

文章编号: 1671-6612 (2022) 05-721-05

# 疫情条件下地铁站台污染物分布规律研究

李孟柯<sup>1</sup> 毕海权<sup>1</sup> 李 田<sup>2</sup> 王宏林<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学机械工程学院 成都 610031;

2. 西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

**【摘要】** 随着复工复产的全面推进,我国已迈入疫情常态化阶段,研究地铁站台候车乘客产生的气体污染物分布特征对防疫指导工作有重要意义。根据土建资料对深圳某地铁站站台公共区的送排风系统进行数值建模,研究站台污染物的分布规律并对地铁站台防疫措施提出建议。研究表明:在站台乘客分布均匀的情况下,排风口侧的污染物浓度整体高于送风口侧;站台端和站台中央的污染物浓度相比其他区域更高;位于吊顶内的排风口无法有效及时的排出站内污染物;站台不同位置污染源产生的污染物影响范围有限,且易积累程度也存在显著差异。

**【关键词】** 地铁站;数值模拟;污染物;示踪气体;COVID-19

中图分类号 TU96 文献标识码 A

## Study on the Distribution of Pollutants on Subway Platforms under Epidemic Conditions

Li Mengke<sup>1</sup> Bi Haiquan<sup>1</sup> Li Tian<sup>2</sup> Wang Honglin<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031;

2. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** With the full progress of the resumption of work and production, China has entered the stage of normalization of the epidemic. The study of the distribution characteristics of gas pollutants produced by waiting passengers on subway platforms is of great significance to the guidance of epidemic prevention. Based on the civil engineering data, the air supply and exhaust system in the public area of a subway station in Shenzhen was numerically modeled, the distribution of pollutants on the platform was studied, and the subway platform epidemic prevention measures were put forward. The research results show that: when passengers are evenly distributed on the platform, the concentration of pollutants on the air outlet side is higher than that on the air inlet side; the concentration of pollutants at the end of the platform and the center of the platform is higher than in other areas; the exhaust vents in the ceiling cannot effectively and timely discharge the pollutants in the station; pollution sources at different locations have a limited impact range of pollutants, and the degree of accumulation is also different.

**【Keywords】** Subway station; Numerical simulation; Pollutants; Tracer gas; COVID-19

## 0 引言

地铁是城市公共交通的重要形式,具有高速、安全、准点、大客流量等特点。近年来,我国轨道交通发展迅速,2005至2015年,拥有公共轨道交通系统的城市从5个增加到24个,里程数从381.6

公里增加到3010.6公里<sup>[1]</sup>。

国内外研究者对世界各地地铁站内的污染物,例如二氧化碳、一氧化碳、颗粒物、多环芳烃、细菌、真菌等开展了丰富的现场测试<sup>[2-6]</sup>,同时有部分研究结合数值模拟方法研究了站内的热湿环

作者简介:李孟柯(1996.01-),男,硕士研究生,主要研究方向为通风技术,E-mail:312612006@qq.com

通讯作者:毕海权(1974.12-),男,博士,教授,E-mail:bhquan@163.com

收稿日期:2022-04-06

境<sup>[7-10]</sup>、风环境<sup>[8,11]</sup>、二氧化碳分布<sup>[7,10]</sup>以及颗粒物分布<sup>[10]</sup>。

地铁站最常见的形式是地下站,其污染物主要来源包括:列车轨行区、室内外环境、表面积尘以及站内人员等。大量的现场测试结果显示:大部分地铁站的热湿环境、风环境均能满足舒适性要求,但站内的空气品质相较于其他地面交通建筑更差。在疫情条件下,站内人员呼吸所产生的污染物其危害性远高于其他类型污染物,但在以往的研究中,室内人员产生的呼吸类气体污染物例如二氧化碳等,常被用于评估建筑室内环控系统的通风效率,忽略了该类污染物在室内扩散所带来的潜在危害。因此研究站内人员呼吸类污染物的分布规律对现阶段疫情防控工作有一定的指导作用。

本文利用商业软件 FLUNET 对深圳市某地铁站站台公共区进行数值建模,结合现阶段疫情防控要求,研究站台屏蔽门前候车乘客产生的气体污染物在站台的分布规律。

## 1 数值计算模型

### 1.1 污染物种类选定

人体呼气的组成成分复杂包括:氮、氧、二氧化碳和水蒸气等,在数值模拟中,为了简化模型通常用单一组分来代替人体呼气产生的各种成分(包括飞沫核)。因此在对人体呼吸产生的污染物进行数值模拟时,首先要确定污染物类型。常见的污染物类型有示踪气体和颗粒物。这两种方法各有优劣:示踪气体研究相对成熟,能较准确模拟小粒径颗粒的扩散,但无法完整模拟颗粒的动力学特性;颗粒物虽然能模拟完整的动力学特性,但如果某一呼吸道传染疾病是通过空气传播,则颗粒物难以保证研究结果的准确性<sup>[12]</sup>。

无论是现场测试还是数值模拟,示踪气体法在室内环境研究领域均有广泛的应用<sup>[13-15]</sup>,常被用于研究室内污染物分布与扩散特点。本文采用示踪气体来模拟站台候车乘客产生的污染气体。

### 1.2 模型建立

选取位于我国南部沿海城市深圳某地铁站作为研究的目标地铁站。该地铁站站台处设有屏蔽门,仿真计算过程中假设屏蔽门关闭且无渗透风,

站台空调系统位于上方吊顶采用对称布置。为减少计算量,根据实际土建资料对站台一端的公共区进行建模,面积约为 987m<sup>2</sup>,站台一端有送风口 18 个,排风口 9 个。在站台下方面两侧靠近屏蔽门位置等距布置 20 个长方体以代表候车乘客。利用 FLUNET-MESHING 划分网格,网格类型为非结构四面体网格,网格数量约为 2600 万,站台公共区模型如图 1 所示。

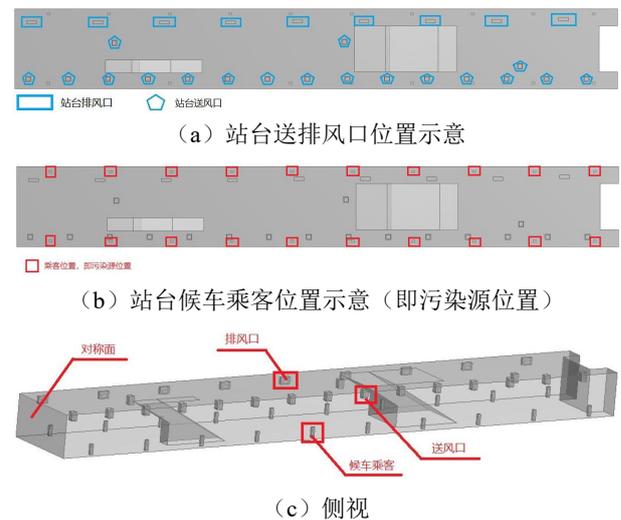


图1 站台模型

Fig.1 Platform model

数值计算求解器选择基于压力的稳态流动计算,将站内空气按不可压缩理想气体处理,湍流模型选择标准  $k-\epsilon$  模型,并开启组分运输模型,示踪气体选择二氧化碳作为站台乘客呼吸产生的污染气体。

### 1.3 计算边界条件

本文计算边界条件的设置,参照目标地铁站大系统的空调通风设计资料,站台公共区计算边界条件如表 1 所示,其中污染源即为站内候车乘客。

表1 计算边界条件

Table 1 Boundary conditions

风口类型	边界条件	详细参数
站台送风口	速度入口	3.78m·s <sup>-1</sup>
站台排风口	速度入口	-2.86m·s <sup>-1</sup>
污染源(乘客)	质量入口	2.3831e <sup>-4</sup> kg·s <sup>-1</sup>
站厅、站台连接区域	压力出口	---
壁面	绝热壁面	---
对称面	对称	---

### 1.4 网格无关性验证

本文的站台模型在划分网格时分别选取 1867 万、2559 万、3048 万的体网格数量进行计算。分别取 1m 高度面平均质量分数、1.5m 高度面平均质量分数及 2m 面平均质量分数的计算结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 随着网格数量的增加相对误

差逐渐减小。由表可知网格量为 2559 万的计算模型能够满足计算精度, 本文选择该网格模型进行计算。表中的质量分数为候车乘客产生的污染气体质量与站内气体总质量之比, 后文云图中站台不同区域污染物的质量分数越高, 则该区域受乘客产生的气体污染物的污染情况越严重。

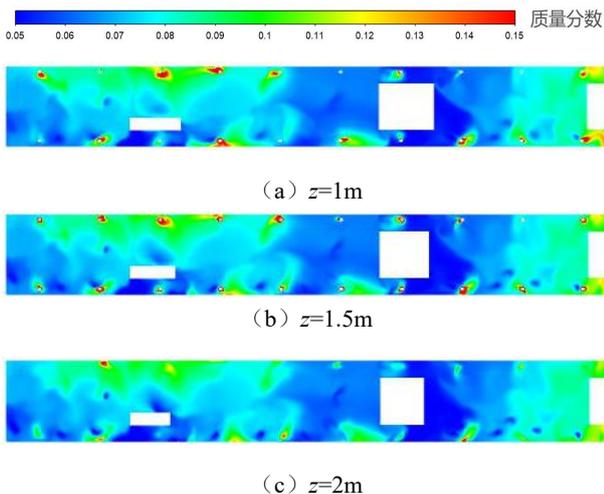
表2 计算结果及相对误差

Table 2 Calculation results and error

体网格量 (万)	1m 高度 质量分数	相对误差绝 对值%	1.5m 高度质量 分数	相对误差绝 对值%	2m 高度 质量分数	相对误差绝 对值%
1867	0.07920	—	0.08032	—	0.07823	—
2559	0.07606	4.0	0.07648	4.8	0.07475	4.6
3048	0.07680	1.0	0.07710	0.8	0.07326	2.0

## 2 计算结果与分析

### 2.1 站台污染物总体分布规律



(d) CO<sub>2</sub> 在不同竖直高度的面平均质量分数

图2 站台污染物整体分布特点

Fig.2 The overall distribution characteristics of platform pollutants

同时开启站台屏蔽门前方的 20 个污染源, 由

于污染源均匀设置, 因此能一定程度反映在特定气流组织形式下站台污染物的整体分布特点, 分别取高度方向  $z=1m$ 、 $1.5m$ 、 $2m$  三个截面的污染物质量分数的分布云图如图 2 所示。

由图 2 可知, 站台排风口侧 (即云图左上方区域) 有大面积高污染物浓度区域, 该区域内的污染物浓度水平远高于送风口一侧及站内其他区域, 这是因为送风口送入站台的新鲜空气可稀释送风口一侧区域的污染物, 同时在送排风气流的作用下站台内气流方向整体由送风口侧流向排风口侧, 从而阻滞了排风口侧污染物的扩散, 导致排风口侧区域内污染物浓度水平升高。站台末端的“凹”形区域也存在高浓度污染物区域, 这是因为该区域四周有三处壁面遮挡, 导致该区域的气流流动相对停滞, 污染物在进入“凹”形区域后很难继续向其他区域扩散。

一般情况下, 认为在排风的作用下沿站台竖直高度方向越靠近吊顶内排风口污染物的浓度将显著降低, 但由图 2 (d) 可知, 随着竖直高度的提升, 各竖直截面污染物的面平均质量分数下降的百分比均不超过 3%, 且污染物质量分数最低的截面 ( $z=4m$ ) 与最高截面 ( $z=1.5m$ ) 相比, 仅下降了 5.7%, 这意味着随着竖直高度越接近排风口, 污染物浓度并未显著衰减, 吊顶内的排风口无法及时有效的排出站内污染物。造成上述现象的原因是人体呼吸产生的气体污染物密度大于空气易在站台下部区域沉积, 从而难以被站台上方的排风口排出。

## 2.2 污染源影响范围分析

由 2.1 节可知, 尽管在站台布置 20 个污染源为均匀布置, 但在同一高度截面上, 站台各区域污染物在气流组织的作用下存在明显的浓度梯度, 为了进一步探讨不同区域污染源产生的污染物的影响范围, 即污染物的扩散距离及浓度水平, 将污染源(乘客)的 4 个为 1 组就近划分, 共计划分 5 个区域, 区域划分如图 3 所示。计算时, 分别开启区域内的 4 个污染源进行计算。取截面高度  $z=1.5\text{m}$  的污染物质量分数分布云图如图 4 所示。

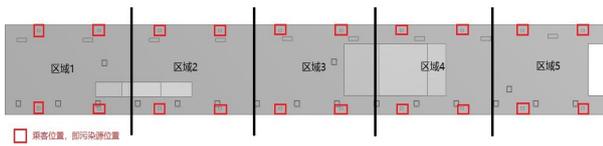


图3 站台污染源区域划分

Fig.3 Division of pollution source area of platform

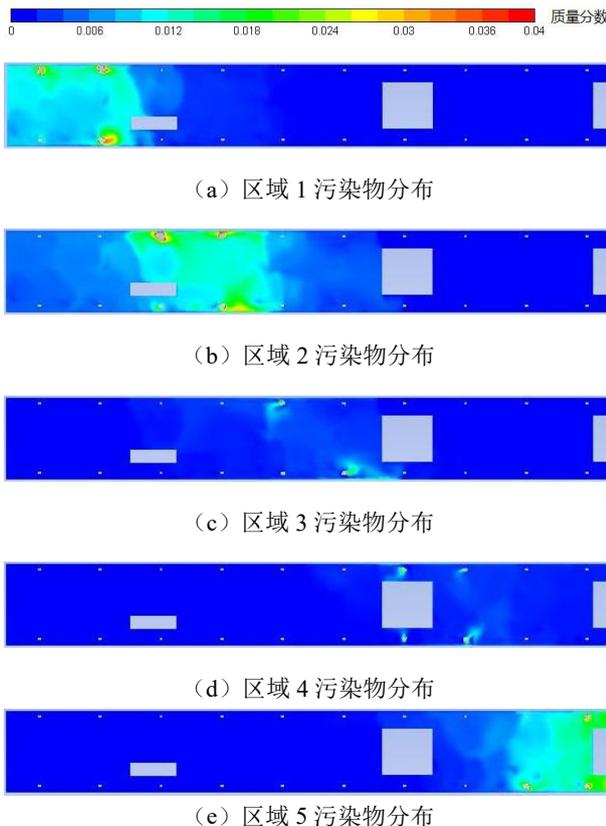


图4 站台内不同位置污染源污染物分布

Fig.4 The distribution of pollutants from different sources of pollution on the platform

由图 4 可知站台不同区域污染源所形成的污染物分布存在显著差异, 位于站台端及站台中央的区域 1、2、5 污染物浓度的质量分数均在

0.012~0.024 之间, 远高于区域 3 与区域 4 (质量分数约为 0~0.012)。所有区域中, 区域 2 的污染源产生的污染物扩散距离最远, 区域 2 中污染源产生的污染物已全面扩散至区域 1 与区域 3, 如图 4 (b) 所示, 而区域 1、3、4、5 的污染物扩散范围主要集中在各自区域内, 对其他区域的影响相对较低。尽管区域 2 的污染物传播范围横跨 3 个区域(区域 1~3), 但区域 2 的污染物在传播至区域 1 与区域 3 时, 质量分数仅仅约为 0.06, 因此可以看出离污染源越远, 污染物浓度的衰减速度极快, 从而可知各区域内污染物不存在严重脱离自身污染源的高浓度远距离扩散现象, 某一区域的污染物浓度水平的高低除了受流场作用外, 还取决于区域内不同位置与污染源的相对距离, 受其他区域污染源的影响相对较小。

## 3 防疫措施建议

根据新闻报道, 疫情期间我国各地区地铁站采用的防疫措施包括: 限制客流<sup>[16]</sup>、要求旅客佩戴口罩并保持安全距离<sup>[17]</sup>、定期组织消杀工作<sup>[18]</sup>。其中消杀工作主要针对地铁站内各物品表面, 而站内人员呼吸产生的污染物由于粒径小, 可以长时间悬浮在空气中, 常规的表面消杀措施难以消除空气中的污染物。参考传染病房, 常见的空气消毒技术主要分为物理消毒和化学消毒<sup>[19]</sup>, 结合地铁站建筑面积大的特点, 建议通过在混风室内或站内固定或可移动的紫外线消毒装置<sup>[20]</sup>, 对站内空气中微生物进行灭活处理, 该方法已应用于方舱医院<sup>[21]</sup>。在第 2 节, 分析获得了站台内污染物的分布规律, 基于上述研究成果, 对地铁站的防疫工作提出以下建议:

(1) 可于地铁停运后开启消杀装置, 根据数值模拟结果对污染物浓度水平较高的站台端与站台中央区域进行重点消杀。

(2) 对于污染物浓度较高的区域, 应适当增加安全距离, 在地铁客运高峰期时段, 可采取客流疏导、贴警示标语等措施减少该区域的客流密度。

(3) 该地铁站位于夏热冬暖区, 一年的大部分运营时段均需制冷, 为了降低站内环控系统能耗, 空调系统会将回收站内空气反复利用, 这会导致乘客呼吸产生的污染物长期在站内循环。考虑新风稀释作用, 若根据送风量的 20%~30%设计新风量, 站台每小时换气次数仍较低 (1.68~2.48/h),

由3.1节可知在地铁运营期间排风口也难以排出站内污染物。因此建议地铁停运后单独开启排风风机运行1~2个小时,通过站厅出入口与隧道补充新风以稀释站内污染气体,防止站内污染物累积至下一个运营时段。

#### 4 结论

本文应用CFD商业软件FLUENT建立深圳某地铁站台公共区三维模型,结合示踪气体方法研究站台公共区人体呼吸污染物的分布规律,并对地铁站疫情期间的消杀工作提出一定建议,研究结论如下:

(1) 站台内污染物浓度水平总体分布呈现回排风口侧高于送风口侧,站台端部及站台中央区域浓度高于站台其他区域。

(2) 污染物浓度水平在站台竖直高度方向上没有显著衰减,这说明吊顶内的排风口无法有效承担站内污染物的排放工作。

(3) 站台内各个区域的污染源产生的污染物影响范围有限,污染物不存在高浓度远距离输送现象。

(4) 不同位置的污染源在其周围流场的作用下,所产生的污染物的积累程度也不同,其中站厅中央与端部附近的污染源产生的污染物积累程度严重。

(5) 针对防疫工作,建议地铁站台应重点消杀站台端与站台中央区域;可在运营高峰时段对高污染区域进行客流疏导;可于停运时段开启并延长排风风机工作时间,通过站厅出口与轨行区补风稀释站内污染物,防止站内污染物累积至下一个运营时段。

#### 参考文献:

[1] 孙世超,顾保南,邓澄远.2015年中国城市轨道交通运营线路统计和分析——中国城市轨道交通“年报快递”之三[J].城市轨道交通研究,2016,19(1):1-4,9.

[2] Li Guo, Yunjie Hua, Qingqing Hu, et al. Characteristics and chemical compositions of particulate matter collected at the selected metro stations of Shanghai, China[J]. Science of the Total Environment, 2014,496: 443-452.

[3] Jun Ho Cho, Kyung Hee Min, Nam Won Paik. Temporal

variation of airborne fungi concentrations and related factors in subway stations in Seoul, Korea[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2005,209(3):249-255.

- [4] L G Murruni, V Solanes, M Debray, et al. Concentrations and elemental composition of particulate matter in the Buenos Aires underground system[J]. Atmospheric Environment, 2009,43(30):4577-4583.
- [5] Hanna L Karlsson, Anders G Ljungman, JohnLindbom, et al. Comparison of genotoxic and inflammatory effects of particles generated by wood combustion, a road simulator and collected from street and subway[J]. Toxicology Letters, 2006,165(3):203-211.
- [6] Fenhuan Yang, Daya Kaul, Ka Chun Wong, et al. Heterogeneity of passenger exposure to air pollutants in public transport microenvironments[J]. Atmospheric Environment, 2015, 109:42-51.
- [7] 任伟.地铁站空调不同送回风方式下污染物分布特征的模拟研究[D].上海:东华大学,2018.
- [8] 符泰然,赵卫平,史聪灵,等.岛式双层地铁车站热环境优化分析[J].建筑技术,2013,44(12):1129-1132.
- [9] 方杰.地铁热环境状态的神经网络预测与数值模拟分析[D].北京:北京交通大学,2020.
- [10] 高月芬,韩帅,刘兆.地铁屏蔽门系统站台空气品质数值模拟分析[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):383-388.
- [11] Milad Khaleghi, Mohammad Reza Talaei. Analysis of unsteady airflow in a subway station influenced by train movement[J]. Science and Technology for the Built Environment, 2020,26(2):210-218.
- [12] 李瑞彬,吴妍,牛建磊,等.人体呼出颗粒物的传播特性及呼吸道传染病感染概率预测方法[J].暖通空调,2020, 50(9):41-54.
- [13] 嵇赟喆.传染性隔离病房的气流组织与负压控制数值研究[D].天津:天津大学,2005.
- [14] Frattolillo A, et al. Natural ventilation measurements in a multi-room dwelling: Critical aspects and comparability of pressurization and tracer gas decay tests[J]. Journal of Building Engineering, 2021,42:102478.
- [15] 常乐,涂书阳,张旭.人员进门过程中污染气体侵入数值模拟[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(12): 1847-1852. (下转第745页)