

# 粤港澳大湾区飞机 LTO 污染排放因子及排放清单

韩博<sup>1\*</sup>, 何真<sup>1</sup>, 张铎<sup>2</sup>, 孔魏凯<sup>1</sup>, 王愚<sup>1</sup> (1. 中国民航大学空中交通管理学院天津市空管运行规划与安全技术重点实验室, 天津 300300; 2. 中国民用航空局空中交通管理局运行管理中心, 北京 100022)

**摘要:** 针对 2018~2019 航季年粤港澳大湾区机场群, 通过实际滑行时间修正和大气混合层高度对爬升/进近时间的修正, 获得飞机主发动机排放因子和区内机场加权排放因子, 同时考虑飞机辅助动力装置的排放, 建立了区内飞机起飞着陆(LTO)污染排放清单. 结果表明, 区域内各机场污染物排放因子存在较大差异, 主要来源于实际运行时间的修正以及各个机场不同的机型占比, 其中 NO<sub>x</sub>、CO、HC、SO<sub>2</sub>、PM 5 类污染物的加权排放因子区内均值分别为 17.58, 8.60, 0.79, 1.37, 0.15kg. 排放量分别为 15327.4, 8066.7, 728.4, 1186.1, 121.9t. 绝大部分来自飞机主发动机排放. 研究期内, NO<sub>x</sub> 排放量在年内呈现夏秋季高、冬春季低的变化趋势, 其他污染物排放量变化较为平缓. 所有污染物在各机场排放量的次序较为一致, 香港、广州白云分列前两位. 各机型中, 区内 NO<sub>x</sub> 及 SO<sub>2</sub> 主要来自 A320 排放, 所占比例分别为 19.5%、17.1%; CO 及 HC 排放占比最大的机型均为 A321, 分别为 25.4%、27.2%; PM 排放量占比最大的机型是 B738, 约为 23.1%.

**关键词:** 粤港澳大湾区; 飞机; 排放清单; 排放因子; 起飞着陆

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2020)12-5182-09

**Research on aircraft LTO pollutant emission factors and emission inventory in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, China.** HAN Bo<sup>1\*</sup>, HE Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Duo<sup>2</sup>, KONG Wei-kai<sup>1</sup>, WANG Yu<sup>1</sup> (1. Tianjin Key Laboratory for Air Traffic Operation Planning and Safety Technology, College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China; 2. Operation Management Center, Air Traffic Management Bureau, Civil Aviation Administration of China, Beijing 100022, China). *China Environmental Science*, 2020,40(12): 5182~5190

**Abstract:** For the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area airport group in the 2018~2019 shipping season, the aircraft main engine emission factor and the weighted airport emission factor in the region were obtained through the correction of the height of the mixed atmosphere to the climb/approach time and the actual taxi time. Meanwhile, considering the emissions of aircraft auxiliary power units, the inventory of aircraft Land take-off (LTO) pollution emissions was listed. The results showed that pollutant emission factors of airports in the region were significantly different, mainly due to the correction of actual operating time and the proportion of different aircraft types in each airport. The mean values of NO<sub>x</sub>, CO, HC, SO<sub>2</sub> and PM weighted emission factors in the region were 17.58, 8.60, 0.79, 1.37 and 0.15kg respectively. The emissions were 15327.4, 8066.7, 728.4, 1186.1, and 121.9t respectively, most of which were from the main engine emissions of the aircraft. During the research, NO<sub>x</sub> emissions showed a high trend in summer and autumn and low in winter and spring, while changes of CO, HC, SO<sub>2</sub> and PM emissions were relatively flat. The order of pollutant emissions from the airports in the area was relatively consistent, with Hong Kong and Guangzhou Baiyun ranking the top two. Among all models, NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> mainly came from A320 emissions, accounting for 19.5% and 17.1% respectively; the models with the largest CO and HC emissions were A321, which were 25.4% and 27.2% respectively; the model with the largest proportion of PM emissions is B738, accounting for about 23.1%.

**Key words:** Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; airport; emission inventory; emission factor; landing and take-off cycle

交通运输行业是大气污染排放的重要来源, 其中, 随着空中交通需求的迅速增加, 航空相关排放对空气质量和人类健康造成的潜在影响随空中交通量的增长而增大<sup>[1-3]</sup>. 大型民航客机发动机运行中会排放 NO<sub>x</sub>、CO、HC、SO<sub>2</sub>、PM 和其他微量化合物<sup>[4]</sup>. 此外, 飞机在地面运行中, 还会使用到辅助动力装置 APU 为客舱提供电力空调以及启动主发动机, 其本质也是一台涡轮发动机, 在运行中也会排放大气污

染物<sup>[5]</sup>.

鉴于飞机在机场起飞着陆(LTO)阶段污染排放的影响, 国内外学者进行了不同程度的研究, Kesgin 等<sup>[6]</sup>、Stettler 等<sup>[7]</sup>、Winther 等<sup>[8]</sup>相继对土耳其阿塔

收稿日期: 2020-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1933110, 21707071); 天津市自然科学基金资助项目(18JCYBJC23800); 天津市教委科研项目(2018KJ248)

\* 责任作者, 副教授, hanbo@live.com

图尔克国际机场(2007)、英国主要机场(2011)、丹麦哥本哈根凯斯楚普机场(2015)排放进行估计计算,确定了各种污染物在不同飞行阶段的排放特征。在国内,已有学者对广州白云国际机场<sup>[9]</sup>、北京首都国际机场<sup>[10]</sup>、上海浦东国际机场<sup>[11]</sup>等国内重点机场进行了排放清单研究,量化了航空器排放在时间上的排放分布,并分析了对机场附近的空气质量影响。在城市机场群研究方面,王瑞宁等<sup>[12]</sup>以 2017 年为基准年对长三角地区民航飞机 LTO 循环大气污染物排放清单进行了研究,针对航空排放的空间分布进行了分析;韩博等<sup>[13]</sup>利用大气混合层高度变化对飞机进近和爬升时间进行优化。基于 LTO 的民航飞机排放因子是指飞机单位 LTO 排放量<sup>[14]</sup>,容易受机场周边大气混合层高度、飞机发动机运行情况等因素的影响,是计算排放清单的重要基础,目前针对航空排放因子的研究相对薄弱。

数据显示<sup>[15-17]</sup>,2018 年粤港澳大湾区机场完成旅客吞吐量 2.1 亿人次,货邮吞吐量 828 万 t,其中,香港国际机场、广州白云国际机场、深圳宝安国际机场在全国机场旅客吞吐量排名中位列第 2、4、6 位。在把握“一带一路”发展重大机遇,打造世界级城市

群过程中,区域内民航发展也将提速,但目前尚缺乏针对区内机场群飞机 LTO 污染排放的研究。本文针对 2018~2019 航季年,粤港澳大湾区机场群飞机 LTO 排放因子和排放清单进行研究。同时考虑飞机主发动机和 APU,采用排放因子法进行计算,通过实际滑行时间和大气混合层高度对模型进行修正,得到了区内重点机型排放因子以及各机场的加权排放因子,并在此基础上建立了 LTO 飞行大气污染排放清单。重点分析实际运行时间修正对各机场主发动机排放因子的影响,同时对排放清单的时空分布特征及各工作模式、机型对清单的贡献进行研究,旨在完善粤港澳大湾区污染防治的数据基础,为区域空气质量提升提供重要支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与时间

粤港澳大湾区现有 7 个机场,分别位于广东省、香港特别行政区、澳门特别行政区,如表 1 所示。其中包括:广州白云国际机场、深圳宝安国际机场、珠海金湾机场、惠州平潭机场、佛山沙堤机场、香港国际机场、澳门国际机场。

表 1 研究区域机场 2018 年吞吐量

Table 1 Throughput of research area airport in 2018

机场	简称	旅客吞吐量(人次)	货邮吞吐量(t)	起降架次(架次)
广州白云国际机场	广州白云	69720403	1890560	477364
深圳宝安国际机场	深圳宝安	49348950	1218502	355907
珠海金湾机场	珠海金湾	11220703	46393	85380
惠州平潭机场	惠州平潭	1879645	5501	15110
佛山沙堤机场	佛山沙堤	109228	129	817
香港国际机场	香港	74672000	5121000	428000
澳门国际机场	澳门	8261412	41509	65777
合计		215,226,929	8282085	1428355

我国民航航班计划分为夏秋航季和冬春航季,本文的研究时间为 2018~2019 航季年,即 2018 年 10 月 28 日~2019 年 10 月 26 日,共计 364d。其中,包括冬春航季自 2018 年 10 月 28 日~2019 年 3 月 30 日,共计 154d;夏秋航季自 2019 年 3 月 31 日~2019 年 10 月 26 日,共计 210d。涉及大气污染物包括 NO<sub>x</sub>、CO、HC、SO<sub>2</sub> 和 PM。

### 1.2 计算方法

本研究针对飞机 LTO 飞行过程中,主发动机及 APU 的大气污染排放进行研究,计算方法如下。

1.2.1 主发动机大气污染物排放因子 计算飞机主发动机的 NO<sub>x</sub>、CO、HC 排放因子与飞机的燃油流量、排放指数、运行时间有关,通过 ICAO 和文献[13]中的方法可计算获得。同时,基于物料衡算法计算 SO<sub>2</sub> 排放因子。

$$EF_{SO_2,k} = FSC \times FF_k \times (TIM_k \times 60) \times \lambda \times 2 \times 10^3 \quad (1)$$

式中:EF<sub>SO<sub>2</sub>,k</sub> 为 SO<sub>2</sub> 在 k 工作模式下的排放因子, g; FSC 为航空煤油中的含硫量,本研究默认航空煤油含硫量为 0.068%; FF<sub>k</sub> 为 k 工作模式下的燃油流率, kg/s; TIM<sub>k</sub> 为 k 工作模式下的工作时间, min; λ 为燃

烧效率,默认值为 0.967<sup>[18]</sup>。

本研究参考 Wayson 等<sup>[19]</sup>创建的一阶近似法计算 PM 的排放因子。

**1.2.2 飞机 APU 大气污染物排放因子计算** APU 的排放因子可以通过各种工作负载的运行时间以及污染物排放系数来进行计算,其中 APU 工作负载的实际运行时间不尽相同,本文以表 2 为准。本研究针对 NO<sub>x</sub>、HC、CO 3 种污染排放进行计算,计算公式如下所示。

$$EF_{i,k} = EC_{i,k} \times (TIM_k \times 60) \times 1000 \times \theta \quad (2)$$

式中:EF<sub>i,k</sub> 为*i*类污染物在*k*工作模式下的排放因子, g; EC<sub>i,k</sub> 为*i*类污染物在*k*工作模式下的排放系数, kg/h; TIM<sub>k</sub> 为*k*工作模式下的运行时间, min; θ 为飞机 APU 使用率,本研究默认为 50%。

表 2 APU 各负载模式运行时间表

Table 2 APU operation schedule of each load mode

飞机工作活动	双发飞机(min)	四发飞机(min)
APU 的启动与稳定	3	3
飞机准备、机组与旅客登机	3.6	5.3
主发动机启动	0.58	2.33
旅客下机以及飞机起飞	15	15

**1.2.3 污染物排放量的计算** 基于上述方法对污染物排放因子的计算,统计 2018~2019 航季年粤港澳大湾区机场的航班数据,可得污染物排放量计算公式如下所示。

$$E_i = \sum_k EF_{i,k} \times M \quad (3)$$

式中: E<sub>i</sub> 为*i*类污染物的排放量, g; EF<sub>i,k</sub> 为*i*类污染物在*k*工作模式下的排放因子, g; M 为 LTO 循环数,次。

### 1.3 基于实际数据的工作模式时间修正

ICAO 主发动机标准排放模型在起飞、爬升、进近、滑行阶段的推力分别为 100%、85%、30%、7%,对应的参考工作时间分别为 0.7,2.2,4.0,26.0min。本研究对其中的爬升、进近、滑行工作时间进行修正。

**1.3.1 基于混合层高度的爬升/进近时间修正** 利用美国 EPA 方法修正 ICAO 规定的爬升/进近参考时间<sup>[20]</sup>。通过现有研究<sup>[21]</sup>,获得区内日最大混合层高度月均值,根据地理位置,广州白云、惠州平潭、佛山沙堤等 3 个内陆机场使用清远气象站数据,香港、澳门、深圳宝安、珠海金湾等 4 个沿海机场使用香

港气象站数据。

**1.3.2 飞机滑行阶段工作时间修正** 由于机场规模、空域容量等多种因素影响,各机场地面滑行时间差异较大,将对 LTO 污染排放产生重要影响。为准确建立排放清单,本研究基于机场实际滑行时间对排放计算模型进行修正。此修正针对内地 5 机场,香港、澳门两场沿用 ICAO 参考滑行时间。

## 2 结果与讨论

### 2.1 典型机型主发排放因子修正分析

在飞机的爬升/进近、滑行阶段,本研究通过各机场航班的实际运行时间,对各机型主发动机污染物单位 LTO 排放量,即排放因子 EF 进行修正。选取区内起降数量占比最高波音 B737-800(B738)为典型机型,分析修正后的排放因子,如图 1 所示。各污染物排放因子的差异,与区内 7 个机场各工作模式的运行时间密切相关。

其中,NO<sub>x</sub> 的排放主要来自飞机起飞、爬升等大推力状态的飞行,因此其排放因子主要受到爬升时间修正的影响。由于夏秋季较冬春季混合层高度高,因此在混合层内爬升时间延长,进而导致 NO<sub>x</sub> 排放因子增大,在区内各机场均显示出较为一致的变化趋势。同时混合层高度还显示出内陆高于沿海地区的特点(图 1),对应在广州白云、惠州平潭、佛山沙堤机场的飞机 NO<sub>x</sub> 排放因子略高于深圳、香港、澳门、珠海等地机场。波音 B738 机型在各机场的 NO<sub>x</sub> 年均排放因子平均值为 13.42kg。

CO、HC 主要来自航空煤油不完全燃烧,其排放因子受到滑行时间修正的影响最大。其中,广州白云、深圳宝安两场由于规模较大,年均地面滑行时间分别为 25.8 和 25.1min,长于其他中小型机场,导致 CO、HC 排放因子较高,且排放因子与滑行时间的月变化趋势较为一致。而珠海金湾、惠州平潭、佛山沙堤等三机场的年平均滑行时间分别为 15.3,14.6,12.2min,远低于 ICAO 模型中基准滑行时间 26.0min,因此修正后的 CO、HC 排放因子略低。香港、澳门两场使用 ICAO 基准滑行时间未进行修正,CO、HC 排放因子主要与发动机处于小推力状态运行的进近时间修正有关,且变化幅度很小。B738 在各机场的 CO 年均排放因子平均值为 5.80kg,而 HC 在各机场排放因子 EF 年均值均低于 1.00kg。

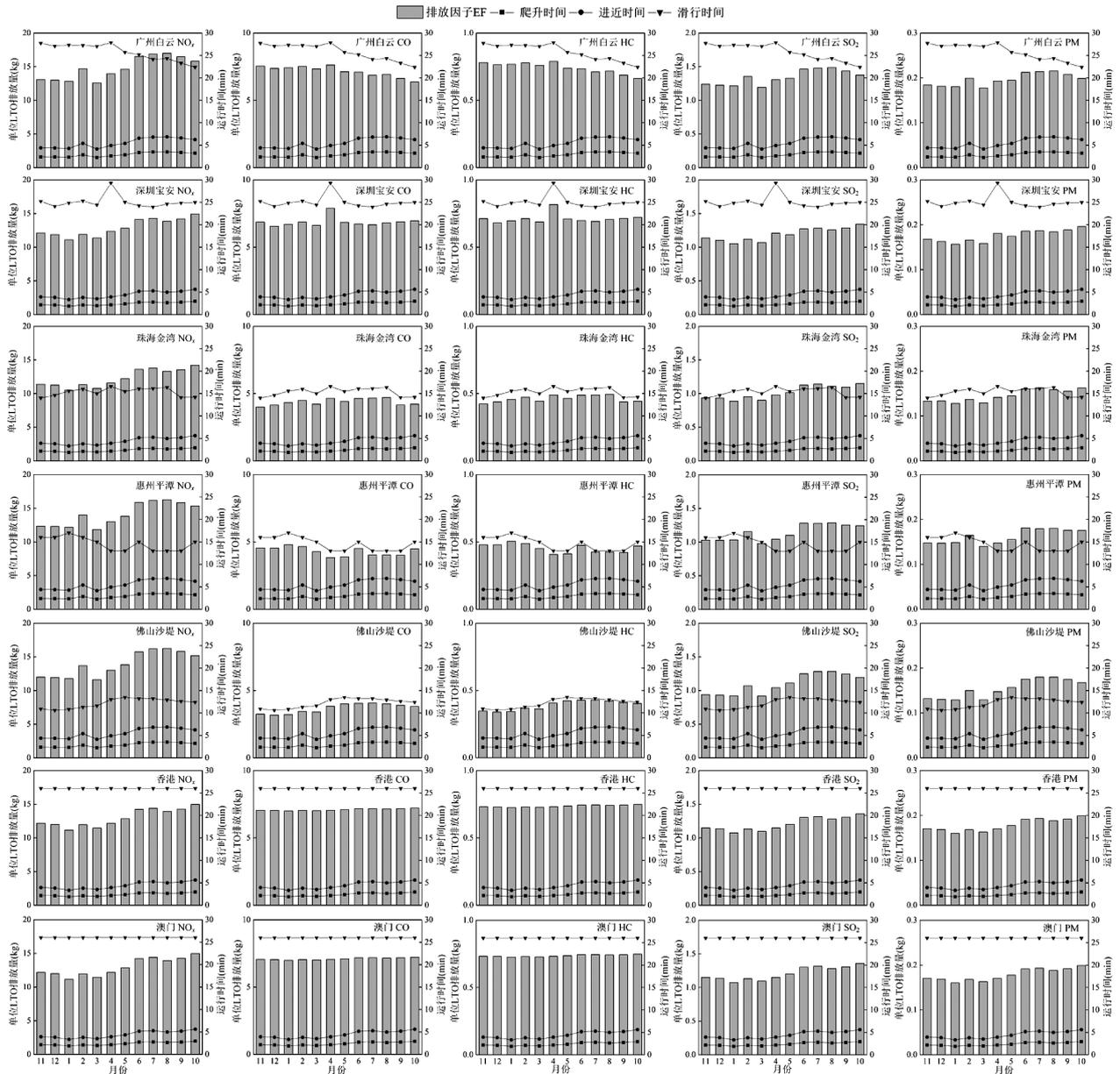


图 1 湾区内机场群 B738 机型修正后排放因子

Fig.1 Modified emission factors of B738model for airport group in the Bay Area

PM、SO<sub>2</sub> 的排放因子变化趋势较为复杂,分析发现与爬升时间修正的变化趋势比较接近.由于 PM、SO<sub>2</sub> 在各工作模式中的排放指数 EI 较低,因此考虑与单位 LTO 循环排放量的变化主要受到耗油量的影响.因此在夏秋季混合层高度较高时,爬升至混合层顶时间延长,导致排放因子增大.同时,由于内陆地区较沿海地区混合层高度高的原因(图 1),因此内陆机场 PM、SO<sub>2</sub> 的排放因子略高于沿海机场,B738 在内陆机场的 PM、SO<sub>2</sub> 年均排放因子平均值分别为 0.17,1.20kg,在沿海机场的 PM、SO<sub>2</sub> 年均排放因子平均值分别为 0.16 和

1.16kg.

### 2.2 湾区内机场加权排放因子分析

基于区内各飞机机型排放因子计算结果,结合各机场 LTO 运行机型占比统计,获得了区内各机场污染物加权排放因子.生态环境部《非道路移动污染源排放清单编制技术指南(试行)》<sup>[14]</sup>(简称“技术指南”)中,提供了一组飞机 LTO 排放因子,但并未考虑机场实际运行时间及机型的差异.区内机场加权排放因子与技术指南的偏差情况如表 3 所示.

从 NO<sub>x</sub> 加权排放因子看,香港机场最高,为 29.91kg;珠海金湾机场最低,为 12.88kg;各机场的均

值为 17.58kg,与技术指南的偏差率为 7.9%,最接近指南所给排放因子的是深圳宝安机场,偏差率仅为 3.4%。CO 排放主要来自飞机的滑行阶段,各机场加权排放因子分布在 4.55~15.78kg 之间,区内均值为 8.60kg,与技术指南的偏差率为 5.9%。其中各机场之间数值差异较大,香港机场 CO 加权排放因子大致为佛山沙堤机场的 3 倍,主要考虑各机场的机型占比差异较大。从 HC 加权排放因子看,香港机场最高,为 1.41kg,惠州平潭、佛山沙堤机场较低,分别为

0.43,0.50kg,区内均值为 0.79kg,与技术指南偏差较大,为 70.6%。SO<sub>2</sub> 排放主要来自于航空煤油中的含硫成分,各机场加权排放因子分布在 1.02~2.14 之间,区内均值为 1.37kg,SO<sub>2</sub> 排放计算方法为物料衡算法,排放因子的差异仅与燃油消耗有关。从 PM 加权排放因子看,各机场数值较小,均在 1kg 以下,最小的是惠州平潭机场和澳门机场 0.12kg,最大的是香港机场 0.20kg。区内均值为 0.15kg,与技术指南的差异较大,偏差率为 72.3%。

表 3 湾区内机场和技术指南排放因子(kg)

Table 3 Emission factors for airports and technology guidelines in the Bay Area (kg)

研究对象	NO <sub>x</sub> (kg)	偏差率(%)	CO(kg)	偏差率(%)	HC(kg)	偏差率(%)	SO <sub>2</sub> (kg)	偏差率(%)	PM*(kg)	偏差率(%)
广州白云	19.82	21.7	10.15	11.0	0.93	65.1	1.61	-	0.17	68.0
深圳宝安	16.84	3.4	9.24	1.1	0.82	69.4	1.38	-	0.15	72.0
珠海金湾	12.88	20.9	5.45	40.3	0.56	79.2	1.02	-	0.13	75.5
惠州平潭	15.55	4.6	5.15	43.7	0.50	81.4	1.12	-	0.12	76.9
佛山沙堤	13.45	17.5	4.55	50.2	0.43	83.9	1.08	-	0.14	73.4
香港	29.91	83.6	15.78	72.7	1.41	47.5	2.14	-	0.20	63.2
澳门	14.60	10.4	9.88	8.1	0.86	67.8	1.25	-	0.12	77.2
湾区内均值	17.58	7.9	8.60	5.9	0.79	70.6	1.37	-	0.15	72.3
技术指南	16.29		9.14		2.68		-		0.54	

注:“-”:无对比数据;“\*”:由于飞机排放PM大多为纳米级,因此将PM与指南PM<sub>2.5</sub>排放因子数据进行对比<sup>[22]</sup>。

总的来看,各机场加权排放因子差异主要来源于实际运行时间的修正以及各个机场不同的机型占比。NO<sub>x</sub> 和 CO 排放因子与技术指南的相比差异较小,偏差率均在 8.0%以内;HC 和 PM 排放因子与技术指南的相比差异较大,偏差率均大于 70.0%。由此可知,技术指南中排放因子更适宜于 NO<sub>x</sub> 和 CO 排放计算。

### 2.3 污染物排放清单

2018~2019 航季年粤港澳大湾区飞机 LTO 大气污染物排放清单,如表 4 所示。其中,NO<sub>x</sub> 是区内机场飞机 LTO 活动的主要污染物,排放总量达 15327.4t。CO、SO<sub>2</sub> 的排放量略低,分别为 8066.7 和 1186.1t,HC、PM 排放量相对较少,分别为 728.4 和 121.9t。其中香港、广州白云、深圳宝安机场是粤港澳大湾区的主要排放机场。

2.3.1 时间分布 2018~2019 航季年粤港澳大湾区飞机 LTO 大气污染物排放月分布,见图 2。NO<sub>x</sub> 作为排放量最大的污染物,变化幅度较大,年内各月排放量在 1107.1~1511.2t 之间变化,月均值为 1289.1t。呈现出夏秋季较高、冬春季较低情况,最大值出现在 7 月,与夏秋季 NO<sub>x</sub> 排放因子较高有关。年内 CO 排放

量变化趋势略小,在 644.9~704.1t 之间变化,月均排放量为 672.2t,低值集中在 2、6、9 月,考虑与区内 LTO 活动规律有关。HC、SO<sub>2</sub> 和 PM 等污染物,月均排放量分别为 60.7,98.8,10.2t,年内各月的排放量变化幅度较小。

表 4 2018~2019 航季年粤港澳大湾区飞机 LTO 循环大气污染物排放清单(t)

Table 4 Air pollutant emission inventory from aircraft LTO cycles in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area during the 2018~2019 shipping season (t)

机场	NO <sub>x</sub>	CO	HC	SO <sub>2</sub>	PM
香港	6358.8	3354.6	299.3	454.7	42.2
广州白云	4641.8	2376.9	218.8	378.1	40.5
深圳宝安	3049.3	1672.8	148.5	249.9	27.4
珠海金湾	544.4	230.5	23.5	42.9	5.6
澳门	546.2	369.6	32.3	46.7	4.6
惠州平潭	149.5	49.5	4.8	10.8	1.2
佛山沙堤	37.5	12.7	1.2	3.0	0.4
合计	15327.4	8066.7	728.4	1186.1	121.9

2.3.2 空间分布 区内排放清单的空间分布情况见图 3。同时将各机场飞机 LTO 飞行中主发动机不

同工作模式及 APU 的排放量贡献占比列于图 3 中。可见各污染物排放量的空间分布较为一致,各机场由高至低依次为香港、广州白云、深圳宝安、珠海金湾、澳门、惠州平潭、佛山沙堤。

从 NO<sub>x</sub> 排放量看,香港机场排放量最高,达 6358.8t;其次为广州白云机场,排放量约为 4641.8t;佛山沙堤机场排放量最低,为 37.5t。从 CO 排放量看,香港机场和广州白云机场排放量较大,分别占区内 CO 排放总量的 41.6%、29.5%。从 HC 排放量看,各机场排放均低于 300t,其中香港机场排放量最大为 299.3t,占排放总量的 41.1%,佛山沙堤机场排放量最小为 1.2t,仅占排放总量的 0.2%。从 SO<sub>2</sub> 排放量来看,香港国际机场为 454.7t,佛山沙堤机场仅为 3t,分别占排放总量的 31.9%、0.3%。从 PM 排放量来看,各机场排放量均低于 50t,香港、广州白云机场分别占排放总量的 34.6%、33.2%。

区内 LTO 循环总量较大的机场有广州白云、香港机场,年 LTO 循环量为该区域第一位、第二位,分别占区内总量的 32.5%、29.5%,但各类污染物排放

量却超过广州白云机场排在首位,原因主要是香港机场起降的飞机类型占比和内地城市机场不同。起降在香港机场的双通道机型比例要高于区内其他城市的机场,而双通道机型各类污染物排放因子相对于单通道机型更高。

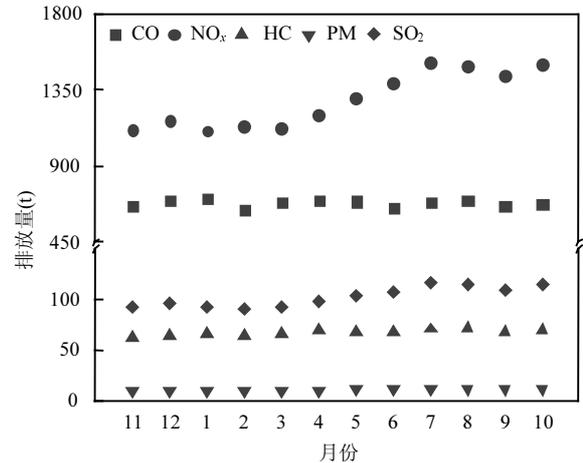


图 2 排放清单月分布

Fig.2 Monthly distribution of air pollutant emissions inventory

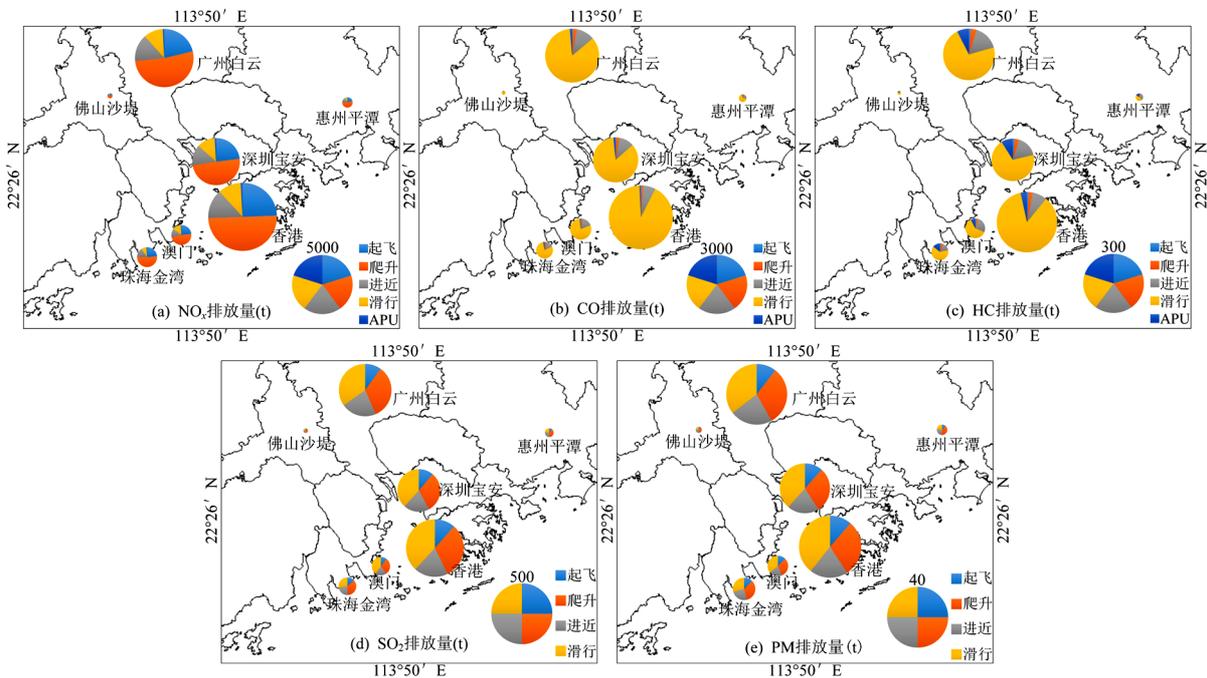


图 3 排放清单空间分布

Fig.3 Spatial distribution of air pollutant emissions inventory

2.3.3 基于实际运行时间修正对排放清单的影响  
通过机场实际滑行时间以及混合层高度对爬升/进近时间进行修正,各类污染物排放因子发生了变化,

排放清单结果更加准确。针对滑行、爬升/进近的时间修正,分别计算修正后的排放清单,相对 ICAO 基准模型计算结果的变化情况如图 4 所示。

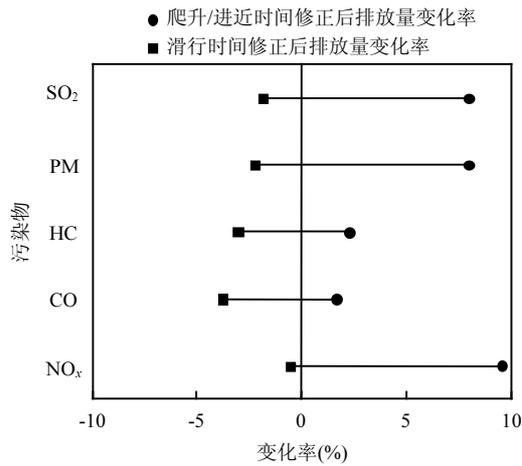


图4 实际运行时间修正对排放清单影响

Fig.4 Impact of actual operating time correction on air pollutant emissions inventory

其中,爬升/进近时间修正,使污染物排放量均增加,区内LTO飞行NO<sub>x</sub>、CO、HC、SO<sub>2</sub>、PM排放量分别增加9.6%、1.7%、2.3%、7.9%、8.0%。NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、PM变化率增长显著的主要原因是这3类污染物的排放主要集中在飞机的爬升和进近阶段,混合层高度的普遍提高延长了飞机在爬升和进近阶段的工作时间,导致混合层高度的排放量增加,结果显示ICAO基准模型低估了相应飞行阶段的污染排放量。

滑行时间的修正对污染物排放量也有较大影响,如图5所示,NO<sub>x</sub>、CO、HC、SO<sub>2</sub>、PM排放量均有所降低,变化率分别为-0.6%、-3.8%、-3.1%、-1.8%、-2.2%。研究区内较多机场飞机实际滑行时间少于ICAO滑行参考时间26min,导致滑行阶段污染物排放量降低。其中CO的变化幅度最大,其主要原因是CO的排放主要存在于飞机的滑行阶段,滑行阶段飞机多使用慢车推力,发动机内燃油的不完全燃烧排放了较多的CO。

爬升/进近及滑行时间修正后的叠加影响,相对于ICAO基准模型结果,NO<sub>x</sub>、CO、HC、SO<sub>2</sub>、PM变化率分别为9.0%、-2.1%、-0.8%、6.1%、5.7%。

## 2.4 清单贡献率分析

**2.4.1 主副动力装置排放贡献率** 在本研究讨论的飞机排放的大气污染物中,NO<sub>x</sub>、CO、HC为主发动机和APU均会排放的污染物。其中APU排放NO<sub>x</sub>、CO、HC总量为141.7,100.2,46.9t,分别占飞机LTO循环NO<sub>x</sub>、CO、HC排放总量的比例为

0.9%、1.2%、6.2%。目前我国民航机场正在推行“APU替代”的减排措施,使用地面桥载设备等地面电源、气源代替APU使用,未来有望进一步降低APU排放量。

**2.4.2 工作模式排放贡献率** 区内飞机主发动机各种工作模式的排放贡献率,如图5所示。结果显示5类污染物在各工作模式下的排放占比相差较大。其中,NO<sub>x</sub>主要来自于飞机LTO中的爬升阶段,占比达51.2%;虽然起飞阶段推力更大,但由于持续时间短,因此排放占比低于爬升阶段,约为23.3%,进近、滑行阶段相对贡献较低。CO和HC在地面滑行阶段排放占比远高于其他阶段,分别为88.3%和78.6%,与滑行阶段发动机推力较低且燃料燃烧不充分有关。SO<sub>2</sub>和PM在不同工作模式下的占比较为接近,在起飞、爬升、进近、滑行等阶段,SO<sub>2</sub>的排放量占比分别为10.8%、32.2%、20.3%、36.7%,PM的排放占比分别为11.2%、30.4%、21.3%、37.1%。

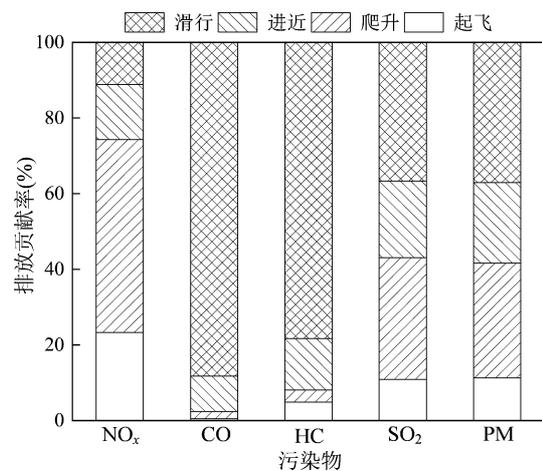


图5 各工作模式下污染物排放贡献率

Fig.5 Contribution of major atmospheric pollutants discharge under various LTO phases

**2.4.3 机型排放贡献率** 图6所示为各机型5类污染物排放占比情况。区内CO、HC排放量最多的机型为A321,该机型排放量分别占CO、HC排放总量的25.4%、27.2%;NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>排放量最多的机型为A320,该机型排放量分别占NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>排放总量的19.5%、17.1%;PM排放量最多的机型为B738,该机型排放量占PM排放总量的23.1%。值得注意的是,B777机型在区内LTO总量占比仅为4.7%,而对NO<sub>x</sub>、CO、HC、SO<sub>2</sub>、PM的排放量贡献率分别达

22.3%、20.4%、18.5%、13.2%、9.7%, 与该机型排放因子较高有关。

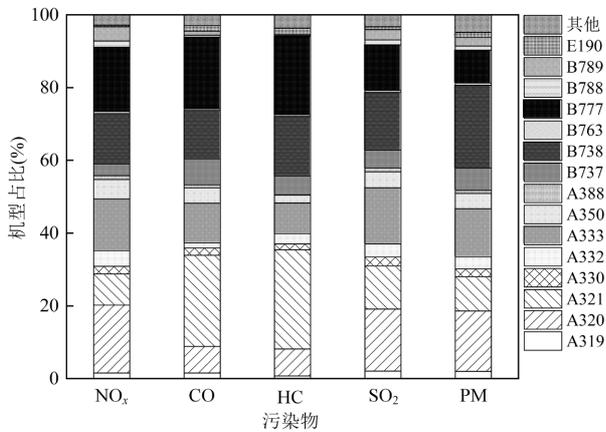


图6 各机型污染物排放贡献率

Fig.6 Contribution of pollutant emissions of various models

### 3.5 不确定性分析

本研究的不确定因素主要来自 3 个方面:一是研究中污染物各阶段排放指数 EI 来自 ICAO 标准值,为固定参数条件下的实验数据,而运行中会随发动机的实际推力、老化及其他条件影响而变化,可能影响污染物排放因子及排放量。二是研究中假设 APU 使用率为 50%,而各机场由于桥载电源、气源等设备数量不同,实际 APU 使用率存在差异。此外,由于缺少基础数据,APU 的 PM 排放暂未考虑。三是研究中  $\text{SO}_2$  及 PM 中含硫组分的计算,以航空煤油含硫量 0.068% 为依据,而实际条件下可能会有所差异,进而影响  $\text{SO}_2$  和 PM 排放因子及排放量。

## 3 结论

3.1 选取区域 LTO 起降数量占比最高的波音 B738 为典型机型,分析其通过实际运行时间修正后的排放因子中,  $\text{NO}_x$  存在明显季节性变化趋势,与混合层高度的影响密切相关;CO 与 HC 受到地面滑行时间影响最大,大型机场排放因子高于中小机场;PM 与  $\text{SO}_2$  排放因子与爬升/进近时间修正有一定关系。

3.2 区内各机场加权污染物排放因子存在较大差异,主要来源于实际运行时间的修正以及各个机场不同的机型占比。其中  $\text{NO}_x$ 、CO、HC、 $\text{SO}_2$ 、PM 排放因子研究区域内均值分别为 17.58、8.60、0.79、1.37、0.15kg,与技术指南对比可知技术指南中排放因子更适宜于  $\text{NO}_x$  和 CO 排放计算。

3.3 2018~2019 航季年粤港澳大湾区飞机 LTO 飞行循环,  $\text{NO}_x$ 、CO、HC、 $\text{SO}_2$ 、PM 的排放量为 15327.4、8066.7、728.4、1186.1、121.9t;其中飞机 APU 排放的  $\text{NO}_x$ 、CO、HC 总量为 141.7、100.2、46.9t,其余绝大部分为主发动机排放。此外,相对于 ICAO 基准模型计算结果,修正排放因子后计算获得  $\text{NO}_x$ 、CO、HC、 $\text{SO}_2$ 、PM 排放清单变化率分别为 9.0%、-2.1%、-0.8%、6.1%、5.7%。时间分布特征,  $\text{NO}_x$  排放量呈现出夏秋季较高、冬春季较低的趋势,月均值为 1289.1t;CO、HC、 $\text{SO}_2$  和 PM 等污染物月均排放量分别为 672.2、60.7、98.8、10.2t。空间分布特征,所有污染物排放量在区内各机场的次序较为一致,香港机场最为突出,广州白云机场次之,深圳、澳门、珠海 3 地机场的污染物排放量处于中等,惠州和佛山的机场污染物排放较少。

3.4 LTO 各工作模式中,  $\text{NO}_x$  主要来自于爬升阶段排放,占比达 51.2%;CO 和 HC 在滑行阶段的排放所占占比均超过 75%; $\text{SO}_2$  和 PM 在不同工作模式下的占比较为接近。各机型中,  $\text{NO}_x$  及  $\text{SO}_2$  主要来自 A320 排放,所占比例分别为 19.5%、17.1%;CO 及 HC 排放占比最大的机型均为 A321,分别为 25.4%、27.2%;PM 排放量占比最大的机型是 B738,占比约为 23.1%。

### 参考文献:

- [1] 韩 博,黄佳敏,魏志强.民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 [J]. 环境科学, 2016,37(12):4524-4530.  
Han B, Huang J M, Wei Z Q. Gaseous emission characterization of civil aviation aircraft during takeoff [J]. Environmental Science, 2016,37(12):4524-4530.
- [2] Cameron M A, Jacobson M Z, Barrett R H, et al. An intercomparative study of the effects of aircraft emissions on surface air quality [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017,122:8325-8344.
- [3] Phoenix D, Khodayari A, Wuebbles D, et al. Aviation impact on air quality present day and mid-century simulated in the Community Atmosphere Model (CAM) [J]. Atmospheric Environment, 2019, 196:125-132.
- [4] Lee D S, Pitari G, Grewe V, et al. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation [J]. Atmospheric environment, 2010,44(37): 4678-4734.
- [5] 施彬彬.飞机辅助动力装置控制技术研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2013.  
Shi B B. Research of aircraft auxiliary power unit control [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [6] Kesgin U. Aircraft emissions at Turkish airports [J]. Energy, 2006, 31(2/3):372-384.
- [7] 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.
- [8] Winther M, Kousgaard U, Ellermann T, et al. Emissions of NO<sub>x</sub>, particle mass and particle numbers from aircraft main engines, APU's and handling equipment at Copenhagen Airport [J]. *Atmospheric environment*, 2015,100:218-229.
- [9] 黄清风,陈桂浓,胡丹心,等.广州白云国际机场飞机大气污染物排放分析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2014,26(3):57-59.  
Huang Q F, Chen G N, Hu D X, et al. Analysis of the airplane emission of atmospheric pollutants in Guangzhou Baiyun international airport [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2014,26(3):57-59.
- [10] 徐冉,郎建垒,杨孝文,等.首都国际机场飞机排放清单的建立 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(8):2554-2560.  
Xu R, Lang J L, Yang X W, et al. Establishment of aircraft emission inventory for Beijing capital international airport [J]. *China Environmental Science*, 2016,36(8):2554-2560.
- [11] 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*, 2020,261:114-115
- [12] 王瑞宁,黄成,任洪娟,等.长三角地区民航飞机起降(LTO)循环大气污染物排放清单 [J]. *环境科学学报*, 2018,38(11):4472-4479.  
Wang R N, Huang C, Ren H J, et al. Air pollutant emission inventory from LTO cycles of aircraft in civil aviation airports in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(11):4472-4479.
- [13] 韩博,孔魏凯,姚婷玮,等.京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 [J]. *环境科学*, 2020,41(3):1143-1150.  
Han B, Kong W K, Yao T W, et al. Air pollutant emission inventory from LTO cycles of aircraft in Beijing-Tianjin-Hebei airport group, China [J]. *Environmental Science*, 2020,41(3):1143-1150.
- [14] 中华人民共和国生态环境部.非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南(试行) [Z]. 2014.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical guidelines for compiling emission inventory of non-road mobile pollution sources (trial implementation) [Z]. 2014.
- [15] 中国民航局.2018年民航机场生产统计公报 [R]. 2019.  
Civil Aviation Administration of China. 2018 civil aviation airport production statistics bulletin [R]. 2019.
- [16] 香港国际机场国际民航交通量确实统计数字 [EB/OL]. <https://www.hongkongairport.com>, 2019.  
Real statistics of international civil aviation traffic at Hong Kong International Airport [EB/OL]. <https://www.hongkongairport.com>, 2019.
- [17] 澳门国际机场旅客数据 [EB/OL]. <http://www.camacau.com/cn>, 2019.  
Macau International Airport Passenger Data [EB/OL]. <http://www.camacau.com/cn>, 2019.
- [18] Schumann U, Arnold F, Busen R, et al. Influence of fuel sulfur on the composition of aircraft exhaust plumes: The experiments SULFUR 1-7[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2002,107(D15): 4247.
- [19] Wayson R L, Fleming G G, Iovinelli R. Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 2009, 59(1):91-100.
- [20] Environmental Protection Agency. Evaluation of air pollutant emissions from subsonic commercial jet aircraft [R]. 1999.
- [21] 廖志恒,许欣祺,谢洁岚,等.珠三角地区日最大混合层高度及其对区域空气质量的影响 [J]. *气象与环境学报*, 2019,35(5):85-92.  
Liao Z H, Xu X Q, Xie J L, et al. Daily maximum mixing height and its effects on air quality in the Pearl River Delta region [J] *Journal of Meteorology and Environment*, 2019,35(5):85-92.
- [22] 韩博,刘雅婷,陈鑫,等.民航飞机起飞过程细粒子排放特征 [J]. *中国环境科学*, 2017,37(5):1620-1627.  
Han B, Liu Y T, Chen X, et al. Fine particles emission characterization of civil aviation aircraft during takeoff [J]. *China Environmental Science*, 2017,37(5):1620-1627.

**作者简介:** 韩博(1982-),男,天津人,副教授,博士,主要研究方向为大气环境与民航环境管理.发表论文 30 余篇.