

基于超声清洗的树木叶面颗粒物粒径分布与吸滞效率研究——以银杏和油松为例

刘金强^{1*} 曹治国^{2*} 刘欢欢^{1*} 张少伟³ 贾黎明¹ 贾忠奎¹ 席本野^{1**}

¹北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083; ²河南师范大学环境学院黄淮水污染防治省部共建教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 河南新乡 453007; ³河南农业职业学院, 郑州 451450

摘要 明确在常规叶片清洗方法(泡洗或泡洗+刷洗)上增加超声清洗对叶面各粒径颗粒物滞纳量定量评估的影响, 并在此基础上研究叶面颗粒物的粒径分布和吸滞效率, 可进一步提高城市树木大气颗粒物吸滞能力的定量评估精度。该文以城市森林建设常用阔叶树种银杏(*Ginkgo biloba*)和针叶树种油松(*Pinus tabulaeformis*)为研究对象, 于雨后(降水量>15 mm) 4天(短滞尘时长)和14天(长滞尘时长)分别采集叶样, 并依次对其进行泡洗(WC)、刷洗(BC)、超声清洗(UC)等洗脱程序, 然后对每个清洗步骤下叶片洗脱液中颗粒物的质量和粒径分布进行测试, 并依此估算叶片各粒径颗粒物的吸滞效率。结果表明, 以“泡洗+刷洗+超声清洗”清洗流程的测试结果为参照, 若只对叶片进行泡洗, 则银杏和油松对大气颗粒物(PM₁, 粒径 $d \leq 1 \mu\text{m}$)、PM_{2.5} ($d \leq 2.5 \mu\text{m}$)、PM₅ ($d \leq 5 \mu\text{m}$)、PM₁₀ ($d \leq 10 \mu\text{m}$)吸滞量会分别被低估约一半(54%、53%、53%和53%)和40% (42%、42%、42%和42%); 若只进行“泡洗+刷洗”, 则银杏和油松对相应粒径颗粒物的吸滞量仍会分别被低估约15% (17%、16%、15%和15%)和20% (21%、20%、20%和20%)。油松叶面颗粒物粒径分布呈双峰曲线, 而银杏叶面颗粒物粒径则呈单峰分布, 且银杏叶面颗粒物平均粒径在短、长滞尘时长下均大于油松。油松叶片对PM₁、PM_{2.5}、PM₅、PM₁₀和总悬浮颗粒物的吸滞效率分别为8.96、23.92、23.96、23.96和23.96 mg·m⁻²·d⁻¹, 分别比银杏叶片高112%、73%、34%、37%和42%。

关键词 大气颗粒物; 吸滞效率; 粒径分布; 超声清洗

引用格式: 刘金强, 曹治国, 刘欢欢, 张少伟, 贾黎明, 贾忠奎, 席本野 (2016). 基于超声清洗的树木叶面颗粒物粒径分布与吸滞效率研究——以银杏和油松为例. 植物生态学报, 40, 798–809. doi: 10.17521/cjpe.2016.0100

Ultrasonic based investigation on particle size distribution and retention efficiency of particulate matters retained on tree leaves—Taking *Ginkgo biloba* and *Pinus tabulaeformis* as examples

LIU Jin-Qiang^{1*}, CAO Zhi-Guo^{2*}, LIU Huan-Huan^{1*}, ZHANG Shao-Wei³, JIA Li-Ming¹, JIA Zhong-Kui¹, and XI Ben-Ye^{1**}

¹Ministry of Education Key Laboratory of Silviculture and Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; ²Key Laboratory for Yellow River and Huaihe River Water Environmental and Pollution Control, Ministry of Education, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang, Henan 453007, China; and ³Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, China

Abstract

Aims On the basis of conventional cleaning method (washing + brushing), this study aims to verify the effect of ultrasonic cleaning on quantitative evaluation of particulate matters with various particle sizes retained on tree leaves, and further to investigate the size distribution and retention efficiency of these particulate matters, which will help to improve the accuracy of quantitative assessment of the retention ability of urban trees to atmospheric particles.

Methods Taking *Ginkgo biloba* and *Pinus tabulaeformis* as examples of broadleaf and conifer species, leaf samples were collected 4 days (short dust retention period) and 14 days (long dust retention period) after the rain (rainfall >15 mm), and then particles retained on these leaves were collected by the means of washing (WC), brushing (BC) and ultrasonic cleaning (UC). Further, the quality and size distribution of the particulate matters eluted at each wash step were determined to assess the retention efficiency of tree leaves to particulate matter with

收稿日期Received: 2016-03-22 接受日期Accepted: 2016-07-23

* 共同第一作者 Co-first author.

** 通信作者 Author for correspondence (E-mail: benyexi@bjfu.edu.cn)

various particle sizes.

Important findings Taking the result of “washing + brushing + ultrasonic cleaning” process as a reference, with only washing process, the retention amount of PM₁ (particulate diameter $d \leq 1 \mu\text{m}$), PM_{2.5} ($d \leq 2.5 \mu\text{m}$), PM₅ ($d \leq 5 \mu\text{m}$) and PM₁₀ ($d \leq 10 \mu\text{m}$) on *G. biloba* and *P. tabuliformis* leaves would be underestimated by around 50% (54%, 53%, 53% and 53%) and 40% (42%, 42%, 42% and 42%), respectively; under washing and brushing protocols, the dust retention capacity of *G. biloba* and *P. tabuliformis* were still undervalued by about 15% (17%, 16%, 15% and 15%) and 20% (21%, 20%, 20% and 20%), respectively. Size distribution of particulate matters retained on *P. tabuliformis* showed bimodal curves, whereas the particulate matters retained on *G. biloba* exhibited unimodal size distribution. However, the average particle size of particulate matters on *G. biloba* leaves were greater than that on *P. tabuliformis* leaves in both short (*G. biloba*: 1.68 μm ; *P. tabuliformis*: 1.16 μm) and long (*G. biloba*: 1.51 μm ; *P. tabuliformis*: 1.19 μm) dust retention periods. The retention efficiency of *P. tabuliformis* to PM₁, PM_{2.5}, PM₅, PM₁₀ and total suspended particulate (TSP) were 8.96, 23.92, 23.96, 23.96 and 23.96 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, respectively, higher than that of *G. biloba* by 112%, 73%, 34%, 37% and 42%, respectively.

Key words particulate matter; retention efficiency; diameter distribution; ultrasonic cleaning

Citation: Liu JQ, Cao ZG, Liu HH, Zhang SW, Jia LM, Jia ZK, Xi BY (2016). Ultrasonic based investigation on particle size distribution and retention efficiency of particulate matters retained on tree leaves—Taking *Ginkgo biloba* and *Pinus tabuliformis* as examples. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 798–809. doi: 10.17521/cjpe.2016.0100

大气颗粒物(PM)通常是指分散在大气气溶胶体系中的各种固态或液态颗粒状物质,作为大气中主要污染成分之一,对人类的生活健康以及生存产生重大影响。PM不仅能够引起人类的过敏、支气管炎和心血管病等疾病(Cohen *et al.*, 2005; Chen *et al.*, 2013; Hofman *et al.*, 2013),而且能够引起人类的早亡(Remy *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2013)。因此,PM污染问题受到世界广泛关注,多个国家已将解决PM引发的环境问题列为国家发展中的重要任务。众多研究表明,植物由于具有巨大的叶面积、复杂的叶面微结构或能分泌黏液而能对PM产生一定的吸滞作用(Yin *et al.*, 2011; Nowak *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2015b)。因此,利用城市森林吸滞PM,进而缓解和调控PM污染近年来已成为国内外众多学者研究的焦点(Przybysz *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2015; 张志丹等, 2015),而且受到世界各级政府部门的普遍关注。

精确、定量测定城市树木叶片PM滞纳量可帮助在不同尺度上(叶片、单木、林分)对城市森林的PM吸滞能力进行准确评估,进而帮助筛选高颗粒物滞纳树种和构建合理的城市森林来调控和缓解城市PM污染。因此,近年来国内外在城市树木叶片滞尘能力评估方面开展了大量研究(Dzierżanowski & Gawroński, 2011; Song *et al.*, 2015; 王兵等, 2015; 王会霞等, 2015)。在这些研究中,质量差减法(阿丽

亚·拜都热拉等, 2015; 范舒欣等, 2015)、滤膜法(Dzierżanowski & Gawroński, 2011; Przybysz *et al.*, 2014; Chen *et al.*, 2015; Sgrigna *et al.*, 2015)、洗脱称量粒度分析法(张志丹等, 2014)等直接测定方法常被用于定量估算单位面积叶片上不同径级颗粒物(PM_{2.5} (直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$)、PM₁₀ (直径 $\leq 10 \mu\text{m}$)、总悬浮颗粒物(TSP)等)的总吸滞量。由于这些方法的应用是建立在对叶面颗粒物进行完整收集的基础上,因此,现有相关研究在采集叶片样本后均先对叶片进行清洗以收集滞纳于其上的颗粒物。目前,常规的叶片清洗方法有单一水洗法(冲洗、泡洗)(Dzierżanowski & Gawroński, 2011; 张放, 2013; Chen *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2015)和水洗刷洗结合法(水洗基础上加入刷洗)(Beckett *et al.*, 2000; 王蕾等, 2006; 么旭阳等, 2014; 王会霞等, 2015)。然而,王赞红和李纪标(2006)、王蕾等(2006)、Przybysz等(2014)和王会霞等(2015)的研究结果显示,这些清洗方法并不能将叶面上的颗粒物完全洗脱掉。我们通过前期试验发现在对植物叶片进行水洗和刷洗后,若再对其进行合理的超声波清洗则可在不破坏叶片结构的情况下使叶面洁净度明显提高,大大提高叶面颗粒物的收集量。然而,关于增加超声波清洗对叶面不同径级颗粒物滞纳量定量评估的影响我们还不清楚。

目前,大多研究是以单位面积叶片上PM_{2.5}、

PM₁₀或TSP的总滞纳量为评判指标来评估城市树木的颗粒物滞纳能力(Dzierżanowski & Gawroński, 2011; Przybysz *et al.*, 2014; 王兵等, 2015), 而对叶面颗粒物的粒径分布关注相对较少。事实上, 叶面颗粒物粒径分布是评估树木空气修复能力的重要参数(Cao *et al.*, 2012), 因为颗粒物的其他物理和化学特性均与粒径有关(俞学如, 2008), 对于叶面颗粒物粒径分布的研究不仅可提供叶片对某一粒径颗粒物的精确吸滞量信息, 而且还可帮助了解叶片对不同类型有毒污染物(重金属、酸性氧化物、微生物等)的去除能力, 从而更能综合表征树木对空气质量的提升能力。目前这方面的研究主要集中在不同树种间(王亚超, 2007; 俞学如, 2008; Sæbø *et al.*, 2012; 刘玲等, 2013)以及不同空气污染背景下(Ottelé *et al.*, 2010; 王会霞等, 2012; Przybysz *et al.*, 2014)树木叶面颗粒物粒径分布的差异性上, 而对树木叶面颗粒物粒径分布的动态变化则探讨较少。此外, 由于叶片样本所经历的滞尘时长可能不同, 采用叶面颗粒物滞纳量进行植物滞尘能力评估时, 不同研究间的数据结果的可比性较差。因此, 近年来有学者采用叶面颗粒物吸滞效率(单位面积叶片单位时间内的颗粒物滞纳量)来评估其滞尘能力(刘玲等, 2013; 么旭阳等, 2014; Chen *et al.*, 2015), 但总体而言, 这方面的研究还很缺乏, 极有必要针对不同树种开展相关研究以为不同树种滞尘能力的更高精度评估提供方法基础与数据支撑。

本文以我国北方城市森林建设中常用的阔叶树种银杏(*Ginkgo biloba*)和针叶树种油松(*Pinus tabulaeformis*)为研究对象, 采集其经历不同滞尘时长的叶片作为试验材料开展相关研究, 研究目标为: 1)评估不同清洗方法(水洗、水洗+刷洗、水洗+刷洗+超声波清洗)对叶面颗粒物的洗脱特征, 明确在常规叶片清洗方法上增加超声清洗步骤对叶面各径级颗粒物滞纳量定量评估的影响; 2)对比分析两个树种叶面颗粒物的粒径分布特征及其动态变化; 3)评估两个树种对不同径级颗粒物的吸滞效率。

1 材料和方法

1.1 样品采集

试验采样地点为北京市西土城遗址公园。于2014年10月15日(雨后(降水量>15 mm) 4天, 下称短滞尘时长)和10月25日(雨后14天, 下称长滞尘时长)

对银杏和油松(只采集其当年生叶片)进行叶片样本采集。采样时, 每个树种各选择5株(5个重复)生长良好、健康无病害的植株作为样树, 用枝剪从每株样树冠层中部剪取10个小枝(采集时防止枝条落地被土壤颗粒附着), 然后从小枝上采集生长状态良好且具有代表性的足量叶片封存于干净自封袋中带回实验室。

1.2 试验仪器

试验所用仪器包括: 枝剪、尼龙材质不掉毛刷子、IS13320激光粒度仪(液体样品/粉末样品; 粒度测定范围0.017–2 000 μm; Beckman Coulter, Brea, USA)、KQ-500DB超声波清洗器(功率500 W; 苏州江东精密仪器有限公司, 苏州)、日立HCP-2临界点干燥仪(Hitachi, Tokyo, Japan)、日立E-1010真空喷镀仪(Hitachi, Tokyo, Japan)、日立S-3400N扫描电镜(分辨率3.0 nm; Hitachi, Tokyo, Japan)、MSA225S-1CE-DA天平(精度0.01 mg; 北京赛多利斯仪器系统有限公司, 北京)、Multifuge X1R高速冷冻离心机(转速5 000 r·min⁻¹, Thermo Fisher Scientific, New York, USA)、DHG9070B电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司, 上海)、50 mL尖底螺口离心管、EPS-ON Expression 1680扫描仪(Seiko Epson, Nagano, Japan)。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

首先, 对经受不同滞尘时长的油松和银杏叶片依次进行水洗(泡洗)(WC)、刷洗(BC)、超声波清洗(UC), 采用前期研究所确定的最佳超声波清洗技术参数组合等洗脱程序; 其次, 对每个清洗步骤下叶片洗脱液中颗粒物的质量和粒径分布进行定量, 并在此基础上定量评估不同清洗方法下单位面积叶面吸滞颗粒物质量和粒度洗脱特征的差异性; 最后, 对油松和银杏叶面吸滞颗粒物的粒径分布特征及其动态变化进行分析, 并估算其对不同粒径颗粒物的吸滞效率。

1.3.2 叶面颗粒物收集与称量

在每个树种5株样树的叶样中分别随机选取一定数量的叶片(银杏60片、油松90束), 依次经历以下清洗步骤: 1)将叶片浸泡在盛有270 mL去离子水的玻璃容器中并搅拌60 s, 然后将洗脱液倒入6个离心管中(50 mL); 2)用经去离子水洗净的尼龙材质不掉毛刷子刷洗叶片至表面洁净, 然后用去离子水连续

冲洗叶面, 并将洗脱液倒入6个离心管中(共用去离子水270 mL); 3)将叶片放入盛有270 mL去离子水的玻璃容器并置于超声波清洗器中, 在前期试验确定的最佳超声技术参数组合(银杏: 功率500 W+超声清洗3 min; 油松: 功率500 W+超声清洗10 min)下对叶片进行超声振荡清洗(振荡中用玻璃棒搅拌), 然后将洗脱液分别倒入6个离心管中。

将上述每个清洗步骤的叶片颗粒物洗脱液进行离心(转速为5 000 r·min⁻¹), 共经历3次离心, 每次20 min, 确认离心完全后, 弃掉上清液, 直至将每个清洗步骤中6个离心管内的洗脱液合并至一个离心管, 并用干净滤纸包裹管口以防灰尘污染。然后, 将离心管放入70 °C烘箱中烘干至恒质量(约24 h), 并放置在天平室中平衡温度湿度0.5 h后称质量(W_2), 其与之前空离心管(用去离子水冲洗, 烘干, 天平室平衡温度湿度0.5 h后称质量)的质量(W_1)差值为每一清洗步骤的叶面颗粒物洗脱质量($W_2 - W_1$)。

1.3.3 叶面颗粒物粒径分布测定

在上述称量后的离心管中再次加入50 mL去离子水, 超声振荡30 min, 然后采用激光粒度仪进行颗粒物粒径分布测定, 由此分别获得WC、BC、UC等清洗程序所得洗脱液中不同粒径颗粒物的体积百分数, 将其默认为质量百分数(Q)(Cao *et al.*, 2013)。据此, 利用公式(1)计算每一清洗步骤对叶面不同径级颗粒物的质量洗脱百分比(P)。

$$P_{i,j} = \frac{W_i \cdot Q_{i,j}}{\sum_i W_i \cdot Q_{i,j}} \quad (1)$$

式中, $P_{i,j}$ 为清洗步骤*i*对叶表面*j*径级颗粒物的洗脱比例(%); W_i 为清洗步骤*i*的叶面总颗粒物洗脱量(g); $Q_{i,j}$ 为清洗步骤*i*所洗脱掉的颗粒物中*j*径级颗粒物的质量百分数(%); *i*为清洗步骤(WC、BC、UC); *j*为不同径级, 本研究中设为 $d \leq 1 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m} < d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m} < d \leq 5 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 和 $d > 10 \mu\text{m}$ 。

1.3.4 叶面积测定

将试验所用叶片样品放入Expression 1680扫描仪中扫描, 然后利用WinRHIZO图像分析软件分析获得叶样的表面积和投影面积数据。银杏叶面积等于投影面积的2倍。根据油松叶片的形状特征(Xing *et al.*, 2014), 其叶面积用投影面积加上0.5倍表面积

进行估算。

1.3.5 叶面微结构观察

随机选取各树种若干片树叶, 用打孔器从每个叶片上随机打下一个直径为6 mm的圆形叶样, 并置于冷冻干燥机中冷冻, 待样品完全脱水干燥后, 对其进行真空干燥、粘台、喷金。然后, 用日立S-3400N型扫描电镜在放大300倍的条件下对叶片的上、下或凹、凸表面进行扫描观测并拍照。然后, 对每张照片上的气孔个数进行统计, 并根据每张照片所代表的叶片扫描面积(0.28635 mm^2)换算得到单位面积叶片上的气孔个数即气孔密度(个·mm⁻²)。

1.4 数据分析

不同滞尘时长下叶片对不同径阶颗粒物的滞纳量为不同洗脱步骤(WC、BC、UC)对相应径阶颗粒物洗脱量的加和。利用该数据和叶面积数据根据公式(2)分别计算银杏和油松对不同径阶颗粒物的吸滞效率(AE)。

$$AE = \frac{LZ_j - SZ_j}{LT - ST} \quad (2)$$

式中, LZ 和 SZ 分别为长、短滞尘时长下单位面积叶片上*j*径级颗粒物的滞纳量, LT 和 ST 分别为长、短滞尘时长的天数, 分别为14天和4天。

使用Excel 2013进行基本数据分析。使用SPSS 20.0, 采用独立样本*t*检验, 分别在不同滞尘时长下对银杏和油松单位面积叶片的各径阶颗粒物滞纳量进行差异性分析($p = 0.05$)。

2 结果

2.1 银杏、油松叶面微结构特征

银杏叶片上表面具有密集的条状和不规则块状突起, PM大部分滞纳于突起间的沟槽中, 小部分则黏着在突起上(图1A)。银杏叶片下表面具有少量的密集条状突起和大量的疣状突起, 其间可滞纳大量颗粒物; 此外, 叶片下表面上的气孔也清晰可见, 并且有少量PM滞留于气孔内部(图1B)。本研究中, 银杏叶片下表面的气孔密度为 (90 ± 5) 个·mm⁻²。

油松叶片凹面具有平行的密集叶脉, 叶脉与叶脉之间形成较浅的条状凹槽, 叶片上的气孔亦清晰可见, 密度达到 (72 ± 6) 个·mm⁻², 其沿与叶脉平行的方向一般一排或两排规则排列, 而叶脉区与气孔区则交替分布; 在叶片凹面上, 大部分PM滞留于叶脉间的条状凹槽内和叶脉上, 少量颗粒物则滞留在

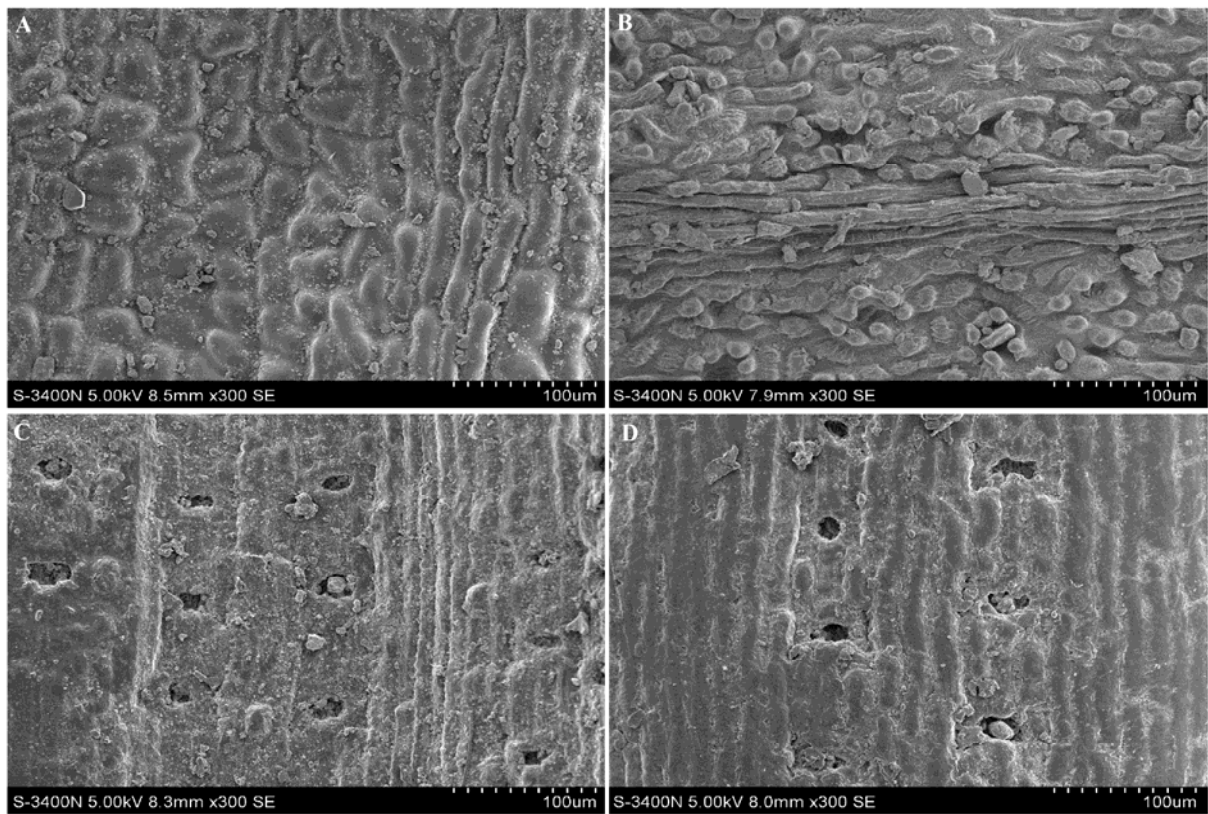


图1 银杏叶片(A)上表面和(B)下表面结构, 油松叶片(C)凹面和(D)凸面结构。
Fig. 1 The structure of the up (A) and below surfaces (B) of *Ginkgo biloba*, and the structure of the concave (C) and bulge surfaces (D) of *Pinus tabulaeformis*.

气孔内部(图1C)。相比较于油松叶片凹面, 其凸面具有相似的微结构, 气孔密度为 $(66 \pm 6) \cdot \text{mm}^{-2}$, 但由于其形状向外凸起, 故滞留颗粒物的数量在表观上要少于凹面(图1D)。此外, 油松叶表面分泌的树脂和黏液也可以拦截和捕获PM (张维康等, 2015)。

2.2 不同清洗方法下银杏、油松叶面颗粒物洗脱特征

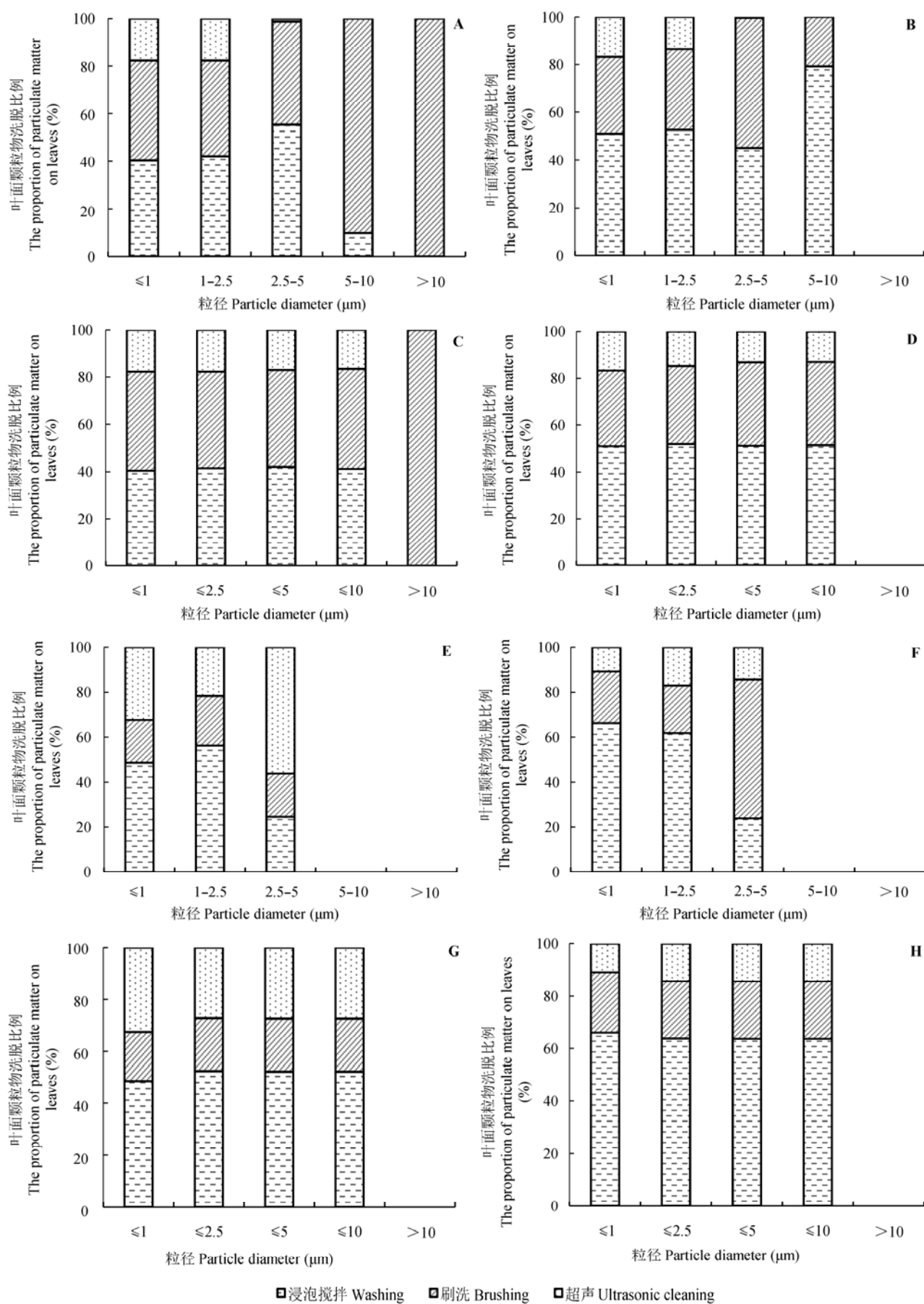
由图2A和2B可知, 对不同滞尘时长下的银杏叶片进行泡洗后, 其上各径级颗粒物均可被大量洗脱掉(除了 $d > 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物); 之后, 对叶片继续进行刷洗, 虽可将其上 $d > 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物完全洗脱掉, 但并不能完全去除 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物; 然而, 若在泡洗和刷洗的基础上, 继续超声波清洗叶片, 则其上残余的 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物可被完全洗

脱掉, 这点也被叶片的电镜扫描照片所证实。采用常用的颗粒物径级对不同洗脱方法下银杏叶面颗粒物的洗脱比例(两种滞尘时长下的平均值)进行统计(图2C, 2D), 发现: 若只采用泡洗法清洗叶片, 则其吸滞 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_5 和 PM_{10} 的质量可能会被低估约一半(54%、53%、53%和53%), 而且较大粒径颗粒物($d > 10 \mu\text{m}$)的吸滞量也可能被大幅低估; 若采用“泡洗—刷洗”法清洗, 则 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_5 和 PM_{10} 的叶片吸滞量则仍可能被低估约15% (17%、16%、15%和15%); 但是, 若采用“泡洗—刷洗—超声清洗”法清洗, 则能较大幅度提高银杏叶片各径级颗粒物吸滞量的评估精度。

与银杏情况相似, 通过泡洗也能将不同滞尘时长下油松叶片上的颗粒物大量洗脱掉(图2E, 2F),

图2 短滞尘时长(A、C、E、G)和长滞尘时长(B、D、F、H)下各清洗步骤所得银杏(A–D)、油松(E–H)叶面不同径级颗粒物质量的洗脱百分比。

Fig. 2 The proportion of particulate matter (PM) retained on leaves experienced for a short (A, C, E, G) and long (B, D, F, H) time of *Ginkgo biloba* (A–D) and *Pinus tabulaeformis* (E–H) after rain.



且对小粒径颗粒物($d \leq 2.5 \mu\text{m}$)的洗脱比例高于大粒径颗粒物($2.5 < d \leq 5 \mu\text{m}$); 对叶片继续进行刷洗虽能继续洗脱掉较多的颗粒物, 但仍有大量颗粒物残留于叶片表面, 而且与银杏不同, 刷洗并不能将油松叶片上 $2.5 < d \leq 5 \mu\text{m}$ 的颗粒物完全洗脱掉; 但是, 泡洗和刷洗后, 若辅以超声清洗, 则能将叶面的残余颗粒物几乎全部去除掉, 这点亦被叶片的电镜扫描照片所证实。同样, 对不同洗脱方法下油松叶面各径级颗粒物的洗脱比例(两种滞尘时长下的平均值)进行统计(图2G, 2H), 发现: 若只对叶片进行泡洗, 则其上滞纳的 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_5 和 PM_{10} 的质量均可能会被低估约40% (42%、42%、42%和42%); 若采用“泡洗—刷洗”法清洗, 则叶片 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_5 和 PM_{10} 的吸滞量仍可能被低估约20% (21%、20%、20%和20%); 但是, 若综合采用“泡洗—刷洗—超声清洗”法清洗叶片, 则能大大提高其各径级颗粒物吸滞量的评估精度。

2.3 银杏、油松叶表面颗粒物的粒径分布特征

如图3所示, 银杏叶面颗粒物的粒径分布在短滞尘时长和长滞尘时长下均呈单峰曲线, 峰值出现在 $d = 1.67 \mu\text{m}$ 处; 油松叶面上的颗粒物在不同滞尘时长下则均呈双峰分布, 峰值分别出现在 $d = 0.79 \mu\text{m}$ 和 $d = 1.67 \mu\text{m}$ 处, 且长滞尘时长下后者的峰值高于前者, 而短滞尘时长下则相反。油松叶面颗粒物的粒径分布范围在不同滞尘时长下相近, 分别为 $0.08\text{--}2.92$ 和 $0.06\text{--}2.92 \mu\text{m}$; 银杏叶片上颗粒物的粒径分布范围大于油松, 且在短滞尘时长($0.07\text{--}33.01 \mu\text{m}$)和长滞尘时长($0.07\text{--}7.42 \mu\text{m}$)下存在较大差异。叶表面总颗粒物中各径阶颗粒物所占的体积百分比在同一滞尘时长下的不同树种间以及同一树种的不同滞尘时长下均存在明显差异(数据未列出); 平均而言(两种滞尘时长下的数据平均), 银杏和油松叶片上 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_5 、 PM_{10} 在总颗粒物中所占的体积百分比分别为38%和44%、91%和99%、98%和100%、99%和100%。通过对各粒径颗粒物的分布百分比进行加权平均, 得到短滞尘时长下油松和银杏叶表面颗粒物的平均粒径分别为 1.16 和 $1.68 \mu\text{m}$, 而在长滞尘时长下分别为 1.19 和 $1.51 \mu\text{m}$ 。

2.4 银杏、油松对不同径级颗粒物的吸滞能力与效率

与短滞尘时长相比, 长滞尘时长下银杏和油松单位面积叶片上各径级颗粒物的吸滞量均有大幅增加, 但径级不同其增加量有明显差异(图4): 银杏单

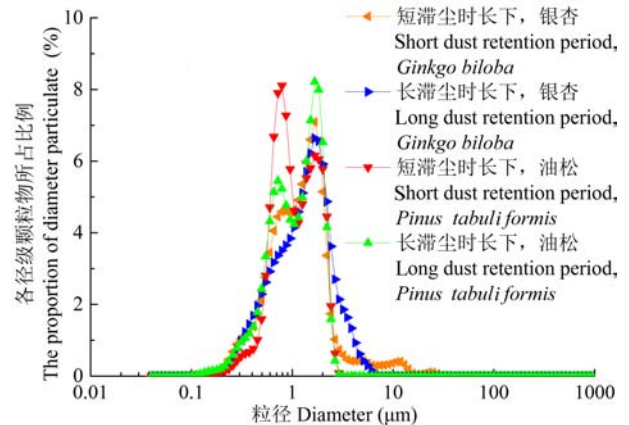


图3 不同滞尘时长下, 银杏和油松叶面颗粒物的粒径分布。

Fig. 3 Diameter distribution of PM retained on leaves of *Ginkgo biloba* and *Pinus tabulaeformis* experienced for a short and long time after rain.

位面积叶片上 PM_{10} 、 $\text{PM}_{1-2.5}$ 、 $\text{PM}_{2.5-5}$ 、 PM_{5-10} 和 $\text{PM}_{>10}$ 的吸滞量增加量分别为42.3、96.1、40.0、-3.6和-5.5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$, 而油松相应径级的增加量分别为89.6、149.6、0.5、0.0和0.0 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$ 。由此可见, 本研究条件下, 经历短滞尘时长(雨后4天)后油松和银杏叶片上颗粒物的吸滞量都尚未达到其饱和最大量。此外, 统计分析结果表明, 在不同滞尘时长下, 油松和银杏单位面积叶片对各径级颗粒物的总吸滞量均无显著差异($p > 0.05$)(图4)。依据公式(2), 计算从经历短滞尘时长到经历长滞尘时长期间(2014.10.15到2014.10.25)叶片对PM的吸滞效率, 得到油松叶片对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_5 、 PM_{10} 和TSP的吸滞效率分别为8.96、23.92、23.96、23.96和23.96 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 分别比银杏叶片高112% ($4.23 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)、73% ($13.83 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)、34% ($17.84 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)、37% ($17.47 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)和42% ($16.92 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)。

3 讨论和结论

树木叶片表面所滞纳PM的快速、完整收集是采用直接测定法(质量差减法、滤膜法、洗脱称量粒度分析法等)定量评估城市树木PM吸滞能力和效率的基础。然而, 目前基于“降雨量15 mm、强度10 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的降雨就可清除掉叶片积尘”理论(Pal et al., 2002)的常规叶片清洗方法(单一水洗法、水洗刷洗结合法)并不能将叶表面的颗粒物完整洗脱掉或收集到(王赞红和李纪标, 2006; 王蕾等, 2006; Przybysz et al., 2014)。本研究的结果也直接证实了这个

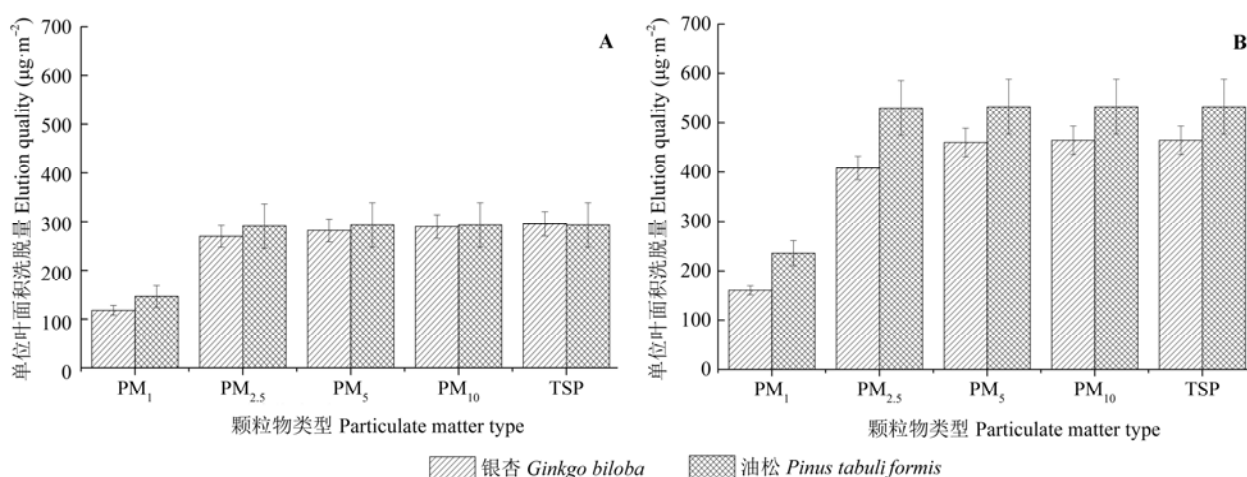


图4 短滞尘时长(A)和长滞尘时长(B)下银杏与油松单位面积叶片上各粒径大气颗粒物滞纳量(平均值±标准误差)。

Fig. 4 The quality of PM with different diameter retained on leaves of *Ginkgo biloba* and *Pinus tabulaeformis* experienced for a short (A) and long time (B) after rain (mean ± SE).

现象,尤其是发现常规清洗方法并不能对叶片上 $d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 的小粒径颗粒物实现完全洗脱(图2)。但是,若对叶片进行常规清洗之后(泡洗+刷洗)辅以超声波清洗,则可进一步将该部分小粒径颗粒物大量洗脱掉。

本研究条件下,若只对叶片泡洗,则油松和银杏叶片对PM₁、PM_{2.5}、PM₅和PM₁₀的吸滞能力(单位面积叶片颗粒物滞纳量)可分别被平均低估约53%和42%。这也意味着自然条件下,短时间内的强降雨可能仅能将油松(47%)和银杏(58%)叶片上一半左右的颗粒物冲洗掉,但是王会霞等(2015)的研究表明自然条件下历时较长的强降雨(连续2天降水,共计31.9 mm)则对油松叶面颗粒物的冲洗效果不明显,但能将女贞(*Ligustrum lucidum*) (50%)和珊瑚树(*Viburnum odoratissimum*) (62%)等阔叶树叶面上的颗粒物冲洗掉一半左右。同样,Przybylski等(2014)发现20 mm降雨能使欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)叶片上30%–40%的颗粒物被冲洗掉。由此可见,降雨对叶面颗粒物的洗脱效能会受到植物种类、降雨强度、降雨历时、降水量等多种因素的影响(Wang *et al.*, 2015b; 王会霞等, 2015)。本研究中,若对叶片进行泡洗+刷洗,则油松和银杏对相应粒径颗粒物的吸滞能力仍会被平均低估约15%和20%。因此,在常规叶片清洗基础上加入超声波清洗对于城市树木PM吸滞能力的准确定量评估极为重要和必要,今后应受到普遍重视。此外,本研究中,在不同滞尘时长下,在常规叶片清洗方法之上加入超声波清洗对于

油松和银杏叶面颗粒物的完整搜集均有非常明显的效果(图2),由此说明超声波洗脱叶面颗粒物的作用和效果是稳定的。这也意味着今后在开展类似研究时,不管针对何种树种和何种滞尘时长,可能均有必要在对叶片常规清洗之后再辅以超声波清洗。

由于针、阔叶树的叶片结构差异较大,所以其对PM的吸滞特征也明显不同。例如,俞学如(2008)研究发现针、阔叶树叶片滞纳颗粒物的粒径分布差异较大,且阔叶树叶面颗粒物的平均粒径大于针叶树;王亚超(2007)的研究结果也表明,针叶树主要滞纳细小颗粒物,而阔叶树除此之外还能滞纳一定的大颗粒物。与这些研究结果相似,本研究也发现银杏(阔叶树种)叶片滞纳颗粒物的粒径范围和平均粒径(1.51–1.68 μm)明显大于油松(针叶树种)叶片(平均粒径1.16–1.19 μm),且不同滞尘时长下该规律一致。由于本研究中,油松(90个 $\cdot\text{mm}^{-2}$)和银杏(69个 $\cdot\text{mm}^{-2}$)叶片上的气孔密度相差不大,且大多数颗粒物滞纳于叶片上的沟槽或凹槽中(图1),因此沟槽或凹槽的深度或宽度可能是造成两个树种叶面颗粒物粒径特征出现较大差异的主要原因(谢滨泽等, 2014; 杨佳等, 2015)。

由于受到风、降雨、PM干沉降、地面扬尘黏着、叶面微结构变化(王扬等, 2011; Wang *et al.*, 2015a)等的综合作用,植物叶片对颗粒物的滞纳是一个动态过程,因此,植物叶面颗粒物的滞纳量和粒径分布特征在同一生长季的不同时期或不同年份间一般会存在较大差异。本研究中,随着滞尘时长的改变,

油松和银杏叶表面颗粒物的滞纳量和粒径分布有明显变化(粒径范围、峰值等参数),这与赵松婷等(2014)、Sæbø等(2012)、Przybysz等(2014)、王兵等(2015)和阿里亚·拜都热拉等(2015)在不同滞尘时长、同年的不同月份或不同年份下对多种植物叶面颗粒物滞纳特征的观察结果相一致。但也有研究发现随着滞尘时长或季节的改变,植物叶面颗粒物的粒径分布并没有明显变化(王亚超, 2007; 赵松婷等, 2014)。出现这种差异的原因可能与采样当地的污染物种类来源以及气候条件有关(王兵等, 2015)。

目前,大多数研究采用单位面积叶片上不同粒径(PM_{2.5}、PM₁₀或(和)TSP)颗粒物的滞纳量来评估不同树种的颗粒物吸滞能力(Dzierżanowski & Gawroński, 2011; Wang *et al.*, 2015b; 王兵等, 2015; 王会霞等, 2015),虽然在同一研究中该指标可行,但在不同研究间,由于叶片滞尘时长可能不同,所以该指标数据的可比性较差。因此,有少数研究采用叶片的颗粒物吸滞效率来对树种的颗粒物吸滞能力进行评估(刘玲等, 2013; 么旭阳等, 2014; Chen *et al.*, 2015)。然而,这些研究在计算吸滞效率时均有一个共同的假设,即一定的降雨能将叶片上的颗粒物完全洗脱掉,因此其计算方法为:叶片颗粒物吸滞效率($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) = 降雨结束一定时期后单位面积叶片上的颗粒物质量($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$) / 该时期的天数(d)(公式(3))。采用该方法对本研究和已有研究的数据进行计算,可以得到本研究中银杏对PM_{2.5}、PM₁₀和TSP的吸滞效率(两种滞尘时长下的平均值)分别为40.6、44.5和45.0 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,这在已有研究的银杏数据中(PM_{2.5}: 0.1–150 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; PM₁₀: 1.4–150 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; TSP: 1.3–300 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)(高金晖等, 2007; 俞学如, 2008; 郑少文等, 2008; 刘玲等, 2013; 谢滨泽等, 2014; 么旭阳等, 2014; Chen *et al.*, 2015; 王会霞等, 2015; 杨佳等, 2015; 张维康等, 2015)处于中等偏低的水平;本研究中油松对PM_{2.5}、PM₁₀和TSP的吸滞效率(两种滞尘时长下的平均值)分别为46.8、47.1和47.1 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,这在已有的油松数据中(PM_{2.5}: 0.41–480 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; PM₁₀: 3.4–520 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; TSP: 3.9–2750 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)(高金晖, 2007; 王会霞等, 2015; 李新宇等, 2015; Chen *et al.*, 2015; Song *et al.*, 2015; Zhang *et al.*, 2015)处于较低的水平。这种差异可能主要是由叶面颗粒物滞纳量测定方法(气溶胶再发生器法、滤膜法、称重法

等)、采样点污染背景、叶片滞尘时长、叶片微结构等的不同而引起。

将采用不同方法(公式(2)和(3))计算得到的本研究中银杏和油松的颗粒物吸滞效率进行对比,可以发现:上述方法(公式(3))对银杏PM_{2.5}、PM₁₀和TSP吸滞效率的计算值分别为本文方法(公式(2))相应计算值的2.9、2.5和2.7倍;对于油松,则分别为2.0、2.0和2.0倍。由此可以推断,已有研究中的叶片颗粒物吸滞效率数值可能远高于其真实值,即大大高估了植物对PM的吸滞效率。因此,建议今后的研究采用本文方法(在对经历不同滞尘时长的叶片辅以超声清洗后,采用公式(2)计算)计算叶片颗粒物的吸滞效率,以实现不同树种以及不同研究间同一树种PM吸滞能力的精确对比和评估。

自然条件下,植物叶片上所滞纳的PM主要通过风力和降雨的作用脱离叶片,因此,本研究中利用“泡洗+刷洗+超声”的方法和大多数研究中利用“泡洗+刷洗”的方法来实现颗粒物与叶片的分离是与自然过程不符的,但是却能帮助综合评估植物叶片对PM的滞纳潜力,即实现对叶片滞纳颗粒物总量的精确评估。叶片滞尘能力可分为“易再生滞尘能力”与“难再生滞尘能力”,“易再生滞尘能力”即植物叶片受降雨冲刷等自然因素的影响后,经一定污染时长,能够再次滞纳颗粒物的能力;而“难再生滞尘能力”指牢固于叶片表面,不易受雨水冲刷等自然因素的影响而使叶片表现出对颗粒物的滞纳能力。因此,在评估植物滞纳颗粒物能力时,应根据研究目的的不同选取合适的叶片颗粒物收集方法,从而实现对植物PM不同类型滞纳能力的精确评估。例如:评估植物长期滞尘能力时,在对叶片颗粒物进行收集时,应采取和实际降水冲刷强度相等的清洗方法,从而实现对植物“易再生滞尘能力”的评估;评估植物总滞尘能力时,则需对叶片进行彻底清洗,从而精确测定植物总的颗粒物滞纳量。因此,今后在对植物滞纳颗粒物能力开展相关研究时,根据研究目的不同,应选取适合的叶片颗粒物洗脱方法,从而进一步提高叶片PM吸滞能力的测量精度。

基金项目 河南省重点科技攻关项目(16210211-0090)、中国博士后科学基金(2015M570629)。

致谢 感谢施晓灯、梁琪(北京林业大学林学院森林培育学科研究生)在外业采样及室内试验工作中给予的帮助。感谢北京市海淀区支农专项资金支林项

目(降低PM_{2.5}空气污染的园林绿化工程关键技术研究与示范)、北京林业大学产学研联合培养研究生基地项目(BLCXY201606)资助。

参考文献

- Baidurela A, Halik U, Aishan T, Nuermaiti K (2015). Maximum dust retention of main greening trees in arid land oasis cities, Northwest China. *Scientia Silvae Sinicae*, 51(3), 57–63. (in Chinese with English abstract) [阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 凯丽比努尔·努尔麦麦提 (2015). 干旱区绿洲城市主要绿化树种最大滞尘量对比. 林业科学, 51(3), 57–63.]
- Beckett KP, Freer-Smith P, Taylor G (2000). Effective tree species for local air-quality management. *Journal of Arboriculture*, 26, 12–19.
- Cao ZG, Yu G, Chen YS, Liu C, Cao QM, Fiedler H, Deng SB, Huang J, Wang B (2012). Particle size: A missing factor in risk assessment of human exposure to toxic chemicals in settled indoor dust. *Environment International*, 49, 24–30.
- Cao ZG, Yu G, Chen YS, Liu C, Liu K, Zhang TT, Wang B, Deng SB, Huang J (2013). Mechanisms influencing the BFR distribution patterns in office dust and implications for estimating human exposure. *Journal of Hazardous Materials*, 252, 11–18.
- Chen LX, Liu CM, Zou R, Yang M, Zhang ZQ (2015). Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matter in the urban environment. *Environmental Pollution*, 208, 198–208.
- Chen YY, Ebenstein A, Greenstone M, Li HB (2013). Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 12936–12941.
- Cohen AJ, Ross Anderson H, Ostro B, Pandey KD, Krzyzanowski M, Künzli N, Gutschmidt K, Pope A, Romieu I, Samet JM (2005). The global burden of disease due to outdoor air pollution. *Journal of Toxicology & Environmental Health Part A*, 68, 1301–1307.
- Dzierżanowski K, Gawroński SW (2011). Use of trees for reducing particulate matter pollution in air. *Challenges of Modern Technology*, 1(2), 69–73.
- Fan SX, Yan H, Qishi MY, Bai WL, Pi DJ, Li X, Dong L (2015). Dust capturing capacities of twenty-six deciduous broad-leaved trees in Beijing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 736–745. (in Chinese with English abstract) [范舒欣, 晏海, 齐石茗月, 白伟岚, 皮定均, 李雄, 董丽 (2015). 北京市26种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力. 植物生态学报, 39, 736–745.]
- Gao JH, Wang DM, Zhao L (2007). Airborne dust detainment by different plant leaves: Taking Beijing as an example. *Journal of Beijing Forestry University*, 29(2), 94–99. (in Chinese with English abstract) [高金晖, 王冬梅, 赵亮, 王多栋 (2007). 植物叶片滞尘规律研究——以北京市为例. 北京林业大学学报, 29(2), 94–99.]
- Hofman J, Stokkaer I, Snauwaert L, Samson R (2013). Spatial distribution assessment of particulate matter in an urban street canyon using biomagnetic leaf monitoring of tree crown deposited particles. *Environmental Pollution*, 183, 123–132.
- Liu L, Fang YM, Wang SC, Xie Y, Yang DD (2013). Leaf micro-morphology and features in adsorbing air suspended particulate matter and accumulating heavy metals in seven trees species. *Environmental Science*, 34, 2361–2367. (in Chinese with English abstract) [刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨耽耽 (2013). 7种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征. 环境科学, 34, 2361–2367.]
- Nowak DJ, Hirabayashi S, Bodine A, Hoehn R (2013). Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten US cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 178, 395–402.
- Ottelé M, Bohemen HD, Fraaij ALA (2010). Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, 36, 154–162.
- Pal A, Kamla K, Ahmad KJ, Behl HM (2002). Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 197, 47–55.
- Przybysz A, Sæbø A, Hanslin HM, Gawroński SW (2014). Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Science of the Total Environment*, 481, 360–369.
- Remy S, Nawrot T, Fierens F, Petit P, Vanderstraeten P, Nemery B, Boulard C (2011). Health impact of urban air pollution in Belgium. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 4, 243–246.
- Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin HM, Gawronska H, Gawronski SW (2012). Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 427–428, 347–354.
- Sgrigna G, Sæbø A, Gawronski SW, Popek R, Calfapietra C (2015). Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy. *Environmental Pollution*, 197, 187–194.
- Song YS, Maher BA, Li F, Wang XK, Sun X (2015). Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China: Source identification and size distribution. *Atmospheric Environment*, 105, 53–60.
- Wang B, Zhang WK, Niu X, Wang XY (2015). Particulate matter adsorption capacity of 10 evergreen species in Beijing. *Environmental Science*, 36, 408–414. (in Chinese with English abstract) [王兵, 张维康, 牛香, 王晓燕 (2015). 北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究. 环境科学, 36, 408–414.]

- Wang HX, Shi H, Li YY, Zhang YJ, Du HX, Du H (2012). Distribution features of particle size and heavy metal elements in foliage-captured dust. *Journal of Safety and Environment*, 12(1), 170–174. (in Chinese with English abstract) [王会霞, 石辉, 李秧秧, 张雅静, 杜红霞, 杜衡(2012). 城市植物叶面尘粒径和几种重金属(Cu、Zn、Cr、Cd、Pb、Ni)的分布特征. 安全与环境学报, 12(1), 170–174.]
- Wang HX, Shi H, Wang YH (2015). Dynamics of the captured quantity of particulate matter by plant leaves under typical weather conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1696–1705. (in Chinese with English abstract) [王会霞, 石辉, 王彦辉 (2015). 典型天气下植物叶面滞尘动态变化. 生态学报, 35, 1696–1705.]
- Wang HX, Shi H, Wang YH (2015a). Effects of weather, time, and pollution level on the amount of particulate matter deposited on leaves of *Ligustrum lucidum*. *The Scientific World Journal*, 935942. doi:10.1155/2015/935942.
- Wang L, Gao SY, Liu LY, Ha S (2006). Atmospheric particle-retaining capability of eleven garden plant species in Beijing. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 597–601. (in Chinese with English abstract) [王蕾, 高尚玉, 刘连友, 哈斯 (2006). 北京市11种园林植物滞留大气颗粒物能力研究. 应用生态学报, 17, 597–601.]
- Wang L, Gong HL, Liao WB, Wang Z (2015b). Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *Science of the Total Environment*, 532, 420–434.
- Wang Y, Fang RC, Lin MM, Lu Y, Wang L, Jin B (2011). Anatomical structure dynamics of *Ginkgo biloba* L. leaves during annual growth and development. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 31, 942–949. (in Chinese with English abstract) [王扬, 房荣春, 林明明, 陆彦, 王莉, 金飘 (2011). 银杏叶发育过程的解剖结构观察. 西北植物学报, 31, 942–949.]
- Wang YC (2007). *Study on the Source Apportionment and Physicochemical Characteristics of Foliar Dust on Urban Plants*. Master degree dissertation, Nanjing Forest University, Nanjing. (in Chinese). [王亚超 (2007). 城市植物叶面尘理化特性及源解析研究. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京.]
- 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. *Ecology & Environment*, 15, 327–330. (in Chinese with English abstract) [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. 生态环境, 15, 327–330.]
- Xie BZ, Wang HX, Yang J, Wang YH, Shi H (2014). Retention capability of PM_{2.5} and its explanation by leaf surface micro-structure of common broad-leaved plant species in Beijing. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 34, 2432–2438. (in Chinese with English abstract) [谢滨泽, 王会霞, 杨佳, 王彦辉, 石辉 (2014). 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. 西北植物学报, 34, 2432–2438.]
- Xing FQ, Mao JF, Meng JX, Dai JF, Zhao W, Liu H, Xing Z, Zhang Hua, Wang XR, Li Y (2014). Needle morphological evidence of the homoploid hybrid origin of *Pinus densata* based on analysis of artificial hybrids and the putative parents, *Pinus tabulaeformis* and *Pinus yunnanensis*. *Ecology and Evolution*, 4, 1890–1902.
- Yang J, Wang HX, Xie BZ, Shi H, Wang YH (2015). Accumulation of particulate matter on leaves of nine urban greening plant species with different micromorphological structures in Beijing. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28, 384–392. (in Chinese with English abstract) [杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 石辉, 王彦辉 (2015). 北京9种树种叶片滞尘量及叶面微形态解释. 环境科学研究, 28, 384–392.]
- Yao XY, Hu YS, Liu YH (2014). Dust-retention effect of 8 common greening tree species in Beijing. *Journal of Northwest Forestry University*, 29(3), 92–95. (in Chinese with English abstract) [么旭阳, 胡耀升, 刘艳红 (2014). 北京市8种常见绿化树种滞尘效应. 西北林学院学报, 29(3), 92–95.]
- Yin S, Shen ZM, Zhou PS, Zou XD, Che SQ, Wang WH (2011). Quantifying air pollution attenuation within urban parks: An experimental approach in Shanghai, China. *Environmental Pollution*, 159, 2155–2163.
- Yu XR (2008). *The Characteristic of Foliar Dust of Main Afforestation Tree Species in Nanjing and Association with Leaf's Surface Micro-structure*. Master degree dissertation, Nanjing Forest University, Nanjing. (in Chinese). [俞学如 (2008). 南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其与叶面结构的关系. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京.]
- Zhang F (2013). *Studies on the Existing Shrubs of the Road in Changchun and the Dust Retention Capacity of the Three Shrubs*. Master degree dissertation, Jilin Agricultural University, Changchun. (in Chinese). [张放 (2013). 长春市街道绿化现有灌木调查及3种主要灌木滞尘能力研究. 硕士学位论文, 吉林农业大学, 长春.]
- Zhang WK, Wang B, Niu X (2015). Absorption capacities of the air particulate matter in urban landscape plants in different polluted regions of Beijing (China). *Environmental Science*, 12, 9263–9638. (in Chinese with English abstract) [张维康, 王兵, 牛香 (2015). 北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力. 环境科学, 12, 9263–9638.]
- Zhang ZD, Cao ZG, Jia LM (2015). Regulation of four typical scenic recreational plantations to stand PM_{2.5} concentration in Beijing, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26, 3475–3481. (in Chinese with English ab-

stract) [张志丹, 曹治国, 贾黎明 (2015). 北京4种典型风景游憩林对林内PM_{2.5}的调控作用. 应用生态学报, 26, 3475–3481.]

Zhang ZD, Xi BY, Cao ZG, Jia LM (2014). Exploration of a quantitative methodology to characterize the retention of PM_{2.5} and other atmospheric particulate matter by plant leaves: Taking *Populus tomentosa* as an example. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 2238–2242. (in Chinese with English abstract) [张志丹, 席本野, 曹治国, 贾黎明 (2014). 植物叶片吸滞PM_{2.5}等大气颗粒物定量研究方法初探——以毛白杨为例. 应用生态学报, 25, 2238–2242.]

Zhao ST, Li XY, Li YM (2014). The characteristics of deposi-

tion of airborne particulate matters with different size on certain plants. *Ecology and Environmental Sciences*, 23, 271–276. (in Chinese with English abstract) [赵松婷, 李新宇, 李延明 (2014). 园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征与规律. 生态环境学报, 23, 271–276.]

Zheng SW, Xing GM, Li J, Li JS (2008). Effect of dust catching capacity of common virescence tree species in the North of China. *Journal of Shanxi Agricultural University*, 28, 383–387. (in Chinese with English abstract) [郑少文, 邢国明, 李军, 李锦生 (2008). 北方常见绿化树种的滞尘效应. 山西农业大学学报(自然科学版), 28, 383–387.]

责任编辑: 刘菊秀 责任编辑: 李 敏



植物生态学报官网



微信订阅号
期刊及学科
相关信息发布



微信服务号
稿件状态查询
全文检索浏览