



WRI CHINA

报告

交通低碳燃料的 可持续性标准： 全球与本土的比较研究

Navigating sustainability: Comparative Study
of China's and International Standards for
Sustainable Transportation Fuels

冉纯嘉、薛露露

作者介绍

冉纯嘉 | 副研究员，世界资源研究所可持续转型中心。

邮件: chunjia.ran@wri.org

薛露露 | 高级研究员，世界资源研究所可持续转型中心。

邮件: lulu.xue@wri.org

校对

谢亮

hippie@163.com

版面设计

张焯

harryzy5204@gmail.com

致谢

作者感谢为本研究提供支持 with 专业洞见的有关专家，以及为本研究的撰写提供宝贵专业建议的专家和同事（排名不分先后）：

郭杰	中国国际可持续交通创新和知识中心
李迪斯	中国国际可持续交通创新和知识中心
马冬	中国环境科学研究院
张爽	大连海事大学
张岩	中国氢能联盟
赵凯	全球甲醇行业协会
刘疏桐	道兰环能Motioneco
胡瑞	河南省君恒实业集团生物科技有限公司
黄卓晖	世界资源研究所
郭禹琛	世界资源研究所
宋苏	世界资源研究所
王蔚	世界资源研究所
张艳萍	世界资源研究所
Audrey Denvir	世界资源研究所
Daniela Russi	世界资源研究所
Daniel Lashof	世界资源研究所
Haley Leslie-Bole	世界资源研究所
Richard Waite	世界资源研究所

上述专家的审阅意见仅代表对报告的学术性建议，并不代表完全认同本研究内容，对于本研究中的任何错误疏漏，相关责任皆由作者承担。

感谢世界资源研究所方莉博士、刘哲博士、苗红、付晓天在报告撰写过程中提供的中肯意见和专业指导。

引用建议

冉纯嘉, 薛露露. 2025. "交通低碳燃料的可持续性标准: 全球与本土的比较研究" 报告. 北京: 世界资源研究所. <https://doi.org/10.46830/wriipt.24.00144>.

版本 1

June 2025 | 2025年6月



目录

3	执行摘要	92	附录1. 本研究梳理的航空、航运可持续替代燃料相关政策
13	Executive Summary	94	附录2. 本研究关于可持续替代燃料WTW温室气体排放核算的假设
25	第一章. 研究背景	97	缩略语表
33	第二章. 研究方法	98	注释
37	第三章. 航空、航运可持续替代燃料的定义与类别	99	参考文献
45	第四章. 航空、航运可持续替代燃料的可持续性指标体系与认证机制	106	关于WRI
53	第五章. 航空、航运可持续替代燃料的原料可持续性要求		
63	第六章. 航空、航运可持续替代燃料温室气体排放强度要求与核算方法		
75	第七章. 中国可持续替代燃料WTW温室气体排放测算结果		
89	第八章. 建议		





执行摘要

推广可持续替代燃料是实现航空与航运领域减排目标的关键路径之一。然而，目前国内外政策对航空与航运领域可持续替代燃料的定义与可持续性要求并不一致。本文对比了ICAO、IMO、欧盟、美国、中国在航空、航运可持续替代燃料的可持续性、温室气体排放强度与核算方法方面的政策标准与认证机制，并测算了中国典型燃料的温室气体排放强度，为完善中国航空、航运可持续替代燃料的标准体系提供参考。

亮点

- 本文对比了ICAO、IMO、欧盟、美国、中国在航空、航运可持续替代燃料的可持续性、温室气体排放强度与核算方法方面的政策标准与认证机制，并测算了中国典型燃料的温室气体排放强度，为完善中国航空、航运可持续替代燃料的标准体系提供参考。
- 研究表明，中国应完善现有航空可持续燃料标准，尽快制定国家层面的航运燃料标准，积极参与IMO与ICAO相关谈判。
- 在生物燃料的原料要求方面，中国已在国际上率先禁止使用粮食生产航空生物燃料，但仍需明确禁止使用粮食生产航运生物燃料。另外，中国对农林废弃物的可持续性要求也有待完善，如明确农林废弃物不能来自高碳储量的生态系统，以及设置合理的秸秆还田比例与林业废弃物保留比例。
- 在生物燃料的核算方法方面，中国有必要考虑与国际标准接轨，包括统一核算边界，科学计入对生物燃料排放有显著影响的间接土地利用变化排放、原料替代排放及相较基准情景所避免的排放。
- 在合成燃料的核算方法方面，中国应提出适合国情与产业发展需要的二氧化碳、氢气与电力来源要求，制定合成燃料核算方法。由于电力碳足迹因子对核算结果有较大影响，建议研究建立国家与区域月级或小时级的电力碳足迹因子，定期更新，并加强国际互认。

研究问题

全球范围内，国际航空与航运产生的二氧化碳排放量占全球能源活动碳排放总量的3.5% (Black等 2024)；若不采取有效措施，这一比例将可能呈现迅速增长的趋势。推广可持续替代燃料被广泛视为实现航空与航运领域减排目标的重要措施之一。

通过标准来界定航空与航运可持续替代燃料，是制定相关推广政策、引导企业投资的基础。近年来，国际民用航空组织 (International Civil Aviation Organization, ICAO)、国际海事组织 (International Maritime Organization, IMO)、欧美国家以及中国纷纷出台了一系列航空与航运可持续替代燃料的推广政策。这些政策正开始对中国民航业、航运业乃至燃料生产行业 (如化工、能源等行业) 产生深远影响。然而，这些政策中关于可持续替代燃料的定义和可持续性要求并不一致。

科学合理的标准至关重要，它不仅能避免因可持续替代燃料的快速增长导致温室气体排放泄漏，也能防止其对粮食安全、生物多样性、土壤固碳等可持续发展领域造成负面影响。例如，秸秆、林业废弃物与能源作物的需求持续增加，可能会削弱土壤固碳能力、降低粮食产量、导致森林退化，进而引发更多土地利用变化产生的温室气体排放，并影响生态环境与生物多样性。

相较ICAO、IMO与欧美国家，中国的航空、航运可持续替代燃料标准体系仍有待完善和提升。这不仅需要结合中国自身发展特点，也需要借鉴国际先进经验。为此，本文基于国际经验的对比与总结，试图回答以下两组研究问题：

1. 欧美及国际组织对航空、航运可持续替代燃料的可持续性要求是什么，与中国有何差异？全球范围对替代燃料进行可持续性认证的机制有哪些？
2. 欧美及国际组织对航空、航运替代燃料的全生命周期 (Well to wheel, WTW) 温室气体排放强度要求与核算方法如何？中国生产的各类航空、航运可持续替代燃料的全生命周期碳排放强度能否满足国内外对可持续替代燃料的温室气体排放强度要求？

研究方法

为回答上述研究问题，本文选择了三类比较对象：

一是国家与地区，聚焦于中国、欧盟、美国及美国加利福尼亚州 (以下简称美国加州)。这些国家与地区的航空或航运

碳排放在全球占比比较高，或已率先出台航空、航运可持续替代燃料政策。

二是联合国负责国际航空、国际航运相关事务的国际组织——ICAO和IMO。这些国际组织会在全球层面出台有拘束力的政策。

三是全球可持续替代燃料认证机制的制定机构，如国际可持续发展和碳认证(International Sustainability & Carbon Certification, ISCC)和可持续生物材料圆桌会议(Roundtable on Sustainable Biomaterials, RSB)。这些机构在ICAO、IMO与相关国家和地区的基础上，制定了更高标准的可持续性要求；同时，获得这些认证机制的认证，也是航空、航运可持续替代燃料进入国际市场的重要前提。

在回答第一组问题时，本文侧重航空与航运可持续替代燃料的定义与分类、燃料可持续性指标体系、原料来源的可持续性要求，以及是否建立了可持续性认证机制。其中，本文特别关注可持续性要求是否涵盖粮食安全、土壤质量和固碳能力、生物多样性保护等关键维度。研究方法主要基于文献综述，参考的文献包括中国、欧盟、美国、美国加州、ICAO、IMO相关政策文件，以及全球可持续替代燃料认证机制的资料。

在回答第二组问题时，本文关注航空、航运生物燃料和合成燃料的全生命周期温室气体排放强度的阈值要求与核算方法(如间接土地利用排放核算方法、共生气体的分配方法等)。研究方法同样基于文献综述，来源包括上述政策文件与期刊文献。此外，本文基于对GREET模型的本地化，计算了中国生产的航运甲醇生物燃料与甲醇合成燃料的温室气体排放强度，并分析其是否满足国内外航运替代燃料的排放强度阈值要求。相关数据(如中国本地原料与制取路径、电力碳足迹因子、物流环节运输距离、供热方式等)来自专家访谈、统计年鉴与文献。由于本地化数据的缺乏与专家访谈样本数量的限制，本文部分计算结果在代表性方面可能存在一定局限。

研究结论

目前，全球尚未形成统一的航空、航运可持续替代燃料的定义与分类体系，尤其在航运领域，相关定义与分类体系的完善工作亟待推进。中国已制定航空可持续替代燃料的标准；然而在航运领域，可持续替代燃料标准仍存在空白，有待填补。本文研究的国家、地区与国际组织中，不仅可再生来源的替代燃料可享受政策优惠，部分低碳来源的可持续替代燃料与化石燃料也是政策激励的对象：

- 在航空领域，可持续替代燃料的标准与分类趋于成熟，一般涵盖生物燃料、合成燃料和回收碳燃料。其中，合成燃料包括非生物来源的可再生燃料(Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBO)以及低碳合成燃料(具体定义见表5)。不过，这些标准与分类在具体界定上还存在些许差异。
- 在航运领域，IMO和欧盟采取技术中立的方式，值得中国借鉴。具体而言，IMO与欧盟基于技术中立的原则¹，以燃料WTW温室气体排放强度要求为门槛，渐进式实现减排目标，同时在近期允许使用化石燃料(例如，2035年前，部分天然气船舶能够符合《欧盟海运燃料法规》的要求)。

全球范围内，IMO和ICAO针对航空与航运替代燃料的可持续性要求也亟待加强。就航空领域而言，中国参考ICAO的可持续性要求；然而在航运领域，中国仍缺乏航运可持续替代燃料标准与可持续性要求。其中：

- 航空领域仍允许使用食物或饲料作物作为生物燃料原料。例如，ICAO并未禁止使用食物或饲料作物为原料，且其粮食安全相关认证与监管力度较弱。
- 航运可持续替代燃料的可持续性维度有待完善。例如，IMO仍在讨论是否纳入经济与社会(包含粮食安全)等可持续性维度。
- RFNBO和低碳合成燃料²的可持续性要求少。例如，欧盟相关要求集中于温室气体排放强度以及电力(能源)与二氧化碳来源，尚未扩展至更全面的社会、经济与环境可持续性维度。
- 国际社会对航运的短寿命气候污染物(如黑碳)与航空非二氧化碳排放(以下简称非二排放，如氮氧化物、尾迹³)的减排要求还有待完善。

在航空、航运可持续替代燃料的原料来源要求方面，就生物燃料而言，中国虽在国际上率先禁止将粮食作为航空生物燃料的原料，但尚未明确禁止其作为航运生物燃料的原料。另外，中国在农林废弃物与能源作物的来源要求及监测机制方面也存在改进空间。就合成燃料而言，中国需完善合格碳源、氢源与电力来源要求，以确保环境可持续性。

全球范围看，本文研究的国家、地区与国际组织对生物燃料与合成燃料的原料有严格要求(见执行摘要表1)：

- 在生物燃料方面，ICAO、IMO、欧盟、美国对农林废弃物与能源作物设置了较高的限制要求，值得中国借鉴。例如，欧盟要求，林业废弃物不得来自2008年后属于原始森林、草地、湿地的区域，且

收集时需遵循可持续森林管理原则；ICAO、IMO 和美国要求，原料（含能源作物）不得来自2008年1月1日后转变为高碳储量的陆地或水生生态系统。

- 在合成燃料方面，欧盟对航空、航运可持续替代燃料的二氧化碳来源有较高要求，且欧盟、美国

也对氢气类别、氢气温室气体排放强度及可再生能源并网制氢电力来源要求严格。**中国在氢气来源要求方面，虽然可以借鉴国际经验，但同时也有必要兼顾产业发展实际，以免阻碍氢能可与可持续燃料产业的早期发展。**

执行摘要表 1 | 航空、航运可持续替代燃料的原料可持续性要求对比

领域	国家、地区与国际组织	生物燃料的原料可持续性要求			合成燃料的原料可持续性要求	
		食物与饲料作物	能源作物	农林废弃物	二氧化碳来源	氢气来源
航空	ICAO	允许	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统	· 可使用化石来源的二氧化碳	无相关要求
	欧盟	禁止，但豁免部分原料	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统 · 针对林业能源作物，可持续森林管理要求	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统 · 针对林业废弃物，可持续森林管理要求 · 针对农业废弃物，土壤监测要求	· 2041年起禁止使用化石来源的二氧化碳	· 必须为非化石来源的氢气 · 对网电制氢的电力来源有严格要求
	美国	允许	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统	无相关要求	· 可为化石来源的氢气 · 对网电制氢的电力来源有严格要求
	中国	禁止	· 不与粮食作物争地 · 不能来自高碳储量的生态系统（但未做历史追溯）	· 可以来自高碳储量的生态系统	无相关要求	无相关要求
航运	IMO	允许	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统	· 可使用化石来源的二氧化碳	无相关要求
	欧盟	禁止，但豁免部分原料	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统 · 针对林业能源作物，可持续森林管理要求	· 不得来自2008年后转变的高碳储量的生态系统 · 针对林业废弃物，可持续森林管理要求 · 针对农业废弃物，土壤监测要求	· 2041年起禁止使用化石来源的二氧化碳	· 可为化石来源的氢气 · 对网电制氢的电力来源有严格要求
	美国	允许	无相关要求	无相关要求	无相关要求	· 可为化石来源的氢气 · 对网电制氢的电力来源有严格要求
	中国	无相关要求	无相关要求	无相关要求	无相关要求	无相关要求

说明：

- 深绿色代表“可持续性”要求高，浅绿色代表有一定程度的“可持续性”要求，橘色代表“可持续性”要求较低，灰色代表无相关要求。
- 政策文件包括ICAO的《CORSA 合格燃料的 CORSA 可持续性标准第三版》和《国际航空的长期全球理想目标可行性报告》，欧盟的《欧盟航空燃料法规》《欧盟海运燃料法规》《可再生能源指令III》和《RFNBO和RCF减排量核算方法》，美国的通胀削减法案《45Z清洁燃料生产减税政策》《45V清洁氢能生产减税政策》，中国的《航空燃料可持续性评价规范》（征求意见稿）、IMO的《2024 LCA 导则》。

来源：作者根据ICAO (2022b, 2022a)、EU P&C (2018, 2023d, 2023e, 2023f, 2024)、U.S.Treasury Department和U.S.IRS (2024)、U.S.Congress (2022a, 2022b)、U.S.EPA (2023)、CARB (2020, 2024)、IMO (2024)、EC (2023b)、中国民航局 (2024a)、Hydrogen Europe (2024) 相关文献总结。



在WTW温室气体排放强度要求与核算方法方面，就航空领域而言，中国对SAF WTW温室气体排放强度的要求较宽松，比ICAO的CORSIA合格燃料的排放强度要求高出12.5%；就航运领域而言，IMO提出了“零或近零温室气体排放技术、燃料和/或能源”（Zero or Near-zero GHG Emission Technologies, Fuels and/or Energy, ZNZs）的温室气体排放强度要求，即到2034年底前温室气体排放强度须低于19 gCO₂e/MJ，自2035年起应低于14gCO₂e/MJ（IMO 2025）。然而，中国目前尚未针对航运可持续替代燃料设定相应的WTW温室气体排放强度要求。

另外，中国在可持续替代燃料WTW温室气体核算方法方面有待完善。首先，虽然中国已制定航空生物燃料核算方法——《航空燃料生命周期碳足迹评价技术规范 第1部分：通则》（征求意见稿）（中国民航局 2024b），但该方法未纳入对生物燃料排放影响显著的间接排放，如土地利用变化排放、替代效应及相较基准情景（Business As Usual, BAU）避免的排放等。其次，除航空生物燃料外，中国在航运生物燃料、航空与航运合成燃料的核算方法方面尚存空白，亟待填补。本文研究的部分国家、地区与国际组织对生物燃料与合成燃料提出了详细的核算方法，甚至提供默认排放因子，值得中国借鉴。其中：

- 在生物燃料方面，欧盟、美国、ICAO⁴与IMO的核算边界与方法完善，包括：一是以定性或定量核算方法核算间接土地利用变化产生的温室气体排放；二是将相较基准情景避免的排放纳入计算，并提供特定减排量作为奖励。
- 在合成燃料方面，欧盟提供了详细的核算方法与默认排放因子，但不同国家、地区与国际组织对氢和二氧化碳共生产品排放的分配方法有较大不同，亟待统一各国标准。

基于对上述各国、地区与国际组织核算方法的分析，本研究以中国航运甲醇生物燃料、甲醇合成燃料为例，采用GREET模型测算其不同情景下2023年和2035年的

WTW温室气体排放强度（见执行摘要图1和执行摘要图2）。在核算方法方面，本文未考虑甲醇生物燃料替代效应，且由于本文只涉及以有机废弃物为原料的情况，所以不涉及间接土地利用变化排放。

考虑到中国尚未出台航运可持续替代燃料温室气体排放强度要求，所以，本文采用欧盟《可再生能源指令III》对生物燃料温室气体排放强度的要求、《欧盟海运燃料法规》对RFNBO和低碳合成燃料的要求，以及美国IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中能获得税收抵免的门槛作为标杆值，与中国计算结果进行对比。

对于甲醇生物燃料

首先，中国生产的甲醇生物燃料WTW温室气体排放强度，受原料来源与制取路径影响。即便以有机废弃物为原料制取生物燃料，一些原料及制取路径的燃料温室气体排放强度依然较高，无法满足欧盟的标准。所以，中国在制定核算方法时，应考虑区分原料（包括电力）来源与制取路径。企业在生产生物燃料时，应优先选择温室气体排放强度低的原料，提升制取效率，并增加可再生能源的使用比例。例如，以垃圾填埋气、废水污泥为原料制取的生物甲醇，其WTW温室气体排放强度达47.6~100.1gCO₂e/MJ，无法达到欧盟对生物燃料的要求。又如以秸秆为原料通过生物质气化路径制取的生物甲醇，如果使用气流床这类电耗较高的气化方法，并在生物质预处理和气化合成环节使用电网电力，生物甲醇的WTW温室气体排放强度达33.1gCO₂e/MJ，无法满足欧盟对生物燃料的排放强度要求。

其次，中国可考虑在生物燃料的核算方法中计算相对于基准情景的避免排放，将其作为排放奖励，在生物燃料WTW温室气体排放中减去。对于部分原料——特别是动物粪便与食物垃圾等，其传统的处理方式（即基准情景），对生物燃料WTW温室气体排放强度影响较大。相较传统的处理方式，这些原料用于生产生物燃料可避免大量的温室气体排放，使其生产的生物燃料具有更低的WTW排放强度。

执行摘要图1 | 航运甲醇生物燃料2023年WTW温室气体排放强度



说明:

- 图中, 欧盟的数值源于《可再生能源指令III》对生物燃料温室气体排放强度的要求 (特别是对2021年1月1日后投入运营的生物燃料生产设备的要求); 美国的数值则基于IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中设定的税收抵免门槛。
 - 图中, “不考虑避免排放”指不考虑相较于BAU避免的排放; 生物质气化路径的电力消耗涵盖生物质预处理及气化合成环节的电力消耗。
- 来源: 作者测算。

对于甲醇合成燃料

氢气来源、合成过程的电力来源以及二氧化碳来源对甲醇合成燃料的排放强度有较大影响:

首先, 针对氢气来源, 只有使用可再生能源制氢、核能制氢、部分共生产品分配方法下的工业副产氢, 才能够达到 (或接近) 欧盟对RFNBO和低碳合成燃料的WTW温室气体排放强度要求。但如果使用电网电力制氢, 并采用全国平均电力碳足迹因子, 甲醇合成燃料WTW排放强度高达301.1gCO₂e/MJ, 远无法满足欧盟的要求。化石燃料制氢结合碳捕获与封存 (Carbon Capture and Storage, CCS) 合成甲醇也很难达到欧盟对低碳合成燃料的要求。

第二, 针对甲醇合成过程的电力来源, 国家/地区电力碳足迹因子尤为重要。例如, 按照目前ISCC的中国电力碳足迹因子计算, 使用可再生氢气且合成过程使用网电制取的合成甲醇很难满足欧盟对RFNBO和低碳合成燃料的要求。

第三, 针对二氧化碳源, 如果不承认电力、工业行业捕集的二氧化碳为合格碳源, 即便用可再生能源电解水制氢合成甲醇, 其WTW温室气体排放强度较化石燃料的下降幅度也极为有限, 或难以符合欧盟对RFNBO和低碳合成燃料的温室气体排放强度要求。

因此, 中国有必要根据国情建立合成燃料生产中氢气、电力和二氧化碳来源的可持续性要求, 并及时更新电力碳足迹因子, 加强国际互认。企业也要谨慎选择原料来源与制取路径, 确保符合可持续性要求。

对于工业副产氢合成甲醇的情况, 排放分配方法的选择对可替代燃料的温室气体排放强度有较大影响。在使用系统扩展法时, 如果氢气原先处理方式为空排, 合成甲醇燃料的WTW温室气体排放强度最低。在使用质量分配法时, 只有在合成环节使用可再生能源, 才有望达到欧盟对低碳合成燃料的要求, 其他情况难以达到要求。

执行摘要图 2 | 航运甲醇合成燃料2023年和2035年WTW温室气体排放强度



说明: 图中, 欧盟的数值源于《欧盟海运燃料法规》中对RFNBO和低碳合成燃料的要求; 美国的数值则基于IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中设定的税收抵免门槛。
来源: 作者测算。

最后，由于中国航空、航运可持续替代燃料的生产地与消费地相距较远，交通运输环节排放对航空、航运可持续替代燃料WTW温室气体排放强度有较大影响。

在燃料的可持续性认证机制方面，对航空领域而言，目前以ICAO与欧盟航空相关认证机制为主，中国在这一领域仍缺乏相应的认证机制；对航运领域而言，在IMO的可持续性框架和ZNZs认证机制2027年正式出台前，国内外主要依据欧盟的航运替代燃料定义与认证机制进行相关认证。未来，中国是否要以IMO或ICAO认证机制为主，还是要建立自有的航空与航运燃料（及其副产品）可持续性认证机制，仍有待研究。

对策建议

针对航空、航运可持续替代燃料标准体系，中国政府有关部门可考虑完善定义、原料来源要求、温室气体排放强度要求及核算方法，积极参与IMO、ICAO的相关谈判，并逐步加强全球区域层面的标准互认：

- 对航空领域而言：一是优化《航空燃料可持续性评价规范》，完善航空替代燃料的定义、原料来源要求、温室气体排放强度要求及核算方法；二是积极参与完善ICAO相关核算方法（如间接土地利用变化的核算）；三是有必要研究建立符合中国国情的SAF（及副产品）的可持续性认证体系；四是储备研究航空非二排放的核算方法与减排措施，适时考虑对航空非二排放的监测和监管。
- 对航运领域而言：一是研究制定国家层面的航运燃料标准与可持续性评价规范，明确定义、原料来源要求、温室气体排放强度要求及核算方法；二是积极参与IMO针对可持续性框架和ZNZs定义的谈判，特别注意应结合中国产业发展特点；三是有必要研究搭建符合中国产业发展需要的航运可持续替代燃料（及副产品）的认证体系；四是储备研究黑碳等非二排放的核算和减排措施。

针对生物燃料而言，鉴于中国在禁止将粮食作为生物燃料的原料方面全球领先，所以，有条件考虑与国际标准实现接轨：

1) 在原料来源要求方面：

首先，从粮食安全角度出发，中国应考虑禁止将粮食用于生产航空生物燃料。

其次，完善对生物燃料原料来源的可持续性要求，具体

包括两条措施：一是完善农林废弃物的可持续性要求，例如设置合理的秸秆还田和林业废弃物保留的比例，明确农林废弃物不能来自高碳储量的生态系统，并且其采集必须实行可持续农林管理措施，以确保土壤健康、土壤碳储与生物多样性；二是完善（航运生物燃料）能源作物的可持续性要求，例如限制能源作物种植对粮食安全、间接土地利用变化的不利影响，加强对高碳储量生态系统来源的限制。

第三，针对原料替代风险，全面梳理中国生物质的储备情况以及各类生物质的现有用途，以便识别并限制那些可能存在替代风险的原料。

2) 在核算方法方面：

一是针对以动物粪便与城市有机垃圾为来源的生物燃料，计算相对于基准情景避免的排放。为简化计算，可按原料类别提供核算上的减排奖励。

二是研究各原料间接土地利用变化风险，利用遥感影像定期监测各原料种植对土地利用变化的影响，尤其是种植面积扩张对森林、草地与湿地的侵占，明确中国本地化的间接土地利用排放核算方法与排放因子（以及排放量）。

3) 在原料溯源与认证机制方面：

一是在对航空、航运生物燃料进行认证时，将生产过程中的副产品纳入可持续性认证范围，以提升副产品的市场价值。

二是加强认证的溯源与监管力度，包括针对农林废弃物以及餐厨废油，强化上游溯源与监管力度，确保原料的可持续性，针对管道运输的生物天然气，采用质量平衡法进行追溯，以完善生物天然气的认证机制。

对于合成燃料而言，建议研究提出适合中国国情与产业发展特点的标准与核算方法：

1) 在原料来源要求方面：

研究提出适合中国国情的二氧化碳、氢气与电力来源要求，在实现航空、航运领域减排的同时，促进可持续燃料产业早期的快速发展。

2) 在温室气体排放强度和核算方法方面：

一是研究是否需要区别生物燃料与合成燃料的WTW温室气体排放强度要求，并出台针对合成燃料的激励政策，例如给予合成燃料财政补贴、开发与之相关的国家核证自愿减排量（China Certified Emission Reduction, CCER）方法学、引入市场机制等，以弥合合成燃料与生物燃料的成本差。

二是研究制定合成燃料WTW的核算方法，在共生产品分配方法等方面加强国际对话，达成统一。

3) 在电力碳足迹因子方面：

一是研究建立中国国家与区域层面的月级或小时级电力碳足迹因子，以支持可再生能源并网制氢精细化的核算与认证要求以及中国企业燃料出口的需要。

二是加强国家与区域层面电力碳足迹因子的国际互认，并持续更新电力碳足迹因子。

针对降低交通运输环节对航空、航运可持续替代燃料温室气体排放强度的影响，中国有必要考虑以下措施，降低燃料运输环节的排放强度与成本：

一是鼓励优先采用水路（特别是可持续燃料船舶）、铁路、管道及新能源重卡运输可持续替代燃料。

二是在航空及航运领域，允许企业或地区依据质量平衡方法对可持续替代燃料的投用及消费进行核算，以确保可再生属性的合理分配与认证。

三是探究是否应构建全国统一的航空、航运可持续替代燃料认购与声明 (book and claim) 机制，实现将可持续替代燃料的环境属性同物理燃料相分离并进行交易，即航空/航运公司即使不加注可持续替代燃料，也能通过交易获取减排证书，从而避免将替代燃料运输至机场或港口所增加的运输成本与排放。

在航空、航运燃料转型之际，相关企业也应抓住发展机遇，深入了解不同区域市场标准差异，规避风险，并加强企业研发。特别是对燃料生产企业而言，建议：一是在投资时宜优先考虑可持续性表现好、温室气体排放强度低的原料及制备路径；二是通过研发与工艺流程优化，提升替代燃料的制取效率（如生物质气化），尽可能增加可再生能源的使用比例。







Executive summary

Promoting sustainable alternative fuels is a key strategy for decarbonizing the aviation and maritime sectors. However, current policies—both domestic and international—differ in their definitions and sustainability criteria for these fuels. This study compares the sustainability requirements, greenhouse gas (GHG) emission intensities, and accounting methodologies for sustainable aviation and maritime fuels across ICAO, IMO, the EU, the United States, and China. It also estimates the GHG emission intensity of typical fuels produced in China, providing insights to support the development of a China-specific standards system for sustainable aviation and maritime fuels.

HIGHLIGHTS

- This study compares standards for sustainable alternative fuels in aviation and shipping across ICAO, IMO, EU, the US, and China, with a focus on sustainability criteria, greenhouse gas emissions (GHG) intensities, and accounting methods to provide a reference for China-specific standard development.
- The findings indicate that China needs to strengthen its existing standards for sustainable aviation fuels (SAF) and develop dedicated standards for sustainable maritime fuels.
- China has made notable progress by prohibiting the use of food crops in aviation biofuel production. However, this restriction should be extended to shipping biofuels. In addition, China should enhance its requirements for agricultural and forestry residues by prohibiting sourcing from high-carbon ecosystems and setting scientifically grounded residue retention thresholds to protect soil health and carbon stocks.
- China should align its biofuel GHG accounting methodologies with international best practices. This includes applying rigorous methods for accounting indirect land-use change emissions, assessing displacement effects, and incorporating avoided emissions.
- For synthetic fuel accounting, China should develop requirements for sourcing of CO₂, hydrogen, and electricity that align with industrial development needs and decarbonization goals. Given the significant impact of electricity emissions factors, China needs to establish monthly or hourly electricity carbon footprint factors and ensure their regular updates.



RESEARCH QUESTIONS

Globally, international aviation and maritime shipping account for 3.5% of energy-related carbon dioxide (CO₂) emissions (Black et al., 2024), and this share continues to grow rapidly. Promoting sustainable alternative fuels is widely regarded as a key strategy for achieving emission reduction targets in both sectors.

Defining sustainable alternative fuels through clear and robust standards is critical. These standards form the basis for designing effective policy frameworks and guiding industry investment. In recent years, the International Civil Aviation Organization (ICAO), the International Maritime Organization (IMO), the European Union, the United States, and China have all introduced policies to support the development of sustainable alternative fuels in these sectors. These policies are beginning to have a profound impact on China's civil aviation, maritime industries, and related fuel production sectors. However, the definitions and sustainability criteria for alternative fuels vary considerably across these jurisdictions.

Science-based standards are essential not only to prevent greenhouse gas (GHG) emissions leakage associated with the rapid scale-up of alternative fuels, but also to mitigate potential negative impacts on food security, biodiversity, and soil carbon accumulation. For example, growing demand for crop residues, forestry waste, and energy crops could diminish soil carbon, reduce grain yields, and cause forest degradation. These impacts may lead to additional GHG emissions from land-use changes and adversely affect biodiversity.

Compared to ICAO, IMO, the EU, and the US, China's standards for sustainable alternative fuels in aviation and maritime remain underdeveloped. Further advancement is needed, both to reflect China's unique development context and to incorporate relevant international best practices. This study draws on global experience to address two key research questions:

- What are the sustainability criteria for aviation and maritime alternative fuels among international organizations, the EU, and the US? How do they differ from China's standards? What certification mechanisms exist globally for ensuring the sustainability of alternative fuels?
- How do the EU, the US, ICAO, and IMO establish GHG emission intensity requirements and accounting methods for aviation and shipping alternative fuels?

Does the lifecycle carbon emission intensity of typical sustainable alternative fuels produced in China comply with domestic and international requirements?

RESEARCH METHODOLOGY

To address the above research question, this study employs a combination of policy and literature review, expert interviews, and model-based calculations. The comparative analysis primarily focuses on:

- China, the EU, the US, and the State of California in the US. These countries and regions either account for a significant share of global aviation or shipping carbon emissions or have been at the forefront of implementing sustainable alternative fuel policies in aviation and shipping.
- The United Nations agencies responsible for international aviation and shipping—ICAO and IMO—which play a central role in developing globally binding standards.
- Global certification bodies, such as the International Sustainability and Carbon Certification (ISCC) and the Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB), which provide internationally recognized sustainability certification systems. These organizations have formulated more stringent sustainability requirements, building upon the frameworks set by ICAO, IMO, and individual national policies. Certification from these systems is essential for sustainable alternative fuels to access the international aviation and shipping markets.

To address the first set of research questions, this study examines the definitions and classifications of sustainable alternative fuels in aviation and maritime sectors, the associated sustainability indicator frameworks, the sustainability criteria for feedstock, and whether a sustainability certification mechanism has been established. In particular, it evaluates whether these criteria address key dimensions such as food security, soil quality and carbon stock preservation, and biodiversity protection. The research methodology is based on a literature review, drawing on policy documents from China, the EU, the US, California, ICAO, and IMO, as well as documentation on global certification schemes.

To address the second set of questions, the study investigates lifecycle GHG emissions intensity thresholds and accounting methods for aviation and maritime alternative

fuels. This includes the treatment of indirect land-use change (iLUC) emissions, emission allocation methods for co-products, and other aspects. The analysis is based on a review of relevant policy documents and academic literature. In addition, the study applies the GREET model with localized inputs to estimate the GHG emissions intensity of bio-methanol and e-methanol produced in China, evaluating their compliance with both domestic and international emissions intensity thresholds for sustainable maritime fuels. The input data—such as locally available feedstocks and production pathways and electricity carbon intensity factors—were sourced from expert interviews, statistical yearbooks, and literature. Due to limited availability of localized data and a small sample size for expert interviews, some model outputs may have constraints in terms of representativeness.

RESEARCH FINDINGS AND RECOMMENDATIONS

Globally, there is still no unified definition or classification system for sustainable alternative fuels—particularly in the shipping sector. China has established standards for sustainable alternative fuels in the aviation sector; however, comparable standards for the shipping sector have yet to be developed. Our analysis shows that globally, not only are alternative fuels derived from renewable sources supported by policy incentives, but some low-carbon fuels and even fossil fuels also benefit from policy support. Specifically:

- In the aviation sector, the classification and standardization of sustainable alternative fuels are relatively advanced. Most frameworks cover three primary categories: 1) biofuels, 2) synthetic fuels, including Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBO) and low-carbon synthetic fuels (see Table 5 for definitions), and 3) recycled carbon fuels. Nonetheless, the concrete definitions vary slightly across jurisdictions.
- In the shipping sector, the definitions by IMO and the EU could provide useful references for China. Specifically, IMO and the EU adopt a technology-neutral approach based on Well-to-Wake (WTW) GHG emission intensity thresholds. Based on the requirement, at the transitional phase, certain fossil fuels may also qualify—for example, before 2035, some LNG vessels can meet the GHG emission intensity requirement of FuelEU Maritime.

At the global level, sustainability frameworks for these fuels also require further improvement. In the aviation sector, although China follows the sustainability requirements established by ICAO, it has not yet established a domestic certification system to support the deployment of SAF within China. In the shipping sector, China still lacks both standards and sustainability requirements for sustainable maritime fuels. Specifically:

- Aviation sector: ICAO has established 14 sustainability criteria, which include food security indicators. However, the use of food and feed crops as feedstock is not explicitly prohibited. In practice, food security assessments are often based on self-reporting by operators, leading to limited oversight and raising potential equity concerns.
- Shipping sector: The sustainability requirements for shipping fuels remain underdeveloped. The IMO's Life Cycle Assessment (LCA) Guidelines outline only 10 sustainability indicators, and discussions are still ongoing regarding the inclusion of economic and social dimensions, such as food security.
- Synthetic fuels (RFNBOs and low-carbon synthetic fuels): Current standards for these fuels mainly focus on GHG emission intensity and the sustainability of electricity and CO₂ sources. Broader social, economic, and environmental criteria have yet to be systematically incorporated.
- Short-lived climate pollutants and non-CO₂ emissions: Globally, there is a need to strengthen sustainability indicators addressing short-lived climate pollutants (e.g., black carbon in shipping) and non-CO₂ effects

in aviation (e.g., nitrogen oxides, contrails). These pollutants have significant climate impacts but are often overlooked in current standards.

China has taken a leading role internationally by prohibiting the use of food crops as feedstocks for aviation biofuels. However, this restriction has not yet been extended to shipping biofuels. For biofuels, there is also room for improvement in regulating feedstocks derived from agricultural and forestry residues, as well as energy crops, to ensure sustainability. For synthetic fuels, China needs to strengthen its sustainability criteria for carbon sources, hydrogen sources, and electricity to ensure they meet environmental benchmarks.

Globally, countries, regions, and institutions covered in this study enforce more rigorous feedstock requirements for both biofuels and synthetic fuels, offering valuable lessons for China (ES-Table 1):

- For biofuels, ICAO, IMO, the EU, and the US require that feedstocks—including energy crops—not originate from land or aquatic ecosystems converted after January 1, 2008, particularly if those systems had high carbon stock. China could draw on these approaches to improve its domestic standards and facilitate alignment with global standards.
- For synthetic fuels, the EU and the US impose stringent requirements on electricity and CO₂ sources for sustainable alternative fuels in aviation and shipping. China should not only learn from international best practices but also balance industrial realities and decarbonization goals.



ES-TABLE 1 | Comparison of feedstock sustainability requirements for sustainable alternative fuels in aviation and shipping

SECTOR	REGION AND INSTITUTION	SUSTAINABILITY REQUIREMENTS FOR BIOFUEL FEEDSTOCKS			SUSTAINABILITY REQUIREMENTS FOR SYNTHETIC FUELS FEEDSTOCKS	
		FOOD AND FEED CROPS	ENERGY CROPS	AGRICULTURAL AND FORESTRY RESIDUES	CO ₂ SOURCES	HYDROGEN SOURCES
Aviation	ICAO	Permitted	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 	<ul style="list-style-type: none"> Fossil-origin CO₂ may be utilized 	(No requirements)
	EU	Prohibited, with exemptions for certain feedstocks	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 Forestry: Sustainable forest management requirements 	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 Forest residues: Sustainable forest management requirements Agricultural residues: Soil monitoring requirements 	<ul style="list-style-type: none"> Use of fossil-origin CO₂ prohibited from 2041 onwards 	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogen must be derived from non-fossil sources Strict criteria apply to electricity sources for grid electricity-based hydrogen production
	US	Permitted	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 	(No requirements)	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogen of fossil origin is permitted Strict criteria apply to electricity sources for grid electricity-based hydrogen production
	China	Prohibited	<ul style="list-style-type: none"> No competition for land with food crops Must not originate from ecosystems with high carbon stock (without historical reference applied) 	<ul style="list-style-type: none"> May originate from ecosystems with high carbon stock 	(No requirements)	(No requirements)
Shipping	IMO	Permitted	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 	<ul style="list-style-type: none"> Fossil-origin CO₂ may be utilized 	(No requirements)
	EU	Prohibited, with exemptions for certain feedstocks	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 Forestry residues: Sustainable forest management requirements 	<ul style="list-style-type: none"> Must not originate from ecosystems with high carbon stock converted after 2008 Forest residues: Sustainable forest management requirements Agricultural residues: Soil monitoring requirements 	<ul style="list-style-type: none"> Use of fossil-origin CO₂ prohibited from 2041 onwards 	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogen of fossil origin is permitted Strict criteria apply to electricity sources for grid electricity-based hydrogen production
	US	Permitted	(No requirements)	(No requirements)	(No requirements)	<ul style="list-style-type: none"> Hydrogen of fossil origin is permitted Strict criteria apply to electricity sources for grid electricity-based hydrogen production
	China	(No requirements)	(No requirements)	(No requirements)	(No requirements)	(No requirements)

Notes:

- Dark green indicates the highest level of 'sustainability' requirements; light green denotes a moderate level of 'sustainability' requirements; orange indicates significant issues with 'sustainability' requirements; and gray signifies the absence of related requirements.
- Policy documents include: ICAO CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels (Third Edition); ICAO Long term global aspirational goal for international aviation ; RefuelEU Aviation ; FuelEU Maritime ; EU Renewable Energy Directive III ; EU Supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable fuels of non-biological origin ; US IRA Section 45Z Clean Fuel Production Credit ; US IRA Section 45V Credit for Production of Clean Hydrogen ; China GB/T 'Sustainability Assessment Standard for Aviation Fuels' (Draft for Comments); and IMO 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels

Source: WRI author based on ICAO 2022b; EU P&C 2018; 2023d; 2023e; 2023f; 2024; U.S. Treasury Department and U.S. IRS 2024; U.S. Congress 2022a; 2022b; U.S. EPA 2023; CARB 2020; 2024; IMO 2024; EU P&C 2023d; ICAO 2022a; EC 2023b; Civil Aviation Administration of China 2024a ; Hydrogen Europe 2024Summary.

Regarding WTW GHG emission intensity requirements and accounting methods: In the aviation sector, China's current standards for SAF is less stringent, exceeding ICAO's CORSIA-eligible fuel emission threshold by 12.5%. In the shipping sector, IMO has established GHG emission intensity requirements for "zero or near-zero GHG emission technologies, fuels, and/or energy" (ZNZs), mandating emissions below 19 gCO₂e/MJ by the end of 2034 and below 14 gCO₂e/MJ from 2035 onwards. However, China has not yet established similar requirements for sustainable maritime fuels.

Furthermore, China's accounting methods sustainable alternative fuels require further improvement. Firstly, although China has developed an accounting method for aviation biofuels, it omits several critical indirect emissions, such as emissions from land use change, displacement emissions, and avoided emissions compared to the BAU scenario. Secondly, China has yet to develop accounting methods for shipping biofuels and synthetic fuels in either the aviation or maritime sectors.

Several international jurisdictions and organizations examined in this study have established more advanced WTW accounting frameworks for both biofuels and synthetic fuels, providing valuable reference for China. Specifically:

- For biofuels, the EU, the US, ICAO, and IMO have established comprehensive accounting methodologies that 1) incorporate emissions from indirect land use change using qualitative or quantitative approaches; 2) Account for avoided emissions compared to BAU, with some offering specific emission reduction credits as policy incentive.
- For synthetic fuels, the EU has issued detailed accounting guidelines along with default emission factors. However, there remains considerable variation among countries and institutions in how emissions are allocated among hydrogen and CO₂ co-products—underscoring the need for harmonized international standards.

Further, this study conducts a case analysis using China's shipping bio-methanol and synthetic methanol fuels, applying the GREET model to estimate their WTW GHG emission intensity for the years 2023 and 2035 under multiple scenarios (see ES-Figures 1 and 2). Methodologically, the study makes two important assumptions: 1) It excludes displacement effects. 2) It does not

consider indirect land-use change (iLUC) emissions, as the feedstock in all modeled cases is limited to organic waste, which typically does not trigger land-use changes.

Because China lacks GHG emission intensity requirements for sustainable maritime fuels, adopts international benchmarks to evaluate China's estimated WTW GHG emissions for shipping bio-methanol and synthetic methanol fuels. The results indicate:

BIO-METHANOL

Firstly, biofuels derived from different feedstocks exhibit significant variability in WTW GHG emission intensities. Notably, even waste-based feedstocks can result in high emissions depending on the feedstocks and conversion processes. For example, bio-methanol derived from landfill gas and wastewater sludge does not meet the EU's RED III GHG emission intensity requirements for biofuels. When utilizing high electricity-consuming gasification methods, such as fluidized bed gasification, and relying on grid electricity during biomass pretreatment and gasification synthesis, the resulting bio-methanol does not comply with EU emission standards. Therefore, China must develop accounting frameworks that distinguish various feedstocks and conversion processes. Fuel suppliers should prioritize feedstocks with low GHG emission intensities, improve energy efficiency, and reduce reliance on carbon-intensive grid electricity.

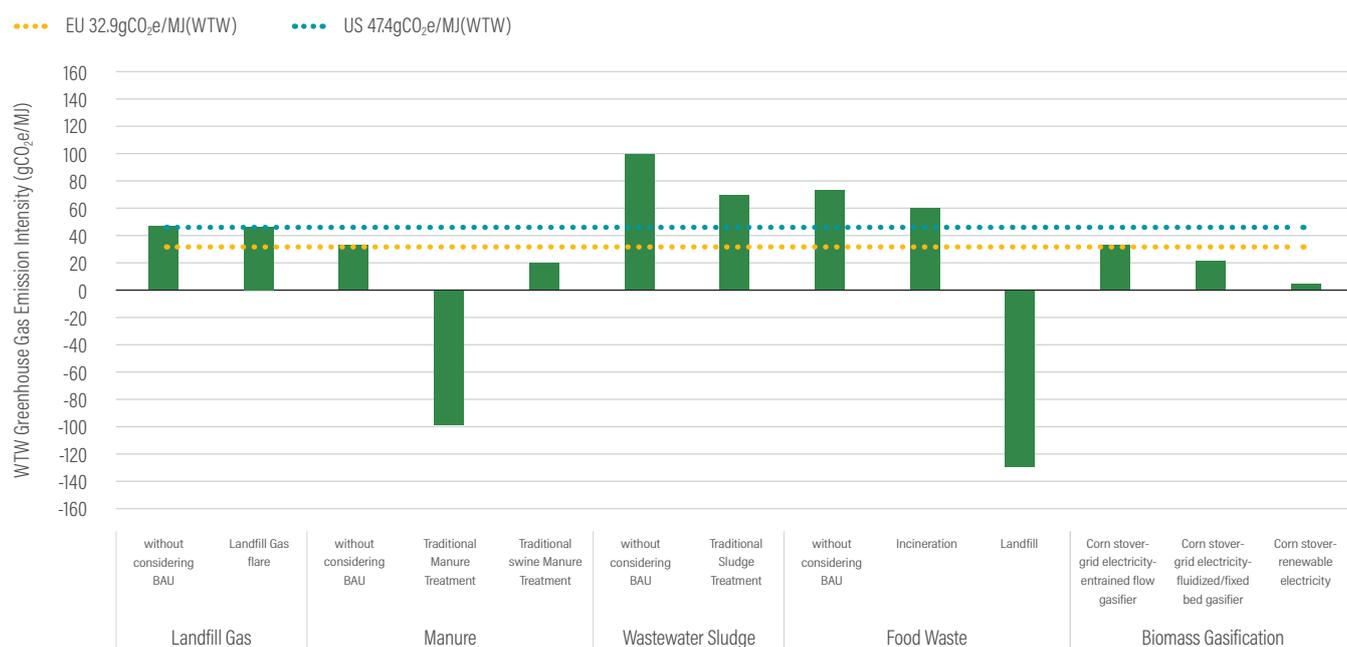
For feedstocks like animal manure and food waste, the conventional treatment methods (BAU scenarios) play a pivotal role in determining the net GHG emissions. Accordingly, it is necessary for China to consider avoided emissions compared to the BAU scenarios by recognizing them as emission credits.

SYNTHETIC METHANOL FUELS

Hydrogen sources, electricity sources for the synthesis process, and CO₂ sources significantly affect the WTW GHG emission intensities of synthetic methanol fuels:

- Hydrogen sources: Only hydrogen produced from renewable electricity, nuclear power, or as an industrial by-product under specific co-product allocation methods can meet—or closely approach—the EU's WTW GHG emission intensity thresholds for RFNBO and low-carbon synthetic fuels. In contrast, hydrogen generated using grid electricity (based on China's national average electricity carbon intensity) causes synthetic methanol fuels to exceed EU GHG thresholds. Hydrogen produced from fossil fuels, even

ES-FIGURE 1 | WTW GHG emission intensity of bio-methanol in 2023



Explanation:

- In the figure, the values for the EU are derived from the GHG emission intensity requirements for biofuels specified in the Renewable Energy Directive III, particularly for biofuel production facilities commissioned after January 1, 2021. The values for the US are based on the tax credit thresholds established in the IRA Section 45Z Clean Fuel Production Tax Credit policy.
- In the figure, avoided emissions are not accounted for relative to Business-As-Usual (BAU) avoided emissions. Electricity consumption in the biomass gasification pathway includes electricity used during biomass pretreatment and gasification synthesis stages.

Source: Calculations by WRI authors.

when combined with carbon capture and storage (CCS), is unlikely to meet the EU's criteria for low-carbon synthetic fuels.

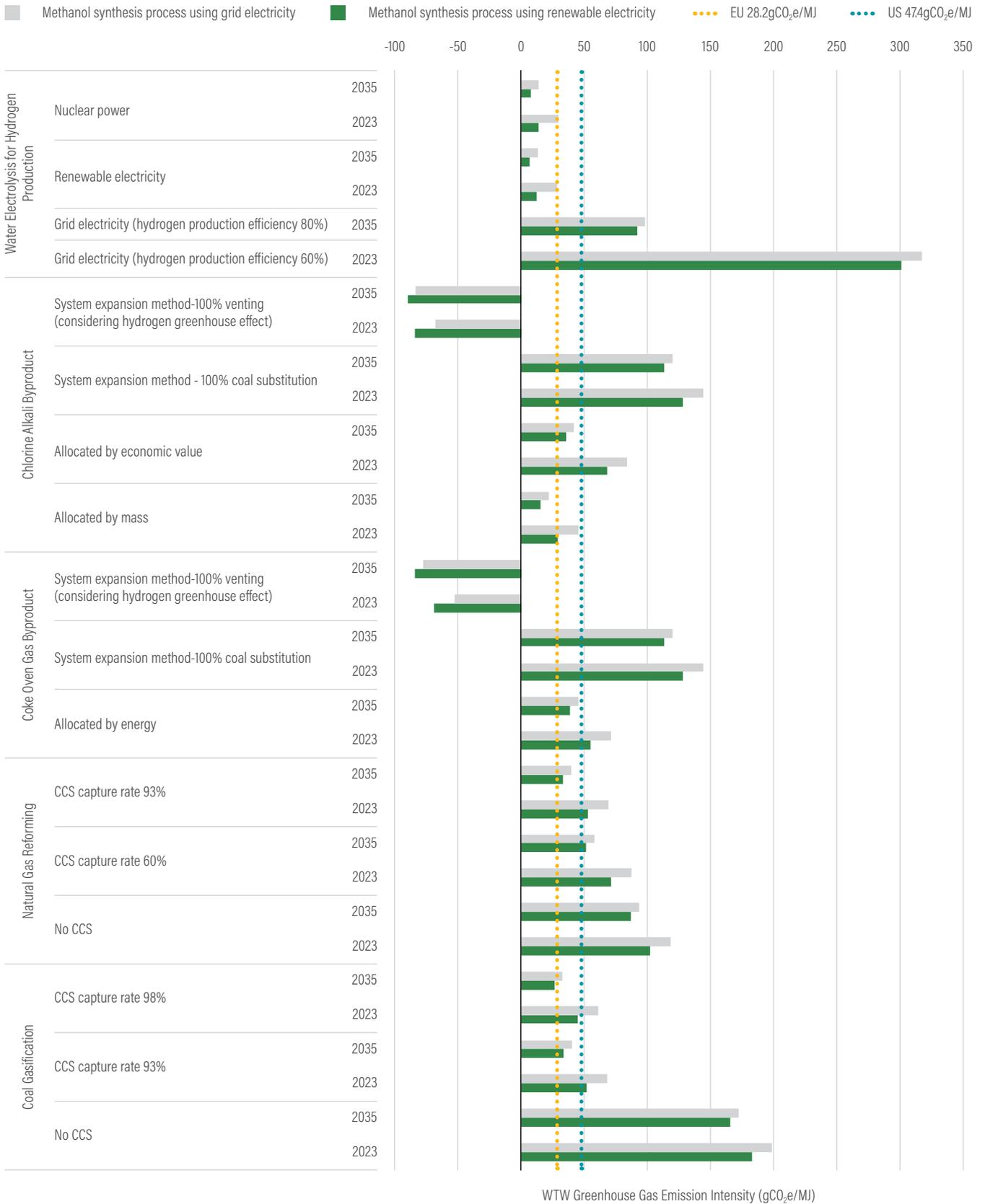
- **Electricity sources for the synthesis process:** The carbon footprint factors of electricity used in the methanol synthesis process are also a determining factor. For example, using renewable hydrogen but relying on grid electricity for synthesis—under ISCC's carbon footprint factor for electricity—leads to synthetic methanol emissions surpassing EU limits. Therefore, it is essential to regularly update China's electricity carbon intensity factors and promote their international mutual recognition.
- **CO₂ sources:** The eligibility of CO₂ sources plays a critical role in determining GHG performance. If CO₂ captured from power plants or industrial facilities is not recognized as a qualified source under the EU regulation, then even methanol synthesized from renewable hydrogen may deliver only marginal GHG reductions compared to fossil-derived methanol, potentially falling short of EU WTW GHG emission thresholds for RFNBOs and low-carbon synthetic fuels.

When by-product hydrogen is used for methanol synthesis, the choice of allocation method significantly impacts the resulting WTW GHG emission intensity. When the system expansion method is applied—particularly in scenarios where the by-product hydrogen would otherwise be vented—the WTW GHG emissions of synthetic methanol are substantially reduced, often reaching the lowest possible levels. In contrast, under the mass allocation method, compliance with the EU's GHG emission thresholds for low-carbon synthetic fuels is only feasible if renewable electricity is used during the synthesis stage. In all other cases, meeting the EU's criteria remains challenging due to higher associated emissions.

The substantial distance between the production and consumption sites of sustainable alternative fuels in China results in significant transportation-related emissions, which would further increase the WTW GHG emission intensity of these fuels.

Regarding certification mechanisms, the aviation sector primarily relies on definition and mechanisms based on ICAO and the EU. In the shipping sector, before the IMO's certification system comes into force in 2027, China's certification practices have largely followed the

ES-FIGURE 2 | WTW GHG emission intensity of synthetic methanol in 2023 and 2035



Note: The values for the EU in the figure are based on the requirements for RFNBO and low-carbon synthetic fuels as stipulated in the EU Maritime Fuel Regulation; The values for the US are based on the tax credit thresholds established in the IRA Section 45Z Clean Fuel Production Tax Credit policy.

Source: Calculations by WRI authors.

EU's definitions and mechanisms for alternative maritime fuels. Whether China should develop dedicated sustainability certification systems for aviation and maritime fuels remains an open question that warrants further research.

Based on the research findings, this study recommends that relevant government departments consider adopting the following measures to strengthen the standards for sustainable alternative fuels in aviation and shipping:

- **Aviation sector,** 1) refine the *Sustainability Assessment Standard for Aviation Fuels*, including clearer definitions of SAF, more robust feedstock source requirements, stricter GHG emission intensity thresholds, and improved accounting methodologies. 2) actively participate in ICAO's ongoing efforts to improve accounting methods, particularly regarding iLUC. 3) research the necessities of developing a domestic sustainability certification system for SAF and its by-products. 4) Advance research on non-CO₂ aviation emissions and explore appropriate monitoring and regulatory mechanisms to address these emissions.
- **Maritime sector,** 1) formulate national standards and sustainability assessment criteria for maritime fuels, explicitly defining feedstock sourcing requirements, WTW GHG emission intensity thresholds, and accounting methods. 2) actively engage in IMO negotiations on the definition of ZNZs. 3) research the necessities of developing a domestic sustainability certification system for sustainable maritime fuels and its by-products. 4) advance research on non-CO₂ maritime emissions, such as black carbon, and develop appropriate accounting methodologies and mitigation strategies.

Regarding biofuels, given China's global leadership in prohibiting the use of food crops as feedstock, it is feasible to further align China-specific standards with international standards. To that end, the following measures are recommended:

- **Feedstock sourcing requirements:** 1) Extend the existing prohibition on food crops in aviation biofuels to include a ban on their use for shipping biofuels to reinforce food security objectives. 2) Sustainability requirements for agricultural and forestry residues should be refined, such as mandating minimum proportions of crop straw to be returned to fields and requiring retention levels for forestry waste, clarifying that residues must not originate from high carbon stock ecosystems (e.g., forests, wetlands), and requiring

that their collection follow sustainable agricultural and forestry management practices. 3) sustainability requirements for energy crops used in shipping biofuels should be strengthened, including mitigating iLUC and preventing exploitation of high carbon stock areas. 4) Conduct a comprehensive biomass availability assessment to evaluate current feedstock uses and identify potential displacement risks.

- **Biofuel accounting methods:** 1) For biofuels from animal manure and municipal organic waste, incorporate avoided emissions from conventional treatment pathways into GHG accounting. 2) Use remote sensing and satellite imagery to monitor land-use changes associated with feedstock cultivation and establish China-specific iLUC emission factors.
- **Feedstock traceability and certification systems:** 1) for agricultural and forestry residues and used cooking oil, strengthen upstream traceability and chain of custody requirements. 2) For biomethane transported via pipeline, implement a mass balance system to strengthen the integrity of the certification process.

Regarding synthetic fuels, the study proposes standards and accounting methods tailored to China's national conditions and industrial development characteristics:

- **Feedstock source requirements,** establish criteria for CO₂, hydrogen, and electricity sources and tailor these requirements to China's energy mix and technological capabilities to ensure that synthetic fuel production supports emissions reduction in aviation and shipping.
- **GHG emission intensity and accounting methods,** 1) assess the need for distinct WTW GHG emission intensities for synthetic fuels versus biofuels, acknowledging differences in production costs and technological maturity; 2) implement additional incentives to support synthetic fuels, including providing financial subsidies, developing China Certified Emission Reduction (CCER) methodologies, and introducing market mechanisms, to bridge the cost gap between synthetic fuels and biofuels. 3) conduct research to develop accounting methods for synthetic fuel WTW, enhance international dialogue on co-product allocation methods, and achieve harmonization.
- **Electricity carbon footprint factor,** 1) develop monthly or hourly electricity carbon footprint factors at both national and regional levels and regularly update these factors, to enable precise emissions accounting—

especially critical for grid-connected hydrogen production. 2) Strengthen international mutual recognition of China's carbon intensity factors.

To reduce the impact of transportation on the GHG emission intensity of sustainable alternative fuels in aviation and shipping, China should consider the following measures: first, promote the use of waterways (especially sustainable maritime fuel ships), railways, pipelines, and new energy heavy-duty trucks for transporting sustainable alternative fuels. Secondly, it is necessary to develop a nationwide book and claim mechanism for sustainable alternative fuels in aviation and shipping, which would allow the environmental attributes of sustainable alternative fuels to be separated from the physical flow of fuels. This mechanism would allow airlines and shipping companies to purchase the environmental benefits (e.g., emission reduction certificates) of sustainable fuels, even if the fuels are consumed elsewhere. It can avoid unnecessary transportation emissions by removing the need to physically deliver fuels to every airport or port.

Companies—particularly fuel producers—should proactively seize development opportunities by aligning with evolving domestic and international sustainability standards and mitigating associated risks. To position themselves competitively in a rapidly transforming global fuel landscape, it is recommended to closely monitor regional policy and standard differences, prioritize the usage of sustainable feedstocks and low-carbon production pathways, enhance production efficiency through innovation and process optimization, and maximize the use of renewable energy.







研究背景

推广可持续替代燃料是实现航空与航运领域减排目标的关键路径之一。然而，目前国内外政策对可持续替代燃料的定义与可持续性要求并不一致。相较 ICAO、IMO 与欧美国家，中国在航空、航运可持续替代燃料标准体系建设方面尚有完善空间。本文通过对比总结国际经验，旨在探讨两组研究问题。

在全球范围内，航空与航运产生的二氧化碳与温室气体排放量可观；若不采取有效措施，其排放将可能呈现迅速增长的态势。2023年，国际航空与远洋运输产生的二氧化碳排放（以下简称碳排放或排放）在全球能源活动产生的碳排放中的占比分别达1.5%与2%（Black等 2024）。如果各国按照《巴黎协定》的2摄氏度升温目标控制各行业的碳排放，而航空与航运的排放仍依目前趋势发展，其碳排放占比可能将上升到2030年的15%（Black等 2024）。

欧盟、美国和中国是全球航空、航运二氧化碳或温室气体排放的主要贡献地区之一。对航空领域而言，美国和中国分别位列全球各国航空营收吨公里（含国内航空与国际航空）的第一位与第二位。若将欧洲地区视作一个整体，它将超越美国，成为全球航空营收吨公里最高的地区。对航运领域而言，欧盟和中国均为全球航运大国（与地区）。以经济权属划分，二者拥有全球最多的商业远洋船舶数量与船舶净载重量；相较于欧盟与中国，美国在航运领域不具备规模优势。中国、美国与欧盟民航业与航运业的规模与排放量见表1。

表1 | 中国、美国与欧盟民航业与航运业的规模与排放量

	中国	欧盟	美国	全球
民航业营收吨公里 (亿吨公里)				
客运与货运	617.21 ^a (2022)	2249.40 ^b (2022)	1856.32 (2022)	7737.14 (2022)
民航业碳排放 (亿吨)				
国内/区域内航线	0.80 ^{c, g} (2023)	0.48 ^d (2022)	1.30 ^c (2022)	3.48 ^f (2022)
国际航线	0.32 ⁱ (2021)	0.65 ^e (2021)	0.635 ^c (2022)	4.37 (2022)
航运业商业远洋船队规模				
船舶数量 (艘)	11735 ^{a, h} (2022)	18595 ^{b, h} (2022)	1758 ^h (2022)	56591 (2022)
船舶净载重量 (亿吨)	4.78 ^{a, h} (2022)	8.29 ^{b, h} (2022)	0.52 ^h (2022)	22.54 (2022)
航运业温室气体排放 (亿吨二氧化碳当量)				
国内/区域内航运	X	0.32 (2021)	0.45 (2022)	X
国际航运	0.51 ^j (2021)	1.24 (2021)	0.32 (2022)	7.06 (2022)

说明: a. 含港澳台数据。

b. 为欧洲数据, 非欧盟数据。

c. 指本国航空公司承运的航线。

d. 指欧洲经济区 (EEA) 内的航线, 包括非欧洲航空公司承运的航线。

e. 指从EEA出发的航线。

f. 指在国家内部飞行的航线。

g. 本研究根据《中国应对气候变化的政策与行动2024年度报告》中的民航吨公里碳排放 (0.919千克) 和《2023年民航行业发展统计公报》运输总周转量计算得到中国民航业的碳排放 (2023年全行业完成运输总周转量1188.34亿吨公里, 其中国际航线完成运输总周转量321.01亿吨公里)。

h. 按照经济权属 (economy of ownership) 划分, 表示对船舶负有主要商业责任的公司所在的经济体。船舶实际所有权的经济体可能与船舶注册的国家 (即船旗国) 不同。

i. 范围为国内及国外航空公司从国内起飞、终点在国外的运输, 含港澳。

j. 国际航海的计算范围为国内水上航运公司、国外水上航运公司从国内起航、终点在国外的运输, 含港澳。

缩写: X=无数据。

来源: 作者根据ICAO (日期不详)、EC (2024f、2023a)、EASA (2022)、EPA (2024)、IEA (2023a、2023b)、UNCTAD (2023)、UNCTAD Data Hub (2022)、生态环境部等 (2024) 相关文献总结。

为减少全球航空与航运温室气体排放，国际民用航空组织 (International Civil Aviation Organization, 简称“ICAO”) 和国际海事组织 (International Maritime Organization, 简称“IMO”) 作为联合国负责国际航空、国际航运领域的国际组织，分别在2022年和2023年提出航空与航运领域的中长期减排目标，包括航空碳排放于2050年实现净零排放的“理想目标”，以及航运温室气体排放于2050年左右实现净零排放的目标 (见表2)。

实现航空、航运的减排目标，推广可持续替代燃料是重要措施之一。例如，根据ICAO (2022b) 的测算，到2050年，航空可持续替代燃料将成为对航空减排贡献最大的措施之一。可持续替代燃料是指有助于交通领域减排且可替代化石燃料消费的燃料，如可持续航空燃料 (sustainable aviation fuels, SAF)。据此定义，化石燃料 (如天然气、化石燃料制甲醇等) 不属于可持续替代燃料的范畴。

为推广可持续替代燃料，ICAO、IMO、欧美国家及中国已在政策措施层面积极布局与发力。例如，国际层面，ICAO自2021年起实施国际航空碳抵消和减排计划 (CORSIA)，借助市场手段推动航空可持续替代燃料的推广。2025年4月，IMO批准了净零框架草案，待最终审议通过后于2027年生效，2028年起实施，规定到2030年和2035年，单一船舶年度平均温室气体燃料强度分别较2008年降低8%~21%和30%~43%，并为船东/船管企业提供经济措施助力合规 (IMO 2025; Lloyd 2025)。

国家和地区层面，欧盟于2023年出台的《欧盟航空燃料法规》(ReFuelEU Aviation) 规定，航空燃料供应商应向欧盟境内的机场提供一定比例的SAF。具体而言，2025年的目标比例为2%，到2030年该比例将提升至6%，并计划到2050年达到70%。此外，该法规还要求航空公司必须确保在欧盟机场加注的航空燃油量至少达到其年度航空燃油需求量的90%，以避免航空公司为规避这一规定提前在非欧盟机场过量加油的情况 (EU P&C 2023e)。同年，欧盟也出台了针对航运可持续替代燃料的法规——《欧盟海运燃料法规》(FuelEU Maritime)，要求自2025年起，船舶燃料温室气体排放强度较2020年行业平均值降低2%，并逐步提升到2050年的80% (EU P&C 2023c)。类似地，中国与美国也相继出台关于SAF和航运可持续替代燃料的目标或政策措施 (见表3)。

这些政策 (包括国内政策与国际政策) 开始对中国民航业、航运业乃至燃料生产行业 (如化工、能源等行业) 产生深远的影响。在航运业方面，随着IMO净零框架的实施，自2028年起，中国5000总吨以上的远洋船舶均须满足年度温室气体燃料强度要求，否则须通过交易或向IMO购买补救单位以达到合规要求。在民航业方面，基于《欧盟航空燃料法规》，自2025年起，中国 (含港澳台) 的6家航空公司在欧盟机场将面临更高的SAF加注成本 (EC 2024k)。此外，这些标准与法规也会增加全球对可持续替代燃料的需求量，为中国燃料生产企业带来发展机遇。

表2 | ICAO和IMO中长期与近期减排目标

	政策名称	中长期目标	近期目标 (含指示性核点)
ICAO	《国际航空的长期全球理想目标 (LTAG)》(Long term global aspirational goal for international aviation)	力争2050年实现二氧化碳净零排放	到2030年，通过使用航空清洁燃料，将国际航空碳排放量减少5% (与不使用清洁能源的情况相比)
IMO	《2023年船舶温室气体减排战略》(2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships)	2050年左右实现国际航运温室气体净零排放	到2030年，国际航运的年温室气体排放量较2008年至少降低20%，力争降低30%；零或近零温室气体排放技术、燃料和/或能源 (zero or near-zero GHG emission technologies, fuels and/or energy, 简称“ZNZs”) 在航运能源消耗量中的占比至少达到5%，力争达到10% 到2040年，国际航运的年度温室气体排放总量较2008年至少降低70%，力争降低80%

来源：作者根据ICAO (2022b)、IMO (2023) 相关文献总结。

表 3 | ICAO、IMO、欧盟、美国与中国在航空和航运可持续替代燃料推广方面出台的政策一览

国家、地区与国际组织及政策名称	政策要求	推广可持续替代燃料的作用	对中国企业的影响	
			对民航业或航运业的影响	对燃料生产行业的影响
航空				
ICAO	<p>国际航空碳抵消和减排计划 (CORSIA)</p> <p>2024—2026年(自愿阶段): ICAO 成员国可自愿参加CORSIA机制, 在自愿参加CORSIA机制的国家的机场之间飞行的航线需清缴 CORSIA合格排放单位(CEEU)</p> <p>2027年起(强制阶段): 包含中国在内的各成员国必须参与 CORSIA机制</p>	航空公司通过使用包括SAF在内的 CORSIA合格燃料, 减少购买碳信用额度, 履行减排义务	2027年起, 包括中国在内的各成员国都必须参与 CORSIA 机制	可能增加全球对SAF的需求
	<p>《欧盟航空燃料法规》(RefuelEU Aviation) ^a</p> <p>航空燃料供应商向欧盟机场提供的一定比例的SAF (2025年为2%, 逐步提升到2050年70%), 自2030年起设置航空RFNBO推广的子目标(从2030年的1.2%逐步提升至2050年35%)</p> <p>航空公司必须确保在欧盟机场加注的航空燃油量至少达到其年度航空燃油需求量的90%</p>	由于欧盟机场有 SAF强制掺混要求, 航空公司必须加注SAF	根据欧盟委员会列表(EC 2024k), 目前该法规涉及的中国航空公司包括中国国际航空公司(国航)、中国东方航空公司(东航)、国泰航空有限公司、中国南方航空公司、中华航空股份有限公司、金鹏航空有限责任公司。这些中国航空公司可能面临欧盟机场更高的加油成本	增加欧盟对SAF的需求, 可能增加中国企业出口机遇
欧盟	<p>欧盟碳排放交易体系 (EU ETS) ^b</p> <p>航空业自2012年起被纳入EU ETS, 管理范围为欧洲经济区(European Economic Area, EEA)内航线的排放; 2026年起, 航空行业将取消免费配额, 全面实施配额拍卖</p>	使用SAF可减少航空公司的碳排放量, 可以减少配额支出, 或交易盈余的排放配额	中国的航空公司在 EEA内飞行的航班需要履约	可能增加欧盟对SAF的需求, 可能增加中国企业出口机遇
	<p>《欧盟可持续金融分类方案》(EU Taxonomy)</p> <p>满足以下条件的经济活动, 可在欧盟获得可持续金融支持: 到2030年, 客运和货运航空在机队层面使用至少15%的SAF, 此后每年增加2%</p>	引导更多可持续融资流向SAF	无直接影响	无直接影响
	<p>《欧盟清洁工业协议》(The Clean Industrial Deal)</p> <p>欧盟委员会将于2025年第三季度发布一项名为“可持续交通投资计划”的战略框架, 提供一揽子措施, 包括简化审批流程、降低市场准入门槛、提供融资与去风险工具, 以吸引更多资金进入可持续替代燃料领域</p>	通过投资促进欧盟本土生产的SAF降低成本	无直接影响	无直接影响

表 3 | ICAO、IMO、欧盟、美国与中国在航空和航运可持续替代燃料推广方面出台的政策一览 (续)

国家、地区与国际组织及政策名称	政策要求	推广可持续替代燃料的作用	对中国企业的影响	
			对民航业或航运业的影响	对燃料生产行业的影响
《SAF大挑战》(SAF Grand Challenge)	2030年起,美国年产30亿加仑SAF,在航空燃料使用量中的占比为10%;2050年,SAF在航空燃料使用量中的占比达100%(年产350亿加仑SAF)	提出有雄心的发展目标,促进SAF的生产与供应	无直接影响	无直接影响
美国 IRA《SAF减税政策》、IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》	IRA《SAF减税政策》(2023—2024年)为美国本土SAF燃料生产商提供税收抵免。后续,IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》(2025—2027年)将承接该政策,但目前暂未发布实施细则	SAF生产商可获得税收抵免激励	无直接影响	无直接影响
	《可再生燃料标准》(Renewable Fuel Standard)、美国加州《低碳燃料标准》(Low Carbon Fuel Standard)	SAF可获得积分用于交易变现,没有强制合规义务		
中国 《“十四五”民航绿色发展专项规划》	“十四五”期间,可持续航空燃料消费量累计达到5万吨;2025年,力争可持续航空燃料消费量达到2万吨以上	促进SAF的生产与供应	增加中国SAF的供给	开拓国内SAF市场
航运				
IMO 《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL)附则VI修正案的净零框架	净零框架已通过MEPC 83会议审议批准,待2025年正式通过后,于2027年生效。该框架包括全球燃料标准(Global fuel standard, GFS)和经济措施,涉及船舶使用燃料的年度温室气体排放强度逐年下降目标,未达到目标的船舶需要通过交易获得盈余单位或向IMO购买补救单位以达到合规要求,而使用ZNZs可获得IMO净零基金奖励。	使用可持续替代燃料可显著降低温室气体强度值,更易达到合规要求,产生的盈余单位还可以交易变现;使用满足温室气体强度阈值要求的ZNZs可以获得直接经济奖励	预计2028年起,中国5000总吨以上的远洋船舶要开始满足IMO的年度温室气体燃料强度要求,否则需要通过交易或向IMO购买补救单位以达到合规要求	增加全球对航运可持续替代燃料的需求
欧盟 《欧盟海运燃料法规》(FuelEU Maritime)	2025年起,对船舶燃料温室气体排放强度(按WTW范围核算)设定逐步下降的目标(从2025年的2%逐步降低至2050年的80%),视RFNBO的推广情况,可能自2034年起设置强制使用RFNBO的比例目标	使用可持续替代燃料可显著降低船东/船管企业的燃料温室气体排放强度值,更容易达到合规要求	2025年起,中国进出EEA的5000总吨以上的船舶受到管理(包括EEA内航行所使用的100%能源,以及进出EEA的航行所使用的50%能源)。船东/船管企业应履行合规义务,满足燃料温室气体强度要求	增加欧盟对航运可持续替代燃料的需求,增加中国企业出口与本地消费的机遇——根据该法规,船舶可在欧洲境外加注

表 3 | ICAO、IMO、欧盟、美国与中国在航空和航运可持续替代燃料推广方面出台的政策一览 (续)

国家、地区与国际组织及政策名称		政策要求	推广可持续替代燃料的作用	对中国企业的影响	
				对民航业或航运业的影响	对燃料生产行业的影响
欧盟	欧盟碳排放交易体系 (EU ETS)	2024年起航运业纳入EU ETS, 管理范围为任何船旗国5000总吨以上的船舶, 涵盖EEA港口间航线100%的碳排放, 以及进出EEA的航线50%的碳排放	使用航运可持续替代燃料可减少船舶的GHG排放, 减少船东/船管企业的配额支出, 或交易盈余的排放配额	按照EU ETS的要求, 中国船东/船管企业在EEA内的航线以及中欧航线50%的碳排放需要履约	可能增加EEA内以及中欧航线对航运可持续替代燃料的需求
	《欧盟可持续金融分类方案》(EU Taxonomy)	满足以下条件之一的经济活动, 可在欧盟获得可持续金融支持: 1. 货运船舶的直接尾气碳排放为零或使用可再生能源 2. 货运船舶的能效指标 (Energy Efficiency Design Index, EEDI) 实现一定水平的降低, 并使用岸电	引导更多可持续融资对航运替代燃料进行投资	无直接影响	无直接影响
	《欧盟清洁工业协议》(The Clean Industrial Deal)	同航空	通过投资促进欧盟本土航运可持续替代燃料降低成本	无直接影响	无直接影响
美国	IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》、IRA《45V清洁氢能生产减税政策》 ^d	航运生物燃料生产商可依据《45Z清洁燃料生产减税政策》(2025—2027年) 申请税收抵免(文件实施细则尚在征求意见); 航运(氢基)合成燃料生产商可依据《45Z清洁燃料生产减税政策》或《45V清洁氢能生产减税政策》(2023—2032) 申请税收抵免。	美国本土的航运可持续替代燃料生产商可获得税收抵免激励	无直接影响	无直接影响

说明: a. 《欧盟航空燃料法规》规定, 除SAF外, 符合要求的低碳航空燃料也能达到合规要求(见第三章)。航空公司必须确保在欧盟机场加注的航空燃油量至少达到其年度航空燃油需求量的90%, 目的是避免航空公司通过提前在非欧盟机场加注廉价航油(过量加油)来降低成本。

b. 航空公司可以采取多种措施在欧盟碳排放交易体系中达到合规要求, 使用SAF只是其中一种措施(且未必是最经济的措施)。

c. 根据Cazzola等(2024)的研究, 30亿加仑SAF在美国2030年航空燃料使用量中占比10%。

d. 根据IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》, SAF最高可获得1.75美元/加仑的税收抵免; 航运可持续替代燃料最高可获得1美元/加仑的税收抵免。

来源: 作者根据ICAO (2023)、EU P&C (2023f, 2023a, 2023c, 2023b)、U.S.Congress (2022c, 2022b, 2022a)、U.S.EPA (2023)、CARB (2020)、中国民航局 (2021)、American Bureau of Shipping (2024)、U.S.IRS&Treasury (2025a, 2025b)、EC (2023d, 2025) 相关文献总结。

通过标准来界定航空与航运可持续替代燃料, 是制定航空、航运可持续替代燃料相关推广政策、引导企业投资的基础和前提。

目前, 相较ICAO、IMO与欧美国家, 中国在航空、航运可持续替代燃料标准体系方面仍有待完善。对政府部门而言, 如果出台过于严苛的可持续替代燃料标准, 可能会影响行业早期发展与投资的积极性; 相反, 如果标准过于宽松, 也会影响环境效益与可持续发展。对企业而言, 标准的

空白、核算方法与排放因子的缺失, 以及对国内外标准规则的错误解读, 都有可能为中国企业在该领域投资带来较大不确定性。

完善航空、航运可持续替代燃料标准体系, 不仅需要结合中国自身特点, 也需要借鉴国际经验。国际上, 航空、航运可持续替代燃料的标准体系通常涉及两方面: 一是燃料的可持续性要求与认证机制; 二是在可持续性要求中, 燃料的全生命周期温室气体排放强度要求与核算方法:

■ 可持续性要求与认证机制：国际上对可持续替代燃料有严格的社会、经济与环境可持续性要求。与传统化石燃料不同，可持续替代燃料的原料来源多元，不同原料在社会、经济与环境可持续性方面的影响各异。如果这些原料的可持续性要求不完善，可能会导致更多的温室气体排放，甚至制约社会、经济与环境的可持续性发展。例如，航空生物燃料的发展可能增加对秸秆等农业废弃物的需求，减少秸秆的还田量，削弱农业的粮食产量（曹丽花等 2016）。在缺水且经济落后的地区，大规模推广能源作物为原料的航空生物燃料，可能消耗更多水资源，影响经济发展与居民用水（康利平等 2013）。

全面且准确的可持续性认证机制是航空与航运可持续替代燃料标准落地实施的重要基础。若第三方可持续性认证体系缺失或不完善，会增加航空、航运可持续替代燃料的欺诈风险，无法有效保障燃料的可持续性。目前，由于国内相关标准尚不完善，主要以国际标准为依据进行认证；未来随着中国相关可持续替代燃料标准的逐步完善，出台本土认证机制也将成为必然。

■ 全生命周期温室气体排放强度要求与核算方法：推广低碳燃料是实现航空、航运减排的重要措施，所以在替代燃料的众多可持续性要求中，燃料的全生命周期温室气体排放强度要求及核算方法至关重要。与传统航空煤油、船用燃料油不同，可持续替代燃料以“上游”温室气体排放为主（EU P&C 2018、2023c），涉及原材料生产、收集、运输等阶段的排放，所以需要针对可持续替代燃料开展燃料

全生命周期的排放核算。如果核算边界不完整或核算方法不严谨，会造成温室气体排放的泄漏，如土地利用变化产生的直接或间接排放，加剧航空、航运全生命周期的温室气体的排放。

所以，本文试图通过国际经验对比与总结，识别中国可以借鉴的先进经验或规避的教训，以回答如下两个研究问题：

1. 欧盟、美国、ICAO、IMO等国家、地区与国际组织对航空、航运可持续替代燃料的可持续性要求分别是什么？与中国有何差异？这些国家、地区与国际组织是否提供替代燃料的可持续性认证机制？

值得注意的是，航空可持续替代燃料的认证涵盖可持续性认证与适航认证两个重要方面。由于欧美国家与ICAO近期出台的政策与标准主要聚焦于可持续性认证，所以，本文将重点关注可持续性认证。不过，航空发动机使用可持续替代燃料的适航批准，作为确保航空安全的重要前提，同样值得高度重视。

2. 替代燃料的可持续性要求中，全生命周期温室气体排放强度要求是近期政策关注的重点。欧盟、美国、ICAO、IMO等国家、地区与国际组织对航空、航运替代燃料的温室气体排放强度要求与核算方法如何？中国生产的各类航空、航运燃料可持续替代燃料全生命周期碳排放强度能否满足国内外对燃料的温室气体排放强度要求？

本研究内容关系见图1。

图1 | 本研究内容关系图



说明：图中橘黄色内容为本文主要研究和分析的内容。
来源：作者绘制。





第二章

研究方法

本文重点对比分析了相关国家、地区与国际组织在航空与航运可持续替代燃料的定义、类别划分、可持续性要求与认证机制，以及全生命周期温室气体排放强度的阈值要求与核算方法。此外，基于对GREET模型的本地化处理，本文计算了中国生产的航运甲醇生物燃料与甲醇合成燃料的温室气体排放强度，并分析其是否满足国内外航运替代燃料的排放强度阈值要求。

为回答上述研究问题，本文比较研究的对象主要包括以下几类：

- 部分国家与地区：中国、欧盟、美国（及美国加州）。这些国家与地区的航空和航运碳排放量在全球占比高，或已率先出台航空、航运可持续替代燃料政策。
- 联合国相关机构：负责国际航空、国际航运领域的ICAO和IMO。这些国际组织会在全球层面出台具有拘束力的政策。
- 全球可持续替代燃料的认证机制的制定机构：如ISCC和RSB。这些机构会在ICAO、IMO与各国要求的基础上，提出更高的可持续性要求；同时，获得这些认证机制的认证，也是航空、航运可持续替代燃料进入国际市场的重要前提。

本文采取政策与文献综述、专家访谈与模型测算的方法开展分析。本文研究方法与研究问题的对应关系见表4。具体研究方法与数据来源的说明如下：

方法一：政策文件及文献汇总与对比分析，主要回答问题1和问题2。

政策文件梳理与对比的来源涉及中国、欧盟、美国（与美国加州）、ICAO与IMO以及国际认证机制，最新出台的航空与航运可持续替代燃料标准、政策与核算方法指南。其中，本文侧重分析这些国家、地区与国际组织对航空和航运可持续替代燃料的定义、可持续性要求、核算方法与认证体系，识别对中国有益的经验借鉴与值得吸取的教训。其中，考虑到可持续性要求的重要性，本文从三方面分析可持续性，包括相关国家、地区与国际组织对可持续性的指标体系完善程度、不同原料来源的可持续性要求、环境可持续性要求（特别是燃料全生命周期温室气体排放强度的要求）。本文参考的官方文件见附录1。然而，该方法的局限性在于难以揭示现有政策文件的不足，如可持续性要求的完整性、核算方法的准确性等，因此，本文以文献汇总与分析作为补充。

在政策文件分析的基础上，本文对上述三方面的可持续性也进行文献分析汇总，识别可持续性要求与核算方法的不足与待改善之处，以及重要排放源与影响燃料全生命周期排放的因素。

表 4 | 本文研究问题与研究方法的对应关系

研究问题	研究方法	研究内容
问题1. 欧盟、美国、ICAO与IMO对航空、航运可持续替代燃料的可持续性要求是什么？如何对航空、航运可持续替代燃料开展数据追溯与可持续性认证，以确保可持续性？	政策文件及文献汇总与对比	航空、航运可持续替代燃料的可持续性要求： 1. 航空、航运可持续替代燃料的定义与类别 2. 航空、航运可持续替代燃料的可持续性要求（即指标体系） 3. 原料的可持续性要求 航空、航运可持续替代燃料的认证体系
问题2. 燃料的可持续性要求中，欧盟、美国、ICAO与IMO对航空、航运可持续替代燃料的温室气体排放强度与核算方法要求如何？中国生产的各类航空、航运可持续替代燃料全生命周期碳排放强度能否满足国内外可持续替代燃料的全生命周期温室气体排放强度的要求？	政策文件及文献汇总与对比、专家访谈 GREET模型测算、专家访谈	航空、航运可持续替代燃料的温室气体排放强度要求与核算方法： 1. 航空、航运可持续替代燃料的温室气体排放强度要求 2. 航空、航运可持续替代燃料的温室气体排放强度核算方法 3. 航空、航运可持续替代燃料的温室气体排放强度核算方法对中国的适用性 根据专家访谈获得的中国本土的原料来源与制取路径，基于不同原料来源、制取路径与核算方法，搭建情景组合，分析： 1. 现状与未来（2035年）中国本土原料、制取路径、核算方法以及其他影响因素对燃料全生命周期温室气体排放强度的影响 2. 识别哪些原料、制取路径与核算方法下，中国生产的航空与航运可持续替代燃料能够满足国内外的温室气体排放强度要求

来源：作者总结。

方法二: GREET模型测算现状与未来中国航空、航运可持续替代燃料全生命周期的排放, 主要回答问题2。

- 核算功能单位: 与国际政策与标准相一致, 本文采用单位燃料热值(或氢气重量)的全生命周期的温室气体排放, 例如, 1兆焦(Megajoule, MJ)航空生物甲醇的全生命周期温室气体排放。
- 核算边界: 航空、航运燃料的全生命周期(Well to Wake, WTW)温室气体排放通常涵盖四个主要环节的排放, 分别为原料生产和运输环节、燃料生产环节、燃料运输环节以及燃料使用环节, 所涉及的温室气体种类包括二氧化碳、甲烷和一氧化二氮。鉴于全生命周期分析(lifecycle assessment, LCA)是一种中长期分析方法, 本文参考LCA常用方法, 采用二氧化碳、甲烷和一氧化二氮100年时间尺度的全球升温潜能值(global warming potential, GWP)进行计算(Carvalho等2023), 相关数值取自IPCC第六次评估报告值。
- 核算方法: 由于选择不同原料(与制取路径)、核算方法, 航空与航运燃料WTW的温室气体排放有较大差异。所以, 本文通过搭建不同的情景组合, 分析中国本土原料、制取路径、核算方法以及其他影响因素对燃料WTW的温室气体排放强度的影响, 识别哪些原料、制取路径与核算方法下, 中国生产的航空与航运可持续替代燃料能够满足国内外的温室气体排放强度要求。这一分析的结果主要用于: 一是为中国未来航空与航运燃料WTW温室气体核算方法搭建提供建议; 二是为中国燃料生产企业生产合规燃料提供参考。值得注意的是, 为避免“与民争粮”, 本文没有考虑以粮食(包括食物与饲料作物)与能源作物作为原料制取的生物燃料。

基于上述方法, 本研究采用美国阿贡国家实验室开发的“交通温室气体、常规污染物排放以及能源消耗量模型”(GREET模型2024 Net版)(Wang等2024)进行情景搭建与计算。该模型为交通领域生命周期分析主流的核算工具之一⁵, 能够基于不同情景假设, 计算燃料全生命周期的温室气体排放。

值得注意的是, GREET模型并非完美。首先, 有研究指出, GREET模型会低估生物燃料的间接土地利用变化排放, 导致生物燃料的WTW温室气体排放强度过低(Berry等2024)。由于本研究在计算时只考虑原料为有机废弃物的情况——不涉及粮食等间接土地利用变化排放的原料, 所以, GREET模型的缺陷对本研究结果的影响较有限。

- 数据来源: GREET模型默认参数是基于美国的实际情况设定的, 与中国的情况存在一定的差异。因此, 本研究对GREET模型中的部分默认值进行了修改, 尽可能采用中国本地公开可得的原料、制备路径与相关数据。具体而言, 中国本地的原料来源与制取路径与效率来自专家访谈, 排放因子(例如中国电力碳足迹因子)、物流环节运输距离、工业供热方式等来自统计年鉴或文献(详见附录2)。然而, 由于航空、航运可持续替代燃料属于新兴事物, 中国本土化数据与制备路径仍缺失(如部分原料的制取效率等), 所以, 本文在这些数据缺失的情况下, 采用了GREET模型的默认值作为替代⁶。这一做法可能会导致本文的研究结果与中国实际的温室气体排放情况存在一定的出入。未来, 中国应尽快完善相关数据统计体系, 以更准确地核算航空、航运可持续替代燃料的温室气体排放强度。本文详细的核算方法与数据来源说明见第7.1节与附录2。

方法三: 专家访谈, 主要回答问题2。

由于中国的生物质储备与欧美国家有差异, 并且正在探索不同的制取路径, 所以, 本文在获得知情同意的基础上, 采用非结构性访谈的方法对4位专家进行了访谈。这些专家主要来自航空、航运可持续替代燃料相关标准制定、原料储备与燃料生产等领域, 具有丰富的的一线实践经验。本文的访谈问题主要聚焦于以下两个方面: 一是中国航空、航运可持续替代燃料的原料来源及其风险(例如是否涉及间接土地利用变化排放); 二是现有常见的原料来源、制备路径与制取效率, 以核算国内产生的航空与航运可持续替代燃料的温室气体排放强度。当专家访谈的结论出现矛盾时, 本文通过增加专家数量的方式, 以多数专家的结论作为主要依据。然而, 受限于专家访谈的样本数量, 本文部分专家访谈结论可能在代表性方面存在一定局限。





第三章

航空、航运可持续替代燃料的定义与类别

全球尚未对航空、航运可持续替代燃料形成统一定义与分类体系。本章依据是否有政策措施支撑，对航空、航运可持续替代燃料进行分类。研究发现，在本研究涉及的国家、地区与国际组织中，其对航空与航运可持续替代的燃料推广政策主要聚焦于三类燃料：生物燃料、合成燃料（RFNBO与低碳合成燃料）与回收碳燃料（RCF）。同时，部分政策在特定情况下也允许使用化石燃料。

全球范围尚缺乏对航空、航运可持续替代燃料的统一定义或分类。考虑到对航空、航运可持续替代燃料进行定义与分类的主要目的是针对不同燃料出台差异化的政策措施，所以，本文以**有无政策措施作为可持续替代燃料的划分节点**，对航空、航运可持续替代燃料进行分类。换言之，本文不考虑仅有可持续替代燃料定义与分类，但没有出台推广政策的情况。

由于欧盟对可持续替代燃料有相对完整、清晰的分类，并常见于欧盟政策文件，所以，本文也列出欧盟的分类方法，并在后文说明本文类别与欧盟类别的对应关系。目前，欧盟根据可持续替代燃料的可再生程度（即环境可持续性），将可持续替代燃料分成可再生来源与低碳来源两类（见表5）。其中，可再生来源包括符合《可再生能源指令III》要求的生物燃料和非生物来源的可再生燃料（Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBO）；低碳来源包括低碳氢气、低碳合成燃料和回收碳燃料（Recycled Carbon Fuels, RCF）。

表5 | 欧盟可持续替代燃料类别及案例

可持续替代燃料的类别		政策文件	定义	案例	
				航运甲醇燃料	航空SAF
可再生来源	生物液体燃料 (biofuel)	《可再生能源指令III》	由生物质制取的液体燃料，且满足可持续性要求，如来自非高碳储量的生态系统等	1. 生物质气化制甲醇 2. 生物天然气制甲醇	生物质气化制SAF
	生物气体燃料 (biogas)	《可再生能源指令III》	由生物质制取的气体燃料，如生物天然气、生物质制氢	不适用	不适用
	非生物来源的可再生燃料 (RFNBO)	《可再生能源指令III》	由除生物质外的可再生能源制成的气体和液体燃料，如可再生能源电解水制氢	可再生能源电解水制氢和直接从空气中捕获二氧化碳合成的甲醇	可再生能源电解水制氢和直接从空气中捕获二氧化碳合成的SAF
	低碳氢气	《气体指令》	由非可再生来源原料制成的氢气，且温室气体排放强度低于28.2 gCO ₂ e/MJ，如满足排放强度要求的工业副产氢等	不适用	不适用
低碳来源	低碳合成燃料 (synthetic low-carbon fuel)	《关于修订温室气体排放监测和报告的执行条例》	由欧盟《气体指令》中定义的低碳氢气与二氧化碳合成的气体或液体燃料，且温室气体排放强度低于28.2 gCO ₂ e/MJ	工业副产氢与直接从空气中捕获二氧化碳合成的甲醇	不适用 ^a
	回收碳燃料 (RCF)	《可再生能源指令III》	由非可再生来源原料的废弃物制成的液体和气体燃料，且原料无法按照《欧盟指令2008/98/EC》进行回收，或属于不可避免的废气	废塑料制成的甲醇	废塑料制成的SAF

说明：a. 虽然欧盟的SAF不适用该类别，但欧盟的LCAF允许非化石基的低碳氢合成的航煤。

来源：作者根据EU P&C (2018, 2023e, 2024)、EC (2024i)、EC Directorate-General for Energy (2023) 相关文献总结。

值得注意的是，可持续替代燃料未必来自可再生来源，在本文研究的国家、地区与国际组织中，部分低碳来源（例如以非可再生氢气为原料）的可持续替代燃料也是政策激励的对象。本文基于航空、航运可持续替代燃料的分析结果如下：

在航空可持续替代燃料领域，本文研究涉及的国家、地区与国际组织的相关标准已相对成熟，主要涵盖生物燃料、合成燃料（RFNBO与低碳合成燃料）、RCF等类别，但具体定义仍存在一些差异。

在欧盟地区，除了符合《可再生能源指令III》要求的生物燃料与RFNBO外，部分低碳来源的航空替代燃料也被纳入欧盟政策的激励范畴。具体而言，欧盟将SAF划分为三类：满足可持续性要求的生物燃料、RFNBO、RCF（见表6）。在SAF基础上，欧盟进一步定义了低碳航空燃料（Low Carbon Aviation Fuels, LCAF），即由非化石基（non-fossil）的低碳氢合成的航空燃料并且这种燃料要满足WTW温室气体排放强度要求（具体强度要求与SAF相同），像核能制氢合成的航空燃料就属于此类别（EU P&C 2023e）。

在欧盟法规体系下，SAF和符合要求的LCAF均能享受政策支持。例如，SAF和符合要求的LCAF，均可用于《欧盟航空燃料法规》的合规。同时，欧盟碳排放交易体系也为航空公司提供2000万个碳配额，用于填补航空替代燃料与传统航煤的成本差，SAF（除RCF外）与LCAF均有资格获得该配额（EC 2023e）。

在中国和美国，SAF的内涵与定义比欧盟更宽泛，包含（化石基）低碳合成燃料。中美定义的SAF是指符合可持续性要求以及“ASTM D1655航空涡轮机燃料标准规范”与“ASTM D7566 含合成烃的航空涡轮燃料标准规范”的非石油基的航空燃料（中国民航局 2018；U.S. Congress 2022b）。根据此定义，LCAF也属于SAF，可贡献于中美政府的SAF推广目标。只不过该LCAF类别比欧盟的边界更广——包括化石基低碳氢（如工业副产氢）合成的航空燃料。所以，中美SAF推广目标主要涉及可再生燃料（生物燃料与RFNBO）、RCF与低碳合成燃料（见表6）。

ICAO对航空替代燃料的定义最为宽松，甚至包括温室气体排放强度低的传统化石燃料航煤。ICAO对SAF也有严格定义，具体要求与欧盟类似（ICAO 2023）。然而，ICAO对LCAF的定义十分宽松：实现WTW温室气体排放强度比传统化石燃料航煤低10%的传统航煤也属于LCAF——即作为CORSIA合格燃料，能参与CORSIA自愿减排机制（Zaman等 2024）。

值得指出的是，ICAO与部分国家也允许将“共炼”方式生产的航空可持续替代燃料作为SAF（见表6）。共

炼方式是指将生物质加入现有航煤的炼化过程，与石油原料同时加工产生。ICAO允许在酯类和脂肪酸类加氢（Hydrotreated Esters and Fatty Acids, HEFA）⁷路径中使用共炼方式，但限制生物质的掺入比例——即要求生物质生产的SAF在所有产品中的体积占比不超过10%（ICAO日期不详）。本文将通过共炼方式生产的航空可持续替代燃料归为生物燃料的一种。

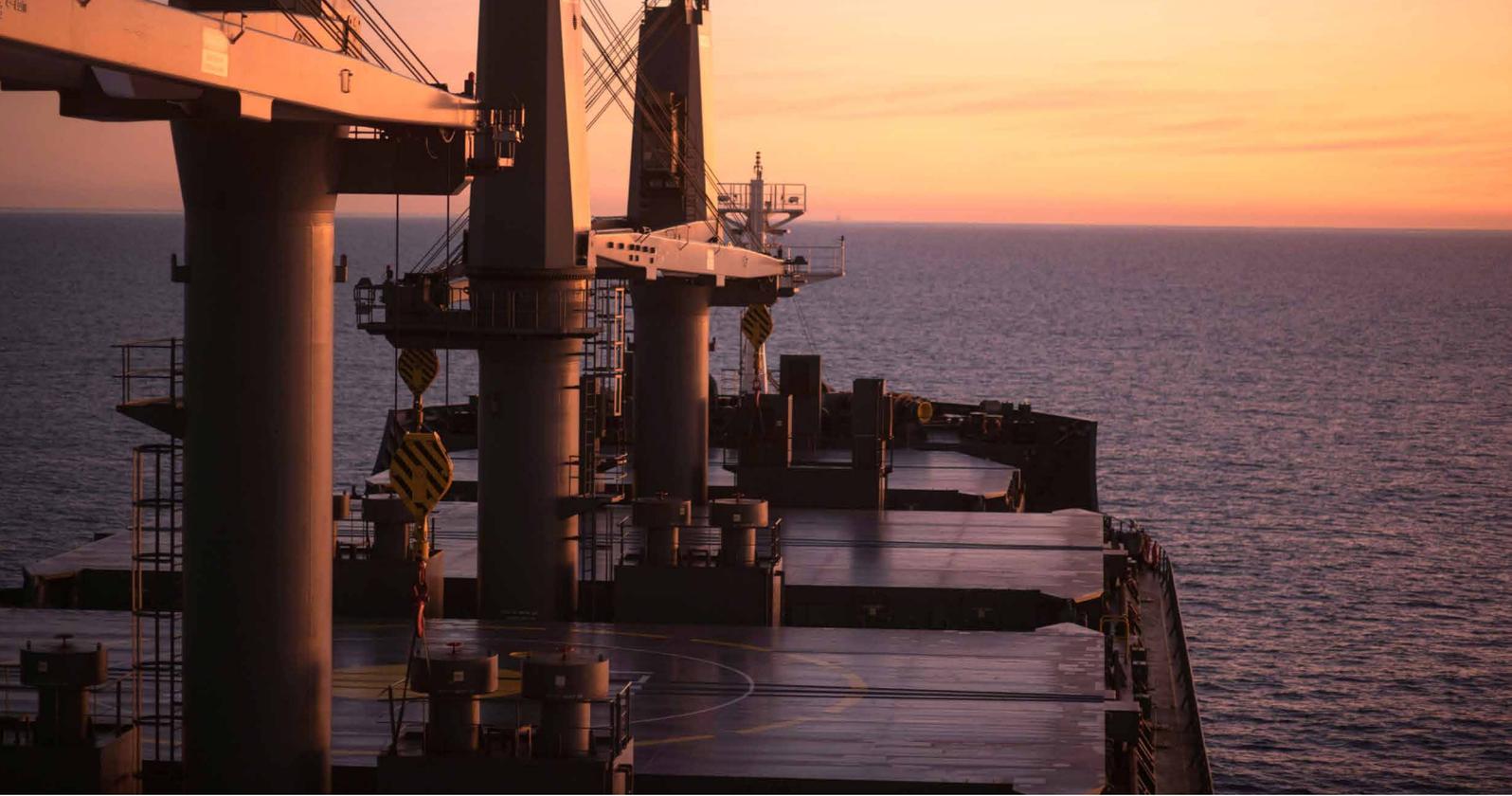
在航运可持续替代燃料领域，IMO、欧盟和美国均采用技术中立原则，以燃料WTW温室气体排放强度要求为门槛，渐进式实现减排目标。近期，IMO和欧盟也允许使用化石燃料。

IMO、欧盟和美国均提出了针对航运可持续替代燃料的激励措施，但管理对象、方式与要求严格程度有所不同（见表7）。其中，IMO和欧盟建立了面向船东/船管公司强制性的单船燃料温室气体强度标准。IMO与欧盟相比，在机制上类似，但增加了市场化机制。美国则是基于燃料的温室气体强度阈值，向燃料生产或进口企业提供税收抵免。中国目前在航运可持续替代燃料的标准与政策措施方面仍是空白。

IMO、欧盟和美国的航运替代燃料推广政策采用的是技术中立原则，未明确规定航运替代燃料的具体类别（或技术路线），只要各类航运燃料能满足燃料WTW温室气体排放强度要求和原料可持续性要求，即可视为合规。特别是IMO和欧盟，近期也允许使用化石燃料。具体为：

- 在欧盟，除符合要求的生物燃料、RFNBO、RCF与低碳合成燃料之外，部分化石燃料（例如液化天然气）在2035年之前也被纳入欧盟《欧盟海运燃料法规》所认可的合规燃料范围之内。该法规依据单船的燃料WTW温室气体排放强度进行市场准入与合规管理，船东/船管企业可以通过灵活机制满足合规要求，如跨报告期的借贷、多艘船组成合规池等。具体而言，自2030年起，船舶年度平均燃料WTW温室气体排放强度需低于85.7gCO₂e/MJ（较2020年减少6%），自2035年起，需低于77.9gCO₂e/MJ（较2020年减少14.5%），方可满足合规要求。这意味着，在2035年前，部分天然气船舶（特别是天然气逃逸量小的船舶，如奥托循环双燃料低速船舶）能够符合《欧盟海运燃料法规》的要求（EU P&C 2023c）。

《欧盟海运燃料法规》仅在计算船舶燃料年度平均WTW温室气体排放强度时，对可持续替代燃料提出了差异化的核算要求。若企业使用符合《可再生能源指令III》或《气体指令》要求的替代燃料，且该



燃料符合WTW温室气体排放强度及原料可持续性要求，则可采用（经认证后的）实际温室气体排放强度值——即有助于降低燃料的WTW温室气体排放强度。反之，若不符合上述要求，企业则需按照对应最高化石燃料的排放因子计算燃料的温室气体排放强度——即难以降低燃料的WTW温室气体排放强度。

- IMO的管理方式与欧盟类似，但对航运燃料温室气体排放强度要求较欧盟更严格，除生物燃料、RFNBO、RCF与低碳合成燃料外，LNG在2029—2033年之前可以作为合规燃料。IMO也是根据单船的燃料WTW温室气体排放强度的目标值来进行合规管理。船东/船管企业可通过交易、存储盈余单位、向IMO购买补救单位等经济措施确保合规⁸；而采用ZNZs船舶甚至可获得IMO净零基金的奖励⁹。然而，IMO提出的两级船舶年度WTW温室气体燃料强度目标（基本合规目标与直接合规目标）比欧盟要求更严格。2030年，IMO的基本合规目标为85.8gCO₂e/MJ，与欧盟相当；直接合规目标为73.78gCO₂e/MJ，比欧盟低14%。2035年IMO的基本与直接合规目标分别为65.3gCO₂e/MJ、53.2gCO₂e/MJ，比欧盟分别低16%和32%。虽然LNG在短期内可作为过渡燃料用于满足合规要求，但根据IMO要求，自2029年起LNG将无法达到满足直接合规目标，2033年无法满足基本合规目标，比欧盟合规时间更短¹⁰。

- 美国的管理方式更不同，且温室气体排放强度要求也比欧盟更严格¹¹——只有航运可持续替代燃料才能享受税收优惠，而化石燃料则无法享受此类优惠。具体来说，美国的《45Z清洁燃料生产减税政策》以航运燃料的WTW温室气体排放强度为依据，为燃料生产企业提供税收优惠。在2025—2027年，美国本土生产的航运燃料，其WTW温室气体排放强度只有低于47.4gCO₂e/MJ的门槛值，才能享受税收优惠政策。这涵盖了符合WTW温室气体排放强度与可持续性要求且在美国本土生产的生物燃料、RFNBO、RCF与低碳合成燃料。但化石燃料无法满足这一政策门槛要求，因而无法获得税收优惠。然而，具体符合要求的燃料类型仍有待该减税政策实施细则的制定与出台。

综上所述，虽然在分类与定义上存在差异，但**本研究涉及的国家、地区与国际组织对于航空与航运可持续替代燃料的推广政策，主要集中在生物燃料、合成燃料（RFNBO与低碳合成燃料）与RCF**。所以，本文将航空、航运可持续替代燃料划分成符合可持续性要求的生物燃料、合成燃料以及RCF三类。这一分类与欧盟的分类存在对应关系：本文的生物燃料涵盖了欧盟的生物液体与气体燃料，如生物煤油、生物甲醇、生物天然气等；本文的合成燃料涵盖欧盟的RFNBO（其中含可再生氢气）、低碳合成燃料（如低碳氢和二氧化碳合成的甲醇）以及低碳氢气。值得指出的是，鉴于RCF存在原料限制（EC Directorate-General for Energy 2023）且其减排潜力也存疑（T&E 2022），所以，在后续的讨论中将不再考虑。

表 6 | 相关国家、地区与国际组织对航空可持续替代燃料定义与类别的对比

■ 生物燃料 ■ 生物燃料（不允许共炼） ■ RFNBO ■ 回收碳燃料（RCF） ■ 低碳合成燃料
 ■ 非化石低碳氢制成的低碳合成燃料 ■ 采用减排措施的传统航煤

	ICAO	欧盟	美国		美国加州	中国
政策文件	《CORSIA合格燃料的CORSIA可持续性标准第三版》	《欧盟航空燃料法规》	IRA《45Z清洁能源生产减税政策》	《可再生燃料标准》 ^{b, d}	《低碳燃料标准》 ^{c, d}	《民用航空飞行活动二氧化碳排放监测、报告和核查管理暂行办法》和《航空燃料可持续性评价规范》（征求意见稿）
政策性质	市场交易机制	强制性法规	税收激励	市场交易机制	市场交易机制	推荐性国家标准
适用范围	ICAO成员国的航空公司	在EEA有航线的航空公司、欧盟机场及管理机构、相关航空燃料供应商	美国本土交通燃料生产商	美国交通燃料生产商或进口商	美国加州交通燃料生产商或进口商	航空燃料供应链上各类运营商
合规燃料类型	SAF和LCAF	SAF和LCAF	SAF	SAF	SAF	SAF
SAF类别要求^a						
LCAF类别要求^f						
定义	SAF/LCAF的WTW温室气体排放强度阈值	生物燃料WTW温室气体排放强度较传统航煤（94gCO ₂ e/MJ）至少减少50%~65%，即32.9~47gCO ₂ e/MJ ^e RFNBO与RCF WTW温室气体排放强度较基线至少减少70%，即28.2gCO ₂ e/MJ	低于47.4 gCO ₂ e/MJ	生物燃料（HEFA工艺）WTW温室气体排放强度较传统航煤（91.2 gCO ₂ e/MJ）减少50%，即45.6gCO ₂ e/MJ	WTW温室气体排放强度低于87.9gCO ₂ e/MJ，且逐年下降	WTW温室气体排放强度较传统航煤（100 gCO ₂ e/MJ）至少减少10%，即90 gCO ₂ e/MJ
温室气体类型	燃料使用阶段为二氧化碳，其他阶段（如原料生产）考虑CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O	CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O

说明：a. 虚线框代表政策中无具体的燃料分类，本文根据政策中的定义描述推测包含表中的燃料类型。中国《民用航空飞行活动二氧化碳排放监测、报告和核查管理暂行办法》只要求满足减排要求的非石油基燃料，未进行详细分类，也未提及是否允许共炼，本文列举了可能的类别。
 b. 美国《可再生燃料标准》仅涉及生物燃料类别的要求。
 c. 根据美国加州《低碳燃料标准》要求，“替代航空燃料”是指由石油或非石油原料制成的可持续替代燃料，可以与传统航空燃料混合使用，无须改造飞机发动机和现有的燃料分销基础设施。所以，本文也纳入化石燃料。
 d. 对于美国《可再生燃料标准》和美国加州《低碳燃料标准》，航空替代燃料如果满足温室气体排放强度阈值，可获得积分交易，但航空燃料不属于强制合规燃料范围。
 e. 根据欧盟《可再生能源指令III》，对于2015年10月5日之前投入运营的设备，生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于47克二氧化碳当量每兆焦；对于2015年10月6日—2020年12月31日投入运营的设备，生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于37.6克二氧化碳当量每兆焦；对于2021年1月1日后投入运营的设备，生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于32.9克二氧化碳当量每兆焦。
 f. ICAO的LCAF指符合CORSIA可持续性标准的化石燃料来源的航空燃料。欧盟的LCAF与ICAO不同，指非化石低碳氢制成的低碳合成燃料。
 来源：作者根据ICAO（2022b、2024a、2024c）、EU P&C（2023f）、U.S.Congress（2022b）、U.S.EPA（2023）、CARB（2020）、中国民航局（2018、2024）、EC（2024g）相关文献总结。

表 7 | 相关国家、地区与国际组织对航运可持续替代燃料定义与类别的对比

■ 生物燃料 ■ RFNBO ■ 回收碳燃料 (RCF) ■ 低碳合成燃料

		IMO	欧盟	美国 ^b	中国
政策要求	政策文件	《国际防止船舶造成污染公约》(MARPOL) 附则VI修正案的净零框架	《欧盟海运燃料法规》	IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》、IRA《45V清洁氢能生产减税政策》	无
	政策性质	强制性法规+经济措施	强制性法规	税收激励	无
	适用范围	5000总吨以上的远洋船舶, 履约主体与IMO《国际船舶安全营运和防止污染管理规则》的履约主体一致, 主要为船东公司与船管公司	进出欧洲经济区5000总吨以上的船舶, 履约主体与IMO《国际船舶安全营运和防止污染管理规则》的履约主体一致, 主要为船东公司与船管公司	美国本土交通清洁燃料生产商	无
	定义	规定了ZNZs的温室气体排放强度在2034年底前应低于19 gCO ₂ e/MJ, 2035年起应低于14 gCO ₂ e/MJ。ZNZs的详细定义待进一步明确	暂无可持续航运燃料的具体定义, 符合《可再生能源指令III》要求的生物燃料和合成燃料可以按照较低的排放强度进行计算	暂无可持续航运燃料的具体定义, 符合IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》燃料排放强度要求的清洁燃料, 或由符合IRA《45V清洁氢能生产减税政策》排放强度要求的清洁氢制成的合成燃料, 可获得税收抵免	无
定义	类别要求 ^a	无			无
	WTW 温室气体排放强度阈值	2034年底前应低于19 gCO ₂ e/MJ, 2035年起应低于14 gCO ₂ e/MJ	按照《可再生能源指令III》和《气体指令》要求, 生物燃料需低于32.9~47 gCO ₂ e/MJ ^c , 低碳合成燃料和RFNBO需低于28.2 gCO ₂ e/MJ	低于47.4 gCO ₂ e/MJ或由WTG排放强度低于4 kgCO ₂ e/kg氢气制成的合成燃料	无
	温室气体类型	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O	无

说明: a. 虽然LNG、LPG相对于传统船用燃料油有减排效果, 在《欧盟海运燃料法规》中也能一定程度上降低船东或船管公司平均燃料WTW温室气体排放强度, 但根据欧盟委员会交通运输总司(2021)的规定, 可持续替代燃料不包括化石燃料, 因此表中的类别要求未包含LNG等化石燃料。

b. 美国加州《低碳燃料标准》和美国《可再生燃料标准》未将远洋船舶的燃料纳入管理中, 因此, 表中未列这些标准。

c. 根据欧盟《可再生能源指令III》, 对于2015年10月5日之前投入运营的设备, 生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于47克二氧化碳当量每兆焦; 对于2015年10月6日—2020年12月31日投入运营的设备, 生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于37.6克二氧化碳当量每兆焦; 对于2021年1月1日后投入运营的设备, 生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于32.9克二氧化碳当量每兆焦。

来源: 作者根据ABS(2024)、EU P&C(2023d)、U.S.Congress(2022b)、EC(2024b、2024c、2024d) 相关文献总结。







第四章

航空、航运可持续替代燃料的可持续性指标体系与认证机制

针对航空、航运替代燃料的完整定义，包括各项社会、经济和环境可持续性要求。本章首先比较了相关国家、地区与国际组织关于航空、航运替代燃料的可持续性指标体系的完整性。其次，本章对这些国家、地区与国际组织是否建立航空与航运燃料的可持续性认证机制进行对比。

4.1 航空、航运替代燃料的可持续指标体系

除燃料的WTW温室气体排放强度外，针对航空、航运替代燃料的完整定义/标准，还包括各项社会、经济和环境可持续性要求。目前，常见的可持续性要求包含以下几个方面：燃料的WTW温室气体排放强度水平、电力与能源来源要求、土壤碳储和土壤健康要求、生物多样性要求、社会可持续性（如粮食安全）与经济可持续性（如本地经济发展）要求等。只有满足上述各项可持续性要求的航空、航运燃料，才能被认证为可持续替代燃料，获得市场准入或政策支持。

本文首先比较相关国家、地区与国际组织对航空、航运替代燃料的可持续性指标体系的完整性，暂不涉及每项指标要求严格程度的对比（见表8和表9）。由于目前全球尚无统一的可持续性指标体系，本文参照智慧货运中心（Smart Freight Centre 2022）可持续性指标体系，对相关国家、地区与国际组织的可持续性指标完整性进行对比。另外，**本文不以相关国家、地区与国际组织是否提出可持续性指标体系作为完整性的判断依据，而是以其是否建立相应的可持续性认证机制作为判断依据**；因为只有相应的认证机制下，可持续性指标才能在实际中得到落实。

首先，全球范围内，相比航空，航运替代燃料的可持续性指标体系尚需进一步完善，对中国而言尤其如此。在航空领域，ICAO、欧盟、美国与中国均已出台或正在制定航空可持续燃料标准，并在这些标准中提出了环境、经济、社会三个维度的可持续性要求。例如，ICAO对CORSIA合格燃料提出的可持续指标体系涉及温室气体减排、保护水质与水资源、保障粮食安全、促进地区经济发展等14个方面（ICAO 2022c）。

然而，**在航运领域**，目前仅IMO和欧盟提出了航运燃料的可持续性要求，而中国与美国仍缺乏相关要求。此外，**即便对于已提出要求的欧盟与IMO，其可持续性指标体系也较为片面**。IMO在《LCA 导则》中仅提出十项可持续性指标，且主要侧重环境可持续性，尚未涵盖经济和社会（如粮食安全）等重要维度。IMO关于是否将粮食安全等可持续性维度纳入评估体系的讨论仍在进行中。鉴于包括粮食安全在内的经济与社会指标是航运替代燃料可持续发展的重要基础，因此，国内外有必要进一步完善航运替代燃料的可持续性要求。

值得指出的是，指标体系完善并不代表相关要求的严格程度。例如，虽然ICAO和美国在航空生物燃料的可持续性指标中提及粮食安全，但二者并未禁止将粮食为生物燃料的原料：特别是对于粮食安全方面的认证，主要采取经营

者自行评估的方式，即企业只需报告为满足粮食安全标准所采取的行动，这导致监管力度相对较弱。而使用食物或饲料作物为生物燃料的原料，可能引发粮食安全隐忧，并进一步导致公平性问题，如减少粮食和饲料供应、推高价格、加剧全球贫困消费者的营养不良状况（Gadhok等 2020；Tim Searchinger等 2023）。基于此，有关粮食安全的具体要求仍有待进一步加强。

第二，RFNBO和低碳合成燃料的可持续性要求仍有限，中国在这一领域的相关要求也有待完善。目前，航空、航运的RFNBO和低碳合成燃料可持续性要求主要基于欧盟《RFNBO生产细则》《RFNBO和RCF减排量核算方法》《气体指令》和美国IRA《45V清洁氢能生产减税政策》。这些政策更倾向于约束燃料的温室气体排放强度及电力/能源与二氧化碳的来源，但未涉及其他社会、经济与环境等可持续性指标。考虑到大规模推广RFNBO或低碳合成燃料（如通过可再生能源电解水制氢）可能会影响水资源保护、生物多样性保护和土地利用变化（RSB 2024a），因此，国内外有必要进一步完善航空、航运RFNBO与低碳合成燃料的可持续性指标体系。

第三，不同国家、地区以及各国际认证机制在替代燃料的可持续性范围界定方面存在差异。

特别是在中国，由于缺乏本土化的认证机制，替代燃料的可持续性有待加强。以航空替代燃料为例，中国虽然遵循ICAO的14项可持续性要求，但尚未建立本土的认证机制，且部分可持续性指标较ICAO要求宽松（见第5.1节说明）。

值得指出的是，国际认证机制的可持续性要求通常比相关国家、地区与国际组织的要求更为严苛，额外增加诸多要求。例如，针对欧盟市场的生物燃料认证机制——RSB EU RED，在欧盟《可再生能源指令III》的基础上，还提出空气质量、水资源保护等可持续性要求作为认证的必要内容（RSB 2024b）。此外，针对全球市场、基于ICAO CORSIA航空生物燃料认证机制——RSB CORSIA，其认证要求远高于ICAO CORSIA合格燃料标准，尤其在减排要求方面与欧盟标准看齐（RSB 2023c）。中国“出海”的航空、航运替代燃料要经过这些国际机构的认证，所以也面临更高的可持续性门槛要求。

最后，全球范围内，温室气体排放强度要求的完整性有待完善。

- **针对短寿命气候污染物，减排要求仍待完善：**虽然黑碳不属于温室气体，但属于具有较高全球增温潜势（global warming potential, GWP）

表 8 | 航空可持续替代燃料的可持续性要求

燃料类型	ICAO		ISCC CORSIA ^e	RSB ICAO CORSIA ^a	欧盟 ^e			RSB EU RED ^f	美国		中国 ^h
	生物燃料	合成燃料 ^g			生物燃料	RFNBO	低碳合成燃料		生物燃料	IRA《45Z清洁能源税收政策》	
环境可持续性	温室气体排放强度(二氧化碳、甲烷和一氧化二氮)	√	○	√	√	√	√	√	○	○	○
	短寿命气候污染物	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	碳储量 ¹	√	○	√	√	√	√	√	√	√	○
	空气质量	√	○	√	√	×	×	√	√	×	○
经济可持续性	二氧化碳来源	不适用	化石基 fossil-based	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用
	电力与能源来源	不适用	×	不适用	不适用	√	√	不适用	不适用	○	不适用
	水质和水资源保护	√	○	√	√	×	×	√	√	×	○
	废弃物和化学品管理	√	○	√	√	×	×	√	√	×	○
	土壤健康	√	不适用	√	√	不适用	不适用	√	√	不适用	○
社会可持续性	生态保护	√	○	√	√	×	×	√	√	×	○
	社会发展	√	○	√	√	×	×	√	√	×	○
社会可持续性	社会公平与劳动者权益保护	√	○	√	√	×	×	√	√	×	○
	粮食安全	√ ^k	不适用	√	√	不适用	不适用	√	√ ^m	不适用	○
是否可以实操可持续性认证	√	×	√	√	√	√	√	√	√	×	×

说明: √ 表示有可持续性要求且认证机制(绿色), ○ 表示有可持续性要求但暂无可持续性认证机制(黄色), × 表示没有可持续性要求(红色), 不适用表示该选项不适用(灰色)。

a. 虽然按照SAF的定义应包含合成燃料,但根据ICAO目前的SAF原料列表来看,合成燃料尚缺乏完善的要求和认证体系。
 b. 根据《CORSIA合格燃料的可持续性标准第三版》,符合CORSIA可持续性标准的LCAE不被视为可持续性燃料。
 c. ISCC CORSIA是以CORSIA要求为基础的认证机制。生物燃料的可持续性要求及认证是缺失的。
 d. RSB ICAO CORSIA是以CORSIA要求为基础的认证机制。经济运营商也可只做按照CORSIA要求进行认证,但不允许使用RSB标识;虽然《RSB-STD-01-010 RSB 先进燃料标准》中有碳源和电力来源的相关要求,但根据《RSB-STD-12-001 RSB 的 ICAO CORSIA 标准的原料清单》,RSB CORSIA认证尚不包含合成燃料的认证。
 e. 《可再生能源指令III》中的可持续性要求仅针对生物燃料;RSB目前仅可认证农业生物质及有机废弃物来源的生物燃料,合成燃料认证资格正在申请中。
 f. 根据欧盟的自愿认证机制清单,RSB目前仅可认证农业生物质及有机废弃物来源的生物燃料,合成燃料认证资格正在申请中。
 g. 除温室气体排放强度要求以外的其他可持续性要求同CORSIA。
 h. 本文无法确定是否包含对合成燃料的要求。
 i. “碳储量”指燃料不来自高碳储量的生态系统获得的生物质。
 j. IRA《45V清洁能源生产减税政策》对制氢的电力有要求。
 k. 尽管ICAO和美国的可持续性要求中涉及粮食安全指标,但并未禁止将食物或饲料作物作为原料,且其对粮食安全的认证方式主要依赖经营者自行评估等较宽松的监管方式。
 l. 《气体指令》第九条提出了低碳燃料认证的基本框架,但尚无具体可操作的认证体系。
 m. 向美国国税局提供第三方出具的燃料符合CORSIA要求、供应链可追溯性要求和信息传输要求的证明材料(如ISCC CORSIA等)。
 来源:作者根据ICAO(2022c)、ISCC(2023a、2024a、2022、2024b、2023b、2024c、2025)、RSB(2023c、2023a、2024b、2023b)、EU PRG(2023b、2023d)、EC(2023c、2023b)、2018、2023d、2024)、U.S. Congress(2022b)、U.S. IRS & Treasury(2025a) 相关文献总结。

表 9 | 航运可持续替代燃料的可持续性要求

国家、地区与国际组织	IMO ^a		欧盟 (同航空) ^b		ISCC EU (同航空)		RSB EU RED (同航空)		美国		中国
	生物燃料	合成燃料	生物燃料	RFNBO	生物燃料	RFNBO	生物燃料	RFNBO	生物燃料	合成燃料	
政策文件	《2024 LCA 导则》		《欧盟海运燃料法规》《可再生能源指令 III》《RFNBO 生产细则》《RFNBO 和 PCF 减排核算方法》《气体指令》		ISCC EU 202 系列可持续性要求		《RSB-STD-11-001 进入欧盟市场的RSB标准》《STD 11-001-01-010 RSB EU RED 先进燃料标准》		IRA《45Z 清洁能源税收政策》	IRA《45V 清洁能源生产减税政策》、IRA《45Z 清洁能源税收政策》	无
燃料类型	生物燃料	合成燃料	生物燃料	RFNBO	生物燃料	RFNBO	生物燃料	RFNBO	生物燃料	合成燃料	无
环境可持续性	温室气体排放强度 (二氧化碳、甲烷和一氧化二氮)	○	○	✓	○	○	✓	✓	○	○	×
	短寿命气候污染物	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
	碳储量	○	○	✓	×	×	×	✓	×	×	×
	空气质量	○	○	×	×	×	×	✓	×	×	×
	二氧化碳来源	不适用	○	不适用	×	×	×	不适用	×	×	×
	电力与能源来源	不适用	○	不适用	✓	×	×	不适用	不适用	×	×
	水质和水资源保护	○	○	不适用	×	×	×	不适用	不适用	○	×
	废弃物和化学品管理	○	○	×	×	×	×	✓	×	×	×
	土壤健康	○	不适用	✓	不适用	✓	不适用	✓	×	不适用	×
	生态保护	○	○	✓	×	×	×	✓	×	×	×
经济发展	×	×	×	×	×	×	✓	×	×	×	
社会可持续性	社会公平与劳动者权益保护	×	×	×	×	×	✓	×	×	×	×
	粮食安全	×	不适用	✓	不适用	不适用	✓	不适用	×	不适用	×
	是否可以实操可持续性认证	×	×	✓	不适用	✓	✓	✓	×	×	×

说明: ✓ 表示有可持续性要求与认证机制 (绿色), ○ 表示有可持续性要求但暂无可持续性认证机制 (黄色), × 表示没有可持续性要求 (红色), 不适用表示该选项不适用 (灰色)。

a. IMO 在《LCA 导则》中仅提出 10 项可持续性指标, 但仍缺乏具体要求。

b. 《可再生能源指令 III》中的可持续性要求仅针对生物燃料。另外, 虽然该可持续性要求未明确包括粮食安全要求, 但由于《欧盟海运燃料法规》中要求, 针对以食物或饲料作物为原料的生物燃料, 按最高化石燃料生产方式计算温室气体排放强度, 所以, 本文视作该可持续性要求涉及粮食安全。

c. IRA《45V 清洁能源生产减税政策》对制氢的电力有要求。

d. 《气体指令》提出了低碳燃料认证的基本框架, 尚无可操作的认证体系。

来源: 作者根据 IMO (2024)、EU P8C (2023c、2018、2023d、2024)、EC (2023c、2023b)、ISCC (2024a、2022、2024b、2023b、2023c、2024c、2025)、RSB (2024b、2023b)、U.S. Congress (2022b)、U.S. IRS & Treasury (2025a) 相关文献总结。

(GWP100=900)的短寿命气候污染物,且航运业的排放量可观。若将黑碳计入国际航运的温室气体排放,其2018年的排放占国际航运(基于航程)温室气体排放总量的6.85%,成为继二氧化碳之后的第二大“温室气体”排放源(IMO 2021)。由于缺乏核算方法,全球范围并未要求核算航运黑碳排放(Rönkkö等 2023)。在2024年的MEPC 82会议上通过的《关于推荐的黑碳排放测量、监测和报告指南》中,IMO提出了全球航运黑碳排放数据收集与监测的方法,用于支撑未来航运黑碳监管法规的制定,所以,针对航运黑碳排放的可持续性要求将不断完善,也值得中国相关部门重视。

- **针对温室气体排放,仍有待扩大排放覆盖范围,特别是航空领域:**虽然ICAO与各国对航空燃料的温室气体排放强度要求主要针对二氧化碳、甲烷和一氧化二氮,但是,除此之外,航空的温室气体排放还涉及其他类型的非二氧化碳温室气体排放(以下简称非二排放),包括氮氧化物(NO_x)、尾迹(contrails)、水蒸气与气溶胶等(IATA 日期不详)。这些尚未被纳入航空温室气体排放核算范畴的航空非二排放对气候变化的影响要远大于碳排放对气候变化的影响。全球航空非二排放产生的有效辐射强迫(Effective Radiative Forcing, ERF)¹²约为全球航空碳排放产生有效辐射强迫的两倍(Lee等 2021)。然而,受地理位置、海拔、气候条件的影响,航空非二排放对气候变化的影响程度存在较大的不确定性。此外,采用何种监测手段与衡量指标仍有挑战(IATA 2024)。鉴于航空非二排放的核算具有高度不确定性,国际社会并未要求计算航空非二排放(见表6)。

但欧盟已开始发力:欧盟碳排放交易体系(EU ETS)要求,2027年起,欧洲经济区出发或到达的航空公司——含中国航空公司——必须开始核算与汇报航空非二排放(EC 2024a)。未来,随着国际社会对航空非二排放的认识不断完善,相关的监管与减排要求将越来越严格,这也值得中国相关部门重视和研究。

4.2 航空、航运替代燃料的认证机制

航空、航运燃料替代燃料的第三方认证机制是确保燃料具备可持续性并获得市场准入或政策激励的重要前提。认证机制的要素通常涵盖三个方面:燃料的可持续性要求、生命周期温室气体排放的核算方法、追溯和监管链(ISCC

2023a)。本节主要对相关国家、地区与国际组织是否存在航空与航运替代燃料的认证机制进行对比,不涉及具体要素内容的对比(见表10)。其结果显示:

航空替代燃料的认证机制方面,目前以ICAO与欧盟航空相关认证机制为主,中国在这一领域仍缺乏相应的认证机制。具体来看,欧盟的SAF认证机制覆盖的燃料类型较为全面,涵盖了生物燃料认证与RFNBO认证。相比之下,ICAO目前仅建立了生物燃料SAF的认证机制,RFNBO以及低碳合成燃料的认证机制尚未完善。美国则遵循ICAO的相关要求,未单独设立额外的认证机制。相较而言,中国是否要建立单独的可持续性认证机制仍有待研究。

航运替代燃料的认证机制方面,目前以欧盟标准为主导;由于缺乏自身的认证机制,中国在航运替代燃料产业领域的发展较被动。除欧盟外,全球尚未针对航运替代燃料建立专门的认证机制。IMO计划在2027年3月1日前公布可持续燃料认证机制(Sustainable Fuels Certification Scheme, SFCS)。所以,在IMO认证机制出台前,国内外主要依据欧盟的航运替代燃料定义与认证机制进行相关认证。此外,如前所述,不同认证机制还会在欧盟要求的基础上进一步“加码”,这无疑进一步提升了航运替代燃料的认证门槛。考虑到基于欧盟要求的航运替代燃料认证机制存在过高的准入门槛,这可能不利于国内航运燃料生产行业的早期发展。

国际上生物燃料的认证机制较多,而RFNBO与低碳合成燃料的认证机制则存在一定缺失。目前,航空、航运可持续替代燃料的认证机制主要集中在生物燃料的认证方面。由于各国关于RFNBO与低碳合成燃料的标准存在缺失,RFNBO的认证主要依据欧盟的定义与要求,而低碳合成燃料的认证机制更是在全球层面(包括欧盟)系统缺失。所以,国内外仍有必要在完善RFNBO和低碳合成燃料可持续性要求的基础上,进一步完善RFNBO与低碳合成燃料的认证机制。

值得注意的是,部分可持续性认证机制可对生物燃料副产品开展认证,既能简化认证流程,又能提升副产品市场价值。目前,仅ISCC EU、RSB EU RED等认证体系支持对生物燃料副产品(如SAF副产的生物柴油、生物石脑油等)进行可持续性认证,而ISCC CORSIA等暂不具备此项能力。在认证生物燃料主产品(即航空、航运替代燃料)的同时,为副产品提供认证服务,能够提升副产品价值并降低生产企业认证成本。未来,国内外若构建相关可持续性认证体系,应将副产品认证纳入考虑。

表 10 | 航空、航运可持续替代燃料相关的认证机制 (不完全统计)

	国家、地区或国际组织	生物燃料	RFNBO	低碳合成燃料
航空	ICAO	ISCC CORSIA、RSB ICAO CORSIA、ClassNK SCS	无	无
	欧盟	ISCC EU、RSB EU RED等15个	ISCC EU、CertifHy、REDcert-EU	无
	美国	可使用ISCC CORSIA等证明符合CORSIA要求	无	无
	中国	无	无	无
	欧盟、ICAO CORSIA以外的自愿认证机制	ISCC PLUS、RSB Global等	ISCC PLUS、H2Global等	无
航运	IMO ^a	无	无	无
	欧盟	ISCC EU、RSB EU RED等15个	ISCC EU、CertifHy、REDcert-EU	无
	美国	无	无	无
	中国	无	无	无
	欧盟以外的自愿认证机制	ISCC PLUS、H2Global等	ISCC PLUS、H2Global等	CertifHy、Climate Bonds等

说明: a. IMO正在制定可持续替代燃料认证机制, 将于2027年3月1日前公布。

来源: 作者根据ICAO (2024a)、EC (2024h、2024b、2024c、2024d)、U.S.Congress (2022b)、IEA (2024a) 相关文献总结。







第五章

航空、航运可持续替代燃料的原料可持续性要求

在燃料的可持续性要求中，原料来源的可持续性要求是重要组成部分。这些要求在生物燃料和合成燃料上存在差异。本章将分别对生物燃料与合成燃料的原料来源的可持续性要求进行地区间的对比分析。

在航空和航运替代燃料的定义、标准以及认证中，对燃料的可持续性要求主要通过对其原料来源的规定得以体现，具体包括以下两种情况：

- **定性的限制要求：**对于某种可持续性表现不佳的原料，相关标准会直接限制使用该原料生产的替代燃料。例如，欧盟的《欧盟航空燃料法规》明确禁止使用大部分食物或饲料作为航空生物燃料的原料。
- **定量的核算要求：**在温室气体核算方面，若采用某种可持续性表现较差的原料生产替代燃料，则其温室气体排放强度核算会按照同类型化石燃料计算。例如，《欧盟海运燃料法规》规定，以食物或饲料为原料的生物燃料，其温室气体排放强度按最高排放的化石燃料制取路径（如传统天然气制甲醇）计算。

目前，航空与航运可持续替代燃料的来源因燃料类别而异，主要体现在生物燃料和合成燃料的原料差异上。因此，后文将分别对生物燃料与合成燃料的原料来源要求进行分

- **生物燃料：**当前生物燃料的原料主要有两类，一是需要专门土地种植的原料，如食物与饲料作物、能源作物；二是有机废弃物，如农林废弃物、餐厨废油（used cooking oil, UCO）和动物油脂、城市有机固体废弃物等。未来，生物燃料还可能扩展到藻类等（ICAO 2024c; Moss等 2024），但因目前藻类供应有限、技术不成熟，本文仅分析前两类来源。
- **合成燃料（含RFNBO与低碳合成燃料）：**其主要原料为氢气与二氧化碳，未来还可能涉及氮气。尽管合成氨（以氮气为原料）是潜在的航空可持续替代燃料，但由于目前面临安全、技术、基础设施障碍（Wood Mackenzie 2024），故本文暂不考虑，仅聚焦以氢气与二氧化碳为原料的合成燃料。氢气的来源广泛，主要包括可再生能源电解水制氢（又分为离网制氢与并网制氢）、网电制氢、生物质制氢、核能制氢、工业副产氢与化石燃料制氢+CCS等。二氧化碳来源则有空气直接捕获的二氧化碳、生物质二氧化碳、电力与工业等行业捕获的二氧化碳、地质封存并自然释放的二氧化碳等。

5.1 生物燃料原料的可持续性要求

航空、航运生物燃料对可持续性的影响主要涉及粮食安全、土壤碳储、生物多样性保护以及土壤健康等可持续指标。为降低航空、航运生物燃料的推广对可持续发展的影响，一些国家或地区会针对航空、航运生物燃料提出比道路交通生物燃料更高的原料来源限制要求（IFPEN 2023）。

由于不同原料来源对可持续性指标的影响有差异，且各国对这些原料的限制也有不同，本文重点对有较大潜在负面影响的四类原料——食物与饲料作物、农林废弃物、能源作物、餐厨废油和动物油脂进行对比（见表11）。对比结果显示：

食物与饲料作物

有研究表明，如果不禁止以食物与饲料作物为原料的生物燃料，将造成严重的气候问题，甚至可能比使用化石燃料的排放更高（T&E 2025；Sandford和Malins 2025）。目前，本研究分析的国家、地区与国际组织中，只有中国（航空领域）与欧盟对食物与饲料作物的使用有较高限制要求。其中：

中国对航空生物燃料的要求最高，《航空燃料可持续性评价规范》（征求意见稿）明确提出，为“保证粮食安全，不与粮食作物争地、不与人争粮”，粮食（含食物与饲料）被禁止作为航空生物燃料的来源。值得注意的是，由于缺乏航运生物燃料相关标准，所以，中国尚未明确粮食或饲料作物是否被禁止用于航运生物燃料。此外，中国是否会禁止进口的航空、航运生物燃料中出现粮基燃料，目前仍不明确。



相较于中国，欧盟对航空生物燃料的要求略显宽松，明确禁止大部分食物与饲料作物作为航空、航运生物燃料的原料。然而，根据欧盟委员会发布的2024/1405号授权指令（EC 2024i），欧盟允许属于特定情况下的例外：一是作为中间作物的食物或饲料作物，但要求其在生产中不产生额外土地扩张；二是不适合作为食物或饲料的受损作物。

除欧盟与中国外，美国、ICAO与IMO的要求宽松，食物与饲料作物仍可作为航空、航运生物燃料的来源。

农林废弃物

ICAO、IMO、欧盟与美国对农林废弃物有较高限制要求，而中国对农林废弃物的来源要求与监测机制尚待完善。

以欧盟为例，对于秸秆等农业废弃物，农业经营主体或欧盟成员国需要制定监测与管理计划，农场只能收集一定科学比例的农业废弃物，用于制取生物燃料，以避免过度收集废弃物对农业土壤固碳能力和土壤质量的影响。对于林业废弃物，欧盟要求，林业废弃物不得来自2008年1月后属于原始森林、草地、湿地等生态保护区的区域，且收集过程中需遵循可持续森林管理原则。为此，第三方认证机构会使用遥感技术监测森林砍伐等情况。

相较之下，中国对农林废弃物的来源要求与监测机制尚待完善。在航空领域，根据《航空燃料可持续性评价规范》（征求意见稿）（中国民航局 2024a），农林废弃物可来自森林、草地、湿地等高碳储量的生态系统，这可能对森林的土壤健康、土壤碳储与生物多样性产生威胁。在航运领域，相关要求更是系统缺乏。

能源作物

能源作物的种植，既不能占用原本用于种植粮食或饲料的土地，以防止间接土地利用变化的负面影响（Searchinger 2015）（见第6.2节解释），也不能位于高碳储量的生态系统内，以避免对生物多样性、土壤固碳能力的不利影响（Phillips等 2024）。

首先，在避免能源作物直接或间接占用耕地方面，中国在航空领域的要求最为严格，但在航运领域的要求仍待完善。相较之下，ICAO、IMO、欧盟与美国尚未限制能源作物种植在农业土地上，也未对间接土地利用变化进行控制。

其次，在保护高碳储量的生态系统方面，ICAO、IMO、欧盟和美国较为领先，中国相关要求仍有待与国际接轨。具体而言，ICAO、IMO和美国要求，能源作物不得来自2008年1月1日后转变的高碳储量陆地或水生生态系统的区域。中国仅规定，在航空领域，能源作物不能来自现在的高碳储量生态系统，但未追溯到2008年；在航运领域，相关要求更是系统缺乏。

餐厨废油和动物油脂

为避免高替代排放风险（见第6.2节解释），只有欧盟在《可再生能源指令III》中对餐厨废油和动物油脂类原料设置了年度使用比例上限要求（合计不超过交通能源供应量的1.7%）。ICAO、IMO、美国、中国均未对餐厨废油和动物油脂的使用量或比例设定上限，也未考虑其替代效应。



表 11 | 相关国家、地区与国际组织对航空、航运生物燃料来源的要求对比

国家、地区或国际组织	政策文件	WTW温室气体排放强度阈值 (gCO ₂ e/MJ)	原料来源的要求			
			食物与饲料作物	能源作物	农林废弃物	餐厨废油 (UCO) 和动物油脂
航空领域						
ICAO	《CORSIA合格燃料的CORSIA可持续性标准第三版》	80	允许以食物与饲料作物作为原料,但要满足不能来自高碳储量的生态系统、保障粮食安全等14项可持续性要求	需符合14项可持续性要求,其中包括原料不得来自2008年1月1日之后转变的高碳储量陆地或水生生态系统	原料需符合14项可持续性要求,其中包括原料不得来自2008年1月1日之后转变的高碳储量陆地或水生生态系统、应维持或增强土壤健康	包含UCO和动物油脂,无上限要求
欧盟	《欧盟航空燃料法规》 《可再生能源指令III》	32.9~47 ⁹	禁止以食物或饲料作物作为原料,但允许使用属于中间作物的食物或饲料作物、不适合作为食物或饲料的受损作物	农业生物质:原料不得来自2008年1月后属于高生物多样性价值(生物多样性丰富的草地等)、高碳储量的生态系统(湿地等)的区域,以及泥炭地 林业生物质:原料不得来自2008年1月后属于原始森林、本地物种林地、生物多样性丰富草地和湿地的区域;采伐需遵循可持续森林管理原则,维持土壤固碳能力、土壤质量与生物多样性	农业废弃物:若经营主体或欧盟成员国已制定监测/管理计划,在确保不影响土壤固碳能力的情况下,才可使用该农业废弃物。同时也要满足对农业生物质的相关要求(见能源作物要求)。农业加工废弃物不需要满足以上要求 林业废弃物:要满足对林业生物质的相关要求(见能源作物要求)。林业加工废弃物不需要满足以上要求	UCO和1类、2类动物油脂 ¹³ 在交通部门燃料供应中的占比不超过1.7% 基于《可再生能源指令III》附件IX列表未涉及的原料(含3类动物油脂)制成的生物燃料,在航空燃料供应中的占比不超过3%
	IRA《SAF减税政策》、IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》	47.4	允许以食物与饲料作物作为原料,如大豆、菜籽油、蒸馏玉米油、玉米、甘蔗等,同时需符合CORSIA合格燃料的14项可持续性要求	需符合CORSIA合格燃料的14项可持续性要求	原料需符合CORSIA合格燃料的14项可持续性要求	包含UCO和动物油脂,无上限要求
美国	《可再生燃料标准》	46 (HEFA工艺)	允许以食物与饲料作物作为原料	允许能源作物,原料不得来自2007年12月19日之后是森林的土地,但不包含湿地等	农业废弃物:只有在不存在替代效应风险时,才可使用该农业废弃物。同时,原料不得来自2007年12月19日之后是森林的土地,但不包含湿地等 林业废弃物:只能使用树木加工(如纸张、家具等)过程产生的废弃物	包含UCO和动物油脂,无上限要求

表 11 | 相关国家、地区与国际组织对航空、航运生物燃料来源的要求对比(续)

国家、地区或国际组织	政策文件	WTW温室气体排放强度阈值 (gCO ₂ e/MJ)	原料来源的要求			
			食物与饲料作物	能源作物	农林废弃物	餐厨废油 (UCO) 和动物油脂
美国加州	《低碳燃料标准》	2024年为8789, 此后逐年下降	允许以食物与饲料作物作为原料	只能源自2008年1月1日之前清理或耕种的土地, 并自2008年1月1日起积极管理或休耕 (2024年11月版本修正案提案)	需要满足对生物质原料的要求 (2024年11月版本修正案提案)	包含UCO和动物油脂, 无上限要求
中国	《航空燃料可持续性评价规范》(征求意见稿)	90	禁止以粮食作为原料(强调“保证当地粮食安全, 不与粮食作物争地、不与人争粮”)	需满足不与粮食作物争地、不能来自高碳储量的生态系统等15项可持续性要求(没有2008年以前的时间要求)	需满足考虑对土壤可能产生的负面影响等15项可持续性要求(原料为废弃物时不需满足碳储量要求, 即可以来自高碳储量的生态系统)	包含UCO和动物油脂, 无上限要求
航运领域						
IMO	《2024 LCA 导则》	ZNZs 2028—2034年为19, 2035年及以后为14	允许以食物与饲料作物作为原料, 但要满足不能来自高碳储量的生态系统等10项等可持续性要求	需满足10项可持续性要求, 其中包括原料不得来自2008年1月1日之后转变的原始森林、林地、草地等高碳储量的生态系统	原料需满足10项可持续性要求, 其中包括原料不得来自2008年1月1日之后转变的原始森林、林地、草地等高碳储量的生态系统, 应维持或增强土壤健康等	包含UCO和动物油脂, 无上限要求
欧盟	《欧盟海运燃料法规》《可再生能源指令III》	32.9 (对于2021年1月1日后投入运营的设备)	由食物与饲料作物生产的燃料排放因子按最高的化石燃料计算(即禁止由食物与饲料作物生产, 但允许使用属于中间作物的食物或饲料作物、不适宜作为食物或饲料的受损作物)	同航空	同航空	UCO和1类、2类动物油脂在交通运输部燃料供应中的占比不超过1.7%
美国 ^b	IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》	47.4	允许食物与饲料作物作为原料	无可持续性要求	无可持续性要求	包含UCO和动物油脂, 无上限要求
中国	×	×	×	×	×	×

说明: 深绿色代表“可持续性”要求较高, 浅绿色代表有一定程度的“可持续性”要求, 橘色代表“可持续性”要求较低, ×表示无相关要求。

a. 根据欧盟《可再生能源指令III》, 对于2015年10月5日之前投入运营的设备, 生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于47克二氧化碳当量每兆焦, 对于2015年10月6日—2020年12月31日投入运营的设备, 生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于37.6克二氧化碳当量每兆焦; 对于2021年1月1日后投入运营的设备, 生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于32.9克二氧化碳当量每兆焦。

b. 美国《可再生燃料标准》和美国加州《低碳燃料标准》不适用于远洋船舶燃料, 所以表中未考虑。

来源: 作者根据ICAO (2022b)、EU P&C (2023f、2018、2023e、2023d)、U.S.Treasury Department和U.S.IRS (2024)、U.S.Congress (2022b)、U.S.EPA (2023)、CARB (2020、2024)、中国民航局(2024a)、IMO (2024) 相关文献总结。

由于生物燃料原料多元、全生命周期链条长，完善相关的认证与溯源体系尤为重要：

一是农林废弃物以及餐厨废油作为原料，为避免欺诈风险，应进一步向上游溯源与监管 (T&E 2020)。目前，国际上的生物燃料认证体系的监管链 (chain-of-custody) 均从上游开始。例如，对于农林废弃物 (不含农林加工废弃物) 而言，为避免掺混农业、林业生物质或对农业、林业可持续发展产生负面影响，ISCC要求监管链从种植环节开始，即类似于农林生物质的认证过程 (ISCC 2024c)。对于餐厨废油而言，为有效避免便宜的棕榈油掺混餐厨废油或餐厨废油未经有效使用就废弃等欺诈问题的出现，ISCC要求监管链要从原产地 (point of origin) 开始，即生产油炸产品的餐馆或工厂需要出具相关声明文件。现实中，考虑到原料的原产地多且人工第三方审核有难度，也有必要通过数据平台的方式，更好地登记与溯源生物质原料的原产地 (EU P&C 2018)。

二是除原料的溯源问题外，目前对于生物燃料 (或生物气体) 运输环节的监管和追溯机制仍有待完善。在部分地区，尤其是欧洲，管道运输是生物天然气 (Biomethane) 的一种主要输送方式。然而，管道中的生物天然气通常与传统天然气混合输送，因此在认证与溯源过程中面临挑战。目前，生物天然气主要采用两种认证与溯源方式：一是发放绿证，实现生物天然气的生产与使用的账面脱钩；二是采用质量平衡的方法，即通过统计手段，确保入网和出网的生物天然气量保持一致，实现系统平衡与合规使用¹⁴ (Scholwin等 2022)。

目前，在上述两种方式中，欧盟采用的是更严格的质量平衡方法，此外，欧盟要求在第三国 (包括中国) 生产的生物天然气也必须采用质量平衡的方法，且需要由欧盟生物燃料数据库 (Union Database for Biofuels, UDB) 覆盖 (EU P&C 2024)，否则，第三国生产的航运生物天然气将无法获得可持续性认证并进入欧盟市场。这一要求也会影响由中国以生物天然气为原料制备的生物甲醇。

目前，中国在生物天然气认证与交易方面有一些积极探索，但相关认证与交易体系仍有待完善并与国际标准接轨。例如，在绿证机制方面，中国产业发展促进会已发布《零碳能源证书自愿核证体系 生物天然气核证规范》(T/CAPID 009—2024) 团体标准，通过绿证形式对生物天然气进行认证 (中国产业发展促进会生物质能产业分会 2024)。绿气新能源 (北京) 有限公司已成功实施了生物天然气“气证合一”的绿证线上交易 (中国能源报 2024)。此外，在质量平衡机制方面，中国天然气管网已经完成了“全国一张网”的整合 (经济日报 2021)，这为使用质量平衡法奠定了基础。未来，中国将基于统一的数据库，按照国内外统一的规则，对 (生物) 天然气交易数据进行记录 (REDcert 2023)，并运用质量平衡法对生物天然气进行追溯。这将有助于中国完善生物天然气的认证机制，助力中国企业更好地走向国际市场。

5.2 合成燃料原料的可持续性要求

在航空和航运替代燃料领域，合成燃料的可持续性影响涉及多个方面，但目前国际上对合成燃料的可持续性要求主要集中在二氧化碳来源和电力/能源来源这两个指标上 (Moss等, 2024)。因此，本文着重分析了中国、美国、欧盟以及部分国际组织对这两个关键指标的具体要求。研究发现如下：

二氧化碳来源要求

目前，仅有欧盟、ICAO和IMO对航空或航运可持续

替代燃料的二氧化碳来源进行了明确规定，而中国和美国在这一方面尚未提出相关要求 (见表12)。

其中，欧盟对于二氧化碳的来源要求最为严格。除了直接空气捕获的二氧化碳、生物质二氧化碳、地质封存并自然释放的二氧化碳之外，欧盟还允许来自欧盟碳排放交易体系中的电力与工业捕集的二氧化碳。但考虑到未来随着电力与工业脱碳进程的深入、可捕集的二氧化碳量减少，欧盟规定，从2036年起，禁止使用发电设施捕获的二氧化碳；从2041年起，禁止使用工业排放的二氧化碳。此外，欧盟目前仅认可英国的碳排放交易体系为有效市场，暂不承认其他国家碳排放交易体系中捕获的二氧化碳为合格碳源 (EC 2024g)，这也提高了中国出口欧盟合成燃料的门槛。

相较之下, ICAO和IMO对航空、航运可持续替代燃料的二氧化碳来源要求更广泛, 其范围既涵盖了直接空气捕获的二氧化碳、生物质二氧化碳, 也涉及电力和工业捕集的二氧化碳。

电力/能源来源要求

相关国家、地区与国际组织对电力/能源来源的要求, 主要涉及氢气类别、氢气温室气体排放强度和网电制氢时电力来源三个方面(见表13):

- **氢气类别: 欧盟对航空领域的低碳合成燃料LCAF所使用的低碳氢气有严格的要求。**如第3.1节所述, 其LCAF使用的氢气必须为“非化石”来源, 即核能制氢以及符合要求的网电制氢。
- **氢气温室气体排放强度: 欧盟与美国对合成燃料的氢气温室气体排放强度有明确要求。**依据《欧盟海运燃料法规》, RFNBO与低碳合成燃料所使用的氢气WTW温室气体排放强度必须低于3.4 kgCO₂e/kgH₂。美国依据IRA《45V清洁氢能生产减税政策》, 当合成燃料所使用氢气的“摇篮到大门(well-to-gate, 简称WTG)”温室气体排放强度低于4 kgCO₂e/kg时, 燃料生产商可获得税收抵免, 其要求较欧盟略宽松。

- **网电制氢的电力来源: 欧盟和美国对网电制氢的电力来源有明确要求, 即在满足特定要求时, 承认网电制氢为可再生氢气(即属于欧盟的RFNBO)或清洁氢气, 并给予政策支持。**为此, 网电制氢需要满足四项要求, 包括额外性、时间匹配、地理匹配与清洁/可再生电力的来源证明(见专栏二)。相较之下, 中国对可再生氢气或清洁氢气的要求较宽松, 而ICAO和IMO尚未提出相关要求。

值得指出的是, IEA(2024c)认为, **欧盟(及美国)上述针对二氧化碳和氢气来源的要求过于严格, 可能会掣肘氢能**与**可持续燃料产业在早期阶段的快速发展**。例如, 虽然电力与工业行业捕获的二氧化碳的全生命周期减排效果有限(见第6.2.2节), 但却是近期较经济的过渡方式。另外, 欧盟和美国对网电制氢的额外性、时间匹配和地理匹配的要求, 可能会延缓氢能产业的相关投资, 并阻碍氢气作为电网灵活性调节资源。另外, 由于中国与欧美在清洁电力/可再生电力的来源证明(如PPA机制)方面存在较大差异(路舒童和江漪 2023), 加之中国区域电力排放因子(或电力碳足迹因子)尚未达到月级或小时级的时间粒度, 这也影响中国企业氢气或合成燃料“出海”欧美。事实上, 中国未必需要完全参考欧盟(及美国)对氢气和二氧化碳来源的要求, 而是应结合自身产业发展要求以及环境可持续发展的必要性, 因地制宜地提出相应要求。

表12 | 相关国家、地区与国际组织对航空、航运合成燃料的二氧化碳来源要求对比

国家、地区与国际组织	应用领域	政策名称	二氧化碳来源
ICAO ^a	航空	《国际航空的长期全球理想目标可行性报告》	来自生物质、废物(其中包括发电、钢铁、水泥行业捕集的二氧化碳)或直接空气捕获
IMO	航运	《2024 LCA 导则》	覆盖所有可能的二氧化碳来源
欧盟 ^b	航空、航运	《欧盟航空燃料法规》《欧盟海运燃料法规》《可再生能源指令III》《RFNBO和RCF减排量核算方法》《气体指令》	针对RFNBO: 欧盟碳排放交易体系的化石来源, 直接空气捕获, 符合RED要求的生物燃料燃烧产生, 符合RED要求的RFNBO或RCF的燃烧产生, 自然释放
美国 ^c	航空、航运	IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》 IRA《45V清洁氢能生产减税政策》	×
中国 ^d	航空	《航空燃料可持续性评价规范》(征求意见稿)	×
	航运	×	×

说明: a. 在ICAO合格燃料的定义中未明确合格二氧化碳的具体类别, 根据ICAO国际航空的长期全球理想目标(LTAG)燃料分类, 二氧化碳来源包含表中的三类。

b. 针对欧盟碳排放交易体系中的化石来源二氧化碳, 欧盟要求, 2036年可使用发电设施捕获的二氧化碳, 2041年前可使用其他工业排放的二氧化碳。

c. 美国的IRA《SAF减税政策》中目前只包含生物质路径, 不含合成燃料路径, 所以未纳入上表。另外, 针对IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》与IRA《45V清洁氢能生产减税政策》, 达到门槛要求的燃料, 其WTW温室气体排放强度越低, 税收优惠就越高。

d. 《航空燃料可持续性评价规范》(征求意见稿)中未明确说明是否包含合成燃料。

缩写: X=无相关要求。

来源: 作者根据ICAO(2022a)、IMO(2024)、EU P&C(2023f、2023d、2023e、2024)、EC(2023b)、U.S.Congress(2022b、2022a)、中国民航局(2024a)相关文献总结。

表 13 | 相关国家、地区与国际组织对航空、航运合成燃料的氢气来源要求对比

国家、地区与国际组织	领域	燃料类别	可再生能源 离网制氢	网电制氢	核能制氢	化石燃料 +CCS	工业副 产氢	温室气体排 放阈值	政策名称
ICAO	航空	无对于氢气类别和排放强度的要求							无
IMO	航运	ZNZs的具体定义尚待明确, 无针对航运领域氢气类别和排放强度的要求							无
欧盟	航空	RFNBO (含 可再生氢 气)	✓	✓ (满足专栏 二要求)	✗	✗	✗	RFNBO与低 碳合成燃料 所使用的氢 气 (WTW) 排 放强度≤3.4 kgCO ₂ e/kgH ₂	《欧盟航 空燃料法 规》
		低碳合成 燃料 (含低 碳氢气)	不适用	✓ (无法满足 专栏二要 求)	✓	✗	✗		
	航运	RFNBO或 低碳合成 燃料	✓	✓	✓	✓	✓		《欧盟海 运燃料法 规》
美国	航空、 航运	清洁氢气制 成的合成 燃料	✓	✓ (满足专栏 二要求)	✓	✓	✓	合成燃料所 使用的氢气 (WTG) 排 放强度≤4 kgCO ₂ e/kg	IRA 《45V清 洁氢能生 产减税政 策》
中国	航空、 航运	无针对航空、航运领域的氢气类别和排放强度要求							无

说明: ✗=不允许此类别氢气, ✓=允许该类别的氢气。
来源: 作者根据Hydrogen Europe (2024) 相关研究修改。

专栏 2 | 欧盟、美国与中国针对网电制氢电力来源要求的对比

针对网电制氢，欧盟与美国有严格的要求，涉及清洁电力/可再生电力的来源证明、额外性、时间匹配和地理匹配等四个要求（见专栏表1）。

其中，欧盟要求最为严格，只有满足以下四个条件的可再生电力，才能被视为完全可再生电力，电力碳排放因子按0计算，产生的氢气属于RFNBO，具体条件包括：

- 可再生电力的来源证明，即非直连情况下，制氢企业要与可再生能源发电侧签署的购电协议（PPA）。
- 额外性，指氢气使用的是额外（新增）的可再生能源。新增可再生能源装机投入运行的时间应不早于制氢装置投入运行前3年。
- 时间匹配，指可再生能源发电与制氢应发生在同一时间段（从年、月级的时间匹配向小时级的时间匹配过渡）。
- 地理匹配，指可再生能源发电与制氢装置处于同一电网区域内。

除上述情况外，欧盟还规定了在以下情况下，网电制氢即便不满足额外性、时间匹配和地理匹配的要求，其制取的氢气也能被视为RFNBO，包括：制氢设施位于上一年可再生能源发电量占比平均超过90%的电力区域，或可再生能源是在电力供需不平衡期间消纳（即弃风弃光）的情况（EC 2023c）。

相较之下，美国要求较宽松，在欧盟可再生电力的基础上还允许清洁电力来源（包括核电、化石燃料发电+CCS）制取的氢气作为清洁氢气，享受美国IRA税费减免政策。即便如此，美国《45V清洁氢能生产减税政策》也提出，清洁电力/可再生电力要满足额外性、时间匹配、地理匹配与来源证明等要求。

最后，中国对网电制氢要求最宽松，仅涉及清洁电力/可再生能源来源证明一项，不涉及额外性、时间或地理匹配要求。另外，加强中国绿证的国际认可度，也将为中国的网电制氢获得国际认可奠定基础，如国际绿色电力消费倡议组织（RE100）已无条件认可中国绿证（中国新闻网 2025）。

专栏表 1 | 欧盟、美国与中国在网电制氢电力来源的要求对比

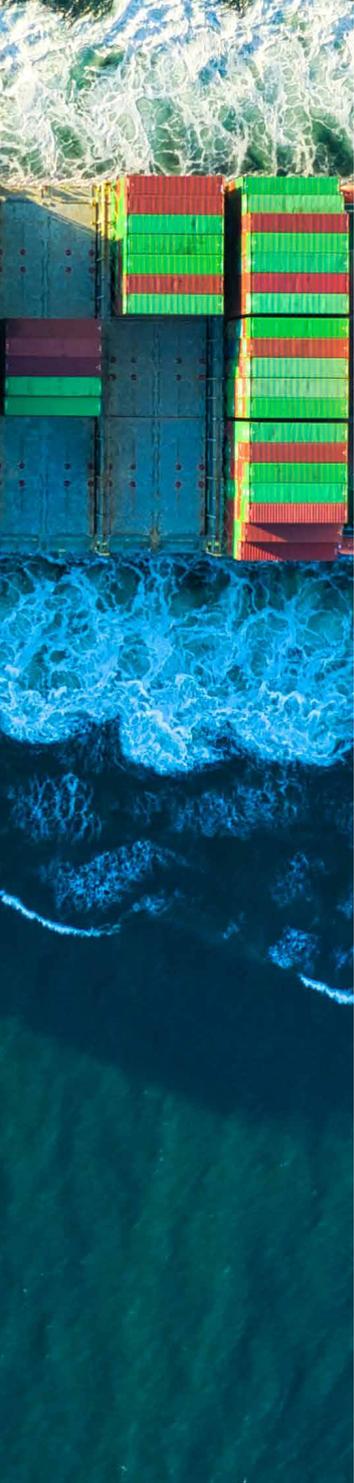
	欧盟《RFNBO生产细则》	美国IRA《45V清洁氢能生产减税政策》	中国《低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》
额外性 (Additionality)	生产可再生能源的装置投入运行时间应不早于可再生氢生产装置投入运行前36个月（对于2028年1月1日前投入运营的可再生氢生产装置豁免额外性要求）	清洁电力生产装置投入运行时间应不早于清洁氢气生产装置投入运行前36个月（对有退役风险且和氢气投资绑定的核电站、制氢设备投入使用前36个月内为发电设施安装CCS等情况，豁免额外性要求）	无
时间匹配	自2030年1月1日起按小时匹配，在此之前按月匹配	自2030年1月1日起按小时匹配，在此之前按年匹配	无
地理匹配^a	1. 可再生能源装置与电解槽位于同一竞标区（在欧盟一般指一个国家）；或 2. 当可再生氢生产区域的电力日前市场价格低于相邻的竞标区时，可使用相邻的竞标区的可再生能源装置；或 3. 可再生能源装置位于海上（如海上风电）	清洁电力生产装置与电解槽位于同一电网区域内	无
清洁电力/可再生电力来源证明^b	非直连情况下，与可再生能源发电侧签署购电协议（PPA），PPA需要标明用于生产RFNBO的可再生电力装置	能源属性证书（EAC）印证新增清洁电力生产装置投入运营的时间、地理位置、发电时段	中国绿色电力证书认购交易平台购买的绿证，或其他行业认可的可再生能源交易形式，如可再生能源电站的直供协议等

说明：a. 在美国，根据IRA《45V清洁氢能生产减税政策》，如果能证明清洁电力的发电厂到制氢设施之间能够进行区域间输送，也可允许跨区域交易。

b. 在美国，根据IRA《45V清洁氢能生产减税政策》，可获得税收抵免的清洁电力指太阳能发电、风电、水电、地热能发电、即将退役的核电，以及制氢设备投入使用前36个月内为发电设施安装CCS设备的化石能源发电厂。

来源：作者根据EC（2023c）、中国氢能联盟（2020）、U.S. IRS & Treasury（2025a）相关文献总结。





第六章

航空、航运可持续替代燃料温室气体排放强度要求与核算方法

本章首先对比分析了相关国家、地区与国际组织对航空、航运燃料全生命周期温室气体排放强度的要求，并从生物燃料和合成燃料两个维度，对比了相关国家、地区和国际组织在核算方法上的异同。

除了对原料来源的可持续性要求之外，航空、航运替代燃料的定义与标准还涵盖了燃料的温室气体排放强度要求。在燃料温室气体排放强度要求基础上，部分国家、地区或国际组织也会提供航空、航运燃料全生命周期温室气体排放强度的核算方法，以便燃料生产商和认证机构能够据此计算不同燃料的温室气体排放强度。只有当燃料同时满足原料可持续性要求和温室气体排放强度要求时，才能获得认证机构的认证，并获得相应市场准入资格或相关政策激励。

6.1 航空、航运可持续替代燃料的温室气体排放强度要求

针对本文研究的国家、地区与国际组织相关政策与标准的分析，结果显示：

在WTW温室气体排放强度要求方面，不同国家、地区与国际组织之间存在一定差异（见表14）。在航空和航运领域，欧盟对可持续替代燃料的WTW温室气体排放强度要

求，均为最为严格的。以航空可持续燃料为例，欧盟《欧盟航空燃料法规》和《可再生能源指令III》要求，对于2021年1月1日后投入运营的生物燃料生产设备，其生产的符合可持续性要求的生物燃料SAF的WTW温室气体排放强度，目前必须低于32.9gCO₂e/MJ，这一数值比ICAO CORSIA合格燃料的要求低59%；而RFNBO SAF的温室气体排放强度则需低于28.2gCO₂e/MJ，比ICAO CORSIA合格燃料的要求低65%。相较之下，中国对SAF WTW温室气体排放强度的要求最为宽松，仅需低于90gCO₂e/MJ（中国民航局 2018、2024a）。这一要求无法满足ICAO的CORSIA合格燃料的要求，比其温室气体排放强度要求还要高出12.5%。这可能与中国的航空煤油WTW排放较高有关，如较长的原油运输距离等因素。然而，若未来中国希望与国际标准接轨，有必要提高航空替代燃料的WTW温室气体排放强度阈值要求。

在燃料类型方面，只有欧盟区分了生物燃料与RFNBO的WTW温室气体排放强度要求，其他国家、地区或国际组织尚未做区分。其中，欧盟针对RFNBO提出更低的WTW温室气体排放强度要求——28.2gCO₂e/MJ，比生物

表 14 | 航空、航运可持续替代燃料的温室气体排放强度要求

	国家、地区或国际组织	政策文件	生物燃料 (gCO ₂ e/MJ)	RFNBO (gCO ₂ e/MJ)	低碳合成燃料 (gCO ₂ e/MJ)
航空	ICAO	《CORSIA合格燃料的 CORSIA 可持续性标准第三版》	80	80	80 ^a
	欧盟	《欧盟航空燃料法规》 《可再生能源指令III》 《RFNBO和RCF减排量核算方法》 《气体指令》	32.9~47 ^b	28.2	28.2
	美国	IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》 IRA《45V清洁氢能生产减税政策》	474	474或由WTG排放强度低于4 kgCO ₂ e/kg的氢气制取的合成燃料	
	中国	《航空燃料可持续性评价规范》 (征求意见稿)		90	
	IMO	《国际防止船舶造成污染公约》 附则VI修正案的净零框架	IMO暂未为上述三类可持续燃料排放提供阈值； 关于能够获得奖励的ZNZs，其阈值要求如下：2028—2034年为19， 2035年及以后为14		
航运	欧盟	《欧盟海运燃料法规》 《可再生能源指令III》 《RFNBO和RCF减排量核算方法》 《气体指令》	32.9~47 ^b	28.2	28.2
	美国	IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》 IRA《45V清洁氢能生产减税政策》	474	474或由WTG排放强度低于4 kgCO ₂ e/kg的氢气制取的合成燃料	
	中国	无		无	

说明：a. ICAO还包含化石燃料的LCAF，由于化石燃料不在本文讨论范畴，所以表中未列举。

b. 根据欧盟《可再生能源指令III》，对于2015年10月5日之前投入运营的设备，生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于47gCO₂e/MJ；对于2015年10月6日—2020年12月31日投入运营的设备，生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于37.6gCO₂e/MJ；对于2021年1月1日后投入运营的设备，生物燃料WTW温室气体排放强度要求为低于32.9克二氧化碳当量每兆焦。

来源：作者根据ICAO (2022c)、EU P&C (2023e、2018、2024、2023c)、EC (2023b)、中国民航局 (2024a)、U.S. Congress (2022b、2022a) 相关文献总结。

燃料的WTW温室气体排放强度低14%（该要求针对2021年1月1日后投入运营的生物燃料设备）。在差异化的WTW温室气体排放强度要求基础上，《欧盟航空燃料法规》与《欧盟海运燃料法规》也提出RFNBO燃料推广的子目标和专门的激励措施，以更好弥合RFNBO与生物燃料的成本差，激励RFNBO的推广。例如，《欧盟航空燃料法规》要求，RFNBO在航空燃料中的占比从2030年1.2%逐步提升至2050年35%，且在计算船舶燃料年度平均燃料温室气体强度时，RFNBO按照2倍系数计算。考虑到RFNBO可实现WTW温室气体的零排放，原料可获得性好，未来，中国也有必要考虑区别生物燃料与RFNBO的WTW温室气体排放强度要求，并出台差异化的激励政策。

6.2 航空、航运可持续替代燃料的温室气体核算方法

除燃料的WTW温室气体排放强度要求外，一些国家、地区与国际组织也会出台燃料WTW温室气体核算方法，供燃料生产商与认证机构计算不同燃料的全生命周期温室气体排放强度。本节主要从生物燃料和合成燃料的核算方法角度进行分析。

6.2.1 生物燃料的核算边界与方法

本节主要梳理与对比相关国家、地区与国际组织对航空、航运生物燃料的核算边界与核算方法。除分析相关国家、地区与国际组织是否出台核算方法之外，本节也着重对

比核算边界与核算方法的差异，特别是是否覆盖主要排放源以及排放分配方法的选择。

生物燃料的核算边界（见图2）与方法比化石燃料更复杂。尽管生物燃料在其原料生长阶段能够吸收大气中的二氧化碳，从而抵消生物燃料在燃烧时产生的二氧化碳，实现全生命周期的近零排放，但实际上生物燃料往往并非碳中性的。这主要是因为：在核算边界方面，生物燃料WTW温室气体排放核算还涉及间接土地利用排放（特别是当原料为粮食和饲料作物、能源作物时），以及生物燃料产品系统边界外的替代排放与避免排放等；在核算方法方面，也涉及共生产品排放的分配方法。若将这些排放计入核算，航空、航运生物燃料的排放甚至可能会高于化石燃料的排放。本章侧重分析对生物燃料WTW温室气体排放强度具有重要影响的排放源及其核算方法，包括间接土地利用变化排放、替代温室气体排放、避免排放与土壤碳汇，以及共生产品的分配方法。

间接温室气体排放

生物燃料在生命周期会产生两种主要的间接温室气体排放，包括间接土地利用变化排放与替代温室气体排放（Carvalho等 2023）。

间接土地利用变化（indirect land use change, iLUC）排放是指由于生物燃料需求增加，农田转用于生物燃料生产，从而促使农业用地扩展以满足原来的粮食需求，并侵占林地和草地，进而引发土地利用变化排放的过程。iLUC排在部分生物燃料WTW温室气体排放中占比较大——特别是对农林废弃物，食物与饲料作物更易引发较高的iLUC排放

图2 | 航空、航运生物燃料WTW温室气体排放核算边界



来源：作者根据IEA（2024a）、ICCT（2023）相关文献绘制。

(ICAO 2024c)。以玉米-乙醇制航空生物燃料为例,玉米为原料的iLUC排放可能在航空生物燃料WTW温室气体排放中占比达11%~75%(Berry等 2024)。iLUC排放难以测算,通常需要借助经济模型进行测算(IEA 2024b; Carvalho等 2023; Weng等 2019),或使用生物物理模型计算碳机会成本进行计算(Berry, Searchinger和Yang 2024a)。

替代温室气体排放或替代效应(displacement effects)是指原料从现有用途转移到生物燃料用途所带来的额外排放。例如,随着SAF对秸秆的需求增长,由于秸秆缺乏需求弹性,市场价格抬升,导致部分现有用途(特别是交通领域以外的用途,如有机肥)负担不起,转而采用便宜但温室气体排放强度更高的原料作为替代(SkyNRG 日期不详; Pavlenko和Searle 2021; MMMCZCS 2024)。对某些地区的原料而言,替代排放的排放量可能很可观。例如,在美国,餐厨废油通常用于饲料行业,但如果将其转至生物燃料制取,会导致饲料行业使用高粱籽油作为替代。如果计入该替代排放,其将占美国餐厨废油WTW温室气体排放强度的一半以上(Pavlenko和Searle 2020)。但替代排放因地区和原料而异,且目前没有公认的核算方法。

相较基准情景避免的排放

相较基准情景(BAU)避免的排放是指相较原料的现有用途,如果将原料用于生产生物燃料,能够在确保现有用途的同时避免的温室气体排放(IEA 2024b)。例如,中国传统粪便管理方式为直接堆沤发酵造肥(黑龙江日报 2020),这种方式的甲烷排放问题突出。但如果利用动物粪便制航空生物天然气,能够在生产有机肥的同时(即有机肥作为副产物),避免大量的甲烷排放。目前,包括GREET模型在内的部分模型提供避免排放的核算方法。

农业土壤有机碳变化

土壤具有一定的固碳能力。不同农业耕作方式会对农业土壤的固碳能力产生不同影响。例如,在原料生长阶段采取的保护性耕作、优化间套种和轮作、设置合理的有机物料还田比例等措施,有望增加土壤有机碳,降低生物燃料的全生命周期温室气体排放(颜晓元 2023)。根据Lessmann等(2022)的研究,如果采用可持续农业管理措施,全球土壤中的有机碳每年可能增加1亿~20亿吨。

然而,值得注意的是,与替代效应类似,国内外尚缺乏针对土壤固碳效应的可靠核算方法,相关核算边界与核算方法都存在较大缺陷与不确定性,可持续农业措施的土壤固碳效应可能被高估(Searchinger等 2018)。

共生产品排放的分配方法

在可持续替代燃料生产中,产品往往并非单一。例如,在航空可持续替代燃料的HEFA制取路径下,会同时产生航空生物燃料与生物柴油。这就需要根据产品的质量、能量和市场价格等因素,将温室气体排放分摊到航空生物燃料上。根据ISO 14044《环境管理生命周期评价要求与指南》(ISO 2006、2020),共生产品排放分配通常采用以下四种方法:

一是过程细分法,将拟分配的单元过程进一步划分为两个或更多的子过程,并计算这些子过程的排放。

二是系统扩展法(含替代法):这种方法通过考虑产品在系统中的替代效应来分配排放。以工业副产氢为例,当氢气从原有用途(如工厂内部供热)转移到交通燃料制取时,如果进而使用煤来替代被转移的氢气进行供热时,那么工业副产氢的温室气体排放强度可等同于煤的全生命周期温室气体排放强度(周圆融 2022)。

三是按物理关系分配:根据共生产品的能量或质量等物理属性进行排放分配。

四是按经济价值分配。这种方法考虑了产品在市场中的经济价值,按照其价值比例分摊温室气体排放。

本文研究的国家、地区与国际组织中,航空、航运生物燃料核算方法的分析见表15,其对比可见:

全球范围,航空生物燃料的核算方法相对完善,而航运生物燃料核算方法仍较薄弱,中国在生物燃料的核算方法方面存在较大缺口。在航空领域,中国、欧盟、美国与ICAO均已出台了相应的核算方法指南。例如,全球层面,ICAO出台的《CORSA实际生命周期排放值计算方法第五版》和《CORSA合格燃料的生命周期排放默认值第六版》能够支持航空生物燃料的温室气体排放强度核算,尽管其计算间接土地利用变化排放的方法仍受到一些批评(Malins 2019)。值得注意的是,尽管中国已制定了《航空燃料生命周期碳足迹评价技术规范 第1部分:通则》(征求意见稿),但该方法尚未涵盖对生物燃料WTW温室气体排放强度具有重要影响的排放,如间接土地利用变化排放、替代效应等。

相比之下,在航运领域,全球范围仅有欧盟出台了完整且详细的航运生物燃料核算方法。根据《可再生能源指令III》《欧盟海运燃料法规》中的核算方法,可以计算航运生物燃料的温室气体排放。在全球层面,尽管IMO已经编制《2024 LCA导则》用于计算航运生物燃料温室气体排放,但关键排放的计算方法尚未最终确定,包括土地利用变化

排放、农业管理改善带来的土壤固碳效应的核算方法等。最后，由于航运替代燃料标准缺失，中国和美国仍有待建立航运生物燃料的WTW温室气体核算方法。

虽然欧盟、美国、ICAO与IMO已在一定程度上计入了间接土地利用变化排放，但其计算方法仍存在诸多争议；中国更需要考虑本国或因贸易产生的间接土地利用变化产生排放。由于iLUC排在食物与饲料作物为来源的生物燃料WTW温室气体排放中占比较大（ICAO 2024c），IMO、ICAO、欧盟与美国均一定程度上考虑了航空、航运生物燃料iLUC排放，但在核算中也面临一系列挑战。一是iLUC排放具有高度不确定性，具体排放量随原料类型与地区而异（Prussi等 2021）。二是相关国家、地区与国际组织采取的核算方法尚未统一——既有定量方法，也有定性方法。目前，定量方法存在较大争议，有研究指出ICAO和美国使用的定量方法严重低估了生物燃料的土地利用变化排放（Malins 2019；Berry, Searchinger和Yang 2024a）；定性方法在识别高风险iLUC原料时也存在一定的挑战（见专栏三）。

鉴于上述挑战，中国目前尚未在核算方法中考虑iLUC排放，也未基于iLUC进行定性限制。另外，在中国本地化实践中考虑iLUC排放的必要性也存在争议。基于本研究的专家访谈，由于中国对国土空间规划与生态环境分区管控有强监管（周侃等 2019）和严格的防止耕地“非粮化”的措施¹⁵，能源作物的种植可能对中国土地利用变化与粮食安全的影响有限。然而，随着未来生物燃料的国际贸易加强，中国进口的以粮食或能源作物为原料的生物燃料可能对全球的iLUC排放产生的潜在影响。因此，中国可以考虑使用定量模型，或实施定性限制，以搭建本土生产以及海外进口生物燃料的iLUC排放核算方法。

由于难以量化，欧盟、美国、ICAO与IMO通常不测算原料的替代效应，而是通过政策限制使用具有替代效应的原料；中国也应考虑限制使用部分原料，以控制替代风险：首先，不是所有原料都有较高替代风险，根据Pavlenko和Searle（2021）的分析，餐厨废油和动物油脂等原料可能存在较高的替代风险，例如，替代了肥皂、化工品和动物饲料的原料。此外，同一种原料在不同地区的替代效应风险程度也可能不同，需要结合地区实际情况考虑。例如，根据专家访谈，秸秆可能在中国有较高的替代效应，特别是对化肥的替代作用。

虽然国际社会在核算方法中尚未计入替代效应，但会采取措施降低替代风险。例如，欧盟通过《可再生能源指令III》对餐厨废油、1类与2类动物油脂为原料的生物燃料设置上限值（在交通燃料消耗中占比不超过1.7%）

（EU P&C 2023d）。所以，中国应系统梳理生物燃料主要原料现有用途，识别替代风险高的原料，并考虑设置原料使用的上限。

欧盟、美国 and ICAO等已考虑相较BAU避免的排放，而中国仍需完善相关核算方法：在核算相较BAU避免的排放时，欧盟、美国 and ICAO主要考虑当原料为城市有机固体废物、动物粪便时，相对原料的原用途（包括直接垃圾填埋与传统动物粪便处理）能避免的温室气体排放。其中，为简化核算方法，欧盟《可再生能源指令III》规定，当动物粪便作为原料时，可以在燃料WTW温室气体排放值中直接减去45gCO₂e/MJ。

在本文分析的国家、地区与国际组织中，唯有中国有待进一步完善航空、航运生物燃料核算方法，将城市有机固体废物、动物粪便避免的排放纳入其中。

虽然欧盟、美国 and ICAO等已考虑土壤有机碳变化，但该部分核算存在较大争议，因此，不建议中国在当前阶段将其纳入核算体系：欧盟、美国、ICAO和IMO均考虑了土壤有机碳变化，尤其是可持续农业管理带来的土壤固碳效应。例如，美国《SAF减税政策》提出，如果采用美国农业部气候智慧农业试点项目中提出的可持续农业管理方式（如免耕），可在燃料WTW温室气体排放中减去特定排放量。具体而言，当玉米为原料时，生物燃料WTW温室气体排放值可减去10gCO₂e/MJ。

然而，目前土壤有机碳的核算方法争议较大。有研究提出，可持续农业管理方式未必会显著增加土壤有机碳（Searchinger等 2018）。基于此，也有研究指出，美国《SAF减税政策》中对可持续农业实践所给予碳排放计算上的优惠措施是不合理的，应予以取消（Clean Air Task Force 2024）。鉴于土壤有机碳变化在国际上存在较大争议，其作用机制与核算方法有待进一步完善，本文暂不将其纳入对中国核算方法的建议。

相关国家、地区与国际组织中，共生产品排放的分配方法差异不大：中国与欧盟、ICAO、IMO的分配方法一致，均采用基于能量的分配方法，而美国则是视具体取路线、副产物而异。

表 15 | 相关国家、地区与国际组织航空、航运生物燃料WTW温室气体排放系统边界与核算方法对比

国家、地区或国际组织	领域	LCA排放因子	间接排放		农业土壤有机碳变化 ^e	相较BAU避免的排放	共生产品排放的分配方法
			iLUC排放	替代效应			
ICAO	航空	提供默认值	✓ ^b	×	✓ ^c	✓ 相对现有城市固废填埋处理方式(即BAU)避免的排放	按能量分配法
IMO	航运	目前仅提供部分默认值(后续将补充更多默认值)	✓	×	✓	×	按能量分配法, 无法按能量分配的可采用按质量、按经济价值等其他方法分配, 视具体情况而定
欧盟	航空、航运	提供默认值	✓	×	✓ ^c	✓ 相对现有动物粪便处理方式(即BAU)避免的排放(此类原料生产的生物燃料可获得排放强度减少45 gCO ₂ e/MJ的奖励)	按能量分配法, 无法按能量分配的可采用按经济价值的方法分配, 视具体情况而定
美国 ^a	航空、航运	提供45ZCF-GREET模型进行计算	✓ ^b	×	✓ ^d	✓ 相对现有垃圾填埋气燃烧、传统动物粪便处理、废水污泥处理方式(即BAU)避免的排放	根据技术路线、副产物情况而异, 例如, HEFA路线产生生物柴油等副产物时, 按能量分配法; ATJ路线下, 玉米乙醇的副产物酒糟饲料按系统扩展法分配排放
美国加州	航空	提供CA-GREET 4.0模型进行计算	✓ ^b	×	×	✓ 相对现有垃圾填埋气燃烧、传统动物粪便处理方式(即BAU)避免的排放	根据技术路线、副产物情况而异, 包括系统扩展法、按能量分配法、按质量分配法
中国	航空	无	×	×	×	×	按能量分配法

说明: 表中, 绿色代表值得借鉴的核算方法, 橘色代表待优化的核算方法。

a. 表中未包含美国《可再生燃料标准》, 因为《可再生燃料标准》实施过程中不需要燃料生产商确定具体生产路径的燃料生命周期排放量。

b. ICAO和美国使用的定量评估方法可能严重低估了iLUC的排放。

c. 在欧盟《可再生能源指令III》中, 动物粪便处理避免的排放也归为可持续农业管理导致的土壤有机碳变化。

d. 符合美国农业部气候智能农业试点计划(USDA CSA Pilot Program)可获得额外的燃料WTW温室气体排放强度减少的奖励(具体奖励规则待进一步制定)。

e. 由于可持续农业管理带来的土壤有机碳变化存在较大不确定性, 减排效果易高估, 所以, 本文不建议在核算中纳入该项的核算或排放强度的数值鼓励。

来源: 作者根据ICAO (2024d、2024c)、IMO (2024)、EU P&C (2018、2023d、2023c)、CARB (2020)、中国民航局 (2024b)、Carvalho等 (2023)、U.S.IRS & Treasury (2025b)、U.S.DOE (2025b) 相关文献总结。

专栏 3 | 相关国家、地区与国际组织使用的间接土地利用变化核算方法的比较

相关国家、地区与国际组织采取的核算方法尚未统一——既有定性方法，也有定量方法（见专栏表2）。其中，ICAO、美国与美国加州采用的是定量方法，即基于常见的经济模型（如GTAP和GLOBIOM）测算不同地区、不同原料的iLUC排放。而欧盟和IMO采用的则是定性方法，即识别高iLUC风险的原料，并限制该原料的使用量。例如，欧盟要求，到2030年底完全禁止生物燃料使用高iLUC风险的原料。IMO尚未制定具体限制措施。

相关国家、地区与国际组织采用的定量经济模型（如GTAP）在测算iLUC时，往往会低估间接土地利用变化的排放，尤其是粮基生物燃料的iLUC排放（Berry等 2024）。相比之下，采用“碳机会成本”方法可能会得出更合理的结果。例如，Searchinger等（2018）测算的结果显示，玉米制乙醇（航空生物燃料AtJ路径过程之一）的iLUC排放因子高达200gCO₂/MJ。然而，美国加州《低碳燃料标准》使用GTAP模型测算的iLUC排放因子仅为Searchinger等（2018）测算结果的10%左右；而GREET模型中得到的iLUC排放因子甚至更低，约为Searchinger等（2018）测算结果的4%~7%。这些经济模型低估iLUC排放因子的主要原因有三方面（Berrv等

2024）：一是模型假设粮食价格上涨会减少粮食需求，但实际情况中，这种需求弹性可能被高估，从而导致对iLUC排放的低估；二是模型假设粮食价格上涨会促使农民采取增产措施，提高亩产效率；三是在模型参数设置中，限制森林转变为农田，并假设向低碳储土地扩张也会低估iLUC排放因子。相较之下，采用更直观的“碳机会成本”方法，即假设以作物产量1:1替代粮食生产，将得到相对更合理的生物燃料的iLUC排放量（Searchinger等 2018）。

采用定性评估的方法，虽然避免了经济模型计算的不确定性，且能在一定程度上规避原料的高iLUC风险，但在识别高风险iLUC原料时也存在挑战。基于欧盟2019/807号授权法案（EC 2019）中的高iLUC风险原料评估标准，目前，欧盟只识别出棕榈油属于高风险原料，而其他粮食可能也存在较高的iLUC风险，但未被列入高iLUC风险原料。另外，欧盟对高风险iLUC原料的识别方法也备受质疑：例如，WTO对印度尼西亚与欧盟关于生物燃料贸易争端的裁决中指出，欧盟未能正确评估用于将棕榈油归类为高风险原料的数据，而且其低iLUC风险生物燃料认证流程也存在缺陷（WTO 2025）。

专栏表 2 | 间接土地利用变化的核算方法和模型对比

国家、地区或国际组织	iLUC排放核算方法	土地利用变化计算模型
ICAO	定量，提供iLUC默认值 ^a	综合GTAP和GLOBIOM两种土地利用变化模型的结果
IMO	定性，定义高iLUC风险为食物和饲料作物，且原料生产区域显著扩大并转移到高碳储量的生态系统	无
欧盟	定性，定义高iLUC风险原料为原料生产区域范围显著扩大并转移到高碳储量的生态系统；并逐步限制高iLUC风险原料的使用，到2030年底全面禁止	无
美国	定量，提供iLUC默认值 ^a	45ZCF-GREET模型
美国加州	定量，提供iLUC默认值 ^a	GTAP模型
中国	无	无

说明：a.默认值为LUC，包含DLUC和iLUC。

来源：作者根据ICAO（2024c）、IMO（2024）、EU P&C（2018）、CARB（2020）、中国民航局（2024a）、EC（2019）、U.S.IRS&Treasury（2025b）、U.S.DOE（2025b）相关文献总结。

6.2.2 合成燃料的核算方法

本节主要梳理与对比相关国家、地区与国际组织对航空、航运合成燃料的核算边界与核算方法（见表16）。与化石燃料不同，合成燃料在核算系统边界（见图3）时还涉及两方面（IEA 2024a）：一是针对合格二氧化碳来源，在二氧化碳原料生产阶段因使用CCS（如工业源安装碳捕集设施）而避免的碳排放；二是在燃料使用阶段，使用CCS（如船舶碳捕集系统）而减少的排放。另外，在核算方法方面，合成燃料也涉及氢气与二氧化碳共生产品排放的分配方法选择问题。所以，不同的CO₂来源要求与排放分配方法选择下，航空、航运合成燃料的WTW排放未必能较化石燃料实现深度减排。本文侧重分析对合成燃料WTW温室气体排放强度有重要影响的排放源及其核算方法，包括：

合格二氧化碳来源在原料生产阶段，因使用CCS而避免的排放

原料生产阶段因使用CCS而避免的排放是指，二氧化碳作为原料制取合成燃料时，相对于之前二氧化碳直接排空的情况所能避免的排放。其核算方法为：燃料使用阶段产生的排放（即燃料燃烧时产生的碳排放）减去原料生产阶段由碳捕集避免的碳排放，再加上碳捕集阶段能量消耗对应的碳排放（见公式-1）：

$$E_i - E_{ex-use} + E_u \quad (\text{公式-1})$$

其中， E_i 为碳捕集与运输、封存阶段消耗能量产生的碳排放， E_{ex-use} 为原料生产阶段因碳捕集而避免排放， E_u 为燃料使用阶段因燃料燃烧（或逃逸）产生的排放。

值得注意的是，二氧化碳来源要求直接影响其核算结果，因为只有政策允许的合格二氧化碳来源，才会考虑因碳捕集所避免的排放（即 E_{ex-use} ）；否则，避免的排放将按零计算。

目前，关于合格二氧化碳来源的争议焦点主要集中于电力、工业行业捕获的二氧化碳。例如，欧盟目前仍不承认其他国家碳排放交易体系排放二氧化碳为合格碳源。即便针对欧盟自身碳排放交易体系中捕获的二氧化碳，欧盟《RFNBO和RCF减排量核算方法》也要求，随着2036—2041年电力与工业行业减排深入，可捕集的二氧化碳减少，电力、工业行业捕获的二氧化碳将不再属于合格的碳源（EC 2023b）。如果将电力、工业行业捕获的二氧化碳排除在合格碳源之外，与传统化石燃料相比，采用这些二氧化碳合成的燃料的减排量并不显著。据测算，使用可再生氢气与“不合格”碳源制取的甲醇合成燃料，其WTW温室气体排放强度仅比化石燃料低17%（Hinicio 2024）。

相反，生物质二氧化碳或直接空气捕获的二氧化碳始终属于合格的二氧化碳来源。所以，如果不考虑农业种植、直接空气捕集等环节产生的排放，使用可再生氢气与生物质二氧化碳合成的甲醇燃料的WTW温室气体排放强度有可能为零，即比化石燃料排放强度低100%。

燃料使用阶段，因使用CCS而避免的排放

燃料使用阶段，因使用CCS而避免的排放是指，在燃料燃烧后捕集二氧化碳，如采用船舶碳捕集系统。其核算方法为：燃料使用阶段产生的排放减去因碳捕集而避免的排放（见公式-2）：

$$E_i + E_u - E_{CCS} \quad (\text{公式-2})$$

其中， E_i 为碳捕集与运输、封存阶段消耗能量产生的排放， E_u 为燃料使用阶段因燃烧（或逃逸）产生的排放， E_{CCS} 为在燃料使用阶段因碳捕集而避免的排放。

图3 | 航空、航运合成燃料WTW温室气体排放核算的系统边界

避免排放



来源：作者根据IEA（2024a）、ICCT（2023）相关文献绘制。

氢气(和二氧化碳)共生产品排放的分配方法

氢气(和二氧化碳)共生产品排放的分配方法,对合成燃料的WTW温室气体排放强度也有较大影响。这里的分配方法与生物燃料的方法概念和类型相同,不再赘述,详见第6.2.1节说明。

本文研究的国家、地区与国际组织航空、航运合成燃料核算方法的分析见表16,其对比可见:

与生物燃料不同,本研究涉及的国家、地区和国际组织,在合成燃料的核算方法(或标准)制定方面进展较落后,亟待完善相关标准与核算方法。目前,仅欧盟出台了完整的航空、航运RFNBO的核算方法——即欧盟《RFNBO和RCF减排量核算方法》,但尚未正式出台低碳合成燃料的核算方法(EC 2024c)。

在全球层面,IMO虽然已出台航运合成燃料的核算方法——《2024 LCA导则》,但缺乏具体操作方法,包括如何计算原料生产环节避免的排放。而ICAO只有针对生物燃料SAF的核算方法,尚无针对合成燃料SAF的核算方法。

此外,中国和美国仅有清洁氢、低碳氢和可再生氢的核算方法(U.S. DOE 2025a、2025b;中国氢能联盟 2020),仍然缺乏针对航空、航运合成燃料的核算方法。值得注意的是,中国虽然出台了《航空燃料生命周期碳足迹评价技术规范 第1部分:通则》(征求意见稿),但该核算方法以生物燃料核算为主,缺乏合成燃料核算的必要内容(如合格碳源、原料生产环节避免的排放),所以,本文未将其计入合成燃料的核算方法。

中国和美国氢气的核算边界并非全生命周期,会影响合成燃料WTW温室气体排放的核算:目前,不同国家和地区尚未统一合成燃料与氢气核算的边界。欧盟对RFNBO和RCF采用WTW的温室气体排放核算边界,而美国和中国针对氢气只核算WTG温室气体排放,不含运输和使用环节的排放。如果运输环节和使用环节产生较多温室气体排放,如长距离运输或者为了运输而将燃料转换成不同运输载体,中国 and 美国的核算边界有可能会低估氢气WTW的温室气体排放。考虑到氢气是合成燃料必不可少的原料来源,两个国家有必要考虑扩展氢气的核算边界至全生命周期,并完善合成燃料的WTW温室气体排放的核算方法。

合成燃料的核算方法有待基于合格的二氧化碳来源,计算原料生产环节因碳捕集而避免的排放:目前,欧盟和IMO在合成燃料核算中,考虑原料生产环节因碳捕集所避免的排放。但与欧盟不同,IMO的《2024 LCA导则》尚未明确合格二氧化碳来源。中国和美国仍缺乏合成燃料相关标准与核算方法学。特别是对中国而言,亟待明确航空、航运合格二氧化碳来源,并在合成燃料核算方法中计入在原料生产环节因碳捕集避免的排放。

氢和二氧化碳存在共生产品排放分配问题,IMO、中国、欧盟和美国目前存在显著差异,亟须达成统一标准:具体来看,IMO优先采用能量法分配,其次是质量或经济价值分配;欧盟则优先依据物理因果关系分配,其次为能量法分配。美国优先选择系统扩展法来处理共生产品的排放分配问题。而中国则优先选择过程细分法(subdivision),其次为物理关系法和经济价值法,最后为“查找共生产品或副产品的排放因子”。然而,对中国而言,系统扩展法仅适用于主产品测算,不适用于副产品,尤其是工业副产氢的测算(见第6.2.1节对系统扩展法的解释)。

上述分配方法与国际标准也存在差异,因此,需要相关国家、地区与国际组织统一分配方法。包括ISO 14044和14067、BSI PAS 2050、GHG Protocol在内的国际标准中,对共生产品分配方法建议的优先顺序为过程细分法、系统扩展法、物理关系法、经济价值分配法(ISO 2020、2018;BSI 2011;WRI和WBCSD 2011)。

对共生产品排放的分配方法的选择,对中国合成燃料WTW温室气体核算尤为重要。这是因为工业副产氢在中国近期氢气供应结构中占有重要地位。例如,根据国家发展改革委2022年出台的《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,到2025年,中国将“初步建立以工业副产氢和可再生能源制氢就近利用为主的氢能供应体系”(国家发展改革委等 2022);预计到2030年,工业副产氢在中国氢气供给中的占比将达22%~23%(中国石化集团经济技术研究院 2023;中国氢能联盟 2019)。因此,中国应关注不同分配方法对工业副产氢温室气体核算的影响,研究是否依据国际标准(如ISO 14044和14067)调整氢气共生产品分配方法的优先级,并改进系统扩展法,以确保核算的准确性与国内外一致性。

表 16 | 相关国家、地区与国际组织航空、航运合成燃料WTW温室气体排放系统边界与核算方法对比

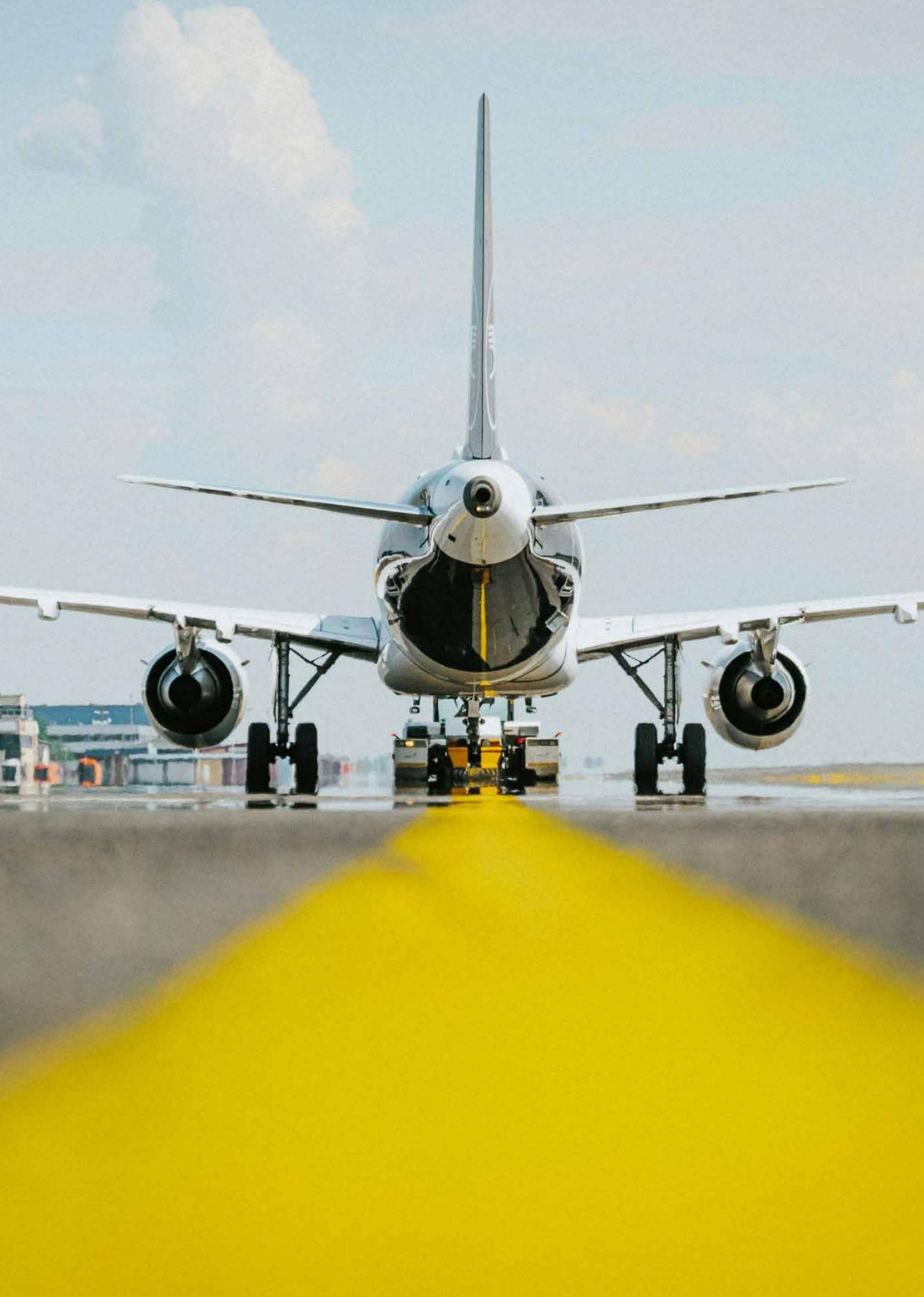
国家、地区或国际组织	核算系统边界	应用领域	原料生产环节因CCS避免的排放	原料生产和运输	燃料生产	燃料运输	燃料使用	燃料使用环节的CCS	LCA排放因子	氢气和二氧化碳共生产品排放分配方法
ICAO	无	航空							无	无
IMO	WTW	航运	✓	✓	✓	✓	✓	✓	自行计算,指南中提供小部分排放因子的默认值	1.能量分配法 2.共生产品不含能量时,可以视具体情况采用按质量分配、按经济价值分配、按经济价值分配等其他方法
欧盟	WTW	航空、航运	✓	✓	✓	✓	✓	✓	自行计算,法规提供部分排放因子的默认值	1.根据物理因果关系 (physical causality) 分配 2.能量分配法 3.按经济价值分配
美国	WTG	交通领域	不适用	✓	✓	✗	✗	不适用	使用45VH2-GREET模型及其默认排放因子进行计算	系统扩展法
中国	WTG	交通和工业 (主要用于氢燃料电池汽车领域)	不适用	✓	✓	✗	✗	不适用	自行计算,标准未提供排放因子的默认值	1.过程细分法 (subdivision) 2.重量、体积、热值等分配。若无法找到合适的物理属性,可采用经济价值法分配 3.查找共生产品的排放因子,并用系统的总排放量减去共生产品的排放量

说明: ✗=核算含此排放环节, ✓=核算无此排放环节。“不适用”指以下情况:一是氢气制取环节不涉及二氧化碳原料以及原料生产环节的碳捕集;二是氢气使用环节由于无碳排放,因此不涉及燃料使用环节的CCS。

ICAO目前的核算方法仅针对生物燃料,目前尚无针对合成燃料的计算方法。IMO计算公式中包含原料生产环节因碳捕集避免的碳排放,但尚待制定进一步的方法指导。对中国《低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》,在煤制氢系统边界中提到燃料生产环节包含CCS,但未明确是否包含碳捕集、运输、封存过程产生的排放。

来源:作者根据ICAO (2024d)、IMO (2024)、中国氢能联盟 (2020)、U.S.IRS & Treasury (2025b、2025a)、U.S.DOE (2025) 相关文献总结。





中国可持续替代燃料 WTW温室气体排放 测算结果

本章采用GREET模型，测算中国生产的航运生物燃料和合成燃料的WTW温室气体排放强度，分析其全生命周期碳排放强度是否满足国内外可持续替代燃料的温室气体排放强度要求。

为分析中国生产的各类航空、航运可持续替代燃料全生命周期碳排放强度是否能满足国内外可持续替代燃料的全生命周期温室气体排放强度要求，本研究采用GREET模型对中国生产的生物燃料、合成燃料的WTW温室气体排放强度进行测算。其中：

生物燃料主要选取生物天然气、生物甲醇进行测算。这是因为两种燃料是目前国际上航运可持续替代燃料的主流选择（MMMCZCS 2022）。其中，本文考虑生物甲醇的两种制取路径，分别为生物天然气制甲醇与生物质气化制甲醇。为确保原料能满足部分可持续性要求，本文主要考虑有机废弃物为原料的情况，包括垃圾填埋气、动物粪便、废水污泥、食物垃圾与秸秆，不涉及食物、饲料作物或能源作物的情况。但值得注意的是，秸秆仍可能存在替代效应。

合成燃料主要涉及氢气、甲醇合成燃料的测算。选择这两种燃料的原因有二：一是氢气和甲醇合成燃料是航运可持续替代燃料的重要选择（MMMCZCS 2022）；二是作为合成燃料的重要原料，氢气的温室气体排放强度在很大程度上决定了合成燃料的温室气体排放强度。其中：

- 对氢气而言，本研究主要考虑三种氢气来源：化石燃料制氢（煤制氢与天然气重整制氢）+CCS、工业副产氢及电解水制氢。这三种来源是2035年前中国可行的氢气制备路径（中国石化集团经济技术研究院 2023），也是IMO、欧盟与美国允许的航运替代燃料的氢气来源。针对工业副产氢，本文考虑目前中国氢气产量中占比最大的两类工业副产氢——焦炉煤气副产氢与氯碱副产氢（C. Wang等 2024）。
- 对甲醇合成燃料而言，本文假设其二氧化碳来自争议较少的生物质二氧化碳。

7.1 本土化输入与核算方法

核算时间范围

关于生物燃料，本文主要核算2023年排放。这是由于未来生物燃料温室气体排放需要使用复杂的经济模型，并结合潜在土地利用变化进行预测。出于简化，本文未对生物燃料排放进行预测。

关于氢气与甲醇合成燃料，温室气体排放强度受电力碳足迹因子的影响较大，考虑未来电力碳足迹因子将大幅下降，所以，本研究测算现状（2023年）与未来（2035年）的温室气体排放。选择2035年是因为届时可再生能源在中国发电结构中的占比将会更高，且根据Wood Mackenzie（2024）预测，2035年左右航运合成燃料将开始具备推广潜力。

核算边界

关于生物燃料，由于目前缺乏本地化数据/模型或相关排放本身难以定量核算，本文未计算航运生物燃料的iLUC排放、替代排放，以及土壤有机碳的变化。这可能导致本文测算的生物燃料的WTW排放具有不确定性。因此，建议中国完善相关数据与模型基础，或完善政策要求（如提出替代燃料上限使用要求）。另外，本文也考虑原料相较BAU避免的排放。由于缺乏中国现有生物质的用途统计，所以，本研究采用了GREET模型中的BAU。

关于氢气与甲醇合成燃料，本文的边界与欧盟《RFNBO和RCF减排量核算方法》一致，即为WTW。

核算方法选择与情景设置

关于生物燃料，本文搭建了不同情景（见图4），分析不同生物质原料、制取路径以及BAU组合下，航运生物天然气、生物甲醇WTW的温室气体排放。在原料与制取路径选择方面，为避免“与民争粮”，本文主要考虑有机废弃物为原料的情况，包括通过垃圾填埋气、动物粪便、废水污泥与食物垃圾制取生物天然气，以及通过秸秆制取生物甲醇。虽然根据本研究的专家访谈，中国也有秸秆厌氧发酵制甲醇的路径，但由于GREET模型中没有该技术路径，所以，本文未考虑。

另外，根据本研究的专家访谈结果，生物质气化制甲醇的温室气体排放量受气化过程的耗电量和电源结构的影响。在耗电量方面，目前气化过程的耗电因气化工艺（即不同床型）而异。本文将耗电量较大的气流床与耗电量较小的流化床（或固定床）区分开来。此外，电力碳足迹因子是影响生物甲醇温室气体排放强度的关键因素。因此，本文对两种电力来源的排放影响进行了测算：一是中国电网电力，即基于中国电网的平均电力碳足迹因子；二是100%可再生能源电力。

关于氢气与甲醇合成燃料，考虑到中国氢气来源多元，加之可再生能源制氢、可再生能源支撑化工生产仍面临成本与技术的挑战，所以，本文搭建出不同情景，并据此分析现在与未来各种可行的氢气来源、电力来源以及其他影响排放的因素（如共生产品排放的分配方法、反事实情景的选择、CCS捕集率等）下，氢气与甲醇合成燃料WTW的温室气体排放强度（见表17）。

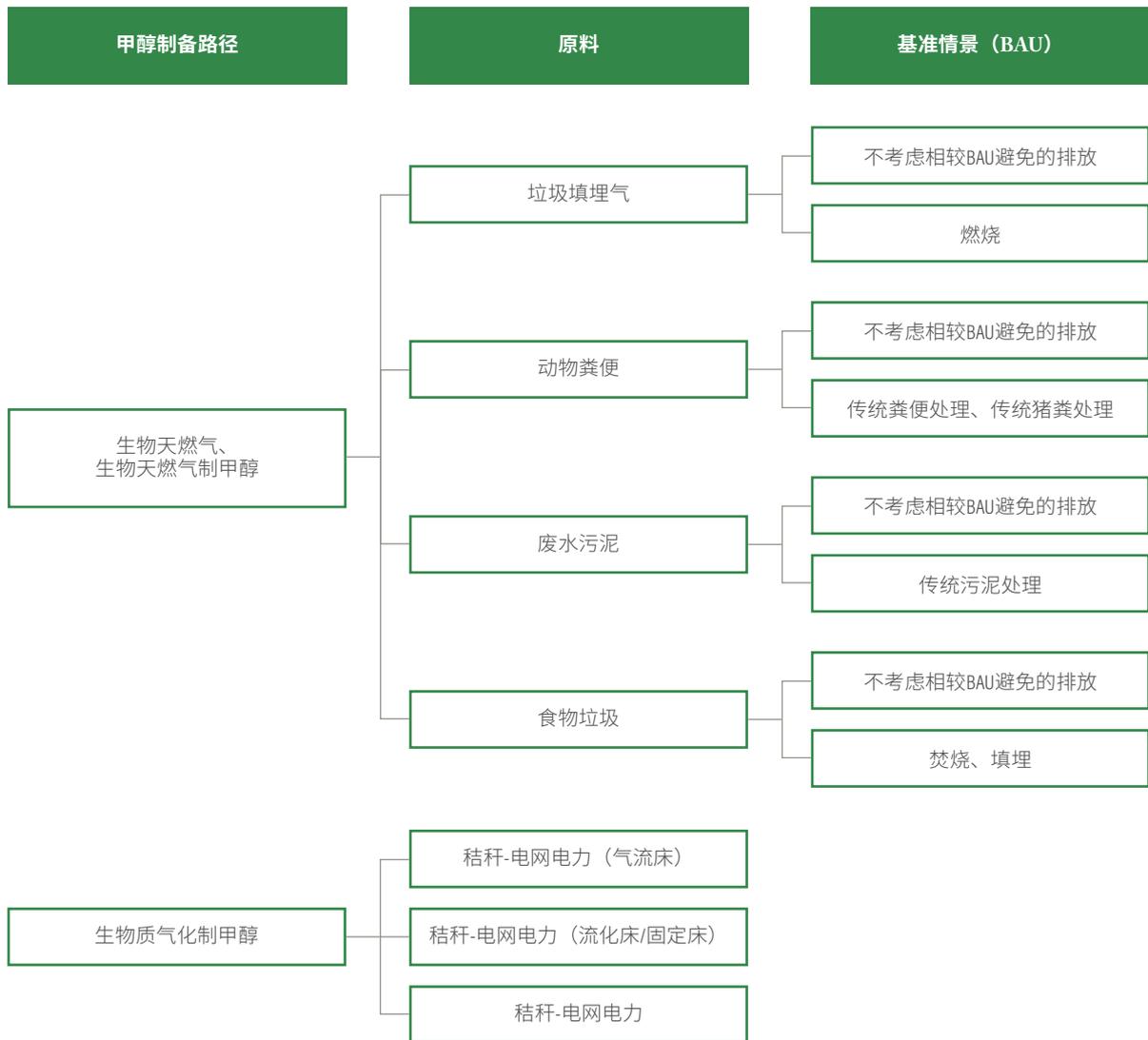
根据国际标准（ISO 2020、2018、2023），本研究使用能量法、质量法、经济价值法与系统扩展法等多种共生产品排放的分配方法，对氢气排放进行分配。其中，使用系统扩展法时，考虑到反事实情景（即现有用途）对排放测算结果有较大影响，本文考虑中国工业副产氢气的两个典型反事实情景：

■ 一是循环利用于企业内部生产，如工业供热。如果将这些工业副产氢气从工业供热中转移出来用于制取航运燃料，就需要额外能源用于工业供热。中国炼焦行业协会（2022）、刘剑波（2020）的研究指出，中国炼焦与氯碱行业中，企业通常采用煤炭供热，所以，本文计算额外用煤供热带来的增加排放。

■ 二是氢气直接排空的情况。如果将这部分排空的氢气捕集起来用做航运燃料，会较排空情况减少氢气排放及其温室气体效应。因此，本文基于氢气的GWP值，计算出避免氢气排空而减少的排放。

详细数据来源说明见附录2。

图4 | 本文中航运生物燃料WTW温室气体排放强度算的情景设置



说明：图中，基准情景指原料现有处理方式。
来源：作者绘制。

表 17 | 本文中航运氢气与甲醇合成燃料WTW温室气体排放强度核算的情景设置

燃料	原料来源	影响因素	情景设置	数据来源
氢气	化石燃料制氢+CCS	CCS捕集率	1. 煤制氢: 0%、93%、98% 2. 天然气重整制氢: 0%、60%、93%	(IEA 2023c)
	工业副产氢	共生产品排放的分配方法	1. 焦炉煤气副产氢, 考虑按能量分配与系统扩展法 2. 氯碱副产氢, 考虑按质量分配、经济价值分配与系统扩展法	在产物含有能量的情况下, 一般直接采用按能量分配, 因此, 焦炉煤气副产氢不考虑按质量或经济价值分配。而氯碱副产氢的其他共生产品不含能量, 因此, 考虑按质量分配、经济价值分配的方法
		系统扩展法的反事实情景	1. 反事实情景为氢气用于内部供热, 替代物为煤 2. 反事实情景为氢气全部排空时, 考虑氢气的温室效应	反事实情景为本文假设; 氢气 GWP100为11.6 (Sand等 2023)
	电解水制氢	电力来源	1. 100%可再生能源 2. 100%核电 3. 电网电力 (中国平均电力碳足迹因子)	根据2023年 (火电占比为66%) 和2035年 (火电占比为25%) 中国发电结构, 以及单位火电发电量碳排放, 计算电力排放水平, 数据源见附录2
		制氢效率	1. 低制氢效率 (60%) 2. 高制氢效率 (80%)	本文参考Shiva Kumar等 (2022) 的假设
合成甲醇	氢气与二氧化碳合成甲醇	氢气来源	1. 化石燃料制氢+CCS 2. 工业副产氢 3. 电解水制氢 (电网电力、核电、可再生能源)	本文假设
		二氧化碳来源	生物质二氧化碳	本文假设
		合成过程的电力来源	1. 100%可再生能源 2. 电网电力 (中国平均电力碳足迹因子)	根据2023年 (火电占比66%) 和2035年 (火电占比25%) 中国发电结构, 以及单位火电发电量碳排放, 计算电力排放水平, 数据源见附录2

来源: 作者假设与总结。

7.2 生物燃料核算结果

基于上述方法，本研究测算的中国生物天然气与生物甲醇在不同情景下2023年WTW温室气体排放强度如图5和图6所示。由于中国尚未出台航运可持续替代燃料温室气体排放强度要求，所以，本文采用欧盟《可再生能源指令III》对生物燃料温室气体排放强度的要求（特别是对2021年1月1日后投入运营的生物燃料生产设备的要求），以及美国IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中能获得税收抵免的门槛，作为标杆值与中国计算结果进行对比分析，结果如下：

首先，不同原料的生物燃料WTW温室气体排放强度有较大差别。即便使用有机废弃物为原料制取生物燃料时，部分原料（与制取路径）的WTW温室气体排放强度仍然较高。所以，中国在制定核算方法时，需区分原料来源（与制取路径）；企业在生产生物燃料时，需考虑使用温室气体排放强度低的原料、提升制取效率并使用可再生能源。

对生物天然气而言：

- 以垃圾填埋气和动物粪便为原料时，中国生产的生物天然气WTW温室气体排放强度达-118.0~27.7gCO₂e/MJ，能够满足欧盟《可再生能源指令III》以及美国IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中对生物燃料温室气体排放强度的要求（32.9~47.4gCO₂e/MJ）。
- 当以食物垃圾为原料时，中国生产的生物天然气的WTW温室气体排放强度受BAU影响较大：在BAU为食物垃圾填埋时，生物天然气的WTW温室气体排放强度达到-149.1gCO₂e/MJ，能满足欧盟和美国对生物燃料温室气体排放强度的要求；但如果BAU为食物垃圾焚烧或者不考虑BAU时，WTW温室气体排放强度为40.8~54.3gCO₂e/MJ，无法满足欧盟或美国的要求。
- 当使用废水污泥为原料时，生物天然气温室气体排放强度高达49.9~80.1gCO₂e/MJ，不能满足欧盟或美国对生物燃料温室气体排放强度的要求。这是因为以废水污泥为原料的制取路径下，对生物质原料的投入占比相对上述制取路径更少。

对生物甲醇而言：

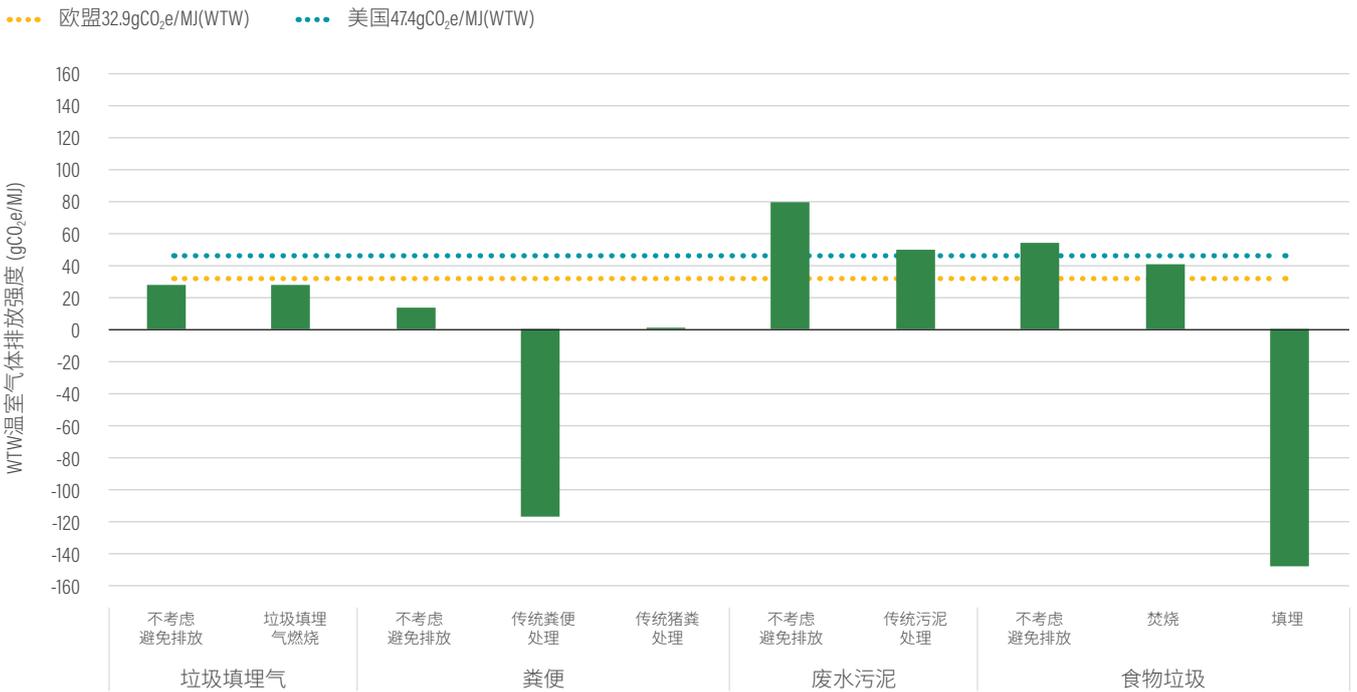
- 以生物天然气制取生物甲醇时，不同原料来源制取的生物甲醇的WTW温室气体排放强度满足欧美要求的情况与上述生物天然气的结论基本一致。唯一有区别的是，垃圾填埋气制生物甲醇无法达到欧盟对生物燃料温室气体排放强度的要求。

- 以秸秆为原料，通过生物质气化路径制取生物甲醇时，其WTW温室气体排放强度受电耗水平和电力来源的影响较大。具体而言，当使用电耗较高的气流床方式气化合成生物甲醇时，若在生物质预处理和气化合成环节采用电网电力，其WTW温室气体排放强度将达到33.1gCO₂e/MJ，无法满足欧盟对生物燃料的排放强度要求。相比之下，当采用电耗相对较低的流化床或固定床方式合成生物甲醇时，在同样使用电网电力的情况下，其排放强度可降低至22.0gCO₂e/MJ，能够符合欧盟的相关要求。如果在生物质预处理和气化合成过程中使用可再生能源，生物甲醇的WTW温室气体排放强度可大幅下降至5.4gCO₂e/MJ，这不仅满足欧盟标准，也显示出该技术路径的巨大减排潜力。此外，研究也表明，气化过程之后补充可再生氢，可以进一步降低生物甲醇的温室气体排放强度。

其次，针对原料是动物粪便、食物垃圾的情况，基准情景（即原料传统处理方式）的设置对生物燃料WTW温室气体排放强度有较大影响。所以，中国有必要在生物燃料的核算方法中计算相对于基准情景避免的排放，例如，在燃料WTW温室气体排放中减去避免的排放值作为奖励。

无论是生物天然气还是生物甲醇，当BAU为传统粪便处理方式（含传统猪粪处理方式）或填埋食物垃圾时，这些原料用于生产生物燃料，能够相较BAU避免的排放最显著。这主要是由于原来的粪便或食物垃圾处理方式下会产生大量甲烷，而如果这些原料用于生产生物燃料，能够避免甲烷排放。为此，中国有必要在核算方法中鼓励使用这类原料，例如，计入其相对BAU避免的（甲烷）排放，或者参考欧盟的经验（EU P&C 2018）提供减排奖励（见表15）。

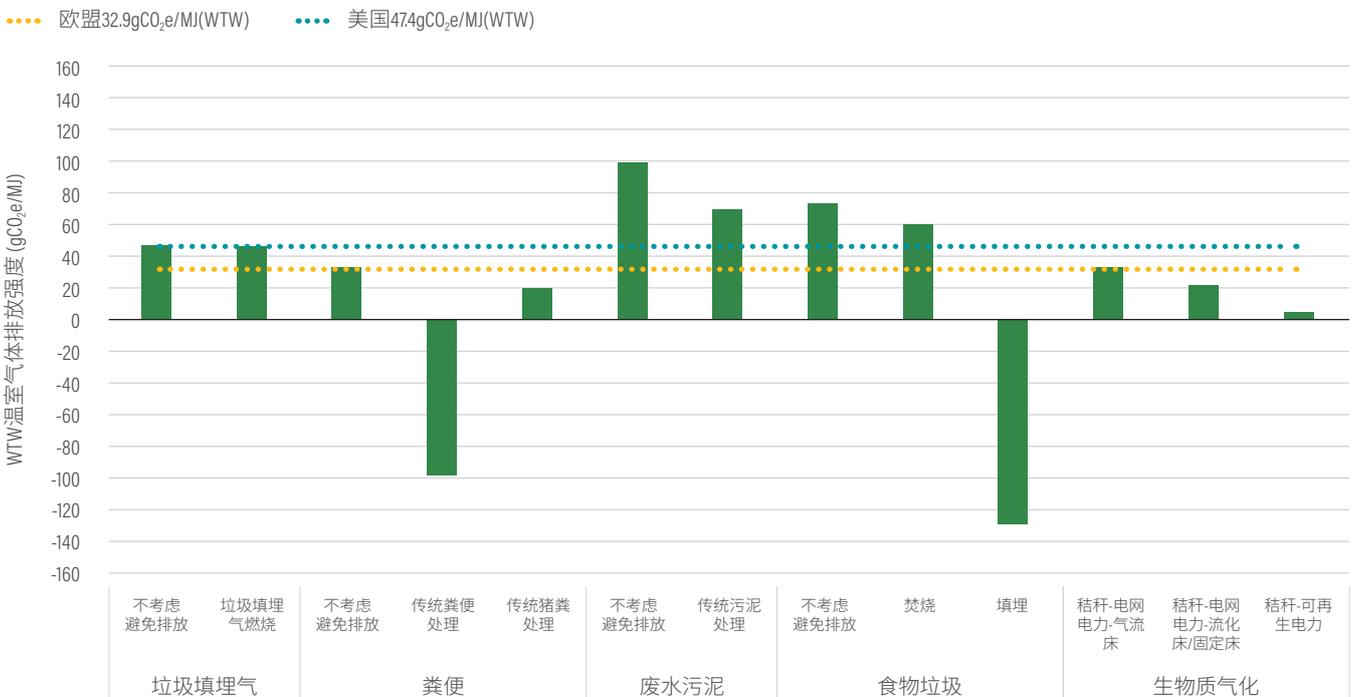
图5 | 航运生物天然气WTW温室气体排放强度



说明:

- 图中, 欧盟的数值源于《可再生能源指令III》对生物燃料温室气体排放强度的要求 (特别是对2021年1月1日后投入运营的生物燃料生产设备的要求); 美国的数值则基于IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中设定的税收抵免门槛。
 - 图中, “不避免排放”指不考虑相较于BAU避免的排放。
- 来源: 作者测算。

图6 | 航运生物甲醇 WTW温室气体排放强度



说明:

- 图中, 欧盟的数值源于《可再生能源指令III》对生物燃料温室气体排放强度的要求 (特别是对2021年1月1日后投入运营的生物燃料生产设备的要求); 美国的数值则基于IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中设定的税收抵免门槛。
 - 图中, “不避免排放”指不考虑相较于BAU避免的排放; 生物质气化路径的电力消耗涵盖生物质预处理及气化合成环节的用电。
- 来源: 作者测算。

7.3 合成燃料核算结果

本研究测算的中国生产的氢气与甲醇合成燃料2023年和2035年的WTW温室气体排放强度如图7、图8、图9和图10所示。

针对氢气，本文选取欧盟针对RFNBO与低碳氢的温室气体排放强度要求（出自《可再生能源指令III》和《气体指令》，二者在温室气体排放强度方面的要求一致）、美国IRA《45V清洁氢能生产减税政策》所设税收抵免门槛，以及中国《低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》中对清洁氢的要求作为标杆值，进行对比分析。

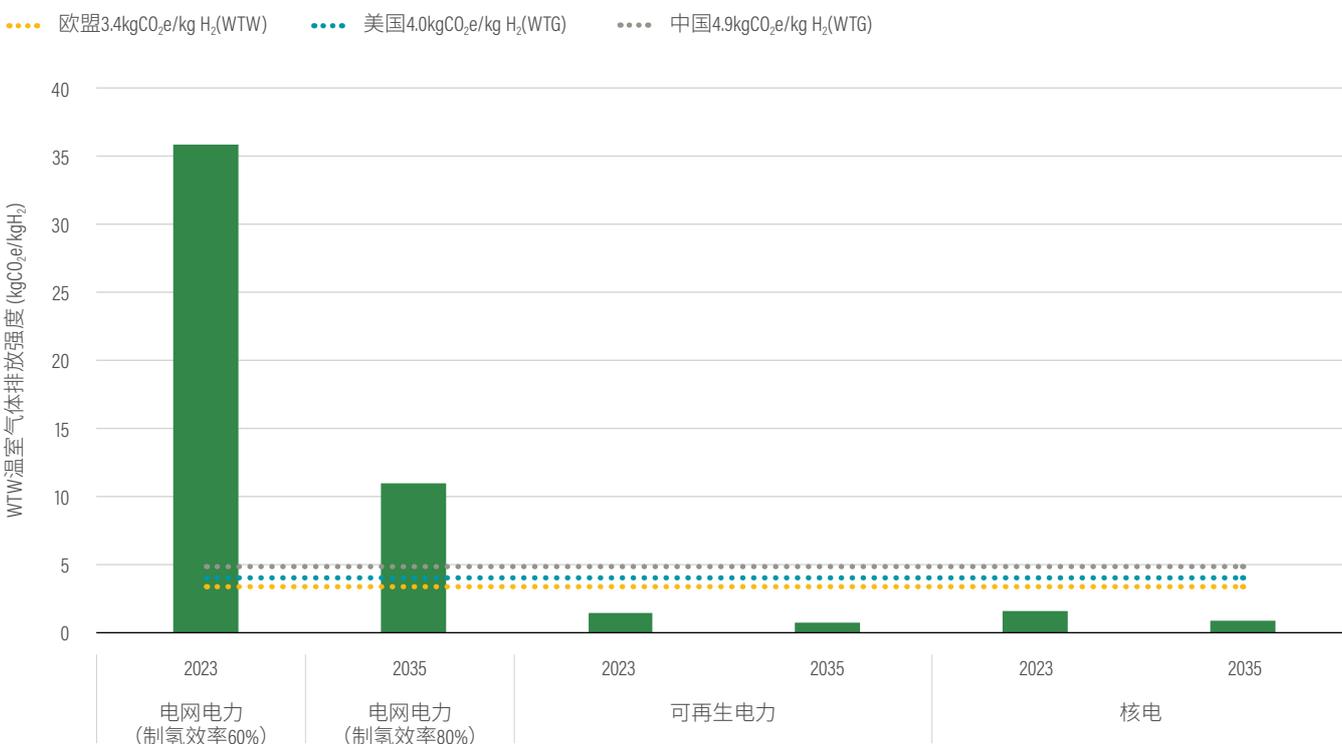
针对甲醇合成燃料，由于中国尚无航运可持续替代燃料温室气体排放强度要求，本文采用欧盟《欧盟海运燃料法规》中对RFNBO和低碳合成燃料的要求，以及美国IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中能够获得税收抵免的门槛要求作为标杆值，进行对比分析。

对比分析的结果如下：

首先，对氢气而言，不同来源的氢气以及氢气共生产产品分配方法对氢气WTW温室气体排放强度有较大影响。所以，中国在制定核算方法时，需区分原料来源，优化氢气共生产产品分配方法；在企业生产氢气时，需考虑使用温室气体排放强度低的路径。即便到2035年，网电制氢、大部分情景下的化石燃料制氢+CCS，以及部分分配方法下的工业副产氢，无法达到欧盟对RFNBO的温室气体排放强度要求（即中国、美国、欧盟中的最低标杆值）。只有可再生电力制氢、核电制氢、部分分配方法下的工业副产氢，以及个别情况下的化石燃料制氢+CCS，能达到欧盟对RFNBO的温室气体排放强度要求。

对网电电解水制氢而言，即使在2035年中国平均电力碳足迹因子以及高制氢效率的情况下，氢气温室气体排放强度（11.0kgCO₂e/kg氢气）远高于中国《低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》中的清洁氢要求（4.9kgCO₂e/

图7 | 不同电力来源的电解水制氢WTW温室气体排放强度



说明：图中，欧盟的数值源于《可再生能源指令III》中对RFNBO的温室气体排放强度要求；美国的数值源于IRA《45V清洁氢能生产减税政策》中能够获得税收抵免的门槛要求；中国的数值源于《低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》中的清洁氢要求。
来源：作者测算。

kg氢气) (即中国、美国、欧盟中的最高标杆值)。所以,从现在到2035年,网电制氢(即中国平均电力碳足迹因子)仍有较高的WTW温室气体排放强度,应尽可能避免采用这种制氢方式。相反,可再生电力制氢或核电制氢的WTW温室气体排放强度能满足欧盟RFNBO的要求。其中,这两种方式在制氢环节为零排放(可再生电力制氢)或者近零排放(核电制氢),仅在氢气压缩与运输环节有少量排放。

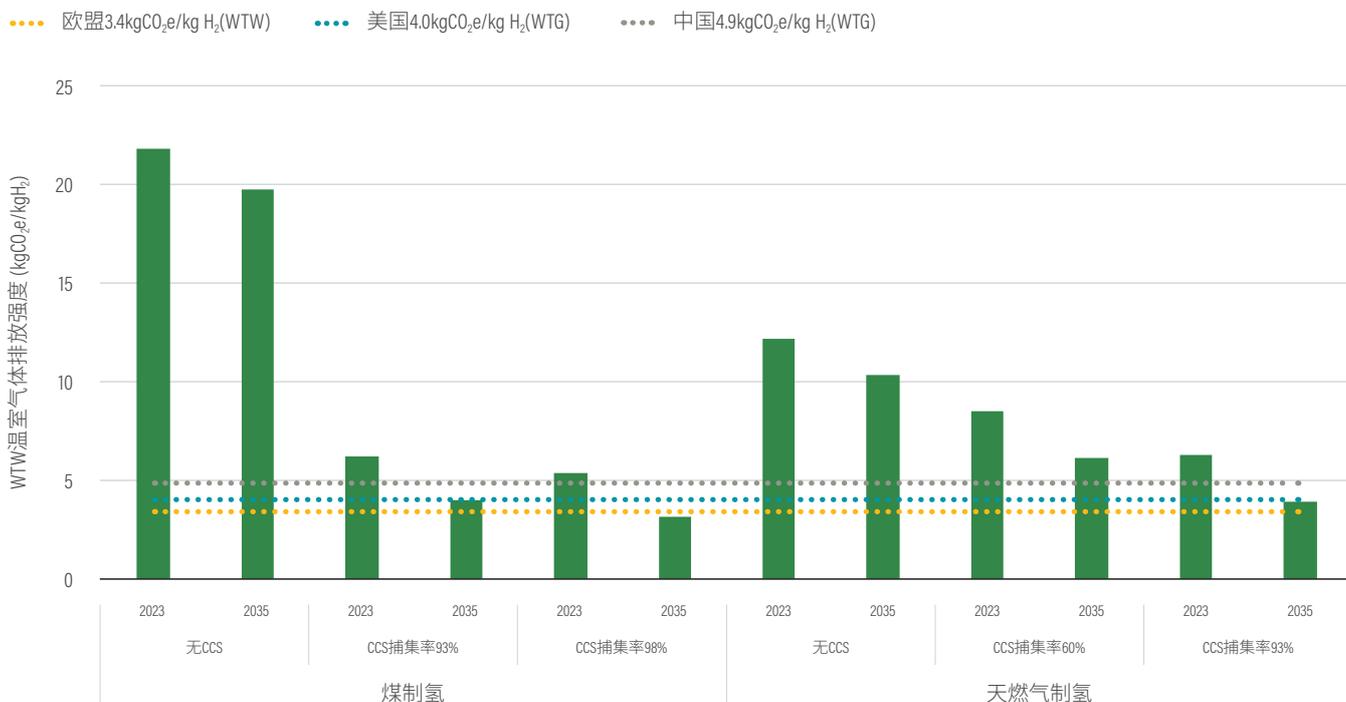
对化石燃料制氢+CCS而言,CCS捕集率与电力来源对氢气温室气体排放强度有较大影响。煤制氢+CCS在目前中国的电力碳足迹因子下,难以达到中国、美国和欧盟对RFNBO和清洁氢气排放强度的要求。到2035年,虽然随着网电排放因子的下降,煤制氢+CCS将有望达到中国与美国关于清洁氢的要求,但仍较难达到欧盟RFNBO的门槛。若要达到欧盟对RFNBO的温室气体排放强度要求,2035年煤制氢CCS的捕集率要到98%以上。届时,CCS成本是否可负担,捕集过程是否有较少的能量消耗量,以及捕集使用的电力来源是否清洁都将成为重要的影响因素。

另外,与煤制氢不同,天然气重整制氢较难实现高捕集率:使用燃烧前捕集系统,天然气重整制氢可从二氧化碳浓度高的合成气中完成60%的捕集率;要想达到90%~95%的捕集率,需要燃烧后从更稀释的烟气中捕集,捕集的难度与

成本会大幅提高(IEA 2022)。因此,相较于天然气重整制氢+CCS(3.9~8.5 kgCO₂/kg氢气),煤制氢+CCS有更低的WTW温室气体排放强度(3.1~6.2 kgCO₂/kg氢气)。所以,天然气重整制氢+CCS较难达到中国、美国和欧盟的RFNBO氢气温室气体排放强度要求。

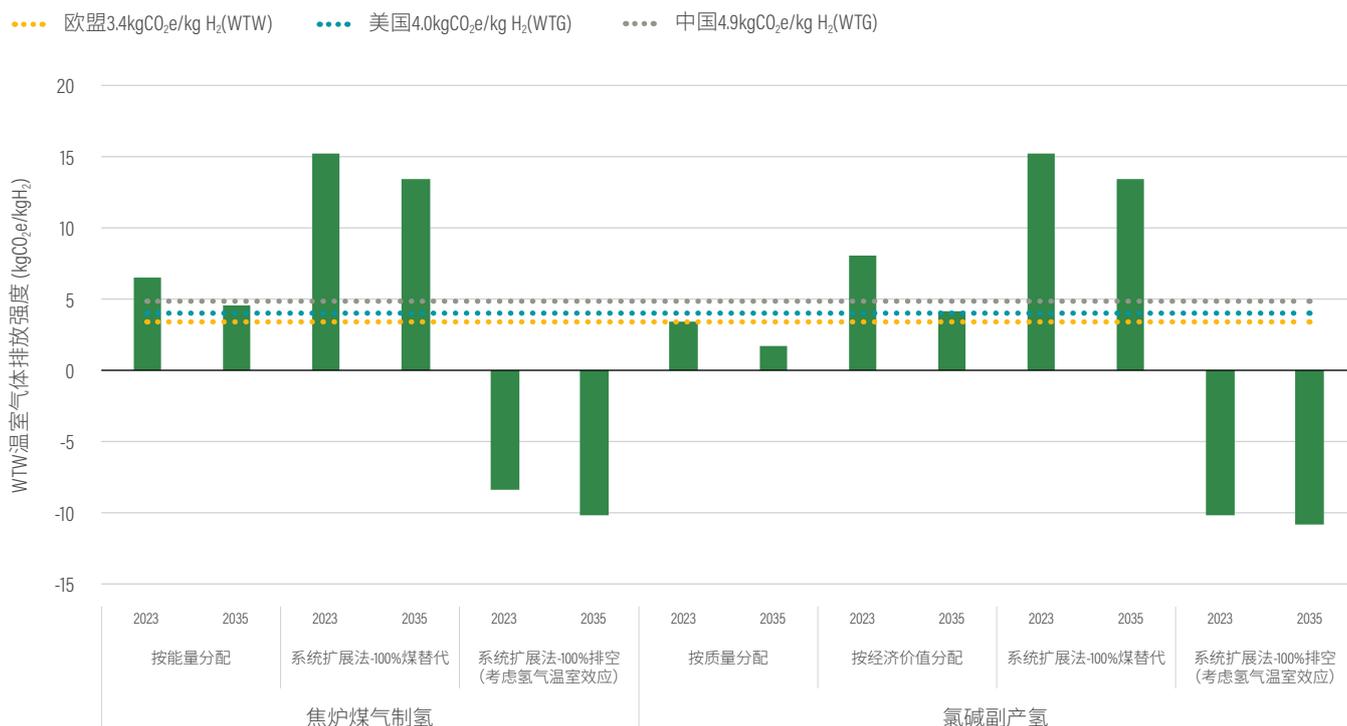
对于工业副产氢而言,不同分配方法的选择对结果的影响很大。首先,采用系统扩展法得出的氢气温室气体排放强度结果呈现明显的波动性,这主要是受反事实情景的影响。其中,在氢气直接排空的反事实情景中,如果考虑氢气的温室气体效应,系统扩展法得到的氢气WTW温室气体排放强度最低,仅为-10.9~-8.3kgCO₂e/kg氢气。换言之,如果将此前直接排空的氢气用作航运燃料,会较氢气排空的情况有明显的温室气体减排效果。相反,在工业副产氢原先用于工业供能的反事实情景中,如果将这部分氢气用作航运燃料,会较原先用途增加排放,得到的氢气WTW温室气体排放强度是所有分配方法中最高的,达到13.5~15.3kgCO₂e/kg氢气,无法满足中国、美国和欧盟对低碳氢和清洁氢气的排放强度要求。这说明,如果中国参照国际标准分配氢气共生产产品的排放(即系统扩展法的优先级高于按质量、能量的分配方法),有必要要求燃料生产企业在计算中明确系统扩展法的反事实情景,避免核算结果的不确定性。

图8 | 化石燃料制氢+CCS WTW温室气体排放强度



说明:图中,欧盟的数值源于《气候指令》所规定的低碳氢温室气体排放强度要求(其排放强度要求与RFNBO相同);美国的数值则基于IRA《45V清洁氢能生产减税政策》中设定的税收抵免门槛;中国的数值取自《低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》中的清洁氢要求。
来源:作者测算。

图9 | 工业副产氢WTW温室气体排放强度



说明: 图中, 欧盟的数值源于《气体指令》所规定的低碳氢温室气体排放强度要求 (与RFNBO相同); 美国的数值则基于IRA《45V清洁氢能生产减税政策》中设定的税收抵免门槛; 中国的数值取自《低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价》中的清洁氢要求。

来源: 作者测算。

在部分副产氢路径中, 采用质量法或能量法进行分配能够在一定程度上降低氢气的碳排放强度。例如, 氯碱副产氢由于副产品 (如氯气) 不含能量, 采用质量或经济价值分配方法时, 氢气的生命周期温室气体排放强度在2023年即有望达到欧盟低碳氢的排放强度要求。与此同时, 焦炉煤气副产氢在采用能量分配法时, 碳排放强度也较低——到2035年, 排放强度能够满足中国清洁氢的要求, 但不能达到欧盟对低碳氢的温室气体排放强度要求。

其次, 对合成燃料而言, 氢气来源、二氧化碳来源以及合成过程的电力来源, 都将影响其能否满足国内外合成燃料温室气体排放强度要求。所以, 中国在制定核算方法时, 需明确合格的原料来源, 加强电力碳足迹因子的国际互认; 企业在生产合成燃料时, 需考虑使用温室气体排放强度低的原料。只有可再生能源制氢、核电制氢、部分共生产品分配方法下的工业副产氢, 才能够达到 (或接近) 欧盟对RFNBO和低碳合成燃料的WTW温室气体排放强度要求 (即美国与欧盟数值中最低的标杆值)。具体而言:

- 如果使用可再生氢或核能制氢合成的甲醇, 无论合成环节使用可再生电力还是网电, 甲醇合成燃料都能满足或接近欧盟对RFNBO和低碳合成燃料的要求。但

如果使用电网电力制氢 (即采用全国平均电力碳足迹因子计算), 甲醇合成燃料则无法满足欧盟与美国对合成燃料温室气体排放强度的要求。

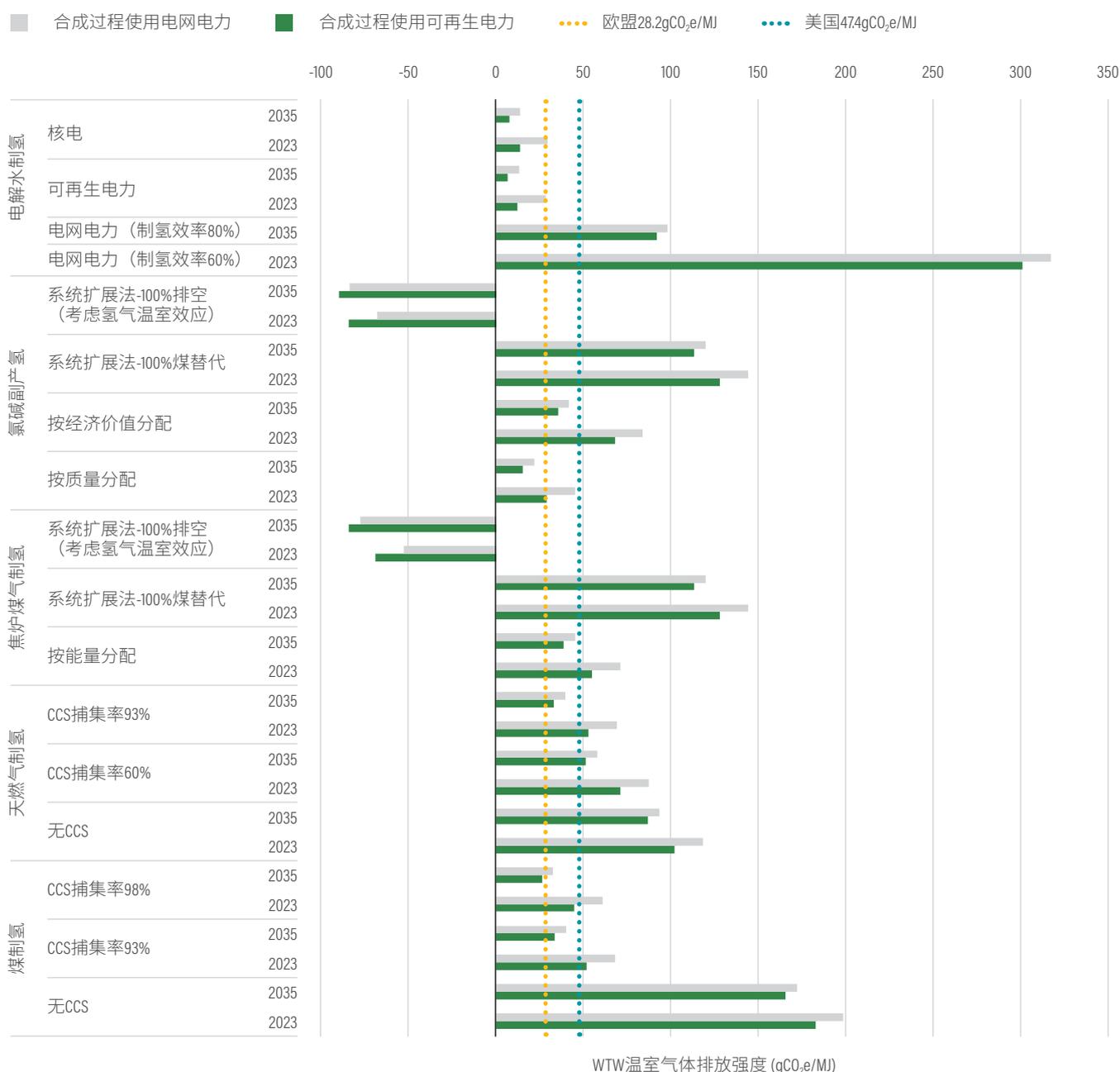
- 如果使用化石燃料制氢+CCS合成的甲醇, 则很难达到欧盟对低碳合成燃料的要求。只有在2035年, CCS捕集率达到98%且合成过程中使用可再生能源的多重要求下, 才能达到欧盟对低碳合成燃料的要求。
- 如果使用工业副产氢合成的甲醇, 且满足使用系统扩展法中氢气排空的情况, 其WTW温室气体排放强度最低, 为负值。此外, 按质量分配法的氯碱副产氢与按能量分配法的焦炉煤气副产氢, 只有在合成环节使用可再生能源时, 才有可能达到欧盟对低碳合成燃料的要求。

另外, 由于合成环节的电力来源对合成燃料的WTW温室气体排放有较大影响, 所以, 国家/地区电力碳足迹因子的取值将格外重要。目前, 国际认证体系 (如ISCC认证) 使用的是中国电力碳足迹因子默认值 (0.94kgCO₂e/kWh, 明显高于生态环境部发布的2023年全国电力碳足迹因子 (0.6205 kgCO₂e/kWh) (ISCC 2024d; 生态环境部等2025)), 导致中国生产的合成燃料在国际认证中始终有较高

的排放。例如，2023年，如果使用可再生氢气合成甲醇，其中合成环节使用网电时，按照生态环境部发布的全国电力碳足迹因子，计算得到的甲醇合成燃料WTW温室气体排放强度为28.3gCO₂e/MJ，几乎能够满足欧盟对RFNBO和低碳合成燃料的要求。但按照ISCC的电力碳足迹因子，计算得到WTW温室气体排放强度为37gCO₂e/MJ，无法满足欧盟对RFNBO和低碳合成燃料的要求。所以，及时更新中国电力碳足迹因子，并加强国内外就中国电力碳足迹因子的互认，尤为重要。

最后，如前所述，碳源也有较大影响。如果相关国家、地区与国际组织均承认各自电力、工业行业捕集的二氧化碳为合格碳源，其制取的合成燃料的WTW温室气体排放强度值，将与本文使用生物质二氧化碳制取合成燃料的WTW温室气体排放强度值大致相当。否则，即使用可再生能源电解水制氢合成甲醇，其WTW温室气体排放相较化石燃料的温室气体排放强度下降幅度也十分有限（见第4.3节说明），可能无法满足相关国家、地区与国际组织对合成燃料温室气体排放强度的要求。

图10 | 甲醇合成燃料WTW温室气体排放强度



说明：图中，欧盟的数值源于《欧盟海运燃料法规》中对RFNBO和低碳合成燃料的要求；美国的数值则基于IRA《45Z清洁燃料生产减税政策》中设定的税收抵免门槛。来源：作者测算。

专栏4 | 交通运输环节排放对航空、航运可持续替代燃料WTW温室气体排放强度的影响较大

中国可持续替代燃料的生产地集中于中西部与东北地区，而消费地则位于东部沿海（航运）或主要一线与二线城市（航空）。由于燃料的生产地与消费地相距较远，交通运输环节的排放不可忽视。

本文以2023年航运甲醇合成燃料从内蒙古自治区兴安盟生产至上海港加注为例（单程运距约为2000千米），测算终端产品（甲醇燃料）在运输环节的排放量。其中，本文选择的甲醇合成燃料制取路径为可再生氢气与生物质二氧化碳合成的甲醇。

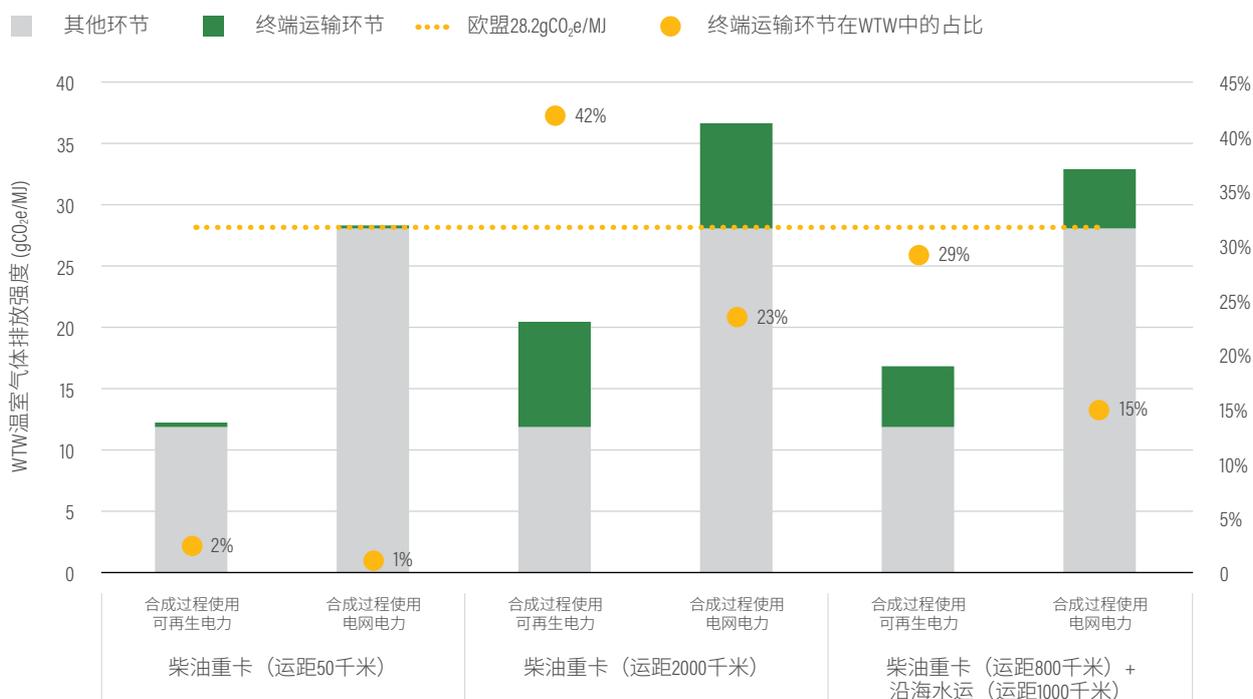
测算结果显示，随着运距增加，交通运输环节排放量明显增加，成为可持续替代燃料WTW温室气体排放的主要来源之一（见专栏图1）：

- 如果使用柴油重卡从内蒙古自治区兴安盟运输至上海港，终端产品运输环节温室气体排放达到 $8.6\text{gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$ 。若合成环节使用网电，终端产品运输环节的排放占甲醇燃料WTW温室气体排放的23%；甲醇燃料WTW温室气体排放强度达到 $36.6\text{gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$ ，无法满足欧盟对

RFNBO和低碳合成燃料的排放强度要求。若合成环节使用可再生电力，甲醇燃料WTW温室气体排放强度达到 $20.5\text{gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$ ，能满足欧盟的要求，但终端产品运输环节的排放占甲醇燃料WTW温室气体排放的比例高达42%。

- 如果使用柴油重卡从内蒙古自治区兴安盟运输至营口港（单程运距约800千米），再从营口港通过水路运输至上海港（单程运距约1000千米），终端产品运输环节的温室气体排放将达到 $4.9\text{gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$ 。若合成环节使用网电，终端产品运输环节的排放占甲醇燃料WTW温室气体排放的15%。在此情况下，甲醇燃料WTW温室气体排放强度为 $32.9\text{gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$ ，无法满足欧盟对RFNBO和低碳合成燃料的排放强度要求。若合成环节使用可再生电力，甲醇燃料WTW温室气体排放强度达到 $16.8\text{gCO}_2\text{e}/\text{MJ}$ ，能满足欧盟的要求，而终端产品运输环节的排放占WTW温室气体排放的比例也要高达29%。

专栏图1 | 不同运输方式对甲醇合成燃料WTW温室气体排放强度的影响



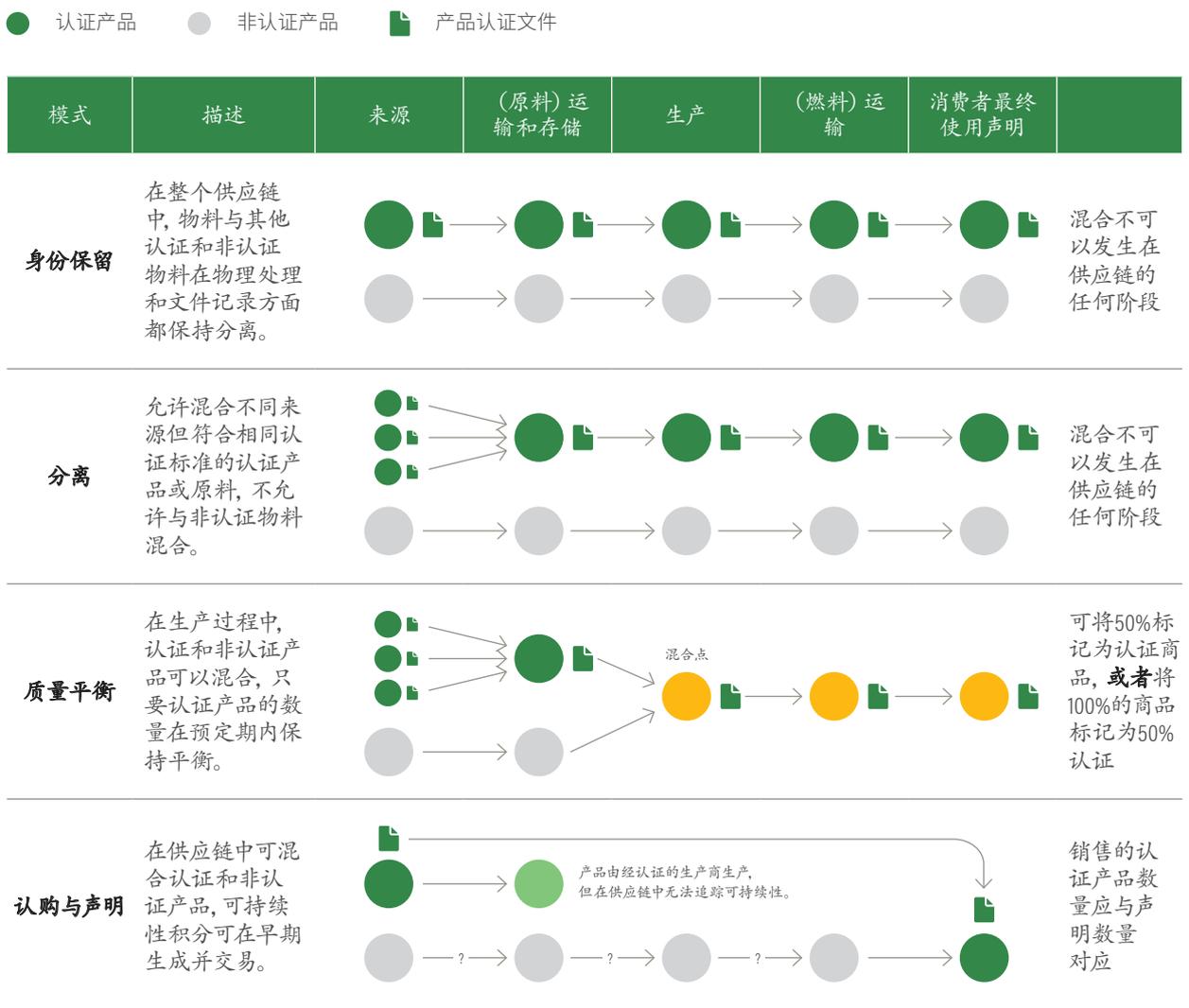
说明：图中，欧盟的数值源于《欧盟海运燃料法规》中对RFNBO和低碳合成燃料的要求。
来源：作者测算。

专栏 4 | 交通运输环节排放对航空、航运可持续替代燃料WTW温室气体排放强度的影响较大(续)

为解决终端燃料远距离运输产生更多温室气体排放的问题，中国有必要考虑如下方案：一是鼓励使用水路（特别是可持续燃料船舶）、铁路、管道、新能源重卡运输替代燃料，避免使用柴油重卡带来的运输环节排放；二是在航空及航运领域，允许企业或地区依据质量平衡方法对可持续替代燃料的投用及消费进行核算，以确保可再生属性的合理分配与认证。三是建立航空、航运可持续替代燃料全国统一的认购与声明机制（book

and claim），将可持续替代燃料的环境属性与物理实体分离，通过专门的注册与登记平台进行交易。例如，在该机制下，航空公司声明使用了航空可持续替代燃料，并从认购与声明的平台购买减排证书，但实际可能并非加注可持续替代燃料。采用认购与声明机制，不仅有助于聚合可持续替代燃料的需求，也避免了将可持续替代燃料运输到每个机场或港口的成本与相应的排放量（见专栏图2）（MMMCZCS 2022）。

专栏图 2 | 质量平衡以及认购和声明机制的说明



来源：作者根据Bakker (2024) 的研究绘制。



TEN

T

EURO
NASSAU



MSC MADELEINE
PANAMA
964200700



第八章

建议

基于上述研究结论，本文建议相关政府部门应因势而谋，考虑采取一系列措施，以完善航空、航运可持续替代燃料的标准体系。

以上分析显示，中国相关政府部门应因势而谋，本研究的具体建议包括：

针对航空、航运可持续替代燃料标准体系，中国仍有待完善定义、原料来源要求、温室气体排放强度要求及核算方法，积极参与IMO、ICAO的相关谈判，并加强全球区域层面的标准互认：

针对航空领域而言，一是优化《航空燃料可持续性评价规范》，完善航空替代燃料的定义、原料来源要求、温室气体排放强度要求及核算方法；二是积极参与完善ICAO相关核算方法（如间接土地利用变化排放的核算）；三是有必要研究建立符合中国国情的SAF（及副产品）的可持续性认证体系；四是储备研究航空非二排放的核算方法与减排措施，适时考虑对航空非二排放的监测和监管。

针对航运领域而言，一是研究制定国家层面的航运燃料标准与可持续性评价规范，明确定义、原料来源要求、温室气体排放强度要求及核算方法；二是积极参与IMO针对可持续性框架和ZNZs定义的谈判，特别应注意与中国产业发展特点结合；三是有必要研究搭建符合中国产业发展需要的航运可持续替代燃料（及副产品）认证体系；四是储备研究黑碳等非二排放的核算和减排措施。

针对生物燃料而言，鉴于中国在禁止粮食作为原料方面全球领先，所以，有条件与国际标准实现接轨：

- **在原料来源要求方面**，一是从粮食安全角度出发，中国应明确禁止粮食用于生产航运生物燃料；二是完善对农林废弃物的可持续性要求，例如设置合理的秸秆还田和林业废弃物保留比例，明确农林废弃物不能来自高碳储量的生态系统，并且其采集必须实行可持续农林管理措施，以确保土壤健康、土壤碳储与生物多样性；三是完善对（航运生物燃料）能源作物的可持续性要求，例如限制能源作物种植对粮食安全、间接土地利用变化的不利影响，加强对高碳储量生态系统来源的限制；四是针对原料替代风险，全面梳理中国生物质的储备情况以及各类生物质的现有用途，以便识别并限制那些可能存在替代风险的原料。
- **在核算方法方面**，一是针对动物粪便与城市有机垃圾为来源的生物燃料，计算相对于基准情景避免的排放，为简化计算，可按原料类别提供核算上的减排奖励；二是研究各原料间接土地利用变化风险，利用遥感影像定期监测各原料种植对土地利用变化的影响，尤其是其种植面积扩张对森林、草地与湿地的侵占情况，明确中国本地化的间接土地利用排放核算方法与排放因子（与排放量）。



- **在原料溯源与认证机制方面**，一是在对航空、航运生物燃料进行认证时，将生产过程中的副产品纳入可持续性认证范围，提升副产品的市场价值；二是针对农林废弃物以及餐厨废油，强化上游溯源与监管力度，确保原料的可持续性；三是对于管道运输的生物天然气，采用质量平衡法进行追溯，以完善生物天然气的认证机制。

针对合成燃料而言，建议研究提出适合中国国情与产业发展特点的标准与核算方法：

- **在原料来源要求方面**，研究提出适合中国国情的二氧化碳、氢气与电力来源要求，在实现航空、航运领域减排的同时，促进可持续燃料产业早期的快速发展。
- **在温室气体排放强度和核算方法方面**，一是研究是否需要区别生物燃料与合成燃料的WTW温室气体排放强度要求，并出台针对合成燃料的激励政策，例如给予合成燃料财政补贴、开发与之相关的国家核证自愿减排量（China Certified Emission Reduction, CCER）方法学、引入市场机制等，以弥合合成燃料与生物燃料的成本差；二是研究制定合成燃料WTW的核算方法，在共生产品分配方法等方面加强国际对话，达成统一。

- **在电力碳足迹因子方面**，一是研究建立中国国家与区域层面的月级或小时级电力碳足迹因子，以支持可再生能源并网制氢精细化的核算与认证要求，以及中国企业替代燃料出口的需要；二是加强国家与区域层面电力碳足迹因子的国际互认，并持续更新电力碳足迹因子。

另外，由于中国航空、航运可持续替代燃料的生产地与消费地相距较远，交通运输环节排放对航空、航运可持续替代燃料WTW温室气体排放强度的影响大，中国有必要考虑：

- 鼓励优先使用水路（特别是可持续燃料船舶）、铁路、管道与新能源重卡运输这些燃料。
- 允许企业或地区依据质量平衡方法对可持续替代燃料的投用及消费进行核算。
- 研究是否有必要建立航空、航运可持续替代燃料全国统一的认购与声明机制，将燃料的可持续属性与燃料本身分离，并进行市场交易。

最后，在航空、航运燃料转型之际，相关企业也应抓住发展机遇，深入了解不同区域市场标准差异，精准规避风险。特别是对燃料生产企业而言，建议：一是在投资时宜优先考虑可持续性表现好、温室气体排放强度低的原料及制备路径；二是通过研发与工艺流程优化，提升替代燃料的制取效率（如生物质气化），并尽可能增加可再生能源的使用比例。



附录

附录 1

本研究梳理的航空、航运可持续替代燃料相关政策

附录表 1 | 本研究中ICAO、IMO、欧盟、美国与中国航空和航运可持续替代燃料的定义与核算方法

国家、地区与国际组织	政策名称	涉及航空、航运领域可持续替代燃料类型
ICAO	国际航空的长期全球理想目标 (LTAG) Long term global aspirational goal for international aviation	现阶段主要指生物燃料类的SAF
	《CORSIA合格燃料的CORSIA可持续性标准第三版》 ICAO CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels(Third Edition)	
	《CORSIA实际生命周期排放值计算方法第五版》 CORSIA Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values(Fifth Edition)	
	《CORSIA合格燃料的生命周期排放默认值第六版》 CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels(Sixth Edition)	
IMO	《2023年船舶温室气体减排战略》 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships	ZNZs定义与类别待明确(目前只有温室气体强度阈值要求)
	《国际防止船舶造成污染公约》附则VI修正案的净零框架Amendments to MARPOL Annex VI-the IMO net-zero framework	
	《2024年船用燃料生命周期温室气体强度指南》 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels	
欧盟	《欧盟航空燃料法规》 RefuelEU Aviation (欧盟2023/2405号授权法规)	生物燃料、低碳氢、RFNBO、RCF、低碳合成燃料
	《欧盟海运燃料法规》 FuelEU Maritime (欧盟2023/1805号授权法规)	生物液体和气体燃料、RFNBO、RCF、低碳氢、低碳合成燃料
	《可再生能源指令III》 Renewable Energy Directive III (欧盟2023/2413号指令)	生物液体和气体燃料、RFNBO、RCF



附录表 1 | 本研究中ICAO、IMO、欧盟、美国与中国航空和航运可持续替代燃料的定义与核算方法 (续)

国家、地区与国际组织	政策名称	涉及航空、航运领域可持续替代燃料类型
欧盟	《RFNBO生产细则》Supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable fuels of non-biological origin (欧盟2023/1184号授权法规)	RFNBO
	《RFNBO和RCF减排量核算方法》Establishing a minimum threshold for greenhouse gas emissions savings of recycled carbon fuels and by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin and from recycled carbon fuels (欧盟2023/1185号授权法规)	RFNBO、RCF
	《气体指令》Common Rules for the Internal Markets for Renewable Gas, Natural Gas and Hydrogen (欧盟2024/1788号指令)	低碳氢、低碳气体
	《关于修订温室气体排放监测和报告的执行条例》Amending Implementing Regulation (EU) 2018/2066 as regards updating the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council (欧盟2024/2493号执行条例)	生物液体和气体燃料、RFNBO、RCF、低碳氢、低碳合成燃料
	《SAF大挑战》SAF Grand Challenge	未明确
美国	通胀削减法案《SAF减税政策》IRA Sustainable aviation fuel credit	生物燃料
	通胀削减法案《45Z清洁燃料生产减税政策》IRA Section 45Z Clean Fuel Production Credit	清洁燃料
	通胀削减法案《45V清洁氢能生产减税政策》IRA Section 45V Credit for Production of Clean Hydrogen	清洁氢
	《可再生燃料标准》(RFS) Renewable Fuel Standard	生物燃料
	美国加州《低碳燃料标准》(LCFS) Low Carbon Fuel Standard	生物燃料
中国	《民用航空飞行活动二氧化碳排放监测、报告和核查管理暂行办法》(民航规〔2018〕3号)	非石油基航空燃料
	《航空燃料可持续性评价规范》(征求意见稿)	非石油基航空燃料
	《航空燃料生命周期碳足迹评价技术规范 第1部分:通则》(征求意见稿)	所有种类的航空燃料
	《航空燃料生命周期碳足迹评价技术规范 第2部分:酯类和脂肪酸类加氢改质生产的合成烃组分》(征求意见稿)	酯类和脂肪酸类加氢改质生产的合成烃组分 (HEFA-SPK)

来源: 作者根据相关政策总结。

附录 2

本研究关于可持续替代燃料WTW温室气体排放核算的假设

附录表 2 | 本研究中航运生物天然气与生物甲醇WTW温室气体排放核算的相关假设

制备路径	原料	基准情景 (BAU)	相较BAU避免的排放	制取效率	原料收集、运输	燃料运输
制生物天然气/ 生物天然气制 甲醇	垃圾填埋气	不考虑改变原料现有处理方式避免的排放	×	1.03兆焦垃圾填埋气+0.05兆焦电力可生产1兆焦生物天然气; 1兆焦生物天然气+0.11兆焦电力可生产1兆焦甲醇	原料收集排放按照GREET模型默认值, 原料运输到燃料工厂距离小于5千米时忽略不计	按照GREET模型默认值, 生物天然气从生产端到使用端通过管道运输1100千米; 从甲醇生产端到使用端通过柴油重卡运输50千米
		垃圾填埋气燃烧	每生产1兆焦生物天然气可避免排放1克二氧化碳当量			
	粪便	不考虑改变原料现有处理方式避免的排放	×	生产1兆焦生物天然气消耗1.9千克粪便; 1兆焦生物天然气+0.11兆焦电力可生产1兆焦甲醇		
		传统粪便处理 (包含所有种类的粪便)	每使用1千克粪便可避免排放410克二氧化碳当量			
		传统猪粪处理	每使用1千克粪便避免排放39克二氧化碳当量			
	废水污泥	不考虑改变原料现有处理方式避免的排放	×	生产1兆焦生物天然气消耗0.1千克原料; 1兆焦生物天然气+0.11兆焦电力可生产1兆焦甲醇		
		传统废水污泥处理: 厌氧发酵后将沼气燃烧进行现场供热	每使用1千克污泥可避免排放388克二氧化碳当量			
		食物垃圾	不考虑改变原料现有处理方式避免的排放	×		
	焚烧		每使用1千克食物垃圾可避免排放47克二氧化碳当量			
	填埋	每使用1千克食物垃圾可避免排放704克二氧化碳当量				
生物质气化制甲醇	秸秆-气流床	×	×	生产1吨甲醇消耗3.1吨秸秆, 耗电1000千瓦时		
	秸秆-流化床/固定床	×	×	生产1吨甲醇消耗3.1吨秸秆, 耗电600千瓦时		

说明: 生物甲醇的运输按照本地生产本地使用的情况, 生物天然气由甲醇生产项目制取, 因此不考虑其运输排放。

来源: 生物质加氢气化制甲醇制取效率数据来自本研究的专家访谈, 其他制备路径的制取效率、相较BAU避免的排放以及运输环节数据参数来自GREET模型中的默认值。

附录表 3 | 中国2023年和2035年发电结构的数据来源

发电结构	2023年			2035年		
	占比	数据来源	分类型的电力碳足迹因子(千克二氧化碳当量每千瓦时) ^a	数据来源	占比	数据来源或说明
水电	13.6%	中国电力企业联合会《中国电力供需分析年度报告2024》	0.0143	生态环境部《关于发布2023年电力碳足迹因子数据的公告》	11%	中国宏观经济研究院能源研究所《中国能源转型展望2023》中的碳中和情景1(CNSI) ^b
火电	66.3%		0.9440		25%	
气电	0%		0.4792		2%	
核电	4.6%		0.0065		6%	
风电	9.4%		0.0336		32%	
光伏发电	6.2%		0.0545		22%	
生物质发电	0%		0.0457		2%	

说明: a.本研究假设各发电类型的2035年电力碳足迹因子与2023年水平相一致。

b.根据《中国能源转型展望2023》, CNSI情景设置为“在用的煤电机组逐步降低年运行小时数, 实施自然退役措施, 最长寿命煤电机组运行到2055年左右, 整个能源系统能够在2055年左右实现净零碳排放”。

来源: 作者根据中国电力企业联合会(2024)、中国宏观经济研究所能源研究所(2023)相关文献总结。

附录表 4 | 本研究中工业副产氢的WTW温室气体排放核算相关的数据假设

制备路径	分配方法及具体参数	数据来源
焦炉煤气副产氢	按能量分配(焦炉煤气中氢气的能量占比为40%)	根据团体标准《焦炉煤气制氢技术规范》(T/CSTE 0005—2020)中的焦炉煤气气体积组分及气体热值计算得到
	系统扩展法-反事实场景为100%氢气用于内部加热, 替代物选择煤炭	根据中国炼焦行业协会(2022)相关信息, 中国焦化行业主要的供能方式是煤、焦炉煤气回炉等, 如果将焦炉煤气用于制氢则需要补充更多煤炭, 所以本文选择替代物为煤炭(不同于GREET模型中默认的天燃气)
	系统扩展法-反事实场景为氢气100%排空, 不需要替代物, 考虑氢气的间接温室效应(氢气的GWP100值按11.6)	根据国际标准《氢技术》(ISO/TS 19870: 2023), 在氢气作为废气排放的情况下, 可以考虑氢气对全球变暖的影响
氯碱副产氢	按质量分配(在氯碱反应的产物中氢气的质量占比为1.3%)	GREET模型的默认值
	按经济价值分配(在氯碱反应的产物中氢气的经济价值占比为4.3%)	GREET模型的默认值
	系统扩展法-反事实场景为100%氢气用于内部加热, 替代物选择煤炭	根据刘剑波(2020)的研究, 中国氯碱工业中, 蒸发环节通常使用煤炭燃烧供能, 因此本文选择替代物为煤炭
	系统扩展法-反事实场景为氢气100%排空, 不需要替代物, 考虑氢气的间接温室效应	根据国际标准《氢技术》(ISO/TS 19870: 2023), 在氢气作为废气排放的情况下, 可以考虑氢气对全球变暖的影响

来源: 作者根据Wang等(2024)、中国技术经济学会(2020)、中国炼焦行业协会(2022)、ISO(2023)、刘剑波(2020)相关文献总结。

附录表 5 | 本研究中电解水制氢的制氢效率假设

情景	制氢效率
2023年网电制氢的情景	60%
2035年网电制氢的情景	80%
2023年可再生能源制氢的情景	60%
2023年核电制氢的情景	60%

来源：作者根据Shiva Kumar等（2022）相关文献假设。

附录表 6 | 本研究中氢气与甲醇在压缩、运输等环节的数据假设

参数	数值	来源
氢气压缩环节耗电量	1.6千瓦时每千克	闫喻婷（2021）假设的20兆帕氢气压缩过程耗电1.6千瓦时每千克
从氢气制取工厂运输到使用端（如甲醇工厂）	柴油重卡运输，运距200千米	中国电动汽车百人会（2020）假设的运输距离200千米
煤炭从开采端运输到氢气制取工厂	铁路、柴油重卡和水路运输的运距分别是640千米、179千米和1255千米，占比分别为80%、13%、7%	张贤等（2021）
天然气从开采端运输到氢气制取工厂	管道运输，运距1000千米	GREET模型默认值
从甲醇生产端到港口加注点	柴油重卡运输，运距50千米	同生物甲醇运输的参数假设，使用GREET模型默认值

来源：作者根据相关文献总结。

缩略语表

缩略语	英文全称	中文全称
AtJ	Alcohol to Jet	醇喷合成工艺
CORSIA	Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation	国际航空碳补偿和减排计划
CCS	Carbon Capture and Storage	碳捕获与封存
EEA	European Economic Area	欧洲经济区
EU ETS	European Union Emissions Trading System	欧盟碳排放交易体系
GFI	Greenhouse Gas Fuel Intensity	温室气体燃料强度
GREET	Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Technologies	交通温室气体、常规污染物排放以及能源消耗量模型
GWP	Global Warming Potential	全球增温潜势
HEFA	Hydrotreated Esters and Fatty Acids	酯类和脂肪酸类加氢
LCA	Lifecycle Assessment	生命周期评价
LCAF	Low Carbon Aviation Fuels	低碳航空燃料
LCFS	Low Carbon Fuel Standard	低碳燃料标准（美国加州）
ICAO	International Civil Aviation Organization	国际民用航空组织
IMO	International Maritime Organization	国际海事组织
IRA	Inflation Reduction Act	通胀削减法案（美国）
ISCC	International Sustainability & Carbon Certification	国际可持续发展和碳认证
ISO	International Organization for Standardization	国际标准化组织
MJ	Mega joule	兆焦
RCF	Recycled Carbon Fuels	回收碳燃料
RED	Renewable Energy Directive	可再生能源指令（欧盟）
RFNBO	Renewable Fuels of Non-Biological Origin	非生物来源的可再生燃料
RFS	Renewable Fuel Standard	可再生燃料标准（美国）
RSB	Roundtable on Sustainable Biomaterials	可持续生物材料圆桌会议
SAF	Sustainable Aviation Fuels	可持续航空燃料
WTG	Well to Gate	摇篮到大门
WTW	Well to Wake	燃料全生命周期
ZNZs	Zero or Near-Zero GHG Emission Technologies, Fuels and/or Energy	零或近零温室气体排放技术、燃料和/或能源

注释

1. 总体上是技术中立的，对某些燃料类别给予更高的奖励，例如《欧盟海运燃料法规》中对RFNBO设置更高的奖励系数。
2. RFNBO和低碳合成燃料是欧盟法规中提出的概念，尚未在ICAO CORSIA中使用。鉴于全球尚未形成可持续替代燃料统一、清晰的分类，本文使用欧盟的分类方式。
3. 尾迹指喷气式飞机释放的水汽在足够的湿度条件下凝结成的云团，是航空业主要的非二排放之一（IATA 日期不详）。
4. 需要注意的是，美国 and ICAO 对生物燃料的核算方法可能严重低估了间接土地利用变化排放（Malins 2019）。
5. LCA领域主流工具还包括GaBi、SimaPro、OpenLCA等。值得注意的是，本文采用的为交通领域LCA工具。
6. GREET模型的默认值主要来源于设备运营商实测数据、过程模拟模型以及相关文献等，体现的是美国电力与工业行业的排放水平。
7. HEFA为生产物质SAF的一种技术路径，其原料主要为餐厨废油和动物油脂。关于SAF生产技术路径的介绍可参阅Chen等（2023）的研究。
8. 船舶年度温室气体燃料强度（greenhouse gas fuel intensity, GFI）低于直接合规目标产生盈余单位，可用于平衡其他船舶的赤字或交易、存储；船舶年度GFI高于直接合规目标需要向IMO购买一级补救单位以达到合规要求，高于基本合规目标的部分需购买盈余单位或向IMO购买二级补救单位以达到合规要求。
9. 采用ZNZs的船舶是否可以获得交易盈余单位和IMO净零基金直接奖励的双重奖励，尚待IMO进一步讨论。
10. 目前IMO尚未给出LNG的WTW默认值，本文的合规分析按照《欧盟海运燃料法规》中的LNG默认值考虑。
11. 虽然美国对航运燃料的温室气体排放强度值要求高，但在原料来源与核算方法上要求较宽松——允许粮食或饲料作物生产生物燃料，导致其更容易合规。
12. 有效辐射强迫指外部气候驱动因子变化导致的地球系统在大气顶部净能量通量的变化。该指标量化了由于人为或自然因素引起的地球系统能量平衡的变化，并可能会影响全球气候。
13. 根据欧盟的分类，1类、2类动物油脂分别为高等和中等健康风险，不可食用，3类动物油脂为低风险，可以供人类和动物食用。
14. 质量平衡法要求生物天然气的生产与使用方必须有管道连接。
15. 中国对于耕地“非粮化”有严格的管理，例如在《国务院办公厅关于防止耕地“非粮化”稳定粮食生产的意见》中明确提出，“实施最严格的耕地保护制度，防止耕地‘非粮化’”（国务院办公厅 2020）。这些严格规定可能将有助于控制直接或间接土地利用变化，保障粮食安全。

参考文献

- 曹丽花, 刘合满和杨东升. 2016. 《农田土壤固碳潜力的影响因素及其调控 (综述)》. 江苏农业科学 44 (10): 16-20. doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.10.004.
- 国家发展改革委等. 2022. 《氢能产业发展中长期规划 (2021-2035年)》. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html.
- 黑龙江日报. 2020. 《“龙猪”养殖, 粪污如何变废为宝?》. 2020年. http://www.moa.gov.cn/xw/qg/202009/t20200917_6352260.htm.
- 经济日报. 2021. 《油气“全国一张网”完成整合》. 2021年. https://www.nea.gov.cn/2021-04/09/c_139869434.htm.
- 康利平, Robert Earley, 安锋和马郁峰. 2013. 《国际生物燃料可持续标准与政策背景报告》. <https://www.icet.org.cn/admin/upload/2016091458029109.pdf>.
- 刘剑波. 2020. 《我国氯碱工业节能技术的进展与发展方向》. 基层建设 2019年 (29). <http://www.chinaqing.com/yc/2020/2166001.html>.
- 路舒童和江漪. 2023. 《购电协议 (PPA) 与中国绿电交易: 企业需要了解的二三事》. 2023年2月. <https://rmi.org.cn/%E8%B4%AD%E7%94%B5%E5%8D%8F%E8%AE%AE%EF%BC%88ppa%E7%BC%89%E4%B8%8E%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E7%BB%BF%E7%94%B5%E4%BA%A4%E6%98%93%EF%BC%9A%E4%BC%81%E4%B8%9A%E9%9C%80%E8%A6%81%E4%BA%86%E8%A7%A3%E7%9A%84/>.
- 欧盟委员会交通运输总司. 2021. *Assessment of Impacts from Accelerating the Uptake of Sustainable Alternative Fuels in Maritime Transport: Final Report*. LU: Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2832/76878>.
- 生态环境部, 国家统计局和国家能源局. 2025. 《关于发布2023年电力碳足迹因子数据的公告》. 2025年1月21日. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk01/202501/t20250123_1101226.html.
- 生态环境部等. 2024. 《中华人民共和国气候变化第一次双年透明度报告》. <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/%E4%B8%AD%E5%8D%8E%E4%BA%BA%E6%B0%91%E5%85%B1%E5%92%8C%E5%9B%BD%E6%B0%94%E5%80%99%E5%8F%98%E5%8C%96%E7%AC%AC%E4%B8%80%E6%AC%A1%E5%8F%8C%E5%B9%B4%E9%80%8F%E6%98%8E%E5%B%A6%E6%8A%A5%E5%91%8A.pdf>.
- 闫喻婷. 2021. 《氢气储运方式的经济性对比研究》. 华中科技大学.
- 颜晓元. 2023. 《土壤碳中和实现与气候变化应对》. 环球杂志, 2023年. http://www.news.cn/globe/2023-01/28/c_1310693259.htm.
- 张贤, 许毛, 徐冬, 仲平, 彭雪婷和樊静丽. 2021. 《中国煤制氢CCUS技术改造的碳足迹评估》. 中国人口·资源与环境 31 (12): 1-11.
- 中国产业发展促进会生物质能产业分会. 2024. 《生物天然气的中国绿色“身份证”来了! 零碳能源证书核证标准正式发布》. 2024年. <https://beipa.org.cn/newsinfo/7427456.html>.
- 中国电动汽车百人会. 2020. 《中国氢能产业发展报告2020》.
- 中国电力企业联合会. 2024. 《中国电力供需分析年度报告2024》. 中国电力出版社.
- 中国宏观经济研究所能源研究所. 2023. 《中国能源转型展望2023》.
- 中国技术经济学会. 2020. 《T/CSTE 0005—2020〈焦炉煤气制氢技术规范〉》. <https://www.cste.org.cn/u/cms/www/202005/21091929hgz1.pdf>.
- 中国炼焦行业协会. 2022. 《加快节能降碳改造升级 推动焦化行业绿色低碳高质量发展》. 2022年. https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztlz/ghnhyjndgzsj/zjgd/202203/t20220323_1320107.html.
- 中国民用航空局. 2018. 《民用航空飞行活动二氧化碳排放监测、报告和核查管理暂行办法》. https://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/GFXWJ/202005/t20200509_202449.html?_refluxos=a10.
- 中国民用航空局. 2021. 《“十四五”民航绿色发展专项规划》. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/28/content_5670938.htm.
- 中国民用航空局. 2024a. 《GB/T〈航空燃料可持续性评价规范〉征求意见稿》. <https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetail?id=E579DB480B5569C2E05397BE0A0ACC22>.
- 中国民用航空局. 2024b. 《MH/T〈航空燃料生命周期碳足迹评价技术规范 第1部分: 通则〉(征求意见稿)》. http://www.caac.gov.cn/HDJL/YJZJ/202406/t20240627_224602.html.
- 中国能源报. 2024. 《首单生物天然气“气证合一”线上交易达成》, 2024年9月2日. <http://paper.people.com.cn/zgnyb/images/2024-09/02/10/zgnyb2024090210.pdf>.
- 中国氢能联盟. 2019. 《中国氢能及燃料电池产业白皮书 (2019版)》. <https://cms-qingneng.oss-cn-beijing.aliyuncs.com/qingnenggw/upload/qingnenggw/640aa33abab6d.pdf>.

- 中国氢能联盟. 2020. 《T/ CAB 0078—2020〈低碳氢、清洁氢与可再生氢的标准与评价〉》.
- 中国石化集团经济技术研究院. 2023. 《中国氢能产业展望报告》. 中国石化出版社.
- 中国新闻网. 2025. 《国际组织RE100宣布无条件认可中国绿证，国家能源局回应》. 2025年4月. <https://www.chinanews.com/cj/2025/04-28/10407331.shtml>.
- 周圆融, 张真和黎妍. 2022. 《从燃料氢全生命周期温室气体排放视角看中国燃料电池汽车示范城市群建设》. https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/10/China-hydrogen-report-A4-CN_final-4.pdf.
- ABS(American Bureau of Shipping). 2024. News Brief MEPC 82. <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/regulatory-news/2024/ABS-Regulatory-News-MEPC-82-Brief.pdf>.
- Bakker, P. 2024. *What Is Book and Claim? How Can It Help Increase Digital Traceability in the Shipping Sector*. 2024年. <https://www.goodshipping.com/news/what-is-book-and-claim>.
- Berry, S., T. Searchinger和A. Yang. 2024a. *Biofuels, Deforestation, and the GTAP Model*. <https://tobin.yale.edu/research/biofuels-deforestation-and-gtap-model-0>.
- Berry, S., T. Searchinger和A. Yang. 2024b. *Evaluating the Economic Basis for GTAP and Its Use for Modeling Biofuel Land Use*.
- Black, S., I. Parry, S. Singh和N. Vernon-Lin. 2024. *Destination Net Zero: The Urgent Need for a Global Carbon Tax on Aviation and Shipping*. <https://www.imf.org/en/Publications/staff-climate-notes/Issues/2024/10/01/Destination-Net-Zero-The-Urgent-Need-for-a-Global-Carbon-Tax-on-Aviation-and-Shipping-555090>.
- BSI. 2011. *BSI PAS 2050:2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services*. <https://knowledge.bsigroup.com/products/specification-for-the-assessment-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-goods-and-services?version=standard>.
- CARB. 2020. 《低碳燃料标准》(*Low Carbon Fuel Standard*). https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-07/2020_lcfs_fro_oal-approved_unofficial_06302020.pdf.
- CARB. 2024. 《低碳燃料标准拟议修正案》(*Proposed Amendments to the Low Carbon Fuel Standard Regulation*). https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2024/lcfs2024/lcfs_fro_atta-1.pdf.
- Carvalho, F., J. O'Malley, L. Osipova和N. Pavlenko. 2023. *Key Issues in LCA Methodology for Marine Fuels*. <https://theicct.org/publication/marine-lca-fuels-apr23/>.
- Cazzola, P., C. Murphy, L. Kang和等. 2024. *Comparative Assessment of the EU and US Policy Frameworks to Promote Low-Carbon Fuels in Aviation and Shipping*. <https://lowcarbonfuel.ucdavis.edu/publication/comparative-assessment-eu-and-us-policy-frameworks-promote-low-carbon-fuels-aviation>.
- Chen, Y., C. Xu, X. Yang, X. He, Z. Zhang, J. Yu, L. Quan和S. Yang. 2023. *Technology Route Options of China's Sustainable Aviation Fuel: Analysis Based on the TOPSIS Method*. *Energies* 16 (22): 7597. doi:10.3390/en16227597.
- Clean Air Task Force. 2024. *Climate Smart Agriculture practices require differentiation*. <https://www.catf.us/2024/08/45z-climate-smart-agriculture-practices-should-be-differentiated-based-on-the-measurability-of-their-impact-on-the-carbon-intensity-of-fuels/>.
- EASA. 2022. *European aviation environmental report 2022*. <https://www.easa.europa.eu/eco/eaer/>.
- EC. 2019. 《欧盟2019/807号授权法案》(*Commission Delegated Regulation (EU) 2019/807 of 13 March 2019 supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council*). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/807/oj.
- EC. 2023a. *Fourth Annual Report from the European Commission on CO₂ Emissions from Maritime Transport (period 2018-2021)*. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-03/swd_2023_54_en.pdf.
- EC. 2023b. 《RFNBO和RCF减排量核算方法》(*Establishing a minimum threshold for greenhouse gas emissions savings of recycled carbon fuels and by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from renewable liquid and gaseous transport fuels of non-biological origin and from recycled carbon fuels*). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R1185>.
- EC. 2023c. 《RFNBO生产细则》(*Supplementing Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council by establishing a Union methodology setting out detailed rules for the production of renewable fuels of non-biological origin*). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:02023R1184-20240610>.
- EC. 2023d. 欧盟委员会2023/2485号授权法案. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2023/2485/oj/eng.
- EC. 2023e. *ETS allowances for SAF*. https://climate.ec.europa.eu/document/download/9a82627a-8a5c-4419-93de-e5ed2d6248eb_en?filename=policy_ets_allowances_for_saf_en.pdf&prefLang=hu.

- EC. 2024a. 《欧盟2024/2493号实施条例》. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2024/2493/oj/eng.
- EC. 2024b. 《欧盟2024/3176号实施决议》. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202403176.
- EC. 2024c. 《欧盟2024/3180号实施决议》. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202403180.
- EC. 2024d. 《欧盟2024/3194号实施决议》. https://eur-lex.europa.eu/eli/dec_impl/2024/3194/oj/eng.
- EC. 2024e. *Draft of Supplementing Directive (EU) 2024/1788 of the European Parliament and of the Council by specifying a methodology for assessing greenhouse gas emissions savings from low carbon fuels*. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PL_COM%3AAres%282024%296848064.
- EC. 2024f. *Publication of 2022 emissions data from aviation*. https://climate.ec.europa.eu/news-your-voice/news/publication-2022-emissions-data-aviation-2024-03-08_en.
- EC. 2024g. *Q&A Implementation of Hydrogen Delegated Acts*. <https://circabc.europa.eu/ui/group/8f5f9424-a7ef-4dbf-b914-1af1d12ff5d2/library/ca8efd4d-cb44-4aec-914d-3d95f95ea293/details>.
- EC. 2024h. *Voluntary Schemes*. 2024年. https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/voluntary-schemes_en.
- EC. 2024i. 《欧盟委员会 2024/1405号授权指令》. https://eur-lex.europa.eu/eli/dir_del/2024/1405/oj/eng.
- EC. 2024j. 《关于修订温室气体排放监测和报告的实施条例》(*Amending Implementing Regulation (EU) 2018/2066 as regards updating the monitoring and reporting of greenhouse gas emissions pursuant to Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council*). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32024R2493>.
- EC. 2024k. *List of aircraft operators in-scope of ReFuelEU Aviation for the reporting period 2024*. https://transport.ec.europa.eu/document/download/8b972ae2-0236-4bbd-ad63-8368f3ccea9_en?filename=ReFuelEU_list_operators.pdf&prefLang=nl.
- EC. 2025. *The Clean Industrial Deal*. https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/clean-industrial-deal_en.
- EC Directorate-General for Energy. 2023. *Assessment of the potential of RFNBOs and RCFs over the period 2020 to 2050 in the EU transport sector*. https://energy.ec.europa.eu/publications/technical-assistance-assess-potential-renewable-liquid-and-gaseous-transport-fuels-non-biological_en.
- EPA. 2024. *Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks 1990–2022*. <https://www.epa.gov/ghgemissions/inventory-us-greenhouse-gas-emissions-and-sinks>.
- EU P&C. 2018. 《可再生能源指令II》(*Renewable Energy Directive II*). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_2018.328.01.0082.01.ENG&toc=OJ:L:2018:328:TOC.
- EU P&C. 2023a. 《欧盟2023/958号指令》(*amending Directive 2003/87/EC as regards aviation's contribution to the Union's economy-wide emission reduction target and the appropriate implementation of a global market-based measure*). <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/958/oj>.
- EU P&C. 2023b. 《欧盟2023/959号指令》(*amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union and Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading system*). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_2023.130.01.0134.01.ENG&toc=OJ%3AL%3A2023%3A130%3ATOC.
- EU P&C. 2023c. 《欧盟海运燃料法规》(*FuelEU Maritime*). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1805>.
- EU P&C. 2023d. 《可再生能源指令III》(*Renewable Energy Directive III*). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023L2413&qid=1699364355105>.
- EU P&C. 2023e. 《欧盟航空燃料法规》(*RefuelEU Aviation*). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32023R2405>.
- EU P&C. 2024. 《气体指令》(*Common Rules for the Internal Markets for Renewable Gas, Natural Gas and Hydrogen*). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401788.
- Gadhok, I., G. Mermigkas, J. Hepburn, C. Bellmann和E. Krivonos. 2020. *Trade and Sustainable Development Goal 2 – Policy Options and Their Trade-Offs*. FAO. doi:10.4060/cb0580en.
- Hinicio. 2024. *RFNBO Compliance Analysis of Products Produced from Renewable Hydrogen and Different Sources of CO₂ in Uruguay and Chile with the EU's Renewable Energy Directive*. <https://hinicio.com/wp-content/uploads/2024/09/2405-RFNBO-Compliance-Analysis-of-Products-Produced-from-H2.pdf>.
- Hydrogen Europe. 2024. *Clean hydrogen production pathways*. https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/2024_H2E_CleanH2ProductionPathwaysReport.pdf.

IATA. 2024. *Aviation Contrails and Their Climate Effect*. <https://www.iata.org/contentassets/726b8a2559ad48fe9decb6f2534549a6/aviation-contrails-climate-impact-report.pdf>.

IATA. 日期不详. *Non-CO₂ Aviation Emissions*. <https://www.iata.org/contentassets/5499da2b3b7d46b3b13be4dad54a9689/policy-position-non-co2-aviation-emissions.pdf>.

ICAO. 2022a. *Report on the feasibility of a long-term aspirational goal(LTAG) for international civil aviation CO₂ emission reductions Appendix M5 Fuels Sub group report*. https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Documents/ICAO_LTAG_Report_AppendixM5.pdf.

ICAO. 2022b. 《国际航空的长期全球理想目标 (LTAG) 》 *Long term global aspirational goal for international aviation*. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/LTAG.aspx>.

ICAO. 2022c. 《CORSIA合格燃料的CORSIA可持续性标准第三版》 (*CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels,Third Edition*) . https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2005%20-%20Sustainability%20Criteria%20-%20November%202022.pdf.

ICAO. 2023. *Annex 16 — Environmental Protection - Volume IV. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation(CORSIA)*. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/SARPs-Annex-16-Volume-IV.aspx>.

ICAO. 2024a. 《CORSIA 可持续性认证计划资格框架和要求第三版》 (*CORSIA Eligibility Framework and Requirements for Sustainability Certification Schemes*) . https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2003%20-%20Eligibility%20Framework%20and%20Requirements%20for%20SCSs%20-%20March%202024.pdf.

ICAO. 2024b. 《CORSIA 批准的可持续性认证计划第三版》 (*CORSIA Approved Sustainability Certification Schemes*) . https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2004%20-%20Approved%20SCSs%20-%20October%202024.pdf.

ICAO. 2024c. 《CORSIA合格燃料的生命周期排放默认值第六版》 (*CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels,Sixth Edition*) . https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20October%202024.pdf.

ICAO. 2024d. 《CORSIA实际生命周期排放值计算方法第五版》 (*CORSIA Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values,Fifth Edition*) . https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO%20document%2007%20-%20Methodology%20for%20Actual%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20October%202024.pdf.

ICAO. 日期不详. *Conversion processes*. <https://www.icao.int/environmental-protection/GFAAF/Pages/Conversion-processes.aspx>.

ICAO. 日期不详. *Presentation of 2022 Air Transport Statistical Results*. <https://www.icao.int/sustainability/WorldofAirTransport/Pages/presentation-of-2022-air-transport-statistical-results.aspx>.

IEA. 2021. *An energy sector roadmap to carbon neutrality in China*. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china>.

IEA. 2022. *Opportunities for Hydrogen Production with CCUS in China*. OECD. doi:10.1787/78fc9e85-en.

IEA. 2023a. *CO₂ emissions from international shipping in the Net Zero Scenario, 2000-2030*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-from-international-shipping-in-the-net-zero-scenario-2000-2030-3>.

IEA. 2023b. *CO₂ emissions in aviation in the Net Zero Scenario, 2000-2030*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-in-aviation-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>.

IEA. 2023c. *Towards Hydrogen Definitions Based on Their Emissions Intensity*. OECD. doi:10.1787/44618fd1-en.

IEA. 2024a. *Global Hydrogen Review 2024 Table: Overview of existing and planned certification systems and regulatory frameworks*. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024/table-overview-of-existing-and-planned-certification-systems-and-regulatory-frameworks>.

IEA. 2024b. *Carbon Accounting for Sustainable Biofuels*. <https://www.iea.org/reports/carbon-accounting-for-sustainable-biofuels>.

IEA. 2024c. *Towards Common Criteria for Sustainable Fuels*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/2dde36bf-2a61-455d-a2a9-8605329fc963/TowardsCommonCriteriaforSustainableFuels.pdf>.

IFPEN. 2023. *Economic Outlook-Biofuels Dashboard 2022*. <https://www.ifpenouvelles.com/article/biofuels-dashboard-2022>.

- IMO. 2021. *Fourth IMO GHG Study 2020*. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>.
- IMO. 2023. 《2023年船舶温室气体减排战略》(2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships). <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>.
- IMO. 2024. 《2024年船用燃料生命周期温室气体强度指南》(2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels). <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2081/Annex%2010.pdf>.
- IMO. 2025. *Marine Environment Protection Committee, 83rd session (MEPC 83), 7-11 April 2025*. 2025年4月11日. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC-83-Summary-Temporary.aspx>.
- ISCC. 2022. *ISCC EU 202-2 Agricultural Biomass: ISCC Principles 2-6*.
- ISCC. 2023a. *ISCC CORSIA 201 System Basics*. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2023/12/ISCC_CORSIA_201_System_Basics_2.0.pdf.
- ISCC. 2023b. *ISCC CORSIA 202 Sustainability Requirements*. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2023/12/ISCC_CORSIA_202_Sustainability-Requirements_2.0.pdf.
- ISCC. 2023c. *ISCC EU 202-4 Forest Biomass – ISCC Principles 2 – 6*. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2023/03/ISCC_EU_202-4_Forest-Biomass_-ISCC-Principle-2-6_Final.pdf.
- ISCC. 2024a. *ISCC EU 202-1 Agricultural Biomass: ISCC Principle 1*. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2024/01/ISCC_EU_202-1_Agricultural-Biomass_ISCC-Principle-1_v4.1_January2024.pdf.
- ISCC. 2024b. *ISCC EU 202-3 Forest Biomass: ISCC Principle 1*. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2024/07/ISCC_EU_202-3_Forest-Biomass_-ISCC-Principle-1_v1.0_Dec2024.pdf.
- ISCC. 2024c. *ISCC EU 202-5 Waste and Residues*. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2024/01/ISCC_EU_202-5_Waste_and_Residues_v4.1_January2024.pdf.
- ISCC. 2024d. *ISCC EU 205 Greenhouse Gas Emissions*. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2024/01/ISCC_EU_205_Greenhouse-Gas-Emissions_v4.1_January2024.pdf.
- ISCC. 2025. *ISCC EU 202-6 Renewable Fuels of Non-Biological Origin (RFNBOs) and Recycled Carbon Fuels (RCFs)*. https://www.iscc-system.org/wp-content/uploads/2024/07/ISCC_EU_202-6_RFNBOs_and_RCF_v1.4.pdf.
- ISO. 2006. *ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*. <https://www.iso.org/standard/37456.html>.
- ISO. 2018. *ISO 14067:2018 Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification*. <https://www.iso.org/standard/71206.html>.
- ISO. 2020. *ISO 14044:2006/Amd 2:2020 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines Amendment 2*. <https://www.iso.org/standard/76122.html>.
- ISO. 2023. *ISO/TS 19870:2023 Hydrogen technologies – Methodology for determining the greenhouse gas emissions associated with the production, conditioning and transport of hydrogen to consumption gate*. <https://www.iso.org/standard/65628.html>.
- Lee, D.S., D.W. Fahey, A. Skowron, M.R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S.J. Doherty, 等. 2021. *The Contribution of Global Aviation to Anthropogenic Climate Forcing for 2000 to 2018*. *Atmospheric Environment* 244 (一月): 117834. doi:10.1016/j.atmosenv.2020.117834.
- Lessmann, M., G.H. Ros, M.D. Young和W. De Vries. 2022. *Global Variation in Soil Carbon Sequestration Potential through Improved Cropland Management*. *Global Change Biology* 28 (3): 1162–77. doi:10.1111/gcb.15954.
- Lloyd. 2025. *IMO Marine Environment Protection Committee (MEPC 83)*. <https://www.lr.org/en/knowledge/regulatory-updates/imo-meetings-and-future-legislation/mepc-83-summary-report/>.
- Malins, C. 2019. *Understanding the Indirect Land Use Change Analysis for CORSIA*. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2019_12_Cerulogy_ILUC-in-CORSIA.pdf.
- MMMCZCS. 2022. *Maritime Decarbonization Strategy 2022*. <https://www.zerocarbonshipping.com/publications/maritime-decarbonization-strategy/>.
- MMMCZCS. 2024. *Well-to-Wake Greenhouse Gas Emissions from Biogas-Based Bio-methane and Bio-methanol*. https://cms.zerocarbonshipping.com/media/uploads/documents/Biogas-as-a-Source-of-Biofuels-for-Shipping_4_Well-to-Wake-Greenhouse-Gas-Emissions-from-Biogas-Based-Bio-methane-and-Bio-methanol.pdf.

- Moss, M., A. Ure, N. Vasileiadis和等. 2024. *Review of existing practices on marine fuel sustainability aspects/certification and third-party verification issues*. <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/FFT%20Project/Second%20study%20-%20sustainability%20and%20verification.pdf>.
- Pavlenko, N., 和S. Searle. 2020. *A Comparison of Methodologies for Estimating Displacement Emissions from Waste, Residue, and by-Product Biofuel Feedstocks*. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Biofuels-displacement-emissions-oct2020.pdf>.
- Pavlenko, N., 和S. Searle. 2021. *Assessing the Sustainability Implications of Alternative Aviation Fuels*. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Alt-aviation-fuel-sustainability-mar2021.pdf>.
- Phillips, J., C. Sandford, S. Kebbie和C. Malins. 2024. *Fuelling nature How e-fuels can mitigate biodiversity risk in EU aviation and maritime policy*. <https://www.sashacoalition.org/biodiversity-risks-eu-aviation-maritime-policy>.
- Prussi, M., U. Lee, M. Wang, R. Malina, H. Valin, F. Taheripour, C. Velarde, M.D. Staples, L. Lonza和J.I. Hileman. 2021. *CORSIA: The First Internationally Adopted Approach to Calculate Life-Cycle GHG Emissions for Aviation Fuels*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 150 (十月): 111398. doi:10.1016/j.rser.2021.111398.
- REDcert. 2023. *Scheme principles for mass balance*. https://www.redcert.org/images/SP_EU_Massbalance_Vers07.pdf.
- Rönkkö, T., S. Saarikoski, N. Kuitinen, P. Karjalainen, H. Keskinen, A. Järvinen, F. Mylläri, P. Aakko-Saksa和H. Timonen. 2023. *Review of Black Carbon Emission Factors from Different Anthropogenic Sources*. *Environmental Research Letters* 18 (3): 033004. doi:10.1088/1748-9326/acbb1b.
- RSB. 2023a. *RSB-STD-01-010 RSB Standard for advanced fuels*. <https://rsb.org/wp-content/uploads/2024/06/RSB-STD-01-010-RSB-Standard-for-advanced-fuels.pdf>.
- RSB. 2023b. *RSB-STD-11-001-01-010 RSB EU RED Standard for Advanced Fuels*. https://rsb.org/wp-content/uploads/2024/06/RSB-STD-11-001-01-010-v.2.2_RSB-EU-RED-Standard-Adv-Fuels.pdf.
- RSB. 2023c. *RSB-STD-12-001 RSB standard for ICAO CORSIA*. https://rsb.org/wp-content/uploads/2024/06/RSB-STD-12-001_RSB-ICAO-CORSIA-version-1.3.pdf.
- RSB. 2024a. *Decarbonising the Maritime Sector: A White Paper of the RSB Sustainable Marine Fuel Platform*. <https://rsb.org/wp-content/uploads/2024/10/24-9-30-sustainable-marine-fuel-white-paper.pdf>.
- RSB. 2024b. *RSB-STD-11-001 RSB Standard on EU Market Access*. https://rsb.org/wp-content/uploads/2024/06/RSB-STD-11-001-v.5.1_Standard-for-EU-market-access-1.pdf.
- Sand, M., R.B. Skeie, M. Sandstad, S. Krishnan, G. Myhre, H. Bryant, R. Derwent, 等. 2023. *A Multi-Model Assessment of the Global Warming Potential of Hydrogen*. *Communications Earth & Environment* 4 (1): 203. doi:10.1038/s43247-023-00857-8.
- Sandford, C., 和C. Malins. 2025. *Full steam ahead?*. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/Cerology_Full-steam-ahead_Feb2025-1.pdf.
- Scholwin, F., F. Brandes, A. Clinkscales, A. Bey, C.C. Chuaca, 张大勇和王乐乐. 2022. 《欧洲和德国的生物天然气证书交易体系——对中国的经验启示》. https://energypartnership.cn/fileadmin/china/media_elements/publications/2022/BiomethaneTrading_IBKE_CN_Final.pdf.
- Searchinger, Tim, 和R. Heimlich. 2015. *Avoiding Bioenergy Competition for Food Crops and Land*. <https://www.wri.org/research/avoiding-bioenergy-competition-food-crops-and-land>.
- Searchinger, Tim, L. Peng, J. Zions和R. Waite. 2023. *The Global Land Squeeze: Managing the Growing Competition for Land*. *World Resources Institute*, 七月. doi:10.46830/wriprt.20.00042.
- Searchinger, Tim, R. Waite, C. Hanson, J. Ranganathan和P. Dumas. 2018. *Creating sustainable food future*. <https://research.wri.org/wrr-food>.
- Searchinger, Timothy, S. Wiersenius, T. Beringer和P. Dumas. 2018a. *Assessing the Efficiency of Changes in Land Use for Mitigating Climate Change*. *Nature* 564 (7735): 249–53. doi:10.1038/s41586-018-0757-z.
- Searchinger, Timothy, S. Wiersenius, T. Beringer和P. Dumas. 2018b. *Assessing the Efficiency of Changes in Land Use for Mitigating Climate Change*. *Nature* 564 (7735): 249–53. doi:10.1038/s41586-018-0757-z.
- Shiva Kumar, S., 和H. Lim. 2022. *An Overview of Water Electrolysis Technologies for Green Hydrogen Production*. *Energy Reports* 8 (十一月): 13793–813. doi:10.1016/j.egy.2022.10.127.

- SkyNRG. 日期不详. *Tackling the Hidden Emissions of Waste Oil Feedstocks*. 日期不详年. <https://skynrg.com/tackling-the-hidden-emissions-of-waste-oil-feedstocks/>.
- Smart Freight Centre. 2022. *Sustainability criteria for biofuels-A review of sustainability frameworks and the role of certification schemes*. https://smart-freight-centre-media.s3.amazonaws.com/documents/Sustainability_criteria_for_biofuels_-_rev_Sep_22.pdf#page=26.13.
- T&E. 2020. *RED II and advanced biofuels Recommendations about Annex IX of the Renewable Energy Directive and its implementation at national level.pdf*. https://te-cdn.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/files/2020_05_REDII_and_advanced_biofuels_briefing.pdf.
- T&E. 2022. *ReFuelEU Aviation T&E's recommendations on the biofuel definition*. <https://www.transportenvironment.org/uploads/files/ReFuelEU-TE-Plenary-recommendations.docx-2.pdf>.
- T&E. 2025. *Shipping: Fuelling deforestation*. <https://www.transportenvironment.org/uploads/files/IMO-Biofuels-TE-briefing-Feb-2025.pdf>.
- UNCTAD. 2023. *Review of Maritime Transport 2023*. Review of Maritime Transport / United Nations Conference on Trade and Development, Geneva 2023. Geneva: United Nations.
- UNCTAD Data Hub. 2022. *Merchant fleet by country of beneficial ownership, annual*. <https://unctadstat.unctad.org/datacentre/dataviewer/US.FleetBeneficialOwners>.
- U.S. Congress. 2022a. 《45V清洁氢能生产减税政策》 (*IRA Section 45V Credit for production of clean hydrogen*) . INTERNAL REVENUE CODE. <https://uscode.house.gov/view.xhtml?req=granuleid:USC-prelim-title26-section45V&num=0&edition=prelim>.
- U.S. Congress. 2022b. 《45Z 清洁燃料生产减税政策》 (*IRA Section 45Z Clean Fuel Production Credit*) . INTERNAL REVENUE CODE. <https://uscode.house.gov/view.xhtml?req=granuleid:USC-prelim-title26-section45Z&num=0&edition=prelim>.
- U.S. Congress. 2022c. 《SAF减税政策》 (*IRA Section 40B Sustainable aviation fuel credit*) . INTERNAL REVENUE CODE. <https://uscode.house.gov/view.xhtml?req=granuleid:USC-prelim-title26-section40B&num=0&edition=prelim>.
- U.S. DOE. 2025a. 《使用 45VH2-GREET确定制氢路径WTG 温室气体排放的指南 (2025 年1月版) 》. https://www.energy.gov/sites/default/files/2025-01/45vh2-greet-manual_january-2025.pdf.
- U.S. DOE. 2025b. 《使用 45ZCF-GREET确定清洁交通燃料生产路径全生命周期排放的指南》. <https://www.energy.gov/eere/greet>.
- U.S. EPA. 2023. 《可再生燃料标准：2023-2025年标准》 (*Renewable Fuel Standard Program: Standards for 2023-2025 and Other Changes*) . <https://www.federalregister.gov/documents/2023/07/12/2023-13462/renewable-fuel-standard-rfs-program-standards-for-2023-2025-and-other-changes>.
- U.S. IRS&Treasury. 2025a. 《45V清洁氢能生产减税政策最终规则》 (*Credit for Production of Clean Hydrogen and Energy Credit Final regulations*) . <https://www.federalregister.gov/documents/2025/01/10/2024-31513/credit-for-production-of-clean-hydrogen-and-energy-credit>.
- U.S. IRS&Treasury. 2025b. 《45Z清洁燃料生产减税政策征求意见稿 通知2025-10》 (*IRA Section 45Z Clean Fuel Production Credit*) . <https://www.irs.gov/pub/irs-drop/n-25-10.pdf>.
- U.S. Treasury Department和U.S. IRS. 2024. 《SAF减税政策通知2024-37》. <https://www.irs.gov/newsroom/treasury-irs-issue-additional-guidance-and-safe-harbors-for-taxpayers-to-comply-with-the-requirements-of-the-sustainable-aviation-fuel-credit>.
- Wang, C., Y. Li, J. Wan和Y. Hu. 2024. *Analysis of CO₂ Emissions Reduction via By-Product Hydrogen*. International Journal of Hydrogen Energy 67 (五月): 942-48. doi:10.1016/j.ijhydene.2024.02.138.
- Wang, M., H. Cai, Z. Lu, A. Elgowainy, M.R. Alam, P. Benavides, L. Benvenuti, 等. 2024. *Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Technologies Model[®] (2024 .Net)*. Argonne National Laboratory (ANL), Argonne, IL (United States). doi:10.11578/GREET-NET-2024/DC.20241203.2.
- Weng, Y., S. Chang, W. Cai和C. Wang. 2019. *Exploring the Impacts of Biofuel Expansion on Land Use Change and Food Security Based on a Land Explicit CGE Model: A Case Study of China*. Applied Energy 236 (二月): 514-25. doi:10.1016/j.apenergy.2018.12.024.
- Wood Mackenzie. 2024. *IMO 2050 Outlook for global marine fuels*. <https://www.woodmac.com/reports/refining-and-oil-products-imo-2050-outlook-for-global-marine-fuels-150285491/>.
- WRI和WBCSD. 2011. *Greenhouse Gas Protocol-Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. <https://ghgprotocol.org/product-standard>.

WTO. 2025. *European Union-Certain measures concerning palm oil and oil palm crop-based biofuels*. https://www.wto.org/english/tratop_e/dispu_e/593r_a_e.pdf.

Zaman, P., F. Majid, D. Brotherton和等. 2024. *CORSIA compliance – the unequal choices that airlines face in the first phase*. 2024年. <https://www.hfw.com/insights/corsia-compliance-the-unequal-choices-that-airlines-face-in-the-first-phase/>.

关于世界资源研究所

世界资源研究所（WRI）是一家独立的国际研究机构，致力于增进人类福祉，守护自然环境，应对气候变化。

我们的挑战

世界正面临多重危机。日益加剧的不平等影响着社会；不可持续的生产与消费模式侵蚀着森林和清洁水源，人类的生命根基受到威胁；从极端高温到毁灭性洪灾，气候变化的冲击愈演愈烈。危机环环相扣，破解之道亦需系统相承。科学的气候行动与自然保护，能从根本上为全人类创造普惠价值。

我们的愿景

我们致力于构建一个可持续的未来：生态系统繁荣，气候系统稳定，人人都可以享受洁净空气、宜居城市、健康土地、优质就业、营养膳食，以及可负担的能源。

我们的工作方法

量化

我们的工作基于及时而独立的研究。WRI 的专家团队科学分析数据，精准定位问题，评估解决方案，衡量实际结果。我们的研究均经过严格的同行评审，以确保其公信力与可行性。

变革

我们将研究成果转化为在地实践。我们深入地方，携手社区、企业和政府机构，试点具有推广潜力的创新性解决方案，扫清实施障碍，监测项目进展，沉淀经验教训。

推广

试点成功后，我们将成功经验推广至国家、区域乃至全球。通过与地方社区、国家政府等多元主体协作，因地制宜地调整方案，调动资源。我们将实践经验通过合作伙伴、出版物及工具平台开放共享，为各方提供借鉴。

图片说明

Cover, Shawn/Unsplash; Pg. ii Austin Rucker/Unsplash; Pg. 2, Chris Pagan/Unsplash; Pg. 4, Daniel Shapiro/Unsplash; Pg. 7, Axel/Unsplash; Pg. 11, Hennie Stander/Unsplash; Pg. 12, Jose Lebron/Unsplash; Pg. 14, Veronica Dudarev/Unsplash; Pg. 16, VMathias Reding/Unsplash; Pg. 22, Taiki Ishikawa/Unsplash; Pg. 24 Gautam Ramuvel/Unsplash; Pg. 32, Bernd Dittrich/Unsplash; Pg. 36, COMAC; Pg. 40, Vladimir Oprisko/Unsplash; Pg. 43, Elias/Unsplash; Pg. 44, Jimmy Gu/Unsplash; Pg. 51, Daniel Shapiro/Unsplash; Pg. 52, Vladimir Oprisko/Unsplash; Pg. 54, ATR/Chunlaud Melody; Pg. 55, finnair.com; Pg. 62, Venti Views/Unsplash; Pg. 73, Lukas Souza/Unsplash; Pg. 74, Oskar Kadaksoo/Unsplash; Pg. 87, Julien Goettelmann/Unsplash; Pg. 88, Marco de Winter/Unsplash; Pg. 90, simpleflying.com; Pg. 90, David Monniaux/Wikimedia Commons; Pg. 91, Neste; Pg. 93, Jackson Jost/Unsplash.

世界资源研究所（WRI）出版物，皆为针对公众关注问题而开展的适时性学术性研究。世界资源研究所承担筛选研究课题的责任，并负责保证作者及相关人员的研究自由，同时积极征求和回应咨询团队及评审专家的指导意见。若无特别声明，出版物中陈述观点的解释权及研究成果均由其作者专属所有。

地图仅供说明之用，并不代表 WRI 对任何国家或地区的领土的法律地位、边界或边界划分发表任何意见。



世界资源研究所
WORLD RESOURCES INSTITUTE

世界资源研究所（美国）北京代表处
北京市东城区东中街 9 号
东环广场写字楼 A 座 7 层 K-M 室
WRI.org.cn

