

辽宁西北部主要绿化树种对空气颗粒物滞留能力研究

淑敏¹, 斯日木极¹, 姜涛², 赵晓亮¹, 杨明¹, 金昶颖¹, 李珂欣¹, 孙美玉¹

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁省风沙地改良利用研究所, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 采用洗脱法测定了辽西北地区阜新市 15 种常见绿化树种单位叶面积滞留粗颗粒物(TSP)及细颗粒物(PM_{2.5})的质量, 分析比较了 15 种种叶去除 TSP 和 PM_{2.5} 能力以及随着空间变化的规律。结果表明: (1) 不同树种单位叶面积 TSP 和 PM_{2.5} 滞留量均存在显著差异, 变化范围分别为 3.68~5.94 g/m² 和 0.47~0.92 g/m², 树种间滞留能力的差值可达 2 倍左右。(2) 在同一个功能区不同树种滞留 TSP 和 PM_{2.5} 的差异由树冠高度(绿篱>灌木>乔木)和叶表面粗糙度(叶表面沟槽宽度的不同可能是沟槽宽度过宽和过窄均不利于叶片捕集颗粒物, 且颗粒物滞留量随沟槽深度增加而增大)以及叶片比叶重(比叶重大的滞尘量大)等所引起。(3) 在不同功能区同一树种单位叶面积滞留 TSP 量的排序为工业区>商业交通区>露天矿区>清洁区, 而 PM_{2.5} 滞留量则无明显差异。乔木中新疆杨、灌木中紫丁香的单位叶面积滞留量与单株滞留量都较高, 起到明显的降尘作用, 是沙尘频发的辽西北地区城市绿化树种的优先之选。

关键词: 绿化树种; 植物叶片; TSP、PM_{2.5}; 滞留; 不同功能区划分

中图分类号: X513; X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0297-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.04.047

Retention Capacity of the Main Urban Afforest Plant Species for Atmospheric Particles in Northwest of Liaoning Province

SHU Min¹, SI Rimuji¹, JIANG Tao², ZHAO Xiaoliang¹,

YANG Ming¹, JIN Changying¹, LI Kexin¹, SUN Meiyu¹

(1. College of Environmental Sciences and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin,

Liaoning 123000; 2. Liaoning Institute of Sandy Land Improvement and Utilization, Fuxin, Liaoning 123000)

Abstract: In this study, elution method was used to determine the retention quality amounts of TSP (larger particles) and PM_{2.5} (smaller particles) per unit leaf area of 15 common afforest plant species. The retentive capacities of TSP and PM_{2.5} for leaves from different plant species were analyzed and compared, and the location-variation law was investigated. Results showed: (1) There were significant differences in the retention amounts of TSP and PM_{2.5} per unit leaf area among plant species, ranging from 3.68 to 5.94 g/m² for TSP, and from 0.47 to 0.92 g/m² for PM_{2.5}, respectively. The largest difference of retention amounts for plant species reached up to 2 times. (2) In the same location, the retention capacities of TSP and PM_{2.5} for different plant species varied as the variations of canopy height, blade surface roughness and specific leaf weight. Specifically, the sequence of retention capacities from high to low was hedge plants, bush plants and arbor plants, and the species with larger specific leaf weight had stronger retention capacity. For the factors of surface roughness, the retention amount of particles increased as the increase of groove depth, and a leaf with neither too wide nor too narrow groove width was proved to have good retention capacity. (3) For the retention amount of TSP in varied locations, the sequence from high to low was Industrial Area (IA), Transportation Area (TA), Open-pit Mine (OP), and Clean Area (CA). In the case of PM_{2.5}, there were little difference at those locations. The particle retention amounts per leaf area or per plant of *P. albarvar*, *pramidalis* and *Syringa oblata* were higher than those of other examined species. Thus, those two species could be chosen as the priority species for urban afforestation for cities in Northwest of Liaoning Province with much dust weather.

Keywords: urban greening trees; plant leaves; TSP, PM_{2.5}; retention; different functional area

收稿日期: 2018-01-29

资助项目: 辽宁省教育厅科学技术研究项目(LJYL023); 辽宁省大学生创新项目(201710147000277, 201610147000021); 辽宁省自然科学基金指导计划项目(17-1058); 辽宁省自然科学基金计划重点项目(20170540425)

第一作者: 淑敏(1984—), 女, 博士, 主要从事水土保持与城市生态修复研究。E-mail: bcym1984@163.com

随着我国城镇工业化的迅速发展,大量有害颗粒物造成严重的雾霾天气,空气质量不断下降,环境问题已逐渐成为人类生存与健康的重大威胁^[1]。城市空气中过量的总悬浮大颗粒物(TPS)影响大气能见度,其中的细颗粒物与区域灰霾以及光化学烟雾现象有密切关系^[2]。TPS中含有直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的小颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)对人体健康危害更为严重^[3-4]。WHO(World Health Organization)在2009年估算每年全球过早死亡的人约有5.3%,310万人死于空气污染^[5]。如何防治空气污染物的危害,主要是颗粒物对人体健康的危害已成为世界污染防治亟待解决的首要问题。而植物依靠叶片等器官能够有效捕捉空气中颗粒物,成为消减城市空气污染的重要过滤体^[6-7]。Litter^[8]和Verma等^[9]的研究表明,树木叶片构造对捕捉沙尘颗粒的效率十分重要;树木滞尘能力与叶片高度、总叶面积(比叶重)、叶片大小、叶片表面的粗糙度等参数决定了其移除效率^[10]。因而根据不同树种叶片滞留空气颗粒物的能力来选择城市绿化树种,可以成为城市绿化的重要指标之一^[11-12]。但是,树木叶片滞留颗粒物是一个复杂的动态过程,受到季节、植物所处的环境、海拔高度、风向、植物本身的叶片结构、生理生态特征等诸多因素影响,呈现出一定的变化趋势^[13]。所以,在城市空气环境越来越恶化的情况下,研究不同城市更多绿化植物叶片滞尘能力,为选择和优化城市绿化树种,对降低空气中颗粒物质量浓度和提高城市空气质量具有重要的科学意义。目前许多城市已开展绿化树种滞尘能力及其耐尘机理的研究,而干旱半干旱区的相关研究尚为欠缺。因此,本研究在辽宁西北地区选取阜新市常见绿

化树种作为研究对象,对4个功能区15种绿化树种叶片滞留颗粒物的能力及机制进行研究,主要研究目的为:(1)在相同或不同环境下,定量确定不同树种滞尘不同粒径颗粒物的能力差异;(2)从叶片结构分析不同树种滞尘颗粒物能力差异的原因;(3)估算常见绿化树种的单株滞尘量,初步筛选出滞尘效果好、抗风沙能力强的树种,为该地区城市绿化树种的科学选配提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究地点与试验材料

本研究于7—8月进行。采样地点按土地利用性质对阜新市功能分区进行分层次随机抽样调查,共设4个采样试验区。分别为工业区(IA)(宏达供热电厂、建筑工地)、露天矿区(OP)(海州露天矿)、商业交通区(TA)(人民大街、红树路、新华街)和清洁区(CA)(人民公园、辽工大校园、辽工大教师公寓)。选定不同环境条件的区域,可防止研究环境单一造成研究结果的片面性。此外,可通过不同地区的研究对比分析,说明在不同环境下相同树种对不同粒径颗粒物附着能力的变化。研究供试树种包括紫丁香(*Syringa oblata*)、紫叶李(*Prunus cerasifera*)、红瑞木(*Swida alba*)、金叶榆(*Ulmus pumila*)、连翘(*Forsythia suspense*)、榆叶梅(*Amygdalus triloba*)、新疆杨(*Populus bolleana*Lauche)、榆树(*Ulmus pumila*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、五角枫(*Acer mono*)、国槐(*Sophora japonica*)、梓树(*Catalpa ovata*)、京桃(*Prunus persica*)、山皂荚(*Gleditsia japonica*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)等15种常见绿化树种(表1)。

表1 树种调查统计

编号	树种	株数/株	树高/m	冠幅/m	枝下高/m
1	紫丁香(<i>Syringa oblata</i>)	12	3.2±0.9	3.5±0.9	0.5±0.2
2	紫叶李(<i>Prunus cerasifera</i>)	12	3.5±0.6	2.8±0.7	0.6±0.3
3	红瑞木* (<i>Swida alba</i>)	—	0.9±0.3	—	—
4	金叶榆* (<i>Ulmus pumila</i>)	—	0.8±0.3	—	—
5	连翘(<i>Forsythia suspense</i>)	12	2.5±0.4	2.2±0.5	0.4±0.2
6	榆叶梅(<i>Amygdalus triloba</i>)	12	2.7±0.7	2.7±0.6	0.6±0.3
7	新疆杨(<i>Populus bolleana</i> Lauche)	12	11.5±1.8	2.1±0.6	1.7±1.2
8	榆树(<i>Ulmus pumila</i>)	12	7.6±1.1	2.9±0.7	1.9±0.7
9	银杏(<i>Ginkgo biloba</i>)	12	9.4±1.4	2.6±0.8	2.4±0.6
10	五角枫(<i>Acer mono</i>)	12	7.6±1.1	2.9±0.8	2.3±1.1
11	国槐(<i>Sophora japonica</i>)	12	11.8±1.8	2.7±1.6	3.4±1.6
12	梓树(<i>Catalpa ovata</i>)	12	6.5±0.6	1.9±0.6	2.1±0.3
13	京桃(<i>Prunus persica</i>)	12	5.3±0.7	2.3±1.0	1.7±0.4
14	山皂荚(<i>Gleditsia japonica</i>)	12	12.5±2.6	2.8±1.8	3.6±1.7
15	臭椿(<i>Ailanthus altissima</i>)	12	9.8±2.5	3.1±1.7	3.4±1.5

注: * 表示绿篱。

1.2 叶片采集方法

每种植物选取3株生长状况良好、林龄相近的个体植株。在7—8月间10天左右没有降雨的情况下,选择乔木生长高度2~3 m、灌木1~1.5 m、绿篱在1 m以下处,树冠外围各个方向上根据叶片大小,在每株树上采集不等叶片。采摘的叶片要求完整、无病虫害,且皆为当年生叶片。把采摘下来的叶片立即封存于自封袋中,及时带回实验室进行测量。

2 研究方法

2.1 单位叶面积滞尘量测定

本试验采用洗脱法测定各植物单位叶面积粗颗粒物(TSP)和细颗粒物(PM_{2.5})质量,每种植物测定3组重复样本,取平均值。每个树种各取适量叶片放入盛有蒸馏水的烧杯中浸泡2 h以上,用小毛刷清洗叶片上的附着物,然后用镊子将叶片小心夹出。尽快将所得浸洗液用已知质量的2.5 μm孔径滤膜过滤,并烘干后称重(0.000 1 g),求得滤膜过滤前后质量之差即为粒径>2.5 μm的颗粒物质量。将滤液烘干称重,得到PM_{2.5}的质量。叶片拦截TSP的量等于PM_{2.5}质量和粒径>2.5 μm颗粒物质量之和。夹出的叶片晾干后,经数码相机(Canon, Japan)照相后,将图像导入电脑中,用Photoshop 7.0软件处理后,计算出叶面积^[14]。

单位叶面积滞尘量=PM_{2.5}质量或TSP质量/叶面积 (1)

比叶重=叶干重/叶面积 (2)

单株总叶面积的估算:采用经验公式估算阔叶树种单株树木的叶片总叶面积^[15],其公式为:

$$Y = \text{Exp}(0.631 + 0.238H + 0.691D - 0.0123S) + 0.182 \quad (3)$$

式中:Y为叶面积总量(m²);H为树冠高度(m);D为树冠直径(m);S为叶面积(m²), $S = D(H + D)/2$ 。

单株滞尘量=单株总叶面积×单位叶面积(TSP)滞尘量 (4)

式中:单位叶面积(TSP)滞尘量用4个功能区的平均滞尘量表示。

2.2 叶片微结构观察

在实验室内,对紫丁香、紫叶李、榆叶梅、新疆杨、榆树、银杏等6种植物叶片中,每种选择3个新鲜叶片,采用OLS4000三维激光共聚焦显微镜(日本,奥林巴斯)观察叶片表面结构适当的比例,对其表面微结构进行观察比较,进行拍摄。每张叶片选择50个位置,利用Image图像处理软件测量叶表面沟槽宽度,并求出平均值。

2.3 数据处理

采用Excel 2017软件进行绘图。采用SPSS 19软件进行数据分析,用单因素方差(one-way ANO-

VA)分析物种之间最大滞尘量的差异,若有显著差异,则用最小显著差异法(LSD)进行多重比较。两变量之间的相关性采用Pearson检验,差异显著性水平设定0.05。比叶重和叶片滞尘量关系采用SPSS 19进行曲线拟合,筛选出最佳拟合曲线(r^2 最大)。

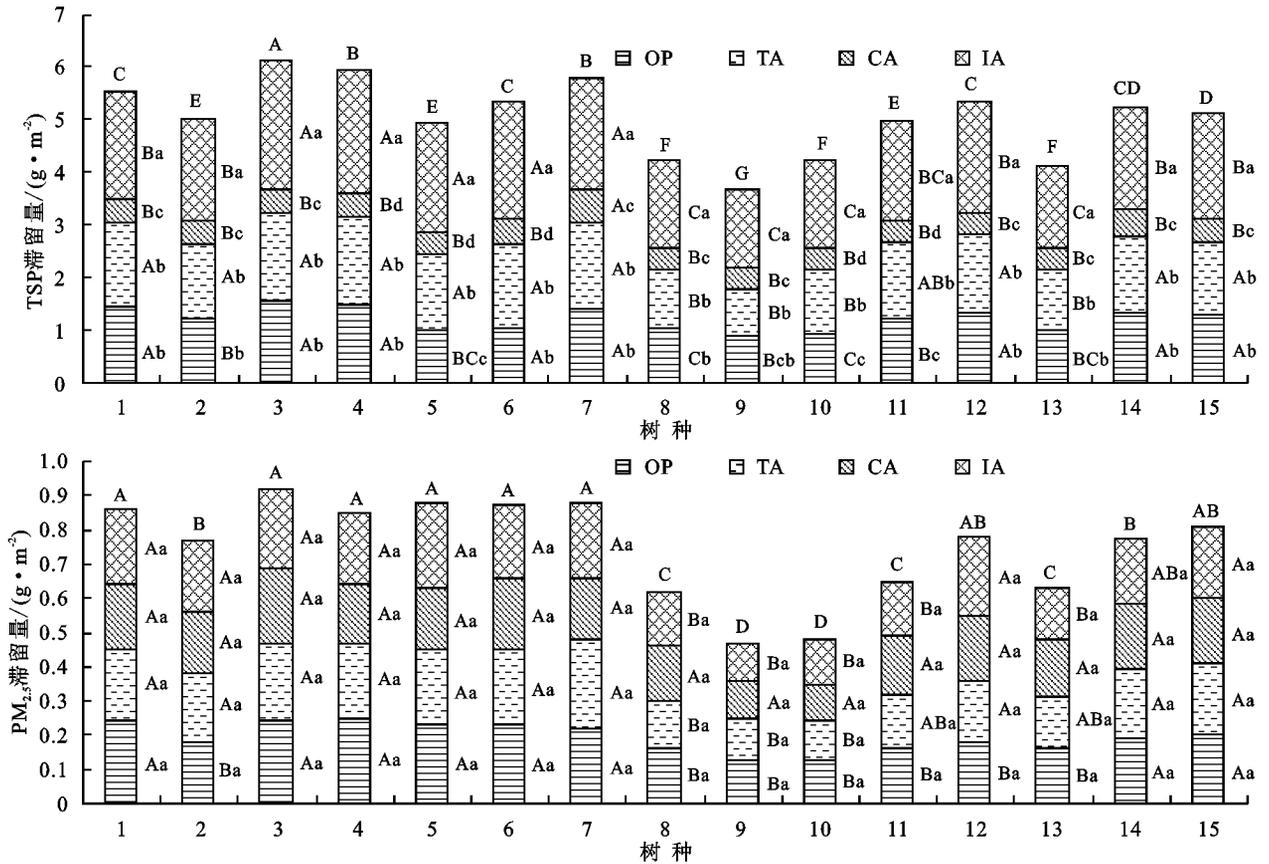
3 结果与分析

3.1 不同树种单位叶面积滞留TSP和PM_{2.5}差异

从图1可以看出,对各试验树种按照叶片滞留TSP与PM_{2.5}能力强弱进行排序,二者次序基本一致,且不同树种单位叶面积TSP滞留量显著大于PM_{2.5}滞留量($P < 0.05$),变化范围分别为3.68~5.94 g/m²和0.47~0.92 g/m²。其中单位叶面积TSP滞留能力最大的树种是红瑞木,金叶榆次之,银杏最小;PM_{2.5}滞留量最大的树种是红瑞木,榆叶梅次之,银杏最小。单位叶面积滞尘颗粒物中红瑞木是银杏的2.09倍。在相同环境下,不同树种TSP滞留量在清洁区差异不大,而在其他区差异较显著($P < 0.05$),且随着不同功能区的排序一致;而不同树种PM_{2.5}滞留量在各功能区间没有显著差异,且随着功能区的变化而无明显规律。

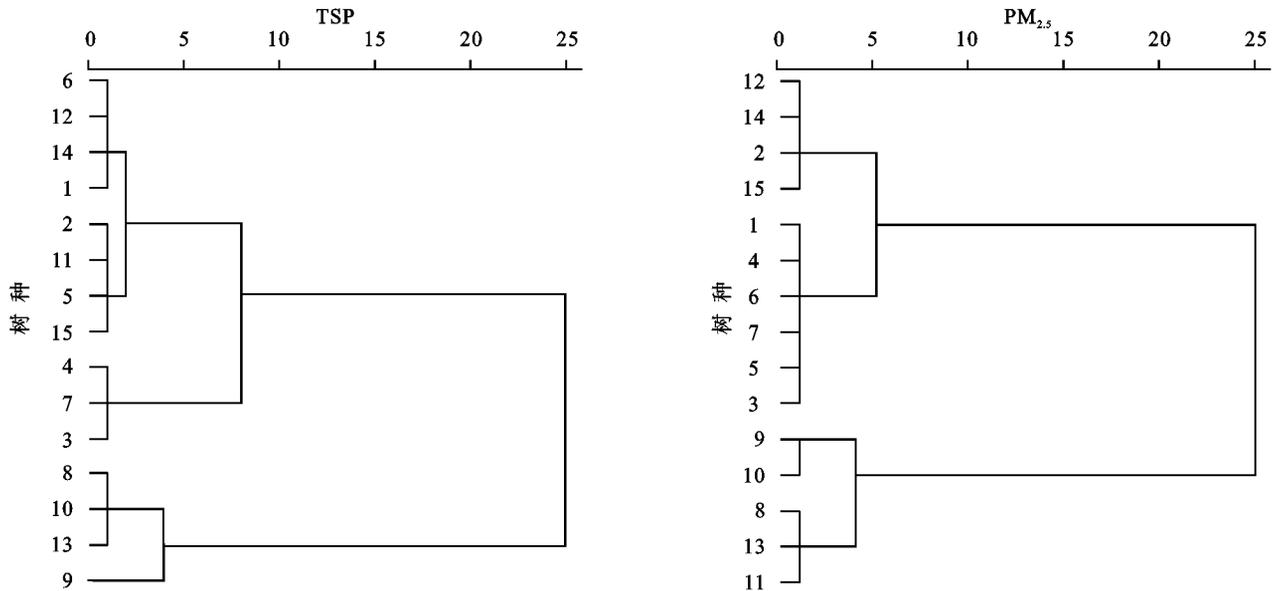
为了更科学地筛选出阜新市的耐尘树种,将试验树种进行适当分类,采用SPSS 19.0软件的平均聚类法对各树种滞尘量进行聚类分析,输出谱系聚类图(图2)。根据聚类分析结果,将所测的15个树种按照TSP和PM_{2.5}滞留量分别划分为3大类:单位叶面积TSP滞留量较大的(1.45~1.53 g/m²)树种有新疆杨、金叶榆和红瑞木;中等的(1.24~1.38 g/m²)树种有榆叶梅、紫丁香、国槐、臭椿和山皂荚;较小的(0.92~1.06 g/m²)树种有银杏、五角枫、京桃和榆树。单位叶面积PM_{2.5}滞留量较大的(0.20~0.25 g/m²)树种有新疆杨、红瑞木、金叶榆、榆叶梅、紫丁香和连翘;中等的(0.17~0.20 g/m²)树种有梓树、臭椿、山皂荚和紫叶李;较小的(0.11~0.16 g/m²)树种有银杏、五角枫、京桃、榆树和国槐。各供试树种单位叶面积TSP和PM_{2.5}滞留量平均值分别为1.32, 0.18 g/m², PM_{2.5}滞留平均质量分数占单位叶面积TSP滞留平均质量分数的13.6%。

对4个功能区的绿篱、灌木和乔木单位叶面积TSP和PM_{2.5}滞留量分别进行独立样本t检验,结果在乔木和灌木、绿篱单位叶面积TSP和PM_{2.5}滞留量在工业区(IA)、商业交通区(TA)存在显著差异,而在露天矿区(OP)、清洁区(CA)差异不显著(表2)。从平均值来看,TSP和PM_{2.5}滞留量的顺序为绿篱>灌木>乔木。比如滞尘多的工业区绿篱的TSP与PM_{2.5}滞留量的平均值比乔木高出31%和33%。



注:树种代号1~15与表1相同;不同大小写字母表示各试验区和各树种 TSP 和 PM_{2.5} 滞尘量在 0.05 水平上差异显著。

图 1 各树种单位叶面积 TSP 和 PM_{2.5} 滞尘量



注:树种代号1~15与表1相同。

图 2 4 个功能区树种叶面 TSP 和 PM_{2.5} 滞留量的聚类分析

表 2 各生活型植物单位叶面积 TSP 与 PM_{2.5} 滞留量

单位:g/m²

生活型	OP		TA		CA		IA		平均值	
	TSP	PM _{2.5}								
乔木	1.17	0.18	1.31	0.16	0.43	0.16	1.82	0.18	1.19	0.16
灌木	1.18	0.21	1.53	0.21	0.45	0.19	2.08	0.22	1.31	0.19
绿篱	—	—	1.56	0.23	0.45	0.20	2.40	0.24	1.47	0.20

3.2 植物叶表面结构特征和滞尘量的关系

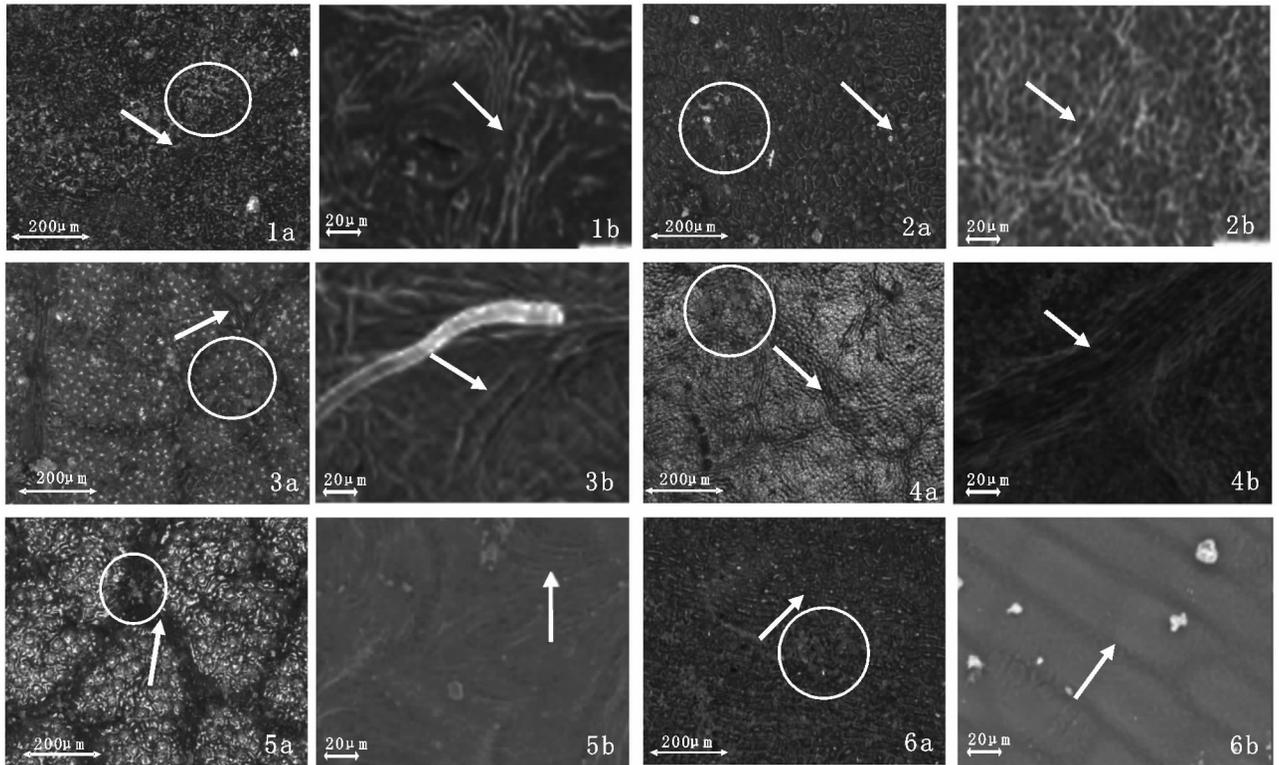
观察各树种代表性叶片的表面电镜扫描图(图

3),发现不同植物叶表面粗糙程度不同,叶面微结构也存在不同特征:6个树种叶片表面均有宽度不同的

沟槽(见图3白色箭头所示),并以紫丁香、榆叶梅和新疆杨叶表面沟槽较明显。其中,新疆杨叶表面粗糙起伏程度最大,分布有纵横交错的沟槽(图3(4a、4b));紫丁香和榆叶梅叶表面粗糙程度不及新疆杨,二者叶片正面均有沟槽,但宽度较新疆杨小,深度也较浅(图3(1a、1b、3a、3b));紫叶李和榆树叶面均分布有细小的沟槽(图3(2a、2b、5a、5b));银杏叶表面

细胞排列较为规则,沟槽宽度均较大(图3(6a、6b))。

从表3可以看出,叶表面粗糙起伏程度最大的新疆杨叶片单位叶面积 TSP 和 $PM_{2.5}$ 滞留量均最大,分别为 $1.64, 0.26 \text{ g/m}^2$;而叶表面细胞排列较为规则的银杏叶片单位叶面积 TSP 和 $PM_{2.5}$ 滞留量均最小,分别为 $0.91, 0.12 \text{ g/m}^2$ 。对各植物按照叶片 TSP 和 $PM_{2.5}$ 滞留能力强弱进行排序,二者顺序完全一致。



注:1为紫丁香;2为紫叶李;3为榆叶梅;4为新疆杨;5为榆树;6为银杏;a表示叶片正面;b表示叶片正面(扩大图);白色箭头指示叶面的沟槽微结构;白色圈指示叶面滞留的颗粒物。

图3 部分植物叶表面微结构电镜扫描

表3 典型植物叶表面沟槽宽度及其单位叶面积滞留量

树种	沟槽 宽度/ μm	TSP 滞留量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	$PM_{2.5}$ 滞留量/ ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
紫丁香	3.94 ± 0.21	1.59	0.24
紫叶李	2.23 ± 0.34	1.43	0.18
榆叶梅	4.12 ± 0.28	1.60	0.24
新疆杨	4.34 ± 0.32	1.64	0.26
榆树	1.98 ± 0.15	1.12	0.14
银杏	6.45 ± 0.43	0.91	0.12

3.3 不同树种滞留量与比叶重之间的相关关系

比叶重是单位面积的叶片干重,反映叶片质地的厚薄与轻重,也是表征叶片特性的一种指标。对6个试验树种的比叶重(x)与滞留量(y)进行相关性分析结果(表4)显示,二者之间的幂函数关系最佳。表明绿化树种比叶重与叶片滞尘能力存在明显相关关系,即比叶重较大的植物滞尘能力较大,并且以紫丁香的相关性较好。

3.4 不同树种单株总滞尘量

根据经验公式(4)得出的不同树种单株总滞尘量

在乔木中新疆杨(0.31 kg)最大,灌木中紫丁香最大(0.06 kg)。新疆杨是最小滞尘量连翘的15.5倍。比较表5与图2可知,不同树种单株滞尘量的大小与单位叶面积滞尘量的大小存在差异,其中灌木和乔木的顺序发生改变,乔木的单株滞尘量显著高于灌木。新疆杨单株总叶面积最大,山皂荚其次,连翘最低;京桃单株叶面积高于紫丁香,但是单株总滞尘量不如紫丁香。因为单株滞尘量取决于单位叶面积滞尘量与总叶面积,在总叶面积相差不大的情况下,单位叶面积滞尘量高则单株滞尘亦高。

表4 不同树种比叶重与滞留量之间的相关关系

树种	拟合方程	R^2	P
紫丁香	$y = 7.655x^{0.245}$	0.965	0.000
紫叶李	$y = 7.689x^{0.452}$	0.916	0.009
榆叶梅	$y = 8.089x^{0.659}$	0.955	0.000
新疆杨	$y = 6.984x^{0.232}$	0.884	0.019
榆树	$y = 5.009x^{0.349}$	0.863	0.002
银杏	$y = 6.751x^{0.516}$	0.902	0.013

注: y 为滞留量(g/m^2); x 为比叶重(mg/cm^2)。

表 5 不同树种单株叶片总滞尘量

树种	树冠	树冠	单位叶面积	单株总叶	单株
	高度 H/m	直径 D/m	S/m^2	面积 Y/m^2	滞尘量/kg
紫丁香	2.7	3.5	10.9	35.3	0.06
紫叶李	2.9	2.8	7.9	23.5	0.04
连翘	2.1	2.2	4.7	13.4	0.02
榆叶梅	2.1	2.7	6.5	18.5	0.03
新疆杨	9.8	2.1	23.0	190.9	0.32
榆树	5.7	2.9	12.5	51.4	0.06
银杏	7.0	2.6	12.5	51.4	0.05
五角枫	5.3	2.9	14.8	57.9	0.07
国槐	8.4	2.7	15.6	88.4	0.15
梓树	4.4	1.9	10.6	34.9	0.05
京桃	3.6	2.3	9.5	48.3	0.04
山皂荚	8.9	2.8	17.4	99.6	0.20
臭椿	6.4	3.1	15.1	64.5	0.17

4 讨论

4.1 不同树种单位叶面积 TSP、PM_{2.5} 的滞留量

植物叶片滞尘能力受到人类活动、环境因素以及植物本身形态特征的影响^[16]。在相同环境中的植物叶片滞尘量由植物的树冠高、树冠大小以及叶片结构特征来决定^[17]。因此不同绿化树种叶片滞留不同颗粒物的能力具有明显差异。本试验的 15 个绿化树种叶片单位叶面积 TSP 和 PM_{2.5} 滞留量平均值分别为 1.32, 0.18 g/m², 高出北京市区及哈尔滨市绿化树种单位面积滞尘量。谢滨泽等^[18] 研究显示, 北京市常见的 20 种绿化树种单位叶面积 TSP 和 PM_{2.5} 滞留量平均值分别为 1.09, 0.15 g/m²; 周蕴薇等^[19] 研究显示, 哈尔滨市 25 个绿化树种叶片平均滞尘量 0.63 g/m², 说明坐落在科尔沁沙地南缘, 降水量少、风沙大、气候干燥的阜新市的绿化树种经受着较严重的沙尘污染, 且绿化树种滞尘截留沙尘能力较强。

本试验结果表明, 15 个树种叶片对 TSP 的滞留量比例明显高于 PM_{2.5}, 且 15 个树种单位面积叶片对 TSP 滞留量随着不同功能区的排序几乎一致, 而各树种对 PM_{2.5} 的滞留量排序却随不同功能区的变化而产生无规律的变化。这可能是由于 TSP 中含有较多的较大颗粒物, 这些颗粒物更容易附着在植物叶片上, 受植物叶片形态的影响, 故呈现明显且有规律的差异; 而 PM_{2.5} 粒径较小, 重量较轻, 相较于大颗粒物可以在空气中停留更长时间, 随风漂浮距离较远^[20]。因此在不同地点上, 相同树种滞留 PM_{2.5} 可能受气象因素的影响较大, 在各区间滞尘量的大小无明显规律。

4.2 叶片滞留 TSP 和 PM_{2.5} 颗粒物随地点与高度的变化特征

植物在城市滞尘中有着不可替代的作用, 在不同地点, 由于其污染程度和环境气候特征具有显著差异, 迫使同一树种在不同地点或不同污染区滞尘能力存在差异性。本试验对比分析了同一树种叶片在不

同地点对 TSP 和 PM_{2.5} 的滞留量, 结果表明, 15 个树种叶片均在工业区滞留量最大, 原因可能是此区的浮尘可能包括输入性沙尘天气从城市外围区域吹到的沙尘颗粒物和本地区内部第二次扬起的地表灰尘和工业区排放的粉尘; 商业交通区滞留量次之, 原因可能是密集的交通流通、建筑施工和活跃的人类活动所致。程政红等^[21] 和戴斯迪等^[22] 研究也表明, 施工路段植物叶片滞尘量大于重度污染路段和风景区与庭院内路段; 另一个方面可能是由于繁荣街道的绿化带小于 5 m, 根据相关研究中表明欲实现交通绿化带明显的净化作用, 其宽度应不小于 5 m, 10 m 为最佳^[23]。

4 个功能区 15 个绿化树种叶片单位叶面积 TSP 和 PM_{2.5} 滞留量均表现为低处叶片高于高处叶片, 绿篱(低于 1 m) > 灌木(1~1.5 m) > 乔木(2~3 m)。这个结果与齐飞艳等^[24] 和王蕾等^[25] 研究指出了灌木树种的滞尘能力高于乔木的结果一样。但是在工业区、商业交通区差异较显著, 在露天矿区、清洁区差异并不显著。车辆行驶等人为活动的扰动, 即自身排放的污染物颗粒及地面灰尘的扬起使空中颗粒污染物浓度加大, 重力作用促使灰尘被低处叶片滞留, 而高处叶片更容易受到强风的影响, 使已滞留的灰尘降落于地面, 降低其滞尘量^[26], 同树种在敞开式环境下比封闭式环境下滞尘量更高^[27]。阜新市海州露天矿区和清洁区交通量低, 人为干扰较低, 城郊防护林和公共绿地有效地降低强风的干扰, 大致可视为封闭式环境。因此露天矿区和清洁区树种不同高度叶片滞留量无明显差异, 且清洁区滞留量相比其他区域最低。

4.3 叶片形态结构对滞留颗粒物的影响

谢滨泽等^[18] 认为叶片沟槽是捕集 TSP 和 PM_{2.5} 等颗粒物的主要部位。本试验的繁荣商业区 3 个乔木 3 个灌木叶片电镜扫描后发现, 叶表面沟槽纵横交错且分布较为密集的新疆杨的单位叶面积滞留 TSP 和 PM_{2.5} 量均最大, 而叶表面沟槽深度较浅的紫丁香与榆叶梅叶片滞留量较小; 叶表面沟槽最不密集且其宽度较大的银杏和叶表面沟槽较细小且深度较浅的榆树单位叶面积滞留 TSP 和 PM_{2.5} 等颗粒物量也较小。因此认为不同宽度和深度的沟槽会对不同粒径颗粒物产生的捕集效果不同。较深的沟槽可拦截较多颗粒物, 深度越大颗粒物脱落的可能性越小; 较浅的沟槽使叶片表面粗糙度较低, 因而捕集颗粒物量较小。单位叶面积滞留 PM_{2.5} 量较多的新疆杨、榆叶梅和紫丁香叶表面沟槽宽度均在 4 μm 左右, 其原因在于 PM_{2.5} 质量较小, 在空气中受到风力作用与其他颗粒物碰撞等因素影响, 运动状态较为复杂, 从而难以被准确滞留在宽度与其粒径相当的沟槽处。

比叶重可以反映叶片质地的厚薄与轻重, 比叶重

小,叶片较轻且质薄,容易随风抖动,影响叶面滞尘的稳定性,致使植物滞尘受外界环境(车辆行驶、气流和风)影响增大,滞尘能力弱,可将比叶重作为比较选取滞尘植物的指标之一^[28]。本研究中,不同绿化树种比叶重(x)与叶片滞尘能力(y)之间的幂函数关系最佳($P < 0.05$),表明其两者间存在明显的相关关系,即比叶重较大的植物滞尘能力较大。由此可知,比叶重的大小与滞尘能力的大小表现基本一致,这与前人的研究^[28]结果相一致。考虑到日常养护管理成本及滞尘量,建议在干旱半干旱区城市绿化应选择比叶重大的树种。

4.4 单株滞尘量差异

树种的生态指标,如树冠高度、宽度及枝下高都会影响单株总叶面积^[15],因而导致不同树种单株滞尘量的差异。本研究中,新疆杨单株滞尘量远高于其他树种。一方面,新疆杨叶片微观结构显示,叶表面粗糙起伏程度最大,分布有纵横交错的沟槽,而且叶表面均密生绒毛,绒毛也可帮助尘埃附着于叶片表面不易被风吹落;另一方面,试验树种当中新疆杨高大魁梧,树叶浓密(比叶重大),树冠饱满使其单株滞尘量也高出其他树种。本研究用任引^[15]经验公式估算单株总叶面积,由于研究区和树种的不同,导致结果有可能存在一定误差,在今后的研究当中要进一步完善。

5 结论

(1) 阜新市 15 种常见绿化树种滞留 TSP 和 $PM_{2.5}$ 的能力有显著差异。同树种在不同功能区 TSP 滞留量有显著差异(工业区 > 商业交通区 > 露天矿区 > 清洁区),而 $PM_{2.5}$ 滞留量则没有明显差异,说明与 $PM_{2.5}$ 相比,TSP 更易受外界环境干扰。

(2) 在工业区和商业交通区的滞尘量在不同高度叶片(绿篱 > 灌木 > 乔木)中差异显著,在海州露天矿和清洁区不同高度叶片滞尘量差异不显著。在同一个功能区不同树种单位叶面积滞留量差异受树冠高度和叶片结构(粗糙度、比叶重)等的影响。

(3) 依据 4 个功能区的不同树种单位叶面积滞留量进行聚类分析和单株滞尘量的结果得知,乔木中新疆杨,灌木中紫丁香的单位叶面积滞留量与单株滞尘量都较高,起到明显的降尘作用。因此,建议在沙尘频发的辽宁西北地区城市绿地规划时,在选择适合当地生长的树种的同时,应优先选择叶片特征滞尘能力强的树种,并进行乔木、灌木、绿篱(草)、藤本等植物类型的合理搭配,以便降低粉尘污染,提高城市生态环境。

参考文献:

[1] Bckett P, Freer-Smith P H, Taylor G. Effective tree species for local air-quality management[J]. Journal of Arboriculture, 2000, 26(1): 12-19.

- [2] Shen J C, Chen C, Duo K X, et al. Research on the concentration, element component and evaluation of ambient $PM_{2.5}$ in Zhengzhou[J]. Environmental Science & Technology, 2012, S2: 243-245.
- [3] Powe N A, Willis K G. Mortality and morbidity benefits of air pollution (SO_2 and PM_{10}) absorption attributable to woodland in Britain[J]. Journal of Environmental Management, 2004, 70(2): 119-128.
- [4] Patricia S V M, Teran L M. Air pollution: Impact and prevention[J]. Respirology, 2012, 17(7): 1031-1038.
- [5] Yan J, Lin L, Zhou W, et al. A novel approach for quantifying particulate matter distribution on leaf surface by combining SEM and object-based image analysis[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 173(4): 156-161.
- [6] Wang Z H, Li J B. Capacity of dust uptake by leaf surface of *Euonymus japonicus* Thunb. and the morphology of captured particle in air polluted city[J]. Ecology and Environment, 2006, 15(2): 327-330.
- [7] Wang B, Lu S W. Evaluation of economic forest ecosystem services in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(2): 417-425.
- [8] Litter P. Deposition of 2.75, 5.0 and 8.5 μm particles to plant soil surfaces[J]. Environment Pollution, 1977, 12: 293-305.
- [9] Verma V, Pakbin P, Cheung K L, et al. Physicochemical and oxidative characteristics of semi-volatile components of quasiultrafine particles in an urban atmosphere[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(4): 1025-1033.
- [10] Simkhovich B Z, Kleinman M T, Kloner R A. Air pollution and cardiovascular injury-epidemiology, toxicology, and mechanisms[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2008, 52(9): 719-726.
- [11] 刘璐,管东生,陈永.广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力[J].生态学报, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [12] 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].生态环境学报, 2014, 23(2): 271-276.
- [13] Schleicher N J, Norra S, Chai F, et al. Temporal variability of trace metal mobility of urban particulate matter from Beijing: A contribution to health impact assessments of aerosols[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(39): 7248-7265.
- [14] 王凯,朱教君,于立忠,等.遮阴对黄波罗幼苗的光合特性及光能利用效率的影响[J].植物生态学报, 2009, 33(5): 1003-1012.
- [15] 任引.遵义市城区行道树结构优化分析[D].南京:南京林业大学, 2005.
- [16] 赵勇,李树人,阎志平.城市绿地的滞尘效应及评价方法[J].华中农业大学学报, 2002, 21(6): 582-586.

- [2] 邓小华,张瑶,田峰,等.湘西植烟土壤 pH 和主要养分特征及其相互关系[J].土壤,2017,49(1):49-56.
- [3] 施河丽,向必坤,彭五星,等.调节植烟土壤酸度防控烤烟青枯病[J].中国烟草学报,2015,21(6):50-53.
- [4] 胡敏,向永生,鲁剑巍.石灰用量对酸性土壤酸度及大麦幼苗生长的影响[J].中国农业科学,2016,49(20):3896-3903.
- [5] 刘世全,张宗锦,王昌全,等.西藏酸性土壤的酸度特征[J].土壤学报,2005,42(2):211-218.
- [6] 邓小华,蔡兴,张明发,等.喀斯特地区湘西州植烟土壤 pH 分布特征及其影响因素[J].水土保持学报,2016,30(6):308-313.
- [7] 吴志丹,江福英,尤志明,等.亚热带茶园土壤酸度特征研究:以福建省武夷山市为例[J].中国环境科学,2016,36(1):181-189.
- [8] 吴士文,索炎炎,张峥嵘,等.南方茶园土壤酸化特征及交换性酸在水稳性团聚体中的分布[J].水土保持学报,2012,26(1):195-199.
- [9] 孙海东,刘备,吴炳孙,等.橡胶树人工林地土壤酸度特征及酸化原因分析[J].西北林学院学报,2016,31(2):49-54.
- [10] 杨甲华,张杨珠,高菊生,等.不同种植模式下丘岗红壤的酸性和交换性能研究[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2012,38(5):526-529.
- [11] 范庆锋,张玉龙,陈重,等.保护地土壤酸度特征及酸化机制研究[J].土壤学报,2009,46(3):466-471.
- [12] 周晓阳,徐明岗,周世伟,等.长期施肥下我国南方典型农田土壤的酸化特征[J].植物营养与肥料学报,2015,21(6):1615-1621.
- [13] 李玲,王继红,兰丽丽,等.长期施肥条件下土壤养分变化及其与土壤酸度的关系[J].吉林农业大学学报,2017,39(1):55-59.
- [14] 袁大刚,陈旋,孙健,等.川西 3 种茶园土壤的酸度和酸碱缓冲能力及石灰需要量比较[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2014,40(4):409-415.
- [15] 李阳,王继红.长期施肥土壤腐殖质变化及其与土壤酸度变化的关系[J].南京农业大学学报,2016,39(1):114-119.
- [16] 朱经纬,李志宏,刘青丽,等.石灰对酸化黄壤整治烟田土壤酸度的影响及其应用效果[J].中国土壤与肥料,2016(3):43-48.
- [17] 孙越,王继红,安羿衡,等.不同作物根茬对土壤酸度的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):220-225.
- [18] 施河丽,谭军,王兴斌,等.烟草秸秆生物有机肥对植烟土壤交换性盐基的影响[J].中国烟草科学,2015,36(4):80-84.
- [19] 邓小华,周米良,田茂成,等.湘西州植烟气候与国内外主要烟区比较及相似性分析[J].中国烟草学报,2012,18(3):28-33.
- [20] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [21] 张宗锦,刘世全,张世熔,等.西藏酸性土壤的分布和酸度特征[J].四川农业大学学报,2003,21(4):322-327.
- [22] 苏有健,王焯军,张永利,等.不同植茶年限茶园土壤 pH 缓冲容量[J].应用生态学报,2014,25(10):2914-2918.
- [23] 王富国,宋琳,冯艳,等.不同种植年限酸化果园土壤微生物学性状的研究[J].土壤通报,2011,42(1):46-50.
- [24] 尚斌,李德成,徐宜民,等.武陵山烤烟产区土壤有机质与 pH 特征研究[J].土壤通报,2015,46(3):590-596.
- [25] 陈玉蓝.四川省植烟土壤酸度特征及其影响因素研究[D].四川雅安:四川农业大学,2014.

(上接第 303 页)

- [17] 柴一新,祝宁,韩焕金.城市绿化树种的滞尘效应:以哈尔滨市为例[J].应用生态学报,2002,13(9):1121-1126.
- [18] 谢滨泽,王会霞,杨佳,等.北京常见阔叶绿化植物滞留 PM_{2.5} 能力与叶面微结构的关系[J].西北植物学报,2014,34(12):2432-2438.
- [19] 周蕴薇,田忠平,苏欣.哈尔滨市常见绿化树种叶表面形态与滞尘能力的关系[J].西北林学院学报,2017,32(1):287-292.
- [20] 张维康,王兵,牛香.北京市常见树种叶片吸滞颗粒物能力时间动态研究[J].环境科学学报,2016,36(10):3840-3847.
- [21] 程政红,吴际友,刘云国,等.岳阳市主要绿化树种滞尘效应研究[J].城市林业,2004,2(2):37-40.
- [22] 戴斯迪,马克明,宝乐.北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征[J].生态学报,2012,32(16):5095-5102.
- [23] 殷彬,蔡静萍,陈丽萍,等.交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化作用[J].生态学报,2007,27(11):4590-4595.
- [24] 齐飞艳,朱彦锋,赵勇,等.郑州市园林植物滞留大气颗粒物能力的研究[J].河南农业大学学报,2009,43(3):256-259.
- [25] 王蕾,高尚玉,刘连友,等.北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J].应用生态学报,2006,17(4):597-601.
- [26] 潘瑞,涂志华,李炎梅,等.人面竹等 10 种观赏竹冬季滞尘效应与规律研究[J].中国农学通报,2012,28(7):270-275.
- [27] 张景,吴祥云.阜新城区园林绿化植物叶片滞尘规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2012,30(6):905-909.
- [28] 王亚军,郁珊珊.厦门市常见园林树种滞尘效应及生态特性研究[J].西南农业学报,2016,29(8):1987-1992.