

## 数据驱动的机场航空器污染物排放清单及特征分析

孙娇娇<sup>1</sup>, 胡荣<sup>1</sup>, 潘肖然<sup>1</sup>, 邓松武<sup>1,2</sup>, 官兆玮<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京 211106; 2. 广东省机场管理集团有限公司, 广东 韶关 512000;

3. 广西低空飞行服务站, 南宁 530012)

**摘要:**提高机场航空器污染物排放清单精度是发展绿色民航的重要前提。本文首先以2019年广州白云国际机场航班运行数据和航空例行天气报告数据为数据驱动,对发动机燃油流量、污染物排放指数、混合层高度和航班运行阶段时长等关键参数进行计算修正;其次,基于国际民航组织标准模型和数据驱动修正模型(简称修正模型)建立碳氢化合物(HC)、一氧化碳(CO)和氮氧化物(NO<sub>x</sub>)的排放清单并进行对比分析;最后,从航空器类型、时间和空间3个维度探究污染物的排放特征。结果表明:修正模型得到的HC、CO、NO<sub>x</sub>年排放量比标准模型分别降低了10.26%、11.94%、26.03%;A320机型具有较低的排放强度;08:00—10:00为3类污染物的高峰排放时段,而02:00—03:00为低峰时段;HC和CO全年排放变化较小,而NO<sub>x</sub>在混合层高度偏高和相对湿度偏低的11—12月排放偏高;3类污染物排放主要分布于离港航路点LMN、YIN、VIBOS所对应的空间方向。

**关键词:**排放清单;数据驱动;机场区域;航空器;排放特征

中图分类号:V351;X738

文献标志码:A

文章编号:1674-5590(2024)05-0089-08

## Data-driven airport aircraft pollutant emission inventory and characteristics analysis

SUN Jiaojiao<sup>1</sup>, HU Rong<sup>1</sup>, PAN Xiaoran<sup>1</sup>, DENG Songwu<sup>1,2</sup>, GUAN Zhaowei<sup>3</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. Guangdong Airport

Authority, Shaoguan 512000, Guangdong China; 3. Guangxi Low Altitude Flight Service Station, Nanning 530012, China)

**Abstract:** Improving the accuracy of the airport aircraft pollutant emission inventory is an important prerequisite for the development of green civil aviation. Firstly, this study uses the data of flight operation and aviation routine weather report of Guangzhou Baiyun International Airport in 2019 as the driving force to calculate and correct key parameters such as flow rate of engine fuel, pollutant emission index, mixing layer height and flight operation stage duration. Secondly, the emission inventories for hydrocarbons (HC), carbon monoxide (CO) and nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) are established and compared based on the standard model of International Civil Aviation Organization and data-driven correction model (abbreviated as correction model), and comparative analysis is conducted. Finally, the pollutant emission characteristics are explored from three dimensions including aircraft type, time and space. The results show that the annual emissions of HC, CO and NO<sub>x</sub> obtained by the corrected model are 10.26%, 11.94%, and 26.03% lower than those of the standard model. A320 aircraft type has lower emission intensities. The peak emissions of three pollutants occur from 08:00 to 10:00, while the off-peak emission times are from 02:00 to 03:00. HC and CO emissions change little throughout the year, in contrast, NO<sub>x</sub> emissions are higher in November and December when the mixing layer height is higher and the relative humidity is lower. The emissions of the three pollutants are concentrated in the directions corresponding to the departure route points of LMN, YIN and VIBOS.

**Key words:** emission inventory; data-driven; airport area; aircraft; emission characteristics

收稿日期:2024-05-05; 修回日期:2024-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(U1933117, 52272333);南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划项目(xcxjh20230738);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX23\_0107)

作者简介:孙娇娇(1998—),女,四川巴中人,硕士研究生,研究方向为民航可持续发展。

近年来中国民航运输业蓬勃发展,2010—2019年民航运输总周转量从538.5亿吨公里增长至1293.3亿吨公里。新冠肺炎疫情之后,2023年运输总周转量已恢复至1188.3亿吨公里。民航运输的快速发展与稳健复苏的同时也带来了民航污染物排放的增加,加剧了空气污染。其中航空器在起飞降落(LTO, landing and take-off)循环产生的氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、挥发性有机化合物(VOC)、一氧化碳(CO)和二氧化硫( $\text{SO}_2$ )等是造成机场周边空气污染的主要原因之一<sup>[1-2]</sup>。因此,为降低机场附近污染物排放,发展绿色民航,中国《“十四五”民用航空发展规划》提出“依法推进机场区域空气质量监测体系建设,鼓励机场编制大气污染物排放清单”。高精度的污染物排放清单是后续科学开展机场污染物特征分析、减排降污的前提。

目前,国内外学者基于国际民航组织(ICAO, International Civil Aviation Organization)标准LTO循环标准和航空器发动机基准数据,建立了涵盖特定时间跨度和空间区域的机场航空器排放清单<sup>[3-4]</sup>。Tokuslu<sup>[5]</sup>基于ICAO基准数据首次对2018年格鲁吉亚国际机场LTO循环建立大气污染物排放清单。Song等<sup>[6]</sup>基于排放扩散模型系统和机场各类机型的LTO年循环数量估算了2009—2010年间韩国4个主要机场的大气污染物排放量。Vujović等<sup>[7]</sup>基于ICAO高级计算模型和发动机排放数据库(EEDB, engine emission data bank)评估了2008—2015年间Nikola Tesla国际机场的大气污染物排放量。Li等<sup>[8]</sup>运用波音燃油流量法2(BFFM2, Boeing fuel flow method 2)对排放指数进行气象修正,并基于ICAO标准LTO循环建立了2017年珠三角5个主要机场的大气污染物排放清单。Yang等<sup>[9]</sup>基于航空器气象观测数据计算混合层高度代替ICAO推荐混合层高度的改进方法获得2015年北京首都国际机场的大气污染物排放清单。为提升航空器大气污染物排放清单的精度,部分学者运用航空器的实际运行数据与基准数据开展对比研究<sup>[10]</sup>。Xu等<sup>[11]</sup>利用飞机通信寻址与报告系统的数据与基准参数展开对比分析,发现机场特定数据和ICAO推荐值之间存在明显差异。曹惠玲等<sup>[12]</sup>运用快速存取记录器数据对燃油流量修正以及对LTO阶段进行更精确的划分,并在此基础上计算航空器在单次LTO循环的 $\text{NO}_x$ 排放量,结果显示,修正的排放量比标准LTO方法低30%以上。以上研究均验证了提高大气污染物排放清单精度的重要性及必要性。

综上所述,关于机场航空器大气污染物排放清单

的研究取得了丰富成果,但仍有以下问题值得深入:①现有机场航空器大气污染物排放清单精度仍需提高,目前大多数文献采用ICAO推荐的标准LTO运行时长(TIM, time in mode)、发动机燃油流量(FF, fuel flow)和污染物排放指数(EI, emission index)建立清单;少数研究开展了部分参数修正,但仍无法较全面地体现航空器的实际运行情况,导致排放清单与实际结果偏差较大<sup>[13]</sup>;②机场航空器大气污染物排放清单的特征分析视角不够丰富<sup>[14-15]</sup>,现有文献多集中于时间特征、机型特征和运行阶段特征分析,缺乏从空间维度开展的特征研究。

因此,针对上述问题,本文首先基于2019年广州白云国际机场(ICAO代码:ZGGG)航班的实际运行数据和航空例行天气报告(METAR, meteorological terminal aviation routine weather report)数据等对混合层高度、航班运行阶段时长、发动机燃油流量和污染物排放指数等关键参数进行实际运行条件下的修正,进而构建数据驱动的、更为精准的机场航空器污染物排放计算模型(简称修正模型);其次,采用自下而上方法建立ZGGG全年HC、CO和 $\text{NO}_x$ 污染物的排放清单;最后,开展由数据驱动的修正模型和ICAO的标准模型所得的不同排放清单的对比分析,并从航空器类型、时间与空间等多个维度展开数据驱动清单的特征分析,以期为机场减排降污、推进绿色机场建设提供有益参考。

## 1 计算模型与数据来源

### 1.1 标准模型

标准LTO循环排放计算模型的计算基础是ICAO定义的标准LTO循环和EEDB数据库。标准LTO循环由4个阶段组成:滑行、起飞、爬升和进近。进港航班和离港航班占据LTO循环的不同阶段:进港航班包含914~0 m范围内的进近阶段以及机场地面滑入阶段;离港航班包含机场地面滑出阶段、0~304 m范围内的起飞阶段以及304~914 m范围内的爬升阶段<sup>[16]</sup>。EEDB数据库报告了航空器在LTO循环各阶段的排放审定数据,主要包含发动机FF、污染物EI等,表1给出了B738机型最常见的CFM56-7B27发动机的基准参数。

基于标准LTO循环和EEDB数据库,可采用自下而上的方法建立机场的年排放清单。首先,获取机场某航空器的发动机型号并查询EEDB数据库得到该型发动机在各阶段的相关排放审定数据;其次,计算

表 1 LTO 循环下 CFM56-7B27 发动机基准参数表

Tab.1 Baseline parameters of CFM56-7B27 engine in LTO cycle

运行阶段	燃油流量 FF/ (kg·s <sup>-1</sup> )	排放指数 EI/(g·kg <sup>-1</sup> )			运行时长/s
		HC	CO	NO <sub>x</sub>	
起飞阶段	1.3	0.1	0.2	30.9	42
爬升阶段	1.0	0.1	0.5	23.7	132
进近阶段	0.4	0.1	1.4	11.0	240
滑行阶段	0.1	1.7	17.9	4.8	1 560

该航空器第  $i$  类污染物的年排放量,即单次 LTO 循环排放量<sup>[17]</sup>与年航班量乘积;最后,对机场全年各类航空器的  $i$  类污染物年排放量求和,最终获得机场该污染物的年排放总量,即

$$E_i = \sum_{n=1}^m \left[ \left( \sum_{k=1}^4 \frac{FF_k \times EI_{ik} \times TIM_k}{1\ 000} \times NE \right) \times N_n \right] \quad (1)$$

式中: $E_i$  为  $i$  类污染物(HC、CO 和 NO<sub>x</sub>)的年排放量(kg); $m$  为机场全年航空器类别数量(类); $FF_k$  为航空器发动机在第  $k$  飞行阶段的燃油流量(kg/s); $EI_{ik}$  为航空器发动机在第  $k$  飞行阶段的  $i$  类污染物排放指数(g/kg); $TIM_k$  为航空器在  $k$  飞行阶段的运行时长(s); $NE$  为航空器发动机的个数(个); $N_n$  为第  $n$  类航空器的年航班数量(架次)。

### 1.2 修正模型

航空器的实际运行条件包括机场地理位置、运行大气环境等,这些会影响航空器的运行效率,使得基准数据与实际运行状况有所偏差,从而产生计算误差,影响污染物排放量的计算精度<sup>[18]</sup>。基于上述原因,本文将 FF、EI 和 TIM 3 个影响排放计算精度的指标与单架次航班的实际运行条件挂钩,从而修正每个航班的排放量。进一步,由自下而上的方法得到修正的机场年排放清单。

#### 1.2.1 燃油流量的修正

EEDB 数据库给出的是海平面高度与基准大气条件下的航空器发动机 FF 数值。为提高计算精度,本文从发动机安装条件、实际气象条件 2 个方面对各阶段的基准 FF 进行修正。表 2 为发动机安装条件对燃油流量影响的修正因子。

表 2 发动机燃油流量的安装条件修正因子

Tab.2 Correction factors for installation conditions of engine

fuel flow		
运行阶段	发动机推力设置/%	修正因子
起飞阶段	100	1.010
爬升阶段	85	1.013
进近阶段	30	1.020
滑行阶段	7	1.100

实际气象条件下的燃油流量的相关修正公式<sup>[19]</sup>表

示为

$$FF_{kl} = \frac{FF_k \times \beta_k \times \delta_l}{\theta_l^{3.8} \times \exp 0.2 Ma^2} \quad (2)$$

$$\theta_l = \frac{T_l + 273.15}{273.15} \quad (3)$$

$$\delta_l = \frac{P_l}{101\ 325} \quad (4)$$

式中: $FF_{kl}$  为实际状况下第  $l$  次航班的航空器发动机在第  $k$  飞行阶段的修正燃油流量(kg/s); $\beta_k$  为航空器在第  $k$  飞行阶段的燃油流量安装条件修正因子; $\delta_l$  为第  $l$  次航班的外界环境气压修正因子; $\theta_l$  为第  $l$  次航班的外界环境温度修正因子; $Ma$  为飞行马赫数; $T_l$  为第  $l$  次航班在实际飞行条件下外界环境的温度(°C); $P_l$  为第  $l$  次航班在实际飞行条件下外界环境的气压(Pa)。

#### 1.2.2 排放指数的修正

EEDB 数据库中污染物 EI 也是基准大气条件下的数值,当运行环境发生变化时,如仍采用默认的 EI 值,结果则会产生偏差。因此,本文运用式(5)分别对 HC 和 CO 污染物的 EI 进行气象修正,式(6)对 NO<sub>x</sub> 污染物的 EI 进行气象修正,即

$$EI_{ikl}^{HC/CO} = EI_{ik}^{HC/CO} \times \left( \frac{\theta_l^{3.3}}{\delta_l^{1.02}} \right)^\alpha \quad (5)$$

$$EI_{ikl}^{NO_x} = \left( \frac{EI_{ik}^{NO_x}}{\theta_l^3 \times \delta_l^{0.4} \times \varphi_l} \right) \quad (6)$$

式中: $EI_{ikl}$  为( $EI_{ikl}^{HC/CO}$ 、 $EI_{ikl}^{NO_x}$ )实际状况下第  $l$  次航班的航空器发动机在第  $k$  飞行阶段  $i$  类污染物的修正排放指数(g/kg); $E_{ik}$  为第  $k$  飞行阶段  $i$  类污染物修正前的排放指数(g/kg); $\alpha$  为修正系数,根据 P3T3 方法取默认值 1.0<sup>[19]</sup>;  $\varphi_l$  为第  $l$  次航班在实际飞行条件下外界环境的相对湿度(%)。

#### 1.2.3 运行时长的修正

航空器在爬升与进近阶段的 TIM 与混合层高度密切相关。然而,实际混合层高度会随着时间发生变化,固定混合层高度将导致污染物排放量计算不准确。因此,本文首先采用 Nozaki 模型估算每日平均混合层高度,并将其作为当日航班的实际混合层高度<sup>[20]</sup>,即

$$H = 121 \times (6 - P) \times \frac{T - TD}{6} + 0.169 \times P \times \frac{U_z + 0.257}{24\rho \times \sin \phi \times \ln \left( \frac{Z}{Z_0} \right)} \quad (7)$$

$$\rho = \frac{2\pi}{24 \times 3\ 600} \quad (8)$$

式中: $H$  为日平均最大混合层高度(m); $P$  为随 Pasquill

稳定性变化的气象参数;  $T$  为日环境平均温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_D$  为日环境平均露点温度( $^{\circ}\text{C}$ );  $U_z$  为  $Z$  ( $Z = 10\text{ m}$ ) 高度日实测平均风速( $\text{m/s}$ );  $Z_0$  为地表粗糙度,  $Z_0 = 0.1$ ;  $\rho$  为地球的角度自旋速度( $\text{rad/s}$ );  $\phi$  为目标机场地理纬度( $^{\circ}$ )。

其次, 根据每日平均混合层高度修正每日进港航班的平均进近时长  $\text{TIM}_k^{\text{app}}$  和离港航班的平均爬升时长  $\text{TIM}_k^{\text{climb}}$ , 修正后的进近时长表示为

$$\text{TIM}_{lk}^{\text{app}} = \text{TIM}_k^{\text{app}} \times \left( \frac{H}{915} \right) \quad (9)$$

修正后的爬升时长表示为

$$\text{TIM}_{lk}^{\text{climb}} = \text{TIM}_k^{\text{climb}} \times \left( \frac{H - 304}{915 - 304} \right) \quad (10)$$

式中:  $\text{TIM}_{lk}$  为实际状况下第  $l$  次航班的航空器在  $k$  飞行阶段的运行时长( $\text{s}$ )。

航班滑行阶段的运行时长来源于航班运行统计数据, 通过航班记录信息计算获得第  $l$  次航班的实际滑行时长。实际离港航班滑行时长表示为

$$\text{TIM}_l^{\text{taxi-out}} = \text{TIM}_{l,i} - \text{TIM}_{l,j} \quad (11)$$

实际进港航班滑行时长表示为

$$\text{TIM}_l^{\text{taxi-in}} = \text{TIM}_{l,m} - \text{TIM}_{l,n} \quad (12)$$

式中:  $\text{TIM}_{l,i}$ 、 $\text{TIM}_{l,j}$ 、 $\text{TIM}_{l,m}$ 、 $\text{TIM}_{l,n}$  分别表示第  $l$  次航班的航空器实际的离港时间( $\text{s}$ )、撤轮挡时间( $\text{s}$ )、挡轮挡时间( $\text{s}$ )、实际到港时间( $\text{s}$ )。

### 1.3 数据来源

本文研究案例为广州白云国际机场(ZGGG)。ZGGG 是中国三大门户复合枢纽机场之一, 且 2020—2023 年的旅客年吞吐量均为中国排名第一。图 1 给出了 2010—2023 年 ZGGG 年起降架次的变化情况: 其中, 2010—2019 年处于稳步增长状态; 因新冠肺炎疫情影响, 2020—2023 年处于波动状态。2019 年的年起降架次为近 10 年的峰值。因此, 本文将 ZGGG 在 2019 年的污染物排放量作为研究案例。

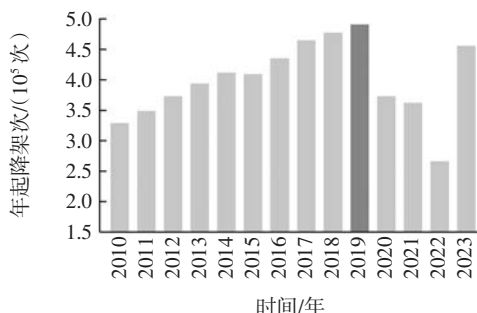


图 1 2010—2023 年 ZGGG 年起降架次变化情况

Fig.1 Changes of takeoff and landing numbers per year at ZGGG from 2010 to 2023

本文所用数据及其来源主要有:

(1) 航班运行统计数据, 从机场运行控制部门获取 2019 年 ZGGG 航班记录信息包含航班实际出发机场、到达机场、起飞时间、到达时间、撤轮挡时间、挡轮挡时间、执飞机型和航路等;

(2) 发动机在标准 LTO 循环下的 FF 和 EI, 来源于 EEDB 数据库;

(3) ZGGG 的运输总周转量和起降架次, 来源于 2010—2023 年民航机场生产统计公报;

(4) ZGGG 的全年气象数据, 来源于航空例行天气报告 (<https://www.ncei.noaa.gov/>);

(5) ZGGG 航路点的经纬度坐标, 来源于中国科学院资源环境科学与数据中心网站 (<https://www.resdc.cn/>);

(6) 航空器发动机的个数, 来源于飞机制造商官网;

(7) 机型与发动机匹配情况, 来源于飞机制造商官网与研究文献[11, 14]。

同时, 以上原始数据具有不完整性且存在噪声数据, 为了提高计算精确性和实用性, 对原始数据进行以下处理:

(1) 机型与航空器型号的匹配, 2019 年 ZGGG 的航班共包含 25 种航空器, 参考飞机制造商官网与文献[11, 14]进行匹配;

(2) 对气象数据的处理, METAR 每半小时记录一次机场气象信息, 本文基于每日 48 个监测时刻的数据, 运用线性插值法获得航班实际运行时刻的气象信息。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 排放清单的对比分析

本文分别基于标准的和修正的 LTO 循环污染物计算模型对 2019 年 ZGGG 航空器排放的 HC、CO 和  $\text{NO}_x$  污染物建立排放清单。HC、CO、 $\text{NO}_x$  年排放量计算结果如表 3 所示: 标准 LTO 循环模型计算结果分别为  $0.39 \times 10^6$ 、 $4.69 \times 10^6$ 、 $4.61 \times 10^6$  kg; 修正模型的计算结果分别为  $0.35 \times 10^6$ 、 $4.13 \times 10^6$ 、 $3.41 \times 10^6$  kg。两类结果对比显示: 修正后 HC、CO 和  $\text{NO}_x$  年排放量分别降低了 10.26%、11.94% 和 26.03%。参数修正前后的年排放清单具有明显差异, 标准模型更为保守。这与文献

表 3 2019 年 ZGGG 排放清单对比表

Tab.3 Comparison of ZGGG emission inventories in 2019

污染物	标准模型/( $10^6$ kg)	修正模型/( $10^6$ kg)	百分比变化/%
HC	0.39	0.35	-10.26
CO	4.69	4.13	-11.94
$\text{NO}_x$	4.61	3.41	-26.03

[16,21]的研究结论一致。

修正前后 HC、CO 和 NO<sub>x</sub> 污染物在 LTO 循环各阶段的排放占比如表 4 所示,各阶段的占比差值小于 3%。HC 和 CO 污染物主要产生于小推力的滑行阶段,

HC 修正前后的占比分别为 97.21%和 94.59%,CO 分别为 97.02%和 96.82%;相比较之下,NO<sub>x</sub> 在 LTO 循环的分布则更加均匀,其中爬升阶段的占比最高,修正前后的占比分别为 43.80%和 45.03%。

表 4 2019 年 ZGGG 的 LTO 循环排放对比表

Tab.4 Comparison of LTO cycle emission at ZGGG in 2019

LTO 循环	HC			CO			NO <sub>x</sub>		
	标准模型/%	修正模型/%	差值/%	标准模型/%	修正模型/%	差值/%	标准模型/%	修正模型/%	差值/%
滑行阶段	97.21	94.59	-2.62	97.02	96.82	-0.20	22.10	20.27	-1.83
起飞阶段	0.51	0.54	0.03	0.23	0.25	0.02	22.77	23.06	0.29
爬升阶段	1.20	1.22	0.02	0.79	0.83	0.04	43.80	45.03	1.23
进近阶段	1.08	1.11	0.03	1.96	2.11	0.15	11.33	11.64	0.31

2.2 基于航空器角度的排放特征分析

航空器是机场的主要排放源,2019 年 ZGGG 共运营 25 种航空器,本文以航空器年累计起降架次占比值大于 1%为类别划分标准,划分为 16 类航空器。图 2 给出了 16 类航空器的年累计污染物排放占比,各类污染物年排放占比前三的机型如下:HC 为 B738(25.1%)、A333(12.4%)和 B77W(10.9%);CO 和 NO<sub>x</sub> 均为 B738、A320 和 A333,其中,3 类机型 CO 占比分别为 22.9%、11.5%和 10.5%,NO<sub>x</sub> 占比分别为 25.2%、12.5%和 10.3%。3 类污染物排放占比前三的机型类别重合度很高,汇总为 B738、A320、A333 和 B77W,故以该 4 类航空器为主要研究对象,结合排放影响因素开展航空器排放特征分析。根据修正模型分析影响航空器污染物年排放特征的主要因素为各类航空器的年累计航班量、年累计滑行时间、平均 EI 和平均 FF。

由图 2 可得,B738、A320、A333、B77W 航空器的年累计航班量占比为 32.5%、18.3%、5.4%、2.4%,年累计滑行时间占比为 29.9%、18.1%、6.1%、2.7%。其中,B738和 A320 航空器污染物的累计排放量占比不高于累计航班量和累计滑行时间占比,表明其具有低排放特征。

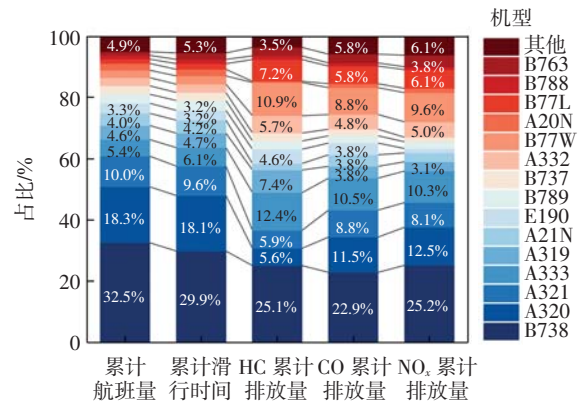


图 2 2019 年 ZGGG 航空器排放污染物特征图

Fig.2 Characteristics of aircraft pollutants emission at ZGGG in 2019

表 5 为该 4 类航空器平均排放参数与全年机场航班平均排放参数的变化关系,并引入排放流量 EI×FF 作为中介变量来量化两者的共同作用。B738、A320、A333、B77W 的 HC、CO、NO<sub>x</sub> 污染物排放流量总和分别为 205.37、148.66、579.13、782.24 g/s。从上述数据分析来看,A320 机型的排放强度偏低,A333 和 B77W 机型的排放强度偏高。

表 5 航空器平均排放参数与全年航班平均排放参数

Tab.5 The average emission parameters of aircraft and the average emission parameters of flights for the whole year

机型	EI 均值/(g·kg <sup>-1</sup> )			燃油流量均值/(kg·s <sup>-1</sup> )	3 类污染物的排放流量总和 <sup>①</sup> /(g·s <sup>-1</sup> )	座位数	运载排放流量强度 <sup>②</sup> /(g·s <sup>-1</sup> ·座 <sup>-1</sup> )	最大起飞重量/t	最大起飞重量排放流量强度 <sup>③</sup> /(g·s <sup>-1</sup> ·t <sup>-1</sup> )
	HC	CO	NO <sub>x</sub>						
B738	2.65	26.47	71.55	2.04	205.37	162	1.27	79	2.60
A320	0.33	21.20	63.42	1.75	148.66	150	0.99	75	1.98
A333	3.33	34.71	78.72	4.96	579.13	286	2.02	236	2.45
B77W	4.95	48.96	57.52	7.02	782.24	361	2.17	348	2.25

注:①某类航空器 3 类污染物的排放流量总和,以 B738 为例,3 类污染物的排放流量总和 = (2.65+26.47+71.55) × 2.04 ≈ 205.37 g/s;②某类航空器 3 类污染物的排放流量总和/座位数,以 B738 为例,运载排放流量强度 = 205.37/162 ≈ 1.27 (g·s<sup>-1</sup>·座<sup>-1</sup>);③某类航空器 3 类污染物的排放流量总和/最大起飞重量,以 B738 为例,最大起飞重量排放流量强度 = 205.37/79 ≈ 2.60 (g·s<sup>-1</sup>·t<sup>-1</sup>)。

2.3 基于时间维度的排放特征分析

机场航空器每日污染物小时排放量的变化趋势如图 3 所示,3 类污染物的小时排放变化趋势相似。在

21:00—03:00 期间污染物排放量呈现下降趋势;在 02:00—03:00 期间 HC、CO 和 NO<sub>x</sub> 污染物排放量降至日低峰,分别为 0.52 × 10<sup>4</sup>、0.64 × 10<sup>5</sup>、0.48 × 10<sup>5</sup> kg;在

03:00—10:00 期间各类污染物排放量呈现波动式增长;在 08:00—09:00 期间 NO<sub>x</sub> 污染物排放量达到日高峰,为 2.08×10<sup>5</sup> kg,在 09:00—10:00 期间 CO 和 HC 排放量达到日高峰,分别为 2.47×10<sup>5</sup> kg 和 2.12×10<sup>4</sup> kg;在 10:00—21:00 期间 3 类污染物排放量变化趋于平稳,起伏较小。

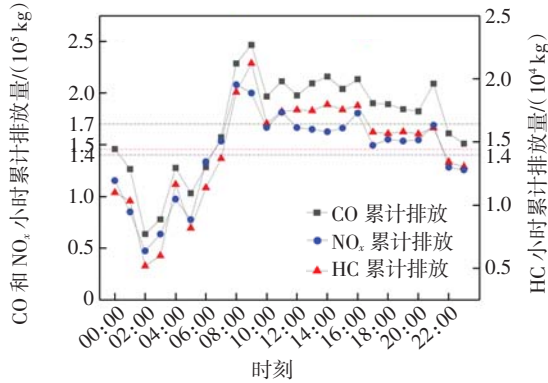


图3 2019年ZGGG污染物日排放的小时分布图

Fig.3 Hourly distribution of ZGGG pollutant daily emissions in 2019

机场航空器污染物小时排放量与航班量体现了机场在 24 h 区间的繁忙程度。图 4 为 ZGGG 每小时的航班量和对应的平均滑行时间变化情况,结合图 3 可得:机场污染物小时累计排放量与小时累计航班量的变化趋势相似,但小时累计航班量与小时平均滑行时间变化趋势具有差异;02:00—06:00 期间为机场排放量最低、航班量最少时间段,但却是日平均滑行时间最高的时间段;其他时间段三者的变化趋势相似。

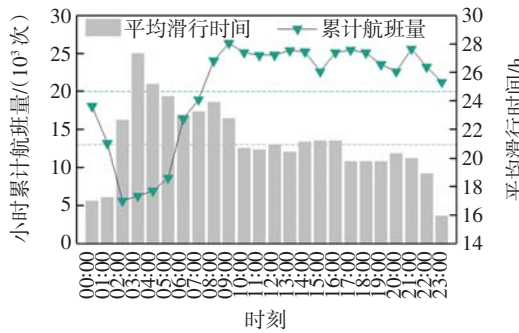


图4 2019年ZGGG小时航班量与平均滑行时间分布图

Fig.4 Distribution of ZGGG hourly flight volume and average taxiing time in 2019

ZGGG 在航班量最少的时间段内,航空器的平均滑行时间却最长,机场航空器地面运行效率最低。分析其可能原因有:因机场维护、清洁等从而导致飞机的滑行距离增加;夜间的货运航班相对集中,特殊的货运操作使得航班滑行时间比普通客运航班更长。

图 5 为 2019 年 ZGGG 污染物日排放量分布情况,其中:HC 的最低和最高日排放量分别为 7.22×

10<sup>2</sup> kg(8月19日)、11.25×10<sup>2</sup> kg(1月18日);CO 的最低和最高日排放量分别为 8.64×10<sup>3</sup> kg(8月19日)、13.33×10<sup>3</sup> kg(2月22日)。HC 与 CO 的日排放变化趋势相似,皮尔逊相关系数为 0.96,且全年排放量的变化起伏较小,最高与最低日排放量比值分别为 1.56 和 1.54。由修正模型可知,污染物的排放受温度、气压、相对湿度和混合层高度等气象条件影响,气象条件的日变化趋势如图 6 所示。进一步分析获得 HC 和 CO 与温度的皮尔逊相关系数分别为-0.49 和-0.54,呈负相关;与气压的系数分别为 0.39 和 0.47,呈正相关。由于温度与气压之间存在相互抵消的效应,因此 HC 和 CO 排放受气象的影响较低、全年变化较小。

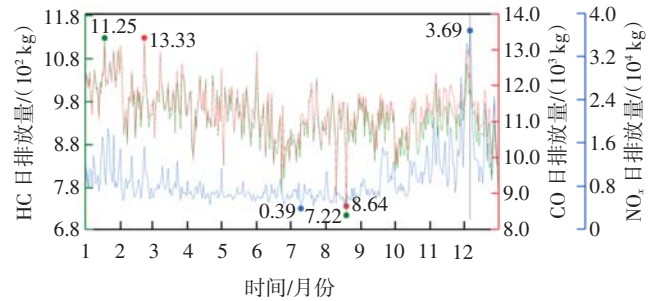


图5 2019年ZGGG污染物日排放量分布图

Fig.5 Distribution of ZGGG pollutant daily emissions in 2019

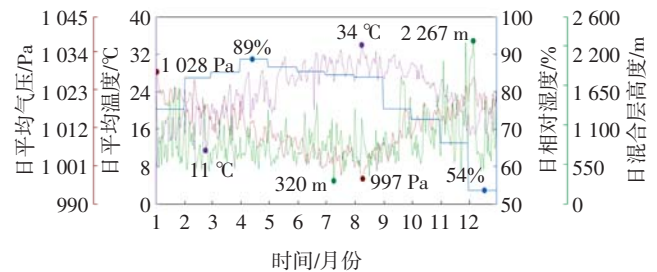


图6 2019年ZGGG气象条件和混合层高度的日分布图

Fig.6 Daily distribution of ZGGG meteorological conditions and mixing layer height in 2019

从图 5 和图 6 中可知:NO<sub>x</sub> 的最低和最高日排放量为 0.39×10<sup>4</sup> kg(7月10日)和 3.69×10<sup>4</sup> kg(12月6日),全年日排放变化趋势幅度较大,最高与最低日排放量比值为 9.46,且在 4—9 月份的排放量明显低于 10—3 月份;进一步分析获得 NO<sub>x</sub> 与温度的皮尔逊相关系数为-0.50,呈负相关;与气压的系数为 0.62,呈正相关;与相对湿度的系数为-0.70,呈负相关;与混合层高度的系数为 0.84,呈正相关。由于温度与气压存在相互抵消的效应,而相对湿度与混合层高度存在交互效应,因此在 11—12 月份 NO<sub>x</sub> 的排放量会明显增多。

## 2.4 基于空间维度的排放特征分析

本文基于标准进离港程序开展机场航空器污染

物排放的空间特征分析。考虑到终端空域实行“进离港分离”且飞行程序具有固定的进离港方向,因此,机场

附近的航空器污染物排放呈现放射性和方向性,如图 7 所示。

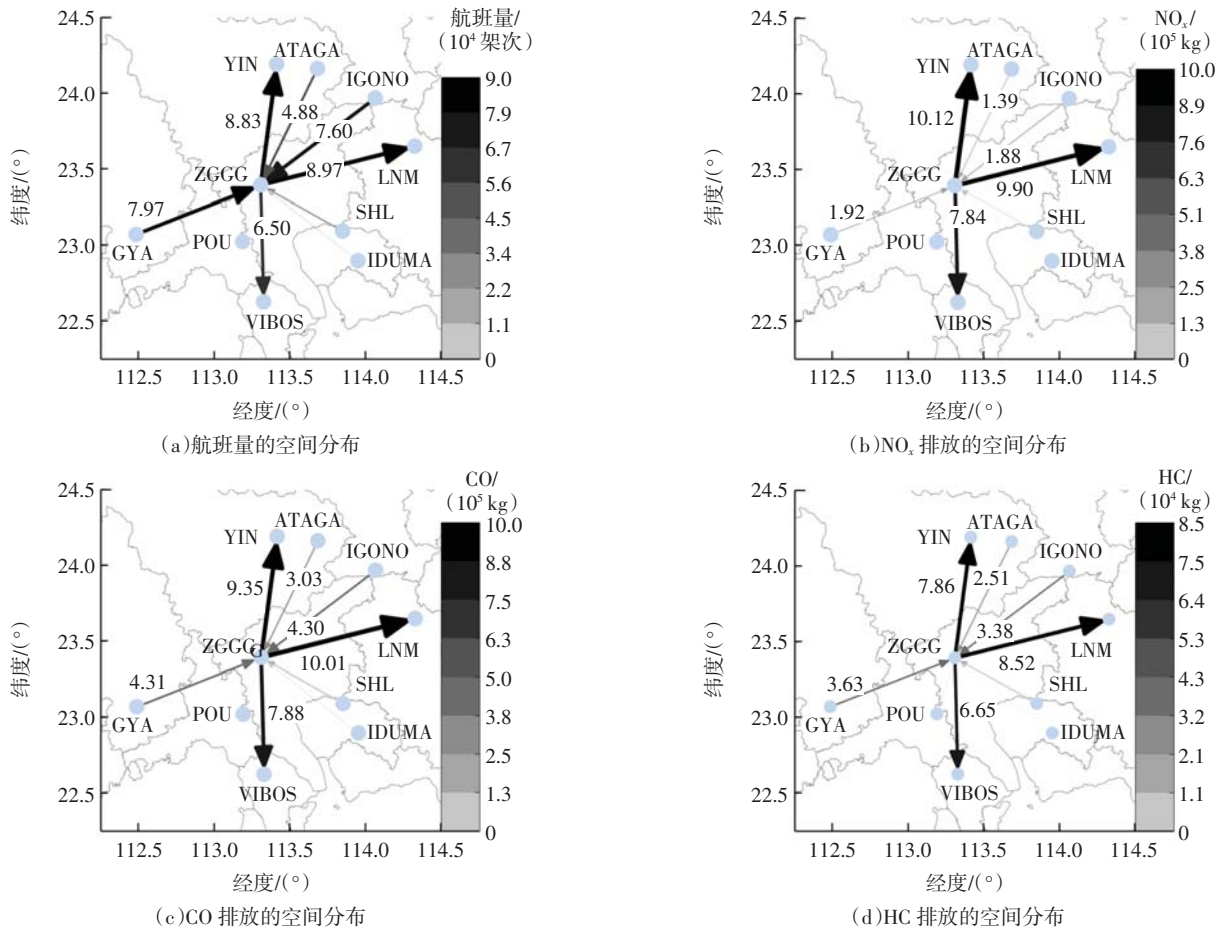


图 7 2019 年 ZGGG 航空器排放的空间特征分析图

Fig.7 Analysis of the spatial characteristics of ZGGG aircraft emissions in 2019

从航班的进离港属性来看:进港航班产生的 NO<sub>x</sub>、CO、HC 污染物为 6.21 × 10<sup>5</sup>、1.40 × 10<sup>6</sup>、1.14 × 10<sup>5</sup> kg,离港航班为 2.79 × 10<sup>6</sup>、2.73 × 10<sup>6</sup>、2.31 × 10<sup>5</sup> kg;离港航班排放的 3 类污染物均高于进港航班,比值分别为 4.49、1.96、2.03。从航路点的航班量空间分布图 7(a)和表 6 所示,航班量占比前三的离港航路点为 LMN(18.55%)、YIN(18.25%)、VIBOS(13.43%),进港航路点为 GYA(16.48%)、IGONO(15.72%)、ATAGA(10.09%)。由图 7(b)、7(c)、7(d)和表 6 可知:CO 与 HC 的空间分布相似,其排放主要分布于离港航路点 LMN(24.25%和 24.70%)、YIN(22.67%和 23.07%)、VIBOS(19.11%和 19.26%)以及进港航路点 GYA(10.46%和 10.51%)、IGONO(10.42%和 9.80%)、ATAGA(7.33%和 7.28%)所对应方向;NO<sub>x</sub> 排放主要分布于离港航路点 LMN(29.03%)、YIN(29.70%)、VIBOS(22.99%)以及进港航路点 GYA(5.63%)、IGONO(5.52%)、ATAGA(4.09%)所对应方向。污染物排放的航路点空间分布存在明显差异。

污染物排放空间分布差异的主要原因如下:①进离港航班的 LTO 循环阶段具有差异,由第 2.1 节可知,HC 与 CO 主要产生于滑行阶段,而 NO<sub>x</sub> 主要产生于滑行、起飞和进近阶段;②不同航路点航班的滑行时长具有差异(图 8),离港航班滑行时间高于进港航班,离港航班的平均滑行时间为 27.0 min,进港航班为 13.5 min。

表 6 2019 年 ZGGG 各航路点的航班量与污染物排放量占比  
Tab.6 The proportion of flight volume and pollutant emissions at each route point at ZGGG in 2019

进/离港	航班量/%	CO/%	HC/%	NO <sub>x</sub> /%
LMN	18.55	24.25	24.70	29.03
POU	0.04	0.15	0.05	0.05
VIBOS	13.43	19.11	19.26	22.99
YIN	18.25	22.67	23.07	29.70
GYA	16.48	10.46	10.51	5.63
IGONO	15.72	10.42	9.80	5.52
ATAGA	10.09	7.33	7.28	4.09
SHL	5.79	4.21	4.18	2.15
IDUMA	1.66	1.40	1.23	0.83

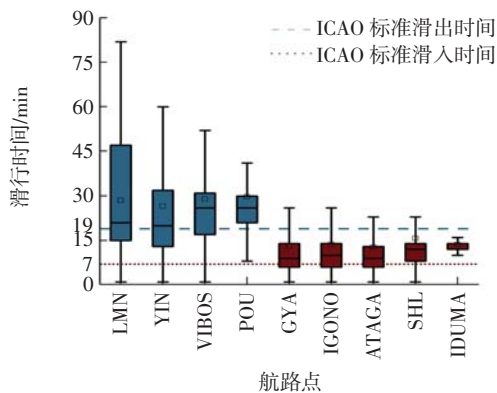


图8 2019年ZGGG航班滑行时间分布图

Fig.8 Distribution of taxiing time of ZGGG flights in 2019

### 3 结语

本文利用2019年广州白云国际机场的航班运行数据与航空例行天气报告数据建立数据驱动的航空器排放修正计算模型(即对发动机燃油流量、污染物排放指数、混合层高度和航班运行时长等参数进行实际运行情况的修正)。基于ICAO的标准模型与修正模型采用自下而上的方法建立机场航空器排放的HC、CO和NO<sub>x</sub>污染物的年排放清单,并对比分析两类清单的区别与联系。最后,根据数据驱动的排放清单分析ZGGG航空器排放的特征。结果表明:

(1)从清单对比分析来看,数据驱动清单的HC、CO、NO<sub>x</sub>年排放量分别为 $0.35 \times 10^6$ 、 $4.13 \times 10^6$ 、 $3.41 \times 10^6$  kg,较标准模型分别降低了10.26%、11.94%、26.03%;

(2)从机型分布来看,A333和B77W机型具有较高的排放强度;

(3)从时间维度来看,02:00—03:00为HC、CO和NO<sub>x</sub>污染物排放量的低峰时段,08:00—09:00为NO<sub>x</sub>的高峰时段,09:00—10:00为HC、CO的高峰时段;HC和CO受气象条件影响较小,全年排放量的变化起伏不大,NO<sub>x</sub>在混合层高度偏高和相对湿度偏低的11—12月的排放量明显增多;

(4)从空间角度来看,离港航班排放量明显高于进港航班,且HC、CO、NO<sub>x</sub>污染物排放集中于离港航路点LMN、YIN、VIBOS所对应的方向。

未来,可融合更多源、更精细的数据,获得更高精度机场航空器大气污染排放清单,并基于此开展污染物扩散、减排等进一步深入研究,以期实现绿色民航。

### 参考文献:

- [1] ICAO. Airport air quality manual[R]. Canada: Montreal: ICAO, 2020.
- [2] HARRISON R M, MASIOL M, VARDOULAKIS S. Civil aviation, air

- pollution and human health[J]. Environmental Research Letters, 2015, 10(4): 041001.
- [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] PRASAD B D, LAL S K. Evaluation of aircraft emission at Tribhuvan International Airport and its contribution to air quality in Kathmandu, Nepal[J]. Atmospheric Environment: X, 2023, 17: 100204.
- [5] TOKUSLU A. Estimation of aircraft emissions at Georgian International Airport[J]. Energy, 2020, 206: 118219.
- [6] 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.
- [7] VUJOVIĆ D, TODORVIĆ N. An assessment of pollutant emissions due to air traffic at Nikola Tesla International Airport, Belgrade, and the link between local air quality and weather types[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 56: 85-94.
- [8] LI J, YANG H T, LIU X G, et al. Aircraft emission inventory and characteristics of the airport cluster in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area, China[J]. Atmosphere, 2020, 11(4): 323.
- [9] YANG X W, CHENG S Y, LANG J L, et al. Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport[J]. Journal of Environmental Sciences, 2018, 72(10): 198-207.
- [10] ZHU C X, HU R, LIU B W, et al. Uncertainty and its driving factors of airport aircraft pollutant emissions assessment[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021, 94: 102791.
- [11] XU H, XIAO K, CHENG J P, et al. Characterizing aircraft engine fuel and emission parameters of taxi phase for Shanghai Hongqiao International Airport with aircraft operational data[J]. Science of the Total Environment, 2020, 720: 137431.
- [12] 曹惠玲,汤鑫豪,苗佳禾.基于QAR数据的发动机LTO阶段氮氧化物排放量计算与分析[J].环境科学学报,2018,38(10):3900-3904.
- [13] 李杰,杨好天,王兵,等.民航飞机起飞推力对油耗和排放的影响分析[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(6):283-288.
- [14] 朱佳琳,胡荣,张军峰,等.中国航空器碳排放测算与演化特征研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2020,44(3):558-563.
- [15] XU H, FU Q Y, YU Y M et al. Quantifying aircraft emissions of Shanghai Pudong International Airport with aircraft ground operational data[J]. Environmental Pollution, 2020, 261: 114115.
- [16] 韩博,王立婕,赵芸婷,等.郑州新郑国际机场本地化排放因子与排放清单[J].环境科学学报,2022,42(9):419-429.
- [17] 黄梦圆,胡荣,张军峰,等.基于快速存取记录器数据的飞机废气排放计算与分析[J].科学技术与工程,2020,20(32):13502-13507.
- [18] 朱昶歆,胡荣,张军峰,等.机场航空器污染物排放测算的不确定性分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(4):688-693.
- [19] ZHANG J R, ZHANG S J, ZHANG X L, et al. Developing a high-resolution emission inventory of China's aviation sector using real-world flight trajectory data[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(9): 5743-5752.
- [20] CHENG S Y, JIN Y Q, LIU L, et al. Estimation of atmospheric mixing heights over large areas using data from airport meteorological stations[J]. Environmental Science and Health, Part A, 2002, 37(6): 991-1007.
- [21] 胡荣,吴文洁,陈琳,等.气象因素对飞机进近飞行燃油效率的影响[J].北京航空航天大学学报,2018,44(4):677-683.

(责任编辑:孟欣)