

丁伟宸,刘勤亚,张俊,等,2023.北京大兴国际机场不利气象条件下飞机尾气排放对大气环境影响的模拟研究[J].气象,49(1):62-73. Ding W C, Liu Q Y, Zhang J, et al, 2023. Simulation study on atmospheric environmental impact of aircraft emissions of Beijing Daxing International Airport under adverse meteorological conditions[J]. Meteor Mon, 49(1):62-73(in Chinese).

北京大兴国际机场不利气象条件下飞机尾气排放对大气环境影响的模拟研究*

丁伟宸^{1,2} 刘勤亚^{3,4} 张俊⁵ 吴成志⁶ 陈乃翀⁶ 胡非^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京 100029

2 中国科学院大学,北京 100049

3 北京中气辉光科技有限公司,北京 100085

4 中国气象科学研究院,北京 100081

5 北京新机场建设指挥部,北京 102602

6 三捷(环境工程)咨询公司,杭州 310012

提 要:北京大兴国际机场作为吞吐量巨大的超大型国际枢纽,其运营过程中飞机尾气排放量大,对机场周边地区大气环境的影响不容忽视。为研究不利气象条件下飞机尾气排放对大气环境的影响,根据北京市环境空气数据筛选出 2020 年度不利气象条件时段,基于北京大兴国际机场 2025 年规划相关基础数据,采用排放与扩散模型系统(EDMS)建立飞机尾气排放源清单,开展不利气象条件下大气污染扩散模拟预测分析。气象分析结果表明不利气象条件时段存在小静风、高湿、厚度薄而强度大的接地逆温等特征,该时段北京地区经历以 PM_{2.5} 为首要污染物的重污染过程,并伴随着低能见度天气。模式预测结果显示在不利气象条件下摩擦速度和混合层高度等参数均处于较小的水平,大气污染扩散条件较差,飞机尾气对周边环境产生较大程度的影响,且污染物落地浓度存在昼间较低、夜间较高的时间分布规律。分析不利气象条件下的污染气象特征和飞机尾气污染物落地浓度分布特征对开展机场大气污染控制措施研究工作具有一定的参考价值。

关键词:气象条件,机场,飞机尾气,扩散模式,重污染

中图分类号: P402, X823

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2022.062901

Simulation Study on Atmospheric Environmental Impact of Aircraft Emissions of Beijing Daxing International Airport Under Adverse Meteorological Conditions

DING Weichen^{1,2} LIU Qinya^{3,4} ZHANG Jun⁵ WU Chengzhi⁶ CHEN Naichong⁶ HU Fei^{1,2}

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry,

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Beijing Zhongqihui Guang Technology Co., Ltd., Beijing 100085

4 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

5 Beijing New Airport Construction Headquarters, Beijing 102602

6 Trinity Consultants, Inc., Hangzhou 310012

* 国家重点研发计划(2017YFC0209600)资助

2022 年 4 月 1 日收稿; 2022 年 8 月 5 日收修定稿

第一作者:丁伟宸,主要从事大气边界层物理和大气湍流研究. E-mail:dingweichen@mail.iap.ac.cn

通讯作者:胡非,主要从事大气边界层物理和大气湍流研究. E-mail:hufei@mail.iap.ac.cn

Abstract: Beijing Daxing International Airport, as a super large international hub with huge throughput, has a large amount of aircraft exhaust emissions, which can impact the atmospheric environment around the airport greatly, and should not be ignored. In order to study the impact of aircraft exhaust emissions on the atmospheric environment under adverse meteorological conditions, the adverse meteorological conditions period in 2020 is selected based on the Beijing air quality data. According to the projected basic data of the 2025 planning of Daxing International Airport, the Emissions and Dispersion Modeling System (EDMS) is used to establish the list of exhaust emission sources of the airport and simulate the diffusion of air pollution. The results of pollution analysis show that there are meteorological characteristics such as light calm wind, high humidity and strong grounding temperature inversion with thin thickness during adverse meteorological conditions. Beijing has experienced heavy pollution processes, accompanied by the low visibility. Under the influence of adverse meteorological conditions, the parameters such as friction velocity and mixing layer height are at a lower level, indicating that the diffusion conditions of air pollution are poor. The model prediction results show that aircraft exhaust would have a great impact on the surrounding environment, and the ground concentration of pollutants might have the time distribution law of low in the daytime but high at night. Such characteristics of pollution meteorology and aircraft emission concentration distribution under adverse meteorological conditions could provide some references for the research on airport air pollution control measures.

Key words: meteorological condition, airport, aircraft exhaust emission, diffusion model, heavy pollution

引 言

交通运输污染源是大气污染的重要来源之一,随着机场业务量的不断增长,飞机尾气排放(特别是吞吐量巨大的大型国际机场)对大气环境的影响日渐成为人们高度关注的问题。北京大兴国际机场定位超大型国际枢纽机场,于2019年9月25日正式投运,设计目标年即2025年,旅客吞吐量:7200万人次,货邮吞吐量:200万吨,飞机起降:62.8万架次。该机场位于北京市南部,大兴区榆垓镇、礼贤镇和河北省廊坊市广阳区之间,在秋、冬季不利气象条件下,该地区时常发生雾-霾污染事件,而机场吞吐量位居全国前列,运营过程中必然产生大量飞机尾气排放,加剧环境空气污染,大大降低机场周边能见度,对机场开放关闭、飞机的起飞着陆和飞行安全都有很大影响(赵慧霞等,2010;邵振平,2014;陈玉蓉,2019;台宏达等,2019),因此研究分析不利气象条件下飞机尾气排放对机场周边环境空气质量的影响至关重要。

目前对机场大气污染的研究主要以飞机尾气 CO_2 和 NO_x 排放(Sausen and Schumann,2000;Liu et al,2003;陈林,2013;朱佳琳等,2020)及其对气候

的影响(Marais et al,2008)为主。伯鑫等(2017)指出,国内机场环境影响评价报告书评价重点为机场噪声影响,而针对机场大气污染影响的分析较为简单。由于飞机在起飞、降落和滑行过程中会产生大量的 SO_2 、 NO_x 、VOCs、CO、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等污染物(Brasseur et al,1998;Mahashabde et al,2011),飞机尾气排放的大气污染物是机场总污染物的主要部分,可能给周边环境空气质量带来较大影响。国内外众多学者对飞机起飞降落(landing-taking off, LTO)的尾气排放量进行核算评估,估算一般依据国际民用航空组织飞机发动机大气污染物排放系数数据库(ICAO Aircraft Engine Emissions Databank, <http://www.easa.europa.eu/document-library/icao-aircraft-engine-emissions-databank>)(夏卿等,2008;宋利生,2013;黄清凤等,2014;杨芮,2018;韩博等,2020)或区域移动源排放清单(樊守彬等,2010)。Schürmann et al(2007)、Zhu et al(2011)、储燕萍(2013)、Masiol and Harrison(2014)和袁远等(2018)采用飞机尾气排放量和周边区域污染物浓度监测数据对比的方式评价上海浦东、天津和瑞士苏黎世等机场飞机尾气排放对周边环境空气质量的影响。朱艳玲(2015)采用排放与扩散模型系统(Emissions and Dispersion Modeling System, EDMS)

定量计算了飞机尾气对周边环境空气质量的影响程度和影响范围,在此基础上提出有效的减缓措施,并对措施前后污染物浓度变化情况进行了对比分析。由此可见,飞机尾气排放对机场周边大气环境产生较大影响,污染物浓度在部分区域超过环境空气质量标准。而现有研究在分析尾气排放的环境影响时大多没有区分正常天气条件和重污染天气条件,对重污染过程中污染物浓度分布情况的研究存在不足。重污染过程是目前最受关注的大气问题之一,飞机尾气污染物的大量排放,可能加重重污染天气负担,因此,对于重污染过程期间的污染气象和飞机尾气污染物落地浓度时空分布特征研究尤其重要。

根据《北京新机场项目环境影响报告书》(<https://www.mee.gov.cn/ywgz/hjyxpj/jsxmhjyx-pj/xmslqk/201605/W020160522143434085352.pdf>),在 2025 年规划情景下,北京大兴国际机场飞机尾气中 SO_2 和 NO_x 的排放量较大,分别为 $355.30 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $4873.21 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$,机场尾气对大气环境的影响不容忽视,且机场所在的大兴区作为北京市南大门,在秋、冬季时常经历重污染过程,开展不利气象条件下飞机尾气对环境的影响研究至关重要。本文结合北京市 2020 年空气质量数据筛选不利气象条件时段,并进行污染气象分析,采用 EDMS 模式建立北京大兴国际机场的飞机尾气排放源清单,以 2020 年为预测基准年模拟 2025 年规划情景下的飞机尾气对周边环境的影响,重点研究不利气象条件下污染气象、大气扩散能力和飞机尾气污染物落地浓度时间分布特征。

表 1 2020 年 2 月 10—15 日北京历史环境空气质量和天气状况

日期/月-日	AQI	质量等级	天气	风力风向
2-10	163	中度污染	雾—晴	东北风 1 级
2-11	232	重度污染	雾	东北风 1 级
2-12	257	重度污染	雾	东北风 1 级
2-13	247	重度污染	雾—雨夹雪	东北风 2 级
2-14	69	良	暴雪—阴	东北风 2 级
2-15	35	优	中雪—晴	西北风 4 级

1.2 不利气象条件时段地面污染气象特征

2020 年 2 月 10—15 日不利气象条件时段 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物小时浓度如图 1a 所示,根据浓度变化可将这次污染过程分为 4 个阶段,其中 EP1 为中度污染阶段,EP2 为重度污染阶段,EP3—EP4 污染

1 不利气象条件时段污染气象特征

大气污染物的扩散能力与区域内的气象条件特别是大气边界层结构和湍流特性密切相关,气象影响因素包括风向、风速、相对湿度、气压、温度等。京津冀相关研究(王跃等,2014;程念亮等,2016;桂海林等,2019;贺园园等 2019;韩笑颜等,2020)结果表明,重污染发生时,往往地面风速小、湿度大、最大混合层高度低,这些气象特征均不利于污染物扩散。

本文基于北京市空气质量历史监测数据,筛选出 2020 年度的不利气象条件时段,同时收集了距离北京大兴国际机场较近的北京市大兴旧宫站 2020 年空气质量数据、河北省固安气象站 2020 年地面气象数据和北京市观象台 2020 年探空气象数据,统计相关气象要素,分析重污染过程中的地面气象条件变化及边界层逆温情况。结果表明,不利气象条件时段内污染气象特征为弱风高湿、近地层有较强逆温层结。空气质量数据来源于北京市生态环境监测中心(<http://www.bjmemc.com.cn/>),地面和探空气象数据来源于国家气象信息中心。

1.1 不利气象条件时段筛选

根据北京市空气质量历史数据,2020 年 2 月 10—15 日北京市出现重污染过程,首要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$,11—13 日达到重度污染,14 日后大气污染呈降低趋势直至消散(表 1)。

过程基本结束。

图 1a 和 1b 显示了 2020 年 2 月 10—15 日重污染过程期间污染物浓度和风速风向变化(在重污染过程期间,2 月 12 日 13—14 时、13 日 15—17 时、14 日 11—12 时 $\text{PM}_{2.5}$ 污染物小时浓度缺测)。由图可知,EP1—EP2 重污染发生期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,小

时浓度范围为 $116\sim 275\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 $193\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, NO_2 小时浓度范围为 $24\sim 125\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均值为 $57\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。此时段内以偏东风为主,风速较小,多为小静风($0\sim 2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),期间平均风速为 $0.7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0\sim 2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速大小占比高达 99.0%。图 1c 和 1d 是重污染过程期间气温、相对湿度、气压和能见度变化,EP1—EP2 阶段平均气温为 $2.6\ ^\circ\text{C}$,平均相对湿度达到 80%,气温和相对湿度

日变化较为明显,且日均温度和湿度呈上升态势,符合冷锋过境前特征。重污染过程期间,天气以雾为主,相对湿度较高会导致二次颗粒物爆发性增长,从而导致区域能见度下降(刘瑞翔等,2020;刘兆东等,2020),期间能见度均值为 $2.1\ \text{km}$,并在 13 日 09 时降至 $70\ \text{m}$ 。在 EP3—EP4 污染结束阶段,受北方冷空气影响(曹爽等,2020),风速明显增强,期间平均风速达 $2.8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,大于 $2\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速占比高达

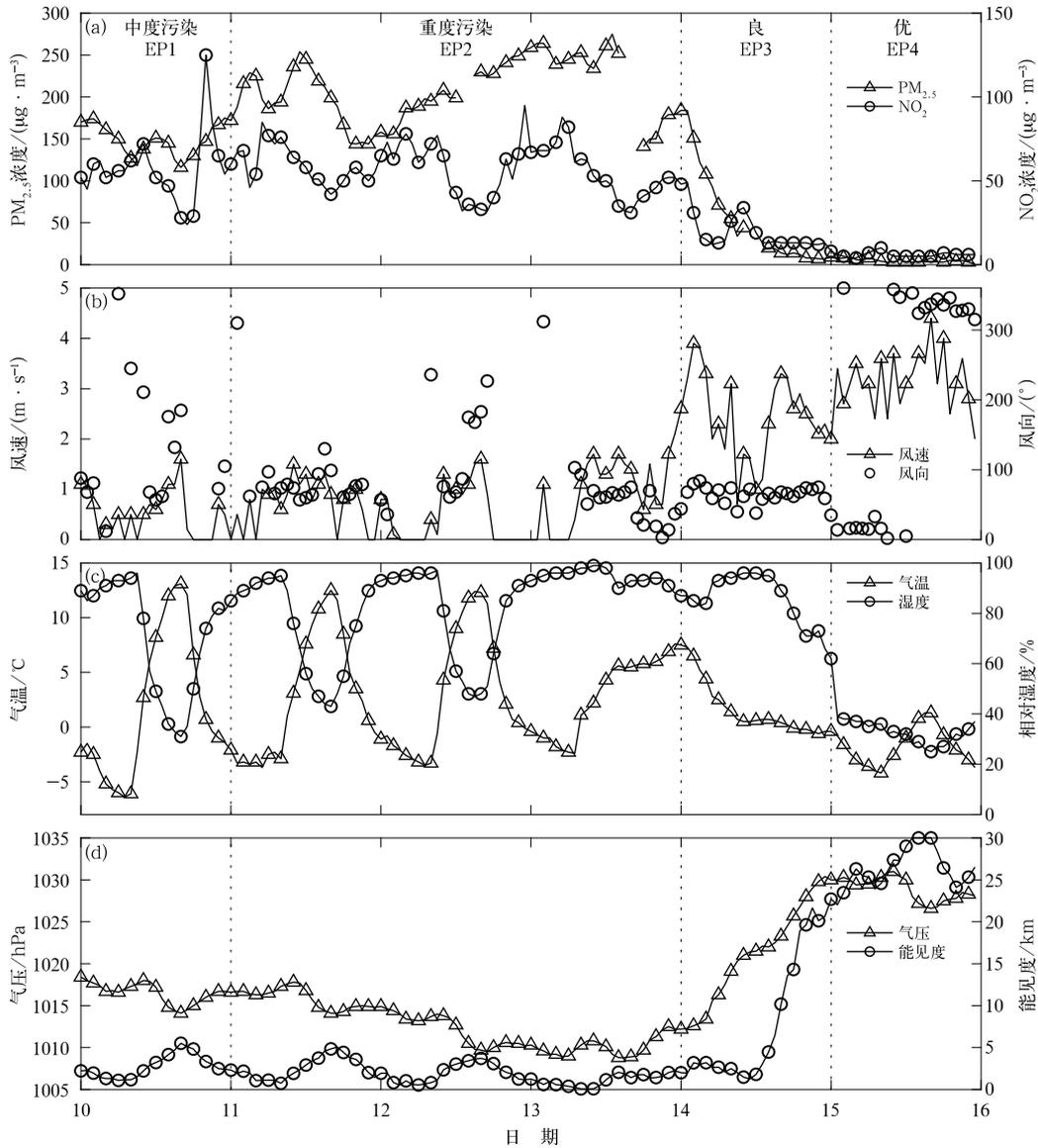


图 1 2020 年 2 月 10—15 日北京大兴国际机场区域污染物小时浓度和气象参数演变 (空气质量数据:大兴旧宫站;气象数据:固安站;EP1—EP4 表示 AQI 污染等级及污染过程,下同)

Fig. 1 Map of regional pollutant concentrations and meteorological parameters of Beijing Daxing International Airport area from 10 to 15 February 2020 (air quality data: Daxing Jiugong Station; meteorological data: Gu'an Station; EP1—EP4 indicate AQI pollution levels and pollution processes, the same below)

87.5%，气温和相对湿度快速降低，平均气温为 0℃，平均相对湿度为 60%，地面气压升高，且天气由暴雪转晴，降雪将颗粒物湿沉降于地面，昼间地面升温，湍流强度增加，污染物迅速扩散，在 EP4 阶段 PM_{2.5} 和 NO₂ 小时浓度均值分别降到 5 μg·m⁻³ 和 6 μg·m⁻³。能见度随着 PM_{2.5} 浓度下降逐渐好转，在 EP4 阶段能见度始终维持在 22 km 以上。相比 EP1—EP2 阶段，EP3—EP4 阶段平均风速增大了 300%，平均相对湿度下降了 25%，PM_{2.5} 和 NO₂ 小时平均浓度分别下降了 97% 和 89%。

1.3 不利气象条件时段逆温特征分析

本节使用的高分辨率温度探空数据来源于北京市观象台，观测时间为每日的 08 时和 20 时（北京时，下同）。采用一阶导数算法 (Guo et al, 2020) 识别逆温层。首先计算一条温度廓线的导数数据，然后从地表至 2000 m 高度检查数据，如果导数为正且 100 m 高度范围内保持为正，则认定为逆温层，一般要求逆温层顶和层底温差大于 0.5℃。如果存在非常薄的负导数层，即层高小于 100 m，则认为该层为逆温层的一部分。最后，将底高度小于 100 m 的逆温层归为接地逆温，大于 100 m 的归为悬浮逆温。逆温层需计算如下参数：(1) 逆温层厚度，即逆温层顶高和底高之间的高度差 ΔH；(2) 逆温强度，公式为 ΔT/ΔH×100，即逆温层顶部和底部温度差

ΔT 除以逆温层厚度 ΔH，一般用单位 ℃·(100 m)⁻¹ 表示。

2020 年 2 月 10—15 日 08 时和 20 时的温度探空曲线见图 2。由温度廓线图可知，EP1—EP2 期间 (2 月 10—13 日) 08 时存在接地逆温，逆温厚度为 560~1254 m，逆温强度为 0.7~2.4 ℃·(100 m)⁻¹，20 时在近地面存在较为浅薄的稳定层结。20 时接地逆温开始发展，由于接地逆温和残留层综合作用导致近地面存在浅薄的稳定层结，经过一夜的发展，到 08 时形成厚度较大的接地逆温层，符合夜间逆温形成并逐渐增厚的逆温发展规律。夜间至早晨稳定层结的存在阻碍了空气的垂直对流运动，不利于污染物的扩散和传输，污染物在逆温层中不断累积形成重污染天气。

EP3 和 EP4 期间受冷空气影响，整体逆温结构不明显，扩散条件较好，空气质量转为优良。

2 飞机尾气源强及特征

根据《北京新机场项目环境影响报告书》，在 2025 年规划情景下，北京大兴国际机场飞机尾气中各污染物排放量分别为 SO₂: 355.30 t·a⁻¹, NO_x: 4873.21 t·a⁻¹, VOCs: 576.71 t·a⁻¹, CO: 3131.94 t·a⁻¹, PM₁₀: 27.87 t·a⁻¹, PM_{2.5}: 27.87 t·a⁻¹。飞机尾气中 SO₂ 和 NO_x 排放量分别占 2020 年大兴

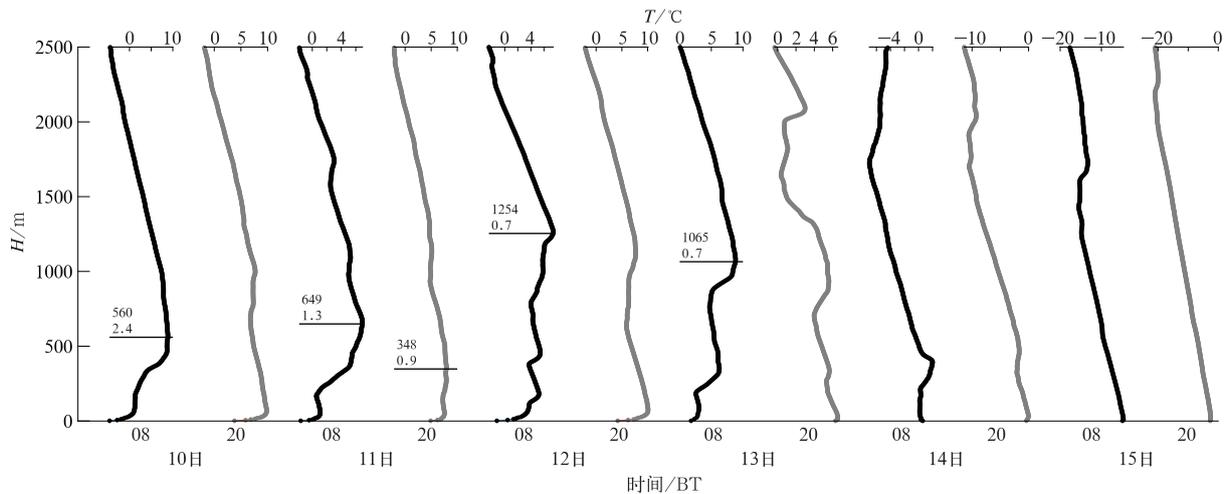


图 2 2020 年 2 月 10—15 日北京市观象台温度廓线

[横线代表接地逆温层厚度；横线上第一行数字为接地逆温层高度，单位：m；第二行为逆温强度，单位：℃·(100 m)⁻¹]

Fig. 2 Temperature profile of Beijing Station from 10 to 15 February 2020

[Horizontal line in each temperature profile represents the ground temperature inversion layer height; the first-line number above the horizontal line is the height of the ground inversion layer, unit: m; and the second-line number is the temperature inversion strength, unit: ℃·(100 m)⁻¹]

区工业企业重点污染物“十三五”总量控制计划中 SO₂ 和 NO_x 目标总量的 55.0%和 57.8%。其中作为二次 PM_{2.5} 重要前体物的 NO_x 排放量最大,因此本次研究以 NO_x、PM_{2.5} 为重点污染物,分析不利气象条件下飞机尾气对大气环境的影响。

本文采用 EDMS 生成飞机尾气在各个高度和水平范围内的一系列立体源强和排放参数。该模型重点关注飞机尾气排放源的设置,飞机在 1 个 LTO 循环中污染物的排放量包含 6 个工作模式,分别为进场 (approach)、进场滑行 (taxi in)、启动 (start

up)、出场滑行 (taxi out)、起飞 (take off) 和爬升 (climb out)。按照机型分类 (表 2)、机型组合 (表 3)、不同时段飞行计划 (表 4, 机场正常运营时间为 07—22 时, 22 时至次日 07 时的飞机架次较少) 和机场跑道起降分配 (图 3) 等信息处理机场尾气排放清单。上述机型分类、机型组合、飞行计划和跑道起降分配数据均基于《北京新机场项目环境影响报告书》。EDMS 生成飞机尾气立体排放源强和排放参数后, 将排放源信息输入污染扩散模式, 进行飞机尾气排放对环境影响的模拟预测。

表 2 北京大兴国际机场机型分类一览表

Table 2 List of aircraft types of Beijing Daxing International Airport

序号	座位数/个	代表机型	等级代字
1	50	EMB145、CRJ-200	B
2	90	ARJ21、EMB190	C
3	150	B737、A320、C919	C
4	210	B757、B767	D
5	260	B787、A350-800、A330-200、A340-300	E
6	310	A350-900、B777、A330-300、A340-600、B747-400	E
7	467	B747-8	F
8	550	A380	F

表 3 北京大兴国际机场 2025 年机型组合比例一览表 (单位: %)

Table 3 List of aircraft types ratio of Beijing Daxing International Airport in 2025 (unit: %)

类别	B	C	D	E	F
国内	2.0	80.0	3.0	15.0	0.0
国际	0.0	48.0	7.0	42.0	3.0

表 4 北京大兴国际机场不同时间段飞行架次比例 (单位: %)

Table 4 Proportion of flight sorties in different time periods of Beijing Daxing International Airport (unit: %)

时段	07—19 时	19—22 时	22 时至次日 07 时
起飞	78	14	8
降落	65	18	17

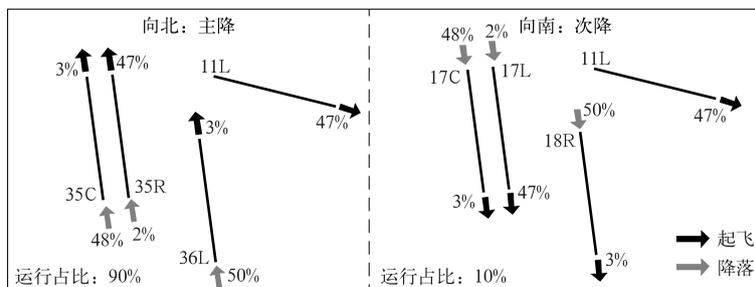


图 3 2025 年北京大兴国际机场不同跑道架次分配

(共 4 条跑道, 主航站区东、西两侧跑道根据距离航站区远近分别命名为东一跑道北向号码: 36L、南向号码: 18R, 尺寸: 3400 m×60 m; 西一跑道北向号码: 35R、南向号码: 17L, 3800 m×60 m; 西二跑道北向号码: 35C、南向号码: 17C, 尺寸: 3800 m×45 m; 侧向跑道为只允许起飞的北一跑道号码: 11L, 尺寸: 3800 m×60 m)

Fig. 3 Allocation map of different runways of Beijing Daxing International Airport in 2025 (Daxing Airport will have 4 runways in 2025. According to the distance from the terminal area, the east and west runways of the main terminal area will be named as follows: the No. 1 east runway, 36L in the north direction, 18R in the south direction, 3400 m×60 m; No. 1 west runway 35R in north direction, 17L in south direction, 3800 m×60 m; No. 2 west runway 35C in north direction, 17C in south direction, 3800 m×45 m; side runway is No. 1 north runway 11L, 3800 m×60 m, only for taking-off)

3 飞机尾气环境影响模拟

北京大兴国际机场于 2019 年投入运营,现阶段运行吞吐量不大,参考意义较小。为反映机场在达到设计运行规模情景下飞机尾气对周边大气环境的影响,本文采用国内外广泛使用的 EDMS,依据上述北京大兴国际机场规划 2025 年的相关基础数据和飞机尾气排放特征,生成机场飞机尾气污染物排放源强,并以 2020 年作为模拟基准年预测了飞机尾气排放对周边大气环境的影响。

3.1 EDMS 模型设置

EDMS 的污染扩散计算内核是稳态烟羽扩散模式,可基于大气边界层数据特征模拟点源、面源、体源等排放污染物在短期(小时平均、日平均)、长期(年平均)的浓度分布,适用于农村或城市地区、简单或复杂地形。地面气象数据采用距离北京大兴国际

机场最近的固安站 2020 年地面逐时风速、风向、温度、云量观测资料;地面气象数据来源于国家气象信息中心。高空气象数据取自中尺度气象模式(WRF 模式)模拟 50 km 内的格点气象资料;该数据层数为 40 层,时间为世界时的 00 时和 12 时,可直接作为 EDMS 气象预处理程序的高空输入文件。地表特征基于北京大兴国际机场周边区域土地利用规划,3 km 内为城市规划用地和工业用地,因此模式采用城市下垫面的地表特征参数。本文的预测方案如表 5 所示,预测时段分为全年预测与不利气象条件时段预测,预测因子为 NO_x 和 $\text{PM}_{2.5}$,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度采用式(1)进行计算:

$$\rho_{\text{PM}_{2.5}} = \rho_{\text{一次PM}_{2.5}} + \varphi_{\text{SO}_2} \rho_{\text{SO}_2} + \varphi_{\text{NO}_2} \rho_{\text{NO}_2} \quad (1)$$

式中: $\rho_{\text{PM}_{2.5}}$ 、 $\rho_{\text{一次PM}_{2.5}}$ 、 ρ_{SO_2} 、 ρ_{NO_2} 分别为 $\text{PM}_{2.5}$ 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 和 NO_2 的质量浓度,单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; φ_{SO_2} 和 φ_{NO_2} 为 SO_2 、 NO_2 浓度换算为二次 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的系数,取值参考《环境影响评价技术导则 大气环境》(生态环境部,2018),分别为 0.58 和 0.44。

表 5 北京大兴国际机场飞机尾气排放环境影响模拟预测方案

序号	方案名称	预测因子	预测时段	预测内容
1	全年预测	NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$	2020 年全年	小时浓度、日均浓度、年均浓度
2	不利气象条件时段预测	NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$	2020 年 2 月 10—15 日	小时浓度、日均浓度

3.2 EDMS 预测结果与分析

根据预测方案采用 EDMS 模拟规划 2025 年北京大兴国际机场飞机尾气污染物在地面的浓度分布情况,采用 2020 年气象条件,得到全年及不利气象条件时段飞机尾气对北京大兴国际机场周边地区的环境影响。

3.2.1 全年预测结果与分析

北京大兴国际机场全年的 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 环境影响预测结果见表 6,其中占标率定义为:

$$P = \frac{\rho}{\rho_0} \times 100\% \quad (2)$$

表 6 2025 年北京大兴国际机场区域主要污染物全年时段最大小时、最大日均及年均质量浓度预测结果(不含机场内部区域)

Table 6 Statistics of the prediction results of the maximum hourly, maximum daily average and annual average mass concentrations of major pollutants at the Beijing Daxing International Airport area throughout the year 2025 (excluding the area inside the airport)

污染物	最大小时浓度		最大日均浓度		平均浓度	
	质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	占标率/%	质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	占标率/%	质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	占标率/%
NO_2	383.106	191.55	102.518	128.15	38.056	95.14
$\text{PM}_{2.5}$	/	/	51.339	68.45	18.457	52.73

式中: P 为污染物地面空气质量浓度占标率,单位:%; ρ 为污染物地面空气质量浓度,单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_0 为污染物环境空气质量浓度标准,单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

由预测结果可知: NO_2 区域最大小时、最大日均、年均贡献浓度占标率分别为 191.55%、128.15%、95.14%; $\text{PM}_{2.5}$ 区域最大日均、年均贡献浓度占标率分别为 68.45%、52.73%。 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 各时段占标率均较高,甚至在机场附近区域出现短期浓度超标,飞机尾气排放对周边环境将产生一定的影响。

NO₂ 和 PM_{2.5} 区域日均浓度前 50 大值发生时段分布如图 4 所示。由图可见,污染物浓度贡献高值主要发生在 10 月下旬至 12 月和 1 月至 3 月上旬的秋、冬季节,与北京市重污染天气高发期吻合,本文所选取的不利气象条件时段也发生于该季节。

3.2.2 不利气象条件时段预测结果与分析

北京大兴国际机场不利气象条件时段排放的 NO₂ 和 PM_{2.5} 预测结果见表 7,由预测结果可知:不利气象条件时段内 NO₂ 区域最大小时、日均贡献浓度占标率分别为 163.11%、109.54%;PM_{2.5} 区域最大日均贡献浓度占标率为 65.71%;NO₂ 和 PM_{2.5} 在不利气象条件时段占标率均较高,NO₂ 在机场附近区域出现超标,说明在不利气象条件下,飞机尾气对周边环境影响较大。不利气象条件下的预测结果

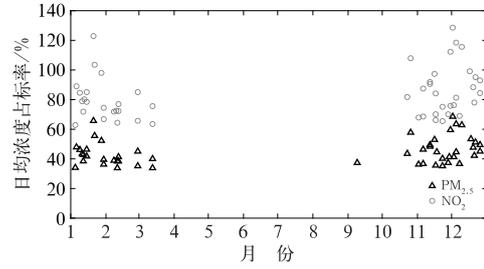


图 4 2025 年北京大兴国际机场区域主要污染物全年时段日均质量浓度前 50 大值发生时段分布

Fig. 4 Distribution map of the top 50 maximum daily mass concentrations of major pollutants at Beijing Daxing International Airport throughout the year 2025

表 7 北京大兴国际机场主要污染物不利气象条件时段最大小时、最大日均质量浓度预测结果(不含机场内部区域)

Table 7 Statistics of the prediction results of the maximum hourly and maximum daily average mass concentration of major pollutants in adverse meteorological conditions at Beijing Daxing International Airport (excluding the area inside the airport)

污染物	最大小时浓度		最大日均浓度	
	质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	占标率/%	质量浓度/($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)	占标率/%
NO ₂	326.210	163.11	87.632	109.54
PM _{2.5}	/	/	49.283	65.71

接近全年预测结果的极大值,说明本文选择的不利气象条件时段具有代表性。下文对此不利气象条件时段的污染物落地浓度和污染气象特征进行分析。

3.2.3 不利气象条件时段污染气象特征分析

EDMS 中飞机尾气污染物落地浓度很大程度上取决于混合层高度和湍流扩散系数(Cimorelli et al, 2005;夏思佳和王勤耕,2009),其中模式定义的混合层高度依赖于对流和机械两个过程,如式(3)所示,模式规定对流边界层(CBL)中混合层高度(z_i)为机械混合层(z_{im})和对流混合层高度(z_{ic})的较大值;在稳定边界层(SBL)中混合层高度只取决于机械湍流(切变湍流),因此 SBL 的混合层高度 z_i 等于 z_{im} 。上述机械混合层高度与摩擦速度(u_*)呈正相关关系,如式(4)所示。模式中扩散系数也分为对流和机械两种成分(SBL 中只含有机成分),分别与对流速度尺度(w_*)和 u_* 大致呈正相关关系。从不利气象条件时段地面风速与摩擦速度的关系(图 5)可知,当风速 $< 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,摩擦速度较小,均 $< 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,当风速 $\geq 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时摩擦速度显著增大,风速与摩擦速度基本呈正相关关系。综上所述,风速大小决定了影响污染扩散能力的摩擦速度、机械

混合层高度和机械湍流扩散系数,即大气污染扩散能力。

$$z_i = \begin{cases} \max(z_{ic}, z_{im}) & \text{CBL} \\ z_{im} & \text{SBL} \end{cases} \quad (3)$$

$$z_{im} \propto u_* \quad (4)$$

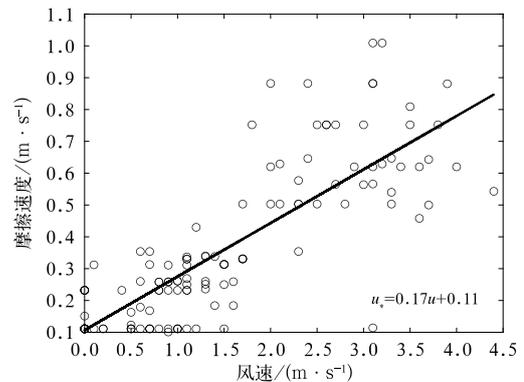


图 5 2020 年 2 月 10—15 日北京大兴国际机场区域地面风速与摩擦速度关系

Fig. 5 Relationship between surface wind speed and friction speed in Beijing Daxing International Airport area from 10 to 15 February 2020

重污染过程期间 EDMS 预测最大小时落地污染物浓度和污染特征参数 (z_{ic} 、 w_* 、 z_{im} 、 u_*) 如图 6 所示。由图 6b 可知在重污染过程期间, 昼间的 w_* 从 08—09 时开始增大, 在中午 (12 时) 至午后 (13 时) 达到最大, 然后持续下降至下午 (16—17 时), z_{ic} 一般从 08—09 时开始持续上升直至 16—17 时消失, 重污染过程中每日的 w_* 和 z_{ic} 差距不大, 说明昼间的对流扩散系数与对流混合层高度在整个过程中变化不大, 两者均不是影响污染物落地浓度的重要因素。由图 6c 可知重污染过程期间 u_* 与 z_{im} 存在较为明显的正相关关系, 且 u_* 与 z_{im} 在 EP1—EP2

和 EP3—EP4 两段时间内存在明显差异。在 EP1—EP2 的污染过程中, 风速基本小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均值为 $0.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_* 始终小于 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均值为 $0.19 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; z_{im} 始终小于 500 m , 均值为 222 m , 均处于较小的水平, 说明此段时间机械湍流扩散能力偏弱, 机械混合层高度偏低; 14 日 00 时前后伴随着冷空气过境, EP3—EP4 期间风速迅速增加到 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 均值达 $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; u_* 增大至 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 均值为 $0.61 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, z_{im} 增大至 500 m 以上, 均值为 1235 m , 机械扩散能力明显增强, 机械混合层高度迅速升高。相比 EP1—EP2 阶段, EP3—EP4 阶段

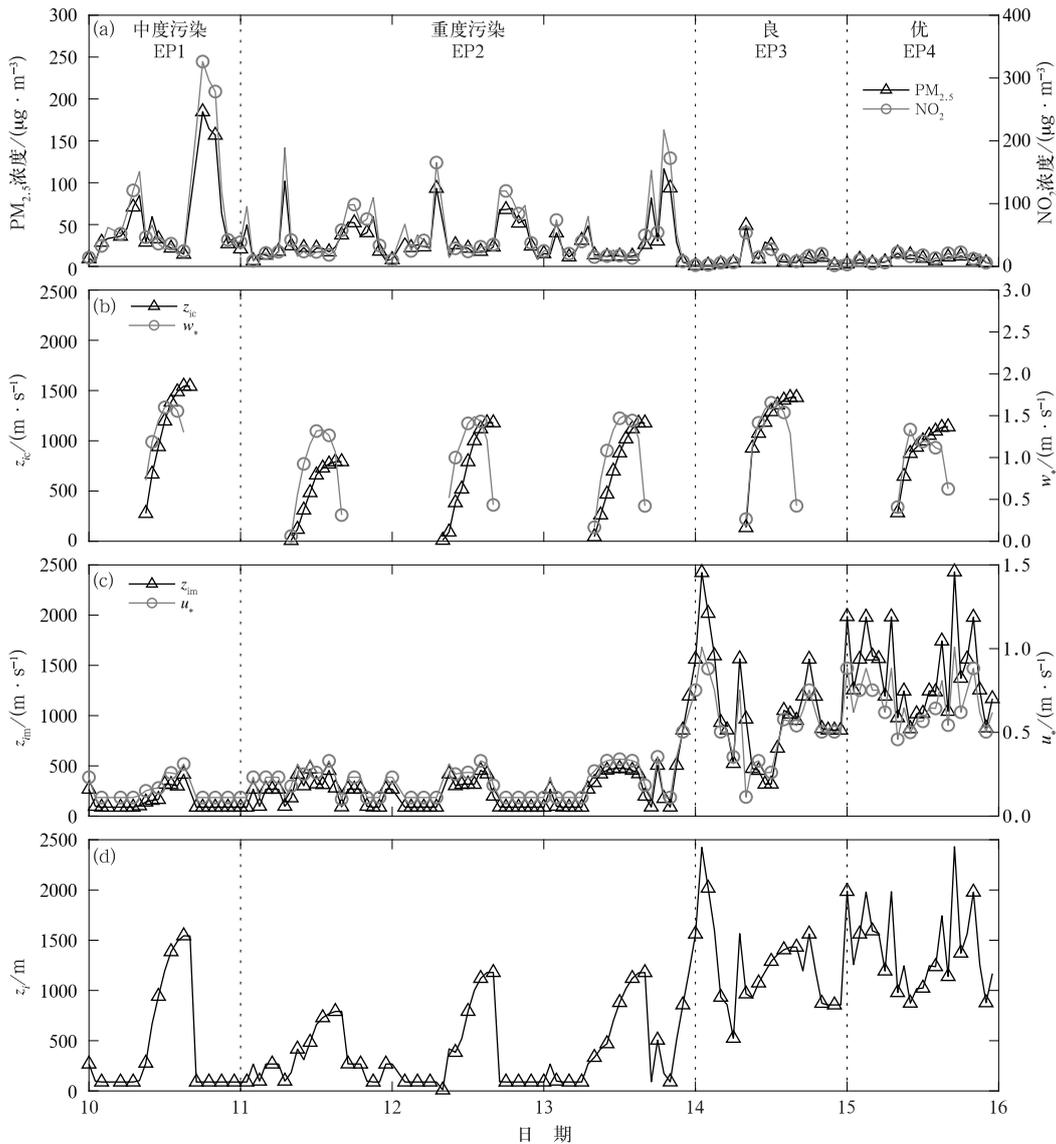


图 6 2020 年 2 月 10—15 日北京大兴国际机场区域模式预测最大小时落地污染物浓度和污染特征参数演变

Fig. 6 Model-predicted maximum pollutant concentration and pollution characteristic parameter evolution in Beijing Daxing International Airport area from 10 to 15 February 2020

摩擦速度均值上升了 221%。

综合考虑图 6b 的对流混合层高度和图 6c 的机械混合层高度得到重污染期间混合层高度(图 6d)。对比图 6a 和 6d 可得,在重污染过程的 EP1—EP2 时段内,由风切变引起的夜间机械混合层高度较低,由太阳辐射形成的日间对流混合层高度相对较高,因此混合层高度此时间段内有明显的日变化特征,即日间高夜间低。由于 EDMS 小时预测结果只代表此小时情况,不考虑污染物累积效应,因此日间相对较高的混合层高度,有利于飞机尾气污染物的垂直扩散,污染物落地浓度值较低。夜间混合层高度较低,污染物难以突破边界层向上输送扩散,而是在较低边界层内滞留,缓慢地沿向下风方向扩散,并较快地随下沉气流扩散到地面,同时较小的水平风也难以将污染物向周边地区输送,导致此时段内夜间污染物落地浓度明显增高(蔡子颖等,2018;徐栋夫等,2020)。EP1—EP2 时间段内 NO_2 最大小时落地浓度范围为 $7.9 \sim 326.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,均值为 $61.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 最大小时落地质量浓度范围为 $4.9 \sim 184.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,均值为 $37.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,考虑区域背景环境污染物浓度值较高,飞机尾气排放将进一步加剧区域重污染程度。EP3—EP4 时段内,大风引起的较强的切变湍流抬高了机械混合层高度,因此 EP3—EP4 阶段混合层高度无论在日间或夜间均处于较高的水平,混合层内扩散能力大大加强,地面污染物能够向上输送到较高的高度,大气环境容量也明显上升,且较大的风速有利于污染物向周边地区扩散,2月14日后污染物浓度迅速降低,EP3—EP4 时间段内 NO_2 最大小时落地浓度范围为 $1.2 \sim 53.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,均值为 $12.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 最大小时落地浓度范围为 $1.1 \sim 49.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,均值为 $8.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,显著低于 EP1—EP2 期间浓度,周边区域背景环境空气质量较好,飞机尾气的影响也较小。相比 EP1—EP2 阶段,EP3—EP4 阶段飞机尾气排放所致的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 最大小时落地浓度均值分别下降了 77%和 80%。

混合层顶存在逆温,污染物只能在逆温层下的混合层内对流弥散,对比图 1a 和图 6d 可知,EP1—EP2 阶段大气污染物浓度的升高也会影响日间混合层顶逆温高度,这是由于空气中的污染物不仅吸收太阳辐射,同时也会削弱地面太阳辐射量,有助于日间逆温的形成。因此,日间逆温和空气污染物之间的相互作用是一个正反馈的过程(Zhang and Li, 2011)。在 EP3—EP4 阶段受到寒潮影响,破坏了日间逆温,降雪过程也有利于清除空气中的污染物,从

而中断了逆温和污染物之间的反馈过程,污染物浓度迅速降低。

综合分析上述重污染过程期间污染气象特征和 EDMS 预测结果可知,京津冀秋、冬季雾-霾消散主要因素为较强的大气水平、垂直运动(周须文等,2020),重污染结束阶段 EP3—EP4 相比重污染阶段 EP1—EP2 平均风速增大了 300%,平均相对湿度下降了 25%,与区域扩散能力密切相关的摩擦速度均值上升了 221%,因此重污染结束阶段 EP3—EP4 环境 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 小时平均浓度分别下降了 97%和 89%,飞机尾气排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 NO_2 最大小时落地浓度分别下降了 77%和 80%。由此可知重污染期间受到弱风高湿、较强的接地逆温等不利气象条件影响,区域环境污染物浓度和飞机尾气污染物落地浓度均处于较高的水平。并且通过分析发现气象条件、污染物扩散能力存在较为明显的日变化,污染物随时间的变化规律为 08—17 时的飞机尾气污染物落地浓度较低,17 时至次日 08 时落地浓度较高,最大的时刻为夜间的 21 时。

4 结论与讨论

依据北京市 2020 年空气质量数据确定不利气象条件时段,采用 EDMS 建立北京大兴国际机场飞机尾气排放清单,并模拟预测了全年及不利气象条件时段的飞机尾气落地浓度分布,通过对不利气象条件时段的污染气象特征和污染物落地浓度时间分布特征的分析得到如下结论:

(1)根据北京市空气质量历史监测数据,选择 2020 年 2 月 10—15 日重污染过程作为不利气象条件时段进行污染气象特征分析,结果表明北京地区秋、冬季不利气象条件基本特征为小静风、高湿度,存在厚度薄、强度大的接地逆温,区域污染扩散条件较差,它们共同作用导致北京地区出现以 $\text{PM}_{2.5}$ 为首要污染物的重污染天气过程,并伴随着低能见度天气。

(2)飞机尾气排放有排放量大、空间分布广的特征,且北京大兴国际机场 2025 年规划显示,二次 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要前体物 NO_x ,其排放量可达 $4873.21 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。全年模式预测结果显示,北京大兴国际机场飞机尾气 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 排放会对周围环境造成一定影响,甚至存在短期超标现象,且区域污染高浓度时段基本发生在重污染高发秋、冬季。

(3)不利气象条件期间的小静风导致决定区域大气扩散能力的摩擦速度和混合层高度参数较小,

影响区域大气扩散能力,使得飞机尾气排放的污染物最大落地浓度较大,进一步恶化周边环境空气质量。冷空气过境后,风速、摩擦速度和混合层高度显著增大,飞机尾气排放污染物落地浓度迅速降低,且重污染期间污染物落地浓度存在较为明显的日变化特征,即 08—17 时的落地浓度较低,17 时至次日 08 时落地浓度较高。

本文讨论的不利气象条件下的飞机尾气影响研究目前在国内外开展较少,由于采用的 EDMS 不具备 $PM_{2.5}$ 二次污染和小静风条件下的模拟能力,下一步可考虑耦合具有上述能力的 CALPUFF、CMAQ 等模式,研制适合国内管理要求的新一代飞机尾气影响预测数值分析模型。

本研究成果对制定不利气象条件下大型枢纽机场的污染控制对策以减轻飞机尾气排放对周边环境空气质量影响具有一定的参考价值。下一步可以在保障机场安全运行的前提下,开展不利气象条件下飞机尾气污染控制措施研究,针对重污染期间的大气扩散特征和规律,设置多种调控措施情景并进行模拟预测,为降低不利气象条件下飞机尾气排放对周边环境的影响,机场完善运行管理和污染控制提供科学依据。

致谢:感谢《飞机尾气对机场区域大气环境影响与减排研究——构建适合北京大兴国际机场飞机尾气影响预测的先进数值分析模型》项目提供的机场排放源清单等资料。

参考文献

伯鑫,段钢,李重阳,等,2017.首都国际机场大气污染模拟研究[J].环境工程,35(3):97-100. Bo X, Duan G, Li C Y, et al, 2017. Air pollution simulation study of Beijing Capital International Airport [J]. Environ Eng, 35(3):97-100(in Chinese).

蔡子颖,张敏,韩素芹,等,2018.天津重污染天气混合层厚度阈值及应用研究[J].气象,44(7):911-920. Cai Z Y, Zhang M, Han S Q, et al, 2018. Research on threshold and regularity of mixed layer thickness in heavy pollution weather in Tianjin[J]. Meteor Mon, 44(7):911-920(in Chinese).

曹爽,何立富,沈晓琳,等,2020.2020年2月大气环流和天气分析[J].气象,46(5):725-732. Cao S, He L F, Shen X L, et al, 2020. Analysis of the February 2020 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 46(5):725-732(in Chinese).

陈林,2013.我国航空运输 LTO 阶段和巡航阶段排放量测算与预测[J].北京交通大学学报(社会科学版),12(4):27-33. Chen L, 2013. Measurement and forecast of the emissions from Chinese air transportation LTO and cruise phases[J]. J Beijing Jiaotong Univ (Soc Sci Ed), 12(4):27-33(in Chinese).

陈玉蓉,2019.四川盆地低能见度天气的变化分析及其对机场运行的影响[D].天津:中国民航大学. Chen Y R, 2019. Change analysis of low visibility weather in Sichuan Basin and its impact on airport operation[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China

(in Chinese).

程念亮,张大伟,陈添,等,2016.2015年北京市两次红色预警期间 $PM_{2.5}$ 浓度特征[J].环境科学,37(7):2409-2418. Cheng N L, Zhang D W, Chen T, et al, 2016. Concentration characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing during two red alert periods[J]. Environ Sci, 37(7):2409-2418(in Chinese).

储燕萍,2013.上海浦东国际机场飞机尾气排放对机场附近空气质量的影响[J].环境监控与预警,5(4):50-52,56. Chu Y P, 2013. The influence of the aircraft exhaust emissions on air quality near Shanghai Pudong International Airport[J]. Environ Monit Forewarning, 5(4):50-52,56(in Chinese).

樊守彬,聂磊,李雪峰,2010.应用 EDMS 模型建立机场大气污染物排放清单[J].安全与环境学报,10(4):93-96. Fan S B, Nie L, Li X F, 2010. Calculating airport emission with EDMS model[J]. J Saf Environ, 10(4):93-96(in Chinese).

桂海林,江琪,康志明,等,2019.2016年冬季北京地区一次重污染天气过程边界层特征[J].中国环境科学,39(7):2739-2747. Gui H L, Jiang Q, Kang Z M, et al, 2019. Analysis of boundary layer characteristics of a heavily polluted weather process in Beijing in winter 2016[J]. China Environ Sci, 39(7):2739-2747(in Chinese).

韩博,孔魏凯,姚婷玮,等,2020.京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单[J].环境科学,41(3):1143-1150. Han B, Kong W K, Yao T W, et al, 2020. Air pollutant emission inventory from LTO cycles of aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei airport group, China[J]. Environ Sci, 41(3):1143-1150(in Chinese).

韩笑颜,周颖,吕喆,等,2020.京津冀典型城市一次重污染过程特征及边界层结构变化对其影响[J].环境科学研究,33(10):2235-2245. Han X Y, Zhou Y, Lü Z, et al, 2020. Characteristics of heavy air pollution process and influence of structure variation of planetary boundary layer in typical cities of Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Res Environ Sci, 33(10):2235-2245(in Chinese).

贺园园,胡非,刘郁珏,等,2019.北京地区一次 $PM_{2.5}$ 重污染过程的边界层特征分析[J].气候与环境研究,24(1):61-72. He Y Y, Hu F, Liu Y J, et al, 2019. Boundary layer characteristics during a heavy $PM_{2.5}$ pollution process in Beijing[J]. Climatic Environ Res, 24(1):61-72(in Chinese).

黄清凤,陈桂浓,胡丹心,等,2014.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,26(3):57-59. Huang Q F, Chen G N, Hu D X, et al, 2014. Analysis of the airplane emission of atmospheric pollutants in Guangzhou Baiyun International Airport[J]. Adm Tech Environ Monit, 26(3):57-59(in Chinese).

刘瑞翔,刘端阳,姚雷,等,2020.近十年连云港市霾变化特征及其气象条件分析[J].气象,46(7):959-970. Liu R X, Liu D Y, Yao L, et al, 2020. Analysis on the variation characteristics and meteorological conditions of haze in Lianyungang City in recent decade[J]. Meteor Mon, 46(7):959-970(in Chinese).

刘兆东,王宏,沈新勇,等,2020.京津冀及周边地区冬季能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度和环境湿度的多元回归分析[J].气象学报,78(4):679-690. Liu Z D, Wang H, Shen X Y, et al, 2020. Multiple regression analysis of winter visibility, $PM_{2.5}$ concentration and humidity in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding regions [J]. Acta Meteor Sin, 78(4):679-690(in Chinese).

- 邵振平,2014. 郑州机场能见度变化特征及雾的成因分析[J]. 气象与环境科学, 37(1): 75-82. Shao Z P, 2014. Visibility variation characteristics and the formation cause analysis of fog in Zhengzhou Airport [J]. Meteor Environ Sci, 37(1): 75-82 (in Chinese).
- 生态环境部,2018. 环境影响评价技术导则 大气环境: HJ 2.2—2018 [S]. 北京: 中国环境科学出版社. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2018. Technical guidelines for environmental impact assessment-Atmospheric environment: HJ 2.2—2018 [S]. Beijing: China Environmental Press (in Chinese).
- 宋利生,2013. 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, 31(6): 46-48, 54. Song L S, 2013. Emission calculation of Chinese airports based on ICAO LTO model [J]. J Civ Aviat Univ China, 31(6): 46-48, 54 (in Chinese).
- 台宏达, 庄子波, 刘海文, 等, 2019. 机场主导能见度仪器自动观测方法研究[J]. 气象科技, 47(2): 222-228, 311. Tai H D, Zhuang Z B, Liu H W, et al, 2019. Automatic observation methods of airport prevailing visibility [J]. Meteor Sci Technol, 47(2): 222-228, 311 (in Chinese).
- 王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等, 2014. 北京冬季 PM_{2.5} 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析[J]. 气候与环境研究, 19(2): 173-184. Wang Y, Wang L L, Zhao G N, et al, 2014. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM_{2.5} heavy pollutions in Beijing during winter [J]. Climatic Environ Res, 19(2): 173-184 (in Chinese).
- 夏卿, 左洪福, 杨军利, 2008. 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, 28(7): 1469-1474. Xia Q, Zuo H F, Yang J L, 2008. Evaluation of LTO cycle emissions from aircraft in China's civil aviation airports [J]. Acta Sci Circumstantiae, 28(7): 1469-1474 (in Chinese).
- 夏思佳, 王勤耕, 2009. 基于 AERMOD 模式的大气扩散参数方案比较研究[J]. 中国环境科学, 29(11): 1121-1127. Xia S J, Wang Q G, 2009. Comparison of different schemes for diffusion parameterization based on AERMOD [J]. China Environ Sci, 29(11): 1121-1127 (in Chinese).
- 徐栋夫, 曹萍萍, 王源程, 2020. 成都一次重污染过程的气溶胶光学特性垂直分布[J]. 气象, 46(7): 948-958. Xu D F, Cao P P, Wang Y C, 2020. Study of the vertical distribution of aerosol optical properties during a heavy pollution event in Chengdu [J]. Meteor Mon, 46(7): 948-958 (in Chinese).
- 杨芮, 2018. 北京首都国际机场离场地面污染物排放量估算[J]. 科技创新与应用, (35): 12-14, 16. Yang R, 2018. Estimation of discharge amount of pollutants on the ground of Beijing Capital International Airport [J]. Technol Innovation Appl, (35): 12-14, 16 (in Chinese).
- 袁远, 吴琳, 邹超, 等, 2018. 天津机场飞机污染排放及其特征研究[J]. 环境工程, 36(9): 81-86, 58. Yuan Y, Wu L, Zou C, et al, 2018. Air pollutants emission of Tianjin Airport and its characteristics [J]. Environ Eng, 36(9): 81-86, 58 (in Chinese).
- 赵慧霞, 王维国, 李泽椿, 等, 2010. 雾对我国交通运输的不利影响及对策[J]. 气象与环境学报, 26(2): 58-62. Zhao H X, Wang W G, Li Z C, et al, 2010. Effects of fog on traffic and transportation and the countermeasures in China [J]. J Meteor Environ, 26(2): 58-62 (in Chinese).
- 周须文, 韩世茹, 井元元, 等, 2020. 京津冀雾霾消散因子及其阈值研究[J]. 气象学报, 78(1): 154-162. Zhou X W, Han S R, Jing Y Y, et al, 2020. A study on haze dissipation factors and their thresholds over Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. Acta Meteor Sin, 78(1): 154-162 (in Chinese).
- 朱佳琳, 胡荣, 张军峰, 等, 2020. 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), 44(3): 558-563. Zhu J L, Hu R, Zhang J F, et al, 2020. Research on the measurement and evolution characteristics of aircraft carbon emissions in China [J]. J Wuhan Univ Technol (Transp Sci Eng), 44(3): 558-563 (in Chinese).
- 朱艳玲, 2015. EDMS 在机场大气污染预测中的应用与研究[D]. 兰州: 兰州交通大学. Zhu Y L, 2015. EDMS application and study of air pollution forecast in the airport [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University (in Chinese).
- Brasseur G P, Cox R A, Hauglustaine D, et al, 1998. European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions [J]. Atmos Environ, 32(13): 2329-2418.
- Cimorelli A J, Perry S G, Venkatram A, et al, 2005. AERMOD: a dispersion model for industrial source applications. Part I: general model formulation and boundary layer characterization [J]. J Appl Meteor Climatol, 44(5): 682-693.
- Guo J P, Chen X Y, Su T N, et al, 2020. The climatology of lower tropospheric temperature inversions in China from radiosonde measurements: roles of black carbon, local meteorology, and large-scale subsidence [J]. J Climate, 33(21): 9327-9350.
- Liu Y, Isaksen I S A, Sundet J K, et al, 2003. Impact of aircraft NO_x emission on NO_x and ozone over China [J]. Adv Atmos Sci, 20(4): 565-574.
- Mahashabde A, Wolfe P, Ashok A, et al, 2011. Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions [J]. Prog Aerosp Sci, 47(1): 15-52.
- Marais K, Lukachko S P, Jun M, et al, 2008. Assessing the impact of aviation on climate [J]. Meteor Z, 17(2): 157-172.
- Masiol M, Harrison R M, 2014. Aircraft engine exhaust emissions and other airport-related contributions to ambient air pollution: a review [J]. Atmos Environ, 95: 409-455.
- Sausen R, Schumann U, 2000. Estimates of the climate response to aircraft CO₂ and NO_x emissions scenarios [J]. Climatic Change, 44(1-2): 27-58.
- Schürmann G, Schäfer K, Jahn C, et al, 2007. The impact of NO_x, CO and VOC emissions on the air quality of Zurich Airport [J]. Atmos Environ, 41(1): 103-118.
- Zhang Q, Li H Y, 2011. A study of the relationship between air pollutants and inversion in the ABL over the city of Lanzhou [J]. Adv Atmos Sci, 28(4): 879-886.
- Zhu Y, Fanning E, Rong C Y, et al, 2011. Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large international airport [J]. Atmos Environ, 45(36): 6526-6533.