

# 广州市中心城区不同通勤方式PM<sub>2.5</sub>暴露水平研究

吕晓娟 李志浩 李杏 曾韦霖 杨攀 林巧绚 郑敬严 杜晓龙 古羽舟  
赵永谦 谢润生 刘涛 林华亮 马文军

511430 广州,广东省疾病预防控制中心广东省公共卫生研究院环境与健康研究室(吕晓娟、李志浩、李杏、曾韦霖、杨攀、林巧绚、郑敬严、杜晓龙、古羽舟、赵永谦、谢润生、刘涛、林华亮、马文军); 510515 广州,南方医科大学公共卫生与热带医学学院(吕晓娟、马文军)

通信作者:马文军, Email: mwj68@gdiph.org.cn

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-6450.2017.03.007

**【摘要】** 目的 了解广州市步行、骑自行车、乘公交、乘地铁4种通勤方式大气PM<sub>2.5</sub>暴露水平。方法 于2015年1—12月,采用美国TSI公司生产的SidePak AM510个体粉尘仪在每个月第2周的周一、周三、周五、周日,每天分早(07:00—09:00)、中(11:00—13:00)、晚(17:00—19:00)3个时段,进行不同通勤方式空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)暴露监测,每隔1 min记录1次数据。结果 步行、骑自行车、乘公交、乘地铁4种通勤方式得到的有效样本量依次为284、281、278和280个。步行、骑自行车、乘公交和乘地铁PM<sub>2.5</sub>暴露浓度M分别为38.4、38.6、23.3和24.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,均与同期监测点的暴露浓度呈正相关( $r > 0.8, P < 0.01$ )。4种通勤方式PM<sub>2.5</sub>暴露浓度均以夏季最低,冬季最高。考虑暴露时间和呼吸速率,4种通勤方式单程暴露量的M由高到低依次为骑自行车21.0  $\mu\text{g}$ 、步行20.1  $\mu\text{g}$ 、乘公交5.1  $\mu\text{g}$ 、乘地铁2.6  $\mu\text{g}$ 。4种通勤方式单程暴露量季节及时段的变化趋势与暴露浓度一致。结论 步行、骑自行车PM<sub>2.5</sub>的暴露浓度高于乘公交和地铁。4种通勤方式的单程暴露PM<sub>2.5</sub>量依次为骑自行车>步行>乘公交>乘地铁。

**【关键词】** PM<sub>2.5</sub>; 步行; 自行车; 公交; 地铁

**基金项目:**广东省科技计划项目(2016A020223008); 广州市科技计划项目(201607010004)

**Commuting mode specific exposure to PM<sub>2.5</sub> in urban area of Guangzhou** Lyu Xiaojuan, Li Zhihao, Li Xing, Zeng Weilin, Yang Pan, Lin Qiaoxuan, Zheng Jingyan, Du Xiaolong, Gu Yuzhou, Zhao Yongqian, Xie Runsheng, Liu Tao, Lin Hualiang, Ma Wenjun

Environmental Health Department, Guangdong Provincial Institute of Public Health, Guangdong Provincial Center for Disease Control and Prevention, Guangzhou 511430, China (Lyu XJ, Li ZH, Li X, Zeng WL, Yang P, Lin QX, Zheng JY, Du XL, Gu YZ, Zhao YQ, Xie RS, Liu T, Lin HL, Ma WJ); School of Public Health and Tropical Medicine, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China (Lyu XJ, Ma WJ)

Corresponding author: Ma Wenjun, Email: mwj68@gdiph.org.cn

**【Abstract】 Objective** To find the differences in PM<sub>2.5</sub> exposure level in the context of four commuting modes (by walk, bicycle, bus and subway) in Guangzhou. **Methods** The PM<sub>2.5</sub> exposure assessment was carried out from January to December 2015 in Guangzhou. PM<sub>2.5</sub> was measured by using SidePak individual dust meter (AM510, TSI Inc. USA) with time interval of 1 minute. Our measurement was taken on Monday, Wednesday, Friday and Sunday in the second week of each month and the samples were collected in the morning (07:00–09:00), afternoon (11:00–13:00) and evening (17:00–19:00). **Results** A total of 284 air samples during walking, 281 air samples during bicycle riding, 278 air samples in bus, and 280 air samples in subway were collected. The median PM<sub>2.5</sub> concentrations exposed during walking, during bicycle riding, in bus and in subway were 38.4, 38.6, 23.3 and 24.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively, which were positive correlated with exposure concentration in fixed surveillance sites. The exposure level was lowest in summer, and highest in winter. The median of one-way exposure level to PM<sub>2.5</sub> from high to low were as follows: 21.0  $\mu\text{g}$  for bicycle riding, 20.1  $\mu\text{g}$

for walking, 5.1  $\mu\text{g}$  for taking bus and 2.6  $\mu\text{g}$  for taking subway. The season and time specific one-way exposure levels to  $\text{PM}_{2.5}$  of four commuting modes were consistent. **Conclusions** The exposure level to  $\text{PM}_{2.5}$  was obviously higher during walking and bicycle riding than that in bus and subway. The exposure level to  $\text{PM}_{2.5}$  during walking was higher than that during bicycle riding, in bus and in subway.

**【Key words】**  $\text{PM}_{2.5}$  exposure; Walking; Bicycle; Bus; Subway

**Fund programs:** Guangdong Provincial Science and Technology Project (2016A020223008); Guangzhou Science and Technology Project (201607010004)

由于经济高速发展,环境污染问题日益突出,大气污染成为人民群众关注的热点问题之一。空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )是我国城市大气污染的主要污染物之一,严重危害人体健康<sup>[1-5]</sup>。人们通过各种方式暴露于大气污染,其中通勤是日常生活中大气污染物高暴露的活动模式之一,在交通繁忙的大城市尤甚。通勤是指居民在居住地和 workplace 之间的往返过程,是人们活动模式中的重要组成部分<sup>[6]</sup>。WHO 的报告显示,人们每天用于通勤的时间约为 1~1.5 h,在此期间  $\text{PM}_{2.5}$  的暴露量约占环境总暴露量的 15% 左右<sup>[7]</sup>,且交通时间每增加 1 h,  $\text{PM}_{2.5}$  的个体暴露量将增加 2.5  $\mu\text{g}$ <sup>[8]</sup>。已有研究表明,广州市通勤环境  $\text{PM}_{2.5}$  污染严重<sup>[9-10]</sup>,且据《2014 中国劳动力市场发展报告》显示,广州市市民的通勤时间位于全国前列,接近 1.5 h。因此,开展通勤环境  $\text{PM}_{2.5}$  暴露研究对于准确评估广州市市民  $\text{PM}_{2.5}$  的健康风险具有重要意义。

## 资料与方法

1. 研究地点:选择广州市越秀区烈士陵园地铁站至荔湾区陈家祠地铁站这一段路线,全程约 4 km,对步行、骑自行车、乘公交、乘地铁 4 种通勤方式  $\text{PM}_{2.5}$  暴露浓度进行监测。该路线横跨越秀-荔湾两个广州老城区,途经中华广场商圈、北京路及上下九商圈,是广州城区的代表性路段,且临近广州市环境监测中心站,便于收集研究期间环境中  $\text{PM}_{2.5}$  暴露浓度。此外,该路段 4 种通勤线路基本一致,可排除各通勤方式因线路不一所致的暴露差异。

2. 研究时间:于 2015 年 1—12 月,选择每个月第 2 周的周一、周三、周五、周日 4 d,进行通勤  $\text{PM}_{2.5}$  的暴露监测。并将每个监测日期分为早、中、晚 3 个时段,依次为 07:00—9:00、11:00—13:00、17:00—19:00。各时段每种通勤方式去程(烈士陵园地铁站 C 出口→陈家祠地铁站 D 出口)与返程(陈家祠地铁站 A 出口→烈士陵园地铁站 B1 出口)连续监测 1 次。

3. 研究方法:采用美国 TSI 公司生产的 SidePak AM510 个体粉尘仪进行  $\text{PM}_{2.5}$  监测。记录数据的时间间隔设置为 1 min,流速调整为 1.7 L/min。监测前

均对粉尘仪的光学和零点进行校正,开机预热 10 min 再进行监测,以确保监测数据的准确性。监测时由 4 名监测人员各采取一种通勤方式在同一时段的同时开始,监测人员统一将仪器置于背包侧面的网格袋,保持出气口通畅,并将进气口导管夹于背包上缘,使进气口的高度与呼吸带高度保持一致,以保证不同通勤方式暴露数据的可比性。将粉尘仪中监测数据导入计算机,检查数据的完整性。仪器的监测时间和通勤记录表的时间以分钟(min)为单位进行核对,误差在 $\pm 5$  min 内的数据视为完整。剔除不完整数据后,为便于环境监测数据与实验数据进行匹配,将 1 次通勤过程监测的每分钟暴露浓度平均值作为 1 个样本,以代表各通勤方式 1 次通勤过程  $\text{PM}_{2.5}$  的暴露浓度。因所收集的环境监测站点  $\text{PM}_{2.5}$  暴露浓度数据是每小时均值,而实验监测数据为每分钟的均值。单程暴露量计算公式:

$$D = \int_{t_1}^{t_2} C(t) \times IR(t) \times dt$$

式中,  $D$  为单程暴露量( $\mu\text{g}$ );  $C(t)$  是通勤暴露浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ );  $t_1$  和  $t_2$  分别是通勤的起止时间;  $IR(t)$  为呼吸速率( $\text{m}^3/\text{min}$ )。呼吸速率取自刘平等<sup>[11]</sup>对我国成年人呼吸量研究中广东部分的数据,以坐、轻微运动、中度运动状态下的呼吸速率值作为此次研究中坐车(公交、地铁)、步行、骑自行车的计算值,分别为  $6.3 \times 10^{-3}$ 、 $7.9 \times 10^{-3}$ 、 $21 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{min}$ 。

4. 统计学分析:应用 Excel 2013 软件整理数据,并建立数据库。用 SPSS 21 软件进行统计分析。经正态分布检验,通勤  $\text{PM}_{2.5}$  暴露浓度数据、固定监测站点数据以及通勤  $\text{PM}_{2.5}$  暴露量数据均为非正态分布,因此选择秩和检验进行不同通勤方式暴露浓度数据,不同季节及时段暴露数据的差异性检验,检验水准为  $\alpha = 0.05$ ;采用  $\bar{x}$ 、 $M$  和  $Q_R$  对通勤和监测点  $\text{PM}_{2.5}$  暴露浓度,以及通勤  $\text{PM}_{2.5}$  暴露量进行统计描述。采用 Spearman 相关分析,对通勤  $\text{PM}_{2.5}$  暴露浓度和固定站点监测数据的相关性进行分析。

## 结 果

1. 样本情况:共监测 12 周 48 d,4 种通勤方式各

收集到288个样本,共有样本1 152个。剔除缺失和异常数据后有效样本数为1 123个,各通勤方式具体样本量见表1。

表1 广州市4种通勤方式PM<sub>2.5</sub>暴露浓度的样本个数

通勤方式	周一			周三			周五			周日			合计
	早	中	晚	早	中	晚	早	中	晚	早	中	晚	
步行	23	23	24	24	23	24	23	24	24	24	24	24	284
骑自行车	23	23	23	24	23	24	22	23	24	24	24	24	281
乘公交	24	22	24	24	24	24	24	24	23	22	21	22	278
乘地铁	22	21	24	24	22	24	24	24	24	23	24	24	280

2. 通勤暴露浓度:研究期间步行、骑自行车、乘公交、乘地铁PM<sub>2.5</sub>暴露浓度的均数分别为46.1、46.0、29.3、27.7 μg/m<sup>3</sup>, M分别为38.4、38.6、23.3、24.1 μg/m<sup>3</sup>。秩和检验结果显示,乘公交、地铁暴露浓度低于同期PM<sub>2.5</sub>监测点的浓度(P<0.05);步行、骑自行车暴露浓度与监测点暴露浓度比较,差异无统计学意义(P>0.05)。Spearman相关分析结果显示,各通勤方式PM<sub>2.5</sub>暴露浓度和监测点浓度的Spearman相关系数(r<sub>s</sub>)均>0.8(P<0.01),呈正相关,见表2。

表2 广州市4种通勤方式及监测点PM<sub>2.5</sub>暴露浓度(μg/m<sup>3</sup>)

通勤方式	样本量	通勤暴露浓度 <sup>a</sup>	监测点浓度 <sup>a</sup>	r <sub>s</sub> (P<0.01)
步行	284	38.4(23.4~56.7) <sup>b</sup>	40.4(27.0~53.3) <sup>c,d</sup>	0.889
骑自行车	281	38.6(23.3~54.1)	40.7(27.0~53.3) <sup>d</sup>	0.879
乘公交	278	23.3(14.3~35.5)	40.0(25.8~53.1) <sup>e</sup>	0.826
乘地铁	280	24.1(16.9~33.4)	41.0(27.0~53.8) <sup>e</sup>	0.817

注:<sup>a</sup>M(Q<sub>n</sub>);步行、骑自行车、乘公交、乘地铁通勤暴露浓度及监测点浓度比较,经Kruskal-Wallis H秩和检验,<sup>b</sup>P<0.05,<sup>c</sup>P>0.05;通勤暴露浓度与监测点浓度比较,经Mann-Whitney U秩和检验,<sup>d</sup>P>0.05,<sup>e</sup>P<0.05

4种通勤方式的暴露浓度M均在夏季最低,其次是春、秋季,冬季最高,经秩和检验结果显示,不同季节间的暴露差异均有统计学意义(P<0.01)。步行、乘公交、乘地铁通勤在早、中、晚3个时段PM<sub>2.5</sub>的暴露浓度差异无统计学意义(P>0.05),骑自行车通勤中午时段的暴露浓度高于早、晚两个时段(P=0.048)。见表3。

表3 广州市不同季节和时段4种通勤方式PM<sub>2.5</sub>暴露浓度<sup>a</sup>(μg/m<sup>3</sup>)

通勤方式	季 节				P值	时 段			P值
	春	夏	秋	冬		早	中	晚	
步行	40.1(31.5~52.4)	23.7(19.6~35.4)	38.8(30.0~52.7)	60.4(32.2~79.1)	<0.01	37.4(23.2~61.7)	46.1(29.7~57.7)	31.4(22.7~49.9)	0.066
骑自行车	40.2(30.0~56.0)	23.1(19.5~36.2)	39.8(31.0~51.1)	58.2(28.4~77.9)	<0.01	39.2(24.0~59.5)	46.9(25.7~57.4)	30.6(22.2~48.4)	0.048
乘公交	24.4(17.5~36.2)	15.6(11.8~21.6)	23.9(15.1~30.2)	40.0(19.3~54.8)	<0.01	23.7(15.2~39.3)	26.3(16.2~36.3)	19.5(13.2~34.1)	0.124
乘地铁	24.4(18.1~30.2)	17.5(13.0~22.2)	25.5(20.0~34.7)	37.5(24.6~49.2)	<0.01	24.4(17.7~36.5)	24.1(16.6~33.0)	24.0(16.6~32.6)	0.171

注:<sup>a</sup>M(Q<sub>n</sub>)

3. 通勤暴露量:研究期间通勤PM<sub>2.5</sub>单程暴露量以骑自行车最高,其暴露量M达21.0 μg,步行、乘公交和乘地铁单程暴露量的M分别为20.1、5.1和2.6 μg,秩和检验结果显示,4种通勤方式单程暴露量差异有统计学意义(P<0.05)。4种通勤环境各季暴露量的变化特征与暴露浓度相似,冬季最高,夏季最低,不同季节间差异有统计学意义(P<0.01)。步行、骑自行车在3个时段的暴露量依次为中>早>晚,公交、地铁的暴露量各时段间差异无统计学意义(P>0.05)。见表4和表5。

表4 广州市4种通勤方式PM<sub>2.5</sub>暴露的相关指标

通勤方式	呼吸速率(m <sup>3</sup> /min)	暴露时间 <sup>a</sup> (min)	暴露量 <sup>b</sup> (μg)
步行	7.9×10 <sup>-3</sup>	65.6±6.8	20.1(12.4~29.2) <sup>c</sup>
骑自行车	21×10 <sup>-3</sup>	28.2±4.7	21.0(14.0~33.5)
乘公交	6.3×10 <sup>-3</sup>	33.1±8.3	5.1(3.2~7.4)
乘地铁	6.3×10 <sup>-3</sup>	16.0±2.1	2.6(1.8~3.7)

注:<sup>a</sup> $\bar{x} \pm s$ ; <sup>b</sup>M(Q<sub>n</sub>);4种通勤方式单程暴露量比较,经Kruskal-Wallis H秩和检验,<sup>c</sup>P<0.05

## 讨 论

本研究选择广州市区某一路线,对步行、骑自行车、乘公交、乘地铁4种通勤方式PM<sub>2.5</sub>的暴露进行观察。结果显示,步行和骑自行车暴露浓度相近,明显高于乘公交和地铁,通勤时PM<sub>2.5</sub>暴露浓度与监测站点暴露浓度差异有统计学意义,故不能直接采用监测点浓度来开展人群的健康风险评估,而从通勤暴露浓度数据与监测点浓度数据的相关性分析发现,两者之间呈正相关性,提示可以通过环境监测浓度间接反映通勤时的暴露浓度。本研究通勤PM<sub>2.5</sub>暴露浓度的平均值与2000年广州市的研究结果相比,乘公交和地铁的暴露浓度下降明显(123和44 μg/m<sup>3</sup>)<sup>[9]</sup>,这与近年来广州市采取措施大力控制空气污染有很大关系。本研究步行的暴露浓度均值低于爱尔兰共和国都柏林、中国广东省佛山市及土耳其等地<sup>[12-14]</sup>,高于美国纽约、西班牙巴塞罗那及英国伦敦等地<sup>[15-17]</sup>;骑自行车的暴露浓度均值与中国四川省南充市、北京市的研究相当<sup>[18-19]</sup>,但高于西班牙巴塞罗那、英国

表 5 广州市不同季节和时段 4 种通勤方式 PM<sub>2.5</sub> 单程暴露量<sup>a</sup>( $\mu\text{g}$ )

通勤方式	季 节				P 值	时 段			P 值
	春	夏	秋	冬		早	中	晚	
步行	20.6(15.2~26.9)	12.5(10.6~17.7)	20.9(14.4~29.1)	29.0(16.5~36.3)	<0.01	19.8(12.5~29.2)	23.7(13.5~31.5)	15.4(11.5~27.2)	0.021
骑自行车	23.1(16.4~31.3)	13.5(11.1~18.4)	24.4(17.3~30.7)	36.2(17.3~43.8)	<0.01	22.4(15.0~36.4)	26.7(16.0~35.9)	17.8(12.1~29.1)	0.022
乘公交	5.6(3.3~7.8)	3.4(2.5~5.1)	4.6(3.4~6.3)	7.3(4.3~10.5)	<0.01	4.2(2.7~6.9)	5.5(3.4~8.0)	5.1(3.2~6.7)	0.164
乘地铁	2.5(1.8~3.2)	1.9(1.5~2.4)	2.8(2.1~4.1)	3.7(2.8~5.3)	<0.01	2.6(1.8~4.3)	2.5(1.8~3.5)	2.7(1.9~3.7)	0.673

注: <sup>a</sup>M(Q<sub>n</sub>)

伦敦等地<sup>[15,20-21]</sup>;乘公交的暴露浓度均值普遍低于其他研究<sup>[13,22-24]</sup>;乘地铁的暴露浓度均值也基本低于其他研究<sup>[25-26]</sup>。但比较时也要注意<sup>[6]</sup>,国内外各研究所用仪器型号及厂商均有不同,而不同厂家的仪器甚至同一厂家的不同型号在检测方法及检测原理均有差异,因此下结论需谨慎。本研究乘公交的暴露浓度相对其他研究低的可能原因有二:一是本研究选择的公交是以电能为动力的,其PM<sub>2.5</sub>的暴露浓度比以柴油等燃料的暴露浓度低<sup>[27]</sup>;二是本研究所乘公交均处于空调开启状态,对环境PM<sub>2.5</sub>的暴露有较好的隔离作用<sup>[9,24]</sup>。而乘地铁PM<sub>2.5</sub>暴露浓度较低则可能与广州市地铁设计布局有关。广州市地铁均设在地下,且地铁站台均采用全封闭式屏蔽门,对来自地铁铁轨、悬链及刹车系统等金属磨损的PM<sub>2.5</sub>污染有一定的阻挡作用。

从通勤暴露的季节变化来看,各通勤方式均在夏季暴露浓度最低,冬季暴露浓度最高。中国广东省佛山市的研究也显示骑自行车、乘公交、乘地铁的暴露浓度夏季低于春季,但步行的暴露浓度夏季高于春季<sup>[12]</sup>。英国伦敦对骑自行车、乘公交、乘地铁的通勤暴露研究发现,夏季的暴露浓度高于冬季<sup>[21]</sup>。而爱尔兰都柏林却在秋季暴露浓度最高,其次是夏、春,冬季最低<sup>[13]</sup>。这可能与不同研究点的环境PM<sub>2.5</sub>的季节性趋势不一致有关。已有研究发现,通勤早时段暴露浓度高于中午和晚上时段<sup>[19]</sup>,这是颗粒物本身“L”形日变化特征的呈现<sup>[28]</sup>。但本研究中早、中、晚 3 个时段间PM<sub>2.5</sub>的暴露浓度未发现类似的规律。

在同时考虑通勤环境PM<sub>2.5</sub>的暴露浓度、通勤过程的呼吸速率及暴露时间后,发现骑自行车的单程暴露量高于步行,远高于乘公交和地铁暴露量。Huang等<sup>[18]</sup>发现,相同的通勤路程,骑自行车的暴露量明显高于乘公交的暴露量。Nyhan等<sup>[29]</sup>的研究也发现,骑自行车的暴露量明显高于步行、乘公交、乘地铁等通勤方式。这与不同通勤方式下,人们的呼吸速率差异有关。如有研究发现,骑行者每分钟的

通气量是乘公交、汽车通勤者的1~5倍,相同的通勤路程骑行者颗粒物暴露量将比乘汽车高出4~7倍<sup>[14,16,30]</sup>。本研究采用的广州市居民骑行时的呼吸速率是乘公交、地铁等通勤方式的3倍左右,骑自行车通勤PM<sub>2.5</sub>的中位暴露量约是乘公交中位暴露量的4倍,乘地铁中位暴露量的8倍。可见通勤人员在通勤活动时的呼吸速率对于通勤暴露评估意义重大。因此,在进行不同通勤的暴露比较时,应同时考虑呼吸速率、暴露时间和通勤路程等因素的影响<sup>[22]</sup>。但对于同一通勤方式而言,在暴露时间一定时,暴露量的月、季节及时段间的变化趋势与暴露浓度是一致的。因此,在研究同一通勤暴露在不同时间点的变化特征时,可直接采用暴露浓度作为评价指标。

综上所述,人们在选择通勤方式时,应考虑不同通勤方式PM<sub>2.5</sub>的暴露特征及自身身体情况。对PM<sub>2.5</sub>暴露的易感人群,如呼吸系统疾病患者、心血管系统疾病患者、老年人、孕妇及婴幼儿等,在出行前应了解当天的大气污染情况,特别是在冬季大气污染严重时,应减少出行时间,选择乘公交、地铁等暴露风险较低的出行方式。

利益冲突 无

## 参 考 文 献

- [1] Liang RJ, Zhang B, Zhao XY, et al. Effect of exposure to PM<sub>2.5</sub> on blood pressure: a systematic review and Meta-analysis [J]. J Hypertens, 2014, 32 (11): 2130-2141. DOI: 10.1097/HJH.0000000000000342.
- [2] Beelen R, Hoek G, van Den Brandt PA, et al. Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR study) [J]. Environ Health Perspect, 2008, 116(2): 196-202. DOI: 10.1289/ehp.10767.
- [3] Pope III CA, Burnett RT, Thun MJ, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. JAMA, 2002, 287 (9): 1132-1141. DOI: 10.1001/jama.287.9.1132.
- [4] Lim SS, Vos T, Flaxman AD, 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]. Lancet, 2012, 380 (9859): 2224-2260. DOI: 10.1016/

- S0140-6736(12)61766-8.
- [5] 潘小川, 李国星, 高婷. 危险的呼吸: PM<sub>2.5</sub>的健康危害和经济损失评估研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 33-44.  
Pan XC, Li GX, Gao T. Dangerous breath: the evaluate research of PM<sub>2.5</sub> health risk and economic loss [M]. Beijing: Environmental Science Press of China, 2012: 33-44.
- [6] Karanasiou A, Viana M, Querol X, 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. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.036.
- [7] Behrentz E, Sabin LD, Winer AM, et al. Relative importance of school bus-related microenvironments to children's pollutant exposure [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2005, 55 (10): 1418-1430. DOI: 10.1080/10473289.2005.10464739.
- [8] Rojas-Bracho L, Suh HH, Catalano PJ, et al. Personal exposures to particles and their relationships with personal activities for chronic obstructive pulmonary disease patients living in Boston [J]. *J Air Waste Manag Assoc*, 2004, 54 (2): 207-217. DOI: 10.1080/10473289.2004.10470897.
- [9] Chan LY, Lau WL, Zou SC, et al. Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China [J]. *Atmos Environ*, 2002, 36 (38): 5831-5840. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00687-8.
- [10] 龙连芳, 王新明, 冯宝志, 等. 广州市区公交车站PM<sub>2.5</sub>与CO暴露水平研究[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(9): 140-145. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2010.09.029.  
Long LF, Wang XM, Feng BZ, et al. Exposure levels of PM<sub>2.5</sub> and CO at bus stations in urban Guangzhou [J]. *Environ Sci Technol*, 2010, 33(9): 140-145. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2010.09.029.
- [11] 刘平, 王贝贝, 赵秀阁, 等. 我国成人呼吸量研究[J]. *环境与健康杂志*, 2014, 31(11): 953-956.  
Liu P, Wang BB, Zhao XG, et al. Research on inhalation rate of Chinese adults [J]. *J Environ Health*, 2014, 31(11): 953-956.
- [12] Wu DL, Lin M, Chan CY, et al. Influences of commuting mode, air conditioning mode and meteorological parameters on fine particle (PM<sub>2.5</sub>) exposure levels in traffic microenvironments [J]. *Aerosol Air Qual Res*, 2013, 13: 709-720. DOI: 10.4209/aaqr.2012.08.0212.
- [13] McNabola A, Broderick BM, Gill LW. Relative exposure to fine particulate matter and VOCs between transport microenvironments in Dublin: personal exposure and uptake [J]. *Atmos Environ*, 2008, 42(26): 6496-6512. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.04.015.
- [14] Panis LI, de Geus B, Vandembulcke G, et al. Exposure to particulate matter in traffic: a comparison of cyclists and car passengers [J]. *Atmos Environ*, 2010, 44 (19): 2263-2270. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2010.04.028.
- [15] de Nazelle A, Fruin S, Westerdahl D, et al. A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona [J]. *Atmos Environ*, 2012, 59: 151-159. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2012.05.013.
- [16] O' Donoghue RT, Gill LW, McKeivitt RJ, et al. Exposure to hydrocarbon concentrations while commuting or exercising in Dublin [J]. *Environ Int*, 2007, 33 (1): 1-8. DOI: 10.1016/j.envint.2006.05.005.
- [17] Kaur S, Nieuwenhuijsen M, Colville R. Personal exposure of street canyon intersection users to PM<sub>2.5</sub>, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK [J]. *Atmos Environ*, 2005, 39 (20): 3629-3641. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2005.02.046.
- [18] Huang J, Deng F, Wu S, et al. Comparisons of personal exposure to PM<sub>2.5</sub> and CO by different commuting modes in Beijing, China [J]. *Sci Total Environ*, 2012, 425: 52-59. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.007.
- [19] 李友平, 范忠雨, 李坤, 等. 不同出行方式PM<sub>2.5</sub>个体暴露及其影响因素[J]. *环境化学*, 2015, 34(8): 1408-1416. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.08.2015012610.  
Li YP, Fan ZY, Li K, et al. Commuter exposure to PM<sub>2.5</sub> and its influencing factors in different commuting modes [J]. *Environ Chem*, 2015, 34(8): 1408-1416. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.08.2015012610.
- [20] Adams HS, Nieuwenhuijsen MJ, Colville RN. Determinants of fine particle (PM<sub>2.5</sub>) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK [J]. *Atmos Environ*, 2001, 35 (27): 4557-4566. DOI: 10.1016/S1352-2310(01)00194-7.
- [21] Adams HS, Nieuwenhuijsen MJ, Colville RN, et al. Fine particle (PM<sub>2.5</sub>) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK [J]. *Sci Total Environ*, 2001, 279 (1/3): 29-44. DOI: 10.1016/S0048-9697(01)00723-9.
- [22] Vouitsis I, Taimisto P, Kelessis A, et al. Microenvironment particle measurements in Thessaloniki, Greece [J]. *Urban Climate*, 2014, 10: 608-620. DOI: 10.1016/j.uclim.2014.03.009.
- [23] Kumar P, Gupta NC. Commuter exposure to inhalable, thoracic and alveolic particles in various transportation modes in Delhi [J]. *Sci Total Environ*, 2016, 541: 535-541. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.09.076.
- [24] Chan LY, Lau WL, Lee SC, et al. Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong [J]. *Atmos Environ*, 2002, 36 (21): 3363-3373. DOI: 10.1016/S1352-2310(02)00318-7.
- [25] 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 Pollut*, 2015, 204: 199-206. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.05.001.
- [26] Onat B, Stakeeva B. Personal exposure of commuters in public transport to PM<sub>2.5</sub> and fine particle counts [J]. *Atmos Pollut Res*, 2013, 4(3): 329-335. DOI: 10.5094/APR.2013.037.
- [27] Zurbier M, Hoek G, Oldenwening M, et al. Commuters' exposure to particulate matter air pollution is affected by mode of transport, fuel type, and route [J]. *Environ Health Perspect*, 2010, 118(6): 783-789. DOI: 10.1289/ehp.0901622.
- [28] 齐飞艳, 郭会锋, 赵勇, 等. 道路绿化林对空气颗粒物浓度的影响[J]. *河南科学*, 2009, 27(6): 734-736. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3918.2009.06.028.  
Qi FY, Guo HF, Zhao Y, et al. The effect of greenbelt in road on atmospheric particles concentration [J]. *Henan Sci*, 2009, 27(6): 734-736. DOI: 10.3969/j.issn.1004-3918.2009.06.028.
- [29] Nyhan M, McNabola A, Misstear B. Comparison of particulate matter dose and acute heart rate variability response in cyclists, pedestrians, bus and train passengers [J]. *Sci Total Environ*, 2014, 468-469: 821-831. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.096.
- [30] Zurbier M, Hoek G, van denHazel P, et al. Minute ventilation of cyclists, car and bus passengers: an experimental study [J]. *Environ Health*, 2009, 8: 48. DOI: 10.1186/1476-069X-8-48.

(收稿日期: 2016-09-26)

(本文编辑: 万玉立)