

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

基于PMF和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析：以南京市观测为例
胡崑，王鸣，王红丽，景盛翱，陈文泰，卢兴东



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社

2021年1月

第42卷 第1期

Vol.42 No.1



目次

2019年国庆节前后北京气态氨和气溶胶铵盐浓度的同步观测 顾梦娜, 潘月鹏, 宋琳琳, 李萍, 田世丽, 武岳洋, 杨婷婷, 李浩洋, 石生伟, 吐莉尼沙, 吕雪梅, 孙倩, 方运霆 (1)

基于无人机探空和数值模拟天津一次重污染过程分析 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹, 史静, 唐颖潇, 姜明, 邱晓滨 (9)

中原城市群典型城市秋冬季大气 PM_{2.5} 污染特征及溯源 苗青青, 姜楠, 张瑞芹, 赵孝因, 齐静文 (19)

沈阳市冬季大气 PM_{2.5} 中水溶性离子污染特征及来源解析 王国祯, 任万辉, 于兴娜, 侯思宇, 张毓秀 (30)

保定地区 PM_{2.5} 中重金属元素的污染特征及健康风险评价 雷文凯, 李杏茹, 张兰, 徐静, 赵文吉, 刘子锐 (38)

基于 PMF 和源示踪物比例法的大气羰基化合物来源解析: 以南京市观测为例 胡崑, 王鸣, 王红丽, 景盛翔, 陈文泰, 卢兴东 (45)

2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源 高璟, 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 唐逸, 杨宁, 李源, 毕温凯, 陈魁 (55)

柳州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析 刘齐, 卢星林, 曾鹏, 于爽 (65)

天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 毕晓辉, 张裕芬, 冯银厂 (75)

2017年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 李文青, 李浩, 谢轶嵩, 王艳, 刘益和, 王庆九, 胡建林 (88)

2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 赵伟, 高博, 卢清, 钟志强, 梁小明, 刘明, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (97)

大型石化企业邻近区域大气沉降中多环芳烃赋存特征及源解析 李大雁, 齐晓宝, 吴健, 黄沈发, 王敏, 沙晨燕, 沈城 (106)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比 岳晨, 李广德, 席本野, 曹治国 (114)

东江流域敌敌畏的排放量估算及归趋模拟 张冰, 张芊芊, 应光国 (127)

松花江哈尔滨段及阿什河抗生素的分布规律与生态风险评估 杨尚乐, 王旭明, 王伟华, 胡雪莹, 高立伟, 孙兴滨 (136)

东北小兴凯湖沉积物 POPs 污染特征及生态风险评估 李慧, 李捷, 宋鹏, 程云轩, 焦立新, 杨亚铮 (147)

河南省地表水源中 PPCPs 分布及生态风险评估 周颖, 吴东海, 陆光华, 姚晶晶, 魏磊, 韩枫 (159)

无锡-常州地下水水中内分泌干扰物的赋存特征和健康风险评估 王淑婷, 饶竹, 郭峰, 刘成海, 战楠, 王娅南, 彭洁, 杨鸿波 (166)

清江流域地表水重金属季节性分布特征及健康风险评估 刘昭, 周宏, 曹文佳, 刘伟, 兰圣涛 (175)

会仙岩溶湿地丰平枯时期地下水金属元素污染与健康风险 李军, 赵一, 邹胜章, 蓝美宁, 樊连杰, 谢浩, 秦月, 朱丹滢 (184)

三峡库区城镇化影响下河流 DOM 光谱特征季节变化 陈昭宇, 李思悦 (195)

不同植物覆盖下黄河三角洲湿地土壤中微塑料的分布 岳俊杰, 赵爽, 程昊东, 段鑫越, 石洪华, 汪磊, 端正花 (204)

基于宏基因组学探讨东平湖水库的菌群结构、耐药基因谱及其公共健康风险 张红娜, 崔娜, 申红妙 (211)

分层型水库藻类季相演替的细菌种群驱动机制 闫苗苗, 张海涵, 黄廷林, 宗容容, 刘凯文, 苗雨甜, 杨尚业, 黄鑫, 王娜 (221)

丹江口库区浮游真菌组成与功能及其影响因素 郑保海, 王晓宇, 李英军, 陈彦, 李百炼, 李玉英, 陈兆进 (234)

太湖出流河道藻颗粒变化及其水质效应 郭宇龙, 许海, 陈旭清, 郑建中, 詹旭, 朱广伟, 朱梦圆 (242)

石盘丘小流域不同土地利用方式下土壤氮磷流失形态及通量 邓华, 高明, 龙翼, 黎嘉成, 王盛燕, 王子芳 (251)

前期干旱天数对生物滞留系统除氮性能的影响 陈焱, 李欣芮, 郑爽, 刘臻, 余雪花, 程启洪 (263)

浒苔生物炭对雨水径流中氨氮的吸附特性及吸附机制 陈友媛, 李培强, 李闲驰, 孙萍, 赵新月, 李洁, 李晋, 辛至然 (274)

填料对潮汐流人工湿地中 CANON 作用强化的影响 刘冰, 郑煜铭, 秦会安, 古励 (283)

FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制 廖玉梅, 余杰, 魏世强, 蒋珍茂 (293)

硝酸钙添加和铅改性膨润土覆盖联用控制底泥中磷释放的效果及机制 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 俞阳, 张志斌 (305)

某市污水厂抗生素和抗生素抗性基因的分布特征 颜亚玮, 於驰晨, 李菲菲, 姚鹏城, 刘宏远 (315)

不同污泥在微波预处理-厌氧消化过程中抗性基因分布及菌群结构演替 李慧莉, 武彩云, 唐安平, 佟娟, 魏源送 (323)

天然富硒土地划定的富硒阈值 王惠艳, 曾道明, 郭志娟, 成晓梦, 彭敏, 孙跃 (333)

融合自然-人为因子改进回归克里格对土壤镉空间分布预测 高中原, 肖荣波, 王鹏, 邓一荣, 戴俊杰, 刘楚藩 (343)

南方典型水稻土镉(Cd)累积规律模拟 戴雅婷, 傅开道, 杨阳, 王美娥, 陈卫平 (353)

闽西南土壤-水稻系统重金属生物可给性及健康风险 林承奇, 蔡宇豪, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 黄华斌 (359)

干湿交替灌溉制度下纳米修复材料对杂交水稻籽粒 Cd 累积及产量的影响 杨茹, 陈馨睿, 张颖, 崔俊义, 武立权, 马友华, 廖江, 何海兵 (368)

三元复合调理剂对土壤镉吸附形态和糙米镉累积的调控效应 蒋毅, 刘雅, 辜娇峰, 杨世童, 曾雄, 王轩宇, 周航, 廖柏寒 (378)

风化煤组配改良剂结合水分管理对水稻根际土壤与稻米甲基汞含量的影响 郑顺安, 吴泽赢, 杜兆林, 倪润祥, 姚启星 (386)

不同施肥措施对水稻土壤微生物抗性的影响 郑开凯, 马志远, 孙波, 梁玉婷 (394)

氮添加影响下新疆天山雪岭云杉林土壤酶活性及其与环境因子的相关性 张涵, 贡璐, 刘旭, 邵康, 李昕竹, 李蕊希 (403)

黄土陵区撂荒农田土壤酶活性及酶化学计量变化特征 钟泽坤, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (411)

生物炭对土壤酶活性和细菌群落的影响及其作用机制 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 曾强, 陈楠, 李小龙, 任天宝, 姬小明, 刘国顺 (422)

植被恢复对刺萼龙葵根际土壤细菌群落结构与功能的影响 张瑞海, 宋振, 付卫东, 鄂玲玲, 高金会, 王然, 王忠辉, 张国良 (433)

黄壤稻田土壤微生物量碳氮及水稻品质对生物炭配施氮肥的响应 史登林, 王小利, 刘安凯, 侯再芬, 梁国太 (443)

等碳量添加秸秆和生物炭对土壤呼吸及微生物量碳氮的影响 何甜甜, 王静, 符云鹏, 符新妍, 刘天, 李亚坤, 李建华 (450)

秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响 孙昭安, 张轩, 胡正江, 王开永, 陈清, 孟凡乔 (459)

生物炭与化肥混合对氨挥发和磷固定的影响 杨文娜, 邓正昕, 李娇, 郑杰炳, 王子芳, 高明 (467)

氮肥减投条件下膜材料使用对稻田氨挥发排放的影响 俞映惊, 王梦凡, 杨根, 何世颖, 段婧婧, 杨林章, 薛利红 (477)

微塑料对斑马鱼胚胎孵化影响及其在幼鱼肠道中的积累 赵佳, 饶本强, 郭秀梅, 高进勇 (485)

无人机热红外支持下的城市微尺度热环境模拟 阳少奇, 冯莉, 田慧慧, 刘艳霞 (492)

基于人居尺度的中国城市热岛强度时空变化及其驱动因子解析 孙艳伟, 王润, 郭青海, 高超 (501)

《环境科学》征订启事(8) 《环境科学》征稿简则(220) 信息(233, 352, 421)

叶片大气颗粒物滞纳能力评估方法的定量对比

岳晨¹, 李广德², 席本野^{1*}, 曹治国^{3*}

(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. 国家开放大学农林医药教学部, 北京 100039; 3. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 新乡 453007)

摘要: 为探究基于相同实验材料和叶面积测定方法的前提下, 5种评估叶片滞尘能力方法的差异, 并在此基础上归纳总结各方法的优缺点, 本研究以北京市常见、叶片特征区别较大的4个城市绿化树种油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、银杏(*Ginkgo biloba*)和一球悬铃木(*Platanus occidentalis*)为研究对象, 采集叶样后, 分别用质量差减法(MS)、滤膜法(MF)、气溶胶再发生器法(AR)、电镜扫描法(SEM)和基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法(ultrasonic-EWPA)对4个树种叶片的PM滞纳能力及特征进行评估。评估的同时测定每种方法评估所需总时间, 并计算其所需总成本。结果表明, 虽然不同方法得到的叶面滞尘效率数值的差异巨大, 但得到的叶面滞尘效率的树种排序存在重合部分, 其中, 评估原理相同或类似的方法得到的结果重合部分更多(最多的为AR和SEM)。各方法得到的针对同一指标的不同树种排序中, 有89%的排序为侧柏>油松>一球悬铃木>银杏, 其余排序为一球悬铃木>银杏>侧柏>油松。5种方法中, 得到指标数量最多、成本最高的均为ultrasonic-EWPA, 得到指标数量最少、成本最低的均为MS; 耗时最长的为MF, 最短的为AR。ultrasonic-EWPA和SEM是高投入高产型方法, 即虽然需要较多的实验耗时及成本, 但能得到更丰富的评估信息; MS则属于低投入低产出型, 得到的信息量较少, 适用于只需粗略评估树木总滞尘能力的情况; MF所得信息量中等, 成本较低, 但耗时过长, 使用前需进行权衡; AR对设备和参数的要求严格, 需谨慎使用。本研究结果可为今后研究人员选择用于评估植物滞尘能力的具体方法提供全面详实的科学依据。

关键词: 方法对比; 大气颗粒物(PM); 滞尘效率; 耗时; 成本; 粒径分布

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)01-0114-13 DOI: 10.13227/j.hjcx.202006054

Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves

YUE Chen¹, LI Guang-de², XI Ben-ye^{1*}, CAO Zhi-guo^{3*}

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Silviculture and Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Faculty of Agriculture Forestry & Medicine, the Open University of China, Beijing 100039, China; 3. Ministry of Education Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environmental and Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007)

Abstract: The objective of this study was to explore the differences of five methods for evaluating the PM retention capacity of leaves based on the same experimental materials and leaf area measurement method and to summarize the advantages and disadvantages of each method. In this study, four tree species (*Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis*, *Ginkgo biloba*, and *Platanus occidentalis*), which are common in Beijing and have greatly different leaf characteristics, were selected as the research objects. The mass subtraction method (MS), the membrane filter method (MF), the aerosol regenerator method (AR), the scanning electron method (SEM), and the elution weighing method coupled with a particle size analysis based on ultrasonic cleaning (ultrasonic-EWPA) were used to evaluate the PM retention capabilities and characteristics of the leaves of the four tree species. The total time needed and the total cost were measured simultaneously during the evaluation process. The results showed that although the values of PM retention efficiency obtained by different methods were quite different, the ranks of the efficiency of four tree species obtained by different methods were the same or partially the same. Additionally, the results obtained by the methods with the same or similar principles were more overlapped (AR and SEM had the most overlapped results). In addition, 89% of the species ranks of the same index obtained by each method were *P. orientalis* > *P. tabulaeformis* > *P. occidentalis* > *G. biloba*, and the remaining 11% were *P. occidentalis* > *G. biloba* > *P. orientalis* > *P. tabulaeformis*. Among the five methods, ultrasonic-EWPA was the one with the largest number of indexes and the highest cost, and MS was the one with the least number of indexes and the lowest cost. The one that needed most time was MF, while the one that needed the least time was AR. ultrasonic-EWPA and SEM are high input and high output methods. That is to say, although they needed more time and cost, they can provide more information; however, MS was opposite, which resulted in less information but lower time and cost needed. So, it is suitable for roughly evaluating the total PM retention capacities of trees; MF had a medium amount of information, low cost, but required too much time, which needs to be weighed and balanced before selecting this method. The AR method had strict requirements for equipment and parameters and should be used with caution. The results of this study can provide a comprehensive and

收稿日期: 2020-06-05; 修订日期: 2020-07-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977308); 河南省高等学校创新人才支持计划项目(20HASTIT011)

作者简介: 岳晨(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物与环境, E-mail: yc999222@126.com

* 通信作者, E-mail: benyexi@bjfu.edu.cn; wq11ab@163.com

detailed scientific basis for researchers to choose specific methods in the future.

Key words: comparison of methods; particulate matters (PM); retention efficiency; time; cost; particle size distribution

大气颗粒物(particulate matters, PM)是城市空气污染的主要成分,会严重危害人类的身心健康^[1-3].长期暴露在PM污染中,慢性病发病率及重病患者死亡率都有增加的风险^[2,4];此外,PM污染还会诱发心脑血管和呼吸系统疾病,对老人和儿童等免疫能力较差的人群的危害更加严重^[5,6].而植物叶片由于具有复杂的微观结构,以及可能覆有绒毛和能够分泌黏液等特征,对于PM具有一定的阻滞作用.同时,植物巨大的叶面积以及可以覆盖地表等特点,能够对PM污染产生很好地调控作用^[7-10].因此,许多学者针对不同树种对于不同类型PM的滞纳能力和叶片上的PM沉积对植物生理特性产生的影响等进行了大量的研究^[11-15].

准确评估树木的滞尘能力是更好利用树木进行空气净化前提.目前用于植物滞尘研究的实验方法主要有野外实验、模拟实验,以及操作实验这3类^[16].野外实验的主要研究对象为植物群落,侧重森林整体对城市环境的影响;模拟实验则关注环境因子对植物滞尘能力的影响,侧重环境因子(大风和降雨等)在植物滞尘过程中所起的作用或带来的干扰^[17].而只有利用操作实验对植物滞尘能力进行定量评估,并了解叶片滞尘的机制和内在因素等,才能更好地开展上述这两类实验.定量评估叶片对PM污染的综合响应是此类研究的关键,而精确测定叶片的PM滞纳量则是评估中的重要环节.

当前常用的评估方法主要有质量差减法(mass subtraction method, MS)、滤膜法(membrane filter method, MF)、气溶胶再发生器法(aerosol regenerator method, AR)、电镜扫描法(scanning electron method, SEM)以及基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法(elution weighing method coupled with a particle size analysis based on the ultrasonic cleaning, ultrasonic-EWPA)^[11,18-21],不同方法各有利弊.质量差减法^[22,23]操作简便迅速,但无法针对具体的PM类型和径级进行叶片滞尘能力和特征的探究.滤膜法在质量差减法的基础上增加了使用滤膜过滤的步骤^[24,25],从而可以对PM的粒径进行径级划分.但通常滤膜的孔径是固定的,因此径级划分只能限制于特定的滤膜规格.气溶胶再发生器法又称为颗粒物再悬浮法^[26],是根据风蚀原理将叶表PM吹起并形成气溶胶,再测定气溶胶中不同径级PM的浓度,从而间接得到叶片滞尘量的方法.电镜扫描法是对叶表PM的数量进行了直接统计^[27].基

于超声清洗的洗脱称量粒度分析法能够更为准确地测定植物叶片滞纳的PM质量,并实现PM粒径分布的直接测定^[28].同时,清洗叶片过程中加入的超声清洗步骤更完整地收集了叶表颗粒物^[29].但该方法存在操作步骤较多、实验耗时较长等问题.

MS、MF和ultrasonic-EWPA都需要对叶片进行清洗,目前有两种常用的方法:单一清洗法(冲洗+泡洗)和泡刷结合法(冲洗+泡洗+刷洗).不同研究采用不同的清洗方法就会导致叶表PM收集的完整度不同.另外,叶片尺度的评估通常是基于单位叶片面积的滞尘情况进行的,因此评估过程中还涉及到叶面积的测定.目前的叶面积测定方法有打孔称重法、方格网测面积及利用叶面积仪对其进行直接测定等^[16],但各测定方法的误差并不一致.除了不同过程的方法相异之外,研究对象的差异,如生活型和生存环境等内在和外在因素的不同,也导致许多研究的结果之间不具有可比性.因此,目前对于各方法之间的具体差异,还并未有准确和能够量化的结果.

针对上述问题,本研究的主要目的如下:①基于相同的实验材料,探究5种评估叶片滞尘能力方法(质量差减法、滤膜法、气溶胶再发生器法、电镜扫描法和基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法)的评估结果的差异;②基于相同的实验材料和叶面积测定方法,探究5种评估方法在耗时和成本方面的差异;③基于5种方法的评估结果、实验耗时和成本的差异,探究选择某种具体方法进行研究时的注意事项.本文以期对未来相关研究选择合适的方法提供科学的依据和参考.

1 材料与方法

1.1 采样地点概况

采样于北京林业大学校园(116°20'43.38"E, 40°0'5.88"N)内进行.该采样区为相对封闭式环境,车辆较少,二次扬尘主要来自于校内人员活动.粉尘主要来源为区域大气污染传输、校园外部的道路车辆扬尘以及校园内施工工程.

1.2 实验材料

本研究对象为生活型、叶片的宏观特征(叶面积、叶片形状等)和微观结构(绒毛、叶脉等)均存在明显差异的4个北京城市绿化树种(表1).

1.3 采样及处理

有研究认为,降雨量大于15 mm的降雨即可将

表 1 实验材料

Table 1 Experimental materials

树种	生活型	平均树高/m	叶片主要特征
油松 (<i>Pinus tabulaeformis</i>)	常绿乔木	25	针形,具树脂道
侧柏 (<i>Platycladus orientalis</i>)	常绿乔木	20	鳞形,具腺槽
银杏 (<i>Ginkgo biloba</i>)	落叶乔木	40	扇形,具细脉
一球悬铃木 (<i>Platanus occidentalis</i>)	落叶乔木	40	阔卵形,具绒毛

叶表的颗粒物基本冲刷干净^[30],王会霞等^[15]的研究也认为这样即可恢复叶片的滞尘能力,使其开始新的滞尘过程,并基于此来计算叶片滞尘量.此外,有许多相关研究设置滞尘天数均为 4 ~ 7 d^[9,20,29,31~34].因此,本次研究于 2018 年 9 月 11 日 [雨后 8 d (降雨量 > 15 mm)] 采集油松、银杏和一球悬铃木的叶片,并于 2018 年 9 月 16 日 [雨后 5 d (降雨量 > 15 mm)] 采集侧柏的叶片(9 月 11 日当天采集完油松、银杏和一球悬铃木的叶片后发生了降雨).由于本次研究的重点在于对比不同方法的评估结果,所以采样时间不同对研究结果的影响可以忽略.

每个树种选择 3 株(3 个重复)生长良好、无病害的健康植株作为样树.用枝剪从每株针叶样树(油松、侧柏)冠层上、中、下部的东、西、南、北方位分别截取 2 个小枝,从每株阔叶样树(银杏、一球悬铃木)冠层下部的东、西、南、北方位分别截取 6 个小枝.迅速收集剪断的小枝,防止其不慎掉落地面被污染.从采集到的小枝上选择状态良好、生长平均的叶片,将其连同叶柄一起剪下并放入干净的自封袋中,将自封袋牢固封口,然后带回实验室进行冷藏备用.

1.4 测定指标及方法

1.4.1 滞尘量

除了 SEM,另外 4 种方法使用的叶片数量相同.每个重复(每种方法各设置 3 个重复)所使用的各树种的具体叶片数量如下:油松 40 束松针、侧柏 40 个小枝、一球悬铃木 14 片叶片和银杏 27 片叶片.

(1)质量差减法 叶片样品放入适量蒸馏水(300 mL)中,使用玻璃棒进行搅拌(60 s),然后将叶片取出并使用尼龙刷轻刷叶片表面,将叶表颗粒物刷洗至上述蒸馏水中,洗脱液收集,容器封口,备用.慢速定量滤纸编号、万分之一天平(精度 0.1 mg;北京赛多利斯仪器系统有限公司,北京)称重(W_1)、备用.洗脱液用慢速定量滤纸过滤,然后使用 DHG9070B 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司,上海)60℃烘干至恒重(两次测定值之差不超过 0.000 2 g),之后再称量烘干后的滤纸重量

(W_2).计算滤纸的空白对照烘干前后的质量差 ΔW ($\Delta W = W_{CK2} - W_{CK1}$,式中, W_{CK1} 为空白对照滤纸烘干前的质量, W_{CK2} 为空白对照滤纸烘干后的质量),以及叶片滞纳的颗粒物的总质量 $W = W_2 - W_1 - \Delta W$.

(2)滤膜法 叶片样品放入适量蒸馏水(300 mL)中,使用玻璃棒进行搅拌(60 s),然后将叶片取出并使用尼龙刷轻刷叶片表面,将叶表颗粒物刷洗至上述蒸馏水中,洗脱液收集,容器封口,备用.将孔径为 1、5 和 10 μm 的纤维滤膜进行编号,并用万分之一天平(精度 0.1 mg;北京赛多利斯仪器系统有限公司,北京)称重(W_{i1})、备用.

用孔径为 10 μm 的滤膜对上述洗脱液进行过滤处理,得到保留粒径 $d > 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物的滤膜 A,以及截有粒径 $d \leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物的滤液 a;用孔径为 5 μm 的滤膜过滤滤液 a,得到保留粒径 $5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物的滤膜 B,以及截有粒径 $d \leq 5 \mu\text{m}$ 的颗粒物的滤液 b;依法进行最后一次过滤,用孔径为 1 μm 的滤膜过滤滤液 b,得到保留粒径 $1 \mu\text{m} < d \leq 5 \mu\text{m}$ 的颗粒物的滤膜 C,以及截有粒径 $d \leq 1 \mu\text{m}$ 的颗粒物的滤液 c,用干净且已称重的 50 mL 离心管封装滤液 c.

用 DHG9070B 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司,上海)将滤膜 A、B、C 和装有滤液 c 的离心管于 60℃ 下进行烘干至恒重(两次测定值之差不超过 0.000 2 g),再用万分之一天平对烘干后的滤膜和离心管的质量(W_{2i})进行称重.计算滤膜及离心管的空白对照烘干前后的质量差 ΔW ($\Delta W = W_{CK2} - W_{CK1}$,式中, W_{CK1} 为空白对照滤膜烘干前的质量, W_{CK2} 为空白对照滤膜烘干后的质量),以及叶片滞纳的各径级颗粒物的质量 $W = W_{2i} - W_{i1} - \Delta W$ (式中 i 为粒径范围, i 为 $d > 10 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m} < d \leq 5 \mu\text{m}$ 和 $d \leq 1 \mu\text{m}$).最后得到 $\text{PM}_{>10}$ 、 PM_{5-10} 、 PM_{1-5} 和 PM_1 的质量.

(3)气溶胶再发生器法 将需要测定的叶片样品放入气溶胶再发生器的料盒中,通过持续的风力将颗粒物从树木叶片表面上吹起并混合均匀(风速 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;使颗粒物重新悬浮 30 s),从而形成分散着不同类型颗粒物的气溶胶,然后利用 831PM 值检测仪[分辨率 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;测试粒径 PM_1 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、

PM₄、PM₁₀和TSP(同时测试和显示); 取样时间 60 s; Met One Instrument, Inc, USA)]测定该气溶胶中 PM₁、PM_{2.5}、PM₄、PM₁₀和TSP的浓度, 根据气溶胶再发生器料盒的体积换算得到上述类型颗粒物的质量。

(4) 电镜扫描法 每个阔叶树种的每个重复各取 3 片叶子, 油松的每个重复各取 3 束针叶, 侧柏的每个重复各取 3 个小枝, 每个阔叶叶片用打孔器取 1 个正面圆片和 1 个反面圆片, 每束针叶和每个小枝的中部用剪刀剪 1 段 1 cm 正面小段和 1 段 1 cm 反面小段。每个叶圆片、针叶小段和小枝小段都用白纸包裹, 在白纸上编号并用回形针固定。所有处理好的样品用 DHG9070B 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司, 上海)60℃烘干 24 h 后取出。

上述样品进行粘台, 用日立 E-1010 真空喷镀仪(Hitachi, Tokyo, Japan)进行喷金, 然后用日立 S3400 扫描电子显微镜(分辨率 3.0 nm; Hitachi, Tokyo, Japan)分别对银杏、一球悬铃木、油松和侧柏叶片的正、反面分别进行扫描观测, 并拍照获取放大 1 500 倍^[35]的图像。用 Image J 软件(v. 1. 51j8, National Institutes of Health, Maryland, USA)测量图像的实际面积的大小以及颗粒物的粒径(以颗粒物的长轴作为粒径), 并统计各径级颗粒物的数量。粒径按 5 个径级进行统计($d \leq 1 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m} < d \leq 2.5 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m} < d \leq 5 \mu\text{m}$ 、 $5 \mu\text{m} < d \leq 10 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m} < d \leq 100 \mu\text{m}$)。

(5) 基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法 离心管编号(包括空白对照用离心管), 用万分之一天平称重(W_1)、备用。叶片样品放入 200 mL 蒸馏水中, 使用玻璃棒进行搅拌(60 s), 然后将叶片取出并使用尼龙刷刷叶片表面, 将叶表颗粒物刷洗至上述蒸馏水中, 再将盛有叶片和洗脱液的烧杯放置于 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)中, 设置 500 W 功率对叶片进行超声清洗(阔叶 3 min, 针叶 10 min), 在超声清洗进行过程中, 同时使用玻璃棒在烧杯中轻轻搅拌, 然后将洗脱液平均分装入 4 个 50 mL 离心管中; 用 MultifugeX1R 高速冷冻离心机(转速 5 000 r·min⁻¹; Thermo Fisher Scientific, New York, USA)对上述洗脱液进行 1 次离心(转速 5 000 r·min⁻¹, 离心时间 20 min)。离心结束后, 将上清液分离至另一个 50 mL 洁净离心管中, 之后用干净滤纸覆盖离心管的管口(防止污染); 将盛有沉淀物(非水溶性颗粒物, water-insoluble particulate matter, WIPM)和上清液(水溶性颗粒物, water-soluble particulate matter, WSPM)的离心管、以及作为空白对照的离心管均放

入 DHG9070B 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司, 上海), 在 60℃ 下进行烘干至恒重(两次测定值之差不超过 0.000 2 g), 然后使用万分之一天平(精度 0.1 mg; 北京赛多利斯仪器系统有限公司, 北京)对离心管进行称重(W_2), 便得到颗粒物的总质量 $W = W_2 - W_1 - \Delta W$ 。式中, ΔW 为离心管的空白对照烘干前后的质量差, $\Delta W = W_{CK2} - W_{CK1}$ (式中, W_{CK1} 为空白对照离心管烘干前的质量, W_{CK2} 为空白对照离心管烘干后的质量)。

上述步骤完成后, 往装有 WIPM 和 WSPM 的离心管中分别倒入 50 mL 去离子水和 50 mL 无水乙醇, 将二者均放入超声波清洗器中进行超声波振荡, 持续 30 min; 然后用 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)测定颗粒物的粒径分布, 并由此获得洗脱液中各径级 PM 的体积分数, 将其作为质量分数(Q)^[36]代入计算。利用公式(1)计算叶面不同径级 WSPM 和 WIPM 的滞纳量(W)。

$$W_i = \sum W \cdot Q_i \quad (1)$$

式中, W_i 为 i 径级 WSPM(或 WIPM)的洗脱量(mg); W 为叶面 WSPM(或 WIPM)的总洗脱量(mg); Q_i 为 i 径级颗粒物的质量分数(%); i 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 $10 \mu\text{m} < d \leq 100 \mu\text{m}$ 。

1.4.2 叶面积

用于测定滞尘量的叶片样品放入 EPSON Expression 1680 扫描仪(Seiko Epson, Nagano, Japan)中进行扫描, 然后利用 WinRHIZO 图像分析软件(Regent Instruments Inc., Canada)分析获得的样品数据(叶样的表面积和投影面积), 根据公式(2)^[31]、(3)^[37]和(4)^[26]分别计算不同树种叶片的叶面积。

$$S_1 = A_p \times 2 \quad (2)$$

$$S_2 = A_p + (A_s/2) \quad (3)$$

$$S_3 = A_s \quad (4)$$

式中, S_1 为银杏(一球悬铃木)叶面积(m²), S_2 为油松叶面积(m²), S_3 为侧柏叶面积(m²); A_p 为投影面积(m²); A_s 为表面积(m²)。

1.4.3 单位叶面积滞尘效率

根据公式(5)计算单位叶面积滞尘量。

$$M_{\text{leaf}} = M_t/S_{\text{leaf}} \quad (5)$$

式中, M_{leaf} 为单位叶面积滞尘量(mg·m⁻²); M_t 为各树种用于实验的所有叶片的总滞尘量(mg); S_{leaf} 为各树种用于实验的所有叶片的叶面积(m²)。

以单位叶面积滞尘效率作为叶片 PM 滞尘能力的表征指标,利用公式(6)计算滞尘效率.

$$E_{\text{leaf}} = M_{\text{leaf}i}/t \quad (6)$$

式中, E_{leaf} 为滞尘效率 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 或 $\mu\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 或 $\text{个} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$]; $M_{\text{leaf}i}$ 为 i 径级单位叶面积滞尘量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$); t 为雨后经历滞尘的天数 (d).

1.4.4 耗时及成本

各方法的耗时及成本均为进行3个重复所需的耗时及成本.使用秒表直接测定各方法实验过程的耗时;各方法的成本为实验过程中购买所需耗材、仪器设备以及使用课题组外实验平台的仪器设备所花费的资金的总和.

1.5 数据分析

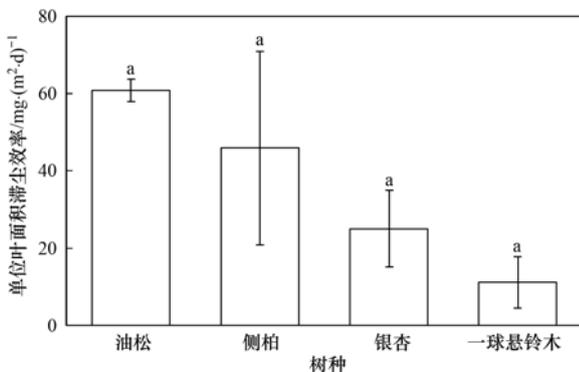
分别用 Kolmogorov-Smirnov 检验和 Levene 检验对树种 PM 滞尘能力数据的正态和方差齐性进行验证.如果数据不符合要求,则对数据进行转换.数据符合条件后,采用配对样本 t 检验或单因素方差分析对数据进行检验,用 Duncan 检验进行多重比较 ($P = 0.05$).对转换后仍不符合上述假设的数据进行 Kruskal-Wallis 非参数检验.所有数据分析均使用 SPSS (2010, v. 19.0; SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 进行.

2 结果与分析

2.1 不同方法的评估结果

2.1.1 质量差减法

单位叶面积滞尘效率的树种间差异不显著 ($P > 0.05$).油松和侧柏的滞尘效率都高于银杏和一球悬铃木,其中油松的滞尘效率最高,一球悬铃木的最低(图1).



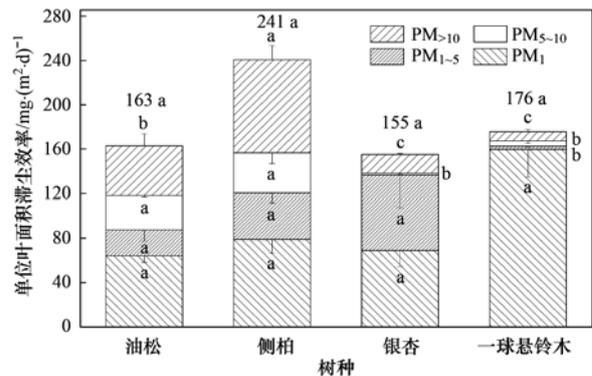
每根柱子上小写字母相同表示各树种滞尘效率的差异不显著 ($P > 0.05$), 根据 Duncan 检验

图1 质量差减法测定得到的4个树种的单位叶面积滞尘效率
Fig. 1 PM retention efficiency of the unit leaf area of the four tree species measured by the mass subtraction method

2.1.2 滤膜法

单位叶面积 TSP 和 PM_{10} 滞尘效率的树种间差

异不显著 ($P > 0.05$), 此外其它径级 PM 的单位叶面积滞尘效率的差异均显著 ($P < 0.05$, 图2). 各树种对不同径级 PM 的滞尘效率的排序变化较大, 但侧柏的 PM_{5-10} 、 $\text{PM}_{>10}$ 和 TSP 的滞尘效率均最高, 其中 $\text{PM}_{>10}$ 滞尘效率显著高于另外3个树种 ($P < 0.05$, 图2).



每个树种对应的柱子上方的数字为各树种对于总颗粒物的单位叶面积滞尘效率; 不同的小写字母表示各树种对于同一径级颗粒物(或总颗粒物)的滞尘效率的差异显著 ($P < 0.05$), 根据 Duncan 检验

图2 滤膜法测定得到的4个树种对于不同径级和总颗粒物的单位叶面积滞尘效率

Fig. 2 Different-sized and total PM retention efficiency of the unit leaf area of the four tree species measured by the membrane filter method

2.1.3 气溶胶再发生器法

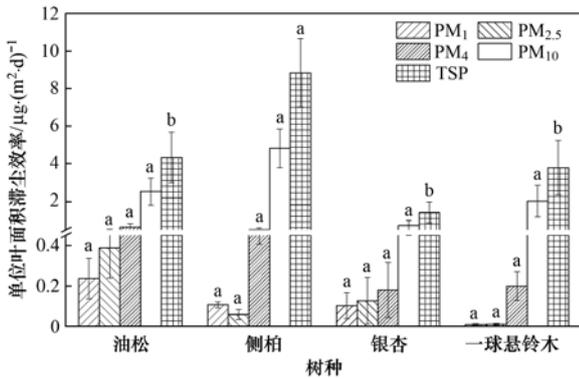
仅单位叶面积 TSP 滞尘效率的树种间差异显著 ($P < 0.05$), 其它径级 PM 的单位叶面积滞尘效率的差异均不显著 ($P > 0.05$, 图3). 不同径级 PM 滞尘效率的树种排序变化较大, 仅 PM_{10} 和 TSP 滞尘效率的树种排序相同, 均为侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏.

2.1.4 电镜扫描法

结果显示, 没有观测到有任何树种滞尘了 PM_1 , 但观测到每个树种都滞尘了 PM_{5-10} 、 PM_{10-100} 和 $\text{PM}_{>100}$. 对于这3个径级的 PM, 不同树种的滞尘效率间存在显著差异 ($P < 0.05$), 各树种的 TSP 滞尘效率间也存在显著差异 ($P < 0.05$, 图4). PM_{5-10} 、 PM_{10-100} 和 TSP 滞尘效率的树种排序一致, 均为侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏, $\text{PM}_{>100}$ 滞尘效率的排序则为侧柏 > 银杏 > 一球悬铃木 > 油松(图4).

2.1.5 基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法

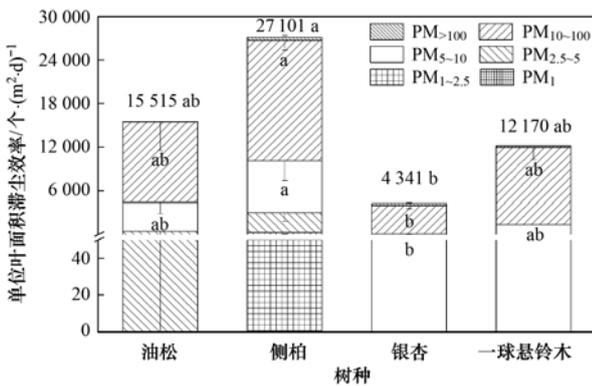
对于所有各类型几乎任一径级的 PM, 滞尘效率的树种间差异均显著 ($P < 0.05$, 图5). 各径级 WSPM 滞尘效率和各径级总颗粒物 (WSPM + WIPM, total particulate matter, TPM) 滞尘效率的树种排序基本一致, 但 WIPM 的排序与其存在较大不



不同的小写字母表示各树种对于同一径级颗粒物的滞尘效率的差异显著 ($P < 0.05$), 根据 Duncan 检验

图3 气溶胶再生器法测定得到的4个树种对于不同径级和总颗粒物(TSP)的单位叶面积滞尘效率

Fig. 3 Different-sized and total PM (TSP) retention efficiency of the unit leaf area of the four tree species measured by the aerosol regenerator method



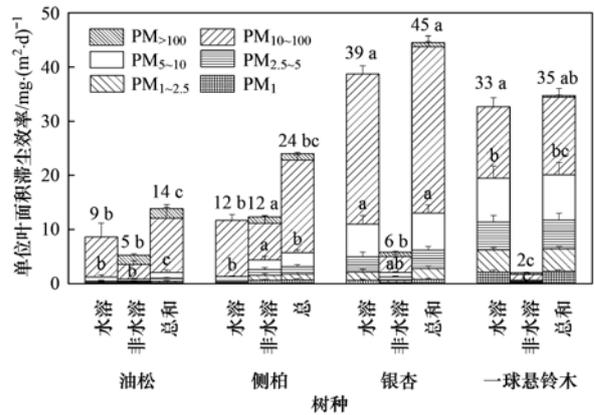
每个树种对应的柱子上方的数字为各树种对于总颗粒物的单位叶面积滞尘效率; 不同的小写字母表示各树种对于同一径级颗粒物(或总颗粒物)的滞尘效率的差异显著 ($P < 0.05$), 根据 Duncan 检验

图4 电镜扫描法测定得到的4个树种对于不同径级和总颗粒物的单位叶面积滞尘效率

Fig. 4 Different-sized and total PM retention efficiency of the unit leaf area of the four tree species measured by the scanning electron microscopy method

同. 银杏的总 WSPM 和 TPM 滞纳效率都最高, 而油松则都最低; 侧柏的总 WIPM 滞纳效率最高, 而一球悬铃木最低 (图 5). 银杏和一球悬铃木的平均 WSPM 滞纳效率高于油松和侧柏的平均滞纳效率; 而对于 WIPM 则恰好相反. 此外, 任一树种叶片滞纳的 PM 中, WSPM 的质量比例总高于 WIPM.

不同类型 PM 的粒径分布有明显差异. 对于同一树种, WSPM 的粒径分布多为单峰型, 且峰值均高于 WIPM; WIPM 的粒径分布更为多样, 而差异主要来自于树种的不同 (图 6). 对于 WSPM, 峰值从大到小的排序与峰值对应的粒径从大到小的排序一致, 均为侧柏 > 油松 > 银杏 > 一球悬铃木 (图 6), 即油松和侧柏比银杏和一球悬铃木滞纳了更多大粒径 PM.



每个树种对应的柱子上方的数字为各树种对于总颗粒物的单位叶面积滞尘效率; 不同的小写字母表示各树种对于同一径级颗粒物(或总颗粒物)的滞尘效率的差异显著 ($P < 0.05$), 根据 Duncan 检验

图5 洗脱称量粒度分析法测定得到的4个树种对于不同径级和总颗粒物的单位叶面积滞尘效率

Fig. 5 Different-sized and total PM retention efficiency of the unit leaf area of the four tree species measured by the elution weighing method coupled with a particle size analysis

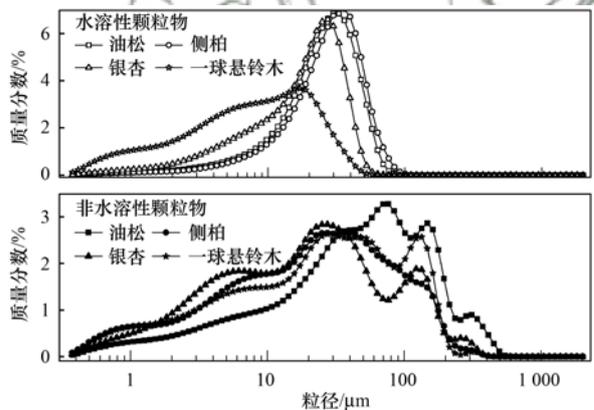


图6 各树种滞纳的水溶性颗粒物(WSPM)和非水溶性颗粒物(WIPM)的粒径分布

Fig. 6 Particle size distribution of water-soluble particulate matter (WSPM) and water-insoluble particulate matter (WIPM) retained by each tree species

WSPM 平均粒径无树种间显著差异 ($P > 0.05$), WIPM 则相反. 其中, 油松和侧柏的 WIPM 平均粒径显著大于银杏和一球悬铃木 ($P < 0.05$, 表 2). 对于同一树种, WSPM 的平均粒径总大于 WIPM, 且 WSPM 的平均粒径范围 ($40 \sim 75 \mu\text{m}$) 也大于 WIPM ($11 \sim 30 \mu\text{m}$), 这表明相较于 WIPM, WSPM 中大粒径颗粒物占比更高.

2.2 不同方法的综合比较

2.2.1 相同单位同一指标的结果对比

由于 SEM 的单位为数量单位 [$\text{个} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], 与另外 3 种方法结果的单位 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 差异较大, 因此进行定量比较时, 仅比较 MS、MF、AR 和 ultrasonic-EWPA 的评估数值. 另外, 由于

表 2 不同类型颗粒物的平均粒径¹⁾

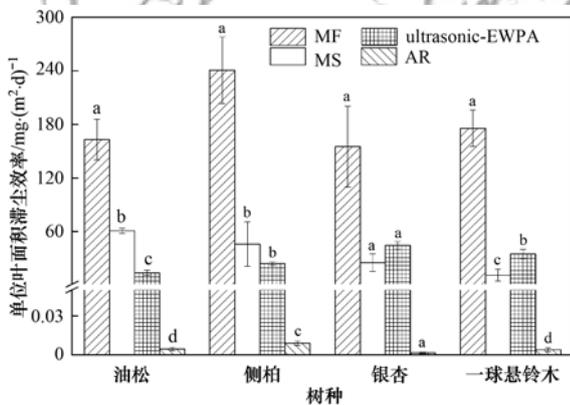
Table 2 Average diameter of different types of particulate matter

颗粒物类型	平均粒径/ μm			
	油松 (<i>P. tabuliformis</i>)	侧柏 (<i>P. orientalis</i>)	银杏 (<i>G. biloba</i>)	一球悬铃木 (<i>P. occidentalis</i>)
水溶性	75a	41a	40a	45a
非水溶性	27a	30a	20b	11c

1) 不同小写字母代表不同树种滞纳的同一类型颗粒物的平均粒径的差异显著 ($P < 0.05$), 根据 Duncan 检验

AR 无法得到 PM_{1-5} 和 PM_{5-10} 的测定结果, 因此分径级对比不同方法的结果时, 不将 AR 的结果纳入比较.

对于 TSP [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$] 这一指标, MF 的测定结果总是最高的, 且对于任一树种, 其测定得到的数值几乎均显著高于 MS 和 ultrasonic-EWPA ($P < 0.05$). 而 AR 的测定结果总是最低的. 对于油松和侧柏, MS 的测定结果高于 ultrasonic-EWPA, 而对于银杏和一球悬铃木则恰好相反 (图 7). 对于油松和侧柏的不同径级 PM 滞纳效率 [$\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$], MF 测定结果总高于 ultrasonic-EWPA, 而银杏和一球悬铃木的结果则更为复杂. 其中, 对于银杏和一球悬铃木的 PM_{5-10} 和 $\text{PM}_{>10}$ 滞纳效率, MF 测定结果总低于 ultrasonic-EWPA (图 8).



不同小写字母表示 4 种方法测定的各树种的 TSP 滞尘效率的差异显著 ($P < 0.05$), 根据 Duncan 检验

图 7 质量差减法、滤膜法、气溶胶再发生器法和洗脱称量粒度分析法测定得到的 4 个树种对于总颗粒物 (TSP) 的单位叶面积滞尘效率

Fig. 7 TSP retention efficiency of the four tree species measured by the mass subtraction method, the membrane filter method, the aerosol regenerator method, and the elution weighing method, each coupled with a particle size analysis

2.2.2 各方法所得指标数量、耗时及成本对比

5 种方法最多可得到 23 个评估指标, 获得最多指标的方法为 ultrasonic-EWPA (23 个指标), 然后依次是 SEM、MF、AR 和 MS (表 3). MF 和 AR、以及 ultrasonic-EWPA 和 AR 的结果均没有重合部分, 而 SEM 和 AR 的结果重合部分最多 (表 3). 23

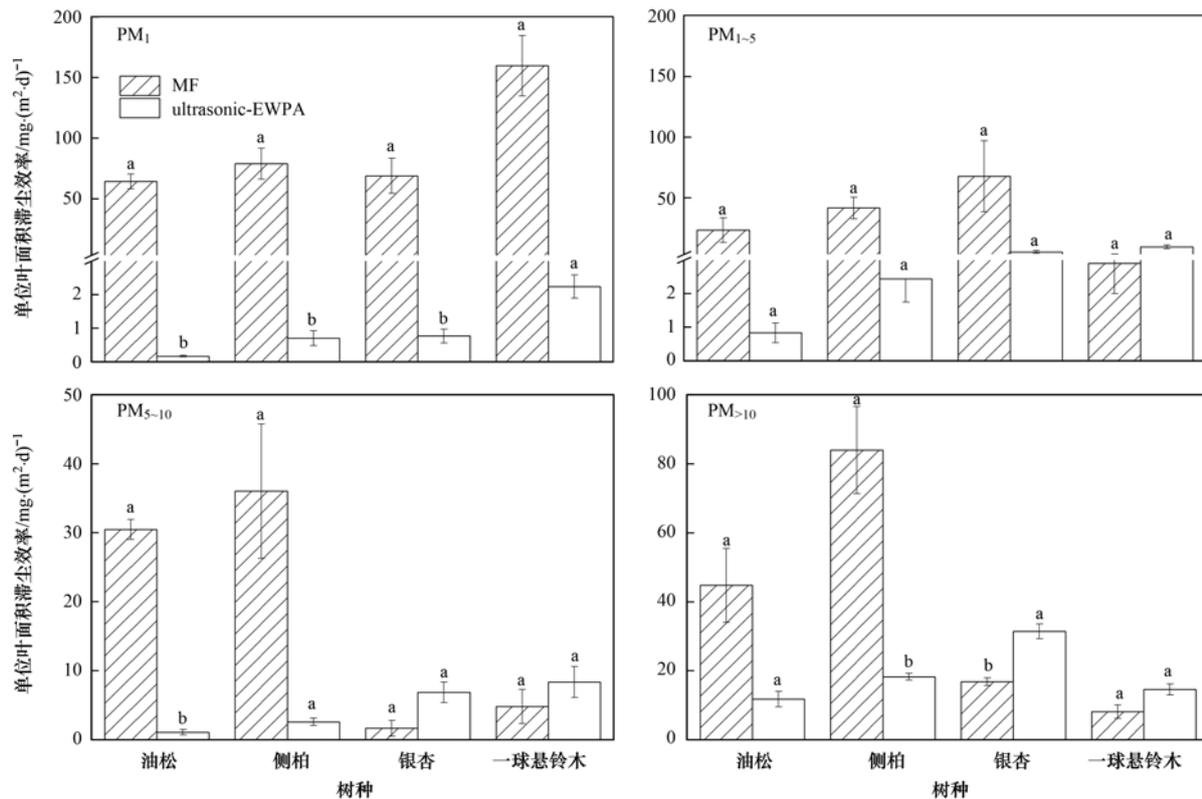
个指标中, 有 11 个指标存在不同方法得出的结果完全或部分重合的情况, 其中 9 个完全重合, 之中 8 个指标的树种排序均为侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏 (表 4). 按各评估方法的耗时从多到少, 排序为: MF > ultrasonic-EWPA > SEM > MS > AR; 按各评估方法的成本从多到少, 排序为: ultrasonic-EWPA > SEM > AR > MF > MS, 其中 AR 和 SEM 的成本相近 (图 9).

表 3 不同评估方法能够得到的指标¹⁾

Table 3 Indexes obtained by the different methods

指标	质量差减法	滤膜法	气溶胶再发生器	电镜扫描法	基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法
TSP	√	√	√##	√##	√
PM_1		√	√	√	√
$\text{PM}_{2.5}$			√	√	√
PM_5		√##		√##	√##
PM_{10}		√	√##	√##	√
PM_{100}				√	√
$\text{PM}_{1-2.5}$		√		√	√
PM_{1-5}		√#		√#	√#
PM_{1-10}		√	√##	√##	√
PM_{1-100}				√	√
$\text{PM}_{2.5-5}$				√#	√#
$\text{PM}_{2.5-10}$			√##	√##	√
$\text{PM}_{2.5-100}$				√	√
PM_{5-10}		√##		√##	√
PM_{5-100}				√	√
PM_{10-100}				√	√
$\text{PM}_{>1}$		√	√##	√##	√
$\text{PM}_{>2.5}$			√##	√##	√
$\text{PM}_{>5}$		√		√	√
$\text{PM}_{>10}$		√	√##	√##	√
$\text{PM}_{>100}$				√	√
粒径分布					√
平均粒径					√

1) “√”表示对应方法能够得到的指标; “##”表示不同方法同一指标的树种滞纳效率排序完全相同, “#”表示不同方法同一指标的树种滞纳效率排序部分相同



不同小写字母表示 2 种方法测定的各树种不同径级颗粒物的滞尘效率的差异显著 ($P < 0.05$), 根据配对样本 t 检验

图 8 滤膜法和洗脱称量粒度分析法测定得到的 4 个树种对于不同径级颗粒物的单位叶面积滞尘效率

Fig. 8 TSP retention efficiency of the four tree species measured by the membrane filter method and the elution weighing method, each coupled with a particle size analysis

表 4 同一指标的树种排序相同的评估方法

Table 4 Different methods with the same rank of one index

指标	评估方法	排序
TSP	气溶胶再发生器法 (AR); 电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏
PM ₅	滤膜法 (MF); 基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法 (ultrasonic-EWPA)	一球悬铃木 > 银杏 > 侧柏 > 油松
PM ₅	电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松
PM ₁₀	气溶胶再发生器法 (AR); 电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏
PM ₁₋₅	滤膜法 (MF); 电镜扫描法 (SEM); 基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法 (ultrasonic-EWPA)	侧柏 > 油松
PM ₁₋₁₀	气溶胶再发生器法 (AR); 电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏
PM _{2.5-5}	电镜扫描法 (SEM); 基于超声清洗的洗脱称量粒度分析法 (ultrasonic-EWPA)	侧柏 > 油松
PM _{2.5-10}	气溶胶再发生器法 (AR); 电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏
PM ₅₋₁₀	滤膜法 (MF); 电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏
PM _{>1}	气溶胶再发生器法 (AR); 电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏
PM _{>2.5}	气溶胶再发生器法 (AR); 电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏
PM _{>10}	气溶胶再发生器法 (AR); 电镜扫描法 (SEM)	侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏

3 讨论

3.1 不同方法的评估结果对比

从基于 $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 这一单位的 TSP 测定结果来看, MS 和 MF 的评估结果均显示油松和侧柏的平均滞尘效率高于银杏和一球悬铃木, 这与大多数采用类似方法的研究结果一致^[38-40], 而 ultrasonic-EWPA 的结果则恰好相反. 并且对于油松和侧柏, MS 的评估数值高于 ultrasonic-EWPA; 而对于银杏

和一球悬铃木, 则是 ultrasonic-EWPA 的评估数值高于 MS. 出现相反的结果可能是由于以下两个原因: 第一, 银杏和一球悬铃木的叶片本身的特征不利于其滞纳大粒径 PM, 而能够分泌具有黏性油脂的油松^[15,41,42] 和叶片呈层叠鳞形的侧柏, 都能很好滞纳并牢固附着大粒径 PM; 第二, MS 和 MF 仅有常规清洗过程, 洗脱的 PM 主要为大粒径 PM, 而 ultrasonic-EWPA 除了进行常规清洗, 还进行了超声清洗, 该步骤洗脱了更多的残余小粒径 PM^[17,29]. 此

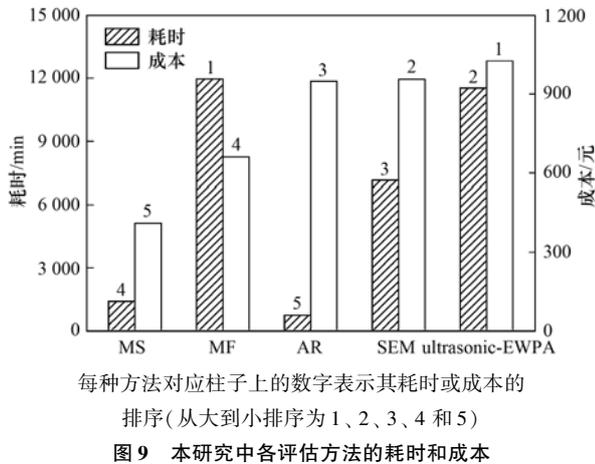


Fig. 9 Time requirements and cost for each method in this study

外,方法间评估数值的差异可能还来源于大气颗粒物中占比极高的 WSPM^[43-46]. 大粒径 WSPM 可能会由于溶解在水中成为了多个小粒径 PM 而通过本无法通过的滤膜孔径,从而导致小粒径 PM 的滞留量被高估. 本研究结果发现:一方面,PM 粒径越小,则 MF 和 ultrasonic-EWPA 的评估数值差异越大;另一方面, MF 评估结果认为各树种对小粒径 PM 的滞留效率几乎都高于对大粒径 PM 的效率,而 ultrasonic-EWPA 却相反. 这些现象都能印证上述推测. 而未经过更细致处理的滤纸和滤膜可能含有的杂质^[47]也会影响每一次过滤得到的 PM 质量的评估,这或许也是 MF 评估数值高于另外 3 种方法的原因之一.

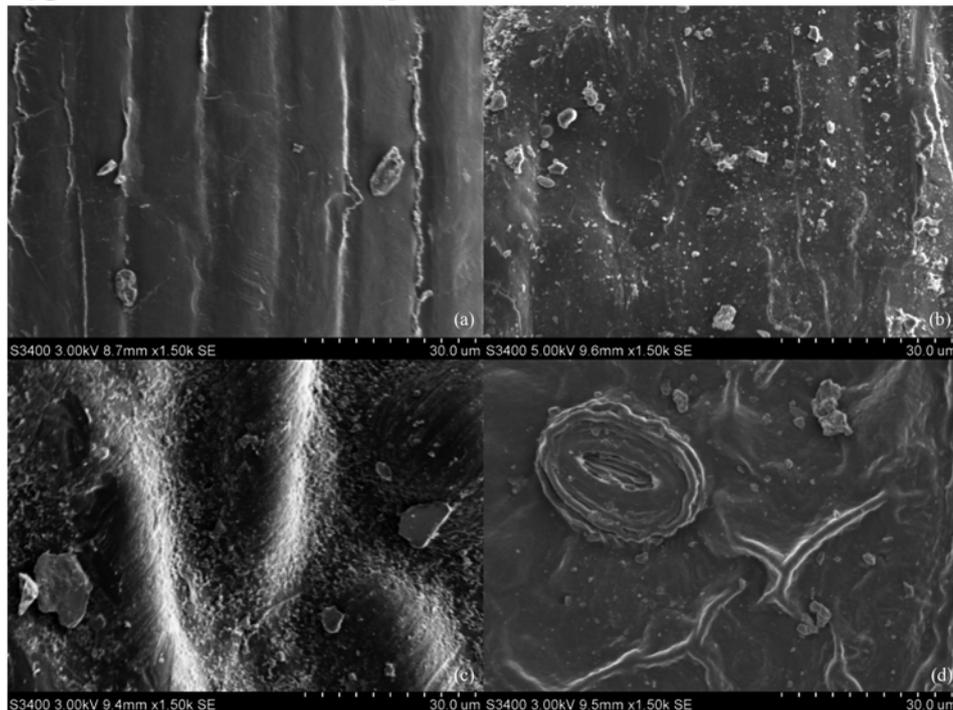
虽然各方法评估数值间存在巨大差异,但各方

法的滞尘效率树种排序间仍有重合部分,即不同方法的定性结果间仍有对比意义. AR 和 SEM 的结果相同部分比例最高(78%),这可能主要是因为二者的原理本质上存在相同之处. AR 主要是利用风力将叶表的颗粒物吹起重新形成气溶胶,后测定不同颗粒物的浓度. 在这个过程中,能够在风力作用下脱离叶片表面的颗粒物,应该既不是粒径太小而卡在叶表的凹槽、沟壑里的小粒径 PM^[17,29],也不是质量太大,从而由于重力作用迅速沉降的大粒径 PM(质量和粒径呈正相关^[48]). 因此,AR 测定的多为粒径中等的颗粒物. 另外,本研究中使用 SEM 进行评估时,用于统计的图像的放大倍数为 1500 倍,在此倍数下,能够完整呈现在视野之中从而被计数,并使研究人员能够准确测定其粒径的也是粒径中等的颗粒物(图 10).

AR 和 SEM 结果的重合部分均指向同一个结论:滞尘效率从大到小的树种排序为侧柏 > 油松 > 一球悬铃木 > 银杏. 根据二者的测定原理可以判断,相较于一球悬铃木和银杏,侧柏和油松滞留了更多粒径中等的颗粒物. 但这一排序仅是 AR 和 SEM 的主要评估结果,并不能代表本研究中 5 种方法的平均评估结果.

3.2 不同方法的综合比较

MS 和 MF 都是以过滤前后滤纸或滤膜的质量差作为叶片滞尘量的评估值,两者在使用过程中也



(a) 油松, (b) 侧柏, (c) 银杏, (d) 一球悬铃木

图 10 各树种叶片正面的电子显微照片(×1500)

Fig. 10 Electron micrographs of the leaf front of each tree species(×1500)

有许多相同或相似的情况: 滤纸和滤膜都非常容易发生堵塞, 这导致过滤步骤受到严重影响, 从而导致最终的测定结果不准确, 且堵塞也会导致过滤时间大幅增加。虽然“少量多次”的过滤方式可以缓解堵塞状况, 但这种方式会增加滤纸或滤膜的称重次数, 从而可能增加误差, 以及增加成本。由于目前常用的常规清洗(泡洗 + 刷洗)^[15,48~50]无法将叶片上的颗粒物完全洗脱^[11,27,51], MS 和 MF 同样会低估叶片的滞尘量。此外, 二者都无法将 WSPM 和 WIPM 区分开, 也就不利于进一步探究叶片特征与颗粒物类型的关系。但无疑 MS 和 MF 均不需要复杂的仪器设备, 实验步骤简单易操作。AR 也是间接得到叶表 PM 滞纳量的方法^[52], 但它是利用风力收集叶表 PM。有研究表明, 在一些情况下, 风力对叶表 PM 没有任何清除作用^[53,54]。因此, 相较于 MS 和 MF, AR 可能更加低估了叶片的滞尘效率。本研究中 AR 评估数值远低于其它方法的现象, 也证实了这一点。

SEM 是直接得到叶表滞尘数量的方法, 结果比较直观。但由于电镜拍照得到的是平面图像, 而叶片表面是立体的空间, 因此在垂直叶表方向上有重叠部分的颗粒物很容易被忽略, 且其粒径也难以准确测量(图 10)。此外, 多次选点进行拍照和统计的方式虽然可以增强样点的代表性, 但会大大增加实验耗时, 后期统计过程的工作量也会剧增。另外, 统计人员不同, 判断和统计 PM 的标准也就不同, 则对同一样点的 PM 数量统计和粒径测定结果就有较大差异。本研究只进行了最直观的颗粒物数量统计, 杨佳等^[47]参照 Speak 等^[55]的方法, 以 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 作为颗粒物的密度^[56], 将颗粒物数量进行了换算, 并得到了相应的质量估算结果。因此在未来研究中, 如有必要, 可以使用合适的 PM 密度进行单位换算, 从而与其它方法进行定量对比。

ultrasonic-EWPA 使用了高速冷冻离心机和激光粒度仪等仪器, 从而直接测定了叶表 PM 的质量和粒径分布, 实现了 PM 径级自由且更为细致的划分。此外, 还利用乙醇溶剂初步区分了颗粒物中的水溶性和非水溶性成分。但上述内容同样增加了实验过程的繁琐。另外, 超声清洗虽然能够明显提高叶表 PM 收集的完整性^[21,29], 但需要通过预实验来确定不同树种叶片最合适的超声参数组合(超声功率和时间等)^[29], 这更增加了实验的复杂程度。不过, 根据 PM 收集的完整性判断, 此法得到的评估结果或许最接近叶片真实滞尘情况。

ultrasonic-EWPA 和 SEM 所获指标数量分别排第一和第二(从多到少), 与其成本排序(从高到低)完全一致。且二者的实验耗时仅分别排第二和第三

(从多到少), 因此性价比较高。而 MF 的成本排第四, 但所得指标仅排第三, 实验耗时则最长。对于 MS, 虽然其所得指标最少, 但它所需成本和耗时也最少, 适合只需粗略评估不同树种总滞尘效率相对大小的研究。AR 指标数排第四, 成本排第三, 实验耗时最少。但由于风力收集 PM 的效果较差, 该法对设备和参数的要求更为严格。事实上, 根据研究者具备的仪器和设备条件的不同、以及选择的叶片清洗方法和叶面积测定方法的不同, 这 5 种方法的具体成本和耗时可能会发生变化。不同方法各有优劣, 研究人员应根据自己的研究目的和研究条件, 选择最为适宜的评估方法。

4 结论

(1) 本研究以 4 个北京常用绿化树种(油松、侧柏、银杏和一球悬铃木)为研究对象, 探究了 5 种评估树木滞尘能力方法间的差异。结果表明: ① MS、MF、AR 和 SEM 均显示油松和侧柏滞尘效率高于银杏和一球悬铃木, 而 ultrasonic-EWPA 则表明, 两者滞尘效率的相对大小会由于 PM 类型的不同而发生变化; ② 各方法的评估数值差异巨大, 但原理相似的方法得到的树种排序大致相同; ③ ultrasonic-EWPA 和 SEM 为高投入高回报型方法, MS 属于低投入低回报型方法; MF 的性价比较为失衡; 使用 AR 这一方法需要基于设备仪器合适且参数适用的前提。

(2) 5 种方法由于操作过程中不可避免地误差, 可能都会造成最终结果对于实际情况不同程度地高估或低估。本研究提供的对于常用的 5 种评估植物滞尘能力的方法的量化比较结果, 能够为相关研究选择合适的评估方法提供科学的依据和参考。

致谢: 感谢李忻芸同学和刘洋同学在外业采样中给予的帮助, 感谢向雨潇、李娅茹和周玥妃同学在室内实验中给予的帮助。

参考文献:

- [1] Cohen A J, Anderson H R, Ostro B, *et al.* The global burden of disease due to outdoor air pollution[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 2005, **68**(13-14): 1301-1307.
- [2] Chen Y Y, Ebenstein A, Greenstone M, *et al.* Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110**(32): 12936-12941.
- [3] Hofman J, Stokkaer I, Snauwaert L, *et al.* Spatial distribution assessment of particulate matter in an urban street canyon using biomagnetic leaf monitoring of tree crown deposited particles[J]. *Environmental Pollution*, 2013, **183**: 123-132.
- [4] Yan J L, Lin L, Zhou W Q, *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**: 156-161.
- [5] Kim K H, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter [J]. Environment International, 2015, **74**: 136-143.
- [6] Chen G B, Jin Z J, Li S S, *et al.* Early life exposure to particulate matter air pollution (PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀) and autism in Shanghai, China: a case-control study [J]. Environment International, 2018, **121**: 1121-1127.
- [7] Amorim J H, Rodrigues V, Tavares R, *et al.* CFD modelling of the aerodynamic effect of trees on urban air pollution dispersion [J]. Science of the Total Environment, 2013, **461-462**: 541-551.
- [8] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, *et al.* Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees [J]. Environmental Pollution, 2013, **183**: 64-70.
- [9] Tian L, Yin S, Ma Y G, *et al.* Impact factor assessment of the uptake and accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons by plant leaves; morphological characteristics have the greatest impact [J]. Science of the Total Environment, 2019, **652**: 1149-1155.
- [10] Ozdemir H. Mitigation impact of roadside trees on fine particle pollution [J]. Science of the Total Environment, 2019, **659**: 1176-1185.
- [11] Przybysz A, Sæbø A, Hanslin H M, *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.
- [12] Mori J, Ferrini F, Sæbø A. Air pollution mitigation by urban greening [J]. Italus Hortus, 2018, **25**(1): 13-22.
- [13] Xu Y S, Xu W, Mo L, *et al.* Quantifying particulate matter accumulated on leaves by 17 species of urban trees in Beijing, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(13): 12545-12556.
- [14] Shao F, Wang L H, Sun F B, *et al.* Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **652**: 939-951.
- [15] 王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化 [J]. 生态学报, 2015, **35**(6): 1696-1705.
Wang H X, Shi H, Wang Y H. Dynamics of the captured quantity of particulate matter by plant leaves under typical weather conditions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, **35**(6): 1696-1705.
- [16] 屈海燕, 赵懿桓, 陆秀君. 植物消减 PM_{2.5} 等大气颗粒物的试验研究方法综述 [J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(5): 15-21.
Qu H Y, Zhao Y H, Lu X J. Experimental study methods for absorbing inhalable particulate matters (PM_{2.5}) by landscape plants: a review [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, **45**(5): 15-21.
- [17] 刘辰明, 张志强, 陈立欣, 等. 降雨对北方城市 5 种典型城市绿化树种叶面滞尘的影响 [J]. 生态学报, 2018, **38**(7): 2353-2361.
Liu C M, Zhang Z Q, Chen L X, *et al.* Impacts of rainfall on leaf PM (airborne particulate matter) detention in five commonly used urban tree species in northern China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, **38**(7): 2353-2361.
- [18] Li Y F, Wang Y J, Wang B, *et al.* The response of plant photosynthesis and stomatal conductance to fine particulate matter (PM_{2.5}) based on leaf factors analyzing [J]. Journal of Plant Biology, 2019, **62**(2): 120-128.
- [19] 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.
- [20] 范舒欣, 晏海, 齐石茗月, 等. 北京市 26 种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力 [J]. 植物生态学报, 2015, **39**(7): 736-745.
Fan S X, Yan H, Qi S M Y, *et al.* Dust capturing capacities of twenty-six deciduous broad-leaved trees in Beijing [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, **39**(7): 736-745.
- [21] 刘金强, 曹治国, 刘欢欢, 等. 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 [J]. 植物生态学报, 2016, **40**(8): 798-809.
Liu J Q, Cao Z G, Liu H H, *et al.* 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 [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, **40**(8): 798-809.
- [22] 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.
Chai Y X, Zhu N, Han H J. Dust removal effect of urban tree species in Harbin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, **13**(9): 1121-1126.
- [23] 陈玮, 何兴元, 张粤, 等. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究 [J]. 应用生态学报, 2003, **14**(12): 2113-2116.
Chen W, He X Y, Zhang Y, *et al.* Dust absorption effect of urban conifers in Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, **14**(12): 2113-2116.
- [24] 李海梅, 刘霞. 青岛市城阳区主要园林树种叶片表皮形态与滞尘量的关系 [J]. 生态学杂志, 2008, **27**(10): 1659-1662.
Li H M, Liu X. Relationships between leaf epidermal morphology and dust-retaining capability of main garden trees in Chengyang District of Qingdao City [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, **27**(10): 1659-1662.
- [25] 陈志刚. 大连市绿化树种滞尘效益的研究 [J]. 安徽农学通报, 2011, **17**(18): 130-133.
Chen Z G. Study on dust catching properties of afforestation tree species in Dalian City [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2011, **17**(18): 130-133.
- [26] 王兵, 张维康, 牛香, 等. 北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究 [J]. 环境科学, 2015, **36**(2): 408-414.
Wang B, Zhang W K, Niu X, *et al.* Particulate matter adsorption capacity of 10 evergreen species in Beijing [J]. Environmental Science, 2015, **36**(2): 408-414.
- [27] 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.
Wang L, Gao S Y, Liu L Y, *et al.* Atmospheric particle-retaining capability of eleven garden plant species in Beijing [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, **17**(4): 597-601.
- [28] 张志丹, 席本野, 曹治国, 等. 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 [J]. 应用生态学报, 2014, **25**(8): 2238-2242.
Zhang Z D, Xi B Y, Cao Z G, *et al.* 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 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, **25**(8): 2238-2242.
- [29] 刘欢欢, 曹治国, 贾黎明, 等. 基于超声清洗的植物叶片吸滞大气颗粒物定量评估——以银杏为例 [J]. 林业科学,

- 2016, **52**(12): 133-140.
- Liu H H, Cao Z G, Jia L M, *et al.* Analysis of the role of ultrasonic cleaning in quantitative evaluation of the retention of tree leaves to atmospheric particles: a case study with *Ginkgo biloba*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(12): 133-140.
- [30] Liu L, Guan D S, Peart M R, *et al.* The dust retention capacities of urban vegetation —— a case study of Guangzhou, South China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(9): 6601-6610.
- [31] Liu J Q, Cao Z G, Zou S Y, *et al.* An investigation of the leaf retention capacity, efficiency and mechanism for atmospheric particulate matter of five greening tree species in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **616-617**: 417-426.
- [32] 阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 等. 阿克苏市 5 种常见绿化树种滞尘规律[J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(9): 970-977.
- Badrulla A, Halik U, Aishan T, *et al.* Patterns of dust retention by five common tree species for urban greening in Aksu City, Northwest China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2014, **38**(9): 970-977.
- [33] 石婕, 刘庆倩, 安海龙, 等. 不同污染程度下毛白杨叶表面 PM_{2.5} 颗粒的数量及性质和叶片气孔形态的比较研究[J]. *生态学报*, 2015, **35**(22): 7522-7530.
- Shi J, Liu Q Q, An H L, *et al.* A comparative study of the stomata and PM_{2.5} particles on the leaf surface of Chinese white poplar (*Populus tomentosa* Carr.) in different polluted places [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(22): 7522-7530.
- [34] Liu H X, Zheng J R, Qu C K, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble inorganic ions in PM₁₀ in a typical mining city, central China[J]. *Atmosphere*, 2017, **8**(4): 74.
- [35] Wang L, Gong H L, Liao W B, *et al.* Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **532**: 420-434.
- [36] Cao Z G, Yu G, Chen Y S, *et al.* Mechanisms influencing the BFR distribution patterns in office dust and implications for estimating human exposure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **252-253**: 11-18.
- [37] Xing F Q, Mao J F, Meng J X, *et al.* 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*[J]. *Ecology and Evolution*, 2014, **4**(10): 1890-1902.
- [38] 郭宏凯, 邢萌萌, 王婉清, 等. 北京 4 个常见树种空气颗粒物滞留能力研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, **31**(5): 316-320.
- Guo H K, Xing M M, Wang W Q, *et al.* Research of PM-capturing capability of four common tree species in Beijing[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, **31**(5): 316-320.
- [39] 张桐, 洪秀玲, 孙立炜, 等. 6 种植物叶片的滞尘能力与其叶面结构的关系[J]. *北京林业大学学报*, 2017, **39**(6): 70-77.
- Zhang T, Hong X L, Sun L W, *et al.* Particle-retaining characteristics of six tree species and their relations with micro-configurations of leaf epidermis[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, **39**(6): 70-77.
- [40] 鲁绍伟, 蒋燕, 李少宁, 等. 北京西山绿化树种 PM_{2.5} 吸附量及叶表面 AFM 特征分析[J]. *生态学报*, 2019, **39**(10): 3777-3786.
- Lu S W, Jiang Y, Li S N, *et al.* Relationship between adsorption capacity of PM_{2.5} and leaf surface characteristics of AFM for typical greening trees in the Western mountains of Beijing[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(10): 3777-3786.
- [41] 陈俊刚, 余新晓, 毕华兴, 等. 典型森林树种对大气颗粒物湿沉降的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(4): 312-317.
- Chen J G, Yu X X, Bi H X, *et al.* Effect of forest tree species on wet deposition of atmospheric particles[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(4): 312-317.
- [42] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution [J]. *Environmental Pollution*, 1998, **99**(3): 347-360.
- [43] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [44] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* The variation of chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **107**: 1-8.
- [45] Han X K, Guo Q J, Liu C Q, *et al.* Effect of the pollution control measures on PM_{2.5} during the 2015 China Victory Day Parade: implication from water-soluble ions and sulfur isotope [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 230-241.
- [46] Zhang Y, Huang W, Cai T Q, *et al.* Concentrations and chemical compositions of fine particles (PM_{2.5}) during haze and non-haze days in Beijing [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **174-175**: 62-69.
- [47] 杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 等. 植物叶面滞留颗粒物的数量和质量特征及方法比较[J]. *生态与农村环境学报*, 2015, **31**(3): 440-444.
- Yang J, Wang H X, Xie B Z, *et al.* Quantity and mass of particulate matter retained on tree leaves and determination methods[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(3): 440-444.
- [48] 杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 等. 北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(3): 384-392.
- Yang J, Wang H X, Xie B Z, *et al.* Accumulation of particulate matter on leaves of nine urban greening plant species with different micromorphological structures in Beijing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(3): 384-392.
- [49] 高传友. 南宁市典型园林植物滞尘效应及生理特性研究 [J]. *水土保持研究*, 2016, **23**(1): 187-192.
- Gao C Y. Research on dust retention capacities and physiological properties of different typical green plants in Nanning City [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(1): 187-192.
- [50] 张罡, 安海龙, 史军娜, 等. 欧美杨对不同粒径氧化锌颗粒物的吸附与吸收能力[J]. *北京林业大学学报*, 2017, **39**(4): 46-54.
- Zhang G, An H L, Shi J N, *et al.* Deposition and absorption capacity of *Populus deltoides* × *P. nigra* to different size zinc oxide aerosol[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, **39**(4): 46-54.
- [51] 王赞红, 李纪标. 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*, 2006, **15**(2): 327-330.
- Wang Z H, Li J B. Capacity of dust uptake by leaf surface of *Euonymus Japonicus* Thunb. and the morphology of captured particulate in air polluted city [J]. *Ecology and Environment*, 2006, **15**(2): 327-330.
- [52] 洪秀玲, 杨雪媛, 杨梦尧, 等. 测定植物叶片滞留 PM_{2.5} 等大气颗粒物质量的方法[J]. *北京林业大学学报*, 2015, **37**(5): 147-154.

- Hong X L, Yang X Y, Yang M Y, *et al.* A method of quantifying the retention of $PM_{2.5}$ and other atmospheric particulates by plant leaves [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, **37**(5): 147-154.
- [53] Ould-Dada Z, Baghini N M. Resuspension of small particles from tree surfaces [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(22): 3799-3809.
- [54] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 等. 北京市春季天气状况对针叶树叶面颗粒物附着密度的影响 [J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(8): 998-1002.
- Wang L, Ha S, Liu L Y, *et al.* Effects of weather condition in spring on particulates density on conifers leaves in Beijing [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, **25**(8): 998-1002.
- [55] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, *et al.* Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **61**: 283-293.
- [56] Held A, Nowak A, Wiedensohler A, *et al.* Field measurements and size-resolved model simulations of turbulent particle transport to a forest canopy [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2006, **37**(6): 786-798.

环 境 科 学

CONTENTS

Concurrent Collection of Ammonia Gas and Aerosol Ammonium in Urban Beijing During National Celebration Days Utilizing an Acid-Coated Honeycomb Denuder in Combination with a Filter System	GU Meng-na, PAN Yue-peng, SONG Lin-lin, <i>et al.</i> (1)
Heavy Pollution Episode in Tianjin Based on UAV Meteorological Sounding and Numerical Model	YANG Xu, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (9)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution in Typical Cities of the Central Plains Urban Agglomeration in Autumn and Winter	MIAO Qing-qing, JIANG Nan, ZHANG Rui-qin, <i>et al.</i> (19)
Characteristics and Sources of Water-soluble Ion Pollution in PM _{2.5} in Winter in Shenyang	WANG Guo-zhen, REN Wan-hui, YU Xing-na, <i>et al.</i> (30)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Collected in Baoding	LEI Wen-kai, LI Xing-ru, ZHANG Lan, <i>et al.</i> (38)
Source Apportionment of Ambient Carbonyl Compounds Based on a PMF and Source Tracer Ratio Method: A Case Based on Observations in Nanjing	HU Kun, WANG Ming, WANG Hong-li, <i>et al.</i> (45)
Characterization and Source Apportionment of Atmospheric VOCs in Tianjin in 2019	GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, XU Hong, <i>et al.</i> (55)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Liuzhou	LIU Qi, LU Xing-lin, ZENG Peng, <i>et al.</i> (65)
Characteristics of Ozone and Source Apportionment of the Precursor VOCs in Tianjin Suburbs in Summer	LUO Rui-xue, LIU Bao-shuang, LIANG Dan-ni, <i>et al.</i> (75)
Transport Influence and Potential Sources of Ozone Pollution for Nanjing During Spring and Summer in 2017	XIE Fang-jian, LU Xiao-bo, YANG Feng, <i>et al.</i> (88)
Ozone Pollution Trend in the Pearl River Delta Region During 2006-2019	ZHAO Wei, GAO Bo, LU Qing, <i>et al.</i> (97)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Deposition in Areas Adjacent to a Large Petrochemical Enterprise	LI Da-yan, QI Xiao-bao, WU Jian, <i>et al.</i> (106)
Quantitative Comparison of Methods to Assess the Airborne Particulate Matter Retention Capacity of Leaves	YUE Chen, LI Guang-de, XI Ben-ye, <i>et al.</i> (114)
Emission Estimation and Fate Simulation of Dichlorvos in the Dongjiang River Watershed	ZHANG Bing, ZHANG Qian-qian, YING Guang-guo (127)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Songhua River Basin of the Harbin Section and Ashe River	YANG Shang-le, WANG Xu-ming, WANG Wei-hua, <i>et al.</i> (136)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of POPs Pollution in Sediments of Xiaoxingkai Lake in the Northeast China	LI Hui, LI Jie, SONG Peng, <i>et al.</i> (147)
Distribution and Ecological Risk Assessment of PPCPs in Drinking Water Sources of Henan Province	ZHOU Ying, WU Dong-hai, LU Guang-hua, <i>et al.</i> (159)
Occurrence Characteristics and Health Risk Assessment of Endocrine Disrupting Chemicals in Groundwater in Wuxi-Changzhou	WANG Shu-ting, RAO Zhu, GUO Feng, <i>et al.</i> (166)
Seasonal Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Qingjiang River	LIU Zhao, ZHOU Hong, CAO Wen-jia, <i>et al.</i> (175)
Metal Pollutions and Human Health Risks in Groundwater from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZHAO Yi, ZOU Sheng-zhang, <i>et al.</i> (184)
Seasonal Variation of DOM Spectral Characteristics of Rivers with Different Urbanization Levels in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Zhao-yu, LI Si-yue (195)
Distribution of Micro-plastics in the Soil Covered by Different Vegetation in Yellow River Delta Wetland	YUE Jun-jie, ZHAO Shuang, CHENG Hao-dong, <i>et al.</i> (204)
Metagenomic Analysis Provides Insights into Bacterial Communities, Antibiotic Resistomes, and Public Health Risks in the Dongping Lake Reservoir	ZHANG Hong-na, CUI Na, SHEN Hong-miao (211)
Mechanism of Algal Community Dynamics Driven by the Seasonal Water Bacterial Community in a Stratified Drinking Water Reservoir	YAN Miao-miao, ZHANG Hai-han, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (221)
Community Structure, Function, and Influencing Factors of Planktonic Fungi in the Danjiangkou Reservoir	ZHENG Bao-hai, WANG Xiao-yu, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (234)
Changes in Algal Particles and Their Water Quality Effects in the Outflow River of Taihu Lake	GUO Yu-long, XU Hai, CHEN Xu-qing, <i>et al.</i> (242)
Characteristics of Soil Nitrogen and Phosphorus Losses Under Different Land-use Schemes in the Shipanqiu Watershed	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i> (251)
Influence of Antecedent Dry Days on Nitrogen Removal in Bioretention Systems	CHEN Yao, LI Xin-rui, ZHENG Shuang, <i>et al.</i> (263)
Effect of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar on the Adsorption Characteristics and Adsorption Mechanisms of Ammonia Nitrogen in Rainfall Runoff	CHEN You-yuan, LI Pei-qiang, LI Xian-chi, <i>et al.</i> (274)
Effect of Filter Medium on the Enhancement of Complete Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Process in a Tidal Flow Constructed Wetland	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, QIN Hui-an, <i>et al.</i> (283)
Adsorption Effect and Mechanism of Aqueous Arsenic on FeMnNi-LDHs	LIAO Yu-mei, YU Jie, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (293)
Combined Use of Zirconium-Modified Bentonite Capping and Calcium Nitrate Addition to Control the Release of Phosphorus from Sediments	ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (305)
Distribution Characteristics of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Wastewater Treatment Plants	XIE Ya-wei, YU Chi-sheng, LI Fei-fei, <i>et al.</i> (315)
Occurrence of Antibiotic Resistance Genes and Bacterial Community Structure of Different Sludge Samples During Microwave Pretreatment-Anaerobic Digestion	LI Hui-li, WU Cai-yun, TANG An-ping, <i>et al.</i> (323)
Selenium Threshold for the Delimitation of Natural Selenium-Enriched Land	WANG Hui-yan, ZENG Dao-ming, GUO Zhi-juan, <i>et al.</i> (333)
Improved Regression Kriging Prediction of the Spatial Distribution of the Soil Cadmium by Integrating Natural and Human Factors	GAO Zhong-yuan, XIAO Rong-bo, WANG Peng, <i>et al.</i> (343)
Simulation Cadmium (Cd) Accumulation in Typical Paddy Soils in South China	DAI Ya-ting, FU Kai-dao, YANG Yang, <i>et al.</i> (353)
Bioaccessibility and Health Risks of the Heavy Metals in Soil-Rice System of Southwest Fujian Province	LIN Cheng-qi, CAI Yu-hao, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (359)
Effects of Nano Material on Cadmium Accumulation Capacity and Grain Yield of Indica Hybrid Rice Under Wetting-drying Alternation Irrigation	YANG Ru, CHEN Xin-rui, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (368)
Regulation Control of a Tribasic Amendment on the Chemical Fractions of Cd and As in Paddy Soil and Their Accumulation in Rice	JIANG Yi, LIU Ya, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (378)
Combined Effect of Weathered Coal Based Amendments and Soil Water Management on Methylmercury Accumulation in Paddy Soil and Rice Grains	ZHENG Shun-an, WU Ze-ying, DU Zhao-ling, <i>et al.</i> (386)
Effects of Fertilization Strategies on the Cadmium Resistance of Paddy Soil Microorganisms	ZHENG Kai-kai, MA Zhi-yuan, SUN Bo, <i>et al.</i> (394)
Soil Enzyme Activity in <i>Picea schrenkiana</i> and Its Relationship with Environmental Factors in the Tianshan Mountains, Xinjiang	ZHANG Han, GONG Lu, LIU Xu, <i>et al.</i> (403)
Effects of Farmland Abandonment on Soil Enzymatic Activity and Enzymatic Stoichiometry in the Loess Hilly Region, China	ZHONG Ze-kun, YANG Gai-he, REN Cheng-jie, <i>et al.</i> (411)
Effect of Biochar on Soil Enzyme Activity & the Bacterial Community and Its Mechanism	FENG Hui-lin, XU Chen-sheng, HE Huan-hui, <i>et al.</i> (422)
Effects of Vegetation Restoration on the Structure and Function of the Rhizosphere Soil Bacterial Community of <i>Solanum rostratum</i>	ZHANG Rui-hai, SONG Zhen, FU We-dong, <i>et al.</i> (433)
Response of Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Rice Quality in a Yellow Soil Paddy Field to Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer	SHI Deng-lin, WANG Xiao-li, LIU An-kai, <i>et al.</i> (443)
Effects of Adding Straw and Biochar with Equal Carbon Content on Soil Respiration and Microbial Biomass Carbon and Nitrogen	HE Tian-tian, WANG Jing, FU Yun-peng, <i>et al.</i> (450)
How Different Ratios of Straw Incorporation to Nitrogen Fertilization Influence Endogenous and Exogenous Carbon Release from Agricultural Soils	SUN Zhao-an, ZHANG Xuan, HU Zheng-jiang, <i>et al.</i> (459)
Effect of Biochar and Chemical Fertilizer Mixture on Ammonia Volatilization and Phosphorus Fixation	YANG Wen-na, DENG Zhen-xin, LI Jiao, <i>et al.</i> (467)
Effects of Film Materials on Ammonia Volatilization Emissions from a Paddy System After Reducing Nitrogen Fertilizer Application	YU Ying-liang, WANG Meng-fan, YANG Bei, <i>et al.</i> (477)
Effects of Microplastics on Embryo Hatching and Intestinal Accumulation in Larval Zebrafish <i>Danio rerio</i>	ZHAO Jia, RAO Ben-qiang, GUO Xiu-mei, <i>et al.</i> (485)
Urban Micro-Scale Thermal Environment Simulation Supported by UAV Thermal Infrared Data	YANG Shao-qi, FENG Li, TIAN Hui-hui, <i>et al.</i> (492)
Estimation of the Urban Heat Island Intensity Change and Its Relationships with Driving Factors Across China Based on the Human Settlement Scale	SUN Yan-wei, WANG Run, GUO Qing-hai, <i>et al.</i> (501)