

刘鑫, 匡江红. 基于动网格技术飞机尾气污染物扩散数值研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(3): 158-163. DOI: 10.20169/j. issn. 2095-2163. 250323

基于动网格技术飞机尾气污染物扩散数值研究

刘鑫, 匡江红

(上海工程技术大学 航空运输学院(飞行学院), 上海 201620)

摘要: 飞机运行中排放的尾气会对大气环境造成严重的影响, 针对目前机场大气环境影响评估方面极少采用基于动网格技术的数值模拟的情况, 本文应用动网格技术, 对机场区域内飞机滑行阶段的尾气扩散进行了共 24 种工况的数值模拟。通过对不同的风速和风向, 分析了外流场对飞机尾气分布特性的影响。结果表明: 风向作为影响飞机污染物扩散的主要因素之一, 将完全主导污染物在机场大气环境中的扩散。不同风速对污染物扩散影响极大, 大风速对飞机污染物具有良好稀释能力, 反之小风速对飞机污染物的稀释能力比较弱。

关键词: 数值模拟; 动网格技术; 飞机污染物扩散; 浓度; 稀释能力

中图分类号: F560

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2025)03-0158-06

Numerical study on the diffusion of aircraft exhaust pollutant based on dynamic grid technology

LIU Xin, KUANG Jianghong

(School of Air Transportation and School of Flying, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The exhaust emissions from aircraft operation can have a very serious impact on the atmospheric environment. In view of the fact that the numerical simulation based on dynamic grid technology is rarely adopted in current airport atmospheric environmental impact assessment, dynamic grid technology is used to simulate the aircraft exhaust gas diffusion in the airport area during taxiing stage for total of 24 working conditions in this paper. The influence of the external flow field on the distribution characteristics of aircraft exhaust is analyzed by comparing different wind speeds and directions. The results show that as one of the main factors affecting the diffusion of aircraft pollutants, the wind direction dominates the diffusion of pollutants in the atmospheric environment of the airport. Different wind speeds have a great influence on the diffusion of pollutants, high wind speed has good dilution ability for aircraft pollutants, while low wind speed has a relatively weak dilution ability for aircraft pollutants.

Key words: numerical simulation; dynamic grid technology; aircraft pollutant dispersion; concentration; dilution ability

0 引言

随着全球航空运输业的飞速发展, 飞机作为一种快速有效的出行工具, 已成为人们日常选用的一种交通方式, 截至 2022 年底, 中国境内授权颁证的运输机场数量达到 254 个。2020 年, 货邮吞吐量达 10 000 吨以上机场就有 59 个^[1], 《新时代民航强国建设行动纲要》提出 2035 年国内运输机场数量将达到 450 个^[2]。在此带动下, 机场的建设和运营越来越多地受到人们关注, 显而易见, 民航事业必然会迎来新的发展高潮, 而在高速发展的同时, 机场周边噪音、飞机尾气的污染情况也已不容小觑。飞机在起降过程中会

排放大量的污染物, 例如碳氢化合物、一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物等, 这些污染物在机场区域的集中排放将导致污染物浓度超标, 进而影响机场周围的空气质量, 因此有必要对机场区域污染物的排放扩散情况进行研究。国内曹惠玲等学者^[3]利用 Gaussian Puff 模型对机场周边环境的污染情况进行研究。Yu 等学者^[4]对航空器巡航阶段空气污染物的排热和扩散进行研究, 对比了不同计算模型对航空器污染物排放及扩散规律的适用性。曹惠玲等学者^[5-7]又利用机载 QAR 数据, 结合欧洲学者提出的 P3-T3 方法, 对污染物基准排放指数进行修正, 完成了对飞机全航段污染物排放量的计算与分析。

作者简介: 刘鑫(1999—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 民航节能减排。

通信作者: 匡江红(1967—), 女, 教授, 主要研究方向: 民航节能减排。Email: kjhnet@126.com。

收稿日期: 2023-08-31

从已有文献上看,目前针对飞机污染物的扩散研究主要采用高斯扩散模式,该模式属于数学模拟法,数值模拟方法却极少应用于这一方面。为此,罗浩等学者^[8]利用数值计算方法对机场区域飞机污染物的排放及扩散规律进行了计算分析。数值模拟方法的提出为飞机污染物扩散模拟研究提供了一种新的理论基础和技术方法,从而丰富了该领域研究内容。但是目前对飞机运行中污染物扩散的模拟,却假设了飞机固定不动,这种模拟方法未能模拟真实的移动污染源,且此种方式也无法充分考虑到飞机运动对污染物排放扩散的影响。而动网格技术则很好地解决了这一问题,Zhao等学者^[9]采用计算流体动力学动网格技术对车辆通过公路隧道过程中不同粒径的超细颗粒的沉积、弥散现象进行了数值模拟。张金贵等学者^[10]利用动网格技术模拟了公路隧道内汽车的尾气污染扩散情况,其结果与实验测量值吻合得较好。Liu等学者^[11]采用计算流体动力学动网格技术对列车行驶过程中隧道内二氧化碳浓度与热环境变化进行了数值模拟,并通过实验进行验证。在此基础上,本文采用计算流体动力学(CFD)动网格技术研究不同风速及风向条件下飞机运动所引起的污染物扩散问题,从而为检测和控制机场空间内飞机尾气污染物浓度,保障机场空间内维护作业人员身心健康提供理论依据。

1 飞机污染物排放数据

1.1 研究对象

本文以国内主流机型空客 A321 为研究对象,

表 1 CFM56-5B2 型发动机排放数据

Table 1 CFM56-5B2 engine emissions data

工作模式	推力/ %Foo	时间/min	燃油消耗率/(kg·s ⁻¹)	污染物排放系数/(g·kg ⁻¹)		
				HC	CO	NO _x
滑行	7	26	0.119	3.04	27.4	4.7

表 1 中, Foo 为额定输出, 设航油分子式为 C₈H₁₈, 就可计算出飞机滑行中尾气总排放量为 3.808 kg/s, 并得到尾气中 3 种污染物质量分数见表 2。

表 2 3 种污染物质量分数

Table 2 Mass fractions of three pollutants

污染物	质量分数
C ₂ H ₆	0.000 19
CO	0.001 71
NO	0.000 29

空客 A321 是欧洲空中客车工业公司研制的双发中短程客机空中客车 A320 加长型, 是 A320 系列飞机中最大的飞机成员。该机型通常配备 2 台 CFM 国际公司的 CFM56-5B2 或国际航空发动机公司 (IAE) 的 V2530-A5 涡扇发动机。本文对配备 CFM56-5B2 发动机的 A321 飞机的尾气扩散进行研究。

1.2 飞行阶段的确定

飞机在机场区域的运行活动可划分为进近、滑行、起飞和爬升四个阶段^[12]。而伯鑫在 CCAPP 2022 年第 2 期学术沙龙中国机场环境与碳数据库 (排放清单)^[13]中指出 CO、HC、SO₂、CO₂ 排放主要来自飞机滑行阶段, 分别占到机场 LTO 循环总排放量的 92.80%、91.56%、41.81% 和 41.81%, 对机场区域的环境空气质量造成了极大影响。因此, 本文以滑行阶段为例, 模拟计算机场区域飞机污染物扩散情况。

1.3 发动机排放口污染物质量分数的确定

本文主要取 3 种典型的污染组分作为模拟对象, 分别为 HC、CO 和 NO_x。但除了 CO 以外, 其余 2 种污染组分均为一定程度的混合物。为了便于分析, 取最能代表其组分特性的物质作为模拟对象, 这里 HC 采用 C₂H₆ 表示, NO_x 则采用 NO 表示。研究中把污染物种类确定为 NO、CO 及 C₂H₆。

排放量基于国际民用航空组织 (ICAO) 提供的 CFM56-5B2 型发动机在滑行阶段的排放数据, 具体数据见表 1。

2 模型和方法

2.1 基本假设

本文采用二维模拟, 为了方便建立模型, 本文做了如下假设:

(1) 飞机发动机排放的包含污染物的尾气呈理想气体状态, 在湍流混合过程中不发生任何化学反应。

(2) 把飞机发动机简化为矩形。

(3) 假设在滑行阶段以匀速状态滑行, 滑行速度为 18 km/h、即 5 m/s。

2.2 物理模型

为了分析飞机滑行过程中不同风速及风向对污染物扩散的影响,建立机场域二维模型。计算域长度为 100 m,宽度为 20 m,分别模拟计算垂直平面(飞机对称面)和水平平面(机场地面)飞机污染物扩散情况,其中垂直面设置飞机发动机大小为 1.5 m×1.5 m,发动机底部离地高度为 3 m。水平面分为 2 种情况分析。第一种模拟单台发动机的扩散情况。设置飞机发动机大小为 2 m×2 m,位置位于飞机滑行道中心;第二种模拟的是双发动机的扩散情况,同样设置飞机发动机大小为 2 m×2 m,2 台发动机间隔为 6 m,2 台发动机分别位于飞机滑行道中心两侧,设计示意如图 1~图 3 所示。

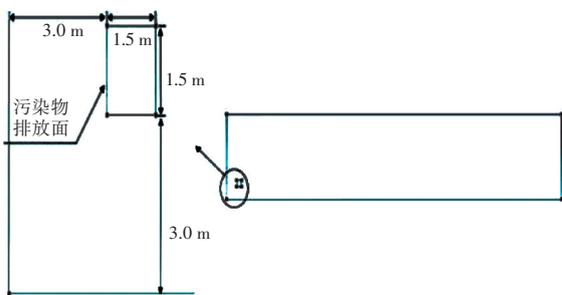


图 1 垂直面模型

Fig. 1 Vertical plane model

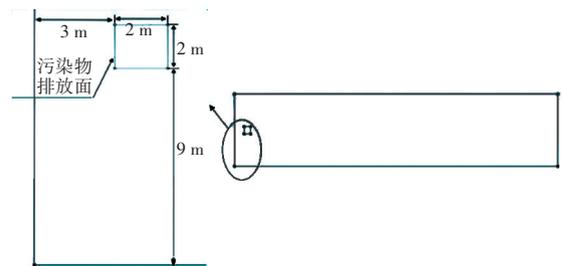


图 2 水平面一发模型

Fig. 2 Horizontal one-shot model

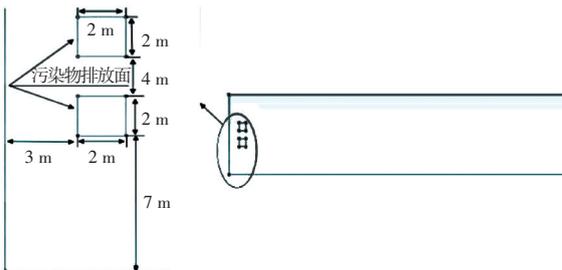


图 3 水平面双发模型

Fig. 3 Horizontal dual-generation model

2.3 数学模型

本文采用动态网格技术来模拟机场区域飞机滑行阶段的瞬态运动,对飞机滑行阶段的尾气污染物扩散进行了模拟。该模拟中涉及到多组分的混合,

故要遵守组分守恒定律;空间域内气体流动处于湍流状态,系统还需遵守湍流控制方程。因此,本文使用的数学模型有湍流模型和组分输运模型,其中湍流模型选择了标准 k-ε 模型,用到的方程具体如下:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) + S_i \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i \phi} \right) + S \quad (3)$$

常见的动态网格方法(例如平滑和重新网格化)适用于复杂或不规则运动模型,简单的刚体运动适用于分层方法,机场区域飞机滑行阶段的运动属于规则的简单的刚体运动,因此本文使用的动网格更新方法为分层方法(Layering),将飞机放置在机场跑道中以保持均匀的线性运动。速度和轨迹由用户定义函数(UDF)指定。分层方法的控制原理表示为:

$$h_{\max} > (1 + \alpha_s) h_{\text{ideal}} \quad (4)$$

$$h_{\min} > \alpha_c h_{\text{ideal}} \quad (5)$$

其中, h_{\max} 表示被拉伸网格层的最大高度; α_s 表示网格 Split Factor 参数; h_{ideal} 表示理想网格高度; h_{\min} 表示被挤压网格层的最小高度; α_c 表示网格 Collapse Factor 参数。本研究所有的模拟均使用 Fluent20.0 进行计算,在瞬态计算中将时间步长设为 0.05,压力-速度耦合采用 SIMPLE 算法,选用双精度非稳态进行迭代计算,非稳态时间步长为 0.05 s,每个时间步长内迭代 20 次。

2.4 边界条件的设置

为更好地模拟实际情况,在垂直面模型中,计算域上部设为压力出口 pressure-outlet,地面设为 wall,风向侧面边界条件设为速度入口 velocity-inlet,与风向相反面设为压力出口 pressure-outlet;在水平面模型中,计算域上部和底部均设为压力出口 pressure-outlet,风向侧面边界条件设为速度入口 velocity-inlet,与风向相反面设为压力出口 pressure-outlet。分别设置风速为 2 m/s、4 m/s 和 6 m/s 或者无风情况,排放面入口采用质量入口。

3 计算结果及分析

为分析不同风速下飞机尾气的流场特性,本文

结合动网格技术研究了飞机滑行中 4 种外界风速、2 种风向、共 24 种不同计算工况下污染物分布特性,计算工况见表 3~表 5。

表 3 垂直平面飞机尾气流场分布特性数值研究工况

Table 3 Numerical study of the distribution characteristics of the tail gas flow field of vertical plane aircraft

工况	风速/(m·s ⁻¹)	风向	工况	风速/(m·s ⁻¹)	风向
1	0	从右向左(东风)	5	0	从左向右(西风)
2	2	从右向左(东风)	6	2	从左向右(西风)
3	4	从右向左(东风)	7	4	从左向右(西风)
4	6	从右向左(东风)	8	6	从左向右(西风)

表 4 水平平面一发尾气流场分布特性数值研究工况

Table 4 Numerical study of the distribution characteristics of the exhaust gasfield in the horizontal on-shot plane

工况	风速/(m·s ⁻¹)	风向	工况	风速/(m·s ⁻¹)	风向
9	0	从右向左(东风)	13	0	从左向右(西风)
10	2	从右向左(东风)	14	2	从左向右(西风)
11	4	从右向左(东风)	15	4	从左向右(西风)
12	6	从右向左(东风)	16	6	从左向右(西风)

表 5 水平平面双发尾气流场分布特性数值研究工况

Table 5 Numerical study of the distribution characteristics of the tail gas flow field in the horizontal double-engine plane

工况	风速/(m·s ⁻¹)	风向	工况	风速/(m·s ⁻¹)	风向
7	0	从右向左(东风)	11	0	从左向右(西风)
8	2	从右向左(东风)	12	2	从左向右(西风)
9	4	从右向左(东风)	13	4	从左向右(西风)
10	6	从右向左(东风)	14	6	从左向右(西风)

计算结果表明,3 种污染物的扩散分布趋势类似,为进一步分析外流场对飞机尾气排放污染物的影响,接下来以 NO 的浓度分布为例进行探讨。

3.1 3 种模型污染物浓度分布特性对比

本文结合动网格技术研究了外界风速 4 m/s

(东风)时,飞机尾气排放污染物分布特性,并将 3 种模型相同风速下的结果进行对比。

图 4 分别为飞机以 5 m/s 速度连续运行 20 s 后污染物 NO 的浓度分布特性,从上到下依次为垂直面模型、水平面一发模型、水平面双发模型。

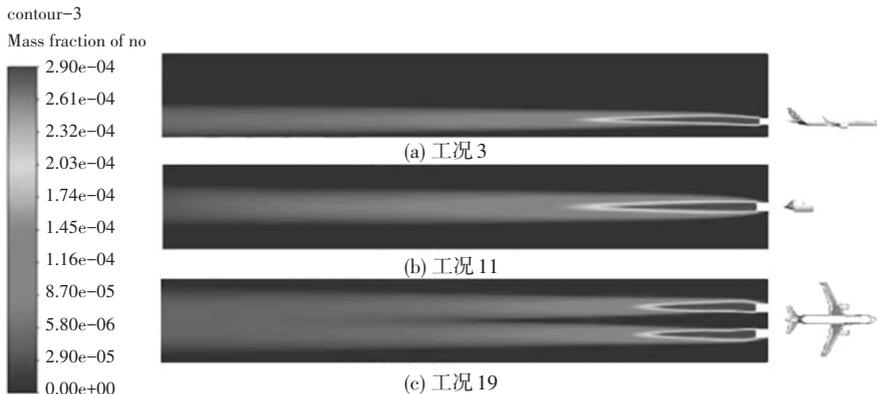


图 4 4 m/s 风速时各模型 NO 浓度分布云图

Fig. 4 NO concentration distribution of each model at 4 m/s wind speed

由图4可见,3个模型同样都是越靠近飞机发动机排放口,污染物浓度值越高,越远离飞机发动机排放口,污染物浓度值越低。垂直面上,污染物浓度主要分布在计算域的下半部分,贴近地面扩散;而水平面2个模型中,污染物浓度均呈对称分布,双发模型中,2台发动机分别排放的污染物会由分离慢慢聚集到一起。

3.2 不同风速时污染物浓度分布特性

图5分别为垂直平面4种工况下,飞机以5 m/s速度连续滑行20 s后污染物NO的浓度分布云图。这里的风向是从右向左(东风),当风速为

0 m/s时,飞机滑行过后污染物浓度分布较为均匀;当风速增加至2 m/s或者4 m/s、甚至6 m/s时,污染物浓度云图发生了明显变化。对比不同风速下的扩散趋势,观察不同风速条件下的红色区域,可以发现随着风速的增大,红色区域越小,这个现象体现了风速对污染物浓度的稀释能力。风速越大,对于特定量级污染物浓度稀释能力越强;风力越小,对于污染物浓度稀释能力相对较弱。风速为0 m/s的时候,对飞机尾气污染物浓度的稀释能力最弱;当外流场风速增大到6 m/s后,对尾气污染物浓度的稀释能力最强。

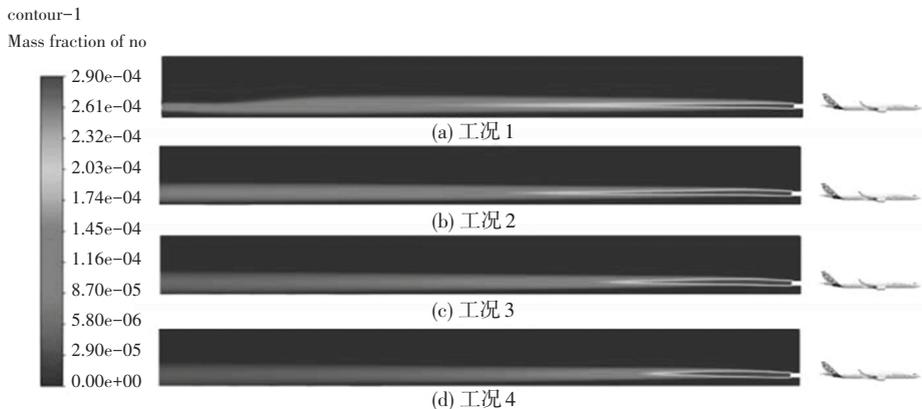


图5 垂直截面各工况NO浓度分布云图

Fig. 5 Vertical section NO concentration distribution cloud for each working condition

3.3 不同风向时污染物浓度分布特性

为进一步分析风向对飞机尾气排放污染物的影响,截取了水平方向2个模型在相同风速不同风向下的NO的浓度分布云图。

图6分别为飞机以5 m/s速度连续运行20 s后污染物NO的浓度分布特性,从上到下依次为西风

风速2 m/s条件下水平面一发模型污染物NO的浓度分布特性、东风风速2 m/s条件下水平面一发模型污染物NO的浓度分布特性、西风风速2 m/s条件下水平面双发模型污染物NO的浓度分布特性和东风风速2 m/s条件下水平面双发模型污染物NO的浓度分布特性。

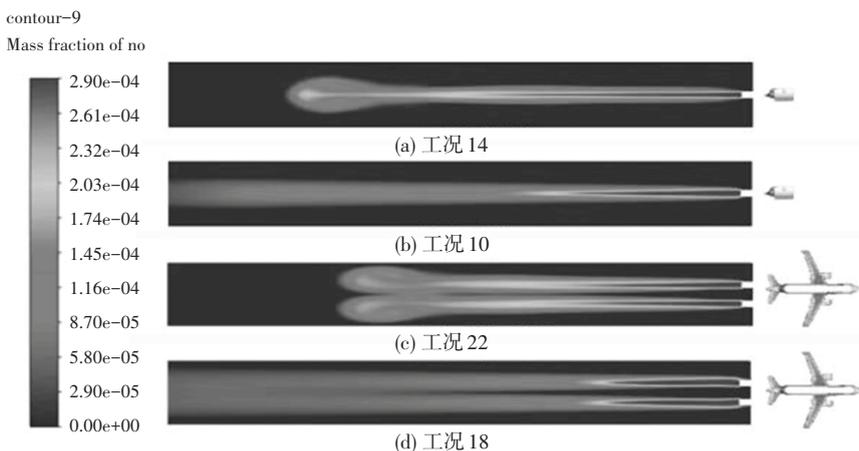


图6 水平截面各工况NO浓度分布云图

Fig. 6 Horizontal section NO concentration distribution cloud for each working condition

从尾气污染物分布规律可以得到,水平面2个模型中,污染物浓度均呈对称分布;双发模型中,2台发动机分别排放的污染物会由分离慢慢聚集到一起。与此同时可以看出,NO扩散趋势受风向影响很大,不同风向导致污染物NO的输运距离不同。在东风条件下水平面单发和双发模型污染物NO的输运距离均较远,随着输运距离的增大,污染物的浓度会越来越低;而在西风条件下水平面单发和双发模型污染物NO的输运距离均较近,并且在特定距离污染物的浓度会发生聚集,该现象说明了污染物扩散的主导方向主要受风向影响。

4 结束语

采用计算流体力学动网格技术,对机场跑道内滑行阶段飞机的尾气扩散进行了共24种工况的数值模拟,研究飞机滑行对于机场空间域污染物分布影响,通过对比不同的外流场风速和风向,验证了飞机在运行过程中尾气排放的扩散规律。结果表明:

(1)不同风速对污染物扩散影响极大,大风速对飞机污染物具有良好稀释能力,反之小风速对飞机污染物的稀释能力比较弱。风速越大,其对特定量级污染物浓度稀释能力越强;风速越小,其对特定量级污染物浓度稀释能力相对较弱。

(2)风向作为影响飞机污染物扩散的主要因素,将完全主导污染物在机场大气环境中的扩散方向,且如果风速足够大,大风会将污染物聚集在飞机滑行方向的一侧,对此区域造成严重污染。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 2020年民航机场生产统计公报[Z]. 北京:中国民用航空局发展计划司,2021.
- [2] 邓海超. 我国直线机场高质量发展问题探析[J]. 民航管理, 2021(3):44-47.
- [3] 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.
- [4] YU Nu,张梦雅,张耀,等. 航空器巡航阶段空气污染的排放和扩散[J]. 科学技术与工程,2020,20(34):28281-28285.
- [5] 曹惠玲,汤鑫豪,苗佳禾. 基于P3-T3方法的飞机LTO阶段氮氧化物排放量计算与分析[J]. 环境科学学报,2019,39(12):4235-4241.
- [6] 汤鑫豪. 基于Gaussian puff模型的航空器排放扩散特性研究[D]. 天津:中国民航大学,2020.
- [7] 曹惠玲,晏嘉伟,李玉铭. 结合QAR数据的全航段排放估算及其对飞行成本的影响研究[J]. 环境科学学报,2021,41(11):4439-4448.
- [8] 罗浩,匡江红,吕鸿雁. 机场区域飞机污染物排放扩散数值研究[J]. 物流科技,2021,44(8):90-95.
- [9] ZHAO Yu, YANG Wanning, SONG Xiaocheng, et al. Deposition and dispersion characteristics of ultrafine particles under different vehicle speeds in road tunnels employing dynamic mesh simulation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 27(8):31311-31329.
- [10] 张金贵,贾德生,张东省,等. 公路隧道内运动汽车尾气污染扩散数值仿真研究[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(1):11-15.
- [11] LIU Minzhang, ZHU Chunguang, ZHANG Huan, et al. The environment and energy consumption of a subway tunnel by the influence of piston wind[J]. Applied Energy, 2019, 246:11-23.
- [12] 祝秀莲,陈帆,崔青,等. 国外机场区域大气污染控制经验启示[J]. 环境影响评价,2019,41(5):33-35.
- [13] TANG Ling, RUAN Jianhui, BO Xin, et al. Plant-level real-time monitoring data reveal substantial abatement potential of air pollution and CO₂ in China's cement sector[J]. One Earth, 2022, 5(8):892-896.