中国民用航空机场大气污染物及碳排放清单

尤 倩[1],李洪枚[1],伯 鑫[2,3*],郑 昀[4**],陈少博[2,3] (1.首都经济贸易大学管理工程学院,北京 100070；2.北京化工大学环境科学与工程系,北京 100029；3.北京化工大学北化中国工业碳中和研究院,北京 100029；4.北京市职业病防治研究院,北京 100093)

摘要：基于 2017~2020 年中国民用航空局飞机起降数据、机队配置数据和国际民航组织(ICAO)飞机发动机排放因子数据库等数据,自下而上编制了2017~2020 年中国民用航空机场高分辨率飞机起飞着陆(LTO)循环大气污染物及碳排放清单,在此基础上探究中国民用航空机场大气污染物和碳排放时空分布特征.分析 2000~2020 年 3 次疫情(2003 年非典、2012 年中东呼吸症、2020 年新冠疫情)对机场大气污染物及碳排放影响.结果表明,2020 年中国民航机场 LTO 循环 NO_x、CO、HC、SO_2、PM 和 CO_2 排放量分别为 10.90, 8.22, 0.96, 0.28, 0.06, 1360.27 万 t; HC、CO、SO_2、CO_2 在滑行阶段排放量最大,分别占总排放量的 92.80%、91.56%、41.81%、41.81%.NO_x、PM 在爬升阶段排放量最大,分别占总排放量的 47.93%、37.39%;2017~2019 年我国民航机场飞机 LTO 循环大气污染物及碳排放总量呈现逐年增长的趋势,受新冠疫情影响 2020 年排放总量下降 22.39%;排放集中在经济较为发达的华东地区.在 2000~2020 年 3 次疫情中,新冠疫情对我国民航机场飞机 LTO 循环排放量影响最显著.

关键词：民用航空机场；新冠；LTO 循环；排放清单；碳排放

中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2022)10-4517-08

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220706.001

Air pollution and CO_2 emission inventory of Chinese civil aviation airport. YOU Qian[1], LI Hong-mei[1], BO Xin[2,3*], ZHENG Yun[4**], CHEN Shao-bo[2,3] (1.School of Management and Engineering, Capital University of Economics and Business, Beijing 100070, China；2.Department of Environmental Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；3.Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China；4.Beijing Institute of Occupational Disease Prevention and Treatment, Beijing 100093, China). *China Environmental Science*, 2022,42(10)：4517~4524

Abstract：Based on the aircraft take-off and landing data of the Civil Aviation Administration of China, fleet configuration data, and the ICAO aircraft engine emission factor database from 2017 to 2020, the air pollution and CO_2 emission inventory of the landing and take-off (LTO) cycle of high-resolution aircraft of civil aviation airport of China were developed from bottom to top. On this basis, the spatial and temporal distribution characteristics of air pollutants and CO_2 on air pollution of China Civil Aviation Airport LTO cycle were explored. We analyzed the 3epidemics from 2000 to 2020 (SARS in 2003, MERS in 2012, and COVID-19 in 2020) on airport air pollution and CO_2 emissions. The results show that the emissions of NO_x, CO, HC, SO_2, PM, and CO_2 in the LTO cycle of civil aviation airports in China in 2020 are 10.90, 8.22, 0.96, 0.28, 0.06, 1360.27 million tons respectively; The emissions of HC, CO, SO_2, and CO_2 are the largest in the taxiing stage, accounting for 92.80%, 91.56%, 41.81% and 41.81% of the total emissions respectively. The emissions of NO_x and PM are the largest in the climbing stage, accounting for 47.93% and 37.39% of the total emissions respectively; Air pollutants and CO_2 emissions from China's Civil Aviation Airport LTO cycle showed an increasing trend over the past 2017~2019 years, and the total emissions in 2020 were reduced by 22.39% by COVID-19. The most concentrated emission area is the economically developed East region. In the 3 epidemics of the 2000~2020 years, COVID-19 has the most significant impact on the LTO emissions from China's civil aviation airport.

Key words：civil aviation airport；novel coronavirus；LTO cycle；emission inventory；CO_2 emission

我国航空运输业发展迅速[1-2],飞机起降架次快速增长,机场污染物排放量随之增加.航空业的碳排放在每年全球人为碳排放中占 2.0%~2.5%[3].目前,机场排放清单研究主要利用 ICAO(international civil aviation organization, ICAO)推荐的模型在不同尺度上探讨飞机发动机在起降(landing and take-off, LTO)循环过程中排放的 HC、NO_x、CO、SO_2 等大气污染物和 CO_2 排放量及影响因素[4-18].对单个机场,如国外的意大利的佛罗伦萨机场[4]、土耳其的阿塔图尔克国际机场[5]、丹麦的哥本哈根凯斯楚普机场[6],国内的广州白云机场[7]、成都双流机场[8]、首都机场[9-11]大气污染物排放的研究,是根据机场实际

收稿日期：2022-03-28

基金项目：国家重点研发计划项目(2019YFE0194500);国家自然科学基金项目(72174125);中央高校基本科研业务费资助(buctrc202133)

* 责任作者，教授，boxin@buct.edu.cn；** 高级工程师，yunzheng2003@126.com

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

运行情况,飞机机型构成,发动机类型,确定飞机发动机排放因子,并核算的机场大气污染物排放量,此方法处理的数据庞杂,数据清洗耗费时间.在此基础上,对城市群如华北地区[12]、珠三角[13]、京津冀[14]、粤港澳[15]的机场排放清单研究,根据区域内起降飞机机型构成,获得各机场或区域的污染物排放因子,核算区域内各机场大气污染物排放量.在全国机场方面,夏卿[16]等以 1 周为周期,将某航空公司机队某型飞机的平均排放因子作为核算机场排放清单的依据;BO[17]等根据《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》[18]编制了 2000~2016 年飞机污染物排放清单,相关研究采用的因子与我国机场实际运行排放情况存在差异,排放量核算结果存在较大不确定性.

目前,研究主要核算单个机场或区域机场的排放因子,全国机场排放因子大多采用不分机型的《非道路移动源大气污染物排放清单编制技术指南》[18]因子或单一机型平均因子,本研究根据中国机队配置情况,核算 LTO 循环阶段,中国飞机平均大气污染物排放因子;建立 2017~2020 年中国大陆(不包括港澳台)民用航空机场 LTO 循环过程的大气污染排放清单(HC、NO_x、CO、PM、SO_2、CO_2);结合本团队已有成果(2000~2016 年机场排放清单)[17],分析了自 2000 年以来,3 次全球性疫情(2003 年的非典、2012 年的中东呼吸症、2020 年新冠疫情)对机场大气污染物排放的影响.

1 研究方法

1.1 研究区域与对象

以 2017~2020 为基准年,区域包括中国 30 个省、自治区及直辖市(中国香港、澳门、台湾和西藏地区暂不考虑) ,2017 年共有机场 229 个,2018 年有 235 个,2019 年有 239 个,2020 年 240 个.飞机起降数据来源于中国民用航空局;全国飞机机队配置数据,来源于中国民用航空局出版物《从统计看民航》[19];机型与发动机匹配数据来源于飞机制造公司官网和文献查阅[12,20];发动机的燃油消耗率、烟度及排放因子,来源于 ICAO 飞机发动机排放数据库[21].研究的排放污染物包括 NO_x、CO、HC、SO_2、PM 和 CO_2.

1.2 大气污染物排放量计算方法

机场区域的污染物排放源包括:飞机LTO循环阶段尾气排放,辅助动力装置(APU)和地面支持设备(GSE)等.其中,飞机 LTO 循环阶段碳排放占比超过 80%[21],故本文仅核算飞机LTO循环阶段大气污染物排放.由于我国机队配置情况复杂,机型繁多,且飞机机型与发动机机型并非一一匹配,全国范围内的详细分机型起降数据统计不易实现, ICAO 提供了不同数据水平下的排放模型,基于 ICAO 标准排放量模型和机场飞机起降航班架次比例排放清单编制方法,已经在多个项目中得到了应用,取得了很好的效果[10,12].因此本研究采用基于机队配置数据计算加权排放因子的方法核算全国机场 LTO 循环大气污染物及碳排放量.2017~2020 年,我国机队配置变化幅度较小,故假设每架飞机的起降概率是均等的,根据 2018 年各机型所占比例(表 1)利用 ICAO 排放因子数据库提供的排放因子,计算飞机发动机LTO循环大气污染物加权排放因子和航空煤油加权消耗率.2018 年,我国行业运输飞机共 3639 架登记在册,纳入本文排放因子核算的机型数量占比 98.79%.

各污染物加权排放因子计算公式如式 1 所示:

$$\mathrm{EI}_{i,j}=\sum \mathrm{EI}_{i,j,m}N_m/(1000N) \tag{1}$$

式中:$\mathrm{EI}_{i,j}$ 表示 i 类污染物在 j 模式下我国机队的加权排放因子,kg/kg;$\mathrm{EI}_{i,j,m}$ 表示 m 类发动机 i 类污染物在 j 模式下的排放因子,kg/kg;N_m 发动机为 m 的飞机数量;N 为总飞机数量.

加权燃油消耗率计算公式:

$$F_j=\sum F_{j,m}N_m/N \tag{2}$$

式中:F_j 为在 j 模式下我国机队的航空煤油加权消耗率,kg/s;$F_{j,m}$ 表示 m 类发动机在 j 模式下的燃油消耗率,kg/s.

烟度计算公式:

$$\mathrm{SN}_j=\sum \mathrm{SN}_{j,m}N_m/\mathrm{N} \tag{3}$$

式中:SN_j 为在 j 模式下我国机队的加权烟度;$\mathrm{SN}_{j,m}$ 表示 m 类发动机在 j 模式下的烟度,来自 ICAO 发动机排放数据库[22].

(1)HC、NO_x、CO 排放量的计算方法:由公式(1)计算出来的加权排放因子,计算飞机发动机不同工作模式的排放量.

$$E_{i,j}=\mathrm{EI}_{i,j}\cdot F_j\cdot t_j\cdot n\cdot 60\cdot \mathrm{LTO} \tag{4}$$

式中:$E_{i,j}$ 为 i 类污染物在 j 模式下的排放量,kg;t_j 表示 j 模式的工作时间(分别为 0.7, 2.2, 4, 26min);n 代表发动机台数;LTO 为 LTO 循环数量.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　2018 年中国全行业运输飞机数及占比

Table 1　The number and proportion of transport aircraft in China's entire industry in 2018

机型	期末架数	发动机	比例(%)	机型	期末架数	发动机	比例(%)
B737−800	1204	CFM56−7B24	33.09	B787−8	29	GEnx−1B	0.80
A320	839	V2527−A5	23.06	B777F	26	GE90−77B	0.71
A321	332	CFM56−5B3/3	9.12	A321NEO	24	CFM56−5B3/3	0.66
A319	185	CFM56−5B7/P	5.08	B747−400F	13	PW4056	0.36
B737−700	143	CFM56−7B22	3.93	A350−900	13	Trent XWB−84	0.36
A330−300	131	Trent 700	3.60	B737−300F	12	CFM56−3B	0.33
A330−200	106	Trent 700	2.91	EMB−145	9	AE3007A1	0.25
EMB−190	105	AE3007A1	2.89	B747−8	7	GEnx−2B	0.19
B737MAX8	86	LEAP−1B	2.36	A300−600F	6	CF6−80C2A8	0.16
B777−300ER	58	GE90−115BL	1.59	B737−900ER	6	CFM56−7BE	0.16
B787−9	57	GEnx−1B	1.57	A380	5	Trent 900−84	0.14
B737F	56	CFM56−7B22	1.54	B767−300F	5	CF6−80C2A1	0.14
A320NEO	53	PW1100G−JM	1.46	B737−900	5	CFM56−7B27	0.14
B757−200F	42	RB211−535E4	1.15	其他			1.21
CRJ−900	38	CF34−8C5	1.04				

(2)SO_2 排放量的计算方法:SO_2 的排放量一般采用物料衡算的核算方法,计算公式为:

$$E_{SO_2}=\sum_{j=1}^{4}\mathrm{FSC}\cdot\eta\cdot F_j\cdot t_j\cdot n\cdot\mathrm{LTO} \tag{5}$$

式中:E_{SO_2} 为 SO_2 的排放量,kg; FSC 为航空燃料的含硫量,不同批次 FSC 差异较大,无具体数据时一般默认为 0.068%;η为燃烧效率(即 SO_2 产率),本文取 96.7%.

(3)PM 排放量的计算方法:ICAO 发动机数据库中不包含 PM 排放因子,PM 的计算采用一阶近似法(FOA3.0).该方法将飞机 PM 排放分为挥发性含硫组分、挥发性有机组分和非挥发性组分 3 部分[23].

$$E_{\mathrm{PM}}=\left(\mathrm{EI}_{\mathrm{PM}}\cdot F_i\cdot t_i\cdot n/1000\right)\cdot\mathrm{LTO} \tag{6}$$

式中:E_{PM} 为 PM 排放量,kg;$\mathrm{EI}_{\mathrm{PM}}$ 为 PM 的 3 部分组分排放因子总和,g/kg,根据燃油含硫率(0.068%),空燃比[24](起飞、爬升、进近和滑行阶段分别为 115, 76,56.25,6.17),烟度(式 3)等计算[21].

(4)CO_2 排放量的计算方法:由公式(2)计算出来的加权燃油消耗率,计算飞机发动机不同工作模式的碳排放量.

$$E_{\mathrm{CO_2}j}=\mathrm{EI}_{\mathrm{CO_2}}\cdot F_i\cdot t_j\cdot n\cdot 60\cdot\mathrm{LTO} \tag{7}$$

式中:$E_{\mathrm{CO_2}}$ 为 CO_2 在 j 模式下的排放量,kg; $\mathrm{EI}_{\mathrm{CO_2}}$ 表示 CO_2 排放因子,本文取 3.15[25].

2　结果与讨论

2.1　2017~2020 年中国机场 LTO 循环排放清单

如表 2 所示,2017~2019 年,机场 NO_x、CO、HC、SO_2、PM 和 CO_2 排放总量呈增长趋势,2020 年排放总量同比下降 22.39%.其中,2020 年中国民航机场 LTO 循环 NO_x、CO、HC、SO_2、PM 和 CO_2 排放量分别为 10.90, 8.22, 0.96, 0.28、0.06 和 1360.27 万 t.

表 2　中国民航飞机 LTO 循环污染物及碳总排放量及排放总量(万 t/a)

Table 2　Pollutants and CO_2emissions of LTO cycle from China's civil aviation aircraft (10^4t/a)

年份	HC	NO_x	CO	PM	SO_2	CO_2	排放总量
2017	0.78	12.35	9.31	0.06	0.32	1540.6	1563.3
2018	0.84	13.36	10.07	0.07	0.35	1666.8	1691.5
2019	0.88	14.05	10.59	0.07	0.37	1752.8	1778.8
2020	0.69	10.90	8.22	0.06	0.28	1360.27	1380.42

表 3　2020 年污染物及碳排放量同比增长前 10 的机场

Table 3　Top 10airports with year−on−year increase in emissions in 2020

机场	增长比例(%)	排放量占全国比例(%)
甘孜格萨尔	736.5	0.005
凯里黄平	638.6	0.106
北京大兴	532.4	0.736
九寨黄龙	449.7	0.009
重庆巫山	382.6	0.005
乌兰察布集宁	259.0	0.035
扎兰屯成吉思汗	246.4	0.285
松原查干湖	175.0	0.278
巴中恩阳	157.7	0.021
白城长安	120.8	0.009

甘孜格萨尔机场、北京大兴机场、重庆巫山机场、九寨黄龙机场等,2020 年排放量同比增长超过

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

300%,此类排放量大幅增长的机场主要为2020年新通航或者复航的国内支线机场(表3).

2.2 污染物排放量的时间变化

由图1可见,2017~2019年,机场大气污染物及碳排放月分布较为均衡,2 月份占比相对较低,主要原因是 2 月份天数与其他月份比天数较少,飞机起降次数较少.2020 年排放量月分布变化明显,2020 年 2 月,受新冠肺炎疫情影响,飞机起降次数骤降,排放量同比下降 70.54%,3 月之后,疫情逐渐好转,航空运输恢复,机场排放逐月增加,同比下降量逐月减少,10 月份同比下降 1.61%,基本恢复疫情前水平.

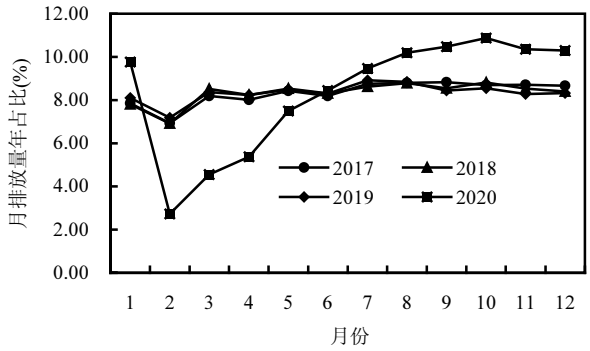


图 1 2017~2020 年机场污染物及碳月排放总量的年占比

Fig.1 Monthly emissions as a percentage of annual emissions of airport in 2017~2020

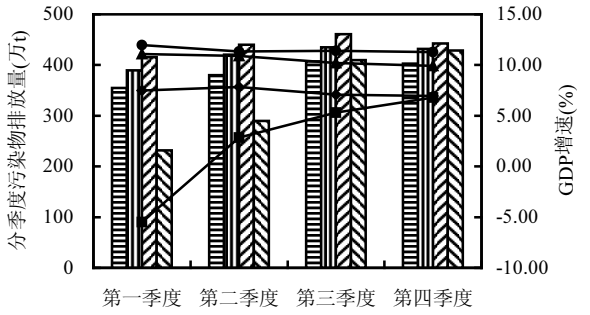
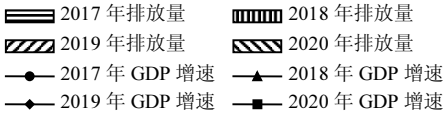


图2 2017~2020年分季度污染物及碳排放量与GDP增速对比

Fig.2 Comparison between quarterly emissions and GDP growth in 2017~2020



如图 2 所示,2017~2019 年,季度 GDP 同比增长超 6%,2020 年第一季度同比下降 5.49%,第四季度恢复正常增长水平,与机场排放的变化规律一致,由此,机场排放量在一定程度上与经济发展水平相关.

2.3 不同飞行模式下排放特征

如图 3 所示,CO、HC、SO_2、CO_2 主要的污染源来自滑行阶段,分别占总排放量的 92.80%、91.56%、41.81%、41.81%.飞机在 LTO 循环的滑行和着陆阶段发动机处于低推动力运行模式,分别约为标准推动力的 7%和 30%,尤其是滑行段发动机燃烧室处于较低温度和压力状态[26-27],燃烧反应不完全,HC 和 CO 排放因子较大[28-29],滑行时间长,产生 HC 和 CO 最大[8,10,12,30-31].滑行阶段 SO_2、CO_2 排放量最大的原因是滑行时间长,燃油消耗多,两种污染排放量与燃油消耗量成正比[31-32].NO_x、PM 的主要污染源来自爬升阶段,分别占总排放量的 47.93%、37.39%.起飞和爬升阶段飞机发动机推动力大,燃油消耗率大,空燃比较小(氧气不足),燃烧室温度高,压力大,产生较多 NO_x 和 PM[12,33-34].

减小 LTO 循环的燃油消耗率、各污染物排放因子和 LTO 循环时间,选择优质燃油(低含量的硫和芳香烃)和低排放发动机,优化 LTO 循环模式,可减少各种污染物排放量.比如,鉴于起飞段和滑行段的污染物排放特征,可以通过采用减小起飞推动力(比如采用发动机组合),减少起飞滑跑阶段的燃油消耗,达到减少 NO_x 和 BC)排放峰值[35-36];中型机场飞机可采用单引擎滑行,减少燃油消耗,可减少污染物排放;选择飞机最佳滑行速度,减少滑行时间,可减少污染物排放[37];选择 50:50 的混合生物燃料(生物质油与航空煤油混合)可减少飞机颗粒物排放 50%~70%[38].

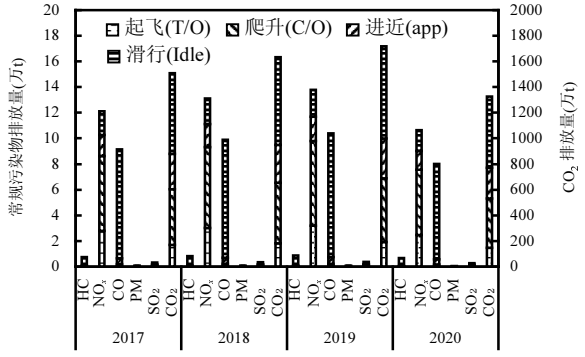


图 3 中国民航机场飞机 LTO 循环污染物及碳排放量

Fig.3 Pollutants and CO_2 emissions of LTO cycle in China's civil aviation airports

2.4 污染物排放量的空间分布

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

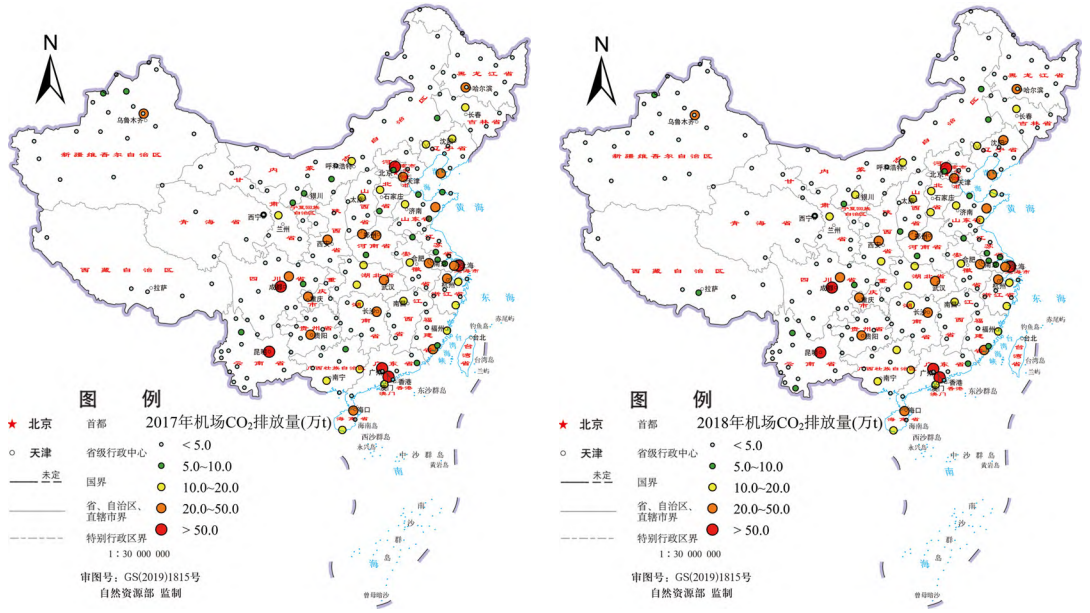
从总体上看,污染物和碳排放存在较大区域差异.我国通用航空企业地区分布按民航各地区管理局所辖区域划分,共有 7 大区域分别是:华东、中南、西南、华北、西北、东北和新疆.以 2018 年为例,各地区年排放总量占全国的比例分别为:26.96%、25.17%、16.28%、14.31%、7.29%、6.42%和 3.56%.排放主要集中在华东地区和中南地区,东北地区和新疆地区占比最小.华东地区经济发达,拥有上海浦东机场、上海虹桥机场等超大规模的机场,而东北部地区和新疆地区 70%以上的机场为 4C 级的支线机场,机场起降架次少,排放量随之减少.从单一机场上看,2017~2020 年机场大气污染物及碳排放主要集中在一些大型机场,机场污染物及碳排放总量与机场所在省市 GDP 相关.以 2018 年为例,排放量最多的 3 个机场为北京首都机场、上海浦东机场和广州白云机场,排放总量占全国排放总量的 5.54%、4.55%和 4.31%(表 4).

随着旅游业与航空运输业的关联性越来越强,机场污染物及碳排放与机场所处地区旅游业兴衰等密切相关.以 CO_2 为例,2018~2020 年 CO_2 排放量同比增长的机场数量占比分别为:73.80%、65.96%、19.67%.如图 4,2018~2020 年同比降低最多的机场为九寨黄龙机场、永州零陵机场和安顺黄果树机场.2018 年九寨黄龙机场所在地的景区九寨沟受灾封闭重建,旅游人数减少,旅游业大幅萎缩,机场排放量同比降低 73.80%. 2019 年,永州零陵机场老化严重,机场跑道提质改造,4 月底后所有航班取消,机场排放量同比降低 76.61%.2020 年疫情暴发安顺黄果树机场所在地安顺市拥有著名旅游景点黄果树大瀑布,游客减少,旅游业受到影响,形势低迷,机场排放量同比降低 79.58%.此外,云南、陕西、重庆等旅游省市的机场排放量较高.由此,除去机场自身原因,旅游业的发展对国内旅游支线机场 CO_2 排放有较大影响.

表 4　2017~2020 年污染物及碳排放总量前 10 机场及其省份 GDP

Table 4　Top 10 airport pollutants and CO_2 emissions and provincial GDP in 2017~2020

排名	2017			2018			2019			2020		
	机场	GDP (亿元)	排放总量 (万 t)	机场	GDP (亿元)	排放总量 (万 t)	机场	GDP (亿元)	排放总量 (万 t)	机场	GDP (亿元)	排放总量 (万 t)
1	北京首都	29883	91.11	北京首都	33106	93.67	北京首都	35445	90.66	广州白云	110761	56.96
2	上海浦东	32925	75.78	上海浦东	36012	77.00	上海浦东	37988	78.08	成都双流	48599	47.56
3	广州白云	91649	70.98	广州白云	99945	72.82	广州白云	107987	74.94	深圳宝安	110761	48.87
4	成都双流	37905	51.42	成都双流	42902	53.72	成都双流	46364	55.97	重庆江北	25003	41.90
5	深圳宝安	91649	51.92	深圳宝安	99945	54.29	深圳宝安	107987	56.47	北京首都	36103	44.47
6	昆明长水	18486	53.43	昆明长水	20881	55.04	昆明长水	23224	54.47	昆明长水	24522	41.86
7	上海虹桥	32925	40.21	西安咸阳	23942	50.41	西安咸阳	25793	52.74	上海虹桥	38701	33.47
8	西安咸阳	21474	48.66	上海虹桥	36012	40.70	上海虹桥	37988	41.63	西安咸阳	26182	39.00
9	重庆江北	20066	44.02	重庆江北	21589	45.88	重庆江北	23606	48.57	上海浦东	38701	49.68
10	杭州萧山	52403	41.35	杭州萧山	58003	43.46	杭州萧山	62462	44.38	杭州萧山	64613	36.21



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

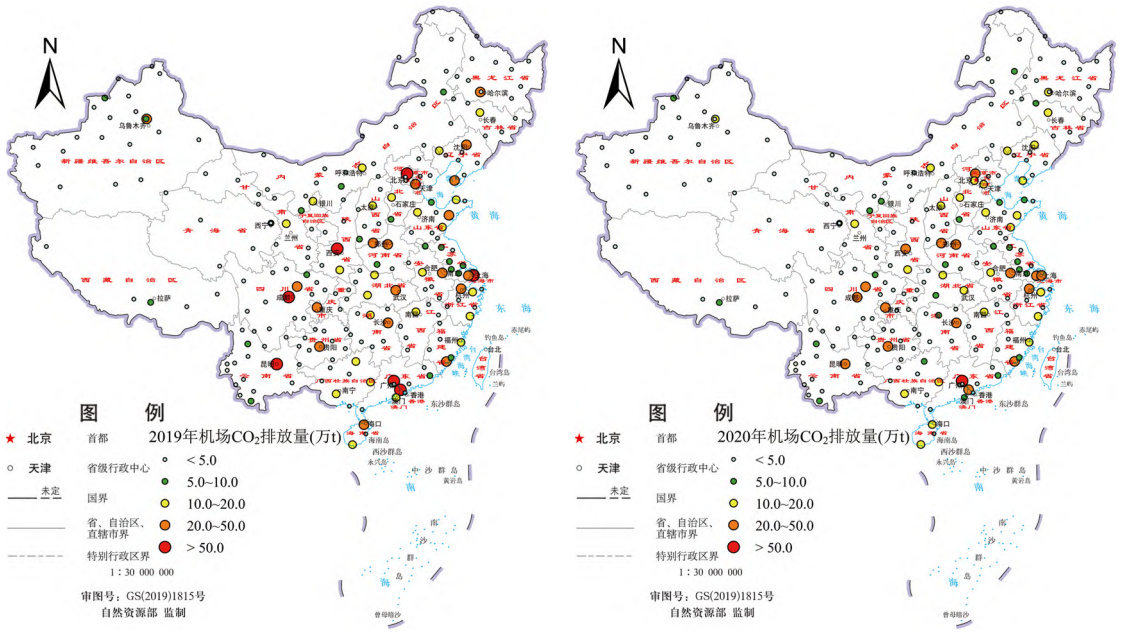


图 4 2017~2020 年中国民航机场 CO_2 排放分布变化

Fig.4 Changes in the distribution of CO_2 emission in China's civil aviation airports in 2017~2020

2.5 疫情对飞机排放量影响

基于本团队 2000~2016 年民用航空机场排放清单的研究成果[17]和本研究涵盖的 2017~2020 根据年中国大陆机场排放清单,对 2000~2020 年我国民用航空机场大气污染物排放总量及其增长率进行分析如图 5 所示.2000~2019 年我国民用航空机场大气污染物(NO_x、CO、HC、SO_2、PM)排放总量逐年增加(年均增长率为 10.59%),到 2020 年的排放总量显著降低.非典期间,2003 年机场排放量同比增长 0.08%,与 2002 年基本持平;2012 年机场排放总量同比增长 10.43%;2015 年机场排放总量同比增长 7.97%;2020 年机场排放总量同比减少 22.39%.

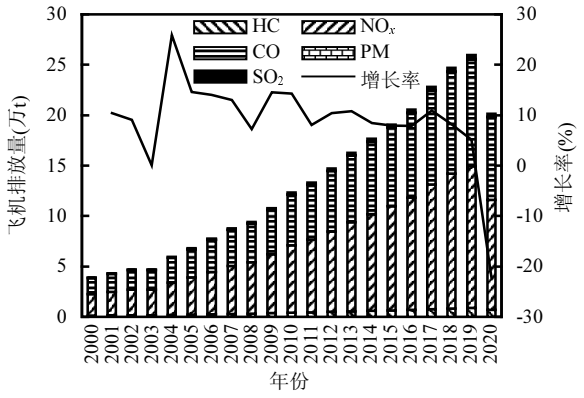


图 5 2000~2020 年中国民航机场飞机大气污染物排放总量及增长率

Fig.5 Total emissions and growth rate of air pollutants in China's civil aviation airports from 2000 to 2020

疫情对机场污染物排放的影响主要与疫情的特点、国家采取的措施相关.非典具有传染性极强、病情发展快速等特点,国家采取严格管控措施,疫情在较短时间内得到控制(北京从 4 月中旬较大规模传染到 6 月 20 日基本结束),非典对民航运输业的影响主要在上半年;中东呼吸症具有病程进展迅速、病死率高等特点,但该疫情未在国内大流行,对民航机场运输影响较小;新冠疫情具有涉及范围广,传染性强,持续时间长等特点,为控制疫情蔓延,国家采取严格的管控措施,控制人口流动,减少感染风险,飞机航班减少,故民航机场大气污染物排放总量下降. 故 21 世纪 3 次全球大流行的疫情,2020 年的新冠疫情对民航机场排放影响最显著.

2.6 不确定性分析

本研究使用蒙特卡罗方法来证实中国民用航空机场排放清单计算的可靠性,根据燃油量和排放因子的概率分布产生随机数,并求解不同参数取值下对应的排放量,获取排放量的分布,以进一步确定其不确定性区间.参照 Settler 等[21]提出的方法,针对 2018 年的 CO_2 排放清单,在蒙特卡罗框架下进行了 1000 次模拟实验,求解了 2018 年机场 CO_2 排放量的 95%置信区间.

对于本研究 2018 年排放清单,结果不确定性主要来源于一下几个方面:第一,排放因子是影响排放清单不确定性的最主要因素,ICAO 发动机数据库推荐

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参数的运行情况与我国民航飞机的实际情况可能存在差异,具有较大的不确定性.实际上发动机排放与飞机发动机类型、实际运行条件以及周围环境密切相关,会随着发动机役龄、维修状态和气候条件发生变化.本文仅选取了我国代表性的飞机发动机机型.飞机型号与发动机型号并非完全一一对应,假设其服从三角形分布(3.148,3.150,3.173)[21].第二, 航空燃油消耗量.本文选用 2018 年的中国机场机队配置数据来计算 2017~2020 年的飞机机型发动机加权航空燃油消耗量,每架飞机每年的起降架次不同,机队配置比例与飞机实际起降比例不完全相等,与实际情况会有偏差.同时,航空燃油的品质也会影响消耗量.假设航空燃油量服从±10%水平的三角形分布.

分析结果表明,本文核算的中国机场排放清单结果是相对稳定的,2018 年机场排放清单总量的95%置信区间为±8.13%.

3　结论

3.1　2017~2019 年机场大气污染物及碳排放量呈现逐年增长的趋势,2020 年排放总量同比降低22.39%,第四季度基本恢复至去年同期水平.CO_2 是最主要的排放物,NO_x 是最主要的污染物.

3.2　HC、CO、SO_2、CO_2 滑行阶段排放量最大,NO_x、PM 爬升阶段排放量最大.基于飞机 LTO 循环数据的精确性及全面性,选取和确定核算模型中有关参数的方法不同,导致 LTO 循环及其不同飞行模式下几种常见污染物排放量的大小顺序存在一定差异性.

3.3　飞机排放在一定程度上可以反映经济发展水平.从全国来看,2020 年 2 月排放量同比下降 70.54%,GDP 同比下降 5.49%.第四季度排放量恢复同期水平,GDP 恢复正常增长率.从地区来看,机场排放量还与所在地 GDP、旅游化兴衰密切相关.

3.4　疫情主要影响国际机场的排放量,对国内支线机场的影响相对较小.与非典和中东呼吸综合征相比,2020 年新冠疫情对机场排放影响更大.

参考文献：

[1] 中国民用航空局.2020 年民航行业发展统计公报 [R]. 北京:中国民用航空局, 2020:1−23.
Civil Aviation Administration of China(CAAC). 2020 civil aviation industry development statistical bulletin [R]. Beijing: CAAC, 2020:1−23.

[2] International Civil Aviation Organization (ICAO). Presentation of 2020 air transport statistical results [R]. ARC. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2020:1−13.

[3] 吴春涛,李　熙,麦贤敏.中国航空碳排放区域差异及演变特征分析 [J]. 规划师, 2015,31(S2):203−208,229.
Wu C T, Li X, Mai X M. The regional difference and evolution characteristics of carbon emission of China's aircraft industry [J]. Planners, 2015,31(S2):203−208,229.

[4] Simonetti I, Maltagliati S, Manfrida G. Air quality impact of a middle size airport within an urban context through EDMS Simulation [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015, 40:144−154.

[5] Kuzu L S. Estimation and dispersion modeling of landing and take−off (LTO) cycle emissions from Atatürk international airport [J]. Air Qual. Atmos. Health, 2018,11:153−161.

[6] Winther M, Kousgaard U, Ellermann T, et al. Emissions of NO_x, particle mass and particle numbers from aircraft main engines APU's and handling equipment at Copenhagen airport [J]. Atmospheric Environment, 2015,100:218−229.

[7] 黄清凤,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.

[8] 周子航,陆成伟,谭钦文,等.成都双流国际机场大气污染物排放清单与时空分布特征 [J]. 中国环境监测, 2018,34(3):75−83.
Zhou Z H, Lu C W, Tan Q W, et al. Emission inventory and spatial and temporal distribution characteristics of air pollutant in Chengdu Shuangliu International Airport [J]. Environmental Monitoring in China, 2018,34(3):75−83.

[9] 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.

[10] 李　杰,赵志奇,刘新罡,等.首都国际机场航空器排放清单的计算分析 [J]. 中国环境科学, 38(12):2018,4469−4475.
Li J, Zhao Z Q, Liu X G, et al. Study an analysis of aircraft emission inventory for Beijing Capital International Airport [J]. China Environmental Science, 2018,38(12):4469−4475.

[11] 伯　鑫,段　钢,李重阳,等.首都国际机场大气污染模拟研究 [J]. 环境工程, 2017,35(3):97−100.
Bo X, Duan G, Li C Y, et al. Air pollution simulation study of Beijing Capital International Airport [J]. Environmental Engineering, 2017, 35(3):97−100.

[12] 王瑞鹏,周　颖,程水源,等.华北地区典型机场清单建立及空气质量影响 [J]. 中国环境科学, 2020,40(4):1468−1476.
Wang R P, Zhou Y, Chen S Y, et al. The establishment of airports emission inventory and the air quality impacts for typical airports in North China [J]. China Environmental Science, 2020,40(4):1468−1476.

[13] 张礼俊,郑君瑜,尹沙沙,等.珠江三角洲非道路移动源排放清单开发 [J]. 环境科学, 2010,31(4):886−891.
Zhang L J, Zheng J Y, Yin S S, et al. Development of non−road mobile

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

source emission inventory for the Pearl River Delta Region [J]. Environmental Science, 2010,31(4):886−891.

[14] 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.

[15] 韩 博,何 真,张 铎,等.粤港澳大湾区飞机 LTO 污染排放因子及排放清单 [J]. 中国环境科学, 2020,40(12):5182−5190.
Han B, He Z, Zhang D, et al. Research on aircraft LTO pollutant emission factors and emission inventory in Guangdong−Hong Kong−Macao Greater Bay Area, China. [J]. China Environmental Science, 2020,40(12):5182−5190.

[16] 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, 2008,30(7):1469−1474.
Xia Q, Zuo H F, Yang J L. Evaluation of LTO cycle emissions from aircraft in China's civil aviation airports [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008,30(7):1469−1474.

[17] Bo X, Xue X, Xu J, et al. Aviation's emissions and contribution to the air quality in China [J]. Atmospheric Environment, 2019,201(3):121−131.

[18] 中国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(实行) [EB/OL]. 2014,http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf.
Ministry of Environment Protection of the People's Republic of China (MEP). Technical guide for the preparation of emission inventory of air pollutants from non road mobile sources [EB/OL]. 2011, http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587960717.pdf.

[19] 中国民用航空局发展计划司.从统计看民航, 2020 [M]. 北京:中国民航出版社, 2020.
Civil Aviation Administration. Civil aviation from the perspective of statistics, 2020 [M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2020.

[20] 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.
Zhu J L, Hu R, Zhang J F, et al. Research on the measurement and evolution characteristics of China's aircraft carbon emissions [J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2020,44(3):558−563.

[21] Stettler M E J, Eastham S, Barrett S R H. Air quality and public health impacts of UK Airports. Part I: Emissions [J]. Atmos. Environ., 2011,45(31):5415−54242016.

[22] International Civil Aviation Organization (ICAO). ICAO aircraft engine emissions databank [EB/OL]. 2021, https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao−aircraft−engine−emissions−databank.

[23] 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, 2009,59(1):91−100.

[24] 李 杰,赵志奇,刘新罡,等.首都国际机场航空器排放清单的计算分析 [J]. 中国环境科学, 2018,38(12):4469−4475.
Li J, Zhao Z Q, Liu X G, et al. Study an analysis of aircraft emission inventory for Beijing Capital International Airport [J]. China Environmental Science, 2018,38(12):4469−4475.

[25] 中国民用航空局.民用航空飞行活动二氧化碳排放监测、报告和核查管理暂行办法 [EB/OL]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202005/P020200509565465444113.pdf.
Civil Aviation Administration of China(CAAC). Interim measures for the administration of monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from civil aviation flight activities [EB/OL]. http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/GFXWJ/202005/P020200509565465444113.pdf.

[26] Sawyer R F, Cernansky N P, Oppenheim A K. Factors controlling pollutant emissions from gas turbine engines [C]//AGARD Conference Proceedings No.125"Atmospheric Pollution by aircraft engines". London, 1973:1−13.

[27] Yelvington P E, Herndon S C, Wormhoudt J C, et al. Chemical speciation of hydrocarbon emissions from a commercial aircraft engine [J]. Journal of Propulsion and Power, 2007,23(5):912−918.

[28] U.S. Environmental Protection Agency(EPA). Procedures for emissions inventory preparation, vol. IV: mobile sources [R]. EPA420−R−92−009. Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, 1992:1−240.

[29] 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.

[30] Li J, Yang H, Liu X, 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.

[31] Aviation Administration Federal. Aviation emissions, impacts & mitigation: a primer [EB/OL]. [01/2015]. https://www.faa.gov/regulations_policies/policy_guidance/envir_policy/media/Primer_Jan2015.pdf.

[32] International Civil Aviation Organization (ICAO). Airport air quality manual (revision based on the first edition) [S]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2006, Doc 9889.

[33] Henry−Lheureux T, Seers P, Ghedhaïffi W, et al. Overview of emissions at Montreal's Pierre Elliott Trudeau International Airport and impact of local weather on related pollutant concentrations [J]. Water, air, and soil pollution, 2021,232(5).

[34] Woody M, Baek B H, Adelman Z, et al. An assessment of aviation's contribution to current and future fine particulate matter in the United States [J]. Atmospheric Environment, 2011,45(20):3424−3433.

[35] Koudis G S, Hu S J, Majumdar A et al. Airport emissions reductions from reduced thrust takeoff operations [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017,52:15−28.

[36] Koudis G S, Hu S J, North R J et al. The impact of aircraft takeoff thrust setting on NO_x emissions [J]. Journal of Air Transport Management, 2017,65:191−197.

[37] Akdeniz H Y. Estimation of aircraft turbofan engine exhaust emissions with environmental and economic aspects at a small−scale airport [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2022, 94(2):176−186.

[38] Moore R H, Thornhill K L, Weinzierl B, et al. Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions [J]. Nature, 2017,543(7645):411−415.

作者简介：尤 倩(1998−),女,河北石家庄人,首都经济贸易大学硕士研究生,主要从事大气环境管理研究.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net