

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201505024

林鑫涛, 叶诺楠, 王彬, 等. 亚热带常绿树种对不同粒径颗粒物的滞留能力 [J]. 广西植物, 2016, 36(2): 170-176

LIN XT, YE NN, WANG B, et al. Different sizes of particulate matters deposited on leaf of typical subtropical evergreen species [J]. Guihaia, 2016, 36(2): 170-176

亚热带常绿树种对不同粒径颗粒物的滞留能力

林鑫涛, 叶诺楠, 王彬, 陈健*, 游诗雪, 张昕丽

(浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室培育基地, 浙江临安 311300)

摘要: 可吸入颗粒物和细颗粒物是大部分城市的首要污染物, 对人体健康和环境都有重要影响; 而城市植物能吸附大气颗粒物, 进而有效降低大气颗粒物浓度。为了深入探究不同树种叶表面特征与自身滞尘效益之间的关系, 该研究以浙江省三种常见城市绿化树种 (青冈、冬青、红花檵木) 为对象, 采用重量法提取各样本在 3 个粒径上 (8~100, 2.5~8, 0.45~2.5 μm) 的单位叶面积滞尘量 ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$), 并结合叶面积指数估测全株滞尘量。结果表明: 三种供试植物叶片对颗粒物平均单位叶面积滞留量在 30.4~63.7 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 之间, 而平均单株滞尘量每株在 1.36~9.36 g 之间。红花檵木因其叶表粗糙、具有绒毛等特征, 对颗粒物 (0.45~100 μm) 有最大的吸附能力 ($63.7 \pm 12.0 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); 对于大颗粒物 (8~100 μm) 和细颗粒物 (0.45~2.5 μm), 三种植物叶片均对其分别具有最大 (40.9%~57.5%)、最小 (15.6%~20.6%) 的吸附能力; 对于单株滞尘量, 青冈因其具有较大叶面积指数等特征, 对颗粒物总吸附效果更佳 (每株 9.36 g)。该研究结果表明城市绿化树种对减缓大气颗粒物污染起到重要作用。

关键词: 植物叶片, $\text{PM}_{2.5}$, 滞尘能力, 叶表特征, 人类健康

中图分类号: Q948 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3142(2016)02-0170-07

Different sizes of particulate matters deposited on leaf of typical subtropical evergreen species

LIN Xin-Tao, YE Nuo-Nan, WANG Bin, CHEN Jian*, YOU Shi-Xue, ZHANG Xin-Li

(The Nurturing Station for the State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, China)

Abstract: Both inhalable particulate matter (PM_{10}) and fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) are the primary pollutants in most of the cities in China, which are known for the harmness to human health. Urban plants could be used as biological filters, playing an important role in reducing the concentrations of particulate matters in the air as result of adsorbing and arresting particulate matters on their foliage. Three typical types of subtropical evergreen plants (*Cyclobalanopsis glauca*, *Ilex chinensis* and *Loropetalum chinense* var. *rubrum*), always used as urban greening species, were selected to study their capacities in capturing particulate matter. The rinse and weight method were used to characterize PM in different particle size fractions (8-100, 2.5-8, 0.45-2.5 μm). The results showed that the particulate matters on leaves ranged from 30.4 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ to 63.7 $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$, while the particles deposited by the whole tree ranged from 1.36 g to 9.36 g. *Loropetalum chinense* var. *rubrum* was the most efficient species in capturing particulate matters ($63.7 \pm 12.0 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$) for its rough surfaces and large quantity of hairs on the foliage. All the tested species have the strongest (40.9%-57.5%) and

收稿日期: 2015-05-23 修回日期: 2015-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(41471442); 浙江省重点创新团队项目(2011R50027); 浙江省省院合作项目(2014SY16); 金华市科技局农业类重点项目(2014-2-010) [Supported by the National Natural Science Foundation of China (41471442); Key Science and Technology Innovation Team of Zhejiang Province (2011R50027); Zhejiang Provincial Institute Cooperative Project(2014SY16); Agricultural Science Planning Project of Jinghua Municipal Science and Technology Bureau(2014-2-010)].

作者简介: 林鑫涛 (1994-), 男, 浙江台州人, 从事全球变化与植物生理响应研究, (E-mail) time0323@139.com。

***通讯作者:** 陈健, 博士, 副教授, 从事森林生态, 环境遥感方面的研究, (E-mail) chenjian@126.com。

the weakest (15.6%-20.6%) dust-capturing capability for the large size fraction (8-100 μm) and the fine size fraction (0.45-2.5 μm) respectively. As for the total amount of surface particulate matters accumulated by the whole tree, *Cyclobalanopsis glauca* is the most efficient species (9.36 g per tree) for its spacial characteristics. All the results showed that urban plants played important roles in mitigating urban airborne particulate matters.

Key Words: plant leaf, $\text{PM}_{2.5}$, dust-capturing capability, surfaces features, human health

大气颗粒物污染对人体健康、生活质量等产生重要影响。人群总死亡率、心血管疾病及呼吸系统疾病等发生与大气颗粒物浓度呈显著性关系,尤其是细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ (空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 颗粒物)的浓度 (Aničič et al, 2011)。我国城市普遍发生以细颗粒物为主要污染物的大气污染 (Beckett et al, 1998)。据 2013 年中国环境状况公报,全国空气质量监测的 496 个县级及以上城市中,仅有 4.1% 的城市细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度达一级标准。植物因其较大的叶面积指数和表面粗糙度,可有效吸附和移除空气中的颗粒物 (McDonald et al, 2007),利用植物减缓环境中的颗粒物污染被认为具有很大潜力。目前国内外对植物叶片滞留颗粒物有研究报道,如 Cavanagh et al (2009) 和肖以华等 (2013) 均发现森林能显著改善空气; Sæbø et al (2012) 和刘璐等 (2013) 的研究表明不同树种的滞尘量差异显著。但这些研究主要集中在植物对总颗粒物的表面滞留能力,很少有涉及植物对不同粒径颗粒物的滞留,尤其对细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸附研究 (张志丹等, 2014; 季静等, 2013)。关于不同植被对 $\text{PM}_{2.5}$ 的阻滞和吸附的定性研究,就植物对 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附作用的强弱,如何有效发挥植物降低 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的重要功能等问题,还缺少必要的研究和总结。此外,大多研究仅考虑叶片表面滞留颗粒物能力,对于植物叶片蜡质对颗粒物的滞留分析还鲜见报道。叶片蜡质是影响植物滞尘的重要因素, Sæbø et al (2012) 发现植物滞尘量与叶片蜡质含量呈正相关。在南方地区,大部分城市绿化树种是常绿树种,叶片均有不同厚度的蜡质分布,忽略蜡质层对不同粒径颗粒物的吸附会造成对树种滞留颗粒物能力和机理研究的极大误差。因此,综合考虑叶表及蜡质对不同粒径颗粒物的吸附能力,尤其是对细颗粒物的吸附能力,对准确研究叶片滞留颗粒物能力和机理研究尤为重要。

本研究以亚热带典型城市常绿绿化树种为对象,通过测定不同供试树种叶片对不同粒径颗粒物的表面和蜡质滞留量,结合叶片表面形态特征,并辅助于 PM 地基监测获取的浓度,以及常规气象因

子的观测,对比分析不同树种对不同粒径 PM,特别是细颗粒物的吸附能力及影响因素,探寻树种叶片对污染颗粒物的滞留机理和适应机制,为城市绿化树种选择提供指导,也为最大程度发挥城市绿地生态效益提供参考。

1 研究区与研究方法

1.1 研究区概况及供试树种

研究区设在浙江杭州市浙江农林大学东湖校区内 ($30^{\circ}15.42' \text{N}$; $119^{\circ}43.58' \text{E}$),属典型亚热带海洋季风气候,年均降水量 1 613.9 mm,降水日 158 d,无霜期年平均为 237 d,年均气温 16°C ,极端最高气温 41.8°C ,最低气温 -8°C 。海拔 40.9 m,土壤以红壤为主,地带性植被为亚热带常绿阔叶林。在城市绿化主要树种中选取三种典型绿化树种作为研究对象:青冈 (*Cyclobalanopsis glauca*)、冬青 (*Ilex chinensis*) 与红花檵木 (*Loropetalum chinense var. rubrum*),从表 1 中可得到所选树种的特征。三种供试树种各 4 棵均来自于大学校园的一块较小狭长绿地,树种之间间距约 5 m,可以初步认为样地内的环境因子 (如光照、降雨、风速、温度、湿度、土壤等因子) 无明显差异。

1.2 研究方法

1.2.1 环境因子监测与分析为进一步明确样地内的生态因子无显著差异,在实验对象周围布设 3 个 I-Button 纽扣式温湿度自动观测仪,用于连续观测实验场地周围的地面温度、湿度等气象指标。实验当天每隔 2 h (6 次) 对样地内 3 处进行 (1) 用手持气象仪测定实验对象周围当时的风速; (2) 用大气颗粒物连续采样器 (Partisol-Plus Model 2025) 在采样点进行 $\text{PM}_{2.5}$ 监测,空气采样流速为 $5 \text{L} \cdot \text{min}^{-1}$,采样头距离放置平台约 1.5 m。分别对所采得的 6 组 (不同时间) 不同地点的环境 PM 数据及气象因子数据进行统计 (图 1),结果表明各组不同地点的环境 PM 数据及气象因子数据在 Levene's 检验下总体呈方差齐性 ($P > 0.05$); 单因素方差分析 (one-way ANOVA)

表 1 所选树种的特征
Table 1 Characteristics of the selected tree species

树种 Plant species	科 Family	生活型 Life form	叶形 Leaf shape	叶序 Phyllotaxy	叶质 Leaf texture	平均株高 Average height (m)	单株总叶面积 Total leaf surface area per tree (m ²)
青冈 <i>Cyclobalanopsis glauc</i>	壳斗科 Fagaceae	乔木 Tree	倒卵状椭圆形或长椭圆形 Obovate elliptic or ovate oblong	互生 Alternation	革质 Keratin	4.5	102.89(±32.63)
冬青 <i>Ilex chinensis</i>	冬青科 Aquifoliaceae	乔木 Tree	椭圆形或披针形, 稀卵形 Elliptic, lanceolate or dilute ovate	互生 Alternation	革质 Keratin	4.1	63.70(±21.34)
红花檵木 <i>Loropetalum hinense</i> var. <i>rubrum</i>	金缕梅科 Hamamelidaceae	灌木 Shrub	卵形 Ovoid	互生 Alternation	革质 Keratin	1.5	5.78(±2.02)

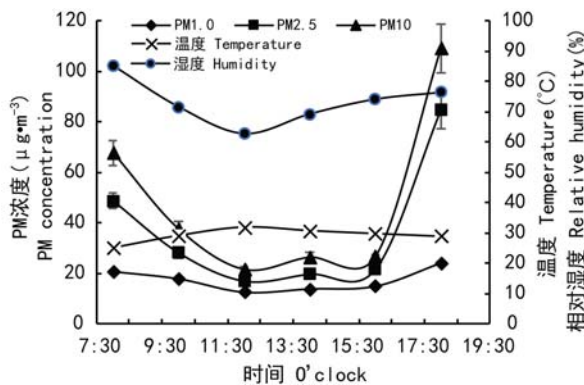


图 1 环境 PM 浓度、温度、相对湿度变化
Fig. 1 Trend of environmental PM concentration, temperature and relative humidity

中, 同一时间不同地点的环境因子 (含环境 PM 数据及气象因子数据) 整体上差异不显著 ($P>0.05$), 即可认为实验树种所处的环境相同。

1.2.2 样品采集 2014 年 8 月中旬 (晴) 进行实验。实验前一天晚上 18:00 进行叶片清洗, 根据冠层特征, 分为高、中、低三个高度, 每个高度从四周均匀选取功能成熟叶片 (生长状况良好, 无损害, 无虫害) 进行标记, 用蒸馏水冲洗标记叶片表面原滞留颗粒物, 于次日晚 18:00 采集样品。为得到足够的细颗粒物, 同时避免过多采样导致粗颗粒物过多堵塞滤纸虑孔, 并且不影响树种正常生长, 每棵树采集样品约 300 cm²。每份样品装在干净塑料薄袋内, 保存于冰箱保鲜室直至样本颗粒物吸附量的测定。

1.2.3 叶片表面 PM 与蜡质层中 PM 的提取与测定 滞尘量的测定参考 Przbysz et al (2014) 的方法。分别将孔径为 8 (Whatman Type 40)、2.5 (Whatman Type 42) 和 0.45 μm (金晶聚偏氟乙烯微孔滤膜 F 型) 的滤纸置于 60 °C 烘箱中烘干 30 min, 取出后置于称重

房中 30 min, 充分吸湿, 使其与称重房内湿度保持一致, 再用分析天平 (万分之一) 进行称重, 分别得到各滤纸初重 (g)。

叶片表面 PM 的提取与测定: 叶片表面能被水冲洗掉的颗粒物, 称为表面 PM (sPM)。将叶片放入盛有 250 mL 去离子水的烧杯中搅动 2 min, 使叶片表面吸附的颗粒物充分溶解。首先用标准分样筛 (160 目, 孔径约 100 μm) 过滤上述滤液, 接着依次用已烘干称重的孔径为 8、2.5 和 0.45 μm 的滤纸 (膜) 在直径 47 mm 的抽滤装置中进行 3 次抽滤, 得到三个粒径范围的颗粒物: 大粒径为 8~100 μm, 粗粒径为 2.5~8 μm, 细粒径为 0.45~2.5 μm。再分别将三层滤纸放入 60 °C 烘箱中烘干 30 min, 取出后置于称重房中 30 min, 充分吸湿, 使其与称重房内湿度保持一致, 再用分析天平 (万分之一) 进行称重, 分别得到各滤纸过滤后的重量 (g)。用重量差量法计算各样本中各粒径下表面 PM 附着量 (sPM_i , g)。

蜡质 PM 的提取与测定: 叶片蜡质中能被三氯甲烷冲洗掉的颗粒物, 称为蜡质 PM (wPM)。将用去离子水清洗过的叶片放入盛有 150 mL 三氯甲烷的烧杯中搅动 1 min, 使叶片蜡质层中颗粒物充分溶解。按照“表面 PM”同样步骤进行过滤、称重, 最后得到每样本中各粒径下蜡质 PM 附着量 (wPM_i , g)。

1.2.4 叶表面形态测定及单位滞尘量计算 (1) 叶面积测定: 采样图像处理法, 将晾干后的叶片放在标准 A4 白纸上, 利用数码相机拍照获取叶片和 A4 白纸的图像, 导入 Photoshop CS3 软件统计像素计算面积, 即得到每份样品叶面积为 s (cm²)。 (2) 单位滞尘量计算: 根据 sPM_i/s 得到每份样品不同孔径下的叶表面单位滞尘量 ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$); 根据 wPM_i/s 得到每份样品不同孔径下的叶蜡质单位滞尘量 ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)。

1.2.5 叶面积指数测定及全株滞尘量估测用 LAI-2000 测定每株供试植物的叶片密度，获得三种供试植物的总叶面积（表 1）。在假定供试植物滞尘均匀时，将单位叶面积叶表滞尘量与总叶面积相乘，近似估得供试植物在三个粒径范围的全株滞尘量（g）。

1.3 数据处理

运用 Microsoft Excel 2013 进行实验数据的描述统计，为保证所得数据方差的同质性，对单位叶面积滞尘量的数据采取自然对数转换，再在 SPSS19.0（SPSS, IBM, USA）用 Levene's 检验分析数据方差的同质性，用单因素方差分析(one-way ANOVA)分析供试树种单位叶面积滞尘量及生态因子间的差异性，若有显著差异，则用最小显著差异法(LSD)进行多重比较。所有分析的差异显著性水平均设定为 0.05。采用 Microsoft Excel 2013 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 植物滞尘效果分析

三种供试树种为同一时期栽种的，且采取的叶片均为成熟叶片，可认为其叶龄相同，即蜡质滞尘时间相同；而叶表滞留颗粒物于实验初期由人工清洗除去，故供试树种叶表滞尘时间亦相同。综上，三种树种总滞尘能力具有可比性。本实验地点设于校内道路景观林带（轻微 $PM_{2.5}$ 污染区），样地区域为狭长形，实验对象周围的环境因子（如光照、降水、风速、温度、湿度、环境 PM 浓度等）差异不显著时对三种供试树种单位叶面积总滞尘量（swPM, 0.45~100 μm ）分析后（表 2），红花檵木 [(63.7±12.0) $\mu g \cdot cm^{-2}$] 显著大于冬青 [(35.8±5.00) $\mu g \cdot cm^{-2}$] 与青冈 [(30.4 ±3.52) $\mu g \cdot cm^{-2}$]，而冬青与青冈间差异不显著。供试树种经人工清洗重新滞尘，相同时间内红花檵木表面滞尘量（sPM, 0.45~100 μm ）显著高于青冈和冬青，其表面滞尘能力分别是冬青的 1.78 倍、青冈的 2.10 倍。供试树种单位叶面积表面滞尘量受到生活型（陈芳等，2006；郭伟等，2010）、叶表粗糙度（Beckett et al, 2000；柴一新等，2002）、叶被毛密度（柴一新等，2002）、叶质等诸多因素的影响。红花檵木为灌木，平均株高在 1.5 m 左右（表 1），其叶表面粗糙程度大且绒毛丰富，故表面更易吸附 PM 颗粒物；而青冈与冬青同为乔木，平均株高相近，两者叶表面较光滑，无毛或少毛，故表面不易吸附 PM 颗粒物。因而红花檵木表面吸

附 PM 能力显著高于青冈和冬青。

植物叶片表面和蜡质能同时吸附 PM 颗粒物（图 2），三种供试树种单位叶面积蜡质滞尘量（wPM, 0.45~100 μm ）均高于表面滞尘量（sPM, 0.45~100 μm ），其中青冈、冬青、红花檵木的单位叶面积蜡质滞尘量分别占其总滞尘量的 70.0%、62.6% 和 63.1%，此时颗粒物主要滞留于蜡质层中。

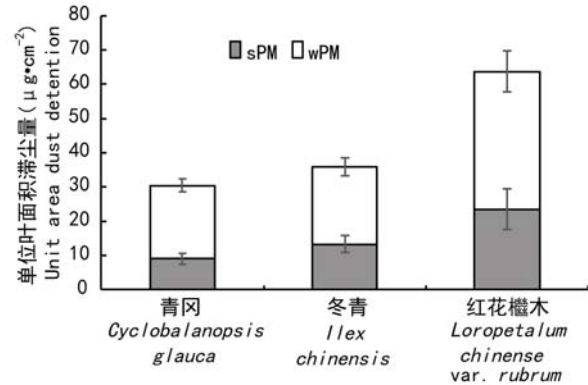


图 2 三种常绿植物吸附表面 PM (sPM)、蜡质 PM (wPM) 总量

Fig. 2 Amount of surface PM (sPM) and wax-embedded PM (wPM) accumulated by three evergreen species

2.2 植物滞留颗粒粒径分布情况及分析

由图 3 可知，三种树种滞留颗粒物的粒径分布为大颗粒物(8~100 μm)占总颗粒物的 40.9%~57.5%，粗颗粒物(2.5~8 μm)占 25.6%~38.5%，细颗粒物(0.45~2.5 μm)占 15.6%~20.6%。不同树种间吸附总颗粒物粒径分布也略有差异（表 2），对于大颗粒物及粗颗粒部分，植株间差异体现为红花檵木显著大于冬青和青冈，而青冈和冬青间差异性较小；对于细颗粒物部分，三种供试树种差异不显著 ($P>0.05$)，但趋势仍呈现出红花檵木>冬青>青冈。

2.3 植物全株滞尘分析

从单木尺度上计算，冬青、青冈和红花檵木叶表重新滞尘量分别约为 8.54、9.36、1.36 g，其中青冈对大颗粒物(6.07 g)、细颗粒物(1.54 g)的滞留能力最佳，而冬青对粗颗粒物(3.76 g)滞留能力最佳。就蜡质滞尘累积量而言，青冈在三个粒径范围内皆具有最大滞尘量（总计 21.9 g）。综合叶表滞尘和蜡质滞尘情况，平均每株青冈的叶总面积约为红花檵木的 17 倍，且其对颗粒物的总滞留量约为红花檵木的 8.5 倍。

表 2 三种常绿植物累积不同粒径下的表面 PM (sPM) 和蜡质 PM (wPM) 量 ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)
Table 2 Amount of surface PM (sPM) and wax-embedded PM (wPM) ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)
accumulated by three evergreen species in different size fractions

PM 类型 Type of PM	树种 Plant species	粒径范围 Size fraction				
		0.45~2.5 μm	2.5~8 μm	8~100 μm	0.45~100 μm	
sPM	冬青 <i>Ilex chinensis</i>	1.8(\pm 0.19)	5.9(\pm 1.47) a	5.7(\pm 0.84) b	13.4(\pm 2.50) ab	
	青冈 <i>Cyclobalanop sisglauc</i>	1.5(\pm 0.13)	1.7(\pm 0.50) b	5.9(\pm 1.01) b	9.1(\pm 1.64) b	
	红花檵木 <i>Loropetalum chinense var. rubrum</i>	3.0(\pm 1.32)	5.0(\pm 0.32) a	15.5(\pm 4.30) a	23.5(\pm 5.94) a	
	wPM	冬青 <i>Ilex chinensis</i>	5.6(\pm 0.72)	7.9(\pm 1.40) b	8.9(\pm 0.39) c	22.4(\pm 2.50) b
wPM	青冈 <i>Cyclobalanopsis glauc</i>	3.7(\pm 0.67)	6.0(\pm 0.48) b	11.5(\pm 0.73) b	21.3(\pm 1.88) b	
	红花檵木 <i>Loropetalum chinense var. rubrum</i>	7.0(\pm 2.37)	17.2(\pm 2.49) a	16.1(\pm 1.23) a	40.2(\pm 6.08) a	
	swPM	冬青 <i>Ilex chinensis</i>	7.4(\pm 0.91)	13.8(\pm 2.87) b	14.6(\pm 1.22) b	35.8(\pm 5.00) b
		青冈 <i>Cyclobalanop sisglauc</i>	5.1(\pm 0.81)	7.8(\pm 0.98) b	17.5(\pm 1.74) b	30.4(\pm 3.52) b
红花檵木 <i>Loropetalum chinense var. rubrum</i>		10.0(\pm 3.68)	22.2(\pm 2.81) a	31.6(\pm 5.53) a	63.7(\pm 12.02) a	

注: 数据为均值 \pm 标准误, 样本容量为 4; 小写字母表示在 0.05 水平上供试植物间差异。

Note: Data are mean \pm SE, $n=4$; Little letters represent the differences among different tested species at the level of 0.05.

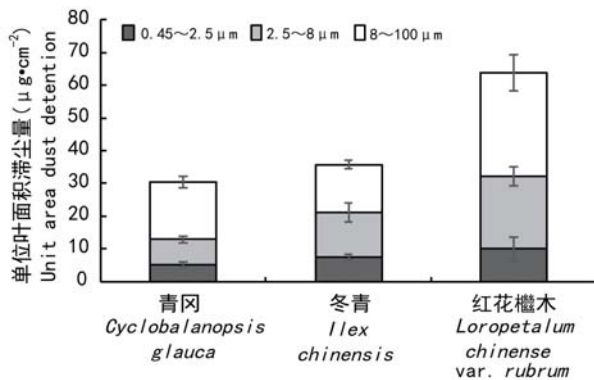


图 3 三种常绿植物吸附大 (8~100 μm)、粗 (2.5~8 μm)、细颗粒物 (0.45~2.5 μm) 总量

Fig. 3 Amount of large (8~100 μm), coarse (2.5~8 μm) and fine (0.45~2.5 μm) PM accumulated by three evergreen species

3 讨论

植物滞尘能力受其种类、生活型、叶表结构、叶表面润湿性、叶表面自由能及其分量、冠幅、比叶面积、叶面倾向、环境状况等 (Sæbø et al, 2012; 郭伟等, 2010; 王会霞等, 2010; 王远森等, 2013) 因素影响。

红花檵木与青冈和冬青的叶片表面结构具有较大差异, 红花檵木叶片表面粗糙程度大且具有绒毛;

而青冈与冬青的叶片表面结构相似, 两者叶片表面具有较细密或少绒毛, 叶片表面光滑, 粗糙程度低下, 但蜡质层较厚, 因而在叶片尺度上, 红花檵木的叶表形态最有利于滞尘; 灌木叶片生长高度 (离地 1~2 m) 的空气颗粒物浓度在距地 10 m 范围内最大 (邱洪斌等, 2002), 因而红花檵木所处小环境颗粒物浓度较高, 有利于滞尘 (王远森等, 2013); 红花檵木叶片较密, 能极大降低大气湍流, 降雨时能减弱雨水对整个植株的冲刷, 从而减少颗粒物的流失, 有利于滞尘。此外, Song et al (2015) 发现叶片气孔是颗粒物主要滞留区域之一, 则叶片的气孔结构、分布等将会影响植株滞留能力, 然而受到实验条件和时间限制, 未能对其进行观测, 若能得到该方面的数据则可进行更详尽分析。

附着于蜡质层中的 PM 为植物叶片长时间的累积, 蜡质较稳定且不溶于水, 一般只有当蜡质脱去时, 其所吸附的颗粒物才能重新回到大气中, 故自然降水或刮风 (Beckett et al, 2000; Pal et al, 2002) 或人工清洗只能除去叶片表面 PM, 而不易除去蜡质 PM。植物叶片蜡质滞尘效果主要与蜡质厚度相关, Przybysz et al (2014) 研究表明单位蜡质滞尘量与蜡质层厚度呈正相关, 而蜡质厚度主要与植物类型、生长阶段等内源因素以及水分、温度、太阳辐射、

生境等外源因素相关(李婧婧等, 2011)。本实验虽未具体测定蜡质层厚度, 但观测得青冈和冬青的蜡层厚度大于红花檵木, 然而两者的蜡质滞尘能力却不及红花檵木, 这可能是受到叶片的叶表形态差异的影响, 有研究表明部分吸附在叶片蜡质层表面的颗粒物会渗透进叶片蜡质层中(Dzierzanowski et al, 2011), 这意味着叶片表面滞尘能力强的红花檵木能将更多的吸附于叶表面的颗粒物转移至蜡质层中, 因而单位蜡质滞尘量较其他两种大。此外, 王赞红等(2006)发现简单清洗及深度清洗均不能彻底去除叶表附着颗粒物, 这意味着本研究提取表面 PM 时不彻底使后者提取蜡质 PM 的值偏高, 该现象在表面粗糙度较大、具绒毛的红花檵木上更易出现, 也可能造成其滞留量偏大。

在三种供试植株中, 大颗粒物(8~100 μm)重量占总颗粒物重量在 50%以上, 贡献最大, 与 Przybysz et al(2014)所得结论一致。然而, 当实验操作方法及观测指标改变时, 结论也不尽相同: 以颗粒物数量为指标时, Tomašević et al(2005)利用扫描电子显微镜—能谱仪(SEM-EDAX)观测到七叶树(*Aesculus hippocastanum*)和土耳其榛子(*Corulus colurna*)叶片上吸附的细颗粒物($D < 2 \mu\text{m}$)占 50%~60%, 贾彦等(2012)观测到类似结论。以颗粒物体积为指标时, 赵松婷等(2014)利用 Hitachi 台式 TM3000 电镜观测到银杏(*Ginkgo biloba*)等 9 种北京城区常用园林树种叶片上吸附的粗颗粒物($D > 10 \mu\text{m}$, 对应该文的大颗粒物)对总颗粒物体积贡献较大; 王会霞等(2015b)分别用激光粒度分析仪(LS230/SVM+)和扫描电子显微镜(JSM-6510 LV)观测到大叶女贞(*Ligustrum lucidum*)吸附颗粒物半数以上为大颗粒物($D > 10 \mu\text{m}$)。细颗粒物($D < 2.5 \mu\text{m}$)由于体积小, 重量轻, 数量足, 易被植株叶片大量吸附, 然而其单位体积和单位质量远远不及大颗粒物($D > 10 \mu\text{m}$), 从而总重量和总体积上不占优势。

不同粒级下比较供试树种间差异时, 对于 0.45~2.5 μm 的颗粒物, 从表面滞尘、蜡质滞尘、总滞尘量比较, 均呈现红花檵木>冬青>青冈的趋势, 然而彼此间差异不显著, 这可能是供试树种吸附细颗粒物的能力本无差异性, 或者由于细颗粒物质量过轻而使方差分析法体现不出其差异性。

单木滞尘量主要与供试树种的单位叶面积滞尘

量和总叶面积有关, 生活型为乔木的青冈、冬青的冠层高大、叶片繁大, 总叶面积也相对较大; 而生活型为灌木的红花檵木虽枝叶茂密, 然总叶面积却不及青冈和冬青, 故在单木尺度上青冈、冬青利于滞尘。王芳等(2015)发现灌木树种单位叶面积滞尘量约为乔木的 1.85 倍, 而单株滞尘量仅为乔木的 0.1 倍, 与本实验结论相似。在实际滞尘时, 植株各方向的 PM 浓度、温度、湿度等微环境因素不尽相同, 向阳面叶片长势较阴面好, 叶片相对集中等因素会影响对颗粒物的滞留, 且枝干、树皮也具有一定的滞尘能力(赵晨曦等, 2013), 忽略这些因素将致使单木滞尘量的估测出现较大的误差。因而得到相关结论仍需大量实验树种以及实验数据支持。

此外, 在晴朗、无(微)风时, 随着滞尘时间的延长, 叶片滞尘必然达到饱和。王赞红和李纪标(2006)发现大叶黄杨在 15 d 滞尘量达到饱和, 王会霞等(2015a)则发现污染严重时女贞和珊瑚树滞尘在 4~5 d 会达到饱和。在春夏季节降水天气频繁, 一般植株滞尘达不到饱和, 而秋冬季节大气污染则相对严重(张桂香等, 2015), 植株可能会出现滞尘饱和现象。然而, 该文由于多种原因限制, 仅初步探讨了 24 h 内三种绿化植物叶片的滞尘能力, 缺乏滞尘饱和值的比较, 在后续的研究中将针对观测时间进行进一步的实验, 以获取更丰富的实验结果。

4 结论

在样地生态因子差异不显著时, 本实验表明: (1) 在叶片尺度上, 生活型为灌木的红花檵木叶片表面粗糙程度大、具有绒毛, 对空气中的颗粒物具有更强的吸附能力; (2) 红花檵木对细颗粒物(0.45~2.5 μm)的滞留能力最强; (3) 三种植物叶片均对大颗粒物(8~100 μm)的总吸附量最大, 对细颗粒(0.45~2.5 μm)的总吸附量最小; (4) 在单木尺度上, 生活型为乔木的青冈冠层高大, 对颗粒物滞留量更大。

基于三种植物的叶片结构特征, 将其与实验结果相结合, 该文初步探讨了叶片表面特征对绿化植物叶片滞尘能力的影响, 旨在为城市绿化植物的选择提供科学依据, 指导如何筛选滞尘能力强的城市绿化树种, 有效利用其滞尘减污效应以减轻城市中大气颗粒物的污染, 减缓大气污染对城市居民的身

体健康和生活造成的影响。

参考文献:

- ANIČIĆ M, SPASIĆ T, TOMAŠEVIĆ M, et al, 2011. Trace element accumulation and temporal trends in leaves of urban deciduous trees(*Aesculus hippocastanum* and *Tilia* spp.) [J]. *Ecol Indic*, 11(3): 824-830.
- BECKETT KP, FREER-SMITH PH, TAYLOR G, 2000. Effective tree species for local air quality management [J]. *J Arboric*, 26(1): 12-19.
- CAVANAGH JAE, PEYMAN ZR, WILSON JG, 2009. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch [J]. *Urban For Urban Gree*, 8(1): 21-30.
- CHAI YX, ZHU N, HAN HJ, 2002. Dust removal effect of urban tree species in Harbin [J]. *Chin J Appl Ecol*, 13(9): 121-126. [柴一新, 祝宁, 韩焕金, 2002. 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*, 13(9): 121-126.]
- DZIERZANOWSKI K, POPEK R, GAWROŃSKA H, et al, 2011. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species [J]. *Int J Phytoremediat*, 13: 1037-1046.
- GUO W, SHENGTU YJ, ZHENG SQ, et al, 2010. Research advances on mechanisms and rules of dust retention of the urban green areas [J]. *Ecol & Environ Sci*, 19(6): 1465-1470. [郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 等, 2010. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展 [J]. *生态环境学报*, 19(6): 1465-1470.]
- JIJ, WANG G, DU XL, et al, 2013. Evaluation of adsorbing haze PM_{2.5} fine particulate matters with plants in Beijing-Tianjin-Hebei region in China [J]. *Sci Sin Vitae*, 43(8): 694-699. [季静, 王罡, 杜希龙, 等, 2013. 京津冀地区植物对灰霾空气中 PM_{2.5} 等细颗粒物吸附能力分析 [J]. *中国科学: 生命科学*, 43(8): 694-699.]
- LI JJ, HUAN JH, XIE SC, 2011. Plant wax and its response to environmental conditions: an overview [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(2): 565-574. [李婧婧, 黄俊华, 谢树成, 2011. 植物蜡质及其与环境的关系 [J]. *生态学报*, 31(2): 565-574.]
- LIU L, GUAN DS, CHEN YQ, 2013. Morphological structure of leaves and dust-retaining capability of common street trees in Guangzhou municipality [J]. *Acta Ecol Sin*, 33(8): 2604-2614. [刘璐, 管东生, 陈永勤, 2013. 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*, 33(8): 2604-2614.]
- MCDONALD AG, BEALEY WJ, FOWLER D, et al, 2007. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM in two UK conurbations [J]. *Atmos Environ*, 41(38): 8455-8467.
- PAL A, KULSHRESHTHA K, AHMAD KJ, et al, 2002. Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? [J]. *Flora*, 197(1): 47-55.
- PRZYBYSZ A, SAEBØ A, HANSLIN HM, et al, 2014. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time [J]. *Sci Total Environ*, 481: 360-369.
- QIU HB, ZHU LL, ZHANG FM, 2002. Pollution characteristics of atmospheric particles from city streets and influencing factors [J]. *Heilongjiang Med Pharm*, 25(3): 3-4. [邱洪斌, 祝丽玲, 张凤梅, 2002. 城市街道大气颗粒物污染特征及影响因素的研究 [J]. *黑龙江医药科学*, 25(3): 3-4.]
- SAEBØ A, POPEK R, NAWROT B, et al, 2012. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces [J]. *Sci Tot Environ*, 427-428: 347-354.
- SONG YS, MAHER BA, LI F, et al, 2015. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: source identification and size distribution [J]. *Atmos Environ*, 105: 53-60.
- TOMAŠEVIĆ M, VUKMIROVIĆ Z, RAJŠIĆ S, et al, 2005. Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area [J]. *Chemosphere*, 61(6): 753-760.
- WANG F, XIONG SG, LI HY, et al, 2015. Study on dust-retention ability of major afforestation tree species in Tianjin airport economic area [J]. *J Arid Land Resour Environ*, 29(1): 100-104. [王芳, 熊善高, 李洪远, 等, 2015. 天津空港经济区绿化树种滞尘能力研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 29(1): 100-104.]
- WANG HX, SHI H, LI YY, 2010. Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species [J]. *Chin J Appl Ecol*, 21(12): 3077-3082. [王会霞, 石辉, 李秧秧, 2010. 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*, 21(12): 3077-3082.]
- WANG HX, SHI H, WANG YH, 2015a. Dynamics of the captured quantity of particulate matter by plant leaves under typical weather conditions [J]. *Acta Ecol Sin*, 35(6): 1696-1705. [王会霞, 石辉, 王彦辉, 2015a. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化 [J]. *生态学报*, 35(6): 1696-1705.]
- WANG HX, SHI H, ZHANG YJ, et al, 2015b. Influence of surface structure on the particle size distribution captured by *Ligustrum lucidum* [J]. *J Saf Environ*, 15(1): 258-262. [王会霞, 石辉, 张雅静, 等, 2015b. 大叶女贞叶面结构对滞留颗粒物粒径的影响 [J]. *安全与环境学报*, 15(1): 258-262.]
- WANG YS, QU YT, ZHANG YY, et al, 2013. Research on dust-retention effect of *Ligustrum × vicaryi* [J]. *N Hort*, 15: 72-75. [王远森, 曲益涛, 张玉阳, 等, 2013. 金叶女贞滞尘效应研究 [J]. *北方园艺*, 15: 72-75.]
- WANG ZH, LI JB, 2006. Capacity of dust uptake by leaf surface of *Euonymus Japonicus* Thunb. and the morphology of captured particle in air polluted city [J]. *Ecol & Environ*, 15(2): 327-330. [王赞红, 李纪标, 2006. 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态 [J]. *生态环境*, 15(2): 327-330.]
- JIA Y, WU C, DONG FC, et al, 2012. Measurement on ability of dust removal of seven green plants at micro-conditions [J]. *J Cent S Univ Technol*, 43(11): 4547-4553. [贾彦, 吴超, 董春芳, 等, 2012. 7种绿化植物滞尘的微观测定 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 43(11): 4547-4553.]
- XIAO YH, LI J, KUANG YW, et al, 2013. Comparison of TSP, PM_{2.5} and their water-soluble ions from both inside and outside of Dafushan forest park in Guangzhou during rainy season [J]. (下转第 185 页 Continue on page 185)