

DOI: 10. 20174/j. JUSE. 2026. 02. 36

高密度居住区地铁通勤颗粒物暴露测度及分析

牟进超¹, 汪乐文¹, 王宇昕¹, 林丹婷², 吴亦政¹

(1. 北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044;
2. 重庆市固体废物管理服务中心有限公司, 重庆 401121)

摘要: 地铁作为城市公共交通的主要组成部分, 其微环境中的颗粒物会给通勤人群带来健康风险。为保障出行人群地铁通勤过程中的出行健康, 研究开展地铁微环境细颗粒物浓度($PM_{2.5}$)的时空异质性分析。结果表明, 地下线路工作日车厢内 $PM_{2.5}$ 浓度($113.67 \mu g/m^3$)高于非工作日($47.62 \mu g/m^3$), 地下线路车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度远高于地面以及高架部分(7倍); 建成时间较早的线路 $PM_{2.5}$ 浓度高于新建线路; 随着列车的驶入驶出, 站台的 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出周期性的变化趋势; 全封闭的屏蔽门在控制颗粒物聚集方面比全高安全门更有效; 平峰时间段 $PM_{2.5}$ 浓度($75 \mu g/m^3$)低于高峰时间段($102 \mu g/m^3$)。此外, 分析了错峰出行策略对通勤人群 $PM_{2.5}$ 暴露水平的潜在影响, 研究表明, 若错峰出行, 将减少一次通勤过程中25.58%的暴露。研究成果可为地下地铁颗粒物防治提供数据支撑。

关键词: 地铁; 通勤; 公共交通出行; $PM_{2.5}$; 暴露

中图分类号: U121

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2026)02-0742-11

Measurement and Analysis of Particulate Matter Exposure in Subway Commuting in High-Density Residential Areas

Mou Jinchao¹, Wang Lewen¹, Wang Yuxin¹, Lin Danting², Wu Yizheng¹

(1. Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China; 2. Chongqing Solid Waste Management Service Center Co., Ltd., Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: Subways, as a primary component of urban public transportation, harbor particulate matter within their microenvironments that pose health risks to commuters. To enhance the health of individuals during their subway commutes, a study was conducted to analyze the spatiotemporal heterogeneity of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) concentrations in the subway microenvironment. The results show that: The $PM_{2.5}$ concentration in underground train carriages on weekdays ($113.67 \mu g/m^3$) is higher than on non-working days ($47.62 \mu g/m^3$), and the $PM_{2.5}$ concentration in underground train carriages is significantly higher than in above-ground and elevated sections (seven times higher); lines constructed earlier have higher $PM_{2.5}$ concentrations than newly built lines; the $PM_{2.5}$ concentration on platforms exhibit a cyclical trend with the arrival and departure of trains; fully enclosed screen doors are more effective than full-height security doors in controlling the accumulation of particles; the $PM_{2.5}$ concentration during off-peak hours ($75 \mu g/m^3$) is lower than during peak hours ($102 \mu g/m^3$). Furthermore, the study analyzed the potential impact of off-peak travel strategies on the $PM_{2.5}$ exposure levels of commuters, the results suggests that off-peak travel could reduce exposure by 25.58% during a single commute.

收稿日期: 2025-05-29(修改稿)

作者简介: 牟进超(1999—), 女, 山东日照人, 硕士, 主要研究方向为交通与环境交叉学科。

E-mail: 22120891@bjtu.edu.cn

通讯作者: 吴亦政(1988—), 男, 浙江海宁人, 博士, 副教授, 主要从事交通与环境、健康影响评估的教学与科研工作。

E-mail: wuyizheng@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52272340); 国家自然科学基金青年科学基金(71901018)

The results of the study provide data support for the prevention.

Keywords: subway; commute; public transportation travel; $PM_{2.5}$; exposure

0 引言

对城市高密度居住区的通勤人群来说,地铁作为城市公共交通的重要组成部分,其准时、可靠、高效,可有效规避有可能的交通延迟、通勤时间增加等风险的发生。随着北京市地铁线路的不断建设发展,截至2023年底,北京城市轨道交通运营总里程达到836 km,跃居全国第一,地铁可达性将进一步提高,出行更加高效便捷^[1]。与此同时,地铁车厢及站台中的空气质量问题也逐渐凸显,人们越来越注重通勤微环境的健康效应^[2-3]。

《2023年度中国城市交通报告》中指出,北京是中国通勤成本最高的城市,年度平均通勤时耗达到44.47 min,平均通勤距离达到12.53 km。长距离通勤除造成精神上的疲惫外,还会带来健康问题。已有大量研究表明,在地铁站与车厢中 $PM_{2.5}$ 为常见的空气颗粒物污染物^[4-6], $PM_{2.5}$ 为空气中直径小于或等于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的细颗粒物,可以深入肺部并进入血液,引发多种疾病,甚至导致死亡进而带来健康风险^[7-9]。地铁属于较为特殊的微环境,由于列车运动过程中铁轨、车轮和刹车片的磨损,不同的通风和空调系统、车站的布局特点以及列车到发频率的变化均会形成具有差异性的颗粒物浓度场^[10-12]。因此,在地铁通勤的过程中,环境 $PM_{2.5}$ 浓度较高且与出行人群活动在时间和空间维度上高度重合,将会导致显著的健康风险。

已有研究表明,部分城市地铁内的颗粒物浓度较高,且会给人群带来健康风险。Martins等^[10]分析和量化巴塞罗那地铁系统地铁站台与车厢的空气质量,表明地铁通勤时间内对个人暴露有很大影响。Shakya等^[13]研究发现美国宾夕法尼亚州费城不同地铁站的颗粒物浓度各不相同,2018年和2019年地下地铁站的平均 $PM_{2.5}$ 分别高出地上地铁站台的5.1倍和2.6倍。卓思华等^[14]研究发现2016年春、秋、冬季北京地铁车厢内 $PM_{2.5}$ 平均浓度超标率为83.8%~98.7%。何生全等^[15]研究了北京典型地铁站台的颗粒物,站台的结构相对复杂多样,大多处于半封闭的地下空间通风较差,不利于站内 $PM_{2.5}$ 扩散,列车进站时的活塞风导致站台的颗粒物浓度升高。在地铁通勤的过程中,环境 $PM_{2.5}$ 浓度较高且与出行人群活动在时间和空间维度高度重合,存在显著的健康风险,地铁车厢及站台对通勤人群的健康危害已成为亟需研究的问

题。为衡量在一次通勤过程中可能存在的健康风险,可以通过对污染物的总吸入量进行定量衡量。

目前国内对高密度居住区通勤人群地铁出行的颗粒物暴露情况的研究相对较少,缺乏更精准的定量化计算,现有研究并未进一步叠加入群时空分布,大部分研究关注于地下部分,缺少更加准确的对地上地下空间差异、车厢站台等更精细的研究。鉴于此,本文基于现场测量、时空多维定量分析等方法,通过对污染物的总吸入量进行精细化测度,以衡量在一次通勤过程中可能存在的健康风险。北京市昌平区的回龙观和天通苑地区(回天地区)为典型的大型居住社区,庞大的居民群体和便利的交通设施,在北京市的城市发展和人口分布中占有重要地位。本文针对回天区域出行人群的主要通勤路径及相关颗粒物暴露开展了案例研究,将有助于减少通勤人群的颗粒物暴露,旨在为交通及公共卫生部门制定 $PM_{2.5}$ 主要防治政策提供有关数据支撑,从而有效控制车厢及站台的颗粒物浓度,降低通勤人群的健康风险。

1 研究方法

为达成本研究的目标,本研究采用现场数据采集和空间统计分析等研究方法,定量分析通勤期间的颗粒物暴露。

(1)研究的背景区域为回天地区,研究从公共交通基础设施数据集中提取地铁通勤数据,从而揭示了该区域地铁通勤的时空特征。

(2)基于所得的通勤人群地铁出行的时空分布数据,研究设计实验方案,利用便携式个体暴露监测设备,模拟了出行人群在主要通勤路径上的活动,实现了精确分析地上与地下线路的差异,并对通勤过程中颗粒物浓度进行了逐秒监测。通过这种高精度的监测方法,研究捕捉到通勤过程中的微观环境变化。

(3)研究应用剂量-反应模型,对所收集的逐秒颗粒物浓度数据进行了积分处理,定量计算出通勤过程中的累积暴露量。

1.1 城市公共交通出行数据

公交IC(Integrated Circuit)卡数据、AFC(Automatic Fare Collection)自动售检票系统数据、公交GPS定位数据、车辆运行数据等共同构成城市公共交通基础数据。研究利用北京市2019年9月全月(包含21个工作日与9个节假日)的7万多

名乘客城市公共交通刷卡数据(共计 1 833 510 条记录)进行分析,数据为曾在北京回天地区有过刷卡记录的乘客,数据样本包含智能卡编号、出入站

点位置和时间等信息,其中智能卡编号唯一,一张 IC 卡对应唯一卡号。数据样例见表 1 所示。

表 1 刷卡数据样例

Table 1 Sample of card swiping data

CNID 卡号	T1 进站时间	T2 出站时间	STATION1 进站站点	lon1 站点经度	lat1 站点纬度	STATION2 出站站点	lon2 站点经度	lat2 站点纬度
615b * * * * 2f81	2019/9/5 18:40	2019/9/5 19:11	东三旗	116.413 666	40.090 054	大柳树 路口西	116.405 594	40.176 605
7f33 * * * * 68e8	2019/9/4 8:59	2019/9/4 9:25	富河园 小区	116.656 578	39.925 526	通州杨庄	116.631 958	39.898 472
879c * * * * 61f2	2019/9/10 9:52	2019/9/10 10:03	东直门	116.436 8	39.941 15	雍和宫	116.416 6	39.946 69
510d * * * * e70a	2019/9/10 9:50	2019/9/10 10:29	天通苑北	116.412 9	40.083 67	望京	116.469 4	39.998 52

1.2 地铁客流数据分析

1.2.1 地铁客流出行时间差异

研究根据获得的基础数据,筛选进出站刷卡位置均为地铁站的出行,作为地铁出行的目标样本。

出行时间可以反映出乘客的 1 d 内在时间上的出行分布,如图 1 所示。根据进出站时间,分别按小时、不同工作日、非工作日对地铁客流数据进行统计分析,可见地铁出行的客流存在明显的双峰,早高峰(7:00—9:00)以及晚高峰(17:00—19:00)。工作日与非工作日的双峰存在差异,工作日的双峰更为明显。且发现周一的出行量明显高于其他工作日,工作日与双休日的比较而言,工作日的出行量比较多,客流稳定,双休日的出行需求明显减少,出行量有所下降。

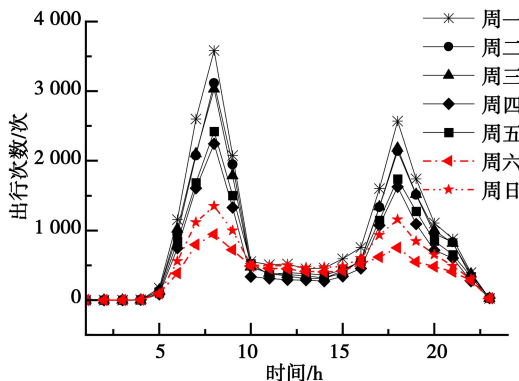


图 1 乘客出行时间分布

Fig. 1 Passenger travel time distribution

1.2.2 出行空间分布

乘客出行的起讫点用出发点与吸引点表示,在发生点和吸引点产生的客流量即为站点的发生量

和吸引量。它既能在时间范围上反映乘客分散与聚集的分布特征,也能在空间范围上反映客流的流向。站点的发生量和吸引量与客流统计时间内城市土地利用性质相关,利用站点经纬度把各站点的客流量绘制到地图上。例如,2019 年 9 月 10 日早高峰(7 点至 9 点)的出行起讫点以及主要客流分布如图 2(b)所示。O 站(天通苑站)的进站客流量最高;根据客流量、地理位置 T₁ 站(立水桥站)、T₂ 站(雍和宫站)、T₃ 站(大屯路东站)为主要换乘站;D₁ 站(西二旗站)、D₂ 站(东直门站)、D₃ 站(望京东站)为主要目的地,D₁ 站(西二旗站)附近为科技园区、中关村软件园区等办公区,客流量较大。D₂ 站(东直门站)为地铁 2 号线、地铁 13 号线和地铁首都机场线的重要的换乘站。D₃ 站(望京东站)位于望京区域,附近有商圈具有特有的经济条件和地理位置。

1.3 试验设计与研究线路

研究使用的采集仪器为 TSI SidePak Aerosol Monitor AM520,测量时间间隔为 1 s。仪器为小型单通道便携式个体暴露粉尘仪,基于仪器搭载的粉尘切割器和光散射激光光度计实现粉尘浓度测定,可提供实时气溶胶质量浓度读数,同时可实现最长 20 h 周期的数据记录功能。其中,仪器具体测定的气溶胶浓度范围为 0.001~100 mg/m³,粒径范围为 0.1~10 μm,目前国内外已有多项研究证明其可靠性^[16-17]。采样者可通过仪器记录通勤过程的 PM_{2.5} 质量浓度数据。作为背景数据,试验在距地铁站 8m 的地表空间进行地表空间 PM_{2.5} 数据采集。同时,试验区域靠近北京市空气质量奥体中心监测站(每小时更新),提供背景环境 PM 浓

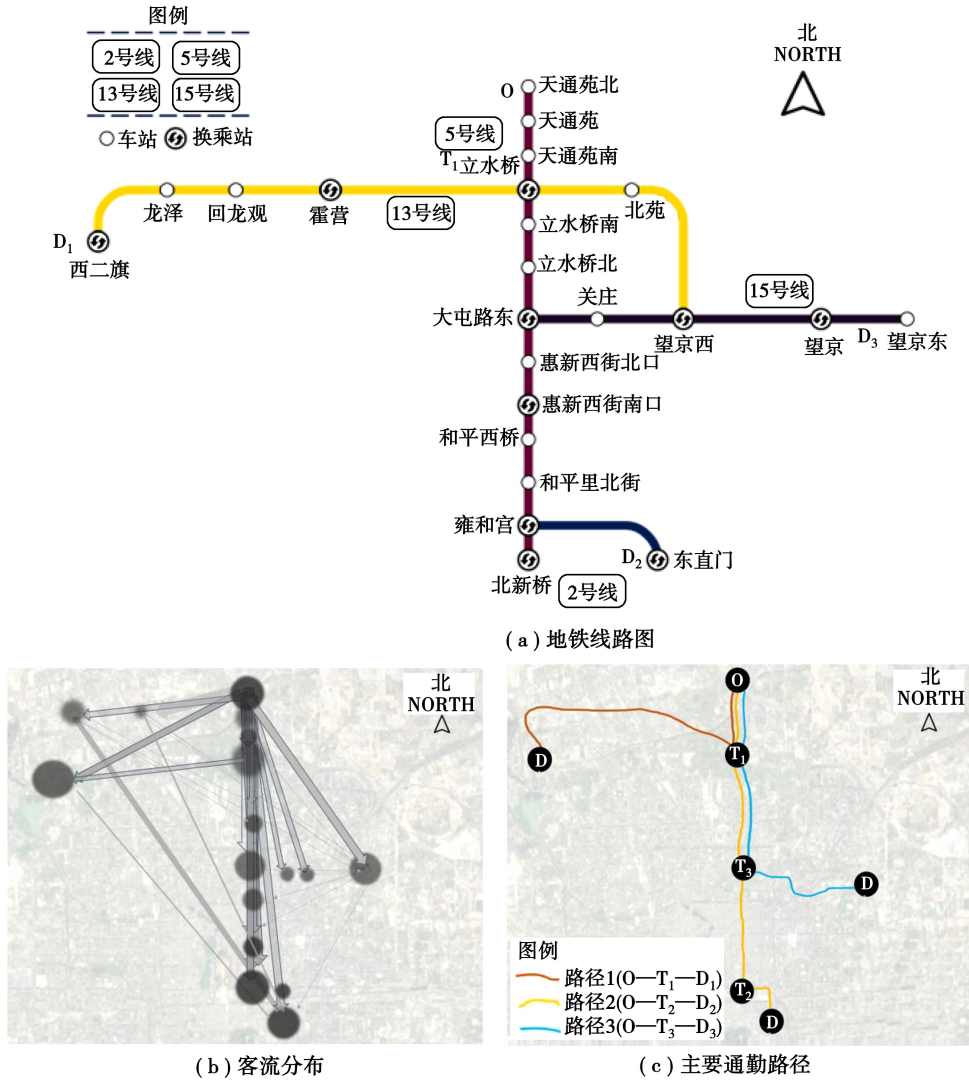


图 2 回天地区早高峰轨道交通客流量分布及路径

Fig. 2 Distribution and routes of rail transit passenger flow during morning peak hours in Huitian area

度数据以及气象数据。

试验方案研究线路与站点的选择则根据客流量大小、地理位置、是否换乘、车站的不同类型等不同特征。研究所选择的站点如图 2 所示。回天地区占地 63 km², 拥有 80 多万的常驻人口, 多条地铁线路使得该区域地铁出行极为便捷。

秋冬季节的污染物浓度较高, 实验在非雨雪天气开展。研究选取 2023 年 11 月 29 日至 12 月 4 日中的周一、周三、周五以及周末。研究根据前文通过公共交通出行数据得到的回天地区的地铁客流数据, 得到该区域的地铁客流空间主要分布如图 2(b) 所示, 客流主要分布在北京地铁的 2 号线、5 号线、13 号线以及 15 号线, 研究分别模拟出行人群在该区域的不同通勤过程, 进行实地调查获取相关数据。三个通勤的路径如图 2(c), O 站为出发站; T₁ 站、T₂ 站和 T₃ 站为中转换乘站点; D₁ 站、D₂ 站和 D₃ 站为目的站。路径 1、路径 2、路径 3 分别为: O—T₁—D₁、

O—T₂—D₂、O—T₃—D₃。采样者首先在相同环境下对仪器进行同步零位校准, 后分别在早高峰与平峰期分别模拟 3 条路径的地铁通勤过程, 采样者在采集过程中手持采样仪器, 采样的高度模拟人体呼吸高度(1.5 m), 模拟通勤人群的活动过程。

北京地铁 2、5、13、15 号线投运时间依次 1984. 9、2007. 10、2003. 1、2010. 12。不同地铁的通风空调的设置有所不同。地铁 2、5 号线地下部分的通风空调系统主要采用的是集成闭式系统。这一系统将隧道通风与车站公共区通风空调系统连通, 设置了送风道和排风道, 配备电动可开启的换热器、过滤器、送风机等设备。13 号线的地面车站公共区域部分并非全封闭设计, 未设置空调系统, 主要依靠自然通风。15 号线的部分全高站台门的半开放型站台采用了多联机空调系统, 并配置了室内柜式机组。

在本研究中, 半高安全门通常高度约为 1~

1.5 m,只覆盖站台的一部分高度;全高安全门站台地面延伸至距离上方留有空间的安全门形式;屏蔽门为全封闭的全高隔离门。北京地铁在增设站台安全门时,考虑通风需求以及利用室外的自然风和温度降低地铁隧道温度,如地铁 1 号线和 2 号线,部分安装的是半高安全门以满足通风需求,部分安装全高安全门。而对于有地下空调系统的站台,如较新的 15 号线等,使用的为全封闭的屏蔽

门,能有效隔离站台与隧道。本研究的站点的站台形式、站台门等如表 2 所示。

1.4 剂量-反应模型

有关通勤人群 $PM_{2.5}$ 暴露剂量的评估,除微环境中的背景 $PM_{2.5}$ 质量浓度,还与人群在污染环境中所处的时间和人群的呼吸水平有关,因此需将暴露时间、呼吸速率参数纳入暴露水平量化的流程。对通勤人群而言,暴露剂量与污染物的浓度、个体

表 2 站点特性

Table 2 Site characteristics

站点	线路交汇	敷设方式	站台形式	站台门
O 站 天通苑站	5	高架车站	侧式站台	半高安全门
T1 站 立水桥站	5、13	地面车站	侧式站台	半高安全门/半高安全门
T2 站 雍和宫站	2、5	地下车站	岛式站台/错层岛式站台	半高安全门/全高安全门
T3 站 大屯路东站	5、15	高架车站/地下车站	侧式站台/岛式站台	半高安全门/屏蔽门
D1 站 西二旗站	13、昌平线	地面车站/高架车站	侧式站台	半高安全门/全高安全门
D2 站 东直门站	2、13、首都机场线	地下车站	岛式站台/侧式站台	半高安全门/半高安全门/屏蔽门
D3 站 望京东站	15	地下车站	岛式站台	屏蔽门

呼吸的速率以及个体处于污染环境下的时长等成正比。为研究更加暴露的计算结果更加接近于实际的暴露量,利用积分暴露量对暴露进行评估,期望达到更加真实的计算结果,暴露量的计算公式为:

$$E = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \cdot IR \cdot dt \quad (1)$$

式中: E 为在通勤人群的环境 $PM_{2.5}$ 暴露剂量, μg ; $C(t)$ 为 t 时间点的实时暴露浓度, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; t_1 和 t_2 分别是通勤的开始和结束时间点, min ; IR 为单位时间空气吸入量, L/min 。

2 结果与分析

基于确立的方法论框架,研究已完成了对客流数据和颗粒物浓度数据的搜集与预处理工作,并构建了相应的暴露评估模型。接下来的研究工作将侧重于对这些数据结果进行深入的统计分析。

(1) 对不同通勤路径上的 $PM_{2.5}$ 浓度进行细致的时空差异性分析,包括对工作日与非工作日、地下线路与地上线路的 $PM_{2.5}$ 浓度差异,以及地铁车厢内部与站台区域的 $PM_{2.5}$ 浓度差异。

(2) 探讨地铁 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因素。通过定量分析,本研究识别客流量变化、站台敷设形式、站台门形式对颗粒物浓度的影响。

(3) 基于实验数据,本研究对通勤人群在不同路径上的 $PM_{2.5}$ 暴露水平进行定量评估。此外,还深入分析错峰出行策略对通勤人群 $PM_{2.5}$ 暴露水

平的潜在影响,以期优化通勤模式和改善公共交通环境提供实证支持。

2.1 颗粒物浓度差异

2.1.1 时间差异

(1) 通过对地上线路与地下线路的同一路径分别在工作日、非工作日的 $PM_{2.5}$ 浓度进行对比,研究结果显示,城市背景 $PM_{2.5}$ 浓度是站内与车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度最大的影响因素。如图 3 所示,横轴为一次通勤过程中,路径 1、路径 2 与路径 3 在时间方面的差异,周一的 $PM_{2.5}$ 浓度 $PM_{2.5}$ 浓度远高于其他日期,与站外可吸入颗粒物作为站内污染源的重要影响因素之一的研究结论相符^[15,18]。实验在地表空间仪器监测到的与奥体中心监测站点的背景 $PM_{2.5}$ 浓度为表 3 所示,表明仪器与站点的监测结果偏离较少,均值的误差在 5% 以内,仪器检测的效果较好。

表 3 仪器与站点数据(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

Table 3 Instrument and site data (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)

	周一	周三	周五	周日	误差/%
仪器检测	43~61	9~11	18~23	36~41	4~5
监测站点	50~61	8~13	21~26	33~38	

为分析工作日与周末的差异状况,对 3 条路径分别在工作日与周末车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度进行显著性检验,可知在工作日与周末车厢内 $PM_{2.5}$ 浓度存在显著性差异($P < 0.01$)。路径 2 的 5 号线地下

部分路段车厢,工作日车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度 ($113.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 均值高于非工作日 ($47.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。受到工作日与非工作日的影响,工作日地铁的通勤人数要远高于非工作日,出行人群的数量增加导致车厢内密闭的空间拥挤,出行人群携带颗粒物,人群在车厢的活动会影响沉降的颗粒物二次悬浮^[19],车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度随之升高。

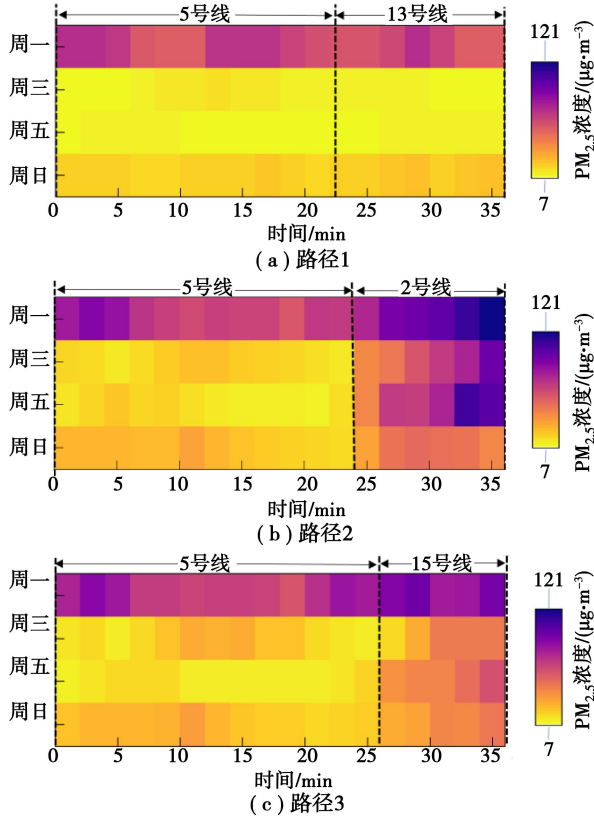


图 3 不同路径不同时间一次通勤过程的颗粒物暴露
Fig. 3 Exposure to particulate matter during a commute on different routes and at different time

(2) 高峰与平峰时间段内颗粒物的浓度存在明显差异,实验获得不同路径在不同的工作日、节假日的浓度均值如图 4 所示,仪器检测的地面环境浓度数据在图 4 中用虚线表示。可见高峰时间段内的颗粒物浓度显著高于平峰时间段。每个箱线图组中包括在同一路径两个不同时间段(早高峰、非高峰)的数据。不同路径的浓度具有一定的差异性:路径 1 的 $PM_{2.5}$ 浓度整体较低,数据的分布较为紧凑,数据之间的差异性较小,因路径 1 均为地上线路通风状况好,通勤过程 $PM_{2.5}$ 浓度变化不大;路径 2 在两个时间段中 $PM_{2.5}$ 浓度都比路径 1 和路径 3 要高,尤其在非高峰的时段, $PM_{2.5}$ 浓度显著增加,且该时间段内变化最大,数据变异性较高,数据的离散程度较大,即 5 号线换乘 2 号线的通勤过程 $PM_{2.5}$ 浓度变化最大;路径 3 在 $PM_{2.5}$ 浓

度在两个时间段内变化相较于路径 2 较小,但总体上比路径 1 要高。

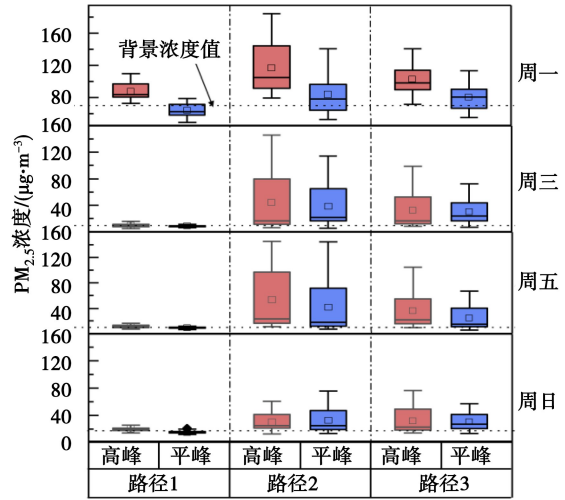


图 4 不同路径浓度对比

Fig. 4 Concentration comparison of different pathways

2.1.2 车厢颗粒物浓度

数据采集期间内,地铁车厢 $PM_{2.5}$ 浓度的地上部分与地下部分存在较大差异,如图 5 所示。路径 1 均为地上线路,路径 2 与路径 3 均为地上换乘地下。对车厢颗粒物浓度进行分析可发现:

(1) 地下线路车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度要远高于地面以及高架部分,由地上线路换乘地下线路时 $PM_{2.5}$ 浓度呈现明显的上升。研究的 3 个路径分别经过 2 号线(地下线路)、5 号线(地上线路、地下线路)、13 号线(地上线路)和 15 号线(地下线路)。从图 3 可发现由地上线路换乘地下线路时,颗粒物浓度存在明显的上升趋势。图 5 为在测试时间段内各线路车厢的平均 $PM_{2.5}$ 浓度。地上线路受城市背景 $PM_{2.5}$ 浓度的影响更大,这与地上部分有自然风促进空气流通,而地下线路的通风与空气流通能力相对有限,地下线路部分颗粒物的扩散和稀释较难,导致 $PM_{2.5}$ 在地铁车厢内集聚有关。

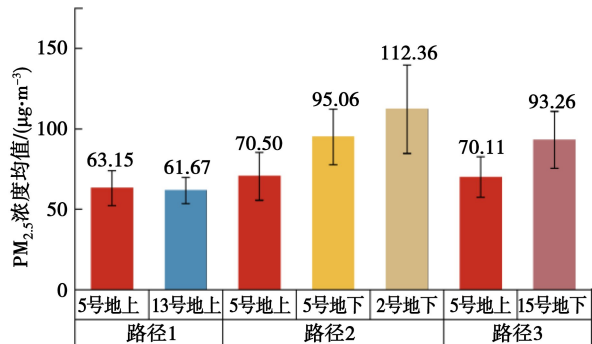


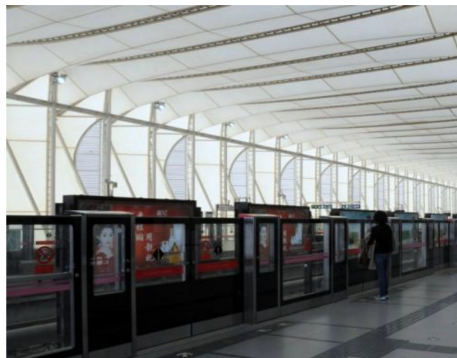
图 5 不同路径不同车厢 $PM_{2.5}$ 浓度

Fig. 5 Average $PM_{2.5}$ concentration in different carriages along different routes

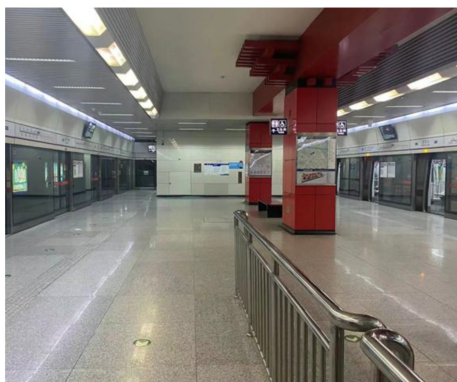
(2)虽均属于地上或地下部分,但不同线路车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度也存在差异。由图 5 研究的结果表明,路径 1 在同一时间段内的测量过程中,5 号线的地上部分 ($63.15 \mu g/m^3$) 与 13 号线 ($61.67 \mu g/m^3$) 虽均为地上线路但也稍有差异,5 号线的地上部分车厢的 $PM_{2.5}$ 浓度略高于 13 号线;路径 2 测量过程中,测试时间内 2 号线 ($112.36 \mu g/m^3$) 要高于 5 号线的地下部分 ($95.06 \mu g/m^3$);路径 3 的测试过程中,15 号线的地下部分 ($93.26 \mu g/m^3$) 要低于同一时间的 2 号线车厢 ($112.36 \mu g/m^3$)。上述不同线路车厢内的浓度差异与线路建设时间、地铁车厢空调系统、城市背景颗粒渗透等因素有关。根据资料显示,2 号线与 15 号线同属于地下线路,2 号线于 1971 年投入运营,15 号线于 2010 年投入运营,新开通的线路空调系统过滤效果好,且站内设计更为合理,通风情况更好等原因使得新建线路车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度显著小于老旧线路。

2.1.3 站台颗粒物浓度

本研究的路径 1 经过 5 号线换乘 13 号线后,终点站为西二旗站,路径 3 经过 5 号线换乘 15 号线后,终点站为望京东站。其中,西二旗站侧式站台为地上站台,望京东岛式站台为地下站台(图 6)。对站台颗粒物浓度进行分析可发现:



(a) 西二旗站侧式站台



(b) 望京东站岛式站台

图 6 站台形式

Fig. 6 Platform form

(1)地上地铁站台与地下地铁站台的 $PM_{2.5}$ 浓度具有明显的差异性,地下地铁站台的 $PM_{2.5}$ 浓度要远高于地上地铁站台。地下地铁站台的 $PM_{2.5}$ 浓度受列车的驶入驶离产生的活塞风等的影响更大, $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势相较于地上地铁站更为明显,这与地下地铁车站的通风较差有关。西二旗地铁站的在调查时间内 $PM_{2.5}$ 浓度范围为 $21 \sim 36 \mu g/m^3$,均值为 $27.7 \mu g/m^3$,望京东地铁站台的 $PM_{2.5}$ 浓度范围为 $28 \sim 75 \mu g/m^3$,均值为 $47.5 \mu g/m^3$ 。在同一时间内,望京东地铁站台的浓度要高于西二旗地铁站(约高出 70%),地下站台的颗粒物浓度要高于地上站台的 7 倍。图 7 为同一时间内,西二旗地铁站台与望京东地铁站台在站台候车时 $PM_{2.5}$ 浓度的变化趋势。

(2)站台的 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出周期性的变化趋势。图 7 为随着列车的进出,颗粒物浓度呈现周期性变化,与列车运行时间和频率相关,波峰点为列车到站停车,在站点车门和屏蔽门开启时,这与潘嵩等^[20]关于活塞风对地铁车站的颗粒物浓度变化影响研究结论一致。当列车即将驶入站台时,由于活塞风的作用, $PM_{2.5}$ 透过屏蔽门门缝进入站台,站台空气中的浓度开始增加,当列车停靠站台屏蔽门打开时,其浓度变化速度加快,屏蔽门关闭后其浓度也在增加,但当其浓度达到一定值时开始减小,慢慢趋于平稳。

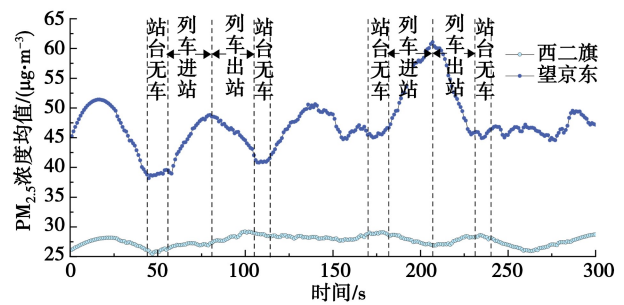


图 7 西二旗、望京东站台 $PM_{2.5}$ 浓度

Fig. 7 Particulate matter concentration at Xi'erqi and Wangjingdong stations

2.3 相关性分析

(1)客流量对车厢内 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响

为研究地铁通勤过程中客流量对车厢内 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响,调查发现周一的城市背景浓度较高,其余时间背景浓度值差异较小。为排除背景浓度的干扰,分析客流量的影响,研究利用调查及刷卡获得的数据,分析周三、周五与周日分别在早高峰与平峰两个时间段的逐时流量与车厢内 $PM_{2.5}$ 质量浓度的关系,为保持变量的同一,研究选取的地下部分车厢内 $PM_{2.5}$ 质量浓度。

如图 8 所示通过相关性分析,客流量与车厢内 $PM_{2.5}$ 质量浓度显著性相关(Pearson 相关系数为 0.729, p 值为 $0.04 < 0.05$),客流量与车厢内 $PM_{2.5}$ 质量浓度呈现为较强的正相关关系。客流量的增加导致车厢内密闭的空间拥挤,影响空调的通风情况,人群在车厢的活动会影响沉降的颗粒物二次悬浮,导致车厢内的 $PM_{2.5}$ 浓度随之升高,人的活动也是颗粒物的主要来源之一^[21-23]。

(2) 车厢与站台浓度相关性

为对站台与车厢内 $PM_{2.5}$ 质量浓度进行分析,因地上部分与地下部分存在一定程度的差异性,分别对西二旗侧式站台与望京东岛式站台的周一的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与车厢 $PM_{2.5}$ 质量浓度进行对比分

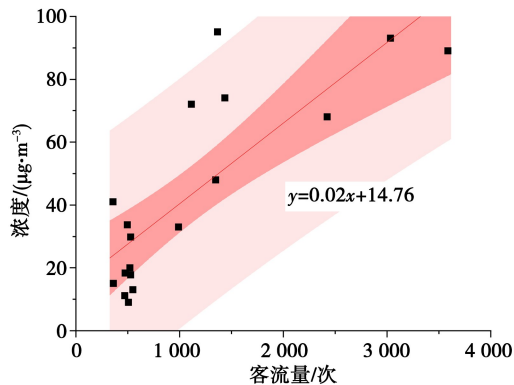


图 8 客流量与车厢 $PM_{2.5}$ 浓度关系

Fig. 8 Relationship between passenger flow and $PM_{2.5}$ concentration

析。列车驶入站台并在站台停留的时间段内,每间隔 10 s 计算均值。

相较于地上部分站台与车厢的 $PM_{2.5}$ 质量浓度关系,地下部分站台与车厢的 $PM_{2.5}$ 质量浓度的差异性更高,望京东站台的 $PM_{2.5}$ 质量浓度($185.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$)远高于车厢内($102.89 \mu\text{g}/\text{m}^3$),而地上站台 $PM_{2.5}$ 质量浓度与车厢的 $PM_{2.5}$ 质量浓度不存在明显的差异。这与在地下站台,随着列车车门打开时,由于乘客的携带、气流的流动作用使 $PM_{2.5}$ 从站台轨道进入车厢,增加车厢内的 $PM_{2.5}$ 质量浓度有关,而地上站台的空气流通好,车厢与站台的浓度差异较小。

(3) 不同敷设方式、站台门的影响

为分析不同形式地铁站台颗粒物浓度的影响因素,研究选取客流无明显双峰的非工作日(周日)的地铁站台进行分析。为分析站台的不同敷设方式、站台门对站台颗粒物浓度的影响如表 4 所示。雍和宫站的 $PM_{2.5}$ 质量浓度均值 $54.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$,望京东站均值为 $48.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$,西二旗站均值为 $28.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。研究根据分位数分组将站台实测浓度进行封装,分为 4 个等级。站台的不同敷设方式、站台门分别设置 0、1 分类变量。

在交叉列联表的基础上,对变量间是否存在相关性进行分析,并做卡方检验(最小期望数 135, p 值小于 0.05),通过列联表分析后,可发现站台的不同敷设方式、站台门与站台颗粒物的浓度存在相关性。

表 4 不同敷设方式、站台门对站台浓度的影响

Table 4 The influence of different laying methods and platform doors on platform concentration

	站台浓度等级/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$				总计	
	1(2~29)	2(29~41)	3(41~53)	4(>54)		
敷设方式	0(地下站台)	19(2%)	258(21%)	476(39%)	465(38%)	1 218
	1(地上站台)	385(63%)	215(35%)	6(1%)	3(0%)	609
站台门	0(屏蔽门)	402(33%)	333(27%)	196(16%)	287(24%)	1 218
	1(全高安全门)	2(0%)	140(23%)	286(47%)	181(30%)	609
总计	404	473	482	468	1827	

表 4 进一步证明了地下地铁站台的 $PM_{2.5}$ 浓度显著高于地上地铁站台(地下站台浓度等级为 3、4 占比显著高于 1、2 级,地上站台则 1、2 级占比超过九成);且表明不同类型的站台门影响站台颗粒物的浓度^[24],屏蔽门比全高安全门的颗粒物浓度更小(屏蔽门形式下 1、2 级占比约为六成,全高安全门则浓度等级为 3、4 占比显著高于 1、2 级),

这与屏蔽门站台封闭性较好,可以更好地控制站台内的空气流动,能有效减少颗粒物的扩散有关^[25]。

2.4 暴露分析

暴露分析的参数主要有背景颗粒物浓度、呼吸速率以及通勤时长。乘坐地铁的工作通勤过程本研究主要包括 4 个微环境:车厢、换乘通道、换乘站台、换乘后的车厢。我国的《中国人群暴露参数手

册(成人卷)》提供了不同性别人群在不同活动强度下的推荐呼吸速率^[26],研究中地铁出行的通勤人群主要处于轻微活动的状态,且通勤人群主要为 20~45 岁中青年人群的短期呼吸速率,男性的呼吸速率在 $0.558 \text{ m}^3/\text{h}$,女性的呼吸速率为 $0.465 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

根据实地调查以及参考导航软件提供的出行时长,不同路径的地铁通勤时长如表 5 所示,3 条路径的通勤时长均为 36 min 左右。

表 5 通勤路径

Table 5 Commuting routes

路径	起点	线 1	中转	线 2	终点	时长/min
路径 1			立水桥	13	西二旗	35
路径 2	天通苑北	5	雍和宫	2	东直门	36
路径 3			大屯路东	15	望京东	35

在调查过程中,选取周一早高峰、非高峰时间段一次通勤过程的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度进行对比分析错峰出行对通勤人群的暴露的影响。从图 9(a)可见,路径 1、路径 2 以及路径 3 错峰时间段的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均低于高峰时间段,错峰出行可以有效减少通勤人群的暴露。早高峰时期 3 条路径的暴露均值为 $30.46 \mu\text{g}$,错峰时期为 $22.69 \mu\text{g}$ 。且在通勤过程中,图 9(b)可见在同一个起讫点与通勤时间的情况下,由于女性的呼吸速率低于男性,女性的 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度要低于男性。不同路径的暴露不同(路径 2>路径 3>路径 1),相较于地上线路,有地下线路地铁通勤的人群 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露越高,对健康的危害更大。

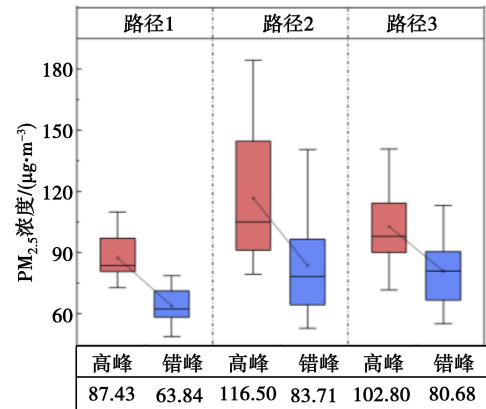
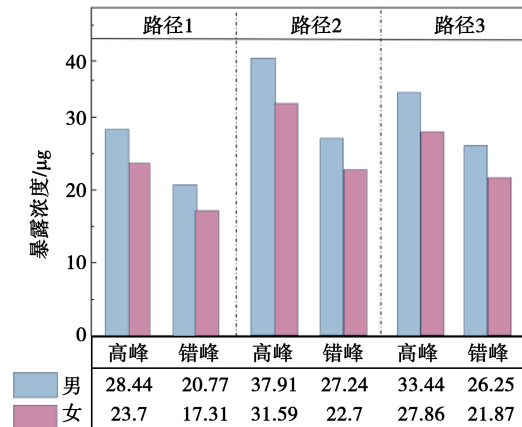
3 结论与建议

3.1 研究结论

(1)工作日、非工作日的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在显著性差异,工作日高于非工作日。城市背景浓度值影响最大,且客流量也与车厢内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著性相关(Pearson 相关系数为 0.729, p 值为 $0.04 < 0.05$)。

(2)地下线路高于地上线路车厢颗粒物浓度(约为 7 倍),不同线路车厢的颗粒物浓度存在差异(2 号线>5 号线地下>15 号线>5 号线地上>13 号线)。

(3)站台的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现出周期性的变化趋势,与站台门的开关与列车行驶频率有关。

(a) 错峰出行 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度

(b) 错峰出行暴露浓度

图 9 错峰出行的浓度、暴露

Fig. 9 Concentration and exposure of off-peak travel

(4)建成时间较早的线路车厢、站台的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度要高于新建线路(2 号线高于 5 号线),未来通过更新空调通风系统、使用全封闭屏蔽门替代全高安全门等措施,可提升通勤环境的空气质量。

(5)平峰时期的 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露($22.69 \mu\text{g}$)要低于早高峰时期($30.46 \mu\text{g}$),错峰出行有助于减少出行人群的颗粒物暴露(减少 25.58%)。

3.2 建议

(1)优化地下站台的新风系统等措施。根据研究发现,在现有的通风条件下,地下地铁站内的污染物浓度较高(望京东地铁站台的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著高于西二旗地铁站),因此应确保新风系统能够为地下站台提供足够的新鲜空气,同时必要时配备高效过滤器以减少室外空气污染物的进入。

(2)根据客流状况自动调节。研究发现客流量与车厢内 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈现为较强的正相关关系,因此,站台通风空调应在室外环境、客流变化情况下预先做出调整。

(3)综合考虑成本、效益、安全性和环境因素下,站台门选择全封闭屏蔽门将更有效地控制站台

颗粒物浓度。

参考文献(References)

- [1] 北京市通州区人民政府. 八座火车站+两座机场! 北京年底将迎交通枢纽新格局[EB/OL]. <https://www.bjtz.gov.cn/bjtz/c202407114/202407/1720387.shtml>. 2023-12-30. (People's Government of Tongzhou District, Beijing. Eight train stations + two airports! At the end of the year, Beijing will usher in a new pattern of transportation hubs[EB/OL]. <https://www.bjtz.gov.cn/bjtz/c202407114/202407/1720387.shtml>. 2023-12-30. (in Chinese))
- [2] 王涵, 黄盛浩, 邓梦思, 等. 成都市地铁站及车厢内挥发性有机化合物种类探究及影响因素分析[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2796-2806. (Wang Han, Huang Shenghao, Deng Mengsi, et al. Investigation of volatile organic compounds types in Chengdu metro stations and carriages and their influencing factor analysis [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2796-2806. (in Chinese))
- [3] Xu B, Hao J. Air quality inside subway metro indoor environment worldwide: A review [J]. Environment international, 2017, 107: 33-46.
- [4] Chang L, Chong W T, Wang X, et al. Recent progress in research on PM_{2.5} in subways [J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2021, 23(5): 642-663.
- [5] Ji W, Li X, Wang C. Composition and exposure characteristics of PM_{2.5} on subway platforms and estimates of exposure reduction by protective masks[J]. Environmental Research, 2021, 197: 111042.
- [6] 张莹, 马宇熙, 张勇, 等. 2021—2022年西北某城市地铁环境空气质量调查研究[J]. 环境与职业医学, 2023, 40(11): 1290-1296. (Zhang Ying, Ma Yuxin, Zhang Yong, et al. Air quality of metro system in a northwestern city of China from 2021 to 2022 [J]. Environmental and Occupational Medicine, 2023, 40(11): 1290-1296. (in Chinese))
- [7] 黄宇, 李荣, 崔龙, 等. 轨道交通列车内空气质量研究现状与展望[J]. 地球环境学报, 2020, 11(4): 345-363. (Huang Yu, Li Rong, Cui Long, et al. Air quality standard and pollution of railway transit system [J]. Journal of Earth Environment, 2020, 11(4): 345-363. (in Chinese))
- [8] Feng S, Gao D, Liao F, et al. The health effects of ambient PM_{2.5} and potential mechanisms [J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2016, 128: 67-74.
- [9] Yang Z, Mahendran R, Yu P, et al. Health effects of long-term exposure to ambient PM_{2.5} in Asia-Pacific: a systematic review of cohort studies [J]. Current Environmental Health Reports, 2022, 9(2): 130-151.
- [10] Martins V, Moreno T, Mendes L, et al. Factors controlling air quality in different European subway systems [J]. Environmental research, 2016, 146: 35-46.
- [11] Chang L, Chong W T, Yau Y H, et al. An investigation of the PM_{2.5} concentrations and cumulative inhaled dose during subway commutes in Changchun, China [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2024, 21(1): 733-746.
- [12] Van Ryswyk K, Kulka R, Jeong C H, et al. Sources of subway PM_{2.5}: Investigation of a system with limited mechanical ventilation [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2024, 133: 104164.
- [13] Shakya K M, Saad A, Aharonian A. Commuter exposure to particulate matter at underground subway stations in Philadelphia [J]. Building and Environment, 2020, 186: 107322.
- [14] 卓思华, 王立鑫, 庞雪莹. 北京地铁车厢内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染特征研究 [J]. 环境污染与防治, 2018, 40(9): 1044-1048, 1073. (Zhuo Sihua, Wang Lixin, Pang Xueying. Study on pollution characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Beijing subway carriages [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(9): 1044-1048, 1073. (in Chinese))
- [15] 何生全, 金龙哲, 吴祥, 等. 北京典型地铁系统可吸入颗粒物实测研究 [J]. 安全与环境工程, 2017, 24(1): 40-44, 50. (He Shengquan, Jin Longzhe, Wu Xiang, et al. Field measurement research of inhalable particles in Beijing typical subway system [J]. Safety and Environmental Engineering, 2017, 24(1): 40-44, 50. (in Chinese))
- [16] Ramos C A, Wolterbeek H T, Almeida S M. Air pollutant exposure and inhaled dose during urban commuting: a comparison between cycling and motorized modes [J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2016, 9(8): 867-879.
- [17] Yan C, Zheng M, Yang Q, et al. Commuter exposure to particulate matter and particle-bound PAHs in three transportation modes in Beijing, China [J]. Environmental pollution, 2015, 204: 199-206.
- [18] 于霄, 郝晋靓, 陈璐, 等. 地铁车站空气污染物影响因素探讨 [J]. 环境工程, 2019, 37(5): 129-133. (Yu Xiao, Hao Jinjing, Chen Lu, et al. Investigation of influence factors on air pollution in metro station [J].

- Environmental Engineering, 2019, 37 (5): 129-133. (in Chinese))
- [19] 夏凤毅, 王馨, 叶丹, 等. 杭州地铁1号线颗粒物污染水平监测与分析[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1): 204-210. (Xia Fengyi, Wang Xin, Ye Dan, et al. Monitoring and analysis of particulate matter pollution level in hangzhou metro line 1 [J]. Journal of Safety and Environmental Studies, 2023, 23 (1): 204-210. (in Chinese))
- [20] 潘嵩, 王洪伟, 王新如, 等. 北京某地铁车站细颗粒物分布特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(4): 415-421. (Pan Song, Wang Hongwei, Wang Xinru, et al. Characteristics of PM2.5 distribution in a subway station in Beijing [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(4): 415-421. (in Chinese))
- [21] Otuyo M K, Mohd Nadzir M S, Latif M T, et al. In-train particulate matter (PM10 and PM2.5) concentrations: Level, source, composition, mitigation measures and health risk effect-A systematic literature review [J]. Indoor and Built Environment, 2023, 32(3): 460-493.
- [22] 刘杰, 于孔飞, 徐琳, 等. 城市道路隧道晚高峰环境参数时空差异性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(1): 337-343. (Liu Jie, Yu Kongfei, Xu Lin, et al. Spatio-temporal difference analysis on environmental parameters inside an urban road tunnel during the evening rush hour [J]. Chinese Journal of
- Underground Space and Engineering, 2024, 20(1): 337-343. (in Chinese))
- [23] 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(增1): 383-388. (Gao Yuefen, Han Shuai, Liu Zhao. Numerical simulation analysis on platform air quality of subway screen door system [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16 (Supp. 1): 383-388. (in Chinese))
- [24] 王薇, 张蕾, 夏斯涵, 等. 地铁入口空间布局对室内空气质量的影响研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(2): 677-689. (Wang Wei, Zhang Lei, Xia Sihan, et al. Study on the Influence of Subway Entrance Space Layout on Indoor Air Quality [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2024, 20 (2) : 677-689. (in Chinese))
- [25] 赵敬德, 王金龙, 严国庆, 等. 城市轨道交通环控系统颗粒物浓度的实测研究[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(4): 342-347. (Zhao Jingde, Wang Jinlong, Yan Guoqing, et al. Measuring results of particle concentration in environmental control system of urban rail transit [J]. Journal of Safety and Environment, 2016 (4) : 342-347. (in Chinese))
- [26] 刘千金. 城市拥堵状态下交通污染及其健康经济损失[D]. 西安: 长安大学, 2021 (Liu Qianjin. The health economic loss of traffic pollution under urban congestion [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021. (in Chinese))

(上接第741页)

- [13] 杨立新. 现代隧道施工通风技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (Yang Lixin. Modern tunneling ventilation technology [M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [14] 中华人民共和国国家卫生健康委员会. 工作场所所有害因素职业接触限值第1部分: 化学有害因素: GBZ 2.1-2019 [S]. 成都: 人民卫生出版社, 2019. (National Health Commission of the People's Republic of China. Occupational exposure limits for hazardous agents in the workplace part 1: Chemical hazardous agents: GBZ 2.1-2019[S]. Chengdu: People's Medical Publishing House, 2019. (in Chinese))
- [15] 邢荣军, 徐湃, 蒋树屏, 等. 交通隧道远程变频通风技术研究[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2017, 36(4): 18-23. (Xing Rongjun, Xu Pai, Jiang Shuping, et al. Ventilation technology of long-distance inverter in traffic tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2017, 36(4): 18-23. (in Chinese))
- [16] 胡利明, 蒋曙光, 韩靖, 等. 风机变频稀释超限瓦斯的自动控制系统设计[J]. 煤矿机械, 2015, 36(2): 29-31. (Hu Liming, Jiang Shuguang, Han Jing, et al. Design of automatic controlling system to dilute over-limit concentration gas by frequency conversion of fan [J]. Coal Mine Machinery, 2015, 36(2): 29-31. (in Chinese))