

## · 基础与应用 ·

不同出行方式 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平的比较研究

李嘉琛<sup>1</sup>, 王裕<sup>1</sup>, 王童<sup>1</sup>, 张永亮<sup>1</sup>, 窦长松<sup>1</sup>, 蔡源发<sup>1</sup>, 李渊博<sup>1</sup>, 李宏宇<sup>1</sup>, 许珺辉<sup>1</sup>,  
宋逸<sup>2</sup>, 周辉<sup>1</sup>, 李国星<sup>1</sup>, 邓芙蓉<sup>1</sup>

1. 北京大学公共卫生学院劳动卫生与环境卫生学系, 北京 100191; 2. 北京大学公共卫生学院儿童青少年卫生研究所

**摘要:**目的 在不同浓度大气 PM<sub>2.5</sub> 水平下, 比较不同出行方式的 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平, 并进一步比较地铁站不同位置的 PM<sub>2.5</sub> 浓度, 以期为城市居民选择适宜的出行方式提供科学依据。方法 于 2015 年 12 月 30 日至 2016 年 1 月 4 日, 选择北京市城区的某条路线作为研究地点, 使用便携式 PM<sub>2.5</sub> 监测仪同时测量步行、乘坐公交车和地铁 3 种出行方式的 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平; 对地铁站台、安检处和地铁车厢内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度进行同步监测并比较。结果 在同一研究时期, 步行、乘坐公交车和地铁测得的 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露浓度均值分别为 219.34、209.61、167.56 μg/m<sup>3</sup>。当大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低时(≤60 μg/m<sup>3</sup>), 乘坐地铁的 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平高于步行和乘坐公交车; 当大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度较高时(>100 μg/m<sup>3</sup>), 乘坐地铁的个体 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平明显低于步行和公交车, 差异均有统计学意义( $P < 0.05$ )。监测期间地铁站台、安检处和车厢内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度均值分别为 196.90、170.20、136.82 μg/m<sup>3</sup>。结论 在不同的大气 PM<sub>2.5</sub> 污染水平下, 不同出行方式的人群 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平不同。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 个体暴露; 出行方式; 交通

中图分类号: R181.3 文献标志码: A 文章编号: 1001-5914(2016)08-0659-04

Comparison of personal exposure to PM<sub>2.5</sub> by different commuting modes

LI Jia-chen\*, WANG Yu, WANG Tong, ZHANG Yong-liang, DOU Chang-song, CAI Yuan-fa, LI Yuan-bo, LI Hong-yu,  
XU Jun-hui, SONG Yi, ZHOU Hui, LI Guo-xing, DENG Fu-rong

\*Department of Occupational and Environmental Health Sciences, School of Public Health, Peking University, Beijing 100191, China

Corresponding author: DENG Fu-rong, E-mail: lotus321321@126.com

**Abstract: Objective** To compare personal exposure to air particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) by three commuting modes under different levels of ambient PM<sub>2.5</sub>. Furthermore, PM<sub>2.5</sub> concentrations at three places in subway station were compared. **Methods** A route at urban area in Beijing was chosen. Personal PM<sub>2.5</sub> exposures by three commuting modes including walking, bus and subway were measured at the same time by using portable PM<sub>2.5</sub> monitors, between December 30, 2015 and January 4, 2016. PM<sub>2.5</sub> concentrations at three places in subway station, including security checkpoint, platform and subway car were measured and compared. **Results** During the same study period, means of personal PM<sub>2.5</sub> exposures were 219.34 μg/m<sup>3</sup>, 209.61 μg/m<sup>3</sup> and 167.56 μg/m<sup>3</sup> for walking, bus and subway respectively. Further comparison showed that subway commuter had higher exposure compared with walker and bus commuter under low ambient PM<sub>2.5</sub> concentration (≤60 μg/m<sup>3</sup>); While subway commuter had the lowest exposure under high ambient PM<sub>2.5</sub> concentration (>100 μg/m<sup>3</sup>). During the study period, means of PM<sub>2.5</sub> concentrations were 196.90 μg/m<sup>3</sup>, 170.20 μg/m<sup>3</sup>, 136.82 μg/m<sup>3</sup> at platform, security checkpoint and subway car respectively. **Conclusion** Commuters using three transport modes have different personal PM<sub>2.5</sub> exposure under different ambient PM<sub>2.5</sub> concentrations. These results will be helpful for citizens to choose commuting mode scientifically.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; Personal exposure; Commuting mode; Transportation

大气细颗粒物(空气动力学直径≤2.5 μm 的颗粒物, PM<sub>2.5</sub>)是我国大部分城市的首要污染物。近年来,随着城市机动车数量的迅速增加,大气 PM<sub>2.5</sub> 在大气颗粒物中所占的比例越来越高,成为导致我国近年来大部分城市和地区雾霾频发的主要原因。流行病学研究表明,大气 PM<sub>2.5</sub> 可对人群的呼吸、心血管、生殖和神经等多个系统和器官造成健康危害,是导致人群疾病发

生、入院和死亡增加的主要因素之一<sup>[1]</sup>。公共交通是大部分城市居民首选的出行交通方式,每日通勤过程可能造成个体较高水平的 PM<sub>2.5</sub> 暴露而增加人群的健康风险<sup>[2]</sup>。有研究认为,相比于在非交通环境中的 24 h 平均暴露水平,在交通环境中 1 h 的高暴露与健康效应的相关性更强<sup>[3]</sup>。作为首都,北京市的交通所致大气污染及其健康影响成为关注焦点。有研究表明,北京市民每天的平均通勤时间可达 87 min<sup>[4]</sup>,因此通勤过程中的 PM<sub>2.5</sub> 暴露不容忽视。既往研究已经证实出行方式是个体 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平的一个独立影响因素<sup>[5-6]</sup>,但在不同研究中各种出行方式对暴露水平的具体影响

DOI:10.16241/j.cnki.1001-5914.2016.08.001

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划(91543112);中华医学基金会项目(CMB 15-228)

作者简介:李嘉琛(1992-),男,硕士研究生,从事环境与健康研究。

通讯作者:邓芙蓉, E-mail: lotus321321@126.com



还不一致。在已有研究中,大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度均不超过  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,而我国部分城市常出现  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较高的情况,城市居民经常不得不在大气  $\text{PM}_{2.5}$  水平较高的环境下选择出行方式,目前有关不同污染水平和不同出行方式的  $\text{PM}_{2.5}$  个体暴露数据研究十分有限。由于时间和空间的便利性,地铁常被作为大城市人群出行的主要交通出行方式,而地铁站内的颗粒物污染情况及其特征目前尚未见报道。既往研究显示,地铁站台的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度高于地面环境<sup>[7]</sup>和车厢内<sup>[8-9]</sup>。但在室外大气的不同  $\text{PM}_{2.5}$  污染水平下,同一交通出行方式或不同地点的个体暴露水平有无差异还待进一步研究。因此,笔者选取北京市为研究地点,在北京市城区选取步行、公交车和乘坐地铁 3 种主要的出行方式,进行不同出行方式  $\text{PM}_{2.5}$  个体暴露水平及其特征的研究,以期为城市居民选择适宜的出行方式提供一定的参考依据。

## 1 材料与方法

**1.1 仪器** LD-6S 多功能精准型激光粉尘仪(北京绿林创新数码科技有限公司),为便携式  $\text{PM}_{2.5}$  监测仪,可以实时显示  $\text{PM}_{2.5}$  浓度,并能自动进行温湿度校正。仪器的检测灵敏度为  $0.001 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,测量范围为  $0.001 \sim 1.000 \text{ mg}/\text{m}^3$ ,测定精度为  $\pm 10\%$ ,重复性误差  $\leq 2\%$ 。采样流量为  $2 \text{ L}/\text{min}$ 。

## 1.2 采样方法

**1.2.1 步行、公交车和地铁的  $\text{PM}_{2.5}$  个体暴露采样** 监测时间为 2015 年 12 月 30 日—2016 年 1 月 4 日,共 6 d,于每日上午 9:00—11:00 进行采样。出行路线为北京大学东门到国家图书馆,全程约 5.6 km。选择这一路线的优势在于公交(717 路)和地铁(4 号线)有几乎相同的路线,可比性较好。此外该路线周围无工业污染,能较好反映居民日常的出行情况。每种出行方式由 2 名采样人员携带一台仪器进行采样测定。在每个采样日,3 组同时从同一起点出发,分别模拟步行、公交车和乘地铁的出行过程,其中乘公交车和地铁包括等车过程。步行组需走完单程,公交组完成 1~2 个单程(平均 1.7 个),地铁组完成 1~7 个单程(平均 5 个),以使各组总时间接近,增加可比性。采用连续监测模式,仪器每分钟自动记录一个平均浓度值。以距研究路线最近的北京市监测站公布的每日  $\text{PM}_{2.5}$  监测数据作为室外大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度。

**1.2.2 地铁站内不同位置的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度采样** 为了进一步探讨同一出行方式下的不同位置个体暴露水平,选择地铁这一出行方式为研究对象,对地铁的站台、安检处和车厢内的人群个体暴露水平进行连续 5 d 监测。监测时间为 2015 年 12 月 31 日—2016 年 1 月 4 日,于每日下午 14:00—16:00 进行采样。分为安检处、站台和车厢内 3 组,每组携带一台仪器。检票处和站台

为定点监测,监测点选在地铁西土城站内的固定位置;车内监测需乘坐地铁 10 号线,从西土城站上车,沿环线走完一周后从西土城站下车。采用连续监测模式,每分钟记录一个平均浓度值。3 组同时开始监测,并同时结束。

**1.3 质量控制** 在每次测量前,每台仪器使用自身的校准程序进行校准。然后 3 台仪器平行测量,相互校准,当发现仪器之间存在明显的系统偏差时,及时调整。当 3 台仪器的平行测量结果较一致时,开始正式测量。每次测量时,两人一组,以应对各种状况。每种出行方式的测量由固定的 2 人完成,以消除不同人员测量习惯不同造成的影响。

**1.4 统计学方法** 将每日仪器记录的所有  $\text{PM}_{2.5}$  浓度值导入计算机,分组别计算中位数、平均数,代表当日某种出行方式或地铁内某位置的个体暴露水平。采用 SPSS 20.0 进行统计分析,组间差异的比较采用 Kruskal-Wallis 检验,均为双侧检验,检验水准为 0.05。

## 2 结果

**2.1 3 种出行方式  $\text{PM}_{2.5}$  个体暴露水平比较** 本研究监测的 6 d 中不同出行方式  $\text{PM}_{2.5}$  个体暴露水平见表 1。在研究期间, $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平的波动幅度较大( $8 \sim 840 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),个体暴露浓度均值分别为 219.34、209.61、 $167.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,总体上看 3 种出行方式  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平的中位数较接近。

表 1 不同出行方式  $\text{PM}_{2.5}$  个体暴露水平( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

出行方式	样本数(个) <sup>a</sup>	最小值	最大值	$\bar{x} \pm s$	M
步行	428	8	840	$219.34 \pm 248.83$	154.0
公交	285	11	710	$209.61 \pm 201.80$	151.0
地铁	310	13	501	$167.56 \pm 98.07$	151.0

注:<sup>a</sup> 每分钟平均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的样本数。

在本研究连续 6 d 的监测期间,研究地点附近的北京市监测站点公布的大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度依次为 42、60、146、246、217、29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。考虑到背景浓度可能对 3 种出行方式的个体暴露水平产生影响,分别在每天进行 3 组间个体暴露水平的比较。在大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度低( $\leq 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的 3 d 中,乘坐地铁出行的  $\text{PM}_{2.5}$  个体暴露浓度较高;在大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较高( $>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )的 3 d 中,乘地铁时个体暴露较低。见表 2。

**2.2 不同大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下的不同出行方式个体暴露水平** 为了进一步分析不同大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下,出行方式间的暴露差异,将监测浓度  $\leq 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的 3 d 和监测浓度  $>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的 3 d 分别进行分析。当大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度  $\leq 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,乘坐地铁的  $\text{PM}_{2.5}$  个体暴露水平高于乘公交车,乘公交车高于步行,差异均有统计学意义( $P < 0.05$ );当大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度  $>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  时,乘坐地

铁的 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平明显低于步行和乘公交车, 差异有统计学意义( $P<0.05$ )。见表 3。

表 2 研究期间每日不同出行方式 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平比较( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

日期	室外浓度	出行方式	样本数(个) <sup>a</sup>	<i>M</i>
12 月 30 日	42	步行	75	13.0 <sup>bc</sup>
		公交	43	34.0
		地铁	15	64.0
12 月 31 日	60	步行	69	68.0 <sup>b</sup>
		公交	26	72.5 <sup>b</sup>
		地铁	14	89.0
1 月 1 日	146	步行	71	169.0 <sup>b</sup>
		公交	56	192.0 <sup>b</sup>
		地铁	68	116.0
1 月 2 日	246	步行	75	365.0 <sup>b</sup>
		公交	50	366.0 <sup>b</sup>
		地铁	73	191.0
1 月 3 日	217	步行	69	733.0 <sup>bc</sup>
		公交	48	614.5 <sup>b</sup>
		地铁	72	301.0
1 月 4 日	29	步行	69	11.0 <sup>bc</sup>
		公交	62	35.5 <sup>b</sup>
		地铁	68	63.0

注:<sup>a</sup> 每分钟平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度的样本数。<sup>b</sup> 与地铁比较, $P<0.05$ ;<sup>c</sup> 与公交比较, $P<0.05$ 。

表 3 不同水平室外大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度下各出行方式的个体暴露水平比较( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

室外浓度	出行方式	样本数(个) <sup>a</sup>	$\bar{x}\pm s$	<i>M</i>
$\leq 60$	步行	213	31.89 $\pm$ 29.76	14.0 <sup>bc</sup>
	公交	131	41.90 $\pm$ 20.70	39.0 <sup>b</sup>
	地铁	97	69.96 $\pm$ 20.87	65.0
$>100$	步行	215	405.05 $\pm$ 230.32	360.0 <sup>b</sup>
	公交	154	352.27 $\pm$ 175.11	354.5 <sup>b</sup>
	地铁	213	212.00 $\pm$ 86.48	193.0

注:<sup>a</sup> 每分钟平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度的样本数。<sup>b</sup> 与地铁比较, $P<0.05$ ;<sup>c</sup> 与公交比较, $P<0.05$ 。

**2.3 地铁站内不同位置的 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露浓度** 监测期间地铁站台、安检处和车厢内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度均值分别为 196.90、170.20、136.82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。站台处的 PM<sub>2.5</sub> 每分钟平均浓度均高于 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 浓度中位数为 222.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 高于安检处和车厢内, 且安检处 PM<sub>2.5</sub> 浓度平均水平高于车厢内, 差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。见表 4。

表 4 地铁内不同位置 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

地点	样本数(个) <sup>a</sup>	最小值	最大值	$\bar{x}\pm s$	<i>M</i>
安检	550	19	318	170.20 $\pm$ 86.23	201.0 <sup>bc</sup>
站台	488	51	326	196.90 $\pm$ 73.30	222.5 <sup>b</sup>
车厢	517	23	267	136.82 $\pm$ 62.13	147.0

注:<sup>a</sup> 每分钟平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度的样本数。<sup>b</sup> 与车厢内比较, $P<0.05$ ;<sup>c</sup> 与站台比较, $P<0.05$ 。

分别分析每日监测数据, 除第 4 天外, 站台 PM<sub>2.5</sub> 浓度均高于安检处和车厢内, 差异均有统计学意义( $P<0.05$ )。见表 5。

表 5 研究期间每日地铁不同位置 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平比较( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

日期	地点	样本数(个) <sup>a</sup>	<i>M</i>
12 月 31 日	安检	102	80.0 <sup>bc</sup>
	站台	83	147.0 <sup>b</sup>
1 月 1 日	车厢	103	90.0
	安检	123	206.0 <sup>c</sup>
	站台	95	225.0 <sup>b</sup>
1 月 2 日	车厢	103	206.0
	安检	110	263.0 <sup>bc</sup>
	站台	101	287.0 <sup>b</sup>
1 月 3 日	车厢	104	190.0
	安检	110	234.0 <sup>b</sup>
	站台	108	232.0 <sup>b</sup>
1 月 4 日	车厢	103	147.0
	安检	105	48.0 <sup>c</sup>
	站台	101	86.0 <sup>b</sup>
	车厢	104	52.0

注:<sup>a</sup> 每分钟平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度的样本数。<sup>b</sup> 与车厢内比较, $P<0.05$ ;<sup>c</sup> 与站台比较, $P<0.05$ 。

3 讨论

既往监测结果表明, 我国北方城市在冬季重污染天数较多, 大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度变异较大<sup>[10]</sup>。从本研究监测期间的大气 PM<sub>2.5</sub> 水平来看, 本次监测的第 1、2、6 天的 大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低, 未超过 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 第 3、4、5 天 PM<sub>2.5</sub> 浓度均超过 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 其中第 4、5 天超过 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。可见大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度日间变化幅度较大, 为分析不同大气污染状况下出行方式对 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露水平的影响提供了条件。

从 3 种不同出行方式的比较结果可见, 在不同的 大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度下, 不同出行方式的暴露水平不同。在 大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度较低时( $\leq 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 乘坐地铁出行的 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露浓度最高(69.96  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 其次是乘坐公 交车和步行, 其 PM<sub>2.5</sub> 个体暴露浓度分别为 41.90、 31.89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而在大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度较高时( $>100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 乘地铁成为 3 种出行方式中个体暴露最低的一种, 其 暴露水平只有步行和乘公交的 50%。原因可能是步行 直接暴露于外界环境中, 而公交车亦非完全封闭, 外 界空气中的颗粒物可进入车内, 因此两者受大气 PM<sub>2.5</sub> 污染影响较大, 随着大气 PM<sub>2.5</sub> 污染的加重, 步行和公 交车内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度快速上升, 而地铁则上升缓慢。此 外, 步行和公交车均属于地面交通方式, 具有良好的 扩散条件, 因此在大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度低时个体暴露也低; 地铁位于地下, 为封闭环境, 受地上污染源影响相对



较小,且扩散条件较差,因此相对于步行和公交车,地铁具有低污染时暴露不低、高污染时暴露不高的特点。

部分学者在北京进行的监测亦得出了与本研究较为一致的结论。李友平等<sup>[11]</sup>的研究显示,步行  $PM_{2.5}$  暴露水平为  $41.5 \mu g/m^3$ ,公交车为  $41.6 \mu g/m^3$ ,研究期间的环境  $PM_{2.5}$  水平不超过  $75 \mu g/m^3$ ,该结果与本研究基本一致,均表明在低污染环境下步行与乘公交车的个体暴露水平无明显差异。Yan 等<sup>[12]</sup>对北京的研究发现,步行、公交车和地铁暴露水平分别为 26.7、32.9、 $56.9 \mu g/m^3$ ,与本研究第 1、6 天的测量结果基本一致,反映出地铁低污染时暴露不低的特点。但也有一些研究与本研究结果不尽相同,如在英国伦敦进行的一项调查发现,乘坐地铁的暴露水平在大气  $PM_{2.5}$  浓度较低时,即可达到  $150 \mu g/m^3$  甚至超过  $200 \mu g/m^3$ <sup>[13]</sup>;中国台北的研究发现, $PM_{2.5}$  平均暴露水平仅  $35.0 \mu g/m^3$ ,在低大气  $PM_{2.5}$  水平时个体暴露下限也较低<sup>[14]</sup>。但这些城市的地铁系统与北京不同,车站、车厢设计不同,运输量也不同,因此研究结果与本研究结果可比性不强。这也说明乘地铁的个体  $PM_{2.5}$  暴露特征因地而异,其他地区的个体  $PM_{2.5}$  暴露规律可能不适用于北京。

本研究还发现,在地铁站内的不同位置,个体  $PM_{2.5}$  的暴露水平有所不同。与地铁车厢内相比,站台的暴露水平较高,与其他学者的研究结果一致<sup>[8-9,15]</sup>。安检处  $PM_{2.5}$  浓度日间波动明显,但总体水平较站台低。此种  $PM_{2.5}$  浓度分布规律与地铁站的建筑结构有关。本研究选择的地铁站安检处位于地下一层,站台位于地下二层,故安检处更靠近地面,通风更好,因此安检处的  $PM_{2.5}$  浓度更接近地面浓度,受背景值影响较大,日间变异较大;站台位置较深,通风和扩散条件差,且靠近可能是污染源的列车与轨道,导致站台  $PM_{2.5}$  浓度偏高,基本不低于  $50 \mu g/m^3$ ,重污染时甚至超过  $300 \mu g/m^3$ 。本次监测结果表明,出行者在站台等车时的  $PM_{2.5}$  暴露水平高于地上,因此在污染较重时,不仅在室外,在地铁站台可能也需要采取个人防护措施。此外,站台的高浓度  $PM_{2.5}$  应被地铁站建筑设计者关注,在建设新地铁站时应注意通风系统的设计,使之符合卫生学要求。

本次研究存在局限性,主要不足是采样天数较少,只能按不同日期粗略区分大气  $PM_{2.5}$  浓度高低,不能定量描述不同大气  $PM_{2.5}$  污染状况下的出行方式间暴露水平。另外采样时间集中在冬季,代表性有限。在实施过程中,不同交通方式的总出行时间有一定差别,如果大气  $PM_{2.5}$  浓度随时间变化较大,结果可能出现一定偏差。但从附近监测点的数据来看,本研究期

间每日监测时间(上午 9:00—11:00)内的  $PM_{2.5}$  浓度波动不明显,因此结果不会受到太大影响。

综上所述,当大气  $PM_{2.5}$  浓度较低时( $\leq 60 \mu g/m^3$ ),乘地铁的个体暴露水平高于步行和乘公交;当大气  $PM_{2.5}$  浓度较高时( $>100 \mu g/m^3$ ),乘地铁暴露水平低于步行和乘公交。为了减少居民出行过程中的  $PM_{2.5}$  暴露,在  $PM_{2.5}$  污染严重时可选择乘地铁出行, $PM_{2.5}$  污染较轻且目的地距离较近时可选择步行或乘公交。地铁站台的  $PM_{2.5}$  浓度高于车厢内和安检处,因此站内候车时的  $PM_{2.5}$  个体暴露不能忽视。

## 参考文献

- [1] Farmer SA, Nelin TD, Falvo MJ, et al. Ambient and household air pollution: complex triggers of disease[J]. Am J Physiol Heart Circ Physiol, 2014, 307: 467–476.
- [2] Peters A, Klot S, Heier M, et al. Exposure to traffic and the onset of myocardial infarction[J]. N Engl J Med, 2004, 351: 1721–1730.
- [3] Adams HS, Nieuwenhuijsen MJ, Colville RN, et al. Fine particle ( $PM_{2.5}$ ) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK[J]. Sci Total Environ, 2001, 279: 29–44.
- [4] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Chinese Crowd Behavior Patterns of Environmental Exposure Study Report (Adult Volumes) [M]. China Environmental Science Press, 2013.
- [5] Huang J, Deng FR, Wu SW, et al. Comparisons of personal exposure to  $PM_{2.5}$  and CO by different commuting modes in Beijing, China[J]. Sci Total Environ, 2012, 425: 52–59.
- [6] Suarez L, Mesias S, Iglesias V, et al. Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile[J]. Environ Sci Process Impacts, 2014, 16: 1309–1317.
- [7] Vânia M, Teresa M, Luís M, et al. Factors controlling air quality in different European subway systems[J]. Environ Res, 2016, 146: 35–46.
- [8] 李路野,樊越胜,谢伟,等.西安市地铁环境中大气颗粒物污染现状调查[J]. 环境与健康杂志, 2013, 30(2): 160–161.
- [9] 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.
- [10] 王占山,李云婷,陈添,等.2013 年北京市  $PM_{2.5}$  的时空分布[J]. 地理学报, 2015, 70(1): 110–120.
- [11] 李友平,范忠雨,李坤,等.不同出行方式  $PM_{2.5}$  个体暴露及其影响因素[J]. 环境化学, 2015, 34(8): 1408–1416.
- [12] Yan CQ, Zheng M, Yang QY, et al. Commuter exposure to particulate matter and particle-bound PAHs in three transportation modes in Beijing, China[J]. Environ Pollution, 2015, 204: 199–206.
- [13] Angeliki K, Mar V, Xavier Q, et al. Assessment of personal exposure to particulate air pollution during commuting in European cities: recommendations and policy implications [J]. Sci Total Environ, 2014, 490: 785–797.
- [14] Tsai DH, Wu YH, Chan CC. Comparisons of commuter's exposure to particulate matters while using different transportation modes[J]. Sci Total Environ, 2008, 405: 71–77.
- [15] Vânia M, Teresa M, María CM, et al. Exposure to airborne particulate matter in the subway system [J]. Sci Total Environ, 2015, 511: 711–722.

收稿日期: 2016-04-29 责任编辑: 黄丽媛