DOI 10.15302/J-SSCAE-2023.05.015

民用航空运输业低碳化发展战略研究

吴光辉[1]，马静华[2*]，刘倩[2]，于敬磊[3]，王煜[2]，熊华文[2]，张志雄[2]，苗强[1]

（1. 中国商用飞机有限责任公司，上海 200126；2. 中国商飞北京民用飞机技术研究中心，北京 102211；
3. 中国民航科学技术研究院，北京 102211）

摘要：碳达峰、碳中和战略目标进入了实施阶段，给处于快速发展期的民用航空（民航）运输业带来了新的压力与挑战，相应碳减排策略研究获得国内外高度关注。本文梳理了国际民航（主要指商用飞机）运输业低碳化发展的形势与要求，研判了我国民航运输业低碳化发展的宏观形势、发展现状和面临问题，提出了相应发展目标和基本思路。通过行业规划、产品创新、低碳能源、航空公司运营等方面的共同努力，到2060年我国民航运输业将如期实现碳中和，全面形成绿色低碳的发展格局。技术创新是推动民航运输业低碳化转型的核心驱动力，建议布局低碳商用飞机产品研发和关键技术攻关、加快推进可持续航空燃料的市场化应用、发展智慧航空以促进低碳运营，从而促成我国民航运输业高质量发展。

关键词：民用航空运输；商用飞机；低碳发展；高效化；智慧化

中图分类号：V1　　**文献标识码：**A

Low-Carbon Development of Civil Aviation Industry

Wu Guanghui[1], Ma Jinghua[2*], Liu Qian[2], Yu Jinglei[3], Wang Yu[2], Xiong Huawen[2], Zhang Zhixiong[2], Miao Qiang[1]

(1. Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd., Shanghai 200126, China; 2. COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute, Beijing 102211, China; 3. China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 102211, China)

Abstract: The carbon peaking and carbon neutralization goals have brought significant pressure and challenges to China's civil aviation industry. Research on carbon reduction strategies for the industry has attracted great attention from China and abroad. This study summarizes the development status of and requirements for the low-carbon development of the global aviation industry (particularly commercial aircrafts), analyzes the carbon reduction status and problems of China's civil aviation industry, and proposes corresponding development goals and basic ideas. Through industrial planning, product innovation, low-carbon energy utilization, and airline operation, carbon neutralization of China's civil aviation industry is expected to be achieved by 2060, thus to form a green and low-carbon development pattern. Technological innovation is the key driving force for promoting the low-carbon transformation of the civil aviation industry. Therefore, we propose the following suggestions: planning the development and key technology research of low-carbon commercial aircrafts, accelerating the commercial application of sustainable aviation fuels, and developing intelligent aviation to promote low-carbon operations.

Keywords: civil aviation; commercial aircraft; low-carbon development; operational efficiency; intelligence

收稿日期：2023-03-24；**修回日期：**2022-09-04

通讯作者：*马静华，中国商飞北京民用飞机技术研究中心高级工程师，研究方向为民机产品发展战略；E-mail: majinghua@comac.cc

资助项目：中国工程院咨询项目“航空制造‘双碳’发展战略研究”(2022-HYZD-03)

本刊网址：www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

全球变暖形势趋于严峻，促使更多国家将碳达峰、碳中和（“双碳”）上升为国家战略目标。降低碳排放并最终实现碳中和，成为全球关注和践行的重要议题。航空运输是经济社会活动中速度最快、通达及时效性最强的运输方式，具有行业体量大、跨境/跨政策体系的运营特征，对国内和国际经贸发展起到难以替代的支持作用。

航空器直接向对流层顶部、平流层底部排放气体和颗粒物，影响大气层的结构，改变大气层的温室气体浓度，引发形成凝结尾流，增加卷云云量；相比其他交通方式而言对气候的影响更为直接，使得航空运输业“双碳”目标的实现过程必然呈现复杂性和多边性。2019年，世界民航运输业的碳排放量为9.2×10^8 t，占全球CO_2排放总量的2.4%、交通领域碳排放量的11%[1]。未来20年，全球航空旅客周转量将以年均3.9%的速度增长，而中国相应增速为5.6%[2]。按照现有的发展趋势，如不及时加以控制，到2050年全球将有25%的碳排放量来自民航运输业，因而航空碳减排压力极大。

我国已正式提出“双碳”战略目标。民用航空（民航）运输业的碳排放量与航空运输量、航空燃油类型、空中交通结构等因素相关。在行业运输周转量、机队规模均持续增长的情况下，民航碳排放总量势必随之增长；探索和完善各种节能减排措施，支持实现航空碳中和的既定目标极具挑战。

我国是全球民航运输业第二大碳排放国，而机队整体机龄短、基线高，在能效提升方面的锁定成本较高，短期潜力有限，面临国内和国际双重碳减排压力，积极探索低碳技术与发展路径迫在眉睫。针对于此，本文辨识民航运输业低碳化发展需求，梳理现状和问题，提出发展目标、基本思路、重点任务，以期为我国民航运输业高质量发展提供启示和参考。

二、国际民航运输业低碳化发展形势

在全球碳减排、绿色航空发展的背景下，民航运输业碳减排成为行业共识。欧洲、美国、国际民航组织（ICAO）、国际航空运输协会（IATA）等国家/地区和国际组织发布了航空碳减排规划，组织开展一系列技术创新研究，为新一代绿色飞机研制、民航运营体系升级等做好准备[3]。2017年，ICAO审议通过《飞机二氧化碳排放》，这是ICAO的191个缔约国同意签署的第1个全球性政府间协定。2019年，欧洲航空安全局颁发了CS-CO_2规章；2022年，美国联邦航空局（FAA）颁发了FAR-38部；2023年，中国民用航空局颁发了CCAR-34-R1，规定了对飞机CO_2排放的要求。这表明，碳减排成为国际主流民用航空适航体系中的强制性标准。

（一）欧洲航空碳减排规划及路径

欧盟委员会提出《欧洲绿色协议》（2019年），目标是到2050年欧洲成为全球首个碳中和地区。欧盟提出“可持续欧洲投资计划”，在欧盟长期预算中将至少25%的经费用于气候行动。《航空净零排放2050路线图》（2021年）提出具体措施：改进飞机/发动机技术（减少碳排放37%），使用可持续航空燃料（减少碳排放34%），实施经济鼓励措施（减少碳排放8%），提升空管和飞机运营效率（减少碳排放6%）[4]。

在推进碳减排的过程中，欧盟委员会提出了“Fit for 55”法规与政策提案（2021年），建议欧盟温室气体净排放量在2030年减少55%、在2050年实现碳中和。与航空运输相关的内容有：修订欧盟排放交易系统、航空排放规则；逐渐取消航空免费碳排放配额，与ICAO的国际航空碳抵消和减排计划（CORSIA）趋同；降低欧盟内部可持续航空燃油的最低税率，鼓励使用可持续航空燃油，激励航空公司使用燃油效率更高、污染水平更低的飞机；要求航空燃油供应商在欧盟的机场内更高比例供应可持续航空燃油[5]。

（二）美国航空碳减排规划及措施

美国出台了一系列航空规划与计划，如“国家航空研究与发展政策”“美国航空航天局航空技术路线图”“FAA美国持续降低能源、排放和噪声计划”“美国航空航天局新航空地平线计划”“美国新一代航空运输系统计划”等，全面支持绿色航空发展（见图1）。其中的重点举措包括：研发更节能的新型飞机和发动机技术，引入效率更高的新型航空器，优化航迹以降低燃油消耗和尾迹的影响，推动

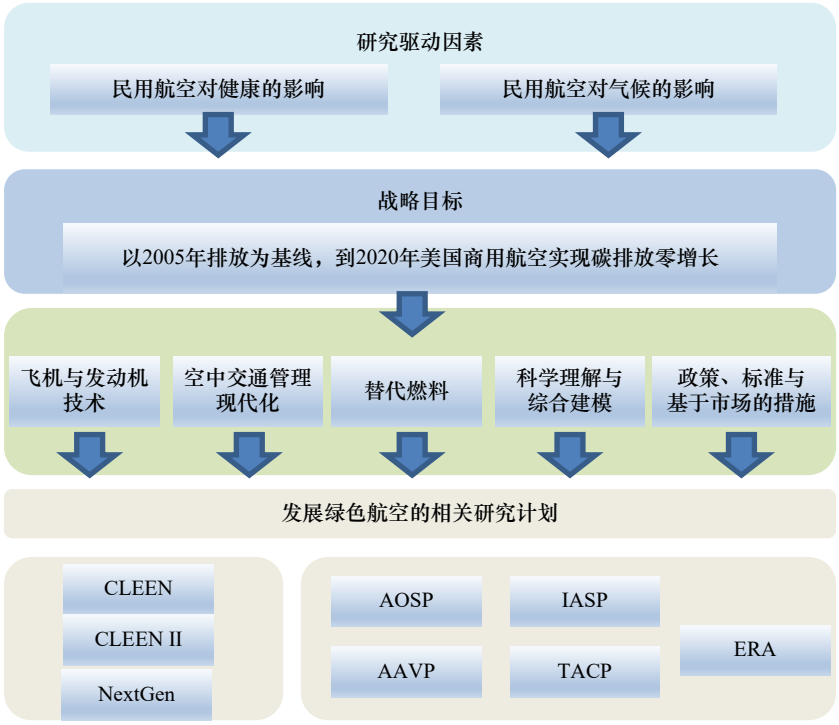

图1 美国绿色航空相关研究计划

注：CLEEN表示持续降低能耗、排放和噪声计划；NextGen表示下一代空中交通管理系统；AOSP表示空域运行和安全计划；AAVP表示先进航空器计划；IASP表示综合航空系统计划；TACP表示变革性航空概念计划；ERA表示环境责任航空计划。

能源行业生产可持续航空燃料等。

（三）国际组织碳减排规划及路径

ICAO提出的CORSIA计划（2016年）是第一个全球性的行业碳减排市场机制。CORSIA计划分阶段推进：2021—2023年为试验期（自愿参与），2024—2026年为第一阶段（自愿参与），2027—2035年为第二阶段（国际航空运输吨千米收入（RTK）超过0.5%或累计全球国际航空运输RTK占比超过90%的国家强制参与）。也要注意到，该机制规定的碳减排方案对快速发展的中国民航极为不利，可能直接影响中国航空公司的国际竞争力[6]。

IATA从行业需求角度出发，分别在2009年、2013年、2020年发布《2050飞机技术发展路线图》，提出了技术升级（含更节能的飞机、可持续替代燃料）、高效的飞行运营、改进的空域与机场基础设施、积极的经济措施等方面的内容；建议行业、政府、监管机构采用，明确了技术方面的减排优势[7]。IATA通过一项决议（2021年），要求成员航空公司承诺到2050年实现净零碳排放，以满足《巴黎协定》中将全球升温控制在1.5 ℃以内的关键目标[8]。

世界航空运输行动小组发布了全球民航应对气候变化的《Waypoint 2050》（2020年），详细制定了短期、中期、长期环境目标，研判了未来新能源技术应用和新能源飞机发展态势[9]。相关环境目标得到了IATA董事会、协会年度大会的支持，即到2050年全球民航CO_2排放量比2005年减少50%，在此基础上再过10年达到净零碳排放。

三、我国民航运输业碳排放现状和问题

（一）我国民航运输业低碳化发展需求

“双碳”战略目标的提出，体现了我国努力遏制全球气候变化的愿景和决心。“碳排放达峰后稳中有降”已列入国家2035年远景目标，诸多行业的绿色低碳化发展成为时代潮流。民航碳排放的结构性特征明显，航空公司（飞机）是民航主要的碳排放源。例如，按照周转量法进行碳排放测算，2020年我国民航CO_2排放总量约为8.22×10^7 t，其中直接碳排放量（飞机和机场使用化石燃料燃烧所产生）占比为97%，间接碳排放量（使用地面电力所产生）占比为3%。飞机飞行航段中的航空煤油燃烧是民

航能源消耗的主体，因而解决航空运输业碳排放的切入点在于减少航空燃油相关的碳排放。

随着民航运输业的快速发展，能源消耗与温室气体排放总量也将快速增加，应对气候变化工作面临的形势更为严峻。我国是ICAO一类理事国，我国民航也需要积极参与ICAO减排事务，严格落实国家节能减排要求，将绿色低碳发展贯穿到行业发展的全过程。《关于“十四五”期间深化民航改革工作的意见》（2021年）要求，从空域优化与改革、政府资源调配、法律法规建设、新技术应用、绿色民航机制等方面出发，促进绿色转型。《“十四五”民用航空发展规划》（2021年）提出，坚持以“双碳”战略目标为引领，从技术、运行、市场机制等方面统筹推进行业绿色发展。《“十四五”民航绿色发展专项规划》（2022年）要求，大力推进行业脱碳，应用绿色低碳技术，提升运营管理能效，强化空管支撑保障，建立基于市场的民航减排机制。相关政策为民航运输业低碳化发展明确了目标导向[10]。

（二）我国民航运输业碳排放发展现状

目前，很多发达国家的民航已实现碳达峰，多为正常发展情况下的自然达峰。我国民航重视绿色发展和低碳转型，以技术和产品升级的方式使民航单位碳排放呈下降趋势（见图2），但因行业发展增速较快而使排放总量仍处于上升阶段。

过去数十年，我国民航运输业快速发展，航空运输周转量、旅客运输量从1980年的4.29×10^{8} t·km、3.43×10^{6}人次分别增长至2019年的1.293×10^{11} t·km、6.6×10^{8} t·km人次[11]；民航碳排放也从1980年的1.07×10^{6} t提高至2019年的1.161×10^{8} t（增长约108倍），占全球民航总碳排放量的27.9%。可以看出，民航碳排放量与行业发展呈正相关性，且二者增速趋同。考虑到我国民航运输业仍处于快速发展阶段，加之碳排放基数大，现有的常规举措不足以支持实现2030年碳达峰目标；尤其是2013年以来，民航单位吨千米碳排放量进入了平台期，表明减排潜力越来越小，而需付出的减排成本将越来越高。

我国民航运输的吨千米碳排放量呈现稳步下降趋势，从1980年的2.493 kg/(t·km)下降至2019年的0.898 kg/(t·km)，合计降幅为64%（见图2）。受新型冠状病毒感染（COVID-19）疫情的影响，2020年民航运输总周转量相比2019年大幅下跌39%，但机队规模仍在增长（截至2020年年末为3903架）。虽然总碳排放量随着总周转量的下挫有显著回调，但民航排放油耗上升至0.995 /(t·km)，较2019年水平高11%，这是由2020年国际航班量下降、飞机平均航段里程缩短导致的[12]。

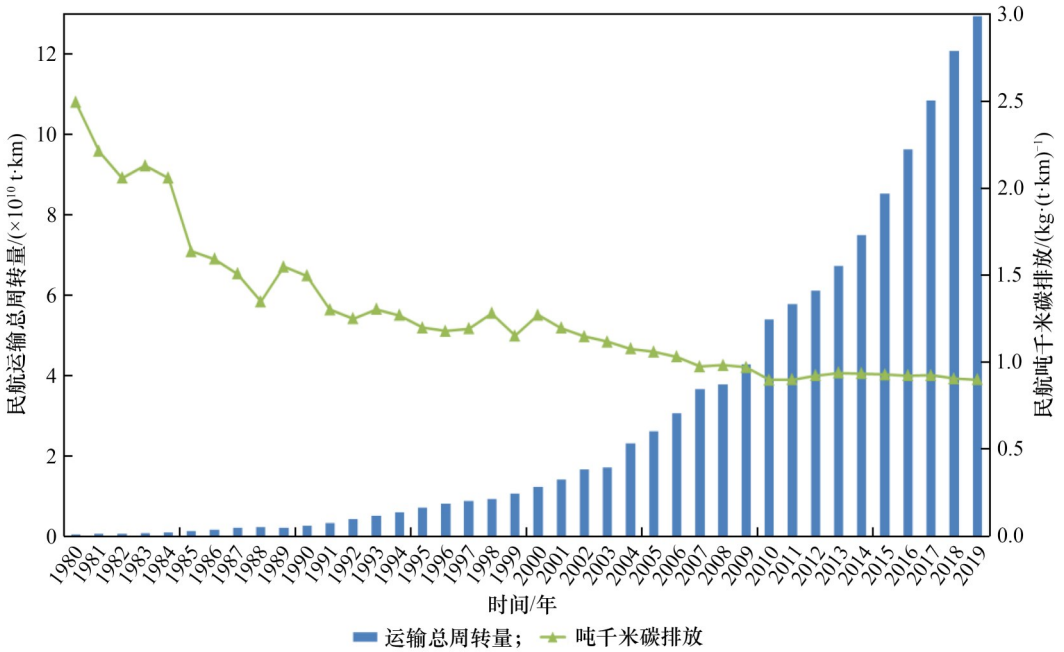

图2　我国民航总运输周转量及吨千米排放情况

（三）我国民航运输业碳排放面临的问题

1. 行业快速发展与碳减排要求严苛之间的矛盾

尽管行业短期内受COVID-19疫情影响较大，但中长期来看全球仍将保持年均4%以上的增长速度。我国民航运输业仍处于快速增长期，成为全球恢复最快的航空市场。“十四五”时期，国内国际双循环新发展格局的构建、《区域全面经济伙伴关系协定》等国际合作的开展，都将拓展我国民航运输业的国际发展空间并提升国际影响力。根据行业规划，2025年我国民航旅客运输量将达到9.3×10^8人次（复合增长率为5.9%），人均乘机率将提升到0.67；相应的民航机场保障航班起降将超过1.7×10^7架次，导致面临的减排压力进一步增大[13]。

目前，我国航空公司机队的平均机龄约为7年，其中客机的平均机龄约为6年；相比发达国家的机队已有较高的飞机燃油效率，但碳减排水平的基线较高、碳排放强度的下降空间较小。现有的碳减排措施，如新型节油飞机/发动机、飞机利用率及载运率提高、高效清洁的地面设备、航空运输系统优化等措施，成本高昂而碳减排收益不明显，难以起到决定性的碳减排作用。

我国正在从单一领域民航大国向综合性民航强国迈进，未来机队规模、机场数量都将快速增长，面临的各类资源环境瓶颈问题也将更加突出：民航可用空域资源供给的增幅有限，航路/航线结构不尽合理，燃料供应对外依存度较高。因此，以绿色低碳为导向的高质量发展是民航运输业持续健康发展的内在要求，有助于拓展发展空间、提升全球市场竞争能力。在“双碳”目标提出后，我国民航绿色低碳发展上升到新的战略高度，平衡好发展与绿色关系迫在眉睫，不可避免地带来严峻的行业调整压力。

2. 产业基础不强与碳减排进度紧迫之间的矛盾

在激烈的国际市场竞争中，我国民航运输业盈利能力相对较弱，而CORSIA市场机制、“Fit for 55”政策提案、可持续航空燃料价格依然较高等情况，都进一步增加了盈利难度。我国民航运输业的薄利现状与额外的碳减排成本耦合，构成了行业发展的直接挑战。

从碳达峰到碳中和，美国经历了约43年，欧洲经历了约71年，而我国仅有30年。相比航空产业链成熟的发达国家，我国民航运输业碳减排周期短、压力大。我国民航产业仍处于发展初期，自主创新能力薄弱，飞机、空管设施/设备、航材等较多来自国外供应商，不利于航空运输业各主体开展节能技术改造。此外，民航运输业的整体运营效能有待提升，空中绕飞、地面滑行时间过长等现象仍然突出。要用10年左右的时间实现碳达峰、再用30年左右的时间实现碳中和，需要彻底解决制约民航运输业发展的资源瓶颈问题，相应任务异常艰巨。

3. 飞机高效脱碳技术与可持续能源产业尚不成熟之间的矛盾

推动民航减碳发展，最有效的方式是实现航空器设计，尤其是飞机动力、能源形式的变革性技术突破，最终实现净零排放。客观来看，航空产品系统复杂、安全性可靠性要求高、验证周期长、技术门槛高，民机主制造商在“革命性”机型研发方面必然保持谨慎态度。当前，我国民航的低碳、零碳、负碳技术发展远不够成熟，各类技术系统集成难、环节构成复杂、应用成本昂贵。根据我国飞机主制造商的发展规划，电动化、氢能源的应用仍有诸多技术障碍，全电飞机、氢能飞机等将在2045年甚至2050年才能投入商用。

在全球主要航空公司的零碳战略中，成效直接且实施快速的选项是可持续航空燃料，但受到生产成本、原材料供应能力的制约。我国虽有国产可持续航空燃料产品获批及试飞应用，但整体上没有形成航空低碳能源产业链，原材料生产、炼化、储运、商业飞行等方面存在短板；如果仅是简单延续当前的政策、投资、碳减排等目标，已有的低碳和零碳技术难以支撑实现民航运输业“双碳”目标。因此，加强政策引导和机制建设，激发利益关联方的积极性，扩大可持续航空燃料研发与试点应用的支持力度及部署范围，培育并协调推进全产业链建设等，成为亟待开展的工作。也需超前谋划全电飞机、氢能飞机等绿色能源航空器的发展，推动国产飞机制造商、航材供应商在此方向上的研发突破。

4. 其他交通方式低碳化发展将加大民航运输业的碳减排压力

国际能源署预测，从全球范围来看，航空排放在交通行业排放中的占比将逐渐提高。在我国，虽然当前民航飞机的碳排放在全部碳排放中的占比很低（2020年约为1%），但随着铁路电气化比例不断提高、电动汽车规模化应用、“公转铁”“公转水”

等交通运输结构持续优化，民航碳排放在整个交通碳排放中的占比将进一步提高，因而民航绿色低碳发展受到更多关注[14]。民航行业对我国交通运输业整体达峰的影响不大，但在交通运输业的深度减排过程中理应做出更大贡献。当然，也应认识到不同交通方式所处发展阶段、技术条件、基础能力的差异性，应将民航“双碳”目标与整个交通运输行业“双碳”进程有机结合，科学制定并强化交通行业“双碳”时间表、路线图，把握好节奏并平衡好力度。

四、我国民航运输业低碳化发展目标、基本思路和重点举措

（一）我国民航运输业低碳化发展目标

航空运输低碳化发展是未来航空技术发展、民航企业“走出去”的必然选择，也是适应航空运输业变革升级的时代要求。《“十四五”民航绿色发展专项规划》提出，2025年我国民航业绿色转型取得阶段性成果，减污降碳协同增效初步显现，行业碳排放强度持续下降，低碳能源消费占比不断提升。到2035年，绿色低碳循环发展体系趋于完善，航空运输实现碳中性增长，机场碳排放逐步进入峰值平台期。

以上述规划目标为基础，综合研判航空市场增长与低碳技术发展趋势，提出我国民航运输业低碳化发展的整体目标：2035—2040年，民航运输业碳排放进入平台期，实现碳达峰；2060年，民航运输业力争实现碳中和。届时，我国将形成民航绿色低碳发展格局，实现民航运输清洁化、高效化、智慧化变革，建成与民航强国相适应的低碳民航运输体系。航空领域分阶段排放特征，在航空产业、产品、运营、能源应用方面的减碳任务与目标如图3所示。

（二）我国民航运输业低碳化发展思路

航空运输业低碳化发展的核心理念是，在充分保障飞行安全和服务质量的前提下，积极推进航空产业的低碳技术创新，以“节能、减排、降噪”为核心要素。落实低碳发展任务，需要民机全产业链、产品全生命周期的协同配合，需要全行业的共同意识、共同研究、共同设计、共同实施。针对民航运输业碳减排发展，国际民航相关组织和多国政府已有规划、举措和路径；以此为基础，结合我国民航运输业发展实际，提出民航运输业低碳化发展思路。

一是在国家层面，统筹“双碳”战略目标、航空运输业碳排放约束，制定民用航空低碳化发展的顶层规划，合理增加财政专项对航空运输业低碳化发展的支持力度。建议设立以企业为主体的专门责任机构，结合国家民用飞机产品发展战略、未来20~30年国产民机发展目标，论证提出我国未来民机技术重大基础研究计划；支持系统性、针对性地开展航空低碳化技术体系研究，涵盖先进方案设计、安全适航、绿色制造、高效运营、绿色回收等重要环节，形成目标明确、层次明晰、逻辑清晰的体系性指引。财政税收政策在航空运输业低碳发展中具有引导性作用，已体现在发达国家的碳税政策、欧盟的碳交易体系中。我国可统筹制定面向全产业链的航空减排经济政策，适时发布相关的财政补贴、税费减免政策。面向全产业链，以航空制造

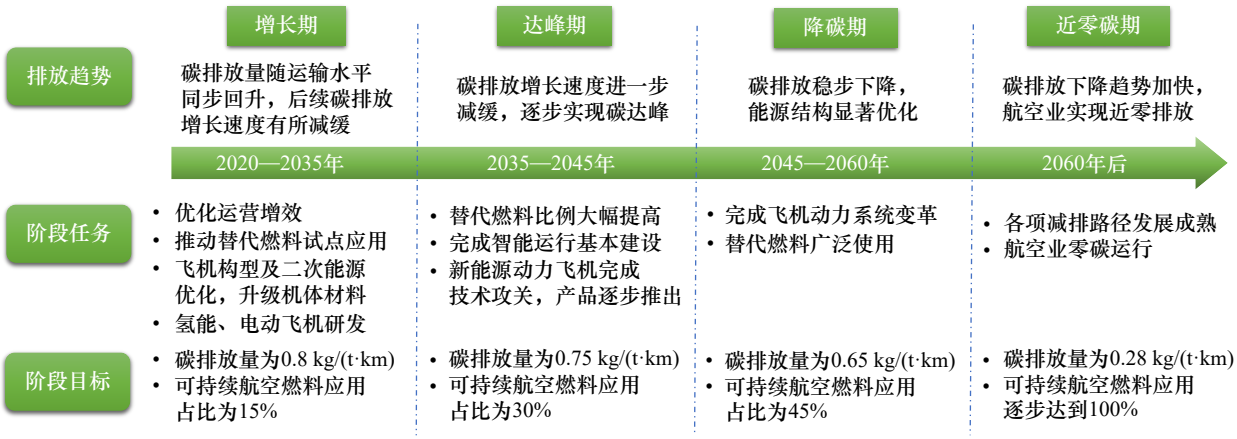

图3　民航运输业碳减排发展阶段预测

和运营企业、科研院所、高校为主体，支持建设开放型实验室、工程中心，聚焦民航低碳、零碳、负碳等先进技术开展研发、验证和应用，

二是在主制造商层面，积极探索产品创新方向，推动能源技术和减排技术的进步与应用。绿色环保是未来民机产品的发展目标，具有更高的燃油效率、更低的噪声、更少的污染排放等显著特征。全球民航运输业正在从提高燃油效率以减少碳排放的渐进式改革，转向发展新型低碳推进技术和新燃料的革命性方向。主制造商应积极与政府、管理局、航空公司、供应商密切合作，分类开展绿色航空器顶层需求及指标体系、技术攻关路径、新材料与制造、安全运营、适航发展、产业配套等研究；通过综合预估与权衡分析，明确产品创新发展目标，制定未来绿色能源航空器的发展规划，提出兼顾可实现性和未来发展目标的行动路线图；适度超前布局中长期的总体进度与关键技术，组织实施具有前瞻性、战略性的重大科研项目，开展支撑翼、翼身融合等新布局飞机方案，电动、混合动力、氢能等新能源飞机技术研发，适时启动核动力飞机的可行性论证；加强航空运输与航空制造的协同创新，重点突破高性能发动机、航空运营效率提升等方面的关键技术，攻克未来航空低碳化发展的瓶颈环节。

三是优化能源结构，加快可持续航空燃料产业化发展与应用。开展可持续航空燃料的技术研发、原料收集、生产适航、民航示范应用，把握航空运输市场的调整主动权。推动重大科技创新和工程示范，实施可持续航空燃料示范工程；加强国际合作，建立可持续航空燃料战略联盟，参与或主导国际标准制定，精准提升国际引领力。建立低碳绿色航油供应链，形成“生产－运输－加注”全产业链发展合力。推进光伏、地热等新能源的机场应用，开展近零碳机场建设。开展氢能源等清洁能源的民航领域示范应用，适度超前部署战略性技术，逐步推动电动、氢能等新能源动力飞机的研制与试用。应关注航空低碳能源应用相关的基础设施（如可持续航空燃料、氢、电等能源的配套存储、运输和供应）建设保障问题，促进能源供应商、民机制造商、航空公司、机场等方面的协调发展。

四是以能效提升、智慧民航、市场机制等作为航空公司运营的脱碳路径。发展智慧民航，促进航空公司低碳运营，以能源高效化利用为目标，推动行业数字化、智能化、智慧化转型升级，提升航班运行控制、网络规划、航空器管理等能力。推进空中交通服务、流量管理、空域管理智慧化，建立智慧节油管理系统，提高民航运行碳排放管理的科学性和精准性，提升航线/航班管理水平。引导航空公司持续优化航线网络布局、机队结构，科学规划国内外航线网络体系，提升民航运输业的整体运行能效。采取市场化减排等手段，建立民航低碳管理机制；强化民航相关企业的减排责任，积极参与国际、国内碳交易市场，显著提升绿色竞争能力。

（三）我国民航运输业低碳化发展的重点举措

一般认为，常规减排技术或替代技术难以实现深度减排，实现长期的深度脱碳或碳中和目标，关键在于突破性技术支撑。IATA、ICAO 等提出的民航减排支柱性措施，如飞机技术进步、空管与机场的管理减排措施、碳市场措施、可持续航空燃料等，在技术成熟程度上存在较大的差异性。综合看来，空管与机场的管理减排措施、运行效率提升措施的技术相对成熟，但减排潜力较小；提升飞机运营效率是近期最可行的手段，飞机与动力系统变革、可持续航空燃料技术将在行业深度脱碳方面发挥关键性作用，而标准体系、市场调控等措施可发挥辅助性作用（见图4）。

五、我国民航运输业低碳化发展建议

（一）研发低碳商用飞机产品

在国产支线飞机、窄体干线飞机陆续进入商业运营后，应及时明确下一代低碳化民用飞机研发任务方向，开展和深化未来产品的预先研究，为支持我国航空低碳化技术跨越式发展提供根本性解决方案。① 对于支线飞机，近期应用可持续航空燃料以快速降低碳排放量；中期（2035 年）采用现有或新研小型发动机作为主发动机并应用油电混合动力能源，创新使用层流大展弦比支撑翼、T 型尾翼、发动机尾吊或翼吊等总体气动布局；远期（2050 年）开发氢燃料电池/氢燃料涡轮推进系统。② 对于窄体干线飞机（单通道），近期应用可持续航空燃料以快速降低碳排放量；中期（2035 年）应用混合电推进动力形式，提高机载用电比例；远期（2050 年）应用氢涡轮发动机为动力形式。③ 对于宽体飞机，

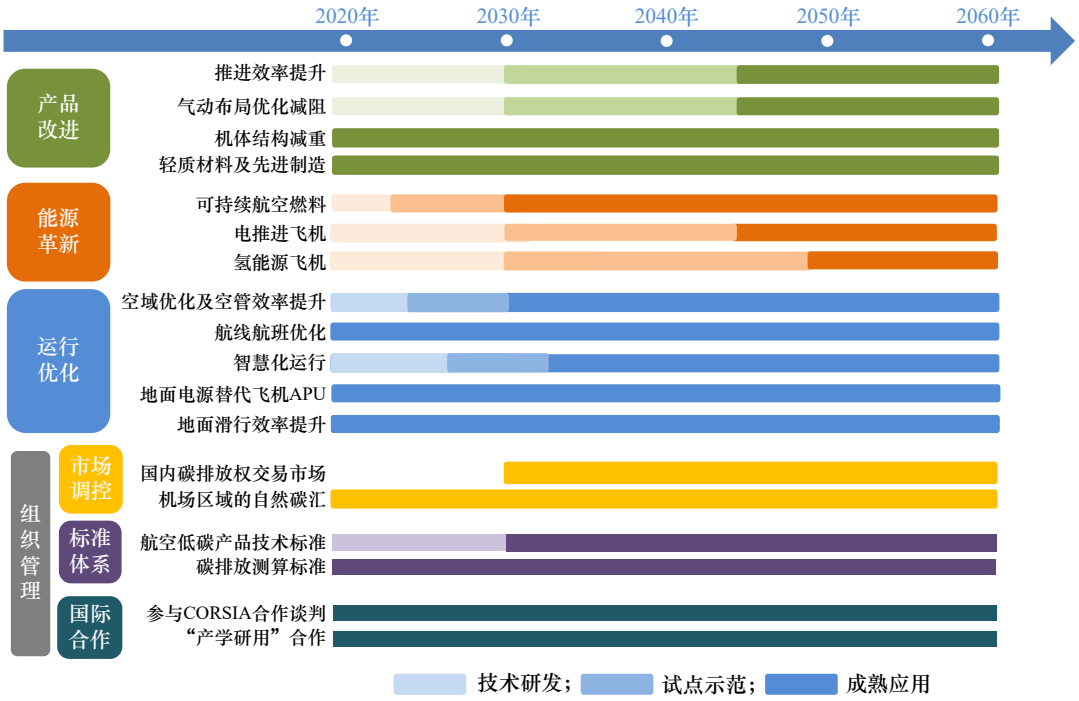

图4　民航运输业低碳化发展举措

注：APU表示辅助动力装置。

着重关注远程航线的碳减排，近期应用可持续航空燃料以快速降低碳排放量；远期（2050年）应用氢动力方案，同步推进核动力方案的技术探索。

（二）推进可持续航空燃料产业化

明确可持续航空燃料应用的政策目标，发挥引导性作用，形成可持续航空燃料产业化发展的良好环境。推进国产飞机型号的可持续航空燃料装机应用、示范航线运行，100%掺混比率的可持续航空燃料地面及飞行试验，开展可行性与安全性评估，建立相关标准及适航认证流程。扩大可持续航空燃料的应用规模，为使用可持续航空燃料的航空公司、生产商、供应商提供合理水平的补贴，促成稳定的可持续航空燃料承购协议，积极加入可持续航空燃料使用者小组、可持续生物材料圆桌会议等机制。提升可持续航空燃料的产能，按照合理水平在燃料生产和供应基础设施的建设期给予贷款优惠、在运行期给予财政补贴，提高对相关技术开发项目的支持力度。

（三）提升民航运营系统效率

适时优化机队结构，引入低能耗、低排放飞机。开展飞机节能技术改造，应用轻质化机载设备、电子飞行包以降低飞机运行载重。加强地面电源对飞机APU的应用替代，持续提升飞机燃油效率。科学规划和布局航空公司智慧中枢，增强航班运行控制、网络规划、航空器管理方面的能力。加快航空产品、航空公司、机场全面协同的数字化转型进程，提升机场智能化航班保障水平与空管服务效率。加强智慧航空公司、智慧空管、智慧机场等的试点和示范。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: March 24, 2023; **Revised date:** September 4, 2023

Corresponding author: Ma Jinghua is a senior engineer from COMAC Beijing Aircraft Technology Research Institute. Her major research field is civil aircraft product development strategy. E-mail: majinghua@comac.cc

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the ‘Dual Carbon’ Development Strategy of Aviation Manufacturing” (2022-HYZD-03)

参考文献

[1] International Council on Clean Transportation. CO emissions from commercial aviation: 2013, 2018, and 2019 [EB/OL]. (2020-10-08)[2023-06-15]. https://theicct. org/publication/CO2-emissions-

from-commercial-aviation-2013-2018-and-2019/.

[2] 中国商用飞机有限责任公司. 中国商飞公司市场预测年报(2022—2041) [EB/OL]. (2022-11-13)[2023-06-15]. http://www.comac.cc/fujian/2022-2041nianbao_cn.pdf.
Commercial Aircraft Corporation of China, Ltd. COMAC market forecast annual report (2022—2041) [EB/OL]. (2022-11-13)[2023-06-15]. http: //www.comac.cc/fujian/2022-2041nianbao_cn.pdf.

[3] 民用航空网. 航空产业碳中和之路全方位解析 [EB/OL]. (2021-08-24)[2023-06-15]. https://www.ccaonline.cn/yunshu/yshot/667761.html.
CCA Online. A comprehensive analysis of the aviation industry's path to carbon neutrality [EB/OL]. (2021-08-24)[2023-06-15]. https://www.ccaonline.cn/yunshu/yshot/667761.html.

[4] A route for net zero European aviation [EB/OL]. (2021-03-15)[2023-06-15]. https://www.destination2050.eu/.

[5] European Council, Council of the European Union. Fit for 55 [EB/OL]. (2021-07-14)[2023-06-15]. https://www. consilium. europa. eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/.

[6] International Civil Aviation Organization. Climate change mitigation: CORSIA [EB/OL]. [2023-06-15]. https://www.icao.int/environmental-protection/corsia/documents/icao%20environmental%20report%202019_chapter%206.pdf.

[7] International Air Transport Association. Aircraft technology roadmap to 2050 [EB/OL]. [2023-06-15]. https://www.iata.org/en/programs/environment/technology-roadmap/.

[8] International Air Transport Association. Working towards ambitious targets [EB/OL]. (2021-10-04)[2023-06-15]. https://www.iata.org/en/programs/environment/climate-change/.

[9] Aviation benefits. Waypoint 2050 [EB/OL]. (2021-09-27)[2023-06-15]. https://aviationbenefits. org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/.

[10] “十四五”民航绿色发展专项规划 [EB/OL]. [2023-06-15]. https://www. gov. cn/zhengce/zhengceku/2022-01/28/5670938/files/c22e012963ce458782eb9cb7fea7e3e3.pdf.
The 14th Five-Year Plan specialized plan for green development of civil aviation [EB/OL]. [2023-06-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-01/28/5670938/files/c22e012963ce458782eb9cb7fea7e3e3.pdf.

[11] Project Team on the Strategy and Pathway for Peaking Carbon Emissions and Carbon Neutrality. Analysis of a peaked carbon emission pathway in China toward carbon neutrality [J]. Engineering, 2021, 7(12): 1673–1677.

[12] 黄震, 谢晓敏, 张庭婷. “双碳”背景下我国中长期能源需求预测与转型路径研究 [J]. 中国工程科学, 2022, 24(6): 8–18.
Huang Z, Xie X M, Zhang T T. Medium- and long-term energy demand of China and energy transition pathway toward carbon neutrality [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(6): 8–18.

[13] World Meteorological Organization. WMO statement on the state of the global climate in 2019 [R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2020.

[14] 李晓易, 谭晓雨, 吴睿, 等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 15–21.
Li X Y, Tan X Y, Wu R, et al. Paths for carbon peak and carbon neutrality in transport sector in China [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 15–21.