

姜霞,侯贻菊,刘延惠,等. 3 种木樨科树种叶片滞尘效应动态变化及其与叶片特征的关系[J]. 江苏农业科学,2019,47(16):150-154.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.16.033

3 种木樨科树种叶片滞尘效应动态变化 及其与叶片特征的关系

姜霞,侯贻菊,刘延惠,舒德远,崔迎春,李成龙,杨冰,丁访军

(贵州省林业科学研究院,贵州贵阳 550005)

摘要:研究贵州省贵阳市 3 种木樨科树种桂花、女贞和迎春花叶片滞尘能力,为筛选出贵阳市滞尘能力优良的园林绿化树种提供参考。利用颗粒物再悬浮法测定 3 种木樨科主要园林绿化树种吸滞颗粒物的能力,结合扫描电镜分析叶片的表面特征,探讨叶片颗粒物吸滞能力的时间变化规律及叶表面微观结构对其滞尘能力的影响。结果发现:(1)不同树种叶片总悬浮颗粒物(TSP, $d < 100 \mu\text{m}$)滞留能力大小顺序为:桂花 $[(3.73 \pm 0.41) \mu\text{g}/\text{cm}^2] >$ 女贞 $[(2.49 \pm 0.41) \mu\text{g}/\text{cm}^2] >$ 迎春花 $[(1.91 \pm 0.23) \mu\text{g}/\text{cm}^2]$;PM₁₀滞留能力大小顺序为:桂花 $[(1.60 \pm 0.18) \mu\text{g}/\text{cm}^2] >$ 女贞 $[(1.10 \pm 0.19) \mu\text{g}/\text{cm}^2] >$ 迎春花 $[(0.85 \pm 0.10) \mu\text{g}/\text{cm}^2]$;叶片 PM_{2.5}滞留能力大小顺序为:桂花 $[(0.11 \pm 0.01) \mu\text{g}/\text{cm}^2] >$ 女贞 $[(0.07 \pm 0.13) \mu\text{g}/\text{cm}^2] >$ 迎春花 $[(0.06 \pm 0.007) \mu\text{g}/\text{cm}^2]$ 。(2)在 1 年内,3 种树种叶片 TSP、细颗粒物(PM_{2.5})以及粗颗粒物(PM₁₀)滞留能力随月份延长呈“高一低一高”趋势,在 5 月或 10 月最低,随后又逐渐上升。(3)在扫描电镜下观察叶表微观结构,发现气孔密度越高,其吸滞颗粒物能力越强。3 种树种叶片滞尘能力表现为桂花>女贞>迎春花。

关键词:贵阳市;木樨科;树种;叶表面结构;滞尘能力;叶片特征

中图分类号: S687.101;S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)16-0150-05

随着城市化和工业化的迅猛发展,大气颗粒物污染逐渐成为影响我国城市居民健康的重要危险因素^[1]。空气悬浮颗粒物通常被称为粉尘,指一定时间内悬浮在空气中的固体微粒。按照空气动力学直径的大小,可将其分为总悬浮颗粒物(TSP, $d < 100 \mu\text{m}$)、可吸入颗粒物(PM₁₀, $d < 10 \mu\text{m}$)和细颗粒物(PM_{2.5}, $d < 2.5 \mu\text{m}$),而其中粒径在 $2.5 \mu\text{m}$ 以内(PM_{2.5})的颗粒物是一类可入肺的颗粒,可以直接通过上呼吸道进入到人体肺泡及血液中^[2],以颗粒物为特征的大气污染问题已严重影响公众身体健康。因此,如何防治大气颗粒物特别是可吸入颗粒物对人类的危害已成为一个迫切需要解决的问题。根据贵阳市 2016 年环境状况公报,贵阳市主要污染物浓度除细颗粒物(PM_{2.5})年均浓度超过《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)二级标准浓度限值 5.7% 之外,其余 5 项污染物年均浓度均达到二级标准。其中,PM_{2.5} 平均浓度为 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$,SO₂ 平均浓度为 $13 \mu\text{g}/\text{m}^3$,NO₂ 平均浓度为 $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$,PM₁₀ 平均浓度为 $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$,CO 第 95 百分位浓

度为 $1.1 \text{ mg}/\text{m}^3$,O₃ 第 90 百分位数浓度为 $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

通过滞尘净化大气是城市森林重要的生态功能之一^[3]。除了可以通过增湿降温,增加环境负离子来调节城市小气候外,植物还可以吸附大气颗粒物,对降低大气颗粒物污染发挥重要作用,从而净化城市空气。植物净化大气中颗粒物主要通过停着(滞留)、附着、黏附 3 种方式,这 3 种方式作用机制不同^[4]。植物叶片滞尘过程是一个复杂的动态过程,但植物的滞尘能力具有绝对性^[5]。研究表明,不同绿化树种因其叶面积大小、叶量、叶形态结构特征差异而具有不同程度的滞尘能力,同时其滞尘能力的发挥受到所处生长区域、气象条件、季节时间、环境因子以及树木自身特征、滞尘机理与生长状况等多方面影响^[6-8]。这就使同一树种在不同地区及不同季节的净化空气悬浮颗粒物的能力也有差异。

目前我国已经开展了一些对绿化树种滞尘能力的研究^[9-10],但有关贵州城市绿化树种对颗粒物的滞尘能力研究较少,特别是对桂花^[11]、女贞^[7]和迎春花^[12]叶片滞尘量研究大多采用“干洗法”称量,且研究主要集中在云南昆明、北京、河北石家庄等大城市,而采用颗粒物再悬浮法对树种滞尘能力研究较少。本研究利用颗粒物再悬浮法,结合扫描电镜分析叶片的表面特征,对贵阳市应用广泛的 3 种木樨科树种桂花、女贞和迎春花进行滞尘能力测定,以期筛选出滞尘能力优良的园林绿化树种来缓解城市空气颗粒物污染和改善城市人居环境质量。

1 研究区概况

贵阳位于贵州省中部,地处 $106^{\circ}07' \sim 107^{\circ}17' \text{E}$ 、 $26^{\circ}11' \sim$

收稿日期:2018-04-19

基金项目:贵州省科技厅社发攻关项目(编号:黔科合 SY 字[2015]3021);贵州省林业厅重大项目(编号:黔林科合[2014]重大 01 号);贵州省林业厅青年人才基金(编号:黔林科合 J 字[2017]01 号);

作者简介:姜霞(1981—),女,重庆人,硕士,副研究员,主要从事森林生态学研究。E-mail:43644135@qq.com。

通信作者:刘延惠,博士,副研究员,主要从事森林生态与森林水文研究。E-mail:liuyhgz@163.com。

26°55'N 之间。处黔中山原丘陵中部,长江与珠江分水岭地带,是一个以山地、丘陵为主的丘原盆地地区,占全市面积的 87.5%,海拔 506.5~1 762.7 m。属于亚热带湿润温和型气候,年平均气温为 15.3℃,年极端最高温度为 35.1℃,年极端最低温度为 -7.3℃,年平均相对湿度为 77%,年平均总降水量为 1 129.5 mm,年雷电日平均为 49.1 d,年平均阴天日为 235.1 d,年平均日照时数为 1 148.3 h,年降雪日数少,平均仅为 11.3 d。城市森林覆盖率达 47.22%,植物种类丰富,主要绿化树种有荷花玉兰(*Magnolia grandiflora* Linn.)、女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.)、香樟[*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.]、白玉兰(*Michelia alba* DC.)、紫薇(*Lagerstroemia*

indica)等。

采样区域设置在贵阳市河滨公园、筑城广场、贵州省林业科学院,分别代表贵阳城市、城市公园、市郊 3 种不同环境。

2 材料与方法

2.1 供试树种和样品采集

本研究涉及 3 个木樨科常见绿化树种,桂花[*Osmanthus fragrans* (Thunb.) Lour.]、迎春花(*Jasminum nudiflorum* Lindl.)和女贞(*Ligustrum lucidum* Ait.),3 种树种的形态特征见表 1。

表 1 3 种树种的形态特征

植物	科名	属名	形态特征
桂花	木樨科	木樨属	常绿乔木或灌木,高 3~5 m,最高可达 18 m;叶片革质,椭圆形、长椭圆形或椭圆状披针形;叶全缘或上半部生细锯齿,无毛
迎春花	木樨科	素馨属	落叶灌木植物,高 0.3~5 m;叶对生,三小叶或单叶,小叶近革质,全缘;叶片和小叶片幼时两面稍被毛,老时仅叶缘具睫毛
女贞	木樨科	女贞属	常绿灌木或乔木,高可达 25 m;叶革质,无毛,表面具有光泽,边缘稍背卷;叶对生,全缘

根据贵阳市的天气状况和降水量特点,安排在 2017 年 2、3、5、8、10、11、12 月进行试验。研究表明,大于 15 mm 的降水即可以对植物叶片滞留颗粒物的能力造成影响^[13],因此,采样前连续 10 d 无降水,风速小于 5 级。选择树种林龄相近、生长状况良好的 3 株样树进行功能叶片采集,采集样品原则为在乔木生长高度 2~3 m 处,分别在 4 个方位(东、南、西、北)采集成熟、完整且无病虫害的叶片,根据叶片大小在每株树采集 100~200 g 不等的叶片,将其立即封存带回实验室处理。

2.2 单位叶面滞尘量测定

本研究采用连接 DUSTMATE 手持式环境粉尘检测仪的空气气溶胶再发生器(QRJZFSQ-I)测定^[14],计算叶表面吸滞的 TSP、PM₁₀、PM_{2.5}的质量,每个树种进行 3 次重复。空气气溶胶再发生器(QRJZFSQ-I)的工作原理为:将待测树种叶片放入气溶胶再发生器的料盒,通过风蚀原理,将叶片上滞纳的颗粒物吹起、混匀,再次形成气溶胶。其中,为了防止颗粒物在料盒内壁的吸附,在料盒的内壁进行防静电处理。然后利用连接在气溶胶再发生器上的 DUSTMATE 手持式环境粉尘检测仪测定气溶胶中 TSP、粗颗粒物和细颗粒物的浓度,并根据监测的大气颗粒物浓度和气溶胶再发生器的空箱颗粒物浓度,最终结合料盒的内部容积换算得到供试叶片的颗粒物滞纳量。之后把测量完的叶片放入扫描仪进行扫描,使用 Adobe Photoshop 软件对扫描完的图像进行处理,利用叶面积分析软件计算叶片面积 $S(\text{cm}^2)$ 。不同树种单位叶面积吸滞颗粒物量的计算公式为:

$$M_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} / S_i \quad (1)$$

式中: M_i 表示不同树种单位叶面积吸滞不同粒径颗粒物的质量, $\mu\text{g}/\text{cm}^2$; m_{ij} 表示测试叶片表面吸滞颗粒物的质量, μg ; i 表示不同树种; j 表示颗粒物种类; $n=3$, 表示重复 3 次; S 表示测试叶片叶面积, cm^2 。

2.3 叶表现微观结构观察

选取健康叶片,在主叶脉中部附近切下 1~2 mm² 小块,

用蒸馏水洗净,常规临界点干燥,粘在样品台上后再用 HUS-5GB 高真空镀膜机镀碳,用 KYKY-1000B 扫描电子显微镜及 NORAN SYSTEM SIX X 射线能谱仪观察、测量长度及拍照。

2.4 数据处理

利用 SPSS 18.0 软件和 Excel 对野外观测数据进行简单相关分析、方差分析。

3 结果与分析

3.1 不同树种滞尘量

由图 1 可知,不同树种滞留颗粒物的能力有较大差异。不同树种叶片滞留 TSP 能力大小顺序为:桂花[(3.73 ± 0.41) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$] > 女贞[(2.49 ± 0.41) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$] > 迎春花[(1.91 ± 0.23) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$];不同树种叶片滞留 PM₁₀ 能力大小顺序为:桂花[(1.60 ± 0.18) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$] > 女贞[(1.10 ± 0.19) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$] > 迎春花[(0.85 ± 0.10) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$];不同树种叶片滞留 PM_{2.5} 能力大小顺序为:桂花[(0.11 ± 0.01) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$] > 女贞[(0.07 ± 0.13) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$] > 迎春花[(0.06 ± 0.007) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$]。滞留颗粒物总量的能力大小顺序依次为:桂花 > 女贞 > 迎春花。从滞留总量来看,木樨科 3 种树种中桂花叶片的颗粒物滞留能力最强,其次为女贞,迎春花的颗粒物滞留能力最弱。

3.2 不同树种滞尘量的时间变化特征

图 2 为 3 个树种在不同月份叶片滞留颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀、TSP)的年变化过程,3 种树种的叶片滞尘量(PM_{2.5}、PM₁₀、TSP)年变化均呈 U 形即“高一低一高”趋势。

由图 2-a 可看出,3 种树种叶片 PM_{2.5} 滞留能力差异显著。桂花叶片滞留 PM_{2.5} 能力在全年以 12 月[(0.31 ± 0.003) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$]最大,其次是 2 月[(0.16 ± 0.04) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$],以 5 月[(0.032 ± 0.004) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$]最小;迎春花叶片 PM_{2.5} 滞留能力在全年以 2 月[(0.085 ± 0.02) $\mu\text{g}/\text{cm}^2$]最大,以 5 月

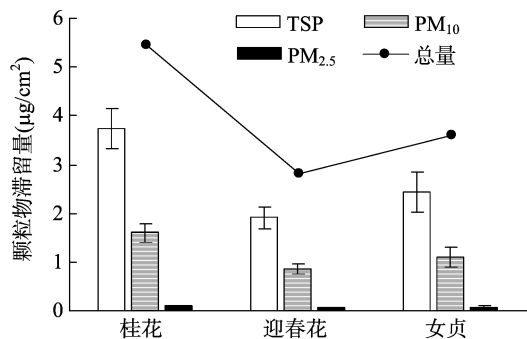
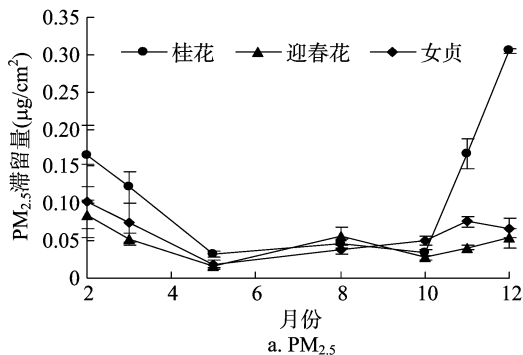
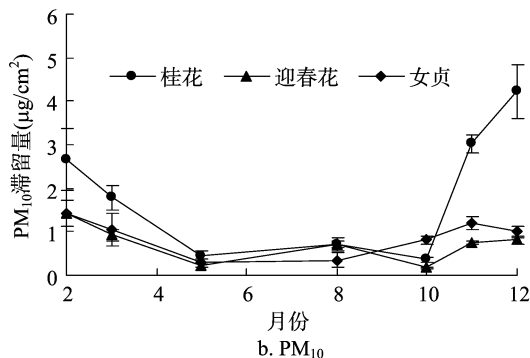
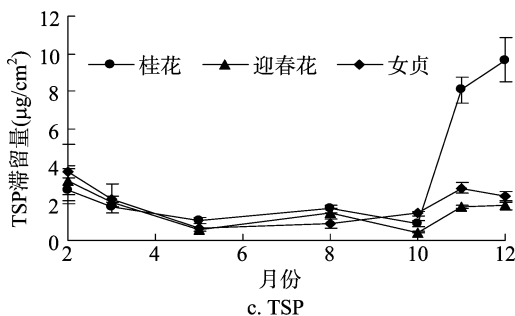


图1 不同树种单位叶面积叶片对不同粒径颗粒物的滞留量

[(0.016 ± 0.002) μg/cm²] 最小; 女贞叶片 PM_{2.5} 滞留能力在全年以 2 月 [(0.10 ± 0.05) μg/cm²] 最大, 以 5 月 [(0.018 ± 0.007) μg/cm²] 最小。

a. PM_{2.5}b. PM₁₀

c. TSP

图2 不同树种单位叶面积叶片对 PM_{2.5}、PM₁₀、TSP 滞留量年变化

研究发现,3 个树种叶片 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP 滞留量在 5 月或 10 月最低,可能是因为贵阳雨水多集中在此阶段,叶片吸滞的颗粒物受到雨水的冲洗,使颗粒物量减少。

3.3 不同生长背景下树种叶片对不同粒径颗粒物滞留能力比较

由图 3 可知,同一树种叶片对各粒径颗粒物的滞留能力因地点不同而具有差异性。本试验选取的 3 种树种叶片单位面积对 PM_{2.5} 滞留量变化趋势一致,均表现为河滨公园 > 筑城广场 > 贵州省林业科学研究院 (省林科院); 女贞对 PM₁₀ 和 TSP 的滞留量与桂花和迎春花变化趋势不相同,女贞表现为筑城广场 > 河滨公园 > 省林科院,桂花和迎春花表现为河滨公园 > 筑城广场 > 省林科院。在不同生长背景下桂花和迎春花叶片单位面积对 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP 滞留量最大值均在河滨公园,在河滨公园桂花的滞留量 (PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP) 分别为 (0.17 ± 0.03)、(2.68 ± 0.62)、(6.44 ± 1.38) μg/cm²,在河滨公园迎春花的滞留量 (PM_{2.5}、PM₁₀ 和 TSP) 分别为 (0.07 ±

由图 2-b 可看出,3 种树种叶片 PM₁₀ 滞留能力差异显著。桂花叶片滞留 PM₁₀ 能力在全年以 12 月 [(4.22 ± 0.62) μg/cm²] 最大,以 10 月 [(0.36 ± 0.06) μg/cm²] 最小; 迎春花叶片滞留 PM₁₀ 能力在全年以 2 月 [(1.43 ± 0.31) μg/cm²] 最大,以 10 月 [(0.17 ± 0.02) μg/cm²] 最小; 女贞叶片 PM₁₀ 滞留能力在全年以 2 月 [(1.42 ± 0.31) μg/cm²] 最大,以 5 月 [(0.28 ± 0.09) μg/cm²] 最小。

由图 2-c 可看出,3 种树种叶片滞留 TSP 能力差异显著。桂花叶片滞留 TSP 能力在全年以 12 月 [(9.65 ± 1.18) μg/cm²] 最大,以 10 月 [(0.94 ± 0.16) μg/cm²] 最小; 迎春花叶片滞留 TSP 能力在全年以 2 月 [(3.16 ± 0.71) μg/cm²] 最大,以 10 月 [(0.41 ± 0.04) μg/cm²] 最小; 女贞叶片滞留 TSP 能力在全年以 2 月 [(3.63 ± 1.50) μg/cm²] 最大,以 5 月 [(0.69 ± 0.22) μg/cm²] 最小。

0.013)、(1.02 ± 0.19)、(2.32 ± 0.44) μg/cm²。女贞叶片单位面积对 PM₁₀ 和 TSP 滞留量最大值均在筑城广场,分别为 (1.58 ± 0.32)、(3.43 ± 0.68) μg/cm²; 女贞叶片单位面积对 PM_{2.5} 滞留量最大值在河滨公园,为 (0.45 ± 0.05) μg/cm²。从树种叶片不同粒径滞留量随地点变化来看,总体上表现为河滨公园 > 筑城广场 > 省林科院,变化趋势为城区 > 近郊。

3.4 滞尘量与叶面积的关系

将 3 种树种单位叶面积叶片对 PM_{2.5}、PM₁₀、TSP 滞留量与叶面积进行简单相关分析,其相关系数见表 2。由表 2 可知,滞尘量与单位叶面积有显著相关性,相关系数在 -0.135 ~ -0.165,呈显著负相关,说明叶面积越小,单位面积的滞尘量越大。

3.5 不同树种叶面微结构与滞尘能力的关系

对 3 个树种叶片样品进行电镜扫描,结果见图 4。通过扫描图像分析各树种叶表面特征 (表 3) 可知,从气孔特征来

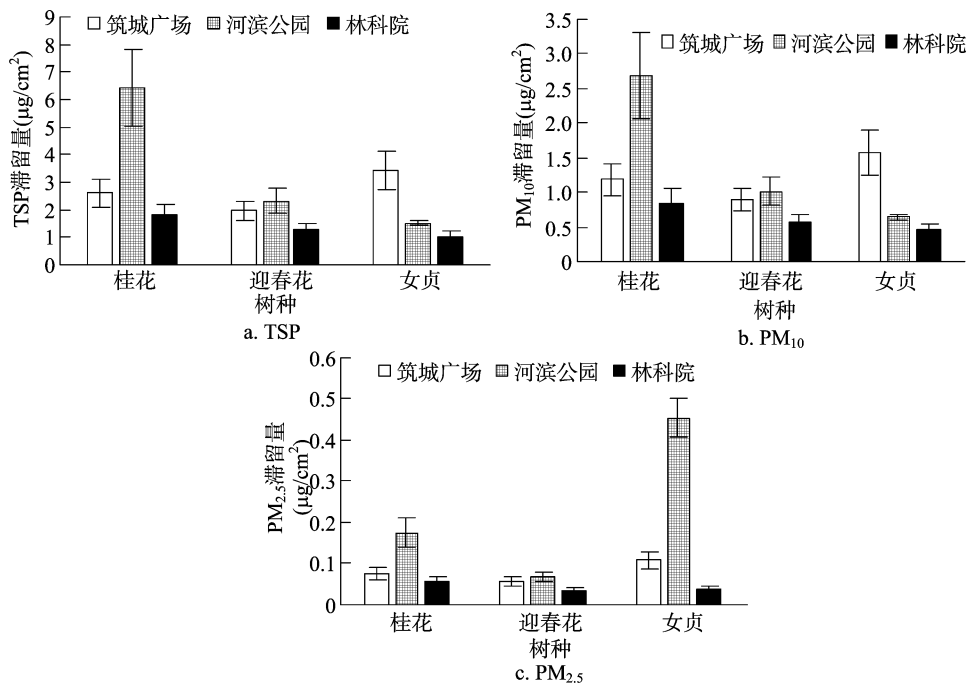


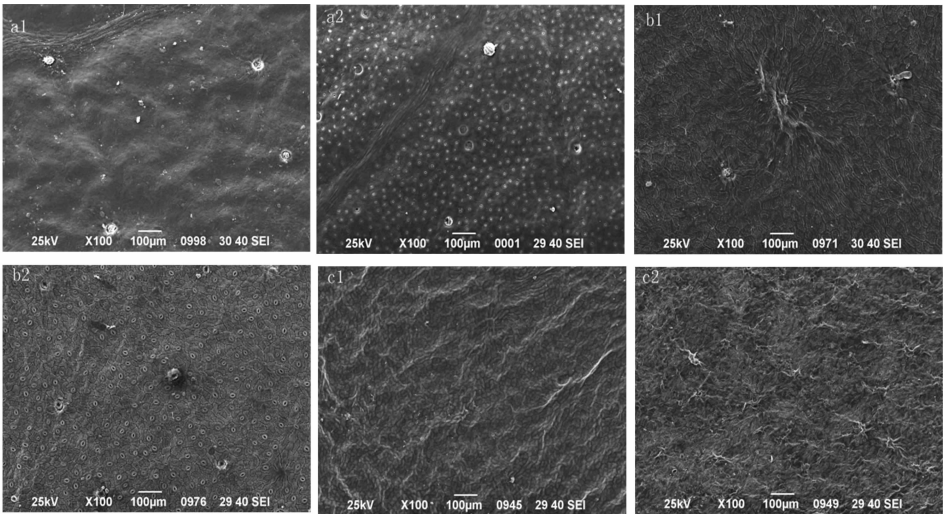
图3 3种树种在不同地点叶片对PM_{2.5}、PM₁₀、TSP滞留量

表2 滞尘量(PM_{2.5}、PM₁₀、TSP)与叶面积的关系

指标	相关系数			
	叶面积	TSP 滞留量	PM ₁₀ 滞留量	PM _{2.5} 滞留量
叶面积	1.000			
TSP 滞留量	-0.165 *	1.000		
PM ₁₀ 滞留量	-0.164 *	0.986 **	1.000	
PM _{2.5} 滞留量	-0.135	0.961 **	0.958 **	1.000

表3 3种树种表皮气孔及表皮毛特征

树种	气孔形态	100 × 视野气孔密度(个)	气孔大小(μm)	叶表面叶毛	叶背面叶毛
桂花	圆形	504	约 25	无	无
女贞	卵圆形	228	约 25	无	无
迎春花	卵圆形	104	约 10	无	无



a1.桂花上表面; a2.桂花下表面; b1.女贞上表面; b2.女贞下表面; c1.迎春花上表面; c2.迎春花下表面

图4 不同树种叶片扫描电镜图像

看,3种树种气孔密度大小顺序为桂花>女贞>迎春花;3种植物上、下表面均未发现有明显的毛被;从叶表面粗糙度来看,桂花叶上表面较光滑但下表皮具有沟状组织,女贞叶表面有褶皱和密布沟状组织,迎春花表面有褶皱。结果表明,滞尘量较大的桂花气孔密度较大,叶上表面粗糙度较低,但下表皮具有沟状组织,气孔开口较大,在一定程度上更容易阻滞灰尘

及各种粒径的颗粒物,使深藏其间的颗粒物很难再次被风或少量雨水带走,故能稳定滞尘,说明较多的气孔密度增强桂花的滞尘能力。

4 讨论与结论

近几年,随着粉尘、雾霾等污染的暴发日益频繁,空气颗

颗粒物严重危害城市居民的身心健康,受到世界范围的关注。贵阳市总体空气质量较好,首要污染物以 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 为主,其中以 $\text{PM}_{2.5}$ 居多^[15]。贵阳市大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度介于 $4 \sim 193 \mu\text{g}/\text{m}^3$,平均值为 $(70 \pm 33) \mu\text{g}/\text{m}^3$,以 12、1 月 2 个月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,7 月最低;贵阳市日均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低于南京、成都、南宁等发达城市,但远高于美国东南部城市^[16]。因此,本研究选择贵阳市常见的 3 种木樨科植物,对其叶片的滞尘能力及叶片结构进行研究。植物因叶片的吸附能力在减少大气颗粒物方面发挥了比较大的作用。不同树种由于其叶面积、叶片的形态结构特征不同,使其对不同粒径颗粒物滞纳能力差异明显。在本研究中,不同树种叶片滞留 TSP 能力大小顺序为桂花 > 女贞 > 迎春花,不同树种叶片滞留 PM_{10} 能力大小顺序为桂花 > 女贞 > 迎春花,不同树种叶片滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 能力大小顺序为桂花 > 女贞 > 迎春花。研究表明,树种叶片结构特征、叶表面粗糙程度、被毛情况、气孔大小、气孔密度等是决定不同树种单位面积滞尘能力的主要驱动因素^[17-18]。一般来说,叶片宽大、平展、叶面粗糙且多茸毛植物的滞尘量更大^[19]。由于本研究中 3 个树种属于同一科植物,其叶片都是革质或近革质,叶片表面均无毛被,叶片粗糙程度相差不大,使得 3 个树种的滞尘量表现为与气孔密度关系密切。这与杨佳等对北京植物园常见树种叶片滞尘量进行研究,发现其中紫叶李、元宝枫滞尘量大与其叶片气孔密度较大相关的研究结果^[17]一致。本研究中滞尘量较大的桂花具备气孔密度较大,叶上表面粗糙度较低、下表皮具有沟状组织、气孔开口较大的特征,在一定程度上更容易阻滞灰尘及各种粒径的颗粒物。这也进一步说明对不同树种叶片结构进行观察,有助于筛选城市绿化树种^[20]。

由于叶片在不同的生长时间段内,其叶片结构不同,使得不同树种在不同季节对空气颗粒物的吸滞能力存在一定差异。而阔叶树种在不同季节对空气颗粒物的吸滞能力受叶片的表面结构影响较大^[21]。在不同季节,3 种树种吸滞 TSP、细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)、粗颗粒物(PM_{10})能力随时间的延长呈“高一低一高”趋势,在 5 月或 10 月最低,随后又逐渐上升。这与张维康等对北京市常见阔叶树叶片吸滞颗粒物能力呈倒 U 型趋势的研究结果^[22]一致。

由于污染程度和环境气候特征具有显著差异,同一树种在不同地点的滞尘能力也表现出一定的差异性。有研究表明,影响叶片滞尘量的因素除叶片表面形态特征外,还可能受研究地点、时间及采样部位等其他因素的影响^[23-24]。在本研究中,桂花和迎春花叶片单位面积对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 滞留量最大值均在滨河公园,女贞对 PM_{10} 和 TSP 滞留量最大值均在筑城广场,对 $\text{PM}_{2.5}$ 滞留量最大值在滨河公园。3 个树种叶片不同粒径滞留量随地点变化总体表现为滨河公园 > 筑城广场 > 省林科院,变化趋势为城区 > 近郊。这可能是由于城区污染程度较大,使植物叶片的滞尘能力也较高。

参考文献:

- [1] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东. 我国 113 个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. 中国环境科学,2010,30(3):410-415.
- [2] 赵雪艳,任丽红,姬亚芹,等. 重庆主城区春季大气 PM_{10} 及 $\text{PM}_{2.5}$

- 中多环芳烃来源解析[J]. 环境科学研究,2014,27(12):1395-1402.
- [3] 王 磊,黄利斌,万 欣,等. 城市森林对大气颗粒物(尤其 $\text{PM}_{2.5}$)调控作用研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2016,40(5):148-154.
- [4] Wang H, Zhang B, Ni Y X, et al. Pharmacodynamic target attainment of seven antimicrobials against gram-negative bacteria collected from China in 2003 and 2004[J]. International Journal of Antimicrobial Agents, 2007, 30(5):452-457.
- [5] 高金晖,王冬梅,赵 亮. 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.
- [6] 张 桐,洪秀玲,孙立伟,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.
- [7] 范舒欣,蔡 妤,董 丽. 北京市 8 种常绿阔叶树种滞尘能力[J]. 应用生态学报,2017,28(2):408-414.
- [8] Jin S J, Guo J K, Wheeler S, et al. Evaluation of impacts of trees on $\text{PM}_{2.5}$ dispersion in urban streets[J]. Atmospheric Environment, 2014, 99:277-287.
- [9] 乔冠皓,陈警伟,刘肖瑜,等. 两种常见绿化树种对大气颗粒物的滞留与再悬浮[J]. 应用生态学报,2017,28(1):266-272.
- [10] 张维康,王 兵,牛 香. 不同树种叶片微观结构对其滞纳空气颗粒物功能的影响[J]. 生态学杂志,2017,36(9):2507-2513.
- [11] 李艳梅,陈奇伯,李艳芹,等. 昆明 10 个绿化树种对不同污染区的滞尘及吸净效应[J]. 西南林业大学学报,2016,36(3):105-110.
- [12] 刘 颖,李冬杰,李朝炜,等. 绿化植物叶面特征对滞尘效应的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(8):454-457.
- [13] 蔡永立,宋永昌. 浙江天童常绿阔叶林藤本植物的适应生态学 I. 叶片解剖特征的比较[J]. 植物生态学报,2001,25(1):90-98.
- [14] 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.
- [15] 黄世芹,彭科曼,陈海凤. 贵阳市近 4 年空气质量特征分析[J]. 贵州气象,2017,41(4):52-56.
- [16] 梁隆超,仇广乐,陈 卓. 贵阳市城区大气颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染特征与季节变化规律[J]. 地球与环境,2015,43(3):290-295.
- [17] 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.
- [18] 申惠蓓,赵 冰,徐静静. 15 个杜鹃花品种叶片解剖结构与植株耐热性的关系[J]. 应用生态学报,2016,27(12):3895-3904.
- [19] 吕铃铃,李洪远,杨佳楠. 植物吸附大气颗粒物的时空变化规律及其影响因素的研究进展[J]. 生态学杂志,2016,35(2):524-533.
- [20] 赵松婷,李新宇,李延明. 北京市 29 种园林植物滞留大气细颗粒物能力研究[J]. 生态环境学报,2015,24(6):1004-1012.
- [21] Terzaghi E, Wild E, Zaccchello G, et al. Forest filter effect: role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs[J]. Atmospheric Environment, 2013, 74:378-384.
- [22] 张维康,王 兵,牛 香. 北京市常见树种叶片吸滞颗粒物能力时间动态研究[J]. 环境科学学报,2016,36(10):3840-3847.
- [23] 张维康,王 兵,牛 香. 北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力[J]. 环境科学,2015,36(7):2381-2388.
- [24] 赵云阁,鲁笑颖,鲁绍伟,等. 北京市常见绿化树种叶片秋季滞纳不同粒径颗粒物能力[J]. 生态学杂志,2017,36(1):35-42.