

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.010

5个园林树种滞尘能力与叶表形态及颗粒物粒径的关系

李海梅¹, 党宁^{1,2}, 禹靓倩², 张涵丹², 陈光才^{2*}

(1. 青岛农业大学林学与园林学院, 山东 青岛 266109; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要: [目的] 研究园林树种叶片滞尘能力与叶表结构及颗粒物特征的关系, 为筛选优良园林绿化树种、提高植被的滞尘效应提供科学依据。[方法] 以杭州市富阳区 5 个常见园林绿化树种 (红花檵木、海桐、红叶石楠、桂花和香樟) 为研究对象, 分别在工业区、交通区和清洁区进行采样, 采用质量差值法测定植物对不同粒径颗粒物的滞留能力, 利用扫描电镜及能谱仪观测植物叶表面结构、颗粒物形貌特征及所含元素, 分析叶片表面结构、颗粒物形态、粒径大小与植株滞尘能力的相互关系。[结果] 在工业区中绿化树种对总颗粒物的滞留量大小为: 红花檵木 ($7.36 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 桂花 ($6.53 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 海桐 ($6.44 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 红叶石楠 ($4.28 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 香樟 ($2.59 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 交通区和清洁区也呈现同样的规律。不同功能区绿化树种对 PM_{10} 的总滞留量达 $11.34 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 不同树种的滞留能力依次为红花檵木、海桐、红叶石楠、桂花和香樟。不同功能区内绿化树种对颗粒物的滞留量呈现工业区 > 交通区 > 清洁区的趋势; 植物叶片滞留的颗粒物形态可分为规则和不规则两类, 常见球形、椭圆形、蓬松状聚合体、链状聚合体、不规则块状、不规则片状等。[结论] 各功能区内, 均以红花檵木的滞尘量最大, 香樟的滞尘量最小; 叶片滞留颗粒物中粗颗粒物占比大于细颗粒物; 叶片滞留的颗粒物多为烟尘集合体和矿物颗粒。

关键词: 粒径; 颗粒物; 叶表面; 形貌特征

中图分类号: S731

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)04-0084-11

随着城市化和工业化进程的不断加快, 大气污染问题日益严重。据《2019 年中国生态环境状况公报》显示, 全国 337 个城市中, 有 53.4% 的城市空气质量超标, 累计发生严重污染 452 天次, 重度污染 1666 天次, 且超过 78.8% 的天数以 $\text{PM}_{2.5}$ 为主要污染物, 19.8% 以上天数以 PM_{10} 为主要污染物, 大气颗粒物已成为空气污染的首要污染物^[1-2]。空气中悬浮颗粒物聚集大量酸性氧化物、挥发性有机化合物、有毒重金属等, 会降低空气能见度和空气质量, 在沉降后也会对土壤、植物、水体等造成二次污染; 此外, 粒径较小的颗粒物还能通过皮肤暴露、呼吸道途径等, 进一步危害人体健康^[3-5]。

绿色植物成为缓解空气污染, 改善生态环境的首选方案。其茂密的枝冠, 能有效降低风速, 使得大气中部分颗粒物沉降下来, 并通过叶片固定和截留^[3,6], 减少颗粒物的移动和扩散, 提升空气质量, 此外还能发挥遮阴、泌氧、降噪等功能^[7]; 其叶片及花、果能绿化美化市容环境, 发挥较大的生态服务能力。

研究表明, 植物叶片的滞尘能力与植物叶表面特征、植物本身的结构以及所处的空间密切相关^[8]。如 Sabin 等发现具有绒毛、沟状凸起、粘液油脂或较短叶柄的叶片能吸附更多的 $\text{PM}_{2.5}$, 叶片越粗糙吸附的颗粒物越多^[9]; Zhang 等发现相较于阔叶树种, 针叶树的叶表面更粗糙、气孔排列密度更高,

收稿日期: 2021-03-01 修回日期: 2021-04-30

基金项目: 中央级公益性科研院所基金重点项目 (CAFYBB2019SZ001); 国家自然科学基金项目 (31971718)

* 通讯作者: 陈光才. E-mail: guangcaichen@sohu.com

滞留颗粒物的能力也更强^[10]。唐明发现不同生活型的植物滞尘能力由高到低依次为绿篱、落叶阔叶树、灌木、草本植物、落叶阔叶大乔木、落叶阔叶小乔木^[11]；植物叶片滞留颗粒物的能力还与所处的地理环境及气候条件密切相关。如小琴丝竹 (*Bambusa multiplex* cv. Alphonse-Karr) 在城市公园绿地的滞尘量高于城市广场绿地、城郊林区与城郊绿地,且冬季滞尘量最高,夏季或春季最低^[12]。植物叶片滞留的颗粒物呈现不同的形貌特征, Tomasevic 等通过表面扫描电镜-能谱联用 (SEM-EDAX) 分析发现,位于叶片两侧的颗粒物 50%~60% 均属于细颗粒物,这些颗粒物单个或聚集成各种团状,呈现球状、片状、不规则状^[13]；苏维在研究中发现,林木叶片滞留的大气颗粒物多为不规则形,有的颗粒物有较明显的棱角,也有的呈现云片状、长条状、絮状物等；少数颗粒物呈现规则的形状,如椭圆状和球状^[14]。

对于植物滞尘的研究,目前多集中于总颗粒物的滞留量,而对不同粒径颗粒物的定量分析较为缺乏,对植物滞留的颗粒物微观形貌特征及所含元素及来源的分析更不多见。从地域而言,我国对于植物滞留颗粒物的研究多集中于北京、青岛、天津、郑州等北方城市,针对长江三角洲城市群的重要城市如杭州市园林植物滞留能力的研究相对较少。本研究通过对浙江省杭州市富阳区不同功能区5个常见园林植物叶片及叶表面颗粒物进行研究,比较园林植物对不同粒径颗粒物滞留量的差异,分析颗粒物的形貌特征及污染物特征,探讨叶片滞尘能力与叶表结构及颗粒物特征的关系,以期为通过合理配置园林绿化植物来降低颗粒物污染、净化城市空气提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集

1.1.1 研究区域及采样地点 根据浙江省杭州市富阳区用地类型及植被分布情况,选择工业区 (119°55'46.455" E, 29°56'29.058" N)、交通区 (119°57'56.264" E, 30°3'39.347" N)、清洁区 (119°57'48.826" E, 30°3'52.596" N) 3个功能区 (图1) 展开研究。工业区位于富阳区中西线附近的环山工业区,此地集中多家再生铜冶炼企业,是富阳区主要工业产业之一,周围人流稀少,车流量相对较少;交通区位于大桥路附近,分布有学校、

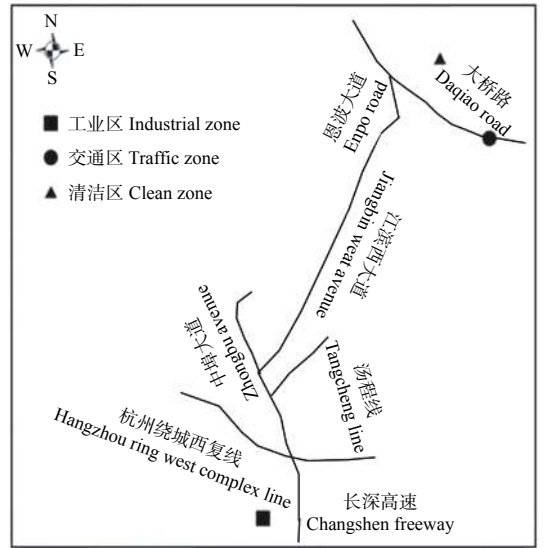


图1 研究区域及采样地点

Fig. 1 The study area and sampling sites

商铺和居民区,车流人流较大;清洁区位于中国林科院亚热带林业研究所院内,此地树木繁茂,车流人流较少,环境质量较好。

1.1.2 试验树种 在对研究区域植物种类开展调查的基础上,选择3个功能区共有的、生长状况良好的香樟 (*Cinnamomum camphora* (Linn.) Presl)、桂花 (*Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour)、红花檫木 (*Loropetalum chinense* (R. Br.) Oliver var. *rubrum* Yieh)、红叶石楠 (*Photinia* × *fraseri* Dress) 和海桐 (*Pittosporum tobira* (Thunb.) Ait) 5种典型常绿园林植物作为供试树种 (表1)。

1.1.3 采样方法 根据赵勇等研究结果,降雨量在15 mm以上、降雨强度达到 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 的降水,可冲刷掉叶片上的粉尘,然后重新滞尘,雨后第7天左右,植物叶片累积的颗粒物达到饱和状态^[15]。根据研究区的降雨特点,于2020年8月14日雨后7 d进行采样,天气良好,无风。选择生长良好,树高和冠幅近似的3株植株分别进行取样(植株高度约为2~2.5 m,植株间距约为3~5 m)。采取植株靠近道路侧,离地面1.5 m左右、无病害长势良好的叶片,用镊子或枝剪轻轻将叶片剪落至自封袋带回,放入实验室冰箱保存待测。

1.2 测定方法

1.2.1 滞尘量测定 采用质量差值法对叶片滞尘量进行测定^[16]。选取15片叶片放入烧杯中浸泡2 h,利用毛刷将叶表面的颗粒物洗刷到蒸馏水中,用镊子取出叶片自然晾干。将滞尘待测液依次用事先称

表1 供试树种的生物学特性

Table 1 Biological characteristics of tree species used in the experiment

树种 Tree species	科 Family	生活型 Life form	叶片特征 Leaf blade features
香樟 <i>C. camphora</i>	樟科 Lauraceae	乔木 Arbor	叶互生, 卵状椭圆形; 革质 Leaves alternate, ovoid ellipse; leathery
红花檵木 <i>L. chinense</i> var. <i>rubrum</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	灌木 Shrub	卵形; 革质 Ovate; leathery
桂花 <i>O. fragrans</i>	木犀科 Oleaceae	乔木 Arbor	叶椭圆形、长圆形或椭圆状披针形; 革质 Elliptic, oblong or elliptically lanceolate; leathery
红叶石楠 <i>Photinia</i> × <i>fraseri</i>	蔷薇科 Rosaceae	灌木 Shrub	长椭圆形或倒卵状椭圆形; 革质 Long elliptic or obovate-elliptic; leathery
海桐 <i>P. tobira</i>	海桐科 Pittosporaceae	灌木 Shrub	倒卵形; 革质 Obovate; leathery

质量的孔径为 10.0、2.5、0.2 μm 的亲水性滤膜进行抽滤, 可依次得到粒径大于 10 μm 、粒径大于 2.5 μm 小于 10 μm 、粒径小于 2.5 μm 的颗粒物, 抽滤后滤膜放入培养皿, 再在烘箱中 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量, 并称质量^[17]。两次滤膜质量之差为 Δm , 其为不同粒径范围颗粒物的质量, PM_{10} 的质量为孔径 2.5 μm 和 0.2 μm 的滤膜质量差值之和, $\text{PM}_{2.5}$ 为滤膜 0.2 μm 的滤膜质量差值, TSP 则为 3 个滤膜质量之差的总和。叶片晾干后, 用 Epson Perfection V700 Photo 扫描仪扫描叶片, 再用 WinRHIZO Pro2005b (加拿大 Regent Instruments 公司) 根系分析系统测量叶面积 S , 则 $\Delta m/S$ 为不同粒径范围颗粒物的单位叶面积滞留量。

1.2.2 叶片表面结构测定 将清洗后的叶片放入烘箱中, 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量, 随机选择叶片, 并选取靠近叶脉两侧约 5 mm × 5 mm 的 2 个正方形叶片, 选取一片观察叶片上表面, 另一片观察叶片下表面。将裁剪好的叶片用导电胶粘在样品台上, 进行喷金处理。处理好的样品放入扫描电镜 (飞纳/Phenom Pro) 中观察。

1.2.3 颗粒物特征及元素分析 用导电胶沾取烘干后滤膜上不同粒径的颗粒物, 放入样品台进行喷金处理。将处理好的样品放入扫描电镜 (飞纳/Phenom Pro) 中观察, 调整电镜观测的倍数、亮度、对比度、焦距, 直至图片清晰并保存。在扫描电镜观测颗粒物的基础上利用能谱仪 (飞纳/Phenom Pro) 同时进行颗粒物元素分析。

1.3 数据处理

应用 DPS7.05 统计软件对植物叶片滞尘量进行单因素方差分析, 采用 LSD 进行多重比较, 分析不同处理之间的差异, 显著性差异水平为 $\alpha = 0.05$ 。图表用 Excel 2020 绘制。

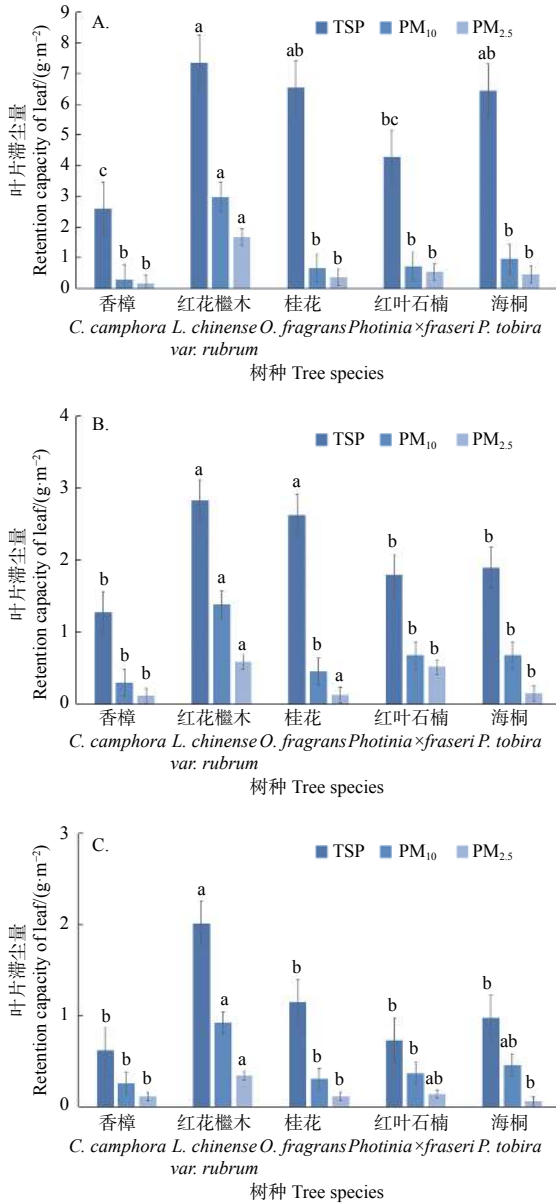
2 结果与分析

2.1 不同绿化树种叶片滞留颗粒物的能力差异

由图 2A 可知, 工业区不同树种对于总颗粒物 (TSP) 的滞留量差异显著, 滞留量从大到小依次为: 红花檵木 (7.36 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、桂花 (6.53 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、海桐 (6.44 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、红叶石楠 (4.28 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 和香樟 (2.59 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), 红花檵木的滞尘量约为香樟的 2.8 倍, 且具有显著性差异 ($P < 0.05$)。各树种对于 PM_{10} 的滞留量大小依次为: 红花檵木 (2.98 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 海桐 (0.96 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 红叶石楠 (0.72 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 桂花 (0.67 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > 香樟 (0.30 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), 其中红花檵木的滞尘量近乎为香樟的 10 倍。各树种对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的滞留量大小依次为: 红花檵木 (1.68 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、红叶石楠 (0.55 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、海桐 (0.46 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、桂花 (0.36 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) 和香樟 (0.16 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。

图 2B 为交通区, 不同树种对于不同粒径颗粒物的滞留量与工业区相似: 对总颗粒物滞留量、 PM_{10} 的滞留量以及 $\text{PM}_{2.5}$ 的滞留量均以红花檵木最高, 香樟最低, 其含量分别为 2.83 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、1.28 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; 1.39 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 和 0.30 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$; 0.59 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、0.12 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。在清洁区中 (图 2C), 各树种对于总颗粒物、 PM_{10} 的滞留量顺序与工业区和交通区相同, 而对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的滞留量大小顺序略有差异。清洁区不同树种对于 $\text{PM}_{2.5}$ 的滞留量大小顺序为: 红花檵木 (0.25 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、红叶石楠 (0.14 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、桂花 (0.114 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、香樟 (0.113 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、海桐 (0.06 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$), 其中红花檵木滞留量最大, 海桐最少, 具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

由图 3 可知, 同一树种在不同污染条件下, 对于不同粒径的滞留量具有显著差异 ($P < 0.05$), 不论是总颗粒物还是 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$, 均呈现为工业



A: 工业区; B: 交通区; C: 清洁区 注: 不同小写字母表示同一指标下 (TSP、PM₁₀、PM_{2.5}) 不同植物滞尘量之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

A: Industrial zone; B: Transport zone; C: Clean zone Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences in the amount of dust retention of different plants under the same index (TSP, PM₁₀, PM_{2.5}) ($P < 0.05$).

图2 同一功能区5种园林植物叶片滞留颗粒物的能力差异
Fig. 2 The retention capacity of different species to particle in same region

区 > 交通区 > 清洁区。工业区树种对于 TSP 的总滞留量达 $27.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 交通区和清洁区分别为 10.42 、 $5.48 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 工业区树种的总滞尘量是清洁区的近 4.96 倍, 具有显著性差异 ($P < 0.05$)。海桐对于 TSP 的滞留量在不同功能区的差异最大,

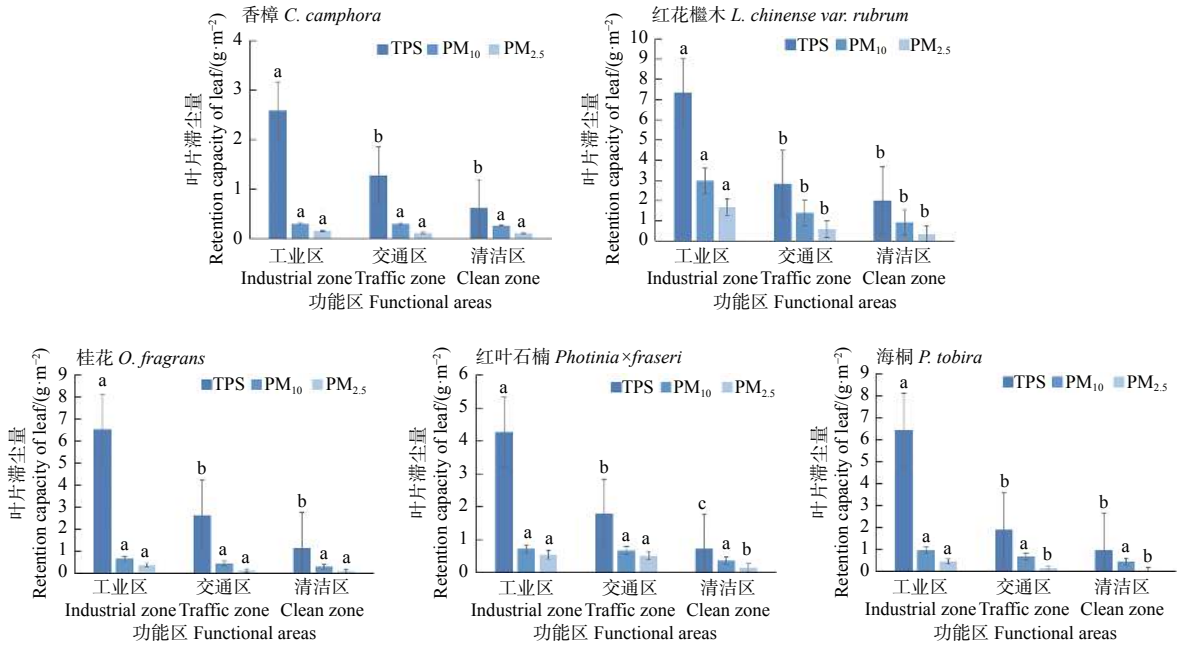
在工业区的滞留量是清洁区的近 6.63 倍。红花檵木对于 PM₁₀ 的滞留量在不同功能区差异最大, 在不同功能区的滞留量分别为 2.98 、 1.39 、 $0.92 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在不同功能区不同树种对于 PM_{2.5} 的总滞留量分别为 3.21 、 1.50 、 $0.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 海桐的差异最大, 工业区的滞留量是清洁区的 7.49 倍。

2.2 不同绿化树种叶片滞留颗粒物的粒径差异

不同功能区中同一树种滞留的同一粒径颗粒物所占总颗粒物的比值存在较大差异 (表 2)。不同树种对于不同粒径颗粒物的滞留比值均大致呈现同样的规律, 从大到小依次为: 粒径 $d > 10 \mu\text{m}$ 、粒径 $2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 、粒径 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 。各树种滞留粒径 $d > 10 \mu\text{m}$ 颗粒物的比值在不同污染条件下均大于 50.00%, 其中桂花叶片滞留粒径 $d > 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物占比最高, 为 90.00%, 红花檵木叶片滞留的该类颗粒物占比最小, 为 59.67%。不同树种对于粒径 $2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 颗粒物滞留量占比约为 10.00%~47.98%。不同树种滞留粒径 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 颗粒物的比值均小于 30.00%, 其中最小的为桂花叶片滞留的此类颗粒物, 为 5.18%。不同功能区的粒径 $d > 10 \mu\text{m}$ 颗粒物总量占比依次为 85.22%、69.21%、60.32%, 呈现为工业区 > 交通区 > 清洁区; 粒径 $2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 颗粒物总量占比与粒径 $d > 10 \mu\text{m}$ 颗粒物总量占比相反, 依次为 14.85%、69.21%、60.32%。由此可知, 香樟、红花檵木、桂花、红叶石楠和海桐滞留粗颗粒物的比值较大, 滞留细颗粒物的比值较小。

2.3 不同绿化树种叶表面结构特征

不同植物的叶表形貌在气孔大小、叶面绒毛、叶面分泌物等存在差异, 这些差异对于植物的滞尘能力有一定的影响^[11, 18]。通过电镜扫描可见, 香樟叶片表面较为光滑, 上表面和下表面细胞结构较为明显, 无明显褶皱, 且气孔密度较小, 气孔开口较小, 其对于不同粒径颗粒物的滞留量均较小 (图 4A、B); 红花檵木上表面褶皱明显, 能明显观测到滞留的颗粒物, 下表面能明显观测到大绒毛, 且气孔密度大, 其对于不同粒径的颗粒物滞留量均最大 (图 4C、D); 桂花上表面褶皱明显, 下表面能观测到沟状组织, 气孔密度大, 对于颗粒物的滞留量较大 (图 4E、F); 红叶石楠上表面有浅线状凸起, 下表面气孔密度较大, 开口较小, 对于不同粒径颗粒物的滞留量均较大 (图 4G、H); 海桐上表面具有蜡质层, 褶皱明显, 沟壑较多, 下表面气孔密度大, 对于不同粒径颗粒物的滞留量也



注：不同小写字母表示同一指标下 (TSP、PM₁₀、PM_{2.5}) 不同植物滞尘量之间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate that there are significant differences in the amount of dust retention of different plants under the same index (TSP, PM₁₀, PM_{2.5}) ($P < 0.05$).

图3 不同功能区同一树种对颗粒物的滞留能力差异

Fig. 3 The retention capacity of greening species to particle in different polluted environment

表2 叶片滞留颗粒物粒径分布比例

Table 2 The ratios of particles differed in size to total particulate matter attached to the leaves

树种 Tree species	工业区 Industrial zone			交通区 Transport zone			清洁区 Clean zone		
	$d > 10 \mu\text{m}/\%$	$2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}/\%$	$d \leq 2.5 \mu\text{m}/\%$	$d > 10 \mu\text{m}/\%$	$2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}/\%$	$d \leq 2.5 \mu\text{m}/\%$	$d > 10 \mu\text{m}/\%$	$2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}/\%$	$d \leq 2.5 \mu\text{m}/\%$
香樟 <i>C. camphora</i>	88.33	11.67	6.41	76.60	23.40	9.10	58.44	41.56	18.04
红花檵木 <i>L. chinense var. rubrum</i>	59.67	40.33	22.38	52.02	47.98	21.60	55.49	44.51	15.73
桂花 <i>O. fragrans</i>	90.00	10.00	5.18	82.99	17.01	5.00	69.95	30.05	10.00
红叶石楠 <i>Photinia x fraseri</i>	82.90	17.10	12.99	62.25	37.75	28.97	52.19	47.81	18.10
海桐 <i>P. tobira</i>	85.05	14.95	7.30	63.81	36.19	7.86	55.99	44.01	6.68

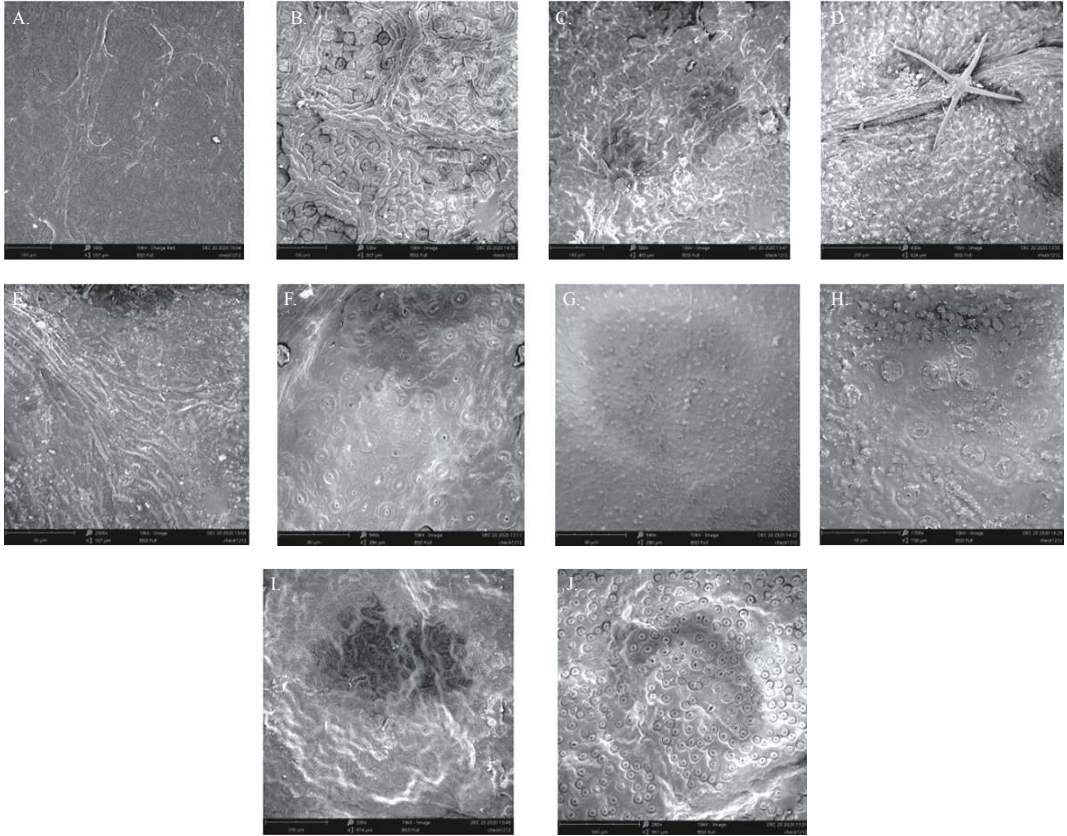
相对较大 (图 4I、J)。5 个园林树种的叶片表面结构特征列于表 3。

2.4 叶片滞留颗粒物的微观形貌特征

由图 5 可见, 绿化树种叶片表面滞留的不同粒径颗粒物总形貌特征有很大差异, 粒径 $d > 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物多为不规则块状颗粒物, 粒径较大, 能清楚地观测到每个颗粒物的形貌特征; 粒径 $2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物常见规则和不规则的块状颗粒, 在扫描电镜下能清楚地观测到其棱角。粒径 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒

物, 粒径较小, 不易观测到具体的形貌特征, 但大多为不规则的块状细颗粒。

在扫描电镜下, 叶片滞留颗粒物主要分为规则状和不规则状 (图 6)。不规则状的颗粒物大多与自然界的岩石、砂砾等有相似的形状, 棱角分明, 其中不规则的颗粒物多为蓬松状聚合物、链状聚合物, 不规则块状、不规则片状。规则的颗粒物多为球状、椭圆状、柱状。图 6A 为不规则的块状, 棱角分明, 表面光滑, 能谱图显示主要成分为 C、



A, B: 香樟叶上、下表面; C, D: 红花檵木叶上、下表面; E, F: 桂花叶上、下表面; G, H: 红叶石楠叶上、下表面; I, J: 海桐叶上、下表面
 A, B: Upper and lower leaf surface of *C. camphora*; C, D: Upper and lower leaf of *L. chinense* var. *rubrum*; E, F: Upper and lower leaf of *O. fragrans*; G, H: Upper and lower leaf of *Photinia x fraseri*; I, J: Upper and lower leaf surface of *P. tobira*

图4 叶表面扫描图像

Fig. 4 Leaf surface scanning images of different tree species

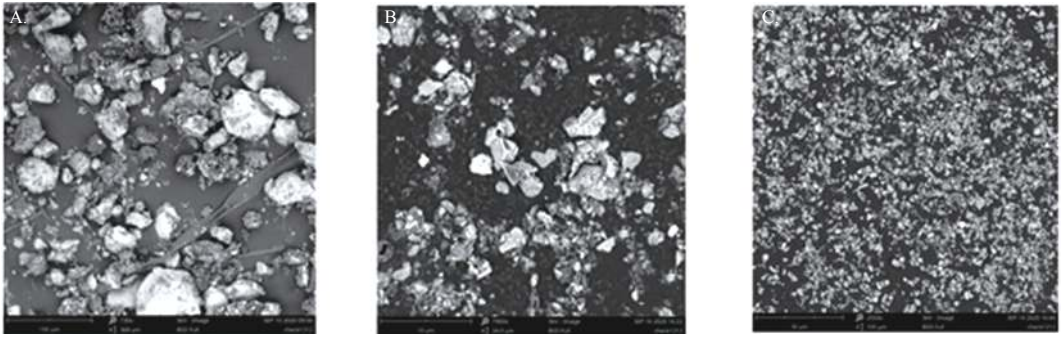
表3 5个园林树种的叶表面特征

Table 3 Leaf surface characteristics of 5 tree species

树种 Tree species	叶表面结构特征 Leaf surface characteristics		滞尘量 Amount of dust
	叶表皮上表面 Upper blade surface	叶表皮下表面 Lower blade surface	
香樟 <i>C. camphora</i>	无明显褶皱, 较平滑 No obvious fold, relatively smooth	气孔密度较小, 有浅沟槽 Small stomatal density, shallow groove	较小 Smaller
红花檵木 <i>L. chinense</i> var. <i>rubrum</i>	高低起伏明显, 有明显褶皱, 吸附有大量颗粒物 Obvious ups and downs, obvious fold, mass particulate matter	有大绒毛, 气孔密度大, 气孔开口较大 Big nap, stomatal density, large pore opening	最大 Maximum
桂花 <i>O. fragrans</i>	褶皱明显, 吸附大量颗粒物 Fold obvious, mass particulate matter	沟状组织, 气孔密度大, 气孔开口较小 Grooved tissue, stomatal density, small pore opening	较大 Larger
红叶石楠 <i>Photinia x fraseri</i>	有浅线状凸起, 无明显褶皱 Shallow linear bulge, no obvious fold	气孔密度较大, 气孔开口较小 Stomatal density, small pore opening	较大 Larger
海桐 <i>P. tobira</i>	有蜡质层, 有明显的褶皱, 沟壑密集 Waxy layer, obvious fold, dense gullies	气孔密度大, 气孔开口较小 Stomatal density, small pore opening	较大 Larger

O、Si元素, 属于矿物颗粒, 极有可能为石英颗粒。图6B为不规则的片状, 成层, 表面光滑, 主要含有C、O、Si、Al等元素, 少量含有Fe、Mg等元素, 属于矿物颗粒, 可能为硅酸盐颗粒。图6C、D为蓬松状聚合体和链状聚合体, 是烟尘

集合体最常见的两种形态, 其主要含有O、C、Si、Ca等元素。图6E为柱状矿物颗粒物, 表面光滑, 附有微小颗粒, 主要有O、C、Si等元素, 属于石英颗粒物。图6F为球形颗粒, 属于高温燃烧后的飞灰颗粒, 表面光滑, 主要含有C、O、Si、

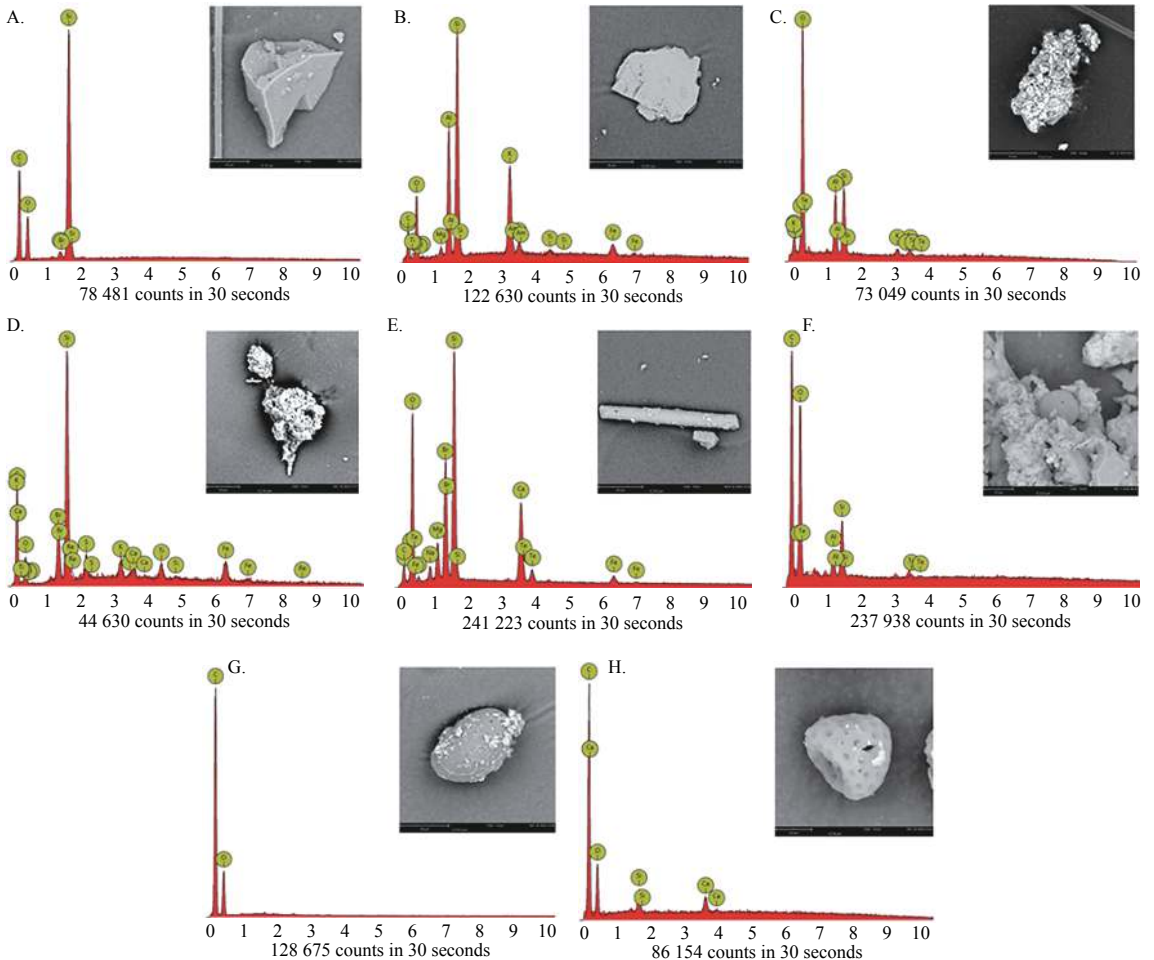


A: 粒径 $d > 10 \mu\text{m}$; B: 粒径 $2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$; C: 粒径 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$

A: Particle size $d > 10 \mu\text{m}$; B: Particle size $2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$; C: Particle size $d \leq 2.5 \mu\text{m}$

图5 不同粒径颗粒物的总体形貌

Fig. 5 General morphologies of particles with different particle sizes



A: 不规则块状; B: 不规则片状; C: 蓬松状聚合物; D: 链状聚合物; E: 柱状; F: 球形; G: 椭圆形; H: 蜂窝状

A: Irregular block; B: Irregular sheet; C: Fluffy polymer; D: Chain polymerization; E: Columnar; F: Spherical; G: Oval; H: Honeycomb

图6 单个颗粒物的微观形貌及能谱图

Fig. 6 The microscopic morphology and energy spectrum of single particulate matter

Al 等元素。图 6G 为椭圆形颗粒物，主要含有 C、O 元素，可能属于生物颗粒。图 6H 呈现蜂窝状，与自然界中花粉颗粒极为相似，其中含有 C、O 及

少量 Ca、Si 元素，属于生物颗粒。由此可知，绿化树种滞留的颗粒物主要为生物颗粒、矿物颗粒、飞灰颗粒、烟尘集合体 4 种（表 4）。

表4 叶片滞留的单个颗粒物形貌及组分特征

Table 4 Morphological characteristics and chemical composition of residual single particles in blades

图6图片编号 Number	颗粒类型 Particle classification	物理特征 Physical characteristics	相对组成 Elementary composition
A	矿物颗粒 Minerals particles	不规则的块状, 棱角分明, 表面光滑 Irregular blocky, angular, smooth surface	主要含有C、O、Si元素 Mainly contains C, O and Si elements
B	矿物颗粒 Minerals particles	不规则的片状, 成层, 表面光滑 Irregular sheet, layered, smooth surface	主要含有C、O、Si、Al等元素, 少量含有Fe、Mg等元素 Mainly contains C, O, Si, Al, and small amount of Fe, Mg and other elements
C	烟尘集合体 Soot aggregates	蓬松状聚合体 Fluffy polymer	主要含有O、C、Si、Ca等元素 Mainly contains O, C, Si, Ca and other elements
D	烟尘集合体 Soot aggregates	链状聚合体 Chain polymerization	主要含有O、C、Si、Ca等元素 Mainly contains O, C, Si, Ca and other elements
E	矿物颗粒 Minerals particles	柱状, 表面光滑, 表面附有微小颗粒 Column, smooth surface, surface with tiny particles	主要含有O、C、Si等元素 Mainly has O, C, Si and other elements
F	飞灰颗粒 Fly ash particles	球形, 表面光滑 Spherical shape, smooth surface	主要含有C、O、Si、Al等元素 Mainly has C, O, Si, Al and other elements
G	生物颗粒 Biological particles	蜂窝状 Honeycomb	主要含有C、O Mainly has C, O
H	生物颗粒 Biological particles	椭圆形, 表面附有微小颗粒 Oval, surface with tiny particles	含有C、O及少量Ca、Si元素 Mainly contains C, O and other elements, and small amount of Ca, Si and other elements

3 讨论

3.1 植物叶片表面特征与滞尘量的关系

本研究中发现, 研究区不同功能区植物的滞尘能力大小顺序为: 红花檵木、桂花、海桐、红叶石楠和香樟。不同植物叶片滞留大气颗粒物的能力有差异, 其中最重要的影响因素就是植物叶表面结构。植物叶表面凸起的凹槽、气孔、沟槽和绒毛等增大了叶表面的粗糙程度, 使其能够附着更多大气颗粒物, 相反植物叶片表面较为光滑, 不能够牢固黏附颗粒物, 滞留的颗粒物相对较少^[19]。本研究红花檵木叶表面具有大绒毛, 上表面有明显褶皱, 这些叶表面结构增加了叶表面的粗糙度, 使红花檵木对于颗粒物的滞留能力增强, 在不同功能区红花檵木滞尘能力均为第一; 相反地, 香樟叶片表面较平滑, 无明显褶皱, 不易黏附固定颗粒物, 因而香樟在不同功能区滞尘能力均最弱; 红叶石楠叶表面有浅线状的凸起和褶皱, 桂花有沟状组织, 这些微结构增加了叶表面的粗糙度, 因此红叶石楠和桂花的滞尘能力也相对较大。气孔密度及开口程度也是决定植物滞留颗粒物能力的一个重要因素, 扫描电镜观察下, 气孔及周围黏附了大量颗粒物, 气孔具有保卫细胞、副卫细胞等结构, 这些细胞间的构造为颗粒物的嵌入提供了条件, 气孔密度越大, 开口越大, 对颗粒物的阻滞作用越明显^[20]。王建辉等在研究中发现, 不同植物滞留总颗粒物的大小顺序

为: 红花檵木 > 麦冬 (*Ophiopogon japonicus* (L. f.) Ker-Gawl.) > 小叶榕 (*Ficus concinna* Miq.) > 红叶石楠 > 桂花 > 山茶 (*Camellia japonica* L.) > 女贞 (*Ligustrum lucidum* Ait.) > 八角金盘 (*Fatsia japonica* (Thunb.) Decne. et Planch.) > 广玉兰 (*Magnolia grandiflora* L.) > 海桐 > 黄角兰 (*Michelia alba* DC. Syst.) > 冬青 (*Ilex chinensis* Sims) > 银杏 (*Ginkgo biloba* L.) > 迎春 (*Jasminum nudiflorum* Lindl.), 其中最高为红花檵木 $12.36 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 最低为迎春 $2.09 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[21], 与本文研究结果基本一致。

本研究中同一树种叶片滞留的颗粒物总量呈现工业区 > 交通区 > 清洁区的趋势。这说明空气质量越差, 空气中悬浮的颗粒物就越多, 植物对颗粒物的滞留量就越大, 工业区多为炼铜等重工业, 污染气体排放等使该地区空气质量较差, 而清洁区植物数量多, 且远离污染区, 空气质量较高, 因此工业区的植物对颗粒物的滞留量大于清洁区。外界环境能影响植物的叶表面结构, 空气污染较大的环境下, 植物的绒毛会变长, 叶片的纹理变得粗糙, 植物叶表面粗糙度变大, 更利于植物黏附固定大气中的颗粒物, 因此处于空气质量较差条件下的植物滞留颗粒物的能力更强^[22-23], 这也与本研究中工业区植物的滞尘能力大于清洁区结论相一致。刘威等对浙江台州植物滞尘能力的研究表明, 不同功能区同一植物单位叶面积滞尘量工业区最多, 城市道路次

之,文教区最少^[24];罗佳等在研究中发现植物对PM_{2.5}的滞留量与空气质量呈正相关,全年PM_{2.5}滞留量工业区>文教区>清洁区^[23],与本研究结果一致。

3.2 颗粒物粒径与叶片滞尘能力的关系及颗粒物的形貌特征

植物叶片滞留颗粒物的粒径分布是衡量植物空气净化能力的重要指标^[25]。研究表明,颗粒物形态、沉降特性、化学特性等与粒径密切相关,因此,精准获取植株叶片对某一粒径颗粒物的滞留信息,可为大气污染治理、植株筛选等提供有力支撑^[26]。本研究采用质量差值法发现各植株叶片滞留的颗粒物均以粗颗粒物($d > 10 \mu\text{m}$)为主,其次为粒径 $2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物,粒径 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物(PM_{2.5})占比最少。初步推测可能与采样的树种多为灌木,距离地面较低,与土壤扬尘有关,土壤扬尘多为粗颗粒物,低矮的植物更容易吸附此类大气颗粒物。粒径越大的颗粒物越容易下沉吸附在叶片表面,而粒径越小,在空气中悬浮的时间就越久,也更容易受风力的影响^[27],因此植物滞留的粗颗粒物总量大于细颗粒物的总量。郑铭浩发现各类型绿地环境下树种对粒径大于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物的滞留量均高于粒径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒物,且植物叶片吸附的空气颗粒物中粒径 $d \leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物占比不到50%,粒径 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物占比不足20%^[28],与本研究结论相似。

另外,本研究发现植物滞留总颗粒物的能力与滞留不同粒径颗粒物的能力并不一致,在不同功能区中植物滞留总颗粒物的能力为红花檵木>桂花>海桐>红叶石楠>香樟;对于PM₁₀滞留量呈现为红花檵木>海桐>红叶石楠>桂花>香樟;对于PM_{2.5}的滞留量大致呈现为红花檵木>红叶石楠>海桐>桂花>香樟。红花檵木对于不同粒径颗粒物的吸附能力均最强,香樟对于不同粒径颗粒物的吸附能力均最弱。桂花的总滞留量在本研究中排第二,但对于PM_{2.5}的滞留量却为第四,而红叶石楠的总滞留量在本研究中排第四,但对于PM_{2.5}的滞留量却排第二。桂花对于粒径较大的颗粒物吸附能力较强,对于粒径较小的颗粒物吸附能力较差;红叶石楠对于粒径较小的颗粒物吸附能力较强,对于粒径较大的颗粒物吸附能力较差,这表明植物对总颗粒物的滞留能力不能代表对于各粒径的滞留能力。这可能与植物叶表面的粗糙度、气孔密度和开口大

小、绒毛密度、分布特征以及植物所处的环境、大气颗粒物的污染程度有一定的关系。王琴等研究表明,PM₁₀滞留能力最强的是二球悬铃木(*Platanus acerifolia* (Aiton) Willdenow),最弱的是栎树(*Koelreuteria paniculata* Laxm.)、构树(*Broussonetia papyrifera* (Linnaeus) L'Heritier ex Ventenat)和广玉兰(*Magnolia grandiflora* L.);滞留PM_{2.5}能力最强的是石楠、桂花、二球悬铃木和广玉兰,最弱的是玉兰(*Magnolia denudata* Desr.),植物总颗粒物的滞留能力与各粒径的滞留能力有所不同^[29],也与本研究研究结果一致。

此外,大气颗粒物的形貌特征能够为确定颗粒物的来源提供一定帮助^[30]。本研究发现植物滞留的颗粒物形貌特征主要分为规则和不规则两类,不规则的块状、片状在每个功能区都大量存在,而不规则烟尘集合体多集中在工业区和交通区,清洁区相对较少,规则的球形飞灰颗粒在工业区较为常见。在不同粒径的观测中烟尘集合体都存在,其多为链状聚合体和蓬松状聚合体,主要含有O、C、Si、Al、Ca等元素,这类颗粒物来自于机动车辆尾气的排放和石化燃料燃烧,在交通区该类颗粒物较为常见。飞灰颗粒在不同的粒径观测中较常发现,飞灰颗粒的粒径范围很广,从几纳米到几百纳米都可存在^[31],飞灰颗粒是高温燃烧后产生的颗粒物,主要是来自于工业排放,这也与在工业区的颗粒物观测中发现较多的飞灰颗粒相吻合。不规则的块状、层状等矿物颗粒粒径都较大,主要含有Si、Al等典型地壳元素,所以此类颗粒物多来自于土壤扬尘,在不同的功能区较为常见。由此推测不同功能区颗粒物的来源有所不同,并与该区域的环境特征相吻合。工业区化石燃料的燃烧、工业排放、重型汽车的运输及裸露的植被导致该区域的大气颗粒物主要来自于道路扬尘、汽车尾气、工业排放;交通区车流量大,汽车尾气的排放导致大气颗粒物的来源多为道路扬尘、汽车尾气;清洁区由于车流人流较少,植被丰富,大气中的颗粒物多为道路扬尘。徐宗泽等在研究中发现工业区的颗粒物多为烟尘集合体、飞灰颗粒和矿物颗粒,而商业区和科技生活区多为烟尘集合体,少见矿物颗粒^[32],与本研究结论相似。

4 结论

(1) 研究区5个常见园林绿化树种中,红

花檵木滞留颗粒物的能力最强,其次为桂花、红叶石楠、海桐,最差的为香樟。植物对不同粒径的滞留能力呈现粒径 $d > 10 \mu\text{m} > \text{粒径}_{2.5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}} > \text{粒径}_{d \leq 2.5 \mu\text{m}}$ 的规律。

(2)叶表面形态对于植物滞留颗粒物的能力有重要影响,叶表面具有绒毛、沟槽、凸起、蜡质层及气孔密度大等结构特征的植物,其叶表面粗糙度较大,对颗粒物的滞留能力也较强。

(3)叶片滞留的颗粒物多为烟尘集合体和矿物颗粒,其来源多为工业排放、汽车尾气、土壤扬尘。不同功能区植物对颗粒物的滞留量呈现工业区 > 交通区 > 清洁区的趋势。

参考文献:

- [1] 代嘉慧,孙方,徐慧,等.杭州市常见绿化乔木滞尘能力分析[J].南方农业,2018,12(12):164-166.
- [2] 齐莉娜.雨水花园——雨水利用的生态性策略[J].城市地理,2015,(22):210.
- [3] 周健,吴宇,张林菁,等.保定市常见灌木滞尘能力研究[J].林业与生态科学,2019,34(1):114-120.
- [4] 陈锦旋.厦门市常见绿化常绿阔叶树种的滞尘能力[J].福建林业科技,2014,41(2):57-60.
- [5] 赵娜,李玉洁,曹月娥,等.干旱区露天煤矿粉尘污染对白榆和梭梭叶绿素荧光参数的影响[J].西南农业学报,2019,32(5):1016-1022.
- [6] Zheng G, Li P. Resuspension of settled atmospheric particulate matter on plant leaves determined by wind and leaf surface characteristics[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(19): 19606-19614.
- [7] 林星宇,李海梅,李彦华,等.园林植物滞尘效益研究进展[J].江西农业学报,2018,30(10):28-31.
- [8] 张诚,宋雨,吴慧,等.行道树滞尘能力研究综述[J].现代农业科技,2018,(8):144-146.
- [9] Sabin L D, Lim J H, Venezia M T, et al. Dry deposition and resuspension of particle-associated metals near a freeway in Los Angeles[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(39): 7528-7538.
- [10] Zang W K, Wang B, Niu X. Study on the adsorption capacities for airborne particulates of landscape plants in different polluted regions in Beijing (China)[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015, 12(8): 9623-9638.
- [11] 唐明.工矿区主要园林植物滞尘效应研究——以唐钢文化广场绿地为例[J].安徽农业科学,2018,46(10):78-81.
- [12] 侯贻菊,丁访军,刘延惠,等.贵阳市常见园林绿化植物琴丝竹滞尘能力研究[J].贵州林业科技,2018,46(1):14-18.
- [13] Tomaevi M, Vukmirovi Z, Raji S, et al. Characterization of trace met-

al particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area[J]. Chemosphere, 2005, 61(6): 753-760.

- [14] 苏维.南昌市PM_(2.5)和PM₍₁₀₎的时空分布特征与城市森林阻抗机制[D].南昌:江西农业大学,2017.
- [15] 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.
- [16] 曹旖旎,吴灏,沈立铭,等.城镇绿化树种叶片滞尘与重金属吸收能力——以浙江省余姚市泗门镇为例[J].林业科学研究,2016,29(5):662-669.
- [17] 王黎华.杭州市八种园林植物滞留大气颗粒物能力差异研究[D].杭州:浙江农林大学,2019.
- [18] 李艳梅,陈奇伯,王邵军,等.昆明市主要绿化树种叶片滞尘能力的叶表微形态学解释[J].林业科学,2018,54(5):18-29.
- [19] 屈新运,张天翼,高天娥,等.10种常绿植物滞留大气颗粒物能力与叶表面微结构的关系[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2019,47(03):84-90.
- [20] 张鹏骞,朱明溟,刘艳菊,等.北京路边9种植物叶片表面微结构及其滞尘潜力研究[J].生态环境学报,2017,26(12):2126-2133.
- [21] 王建辉,刘奕清,邹敏.永川城区主要绿化植物的滞尘效应[J].环境工程学报,2013,7(3):1079-1084.
- [22] Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad K J, et al. Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution?[J]. Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants, 2002, 197(1): 47-55.
- [23] 罗佳,周小玲,田育新,等.长沙市不同污染程度区域桂花和香樟叶表面PM_(2.5)吸附量及其影响因素[J].应用生态学报,2019,30(2):503-510.
- [24] 刘威,陈珍,李孝乾,等.台州椒江不同植物滞尘能力分析[J].台州学院学报,2018,40(6):30-37,49.
- [25] Przybyz A, Sæbo A, Hanslin H, et al. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time[J]. Science of The Total Environment, 2014, 481: 360-369.
- [26] Song Y S, Maher B A, Li F, et al. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution[J]. Atmospheric Environment, 2015, 105: 53-60.
- [27] 张维康,王兵,牛香.北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力[J].环境科学,2015,36(7):2381-2388.
- [28] 郑铭浩,方文,马立辉,等.重庆市主城区常见乔木树种叶片滞纳空气颗粒物功能研究[J].林业调查规划,2017,42(1):25-31.
- [29] 王琴,冯晶红,黄奕,等.武汉市15种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征[J].生态学报,2020,40(1):213-222.
- [30] 鲁斯唯,林婷,李森琳,等.厦门城区秋季不同粒径大气颗粒物的微观形貌分析[J].厦门大学学报:自然科学版,2015,54(2):216-223.
- [31] 邵龙义,杨书申,时宗波,等.城市大气可吸入颗粒物物理化学特性及生物活性研究[M].北京:气象出版社,2006.
- [32] 徐宗泽,代群威,王岩,等.大气颗粒物中颗粒微观形貌特征及其矿物组成分析[J].化工矿物与加工,2019,48(9):55-58.

The Relationships between the Dust-holding Capacity and the Leaf Surface Structure & Particle Size in Five Evergreen Tree Species Locates in Hangzhou

LI Hai-mei¹, DANG Ning^{1,2}, YU Liang-qian², ZHANG Han-dan², CHEN Guang-cai²

(1. College of Landscape Architecture and Forestry, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong, China;

2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] To study the relationship between leaf dust retention capacity and leaf surface structure and particle characteristics of landscaping tree species so as provide data for screening excellent landscaping tree species and improving the dust retention effect of vegetation. [Method] Five common evergreen tree species (*Loropetalum chinense* var. *rubrum*, *Osmanthus fragrans*, *Pittosporum tobira*, *Photinia* × *fraseri* and *Cinnamomum camphora*) in Fuyang District of Hangzhou were studied. The samples were collected from industrial zone, traffic zone and clean zone. The dust-holding capacity of these plants was recorded by weight difference method, the leaf surface structure, particle morphological structure and elemental composition of dust were observed by SEM-EDS. The relationship between leaf surface structure, particle morphology, particle size and dust holding capacity was analyzed. [Result] The results showed that the leaf dust retention capacity of the five tree species in the industrial area followed the order of *L. chinense* var. *rubrum* ($7.36 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > *O. fragrans* ($6.53 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > *Pittosporum tobira* ($6.44 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > *Photinia* × *fraseri* ($4.28 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > *C. camphora* ($2.59 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), and the same pattern was observed in traffic zone and clean zone. The total PM₁₀ retention amount of these tree species reached to $11.34 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, the order of retention capacity of these tree species was *L. chinense* var. *rubrum*, *Pittosporum tobira*, *Photinia* × *fraseri*, *O. fragrans* and *C. camphora*. The air quality in these zones showed obvious effect on the leaf retention capacity, followed the order of industrial zone > traffic zone > clean zone. The particles trapped in plant leaves consisted of regular particles and irregular mineral particles, which mainly included spherical, oval, fluffy polymer, chain polymer, irregular block and irregular sheet. [Conclusion] *L. chinense* var. *rubrum* shows the strongest dust-retention ability, while *C. camphora* shows the weakest retention of particulate matter. The percentage of coarse particles trapped in the leaves are higher than that of the fine particles. The particles trapped in leaves are mostly soot aggregates and minerals particles

Keywords: particle size; particulate matter; leaf surface; appearance characteristics

(责任编辑: 金立新)