

基于混合生命周期评价的我国绿色航空器碳排放比较研究*

王 泽, 王群伟, 王长波, 杨子彦

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 为准确核算绿色航空器生命周期二氧化碳排放, 并评估其减排效果, 构建了将过程分析与投入产出分析相结合的混合生命周期评价模型, 用于核算生物质能航空器、电动航空器以及氢能航空器的生命周期碳排放, 并与传统航空器进行比较。结果发现, 采用风电制氢驱动的航空器在全部绿色航空器中碳排放最低, 仅为 674.21 g/(t·km)。灰氢驱动的航空器碳排放最高, 达到 1 724.12 g/(t·km)。这说明燃料来源对航空器的“绿度”至关重要, 若以化石能源制氢或发电驱动航空器, 尽管运行过程不产生直接排放, 但其排放却转移至上游产业链。总体上, 绿色航空器减碳效果较好。与传统航空器相比, 氢能航空器、生物燃料航空器和电动航空器可分别减少 25%, 20% 和 10% 的二氧化碳排放。

关键词: 航空碳排放; 绿色航空器; 可再生能源; 混合生命周期评价; 投入产出分析

中图分类号: V272

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2024) 03-2211010-11

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2211010

1 引 言

随着全球变暖的加剧, 大规模使用化石能源引发的气候和环境问题受到越来越多国家的重视, 各国政府致力于在不同领域推动传统能源的转型。作为能源消耗和二氧化碳排放大户, 交通运输业一直都是各国节能减排的重点领域。其中, 航空运输业的二氧化碳排放问题尤为突出^[1-2]。据航空运输行动组织 (Air Transport Action Group, ATAG) 报告, 2019 年全球航空运输业排放了近 9.15 亿吨二氧化碳, 占据交通运输业二氧化碳排放量的 12%^[3]。国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 报告显示, 从 2013 年到 2019 年, 全球民航运输业碳排放量已经超过国际民航组织预测数值的 70%。根据国际民航组织预测, 按照目前高增长的趋势, 到 2050 年全世界将有 25% 的碳排放量来自于航空业^[4]。由于排放空间位置较高, 航空器的尾气会直接排放到对流层上端和平流层, 形成更严重的温室效应^[5]。因此, 寻求航

空运输业绿色低碳发展路径已迫在眉睫。

为降低航空运输业碳排放, 欧美发达国家已开始布局绿色航空器产业的发展, 即通过开发和利用绿色低碳燃料替代传统航空用能, 主要技术包括氢能^[6-7]、电动飞机^[8-9]和航空生物燃料^[10-11]等。尽管当前仍面临高额成本和技术瓶颈, 发展绿色航空器仍被认为是实现航空运输业减碳甚至零碳的必经之路。正如 Staples 预测, 使用可持续绿色航空燃料替代传统能源可在 2050 年之前减少 68% 航空运输温室气体排放^[12]。在国家“双碳”目标提出的背景下, 我国政府也非常重视绿色航空器及其燃料的研发, 以求尽早加入国际赛道, 在新一轮产业竞争中占据有利地位。2019 年, 我国首次将氢能源写入政府工作报告中。此后, 氢能产业链中制氢、储运、加氢燃料电池应用等各环节的发展也开始受到重视, 为氢能航空动力发展奠定基础。然而, 作为新兴产业, 绿色航空器能否减碳仍存在争议^[13-14]。例如, 虽然氢能在燃烧过程中不产生二氧化碳排放, 但氢能的生产以

* 收稿日期: 2022-11-03; 修订日期: 2023-09-21。

基金项目: 教育部人文社会科学基金 (22YJCZH184); 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (72161147003); 国家自然科学基金面上项目 (72373064); 江苏省高校哲学社会科学研究重大项目 (2022SJD050)。

作者简介: 王 泽, 硕士生, 研究领域为可再生能源社会经济环境影响分析。

通讯作者: 王长波, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究领域为能源与环境经济, 投入产出分析。E-mail: changbo@nuaa.edu.cn

引用格式: 王 泽, 王群伟, 王长波, 等. 基于混合生命周期评价的我国绿色航空器碳排放比较研究[J]. 推进技术, 2024, 45(3): 2211010. (WANG Z, WANG Q W, WANG C B, et al. A comparative study of China's green aircraft carbon emissions based on hybrid life cycle assessment[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(3): 2211010.)

及氢能航空器的制造过程需要大量的能源和材料投入,并产生排放。为准确判断航空器的“绿度”,应基于完整产业链对航空器碳排放进行核算,防止碳排放的产业链转移。

在航空器碳排放核算方面,现有的研究通常采用生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)方法进行估计,该方法可将机场建设与维护、航空器制造、运行和报废等阶段纳入系统边界,因而增强结果的可靠性^[14-15]。采用该方法,学者们对传统航空器进行了环境生命周期评价,发现飞机运行阶段产生的环境影响占 90% 以上^[16],因而清洁燃料的替代成为减少航空碳排放的重要手段。此后,较多学者针对清洁航空替代燃料开展了生命周期评价,包括氢能^[15, 17-19]、航空生物燃料^[20-23]和可再生能源发电^[24-25]等。例如, Bhandari 等^[19]和 Cetinkaya 等^[26]通过 LCA 评估了多种不同制氢方式生产氢能源的生命周期环境影响,发现可再生能源制取的氢气相较于传统能源更清洁,其中风能和水能电解氢是环境友好程度最高的制氢技术; Cox 等^[27]对多种原料来源的航空生物燃料制备进行了生命周期环境影响评价,并与化石能源对比。然而,较少研究从全生命周期角度考察绿色航空器的二氧化碳排放。尽管少数学者对国外个别绿色航空器类型进行了碳排放核算,但目前仍缺乏针对我国全谱系绿色航空器碳排放评估的研究,难以有效指导我国绿色航空器产业的健康发展。

此外,在核算方法方面,有学者指出传统的基于过程的生命周期评价(Process-based LCA, PLCA)作为一种自下而上的计算方法,在清单数据收集过程中不可避免地会出现“截断误差”的问题,即由于人力物力所限,清单收集必须在某个节点停止,因而造成核算边界不完整^[28-30]。为克服这一缺陷,有学者提

出自上而下的投入产出分析方法(Input-output analysis, IOA),该方法基于经济投入产出表而建立,其系统边界为整个国民经济系统,因而可以减少截断误差^[31-33]。然而,该方法仅提供部门尺度的碳排放核算结果,由于部门划分精度有限,采用部门排放水平代表具体产业(如,航空运输业)会造成聚合误差^[29]。为结合两种方法的优点, Suh 等^[28]和 Heijungs 等^[34]将 PLCA 和 IOA 相结合,提出混合生命周期评价模型(Hybrid LCA, HLCA),该模型既能采用 PLCA 详细解析绿色航空器不同生命周期阶段的物料投入,同时还可以利用 IOA 模型追溯航空器上游产业链,确保边界完整。该方法目前已被广泛应用于可再生能源生命周期能源消耗和碳排放核算中^[33, 35-37],在绿色航空器碳排放评估的应用有待进一步开展。

为此,本文将构建适用于绿色航空器碳排放核算的混合生命周期评价模型,采用统一的系统边界核算并比较氢能、生物质能、纯电动航空器和传统航空器在机场建设与运营、航空器研制和航空器运行维护等阶段的二氧化碳排放。研究将从生命周期碳排放量、碳排放生命周期阶段分布和碳减排效益等角度提供包含典型绿色航空器和传统航空器的全谱系航空器碳排放评估结果,为我国航空运输业低碳转型技术选择和航空业双碳目标实现提供数据支撑。

2 方法与数据来源

2.1 系统边界与功能单位

本文主要考察绿色航空器与传统航空器的生命周期二氧化碳排放,根据研究目的将系统边界划分为三个阶段:机场建设与运营、航空器生产制造和航空器运行维护(见图 1)。其中,航空燃料的生命周期(生产、运输和燃烧)包括在航空器的运行维护阶段。

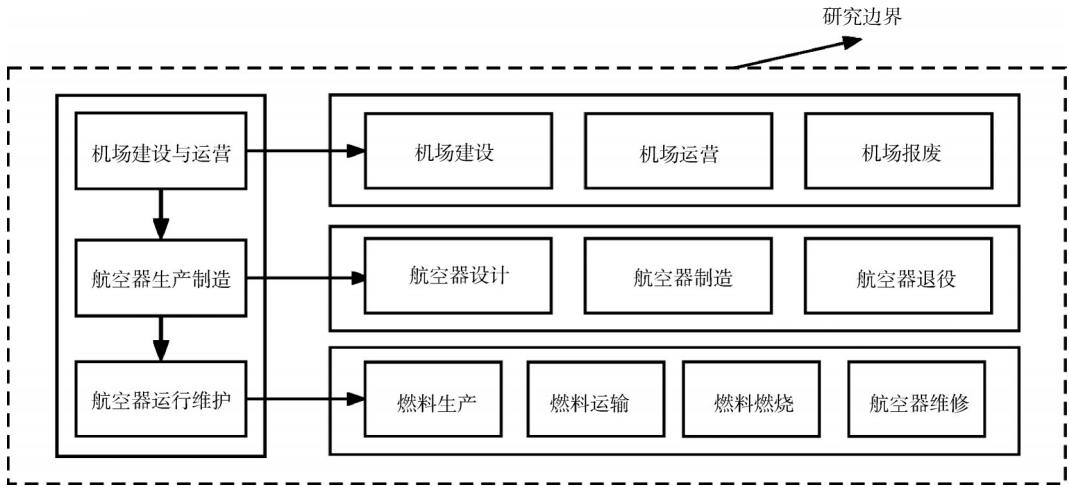


图1 系统边界和生命周期阶段

为准确比较绿色航空器与传统航空器的生命周期排放,本文将功能单位设定为“吨公里二氧化碳排放”(g/(t·km)),即航空器携带每吨(t)有效载荷飞行每公里(km)里程在航空产业链上发生的完全碳排放,后文数据结果的表达均基于该功能单位。

2.2 混合生命周期评价模型的构建

根据系统边界定义,航空器各生命周期阶段的投入主要可以分为以下几类:(1)直接的能源投入,及航空器燃料投入;(2)机场建设投入;(3)机场运营过程中的能源和材料投入;(4)航空器制造投入;(5)航空器维修投入。本文采用分层式的混合生命周期模型核算航空器二氧化碳排放,具体来说,采用PLCA模型核算由于航空燃料燃烧产生的直接二氧化碳排放,而隐含在机场建设与运行、航空器制造、航空器维修和航空燃料生产及运输过程中的排放则采用IOA模型核算(见图2)^[36, 38]。

航空器全生命周期二氧化碳排放的计算公式如式(1)所示,即

$$E_{T,CO_2} = E_{D,CO_2} + E_{I,CO_2} \quad (1)$$

式中 E_{T,CO_2} 是航空器的生命周期二氧化碳总排放, E_{D,CO_2} 是航空燃料燃烧产生的直接二氧化碳排放, E_{I,CO_2} 是航空器间接二氧化碳排放。

航空燃料燃烧产生的直接二氧化碳排放 E_{D,CO_2} 的计算如式(2)所示,即

$$E_{D,CO_2} = \sum_i E_i \cdot \varphi_i \cdot \gamma_i \quad (2)$$

式中 φ 和 γ 分别为燃料消耗量、燃料碳排放系数和碳

氧化率, i 为燃料类型。不同燃料的碳排放系数及碳氧化率数据来源于《2006年IPCC温室气体清单指南》^[39]。

间接二氧化碳排放IE采用IOA模型计算如式(3)和(4)所示,即

$$E_{I,CO_2} = \sum_j m_j \cdot C_j \quad (3)$$

式中 C 为航空器生命周期阶段的关键设备和原材料投入价格, j 为不同产业部门; m 是关键设备和原材料对应经济各部门的完全碳排放系数,即经济部门单位产出在产业链上引起的排放量。各部门完全碳排放系数的计算如式(4)所示^[40],即

$$M = q \cdot (I - A)^{-1} \quad (4)$$

式中 M 国民经济各部门完全碳排放强度矩阵, q 为国民经济各部门直接碳排放强度矩阵,即部门单位总产出直接排放量; $(I - A)^{-1}$ 为里昂惕夫逆系数矩阵,其中 I 为单位矩阵, A 为投入产出表固有的直接消耗系数矩阵。本文的投入产出计算基于2018年中国国家投入产出表进行。

2.3 清单分析

2.3.1 机场建设与运营

本文采用IOA模型核算机场建设与运营过程中的二氧化碳排放,因而需要收集该过程各类投入的经济成本。在案例机场的选取过程中,本文收集并比较了多个机场的投入数据,最终综合考虑数据的完备性和时效性,选取了2019年规划建设的甘肃省庆阳华池通用机场,该机场项目的投资总额约为36 011万元,其中工程费用为28 243万元。项目建设

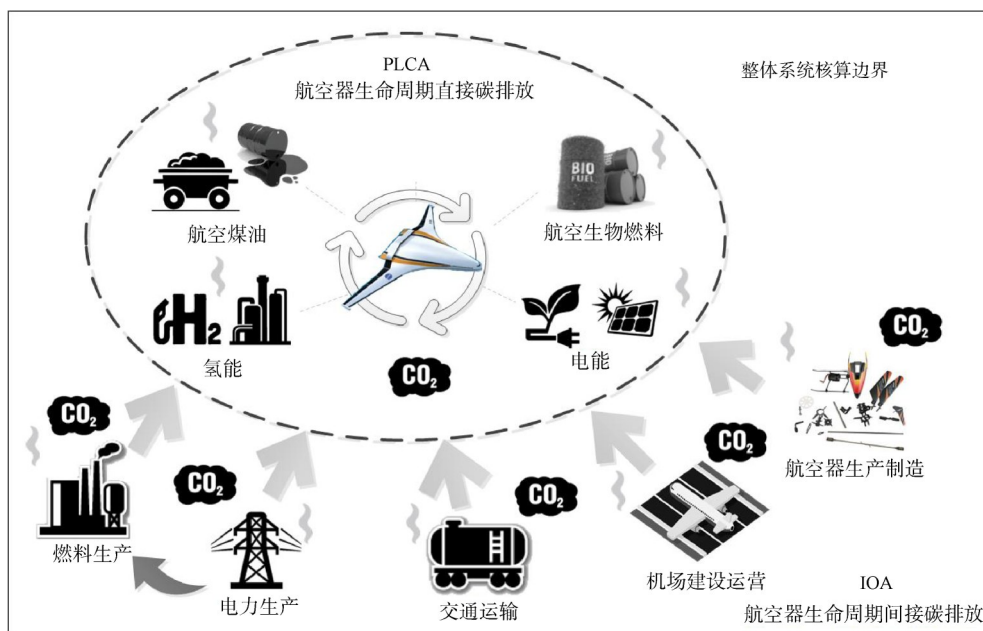


图2 航空器碳排放核算说明

投入参照《民用机场建设工程概算编制方法》(民航机发【2001】88号文)的成本结构进行计算^[41];项目运营投入主要考虑机场的电力消耗和水的消耗,数据来源于机场环境影响评价报告。最后,在机场的报废阶段,本文假定残值率为5%,回收后的建筑材料可以进一步利用。机场建设与运营环节的详细投入数据如表1所示。

2.3.2 航空器研发制造

由于绿色航空器大多仍处于研发阶段,成本数据难以获取,本文选取当前较为典型的A320Neo窄体飞机作为代表进行航空器研发制造成本的估算。航空器的研制成本采用由Karen和Jacob提出的“麻省模型”^[42-43]进行计算。麻省模型将飞机的研制成本分为非重复成本(研发成本)和重复成本(制造成本)两部分,本研究假定同一批次的飞机生产数量为100架,以此对非重复性成本进行分摊,从而确定单个航空器的研制成本(见表1)。最后,本文假定在航空器的寿命终止后,其残值率为5%。

为减少采用统一机型估算航空器研制成本带来的误差,本文分别考虑了不同类型航空器的有效载

荷(见表2),从而更为合理地将研制成本分摊至吨公里水平。本文选取的相关参数和假设说明如下:

(1)为计算航空器年飞行距离,依据《国际民用航空二氧化碳减排长期理想目标(LTAG)可行性报告》,本文假设航空器的平均飞行速度为726 km/h,年飞行时间为3 000 h,因此年飞行距离为2 178 000 km。

(2)为计算航空器的有效载荷,同样参考LTAG可行性报告中的计算方式,本文假设单客平均质量(单人+行李)为225磅(约100 kg)。传统航空器和物质能航空器均以A320Neo作为案例机型,仅在燃料类型上进行区分;氢能航空器选取的案例机型是以A320Neo为原型设计的窄体机FZN-1E;纯电动航空器选取的案例机型是瑞典ES-30。不同类型航空器标准载客数不同(见表2),有效载荷为各航空器的标准载客数与单客平均质量的乘积。

2.3.3 航空器运行与维护

本阶段主要考虑航空器运行过程中的维修和燃料投入。其中,航空器的维修成本计算参照Franklin Harris基于67家美国航空公司运营数据建立的测算模型^[44]。经计算,每架飞机的维护成本为160.47万元/年,

表1 机场建设运营和航空器研制阶段清单投入

生命周期阶段	具体项目	投入成本/(元/(t·km))	碳排放系数/(g/元)
机场建设运营	机场建设	土木工程建设	0.419 8
		车辆设备	0.282 8
		建设单位管理费	0.014 4
		勘察费	0.016 6
		设计费	0.049 8
		工程建设监理	0.011 9
		质检费	0.003 7
		联合试运转	0.010 8
		设计审查	0.004 4
		办公器具	0.001 2
		职工培训	0.001 2
		专项技术研究	0.008 1
		招投标管理	0.001 9
		项目前期管理	0.008 1
	机场运营	水的供应	0.003
		电力供应	0.267
航空器研制	航空器研发	工程设计	0.267 3
		制造工程	0.044 5
		工装设计	0.026 7
		工装制造	0.071 3
		试飞	0.035 6
	航空器制造	航空器生产制造	1.459 2

分摊到功能单位后的计算结果为 0.049 元/(t·km), 航空器修理服务的碳排放系数为 104.14 g/元, 由此得出航空器维护阶段的碳排放为 5.11 g/(t·km)。

在航空燃料碳排放方面, 本文不仅考虑航空燃料燃烧的直接排放, 同时考虑燃料生产和运输过程中的间接排放, 即包括各类航空燃料“生产-运输-燃烧”全过程的二氧化碳排放。各类航空燃料清单数据主要包括燃料使用量、生产成本及运输成本。

(1)传统航空燃料传统的航空燃料以航空煤油为主, 其采购成本为 5 元/kg^[45]。依据《国际民用航空二氧化碳减排长期理想目标(LTAG)可行性报告》, A320Neo 航空器航程 6 300 km, 除去储备和滑行耗油, 消耗航空煤油 16 275 kg, 以此可以算出吨公里航空煤油成本为 1.10 元/(t·km); 石油精炼部门的碳排放系数为 77.16 g/元, 据此计算航空煤油生产阶段碳排放。燃料的运输方式考虑为陆路运输, 运输过程的柴油消耗系数为 0.05 L/(t·km)^[46], 运输距离假定为 100 km。柴油燃烧的二氧化碳排放系数为 2.73 kg/L^[39], 最终可计算航空燃料的运输阶段产生的总排放为 3.01 g/(t·km)。

(2)生物质燃料航空生物燃料生产过程的投入数据来自 Michailos 等^[47]对航空生物燃料进行的技术经济评估, 本文考虑了当前最主流的三种航空生物

质燃料生产的技术类型, 分别为加氢法(Hydro-processing, HP)、费托法(Fischer-Tropsch synthesis, FT)和热解法(Zeolite cracking, ZC), 生产原料为林业废弃物, 生产过程清单投入如表 3 所示。

航空生物燃料的运输参考以课题组对生物乙醇的研究成果^[33], 假定运输距离为 100 km, 过程中消耗柴油作为动力, 油耗系数为 0.05 L/(t·km)。此外, 航空生物燃料在使用过程中需要和航空煤油混合使用, 本研究假定两种燃料以 1:1 比例进行混合。

(3)电能本文讨论的电动航空器特指纯电航空器, 此类航空器以电能为动力, 运行过程中不需要额外消耗燃料, 因此能够实现飞行过程零排放。航空器飞行过程消耗电力产生的碳排放参照 Feng 等^[25]的研究成果, 该研究基于 HLCA 模型计算中国不同类型电力生产的生命周期碳排放结果, 包括煤电、油电、气电、生物质发电、光伏发电、风电、核电和水电。本文基于此计算了电动航空器电力生产阶段的碳排放(见表 4)。

(4)氢能源本文讨论的氢能航空器以液氢为动力, 根据不同的制氢方式可分为灰氢、蓝氢和绿氢。灰氢是指化石燃料制取的氢气, 主要有蒸汽甲烷重整(SMR)和煤气化(CG)两种技术手段。基于到我国以煤炭为主的能源现状, 本文在此主要考虑煤化工

表 2 传统航空器和绿色航空器的案例机型

航空器类型	机型	标准载客数/人	有效载荷/t
传统航空器	A320Neo	150 ^①	1.5
氢能航空器	FZN-1E	180 ^②	1.8
生物质能航空器	A320Neo	150 ^①	1.5
纯电动航空器	ES-30	30 ^③	0.3

注: ①数据来源: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a320-the-most-successful-aircraft-family-ever/a320neo>;

②数据来源: <https://www.cnnnews.com.cn/2022/0610/345370.shtml>;

③数据来源: <https://heartaerospace.com/es-30/>。

表 3 航空生物燃料生产清单投入

生产投入项目	投入成本/(元/(t·km))			碳排放系数/ (g/元)
	HP	G+FT	ZC	
化工专用设备	0.221 4	0.246 3	0.225 6	128.46
通用设备	0.055 4	0.061 6	0.056 4	117.44
土木工程建筑	0.166 1	0.184 7	0.169 2	143.67
工业氧	0.000 0	0.059 2	0.000 0	177.82
化学催化剂	0.070 8	0.029 6	0.136 0	177.82
飞灰处理	0.000 7	0.000 8	0.000 8	55.92
维护	0.151 2	0.169 1	0.153 8	104.14
冷却水和锅炉水	0.002 0	0.002 3	0.003 2	172.24
原料(林业废弃物)	0.333 7	0.370 3	0.387 7	30.09

表 4 电动航空器电力消耗二氧化碳排放(分摊到功能单位)

发电方式	生命周期碳排放(g/(t·km))
煤电	3 238.74
油电	3 195.03
气电	2 253.69
生物质发电	256.20
光电	200.91
风电	122.18
核电	45.03
水电	34.76

生产的氢气。蓝氢是在灰氢的基础上采用了碳捕集利用与封存技术(CCUS)。根据已有研究,本文假定煤制氢环节的CO₂捕集率为90%^[48]。CG和CG+CCUS制氢过程的投入成本来自于Nikolaidis等的研究^[49]。绿氢是使用可再生电力电解水进行氢气制备,本文考虑主流的“风-电-氢”和“光-电-氢”两种技术路线,生产过程的发电成本与电解制氢成本参照El-Eman等的研究^[50]。根据Siddiqui和Dincer的研究^[14],计算过程中电氢转换效率设定为53 kWh/kg。

氢在常温常压下为气态,单位体积储能密度低,燃烧温度高,且易对金属材料造成氢脆,因此氢气的高效安全输送和储存相较于航空煤油难度更大,成本更高。参考Yao等^[51]总结的三种氢气储运方式,本文选用成本最低的高压氢瓶公路运输的方式进行运输成本估算(3.22元/kg)。由于氢气燃烧不产生二氧化碳排放,因此氢燃料生命周期碳排放计算主要考虑氢的生产和储运两个阶段(见表5)。

3 结果与讨论

3.1 生物燃料航空器二氧化碳排放

如图3所示,不同工艺下生物燃料航空器的生命周期二氧化碳排放差异较小,其排放为1 002~1 018

g/(t·km)(平均为1 011.88 g/(t·km))。其中,采用热解法制取航空生物燃料的碳排放略高于费托法和加氢法。从排放结构看,碳排放主要来自航空器运行维护阶段,平均占比为51%。其次为机场建设运营和航空器研制阶段,平均占比分别为37%和12%。需要说明的是,本文考虑生物燃料和航空煤油混合使用。由于生物质原料在生长过程中通过光合作用吸收二氧化碳,与航空生物燃料燃烧排放相互抵消^[52],因此本文忽略了生物燃料燃烧排放,仅考虑航空煤油燃烧排放。

具体分析航空器运行维护阶段,发现该阶段排放主要来自航空燃料燃烧,分别占该阶段和生命周期总排放的66%和34%。这说明尽管生物燃料减小了航空器生命周期碳排放,但仍需通过碳吸收等技术减小航空煤油燃烧排放。此外,燃料生产过程的间接排放占该飞机运行维护阶段碳排放总量的33%,其中航空生物燃料生产和航空煤油生产分别占20%和13%。可见,尽管生物燃料燃烧不产生直接排放,但其生产过程隐含的间接排放不可忽视。航空器维护和燃料运输过程中的排放较小,仅共占1%左右。

3.2 纯电动航空器二氧化碳排放

本文核算了8种不同电力来源的纯电动航空器生命周期二氧化碳排放(见图4)。若采用化石能源发电(即煤电、油电和气电),电动航空器生命周期二氧化碳排放平均为1 142.08 g/(t·km)。其中,煤炭发电驱动的航空器排放最高,达到1 396.76 g/(t·km)。相较而言,可再生能源发电驱动的航空器生命周期排放平均为1 017.24 g/(t·km),比化石能源发电平均下降25%。其中,水力发电驱动航空器排放最低,仅为1 002.63 g/(t·km)。可见,电动航空器的绿色程度取决于其电力来源。若采用化石能源发电驱动航空

表 5 不同类型氢燃料的生产和储运清单投入

生命周期阶段		投入成本/(元/(t·km))	碳排放系数/(g/元)
氢气生产	风-电-氢	其他通用设备	1.38
		化工专用设备	5.53
		土木工程建筑	4.15
	光-电-氢	其他通用设备	1.34
		化工专用设备	5.36
		土木工程建筑	4.02
	灰氢(CG)	煤化工	0.64
		CCUS工程	0.00
	蓝氢(CG+CCUS)	煤化工	0.64
		CCUS工程	0.14
	氢气储运		0.18
			92.64

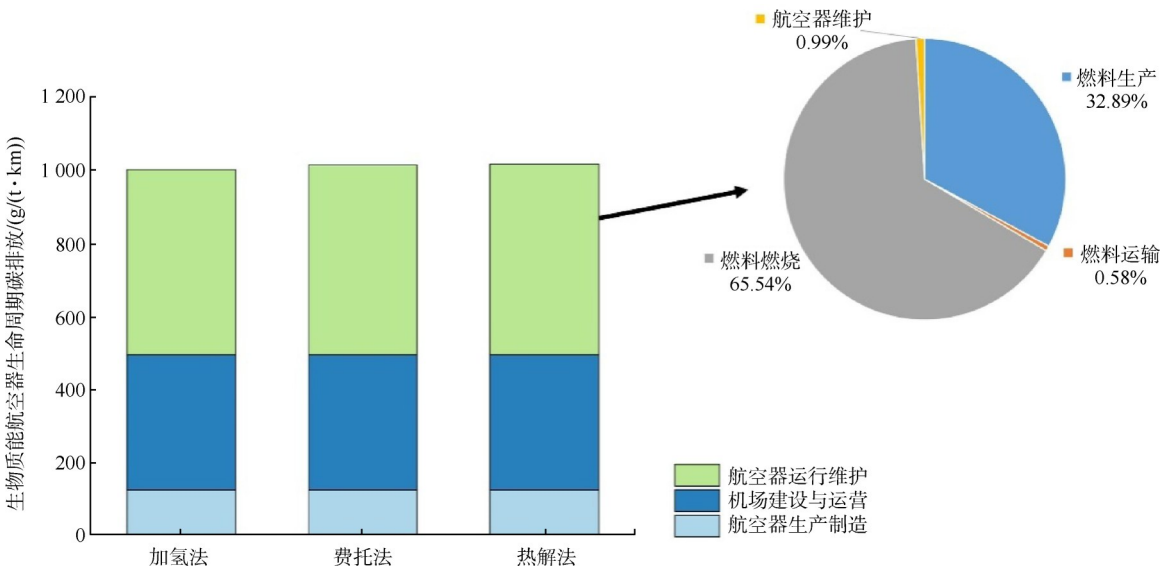


图3 生物质航空器的生命周期碳排放

器,实际上只是一种碳排放的转移——从航空运输业转移至发电行业。

具体到不同生命周期阶段,航空器研制碳排放为 623.21 g/(t·km),是各类纯电动航空器总排放最大来源,占比达到 44%~63%。这主要是因为现阶段电动飞机有效载荷低,研制成本高,因此以服务功能单位对生产阶段进行评估时,无论是经济还是环境成本相较于其他大型航空器表现出明显的劣势。机场建设与运营阶段的碳排放为 370.03 g/(t·km),占各类电动航空器的 26%~37%。

在航空器运行维护阶段,纯电航空器飞行消耗电力,不产生直接碳排放。该阶段碳排放主要来自于电力的生产,航空器维修排放可忽略不计。如图 4 所示,传统化石能源发电排放较高,运行维护阶段平均排放为 361.34 g/(t·km),占总排放的平均比重达到 27%。相反,可再生能源发电过程较为清洁,运行维护阶段平均排放仅为 24.00 g/(t·km),约占各类绿色航空器生命周期总排放的 2%左右。

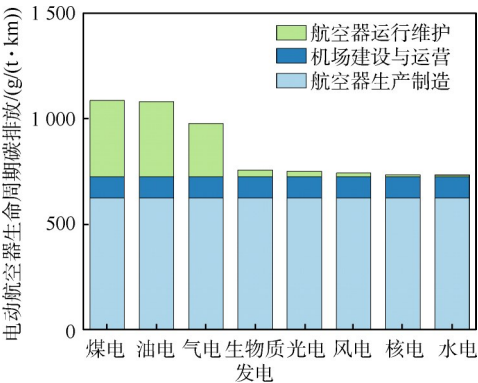


图4 电动航空器生命周期碳排放

3.3 氢能航空器二氧化碳排放

根据不同的氢能源制备技术,本小节比较了四种氢能航空器的生命周期碳排放(见图 5)。氢能航空器的平均生命周期二氧化碳排放为 953.69 g/(t·km),不同氢气制备工艺对结果影响很大。使用来自煤化工生产的氢气(灰氢)作为燃料的航空器清洁度最低,生命周期二氧化碳排放高达 1 724.12 g/(t·km)。但是如果在氢气制备阶段引用 CCUS 技术(蓝氢),能够有效降低氢能航空器的生命周期碳排放,其生命周期二氧化碳排放仅为 688.67 g/(t·km)。使用风电和光电电解制备的氢气作为动力的航空器生命周期二氧化碳排放明显降低,分别为 674.21 和 727.76 g/(t·km)。可见,使用可再生能源或化石能源+CCUS 的方式制取氢气才能使氢能航空器在生命周期层面做到真正减碳。

具体到各生命周期阶段,除灰氢驱动的航空器外,机场的建设运营是碳排放的最主要来源,占绿氢和蓝氢航空器生命周期排放的 50%~55%;其次为航空器的运行与维护,占比为 28%~33%。对于灰氢驱动的航空器,其生命周期碳排放主要来自于飞行器的运行维护,占比高达 72%;其次为机场的建设运营,占比为 21%。对于各类氢能航空器,航空器生产制造阶段的碳排在整个生命周期阶段占比相对较低,平均为 13%。

机场建设与运营阶段的高排放主要来自运营过程大量电力消耗,占该阶段排放的 74%。在航空器的运行维护阶段,由于氢燃烧不排放二氧化碳,因此这一阶段的碳排放主要来自于氢能源的生产过程。煤

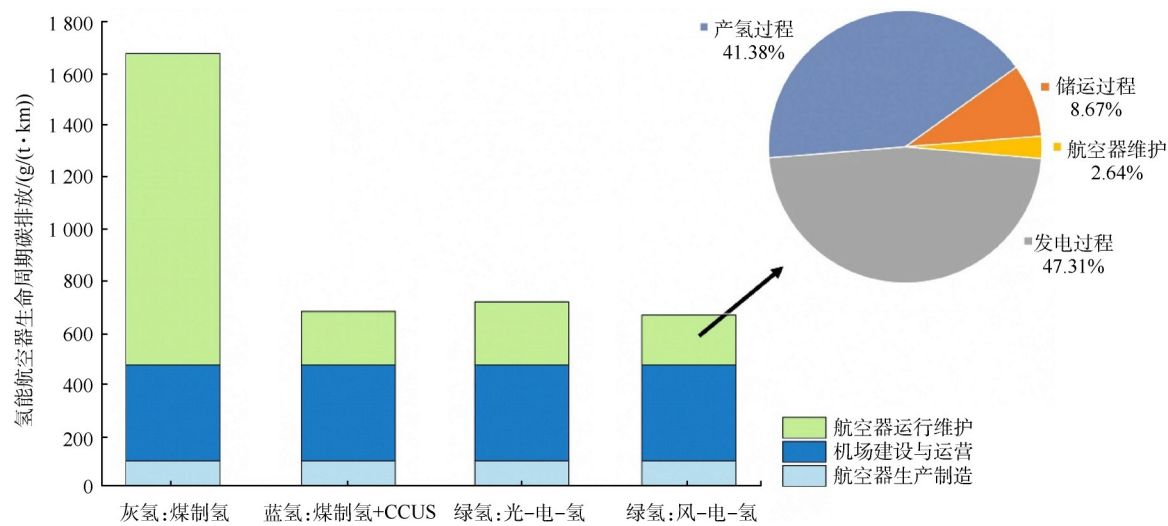


图5 氢能航空器生命周期碳排放

制氢过程清洁度最低,碳排放高达 1 183.37 g/(t·km),占灰氢航空器运行维护阶段总排放的 95% 以上。但如果在生产过程中应用 CCUS 技术,其碳排放将下降为 185.80 g/(t·km)。可再生能源制氢过程的平均碳排放为 205.16 g/(t·km),以“风-电-氢”制备氢气为例,氢气生产过程碳排放占运行维护阶段比重为 89%,其中“风-电”过程占比 47%，“电-氢”过程占比 41%。此外,氢能源的储运过程占比 9%,航空器维护占比 3%。

3.4 绿色航空器和传统航空器的比较

综合比较传统与绿色航空器,可以看出绿色航空器生命周期碳排放更低。传统航空器的生命周期二氧化碳排放为 1 265.91 g/(t·km),其中飞机运行过程中燃料燃烧的直接排放为 677.92 g/(t·km),占生命周期二氧化碳排放 54%。从平均水准看,氢能航空器的生命周期二氧化碳排放最低,为 953.69 g/(t·km),比传统航空器减少 25% 的碳排放;其次是生物质航空器和电动航空器,分别为 1 011.88 g/(t·km) 和 1 142.08 g/(t·km),分别可减少 20% 和 10% 的碳排放。

然而,并非所有绿色航空器都能真正实现减碳。从图 6 可以看出,灰氢驱动的航空器和以煤电、油电作为动力的电动航空器,生命周期碳排放都在传统航空器之上。这是因为虽然这些航空器飞行过程中不会因为燃料燃烧产生碳排放,但在氢气和电力的生产阶段反而会产生更多的碳排放。对于此类绿色航空器,碳排放并没有消失,而是被转移到了产业链的上游。

以可再生能源作为航空器燃料能够大幅度降低其生命周期碳排放。其中,以可再生能源发电驱动

的电动航空器,相较于传统航空器最高减少 21% 的碳排放(水电驱动的航空器);以可再生能源制氢驱动的氢能航空器,最多可减少 47% 的生命周期碳排放(风电制氢驱动的航空器);以航空生物煤油作为燃料的航空器,最多可减少 21% 的碳排放,并且其减排效应会随着航空生物燃料混合比例的提高而上升。

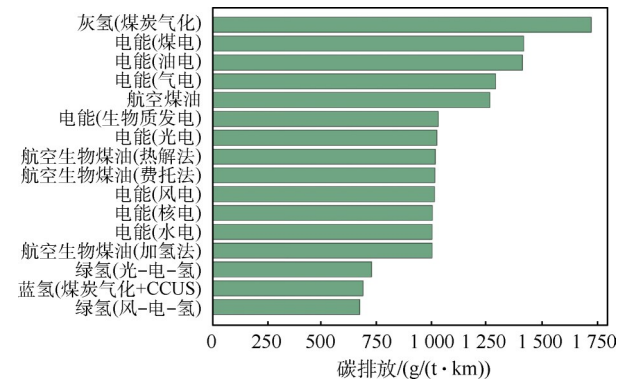


图6 不同技术路线的绿色航空器和传统航空器生命周期碳排放对比

4 结论与建议

本文构建了混合生命周期评价模型,采用统一的系统边界核算并比较各种典型绿色航空器和传统航空器在机场建设运营、航空器研发制造和航空器运行维护等阶段的二氧化碳排放,得到如下结论:

(1)在各类绿色航空器中,生命周期碳排放最高的是灰氢(煤制氢)驱动的氢能航空器(1 724.12 g/(t·km)),高于传统航空器(1 265.91 g/(t·km)),碳排放最低的是绿氢(风-电-氢)驱动的氢能航空器(674.21 g/(t·km))。这说明使用化石能源而非可再

生能源生产航空燃料,生命周期碳排放没有减少,而仅是转移到了产业链上游。

(2)从排放的生命周期阶段分布来看,生物燃料航空器的排放主要来自混合燃料中航空煤油燃烧;纯电动航空器的排放则主要来自航空器的生产制造过程以及化石能源发电;在氢能航空器中蓝氢和绿氢驱动的航空器其排放主要来自航空器研制,而灰氢驱动的航空器排放主要来自燃料的生产过程。由此可见,尽管绿色航空器在燃料燃烧阶段可实现零碳或低碳,但其实上游燃料生产和航空器制造产生的排放仍不可忽视。

(3)从绿色航空器的减排效果看,氢能航空器的减排效益最大,与传统航空器相比平均可减少25%的碳排放。生物燃料航空器和纯电动航空器的减排效果也较为明显,平均可减少20%和10%的二氧化碳排放。

基于以上研究结论,本文提出如下政策建议:

(1)为准确评估绿色航空器“绿度”,应该构建包含绿色航空器全生命周期阶段的碳排放监测系统,不仅包括运行过程中的直接燃烧排放,还应该包括隐含于燃料生产、航空器制造和机场建设等过程的间接排放,防止发生碳排放的产业链转移。

(2)为减少航空碳排放,绿色航空器的发展势在必行,但不同绿色航空器技术的发展应存在优先级。从短期来看,考虑到我国农林废弃物资源丰富,且生物燃料航空器对机场和航空器的改造要求较低,应注重航空生物燃料的优先发展;而从中期来看,随着交通部门电气化水平逐渐提高,电动航空器的发展具有较大潜力;尽管当前氢能航空器还处在研发阶段,但从长期来看应不断加强制氢和储氢技术,发挥氢能航空器的减碳作用。

致谢:感谢教育部人文社会科学基金、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目、国家自然科学基金面上项目和江苏省高校哲学社会科学研究重大项目的资助。

参考文献

- [1] 李玲玲,韩瑞玲,张晓燕. 中国航空碳排放及其效率时空演化特征分析[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3919-3932.
- [2] ZHOU W J, WANG T, YU Y D, et al. Scenario analysis of CO₂ emissions from China's civil aviation industry through 2030[J]. Applied Energy, 2016, 175: 100-108.
- [3] Air transport action group. Aviation: benefits beyond borders[R]. ATAG, 2020.
- [4] LIU J, TIAN J Y, LYU W J, et al. The impact of covid-19 on reducing carbon emissions: from the angle of international student mobility [J]. Applied Energy, 2022, 317: 119136.
- [5] LEE D S, FAHEY D W, FORSTER P M, et al. Aviation and global climate change in the 21st century[J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(22-23): 3520-3537.
- [6] BREWER G D. Hydrogen aircraft technology[M]. UK: Routledge, 2017.
- [7] KHANDELWAL B, KARAKURT A, SEKARAN P R, et al. Hydrogen powered aircraft: the future of air transport [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2013, 60: 45-59.
- [8] 黄俊,杨凤田. 新能源电动飞机发展与挑战[J]. 航空学报, 2016, 37(1): 57-68.
- [9] HOSPODKA J, BÍNOVÁ H, PLENINGER S. Assessment of all-electric general aviation aircraft [J]. Energies, 2020, 13(23): 6206.
- [10] WANG M, DEWIL R, MANIATIS K, et al. Biomass-derived aviation fuels: challenges and perspective [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019, 74: 31-49.
- [11] HARI T K, YAAKOB Z, BINITHA N N. Aviation biofuel from renewable resources: routes, opportunities and challenges [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 1234-1244.
- [12] STAPLES M D, MALINA R, SURESH P, et al. Aviation CO₂ emissions reductions from the use of alternative jet fuels[J]. Energy Policy, 2018, 114: 342-354.
- [13] VAN RENNSSEN S. The hydrogen solution? [J]. Nature Climate Change, 2020, 10(9): 799-801.
- [14] SIDDIQUI O, DINCER I. A comparative life cycle assessment of clean aviation fuels[J]. Energy, 2021, 234: 121126.
- [15] BICER Y, DINCER I. Life cycle evaluation of hydrogen and other potential fuels for aircrafts [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(16): 10722-10738.
- [16] HOWE S, KOLIOS A, BRENNAN F. Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2013, 19: 34-41.
- [17] PEREIRA S R, FONTES T, COELHO M C. Can hydrogen or natural gas be alternatives for aviation? -a life cycle assessment[J]. International Journal of Hydrogen energy, 2014, 39(25): 13266-13275.
- [18] MEHMETI A, ANGELIS-DIMAKIS A, ARAMPATZIS G, et al. Life cycle assessment and water footprint of hydrogen production methods: from conventional to emerging technologies[J]. Environments, 2018, 5(2).
- [19] BHANDARI R, TRUDEWIND C A, ZAPP P. Life cycle

- assessment of hydrogen production via electrolysis—a review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 85: 151–163.
- [20] SUN H R, LUO Z Y, LI S M, et al. Comparative life cycle assessment(LCA) of biofuel production via corn stover: fermentation to ethanol, pyrolysis to bio-oil, and gasification to jet fuel[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021, 13: 12809–12821.
- [21] PIEROBON F, EASTIN I L, GANGULY I. Life cycle assessment of residual lignocellulosic biomass-based jet fuel with activated carbon and liginosulfonate as co-products[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2018, 11(1): 1–18.
- [22] GANGULY I, PIEROBON F, BOWERS T C, et al. ‘Woods-to-wake’ life cycle assessment of residual woody biomass based jet-fuel using mild bisulfite pretreatment[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2018, 108: 207–216.
- [23] HAN J, ELGOWAINY A, CAI H, et al. Life-cycle analysis of bio-based aviation fuels[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 150: 447–456.
- [24] BHAT I, PRAKASH R. LCA of renewable energy for electricity generation systems—a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(5): 1067–1073.
- [25] FENG K, HUBACEK K, SIU Y L, et al. The energy and water nexus in chinese electricity production: a hybrid life cycle analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 342–355.
- [26] CETINKAYA E, DINCER I, NATERER G F. Life cycle assessment of various hydrogen production methods[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(3): 2071–2080.
- [27] COX K, RENOUF M, DARGAN A, et al. Environmental life cycle assessment (LCA) of aviation biofuel from microalgae, pongamia pinnata, and sugarcane molasses[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2014, 8(4): 579–593.
- [28] SUH S, LENZEN M, TRELOAR G J, et al. System boundary selection in life-cycle inventories using hybrid approaches [J]. *Environmental Science&Technology*, 2004, 38(3): 657–664.
- [29] LENZEN M. Errors in conventional and input-output—based life—cycle inventories [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2000, 4(4): 127–148.
- [30] WANG C B, CHANG Y, ZHANG L X, et al. Quantifying uncertainties in greenhouse gas accounting of biomass power generation in china: system boundary and parameters[J]. *Energy*, 2018, 158: 121–127.
- [31] BULLARD C W, PENNER P S, PILATI D A. Net energy analysis: handbook for combining process and input-output analysis [J]. *Resources and Energy*, 1978, 1(3): 267–313.
- [32] LAVE L B. Using input-output analysis to estimate economy-wide discharges [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(9): 420–426.
- [33] WANG C, MALIK A, WANG Y, et al. The social, economic, and environmental implications of biomass ethanol production in China: a multi-regional input-output-based hybrid LCA model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 249: 119326.
- [34] HEIJUNGS R, SUH S. The computational structure of life cycle assessment [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2002.
- [35] MALIK A, LENZEN M, GESCHKE A. Triple bottom line study of a lignocellulosic biofuel industry[J]. *Gcb Bioenergy*, 2016, 8(1): 96–110.
- [36] WANG C B, ZHANG L X, CHANG Y, et al. Biomass direct-fired power generation system in China: an integrated energy, GHG emissions, and economic evaluation for salix[J]. *Energy Policy*, 2015, 84: 155–165.
- [37] 杨举华, 张力小, 王长波, 等. 基于混合生命周期分析的我国海上风电场能耗及温室气体排放研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(2): 786–792.
- [38] ZHANG L X, WANG C B, SONG B. Carbon emission reduction potential of a typical household biogas system in rural China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 47: 415–421.
- [39] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[C]. Tokyo: Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies(IGES), 2007.
- [40] 王长波, 胡志伟, 周德群. 中国居民消费间接 CO₂ 排放核算及其关键减排路径[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2022, 24(3): 15–27.
- [41] 张辉华. 机场建设项目投资决策与管理的系统研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2005.
- [42] MARKISH J. Valuation techniques for commercial aircraft program design[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [43] WILLCOX K. Aircraft systems engineering cost analysis [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2008.
- [44] HARRIS F D. An economic model of US airline operating expenses[R]. NASA/CR-2005-213476, 2005.
- [45] 中国民航局. 国家发展改革委民航局关于调整民航国内航线旅客运输燃油附加与航空煤油价格联动机制基础油价的通知[Z]. 中国: 国家发改委, 民航局, 2015.
- [46] CHEN G Q, YANG Q, ZHAO Y H. Renewability of wind power in China: a case study of nonrenewable energy cost and greenhouse gas emission by a plant in Guangxi [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011,

- 15(5): 2322–2329.
- [47] MICHAÏLOS S, BRIDGWATER A. A comparative techno-economic assessment of three bio-oil upgrading routes for aviation biofuel production[J]. *International Journal of Energy Research*, 2019, 43(13): 7206–7228.
- [48] LISZKA M, MALIK T, MANFRIDA G. Energy and exergy analysis of hydrogen-oriented coal gasification with CO₂ capture[J]. *Energy*, 2012, 45(1): 142–150.
- [49] NIKOLAIDIS P, POULLIKKAS A. A comparative overview of hydrogen production processes [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 597–611.
- [50] EL-EMAM R S, ÖZCAN H. Comprehensive review on the techno-economics of sustainable large-scale clean hydrogen production[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 220: 593–609.
- [51] YAO F, JIA Y, MAO Z Q. The cost analysis of hydrogen life cycle in China[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(7): 2727–2731.
- [52] KOPETZ H. Build a biomass energy market[J]. *Nature*, 2013, 494(7435): 29–31.

(编辑:白 鹭)

A comparative study of China's green aircraft carbon emissions based on hybrid life cycle assessment

WANG Ze, WANG Qunwei, WANG Changbo, YANG Ziyang

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to accurately account for the life-cycle carbon dioxide emissions of green aircraft and evaluate their emission reduction effects, a hybrid life-cycle evaluation model combining process analysis and input-output analysis was developed to account for the life-cycle carbon emissions of biomass, electric and hydrogen powered aircraft, and to compare them with those of conventional aircraft. The results show that aircraft powered by hydrogen from wind electrolysis have the lowest carbon emission of all green aircraft, at 674.21 g/(t·km), while those powered by grey hydrogen have the highest carbon emission, at 1 724.12 g/(t·km) indicating that the fuel source is critical to the ‘greenness’ of the aircraft. If the aircraft is powered by hydrogen from fossil sources or electricity, the emissions are transferred to the upstream chain, although there are no direct emissions from the operation. In general, green aircraft are more effective at reducing carbon emissions. Compared to conventional aircraft, hydrogen powered aircraft, biomass powered aircraft and electric aircraft can reduce CO₂ emissions by 25%, 20% and 10%, respectively.

Key words: Aviation carbon emissions; Green aircraft; Renewable energy; Hybrid life cycle assessment; Input-output analysis

Received: 2022-11-03; **Revised:** 2023-09-21.

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2211010

Foundation items: Humanities and Social Sciences Fund of Ministry of Education (22YJCZH184); Project supported by the Funds for International Cooperation and Exchange of National Natural Science Foundation of China (72161147003); Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (72373064); The Major Project of Philosophy and Social Science Research in Colleges and Universities in Jiangsu Province (2022SJZD050).

Corresponding author: WANG Changbo, E-mail: changbo@nuaa.edu.cn