文章编号:1005-0523(2022)02-0053-09

机场航空器碳排放演化特征及影响因素分解

宋 文,胡 荣,曾 雯,王德芸,张军峰

(南京航空航天大学民航学院,江苏 南京 211106)

摘要:科学识别并分析行业因素对自身碳排放的影响是制定针对性减排措施,实现2030年碳达峰的重要基础。以中国31个省(自治区、直辖市)的2007—2016年机场航空器碳排放为样本,首先,分析中国机场航空器碳排放的时空演变特征;其次,采用LMDI分解方法讨论机场开放程度、机场连接强度、运输强度及能耗强度对航空器碳排放的影响;最后,针对影响效果提出完善航线规划、优化网络结构与机型指派等减排建议。结果表明:全国机场航空器碳排放量年均增长率约为9.46%,东部沿海、西南地区的机场航空器碳排放水平较高,广东增加值最大、西藏最小,河北增速最快、上海最慢;机场开放程度、机场连接强度及运输强度的变动促进碳排放增长,其中机场开放程度对碳排放的影响最为显著;能耗强度变动抑制碳排放增长,且抑制效果逐年加强。

关键词:航空器碳排放;碳达峰;对数平均迪氏指数;机场开放程度;能耗强度

中图分类号:U8;F562 **文献标志码**:A

本文引用格式:宋文,胡荣,曾雯,等. 机场航空器碳排放演化特征及影响因素分解[J]. 华东交通大学学报,2022,39(2):53-61.

The Evolutionary Characteristics and the Decomposition of Driving Factors of Aircraft Carbon Emissions at Airports

Song Wen, Hu Rong, Zeng Wen, Wang Deyun, Zhang Junfeng

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

Abstract: Scientific identification and analysis of the impact of industry factors on carbon emission will be an important basis for formulating targeted emission reduction measures to achieve carbon peak in 2030. Taking the airport aircraft carbon emission of 31 provinces (including autonomous regions and municipalities) from 2007 to 2016 in China as a sample, the study firstly analyzed the temporal and spatial evolution characteristics of China's airport aircraft carbon emission. Then, it used the LMDI decomposition method to discuss the degree of airport openness and airport connectivity strength, transportation intensity and energy consumption intensity on aircraft carbon emissions. Finally, it put forward emission reduction suggestions for improving route planning, optimizing network structure and fleet assignment in response to the impact. The results show that the average annual growth rate of aircraft carbon emission in airports across the country is about 9.46%. The carbon emission level of airport aircraft in the eastern and southwestern regions are relatively high, with Guangdong having the largest added value, Tibet the smallest value, Hebei the fastest growth rate, and Shanghai the slowest growth rate. The changes in the degree of airport openness, airport connection strength, and transportation intensity promote the growth of carbon emission. Among them, the degree of airport openness has the most significant impact on carbon

收稿日期:2021-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(U1933117)

emission. Changes in energy consumption intensity inhibit the growth of carbon emission, and the effect has been strengthened year by year.

Key words: aircraft carbon emission; carbon peak; logarithmic mean Divisia index (LMDI); airport openness; energy consumption intensity

Citation format:SONG W,HU R,ZENG W,et al. The evolutionary characteristics and the decomposition of driving factors of aircraft carbon emissions at airports[J]. Journal of East China Jiaotong University,2022,39(2):53-61.

为实现可持续发展,中国提出了"2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和"的奋斗目标。近年来,我国民航运输业增速迅猛,"十三五"期间民航旅客周转量在综合交通体系中占比高达33.1%,随之产生的碳排放量与日俱增,民航业的碳排放问题已成为各界的关注热点。机场作为航空运输体系的关键节点,航空器在机场活动而带来的碳排放将给周围居民及环境带来更直接的影响[1]。从机场角度研究航空器碳排放影响因素,有助于深化绿色机场建设,推进机场的可持续发展。

LTO循环阶段指航空器在915 m以下运行的进近、滑行、起飞和爬升阶段,此阶段产生的碳排放将直接影响机场及周边地区环境。关于机场航空器碳排放影响因素的研究有限,集中于对影响因素的分解方法、因素识别及影响效应等方面。在分解方法方面,LMDI分解法是最常见的分解技术。例如:徐晨等[2]采用LMDI方法分解了江苏省机场碳排放的影响因素。洪浩强等[3]以江苏省9个民用机场为研究对象分析了LTO阶段航空器碳排放的影响因素。在影响因素识别方面,大多从经济、人口、市场等角度展开。例如:朱佳琳[4]基于宏观经济等将航空器碳排放影响因素分解为人均GDP、人口总数、单位运输收入周转量等。Liu等[5]基于宏观政策将影响因素分解为运输收入、运输强度、能源强度。Zhang等[6]认为机场二氧化碳排放量主要受城市化、外国直接投资、第三产业比重、客运量和铁路客运量的影响。在影响效应方面,较多学者认为能源强度、运输规模等为影响碳排放的主要因素。Postorino等[7]认为机场航空器运行次数与机场空中运输需求与碳排放量最相关。Zhou等[8]认为空中交通需求对碳排放影响最为显著。徐晨等[2]认为能源强度对江苏省机场碳排放有抑制作用,而单位收入旅客吞吐量有促进作用。最后,在政策建议方面,研究成果分布于新型航空器研发、运行流程优化、管理手段创新(如碳交易、碳税等)等。Grote等[9]从政策、法律与技术、业务方面梳理了措施文献,强调了减排措施对降低油耗的作用。Zhou等[8]认为减排建议或政策必须更好地反映行业的特征,才能更好地实现行业的绿色发展。而以往研究的减排建议对机场的针对性有限,李静[10]基于机场调查数据发现:我国机场碳减排工作从国家到行业层面的政策、措施等尚不完善。

综上所述,关于机场航空器碳排放的研究取得了较为丰硕的成果,但仍有以下几点值得进一步拓展:① 研究对象的进一步扩展。现有研究集中于单个机场或区域内机场的航空器碳排放影响因素研究,缺乏从全国层面的分析。② 因素选择的进一步细化。现有研究较多从宏观角度开展碳排放影响因素的选择,缺乏体现机场网络布局、保障机型等具体特征的研究。以全国31个省(自治区、直辖市)机场为研究对象,首先,分析了全国机场航空器碳排放的时空演化特征;其次,采用LMDI分解方法,聚焦机场运行实践,开展了机场航空器碳排放影响因素分解及影响效应分析,以期为绿色机场建设提供有益参考。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 机场航空器碳排放量测算方法

全球诸多组织及学者提出了多种机场航空器碳排放测算模型,例如:ICAO标准排放计算模型、EPA、EMEP等计算模型。ICAO推荐的标准排放计

算模型广泛应用于 LTO 阶段的碳排放计算。文章采用 ICAO 标准模型开展机场航空器碳排放的测算，具体计算如下

$$E=\sum_{m=1}^{4}(nt_mF_mI) \tag{1}$$

式中：E 为机场某航空器一个 LTO 循环的碳排放量，kg；n 为该航空器配备的发动机数量，个；m 为飞行阶段（进近、滑行、起飞及爬升）；t_m 为航空器第 m 飞行阶段的运行时长，s；F_m 为航空器在第 m 飞行阶段单发燃油流量，kg/s；I 为碳排放因子，根据《IPCC 国家温室气体清单指南》，取值 3.115 kg/kg。

由式（1）可得一架航空器一个 LTO 循环的碳排放量；将某机场该航空器一年所有 LTO 循环加总可得该机场该型号航空器的年 LTO 碳排放量；再将所有型号航空器的年 LTO 碳排放加总可得该机场全年的 LTO 碳排放量；进一步将某省份所有机场的年 LTO 排放加总，即可到该省份的年 LTO 碳排放量；最后，将所有省份的年 LTO 排放加总便得全国一年的 LTO 碳排放总量。

1.1.2　LMDI 分解方法

机场航线数量、起降架次、旅客吞吐量作为机场重要的运行指标，直接体现了机场的通达水平和生产能力。此外，以往研究表明，二氧化碳排放量取决于燃料类型、飞机及发动机类型[11]，这三者的发展水平可以通过能源消耗量及碳排放因子两指标体现。为深化机场运行对航空器碳排放的影响，采用以上指标构建如下恒等式

$$C=\sum_{i=1}^{n}C_i=\sum_{i=1}^{n}A_i\times\frac{L_i}{N_i}\times\frac{P_i}{L_i}\times\frac{E_i}{P_i}\times\frac{C_i}{E_i}=\sum_{i=1}^{n}A_i\times O_i\times T_i\times S_i\times I \tag{2}$$

式中：C 为全国机场航空器碳排放量；i 为第 i 个省份；C_i 为 i 省份机场航空器碳排放量；A_i 为机场航线数量；L_i 为机场航班起降架次；P_i 为机场旅客吞吐量；E_i 为机场航空燃油消耗量。

机场开放程度即为机场航线数量，另以 N_i 表示，从规模上反映了机场通达水平；L_i/A_i 指 i 省份机场单条航线的航班起降架次，代表机场连接强度（以 O_i 表示），从强度上反映机场通达水平；P_i/L_i 指 i 省份单位航班起降架次旅客吞吐量，代表机场运输强度（以 T_i 表示），反映机场运输能力；E_i/P_i 指 i 省份单位旅客能源消耗量，代表机场能耗强度（以 S_i 表示），反映技术水平；C_i/E_i 指单位燃油消耗所对应的二氧化碳排放量，即碳排放因子 I。与各省份相关变量对应，N，O，T，S 分别代表全国的机场开放程度、连接强度、运输强度与能耗强度。

采用 LMDI 方法分析影响效应。LMDI 可解决变量的残差干扰问题，其中，乘法效应以倍数形式反映相对变化且适用于多级研究[12]。以各省份机场碳排放量为子对象，基于 LMDI 的乘法效应定量分析全国机场航空器碳排放分解因素的影响效应。采用式（3）对不同时期的碳排放比展开

$$D=\frac{C_t}{C_0}D_N\times D_O\times D_T\times D_S\times D_I \tag{3}$$

式中：D 为 t 时期与基期的机场航空器碳排放量之比（C_t/C_0）；D_N，D_O，D_T，D_S，D_I 分别为机场开放程度、连接强度、运输强度、能耗强度、碳排放因子对 t 时期较基期碳排放量变动的影响，具体值如下

$$\left.\begin{aligned}
D_N&=\exp\Big(\sum_{i=1}^{n}w_i(t)\times\ln\frac{N_{i,t}}{N_{i,0}}\Big)\\
D_O&=\exp\Big(\sum_{i=1}^{n}w_i(t)\times(\ln O_t-\ln O_0)\Big)\\
D_T&=\exp\Big(\sum_{i=1}^{n}w_i(t)\times(\ln T_t-\ln T_0)\Big)\\
D_S&=\exp\Big(\sum_{i=1}^{n}w_i(t)\times(\ln S_t-\ln S_0)\Big)\\
D_I&=\exp\Big(\sum_{i=1}^{n}w_i(t)\times(\ln I_t-\ln I_0)\Big)=1\\
w_i(t)&=\frac{(C_{i,t}-C_{i,0})/(\ln C_{i,t}-\ln C_{i,0})}{(C_t-C_0)/(\ln C_t-\ln C_0)}
\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

1.2　数据来源

数据来源主要有：① OAG 数据库。获取全国各个省（自治区、直辖市）机场 2007—2016 年的航班运行数据，包括：执飞机型、起讫机场、运行时刻、航班频次等。② ICAO 发动机排放数据库。获取不同型号发动机不同运行阶段的燃油流量等。③ 航空器制造商网站及相关文献。获取不同航空器的发动机匹配型号及安装个数。④ 2007—2016 年民航机场生产统计公报。获取各机场旅客吞吐量、航班起降架次。

研究技术路线图如图 1 所示。

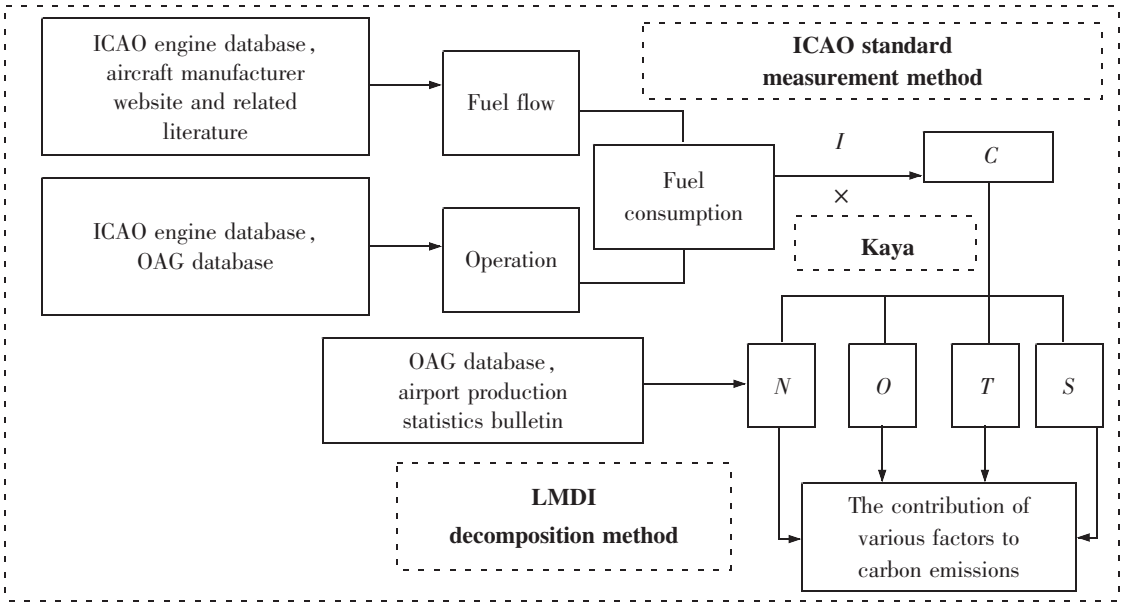


图 1 机场碳排放测算及影响因素分析技术路线图

Fig.1 Technical roadmap of airport carbon emission measurement and driving factor analysis

2 结果与分析

2.1 碳排放演化特征

2.1.1 时序演化特征

2007—2016年,我国机场旅客吞吐量从3.87亿人次增长到10.16亿人次,航班起降架次从393万架次提升至924万架次,年均增长率约为9.96%。航空器LTO循环数快速增加,带来航空器碳排放量的逐年递增。

图2为2007—2016年全国机场航空器碳排放量的测算结果。2007年碳排放量为5.18×10^6 t,2016年达到1.17×10^7 t,年均增长率达到9.46%,其中,2008年受金融危机影响增长最慢(7.31%),2010年增速最大(13.59%)。随着国家经济结构的转型,各地区更加关注民航业发展,虽然"十一五""十二五"规划中明确提出重视民航业的节能减排工作[13],但2010年后机场航空器碳排放仍以年均8.62%左右的速度增长,缓解机场碳排放问题刻不容缓。

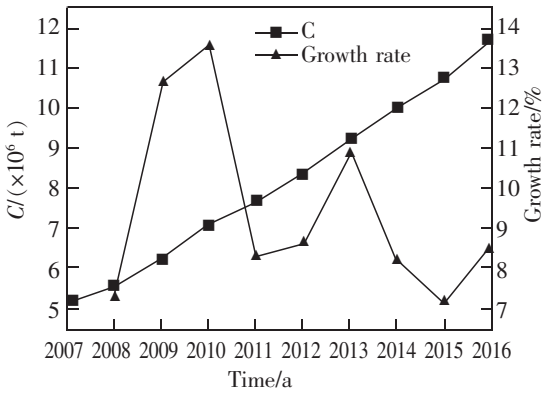


图 2 2007—2016年全国机场碳排量增长图

Fig.2 2007—2016 national airport carbon emission growth graph

2.1.2 空间演化特征

以自然断点法[14-16]将全国机场航空器碳排放量分为5个不同等级,进而考察各省份机场碳排放水平及其变动趋势。图3给出了2007年与2016年各省份机场碳排放量等级划分结果。

从碳排放量数值大小来看,碳排放量较高的区域集中在东部沿海、西南地区。东部沿海地区(即上海、广东、浙江、山东、江苏)经济水平较高,2016年该地区人口占全国总人口仅为29%,但生产总值占比达43.3%,拥有多个国际枢纽机场,航空客运需求量大,碳排放水平较高。例如:广东机场碳排放量在各年都处于高排放水平,上海虽然只含有2个机场,但其碳排放量远高于大部分省份多个机场累加量。西南地区(即四川、云南)地域广阔,发达的旅游业带动了民航运输业的快速发展;同时,西部地区已成为机场建设的优先地区,机场数量较高(云南与四川分别拥有15座和14座机场),这些因素造成西南地区碳排放量处于较高水平。

10 年间，全国机场航空器碳排放量共增加 6.51×10^6 t（1.26 倍），所有省份均有不同程度地上升。从图 4 各省份增加的绝对量来看，广东增长最多（68 万 t），西藏增长最少（2.3 万 t）。从图 4 相对比例来看，河北增长最快，增加 6.35 倍，较慢的是上海，增加了 0.63 倍。

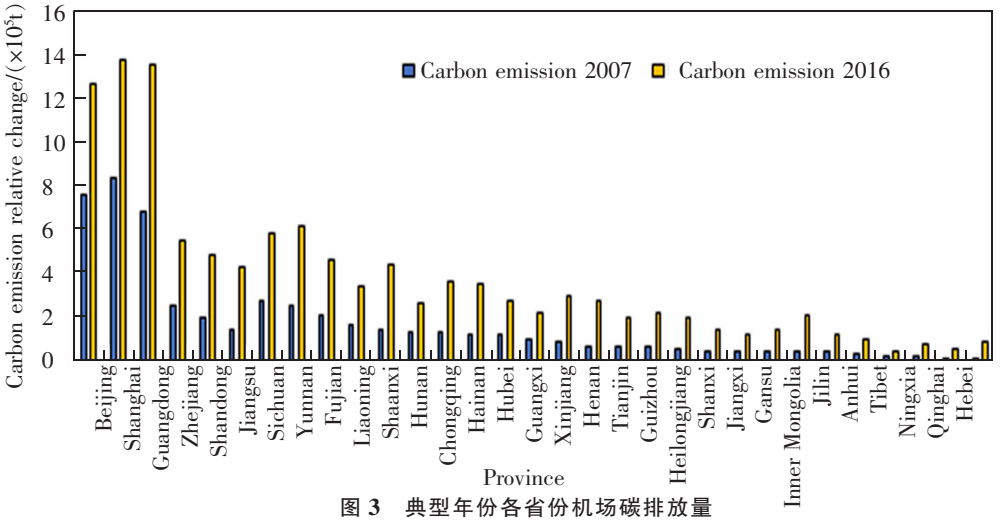


图 3　典型年份各省份机场碳排放量

Fig.3　Carbon emission of airports in provinces in typical years

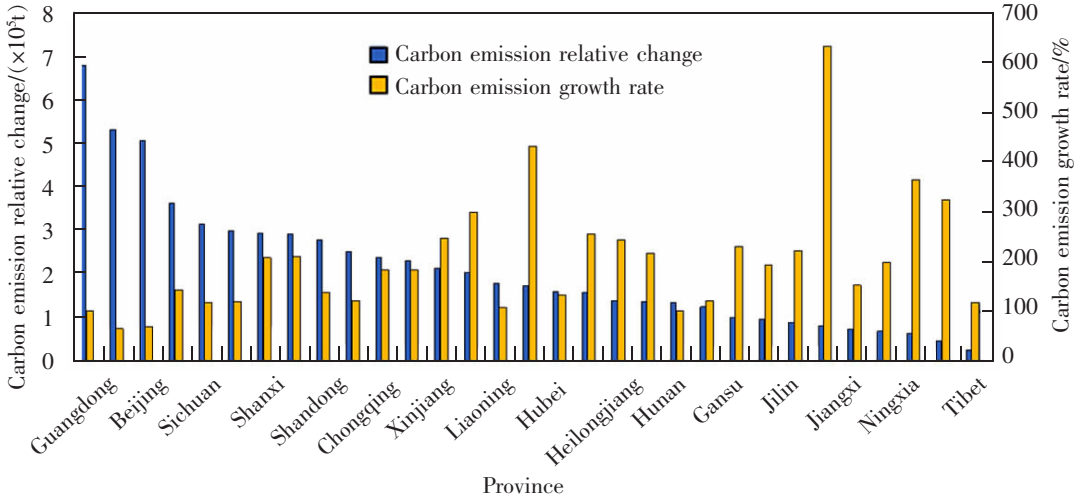


图 4　2007—2016 年各省份机场航空器碳排放量的变动情况

Fig.4　Variation of carbon emissions from airfields in provinces from 2007 to 2016

2.2　影响因素分解

利用式(3)~式(4)，基于 LMDI 乘法效应，全国机场航空器碳排放的影响因素分解结果如图 5 所示。可知，机场开放程度和机场连接强度是机场航空器碳排放最重要的正向驱动因素，累积效应分别为 1.937 和 1.169，占总累积效应的 74.6%和 13.4%；能耗强度的累积效应为负，占总累积效应的 10.6%，体现出其对航空器碳排放的抑制作用，这与现有研究成果一致。

下面，进一步分析各行业因素对机场航空器碳排放的逐年影响。

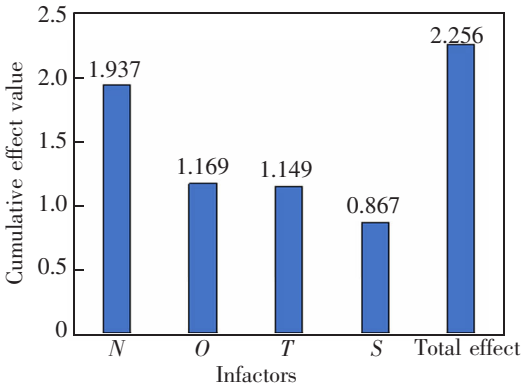


图 5　2007—2016 年全国机场碳排放各行业因素累积效应贡献度图

Fig.5　Cumulative effect contribution of various factors of national airport carbon emission from 2007 to 2016

2.2.1 机场开放程度

图6给出了2007—2016年全国机场航线数量(机场开放程度)的发展情况。10年间,全国机场航线数量逐年持续增长,从1 684条增长到3 411条,年均增长率达8.16%,其中2008年增长最慢(2.55%),2013年增速最快(12.46%)。

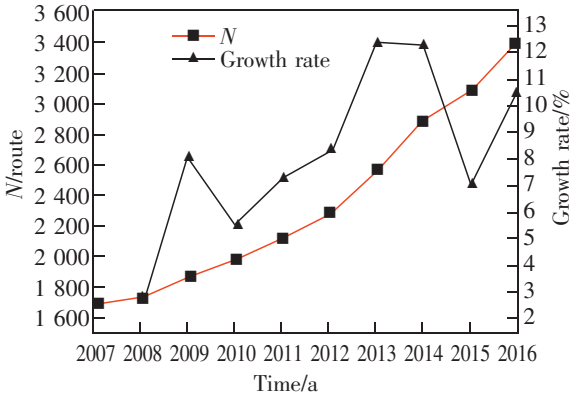


图6 2007—2016年全国机场航线数量发展趋势图

Fig.6 The development trend of the number of routes at national airports from 2007 to 2016

机场开放程度的影响效应在10年间始终为正,除个别年份(2010,2014,2015年),其正向影响效果不断加强。10年间机场开放程度使机场航空器碳排放量增加了4.86×10^6 t。影响效应在2008年最小,仅带来3.21%(1.63×10^5 t)的增长;2013年最大,使机场航空器碳排放量增加了11.22%(9.40×10^5 t)。随着国家综合实力的提升,我国产业结构不断转型和升级,“要想富先修路”的俗语转变为“要开放,修机场;要想强,上民航”,机场开放程度的增加将带来各地区客货流的增长,从而导致机场碳排放增加,且效果显著;因此减排时应侧重考虑机场开放程度的影响。

2.2.2 机场连接强度

2007—2016年全国机场单位航线起降架次(连接强度)的发展情况如图7所示。10年间,全国机场的单位航线起降架次由2 335架次/条增长到2 708架次/条,年均增长率仅为1.66%。前期稳定增长,2012年达到最大值(2 886架次/条),随后下降。2010年增长最大(8.33%),2016年增长最慢(–2.33%),该年机场航线数量增速为10.4%,而航班起降架次增速仅为7%。

2007—2016年机场连接强度对碳排放的影响效应与年增长率趋势相似,有3年(2013,2014,2016年)的影响效应为负,正向影响效果以2010年为节点先升后降,2013年后,影响效应由正转负,除2015年有正向促进(0.53%)外,负向效果不断加强。

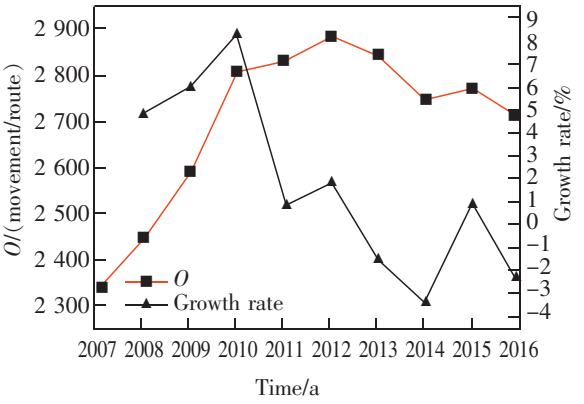


图7 2007—2016年全国机场单位航线起降架次发展趋势图

Fig.7 The development trend chart of the number of movement per route at national airport from 2007 to 2016

10年间连接强度为机场航空器带来了8.75×10^5 t碳排放量的增长;正向效应在2010年最大,增加了8.13%(5.09×10^5 t)碳排放量;负向效应在2016年最大,减少了2.44%(2.62×10^5 t)碳排放量。

虽然机场连接强度的发展促进碳排放增长,但有负向趋势。随着我国民航事业发展,10年间机场数量增加了45.9%,其中支线机场居多,航线干支结合得到加强,极大减少冗余航班数量。此外,大中型飞机广泛使用(见图8),这在满足高客流的同时一定程度减缓了起降架次的增加。这两方面使得机场连接强度不断降低,这在一定程度上减缓机场航空器碳排放的增长。可见,优化航线结构和合理配置机型对机场减排有积极作用[17]。

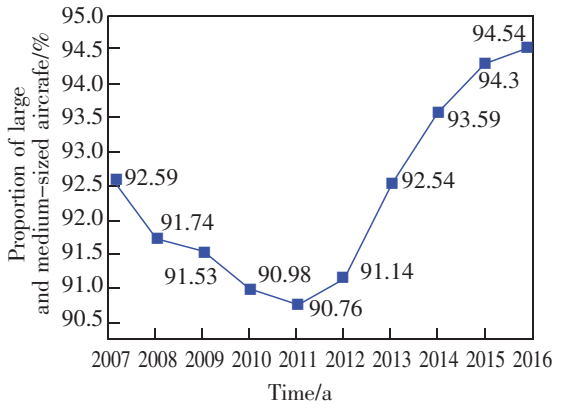


图8 2007—2016年全国大中型飞机架数占比图

Fig.8 Proportion of large and medium-sized aircrafts in China from 2007 to 2016

2.2.3　机场运输强度

图 9 是 2007—2016 年全国机场单位起降架次旅客吞吐量(运输强度)的发展情况。10 年间，机场单位航班起降架次旅客吞吐量从 98 人/架次增长到 110 人/架次，呈增长趋势。年均增长率为 1.25%，2008 年增长最慢(−2.4%)，2009 年增速最快(4.60%)。

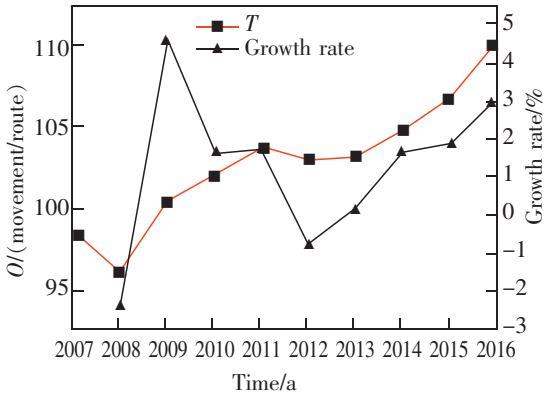


图 9　2007—2016 年全国机场单位起降架次旅客吞吐量发展趋势图

Fig.9　Development trend of passenger per movement at national airports from 2007 to 2016

机场运输强度对机场航空器碳排放的影响变动幅度较小，除 2008，2012 年外，均为正向效应，且以 2012 年为节点，正向效果先降后升。10 年间，其变动带来了 7.71×10^5 t 碳排放量的增长。2008 年负向效应最大，减少了 1.72%(8.92×10^4 t) 碳排放量；2009 年正向效应最大，增加了 4.30%(2.39×10^5 t)碳排放量。运输强度增速较快，可将之作为推动碳减排的潜在因素。

2.2.4　能耗强度

较多研究证明能耗强度的变化是抑制碳排放量上升的一个因素[18−20]，全国机场单位旅客能源消耗量(能耗强度)2007—2016 年间的发展如图 10 所示。10 年间，单位旅客能源消耗量从 4.30 kg/人降低到 3.69 kg/人，年均增长率为−1.68%，2008 年增速最大(2.30%)，2009 年最小(−5.97%)，之后以 2%左右的速度逐年降低。

除 2008 年和 2013 年外，能耗强度对机场航空器碳排放的影响均为负向效应，负向效果以 2013年为节点由弱变强。10 年间，能耗强度变动减少了 6.87×10^5 t 机场航空器碳排放量。2008 年正向影响最大，增加了 2.57%(1.33×10^5 t)碳排放量；2009 年

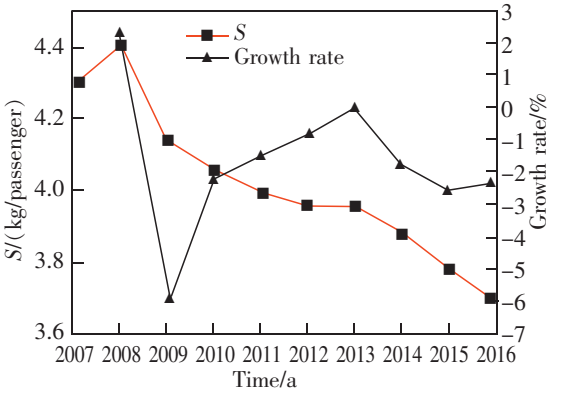


图 10　2007—2016 年全国机场单位旅客能源消耗量发展趋势图

Fig.10　Development trend of energy consumption per passenger at national airports from 2007 to 2016

负向影响最大，减少了 5.74%(3.20×10^5 t)碳排放量。可见，能耗强度对机场碳排放的抑制作用不容小觑，提高技术水平、降低单位能耗将成为减排的必要途径[21]。

2.3　减排措施

基于以上分析，提出如下减排建议，以加速 2030 年碳达峰的实现。

1) 明确机场定位，吸引发展战略方向相近的航空公司共同构建合理的机场航线网络结构，避免机场通航点的无序、低效扩张。

2) 做好机场航线网络的规划与优化。机场与潜在航空公司共同做好航空市场需求分析，拟开辟航线效益分析等，除保障国家基本航空服务外，减少不必要与低效航线的设置，以缓解机场开放程度对碳排放的推动。

3) 优化航线网络结构，通过中枢辐射式、干支结合等方式替代点对点，提高客座率，减少航班冗余，以降低机场连接强度。

4) 通过市场手段优化机场航班数量。综合采用航空性业务费用优惠，机场保障设施优先使用等方式鼓励航空公司提高航班客座率。

5) 优化机型指派。根据航线特征合理指派不同机型，做到航线、航班与机型的最优适配，以降低运输强度发展对机场航空器碳排放的影响。

6) 优化场面运行，通过提高运行管理水平、引进先进技术(如 A−CDM 系统)、采取优化场面布局、机位调度与滑行路径等措施减少航空器场面等待及运行时间，以减少额外碳排放。

7) 提高技术水平，优化机场航空器发动机工作

效能、开发环保型飞机,以实现高燃油效率、低排放水平,从而降低单位旅客能源消耗量;同时通过研发新能源,从源头控制航空器碳排放。

3 结论

根据全国各省份机场2007—2016年航空器运行数据,运用ICAO推荐方法测算了机场航空器碳排放量,并采用LMDI分解法定量分析了行业自身因素对机场航空器碳排放量的影响,以制定针对性减排建议,主要结论如下。

1)2007—2016年,全国机场航空器碳排放年均增长率约为9.46%;东部沿海、西南地区的机场航空器碳排放水平较高;从碳排放增量角度看,广东最大、西藏最小;从碳排放增速看,河北最快、上海最慢。

2)机场开放程度、机场连接强度与运输强度是正向的驱动因素,贡献占比分别为:74.6%,13.4%及10.6%。通过优化机场通达性水平,实现机型与航班的合理配置等以协调机场运行发展与绿色建设的关系将成为机场减排的有效方案。

3)能耗强度的变动抑制了机场航空器碳排放的增长,其贡献度占比10.56%。应重视技术发展,以最大限度提高能源效率,降低单位旅客能耗水平,实现减排最大化。

参考文献:

[1] STETTLE 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.

[2] 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.
XU C,ZHU J L,HU R. Decomposition of Jiangsu airport carbon emission factor index based on LMDI method[J]. Aviation Computing Technology,2018,48(3):86-90.

[3] 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.
HONG H Q,HU R,ZHANG J F,et al. Decomposition of driving factors for the evolution of airport aircraft carbon emissions[J]. Journal of East China Jiaotong University,2020,37(5):74-79.

[4] 朱佳琳. 中国民用航空器碳排放时空演化特征及驱动因素研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2020.
ZHU J L. Research on the temporal and spatial evolution characteristics and driving factors of China's civil aircraft carbon emissions[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2020.

[5] LIU X,HANG Y,WANG Q W,et al. Flying into the future: a scenario-based analysis of carbon emissions from China's civil aviation[J]. Journal of Air Transport Management,2020,85(10):101793-101808.

[6] ZHANG W,JIANG L,CUI Y,et al. Effects of urbanization on airport CO_2 emissions:A geographically weighted ap proach using nighttime light data in China[J]. Resources, Conservation and Recycling,2019,150(8):104454.

[7] POSTORINO M N,MANTECHINI L. A transport carbon footprint methodology to assess airport carbon emissions[J]. Journal of Air Transport Management,2014,37(3):76-86.

[8] ZHOU W J,WANG T,YU Y D,et al. Scenario analysis of CO_2 emissions from China's civil aviation industry through 2030[J]. Applied Energy,2016,175(5):100-108.

[9] GROTE M,WILLIAMS I,PRESTON J. Direct carbon dioxide emissions from civil aircraft[J]. Atmos Environment,2014,95(6):214-224.

[10] 李静. 解析中国机场碳排放现状及碳减排对策[N]. 中国民航报,2015-06-18(6).
LI J. Analyze the current situation of China's airport carbon emissions and carbon emission reduction countermeasures[N]. China Civil Aviation News,2015-06-18(6).

[11] 孔令乾. 航空碳排放测算及影响因素分析[D]. 大连:大连海事大学,2017.
KONG L Q. Aviation carbon emission calculation and analysis of influencing factors[D]. Dalian: Dalian Maritime University,2017.

[12] ANG B W. The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide[J]. Energy Policy,2005,33(7):867-871.

[13] 陈俣秀,于剑. 我国民航业"节能减排"的投资效率——基于超效率DEA模型的评价及分析[J]. 会计之友,2017(17):65-69.
CHEN M X,YU J. The investment efficiency of "energy saving and emission reduction" in China's civil aviation industry: evaluation and analysis based on the super-efficiency DEA model[J]. Accounting Friends,2017(17):65-69.

[14] 郭鹏程. 中国民航客运碳排放时空演变与影响因素研究[D]. 兰州:西北师范大学,2020.
GUO P C. Research on the temporal and spatial evolution and influencing factors of China's civil aviation passenger

transport carbon emissions[D]. Lanzhou：Northwest Normal University，2020.

[15] 刘贤赵，高长春，宋炎，等. 湖南市域化石能源消费碳排放时空格局及驱动因素[J]. 生态学报，2017，37(7)：2476–2487.
LIU X Z，GAO C C，SONG Y，et al. Temporal and spatial patterns and driving factors of carbon emissions from fossil energy consumption in Hunan city[J]. Acta Ecologica Sinica，2017，37(7)：2476–2487.

[16] 高长春，刘贤赵，李朝奎，等. 近 20 年来中国能源消费碳排放时空格局动态[J]. 地理科学进展，2016，35(6)：747–757.
GAO C C，LIU X Z，LI C K，et al. The spatiotemporal pattern of carbon emissions from energy consumption in China in the past 20 years[J]. Advances in Geographical Sciences，2016，35(6)：747–757.

[17] TETZLOFF I J，CROSSLEY W A. Measuring systemwide impacts of new aircraft on the environment[J]. Journal of Aircraft，2014，51(5)：1483–1489.

[18] 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 Q T，LU C T，ZHOU D Q. Index decomposition of carbon emission factors in China's civil aviation industry based on LMDI method[J]. Journal of Tianjin University (Social Science Edition)，2014，16(5)：397–403.

[19] 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 Y T，WU W W，LI X X. Research on the development characteristics and influencing factors of China's aviation carbon emissions[J]. Journal of East China Jiaotong University，2019，36(6)：32–38.

[20] 庄颖，夏斌. 广东省交通碳排放核算及影响因素分析[J]. 环境科学研究，2017，30(7)：1154–1162.
ZHUANG Y，XIA B. Accounting of traffic carbon emissions and analysis of influencing factors in Guangdong Province[J]. Environmental Science Research，2017，30(7)：1154–1162.

[21] PER G，LUCY B，STEPHE I. The market development of aviation biofuel：Drivers and constraints[J]. Journal of Air Transport Management，2014，39(10)：1016–1032.



第一作者：宋文(1996—)，女，硕士研究生，研究方向为交通运输规划与管理、绿色民航。2019 年本科毕业于中国民航大学，现就读于南京航空航天大学。E-mail：songwwen@nuaa.edu.cn。



通信作者：胡荣(1980—)，男，副教授，博士，硕士研究生导师，研究方向为民航可持续发展研究。2003 年本科毕业于南京航空航天大学，2010 年博士毕业于南京航天航天大学(硕博连读)。E-mail：hoorong@nuaa.edu.cn。

(责任编辑：刘棉玲)