

中国民航业可持续航空燃料发展技术路径研究

胡玉杰^{1,*}, 石强强², 陈梦雨¹

1. 贵州大学 管理学院, 贵阳 550025;

2. 贵州大学 公共大数据国家重点实验室, 贵阳 550025



摘要：航空业是难减排行业之一，实现净零排放对航空业可持续发展具有至关重要的意义。其中，推进可持续航空燃料（Sustainable Aviation Fuel, SAF）的发展是实现净零排放目标的关键举措。为有效布局中国民航业 SAF 发展的技术路径，有必要系统挖掘其发展的驱动因素。然而，目前缺乏从燃料全产业链的角度出发，系统探索驱动因素并给出技术规划的研究。因此，本文从 SAF 的全产业链（上游、中游、下游）视角出发，利用文本挖掘技术和文献分析方法系统识别出影响因素，并建立影响因素的指标评价模型，最后结合德尔菲法构建民航业 SAF 发展技术布局的时间列表。结果表明，2050 年前，成本、技术和原材料是 SAF 发展的重要影响因素。2050 年后，各影响因素趋于均衡，无显著影响因素驱动。要实现 SAF 的长期可持续发展，从短期来看，发展新一代的燃料发展工艺和政策驱动是解题关键（59.68% 和 64.51% 的专家支持）；从长远来看，更为先进的合成燃料或替代能源成为主流。本文不仅通过挖掘分析关键影响因素构建了 SAF 发展时间技术清单，为燃料制造商、政府提供了可行的相应技术方案，也为促进中国民航业全面绿色转型，助力全球航空业 2050 年实现净零排放目标提供了参考。

关键词：碳减排；民航业；可持续航空燃料；技术路径；全产业链

中图分类号：F426.5 **文献标志码：**A **文章编号：**2097-4981(2026)01-0150-24

DOI: 10.3724/j.issn.2097-4981.JECC-2025-0038

0 引言

近年来，国际航空业蓬勃发展，传统航空涡轮燃料的使用增加了温室气体排放，加剧了全球气候变化。预估到2050年，航空业对全球化石燃料二氧化碳排放的贡献率可能增至4.6%~20.2%^[1]。航空业是全球二氧化碳排放的关键来源之一，约占全球总排放的2%~3%^[2]。因此，航空业也是气候变化的较大贡献者之一^[3]。为此，国际民用航空组织（International Civil Aviation Organization, ICAO）建立了全球首个

行业减排机制——国际航空碳抵消和减排机制，并设定了在2050年前实现国际航空业净零排放的目标。国际航空运输协会（International Air Transport Association, IATA）同样设定了到2050年将航空业的二氧化碳排放量降低50%的目标。传统航空煤油在飞机飞行过程中产生的排放是航空业二氧化碳排放的主要来源，预计每升传统煤油将造成2~3 kg的二氧化碳排放。相较于技术进步和运营效率提升，使用可持续航空燃料（Sustainable Aviation Fuel, SAF）等清洁燃料能更有效地助力航空业实现碳减排^[4]。在

收稿日期：2025-08-03；**接受日期：**2025-10-15

基金项目：国家自然科学基金地区科学基金项目（72464006）；贵州省哲学社会科学青年学术先锋项目（QNXXSF2025001）；贵州大学人文社会科学研究课题（GDJD202404）

通讯作者：胡玉杰（1990—），女，博士，副教授，硕士生导师，主要研究方向为能源与环境政策建模、大数据与区域治理等。E-mail: yjhu@gzu.edu.cn

引用格式：胡玉杰, 石强强, 陈梦雨. 中国民航业可持续航空燃料发展技术路径研究[J]. 能源与气候变化, 2026, 2(1): 150-173.

HU Y J, SHI Q Q, CHEN M Y. A Study on the Technological Path of Sustainable Aviation Fuel Development in China's Civil Aviation Industry[J]. Journal of Energy and Climate Change, 2026, 2(1): 150-173.

净零排放等减排目标下, ICAO及各国纷纷出台相关政策, 致力于推动SAF行业的发展, 以有效应对气候变化带来的挑战。欧盟通过《ReFuelEU航空法规》强调, 2030年起航空燃料中必须至少包含一定比例的合成燃料, 并且这一比例将在2050年前逐步提高。《“十四五”民用航空发展规划》指出, 发展SAF是实现民航业碳减排的重要途径, 需大力推进SAF的常态化应用和试点示范。尽管如此, 全球SAF行业在供需两端仍主要处于理论积累阶段, 面临产能、技术、原材料供应和成本等多方面的挑战和限制。同时, 国内SAF面临收集和加工成本较高、技术路线相对单一、供应链不成熟等问题, 其产业化发展受到限制^[5]。为实现ICAO到2050年净零排放的承诺, 中国航空业必须迈出关键一步, 推动SAF的产量和需求达到所需水平。若中国航空业能够达到IATA关于SAF使用5.2%的目标, 预计到2050年, 中国对SAF的需求将达到每年86 Mt。为实现这一大幅增长, 亟需采取措施降低生产成本, 巩固中国市场对SAF的需求, 并探索适合中国民航业发展的SAF技术发展路径。因此, 系统识别阻碍航空业SAF发展的影响因素, 并瞄准关键因素进行改进, 对于推动中国民航业实现净零排放目标具有重要意义。本文旨在实现以下3个目标: 1) 基于数据驱动结合全产业链系统构建中国民航业SAF发展的影响因素清单; 2) 开发中国民航业SAF发展影响因素评估模型, 识别关键影响因素; 3) 提出民航业SAF发展的技术布局时间列表。

1 文献综述

根据现有文献, 学者从不同角度对SAF技术发展进行了相关研究。CABRERA和DE SOUSA^[6]综述了SAF在航空中的应用, 总结了相关替代燃料的生产方法、后勤和技术障碍及未来大规模实施的潜力。AHMAD和XU^[7]通过访谈数据创建了多认知地图, 调查了SAF供应链中工业利益相关者对SAF消费量增加的看法。GUIMARÃES等^[8]评估了不同生产策略对提高SAF生产经济可行性的影响, 指出关键途径在于将其与更成熟的路线相结合, 并依赖环境政策激励。王圣等^[9]总结了SAF的生产技术、政策与环境影响,

重点探讨了脂质催化转化、碳水/木质纤维素生物质转化路径及生物炼油厂概念。研究表明, 基于分子管理开发新型催化策略可提升目标产物收率、改善成本; 全产业链协同研究则是实现SAF规模化生产的关键。MARTINEZ-VALENCIA等^[10]利用财务分析和系统动力学方法, 评估了各种政策对若干经济指标的影响, 指出最大限度地使用SAF可以将评估工厂规模的财务损失降至最低。BULLERDIEK等^[11]采用仿真模拟软件, 以德国北部两种生物质原料为对象, 通过技术经济分析对比了4种SAF生产工艺的转化效率, 并评估了影响其经济性的关键因素。WANG等^[12]针对木质纤维素向航空燃料的转化展开了研究, 深入剖析了纤维素、半纤维素、木质素及其衍生物催化转化的潜在路径, 重点介绍了相关催化方法。研究表明, 此类方法可实现100%生物质来源航空燃料的生产, 并能高效利用木质纤维素的所有组分。

现有关于SAF发展技术路径的研究, 其研究范围主要集中在全球层面。闫锋和苏帅^[13]梳理了SAF的发展过程和现状, 介绍了其相关认证程序、使用现状及经济效益, 并列出了现阶段可用于SAF生产的一些前沿技术。QASEM等^[14]采用定量分析方法在技术层面对SAF进行了研究, 探讨了其生产原料、技术经济性和转化率等相关影响因素。陈达等^[15]采用文献计量分析方法, 量化分析了Web of Science数据库在2001—2022年收录的2 440篇与SAF相关研究文献, 并通过incoPat全球专利数据库对SAF关键技术的发展态势进行了评估, 为中国根据自身国情发展SAF科技与产业提供了信息支持。然而, 上述研究缺少对SAF全生命周期影响因素系统的归纳梳理及其具体发展路径的评估。同时, 目前还缺少对中国SAF发展路径的相关研究。为此, 本文采用定量和定性相结合的方法, 首先从全产业链(包括燃料的上游、中游、下游)角度系统挖掘中国民航业SAF发展技术路径的影响因素; 然后, 建立影响因素优先排序的评价模型; 最后, 利用德尔菲法构建SAF发展技术布局的时间列表, 进一步量化中国民航业未来SAF的发展路径。

2 理论模型

本文从SAF全产业链角度出发, 探究中国民航业

SAF发展技术路径 (图1), 具体步骤如下:

步骤1: 采用文本挖掘和文本分析方法, 对影响SAF发展的所有影响因素进行识别和分类。数据来源于各大航空公司官方网站、官方新闻报道、企业社会责任报告和研究文献。

步骤2: 建立指标评价模型, 对SAF发展影响因素进行排序。

步骤3: 运用德尔菲法构建民航业SAF发展技术布局的时间列表, 提供民航业SAF发展技术路径。

步骤4: 给出结论和政策含义。

2.1 基于全产业链的影响因素文本挖掘

考虑到SAF全产业链均可能存在阻碍其发展的影响因素, 本文从全产业链角度出发, 采用文本挖掘和文本分析方法, 系统识别中国民航业SAF发展技术

路径的影响因素。

文本挖掘是一种从大量文本资料中发掘出先前未知、易于理解且具有应用价值的知识的过程, 并通过运用这些知识来更有效地整理信息, 以供未来查询和使用^[16]。本文的文本挖掘过程如图2所示, 具体步骤如下:

步骤1: 确认抓取对象, 包括通过搜索引擎爬取的数据和文献。数据来自航空业各责任主体官方网站的新闻和环境责任报告, 包括各大航空公司 (中国南方航空股份有限公司、中国国际航空有限公司、中国东方航空股份有限公司、海南航空控股股份有限公司)、燃料生产商 (中国石油化工股份有限公司镇海炼化分公司、龙岩卓越新能源股份有限公司) 和燃料供应商 (中国航空油料集团有限公司) 等。文献来自Web of Science核心合集数据库。

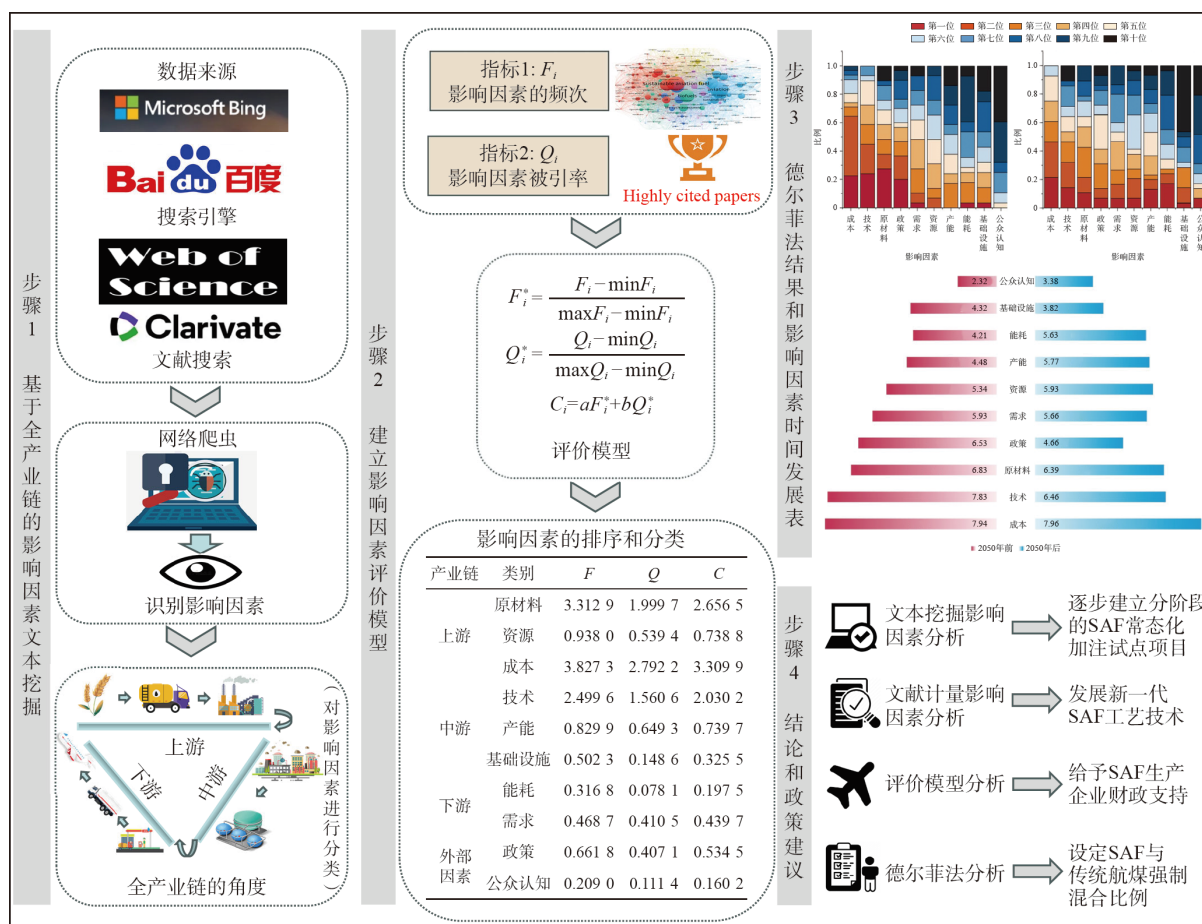


图1 研究框架

Fig.1 Research framework

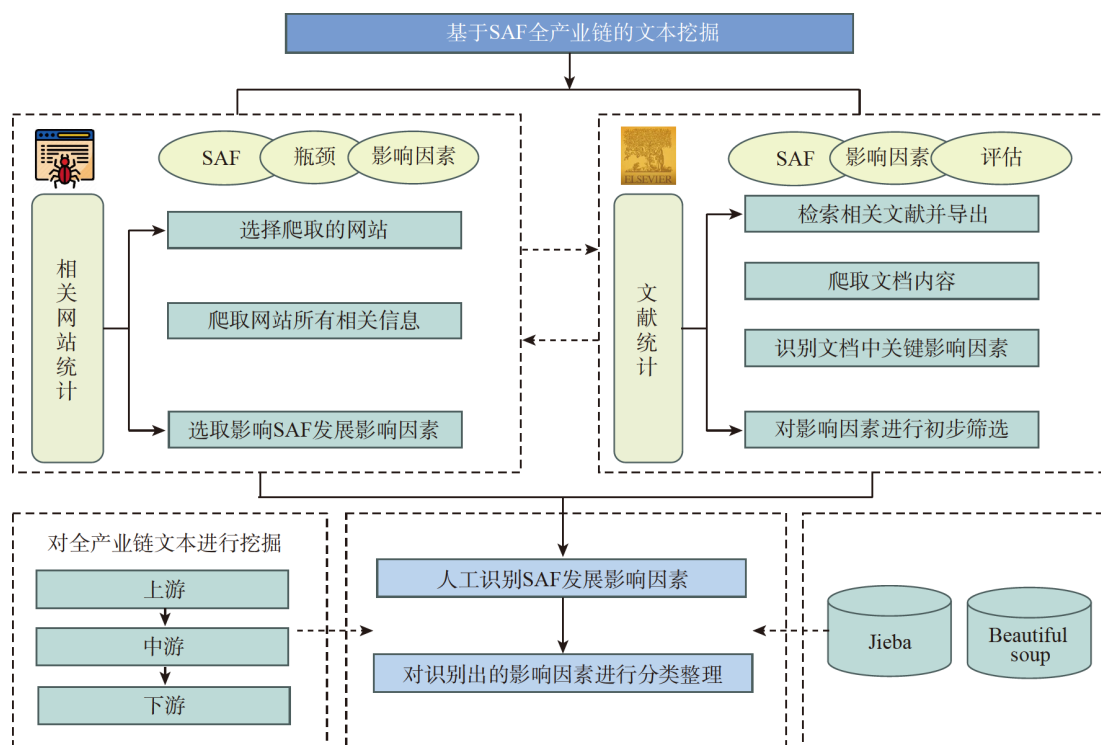


图2 基于全产业链的文本挖掘流程

Fig.2 Flowchart of text mining based on entire industry chain

步骤2：检索。官方统计数据通过访问责任方官方网站获得，以Sustainable aviation fuel、Develop、Influencing factor关键词作为搜索条件，抓取网站信息，并借助Python的主流分词工具Jieba和Beautiful Soup库进行筛选。文献通过设置搜索关键词、边界、时间线、文章类型等条件，利用布尔运算符进行高级检索获得。其中，关键词以Sustainable aviation fuel、Civil aviation、Bottleneck、Develop为主，时间线为2010—2024年，共检索到Web of Science核心合集数据库中的254篇文献。通过人工筛选过滤掉与研究主题不符的文献，最终保留了51篇文献作为研究对象。

步骤3：确定影响因素。本文采用语言分析方法，对影响SAF发展的相关因素进行间接分析，人工识别SAF发展的影响因素。

2.2 基于文献计量的影响因素关联分析

科学计量学可以通过数学方法来统计和可视化捕捉研究领域的网络结构，常见的分析工具包括

CiteSpace和VOSviewer^[17]。CiteSpace软件通过共现、共被引用、作者、关键词等分析，讨论该研究领域的当前研究状态和发展动态^[18]。VOSviewer软件具有强大的数据处理能力，同时能够将处理结果可视化。节点和字体的大小对应文章数量的多少，节点之间连接线的宽度和距离表示相互之间的接触程度，不同的颜色代表不同的簇。本文利用VOSviewer软件进行统计和网络映射分析，并对选取的51篇文献绘制共现网络图，确保文档主题与SAF一致。同时，本文系统识别了民航业SAF发展的影响因素，并绘制了影响因素的共现图。关键词共生网络描绘了文献主题与影响因素之间的关系。

2.3 影响因素评估建模

为辨识重要的影响因素或不同因素的显著性，本文构建包含影响因素的频次(F_i)和文献被引次数(Q_i)指标的评估模型。前者为单个影响因素在所有检索到的信息中出现的次数(每篇网页和文章仅统计一次)，代表有多少篇网页和文献提到了该影响因

素；后者为包含该影响因素的被引率最高的文献的年平均被引次数，代表该影响因素的权威性和重要性。本文根据两个指标的综合评价，对影响因素的显著性进行评价。

在爬取到的2 680条网页信息和检索到的51篇文献中，某一个影响因素出现的频次表示有多少研究认为该影响因素会影响SAF的发展。某一个影响因素的重要性与其在文档中出现的次数成比例地增加^[19]。该值越显著，说明影响因素越具有普遍性。本文使用 F_i^* 表示影响因素频次的归一化值，如式（1）所示：

$$F_i^* = \frac{F_i - \min F_i}{\max F_i - \min F_i} \quad (1)$$

式中， i 代表第 i 个影响因素， $i = 1, 2, \dots, 10$ 。

在所有研究影响因素的文献中，以年平均被引率最高的文献作为评价指标，评估影响因素的重要性。被引率是衡量学术影响力的一种有代表性、简单、标准及客观的方法^[20]。文献的被引率越高，表明研究该影响因素的文献质量越高，反映了该影响因素的权威性和重要性。本文使用 Q_i^* 表示影响因素文献被引次数的归一化值，如式（2）所示：

$$Q_i^* = \frac{Q_i - \min Q_i}{\max Q_i - \min Q_i} \quad (2)$$

当指标维度单一、含义独立且无明确优先级排序依据时，等权赋值是避免主观偏差的最优简化方法^[21-23]。从指标核心属性来看，评价模型中的 F_i 与 Q_i 具有同等重要的评价价值且功能互补。 F_i 反映某影响因素被学术界、行业界关注的广泛性：其值越高，代表该影响因素的覆盖范围越广； Q_i 反映研究某影响因素的成果的权威性：其值越高，代表该影响因素的深度与学术认可度越强。二者分别从“广度”和“深度”两个维度共同构成了影响因素显著性的评价基础，不存在主次之分，赋予同等权重。本文将综合评价指标记为 C_i ，如式（3）所示：

$$C_i = aF_i^* + bQ_i^* \quad (3)$$

式中， a 、 b 为权重指数，取值均为0.5。

由于两个指标均为正，因此两个指标的值越大越好。具体流程如图3所示。

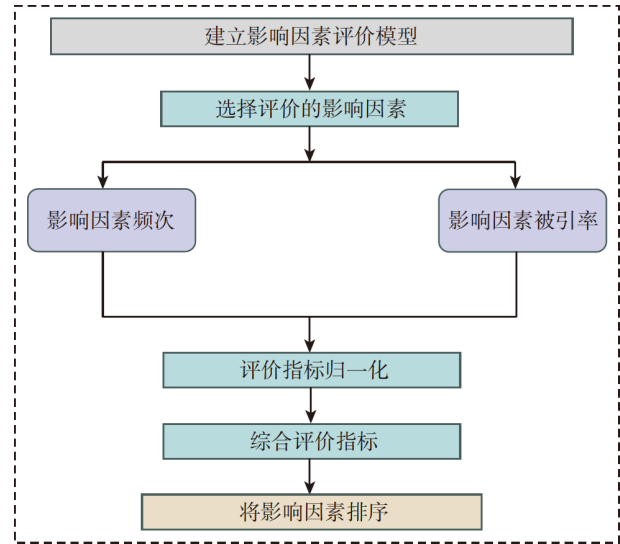


图3 影响因素评价模型流程

Fig.3 Process of influencing factor evaluation model

2.4 基于德尔菲法的关键影响因素识别

为量化SAF发展技术路径相关影响因素之间的相对显著性，本文采用德尔菲法系统获得关键排名分数。德尔菲法是一种集体决策工具，基于多位专家的专业知识、经验和个人判断能力，其核心特征在于参与者匿名参与、多轮反馈机制及结果的统计分析^[24-25]。在评估影响因素及其重要性后，需要明确在SAF全产业链中，哪些特定阶段应该优化或重点关注哪些影响因素。为收集专家意见，本文采用在线方式，设计相关问卷，采用德尔菲法的一般步骤进行了两轮收集。第一轮的结果被纳入第二轮问卷中，以相互了解其他专家的观点。第二轮的结果被视为最终结果。影响因素在时间维度上的重要性排序流程如图4所示，具体步骤如下：

步骤1：专家选择。本文选取国内外从事专业技术岗位和管理岗位的31位经验丰富的专家参与问卷调查。各位专家分别来自民航组织、航空公司、飞机制造企业、SAF技术开发企业、生物航煤配套技术咨询有限公司、高校和航空业相关的科研单位等。

步骤2：确定问题。为确定SAF发展技术路径，各专家以2050年左右为时间点，根据影响因素的评价结果，对整理分析得到的10类影响因素的重要性进行排序。

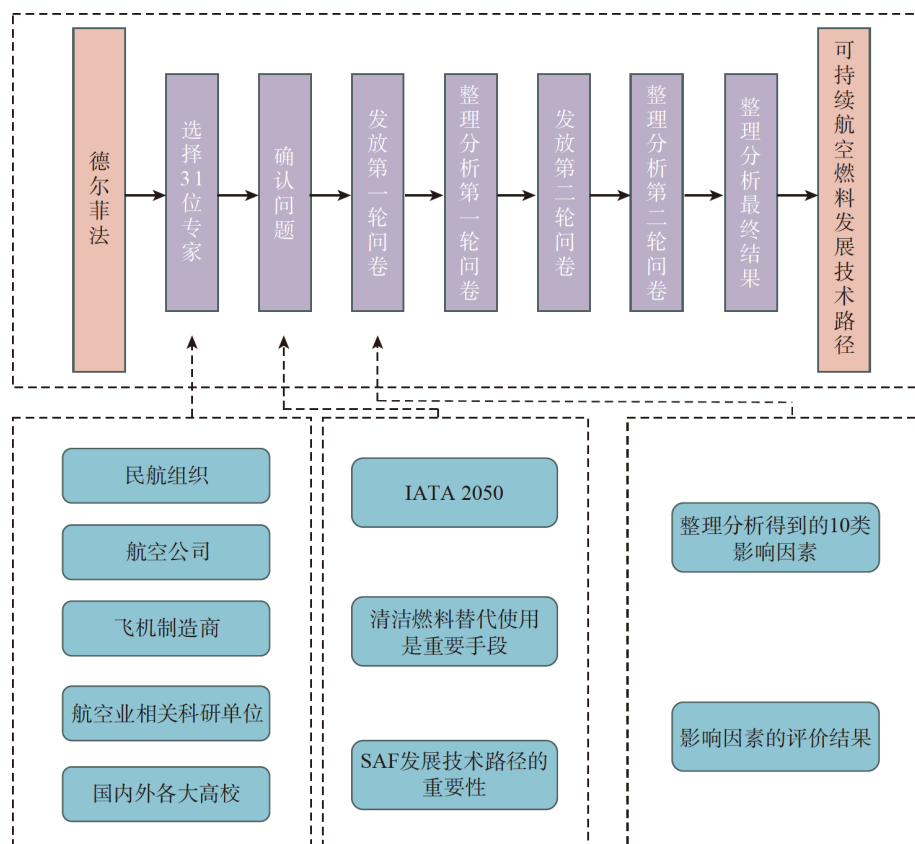


图4 德尔菲法确认各影响因素流程

Fig.4 Process of confirming various influencing factors using the Delphi method

步骤3: 收集和分析问卷。

步骤4: 发放第二轮问卷。各专家展示第一轮的结果, 并在了解第一轮结果后再次选择。

步骤5: 整理和分析结果。

3 结果分析

3.1 SAF全产业链的影响因素分析

基于SAF全产业链, 本文系统挖掘了民航业SAF发展的影响因素, 如表1和图5所示。产业链上游主要包含原材料获取、原材料运输和储存、原材料处理3个阶段。在原材料获取阶段, 主要影响因素包括原材料种类(包括废弃动植物油、生物质、城市和林业废弃物等)、原材料数量、原材料分布、原材料采购方式、政策和法规。不同的原材料决定着SAF的生产工艺, 进而影响成本。在原材料运输和储存阶段, 主要影响因素包括原材料运输类型、原材料储

存方式、基础设施建设、设备装置。原材料需被运输至加工厂进行储存, 不同的原料采用的储存方式不同。在原材料处理阶段, 主要影响因素包括原材料加工工艺、原材料加工成本、环境影响。在不同的加工工艺中, 原材料的转化率有所差异, 又因其工艺链条不一致, 其加工成本也有所不同。

产业链中游主要包含燃料生产、燃料认证和燃料推广3个阶段。在燃料生产阶段, 主要影响因素包括基础设施建设、设备和工艺装置、工艺技术路线、催化剂、燃料转化率。基础设施建设的规模决定着SAF的生产规模。设备和工艺装置是燃料生产的核心。不同的生产工艺有着不同的工艺链条和生产装置。而不同的工艺技术路线进一步决定着燃料的转化率。此外, 催化剂的种类也会影响燃料的转化率。在燃料认证阶段, 主要影响因素包括认证标准、认证机构和程序、认证周期、认证流程。相较于国外, 中国的燃料认证体系存在建立缓慢且不完善、认证

表1 基于全产业链的影响因素分类
Table 1 Classification of influencing factors based on entire industrial chain

产业链	详细阶段	影响因素
上游	原材料获取阶段	原材料种类
		原材料数量
		原材料分布
		原材料采购方式
		政策和法规
	原材料运输和 储存阶段	原材料运输类型
		原材料储存方式
		基础设施建设
		设备装置
原材料处理阶段	原材料加工工艺	
	原材料加工成本	
	环境影响	
中游	燃料生产阶段	基础设施建设
		设备和工艺装置
		工艺技术路线
		催化剂
		燃料转化率
	燃料认证阶段	认证标准
		认证机构和程序
		认证周期
		认证流程
燃料推广阶段	技术成熟度	
	经济性	
	政策和法规	
	社会认知度	
	产业链配套	
下游	储存和分配阶段	储存设施建设
		混合比例
		供应链体系
	加注和使用阶段	加注设施
		燃料质量
		航空器性能
		飞行条件
	运营和检测阶段	管理和检测措施
		质量和安全管理
数据分析与优化		
环境效益评估阶段	污染物排放	
	碳排放	
	公众认知度	
	政策和法规	

数据来源：基于 Web of Science 的文献整理、航空公司减排新闻和社会责任报告。

流程复杂、认证周期长等问题。在燃料推广阶段，主要影响因素包括技术成熟度、经济性、政策和法规、社会认知度、产业链配套。

产业链下游主要包含储存和分配、加注和使用、运营和检测及环境效益评估4个阶段。在燃料储存阶段，主要影响因素包括储存设施建设、混合比例、供应链体系。生产加工出来的燃料需要相应的储存设备进行存储，储存设施建设的规模决定着燃料的存储规模。混合比例决定燃料的使用量。在加注和使用阶段，主要影响因素包括加注设施、燃料质量、航空器性能、飞行条件。在运营和检测阶段，主要影响因素包括管理和检测措施、质量和安全管理、数据分析与优化。在环境效益评估阶段，主要影响因素包括污染物排放、碳排放、公众认知度、政策和法规。

本文通过文本挖掘和文献挖掘，聚焦SAF全产业链，将影响其发展的瓶颈和影响因素归纳为原材料、成本、资源、能耗、技术、需求、产能、公众认知、政策、基础设施10个方面。1）原材料：生产SAF所需要的物料，包括固体废弃物、植物秸秆、废弃动植物油脂等生物质资源，加工阶段所需的催化剂和氢气等。2）成本：影响SAF最终成本较高的相关因素，包括原材料收集成本、原材料运输和储存成本、环境成本、加工所需的水电成本、催化剂成本等。3）资源：SAF的原料可能引发食物与能源之间的竞争，影响食品安全。例如，某些SAF生产技术可能导致相对较高的碳足迹；SAF生产可能需要大量的水，导致对水资源的争夺；SAF的生产过程过于依赖非可再生能源，可能会影响整体的环境可持续性。4）能耗：在SAF全产业链中涉及的能源消耗，包括原材料获取阶段、生产过程阶段、储存和分配阶段的能耗。5）技术：生产加工SAF涉及的具体工艺技术路线、新型催化剂开发、燃料转化率提高、燃料认证体系建设等相关因素。6）需求：主要包括航空公司对SAF用量的需求。7）产能：SAF的生产能力，即在一定时间内的SAF产量。这类因素包括原料供应、生产技术、工厂规模、生产效率等。8）公众认知：社会对环保意识的重视程度，包括公众对SAF的认知、态度和反应等。9）政策：政府部门对SAF相关激励措施的引导和实施、相关法律法规体系的建设、国

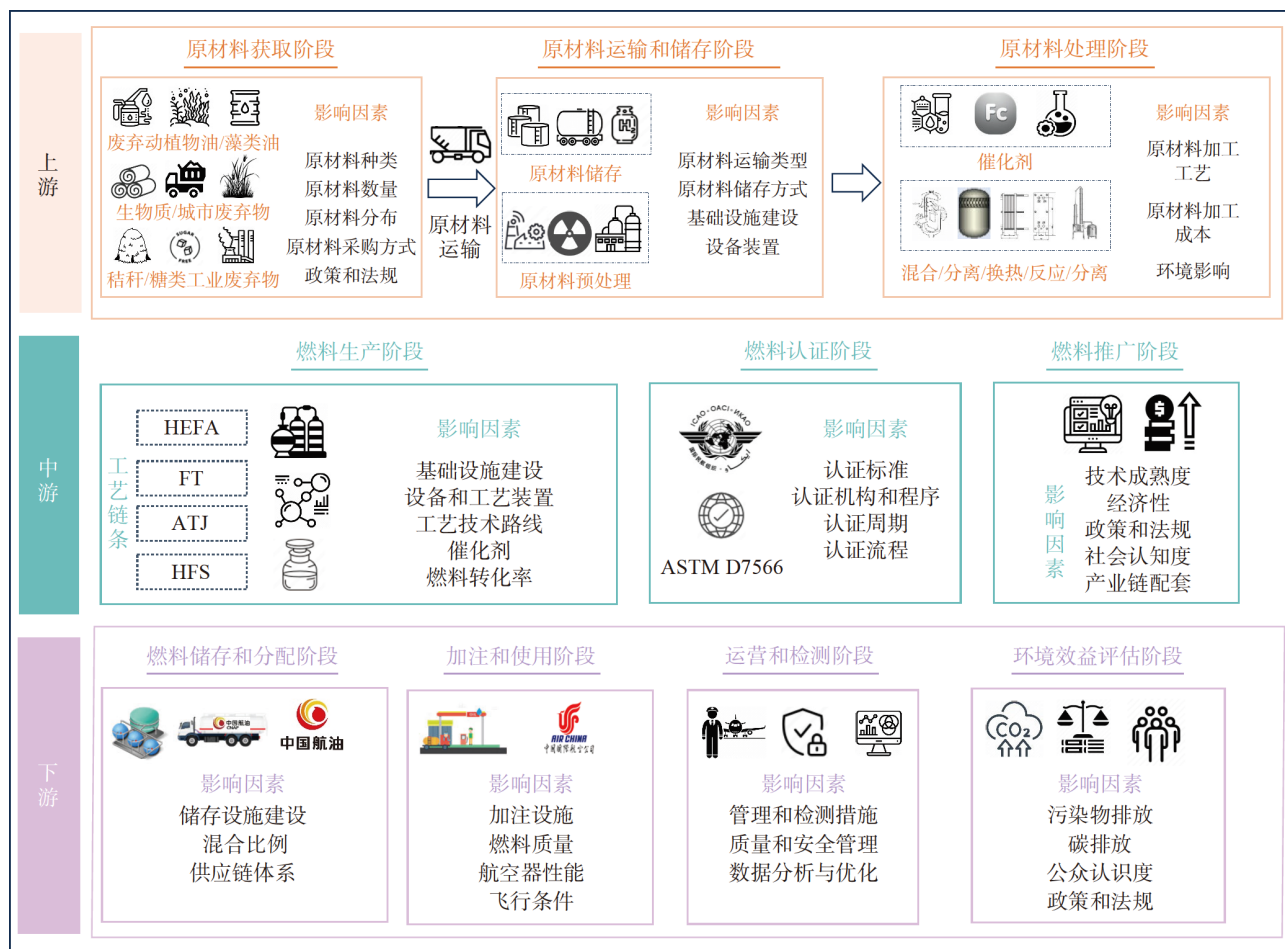


图5 SAF全产业链影响因素识别

Fig.5 Identification of influencing factors for SAF entire industry chain

注：“HFS”指加氢发酵糖合成异构烷烃技术。

际合作和协议等。10) 基础设施：在SAF生产、存储、运输和分发阶段的基础设施建设，包括生产设备技术设施、供应链基础设施、储存和分发实施等。相关研究综述如表2所示。

3.2 核心文献的主题及驱动因素分析

首先，对选取的51篇文献绘制共现网络图，确保文档主题与SAF一致。结果表明，Sustainable aviation fuel、Aviation、Biofuels、Sustainability为高频词汇和热点话题。在文献基础上，本文进一步系统识别了民航业SAF发展的影响因素，并绘制了影响因素的共现图。图6、图7分别为关键词、影响因素共生网络。结果表明，Cost、Technology、Raw material、Policy、Public perception、Supply chain、

Demand为民航业SAF发展的影响因素。

3.3 影响因素分类

本文首先根据选取的51篇文献和网络爬取到的信息，得出201个影响因素；然后去除重复表达与排放关联性极小的因素，保留60个影响因素；最后根据影响因素自身的特征对其进行归纳分析，得到10个分类：原材料、成本、资源、能耗、技术、需求产能、公众认知、政策、基础设施。表3~表6为网络共现图中出现频次较高的部分类别包含的影响因素。本文将以上10个分类整合到SAF的全产业链中，即上游、中游、下游3个阶段。此外，考虑到SAF在全产业链中还会受到部分外在条件的影响，如资源、公众认知、政策等影响因素，本文还加入了外在条

表2 相关研究综述
Table 2 Review of related research

文献来源	发表时间	原材料	成本	资源	能耗	技术	需求	产能	公众认知	政策	基础设施
ZHANG 等 ^[26]	2022	√	—	√	√	—	—	—	—	—	—
GUTIÉRREZ-ANTON 等 ^[27]	2017	—	—	—	—	√	—	—	—	—	—
HABERMEYER 等 ^[28]	2023	√	—	—	—	—	√	—	—	—	—
WANG 等 ^[9]	2022	√	√	√	—	—	—	—	—	—	—
MOFIJUR 等 ^[29]	2022	√	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CHAO 等 ^[30]	2019	—	—	—	—	—	√	—	√	√	—
SONG 等 ^[31]	2023	—	√	—	—	√	—	—	—	—	—
AHMAD 等 ^[7]	2021	—	—	√	—	—	—	—	√	—	—
YILMAZ 和 ATMANLI ^[32]	2021	√	—	√	—	√	—	—	—	—	—
ESWARAN 等 ^[33]	2021	√	√	—	—	√	—	—	—	√	—
HADDAD 和 FAWAZ ^[34]	2013	—	√	√	—	√	—	—	—	—	—
GUTIÉRREZ-ANTONIO 等 ^[35]	2018	√	—	√	—	√	—	√	—	—	—
SHAHRIAR 和 KHANAL ^[36]	2022	—	√	√	—	√	—	—	—	√	—
HARI 等 ^[37]	2015	√	—	√	—	√	—	—	—	—	√
GOH 等 ^[38]	2022	√	—	√	—	√	—	—	—	—	—
LEWIS 等 ^[39]	2019	√	√	—	—	√	—	—	—	—	—
TANZIL 等 ^[40]	2021	—	√	—	—	√	—	—	—	—	—
WEI 等 ^[41]	2019	√	√	—	—	—	—	—	—	√	—
PRUSSI 等 ^[42]	2019	—	—	√	—	—	√	—	—	—	—
WANG ^[43]	2019	√	√	—	—	√	—	—	—	—	—
KIM 等 ^[44]	2023	√	√	—	—	√	—	√	—	—	—
DEUBER 等 ^[45]	2023	—	√	√	—	√	—	—	—	—	—
OKOLIE 等 ^[46]	2023	√	√	√	—	√	—	—	—	√	—
BHATT 等 ^[47]	2023	√	√	—	—	√	—	—	—	—	—
MICHAİLOS 和 BRIDGWATER ^[48]	2019	—	√	√	√	—	—	√	—	√	—
WANG 等 ^[49]	2021	—	√	—	—	√	—	—	—	√	√
DEL MONTE 等 ^[50]	2022	√	√	—	—	√	—	—	—	—	—
PRUSSI 等 ^[51]	2022	√	√	—	—	—	√	—	—	—	√
CAPAZ 等 ^[52]	2020	√	—	√	—	√	—	—	—	—	—
GELEYNSE 等 ^[53]	2018	—	√	—	—	√	—	—	—	—	—
COLLIS 等 ^[54]	2022	—	√	—	—	√	—	—	—	—	—
PIPITONE 等 ^[55]	2023	—	√	—	—	√	—	—	—	—	—
DINIZ 等 ^[56]	2018	√	√	—	—	—	—	—	—	√	—
SEBER 等 ^[57]	2022	√	—	—	—	—	—	—	—	—	—
WANG 和 TAO ^[58]	2016	—	√	√	—	√	—	—	—	—	—
WALTER 等 ^[59]	2021	√	√	—	—	√	—	—	—	—	—
HUQ 等 ^[60]	2021	√	√	—	—	√	—	—	—	—	—
MARTINEZ-VALENCIA 等 ^[61]	2021	√	√	—	√	—	—	—	—	—	√

续表 2

文献来源	发表时间	原材料	成本	资源	能耗	技术	需求	产能	公众认知	政策	基础设施
GÓMEZ-DE LA CRUZ 等 ^[62]	2017	—	√	√	—	√	—	—	—	—	—
BOLONIO 等 ^[63]	2022	—	√	—	—	—	—	√	—	—	—
UMENWEKE 等 ^[64]	2023	—	√	√	—	—	—	—	—	—	—
RAMBABU 等 ^[65]	2023	√	—	—	—	√	—	—	—	—	—
TIWARI 等 ^[66]	2023	√	—	—	—	√	—	√	—	—	—
VAN DYK 等 ^[67]	2019	—	—	√	—	√	—	—	—	—	—
SU 等 ^[68]	2022	—	—	—	—	√	—	—	—	—	—
WHY 等 ^[69]	2022	√	—	—	—	√	—	—	—	—	—
OBNAMIA 等 ^[70]	2020	√	—	√	—	—	—	—	—	—	—
ALHERBAWI 等 ^[71]	2021	√	√	—	—	√	—	—	—	—	—
LIU 等 ^[72]	2021	√	√	—	—	—	—	—	—	√	—
DE SOUZA 等 ^[73]	2020	√	√	—	—	—	—	√	—	—	—
LIM 等 ^[74]	2023	—	√	√	—	—	√	√	—	—	—

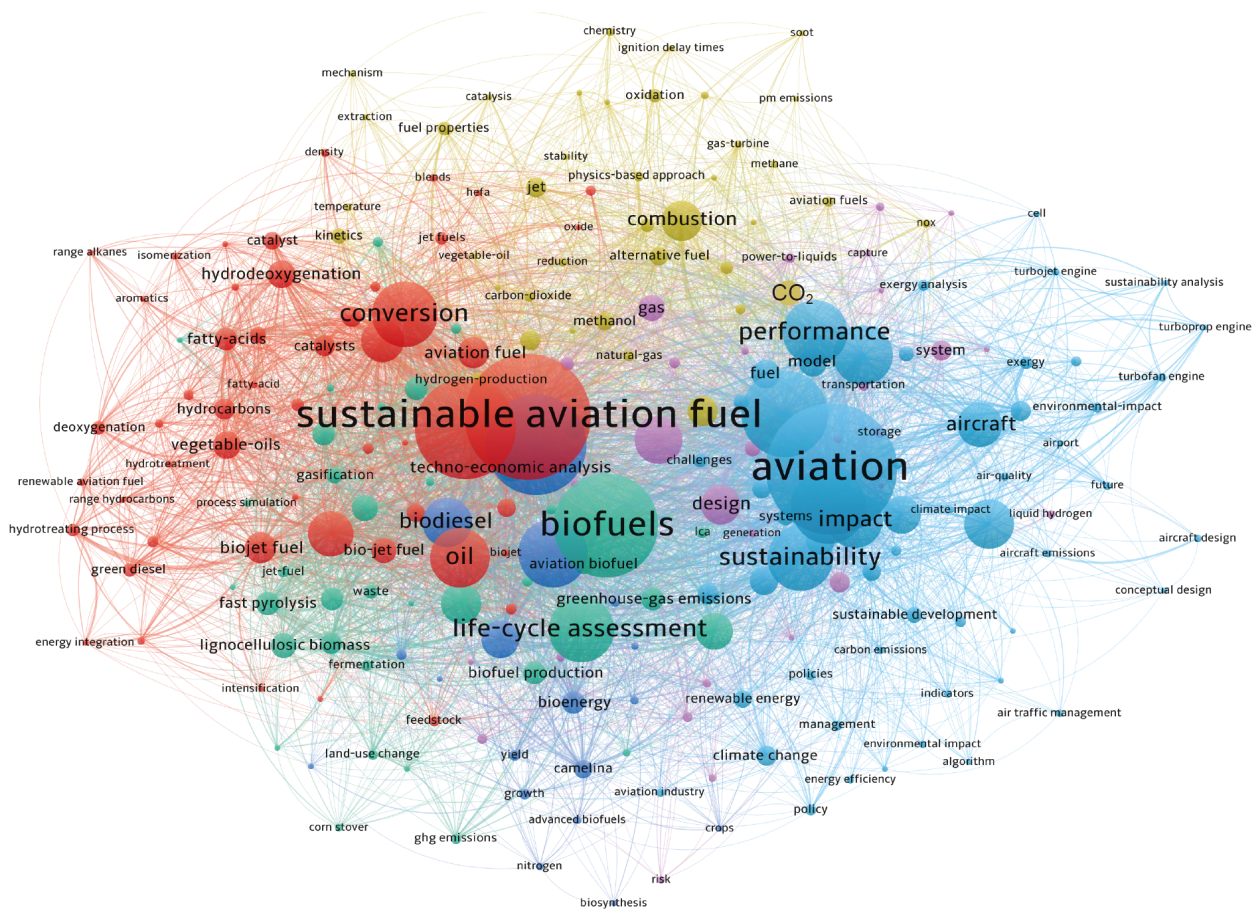


图6 关键词网络共现图

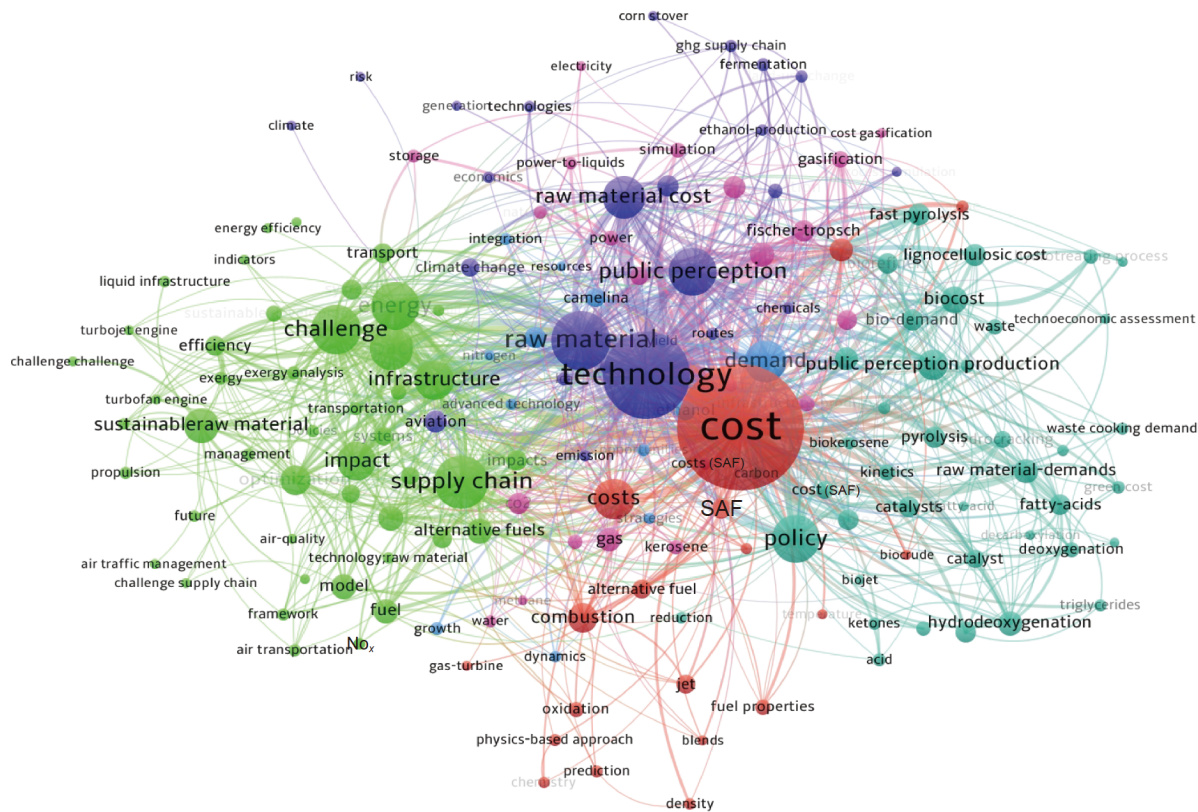


图7 影响因素网络共现图

Fig.7 Influencing factors co-occurrence network map

表3 原材料包含的影响因素文献综述

Table 3 Literature review on influencing factors of raw material

因素	来源	解释
原材料种类	文献[27]	目前生产 SAF 主要的原料类型, 包括农业废弃物、废弃动植物油脂、城市固体废物、微生物等
原材料数量	文献[75]	目前主流生产工艺原材料转化率下所需要的原材料供应能力
原材料分布	文献[61]	SAF 原料大多具有明显地域性或季节性, 导致分布不均匀, 进而影响原料供给
原材料搜集方式	文献[27]	原材料种类不同导致搜集方式不同, 进而导致搜集成本不同
原材料运输	文献[76]	原材料种类不同导致运输方式的类型不同, 进而导致运输成本不同
原材料储存	文献[76]	原材料种类不同导致储存方式不同, 进而导致储存成本不同
原材料预处理	文献[28]	原材料种类不同导致预处理方式不同, 所需要的处理设备也不同, 进而导致处理成本不同

件因素。本文将SAF的上游阶段、中游阶段、下游阶段、外在条件设为一级指标；原材料、成本、资源、能耗、技术、需求、产能、公众认知、政策、基础设施设为二级指标；由网络爬取到的信息统计和文献得出的60个影响因素设为三级指标。基于识别出的影响因素，本文构建影响因素评价指标模型，对不同阶段、不同类别的影响因素指标进行评价分析。

图8为通过网络爬取的关于SAF发展影响因素的

统计结果,共爬取到2 684条信息,通过人工筛选和去除不可用的信息,最终得到1 889条可用信息。本文分别使用总被引频次和总被引率两个评价指标对其进行评价。由图8可以看出,成本因素总被引频次处于最高水平,其次为技术、原材料和基础设施,4类因素的总被引率分别为81.00%、54.00%、35.00%和19.00%。该结果表明,以上4类因素是影响SAF发展的主要因素。此外,SAF发展还受到一些外部条件因

表 4 成本包含的影响因素文献综述

Table 4 Literature review on influencing factors of cost

因素	来源	解释
原材料采购成本	文献[7]	随着 SAF 产量的增加，所需的原材料增加，原材料成本是影响 SAF 总成本最主要的因素
原材料运输成本	文献[28]	运输原材料所产生的成本
原材料储存成本	文献[32]	储存原材料所需要的成本
原材料预处理成本	文献[7]	原材料二次加工所需要的成本
生产加工成本	文献[36]	使用不同的生产技术和方法产生的成本，包括生产过程中所需的能源成本，如电力、燃气等
副产物回收成本	文献[51]	生产阶段所产生的、可利用回收的副产品，如液化汽油、石蜡油等
劳动力成本	文献[36]	生产过程中所需的劳动力成本，包括原材料采集、生产、维护等环节的劳动力成本

表 5 技术包含的影响因素文献综述

Table 5 Literature review on influencing factors of technology

因素	来源	解释
生产工艺链条	文献[64]	目前美国材料实验协会（American Society of Testing Materials, ASTM）已经批准的 9 种用于生产合成烃组成的生产工艺路线
燃料转化率	文献[58]	决定 SAF 产量的重要因素之一
催化剂	文献[64]	研发新型催化剂有助于提高燃料转化率
能源回收	文献[50]	燃料转化工程中产生的可利用废热和废气，能够提高整体生产过程的能源效率
副产品回收	文献[50]	开发新的副产品或能源利用途径，提高整体生产工艺的经济性
燃料认证体系	文献[77]	建立和完善燃料认证标准体系能够进一步加快 SAF 的商业化进程

表 6 政策包含的影响因素文献综述

Table 6 Literature review on influencing factors of policy

因素	来源	解释
补贴和激励措施	文献[78]	政府提供的生产补贴可以降低生产成本，促进 SAF 产业的发展，直接或间接补贴终端用户使用 SAF，能够刺激市场需求
能源政策目标	文献[79]	强制或鼓励航空公司在其能源组合中使用一定比例的 SAF，同时设定减少温室气体排放的目标
环境法规和标准	文献[80]	确保 SAF 的生产和采购不会导致过度土地使用、森林破坏或生态系统崩溃
贸易政策	文献[81]	合作协议和贸易协定可促进 SAF 在国际市场上的流通
研发和创新支持	文献[82]	提供资金支持用于 SAF 的技术研发，以提高生产效率，支持 SAF 示范项目的建设，鼓励采用先进的生产技术
税收政策	文献[83]	调整燃料税率，对 SAF 提供税收减免，以促使更多企业使用 SAF

素的影响，如公众认知、政策等。从长期发展视角来看，随着技术工艺水平的不断提升和基础设施的不断完善，这些影响因素的占比也将随之发生变化。但就目前国内 SAF 发展情况来看，成本、技术、原材料、基础设施仍是阻碍 SAF 发展的主要因素。

图 9 是对文献中 SAF 发展影响因素的统计结果。可以看出，51 篇文献讨论最多的影响因素类别为原材料、成本、技术、资源。高被引文献集中于 2020—2023 年。原材料的可持续供应是 SAF 商业化面临的重要挑战。SAF 的原材料应具备高产量、广泛分布、低

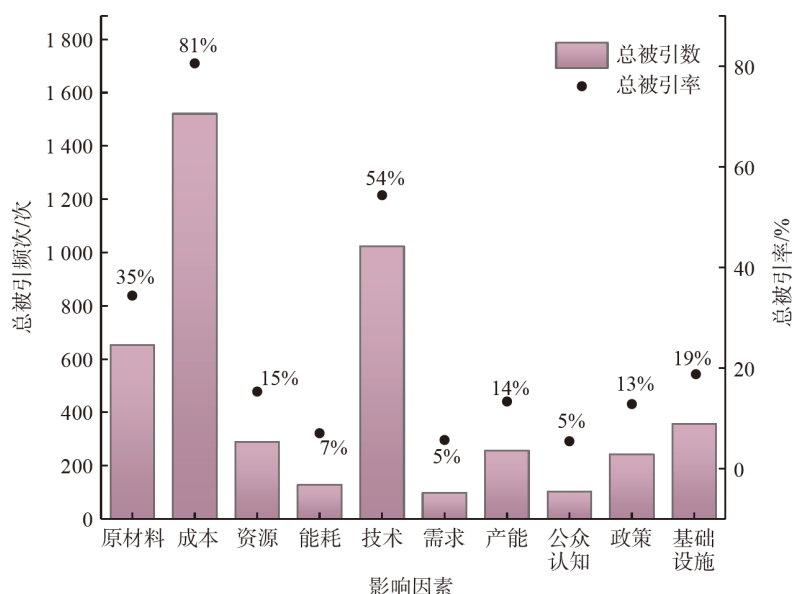


图8 文本挖掘影响因素统计
Fig.8 Statistical analysis of influencing factors via text mining

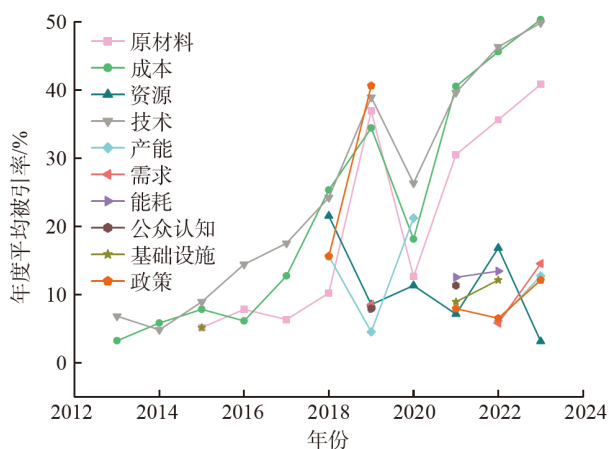


图9 文献影响因素统计结果
Fig.9 Statistical results of influencing factors from literature

成本、多样化获取方式、不与粮食生产发生冲突、不导致森林砍伐等特性。而实现其长期且大规模生产的关键在于，开发出仅需最少土地、水资源和营养物质的原料。在目前商业化水平最高的加氢脱氧-异构化（Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, HEFA）技术水平下，充分利用餐饮废油、城市固体垃圾等来提高废弃油脂的回收率，是提高原料可利用性的重要途径。影响SAF生产成本的主要因素包括原料成本、运营费用、设备投资、转化效率、产品产量以

及馏分燃料和副产品市场售价等。为进一步降低成本，未来应专注于提升原料的生产效率，开发成本效益更高的催化剂，减少设备成本，优化反应参数和工厂规模，提升副产品的市场价值。在所有的技术路线中，HEFA将在很长一段时间内占据市场主体地位，但考虑到其原料供应存在一定限制，整体产能不会出现迅速增长。随着技术日益成熟，气化-费托（Fischer-Tropsch, FT）合成工艺和醇制喷气燃料（Alcohols-to-Jet, ATJ）工艺的成本持续下降，且其原料可选项较多（农林废弃物、城市固体废物、工业废弃物等），其市场份额将有望在2030—2050年不断提升。

除上述4类影响因素外，产能、需求、能耗、公众认知、基础设施、政策因素的指标表现良好，表明这些因素同样具有显著的影响力度。原因在于，以上影响因素之间存在密切的关联性，彼此之间相互作用。为更好地说明SAF全产业链中每一类影响因素的重要程度，本文将对影响因素评价模型的结果进行分析。

3.4 影响因素统计排名

基于3.3节的分析结果，本文得到了影响因素的分类。这些分类因素分布在SAF的全产业链中，包括

燃料的上游、中游、下游阶段。此外,还包括一些外部条件,包括公众认知、政策等影响因素。燃料的上游阶段包括原材料、资源、成本等因素;燃料的中游阶段包括技术、产能、基础设施等因素;燃料的下游阶段包括公众认知、政策、能耗、需求等因素。本文利用影响因素评价模型分别对各个阶段的影响因素指标进行评价分析,如表7所示。

表7 影响因素类别评价结果
Table 7 Evaluation results of influencing factor categories

产业链	类别	<i>F</i>	<i>Q</i>	<i>C</i>
上游	原材料	3.312 9	1.999 7	2.656 5
	资源	0.938 0	0.539 4	0.738 8
	成本	3.827 3	2.792 2	3.309 9
中游	技术	2.499 6	1.560 6	2.030 2
	产能	0.829 9	0.649 3	0.739 7
	基础设施	0.502 3	0.148 6	0.325 5
下游	能耗	0.316 8	0.078 1	0.197 5
	需求	0.468 7	0.410 5	0.439 7
外部因素	政策	0.661 8	0.407 1	0.534 5
	公众认知	0.209 0	0.111 4	0.160 2

由表7可知,影响SAF全产业链发展的主要因素为原材料、成本和技术,指标综合值较高,分布在上游和中游阶段。这3种因素直接影响SAF全产业链的发展。此外,外部条件对SAF全产业链发展的影响也较为明显。其中,政策因素具有显著影响。

图10为各类别影响因素的评价结果。可以看出,原材料种类、原材料数量、原材料分布的指标综合值较高,分别为0.522 5、0.519 2、0.402 3,表明这3类影响因素受到的关注和研究最多。但是其他影响因素,如原材料的搜集方式、运输和储存等也是重要影响因素。影响原材料的主要因素包括水资源、土地资源、能源资源等,解决以上资源问题将对SAF发展起到推动作用^[84]。

成本因素的指标综合值占比最高,为29.731 9%。成本因素分布在SAF产业链各个阶段。其中,原材料采购成本、生产加工成本和原材料运输成本的指标综合值较高,分别为0.796 9、0.628 7和0.466 7,即主要成本因素分布在SAF产业链的上游和中游阶段。如何有效降低原材料的采购成本、生产加工成本和运

输成本,对降低SAF全产业链成本具有重要意义。

生产工艺链条、催化剂和燃料认证体系的指标综合值较高,分别为0.570 9、0.491 1和0.350 4。作为技术层面的重要影响因素之一,目前共有9条工艺链条得到了ASTM核准,而可商业化的技术链条不足50%。同时,燃料认证体系也会影响生产工艺链条。因此,未来应进一步促进和优化工艺链条,完善和简化相应的认证体系。此外,选择催化效率更高的催化剂,能够进一步提高燃料转化率,从而提高SAF产能。

产能的主要影响因素为市场需求、技术发展、政府政策支持、成本和经济因素。其中,成本和经济因素及市场需求是制约产能发展最主要的因素,其次是技术发展和政府政策支持。基础设施的主要影响因素为厂房建设、厂房设备建设、投资环境和资金支持、技术标准和认证。其中,厂房建设、厂房设备建设是制约基础设施发展最主要的因素,其次是投资环境和资金支持、技术标准和认证。能耗的主要影响因素为生产过程能源消耗、运输和配送过程能源消耗、生产规模 and 效率。其中,运输和配送过程能源消耗、生产过程能源消耗是能耗层面最主要的因素,其次是生产规模和效率。需求的主要影响因素为技术发展水平、供应链稳定性、政策支持和航空业市场。其中,技术发展水平、政策支持和航空业市场为最主要的因素,其次是供应链稳定性。政策的主要影响因素为补贴和激励措施、能源政策目标、环境法规和标准、贸易政策、研发和创新支持、税收政策。其中,补贴和激励措施、研发和创新支持为最主要的因素,其次是能源政策目标、环境法规和标准、税收政策。公众认知的影响因素包括信息传播渠道、科学普及程度、环保意识、成本和经济因素、燃料宣传和普及。其中,环保意识、成本和经济因素为主要影响因素。

3.5 SAF 发展时间技术清单

本文采用德尔菲法对统计得到的10类影响因素进行排名,分别创建了2050年前和2050年后民航业SAF各影响因素优先级排序结果,如图11、图12所示。

由德尔菲法调查结果可知,66.00%的专家认为

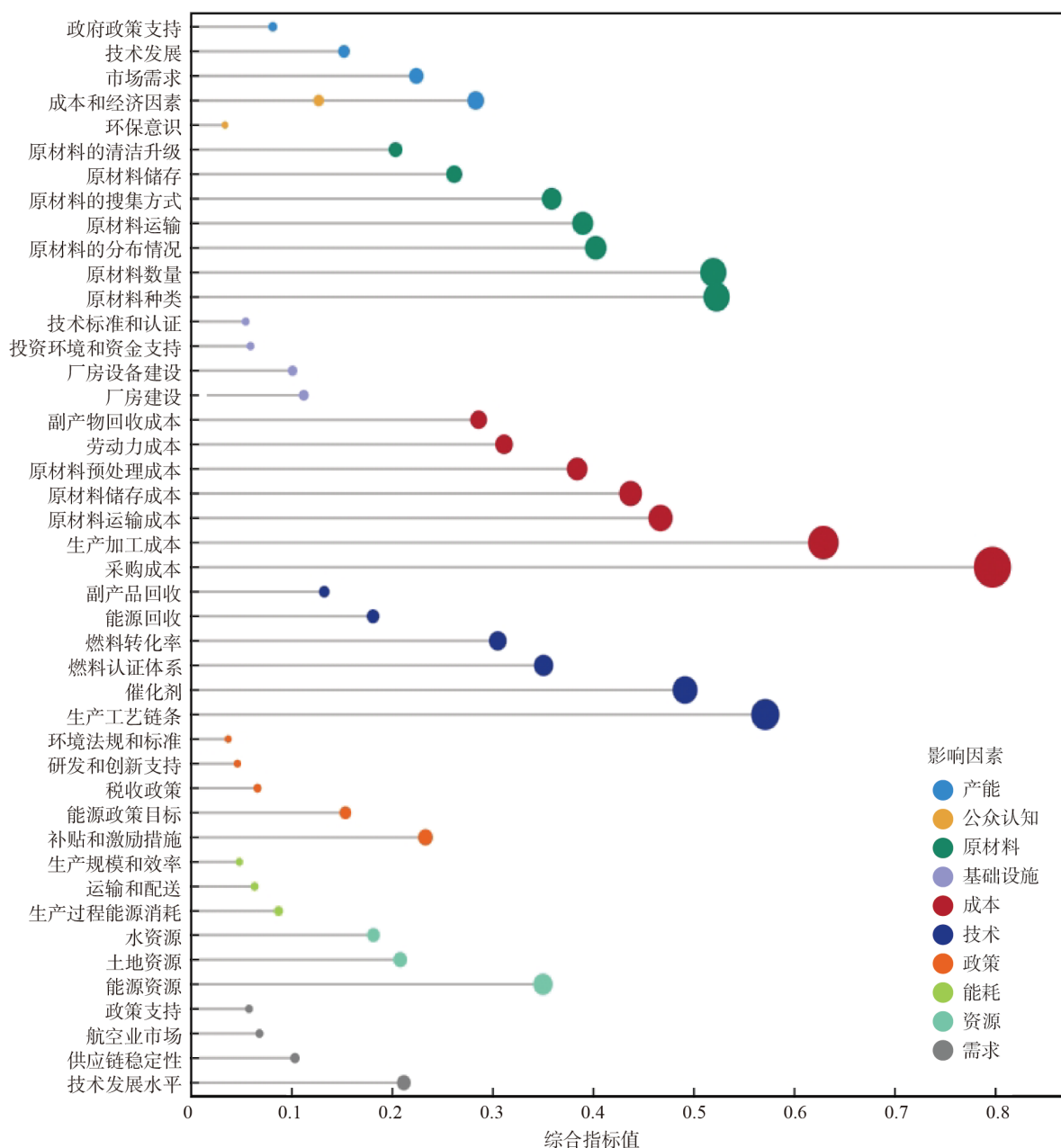


图10 各类别影响因素综合指标值评价结果

Fig.10 Evaluation results of comprehensive index values for various types of influencing factors

在2050年前，成本、技术和原材料是影响SAF发展最重要的因素，其综合得分在所有影响因素中的排名分别为第一、第二和第三。成本高和原材料短缺是目前SAF加速发展面临的主要挑战。但是，这种发展趋势并不是长期的。从短期来看，降低成本有助于推进SAF市场的快速壮大，但存在一定的上限。因为在不同的SAF生产工艺链条下，使用的原材料也有所

不同。在2035年前，SAF生产工艺以酯及脂肪酸加氢工艺为主，其原材料主要为废弃油脂或专门种植的油料植物。由于工艺流程较短，相较于其他工艺，其生产成本最低。因此，HEFA成为短期内SAF生产的首选技术路线。然而，HEFA工艺面临原料短缺难题。由于原材料供给紧张，其实际产量较规划产能存在较大差距。当供给受限时，需求的不断增高和

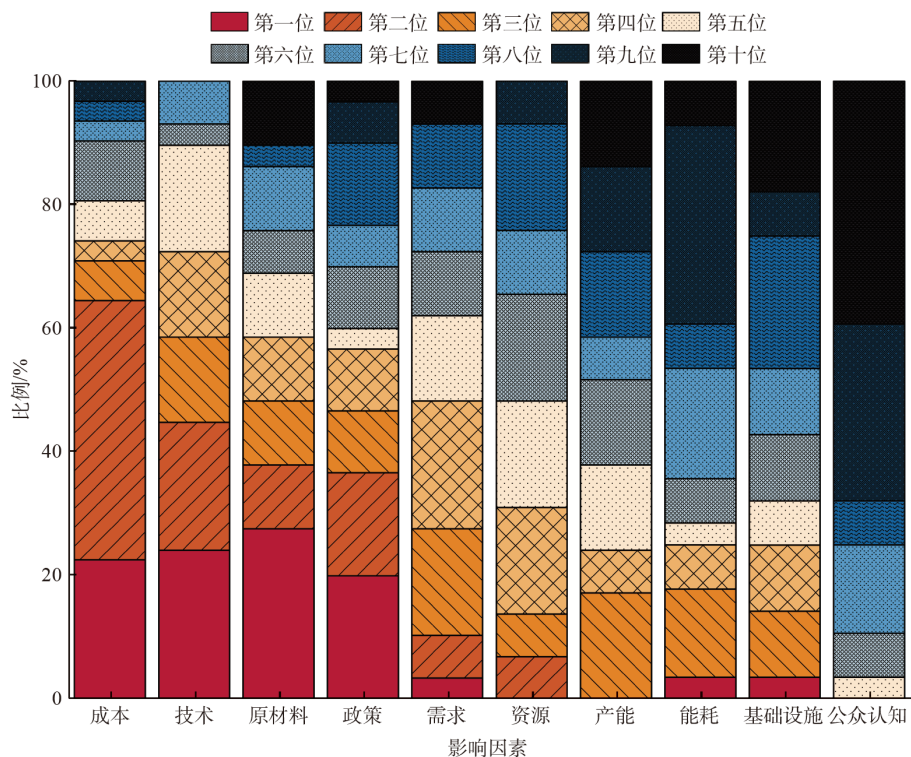


图 11 2050 年前各影响因素优先级排序结果

Fig.11 Prioritization results of various influencing factors before 2050

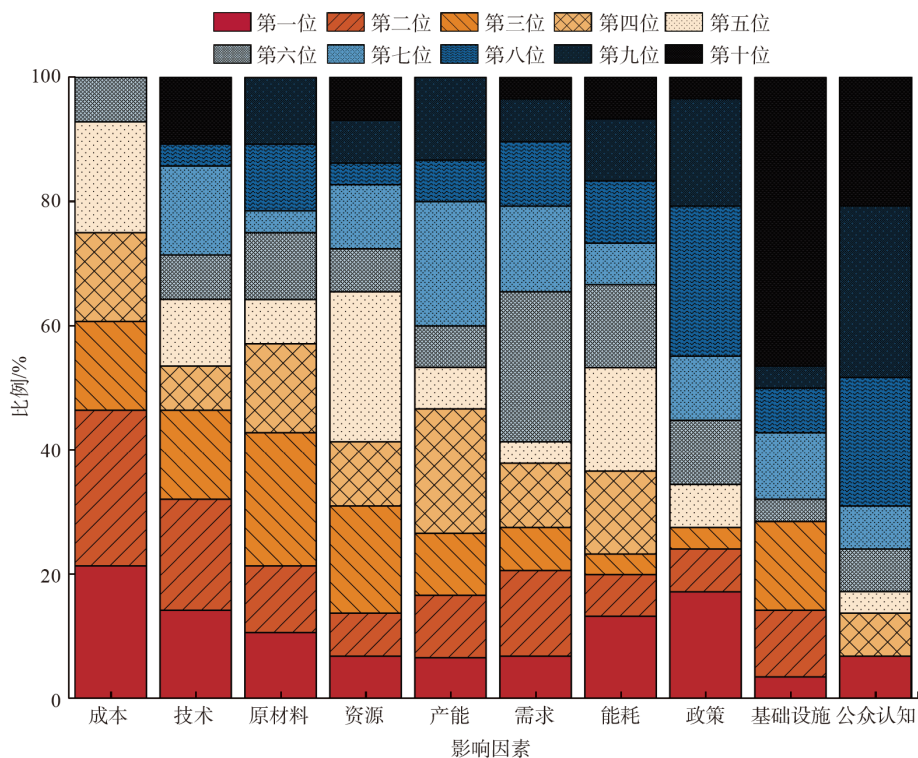


图 12 2050 年后各影响因素优先级排序结果

Fig.12 Prioritization results of various influencing factors after 2050

市场竞争的日益激烈将进一步推高SAF的成本，影响SAF产业的发展。在2035—2050年，随着HEFA产能达到峰值，SAF原材料的进一步供应将由以具有产量高、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的小农为主的FT燃料来补充。虽然从长远来看，利用秸秆生产SAF能够带来多方面的收益，但在短期内，秸秆仍面临供应不足和采购成本较高等实际挑战。在供应量方面，秸秆的实际收集量较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，根据统计数据，宁波市及其周边地区的秸秆年产量预计可达60万吨。然而，该地区的农田普遍较小且分散，导致秸秆的收集工作较为困难。农民通常倾向于将秸秆直接还田，而不进行收集，导致该地区实际收集的秸秆量不足10万吨。同时，较低的收集效率增加了最终的采购成本。秸秆的收集效率较低，从而推高了采购成本，原因主要有以下三方面：1）中国农业机械化程度相对较低；2）秸秆本地处理、利用能力较差，提高了原材料运输成本；3）缺乏统一的秸秆收集、储存、运输技术和服务规范，相关环节缺乏政策指导。

从图12可知，2050年后的各影响因素占比总体

较为接近，分别为14.30%、11.61%、11.48%、8.37%、10.17%、10.65%、10.37%、10.11%、6.86%、6.07%。成本、原材料、技术和政策因素不再是突出的影响因素。原因主要在于，随着绿电制氢技术和生物质原料供应逐渐达到规模化上限，合成燃料技术因其产能和成本效益成为SAF市场的主导力量。由德尔菲法调查结果可知，按照中国SAF目前的发展趋势，38.71%的专家认为在2050年SAF产量将达到6 000万吨左右。同时，通过采用SAF和其他替代能源技术，中国航空业预计将在未来实现全面的零碳排放转型。

SAF要实现长期可持续发展，需找到新突破口。

图11表明，2035年前SAF规模化生产主要受成本（14.25%）、技术（14.05%）、原材料（11.72%）制约，核心制约因素为废弃油脂原料量达到饱和，需发展新的燃料工艺。图13为2050年前后各影响因素综合评价结果。图14（a）表明，61.29%的专家支持ATJ工艺，58.06%的专家支持气化-FT工艺，这两种工艺将成为2035年后的主要工艺链条。图14（b）表明，2050年前工艺水平一定时，可从工艺设备装置（64.52%）、原材料获取运输（61.29%）、SAF储存及

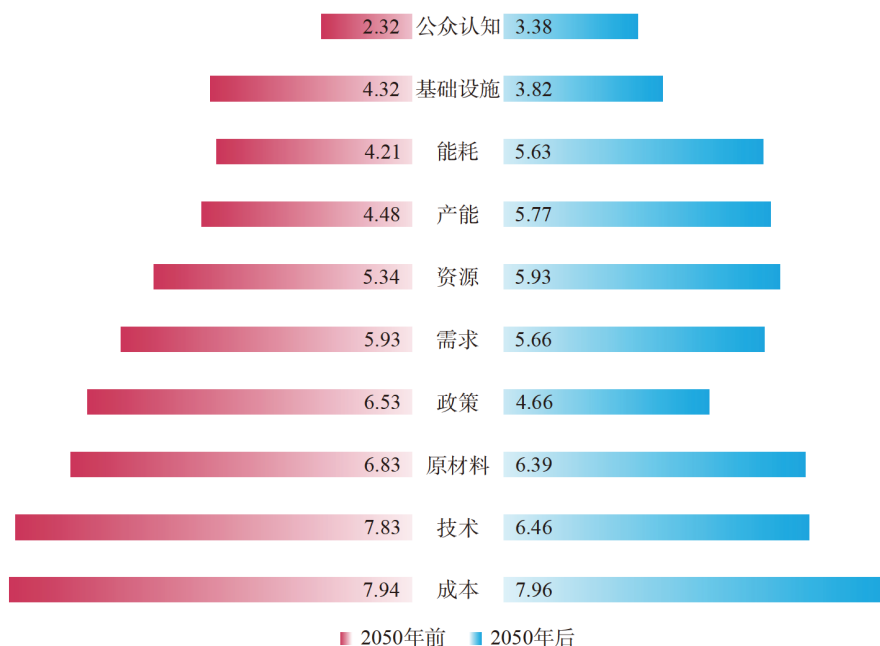


图13 2050年前后各影响因素综合评价结果

Fig.13 Comprehensive evaluation results of various influencing factors before and after 2050

催化剂（均值为45.16%）层面优化成本。政策对SAF发展至关重要，专家认为需在4个方面开展政策支持。1）原材料补贴政策：35.48%的专家认为应加大原材料补贴力度。其中，84.00%的专家建议将补贴标准提高10%~43%，以缓解原料供应不足和成本过高的问题。2）消费量激励政策：29.03%的专家关注消费量政策的完善。其中，33.33%的专家认为现有政策执行效果不佳，建议将消费激励力度提升30%~50%，以扩大SAF市场需求。3）SAF掺混比例政策：12.90%的专家建议提高SAF强制掺混比例。在相关意见中，75.00%的专家认为当前掺混政策执行不到位；66.67%的专家主张分阶段提升掺混比例至5%~50%；另有33.33%的专家建议直接将掺混比例提高至50%以上（该意见可能代表长期目标，而非短期可实现的政策要求）。4）研发资金支持政策：16.13%的专家呼吁增加研发资金投入。其中，20.00%的专家认为现有研发支持政策执行不足，建议将研发补贴或专项资金规模提高30%，以推动技术突破和成本下降。结合前期分析及德尔菲法结果，图15列出了按重要性排序的SAF发展时间技术清单，并针对全产业链主要影响因素给出了发展路径及政策建议。

在SAF产业链上游，原材料、成本和资源是主要影响因素。在原材料与成本优化层面，2035年前需搭建集成信息发布、在线交易、支付结算及市场分析等功能的废弃油脂交易平台，吸引合法回收与处

理企业入驻，并通过低息贷款等政策降低收集成本；同时对SAF生产企业按单位产量和项目规模给予财政补贴，参照生物柴油企业实行增值税全额征收后100%退还的政策，以降低固定投资成本。2035—2050年可推动SAF与煤制油产业结合发展，借助二者相似的FT流程复用现有设施，减少初期投资，并依托华北、西北煤制油项目靠近秸秆主产区的区位优势，降低原材料收集与运输成本；此外通过国产化气化工艺装备替代进口设备、扩大产业规模等方式改进工艺与实现规模化生产，进一步压缩生产成本。在资源层面，回收生产过程中的余热、余压等，进行二次利用以提升能源利用效率；同时推行轮作、保护性耕作等措施，实施可持续土地管理，合理规划原材料种植区域，避免过度开垦与土地退化。

SAF产业链中游受技术、成本、产能和基础设施建设影响显著。在技术层面，2035年前要研发催化效率更高的催化剂，通过封装活性中心等结构增强性能以提升转化效率，还可利用转基因技术提高非食用油料作物含油量，弥补油脂类原料不足；2035—2050年依托成熟煤油生产体系，开发优化以秸秆、木质废料为原料的FT工艺，借助国内农林业生物质资源优势与煤制油产业基础的FT装置转型，提升产能并降低成本；2050年后则聚焦可再生电力制氢、碳捕捉利用及氢碳合成等先进技术，开发新型合成燃料工艺，突破生物质原料限制。在产能层面，需

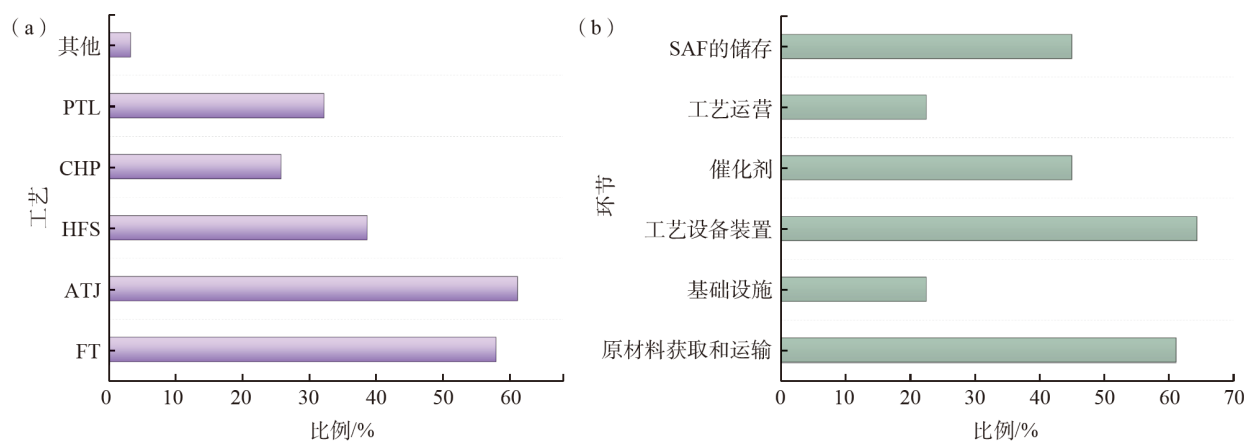


图14 2050年前工艺布局和工艺链条成本优化

Fig.14 Process layout before 2050 and process chain cost optimization

注：“PTL”指动力合成燃料技术；“CHP”指催化水热解技术。

拓展低成本、高储量的秸秆基FT工艺链条，与现有HEFA工艺结合实现降本增产；同时由政府出台航司SAF强制掺混政策，以需求拉动产能提升。在基础设施建设方面，可参照新能源汽车、氢能产业政策，按产能或项目规模对SAF企业基础设施建设给予财政补贴；同时，还需改造升级机场附近航油加注设施，确保SAF与现有储罐、输油管道等兼容，适配未来新型掺混航空煤油的储存、掺混与加注需求。

SAF产业链下游的核心影响因素为能耗、政策和需求。在能耗层面，一方面需对生产过程中的余热、余压等副产品循环利用以减少能耗；另一方面需结合原材料与企业分布优化物流路线，采用电动或生物燃料运输工具、轻量化可重复包装材料，降低运输配送环节能耗与碳排放。在需求层面，需建立类似绿色电力证书的油证分离SAF消费证明交易机制，打破地理位置限制；政府需出台航司燃油SAF强制掺混政策以提振市场需求；2035年前在北京、上海等枢纽城市机场设置SAF加注试点及试点航线，核算实际成本并评估技术成熟度；2035—2050年以试点机

场为核心推广产业链建设，扩大产能与构建稳定供应链，同时加强与国际伙伴合作，搭建区域SAF供给使用网络。

针对产业链外部的政策与公众认知因素，政策层面需设定明确目标，2035年SAF强制掺混比例达10%，2050年接近50%；通过碳配额等方式将航空业纳入碳市场强制减排，或要求航司为传统航煤碳排放付费，提升SAF竞争力；还需借助转型金融、绿色金融工具，通过财政基金、绿色信贷等渠道加大资金支持，重点扶持小型初创企业以降低商业风险。公众认知层面，要通过媒体宣传、教育项目等提升公众对SAF的重视，同时推出SAF可选航班，建立消费透明度，让公众能通过选择支持可持续航空发展。

3.6 与基于专利数据的融合对比分析

为从技术创新与知识产权视角进一步验证和补充本文的研究结果，本节将研究结果与基于专利数据的融合对比分析。具体而言，本文参考了DE OLIVEIRA等^[85]运用图论方法对全球SAF专利网络的

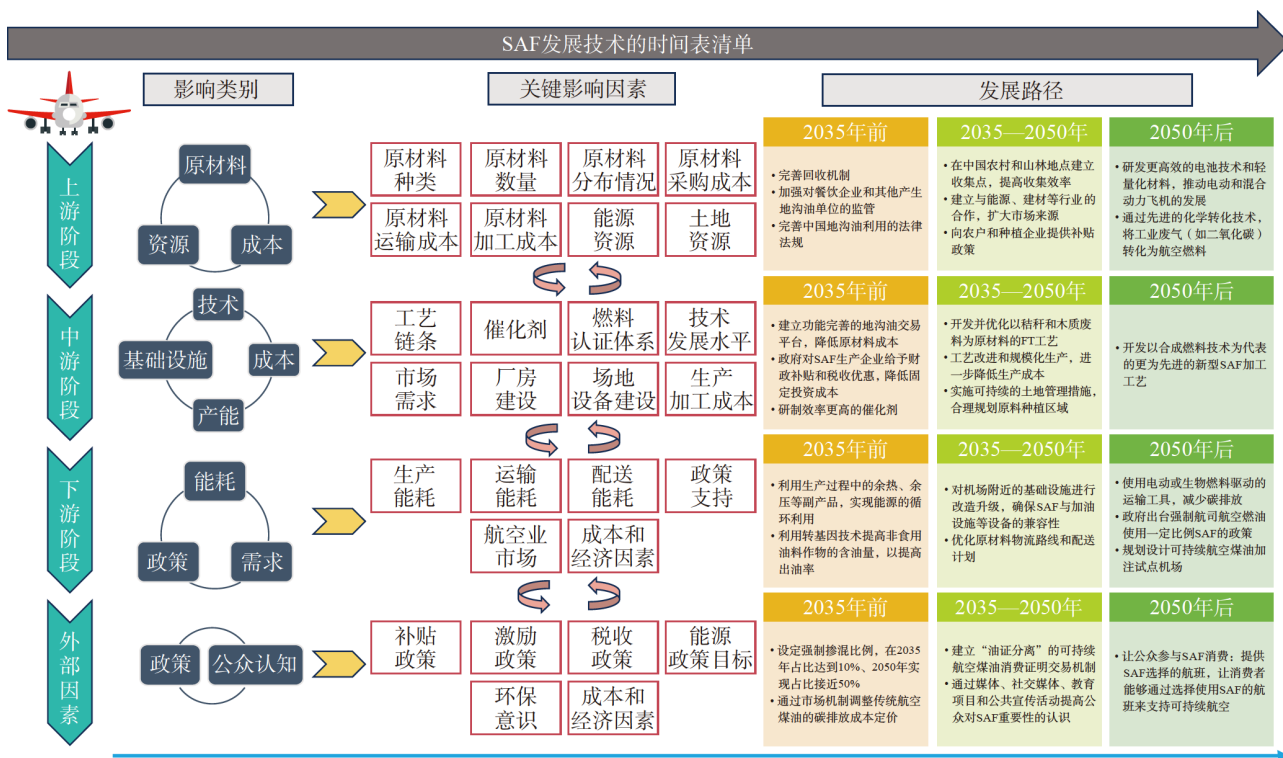


图15 SAF发展技术时间轴清单
Fig.15 Timeline list of SAF development technologies

分析、王雅等^[86]对中国SAF专利技术的早期研究及何音等^[87]针对中国通用航空油料保障体系的专利分析。

DE OLIVEIRA等^[85]、王雅等^[86]的专利分析聚焦于SAF的生产技术，如加氢处理与FT工艺等，核心关切在于如何生产绿色航空燃料。而何音等^[87]的专利研究则突显了保障技术的发展滞后，如储存、加注与输送系统，核心关切在于如何应用绿色航空燃料。以上研究从专利数据出发，共同揭示出中国SAF发展的整体图景：虽然前端生产技术已具备一定基础，但后端应用保障体系仍存在明显短板。本文基于全产业链的识别结果明确指出，基础设施是影响SAF发展的重要因素。何音等^[87]基于专利数据的分析结果进一步证实并细化了该判断，指出了供油网络区域分布不均、供油方式不匹配、输送渠道不畅等具体问题。专利数据表明，SAF的推广不仅依赖技术突破，更是一个系统工程，需技术与基础设施协同推进。

王雅等^[86]的专利分析明确指出，HEFA工艺已成为最主流的SAF生产技术，相关专利申请占比达44%，并以中石化等技术主体为代表，显示出较高成熟度。同时，该研究也指出，以生物质（如农林废弃物）为原材料的技术路线主要由国际企业（如壳牌）主导，而藻类原材料技术则被视为未来重要方向。本文通过德尔菲法得出了HEFA工艺在2035年前仍将主导市场的结论，而王雅等^[86]早在2018年就基于专利数据预警了该路线面临的原料限制问题，两者高度吻合。DE OLIVEIRA等^[85]的全球专利分析进一步从创新网络中心度指标验证了这一趋势，发现HEFA等加氢工艺（C10G）仍是技术布局中最核心的节点。

专利数据同样反映出SAF技术路线呈现多元化发展趋势。王雅等^[86]较早预见了这一动向，而本文也指出应在2035年后推进FT、ATJ等路线的转型。DE OLIVEIRA等^[85]的专利分析结果表明，分离技术（B01D）、氢气/合成气制备（C01B）等相关节点的中心度不断提升，说明全球创新活动正在为技术路线多元化积累知识基础。

此外，王雅等^[86]通过专利分析较早识别出SAF规模化面临的两大瓶颈：成本高与原材料可持续供应

问题，并借鉴国际经验呼吁国家出台补贴政策以推动SAF产业化发展。本文将成本（14.25%）与原材料（12.26%）认定为2050年前SAF发展最关键的影响因素，与前人研究结论形成强烈呼应，说明这些问题具有长期性和结构性的特点。德尔菲法结果中专家对政策驱动的高度支持（59.68%），也进一步印证了从专利数据中所观察到的政策与技术创新的紧密关联。

4 结论和政策建议

航空业是全球温室气体排放的重要来源，SAF是实现其2050年净零排放目标的关键。本文通过定量与定性相结合的方式，挖掘SAF全产业链各阶段的主要影响因素，经影响因素指标评价模型和德尔菲法评估，形成面向中国民航业的SAF发展时间技术清单，提出系统性技术路径。主要结论如下：

（1）SAF产业链上游受原材料、成本、资源等因素影响，中游受技术、基础设施等因素影响，下游受政策、需求等因素影响。部分因素跨阶段存在，且各因素间相互关联制约。

（2）词云、关键词共现等分析结果表明，成本、技术、原材料在总被引数、总被引率等指标中频次最高，是制约SAF发展的核心因素。同时，成本受制于技术与原材料，SAF在短期内的迅速发展需重点向以上3个方面发力。

（3）影响因素评价模型显示，成本（3.31）、原材料（2.65）、技术（2.03）综合指标值排名位列前三。成本主要受采购成本、生产加工成本等影响；原材料受制于种类、数量等；技术则与生产工艺、催化剂等相关。公众认知等其他因素也能通过影响消费推动产业发展。

（4）德尔菲法结果表明，66.00%的专家认为2050年前，成本、技术、原材料是核心影响因素，规模化生产后需求与政策影响凸显；61.29%的专家认为ATJ工艺具有商业化潜力，58.06%的专家认可气化-FT工艺；专家建议从工艺设备、原料运输方面优化成本，并通过原材料补贴政策（现有基础增10%~43%）与消费量（提高30%~50%）提升产量。

基于上述结论，本文提出如下政策启示：

(1) 结合原料区域差异与加注特性,分阶段、分区域建设SAF加注试点,从干线机场逐步推广至枢纽机场,改造机场加注设施确保兼容性,规划常态化试点路线图以降低成本并扩大加注网络。

(2) 针对SAF产业投入高、周期长、风险高及政策推力不足的问题,参考新能源汽车、氢能及生物柴油产业政策,对生产与研发企业给予按产量或规模的财政补贴、增值税全额征收后100%退还等税收优惠,还可借鉴美国抵税政策,降低企业门槛与成本。

(3) 鉴于地沟油产量有限,HEFA工艺难以满足需求,建议依托成熟煤油生产体系,以政策规划、专项资金支持FT工艺(以秸秆、木质废料为原材料)的研发与示范,推动技术标准制定,鼓励技术合作与人才引进以攻克核心难题。

(4) 分阶段设定SAF与传统航空煤油强制掺混比例,先开展技术可行性研究与设施改造估算,短期少量掺混控制航空公司成本,长期刺激需求与研发;同时通过碳定价等市场手段提升SAF竞争力,推动其应用与产业发展。

参考文献

- [1] STAPLES M D, MALINA R, SURESH P, et al. Aviation CO₂ emissions reductions from the use of alternative jet fuels[J]. *Energy Policy*, 2018, 114: 342–354.
- [2] 黄晓勇, 王能全. 世界能源发展报告(2018) [M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2018.
- [3] ANDRÉS L, PADILLA E. Driving factors of GHG emissions in the EU transport activity[J]. *Transport Policy*, 2018, 61: 60–74.
- [4] LUMSDON L. Transport and tourism: Cycle tourism—a model for sustainable development [J]. *Journal of Sustainable Tourism*, 2000, 8(5): 361–377.
- [5] 李蕴. 关于加快我国可持续航空燃料发展的思考与建议[J]. *大飞机*, 2023(4): 60–63.
- [6] CABRERA E, DE SOUSA J M M. Use of sustainable fuels in aviation: A review[J]. *Energies*, 2022, 15(7): 2440.
- [7] AHMAD S, XU B. A cognitive mapping approach to analyse stakeholders' perspectives on sustainable aviation fuels[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 100: 103076.
- [8] GUIMARÃES H R, BRESSANIN J M, MOTTA I L, et al. Decentralization of sustainable aviation fuel production in Brazil through Biomass-to-Liquids routes: A techno-economic and environmental evaluation[J]. *Energy Conversion and Management*,

- 2023, 276: 116547.
- [9] 王圣, 杨鹤, 闫瑞, 等. 生物航煤生产技术的发展现状[J]. *生物工程学报*, 2022, 38(7): 2477–2488.
- [10] MARTINEZ-VALENCIA L, PETERSON S, BRANDT K, et al. Impact of services on the supply chain configuration of sustainable aviation fuel: The case of CO₂e emission reductions in the U.S.[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 404: 136934.
- [11] BULLERDIEK N, NEULING U, KALTSCHMITT M. A GHG reduction obligation for sustainable aviation fuels (SAF) in the EU and in Germany[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2021, 92: 102020.
- [12] WANG H L, YANG B, ZHANG Q, et al. Catalytic routes for the conversion of lignocellulosic biomass to aviation fuel range hydrocarbons[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 120: 109612.
- [13] 闫锋, 苏帅. 可持续航空燃料的发展现状及应用浅议[J]. *民航学报*, 2024, 8(1): 112–115.
- [14] QASEM N A A, MOURAD A, ABDERRAHMANE A, et al. A recent review of aviation fuels and sustainable aviation fuels[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2024, 149(10): 4287–4312.
- [15] 陈达, 刘春婷, 吴梦紫, 等. 可持续航空燃料研究趋势及热点演进: 基于文献计量的可视化分析[J]. *环境工程*, 2024, 42(10): 132–139.
- [16] ZHANG J F, FANG H, WANG H X, et al. Energy efficiency of airlines and its influencing factors: A comparison between China and the United States[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017, 125: 1–8.
- [17] ZHANG J Z, WANG M, ZHOU X Y, et al. Exploring the emerging evolution trends of probabilistic service life prediction of reinforced concrete structures in the chloride environment by scientometric analysis[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 8883142.
- [18] HUANG Y, GLÄNZEL W, ZHANG L. Tracing the development of mapping knowledge domains[J]. *Scientometrics*, 2021, 126(7): 6201–6224.
- [19] JUNG H, LEE B G. Research trends in text mining: Semantic network and main path analysis of selected journals[J]. *Expert Systems with Applications*, 2020, 162: 113851.
- [20] WALLIN J A. Bibliometric methods: Pitfalls and possibilities[J]. *Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology*, 2005, 97(5): 261–275.
- [21] 刘爽, 吕永波, 张仲义. 基于AHP和PCA的多指标评价建模方法及应用[J]. *信息与控制*, 2015, 44(4): 416–421.
- [22] 戴文战. 基于三层BP网络的多指标综合评估方法及应用[J]. *系统工程理论与实践*, 1999, 19(5): 29–34.
- [23] REZAEI J, ARAB A, MEHREGAN M. Equalizing bias in eliciting attribute weights in multiattribute decision-making: experimental research[J]. *Journal of Behavioral Decision Making*, 2022, 35(2): e2262.

- [24] JORM A F. Using the Delphi expert consensus method in mental health research[J]. Australian and New Zealand Journal of Psychiatry, 2015, 49(10): 887–897.
- [25] CHALMERS K J, JORM A F, KELLY C M, et al. Offering mental health first aid to a person after a potentially traumatic event: A Delphi study to redevelop the 2008 guidelines[J]. BMC Psychology, 2020, 8(1): 105.
- [26] ZHANG Z W, WEI K H, LI J Q, et al. Life-cycle assessment of bio-jet fuel production from waste cooking oil via hydroconversion[J]. Energies, 2022, 15(18): 6612.
- [27] GUTIÉRREZ-ANTONIO C, GÓMEZ-CASTRO F I, DE LIRA-FLORES J A, et al. A review on the production processes of renewable jet fuel[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 79: 709–729.
- [28] HABERMEYER F, PAPANTONI V, BRAND-DANIELS U, et al. Sustainable aviation fuel from forestry residue and hydrogen—a techno-economic and environmental analysis for an immediate deployment of the PBtL process in Europe[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2023, 7(17): 4229–4246.
- [29] MOFIJUR M, AHMED S F, RONY Z I, et al. Screening of non-edible (second-generation) feedstocks for the production of sustainable aviation fuel[J]. Fuel, 2023, 331: 125879.
- [30] CHAO H, AGUSDINATA D B, DELAURENTIS D, et al. Carbon offsetting and reduction scheme with sustainable aviation fuel options: Fleet-level carbon emissions impacts for U.S. airlines[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2019, 75: 42–56.
- [31] SONG M J, ZHANG X H, CHEN Y B, et al. Hydroprocessing of lipids: An effective production process for sustainable aviation fuel[J]. Energy, 2023, 283: 129107.
- [32] YILMAZ N, ATMANLI A. Sustainable alternative fuels in aviation[J]. Energy, 2017, 140: 1378–1386.
- [33] ESWARAN S, SUBRAMANIAM S, GELEYNSE S, et al. Techno-economic analysis of catalytic hydrothermolysis pathway for jet fuel production[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 151: 111516.
- [34] HADDAD M, FAWAZ Z. Evaluation of microalgal alternative jet fuel using the AHP method with an emphasis on the environmental and economic criteria[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2013, 32(3): 721–733.
- [35] GUTIÉRREZ-ANTONIO C, SORIA ORNELAS M L, GÓMEZ-CASTRO F I, et al. Intensification of the hydrotreating process to produce renewable aviation fuel through reactive distillation[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2018, 124: 122–130.
- [36] SHAHRIAR M F, KHANAL A. The current techno-economic, environmental, policy status and perspectives of sustainable aviation fuel (SAF)[J]. Fuel, 2022, 325: 124905.
- [37] KANDARAMATH HARI T, YAAKOB Z, BINITHA N N. Aviation biofuel from renewable resources: Routes, opportunities and challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1234–1244.
- [38] GOH B H H, CHONG C T, ONG H C, et al. Recent advancements in catalytic conversion pathways for synthetic jet fuel produced from bioresources[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 251: 114974.
- [39] LEWIS K C, NEWES E K, PETERSON S O, et al. US alternative jet fuel deployment scenario analyses identifying key drivers and geospatial patterns for the first billion gallons[J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2019, 13(3): 471–485.
- [40] TANZIL A H, BRANDT K, WOLCOTT M, et al. Strategic assessment of sustainable aviation fuel production technologies: Yield improvement and cost reduction opportunities[J]. Biomass and Bioenergy, 2021, 145: 105942.
- [41] WEI H J, LIU W Z, CHEN X Y, et al. Renewable bio-jet fuel production for aviation: A review[J]. Fuel, 2019, 254: 115599.
- [42] PRUSSI M, O'CONNELL A, LONZA L. Analysis of current aviation biofuel technical production potential in EU28[J]. Biomass and Bioenergy, 2019, 130: 105371.
- [43] WANG W C. Techno-economic analysis for evaluating the potential feedstocks for producing hydro-processed renewable jet fuel in Taiwan[J]. Energy, 2019, 179: 771–783.
- [44] KIM S, IM H, YU J, et al. Biofuel production from Euglena: Current status and techno-economic perspectives[J]. Bioresource Technology, 2023, 371: 128582.
- [45] DE SOUZA DEUBER R, BRESSANIN J M, SANTOS FERNANDES D, et al. Production of sustainable aviation fuels from lignocellulosic residues in Brazil through hydrothermal liquefaction: techno-economic and environmental assessments[J]. Energies, 2023, 16(6): 2723.
- [46] OKOLIE J A, AWOTOYE D, TABAT M E, et al. Multi-criteria decision analysis for the evaluation and screening of sustainable aviation fuel production pathways[J]. iScience, 2023, 26(6): 106944.
- [47] BHATT A H, ZHANG Y M, MILBRANDT A, et al. Evaluation of performance variables to accelerate the deployment of sustainable aviation fuels at a regional scale[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 275: 116441.
- [48] MICHAÏLOS S, BRIDGWATER A. A comparative techno-economic assessment of three bio-oil upgrading routes for aviation biofuel production[J]. International Journal of Energy Research, 2019, 43(13): 7206–7228.
- [49] WANG Z J, STAPLES M D, TYNER W E, et al. Quantitative policy analysis for sustainable aviation fuel production technologies[J]. Frontiers in Energy Research, 2021, 9: 751722.
- [50] DEL MONTE D M, CRUZ P L, DUFOUR J. SAF production from cameline oil hydrotreatment: A technoeconomic assessment of alternative process configurations[J]. Fuel, 2022, 324: 124602.
- [51] PRUSSI M, PANOUTSOU C, CHIARAMONTI D. Assessment of the feedstock availability for covering EU alternative fuels de-

- mand[J]. Applied Sciences, 2022, 12(2): 740.
- [52] CAPAZ R S, GUIDA E, SEABRA J E A, et al. Mitigating carbon emissions through sustainable aviation fuels: Costs and potential [J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2021, 15(2): 502–524.
- [53] GELEYNSE S, BRANDT K, GARCIA-PEREZ M, et al. The alcohol-to-jet conversion pathway for drop-In biofuels: Techno-economic evaluation[J]. ChemSusChem, 2018, 11(21): 3728–3741.
- [54] COLLIS J, DUCH K, SCHOMÄCKER R. Techno-economic assessment of jet fuel production using the Fischer-Tropsch process from steel mill gas[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 1049229.
- [55] PIPITONE G, ZOPPI G, PIRONE R, et al. Sustainable aviation fuel production using in-situ hydrogen supply via aqueous phase reforming: A techno-economic and life-cycle greenhouse gas emissions assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 418: 138141.
- [56] DINIZ A P M M, SARGEANT R, MILLAR G J. Stochastic techno-economic analysis of the production of aviation biofuel from oilseeds[J]. Biotechnology for Biofuels, 2018, 11: 161.
- [57] SEBER G, ESCOBAR N, VALIN H, et al. Uncertainty in life cycle greenhouse gas emissions of sustainable aviation fuels from vegetable oils[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 170: 112945.
- [58] WANG W C, TAO L. Bio-jet fuel conversion technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 801–822.
- [59] WALTER A, SEABRA J, ROCHA J, et al. Spatially explicit assessment of the feasibility of sustainable aviation fuels production in Brazil: Results of three case studies[J]. Energies, 2021, 14(16): 4972.
- [60] HUQ N A, HAFENSTINE G R, HUO X C, et al. Toward net-zero sustainable aviation fuel with wet waste-derived volatile fatty acids[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(13): e2023008118.
- [61] MARTINEZ-VALENCIA L, CAMENZIND D, WIGMOSTA M, et al. Biomass supply chain equipment for renewable fuels production: A review[J]. Biomass and Bioenergy, 2021, 148: 106054.
- [62] GÓMEZ-DE LA CRUZ A, ROMERO-IZQUIERDO A G, GUTIÉRREZ-ANTONIO C, et al. Modelling of the hydrotreating process to produce renewable aviation fuel from micro-algae oil[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2017, 40: 655–660.
- [63] BOLONIO D, SÁNCHEZ-CANALES M, JIMÉNEZ-OYOLA S, et al. Techno-economic, life cycle, and environmental cost assessment of biojet fuel obtained from Pinus pinaster by turpentine hydrogenation[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2022, 6(10): 2478–2489.
- [64] UMENWEKE G C, PACE R B, SANTILLAN-JIMENEZ E, et al. Techno-economic and life-cycle analyses of sustainable aviation fuel production via integrated catalytic deoxygenation and hydrothermal gasification[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452: 139215.
- [65] RAMBABU K, BHARATH G, SIVARAJASEKAR N, et al. Sustainable production of bio-jet fuel and green gasoline from date palm seed oil via hydroprocessing over tantalum phosphate[J]. Fuel, 2023, 331: 125688.
- [66] TIWARI R, MISHRA R, CHOUBEY A, et al. Environmental and economic issues for renewable production of bio-jet fuel: A global prospective[J]. Fuel, 2023, 332: 125978.
- [67] VAN DYK S, SU J P, EBADIAN M, et al. Potential yields and emission reductions of biojet fuels produced via hydrotreatment of biocrudes produced through direct thermochemical liquefaction[J]. Biotechnology for Biofuels, 2019, 12: 281.
- [68] SU J P, VAN DYK S, SADDLER J. Repurposing oil refineries to “stand-alone units” that refine lipids/oleochemicals to produce low-carbon intensive, drop-in biofuels[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376: 134335.
- [69] WHY E S K, ONG H C, LEE H V, et al. Single-step catalytic deoxygenation of palm feedstocks for the production of sustainable bio-jet fuel[J]. Energy, 2022, 239: 122017.
- [70] OBNAMIA J A, MACLEAN H L, SAVILLE B A. Regional variations in life cycle greenhouse gas emissions of canola-derived jet fuel produced in western Canada[J]. Global Change Biology Bioenergy, 2020, 12(10): 818–833.
- [71] ALHERBAWI M, MCKAY G, MACKAY H R, et al. A novel integrated pathway for Jet Biofuel production from whole energy crops: A *Jatropha curcas* case study[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 229: 113662.
- [72] LIU H Y, ZHANG C, TIAN H L, et al. Environmental and techno-economic analyses of bio-jet fuel produced from *Jatropha* and *Castor* oilseeds in China[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2021, 26(6): 1071–1084.
- [73] DE SOUZA L M, MENDES P A S, ARANDA D A G. Oleaginous feedstocks for hydro-processed esters and fatty acids (HEFA) biojet production in southeastern Brazil: A multi-criteria decision analysis[J]. Renewable Energy, 2020, 149: 1339–1351.
- [74] LIM M, LUCKERT M K, QIU F. Economic opportunities and challenges in biojet production: A literature review and analysis[J]. Biomass and Bioenergy, 2023, 170: 106727.
- [75] HEYNE J, RAUCH B, LE CLERCQ P, et al. Sustainable aviation fuel prescreening tools and procedures[J]. Fuel, 2021, 290: 120004.
- [76] MASUM F H, COPPOLA E, FIELD J L, et al., Supply chain optimization of sustainable aviation fuel from carinata in the South-eastern United States[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 171: 113032.
- [77] CHIARAMONTI D, BUFFI M, RIZZO A M, et al. Bio-hydrocarbons through catalytic pyrolysis of used cooking oils and fatty acids for sustainable jet and road fuel production[J]. Biomass and Bioenergy, 2016, 95: 424–435.

- [78] BRAUN M, GRIMME W, OESINGMANN K. Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing[J]. *Journal of Air Transport Management*, 2024, 117: 102580.
- [79] YANG L S, HU Y J, WANG H L, et al. Uncertainty quantification of CO₂ emissions from China's civil aviation industry to 2050[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 336: 117624.
- [80] LÓPEZ GÓMEZ M, POSADA J, SILVA V, et al. Diagnosis of challenges and uncertainties for implementation of sustainable aviation fuel (SAF) in Colombia, and recommendations to move forward[J]. *Energies*, 2023, 16(15): 5667.
- [81] JIANG C M, YANG H J. Carbon tax or sustainable aviation fuel quota[J]. *Energy Economics*, 2021, 103: 105570.
- [82] ZHANG J Y, WEBBER M S, PU Y Q, et al. Sustainable aviation fuels from biomass and biowaste via bio-and chemo-catalytic conversion: Catalysis, process challenges, and opportunities[J]. *Green Energy & Environment*, 2025, 10(6): 1210–1234.
- [83] TRINH J, HARAHAH F, FAGERSTRÖM A, et al. What are the policy impacts on renewable jet fuel in Sweden [J]. *Energies*, 2021, 14(21): 7194.
- [84] ZHANG Y, JIANG Y J. Robust optimization on sustainable bio-diesel supply chain produced from waste cooking oil under price uncertainty[J]. *Waste Management*, 2017, 60: 329–339.
- [85] DE OLIVEIRA M N, MOSQUÉRA L R, DOS SANTOS MARTINS P H, et al. Tracking biofuel innovation: A graph-based analysis of sustainable aviation fuel patents[J]. *Energies*, 2024, 17(15): 3683.
- [86] 王雅, 金婷, 余俊彦. 从专利角度浅析中国生物航空燃料技术[J]. *中国发明与专利*, 2018, 15(7): 55–59.
- [87] 何音, 葛金梅. 基于专利信息的中国通用航空油料领域科技趋势分析[J]. *企业科技与发展*, 2020(9): 12–14.

A Study on the Technological Path of Sustainable Aviation Fuel Development in China's Civil Aviation Industry

HU Yujie^{1,*}, SHI Qiangqiang², CHEN Mengyu¹

1. School of Management, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. State Key Laboratory of Public Big Data, Guizhou University, Guiyang 550025, China

Abstract : The aviation industry is one of the difficult to reduce emissions industries, and achieving net zero emissions is of crucial importance for the sustainable development of the aviation industry. Among them, promoting the development of sustainable aviation fuel (SAF) is a key measure to achieve the goal of net zero emissions. It is necessary to systematically and comprehensively explore the driving factors for the development of SAF in China's civil aviation industry in order to effectively lay out its technological path. However, current research rarely systematically explores driving factors and provides technical planning from the perspective of the entire fuel industry chain. Therefore, this study starts from the perspective of the entire industry chain of SAF (upstream, midstream, downstream), uses text mining technology and literature analysis methods to systematically identify influencing factors, and establishes an indicator evaluation model for influencing factors. Finally, combined with the Delphi method, a time list of SAF development technology layout in the civil aviation industry is constructed. The results indicate that before 2050, cost, technology, and raw materials are important factors affecting the development of SAF. After 2050, all influencing factors tend to be balanced, with no significant driving factors. To achieve long-term sustainable development of SAF, in the short term, developing new generation fuel development processes and policy drivers is the key to solving the problem (supported by 59.68% and 64.51% of experts). In the long run, more advanced synthetic fuels or alternative energy sources will become mainstream. This article not only constructs a list of SAF development time technologies by mining and analyzing key influencing factors, providing feasible technical solutions for fuel manufacturers and governments, but also provides policy insights for promoting the comprehensive green transformation of China's civil aviation industry and helping the global aviation industry achieve net zero emissions by 2050.

Key Words : carbon reduction; civil aviation industry; sustainable aviation fuel; technical path; entire industrial chain