

中国民航业中长期碳排放预测与技术减排潜力分析

许绩辉,王 克* (中国人民大学环境学院,北京 100872)

摘要: 基于 LEAP 构建自下而上的中国民航业能源系统模型,设置冻结、现有政策、力度、替代和革命五组情景,深入分析民航业的驱动因子和发展趋势,探讨中国民航业中长期低碳发展的技术路径.结果显示,预计 2060 年左右人均乘机次数翻两番,突破 2 人次,冻结情景下 2060 年会带来高达 6.9 亿 t 的碳排放.力度情景下,民航业碳排放有望在 2044 年左右达峰,峰值水平控制在 3 亿 t 左右,40 年累积减排近 50%,仅需增加约 1 万亿人民币的成本.稳步推进机队更新换代,加快基础设施提升和运营操作改进,发展可持续航空燃料是民航业必须依赖的减排手段,分别能带来 44.1%、29.5%和 26.4%的减排量.因此,民航业要尽早制定行业“双碳”目标和实施路径计划,中短期统筹推进空域改革、空中交通管理和航司精细化管理,大力支持国产大飞机的发展,长期推动可持续航空燃料全产业链商业化和市场化.

关键词: 民航业; LEAP 模型; 碳减排; 技术路径; 情景分析

中图分类号: X32 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2022)07-3412-13

Medium- and long-term carbon emission forecast and technological emission reduction potential analysis of China's civil aviation industry. XU Ji-hui, WANG Ke* (School of Environment and Natural Resources, Renmin University of China, Beijing 100872, China). *China Environmental Science*, 2022,42(7): 3412~3424

Abstract: This study develops a bottom-up energy system model of China's civil aviation industry based on the LEAP model framework, sets FROZEN, GOAL, MAX, SAF, and REVOLUTION scenarios to quantitatively analyze the industry's driving factors and development trends, and discusses the medium- and long-term low-carbon development technological pathways. The results show that the number of flights per person is expected to quadruple to more than two by 2060, which will imply up to 690million tons of carbon emissions under the FROZEN (baseline) scenario. Under the MAX scenario, carbon emissions from China's civil aviation industry are expected to reach a peak at around 300million tons in 2044. The cumulative emission reduction of nearly 50% over the 40 years only requires an additional cost of about 1trillion RMB (compared to the baseline). Promoting fleet replacement, accelerating infrastructure upgrading and operation improvement, and developing sustainable aviation fuels are the essential emission reduction means for the civil aviation industry, which can bring 44.1%, 29.5%, and 26.4% emission reduction respectively. In conclusion, China's civil aviation industry should formulate the goal of "carbon peak and carbon neutrality" and its implementation plans as soon as possible: promoting the airspace reform, air traffic management, and refined airline management in the short- and medium-term, providing vigorous support to the development of domestic large aircraft, and accelerating the commercialization and marketization of industry chain of sustainable aviation fuels in the long term.

Key words: civil aviation; LEAP model; carbon emissions reduction; technological pathways; scenario analysis

改革开放以来,我国民航需求持续增长,由此带来巨大的碳排放,约占全国总排放的 1%.[¹]但我国人均乘机次数仍远落后发达国家[²],随着我国经济高质量发展,民航业未来还有很大的增长空间,将成为未来能源消费和碳排放增长的主要来源之一.中国已正式宣布将力争 2030 年前实现碳达峰、2060 年前实现碳中和[³],在其他部门通过低碳转型减少排放的背景下,占全社会排放比重不断上升的民航业将在中长期成为我国实现“双碳”目标的重要挑战.此外,民航业是世界上第一个由各国政府协定实施全球碳中和增长措施的行业,全球航空运输业碳中和方案及减排计划(CORSIA)已进入试验期[⁴],如果按照 CORSIA 确立

的市场机制去抵消增长的 CO₂,中国民航业将面临巨大的成本压力,在国际竞争中将处于不利地位.因此,研究我国民航业的排放路径、减排潜力以及优选减排技术措施,有助于为中国民航业在保证人民群众航空出行需求的前提下,科学控制碳排放,走上低碳可持续发展道路提供参考.

整体上,现有关于中国民航业碳排放的研究主要集中在碳排放估算和影响因素分解等领域.

收稿日期: 2021-12-23

基金项目: 全球能源互联网集团有限公司科学技术项目(SGGEIG00JYJS 2100049)

* 责任作者, 副教授, wangkert@ruc.edu.cn

碳排放估算方面,不断完善了不同边界的基于燃料消耗估算民航业碳排放的方法^[5-8]。影响因素分解方面,现有研究采用结构分解分析(SDA)与指数分解分析(IDA)以及进一步发展的 LMDI 法、系统动力学方法对交通行业^[9-11]和民航业^[12-14]展开分析,结果显示 GDP、人口等宏观经济因素正向变化会驱动碳排放的增长,通过提升技术水平、运行效率,加快替代能源使用等影响能源强度和排放强度的方式能够抑制碳排放的增长。许多研究进一步在全球或欧洲范围内展开民航业中长期情景分析,为行业提供技术解决方案,描述民航业低碳发展的实施路径。^[15-20]但现有的减排路径的定性讨论^[21]和可持续航空燃料中短期减排潜力分析^[22]对民航业的减排技术的考虑不够全面,对中国民航业中长期的碳排放预测和各项减排技术应用潜力的评估存在不足。因此,有必要在前述研究的基础上进一步结合中国实际,充分考虑各类减排技术和措施,在更长的时间尺度开展情景分析。

需求预测方面,现有研究一般把国内生产总值 GDP 和航空公司收益自变量,航空旅客周转量作为因变量进行建模^[23],大多采用时间序列法、多元回归分析法、弹性系数法^[24-26]以及季节时间序列模型、GMDH 模型、多变量灰色数列预测、系统动力学等进一步发展的预测手段。^[27-32]但这些总量预测的方法存在三方面不足,一是没有充分考虑客运与货运、国内与国际的不同的市场,二是总量预测没有考虑机队执飞情况,没有建立与飞机技术的联系,三是需要进一步考虑 COVID-19 冲击对计量模型长期稳定性的影响。按航线组、分机型的自下而上预测方法^[19,33-38],从中短期与长期分别考虑疫情冲击的影响^[18,39]可以较好地解决上述问题,但所需的数据条件无法从国内公开渠道获取。因此,有必要结合中国公开数据条件优化自下而上的需求预测方法。

为此,本文聚焦中国尺度,基于 LEAP 模型框架,构建自下而上中国民航业能源系统模型,参考飞机技术路线图^[40]、航空脱碳路线图^[41-42]、航空燃料路线图^[43-44]等技术规范全面梳理民航业各项减排技术和措施,结合民航业发展特征设置冻结、现有政策、力度、替代和革命五组情景,进一步区分市场和机队类型,深入分析民航业碳排放的驱动因子和发展趋势,分析 COVID-19 冲击后中国民航业长期低

碳转型的路径、技术选择和成本,对评估中国民航业在“双碳”目标下实现低碳可持续发展具有重要的理论和现实意义。

1 方法与数据

1.1 自下而上中国民航业能源系统模型

基于 LEAP 模型框架开发的自下而上中国民航业能源系统模型^[45],包括需求、技术和减排成本评估三个模块,对民航业的能源消费、碳排放进行仿真模拟。模型的总体计算机理如下:首先,人口、GDP 等社会经济驱动因子决定民航业未来能源服务需求,然后在不同情景下确定满足需求的未来能效和低碳技术扩散率的技术组合,最后加总不同市场、不同机队(技术终端载体)消耗的能源以及由此带来的碳排放,得到全行业能源消费量与碳排放。模型以 2020 年为基准年,展望到 2060 年。

模型基本框架如图 1 所示。需求模块中,运输周转量按客货运划分了三个市场。技术模块中,终端技术载体横向上分成四类机型,纵向上划分为两代机型。参考主流技术规范^[18,40-41],模型选择的技术分为基础设施提升与操作运营改进(O 因素)、飞机更新换代(T 因素)、可持续航空燃料(F 因素)三类。成本模块中,识别每项减排技术和措施的全生命周期(投资-服役-折旧-退役)成本,与该技术全生命周期减排量构建技术边际减排成本曲线,再结合该技术在情景中的减排潜力计算情景应用的总成本。

技术模块是模型的重点。在遍历民航业主流技术报告的基础上,模型全面梳理 3 类 8 种 19 项减排效果好、操作性强的技术措施。(表 1)相较美国、欧洲等地区较为灵活的空域,由空军管制的中国民用空域有更大的提升空间,本文将航路优化与空域改革技术区分于空中交通管理(ATM)单独建模,兼顾了补偿航空需求对效率的潜在负面影响^[42,46]。为了探讨可持续航空燃料在中国民航业的减排潜力,本文充分考虑了传统、先进和零碳三种工艺^[43-44],以求选取技术客观、全面。此外,针对尚在热议的下一代飞机技术,分析现有的技术报告^[20,40]后,本文从结构、材料和动力三个方面充分考虑最大可能的技术集成路径。这些全面详实的技术细节为准确描绘中国民航业未来低碳发展路径奠定了扎实基础。

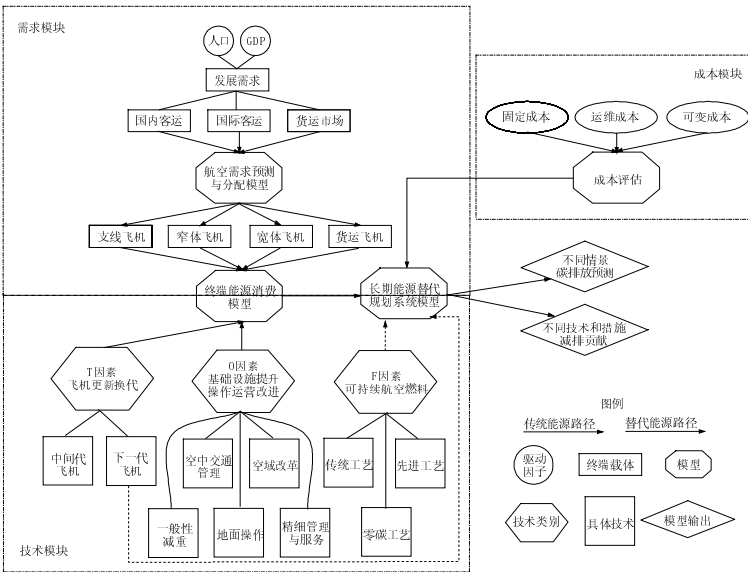


图 1 模型结构
Fig.1 Model structure

表 1 模型选取技术

Table 1 Emission reduction technologies included in the model

技术大类	技术子类	技术明细	区分机队
基础设施提升与运营操作改进(O因素)	高效运营操作:常规	一般性减重	否
		精细化管理与维护	否
	高效运营操作:地面作业	单引擎滑行	否
		电动滑行	否
		燃料电池替代APU	否
	基础设施提升:专项改进	航路优化与空域改革	否
		地面拥塞管理	否
	基础设施提升:空中交通管理(ATM)	优化离场程序	否
		优化巡航路径	否
		优化进场程序	否
飞机更新换代(T因素)	中间代飞机	高效动力技术	是
	渐进式下一代飞机	高效结构设计与材料技术	是
		先进动力技术	是
		先进结构设计与材料技术	是
	革命式下一代飞机	革命性动力技术	是
可持续航空燃料(F因素)	可持续航空燃料	革命性结构设计与材料集成技术	是
		常规工艺	否
		先进工艺	否
		零碳工艺	否

注:技术参数主要来源:ATAG的路标2050报告^[18]、ICAO环境报告^[20]、欧洲的航空净零排放路径报告^[41]、IATA航空科技技术路线图^[40]、以及相关文献^[42-44, 47-48]。

为与中国民航局公布的统计数据口径保持一致,模型的核算边界是中国境内航空公司所属航空器执行的传统商业航班带来的二氧化碳排放,不包

括机场地面支持设备运行、机场建筑用电带来的直接或间接排放,也不包括通用航空,包机、专机、商务飞行等航班类型的排放。

1.2 计算方法

民航碳排放的计算与交通领域一般计算方法一致,由客运或货运周转量和单位周转量燃料消耗、单位燃料排放系数相乘得到.计算公式如下:

$$E = \sum A_{m,n} \times C_{m,n} \times F_{m,n} \tag{1}$$

式中: E 为中国民航业 CO_2 排放, t CO_2 ; m 为不同的市场,即国内客运、国际客运、货运航空三个市场; n 为不同的能源品种,包括传统航空煤油和可持续航空燃料; A 是周转量, $\text{t}\cdot\text{km}$,是衡量航空出行活动量的指标; C 是能源强度,即单位周转量燃料消耗, $\text{kg}/(\text{t}\cdot\text{km})$; F 为排放强度,即单位能源消费产生的 CO_2 排放量, $\text{t CO}_2/\text{t}$ 。

其中,周转量综合考虑业内对民航业受COVID-19冲击的影响和复苏时间,以及对中长期增长趋势的判断外生假设确定.计算公式为:

$$A_{m,t} = A_{m,t-1} \times (1 + \theta_t) \tag{2}$$

式中: A 为周转量,客运的单位(10^8 人 $\cdot\text{km}$),货运的单位是($10^8\text{t}\cdot\text{km}$); m 是不同的市场; θ 是年度变化率,以百分数计; t 为年份。

能源强度由各分项技术的能源经济性和渗透率综合决定,计算公式为:

$$C_t = C_{t-1} \times (1 - \sum \delta_i \times \lambda_i) \tag{3}$$

式中: C 为单位周转量燃料消耗, $\text{kg}/(\text{t}\cdot\text{km})$, δ 为能效

提升率,以百分数计; i 代表不同技术; λ 是技术渗透率; t 为年份。

排放强度由传统航空煤油的排放因子、可持续航空燃料的减排系数,以及混合率综合得到,该方法由国际民航组织航空环境保护委员会(CAEP)市场措施工作组^[20]提供的公式推导而来,具体为:

$$F=3.16 \times (1-\beta_n) + 3.16 \times (1-ERF_n) \times \beta_n \quad (4)$$

式中:3.16 是 Jet-A/Jet-A1 型传统航空喷气燃料燃料转换系数;ERF 是减排系数,单位是 kg CO₂/kg, β_n 为第 n 种可持续航空燃料在燃料中的混合率。

本文还将 Hassanbeigi 等^[49]提出的碳减排成本计算方法与财务分析的基本框架相结合推广到民航业,具体公式为:

$$\text{Cost}_{\text{CO}_2} = \frac{\text{FC} - \text{BC}}{\text{CO}_{2\text{baseline}} - \text{CO}_{2\text{abatement}}} \times \text{AP} \quad (5)$$

式中:FC 是采用该减排技术所需的全部成本,BC 是不采取减排技术或措施的成本, $\text{CO}_{2\text{baseline}} - \text{CO}_{2\text{abatement}}$ 是采取减排技术后全生命周期累计减排量,前述比值即该技术的边际减排成本,元/t CO₂.AP 是全行业采用了某种减排技术或措施实现的减排量,t CO₂.Cost 为减排总成本,元。

1.3 数据来源

本文数据需求及来源如下:中国未来人口假设来源联合国《世界人口展望(2019)》^[50],GDP 参考“十四五”规划和 2035 远景目标确定^[51],民航业中长期规划目标来源《新时代民航强国建设行动纲要》^[52],主要活动数据¹来源国家统计局^[53]、中国民航局^[54-55]、CEIC 数据库^[56],相关技术和成本参数参考国内外文献[17-18,20,40-45,47-48];排放因子来源于 CAEP^[20,57].为与政策规划保持一致,模型的基准年设置为 2020 年,贴现率综合考虑全国银行业同业拆借中心发布的 5 年期以上贷款市场报价利率(LPR,4.65%),与近年来反映通货膨胀的居民消费价格指数增长率(2%左右),取值为 6.65%。

参考 SCHÄFER 的研究^[47],本文假设传统航空煤油价格不变,价格为 75 美元/桶,按政策规定的 1:7.9 的吨桶比^[58],折合 592.5 美元/t;假设可再生能源电价^[59]与液氢^[60]价格不变;假设美元人民币汇率不变,以国家统计局公布的 2020 年人民币兑美元平均汇率 100:692.65 进行折算。

2 情景设定

本文设置了 5 组情景,校准减排技术措施的冻结情景(FRN)、反映行业规划的现有政策情景(GOAL)、反映进一步应对气候变化的力度情景(MAX)、突出可持续航空燃料最大应用潜力的替代情景(SAF),突出零碳技术应用潜力的革命情景(REV),具体情景假设如下(表 2)。

表 2 不同情景主要参数的区别

Table 2 Differences in main parameters across scenarios

情景	目标	O 因素	T 因素	F 因素
冻结情景(FRN)	不应气候变化	不改进	传统技术,不进步	不使用
现有政策情景(GOAL)	延续现在应对气候变化力度	操作改善,基建 2050 实现	传统技术,更新、引进慢(25 年)	2050 替代 10%
力度情景(MAX)	努力碳达峰	操作高效,基建 2035 实现	传统技术,更新、引进快(20 年)	2050 替代 30%
替代情景(SAF)	积极碳中和	操作高效,基建 2035 实现	传统技术,更新、引进快(20 年)	2060 替代 100%
革命情景(REV)	加快碳中和	操作高效,基建 2035 实现	革命技术,更新、引进快(20 年)	2060 替代 100%

冻结情景假设民航业发展按历年趋势往外推,不考虑应对气候变化目标.该情景下,中国民航业延续传统发展路径,燃油效率技术进步达到瓶颈;以空中交通管理为主的基础设施提升和操作改进进展缓慢,与需求增长相抵消;能源结构保持不变,不使用可持续航空燃料。

现有政策情景假设民航业按《新时代民航强国建设行动纲要》和相关发展规划的目标改革发展,不采取额外的减缓行动.空气动力学、减载以及动力技术有所发展,民航业通过更新中间代飞机、引进渐进式下一代飞机,燃油效率逐步提升;逐步优化航路和空中交通管理,北斗导航按期投入使用,操作改进措施稳步推广,整体效率提升技术红利在 2050 年建成全方位民航强国时全部实现;航司初步尝试可持

1 能源强度数据来源《从统计看民航(2019)》、各航司年报和公开报道机队引进和退出情况(2019、2020).2020 年效率水平按 2020 年实际机队数据与 2018 年活动量结构进行加权调整估算,并与官方统计公布的 2018 年、2019 年全行业效率水平进行对比校对。

续航空燃料,但能源结构仍以传统航空煤油为主,可持续航空燃料应用参照中国能源消费结构趋势,2050 年仅替代 10% 的航空燃料消耗。

力度情景假设政府大力支持民航业碳达峰,低碳技术进一步发展,可持续航空燃料逐步商业化.空气动力学、减载以及动力技术加快发展,中国民航业加快更新中间代飞机、引进渐进式下一代飞机,燃油效率加速提升;空域改革成效显著,导航和航路得到广泛优化,整体效率提升技术红利在 2035 年建成多领域民航强国时全部实现;政府支持可持续航空燃料,以当前世界平均水平按照 S 曲线上升路径外推,2050 年可替代 30% 航空燃料消耗。

替代情景假设在力度情景的基础上,政府为进一步支持民航业碳中和,大力支持可持续航空燃料的投资、研发、生产和推广,可持续航空燃料产量扩大、成本降低、迅速商业化,确保与传统航空煤油相比具有市场竞争力.此情景下可持续航空燃料商业化成熟度高、成本低,2025 年可替代 2%、2030 可替代 5%、2050 替代 75%、2060 年实现完全替代传统航空煤油。

革命情景假设在替代情景的基础上,政府大力支持零碳技术的研发和应用,行业采用突破性变革的飞机架构和推进动力,机场和产业链配套提供有效保障.此情景下,氢能飞机、电动飞机等革命性零碳技术,混合动力飞机等革命性高效推进技术取得突破进展,下一代飞机引入时间提前,2035 年左右全电动支线飞机和氢能窄体机投入市场,2040 年左右混合动力宽体机投入市场,2050 年后支线飞机覆盖的国内市场全部由全电动飞机执飞。

3 民航业关键驱动因子分析

3.1 客运周转量增长趋势

行业普遍认为民航业中长期会恢复到以前基准模型的增长趋势^[39,61],国际民航组织、波音、空客、中国商飞等机构^[33-36,39]最新预测中国民航 20 年客运年均增长率大致在 4.7%~5.98%。2020 年 7 月国内客运与去年同期持平表明国内旅行已恢复到 COVID-19 之前的水平^[62],但许多国家要到 2023 年以后才能形成群体免疫^[63],短期内航空旅行以国内市场为主,国际市场受各国边境管控以及中航局“五个一”政策影响复苏缓慢^[64]。本文假设民航业长

期趋势不会发生结构性变化,短期内国内客运 V 型复苏,国际客运 U 型复苏^[65],长期按照疫情前的趋势发展,增速逐渐放缓,国际旅客增速略高于国内旅客增速;国内客运和国际客运分别因疫情原因推后 2 年、4 年复苏,复苏后会出现短期高速增长“报复性反弹”(表 3)。

表 3 未来中国民航客运周转量及变化率假设

Table 3 Assumptions of future passenger turnovers and change rates of China's civil aviation industry

时期 类别	参照年 ² 2019	短期 2021E	长期		
			2035E	2050E	2060E
国内周转量 (万亿人·km)	0.85	0.68	2.01	3.44	3.89
变化率(%)		-10.6	5.5	4.6	3.8
国际周转量 (万亿人·km)	0.32	0.06	1.22	2.22	2.52
变化率(%)		-55.3	8.8	6.5	5.2
客运周转量 (万亿人·km)	1.17	0.75	3.23	5.66	6.41
变化率(%)		-20.2	6.5	5.2	4.2

3.2 货运周转量增长趋势

航空货运是国际国内“双循环”格局的重要部分,随着全球经济逐渐复苏,全球制造业出口需求强劲,货运航空由此迅速增长,我国航空货运量占亚洲比重近 50%^[66]。短期内在全球范围内空运新冠疫苗预计会额外增加 2% 的货运周转量^[67]。相关专业机构^[22-25,28]最新预测世界航空货运年均增长率在 2.6%~4.1%,亚太地区略高于世界均值.本文假设 2021 年货运航空恢复到疫情前的水平,2022~2024 年年均增长率相较行业预测高 2%,中长期货运增长参照亚太地区航空货运增长预测值(表 4)。

表 4 未来中国民航货运周转量及变化率假设

Table 4 Assumptions of future cargo turnovers and change rates of China's civil aviation industry

时期 类别	参照年 2019	短期 2021E	长期		
			2035E	2050E	2060E
货运周转量 (亿 t·km)	263.2	263.2	512.74	757.1	836.32
变化率(%)		0	4.3	3.5	2.9

2 受到 COVID-19 冲击,民航业短期波动较大,长期趋势仍然回到原来的轨迹,行业研究大多与疫情前的 2019 年(代表原来的轨迹起点)进行对比.因此,本为了更直观地展示疫情冲击下行业短期的波动,本研究参考行业经验,选取 2019 年作为参照年,但整体建模的基准年是 2020 年,下同。

3.3 机队执飞结构

根据中国民用航空局详细分机型的机队规模及效率指标统计数据^[54]可知窄体机是我国民航客运的主力,占比高达 67.7%,支线客机执飞占比极少,仅为 1.51%。除执飞远程洲际航线外,部分宽体机也执飞国内枢纽机场间的商务航线,据估计宽体客机执飞国内航线周转量约为 24.1%,约为宽体机队的 50%^[45]。本文假设国际航空逐步恢复正常后(即 2025 年及以后),机队执飞国际国内航线的结构延续往年的情况,即国内客运周转量的 25%由宽体机执飞,2%由支线飞机执飞,剩下 73%由窄体机执飞;国际客运周转量的 50%由宽体机执飞,50%由窄体机执飞。(表 5)

表 5 未来中国民航客机机队执飞结构假设(%)
Table 5 Assumptions of operating structure of future aircraft fleet of China's civil aviation industry(%)

类型		参照年	短期				中长期
类别	机型	2019	2021E	2022E	2023E	2024E	2025-
国内	宽体	25	40	35	30	25	25
	窄体	73	58	63	68	73	73
	支线	2	2	2	2	2	2
国际	宽体	50	90	80	70	60	50
	窄体	50	10	20	30	40	50

3.4 关键技术假设

飞机更新换代方面,按 25 年线性更新换代的假设,预计下一代支线飞机和窄体机于 2035 年服役,宽体机将于 2040 年服役。^[41]鉴于货机发展轨迹一般是客运技术成熟后进行“客改货”且我国货机主要是窄体机与宽体机,因此本文货机的技术参数取窄体机与宽体机的平均值。考虑到国外的氢能的可用性和配套基础设施存在不确定性,且数据达不到国际主流研究精细到航线的水平,本文参考荷兰皇家航空航天中心的研究^[41],假设革命性技术路径下液氢驱动的窄体机仅适用与国内航班,国际航班仍然使用传统航空煤油,全电动飞机仅覆盖国内支线市场(表 6)。

运营操作改进方面,鉴于中国在 2016 年底才首次成功实践 CDO 和 COO^[68],东航、南航实施率仅在 20%~40%^[69],本文假设所有操作运营改进措施在基准年均未实施,从 2021 年开始实施。基础设施提升方面,各国对其领土上方的空域拥有完全和排他的主权^[70]使得空域改革和 ATM 只对本国境内的飞行有效,为兼顾全球航空系统组块升级(ASBU)的效益,本文参考荷兰皇家航空航天中心的研究^[41]假设基础设施提升技术只对国际客运发挥 50%、对货运发挥 75%的效用。(表 7)

表 6 不同情景下机队能源强度、技术碳减排强度假设
Table 6 Assumptions of fleet energy intensity and carbon emission intensity reduction under different scenarios

机队	2020	2035E		2050E		2060E	
	能源强度	能源强度	CO ₂ 减排(%)	能源强度	CO ₂ 减排(%)	能源强度	CO ₂ 减排(%)
现有政策情景							
宽体机	0.451	0.409	9.28	0.354	21.44	0.317	29.69
窄体机	0.307	0.268	12.73	0.232	24.44	0.221	28.13
支线飞机	0.276	0.241	12.70	0.208	24.59	0.198	28.28
货运飞机	0.140	0.130	7.50	0.112	19.71	0.103	26.50
力度情景/替代情景							
宽体机	0.451	0.399	11.60	0.344	23.71	0.302	32.99
窄体机	0.307	0.259	15.91	0.227	26.08	0.221	28.13
支线飞机	0.276	0.232	15.88	0.203	26.23	0.198	28.28
货运飞机	0.140	0.128	8.75	0.108	23.00	0.101	28.00
革命情景							
宽体机	0.451	0.399	11.60	0.306	32.22	0.233	48.45
窄体机	0.307	0.256	19.62	0.189	72.55	0.174	82.67
支线飞机	0.276	0.228	21.51	0.135	89.77	0.113	99.59
货运飞机	0.140	0.128	8.75	0.099	29.42	0.084	40.25

注:上表CO₂减排不包括可持续航空燃料和基础设施提升与运营操作管理,仅考虑机队更新换代,能源强度单位为kg/t·km。

可持续航空燃料方面,我国目前可持续航空燃料商业化利用率极低,多是通过 HEFA 技术加工油脂类的生物质燃料^[71],但也掌握先进工艺的技

术^[72-73],本文充分考虑生物燃料渐进式的发展路径^[74-76],假设 2035 年以前,由于成本和技术成熟优势,常规工艺在市场中占主要地位,2035 年后,油脂原料

受限,以废弃物为原料、以 FT/ATJ 工艺为代表的先进工艺市场占比逐步扩大.2050 年后,得益于我国可再生能源供电结构改善,PtL 零碳工艺逐步成熟并扩大市场份额.本文假设所有技术均不能实现碳捕获(即不是负碳技术);零碳工艺完全采用可再生用电,ERF 为 100%;其他两类工艺 ERF 线性增长³,常规工艺稍慢于先进工艺.最后,参考英国可持续航空燃料路线图研究^[44],可持续航空燃料的替代水平变化趋势拟合 logistics 曲线.

表 7 不同情景 O 因素普及率假设(%)

Table 7 Assumptions of the penetration rates of the “O factor” under different scenarios(%)

类别	2025E	2035E	2050E
现有政策情景			
运营操作改进	33.3	100	100
基础设施提升	16.7	50	100
力度情景/替代情景/革命情景			
运营操作改进	50	100	100
运营操作改进	33.3	100	100

表 8 可持续航空燃料市场结构、ERF 和替代水平假设(%)

Table 8 Assumptions of the market structure, ERF and substitution levels of sustainable aviation fuels(%)

类别	2025E	2035E	2050E	2060E
市场结构				
常规工艺	99	84	44	18
先进工艺	1	15	51	72
零碳工艺	—	1	5	10
ERF				
常规工艺	45	55	70	80
先进工艺	52.5	67.5	90	99
零碳工艺	100	100	100	100
替代水平				
现有政策情景	0.04	0.45	10.25	18.62
力度情景	1.00	5.00	31.83	51.51
替代情景	1.93	12.74	77.18	100
革命情景	1.93	12.74	77.18	100

4 民航业中长期碳减排潜力分析

4.1 民航业 CO₂ 排放趋势

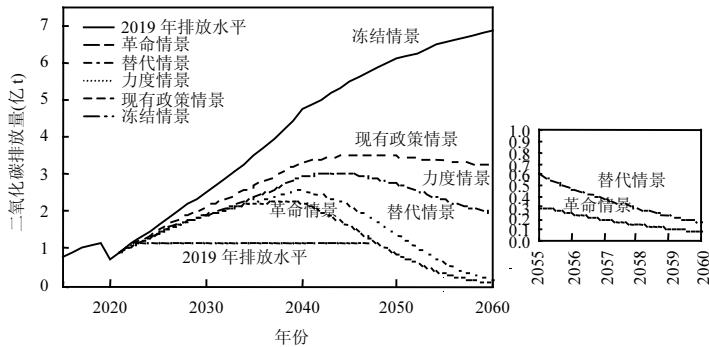


图 2 中国民航业 CO₂ 排放趋势
Fig.2 CO₂ emission trends of China's civil aviation industry

图2是不同情景下民航业中长期CO₂排放趋势.冻结情景下,随着航空需求快速增长,中国民航业碳排放快速上升,呈现“准线性”排放的特征,2060 年 CO₂ 排放将达到 6.9 亿 t,是 2019 年的 6 倍、2005 年的 25 倍,40 年将累积带来 174.2 亿 t 碳排放,成为我国未来碳排放增长的重要来源.

现有政策情景下,民航业碳排放放在 2046 年左右达峰,峰值水平约为 3.5 亿 t,此后十年为峰值平台期,碳排放稳稳中略降,2060 年下降至 3.3 亿 t.该情景 40 年累积减排量约为 63 亿 t,这意味着现有应对气候变化的措施能够发挥 36.2%的减排效果,推动民航业

实现碳达峰.

力度情景下,各项减排技术和措施协同增效,民航业有机会在 2044 年左右达峰,峰值水平进一步降低至 3 亿 t,峰值平台期缩短,碳排放稳步下降,2060 年下降至 2 亿 t.该情景表明,更有力度的应对气候变化措施能进一步实现 20.2 亿 t 的累积减排量,带来 11.6%的减排贡献,推动民航业提早达峰、降低峰值.

3 为与国际碳市场保持一致,本文选取 CORSIA 合格燃料的生命周期排放值默认值表的世界范围的平均值计算 ERF,按目前 50%的混合比例,参考国际分类方式,整个行业常规工艺的 ERF 为 40%,先进工艺可持续航空燃料技术 ERF 为 45%.

替代情景下,可持续航空燃料的减排潜力得到充分发挥,民航业达峰时间提前到 2040 年左右,峰值水平进一步降低至 2.6 亿 t,峰值拐点后碳排放迅速下降,预计在 2050 年左右回落至 2019 年水平,在 2060 年可及近零排放(1680 万 tCO₂).这意味着,全面部署可持续航空燃料可以进一步实现 27.5 亿 t 的累积减排量,带来 15.8%的减排贡献,推动民航业迈向近零排放.

替代情景已经是渐进式技术路径下民航业的最优排放趋势,若要进一步减少碳排放、降低达峰水平,必须对机身架构和推进技术进行革命性创新.革命情景下,通过充分挖掘飞机技术的潜力,可以进一步发挥 5.1%的减排贡献,带来 8.9 亿 t 的累积减排量,民航业碳排放峰值为 2.3 亿 tCO₂,仅较 2019 年翻一番,2060 年碳排放下降到 828 万 t,触及近零排放.

4.2 民航业减排成本分析

本文测算 40 年间各情景的应用总成本.如图 3,冻结情景下,民航业引进新飞机与燃油消费约带来 16.4 万亿元的总成本.现有政策情景下,整个行业因减少使用传统化石燃料而节约了约 4.7 万亿元的成本.力度情景加快应对气候变化,为此相较冻结情景额外增加约 1 万亿元.替代和革命情景因大量使用价格较高的可持续航空燃料,由此带来巨大的成本,分别较冻结情景增加 10.1 万亿元、7.6 万亿元.虽然革命情景低于替代情景的总成本,但下一代革命式飞机服役仍然存在着不确定性.

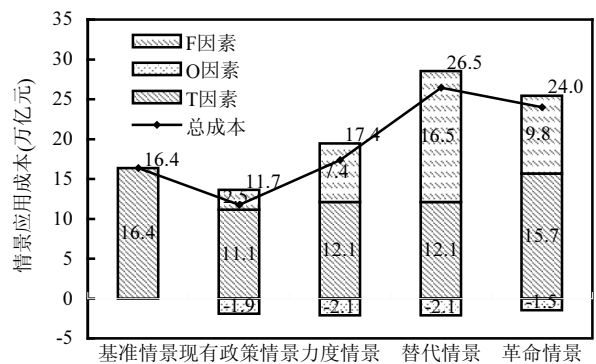


图3 各情景应用成本及结构
Fig.3 Cost and structure under different scenarios

从成本结构上看,不同情景间飞机更新换代新增的成本和基础设施提升与运营操作改进措施带来的节油收益差异不大,前者的成本大致在 12 万亿

元左右,后者的净效益大致在 2 万亿元左右.可持续航空燃料是影响减排效果和总成本的主要因素,替代情景下使用可持续航空燃料的成本高达 16.5 万亿元,总成本相较冻结情景翻一番.因此,民航业应当加快推动净收益的基础设施提升和运营操作改进,要结合实际审慎部署可持续航空燃料,统筹发展民航业碳减排技术,推进能效提升措施.

4.3 民航业中长期减排技术潜力分析

如表 9,替代情景和革命情景应用总成本远远高于现有政策情景,边际减排成本远高于现在 50 元/t 左右的平均碳价^[77],而力度情景相对于现有政策情景进一步减排,仅比冻结情景新增 1 万亿元人民币,且只要市场碳价高于 120 元/t 时民航业就有动力去减排.因此,力度情景更适合中国民航业未来的发展路径.

表 9 各情景综合比较
Table 9 Comprehensive comparison between different scenarios

情景	减排量(亿 t)	减排贡献(%)	应用总成本 (万亿元)	边际减排成本 (元/tCO ₂)
冻结	0	0	16.4	
现有政策	63	36	11.8	-734
力度	83.2	47.6	17.4	120
替代	110.8	63.3	26.5	911
革命	119.7	68.4	24.1	638

实现从冻结情景到力度情景的转型,即从图 4 的上边界排放轨迹到下边界排放路径,民航业必须要协同推进各项减排技术和措施.

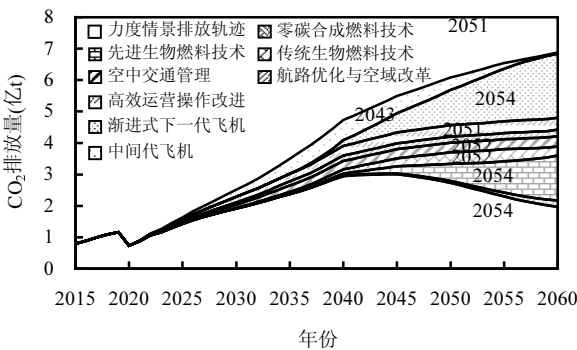


图4 中国民航业中长期减排技术路线
Fig.4 Roadmap for medium - and long-term emission reduction technologies in China's civil aviation industry

首先要充分发挥燃油经济性潜力.要加快引入

更高效的新型飞机,不断降低全行业的能源强度,到 2060 年吨公里油耗下降到 0.285kg,约为疫情前的水平的 65.4%。飞机更新换代 40 年间累积 36.7 亿 tCO₂ 的减排量,贡献了 44.1%的减排,是中长期减排的主要驱动力。其中,渐进式下一代客机是最重要的减排技术,累积减排贡献高达 28.8%。由于商飞 C919 目录价格远低于波音 737MAX 和空客 A320NEO^[78],因此要大力支持中国商飞、中国航发研发先进动力技术与结构与材料集成技术,加快引入国产大飞机。

其次要加快中国空域改革,加快部署北斗导航系统,推进航班标准化 CDO/COO 操作,充分发挥运营操作改进措施在中短期减排的潜力,持续挖掘基础设施提升的潜能。到 2035 年,基础设施提升技术和运营改进措施累积 4.1 亿 tCO₂ 减排量,贡献了 56.7%的减排,是民航业中短期减排的驱动力,为民航业碳排放达峰提供了有力支持。

再有要大力支持可持续航空燃料的发展,推进可持续航空燃料原料供给、生产技术、市场推广全产业链协同优化,提高可持续航空燃料的 ERF,实施统一碳市场确保与传统航空煤油具有成本竞争力。到 2060 年,随着传统航空煤油消费比例持续下降,可持续航空燃料消费比重提升至 51.5%,由此累积 21.9 亿 tCO₂ 的减排量,贡献了 26.4%的减排。其中,先进工艺自 2050 年起占据可持续航空燃料的主要市场份额,40 年累积贡献了 60.7%的减排量,是要重点发展的可持续航空燃料技术。

4.4 不确定性分析

由于油价变化对民航业影响较大,贴现率的选取对长期情景分析结果也有较大影响,本文也对选取了不同油价和贴现率进行验证。^[45]结果显示,油价对情景应用总成本的影响较大,不同情景对贴现率的敏感度较高,油价或贴现率越高,情景应用总成本越低,越有利于民航业主动减排。根据中国碳价调查^[77],未来碳价 20–80 百分位数区间覆盖力度情景 120 元/t 的边际减排成本。因此,在油价不明显低于 75 美元/t 的情况下,本文研究结论是基本可靠的。

与同类研究相比较,吕继兴^[79]的中国民航业碳达峰较本文早,但峰值水平相近,这是因为其研究是简化地按照线性需求增长、技术进步线性外推并就可持续航空燃料替代的绝对值进行组合,这会放大技术进步和可持续航空燃料渗透的速率。本文力度

情景的 T 因素与 O 因素预期贡献与 ICAO^[20]和 ATAG^[18]的综合情景 1 相近。虽然 F 因素差异较大,但中国可持续航空燃料渗透客观慢于欧洲,另一方面,可持续航空燃料与市场机制抵消紧密相连,如果可持续航空燃料有竞争力航司就会使用可持续航空燃料,如果碳抵消更便宜,航司就会选择抵消,因此若把 F 因素与市场机制合并看待,本文与现有的对民航业低碳发展路径的技术潜力判断比较一致。

受限于数据的可获得性,本文只能按国内客运、国际客运、货运航空三个市场,按宽体机、窄体机、支线飞机和货运飞机四类机型进行分析,将来如有条件可进一步搜集更细致的按航线组划分的活动量数据和按具体机型划分的技术数据,引入可再生能源、低碳氢、生物质原料供给分析,将可持续航空燃料的供给与需求结合,进一步优化模型,更为精细地描述技术减排路径。

4.5 建议

中国将成全球最大航空市场已成为行业共识,要尽早制定民航业碳达峰、碳中和目标和实施路径计划,针对民航业脱碳较难、增长势头较猛、许多减排技术和措施能带来净收益的特点,尽早谋篇布局、统一规划,推动民航业走向高质量的低碳发展路径。

统筹中短期、长期与持续坚持三个时间节奏,协同推进低碳技术创新、基础设施提升、运营操作优化和替代燃料推广。中短期要加快空域改革、优化航路,加快提升国家空中交通管理水平,加快推进航司精细化管理,充分挖掘标准化高效运营操作的潜力。要加大航空低碳技术的研发、投资、推广力度,长期大力支持国产大飞机、国产航空发动机的发展,加快引进更高效、更低碳、更低成本的国产飞机。要持续推动可持续航空燃料全产业链商业化和市场化,加大向零碳转型的可再生用电供应链、氢供应链相关技术的投资力度和相关基础设施配套,避免民航业陷入高碳锁定路径。

5 结论

5.1 中国民航业将提前完成《新时代民航强国建设行动纲要》第一阶段目标,预计 2060 年左右人均乘机次数翻两番,达到 2 人次,由此带来高达 6.9 亿 tCO₂ 排放,是 2019 年的 5.3 倍。

5.2 现有政策会为民航业带来减排的净收益,更大

力度的控排减排措施将推动民航业碳排放 2044 年左右达到 3 亿 t 的峰值拐点,预计 2060 年控制在 2 亿 t 以内,累积减排近 50%的同时仅需额外支出 1 万亿元左右的成本。

5.3 机队更新换代、基础设施提升和运营操作改进、发展可持续航空燃料是中国民航业中长期减排的必须依赖的减排手段。基础设施提升和运营操作改进具有负的边际减排成本,是中短期减排的“先手棋”。更高效的飞机减排效果显著,是中长期减排的持续动力。传统技术路径下,可持续航空燃料在不同情景的累积减排量在 7 亿 t 至 49 亿 t 不等(减排贡献在 12%~45%之间),是决定中国民航业碳排放趋势的关键因素,直接影响峰值“拐点”出现时间和出现位置。

5.4 由于执飞远程洲际航班的宽体机难以实现燃料严格意义上的“零碳”或“负碳”,中国民航业仅依靠自身内涵式发展只能实现近零排放,要依靠外部抵消才可能实现碳中和。CORSIA 已确立了抵消 CO₂ 的市场机制,可以成为民航业迈向碳中和的“兜底”措施。但抵消也会为民航业带来额外的抵消成本,有必要对中国民航业未来参与 CORSIA 机制的成本效益进行评估。

参考文献:

- [1] 刘绍勇.建议研究制定民航业 2030 碳达峰和 2060 碳中和方案 [EB/OL].<http://finance.people.com.cn/n1/2021/0309/c1004-32046573.html> 2021-03-09/2021-03-09.
Liu Shaoyong. It is suggested that the civil aviation industry should formulate "carbon peak and carbon neutrality" implementation plan [EB/OL].<http://finance.people.com.cn/n1/2021/0309/c1004-32046573.html> 2021-03-09/2021-03-09.
- [2] 夏高健.改革开放以来我国人均乘机次数增长弹性在下降 [EB/OL].<http://news.carnoc.com/list/540/540547.html> 2020-08-05/2021-02-16.
Xia Gaojian. Since the reform and opening up, the growth elasticity of the number of flights per person is declining [EB/OL]. <http://news.carnoc.com/list/540/540547.html> 2020-08-05/2021-02-16.
- [3] 新华社.习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文) [EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm 2021-04-05.
Xinhua News Agency. Chairman XI Jinping's important speech at the General Debate of the 75th Session of the United Nations General Assembly [EB/OL]. http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527652.htm 2021-04-05.
- [4] ICAO. CORSIA News [EB/OL]. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/CORSIA-News.aspx> 2021-08-16.
- [5] Fan W, Sun Y, Zhu T, et al. Emissions of HC, CO, NO_x, CO₂, and SO₂ from civil aviation in China in 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2012,56:52-57.
- [6] Loo B P, Li L. Carbon dioxide emissions from passenger transport in China since 1949: implications for developing sustainable transport [J]. *Energy policy*, 2012,50:464-476.
- [7] 何吉成.1960~2009 年中国民航飞机的 CO₂ 逐年排放变化 [J]. *气候变化研究进展*, 2011,7(4):281.
He Jicheng. Estimation of the aircraft CO₂ emission of China's civil aviation during 1960~2009 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2011,7(4):281.
- [8] 范武波,钱 骏,叶 宏,等.四川省非道路移动源大气污染物排放清单研究 [J]. *中国环境科学*, 2018,38(12):4460-4468.
Fan W B, Qian J, Ye H, et al. Study on the non-road mobile source emission inventory for sichuan province [J]. *China Environmental Science*, 2018,38(12):4460-4468.
- [9] Timilsina G R, Shrestha A. Transport sector CO₂ emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options [J]. *Energy policy*, 2009,37(11):4523-4539.
- [10] 高 标,许清涛,李玉波,等.吉林省交通运输能源消费碳排放测算与驱动因子分析 [J]. *经济地理*, 2013,33(9):25-30.
Gao Biao, Xu Qingtao, Li Yubo, et al. Calculation and driving factors analysis of carbon emissions from traffic and transportation energy consumption in Jilin Province [J]. *Economic Geography*, 2013,33(9): 25-30.
- [11] 王海燕,王 楠.中国综合交通运输体系碳排放影响因素研究 [J]. *物流技术*, 2019,38(2):78-83.
Wang Haiyan, Wang Nan. Research on factors affecting carbon emissions of China's comprehensive transportation system [J]. *Logistics Technology*. 2019,38(2):78-83.
- [12] Sgouridis S, Bonnefoy P A, Hansman R J. Air transportation in a carbon constrained world: Long-term dynamics of policies and strategies for mitigating the carbon footprint of commercial aviation [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2011,45(10): 1077-1091.
- [13] 陈其霆,陆晨婷,周德群.基于 LMDI 方法的中国民航业碳排放因素的指数分解 [J]. *天津大学学报(社会科学版)*, 2014,16(5):397-403.
Chen Qiting, Lu Chenting, Zhou dequn. Index decomposition of the factors influence China Civil Aviation Markets' carbon emissions based on LMDI Method [J]. *Journal of Tianjin University (Social Science)* 2014,16(5):397-403.
- [14] 石钰婷,吴薇薇,李晓霞.我国航空碳排放发展特征及影响因素研究 [J]. *华东交通大学学报*, 2019,36(6):32-38.
Shi Yuting, Wu Weiwei, Li Xiaoxia. Study on development and influencing factors of China's Aviation carbon emission [J]. *Journal of East China Jiaotong University* 2019,36(6):32-38.
- [15] Gunmundsson S V, Anger A. Global carbon dioxide emissions scenarios for aviation derived from IPCC storylines: A meta-analysis [J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2012,17(1):61-65.
- [16] Macintosh A, Wallace L. International aviation emissions to 2025: Can emissions be stabilised without restricting demand? [J]. *Energy policy*, 2009,37(1):264-273.

- [17] Bethan Owen, David S. Lee, Ling Lim. Flying into the future: Aviation emissions scenarios to 2050 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010,44(7):2255-2260.
- [18] Air Transport Action Group (ATAG). WAYPOINT 2050 [R]. 2020. https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf.
- [19] European Union Aviation Safety Agency (EASA), European aviation environmental report 2019 [R]. 2019. <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2019-aviation-environmental-report.pdf>.
- [20] ICAO. 2019 Environmental Report: Aviation and environment [R]. 2019. [https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICA-O-ENV-Report2019-F1-WEB%20\(1\).pdf](https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ICA-O-ENV-Report2019-F1-WEB%20(1).pdf).
- [21] 杨绪彪,朱丽萍.碳中和增长目标下解决航空碳排放的路径选择 [J]. *经济问题探索*, 2015,(7):18-22.
- Yang Xubiao, Zhu Liping. Path selection for solving aviation carbon emission under carbon neutral growth target [J]. *Inquiry into Economic Issues*, 2015,(7):18-22.
- [22] Zhou W, Wang T, Yu Y, et al. Scenario analysis of CO₂ emissions from China's civil aviation industry through 2030 [J]. *Applied energy*, 2016,175:100-108.
- [23] 王 晶.民用飞机市场需求预测方法研究 [J]. *民用飞机设计与研究*, 2013,(3):67-74.
- Wang Jing. Study on the Forecast Method of Market Demand for Civil Aircraft [J]. *Civil Aircraft Design & Research*, 2013,(3):67-74.
- [24] 任新惠,唐少勇.我国航空旅客运输需求预测——基于计量经济学与系统动力学组合模型 [J]. *交通运输研究*, 2015,1(1):92-98.
- Ren Xin-hui, Tang Shao-yong. Prediction of passenger demand in air transportation: A combination model based on econometrics and system dynamics [J]. *Transport Research*, 2015,1(1):92-98.
- [25] 蔡文婷,彭 怡,陈秋吉.基于多元回归模型的航空运输客运量预测 [J]. *航空计算技术*, 2019,49(4):50-58.
- Cai Wenting, Peng Yi, Chen Qiuji. Prediction of air transportation passenger volume based on multivariate regression model [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2019,49(4):50-58.
- [26] 冯 敏,朱新华.中国民航货运市场分析和预测 [J]. *中国民航大学学报*, 2007,25(1):45-48.
- Feng Min, Zhu Xinhua. Analysis and forecast of China civil air cargo transport market [J]. *Journal of Civil Aviation university of china*, 2007,25(1):45-48.
- [27] 孔建国,李 骁.基于 MATLAB 的小波分析在民航旅客运输量预测中的应用研究 [J]. *中国科技信息*, 2014,(16):40-41.
- Kong Jianguo, Li Xiao. Research on the application of wavelet analysis based on MATLAB in forecasting civil aviation passenger transport volume [J]. *China Science and Technology Information*, 2014,(16):40-41.
- [28] 孙亚兰.基于季节时间序列模型的民航客运需求预测分析 [J]. *中国外资*, 2013,(18):263-266.
- Sun Yalan. Forecasting analysis of civil aviation passenger transport Demand based on seasonal time series model [J]. *Foreign Investment in China* 2013,(18):263-266.
- [29] 景崇毅.基于迭加趋势的航线季节客运需求分析方法 [J]. *中国民航飞行学院学报*, 2014,25(2):5-7.
- Jing Chongyi. An analyzing method of airlines' seasonal passenger transport demand based on superimposing trend [J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2014,25(2):5-7.
- [30] 董 兵.基于多变量灰色数列模型的民航客运量预测 [J]. *中国民航飞行学院学报*, 2010,21(1):21-23.
- Dong Bing. Forecast of civil aviation passenger volume based on multi-variable grey series model [J]. *Journal of Civil Aviation Flight University of China*, 2010,21(1):21-23.
- [31] 邓洁君,罗 利.基于 GMDH 的民航客运量需求预测与分析 [J]. *软科学*, 2006,(6):35-38.
- Deng Jiejun, Luo Li. Demand forecasting and analyzing of civil aviation passenger transport markets based on GMDH. [J]. *Soft Science*. 2006,(6):35-38.
- [32] 陈亚青,韩云祥.基于系统动力学的航空系统客运量预测模型 [J]. *交通信息与安全*, 2009,27(5):146-148,165.
- Chen Yaqing, Han Yunxiang. Prediction model of passenger capacity in air transport system based on system dynamics [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2009,27(5):146-148,165.
- [33] 中国商飞.中国商飞公司市场预测年报(2020-2039) [R]. 上海:中国商用飞机有限责任公司, 2020.
- Comac. Market forecast annual report of Comac (2020-2039) [R]. Shanghai: Commercial Aircraft Corporation of China LTD. 2020.
- [34] ICAO. ICAO Long-term traffic forecasts: Passenger and cargo [R]. 2016. <https://www.icao.int/safety/ngap/NGAP8%20Presentations/ICAO-Long-Term-Traffic-Forecasts-July-2016.pdf>.
- [35] Airbus. Global market forecast: Cities, airports & aircraft (2019-2038) [R]. 2019. <https://www.airbus.com/aircraft/market/global-market-forecast.html>
- [36] Boeing. Commercial market outlook 2020-2039 [R]. 2020. <https://www.boeing.com/commercial/market/commercial-market-outlook/>.
- [37] Lister D, Griggs D J, Mcfarland M, Dokken D J. Aviation and the global atmosphere: A special report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge University Press, 1999.
- [38] Department for transport UK. UK Aviation forecasts: Moving Britain ahead [R]. London, 2017. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/878705/uk-aviation-forecasts-2017.pdf.
- [39] Japan Aircraft Development Corporation. Worldwide market forecast (2020-2039) prompt report [R]. 2020. http://www.jadc.jp/files/topics/159_ext_01_en_0.pdf.
- [40] IATA. Aircraft technology roadmap to 2050 [R]. 2019. <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>.
- [41] NLR - Royal Netherlands Aerospace Centre, SEO Amsterdam Economics. Destination 2050—A route to net zero European aviation [R]. Amsterdam, 2021. https://www.destination2050.eu/wp-content/uploads/2021/02/Destination2050_Report.pdf.
- [42] Sustainable aviation. Decarbonisation road-map: A path to net zero [R]. 2020, https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation_CarbonReport_20200203.pdf.
- [43] Soubly K, Wolff C, Uppink L, et al. Clean skies for tomorrow: Sustainable aviation fuels as a pathway to net-zero aviation [R]. World Economic Forum, McKinsey & Company, 2020. http://www3.weforum.org/docs/WEF_Clean_Skies_Tomorrow_SAF_Analytics_2020.pdf.

- [44] Sustainable aviation. Sustainable aviation fuels road-map: Fueling the future of UK aviation [R]. 2020. https://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/2020/02/SustainableAviation_FuelReport_20200231.pdf.
- [45] 许绩辉. 中国民航业中长期碳减排潜力及技术路径分析 [D]. 北京: 中国人民大学, 2021.
- Xu Jihui. Analysis on China's civil aviation industry's medium and long-term carbon emissions reduction potential and technology path. [D]. Beijing: Renmin University of China, 2021.
- [46] Stollery P. ATM global environment efficiency goals for 2050 [R]. CANSO Environment Workgroup; 2008. https://issuu.com/canso/docs/atm_global_environment_efficiency_goals_for_2050?e=1305071%2F9383178.
- [47] SchÄfer A W, Evans A D, Reynolds T G, et al. Costs of mitigating CO₂ emissions from passenger aircraft [J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(4):412-417.
- [48] 能源转型委员会. 中国 2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景 [R]. <https://www.rmi-china.com/static/upfile/news/nfiles/ETC.pdf>. 2019.
- Energy Transitions Commission (ETC). China 2050: A zero-carbon vision of a fully modernized country [R]. <https://www.rmi-china.com/static/upfile/news/nfiles/ETC.pdf>. 2019.
- [49] Hasanbeigi A, Menke C, Price L. The CO₂ abatement cost curve for the Thailand cement industry [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(15):1509-1518.
- [50] Department of Economic and Social Affairs. World Population Outlook 2019 [R]. United Nations, 2019. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>.
- [51] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm 2021-03-21.
- Xinhua News Agency. Outline of the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of the People's Republic of China and the Vision For 2035. [EB/OL]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm 2021-03-21.
- [52] 中国民用航空局. 新时代民航强国建设行动纲要 [EB/OL]. <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/5437866/files/3ea6e792672a471b989ab2b8d2a8b4c8.pdf> 2018-11-26/2021-04-08.
- Civil Aviation Administration of China. Outline of action for building a civil Aviation power in the New Era [EB/OL]. <http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2018-12/31/5437866/files/3ea6e792672a471b989ab2b8d2a8b4c8.pdf> 2018-11-26/2021-04-08.
- [53] 国家统计局. 国家数据(民航周转量年度数据) [EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01> 2021-04-08.
- National Bureau of Statistics. National data (Annual Data of Civil Aviation Turnover) [EB/OL]. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01> 2021-04-08.
- [54] 中国民用航空局发展计划司. 从统计看民航(2019) [R]. 北京: 中国民航出版社, 2019.
- Civil Aviation Administration of China Development Planning Division. Civil aviation from statistics (2019) [R]. Beijing: Civil Aviation Press of China, 2019.
- [55] 中国民用航空运输局. 2020 年民航行业发展统计公报 [R]. 2020. <http://www.gov.cn/xinwen/2021-06/11/5617003/files/c51af61cc760406e82403d99d898f616.pdf>.
- Civil Aviation Administration of China. Statistical Bulletin on the development of Civil Aviation industry in 2020 [R]. 2020. <http://www.gov.cn/xinwen/2021-06/11/5617003/files/c51af61cc760406e82403d99d898f616.pdf>.
- [56] CEIC. CEIC Data [EB/OL]. <https://www.ceicdata.com/zh-hans> 2021-04-08.
- [57] ICAO. CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels [R]. 2021. <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/ICAO%20document%2006%20-%20Default%20Life%20Cycle%20Emissions%20-%20March%202021.pdf>.
- [58] 国家发展与改革委员会. 国家发展改革委关于推进航空煤油价格市场化改革有关问题的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zwgk/2011-07/12/content_1904420.htm 2011-07-12/2021-03-15.
- National Development and Reform Commission. Circular on issues related to promoting market-oriented reform of aviation kerosene price http://www.gov.cn/zwgk/2011-07/12/content_1904420.htm 2011-07-12/2021-03-15.
- [59] 曹艺严, 陈 济, 刘秉祺, 等. 电力增长零碳化(2020~2030): 中国实现碳中和的必经之路 [R]. 洛基山研究所, 能源转型委员会, 2021. https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/01/RMI_ETC_China-Zero-Carbon-Electricity-Growth-report-2020_CN.pdf.
- Cao Yiyan, Chen Ji, Liu Bingqi, et al. Zero carbon electricity Growth (2020~2030) : The only way for China to achieve carbon neutrality. [R] Rocky Mountain Institute, Energy Transitions Commission, 2021. https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/01/RMI_ETC_China-Zero-Carbon-Electricity-Growth-report-2020_CN.pdf.
- [60] 中国氢能联盟. 氢能平价之路 [R]. 北京, 2020. <http://www.h2cn.org/Uploads/2020/07/30/u5f2239a793412.pdf>.
- China Hydrogen Alliance. Road to hydrogen parity [R]. Beijing, 2020. <http://www.h2cn.org/Uploads/2020/07/30/u5f2239a793412.pdf>.
- [61] Pearce B. COVID-19 June data and revised air travel outlook [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/june-data-and-revised-air-travel-outlook/2020-07-28/> 2021-03-08.
- [62] Cirium. Impact of COVID-19 on China: The road to recovery for one of the world's biggest aviation markets [EB/OL]. 2021. <https://discover.cirium.com/discover/ideas/covid-19-impact> 2021-03-08.
- [63] Airfinity. Snapshot COVID-19 data. Science, trial forecast, production and news analysis [EB/OL]. 2020. <https://www.ifpma.org/resource-centre/slides-airfinity-5th-global-biopharma-ceo-top-execs-virtual-press-briefing-covid-19-8-december-2020> 2021-03-08.
- [64] IATA. COVID-19 Weak year-end for air travel and outlook is deteriorating [EB/OL]. <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/weak-year-end-for-air-travel-and-deteriorating-outlook> 2021-02-03/2021-03-08.
- [65] ICAO. Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation: Economic Impact Analysis [EB/OL]. https://www.aaco.org/Library/Files/Uploaded%20Files/Economics/Corona%20studies/3dec%20ICA_O_Coronavirus_Econ_Impact.pdf 2020-12-03/2021-03-08.

- [66] 程 婕. 中国民航市场: 有挑战, 亦有后劲 [EB/OL]. http://www.caacnews.com.cn/1/tbtj_202011/t20201127_1315245.html 2020-11-27/2021-03-08.
- Cheng Jie. China's civil aviation market: It is both a challenge and an opportunity [EB/OL]. http://www.caacnews.com.cn/1/tbtj_202011/t20201127_1315245.html 2020-11-27/2021-03-08.
- [67] 潘寅茹. 百亿剂新冠疫苗全球行, 需 8 千架波音 747、1500 万个冷藏箱 [EB/OL]. <https://www.yicai.com/news/100922141.html> 2021-01-20/2021-03-08.
- Pan Yinru. Ten billion doses of COVID-19 vaccine are needed to travel around the world, using 8,000 "Boeing 747" aircrafts and 15million freezers [EB/OL]. <https://www.yicai.com/news/100922141.html> 2021-01-20/2021-03-08.
- [68] 新华社. 国内机场首次成功实践连续下降与爬升运行 [EB/OL]. <http://kpzg.people.com.cn/n1/2016/1213/c404389-28944333.html> 2016-12-13/2021-03-08.
- Xinhua News Agency. Domestic airport successfully achieved continuous descent and climb operation [EB/OL]. <http://kpzg.people.com.cn/n1/2016/1213/c404389-28944333.html> 2016-12-13/2021-03-08.
- [69] 杨燕超. 听说航空业很快要被“绿”了? ——中国篇 [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/W2sPk9N6GUbVwBRsK1TMvA> 2021-02-04/2021-03-08.
- Yang Yanchao. I heard that the aviation industry will soon be "green"? —— China [EB/OL]. <https://mp.weixin.qq.com/s/W2sPk9N6GUbVwBRsK1TMvA> 2021-02-04/2021-03-08.
- [70] ICAO. Convention on International Civil Aviation [M]. 2006. https://www.icao.int/publications/Documents/7300_cons.pdf.
- [71] 中国新闻网. 中国自主研发生物航煤首次商业载客飞行成功 [EB/OL]. <http://energy.people.com.cn/n/2015/0321/c71661-26729451.html> 2015-03-21/2021-03-08.
- China News Network. China has successfully carried passengers on its first commercial flight of domestically developed bio-jet coal [EB/OL]. <http://energy.people.com.cn/n/2015/0321/c71661-26729451.html> 2015-03-21/2021-03-08.
- [72] 马隆龙, 刘琪英. 草本能源植物培育及催化制备先进液体燃料 [J]. 科技创新导报, 2016, 10(13): 165-166.
- Ma Longlong Liu Qiying. Advanced liquid fuel production by herbage energy plant breeding and catalytic transformation [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 10(13): 165-166.
- [73] 马隆龙, 刘琪英. 糖类衍生物催化制液体烷烃燃料的基础研究 [J]. 科技创新导报, 2016, 10(13): 163-164.
- Ma Longlong, Liu Qiying. Basic research on liquid alkanes from sugar derivatives by aqueous phase catalysis [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2016, 10(13): 163-164.
- [74] Searle S, Pavlenko N, Kharina A, et al. Long-term aviation fuel decarbonization: Progress, roadblocks, and policy opportunities [R]. Transportation, T.I.C.o.C., 2019. https://theicct.org/sites/default/files/publications/Alternative_fuel_aviation_briefing_20190109.pdf.
- [75] De Jong S, Hoefnagels E, Van Stralen J, London H, Slade R, Faaij A, Junginger H. Renewable jet fuel in the European Union: scenarios and preconditions for renewable jet fuel deployment towards 2030 [M]. Copernicus Institute, Department IMEW, Energy & Resources, 2017.
- [76] E4TECH (UK) LTD. & STUDIO GEAR UP. Study on the potential effectiveness of a renewable energy obligation for aviation in the Netherlands [R]. London, 2019. <https://www.rijksoverheid.nl/binaries/rijksoverheid/documenten/rapporten/2020/03/03/bijlage-1-onderzoek-e4tech-sgu-obligation-for-aviation-in-the-netherlands-final-v3.pdf>.
- [77] Slater H, De Boer D, 钱国强, 等. 2020 年中国碳价调查 [R]. 北京: 中国碳论坛, 2020. <http://www.chinacarbon.info/wp-content/uploads/2020/12/2020-CCPS-CN.pdf>.
- Slater H, De Boer D, Qian Guoqiang, et al. Carbon price survey in China in 2020 [R]. Beijing: China Carbon Forum, 2020. <http://www.chinacarbon.info/wp-content/uploads/2020/12/2020-CCPS-CN.pdf>.
- [78] 赵晓闯, 廖泽略. 国产民用飞机将开启黄金时代——国防军工行业专题报告 [R]. 世纪证券, 2020. <http://qccdata.qichacha.com/ReportData/PDF/7fd75918d1aecbb07fd12abc2d64ca7a.pdf>.
- Zhao Xiaochuang, Liao Zelue. Domestic civil aircraft will open a Golden Era — Special Report on National Defense and Military Industry [R]. Century Securities, 2020. <http://qccdata.qichacha.com/ReportData/PDF/7fd75918d1aecbb07fd12abc2d64ca7a.pdf>.
- [79] 吕继兴. 浅析民航飞行活动碳达峰与碳中和 [EB/OL]. 民航环境与可持续发展智库 <https://mp.weixin.qq.com/s/N857ex-KgGJlpzLRduKzug> 2021-03-19/2021-04-07.
- Lv Jixing. Analysis of carbon peak and carbon neutralization in civil aviation flight activities. [EB/OL]. Think Tank on Civil Aviation Environment and Sustainable Development <https://mp.weixin.qq.com/s/N857ex-KgGJlpzLRduKzug> 2021-03-19/2021-04-07.

作者简介: 许绩辉(1996-), 男, 海南儋州人, 中国人民大学硕士研究生, 主要从事能源与气候变化经济学研究。