

# 北京市交通干道防护林带内 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化特征

李素莉<sup>1</sup>, 杨 军<sup>2\*</sup>, 马履一<sup>1</sup>, 贾黎明<sup>1</sup>, 李荣桓<sup>3</sup>, 秦永胜<sup>3</sup>

(1. 教育部森林培育与保护重点实验室 北京林业大学, 北京 100083; 2. 地球系统数值模拟教育部重点实验室  
地球系统科学研究中心, 清华大学, 北京 100084; 3. 北京市园林绿化局, 北京 100083)

**摘 要:**选择北京市北五环路和京藏高速路上的 5 个地段对 PM<sub>2.5</sub> 浓度、温度、湿度、风速风向进行了连续观测, 并对各地段的 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化和环境因子的关系进行了回归分析。结果表明: 1) 有林带和无林带地段上的观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化趋势不同, 无林带地段各观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度一般随距道路距离增加变小, 有林带地段各观测点上 PM<sub>2.5</sub> 浓度则有升有降; 2) 林带内各观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度和道路侧的 PM<sub>2.5</sub> 浓度显著相关, 和林内的温、湿度显著相关, 但和林内风速的相关性不显著; 3) 林带的宽度对林带内各观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度有一定影响。

**关键词:** 林带; PM<sub>2.5</sub>; 环境因子; 削减作用

**中图分类号:** S732      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-7461(2015)03-0245-08

## Variations of PM<sub>2.5</sub> Concentrations Inside the Greenbelts along Two Urban Traffic Arteries in Beijing

LI Su-li<sup>1</sup>, YANG Jun<sup>2\*</sup>, MA Lu-yi<sup>1</sup>, JIA Li-ming<sup>1</sup>, LI Rong-huan<sup>3</sup>, QIN Yong-sheng<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory for Earth System Modeling, Ministry of Education Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Beijing Municipal Bureau of Landscape and Forestry, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In this study, the concentrations of PM<sub>2.5</sub>, air temperature, relative humidity (RH), wind speed, and wind direction at five locations on the North Fifth-ring Road and Beijing-Xizang Highway were continuously monitored. The correlation between the concentration of PM<sub>2.5</sub> and environmental factors was analyzed using a regression analysis method. The results showed: 1) the variation trends were different between locations with greenbelts and the location without a greenbelt. For the location without a greenbelt, the concentrations of PM<sub>2.5</sub> decreased as the distances to the road increased. For locations with greenbelts, concentrations of PM<sub>2.5</sub> at different distances showed both increasing and decreasing trends; 2) the concentrations of PM<sub>2.5</sub> at roadside had a significant influence on the concentrations of PM<sub>2.5</sub> inside the greenbelts. The influences of air temperatures and RH were also significant. However, no significant relationship was identified between the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and wind speeds inside the greenbelts, and 3) the width of greenbelt had some effects on the concentrations of PM<sub>2.5</sub> inside the greenbelt.

**Key words:** greenbelt; PM<sub>2.5</sub> concentration; environmental factor; removal effect

PM<sub>2.5</sub>是指空气动力学直径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ 的悬浮颗粒物<sup>[1-2]</sup>, 城市空气中高浓度的 PM<sub>2.5</sub> 引起的雾霾现象会降低城市能见度, 更重要的是能引发疾病, 严重威胁城市居民的身体健康<sup>[3-4]</sup>。随着城市中汽车保

收稿日期: 2014-06-24    修回日期: 2014-10-20

基金项目: 北京市科技计划(Z121100000312069, Z121100008512002)。

作者简介: 李素莉, 女, 在读硕士, 研究方向: 城市林业。E-mail: 907809942li@sina.com

\* 通信作者: 杨军, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 城市生态。E-mail: larix001@gmail.com

有量的逐渐增加,汽车尾气排放、行驶过程中扬尘及轮胎磨损物等构成了交通道路  $PM_{2.5}$  的主要来源<sup>[5]</sup>。众多的研究表明,树木具有较大的比表面积,枝叶表面具有的特殊结构如绒毛和气孔等都有利于其吸滞空气中的颗粒物,降低颗粒物污染<sup>[4,6]</sup>,树木还可通过遮阴和蒸腾的方式降低环境温度,减缓一些大气化学反应,从而降低二次粒子的生成<sup>[7]</sup>。因此,在道侧建设防护林带可能具有削减道路交通产生的  $PM_{2.5}$  的效果。目前对于道侧防护林带控制道路交通产生的颗粒物的作用的研究大多集中在控制 TSP(大气总悬浮颗粒物)和  $PM_{10}$ (空气动力学直径  $\leq 10\mu m$  的颗粒物)方面<sup>[8-12]</sup>,针对道侧防护林带对  $PM_{2.5}$  的影响作用大小和机理的研究相对较少<sup>[13-17]</sup>,当前对道侧林带是否有明显地削减  $PM_{2.5}$  细粒子的作用尚存有争议<sup>[13,18]</sup>。本研究实地观测了不同宽度的道侧防护林带内外  $PM_{2.5}$  浓度的变化,分析了林带对道路来源的  $PM_{2.5}$  的影响。以期应用防护林带控制城市交通来源的  $PM_{2.5}$  提供参考。

1 研究地点与方法

1.1 研究地点与概况

根据林带宽度的不同,本研究在北京市车流量较大的主干道北五环路和京藏高速路上分别选择了 3 个和 2 个地点进行观测。北五环路上的地点是道侧有林带的顾家庄桥(116°26′31.74″E,40°1′1.10″N)、广顺桥(116°28′4.94″E,40°0′49.08″N)和无林带的北苑桥(116°24′59.11″E,40°1′14.35″N),京藏高速路上的 2 个地点分别是有林带的辛庄桥(116°17′19.49″E,40°5′48.98″N)和华北电力大学西侧(116°17′47.94″E,40°5′12.58″N,简称华电西)。

顾家庄桥林带宽约为 115 m,主要树种为油松(*Pinus tabulaeformis*)、桧柏(*Sabina chinensis*)、毛白杨(*Populus tomentosa*)、旱柳(*Salix matsudana*),林带平均郁闭度是 0.60,疏透度是 0.32。广顺桥林带宽约为 64 m,主要树种为白皮松(*Pinus bungeana*)、桧柏、毛白杨、旱柳,林带平均郁闭度是 0.60,疏透度是 0.29。北苑桥地段无林带。辛庄桥林带宽约为 72 m,主要树种为油松、侧柏(*Platycladus orientalis*)、毛白杨、国槐(*Sophora japonica*)、黄栌(*Cotinus coggygria*),林带平均郁闭度是 0.55,疏透度是 0.35。华电西林带宽约为 26 m,主要组成树种为侧柏、油松、毛白杨、旱柳、刺槐(*Robinia pseudoacacia*),林带平均郁闭度是 0.60,疏透度是 0.37。

在北五环路的南侧沿垂直于道路的方向上布设 6 个观测点,分别为道路边(点 0)和点 1~点 5。在

京藏高速路上考虑到辅路的影响,在东侧自辅路开始布设了 5 个点,即点 0~点 4(图 1)。

1.2 试验仪器和观测方法

试验在 2012 年 8 月 29 日、8 月 31 日、9 月 9 日、9 月 16 日、9 月 23 日、10 月 1 日、10 月 4—7 日进行,每个地点重复进行了 2 次持续观测,持续观测的时间为 8:00—17:00,每隔 30 min 采集 1 次数据。各观测点上空气中的  $PM_{2.5}$  浓度用微电脑激光粉尘仪(LD-5C(B),北京绿林创新数码科技有限公司)测定,仪器最小测定值为  $1\mu g \cdot m^{-3}$ ,测量精度为 10%。同时刻的主要气象因子使用便携式气象站(Kestrel4000,美国 Nielsen-Kellerman)测定。采集数据前仪器均经过校正,排除仪器间的误差。采集数据时仪器固定在距地面 1.3 m 高处。郁闭度测定方法为标准地的两对角线上树冠覆盖的总长度与两对角线总长之比;植物群落的疏透度指林带纵断面透光空隙的面积与纵断面面积之比,疏透度越小,植物结构越紧密。疏透度的测定方法为用数码相机拍摄样地照片,用“数字图像处理法”计算得出<sup>[10]</sup>。

1.3 数据分析方法

分析时首先分析有无林带、路边风速和风向对各观测点  $PM_{2.5}$  的影响,然后根据文献 Brantley<sup>[19]</sup>提到的方法对风向进行分类,分为低速风( $<0.5 m/s$ ,风向不限)、平行风(和林带方向平行)、顺风(从道路方向吹向林带)和逆风(从林带方向吹向道路)。对不同风向类型下林带内外各观测点之间的  $PM_{2.5}$  浓度差异进行计算,并用配对 T 检验方法进行显著性检验。各观测点的  $PM_{2.5}$  浓度数据与环境因子的关系采用回归分析。数据分析在 Origin 9.0 和 SPSS 20.0 里进行。

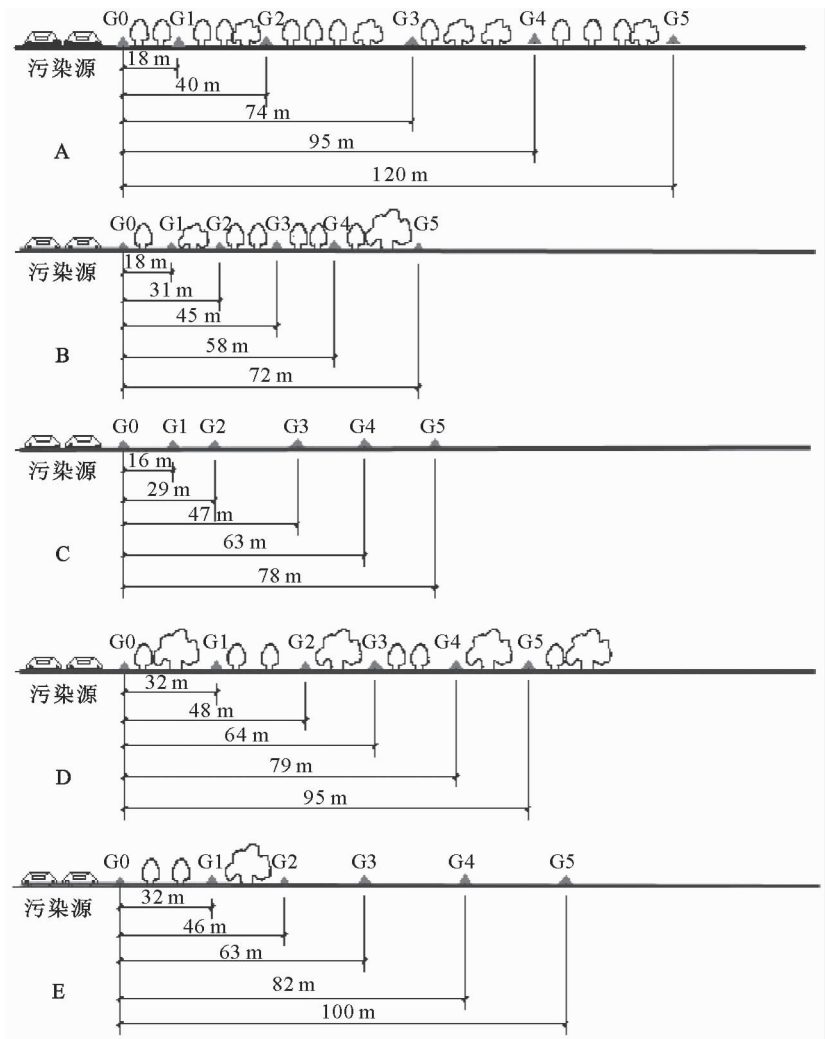
2 结果与分析

2.1 道侧  $PM_{2.5}$  浓度的日变化

各地段路边点 0 上的  $PM_{2.5}$  每小时平均浓度的日变化与两条道路上的交通高峰时刻基本重合(图 2)。如工作日京藏高速路道侧的  $PM_{2.5}$  的浓度峰值大致出现在 8:00 左右,与早高峰以进京车辆为主,集中在路东侧的情况一致。在华电西观测地段,10 月 1 日正值“十一”假期第 1 天,其  $PM_{2.5}$  浓度要明显高于假期中间 10 月 5 日。说明道路交通产生的  $PM_{2.5}$  是路边观测点观测到的  $PM_{2.5}$  的主要来源。

2.2 各观测点上  $PM_{2.5}$  浓度比较分析

各地段在监测期内的风速均在  $0\sim2.0 m \cdot s^{-1}$  范围内。在有林带地段,林带内的各观测点(点 1~点 5)之间的  $PM_{2.5}$  浓度变化不明显。和路边点 0 上



注:A:顾家庄桥、B:广顺桥、C:北苑桥、D:辛庄桥、E:华电西。G0~G5 指观测点 0~观测点 5。

图 1 各试验地观测点位置示意

Fig. 1 Locations of monitoring sites

的浓度相比,顾家庄桥、华电西和辛庄桥林带内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度要小于路边点上浓度,而广顺桥林带内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度要高于路边点。位于顾家庄桥和华电西林带后的点上 PM<sub>2.5</sub> 浓度低于路边点,与一般对林带的净化作用的期望一致。但广顺桥林带后的点上 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于路边点(图 3),其原因将在 2.3 中结合风向进一步分析。

无林带的北苑桥地段各观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度随着距离的增加有一定降低,说明空气有一定的自净能力。但随着距离的增加,其他来源如居民活动产生的 PM<sub>2.5</sub> 的影响逐渐增大,降低的趋势逐渐减小。

2.3 风向和风速对观测点上 PM<sub>2.5</sub> 浓度的作用

2.3.1 道路 0 点上 PM<sub>2.5</sub> 浓度和风速的关系 各地段路边 0 点上的 PM<sub>2.5</sub> 浓度随风速的变化并无规律,相关系数  $R^2$  均较小,未呈现出显著 ( $p < 0.05$ ) 相关关系(图 4)。这可能是由于在观测期间测得的风速基本在  $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,按照气象部门的风力等级划分为轻风,风速偏低。但这种低风条件正是

北京雾霾天形成的主要因素。因此,无风或低风条件下,道路边林带的削减 PM<sub>2.5</sub> 的作用对于从源头控制 PM<sub>2.5</sub> 至关重要。

2.3.2 不同风向下各观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化 以广顺桥和北苑桥为例,不同风向下各观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化情况(图 5)表明,顺风条件下,有林带地段广顺桥各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度高于路边点 0,无林带地段北苑桥各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度较路边点 0 浓度低,可能与污染物在从路边向林带扩散的过程中,林带降低了风速导致 PM<sub>2.5</sub> 在林中滞留有关。而无林带阻挡的地带由于空气的稀释作用,各观测点上的 PM<sub>2.5</sub> 浓度均低于路边点。

平行风条件下,广顺桥地段观测点浓度均比路边 0 点高,而北苑桥各点间浓度差异不明显。在平行风时,道路污染物主要沿道路风向扩散,而林带内靠近道路的点会受到污染物扩散的影响,在林带降低风速的情况下,容易滞留 PM<sub>2.5</sub>。靠近路边的林带内外点上的污染物浓度高于其它点上污染物浓度(图 5)。

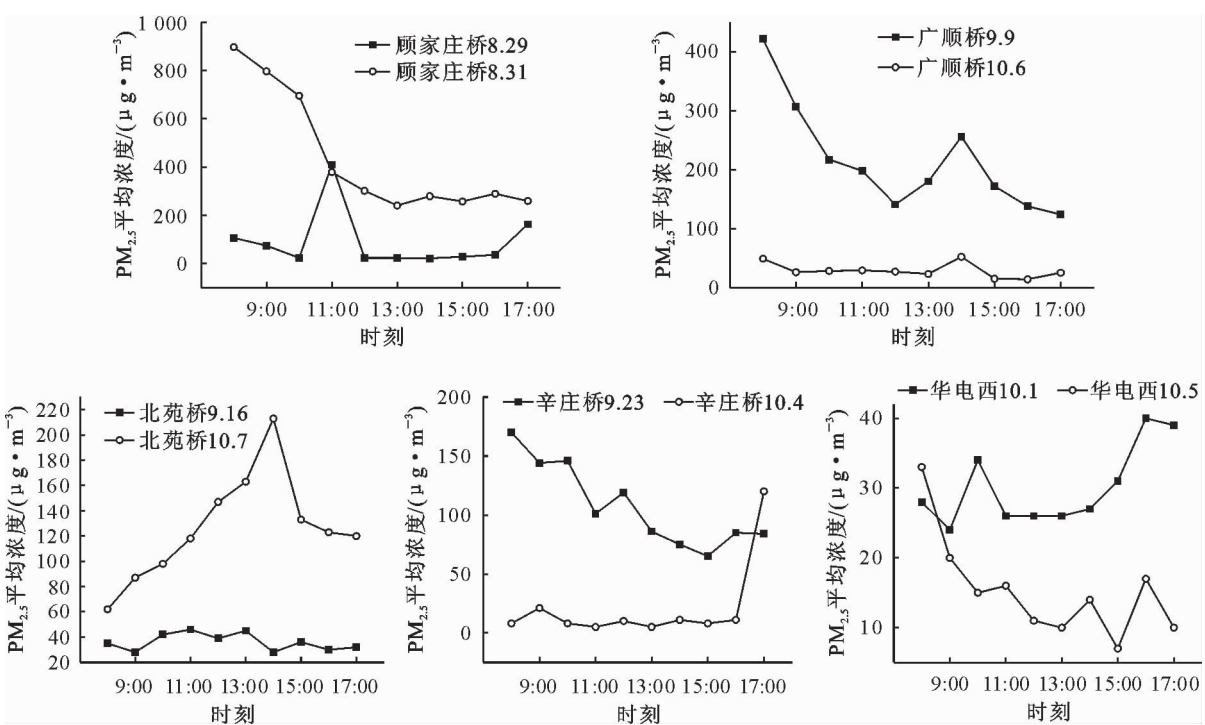


图 2 道路 0 点 PM<sub>2.5</sub> 每小时平均浓度  
Fig. 2 Hourly concentrations of PM<sub>2.5</sub> at site 0

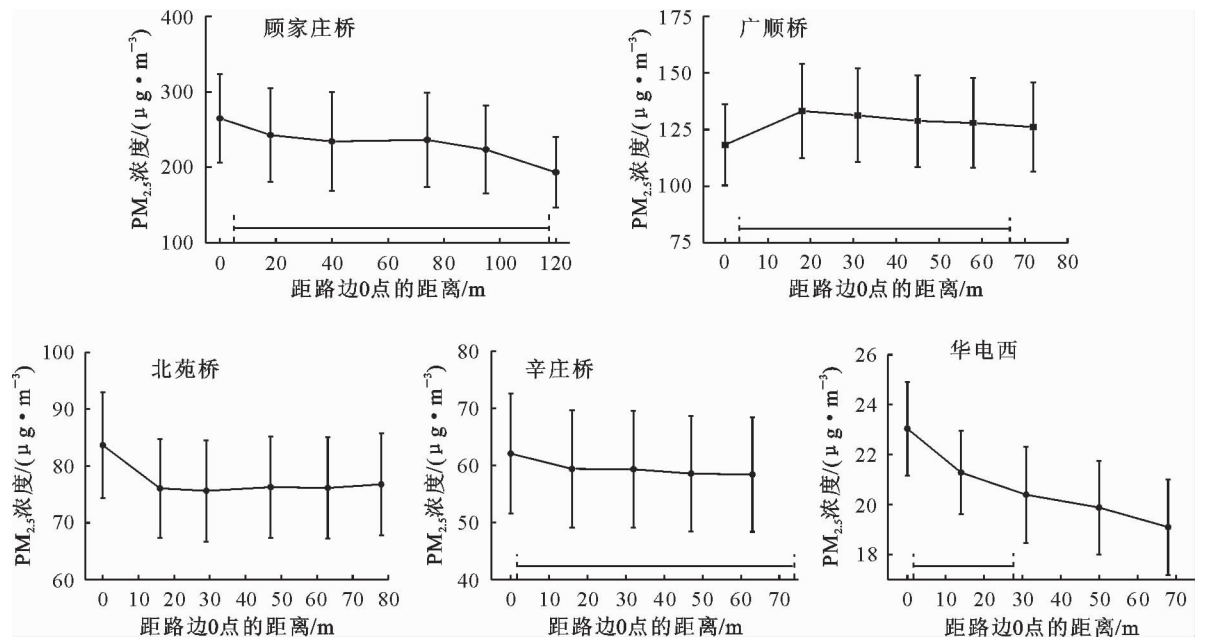


图 3 各观测点上 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度(误差线代表标准误差),虚线表示林带所在位置

Fig. 3 Average concentrations of PM<sub>2.5</sub> (error bars represents Se) at monitoring sites, dotted lines show the locations of greenbelts

逆风条件下,广顺桥各点间 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化无规律,北苑桥地段各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度均比路边低。在逆风情况下道路污染物无法向林带扩散,因此,其浓度和林带内各点上的浓度无直接关系。

2.4 林带内外各观测点间 PM<sub>2.5</sub> 浓度差异比较

在风速 $\leq 2.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的顺风条件下,对各地段林带内外各观测点间 PM<sub>2.5</sub> 浓度进行配对  $t$  检验,检验的结果见表 1~表 5。

有林带情况下,广顺桥、辛庄桥和华电西各地段

林内观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度与林外点的差异多达显著差异水平,广顺桥各点的浓度高于路边点,且林内各点之间还存在显著差异。而华电西和辛庄桥各地段林内点上的浓度低于路边点浓度,林带内点之间的 PM<sub>2.5</sub> 浓度存在差异但不显著。林带后点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度除广顺桥外均低于路边点的浓度,并在华电西,辛庄桥差异显著。无林带的北苑桥各观测点浓度均显著低于路边点,表明林带对道路来源的 PM<sub>2.5</sub> 的扩散具有一定影响。

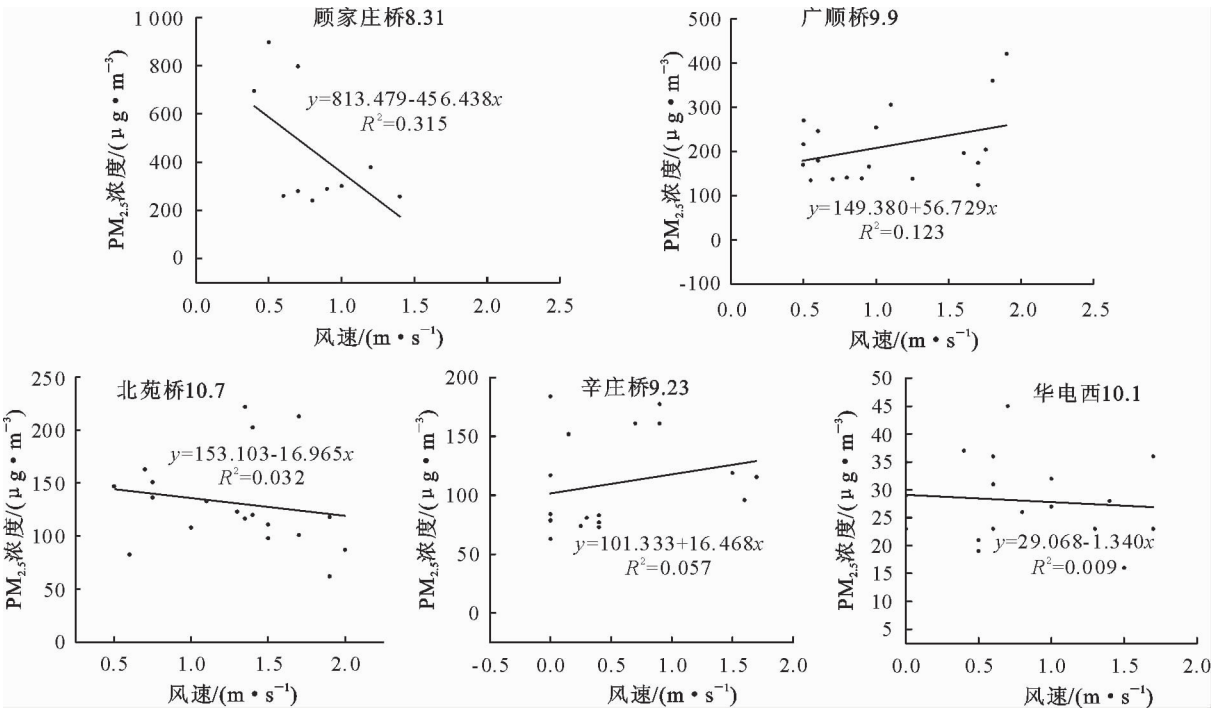
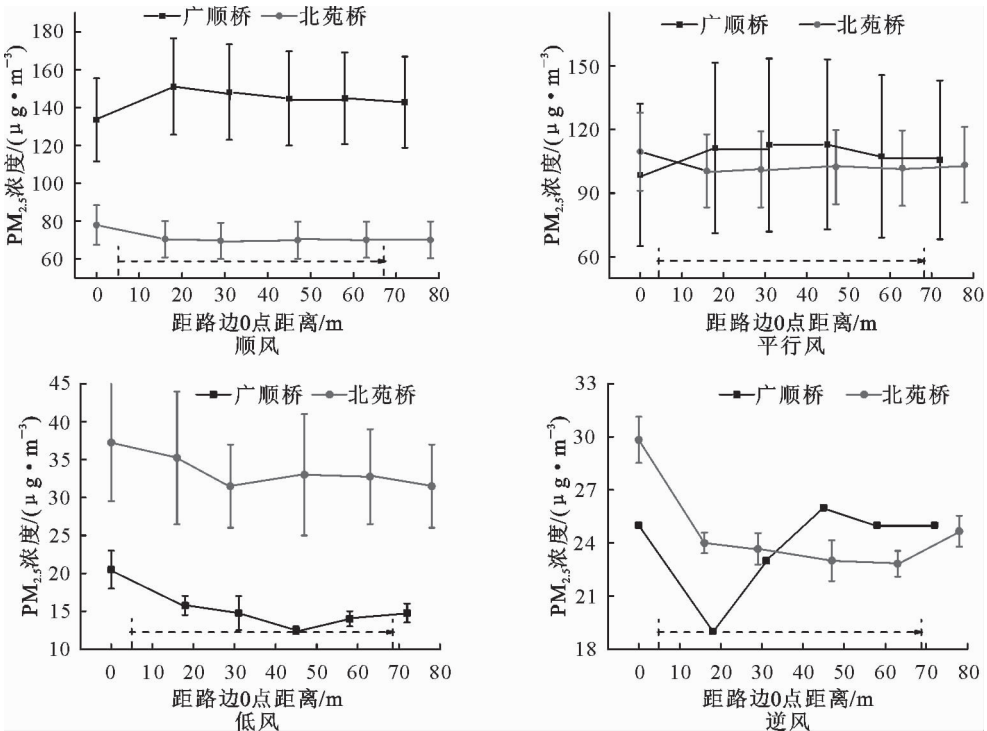


图 4 各地段路边 0 点 PM<sub>2.5</sub> 浓度和风速关系

Fig. 4 Correlations between concentrations of  $PM_{2.5}$  at site 0 and wind speeds



虚线表示林带位置

图 5 广顺桥和北苑桥不同风向下 PM<sub>2.5</sub> 浓度

Fig. 5 Concentrations of  $PM_{2.5}$  at sites in Guangshunqiao and Beiyuanqiao under different wind directions, the location of the greenbelt is represented by the dotted line

有林带的顾家庄桥各观测点上  $PM_{2.5}$  浓度和路边点的浓度差均未达到显著水平,但愈往林带深处的观测点,  $PM_{2.5}$  浓度从高于路边点向低于路边点转变。顾家庄林带是本研究宽度最大的一条,几乎是广顺桥和辛庄桥的 2 倍,华电西的 3 倍,其内部小气

候的变化较其它林带平缓。

2.5 顺风情况下环境因子与林带内外各观测点上  $PM_{2.5}$  浓度的关系

选取的数据,选取顺风情况下路边点 0 的  $PM_{2.5}$  浓度(反映  $PM_{2.5}$  的来源)、各点距 0 点距离、

表 1 顾家庄桥各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度差

Table 1 Differences of concentrations of PM<sub>2.5</sub> at different monitoring sites in Gujiazhuangqiao

顾家庄桥	观测点 0	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
观测点 0	0	−10.43	−12.00	13.43	12.71	15.86
观测点 1		0	−1.57	23.86	23.14	26.29
观测点 2			0	25.43	24.71	27.86*
观测点 3				0	−0.71	2.43
观测点 4					0	3.14
观测点 5						0

注：\*  $p<0.05$ ；\*\*  $p<0.01$ ；\*\*\*  $p<0.001$ 。以下同。

表 2 广顺桥各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度差

Table 2 Differences of concentrations of PM<sub>2.5</sub> at different monitoring sites in Guangshunqiao

广顺桥	观测点 0	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
观测点 0	0	−17.61**	−14.66**	−11.25*	−11.45*	−9.34
观测点 1		0	2.94	6.36*	6.16	8.27*
观测点 2			0	3.41*	3.21	5.32**
观测点 3				0	−0.20	1.91
观测点 4					0	2.11
观测点 5						0

表 3 北苑桥各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度差

Table 3 Differences of concentrations of PM<sub>2.5</sub> at different monitoring sites in Beiyuanqiao

北苑桥	观测点 0	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
观测点 0	0	7.39**	8.34**	7.92**	7.74**	7.81**
观测点 1		0	0.95	0.53	0.34	0.42
观测点 2			0	−0.42	−0.61	−0.53
观测点 3				0	−0.18	−0.11
观测点 4					0	0.08
观测点 5						0

表 6 各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度与环境因子的单因素方差分析

Table 6 ANOVA of PM<sub>2.5</sub> concentration and environmental factors at monitoring sites

地段	各变量的回归系数						调整后 $R^2$	显著性
	点 0 PM <sub>2.5</sub> 浓度 /( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	距 0 点距离 /m	距林带中心点 距离/m	相对湿度 /%	风速 /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气温 /℃		
顾家庄桥	0.42***	−0.26	0.00	16.50***	−23.05	−0.89	0.94	0.000***
广顺桥	1.07***	0.97	−1.09	0.18*	−16.84	1.45**	0.97	0.000***
北苑桥	0.92***	0.00	—	0.33*	0.740	0.34	0.99	0.000***
辛庄桥	0.99***	0.88	−0.91	−0.07	1.89	0.39	0.98	0.000***
华电西	0.88***	0.15	−0.16	0.22	0.89	0.68	0.87	0.000***

有林带的 3 个地段林内观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度都显示和林内的相对湿度相关,与相对湿度对细颗粒物的生成的影响有关,空气中相对湿度的增加能够促进细颗粒物的生成<sup>[20]</sup>。林带内因为风速降低、植物蒸发因而具有较高的相对湿度,能够促进阻滞的污染物生成细颗粒物。而在华电西的林带因为宽度较小,仅 26 m,对相对湿度的影响较小,有正相关关系,但未达显著水平。

各点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度和风速的相关性均不显著,

表 4 辛庄桥各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度差

Table 4 Differences of concentrations of PM<sub>2.5</sub> at different monitoring sites in Xinzhuangqiao

辛庄桥	观测点 0	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4
观测点 0	0	2.68*	2.75	3.53*	3.67*
观测点 1		0	0.07	0.84	0.99
观测点 2			0	0.78	0.92
观测点 3				0	0.14
观测点 4					0

表 5 华电西各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度差

Table 5 Differences of concentrations of PM<sub>2.5</sub> at different monitoring sites in Huadianxi

华电西	观测点 0	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4
观测点 0	0	1.76*	2.65	3.16**	3.95**
观测点 1		0	0.89	1.41	2.19*
观测点 2			0	0.51	1.30
观测点 3				0	0.78
观测点 4					0

距林带中心点距离以及各观测点上的气象因子包括风速、温度和相对湿度,对各地段观测点上的 PM<sub>2.5</sub> 浓度和环境因子进行了线性回归和单因素方差分析(ANOVA 分析),结果(表 6)表明,有林带的各地段各观测点上的 PM<sub>2.5</sub> 浓度和路边 PM<sub>2.5</sub> 浓度极显著相关,说明顺风情况下道路是林带内 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源。各点上的浓度和其距 0 点的距离及到林带中心点的距离无明显关系,说明林带对道路来源的 PM<sub>2.5</sub> 的作用不是简单的线性衰减关系,不支持通常所认为的离道路越远、越深入林带则 PM<sub>2.5</sub> 浓度越低的认识。

可能与林内风速较低有关<sup>[15-16]</sup>。由于树木等结构的作用易形成湍流,风向多变,对于 PM<sub>2.5</sub> 扩散的影响无明显的规律性。

林带内温度和相对湿度对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响在广顺桥体现明显。在林带内的观测点 1~点 4 的温度和相对湿度都和 PM<sub>2.5</sub> 浓度相关,而在林带外的观测点 5 的温湿度与 PM<sub>2.5</sub> 浓度无显著关系,只受到风速和源头 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响(表 7)。



表 7 广顺桥各观测点 PM<sub>2.5</sub> 浓度与环境因子关系

Table 7 Relationships among the concentrations of PM<sub>2.5</sub> and environmental factors at monitoring sites in Guangshunqiao

参数	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
0 点 PM <sub>2.5</sub> 浓度	0.90 ***	0.86 ***	0.89 ***	0.82 ***	1.05 ***
风速	−5.46	−18.67	−25.82	7.85	−25.84 *
温度	3.12 **	2.76 **	2.56 *	2.84 *	1.74
相对湿度	1.58 ***	1.71 ***	1.58 **	1.78 ***	0.03
调整后 R <sup>2</sup>	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97

2.6 林带对风速、温度、相对湿度的影响

林带的温度和相对湿度对观测点的 PM<sub>2.5</sub> 浓度具有显著影响,而风速的影响不显著。进一步对此 3 个因子在林带内的变化情况进行分析(图 6)。除顾家庄桥外,其他 3 个有林地带均是越接近林带的中心位置,风速越低、温度越低、而相对湿度升高。和他人的研究结果一致<sup>[21]</sup>。顾家庄桥地段的风速随距林带中心距离越近略有升高,这主要是由于顾家庄桥林带宽度较大,迎风面林缘对风速的降低作用在一定距离后衰减,该林带内的温湿度的变化也较其他 3 条林带平缓。

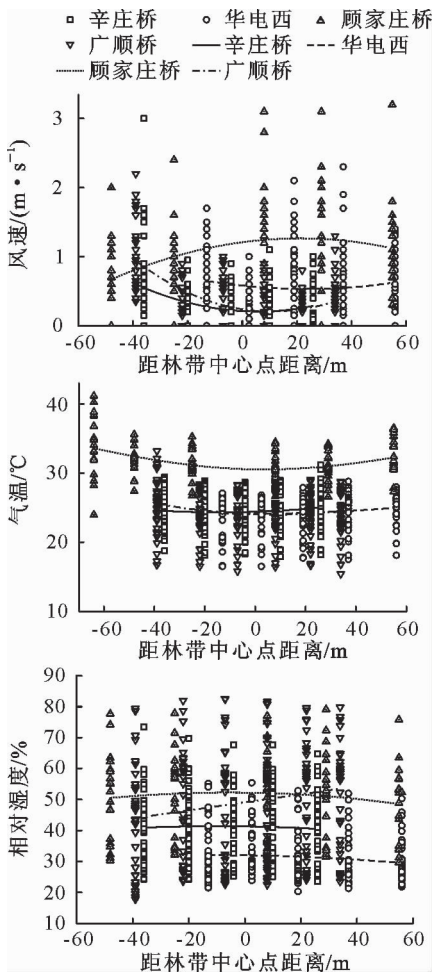


图 6 各观测点的风速、温度和相对湿度随距林带中心距离变化

Fig. 6 Variations of wind speeds, temperatures and relative humidity along the distances to centers of greenbelts

3 结论与讨论

道路旁的防护林带对于交通产生的 PM<sub>2.5</sub> 扩散有明显影响。林带内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度受到林带宽度和气象因子的影响,不是总低于道侧的 PM<sub>2.5</sub> 浓度。在特定的条件下,林带内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度会高于道侧浓度,这种浓度升高的现象和林带内相对湿度较高,风速低有关。

王月容<sup>[13]</sup>等对北京城市绿地 PM<sub>2.5</sub> 浓度的观测显示,PM<sub>2.5</sub> 浓度与相对湿度呈正相关关系,与本研究结果一致;但他们为考虑风向因素,认为 PM<sub>2.5</sub> 浓度和风速、温度呈负相关关系,与本研究不同。国外的研究显示风向是影响路边植被的降尘作用的关键因子<sup>[19,22]</sup>。古琳<sup>[15]</sup>等对无锡市城市游憩林内的 PM<sub>2.5</sub> 浓度进行了 4 个季节的观测后发现,相对湿度和温度与 PM<sub>2.5</sub> 浓度均极显著相关,但风速的影响不大,与本研究结果一致。么旭阳<sup>[16]</sup>在对北京 8 种常见绿化树种滞尘效应的研究中也指出,风速较低会抑制粉尘的扩散,从而造成近地面层的粉尘颗粒物成倍地增加。郭含文<sup>[14]</sup>等也发现绿地中的 PM<sub>2.5</sub> 浓度在阴天最高,可能为太阳辐射的影响。

关于林带宽度的影响,王月容<sup>[13]</sup>等认为削减效果最明显的是在绿带的 26 m 处,因此,绿带的最佳宽度应该是 30 m 左右,而牟浩<sup>[17]</sup>的研究结果显示,林带对 PM<sub>2.5</sub> 的削减作用和林带的宽度及距路边的距离不相关。本研究结果显示,PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化和距路边及林带中心的距离关系不显著,不存在一种线性衰减关系。但较宽的林带对林内小气候的影响大,林内的能够维持较高的 PM<sub>2.5</sub> 浓度,有利于 PM<sub>2.5</sub> 的沉降和树木通过枝叶进行拦截,避免其扩散到其它区域。林带面积越大,则树木的枝叶表面积越大,在一定程度上能够增加对 PM<sub>2.5</sub> 的拦截吸附。

对不同风向、不同宽度的道侧防护林带内外的 PM<sub>2.5</sub> 浓度观测结果显示,防护林带内 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化受到多个因素的影响,林带不仅能够对道路产生的 PM<sub>2.5</sub> 起到滞留作用<sup>[6-7]</sup>,由于对环境因子的改变,还可能促进 PM<sub>2.5</sub> 的生成。采用林带内外浓度差来表征林带的滞尘作用的做法存在不足,采用林

带内和道路边  $\text{PM}_{2.5}$  浓度之差无法代表林带对  $\text{PM}_{2.5}$  的削减作用,在很多情况下会为负值;而用林带后的某点的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度和靠道路位置的浓度差作为林带对颗粒物的削减率也存在一定的问题,林带边缘由于不同界面的存在易形成湍流,在此情况下  $\text{PM}_{2.5}$  的变化无规律<sup>[23]</sup>,如果选择的点距林带太远,又将受到其它来源的  $\text{PM}_{2.5}$  的影响。因此,采用  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度差来代表道路防护林带的滞尘作用的方法有一定的局限性,需要结合其他一些控制措施来实施。道路防护林带对道路来源的  $\text{PM}_{2.5}$  真正削减作用是指沉降在林内空地 and 吸附在树木枝叶上的那部分  $\text{PM}_{2.5}$  的量,这可以通过测定实际沉降量和模型模拟获得。

由于观测周期短、样地数量少和对环境因子缺乏控制等原因,本研究尚无法揭示林带对  $\text{PM}_{2.5}$  削减作用的影响机理,有待进一步研究。

致谢:感谢代光辉、张志永和常亚敏在野外调查和观测中给予的帮助。

参考文献:

[1] 杨复沫,马永亮,贺克斌. 细微大气颗粒物  $\text{PM}_{2.5}$  及其研究概况[J]. 世界环境, 2000(4):32-34.

[2] 傅敏宁,郑有飞,徐星生,等.  $\text{PM}_{2.5}$  监测及评价研究进展[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34 (4) :1-6.

[3] 张文丽,徐东群,崔九思. 空气细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )污染特征及其毒性机制的研究进展[J]. 中国环境观测, 2002, 18 (1) : 59-63.

[4] 余海龙,黄菊莹. 城市绿地滞尘机理及其效应研究进展[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6):238-241  
YU H L, HUANG J Y. Research advances in mechanism and effect of dust retention of urban green areas [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(6):238-241 (in Chinese)

[5] 孙淑萍. 北京城区绿化对空气中可吸入颗粒物与降尘的影响[D]. 北京:中国农业大学,2003.

[6] 闫娜,龚雪梅,张晓玮,等. 城市绿化树种滞尘效应研究综述[J]. 职业技术, 2012,(5) :129-130.

[7] NOWAK, D. J, CRANE, D. E, STEVENS, J. C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States [J]. Urban Forestry & Urban Greening. 2006(4):115-123.

[8] 李炯. 典型城市交通道路空气悬浮颗粒物污染特征、预测及评价[D]. 北京:北京林业大学,2010.

[9] 金维明. 主要气象因素对可吸入颗粒物浓度影响规律探讨[J]. 中国环境观测,2009, 25 (4):71-75.

[10] 殷杉,申哲民,王文华,等. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益[J]. 生态学报, 2007, 27 (11):4590-4595.  
YIN S, SHEN Z M, WANG W H, *et al.* Effects of vegetation status in urban green spaces on particles removal in a canyon street atmosphere [J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(11):4590-4595. (in Chinese)

[11] 李萍,王松,王亚英,等. 城市道路绿化带“微峡谷效应”及其对非机动车道污染物浓度的影响[J]. 生态学报, 2011, 31 (10):2888-2896.  
LI P, WANG S, WANG Y Y, *et al.* “Micro-canyon effect” of city road greenbelt and its effect on the pollutant concentration above roads for non-motorized vehicles [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (10):2888-2896. (in Chinese)

[12] 贺芳芳,邵德民,程建敏,等. 冬春上海市郊外环林带防尘效应的初步研究[J]. 中国农业气象, 2008, 29 (1):51-55.

[13] 王月容,李延明,李新宇,等. 北京市道路绿地对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度分布与消减作用的影响[J]. 湖北林业科技, 2013, 42(6):4-9.

[14] 郭含文,丁国栋,赵媛媛. 城市不同绿地  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度日变化规律[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11 (4):99-103.

[15] 古琳,王成,王晓磊. 无锡惠山三种城市游憩林内细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ ) 浓度变化特征 [J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2485-2493.  
GU L, WANG C, WANG X L. Variation characteristics of fine particulate matter  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in three urban recreational forests in Hui Mountain of Wuxi City, Jiangsu Province of East China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24 (9):2485-2493. (in Chinese)

[16] 么旭阳,胡耀升,刘艳红. 北京市 8 种常见绿化树种滞尘效应 [J]. 西北林学院学报, 2014, 29 (3):92-95  
YAO X Y, HU Y S, LIU Y H. Dust-retention effect of 8 common greening tree species in Beijing [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29 (3):92-95. (in Chinese)

[17] 牟浩. 城市道路绿带宽度对空气污染物的削减效率研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2013, 6.

[18] VOS P E J,MAIHEU B,VANKERKOM J, *et al.* Improving local air quality in cities:To tree or not to tree[J]. Environmental Pollution, 2013, 183:113-122

[19] BRANTLEY H L,HAGLER G S W, DESHMUKH P J, *et al.* Field assessment of the effects of roadside vegetation on near-road black carbon and particulate matter [J]. Science of the Total Environment, 2014(468/469):120-129.

[20] HENNIGAN C J, BERGIN M H, DIBB J E, *et al.* Enhanced secondary organic aerosol formation due to water uptake by fine particles [J]. Geophysical Research Letters. 2008, 35(18), 1-5,

[21] NOWAK D J, DWYER J F. Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In:KUSER, J (Ed.), Urban and community forestry in the Northeast [M]. New York:Plenum Publishers,2000:11-25.

[22] BOWKER G E, BALDAUF R, ISAKOV V, *et al.* The effects of roadside structures on the transport and dispersion of ultrafine particles from highways [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(37), 8128-8139.

[23] HAGLER G S W, LIN M Y, KHLYSTOV A, *et al.* Field investigation of roadside vegetative and structural barrier impact on near-road ultrafine particle concentrations under a variety of wind conditions [J]. Science of the Total Environment, 2012,419:7-15.