王春旺,李晓锋,佟林全,等.基于网络模型的地铁系统 $PM_{2.5}$ 浓度模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1278−1287.
Wang C W, Li X F, Tong L Q, et al. Simulation study on $PM_{2.5}$ concentration in subway system based on network model [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1278−1287.

基于网络模型的地铁系统 $PM_{2.5}$ 浓度模拟研究

王春旺 [1,2,3],李晓锋 [4*],佟林全 [2,3],张忠彬 [2,3],樊晶光 [2,3],金龙哲 [1] (1.北京科技大学资源与安全工程学院,北京 10083；2.国家卫生健康委职业安全卫生研究中心,北京 102308；3.国家卫生健康委粉尘危害工程防护重点实验室,北京 1023083；4.清华大学建筑学院,北京 100084)

摘要：本文依据质量守恒原理建立了地铁系统 $PM_{2.5}$ 浓度的网络模型,并建立了列车在隧道内运行阶段的 $PM_{2.5}$ 产尘量模型,从而模拟地铁系统各区域的 $PM_{2.5}$ 浓度变化.应用该模型对中国南方某典型地铁线路进行了模拟分析,并开展现场实验进行了验证.结果表明,模拟结果误差在 10%以内.定量分析了发车对数及室外浓度对地铁站 $PM_{2.5}$ 浓度的影响:地铁站 $PM_{2.5}$ 浓度随着发车对数的增加呈现非线性增加趋势,当发车对数增加 78%,车站 $PM_{2.5}$ 浓度增加约 86%;地铁站 $PM_{2.5}$ 浓度与室外 $PM_{2.5}$ 在一定范围内浓度差值为一定值,与室外 $PM_{2.5}$ 浓度成线性叠加关系.对于高峰期发车对数达到 24 对/h 以上的地铁线路,即使室外浓度达到 WHO 推荐值(24h 均值 15μg/m^3),地铁站运营期间 $PM_{2.5}$ 浓度仍难以达到室内空气质量标准的要求(24h 均值 50μg/m^3).

关键词：地铁；$PM_{2.5}$；传播规律；现场测试；网络模型
中图分类号：X506 **文献标识码**：A **文章编号**：1000−6923(2026)03−1278−10

Simulation study on $PM_{2.5}$ concentration in subway system based on network model. WANG Chun-wang[1,2,3], LI Xiao-feng[4*], TONG Lin-quan[2,3], ZhANG Zhong-bin[2,3], FAN Jing-guang[2,3], JIN Long-zhe[1] (1.School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China；2.National Center for Occupational Safety and Health, National Health Commission, Beijing 102308, China；3. National Health Commission Key Laboratory for Engineering Control of Dust Hazard, Beijing 102308, China；4.School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1278~1287

Abstract：A network model based on mass conservation was established to simulate $PM_{2.5}$ dispersion in subway systems, integrating a source model for train-induced dust in tunnels. The model was applied to a representative line in southern China and validated with field measurements, showing errors within 10%. Results indicate that station $PM_{2.5}$ concentration increases nonlinearly with train frequency (approximately +86% for a +78% frequency increase) and exhibits a near-constant differential relative to outdoor concentration, suggesting a linear additive effect. Notably, for lines operating at over 24 trains per hour during peak periods, station $PM_{2.5}$ levels consistently exceeded the indoor air quality standard (50μg/m^3), even when outdoor concentrations met the WHO guideline (15μg/m^3).

Key words：subway system；$PM_{2.5}$；propagation law；field test；network model

由于快捷、便利性和安全性,地铁已成为大城市的主要通勤方式.截至 2022 年底,中国大陆已有 55 座城市开通地铁系统,运营总长达 8000km,占城市轨道交通总线路的 78.3%[1].地铁站由于深埋于地下,通风受限,导致空气污染严重,会对人体健康产生不良影响[2−4],其空气质量也引起了广泛地关注.

国内一些主要城市,如北京[5]、上海[6]、南京[7]均在地铁站台监测到高出室外环境几倍到几十倍的细颗粒物浓度.此外,与环境空气相比,站台收集的细颗粒物通常含有高浓度的 Fe(铁)、Mn(锰)、Cu(铜)等源自列车运行时产生的金属元素[8],地铁细颗粒物也因此具有更高的遗传毒性[9],对人体的健康影响不应忽视[10].

已有实测研究表明,地铁站内 $PM_{2.5}$ 浓度受多重因素影响,其中室外环境被普遍认为是主要影响因素之一[11-12],其与站内浓度的相关性较高(部分研究显示 R^2>0.9[12]).此外,列车运行频率、通风系统条件等内部因素也会显著影响 $PM_{2.5}$ 的积聚与扩散[13].相比之下,站内温湿度及瞬时客流量等因素的影响则相对有限[11].这些研究共同说明,室外环境、列车运行频率、通风系统及结构设计是影响地铁站 $PM_{2.5}$

收稿日期：2025−08−08
基金项目：国家卫生健康委职业安全卫生研究中心重点项目(ZY−2024−ZD01−01)
* 责任作者, 教授, xfli@tsinghua.edu.cn

浓度的主要因素.由于地铁站环境特殊,通过实测的方法很难长时间、连续性获得站内颗粒物浓度数据,一些学者尝试采用模拟研究的方法对地铁站颗粒物的浓度进行预测.研究方法上多采用人工神经网络[14]、机器学习[15]和计算流体力学(CFD)[16]等方法.部分研究通过实测数据对模型进行了验证,其预测准确率可达约 67%~84%[14-15].基于模拟结果,还可进一步提出空气品质改善的针对性建议[16].整体来看,数据驱动模型与流体力学仿真已成为该领域重要的研究工具,为理解地铁环境中颗粒物的动态分布与影响因素提供了有效支持.

当前针对地铁站颗粒物浓度的实验研究,提供了大量的实测数据,揭示了地铁站 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因素.然而,这些结论多基于特定站点或短期观测,因此结论在整个地铁系统中的适用性还有待商榷.在模拟研究方面,人工神经网络模型和机器学习模型均需要大量的实测数据作为输入参数,目前多限于单座地铁站的模拟分析,并且由于该两种方法具有数据的高度依赖性,模拟结果往往会出现可解释性较差的问题.CFD 虽然可以模拟较短时间内(如一个行车周期)的地铁站台颗粒物浓度变化规律,但在模拟过程中简化或忽略了很多重要条件,比如隧道内上、下游区间列车运行对当前车站颗粒物浓度的影响、列车载客量变化对轮轨摩擦产生的 $PM_{2.5}$ 源强度影响等,此外,该方法也难以对地铁站全天的颗粒物浓度特征进行动态模拟,因此,其研究结论也具有较大的局限性.

本研究拟建立一个地铁线路 $PM_{2.5}$ 浓度的数值模拟模型,描述地铁系统内 $PM_{2.5}$ 的传播规律,模拟分析地铁系统 $PM_{2.5}$ 浓度的逐时变化及分布规律,旨在为改善地铁站环境空气质量和优化环境控制系统的设计提供参考.

1　研究方法

1.1　$PM_{2.5}$ 浓度模拟

1.1.1　数学模型　对于一条地铁线路的任意车站 i,其 $PM_{2.5}$ 浓度平衡关系如图 1 所示,根据质量守恒方程,在任意时刻 t,车站内的 $PM_{2.5}$ 浓度变化可以用公式(1)表达:

$$V_{cz,i}\mathrm{d}C_{cz,i}=G_{sf}^{+}C_{sf}\mathrm{d}t-G_{pf}^{-}C_{cz,i}\mathrm{d}t+G_{o}^{+}C_{o}\mathrm{d}t-G_{o}^{-}C_{cz,i}\mathrm{d}t+G_{sd,i}^{+}C_{sd,i}\mathrm{d}t-G_{sd,i}^{-}C_{cz,i}\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中:$V_{cz,i}$ 为车站体积,m^3;$C_{cz,i}$ 为车站 $PM_{2.5}$ 浓度,C_{sf} 为 $PM_{2.5}$ 浓度,C_o 为室外环境 $PM_{2.5}$ 浓度,$C_{sd,i}$ 为隧道内 $PM_{2.5}$ 浓度,μg/m^3;G_{sf}^{+} 为机械送风量,G_{pf}^{-} 为机械排风量,$G_{sd,i}^{+}$ 为隧道流入车站的风量,G_{o}^{+} 为出口流入车站的风量,$G_{sd,i}^{-}$ 为车站流入隧道的风量,G_{o}^{-} 为车站流向室外的风量,m^3/s.

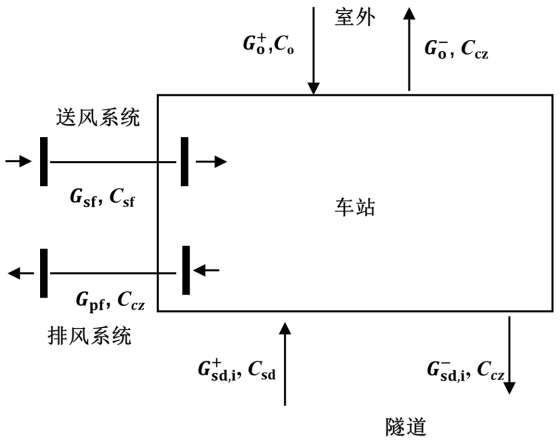


图 1　车站 $PM_{2.5}$ 浓度平衡示意

Fig.1　Balance of $PM_{2.5}$ concentration in a subway station

对于隧道 i,其 $PM_{2.5}$ 浓度平衡关系如图 2 所示.在任意时刻 t,$PM_{2.5}$ 浓度变化可以用公式(2)表达:

$$V_{sd,i}\mathrm{d}C_{sd,i}=G_{sd,i}^{-}C_{cz,i}\mathrm{d}t+G_{sd,i\text{-}1}^{-}C_{sd,i\text{-}1}\mathrm{d}t-G_{sd,i}^{+'}C_{sd,i}\mathrm{d}t+S_{lc}\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中:$V_{sd,i}$ 为隧道体积,m^3;$G_{sd,i}^{-}$,$G_{sd,i-1}^{-}$,$G_{sd,i}^{+'}$ 分别为由车站、上游隧道流入当前隧道的风量和流出当前隧道的风量,m^3/s;$C_{sd,i}$,$C_{cz,i}$,$C_{sd,i-1}$ 分别为当前隧道,车站和上游隧道的 $PM_{2.5}$ 浓度,μg/m^3;S_{lc} 为列车在隧道内运行时的 $PM_{2.5}$ 产尘量, μg/s.

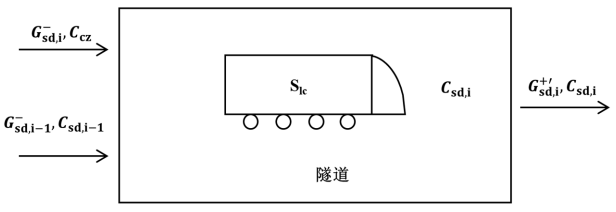


图 2　隧道 $PM_{2.5}$ 浓度平衡示意

Fig.2　Balance of $PM_{2.5}$ concentration in a subway tunnel

地铁车站、隧道相互连接,形成一个通风网络,如图 3 所示.车站、隧道的 $PM_{2.5}$ 浓度作为待求解的自变量,对地铁线路的所有车站、隧道,按照上述模型分别建立 $PM_{2.5}$ 浓度的平衡方程.将方程(1)和(2)

联立,即可求出隧道以及站台的 $PM_{2.5}$ 浓度.

根据中国城市轨道交通协会的统计数据,当前我国换乘车站数量仅占总运营车站数量的 14%[1],并且换乘车站由于结构复杂、站内环境影响因素众多,不利于归因分析,因此,本研究所建立的车站模型针对的是非换乘的标准站.

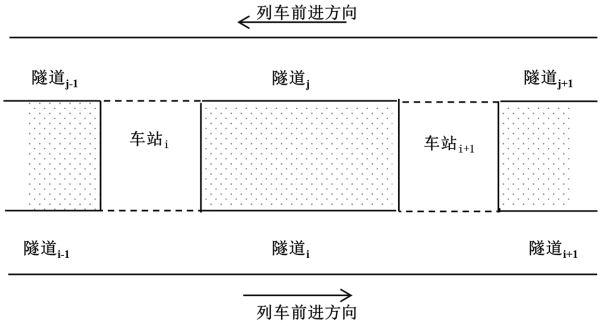


图 3 地铁通风网络示意

Fig.3 Schematic diagram of subway network

1.1.2 列车 $PM_{2.5}$ 产尘量模型 列车在隧道内运行时的 $PM_{2.5}$ 产尘量(S_{ic})来自列车运行时的车轮磨损和刹车片与车轮接触引起的磨损两部分[17].

(1)车轮磨损 $PM_{2.5}$ 产尘量:根据 Archard 磨损理论模型[18],磨损材料的体积用公式(3)表示:

$$V_{\mathrm{w}} = k\frac{sN}{H} \tag{3}$$

式中:V_{w} 为磨损体积,m^3;k 为磨损系数;s 为滑动距离,m;N 为法向载荷,N;H 为磨损材料的硬度,N/m^2.则单位时间内的磨损率(kg/s)为:

$$\rho\frac{V_{\mathrm{w}}}{t} = \rho k\frac{sN}{tH} = \rho k\frac{N}{H}\bar{V}_{\mathrm{slip}} \tag{4}$$

式中:$\bar{V}_{\mathrm{slip}}$,为滑动速度,m/s;ρ为磨损材料的密度,kg/m^3.

根据赫兹接触理论,轮轨接触区域会形成一个椭圆形的接触斑,对于滑动区内长为 Δx 和 Δy 的有限元来说,滑动速度可由公式(5)表示:

$$v_{\mathrm{slip}} = V_{\mathrm{vehicle}}\sqrt{(\upsilon_{\mathrm{x}} - \phi\Delta y)^2 + (\upsilon_{\mathrm{y}} + \phi\Delta x)^2} \tag{5}$$

式中:V_{vehicle},为车轮速度,m/s;u_x、u_y 分别为纵向、横向滑蠕率;ϕ为自旋滑蠕率,m^{-1}.由理论公式可知,滑动速度与车轮速度呈正相关性,也就是说磨损率(kg/s)与车轮速度呈正相关性.

由于在实际工程中,难以直接测试列车运行过程中由于轮轨接触产生的磨损率,一些学者采用实验的方法得到了车轮在不同的转速及压力下磨损率的变化规律.测试结果表明,在一定范围内,车轮磨损产尘量磨损率(μg/s)与转速近似呈正比例关系,如图 4 所示.

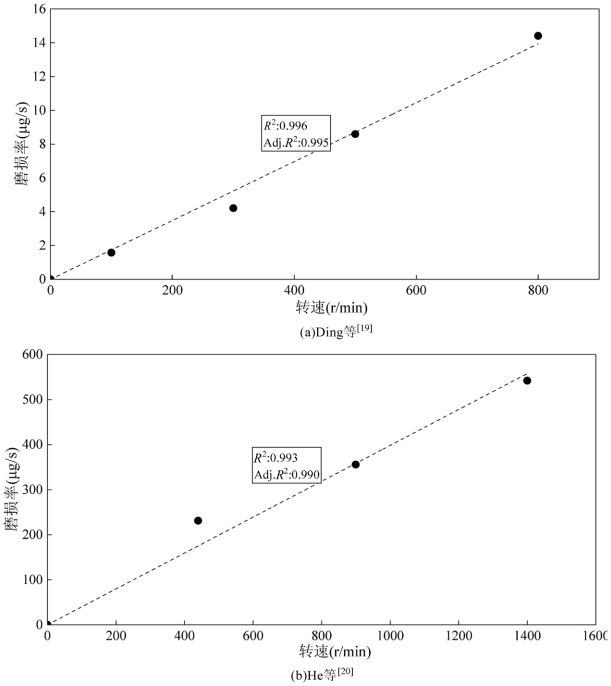


图 4 轮轨式样磨损率与转速关系

Fig.4 Relationship between wheel rail wear rate and rotational speed

地铁列车在隧道内运行时通常会经历加速行驶、匀速行驶、减速行驶 3 个阶段,列车转速通常在 0~800r/min,与以上两个研究处在相同的转速范围.基于以上研究成果,在本模型中认为车轮磨损产尘量(μg/s)与车轮转速,即列车速度呈正比例关系.

在轮轨摩擦产生的颗粒物特征研究方面,Abbasi 等[21]测试了列车典型工况(运行速度 70km/h,载荷 870MPa),单个轮盘磨损产生的 PM_{10} 的粒子特征,根据该研究提供的粒子数量及粒径分布计算得出单个轮盘 PM_{10} 的磨损率为 45.7μg/s.根据材料硬度与轮轨磨损量近似呈线性关系这一结论[22],本文计算得出对于标准的轮轨材料,运行速度 70km/h,载荷 870MPa 时,单个车轮 PM_{10} 的产尘量为 57.1μg/s.

Lee[23]证明了不同运行速度下颗粒物的粒径分布基本一致,并且给出了不同粒径范围内的粒子数量.根据其研究中提供的数据,本文计算得出 D≤100nm 时,粒子的平均粒径为约为 80nm,100nm<

D≤1μm 时,粒子的平均粒径约为 380nm,1μm<D≤10μm 时,粒子的平均粒径约为 1.8μm.Olofsson 等[24]利用销盘模型测试了轮轨摩擦过程,其测试的颗粒物粒径及体积分布与 Lee[23]的研究结果基本一致.

根据 Lee[23]的研究结果,本文计算了 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 的质量占比在 70%左右,如图 5 所示.对比现场测试结果,洛杉矶地铁为 0.77[25],上海地铁为 0.56~0.95[26],台北地铁为 0.67~0.78[27],与计算结果基本一致.因此,可以得到列车运行速度 70km/h,车轮承担载荷为 870MPa 时,单个车轮的 $PM_{2.5}$ 产尘量为 40μg/s (57.1μg/s 乘以 0.7).为了方便表述,本文定义该工况为基本工况.

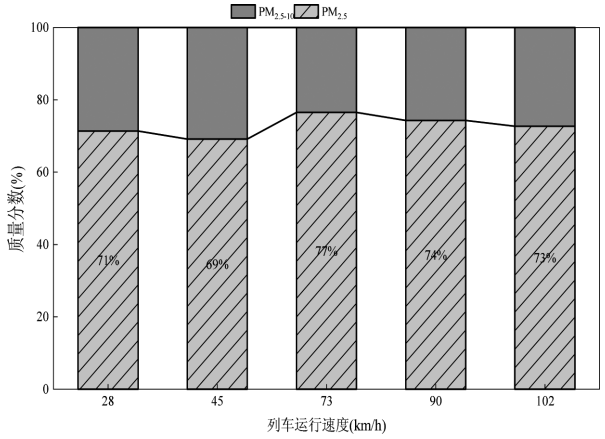


图 5　不同列车运行速度下 $PM_{2.5}$ 占 PM_{10} 的质量分数

Fig.5　Mass fraction of $PM_{2.5}$ to PM_{10} at different train speed

以上的模型实验研究均是在固定载荷下开展的,由于列车在不同时间段的载客量会发生变化,因此,施加在轮轨上的接触载荷也会随之变化.理论分析及实验研究均表明磨损率与接触载荷成正比[28].此外, Sundh[29]的研究表明,对于同一种轮轨材料,压力变化对轮轨接触产生的颗粒物的粒径分布几乎没有影响,即不同接触压力下轮轨摩擦产生的颗粒物的粒径分布基本一致.

因此,建立列车不同运行工况下,车轮磨损 $PM_{2.5}$ 产尘量如公式(6)所示:

$$m_{\mathrm{W}}=\frac{v}{v_0}\frac{N}{N_0}m_{\mathrm{w},0} \tag{6}$$

式中:m_{w} 为车轮磨损 $PM_{2.5}$ 产尘量, μg/s;v_0 为基本工况的运行速度, 70km/h; N 为轮轨接触载荷,MPa;N_0 为基本工况接触载荷,870MPa;$m_{\mathrm{w},0}$ 为基本工况的 $PM_{2.5}$ 产尘量, 40μg/s.

每节车厢有 8 个车轮,对于 6 节编组的列车, 共计 48 个车轮,则对于一列车的 $PM_{2.5}$ 产尘量应为公式(3)乘以 48.

(2)刹车片(闸瓦)磨损 $PM_{2.5}$ 产尘量:地铁设计最高时速一般为 80km/h,实际运行时的最高速度一般在 72km/h 左右.列车在隧道内运行时通常以 0.8m/s^2 的加速度加速到最大运行速度,然后匀速运行,最后再以 0.8m/s^2 的速度减速,直到列车停靠站台[30-31].

地铁在减速阶段,一开始采用电制动,当速度低于空电转换速度时,电制动退出,空气制动介入,导致列车刹车片磨损,从而产生大量粉尘[32].空电转换速度与车辆牵引系统及线路服务要求有关,不同城市地铁稍有差别,如北京地铁 13 号线转换速度为 10km/h[33], 厦门地铁为 14km/h[34], 南京地铁为 18km/h[35].

根据统计,中国地铁列车每行驶 10000km 的刹车片磨损厚度为 2.64~3.40mm[36–38],中国地铁区间平均长度约 1km[1],假设列车每 1 万 km 刹车 1 万次,则每次刹车的刹车片磨损厚度为 2.64×10^{-4}~3.40×10^{-4}mm.

根据列车减速度及空电转换速度,可计算得出刹车片制动的时间.则刹车片的单位时间刹车片 $PM_{2.5}$ 产尘量 m_{b} (μg/s)由公式(7)计算得出:

$$m_{\mathrm{b}}=\varphi\frac{l\cdot w\cdot\delta\cdot\rho}{v_{\mathrm{s}}/a} \tag{7}$$

式中:l 为刹车片的长度,一般为 320mm;w 为刹车片的宽度,一般为 82mm;δ 为磨损厚度,2.64×10^{-4}~3.40×10^{-4}mm;ρ 为刹车片密度,2.17g/cm^3; v_{s} 为空电转换速度,10~18km/h; a 为列车减速度, 0.8m/s^2;φ 为 $PM_{2.5}$ 产尘量在总磨损量中的占比.有学者对地铁制动过程中刹车片产生的颗粒物特征进行过研究,结果为刹车片产生的颗粒物中 $PM_{2.5}$ 占总磨损量的 80%左右[21,39],所以,公式(7)中的ϕ取 0.8.

由公式(7)计算得出,单个刹车片的单位时间 $PM_{2.5}$ 产尘量为 33~39μg/s,因此,取平均值认为单位时间产尘量为 36μg/s.

基于以上研究,可以得到各种工况下列车在隧道中的 $PM_{2.5}$ 逐秒产尘量.

1.2　通风量模拟

影响地铁系统通风的因素很多,常用的数值模拟模型有三维的 CFD 模型和一维的网络模型.CFD

模型由于其优越的可视化效果在用于模拟隧道通风、地铁站的火灾通风以及活塞风对温度和风场(站台)的影响方面优势明显[40],但其建模过程往往比较复杂,对计算机的计算能力有较高的要求,往往只能模拟 1 座地铁站及其相邻区间隧道,并不适用于整条线路的模拟.

网络模型由于具有建模简单、计算时间短、可以构建整条地铁线路通风网络的优点而成为研究地铁通风的常用方法[41].本研究的通风模拟采用网络法.通风模拟采用的软件是 Subway Thermal Environment Simulation (STESS)[42].STESS 可以模拟整条线路在不同行车密度下的车站出入口和隧道内的空气速度、空气流量和压力.STESS 在算法上对计算稳态流动的 MKP 算法(基本回路分析法)[43]进行了改进,采用了一种用于网络非定常流动特性的改进算法(MMKP) 以解决地铁网络中的动态通风问题,改进后的算法不断改变矩阵中的分支顺序,确保只求解对角占优矩阵,保证了动态网络流模拟的收敛性,同时也大大节省了计算时间[44].

1.3 模型建立及参数设置

为了验证模型的适用性,对中国南方某非屏蔽门地铁线路建模分析.该路线是该市第一条开通的地铁线路,共 15 站 14 个区间,于 2005 年 9 月正式运营,线路日均客流量达到了 102 万人次,高峰期发车对数达到了 26 对/h,在中国非屏蔽门系统地铁线路中具有代表性.

表 1 列车区间运行计划

Table 1 Train operation schedule

区间隧道	隧道长度(m)	运行时间(s)	车站	停站时间(s)
S1-S2	1301	106	S1	25
S2-S3	1105	96	S2	25
S3-S4	1222	105	S3	45
S4-S5	1137	97	S4	25
S5-S6	1153	99	S5	30
S6-S7	977	90	S6	30
S7-S8	1143	99	S7	25
S8-S9	1067	95	S8	35
S9-S10	931	86	S9	30
S10-S11	859	83	S10	45
S11-S12	858	82	S11	30
S12-S13	961	90	S12	30
S13-S14	1127	97	S13	45
S14-S15	1049	93	S14	30

根据实际资料统计,输入列车在各个区间的运行时间、发车密度、载客率分别如表 1 和表 2 所示.列车采用的编组为中国地铁系统里最常用的 6 节编组列车,最高运行时速 72km/h,加/减速度为 0.8m/s^2.利用 STESS 软件建立的通风模型如图 6 所示.

表 2 发车密度及载客率

Table 2 Train density and load factor

时刻	行车对数	载客率	时刻	行车对数	载客率
5:00	6	0.18	15:00	14	0.34
6:00	15	0.25	16:00	16	0.36
7:00	25	0.80	17:00	24	0.80
8:00	25	1.00	18:00	24	1.00
9:00	14	0.65	19:00	14	0.65
10:00	14	0.30	20:00	14	0.40
11:00	14	0.30	21:00	10	0.35
12:00	14	0.30	22:00	9	0.24
13:00	14	0.30	23:00	6	0.18
14:00	14	0.30			

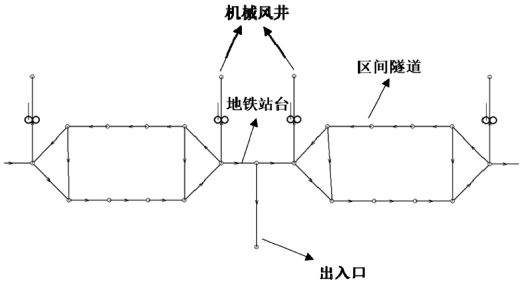


图 6 STESSS 通风网络模型

Fig.6 STESS ventilation network model

自然通风模式是目前国内外地铁系统中常用的通风模式,由于在该模式下地铁系统与室外的气流交换仅依靠活塞风,该模式是反映地铁系统与外界发生气流交换规律的一种基础模式.因此,选择模拟的通风模式为自然通风模式.

1.4 现场测试

本文选择了模拟路线的中间车站(S8 站)进行 $PM_{2.5}$ 浓度的测试以验证模拟结果的准确性.该车站为上下 2 层的岛式非换乘车站.$PM_{2.5}$ 浓度测试采用光散射法和称重法同时进行,并用称重法对光散射法进行校准.光散射法采用的仪器为 TSI8520.首先进行了预测试,在站台上均匀选取了 6 测试点,测试位置距站台 1.5m 高.预测试结果表明 6 个位置的小时平均浓度基本一致,说明站台 $PM_{2.5}$ 经过活塞风充分掺混后浓度分布均匀,因此选择靠近站台中间位置的测点进行连续测试.室外背景浓度测点布置在

离地铁站附近约 50m 处.测试仪器的采样间隔设置为 30s.

$PM_{2.5}$ 样本采用 37mm 直径的特氟隆滤膜收集,滤膜放置在一个接有 $PM_{2.5}$ 采样头(Model 200Personal Impactor, TSI, USA)的空气采样泵中(Air Check XR5000, 4L/min, SKC Inc., Eighty Four, PA, USA).采样前后,将特氟隆膜置于恒温(25±0.1)◦C、恒湿(45%±2.5%)的保温箱中放置 48h,然后在精密度为 0.001mg 的微量天平上称重.

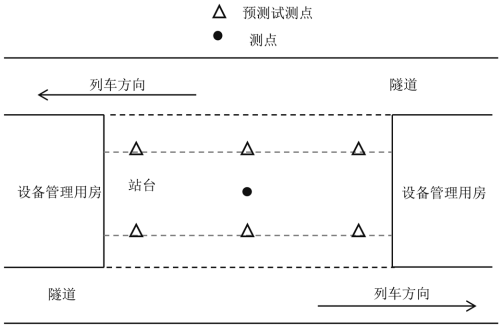


图 7　站台测点布置示意

Fig.7　Schematic diagram of platform and tunnel measurement points

2　结果与讨论

2.1　实测结果

如图 8 所示,地铁开始运营前站台 $PM_{2.5}$ 浓度与室外浓度基本一致,站内最低浓度出现在早上 5:00 左右,此时室外浓度同样处于最低水平,约 50μg/m^3.地铁站从 6:00 开始运营后,站台 $PM_{2.5}$ 浓度快速升高,在 8:00~9:00 之间出现一个峰值,约 150μg/m^3,此时也是地铁运营的早高峰,列车的发车密度达到最大,导致隧道内产生了大量的细颗粒物,站台浓度因此达到最高.早高峰过后,由于发车密度减小,站台 $PM_{2.5}$ 浓度快速下降后基本保持稳定状态(10:00~16:00),而此时室外浓度则是先升高后降低的变化趋势.16:00 后随着晚高峰逐渐到来,发车密度逐渐增大,站台 $PM_{2.5}$ 浓度又随之升高,直至形成第二个峰值,与早高峰期间的浓度值相当.室外浓度在该时段也略有升高,从 50μg/m^3 升高至 70μg/m^3.全天来看,站台 $PM_{2.5}$ 日平均浓度为 107μg/m^3,比室外浓度(52μg/m^3)高 55μg/m^3.可以看出,地铁系统的 $PM_{2.5}$ 浓度会受到列车运行和室外浓度变化的双重影响,受列车运行影响更明显,地铁 $PM_{2.5}$ 浓度的波动幅度明显高于室外.

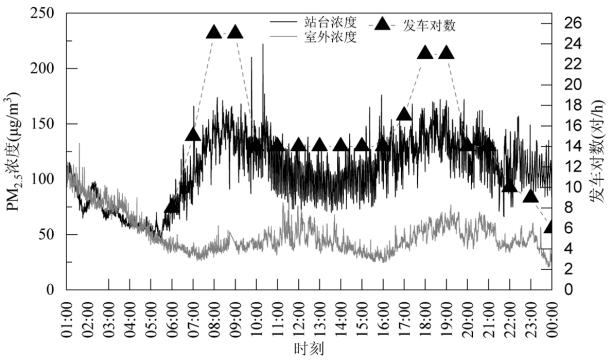


图 8　站台 $PM_{2.5}$ 浓度测试结果

Fig.8　Platform $PM_{2.5}$ concentration test results

由图 9 可以看出,虽然在运营高峰期站台浓度明显高于非高峰期,高出约 50μg/m^3,但站台浓度的波动幅度却无明显差异,非高峰期波动幅度在 40~50μg/m^3,高峰期波动幅度在 50~60μg/m^3.

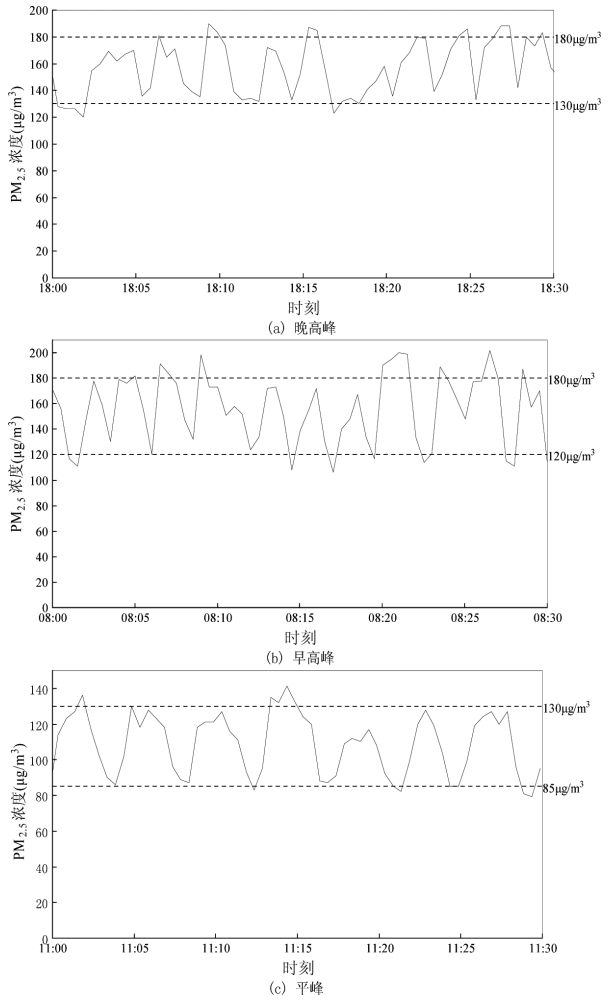


图 9　站台 $PM_{2.5}$ 浓度

Fig.9　Platform $PM_{2.5}$ concentration test results

2.2 模拟与实测结果对比

由图 10(a)可以看出,模拟浓度全天的变化规律与实测结果一致.将 1h 内的模拟与实测的结果对比如图 10(b)所示, $PM_{2.5}$ 浓度会出现周期性的波动,与列车发车间隔(5min)相一致,模拟结果也准确的体现了这一规律.但实测值的波动幅度要大于模拟值.这是由于模拟模型车站当作一个控制体,计算得出的是车站整个空间的平均浓度,而实测值反映的是某一位置处的浓度变化,因此,实测结果的波动幅度大于模拟结果.

实际上,在研究 $PM_{2.5}$ 浓度对人的健康影响时,往往更关注的是小时平均浓度,因此,本文对实测结果及模拟结果的小时平均浓度进行进一步地对比.

图 10(c)为站台 $PM_{2.5}$ 浓度实测结果与模拟结果的小时平均浓度对比,可以看出不论是变化规律还是浓度值,模拟值十分接近实测值,不同时刻的模拟结果与实测结果相对误差基本在 10%以内.$PM_{2.5}$ 浓度的模拟结果与实测结果吻合良好,证明了 $PM_{2.5}$ 模拟模型的准确性.

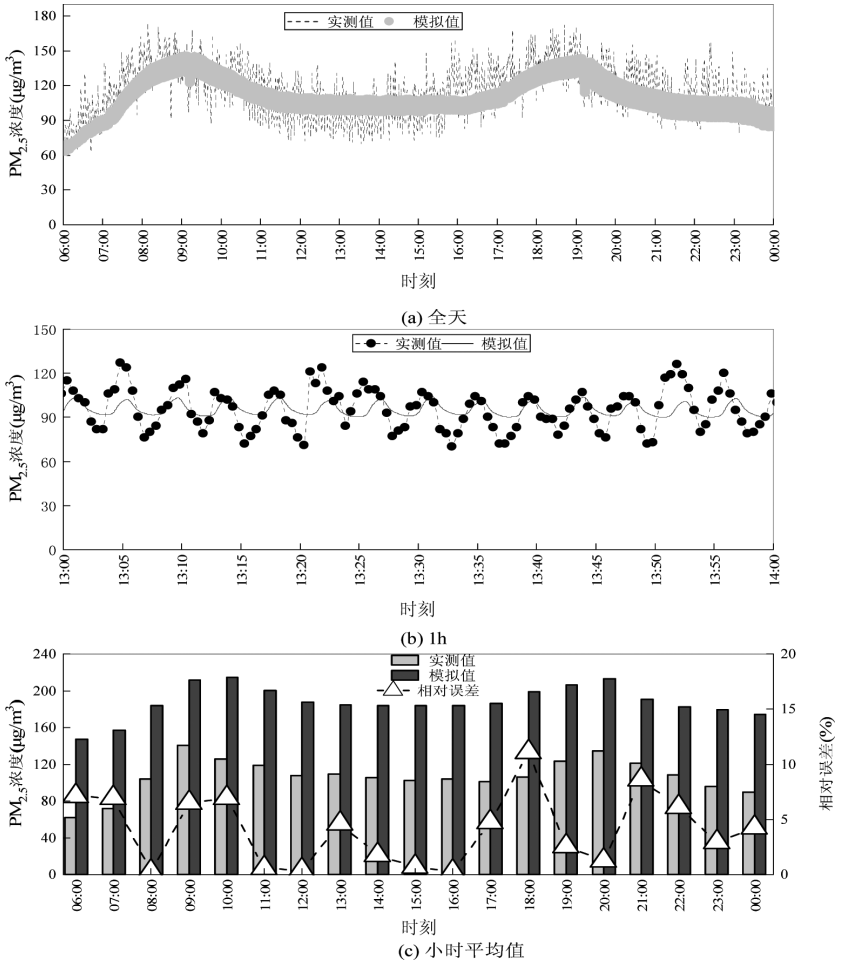


图 10 站台实测结果与模拟结果对比

Fig.10 Comparison between platform measurement results and simulation results

2.3 发车对数对车站 $PM_{2.5}$ 浓度的影响

发车对数是影响车站 $PM_{2.5}$ 浓度的一个关键因素.为了消除室外浓度的影响,选择室外浓度为 0 的模拟结果分析发车对数与室内浓度的关系.由图 11 可以看出,站台 $PM_{2.5}$ 浓度随着发车对数的增加而呈现非线性增加趋势, 高峰期(发车对数 25 对/h)站台 $PM_{2.5}$ 浓度比平峰期(发车对数 14 对/h) $PM_{2.5}$ 浓度高出约 $42\mu g/m^3$.两个工况相比,发车对数增加约 78%,站台 $PM_{2.5}$ 浓度增加了约 86%.从列车 $PM_{2.5}$ 产尘量理论模型中可知,$PM_{2.5}$ 产尘量会随发车对数增加而线性增加,但由于隧道活塞风量同时会随发车对数增加而非线性增加[41],因此,站台 $PM_{2.5}$ 浓度随发车对数呈现非线性增加趋势.

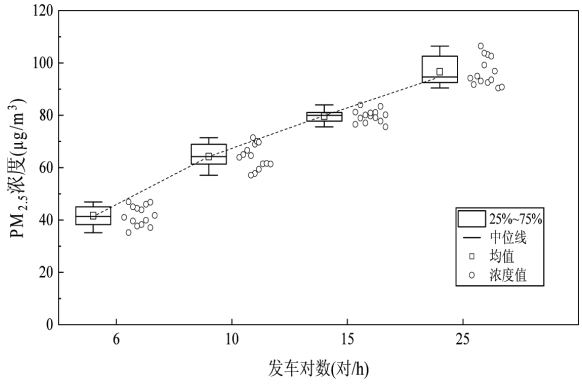


图 11　不同发车对数下站台 $PM_{2.5}$ 浓度

Fig.11　$PM_{2.5}$ concentration at different train numbers on the platform

2.4　地铁 $PM_{2.5}$ 浓度预测及评价

当前地铁系统的 $PM_{2.5}$ 浓度标准体系还不健全,许多研究在评价地铁站内的 $PM_{2.5}$ 浓度水平时,通常以室内空气质量标准作为对比.表 3 给出了一些国家或地区的室内 $PM_{2.5}$ 浓度的指导值.根据这些指导值,本文模拟时输入的室外浓度分别设置为 0μg/m^3(极限情况),15μg/m^3(WHO 标准值),35μg/m^3(美国标准值)和 50μg/m^3(中国标准值),讨论当室外浓度达到以上标准要求时车站的 $PM_{2.5}$ 浓度水平,根据不同范围的室外 $PM_{2.5}$ 浓度水平对地铁站台的 $PM_{2.5}$ 浓度进行模拟分析并评价.

表 3　一些国家和地区空气质量标准

Table 3　Air quality standards in some countries and regions

国家/机构	标准名称	场所	PM_{10}(mg/m^3)	$PM_{2.5}$(mg/m^3)
中国	室内空气质量标准(GB / T 18883 — 2022)	室内	⩽0.10(24h)	⩽0.05(24h)
世界卫生组织(WHO)	WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide (2021)	室内/室外	⩽0.045(24h)	⩽15(24h)
美国	ASHRAE Standard 62.1−2019, Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (2019)	室内	⩽0.15(24h)	⩽0.035(24h)

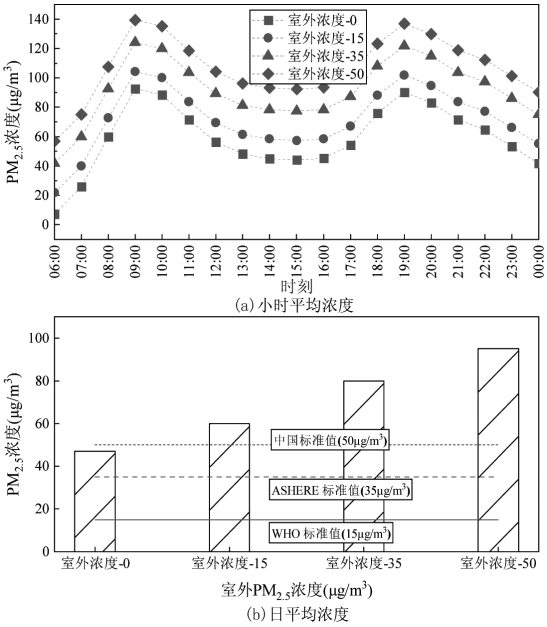


图 12　不同室外浓度下站台 $PM_{2.5}$ 浓度

Fig.12　$PM_{2.5}$ concentration on platforms under different outdoor concentrations

仍以 S8 站为例进行说明,图 12 (a)表明,室外 $PM_{2.5}$ 日均浓度升高时,地铁站内的 $PM_{2.5}$ 浓度随之规律性增加.如图 12 (b)所示,地铁站台的 $PM_{2.5}$ 日平均浓度与室外 $PM_{2.5}$ 日平均浓度基本上呈线性关系.可以看出,由于存在明显的室内源,即使室外浓度为 0,地铁站内 $PM_{2.5}$ 浓度也会超出美国 ASHERE 标准值,当室外 $PM_{2.5}$ 日平均浓度达到 WHO 标准值 15μg/m^3 时,地铁站台 $PM_{2.5}$ 日均浓度也难以达到中国室内空气质量标准;而当室外 $PM_{2.5}$ 日均浓度达到 35μg/m^3 时(室外环境空气品质水平仍为优),此时车站内的 $PM_{2.5}$ 日均浓度已经超出《环境空气质量标准》GB3095−2012 中的限制浓度 75μg/m^3,空气品质已经达到污染级别.

地铁站内的空气质量会受到室外空气和室内源(列车)的双重影响,室内源的影响甚至更大.另外,与待在室内的时间相比,公众在地铁站内停留的时间很短,因此,对于这样一个特殊的微环境空间,若以室内空气质量标准作为控制目标,则地铁站需要全天开启机械通风,势必造成极大地能耗浪费,因此,也亟需制定针对地铁环境的 $PM_{2.5}$ 浓度标准及科学的通风控制策略.

3　结论

3.1　提出了一种模拟地铁 $PM_{2.5}$ 浓度的方法.首先,依据质量守恒原理,建立了地铁系统 $PM_{2.5}$ 浓度的数学模型;其次,建立了地铁列车在隧道内运行时的产尘量模型,求解列车在不同运行工况下的 $PM_{2.5}$ 产尘

量;此外,利用网络法建立了地铁系统通风模拟模型.

3.2 应用该模型对实际地铁线路的$PM_{2.5}$浓度进行了模拟计算,并开展现场实验对模拟结果进行了验证.结果表明,模型计算结果与实测值非常接近,真实的反映了地铁站$PM_{2.5}$浓度的变化规律.

3.3 应用该模型模拟分析了地铁车站$PM_{2.5}$浓度的变化规律:随着发车对数增加,地铁站 $PM_{2.5}$ 浓度呈非线性增加趋势;地铁站 $PM_{2.5}$ 浓度与室外 $PM_{2.5}$ 浓度差值基本为一定值,与室外$PM_{2.5}$浓度成线性叠加关系.当室外浓度达到 WHO 推荐值(24h 均值 15μg/m^3),非屏蔽门地铁站运营期间 $PM_{2.5}$ 浓度仍难以达到室内空气质量标准的要求,需要开启机械通风改善地铁站空气质量.

参考文献:

[1] 中国城市轨道交通协会.中国城市轨道交通年鉴 [M]. 上海:上海书店出版社, 2023.
China Association of Metros. China urban rail transit almanac [M]. Shanghai: Shanghai Bookstore Publishing House, 2023.

[2] 常 利,王新如,孟 鑫,等.地铁站内乘客 $PM_{2.5}$ 暴露风险评估 [J]. 暖通空调, 2025,55(6):172-176.
Chang L, Wang X R, Meng X et al. Risk assessment of $PM_{2.5}$ exposure for passengers in subway stations [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2025,55(6):172-176.

[3] 曾凡美,贺 淼.地铁$PM_{2.5}$对气道上皮损伤的研究 [C]//中国环境科学学会 2024 年科学技术年会论文集, 2024:135.
Zeng F M, He M. Study on the damage of subway $PM_{2.5}$ to airway epithelium [C]// Proceedings of the 2024Science and Technology Annual Meeting of the Chinese Society of Environmental Sciences, 2024:135.

[4] 赵 岩,陈 阳,王玉雯,等.天津市某地铁站台 $PM_{2.5}$ 污染特征及人群健康风险评估 [J]. 中国公共卫生, 2024,40(11):1347-1352.
Zhao Y, Chen Y, Wang Y W, et al. Concentrations and associated health risks of indoor/outdoor $PM_{2.5}$-bound metallic elements at a subway station in Tianjin city during winter [J]. Chinese Journal of Public Health, 2024,40(11):1347-1352.

[5] Zhang M, Shao L, Jones T, et al. Atmospheric iron particles in $PM_{2.5}$ from a subway station, Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2022,283:119175.

[6] Zhang X, Xu Y, Su J. Temporal and spatial characteristics of particulate matters in metro stations of Shanghai, China [J]. Building and Environment, 2020,179:1-10.

[7] 纪文静,曾俊杰,李晓锋.不同制式地铁车站公共区 $PM_{2.5}$ 污染特征 [J]. 中国环境科学, 2024,44(5):2399-2406.
Ji W J, Zeng J J, Li X F. $PM_{2.5}$ pollution characteristics in the public areas of subway stations with different platform door systems [J]. China Environmental Science, 2024,44(5):2399-2406.

[8] Ji W, Zhao K, Liu C, et al. Spatial characteristics of fine particulate matter in subway stations: Source apportionment and health risks [J]. Environmental Pollution, 2022,305:119279.

[9] Karlsson H L, Nilsson L, Moller L. Subway particles are more genotoxic than street particles and induce oxidative stress in cultured human lung cells [J]. Chemical Research in Toxicology, 2005,18(1): 19-23.

[10] Zhang J, Chen Z, Shan D, et al. Adverse effects of exposure to fine particles and ultrafine particles in the environment on different organs of organisms [J]. Jurnal of Environmental Sciences, 2024,135:449-473.

[11] 王新如,裴 斐,常 利.冬季地铁 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 动态分布特性与影响因素分析 [J]. 建筑节能(中英文), 2024,52(11):116-120,140.
Wang X R, Pei F, Chang L. Analysis of dynamic distribution characteristics and influencing factors of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in subway in winter [J]. Journal of Building Energy Efficiency, 2024,52(11):116-120,140.

[12] Zhao L, Wang J, Gao H O, et al. Evaluation of particulate matter concentration in Shanghai's metro system and strategy for improvement [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017,53:115-127.

[13] Martins V, Moreno T, Mendes L, et al. Factors controlling air quality in different European subway systems [J]. Environmental Research, 2016,146:35-46.

[14] Park S, Kim M, Kim M, et al. Predicting PM_{10} concentration in Seoul metropolitan subway stations using artificial neural network (ANN) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018,341:75-82.

[15] Zhang K, Yang J, Sha J, et al. Dynamic slow feature analysis and random forest for subway indoor air quality modeling [J]. Building and Environment, 2022,213:108876.

[16] Yang J, Liu M, Zhang H, et al. Numerical analysis and improvement strategy of particulate matter concentration in underground subway stations [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 146:105662.

[17] Yang J, Fan X, Zhang H, et al. A review on characteristics and mitigation strategies of indoor air quality in underground subway stations [J]. Science of the Total Environment, 2023,869:161781.

[18] Archard J F. Contact and rubbing of flat surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953,24(8):981-988.

[19] Ding H H, He C G, Ma L, et al. Wear mapping and transitions in wheel and rail materials under different contact pressure and sliding velocity conditions [J]. Wear, 2016,352-353:1-8.

[20] He C G, Guo J, Liu Q Y, et al. Experimental investigation on the effect of operating speeds on wear and rolling contact fatigue damage of wheel materials [J]. Wear, 2016,364-365:257-269.

[21] Abbasi S, Jansson A, Olander L, et al. A pin-on-disc study of the rate of airborne wear particle emissions from railway braking materials [J]. Wear, 2012,284-285:18-29.

[22] 刘吉华,陈水友,刘启跃.4 种成分车轮钢与 U71Mn 钢轨钢间的磨损行为 [J]. 机械工程材料, 2017,41(7):70-75.
Liu J H, Chen S Y, Liu Q Y. Wear behavior between wheel steels with four chemical composition and U71Mn rail steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2017,41(7):70-75.

[23] Lee H W. Generation characteristics of the airborne wear particles emitted from the wheel–rail contact for various train velocities and

their generation relation with the train velocity [J]. Atmospheric Environment: X, 2020,5:100068.

[24] Olofsson U, Olander L, Jansson A. A study of airborne wear particles generated from a sliding contact [J]. Journal of Tribology, 2009, 131(4):1−4.

[25] Kam W, Cheung K, Daher N, et al. Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground−level rail systems of the Los Angeles Metro [J]. Atmospheric Environment, 2011,45(8):1506−1516.

[26] Qiao T, Xiu G, Zheng Y. Preliminary investigation of PM_1, $PM_{2.5}$, $PM_{10}$and its metal elemental composition in tunnels at a subway station in Shanghai, China [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2015,41:136−146.

[27] Cheng Y H, Lin Y L, Liu C C. Levels of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Taipei rapid transit system [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(31):7242−7249.

[28] Olofsson U, Olander L, Jansson A. Towards a model for the number of airborne particles generated from a sliding contact [J]. Wear, 2009, 267(12):2252−2256.

[29] Sundh Jon U O. Wear rate testing in relation to airborne particles generated in a wheel rail contact [J]. Lubrication Science, 2009, 21(6):135−150.

[30] Olofsson U. A study of airborne wear particles generated from the train traffic−block braking simulation in a pin−on−disc machine [J]. Wear, 2011,271(1/2):86−91.

[31] 刘　卓.地铁车辆制动系统空气制动施加方式及特点分析 [J]. 铁道机车车辆, 2011,31(6):66−69.
Liu Z. Air−brake application analysis of metro vehicle brake system [J]. Railway Locomotive and Car, 2011,31(6):66−69.

[32] Querol X, Moreno T, Karanasiou A, et al. Variability of levels and composition of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the Barcelona metro system [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012,12(11):5055−5076.

[33] 涂贵军,赵　欣,张振超.适用于北京地铁 13 号线列车的 SZK6 型国产化制动系统的研制 [J]. 中国标准化, 2019,(S2):276−281.
Tu G J, Zhao X, Zhang Z C. Development of the SZK6 braking system applicable to Beijing subway line 13 [J]. China Standardization, 2019,(S2):276−281.

[34] 郭君儒.厦门地铁 1 号线电客车制动闸瓦磨耗规律及剩余寿命研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2021.
Guo J R. Braking shoe wearing rule andremaining lifespan analysis onmetro train of xiamen metro line 1 [J]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Master Degree Thesis, 2021.

[35] 张和平.南京地铁车辆制动系统特点分析 [J]. 机车电传动, 2005, (5):51−53,73.
Zhang H P. Analysis on characteristics of braking system in Nanjing metro vehicle [J]. Electric Drive for Locomotives, 2005,13(5):38−40.

[36] 宋大伟,韩莎莎,李亚东,等.南京地铁 1 号线国产闸瓦试验研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2010,13(3):38−40.
Song D W, Han S S, Li Y D, et al. Test of domestic brake shoe for nanjing metro line1 [J]. Urban Mass Transit, 2010,13(3):38−40.

[37] 高佩宝.城市轨道交通车辆用高摩复合闸瓦的研究 [D]. 北京:清华大学, 2016.
Gao P B. Research on the preparation andapplication of high friction compound brake block for urban rail transitvehicles [J]. Beijing: Tsinghua University Master Degree Thesis, 2016.

[38] 宫象亮.地铁车辆用合成闸瓦国产化研究 [J]. 铁道车辆, 2023, 61(4):73−76.
Gong X L. Study on localization of composite brake shoes for subway vehicle [J]. Rolling Stock, 2023,61(4):73−76.

[39] Abbasi S, Wahlström J, Olander L,et al. A study of airborne wear particles generated from organic railway brake pads and brake discs [J]. Wear, 2011,273(1):93−99.

[40] Peng Y, Gao Z, Ding W, et al. Application of computational fluid dynamics in subway environment without fire and smoke−literature review [J]. Building and Environment, 2021,206.

[41] Wang Y, Li X. Unorganized ventilation in subway stations with Platform Screen Doors [J]. Building and Environment, 2017,125:556−564.

[42] Wang Y, Li X. Stess: Subway thermal environment simulation software [J]. Sustainable Cities and Society, 2018,38:98−108.

[43] Shampine L F. Solving ordinary differential equations for simulation [J]. Mathematics & Computers in Simulation, 1978,20(3):204–207.

[44] 朱颖心.水力网络流动不稳态过程的算法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 1989,(5):72−78.
Zhu Y X. Calculation method for dynamic process of flow in hydrodynamic network [J]. Journal of Tsinghua University, 1989,29 (5):72−78.

作者简介：王春旺(1989−),男,河南周口人,博士(后),主要从事轨道交通系统细颗粒物的传播规律及通风系统控制研究.发表论文 20 余篇.wcw0502@ustb.edu.cn.