马子昂,张 峥,徐 鑫,等.中国民用航空机场融合排放清单及验证研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(1):101-108.
Ma Z A, Zhang Z, Xu X, et al. Integrated emission inventory and verification of China's civil aviation airports [J]. China Environmental Science, 2026,46(1):101-108.

中国民用航空机场融合排放清单及验证研究

马子昂,张 峥,徐 鑫*,伯 鑫* (北京化工大学化学工程学院,北化中国工业碳中和研究院,北京 100029)

摘要：基于国际民航组织(ICAO)标准排放模型,结合中国民用航空局统计数据,构建了最新的 2023~2024 年中国大陆民用航空机场起降循环(LTO)阶段的大气污染物及碳融合排放清单,并利用 CHAP 数据集验证排放清单准确性.结果表明:2023 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 12.77×10^4, 10.10×10^4, 0.84×10^4, 0.37×10^4, 0.10×10^4, 1767.39×10^4t, 2024 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 13.53×10^4, 10.70×10^4, 0.89×10^4, 0.39×10^4, 0.10×10^4, 1871.89×10^4t, 2024 年 LTO 阶段总排放量较 2023 年增长了 5.91%.2023、2024 年排放时空特征显示,东部经济发达地区(如北京、上海、广州)因航班密集,CO_2 排放量占全国 26%以上,而西部地区受限于支线机场数量,排放量较低.经验模型表明 NO_x 排放与 CHAP 浓度数据相关性较强(r=0.50),验证了清单可靠性.

关键词：民用航空机场；二氧化碳；融合排放清单；起降循环
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)01-0101-08

Integrated emission inventory and verification of China's civil aviation airports. MA Zi-ang, ZHANG Zheng, XU Xin*, BO Xin* (BUCT Institute for Carbon-neutrality of Chinese Industries, College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China). *China Environmental Science*, 2026,46(1)：101~108

Abstract：Based on the International Civil Aviation Organization (ICAO) standard emission model, combined with statistical data from the Civil Aviation Administration of China (CAAC), an updated 2023~2024 air pollutant and carbon fusion emission inventory for the landing and take-off (LTO) cycles of civil aviation airports in mainland China was constructed, and the accuracy of the emission inventory was verified using the CHAP dataset. The results showed that in 2023, NO_x, CO, HC, SO_2, PM, and CO_2 emissions from LTO cycles at Chinese civil aviation airports were 1.277×10^5, 1.010×10^5, 0.084×10^5, 0.037×10^5, 0.010×10^5, and 176.739×10^5t, respectively. In 2024, the corresponding emissions were 1.353×10^5, 1.070×10^5, 0.089×10^5, 0.039×10^5, 0.010×10^5, and 187.189×10^5t, with a total LTO phase emission increase of 5.91% compared to 2023. The spatial and temporal characteristics of emissions in 2023 and 2024 indicated that economically developed eastern regions (such as Beijing, Shanghai, and Guangzhou) had CO_2 emissions accounting for more than 26% of the national total due to dense flight operations, whereas emissions were lower in western regions due to the limited number of regional airports. Empirical models showed a strong correlation between NO_x emissions and CHAP concentration data (r=0.50), validating the reliability of the inventory.

Key words：civil aviation airports；carbon dioxide；integrated emission inventory；landing and take-off (LTO) cycles

近年来,中国航空业飞机起降架次迅速增长[1],污染物排放量显著增加[2-4].据统计,全球每年航空业的碳排放占全球人为碳排放的 2.0%~2.5%,其增长速度超过了公路、铁路和航运[5].为准确评估民航机场污染物及碳排放影响,本研究建立了最新的中国民用航空器机场融合排放清单.

目前一般以两个标准化循环阶段(起降循环和巡航循环)来开展机场清单的编制,该标准化循环由国际民航组织(ICAO)划分.包含起飞、爬升、进近和滑行 4 个阶段的单次起降活动称为一次起降循环(LTO)[6],该阶段对低空大气环境的负面影响较为突出[7],主要原因是单位里程排放量最大.近年来,部分学者在机场大气污染物排放清单编制、排放特征分析及本地化排放因子研究方面主要依据该循环量化计算.例如,孙娇娇等[8]基于数据驱动修正模型建立广州白云机场排放清单.徐鑫等[9]建立了 2021~2022 年中国大陆机场排放清单,并进行了情景设定分析.汪亚男等[10]建立了大兴机场 LTO 大气污染物排放清单,将排放清单分为试运营、新冠疫情和常态化 3 个阶段,评估了不同阶段机场排放大气污染物对周边地区的空气质量影响.尤倩等[11]自下而上编制了 2017~2020 年中国民航机场高分辨率飞机起飞着陆

收稿日期：2025-06-23
基金项目：国家自然科学基金资助项目(72174125)
* 责任作者: 徐 鑫, 博士研究生, xuxin04210202@163.com; 伯 鑫, 教授, boxin@buct. edu.cn

(LTO)循环大气污染物及碳排放清单,在此基础上探究中国民航机场大气污染物和碳排放时空分布特征.可见,目前大多数研究聚焦于研究范围、计算方法和情景设定等方面,以上研究虽能较为准确评估航空排放的影响和未来排放趋势.但对于排放清单的全面性和准确性研究有限,清单方法学验证体系较少;并缺少最新年份的高时空分辨率的机场污染物和 CO_2 融合排放清单及长时间排放变化分析.因此,本研究的创新点为建立最新的中国民航大气污染物及 CO_2 融合排放清单并通过 CHAP 数据集进行清单方法学验证.

针对上述问题,本研究结合机队构成数据[12]和国内机场航班起降架次,构建了排放因子数据库,编制了 2023~2024 年中国大陆地区(不含港澳台)民航机场 LTO 循环阶段的融合排放清单(NO_x、CO、HC、SO_2、PM 及 CO_2),对其时空分布特征进行了系统分析,结合 CHAP 数据集中的污染物浓度构建实证模型,以验证民航部门融合排放清单的准确性.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究收集中国 31 个省份与直辖市自治区的 2023~2024 年运输机场数据(不含港澳台),基于中国民用航空局官方统计数据获取航班起降架次,依据《从统计看民航 2022》[12]确定全国民航机队构成,通过飞机制造商官网及文献调研[13]建立机型-发动机匹配数据库,引用 ICAO 飞机发动机排放数据库[14]获取发动机燃油消耗率、排放因子及烟度等关键参数.

1.2 大气污染物排放量计算方法

飞机的 LTO 循环阶段的排放尾气占机场区域大气污染总排放的 80%[15],故飞机的 LTO 循环阶段为本文研究焦点.鉴于我国民航运营存在全国范围内航空器起降时序数据可获取性受限、多机型混编运行且发动机与机型非完全匹配,故本研究采用 ICAO 标准排放模型构建核算框架.该方法通过整合机型运行频次统计与标准化排放参数,已在国内多个航空环境评估项目中实现有效验证[16].本研究依据各机型占比(表 1),计算了该循环阶段的加权排放因子和航空煤油的加权消耗率.本研究覆盖了我国 4054 架注册航空运输飞机中 96.62%的排放因子核算;参考本团队之前发表的研究成果来计算各污染物的烟度、加权燃油消耗率、加权排放因子及 NO_x、CO、HC、SO_2、PM 及 CO_2 排放量[11].

表 1 中国全行业运输飞机架数及占比

Table 1 Number and proportion of transport aircraft by industry in China

机型	期末架数	发动机	比例(%)	机型	期末架数	发动机	比例(%)
B737-800	1190	CFM56-7B24	29.35	B787-8	7	GEnx-1B	0.17
A320	788	V2527-A5	19.44	B777F	30	GE90-77B	0.74
A321	334	CFM56-5B3/3	8.24	A321NEO	109	CFM56-5B3/3	2.69
A319	174	CFM56-5B7/P	4.29	B747-400F	13	PW4056	0.32
B737-700	143	CFM56-7B22	3.53	A350-900	45	Trent XWB-84	1.11
A330-300	129	Trent 700	3.18	B737-300F	0	CFM56-3B	0.00
A330-200	104	Trent 700	2.57	EMB-145	8	AE3007A1	0.20
EMB-190	85	AE3007A1	2.10	B747-8	7	GEnx-2B	0.17
B737MAX8	97	LEAP-1B	2.39	A300-600F	6	CF6-80C2A8	0.15
B777-300ER	63	GE90-115BL	1.55	B737-900ER	6	CFM56-7BE	0.15
B787-9	83	GEnx-1B	2.05	A380	5	Trent 900-84	0.12
B737F	74	CFM56-7B22	1.83	B767-300F	13	CF6-80C2A1	0.32
A320NEO	341	PW1100G-JM	8.41	B737-900	5	CFM56-7B27	0.12
B757-200F	58	RB211-535E4	1.43	其他	137	-	3.38

污染物排放量核算方法参考本团队先前研究[11], HC、NO_x、CO 排放量计算方法见公式(1),其中 $EI_{i,j}$ 见公式(2),F_j 见公式(3):

$$E_{i,j} = \mathrm{EI}_{i,j} \times F_j \times t_j \times n \times \mathrm{LTO} \quad (1)$$

$$\mathrm{EI}_{i,j} = \sum \frac{\mathrm{EI}_{i,j,m} \times N_m}{1000N} \quad (2)$$

$$F_j = \sum \frac{F_{j,m} \times N_m}{N} \quad (3)$$

式中:$E_{i,j}$ 为 i 类污染物在 j 模式下的排放量,kg;$EI_{i,j}$

为 i 类污染物在 j 模式下的加权排放因子,kg/kg;F_j 为在j模式下航空煤油加权消耗率,kg/s;t_j为j模式的工作时间,min;n 为发动机台数,台;LTO 为 LTO 循环数量,个;$EI_{i,j,m}$为 m 类发动机 i 类污染物在 j 模式下的排放因子,kg/kg;N_m为 m 类发动机数量,台;N 为总飞机数量,架;$F_{j,m}$为 m 类发动机在 j 模式下的燃油消耗率,kg/s.

采用物料衡算法核算 SO_2 排放量,计算方法见公式(4):

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

式中:E_{SO2}为 SO_2的排放量,kg;FSC 为航空燃料的含硫量,%(默认 0.068%);η为燃烧效率,%(本文取 96.7%).

采用一阶近似法(FOA3.0)计算 PM 排放因子,该方法将 PM 分为挥发性含硫组分、挥发性有机组分和非挥发性组分[17]:

$$E_{\mathrm{PM}}=\left(\mathrm{EI}_{\mathrm{PM}}\times F_j\times t_j\times\frac{n}{1000}\right)\times\mathrm{LTO} \tag{5}$$

式中:E_{PM}为 PM 排放总量,kg:EI_{PM}为 PM 的 3 部分组分排放因子总和,g/kg.

CO_2排放量计算由公式(6)所示:

$$E_{\mathrm{CO_2},j}=\mathrm{EI}_{\mathrm{CO_2}}\times F_j\times t_j\times n\times 60\times\mathrm{LTO} \tag{6}$$

式中:$E_{CO2,j}$为 CO_2在 j 模式下的排放量,kg;EI_{CO2}为 CO_2的排放因子,取 3.15[11].

1.3　CHAP 数据集和处理

ChinaHighAirPollutants(CHAP) 数据集 (https://weijing-rs.github.io/publication.html)融合了多光谱卫星遥感技术、地面观测、大气再分析技术、排放清单和模型模拟结果[18],特点是时间序列长、覆盖面广、时空分辨率高.为进行空间分析与可视化,本研究将源自 CHAP 的 NetCDF 格式数据集,通过重采样与投影变换,转换为适用于地理信息系统(GIS)的 GeoTIFF 格式.采用 GIS 提取技术根据机场具体经纬度,提取不同民航机场的空气污染物表面浓度[18].具体提取空间分辨率为 1km×1km 范围内的 NO_2浓度信息,并对所得数据进行统计分析.

1.4　经验模型

本研究主要聚焦于机场典型大气污染物 NO_x[19],通过构建经验模型,系统探讨中国民航机场污染物排放量与大气中污染物浓度之间的关系[20].分析结果揭示了二者之间的相关性特征,所得经验模型如下所示.

$$\ln y=k\ln x+c \tag{7}$$

式中:x 是排放清单中污染物的排放量,单位:t/a;y 是从空气质量数据集中提取的空气污染物的浓度,单位:μg/m^3;k 和 c 是系数.

2　结果与讨论

2.1　中国民航机场 LTO 循环排放清单(2023~2024 年)

机场大气污染物及碳排放如表 2 所示,相比于 2023 年,2024 年中国民航飞机起降架次升高,导致 LTO 循环大气污染物及碳排放总量升高了 5.91%,其中 NO_x、CO、HC、SO_2、和 CO_2 排放量分别升高了 5.95%、5.94%、5.95%、5.41%、5.91%,PM 排放量保持不变.

表 2　2023~2024 年中国民航飞机 LTO 循环大气污染物及碳排放量(10^4t)

Table 2　LTO-cycle air pollutant and carbon emissions from civil aircraft in China (2023~2024) (10^4t)

年份	NO_x	CO	HC	SO_2	PM	CO_2	排放总量
2023	12.77	10.10	0.84	0.37	0.10	1767.39	1791.57
2024	13.53	10.70	0.89	0.39	0.10	1871.89	1897.50

2.2　大气污染物排放量的时间变化

如图 1 所示,2023 年与 2024 年大气污染物及碳排放量的变化趋势相似.整体上在 7~8 月份排放量较高,冬季排放量较低.值得关注的是 2023 年 1 月份月排放量最低,为 6.23%.这主要与《中华人民共和国传染病防治法》甲类传染病防控措施于 2023 年 1 月 8 日正式解除(国家卫健委 2022 年第 7 号公告)有关[21],在此之前,民航运输量仍处于疫情管控期水平,导致当月机场大气污染物排放强度显著低于基准年份.此外,由于 2023 年国庆假期与中秋假期连休(9 月 29 日至 10 月 6 日),而 2024 年国庆假期为 10 月 1 日至 10 月 7 日,节假日期间飞机起降架次存在差异,进而引发两年 9~10 月期间机场排放量的差别.综上,航空出行活动强度是影响机场污染物排放变化的主要因素之一.

此外,本研究结合团队前期编制的排放清单成果,比较分析了 2015~2024 年我国近十年民航大气

污染物及 CO_2 排放总量变化(图 2).结果表明,各污染物及 CO_2 排放量变化趋势相似,与起降架次紧密相关.较于 2018 年,2019 年飞机起降架次升高,但是 PM 排放量降低的原因是排放因子减小.2020 年~2022 年受到新冠疫情的影响,机场大气污染物和 CO_2 排放量随起降架次降低而降低,2022 年新冠病毒 Omicron 变异株广泛传播[22],并且 2022 年民航公司受行业旅客运输量持续下滑导致亏损严重、现金流断裂等影响同样也导致了 2022 年民航大气污染物及 CO_2 排放量减少[23].

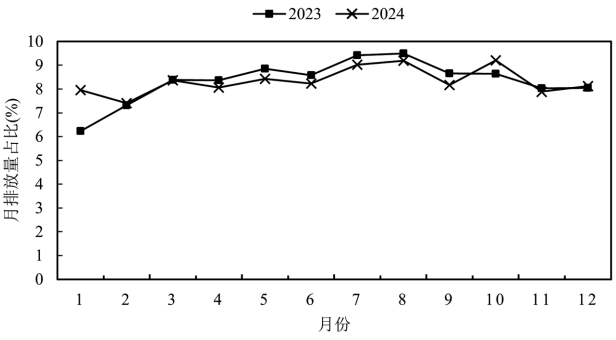


图 1 2023~2024 年机场大气污染物及碳月排放量的年占比

Fig.1 Annual percentage of monthly emissions of air pollutants and carbon at airports (2023~2024)

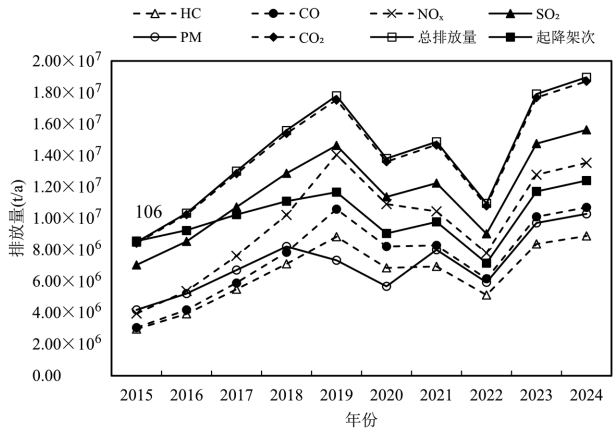


图 2 2015~2024 年机场大气污染物及碳年排放量变化

Fig.2 Annual changes in airport air pollutant and carbon emissions from 2015 to 2024

HC 排放量乘 1000,CO 排放量乘 100,NO_x 排放量乘 100,SO_2 排放量乘 4000,PM 排放量乘 10000

2.3 不同飞行模式下排放特征

结果表明,CO(排放量占总排放量的 92.55%)、HC(排放量占总排放量的 89.76%)是滑行阶段的主要污染物(图 3).由于飞机在 LTO 循环的滑行阶段(7%标准推力)和进近阶段(30%标准推力)是处于特殊工况[24],从而导致燃烧室压力与温度较低、燃油无法完全燃烧,所以 HC、CO 在滑行阶段的排放占比最高[25].而 SO_2、CO_2 的排放量是严格遵循燃油消耗量线性关系,在 LTO 循环四阶段中的滑行阶段时间占比最长,而持续的低速滑行导致燃油累积消耗量显著高于其他阶段[26],所以在滑行阶段这两种污染物的排放占比较高.而 NO_x、PM 的峰值阶段处在爬升阶段,由于飞机在爬升阶段的推动力较大,燃烧室温度骤增,加剧了热力型 NO_x 的生成,同时高温高压的环境加剧了燃油裂解过程,从而导致碳烟颗粒成核速率提升,从而导致 PM 的排放量也相应增多[27-28].

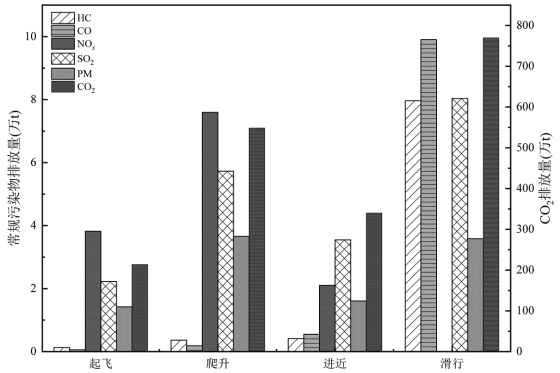


图 3 2024 年中国民航机场飞机 LTO 循环大气污染物及碳排放量

Fig.3 2024 aircraft LTO-cycle emissions at Chinese airports: air pollutants and carbon

HC 排放量乘 10,SO_2 排放量乘 50,PM 排放量乘 100

2.4 大气污染物及碳排放量的空间分布(2023~2024 年)

基于 2023 年和 2024 年民航 CO_2 排放量空间异质性分析,研究表明区域碳排放量存在着较大的差异(图 4).我国东部、南部及中部四川重庆地区的人员密集,区域经济发展情况好,人口流动需求大,运输需求强度高,对应的 CO_2 排放量高;相比于 2023 年,2024 年机场碳排放量无明显区域差异.

我国六大地区 CO_2 排放量结果如图 5 所示.中国六大地区华东地区和中南地区 CO_2 排放量占主导地位,西北和东北地区 CO_2 排放量较低.2023 年华东地区的 CO_2 排放量占总排放量 26.39%,2024 年占 26.61%,均为全年排放量最高;中南地区次之,2023 年排放量占比 25.00%;2024 年占比 24.87%.华东地

区的 GDP 总量居全国之首[29],其 CO_2 排放量与经济社会发达程度形成空间耦合.其中华东地区(以上海浦东机场、上海虹桥机场为例)航班派送频繁[12],导致当地 CO_2 排放量较高.中南地区(包含河南、湖北等人口大省和广东等经济发达大省[29])常住人口和 GDP 总量在六大区中排名第二,航班需求旺盛导致起降架次高位运行,因此 2023 及 2024 年以上两地区 CO_2 排放量处于较高水平.CO_2 低排放区域为我国西北和东北地区,2023 年排放量仅占 11.78%和 6.88%;2024 年占 10.82%和 6.12%.两个地区的经济发展相对滞后[29],4C 级的支线机场占比 70%[11],因此污染的程度也随之减轻.由此可知,区域航空碳排放主要受经济规模、人口密度和航空基础设施水平等要素驱动.

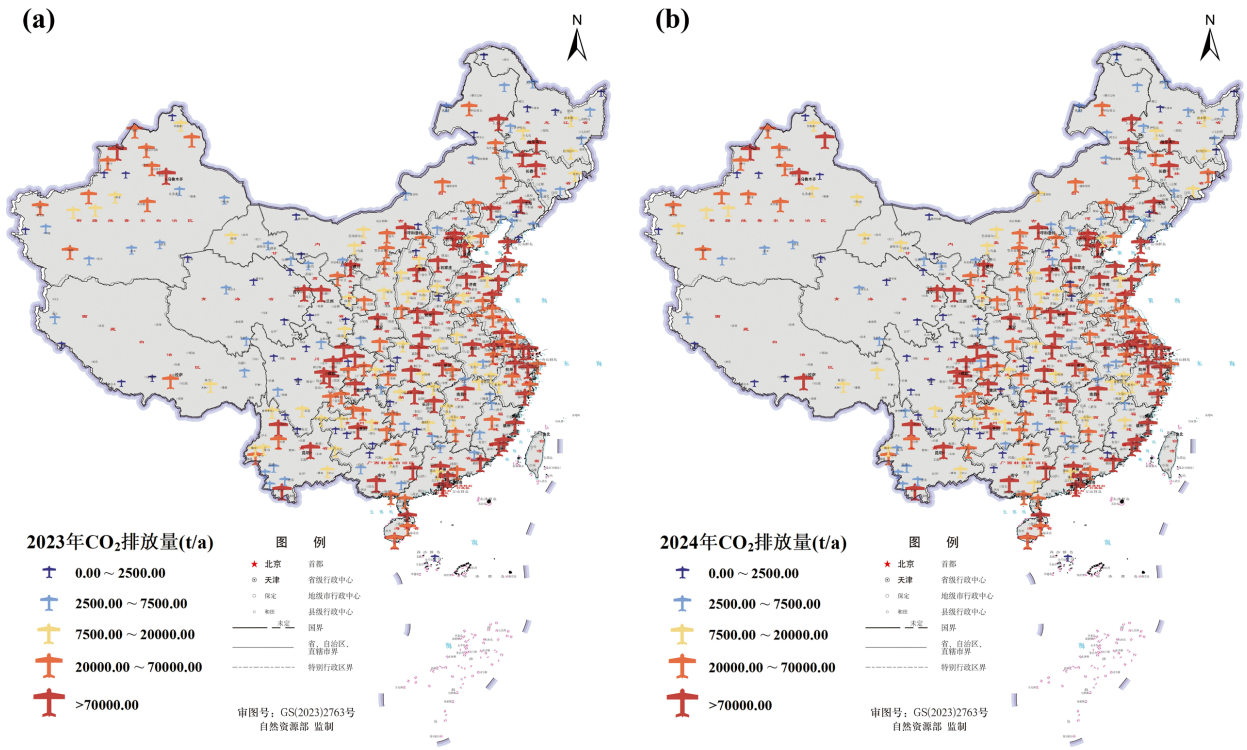


图 4　2023(a)~2024(b)年中国民航机场 CO_2 排放分布变化

Fig.4　Spatiotemporal distribution changes of CO_2 emissions from Chinese civil aviation airports (2023~2024)

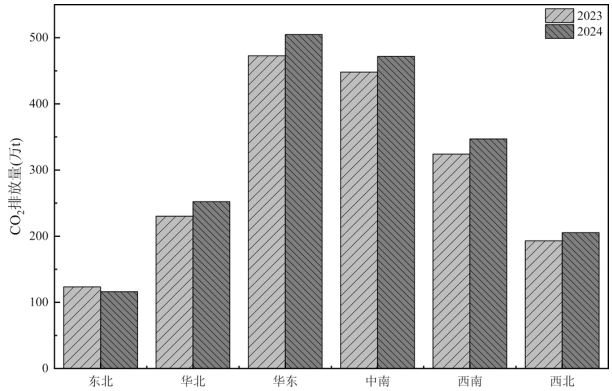


图 5　2023 及 2024 年中国六大地区 CO_2 排放量分布

Fig.5　Distribution of CO_2 emissions across China's six major regions (2023~2024)

民用机场大气污染物排放的空间分布特征表现出明显的区域差异(图 6).本研究选取了 2023 年~2024 年民航机场放量较大的污染物(CO 和 NO_x)开展研究,这些排放倾向于集中在中国的东部、中部和南部地区,东北和西部地区的污染物排放量相对较低.这一规律在 CHAP 数据集污染物浓度分布中也很明显.机场排放高值区与 CHAP 数据集污染物浓度高值区重合.高排放地区通常人口密集,经济总量大,航空运输基础设施发达,机场众多,飞行活动频繁,航空排放负担较重,而东北、新疆等地超过 70%的机场被列为 4C 级支线机场,起降量少,排放量减少[11].此外,An 等[30]研究表明,鉴于机场和航线的密集程度,民航对中国东部和中部地区的影响最大.

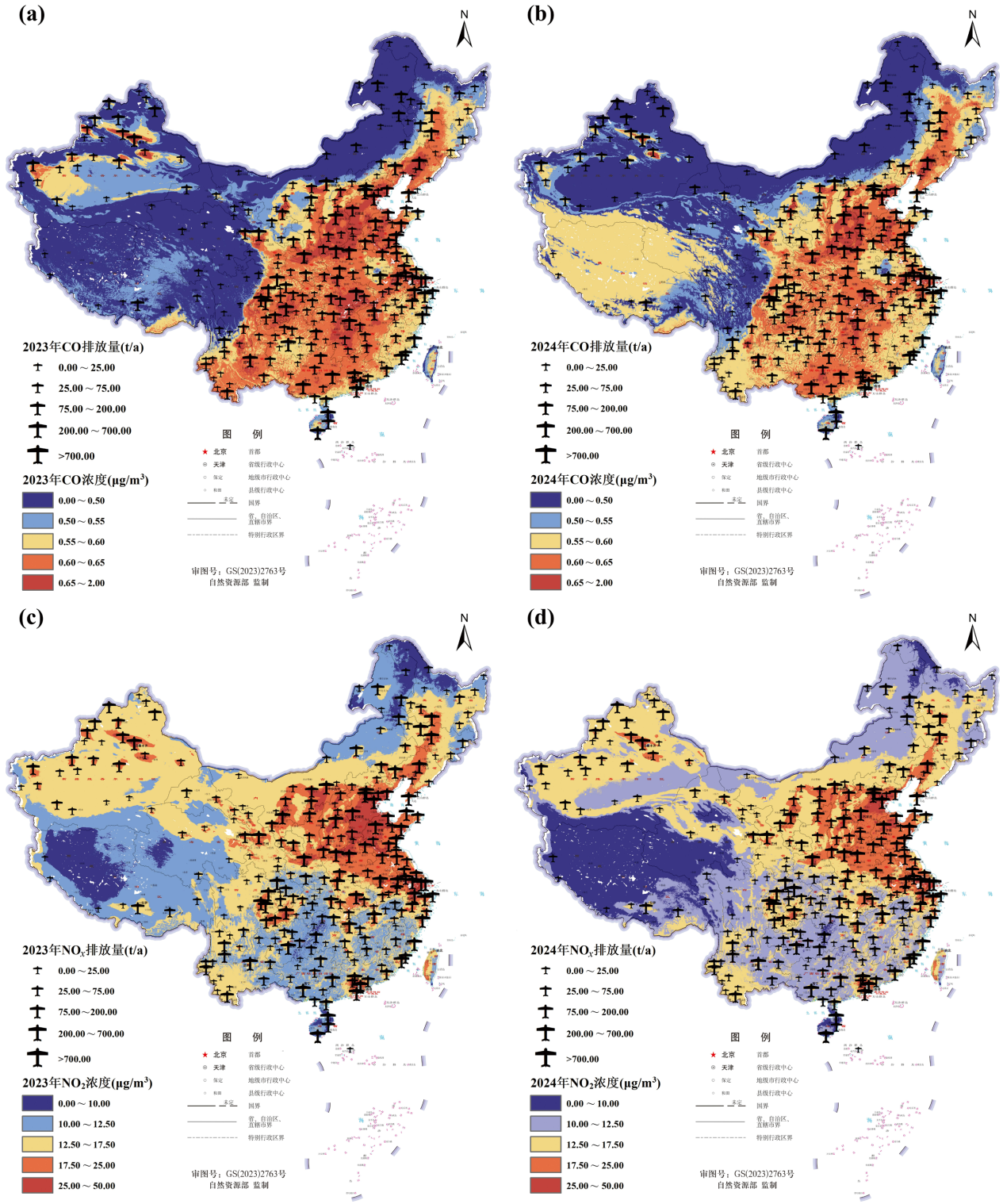


图 6 2023~2024 年中国机场 CO(a)(b)与 NO_x(c)(d)排放量的空间分布特征及其与 CHAP 数据的对比

Fig.6 Spatial distribution of CO (a, b) and NO_x (c, d) emissions from Chinese airports in 2023~2024, with comparative visualization based on CHAP dataset

2.5 经验模型

本研究建立了一个经验模型,以验证 CHAP 污染物浓度数据集与本清单污染物 NO_x 排放量之间的关系.如图 7 所示,NO_x 呈现较好的相关性.较于 2023 年的相关性 r=0.46,2024 年相关性 r=0.50 有略微升高,这种相关性的升高可能由于机场起降架次升高,从而导致污染物排放量升高.Zhang 等[31]认为航空机场的 NO_x 排放量估计占总人为排放量的

4%~10%,此外机场降落和起飞(LTO)阶段 NO_x 排放强度比以货运卡车交通为主的高速公路排放强度高一个数量级[32].伯鑫等[33]建立了 2012 年北京首都机场的排放清单并模拟了从机场到周围环境的空气污染情况.根据污染物扩散的模拟结果,机场的 NO_x 排放对机场周围环境产生了显著影响.因此,NO_2 浓度的波动在 CHAP 数据集中与 NO_x 排放量密切相关.

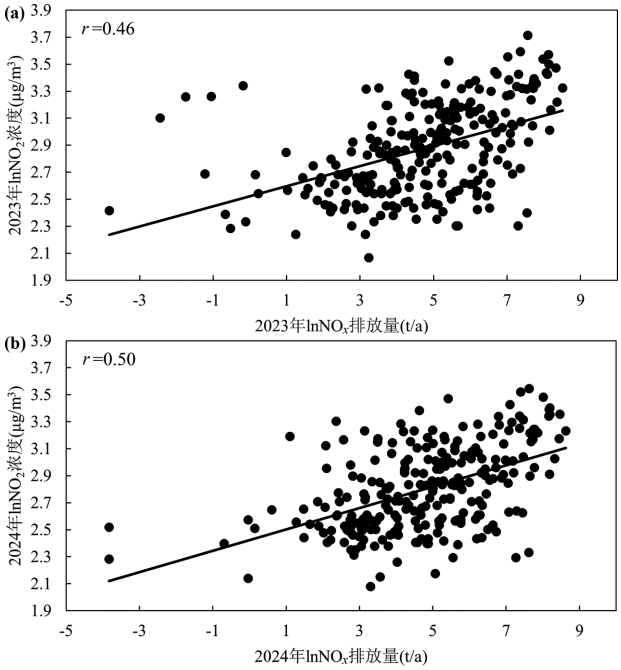


图 7　2023(a)~2024(b)年 CHAP 数据集中的 NO_2 浓度与空气污染排放清单中的 NO_x 排放构建经验模型

Fig.7　Empirical model constructed for NO_2 concentration in CHAP datasets and NO_x emissions in air pollution emission inventories from 2023 (a) to 2024 (b)

表 3　典型城市模型验证结果

Table 3　Typical urban model verification results

机场名称	2023 年		2024 年	
	$lnNO_x$ 排放量	$lnNO_2$ 浓度	$lnNO_x$ 排放量	$lnNO_2$ 浓度
北京/首都国际机场	8.33	3.47	8.46	3.36
上海/虹桥国际机场	7.98	3.54	8.01	3.48
广州/白云国际机场	8.51	3.33	8.63	3.23
深圳/宝安国际机场	8.36	3.22	8.45	3.17
乌鲁木齐/地窝堡国际机场	7.56	3.71	7.63	3.54
拉萨/贡嘎国际机场	6.19	2.56	6.28	2.61
三亚/凤凰国际机场	7.30	2.30	7.27	2.29
西双版纳/嘎洒国际机场	6.35	2.78	6.35	2.68
桂林/两江国际机场	6.18	2.53	6.20	2.43
相关性	0.72		0.75	

注:排放量单位为t/a,浓度单位为μg/m^3.

为论证模型准确性,本研究选取我国典型城市开展 NO_x 排放量及 CHAP 中 NO_2 的浓度进行相关性分析(表 3),结果表明,2023 年和 2024 年的相关性 r 分别为 0.72 和 0.75,证明经验模型的准确性.

2.6　不确定性分析

本研究采用蒙特卡洛方法进行不确定性评估,根据活动水平和排放因子的概率分布产生随机数,计算对应的排放量.重复计算 10000 次.求解得到大气污染物及 CO_2 的不确定性范围(表 4).结果表明,该清单的结果相对稳定.

此外,民用航空的排放估算依赖于国际民用航空组织(ICAO)发动机数据库推荐的发动机排放因子,受到发动机排放、飞机发动机类型、实际操作条件和环境因素影响的操作参数可能与现实情况偏离.除此之外,用于确定各种飞机类型航空燃料消耗的发动机加权方法,可能无法准确反映每架飞机的实际起降比.

表 4　污染物排放量不确定性范围(%)

Table 4　Uncertainty range of pollutant emissions(%)

年份	HC	CO	NO_x	SO_2	PM	CO_2
2023	−6.16~6.14	−6.17~6.26	−9.34~9.37	−4.98~4.98	−4.97~4.96	−4.96~4.95
2024	−6.00~6.02	−5.86~6.16	−9.52~9.47	−4.75~4.83	−4.74~4.81	−4.81~4.83

3　结论

3.1　2024 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 13.53×10^4, 10.70×10^4, 0.89×10^4, 0.39×10^4, 0.10×10^4, 1871.89×10^4t.与 2023 年相比,2024 年中国民航飞机 LTO 循环大气污染物及碳排放总量增加了 5.91%.机场排放量在一定程度上与经济发展水平有关联.随着新冠疫情管控的放开,我国经济形式回暖,机场排放有一定程度上升.

3.2　2023 及 2024 年我国各区域机场 CO_2 排放量呈现显著的空间异质性特征.区域经济结构、人口集聚效应及地理区位要素构成关键驱动因素:东部经济带依托其高度城市化进程、密集的航空运输网络及活跃的产业经济活动,其机场碳排放强度呈现显著高值特征;西部地区受制于地理屏障阻隔、区域经济发展梯度差异及人口分布稀疏等复合因素,机场碳排放强度相对处于低位状态.

参考文献：

[1] 中国民用航空局.2021 年民航行业发展统计公报 [EB/OL]. 2022, https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/minhang/202206/P020220607377281705999.pdf.
Civil Aviation Administration of China. 2021 Civil Aviation Industry Development Statistical Bulletin [EB/OL]. 2022, https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/minhang/202206/P020220607377281705999.pdf.

[2] Yim S H L, Lee G L, Lee I H, et al. Global, regional and local health impacts of civil aviation emissions [J]. Environmental Research Letters, 2015,10(3):034001.

[3] Lund M T, Aamaas B, Berntsen T, et al. Emission metrics for quantifying regional climate impacts of aviation [J]. Earth System Dynamics, 2017,8(3):547–563.

[4] Nowak M, Jasinski R, Frąckowiak A. Adaptation of the LTO test to the local airports infrastructure [J]. Transportation Research Procedia, 2020,51:349–356.

[5] Zhang J R, Jiang Y L, Wang Y J, et al. Increased impact of aviation on air quality and human health in China [J]. Environmental Science & Technology, 2023,57(48):19575–19583.

[6] Galant-Gołębiewska M, Jasiński R, Ginter M, et al. Methodical aspects of the LTO cycle use for environmental impact assessment of air operations based on the Warsaw Chopin airport [J]. Aviation, 2021,25(2):86–91.

[7] Bo X, Xue X D, Xu J, et al. Aviation's emissions and contribution to the air quality in China [J]. Atmospheric Environment, 2019,201:121–131.

[8] 孙娇娇,胡 荣,潘肖然,等.数据驱动的机场航空器污染物排放清单及特征分析 [J]. 中国民航大学学报, 2024,42(5):89-96.
Sun J J, Hu R, Pan X R, et al. Data-driven airport aircraft pollutant emission inventory and characteristics analysis [J]. Journal of Civil Aviation Univrsity of China, 2024,42(5):89-96.

[9] 徐 鑫,尤 倩,张 峥,等.碳达峰情景下中国民用航空机场大气污染物及碳排放清单研究 [J]. 环境科学学报, 2024,44(7):428-437.
Xu X, You Q, Zhang Z, et al. Air pollutants and carbon emission inventory of civil aviation airports in China in the scenario of peak carbon dioxide emissions [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024,44(7):428-437.

[10] 汪亚男,孙乃秀,冯建红,等.北京大兴国际机场排放及其环境影响与预测 [J]. 环境科学学报, 2023,43(4):153-165.
Wang Y N, Sun N X, Feng J H, et al. Emission and environmental impact of Beijing Daxing International Airport [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023,43(4):153-165.

[11] 尤 倩,李洪枚,伯 鑫,等.中国民用航空机场大气污染物及碳排放清单 [J]. 中国环境科学, 2022,42(10):4517-4524.
You Q, Li H M, Bo X, et al. Air pollution and CO_2 emission inventory of Chinese civil aviation airport [J]. China Environmental Science, 2022,42(10):4517-4524.

[12] 中国民用航空局发展计划司.从统计看民航, 2022 [M]. 北京:中国民航出版社, 2024.
Civil Aviation Administration. Civil aviation from the perspective of statistics, 2022 [M]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2024.

[13] 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 aircraft carbon emissions in China [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2020,44(3):558-563.

[14] International Civil Aviation Organization (ICAO).ICAO aircraft engine emissions databank [EB/OL]. 2023, https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank.

[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] 宋利生.基于 ICAO 起降模型的中国机场飞机排污计算研究 [J]. 中国民航大学学报, 2013,31(6):46-48,54.
Song L S. Emission calculation of Chinese airports based on ICAO LTO model [J]. Journal of Civil Aviation Univrsity of China, 2013,31(6):46-48,54.

[17] 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.

[18] Wei J, Li Z Q, Wang J, et al. Ground-level gaseous pollutants (NO_2, SO_2, and CO) in China: daily seamless mapping and spatiotemporal variations [J]. Atmospheric Chemistry Physics, 2023,23(2):1511–1532.

[19] 叶文婧,万莉莉,张天赐.基于环境承载力的机场发展策略研究 [J]. 科技通报, 2023,39(8):100-106.
Ye W Q, Wan L L, Zhang T C. Research on Airport Development Strategy Based on Airport Environmental Carrying Capacity [J]. Bulletin of Science and Technology, 2023,39(8):100-106.

[20] Xu X, You Q, Zhang Z, et al. Insights into civil aviation emissions in China: Analysis of an emission inventory of air pollutants and the China High Air Pollutants (CHAP) dataset [J]. Atmospheric Environment: X, 2024,22:100270.

[21] 国家卫生健康委员会.国家卫生健康委公告 2022 年第 7 号 [EB/OL]. 2022,https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-12/26/content_5733669.htm.
National Health Commission of the People's Republic of China. National Health Commission of the People's Republic of China Announcement No.7 of 2022 [EB/OL]. 2022, https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-12/26/content_5733669.htm.

[22] Karim S S A, Karim Q A. Omicron SARS-CoV-2variant: a new chapter in the COVID-19pandemic [J]. Lancet, 2021,398(10317):2126-2128.

[23] 中国民用航空局. 2022 年民航行业发展统计公报[EB/OL]. 2023,https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/202305/P020230530540257290212.pdf.
Civil Aviation Administration of China. 2022 Civil Aviation Industry Development Statistical Bulletin [EB/OL]. 2023, https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/202305/P020230530540257290212.pdf.

[24] Sawyer R F, Cernansky N P, Oppenheim A K. Factors controlling pollutant emissions from gas turbine engines [A]//AGARD. Atmospheric Pollution by aircraft engines [C]. London: AGARD, 1973:1-13.

[25] Aviation Administration Federal (AAF). Aviation emissions, impacts & mitigation: a primer [EB/OL]. 2015, https://crp.trb.org/acrpwebresource4/aviation-emissions-impacts-mitigation-a-primer.

[26] Henry-Lheureux T, Seers P, Ghedhaïfi 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):173.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 国家统计局.2024 年中国统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2024.
National Bureau of Statistics. China Statistical Yearbook 2024 [M]. Beijing: China Statistics Press, 2024.

[30] An H W, Wang Y, Wang Y X, et al. Civil aviation emissions in China in 2019: characteristics and abatement potential [J]. Journal Environmental Sciences. 2024,151:225–237.

[31] 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.

[32] Zhang J R, Zhang S J, Wang Y J, et al. Air quality improvement via modal shift: assessment of rail-water-port integrated system planning in Shenzhen, China [J]. Science of the Total Environment, 2021,791:148158.

[33] 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 internation airport [J]. Environmental Engineering, 2017,35(3):97-100.

作者简介： 马子昂(2002-),男,河北保定人,北京化工大学硕士研究生,主要从事大气污染物及碳融合排放清单,空气质量数值模拟研究. mzang_m@163.com.