

中美航空业脱碳的重点领域



中美航空业脱碳的重点领域

郑欣怡，国际清洁交通委员会*

Dan Rutherford（丹·鲁瑟福），国际清洁交通委员会*

* 机构名称仅用于注明作者所在单位。本文仅代表作者个人观点，并不代表其所在机构观点。

背景与挑战

目前，航空业占全球人为二氧化碳排放总量的2.5%。但随着航空需求快速增长，航空业对气候变化的影响也日益显著。过去10年，飞机产生的二氧化碳排放量增长了44%，按照最近的速度到2050年可能再增加两倍（国际民航组织，2019）。预计在未来30年，航空业的累积二氧化碳排放量将达到约500亿吨（国际民航组织，2016）。从2020年起，为了以67%的概率实现将温度升高限制在1.5摄氏度的目标，全球碳预算为4,000亿吨二氧化碳，其中航空业将占12.5%（政府间气候变化专门委员会，2021）。除了二氧化碳以外，氮氧化物、黑碳和水蒸汽等短期气候污染物的影响，可能会使航空业的气候影响扩大两倍（欧盟航空安全局，2020）。

中美两国是全球规模最大的两个航空市场。从两国发出的航班占全球航空客运业务的35%，占2019年全球航空客运二氧化碳排放量的36%（Graver等，2020）。具体来说，从中国发出的航班消耗了3,300万吨航空燃料，排放1.03亿吨二氧化碳；从美国发出的航班消耗了5,700万吨航空燃料，排放1.79亿吨二氧化碳。

表1：2019年从美国和中国发出的客运航班二氧化碳排放量

始发地	客运航班二氧化碳排放量 [百万吨]	总二氧化碳排放量占比	客运周转量 (RPK) [10亿]	总客运周转量占比	二氧化碳排放强度[克二氧化碳/客运周转量]
美国	179	23	1,890	22	95
中国	103	13	1,167	13	88

（Graver等，2020）

Aviation fuel efficiency (volume of fuel per revenue tonne-kilometer) is currently projected to目前最乐观的预测是，从2015年到2050年，航空燃料效率（每客运周转量的耗油量）预计每年将提升1.53%（国际民航组织，2022a）。另一方面，在新冠疫情之前，航空客运需求以每年约

4.2%的速度增长，预计在复苏之后航空客运需求每年将增长3.6%（国际民航组织，2022a）。这凸显出开发低碳甚至零排放飞机和燃料的必要性。为了在不增加全球碳预算占比的情况下，实现与《巴黎协定》一致的全球温升幅度远低于2摄氏度的目标，航空业从2021年到2050年需要将累积排放量减少超过一半，降至不超过230亿吨（Graver等，2022）。

2010年至2016年期间，联合国国际民用航空组织（ICAO）为国际航空业提出了两个理想目标：到2050年燃料效率每年提升2%，以及从2020年起实现碳中和性增长（国际民航组织，2019）。在认识到短期内减少碳排放的挑战性之后，国际民航组织执行了一个名为国际航空碳抵消与减排计划（CORSIA）的市场化机制。参与该计划的航空公司有义务购买排放补偿，以抵消其超出2020年基准水平的排放量增长。美国从2021年开始试点，允许国内航空公司自愿参与该计划，而中国将从2027年起强制要求航空公司参与该计划。在该计划中，航空公司可以使用符合条件的低碳燃料减少抵消要求。国际民航组织目前正在基于燃料路径的生命周期排放量，制定可持续航空燃料（SAF）的国际可持续性框架。

2016年，国际民航组织发布了全球首个新飞机二氧化碳标准。不符合与其最大起飞质量（MTOM）相匹配的排放限值的机型，将不得对外出口。各国采用的国内标准，严格程度至少必须与国际民航组织的标准相当。该标准将在2028年生效，适用于所有新交付的飞机。然而，该标准的严格程度是根据2016年之前的技术决定的，2016年交付的普通新飞机已经达到该标准（Zheng & Rutherford，2020）。现行标准促进减排的效果有限。

在最近召开的第26届联合国气候变化大会上，二十八个国家组成“国际航空气候雄心联盟”，并承诺采取措施，按照与1.5摄氏度减排路径一致的速度减少航空业的碳排放（英国第26届联合国气候变化大会，2021）。该承诺展现了航空业对国际民航组织长期气候目标的支持，对有效执行国际航空碳抵消与减排计划的承诺，以及优先投资可持续航空燃料（SAF）和零排放飞机的计划。

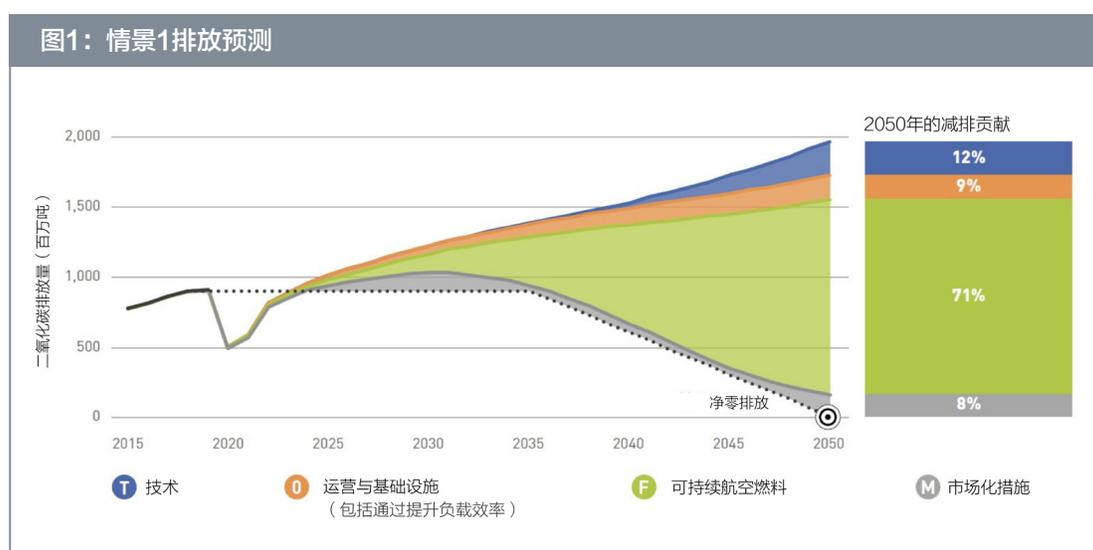
国际民航组织的各成员国将在今年9月召开的第41届国际民航组织大会上，提出净零碳排放长期理想目标（LTAG）（国际民航组织，2022b）。国际民航组织已经研究了设定净零碳排放长期理想目标的可行性，并发表了一份报告，证明大幅减少温室气体排放是可行的（国际民航组织，2022c）。这个目标的力度将取决于各成员国在大会上的谈判结果。净零碳排放长期理想目标将有助于推动航空业减排，因为只靠碳中和增长目标和国际航空碳抵消与减排计划是无法实现大幅减排的。

低碳技术规模化的进展缓慢，因此需要有政策决心。可持续航空燃料作为化石航空燃料的即用型替代品，其成本是化石燃料的2至5倍，而且在2020年，可持续航空燃料仅占全球航空燃料供应的约0.05%。目前，只有个别国家和地区出台加快采用可持续航空燃料的政策。2021年，欧盟在“减碳55”一揽子气候政策中提出了“可持续航空燃料”计划（ReFuelEU），要求各成员国机场增加可持续航空燃料的份额。这项燃料掺混规定提出，到2030年可持续航空燃料占总燃料供应的5%，计划到2050年提高到63%（欧盟委员会，2021）。英国也在其航空业零排放征求意见稿中提出了类似的燃料掺混供给目标，计划到2030年可持续航空燃料占10%，到2050年提高到75%（英国，2022）。美国加利福尼亚州的低碳燃料标准（LCFS）也支持可持续航空燃料供应商选择性地参与，获取减排积分（加州空气资源委员会，2022）。因此，航空业脱碳主要面临三个方面的挑战。第一，通过国际民航局制定国际政策需要成员国推动改革。第二，低碳技术（尤其是可持续航空燃料）部署目前缺少政府支持以及大规模公共或私人投资。第三，需求增长迅速且不平衡，引发了对执行减排措施的公平性的担忧。

减排潜力

许多机构分析了航空业到本世纪中叶的脱碳潜力，并公布了全球航空业减排路线图。例如，航空运输行动组织（ATAG，2021）发布的《Waypoint 2050》报告，国际民航组织（2022b）的净零碳排放长期理想目标可行性报告，国际清洁交通委员会（ICCT）发布的《Vision 2050》报告（Graver等，2022）等。这些报告分别代表了行业利益相关者、国际监管机构和非政府组织的观点。这三份路线图展示了航空业通过开发先进机型和清洁燃料，根据1.75摄氏度减排路径减少二氧化碳排放的潜力。如果想根据1.5摄氏度的目标减排，则需要跨行业联合采取行动，例如碳捕集与封存技术。国际清洁交通委员会的报告中还强调，为了与《巴黎协定》保持一致，航空业的二氧化碳排放量需要至少在2030年、最快在2025年达峰。

所有路线图均指出清洁燃料是最重要的减排工具，其次是飞机技术、运营效率和通过市场化措施减少需求等。图1显示了各种工具的相关作用。它们给中国和美国带来了类似的机会与挑战。



（航空运输行动组织，2021）

清洁燃料

可持续航空燃料是使用非化石资源生产的所有航空燃料的总称。三个路线图都认为，使用可持续航空燃料可将总排放量减少约60%。在可以预见的未来，可持续航空燃料是长途航班唯一可行的替代能源，因为氢能和电能都面临航程限制。作为一种即用型燃料，可持续航空燃料可以与传统航空燃料掺混供给，最高掺混比例可达到50%，100%掺混的可行性仍在验证当中。

国际清洁交通委员会估计，在1.75摄氏度减排路径下，到2050年，需要3.15亿吨可持续航空燃料来完全取代化石航空燃料。可持续航空燃料的质量非常重要。考虑到土地利用变化和替代产品排放等因素，一种替代燃料的生命周期排放量必须至少比传统航空燃料低50%，才能被视为可持续航空燃料。使用玉米、大豆和棕榈生产的燃料，通常并不符合这些标准（国际民航组织，2021b；Pavlenko&Searle，2021）。近期的可持续航空燃料供应将主要来自废弃的脂肪、油和油脂（FOG）。在中期，使用纤维素类农林废弃物生产的先进生物燃料预计将更加普及。从长远来看，随着可再生电力和碳捕集成本下降，合成燃料（又被称为绿色合成煤油）可能成为主流。然而，要在市场中普及具有高生命周期减排潜力的高质量可持续航空燃料，需要制定综合性策略，克服近期的成本、供应和可持续性的挑战。

除了可持续航空燃料之外，氢能和电能也可以作为替代能源。零排放飞机的设计尚处在起步阶段，但其潜力却不容忽视。空中客车正在开发一款氢动力支线窄体飞机，预计将在2035年左右开始投入运营。国际清洁交通委员会估计，从2035年开始，具有革命性意义的氢动力飞机可以承担约三分之一（31%至38%）的客运业务（Mukhomadhaya & Rutherford, 2021）。氢动力技术对中美两国意义重大，因为两国国内都有规模庞大的短途航空市场。为了实现氢动力飞机的潜力，需要使用超轻低温储氢罐，以及制氢、运氢、储氢和加氢等基础设施。

受制于电池的低能量密度，电动飞机的潜力较低，单位质量可以携带的能量只有化石航空燃料的四十分之一。电动飞机可以取代三分之二的通勤飞机，以及四分之一的涡轮螺旋桨飞机。到2050年，电动飞机每年可减排370万吨二氧化碳当量，相当于航空客运预期排放量的0.2%（Mukhopadhaya & Graver, 2022）。

燃料效率

提升燃料效率可进一步减排30%至35%。燃料效率的提升可以通过使用新一代飞机以及采用更高效的运营策略来实现。燃料效率是一个重要工具，有助于减少近期排放，并使能源需求与清洁燃料供应保持一致。

历史上，每一代飞机都会比上一代机型减少15%至20%的燃料消耗。因此，新机型取代旧机型能够大幅减少燃料消耗。然而，飞机研发需要投入大量资本；政府需要出台政策，激励航空公司加快机队更新换代，并提高整个机队的燃料效率。同时还需要通过报废政策，促进材料回收再利用。

在技术方面，除了波音777X以外，最近几年很少有新设计发布。国际清洁交通委员会的分析认为，与2015年交付的新飞机相比，从2034年起，使用先进节能技术的全新设计（如混合层流翼、自适应柔性机翼后缘和开式转子发动机等）可减少40%的燃料消耗（Kharina等, 2016）。从2035年到2050年，这些新设计可将燃料效率每年提升约2%。预计从2019年到2050年，平均每年可将燃料效率提升1.6%。

运营的燃料效率与许多因素有关。航空公司可以改善的一个领域是提高有效载荷的效率，即在机舱内增加座椅数量，并提高上座率。另外一个工具是通过单引擎滑行、使用电动牵引车拖至机位、持续爬升和下降、智能空中交通流量管理、减少燃料装载量（欧盟航空安全局, 2022）和编队飞行（空中客车, 2022）等措施，提高交通效率。从2019年至2050年，这两个领域每年合计可实现大约0.6%的燃油效率提升。

需求变化

清洁燃料对化石航空燃料的价格溢价意味着，政府可能需要执行市场化机制（如加州的低碳燃料标准）或直接提供税收抵免，以补贴清洁燃料。这两项措施相结合有助于可持续航空燃料实现规模化经济，并降低生产成本，这对于最终达到100%的清洁燃料至关重要。与此同时，燃料价格可能上涨，出行需求可能小幅减少，能够带来二次减排。在多个路线图中均模拟了市场化措施和需求变化的影响。

另外一个影响较小但不容忽视的减排措施是出行模式转变。在铁路基础设施成熟的区域，从短途航班改为乘坐高铁（HSR）有助于进一步减少当地的碳排放。对现有高铁的研究发现，高铁通常可以取代1000公里以下的航班，而在中国最高可以取代长达2300公里的航班。随着高铁服务的日

益成熟，约20%的航空出行需求可以被高铁取代（Zheng，2022）。2019年，2000公里以下的航班平均碳强度为每乘客公里80至220克二氧化碳，具体碳强度取决于飞机的机型（Graver等，2020）。而在美国电网上运行的电动火车每乘客公里的碳排放量约为38克二氧化碳（Miller，2021）。因此，改变出行模式转变可降低50%-80%的碳强度，若使用更清洁的电网还可以进一步降低碳强度。欧盟一直在考虑采用该措施，它对于中国和美国的国内航空排放也密切相关。

非二氧化碳影响

航空业非二氧化碳排放的全球变暖潜势可能是二氧化碳排放的两倍（欧盟航空安全局，2020）。减少非二氧化碳排放能够快速见效，可以抵消增加的二氧化碳排放，为我们实现脱碳争取更多时间（Klower等，2021）。研究发现，可持续航空燃料在燃烧过程中产生的硫、芳烃和颗粒物低于传统航空燃料，因此非二氧化碳气候影响更低。然而，距离可持续航空燃料的广泛应用仍有很长时间；我们不能将燃料转换作为解决航空业非二氧化碳影响的唯一办法。其他解决方案还包括调整巡航高度，以避开高密度的冷空气。这样做可将凝结尾迹形成减少60%（Teoh等，2020），但需要大量空中交通协调。另外一种解决方案是对传统航空燃料进行加氢处理，以降低芳香烃含量，这种做法在短期内更容易实现（欧盟航空安全局，2020；Voigt等，2021）。这种做法可以有效减少凝结尾迹形成，并且所涉及的利益相关者更少。

给中国的建议

中国航空业正在努力与2030年前实现碳达峰和2060年前实现碳中和的国家气候策略保持一致。2022年年初，中国民用航空局（CAAC）正式印发《“十四五”（2021 - 2025）民航绿色发展专项规划》（中国政府，2022）。规划中提出到2035年，民用航空实现碳中性增长，机场二氧化碳排放逐步进入峰值平台期。

中国民用航空局的专项计划在以下四个领域采取行动，分别是：治理体系、低碳发展战略、污染防治和创新能力建设等。低碳发展战略中提出了多个目标，包括提高商用航班的燃料效率，加快机队更新换代，在旅客吞吐量500万人次以上机场试点可持续航空燃料掺混供给等模式，到2025年可持续航空燃料部署增加到2万吨，推动纯电动、油电混动飞机的应用，以及推动机场建设智能能源系统等。该规划中还强调了在执行过程中财政支持的必要性，并鼓励企业充分利用绿色金融。

除了该发展规划以外，中国还计划将航空业纳入全国碳市场。中国还在过去二十年建设了庞大的高铁路网，为频繁的短途航班提供低碳替代选择。

中国在推动航空业脱碳时从全局出发，以飞机和机场排放以及减少污染作为重点。然而，当前的发展规划中并没有明确说明是否将大量资源投入到最重要的减排措施中。中国优先考虑的应该是促进高质量可持续航空燃料的生产和应用。到目前为止，中国国内只有一家可持续航空燃料生产企业投入运营，另外一家仍在筹划阶段。中国迫切需要制定全国可持续航空燃料规模化路线图；下文讨论了中国的一些政策选择。

2021年，中国启动了国家碳排放权交易体系（ETS）的在线交易。该体系目前覆盖了电力行业，并将逐步扩展到其他行业，其中包括航空业。市场开盘价约为48元/吨（约合7美元/吨），预计到2030年将上涨到139元/吨（约合20美元/吨）（美国战略与国际研究中心，2021；Slater等，2021）。这种基于排放强度的碳排放权交易体系非常适合用于减少清洁燃料和传统燃料之间的

价差。但政府首先需要将航空业纳入碳排放权交易体系，并引导将相关收入投入到可持续航空燃料开发。在碳市场中产生的收入应该优先用于开发先进生物燃料和合成燃料，而不是基于粮食的生物燃料。确定航空公司、机场、燃料供应商和其他利益相关者之间的排放边界，将是防止重复计算的关键。

除了碳排放权交易体系以外，中国政府的直接财政支持也是一个可行的选择。一种做法是通过税收抵免补贴可持续航空燃料，从而为其创造一个与传统航空燃料公平竞争的环境。另外一种做法则是成立公私合伙企业，从而降低投资风险，并保证机场会购入可持续航空燃料。例如，日本在2022年成立了一支绿色创新基金，规模达到2万亿日元（约合160亿美元），为可持续航空燃料生产商提供政府补助（美国农业部，2022）。中国民用航空局还可以采取对航空公司的激励措施，鼓励航空公司投资可持续航空燃料和燃料效率更高的飞机，例如优先分配机位或增加航线的市场份额等。

除此之外，中国正在大量开展机场建设和扩建；这是为可持续航空燃料和零排放飞机整合基础设施的绝佳机会。除了可持续航空燃料以外，中国还可以在国际民航组织的政策制定过程中发挥更加积极的作用。中国最近自主生产了第一架商用飞机中国商飞C919。但此前由于飞机和发动机生产能力有限，在国际民航组织的环境标准制定过程中，中国并没有强大的影响力。现在，中国应该提升其国际民航组织中的环境领导地位。中国应该认识到国际航空业气候目标的重要性，并帮助确保这个目标会考虑到各国历史排放量的不同水平。

中国还可以发挥带头作用，及时向国际民航组织提交一份有力度的国家行动计划。自2015年以来，中国民用航空局一直在密切跟踪民航领域的燃料消耗和燃料效率。中国应该根据其燃料效率趋势、可持续航空燃料目标和其他已经制定的措施，开发一份全国航空业脱碳路线图。将预测排放路径与基线情景的排放量进行对比，可以更好地量化现有减排措施的力度。此外，提升测算和预测非二氧化碳影响（如凝结尾迹）的能力同样十分关键。

给美国的建议

美国航空业与整个国家的气候战略保持一致，即到本世纪中叶实现净零排放，从而将升温幅度控制在1.5摄氏度。2021年，美国联邦航空管理局（FAA）发布了最新版航空业气候行动计划，详细介绍了美国航空业到2050年实现净零温室气体排放的目标（美国联邦航空管理局，2021）。美国航空业包括国内航班、由美国航空公司经营的国际航班以及国内机场。

该行动计划详细介绍了八个领域的措施，分别是：飞机技术、经营效率、可持续航空燃料、国际领导力、联邦航空管理局的领导力、机场减排、非二氧化碳影响和跨行业减排。具体来说，美国航空业将开发和出售下一代飞机，与目前最先进的机型相比，下一代飞机有望将燃料效率提高30%。美国联邦航空管理局估计，新型窄体飞机将在2035年前问世，到2040年将完成对新型宽体飞机设计的开发。行业还将努力完善运营，包括支持数字化、自动协商优化飞行轨迹，以及调整高空轨迹以减少凝结尾迹形成等。

此外，美国政府还启动了跨部门的“可持续航空燃料大挑战”计划，近期目标是到2030年每年供应30亿加仑的可持续航空燃料。参与该计划的相关部门将以降低可持续航空燃料成本、提高燃料可持续性和扩大应用范围为重点制定执行计划。目前，美国有一家已投入商业化运营的可持续航空燃料生产企业，另有至少五家正在规划当中。美国联邦航空管理局还在探索减少非二氧化碳排放的

相关技术，例如为使用天气预报预测凝结尾迹的研究提供资助。

除此之外，美国联邦航空管理局还发布了国际航空碳抵消与减排计划执行指南，美国的航空公司在2021年已经开始参与试点。除了美国联邦航空管理局以外，美国环境保护局在2020年发布了国内飞机二氧化碳排放标准，该标准与国际民航组织的标准相同。如前文所述，美国需要更严格的标准，以提高燃料效率，推动减排（美国环境保护局，2020）。

美国的行动计划表明，美国将利用其在航空航天技术领域的强大实力，进一步推动飞机设计和空中交通管理方面的创新。“可持续航空燃料大挑战”计划展现了美国的雄心，并且提出了一个综合性战略。但该计划仍需要转变成联邦级和州级政策，并且应该以推广先进生物燃料和合成燃料作为政策重点。例如，拟推出的可持续航空燃料税收抵免计划，可能过于偏重于对基于粮食的燃料路径的激励，引发了对产品替代或土地利用变化的担忧（国际清洁交通委员会，2022）。

美国可以现有政策为基础，为发展可持续航空燃料提供经济激励。值得注意的是，加利福尼亚州、俄勒冈州和华盛顿州的低碳燃料标准（LCFS）可以将航空燃料作为一种强制路径，由航空公司开始负担可持续航空燃料的费用。低碳燃料标准还可以允许氢和电力供应商选择性加入，获取减排积分。与此同时，政府应该考虑出台可持续航空燃料掺混供给规定，排除基于粮食的生物燃料路径，并出台针对合成燃料的次级规定。这些次级规定对于防止燃料供应商为合规仅生产符合条件但成本最低的燃料至关重要。推动发展合成燃料非常重要，因为大多数生物燃料的原材料都是有限资源。对燃料供应商的税收抵免或其他可持续航空燃料激励措施的设计，也应该遵循相同的原则。

此外，美国可以进一步完善排放核算。美国的航空公司目前按照飞机类型，每个季度向交通运输部报告燃料消耗数据。在订票平台向消费者披露航班排放量，使消费者可以选择排放量更低的航班，并激励航空公司提高燃料效率。此外，开发测量凝结尾迹形成的技术能力，也是完善温室气体排放测算的关键。

最后，转变出行方式在美国依旧是一种未得到充分利用的减排措施。可以由火车取代的航空出行市场，通常是人口密集的城市之间2,000公里以下的航线，在2019年，这些航线约占美国国内航空业务的四分之一（24%）。电动火车的碳强度比飞机飞行相同距离的碳强度低约60%；使用列车取代所有大型城市间的短途航班，能够将美国国内碳排放减少15%（Zheng，2022）。通过投资高铁基础设施释放这些减排潜力，不仅有助于减少排放，还能增加城市之间的联系，创造更多经济机会。首先可以利用《两党基础设施法案》的拨款，提高现有铁路服务的速度。美国还可以考虑向中国购买高铁技术，因为中国在高铁领域拥有深厚的专业知识。

合作机会

航空业的全球性，决定了国际政策制定是气候行动的核心，尤其是在推广新飞机技术方面。而可持续航空燃料将主要依赖国内政策提供支持和激励。如果中美两国能够在这两个重要领域展开合作，将对全球脱碳产生巨大的促进作用。两国的合作还可以针对上文提到的国际治理、技术扩散和公平性这三个主要挑战，提出解决思路。

如上文所述，国际民航组织正在考虑在今年9月召开的第41届大会上通过航空业脱碳净零碳排放长期理想目标。各成员国的立场将决定全球目标的力度。与《巴黎协定》类似，国际民航组织的净零碳排放长期理想目标旨在确立一个基于国家自主贡献的共同目标。中美两国应该本着诚意原则

进行磋商，共同探索制定有雄心且公平的净零碳排放长期理想目标。例如，目标以累积排放量为基础，允许各成员国制定不同的执行时间表，有助于实现“共同但有区别的责任”这一原则。两国应该针对净零碳排放长期理想目标的具体细节，展开有效的讨论。

两国还应该在长期目标的执行方面求同存异。美国可以倡议对任何全球措施进行影响力评估，以确保发展中国家不会受到过度影响。而中国应该支持由各国分别提交具体的比各自的基线情景大幅减少排放的行动计划，以确保实现净零碳排放长期理想目标取得进展。如果遵循这些原则，净零碳排放长期理想目标将意味着各国认同一个全球目标，但可以制定不同的排放达峰和减排时间表。

在未来国际民航组织的谈判中，中美两国共同发挥领导作用，也有助于推行更有效、更严格的环境标准。尤其是两国可以支持更新国际民航组织的飞机二氧化碳标准，现有标准并不能有效推动发展新技术。制定更加严格的二氧化碳标准，同时推出灵活性机制，如企业平均标准或分级标准等，可帮助制造商以经济高效的方式生产和销售燃料效率更高的设计。此外，对于两国来说，重要的是呼吁国际民航组织在未来几年，针对可能在2030年代开始投入使用的氢动力飞机，开始制定标准。对航空业的非二氧化碳影响达成科学上的共识，也应该是国际合作的重中之重。中美两国应该联合倡议国际民航组织的资源分配与长期脱碳目标保持一致。

最后，中美两国可以利用他们在国际民航组织中的政治影响力，建议提高其决策过程的透明度。可以采取的具体措施包括但不限于在高层会议之前发布工作文件，以及公开会议记录等。

前文已经讨论过清洁燃料的规模化战略。两国除了制定力度相似的国内政策以外，在这方面也有国际合作的机会。两国可以选择几条跨太平洋航线，建立一条可持续航空燃料走廊，使两国的航空公司在相关联的机场能够获得100%高质量可持续航空燃料。这样一条低碳走廊为两国在国际航班中使用可持续航空燃料，提供了一个协调投资、基础设施和监管框架的平台。而且这条走廊能够自然而然地聚合对可持续航空燃料的需求，降低燃料供应商以及其他利益相关者面临的不确定性。如果有必要，本项目可以重点分析以商务出行为主的航线。这些航线的商务旅行者更有可能支付可持续航空燃料的价格溢价，并且有兴趣获取自愿减排碳额度。当然，政府的直接补贴是另外一种选择。参与该走廊的机场可以开展试点，降低100%使用可持续航空燃料的航班的着陆费，从而提供额外激励。之后可以拓展通过在这条走廊开展的活动所形成的生态系统，服务更多中美航线和与其他国家之间的航线。海洋运输行业已经有零排放交通走廊的先例；美国在2022年初开始了绿色海运走廊计划。

然而，可持续航空燃料的应用，需要有一套可靠的国际可持续航空燃料可持续性标准作为配套。中国和美国都有机会从头开始制定高质量的标准，并防止低质量燃料主导市场。国际航空碳抵消与减排计划对替代燃料的可持续性标准，可以为制定保证可持续航空燃料质量的国内和国际政策奠定基础。

最后，中美两国可以联合承诺对化石航空燃料进行加氢处理，将化石航空燃料中的芳香烃含量减少50%，从而将凝结尾迹减少约30%。两国可以提出通用ASTM标准，强制要求降低航空燃料中的芳香烃含量，并在国内采取统一的监管规定，从而为其他国家树立榜样。

总结

使航空业与《巴黎协定》的升温目标保持一致，需要各国政府有减排的雄心和资源，并且有可

靠的政策提供支持。中国和美国作为规模最大的两个航空市场，在推动航空业低碳转型的过程中发挥着关键性的领导作用。两国之间相互合作，有助于解决航空业脱碳所面临的主要障碍，包括效率不高的国际政策制定，以及推广清洁燃料缺乏动力等。

整个航空业为了减少温室气体排放，必须采用清洁燃料，提高燃料效率，通过市场化措施和出行模式转变等改变需求，以及减少非二氧化碳影响。

中国和美国处在不同经济发展阶段，因此未来几十年，两国的航空运输量增长将存在差异。两国的脱碳计划自然也会有所不同。然而，我们相信，两国可以对航空业碳排放达峰的紧迫性达成一致，协调两国的脱碳重点领域，并促进在关键领域的合作。但两国需要通过国内政策，为高质量的可持续航空燃料提供更多支持和激励。中国需要加强在国际民航组织中的领导地位，而美国则需要推动排放量披露，并进行高铁投资。

两国可以开展合作的潜在领域包括在国际民航组织的领导作用、可持续航空燃料走廊、强化环境保护标准以及通过降低燃料中的芳香烃含量减少凝结尾迹等。如果两国能立即采取行动，将引领全球航空业在未来几十年深度脱碳，与全球升温幅度远低于2摄氏度的目标保持一致。

致谢

感谢Hongming Liu（美国环保协会）对本报告的初稿进行评审。

参考文献

1. 空中客车 (2022). fello'fly项目.检索自空中客车网站, 网址: <https://www.airbus.com/en/innovation/disruptiveconcepts/biomimicry/fellofly>
2. 航空运输行动组织. (2021). 《Waypoint 2050》.检索自航空运输行动组织网站, 网址: <https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/>
3. 波音. (2021). 《2021年至2040年商业市场展望》.检索网址: <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/index.page>
4. 加州空气资源委员会. (2022). 《低碳燃料标准》.检索自加州空气资源委员会, 网址: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-carbon-fuel-standard>
5. 中国政府. (2022). 《“十四五”民航绿色发展专项规划》.检索网址: <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/28/5670938/files/c22e012963ce458782eb9cb7fea7e3e3.pdf>
6. 美国国际战略研究中心. (2021). 《中国的新全国性碳交易市场：在希望与悲观之间》.检索网址: <https://www.csis.org/analysis/chinas-new-national-carbon-trading-market-between-promise-and-pessimism>
7. 欧盟航空安全局. (2020). 根据《欧盟碳排放权交易体系指令》第30（4）条对航空业的非二氧化碳气候影响以及潜在政策措施的更新分析.检索网址: <https://www.easa.europa.eu/downloads/120860/en>
8. 欧盟航空安全局. (2022). 《欧盟航空安全局发布最新燃油/能源规则，可产生积极的环境影响》.检索网址: <https://www.easa.europa.eu/newsroom-andevents/press-releases/easa-publishes-new-fuelenergy-rules-positive-environmental>
9. 欧盟委员会. (2021). 《欧洲议会与欧洲理事会有关确保可持续航空运输保证公平竞争环境的条例提案》.检索自欧盟委员会网站, 网址: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021PC0561&from=EN>

10. Graver, B., Rutherford, D., & Zheng, X. (2020). 《2013年、2018年与2019年商用航空的二氧化碳排放》.检索自国际清洁交通委员会网站, 网址: <https://theicct.org/publication/co2-emissions-from-commercial-aviation-2013-2018-and-2019/>
11. Graver, B., Zheng, S., Rutherford, D., Mukhopadhaya, J., & Pronk, E. (2022). 《愿景2050: 航空业与<巴黎协定>保持一致》.检索自国际清洁交通委员会网站, 网址: <https://theicct.org/publication/global-aviation-vision-2050-align-aviation-paris-jun22/>
12. (2016). 《环境趋势报告》.检索网址: <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICAO%20Environmental%20Report%202016.pdf>
13. 国际民用航空组织. (2019). 《第A40-18号决议: 国际民航组织关于环境保护的持续政策和做法的综合声明——气候变化》.检索网址: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/Assembly/Resolution_A40-18_Climate_Change.pdf
14. 国际民用航空组织. (2021a). 《国际民用航空组织客运周转量预测情境》.检索网址: <https://www.icao.int/sustainability/Documents/Post-COVID-19%20forecasts%20scenarios%20tables.pdf>
15. 国际民用航空组织. (2021b). 《国际航空碳抵消与减排计划的合格燃料默认生命周期排放值》.检索自国际民用航空组织网站, 网址: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20March%202021.pdf>
16. 国际民用航空组织. (2021a). 《到2050年航空业的环境趋势》.检索网址: https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/EnvironmentalReports/2022/ENVReport2022_Art7.pdf
17. 国际民用航空组织. (2021b). 《国际民航二氧化碳减排长期理想目标可行性的高级别会议 (HLM-LTAG) 对议程项目4的讨论摘要修订版》.检索网址: https://www.icao.int/Meetings/HLM-LTAG/Documents/HLM-LTAG_SD_004_REV2_v2_clean.pdf
18. 国际民用航空组织. (2022c). 《国际民航二氧化碳减排长期理想目标 (LTAG) 可行性报告》.检索网址: <https://www.icao.int/environmental-protection/LTAG/Pages/LTAGreport.aspx>
19. 国际清洁交通委员会. (2022). 《公众评论函: 在可持续航空燃料大挑战背景下基于农作物的生物燃料》. 检索网址: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/06/SAF-Grand-Challenge-crop-based-fuels-letter-vf.pdf>
20. 政府间气候变化专门委员会. (2021). 《政府间气候变化专门委员会第六次评估报告第一工作组报告: 自然科学基础》.检索网址: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_TS.pdf
21. Kharina, A., Rutherford, D., & Zeinali, M. (2016). 《近期和中期技术提升新飞机燃油效率的成本评估》.检索自国际清洁交通委员会网站, 网址: <https://theicct.org/publication/cost-assessment-of-near-and-mid-termtechnologies-to-improve-new-aircraft-fuel-efficiency/>
22. Klöwer, M., Allen, M. R., Lee, D. S., Proud, S. R., Gallagher, L., & Skowron, A. (2021). 《航空业的全球变暖贡献量化分析》.《环境研究快报》16(10), 104027.
23. Miller, C. A. (2021). 《美国东北部地区以轨道出行取代航空出行, 减少乘客人均二氧化碳排放》.《空气与废弃物管理协会会志》71(12), 1458-1471.
24. Mukhopadhaya, J., & Rutherford, D. (2021). 《革命性氢动力飞机的性能分析》.检索自国际清洁交通委员会网站, 网址: <https://theicct.org/publication/aviation-global-evo-hydrogen-aircraft-jan22/>
25. Mukhopadhaya, J., & Graver, B. (2022). 《电动支线飞机性能分析》.检索自国际清洁交通委员会网站, 网址: <https://theicct.org/publication/global-aviation-performance-analysis-regional-electric-aircraft-jul22/>
26. Pavlenko, N., & Searle, S. (2021). 《替代航空燃料的可持续性影响评估》.检索自国际清洁交通

- 委员会网站, 网址: <https://theicct.org/publication/assessing-the-sustainability-implications-of-alternative-aviation-fuels/>
27. Slater, H., De Boer, D., Qian, G., & Shu, W. (2021). 《2021年中国碳价调查》. 检索网址: http://www.chinacarbon.info/wp-content/uploads/2022/02/EN_2021-China-Carbon-Pricing-Survey-Report.pdf
 28. Teoh, R., Schumann, U., Majumdar, A., & Stettler, M. E. (2020). 《通过小范围改道和采用新技术减少飞机凝结尾迹的气候影响》. 《环境科学与技术》 54(5), 2941-2950.
 29. 英国. (2022). 《航空业零排放: 英国的航空业净零排放策略》(2022年7月19日更新). 检索自英国交通部网站, 网址: <https://www.gov.uk/government/speeches/jet-zero-strategy-our-approach-for-achieving-net-zero-aviation-by-2050>
 30. 英国第26届联合国气候变化大会. (2021). 《国际航空气候雄心联盟: 第26届联合国气候变化大会宣言》. 检索网址: <https://ukcop26.org/cop-26-declaration-international-aviation-climate-ambition-coalition/>
 31. 美国农业部. (2022). 《日本: 日本政府与产业合作伙伴共同发展可持续航空燃料产能》. 检索网址: <https://www.fas.usda.gov/data/japan-japanese-government-and-industry-partner-develop-saf-capacity>
 32. 美国环境保护局. (2020). 《控制飞机和飞机发动机空气污染: 温室气体排放标准与检测流程——最终规则制定》. 检索网址: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/control-air-pollution-airplanes-and-airplane-engines-ghg>
 33. 美国联邦航空管理局. (2021). 《美国2021年航空业气候行动计划》. 检索网址: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2021-11/Aviation_Climate_Action_Plan.pdf
 34. Voigt, C., Kleine, J., Sauer, D., Moore, R. H., Bräuer, T., Le Clercq, P., ... & Anderson, B. E. (2021). 《燃烧更清洁航空燃料可减少凝结尾迹卷云》. 《通讯-地球与环境》 2(1), 1-10.
 35. Zheng, S. (2022). 《乘坐高速火车, 实现低碳出行》. 检索网址: <https://theicct.org/aviation-rail-shift-lower-carbon-mar22/>
 36. Zheng, X.S., & Rutherford, D. (2020). 《新商用飞机的燃料燃烧: 1960年至2019年》. 检索自国际清洁交通委员会网站, 网址: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/Aircraft-fuel-burn-trends-sept2020.pdf>

