

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20140365

测定植物叶片滞留 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物质量的方法

洪秀玲 杨雪媛 杨梦尧 仲禹璇 李辰 张桐 刘玉军

(北京林业大学生物科学与技术学院)

摘要:以7种重庆市绿化基调树种为例,将滤膜过滤称质量优化为滤膜分级(10、2.5 μm)过滤称质量,并与数学比例关系换算相结合,建立了一种新的测定植物叶片滞留细颗粒物($PM_{2.5}$,直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$)等大气颗粒物质量的方法。该方法不直接进行 $PM_{2.5}$ 的收集和称量,回避了单独采用滤膜过滤称质量时,由于 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 中粒径、质量极其微小的颗粒被滤掉而导致 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 不能完全被收集和准确称量的缺点。该方法所需仪器设备简单,普通实验室便具备,同时也克服了利用显微仪器观察并量算植物叶片滞留颗粒物的局限性。用通过120目筛的土壤样品进行准确性和稳定性检验,该方法准确可靠,具有可操作性。应用该方法测定了7种重庆市绿化基调树种叶片滞留 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物质量,为评价不同树种和林分结构的滞尘功能差别奠定了技术基础。

关键词:植物;叶片; PM_{10} ; $PM_{2.5}$;质量

中图分类号:X171 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2015)05-0147-08

HONG Xiu-ling; YANG Xue-yuan; YANG Meng-yao; ZHONG Yu-xuan; LI Chen; ZHANG Tong; LIU Yu-jun. **A method of quantifying the retention of $PM_{2.5}$ and other atmospheric particulates by plant leaves.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015) **37**(5) 147-154 [Ch, 21 ref.] College of Biological Sciences and Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

Taking seven keynote tree species in urban afforestation of Chongqing as research objects, we established a new method for quantifying fine particulate matters ($PM_{2.5}$, $d \leq 2.5 \mu\text{m}$) and other atmospheric particulates retained by tree leaves. The previously commonly used of method simply weighing filtrated membranes (SWFM) was modified by combining weighing several levels(10, 2.5 μm) of filtrated membranes, and conversion of mathematical proportion relationship was also applied. With the modified method we do not need to directly collect and weigh the amount of $PM_{2.5}$, and therefore may avoid the disadvantage of not completely collecting and accurately weighing PM_{10} or $PM_{2.5}$ by SWFM, because by SWFM very tiny particulates among PM_{10} or $PM_{2.5}$ might be lost in the filtration. The new method only demands simple equipments such as electronic balance and glassware that are easily found in ordinary laboratories, and also overcomes the limitations of using microscopes for observing, measuring and calculating the weight of retained particulates by leaves. The method is accurate, reliable and feasible after validating the accuracy and stability with soil samples filtered by a 120-mesh sieve. By using this modified method, $PM_{2.5}$ and other atmospheric particulates retained by seven keynote tree species for urban afforestation in Chongqing were measured. Our study provides basic technological support for evaluating capacities of forests with different tree species and different structures to retain $PM_{2.5}$ and other atmospheric particulates.

Key words plant; leaves; PM_{10} ; $PM_{2.5}$; mass

Particulate Matter (PM), 中文名称为颗粒物,是 大气环境中液体和固体颗粒物的总称。颗粒物按粒

收稿日期:2014-10-09 修回日期:2014-12-04

基金项目:林业公益性行业科研专项(201304301)。

第一作者:洪秀玲。主要研究方向:社区绿化植物的滞尘特征及其机理。Email: hong_xiuling@126.com 地址:100083 北京市清华东路35号北京林业大学生物科学与技术学院。

责任作者:刘玉军,教授,博士生导师。主要研究方向:植物生理。Email: yjliubio@163.com 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

径可以划分为粗颗粒分散系(气体动力学当量直径 $> 10 \mu\text{m}$)和胶体分散系(气体动力学当量直径 $\leq 10 \mu\text{m}$)。气体动力学当量直径 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物(PM_{10})即为可吸入颗粒物,在空气中按斯托克斯定律(Stokes Law)作等速下降^[1],是对环境和人体健康危害最大的颗粒物成分^[2]。其中气体动力学当量直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)极易漂浮,不易沉降,可长时间滞留在大气中并随风飘散。 $\text{PM}_{2.5}$ 由于较大的比表面积易附着大量有毒有害物质,特别是重金属元素和芳香烃类化合物,并且可以通过呼吸进入肺泡,故而会对人体呼吸系统和心血管系统造成较为严重的伤害^[3-4]。国内外现有研究结果表明,中、重度灰霾污染环境中,急性呼吸道感染、哮喘、感冒等呼吸系统疾病的发病概率明显上升^[5-8]。此外,大气中可吸入颗粒物含量过高,是导致形成雾霾的主要原因,给人类活动带来不便^[1]。再者,大气可吸入颗粒物浓度过高会影响太阳辐射和地表能量交换,与热岛效应有密切关系,会造成一系列环境问题^[9-10]。近年来我国大气细颗粒物污染日趋严重,2012年2月,国家环境保护部制定了新的环境质量标准,依据《2013年中国环境状况公报》^[11],对 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 观测结果年均值显示:74个新标准第一阶段监测实施城市中仅海口、舟山和拉萨3个城市空气质量达标,占4.1%;超标城市比例为95.9%。

植物作为城市绿化的主体,具备特殊的冠层结构、枝叶结构和叶表面特性,已被证实具备净化大气颗粒物的能力^[12]。大多数植物的叶片对空气中可吸入颗粒物有良好的吸滞作用。一般认为,植物总叶片面积越大、植被带越宽广、叶面粗糙多绒毛、叶面积指数大并且能分泌黏性分泌物的植物种,如核桃(*Juglans regia*)、板栗(*Castanea mollissima*)、臭椿(*Ailanthus altissima*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等可以作为滞尘树种,用于吸附滞留尘埃林带的构建^[13-14]。有研究表明,植物叶片表面可以吸附亲脂性有机污染物如多氯联苯、多环芳烃和可溶性无机盐污染物,将该类污染物抽离 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒,进一步降低 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒的污染性^[15]。大量的定性研究表明,植物具备缓解大气颗粒物污染、改善空气质量的作用。面对迅速提高的发挥林木滞留 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 功能的新要求,进行代表性叶片的取样,定量分析单位叶面积及植被整体的滞尘数量,评估不同树种的滞尘优势,对城市园林绿化树种配置选择具有重要意义。

当前,国内外对植物滞留颗粒物的定量测定没有统一的标准方法,一般采用差重法,包括水洗称量法和叶表面擦拭法。水洗称量法即将采集的叶片用

蒸馏水浸泡2 h,软毛刷刷下叶片上附着物,之后有两种处理方法:一是在100℃的烘箱中将水分完全烘干之后称质量^[16];二是浸泡液在真空泵上用已烘干并称质量(W_1)的滤纸抽滤,再将此滤纸烘干,用天平称质量(W_2),两次质量之差($W_2 - W_1$)即为叶片滞留颗粒物的总质量^[17]。叶表面擦拭法指先用天平将采集的叶片称质量(w_1),然后用海绵将叶片表面的灰尘擦拭干净后,再测一次叶片质量(w_2),两次质量之差($w_1 - w_2$)即为叶片滞尘量。张志丹等^[18]建立了一种利用激光粒度仪和天平定量评估植物叶片吸滞细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)等大气颗粒物能力的方法——洗脱称量粒度分析法,该方法能直接对植物叶片吸滞大气颗粒物质量和粒径分布进行测定。

本文综合了其他学者研究方法的优势,将滤膜过滤称质量优化为滤膜分级过滤称质量,并与数学比例关系换算相结合,避免了单独采用滤膜过滤称质量时,由于 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中粒径、质量极其微小而不能完全收集和准确称量的缺点,建立了一种新的研究植物叶片滞留细颗粒物质量的测定方法。

1 材料与方法

1.1 方法思路

本研究思路采用了部分与整体关系的原理,颗粒物均匀分散在液体中,移取部分悬浊液烘干得到少量颗粒物,则少量颗粒物占部分悬浊液的比例等于总颗粒物占整体悬浊液的比例,由此得到整体悬浊液、部分悬浊液和少量颗粒物的质量,并可通过比例关系得到总颗粒物质量。剩余的悬浊液依次利用两种不同孔径的滤膜(10、2.5 μm)过滤烘干同样得到部分颗粒物的质量,利用相同的原理可得到对应粒径范围的颗粒物质量。具体操作步骤如图1所示。

1.2 供试树种及样品采集

供试树种为重庆市7种绿化基调植物,其中常绿乔木有小叶榕(*Ficus concinna*)、桂树(*Cinnamum burmanni*);落叶乔木有广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、黄葛树(*Ficus virens* var. *sublanceolata*)、重阳木(*Bischofia polycarpa*);常绿灌木有孝顺竹(*Bambusa multiplex*)、海桐(*Pittosporum tobira*)。其中广玉兰和海桐采于重庆渝北区红石路花卉园内,其他树种均采于重庆渝北区红石路两侧。2014年3月,雨后一周采集完整无损伤的植物叶片,每种植物在3~5株个体的不同方向采样,乔木采样高度为2 m左右,灌木为1~1.5 m,根据单叶面积大小采集数量由40~60片不等。每个树种设3

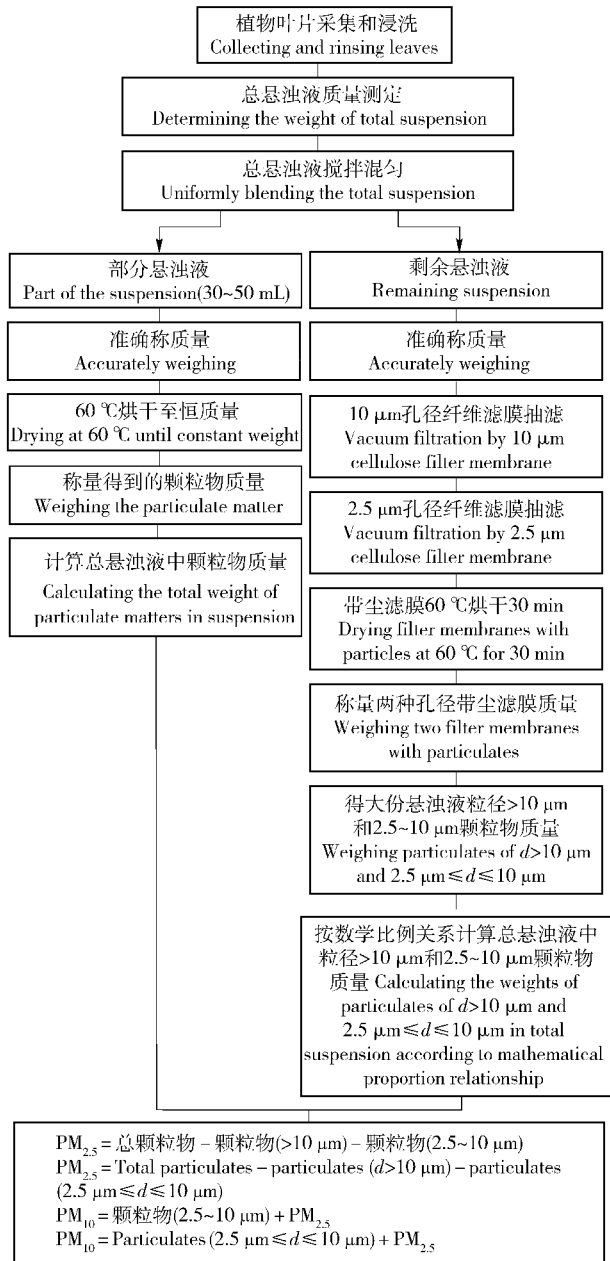


图1 植物叶片滞留PM₁₀、PM_{2.5}大气颗粒物质量测定方法流程

Fig. 1 A protocol for quantifying PM₁₀ and PM_{2.5} retained by plant leaves

个重复。采集后将叶片置于自封袋中带回实验室。

1.3 主要仪器设备

SHZ-III型循环水真空泵(上海亚荣生化仪器厂)、DHG-9240A型电热烘箱(上海一恒科学仪器有限公司)、0.001 g感量电子天平(上海越平科学仪器有限公司)、0.000 1 g感量电子天平(赛多利斯科学仪器(北京)有限公司)、驰久08-1恒温磁力搅拌器(上海梅颖浦仪器仪表制造有限公司)、HP Scanjet 200扫描仪(惠普公司);10和2.5 μm孔径纤维滤膜、抽滤玻璃仪器套件及1 000 mL广口烧瓶、一次性塑料培养皿、玻璃棒、镊子、移液管等常规

实验器材,均购自北京科百奥生物科技有限公司。

1.4 实验方法

1.4.1 滤膜烘干时间确定

取10、2.5 μm孔径纤维滤膜各3张,分别用于过滤200 mL清洗叶片的悬浊液后,称质量,编号置烘箱中60 °C烘干。10 min后第一次取出迅速称质量后放回,此后每隔5 min取出称质量1次,共称7次。结果表明,大部分滤膜在烘干30 min时恒质量,故选择30 min为滤膜烘干时间。实验数据见表1。

1.4.2 植物叶片滞留PM_{2.5}等大气颗粒物的质量测定

叶片清洗和含颗粒物悬浊液总质量测定:用去离子水浸泡采集的叶片60 min左右,接着用软毛刷刷洗叶片上下表面,重复清洗3次,合并洗后悬浊液。将悬浊液以感量0.001 g天平称质量,得含颗粒物悬浊液总质量 m_{T1} ;每次清洗用水量约200 mL,3次合并约600 mL。

叶片滞留颗粒物总质量测定:将洗涤后的总悬浮液采用恒温磁力搅拌器搅拌5~10 min,使总悬浊液中的颗粒物均匀分散。用移液管从搅拌均匀后的总悬浊液中移取30~50 mL于提前称质量的塑料培养皿中,称量,获得部分悬浊液的质量 m_{p1} ;把塑料培养皿置于60 °C烘箱中将此部分悬浊液烘干至恒质量,然后称量获得此悬浊液中颗粒物质量 m_{pg} ;按照式(1)计算总悬浊液中颗粒物的总质量 m_{Tg} :

$$m_{Tg} = m_{pg} \frac{m_{T1}}{m_{p1}} \quad (1)$$

分级过滤处理:1)对移取了部分悬浊液后的剩余悬浊液用10 μm孔径的纤维滤膜进行第一次过滤处理,获得截留有粒径>10 μm的颗粒物的第一滤膜和含有粒径≤10 μm颗粒物的第一滤液;2)对含有粒径≤10 μm颗粒物的第一滤液用2.5 μm孔径的纤维滤膜进行第二次过滤处理,获得截留有粒径>2.5 μm且≤10 μm颗粒物的第二滤膜和含有粒径≤2.5 μm颗粒物的第二滤液,第二滤液弃之。以上采用的滤膜均于60 °C烘箱中烘干30 min并提前称质量。

滤膜烘干及不同粒径等级颗粒物质量计算:1)对截留有粒径>10 μm颗粒物的第一滤膜和截留有粒径>2.5 μm且≤10 μm颗粒物的第二滤膜于60 °C烘箱中烘30 min,然后分别称量,得到烘干后的粒径>10 μm颗粒物的质量 $m_{sy>10}$ 、烘干后粒径>2.5 μm且≤10 μm颗粒物的质量 $m_{sy2.5-10}$;2)按照式(2)、式(3)计算总悬浊液中粒径>10 μm、粒径>2.5 μm且≤10 μm的颗粒物的质量 $m_{pm>10}$ 、

表1 纤维滤膜质量随烘干时间变化量

Tab. 1 Variation of cellulose filter membrane mass along with drying time

g

时间 Time/min	10 μm 孔径纤维滤膜质量 Mass of 10 μm cellulose filter membrane			2.5 μm 孔径纤维滤膜质量 Mass of 2.5 μm cellulose filter membrane		
	A	B	C	A	B	C
	0	0.281 3	0.289 2	0.289 6	0.181 8	0.202 4
10	0.276 5	0.275 7	0.250 8	0.169 5	0.188 8	0.172 1
15	0.274 4	0.273 2	0.248 7	0.166 2	0.185 7	0.169 1
20	0.273 8	0.273 0	0.246 8	0.165 0	0.183 9	0.167 7
25	0.273 7	0.273 0	0.246 6	0.164 3	0.183 2	0.167 0
30	0.273 7	0.273 1	0.246 5	0.163 8	0.182 8	0.166 4
35	0.273 7	0.273 0	0.246 5	0.163 8	0.182 8	0.166 4
40	0.273 7	0.273 0	0.246 6	0.163 8	0.182 7	0.166 3
45	0.273 6	0.272 9	0.246 5	0.163 7	0.182 7	0.166 4
50	0.273 7	0.273 0	0.246 6	0.163 8	0.182 8	0.166 3

$m_{pm2.5-10}$; 3) 按照式(4)、式(5)计算总悬浊液中 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 颗粒物的质量 $m_{pm2.5}$ 、 m_{pm10} 。

$$m_{pm > 10} = m_{sy > 10} \frac{m_{T1}}{m_{T1} - m_{p1}} \quad (2)$$

$$m_{pm2.5-10} = m_{sy2.5-10} \frac{m_{T1}}{m_{T1} - m_{p1}} \quad (3)$$

$$m_{pm2.5} = m_{Tg} - m_{pm > 10} - m_{pm2.5-10} \quad (4)$$

$$m_{pm10} = m_{pm2.5} + m_{pm2.5-10} \quad (5)$$

1.4.3 叶面积计算

将叶片置于扫描仪中扫描,然后用 Image J2x 图像分析软件计算叶面积(S);本研究采用单位叶面积滞留颗粒物质量($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)来衡量植物叶片滞尘能力。

1.5 实验方法的检验

本实验方法中总颗粒物质量的获得为部分代替整体,为间接获得,因此需要对其进行准确性和稳定性分析。分析时取少量土样,过120目筛,收集约20g过筛土样,加200mL纯净水搅拌,静置,弃上清液,重复清洗3次,最后在200mL纯净水中浸泡24h,以去除可溶性物质。之后6000 r/min离心10min,弃上清液,土样在80℃烘箱中烘24h,烘干并去除挥发性物质,将烘干的土样作为实验样品。

1.5.1 总颗粒物质量测定方法的准确性

分别称取0.1000、0.2000、0.3000、0.4000、

0.5000、0.6000、0.7000、0.8000、0.9000、1.0000g烘干土样,分别于1000mL烧杯中,加约600mL纯净水分散。之后,按照1.4.2中植物叶片滞留颗粒物总质量测定方法进行的操作和计算,误差计算方法为:

$$\text{误差} = | \text{样品质量} - \text{测定质量} | / \text{样品质量}$$

1.5.2 总颗粒物质量测定方法的稳定性

称取3份实验土样,每份1.0000g,分别于1000mL烧杯中,加约600mL纯净水分散。之后,按照1.4.2中植物叶片滞留颗粒物总质量测定方法进行的操作和计算。

1.6 数据分析

除总颗粒物质量测定方法的准确性分析(1.5.1)之外,其他实验数据均通过SPSS 17.0软件对数据组进行0.05水平的单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 总颗粒物质量测定方法的准确性

总颗粒物质量测定方法准确性分析实验的数据见表2。由表中数据可见,采用本文中总颗粒物质量测定的方法,测得的总颗粒物质量与实际质量间误差均在5%以内,应视为称量产生中系统误差;这种系统误差较小,难于避免,处于可接受范围内,在操作过程中可通过多次反复称量进一步减小。

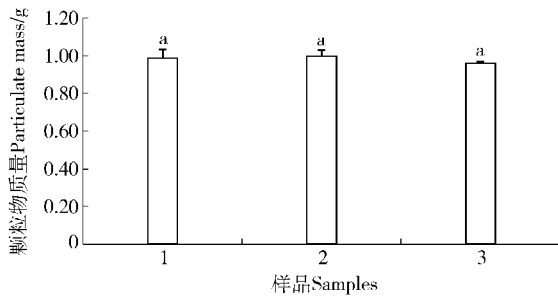
表2 总颗粒物质量测定方法准确性分析

Tab. 2 Accuracy analysis of quantitative method of the total particulate matters

指标 Indicators	组别 Group									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
样品质量 Sample mass/g	0.102 2	0.201 0	0.301 7	0.400 1	0.502 0	0.602 1	0.700 9	0.800 5	0.900 3	1.002 3
测定质量 Determined mass/g	0.098 8	0.195 5	0.291 3	0.383 4	0.492 5	0.604 1	0.683 1	0.761 0	0.917 6	1.002 4
误差 Error/%	3.34	2.75	3.45	4.19	1.90	0.33	2.54	4.93	1.92	0.01

2.2 总颗粒物质量测定方法的稳定性

稳定性实验结果如图 2, 重复测定 3 个样品, 结果无显著差异 ($P > 0.05$), 且误差保持在 5% 以内, 表明所建立的测定颗粒物总质量的方法稳定可靠, 具有很强的可操作性。



相同字母表示单因素方差分析结果在 0.05 水平上无显著差异。The same letters indicated that the result of ANOVA had no significant difference at $P < 0.05$ level.

图 2 总颗粒物质量测定方法稳定性分析

Fig. 2 Stability analysis of quantitative method of the total particulate matters

2.3 应用实例: 以 7 种重庆市绿化基调树种为例

应用本文建立的方法对 7 个重庆市绿化基调树种叶片滞留 PM_{2.5} 等大气颗粒物进行了质量测定, 并对比评价了 7 个树种叶片滞留总颗粒物、PM₁₀、PM_{2.5} 的能力。

2.3.1 植物叶片单位叶面积滞留总颗粒物的质量

研究结果(图 3)表明, 针对总颗粒物, 7 个供试树种对总颗粒物的滞留能力差异较大。7 个树种滞尘能力的顺序是: 小叶榕 ($333.4808 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 桂树 ($271.1753 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 广玉兰 ($196.8376 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 黄葛树 ($191.6022 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 孝顺竹 ($115.3661 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 海桐 ($89.0527 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 重

阳木 ($85.5243 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)。其中, 小叶榕的滞留能力最强, 这与邱媛等^[19]的研究结果不一致, 他们对广东省惠州市不同功能区 4 种主要绿化乔木的滞尘能力进行的研究表明, 小叶榕的滞尘能力较差, 可能是重庆市区和惠州市颗粒物污染程度不同所致。

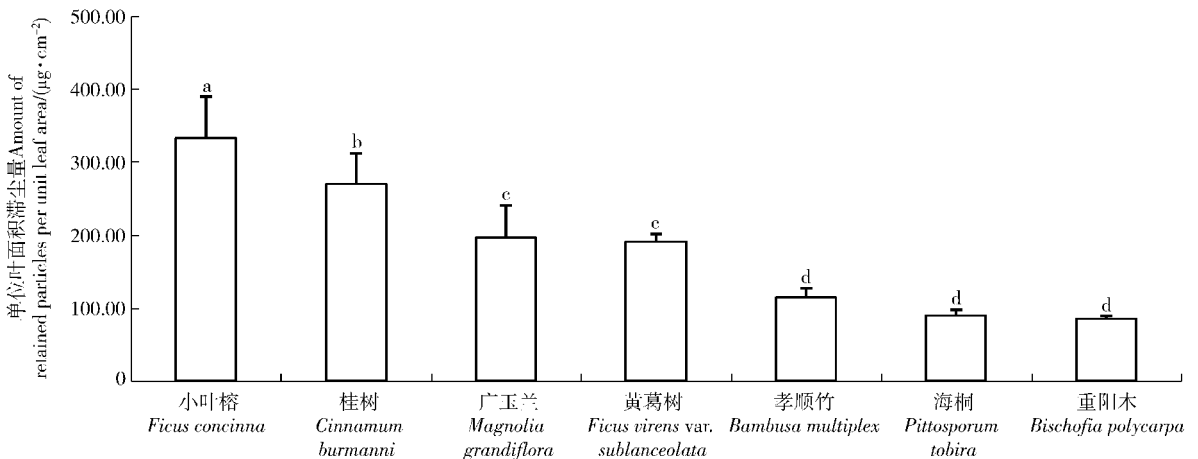
2.3.2 植物叶片单位叶面积滞留 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的质量

7 个树种滞留细颗粒物的能力与滞留总颗粒物的能力表现的规律不同。对于 PM₁₀(图 4A), 滞留能力最强的两个树种是小叶榕和海桐, 分别为 42.0522 和 $33.0869 \mu\text{g}/\text{cm}^2$; 滞留能力最差的是重阳木, 为 $21.0647 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 。7 个树种滞留 PM₁₀ 能力顺序为: 小叶榕 ($42.0522 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 海桐 ($33.0869 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 黄葛树 ($28.3243 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 孝顺竹 ($27.0547 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 广玉兰 ($25.2191 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 桂树 ($24.8090 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 重阳木 ($21.0647 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)。对总颗粒物滞留能力最差的海桐表现出了较强的滞留细颗粒物的能力, 而对粗颗粒物有较强滞留能力的桂树在滞留 PM₁₀ 时表现一般。

从图 4B 可以看出, 7 个树种滞留 PM_{2.5} 的能力依次为小叶榕 ($41.9131 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 海桐 ($32.8661 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 黄葛树 ($28.1463 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 孝顺竹 ($26.9610 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 广玉兰 ($24.8522 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 桂树 ($24.6251 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 重阳木 ($20.7738 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)。各树种的滞留能力规律与滞留 PM₁₀ 的一致, 且大多树种间没有显著差异。滞留能力最好的小叶榕为滞留能力最差的重阳木的 2.02 倍。

3 讨论与结论

我国对植物滞留 PM₁₀、PM_{2.5} 的研究起步较晚,



不同字母表示各树种的单因素方差分析结果在 0.05 水平上有显著差异。下同。Different letters indicated that the result of ANOVA had significant difference at $P < 0.05$ level. The same below.

图 3 重庆市区 7 种绿化基调树种单位叶面积大气颗粒物滞留量

Fig. 3 Comparison of total particulate matters retained by leaves of seven key tree species in downtown Chongqing

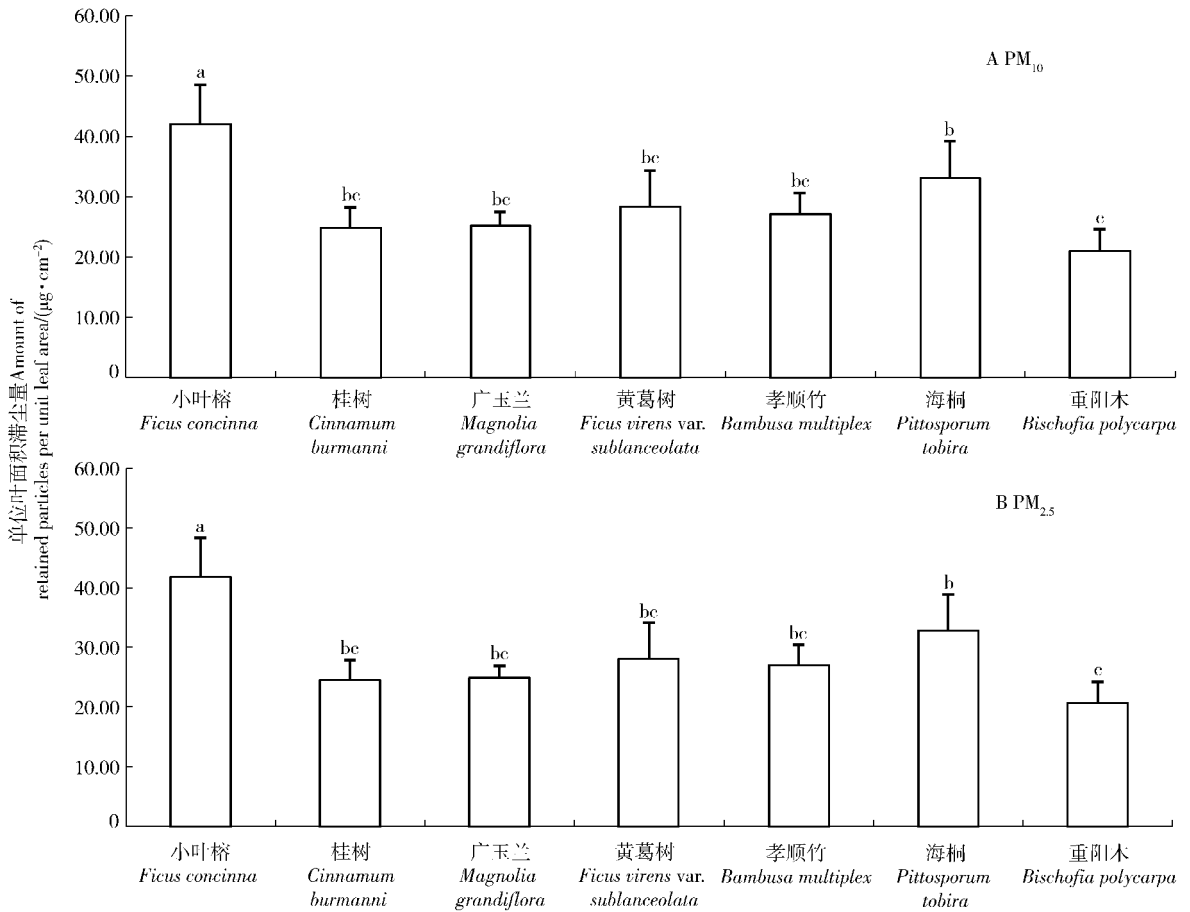


图4 重庆市7种绿化基调树种单位叶面积对PM₁₀和PM_{2.5}的滞留量

Fig.4 Comparison of PM₁₀ and PM_{2.5} retained by leaves of seven keynote tree species in downtown Chongqing

对于植物叶片滞留大气颗粒物的定量研究目前很多主要集中在植物叶片滞留总颗粒物效益方面,对于植物叶片滞留PM₁₀、PM_{2.5}的效果少见报道,这主要受到研究方法的限制。前文所列举的差重法仅能得到总颗粒物的质量,不能对颗粒物进行分级定量,所以仅能研究植物叶片滞留总颗粒物的能力,无法有针对性地探讨其在滞留细颗粒物方面是否存在优势。并且,差重法中的水洗称量法的第一种操作方法^[16](即将悬浊液烘干)优点是能得到悬浊液中所有的颗粒物,定量测量准确,但烘干大量的液体耗时过长,可操作性差且耗费能源;第二种操作方法^[17](滤膜过滤)比烘干液体节省时间,在操作上更可行,但无论多小孔径的滤膜,都无法搜集全部粒径的细颗粒物,至少在理论上存在误差。而且随着滤膜孔径的减小,过滤时间会成几何级数式延长,也存在操作性差的问题。

为研究植物叶片滞留颗粒物的尺寸特征,国内外的学者尝试了一些方法。贾彦等^[20]在长沙市开展7种绿化植物滞尘的微观测定时,从叶片不同部位随机切取边长约1 cm正方形样品,对每个样品采用对角线法选取5个观测点,然后采用XSJ-HS型

生物显微图像电脑分析系统(北京泰克仪器有限公司生产)观测,计算每张图片中粉尘数量、粉尘颗粒粒径分布等参数。王蕾等^[21]用XL30型环境扫描电镜结合Adobe Photoshop图像处理软件分析叶表面颗粒物粒径分布。以上方法依托仪器设备,简单方便,但是采用仪器仅对局部叶面进行量算,无法对叶片吸滞的所有颗粒物进行测定,也未考虑颗粒物在叶表面的分布是否均一。Kulshreshtha等^[16]采用的方法是将颗粒物悬浮于水溶液中混匀,取液滴滴在载玻片上,用光学显微镜随机选择100个颗粒,以每个颗粒的最大直径作为该颗粒的粒径,每个样品做5个重复,然后计算不同粒径范围的颗粒物比例。该方法所用仪器简单易得,但用5个液滴,每个液滴100个颗粒物的尺寸特征比例来代表样品滞尘粒径特征,同样存在无法对叶片吸滞的所有颗粒物进行测定的不足。并且利用人工选择100个颗粒并计算粒径大小,工作量大。而且,以上方法都仅能得到颗粒物粒径分布的百分比,无法评估植物叶片滞留的不同粒径颗粒物的质量,尤其是对细颗粒物的定量评估。张志丹等^[18]建立的洗脱称量粒度分析法可操作性强,具有一定的实用性,但利用激光粒度仪测

定粒径分布时,分散介质、超声时间、样品浓度等因素都会对测定结果造成影响,因此在测定不同树种时,各种实验条件要经过大量预实验进行确定,且一般实验室不具备激光粒度分析仪。

本文的测定方法将滤膜过滤称质量优化为滤膜分级过滤称质量,并与数学比例关系换算相结合,不直接进行 $PM_{2.5}$ 的收集和称量,回避了单独采用滤膜过滤称质量时,由于 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 中粒径、质量极其微小而不能完全收集和准确称量的缺点。该方法完善了差重法^[16-17]仅能得到植物叶片滞留的颗粒物总质量,不能获得细颗粒物质量的缺点。此外,还可完善生物显微图像电脑分析系统^[20]、扫描电镜观察^[21]、电子显微镜计数^[16]等利用显微仪器量算叶片滞留颗粒物方法的局限性,也比洗脱称量粒度分析法^[18]节省了探索实验条件的环节和减少对精密仪器的依赖。该方法所需仪器设备简单,普通实验室便具备,可操作性强。经过准确性和稳定性检验,该方法准确可靠,具有可操作性。虽然应用过程中存在一些不可避免的误差,例如测定的总颗粒物质量与实际质量存在偏差,但误差保持在5%以内,为处于可接受范围的系统误差。

本方法的准确度与天平的灵敏度有关,在实际应用时,为了使误差处于可接受范围内并尽可能的小,天平要预热足够的时间(至少30 min),所有的称质量均需多次(一般3次以上),不连续称量之后取平均值。并且相邻的3次称量之间最好相差不超过 ± 0.0003 g,为了达到这个要求,有时需称量10次以上。对天平的工作环境也有较高要求,工作台要牢固水平,远离热源和磁场;所处的环境须稳定,周围无影响天平性能的振动和气流存在;温度(20℃左右为佳)、湿度(45%~75%为佳)均需保持稳定。

最后利用新方法对重庆7个常见绿化树种叶片滞留的颗粒物进行分级定量测量,实践表明这一方法理论上科学合理,操作上简便可行,可为今后植物叶片滞留 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物定量评价提供技术支撑。本研究对7种重庆绿化基调树种滞留 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物的能力进行了分析,从一个方面反映城市散生绿化树种的滞尘能力,但植物的滞尘效果受到多因素共同影响,要阐明不同树种在阻挡、截留与吸附大气颗粒物方面的作用与机理,还需开展更多方面的研究。本研究所建立的方法可为今后开展更为系统的评价不同树种和林分结构的滞尘功能的研究奠定技术基础,为构建健康高效的滞尘型景观生态林作出贡献。

参 考 文 献

- [1] 刘福智,刘加平.植物对空气中可吸入颗粒物的量化控制及影响[J].青岛理工大学学报,2005,26(5):25-29.
LIU F Z, LIU J P. The quantitative controlling and effect of greens on the dust in air [J]. Journal of Qingdao Technological University, 2005, 26(5): 25-29.
- [2] 贾海红,王祖武,张瑞荣.关于 $PM_{2.5}$ 的综述[J].污染防治技术,2003,16(4):135-138.
JIA H H, WANG Z W, ZHANG R R. Summarization of $PM_{2.5}$ [J]. Pollution Prevention and Control Technology, 2003, 16(4): 135-138.
- [3] 周家斌,王铁冠,王云碧,等.不同粒径大气颗粒物多环芳烃的含量及分布特征[J].环境科学,2005,26(2):40-44.
ZHOU J B, WANG T G, WANG Y B, et al. Concentration and distribution characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons in airborne particles with different sizes[J]. Environmental Science, 2005, 26(2): 40-44.
- [4] 杨勇杰,王跃思,温天雪.采暖期开始前后北京大气颗粒物中化学元素特征及来源[J].环境科学,2008,29(11):3275-3279.
YANG Y J, WANG Y S, WEN T X. Characteristics and sources of elements of atmospheric particles before and in heating period in Beijing [J]. Environmental Science, 2008, 29(11): 3275-3279.
- [5] MAR T F, NORRIS G A, KOERNIG J Q, et al. Associations between air pollution and mortality in Phoenix [J]. Environment Health Perspectives, 2000, 108: 347-353.
- [6] TADAV A K, KUMAR K, KASIM A W G, et al. Visibility and incidence of respiratory disease during the 1998 haze episode in Brunei Darussalam [J]. Pure and Applied Geophysics, 2003, 160: 265-277.
- [7] 覃辉艳,彭晓武,蒙智娟,等.大气 $PM_{2.5}$ 致人支气管上皮细胞 DNA 损伤的研究[J].环境与健康,2012,29(5):391-393.
QIN H Y, PENG X W, MENG Z J, et al. $PM_{2.5}$ -induced DNA damage in human bronchial epithelial cells [J]. Journal of Environment and Health, 2012, 29(5): 391-393.
- [8] 时彦玲,邓林红.细颗粒物($PM_{2.5}$)对气道的病理作用及其与哮喘病理机制的关系[J].医用生物力学,2013,28(2):127-133.
SHI Y L, DENG L H. Pathological effects of particulate matter ($PM_{2.5}$) on pulmonary airways and its roles in asthma pathobiology [J]. Journal of Medical Biomechanics, 2013, 28(2): 127-133.
- [9] LYAMANI H, OLMO F J, NTARA A A, et al. Atmospheric aerosols during the 2003 heat wave in southeastern Spain II: microphysical columnar properties and radiative forcing [J]. Atmos Environ, 2006, 40: 6465-6476.
- [10] TIE X, MADRONICH S, WALTERS S, et al. Effect of clouds on photolysis and oxidants in the troposphere [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(20):4642.
- [11] 中华人民共和国环境保护部.2013年中国环境状况公报[EB/OL].(2014-06-04)[2014-06-27].http://jcs.mep.gov.cn. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of

- China. Chinese environmental state bulletin 2013 [EB/OL]. (2014-06-04)[2014-06-27]. <http://jcs.mep.gov.cn>.
- [12] 杨怀林,车勇,任建. 城市森林对 PM_{2.5} 的调控作用[J]. 四川林勘设计, 2013, 6(2):40-43.
YANG H L, CHE Y, REN J. Regulating roles of urban forest in PM_{2.5} [J]. Sichuan Forestry Exploration and Design, 2013, 6(2):40-43.
- [13] 熊治廷. 环境生物学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000: 74-90, 519-520.
XIONG Z T. Environmental biology [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2000: 74-90, 519-520.
- [14] 高金晖,王冬梅,赵亮,等. 植物叶片滞尘规律研究:以北京市为例[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2):94-99.
GAO J H, WANG D M, ZHAO L, et al. Airborne dust detainment by different plant leaves: taking Beijing as an example [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(2):94-99.
- [15] 周启星,魏树茹,张倩茹,等. 生态修复[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
ZHOU Q X, WEI S R, ZHANG Q R, et al. Ecological restoration [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [16] KULSHRESHTHA K, RAI A, MOHANTY C S, et al. Particulate pollution mitigating ability of some plant species [J]. Environmental Research, 2009, 3(1):137-142.
- [17] 江胜利. 杭州地区常见园林绿化植物滞尘能力研究[D]. 临安: 浙江农林大学, 2012.
JIANG S L. Study on the dust retention capacity of the street trees in Hangzhou district [D]. Linan: Zhejiang A & F University, 2012.
- [18] 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.
- [19] 邱媛,管东生,宋巍巍,等. 惠州城市植被的滞尘效应[J]. 生态学报, 2008, 28(6):2455-2462.
QIU Y, GUAN D S, SONG W W, et al. The dust retention effect of urban vegetation in Huizhou, Guangdong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6):2455-2462.
- [20] 贾彦,吴超,董春芳,等. 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, 2012, 43(11):4547-4553.
JIA Y, WU C, DONG C F, et al. Measurement on ability of dust removal of seven green plants at micro-conditions [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(11):4547-4553.
- [21] 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. Atmosphere particles-retaining capability of eleven plant species in Beijing [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(4):597-601.

(责任编辑 赵 勃 董晓燕
责任编辑委 夏新莉 王彦辉)