

园林植物对大气细颗粒物浓度的正负作用评价

李新宇,赵松婷,许蕊,李延明

(北京市园林科学研究院/园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室,北京 100102)

摘要:针对于园林绿地对城市大气环境中发挥的双重作用,本研究综合评价不同植物种类对消减 $PM_{2.5}$ 污染的能力差异,以期为城市绿地功能优化与提升提供科学依据。以北京市常用园林绿化植物为试验材料,在目前构建的植物叶片滞留细颗粒物质量的计算模型的基础上,考虑植物释放VOCs对大气颗粒物浓度的贡献量作为一个影响因子参与计算,对植物个体消减细颗粒物的净化效益进行研究。结果表明:(1)植物个体之间滞留 $PM_{2.5}$ 能力有很大的差异,单位叶面积 $PM_{2.5}$ 滞留量较多的植物有元宝枫、大叶黄杨、胡枝子、锦带花、樱花,较少的为黄栌、旱柳、油松、七叶树;(2)油松、黄栌、圆柏3种植物由于释放 α -蒎烯的量较高,对生成SOA的贡献较高;(3)综合评价植物消减细颗粒物的净化效益,黄栌与油松2种植物对 $PM_{2.5}$ 没有消减作用,反而增加空气 $PM_{2.5}$ 浓度,其余13种植物对 $PM_{2.5}$ 具有消减作用,其中锦带花与元宝枫2种植物单位叶面积对 $PM_{2.5}$ 的消减能力最强。

关键词:园林植物;细颗粒物;挥发性有机化合物;滞尘功能;二次有机气溶胶

中图分类号:X173

文献标志码:A

论文编号:cjas20190500050

Positive and Negative Effects of Landscape Plants on Atmospheric Fine Particulate Matter Concentration

Li Xinyu, Zhao Songting, Xu Rui, Li Yanming

(Beijing Institute of Landscape Architecture/ Beijing Key Laboratory of Ecological Function Assessment and Regulation Technology of Green Space, Beijing 100102, China)

Abstract: In view of the dual role of garden green space in urban atmospheric environment, this study evaluated the difference of $PM_{2.5}$ pollution reduction capability of different plant species to provide a scientific basis for optimizing and upgrading urban green space function. Based on the current model of calculating the quality of fine particulate matter retained in plant leaves, taking the contribution of VOCs released by plants to the concentration of atmospheric particulate matter as an influencing factor, the purifying benefit of reducing fine particulate matter by plants was studied. The results showed that: (1) there were big differences among the plant individuals of the capability of fine particles retention by trees in every unit leaf area for 7 days; (2) *Pinus tabulaeformis*, *Cotinus coggygria* and *Sabina chinensis* had higher contribution to the generation of SOA due to their higher release of α -pinene; (3) according to the comprehensive evaluation of the purifying benefit of reducing fine particulate matter in plants, *Cotinus coggygria* and *Pinus tabulaeformis* did not reduce $PM_{2.5}$, but increased the concentration of $PM_{2.5}$ in air, the other 13 plants all had a reduction effect on $PM_{2.5}$, the leaf area of *Weigela florida* and *Acer truncatum* had the strongest capability to reduce $PM_{2.5}$.

Keywords: Landscape Plants; Fine Particulate Matter; Volatile Organic Compound; Dust Reduction Capability; Secondary Organic Aerosol

基金项目:北京市科技计划重大课题“北方地区城市背景下多尺度绿化生态效益评价体系的研究及建立”(D171100007117001)。

第一作者简介:李新宇,女,1979年出生,内蒙古赤峰人,教授级高工,博士,主要从事城市生态功能评价与优化研究。E-mail:lx09618@163.com。

通讯作者:李延明,男,1965年出生,河南人,教授级高工,主要从事风景园林学研究。E-mail:liyanming_beijing@hotmail.com。

收稿日期:2019-05-20,修回日期:2019-07-25。

0 引言

园林绿地对城市大气环境中发挥双重作用,既要评价城市园林植物对细颗粒物的吸附能力,又要定量分析其所释放的 VOCs 的量,因为 VOCs 会作为重要的前体物参与生成 SOA,因此综合评价的研究结果有助于绿化树种的合理选择。国内外在构建模型评价植物消减细颗粒浓度的能力方面已有研究。国外学者主要通过结合场景对象的生态模型在城市尺度上进行城市树木与草通过扩散和沉积减少 PM_{2.5}的效果模拟,估计城市树木的空气污染的去除能力^[1-2];或基于城市森林污染沉积速率、空气污染排放和周边环境空气质量的大小和空间分布差异分析,利用模型研究 PM_{2.5}与林木冠层指标的关系^[3]。国内学者基于不同尺度研究植物对 PM_{2.5}的削减及滞留影响,通过模型估算城市尺度林冠覆盖面积上的 PM_{2.5}的年均削减量^[4];基于林带对阻滞吸附 PM_{2.5}等颗粒物的影响研究,建立林带阻滞吸附颗粒物有效宽度的模型^[5]。但目前研究均未提及考虑植物释放 VOC 对大气颗粒物浓度的贡献量,并作为一个影响因子参与计算。而植物会在生理过程中向大气释放出大量挥发性有机化合物(volatile organic compound, VOCs)^[6-9],在一定的光照等气象条件下,可通过参与光化学反应,以前体物的形式对大气中的臭氧(O₃)和二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)的形成产生重要影响^[10-11],这会直接或间接影响气候变化与大气质量,且影响大小通常与排放清单总量呈正相关关系^[12-14]。针对于园林绿地对城市大气环

境中发挥的双重作用,本研究在考虑园林植物对细颗粒物的滞留能力及植物释放 VOC 的前提下,构建植物消减细颗粒物模型,分析评价植物种类差异对消减 PM_{2.5}污染的能力,以期城市绿地功能优化与提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验时间、地点

研究田间试验于2016年5—8月在北京市园林科学研究院内(116°27'52"E, 39°58'31"N)进行,室内试验在北京市园林生态功能评价与调控技术北京市重点实验室及北京大学环境科学与工程学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室进行。采样点为人工种植植被区域,植被覆盖度较高。

1.2 试验材料

选择北京市常用的15种园林植物作为研究对象(表1),包括6种落叶阔叶乔木、2种常绿针叶乔木、3种落叶阔叶小乔木、4种灌木(包括3种落叶阔叶灌木和1种常绿阔叶灌木),每种植物分别选取3棵树龄接近、生长良好、无病虫害的健康成树进行测量。

植物滞留 PM_{2.5}试验采用干洗法称重结合扫描电镜观测方法。对选好的树种依据其自身特点从树冠四周及上中下各部位均匀采集叶片30~300片,采集时选择生长状态良好且具有代表性的叶片,对每种树种进行3次重复采样,并同时立即将叶片封存于干净防尘盒内以防挤压或叶毛被破坏。一般认为,15 mm的降雨量就可以冲掉植物叶片的降尘,然后重新滞尘。根

表1 采样基本信息

树种	拉丁名	植被类型	主要分布情况
绦柳	<i>Salix pendula</i>	落叶阔叶乔木	华北、东北、西北至淮河流域
油松	<i>Pinus tabulaeformis</i>	常绿针叶乔木	华北、东北、西北、中原
黄栌	<i>Cotinus coggygia</i>	落叶阔叶小乔木	华北、西南
七叶树	<i>Aesculus chinensis</i>	落叶阔叶乔木	黄河流域和东部各省
金钟花	<i>Forsythia viridissima</i>	落叶阔叶灌木	华北、西南
钻石海棠	<i>Malus sparkler</i>	落叶阔叶小乔木	华北、西北、华南
大叶黄杨	<i>Buxus megistophylla</i>	常绿阔叶灌木	西南、华南
樱花	<i>Prunus serrulata</i>	落叶阔叶乔木	南北各省区
早柳	<i>Salix matsudana</i>	落叶阔叶乔木	华北、东北、西北、长江流域
圆柏	<i>Sabina chinensis</i>	常绿针叶乔木	华北、东北、西南、华南
紫丁香	<i>Syringa oblata</i>	落叶阔叶小乔木	华北、东北、西北、西南
锦带花	<i>Weigela florida</i>	落叶阔叶灌木	华北、东北、西北、淮河流域
胡枝子	<i>Lespedeza bicolor</i>	落叶阔叶灌木	南北各省区
白蜡	<i>Fraxinus chinensis</i>	落叶阔叶乔木	南北各省区
元宝枫	<i>Acer truncatum</i>	落叶阔叶乔木	华北、东北、长江流域

据北京市的降雨特点,于雨量大于 15 mm 后 7 天进行采样。全年内共采集到 7 天滞尘样本 3 次。

采用半静态封闭式采样法采集植被排放的 VOCs 样品^[15]。选择风速较低、空气质量较好、无降雨、温度与光合有效辐射(PAR)接近标准条件(温度 30℃,PAR 1000 μmol/(m²·s))的天气进行测量采样。每种树分别采集 3 个平行样。采样结束后,剪下所罩树枝的所有树叶,放置于密封袋中,带回实验室,测量其叶面积后置于烘箱中于 70℃烘干 48 h 后称重,记录叶片干重。

1.3 试验方法

1.3.1 园林植物对细颗粒物的滞留能力评价 利用一种植物滞留细颗粒物质量的检测方法(国家发明专利,授权申请号 201410398759.X),对选定园林植物滞留颗粒物尤其是细颗粒物 PM_{2.5} 的能力进行定量计算。

1.3.2 植物夏季 SOA 生成浓度估算 采用半静态封闭式采样装置收集 15 种北京常用园林植物的挥发性有机化合物并进行测定。采用低温冷阱预浓缩和气相色谱质谱联用技术(Gas Chromatography- Mass Spectrometer/Flame Ionization Detector, GC-MS/FID),分析植被排放样品中的 VOCs 浓度和背景空气样品中的 VOCs 浓度,使用的仪器为北京大学环境科学与工程学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室自主研发、武汉市天虹仪表有限责任公司生产的在线 GC-MS/FID 系统。该系统可实现 VOCs 样品的采集、预浓缩、在线分析、数据采集与处理。利用该系统对采集样品植被排放 VOCs 的主要类别组成与植被排放 VOCs 的物种浓度特征进行分析。

根据北京市夏季气溶胶变化特征,使用国内外研究中应用较多的气溶胶生成系数法,根据实测的 VOCs 浓度,使用参数化的方法计算 SOA 的生成量^[16-17]。

1.3.3 单位叶面积植物消减颗粒物量(NLW_{2.5S})计算方法 式(1)中,NLW_{2.5S}为植物单位叶面积真正消减 PM_{2.5} 的质量,LW_{2.5S}为植物单位叶面积滞留 PM_{2.5} 的质量,SOA_{2.5S}为植物单位叶面积生成二次有机气溶胶的质量。

$$NLW_{2.5S}=LW_{2.5S}-SOA_{2.5S} \dots\dots\dots (1)$$

2 结果与分析

2.1 园林植物单位叶面积 PM_{2.5} 周滞留量比较

在植物滞尘量计算的基础上,结合电镜观测结果,计算得出单位叶面积滞留 PM_{2.5} 的质量。由图 1 可以看出,不同植物之间滞留细颗粒物能力有很大的差异,单位面积 PM_{2.5} 滞留量最多的元宝枫(0.606 g/m²)是单位面积 PM_{2.5} 滞留量最少的七叶树(0.044 g/m²)的 13.8 倍。

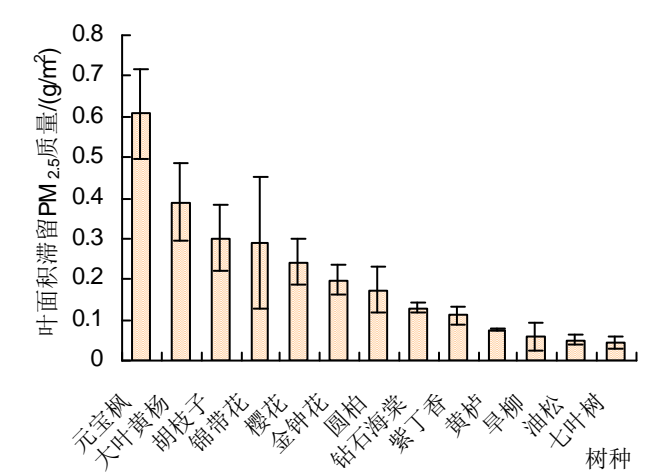


图 1 全部植物单位叶面积 PM_{2.5} 滞留量比较

单位叶面积 PM_{2.5} 滞留量较多的植物有元宝枫、大叶黄杨、胡枝子、锦带花、樱花,其单位叶面积 PM_{2.5} 每周滞留量均在 0.2 g/m² 以上;较少的为黄栌、旱柳、油松、七叶树,其单位叶面积 PM_{2.5} 滞留量均在 0.1 g/m² 以下。

2.2 植物夏季 SOA 生成浓度估算

参考北京市夏季植物二次有机气溶胶 SOA 生成潜势估算值 FAC,有 31 种 VOCs 会生成二次有机气溶胶(表 2^[17]),其中 α-蒎烯、β-蒎烯生成潜势最高,达到 30%。根据测定的植物释放 VOCs 种类的不同,计算

表 2 北京市夏季 SOA 生成潜势估算

VOCs 组分	VOCs 物种	FAC/%	VOCs 组分	VOCs 物种	FAC/%
烷烃	非 SOA 前体物	0	芳香烃	间/对二甲苯	4.7
	甲基环戊烷	0.17		邻二甲苯	5
	环己烷	0.17		异丙基苯	4
	正庚烷	0.06		正丙基苯	1.6
	甲基环己烷	2.7		间乙基甲苯	6.3
	2-甲基庚烷	0.5		对乙基甲苯	2.5
	3-甲基庚烷	0.5		邻乙基甲苯	5.6
	正辛烷	0.06		1,3,5-三甲苯	2.9
	正癸烷	2		1,2,4-三甲苯	2
	正十一烷	2.5		1,2,3-三甲苯	3.6
				1,3-二乙基苯	6.3
烯烃	非 SOA 前体物	0		1,4-二乙基苯	6.3
	异戊二烯	2		1,2-二乙基苯	6.3
	α-蒎烯	30	羰基化合物	非 SOA 前体物	0
	β-蒎烯	30		辛醛	0.24
芳香烃	苯	2		壬醛	0.24
	甲苯	5.4		癸醛	0.24
	乙苯	5.4			

15种植物单位叶面积生成SOA量(图2a, 2b, 2c)。由于油松、黄栌、圆柏等3种植物释放 α -蒎烯的量较高,所以植物释放VOCs对SOA的贡献较高,大于 $0.1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{周})$ 。七叶树、紫丁香、绦柳、旱柳、钻石海棠等5种植物释放的VOCs中也因含有一定量的 α -蒎烯,对SOA的贡献大于 $0.001 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{周})$ 。其他7种植物释放的VOCs中,除樱花外,其余均不释放 α -蒎烯,对SOA的贡献均较小。

2.3 植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减量

根据单位叶面积植物消减颗粒物量计算方法,对比分析北京市15种乔灌木在夏季时对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减能力(表3)。除黄栌与油松外,其余13种植物吸附细颗粒物的能力($LW_{2.5S}$)远强于其自身释放 $\text{SOA}_{2.5}$ 量,两者差别在几千倍到几倍不等。锦带花与元宝枫2种植物单位叶面积对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减能力最强,两者都大于 $0.600 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{周})$ 。紫丁香、大叶黄杨、胡枝子、樱花、金钟花、钻石海棠、七叶树、旱柳等8种植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 具有

一定的消减作用,消减能力大于 $0.100 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{周})$ 。圆柏、白蜡、绦柳等3种植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 也具有一定消减作用。黄栌与油松由于释放VOCs物质对SOA贡献较大,因此这2种植物会增加空气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度。

3 结论

(1)植物个体之间滞留细颗粒物能力有很大的差异,单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 滞留量较多的植物有元宝枫、大叶黄杨、胡枝子、锦带花、樱花,较少的为黄栌、旱柳、油松、七叶树。

(2)不同树种排放的VOCs类别组成差异较大,且每种物质生成SOA潜势各不相同。油松、黄栌、圆柏3种植物由于释放 α -蒎烯的量较高,植物对生成SOA的贡献较高。七叶树、紫丁香、绦柳、旱柳、钻石海棠等5种植物对SOA也具有一定的贡献。其他7种植物对SOA的贡献较小。

(3)锦带花与元宝枫2种植物单位叶面积对 $\text{PM}_{2.5}$ 的消减能力最强。紫丁香、大叶黄杨、胡枝子、樱花、金

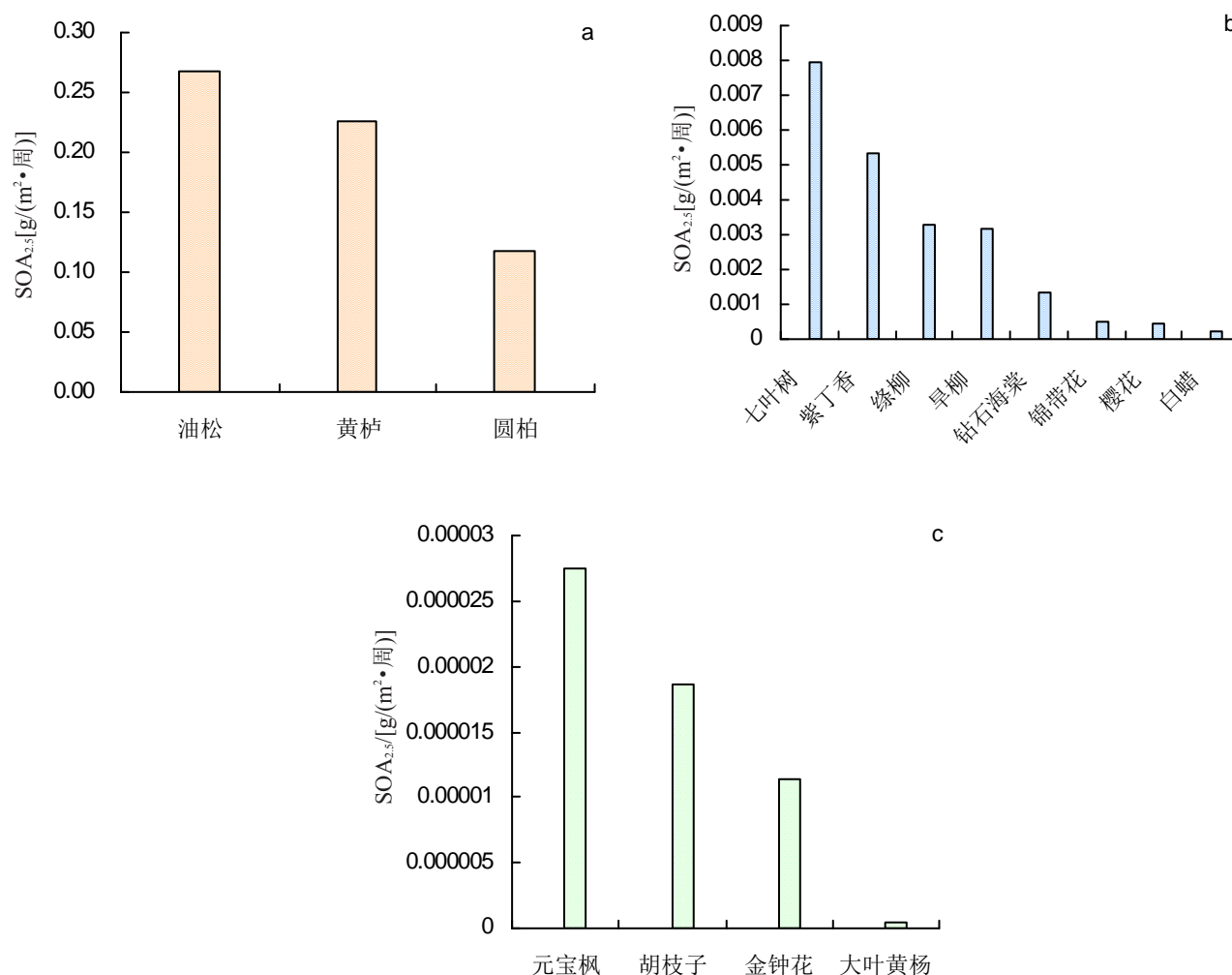


图2 北京市不同植物夏季SOA生成浓度估算

表3 北京市不同植物SOA的生成量及对PM_{2.5}的消减量

植物种类	SOA 排放速率/[μgC/(gdw·h)]	叶面积/(cm ² /gdw)	SOA _{2.5} /[g/(m ² ·周)]	LW _{2.5} /[g/(m ² ·周)]	NLW _{2.5} /[g/(m ² ·周)]
锦带花	0.099	122.474	0.001	0.615	0.614
元宝枫	0.009	200.814	0	0.606	0.606
紫丁香	1.011	119.197	0.005	0.409	0.403
大叶黄杨	0	106.844	0	0.388	0.388
胡枝子	0.006	198.863	0	0.301	0.301
樱花	0.115	164.638	0	0.242	0.242
金钟花	0.004	199.837	0	0.193	0.193
钻石海棠	0.317	151.767	0.001	0.129	0.128
七叶树	1.548	123.062	0.008	0.128	0.12
旱柳	0.722	144.35	0.003	0.119	0.116
圆柏	5.602	30.05	0.117	0.173	0.056
白蜡	0.048	153.046	0	0.03	0.03
缘柳	0.588	112.311	0.003	0.017	0.013
黄桧	46.298	128.926	0.226	0.133	-0.093
油松	12.311	28.892	0.268	0.051	-0.217

钟花、钻石海棠、七叶树、旱柳等8种植物对PM_{2.5}消减作用其次。黄桧与油松2种植物对PM_{2.5}没有消减作用,反而增加空气PM_{2.5}浓度。

4 讨论

针对于园林绿地对城市大气环境中发挥的双重作用,既要综合分析城市园林植物对细颗粒物的吸附能力,又要定量分析其所释放的VOCs排放总量对SOA形成的贡献,研究结果有助于绿化树种的合理选择。已有研究结果表明^[18-20],不同植物个体之间滞留细颗粒物及释放VOCs的量差异显著,虽然植物都会不同程度释放VOCs,但大多数挥发物对人体有益无害^[21],人为源对SOA的贡献远大于天然源的贡献,比较其滞尘量,植物间接生成SOA的量较少^[22-23],大多数植物主要通过叶片及树冠对颗粒物沉降速度产生影响,能够吸附和过滤灰尘,减少空气中颗粒物浓度。

研究虽然对于北京地区主要树种典型天气条件下VOCs排放的种类及排放速率的特征有了初步了解,但温度、辐射等环境因子对VOCs排放速率都有很大的影响^[24],仍然缺乏对它们的日、月、季、年变化规律,特别是冠层尺度上森林VOCs排放的准确了解和模拟。因此,在以后的相关研究中,应该更系统地研究包括植物体内、植物释放到外界、群落空气中的VOCs种类、含量及其变化规律,了解各种挥发性有机物的释放源、分布规律、迁移变化等,为城市绿地植物配植提供更可靠的理论依据。

参考文献

[1] Selmi W, Weber C, Riviere E, et al. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2016,17:192-201.

[2] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, et al. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten US cities and associated health effects[J]. Environmental Pollution,2013,178:395-402.

[3] King, K L, Johnson S, Kheirbek I, et al. Differences in magnitude and spatial distribution of urban forest pollution deposition rates, air pollution emissions, and ambient neighborhood air quality in New York City[J]. Landscape and Urban Planning,2014,128:14-22.

[4] 赵晨曦. 基于不同尺度的植物对PM_{2.5}的削减及滞留影响研究[D]. 北京:北京林业大学,2015.

[5] 刘萌萌. 林带对阻滞吸附PM_{2.5}等颗粒物的影响研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.

[6] 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.

[7] 王扶潘,朱乔,冯凝,等. 深圳大气中VOCs的二次有机气溶胶生成潜势[J]. 中国环境科学,2014,34(10):2449-2457.

[8] Claeys M, Graham B, Vas G, et al. Formation of secondary organic aerosols through photo oxidation of isoprene[J]. Science,2004,303:1173-1176.

[9] 王效科,牟玉静. 太湖流域主要植物异戊二烯排放研究[J]. 植物学通报,2002,19(2):224-230.

[10] Geng F, Tie X, Guenther A, et al. Effect of isoprene emissions from major forests on ozone formation in the city of Shanghai[J]. Atmospheric Chemistry and Physics,2011,11:10449-10459.

[11] Erik V. The man who smells forests[J]. Nature,2009,459:498-499.

[12] 陈文泰,邵敏,袁斌,等. 大气中挥发性有机物(VOCs)对二次有机气溶胶(SOA)生成贡献的参数化估算[J]. 环境科学学报,2013,33(1):

- 163-172.
- [13] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions [J]. *Journal of Geophysical Research*,1995,100:8873-8892.
- [14] Grosjean D. In situ organic aerosol formation during a smog episode estimated production and chemical functionality[J]. *Atmospheric Environment*,1992,26A:953-963.
- [15] Zimmerman P R. Testing of hydrocarbon emissions from vegetation, leaf litter and aquatic surfaces and development of a methodology for compiling biogenic emission inventories[A]. EPA 450/4- 79- 004[C], USA. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC,1979.
- [16] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment*,1989,23(8):1733-1747.
- [17] 吕子峰,段菁春.北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. *环境科学*,2009,30(4):969-974.
- [18] 赵松婷,李新宇,李延明.园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律[J]. *生态与环境学报*,2014,23(2):271-276.
- [19] 吴艳芳,闫淑君,段嵩岚,等.15种草本植物春季滞留颗粒物效应研究[J]. *森林与环境学报*,2017,23(4):418-422.
- [20] 谢扬飏,邵敏,陆思华,等.北京市园林绿地植被挥发性有机物排放的估算[J]. *中国环境科学*,2007,27(4):498-502.
- [21] 马楠,周帅,林富平,等.5种绿篱植物挥发性有机化合物成分分析[J]. *浙江农林大学学报*,2012,29(1):137-142.
- [22] Weitkamp E A, Sage A M, Pierce J R, et al. Organic aerosol formation from photochemical oxidation of diesel exhaust in a smog chamber[J]. *Environmental Science and Technology*,2007,41(20):6969-6975.
- [23] Grieshop A P, Logue J M, Donahue N M, et al. Laboratory Investigation of photochemical oxidation of organic aerosol from wood fires 1: measurement and simulation of organic aerosol evolution[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*,2009,9(4):1263-1277.
- [24] 司徒淑婷,王雪梅,Guenther Alex,等.气象模拟误差对异戊二烯排放估算的影响[J]. *环境科学学报*,2010,30(12):2383-2391.