

北京地铁车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染特征研究*

卓思华 王立鑫[#] 庞雪莹

(北京建筑大学供热、供燃气、通风及空调工程北京市重点实验室,北京 100044)

摘要 地铁是人们出行的重要交通方式,车厢内颗粒物污染可影响人体健康。2016年春、秋、冬季对北京地铁1号、2号、4号、10号线进行现场监测,探讨北京地铁车厢内颗粒物污染特征。研究结果表明,北京地铁车厢内 $PM_{2.5}$ 平均浓度超标率为83.8%~98.7%,地铁1号线 PM_{10} 平均浓度超标率为59.6%。地铁车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度存在工作日和周末组间显著性差异,表明客运量对车厢内颗粒物浓度有较大影响。地铁车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度存在季节性差异,冬季车厢内颗粒物平均浓度最高。不同线路车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度存在组间差异,地铁通风空调系统、门系统和客运量是造成其差异的主要原因。

关键词 地铁 $PM_{2.5}$ PM_{10} 客流量

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.09.018

Study on pollution characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Beijing subway carriages ZHUO Sihua·WANG Lixin·PANG Xueying. (Beijing Key Lab of Heating, Gas Supply, Ventilation and Air Conditioning Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044)

Abstract: Subway is an important trip mode for people, and particulate pollution in the carriages can affect human health. In this paper, the monitoring of particulate matter was carried out in Beijing subway Lines 1, 2, 4 and 10 in spring, autumn and winter of 2016, to explore the characteristics of particulate matter pollution in Beijing subway carriages. The results showed that the exceeding standard rate of $PM_{2.5}$ average concentration in the carriages of Beijing subway Lines 1, 2, 4 and 10 was from 83.8% to 98.7%, and that of PM_{10} average concentration in subway Line 1 was 59.6%. There were significant differences of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations between working days and weekends, indicating that the passenger volume had a great effect on the concentrations of particulate matter in the carriages. There were seasonal differences of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in the subway carriages and the average concentrations of particulate matter in winter were the highest. The concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in different lines had the significant difference, and the main reasons might be the difference of the ventilation and air-conditioning system, the door system and the passenger volume.

Keywords: subway; $PM_{2.5}$; PM_{10} ; passenger volume

北京现拥有17条地铁线路270座车站,截至2015年底,北京轨道运营里程达到554 km,2010—2015年客运量从184 645万人次增长到332 381万人次^[1],单日最高运送乘客已突破1 000万人次,地铁中空气质量与乘客及工作人员的健康密切相关。北京公共交通工具微环境空气污染严重^[2]。地铁属于封闭的交通工具,随着客流量增大,地铁内污染源增多,原有的通风系统能力有限,通风不足,地铁内污染物浓度较高^[3]。研究表明,室外 $PM_{2.5}$ 污染导致的死亡人口占比高达16.2%,位居导致死亡的67个主要因子的第4位^[4]; $PM_{2.5}$ 及其携带成分渗透到血液参与血液循环,可对人体呼吸系统、心肺及血液系统、生殖系统、内分泌系统带来伤害^[5-6];另外,地铁

内颗粒物通常含有铁、锰、铬、镍、铜等金属元素,这些颗粒物进入人体后,对人们的健康危害极大^[7]。人们平均有7.2%的时间在交通工具中度过^[8],地铁中空气品质状况已经成为迫切需要研究的问题。在伦敦地铁的空气质量监测中,ADAMS等^[9]研究得出地铁的空气中 $PM_{2.5}$ 浓度比地面 $PM_{2.5}$ 浓度高3~8倍。在对洛杉矶交通环境颗粒物监测中,KAM等^[10]发现相比于地面轻轨,地下地铁车厢中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度较高。对首尔地铁站的颗粒物监测中发现,车厢内的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度高于站台,地下站台高于地面站台^[11-12]。樊越胜等^[13]研究得出地铁车厢内 $PM_{2.5}$ 浓度超标且 $PM_{2.5}$ 浓度大于站台。张霞等^[14]对上海地铁的研究结果表明,地铁站中不同

第一作者:卓思华,男,1994年生,硕士研究生,主要从事环境健康与室内空气品质研究。[#] 通讯作者。

* 北京市教委科技计划项目(No.KM201410016014);北京建筑大学科学研究基金资助项目(No.331613017)。

时间、不同地点 PM₁₀ 浓度有明显变化。当前国内外对地铁车厢内颗粒物污染特征的系统研究较少。本研究选取 4 条北京地铁线路,分别在春、秋、冬季对车厢内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平进行监测,探讨车厢内颗粒物污染特征,为改善地铁车厢内空气质量提供依据。

1 研究方法

1.1 方法

本研究选取北京地铁 1 号、2 号、4 号、10 号 4 条线路为监测对象(1 号线为东西走向,4 号线为南北走向,2 号线与 10 号线为环线),于 2016 年 1 月(冬季)、2016 年 4 月(春季)以及 2016 年 9 月(秋季)对工作日和周末的早、中和晚时段进行现场监测,同时记录车厢内乘客人数。共测试 72 次,每季 24 次。

所测参数包括温度、相对湿度、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度,测试间隔为 30 s。所采用的实验仪器为 QT50 空气质量检测器,可实时监测空气中的 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度以及温度和相对湿度;PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度测量范围:0~990 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;温度测量范围:-20~60 $^{\circ}\text{C}$;相对湿度测量范围:0~90%。

1.2 数据分析

用 SPSS 19.0 进行统计分析,使用 Spearman 进行相关性分析检验各线路工作日与周末车厢内 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度相关性,对其各个时段的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度进行非参数 Wilcoxon 检验,对 4 条不同线路、各个季节之间进行 Kruskal-Wallis 组间差异检验,并对不同线路车厢内温度和相对湿度进行独立样本 Kruskal-Wallis 检验。

1.3 评价标准

车厢内 PM₁₀ 按照《公共交通工具卫生标准》(GB 9673—1996)进行评价;温度和相对湿度参考《室内空气质量标准》(GB/T 18883—2002)和 GB 9673—1996 进行评价;由于目前没有地铁环境中 PM_{2.5} 污染评价标准,故依据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)进行评价。

2 结果与讨论

2.1 监测结果

由表 1 可知,春、秋两季,除地铁 1 号线外,2 号、4 号以及 10 号线地铁车厢内 PM₁₀ 平均质量浓度均低于 GB 9673—1996 规定的 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;冬季,1 号线 PM₁₀ 平均质量浓度最高达 350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,超标率达 59.6%。这或许与北京地铁 1 号线开通时间较早(1971 年开始封闭运营),人流密度较大以及空调通风系统过滤效果较差等原因有关。4 条线路车厢内 PM_{2.5} 平均质量浓度均超过 GB 3095—2012 规定的二级标准限值 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,1 号、2 号、4 号、10 号线最高平均质量浓度分别为 191、141、149、152 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,其超标率分别为 98.7%、93.3%、89.9%、83.8%。

参考 GB 9673—1996 和 GB/T 18883—2002,冬季车厢内温度、相对湿度均有一定超标,超标率分别为 29.0%~82.7%、17.9%~64.8%。不同线路间温度和相对湿度存在季节显著性差异($P<0.05$)。

2.2 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度工作日与周末比较

春、秋两季 4 条不同线路工作日与周末各时段 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的平均浓度分布分别如图 1、图 2 所示,工作日与周末各时段车厢内 PM_{2.5} 平均浓度全部超标,最高达到 194 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;PM₁₀ 最高平均质量浓度达 349 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。除了春季 4 号线的中午平峰和晚高

表 1 各线路温度、相对湿度、PM_{2.5} 和 PM₁₀
Table 1 Temperature, relative humidity, PM_{2.5} and PM₁₀

时间	线路	温度/ $^{\circ}\text{C}$		相对湿度/%		PM _{2.5} / $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$		PM ₁₀ / $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	
		均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
2016 年春	1 号线	25.6	23.1~26.8	43.3	34.0~52.0	151	63~371	253	84~857
	2 号线	25.7	23.3~27.2	37.5	27.1~48.1	120	42~211	188	74~352
	4 号线	26.3	25.3~27.0	45.4	41.1~51.9	102	20~184	161	45~295
	10 号线	26.1	24.4~28.0	54.1	48.6~56.9	125	60~326	203	96~771
2016 年秋	1 号线	25.0	23.6~26.1	57.0	54.4~59.5	171	80~304	294	134~738
	2 号线	26.8	26.0~28.0	58.9	57.0~61.7	139	76~235	225	121~475
	4 号线	26.3	24.9~26.8	64.6	62.2~67.8	101	25~160	159	49~245
	10 号线	26.5	25.7~27.3	52.9	49.6~60.1	99	54~158	156	83~296
2016 年冬	1 号线	23.8	17.5~27.0	41.6	33.2~52.3	191	88~346	350	143~761
	2 号线	22.9	15.0~27.0	34.6	24.6~45.0	141	50~347	236	78~815
	4 号线	22.8	11.0~29.0	33.9	18.0~38.8	149	35~345	260	69~803
	10 号线	21.5	13.0~27.0	35.6	23.0~45.0	152	12~476	278	16~1 023

峰时段以及秋季1号线的全时段、秋季2号线中午平峰时段外,工作日地铁车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓度均高于周末地铁车厢内平均浓度。总体而言,工作日早晚高峰时段 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓度高于平峰时段。这可能与车厢内乘客人数有关,地铁车厢环境较为密闭,车厢内环境空气品质并不好,再加上工作日早晚高峰时段人们乘坐地铁上下班,导致地铁客流量变大,车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度有所升高。周末人们通常选择休息,相比工作日无特定的起床与出门时间。因此,周末早晚时段地铁客流量相对于工作日要小,相应的其车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度也会变小。通过分析可知,工作日、周末车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度显著相关 ($P < 0.01$),对其各个时段的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度进行非参数 Wilcoxon 检验,结果表明,工作日与周末的浓度差异具有统计学意义 ($P < 0.05$)。

对秋季1号线周末车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓

度高于平时周末同时段平均浓度进行分析发现,秋季1号线周末的现场测试时间恰逢十一国庆长假,北京地铁1号线途经重要旅游景点天安门、军事博物馆、五棵松体育馆等地铁站,地铁客流量是平常周末的5倍,由此可见,客运量对车厢内的颗粒物浓度有较大影响。

2.3 季节对车厢内 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度的影响

不同季节地铁车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分布如图3所示。在不同季节所监测的4条线路中,车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓度全部超标且均冬季最高;除10号线外,1号、2号、4号线的春季车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 平均浓度低于冬秋两季,这与 LI 等^[15] 对北京大气 $PM_{2.5}$ 的季节特征研究结果一致,其研究表明 $PM_{2.5}$ 浓度随季节变化较大,1月相对于其他月份较高,4月相对较低。对4条不同线路各个季节浓度进行 Kruskal-Wallis 组间差异检验,结果表明4条线路存在季节性差异,具有统计学意义 ($P = 0$)。

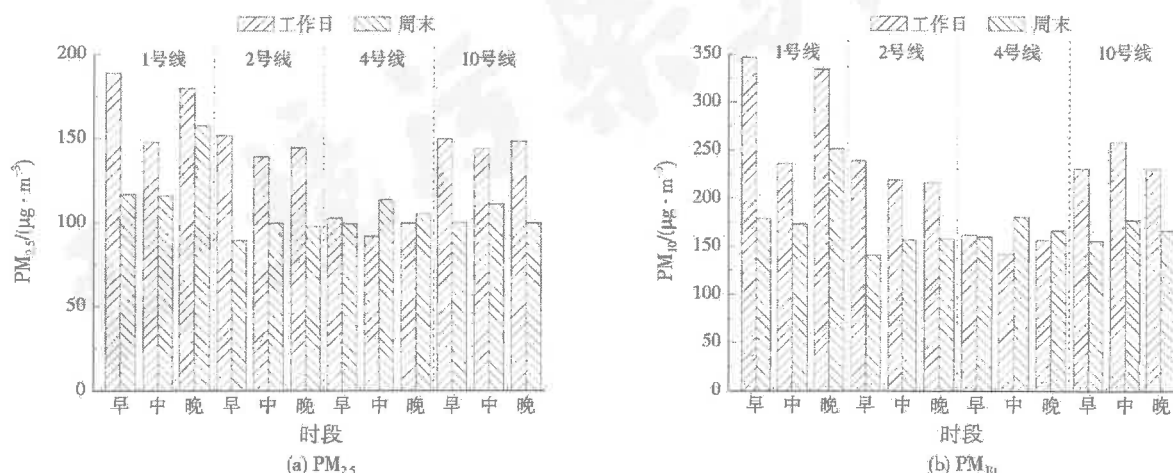


图1 春季各线路工作日与周末车厢内 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10}
Fig.1 $PM_{2.5}$ and PM_{10} in carriages of working days and weekend in spring

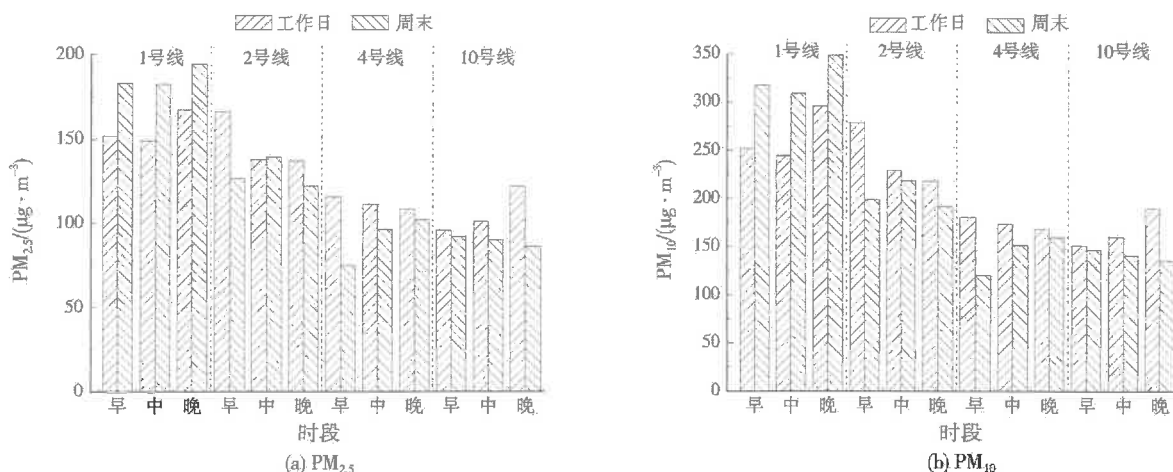


图2 秋季各线路工作日与周末车厢内 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10}
Fig.2 $PM_{2.5}$ and PM_{10} in carriages of working days and weekend in autumn

2.4 线路间 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度比较

对4条线路地铁车厢内各时段颗粒物浓度进行Kruskal-Wallis组间差异检验,结果表明,线路间 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度具有显著性差异($P=0$),平均浓度高低顺序依次为1号、2号、10号、4号线,如图4所示。其原因为:(1)北京地铁通风空调系统逐渐改进,地铁1号、2号线采用传统的通风空调系统,而4号、10号线采用新型通风空调集成系统,研究表明新型通风空调集成系统能够完全达到轨道交通通风空调系统的功能要求^[16];(2)1号、2号线为半安全门系统,而4号、10号线为屏蔽门系统。地铁站台颗粒物浓度受列车运行产生的活塞风影响很大,列车停靠站台时,其带来的活塞风中来源于列车车轮与钢轨摩擦产生的较高浓度的颗粒物^[17]。屏蔽门系统可有效阻碍隧道和站台内的颗粒物进入车厢,因此4号、10号线车厢内颗粒物平均浓度显著低于1号、2号线。此外,同为半安全门系统的1

号、2号线之间存在浓度差异,同为屏蔽门的4号、10号线也存在差异,主要原因是由于客流量的影响^[18]。由此可见,地铁通风空调系统、门系统和客运量是造成线路间颗粒物浓度存在显著差异的主要原因。

2.5 与国内外研究比较

本研究结果与国内外相关研究比较见表2。与国内外同类型研究相比,北京地铁车厢内颗粒物浓度较高,车厢内空气质量较差。原因如下:(1)据2015年轨道交通日均客运量统计,北京位列全国之首^[19],客运量对车厢内颗粒物浓度有较大影响。(2)地铁隧道内由于金属摩擦而产生的颗粒物同样也是车厢内颗粒物的源^[20-21]。

综上所述,由于地铁人流量大,地铁车厢相对封闭会影响车厢内空气品质,因此应该采取措施改善地铁车厢内空气质量。目前关于地铁车厢内空气品质的相关标准尚未出台,而关于建筑室内空气品质

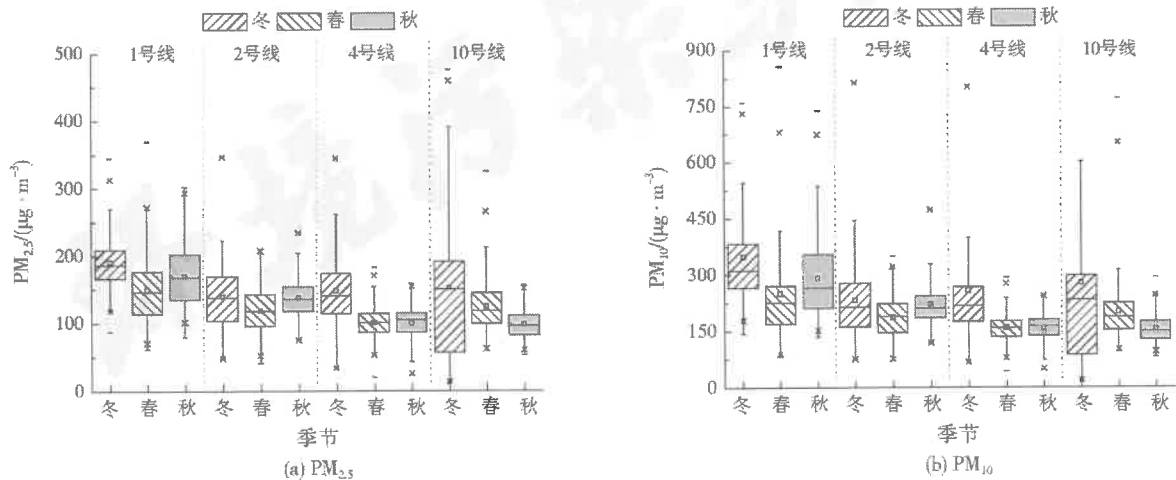


图3 不同线路各季节车厢内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10}
Fig.3 $PM_{2.5}$ and PM_{10} in different carriages in each season

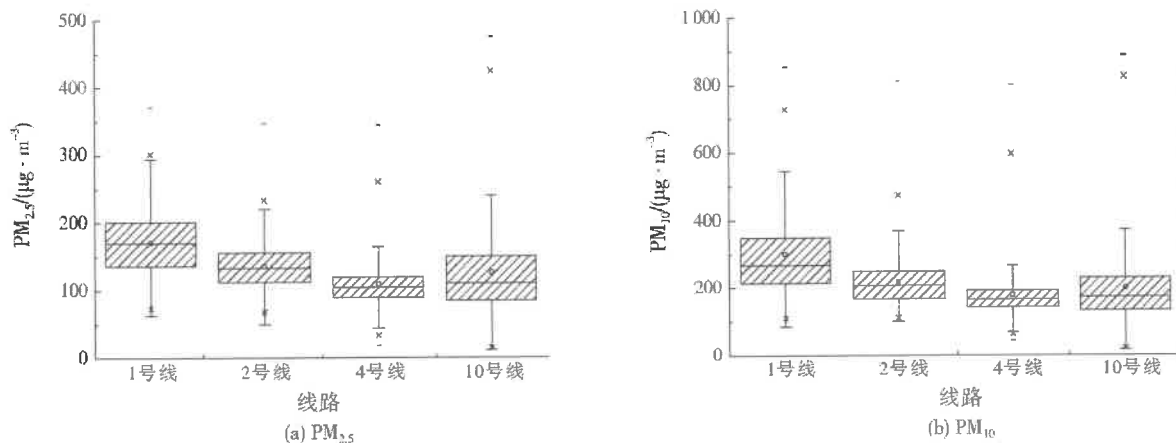


图4 各线路车厢 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10}
Fig.4 $PM_{2.5}$ and PM_{10} in each carriage

表2 不同城市地铁车厢内空气品质
Table 2 The air quality of subway carriages in different cities

城市	监测年份	PM _{2.5} /(μg·m ⁻³)	PM ₁₀ /(μg·m ⁻³)	参考文献
北京	2004—2005		199.3~450.3	[2]
	2006		190~450	[22]
深圳	2005—2006	70~260		[23]
香港	1999—2000	21~48	23~85	[24]
台湾	2007	8~68	10~97	[25]
首尔	2004	102.4~137.8	128.1~158.1	[11]
洛杉矶	2010	9~130	14~197	[10]
沈阳	2014—2016	43~82	99~250	[26]
昆明	2014—2016	4~46	7~71	[26]
布拉格	2002	1.4~113.7		[27]
北京(本研究)	2016	12~476	16~1 023	

的控制及评价标准已比较完善,制定适用于地铁空间的空气品质标准至关重要。

3 结论

(1) 冬季地铁车厢内温度和相对湿度均有一定超标,温度超标率最高为82.7%,相对湿度超标率最高为64.8%。4条地铁线路车厢内PM_{2.5}平均浓度超标率为83.8%~98.7%,地铁1号线PM₁₀平均浓度超标最为严重且超标率为59.6%。

(2) 总体而言,工作日地铁车厢内PM_{2.5}和PM₁₀平均浓度高于周末,早晚高峰时段PM_{2.5}和PM₁₀平均浓度高于平峰时段;十一国庆长假周末PM_{2.5}和PM₁₀平均浓度高于平常周末。客运量对车厢内颗粒物浓度有较大影响。

(3) 地铁车厢内PM_{2.5}和PM₁₀浓度存在季节性差异,冬季车厢内颗粒物平均浓度最高。不同线路车厢内PM_{2.5}和PM₁₀浓度存在组间差异,地铁通风空调系统、门系统和客运量是其主要原因。

参考文献:

[1] 北京市统计局,国家统计局北京调查总队.2016北京统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2016.
[2] 李瀚瀚,颜敏,刘金凤,等.北京市公共交通工具微环境空气质量综合评价[J].环境与健康杂志,2008,25(6):514-516.
[3] 杨伟超.运营地铁内污染物浓度的计算方法及应用研究[D].长沙:中南大学,2009.
[4] LIM S S, VOS T, FLAXMAN A D, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the global burden of disease study 2010 [J]. The Lancet, 2012, 380(9859): 2224-2260.
[5] OSTRO B, LIPSETT M, REYNOLDS P, et al. Long-term exposure to constituents of fine particulate air pollution and mortality: results from the California teachers study [J]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(3): 363-369.
[6] ZANOBETTI A, FRANKLIN M, KOUTRAKIS P, et al. Fine particulate air pollution and its components in association with cause-specific emergency admissions [J]. Environmental Health, 2009, 8: 58.

[7] CHENG Y H, YAN J W. Comparisons of particulate matter, CO, and CO₂ levels in underground and ground-level stations in the Taipei mass rapid transit system [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(28): 4882-4891.
[8] KLEPEIS N E, NELSON W C, OTT W R, et al. The national human activity pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants [J]. Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology, 2001, 11(3): 231-252.
[9] 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]. Science of the Total Environment, 2001, 279(1/2/3): 29-44.
[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] PARK D U, HA K C. Characteristics of PM₁₀, PM_{2.5}, CO₂ and CO monitored in interiors and platforms of subway train in Seoul, Korea [J]. Environment International, 2008, 34(5): 629-634.
[12] 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(1/2/3): 440-443.
[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.
[14] 张霞, 金铁, 王晓保, 等. 上海两地铁车站空气中PM₁₀和PM_{2.5}浓度分布特征[J]. 环境与职业医学, 2014, 31(7): 534-536.
[15] LI R K, LI Z P, GAO W J, et al. Diurnal, seasonal, and spatial variation of PM_{2.5} in Beijing [J]. Science Bulletin, 2015, 60(3): 387-395.
[16] 王奕然. 新型通风空调集成系统在北京地铁中的应用[J]. 都市轨道交通, 2010, 23(6): 85-89.
[17] PFEIFER G D, HARRISON R M, LYNAM D R. Personal exposures to airborne metals in London taxi drivers and office workers in 1995 and 1996 [J]. Science of the Total Environment, 1999, 235(1/2/3): 253-260.
[18] 刘扬. 敏感性因素对城市轨道交通客运量的影响分析[J]. 交通工程, 2017, 17(3): 14-18.
[19] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通2015年统计和分析 [J]. 都市轨道交通, 2016, 29(4): 6-11.
[20] QIAO T, XIU G L, ZHENG Y, et al. Preliminary investigation of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ 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.

(下转第1073页)

