

# 地铁车站内空气中细颗粒物质量浓度特征及影响因素分析\*

刘承昊 纪文静\*\*

(北京科技大学土木与资源工程学院, 100083, 北京//第一作者, 硕士研究生)

**摘要** 目的:为全面了解地铁车站内  $PM_{2.5}$  (我国把空气动力学直径在  $2.5\ \mu m$  以下的颗粒物称为  $PM_{2.5}$ ) 污染特征, 制定科学有效的控制措施, 以保护地铁车站工作人员及乘客的身体健康。方法:对南京市 5 个地铁站设备区和站台区的  $PM_{2.5}$  质量浓度、 $CO_2$  体积浓度及温湿度进行同步测试, 使用相关性分析方法和回归模型进行数据分析。结果及结论:地铁站内  $PM_{2.5}$  污染严重, 设备区和站台区  $PM_{2.5}$  全年平均质量浓度分别为  $47.50\ \mu g/m^3$  和  $54.92\ \mu g/m^3$ , 均超过室外大气  $PM_{2.5}$  年均质量浓度 ( $35.7\ \mu g/m^3$ ); 且地铁站内秋冬季节  $PM_{2.5}$  质量浓度高于夏季; 室外  $PM_{2.5}$  质量浓度对设备区及站台区的  $PM_{2.5}$  质量浓度均影响显著, 相关系数分别为 0.87 与 0.75; 站台区  $PM_{2.5}$  对设备区  $PM_{2.5}$  也有显著影响, 相关系数为 0.84;  $CO_2$  体积浓度整体而言与  $PM_{2.5}$  质量浓度为正相关关系, 室外风速与站内  $PM_{2.5}$  质量浓度为负相关关系; 温湿度对设备区和站台区  $PM_{2.5}$  的影响没有统一规律; 地铁站内每日  $PM_{2.5}$  质量浓度存在周期性波动, 在上下班高峰时段站内  $PM_{2.5}$  质量浓度升高, 这与列车频次增加有关; 列车停止运营后  $PM_{2.5}$  质量浓度持续降低并在凌晨 03:00—06:00 达到每日最低浓度。

**关键词** 地铁车站; 细颗粒物浓度; 相关性分析; 多元线性回归

**中图分类号** R122.3; U231<sup>+</sup>.4

**DOI**:10.16037/j.1007-869x.2023.12.019

## Analysis of Characteristics and Influencing Factors of Fine Particle Mass Concentration in Metro Station Air

LIU Chenghao, JI Wenjing

**Abstract** Objective: To thoroughly understand the pollution characteristics of  $PM_{2.5}$  (particles with an aerodynamic diameter of 2.5 micrometers or less, as termed in China) inside metro stations, scientifically effective control measures are formulated to protect the health of metro station staff and passengers.

**Methods**: Synchronized testing of  $PM_{2.5}$  mass concentration

(hereinafter referred to as 'concentration'),  $CO_2$  volume concentration, and temperature-humidity is conducted in the equipment and platform areas of 5 metro stations in Nanjing. Data analysis is carried out using correlation analysis methods and regression models. **Results & Conclusions**: Severe  $PM_{2.5}$  pollution is observed inside metro stations, with annual average concentrations of  $47.50\ \mu g/m^3$  in the equipment area and  $54.92\ \mu g/m^3$  on the platform, both exceeding the annual average concentration of outdoor atmospheric  $PM_{2.5}$  ( $35.7\ \mu g/m^3$ ). Furthermore,  $PM_{2.5}$  concentrations in the fall and winter seasons are higher than those in summer. Outdoor  $PM_{2.5}$  concentration significantly affects the  $PM_{2.5}$  concentrations in the equipment and platform areas, with correlation coefficients of 0.87 and 0.75, respectively. The platform  $PM_{2.5}$  concentration has a significant impact on equipment area  $PM_{2.5}$  concentration, with a correlation coefficient of 0.84. Overall,  $CO_2$  volume concentration exhibits a positive correlation with  $PM_{2.5}$  concentration. Outdoor wind speed shows a negative correlation with  $PM_{2.5}$  concentration inside the station, while the influence of temperature-humidity on platform  $PM_{2.5}$  exhibits no consistent pattern.  $PM_{2.5}$  concentration inside the metro station exhibits periodic fluctuations, peaking during rush hours due to increased train frequency.  $PM_{2.5}$  concentration continues to decline after the cessation of train operations, reaching the daily minimum concentration between 03:00 and 06:00 in early morning.

**Key words** metro station; fine particle concentration; correlation analysis; multiple linear regression

**Author's address** College of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, 100083, Beijing, China

城市公共交通中, 地铁由于其快速、便捷、舒适

\* 国家重点研发计划项目 (2018YFC0705000)

\*\* 通信作者

已成为各大城市人们出行的首选。城市地下轨道交通具有封闭性、空气流通受限、排放源特殊等特征,污染物易堆积而造成空气质量恶化。多项研究表明地铁站内  $\text{PM}_{2.5}$  污染严重。伦敦地铁站台的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度是地面交通工具的 3 ~ 10 倍,北京、上海等城市地铁站内公共区域  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度高于室外且超过环境  $\text{PM}_{2.5}$  限值<sup>[1-3,4]</sup>。已有研究大都将站台区  $\text{PM}_{2.5}$  污染作为研究重点,但针对设备区(设备管理用房区,包括车控室、站长室、休息室等)的研究极少,而车站工作人员需长期暴露于设备区环境下,且设备区内  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度受室外  $\text{PM}_{2.5}$ <sup>[5]</sup> 和车站内部  $\text{PM}_{2.5}$  污染源的共同影响,目前尚无针对两类区域中  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分布特征的研究。本研究同步测试了南京市 5 个地铁站内站台区和设备区的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度,并与同期站外大气  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度进行对比,同时监测了站台区和设备区的温湿度及

$\text{CO}_2$  体积分数(可在一定程度上代表站内的通风状况及客运量),获得了同期室外风速等环境参数,旨在针对地铁站内不同区域  $\text{PM}_{2.5}$  的污染特征进行研究,并分析不同因素对  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的影响。

1 研究对象与方法

1.1 测试地点与设备

本研究针对南京市 4 条地铁线路的 5 个地铁车站进行研究,分别对 5 个地铁站的站台区和设备区的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度、温湿度及  $\text{CO}_2$  体积分数进行实时监测。5 个地铁站的详细信息见表 1。S1 站与 S2 站位于南京地铁 1 号线,S3、S4 和 S5 站分别位于南京地铁 3 号线、4 号线和 10 号线。在每个车站的设备区和站台区都安装了空气监测仪来监测地铁站内  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度、温湿度及  $\text{CO}_2$  体积分数,测试时间为 2019 年 7 月至 2020 年 5 月。

表 1 地铁站信息及测试时间

Tab. 1 Metro station information and testing time

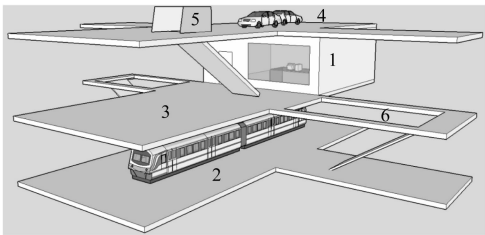
| 车站信息 |       |        | 测试日期                         |                               |                             |                             |
|------|-------|--------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 车站名  | 所属线路  | 开通时间   | 夏季                           | 秋季                            | 冬季                          | 春季                          |
| S1   | 1 号线  | 2005 年 | 2019 年 7 月 22 日—<br>8 月 6 日  | 2019 年 10 月 22 日—<br>11 月 1 日 | 2020 年 1 月 2 日—<br>1 月 16 日 |                             |
| S2   | 1 号线  | 2010 年 | 2019 年 7 月 16 日—<br>7 月 29 日 | 2019 年 10 月 22 日—<br>11 月 1 日 | 2020 年 1 月 2 日—<br>1 月 16 日 | 2020 年 3 月 22 日—<br>4 月 5 日 |
| S3   | 3 号线  | 2015 年 | 2019 年 7 月 22 日—<br>8 月 6 日  | 2019 年 10 月 22 日—<br>11 月 1 日 | 2020 年 1 月 2 日—<br>1 月 16 日 | 2020 年 3 月 20 日—<br>4 月 5 日 |
| S4   | 4 号线  | 2017 年 | 2019 年 7 月 22 日—<br>8 月 6 日  | 2019 年 10 月 22 日—<br>11 月 1 日 | 2020 年 1 月 2 日—<br>1 月 16 日 |                             |
| S5   | 10 号线 | 2014 年 | 2019 年 7 月 22 日—<br>8 月 6 日  | 2019 年 10 月 8 日—<br>10 月 24 日 | 2020 年 1 月 9 日—<br>1 月 24 日 |                             |

1.2 地铁站结构

本研究选择的地铁站均为地下二层岛式车站,如图 1 所示,负一层为站厅区和设备区,两者被隔离门隔开。负二层则为站台区域,站台区通过楼梯通道与负一层相联通。设备区和站台区分别使用两套独立的通风空调系统,设备区的空调系统只服务于设备管理用房,而站台区空调系统服务于整个车站的公共区域,包括站厅和站台区。

1.3 样本数据

研究中使用的站内  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度、温湿度、 $\text{CO}_2$  体积分数数据来自空气监测仪,室外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度以及风速数据则来自离各站台最近的国控监测点。本研究选取每个车站春夏秋冬 4 个季节各



注:1—设备区;2—站台区;3—站厅区;4—室外;5—地铁站入口;6—扶梯。

图 1 地铁站结构

Fig. 1 Structure of metro station

2 周数据,全年共计至少 8 周数据进行季节性变化分析,空气检测仪的记录频率为 30 s 至 5 min 不等,而国控监测点的数据为每小时数据。为方便研究,相关性分析与多元线性回归分析中将所有数据处

理为时均数据。测试期间因地铁站供电原因, S1、S4 和 S5 站春季数据缺失。

#### 1.4 相关性分析

为研究站台区和设备区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度之间的相关性, 以及  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度受温湿度、 $\text{CO}_2$  体积分数以及室外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度、室外风速的影响程度, 引入相关性分析方法。

针对地铁站内站台区和设备区  $\text{PM}_{2.5}$  的相关关系, 利用每小时的数据进行分析。本研究所有变量均为连续变量且一一对应, 各项数据均呈现正态分布,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与各影响因素呈线性关系, 满足 Pearson(皮尔逊)系数使用条件。使用 PCOR(皮尔逊相关系数)方法计算各因素之间的相关系数。

皮尔逊相关系数  $R_{\text{PCO}}$  的计算公式如下:

$$R_{\text{PCO}} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

式中:

$X$  和  $Y$ ——站内某区域  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度及某一环境因素, 环境因素包括站内其他区域(设备区或站台区)的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度、温湿度、 $\text{CO}_2$  体积分数、室外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度和室外风速;

$\bar{X}$  和  $\bar{Y}$ —— $X$  和  $Y$  的平均值;

$i$ ——自然序数;

$N$ ——样本数。

相关系数的正负号代表两者是正相关或负相关, 其绝对值越接近 1 代表相关性越强。

#### 1.5 多元线性回归分析

为进一步研究各因素影响站内  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的显著程度, 建立多元线性回归模型。设备区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度  $C_{\text{设}}$  和站台区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度  $C_{\text{台}}$  的多元线性回归模型分别如式(2)、(3)所示:

$$C_{\text{设}} = \beta_0 + \beta_p C_{\text{台}} + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + \varepsilon \quad (2)$$

$$C_{\text{台}} = \beta_0 + \beta_o C_{\text{设}} + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_5 + u + \varepsilon \quad (3)$$

式中:

$x_1$ ——室外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度;

$x_2$ ——温度;

$x_3$ ——相对湿度;

$x_4$ —— $\text{CO}_2$  体积分数;

$x_5$ ——室外的风速;

$\beta_1, \dots, \beta_p$ ——回归系数;

$u$ ——站台区细颗粒物散发源产生的颗粒物浓度;

$\varepsilon$ ——残差。

多元线性回归模型将所有环境影响因素包含在一个模型中, 有利于更加系统地分析各因素的影响程度。

## 2 研究结果分析

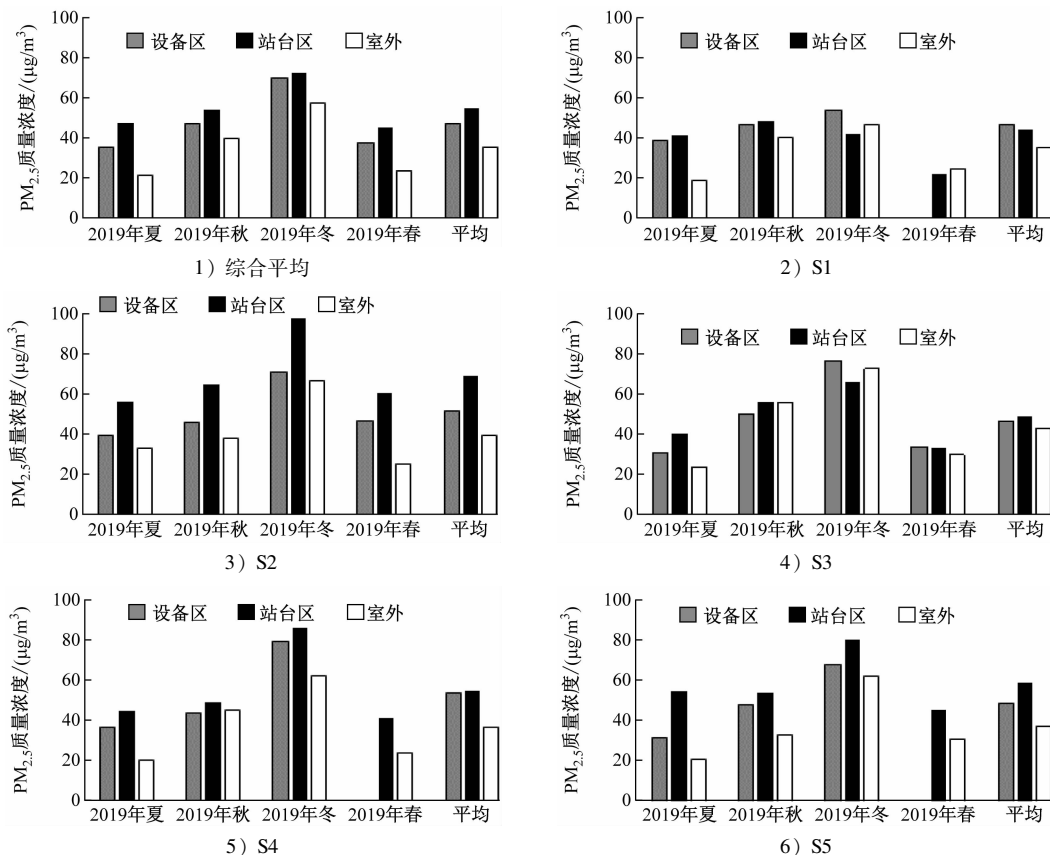
### 2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征

测试车站设备区与站台区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度见图 2, 可以发现多数情况下地铁站内两区域的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度均高于室外, 其中站台区往往高于设备区, 污染较为严重。这是由于列车运行时与钢轨摩擦会产生  $\text{PM}_{2.5}$ , 这部分  $\text{PM}_{2.5}$  可以通过站台通风系统或列车进出站时产生的活塞风进入站台, 从而使站台区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度显著升高<sup>[6-7]</sup>。同时, 站台区的  $\text{PM}_{2.5}$  也可通过人员活动或者渗风等方式进入设备区, 导致设备区的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度升高<sup>[8-9]</sup>。

从图 2 中可以看出,  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度存在季节上的差异, 呈现出秋冬季节大于春夏季节的规律。设备区 4 个季节的  $\text{PM}_{2.5}$  平均质量浓度分别为: 春季  $(37.89 \pm 24.20) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 夏季  $(35.46 \pm 16.17) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 秋季  $(46.87 \pm 20.10) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 冬季  $(69.76 \pm 37.39) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其低于同时期站台区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度。同时期站台区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度分别为: 春季  $(45.55 \pm 34.68) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 夏季  $(47.55 \pm 18.36) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 秋季  $(54.35 \pm 22.19) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 冬季  $(72.22 \pm 38.77) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。地铁站内  $\text{PM}_{2.5}$  季节分布规律与室外  $\text{PM}_{2.5}$  一致, 大气中  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度通常也在冬季达到一年中的最大值<sup>[10]</sup>。

### 2.2 设备区和站台区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度影响因素分析

设备区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与站台区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度表现为强正相关关系, 相关性系数分布在 0.83 至 0.99 之间(结果见图 3)。同时, 设备区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与室外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度也存在强正相关性关系, 相关性系数分布在 0.81 至 0.9 之间。对于站台区  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与室外  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度, 车站 S2、S3、S4、S5 的相关性系数分别为 0.85、0.88、0.89、0.82, S1 的相关性系数为 0.61, 两区域  $\text{PM}_{2.5}$  在除



注:“综合平均”为5个车站的平均值。

图2 各地铁站  $PM_{2.5}$  质量浓度分布

Fig. 2 Distribution of  $PM_{2.5}$  concentration at various metro stations

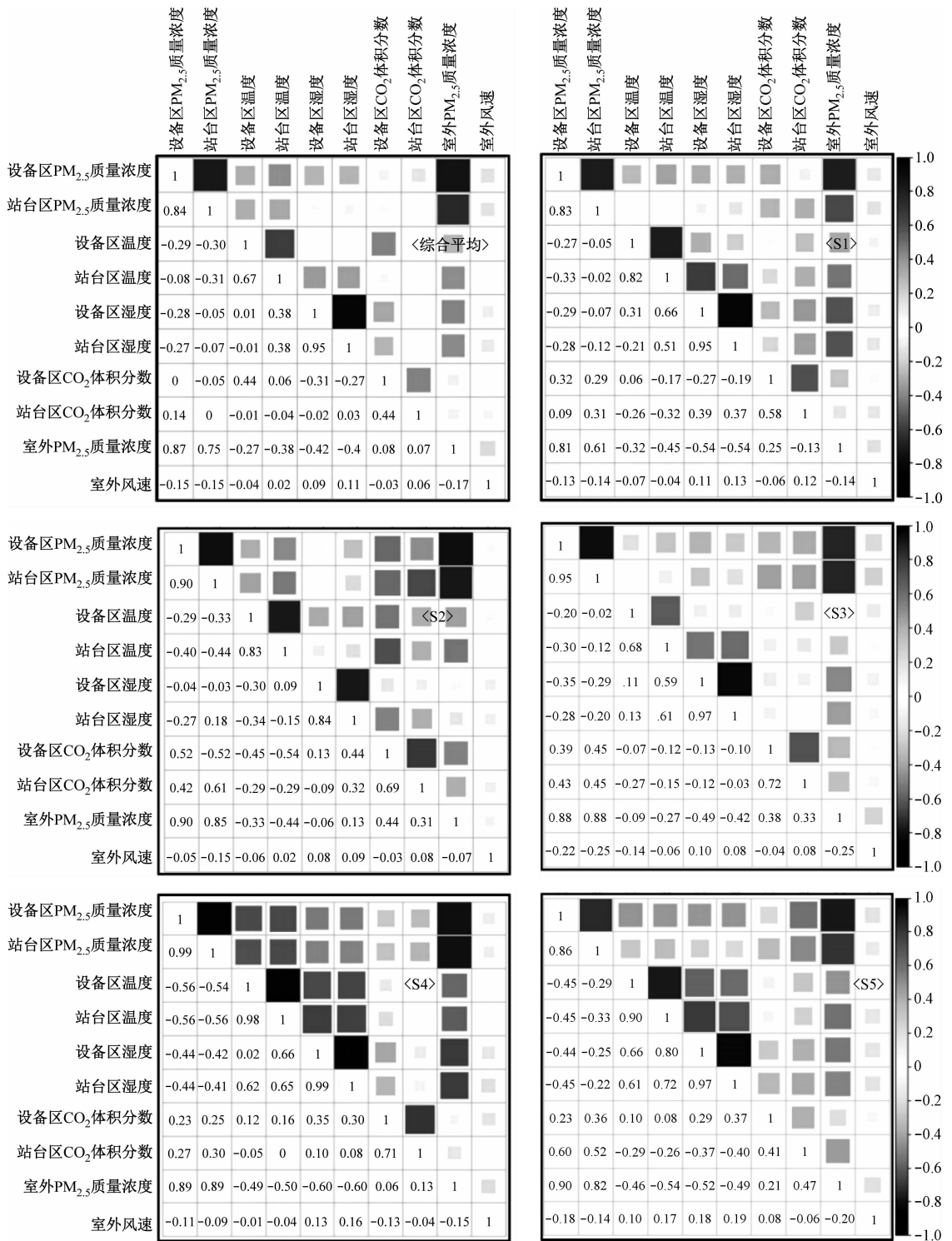
S1 以外的站均为强正相关关系。以上结果表明设备区与站台区之间存在空气交换,且室外  $PM_{2.5}$  也是地铁站内部  $PM_{2.5}$  的重要来源之一。设备区和站台区  $PM_{2.5}$  质量浓度和  $CO_2$  体积分数也存在正相关关系,相关性系数在0.23至0.61,  $CO_2$  体积分数可在一定程度上代表客运量大小,人员活动会产生  $PM_{2.5}$ ,因此客运量增大,站内  $PM_{2.5}$  也会升高。温湿度与两个区域  $PM_{2.5}$  的相关性关系存在显著的站间差异,设备区  $PM_{2.5}$  与温度相关性系数在  $-0.56$  至  $-0.2$  范围;站台区  $PM_{2.5}$  与温度相关性系数在  $-0.56$  至  $0.02$  范围,仅 S1 为正值。温度与站内  $PM_{2.5}$  偏负相关关系,冬季温度降低,站内  $PM_{2.5}$  质量浓度相比夏季往往升高,这与监测结果一致。设备区  $PM_{2.5}$  与湿度相关性系数在  $-0.44$  至  $0.04$  范围,仅 S3 为正值。站台区  $PM_{2.5}$  与湿度相关性系数在  $-0.41$  至  $0.18$  范围,仅 S3 为正值,湿度与  $PM_{2.5}$  无明确相关关系。综合五站来看,室外风速与地铁站设备区和站台区  $PM_{2.5}$  质量浓度的相关系数均为负数,分别为  $-0.15$  与  $-0.13$ ,室外风速与站内  $PM_{2.5}$

总体上呈负相关关系,当风速增大时,有利于站内和站外  $PM_{2.5}$  扩散,会一定程度降低  $PM_{2.5}$  浓度。

## 2.3 多元线性回归分析

### 2.3.1 设备区 $PM_{2.5}$ 质量浓度回归分析

设备区  $PM_{2.5}$  质量浓度的回归分析结果见表2,回归结果验证了相关性分析的结论,即设备区  $PM_{2.5}$  质量浓度与站台区  $PM_{2.5}$  质量浓度、 $CO_2$  体积浓度为正相关关系。从回归结果来看,对设备区  $PM_{2.5}$  影响最显著的是站台和室外  $PM_{2.5}$ 。回归系数的大小代表某自变量对因变量的影响程度,对这些系数进行可信度检验。由表3知,室外风速对各站设备区  $PM_{2.5}$  浓度影响都不显著 ( $p$ (卡方值)  $> 0.05$ ),站台区  $PM_{2.5}$  浓度、室外  $PM_{2.5}$  浓度和温度都是显著的变量 ( $p < 0.05$ ),相对湿度与  $CO_2$  体积浓度在 S1、S2 与 S3 显著 ( $p < 0.01$ ),在 S4 与 S5 不显著 ( $p > 0.05$ )。在各个车站,站台区  $PM_{2.5}$  浓度的回归系数都是正值且显著 ( $p < 0.001$ ),回归系数从大到小分别为 S3 (1.17)、S4 (0.89)、S1 (0.76)、S5 (0.34) 和 S2 (0.29)。室外  $PM_{2.5}$  的浓度对设备区

图3 地铁站各区域  $PM_{2.5}$  与其环境因素的相关性系数截图Fig.3 Screenshot of correlation coefficient between  $PM_{2.5}$  and environmental factors in various areas of metro stations

的  $PM_{2.5}$  浓度都有显著影响,但影响的程度并不相同。在 S3、S4,室外  $PM_{2.5}$  质量浓度升高  $1 \mu g/m^3$  对应设备区会升高  $0.10 \mu g/m^3$ ,但在 S1、S2 与 S5 这

个数值分别是  $0.39 \mu g/m^3$ 、 $0.57 \mu g/m^3$  与  $0.52 \mu g/m^3$ 。设备区只通过风亭与外界进行空气交换,室外  $PM_{2.5}$  对设备区  $PM_{2.5}$  的影响程度实际上反映

表 2 设备区 PM<sub>2.5</sub> 环境影响因素回归结果

| Tab. 2 Regression results of PM <sub>2.5</sub> environmental impact factors in equipment area |                            |                          |                         |                        |                         |                         |
|---|----------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 参数  | S1                         | S2                       | S3                      | S4                     | S5                      | 综合评价                    |
| 站台 PM <sub>2.5</sub> 质量浓度   | 0.761 0 <sup>***</sup> (a) | 0.286 0 <sup>***</sup>   | 1.166 0 <sup>***</sup>  | 0.886 0 <sup>**</sup>  | 0.343 0 <sup>***</sup>  | 0.471 0 <sup>***</sup>  |
|   | 0.033 9 (b)                | 0.033 8                  | 0.039 4                 | 0.036 0                | 0.032 6                 | 2.935 2                 |
|   | 2.146 6 (c)                | 3.614 4                  | 5.340 8                 | 8.613 3                | 3.677 7                 | 3.012 6                 |
| 室外 PM <sub>2.5</sub> 质量浓度   | 0.393 0 <sup>***</sup>     | 0.566 0 <sup>***</sup>   | 0.097 0                 | 0.101 1 <sup>***</sup> | 0.524 8 <sup>***</sup>  | 0.439 3 <sup>***</sup>  |
|   | 0.027 0                    | 0.038 1                  | 0.030 3                 | 0.036 9                | 0.039 4                 | 0.019 7                 |
|   | 2.924 3                    | 3.394 4                  | 5.958 7                 | 8.439 0                | 4.680 1                 | 3.652 9                 |
| 温度  | -1.910 6 <sup>***</sup>    | 0.632 9 <sup>**</sup>    | -2.269 5 <sup>***</sup> | -0.486 4 <sup>*</sup>  | -0.904 6 <sup>***</sup> | -0.528 2 <sup>***</sup> |
|   | 0.203 4                    | 0.197 4                  | 0.171 2                 | 0.192 8                | 0.259 1                 | 0.106 5                 |
|   | 1.276 4                    | 1.403 7                  | 1.056 9                 | 2.458 3                | 1.819 4                 | 1.474 3                 |
| 湿度  | 0.081 7 <sup>*</sup>       | 0.303 8 <sup>***</sup>   | -0.109 8 <sup>*</sup>   | 0.044 9                | 0.019 5                 | -0.077 6 <sup>**</sup>  |
|   | 0.033 5                    | 0.075 6                  | 0.043 4                 | 0.047 7                | 0.056 7                 | 0.025 2                 |
|   | 1.785 8                    | 1.115 0                  | 1.479 2                 | 3.037 1                | 2.590 3                 | 1.622 3                 |
| CO <sub>2</sub>   | 0.021 5 <sup>***</sup>     | 0.036 1 <sup>**</sup>    | -0.044 3 <sup>***</sup> | -0.003 6               | -0.013 0                | 0.013 4 <sup>***</sup>  |
|   | 0.005 1                    | 0.011 4                  | 0.010 5                 | 0.009 9                | 0.016 3                 | 0.002 3                 |
|   | 1.197 2                    | 1.480 0                  | 1.276 0                 | 1.640 4                | 1.425 5                 | 1.465 0                 |
| 风速  | -0.100 9                   | -0.179 5                 | 0.079 8                 | -0.358 7               | -0.179 8                | 0.098 6                 |
|   | 0.340 5                    | 0.575 1                  | 0.310 4                 | 0.338 7                | 0.480 8                 | 0.255 8                 |
|   | 1.044 7                    | 1.033 6                  | 1.104 2                 | 1.100 9                | 1.060 2                 | 1.043 4                 |
| ε   | 31.345 3 <sup>***</sup>    | -42.144 4 <sup>***</sup> | 67.306 5 <sup>***</sup> | 5.808 1                | 37.124 6 <sup>**</sup>  | 12.418 8                |
|   | 6.673 2                    | 9.903 2                  | 7.662 5                 | 4.428 8                | 12.119 2                | 2.935 2                 |
| R <sup>2</sup>  | 0.861 5                    | 0.898 7                  | 0.938 7                 | 0.971 4                | 0.866 5                 | 0.850 8                 |

注:① *a* 为回归值,*b* 为标准差,*c* 为 VIF(方差膨胀系数),*ε* 为残差;② \*\*\* 为  $p < 0.001$ , \*\* 为  $p < 0.01$ , \* 为  $p < 0.05$ ,  $p < 0.05$  代表变量显著。

了地铁站设备区空调系统对 PM<sub>2.5</sub> 的过滤能力。虽然室外风速对室外 PM<sub>2.5</sub> 的浓度有一定影响,但在回归分析中室外风速这一变量的回归系数均不显著( $p > 0.05$ )。温度对设备区 PM<sub>2.5</sub> 的影响在 5 个车站均显著,但站间差异极大。湿度的回归系数在 S4、S5 不显著( $p > 0.05$ ),湿度对地铁站内 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响没有统一规律,也与相关性分析结果一致。

2.3.2 站台区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度回归分析

站台区 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的回归分析结果见表 3。室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度是影响站台 PM<sub>2.5</sub> 浓度的重要因素,除了 S1 室外 PM<sub>2.5</sub> 不是显著变量( $p > 0.05$ )外,S2 至 S5 室外 PM<sub>2.5</sub> 的回归系数分别为 0.22、0.16、0.19 和 0.40,室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度对所有车站站台 PM<sub>2.5</sub> 浓度均为正向影响。与设备区相比,外界 PM<sub>2.5</sub> 影响站台区 PM<sub>2.5</sub> 的能力相对较弱,原因可能是站台区有 PM<sub>2.5</sub> 散发源削弱了室外 PM<sub>2.5</sub> 的影响。CO<sub>2</sub> 体积浓度在站台区的影响比在设备区更显著,5 个

模型中的回归系数均显著( $p < 0.001$ ),S1 至 S5 的 CO<sub>2</sub> 回归系数分别为 0.03、0.14、0.02、0.03 和 0.09,客运量对 PM<sub>2.5</sub> 的正向影响在站台区得到了充分体现。温度这一变量的回归系数在 S1、S3、S4 与 S5 显著( $p < 0.05$ )。湿度在 S1、S2、S4 与 S5 对站台区域 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度影响显著( $p < 0.01$ ),从回归结果看,温湿度对 PM<sub>2.5</sub> 的影响依然存在站间差异,未能发现统一规律。此外,室外风速对各个车站站台 PM<sub>2.5</sub> 的影响都不显著( $p > 0.05$ )。

2.4 站内 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的典型日变化特征

为研究地铁站内不同区域 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的典型日实时变化特征,选取 S3 2019 年 8 月 3 日 00:00 至 8 月 9 日 24:00 的监测数据进行分析,所有的数据间隔均为 1 h。

地铁站内 PM<sub>2.5</sub> 实时质量浓度及室外颗粒物质量浓度如图 4 所示。由图 4 可以发现:PM<sub>2.5</sub> 质量浓度站台区 > 设备区 > 室外,与季节平均结果一致。

表 3 站台区 PM<sub>2.5</sub> 环境影响因素回归结果

| Tab.3 Regression results of PM <sub>2.5</sub> environmental impact factors in platform area |                                     |                         |                          |                         |                          |                         |
|---|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 参数  | S1                                  | S2                      | S3                       | S4                      | S5                       | 综合评价                    |
| 设备区 PM <sub>2.5</sub>   | 0.638 9 <sup>***</sup> ( <i>a</i> ) | 0.734 8 <sup>***</sup>  | 0.574 6 <sup>***</sup>   | 0.801 8 <sup>***</sup>  | 0.639 5 <sup>***</sup>   | 0.765 4 <sup>***</sup>  |
|   | 0.027 7( <i>b</i> )                 | 0.073 6                 | 0.021 8                  | 0.032 9                 | 0.070 2                  | 0.028 3                 |
|   | 3.474 4( <i>c</i> )                 | 7.240 8                 | 5.363 8                  | 8.422 5                 | 7.178 3                  | 4.468 7                 |
| 室外 PM <sub>2.5</sub>  | 0.008 8                             | 0.224 6 <sup>***</sup>  | 0.159 4 <sup>***</sup>   | 0.192 1 <sup>***</sup>  | 0.399 3 <sup>***</sup>   | 0.196 4 <sup>***</sup>  |
|   | 0.028 6                             | 0.066 8                 | 0.021 4                  | 0.034 1                 | 0.064 2                  | 0.027 5                 |
|   | 4.279 7                             | 7.005 0                 | 5.514 0                  | 8.332 6                 | 6.676 6                  | 4.656 0                 |
| 温度  | 1.397 2 <sup>***</sup>              | -0.216 5                | 1.388 6 <sup>***</sup>   | -0.703 1 <sup>***</sup> | -0.610 2 <sup>*</sup>    | -0.223 9 <sup>*</sup>   |
|   | 0.118 9                             | 0.221 5                 | 0.132 8                  | 0.185 1                 | 0.308 0                  | 0.113 5                 |
|   | 1.542 5                             | 1.300 0                 | 1.826 2                  | 2.760 2                 | 2.428 8                  | 1.318 7                 |
| 湿度  | -0.115 5 <sup>**</sup>              | -0.628 2 <sup>***</sup> | 0.006 2                  | 0.237 0 <sup>***</sup>  | 0.642 3 <sup>***</sup>   | 0.492 0 <sup>***</sup>  |
|   | 0.040 2                             | 0.127 3                 | 0.039 1                  | 0.047 0                 | 0.072 4                  | 0.032 5                 |
|   | 1.858 6                             | 1.173 2                 | 2.098 0                  | 3.010 3                 | 2.364 4                  | 1.324 8                 |
| CO <sub>2</sub>   | 0.029 4 <sup>***</sup>              | 0.137 7 <sup>***</sup>  | 0.016 0 <sup>***</sup>   | 0.025 9 <sup>***</sup>  | 0.087 0 <sup>***</sup>   | -0.024 8 <sup>***</sup> |
|   | 0.003 9                             | 0.008 9                 | 0.002 8                  | 0.006 0                 | 0.024 8                  | 0.002 7                 |
|   | 1.319 8                             | 1.247 5                 | 1.290 4                  | 1.277 7                 | 1.767 5                  | 1.052 4                 |
| 风速  | -0.414 7                            | 0.564 6                 | -0.475 6 <sup>*</sup>    | 0.283 4                 | -0.190 8                 | -0.130 4                |
|   | 0.301 3                             | 0.697 7                 | 0.230 3                  | 0.318 7                 | 0.656 5                  | 0.318 0                 |
|   | 1.070 0                             | 1.019 6                 | 1.125 4                  | 1.128 6                 | 1.058 7                  | 1.052 1                 |
| $\varepsilon$   | -30.119 3 <sup>***</sup>            | 30.381 2 <sup>***</sup> | -27.518 0 <sup>***</sup> | -1.040 5                | -51.136 0 <sup>***</sup> | 2.366 3 <sup>***</sup>  |
|   | 3.199 1                             | 8.715 8                 | 3.159 8                  | 3.817 0                 | 13.637 0                 | 3.173 3                 |
| $R^2$   | 0.803 2                             | 0.904 7                 | 0.941 0                  | 0.974 9                 | 0.804 3                  | 0.782 7                 |

注:① *a* 为回归值,*b* 为标准差,*c* 为 VIF, $\varepsilon$  为残差;② \*\*\* 为  $p < 0.001$ , \*\* 为  $p < 0.01$ , \* 为  $p < 0.05$ ,  $p < 0.05$  代表变量显著。

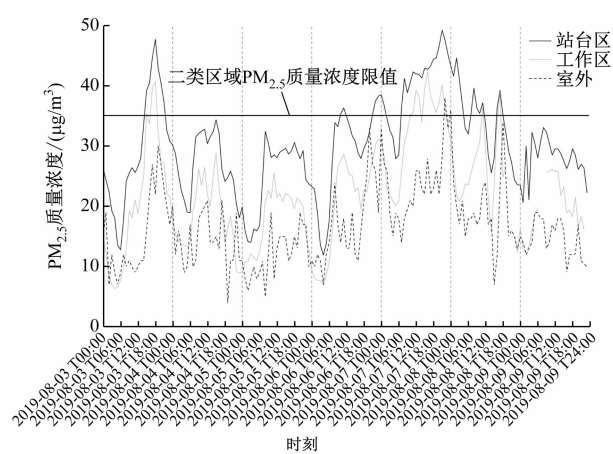


图 4 2019 年 8 月 3 日至 8 月 9 日 S3 站内外 PM<sub>2.5</sub> 浓度  
Fig.4 PM<sub>2.5</sub> concentration inside and outside S3 station from August 3 to August 9, 2019

PM<sub>2.5</sub> 质量浓度有显著的周期性变化,PM<sub>2.5</sub> 质量浓度的谷值一般出现在 03:00—06:00。24 h 周期内有 2 个峰值,上午的峰值常发生在 11:00 左右,下午

的峰值常发生在 18:00 附近。PM<sub>2.5</sub> 质量浓度在 09:00—12:00 与 18:00—21:00 大幅升高与上下班高峰期列车运行频次增加有关,且此时地面交通也进入高峰期,导致此时室外 PM<sub>2.5</sub> 浓度也有一定程度升高,在二者共同作用下站内 PM<sub>2.5</sub> 浓度达到峰值。交通高峰期后 PM<sub>2.5</sub> 仍维持一段时间的高浓度水平,原因可能是地铁站较封闭,空气流通不畅。地铁站内不同区域的 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化趋势大致相同,站台区与设备区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度在相近时间达到峰值。站内 PM<sub>2.5</sub> 浓度受室外 PM<sub>2.5</sub> 的影响显著,站内 PM<sub>2.5</sub> 变化趋势和室外 PM<sub>2.5</sub> 较为一致。地铁站内 PM<sub>2.5</sub> 源的存在对站内 PM<sub>2.5</sub> 的影响同样不能忽视,因而站内 PM<sub>2.5</sub> 的浓度始终要高于室外 PM<sub>2.5</sub>。在 GB 3095—2012《环境空气质量标准》中,地铁站被划分为二类区域,其 PM<sub>2.5</sub> 年均质量浓度限值为 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,设备区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度在该监测时段内绝大多数时间低于限值,站台区域超过该限值的时间

较多。考虑到8月3日至8月9日属于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低的夏季,全年地铁站内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超标的时间不容乐观。

### 3 结语

室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与设备区和站台区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度都有正相关关系,设备区受到的影响更加显著。温度与湿度在各地铁站对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响没有统一规律。站台区 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度高于设备区 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度,而设备区 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度又高于室外 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,设备区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度受站台区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响显著;地铁站内各区域秋冬季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高于春夏季节 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,且均高于国家标准限值,车站空气质量亟需改善。加强设备区和站台区空调系统过滤效率及滤网更换频率,增大空调系统新风量,做好站台区域与隧道区域的隔离(如安装全封闭安全门),均能有效降低地铁车站 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度,保护乘客和工作人员的身体健康。设备区、站台区与室外 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度变化趋势大体一致,三者的浓度变化具有周期性。日间地铁站 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著高于夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,每日峰值一般在通勤高峰期。

### 参考文献

- [1] 王春艳,樊星,刘佳,等. 北京某地铁站台空气颗粒物的数量浓度和质量浓度以及粒径分布和元素组成[J]. 城市轨道交通研究,2020,23(3):12.  
WANG Chunyan, FAN Xing, LIU Jia, et al. Number/mass concentration, particle size distribution and elemental composition of airborne particulate matter at a subway station in Beijing[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(3): 12.
- [2] 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.  
PAN Song, WANG Hongwei, WANG Xinru, et al. Characteristics of  $\text{PM}_{2.5}$  distribution in a subway station in Beijing[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2018, 34(4): 415.
- [3] 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.  
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.
- [4] 吴颖娣,梁珍,沈恒根,等. 上海某地铁站台空气颗粒物粒径分布[J]. 东华大学学报(自然科学版),2018,44(5):811.  
WU Yingdi, LIANG Zhen, SHEN Henggen, et al. Particle size distribution of air particulate matter in Shanghai subway station[J]. Journal of Donghua University(Natural Science), 2018, 44(5): 811.
- [5] 于霄,郝晋赜,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.  
YU Xiao, HAO Jinliang, CHEN Lu, et al. Investigation of influence factors on air pollution in metro station[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(5): 129.
- [6] 庞雪莹,王立鑫,王丹丹,等. 冬夏两季北京地铁车厢内空气质量研究[J]. 城市轨道交通研究,2018,21(4):69.  
PANG Xueying, WANG Lixin, WANG Dandan, et al. Air quality study in subway compartment during winter and summer seasons in Beijing[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(4): 69.
- [7] 夏春晶,张倩,陈建云,等. 冬季地铁隧道空气中颗粒物体积质量分布及相关性分析[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(7):35.  
XIA Chunjing, ZHANG Qian, CHEN Jianyun, et al. Distribution of particulate matter concentration in metro tunnel during the winter and correlation analysis[J]. Urban Mass Transit, 2017, 20(7): 35.
- [8] JI W, LIU Z, LIU C, et al. Characteristics of fine particulate matter and volatile organic compounds in subway station offices in China[J]. Building and Environment, 2021, 188(16): 107502.
- [9] JI W, LIU C, LIU Z, et al. Concentration, composition, and exposure contributions of fine particulate matter on subway concourses in China[J]. Environmental Pollution, 2021, 275: 116627.
- [10] SHEN J, GAO Z. Commuter exposure to particulate matters in four common transportation modes in Nanjing[J]. Building and Environment, 2019, 156: 156.

(收稿日期:2021-06-06)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821