

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2015.08.2015012610

李友平, 范忠雨, 李坤, 等. 不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露及其影响因素[J]. 环境化学, 2015, 34(8): 1408-1416
LI Youping, FAN Zhongyu, LI Kun, et al. Commuter exposure to $\text{PM}_{2.5}$ and its influencing factors in different commuting modes[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(8): 1408-1416

不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露及其影响因素*

李友平^{1**} 范忠雨¹ 李 坤² 吴大磊³

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院, 南充, 637009; 2. 广元市利州区环境保护局, 广元, 628000;
3. 广东省社会科学院环境经济与政策研究中心, 广州, 510610)

摘 要 于 2014 年 4 月在南充市城区选择一条固定线路, 使用数字直读式颗粒物测定仪连续 14 d 对自行车、公交车、私家车、摩托车、出租车和步行等 6 种出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度进行监测; 获取采样期间的气象数据和大气环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据, 以了解不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露水平及其影响因素. 结果表明, 不同出行方式中 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度最高和最低的分别为私家车 (51.2 ± 29.2) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和出租车 (40.2 ± 29.8) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 在出行高峰期和工作日, $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度分别高于非出行高峰期和周末. 计入个体暴露时间和呼吸率, 最高和最低 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露量分别为步行 (20.9 ± 17.9) μg 和出租车 (2.8 ± 2.1) μg . 应用相关性分析和线性回归分析得出, 降雨和风速有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度降低; 大气环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对个体暴露量有正相关影响.
关键词 $\text{PM}_{2.5}$, 个体暴露, 出行方式, 微环境, 南充市.

Commuter exposure to $\text{PM}_{2.5}$ and its influencing factors
in different commuting modes

LI Youping^{1**} FAN Zhongyu¹ LI Kun² WU Dalei³

(1. College of Environmental Science and Engineering, China West Normal University, Nanchong, 637009, China;
2. Lizhou Environmental Protection Agency, Guangyuan, 628000, China; 3. Center for Environmental Economics and
Policy Research, Guangdong Academy of Social Science, Guangzhou, 510610, China)

Abstract: This study was carried out to measure commuter exposure to $\text{PM}_{2.5}$ and investigate its influencing factors on a fixed route by different commuting modes (bicycle, bus, car, motor, taxi and walk) in April, 2014, in Nanchong. Real-time meteorological data and ambient $\text{PM}_{2.5}$ concentrations were obtained during the same period. The highest and lowest $\text{PM}_{2.5}$ exposure concentrations were (51.2 ± 29.2) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and (40.2 ± 29.8) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ for car and taxi commuters, respectively; During the peak traffic period and working days, the exposure concentrations were higher than the non-peak and weekend, respectively. The maximum and minimum exposure doses were (20.9 ± 17.9) μg and (2.8 ± 2.1) μg for walk and taxi commuters. Correlation analysis showed that rainfall and wind speed were beneficial to reducing $\text{PM}_{2.5}$ exposure concentrations. Linear regression analysis demonstrated that ambient $\text{PM}_{2.5}$ concentrations correlated positively with commuter exposure concentrations.

Keywords: $\text{PM}_{2.5}$, personal exposure, commuting modes, micro-environment, Nanchong City

2015 年 1 月 26 日收稿.

* 四川省大学生创新训练计划项目(201310638042); 四川省教育厅项目(13ZB0011); 南充市科技局项目(13A0071); 化学合成与污染控制四川省重点实验室项目(CSPC2014-4-2); 四川省科技厅项目(2015JY0094).

** 通讯联系人, E-mail: lyp920@163.com

大气颗粒物特别是细颗粒物(PM_{2.5})作为交通微环境中的主要污染物,对人体神经、呼吸道、心血管和免疫等多个系统的危害已经被大量流行病学研究证实^[1-4].近年来,越来越多的国外研究者关注交通出行大气个体暴露,研究发现在交通微环境中 PM_{2.5}浓度实际上比室外固定监测点浓度高^[5-7];人们每天暴露在交通微环境中的时间短,但是暴露量却占总暴露量较大比例^[8-10].在我国,交通出行大气颗粒物个体暴露相关方面的研究主要在一些特大城市^[11-14],大中城市出行方式 PM_{2.5}个体暴露很少被关注.不同地区空气污染程度、居民出行方式和每天出行时间等存在差异,因此开展不同地区交通出行 PM_{2.5}个体暴露研究具有重要现实意义.

南充市地处四川盆地东北部,嘉陵江中游,介于北纬 30°35′—31°51′,东经 105°27′—106°58′之间,为川东北区域中心城市、成渝经济区北部中心城市,城区人口近 120 万,建成区面积近 120 平方公里,机动车保有量约 80 万辆.以往对南充大气颗粒物污染水平的相关研究大多集中在污染物离子组成及污染水平上^[15-16],到目前为止,对南充市不同交通方式 PM_{2.5}个体暴露相关问题的研究还没有开展.

本研究通过在南充市城区选择一条有代表性的固定线路进行监测,连续 14 d 分别对南充市大多数人出行选择的自行车、公交车、私家车、摩托车、出租车和步行等 6 种方式进行 PM_{2.5}浓度监测,以探究南充市不同出行方式 PM_{2.5}个人暴露水平及其影响因素,为南充市大气污染治理和市民出行方式选择提供科学依据.

1 实验部分

1.1 采样方法

于 2014 年 4 月 17 日至 30 日,在四川省南充市城区选择一条约 5.3 km 的固定线路(图 1),对南充市民出行经常选用的自行车、公交车、私家车、摩托车、出租车和步行等 6 种方式进行 PM_{2.5}浓度实时监测.该线路上各路段车流量、路面车道数目和建筑物密集程度等各不相同,是一条连接市中心和郊区的重要道路,周围无工业污染,能很好代表南充市民日常出行距离和出行线路的特点.

将经过统一培训的采样人员每两人分为一组,采样时将监测仪放置于双肩包中,切割头和呼吸区处于相同高度.在私家车和出租车出行方式中,监测仪均放置于前排座位;公交车出行方式中,仪器则放在随机位置.采样期间,私家车和出租车通常只开启前排座位两边部分窗户,公交车窗户开启情况则不受采样人员控制,通常窗户为开启状态.在南充,私家车和摩托车均使用无铅汽油,公交车和出租车则使用压缩天然气作为燃料.

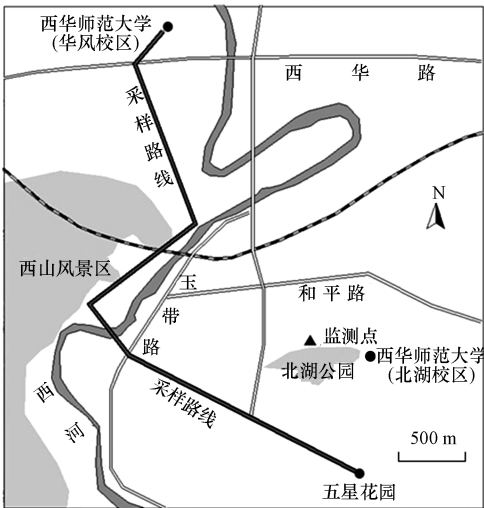


图 1 采样路线

Fig.1 Location of the sampling route

使用两台数字直读式 MicroDust pro 颗粒物测定仪(Casella CEL, Bedford, UK)进行 PM_{2.5}监测,该仪

器利用光散射原理对数据瞬时记录,具有便携、快速和操作方便等优点.同时,使用一台小型个体采样泵(D705-22, HARGRAVES, USA)来确保测定仪的连续恒定气流量,采样流量为 $3.7\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,实时 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据每分钟记录1个.每次采样之前均对测定仪的光学和零点进行校正,开机预热 10 min 再进行实验,在所得数据基础上除以校正因子1.5得到重量法测量结果^[17].为确保监测数据真实准确,不同出行方式监测时间每天交替进行,即同种出行方式相邻2 d监测时间一天在上午,另一天在下午;两台测定仪也每天交替.李坤等^[18]研究表明,南充市白天车流量峰值出现在08:00—09:00、11:00—12:00和14:00—15:00等3个时间段.上午采样在高峰期(8:00—10:00);下午采样在非高峰期(15:00—17:00),共得到80组有效数据.在采样过程中均详细记录采样中的偶然事件(扫地、红灯、焚烧树叶、吸烟等).另外,从Weather Underground获取采样期间对应时段的降雨、风速、温度和湿度气象数据^[19];从南充市环境保护局获取离采样路线最近的市委固定监测点 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度作为监测时段的环境浓度^[20].

1.2 数据处理

将测定仪中监测数据导入电脑,检查其中的异常值.相邻两次监测所得数据相差大于10倍,可认为是异常值^[21].剔除异常数据后所得的有效数据用Excel 2007、Origin 9.0及SPSS 20进行相关分析处理.平均暴露浓度为每天不同出行方式所有数据的算术平均值.暴露量计算公式如(1)所示:

$$D = C \times \text{IR} \times \Delta t \tag{1}$$

式中, D 为出行暴露量(μg); C 为出行暴露浓度($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$); IR 为呼吸速率($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$).本次实验没有对呼吸速率进行测试,因此采用《中国人群暴露参数手册(成人卷)》^[22]中成年人在休息、轻微体力活动和中等体力活动状态下的呼吸速率值作为此次实验中坐车(公交车、私家车、摩托车和出租车)、步行和自行车出行方式的计算值,分别为 0.40 、 0.49 、 $1.31\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$; Δt 为出行暴露时间(h).

2 结果与讨论

2.1 不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度

2.1.1 不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度日变化

图2给出了监测期间不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体日均暴露浓度和环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度,由图2可知,在监测期间各出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度与环境浓度变化趋势基本一致.不同出行方式之间,日均暴露浓度最大值和最小值分别为摩托车24日 $139.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和步行25日 $4.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.基本上,各出行方式最大值都集中在23日和24日,可能是这两天大气环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,而风速相对较低;最小值则集中在19日和25日,可能与这两天有降雨,环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏低,且处于周末附近与车流量的减少也有一定关系.按照《环境空气质量标准》(GB3095—2012) $\text{PM}_{2.5}$ 日平均浓度 $75.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的标准,各种出行方式日平均暴露浓度均有不同程度超标,最高和最低的为私家车与公交车,超标率分别为30.0%和7.1%.

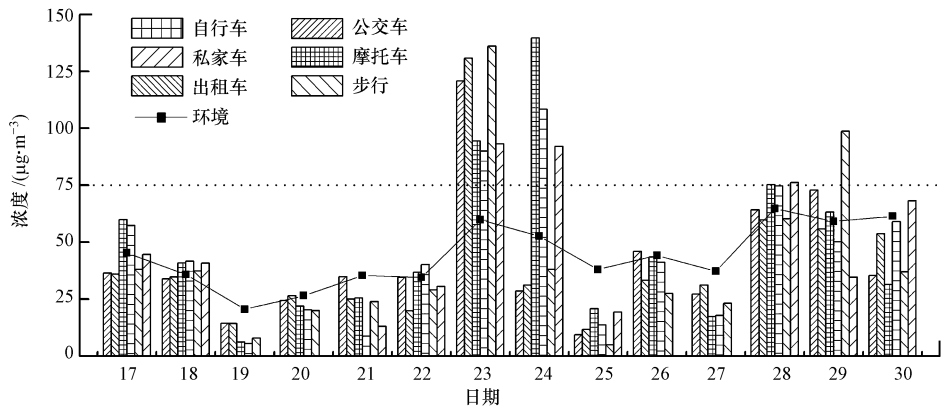


图2 不同出行方式日均 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度与环境浓度

Fig.2 Daily personal exposure and ambient concentrations of $\text{PM}_{2.5}$ for different commuting modes

2.1.2 不同出行方式平均暴露浓度

在比较不同出行方式日均 PM_{2.5}个体暴露浓度的基础上,图 3 给出了研究期间不同出行方式平均暴露浓度,即 14 d 暴露浓度的平均值.由图 3 可见,私家车暴露浓度最高,达到了 (51.2±29.2) μg·m⁻³;而出租车暴露浓度最低,仅为 (40.2±29.8) μg·m⁻³,总体平均暴露浓度高低为私家车>摩托车>自行车>步行>公交车>出租车.道路环境中的污染物浓度由于受机动车尾气排放的影响,呈现出中间高而两边低的情况^[23].在私家车和出租车行驶过程中,监测仪均放在前排座位上,两边的窗户一般处于部分开启状态.受道路环境中污染物浓度横向分布特点影响,使离污染源越远的出行方式所受的平均暴露浓度越低.Jalava 等^[24]指出,车内污染物浓度的高低与其使用的燃料类型有很大的关系.此次研究中,公交车和出租车两种离污染源较近的出行方式平均暴露浓度却最低,可能有两个原因:在南充市公交车和出租车占机动车总车流量 33%^[18],且均采用更为清洁的压缩天然气,减少了自身污染;另一方面,在监测期间,连日的低风速等原因,使得南充市污染水平在 23 日和 24 日早上达到顶峰,使 24 日下午监测的公交车、出租车和步行的数据远远低于上午监测的自行车、私家车和摩托车的出行数据.

将本研究结果与文献进行比较,从表 1 可知,部分研究在监测过程中开启了空调系统,可能会在一定程度上降低车内 PM_{2.5}浓度.与本研究结果相似,在私家车没有开启空调的研究中,巴塞罗那、伦敦和都柏林同样得到私家车在不同出行交通方式中有较高的暴露浓度,而步行暴露浓度相对较低,PM_{2.5}个体暴露浓度呈现出离机动车尾气排放距离越远值越低的趋势.总体上,自行车、公交车和步行等 3 种出行方式暴露浓度均低于佛山和北京两个国内城市,也低于圣地亚哥而高于巴塞罗那和伦敦等国外城市;私家车 PM_{2.5}个体暴露浓度除低于都柏林以外,高于巴塞罗那、伦敦和圣地亚哥等其他国外城市;摩托车低于仅有的佛山;出租车暴露浓度高于北京,与伦敦相当,低于佛山.不同研究所用仪器型号不同,很难准确比较其监测结果^[25].但相对而言,南充不同出行方式 PM_{2.5}个体暴露浓度值低于国内城市,高于除都柏林以外的其他国外城市.

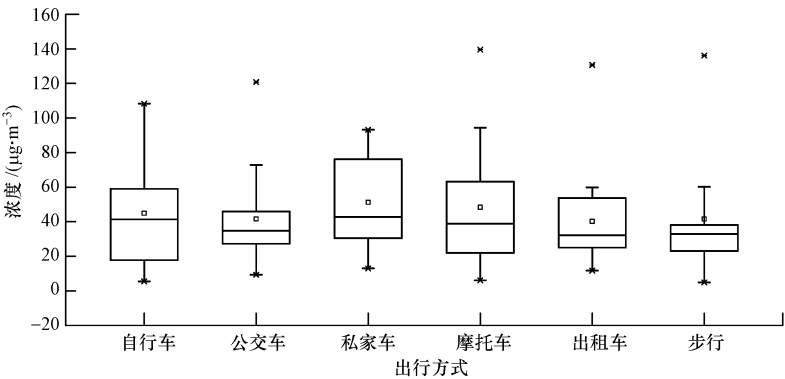


图 3 不同出行方式平均 PM_{2.5}个体暴露浓度

Fig.3 Average personal PM_{2.5} exposure concentrations for different commuting modes

表 1 不同城市不同出行方式 PM_{2.5}个体暴露浓度比较 (μg·m⁻³)

Table 1 Comparison of personal PM _{2.5} exposure concentrations with different commuting modes (μg·m ⁻³)							
研究城市	监测年份	自行车	公交车	私家车	摩托车	出租车	步行
南充(本研究)	2014	44.9	41.6	51.2	48.3	40.2	41.5
北京 ^[13]	2010—2011	49.1	42.4 ^a	—	—	31.6 ^a	— ^b
佛山 ^[17]	2011	76.8	75.9 ^a	—	77.1	56.8 ^a	74.1
巴塞罗那 ^[26]	2009	35.0	25.9	35.5	—	—	26.1
圣地亚哥 ^[27]	2011—2012	—	60.4	46.5 ^a	—	—	50.9
伦敦 ^[28]	2003	33.5	34.5	38.0	—	41.5	27.5
都柏林 ^[29]	2005—2006	79.9	115.7	85.9	—	—	—

注: ^a监测过程中车窗关闭,开启空调系统; ^b无相关数据.

2.1.3 不同出行时间个体暴露浓度

为比较不同出行时间段 PM_{2.5}个体暴露浓度特征,表 2 给出了每日出行高峰期和非高峰期,工作日

和周末暴露浓度的监测结果.由表 2 可知,不同出行方式在上午高峰期出行的暴露浓度均不同程度高于下午非高峰期出行暴露浓度.其中,步行、私家车和自行车 3 种出行方式上下午暴露浓度差异最为明显,均超过 $20.0\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.Kaur 等^[28]在研究伦敦不同出行方式时同样得到上午个体暴露浓度明显高于其他时段暴露浓度的结论.相反,环境浓度在高峰期和非高峰期没有明显差异,表明交通微环境中机动车尾气是 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的重要来源.工作日和周末,不同出行方式在工作日的暴露浓度均明显高于周末浓度值,暴露浓度差异最大和最小的分别为摩托车和公交车,差值为 $36.6\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $19.1\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也是工作日明显高于周末.交通量对道路交通环境中细颗粒物浓度影响非常显著^[30].在南充,周末车流量较工作日减少,导致 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度在周末较工作日减少,与监测 14 d 中周末均出现降雨和高风速可能也有一定关系.

表 2 不同出行时间 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度 ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)

Table 2 Commuter $\text{PM}_{2.5}$ exposure concentrations at different time periods ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)				
出行方式	高峰期	非高峰期	工作日	周末
自行车	64.7±28.1	43.9±33.5	54.3±31.2	21.2±14.8
公交车	54.8±43.2	39.3±14.2	47.1±31.4	28.0±13.1
私家车	61.5±25.4	41.0±31.7	— ^a	—
摩托车	64.8±45.2	52.8±30.2	58.8±36.8	22.2±15.7
出租车	51.8±46.9	39.8±16.5	45.8±33.8	26.3±8.5
步行	60.3±55.0	40.3±11.7	50.3±39.0	19.6±8.4
环境	51.3±19.2	53.4±14.5	51.2±16.7	32.1±10.6

注:^a无监测数据.

2.2 不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露量

2.2.1 日均 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露量

不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 个体日均暴露量如图 4 所示.由图 4 可知,日均个体暴露量最高和最低值分别出现在 23 日和 19 日,为步行的 $68.4\text{ }\mu\text{g}$ 和摩托车的 $0.5\text{ }\mu\text{g}$,差值达到 $67.9\text{ }\mu\text{g}$,不同出行方式的最高暴露量是最低暴露量的 136.8 倍.自行车和步行日均暴露量相当,公交车、出租车、私家车和摩托车日均暴露量相当,且步行和自行车日均暴露量远高于其他 4 种出行方式.这是由不同出行方式的特点造成的.

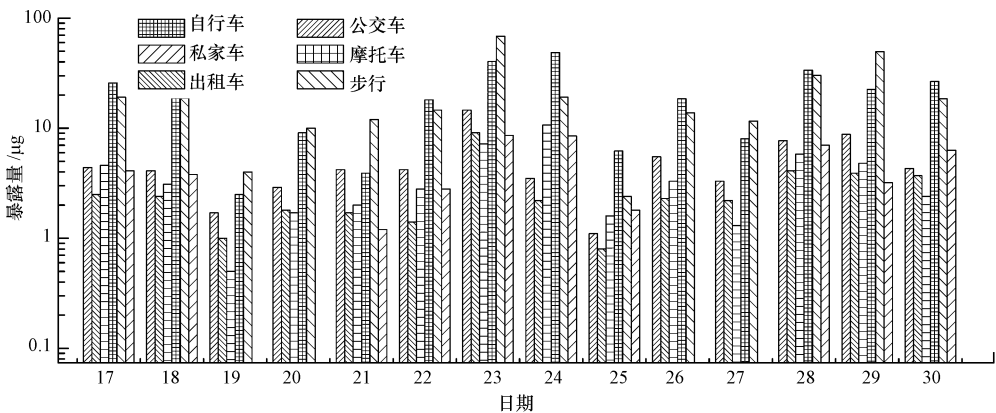


图 4 $\text{PM}_{2.5}$ 个体日均暴露量
Fig.4 Daily commuter exposure doses of $\text{PM}_{2.5}$

2.2.2 不同出行方式平均暴露量

将 14 d 中不同出行方式各日暴露量平均得到平均暴露量,不同出行方式的呼吸速率、暴露时间和平均暴露量见表 3.从总体上看,南充出行速度最快的为出租车,到达目的地所用时间最短,为 $(0.17\pm 0.03)\text{h}$,而步行所花时间最长,大约为出租车 6 倍,到达目的地所用时间为 $(1.03\pm 0.09)\text{h}$.不同出行方式 $\text{PM}_{2.5}$ 平均个体暴露量从高到低依次是步行、自行车、公交车、私家车、摩托车和出租车,步行和自行车的暴露量比其他 4 种出行方式高出一个数量级.与 $\text{PM}_{2.5}$ 个体暴露浓度不同,暴露浓度最高的私家车和摩

托车暴露量较低,而出行暴露浓度相对较低的步行和自行车的 2 种出行方式暴露量最高.Huang 等^[31]在北京用出租车、公交车和自行车对比不同出行方式 PM_{2.5}个体暴露量同样得到自行车暴露量最高.公交车、出租车、私家车和摩托车等 4 种出行方式中人都为坐立姿势,呼吸率相对于步行和自行车较低;此外,步行和自行车出行较慢,使相同出行距离暴露时间更长,因此,在相同出行距离下步行和自行车 PM_{2.5}平均个体暴露量要比其他出行方式高很多.

表 3 不同出行方式平均 PM_{2.5}个体暴露量
Table 3 Average personal PM_{2.5} exposure doses for different commuting modes

出行方式	呼吸速率/(m ³ ·h ⁻¹)	暴露时间/h	暴露量/μg
自行车	1.31	0.34±0.06	20.2±14.0
公交车	0.40	0.30±0.01	5.0±3.4
私家车	0.40	0.23±0.03	4.7±2.7
摩托车	0.40	0.19±0.02	3.7±2.8
出租车	0.40	0.17±0.03	2.8±2.1
步行	0.49	1.03±0.09	20.9±17.9

2.2.3 不同出行时间个体暴露量

通过对不同出行时间段 PM_{2.5}个体暴露量的比较,见表 4,可以得到暴露量的相对高低,从而可以为减少出行 PM_{2.5}个体暴露量提供指导.暴露时间上,不同出行方式在出行高峰期的暴露时间均不同程度高于非出行高峰期.不同出行方式暴露时间在工作日和周末则各有高低,可能有两个原因:工作日的暴露时间是综合了出行高峰期和非出行高峰期时间;周末车流量虽比工作日有一定减少,但是在周末车辆出行时间不规则,从而引起暴露时间的不规则.在这 4 个出行时间段中,出租车的 PM_{2.5}个体暴露量都最低,这是由于其最低暴露浓度和最少暴露时间引起的;除周末外,步行 PM_{2.5}个体暴露量都比其他出行方式高,这主要是其较长的暴露时间造成的.不同出行方式在高峰期暴露量均比非高峰期高,是由于在高峰期暴露浓度和暴露时间均比非高峰期高.同样地,工作日暴露量比周末暴露量高主要是因为工作日暴露浓度要比周末高.

表 4 不同出行时间 PM_{2.5}个体暴露量
Table 4 Commuter PM_{2.5} exposure doses at different two periods

出行方式		自行车	公交车	私家车	摩托车	出租车	步行
高峰期	暴露时间/h	0.33±0.05	0.31±0.01	0.23±0.02	0.20±0.01	0.18±0.03	1.10±0.05
	暴露量/μg	28.0±12.1	6.8±5.4	5.7±2.4	4.7±3.7	3.8±3.4	32.5±29.6
非高峰期	暴露时间/h	0.32±0.06	0.30±0.01	0.22±0.04	0.18±0.02	0.16±0.04	1.00±0.05
	暴露量/μg	18.4±14.0	4.7±1.7	3.7±2.9	3.8±2.1	2.5±1.0	20.4±5.9
工作日	暴露时间/h	0.33±0.05	0.30±0.01	—	0.19±0.02	0.17±0.04	1.10±0.06
	暴露量/μg	23.1±13.3	5.7±3.8	—	4.5±2.8	3.1±2.3	36.3±20.4
周末	暴露时间/h	0.39±0.02	0.30±0.02	—	0.19±0.02	0.18±0.03	0.92±0.05
	暴露量/μg	10.9±7.6	3.3±1.6	—	1.7±1.2	1.9±0.6	8.9±3.8

2.3 气象因素和环境浓度对 PM_{2.5}个体暴露浓度的影响

2.3.1 气象因素对 PM_{2.5}个体暴露浓度影响

表 5 给出了温度、湿度、风速和降雨等气象因素与不同出行方式 PM_{2.5}个体暴露浓度之间的相关性,通过相关性能了解相互之间是否存在显著联系.从表 5 可以看出,6 种不同出行方式对降雨和风速(公交除外)两种气象因素都呈负相关关系,表明降雨和风速有利于 PM_{2.5}个体暴露浓度的降低.在降雨过程中,雨水对空气中的污染物具有洗刷作用,能在一定程度上抑制地面扬尘的产生,从而降低 PM_{2.5}个体暴露浓度;而高风速能稀释和冲散空气中污染物,也能起到降低污染物浓度的作用.由图 5 可知,PM_{2.5}个体暴露浓度低的当天有降雨或者较高的风速,在降雨和高风速同时存在的 19 和 25 日,PM_{2.5}个体暴露浓度是监测 14 d 中最低的两天,而 PM_{2.5}个体暴露浓度最高的 23 日和 24 日,风速分别为 1.2 m·s⁻¹和

1.3 m·s⁻¹,为 14 d 中最低,而两天天气均为多云,降雨量为零.Adams 等^[32]研究表明,风速能影响大约 20%不同出行方式中个体暴露浓度变化;Gomez-Perales 等^[33]发现,风速每升高 1 m·s⁻¹,小巴和公交车出行方式 PM_{2.5}个体暴露浓度会分别下降 22%和 24%;降雨对空气中污染物浓度的负相关性在之前文献中也被提及^[34].在本研究中,没有发现温度和湿度对 6 种出行方式有显著影响.

表 5 气象因素和 PM_{2.5}个体暴露浓度的相关性

Table 5 Correlations between meteorological parameters and PM _{2.5} exposure concentrations						
气象因素	自行车	公交车	私家车	摩托车	出租车	步行
温度	0.442	0.166	0.251	0.174	0.143	0.264
湿度	0.418	-0.04	0.330	0.383	0.274	0.383
风速	-0.757 **	-0.443	-0.564 *	-0.611 *	-0.515 *	-0.656 **
降雨	-0.574 *	-0.653 **	-0.592 *	-0.576 *	-0.556 *	-0.622 **

注:** P<0.01; * P<0.05.

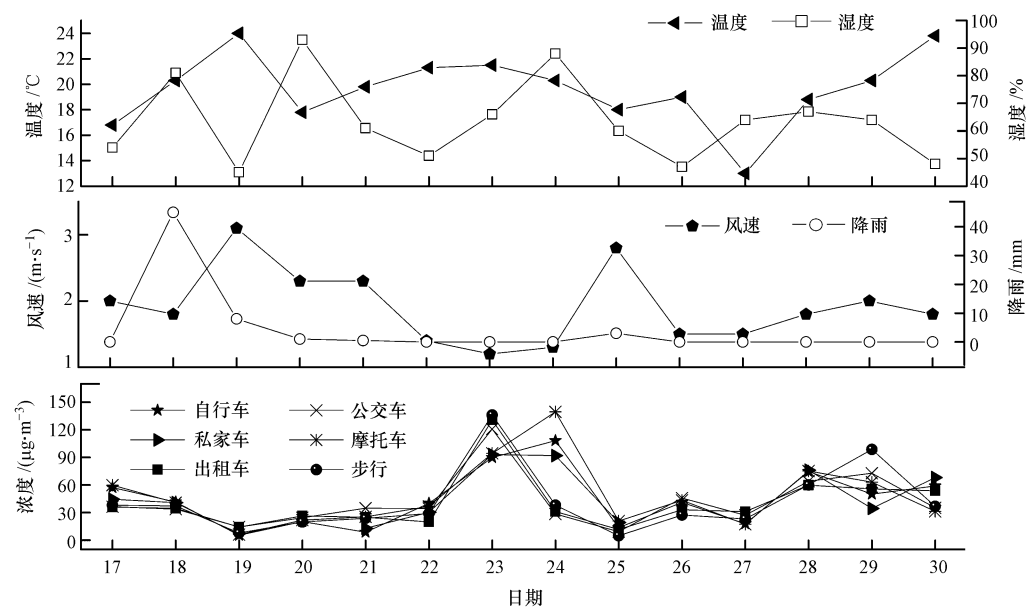


图 5 PM_{2.5}个体暴露浓度及气象因素日变化

Fig.5 Daily variations of PM_{2.5} exposure concentrations and meteorological factors

2.3.2 PM_{2.5}环境浓度对个体暴露浓度的影响

用环境浓度值作自变量,PM_{2.5}个体暴露浓度作因变量做线性回归方程.所得方程中,斜率代表环境浓度对个体暴露浓度的影响程度,截距则表示交通微环境中排放源排放强度与沉降速度的大小^[34].同时用 6 种出行方式 PM_{2.5}个体暴露浓度与环境浓度做相关性分析,结果见表 6.

表 6 PM_{2.5}环境浓度和个体暴露浓度的线性回归及相关性

Table 6 Linear regressions and correlations between ambient and personal exposure PM _{2.5} concentrations					
出行方式	斜率/ (μg·m ⁻³ /μg·m ⁻³)	截距/ (μg·m ⁻³)	决定系数(R ²)	相关性	数据量
自行车	1.484	-22.909	0.579	0.761 **	14
公交车	1.169	-11.782	0.431	0.656 *	14
私家车	1.548	-28.442	0.546	0.739 *	10
摩托车	1.467	-18.674	0.423	0.651 *	14
出租车	1.340	-20.957	0.511	0.715 **	14
步行	1.552	-29.337	0.479	0.692 **	14

注:** P<0.01; * P<0.05.

由表 6 可知,PM_{2.5}环境浓度对 6 种出行方式都呈正相关关系,特别是对出租车、自行车和步行等 3 种出行方式的 PM_{2.5}个体暴露浓度影响极显著.6 种出行方式的斜率都较高,表明各种出行方式受环境浓度的影响都较大.另外,各个出行方式的截距都不同程度的呈现出负值,表明该微环境中颗粒物的沉降速度大于自身排放.由 PM_{2.5}环境浓度和不同出行方式个体暴露浓度日变化趋势基本一致可知,环境浓度的高低能影响个体暴露浓度的高低,环境浓度是影响个体暴露浓度的一个重要因素.Wu 等^[17]的研究表明,在交通微环境中 PM_{2.5}环境浓度对个体暴露浓度有重要影响.Knibbs 等^[35]的研究也发现 PM_{2.5}环境浓度对个体暴露浓度呈一定的线性关系,有很好的指示作用.

3 结论

(1) 在南充市,不同出行方式 PM_{2.5}个体暴露浓度大小顺序为私家车>摩托车>自行车>步行>公交车>出租车.在不同出行时段,出行高峰期和工作日 PM_{2.5}个体暴露浓度分别高于非高峰期和周末.

(2) 步行和自行车出行方式有长暴露时间和高呼吸率,与 PM_{2.5}个体暴露浓度相对较低不同,暴露量较高;出租车出行的暴露浓度、暴露时间和呼吸率都最低,其 PM_{2.5}个体暴露量最低.

(3) 相关性分析表明,降雨或风速有利于 PM_{2.5}个体暴露浓度降低,温度和湿度没有表现出明显的相关性.线性回归和相关性分析表明,PM_{2.5}环境浓度是不同出行方式个体暴露的重要影响因素.

致谢:感谢 2011 级环境工程专业谭敏、崔荣琼、赵丽、肖茵、梁婉瑶、任亚君、张会群、刘莉梅等 8 名本科学学生参与 PM_{2.5}个体暴露实验.

参 考 文 献

[1] Graff D W, Cascio W E, Rappold A, et al. Exposure to concentrated coarse air pollution particles causes mild cardiopulmonary effects in healthy young adults[J]. Environmental Health Perspectives, 2009, 117(7): 1089-1094

[2] Nelin T D, Joseph A M, Gorr M W, et al. Direct and indirect effects of particulate matter on the cardiovascular system[J]. Toxicology Letters, 2012, 208(3): 293-299

[3] Kang X, Li N, Wang M, et al. Adjutant effects of ambient particulate matter monitored by proteomics of bronchoalveolar lavage fluid[J]. Proteomics, 2010, 10(3): 520-531

[4] Calderón-Garcidueñas L, Engle R, Mora-Tiscareño A, et al. Exposure to severe urban air pollution influences cognitive outcomes, brain volume and systemic inflammation in clinically healthy children[J]. Brain and Cognition, 2011, 77(3): 345-355

[5] 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

[6] Cheng Y H, Chang H P, Yan J W. Temporal variations in airborne particulate matter levels at an indoor bus terminal and exposure implications for terminal workers[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2012, 12: 30-38

[7] Zuurbier 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]. Environmental Health Perspectives, 2010, 118(6): 783-789

[8] Gulliver J, Briggs D J. Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 1-8

[9] Fondelli M C, Chellini E, Yli-Tuomi T, et al. Fine particle concentrations in buses and taxis in Florence, Italy[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(35): 8185-8193

[10] Kaur S, Nieuwenhuijsen M J, Colville R N. Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(23): 4781-4810

[11] 肖珊,余琦,马蔚纯,等. 上海冬季公共交通出行 PM₁污染暴露特征[J]. 中国环境科学, 2012, 32(11): 1933-1938

[12] Chan L Y, Lau W L, Zou S C, et al. Exposure level of carbon monoxide and respirable suspended particulate in public transportation modes while commuting in urban area of Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(38): 5831-5840

[13] Li T T, Bai Y H, Liu Z R, et al. Air quality in passenger cars of the ground railway transit system in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2006, 367: 89-95

[14] Chan L Y, Lau W L, Lee S C, et al. Commuter exposure to particulate matter in public transportation modes in Hong Kong[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(21): 3363-3373

[15] 张福庆,李文卿,杜良梅,等. 春季南充城区 PM₁₀污染水平及其水溶性离子特征研究[J]. 环境科学导刊, 2014, 33(1): 11-16

[16] 方云祥,李铁松,李成柱,等. 南充市大气 PM₁₀污染水平的分布特征[J]. 四川环境, 2004, 23(4): 43-45

- [17] Wu D L, Lin M, Chan C Y, et al. Influences of commuting mode, air conditioning mode and meteorological parameters on fine particle ($PM_{2.5}$) exposure levels in traffic microenvironments[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, 13: 709-720
- [18] 李坤, 李友平, 刘汉明, 等. 南充市车流量对城市空气质量的影响分析[J]. *广东化工*, 2014, 41(15): 163-164
- [19] Weather Underground. 南充市历史天气[EB/OL]. [2014-11-7]. <http://www.wunderground.com/history/wmo/57411/>
- [20] 南充市环境保护局. 南充市空气质量实时发布系统[EB/OL]. [2014-11-7]. <http://61.188.185.95:8016/>
- [21] Boogaard H, Frank B, Kamminga J, et al. Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 Dutch cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43: 4234-4242
- [22] 环境保护部. 中国人群暴露参数手册(成人卷)[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013: 30
- [23] Hitchins J, Morawska L, Wolff R, et al. Concentrations of submicrometre particles from vehicle emissions near a major road[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 51-59
- [24] Jalava P I, Aakko-Saks P, Murtonen T, et al. Toxicological properties of emission particles from heavy duty engines powered by conventional and bio-based diesel fuels and compressed natural gas[J]. *Particle and Fibre Toxicology*, 2012, 9: 37
- [25] 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]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 785-797
- [26] Nazelle A d, Fruin S, Westerdahl D, et al. A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 59: 151-159
- [27] Suárez L, Meslas 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]. *Environmental Science Processes and Impacts*, 2014, 16: 1307-1309
- [28] Kaur S, Nieuwenhuijsen M, Colvile R. Personal exposure of street canyon intersection users to $PM_{2.5}$, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(20): 3629-3641
- [29] McNabola A, Broderick B M, Gill L W. Relative exposure to fine particulate matter and VOCs between transport microenvironments in Dublin: Personal exposure and uptake[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(26): 6496-6512
- [30] 沈俊秀, 肖珊, 余琦, 等. 上海市道路环境 PM_1 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平[J]. *环境化学*, 2011, 30(6): 1206-1207
- [31] Huang J, Deng F R, Wu S W, et al. Comparisons of personal exposure to $PM_{2.5}$ and CO by different commuting modes in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 425: 52-59
- [32] Adams H S, Nieuwenhuijsen M J, Colvile R N. Determinants of fine particle ($PM_{2.5}$) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(27): 4557-4566
- [33] Gomez-Perales J E, Colvile R N, Nieuwenhuijsen M J, et al. Commuters exposure to $PM_{2.5}$, CO, and benzene in public transport in the metropolitan area of Mexico City[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(8): 1219-1230
- [34] Battarbee J L, Rose N L, Long X. A continuous, high resolution record of urban airborne particulates suitable for retrospective microscopical analysis[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(2): 171-181
- [35] Knibbs L D, De Dear R J, Morawska L. Effect of cabin ventilation aate on ultrafine particle exposure inside automobiles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44: 3546-3551