

文章编号:1005-0523(2020)05-0074-06

机场航空器碳排放演变的驱动因素分解研究

洪浩强,胡 荣,张军峰,黄梦圆

(南京航空航天大学民航学院,江苏 南京 211106)

摘要:驱动因素的有效识别与科学分解是制定机场航空器碳减排政策的重要基础。以江苏省九个民用机场为研究对象,采用ICAO推荐的着陆起飞(LTO)循环计算方法,核算了2007-2016年机场航空器碳排放总量;运用LMDI方法从机场运行规模、排放强度、单位收入吞吐量、单位能耗收入以及单位LTO能耗五个驱动因素开展机场航空器碳排放演变的驱动因素分解分析;最后,基于因素分解结果提出了减排建议。

关键词:航空器;碳排放;LTO循环;驱动因素;减排措施

中图分类号:U8;F562

文献标志码:A

本文引用格式:洪浩强,胡荣,张军峰,等. 机场航空器碳排放演变的驱动因素分解研究[J]. 华东交通大学学报,2020,37(5):74-79.

Citation format: HONG H Q, HU R, ZHANG J F, et al. Decomposition of driving factors for the carbon emission evolution of aircraft in airports[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(5): 74-79.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.011

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)指出人类活动产生的二氧化碳是温室效应最为显著的贡献源。相较于工业、农业等部门,对交通运输行业二氧化碳排放的研究相对偏少,其中关于民航运输业的研究更是亟待加强^[1]。近五年我国民航全行业运输总周转量年均增长达到12.4%^[2],与之伴生的碳排放增长问题日益受到重视。

在碳排放核算方面,ICAO制定了简单方法、高级方法和复杂方法,欧洲也提出了EMEP 1级方法、EMEP 2级方法和EMEP 3级方法。为满足具体研究的要求,国际上也提出了SOURDINE方法、ALAQS方法以及EDMS、AEDT、APMI等模型软件^[3]。其中,Stettler等(2011)制定了2005年英国20个机场的航空器LTO循环阶段碳排放清单^[4];Kurniawan等(2011)采用ICAO推荐方法、EPA方法、EEA/EMEP方法和MEET方法等对LTO阶段污染物排放指标进行测算并对测算结果进行比较,研究表明不同模型计算结果没有明显差异,并指出因为ICAO推荐方法被很多组织和项目应用,所以该方法是用于LTO循环污染物排放评价的最有效的方法^[5]。朱佳琳等(2019)采用ICAO推荐方法对2007—2016年江苏省机场LTO阶段碳排放进行测算^[6],等等。

其次,在影响因素分析上,夏卿等(2008)研究发现对航空器LTO循环碳排放具有显著影响的因素有:机型以及机型-发动机匹配情况、排放因子、发动机推力设置和LTO循环数量^[7]。Song等(2012)指出航空器排放取决于航空器类型和数量、航空器发动机的类型和效率、使用的燃料、飞行距离、功率设置、运行时间等^[8]。Liu等(2017)认为能源强度、纯技术效率、科技进步、规模效率、运输量和运输距离是碳排放量变化背后的主要驱动因素^[9]。徐晨等(2018)将影响碳排放的因素分解为机场航空性运输收入、机场吞吐量、市场结构和耗油量,并指出影响碳排放增长的主要因素是机场航空性业务收入的增加^[10],等等。

最后,在研究方法选取上,根据研究方法的不同,可分为经济计量分析和分解分析。肖宏伟等(2013)采用经济计量分析的方法考察各驱动因素对碳排放规模和强度的影响^[11]。石钰婷等(2014)用LMDI方法(Logarithmic Mean Divisia Index)对我国航空碳排放的影响因素进行分解分析^[12]。邓吉祥等(2014)指出分解分析

收稿日期:2020-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(U1933117);南京航空航天大学研究生开放基金(kfjj20200719)

作者简介:洪浩强(1997—),男,硕士研究生,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:462194252@qq.com。

通信作者:胡荣(1980—),男,副教授,博士,硕士研究生导师,研究方向为交通运输规划与管理。E-mail:hoorong@nuaa.edu.cn。

法中 LMDI 方法具有分解技术较为成熟、形式较为多样、计算方便且无残差等优点,目前已广泛应用于 CO₂ 排放效应分解领域^[13]。杨正东和李京文(2015)指出各种研究方法都有自己的优缺点和适用范围,当研究对象需要完全分解和需要多层级的分析时,在保障没有负数数据出现时,LMDI 方法是适用性最广泛的指数分解方法^[14]。

综上所述,在机场航空器碳排放的驱动因素识别及分解研究方面取得了诸多研究成果,但仍有如下几点需进一步拓展与深入:① 在研究对象方面,现有研究更多聚焦于整个行业的分析,针对机场这一民航主体的研究较少。② 在驱动因素分解方面,现有研究与运行直接相关的驱动因素尚不丰富,比如鲜有考虑单位 LTO 能耗和客均排放强度等,值得进一步研究。因此,本文以江苏省 9 个民用机场为例,采用 ICAO 推荐方法计算各机场航空器碳排放总量,然后使用 LMDI 方法对航空器碳排放演变的驱动因素进行分解分析,最后给出相应的减排建议,以期为绿色民航建设提供参考。

1 模型与数据

1.1 ICAO 推荐方法

ICAO 将航空器在机场运行的活动划分为进近、滑行、起飞和爬升四个运行阶段(即 LTO 循环)。ICAO 根据发动机生产商提供的 LTO 循环下不同机型发动机的运行参数,建立了发动机排放数据库,其中包含发动机在不同运行阶段的基准燃油流量以及若干排放物的排放因子。碳排放因子指能源燃烧或使用过程中单位能源所产生的碳排放数量,根据 IPCC 建议航空煤油的 CO₂ 排放因子可取 3.115(kg/kg)^[5]。

因此,机场航空器单个 LTO 循环碳排放量可以由 LTO 循环过程中的燃油消耗量与 CO₂ 排放因子求得

$$C = \sum_{i=1}^4 (n \times t_i \times f_i \times I) \quad (1)$$

其中: C 为单个 LTO 循环中 CO₂ 的排放量,kg; n 为航空器的发动机个数,个; t_i 为航空器在运行阶段 i 的运行时间,s; f_i 为航空器在运行阶段 i 的单发燃油流量,kg/s; I 为能源的 CO₂ 排放因子,kg/kg; $i=1,2,3,4$ 分别表示进近、滑行、起飞和爬升 4 个运行阶段。

只需将某一时间内机场所有类型航空器的每一次 LTO 循环碳排放进行加总即可得到该时间段内的机场航空器的碳排放总量。

1.2 LMDI 方法

考虑到基础数据没有负数,LMDI 方法具有因素可逆、部分效应之和与总效应一致和形式多样化的特点以及这一方法在能源效应以及环境影响研究中的广泛应用,本文选取 LMDI 方法进行驱动因素分解分析。

以往研究表明,机场航空器碳排放主要受 LTO 循环数量、航空器类型、发动机类型、运行时间和能源排放因子等因素直接影响^[6-7]。此外,从机场运行的角度,机场换算旅客吞吐量和航空器 LTO 循环油耗也是重要驱动因素。因此,综合以上考虑,本文将机场航空器碳排放演变驱动因素分解为运行规模、排放强度、单位收入吞吐量、单位能耗收入以及单位 LTO 能耗 5 个因素,如表 1 所示。

表 1 驱动因素表
Tab.1 Driving factors

驱动因素	单位	含义	符号
运行规模	个	航空器 LTO 循环数量	L
排放强度	kg/人次	碳排放量/换算旅客吞吐量	M
单位收入吞吐量	人次/万元	换算旅客吞吐量/机场服务收入	I
单位能耗收入	万元/kg	机场服务收入/能源消耗量	N
单位 LTO 能耗	kg/个	能源消耗量/LTO 循环数	J

基于上述因素选取结果,建立驱动因素分解模型

$$\sum_{i=1}^n C_i^t = \sum_{i=1}^n L_i^t \times \frac{C_i^t}{P_i^t} \times \frac{P_i^t}{Q_i^t} \times \frac{Q_i^t}{F_i^t} \times \frac{F_i^t}{L_i^t} \quad (2)$$

$$\text{令 } M_i^t = \frac{C_i^t}{P_i^t}; I_i^t = \frac{P_i^t}{Q_i^t}; N_i^t = \frac{Q_i^t}{F_i^t}; J_i^t = \frac{F_i^t}{L_i^t} \quad (3)$$

其中: L_i^t 为LTO循环数量,个; P_i^t 为换算旅客吞吐量,人次; C_i^t 为碳排放量,kg; F_i^t 为能源消耗量,kg; Q_i^t 为机场服务收入,万元; i 表示第*i*个机场, t 表示第*t*年。

从第*t*年到第*t+1*年, n 个机场的CO₂排放量之和如式(4),式(5)所示

$$C^t = \sum_{i=1}^n C_i^t = \sum_{i=1}^n L_i^t \times M_i^t \times I_i^t \times N_i^t \times J_i^t \quad (4)$$

$$C^{t+1} = \sum_{i=1}^n C_i^{t+1} = \sum_{i=1}^n L_i^{t+1} \times M_i^{t+1} \times I_i^{t+1} \times N_i^{t+1} \times J_i^{t+1} \quad (5)$$

易得式(6)

$$\Delta C = C^{t+1} - C^t = \Delta C_L + \Delta C_M + \Delta C_I + \Delta C_N + \Delta C_J \quad (6)$$

其中: ΔC_L 为运行规模的驱动效应,kg; ΔC_M 为排放强度的驱动效应,kg; ΔC_I 为单位收入吞吐量的驱动效应,kg; ΔC_N 为单位能耗收入的驱动效应,kg; ΔC_J 为单位LTO能耗的驱动效应,kg; ΔC 为碳排放增量,kg。

采用LMDI加法公式进行计算分析,各因素驱动效应如式(7)所示

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta C_L = \sum_{i=1}^n K_i \times \ln\left(\frac{L_i^{t+1}}{L_i^t}\right) \\ \Delta C_M = \sum_{i=1}^n K_i \times \ln\left(\frac{M_i^{t+1}}{M_i^t}\right) \\ \Delta C_I = \sum_{i=1}^n K_i \times \ln\left(\frac{I_i^{t+1}}{I_i^t}\right) \\ \Delta C_N = \sum_{i=1}^n K_i \times \ln\left(\frac{N_i^{t+1}}{N_i^t}\right) \\ \Delta C_J = \sum_{i=1}^n K_i \times \ln\left(\frac{J_i^{t+1}}{J_i^t}\right) \end{array} \right. , \text{其中 } K_i = \frac{C_i^{t+1} - C_i^t}{\ln C_i^{t+1} - \ln C_i^t} \quad (7)$$

1.3 数据来源

本文选取江苏省南京禄口国际机场(IATA三字码:NKG)、苏南硕放国际机场(WUX)、常州奔牛国际机场(CZX)、扬州泰州国际机场(YTY)、南通兴东国际机场(NTG)、淮安涟水机场(HIA)、盐城南洋国际机场(YNZ)、徐州观音国际机场(XUZ)和连云港白塔埠机场(LYG)九个机场2007—2016年相关运行数据进行研究。数据来源如下:

- 1) OAG数据库。获取江苏省机场2007—2016年的LTO循环数量,包含了客货运航空器的运行数据。
- 2) ICAO发动机排放数据库。获取不同类型航空器发动机燃油流量数据。
- 3) 航空器制造商网站及研究文献。获取航空器发动机个数以及机型-发动机匹配数据。假设同一机型装备的发动机类型相同,依据以往学者的相关研究对所列出的机型进行发动机-航空器匹配处理^[5]。
- 4) 2007—2016年民航机场生产统计公报。获取机场旅客及货邮吞吐量数据,得到换算旅客吞吐量。
- 5) 2008—2017年《从统计看民航》。获取机场服务收入数据。

基于上述数据来源与相关假设,本文采用ICAO推荐方法进行碳排放核算,主要计算结果见表2。2007—2016年江苏省机场年均换算旅客吞吐量、起降架次及碳排放增长率分别约为14.1%、13.2%和13.4%,碳排放增长率略低于机场换算旅客吞吐量增长率,表明江苏省机场处于良好的低碳发展态势。

表 2 江苏省机场航空器碳排放表
Tab.2 Aircraft carbon emissions of airports in Jiangsu

年份	碳排放总量/t	年份	碳排放总量/t
2007	139 103	2012	258 730
2008	156 868	2013	307 970
2009	184 833	2014	341 025
2010	212 913	2015	369 952
2011	232 562	2016	430 263

2 结果与讨论

2.1 驱动因素的累计效应

2007—2016 年江苏省 9 个机场的航空器碳排放驱动因素的累计效应如图 1 所示。

从总体上来看,运行规模起到 90%的正向驱动效应,是碳排放增长最为重要的驱动因素;单位 LTO 能耗次之,约为 10%;此外,单位收入吞吐量的变化总体上促进了 8%的碳排放增长;单位能耗收入引起的碳排放变化较小,仅为 1%;而排放强度的变化对碳排放的增长起到较为显著的抑制作用,抑制效应为 9%。

2.2 驱动因素的逐年效应

各驱动因素逐年驱动效应计算结果如图 2 所示。

因计算结果以 kg 为单位时数值过大,故此处将单位换算为 t。图 2 中: ΔC_L 代表运行规模的驱动效应,t; ΔC_M 代表排放强度的驱动效应,t; ΔC_I 代表单位收入吞吐量的驱动效应,t; ΔC_N 代表单位能耗收入的驱动效应,t; ΔC_J 代表单位 LTO 能耗的驱动效应,t; ΔC 代表碳排放增量,t。

2.2.1 运行规模的驱动效应

运行规模的逐年效应均为正值且明显高于其他因素,说明由于运行规模增长导致的碳排放增长效应最为显著,因此,运行规模因素是机场航空器碳排放演变最主要的驱动因素。其中 2012—2013 年与 2015—2016 年驱动效应最为显著,分别为 47 900 t 与 53 058 t。2007—2016 年江苏省机场航空器起降架次和换算旅客吞吐量年均增长率在 13%以上,可以看出运行规模的增长是市场规模不断扩大的必然结果,由此带来的温室气体排放的增长十分显著。

2.2.2 单位 LTO 能耗的驱动效应

单位 LTO 能耗逐年效应均为正值但均不显著,即使在年效应最大的 2013—2014 年,其驱动效应也仅为 7 996 t,这说明江苏省航空器单位 LTO 能耗正在缓慢上升。通过对江苏省机场大型航空器(相对于支线飞机)燃油

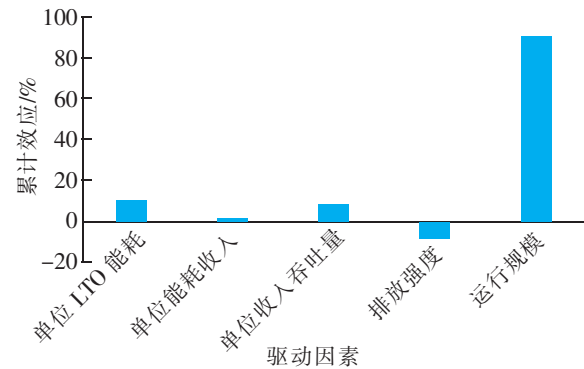


图 1 各因素累计驱动效应图

Fig.1 The cumulative effect of driving factors

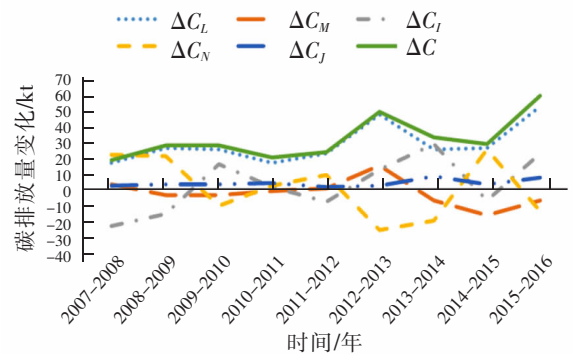


图 2 各驱动因素逐年驱动效应图

Fig.2 The annual effect of driving factors

消耗占比分析发现,大型航空器的能耗占比呈上升趋势(图3)。可以看出,单位LTO能耗的不断增加是机型变大的体现,这是近年来民航行业大发展而不断投入大型航空器所致。

2.2.3 排放强度的驱动效应

图2可以看出在2007—2016年中,排放强度这一指标仅在其中两年有所上升,但上升幅度较小,其余时间均处于下降阶段,排放强度的降低可以有效抑制碳排放的增长,其中2014—2015年负向驱动效应最大,为-17 263 t。排放强度的降低一方面得益于大型航空器的广泛应用(规模效应),另一方面得益于载运率和客座率的上升(图4)。

2.2.4 单位收入吞吐量的驱动效应

单位收入吞吐量逐年驱动效应波动较大且正负波动较为明显,但累计效应不显著(约8%)。原因是单位收入吞吐量这一指标值存在增减交替的情况。

从机场服务收入构成来看,机场核心收入由旅客自身的安检费、服务费以及均摊到各个旅客身上的航空性费用。其中航空性费用与机型、停场时长、客桥占用时长等密切相关,而时间长短等因素并没有逐年增长的必然趋势,这就造成了机场服务收入的波动特点。

2.2.5 单位能耗收入的驱动效应

虽然该指标累计效应仅为1%,但从每一年的效应值来看,单位能耗收入指标波动较大,呈现明显的正负交替现象,导致促进效应与抑制效应相互抵消、累计效应不显著。相关研究表明机场服务收入的增长对机场航空器碳排放的增长起到显著的促进作用^[9],但将机场服务收入与能源指标综合考量,指标的波动说明单位能耗收入的演变与机场服务收入的演变存在差异,因此可以认为在不同机场,单位能耗所产生的经济效益是不一样的,即使在同一机场,不同航班之间的单位能耗产生的经济效益也不尽相同。

2.3 减排措施

基于上述有关机场航空器碳排放驱动因素的分析结果,提出如下减排建议:① 优化场面运行。通过机坪管制对场面运行资源的统筹,合理规划场面运行路线,在运行规模不断增长的情况下,减少因场面低效运行而导致的额外能源消耗与碳排放。② 机型指派精细化管理。鼓励航空公司在进行机型指派决策时将温室气体排放考虑在内,实现大小机型在不同航线指派的总体最优;如果必要,局方可以通过类似排放费/税的经济手段进行宏观调控,促使航空公司将排放作为成本因素进行考虑。③ 新技术开发与应用。鼓励发动机节能技术创新与生物能源的开发利用,从源头上减少化石燃料消耗,进而实现减排的目的。④ 提高航班客座率。对于客座率较低的航班,可以通过航班共享、合并航班或增加经停点的方式化零为整,在旅客便利性与客座率之间进行综合权衡,减少因低客座率造成的高排放强度。

3 结论

基于江苏省机场2007—2016年运行数据,采用ICAO推荐方法与LMDI方法进行机场航空器碳排放驱动因素的定量分析,主要结论如下:① 江苏省机场2007—2016年均碳排放增长率约为13.4%。其中南京禄口机场贡献率最高,占50%以上,无锡硕放机场次之,约为16%。② 运行规模增长是碳排放增长最主要的驱

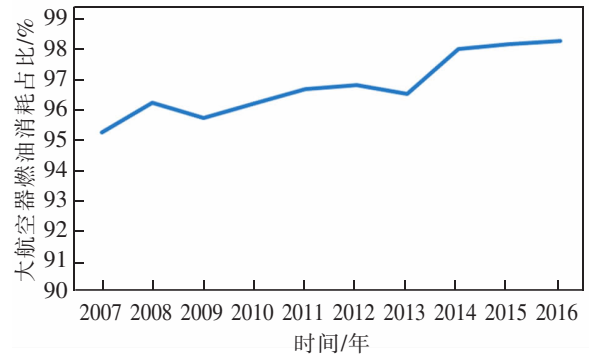


图3 大型航空器燃油消耗占比图

Fig.3 Proportion of fuel consumption of large aircraft

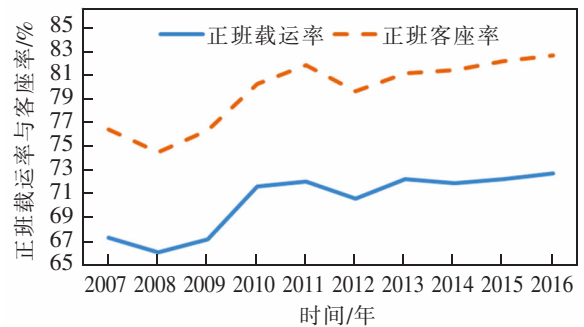


图4 载运率和客座率变化趋势图

Fig.4 Trend of load factor and passenger load factor

动因素,正向驱动效应约为90%;其次为单位LTO能耗约为10%。相对而言,单位收入吞吐量、单位能耗收入的累计驱动效应不显著。③排放强度的降低有效抑制了碳排放增长,累计效应为-9%。从运行的角度来看,在繁忙航线采用大机型、客座率低的航线采用小机型以及提高客座率是减排效果较为显著的可行方案。

参考文献:

- [1] GUO M Y, MENG J. Exploring the driving factors of carbon dioxide emission from transport sector in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226:692-705.
- [2] 中国民用航空局. 2018年民航行业发展统计公报[ER/OL]. [2019-3-5]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/201905/t20190508_196033.html.
- [3] 李杰,赵志奇,王凯,等. 航空器排放清单计算方法研究进展综述[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(9):183-191.
- [4] STETTLER M E J, EASTHAM S, BARRETT S R H. Air quality and public health impacts of UK airports. Part I: Emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(31):5415-5424.
- [5] KURNIAWAN J S, KHARDI S. Comparison of methodologies estimating emissions of aircraft pollutants, environmental impact assessment around airports[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2011, 31(3):240-252.
- [6] 朱佳琳,胡荣,张军峰,等. 机场碳排放测算与时间演化特征研究[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2019, 43(1):102-107.
- [7] 夏卿,左洪福,杨军利. 中国民航机场飞机起飞着陆(LTO)循环排放量估算[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(7):1469-1474.
- [8] SONG S K, SHON Z H. Emissions of greenhouse gases and air pollutants from commercial aircraft at international airports in Korea[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 61:148-158.
- [9] WANG Q W, LIU X, ZHOU D Q, et al. What drives CO₂ emissions from China's civil aviation? An exploration using a new generalized PDA method[J]. *Transportation research, Part A: Policy and practice*, 2017, 99:30-45.
- [10] 徐晨,朱佳琳,胡荣. 基于LMDI法的江苏省机场碳排放因素指数分解[J]. *航空计算技术*, 2018, 48(3):86-90.
- [11] 肖宏伟,易丹辉,张亚雄. 中国区域碳排放空间计量研究[J]. *经济与管理*, 2013, 27(12):53-62.
- [12] 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.
- [13] 邓吉祥,刘晓,王铮. 中国碳排放的区域差异及演变特征分析与因素分解[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(2):189-200.
- [14] 杨正东,李京文. 能源因素分解模型比较、改进与应用[J]. *管理学报*, 2015, 12(12):1860-1864.

Decomposition of Driving Factors for the Carbon Emission Evolution of Aircraft in Airports

Hong Haoqiang, Hu Rong, Zhang Junfeng, Huang Mengyuan

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: The effective identification and scientific decomposition of the driving factors are important foundation for formulating the airport's aircraft carbon emission reduction policies. Taking nine civil airports in Jiangsu Province as the research objects, the total carbon emissions of aircrafts in the airports from 2007 to 2016 were calculated by using the landing and take-off (LTO) cycle calculation method recommended by ICAO; then the LMDI method was used to analyze the driving factors of the evolution of airfield aircraft carbon emissions from five perspectives including airport operation scale, emission intensity, unit revenue throughput, unit energy consumption income and unit LTO energy consumption. Finally, based on the results of factor decomposition, suggestions for reducing emissions were put forward.

Key words: aircraft; carbon emissions; LTO cycle; driving factors; carbon reduction measures