

李晨旭,王紫怡.机场大气污染物排放时空分布测算方法与特征 [J]. 中国环境科学, 2025,45(2):648-656.

Li C X, Wang Z Y. Calculation methods and characteristics of temporal and spatial distribution of airport air pollutant emissions [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):648-656.

## 机场大气污染物排放时空分布测算方法与特征

李晨旭\*,王紫怡 (中国民航大学交通科学与工程学院,天津 300300)

**摘要:** 以天津机场为例,对比了基于模型推荐值与基于机场实际运行数据修正模型参数后的排放测算结果,建立高空间(45m×45m)分辨率的排放清单,识别了排放热点.结果表明:根据推荐值计算机场单日移动源的NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM、HC排放量分别为2320.01,12919.90,199.36,76.83,635.92kg,根据实际情况修正运行参数后,测算移动源产生的NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM、HC排放量分别为1982.65,722.25,157.27,70.48,86.38kg.单日机场的总排放峰值出现在离港高峰08:00-09:00.空间分析表明:NO<sub>x</sub>的排放热点分布于离港跑道端;CO的排放热点主要分布于进离港航班使用的联络滑行道的汇合区;SO<sub>2</sub>、PM的排放热点主要分布于进离港航班较多的停机位;HC的排放热点主要在联络滑行道的汇合区以及进离港航班较多的停机位.NO<sub>x</sub>前20%排放强度主要来源于飞机在起飞状态下的排放;CO前20%排放强度主要来源于飞机在滑行状态下的排放;SO<sub>2</sub>、HC前20%排放强度主要来源于地面支持设备在停机位服务状态下的排放和飞机在滑行状态下的排放;PM前20%排放强度主要来源于地面支持设备在停机位和服务车道产生的排放.

**关键词:** 机场; 移动源; 排放热点; EDMS; LTO

**中图分类号:** X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)02-0648-09

**Calculation methods and characteristics of temporal and spatial distribution of airport air pollutant emissions.** LI Chen-xu\*, WANG Zi-yi (School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China). *China Environmental Science*, 2025,45(2): 648-656

**Abstract:** A case study was conducted at Tianjin Airport by the research team, in which the predicted emissions using default parameters (recommended values) were compared with the results based on inputs that had been adjusted to real-world airport operations. A high spatial resolution (45m×45m) emission inventory was established in the airfield area to identify emission hotspots, and the results indicated that the daily emissions generated by all mobile sources at the airport based on recommended values were 2,320.01kg (NO<sub>x</sub>), 12,919.90kg (CO), 199.36kg (SO<sub>2</sub>), 76.83kg (PM) and 635.92kg (HC). After adjustment of inputs based on real-world airport operations, the emissions results were 1,982.65kg (NO<sub>x</sub>), 722.25kg (CO), 157.27kg (SO<sub>2</sub>), 70.48kg (PM) and 86.38kg (HC). The time between 08:00 to 09:00 (the departure peak at the airport) was identified as the period when the maximum total emissions across time of day occurred. Results of the spatial analysis showed that the emission hotspots were predominantly distributed as follows: for NO<sub>x</sub>, near the end of the departure runway; for CO, the merging area of taxiways (which connect arriving and departing flights); for SO<sub>2</sub> and PM, the aprons with a larger number of arriving and departing flights; and for HC, both the merging area of connecting taxiways and the aprons with a larger number of flights. The top 20% of emissions were primarily from: for NO<sub>x</sub> the take-off stage of aircraft; for CO, taxiing stage of aircraft; for SO<sub>2</sub> and HC, the ground support equipment in the parking position during the service stage and taxiing stage of aircraft; and for PM, ground support equipment at parking lots and service lanes.

**Key words:** airport; mobile source; emission hotspots; EDMS (emissions and dispersion modeling system); LTO (landing and take-off)

随着民航业务蓬勃发展,民航运输的大气污染物排放也逐渐成为公众关注的焦点<sup>[1-2]</sup>.我国民航运输业多年来一直保持高速发展,机场起降(LTO)循环大气污染物和排放量总体呈增长趋势<sup>[3-4]</sup>,预计未来航空业排放的影响愈发显著<sup>[5-7]</sup>.排放显著较高的区域称为排放热点,暴露于短期、高浓度污染物将提高呼吸系统急性发病概率<sup>[8]</sup>.因此深入研究机场各移

动源在不同时空的排放,帮助机场更清晰地明确排放的来源、分布以及排放热点,可以为不同贡献方的减排任务、提出降低暴露风险的措施提供更精准的

收稿日期: 2024-09-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U2133206);中央高校基本科研业务费(KJZ53420210017)

\* 责任作者, 讲师, cxli@cauc.edu.cn

建议.

目前,针对机场移动源排放,国内外相关研究聚焦于估算飞机主发动机在起飞降落阶段和巡航阶段的排放总量<sup>[9]</sup>,仅有少数学者考虑到机场其他移动源排放的影响<sup>[10]</sup>.飞机排放测算模型主要有国际民航组织(ICAO)的简单方法、高级方法和复杂方法、美国的 EPA 方法、欧洲的 EMEP 方法<sup>[11]</sup>,学者多采用 ICAO 的简单方法进行飞机排放测算.例如韩博等<sup>[12]</sup>运用 ICAO 简单方法与 EPA 方法,周子航<sup>[13]</sup>依据机场 LTO 循环数与地面支持设备情况采用 ICAO 简单方法,分别对京津冀机场群、成都双流国际机场展开研究,建立不同类型的排放清单.此外陈文君等<sup>[14]</sup>在此基础上设计针对飞机主发动机和地面支持设备(GSE)半小时尺度计算方法,提高了排放清单的时间分辨率.宏观空间角度上,Zhang 等<sup>[15]</sup>引入真实的航空飞行轨迹信息,开发基于真实飞行轨迹的航空排放模型,探究不同机场间的排放差异及成因.

国内外对于机场污染物排放的研究主要集中在机场群或机场整体,针对机场区域高分辨率时空细分以及排放热点的研究较少.同时研究机场排放分布情况还处于起步阶段,仅有少数学者初步探讨了机场污染物的时空分布特征<sup>[13,16]</sup>.在机场移动源方面,研究多聚焦于飞机主发动机或部分移动源的排放,而非全面覆盖不同类型的移动源.在上述的机场大气污染物研究中,对于机场飞行区污染物高时空分辨率测算方法仍缺乏普适性.因此本文结合运动学模型,提出基于 ICAO 的简单方法的机场高空间分辨率的污染物排放测算方法,以天津滨海国际机场(以下简称天津机场)为例,建立机场高时空分辨率排放清单,确定各区域的排放热点,以及污染物在时间和空间上的分布特征.以期相关部门制定更加科学的空气质量改善方案提供技术支持.同时,为机场管理部门制定航班调度计划和环保措施提供参考依据,从而降低机场区域的空气污染程度.

## 1 研究方法

### 1.1 研究对象

本文选取天津机场作为研究对象,该机场为拥有平行双跑道的民用国际机场.跑道间距 2100m,初期采用隔离平行运行模式,东跑道用于降落,西跑道用于起飞,西跑道长 3600m、宽 60m,等级 4F;东跑道

长 3200m、宽 45m,等级 4E.

### 1.2 机场移动源高分辨率时空分布排放测算模型

机场飞行区移动源包括飞机主发动机、辅助动力装置(APU)以及 GSE.本文针对飞机主发动机排放的污染物,基于 ICAO 的简单方法<sup>[17-18]</sup>建立时空分布排放测算模型.以机场跑道起始点为原点,对机场飞行区进行网格划分,建立以  $L(m)$  为单位长度的平面直角坐标系网格图,将不同污染物的排放量以  $L(m) \times L(m)$  的空间分辨率呈现.飞机主发动机排放具体计算模型如公式(1).

$$E_{x,y,i,j} = t_{x,y,type} \cdot FF_{j,type} \cdot EI_{i,j,type} \cdot Ne_j \quad (1)$$

式中: $E_{x,y,i,j}$  为  $j$  型飞机主发动机在  $(x,y)$  坐标处产生的  $i$  类污染物(HC、CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、PM)排放量,g; $FF_{j,type}$  为  $j$  型飞机在空间  $type$  的燃油消耗率,kg/s; $EI_{i,j,type}$  为  $j$  型飞机产生的  $i$  类污染物在  $type$  的排放指数,g/kg,即消耗 1kg 燃油的污染物排放量; $Ne_j$  为  $j$  型飞机发动机个数; $i$  代表污染物的类型; $j$  代表机型; $type$  包括飞机位于  $type1$ (离港跑道)、 $type2$ (进港跑道)和  $type3$ (滑行道).

从飞机松刹车开始加速到飞机离开地面,在此阶段飞机的加速度随速度增加而逐步衰减<sup>[19]</sup>,飞机起飞时在跑道上的滑行时间计算模型如式(2)~(5)所示.

$$k_j = 1 - \frac{a_{T,j}}{a_{0,j}} \quad (2)$$

$$a_{x,y,j} = a_{0,j} (1 - k_j V_{x-L,y,type1,j} / V_{lof,j}) \quad (3)$$

$$V_{x,y,type1,j} = \sqrt{2 \cdot a_{x,y,type1,j} \cdot L + V_{x-L,y,type1,j}^2}, (L \leq 45) \quad (4)$$

$$t_{x,y,type1,j} = \frac{V_{x,y,type1,j} - V_{x-L,y,type1,j}}{a_{x,y,type1,j}} \quad (5)$$

式中: $a_{0,j}$  为  $j$  型飞机在离港跑道端的初始加速度,  $m/s^2$ ;  $k_j$  为  $j$  型飞机离开地面时的加速度与初始加速度的比值,  $k_j$  越大,说明在加速过程中,加速度的衰减越快;  $a_{T,j}$  为  $j$  型飞机离开地面时的加速度,每次起飞过程基本保持恒定,  $m/s^2$ ;  $V_{lof,j}$  为  $j$  型飞机起飞离地速度,  $m/s$ ;  $V_{x,y,type1,j}$  为  $j$  型飞机在  $(x,y)$  坐标处的速度,  $m/s$ ;  $a_{x,y,type1,j}$  为  $j$  型飞机在离港跑道  $(x,y)$  坐标处的加速度,  $m/s^2$ ;  $L$  为单位长度,  $m$ ;  $t_{x,y,type1,j}$  为  $j$  型飞机在离港跑道  $(x,y)$  坐标处单位面积内的滑行时间(s);  $type1$  代表飞机位于离港跑道.

不放阻伞着陆过程可近似为匀减速直线运动过程<sup>[20]</sup>,飞机着陆时在跑道上的滑行时间计算模

型如公式(6)~(7)所示.

$$V_{x,y,type2,j} = \sqrt{2 \cdot a_{type2,j} \cdot L + V_{x-L,y,type2,j}^2}, (L \leq 45) \quad (6)$$

$$t_{x,y,type2,j} = \frac{V_{x,y,type2,j} - V_{x-L,y,type2,j}}{a_{type2,j}} \quad (7)$$

式中: $V_{x,y,type2,j}$ 为*j*型飞机在进港跑道(x,y)坐标处的速度,m/s; $a_{type2,j}$ 为*j*型飞机在进港跑道(x,y)坐标处的加速度,m/s<sup>2</sup>; $t_{x,y,type2,j}$ 为*j*型飞机在进港跑道(x,y)坐标处单位面积滑行的时间,s;type2代表飞机位于进港跑道.

飞机在滑行道上的滑行时间计算模型如公式(8)所示.机场的滑行道分为主滑行道、快速出口滑行道、普通滑行道等,不同滑行道的滑行速度限制有差异.

$$t_{x,y,type3,j} = \frac{L}{V_{x,y,type3,j}} \quad (8)$$

式中:type3代表飞机位于滑行道.

APU排放量在ICAO建议的运行负荷条件下计算<sup>[17]</sup>,其中APU的运行周期由启动(无负荷)、正常

运转(最大环境控制系统)、大负荷(主发动机启动)三个负荷条件来表示,APU的排放主要产生在停机坪内,具体如公式(9).

$$E_{APU,x,y,i,j} = \sum_k 1000 \cdot T_{load,c} \cdot EI_{APU,i,j,c} / 60 \quad (9)$$

式中: $E_{APU,x,y,i,j}$ 为*j*型飞机APU在(x,y)坐标处产生*i*类污染物的排放量(g); $T_{load,c}$ 为负荷*c*条件下的运行时间(min); $EI_{APU,i,j,c}$ 为*j*型飞机在负荷*c*条件下产生的*i*类污染物的排放指数,kg/h;*i*代表污染物的类型;*j*代表机型;*c*代表APU的负荷条件.

GSE是机场配备的为飞机提供保障服务的设备,其中保障车辆主要包括:电源车、空调车、气源车、升降平台车、行李货物牵引车、传送带车、餐饮车、客梯车、清水车、污水车、垃圾车、飞机牵引车、油泵车、除冰车、摆渡车等.航空排放与扩散模型(EDMS)由美国联邦航空局(FAA)和美国空军合作开发,本文主要利用EDMS模型中的NON-ROAD模型计算GSE的污染物排放量<sup>[21]</sup>,GSE的排放主要产生在停机坪和服务车道上,具体如式(10)所示.

表1 FAA参数推荐值(部分)

Table 1 Recommended values of parameters by the FAA (section)

机型	GSE类型	FUEL	BHP <sub>q</sub> (kW)	LF <sub>q</sub>	U <sub>q,o</sub> (min)	EI <sub>GSE,CO,q</sub> [g/(kW·h)]	EI <sub>GSE,HC,q</sub> [g/(kW·h)]	EI <sub>GSE,PM,q</sub> [g/(kW·h)]
B737-800	空调车	电动	0	0.75	30	0	0	0
	气源车	柴油	317.05	0.9	7	1.26	0.24	4.06
	飞机牵引车	柴油	65.65	0.8	8	1.65	0.27	3.62
	行李货物牵引车	汽油	79.82	0.55	75	466.43	17.04	9.71
	传送带车	汽油	79.82	0.5	48	323.14	13.45	9.71
	客舱服务车	柴油	156.66	0.53	20	0.17	0.17	0.24
	餐饮车	柴油	156.66	0.53	15	0.17	0.17	0.24
	油泵车	柴油	175.31	0.7	12	0.34	0.21	0.78
	污水车	柴油	41.78	0.25	15	0.25	0.20	0.56
	服务车	柴油	175.31	0.2	15	0.21	0.19	0.39
	清水车	电动	0	0.2	12	0	0	0
ERJ190	飞机牵引车	柴油	68.04	0.80	5	1.65	0.27	3.62
	行李货物牵引车	汽油	65.42	0.55	35	466.43	17.04	9.71
	传送带车	汽油	65.42	0.50	30	323.14	13.45	9.71
	餐饮车	柴油	142.64	0.53	10	0.17	0.17	0.24
	油泵车	柴油	142.64	0.25	20	0.20	0.19	0.32
	污水车	柴油	69.15	0.25	15	0.25	0.20	0.56
	清水车	柴油	142.64	0.20	15	0.21	0.19	0.39

$$E_{GSE,x,y,i,q} = BHP_q \cdot LF_q \cdot (U_{q,o} / 60) \cdot EI_{GSE,i,q} \quad (10)$$

式中: $E_{GSE,x,y,i,q}$ 为*q*类型GSE在(x,y)坐标处产生的*i*类污染物排放量,g;BHP<sub>q</sub>是*q*类型GSE发动机的平均额定功率,kW;LF<sub>q</sub>是第*q*类型车辆的负载因子;U<sub>q,o</sub>是第*q*类型车辆在*o*状态下(包括作业状态

和行驶状态)的时长,h;EI<sub>GSE,i,q</sub>是*q*类型GSE产生的*i*类污染物的排放速率,g/(kW·h);*i*代表污染物的类型;*q*代表车辆的类型.FAA提供的推荐值<sup>[21]</sup>如表1所示.

### 1.3 排放测算模型参数修正

飞机主发动机方面,对滑行时间参数进行修正.本文基于天津机场 2023 年 12 月 20 日实际航班数据,结合实际运行规则设计的飞机进离港路径,如图 1 所示.计算各机型进离港滑行时间,修正了 ICAO 简单方法中的运行时间.飞机滑行包括进港滑行和离港滑行,离港时以停机坪为起点,跑道端入口为终点;进港时以跑道出口为起点,停机坪为终点.本文根据天津机场地面运行的基本规则,分别计算各停机位至跑道的滑行时间.根据中国民航局规定,飞机滑行速度最大为 50km/h,据此,本文假定飞机在主滑行道和快速出口滑行道的滑行速度为 50km/h,普通滑行道的滑行速度为 25km/h,皆为匀速行驶,不考虑飞机转弯时的速度变化.天津机场每日按需实施双跑道隔离平行运行模式,即 RWY16R/34L 用于起飞, RWY16L/34R 用于着陆.

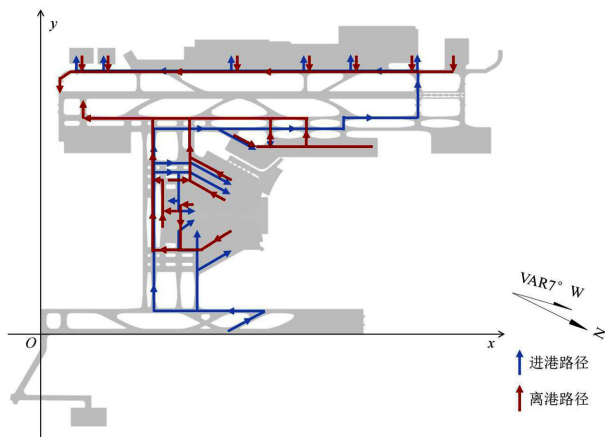


图 1 天津滨海国际机场进离港滑行路径

Fig.1 Arrival and departure taxiways at Tianjin Binhai International Airport

APU 方面,根据天津机场停机位实际配备 APU 替代设施情况,对污染物排放量进行修正.天津机场 101~107、112~118、201~230、409~419、501~504、886~899、901~905 号停机位配有 APU 替代设施(静变电源和飞机地面专用空调).

GSE 方面,根据对机场工作人员的调查访问,对 EDMS 建议的不同机型所需的特种车辆类型进行调整,以国内广泛使用的 B737-800(以下简称 B738)为例,该机型所需的特种车辆包括飞机牵引车、行李货物牵引车、传送带车、客梯车、餐饮车、油泵车、清水车、污水车、垃圾车.不使用气源车和空调车.根据机场实际情况,行李牵引车和传送带车将

EDMS 建议的汽油车调整为柴油车,同时考虑机场 GSE 整体电动化水平,除油泵车外其他特种车辆电动化比例按 20%计算.

## 2 结果与讨论

文章 2.1 节对比了基于模型推荐值与基于机场实际运行数据修正模型参数后的排放测算结果.在 2.2 节、2.3 节、2.4 节是基于参数修正后的排放测算量对机场污染物排放的时空分布特征以及进离港对排放热点分布的影响进行分析.

### 2.1 不同移动源的污染物排放特征分析

天津机场 2023 年 12 月 20 日起降 13 种机型,共 342 架次航班.机型起降分布统计结果如图 2 所示,其中起降占比较大的机型为 B738、A320,占比分别为 50.88%、21.18%,其他机型运行数量占比均低于 10.00%.

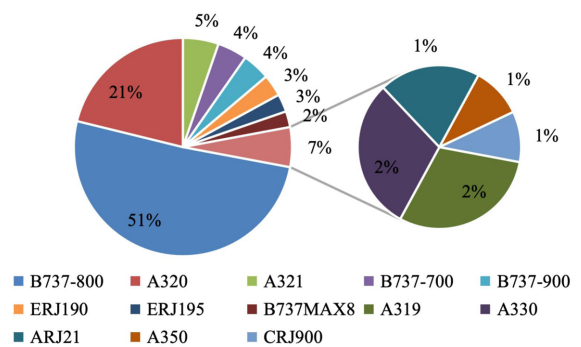


图 2 天津滨海国际机场运行机型分布

Fig.2 Distribution of operational aircraft types at Tianjin Binhai International Airport

如表 2 所示,计算天津机场当日各类移动源的大气污染物排放清单.根据 ICAO 推荐的主发动机、APU 运行数据,以及 EDMS 推荐的 GSE 运行数据计算移动源排放的 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM、HC 的总量分别为 2320.01kg、12919.90kg、199.36kg、76.83kg、635.92kg.根据天津机场实际情况,修正不同移动源污染物排放量,移动源排放的 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM、HC 的总量分别为 1982.65kg、722.25kg、157.27kg、70.48kg、86.38kg.

从不同排放源来看,如图 3 所示,修正前 NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 主要来源于飞机发动机,CO、PM 和 HC 主要来源于 GSE.占比为 14.36%.HC、SO<sub>2</sub> 和 PM 的排放量相对较少,分别为 3.94%、1.23%、0.48%.如图 3(b)

所示,修正后 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub> 以及 HC 主要来源于飞机主发动机的排放.PM 排放量中主发动机占比 43.40%, GSE 占比 56.37%.

从总量上看,参数修正后的主发动机、APU、GSE 的总排放量分别减少了 14.53%、92.49%、97.79%. 其中主发动机排放量的减少是由于飞机滑行实际运行时间小于推荐时间,经计算,飞机进港平均滑行时间为 6.94min,离港平均滑行时间为 5.58min,飞机主发动机的 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM、HC 的排放量分别减少了 3.54%、31.47%、21.11%、8.25%、47.16%.APU 排放量的减少是考虑了机场停机位实际配备了 APU

替代设施的情况.GSE 排放量减少主要由于对 FAA 建议的不同机型所需的特种车辆类型进行了调整,同时考虑了机场 GSE 电动化比例.GSE 排放的 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM、HC 分别减少了 63.82%、99.48%、10.29%、3.40%、96.93%,其中 CO 和 HC 排放量的减少比例最大,主要是由于根据实际情况将行李牵引车和传送带车的汽油车调整为柴油车,柴油车 CO、HC 排放因子显著低于汽油车.其中行李牵引车汽油车 CO、HC 排放因子分别是柴油车的 88.99 倍、63.55 倍,传送带车汽油车 CO、HC 排放因子分别是柴油车的 94.16 倍、52.79 倍<sup>[21]</sup>.

表 2 天津滨海国际机场污染物排放清单

Table 2 Pollutant emission inventory of Tianjin Binhai International Airport

项目	来源类别	NO <sub>x</sub> (kg)	CO (kg)	SO <sub>2</sub> (kg)	PM (kg)	HC (kg)	总量(kg)
运行参数修正前	主发动机	1922.05	953.28	146.87	33.34	129.40	3184.94
	APU	50.90	83.65	6.82	2.36	47.01	190.74
	GSE	347.06	11882.97	45.67	41.13	459.51	12776.34
	总量	2320.01	12919.90	199.36	76.83	635.92	16152.02
运行参数修正后	主发动机	1854.10	653.33	115.86	30.59	68.38	2722.26
	APU	2.98	6.86	0.44	0.16	3.89	14.33
	GSE	125.57	62.06	40.97	39.73	14.11	282.44
	总量	1982.65	722.25	157.27	70.48	86.38	3019.03

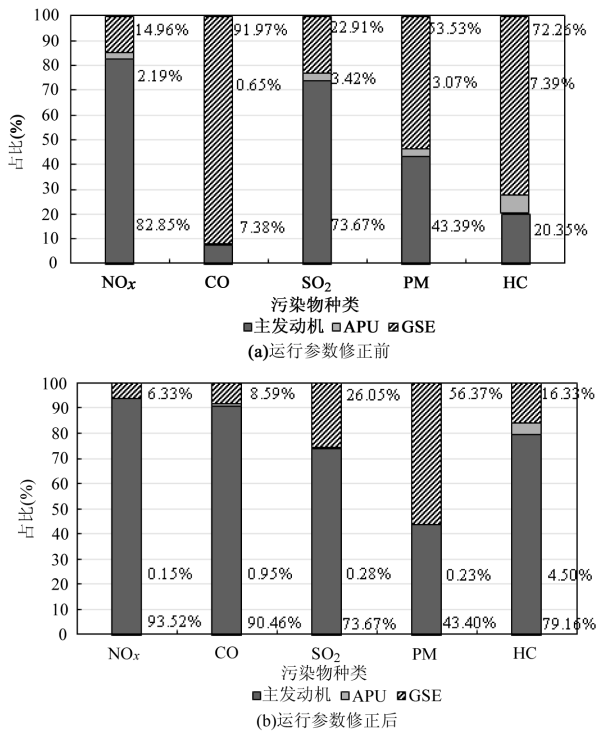


图 3 运行参数修正前后的不同移动源的污染物排放占比  
Fig.3 Pollutant emission ratio of different mobile sources before and after modification of operating parameters

2.2 机场污染物排放的时间分布特征

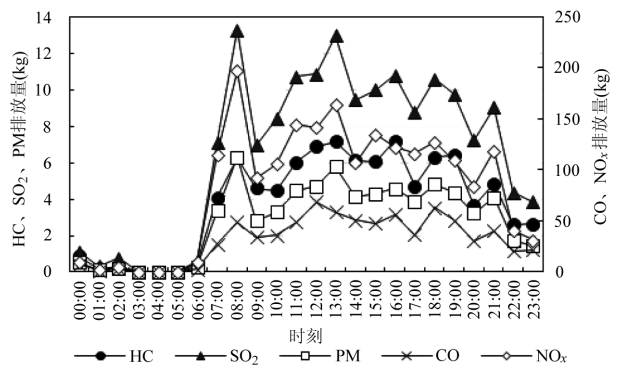


图 4 天津滨海国际机场污染物排放的小时分布  
Fig.4 Hourly distribution of pollutant emissions at Tianjin Binhai International Airport

由图 4、图 5 可知,一天内机场在 08:00~21:00 排放较多,0:00~6:00 排放较少.天津机场计算日当天的起降高峰小时为 13:00~14:00,总排放量峰值出现在离港高峰 08:00~09:00,主要由于飞机在起飞阶段会产生大量 NO<sub>x</sub>.从整体来看,污染物排放量与起降架次趋势较为一致,而当出现起降架次较为接近的情况时,排放量

还与进离港比例、机型差异、滑行路径等因素有关.

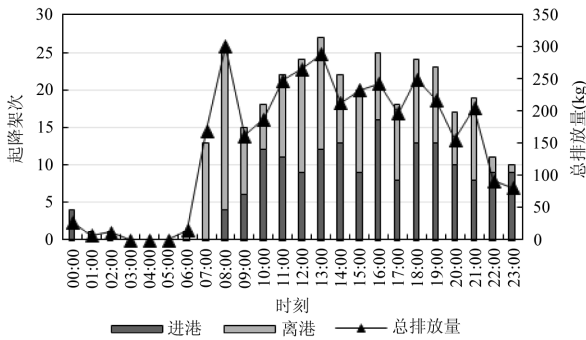


图5 天津滨海国际机场污染物总排放量与起降架次的小时分布

Fig.5 Hourly distribution of total pollutant emissions and take-off and landing flights at Tianjin Binhai International Airport

15:00 时段至 16:00 时段航班数量增多,但 NO<sub>x</sub>

排放量由 135.05kg 增加至 122.22kg,这是由于 15:00 时段的离港航班数量多于 16:00 时段,飞机离港时主发动机会产生大量 NO<sub>x</sub>,同时 15:00 时段离港了一架 A350-941,该机型在起飞、爬升阶段的 NO<sub>x</sub> 排放指数高于常见的窄体机 A320 的排放指数<sup>[18]</sup>.

### 2.3 机场污染物排放的空间分布特征

通过统计天津机场计算日当天进离港航班总量,确定该日的高峰小时为 13:00~14:00.以天津机场跑道 RWY16L/34R 起始点为原点,创建高时间(小时)和空间(45m×45m)分辨率的排放清单,用于识别高峰小时各污染物的排放热点.本研究将单位面积(45m×45m)内排放量位于前 3%的区域定义为排放热点.由于该高峰小时进离港航班的停机位皆配备了 APU 替代设施,因此移动源污染物计算仅包括飞机主发动机和 GSE.

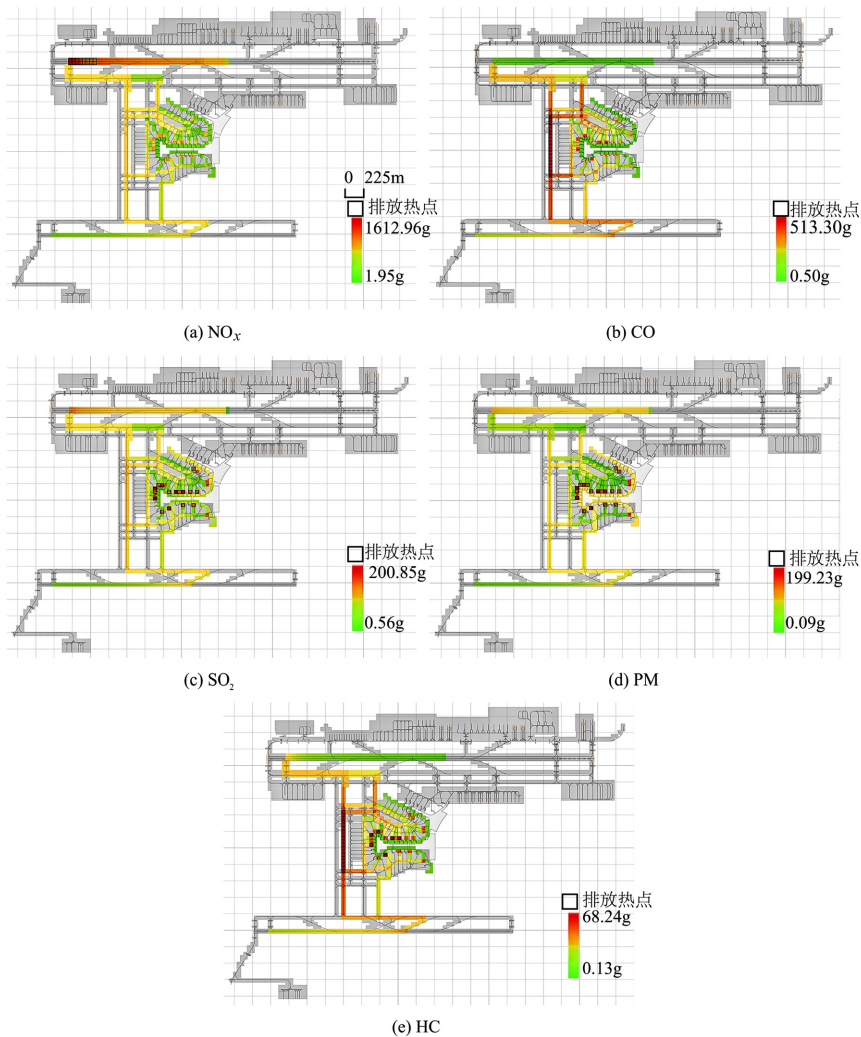


图6 天津滨海国际机场高峰小时各污染物排放热点

Fig.6 Hotspots of pollutant emissions during peak hours at Tianjin Binhai International Airport

如图 6(a)所示,NO<sub>x</sub> 在单位面积内所排放的最大值为 1612.96g,最小值为 1.95g.NO<sub>x</sub> 的排放热点为离港跑道端,排放主要来源于飞机主发动机,起飞阶段 NO<sub>x</sub> 的排放指数远高于滑行阶段的排放指数,同时起飞过程在跑道端的速度最慢,在单位面积内所需的时间最长,因此离港跑道端的 NO<sub>x</sub> 排放量最高.如图 6(b)所示,CO 在单位面积内所排放的最大值为 513.30g,最小值为 0.50g.CO 的排放热点集中在飞机进离港前在联络滑行道的汇合区,这是由于 CO 的排放主要来源于飞机主发动机,而该联络滑行道汇合区相较于其他滑行区域所使用的飞机数量最多.如图 6(c)、图 6(d)所示,SO<sub>2</sub>、PM 的排放热点都主要分布在进离港航班较多的停机位.SO<sub>2</sub>、PM 在单位面积内所排放的最大值分别为 200.85g、199.23g,最小值分别为 0.56g、0.09g.GSE 在停机位内排放的 SO<sub>2</sub>、PM 均高于飞机主发动机起飞、滑行阶段在单位面积内的排放量.以 B738 为例,在停机位单位面积内该机主发动机的 SO<sub>2</sub>、PM 排放量分别为 1.46g、0.09g,而 GSE 的 SO<sub>2</sub>、PM 排放量分别为 88.27g、99.46g.如图 6(e)所示,HC 在单位面积内所排放的最大值为 68.24g,最小值为 0.13g.HC 的排放热点主要在联络滑行道的汇合区以及进离港航班较多的停机位,由于主发动机与 GSE 在单位面积内 HC 排放量差距不显著,因此在经过飞机较多的滑行道和停机位都会成为排放热点.

表 3 天津滨海国际机场污染物平均排放强度

Table 3 The average emission intensity of pollutants at Tianjin Binhai International Airport

排放强度 分区	NO <sub>x</sub> (g)	CO (g)	SO <sub>2</sub> (g)	PM (g)	HC (g)
(0%~3%)	995.01	513.30	122.06	127.83	55.72
(3%~10%)	640.24	360.47	66.27	58.23	43.39
(10%~20%)	452.60	272.80	41.37	31.55	32.16

本研究将单位面积(45m×45m)内的排放量定义为排放强度,前 3%、10%、20%各污染物平均排放强度如表 3 所示.NO<sub>x</sub>、CO 不同区间内平均排放强度差值较大,NO<sub>x</sub> 前 20%排放强度主要来源于飞机在起飞状态下的排放,CO 前 20%排放强度主要来源于飞机在滑行状态下的排放;SO<sub>2</sub>、PM、HC 不同区间内平均排放强度差值较小,SO<sub>2</sub>、HC 前 20%排放强度主要来源于 GSE 在停机位服务状态下的排放

和飞机在滑行状态下的排放,PM 前 20%排放强度主要来源于 GSE 在停机位和服务车道产生的排放.

## 2.4 进离港对排放热点分布的影响

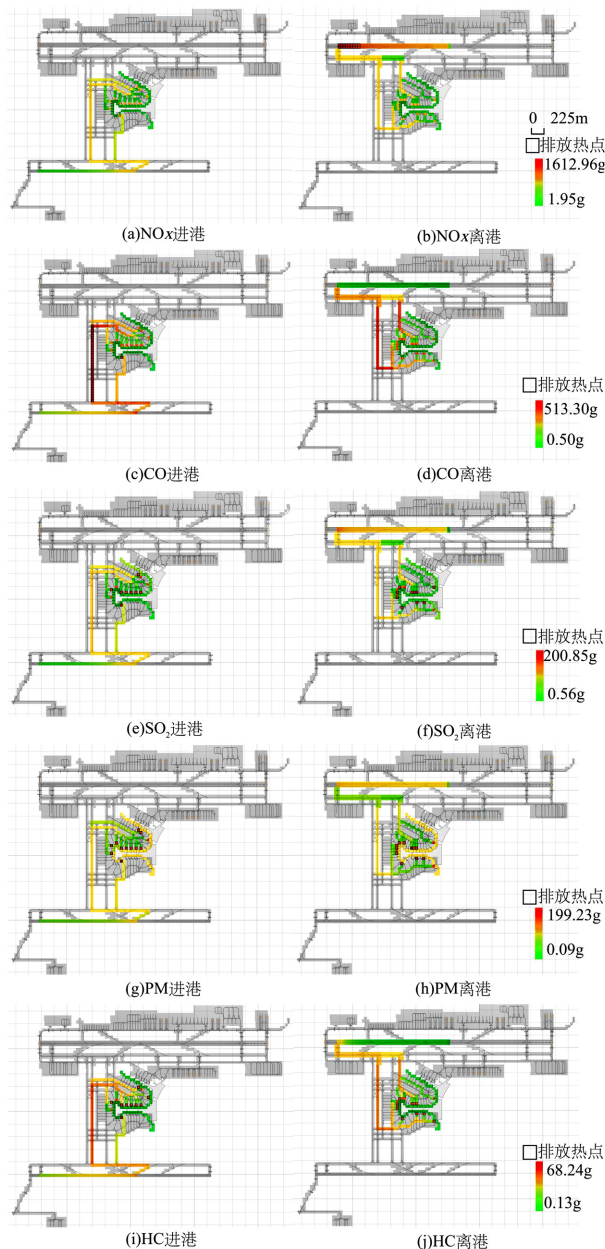


图 7 天津滨海国际机场高峰小时各污染物进离港排放热点  
Fig.7 Hotspot emissions of pollutants arriving and leaving during peak hours at Tianjin Binhai International Airport

进离港航班在高峰小时各污染物排放热点的分布,如图 7 所示.图 7(a)、图 7(b)所示的 NO<sub>x</sub> 的排放热点全部分布于离港航班的起飞跑道端,主要因为相较于滑行阶段,起飞阶段是 NO<sub>x</sub> 排放的主要来源,通常伴随着高推力需求和较高的燃烧温度.如图 7(c)、图 7(d)所示,CO 的排放热点全部分布于进港航

班联络滑行道的汇合区和 A350 所使用的停机位,联络滑行道的汇合区的排放热点主要由于使用该联络滑行道的停机坪区域进港航班数量较多;同时宽体机的停机位也可能会成为 CO 的排放热点,停机位的排放热点主要来源于服务 A350 的 GSE 排放,该机型为宽体客机,GSE 的服务时间较长,产生较多的 CO。如图 7(e)至图 7(j)所示,SO<sub>2</sub>、PM、HC 的排放热点分布受进离港因素影响较小,SO<sub>2</sub>、PM、HC 的排放热点分布在进港航班中占比 44.44%、50.00%、45.00%,均位于停机位,来源于 GSE 的排放。综合来看,NO<sub>x</sub> 排放热点分布受离港航班影响较大,CO、SO<sub>2</sub>、PM、HC 分布进离港差异不明显,主要受到航班数量的影响。

## 2.5 不确定性分析

在本研究的模型测算中,许多影响因素也会导致结果的不确定性。模型中的飞机主发动机和 GSE 排放量测算部分,不确定性主要来源于以下几个方面:第一,发动机的老化因子。不同发动机(包括飞机主发动机和 GSE 的发动机)在不同运行条件下的老化因子未予以考虑。第二,排放因子。本文飞机主发动机的排放因子采用的 EEDB 中的推荐值,而排放因子推荐值主要在海平面静态条件和 7%、30%、85%、100%额定推力设置下测试<sup>[22]</sup>,因此推荐的发动机额定推力可能与飞机实际飞行状态存在差异。第三,GSE 发动机的负载。GSE 的负载采用 FAA 的推荐值,实际中某些 GSE 的负载可能与推荐值不完全相等,例如飞机牵引车的负载主要取决于该飞机实际的起飞重量。模型中的加速度运动计算部分,由于未考虑由管制、天气等因素导致的飞机排队,则滑行阶段的飞机等待时间和滑行速度的不确定性较大。

## 3 结论

3.1 本文提出将 ICAO 排放模型和 EDMS 模型联用的排放物网格化测算方法,实现根据实际运行数据快速测算机场高空间分辨率下的排放量、识别排放热点,为飞行区污染物排放时空分布评估与排放热点分析提供可靠方法。

3.2 根据机场移动源实际运行数据修正 ICAO 排放模型运行参数推荐值,修正后主发动机、APU、GSE 的总排放量相较于修正前分别减少了 14.53%、92.49%、97.79%。

3.3 机场排放热点的分布主要与停机位分配、滑行路径分配、飞机滑跑速度、GSE 类型有关。NO<sub>x</sub> 排放热点分布于在离港跑道端,受离港航班影响较大。SO<sub>2</sub>、PM、HC 的排放热点分布于进离港航班较多的停机位,且 HC 的排放热点也会分布在联络滑行道的汇合区。综合来看,各污染物排放热点多数分布在停机坪,而此区域机场工作人员和旅客聚集多、暴露风险高。

## 参考文献:

- [1] Liu Z, Deng Z, Steven J, et al. Monitoring global carbon emissions in 2021 [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022,3(4):217-219.
- [2] 张田,田勇.中国民航飞机大气污染物和碳排放清单估算 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(10):5614-5623.  
Zhang T, Tian Y. Estimation of both air pollutants and carbon emission inventories from civil aircrafts in China [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(10):5614-5623.
- [3] An H W, Wang Y, Wang Y X, et al. Civil aviation emissions in China in 2019: Characteristics and abatement potential [J]. *Journal of Environmental Sciences*, Volume 151, 2025, Pages 225-237, ISSN 1001-0742.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 韩博,石依琳,纪翔,等.典型通航飞机 PM 与 TVOC 排放特征及排放因子 [J]. *中国环境科学*, 2023,43(4):1550-1557.  
Han B, Shi Y L, Ji X, et al. PM and TVOC emission characteristics and emission factors of typical general aviation aircraft [J]. *China Environmental Science*, 2023,43(4):1550-1557.
- [7] Laís Fajersztajn, et al. Health effects of pollution on the residential population near a Brazilian airport: A perspective based on literature review [J]. *Journal of Transport & Health*, 2019,14(C):100565-100565.
- [8] Wu R S, Zhong L S, Huang X L, et al. Temporal variations in ambient particulate matter reduction associated short-term mortality risks in Guangzhou, China: A time-series analysis (2006-2016) [J]. *Science of the Total Environment*, 2018,645:491-498.
- [9] 李杰,赵志奇,刘新望,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.
- [10] 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.
- Han B, Wang L J, Zhao Y T, et al. Study on localized emission factors and emission inventory of Zhengzhou Xinzheng international airport [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022,42(9):419-429.
- [11] 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.
- Li J, Zhao Z Q, Wang K, et al. Review of methods and progress on aircraft emission inventory studies [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018,41(9):183-191.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陈文君,廖一嘉,周建力,等.机场大气污染物高时间分辨率排放清单计算方法研究 [J]. 中国环境监测, 2022,38(4):217-226.
- Chen W J, Liao Y J, Zhou J L, et al. Study on calculation method of airport air pollution high temporal resolution emission inventory [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022,38(4):217-226.
- [15] 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.
- [16] Liu H J, Tian H Z, et al. Atmospheric emission inventory of multiple pollutants from civil aviation in China: Temporal trend, spatial distribution characteristics and emission features analysis [J]. *Science of The Total Environment*, 2019,648:871-879.
- [17] International Civil Aviation Organization (ICAO). Airport air quality manual (revision based on the second edition) [M]. Montréal: International Civil Aviation Organization, 2006,Doc 9889.
- [18] 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>.
- [19] 魏志强,刘馨泽.飞机起飞过程的加速特性分析与轨迹仿真 [J]. 飞行力学, 2019,37(4):17-20.
- Wei Z Q, Liu X Z. Analysis of the acceleration characteristics and trajectory simulation of aircraft during takeoff [J]. *Flight Dynamics*, 2019,37(4):17-20.
- [20] 林可心,岑国平,李 乐,等.飞机起飞着陆性能仿真与分析 [J]. 空军工程大学学报, 2012,13(4):21-25.
- Lin K X, Cen G P, Li L, et al. Simulation and analysis for airplanes' performance of takeoff and landing [J]. *Journal of Air Force Engineering University*, 2012,13(4):21-25.
- [21] Federal Aviation Administration. Emissions and dispersion modeling system (EDMS) user's manual [R]. Washington, DC: Office of Environment and Energy, 2005.
- [22] 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.

**致谢:** 本研究的现场数据采集工作由天津机场飞行区管理部工作人员协助完成,在此表示感谢。

**作者简介:** 李晨旭(1990-),女,黑龙江牡丹江人,讲师,博士,主要从事绿色民航,交通排放模型,机场运行管理研究.发表论文 10 余篇. cxli@cauc.edu.cn.