马思萌,郑文慧,韩 博,等.东部沿海地区大型机场污染物排放特征及其环境影响评估 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6020-6031.
Ma S M, Zheng W H, Han B, et al. Emission characteristics and environmental impact assessment of a large airport in eastern coastal area [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6020-6031.

东部沿海地区大型机场污染物排放特征及其环境影响评估

马思萌[1,2],郑文慧[2,3],韩 博[1,2*],赵静波[1,2],于 剑[2,4] (1.中国民航大学交通科学与工程学院,天津 300300；2.中国民航大学中国民航环境与可持续发展研究中心,天津 300300；3.中国民航大学空中交通管理学院,天津 300300；4.中国民航管理干部学院,北京 100102)

摘要：基于真实航班飞行轨迹数据,建立青岛胶东机场飞机高分辨率污染物排放清单,同时改进三维非稳态拉格朗日扩散(CALPUFF)模型使其适用于高动态性的飞机移动源,考察污染物模拟结果对飞机排放时空分辨率的敏感性,在此基础上,定量评估机场飞机排放对大气环境的影响.结果表明:胶东机场飞机氮氧化物(NO_x)、二氧化硫(SO_2)和细颗粒物($PM_{2.5}$)排放量与航班起降架次呈现出相似的时间变化特征(03:00~05:00 排放量较低,15:00~17:00 排放量较高),空间分布与机场布局以及进离场航迹紧密相关,排放高值集中于机场飞行区的重要区域(包括跑道、滑行道和停机坪等).飞机排放清单的时空分辨率对污染物浓度贡献模拟结果具有显著影响,且随着空间分辨率的升高,时间分辨率对模拟结果的影响愈发显著;基于 1h 时间分辨率和 100m 空间分辨率的排放清单能有效识别局部排放的短时波动,更好地表征机场飞行活动污染物浓度贡献的精细化分布特征.胶东机场飞机排放对 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 浓度贡献年均值分别为 4.21、0.53 和 0.07 μg/m^3(区域最大值分别为 220.25、33.46 和 4.69μg/m^3),集中于以机场区域为中心,辐射周边 10~15km 范围内;受气象因素和排放的共同影响,三种污染物浓度贡献存在显著的季节性差异,冬季影响范围更广,而夏季则主要集中于机场及其西北区域.

关键词：大型机场；大气污染物；飞机排放；环境影响；青岛胶东
中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6020-12

Emission characteristics and environmental impact assessment of a large airport in eastern coastal area. MA Si-meng[1,2], ZHENG Wen-hui[2,3], HAN Bo[1,2*], ZHAO Jing-bo[1,2], YUJian[2,4] (1.School of Transportation Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China；2.Research Centre for Environment and Sustainable Development of Civil Aviation of China, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China；3.College of Air Traffic Management, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China； 4.Civil Aviation Management Institute of China, Beijing 100102, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6020~6031

Abstract：A high-resolution aircraft emission inventory for Qingdao Jiaodong Airport based on real flight trajectory datawas established.Concurrently, the three-dimensional non-steady-state puff dispersion model (CALPUFF) was improved to accommodate high-dynamic aircraft mobile sources, and the sensitivity of pollutant simulation results to the temporal and spatial resolution of aircraft emissionswas investigated. Building upon this, a quantitative assessment of the environmental impacts of aircraft emissionswasperformed. The results indicated that nitrogen oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO_2), and fine particulate matter ($PM_{2.5}$) emissionsexhibited similar temporal variation characteristics in relation to flight takeoffs and landings, with low emissions observed from 03:00 to 05:00 and high emissions occurring from 15:00 to 17:00. The spatial distribution of emissions was closely related to the airport layout and the approach and departure tracks, with high emissions concentrated in critical areas of the airport flight area, including the runway, taxiway, and apron. The spatiotemporal resolution of the aircraft emission inventory significantlyaffectedthe simulation results of pollutant concentrations, withthe effect of temporal resolution becoming increasingly pronounced at higher spatial resolutions. An emission inventory based on a 1-hourtemporal resolution and a 100-meter spatial resolution effectively captured short-term variations in local emissions and better characterized the fine-scale pollutant concentration distributions associated with airport operations. The annual mean contributions of aircraft emissions to NO_x, SO_2, and $PM_{2.5}$ concentrations at Jiaodong Airport were 4.21, 0.53 and 0.07μg/m^3, respectively, with regional maximum values of 220.25, 33.46 and 4.69μg/m^3. These emissions were concentrated within a radius of 10~15km around the airport. Influenced by both meteorological factors and emissions, significant seasonal variations in the contributions of these three pollutants were observed. The impact was more widespread in winter; in contrast, during summer, it was primarily concentrated around the airport and its northwestern region.

Key words：large airport；air pollutant；aircraft emission；environmental impact；Qingdao Jiaodong
收稿日期：2025-03-26
基金项目：国家自然科学基金资助项目(U2133206,42305192);天津市教委科研计划项目(2024KJ102)
* 责任作者，教授, bhan@cauc.edu.cn

作为全球交通运输系统的重要组成部分,航空运输在经济贸易和全球连通性方面发挥着关键作用.随着经济增长和全球化进程的加快,我国民航运输需求持续增长,航空业发展速度位居世界前列,随之而来的环境问题日益凸显.航空排放是城市空气污染的重要来源之一[1],尤其是机场区域飞机发动机的污染排放.由于其排放高度通常位于大气边界层以下,且具有集中性和局部性的特点,对城市空气质量和人体健康造成了更为突出的负面影响,逐渐成为备受关注的热点问题[2-3].

精准定量与识别机场区域飞行活动污染物排放量及其时空分布属性是科学评估其环境效应的重要环节.国内外学者在飞机排放计算方面已经开展了大量的研究,研究中应用较为广泛的排放估计方法包括国际民航组织(ICAO)建立的飞机起降循环(LTO)基准排放模型和一阶近似方法(FOA)[4-6],以及国内外学者改进的基于航班运行数据的排放计算方法[7-10]等.然而,目前相关研究多局限于排放量的计算方面,对污染物的时空特征分析并不全面,阻碍了对其环境影响的评估[11-12].在机场飞机排放的环境影响评估方面,国内外学者针对民航飞机排放对机场周边污染物浓度贡献展开了不同程度的研究,通常依赖于系统专业的方法工具[13-14].例如,稳态烟羽模型(AERMOD)[15]、社区多尺度空气质量模型(CMAQ)[16]、三维高斯模型(ADMS)[17]、带扩展的综合空气质量模型(CAMx)[18]等已被广泛应用于模拟机场区域污染物的传输扩散,探究机场飞机排放的环境影响范围和程度.除此之外,物理扩散模型和监测手段也常被用于机场污染物扩散模拟[19-21].然而,这些研究大多使用特定尺度空气质量模型,即使针对相同的研究区域,由于不同的模型及模型设置,模拟结果差异往往较大.例如,Bo 等[18]利用 CAMx 模型在 36km 空间分辨率下估算的全国机场 NO_x 排放的环境贡献为 0.22μg/m^3,与汪亚男等[22]利用 ADMS 模型在 0.5km 空间分辨率下估算的浓度贡献值有很大差异(北京大兴国际机场飞机排放最大贡献浓度为 82.1μg/m^3).由此可见,环境影响评估结果的准确性和适用性尚未得到清晰讨论[23].

针对上述问题,本文以青岛胶东国际机场(以下简称胶东机场)为例,基于 2023 年 1 月和 7 月机场真实航班飞行轨迹数据(ADS-B),构建胶东机场飞行活动高分辨率污染物排放清单;改进 CALPUFF 模型仅适用于固定点源的限制,利用改进后的模型模拟不同时空分辨率对污染物扩散结果的影响,识别关键时空尺度阈值,并确定适宜飞机排放环境影响评估的模型配置;在此基础上,定量评估机场区域飞行活动污染物排放对机场及周边地区的污染物(NO_x, SO_2, $PM_{2.5}$)年均浓度贡献及其时空差异性,以期为区域大气环境管控提供数据及技术支持.

1　材料与方法

1.1　研究区域与对象

胶东机场是我国东部沿海重要交通枢纽,其运输能力不仅辐射青岛及山东半岛,还对华东地区乃至东北亚区域产生深远影响[24].作为面向日韩的门户机场,胶东机场充分发挥东北亚几何中心优势,2024 年国内外客运航线总数达 228 条,通过密集的国际航线网络连接全球主要城市.同时机场也面临运输承载能力和环境承载能力的双重考验.探究机场区域飞机污染物排放特征及其对城市空气质量的影响效应,是科学制定区域空气质量改善策略的重要理论基础和实证依据,有助于推动航空运输业的绿色可持续发展[25].

胶东机场位于中国山东省青岛市,是省内唯一一座 4F 级国际机场,是开放型航线网络布局的重要枢纽,起到贯通南北,连接世界的关键作用.胶东机场距离青岛市中心约 39km,能够充分辐射山东甚至整个华东地区.机场有两条独立运行的长 3600m 远距跑道,2023 年机场旅客吞吐量 2142.07 万人次,货邮吞吐量 2.6×10^{5}t,飞机起降架次 17.08 万架次,是我国中东部地区的重要干线机场[26].本文以胶东机场的民航飞机为研究对象,选择胶东机场稳定通航后的 2023 年冬季(1 月)和夏季(7 月)为研究时段,研究的大气污染物包括 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$.

1.2　研究方法

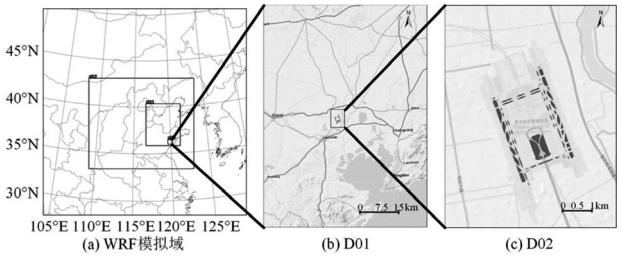
1.2.1　空气质量模拟　选用中尺度气象模型(WRF)和 CALPUFF 模型进行空气质量模拟,其中 WRF 的模拟结果为 CALPUFF 模型提供气象场,模型参数设置如表 1[27].CALPUFF 模型是中国生态环境部推荐的大气环境影响评价的模型之一[28],主要由诊断风场模型(CALMET)、CALPUFF 和后

处理模块(CALPOST)3 个部分组成.研究采用 Lambert 投影坐标系,X和Y方向中心坐标为 N39.5°, E116.5°,两条真纬度分别为 N30°和 N60°.WRF 和 CALPUFF 模型分别采用四层和两层网格嵌套,WRF 模型最内层覆盖区域与 CALPUFF 模型的最外层覆盖区域基本一致,只是四个边界各多 3 个网格,如图 1 所示. CALPUFF 模拟区域以胶东机场为中心,第一层网格主要覆盖青岛市多个行政区的部分区域,网格数为 74×100,网格分辨率为 1km;第二层网格主要覆盖了胶东机场两条跑道及附近区域网格数为 62×80 个网格,网格分辨率为 100m.模拟时段为 2023 年 1 月和 7 月作为冬季和夏季的代表月份.

表 1 模型参数设置

Table 1 Model parameter setting

WRF 模型	参数设置
长/短波辐射方案	RRTM and Dudhia Schemes
地面层方案	Monin-Obukhov Similarity Theory
边界层方案	Yonsei University Scheme
积云参数化方案	Kain-Fritsch Schemes
微物理过程方案	Thompson Schemes
CALPUFF 模型	**参数设置**
化学机制	Computed internally(MESOPUFF Ⅱ Scheme)
气象数据	WRF-CALMET
排放数据	PTEMARB.DAT
地形数据	SRTM-3



(a) WRF模拟域 (b) D01 (c) D02

图 1 WRF-CALPUFF 模型的模拟区域

Fig.1 Simulation area of WRF-CALPUFF model

飞机的起降过程是动态的,其位置、时刻在不断变化,其污染物排放也随飞行速度、发动机负载等变化,而传统的 CALPUFF 模型通常应用于固定点源.为更精准的模拟污染物在大气环境中的扩散过程,该研究对 CALPUFF 模型进行改进以使其适用于高动态性的飞机源的情况.具体而言,将飞机连续的航迹离散化为一系列具有时间意义的空间点,表示飞机在不同时刻的空间位置,用于近似飞机的进离场航迹.基于微分理论,近似认为连续离散点之间的微分时段内,飞机的飞行工况各污染物排放是恒定的,由此创建不均匀的点源排放文件(PTEMARB.DAT)以模拟高动态飞机源排放.利用 CALPUFF 模型模拟微分时段内的烟团排放和扩散,并叠加不同地理坐标点在不同时刻的扩散烟羽,获得飞机飞行中大气污染物扩散的基本规律.

1.2.2 机场飞行活动 高分辨率排放清单的构建基于 ICAO 发动机排放数据库,结合 ADS-B 机场真实航班飞行信息(位置、飞行高度、实时速度、俯仰角度等),计算三种污染物(NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$)的瞬时排放量,计算公式如式(1)所示[29].

$$E = \Sigma F_{ij} \cdot N \cdot T_i \cdot \mathrm{EI}_{ijp} \quad (1)$$

式中:F_{ij} 是记录 i 中飞机 j 的瞬时燃油消耗率,kg/s;N 是发动机个数;T_i 是相邻数据记录的间隔时间,s; 是记录 i 中飞机 j 污染物 p 的瞬时排放指数,与实际温度,气压,湿度有关.NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 的瞬时排放因子如式(2)~(3):

$$\mathrm{EI}_{SO_2}=\mathrm{FSC}\cdot\eta\times10^3 \quad (2)$$

$$\mathrm{EI}_{PM_{2.5}} = \mathrm{EI}_{HC}\cdot\delta\times10^{-3} + \varepsilon\cdot\mathrm{FSC}\times3\times10^3 + \mathrm{SN}^{1.234}\times (0.776\times\mathrm{AFR}+0.877)\times0.694\times10^4 \quad (3)$$

式中:FSC 是燃油含硫量(0.068%);η是燃烧效率(0.967)[30];δ为发动机挥发性有机组分与 HC 组分的排放指数比值,mg/g;EI_{HC} 为发动机 HC 排放指数,g/kg;ε是燃油转化效率(0.033)[31];SN 是颗粒物排放烟度;AFR 是发动机空燃比.

采用 1km×1km、500m×500m 和 100m×100m 的空间分辨率分别对胶东机场所在区域进行水平网格划分,并使用 8 个垂直层对 3000m 以下的空间进行垂直划分.基于 GIS 技术将起降航线排放量分配在 3-D 网格中,对不同网格内的污染物排放量进行汇总计算,获取胶东机场飞行活动的网格化多维排放清单.结合网格排放的汇总结果,构建机场区域飞行活动污染物 0.5h、1h 和 24h 分辨率的 3-D 排放清单.

1.2.3 敏感性试验设置 为验证 WRF-CALPUFF 模型在航空源扩散模拟中的适用性和可行性,该研究设置了多组时空敏感性试验,如表 2.其中 A3、A4 和 A5 差值代表空间分辨率的影响,A1 和 A2、A3 和 A5 以及 A6 和 A7 差值代表时间分辨率的影响.

通过改变模拟区域内飞机排放清单的空间分辨率和时间分辨率,评估 WRF-CALPUFF 模型在不同时空尺度下的模拟性能,改进模型参数以进行更加准确可靠的机场空气质量模拟.由于不同月份的排放清单对空气质量模型的性能影响不大,后续敏感性试验分析以 2023 年 1 月为例.

表 2　敏感性试验设置

Table 2　Sensitivity experiment setup

序号	名称	试验设置
A1	1km-24h	1km 空间分辨率和 24h 时间分辨率排放
A2	100m-24h	100m 空间分辨率和 24h 时间分辨率排放
A3	1km-1h	1km 空间分辨率和 1h 时间分辨率排放
A4	500m-1h	500m 空间分辨率和 1h 时间分辨率排放
A5	100m-1h	100m 空间分辨率和 1h 时间分辨率排放
A6	1km-0.5h	1km 空间分辨率和 0.5h 时间分辨率排放
A7	100m-0.5h	100m 空间分辨率和 0.5h 时间分辨率排放

2　结果与讨论

2.1　机场排放时空特征

2023 年,胶东机场飞行活动 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 月均排放量分别为 164.15、8.51 和 1.23t,其中 NO_x 是飞机运行过程排放的主要污染物.机场飞机排放具有明显的时空异质性,且不同污染物的时空分布特征相似.

从时间维度来看,三种污染物的排放量与航班起降架次呈现出相似的时间变化特征,如图 2 所示.在飞机起降架次较少的 03:00~05:00 时段内,三种污染物排放量最低.相反,在 15:00~17:00 的航班高峰时段,NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 排放量达到高值,分别为排放最低时段的 13.25、12.94 和 13.34 倍,主要由于该时段飞机频繁起降和地面滑行增加了燃油消耗和污染物排放量.

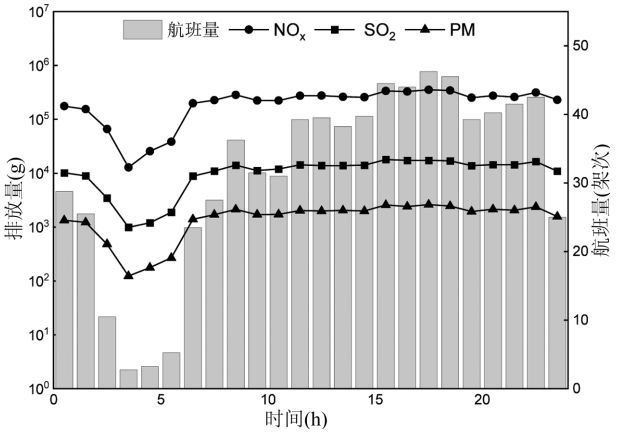
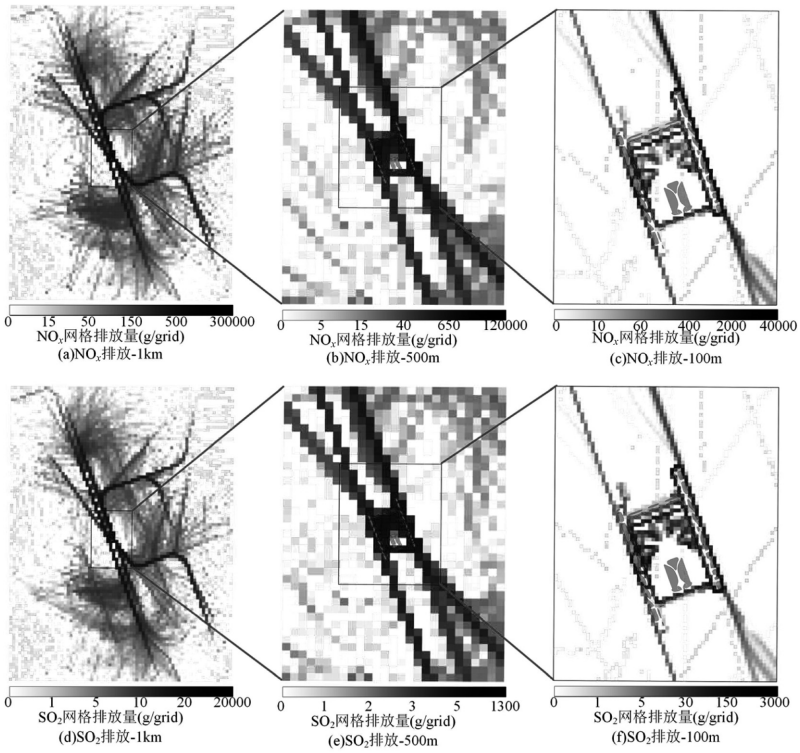


图 2　胶东机场飞机排放与航班量的小时变化

Fig.2　Hourly variation of aircraft emissions and flight volume at TAO



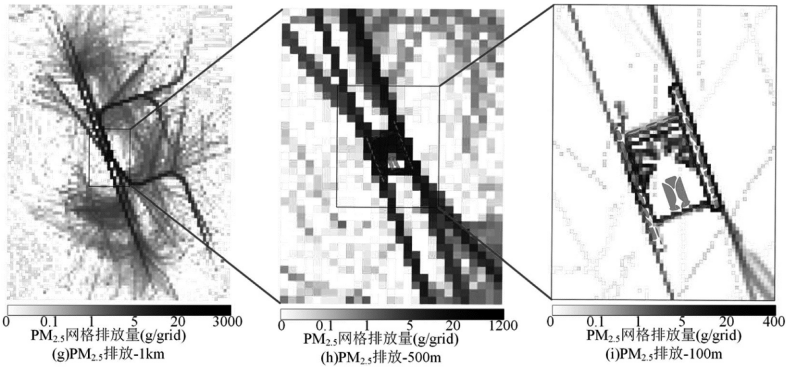


图 3 机场飞机排放的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of airport aircraft emissions

从空间维度来看,飞机排放的空间分布与机场的空间布局以及航线轨迹具有显著相关性,三种污染物的排放主要集中于机场及其周边区域,其空间分布与进离场路线基本吻合(图 3),这与进离场航线的固定性和航空排放的集中性密切相关.具体而言,NO_x 排放主要集中于跑道附近,其主要原因是起飞和爬升阶段发动机推力较大,NO_x 排放指数较高,导致排放量较高.SO_2 排放则相对均匀地分布在机场飞行区的重要区域,如停机坪和滑行道等,这主要是由于 SO_2 排放仅受飞机运行过程中耗油量的影响,因此,运行时间较长的进近、滑行和爬升阶段耗油量较高,导致 SO_2 排放量较高.$PM_{2.5}$ 排放主要集中于跑道和滑行道附近,其排放受燃油流量、飞行时间和排放指数的共同影响,而 $PM_{2.5}$ 的排放指数随推力变化的幅度较小[32],因此在跑道和滑行道的 $PM_{2.5}$ 排放量均较高.

2.2 不同时空分辨率对扩散模拟结果影响分析

飞机排放清单的时空分辨率对 WRF-CALPUFF 模型的污染物浓度贡献模拟结果具有显著影响,且随着空间分辨率的升高,时间分辨率对模拟结果的影响愈发显著,如图 4 所示.以 NO_x 为例,对比 A1、A3 和 A6 结果发现,在排放空间分辨率为 1km 的情况下,基于 24h、1h 和 0.5h 分辨率排放清单得到的 NO_x 浓度贡献空间分布相似,均呈现机场中心浓度贡献较高,周边区域浓度贡献平滑下降的趋势,模拟域内三者的网格最大浓度贡献差异低于 0.05μg/m^3(三者网格平均浓度差异低于 0.007μg/m^3).在排放空间分辨率为 100m 的情况下(A2、A5 和 A7),虽然基于 24h、1h 和 0.5h 分辨率排放清单得到的 NO_x 浓度贡献高值均主要分布在跑道滑行道和停机坪附近,但三者网格最大浓度贡献差异最高可达 31.83μg/m^3(24h:161.70μg/m^3、1h:138.38μg/m^3 和 0.5h:129.87μg/m^3),三者网格平均浓度差异低于 0.06 μg/m^3,显著高于排放空间分辨率为 1km 的情况.具体来看,在 100m 空间分辨率下使用 24h 分辨率的排放清单会显著低估跑道、滑行道的污染物浓度贡献,高估机场其他区域的污染物浓度贡献.这可能是因为低时间分辨率无法反应飞机排放源的时段性特征,难以捕捉其物理化学反应的短期变化,模型的数值平滑效应导致高峰排放或快速变化的物理过程被平滑处理.

为探究排放时间分辨率对污染物浓度贡献模拟结果时间变化的影响,对比了机场区域 NO_x 浓度贡献与航班流量的时间变化,如图 5 所示.结果显示,相较于基于 24h 分辨率排放清单得到的 NO_x 浓度贡献,基于 1h 和 0.5h 分辨率排放清单得到的 NO_x 浓度贡献与航班流量的时间变化趋势更为一致.基于 24h 分辨率排放清单得到的 NO_x 浓度贡献时间变化特征并不显著,全天呈现平稳变化(图 5(a)),而基于 1h 和 0.5h 分辨率排放清单得到的 NO_x 浓度贡献存在显著的小时波动,呈现凌晨(00:00~06:00)较低,中午(11:00~14:00)和傍晚(17:00~21:00)较高的分布特征(图 5(b)).这与机场飞行活动水平的时间变化特征更吻合,进一步证实了高时间分辨率(不低于 1h)排放清单对于机场大气环境影响评估的重要性,其更有利于识别局部排放的短时波动和污染物扩散的时空变化规律.值得注意的是,与基于 1h 分辨率排放清单得到的 NO_x 浓度贡献相比,基于 0.5h 分辨率排放清单的结果表现出更强的波动性.特别是在空间分辨率较高(100m)的情况下,NO_x 浓度贡献出现了一些异常高值.例如,机场

中心区域 19:00 的 NO_x 浓度贡献比相邻时段(18:00 和 20:00)高出 3~5 倍,而其航班量变化并未显示出如此显著的差异.为此,后续研究中将采用 1h 分辨率的排放清单进行污染物扩散模拟.

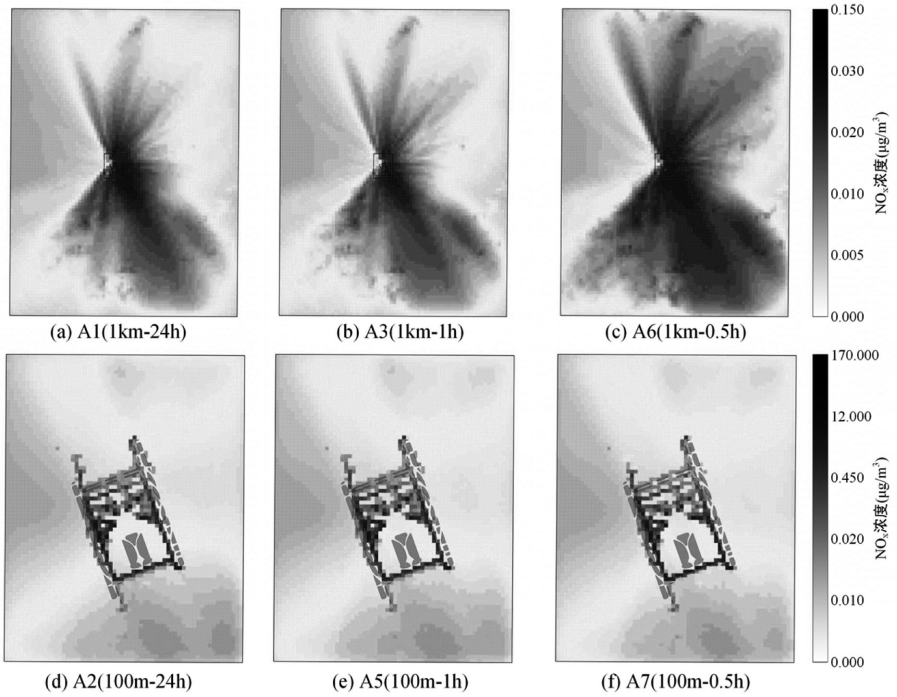


图 4　排放清单时间分辨率对扩散模拟结果的影响

Fig.4　Impact of emission inventory time resolution on dispersion simulation results

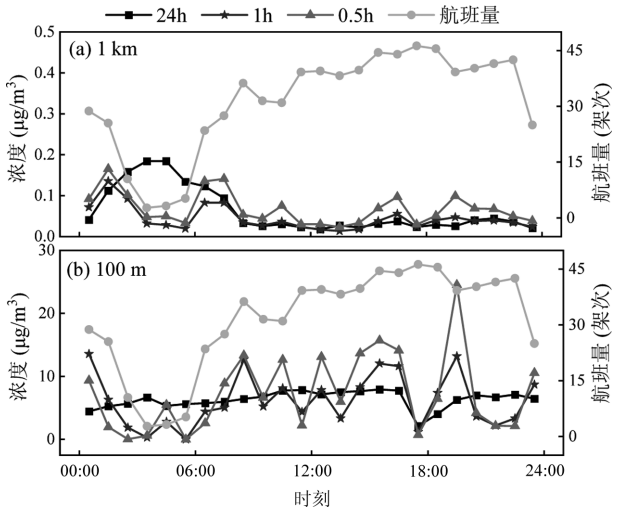


图 5　机场区域 NO_x 浓度贡献的时间分布

Fig.5　Time distribution of NO_x concentration contribution near the airport

进一步分析排放空间分辨率对污染物模拟结果的影响,基于上述 1h 时间分辨率排放清单进行敏感性试验(A3、A4 和 A5),结果如图 6.在三种不同空间分辨率下,NO_x 浓度贡献的空间分布呈现出较高的一致性,主要集中于机场飞行区并沿南北方向呈带状延伸,且浓度贡献值随距离增加呈现明显的递减趋势.图 6(c)和 6(f)显示基于 1km、500m 和 100m 空间分辨率排放得到的 NO_x 浓度贡献模拟结果差异.结果显示,不同空间分辨率排放对 NO_x 浓度贡献的影响主要集中于跑道、滑行道等飞机活动频繁的区域.相比于基于 1km 和 500m 分辨率排放得到的 NO_x 浓度贡献(1km 区域浓度贡献最大值为 0.088 μg/m^3; 500m 区域浓度贡献最大值为 0.083μg/m^3),基于 100m 分辨率排放得到的 NO_x 浓度贡献在跑道附近显著升高(区域浓度贡献最大值为 138.38μg/m^3).这一现象表明较低的空间分辨率(如 1km 和 500m)虽能反映飞机排放浓度贡献的整体趋势,但掩盖了局部的浓度贡献高值,这主要是由于在较低空间分辨率的模拟中,机场跑道、滑行道、登机口等区域的局部高排放强度被平滑到大面积网格中,无法真实反映污染热点区域的影响.相比之下,采用高空间分辨率(100m)模拟能够更准确地捕捉排放源的局部聚集特征,有助于揭示机场飞行活动污染物浓度贡献的精细化分布特征,并识别机场活动相关的排放和扩散浓度热点.

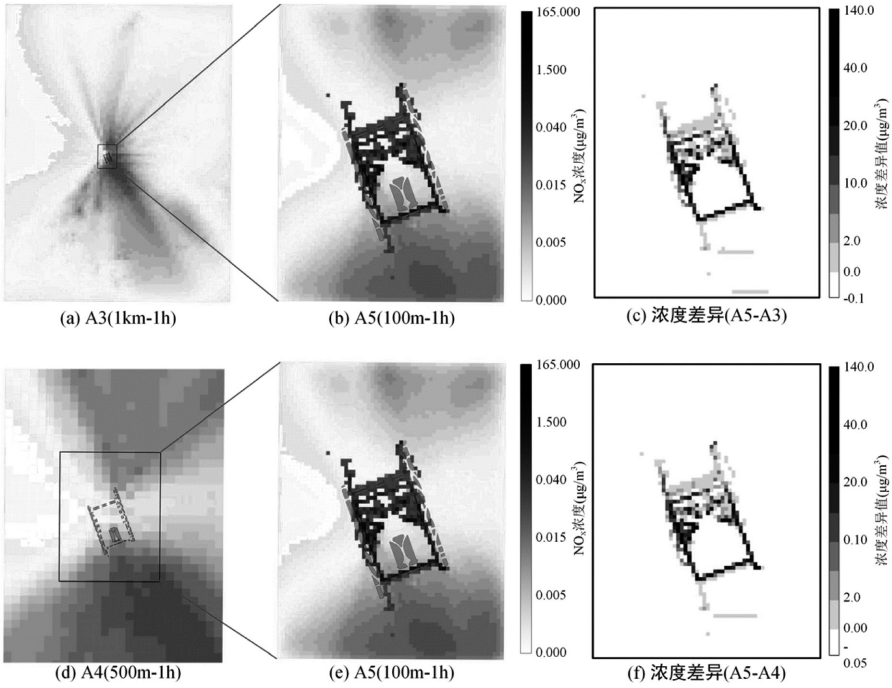


图 6 排放清单空间分辨率对扩散模拟结果的影响

Fig.6 Impact of emission inventory spatial resolution on dispersion simulation results

2.3 机场区域飞机排放对大气环境的影响

2.3.1 气象要素模拟 效果评估采用国家气候数据中心综合地表数据库(www.ncdc.noaa.gov/data-access/quick-links#ghcn)中青岛气象站(编号 54857)的观测数据,与模拟域内相应网格的主要气象要素模拟值进行对比分析,结果如表 3 所示.整体来看,WRF 模型对风速、风向和湿度(以水汽混合比表征大气中的水汽含量)的模拟效果较好,其平均偏差(MB)分别为−0.43~−0.41m/s、−8.51°~3.85°、−0.92~ −0.22g/kg,均在 Emery 等[33]和 Tesche 等[34]提出的可接受范围内(风速:MB≤±0.5m/s;风向:MB≤±10°;湿度:MB≤±1g/kg).此外,冬季温度的 MB 为−0.05℃,在可接受范围内(MB≤±0.5℃),而夏季温度略有高估(MB 为 0.57℃),略高于可接受标准.冬夏两季主要气象要素(风速、风向、湿度、温度)模拟值与观测值的时间序列对比图(图 7)显示,冬夏两季主要气象要素模拟值与观测值的变化趋势基本保持一致.

表 3 主要气象要素模拟值与观测值的对比统计

Table 3 Performance statistics of meteorological predictions over domain 1at 1km resolution

模拟时段	气象参数	观测平均值	模拟平均值	MB	RMSE	NMB	NME
冬季	风速(m/s)	3.77	3.36	−0.41	1.61	−10.77	32.61
	风向(°)	205.19	196.68	−8.51	60.73	5.16	19.89
	温度(℃)	0.51	0.46	−0.05	2.10	−9.89	94.75
	水汽混合比(g/kg)	2.50	2.28	−0.22	0.51	−8.61	14.88
夏季	风速(m/s)	3.76	3.96	−0.43	1.69	−11.43	34.35
	风向(°)	168.31	170.75	3.85	49.20	2.30	17.46
	温度(℃)	27.15	27.72	0.57	2.24	2.11	5.68
	水汽混合比(g/kg)	18.59	17.67	−0.92	2.67	−8.16	10.56

注:[a]MB为平均偏差,计算式为: $MB=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Mod_i-Obs_i)$, Mod_i为第i时刻的模拟值,Obs_i为第i时刻的观测值,N为观测数据总数;[b]RMSE为均方根误差,计算公式为 $RMSE=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(Mod_i-Obs_i)^2}$;[c]NMB为归一化平均偏差,计算式为: $NMB=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{Mod_i^*-Obs_i^*}{Obs_i^*}\right)\times100\%$,式中,$Mod_i^*=\frac{Mod_i-Mod_{min}}{Mod_{max}-Mod_{min}}$, $Obs_i^*=\frac{Obs_j-Obs_{min}}{Obs_{max}-Obs_{min}}$, N为观测数据总数;[d]NME为归一化平均误差,计算式为 $NME=\frac{\sum_{i=1}^{N}|Mod_i^*-Obs_i^*|}{\sum_{i=1}^{N}Obs_i^*}\times100\%$.当温度的MB≤±0.5℃、湿度的MB≤±1g/kg、风向的MB≤±10°和风速的MB≤±0.5m/s时,可以认为结果在可接受标准内[33-34].

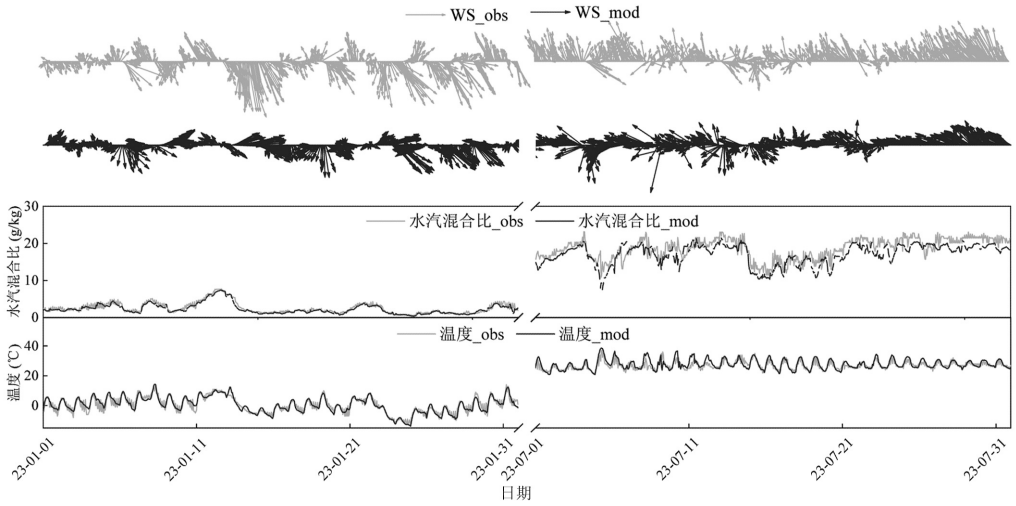


图 7　主要气象要素模拟值与观测值时间序列对比

Fig.7　The daily variation of predicted and observed meteorological factors

2.3.2　环境影响评估　风场是影响污染物扩散路径和范围的主要因素,分析研究区域不同季节风场变化可知(图 8),研究区域冬季主导风向为西北风,平均风速为 3.26m/s;夏季主导风向为东南风,平均风速为 3.49m/s.不同气象条件和活动水平下胶东机场飞机排放对周边区域 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献结果如图 10 所示.由图可知,胶东机场飞行活动排放对机场 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 浓度贡献年均值分别为 4.21、0.53 和 0.07μg/m^3,区域最大值分别为 225.2、34.2 和 4.8μg/m^3.与国内外相关研究对比发现(表 4),NO_x 年均浓度贡献略高于北京首都、天津滨海等机场(82.1~165.3μg/m^3),$PM_{2.5}$ 年均浓度贡献与天津滨海机场相近,但略低于北京首都和北京大兴机场(5.0~8.1μg/m^3).这主要与机场规模、航班量、气象条件以及模型设置等因素密切相关,这些因素直接影响机场飞机污染物排放量及其浓度贡献.

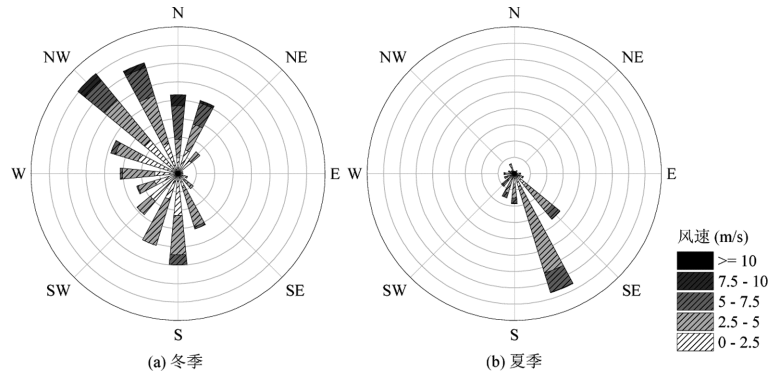


图 8　机场区域不同季节的风玫瑰图

Fig.8　Windrose of meteorological data in different seasons near the airport

为探究胶东机场飞行活动污染物排放对周边区域的影响程度和范围,将完整覆盖两条跑道的区域定义为机场区域,分析距机场区域不同距离的三种污染物的环境浓度贡献变化,结果如图 9 所示.由图可知,胶东机场飞行活动污染物排放对周边区域的环境影响呈现显著的空间梯度分布特征(图 9),影响主要集中于以机场区域为中心,辐射周边 10~15km 范围内.随着距机场区域距离的增加,三种污染物的浓度贡献均呈现出逐渐减小的变化趋势.机场中心区域 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 的平均浓度贡献为 2.96,0.38,0.05μg/m^3;当距离增至 15km,其平均浓度贡献分别降低至 1.87×10^{-2}、1.96×10^{-3} 和 2.89×10^{-4}μg/ m^3,且浓度贡献趋于稳定.三种污染物浓度贡献的空间分布相似,这与三者排放特征密切相关,其中 NO_x 的

浓度贡献显著高于其他污染物,$PM_{2.5}$ 浓度贡献相对较低(图 9).这种差异主要与 NO_x 在航空活动中的高强度排放有关,而 $PM_{2.5}$ 的排放强度较低且沉降速率较快.

表 4 胶东机场污染物排放对周边区域影响与国内外机场对比

Table 4 Comparison of airport emission contribution to surrounding regions between TAO and other domestic/foreign airports

机场	研究时段	网格分辨率	模型	$NO_x(\mu g/m^3)$	$SO_2(\mu g/m^3)$	$PM_{2.5}(\mu g/m^3)$
青岛胶东机场(本研究)	2023 年夏季	100m	CALPUFF	302.12	45.90	6.44
	2023 年冬季			138.38	21.02	2.95
	2023 年全年			220.25	33.46	4.69
天津滨海机场[35]	2017 年冬季	1km	CMAQ	–	–	3.24
北京大兴机场[22]	2020 年冬季	500m	ADMS	82.1	–	–
北京首都机场[36]	2012 年全年	–	AERMOD	165. 28	9. 49	8. 06
北京大兴机场[17]	2021 年冬季	500m	ADMS	133.64	5	5
北京首都机场[37]	2018 年全年	–	Gaussian	–	–	5.79
Hartsfield Jackson Atlanta International Airport[38]	2005 年 7 月	100m	CMAQ−post−processing	–	–	1.8
Amerigo Vespucci airport(I. Simonetti)[39]	2015 年全年	250m	AERMOD	40	1.5−3	1.5

注:表格中的污染物浓度均为区域最大年均浓度值.

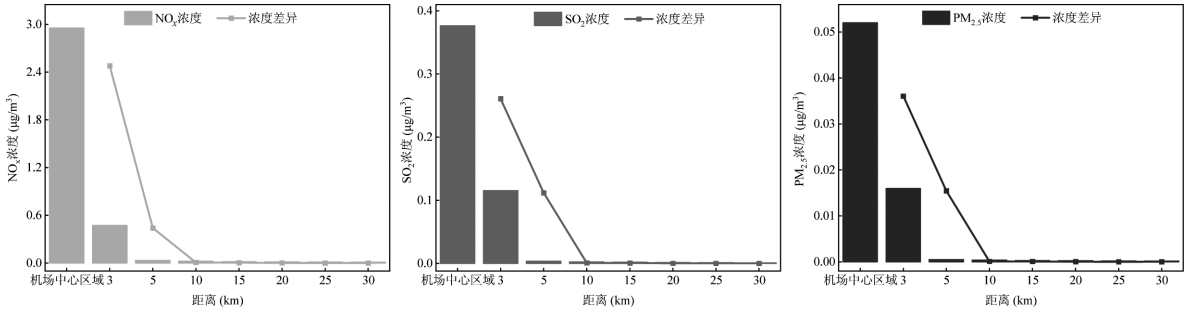


图 9 浓度扩散趋势

Fig.9 Concentration dispersion trends

机场中心区域是指覆盖机场两条跑道的 3km×5km 区域

受不同季节气象条件影响,飞机排放对周边区域污染物浓度影响存在显著差异性(图 10).冬季,污染物浓度贡献的空间分布呈现四周辐射状特征,主要分布在机场及其东南区域,NO_x、SO_2、和 $PM_{2.5}$ 的浓度贡献高值区域均位于机场内部飞行区,三种污染物浓度贡献平均值分别为 3.34,0.42,0.06μg/m^3,区域最大值分别为 138.38,21.02,2.95μg/m^3.这主要是受季节风向和排放源位置影响,青岛胶东地区冬季以西北风为主,北风和西风也占有一定频率,导致大气污染物易于向东南方向扩散并在该区域累积.此外,胶东机场的进离场航线呈南北向分布,其中东南部区域航线密集,飞行活动频繁,排放强度较高,进一步加剧了该区域的污染物浓度贡献集中现象.相比之下,夏季受东南风影响,飞机排放影响较大的区域为机场及其西北区域,呈片状分布,机场区域 NO_x、SO_2、和 $PM_{2.5}$ 浓度贡献平均值分别为 5.08,0.64,0.09μg/m^3,区域最大值分别为 302.12,45.90,6.44μg/m^3.冬、夏两季污染物浓度贡献的显著季节性差异主要归因于污染物排放量和气象条件的共同作用.作为中国著名的海滨城市,青岛夏季旅游业旺盛,航班量约为冬季的 1.6 倍,飞行活动强度显著增加,导致污染物排放量相应升高.此外,气象条件(如风速和风向)的季节性变化也是影响污染物扩散和累积的关键因素,这导致污染物扩散趋势和速度存在差异.

为量化气象参数对污染物扩散的影响,分别选取胶东机场两个具有代表性的时段进行对比分析:扩散条件较差的时段(Case 1:2023 年 7 月 16 日,低风速:2.05m/s,风向不稳定)和扩散条件较好的时段(Case 2:2023 年 7 月 30 日,高风速:5.8m/s,风向稳定).在排放水平保持稳定的前提下,分析不同气象条件

对污染物浓度贡献空间分布的影响(以 NO_x 为例),如图 11 所示.结果显示,随着风速的降低,污染物浓度贡献呈现增加的趋势,相较于扩散条件较好的时段(Case 2),扩散条件较差的时段(Case 1)机场及周边区域 NO_x 平均浓度贡献增加了 52%.具体来看,在 Case 1 期间,机场及周边区域的 NO_x 平均浓度贡献为 0.030μg/m^3.由于当地风速较低,污染物扩散受限,其空间分布呈现出与机场起降航线高度吻合的特征,并在排放源附近形成累积分布.而在 Case 2 期间,NO_x 浓度贡献在机场西北部形成了明显的高值区,平均浓度贡献为 0.019μg/m³,相较于 Case 1 期间的浓度贡献降低了 0.011μg/m^3.

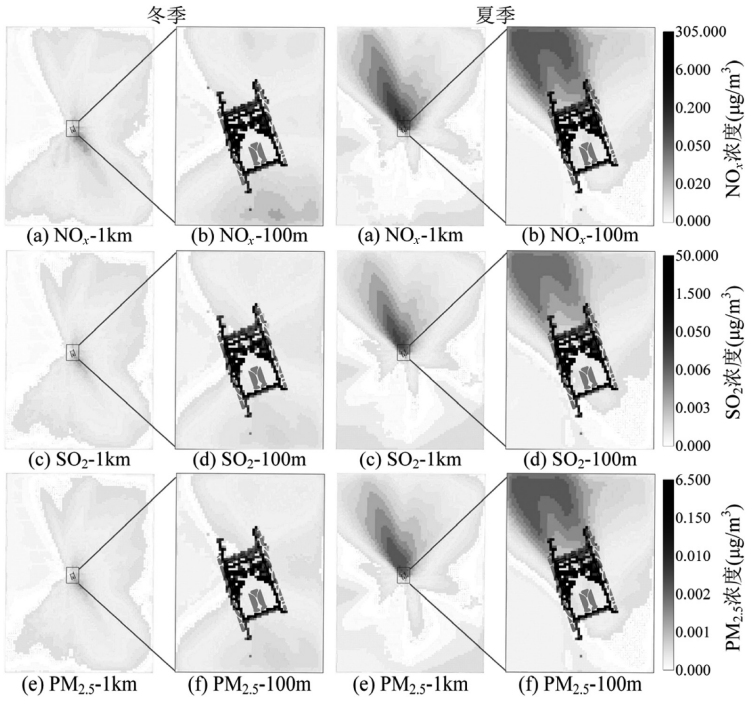


图 10　胶东机场飞机排放对污染物地面浓度贡献

Fig.10　Contribution of aircraft emissions to ground concentration of pollutants at TAO

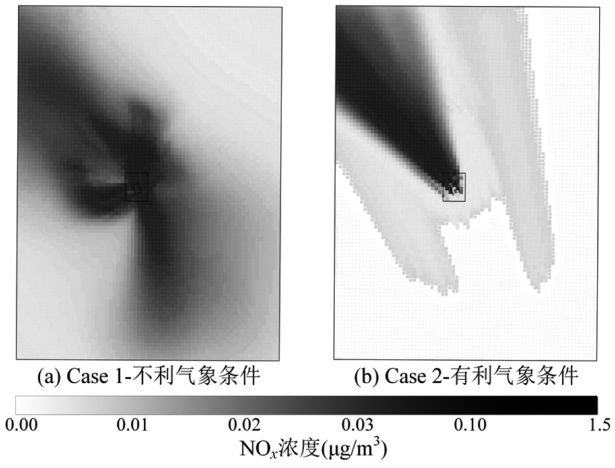


图 11　不同气象条件下 NO_x 浓度贡献空间分布

Fig.11　Spatial distribution of NO_x concentration contributions under different meteorological conditions

2.4　不确定性分析

本研究的不确定性主要来源于四个方面.一是,研究中污染物各阶段排放指数来源于 ICAO 发动机排放数据库,为固定参数条件下的实验数据,而实际运行中这些参数会随发动机推力、老化及其他条件的变化而变化,可能影响污染物排放估算结果.二是,研究中 CALPUFF 模型侧重于污染物的物理扩散过程,对 NO_x 和 SO_2 等一次污染物的空间分布描述较为准确,但对 $PM_{2.5}$ 中二次气溶胶(如硝酸盐、硫酸盐)的形成过程考虑不足.尽管研究中使用了 MESOPUFF II 化学机制模块,但其较为简化,未引入复杂的光化学反应、气-液相转化、温度-湿度影响等过程,导致对二次污染物的细组分预测精度有限.三是,研究中风速风向、温度、气压、大气稳定度和相对湿度等因素对排放估算和扩散模拟产生一定程度的影响,尤其在机场复杂气象条件下,如微风、逆温、高湿度环境中,模拟浓度可能出现系统性偏差.四是,研究中污染物浓度贡献未与实测数据进行对

比验证,主要由于实验条件限制和监测点布设不足,导致目前难以获取机场周边实测环境污染物浓度数据.未来将联合机场相关部门开展机场区域环境监测,以进一步验证污染物浓度贡献的可靠性.

3 结论

3.1 基于高精度航班飞行轨迹数据,建立胶东机场飞机高分辨率污染物排放清单,同时改进 CALPUFF 模型使其适用于高动态性的飞机移动源,实现飞机排放污染扩散的精细化模拟,为机场区域飞机排放环境影响评估提供可靠方法,并为优化飞机运营和制定减排策略提供科学依据.

3.2 2023 年,胶东机场飞机 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 排放量月均值分别为 164.15、8.51 和 1.23t.三种污染物的排放量与航班起降架次呈现出相似的时间变化特征:03:00~05:00 排放量较低,15:00~17:00 排放量较高.三种污染物排放空间分布与机场布局以及进离场航迹紧密相关,主要位于机场飞行区的重要区域,包括跑道、滑行道和停机坪等.

3.3 飞机排放清单的时空分辨率对污染物浓度贡献模拟结果具有显著影响,且随着空间分辨率的升高,时间分辨率对模拟结果的影响愈发显著.基于 1h 分辨率排放清单得到的污染物浓度贡献与航班流量的时间变化趋势更为一致,揭示其更有利于识别局部排放的短时波动和污染物扩散的时空变化规律;基于 1km 分辨率排放清单得到的污染物浓度贡献在跑道附近被显著低估,因此,基于 100m 分辨率排放清单能更好地表征机场飞行活动污染物浓度贡献的精细化分布特征.

3.4 胶东机场飞行活动排放对 NO_x、SO_2 和 $PM_{2.5}$ 的年均浓度贡献分别为 4.21、0.53 和 0.07μg/m^3(区域最大值分别为 220.25、33.46 和 4.69μg/m^3),主要集中于机场区域为中心,辐射周边 10~15km 范围内.三种污染物浓度贡献存在显著的季节性差异,主要归因于污染物排放量和气象条件的共同作用.冬季三种污染物浓度贡献主要分布在机场及其东南区域,呈辐射状发散;而夏季则集中于机场及其西北区域,呈片状分布.

参考文献:

[1] 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.

[2] Fajersztajn L, Guimaraes M T, Duim E, 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, 2019,14:100565.

[3] Hudda N, Simon M C, Zamore W, et al. Aviation-related impacts on ultrafine particle number concentrations outside and inside residences near an airport [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(4): 1765-1772.

[4] Yilmaz İ. Emissions from passenger aircraft at kayseri airport, turkey [J]. Journal of Air Transport Management, 2017,58:176-182.

[5] Tokuslu A. Estimation of aircraft emissions at georgian international airport [J]. Energy, 2020,206:118219.

[6] Hu R, Zhu J, Zhang Y, et al. Spatial characteristics of aircraft CO_2 emissions at different airports: some evidence from China [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 85:102435.

[7] 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 BayArea, China [J]. China Environment Science, 2020,40(12):5182-5190.

[8] 曹惠玲,苗佳禾,苗凌云,等.基于实际飞行数据的首都机场飞机发动机日排放清单估算方法研究 [J]. 环境科学学报, 2019,39(8):2699-2707.
Cao H L, Miao J H, Miao L Y, et al. Research on estimation method of daily emission inventory of aircraft engine in Beijing capital international airport based on real flight data [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019,39(8):2699-2707.

[9] Nikoleris T, Gupta G, Kistler M. Detailed estimation of fuel consumption and emissions during aircraft taxi operations at dallas/fort worth international airport [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2011,16(4):302-308.

[10] Tokuslu A. Estimation of aircraft emissions at georgian international airport [J]. Energy, 2020,206:118219.

[11] 孟凡胜,王 飞,殷宝辉,等.京津冀中部夏季大气颗粒物空间分布特征 [J]. 环境科学研究, 2018,31(5):814-822.
Meng F S, Wang F, Yin B H, et al. Spatial distribution properties of atmospheric particles over central Beijing-Tianjin-Hebei Region in summer [J]. Research of Environmental Sciences, 2018,31(5):814-822.

[12] 全 澍,刘淼晗,陈博轩,等.河南省近地表 O_3 污染特征及其与气象因素之间的关系 [J]. 环境科学研究, 2022,35(12):2666-2676.
Quan S, Liu M H, Chen B X, et al. Characteristics of near-surface O_3 pollution and its relationship with meteorological factors in Henan Province [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(12):2666-2676.

[13] 赵志奇,李 杰,田 勇,等.航空排放对大气环境影响研究现状综述 [J]. 环境科学与技术, 2018,41(3):186-192.
Zhao Z Q, Li J, Tian Y, et al. Impact of Aviation emissions on atmospheric environment: A research review [J]. Environmental Science & Technology, 2018,41(3):186-192.

[14] Zhang J, Jiang Y, Wang Y, et al. Increased impact of aviation on air

quality and human health in China [J]. Environmental Science & Technology, 2023,57(48):19575−19583.

[15] Kuzu S L. Estimation and dispersion modeling of landing and take−off (LTO) cycle emissions from atatürk international airport [J]. Air Quality Atmosphere and Health, 2018,11(2):153−161.

[16] Yang X, Cheng S, Lang J, et al. Characterization of aircraft emissions and air quality impacts of an international airport [J]. Journal of Environmental Sciences, 2018,72:198−207.

[17] Wang Y N, Zou C, Fang T G, et al. Emissions from international airport and its impact on air quality: a case study of beijingdaxing international airport (PKX), china [J]. Environmental Pollution, 2023, 336:122472.

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

[19] Masiol M, Harrison R M. Quantification of air quality impacts of London heathrow airport (UK) from 2005 to 2012 [J]. Atmospheric Environment, 2015,116:308−319.

[20] 曹惠玲,晏嘉伟,匡家骏,等.飞机排放对机场周边环境的影响研究 [J]. 航空动力学报, 2023,38(10):2501−2515.
Cao H L, Yan J W, Kuang J J, et al. Research on impact of aircraft emissions on surrounding environment of airports [J]. Journal of Aerospace Power, 2023,38(10):2501−2515.

[21] Vichi F, Frattoni M, Imperiali A, et al. Civil aviation impacts on local air quality: a survey inside two international airports in central italy [J]. Atmospheric Environment, 2016,142:393−405.

[22] 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.

[23] 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):34001.

[24] 李海生,安　达,裴莹莹,等.中韩合作助力东北亚蓝天 [J]. 环境科学研究, 2022,35(4):845−851.
Li H S, An D, Pei Y Y, et al. Close Cooperation between China and South Korea for the Blue Sky of Northeast Asia [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(4):845−851.

[25] 姜　华,高　健,李　红,等.我国大气污染协同防控理论框架初探 [J]. 环境科学研究, 2022,35(3):601−610.
Jiang H, Gao J, Li H, et al. Preliminary research on theoretical framework of cooperative control of air pollution in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(3):601−610.

[26] 中国民用航空局.2023 年民航机场生产统计公报 [R]. 北京:中国民用航空局发展计划司, 2024.
Civil Aviation Administration of China. The civil aviation industry development statistical bulletin in 2023 [R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2024.

[27] 王逸豪,张　宇,雷　宇.降低长三角地区 O_3 暴露风险的前体物减排路径优化研究 [J]. 环境科学研究, 2023,36(6):1072−1082.
Wang Y H, Zhang Y, Lei Y. Optimization of precursors mitigation paths to reduce the risk from O_3 exposure in the Yangtze River Delta [J]. Research of Environmental Sciences, 2023,36(6):1072−1082.

[28] Oleniacz R, Rzeszutek M. Intercomparison of the CALMET/ CALPUFF modeling system for selected horizontal grid resolutions at a local scale: A case study of the MSWI plant in Krakow, Poland [J]. Applied Sciences, 2018,8(11):2301.

[29] Zhang J, Zhang S, Zhang X, 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.

[30] 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).

[31] Wayson R L, Fleming G G, Iovinelli R. Methodology to estimate particulate matter emissions from certified commercial aircraft engines [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2009,59(1): 91−100.

[32] 韩　博,刘雅婷,谭宏志,等.一次航班飞行全过程大气污染物排放特征 [J]. 环境科学学报, 2017,37(12):4492−4502.
Han B, Liu Y T, Tan H Z, et al. Emission characterization of civil aviation aircraft during a whole flight [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017,37(12):4492−4502.

[33] Emery C, Tai E, Yarwood G. Enhanced meteorological modeling and performance evaluation for two texas ozone episodes [R]. Final Report. The Texas Natural Resource Conservation Commission, 12118 Park 35 Circle Austin, Texas. http://www.tceq.state.tx.us/assets/public/ implementation/air/am/contracts/reports/mm/,2001.

[34] Tesche T W, Mcnally D E, Emery C A, et al. Evaluation of the MM5 Model over the Midwestern U.S. for three 8−hour oxidant episodes [R]. Alpine Geophysics, LLC, Ft Wright, KY, and ENVIRON International Crop, Novato, CA, USA, 2001.

[35] 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, Cheng S Y, et al. The establishment of airports emission inventory and the air quality impactsfor typical airports in North China [J]. China Environmental Science, 2020,40(4):1468−1476.

[36] 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.

[37] Cui Q, Jia Z, Liu Y, et al. 24−hour average $PM_{2.5}$ concentration caused by aircraft in Chinese airports from Jan. 2006 to Dec. 2023 [J]. Scientific Data, 2024,11(1):284.

[38] Woody M C, Wong H W, West J J, et al. Multiscale predictions of aviation−attributable $PM_{2.5}$ for U.S. airports modeled using CMAQ with plume−in−grid and an aircraft−specific 1−D emission model [J]. Atmospheric Environment, 2016,147:384−394.

[39] 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.

作者简介：马思萌(1990−),女,河北保定人,讲师,博士,主要从事民航低碳与污染防控研究.发表论文 20 余篇.smma@cauc.edu.cn.