

DOI: 10.5846/stxb201808241808

王琴, 冯晶红, 黄奕, 王鹏程, 谢梦婷, 万好, 苏泽琳, 王仁鹏, 王征洋, 余刘思. 武汉市 15 种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征. 生态学报, 2020, 40(1): 213-222.

Wang Q, Feng J H, Huang Y, Wang P C, Xie M T, Wan H, Su Z L, Wang R P, Wang Z Y, Yu L S. Dust-retention capability and leaf surface micromorphology of 15 broad-leaved tree species in Wuhan. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 213-222.

武汉市 15 种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征

王 琴*, 冯晶红, 黄 奕, 王鹏程, 谢梦婷, 万 好, 苏泽琳, 王仁鹏, 王征洋, 余刘思

湖北工业大学土木建筑与环境学院, 武汉 430068

摘要:以武汉市 15 种常见的阔叶乔木为研究对象,通过 3 级滤膜过滤法测定了各乔木单位叶面积滞留不同粒径颗粒物(TSP、PM_{>10}、PM₁₀、PM_{2.5})的质量,并通过扫描电镜观察比较了 15 种乔木的叶表面微形态结构,分析了微形态对植物滞尘能力的影响。结果表明:15 种乔木单位叶面积的滞尘量存在显著差异($P < 0.05$),综合滞尘能力最强的植物为二球悬铃木、桂花和石楠,除以上 3 者外,女贞和广玉兰分别具有较强的滞留 PM₁₀和 PM_{2.5}的能力;加杨滞留 TSP 和 PM_{>10}的能力最弱,玉兰滞留 PM₁₀和 PM_{2.5}的能力最弱。各乔木单位叶面积滞留 PM_{2.5}和 PM₁₀的质量分别占总粉尘量的 0.7%—8.9%和 3.6%—33.9%。叶表面微结构观察表明,叶表面粗糙、褶皱较多,或被有蜡质层的植物有利于粉尘颗粒物的附着。相关性分析表明,植物单位叶面积的滞尘量与叶表面沟槽的宽度呈显著相关,上下表面沟槽宽度越小,越有利于细微颗粒物(PM_{2.5})的滞留,下表面沟槽宽度增加,有利于粉尘总颗粒物(TSP)的滞留。由此可见,叶表面粗糙度、蜡质含量和沟槽宽度等微形态结构是调控绿化树种叶片滞尘能力的重要因素,在武汉以治理大气粉尘污染为目标进行城市绿化时,可考虑选择二球悬铃木、桂花和石楠等滞尘能力强的树种。

关键词:阔叶乔木;大气颗粒物;滞尘能力;叶表微形态;污染治理

Dust-retention capability and leaf surface micromorphology of 15 broad-leaved tree species in Wuhan

WANG Qin*, FENG Jinghong, HUANG Yi, WANG Pengcheng, XIE Mengting, WAN Hao, SU Zelin, WANG Renpeng, WANG Zhengyang, YU Liusi

School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China

Abstract: We selected 15 common broad-leaved tree species in Wuhan and quantified particles of different sizes (TSP, PM_{>10}, PM₁₀, PM_{2.5}) per unit leaf area using a 3-layer membrane filtration method. To explore the influence of leaf surface micromorphology on dust-retention ability, the leaf surface micromorphology of the 15 tree species was observed by scanning electron microscopy (SEM). The results showed that there were significant differences in dust retention per unit leaf area among the 15 tree species ($P < 0.05$). The plants with the strongest dust-retention ability were *Platanus acerifolia*, *Osmanthus fragrans*, and *Photinia magnolia*. In addition to, *Ligustrum lucidum* and *Magnolia grandiflora* had a strong ability to retain PM₁₀ and PM_{2.5} on their leaves, respectively. *Populus × canadensis* had the weakest ability to retain TSP and PM_{>10}, and *Magnolia denudata* had the weakest ability to retain PM₁₀ and PM_{2.5}. The ratio of PM_{2.5} and PM₁₀ mass per unit leaf area to total dust content ranged from 0.7% to 8.9% and from 3.6% to 33.9%, respectively. Micromorphological observations of the leaf surfaces showed that rough, wrinkled leaves or a waxy layer on the leaves were conducive to the

基金项目:国家自然科学基金青年项目(31500577);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201605);2018 年省级大学生创新创业计划项目(201810500055)

收稿日期:2018-08-24; 网络出版日期:2019-10-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 410126352@qq.com

attachment of dust particles. The correlation analyses indicated that the amount of dust per unit leaf area was significantly correlated with the width of the grooves on the leaf surface. The smaller the width of grooves on the upper and lower surfaces, the more favorable the retention of fine particles ($PM_{2.5}$). The larger the width of grooves on the lower surface, the more favorable the retention of total particles (TSP). Therefore, the micromorphological structure of the leaf surface (roughness, wax content, and groove width) are important factors in the dust-retention capability of greening tree species. When urban greening is carried out in Wuhan to control atmospheric dust pollution, we suggest to choose tree species with a strong dust-retention capability, such as *P. acerifolia*, *O. fragrans*, and *P. magnolia*.

Key Words: broad-leaved trees; atmospheric particulate matters; dust-retention capability; leaf surface micromorphology; pollution control

近年来,随着我国高速的城市化进程,工业燃料的燃烧、交通扬尘、建筑施工扬尘和生活废气排放量的骤增,导致严重的空气污染问题,已经严重威胁到人类的健康和生活^[1]。空气中的总悬浮颗粒物(Total Suspended Particulate,简称TSP,粒径 $d \leq 100 \mu m$)是国内外大多数城市的首要污染物,聚集大量有害重金属、酸性氧化物、有机物、细菌和病菌等^[2]。越细小的颗粒物(Particulate Matter, PM)对人体的危害越大, PM_{10} ($d \leq 10 \mu m$ 的颗粒物)会引起慢性鼻炎或支气管炎等疾病; $PM_{2.5}$ ($d \leq 2.5 \mu m$ 的颗粒物)则会诱发一系列呼吸系统、心脑血管疾病,严重的可危及生命^[3]。此外,大气中的悬浮颗粒物由于沉降困难,容易引发雾霾天气,还会加剧城市温室效应^[4]。

园林植物可以阻挡、过滤及吸滞大气中的粉尘颗粒物,改善城市大气污染状况^[5-6]。由于不同城市的大气污染特征不同,园林植物分布也存在差异,利用园林植物进行大气污染治理的措施也就不同。而在同一城市,不同植物具有各自独特的叶表面微形态结构,植物的滞尘能力和机制也存在明显差异^[7]。因此,在城市大气污染治理中,针对地域特性和植物分布特点,筛选具有较强滞尘能力的绿化树种,并进一步开展绿化树种滞尘机制研究,可以为城市绿化树种的合理配置提供理论依据。

目前,我国学者在城市园林植物滞尘能力与机制等方面的研究,主要集中在北京^[8-12]、西安^[13]、南京^[14-15]、青岛^[16-17]、广州^[18]、昆明^[19-20]等城市,武汉作为我国中部地区的核心城市,关于绿化树种滞尘机制的研究还不够深入。周志翔^[21]、陈芳^[22]、余曼^[23]、谢子瑞^[24]等对武汉市厂区、城区主干道、园林绿地内的不同植物种类的滞尘能力进行了比较,宏观上分析了不同植物的叶表面特性、树冠结构、枝叶密集程度等与滞尘能力的关系。但这些研究主要集中于绿化树种对总悬浮颗粒物(TSP)的滞留能力,缺乏对细微颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)滞留能力的定量研究;对叶面微结构的研究也仅停留在电镜扫描观察与分析上,缺乏对叶表面微结构的量化数据与植物滞尘能力的相关性分析。

研究表明,与灌木和草本相比,乔木凭借其硕大的林冠、复杂的枝叶结构和较多的叶片数量,更有利于截留、阻挡与吸附大气中的粉尘^[8,25]。为了研究武汉市不同树种对各粒径颗粒物的滞留能力以及叶表面特征对滞尘能力的影响,本文选取武汉城区15种常见的园林阔叶乔木,测定各乔木单位叶面积对TSP、 $PM_{>10}$ 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的吸滞量,对比和分析不同树种滞留各粒径颗粒物的能力;并通过扫描电镜观察叶表面微结构特征,准确量化各项微结构参数,分析这些微结构特征与植物滞尘量之间的关系,从微观上解释各树种滞尘能力差异的原因,为武汉市大气污染治理过程中合理选择绿化树种提供理论依据。

1 研究地概况

1.1 采样点概况

采样地点为武汉市洪山区巡司河风情公园绿化带,该绿化带长2.3 km,宽为56 m,距离南李路主干道约2 m,附近车流量大,且有地铁施工,汽车尾气及扬尘污染严重。

1.2 供试植物种类

本研究选取了武汉市常见的 15 种园林阔叶乔木进行滞尘能力比较,包括 8 种常绿乔木:香樟、桂花、石楠、广玉兰、女贞、山杜英、构树和乐昌含笑,7 种落叶乔木:二球悬铃木、栎树、银杏、加杨、玉兰、日本晚樱、乌桕。经调查和统计,15 种乔木在巡司河风情公园均有分布,且每种数量在 10 株以上,因此,所有的采样均在此区域内进行。

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

研究发现,降雨量在 15 mm 以上,降雨强度达到 30 mm/h 的降水,可以冲刷掉叶片上 90% 的粉尘,然后重新开始粉尘积累^[26]。本研究于 2017 年 9—11 月份降雨后第 7 天进行 3 次采样。为了保证采样环境的一致性,各树种的采样时段均为每天 9:00—11:00,采样乔木均在距离道路边界 10 m 范围内,采样高度为离地面 2 m 左右,每个树种选择 3 株生长状况较一致的乔木,在树冠外围的东、南、西、北 4 个方位,分为上、中、下 3 个层次随机采集健康完整的叶片,单叶较大者采集 20—30 片,较小者采集 50—60 片,每个树种重复采样 3 次,并将叶片小心装入封口带,立即带回实验室处理。

2.2 叶面滞尘量的测定

本试验采用 3 级滤膜过滤法测定各乔木单位叶面积附着不同粒径颗粒物的情况^[27]。将每种植物采集的叶片放入蒸馏水中浸泡 2 小时,并用软毛刷小心清洗叶片正、反面的粉尘,随后小心夹出叶片,将清洗液依次用 10 μm 、2.5 μm 、0.2 μm 孔径的滤膜(美国 Whatman,聚碳酸酯膜)过滤,过滤后的滤膜放入恒温干燥箱(温度设定 60℃)烘干,再用万分之一天平(赛多利斯)称质量,与 3 种干净滤膜的质量差即为不同颗粒物的滞留量,孔径为 10.0 μm 、2.5 μm 和 0.2 μm 的滤膜上的颗粒物分别视为 $\text{PM}_{>10}$ 、 $\text{PM}_{2.5-10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$,粉尘颗粒物的总质量 TSP 为三者质量之和, PM_{10} 的质量为 $\text{PM}_{2.5-10}$ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量之和。清洗晾干后的叶片采用活体叶面积仪(YMJ-B,浙江托普)测量单面面积,每种植物叶片单面面积之和为样品叶片总面积。

计算各植物 TSP、 $\text{PM}_{>10}$ 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 滞留量与叶片总面积的比值,得到单位叶面积上各粒径颗粒物的滞留量。

2.3 叶表面微观结构观测

为了观察叶表面的微观结构(表皮毛、气孔密度和大小、沟槽宽度和深度、蜡质层、晶状体等)和粉尘附着情况,每种植物随机选择 3 片新采摘的、健康无破损的叶片,避开主叶脉随机切取 5 mm×5 mm 的正方形样品若干,每个样品经过固定后用场发射环境扫描电子显微镜(Hitachi SU-8010)在低真空模式(10.0 kV)下观察并拍照。分别选择 5 张放大倍数为 200 倍、500 倍和 1000 倍的扫描电镜图统计叶片表皮毛数量、气孔密度、气孔长度和宽度、沟槽宽度。

2.4 数据处理

利用 SPSS 22.0(IBM,USA)软件进行数据处理和聚类分析。不同树种单位叶面积滞留的 TSP、 $\text{PM}_{>10}$ 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 用单因素方差分析法(one-way ANOVA)进行差异分析,若差异显著则用 LSD 法(least-significant difference)进行多重比较。采用偏相关法分析树种叶片微形态参数与滞尘能力之间的关系。

3 结果分析

3.1 不同树种单位叶面积滞尘能力比较

由图 1 可以看出,各树种单位叶面积 TSP、 $\text{PM}_{>10}$ 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的滞留量变化范围分别为 0.235—1.893, 0.171—1.487, 0.023—0.358 g/m² 和 0.006—0.058 g/m²,树种之间滞尘量存在显著性差异($P<0.05$)。各树种单位叶面积滞留 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量分别占总粉尘量(TSP)的比例为 3.6%—33.9% 和 0.7%—8.9%。

根据图 1 和图 2 可知,15 种乔木单位叶面积滞尘能力可划分为 3 或 4 个等级。各树种 TSP 和 $\text{PM}_{>10}$ 滞留

能力的等级划分一致,最强的是二球悬铃木、石楠和桂花,三者之间差异显著,单叶面积 TSP 和 $PM_{>10}$ 滞留量分别为 1.287—1.893 g/m^2 和 1.060—1.487 g/m^2 ;中等的是女贞、玉兰、日本晚樱、栾树和山杜英,两两之间差异不显著,单叶面积 TSP 和 $PM_{>10}$ 滞留量分别为 0.632—0.834 g/m^2 和 0.563—0.781 g/m^2 ;最弱的是广玉兰、乐昌含笑、香樟、乌桕、银杏、构树和加杨,两两之间差异亦不显著,单叶面积 TSP 和 $PM_{>10}$ 滞留量分别为 0.235—0.528 g/m^2 和 0.171—0.430 g/m^2 ;单位叶面积 TSP 和 $PM_{>10}$ 滞留量最大的是二球悬铃木,最小的是加杨,两种滞尘量前者是后者的 7.8 倍和 8.7 倍。 PM_{10} 滞留能力最强的是二球悬铃木 (0.358 g/m^2),较强的是女贞、石楠、桂花 (0.178—0.211 g/m^2),中等的是日本晚樱、乐昌含笑、香樟和乌桕 (0.113—0.155 g/m^2),最弱的是栾树、构树、广玉兰、山杜英、加杨、银杏和玉兰 (0.023—0.057 g/m^2);单位叶面积 PM_{10} 滞留量最大的二球悬铃木是滞留量最小的玉兰的 18 倍。 $PM_{2.5}$ 滞留能力最强的是石楠、桂花、二球悬铃木和广玉兰 (0.047—0.058 g/m^2),较强的是乐昌含笑、栾树、日本晚樱和女贞 (0.038—0.043 g/m^2),中等的是香樟、乌桕、银杏、构树、山杜英、加杨 (0.016—0.027 g/m^2),最弱的是玉兰 (0.006 g/m^2);单位叶面积 $PM_{2.5}$ 滞留量最大的石楠是滞留量最小的玉兰的 9.7 倍。

通过比较可以看出,综合滞尘能力最强的植物是二球悬铃木、桂花和石楠,除以上 3 者外,女贞和广玉兰分别有较强的滞留 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的能力,加杨滞留 TSP 和 $PM_{>10}$ 的能力最弱,玉兰滞留 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的能力最弱。

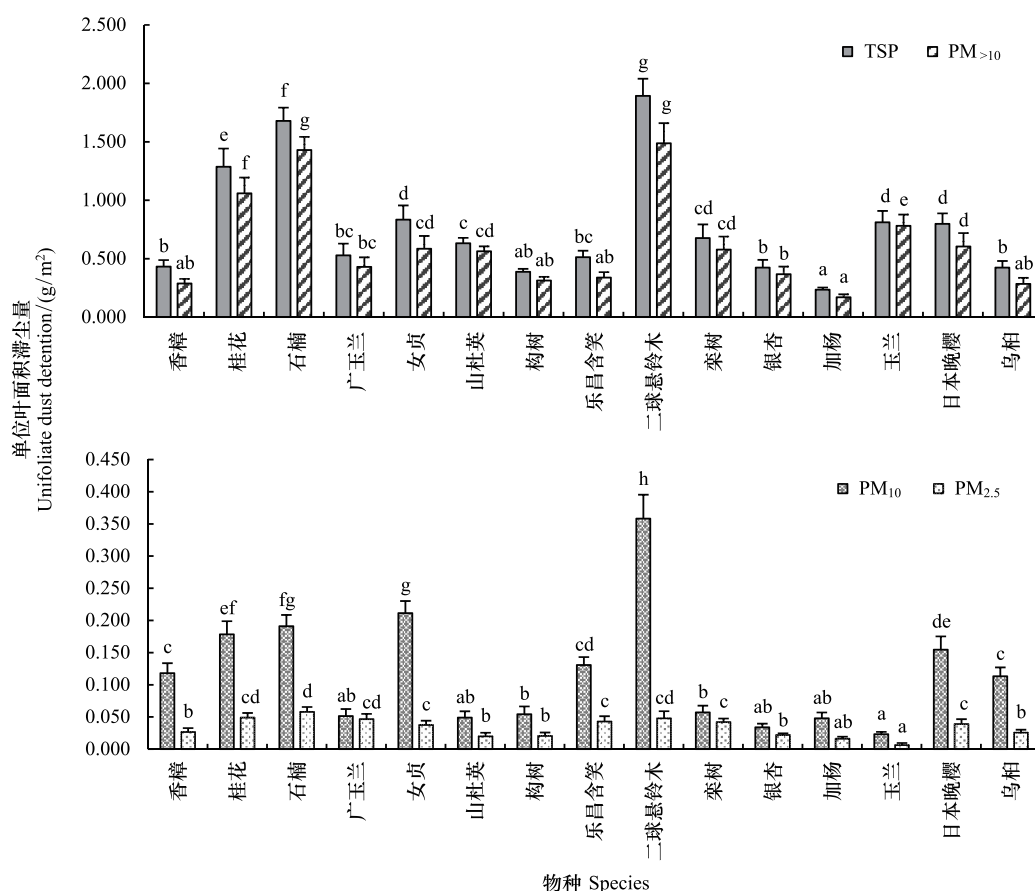


图 1 15 种乔木单位叶面积 TSP、 $PM_{>10}$ 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 滞留量

Fig.1 The amount of TSP, $PM_{>10}$, PM_{10} and $PM_{2.5}$ on unit leaf area of 15 tree species

TSP: 总悬浮颗粒物; $PM_{>10}$: 直径大于 10 μm 的细微颗粒物; PM_{10} : 直径在 2.5—10 μm 范围的细微颗粒物; $PM_{2.5}$: 直径在 0.2—2.5 μm 范围的细微颗粒物; 不同小写字母表示各物种 TSP、 $PM_{>10}$ 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 滞留量的 Duncan 多重比较结果在 0.05 水平上差异显著

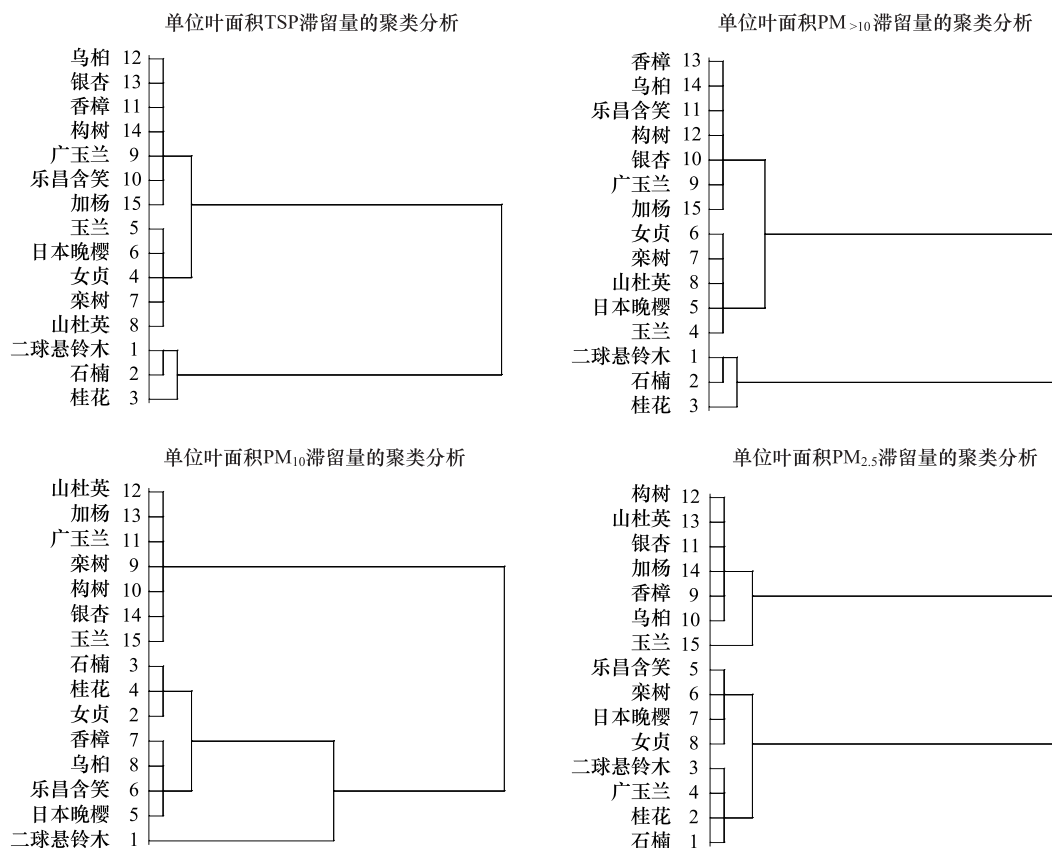


图2 15种乔木滞尘能力的聚类分析

Fig.2 Clustering analysis on dust detention ability of 15 tree species

3.2 不同植物叶表微结构分析

利用电镜扫描对 15 种乔木叶片的表皮毛、气孔分布、褶皱结构,以及粉尘附着情况进行显微观察,结果如图 3 所示:(1)滞尘能力最强的二球悬铃木叶片上、下表面均有密集的分枝毛结构,且叶表面粗糙,具明显的沟槽和气孔结构,可见颗粒物附着于分枝毛及沟槽间隙;(2)桂花和石榴的叶表面较平整,但二者表面均有明显的鳞片状蜡质结构,附着有较多的颗粒物;(3)女贞和日本晚樱叶片下表面气孔周围有较窄的褶皱和深沟槽,这些结构有利于粉尘的滞留,但二者上表面沟槽较浅或较平整,不利于粉尘的稳定固着;(4)玉兰叶片上表面被有表皮毛,下表面分布有起伏的气孔,可见部分颗粒物滞留于表皮毛和气孔周围下陷的沟槽处,但叶片上、下表面的沟槽均较浅,也不利于粉尘的稳定固着。(5)栎树上、下表面有密集的条纹沟槽和凸起结构,可以滞留部分粉尘,但上、下表面的沟槽间距均小于 $2\mu\text{m}$,不利于大颗粒物的附着。(6)山杜英上、下表面较平整,纹理不显著,下表面分布少量毛状结构,滞留颗粒物较少。(7)广玉兰叶片上表面比较光滑平整,不利于颗粒物滞留,下表面分布有密集的绒毛,有利于细小颗粒物的滞留。(8)乐昌含笑上、下表面相对平整,没有明显的突起和下陷,这些结构都不利于颗粒物附着。(9)香樟叶片上表面平展光滑,粉尘不易附着,下表面被有密集白粉,遮盖气孔结构,表面颗粒物分布较少。(10)乌柏叶片上、下表面均有不规则的凸起和沟槽,同时被有密集的片状晶体结构,具有一定疏水性,不利于粉尘的附着。(11)银杏叶片上表面细胞为长条形,沿叶脉方向形成条纹状浅沟槽,下表面细胞凸起,气孔下陷,沟槽及细胞缝隙可见滞留的粉尘颗粒。(12)构树叶片上表面粗糙,密被直径 $70\text{--}80\mu\text{m}$ 的锥形毛,周围形成密集条纹突起,沟槽间距小,下表面密被气孔和白色棉毛,这些结构都有利于粉尘颗粒物的附着。(13)加杨叶片上、下表面平整,均有气孔分布,细胞之间有较浅的沟槽,分布少量细小颗粒物。

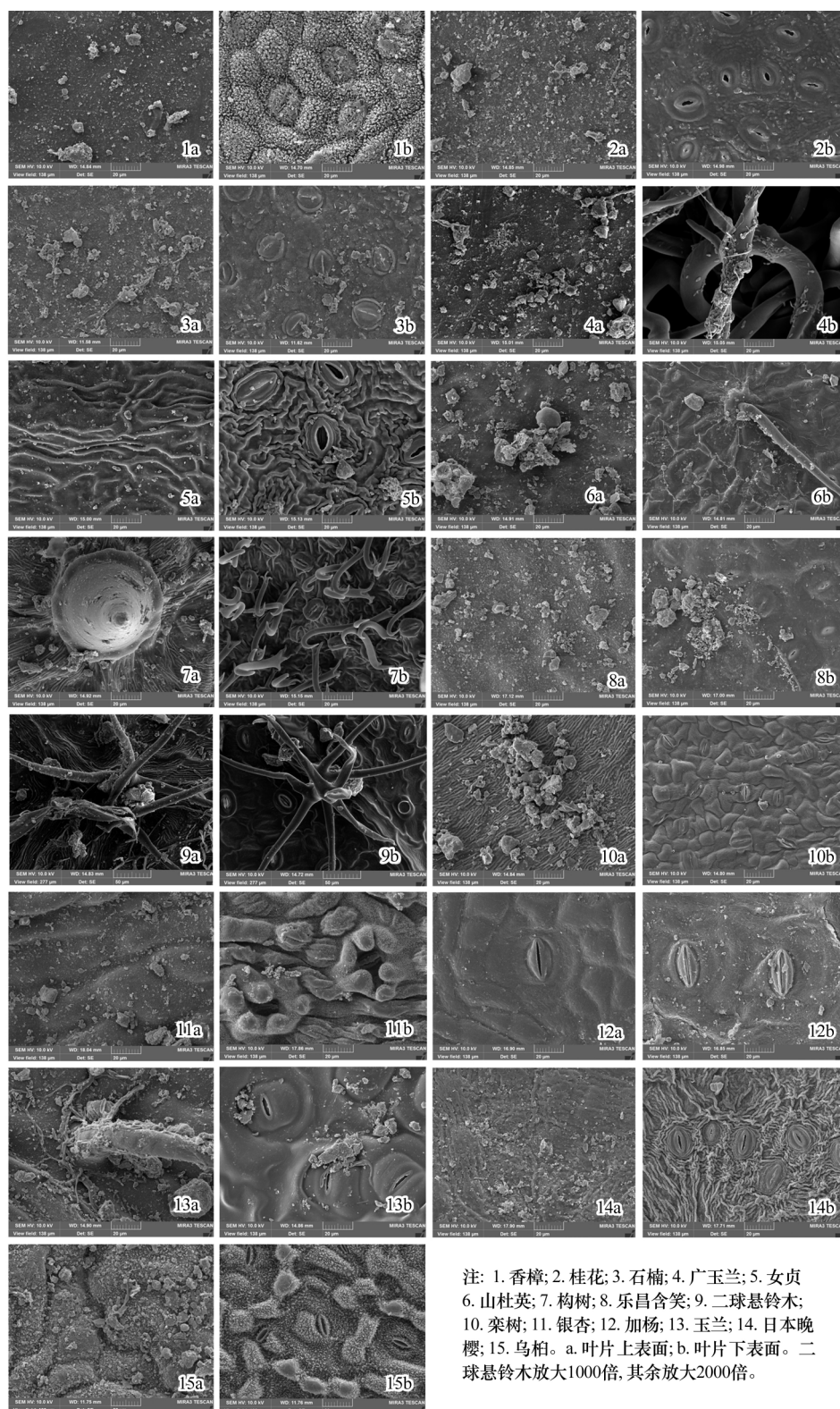


图3 15种乔木叶表面微形态扫描电镜图像

Fig.3 The SEM images of particulate matter morphology on leaf surface of 15 tree species

由以上观察结果可以看出,不同植物对粉尘颗粒物的附着能力不同。(1)叶片表面粗糙有利于粉尘颗粒物的附着,如二球悬铃木;叶表面平整光滑不利于粉尘滞留,如广玉兰、乐昌含笑、香樟和加杨。(2)叶片表面

被蜡质结构容易使粉尘颗粒物吸附,如桂花和石楠;而叶表被疏水性的晶体结构不利于粉尘的附着,如乌桕。
(3)叶片表面沟槽的深度和宽度对叶片滞留粉尘能力有很大影响,沟槽较深,宽度适中有利于颗粒物滞留,如二球悬铃木、女贞和日本晚樱;而沟槽较浅,宽度太窄或太宽都不利于粉尘颗粒物附着,如玉兰和银杏。

3.3 植物叶表微结构与滞尘能力的关系

为了进一步分析植物的叶表微结构对滞尘能力的影响,本研究对各乔木叶表微结构(表皮毛数量、下表皮气孔密度、气孔长度和宽度、上下表皮的沟槽宽度)和滞尘量(单位叶面积滞留 TPS 和 PM_{2.5}质量)进行量化统计(表 1),同时对两者进行偏相关分析(表 2)。结果表明,叶片的表皮毛数量、气孔密度、气孔长度及宽度与单位叶面积 TSP 和 PM_{2.5}滞留量均未达到显著性相关,但上、下表皮沟槽的宽度与树种的滞尘能力密切相关。本研究中,上表皮的沟槽宽度与叶片单位面积 PM_{2.5}滞留量呈显著负相关($R^2 = -0.588; P = 0.027$),表明叶片上表皮沟槽宽度增加,叶表面滞留的 PM_{2.5}质量呈下降趋势。下表皮的沟槽宽度与叶片单位面积滞留 TSP 呈极显著正相关($R^2 = 0.712; P = 0.004$),与叶片单位面积滞留 PM_{2.5}呈显著负相关($R^2 = -0.648; P = 0.012$),表明叶片下表皮的沟槽宽度增加时,单位面积滞留的粉尘总颗粒物(TSP)随之增加,而滞留的 PM_{2.5}呈下降趋势。因此,在一定范围内,上、下表皮的沟槽宽度越小时,越有利于细微颗粒物(PM_{2.5})的滞留,而当下表皮的沟槽宽度增加时,有利于粉尘总颗粒(TSP)的滞留。

表 1 15 种乔木叶片表面微结构参数
Table 1 Leaf surface structure parameters of 15 tree species

树种 Species of trees	TN/200 倍视野 200 times- vision	SD/500 倍视野 500 times- vision	SL/ μm	SW/ μm	GWU/ μm	GWL/ μm	UTSP/ (g/m^2)	UPM _{2.5} / (g/m^2)
香樟 <i>C. camphora</i>	0	66.40±2.05	26.40±1.14	19.40±1.82	0	1.84±0.11	0.43±0.06	0.03±0.01
桂花 <i>O. fragrans</i>	0	155.80±4.15	17.20±1.64	10.80±1.48	0	1.35±0.12	1.29±0.16	0.05±0.01
石楠 <i>P. serrulata</i>	0	74.20±3.28	19.20±0.84	18.20±1.64	0	1.47±0.15	1.68±0.11	0.06±0.01
广玉兰 <i>M. grandiflora</i>	95.60±8.02	31.60±2.44	34.38±1.34	32.16±2.70	0	2.23±0.27	0.53±0.10	0.05±0.01
女贞 <i>L. lucidum</i>	0	55.40±2.70	24.83±0.84	14.47±1.14	10.15±4.04	3.34±1.72	0.83±0.12	0.04±0.01
山杜英 <i>E. sylvestris</i>	12.20±0.83	118.20±4.20	12.52±0.17	8.24±0.13	0	6.23±1.30	0.63±0.05	0.02±0.01
构树 <i>B. papyrifera</i>	648.40±12.39	147.40±2.70	16.23±0.87	12.30±0.05	1.40±0.10	1.92±0.34	0.39±0.03	0.02±0.01
乐昌含笑 <i>M. chapensis</i>	0	119.60±4.60	11.12±0.77	8.14±0.27	0	0	0.51±0.06	0.04±0.01
二球悬铃木 <i>P. acerifolia</i>	1.20±0.84	32.50±1.54	36.44±0.27	28.31±0.14	2.83±1.21	22.15±0.38	1.89±0.15	0.05±0.01
栾树 <i>K. paniculata</i>	0.60±0.55	106.40±7.73	14.80±2.59	6.80±0.84	0.84±0.17	1.56±0.34	0.68±0.12	0.04±0.01
银杏 <i>P. biloba</i>	0	32.40±2.88	17.40±1.52	9.40±1.14	9.80±2.39	2.50±1.17	0.42±0.07	0.02±0.00
加杨 <i>P. × canadensis</i>	0	30.80±2.28	25.60±1.14	13.25±0.84	6.43±1.14	2.74±0.66	0.24±0.02	0.02±0.00
玉兰 <i>M. denudata</i>	7.80±0.84	32.60±3.65	20.00±1.41	6.06±1.10	12.40±1.82	17.20±9.42	0.81±0.10	0.01±0.00
日本晚樱 <i>C. serrulata</i> var. <i>lannesiana</i>	0	79.00±5.15	15.00±1.87	4.18±0.47	0	1.46±0.88	0.80±0.09	0.04±0.01
乌桕 <i>S. sebiferum</i>	0	86.80±3.96	13.44±1.89	5.40±1.14	4.80±0.84	11.40±3.58	0.42±0.06	0.03±0.01

TN,表皮毛数量 Trichome number of epidermis;SD,下表皮气孔密度 Stomata density of lower epidermis;SL,气孔长度 Stomata length;SW,气孔宽度 Stomata width;GWU,上表皮沟槽宽度 Groove width of upper epidermis;GWL,下表皮沟槽宽度 Groove width of lower epidermis;UTSP,单位叶面积 TSP, Unifoliate TSP;UPM_{2.5},单位叶面积 PM_{2.5}, Unifoliate PM_{2.5}

表 2 植物叶表微结构参数与滞尘能力之间的相关性

Table 2 Correlation between microstructure characteristics of leaves surface and the dust retention ability

	TN	SD	SL	SW	GWU	GWL	UTSP	UPM _{2.5}
TN	1	0.441	-0.006	0.216	-0.340	-0.196	-0.102	-0.122
SD		1	-0.723 **	-0.538 *	-0.613 *	-0.392	-0.125	0.153
SL			1	0.899 **	0.326	0.440	0.164	0.117
SW				1	0.067	0.285	0.043	0.369
GWU					1	0.372	0.315	-0.588 *
GWL						1	0.712 **	-0.648 *
UTSP							1	0.730 **
UPM _{2.5}								1

4 讨论

4.1 各树种不同粒径粉尘颗粒物滞留能力的比较

不同树种对各粒径粉尘颗粒物的滞留能力存在明显差异。根据聚类分析的结果,二球悬铃木、石楠和桂花单位叶面积滞留 TSP、PM₁₀的能力均大于其他树种,滞留 PM₁₀能力最强的是二球悬铃木,但是滞留 PM_{2.5}能力最强的植物却是石楠和桂花。另外,女贞滞留 TSP 和 PM₁₀的能力分别排第 4 和第 2,但是滞留 PM_{2.5}和 PM₁₀的能力仅排第 6 和第 8;广玉兰滞留 TSP、PM₁₀、PM_{2.5}的能力均较弱,但是滞留 PM_{2.5}的能力却较强。其他研究者也得到类似的结果,贾彦等^[28]发现虽然红桤木叶片滞尘量只有桂花树的一半,但 PM_{2.5}的滞留量却相差不大。杨佳等^[9]的研究中,在同一地点,元宝枫单位叶面积 PM 滞留量较强,但是 PM_{2.5-10}滞留量却较小。由此可知,树种单位叶面积总粉尘颗粒物(TSP)的滞留能力不能决定各粒径颗粒物的滞留能力。这与叶片表面的微观结构,包括叶片的粗糙程度、表面绒毛的密度与长短、沟槽的宽度与深度、气孔数量与形状等都有密切关系^[13,18,29]。

本研究中,各供试乔木单位叶面积滞留 PM₁₀和 PM_{2.5}占总粉尘量 TSP 的质量分数变化范围分别为3.6%—33.9%和 0.7%—8.9%,即叶片表面滞留的粉尘以大于 10 μm 的粗颗粒物为主。张桐等^[7]的研究也表明,北京 6 种供试树种吸附的颗粒物粒径分布主要在 10—50 μm,PM₁₀和 PM_{2.5}占总颗粒物的比分别为 15.16%—23.79%和 4.69%—7.66%,与本研究结果一致。谢滨泽等^[30]、Sæbø 等^[31]测定供试植物单位叶面积 PM_{2.5}滞留量占 TSP 平均质量分数分别为 13.77%和 12.37%,与本研究结果相差不大。但是,赵松婷等^[10]、Tomašević 等^[32]的研究结果却显示,供试树种叶表颗粒物主要为 PM₁₀和 PM_{2.5},占到总颗粒物的 60%—90%以上。分析研究结果存在差异的原因可能有 3 个方面:(1)不同城市的粉尘污染源不一样,导致空气中的 TSP 浓度和各粒径颗粒物的分布比例有所不同^[30];(2)不同植物叶表面的微结构差异较大,对不同粒径颗粒物的滞留能力也存在明显差别^[17]。(3)不同研究者的统计方式不一,细颗粒物 PM₁₀和 PM_{2.5}由于体积小,数量足,易被植株叶片大量吸附,按数量比统计的结果会比较高,然而其单位体积和单位质量远不及大颗粒物($d>10\text{ }\mu\text{m}$),总重量和总体积相应比例也较低^[33]。

4.2 叶表面微形态结构对树种滞尘能力的影响

不同树种滞留粉尘颗粒物的能力主要取决于植物叶片表面的微观结构。叶表面较粗糙^[25,32]、具有大量的沟槽和突起结构^[34]有利于增加粉尘颗粒物与叶表面之间的接触面积和物理作用力,使得滞留的粉尘不易从叶面脱落^[20];叶表面光滑或具有平滑片状组织的植物对粉尘颗粒物的吸附能力较差^[35-36]。本研究中二球悬铃木叶片上、下表面粗糙、褶皱分布密集,有利于粉尘颗粒物滞留在叶表面沟缝间隙中,其单位叶面积各粒径颗粒物的滞尘能力在聚类分析中排第一;而叶片表面光滑平整、沟槽数量少的植物如香樟、乐昌含笑、杨树的滞尘能力则比较弱。此外,植物叶表粉尘颗粒物的滞留量与沟槽的深度和宽度有关,较深的沟槽可拦截较多颗粒物,较浅的沟槽使叶片表面粗糙度降低,颗粒物吸附量减少^[10,36];叶表面沟槽较窄时对 PM_{2.5}等粒径细小的颗粒物表现出较强的滞留能力,而沟槽较宽时,细小的颗粒物不易在叶表沟槽间隙中固着^[28,30]。在本研究中,银杏和玉兰的叶表分布有大量沟槽,但沟槽深度浅,宽度大,其对 PM_{2.5}的滞留能力也相应较弱。通过分析叶表显微结构参数与滞尘能力之间的相关性,发现植物叶表面沟槽宽度与植物滞尘能力显著相关,上下表面的沟壑宽度越小时,越有利于细微颗粒物(PM_{2.5})的滞留,而当下表面的沟壑宽度增加时,有利于粉尘总颗粒物(TSP)的滞留,此结论与李艳梅等^[20,30]的研究一致。

植物叶片表面覆盖的蜡质层也是影响粉尘颗粒物滞留量的重要因素。叶表面滞留的粉尘中一些化学物质可以通过亲脂性通道富集在角质层或者表皮蜡质层^[37]。一些研究者发现,植物滞尘量与叶片表面蜡质含量呈显著正相关^[31,38]。孙晓丹等^[17]、高国军等^[39]发现大叶黄杨的蜡质层对不同粒径颗粒物具有较强的吸附能力,能够有效降低城市中的大气颗粒物。林鑫涛^[33]等发现,青冈、冬青、红花檵木的单位叶面积蜡质滞尘量分别占其总滞尘量的 70.0%、62.6%和 63.1%,颗粒物主要滞留于蜡质层中。本研究中,石楠和桂花的显微结

构可以看出,其表面较平整,但覆盖有较厚的蜡质层,在 15 种乔木的聚类分析中,这两种植物的综合滞尘能力也较高,可见植物的滞尘能力与叶表面蜡质层呈正相关,与以上研究者的结论一致。有的学者则持不同观点,认为叶片表面的蜡质结构的疏水性使叶片表面与粉尘颗粒物的接触角变小,导致植物的滞尘能力减弱^[18,23,40]。王会霞等^[13]发现,植物表面微结构影响植物的接触角、润湿性和表面自由能,从而对植物的滞尘能力产生影响。因此,可以以植物叶表的蜡质层与叶片接触角、润湿性和表面自由能的关系为切入点,进一步探究叶片表面蜡质含量对植物滞尘能力的影响。

5 结论

(1)武汉市 15 种常见的阔叶乔木对不同粒径颗粒物的滞留能力差异显著,根据聚类分析,15 种乔木的滞尘能力可以划分为 3 到 4 个等级,其中,二球悬铃木、桂花和石楠的综合滞尘能力最强。另外,女贞和广玉兰分别具有较强的滞留 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的能力。

(2)各乔木叶片表面的微形态结构对植物滞留不同粒径粉尘的能力影响很大。叶表面粗糙,或被有蜡质层的植物有利于粉尘颗粒物的附着。相关性分析表明,植物单位叶面积滞尘量与叶表面沟槽的宽度显著相关,上下表面的沟槽宽度越小时,越有利于细微颗粒物($PM_{2.5}$)的滞留,而下表面的沟槽宽度增加时,有利于粉尘总颗粒物(TSP)的滞留。

(3)在武汉以治理大气粉尘污染为目标进行城市绿化时,可考虑选择二球悬铃木、桂花和石楠等滞尘能力强的树种,叶表面粗糙度、蜡质含量和沟槽宽度可作为评价绿化树种滞尘能力的主要指标。

致谢:感谢新西兰奥塔哥大学(University of Otago)Jennifer Smith 博士对写作的帮助。

参考文献(References):

- [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.中国环境科学,2010,30(3):410-415.
- [2] Hinds W C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [3] 乔玉霜,王静,王建英.城市大气可吸入颗粒物的研究进展.中国环境监测,2011,27(2):22-26.
- [4] 申进朝,陈纯,多克辛,王琪,何占航,路新燕.郑州市环境空气细颗粒物浓度、组成及评价.环境科学与技术,2012,35(S2):237-239.
- [5] 陈小平,焦奕雯,裴婷婷,周志翔.园林植物吸附细颗粒物($PM_{2.5}$)效应研究进展.生态学杂志,2014,33(9):2558-2566.
- [6] Ottel   M, van Bohemen H D, Fraaij A L A. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. Ecological Engineering, 2010, 36(2):154-162.
- [7] 张桐,洪秀玲,孙立炜,刘玉军.6 种植物叶片的滞尘能力与其叶面结构的关系.北京林业大学学报,2017,39(6):70-77.
- [8] 王兵,王晓燕,牛香,张维康,汪金松.北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能.环境科学,2015,36(6):2005-2009.
- [9] 杨佳,王会霞,谢滨泽,石辉,王彦辉.北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释.环境科学研究,2015,28(3):384-392.
- [10] 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.生态环境学报,2015,24(6):1004-1012.
- [11] 李少宁,刘斌,鲁笑颖,鲁绍伟,陈军丽,李辉.北京常见绿化树种叶表面形态与 $PM_{2.5}$ 吸滞能力关系.环境科学与技术,2016,39(10):62-68.
- [12] 范舒欣,蔡妤,董丽.北京市 8 种常绿阔叶树种滞尘能力.应用生态学报,2017,28(2):408-414.
- [13] 王会霞,石辉,李秧秧.城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响.应用生态学报,2010,21(12):3077-3082.
- [14] 是怡芸.南京常见绿化树种滞留 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物的效应研究[D].南京:南京林业大学,2017.
- [15] 张家洋,周君丽,任敏,胡海波.20 种城市道路绿化树木的滞尘能力比较.西北师范大学学报:自然科学版,2013,49(5):113-120.
- [16] 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.生态学杂志,2008,27(10):1659-1662.
- [17] 孙晓丹,李海梅,郭霄,孙丽.10 种灌木树种滞留大气颗粒物的能力.环境工程学报,2017,11(2):1047-1054.
- [18] 刘璐,管东生,陈永勤.广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力.生态学报,2013,33(8):2604-2614.
- [19] 李艳梅,陈奇伯,李艳芹,邓志华,贝荣塔.昆明 10 个绿化树种对不同污染区的滞尘及吸净效应.西南林业大学学报,2016,36(3):105-110.
- [20] 李艳梅,陈奇伯,王邵军,孙应都,杨误舟,杨思莹.昆明市主要绿化树种叶片滞尘能力的叶表微形态学解释.林业科学,2018,54(5):18-29.

- [21] 周志翔, 邵天一, 王鹏程, 高翊, 徐永荣, 郭尔祥, 徐隆辉, 叶贞清, 彭行梅, 于春杰. 武钢厂区绿地景观类型空间结构及滞尘效应. 生态学报, 2002, 22(12): 2036-2040.
- [22] 陈芳, 周志翔, 郭尔祥, 叶贞清. 城市工业区园林绿地滞尘效应的研究——以武汉钢铁公司厂区绿地为例. 生态学杂志, 2006, 25(1): 34-38.
- [23] 余曼, 汪正祥, 雷耘, 李中强, 谭庆. 武汉市主要绿化树种滞尘效应研究. 环境工程学报, 2009, 3(7): 1333-1339.
- [24] 谢子瑞, 赵锦慧, 黄超. 武汉市公园绿化植物滞尘能力的初步研究. 湖北大学学报: 自然科学版, 2018, 40(4): 424-428.
- [25] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. Atmospheric Environment, 2011, 45(38): 6987-6994.
- [26] 刘辰明, 张志强, 陈立欣, 邹瑞, 张璐, 高源, 李冬梅. 降雨对北方城市 5 种典型城市绿化树种叶面滞尘的影响. 生态学报, 2018, 38(7): 2353-2361.
- [27] Dzierzanowski K, Popek R, Gawrońska H, Sæbø A, Gawroński S W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037-1046.
- [28] 贾彦, 吴超, 董春芳, 李常平, 廖慧敏. 7 种绿化植物滞尘的微观测定. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4547-4553.
- [29] 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. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2507-2513.
- [30] 谢滨泽, 王会霞, 杨佳, 王彦辉, 石辉. 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, 2014, 34(12): 2432-2438.
- [31] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin H M, Gawronska H, Gawronski S W. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. Science of the Total Environment, 2012, 427-428: 347-354.
- [32] Tomašević M, Vukmirović Z, Rajšić S, Tasić M, Stevanović B. Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area. Chemosphere, 2005, 61(6): 753-760.
- [33] 林鑫涛, 叶诺楠, 王彬, 陈健, 游诗雪, 张昕丽. 亚热带常绿树种对不同粒径颗粒物的滞留能力. 广西植物, 2016, 36(2): 170-176, 185-185.
- [34] Speak A F, Rothwell J J, Lindley S J, Smith C L. Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city. Atmospheric Environment, 2012, 61: 283-293.
- [35] 吕铃钥, 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. 生态学杂志, 2016, 35(2): 524-533.
- [36] 李少宁, 鲁绍伟, 刘斌, 鲁笑颖, 陈军丽, 李辉. 北京主要绿化树种叶表面微形态与 $PM_{2.5}$ 吸滞能力. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(8): 98-107.
- [37] Uzu G, Sobanska S, Sarret G, Muñoz M, Dumat C. Foliar lead uptake by lettuce exposed to atmospheric fallouts. Environmental Science & Technology, 2010, 44(3): 1036-1042.
- [38] Popek R, Gawronska H, Wrochna M, Gawronski S W, Sæbø A. Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in waxes—a 3-year study. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(3): 245-256.
- [39] 高国军, 徐彦森, 莫莉, 余新晓. 植物叶片对不同粒径颗粒物的吸附效果研究. 生态环境学报, 2016, 25(2): 260-265.
- [40] Rai A, Kulshreshtha K, Srivastava P K, Mohanty C S. Leaf surface structure alterations due to particulate pollution in some common plants. The Environmentalist, 2010, 30(1): 18-23.