



柳冬香. 福州市普通公路主要绿化树种叶片显微结构与滞尘能力[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(4): 853–865.

LIU D X. Leaf microstructure and dust retention capacity of main greening tree species in Fuzhou City[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(4): 853–865.

# 福州市普通公路主要绿化树种 叶片显微结构与滞尘能力

柳冬香

(福建农林大学 福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室/后勤管理处, 福建 福州 350002)

**摘要:**【目的】分析福州市普通公路主要绿化树种滞尘能力的差异以及植物叶表面显微结构对滞尘能力的影响, 能够为福州市公路优良滞尘植物的筛选和公路绿化带优化提供数据支持和指导, 进而为生态城市的建设提供一定的参考依据。【方法】以东南沿海丘陵地区的福州市为研究地区, 以福州市普通公路主要的10种绿化植物为研究对象, 通过扫描电镜观察比较了10个树种的叶片表面微结构, 并分四季测定叶片单位面积滞留不同粒径颗粒物的质量和分布特征。【结果】(1)10个绿化树种中大部分树种对粉尘及悬浮颗粒物的滞留量表现为春>夏>秋>冬。不同树种对大气颗粒物的滞留效果存在显著( $P<0.05$ )差异, 综合看来, 黄花槐(*Sophora xanthantha*)的滞尘能力最强, 滞尘量和不同粒径颗粒物的滞留量均显著( $P<0.05$ )高于其余树种, 小叶榄仁(*Terminalia neotaliala* Capuron)的滞尘能力也较强。此外, 紫薇(*Lagerstroemia indica* L.)对粉尘、TSP及PM<sub>10</sub>的滞留能力较强, 紫叶李(*Prunus cerasifera* Ehrhar f.)对TSP、PM<sub>10</sub>及PM<sub>2.5</sub>的滞留能力较强, 榕树(*Ficus microcarpa* Linn.f.)对粉尘的滞留能力较强; 而香樟(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.)、美丽异木棉(*Ceiba speciosa* St. Hih.)和鸡冠刺桐(*Erythrina crista-galli* Linn.)的滞尘能力最弱。(2)各树种叶片滞留的悬浮颗粒物中PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>质量占TSP的比例分别为31.24%~72.71%和50.27%~89.15%, 实验树种对大气细颗粒物的滞留效果较好。(3)气孔大小和密度与滞尘能力无显著( $P>0.05$ )相关关系, 但叶片表面表皮毛、褶皱、沟槽、突起等结构较多的树种滞尘能力更强。【结论】在以生态城市为目标建设公路绿化带时应该选择滞尘能力强且兼具良好观赏价值的树种, 可以考虑选择黄花槐、紫薇、紫叶李等落叶树种和小叶榄仁、榕树等常绿树种进行搭配。

**关键词:** 大气颗粒物; PM<sub>2.5</sub>; 滞尘能力; 叶面微结构; 公路绿化

中图分类号: Q948.11 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2021)04-0853-13

## Leaf Microstructure and Dust Retention Capacity of Main Greening Tree Species in Fuzhou City

LIU Dongxiang

(Fujian Agriculture and Forestry University Key Laboratory of Forest Ecosystem Process and Management in Fujian Province, Logistics Management Office, Fujian agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

收稿日期: 2020-12-21 修回日期: 2021-01-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(32071578)和福建省交通运输科技市场主导性重点科技项目(201823)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(32071578) and Fujian Province Transportation Technology Market Leading Key Scientific and Technological Projects(201823)

作者简介: 柳冬香, 高级工程师, 硕士, 主要从事道路绿化、园林植物配置等方面的研究, orcid.org/0000-0002-7083-8277, liudongxiang@fafu.edu.cn。

**Abstract:** [Objective] To analyze the difference in dust retention capacity of main greening tree species on ordinary highways in Fuzhou and the influence of leaf surface microstructure on dust retention capacity, which can provide data support and guidance for the selection of fine dust retaining plants and the optimization of highway green belt in Fuzhou City, and provide certain reference basis for the construction of ecological city. [Method] Fuzhou City in Southeast Coastal Hilly Area was taken as the research area, and the 10 main greening plants for ordinary highway greening in Fuzhou City were taken as the research object. The leaf surface microstructure of the 10 tree species was observed and compared by scanning electron microscope, and the mass and distribution characteristics of particles of different particle sizes retained per unit area were measured in four seasons. [Result] (1) The retention of dust and suspended particulate matter in most of the 10 greening tree species was spring>summer>autumn>winter. There were significant ( $P<0.05$ ) differences in the retention effects of different tree species on atmospheric particles. On the whole, the dust retention capacity of *Sophora xanthantha* was the strongest, and both the dust retention capacity and retention amount of particles of different particle sizes were significantly ( $P<0.05$ ) higher than those of other tree species. The dust retention capacity of *Terminalia neotaliala* Capuron was also strong. In addition, *Lagerstroemia indica* L. had stronger retention capacity for dust, TSP and PM<sub>10</sub>, *Prunus cerasifera* Ehrhar f. had stronger retention capacity for TSP, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, and *Ficus microcarpa* Linn. f. had stronger retention capacity for dust. But *Cinnamomum camphora* (L.) Presl., *Ceiba speciosa* St. Hih. and *Erythrina crista-galli* Linn. Had the weakest dust-retaining ability. (2) The proportion of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in TSP in the suspended particles in leaves of each tree species were 31.24%–72.71% and 50.27%–89.15%, respectively. The experimental tree species had a better retention effect on atmospheric fine particles. (3) There was no significant ( $P>0.05$ ) correlation between stomatal size, density and retention capacity, but the tree species with more structures on the leaf surface, such as epidermis, folds, grooves, and protrusions, had stronger dust retention capacity. [Conclusion] Therefore, tree species with strong dust retention capacity and good ornamental value should be selected when constructing highway green belt with ecological city as the goal. Deciduous tree species (eg. *Sophora xanthantha*, *Lagerstroemia indica* L. and *Prunus cerasifera* Ehrhar f.) and evergreen tree species (eg. *Terminalia neotaliala* Capuron and *Ficus microcarpa* Linn. f.) should be considered for matching.

**Keywords:** atmospheric particulate matter; PM<sub>2.5</sub>; dust retention capacity; leaf microstructure; highway greening

【研究意义】随着城市化进程的发展,城乡路网越来越密集,机动车排放的大气颗粒物成为城市空气污染的主要污染物<sup>[1]</sup>,导致了雾霾、温室效应等环境问题以及呼吸道疾病、心脑血管疾病等健康问题<sup>[2]</sup>,危害甚大。各种减排除尘措施的出台以及对土壤和道路扬尘的控制,一些较大的颗粒物能够被有效减少,但粒径较小的颗粒物去除较为困难。降低空气中的粉尘、颗粒物等污染物是生态城市建设的必要任务。【前人研究进展】研究表明植物对大气细颗粒物有明显的滞留效果<sup>[3-5]</sup>,植物一般通过粘附、吸附、滞留的方式来阻滞大气颗粒物<sup>[6]</sup>,其中叶片在植物滞留颗粒物时发挥着最重要的作用。大量研究表明,植物树冠结构、叶片表面特征、叶面倾角等都会影响植物对大气颗粒物的滞留<sup>[7]</sup>,叶表面结构是影响植物滞尘能力的重要因素。许多学者研究发现叶表面沟槽突起多<sup>[8-9]</sup>、绒毛多、气孔密集、气孔开口大<sup>[10-11]</sup>、蜡质含量高<sup>[12]</sup>的植物滞尘能力更强。

【本研究切入点】道路包含市政道路和公路,在城乡一体化的发展趋势下,普通公路的绿化建设逐渐趋近于市政道路<sup>[13]</sup>,然而与市政道路相比,公路的绿化易被忽视。公路绿化带可相对减少空气含尘量从而净化空气,其滞尘功能是公路绿化带的主要生态环境效应之一<sup>[14]</sup>。福州市位于东南沿海丘陵地区,夏季多台风暴雨,公路附近区域易受到降雨、风力等侵蚀产生大量扬尘。在福州市公路事业发展中心提供的,福州市政道路和公路绿化中普遍使用的10种园林树种中(表1),目前国内对于黄花槐

(*Sophora xanthantha* C. Y. Ma)、鸡冠刺桐(*Erythrina crista-galli* Linn.)、美丽异木棉(*Ceiba speciosa* St. Hih.)和小叶榄仁(*Terminalia neotaliala* Capuron)的滞尘研究极少。王燕<sup>[15]</sup>的研究表明黄花槐、鸡冠刺桐、美丽异木棉的叶片滞尘能力较强,滞尘量平均在1.4~2.5 mg/cm<sup>2</sup>。对榕树(*Ficus microcarpa* Linn. f.)、香樟(*Cinnamomum camphora* (L.) Presl.)和白兰(*Michelia alba* DC)等种植范围较广的常见绿化树种的滞尘研究较多。陈齐明<sup>[16]</sup>研究发现榕树叶片的滞尘量大于香樟和白兰。唐文莉等<sup>[17]</sup>的研究发现合肥市几种行道树中香樟的滞尘能力最强。有学者研究<sup>[18]</sup>发现,受气象、城市污染状况等影响,同一种绿化树在不同城市的滞尘量存在差异。因此在进行绿化设计时,有必要对当地的常用绿化树种进行研究,筛选出当地滞尘效果较好的树种。【拟解决的关键问题】福建省作为全国生态文明建设示范区,随着城乡一体化发展,公路承担越来越多市政道路的职能,对公路绿化带配置进行优化十分必要。如何选择滞尘能力强的植物种类,更好地发挥公路绿化带净化空气的作用,成为解决公路绿化生态环境的重要任务。本文通过对福州市道路主要绿化树种进行叶表面微结构、滞尘量、不同粒径颗粒物滞留量进行比较,分析不同树种滞留大气颗粒物的能力以及叶面结构与滞尘能力的关系,为更好地筛选公路滞尘植物提供数据支持与指导,为建设结构更加完善、滞尘能力更强、兼备观赏价值的公路绿化带和实现绿地系统可持续发展奠定基础。

## 1 研究区概况

福州市是福建省省会城市,位于福建省东部沿海闽江下游,东经118°08'~120°31',北纬25°15'~26°39',属亚热带海洋性季风气候,温暖湿润,四季常青,雨量充沛,年平均气温16~20℃,年平均降水量900~2 100 mm,年相对湿度77%<sup>[19]</sup>。福州市分属亚热带季雨林和中亚热带常绿阔叶林2种植被地带,受多种自然条件影响,植被类型复杂,植物种类繁多,以常绿阔叶树种占优势。公路区域常见的绿化树种主要包括豆科(Leguminosae)、桑科(Moraceae)、木兰科(Magnoliaceae)、樟科(Lauraceae)、木棉科(Bombacaceae)、木樨科(Oleaceae)、蔷薇科(Rosaceae)、漆树科(Anacardiaceae)等。采样区域为福州市西三环路(K1+100-K2+100)绿化带,该路段位于乌龙江畔,车流量较大,汽车尾气污染及冬季扬尘较为严重。

## 2 材料与方法

### 2.1 采样

选取福州市公路事业发展中心提供的,市政道路和公路绿化中普遍使用的10种园林树种(表1)作为研究材料。兼顾城市道路和普通公路的特点,以福州市西三环路(K1+100-K2+100)为采样区域,经调查和统计,所选的树种在采样区域均有分布,且数量满足采样要求。在距离公路中心15 m以内、无其他污染源、主辅路无车辆出入口的区域设置采样点,每个树种随机选取5个采样点,每个采样点内选取长势良好且相近的3株作为采样植株。由于雨水能够冲刷掉植物叶片上的灰尘,因此于2017年4月(春季)、7月(夏季)、10月(秋季)和2018年1月(冬季)选择3天天气较为晴好的时间(若遇降雨则选择降雨7 d后的晴好天气)分别对10种树木进行采样,冬季只对常绿树种进行采样。根据不同植物叶片面积大小,在树冠内部和树冠外围的东南西北4个方位,分为上、中、下3个层次,随机采集叶片长势良好、健康完整的成熟叶片,较大的叶片采集10片左右,中等大小的叶片采集30片左右,较小的叶片则采集50片左右。将采集的叶片小心放入自封袋,避免抖落灰尘,带回实验室以供滞尘量等指标的测定。

### 2.2 叶片表面微结构分析

每种植物随机选取3~5片采集好的新鲜叶片,避开主叶脉,在叶片上随机切取5个5 mm×5 mm的小方块,立即将取下的样品用2.5%的戊二醛溶液固定24 h左右。每隔15 min用磷酸缓冲液冲洗一次固定好的样品,共冲洗3次;每隔10 min用不同浓度梯度(50%,70%,80%,90%和100%)的乙醇进行脱水,脱水后置于真空干燥器中抽真空干燥后取出,粘台,喷金,然后在扫描电子显微镜(日本电子JSM-6390A)下放大500倍和1 000倍观察叶片上下表面的显微结构(表皮毛、气孔数量和大小、突起和褶皱数量、沟槽深度等),拍照并做好记录。

表 1 10 种绿化植物的基本信息  
Tab.1 Basic information of 10 greening plants

| 序号<br>Number | 树种<br>Plant species                          | 科<br>Families | 生活型<br>Life forms | 叶形<br>Leaf shape            | 成熟叶大小<br>Mature leaf size   |
|--------------|----------------------------------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1            | 白兰<br><i>Michelia alba</i> DC                | 木兰科           | 常绿<br>乔木          | 长椭圆形或披针状椭圆形                 | 长 10~27 cm,<br>宽 4~10 cm    |
| 2            | 羊蹄甲<br><i>Bauhinia purpurea</i> Linn.        | 豆科            | 常绿<br>乔木          | 近圆形                         | 长 10~15 cm,<br>宽 9~14 cm    |
| 3            | 榕<br><i>Ficus microcarpa</i> Linn. f.        | 桑科            | 常绿<br>乔木          | 狭椭圆形                        | 长 4~8 cm,<br>宽 3~4 cm       |
| 4            | 香樟<br><i>Cinnamomum camphora</i> (L.)Presl.  | 樟科            | 常绿<br>乔木          | 卵状椭圆形                       | 长 6~12 cm,<br>宽 2.5~5.5 cm  |
| 5            | 美丽异木棉<br><i>Ceiba speciosa</i> St. Hih.      | 木棉科           | 落叶<br>乔木          | 掌状复叶,小叶 3~7 片,椭圆形           | 小叶长 7~14 cm,<br>宽 2~4 cm    |
| 6            | 小叶榄仁<br><i>Terminalia neotaliala</i> Capuron | 使君子科          | 落叶<br>乔木          | 提琴状倒卵形                      | 长 3~8 cm,<br>宽 2~3 cm       |
| 7            | 鸡冠刺桐<br><i>Erythrina crista-galli</i> Linn.  | 豆科            | 落叶<br>乔木          | 羽状复叶,小叶 3 片,<br>长卵形或披针状长椭圆形 | 小叶长 7~10 cm,<br>宽 3~4.5 cm  |
| 8            | 紫叶李<br><i>Prunus cerasifera</i> Ehrhar f.    | 蔷薇科           | 落叶<br>乔木          | 椭圆形、卵形或倒卵形                  | 长 3~6 cm,<br>宽 2~3 cm       |
| 9            | 黄花槐<br><i>Sophora xanthantha</i> C. Y. Ma    | 豆科            | 半常绿<br>小乔木        | 羽状复叶,小叶 8~12 对,<br>长圆形或长椭圆形 | 小叶长 2.5~3.5 cm,<br>宽 1~2 cm |
| 10           | 紫薇<br><i>Lagerstroemia indica</i> L.         | 千屈菜科          | 落叶<br>小乔木         | 椭圆形、阔矩圆形或倒卵形                | 长 2.5~7 cm,<br>宽 1.5~4 cm   |

2.3 单位叶面积滞尘量测定

采用水洗脱法测定单位叶面积滞尘量。将采集的叶片样品分别放于小烧杯中用蒸馏水浸泡 2 h,然后用镊子夹取叶片,再用洗瓶轻轻冲洗叶片上下表面,将叶片表面滞留的颗粒物洗入浸洗液中。浸洗液用已烘干称量( $m_0$ ,精确到 0.000 1 g)的滤纸(100 目)过滤,然后将过滤完的滤纸置于烘箱中 60 ℃下烘干 24 h,再称量( $m$ ),叶片总面积  $A$  用叶面积扫描仪测定。根据公式计算:

单位叶面积滞尘量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )= $(m-m_0)/A$  (1)

2.4 不同粒径颗粒物滞留量测定

采用分级过滤的方法测定单位叶面积不同粒径颗粒物的滞留量。将采集的叶片样品分别放于烧杯中用蒸馏水浸泡 2 h,然后用镊子夹取叶片,再用洗瓶轻轻冲洗叶片上下表面,将叶片表面滞留的颗粒物洗入浸洗液中。浸洗液用已烘干的微孔滤膜(孔径 100  $\mu\text{m}$ )过滤,滤出液再先后用已烘干称量(精确到 0.000 1 g)的 10  $\mu\text{m}$  和 2.5  $\mu\text{m}$  微孔滤膜过滤,最后将剩余的滤出液倒在已烘干称量的一次性培养皿中,用洗瓶将杯中残留的滤出液洗到小烧杯中。将过滤后的滤膜以及盛有滤出液的培养皿置于烘箱中 60 ℃烘干至恒重后称量,两次质量之差即为留在滤膜和小烧杯中的颗粒物质量。叶面积  $A$  用叶面积扫描仪测定,颗粒物质量除以叶面积即为单位叶面积滞留的颗粒物质量。根据公式计算每种植物单位面积不同粒径的颗粒物质量:

单位叶面积 PM2.5 滞留量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )= $(m_2-m_1)/A$  (2)

单位叶面积 PM10 滞留量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )= $(m_2-m_1+m_4-m_3)/A$  (3)

单位叶面积 TSP 滞留量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )= $(m_2-m_1+m_4-m_3+m_6-m_5)/A$  (4)

式(2)、(3)和(4)中, $m_1$ 为培养皿质量, $m_2$ 为盛有颗粒物的培养皿质量, $m_3$ 为 2.5  $\mu\text{m}$  微孔滤膜质量, $m_4$ 为留有颗粒物的 2.5  $\mu\text{m}$  微孔滤膜质量, $m_5$ 为 10  $\mu\text{m}$  微孔滤膜质量, $m_6$ 为留有颗粒物的 10  $\mu\text{m}$  微孔滤膜质量, $A$  为叶片总面积。

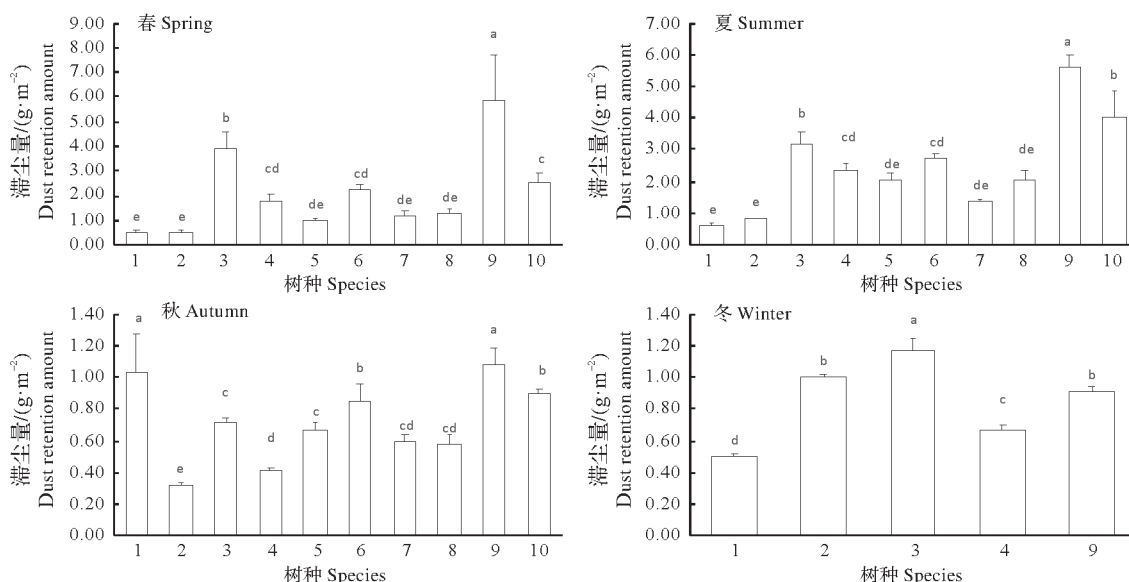
## 2.5 数据处理与综合分析

用Excel 2016软件对数据进行处理、计算均值和标准差及作图,用R软件对单位叶面积滞尘量及不同粒径颗粒物滞留量进行方差分析和多重比较(LSD,  $P<0.05$ ),并对不同树种的滞尘能力进行聚类分析(最长距离法)及作图,用SPSS 19.0软件对植物气孔大小与滞尘能力进行Pearson相关性分析。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同绿化树种单位叶面积滞尘能力比较

3.1.1 不同季节植物单位叶面积滞尘量差异 不同树种的叶片单位面积滞尘量不同,且不同季节的滞尘量也存在差异。黄花槐的叶片滞尘能力在所有树种中最为突出,其单位叶面积滞尘量春季为 $5.85\text{ g/m}^2$ ,夏季为 $5.60\text{ g/m}^2$ ,秋季为 $1.07\text{ g/m}^2$ ,均显著( $P<0.05$ )大于其他树种,仅在冬季由于是半常绿树种而低于榕树。榕树的叶片滞尘量在所有树种中处于中上水平,在冬季的滞尘量( $1.17\text{ g/m}^2$ )显著( $P<0.05$ )大于其他树种。紫薇是落叶树种,它在春、夏、秋有叶片时的滞尘量也较高,与黄花槐相差不大。春、夏季白兰和羊蹄甲的滞尘量在所有树种中最低,但白兰在秋季的滞尘量排名较前,羊蹄甲的滞尘量除了冬季排名较前外,其他季节均在所有树种中表现最差。比较同一树种不同季节的滞尘量发现,大部分树种滞尘量由高到低依次为春、夏、秋、冬,但白兰秋季滞尘量大于其他季节,紫薇春季滞尘量比夏、秋季更低(图1)。



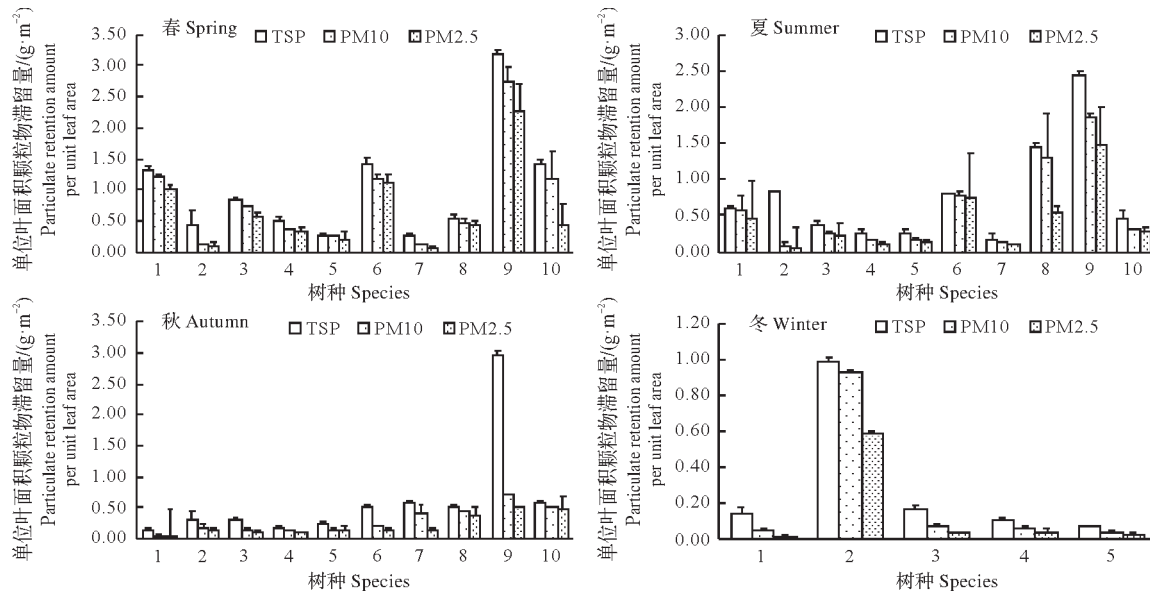
1:白兰;2:羊蹄甲;3:榕;4:香樟;5:美丽异木棉;6:小叶榄仁;7:鸡冠刺桐;8:紫叶李;9:黄花槐;10:紫薇。不同小写字母(a,b)表示不同植物的滞尘量之间差异显著( $P<0.05$ )。

1: *Michelia alba* DC; 2: *Bauhinia purpurea* Linn.; 3: *Ficus microcarpa* Linn. f.; 4: *Cinnamomum camphora* (L.) Presl.; 5: *Ceiba speciosa* St. Hil.; 6: *Terminalia neotaliala* Capuron; 7: *Erythrina crista-galli* Linn.; 8: *Prunus cerasifera* Ehrhar f.; 9: *Sophora xanthantha*; 10: *Lagerstroemia indica* L. Different lowercase letters (a, b) indicate significant differences of dust retention among different plants ( $P<0.05$ ).

图1 不同季节下不同树种的单位叶面积滞尘量

Fig.1 Dust retention per unit leaf area of different tree species in different seasons

3.1.2 不同季节植物单位叶面积悬浮颗粒物滞留量差异 同一树种对同一粒径颗粒物的滞留量在不同季节存在差异,大部分树种的颗粒物滞留量按季节由大到小排序为春、夏、秋和冬。同一季节下不同树种的颗粒物滞留量也存在差异。春季和夏季黄花槐的TSP、PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>滞留量在10种树种中最高,而鸡冠刺桐的颗粒物滞留量最低;秋季各个树种的颗粒物滞留量均较低,而黄花槐的TSP滞留量( $2.95\text{ g/m}^2$ )远高于其他树种,且高于黄花槐对PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>的滞留量;冬季羊蹄甲的颗粒物滞留量最高,为 $0.59\sim 1.00\text{ g/m}^2$ ,而其他几种树种的颗粒物滞留量均不超过 $0.20\text{ g/m}^2$ (图2)。



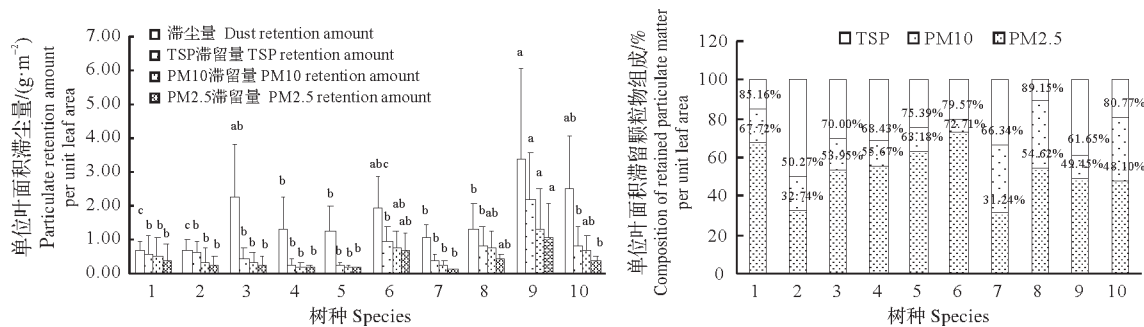
1:白兰;2:羊蹄甲;3:榕;4:香樟;5:美丽异木棉;6:小叶榄仁;7:鸡冠刺桐;8:紫叶李;9:黄花槐;10:紫薇。不同大写字母表示同一树种不同粒径颗粒物滞留量差异显著( $P<0.05$ ),不同小写字母表示同一粒径颗粒物不同树种差异显著( $P<0.05$ )。

1: *Michelia alba* DC; 2: *Bauhinia purpurea* Linn.; 3: *Ficus microcarpa* Linn. f.; 4: *Cinnamomum camphora* (L.) Presl.; 5: *Ceiba speciosa* St. Hih.; 6: *Terminalia neotaliala* Capuron; 7: *Erythrina crista-galli* Linn.; 8: *Prunus cerasifera* Ehrhar f.; 9: *Sophora xanthantha*; 10: *Lagerstroemia indica* L. The different uppercase letters indicate that there is a significant ( $P<0.05$ ) difference in particulate retention of different sizes in the same tree species, and the different lowercase letters indicate that there is a significant ( $P<0.05$ ) difference in particulate retention of the same size in different tree species.

图2 不同季节下不同树种的单位叶面积TSP、PM10、PM2.5滞留量

Fig.2 TSP、PM10、PM2.5 retention amount per unit leaf area of different tree species in different seasons

3.1.3 不同树种年均单位叶面积滞尘能力比较 由图3、4可以看出,各树种单位叶面积滞尘量和TSP、PM10、PM2.5滞留量的变化范围分别为0.67~3.36  $\text{g}/\text{m}^2$ 、0.25~2.16  $\text{g}/\text{m}^2$ 、0.18~1.33  $\text{g}/\text{m}^2$ 和0.10~1.07  $\text{g}/\text{m}^2$ , PM2.5和PM10质量占TSP的比例分别为31.24%~72.71%和50.27%~89.15%。10种绿化树种的滞尘能力可以划分为3或4个等级。从年均单位叶面积滞尘量来看,黄花槐的滞尘量最高(3.36  $\text{g}/\text{m}^2$ );其次是紫薇(2.50  $\text{g}/\text{m}^2$ )、榕树(2.26  $\text{g}/\text{m}^2$ )和小叶榄仁(1.93  $\text{g}/\text{m}^2$ );而羊蹄甲和白兰的滞尘量最低(0.67  $\text{g}/\text{m}^2$ ),与黄花槐相差了2.69  $\text{g}/\text{m}^2$ ;其余树种的滞尘量处于中等水平,4个等级的树种之间存在显著( $P<0.05$ )差异。单位面积TSP和PM10滞留量的划分情况一致,滞留能力最强的是黄花槐(分别为2.16  $\text{g}/\text{m}^2$ 和1.33  $\text{g}/\text{m}^2$ ),显著



1:白兰;2:羊蹄甲;3:榕;4:香樟;5:美丽异木棉;6:小叶榄仁;7:鸡冠刺桐;8:紫叶李;9:黄花槐;10:紫薇。不同小写字母(a,b)表示不同树种之间差异显著( $P<0.05$ )。

1: *Michelia alba* DC; 2: *Bauhinia purpurea* Linn.; 3: *Ficus microcarpa* Linn. f.; 4: *Cinnamomum camphora* (L.) Presl.; 5: *Ceiba speciosa* St. Hih.; 6: *Terminalia neotaliala* Capuron; 7: *Erythrina crista-galli* Linn.; 8: *Prunus cerasifera* Ehrhar f.; 9: *Sophora xanthantha*; 10: *Lagerstroemia indica* L. Different lowercase letters (a,b) indicate significant differences among different plants ( $P<0.05$ ).

图3 不同树种的单位叶面积滞尘量及颗粒物组成

Fig.3 Dust retention and particulate matter composition per unit leaf area of different tree species

( $P<0.05$ )高于其他树种;其次是小叶榄仁、紫叶李和紫薇,其余树种的TSP、PM10滞留能力最弱。PM2.5滞留能力最强的树种也是黄花槐( $1.07\text{ g/m}^2$ ),显著( $P<0.05$ )高于其他树种;其次是小叶榄仁、白兰和紫叶李(滞留量在 $0.38\sim 0.66\text{ g/m}^2$ );中等水平的树种有紫薇、羊蹄甲和榕树( $0.21\sim 0.39\text{ g/m}^2$ );最低的为鸡冠刺桐、香樟和美丽异木棉( $0.10\sim 0.16\text{ g/m}^2$ )。

综合看来,黄花槐的滞尘能力最强,滞尘量和不同粒径颗粒物的滞留量均显著( $P<0.05$ )高于其余树种,小叶榄仁对粉尘及悬浮颗粒物的滞留能力也较强。此外,紫薇对粉尘、TSP及PM10的滞留能力较强,紫叶李对TSP、PM10及PM2.5的滞留能力较强,而香樟、美丽异木棉和鸡冠刺桐滞留粉尘及颗粒物的能力最弱。

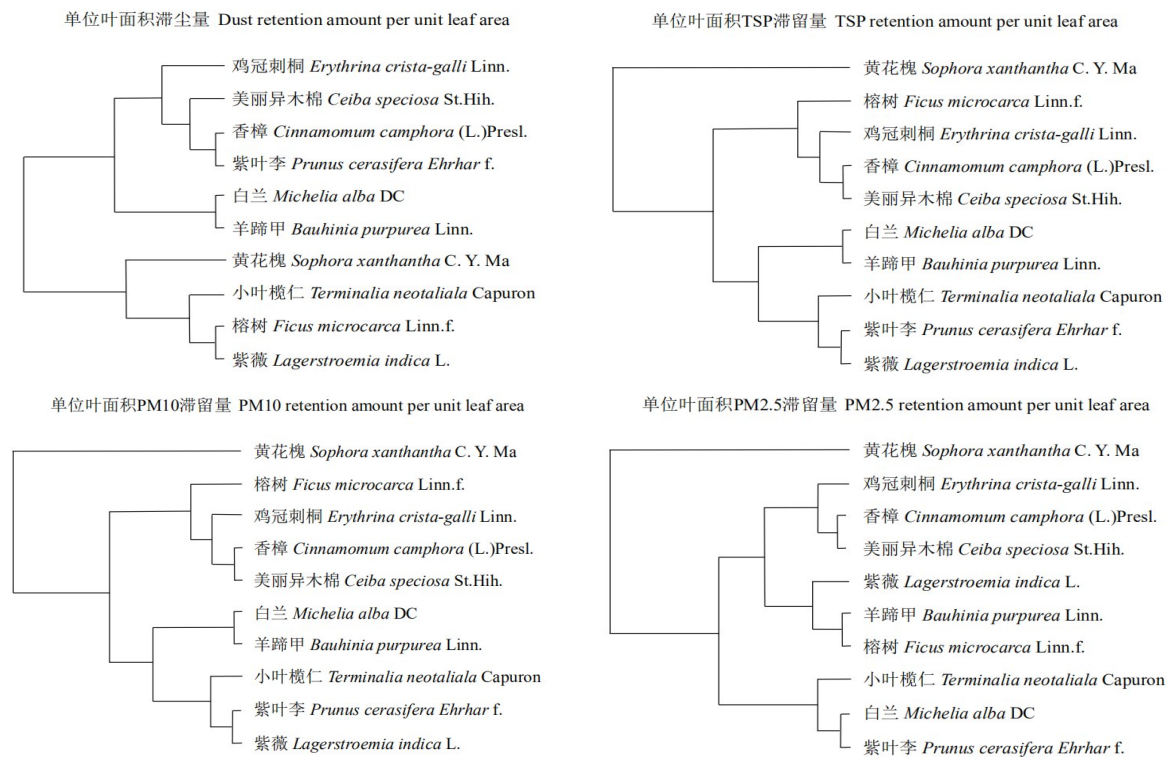


图4 10种绿化树种滞尘能力的聚类分析

Fig.4 Cluster analysis on dust retention ability of 10 greening tree species

3.2 不同绿化树种叶面显微结构

从植物叶片的电镜扫描图(电镜功率15 kV,放大1 000倍)中可以清晰地看到不同植物叶片表面结构存在巨大差异。白兰与榕树的叶片表面结构较为相似,叶片上下表面均较为光滑,几乎无绒毛、沟壑、褶皱等结构,下表面气孔数量较多,但白兰的气孔开口较小而榕树气孔较大(图5a,5b,5e,5f)。羊蹄甲叶片表面尤其上表面存在大量细密的绒毛,且有许多褶皱和突起,分布较为密集,凹凸程度较大(图5c,5d)。香樟、美丽异木棉的叶片上表面结构与白兰、榕树的上表面相似,但下表面不同。香樟叶片的下表面有较多突起,美丽异木棉的下表面有许多深且复杂的褶皱形成网状结构(图5g,5h,5i,5j)。小叶榄仁叶片表面与其他树种不同,上表面有清晰可见的气孔而下表面较为光滑(图5k,5l)。鸡冠刺桐叶片上下表面均有气孔分布,且也有较多密集的褶皱和突起,但仅下表面有被毛覆盖(图5m,5n)。紫叶李叶片上下表面有许多小而浅的褶皱,形成平行的沟壑状(图5o,5p)。黄花槐和紫薇的气孔密度和开口较大,黄花槐的叶片上下表面均有气孔分布,还有多且密的被毛覆盖,并且有许多褶皱和突起,紫薇叶片上下表面均有较浅的褶皱,上表面的褶皱分布较为密集(图5q,5r,5s,5t)。褶皱、突起和绒毛结构能够有效地滞留空气中的颗粒物,因此单从叶面结构看来,黄花槐、紫叶李和羊蹄甲的叶片上下表面比较粗糙,有利于粉尘的滞留(表2,图4)。

表 2 10 种绿化植物的叶表面显微结构  
Tab.2 Leaf surface microstructure of 10 greening plants

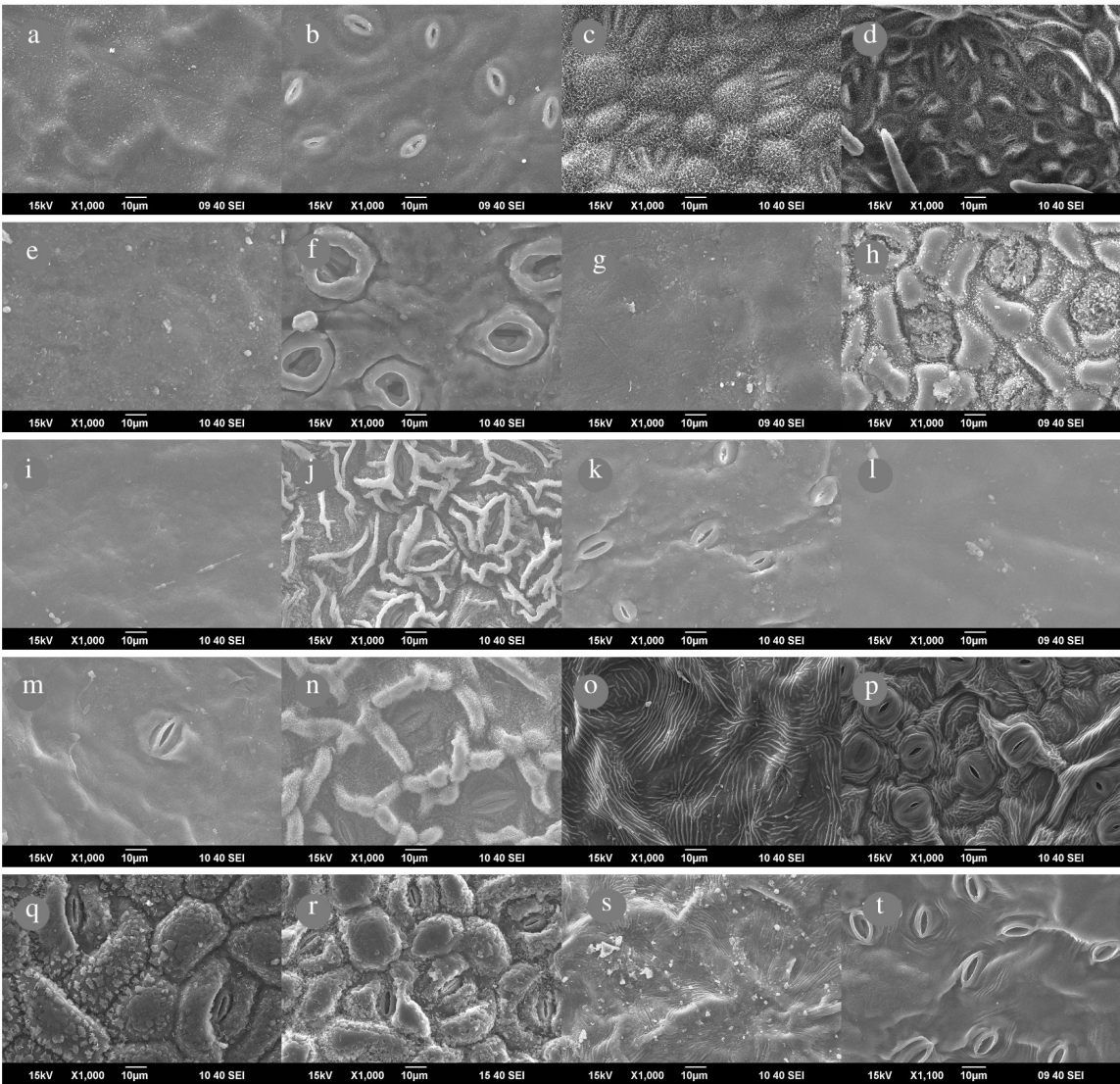
| 序号<br>Number | 叶片上表面特征<br>Characteristics of leaf upper surface |                   |                        |                      |                                   | 叶片下表面特征<br>Characteristics of leaf lower surface |                   |                        |               |                                                |
|--------------|--------------------------------------------------|-------------------|------------------------|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------|------------------------|---------------|------------------------------------------------|
|              | SL/ $\mu\text{m}$                                | SW/ $\mu\text{m}$ | SD/500<br>times-vision | 表皮毛                  | 褶皱结构                              | SL/ $\mu\text{m}$                                | SW/ $\mu\text{m}$ | SD/500<br>times-vision | 表皮毛           | 褶皱结构                                           |
|              |                                                  |                   |                        | Trichome             | Fold structure                    |                                                  |                   |                        | Trichome      | Fold structure                                 |
| 1            | 0                                                | 0                 | 0                      | 无                    | 无                                 | 12.60±1.82                                       | 6.40±0.89         | 20.60±1.95             | 稀疏<br>短柔毛     | 无                                              |
| 2            | 9.50±1.00                                        | 5.72±1.38         | 6.80±1.48              | 覆盖絮状<br>短柔毛，<br>极为密集 | 蜂窝状突起                             | 3.80±1.10                                        | 0.94±0.15         | 6.20±1.30              | 密被短柔<br>毛,有纤毛 | 蜂窝状凹陷                                          |
| 3            | 0                                                | 0                 | 0                      | 无                    | 无                                 | 32.80±1.92                                       | 28.00±4.06        | 13.80±2.39             | 无             | 无                                              |
| 4            | 0                                                | 0                 | 0                      | 无                    | 无                                 | 25.60±3.21                                       | 22.70±0.84        | 12.60±1.52             | 无             | 短棒状突起，<br>沟壑较宽深                                |
| 5            | 0                                                | 0                 | 0                      | 无                    | 无                                 | 17.10±3.09                                       | 6.60±1.52         | 12.80±3.19             | 覆盖<br>短绒毛     | 短褶皱，不规<br>则网状分布                                |
| 6            | 12.20±2.08                                       | 9.00±1.06         | 22.60±2.88             | 无                    | 稀疏沟壑，<br>较宽浅                      | 0                                                | 0                 | 0                      | 无             | 无                                              |
| 7            | 13.20±1.10                                       | 6.40±0.96         | 2.40±0.55              | 无                    | 不规则稀疏<br>褶皱                       | 18.20±2.28                                       | 7.50±1.27         | 15.00±3.16             | 密被絮状<br>短柔毛   | 棒状突起，<br>不规则稀疏<br>网状分布                         |
| 8            | 0                                                | 0                 | 0                      | 无                    | 密集平行状<br>及放射状细<br>褶皱,不规则<br>稀疏大褶皱 | 15.40±2.25                                       | 12.70±1.96        | 24.60±3.58             | 无             | 密集平行状细<br>褶皱,不规则分<br>布片状大褶皱<br>及重叠状分布<br>条状粗褶皱 |
| 9            | 11.20±0.84                                       | 7.10±2.16         | 7.00±1.58              | 覆盖贴伏<br>状绒毛          | 致密排列不<br>规则团块状<br>突起              | 9.30±1.10                                        | 5.10±0.96         | 18.60±4.04             | 密被短<br>柔毛     | 致密排列不<br>规则团块状<br>突起                           |
| 10           | 0                                                | 0                 | 0                      | 无                    | 稀疏不规则<br>条状粗褶皱<br>及密集平行<br>状细褶皱   | 13.40±1.52                                       | 6.60±1.56         | 32.40±3.36             | 无             | 稀疏不规则<br>片状褶皱及<br>少数紧密排<br>列细短褶皱               |

1:白兰;2:羊蹄甲;3:榕;4:香樟;5:美丽异木棉;6:小叶榄仁;7:鸡冠刺桐;8:紫叶李;9:黄花槐;10:紫薇;SL:气孔长度;SW:气孔宽度;SD:气孔密度。

1: *Michelia alba* DC.; 2: *Bauhinia purpurea* Linn.; 3: *Ficus microcarpa* Linn.f.; 4: *Cinnamomum camphora* (L.) Presl.; 5: *Ceiba speciosa* St. Hih.; 6: *Terminalia neotaliala* Capuron; 7: *Erythrina crista-galli* Linn.; 8: *Prunus cerasifera* Ehrhar f.; 9: *Sophora xanthantha*; 10: *Lagerstroemia indica* L.; SL: Stomatal length; SW: Stomatal length; SD: Stomatal density.

3.3 气孔参数与滞尘能力的相关性

为进一步分析植物叶片表面显微结构与滞尘能力的关系,将气孔参数量化后与滞尘量进行 Pearson 相关分析(表 3)。结果显示,气孔参数(长度、宽度、密度)与滞尘能力指标(单位叶面积滞尘量和 TSP、PM10、PM2.5 滞留量)之间均未达到显著性相关。因此,叶片上下表面的气孔大小和密度不是滞尘能力的主要影响因素,滞尘能力可能受叶面的表皮毛、沟槽等其他结构的影响较大。



a、b:白兰;c、d:羊蹄甲;e、f:榕;g、h:香樟;i、j:美丽异木棉;k、l:小叶榄仁;m、n:鸡冠刺桐;o、p:紫叶李;q、r:黄花槐;s、t:紫薇;a:叶片上表面;b:叶片下表面。

1: *Michelia alba* DC.; 2: *Bauhinia purpurea* Linn.; 3: *Ficus microcarpa* Linn.f.; 4: *Cinnamomum camphora* (L.) Presl.; 5: *Ceiba speciosa* St.Hih.; 6: *Terminalia neotaliala* Capuron; 7: *Erythrina crista-galli* Linn.; 8: *Prunus cerasifera* Ehrhar f.; 9: *Sophora xanthantha*; 10: *Lagerstroemia indica* L.; a: Leaf upper surface; b: Leaf lower surface.

图5 10种绿化植物的叶表面微结构扫描电镜图像

Fig.5 The SEM images of particulate matter structure on leaf surface of 10 greening plants

4 讨 论

本文实验结果发现,不同种类的植物叶片在不同季节的单位叶面积滞尘量及单位叶面积颗粒物滞留量存在差异。大部分树种的单位叶面积滞尘量和颗粒物滞留量表现为春>夏>秋>冬,羊蹄甲冬季滞尘量最高,紫叶李夏季滞尘量最高。但不同学者的研究结果不同,张家洋等<sup>[20]</sup>研究发现植物叶片滞尘量秋>春>夏,张景等<sup>[21]</sup>研究发现植物滞尘量春>秋>夏,孙应都等<sup>[22]</sup>研究发现大部分植物的滞尘能力在秋冬季更高。不同城市环境和实验树种的差异可能是导致实验结果不一致的原因。殷卓君等<sup>[23]</sup>研究表明植物叶表粗颗粒物滞留量与风速和温度呈显著负相关,且气温升高后空气湿度相对降低<sup>[24]</sup>,也会导致滞尘量下降。福州位于东南沿海地区,春季气温较低且多雨,空气湿度较高,有利于粉尘和悬浮颗粒物在叶片表面的滞留;冬季降雨少,干冷多风的天气较多,悬浮在大气中的颗粒物较难沉降到叶片上,这可能是不同树种滞尘量产生季节差异的原因。

表 3 植物气孔参数与滞尘能力之间的相关性

Tab.3 Correlation between stomatal parameter and dust retention capacity of plants

|        | SLU | SWU     | SDU     | SLL     | SWL     | SDL     | MD    | MTSP   | MPM10   | MPM2.5  |
|--------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|-------|--------|---------|---------|
| SLU    | 1   | 0.979** | 0.688*  | -0.580  | -0.570  | -0.519  | 0.097 | 0.418  | 0.310   | 0.367   |
| SWU    |     | 1       | 0.814** | -0.661* | -0.600  | -0.580  | 0.161 | 0.481  | 0.391   | 0.471   |
| SDU    |     |         | 1       | -0.711* | -0.536  | -0.676* | 0.173 | 0.357  | 0.363   | 0.490   |
| SLL    |     |         |         | 1       | 0.934** | 0.279   | 0.071 | -0.457 | -0.470  | -0.495  |
| SWL    |     |         |         |         | 1       | 0.166   | 0.127 | -0.355 | -0.354  | -0.361  |
| SDL    |     |         |         |         |         | 1       | 0.293 | 0.167  | 0.268   | 0.085   |
| MD     |     |         |         |         |         |         | 1     | 0.701* | 0.703*  | 0.704*  |
| MTSP   |     |         |         |         |         |         |       | 1      | 0.966** | 0.956** |
| MPM10  |     |         |         |         |         |         |       |        | 1       | 0.973** |
| MPM2.5 |     |         |         |         |         |         |       |        |         | 1       |

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; SLU: 上表皮气孔长度; SWU: 上表皮气孔宽度; SDU: 上表皮气孔密度; SLL: 下表皮气孔长度; SWL: 下表皮气孔宽度; SDL: 下表皮气孔密度; MD: 单位叶面积滞尘量; MTSP: 单位叶面积 TSP 滞留量; MPM10: 单位叶面积 PM10 滞留量; MPM2.5: 单位叶面积 PM2.5 滞留量。

\*:  $P < 0.05$ ; \*\*:  $P < 0.01$ ; SLU: Stomata length of upper epidermis; SWU: Stomata width of upper epidermis; SDU: Stomata density of upper epidermis; SLL: Stomata length of lower epidermis; SWL: Stomata width of lower epidermis; SDL: Stomata density of lower epidermis; MD: Dust retention per unit leaf area; MTSP: TSP retention per unit leaf area; MPM10: PM10 retention per unit leaf area; MPM2.5: PM2.5 retention per unit leaf area.

同一树种对不同粒径的大气颗粒物的滞留量表现出差异,且不同树种对同一粒径颗粒物的滞留量也表现出差异。福州市公路的 10 种主要绿化树种中,黄花槐无论是对粉尘还是对悬浮颗粒物的滞尘能力均显著( $P < 0.05$ )高于其他树种;紫薇和小叶榄仁的滞尘量分别排在第 2 和第 4 位,对 TSP 的滞留量分别排在第 4 和第 2 位,这两个树种对粉尘和悬浮颗粒物的滞留能力均较强;榕树对粉尘的滞留能力排在第 3 位,但对 TSP、PM10、PM2.5 的滞留能力较弱。因此植物叶片滞留粉尘和悬浮颗粒物的能力并非完全一致,对不同粒径颗粒物的滞留效果受到叶片表面的气孔、表皮毛、沟槽、蜡质层、粘液等不同结构的影响。其他研究者的研究结果与本文类似,例如王琴等<sup>[25]</sup>发现广玉兰滞留 TSP 和 PM10 的能力较弱但滞留 PM2.5 的能力较强;贾彦等<sup>[26]</sup>也发现红桉木与桂花树的 PM2.5 滞留量差异不明显,但红桉木的滞尘量仅是桂花树的一半。PM10 主要由气孔、沟壑、粗糙表皮、绒毛等结构滞留在叶片表面,且滞留效果不易受风力影响,较为稳定;而粒径大于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒物主要通过枝叶阻挡和重力作用沉降到叶片上,易受风和降雨的影响迅速脱落<sup>[27]</sup>。因此,黄花槐、紫薇等叶片表面粗糙的树种滞留细颗粒物的能力比榕树、白兰等叶片表面平滑的树种稍强。本次实验发现 10 种绿化树种叶片上滞留的颗粒物中,细颗粒物(PM10)所占的比例较高,均超过了 50%,最高可达到 89.15%;PM2.5 所占的比例也较高(31.24%~72.71%)。查燕等<sup>[28]</sup>对南京的 4 种绿化植物进行研究发现植物叶片吸附细颗粒物的数量百分比为 68.24%;赵松婷等<sup>[29]</sup>研究发现植物叶片吸附的细颗粒物数量比例达到 98% 以上;而王琴等<sup>[25]</sup>的研究结果中 PM10 占 TSP 质量分数的 3.6%~33.9%。不同研究得出的结果产生差异的原因可能是研究区环境差异导致大气颗粒物组成不同<sup>[30]</sup>;此外,实验植物的种类不同,颗粒物滞留量受到植物叶片形态和叶表面微结构的影响<sup>[31]</sup>。

植物叶表面微结构能够对叶片的滞尘量产生影响。研究表明植物叶片的气孔密度、蜡质层、表皮毛、粗糙度、湿润性等,是影响不同植物滞纳空气颗粒物能力的主要影响因素<sup>[32]</sup>,叶表面被毛使颗粒物进入绒毛并卡住难以脱落<sup>[33]</sup>,但被毛密度小且较长时不利于颗粒物滞留<sup>[34]</sup>。结合树种叶片表面电镜图可以发现黄花槐叶片表面较粗糙,有细密丰富的绒毛、突起和褶皱,增大了颗粒物与叶片的接触面积,有利于叶片滞纳颗粒物<sup>[35]</sup>。黄花槐和紫薇的气孔密度较大,对于粉尘的滞留有利<sup>[32]</sup>,因此这两种树种的滞尘量在所有实验树种中较高。紫薇在夏、秋季的滞尘量与黄花槐相差不大而春季的滞尘量略低的原因则可能是春季紫薇叶片大都是新长的嫩叶,叶面积较小,表面粗糙程度不足。白兰和香樟叶片表面光滑革质不易阻滞粉尘,同时风和降雨容易将叶片上已经滞留的粉尘带走<sup>[36]</sup>,这可能是这两种植物叶片滞尘量远

小于其他树种的主要原因。尽管香樟和鸡冠刺桐的叶片下表面有绒毛和突起,但由于粉尘主要滞留在叶片上表面,因此整体来说这两个树种的滞尘量不高。香樟年均单位叶面积滞尘量只有  $1.30 \text{ g/m}^2$ ,与高传友<sup>[37]</sup>的研究结果( $1.623 \text{ g/m}^2$ )相差不大。羊蹄甲的粉尘滞留量较低而冬季的悬浮颗粒物滞留量高于其他树种,主要是因为叶片表面的褶皱和绒毛结构对细颗粒物的滞留效果更好。此外,滞尘能力也与树冠的形状和结构有关。羊蹄甲叶片较大,树冠较为稀疏,且枝条柔软下垂,受风和降雨的影响,不利于大颗粒粉尘的滞留。与其他树种相比,冬季榕树的滞尘量显著( $P < 0.05$ )较大,在几种常绿树种当中榕树的树冠较大,枝叶浓密,能更好地将粉尘滞留在叶片上,这可能是榕树滞尘量更大的原因。

## 5 结 论

对各树种的单位叶面积滞尘量及不同粒径颗粒物滞留量综合分析看来,福州市普通公路主要的10个绿化树种中,黄花槐的滞尘能力最强,小叶榄仁、紫薇和紫叶李的滞尘能力在10个树种中排名也较前。榕树对粉尘的滞留能力较强而对悬浮颗粒物的滞留能力较弱,香樟、美丽异木棉和鸡冠刺桐的滞尘能力最弱。各树种叶片滞留的悬浮颗粒物中PM2.5和PM10质量占TSP的比例分别为31.24%~72.71%和50.27%~89.15%,10个实验树种对粒径小于  $10 \mu\text{m}$  的悬浮颗粒物滞留量较高。10个绿化树种的气孔大小和密度与滞尘量无显著( $P > 0.05$ )相关关系,但叶片表面表皮毛、褶皱、沟槽、突起等结构较多的树种滞尘能力更强。降雨和风力等环境因素以及叶片和树冠结构等植物因素均是植物滞尘能力的影响因素,而不同植物对不同粒径颗粒物的滞留存在差异。因此,在公路绿化植物筛选和绿化带优化中不能单纯考虑植物的总滞尘量,还应根据当地大气颗粒污染物的组成,选择对不同粒径颗粒物滞留能力较强的树种进行搭配,使绿化带功能更加完善。对福州来说,在以生态城市为目标建设公路绿化带时可以考虑选择黄花槐、紫薇、紫叶李等落叶树种和小叶榄仁、榕树等常绿树种进行搭配,兼具较高的观赏价值及滞尘功能。

## 参考文献 References:

- [1] SHRIDHAR V, KHILLARE P S, AGARWAL T, et al. Metallic species in ambient particulate matter at rural and urban location of Delhi[J]. J hazard mater, 2010, 175(1/3): 600-607.
- [2] YIN H, PIZZOL M, JACOBSEN J B, et al. Contingent valuation of health and mood impacts of PM2.5 in Beijing, China[J]. Science of the total environment, 2018, 630, 1269-1282.
- [3] 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[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2604-2614.  
LIU L, GUAN D S, CHEN Y Q. Morphological structure of leaves and dust-retaining capacity of common street trees in Guangzhou municipality[J]. Acta ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [4] 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.
- [5] TALLIS M, TAYLOR G, SINNETT D, et al. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments[J]. Landscape and urban planning, 2011, 103(2): 129-138.
- [6] HOFMAN J, WUYTS K, WITTENBERGHE S V, et al. On the temporal variation of leaf magnetic parameters: seasonal accumulation of leaf-deposited and leaf-encapsulated particles of a roadside tree crown[J]. Science of the total environment, 2014, 493: 766-772.
- [7] 是怡芸. 南京常见绿化树种滞留PM2.5等大气颗粒物的效应研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.  
SHI Y Y. Study on particulate matter and its size fractions deposited on common greening species in Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2017.
- [8] 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.
- [9] TOMAŠEVIĆ M, VUKMIROVIĆ Z, RAJŠIĆ S, et al. Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area[J]. Chemosphere, 2005, 61(6): 753-760.

- [10] 刘玲,方炎明,王顺昌,等.7种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征[J].环境科学,2013,34(6):2361-2367.
- LIU L, FANG Y M, WANG S C, et al. Leaf micro-morphology and features in adsorbing air suspended particulate matter and accumulating heavy metals in seven trees species[J]. Environmental science, 2013, 34(6): 2361-2367.
- [11] 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 science, 2015, 28(3): 384-392.
- [12] Sæbø A, POPEK R, NAWROT B, et al. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces[J]. Science of the total environment, 2012, 427-428: 347-354.
- [13] 林丽.华南地区滨海城市人口密集区普通公路生态建设分析:以福建省道206线文曾路段为例[J].福建交通科技, 2018(5):41-44.
- LIN L. Analysis of ordinary highway ecological construction in densely populated areas of coastal cities in South China: taking Wenzeng section of Fujian Provincial highway 206 as an example[J]. Fujian transportation science and technology, 2018(5): 41-44.
- [14] 王慧,郭晋平,张芸香.公路绿化带滞尘效应研究[J].生态环境学报,2015,24(9):1478-1485.
- WANG H, GUO J P, ZHANG Y X. Dust-retaining effects of roadside tree-belt on TSP pollution of roadside[J]. Ecology and environmental sciences, 2015, 24(9): 1478-1485.
- [15] 王燕.广东省生态景观林带生态效益和景观评价:以惠州、梅州为例[D].广州:华南农业大学,2016.
- WANG Y. Ecological benefit and landscape aesthetic value of eco-landscape forest belt in Guangdong Province: a case study of Huizhou City and Meizhou City[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [16] 陈齐明.黄金宝树与福州市4种常见行道树生态效益的比较[J].防护林科技,2016(9):8-10.
- CHEN Q M. Comparison on ecological benefits of *Melaleuca bracteata* and four kinds of common street trees in Fuzhou City[J]. Protection forest, 2016(9): 8-10.
- [17] 唐文莉,周梦钰,刘正茂,等.合肥市8种行道树秋季叶滞尘能力的研究[J].安徽建筑大学学报,2019,27(3):67-72.
- TANG W L, ZHOU M Y, LIU Z M, et al. Study on dust detention ability of eight kinds of roadside trees in autumn in Hefei City[J]. Journal of Anhui jianzhu university, 2019, 27(3): 67-72.
- [18] 郑瑶瑶,李晓燕.不同城市11种常用绿化树种滞尘能力研究[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2019,37(4):56-62.
- ZHENG Y Y, LI X Y. Study on dust-retention ability of 11 common greening tree species in different cities[J]. Journal of Guizhou normal university(natural sciences), 2019, 37(4): 56-62.
- [19] 胡喜生,洪伟,吴承祯.福州市土地生态系统服务与城市化耦合度分析[J].地理科学,2013,33(10):1216-1223.
- HU X S, HONG W, WU C Z. Coupling degrees of land ecosystem services and urbanization of Fuzhou City[J]. Scientia geographica Sinica, 2013, 33(10): 1216-1223.
- [20] 张家洋,周君丽,任敏,等.20种城市道路绿化树木的滞尘能力比较[J].西北师范大学学报(自然科学版),2013,49(5):113-120.
- ZHANG J Y, ZHOU J L, REN M, et al. Comparison of dust retention capacities by 20 urban road afforestation trees[J]. Journal of northwest normal university(natural science), 2013, 49(5): 113-120.
- [21] 张景,吴祥云.阜新城区园林绿化植物叶片滞尘规律[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2011,30(6):905-908.
- ZHANG J, WU X Y. Detaining dust law of landscape greening plants leaves in urban area of Fuxin[J]. Journal of Liaoning technical university(natural science), 2011, 30(6): 905-908.
- [22] 孙应都,陈奇伯,李艳梅,等.昆明市6个绿化树种叶表微结构与滞尘能力的关系研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(3):78-85.
- SUN Y D, CHEN Q B, LI Y M, et al. Relationship between leaf structure and dust retention capacity of 6 greening tree species in Kunming[J]. Journal of southwest forestry university(natural sciences), 2019, 39(3): 78-85.
- [23] 殷卓君,沈小雪,李瑞利,等.深圳市常见园林植物滞尘效应研究[J].北京大学学报(自然科学版),2020,56(6):1081-1090.
- YIN Z J, SHEN X X, LI R L, et al. Study on the dust retention effect of common garden plants in Shenzhen[J]. Acta scientiarum naturalium universitatis pekinensis, 2020, 56(6): 1081-1090.

- [24] 张斌斌,伍文忠,孙丰宾,等.冬季不同植物配植类型绿地内PM<sub>2.5</sub>致变因素研究[J].中国城市林业,2019,17(5):25-30.  
ZHANG B B, WU W Z, SUN F B, et al. A study of mutative factors to PM<sub>2.5</sub> in green spaces with different arrangements of plants in winter[J]. Journal of Chinese urban forestry, 2019, 17(5): 25-30.
- [25] 王琴,冯晶红,黄奕,等.武汉市15种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征[J].生态学报,2020,40(1):213-222.  
WANG Q, FENG J H, HUANG Y, et al. Dust-retention capability and leaf surface micromorphology of 15 broad-leaved tree species in Wuhan[J]. Acta ecologica Sinica, 2020, 40(1): 213-222.
- [26] 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.
- [27] 段嵩岚,闫淑君,吴艳芳,等.福州市11种绿化灌木春季滞留颗粒物效应研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2017,37(4):47-53.  
DUAN S L, YAN S J, WU Y F, et al. Effects of particles by 11 greening shrubs in spring in Fuzhou city[J]. Journal of south-west forestry university (natural sciences), 2017, 37(4): 47-53.
- [28] 查燕,马华升,俞祥群,等.城市绿化植物对不同粒径大气颗粒物的吸附特征研究[J].环境污染与防治,2020,42(7):807-811.  
ZHA Y, MA H S, YU X Q, et al. The adsorbing characteristic of urban greening plant on depositing size-fractionated particles [J]. Environmental pollution & control, 2020, 42(7): 807-811.
- [29] 赵松婷,李新宇,李延明.北京市常用园林植物滞留PM<sub>2.5</sub>能力的研究[J].西北林学院学报,2016,31(2):280-287.  
ZHAO S T, LI X Y, LI Y M. Capability of common garden plants in Beijing to retain PM<sub>2.5</sub> [J]. Journal of northwest forestry university, 2016, 31(2): 280-287.
- [30] 谢滨泽,王会霞,杨佳,等.北京常见阔叶绿化植物滞留PM<sub>2.5</sub>能力与叶面微结构的关系[J].西北植物学报,2014,34(12):2432-2438.  
XIE B Z, WANG H X, YANG J, et al. Retention capability of PM<sub>2.5</sub> and it's explanation by leaf surface micro-structure of common broad-leaved plant species in Beijing [J]. Acta botanica boreali-occidentalia Sinica, 2014, 34(12): 2432-2438.
- [31] 段嵩岚,闫淑君,田高飞,等.福州市19种灌木滞留颗粒物效应与叶片性状研究[J].西北林学院学报,2018,33(4):230-238.  
DUAN S L, YAN S J, TIAN G F, et al. Effects of the particles retained by 19 widely used shrubs on road sides and their relationships with leaf trait in Fuzhou [J]. Journal of northwest forestry university, 2018, 33(4): 230-238.
- [32] 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.  
ZHANG W K, WANG B, NIU X. The leaf microstructure of different trees and its impact on air particles-capturing ability [J]. Chinese journal of ecology, 2017, 36(9): 2507-2513.
- [33] 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.
- [34] 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[J].应用生态学报,2010,21(12):3077-3082.  
WANG H X, SHI H, LI Y Y. T Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species [J]. Chinese journal of applied ecology, 2010, 21(12): 3077-3082.
- [35] ZHANG W K, WANG B, NIU X. Relationship between leaf surface characteristics and particle capturing capacities of different tree species in Beijing [J]. Forests, 2017, 8(3): 92.
- [36] 陈小平,焦奕雯,裴婷婷,等.园林植物吸附细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)效应研究进展[J].生态学杂志,2014,33(9):2558-2566.  
CHEN X P, JIAO Y W, PEI T T, et al. The effect of adsorbing fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) by garden plants: a review [J]. Chinese journal of ecology, 2014, 33(9): 2558-2566.
- [37] 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.