

太原市森林公园林带对空气 PM_{2.5} 的净化效率

武晓红¹, 张先平^{1,2*}, 李晓迪¹, 闫彩云¹, 宋丽红³, 耿 红⁴

(1. 山西林业职业技术学院 林学系, 山西 太原 030009; 2. 太原学院 园艺系, 山西 太原 030012;
3. 太原市环境监测中心站, 山西 太原 030002; 4. 山西大学 环境科学研究所, 山西 太原 030006)

摘 要:开展城市绿地滞尘效应研究对指导城市绿地建设具有重要科学意义。为了研究城市交通主干道周边绿地的滞尘效应,以太原市森林公园西侧紧邻滨河东路南北长 600 m,东西宽 100 m 的针叶混交林带为研究对象,在林带最西侧与道路交界处设对照点(0 m),由西向东垂直于路面在林带内分别设置 20、40、60、80 m 4 个监测点,用中流量大气 PM_{2.5} 采样器(100 L/min)在各点对 PM_{2.5} 进行日间采样,分析林带内 PM_{2.5} 浓度的变化特征并计算林带对 PM_{2.5} 的净化效率。结果表明:1)林带宽度影响其对大气 PM_{2.5} 的净化效率,从 20~60 m 的净化效率逐渐提高,80 m 处略低于 60 m;2)林带对局部空气 PM_{2.5} 净化效率与区域空气质量呈负相关,当空气质量为优良时,林带可以有效地降低局部 PM_{2.5},当空气质量为中重度污染时,林带 20~40 m 宽处会聚集较高浓度的 PM_{2.5};3)林带内分时段净化效率显示,9:30—11:00 的净化效率最低,12:30—17:00 净化效率较高,且 15:30—17:00 林内 PM_{2.5} 质量浓度最低,提示该时段适宜市民在公园内活动。

关键词:林带;PM_{2.5};净化效率;空气质量;太原市

中图分类号:S731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2020)02-0260-06

Characteristics of the Variation of PM_{2.5} Concentration in Forest Belt of Taiyuan Forest Park

WU Xiao-hong¹, ZHANG Xian-ping^{1,2*}, LI Xiao-di¹, YAN Cai-yun¹, SONG Li-hong³, GENG Hong⁴

(1. Department of Forestry, Shanxi Forestry Vocational and Technical College, Taiyuan 030009, Shanxi, China;
2. Department of Horticulture, Taiyuan University, Taiyuan 030012, Shanxi, China; 3. Taiyuan Environmental Monitoring Station, Taiyuan 030002, Shanxi, China; 4. Institute of Environmental Science, Shanxi University, Taiyuan 030006, Shanxi, China)

Abstract: The study of dust retention effect is of great significance to guide the construction of urban green space scientifically and rationally. In order to study the dust detention effect of urban green space on main traffic roads, the typical coniferous mixed forest belt (600 m south-north×150 m east-west) adjacent to east Binhe road on the west side of Taiyuan Forest Park was taken as the research object, and five monitoring points, 0 (control point, and this point located at the edge between forest belt and Binhe road), 20, 40, 60, 80 m, were set up. Then PM_{2.5} of each point was monitored by mid-flow sampler during the day, and characteristics of the variation of PM_{2.5} concentration in the forest belt were analyzed. The results showed that: 1) the width of the forest belt affected the purification efficiency of PM_{2.5}, and the purification efficiency increased from 20 m to 60 m while slightly lower than 60 m at 80 m, indicating that the 60m width of forest belt on the main traffic road can effectively purify air particular. 2) The purification efficiency of PM_{2.5} for local air was negatively correlated with regional air quality. When air quality was good, the forest belt could effectively reduce the local PM_{2.5} concentration. When air quality was moderately or severely pol-

收稿日期:2019-05-07 修回日期:2019-10-28

基金项目:生态环保部大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0208);山西省重点研发计划项目(社发)(201803D31025);山西省林业科技创新项目(2016050)。

作者简介:武晓红,女,讲师,在读硕士,研究方向:生态环境学。E-mail:975065476@qq.com

*通信作者:张先平,女,教授,博士,研究方向:植被生态学。E-mail:492889505@qq.com

luted,the forest belt would focus on the higher concentration of PM_{2.5} at 20—40 m width,indicating that the forest belt ecosystem has a threshold value for dust detention. 3) The purification efficiency of different time periods in the forest belt showed that the purification efficiency was the lowest at 9:30—11:00,higher at 12:30—17:00,and the PM_{2.5} concentration in the forest was the lowest at 15:30—17:00,which is suitable for public activities in the park.

Key words:forest belt; PM_{2.5}; purification efficiency; regional air quality; Taiyuan

据统计 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 是我国大多城市的首要空气污染物^[1],这些大气颗粒物进入人体后对心肺功能、心血管等有严重的危害^[2-3]。全世界每年有 330 万人由于与 PM_{2.5} 相关的大气污染而过早死亡,且主要集中在亚洲^[4]。城市绿地内通常有乔、灌、草组成的人工植被,具有生态调节和社会服务等功能的森林生态系统^[5],在维护城市生态系统、提供市民休闲活动空间、改善空气质量等方面有着重要的作用,因此开展城市绿地滞尘效应研究对指导城市绿地建设具有重要科学意义。

城市绿地对颗粒物的影响主要体现在:地表覆盖能够减少颗粒物的来源,从而达到减尘功效^[6];改变风向减少颗粒物进入区域的阻尘作用^[7];植被的叶片表面、枝条、皮孔等可以吸附和捕获大气颗粒物的滞尘作用^[8];改变风速促进颗粒物沉降的降尘作用^[9];不同植物对颗粒物的滞留能力^[10],绿地配置变化对大气颗粒物消减的差异^[11-12]。在中大尺度上,一方面直接对绿地滞尘量进行估算,应用比较成熟的是由美国农业部东北森林研究中心开发的 UFORRE 及 i-Tree 模型,很多学者应用该模型对绿地滞尘总量^[13-14]及影响绿地滞尘因素^[15]进行了研究,取得了较好效果;另一方面采用遥感影像间接获取大气质量信息及时空变化,从而有效地评估绿地对大气质量的改善作用^[16-18]。小尺度的研究大多集中在物种水平上,应用洗脱法或扫描电镜法对单位叶面积滞尘量进行测定,进一步估算绿地滞尘^[19-21]。根据研究目的,对绿地内大气质量实地监测,分析绿地对空气质量的改善作用^[22]。未来需加强中小尺度的绿地滞尘效应研究^[23],此类研究便于深入探究绿地滞尘机理,更好地为改善城市大气质量服务。以山西省太原市森林公园内紧邻滨河东路的林带为研究对象,于 2017 年 9 月到 11 月对公园林带内 PM_{2.5} 质量浓度进行实地监测,分析林带对空气质量的影响,以期城市绿地建设提供科学依据。

1 试验地概况

太原市森林公园位于太原市尖草坪区,创建于 1991 年,2004 年 9 月正式开放,以针阔乔木林为主要植被类型,具有生态、休闲、旅游和科普功能的大型城

市生态公园。公园总面积为 176.7 hm²,园内划分为树木园、森林景观区、人工湖水景区、百鸟园等。

2 研究方法

2.1 采样方法

样地设在森林公园景观区中部,林带南北向长约 600 m,东西向宽约 100 m,林带地面与滨河东路路面齐平,群落类型为油松(*Pinus tabulaeformis*) + 白皮松(*Pinus bungeana*)—早熟禾(*Poa pratensis*),乔木平均胸径为 10 cm,平均树高为 7.4 m,乔木株行距为 2 m×1.5 m;乔木层盖度为 60%,草本层盖度 80%。在滨河东路和林带最西侧的交界处,记为 0 m 点,从该点垂直于滨河东路的林带内依次向东设 20、40、60 m 和 80 m 处 4 个采样点,采样高度为 1.5 m。

选择微风无降水天气条件进行采样,具体时间为 2017 年 9 月 19 日、10 月 5 日、10 月 6 日、11 月 1 日、11 月 5 日、11 月 8 日共 6 d。使用智能中流量采样器采集 PM_{2.5},采样高度为距地面 1.5 m,流速为 (100 L/min),每次采样时间为 9:30—17:00,每隔 90 min 更换 1 次玻璃纤维滤膜。具体测定方法依照《环境空气 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的测定 重量法》(HJ 618-2011)。

各林带宽度的净化效率计算公式为:

$$\eta_i = (\rho_0 - \rho_i) / \rho_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中, ρ_0 为 0 m 处 PM_{2.5} 的质量浓度, ρ_i 分别为林带宽 20、40、60、80 m 处 PM_{2.5} 的质量浓度。当 $\rho_0 > \rho_i$ 时,效率为正效率,反之为负效率。

2.2 数据分析

研究数据用 Microsoft Excel 2016 计算,结合 SPSS22.0 进行统计分析。运用 ArcGIS 10.2 和 Oringin 8.1 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 林带内 PM_{2.5} 质量浓度日变化

由林带内不同宽度处日平均 PM_{2.5} 质量浓度统计分析(表 1)可以看出,9 月 19 日、10 月 5 日和 11 月 8 日各采样点 PM_{2.5} 质量浓度日变化规律相似,即 0 m 处 PM_{2.5} 质量浓度最高,随着林带加宽 PM_{2.5}

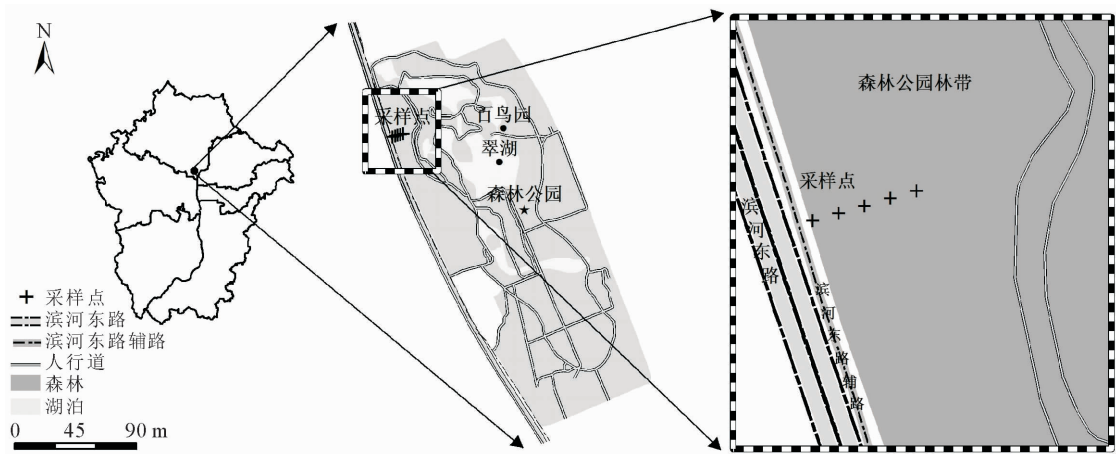


图 1 太原森林公园采样点位置

Fig. 1 Monitoring points in Taiyuan Forest Park

表 1 太原市森林公园林带内各监测点 PM_{2.5} 质量浓度日变化

Table 1 The diurnal variation of PM_{2.5} concentration at different forest belt monitoring points in Taiyuan Forest Park

距离/m	9 月 19 日	10 月 5 日	10 月 6 日	11 月 1 日	11 月 6 日	11 月 8 日
0	78.64±10.29A	92.69±13.57A	159.95±12.06A	177.12±5.35A	213.88±29.78A	94.97±12.15A
20	70.94±10.34A	85.61±18.30A	162.22±9.25A	175.74±5.63A	215.65±19.76A	80.37±13.11A
40	64.98±12.52A	80.19±16.81A	153.58±13.80A	182.58±12.17A	203.27±22.77A	80.45±8.86A
60	72.43±10.46A	70.43±16.00A	149.95±15.52A	176.56±6.40A	207.35±20.52A	78.12±9.08A
80	65.07±11.16A	82.82±22.68A	151.40±10.73A	174.08±10.27A	206.16±18.90A	78.10±15.76A

注:表中数据为平均值±标准误差,同一行大写字母表示林带不同宽度 PM_{2.5} 差异显著性,显著水平 $P=0.05$ 。

质量浓度呈下降趋势,到 80 m 宽林带处,PM_{2.5} 质量浓度略有回升。

从 10 月 6 日、11 月 1 日和 11 月 6 日的结果可以看出,PM_{2.5} 质量浓度的峰值出现在林带 20 m 处或 40 m 处。

2.2 分时段林带内 PM_{2.5} 质量浓度的变化

从采样点不同时段林带内 PM_{2.5} 质量浓度变化规律(图 2)看,总体上 PM_{2.5} 质量浓度从 9:30—11:00 到 15:30—17:00 呈先升高后降低的趋势,PM_{2.5} 质量浓度最大值通常会出现在 11:00—12:30、12:30—14:00、14:00—15:30 时间段,9:30—11:00 和 15:30—17:00 时间段质量浓度相对较低。

9 月 19 日、10 月 5 日和 11 月 8 日林内 ρ (PM_{2.5}) $\leq 115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (空气质量三级),这 3 d 在 14:00 以后 PM_{2.5} 质量浓度明显降低。

2.3 PM_{2.5} 质量浓度净化效率分析

2.3.1 林带内 PM_{2.5} 净化效率日间变化 观测时间内,森林公园林带不同宽度 PM_{2.5} 净化效率(表 2)表现为,每日的 9:30—11:00 的净化效率最低,出现负效率的比例为 65%,最低效率为 -13.36%。12:30—14:00、14:00—15:30 和 15:30—17:00 时段的净化效果比较明显,正效率比例都在 90% 以上,最高净化效率为 35.85%。

2.3.2 大气 PM_{2.5} 质量浓度与林带对 PM_{2.5} 净化效率的关系 通过 1 d 内林带相同宽度不同时间段的净化效率可以计算出各林带宽度日平均净化效率(表 3)。6 d 的监测试验中,20 m 处,负效率出现在 10 月 6 日和 11 月 6 日;40 m 处,负效率出现在 11 月 1 日;其他时间段内,均为正效率。从各宽度 6 d 的平均值来看,净化效率随着宽度的增加而提高,在 60 m 的范围内净化效率达到顶点,然后在 60~80 m 的范围内,净化效率又开始回落,但始终维持着一个正净化效率。

表 3 显示,9 月 19 日、10 月 5 日和 11 月 8 日的平均净化效率均为正,且都维持一个较高水平,日平均效率分别为 13.10%、14.58% 和 15.48%。而 10 月 6 日,11 月 1 日和 11 月 6 日的平均效率皆有负值出现,且总体效率较低,日平均效率分别为 3.49%、-0.10%、1.88%。用太原市尖草坪区的环境空气监测国控点 PM_{2.5} 质量浓度与不同点位净化效率进行单因素方差分析,发现国控点 $\rho(\text{PM}_{2.5}) \leq 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,PM_{2.5} 质量状况属于优良的日期之间 9 月 19 日、10 月 5 日和 11 月 8 日无显著差异;国控点 $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,PM_{2.5} 质量状况属于中重度污染,10 月 6 日(略低于 $115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、11 月 1 日和 11 月 6 日无显著差异,但优良天气与中重度污染天气之间有显著差异。

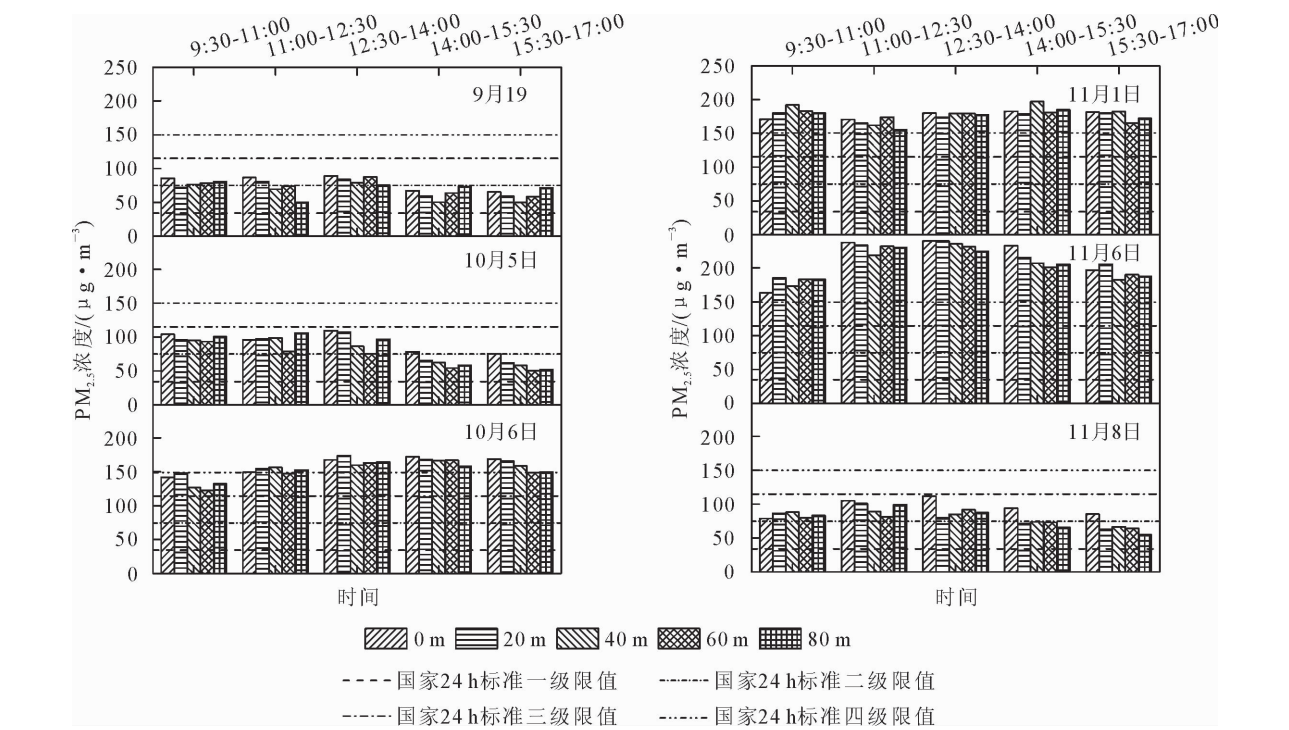


图 2 太原森林公园林带各监测点 PM_{2.5} 质量浓度分时段变化特征

Fig. 2 The time interval variation characteristics of PM_{2.5} concentration at different forest belt monitoring points in Taiyuan Forest Park

表 2 太原森林公园林带各监测点 PM_{2.5} 质量浓度净化效率日间变化规律

Table 2 Diurnal variation of purification efficiency characteristics of PM_{2.5} concentration at different forest belt monitoring points in Taiyuan Forest Park

日期	距离/m	9:30—11:00	11:00—12:30	12:30—14:00	14:00—15:30	15:30—17:00
9 月 19 日	20	15.70A(a)	7.11A(b)	5.68A(bc)	11.68A(bc)	9.33A(c)
	40	10.43A(a)	20.02A(b)	11.32A(bc)	25.02A(bc)	23.31A(c)
	60	8.50A(a)	14.23A(b)	1.29A(bc)	5.04A(bc)	10.63A(c)
	80	5.90A(a)	41.88A(b)	15.09A(bc)	9.76A(bc)	10.08A(c)
10 月 5 日	20	7.53A(a)	—1.12A(b)	2.08A(bc)	16.44A(bc)	17.88A(c)
	40	8.62A(a)	—2.88A(b)	20.96A(bc)	20.03A(bc)	23.37A(c)
	60	10.23A(a)	18.05A(b)	31.14A(bc)	30.54A(bc)	33.48A(c)
	80	3.26A(a)	—10.42A(b)	11.78A(bc)	25.04A(bc)	31.05A(c)
10 月 6 日	20	4.60A(a)	—3.75A(b)	—3.69A(bc)	2.29A(bc)	1.78A(c)
	40	10.64 A(a)	—4.87A(b)	4.65A(bc)	3.28A(bc)	6.25A(c)
	60	13.40A(a)	1.12A(b)	2.66A(bc)	2.94A(bc)	11.73A(c)
	80	6.74A(a)	—2.24A(b)	2.03A(bc)	8.14A(bc)	11.32A(c)
11 月 1 日	20	—5.18A(a)	2.95A(b)	3.13A(bc)	2.17A(bc)	0.63A(c)
	40	—12.41A(a)	4.90A(b)	0.33A(bc)	—7.91A(bc)	—0.31A(c)
	60	—7.17A(a)	—2.00A(b)	0.32A(bc)	0.95A(bc)	8.91A(c)
	80	—5.53A(a)	8.83A(b)	1.26A(bc)	—1.18A(bc)	5.25A(c)
11 月 6 日	20	—13.36A(a)	1.63A(b)	0.03A(bc)	7.47A(bc)	—4.23A(c)
	40	—6.17A(a)	7.97A(b)	1.86A(bc)	11.06A(bc)	7.12A(c)
	60	—12.31A(a)	2.35A(b)	3.53A(bc)	13.74A(bc)	3.45A(c)
	80	—12.33A(a)	3.04A(b)	6.29A(bc)	11.80A(bc)	4.59A(c)
11 月 8 日	20	—9.89A(a)	3.74A(b)	28.52A(bc)	23.80A(bc)	26.55A(c)
	40	—12.01A(a)	15.44A(b)	24.02A(bc)	21.41A(bc)	22.17A(c)
	60	—1.39A(a)	22.35A(b)	18.02A(bc)	22.02A(bc)	24.68A(c)
	80	—5.65A(a)	5.91A(b)	21.53A(bc)	29.77A(bc)	35.85A(c)

注:同一列大写字母表示不同宽度林带 PM_{2.5} 净化效率差异显著性,同一行小写字母(括号内)表示不同时间段 PM_{2.5} 净化效率差异显著性,显著水平 $P=0.05$ 。

图 3 为对林带内不同宽度处 PM_{2.5} 的去除效率和当日尖草坪国控点 PM_{2.5} 质量浓度进行拟合,发现二者之间呈较好的负相关性,即随着当日 PM_{2.5} 质量浓度的升高,林带的净化效率不断下降。

表 3 太原森林公园林带各监测点平均净化效率与
当日 PM_{2.5} 质量浓度的方差分析

Table 3 Variance analysis between daily PM_{2.5} concentration and
average purification efficiency in different forest belt in
Taiyuan Forest Park

日期	尖草坪点 PM _{2.5} 浓度 /(μg·m ⁻³)	不同宽度处平均净化效率/%			
		20 m	40 m	60 m	80 m
9 月 19 日	36	9.90A	18.02A	7.94A	16.54A
10 月 5 日	54	8.56A	14.02A	24.69A	12.14A
10 月 6 日	106	-1.59B	3.99B	6.37B	5.20B
11 月 1 日	202	0.74B	-3.08B	0.20B	1.72B
11 月 6 日	182	-1.69B	4.37B	2.15B	2.68B
11 月 8 日	54	14.55A	14.21A	17.14A	17.48A
平均净化效率/%		5.08	8.59	9.75	9.29

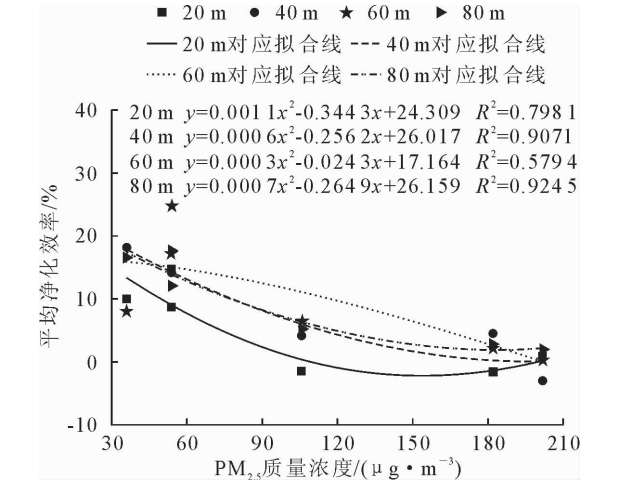


图 3 太原市森林公园林带各监测点平均净化效率与
区域 PM_{2.5} 质量浓度相关性

Fig. 3 Correlations between average purifying effects at different
forest belt monitoring points in Taiyuan Forest Park and daily
PM_{2.5} concentration in this region

3 讨论

3.1 不同宽度林带内 PM_{2.5} 质量浓度变化

当区域日平均 PM_{2.5} 质量浓度在良($\rho(\text{PM}_{2.5}) \leq 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)以下时,林带内 PM_{2.5} 质量浓度明显降低(9 月 19 日、10 月 5 日和 11 月 8 日);当区域日平均质量浓度为中重度污染($\rho(\text{PM}_{2.5}) > 115 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)以上时,林带 20 m 和 40 m 宽度处 PM_{2.5} 质量浓度高于对照点(10 月 6 日、11 月 1 日和 11 月 6 日),即林带会聚集 PM_{2.5}。总体来看,不论区域空气 PM_{2.5} 质量浓度如何变化,林带都能不同程度降低局部 PM_{2.5} 质量浓度,且在林带宽 40~80 m 范围内出现 PM_{2.5} 质量浓度最低值。这也表明:滨河东路这样的城市交通主干道的绿化带宽度保持 60 m,才可有效降低道路两边空气的 PM_{2.5} 质量浓度。

进一步分析空气重度污染时林带聚焦 PM_{2.5} 现象,也容易理解,林带这一生态系统对其环境空气的

净化能力有一定的阈值,即在阈值内植被可以快速滞纳空气中的颗粒物,当超过阈值时,植被净化速度小于污染物排放速度,再加上林带内空气流动速度相对较慢,就造成 20~40 m 林带内 PM_{2.5} 质量浓度积聚升高的现象。

3.2 林带内 PM_{2.5} 质量浓度分时段变化特征

从林带分时段 PM_{2.5} 质量浓度变化看,其日间变化大致呈先增高后降低的单峰模式,且以 15:30—17:00 PM_{2.5} 质量浓度最低,这一结果可以指导市民选择合理时间到公园活动。国内学者对于林带内 PM_{2.5} 变化规律有不同观点,有研究发现林带内 PM_{2.5} 质量浓度日变化呈“L”形^[24];道路绿地 PM_{2.5} 质量浓度变化曲线呈“双峰单谷”型^[25];而研究表明游憩林 PM_{2.5} 质量浓度呈“双峰双谷”型^[24]。造成林带 PM_{2.5} 质量浓度分时段差异的原因:一方面与植物的生理活动相关,不同时段植物的活性不一样,净化效率也有高低^[27];另一方面也可能与太阳辐射相关,经过中午较强的太阳辐射,大气的垂直对流作用加强,有利于 PM_{2.5} 的扩散、迁移。

3.3 林带对 PM_{2.5} 质量浓度净化效率

从林带不同监测点位 PM_{2.5} 质量浓度净化效率来看,20、40、60 m 和 80 m 处的平均净化效率分别为 5.08%、8.59%、9.75 和 9.29%,即 60 m 处的净化效率最高,但不同宽度水平差异并不显著。

从分时段的净化效率来看,9:30—11:00 的净化效率最低,负效率的比例为 65%,而 12:30—14:00、14:00—15:30 和 15:30—17:00 时段正效率比例都在 90%以上。方差分析显示,净化效率与时段有显著差异。这可能与植物生理活动规律、太阳辐射和气温等有关。

区域空气日平均 PM_{2.5} 质量浓度与林带净化效率的相关性分析进一步验证,空气日平均 PM_{2.5} 质量浓度和日平均净化效益呈负相关,即林带能够在一定范围内有效地净化局部空气 PM_{2.5},当超出其净化阈值后,道路林带会聚焦空气中的 PM_{2.5}。

4 结论

当空气质量为优良时,林带可以有效地降低局部 PM_{2.5},当空气质量为中重度污染时,林带 20~40 m 宽处会聚焦较高浓度的 PM_{2.5}。林带净化效率与空气质量呈负相关。

林带宽度影响其净化效率,从 20~60 m 净化效率逐渐提高,表明 60 m 宽的林带可以较好地降低道路空气中 PM_{2.5} 质量浓度。

林带内分时段净化效率显示,9:30—11:00 的净化效率最低,12:30—17:00 净化效率较高,且

15:30—17:00 林内 PM_{2.5} 质量浓度最低,适于市民在公园活动。

因本次实测是在同一绿地类型的秋季 6 d 内进行,时间较短,今后可以在不同绿地类型的多个季节进行长期监测,以期系统深入地开展绿地滞尘效应研究。

参考文献:

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报[R]. 北京,2018.

[2] PETROVIC S, URCH B, BROOK J. Cardiorespiratory effects of concentrated ambient PM_{2.5}: a pilot study using controlled human exposures[J]. *Inhalation Toxicology*, 2000, 12 (supp. 1): 173-188.

[3] HUANG Z J, ZHOU Y Q, YUAN H. GW25-e5114 PM_{2.5} components in association with emergency department visits for hypertension-related cardiovascular disease[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2014, 64(16): C93-C93.

[4] LELIEVELD J, EVANS J S, FNAIS M. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on global scale[J]. *Nature*, 2015, 525 (7569): 367-371.

[5] 刘世荣,代力民,温远光,等. 面向生态系统服务的森林生态系统经营:现状、挑战与展望[J]. *生态学报*, 2015, 35(1): 1-9.

[6] 刘常富,李海梅,何兴元,等. 城市森林概念探析[J]. *生态杂志*, 2003, 22(5): 146-149.

[7] 杨阿强,孙国清,卢立新,等. 基于 MODIS 资料的中国东部时间序列空气动力学粗糙度和零平面位移高度估算[J]. *气象科学*, 2011, 31(4): 516-524.

[8] 李新宇,赵松婷,郭佳,等. 基于扫描电镜定量评价植物滞留大气颗粒物能力[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(1): 286-291.

LI X Y, ZHAO S T, GUO J L, *et al.* Evaluation of the retention capability of air particulates by common trees based on SEM[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(1): 286-291. (in Chinese)

[9] BECKETT KP, FREER-SMITH PH, TAYLOR G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and wind-speed[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6: 995-1003.

[10] 赵松婷,李新宇,李延明. 北京市 29 种园林植物滞留大气细颗粒物能力研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(6): 1004-1012.

[11] 刘宇,黄旭,偶春,韩浩章. 夏季不同结构绿地空气 PM_{2.5} 浓度与气候因子关系[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(5): 241-245.

[12] 屈海燕,陆秀君. 沈阳市 3 条街道绿带 PM₁₀、PM_{2.5} 浓度特征及影响因素分析[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(4): 57-62.

QU H Y, LU X J. Characteristics of the levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in the green belts of three roads in Shenyang and their correlations with meteorological factors [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 2017, 32(4): 57-62. (in Chinese)

[13] BALDOCCHI D A, HICKS B B, CAMARA P. A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surface[J]. *Atmospheric Environment*, 1987, 21(2): 91-101.

[14] BRUSE M, FLEER H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a tree dimensional numerical model[J]. *Environmental Model & Software*, 1998, 13

(3/4): 373-384.

[15] HIRABAYASHI S, KROLL C N, NAWAK D J. Component-based development and sensitivity analyses of an air pollutant dry deposition model[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(6): 804-816.

[16] ZHANG X D, DU J, HUANG T, ZHANG L M, *et al.* Atmospheric removal of PM_{2.5} by man-made Three Northern Regions Shelter Forest in Northern China estimated using satellite retrieved PM_{2.5} concentration[J]. *Sciences of the Total Environment*, 2017, 593-594: 713-721.

[17] 邱媛,管东生,宋巍巍,等. 惠州城市植被的滞尘效应[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2455-2462.

[18] 周志翔,邵天一,王鹏程,等. 武钢厂区绿地景观类型空间结构及滞尘效应[J]. *生态学报*, 2002, 22(12): 2036-2040.

[19] 石婕,刘庆倩,安海龙,等. 不同污染程度下毛白杨叶表面 PM_{2.5} 颗粒的数量及性质和叶片气孔形态的比较研究[J]. *生态学报*, 2015, 35(22): 7522-7530.

SHI J, LIU Q Q, AN H L, *et al.* A comparative study of the stomata and PM_{2.5} particles on the leaf surface of Chinese white poplar (*Populus tomentosa* Carr.) in different polluted places [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7522-7530. (in Chinese)

[20] 王会霞,石辉,李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3077-3082.

WANG H X, SHI H, LI Y Y. Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(12): 3077-3082. (in Chinese)

[21] 段嵩岚,闫淑君,田高飞,等. 福州市 19 种灌木滞留颗粒物效应与叶片性状研究[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(4): 230-238.

DUAN S L, YAN S J, TIAN G F, *et al.* Effects of the particles retained by 19 widely used shrubs on road sides and their relationships with leaf trait in Fuzhou[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(4): 230-238. (in Chinese)

[22] 王磊,黄利斌,万欣,等. 城市森林对大气颗粒物(尤其 PM_{2.5}) 调控作用研究进展[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2016, 40(5): 148-154.

WANG L, HUANG L B, WAN X, *et al.* Progress on the regulating effects of urban forest vegetation on atmospheric particulate matter (especially PM_{2.5}) [J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2016, 40(5): 148-154. (in Chinese)

[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.

MA K M, YIN Z, ZHANG Y X. Advancement in the method and mechanism of the green space dust retention effect [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12): 4482-4491. (in Chinese)

[24] 陈上杰,牛健植,韩旖旎,等. 道路绿化带内大气 PM_{2.5} 质量浓度变化特征[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 100-105.

[25] 王月容,李延明,李新宇,等. 北京市道路绿地对 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.

[26] 郭二果,王成,鄯光发,等. 北京西山典型游憩林空气颗粒物不同季节的日变化[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3253-3263.

[27] 包红光,王成,鄯光发,等. 夏季海淀公园内 PM_{2.5} 浓度水平梯度分布规律[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(6): 3678-3684.