

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.04.006

北京某地铁车站细颗粒物分布特性研究

潘嵩^{1,2}, 王洪伟², 王新如², 谷雅秀³, 裴斐²

(1. 北京工业大学 绿色建筑环境与节能技术北京市重点实验室, 北京 100124;
2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124; 3. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

摘要: 为了解地铁环境细颗粒物(PM_{2.5})污染状况,本文对北京地铁车站 PM_{2.5} 的浓度进行测试,对北京地铁车站 PM_{2.5} 分布规律及其浓度的影响因素进行研究。选择复杂的换乘车站—宋家庄车站,针对地铁的公共区(站厅、站台)采用多测点连续测试的方式进行测试。分析结果表明,在室外环境 PM_{2.5} 污染程度低于重度污染的情况下,地铁车站 PM_{2.5} 浓度高于室外;列车的频率(活塞风)会造成车站公共区的 PM_{2.5} 浓度呈现周期性变化。相关性分析表明,地铁站内外细颗粒物之间的相关性显著,颗粒物(PM_{2.5} 与 PM₁₀)之间的相关性显著。对地铁站内细颗粒物影响颗粒物浓度的相关因素进行分析,明确了客流量、车站温湿度对地铁内 PM_{2.5} 浓度的影响不显著。

关键词: 地铁车站; 细颗粒物(PM_{2.5}); 分布; 影响因素

中图分类号: TU248.2

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)04-0415-07

Characteristics of PM_{2.5} distribution in a subway station in Beijing

PAN Song^{1,2}, WANG Hongwei², WANG Xinru², GU Yaxiu³, PEI Fei²

(1. Beijing Key Laboratory of Green Built Environment and Energy Efficient Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: To get acquainted with the pollution condition of fine particle matter (PM_{2.5}) in the metro environment, PM_{2.5} distribution and impact factors have been investigated by using the onsite test results obtained from Songjiazhuang Subway Station, a complicated three-transfer metro station in Beijing. A series of time-continuous and multi-point measurement is conducted in both the hall and the platform of this station. The results show that PM_{2.5} concentration in metro station is higher than that of the outdoors when outside PM_{2.5} concentration is beneath the level of severe pollution. The PM_{2.5} concentration in metro station presents some periodic changes, which is considered to be caused by the frequency of trains' intersection (the piston effect). According to the correlation analysis, a strong relationship is found between the inside and outside PM_{2.5} concentrations, as well as the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ in station. It is clear that passenger flow, station temperature and humidity have no significant effect on the PM_{2.5} concentration in the metro station.

Key words: subway station; PM_{2.5}; concentration distribution; impact factor

研究表明地铁站内污染物暴露水平相比于其他环境要高很多,与地面街道、市中心繁华街道相比,地铁内细颗粒物浓度要高数倍,并且与室外污染物颗粒相比,地铁中的污染物颗粒更具遗传毒性,对身体更容易造成较大的危害^[1],同时人们在地铁中度过的时间也越来越长。据美国环保署(EPA)早在

1993—1994 年间对近万人的跟踪调查数据显示,人们平均有 7.2% 的时间在地铁中度过^[2]。PM_{2.5} 污染造成的经济损失越来越大,因此地铁车站内的空气品质尤其是细颗粒物污染受到国内外许多学者的高度关注。

迄今,国内外学者对不同的地铁车站的 PM_{2.5}

收稿日期: 2017-03-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578011);国家自然科学基金重大资助项目(51590912)

作者简介: 潘嵩,男,博士,副教授,研究方向为地铁环控与空气品质。E-mail:pansong@bjut.edu.cn

通讯作者: 谷雅秀,女,博士,副教授,研究方向暖通空调与制冷系统中的强化传热传质。E-mail:guyx2007@chd.edu.cn

浓度及其影响因素进行了研究。目前国外已有的研究涵盖的地点主要有纽约^[3-4]、赫尔辛基^[5]、韩国首尔市^[6]、瑞典斯德哥尔摩的奥丁站^[7]、巴塞罗那^[8]、德黑兰^[9]、洛杉矶^[10]，中国现有的研究主要有上海^[11]、台北^[12]、西安^[13]。主要的研究方法是对地铁环境不同位置进行测试，分析其浓度分布以及物理特性，使得人们对地铁环境 PM2.5 有进一步认识。但是，现有研究主要集中在 PM2.5 浓度以及地铁内分布规律等方面的研究，测试方法主要采用间歇测试。人们对于地铁 PM2.5 的特性认识不足，对其来源以及产生方式没有确定的结论。这些方面的研究仍需要大量前期数据支撑，来进一步的研究和测试。

对于不同类型的地铁车站仍需要进一步的研究和数据积累。本文采用现场多测点连续实地测试的方法，弥补了前期研究间歇测试造成的数据不连续且存在时间差的缺陷。对北京地铁车站—宋家庄站进行测试，针对大型复杂换乘站，对该车站的 PM2.5 分布规律特性进行研究，主要分析 PM2.5 的浓度及其浓度变化的影响因素。本文对于人们对地铁车站环境中 PM2.5 污染现状以及 PM2.5 浓度影响因素的进一步认识具有重大意义，对今后地铁 PM2.5 防治研究提供可靠的参考价值和数据支持。

1 测试内容和方法

1.1 测试车站

宋家庄为三线换乘车站，结构复杂，是重要的交通枢纽站，其设计满足高峰小时客流集散量 71 900 人，出入站客流量 12 375 人，地铁出入公交枢纽客流量 8 184 人，车站存在 9 个出口，车站结构见图 1。

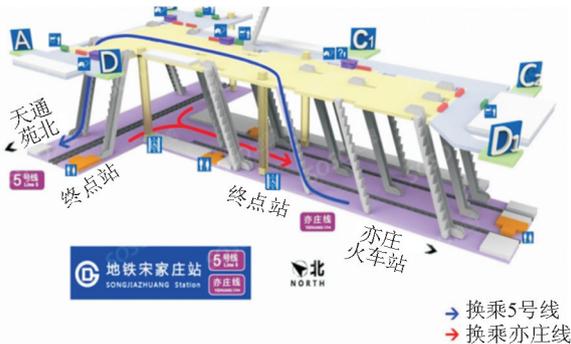


图1 宋家庄站5号线和亦庄线换乘

Fig.1 Songjiazhuang Line 5 and Yizhuang Line transfer station

宋家庄车站为亦庄线和5号线的始发车站、10号线的中间换乘车站。5号线车站于2007年10月7日随着5号线开通投入运营；亦庄线车站于2010年12月30日随着亦庄线开通投入运营；10号线车

站于2012年12月30日随着10号线二期工程开通投入运营。宋家庄换乘车站对于地铁车站的研究具有很强的代表性，它既包含了始发站和终点站，也包括了中间车站的特点。因此本文的测试地点选用三线换乘车站—宋家庄车站。

宋家庄站为三线换乘车站，车站为地下二层，其中5号线采用侧式站台，亦庄线采用港湾式月台布局，直接和5号线终点站垂直连接，而10号线采用的是双岛式站台布局，与5号线平行。测试阶段地铁车站运行采用空调季节最小新风运行模式。车站公共区通风空调系统站厅按均匀送/回/排风设计；站台层设置均匀送风，在车行道上方与站台板下设置回/排风道，车行道上方排风口与列车空调冷凝器对齐，站台板下排风口均匀布置，在安全门以内公共区域设置集中回/排风道。车站送/回/排风机兼作车站的排烟风机，回/排风道兼作车站排烟风道。

1.2 测点分布

测试地点主要分布于宋家庄地铁的公共区——站台和站厅，站台有10号线外环线（宋家庄开往成寿寺）和内环线（宋家庄开往石榴庄），亦庄线始发站与终点站台以及5号线的始发站和终点站台六个站台。由于行车换乘，所有站台均只开放一侧车门，因此所有站台均可以看作是侧式站台。站台处的测点位置沿着站台均匀分布靠近列车行驶侧，每个站台布置三个测点，分别记为1、2、3，均与列车行驶隧道距离为1 m，测试高度均为1.5 m，其中测点1距离站台列车上行方向壁面2 m，测点3距离站台列车下行方向壁面2 m，测点2为站厅的中间位置，具体测点位置见图2。站厅一共有9个出口，测点布置在A、H、I出口的检票口闸机位置，测点分别记为站厅1、2、3，测试高度为1.5 m。

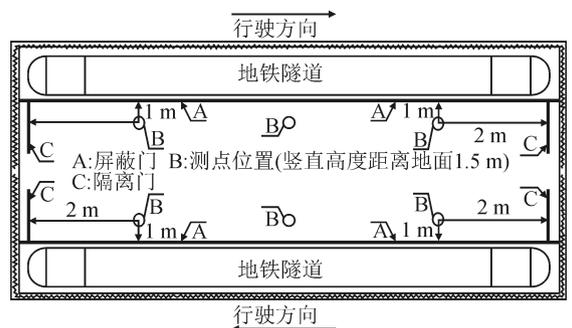


图2 宋家庄站站台测点图

Fig.2 Measuring points of platform in Songjiazhuang Station

1.3 测试内容和方法

1.3.1 测试仪器

测试仪器 TSI8532 是一款具有数据记录功能

的光散射激光光度手持仪器,能够实时显示 PM10、PM2.5 以及 PM1.0 的浓度。量程为 0.001~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,分辨率为 $\pm 0.1\%$ 读数,0.001 mg/m^3 取大值,零点稳定性为 $\pm 0.002 \text{ mg}/\text{m}^3$ 。该仪器采用光散射原理检测 PM2.5 等颗粒物的浓度,能够实现实时监测,具有体积小,重量轻,操作简单,噪音低,稳定性好等特点,可以直读,可以存储、输出电信号,具有价格便宜,耗材小,维护成本低等优势。

1.3.2 测试方法及内容

每次使用仪器前都应对其进行零点的标定,每次进行零点标定前确保已经连接过滤膜。

测试时间为 2016 年 3 月,地铁空调模式为通风模式,测试时间段为地铁运行非高峰时段 13:30~16:00 以及列车运行高峰时段 17:00~19:00。测试时采用多测点同步连续(室外环境同时测试)测试的方法,测试数据记录时间为 1 min/次。测试主要参数包含 PM1.0、PM2.5、PM10 以及温湿度。

2 结果与讨论

2.1 PM2.5 检测结果与分析

测试时同时测试室外环境参数,测试时间段选取列车非高峰运行时段,室外环境参数变化不大,因此室外环境参数选取时段的平均值,具体数值见表 1。地铁站细颗粒物的测试结果见表 2,表中的数据取列车非高峰运行时段测试数据。针对北京这一

PM2.5 污染严重的城市,测试日期选取的原则是室外环境处于不同的污染等级,如表 1 所示,室外环境分别处于优(0~50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、良(50~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、中度污染(150~200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、重度污染(200~300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、严重污染(高于 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)。有助于对地铁站的 PM2.5 的污染进行全面客观性的分析和比较。与表 1 中所列室外环境中的 PM2.5 浓度比较,在室外环境 PM2.5 污染程度为优的情况下,地铁站公共区的 PM2.5 平均浓度是室外环境 PM2.5 浓度的 3~5 倍,污染等级为良;在室外环境为良和 中度污染 的条件下,地铁站公共区的 PM2.5 平均浓度大约是室外环境的 2 倍,相对应的地铁站的污染等级分别为中度污染和重度污染;在室外环境为重度污染时,地铁站公共区的 PM2.5 平均浓度是室外环境的一半,地铁站的污染等级仍为中度污染;在室外环境为严重污染时,地铁站的 PM2.5 平均浓度为室外环境的 60%~75%,地铁站公共区的污染等级为重度污染。对 PM2.5 与 PM10 的关系进行分析,PM2.5/PM10=0.68~0.86,平均值为 0.77,说明站内 PM2.5 是站内 PM10 的重要组成部分,这与 Kam 等^[10]研究的美国洛杉矶地铁站台 PM2.5/PM10=0.73 以及 Cheng 等^[12]研究的中国台北地铁站台 0.65~0.75,以及樊越胜^[13]的结论 PM2.5/PM10=0.64~0.87 的结果相似。

表 1 宋家庄车站站外同时测试空气环境参数
Tab.1 Outdoor test environment of Songjiazhuang Station

日期	PM2.5/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM10/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	温度/($^{\circ}\text{C}$)	湿度/%	等级分类
2016.03.01	293	597	17	18	重度污染
2016.03.02	200	236	23.5	11.5	中度污染
2016.03.03	451	517	21	25.5	严重污染
2016.03.04	374	417	16	28	严重污染
2016.03.05	59	306	17	27	良
2016.03.09	24	52	17	9	优
2016.03.10	8	9	21	5	优
2016.03.11	25	54	22	10	优
2016.03.13	53	66	23.8	17.4	良

在室外环境 PM2.5 污染程度低于重度污染的条件下,地铁站的 PM2.5 浓度高于同时刻室外环境,但在室外环境 PM2.5 浓度高于 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (重度污染及以上)时,地铁站的 PM2.5 浓度低于同时刻的室外环境。

通过观察可以看出,地铁站内的 PM2.5 浓度

会随着室外环境 PM2.5 浓度的增加而增加,但是地铁站内的颗粒物浓度的变化幅度小于室外环境颗粒物的变化幅度。说明地铁站公共区的 PM2.5 浓度受到室外环境的影响,但地铁站内的 PM2.5 浓度与北京室外环境相比,地铁站公共区 PM2.5 浓度变化幅度小。

表2 宋家庄站测试结果
Tab. 2 Testing result of Songjiazhuang Station

日期	地点	PM _{2.5} /($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ /($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	温度/($^{\circ}\text{C}$)	湿度/%
2016.03.01	10号开往石榴庄	148±35	221±20	22	16
	10号开往成寿寺	144±32	214±13	22	17
2016.03.02	亦庄线	236±41	289±36	20	19
	5号线始发站	189±33	231±30	20	17
2016.03.03	站厅	275±36	365±44	23	28
2016.03.04	10号开往石榴庄	263±27	323±28	26	23
	10号开往成寿寺	273±26	336±15	23	27
2016.03.05	5号线终点站	62±28	82±39	21	13
	5号线起始站	44±11	56±14	22	12
2016.03.09	10号开往石榴庄	20±2	27±3	18	9
	10号开往成寿寺	46±3	56±5	23	9
2016.03.10	5号线终点站	48±4	59±4	22	11
	5号线起始站	44±10	72±11	19	9
2016.03.11	站厅	60±8	81±11	20	18
2016.03.13	5号线终点站	73±16	86±21	22	11
	5号线起始站	53±22	69±36	21	10

2.2 站台的测试结果

为明确站台本身PM_{2.5}浓度的变化,本文以室外空气中度污染(3月2日)、优(3月10日)两种情况下对同一车站—地铁五号线始发站为例进行测试。3月2日测试结果PM_{2.5}的平均浓度为220 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,PM₁₀的平均浓度为257 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,3月10日测试结果PM_{2.5}的平均浓度为26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,PM₁₀的值平均浓度为35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。结合室外条件(表1),从图3~4可以得知在室外环境为优和中度污染时,地铁车站站台的PM_{2.5}平均浓度大于室外PM_{2.5}平均浓度。

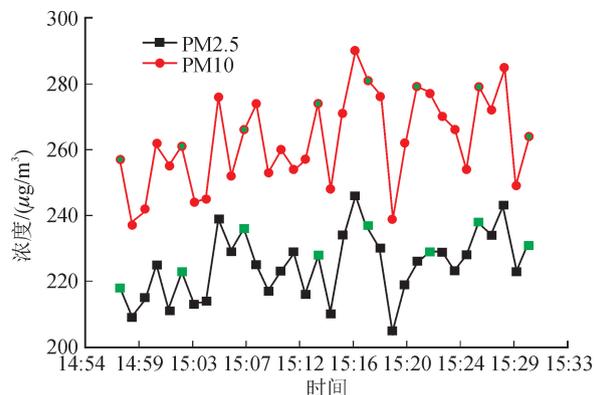


图3 3月2日宋家庄5号线始发站测试
Fig. 3 Test in Songjiazhuang Station of line 5 in Mar. 2

从非高峰时段连续测试的结果可以看出,无论室外污染等级如何,地铁站台处的PM_{2.5}浓度与PM₁₀浓度都呈现一定的周期性的波动。图3~4中,PM_{2.5}与PM₁₀的值波动同步呈现周期性规律

(绿点表示列车驶入时刻),波动周期为列车的运行间隔时间。当列车驶进车站,站台PM_{2.5}与PM₁₀的浓度会增加,当列车驶出车站,站台PM_{2.5}与PM₁₀浓度会降低,这与潘嵩^[14]的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。

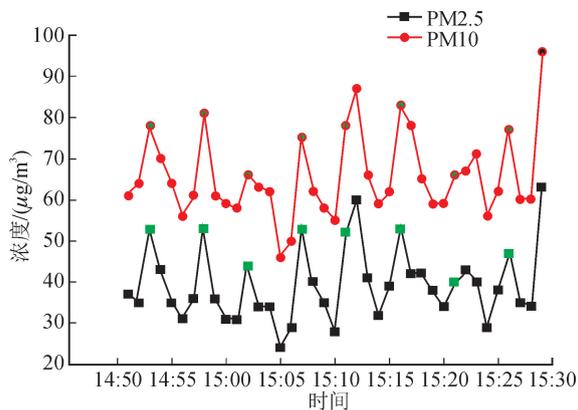


图4 3月10日宋家庄5号线始发站测试
Fig. 4 Test in Songjiazhuang Station of line 5 in Mar. 10

2.3 站厅的测试结果

对于站厅的测试结果,本文选取严重污染情况3月3日和环境质量为优的3月11日为例,如图5~6所示,测点数据采取受到列车运行频率影响相同的靠近地铁10号线的A、I、H三个出口处的数据,分别记为出口1,2,3。当室外空气品质为优,室外环境平均浓度PM_{2.5}为25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,PM₁₀为54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,地铁站厅平均浓度PM_{2.5}为52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,PM₁₀为73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;当室外环境空气品质为严重污

染时,平均浓度 PM2.5 为 451 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10 为 517 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,地铁站厅平均浓度 PM2.5 为 317 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10 为 396 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。当室外环境严重污染时,站厅也是严重污染状态,但是数据小于室外;当室外环境为优时,站厅内数据也会降低,但是数值比室外要高。

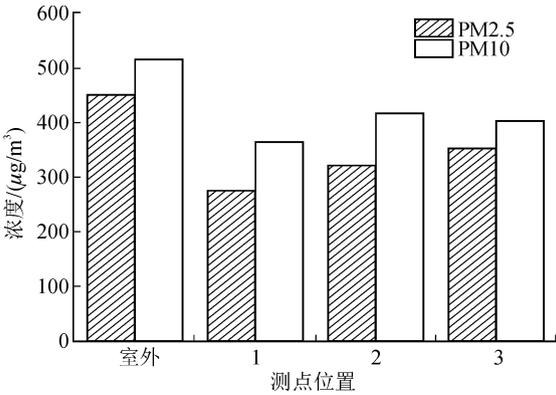


图5 3月3日宋家庄站厅测试
Fig. 5 Songjiazhuang Hall in Mar. 3

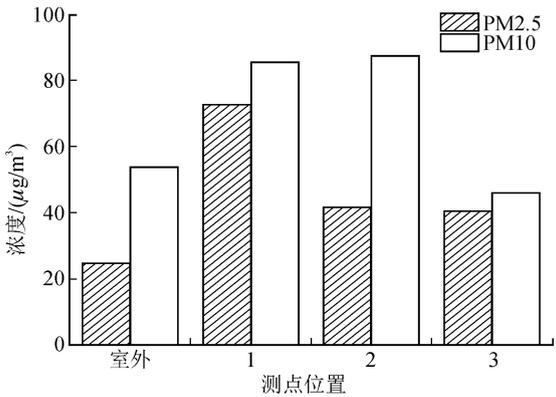
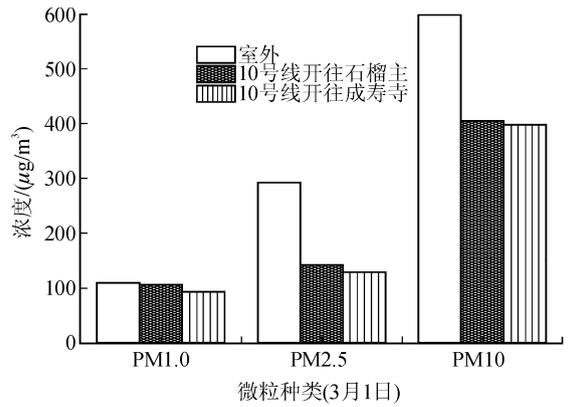


图6 3月11日宋家庄站厅测试
Fig. 6 Songjiazhuang Hall in Mar. 11

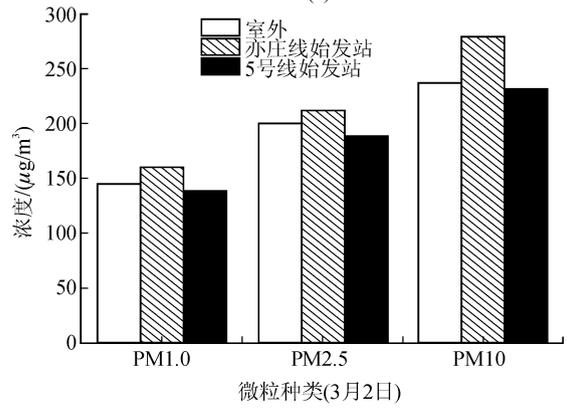
站厅3个出口处的PM2.5浓度接近,结合表2中给出的数据,可以得知,在列车运行和车站结构等条件相同的情况下,即使3月3日的室外环境污染程度高于3月4日,但3月3日测试的站厅的PM2.5浓度要高于3月4日地铁车站站台的PM2.5浓度。对比室外环境相同的3月9日和3月11日,也能得到相同的结论,说明在客观条件相同的条件下,站厅PM2.5浓度高于站台PM2.5浓度,这说明深度可能也会对PM2.5的浓度产生影响。

2.4 宋家庄不同线站台对比

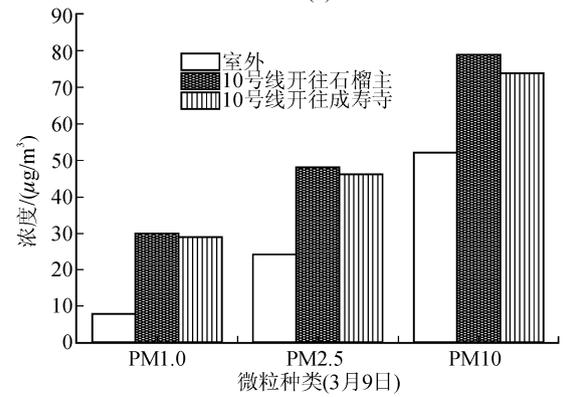
宋家庄站所有的站台均为侧式站台,在非高峰测试时段,不同地铁线路的列车的运行频率相同。本文针对不同线路的站台,选取室外环境污染等级不同的日期,对不同的站台PM2.5浓度进行对比,结果见图7。



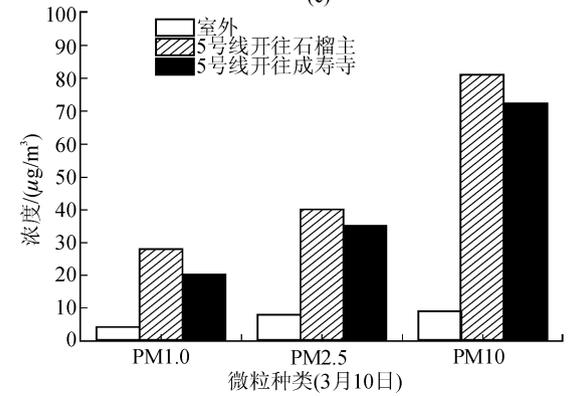
微粒种类(3月1日)
(a)



微粒种类(3月2日)
(b)



微粒种类(3月9日)
(c)



微粒种类(3月10日)
(d)

图7 宋家庄站不同线站台对比

Fig. 7 Comparison of platforms at different lines of Songjiazhuang Station

室外条件相同的情况下,根据图 7(a)~(b)中可以看出在地铁车站构造相同的情况下,相同的地铁线路不同方向的站台,PM2.5 浓度大约相同,说明相同的线路,若站台结构相同,那么在室外环境相同的情况下,不同地铁车站站台的 PM2.5 浓度相似;图 7(b)中亦庄线与 5 号线两条线的始发站站台相比较,亦庄线 PM2.5 浓度大于 5 号线,由于两站台列车运行频率相同,室外环境相同,客流量相似,综合考虑,亦庄线车站站台长度大于 5 号线可能是原因之一;在室外条件相似的情况下根据图(c)~(d),对比不同构造的车站,10 号线的 PM2.5 浓度在 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右而 5 号线的 PM2.5 浓度在 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,这可能是由于 5 号线站台宽度小于 10 号线站台宽度引起的。对于不同站台进行对比,可以得知,站台结构会对地铁车站站台 PM2.5 浓度产生影响。

3 相关性分析

为了量化地铁车站的 PM2.5 浓度影响因素的影响程度,本文对宋家庄车站公共区的 PM2.5 浓度与室外环境 PM2.5 浓度、客流量以及地铁车站的温湿度等进行了相关性分析,结果见表 3~4。

表 3 地铁站内 PM2.5 各影响因素相关性分析表

Tab. 3 Correlation analysis between factors and PM2.5 in station

因素	方程	R^2	修正后 R^2	显著性
室外环境 PM2.5	$Y=0.538X+20.370$	0.877	0.861	000.1
温湿度	—	0.135	0.138	0.159
客流量	—	0.245	0.246	0.135

表 4 温湿度对 PM2.5 浓度的影响方差分析

Tab. 4 Variance analysis of effect of temperature and humidity on PM2.5 concentration

方法	参数	F	Sig
单因素方差分析	温度	11.752	0.000
	湿度	4.102	0.000
多因素方差分析	温度	2.955	0.028
	湿度	1.462	0.180
	温度 * 湿度	1.265	0.295

3.1 地铁站公共区与室外环境的相关性

表 3 中表示了地铁车站公共区 PM2.5 与室外 PM2.5 浓度之间的线性回归拟合相关性结果,地铁车站的 PM2.5 浓度与室外有很大的相关性($R^2 = 0.861$), $Y = 20.370 + 0.538X$,相关系数 R^2 越接近 1,显著性系数越小于 0.005,回归方程显著性越好,因此说明此回归方程模型很好的表达了车站的

PM2.5 的浓度和室外的 PM2.5 浓度的高度相关性。说明地铁站公共区的 PM2.5 浓度与室外浓度有很大的关联性,Moreno^[8]等人也有相同的结论。

3.2 PM2.5 与客流量的相关性

本文结合地铁的运行时段,分别在运营的非高峰时段和高峰时段分别测试客流量对于地铁 PM2.5 浓度的影响。测试时每 5 min 的客流量记为一次数据,测试 5 min 内的 PM2.5 浓度,共测试不同时段 59 对数据,根据客流量的不同观察车站 PM2.5 的实时变化发现,结合地铁站公共区 PM2.5 浓度与客流量的相关性拟合分析结果(表 3),客流量与 PM2.5 的浓度相关性不大($R^2 = 0.245$),方程的显著性不明显,否定了客流量对地铁车站内 PM2.5 浓度值会产生影响^[15]这一猜测。

3.3 PM2.5 与车站温湿度的相关性

本论文将车站温度、湿度两种因素对于地铁 PM2.5 浓度的影响进行单因素以及多因素方差分析,结果见表 4。

多因素方差分析温度 $Sig = 0.028 < 0.05$,显著性好,但湿度无明显显著性,温度对 PM2.5 有显著性影响,但湿度与温度 * 湿度对 PM2.5 的浓度没有显著的影响;在单因素方差分析中,温度、湿度对于 PM2.5 浓度均有显著性影响。但是结合测试时段,结合表 3 中温湿度与 PM2.5 浓度的相关性($R^2 = 0.135$)不明显,因此本文认为温湿度对地铁车站公共区的 PM2.5 浓度没有显著性影响。

4 结论

文章首次实现对地铁车站 PM2.5 进行了多测点同时且连续测试,通过分析得到的结论主要如下。

1) 在室外环境 PM2.5 污染程度为优的情况下,地铁车站公共区的 PM2.5 平均浓度是室外环境 PM2.5 浓度的 3~5 倍,污染等级为良;在室外环境为良和中度污染的情况下,地铁车站公共区的 PM2.5 平均浓度大约是室外环境的 2 倍,相对应的地铁车站的污染等级分别为中度污染和重度污染;在室外环境为重度污染时,地铁车站公共区的 PM2.5 平均浓度是室外环境的一半,地铁车站的污染等级仍为中度污染;在室外环境为严重污染时,地铁车站的 PM2.5 平均浓度为室外环境的 60%~75%,地铁车站公共区的污染等级为重度污染。对 PM2.5 与 PM10 的关系进行分析,PM2.5/PM10 = 0.68~0.86,平均值为 0.77,说明站内 PM2.5 是站内 PM10 的重要组成部分。

2) 地铁车站站台处的 PM2.5 浓度受活塞风影

响呈现周期性波动;在室外环境条件相同时,地铁站公共区站厅处的PM_{2.5}浓度高于站台,即深度会对地铁PM_{2.5}浓度产生影响;地铁站台结构对于车站站台PM_{2.5}浓度会产生影响,在地铁站构造不同的站台,在室外条件以及列车运行等条件相同时,地铁车站站台颗粒物的浓度污染不同。

3) 地铁站PM_{2.5}与PM₁₀、室外PM_{2.5}浓度的相关性较大($R^2=0.98, 0.86$),客流量对地铁站PM_{2.5}浓度影响不显著($R^2=0.245$),车站内温湿度会对地铁站PM_{2.5}浓度没有显著性影响($R^2=0.135$)。

参考文献:

- [1] 李金娟, 邵龙义, 杨书申. 可吸入颗粒物的健康效应机制[J]. 环境与健康杂志, 2006, 23(6): 185-188.
LI Jinjuan, SHAO Longyi, YANG Shushen. Adverse effect mechanisms of inhalable particulate matters [J]. Journal of Environment and Health, 2006, 23(6): 185-188.
- [2] KAMANI H, HOSEINI M, SEYEDSALEHI M, et al. Concentration and characterization of airborne particles in Tehran's subway system [J]. Environment Science and Pollution Research, 2014, 21(12): 7319-7328.
- [3] VILCASSIM M J R, THURSTON G D, PELTIER R E, et al. Black carbon and particulate matter (PM_{2.5}) concentrations in New York City's subway stations [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(24): 14738-14745.
- [4] CHILLRUD S N, EPSTEIN D, ROSS J M, et al. Elevated airborne exposures of teenagers to manganese, chromium, and iron from steel dust and New York City's subway system [J]. Environmental Science & Technology, 2004, 38(3): 732-737.
- [5] AARNIO P, YLI-TUOMI T, KOUSA A, 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.
- [6] KIM K Y, KIM Y S, ROH Y M, et al. Spatial distribution of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Seoul Metropolitan Subway stations [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1/3): 440-443.
- [7] MIDANDER K, ELIHN K, WALLÉN A, et al. Characterisation of nano- and micron-sized airborne and collected subway particles, a multi-analytical approach [J]. Science of the Total Environment, 2012, 427-428: 390-400.
- [8] MORENO T, PÉREZ N, RECHE C, et al. Subway platform air quality: Assessing the influences of tunnel ventilation, train piston effect and station design [J]. Atmospheric Environment, 2014, 92: 461-468.
- [9] KAMANI H, HOSEINI M, SEYEDSALEHI M, et al. Concentration and characterization of airborne particles in Tehran's subway system [J]. Environment Science and Pollution Research, 2014, 21(12): 7319-7328.
- [10] KAM W, CHEUNG K, DAHER N, et al. Particulate matter (PM) concentrations in underground and ground-level rail systems of the Los Angeles Metro [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(8): 1506-1516.
- [11] GUO Li, HU Yunjie, HU Qingqing, et al. Characteristics and chemical compositions of particulate matter collected at the selected metro stations of Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2014, 496: 443-452.
- [12] CHENG Y H, LIN Y L, LIU C C. Levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in Taipei Rapid Transit System [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 7242-7249.
- [13] 樊越胜, 胡泽源, 刘亮, 等. 西安地铁环境中PM₁₀、PM_{2.5}、CO₂污染水平分析 [J]. 环境工程, 2014, 32(5): 120-124.
FAN Yuesheng, HU Zeyuan, LIU Liang, et al. PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ pollution level analysis in Xi'an Metro environment [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(5): 120-124.
- [14] 樊莉, 潘嵩, 李炎峰, 等. 北方地区某地铁站PM_{2.5}浓度变化规律研究 [J]. 安装, 2014, (2): 25-26.
- [15] MA Huan, SHEN Henggen, LIANG Zhen, et al. Passengers' exposure to PM_{2.5}, PM₁₀, and CO₂ in typical underground subway platforms in Shanghai [M] // Springer, Berlin, Heidelberg, Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, Lecture Notes in Electrical Engineering, 2014, 261: 237-245.

(责任编辑 王绪迪)