

doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.040

郑州市道路绿地乔-灌型植物配置对大气颗粒物的影响

赵冰锐^{1,2}, 王翼飞¹, 华超¹, 汪安印¹, 尤啸龙¹, 宋芳琳², 贺丹¹

(1. 河南农业大学 风景园林与艺术学院, 河南 郑州 450002; 2. 郑州市城市道路绿化管理处, 河南 郑州 450000)

摘要:为研究城市道路不同植物配置模式对大气中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的削减作用,以郑州市建设路为研究对象,选取4种乔-灌型植物配置,采用便携式颗粒物检测仪器(CW-HAT200S)及气象仪(Kestrel 5000)测定其 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度和气象因子,分析乔-灌型植物群落对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在垂直空间和水平空间的削减作用。结果表明,道路环境下 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度在垂直方向和水平方向的日动态变化规律表现较为一致,均呈“U”型,早晚高,中午低;颗粒物浓度与温度、风速呈显著负相关,与湿度呈显著正相关;削减率与温度、风速和湿度的相关关系不明显。乔木枝下高较低、有多层高度的配置形式对颗粒物的削减更有效果,群落配置“美人梅+红叶石楠+黄杨”在垂直方向上削减效果最好,群落配置“悬铃木+海桐+构骨”在水平方向上削减效果最好。

关键词:城市道路;大气颗粒物;植物群落;削减率;郑州市

中图分类号:S731.8;TU986.34;P427.2 文献标识码:A 文章编号:1671-3168(2023)02-0212-07

引文格式:赵冰锐,王翼飞,华超,等.郑州市道路绿地乔-灌型植物配置对大气颗粒物的影响[J].林业调查规划,2023,48(2):212-218. doi:10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.040

ZHAO Bingrui, WANG Yifei, HUA Chao, et al. Effect of Arbor-Shrub Plant Configuration on Atmospheric Particulate Matters in Zhengzhou Road Green Space[J]. Forest Inventory and Planning, 2023, 48(2): 212-218. doi: 10.3969/j.issn.1671-3168.2023.02.040

Effect of Arbor-Shrub Plant Configuration on Atmospheric Particulate Matters in Zhengzhou Road Green Space

ZHAO Bingrui^{1,2}, WANG Yifei¹, HUA Chao¹, WANG Anyin¹, YOU Xiaolong¹,
SONG Fanglin², HE Dan¹

(1. College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Zhengzhou Administration of Urban Road Greening, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The objective of this study was to explore the effect of different plant configurations methods on reducing the concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the atmosphere. Four types of arbor-shrub plant configurations in Jianshe Road of Zhengzhou were selected to detect the $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations and meteorological factors by PMs samplers (CW-HAT200S) and a portable weather station (Kestrel 5000), and to analyze reduction of arbor-shrub plant community in vertical space and horizontal space. The results showed that under the road traffic environment, the diurnal dynamic changes of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concen-

收稿日期:2021-11-30;修回日期:2022-10-25.

基金项目:国家自然科学基金项目(31600579);河南省科技攻关项目(212102110185);河南省青年骨干教师资助项目(2020GGJS049).

第一作者:赵冰锐(1994-),女,河南长垣人,硕士,助理工程师.主要从事风景园林植物应用研究.

责任作者:贺丹(1983-),女,河南新乡人,博士,副教授.研究方向为风景园林植物应用.

trations in the vertical and horizontal directions were relatively consistent, showing a “U” shape, higher in the morning and evening and lower at noon; the particulate matter concentrations had a significant negative correlation with temperature and wind speed, and a significant positive correlation with humidity; the correlation between reduction rate and temperature, wind speed and humidity were not obvious. The configuration with low height under the branches and multi-layer height was more effective for the reduction of particulate matter. In this experiment, the configuration of “*Prunus × blireana* ‘Meiren’ + *Photinia serrulata* + *Buxus sinica*” had a better reduction effect in the vertical direction, and the configuration of “*Platanus orientalis* + *Pittosporum tobira* + *Ilex cornuta*” had a better reduction effect in the horizontal direction.

Key words: urban road; atmospheric particulate matter; plant community; reduction rate; Zhengzhou City

近年来,随着郑州市城市建设的快速发展,大气污染情况严重,全年60%以上时间空气处于污染状态,PM_{2.5}、PM₁₀等可吸入颗粒物年均浓度超过标准限值^[1]。颗粒物可通过呼吸系统、破损皮肤等途径进入人体,对血管、心肺系统及神经系统等造成严重危害^[2-3]。同时颗粒物浓度的升高降低了能见度,影响交通安全^[4]。机动车尾气排放是城市大气颗粒污染物的主要来源^[5-6],因此如何降低道路的颗粒物污染对城市大气治理至关重要。

植物叶片通过阻滞、吸附等方式对颗粒物进行削减,在大气污染治理中产生不可替代的作用^[7-8]。道路分车绿带作为阻隔汽车尾气污染的第一道防线,具有降低大气污染的功能。目前,国内外学者对道路植物削减颗粒物开展了相关研究,大多以植物个体为研究对象。由于植物叶片表面结构特征和生活型的差异,不同植物个体削减颗粒物的能力不同^[9-11]。而相同植物种类在不同区域环境或不同群落中削减颗粒物的能力也不相同^[12-14]。在道路环境植物群落对颗粒物的削减作用研究中,乔-灌-草群落结构对颗粒物的削减作用最大^[15-17],而多层次、复杂化的组合以及乔木的复层混交可增加乔-灌-草群落结构对PM_{2.5}的削减作用^[18-19]。此外,有研究表明,不同等级道路的绿化带群落结构削减效果存在差异,主干道分车绿带的最优配置结构是乔-灌型,次干道最优配置结构是乔-灌-草型,而支路差异不显著^[20];在垂直梯度和水平梯度上,草本型和灌木型结构、乔-草型和灌木型结构分别对大气颗粒物的削减作用更好^[21]。

本研究选择郑州市道路中4种典型的乔-灌型群落配置为研究对象,连续动态测定PM_{2.5}、PM₁₀浓度和气象因子,通过比较分析不同植物群落配置对颗粒物的削减规律,为更有效地发挥郑州市城市道路植物的滞尘作用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

郑州市位于东经112°42′~114°14′,北纬34°16′~34°58′范围,地处河南省中部偏北,年均风速2.8~3.2 m/s,年均温15.6℃,年均降雨量640 mm。

1.2 道路样地选择

以郑州市建设路段(大学路至华山路)为监测点,道路为东西走向,总长约4 km,周围属于商业居住区,无大型工厂或施工情况,可认为交通是该道路颗粒物的最主要来源。选取道路样地中位于侧分车绿带的植物群落共计4种,侧分车绿带宽度为3 m,植物种类丰富,长势良好。各群落分别设置3 m×5 m的样方进行垂直变化研究,另外选择样方1和样方4植物群落绿带进行水平变化研究。样方位置分布如图1所示,各样方植物配置如表1所示。

1.3 试验测定方法

1.3.1 测量仪器

赛纳威CW-HAT200S手持式粉尘仪(CHINA)、Kestrel 5000手持式气象记录仪(USA)、皮尺。

1.3.2 测量点选取

垂直测量对照组为各样方机动车道一侧边缘中点处,实验组为样方非机动车道一侧边缘中点处,各样方对照组和实验组均在距地面垂直高度0.5 m、1.5 m、2 m处分别设置3个测量点(图2)。每个采集点重复采集3次。

水平测量从路口绿化带起点处开始,沿绿化带延伸方向每隔10 m设置一个测量点,共计3个,均距地面高度1.5 m(基本与人的呼吸带高度相一致)(图3)。每个采集点重复采集3次。

1.3.3 测量时间及指标

选择2021年7月7日无风晴天进行监测,在车流量较高的7:00—19:00时间段,应用手持粉尘仪同时测定各样方测量点的PM_{2.5}和PM₁₀浓度。对

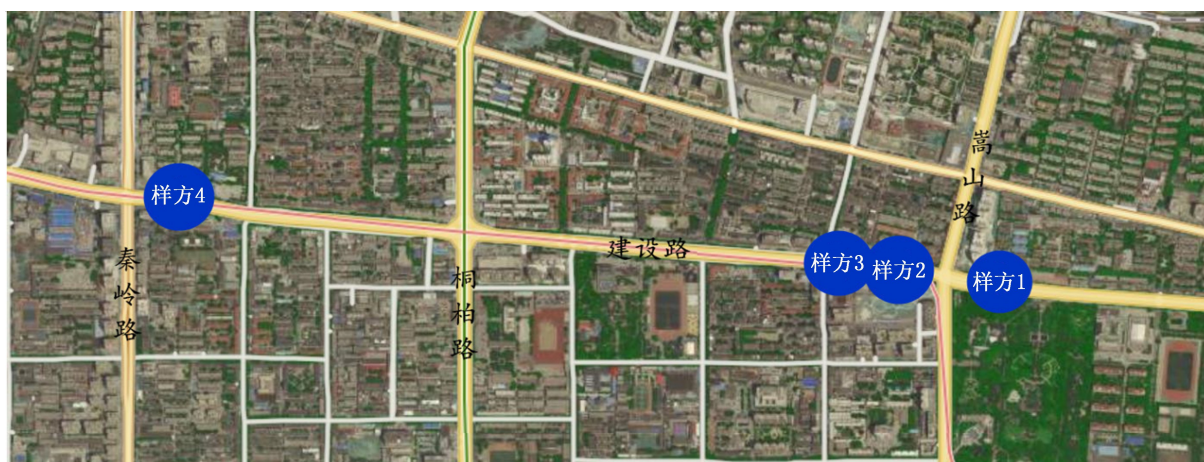


图 1 样方位置分布

Fig. 1 Location distribution of samples

表 1 样方植物配置

Tab. 1 Plant configuration of samples

样方 编号	植物 类型	种名	冠幅 /m	高度 /m	其他 特征
样方 1	乔木	悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	12.72	13.35	—
	灌木	海桐 <i>Pittosporum tobira</i>	0.20	0.56	—
		构骨 <i>Ilex cornuta</i>	1.00	0.94	球形
样方 2	乔木	雪松 <i>Cedrus deodara</i>	6.40	16.36	—
	灌木	红叶石楠 <i>Photinia serrulata</i>	0.25	0.55	—
		黄杨 <i>Buxus sinica</i>	0.20	0.40	—
样方 3	乔木	美人梅 <i>Prunus×blireana</i> 'Meiren'	2.50	5.40	—
	灌木	红叶石楠 <i>Photinia serrulata</i>	0.25	0.55	—
		黄杨 <i>Buxus sinica</i>	0.20	0.40	—
样方 4	乔木	女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	2.50	3.00	球形 造型树
	灌木	红叶石楠 <i>Photinia serrulata</i>	0.25	0.55	—
		黄杨 <i>Buxus sinica</i>	0.20	0.40	—

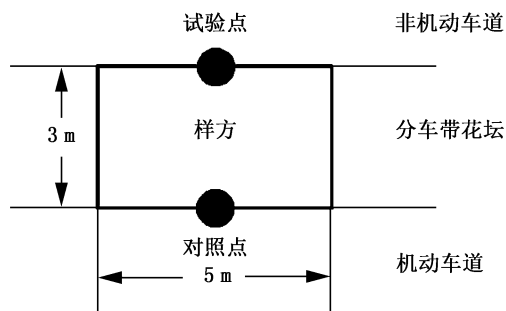


图 2 垂直测量点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vertical measurement points

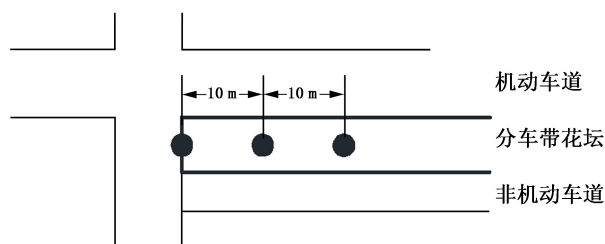


图 3 水平测量点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of horizontal measurement points

每个测量点连续测 3 次,每次测量的时间为 60 s,取 3 次测量数据的平均值为该测量点的颗粒物浓度值。每隔 2 h(即 7 时、9 时、11 时、13 时、15 时、17 时、19 时)再次测定全部样方测量点颗粒物浓度,共计 7 个时间点。对照组测量时粉尘仪检测口应朝向车行道,实验组测量时粉尘仪检测口应朝向侧分车绿带。手持气象记录仪在 7 个时间点同步测定各样方 1.5 m 高度处气象因子,包括风速、温度和湿度。在每 2 h 的测量时间段内,统计各样方路段 10 min 内车流量 3 次,取平均值为该时间段的车流量。

1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2019 软件对所测数据进行整理,应用 SPSS 23.0 软件进行相关性分析。通过削减率(P)来衡量不同植物组成的滞尘效果。

垂直方向削减率的计算公式^[22]为:

$$P_1 = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: P_1 为样方颗粒物削减率; C_1 为对照点大气颗粒物浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); C_2 为试验点大气颗粒物浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

水平方向削减率的计算公式^[24]为:

$$P_2 = \frac{C_3 - C_4}{C_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中: P_2 为颗粒物水平削减率; C_3 是10 m测点的大气颗粒物浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$); C_4 是20 m测点的大气颗粒物浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。

2 结果与分析

2.1 乔-灌型绿地对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 削减作用的垂直方向变化

2.1.1 日动态变化

以1.5 m高度为例,不同样方 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的日动态变化如图4所示。

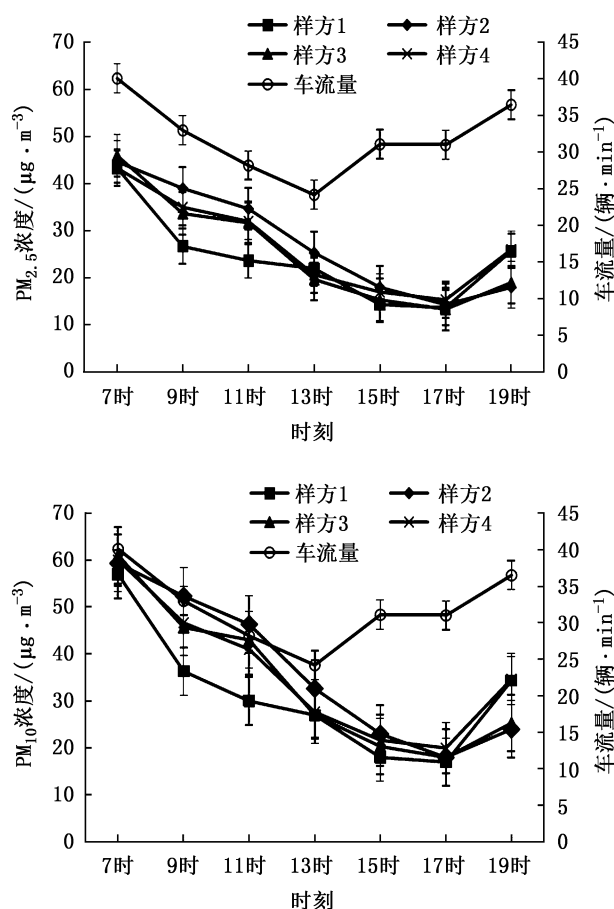


图4 不同样方 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度日动态变化(1.5 m 高度)

Fig. 4 Daily dynamic changes of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} concentration in each sample (1.5 m height)

PM_{10} 浓度的日变化幅度总体较 $\text{PM}_{2.5}$ 大,规律表现较为一致。各样方 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度均为早晨7时最高, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高为 $46 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 浓度

最高为 $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。随着时间推移,颗粒物浓度逐渐降低,至17时达到最低点 $13.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$,然后开始回升。郑州市上下班高峰集中在早晨和傍晚,特别是早上7时,车流量为全天最大,平均40辆/min,随着时间的推移,车流量逐渐降低,至13时达到最低点后开始回升。颗粒物浓度与车流量日变化曲线总体一致,均呈“U”型,但颗粒物浓度上升时间点晚于车流量上升时间。

不同样方 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 削减率的日均动态变化如图5所示。

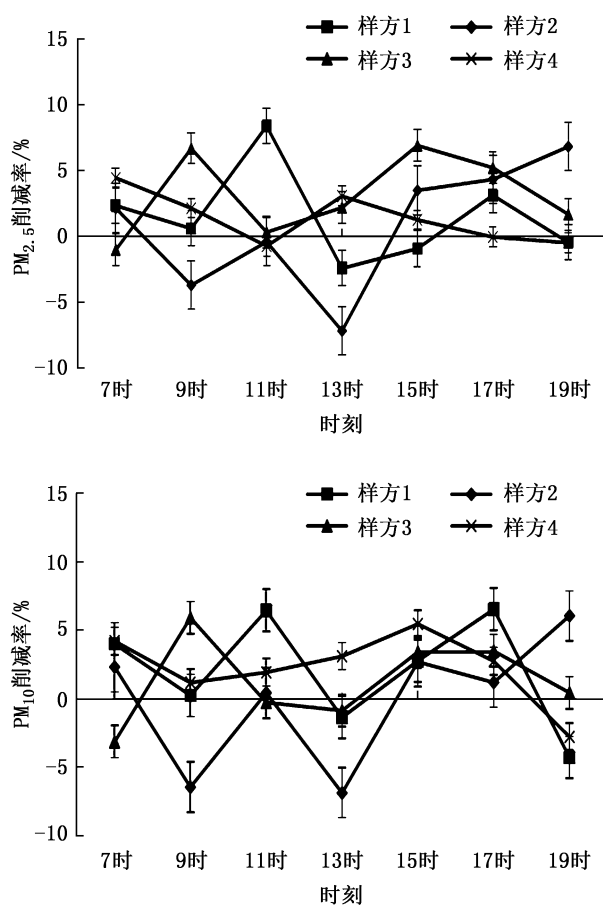


图5 不同样方对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 削减率日均动态变化

Fig. 5 Daily average dynamic change of the reduction rate of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in each sample

随着时间的变化,各样方削减率不断上下波动,幅度均在10%左右,较为稳定。但削减能力表现有所差别,其中样方3、4的削减率多为正值,而样方1、2的削减率在部分时间点为明显负值。各样方 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日均削减率大小依次为样方3 > 样方4 > 样方1 > 样方2。

2.1.2 空间变化

不同高度处各样方 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 削减率变化如图 6 所示。

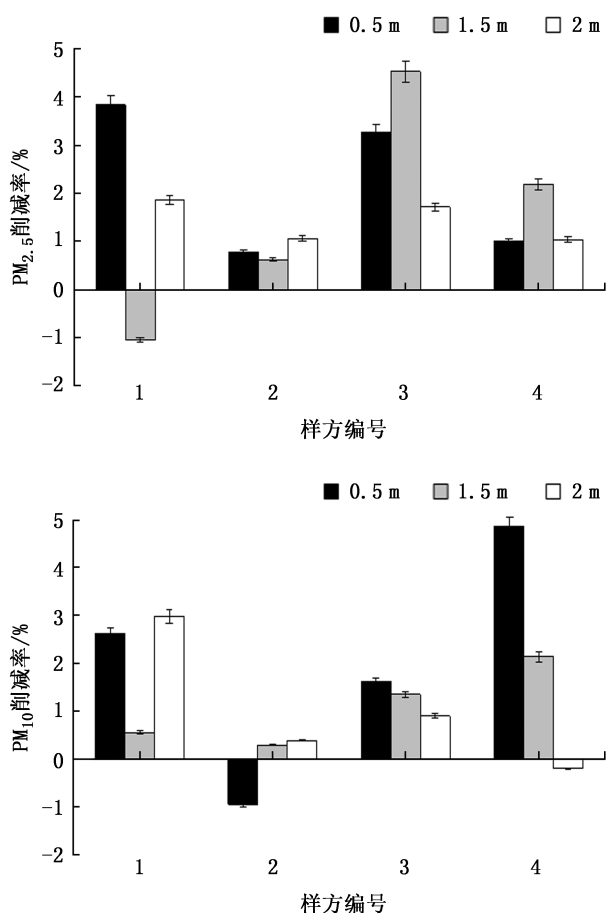


图 6 垂直方向各样方绿带对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的削减率变化

Fig. 6 Reduction rate of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in each sample in the vertical direction

0.5 m 高度处,样方 1 绿带对 $PM_{2.5}$ 的削减率最高,为 3.84%;样方 4 绿带对 PM_{10} 的削减率最高,为 4.87%。1.5 m 高度处,样方 3 绿带对 $PM_{2.5}$ 的削减率最高,为 4.53%;样方 4 绿带对 PM_{10} 的削减率最高,为 2.15%。2 m 高度处,样方 1 绿带对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的削减率均为最高,分别为 1.87%和 2.99%。

2.2 乔-灌型绿地对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 削减作用的水平方向变化

以 10 m 处为例,水平方向 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的日动态变化如图 7 所示。

与垂直方向浓度变化表现一致,总体 PM_{10} 浓度的日变化幅度较 $PM_{2.5}$ 更大,均大致呈“U”型。各样方 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度早晨 7 时最高, $PM_{2.5}$ 浓度最高为 $43.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{10} 浓度最高为 $58.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

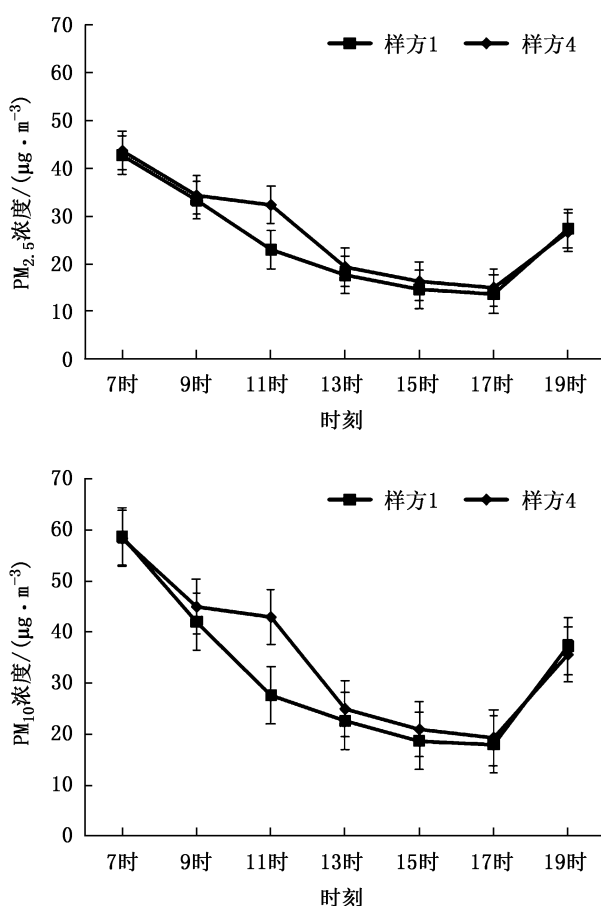


图 7 水平方向 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度日动态变化

Fig. 7 Daily dynamic changes of $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in the horizontal direction

随着时间的推移,颗粒物浓度逐渐降低,至 17 时达到最低点后开始回升。

水平方向 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的削减率日变化特征如图 8 所示。

削减率大多为正值,说明 20 m 以内的水平方向存在明显的削减作用。其中,样方 1 绿带对 $PM_{2.5}$ 削减率的日变化幅度较 PM_{10} 稍大,样方 4 绿带刚好相反,总体样方 1 绿带的削减率日变化较样方 2 波动更大。

2.3 乔-灌型绿地 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度及削减率与气象因子的关系

$PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度及削减率与温度、风速、相对湿度的相关性如表 2 所示。

从表 2 可以看出,气象因子对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的影响较为一致,均与温度、风速呈显著负相关,与相对湿度呈显著正相关。相关性强弱依次为相对湿度 > 温度 > 风速。同时,气象因子与乔-灌型群落 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 削减率的相关性并不明显。

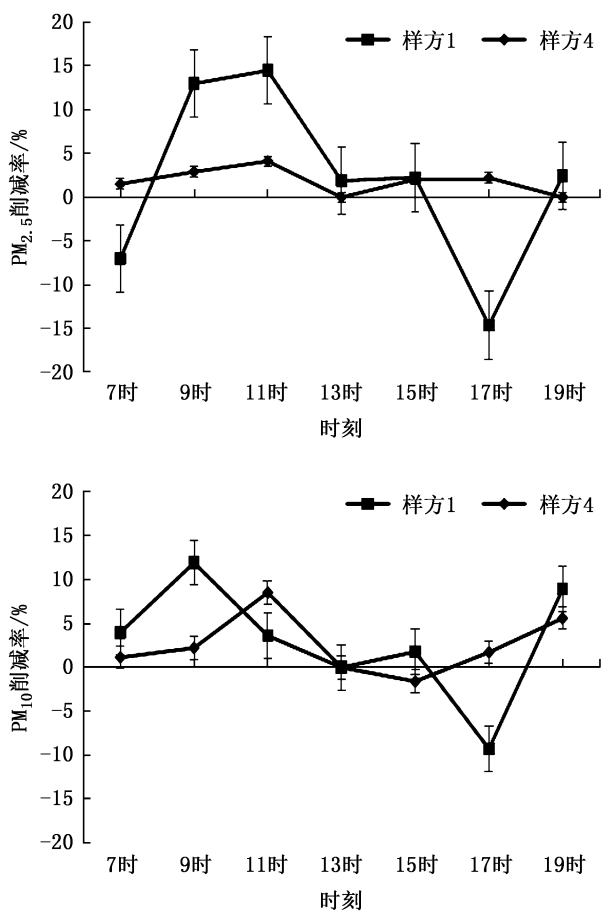


图 8 水平方向各样方绿带对 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的削减率日动态变化

Fig. 8 Daily dynamic changes in the reduction rate of PM_{2.5} and PM₁₀ in the horizontal direction

表 2 PM_{2.5}、PM₁₀ 浓度及削减率与气象因子的相关性分析
Tab. 2 Correlation between the concentration and reduction rate of PM_{2.5} and PM₁₀ and meteorological factors

项目	温度	风速	相对湿度
C_2 (PM _{2.5})	-0.450 **	-0.310 **	0.668 **
C_2 (PM ₁₀)	-0.453 **	-0.304 **	0.672 **
P_1 (PM _{2.5})	0.058	-0.058	-0.042
P_1 (PM ₁₀)	0.107	-0.187	-0.090
P_2 (PM _{2.5})	0.222	0.218	-0.262
P_2 (PM ₁₀)	-0.046	0.277	0.104

注: * 表示 0.05 水平(双侧)显著相关, ** 表示 0.01 水平(双侧)显著相关; C_2 为试验点大气颗粒物浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$), P_1 为样方颗粒物削减率, P_2 为颗粒物水平削减率。

3 讨论与结论

道路环境下, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的日动态变化曲线与车流量日变化基本一致, 说明道路中颗粒物

的来源主要是机动车尾气排放^[6]。但颗粒物浓度上升时间点晚于车流量上升, 原因可能是 13 时时温度较高、风速较大、湿度较低, 大气颗粒物的分子运动较快^[23]。经过稀释扩散与植物削减后, 大气中颗粒物浓度未能迅速上升。同时, 根据相关性分析, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度与温度、风速呈显著负相关, 与湿度呈显著正相关。而白天较晚上温度高、湿度低, 所以日浓度变化表现均呈“U”型, 早晚高, 中午低。这与以往研究结果一致, 但最低点的出现时间不同, 可能受气候条件、车流量等环境因素影响^[24-26]。

相关性分析表明样方颗粒物削减率与温度、风速和湿度的相关性并不显著。所以, 不同乔-灌型道路绿带对颗粒物的垂直削减能力表现有所差别, 其原因主要在于植物自身结构特征和配置组成不同^[9, 18-19]。在 0.5 m 高度, 削减率更高的样方 1 和 4 均有低高度球冠, 这与张灵芝等^[25]对重庆市道路绿地滞尘效应的研究结果一致, 表明以球形布局的植物群落对颗粒物的削减作用更强。在 1.5 m 高度, 削减率更高的样方 3 和 4 中植株枝下高较低、枝叶有多层高度、密集度适中^[15], 表明有多层高度的配置优于单层群落配置^[18]。在 2 m 高度, 悬铃木单叶面积和冠幅更大, 捕获空气中颗粒物的能力更强, 所以样方 1 对颗粒物的削减作用更为突出^[27]。本研究中, 总体垂直方向削减能力依次为样方 3 > 样方 4 > 样方 1 > 样方 2, 即群落配置“美人梅+红叶石楠+黄杨” > 群落配置“女贞+红叶石楠+黄杨” > 群落配置“悬铃木+海桐+构骨” > 群落配置“雪松+红叶石楠+黄杨”。

水平方向 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的削减率日变化大多为正值, 说明 20 m 以内的水平方向存在明显的削减作用。但也存在部分负值, 可能是由于二次扬尘影响或滞尘速度慢于颗粒物聚集的速度, 使道路绿地对颗粒物的削减出现逆向表现^[22]。本研究中, 总体样方 1 绿带的水平削减能力大于样方 4, 即群落配置“悬铃木+海桐+构骨” > 群落配置“女贞+红叶石楠+黄杨”。

综上所述, 道路颗粒物 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度同时受到气象因子与交通因子的影响, 基本呈现先降低后增高的“U”型曲线, 并与湿度、车流量呈正相关, 与温度、风速呈负相关。相同植物群落类型, 不同植物配置对大气颗粒物的削减效果也有所不同。因此选择优势物种和营造多层空间结构等措施可有效提高乔-灌型道路植物群落对大气颗粒物的削减能力。

参考文献:

- [1] 王翠连,张军,郑瑶,等. 郑州城区 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征及其对气象因子的响应[J]. 环境保护科学,2019,45(6):76-83.
- [2] 甄泉,方治国,王雅晴,等. 雾霾空气中细菌特征及对健康的潜在影响[J]. 生态学报,2019,39(6):2244-2254.
- [3] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale[J]. Nature, 2015(525):367-383.
- [4] TU Huizhao, LI Zhenfei, SUN Yifan, et al. Driving behavior in case of Haze: A high fidelity driving simulator study [C]//14th COTA International Conference of Transportation Professionals. Changsha, China: Curran Associates, Inc, 2014.
- [5] 韩力慧,张鹏,张海亮,等. 北京市大气细颗粒物污染与来源解析研究[J]. 中国环境科学,2016,36(11):3203-3210.
- [6] 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,2013,34(10):3741-3748.
- [7] NOWAK D J, HIRABAYASHI S, DOYLE M, et al. Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018(29):40-48.
- [8] 易心钰,彭映赫,廖菊阳,等. 森林植被与大气颗粒物的关系[J]. 植物科学学报,2017,35(5):790-796.
- [9] HE C, QIU K, POTT R. Reduction of urban traffic-related particulate matter—leaf trait matters[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(6):5825-5844.
- [10] 路艳,卞贵建,季洪亮. 道路绿化树种滞尘的季节效应与叶片特征关系[J]. 森林与环境学报,2020,40(3):269-275.
- [11] 王会霞,王彦辉,杨佳,等. 不同绿化树种滞留 $PM_{2.5}$ 等颗粒污染物能力的多尺度比较[J]. 林业科学,2015,51(7):12-23.
- [12] 江胜利,金荷仙,许小连. 杭州市常见道路绿化植物滞尘能力研究[J]. 浙江林业科技,2011,31(6):45-49.
- [13] 张家洋,周君丽,任敏,等. 20 种城市道路绿化树木的滞尘能力比较[J]. 西北师范大学学报(自然科学版),2013,49(5):113-120.
- [14] 刘颖,李朝炜,邢文岳,等. 城市交通道路绿化植物滞尘效应研究[J]. 北方园艺,2015(3):77-81.
- [15] 胡海滨,钱庆荣,陈庆华,等. 福州市主干道分车绿带对骑行通勤者暴露于细颗粒物的影响[J]. 西北林学院学报,2021,36(4):241-248.
- [16] 孙晓丹,李海梅,刘霞,等. 不同绿地结构消减大气颗粒物的能力[J]. 环境化学,2017,36(2):289-295.
- [17] ABHIJITH KV, KUMAR P. Field investigations for evaluating green infrastructure effects on air quality in open-road conditions [J]. Atmospheric Environment, 2019(201):132-147.
- [18] 徐欢,赵晶晶,李红. 道路绿地植物配置对 $PM_{2.5}$ 浓度分布与消减作用的影响[J]. 北方园艺,2016(24):65-69.
- [19] 王国玉,白伟岚,李新宇,等. 北京地区消减 $PM_{2.5}$ 等颗粒物污染的绿地设计技术探析[J]. 园林生态,2014,30(7):70-76.
- [20] 陈小平,肖慧玲,周志翔,等. 城市道路典型绿带结构对总悬浮颗粒物的净化效应[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(11):1620-1626.
- [21] 杨貌,张志强,陈立欣,等. 春季城区道路不同绿地配置模式对大气颗粒物的削减作用[J]. 生态学报,2016,36(7):2076-2083.
- [22] 张灵芝,秦华. 城市道路行道树绿带对 $PM_{2.5}$ 的滞尘效应及其变化分析[J]. 中国园林,2015,31(5):106-110.
- [23] 马克明,殷哲,张育新. 绿地滞尘效应和机理评估进展[J]. 生态学报,2018,38(12):4482-4491.
- [24] 邵锋. 园林树木对 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物浓度和成分的影响及滞尘效应研究——以浙江农林大学为例[D]. 北京:北京林业大学,2020.
- [25] 张建设,冯万富,史晓海,等. 不同绿地结构对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的消减作用[J]. 江苏农业科学,2019,47(21):302-304.
- [26] FLICSTEIN B, BRODAY D M. The impact of a forced reduction in traffic volumes on urban air pollution[J]. Atmospheric Environment, 2008,42(3):428-440.
- [27] 赵晨曦,王玉杰,王云琦,等. 细颗粒物($PM_{2.5}$)与植被关系的研究综述[J]. 生态学杂志,2013,32(8):8.

责任编辑: 陈旭