

文章编号: 1671-0444(2018)05-0811-10

上海某地铁站台空气颗粒物粒径分布

吴颖娣¹, 梁 珍¹, 沈恒根¹, 郭二宝¹, 何 垒², 刘文龙²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 浙江 杭州 310004)

摘要: 由于地铁车站站台属于半封闭建筑结构且人员数量非常大, 站内空气质量对公共安全而言是至关重要的。为更好地了解地铁站台颗粒物分布情况, 在2016年8月对上海某地铁站空气质量进行了实地监测, 分析了不同粒径颗粒物在一天内的变化情况及其浓度最高时的颗粒物粒径分布范围。测试结果显示: 站台内粒径为0.23~1.00 μm 的细颗粒物浓度最高; $\text{PM}_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比例高达88%, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度变化和人员数量变化相关; $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度在早高峰时最大, 晚高峰时的浓度低于早高峰。

关键词: 地铁站台; $\text{PM}_{2.5}$; PM_{10} ; 粒径分布测试

中图分类号: TU 993.2 文献标志码: A

Particle Size Distribution of Air Particulate Matter in Shanghai Subway Station

WU Yingdi¹, LIANG Zhen¹, SHEN Henggen¹, GUO Erbao¹, HE Lei², LIU Wenlong²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China;
2. CREEC East China Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

Abstract: The air quality in the station is crucial to public security, as the subway platform is a semi-enclosed building structure and there is a large pedestrian volume. In order to investigate the distribution of particles at the subway platform, a site monitoring of the subway station in Shanghai was carried out in August 2016 to analyze the variation of the particle size in one day and the range of the particle size distribution at the highest concentration. The results show that the concentration of fine particles in the platform with the diameter of 0.23 μm to 1.00 μm is the highest. The proportion of $\text{PM}_{2.5}$ is up to 88% among PM_{10} , and concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} are correlated with the changes of flow density. Besides, the concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} is up to their highest levels at the early peak, and the particles concentration at the late peak is lower than that at the early peak.

Key words: subway platform; $\text{PM}_{2.5}$; PM_{10} ; particle size distribution test

地铁车站的人员数量非常大, 一个车站的小时最大客流量可超过万人。而与此同时, 由于地铁车站站内站厅与站台均属于半封闭的建筑结构, 尤其是站台大部分位于地下二层, 自然通风困难, 室内空气

污染物不容易自然扩散, 均需要采用机械通风空调进行解决。人们在候车时不仅舒适的温湿度很重要, 而且良好的空气品质也至关重要, 而颗粒物的浓度则是地铁站厅和站台空气品质的主要参数之一。

收稿日期: 2017-04-07

作者简介: 吴颖娣(1992—), 女, 安徽蚌埠人, 硕士研究生, 研究方向为建筑环境空气测量控制, E-mail: wuyd978@163.com

梁 珍(联系人), 女, 副教授, E-mail: liangzhen@dhu.edu.cn

PM_{2.5}和PM₁₀的浓度是目前最受关注的参数。其中,PM₁₀代表环境空气中空气动力学当量直径小于等于10 μm的颗粒物,也称可吸入颗粒物,PM_{2.5}代表环境空气中空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒物^[1]。文献[2]研究表明地铁中产生的颗粒物与比其他场合相比有较大的区别。

目前对地铁站厅和站台的室内环境和空气品质的研究除集中在活塞风及地铁候车厅温度场及速度场^[3-6]外,国外学者对地铁站台内部空间的颗粒物分布也做了一些研究。Adams等^[7]对伦敦地铁夏冬季节站台的PM_{2.5}的分布情况及地铁空气化学组成成分进行了研究,结果表明,相比在地上行走的人,搭乘地铁出行的人暴露在颗粒物中的水平高出八倍,却比乘坐公共汽车低一倍左右,而且冬季的颗粒物浓度比夏季的低一些。Aarnio等^[8]认为地铁在运营过程中产生较多小粒径颗粒物。文献[9]研究表明,不同粒径颗粒物的分布与地铁站台的通风系统和列车通过次数有关,并且与地铁站台屏蔽门的数量和开度有关,除了0.3~0.8 μm以外的颗粒物粒径与屏蔽门的数量存在统计学的相关性。文献[10]对墨西哥地铁站的颗粒物浓度和属性进行了试验研究,经现场监测得出PM_{2.5}的浓度范围60~93 μg/m³,比室外高出6%,PM₁₀浓度范围为88~145 μg/m³,比室外高出20%。

近年来,随着我国地铁建设的快速发展,国内一些卫生机构和研究人员也开始对地铁环境中的颗粒物进行关注,北京、上海、广州、深圳等城市的主要地铁线路均进行了一些现场测试及分析^[11]。何生全等^[12]对北京地铁不同环控系统可吸入颗粒物进行研究,结果表明,各环控系统在车辆驶入前后,PM_{2.5}与PM₁₀质量浓度变化趋势几乎一致,且PM₁₀质量浓度总体大于PM_{2.5}质量浓度,站台空气中可吸入颗粒物PM₁₀未超标,而PM_{2.5}超标。严国庆等^[13]对上海人民广场地铁站台的空气颗粒物进行研究,结果表明,在上海地区的地铁安全门系统站台的PM₁₀、PM_{2.5}浓度存在比较明显的超标现象,屏蔽门系统PM₁₀浓度基本没有超过标准值,但PM_{2.5}出现了超标现象,且地铁站台的可吸入颗粒物主要是PM_{2.5}^[13]。针对地铁空气污染状况,樊越胜等^[14]通过对西安地铁环境进行测试,结果表明,地铁站台的PM_{2.5}和PM₁₀的浓度分布具有强烈的相关性($R^2=0.92$, $Q=75$),二者具有共同的来源。

笔者于2016年8月通过对上海市某地铁站进行为期3 d的实时监测,得到了不同粒径颗粒物在1

d内的变化情况及浓度最高的粒径范围。本文研究目的在于反映地铁站台颗粒物的分布情况,为地铁站台空气品质优化提供基础数据。

1 试验监测

1.1 采样地点和时间

实测地铁站是在上海市区繁华地带的某地铁站,客流特点是早高峰出站人数多,晚高峰进站人数多。该地铁站属于地下两层的双层岛式站台,站厅层位于地下一层,站台层位于地下二层。监测地点是在地铁站地下二层站台。该站台采用是屏蔽门系统。站台是一个长158.7 m、宽10 m、高4.4 m的空间。站台配有中央机械通风系统。

监测点设在站台的位置,从长度方向看基本在中部靠近垂直电梯处,宽度方向是离屏蔽门1 m处(人员经常停留区),根据GB/T 17220—1998《公共场所卫生监测技术规范》要求,人群呼吸带范围距地面1.2~1.5 m,故测试点高度选取离地1.2 m。为了避免受送风气流和回风气流影响,尽量避开人流通风道和空调通风口。

采样时间是在2016年的8月,选择工作日,列车正常运行。具体为8月2日(周二)的11:15~17:30,8月3日(周三)的6:50~19:50,8月5日(周五)的9:30~17:30。监测时段基本覆盖了高峰期和非高峰期。根据测试阶段给出的室外气象数据,得出测试时间的室外气象参数如表1所示。

表1 室外气象参数

Table 1 Outdoor meteorological parameters

时间	平均相对温度/°C	平均相对湿度/%
8月2日	32.6	76.9
8月3日	31.8	81.7
8月5日	27.9	87.0

8月3日地铁站小时人流量如图1所示。因地铁站台是人员流动性较大的一个空间,而乘客在站台内停留时间一般仅为列车运行的间隔时间,所以需要小时客流量转化成站内人员数量。测试地铁站在工作日早高峰时间段(7:15~9:00)列车间隔约3 min,在平峰时间段(9:00~17:00)列车间隔约5 min 30 s,在晚高峰时间段(17:00~20:00)约3 min 40 s,而在其他时间段的列车间隔为8~10 min(以上数据从上海地铁官网得出)。根据以上运行间隔,假设小时客流量在对应小时内是均匀进出站,乘客进站停留时间为列车间隔时间,出站的滞留时间需3~5 min,根据小时的进、出站客流量按式

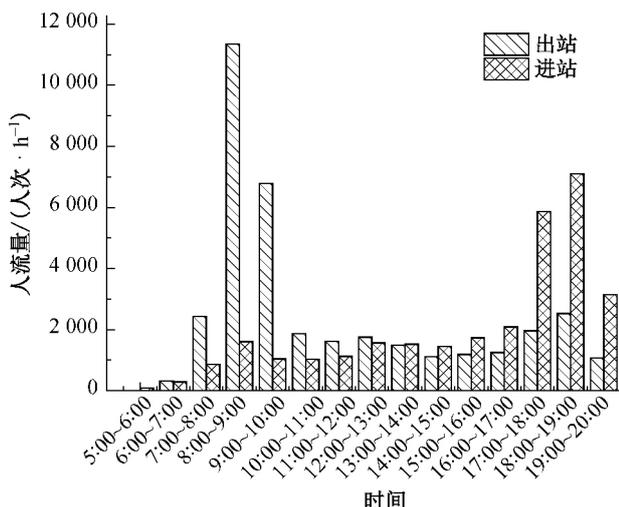


图 1 8月3日地铁站小时客流量

Fig. 1 Hours flow of the subway station on August 3rd

(1) 计算站台人员数量,即将小时客流量换算成等效的人员数量^[15]为

$$G = A_1 \frac{a}{60} + A_2 \frac{b}{60} \quad (1)$$

式中:G 为站台人员数量,个;A₁、A₂ 分别为站台小时进、出站客流量,人次/h;a、b 分别为乘客进、出站的停留时间,min。

运行时段站台人员数量在 3d 内的变化情况如图 2 所示。

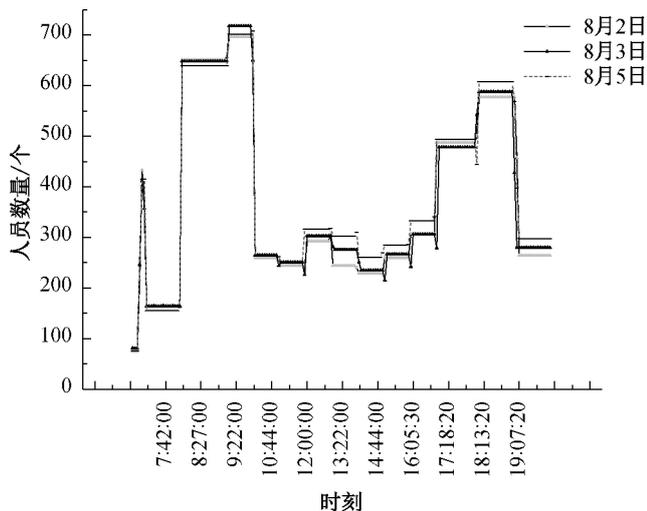


图 2 为期 3 天的站台人员数量随时间变化图

Fig. 2 The number of people on the platform for three days varies with time

1.2 采样仪器

采样仪器选用 Grimm 1.108 型便携式气溶胶光谱仪(德国 Grimm 公司),该仪器可以对 0.23~20.00 μm 颗粒物质量浓度进行监测,数据记录时间

间隔设定为 6 s。Grimm 1.108 型气溶胶光谱仪的测试参数设置如表 2 所示。

表 2 Grimm 1.108 型气溶胶光谱仪的测试参数设置

Table 2 Grimm 1.108 aerosol spectrometer test parameter setting

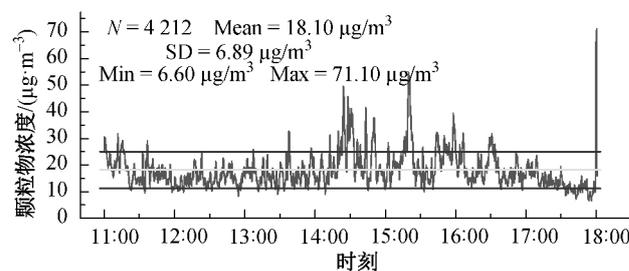
参数	设定范围
采样流量/(L · min ⁻¹)	1.2
取样间隔/s	6
操作温度/°C	0~40
灰尘质量浓度范围/(μg · m ⁻³)	0.1~100 000
粒径通道/μm	0.3/0.4/0.5/0.65/0.8/1/1.6/2/3/4/5/7.5/10/15/20

2 测试结果与分析

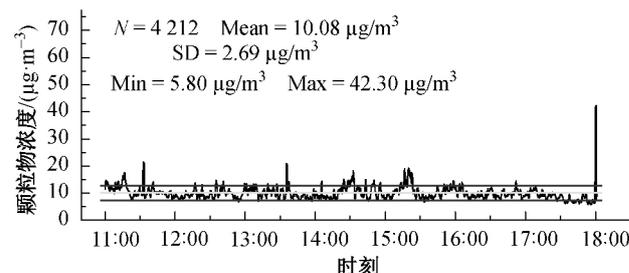
2.1 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 在一天之内浓度变化

本文首先分析了 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度分布,数据运用 Origin 85 软件进行统计学分析。

由于每天的测试时间段不相同,且初步分析数据颗粒物的粒径分布大致相同,因此将 3 d 的数据单独分析。鉴于 8 月 3 日测试的时间段最为完整,基本覆盖了列车从开始运行到早高峰,再经历非高峰时段到晚高峰,故首先详细分析 8 月 3 日的监测数据。8 月 3 日室外颗粒物浓度如图 3 所示。其中,上下两条直线为标准差(SD),表征颗粒物浓度在平均值水平上的离散程度,中间直线为平均值(Mean),表征颗粒物在测试时间段的平均浓度。由



(a) PM₁₀



(b) PM_{2.5}

图 3 8月3日室外 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度的日变化趋势

Fig. 3 Diurnal trend of outdoor PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations on August 3rd

图 3 可知,在测试阶段该地铁站所处的室外空气颗粒物含量相较于 GB 3095—2012《环境空气质量标准》的浓度限值低。

8 月 3 日某地铁站台从列车开始运营到晚高峰的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度特征和变化趋势如图 4 所示。

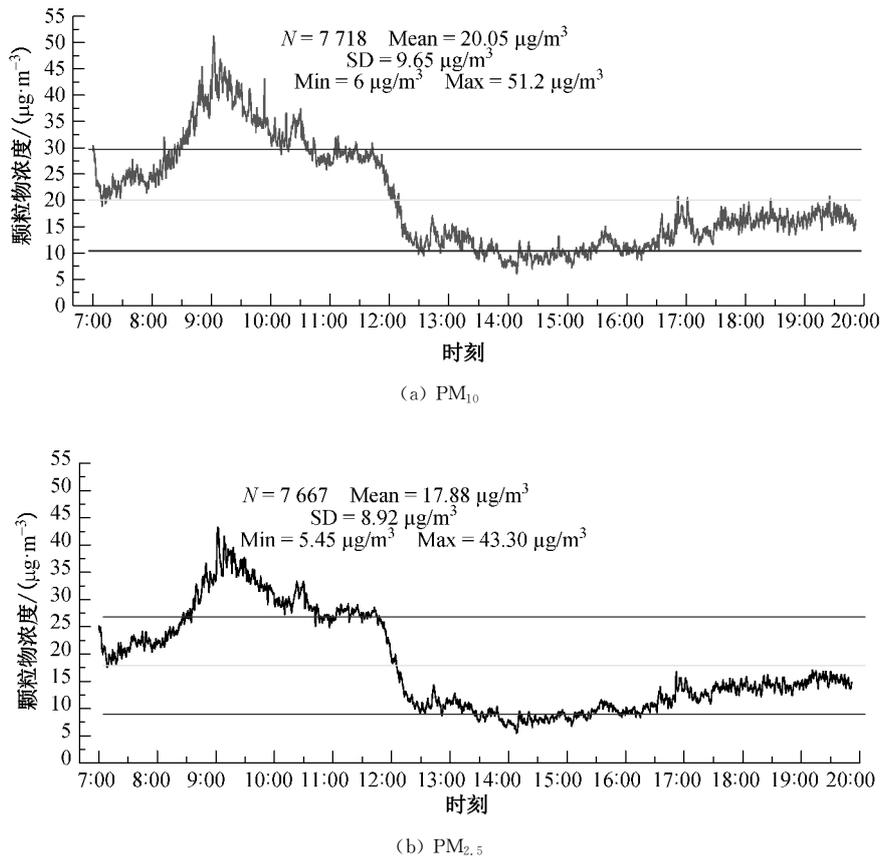


图 4 8 月 3 日地铁站台 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的日变化趋势

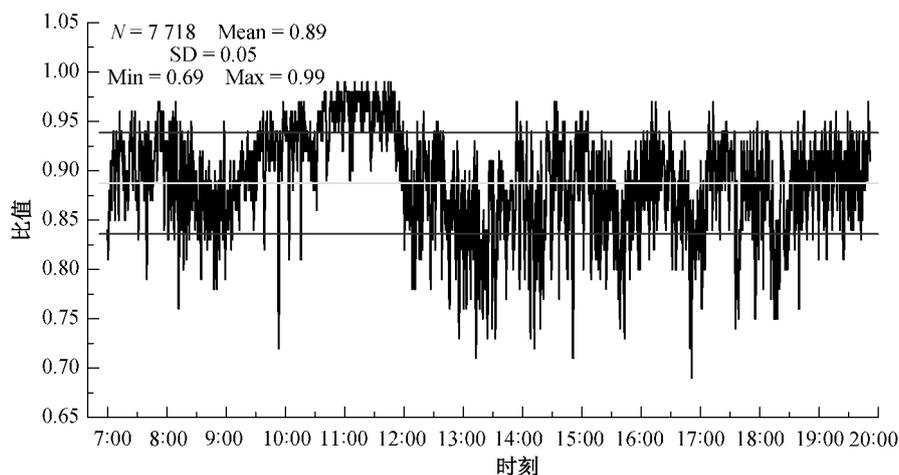
Fig. 4 The diurnal trend of PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration in one subway station on August 3rd

从图 4 中明显看出: $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度变化趋势大致相同,较高浓度的时间段在 7:30~12:00 之间,9:00 左右出现了一个明显的峰值;随着晚高峰到来, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度有增大趋势,但都没有达到早高峰时段浓度的最大值。一天之内,颗粒物浓度波动范围较大,在平均值上的离散程度明显。对应于地铁站台人员数量(见图 2)分析可以看出, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度随人员数量增加而变大,反之,随人员数量减小而变小。

从图 4 可以看出,一天之内 $PM_{2.5}$ 的浓度在 $(17.95 \pm 8.86) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 附近波动, PM_{10} 的浓度为 $(20.11 \pm 9.62) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。为了更好地看出 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比例,绘制了 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中浓度比例图(如图 5 所示),可以看出 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 所占的比例高达 88%,可见地铁站台内部的颗粒物以细颗粒物为主。该结论与其他地铁站的研究结果类

似^[16-18]。GB 50157—2013《地铁设计规范》指出地下车站公共区域空气可吸入颗粒物 PM_{10} 的日平均浓度应低于 $0.25 \text{ mg}/\text{m}^3$ ^[19],可见测试地铁站台的 PM_{10} 的日平均浓度达标。由于 GB50157—2013《地铁设计规范》尚未规定 $PM_{2.5}$ 指标,可以参照 GB 3095—2012《环境空气质量标准》来评定(一级限值是 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$,二级限值是 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)^[1]。而 $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 之间颗粒物的浓度可参照美国环保署制定的《洁净空气法》(标准为 24 h 周期内 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。从测试结果可以看出,被测试站台的空气质量达标。

影响地铁站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的因素有很多,除受引入新风(主要是受外部道路交通的影响^[17])的颗粒物浓度和空调过滤器性能的影响,还有隧道里的空气通过屏蔽门缝隙的透过率、交通和乘客密度^[20]。

图5 8月3日监测结果 $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比例Fig. 5 $PM_{2.5}$ in the proportion of PM_{10} in monitoring results on August 3rd

对比图2和图4可以发现,颗粒物浓度和人员数量都存在早晚两个峰值,可见颗粒物浓度和人员数量是有关系的。但分析显示,早高峰人员数量是晚高峰的1.22倍,而 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在早高峰和晚高峰的比值大约是2.5,也就是说晚高峰的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度远低于早高峰,但是站台人员数量却并没有相差那么大。这一现象说明早高峰的颗粒物浓度除受人员数量的影响,应该还有其他因素影响,而且该影响因素和人员数量有关系。经考察分析,推测可能的原因是:夜晚地铁内的空调通风系统没有开,颗粒物都悬浮在站台空间内,所以早晨站台的背景浓度已较高,故早高峰浓度峰值很高,而白天地铁内机械通风系统一直处于开启的状态,颗粒物不会在空间内堆积,而是通过排风系统被处理,晚高峰之前一段平峰时间颗粒物浓度处于一天之内的最低值,因此晚高峰时颗粒物浓度增长不会到达早高峰时的峰值。

2.2 不同粒径范围浓度监测结果分析

由前面分析可以看出, $PM_{2.5}$ 在 PM_{10} 中所占比例高达80%以上,由此说明小粒径颗粒物更值得关注,且因 PM_{10} 本身包含 $PM_{2.5}$,笼统给出的浓度掩盖了其中不同粒径范围浓度变化的特点,有必要将不同粒径的颗粒物剥离开单独进行分析。粒径为 $2.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒物可以进入鼻腔至中支气管;粒径为 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物进入支气管末端;粒径为 $1.0\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒物就要通过肺泡进入血液系统^[21]。故下面按 $0.23\sim 1.00\ \mu\text{m}$ 、 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 、 $2.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 、 $10.0\ \mu\text{m}$ 以上共4个粒径范围分别进行研究。

4个不同粒径范围的颗粒物浓度分布如图6所示。从图6中可以看出, $0.23\sim 1.00\ \mu\text{m}$ 粒径范围

内的颗粒物浓度最高,其次是粒径范围在 $2.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒物。粒径在 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和大于 $10.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒物浓度较小。粒径范围为 $0.23\sim 1.00\ \mu\text{m}$ 的颗粒物浓度波动幅度较大,颗粒物浓度在平均值上的离散程度较明显,而其他粒径颗粒物的浓度在一天之内变化不明显。

对粒径范围为 $0.23\sim 1.00\ \mu\text{m}$ 而言,颗粒物浓度从早上6:50起逐渐增大到9:00左右达到第一个峰值,之后颗粒物浓度逐渐降低,在下午14:00左右降到最低,之后随着客流量逐渐增大又开始上升,但远低于早高峰的浓度峰值。对应于图2,可以看出粒径为 $0.23\sim 1.00\ \mu\text{m}$ 的颗粒物浓度变化和人员数量变化的规律及幅度相关。这与文献[22-23]得出的地铁站台内无论是细颗粒还是粗颗粒浓度在高峰期均高于非高峰期的结论一致。

在大于 $10.0\ \mu\text{m}$ 的粒径范围内的颗粒物,很多时刻浓度为0。这可能是由于大于 $10.0\ \mu\text{m}$ 的粒径颗粒物是由列车和轨道之间的摩擦产生的,该颗粒物随列车进出站带动隧道里的活塞风流动,当屏蔽门打开进入站台,故出现了一定的间断。

为进一步弄清粒径为 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 颗粒物的浓度分布,故改变纵坐标刻度,结果如图7所示。由图7可以看出,粒径在 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 两个范围内的颗粒物均在9:10左右出现了一个峰值,随后到10:20这一时间段,颗粒物浓度一直降低,在此之后的颗粒物浓度大致保持不变,须注意的是粒径在 $2.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 比 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 范围内的颗粒物浓度稍大。这一结果与文献[24-25]所监测和研究的地铁站台内部颗粒物一天之内分布情况相一致。

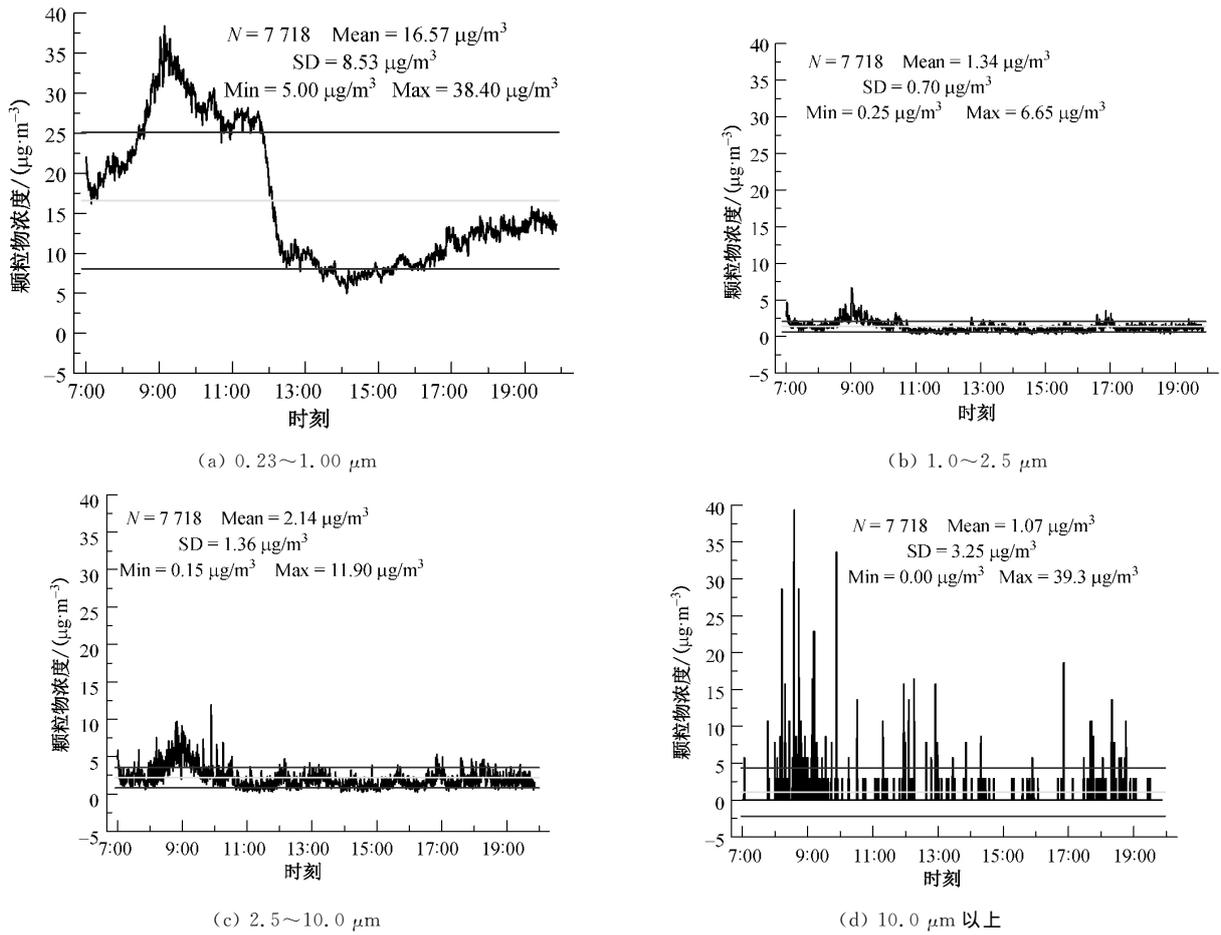


图 6 8月3日 Grimm 1.108 监测的不同粒径分布情况

Fig. 6 Grimm 1.108 monitoring the distribution of different particle size on August 3rd

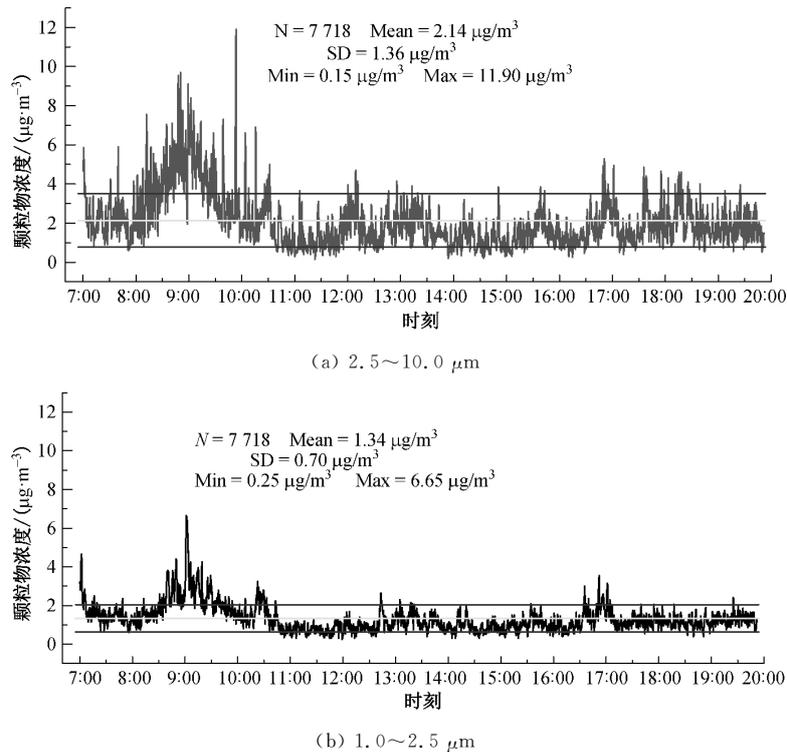


图 7 2.5~10.0 μm 和 1.0~2.5 μm 颗粒物一天之内浓度分布图

Fig. 7 2.5-10.0 μm and 1.0-2.5 μm particles concentration distribution within one day

2.3 其他检测日的颗粒物浓度分析

8月2日监测得出的不同粒径颗粒物分布如图8所示。从上午11:06至下午17:32共监测到3868个样本点。从图8可以看出,不同粒径颗粒物的分布情况和8月3日的监测结果相似,粒径为0.23~1.00 μm的颗粒物最多,其他粒径范围内的颗粒物分布情况不明显,测量时间内分布情况保持不变。所有不同粒径颗粒物都有着基本相同的变化规律,在11:06到12:30这一时间段内,地铁站人流量比较小,颗粒物浓度不断减少并且保持在比较低的值域内,此后一直到了14:10这一时间段,随着人流量的增加,颗粒物的浓度有所增加,在14:10~16:30时间段,颗

颗粒物浓度一直在平稳的范围内,几乎没有增长,直到16:30以后,颗粒物浓度骤然增长到一个最大值,之后再缓慢降低。这种现象主要由客流量的变化而引起的,乘客的流量变化带动空气中颗粒物的流动和扩散,当人流量增加时空气中的颗粒物浓度逐渐升高。

此外,从不同粒径颗粒物的浓度来看,粒径在0.23~1.00 μm的颗粒物所占比例更多,4种粒径范围内的颗粒物变化趋势大致相同,且细颗粒物对周围环境的敏感度比粗颗粒物的高。8月2日监测得出的PM_{2.5}和PM₁₀的浓度分布如图9所示。从图9中可以得出,PM_{2.5}和PM₁₀的变化趋势保持一致,且PM_{2.5}在PM₁₀中占了较高的比例。

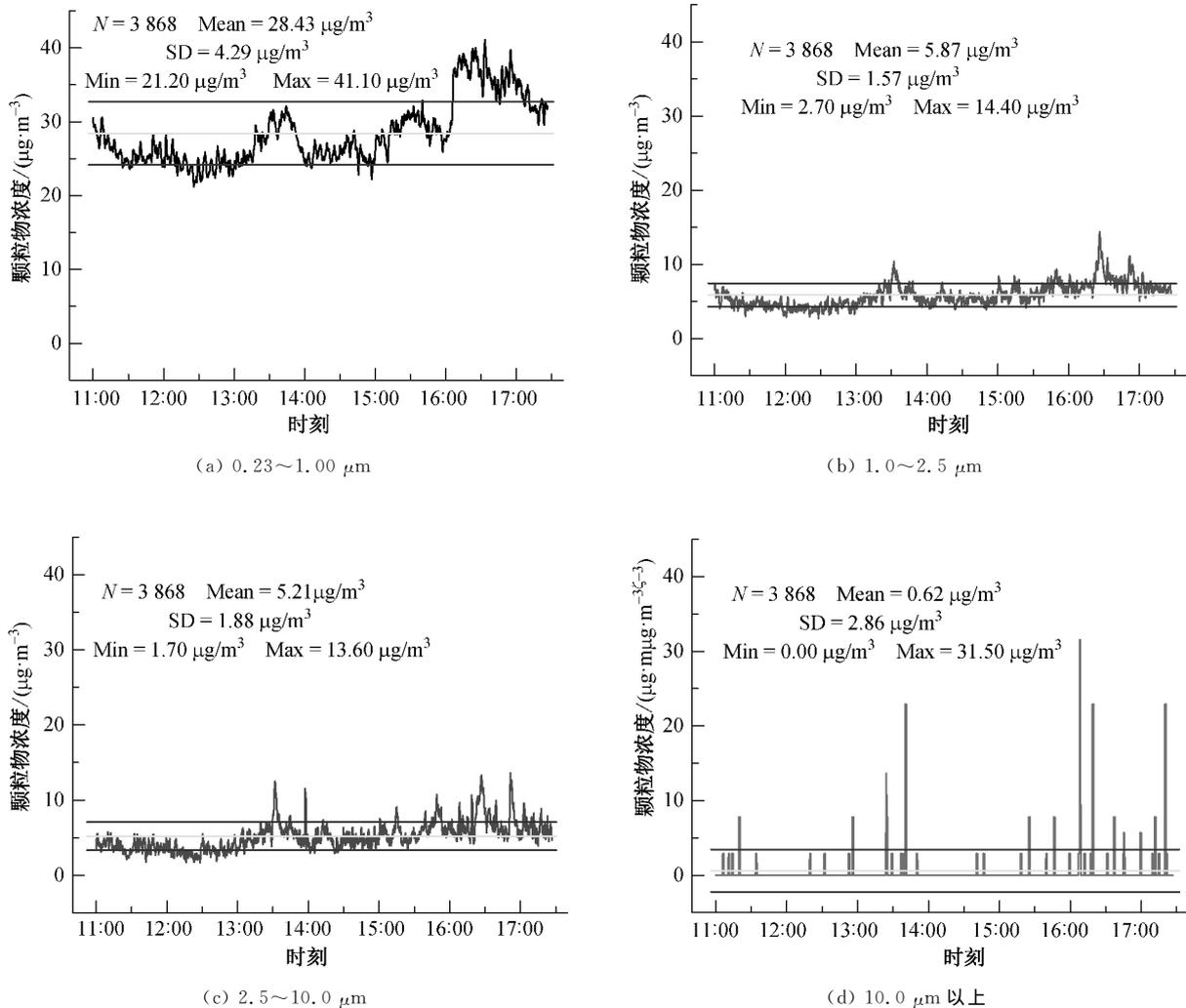


图 8 8月2日 Grimm 1.108 监测的不同粒径分布情况

Fig. 8 Grimm 1.108 monitoring the distribution of different particle size on August 2nd

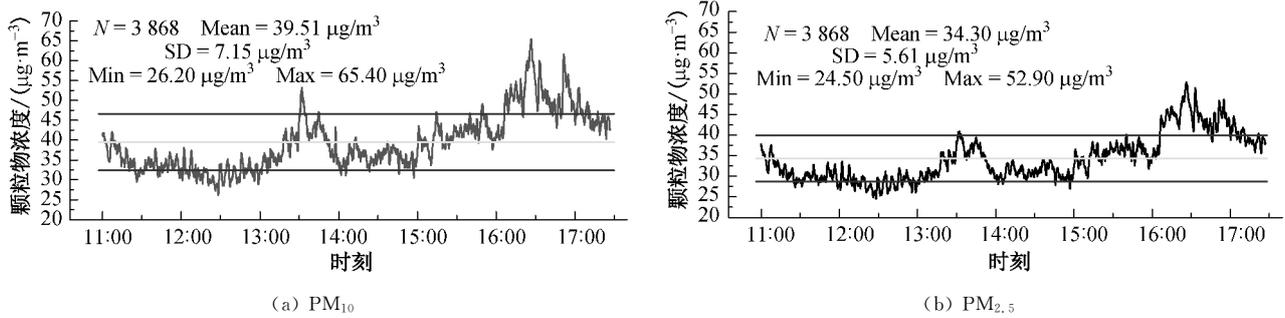


图 9 8月2日 PM₁₀和 PM_{2.5}浓度的日变化趋势

Fig. 9 The diurnal trend of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration on August 2nd

8月5日上午9:29至下午17:27监测得到的4787个样本点所绘制出的不同粒径颗粒物分布图以及PM_{2.5}和PM₁₀的浓度分布图分别如图10和11所示。从图10和11中可知,8月5日颗粒物的浓度

分布情况与前两天的大致保持一致,在此就不多做赘述。8月2日和8月5日的测试结果从一定程度上说明了该地铁站站台的空气品质具有一定的稳定性和基本一致的规律。

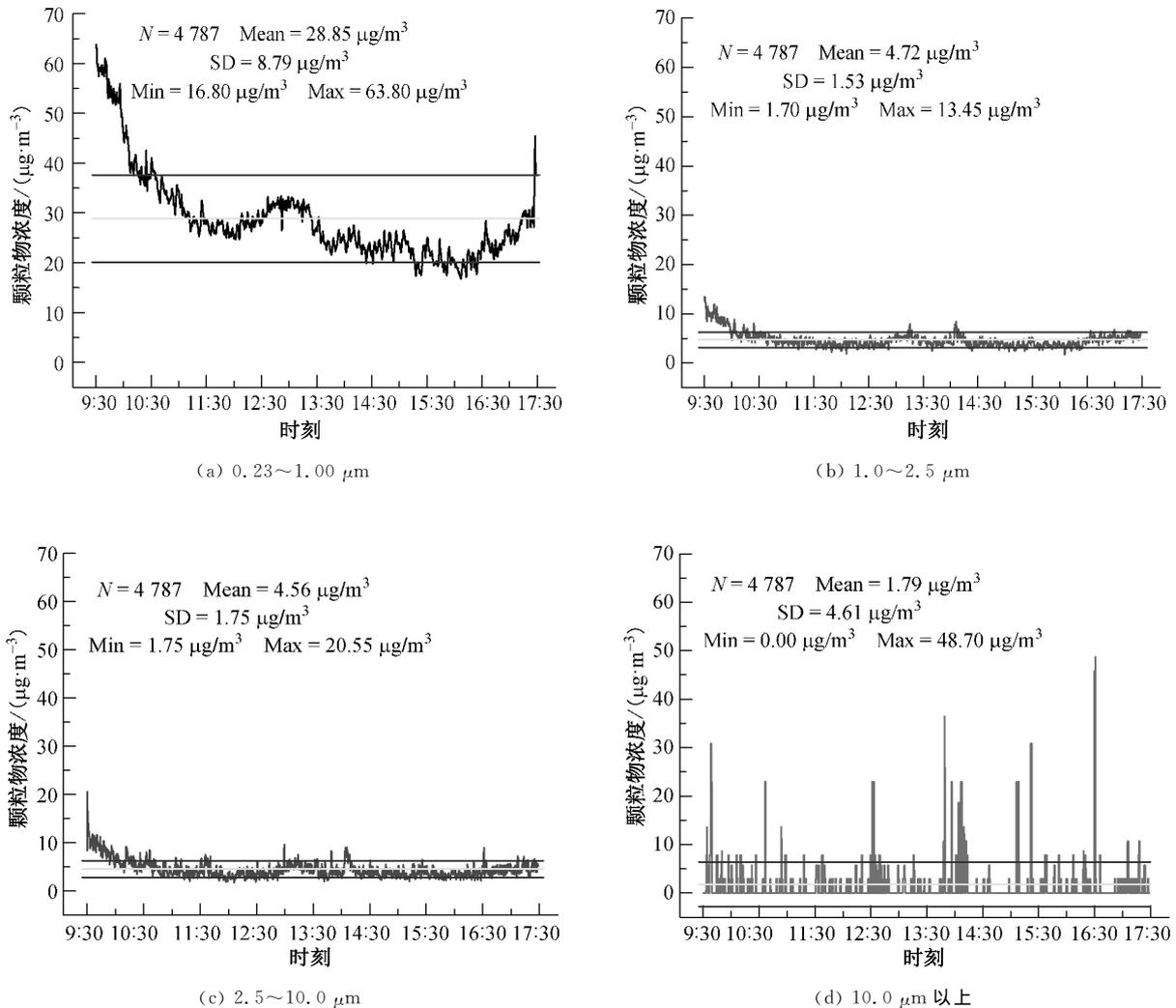
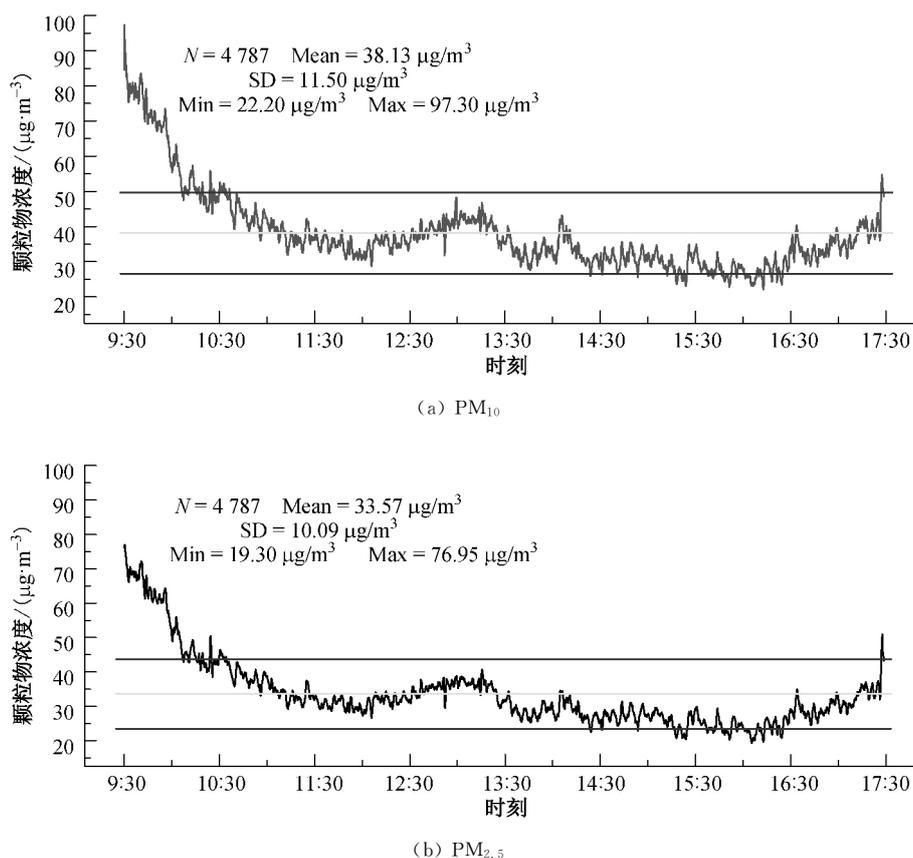


图 10 8月5日 Grimm 1.108 监测的不同粒径分布情况

Fig. 10 Grimm 1.108 monitoring the distribution of different particle size on August 5th

图 11 8月5日 PM₁₀和 PM_{2.5}浓度的日变化趋势Fig. 11 The diurnal trend of PM₁₀ and PM_{2.5} concentration on August 5th

3 结 论

(1) 在室外颗粒物浓度较低的情况下,地铁站台内粒径为 $0.23\sim 1.00\ \mu\text{m}$ 的细颗粒物浓度最高,粒径为 $1.0\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\sim 10.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒物位居其次,且这两种粒径范围的颗粒物浓度相差无几,粒径大于 $10.0\ \mu\text{m}$ 的颗粒物浓度最低且具有间断性。PM_{2.5}在 PM₁₀中占比高达 88%,可见地铁站台内部以细颗粒物为主。

(2) PM_{2.5}和 PM₁₀的浓度变化与人员数量变化相关,早高峰时浓度最大,晚高峰时的浓度低于早高峰。推测原因是夜间空调不运行,如需降低早高峰颗粒物浓度可以选择早开空调进行过滤,降低背景浓度。

(3) 测试地铁站在室外颗粒物浓度较低的情况下站台的空气质量达标,测试地铁的 PM₁₀日平均浓度小于 GB 50157—2013 规定的可吸入颗粒物 PM₁₀的日平均浓度,并且其 PM_{2.5}浓度处于 GB 3095—2012 规定的一级限值内。

参 考 文 献

[1] 环境空气质量标准:GB 3095—2012[S]. 中国环境科学出版社,2012.

- [2] 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.
- [3] 张发勇. 地铁车站通风空调系统优化设计探讨[J]. *制冷与空调*, 2011, 25(3): 232-238.
- [4] 高彩凤. 地铁岛式站台公共区通风空调气流组织方式研究[D]. 天津:天津大学环境科学与工程学院,2007.
- [5] 李莉. 地铁岛式站台公共区流场的动态模拟研究[D]. 天津:天津大学环境科学与工程学院,2007.
- [6] 苏文博. 武汉地铁车站温湿度模拟分析[D]. 武汉:华中科技大学动力与机械学院,2012.
- [7] ADAMS H S, NIEUWENHUIJSEN M J, COLVILE R N, et al. Fine particle(PM_{2.5}) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK[J]. *The Science of the Total Environment*, 2001, 279(1/2/3): 29-44.
- [8] AARNIO P, KOUSA Y T, MAEKELAE T, et al. The concentrations and composition of and exposure to fine particles (PM_{2.5}) in the Helsinki subway system[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(28): 5059-5066.
- [9] KWON S B, NAMGUNG H G, JEONG W, et al. Transient variation of aerosol size distribution in an underground subway station[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2016, 188(6): 2-11.

- [10] MUGICA-ÁLVAREZ V, FIGUEROA-LARA J, ROMERO-ROMO M, et al. Concentrations and properties of airborne particles in the Mexico City subway system[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 49(7): 284-293.
- [11] 胡泽源. 地铁环境中颗粒物污染水平的理论分析及数值模拟研究[D]. 西安: 西安建筑大学环境与市政工程学院, 2014.
- [12] 何生全, 金龙哲, 吴祥. 不同地铁环控系统可吸入颗粒物研究及防治[J]. *中国安全科学学报*, 2016, 26(3): 128-132.
- [13] 严国庆, 赵敬德, 施振扬, 等. 上海人民广场站站空气颗粒物浓度的实测分析[J]. *环境工程*, 2014, 32(s1): 541-545.
- [14] 樊越胜, 胡泽源, 刘亮, 等. 西安地铁环境中 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 CO_2 污染水平分析[J]. *环境工程*, 2014, 32(5): 120-124.
- [15] 吴喜平. 地铁站台应用屏蔽门对空调节电系统的分析[J]. *华北电力*, 2001, 29(2): 20-23.
- [16] CHAN L Y, LAU W L, LEE S C. Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(21): 5831-5840.
- [17] PARK D U, HA K C. Characteristics of PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea[J]. *Environment International*, 2008, 34(5): 629-634.
- [18] HARRISON R M, DEACON A R, JONES M R, et al. Sources and processes affecting concentrations of PM_{10} and $PM_{2.5}$ particulate matter in Birmingham (U K) [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(24): 4103-4117.
- [19] 北京城建设计研究总院有限责任公司, 中国地铁工程咨询有限公司, 上海市隧道工程轨道交通设计研究院, 等. 地铁设计规范(附条文说明): GB 50517-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [20] CHAN L Y, LAU W L, LEE S C. Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(21): 3363-3373.
- [21] 郝吉明. 大气污染控制工程[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [22] 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): 253-261.
- [23] ONAT B, STAKEEVA B. Personal exposure of commuters in public transport to $PM_{2.5}$ and fine particle counts [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2013, 4(3): 329-335.
- [24] KWON S B, JEONG W, PARK D, et al. A multivariate study for characterizing particulate matter(PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1) in Seoul metropolitan subway stations, Korea [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2015, 297: 295-303.
- [25] CUSACK M, TALBOT N, ONDRÁČEK J, et al. Variability of aerosols and chemical composition of PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 on a platform of the Prague underground metro [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, 118: 176-183.

(责任编辑: 杜 佳)

(上接第 791 页)

- [5] QIAO H, GAO D, XIAO X. Numerical simulation for three dimensional spray field of the wet skin-pass mill nozzle[C]// International Conference on Fluid Power and Mechatronics. IEEE, 2011: 123-127.
- [6] NIE B S, MENG J Q, JI Z F. Numerical simulation research of liquid-solid two-phase flow in abrasive water jet nozzle[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2009, 18(2): 157-161.
- [7] 陈亮. 高压水射流扇形喷嘴内外流场仿真分析[D]. 兰州: 兰州理工大学机械电子工程学院, 2010.
- [8] 屈长龙, 王喜顺. 基于 FLUENT 的高压水射流除锈的流场仿真及射流参数优化[J]. *机械与电子*, 2016(2): 24-27.
- [9] 余留芳, 张金阳, 刘志农. 旋转喷头喷射外流场计算流体力学仿真分析[J]. *清洗世界*, 2011(5): 15-28.
- [10] 任小增. 高压水射流清洗用扇形喷嘴的结构及磨损研究[D]. 长沙: 中南大学机电工程学院, 2009.
- [11] 张佳福, 高善兵, 畅通, 等. 基于高压水射流清洗技术的研究[J]. *机电产品开发与创新*, 2011(5): 24-26.

(责任编辑: 杜 佳)