原创精选
Selected article

某市地铁车站 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的时空分布特征

王凯，张霞，张琳，苏瑾

上海市疾病预防控制中心公共服务与健康安全评价所，上海 200336

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.20193

摘要：

[背景] 地铁环境相对密闭，人流量大，容易造成各种污染物累积而导致空气质量恶化，并影响人体健康。我国目前尚未制定相应的卫生标准。

[目的] 了解轨道交通地铁车站 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度，为今后制定卫生管控措施以及为制定标准限值提供建议。

[方法] 选取某市 19 座地铁车站，分别于夏季（2018 年 8 月）、秋季（2018 年 11 月）、冬季（2019 年 1 月）任意一个工作日的 7:00—11:00（含早高峰时段 2 h 和平峰时段 2 h）或 15:00—19:00（含晚高峰时段 2 h 和平峰时段 2 h），同时对车站站台、隧道和室外环境的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 连续监测 4 h。监测点高度为 1.0~1.5 m。使用粉尘浓度测量仪以每 5 min 计数 1 次的频率进行连续监测，并获得 5 min 平均浓度。所得监测结果分别按不同位置、不同季节和不同时段等进行比较，并分析颗粒物浓度区间分布特征，采用时间加权法计算 15 min 暴露浓度。

[结果] 本次所测地铁站台 $PM_{2.5}$ 的质量浓度（下称浓度）范围为 25~275 μg·m^{-3}，M（P_{25}，P_{75}）为 71（54，97）μg·m^{-3}；站台 PM_{10} 的浓度范围为 40~582 μg·m^{-3}，M（P_{25}，P_{75}）为 112（87，151）μg·m^{-3}。隧道区域 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度分别为室外的 1.42 倍和 1.69 倍，站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别为室外的 1.34 倍和 1.58 倍（P<0.05）。夏季站台 $PM_{2.5}$ 的浓度最高，分别是秋、冬季的 1.16 倍和 1.03 倍（P<0.05）；夏季 PM_{10} 浓度也为最高，分别是秋、冬季的 1.20 倍和 1.02 倍（P<0.05）。同时，早高峰时段站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度最高（P<0.05），M（P_{25}，P_{75}）分别为 84（61，114）μg·m^{-3} 和 128（98，174）μg·m^{-3}。若按 15 min 暴露剂量预估，早高峰站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 暴露浓度比同一时段下室外浓度分别高 8.0 μg·m^{-3} 和 40.5 μg·m^{-3}。站台 $PM_{2.5}$ 浓度集中在 0~100 μg·m^{-3} 内，占全部样本的 78.0%；站台 PM_{10} 浓度集中在 0~150 μg·m^{-3} 内，占 74.7%；且站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 具有高度相关性（r=0.927，P<0.001），$PM_{2.5}/PM_{10}$ 值为 0.63。

[结论] 本次所测地铁车站 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均高于室外环境浓度。其中，隧道内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染最严重，该污染可能由列车运行产生大量的颗粒物所致，并会影响站台环境。

关键词：轨道交通系统；地铁站台；细颗粒物；可吸入颗粒物

Spatio-temporal distribution characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in metro stations in a city WANG Kai, ZHANG Xia, ZHANG Lin, SU Jin (Division of Public Health Service and Safety Assessment, Shanghai Municipal Center for Disease Control and Prevention, Shanghai 200336, China)

Abstract:

[Background] Accumulation of various pollutants in confined and crowded metro stations will deteriorate the air quality and affect passengers' health. Sanitary standards for metro carriages have not been established in China.

[Objective] The study is designed to investigate the concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in metro stations, and to provide evidence for proposing sanitary control strategies and standard limits for the metro system.

[Methods] $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations at underground platforms, in tunnels, and outdoors of 19 selected metro stations in a city were measured for continuously 4 h at the same time during 7:00-11:00 (including 2 h of morning rush and 2 h of non-rush) or 15:00-19:00 (including 2 h of evening rush and 2 h of non-rush) of any one workday in summer (August 2018), autumn (November 2018), and winter (January 2019). The height of monitoring points was 1.0-1.5 m from the floor. Continuous monitoring of the pollutants was conducted with a dust concentration

基金项目
上海市地方标准制定项目（沪质技监标［2018］291 号）

作者简介
王凯（1982—），男，学士，高级工程师；
E-mail：wangkai@scdc.sh.cn

通信作者
苏瑾，E-mail：sujin@scdc.sh.cn

利益冲突 无申报
收稿日期 2020-04-24
录用日期 2020-07-30

文章编号 2095-9982(2020)09-0853-05
中图分类号 R128
文献标志码 A

▸引用
王凯，张霞，张琳，等. 某市地铁车站 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的时空分布特征［J］. 环境与职业医学，2020，37（9）：853-857.

▸本文链接
www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20193

Funding
This study was funded.

Correspondence to
SU Jin, E-mail: sujin@scdc.sh.cn

Competing interests None declared
Received 2020-04-24
Accepted 2020-07-30

▸To cite
WANG Kai, ZHANG Xia, ZHANG Lin, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in metro stations in a city[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(9): 853-857.

▸Link to this article
www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.20193

detector which recorded one data point per 5 min, and an average concentration was calculated. The results were compared by different locations, seasons, operation hours, and concentration intervals; the 15 min time-weighted concentration was calculated.

[Results] The concentration of $PM_{2.5}$ ranged from 25 to 275 μg·m^{-3} at underground platforms, and the median (P_{25}, P_{75}) concentration was 71 (54, 97) μg·m^{-3}; while the concentration of PM_{10} at underground platforms ranged from 40 to 582 μg·m^{-3}, and the median (P_{25}, P_{75}) concentration was 112 (87, 151) μg·m^{-3}. The concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in tunnels were 1.42 times and 1.69 times higher than those outdoors, while the concentrations at underground platforms were 1.34 times and 1.58 times higher than those outdoors ($P<0.05$). The concentration of $PM_{2.5}$ at underground platforms in summer were 1.16 times and 1.03 times higher than those in autumn and winter, respectively ($P<0.05$); the concentration of PM_{10} at underground platforms in summer were 1.20 times and 1.02 times higher than those in autumn and winter, respectively ($P<0.05$). The concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in morning rush hours were the highest ($P<0.05$), and the median (P_{25}, P_{75}) values were 84 (61, 114) μg·m^{-3} and 128 (98, 174) μg·m^{-3}, respectively. As estimated by 15 min exposure, the $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations at underground platforms in morning rush hours were 8.0 μg·m^{-3} and 40.5 μg·m^{-3} higher than those outdoors at the same time. The concentration of $PM_{2.5}$ at underground platforms was largely distributed from 0 to 100 μg·m^{-3}, which accounted for 78.0% of total samples, while the concentration of PM_{10} was mainly distributed from 0 to 150 μg·m^{-3}, which accounted for 74.7%. A strong correlation between $PM_{2.5}$ and PM_{10} at underground platforms was observed (r=0.927, $P<0.001$), and the $PM_{2.5}$/PM_{10} ratio was 0.63.

[Conclusion] The concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} measured in selected metro stations are higher than those outdoors. $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution in tunnels are most serious, which might be caused by the emissions from the metro train system and could adversely affect the platform environment.

Keywords: metro system; metro platform; fine particulate matter; inhalable particulate matter

城市轨道交通（地铁）作为一种快速、便捷的运输方式，已然成为各国缓解城市交通压力的首选交通工具[1]。然而地铁站台内空间相对密闭，客流量大，室内外空气无法有效流通，各种污染物容易聚集并造成室内空气质量恶化。颗粒物是地铁环境中的主要污染物之一。空气中的细颗粒物（fine particulate matter，$PM_{2.5}$）和可吸入颗粒物（inhalable particulate matter，PM_{10}）与医院病人就诊率、呼吸系统疾病发病率、心脏病发病率和死亡率之间均存在着显著关联[2-3]。因此，乘客频繁暴露于颗粒物质量浓度（后称浓度）较高的地铁环境中，无论时间长短，都可能遭遇健康问题的困扰[4]。

目前，除韩国、中国台湾等专门制定了地铁环境颗粒物的卫生标准，其他国家和地区尚未制定专门的标准限值[5-6]。我国大陆仅GB 50157—2013《地铁设计规范》规定了PM_{10}限值为250 μg·m^{-3}，但这一标准参考的是1996年国家环保标准的限值，GB 3095—2012《环境空气质量标准》制定的新浓度限值则严于250 μg·m^{-3}[7-8]。

因此，本研究通过监测分析地铁车站环境$PM_{2.5}$和PM_{10}的浓度水平及变化规律，为轨道交通环境颗粒物的卫生管控与卫生标准限值的制定提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 车站选择和布点

至2018年，某市共有地下车站约370座，本次研究按地下车站总数的5%抽样，即19个车站作为监测对象。同时，根据地下车站网状分布的特点，以城市中心为中心点，从中心向东南西北等8个不同方位做放射线，并分别在距离中心4 km和8 km处设一个监测对象。若同一监测对象内相邻车站较多时，则优先选择运行时间较长、客流较大的车站。同时，为避免不同车站建筑结构对监测结果的影响（目前车站主要采用岛式，少数车站为侧式结构），本研究统一选择岛式车站。此外，考虑到中心点换乘线路较为集中，客流量比较大，且车站面积大，故拟在中心点选择3个车站作为监测对象。

根据调查，由于乘客在站厅的逗留时间较短，而在站台等候列车逗留的时间相对较长，且站台较站厅位于地下更深的区域，空间更为封闭，污染更为严重，对人群健康的影响更大。因此，本研究重点监测站台环境的$PM_{2.5}$和PM_{10}浓度。在所选的车站站台中心区域设置1个监测点，并在室外和隧道区域分别设置1个对照点（见图1）。其中，室外对照点位于地铁车站进风口上风向5~10 m以外的空旷区域，隧道对照点位于车站上行方向（根据地铁线路规定）端头门内，且距离端头门前方5~10 m处。如条件无法满足，则将隧道参照点设置于隧道风井区域。监测点高度设置为

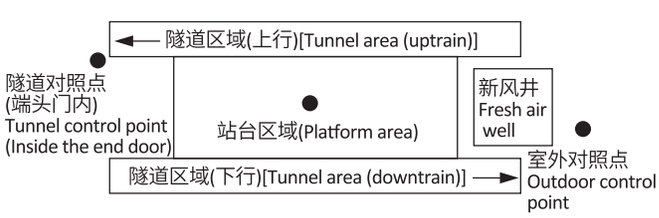


图1 地铁监测点设点

Figure 1 Monitoring points in the metro system

1.0~1.5 m，尽可能靠近人员呼吸带区域，并避开通风口和人行通道区域等。每个监测点同时设置 2 台颗粒物监测仪，分别监测 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度。

1.2 监测时间

根据调查，目前地铁运营公司按照不同季节的气候特点，采取不同的空调通风系统运行模式进行车站环境的通风换气。因此，本研究选择夏季、秋季、冬季 3 个季节进行监测（春季与秋季过渡季节采用相同的空调通风运行模式）。每个车站分别于夏季（2018 年 8 月）、秋季（2018 年 11 月）和冬季（2019 年 1 月），随机选择一个工作日实施监测。每个车站的监测时间为同一个工作日内的早高峰（7:00—9:00）和平峰时段（9:00—11:00），或晚高峰（17:00—19:00）和平峰时段（15:00—17:00），连续监测 4 h。

1.3 监测仪器

本次监测采用朗亿 LPM-1000 型数字粉尘浓度测量仪，分别配置 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 切割器，并自带数据存储功能。仪器最小分辨率为 1 μg·m^{-3}，测量精度≤ ±5%，每隔 5 min 可读取一个指示值或平均值，可连续监测 4 h。监测前，将监测仪置于实验舱内进行校准，现场测量前根据仪器说明书要求进行零点校正。

1.4 统计学分析

本研究采用 SPSS 21.0 统计软件进行数据统计与分析。浓度采用 M（P_{25}，P_{75}）或最小值（Min）~ 最大值（Max）表示，计数资料采用百分比表示。采用 Shpiro-Wilk 检验法对数据的正态性进行检验，数据检验为非正态分布时，采用 Kruskal-Wallis H 秩检验对数据进行多重比较。以每 15 min 为一个区间，分别计算 15 min 内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的时间加权平均暴露浓度，同时采用二分类非条件 logistic 回归分析 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 之间关系。采用 Spearman 等级相关分析数据相关性。检验水准 α=0.05。

2 结果

2.1 地铁不同区域的 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度特征

地铁车站不同区域 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 的监测结果见表 1。站台、隧道及室外对照点 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的监测浓度呈非正态分布（P<0.001）。隧道 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度中位数分别是室外对照点的 1.42 倍和 1.69 倍，而站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 分别是室外对照点的 1.34 倍和 1.58 倍（P<0.05）。

2.2 地铁站台不同时间的 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度特征

2.2.1 不同季节变化特征 车站站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在每个季节均呈非正态分布（P<0.001）。比较不同季节间数据，结果显示夏季站台 $PM_{2.5}$ 浓度均高于秋、冬季，且夏季浓度中位数分别是秋季和冬季的 1.16 倍和 1.03 倍（P<0.05）；夏季站台 PM_{10} 浓度均高于其他两个季节，且夏季浓度中位数分别是秋季和冬季的 1.20 倍和 1.02 倍（P<0.05）。见表 2。

2.2.2 不同运行时段的变化特征 车站站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在运行时段上均呈非正态分布（P<0.001），且站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均随着时间推移而呈现出明显的变化趋势。不同运行时段 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度差异具有统计学意义，早高峰时段均最高（P<0.05），见表 2。乘客在站台停留时间一般为 3~5 min，如遇地铁早高峰拥挤时，乘客停留时间会延长至 10~15 min 左右。根据乘客停留时间，采用时间加权方法预估早高峰期间 15 min 短时间的暴露浓度，可以发现车站内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的最大暴露浓度分别为 92.8、149.6 μg·m^{-3}，同时段室外浓度为 84.8、109.1 μg·m^{-3}，前二者比后二者分别增加了 8.0、40.5 μg·m^{-3}。

表 1 地铁车站不同监测点 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度

Table 1 Concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in different monitoring points of the metro system

测点位置 Measuring site	实测样本数 Number of samples（n）	$\rho_{PM_{2.5}}$/（μg·m^{-3}）			$\rho_{PM_{10}}$/（μg·m^{-3}）		
		M	P_{25}~P_{75}	Min~Max	M	P_{25}~P_{75}	Min~Max
站台 Underground platform	6810	71	54~97	25~275	112	87~151	40~582
隧道 Tunnel	6802	75	58~111	22~236	120	83~186	20~567
室外对照点 Outdoor control	6802	53	37~190	9~513	71	49~135	10~1323

表 2 不同季节、不同时段地铁站台 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度

Table 2 Concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at underground platforms of the metro system in different seasons and operating hours

时间 Time	样本数 Number of samples（n）	$\rho_{PM_{2.5}}$/（μg·m^{-3}）			$\rho_{PM_{10}}$/（μg·m^{-3}）		
		M	P_{25}~P_{75}	Min~Max	M	P_{25}~P_{75}	Min~Max
季节（Season）							
夏季（Summer）	2264	79	59~106	27~275	127	98~173	43~374
秋季（Autumn）	2302	68[a]	49~89	25~171	108[a]	82~140	40~248
冬季（Winner）	2244	70[ab]	54~97	31~271	106[ab]	85~147	52~582
时段（Time interval）							
早高峰 Morning rush hours	1680	84	61~114	29~275	128	98~174	53~582
平峰 Non-rush hours	3450	67[c]	51~93	25~203	107[c]	82~143	40~374
晚高峰 Evening rush hours	1680	71[c]	56~95	29~157	111[cd]	93~146	57~213

［注］a、b：与夏季、秋季相比，P<0.05；c、d：与早高峰、平峰相比，P<0.05。

［Note］a, b: Compared with summer and autumn, P<0.05; c, d: Compared with morning rush hours and non-rush hours, P<0.05.

2.3 地铁车站 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度区间分布

对车站站台区域的颗粒物监测数据以每 25 μg·m^{-3} 为区间跨度，统计颗粒物浓度分布特征，见表 3。$PM_{2.5}$ 数据表明，浓度分布在 >50~75 μg·m^{-3} 区间范围的最高，占全部监测结果的 34.9%；分布在 0~100 μg·m^{-3} 浓度范围内的 $PM_{2.5}$ 则占 78.0%。PM_{10} 分布在 >75~100 μg·m^{-3} 区间范围的比例最高，占全部结果的 23.4%；分布在 0~150 μg·m^{-3} 浓度范围内的 PM_{10} 占 74.7%。

分析被测车站站台同一时间、同一位置 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的关联性，发现站台的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度具有高度相关性（r=0.927，P<0.001）。采用线性回归分析可知站台 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 值达到 0.63（t=2.074，P=0.038）。

表 3 地铁站台 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 浓度区间分布

Table 3 Concentration distributions of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at underground platforms of the metro system

质量浓度 /（μg·m^{-3}）Mass concentration/（μg·m^{-3}）	$PM_{2.5}$		PM_{10}	
	样本数 Number of samples（n）	构成比 /% Proportion/%	样本数 Number of samples（n）	构成比 /% Proportion/%
0~	4	0.1	0	0.0
>25~	677	19.9	17	0.5
>50~	1 189	34.9	486	14.3
>75~	788	23.1	798	23.4
>100~	401	11.8	745	21.9
>125~	221	6.5	500	14.7
>150~	89	2.6	360	10.6
>175~	27	0.8	214	6.3
>200	9	0.3	285	8.4
合计（Total）	3 405	100.0	3 405	100.0

3 讨论

与世界各地的地铁系统相比，本研究车站 $PM_{2.5}$ 平均浓度水平与巴黎地铁测得浓度（66 μg·m^{-3}）较为接近，但比中国台北地铁浓度（35 μg·m^{-3}）高，比首尔（129 μg·m^{-3}）低[4, 9-10]；车站 PM_{10} 平均浓度水平和布拉格地铁浓度（103 μg·m^{-3}）接近，但高于中国台北地铁（51 μg·m^{-3}），低于布达佩斯地铁（180 μg·m^{-3}）[10-12]。有学者认为，世界各地地铁系统颗粒物浓度的差异变化，可能与地铁环境、使用年限、列车制动系统和空调通风系统等不同有关，也可能受测量时间、地点、季节、设备和室外气候因素等的影响[13-14]。但是无论受哪种影响，罗马、斯德哥尔摩、纽约等世界各地地铁系统的颗粒物浓度基本处于同一个波动范围内（50~450 μg·m^{-3}）[4, 9-12, 15-18]。而本次监测获得的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 结果也处于这个范围内。

环境 $PM_{2.5}$ 的限值主要采用世界卫生组织制定的 75 μg·m^{-3}，但该限值不适用于发展中国家，且有专家表示世界卫生组织需要重新考虑对 $PM_{2.5}$ 的暴露风险证据进行审查，尤其是短期暴露的有关证据，因为新出现的证据表明，短时间暴露也会对健康造成不利影响[19-20]。我国地铁现行的 PM_{10} 浓度限值为 250 μg·m^{-3}，韩国为 150 μg·m^{-3}，而本次监测站台 PM_{10} 浓度则集中分布于 0~150 μg·m^{-3} 范围内，表明前者的限值较宽松。$PM_{2.5}$ 集中分布在 0~100 μg·m^{-3} 浓度区间内，约占检测总数的 80%，且站台 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 的占比分布较为稳定。因此，结合现有通风净化技术、隧道污染情况、颗粒物分布特征等因素，建议 $PM_{2.5}$ 的限值可设置为 100 μg·m^{-3}，PM_{10} 限值设置为 150 μg·m^{-3}。待日后地铁通风净化技术得到提升，且隧道颗粒物污染进行有效控制后，再进一步提升 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的卫生要求。

本次研究发现隧道内颗粒物的污染最为严重，站台颗粒物浓度与隧道较为接近，且隧道和站台颗粒物浓度均高于室外环境。这些污染可能是地铁列车在隧道内运行时，导电轨和电极、制动块、铁轨和车轮之间的机械磨损等产生大量的颗粒物所致[21]。据北京地铁 1、2 号线调查，每年产生的颗粒物高达 1 700 kg[22]。由于站台屏蔽门存在渗透风现象，会导致 $PM_{2.5}$ 渗透至站台[23]，且现有空调通风系统又无法有效去除空气中 $PM_{2.5}$，进而影响车站环境的 $PM_{2.5}$ 浓度。同时，从现有通风井设置的情况看，隧道内 $PM_{2.5}$ 也无法有效排出至室外。按季节分析，夏季车站站台 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度偏高，这可能与夏季地铁空调通风系统的运行方式以及地铁内湿度有关。一方面，夏季因节能原因，地铁没有采用全新风运行方式，不利于颗粒物的去除。另一方面，本次采用的光散射测量法受环境湿度的干扰较大，当环境湿度大于 60% 时，测量的颗粒物浓度容易高估，且湿度越大则结果偏高程度越明显[24-25]。而本次监测时也存在夏季湿度比秋、冬季高的情况。此外，站台颗粒物浓度随客流变化而产生一定波动规律，即颗粒物浓度随客流量增加而上升，反之亦然。预估乘客在地铁车站的暴露量时，发现高峰时段 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 15 min 最大暴露浓度分别比对应时段室外浓度高 8.0 μg·m^{-3} 和 40.5 μg·m^{-3}。值得注意的是，$PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度每增加 10 μg·m^{-3}，人群的呼吸系统疾病死亡率会分别增加 1.43% 和 0.65%[26]。

本研究还发现地铁站台中的 $PM_{2.5}$ 占据了 PM_{10} 的主要部分。由于 $PM_{2.5}$ 密度比 PM_{10} 小，因此在空气停留时间更长。目前地铁空调通风系统主要采用初效过滤器，该过滤器仅能够过滤空气中粗颗粒，对 $PM_{2.5}$ 的

去除效果较差，也导致了密闭环境中 $PM_{2.5}$ 大量聚集。

综上所述，本研究显示地铁颗粒物污染主要来源于隧道，列车运行时产生的大量颗粒物、客流量增大和不利的通风条件也会影响颗粒物浓度。因此，今后建造地铁时，应考虑设置更高效率的空气过滤器单元或装置，增加室内通风换气，加强环境清洁等措施，来降低车站内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度。

参考文献

[1] 严国庆，赵敬德，施振扬，等. 上海人民广场站站台空气颗粒物浓度的实测分析 [J]. 环境工程，2014，32 (S1)：541-543，579.

[2] 姜斌彤，沈叶民. 杭州市大气能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度的关系 [J]. 资源节约与环保，2015 (4)：105-106，113.

[3] ULIRSCH G V，BALL L M，KAYE W，et al. Effect of particulate matter air pollution on hospital admissions and medical visits for lung and heart disease in two southeast Idaho cities [J]. J Exp Sci Environ Epidemiol，2007，17 (5)：478-487.

[4] KIM K H，HO D X，JEON J S，et al. A noticeable shift in particulate matter levels after platform screen door installation in a Korean subway station [J]. Atmos Environ，2012，49：219-223.

[5] 실내공기질관리법시행규칙 [A/OL]. [2020-04-01]. http://www.law.go.kr/.

[6] 室内空气质量标准草案总说明 [A/OL]. [2020-04-01]. http://www.docin.com/p-615388610.html.

[7] 地铁设计规范：GB 50157—2013 [S]. 北京：中国建筑工业出版社，2013.

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

[9] RAUT J C，CHAZETTE P，FORTAIN A. Link between aerosol optical，microphysical and chemical measurements in an underground railway station in Paris [J]. Atmos Environ，2009，43 (4)：860-868.

[10] CHENG Y H，LIN Y L，LIU C C. Levels of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in Taipei rapid transit system [J]. Atmos Environ，2008，42 (31)：7242-7249.

[11] BRANIŠ M. The contribution of ambient sources to particulate pollution in spaces and trains of the Prague underground transport system [J]. Atmos Environ，2006，40 (2)：348-356.

[12] SALMA I，WEIDINGER T，MAENHAUT W. Time-resolved mass concentration，composition and sources of aerosol particles in a metropolitan underground railway station [J]. Atmos Environ，2007，41 (37)：8391-8405.

[13] KIM K Y，KIM Y S，ROH Y M，et al. Spatial distribution of particulate matter (PM_{10} and $PM_{2.5}$) in Seoul Metropolitan Subway stations [J]. J Hazard Mater，2008，154 (1/2/3)：440-443.

[14] TING Q，GUANG L X，YI Z，et al. 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.

[15] RIPANUCCI G，GRANA M，VICENTINI L，et al. Dust in the underground railway tunnels of an Italian town [J]. J Occup Environ Hyg，2006，3 (1)：16-25.

[16] JOHANSSON C，JOHANSSON P Å. Particulate matter in the underground of Stockholm [J]. Atmos Environ，2003，37 (1)：3-9.

[17] WANG X，GAO H O. Exposure to fine particle mass and number concentrations in urban transportation environments of New York City [J]. Trans Res Part D：Trans Environ，2011，16 (5)：384-391.

[18] MARTINS V，MORENO T，MINGUILLÓN M C，et al. Exposure to airborne particulate matter in the subway system [J]. Sci Total Environ，2015，511：711-722.

[19] WHO Working Group. Health aspects of air pollution with particulate matter，ozone and nitrogen dioxide [R]. Copenhagen：WHO，2003.

[20] WHO. Available evidence for the future update of the WHO Global Air Quality Guidelines (AQGs) [R]. Bonn：WHO，2015.

[21] 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]. J Hazard Mater，2015，297：295-303.

[22] 陈韶章，孙钟权，王爱仪，等. 地下铁道站台屏蔽门系统 [M]. 北京：科学出版社，2005：9.

[23] TERESA M，CRISTINA R，MARIA C，et al. The effect of ventilation protocols on airborne particulate matter in subway systems [J]. Science of the Total Environment，2017 (584/585)：1317-1323.

[24] 徐春雨，王秦，李娜，等. 大气 $PM_{2.5}$ 浓度的光散射测定法及湿度校正 [J]. 环境与健康杂志，2015，32 (2)：151-154.

[25] DAY D E，MALM W C，KREIDENWEIS S M. Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity [J]. J Air Waste Manage Assoc，2000，50 (5)：710-716.

[26] 谢鹏，刘晓云，刘兆荣，等. 我国人群大气颗粒物污染暴露-反应关系的研究 [J]. 中国环境科学，2009，29 (10)：1034-1040.

（英文编辑：汪源；责任编辑：陈姣）