

道路区域 PM_{2.5} 浓度的影响因素研究

王 涛 王国祥[#] 周梦翩 陈梦平 李 晶 吴松峻 罗 敏

(南京师范大学地理科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要 为探究人为因素和气象因素对道路区域 PM_{2.5} 浓度的影响, 选择南京仙林大学城某条典型道路开展大气 PM_{2.5} 监测实验。结果表明, 道路清扫抬升 PM_{2.5} 浓度, 白天的抬升作用较傍晚和夜间更加显著。各类交通流对道路区域 PM_{2.5} 浓度的影响程度排序为: 柴油车 > 汽油车 > 燃气车 > 道路行人。PM_{2.5} 浓度阴天高于晴天和多云天, 霾日 (209.3、80.5 μg/m³) 高于非霾日 (47.0、62.0 μg/m³); 在霾日变化特征各异, 在非霾日均呈“三峰”分布特征。非霾日, 道路区域 PM_{2.5} 浓度的高值区与相对湿度的高值区, 温度、风速的低值区重合; PM_{2.5} 浓度的低值区与相对湿度的低值区, 温度、风速的高值区重合。温度与 PM_{2.5} 浓度呈负相关 ($r = -0.501$, $P < 0.05$), 是影响 PM_{2.5} 污染程度的关键气象因子。由此可见, 道路清扫、交通流和各类气象因素对道路区域 PM_{2.5} 浓度影响显著。

关键词 PM_{2.5} 道路清扫 交通流 人为因素 气象因素

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2016.08.006

Study on influence factors of PM_{2.5} concentrations in road region WANG Tao, WANG Guoxiang, ZHOU Mengpian, CHEN Mengping, LI Jing, WU Songjun, LUO Min. (School of Geography Science, Nanjing Normal University, Nanjing Jiangsu 210023)

Abstract: To study the concentrations of PM_{2.5} in road region influenced by human factors and meteorological factors, atmospheric monitoring experiments were conducted on one certain road in Nanjing Xian Lin University City. The research results showed as follows: road sweeping made the PM_{2.5} concentrations in the road region rise. The rising effect of road sweeping in the daytime was much more serious than that in the evening and in the midnight. Traffic flows had effects on the PM_{2.5} concentrations and the influence degree of all kinds of traffic flows was ranked by diesel vehicle > gasoline vehicle > natural gas vehicle > pedestrian. PM_{2.5} concentrations were higher on clear and cloudy days than on overcast days, higher on hazy days (209.3 μg/m³ and 80.5 μg/m³) than on non-hazy days (47.0 μg/m³ and 62.0 μg/m³). PM_{2.5} concentrations had various change features on hazy days while they showed triple peak distributions on non-hazy days. On non-hazy days, higher PM_{2.5} concentrations corresponded to higher relative humidity but lower temperature and wind speed; lower PM_{2.5} concentrations corresponded to lower relative humidity but higher temperature and wind speed. Temperature had significant influence on the contamination degree of PM_{2.5}, showing negative correlation with PM_{2.5} concentrations ($r = -0.501$, $P < 0.05$). The research indicated that road sweeping, traffic flows and all kinds of meteorological factors obviously influenced the PM_{2.5} concentrations in the road region.

Keywords: PM_{2.5}; road sweeping; traffic flow; human factor; meteorological factor

目前, 全球大气颗粒物污染日趋严重, 也日益受到关注。国内外研究表明, 大气颗粒物的污染程度受人为因素和气象因素的共同影响。车瑞俊等^[1]在北京商业区进行了为期 3 d 的大气监测, 结果显示颗粒物浓度在游客高峰时段显著上升。李炯等^{[2]655}在北京和广州的研究表明, 道路环境的 PM₁₀ 和 TSP 浓度均与总车流量呈正相关, 这与罗娜娜等^[3]通过最佳子集分析得到的结论相似。此外, 温度、相对湿度、风速、降水和逆温层等气象因素已被证实均会影

响大气颗粒物的污染程度^[4-6]。

近年来, 我国交通运输业发展迅猛, 许多学者研究了道路区域大气颗粒物的污染情况。施益强等^[7]指出, 厦门市 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度与道路面积比例呈正相关。何宗健等^[8]在南昌的研究表明, 交通密集区的 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度高于其他功能区。沈俊秀等^{[9]1206}在上海的研究也表明, 道路区域的 PM₁₀ 浓度高于全市日均值, PM_{2.5} 污染严重。李新宇等^[10]指出, 北京市交通干道的 PM_{2.5} 浓度与车流量有一致的

第一作者: 王 涛, 男, 1994 年生, 本科, 研究方向为大气环境化学。[#] 通讯作者。

日变化特征。

但是,相关方面的研究存在一些局限性。在道路清扫方面,常借助于模拟实验^[11,36],进行的监测实验也往往限于较短时间^[12],鲜见连续24 h的实地监测数据。在入流量方面,尚未见到入流量与道路区域颗粒物浓度的定量分析。在车流量方面,大多是关于排放清单的研究^[13]和颗粒物浓度与总车流量的相关性分析^[2],颗粒物浓度与不同燃料类型的车流量的关系鲜见报道。在气象因素方面,国内外学者在探讨 $PM_{2.5}$ 浓度与气象因子的关系时常以城市区域为对象^[14-16],少有针对交通密集区的探讨。此外,国内外对道路区域大气颗粒物的研究多以TSP和 PM_{10} 为对象^[17-18],较少涉及对健康危害更大的 $PM_{2.5}$ 。本研究通过多次大气监测实验,探究人为因素(道路清扫、各类交通流)和气象因素(天气现象、各类气象因子)对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响情况,以期对道路区域 $PM_{2.5}$ 的防治提供科学性建议。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及监测布点

研究区位于南京仙林大学城某高校校园内的交通干道(见图1)。该路段上来往行人和车辆较密集,沿途两侧有高楼和行道树(樟树,单排种植,树干高约3.5 m,树冠直径约4 m)。该路段附近无工业和秸秆焚烧等污染源,可忽略各类外界因素的干扰。

在道路同侧边缘设置监测点A和B。两点间间隔约120 m,可认为相互之间无影响。两点均位于道路主干段,可认为通过A、B点的人流量和车流量基本无差别。

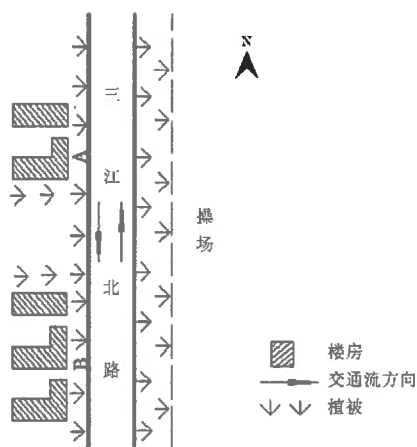


图1 监测区域概况

Fig.1 General situation of the monitoring region

1.2 仪器设备

KC1000型大流量TSP采样器, $PM_{2.5}$ 切割器和玻璃纤维滤膜(2.5 μm 孔径);EL104型分析天平(梅特勒-托利多仪器有限公司);CW-HAT200型高精度手持式 $PM_{2.5}$ 速测仪;Kestrel 4500NV型便携式气象仪;机械计数器等。

1.3 采样方法及采样频率

为研究道路清扫对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,于2014年4月8日15:00至4月9日14:00监测A、B两点 $PM_{2.5}$ 浓度。分别于4月8日17:00、22:00和4月9日3:00、9:00在A点南北方向15 m范围内对道路进行清扫,清扫的强度和持续时间均与平时相同。另于2014年10月21日15:00至10月22日14:00监测A点 $PM_{2.5}$ 浓度,并统计交通流量。采样频率均为1 h/次,即每小时更换一次滤膜。两次实验期间,气象因素等非人为影响要素均无异常变化。

为探究气象因素对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,于2014年11月22日、23日和2014年12月6日、14日监测A点 $PM_{2.5}$ 浓度和气象数据,监测时段为每日7:00~22:00。在各时刻的10分、30分和50分(如7:10、7:30和7:50)用 $PM_{2.5}$ 速测仪采样1 min得 $PM_{2.5}$ 浓度,同时用气象仪测定温度、相对湿度、风速、大气压的1 min均值,各项数据取平均值分别作为 $PM_{2.5}$ 浓度和各气象因子的小时均值。

1.4 交通流量统计

在10月的实验中统计各时刻通过监测点A的车流量和入流量。根据车辆燃料类型的不同将其分为3类:燃气车(公交车、部分大客车)、柴油车(卡车、货车)和汽油车(轿车、面包车等)。

1.5 测定方法说明

鉴于道路清扫、交通流产生的 $PM_{2.5}$ 难以于短时间内在道路区域与空气充分混合,对监测区域的空气质量的影响存在不均匀性和滞后性,故在研究人为因素对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响时,选用重量法^[19]测定 $PM_{2.5}$ 浓度:将滤膜放入恒温恒湿箱中平衡24 h(温度20 $^{\circ}C$,相对湿度55%)后用分析天平进行称量,记录质量。同一滤膜在恒温恒湿箱中相同条件下再平衡1 h后称量,保证两次质量误差控制在0.04 mg。采样后的滤膜重复上述处理,利用差量法求得采样 $PM_{2.5}$ 质量,结合采样空气体积即可算出 $PM_{2.5}$ 浓度。而气象因子在道路区域近地面的各空间点基本一致,故在研究其影响时,为提高实验效

率,选用速测仪测定 $PM_{2.5}$ 浓度。

各组实验中的监测高度均保持在离地面 1.5 m 左右。

1.6 数据处理

利用 SPSS 21.0 软件对相关变量进行单样本 K-S 统计检验,各组数据均为正态分布。但考虑到交通流量为离散数据, $PM_{2.5}$ 浓度和气象因子为连续数据,故在之后探究 $PM_{2.5}$ 浓度与交通流量的相关性时选用 Spearman 相关分析,而在探究 $PM_{2.5}$ 浓度与气象因子的相关性时选用 Pearson 相关分析,并且均进行相关系数双侧检验。

2 结果与讨论

2.1 道路清扫对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响

如图 2 所示,上午 9:00 清扫后,A 点的 $PM_{2.5}$ 浓度为 B 点的 2.93 倍;在傍晚 17:00 和夜间 22:00、3:00 清扫后,A 点的 $PM_{2.5}$ 浓度仅分别为 B 点的 1.35、1.37、1.34 倍。此外,上午 9:00 清扫后,A 点的 $PM_{2.5}$ 浓度在之后的 3 h 内均高于 B 点;而其余 3 次清扫后,A 点的 $PM_{2.5}$ 浓度只在接下来的 1~2 h 内高于 B 点,之后便恢复正常。这说明上午 9:00 的道路清扫对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的抬升作用最明显。

白天的相对湿度较低, $PM_{2.5}$ 的沉降效果较差;同时,白天清扫时刻与交通流量高峰时段重叠,密集的交通流使因清扫而起的大量扬尘在大气中停留更长的时间。而傍晚和夜间的相对湿度较大, $PM_{2.5}$ 的沉降效果较好。研究表明,湿度的增加有助于模拟清扫过程中 PM_{10} 浓度的降低^{[11]365};相对湿度 $>65\%$ 时,大气中的细粒子会互相凝聚成粒径较大的粒子而发生沉降,导致 $PM_{2.5}$ 浓度下降^{[20]106}。白天清扫时段与人流量的高峰时段重合,使人群的 $PM_{2.5}$ 暴露水平升高,健康风险增加^[21]。

2.2 交通流对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响

$PM_{2.5}$ 浓度与燃气车流量、柴油车流量、汽油车流量和道路行人流量均有相似的变化关系(见图 3)。为定量描述 $PM_{2.5}$ 浓度与各类交通流量的关系,对其进行相关性分析。结果显示, $PM_{2.5}$ 浓度与燃气车流量呈正相关($r=0.425, P<0.05$),与柴油车流量呈正相关($r=0.633, P<0.01$),与汽油车流量呈正相关($r=0.466, P<0.05$)。因此,3 类车流与道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性排序为:柴油车 $>$ 汽油车 $>$ 燃气车。机动车对道路环境中的大气颗粒物有较大的贡献量^[22],主要体现在尾气排放和非尾气管排放。尾气排放的颗粒物包括炭黑粒子等一次颗粒物和 NO_x 等气态物质在大气中经光化学反应等过程形成的二次颗粒物^[23]。非尾气管排放主要源自车辆制动磨损、轮胎磨损、路面磨损和车辆扬尘^[24]。因机动车对 $PM_{2.5}$ 的贡献最主要源自尾气排放^{[13]84},故各类车流对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的不同影响主要在于其耗能类型的不同。因此,柴油燃烧对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响最大,其次是汽油,天然气的影响较小。资料显示,2013 年全国机动车排放的 $PM_{2.5}$ 中超过 90% 来自柴油车^[25]。实验室研究表明,柴油车的碳烟颗粒物排放量通常是汽油车的几十倍^[26],而汽油车排放的颗粒物又明显多于燃气车^[27]。本研究中, $PM_{2.5}$ 浓度与燃气车流量和汽油车流量的相关系数接近,可能是因为燃气车相对于汽油车而言体型较大,非尾气管排放量(尤其是车辆扬尘)较大。 $PM_{2.5}$ 浓度与道路行人流量无相关性($r=0.367, P>0.05$)。行人流对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响机制在于行人走动时扰动近地面空气,使滞留在地表的颗粒物上浮至大气中,抬升 $PM_{2.5}$ 浓度。此作用对 $PM_{2.5}$ 的贡献量少于汽车尾气,人群密集时段或密集地区的高 $PM_{2.5}$ 浓度可能与行人流量有关。

2.3 天气对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响

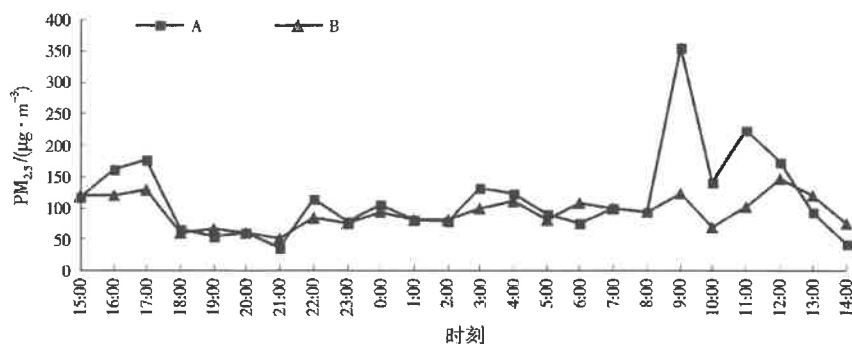


图 2 道路在清扫和未清扫情况下 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化
Fig.2 $PM_{2.5}$ in road region when swept and not swept

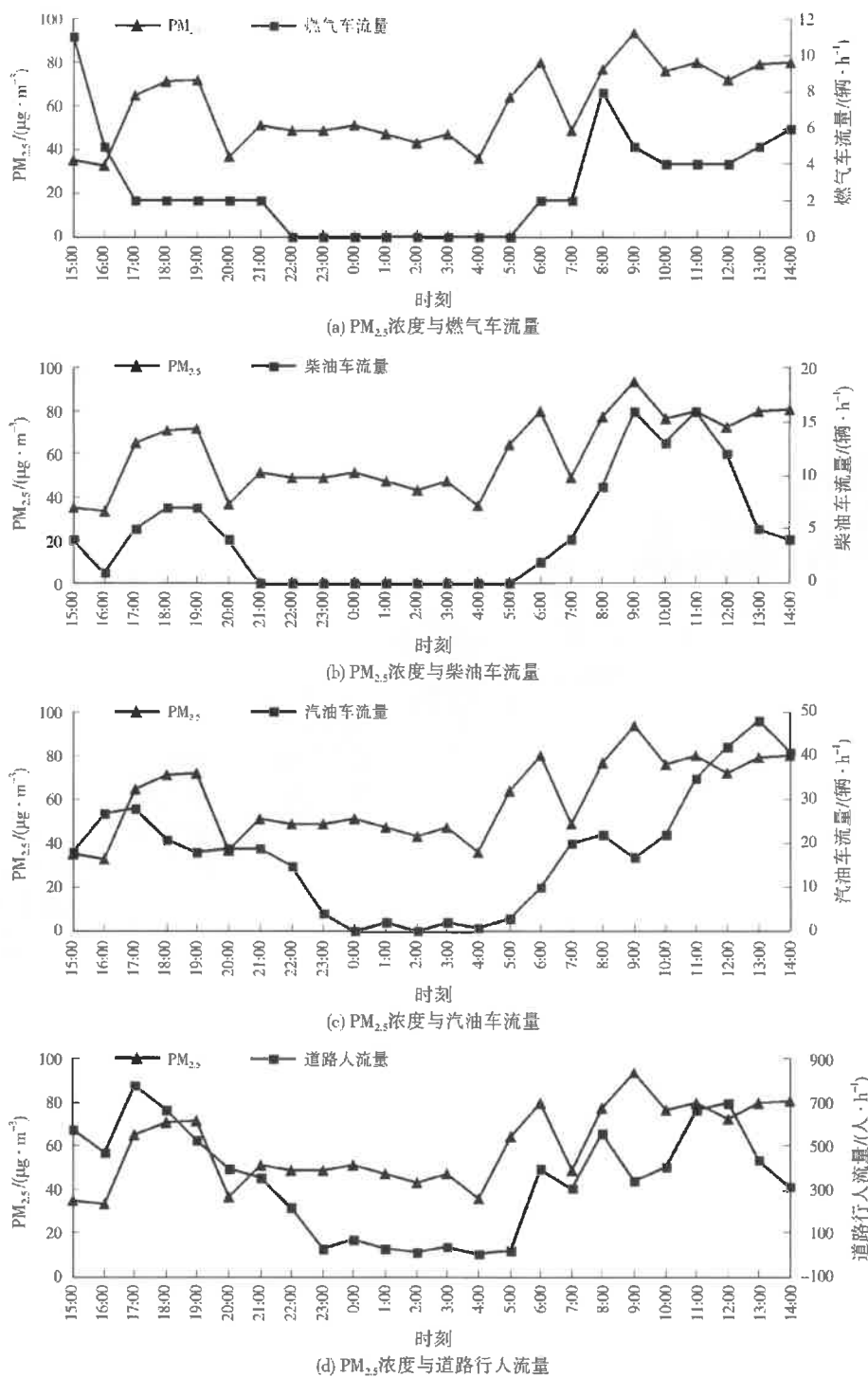


图3 道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度及各类交通流量

Fig.3 $PM_{2.5}$ and all kinds of traffic flows in road region

从中国空气质量在线监测分析平台 (<http://aqistudy.sinaapp.com/>) 上获取 11 月 22 日、23 日和 12 月 6 日、14 日的天气状况等资料 (见表 1)。4 次实验中, 研究区的天气状况和空气质量状况差异较

大: 第 1、2 次实验当天, 天气以阴为主, 空气质量指数 (AQI) 较高, 空气质量状况分别为重度污染和轻度污染, 两天均为霾日, 第 1 次实验当天尤为严重; 第 3、4 次实验当天, 天气状况均为晴转多云,

表 1 天气及空气质量状况
Table 1 Weather and air quality conditions

实验批次	日期	天气状况	AQI	空气质量状况
1	2014-11-22	多云转阴	241	重度污染
2	2014-11-23	阴	149	轻度污染
3	2014-12-06	晴转多云	80	良
4	2014-12-14	晴转多云	86	良

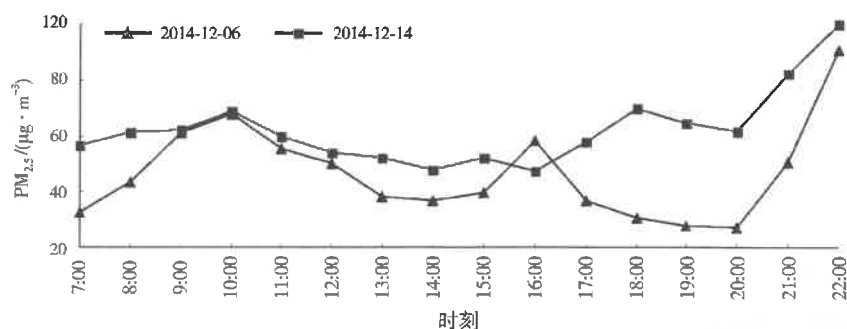


图 4 非霾日道路区域 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化
Fig.4 $PM_{2.5}$ in road region on non-hazy days

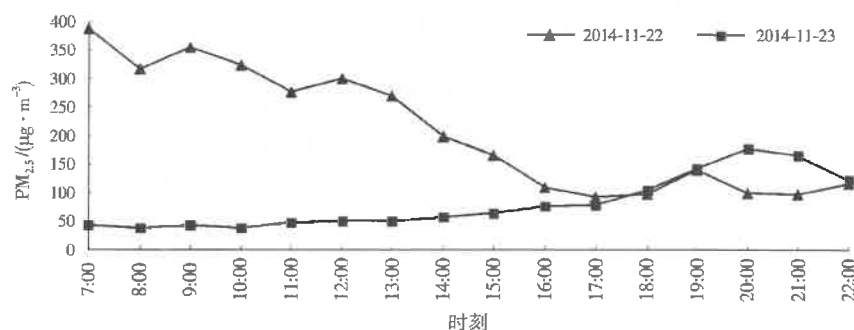


图 5 霾日道路区域 $PM_{2.5}$ 小时浓度变化
Fig.5 $PM_{2.5}$ in road region on hazy days

AQI 较低,空气质量状况为良,为非霾日。

在非霾日的第 3、4 次实验中, $PM_{2.5}$ 均值分别为 47.0 、 $62.0 \mu g/m^3$,均低于《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准日均值($75 \mu g/m^3$)。两次实验的 $PM_{2.5}$ 浓度变化均呈明显的“三峰”特征(见图 4)。10:00 和傍晚的高峰主要与交通量高峰有关,22:00 的高峰主要受逆温层的影响^[28-29]。

而在霾日的第 1、2 次实验中, $PM_{2.5}$ 均值分别为 209.3 、 $80.5 \mu g/m^3$,均超过 GB 3095—2012 二级标准日均值。道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度阴天高于晴天和多云天,霾日高于非霾日,分别与上海^[30]和南京^[31]的情况相似。这两次实验的 $PM_{2.5}$ 浓度变化未呈“三峰”特征(见图 5):22 日白天 $PM_{2.5}$ 浓度较高,中午过后开始下降,16:00 后趋于平稳;23 日白天 $PM_{2.5}$ 浓度较低,但在午后渐渐升高,在 20:00 达到峰值,之后呈下降趋势。因此,天气现象的不同导致 $PM_{2.5}$ 的污染特征存在较大差异。研究表明,在特殊

天气条件下,污染气象条件对颗粒物浓度早中晚差异的影响可能大大超过交通量日变化的影响^{[9]1207}。

2.4 气象因子对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响

由 2.3 节可知,就道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的变化而言,霾日情况差别较大,而非霾日的特征相似。故着重研究气象因子在非霾日对道路区域 $PM_{2.5}$ 浓度的影响,以 12 月 14 日的数据为例(见图 6,图 6(d)缺 10:00 时大气压数据)。

午后 12:00—16:00 时段, $PM_{2.5}$ 浓度出现低谷,大致对应温度、风速的高值区和相对湿度的低值区。温度较高时,大气垂直湍流运动强烈,有利于 $PM_{2.5}$ 的扩散和输移,使其浓度下降^[32];颗粒物粒子的布朗运动也随之加快^[33]。同时,较高的风速也对 $PM_{2.5}$ 有稀释扩散和输送作用^[34]。 $PM_{2.5}$ 浓度在监测时段的 10:00 和傍晚前后都出现了高峰,此时基本对应相对湿度的高值区和温度、风速的低值区。研究表明,相对湿度 $< 65\%$ 的情况下,相对湿度的增

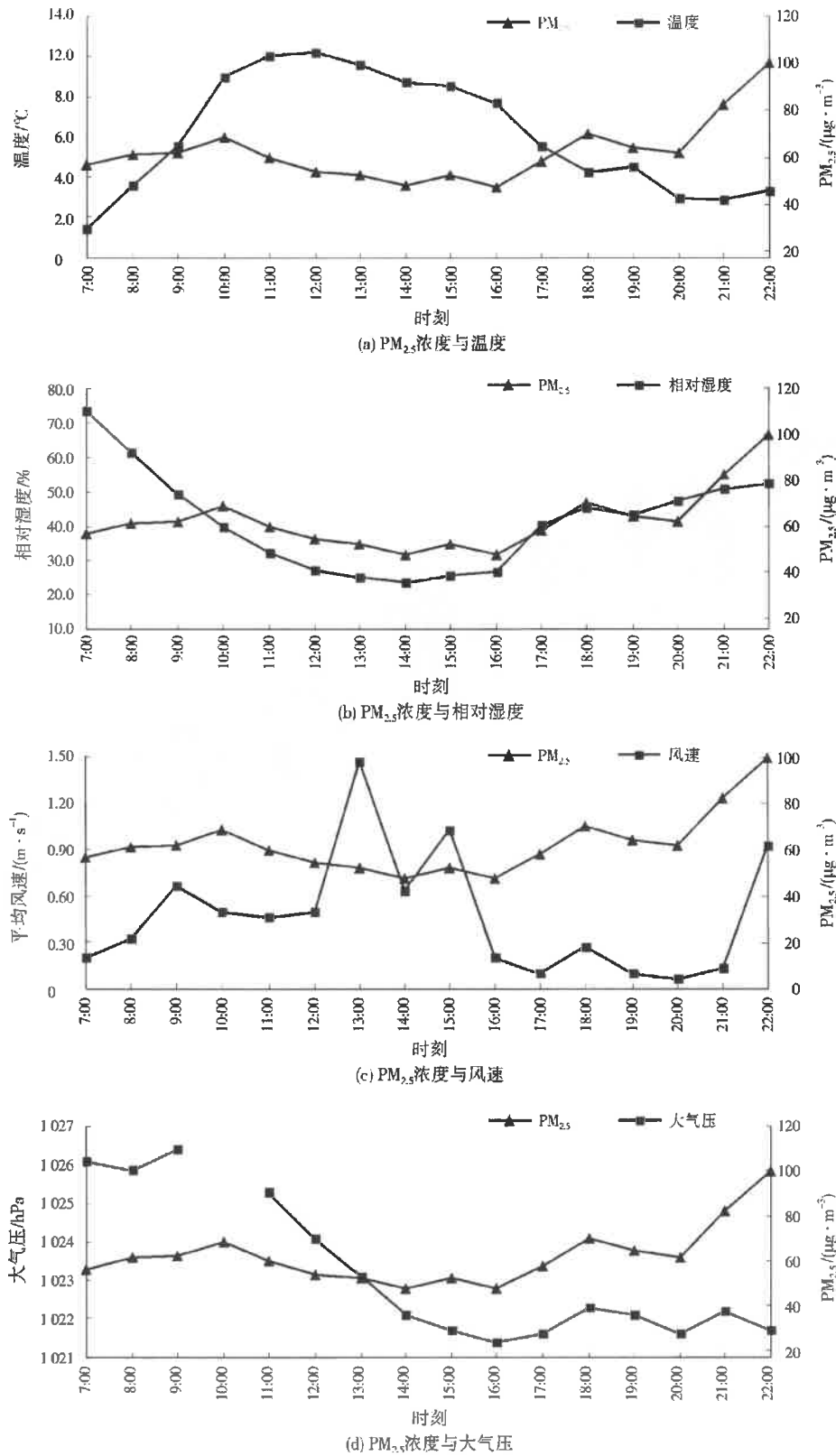


图 6 道路区域各类气象因子与 $PM_{2.5}$ 浓度的变化特征
Fig.6 Meteorological factors and $PM_{2.5}$ in road region

加有助于气态物质转化为二次颗粒物^[34];也使颗粒物的吸湿作用加强,质量浓度升高^[35]。而较低的温度和风速使得区域内大气对流作用减弱,不利于 PM_{2.5} 的稀释扩散。20:00 后,PM_{2.5} 浓度显著升高。此时温度、风速和大气压值都很低,逆温效应较强,大气对流作用减弱,使 PM_{2.5} 在相对封闭的道路环境中积聚,浓度升高。相关性分析表明,PM_{2.5} 浓度与温度呈负相关($r = -0.501, P < 0.05$),而与其他气象因子间无相关性,说明温度是影响道路区域 PM_{2.5} 污染程度的重要气象因子。

3 结论与建议

(1) 道路清扫抬升道路区域的 PM_{2.5} 浓度,白天的抬升作用较傍晚和夜间的更加显著。白天清扫时段与人流量高峰时段重合,建议将清扫时间安排在夜晚等非人流量高峰时段。

(2) 道路区域的 PM_{2.5} 浓度与各类交通流量均有相似的变化特征。各类交通流对 PM_{2.5} 浓度的影响程度排序为:柴油车>汽油车>燃气车>道路行人,PM_{2.5} 浓度与前 3 者流量呈正相关。柴油车对道路区域 PM_{2.5} 浓度的贡献最大,建议严格控制其流量。

(3) 道路区域 PM_{2.5} 浓度阴天高于晴天和多云天,霾日高于非霾日,在霾日变化特征各异,在非霾日均呈“三峰”分布特征。

(4) 非霾日,道路区域 PM_{2.5} 浓度的高值区与相对湿度的高值区,温度、风速的低值区重合;PM_{2.5} 浓度的低值区与相对湿度的低值区,温度、风速的高值区重合。温度与 PM_{2.5} 浓度呈负相关,是影响道路区域 PM_{2.5} 污染程度的重要气象因子。

参考文献:

- [1] 车瑞俊,刘大猛,袁杨森.北京冬季大气颗粒物污染水平和影响因素研究[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(5):556-563.
- [2] 李炯,孙德智,王毅力.北京市和广州市三种典型交通道路空气悬浮颗粒物污染特征[J].环境化学,2010,29(4).
- [3] 罗娜娜,赵文吉,晏星,等.交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究[J].环境科学,2012,34(10):3741-3748.
- [4] 孙俊玲,刘大猛,扬雪.北京市海淀区大气颗粒物污染水平及其影响因素[J].资源与产业,2009,11(1):96-100.
- [5] 袁杨森,刘大猛,车瑞俊,等.北京市秋季大气颗粒物的污染特征研究[J].生态环境,2007,16(1):18-25.
- [6] AARNIO P, MARTIKAINEN J, HUSSEIN T, et al. Analysis and evaluation of selected PM₁₀ pollution episodes in the Helsinki Metropolitan Area in 2002[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(17):3992-4005.
- [7] 施益强,王坚,张枝桦.厦门市空气污染的空间分布及其与影响因素空间相关性分析[J].环境工程学报,2014,8(12):5406-5412.
- [8] 何宗健,袁胜利,肖美.夏季南昌市大气颗粒物 PM₁₀、PM_{2.5} 污染水平研究[J].安徽农业科学,2010,38(3):1336-1338.
- [9] 沈俊秀,肖珊,余琦,等.上海市道路环境 PM₁₀、PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平[J].环境化学,2011,30(6).
- [10] 李新宇,赵松婷,李延明,等.北京市不同主干道绿地群落对大气 PM_{2.5} 浓度消减作用的影响[J].生态环境学报,2014,23(4):615-621.
- [11] 刘立忠,张承中,李治婷.道路人工清扫扬尘中 PM₁₀ 污染影响因素研究[J].西北大学学报(自然科学版),2005,35(3).
- [12] 王玮,黄河清.道路清扫对城市道路空气悬浮颗粒物含量的影响[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2012,29(2):171-175.
- [13] 刘永红,詹鹏铭,刘建昌,等.广东佛山交通扬尘排放特征研究[J].环境科学与技术,2014,37(8).
- [14] 刘凯,王睿,邱刚.西安市 2013 年 PM_{2.5} 浓度变化分析研究[J].环境污染与防治,2015,37(4):66-70.
- [15] 温维,韩力慧,代进,等.唐山夏季 PM_{2.5} 污染特征及来源解析[J].北京工业大学学报,2014,40(5):751-758.
- [16] YANG Yiru, LIU Xingang, QU Yu, et al. Formation mechanism of continuous extreme haze episodes in the megacity Beijing, China, in January 2013[J]. Atmospheric Research, 2015, 155:192-203.
- [17] CHANG Y M, CHOU C M, SU K T, et al. Effectiveness of street sweeping and washing for controlling ambient TSP[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(10):1891-1902.
- [18] 樊守彬.北京机动车尾气排放特征研究[J].环境科学与管理,2011,36(4):28-31.
- [19] HJ 618—2011,环境空气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的测定 重量法[S].
- [20] 黄虹,曾宝强,曹军骥,等.广州大学城大气 PM_{2.5} 质量浓度与影响因素[J].环境科学与技术,2009,32(5).
- [21] 游燕,白志鹏.大气颗粒物暴露与健康效应研究进展[J].生态毒理学报,2012,7(2):123-132.
- [22] 樊守彬,杨力鹏,程水源.道路环境颗粒物浓度空间分布研究[J].环境科学与技术,2011,34(7):56-58.
- [23] 赵顺征,易红宏,唐晓龙,等.空气细颗粒物污染的来源、危害及控制对策[J].科技导报,2014,32(33):61-66.
- [24] 樊守彬.车辆非尾气颗粒物排放特征研究[J].环境科学与技术,2011,34(5):124-127.
- [25] 黄志辉,陈伟程,吉喆,等.全国机动车污染物排放量——《2013 年中国机动车污染防治年报》(第 II 部分)[J].环境与可持续发展,2014(1):91-96.
- [26] 王青芳,张超,孙红芳,等.柴油车尾气碳烟颗粒物捕集装置的研究[J].环境科学研究,2001,14(4):57-59.
- [27] 王军方,葛蕴珊,何超,等.汽油车和天然气汽车颗粒物排放特性研究[J].汽车工程,2009,31(2):137-140.
- [28] 洪盛茂,焦荔,包贞.杭州市区可吸入颗粒物的污染特征分析[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(5):571-577.
- [29] 韩婧,代志光,李文韬.西安市灰霾天气下 PM_{2.5} 浓度与气象条件分析[J].环境污染与防治,2014,36(2):52-56.
- [30] 胡环,董洁霜.典型城市道路区域空气 TSP 和 PM₁₀ 污染特征研究——以上海市为例[J].天津师范大学学报(自然科学版),2013,33(4):44-48.
- [31] 魏玉香,银燕,杨卫芬,等.南京地区 PM_{2.5} 污染特征及其影响因素分析[J].环境科学与管理,2009,34(9):29-34.
- [32] 陈俊刚,毕华兴,许华森,等.北京市道路防护林带内外 PM_{2.5} 质量浓度特征及与气象要素的相关性[J].中国水土保持科学,2014,12(3):1-8.
- [33] 韩道义,刘文清,张玉钧,等.温度和相对湿度对气溶胶质量浓度垂直分布的影响[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(5):619-624.
- [34] 何平,杨兴堂,沈先标,等.上海宝山区大气 PM_{2.5} 污染特征分析[J].环境与职业医学,2010,27(12):724-726.
- [35] 刘大猛,马永胜,高少鹏,等.北京市春季燃烧源大气颗粒物的污染水平和影响因素[J].现代地质,2005,19(4):627-633.

编辑:陈泽军 (收稿日期:2015-11-02)

