

文章编号:1671-1637(2026)05-0246-14

## 基于运行仿真的机场飞机排放本地化修正模型及应用

马思萌<sup>1,2</sup>, 汤慧娟<sup>1,2</sup>, 郑宸<sup>1,2</sup>, 韩博<sup>\*1,2</sup>, 赵静波<sup>1,2</sup>, 于剑<sup>2,3</sup>

(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. 中国民航管理干部学院, 北京 100102)

**摘要:** 交通工具的污染物排放量及分布是交通系统优化的重要依据之一, 鉴于机场实际运行条件对飞机污染物排放具有直接影响, 且各影响因素之间存在复杂的交互作用, 构建了基于运行仿真的机场飞机排放本地化修正模型, 以实现排放的精准定量。基于全空域及机场仿真模型开展面向机场排放的“多场景-多因素”仿真试验, 获取了运行时间、燃油流率等排放参数的多元数据集; 利用 $k$ 近邻互信息算法和夏普利加性解释模型识别影响排放的关键因素, 并量化了各因素对燃油消耗和污染物排放量的贡献程度, 据此构建了排放本地化修正参数集; 结合福州长乐国际机场的历史航班数据, 开展实例应用研究, 建立了2022年该机场飞机精细化排放清单。分析结果表明: 大气温度、地面风速风向、飞机进离场速度、管制间隔和天气现象是影响机场飞机排放的主要因素; HC和CO排在滑行阶段占比较高, 分别占总排放的97.4%和94.2%, 而NO<sub>x</sub>和PM<sub>2.5</sub>排在爬升和起飞阶段占比较高, 两阶段占比之和分别为52.9%和66.1%; 随垂直高度的增加, 各污染物排放总体均呈现先增大后减小再逐渐趋于平稳的态势, HC、CO、SO<sub>2</sub>和PM<sub>2.5</sub>的排放峰值出现在200~350 m范围内, 而NO<sub>x</sub>和CO<sub>2</sub>的排放峰值则集中于300~500 m范围内, 计算结果与基于选定航班机载实时记录数据的排放计算结果的相对偏差仅为0.6%~1.3%, 而与基于国际民用航空组织基准排放模型估算结果的相对偏差为11%~23%。建立的基于运行仿真的机场飞机排放本地化修正模型可为评估机场运行污染排放效应及制定科学减排对策提供技术支撑。

**关键词:** 航空运输; 机场飞机排放; 运行仿真; 大气污染;  $k$ 近邻互信息; SHAP

**中图分类号:** U8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.027

### Localized correction model for airport aircraft emissions based on operational simulation and its application

MA Si-meng<sup>1,2</sup>, TANG Hui-juan<sup>1,2</sup>, ZHENG Chen<sup>1,2</sup>, HAN Bo<sup>\*1,2</sup>, ZHAO Jing-bo<sup>1,2</sup>, YU Jian<sup>2,3</sup>

(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. Civil Aviation Management Institute of China, Beijing 100102, China)

**Abstract:** The emission and distribution of transportation pollutants are an important basis for

**出版历程:** 2025-03-20 收稿, 2025-06-05 修回, 2025-07-08 录用

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(U2133206, 42305192, U1933110); 天津市教委科研项目(2024KJ102)

**作者简介:** 马思萌(1990-), 女, 河北保定人, 副教授, 理学博士, E-mail: smma@cauc.edu.cn.

**\*通信作者:** 韩博(1982-), 男, 天津人, 教授, 博士生导师, 理学博士, E-mail: bhan@cauc.edu.cn.

**引用格式:** 马思萌, 汤慧娟, 郑宸, 等. 基于运行仿真的机场飞机排放本地化修正模型及应用[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(5): 246-259.

**Citation:** MA Si-meng, TANG Hui-juan, ZHENG Chen, et al. Localized correction model for airport aircraft emissions based on operational simulation and its application[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(5): 246-259.

transportation system optimization. Given that the actual operating conditions of airports directly affect airport aircraft emissions and that complex interactions exist among various factors, a localized correction model for airport aircraft emissions based on operational simulation was developed to achieve accurate emission quantification. Through the total airspace & airport modeller (TAAM), “multi-scenario-multi-factor” simulation experiments for airport aircraft emissions were conducted to obtain a multivariate dataset of emission parameters including operational time and fuel flow rate. The k-nearest neighbor mutual information algorithm and SHAP model were employed to identify the key factors affecting emissions and to quantify the contribution of each factor to fuel consumption and pollutant emissions. Consequently, a localized emission correction parameter set was constructed. Using historical flight data from Fuzhou Changle International Airport, a case study was conducted and a refined emission inventory was established for aircraft at this airport in 2022. Analysis results indicate that atmospheric temperature, surface wind speed and direction, aircraft approach and departure speeds, air traffic control separation, and weather phenomena are the primary factors influencing airport aircraft emissions. During the taxiing phase, HC and CO represent a substantial proportion of total emissions, accounting for 97.4% and 94.2%, respectively. NO<sub>x</sub> and PM<sub>2.5</sub> emissions are predominantly observed during the climb and takeoff phases, and the sums of proportions of the two stages are 52.9% and 66.1%, respectively. As altitude increases, emissions of various pollutants generally exhibit a trend of initially rising, followed by a decline, and ultimately stabilizing. The emission peak of HC, CO, SO<sub>2</sub>, and PM<sub>2.5</sub> occurs within the altitude range of 200-350 m, whereas that of NO<sub>x</sub> and CO<sub>2</sub> occurs within the 300-500 m range. The relative deviation between the calculated results and those based on selected flight onboard real-time recorded data ranges from 0.6% to 1.3%, whereas the relative deviation from the estimation results derived from the International Civil Aviation Organization (ICAO) baseline emission model estimation results varies from 11% to 23%. The localized correction model for airport aircraft emissions based on operational simulation can provide technical support for assessing the pollution emission effects of airport operations and formulating scientific emission reduction strategies.

**Keywords:** air transportation; airport aircraft emission; operational simulation; air pollution; k-nearest neighbor mutual information; SHAP

**Publication history:** Received 2025-03-20; Received in revised form 2025-06-05; Accepted 2025-07-08

**Funding:** National Natural Science Foundation of China (U2133206, 42305192, U1933110); Scientific Research Project of Tianjin Education Commission (2024KJ102)

\* **Corresponding author:** HAN Bo, professor, PhD, E-mail: bhan@cauc.edu.cn.

## 0 引言

随着经济增长和全球化进程的加快,中国民航运输需求持续增长,航空业发展速度位居世界前列。截至 2024 年底,中国运输机场(不含港澳台地区)数量达到 263 个,完成运输总周转量 1 485.17 亿吨公里<sup>[1]</sup>,预计未来中国航空运输量仍将以每年 6% 的速度增长。在此背景下,民航运输导致的污染物排放已成为全国大中城市大气污染防治的重点关

注对象之一<sup>[2]</sup>。民航飞机的飞行阶段主要分为高空巡航和机场起降阶段。由于起降阶段的飞行高度位于大气边界以下,其对城市环境空气质量和人体健康的影响更为显著<sup>[3-4]</sup>。精准评估机场污染物排放和时空分布是优化机场运行、制定科学减排对策的基础和关键。

国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)提出的基准排放清单模型是目前国内外应用最为广泛的机场排放估算方

法<sup>[5]</sup>。除此之外,基于传统的数学模型、飞机动力学方程、飞机性能数据库(Base of Aircraft Data, BADA)性能模型等方法也常用于计算机场飞机污染物排放量。然而,这些方法大多采用理想的参数假设,与实际条件存在差异,对排放计算结果带来较大不确定性<sup>[6-7]</sup>。研究表明<sup>[8]</sup>,由于飞行时间、耗油量及排放指数等参数与实际起飞质量、飞行高度、大气环境条件密切相关,飞机实际运行中的污染物排放指数与 ICAO 提供的基准数据存在较大差异。为提升排放估算的准确性,有研究通过考虑大气混合层高度等外界条件的影响<sup>[9]</sup>对 ICAO 基准模型参数进行了修正。然而,现有研究往往仅考虑单一或少量对机场排放有影响的因素,且对影响机制的探究不足,对机场排放的精准定量带来了极大挑战。此外,部分学者尝试利用机器学习技术建立飞机污染物排放预测模型<sup>[10]</sup>,并探究排放影响因素<sup>[11]</sup>,但该方法需要依赖大量实际运行数据来确保预测精度。虽然快速存取记录器、二次监视雷达等高精度实际运行信息能够显著提高飞机排放估算的准确性<sup>[12]</sup>,但广泛获取此类数据往往存在较大难度。相比之下,机场交通运行系统仿真模型通过设置不同情景,能够获得大量飞行轨迹数据,为探索机场运行与排放之间的复杂影响关系提供了重要条件。随着此类模型可信度的不断提高,其在机场场面与陆侧交通的集成仿真<sup>[13]</sup>、空域与跑道资源的协同优化<sup>[14-15]</sup>、发动机性能分析<sup>[16]</sup>和航班延误预测<sup>[17]</sup>等多个领域得到广泛应用,然而,应用此类模型进行机场排放高精度测算的研究尚不多见。考虑到机场实际运行条件(如机场交通流量、发动机推力、气象条件等)会直接影响飞机排放,且不同影响因素之间可能存在复杂交互作用,因此有必要研究机场排放的关键影响因素,对排放进行本地化多参数修正,从而提高机场排放估计的准确性。

针对上述问题,本研究首先基于全空域及机场仿真模型(Total Airspace & Airport Modeller, TAAM)开展面向机场的“多场景-多因素”仿真试验,充分考虑了流量控制、水平调速、天气现象、大气温度、近地面风速风向等多种因素与飞机燃油消耗和排放之间的复杂关系,构建了基于运行仿真的机场飞机排放本地化修正模型,为准确评估机场飞机排放提供技术支撑。同时,在福州长乐国际机场(简称福州机场)进行了实例研究,建立了 2022 年该机场飞机精细化排放清单,并探究了其排放特征。

## 1 基于运行仿真的机场飞机排放本地化修正模型的建立

### 1.1 模型概述

机场交通流量、飞机发动机推力、气象条件等因素都会对飞机大气污染物排放造成一定的影响,因此,即使在相同机场的起降飞行中,不同飞机的性能参数和飞行轨迹也存在较大差异,最终影响机场的污染物排放水平及其分布情况。本文建立的基于运行仿真的机场飞机排放本地化修正模型,计算流程如图 1 所示( $\theta$  为空管条件, $\omega$  为气象条件),主要包括以下内容。

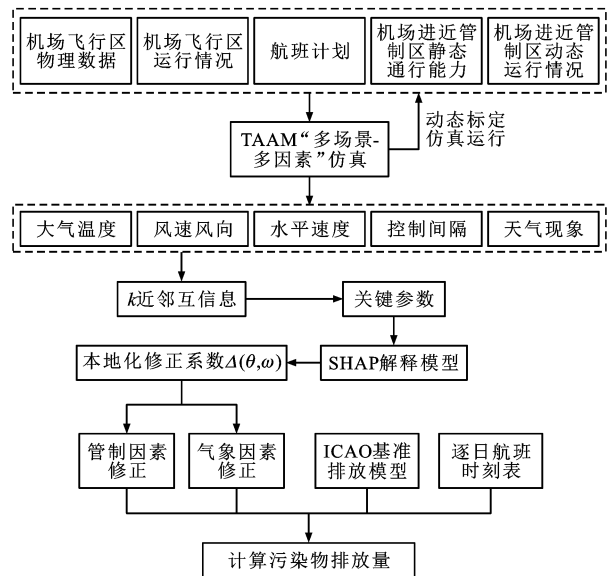


图 1 本地化修正模型流程

Fig. 1 Flow of the localized correction model

(1) 利用 TAAM,搭建机场空侧及空域的机场运行仿真平台,进行面向机场排放的“多场景-多因素”仿真试验,获取排放参数(运行时间、燃油流率、排放指数等)的多元数据集。

(2) 利用  $k$  近邻互信息特征选择方法,识别影响机场飞机污染物排放的相关变量子集。

(3) 利用夏普利加性解释(Shapley Additive Explanation, SHAP)模型,计算所述相关变量子集中各目标特征的归因值,确定机场飞机排放本地化修正系数集。

(4) 基于 ICAO 基准排放模型,结合机场逐日航班时刻表,初步计算飞机污染物排放量,利用本地化修正系数集对排放结果进行修正。

### 1.2 基于 TAAM 的机场交通运行仿真流程

TAAM 不仅能仿真整个空地交通运行,也能模拟具体的飞机作业环节,可用于空中交通管理(Air

Traffic Management, ATM)和地面运行管理(Ground Operation Management, GRD)中具体运行方案的深入分析,其仿真模拟具有较强的细节刻画能力。通过设置不同的仿真场景,能够细致地模拟ATM和GRD的各项运行环节,进行门到门的全过程仿真,实现各种运行方案的对比分析与评估。TAAM的空中交通管理模拟采用了互动式的三维空间建模,进一步通过加入时间变量,在四维方向上实现系统运行的实时仿真监控,能够及时探测并解决潜在的冲突问题,极大提升模型空域管理的灵活性。本研究以福州机场为例,搭建机场交通运行仿真平台。

### 1.2.1 福州机场基本情况

福州机场位于福州市中心东南端38.8 km处,机场北临闽江口,东、南濒海,半径5 km之内无高山,地势较为平坦。向西、西北、西南延伸,高山环抱,地势较为复杂,特别是机场以西500~1 000 m的山接连不断,整个机场净空条件良好,是4E级民用国际机场。2022年,福州机场完成旅客吞吐量5 739 444人次,货邮吞吐量91 837.449 t,航班起降58 216架次,分别排在中国第32、27、41位。

福州机场为单跑道运行,03R和21L号跑道真方位角分别为27°和207°,跑道入口标高分别为6.3、14.3 m,跑道长3 600 m、宽45 m,非全跑道使用距离为3 485 m,升降带长3 720 m、宽300 m,跑道端安全区长300 m、宽120 m,无停止道、净空道。该机场实施机坪运行管理,福州地面负责所有飞机放行许可和开车指令的发布。塔台管制区以福州机场跑道基准点为圆心,20 km为半径的弧,以及与距离跑道中心线两侧各10 km的跑道平行线相交所围成的区域,垂直范围为修正海平面气压高度900 m(含)。该机场运行以区域导航(Area Navigation, RNAV)飞行程序为主用程序,进近以使用仪表着陆系统进近方式为主。起落航线位于跑道的西侧,C、D类飞机起落航线高度为700 m,A、B类飞机起落航线高度为400 m。

### 1.2.2 机场仿真模型配置

基于TAAM的仿真模拟流程主要包括静态模型搭建、动态模型标定和运行数据输出3部分。

#### (1)静态模型搭建

录入机场跑道及滑行道、航路点及导航台的配备、标准进离场程序、扇区结构、航班飞行计划等模型建立所需的相关数据,建立机场静态模型。考虑到福州地区军航活动特点,军航活动时所有飞机均使用标准进离场航线,雷达管制引导机动区域限制

在BZ-RUPOX-DO-ENVEN闭合区域内。

#### (2)动态模型标定

根据福州机场和进近空域内相关的移交协议和管制思路进行TAAM模型的标定和动态修正,识别运行中存在的问题,并加入规则、限制等及时做出调整,从而使模型更贴近实际运行情况。针对机场仿真运行过程中存在的飞机冲突问题,TAAM中内置了FMA和Intrail两种解决策略。为使福州机场的基准仿真运行模型更接近实际的管制过程,得到更多的运行数据,通过对比2种方案的输出结果,针对福州进近空域模型,最终选取FMA搭配空域规则的冲突解决模式。此外,为确保仿真模型与实际情况的一致性,还需考虑空域内各扇区之间的移交规定。通过设置相应的扇区雷达间隔和扇区容量,编写适用的速度和高度限制、新航路改飞等运行规则,以符合既定的管制移交要求。

#### (3)运行数据输出

在确保仿真模拟结果与机场实际运行情况比较接近、可靠的情况下,输出福州机场当前空域、管制运行、航班计划、具体航班状态、航班燃油消耗等排放参数的多元数据集。

## 1.3 $k$ 近邻互信息特征选择方法

$k$ 近邻算法( $k$ -nearest Neighbor, KNN)是Cover等<sup>[18]</sup>在1967年提出的分类算法,算法理论较简单、运算量较小,但存在 $k$ 值选取敏感的问题。而 $k$ 近邻互信息算法避免了直接计算概率密度分布函数,在高维空间具有较好的鲁棒性<sup>[19]</sup>。因此,互信息广泛应用于度量特征与目标变量之间的相关性,且该度量准则不受变量之间是否是线性关系的影响。具体来说,给定一个特征变量集合 $X\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 和一个目标变量集合 $Y\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$ ,对于每个特征 $x_i$ ,将其与目标变量 $Y$ 进行 $k$ 近邻匹配,即找出与该特征最相关的 $k$ 个样本。或者说,统计每个特征与目标变量的共现次数,即在 $k$ 个最近邻样本中特征和目标变量同时出现的次数。

2个变量集合之间的互信息MI( $X, Y$ )定义为

$$MI(X, Y) = - \int \int p(x, y) \lg \left[ \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \right] dx dy \quad (1)$$

式中: $p(x)$ 、 $p(y)$ 分别为 $X$ 与 $Y$ 的边缘概率分布; $p(x, y)$ 为2个随机变量之间的联合概率分布。

为避免特征变量维数过大而出现概率分布估计准确度下降的“维数灾难”问题,Stogbauer等<sup>[20]</sup>提出了一种直接对变量熵和互信息的估计方法,基本思路为:在 $X$ 和 $Y$ 构成的样本空间 $\Phi(X, Y)$ 中,以 $\rho_i/2$ 为

点  $\varphi_i = (x_i, y_i)$  到其  $k$  近邻的距离,  $\rho_{xi}$  和  $\rho_{yi}$  分别为点  $\varphi_i = (x_i, y_i)$  映射到  $X$  轴和  $Y$  轴的距离, 通过计算每个特征变量与目标变量的互信息, 得到特征变量的重要性排序, 从而选择最相关的特征参与后续的研究分析。

$k$  近邻算法下的估计熵  $H$  表示为

$$H = \frac{m}{n} \sum_{i=1}^n \ln(2p_i) + \ln(c_m) + \psi(n) - \psi(k) \quad (2)$$

式中:  $p_i$  为  $x_i$  与第  $k$  个近邻点之间的距离;  $c_m$  为单位球体的体积;  $\psi(\cdot)$  为双  $\Gamma$  函数, 且满足  $\psi(1) = 0.5773$  和  $\psi(x+1) = \psi(x) + x^{-1}$ ,  $\psi(n)$  和  $\psi(k)$  分别表示该函数在  $n$  和  $k$  处的取值,  $n$  为样本总数。

$\ln$  函数的值表示为

$$\ln[\rho(x)] = \psi(k) - \psi(n) - mE[\ln(\rho)] - \ln(c_m) \quad (3)$$

特征与目标变量之间的互信息表示为

$$\begin{aligned} MI(X, Y) = & -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\psi(\alpha_{xi} + 1) + \psi(\alpha_{yi} + 1)] + \\ & \psi(n) + \psi(k) \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\alpha_{xi}$  为在特征变量  $X$  的数据集合中与  $x_i$  距离小于  $\rho_i/2$  的数据点个数;  $\alpha_{yi}$  为与  $y_i$  距离小于  $\rho_i/2$  的数据点个数。

多个变量 ( $X_1, X_2, \dots, X_m$ ) 之间的互信息可由式(4)扩展得到, 表示为

$$\begin{aligned} MI(X_1, X_2, \dots, X_m) = & -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\psi(\alpha_{xi1} + 1) + \\ & \psi(\alpha_{xi2} + 1) + \dots + \psi(\alpha_{xim} + 1)] + \psi(n) + \psi(k) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $\alpha_{xim}$  为变量  $X_m$  在第  $i$  个样本中的取值。

#### 1.4 基于 SHAP 模型的排放本地化修正系数集构建

SHAP 是一种基于博弈论思想的模型输出结果解释方法, 其将每个特征变量看作一个玩家, 模型输出的结果看作众多玩家合作的项目收益, 由于每个玩家在项目中的贡献是不同的, 计算 SHAP 值可以保证每个玩家根据贡献的多少获得公平的收益份额<sup>[21]</sup>。通过计算加入一个特征模型后的边际贡献, 并考虑该特征在所有特征序列情况下不同的边际贡献, 再取所有情况下边际贡献的均值, 即得到该特征的 SHAP 值。因此, SHAP 值可以起到特征权重测度的作用, 表征不同特征变量对仿真模型输出结果的边际贡献程度。SHAP 模型的数学描述为一种可加特征归因方法, 将黑盒模型的结果解释为每个输入特征的归因值之和: 假设第  $i$  个特征为  $x_i$ , 模型对第  $i$  个样本的输出结果为  $y_i$ , 则有

$$y_i(x) = \mu_0 + \sum_{i=1}^n \mu_i z_i \quad (6)$$

SHAP 值的定义为

$$\begin{cases} \mu_i = \sum_S \frac{|S|!(q-|S|-1)!}{q!} [F(S \cup \{x_i\}) - F(S)] \\ S \subseteq \frac{\{x_1, x_2, \dots, x_n\}}{x_i} \\ z_i = 0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $q$  为输入特征的数目;  $\mu_0$  为所有样本特征输出结果的均值;  $\mu_i$  为单个特征  $x_i$  的归因值, 即 SHAP 值;  $S$  为剔除单个特征  $x_i$  后剩余的特征子集;  $z_i$  为针对文本特征引入的 0-1 变量, 表示特征  $x_i$  的存在性。

通过上述公式衡量每个特征的边际贡献值, 当目标特征的 SHAP 值大于 0 时, 说明该目标特征对模型输出结果有促进作用, 当目标特征的 SHAP 值小于 0 时, 说明该目标特征对模型输出起抑制作用, 且 SHAP 值的绝对值越大表示对模型输出的影响作用越强。

根据 TAAM 模型输出的“多场景-多因素”排放参数的多元数据集, 提取不同场景下各航班的运行时间、燃油流率和燃油消耗量数据, 利用 SHAP 解释模型得到各特征的 SHAP 值, 即排放关键影响因素对福州机场燃油消耗的边际贡献值, 建立机场飞机排放本地化修正系数集  $\Delta(\theta, \omega)$ , 在本研究中主要取决于空管条件  $\theta$  和气象条件  $\omega$ , 表示为

$$\Delta(\theta, \omega) = \frac{\bar{\mu}_l}{\sum_j f_{i,j,l}} \quad (8)$$

式中:  $\bar{\mu}_l$  为特征  $l$  的平均 SHAP 值, 即相应影响因素对飞机燃油消耗的具体贡献值, 通过对同一参数设置进行了 11 次独立仿真运行, 选取延误航班平均延误时间排名第 6 位(即中位数)对应的燃油消耗值作为该场景下的代表性仿真结果<sup>[22]</sup>;  $f_{i,j,l}$  为特征  $l$  对应的 TAAM 模型中飞机  $i$  执行飞行阶段  $j$  的燃油消耗结果输出值。

值得注意的是, 本研究通过 SHAP 值与仿真模型输出的燃油消耗比值的综合分析, 构建兼顾因子重要性与全年频次分布的本地化修正系数集, 从而提升排放估算的合理性与适应性。

在此基础上, 结合 ICAO 基准排放模型<sup>[23]</sup>(如式(9)所示), 利用 TAAM 模型中获取的不同飞行阶段运行时间代替 ICAO 参考值, 计算本地化修正后的飞机污染物排放量

$$E_{i,j,k} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n n_i F_{i,j}(60t_{i,j}) I_{i,j,k} \quad (9)$$

$$E'_{i,j,k} = [1 + \Delta(\theta, \omega)] E_{i,j,k} \quad (10)$$

式中:  $E_{i,j,k}$  为飞机  $i$  执行飞行阶段  $j$  时污染物  $k$  的排放量;  $n_i$  为飞机  $i$  的发动机台数;  $F_{i,j}$  为飞机  $i$  执

行飞行阶段  $j$  对应的燃油流率;  $t_{i,j}$  为飞机  $i$  执行飞行阶段  $j$  对应的运行时间;  $I_{i,j,k}$  为飞机  $i$  执行飞行阶段  $j$  时污染物  $k$  的排放指数,数据来源于发动机排放数据库(Aircraft Engine Emissions Databank, EEDB)数据库,并基于 BFFM2 (Boeing Fuel Flow Method 2, BFFM2)方法<sup>[24]</sup>对其进行修正;  $E'_{i,j,k}$  为飞机  $i$  执行飞行阶段  $j$  时污染物  $k$  的修正排放量。

1.5 机场“多场景-多因素”仿真试验设置

空中交通管制对航班的安全、高效和有序执行至关重要。航班的航线规划和航路选择、高度分配、速度调配、起降程序和流量间隔管理等都受到空中交通管制的调控。其中,等待、调速、引导等各种管制指令的次数和准确性会直接影响机场交通运行流畅和延误情况,进而影响机场飞机的燃油消耗和污染物排放。除此之外,机场的气象条件也会对飞机的飞行性能和机场空侧的跑道性能产生影响,进而影响飞机的燃油消耗和污染物排放。因此,本研究基于福州机场现行条件设施和运行情况,针对福州机场管制指令和气象条件提取飞机污染物排放的影响因素,分别设置流量控制、水平调速、天气现象、大气温度和近地面风速风向的“多场景-多因素”仿真试验,获取各场景下每个航班各飞行阶段的运行时间、燃油流率和燃油消耗量等数据,为后续研究准备必要的训练数据集。具体的试验设置方案如表 1~3 所示。

表 1 福州机场运行控制情景设置

Table 1 Scenarios setting of operational control at Fuzhou Airport

间隔情景	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
连续起飞间隔/min	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
连续落地间隔/km	6.4	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0
一起两落间隔 (插飞机间隔)/km	10.8	11.5	12.0	13.0	14.0	15.0

表 2 福州机场水平调速试验设置

Table 2 Horizontal speed control experiment settings at Fuzhou Airport

进离场指示空速情景	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>	V <sub>6</sub>	V <sub>7</sub>	V <sub>8</sub>	V <sub>9</sub>
最后进近速度仿真 试验组/(km·h <sup>-1</sup> )	215	225	235	245	255	265	275	285	295
离场速度仿真试验组/ (km·h <sup>-1</sup> )	490	500	510	520	530	540	550	560	570

本研究流量控制试验主要通过设置不同的飞机进离场间隔情景,反映管制指挥水平和机场运行效率,分别对管制间隔进行 6 组仿真运行试验,并输出相应的机位延误、滑行道/跑道入口等待延误数据,

表 3 福州机场气象条件试验设置

Table 3 Meteorological condition setting at Fuzhou Airport

气象条件类型	情景参数设置
特殊天气 现象	典型温度为 20.8℃,天气变量为降雨
	典型温度为 5.0℃,天气变量为霜冻
	典型温度为 5.0℃,天气变量为降雪
	典型温度为 20.8℃,天气变量为恶劣天气
大气温度	天气现象恒量为干燥,年平均温度为 20.8℃
	天气现象恒量为干燥,年平均最高温度为 26.8℃
	天气现象恒量为干燥,年平均最低温度为 17.5℃
	天气现象恒量为干燥,年极端最高温度为 41.9℃
地面风速 风向	天气现象恒量为干燥,年平均温度为 20.8℃
	风向为 0°、30°、60°、90°、120°、150°、180°、210°、 240°、270°、300°、330°
云底高	风速为 0、9.3、18.5、27.8、37.0、46.3 km·h <sup>-1</sup>
能见度/m	模型默认值
	模型默认值

进而探究机场地面等待对飞机发动机燃油消耗与污染物排放量的影响。试验输出的各类航班延误时间定义为仿真系统运行过程中由于冲突避让、交通拥堵、流量控制等因素造成相应点位的航班延误。由于机场飞行区滑行道系统不同点位和路段滑行速度的差异性和随机性较大,参考福州机场调研情况和其他大型机场仿真参数设置,间隔试验中默认飞机速度参数设置为主滑行道 27.8~37.0 km·h<sup>-1</sup>、机坪滑行道 14.8 km·h<sup>-1</sup>、机位顶推速度 5.6 km·h<sup>-1</sup>。

针对水平调速试验,根据 ICAO 规定,飞机在跑道入口的指示空速  $V_{at}$  定义为:在允许的最大着陆重量和着陆外形条件下,飞机失速速度的 1.3 倍。在飞行程序设计,飞机主要考虑固定翼飞机和直升机,固定翼飞机按照  $V_{at}$  的范围划分为 A、B、C、D、E 五类,每类飞机对应不同的最后进近速度范围和最小复飞速度。按照进近速度的飞机分类,福州机场的典型机型均属于 C 类飞机,其最后进近阶段的指示空速范围为 215~295 km·h<sup>-1</sup>,最小离场速度为最小复飞指示空速 445 km·h<sup>-1</sup> 加 10%<sup>[25]</sup>。本研究以 10 km·h<sup>-1</sup> 为调整步长,设置飞机的进离港水平速度,表征不同的航班运行效率,分别进行 9 组仿真试验,并输出相应的起降阶段运行时间数据,进而探究飞机水平速度对飞机发动机燃油消耗与污染物排放量的影响。

针对气象条件试验,特殊天气现象、大气温度和

地面风速风向等是影响机场运行的主要因素<sup>[26]</sup>。因此,本研究主要考虑上述三大类气象因素对福州机场飞机燃油消耗及污染物排放的影响。其中大气温度数据和试验情景均参照福州机场气象观测站(编号:588470)记录的气象数据和航空例行天气报告(METAR)。针对福州机场的典型气象条件,在云底高和能见度保持模型默认设定值的前提下,分别对于特殊天气现象、大气温度、风速风向进行试验设计,并依次进行4组、5组和61组相对控制变量的场景仿真试验。

## 2 案例应用

### 2.1 机场仿真模型评估

选取福州机场的典型繁忙日,建立福州机场的基准仿真运行场景,并将该场景输出的机场起降航班时刻分布(架次·h<sup>-1</sup>)、各走廊口方向流量分布(架次)、各跑道方向运行平均延误时间(min)等数据与福州机场2022年冬春航季实际运行情况进行对比,以此验证福州机场基准仿真模型的准确性和客观性,对比结果如图2所示。

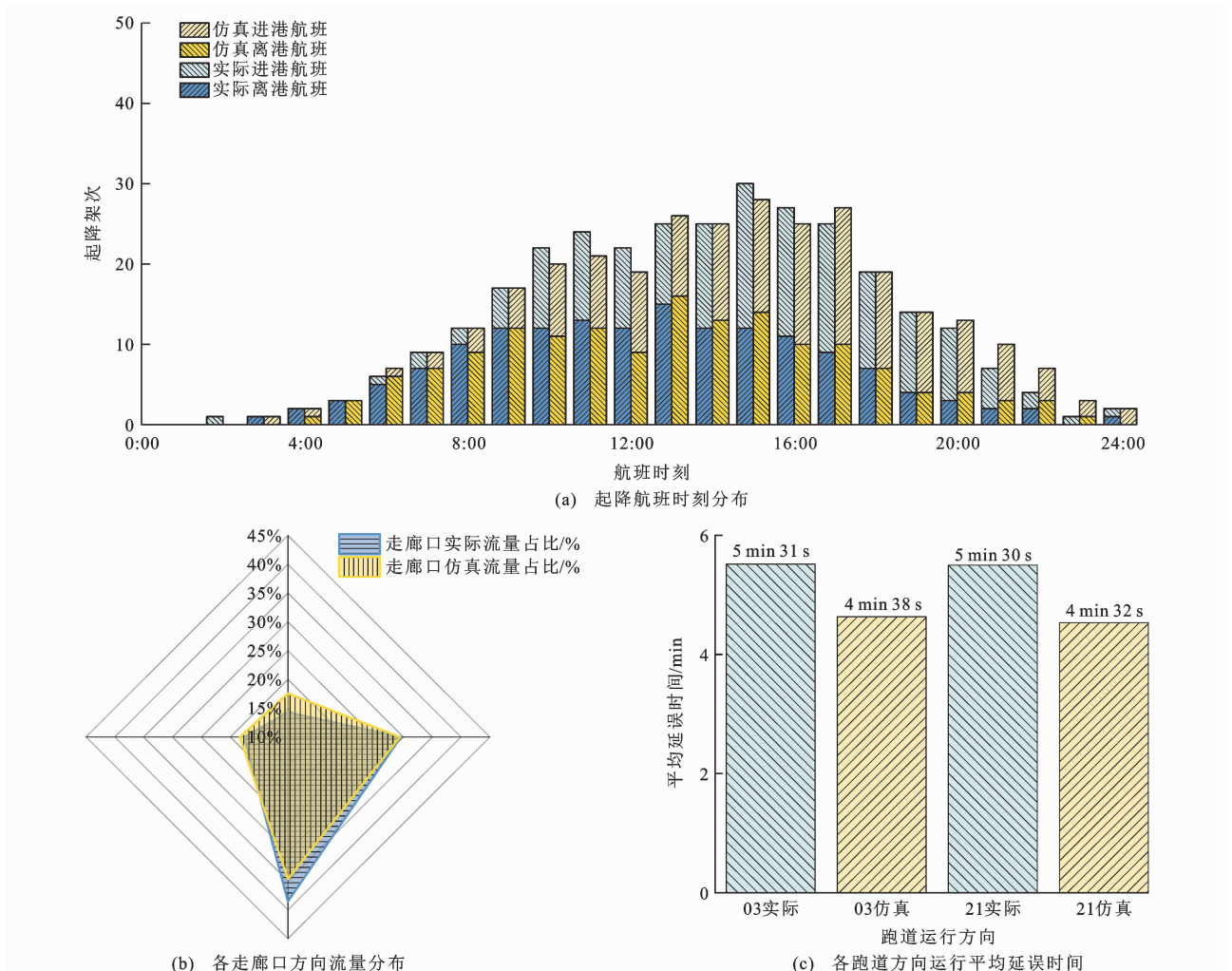


图2 福州机场实际与仿真运行中航班时刻、流量及延误

Fig. 2 Flight timetable, traffic flow, and delays in real and simulated operations at Fuzhou Airport

基准仿真模型的机场起降航班时刻分布(架次·h<sup>-1</sup>)、各走廊口方向流量分布(架次)、各跑道方向运行平均延误时间(min)与实际运行情况较为相近,基本能够反映福州机场的运行情况(图2)。通过计算实际运行数据与仿真运行数据的平均相对误差(Mean Relative Error, MRE)、均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)及平均绝对误差

(Mean Absolute Error, MAE)来评估预测结果。其中,MRE的取值范围是[0, 1],RMSE的取值范围是[0, +∞),MAE的取值范围是[0, +∞),误差指标值越小、越接近0,模型的可靠性越高。如表4所示,各项指标误差均在可接受范围内。具体而言,起降航班架次日分布、各走廊口方向流量分布和各跑道方向运行平均延误时间的MRE均低于

表 4 基于关键参考指标误差分析的仿真模型标定  
Table 4 Calibration of simulation model based on error analysis of key reference indicators

仿真模型标定关键参考指标	MRE	RMSE	MAE
起降航班时刻分布/(架次·h <sup>-1</sup> )	0.006	2.000	2.000
各走廊口方向流量分布/架次	0.095	0.026	0.020
各跑道方向运行平均延误时间/min	0.168	0.926	0.925

0.2, RMSE 和 MAE 均低于 2.0。这表明模型输出数据具有较高的可靠性,可为后续深入探究福州机场排放影响因素及其影响程度提供必要的训练数据集。

### 2.2 机场飞机排放本地化修正系数集

管制间隔、水平速度、天气现象、大气温度、风速风向变化与燃油消耗的互信息如图 3(a)所示。根

据互信息值的高低,得到最强相关子集重要性由大到小的排序为:大气温度、地面风速风向、飞机进离场速度、管制间隔、天气现象。进一步利用 SHAP 模型探究各因素对飞机起降阶段燃油消耗和污染物排放的影响程度,结果如图 3(b)所示。每个样本点代表一个特征的 SHAP 值,即该仿真试验场景下任一航班对燃油消耗的边际贡献。竖轴方向上的点位置由场景特征决定,横轴方向上的点位置由 SHAP 值决定,点的颜色深浅代表特征值的大小,SHAP 值的重叠点沿竖轴方向抖动堆积,最终形成排放关键因素特征的 SHAP 值分布。可知,大多数特征的 SHAP 值为正向值,与上述管制间隔、水平速度、天气现象、大气温度、地面风速风向对飞机污染物排放的影响结果基本一致。

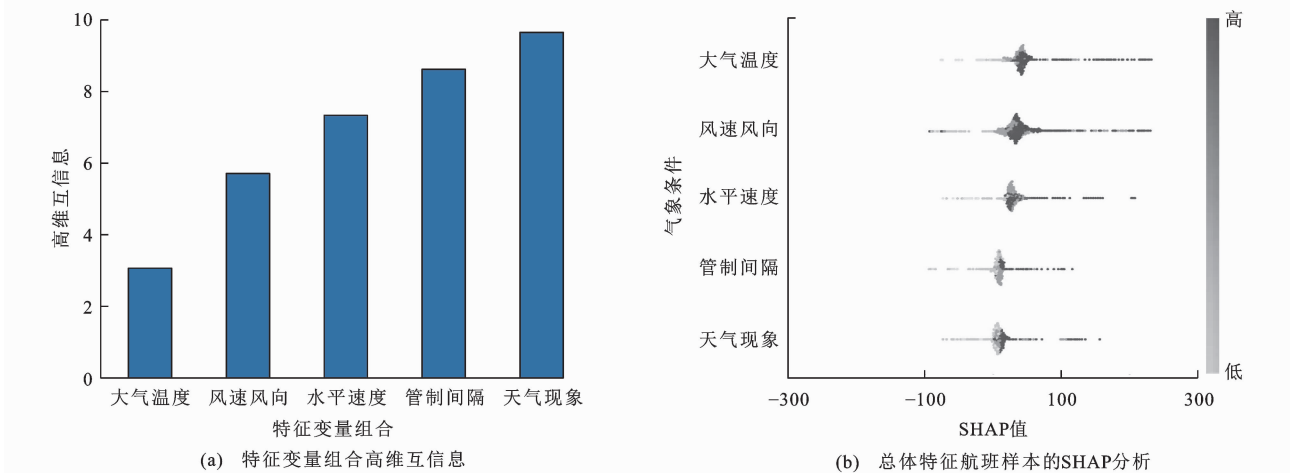


图 3 特征变量组合高维互信息图和总体特征航班样本的 SHAP 分析

Fig. 3 High-dimensional mutual information map of combinations of feature variables and the SHAP analysis of flight samples with whole characteristic variables

上述研究确定了不同试验场景中关键因素对应的变量特征值对仿真模型输出燃油消耗值的边际贡献值。随后,将各特征的平均 SHAP 值与基准仿真模型输出的燃油消耗结果值之比作为福州机场飞机排放本地化修正系数  $\Delta(\theta, \omega)$ 。基于此,构建基于管制指令和气象条件的福州机场飞机排放本地化修正系数集,并据此对排放进行修正。

#### (1) 管制因素修正

飞机的姿态、高度和速度变化与管制员的动作调配指令之间存在对应关系。根据福州空管提供的管制员工作负荷评估资料,汇总福州机场典型繁忙日的管制指令发布信息及相应的飞机位置、速度和高度等雷达数据,并从中筛选出与本研究相关的管制指令进行频次统计,如图 4 所示。

在实际的机场起降管制过程中,为实现航路分

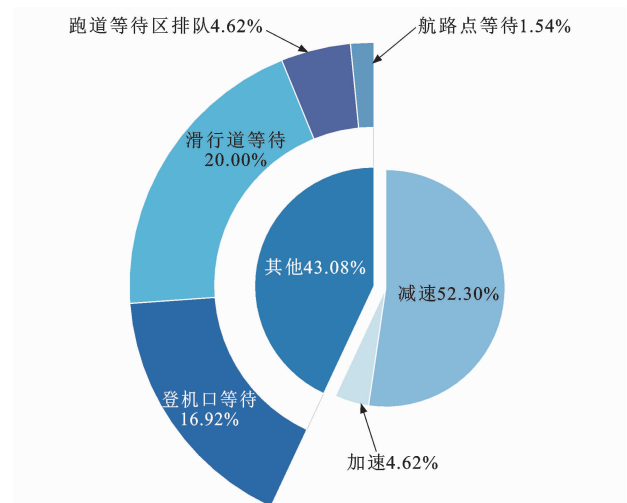


图 4 福州机场典型繁忙日管制指令统计

Fig. 4 Statistics of control instructions on typical busy days of Fuzhou Airport

离规避飞机冲突或潜在冲突,各进离场飞机经由管制员调配的实际起降阶段运行时间会与按照标准进离场航线飞行的标准起降阶段运行时间存在差异。为加入管制指令对飞机起降阶段的燃油消耗和污染物排放的影响,在统计管制指令类型和相应日均频次的基础上,采用 SHAP 模型进行归因分析,深入挖掘管制指令对飞机起降阶段的燃油消耗和污染物排放的不同影响程度,并计算管制指令的排放本地化修正系数集,如表 5 所示。

表 5 基于管制指令的飞机排放本地化修正系数集

Table 5 Localized correction coefficient set for aircraft emissions based on air traffic control instructions

管制指令类型		日均频次	排放本地化修正系数(1+Δ)
等待指令	登机口等待	11	1.028 92
	滑行道等待	13	1.055 52
	跑道排序等待	3	1.075 78
	航路点等待	1	1.046 59
调速指令	进离场加速/减速	37	1.085 32

表 6 基于气象条件的飞机排放本地化修正系数集

Table 6 Localized correction coefficient set for aircraft emissions based on meteorological conditions

不同气象条件		2022 年出现天数/d	排放本地化修正系数(1+Δ)	
典型天气现象	降雨	188	1.051 67	
	降雪	0	1.075 05	
	龙卷风	0	1.084 23	
	冰雹	1	1.011 54	
	暴雨	11	1.084 25	
大气温度区间	2.6 ℃	年极端最低温度	1	0.847 13
	(2.6,17.5] ℃	年平均最低温度	115	1.154 42
	(17.5,20.8] ℃	年平均温度	60	1.212 31
	(20.8,26.8] ℃	年平均最高温度	83	1.333 25
	(26.8,41.9] ℃	年极端最高温度	106	1.482 74
风速区间	(0,9.3] km·h <sup>-1</sup>	顺风	1	0.921 71
		斜顺风	1	0.962 24
		正侧风	0	1.059 50
	(9.3,18.5] km·h <sup>-1</sup>	顺风	43	1.053 56
		斜顺风	28	1.091 48
		正侧风	20	1.155 92
	(18.5,27.8] km·h <sup>-1</sup>	顺风	47	1.182 11
		斜顺风	56	1.269 89
		正侧风	9	1.356 73
	(27.8,37.0] km·h <sup>-1</sup>	顺风	41	1.375 24
		斜顺风	24	1.406 98
		正侧风	18	1.446 63
	(37.0,46.3] km·h <sup>-1</sup>	顺风	6	1.456 68
		斜顺风	22	1.443 23
		正侧风	12	1.478 23

## (2)气象因素修正

参照 2022 年福州机场气象观测站(588470)记录的气象数据和福州机场 METAR 气象报文数据,经统计,福州机场 2022 年全年总降雨天数为 188 天,全年总暴雨天数为 11 天,全年总冰雹天数为 1 天,无降雪和龙卷风观测记录天数;年平均气温为 20.8 ℃,年平均最高气温为 26.8 ℃,年平均最低气温为 17.5 ℃,年极端最高气温为 41.9 ℃,年极端最低气温为 2.6 ℃,年平均风速为 13.7 km·h<sup>-1</sup>,最大持续风速为 45.3 km·h<sup>-1</sup>,最大风速(含阵风)为 50.4 km·h<sup>-1</sup>。与管制指令对飞机起降阶段的燃油消耗和污染物排放的影响修正类似,计算气象条件相关的福州机场飞机排放本地化修正系数集,如表 6 所示。

## 2.3 基于本地化修正的机场飞机精细化排放清单

基于上述福州机场飞机排放本地化的修正方法,结合 2022 年福州机场历史航班时刻表,计算该机场飞机起降阶段 HC、CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放量,探究其排放时空分布特征。

2022 年,福州机场飞机起降阶段 HC、CO、NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放总量分别为 42.4、368.9、589.2、31.7、10.1 t 和 202.8 kt,如图 5(a)。HC 和 CO 排在滑行阶段占比较高,分别占其总起降阶段排放的 97.4%和 94.2%。相比之下,NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放主要集中在爬升和起飞阶段,这 2 个阶段的排放量之和分别占其总起降阶段排放的 52.9%和 66.1%。分机型来看,如图 5(b),B738 机型排放贡献最大,其排放占总排放的 48.9%~57.5%,其次是 A320 机型,其排放占总排放的 15.3%~19.7%。

各污染物排放量与航班起降架次的时间变化规

律较为一致,表明机场区域飞机排放主要受航班起降活动的影响。从月度变化趋势来看,如图 5(c),1 月份由于航班起降架次最多,导致各污染物排放量达到全年最高值;而 11 月份由于航班起降架次最少,各污染物排放量均相应降至全年最低水平。在日变化特征方面,各污染物排放量均表现出明显的昼夜波动规律,如图 5(d),其中 15:00 由于航班起降频次达到峰值,各污染物排放量也随之攀升至日间最高值;而在 23:00 至次日 5:00 期间,由于航班起降架次显著减少,各污染物排放量均维持在较低水平。

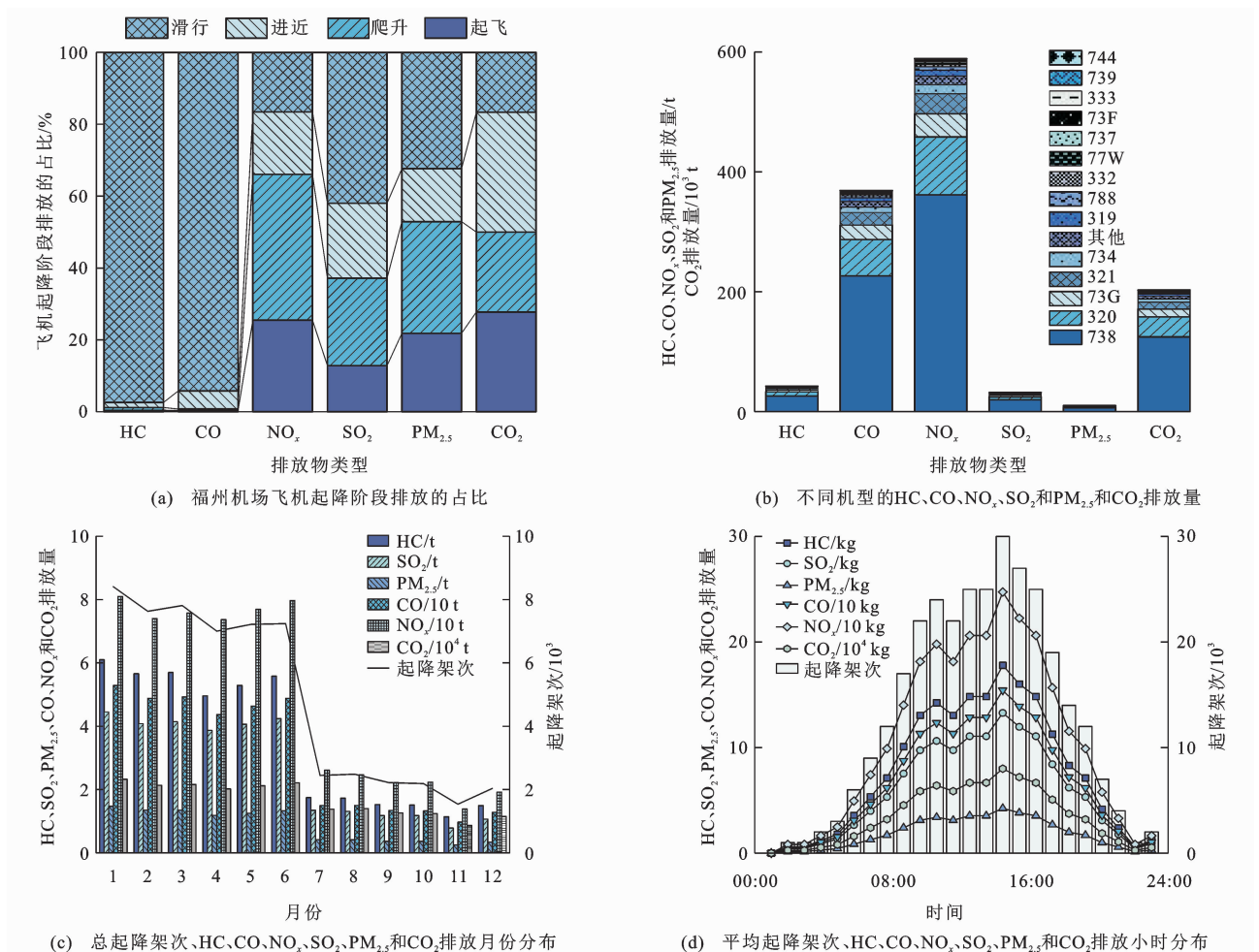


图 5 2022 年福州机场排放时间分布

Fig. 5 Temporal distribution of emissions at Fuzhou Airport in 2022

从排放的空间分布来看,如图 6(a)~(f),HC 和 CO 排放主要集中在机坪滑行道、平行滑行道以及垂直联络滑行道;NO<sub>x</sub> 排放主要集中在跑道、垂直联络道,在机坪滑行道和平行滑行道的排放相对较少;SO<sub>2</sub> 排放主要分布于跑道,同时在机坪滑行道、垂直联络道、平行滑行道、快速脱离道的排放分布较为均匀;PM<sub>2.5</sub> 排放主要集中在跑道、垂直联络

滑行道、机坪滑行道和快速脱离道;CO<sub>2</sub> 排放主要集中在跑道,并且在机坪滑行道、垂直联络滑行道、平行滑行道、快速脱离道的排放情况也较为均匀,如图 6(g)。随垂直高度的增加,各排放总体均呈现先增大后减小、再逐渐趋于平稳的态势,HC、CO、SO<sub>2</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的排放峰值出现在 200~350 m 范围内,而 NO<sub>x</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的排放峰值则集中于 300~

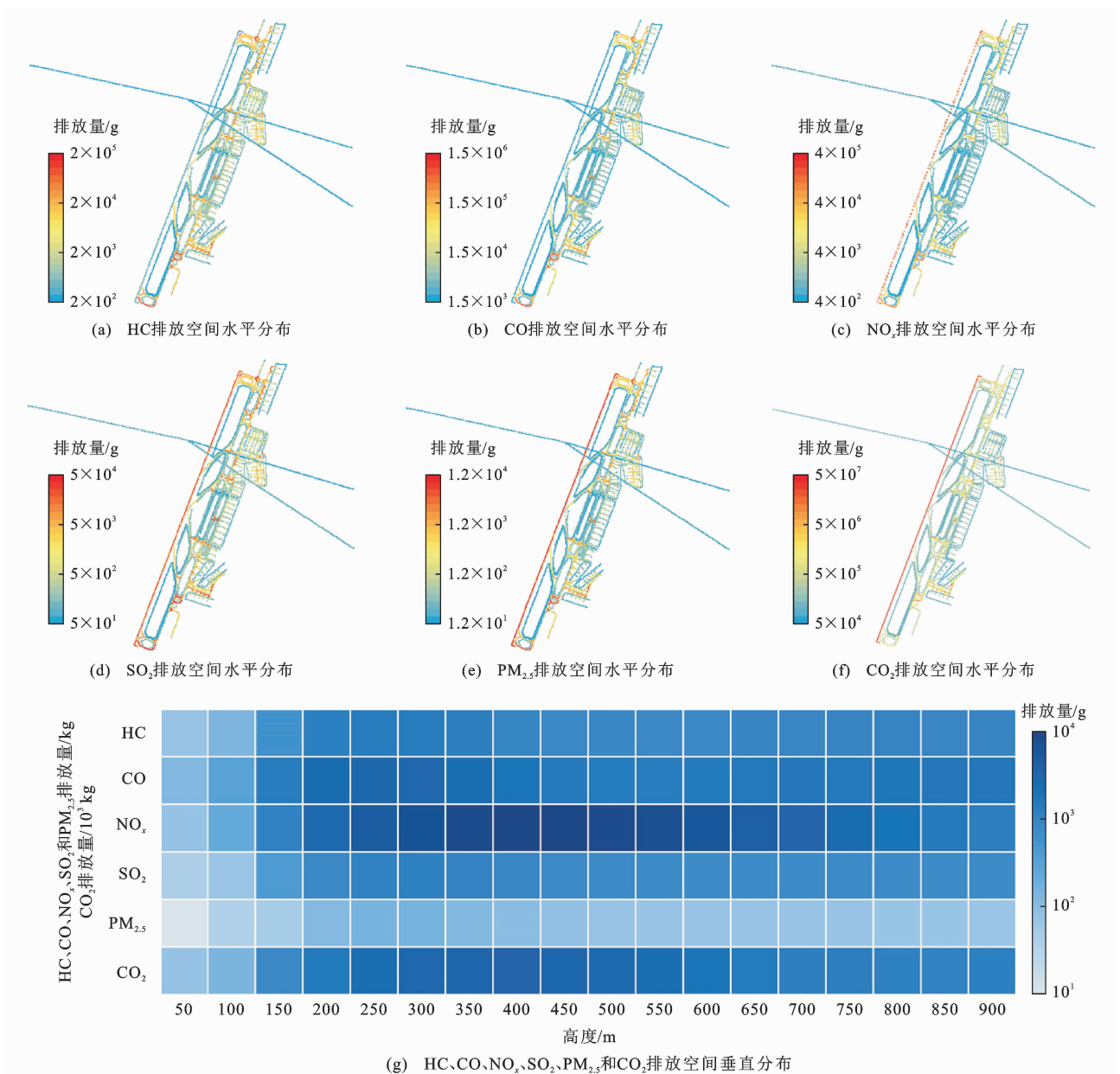


图6 2022年福州机场排放空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of emissions at Fuzhou Airport in 2022

500 m 范围内。

#### 2.4 结果校验与分析

为验证本研究构建的机场飞机排放本地化修正模型的准确性,利用2022年12月1日06:05由福州飞往广州的航班机载实时记录数据,提取该航班的飞行时间与燃油流率,并基于ICAO基准模型测算其污染物排放量(式9),同时将测算结果与仿真模型输出结果进行实证对比,结果如图7(a)所示。本研究排放结果与机载数据的测算结果较为一致,两者的相对偏差在1.3%以内,说明本研究构建的多因素修正模型能够比较准确地反映福州机场的实际排放情况。

本研究充分考虑了管制指令和气象条件对机场飞机排放的影响,并基于流量控制、水平调速、天气现象、大气温度、近地面风速风向等多种因素对福州机场飞机排放进行本地化修正。ICAO基准排放模型采用固定参数(如各阶段飞行时间、燃油流率等)估算2022年全年福州机场飞机排放,其结果与本研究结果的偏差如图7(b)所示。与本研究结果相比,ICAO基准模型高估福州机场污染物排放量约为11%(SO<sub>2</sub>)~23%(PM<sub>2.5</sub>)。这一差异主要源于以下2个方面:首先,本研究综合考虑机场实际运行条件对飞机排放的影响,通过对排放进行多参数本地化修正使排放量测算结果更加精准;其次,本研究中

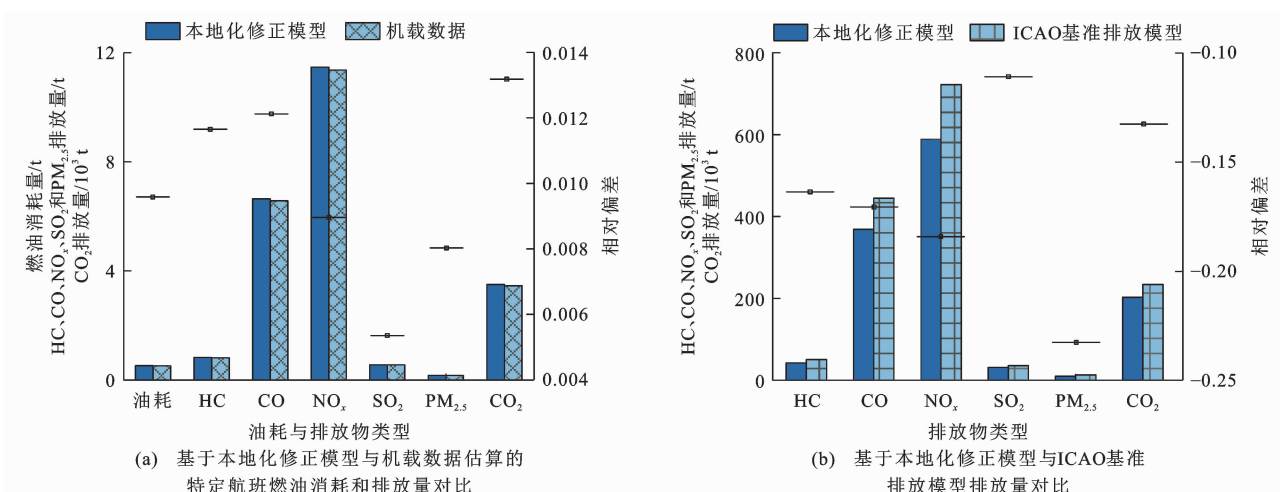


图 7 本地化修正模型与其他方法的燃油消耗量与排放量估算对比

Fig. 7 Comparison of fuel consumption and estimated emissions by the localized correction model and other methods

采用仿真运行时间替代 ICAO 建议的标准运行时间,使航班在飞行各阶段的运行时间更符合实际运行情况。

## 2.5 不确定性分析

本研究不确定性主要来源于 4 个方面。一是研究中 TAAM 仿真模型的建立是基于一定的规则设定与假设,而实际条件下可能会有所差异,进而影响排放参数多元数据集的准确性。已有研究表明,此类模型的平均误差在 6% 以内<sup>[27]</sup>。二是研究中 SHAP 模型在多变量非线性的机场运行场景中,计算出的边际贡献值可能存在一定偏移。其误差可能源于模型训练样本覆盖度的局限性,尤其是部分罕见气象条件或极端运行情景在样本中比例较低,导致 SHAP 值估计精度下降。三是研究中污染物各阶段排放指数来自 ICAO 标准值,为固定参数条件下的试验数据,而运行中会随发动机的实际推力、老化及其他条件影响而变化,可能影响污染物排放因子及排放量。实测研究结果显示,对于同一台发动机,在不同推力工况下,其污染物排放指数波动范围可达 15%~45%<sup>[28]</sup>,而随着飞机发动机使用年限的增加,其排放指数可能上升 2%~10%。四是在排放结果校验部分,研究中仅选取了单次航班的机载实时记录数据进行验证。为增强研究结果的可靠性,后续研究将纳入更多航班数据,以进一步验证本文方法的有效性。此外,本文方法可广泛应用于各类民用航空机场,然而,研究建立的排放本地化修正参数集仅能有效应用于与福州机场具备相似交通强度、气象条件的机场,如温州龙湾、宁波栎社等机场。对于交通强度、气象条件等与福州机场存在显著差异的机场,需结合当地实际航空运行流量、气象观测

资料等,重新进行模型参数的本地化标定和优化。

## 3 结 语

(1) 本文提出一种基于运行仿真的机场飞机排放本地化修正模型,将机场交通运行仿真模型、ICAO 基准排放模型和机器学习模型联用,实现机场本地化排放清单的构建,为机场区域飞机排放评估提供可靠方法。

(2) 针对机场运行与飞机排放之间的复杂影响关系,综合考虑流量控制、水平调速、天气现象、大气温度和近地面风速风向等因素对飞机在实际运行条件下的燃油消耗和污染物排放的影响,建立了机场飞机排放本地化修正系数集,使排放计算更加精准。

(3) 本文案例计算结果与基于选定航班机载实时记录数据的排放计算结果的相对偏差仅为 0.6%~1.3%,与基于 ICAO 基准排放模型估算结果的相对偏差为 11%~23%,充分证实了本文所构建模型在机场排放评估领域的优势与可靠性。与 ICAO 基准排放模型相比,本文模型还可用于计算机场不同运行条件和气象条件下的污染物排放量数据,可较为精准的确定污染物排放的时空分布规律和关键影响因素,而不依赖于大量的真实飞行轨迹数据,从而为制定机场运行优化策略和科学减排对策提供数据和技术支撑。

(4) 本研究未考虑机场其他潜在排放源(如辅助动力装置和地面特种车辆等)的影响。此外,在多场景仿真试验中,受限于仿真软件功能,未能模拟不同气压和湿度条件下的场景。后续研究应综合考虑各类机场排放源,并扩展仿真试验场景,以提高排放清单模型的完整性和准确性。

## 参 考 文 献 :

## References :

- [ 1 ] 中国民用航空局. 2024 年民航行业发展统计公报[R]. 北京: 中国民用航空局, 2025.  
Civil Aviation Administration of China. The civil aviation industry development statistical bulletin in 2024[R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2025.
- [ 2 ] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 2021[R]. 北京: 生态环境部, 2021.  
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China mobile sources environmental management annual report 2021[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2021.
- [ 3 ] EASTHAM S D, CHOSSIERE G P, SPETH R L, et al. Global impacts of aviation on air quality evaluated at high resolution[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2024, 24(4): 2687-2703.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 韩 博, 孔魏凯, 谭宏志, 等. 飞机 LTO 排放影响评估耦合模型研究与应用[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(6): 2409-2417.  
HAN Bo, KONG Wei-kai, TAN Hong-zhi, et al. A coupling model and its application on impact assessment of the aircraft emissions during LTO cycle [J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(6): 2409-2417.
- [ 6 ] MA S M, WANG X, HAN B, et al. Exploring emission spatiotemporal pattern and potential reduction capacity in China's aviation sector: Flight trajectory optimization perspective[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 951: 175558.
- [ 7 ] 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: 5743-5752.
- [ 8 ] ZHU C X, HU R, LIU B W, et al. Uncertainty and its driving factors of airport aircraft pollutant emissions assessment[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2021, 94: 102791.
- [ 9 ] 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 Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, et al. Air pollutant emission inventory from LTO cycles of aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei airport group, China [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1143-1150.
- [ 10 ] 王 兵, 冯培佳, 彭 瑛. 基于 QAR 数据和改进 iTransformer 的民用航空器燃油流量估算方法[J/OL]. *交通运输工程学报*, 2025, <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.067>.  
WANG Bing, FENG Pei-jia, PENG Ying. Estimation method for civil aircraft fuel flow based on QAR data and improved iTransformer [J/OL]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2025, <https://doi.org/10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.067>.
- [ 11 ] MA S M, LIN S Z, HAN B, et al. Revealing considerable emissions reduction potential in flight operations: A real-time emission perspective[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2025, 143: 104745.
- [ 12 ] 任 强, 王立婕, 姚婷玮. 基于机载数据的飞行过程大气污染排放研究[J]. *安全与环境学报*, 2022, 22(6): 3395-3402.  
REN Qiang, WANG Li-jie, YAO Ting-wei. Study on air pollution emission of aircraft during flight based on flight data[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(6): 3395-3402.
- [ 13 ] 邢志伟, 李世皎, 唐云霄, 等. 基于 Agent-元胞自动机的机场场面交通仿真[J]. *系统仿真学报*, 2018, 30(3): 857-865.  
XING Zhi-wei, LI Shi-jiao, TANG Yun-xiao, et al. Airport surface traffic simulation based on agent-cellular automaton[J]. *Journal of System Simulation*, 2018, 30(3): 857-865.
- [ 14 ] 张启钱, 王中叶, 张洪海, 等. 基于 SMILO-VTAC 模型的复杂低空多机冲突解脱方法[J]. *交通运输工程学报*, 2019, 19(6): 125-136.  
ZHANG Qi-qian, WANG Zhong-ye, ZHANG Hong-hai, et al. SMILO-VTAC model based multi-aircraft conflict resolution method in complex low-altitude airspace[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2019, 19(6): 125-136.
- [ 15 ] 陈正磊, 种小雷, 刘超佳, 等. 基于多智能体建模和蒙特卡洛仿真的跑道容量评估[J]. *交通运输工程学报*, 2023, 23(6): 244-256.  
CHEN Zheng-lei, CHONG Xiao-lei, LIU Chao-jia, et al. Runway capacity evaluation based on multi-agent modeling and Monte Carlo simulation [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2023, 23(6): 244-256.
- [ 16 ] JIA Z H, TANG H L, JIN D H, et al. Research on the volume-based fully coupled method of the multi-fidelity engine simulation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 123: 107429.
- [ 17 ] 李明捷, 黄欣宁, 吕晨辉, 等. 基于排队网络模型的机场航班延误预测[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(27): 11886-11891.  
LI Ming-jie, HUANG Xin-ning, LV Chen-hui, et al. Airport flight delay prediction based on queuing network model[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(27): 11886-11891.
- [ 18 ] COVER T, HART P. Nearest neighbor pattern classification[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1967, 13(1): 21-27.
- [ 19 ] AHA D W, KIBLER D, ALBERT M K. Instance-based learning algorithms[J]. *Machine Learning*, 1991, 6(1): 37-66.
- [ 20 ] STOGBAUER H, KRASKOV A, ASTAKHOV S A, et al. Least-dependent component analysis based on mutual information[J]. *Physical Review E*, 2004, 70(6): 066123.
- [ 21 ] 唐铁桥, 曹 峰, 王 芃, 等. 飞机可持续滑行技术理论进展与应用挑战[J]. *交通运输工程学报*, 2026, 26(1): 8-30.  
TANG Tie-qiao, CAO Feng, WANG Peng, et al. Theoretical advances and application challenges of sustainable aircraft

- taxiing technology[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2026, 26(1): 8-30.
- [22] AP-93-TM-2017-01, 机场时刻容量评估技术规范[S]. AP-93-TM-2017-01, Technical specifications for airport capacity assessment of flight schedules[S].
- [23] International Civil Aviation Organization. Doc9889, airport air quality manual[R]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2011.
- [24] European Union Aviation Safety Agency. ICAO aircraft engine emissions databank[R]. Cologne: European Union Aviation Safety Agency, 2023.
- [25] International Civil Aviation Organization. Doc8168, aircraft Operations [M]. Montreal: International Civil Aviation Organization, 2020.
- [26] 胡 荣,吴文洁,陈 琳,等. 气象因素对飞机进近飞行燃油效率的影响[J]. *北京航空航天大学学报*, 2018, 44(4): 677-683. HU Rong, WU Wen-jie, CHEN Lin, et al. Influence of meteorological factors on aircraft fuel efficiency in approach flight[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2018, 44(4): 677-683.
- [27] 苏佳明,胡明华,尹嘉男,等. 复杂机场“机-车-场道”交通仿真模型研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2024, 56(6): 994-1001. SU Jia-ming, HU Ming-hua, YIN Jia-nan, et al. An “aircraft-vehicle-surface” traffic simulation model in complex airports[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2024, 56(6): 994-1001.
- [28] ZHAO J B, MAO Z X, HAN B, et al. Characterizing aircraft exhaust emissions and impact factors at Tianjin Binhai International Airport via open-path fourier-transform infrared spectrometer[J]. *Toxics*, 2024, 12(11): 782.