文章编号：1671-6612（2026）05-737-06

地铁站公共区通风系统滤网过滤效率与积尘量实测与分析

廖佳仪[1]　曹寿裕[1]　王静伟[1]　张黎明[2]　陈嘉伦[2]　巩　煜[2]　关　军[2]

（1.广州地铁设计研究院股份有限公司　广州　510410;
2.南京理工大学能源与动力工程学院　南京　210094）

【摘　要】　为揭示地铁站公共区机械通风系统过滤段的积灰特性，以华南地区三个典型地铁站为研究对象，采用现场在线监测方法，对机械通风系统送风道过滤段滤网前后 $PM_{2.5}$、PM_{10} 浓度及通风风量进行连续监测，并结合数据预处理、过滤效率与积尘量计算分析，探究过滤段滤网的过滤效率与积尘特征。结果表明，三个地铁站过滤段滤网前颗粒物浓度和过滤效率在监测日中均呈现出较为明显的波动，且各站点的变化趋势各异。过滤段滤网对 PM_{10} 的过滤效率显著高于 $PM_{2.5}$，且 PM_{10} 模型的预测效果（R^2 值）也远高于 $PM_{2.5}$。滤网表面 PM_{10} 的积尘量在半个月内即可超过 60g/m²，显著高于风道壁面的沉积量水平。研究以期为地铁站通风系统的运维管理提供科学参考。

【关键词】　地铁车站；机械通风系统；空气滤网；过滤效率；积灰特性

中图分类号　TU96+6　　文献标志码　A

Field Analysis of Filtration Efficiency and Dust Accumulation of Filters in the Ventilation System of Public Areas in Subway Stations

Liao Jiayi[1]　Cao Shouyu[1]　Wang Jingwei[1]　Zhang Liming[2]　Chen Jialun[2]　Gong Xing[2]　Guan Jun[2]

(1.Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd, Guangzhou, 510410
2.School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, 210094)

【Abstract】　To investigate the dust accumulation characteristics of the mechanical ventilation system's filter section in the public areas of subway stations, this study took three typical subway stations in South China as the research objects. By using the method of on-site continuous monitoring, the concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} before and after the filter section of the mechanical ventilation system's supply air duct and the ventilation air volume were continuously monitored. Combined with data preprocessing, filtration efficiency and dust accumulation calculation analysis, the filtration efficiency and dust accumulation characteristics of the filter section's filter screen were explored. The results show that the particle concentration and filtration efficiency before the filter section of the three subway stations all present relatively obvious fluctuations during the monitoring period, and the changing trends of each station are different. The filtration efficiency of the filter section's filter screen for PM_{10} is significantly higher than that for $PM_{2.5}$, and the prediction effect (R^2 value) of the PM_{10} model is also much higher than that of the $PM_{2.5}$ model. The dust accumulation of PM_{10} on the filter screen surface can exceed 60g/m² within half a month, which is significantly higher than the deposition level on the air duct wall. This study could provide a scientific reference for the operation and maintenance management of the ventilation system in subway stations.

作者简介：廖佳仪（1986-），男，硕士，高级工程师，E-mail：liaojiayi@dtsjy.com
通讯作者：关　军（1978-），男，博士，教授，E-mail：guanjun@njust.edu.cn
收稿日期：2026-04-08

【Keywords】 Subway station; Mechanical ventilation system; Air filter; Filtration efficiency; Dust accumulation characteristics

0 引言

在“双碳”目标背景下，地铁凭借运量大、运行效率高等优势，已成为城市公共交通体系的重要组成部分。据交通运输部统计，截至 2025 年 12 月，全国共有 54 个城市开通运营城市轨道交通线路 343 条，运营里程达 11710.3km，年客运量达 29.3 亿人次[1]。地铁车站多为封闭或半封闭的地下空间，其通风系统需长期高负荷运行，易受站内外多源颗粒污染的影响，进而对车站室内人员健康与运行能耗产生不利影响。因此，研究地铁通风系统颗粒污染及其积灰特性，对于保障站内环境安全、提升通风系统运行性能具有重要的现实意义。

已有研究表明，地铁站内颗粒物来源较为复杂，既包括道路交通排放、工业活动和土壤扬尘等站外来源，也包括乘客通行与候车过程以及列车进站过程中车轮与轨道摩擦产生的站内来源[2-6]。尽管上述研究已较为系统地揭示了地铁站内颗粒污染的来源特征，但研究对象主要集中于站台、站厅及办公区等人员活动空间，对通风系统内部颗粒物输运与沉积特性的关注仍相对不足。事实上，随着运行时间的延长，颗粒物在通风系统风道内壁、过滤网及换热器表面不断沉积，逐渐形成难以清除的积灰层，这不仅会增加通风阻力[7]、降低换热效率[8]，还将导致系统运行能耗上升。同时，通风系统内部相对较高的湿度条件为细菌、真菌的生长提供有利环境[9]，并可能因在送风过程中发生的二次悬浮，对站内空气质量和人员健康构成潜在威胁[10]。基于上述问题，国内外学者围绕地铁通风系统的卫生状况和积尘水平开展了相关研究。例如，吴小燕等[11]和刘金忠等[12]分别对西安和沈阳地铁通风系统风管的积尘量进行了现场检测，揭示了不同线路和运行工况下通风系统的积灰水平。

综合现有研究表明，当前研究主要关注地铁站内环境颗粒物浓度水平及其来源解析，而针对通风系统内部不同功能区域（如新风段、回风段及过滤段）的积灰特性及颗粒物沉积规律的系统研究仍相对不足。尤其值得注意的是，过滤段作为通风系统中颗粒物捕集的关键环节，其滤网的过滤效率和积灰程度等尚缺乏基于实际数据的定量分析结论。基于此，本文以地铁站通风系统为研究对象，通过现场监测与计算分析，量化表征滤网过滤效率及其积灰特征，以期为地铁站通风系统的运维管理提供科学参考。

1 研究方法

1.1 测试方法

为获取地铁站通风系统过滤段表面的颗粒物积尘特性，本文选取华南地区三个典型地铁站公共区通风系统为研究对象，于 2024 年夏季（8 月份）开展测试。其中三个站均采用机械通风模式，其均含有新风道、回风道、混风室及送风道等主要关联区域，三个地铁站的通风系统原理图如图 1 所示。其中，站 A 在测试期间始终为小新风模式；站 B 测试期间前两日为小新风模式，第 3 日切换为全新风模式；站 C 测试期间前两日为全新风模式，第 3 日切换为小新风模式。

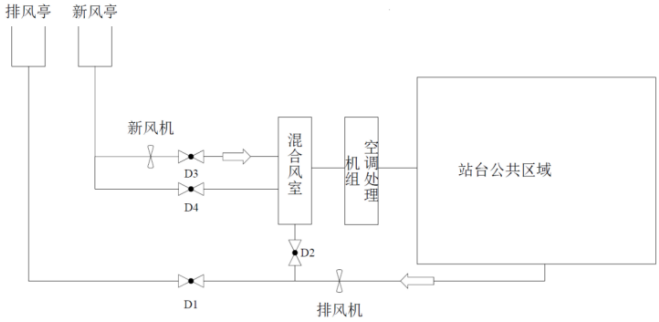


图 1　地铁站公共区域通风系统原理图

Fig.1　Schematic diagram of the ventilation system in the public area of a subway station

该通风系统过滤段安装于送风道，且均采用地铁站常用的布袋式滤网进行颗粒物捕集。本研究采用无线万向风速风温记录仪和环境监测仪器等设备，对送风道滤网前后进行连续三天的颗粒物浓度

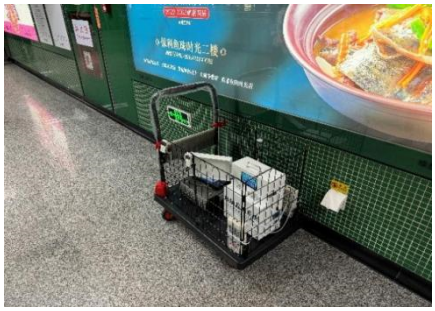
及风速的在线监测，部分相关测试设备现场安装情况如图 2 所示。为保证测试数据的准确性与可靠性，主要仪器在测试前均进行了返厂校正，并在现场测试期间辅以专业仪器进行对比监测与数据修正，相关仪器参数如表 1 所示。



（a）过滤段入口测点



（b）过滤段后测点



（c）站厅测点



（d）站外测点

图 2　测试现场图（以站 A 为例）

Fig.2　Field measurement points (taking station A for example)

表 1　监测仪器基本信息

Table 1　Basic information of instruments

仪器	测试参数	型号	规格参数
颗粒物传感器（中国，蓝居 U-MINI500）	$PM_{2.5}$	UDL-$PM_{2.5}$	量程：0~1000μg/m³（光学原理），分辨率：0.1μg/m³
	PM_{10}	UDL-PM_{10}	量程：0~1000μg/m³（光学原理），分辨率：0.1μg/m³
万向风速风温记录仪（中国，天建华仪）	风速	WFWZY-1	量程：0.05−30m/s，分辨率：0.01m/s
压差计（中国，上海亿欧）	压差	EY-200A	量程：0−500Pa，分辨率：0.1Pa
粒子计数器（美国，TSI）	$PM_{2.5}$	DustTrak 8530	量程：0.001mg/m³−400mg/m³，分辨率：0.001mg/m³
宽粒径谱仪（德国，Grimm）	PM_{10}	Mini-WRAS-1.371	量程：0.00001mg/m³−100mg/m³，分辨率：0.001mg/m³

1.2　分析方法

由于本次测试所采用的环境监测终端通过基于空气参数传感器来获取时间序列数据，在实际运行过程中难免会存在数据缺失、异常值及数据漂移等问题。因此，在数据分析前需对原始监测数据进行预处理，具体方法如下：

（1）数据缺失：本研究测试数据主要通过 U 盘存储，仅会在个别时间点出现数据缺失的问题，缺失比例较低，对整体数据可靠性影响有限。为保证时间序列数据的连续性，采用相邻时间点数据进行线性插值处理[13]，来保证测试数据的完整性。

（2）异常值：参考相关的研究方法[14]，利用

Matlab 软件对测试数据进行滤波处理，以去除由传感器噪声或瞬时干扰引起的异常值。

（3）数据漂移：在正式测试前，将所有环境监测仪器与专业仪器在实验室条件下进行对比校准，当 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的变化趋势一致且偏差率小于 10%时，认为该仪器测试数据可靠，可用于现场测试。测试结束后，根据校准结果对实测数据进行统一修正，偏差率计算公式如式（1）所示。

$$DR=\left|\frac{(\text{监测值}-\text{标准值})}{\text{标准值}}\right|\times 100\% \tag{1}$$

将单位面积颗粒物的沉积质量定义为积尘量 L。积尘量计算公式为：

$$L=\Delta M / S \tag{2}$$

式中：L 为积尘量，g/m²；S 为采样面积，m²；ΔM 为过滤段积尘采样前后的积灰量差值，g，可根据过滤效率间接计算[15]，其计算公式为：

$$M=Q\cdot C_2\cdot t\cdot \eta\cdot \varepsilon/1000000 \tag{3}$$

式中：Q 为通风系统在运行时间内的送风量，m³/h；t 为运行时间，h；C_2 为在运行时间内过滤段滤网前的颗粒物平均质量浓度，μg/m³；η为该颗粒物对应的过滤效率，%；ε为修正系数，用于修正大于此粒径范围的颗粒物的质量浓度，一般取值为 1.2−1.4（本研究取 1.3）；M 为过滤段沉积质量，g。

此外，公式（3）中的过滤效率可通过滤网前后的颗粒物浓度计算得到，其计算公式为：

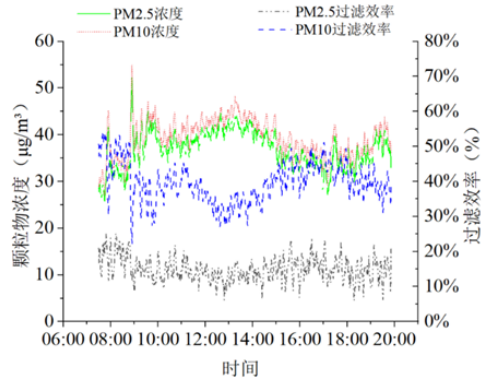
$$\eta=\frac{C_2-C_1}{C_2}\times 100\% \tag{4}$$

式中：C_1 为在运行时间内滤网后的颗粒物平均质量浓度，μg/m³；C_2 为在运行时间内滤网前的颗粒物平均质量浓度，μg/m³。

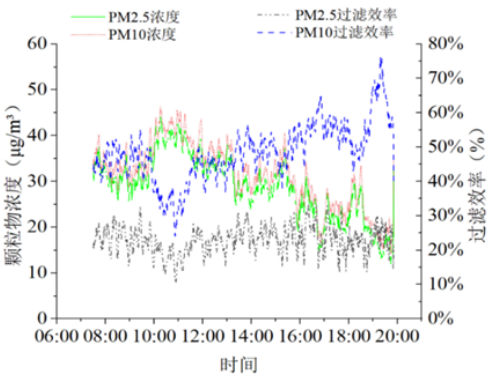
2　结果分析

2.1　滤网过滤效率分析

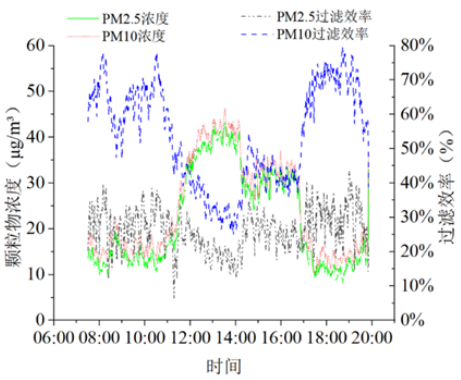
图 3 为三个地铁站滤网前 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度及其过滤效率的计算结果。结果发现，三个地铁站滤网前 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度及其过滤效率在监测日中均呈现出较为明显的波动，且各站点的变化趋势各异。其中，全新风模式下（如站 C）无回风混合，相对小新风模式而言，滤网进口颗粒物浓度受站外环境影响更直接，波动幅度更大；过滤段滤网的 PM_{10} 过滤效率（20%−80%）显著优于 $PM_{2.5}$（5%−45%），推测与 PM_{10} 粒径较大、更易在过滤介质中被捕集有关。此外，测试期间站 A 的站外 PM_{10} 日均值浓度（115.9μg/m³）远高于其他两站（站 B：61.8μg/m³；站 C：21.8μg/m³），高浓度粗颗粒易迅速形成尘饼，改变过滤行为。



（a）站 A（小新风模式）



（b）站 B（小新风模式）



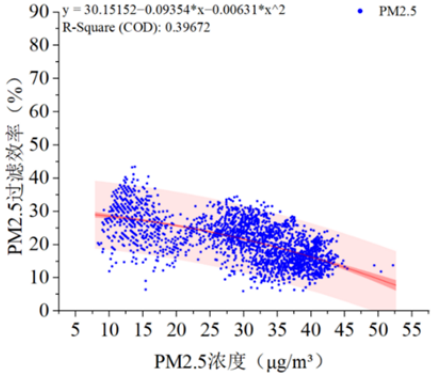
（c）站 C（全新风模式）

图 3　滤网前段颗粒物浓度与过滤效率的时间变化曲线

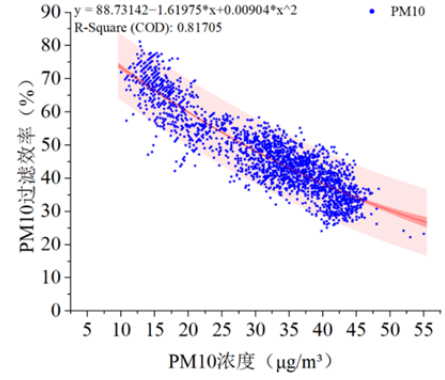
Fig.3　Time-dependent curves of particle concentration and filtration efficiency upstream of the filter

考虑到过滤效率与滤网前的颗粒物浓度存在一定关系，图 4 进一步给出了三个站点的滤网过滤效率与滤网前颗粒物浓度数据的拟合结果。由图可知，滤网前 PM_{10} 浓度与其过滤效率关系的拟合效

果较好（R^2>0.8），可根据过滤段滤网前的 PM_{10} 浓度来确定过滤效率；而滤网前 $PM_{2.5}$ 浓度与其过滤效率关系拟合曲线的 R^2 仅为 0.4，其过滤效率的预测效果相对较差。需要说明的是，鉴于 $PM_{2.5}$ 浓度已包含于 PM_{10} 中，且上述 PM_{10} 浓度与过滤效率的拟合效果更优，故本文采用滤网前 PM_{10} 浓度及其过滤效率计算积尘量。



（a）$PM_{2.5}$ 浓度与过滤效率分布散点图



（b）PM_{10} 浓度与过滤效率分布散点图

图 4　滤网前颗粒物浓度与过滤效率的关联性分布散点图

Fig.4　Scatter plot of the correlation between particle concentration and filtration efficiency upstream of the filter

2.2　过滤段积尘量分析

根据式（2）-（4），计算各站点通风系统滤网 PM_{10} 的日积尘量，结果如表 2 所示。其中，现场调研记录获取的地铁站风机日开启时长约为 14h，通风系统过滤段面积约为 15m²。假定过滤段每 3 天的沉积量与测试期间 3 天的沉积量相同，则可预估一个月内的过滤段滤网积尘量。结果表明，过滤段滤网表面 PM_{10} 在 15 天内的积尘量即可超过 60g/m²，且 30 天后（常规清洗频率）最高可达 153.06g/m²（站 A），均显著高于通风系统风道壁面的沉积量水平（19.06−31.51g/m²）[16]。由于过滤段清洗时间一般为 1 个月或更长，导致大量颗粒物在过滤段表面富集，进而影响滤网过滤效率和风机阻力，如未得到及时清洗，则会进一步恶化送风空气质量和风机能耗。为此，本研究计算分析得到的过滤段滤网积尘量，除了可以作为滤网积灰特性的重要特征参数以外，还可用于间接判定滤网清洗或更换的频率。

表 2　过滤段 PM_{10} 积尘量

Table 2　PM_{10} dust accumulation in the filtration section.

站点	平均风量 /(m³/s)	第一天过滤段 PM_{10} 积尘量 /(g/m²)	第二天过滤段 PM_{10} 积尘量 /(g/m²)	第三天过滤段 PM_{10} 积尘量 /(g/m²)	3 天 PM_{10} 积尘量 /(g/m²)	15 天 PM_{10} 积尘量 /(g/m²)	30 天 PM_{10} 积尘量 /(g/m²)
站 A	53.13	5.550	4.926	4.870	15.306	76.530	153.060
站 B	41.55	4.472	4.820	5.522	14.814	74.150	148.300
站 C	30.78	4.430	4.420	4.654	13.324	66.620	133.240

3　研究结论

本研究以华南地区三个典型地铁站为对象，采用现场在线监测的方法，对通风系统过滤段前后 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度及通风风量进行连续监测，定量分析过滤段的过滤效率以及积尘量。其主要结论如下：

（1）三个地铁站过滤段滤网前 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在监测日中均呈现出较为明显的波动，且各站点的变化趋势各异。

（2）过滤段滤网对不同粒径颗粒物的过滤效率差异明显，其对 PM_{10} 的过滤效率显著高于 $PM_{2.5}$，且 PM_{10} 过滤效率的预测效果（R^2 值）也远高于 $PM_{2.5}$。

（3）测试站点滤网表面 PM_{10} 的积尘量在半个月内即可超过 60g/m²，显著高于通风系统风道壁面的沉积量水平，表明滤网在地铁站通风系统中的颗粒物富集最为严重，是亟须重点清洗或更换的关键区域。

参考文献：

[1]　交通运输部.2025 年 12 月城市轨道交通运营数据速报[EB/OL].https://cbgc.scol.com.cn/news/7200858,2026-01-21.

[2] Zhang X, Xu Y, Su J. Temporal and spatial characteristics of particulate matters in metro stations of Shanghai, China[J]. Building and Environment, 2020, 179:106956.

[3] Minguillón M C, Reche C, Martins V, et al. Aerosol sources in subway environments[J]. Environmental research, 2018,167:314-328.

[4] 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.

[5] Wang C, Li X. Characteristics, sources, and improvement measures regarding fine particulate matter in subway station office and the VAC system[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024,31(23):33763-33779.

[6] Considine B, Gallagher J, Kumar P, et al. The impact of street level particulate emissions on the energy performance of roof level building ventilation systems[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023,233:105310.

[7] 王进仕,段逸飞,秦远智,等.含灰湿空气外掠翅片管束积灰和阻力特性实验研究[J].工程热物理学报,2021, 42(1):172-177.

[8] Tang S Z, He Y L, Wang F L, et al. Parametric study on fouling mechanism and heat transfer characteristics of tube bundle heat exchangers for reducing fouling considering the deposition and removal mechanisms[J]. Fuel, 2018,211:301-311.

[9] Liu Z, Deng Y, Ma S, et al. Dust accumulated fungi in air-conditioning system: Findings based on field and laboratory experiments[C]. Building simulation. Tsinghua University Press, 2021,14:793-811.

[10] Zhou B, Zhao B, Tan Z. How particle resuspension from inner surfaces of ventilation ducts affects indoor air quality-A modeling analysis[J]. Aerosol Science and Technology, 2011,45(8):996-1009.

[11] 吴小燕,张峰,刘萍,等.西安市地铁 1 号线运营前后集中空调通风系统卫生状况调查[J].公共卫生与预防医学,2016,27(2):31-33.

[12] 刘金忠,马英顺,纪璎伦,等.沈阳地铁集中空调通风系统卫生学调查[J].环境与健康杂志,2015,32(1):71-73.

[13] Junninen H, Niska H, Tuppurainen K, et al. Methods for imputation of missing values in air quality data sets [J]. Atmospheric Environment, 2004,38(18):2895-2907.

[14] 徐崇.中国住宅室内空气质量长期监测数据 MySQL 数据库[D].天津:天津大学,2018.

[15] Zhang M, Liu J, Liu X, et al. Evaluation and prediction of fibrous filters' operating performance in residential fresh air system[J]. Building and Environment, 2024,255: 111441.

[16] 陈嘉伦.地铁车站通风系统积灰特性与清洗频率研究[D].南京:南京理工大学,2025.