代技术的布局上也处在领先地位。比较值得注意的是Fulcrum Bioenergy公司，虽然Fulcrum产量不高，但是是目前全球为数不多的正在使用费托合成技术生产可持续航煤的公司。Fulcrum Bioenergy于2022年5月宣布其位于Sierra的工厂是全球第一个成功利用费托合成技术商业化投产的可持续航煤工厂，其主要原料为城市固废，转化率约为20%，预计每年可利用17.5万吨的原料生产出3.3万吨的可持续航煤。此外，Fulcrum还计划继续建设两家应用费托合成技术的工厂，总产能预计可提升至14万吨²²。而Gevo公司目前拥有一座采用醇制油技术的工厂，尽管产量几乎可以忽略不计，但作为示范性项目仍然具有重要意义。未来，Gevo还计划建设一座16万吨的新醇制油工厂以扩充产能。

图表 7 美国近年可持续航煤产量 (万吨)



2.3 欧美可持续航煤政策

欧盟政策

欧盟可持续航煤产业的蓬勃态势在很大程度上要归功于政策，过去几年中，欧盟颁布了一系列政策措施来支持航空业碳减排，而可持续航煤正是这些措施的核心。

为了应对气候变化，欧盟在2020年提出了欧洲绿色新政（European Green Deal）长期发展战略，旨在通过立法的形式确保2050年实现碳中和。在此战略下，欧盟先后提出了一系列政策提案，统称为Fit for 55一揽子政策组合（简称FF55，其中“55”指欧盟将在2030年前实现温室气体净排放量与1990年相比至少减少55%的中期目标）。其中，欧洲碳排放交易体系（EU Emissions Trading System, ETS）的修改提案、ReFuelEU Aviation提案和2021修订版的能源税指令（Energy Taxation Directive, ETD）对可持续航煤产业的影响最大。

表格 1 欧盟主要可持续航煤政策

FF55政策提案名称	政策提议	当前政策方案	FF55政策提案方案
欧洲碳排放交易体系(ETS)更新	扩大ETS在航空领域覆盖范围	欧洲内部航线	2027年视情况可能扩大至来往欧洲航线
	减少ETS免费碳配额比例	85%	2026年后不再提供免费配额
	使用ETS资金支持SAF产业	无	使用ETS收入补贴SAF生产企业, 预计总额16亿欧元
	为SAF提供免费排放许可	无	2024年起额外对使用SAF的航司提供免费排放许可
RefuelEU Aviation提案	强制要求航空燃料供应商掺混使用SAF	无要求	2025 - 2050年间掺混比例从2%逐步提高至70%
能源税指令(ETD)更新	提高化石航煤税率	免税	2023-2033年间逐步提高至€10.75/GJ

* 政策梳理更新于2023年10月

ETS的作用对象是航空公司，FF55提案要求扩大碳市场的覆盖范围和付费配额比例，增大航司的碳成本压力，压缩传统航空煤油的成本经济性优势。同时提案还为使用可持续航煤的航司提供碳成本豁免和资金奖励以增加可持续航煤的吸引力；RefuelEU Aviation提案针对的则是航空燃料供应商，提案要求供应商在欧盟出售的航空燃料中必须掺入一定比例的可持续航煤，比例要求将从2025的2%逐渐增加至2050年的70%；ETD更新提案则要求对传统化石航煤征税，由于历史原因，航煤一直不在欧盟能源税的征收范围内，这与欧盟航空低碳转型的目标背道而驰，能源税指令更新提案旨在纠正这一错误。

美国政策

不同于欧盟以强制性目标和惩罚性措施为核心的政策体系，美国的可持续航煤政策更多以鼓励性、支持性为主，主要运用财政补贴、税务减免等政策手段。2021年，美国政府发布了《美国航空业气候行动计划》²³，该计划确认了2050年美国航空业碳中和的长期目标，此后，美国先后发布了可持续航空燃料大挑战路线图(Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge)、可持续燃料标准(包括Renewable Fuel Standard 和 Low Carbon Fuel Standard, 简称RFS和LCFS)、通胀削减法案(Inflation Reduction Act, 简称IRA)等三个主要政策。

表格 2 美国主要可持续航煤政策

政策名称	政策措施/目标	生效时间
通胀削减法案IRA	对使用SAF的企业提供税务减免。每加仑SAF(约3kg)可抵税1.25 - 1.75美元	2023-2024
	对SAF生产企业提供税务减免。每加仑SAF可抵(1.75 * 减排系数)美元	2025-2027
	对SAF研发项目提供补贴, 共计2.9亿美元	2022-2026
可持续燃料标准RFS、LCFS等	类似于双积分政策。航空燃料供应商在本土销售可持续燃料会产生环境权益, 可进入市场进行交易。除了全美通行的RFS市场外, 加州等地也有自己的LCFS市场, 与RFS并存	长期有效
可持续航空燃料大挑战路线图	本土产量达到30亿加仑(900万吨)	2030
	本土产量达到350亿加仑(超1亿吨)	2050

* 政策梳理更新于2023年10月

2022年发布的《可持续航空燃料大挑战路线图》提出了2030年本土产量达900万吨、2050年产量达到1亿吨、航空燃油100%加注可持续航煤等较为激进的目标，为产业发展规划了总体路线；可持续航煤燃料标准是一个类似于双积分政策的市场化机制，政策要求汽油和柴油供应商在燃料中混入一定比例的生物燃料或低碳燃料，如无法实现，则必须向超额混入的企业付费购买RIN（Renewable Identification Number）或支付罚金。而航空燃料企业一方面不受强制混入要求的约束，一方面其使用的可持续航煤仍可以生成RIN并以此获利；2022年发布的通胀削减法案则系统性地为可持续航煤的生产、应用和研发企业提供税务减免和财政补贴。除此以外，美国部分州政府也出台了各自的可持续航煤政策。



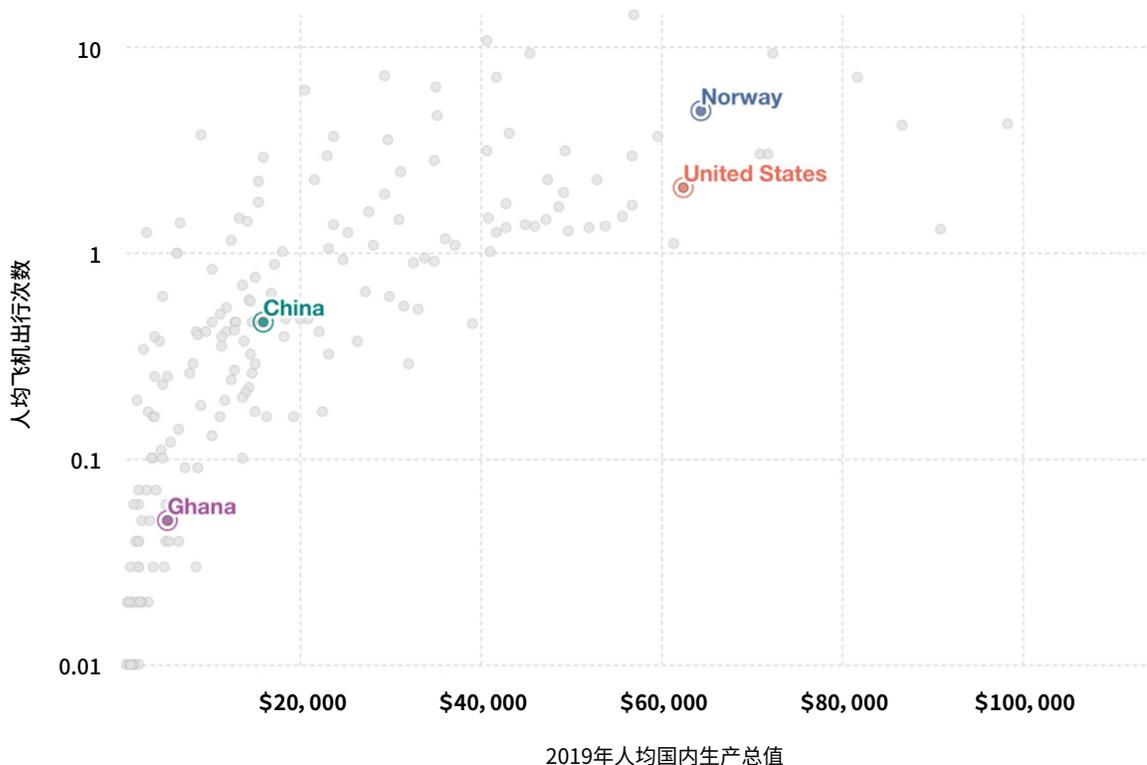
(三) 我国可持续航煤产业发展趋势

与欧美相比，我国在对待可持续航煤的态度上更加谨慎，目前尚未发布明确的长期目标和支持措施。不过，在能源转型和双碳目标的支撑下，可持续航煤在航空碳减排中的作用正得到越来越多的重视。同时，由于各国航空业之间存在紧密的联系，全球可持续航煤产业的发展对我国的影响已经逐渐显现，国际组织和欧美国家对于航空碳排放的严格要求既给我国航空业带来了更大的减排压力，也给我国生物质燃料企业创造了更大的发展空间。在这些因素的影响下，我国可持续航煤产业即将经历一段高速发展期。

3.1 国际政策影响下的我国可持续航煤市场

由于航空业还处在发展中阶段，碳排放仍在快速增加，我国面临着更大的航空减排压力。2019年，我国年人均航空出行次数仅为0.47，距离发达国家还有一定差距。但预计随着经济的发展和出行需求的快速增加，这一数字到2050年时将达到1.5²⁴。据中国商飞公司发布的《民用飞机中国市场预测年报2019-2038年》预测，到2038年，为满足运量增长需求，中国客机机队规模将达到8678架，较2021年增长超过100%。而伴随着航空需求而来的是日益增长的航空燃油消耗和碳排放。在2014到2019年间，中国航空煤油年消耗量从2207万吨增长到了3684万吨，5年间增长了67%，而航空碳排放也从2014年的约7000万吨增长到了2019年的11605万吨²⁵。

图表 8 2019年航空旅行次数与人均GDP对比²⁶



在航空碳排放与日俱增的同时，我国航空业在国际上面临的碳减排压力也在持续增加。根据ICAO制定的规则，我国将于2027年正式参与国际航空碳抵消和减排计划（CORSIA）。该计划旨在将全球国际航线碳排放控制在2019年水平的85%以下，超过的部分航空公司必须以碳抵消的方式予以控制。根据《民航行业发展统计公报》

的周转量数据计算，2019年，我国国际航线碳排放大约为4060万吨，占我国航空业总排放量的35%。若我国航空业保持现有的增长速度，到2033年时，我国仅在国际航线上的减排责任就将达到1618万吨二氧化碳。如此规模的碳排放很难依靠效率提升和碳抵消来完全消除，航空业必须要依靠可持续航煤来从源头上实现碳减排。

表格 3 **CORSIA对我国航司的减排要求估算**

	2019	2027	2033
我国国际航线碳排放(万吨)	4060	4660	5800
行业平均排放增长因子	NA	27%	39%
我国平均排放增长因子	NA	26%	40%
我国减排责任(万吨)	NA	1088	1618
合国内SAF需求*(万吨)	NA	340	506

3.2 我国可持续航煤相关政策

为了有效应对国际航空业的减排压力，同时助力双碳目标的实现，我国也通过一系列政策的制定的方式促进航空行业的加速减排。一方面，航空业已经被纳入了碳市场重点碳排放行业名单中，为未来通过市场机制进行碳排放控制奠定了基础。另一方面，2022年发布的《“十四五”民用航空发展规划》则正式将合理有效管控行业碳排放、完善航空碳排管理制度、推动建立符合国情和行业发展阶段的航空碳减排市场机制确定为民航业在“十四五”期间的主要任务。在这一背景下，十四五规划和相关政策中多次出现了与碳减排和可持续航煤相关的内容：

- 《“十四五”民航绿色发展专项规划》明确设立了至2025年可持续航煤消耗量需达5万吨的目标。
- 《“十四五”民用航空发展规划》提到要推进可持续航煤常态化试点和可持续认证机制，以及推动建立符合国情和行业发展阶段的航空碳减排市场机制。
- 《“十四五”生物经济发展规划》提到鼓励可持续航煤的试点项目。
- 《2030年前碳达峰行动方案》指出要大力推进先进生物液体燃料、可持续航空燃料替代传统燃油。
- 国家发改委印发的《绿色低碳先进技术示范工程实施方案》提到在过程降碳端推进可持续航空燃料的研发生产供应等示范项目。
- 民航局航空器适航审定司牵头起草了《航空替代燃料可持续性要求（征求意见稿）》，该举措主要着眼于环境、社会和经济三个方面的可持续标准认定，旨在建立既满足国际通用要求又适合中国情况的航空替代燃料的可持续认证体系建设，而非盲目追随现有的国际既定标准。

考虑到我国航空业仍处于快速发展阶段，且2020年后受疫情影响较大，为了避免过于激进的可持续航煤政策给航空业带来太大的经济压力，我国目前尚未发布明确的可持续航煤发展时间线。不过，多个政策文件已明确表明政府对可持续航煤产业发展的积极支持态度，这一明确的政策导向增强了市场信心，激发了企业积极投入可持续航煤的研发和推广，也为可持续航煤产业的投资扩能提供了强有力的动力和方向。

3.3 我国可持续航煤的发展现状

我国的可持续航煤产业起步较晚，目前仍然处于早期探索阶段。在这一阶段，产业主要以小规模实验性应用项目为主。2011年，镇海炼化首次利用HEFA技术生产出可持续航煤，标志着我国初步具备了生产可持续航煤的能力。在2011至2017年期间，镇海炼化的可持续航煤装置作为示范项目，分批进行了数次试生产，主要提供给国内主要航司的实验性飞行项目。而到2018年时，因为经济可行性和市场关注度的问题，生物航煤需求不足，试点项目暂停，可持续航煤在我国的发展进入相对停滞期。

随着政策和市场对可持续航煤的关注度逐渐升温，产业在短暂的停滞期后迎来了快速发展的阶段。2021年，《“十四五”民航绿色发展专项规划》发布，其中首次提出了到2025年累计消费可持续航煤5万吨的目标，明确了我国对于可持续航煤的鼓励态度。同时在国际上，随着以欧盟RefuelEU计划为代表的航空减排政策陆续推出，全球对可持续航煤的需求大幅提升。在政策和市场的双重推动下，相关产业迅速做出了反应，镇海炼化在2022年重启可持续航煤项目并实现了规模化生产，随后嘉澳环保、东华能源等传统生物质燃料龙头企业也相继宣布开始进行可持续航煤的生产和研发布局。

截至2023年8月，镇海炼化已经实现了可持续航煤量产，产能为10万吨/年，主要使用HEFA技术处理餐余油脂。易高-怡斯莱在张家港建设的10万吨产能的HEFA装置也已经建成，主要面向国际市场，并且已于2022年第四季度通过中国石油国际事业（伦敦）公司将2000余吨可持续航煤出口至欧洲。四川天舟的产能为20万吨/年的HEFA项目将于2023年年底完成中交。其余可持续航煤项目将在未来1-5年内逐步建成投产。截至2023年9月，我国已宣布的可持续航煤项目总规划产能约390万吨。在目前已经建成或已宣布的项目中，HEFA技术路线的总产能为350万吨，仍然是行业最主流的技术路线选择。其中，跨国企业霍尼韦尔将与三家本土企业合作，以技术提供商的方式授权HEFA技术工艺，总规划产能达230万吨。除此以外，目前已有的生物柴油企业也可以通过工艺改造转而生产可持续航煤。

表格 4 我国可持续航煤产能

	厂商	规划产能(万吨)	技术路线
已投产	镇海炼化	10	HEFA
	易高-怡斯莱	10	HEFA
尚未投产/规划阶段	金尚环保+霍尼韦尔	30	HEFA
	东华能源+霍尼韦尔	100	HEFA
	嘉澳环保+霍尼韦尔	100	HEFA
	国家电投+国泰航空	20-40	合成燃料
	山东海科化工	50	HEFA
	四川天舟	50	HEFA

图表 9 我国可持续航煤规划产能及技术路线 (万吨)



在其他可持续航煤技术路线方面，国家电投与国泰航空计划打造我国第一个合成燃料航煤项目，该项目计划在2024-2026年期间建造四座可持续航煤工厂，利用国电投的绿色能源优势使用绿电制氢合成生产可持续航煤，每个工厂产能约5-10万吨。目前国家电投已经开始建设位于新疆塔城的年产1万吨可持续航煤的示范项目，该项目利用120万千瓦的风电制绿氢，并通过CCUS技术捕捉二氧化碳，最终将两者合成为可持续航煤，实现了对新疆本地的可再生电力资源的最大化本地消纳和高附加值利用。

除了生产企业，可持续航煤产业的下游环节在逐步走向成熟。目前空客公司与中航油签订了为期三年共3000吨的国产可持续航煤采购协议，用于空客天津基地进行飞机交付和测试。中航油（北京）机场航空油料公司近期开始进行可持续航煤配套工艺流程改造项目，也为国内机场实现常态化供应可持续航煤做出了重要铺垫。

图表 10 中国可持续航煤产业发展历程

第一阶段：
早期探索

第二阶段：
快速发展



(四) 下一代可持续航空煤油技术的路线选择

在各国政府和国际组织提出的航空低碳目标下，全球市场对可持续航煤的需求将大幅增长，也对其生产和供应能力提出了更高的要求。在当前的四种主要生产技术中，HEFA技术最成熟、产业链最完善、生产成本最低。然而，由于HEFA技术受到有限油脂资源的限制，随着餐厨废油供给逐渐见顶，HEFA必然会面临产能不足和售价过高的挑战。因此，提前研发下一代技术可能是我国可持续航煤行业长期发展的关键。

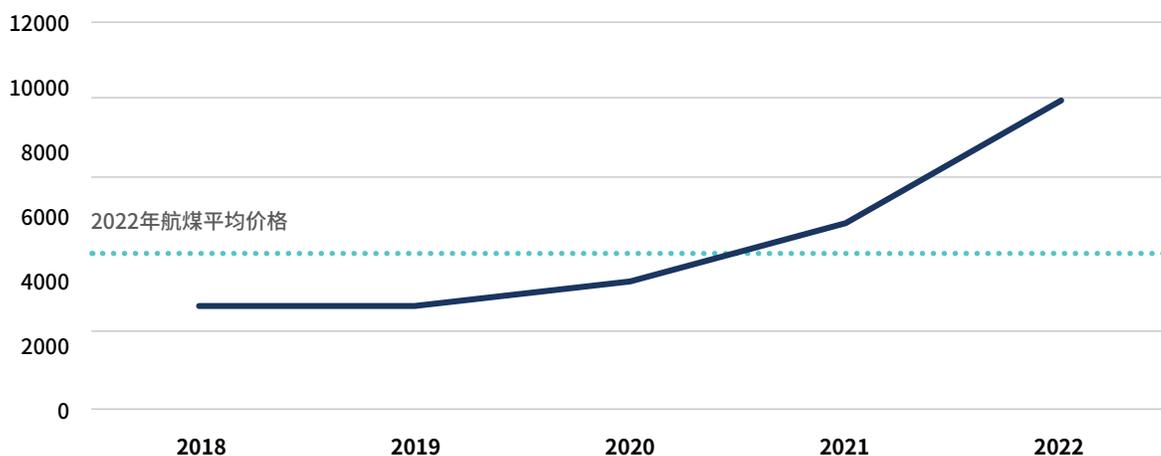
4.1 HEFA技术路线的局限性

HEFA技术与传统石油化工中利用催化加氢将重质油转化为轻质油的过程类似，同样是将长碳链的生物油脂催化加氢，得到短碳链的轻质油，产物主要为生物柴油。依托于成熟的石化工艺，这项技术的壁垒不高，甚至一些HEFA工厂就是由传统的石油化工加氢装置改装而来。由于工艺流程较短，HEFA的生产成本也十分可控，远低于其他三种技术。因此，在可持续航煤需求增加的背景下，HEFA成为了各路企业入局的首选技术路线。

然而，HEFA产业正面临着原料短缺的难题。虽然我国的可持续航煤规划产能高速增长，但是，由于原材料供给紧张，实际产量和规划产能存在较大差距。以镇海炼化为例，虽然其在2022年实现了规模化生产，且连接到空客、国航、多彩贵州等多家企业与航司的订单，但由于餐厨废油短缺，全年产量仅为600吨左右，远低于10万吨的规划产能。

2022年，受油价上升以及欧美减排政策的影响，全球生物质燃料需求飙升，我国餐厨废油资源出现了供不应求的情况。每吨废油的价格甚至一度超过了1万元²⁷。而传统航空煤油的价格约5000元/吨，即便在2022年燃油价格大幅上涨的情况下，也只增长到了每吨8000元左右。因此，废弃油脂供给问题成了我国可持续航煤产业发展的首要难题。

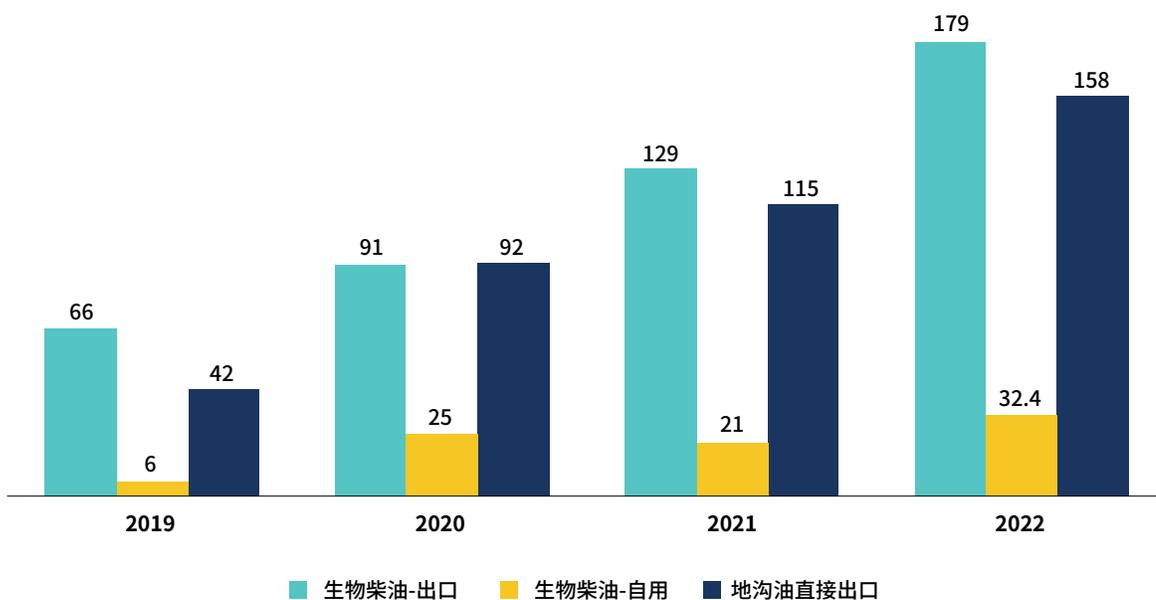
图表 11 我国废弃油脂价格增长趋势 (元/吨)



我国是食用油消费大国，2021年消费量达到3700万吨²⁸，占全球食用油消费的25%。同时，我国也是主要废弃油脂资源国，假设废弃油脂产率约为30%，年理论供应量约为1100万吨。受限于经济性和收集体系的完善度，目前每年仅有约300到400万吨的废弃油脂被规范化回收利用。

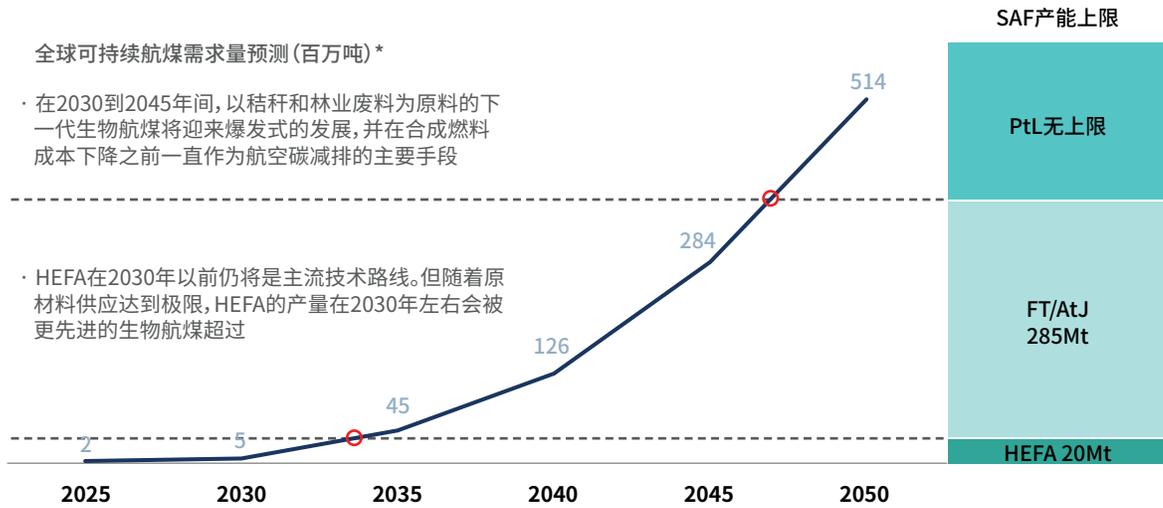
而这400万吨废弃油脂资源中，只有极小部分被留在了我国。根据中国海关总署及相关研究院统计，约有一半废弃油脂会被出口至欧美国家作为原料，另一半则会在国内被加工生产为生物柴油后再出口，仅有约10%被用于满足国内的生物柴油需求。而随着欧美国家对生物柴油以及其他生物燃料的需求不断升高，我国的废弃油脂以及生物柴油出口量也逐年提升。2022年，我国出口的生物质柴油及废弃油脂总共337万吨，自用32.4万吨，已接近供给极限。²⁹

图表 12 中国废弃油脂利用情况 (百万吨/年)



由于HEFA技术路线下的可持续航煤同样需要废弃油脂作为原料，同时未来几年，多家以HEFA为技术路线的企业相继投产且产能相对较大，未来废弃油脂的需求量将达到每年400万吨以上。而即便将我国全部的废弃油脂和加工产能都用于可持续航煤，其最终产量也只能满足航空业的短期需求。按照90%的转化率、产物中可持续航煤占比50%计算³⁰，400万吨废弃油脂仅能够产出约180万吨可持续航煤。当供给受限时，需求的不断增高和市场竞争的日益激烈将进一步推高生物质燃料的成本，影响可持续航煤产业的发展。

图表 13 技术选择与全球可持续航煤需求预测 (百万吨/年)



因此, 在能源转型和双碳目标的驱动下, 我国可持续航煤的发展既要兼顾自身产业转型的需要、国际航空碳减排政策的要求, 又要充分考虑原材料长期稳定供应能力和市场价格的变化趋势。在这样的环境下, 提前布局下一代可持续航煤技术已经成为了支撑行业长期有序发展的必要选择。

4.2 下一代可持续航煤的三个技术方向

如前文所述, 目前行业中主要有三种具备长期发展潜力的技术路线, 分别是气化-费托合成、醇制油以及合成燃料技术。

气化-费托合成技术

气化-费托合成技术能够将秸秆、木材、煤炭甚至城市固废等材料通过气化催化的步骤合成为生物质燃料, 由德国化学家Franz Fischer 和Hans Tropsch在1925年开发, 在煤制油领域中已经相对成熟。相比于HEFA, 费托合成最大的优势在于其原料的多样性。除了煤炭, 理论上费托合成可以将任何碳氢化合物转化为液态燃料, 不受特定原料限制。这样的特点使得费托合成技术拥有很高的产能天花板, 仅秸秆一项原料在我国的产量就超过8亿吨, 即使只有10%的秸秆能够被用于生物质燃料生产, 按照费托合成转化率计算, 对应的产能也将超过1000万吨。

不过相较于HEFA, 利用费托合成技术生产可持续航煤目前还存在成本上的困难。一方面, 费托合成技术的生产过程和工艺流程更长更复杂, 使得其生产成本相对较高。另一方面, 尽管费托合成技术可用的原料更多样, 但相关的收集处理体系在我国仍处于相对空缺的状态, 使得当前的可收集总量和成本都不够理想。

根据研究团队统计, 截至2023年8月, 全球已宣布的费托合成计划产能已达136万吨, 多集中在北美和英国, 亚洲仅有一家北美初创公司WasteFuel计划在菲律宾建厂。其中, 北美的Fulcrum Bioenergy已正式投入商业化运营, 加拿大的Enerkem公司也正在建设, 预计2023年投产。一般情况下, 费托合成的转化率约为10%-15%。³¹ 碳排放方面, 利用费托合成生产的可持续航煤的温室气体排放约为5.3-28.5克二氧化碳/兆焦耳, 相当于能够实现航空燃料全生命周期67%-94%的碳减排。

醇制油技术

醇制油技术能够将淀粉、木质纤维素等糖类生物质转化为醇类, 并通过脱水低聚的过程形成生物燃油。这个过程类似于石油精炼和石化行业中的催化环节。与费托合成类似, 醇制油技术也可以使用秸秆等纤维素材料作为

原料，因此同样可以部分解决HEFA原材料供应不足的问题。在成本方面，同等产量下，应用醇制油技术的资本性支出较费托合成要低，但是仍高于HEFA技术。根据估算，对于中小产量的设施，费托合成的理论生产成本比醇制油的略高，但是在更大产量级，醇制油技术的成本则更高。³²

醇制油技术的生产成本受原料选择的影响很大。Yao等人的研究显示，假设乙醇为中间产物，甘蔗是成本和风险最低的原料，其次是玉米粒和柳枝稷。³³一项由美国联邦航空管理局领导的技术评估，比较了不同中间醇类产物的成本经济性。尽管各种醇类在理论上都可以作为醇制油转化的中间体，然而，由于生成的醇类不同，对应的生产设施存在显著差异。总的来看，最终醇制油产可持续航煤的成本很大程度上取决于生产中间醇类产物的转化效率，而且生产中间醇类产物的成本受到发酵单位（fermentation unit）和原料价格的影响。³⁴

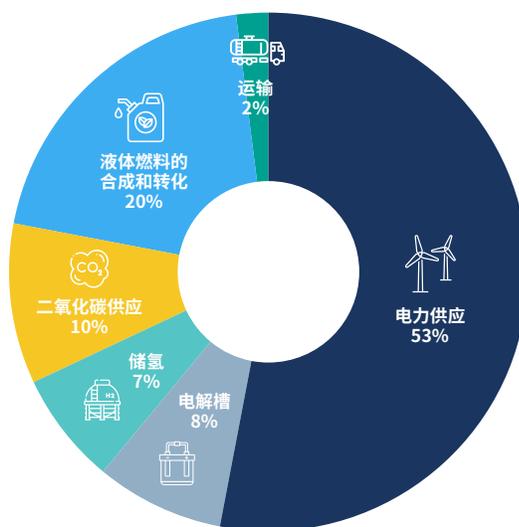
截至2023年8月，全球已宣布的醇制油的计划产能约96万吨/年。其中仅美国的Gevo的小规模示范性项目已投产，另有一家美国企业LanzaJet仍在建设中，预计2023年投产。除了欧美外，亚洲仅有一家日本企业宣布将使用醇制油技术生产可持续航煤。

合成燃料技术

合成燃料技术实际上以三个重要技术为基础，既可再生电力水解制氢、碳捕捉和利用、以及氢气和碳源合成可持续航煤技术，其中每一项技术本身都对全社会的能源转型和低碳发展意义重大。合成燃料技术不受任何生物质原料的限制，只需要可再生电力和二氧化碳就可以生产，一旦实现大规模应用，所有的交通碳排放问题都将迎刃而解。

以当前各国的技术发展水平来看，合成燃料距离大规模应用还很遥远。合成燃料目前的问题主要体现在生产环节较多、工艺效率有限、以及各环节技术成熟度参差不齐等三个方面，使得合成燃料的整体生产成本偏高。尽管近年来光伏、风电和电解槽等关键技术和设备已经实现了大幅降本，但合成燃料的价格仍然与传统燃料相距甚远。根据德国联邦环境署的估算，2021年9月普通航煤市场价格约为每吨600欧元³⁵，而采用合成燃料技术生产的可持续航煤，即使是在最乐观的预测情景下，最低价格仍达到每吨1000欧元，接近普通航煤的二倍。

图表 14 合成燃料技术成本分布估算³⁶



合成燃料技术在欧洲起步较早，截止至2022年7月份，仅欧洲内部计划产能已达43万吨/年。其中位于德国的Atmosfair已于2021年率先投产，项目利用2.5兆瓦的风力发电设施进行生产，产品供给汉莎航空。在中国，国家电投已于2023年7月在新疆塔城开始建设年产1万吨的合成燃料可持续航煤示范项目。

4.3 我国下一代可持续航煤技术选择

在三种可持续航煤技术中，世界各国的发展侧重点各有不同，例如美国凭借自己农业与生物质大国的地位更青睐醇制油技术，德国则依靠自身在新能源与化工领域的基础出台了多项政策以推动国内合成燃料产业的发展。而我国农业资源丰富、化工基础良好、航空市场蓬勃发展，同时在煤制油、电解制氢等技术领域都处于国际前沿水平，因此我国应当以费托合成与合成燃料技术为主要发展方向，其中更成熟的费托合成技术将作为下一代可持续航煤技术取代HEFA，成为未来几十年中航空业最重要的低碳燃料来源。

短期内，使用生物质资源的费托合成技术是更现实的选择。一方面，费托合成技术可以充分发挥我国农林业生物质资源较为丰富的优势，利用秸秆等原材料大幅提高可持续航煤产能上限；另一方面，我国费托合成技术相对成熟，依托于煤制油技术的产业基础，原有的费托合成装置可以快速转型，以较低的成本生产生物质燃料。利用这两点优势，依托于费托合成技术进行可持续航煤的生产能够实现比全球其他国家更高的效率以及更低的价格。

从长远的角度看，合成燃料技术是航空行业实现零碳转型的最终解决方案。在摆脱以生物质为基础的生产流程之后，可持续航煤的产能将不再受到原材料产量、生物质生长周期等天然因素的限制。而凭借未来廉价的可再生电力资源，合成燃料也有希望重新将航空燃料的价格拉回到与传统化石燃料相当的水平。不过，想要实现这样的愿景，我国首先需要完成电力系统由化石能源向新能源的全面转型，在此基础之上还需要实现廉价且普遍的碳捕集与封存利用（CCUS），只有这样合成燃料的大规模生产与应用才有推广的基础。

考虑到当前技术成熟度和原料供应的限制，以及中国绿色能源的发展现状，报告认为未来我国的可持续航煤发展将分为三个阶段：

- **近期（2023–2035）：HEFA为主，费托与合成燃料以小规模试生产的形式作为补充。**
HEFA技术较为成熟且已有可观的规划产能，最具近景市场可推广性，有潜力带动可持续航煤消费侧市场的规模化发展。而受限于成本、技术成熟度等因素，费托合成和合成燃料技术在这一阶段很难具备大规模生产的条件。
- **中期（2035–2050）：费托燃料替代HEFA，合成燃料技术逐步加速。**
随着HEFA产能见顶，进一步的可持续航煤供给只能由费托燃料补充。依托于我国的资源和技术优势，费托可持续航煤的生产成本将逐步降低至与HEFA平价，甚至有可能比HEFA更低。同时，随着绿电制氢、碳捕集等技术的成本下探，合成燃料技术的经济性也将逐步改善。
- **远期（2050–）：合成燃料或替代能源成为主流，航空业最终实现100%零碳。**
在绿电制氢规模化、生物质原料供应已基本达到饱和的情况下，合成燃料技术凭借其产能和成本优势将占据可持续航煤市场的主流地位，而借助可持续航煤和其他替代能源技术，我国航空业也将在未来实现全面零碳转型。

然而，考虑到费托合成技术生产可持续航煤的概念刚刚起步，相关技术和配套产业都不成熟，在短时间内实现实践应用和大规模推广存在一定的难度。一方面，尽管费托合成技术理论上可以使用更廉价的原材料，但相关原材料供应产业还处于拓荒阶段，大量廉价原材料目前并不能得到有效的收集和处理，这不仅有可能直接导致最终的原料成本反而高于传统的餐厨废油，还同时限制了费托合成可持续航煤的产量潜力。另一方面，费托合成制航煤相关技术还未得到充分实践，配套产业不成熟，这些因素也推高了生产成本，影响了燃料供应商以及航空公司采购费托燃料的意愿。因此，如何充分发挥费托合成的优势，同时解决原料供应和成本经济性两方面的挑战，就成了费托技术能否顺利推广的关键。

(五) 原料——利用秸秆拓高可持续航煤产能上限

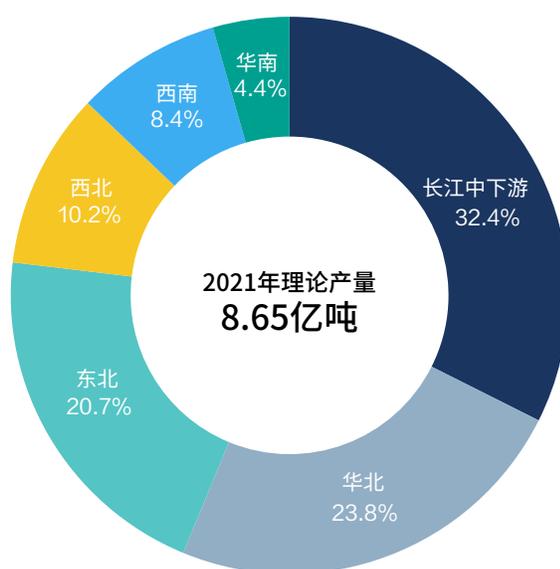
理论上，费托合成技术具有原材料价格低廉、供给规模大、生产技术相对成熟等优势，与HEFA技术有限的产能相比，费托合成技术在我国理论产能能够超过2000万吨，足以支撑航空业的中长期低碳转型。不仅如此，可持续航煤产业还能够与我国农业、林业产生良性互动，带来农民增收、资源充分利用、改善农田病虫害等多方面的益处。

在原材料方面，我国丰富的农业废弃物为费托可持续航煤提供了广阔的未来发展空间。费托合成技术可以使用多种植物基材料作为原材料，煤炭、农业废物、林业废物、甚至城市建材垃圾都可以被用作可持续航煤生产。我国是农业大国，每年产生的秸秆材料超过8亿吨，秸秆具有产量高、产能相对稳定、资源一致性相对较高、碳排放相对较低等优势，因此最有潜力成为费托合成技术的主要原材料。

5.1 我国秸秆利用现状

我国秸秆产量丰富，分布广泛。根据生物质协会的统计数据，2021年我国秸秆理论产量约8.65亿吨，可收集量约7.34亿吨，综合利用量约6.47亿吨，秸秆的产生和利用情况与区域地形地貌、自然资源条件、农业活动、经济特点等因素密切关系，因而具有广泛的区域差异性。据全国主要农区秸秆资源台账统计结果显示，秸秆的产量主要集中在长江中下游、华北和东北地区，秸秆的收集成本也与地区高度相关，一般而言北方地区的秸秆收集成本偏低，如内蒙古地区的部分秸秆利用项目中秸秆价格可低至150元/吨，而南方地区的秸秆秸秆一般偏高，例如江浙地区秸秆最终收购价格可能高达400元/吨。

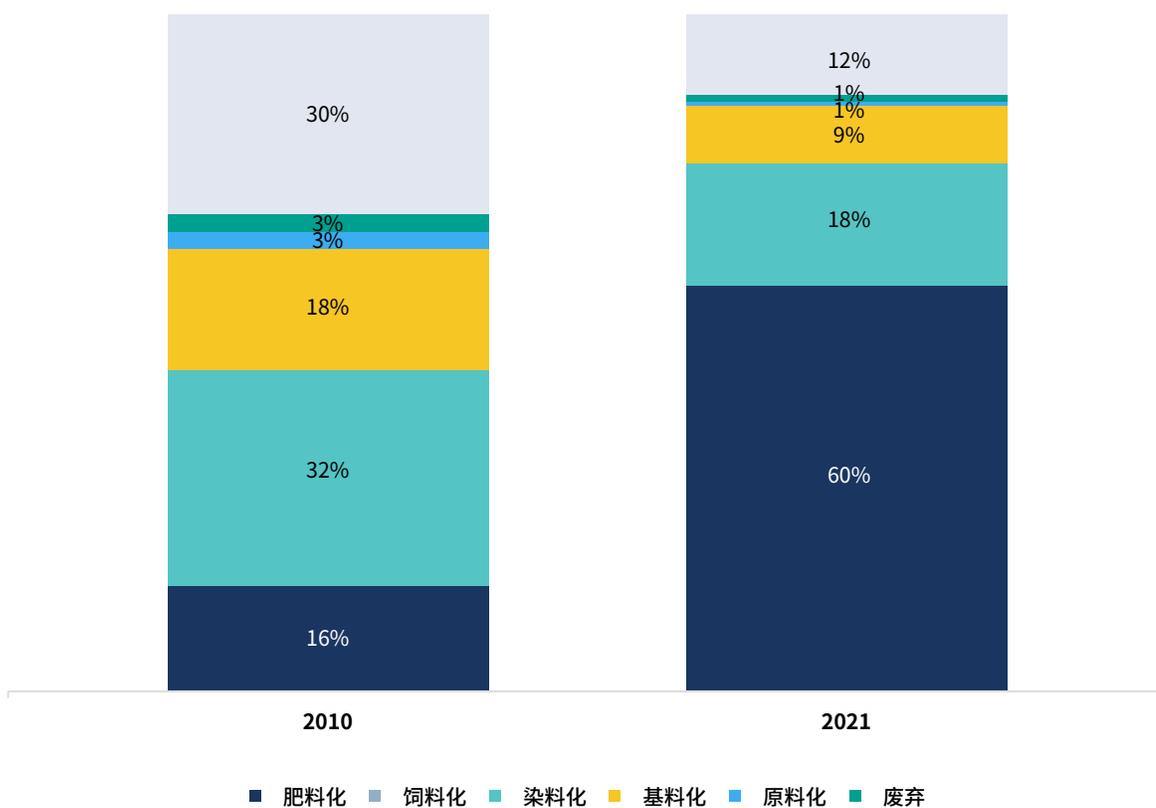
图表 15 我国秸秆产量及分布



秸秆是农村日常生活中主要的燃料、材料和肥料来源，但长期以来未能得到完全有效的利用。2010年时，全国的秸秆综合利用率仅为70.6%，农民为了处理多余的秸秆废料，曾经十分流行将秸秆就地焚烧，这在当时形成了非常严重的空气污染问题。

如今，秸秆焚烧已经被明令禁止，我国转而鼓励秸秆“肥料化”还田处置，要求各地因地制宜推行秸秆翻埋还田、碎混还田、覆盖还田等还田措施。根据农业农村部2022年发布的《全国农作物秸秆综合利用情况报告》，我国秸秆综合利用率已经升高到了88.1%，其中，肥料化一项就占到了60%。但是，肥料化并不能完全解决废弃秸秆的处理难题，由于秸秆在还田前无法得到有效的处理，还田后往往会引入病虫害，且秸秆在田地中缓慢发酵会造成温度升高，引起烧苗等问题，还田后反而给农作物产量带来了负面效果。

图表 16 秸秆利用方式对比



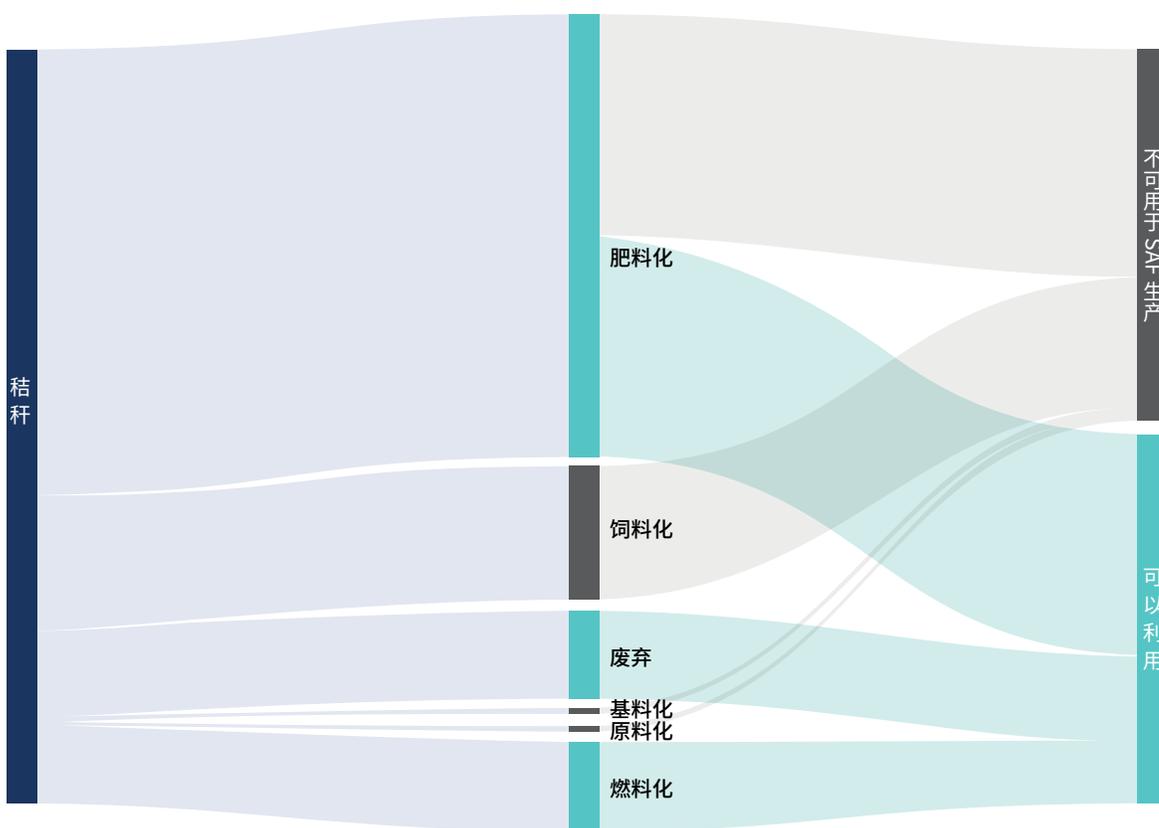
而秸秆能源化为废弃秸秆难处理这一问题提供了新的解决思路。为了进一步加强秸秆综合利用、解决废弃秸秆难处理问题，同时鼓励我国生物质产业发展，秸秆已被确立为我国生物质能源化最重要的原材料之一，2021年起，国家先后发布了多条政策推动加快秸秆能源化利用进程，如《秸秆能源化利用补助资金管理暂行办法》、《国务院办公厅关于印发“十四五”推进农业农村现代化规划的通知》、《农业农村部办公厅关于做好2023年农作物秸秆综合利用工作的通知》等。在这一背景下，可持续航煤产业有望成为政策的有利切入点。

5.2 秸秆制可持续航煤的优势

由于我国秸秆产量相对较大，且存在处理难度较大的问题，将秸秆资源化为可持续航煤不仅能够解决秸秆利用的问题，也能为可持续航煤的生产提供有效的资源支撑。

秸秆是优良的费托可持续航煤原料，其庞大的产量有潜力完全满足我国的航空燃料需求。即使只考虑燃料化和废弃的秸秆，我国可利用的秸秆产量每年也能达到1.9亿吨。如果这部分秸秆能够被有效收集利用，那么按照15%的转化率计算，最终可以产出约2800万吨可持续航煤，远超HEFA路线的理论产能。而如果目前肥料化的秸秆也能够有50%被用作可持续航煤生产，那么最终理论产能将超过6000万吨，相比之下，我国每年航空燃油总需求不超过4000万吨。

图表 17 2020年全国秸秆利用情况



另一方面，利用秸秆生产可持续航煤不仅有希望解决秸秆难处理的问题，同时还可以为农民提供额外的经济补偿，实现农民收入增加，促进农村低碳公平转型。当下，废弃秸秆基本上不能为农户创造任何价值，秸秆直接还田还可能带来隐患，创造负价值。而传统的秸秆能源化利用形式收益低、成本高，社会意义大于经济效益，对农户而言吸引力有限。相比之下，可持续航煤是一种高附加值、高需求量的燃料产品，将秸秆制成可持续航煤理论上能够创造更多的价值，为农户提供新的收入来源；而其庞大的市场也能够产生规模效应，推动秸秆回收产业链的规模化和规范化，带动全国秸秆收集体系的建立，不仅可以直接增加农村就业机会，还可以进一步降低秸秆处理的难度，形成互利共赢。

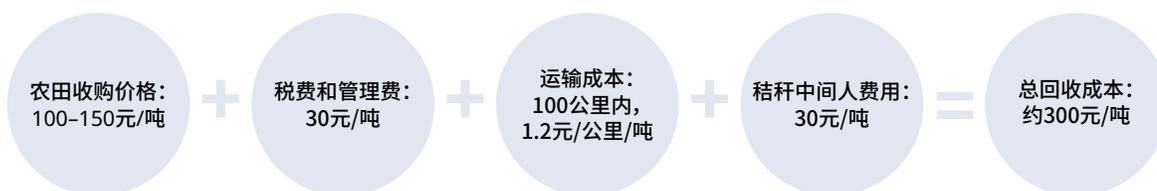
5.3 秸秆利用难点

尽管长远来看使用秸秆生产可持续航煤能够产生多方面的收益，但短期内秸秆的有效利用还面临着供应不足和采购价格高等实际问题。这两方面的问题不仅推高了末端企业的秸秆应用难度，同时还打击了中游企业参与秸秆收集市场的热情，形成了恶性循环。

供应量方面，秸秆的实际收集量与农田的理论收集量往往存在巨大差距。以镇海炼化所在的宁波市为例，统计数据显示，宁波市2021年粮食产量67万吨，按照水稻与秸秆草谷比1: 0.9计算，宁波及周边地区每年秸秆产量可以达到60万吨。然而在对宁波本地生物质利用企业——明州生物质发电有限公司的实际调研过程中，研究团队了解到，由于宁波本地农田大多小而散，且以水稻田为主，秸秆收集难度较大，农民一般仍会选择将秸秆直接还田。因此当地秸秆实际收集量不足10万吨。

除了供应量，低下的收集效率还会推高最终的采购成本。在现有体系下，秸秆的田间收购价格并不高。由于田间的秸秆在未能及时处理时反而会会影响未来的收成，农民很乐意以低廉的价格出售秸秆，如果秸秆中间人能够帮助收集，甚至有时可以免费赠送。但本次研究的调研结果显示，大多数生物质利用项目最终的秸秆收购价格往往超过300元/吨，这表明低效的收集过程才是秸秆采购中成本支出的大头，出售秸秆的收益也未能有效传导到农民手中。

图表 18 秸秆收集的大致成本构成



秸秆之所以难以收集，其原因与我国的农业特点有关。与美国、巴西等农业国家不同，我国的农田多而散，同一片区域内的作物种植种类复杂多样，这样的农业条件使得秸秆的收集和运输过程更为复杂，增加了秸秆利用的难度。正因如此，我国的秸秆收储体系长期以来未能得到广泛推广，仅在少数地区以个别示范性项目的形式存在，整体发展水平较为落后，主要体现在三个方面：

- 首先，我国农业机械化程度相对较低。集中式、机械化的农业生产是提升生产效率、实现农业现代化的关键，这对秸秆收集同样适用。我国秸秆收购对象多为散户，单个农户种植面积小、秸秆产量低，农户之间缺乏协调配合，这些因素使得机械化、集中化的秸秆收集工作难以开展。对于单个农户而言，购买昂贵的机械设备既不现实、也无必要，而若多个农户之间联合开展机械化秸秆收集，则要考虑不同区域、不同收获时间、不同作物之间的协调，管理难度陡增。

图表 19 机械化秸秆采集



- 其次，秸秆本地处理、利用能力较差，推高了原材料运输成本。秸秆本身是一种低价值产品，未经处理的秸秆体积大、密度小、含水量高，十分难以运输。当运输距离为50公里时，1吨秸秆运输成本为50元左右，而当距离为100公里时，成本会增加到80-100元。因此本地处理、本地加工甚至本地利用才是秸秆利用最经济的方式。但由于我国秸秆收集量有限的问题，一座秸秆处理、利用工厂往往需要在较大地域范围内采购秸秆才能满足自己规模化的要求，运输距离较远，秸秆运输成本较高。
- 第三，我国目前没有统一的秸秆收储运技术和服务规范，政策对相关环节缺乏指导。在消费端，秸秆若要作为能源化利用的原料，需要在品质统一、产量稳定、价格透明等方面达到更高的要求。而在生产端，粗放的农业生产环节和复杂的秸秆收集过程使得最终收集到的秸秆在质量、产量和价格上都具有很高的不确定性。这两者之间的不统一不仅会带来额外的处理、分类成本，还会给相关企业带来运营风险。

在这三层因素的影响下，我国秸秆的收集效率以及最终的到厂价格都很难产生足够的经济性，无法吸引到足够的下游买家，秸秆收集体系也就失去了进一步推广和改进的动力，陷入了死循环中。因此目前为止，我国大多数地区的秸秆收集工作还处在手工零散收集的阶段，秸秆或者是被农民自行处理，或是由中间人不定期上门收集，未能形成固定的收集体系。

5.4 秸秆收集体系是降本增产的关键

为了解决以上问题，我国应当建立专业化、标准化、服务化的秸秆收集体系，简化秸秆收集流程，增加各环节的透明度，建立广泛的秸秆收集网络：

- 由政府出面建立相关规范、标准，承担起市场管理与监管工作，并在产业发展初期提供财政补贴和政策支持。
- 由专业企业承担具体的收集工作，代替原有的散户、中间人等环节，负责秸秆的收集、运输、处理、销售等环节，为上游农户和下游厂商提供标准化的服务与价格，并借助企业的高效管理和规模效应来降本增效。
- 建立秸秆多层级处理网络，用“先处理、再运输”的模式，在当地首先完成脱水、破碎、封装等环节的预处理工作，节省运输成本，使秸秆原材料可以在更远的距离上运输。

在目前的秸秆收集过程中，小而散的收集环节造成了大量的低效劳动和重复劳动，且由于标准不统一，二次筛选、分类的过程也同样耗费大量人力物力。而建立专业、标准化的收集体系，不仅有利于减少中间环节的重复工作和成本，还可以发挥规模效应、管理优势，增强秸秆收集过程中的机械化水平，提高收集效率。

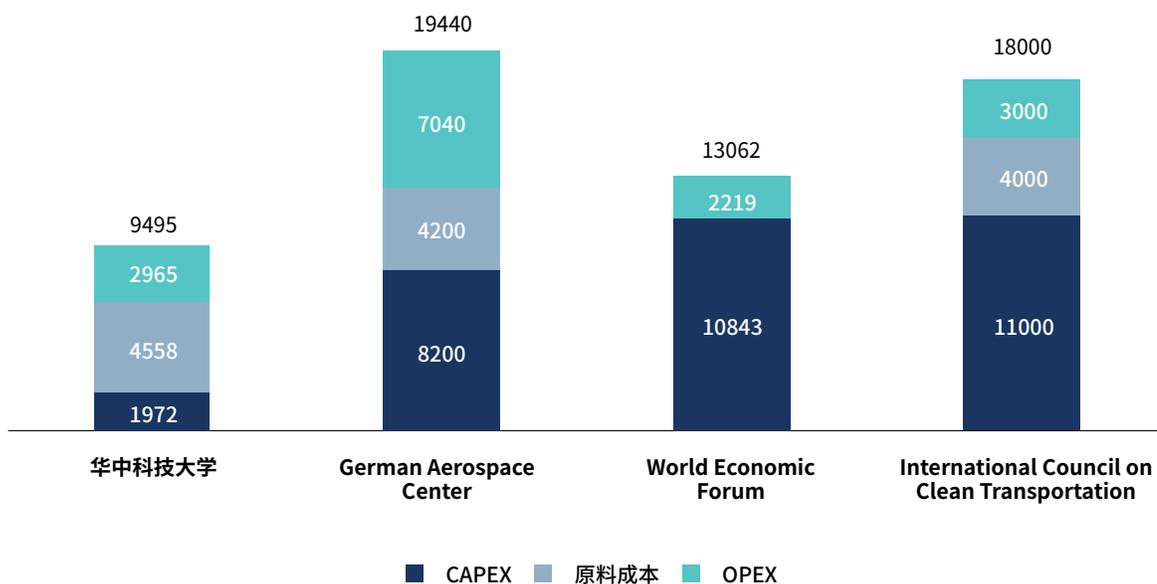
(六) 成本——煤制油产业助力可持续航煤突破价格下限

传统化石航煤的成本大约占据航司总运营性支出的30%至40%，是成本中的大头，而从经济性考虑，可持续航煤整体生产成本远高于传统航空燃油，这成为了影响可持续航煤接受度的主要因素。费托合成技术之所以没能成为当前可持续航煤生产的首选技术，很大一部分原因就在于其生产成本相对更高，许多研究估计，费托合成可持续航煤（以下简称费托SAF）最终的加注价格不仅会高于传统燃油，与HEFA燃料相比也不具优势。在航空公司普遍亏损的后疫情时代，昂贵的费托SAF自然缺乏吸引力。不过，依托于我国在费托合成技术应用方面的长期积累和国内庞大的航空市场，未来费托SAF有可能在3至5年内实现万吨级装置的示范，随后通过快速的技术进步和规模效应，在成本经济性上完成对HEFA燃料的反超。

6.1 费托SAF成本估算

除了美国Fulcrum生物能源已经实现了小规模生产费托SAF外，费托合成技术目前尚未能广泛应用于可持续航煤的生产，这就导致关于费托SAF的生产成本在市场上并没有太多实际的数据可以参考。在过去几年中，有数篇权威报告对费托合成技术制可持续航煤的成本做了预测，成本预测范围大约在9000元/吨到20000元/吨之间。由于不同的研究结论差别较大，且从结果上来看，这些研究的结论天差地别，在很多基础假设上也并不符合中国国情，参考价值有限。

图表 20 不同机构对费托可持续航煤成本的预测(元/吨)^{37, 38, 39, 40}

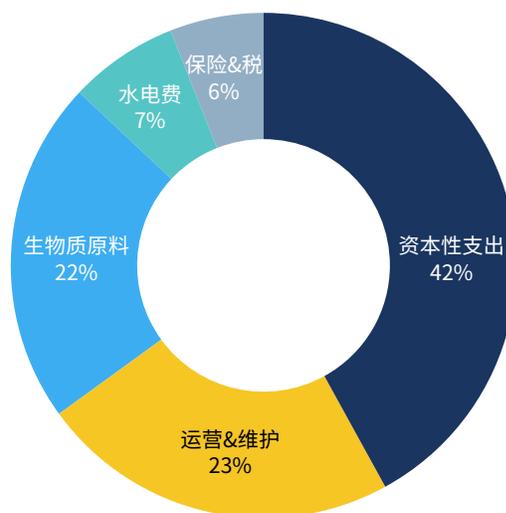


而实际上，费托合成技术在我国早已有规模化的应用，我国长期使用费托合成技术来进行煤制油生产，在技术层面已经十分成熟。而费托SAF的工艺流程与煤制油十分类似，在温度条件、催化剂种类等关键参数上基本类似，因此我国的煤制油成本可以为费托SAF提供参考。不仅如此，自费托合成技术从1925年诞生至今已有将近百年的历史，其工艺流程和基本参数已经为人所熟知，相关成本也相对透明。本篇报告将参考我国已有的费托合成煤制油项目，大致估算费托SAF在我国的生产成本。

资本性支出

费托合成的生产成本可以分为投资装置的资本性支出和生产消耗的运营性支出，资本性支出主要包括燃料生产企业在购买装置、搭建厂房、施工建设等环节的支出。相比于其他几种可持续航煤技术，费托合成由于工艺流程更长、化学反应更复杂，因此其反应装置所需的投资也相对更高，在总成本中的占比相对更大。

图表 21 费托合成技术成本分布估算⁴¹



费托合成的工艺流程主要有预处理、气化、气体处理、费托合成、精炼五个步骤，与HEFA“加氢精炼”的工艺流程相比，费托合成技术要复杂得多。正因如此，费托合成装置需要更高的前期投资，同时还具有建设周期长、单体规模大、单位资本性支出高的特点。根据美国国家可再生能源实验室估算，一座年产20万吨左右的费托SAF工厂，其前期投资成本约为38亿人民币，对应的单位资本性支出高达1.9亿元/万吨。⁴²相比之下，HEFA的资本性支出远远低于费托合成，根据欧盟Bio4A的一项研究，一个产能50万吨/年的HEFA装置，总资本性投入约为38.4亿元人民币，对应的单位产能的资本性支出仅为7680万元/万吨。⁴³

费托合成技术的高资本性支出在我国已建成的煤制油项目中也有所体现。下表列出了三个我国重要的煤制油项目，从单位产能对应的投资规模来看，资本性支出最低的宁夏项目也高达1.6亿元/万吨，而总投资中，装置投资又平均占到70%以上。

表格 5 煤制油项目各类装置总投资比例 (%) ⁴⁴

煤制油项目各类装置总投资比例			
	宁夏400万吨项目	内蒙古100万吨项目	山西100万吨项目
工艺生产装置	49.08%	40.11%	45.51%
公用工程	15.33%	12.47%	13.42%
储运系统	6.23%	6.61%	7.02%
辅助设施	2.48%	4.88%	4.75%
厂外工程	4.42%	6.03%	2.53%
其他	0.59%	6.92%	2.32%
各类装置加总	78.13%	77.02%	75.55%
总投资(亿元)	560	170	230

根据以上信息，如果假设费托SAF项目的单位资本性支出为2亿元/万吨，项目寿命为15年，每年产能利用率70%，折现率5%，那么单位费托SAF的资本性支出为2750元/吨。

运营成本

费托SAF的运营成本主要包括原料成本、电耗、水耗、运营与维护成本等等。其中，原材料是对运营成本影响最大的因素之一，平均来看，原料成本占到运营成本的40%、占总成本的22%左右。但在实际生产中，原材料的价格上下浮动的空间非常大，不同的原材料选择可能极大地影响最终的可持续航煤价格。

如上一章所述，我国最有潜力的原材料是秸秆，而秸秆的收购成本在不同区域之间差异显著，单价范围可以在150元/吨到400元/吨之间浮动。秸秆制油的转化率大约为10%到15%，这意味着生产一吨油料需要将近10吨原材料。如果秸秆的收购成本为300元/吨，那么成品油的成本中仅原材料一环就会高达3000元。

除了原材料外，其他运营成本如水电、人力、运维等环节的成本也是运营成本的主要组成。参考我国煤制油企业的运营成本，一般生产一吨油料需要消耗煤炭4-5吨，当煤炭价格为600元/吨时，原材料成本大约为3000元。而煤制油的其他运营成本约为2000到2500元。⁴⁵费托SAF生产流程与煤制油类似，但在气化环节前需要对原材料进行额外的筛选、烘干等操作，根据中石化石油院的研究，这一步骤会额外增加500-1000元的运营成本，因此估计费托SAF生产过程中的其他运营成本大约在2500-3500元的范围内。这一结果与其他研究报告中2000-4000元/吨的测算结果基本一致。

总生产成本

将资本性支出和运营支出相加，可以得到费托SAF的总生产成本大约为8000元到11000元/吨。

这一结果略低于世界经济论坛、国际清洁交通委员会等机构的预测，本篇报告认为得益于我国煤制油产业的多年布局，费托合成技术在我国的发展较为成熟、产业规模相对更大，实现了一定的规模效应，因此我国利用费托合成技术生产可持续航煤的成本也将低于世界平均水平。

那么费托SAF与其他低碳燃料相比是否有竞争力？在理想的情况下（原材料充足、产业规模庞大等等），费托合成技术由于工艺流程较为复杂，其资本性支出和运营支出都比HEFA更高。但实际情况是，我国的HEFA价格因为原材料的问题一度升至超过2万元/吨，不仅远高于主流机构推算的9000元/吨的水平，甚至也高于推算的费托SAF的价格。尽管费托SAF最终落地的生产价格仍不确定，不过可以肯定的是，当我国废弃油脂原材料利用逐步触顶后，HEFA的价格将会快速上涨。而随着产业技术、秸秆等原材料的收集体系逐步成熟，产业规模逐步扩大，未来费托SAF的成本将会逐步下降。在下一节中，报告将重点总结我国费托SAF生产未来成本下降的主要驱动力。

6.2 与煤制油产业结合发展可促进成费托SAF成本下降

煤制油与费托SAF生产流程的相似性不仅为可持续航煤生产提供了技术基础，煤制油产业在基础设施和生产装置上的资本性投入也能够为可持续航煤生产所用，甚至可持续航煤生产还可以帮助煤制油产业提高盈利能力，实现两者的协同发展。

自2000年以来，出于能源安全的考虑，我国一批煤制油项目相继上马。然而近两年来，受到用煤成本波动、国际原油市场价格的影响，已建成的煤制油项目经济效益不尽如人意，甚至有个别项目暂时停产。⁴⁶ 使用煤炭制成的油品无法与其他常规油品做出区分，煤制油产品面临着激烈的竞争，盈利能力十分有限。

而可持续航煤给煤制油产业提供了一条不同寻常的发展思路。由于煤制油间接液化和生物质制可持续航煤都使用低温费托合成技术，因此现有的煤制油装置可以经过改装后部分用作可持续航煤生产。尽管费托SAF的成本相比传统煤油更加昂贵，但其附带的环境属性赋予了它独特的竞争力，能够为煤制油企业提供新的收益，帮助我国煤制油企业走出当前的生存困境。

而对于可持续航煤产业来说，煤制油产业也提供了一个理想的发展起点。依托于现有的煤制油装置，可持续航煤产业可以以更低的前期投资规模、更高的技术成熟度投入生产，大大降低了产业发展门槛和生产成本。不仅如此，煤制油项目大多分布在我国华北、西北地区，临近主要秸秆产地，且秸秆收集成本相对较低，本地秸秆资源丰富，有利于在当地形成规模化产业链、进一步降低原材料成本。

表格 6 我国已建煤制油项目⁴⁷

项目名称	规模(万吨)	建设地点	投产时间
神华鄂尔多斯煤直接液化	108	内蒙古鄂尔多斯	2008
神华鄂尔多斯煤间接液化	18	内蒙古鄂尔多斯	2009
伊泰集团煤制油	16	内蒙古鄂尔多斯	2009
潞安集团煤间接液化	16	山西长治	2009
兖矿集团榆林煤间接液化	115	陕西榆林	2015
神华宁煤煤间接液化	405	宁夏银川	2016
伊泰集团精细化学品	120	内蒙古鄂尔多斯	2017
潞安集团高硫煤清洁利用油化电热一体化	108	山西长治	2017
陕西延长集团榆林煤炭间接液化	15	陕西榆林	2017
兖矿集团高温费托合成	10	陕西榆林	2018

除此以外，规模效应和国产化替代也能够进一步促进费托SAF的成本下降。随着产业规模扩大、技术成熟度提高，每单位产能所需的资本投资和运营型支出将逐渐减少。根据ICCT的估算，工艺改进和规模效应最多可以将费托SAF工厂的总资本成本降低30%。⁴⁸另外，国产化替代也是降低成本的有效途径。尽管目前国内的生物质气化技术仅集中在生物质气化发电等非化工领域，尚未完全具备商业化条件。但是由于煤气化炉在我国广泛存在，且技术种类较为全面，可以为后续生物质气化的技术进步做基础。例如，近十年来，我国的清洁高效煤气化技术发展迅速，完全国产化的加压气流床水煤浆/干粉气化和工艺技术和装备（如，航天炉）不但替代了原本的高价的进口炉，还大大拓宽了原料的可选择范围。类似的突破会对成本下降起到关键作用。

(七) 下一代可持续航煤推广手段

在前两章中，报告分析了费托SAF产业在我国的发展潜力，从中不难看出，搭建起完整的可持续航煤产业链、实现费托SAF从无到有的突破并非易事。与许多低碳技术一样，费托SAF在发展前期会面对巨大的成本问题，很难仅仅依靠市场机制实现推广和替代。传统燃料之所以成本更低，主要是由于传统燃料不必承担碳排放带来的社会成本外部性，而现有市场机制下可持续航煤的环境权益价值又无法体现。而成本经济性上的困难又阻碍了下一代可持续航煤的进一步发展，产业链各环节普遍存在阻碍，上下游之间相互掣肘，成本经济性的劣势因此无法得到解决，形成了经典的“鸡生蛋、蛋生鸡”的难题。

解决这一矛盾需要顶层的政策规划设计和产业扶持政策来指导和辅助可持续航煤产业发展。政策设计应从需求侧和供给侧同时发力，通过多维度的一揽子政策来推动航空业脱碳，以帮助实现碳中和的目标。我们认为，我国应该从优化政策设计、建立市场机制和完善原料供应体系三个方面进一步加强可持续航煤的产业发展。

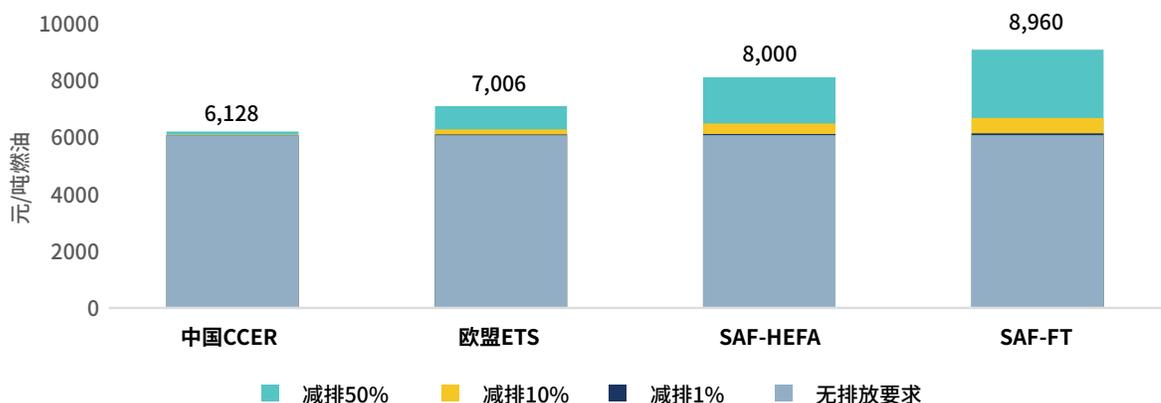
7.1 优化政策工具

(1) 设定强制掺混比例：

强制可持续航煤掺混比例是提高可持续航煤应用量、推动市场规模扩张最行之有效的手段。国际上，法国是最先采取这一政策措施的国家，而受其启发，欧盟在FF55中也设置了针对所有欧盟国家的掺混要求。这一政策充分调动了欧洲生物质燃料生产企业的积极性，加速了相关产业的发展。而对于我国，掺混目标不仅能够快速激发市场需求，同时还将吸引资本入场，在降低产业融资难度的同时加速相关技术研发速度，是推动可持续航煤产业建立的有效手段。

行业中有一种反对强制掺混比例要求的声音，认为强制要求会大幅增加航司的日常运营成本，干扰市场发展，降低航司的竞争力。但实际上，尽管可持续航煤的价格的确相比传统航煤更为昂贵，但可持续航煤掺混目标在短期内并不会造成航司燃料成本大幅增加。即便激进如欧盟，其可持续航煤掺混目标在2030年前也不超过6%，而小比例的混入要求只会造成航司燃料成本小幅上升，如下图所示。考虑到燃料成本传统上只占总成本的30%–40%，短期内小比例的可持续航煤掺混对航司总成本的影响并不显著。而长期来看，可持续航煤的成本会随着产业发展逐步下降，适当的可持续航煤掺混目标并不会给航司带来更多的负担。

图表 22 不同减排目标与减排方式下每吨燃油成本对比



* 在HEFA成本为9000元/吨，费托（FT）成本为11000元/吨的情况下

当然，为了避免过高的掺混目标对可持续航煤和航空行业起到拔苗助长的效果，相关机构应牵头对可持续航煤掺混比例的技术可行性进行深入论证，并对供油系统的基础设施后续改造需求进行估算，以此作为设立分阶段性的强制掺混比例要求的基础。今年年初时，中国民航局也宣布了正在研究和评估可持续航煤在2035年占比达到10%、2050年实现占比接近50%的可能性。⁴⁹

(2) 制定分阶段的常态化可持续航煤加注试点：

对于航司而言，稳定、可靠的可持续航煤供给和加注是应用的前提，因此常态化加注是培养稳定可持续航煤市场需求的先决条件。目前我国可持续航煤应用仍没有实现常态化商业运行，如空客新机交付和“绿色亚运”等项目均为以单次合同为基础的短期项目，需要中航油为其提供定制的“可持续航煤服务”。为了推动常态化可持续航煤加注服务推广，我国可规划设计可实践的常态化加注试点路线图，从个别干线机场开始，逐渐推广至各大主要城市枢纽机场和航线。而政策设计应基于我国的空中交通布局，考量物流运输成本、经济活跃度、环境影响、技术成熟度等多方面因素。

- 2023-2025：设立可持续航煤加注试点机场，如北京上海等主要交通枢纽的城市机场，并确定主要连接航线为试点航线。通过试点运行，详细核算出可持续航煤的实际使用成本，评估出制储运用可持续航煤所需的技术成熟度，为后续进一步扩大我国可持续航煤供给和需求做准备。
- 2025-2030：以试点机场为核心推广可持续航煤产业链搭建，扩大可持续航煤产能，建立可持续的可持续航煤的供应链。鼓励与周边国家和其他国际伙伴开展合作，建立区域内可持续航煤供给与使用网络，扩大可持续航煤需求。同时对机场附近的航油加注基础设施进行改造，确保可持续航煤与当地的储罐、输油管道、加油设施的兼容性。尽管可持续航煤是一种原位替代燃料，不需要大规模的基础设施建设，但是为了适配未来的新需求，科学地分类储存、掺混、加注新型掺混航煤，需要改造升级现有的部分基础设施。政府也应牵头从生产、储存、运输三个环节入手，投资招标建设，以配套可持续航煤未来的常态化供应需求。

(3) 给予可持续航煤消费企业财政支持

可持续航煤与普通航煤的较大价格差距是可持续航煤市场迟迟无法扩大的关键阻碍。如果说强制掺混和碳成本政策属于“大棒”，要求航司部分承担可持续航煤带来的额外溢价，那么财政支持政策就属于“胡萝卜”，能够帮助航司消化额外的成本，从而提升企业应用可持续航煤的意愿。在具体政策设计上，我国可以参考美国的《通胀削减法案》，对使用和生产可持续航煤的企业给予税收优惠，也可以仿照我国的氢能政策，向使用可持续航煤的企业提供直接的财政补贴。

(4) 对于可持续航煤生产企业给予财政支持

由于可持续航煤产业具有资本投入大、研发周期长、市场风险高等特点，小型初创企业很难突破入门槛实现盈利。同时，由于目前我国相关政策的推动力度较小，民间资本对可持续航煤产业尚持观望态度，除了HEFA等成熟技术外，投资人对可持续航煤相关项目关注度不高。因此，建议我国持续对可持续航煤生产企业、关键技术研发企业给予直接的财政支持，以促进技术创新和长期的行业发展。

- 财政补贴：参照我国其他产业，如新能源汽车和氢能产业政策，以国补和地补的形式补贴可持续航煤生产企业。补贴形式可以采取多种形式，比如，按照每生产单位来进行补贴，或者按项目规模进行补贴等。
- 建立税收优惠：以增值税为例，参考生物柴油企业所享受的政策，即先征收全额的增值税，之后再予以100%退还，以此促进可持续航煤生产企业扩大企业生产规模、降低企业税负成本。同时也可参考其他国家政策，如美国《通胀削减法案》中的抵税政策。

(5) 出台产业政策支持下一代可持续航煤技术发展

可持续航煤作为航空低碳转型手段，其价值不能完全由经济性体现，因此相关技术发展离不开政府的支持。政府应出台产业政策和发展规划，牵头建立专项资金，支持可持续航煤技术研发和示范项目运营，推进相关技术标准建立，鼓励通过技术合作、人才引进等方式，对下一代可持续航煤生产技术的核心生产环节和关键零部

件进行技术攻关。国际上已经有多国出台了类似政策可供参考，例如美国政府发布的《可持续航煤大挑战路线图》设置了2.9亿美金用于新兴低排放航空技术项目的开发和示范。又如，英国政府设立的“可持续航煤信息交换中心”（SAF Clearing House），旨在打破学术研究创新技术成果和企业对于创新技术需求之间的信息不对称，帮助示范项目落地运行。

7.2 建立市场机制

(1) 建立可持续航煤碳排放核算标准和体系

当企业为可持续航煤的高昂价格买单时，其实是在为可持续航煤所代表的环境属性付费，而衡量可持续航煤产品环境属性的价值必须依赖完善、透明的碳核算体系和标准，因此可以说，可持续航煤碳排放核算标准是一切市场化机制和政策的基础。对于有减排需求的货主企业和航空公司而言，无论是为了实现其减排目标，还是为了满足碳市场的要求，可持续航煤产品的减排水平都必须做到可信、可查、可追溯，而且，因航空业自身的国际“交通”互联属性较强，可持续航煤产品的碳排放认证还需要做到能够和国际标准互认互通。

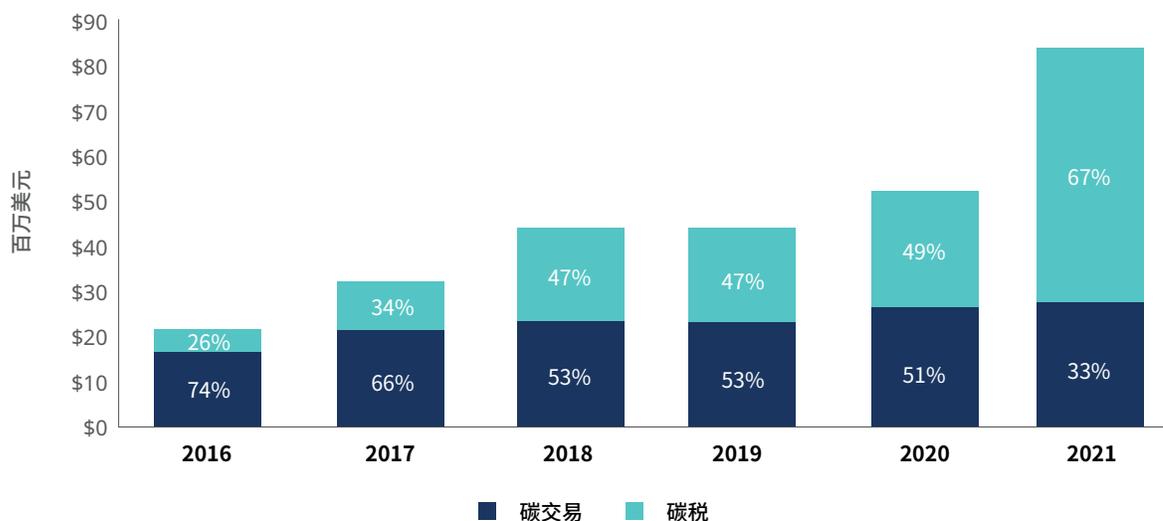
可以预见，我国未来将成为可持续航煤产业链中的核心生产国和消费国，因而在可持续航煤产业发展的初期，我国在制定标准、推动可持续航煤产业发展方面可发挥引领作用。

(2) 优化传统航煤碳成本的市场化定价

要求航司为传统航空燃料的碳排放买单也是提升可持续航煤竞争力的手段之一，碳成本可以加速传统燃料与可持续航煤的成本平价，可行的政策包括航空碳市场、航空燃料碳税等。目前国内碳市场尚未覆盖到航空业，市场缺乏转型动力，只能依靠航司主动为可持续航煤的绿色溢价付费。显然，航司的内生性消费不足以成为我国可持续航煤产业发展的源动力，然而，通过碳配额等方式强制航空业减排可能无法全面调动市场措施对减排的促进作用。因此，应该根据航空业的特殊性，差异化处理其碳排放成本问题。为了提升航空公司对可持续航煤消费的需求，应当采取“量体裁衣”的市场化定价策略，以更合理的方式确定碳成本。

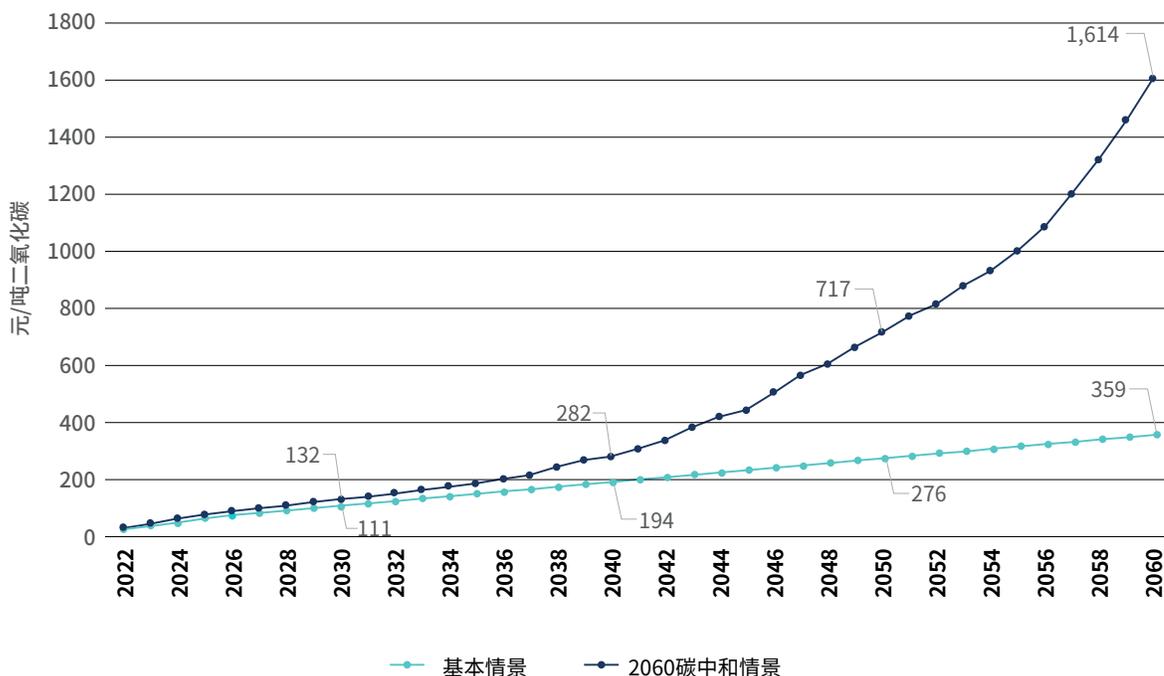
在国际上，欧盟的ETS碳市场已经覆盖了欧盟内部航线，未来还将逐步扩大碳市场的付费配额占比。在此压力下，欧盟已有多家航司开始着手在可持续航煤强制要求之上额外布局可持续航煤应用。具体碳成本的定价可以参考国际相关碳市场。根据2023年世界银行发布的《碳定价机制发展现状与未来趋势2023》，目前全球的ETS和碳税覆盖了全球23%的温室气体排放。近年来在金融市场和各利益相关方的积极参与下，全球碳成本在快速增长。

图表 23 全球碳定价收益情况⁵⁰



有学者研究揭示，在2060碳中和的场景下，2030年中国碳价格将达到132元/吨，2050年将达到717元/吨，2060年将高达1614元/吨。⁵¹根据研究公司彭博新能源金融的预测，2030年欧盟的碳市场定价将达到1088元/吨（136欧元/吨）。⁵²届时，航司使用化石基航煤以及单纯购买碳汇作为减排选择，将需要承担更高的成本，同时将给费托SAF带来更大的市场吸引力。

图表 24 中国碳价格走势预测⁵³



(3) 建立“油证分离”的可持续航煤消费证明交易机制

我国可持续航煤消费市场还处在“幼稚期”，截至2023年8月，国内的可持续航煤应用项目全部需要从中国石化镇海炼化一家企业采购，并将可持续航煤运送到相对应的机场，这给有意应用可持续航煤的企业带来了许多实际的困难和成本。而“油证分离”的消费证明交易机制类似与我国的“绿色电力证书”，允许企业在不实际使用可持续航煤的情况下，也能通过支付溢价的方式完成可持续航煤消费，避免了因为实际地理位置限制而无法应用可持续航煤的情况。

在这一领域，世界经济论坛、落基山研究所、普华永道已共同发起了可持续航煤凭证框架（SAF Certificate Framework，简称SAFc）交易机制，这一机制参考了当下已经较为成熟的绿电交易机制，为有供应链减排需求的企业提供了一个市场化的交易渠道。目前世界上已有多家大型跨国企业参与，如微软、德勤、波音、美国航空等。

(4) 形成可持续航煤产业联盟

可持续航煤产业链在我国尚在建立初期，尽管现在的上下游关系不复杂，但是仍存在信息不对称等市场失灵现象，不能自主实现业内资源的最优配置。政府应牵头成立产业联盟，以垂直式的组织方式优化整条产业链的资源配置，加强产业内的交流互动。通过这种组织形式，行业领先企业可以联合上下游企业共同发展可持续航煤商业项目，以较低的成本实现资源调配和优势互补，共担成本、共享利益。

在横向视角下，可持续航煤消费方面的航空公司产业联盟能够充分发挥协同效应，建立共享机制，并共同承诺购买一定数量的可持续航煤。这种航司产业联盟不仅可以借助自身影响力鼓励其他航空公司进入可持续航煤消费市场，还能够确保可持续航煤的消费量有一个稳定的底线保障。

目前，落基山研究所也已与美国环保协会一同建立了可持续航煤买家联盟（Sustainable Aviation Buyers Alliance），集合了多家全球航司和货主企业，共同参与可持续航煤市场。

（5）转型金融、绿色金融等引导注资

地方政府配合银行等金融机构，通过财政基金、绿色基金、绿色债券、绿色信贷等渠道加大对可持续航煤生产企业的资金支持力度，具体措施包括发放贷款贴息、开展普惠金融服务等。尤其，对于生产、消费可持续航煤的小型初创企业，政府应予以更高的融资政策扶持力度，以减轻可持续航煤生产本身的重资本属性、技术不确定性带来的高商业风险。

7.3 完善原料供应体系

可靠、稳定、均一的生物质原料供应是可持续航煤产业发展的基础，也是费托SAF能够低成本生产的前提。为了解决我国现有秸秆收集体系机械化程度低、本地处理能力差以及标准缺失等问题，我国应引导建立类似公用事业部门的秸秆综合收集利用产业，设定统一的收集标准，将原有分散、碎片化的收集环节垂直整合，为农户提供专业、快捷的秸秆收集服务，形成标准化的秸秆市场。具体而言，报告提出三条建议：

- （1）促进秸秆收集流程规范化，秸秆产品标准化：由政府牵头完善秸秆收集标准，规范化收集流程，标准化秸秆原材料产品；同时加强秸秆收集教育，提高秸秆收集企业准入门槛，提升专业化程度。
- （2）建立秸秆收储网络：彻底改变传统的秸秆收集散而乱的现状，建立统一管理的秸秆收储运网络。如，安徽省2018年下发的《安徽省农作物秸秆综合利用三年行动计划（2018-2020年）》要求，在科学合理的运输半径内，形成县有秸秆综合利用企业、乡镇有标准化收储中心、村有固定收储点的收储运网络，并且，探索将收储点纳入村集体财产、企业租用支付费用、收储利润村民共享等机制。
- （3）支持秸秆利用体系市场化发展：通过财政、金融和行政手段扶持秸秆利用龙头企业，鼓励建立秸秆产品交易市场，完善秸秆交易规则，吸引社会资本投入，最终实现秸秆产业的独立稳定运行。

参考文献

- 1 UNEP, “Emission Gap Report 2022: The Closing Window”, 2022
- 2 IEA, “Transport: Improving the Sustainability of Passenger and Freight Transport”, 2022
- 3 中国新闻网 (2021) 《交通运输碳排放占总量10% 中国提出加快发展智能交通》
- 4 IPCC, “IPCC Sixth Assessment Report”, 2021
- 5 IEA, “Aviation”, 2022
- 6 ICAO, “Environmental Trends in Aviation to 2050”, 2022
- 7 World Economic Forum, Creating zero-emission aviation with hydrogen and electric power, 2021
- 8 Airbus, “Airbus and China Aviation Industry Sign Next Phase in Partnership”, 2023
- 9 World Economic Forum and McKinsey & Company, “Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation”, 2020
- 10 IATA, “Net Zero 2050: Sustainable Aviation Fuels”, 2022
- 11 北京大学能源研究院 (2022) 《中国可持续航空燃料发展研究报告》
- 12 World Economic Forum and McKinsey & Company, “Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation.”, 2020
- 13 国际航空运输协会 (2022) 《2022 年 SAF 产量增 200% 需更多生产激励措施实现净零碳排放》
- 14 国际航空运输协会 (2023) 《SAF产量将持续增长 需政策支持以实现生产原料多样化》
- 15 ICAO, “ICAO SHORT-TERM PROJECTIONS ON SAF PRODUCTION”, 2022
- 16 IATA, “Net Zero 2050: Sustainable Aviation Fuels”, 2022
- 17 IATA, “Policy Net Zero Roadmap”, 2023
- 18 European Union Aviation Safety Agency, “European Aviation Environmental Report”, 2022
- 19 European Union Aviation Safety Agency, “European Aviation Environmental Report.”, 2022
- 20 Transport & Environment, “EU agrees to world’s largest green fuels mandate for aviation”, 2023
- 21 U.S. Government Accountability Office, “Sustainable Aviation Fuel: Agencies Should Track Progress Toward Ambitious Federal Goals”, 2023
- 22 Fulcrum BioEnergy, “Fulcrum BioEnergy Successfully Starts Operations of Its Sierra BioFuels Plant.”, 2022
- 23 Federal Aviation Administration, “United States Aviation Climate Action Plan”, 2021
- 24 陈文来 (2021) 《2050年我国民航人均出行次数研究》
- 25 北京大学能源研究院 (2022) 《中国可持续航空燃料发展研究报告》
- 26 Our World in Data, <https://ourworldindata.org/grapher/number-air-trips-vs-gdp>
- 27 华夏时报 (2022) 《地沟油’ 华丽变身生物柴油, 每吨价格超万元成香饽饽》
- 28 国家粮油信息中心 (2023) 《大食物观引领植物油加工与消费》
- 29 中国海关总署, <http://stats.customs.gov.cn/>
- 30 World Economic Forum and McKinsey & Company, “Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation”, 2021

- 31 Gorimbo, Liu, and Yao, “Chemical and Fuels from Biomass via Fischer-Tropsch Synthesis”, 2023
- 32 Shahriar and Khanal, “The Current Techno-Economic, Environmental, Policy Status and Perspectives of Sustainable Aviation Fuel (SAF)”, 2022
- 33 Guolin Yao., “Stochastic Techno-Economic Analysis of Alcohol-to-Jet Fuel Production”, 2017
- 34 Geleynse, Brandt, and Wolcott, “The Alcohol-to-Jet Conversion Pathway for Drop-In Biofuels”, 2018
- 35 German Environment Agency, “Power-to-Liquids: A Scalable and Sustainable Fuel Supply Perspective for Aviation”, 2022
- 36 German Environmental Agency, “Power-to-Liquids: A Scalable and Sustainable Fuel Supply Perspective for Aviation”, 2022
- 37 刘文质 (2018) 《生物质气化费托合成生产航空煤油的生命周期评价及经济性分析》
- 38 Ralph-Uwe Dietrich, “Cost calculations for three different approaches of biofuel production using biomass, electricity and CO₂”, 2017
- 39 World Economic Forum, “Clean Skies for Tomorrow: Sustainable Aviation Fuels as a Pathway to Net-Zero Aviation”, 2020
- 40 The International Council on Clean Transportation, “The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union”, 2019
- 41 Ralph-Uwe Dietrich, “Cost calculations for three different approaches of biofuel production using biomass, electricity and CO₂”, 2017
- 42 Swanson, Platon, and Hsu, “Techno-Economic Analysis of Biofuels Production Based on Gasification.”, 2010
- 43 Bio4A EU, “Assessing the Business Case for HEFA-Based Sustainable Aviation Fuels”, 2019
- 44 黄盼、段然、刘光启 (2022) 《煤制油项目工程造价研究》
- 45 陈子瞻 (2017) 《煤制油成本案例分析及产业前景》
- 46 中国能源报 (2023) 《煤制油：战略储备如何走出困境》
- 47 超级石化 (2022) 《低温费托合成产物高值化加工利用路线及煤制油产业展望》
- 48 Peters, Alberici, and Passmore, “How to Advance Cellulosic Biofuels: Assessment of Costs, Investment Options and Policy Support.”, 2015
- 49 温笑寒 (2023) 《深读：SAF，航空业减排的‘牛鼻子’》
- 50 World Bank. “State and Trends of Carbon Pricing 2023,” 2023
- 51 Qi, Cheng, Tan, “Predicting China’s Carbon Price Based on a Multi-Scale Integrated Model”, 2022
- 52 BloombergNEF, “Global Carbon Market Outlook 2022: Bulls Trump Bears”, 2022
- 53 Qi, Cheng, Tan, “Predicting China’s Carbon Price Based on a Multi-Scale Integrated Model”, 2022

落基山研究所，航空零碳必由之路——下一代可持续航空煤油技术发展前景, 2023

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别注明, 本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center

22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

©2023年10月, 落基山研究所版权所有。
Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的注册商标。