

深圳市常见园林植物滞尘效应研究

殷卓君 沈小雪 李瑞利 高辉辉 于凌云 周琳 吴海轮 曹烨[†]

北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; [†] 通信作者, E-mail: cykaiyang@163.com

摘要 以深圳市6种常见的园林植物为对象, 研究其单位面积滞尘量及其粒径组成特征, 探究植物叶片表面的微观形貌结构以及滞留颗粒物的组分和分布特征, 分析气象因子对植物滞尘的影响。结果表明: 1) 6种园林植物的单位叶面积滞尘量排序为黄金榕($0.74 \pm 0.21 \text{ g/m}^2$) > 鹅掌藤($0.42 \pm 0.26 \text{ g/m}^2$) > 对叶榕($0.24 \pm 0.26 \text{ g/m}^2$) > 龙船花($0.20 \pm 0.07 \text{ g/m}^2$) > 沿阶草($0.18 \pm 0.10 \text{ g/m}^2$) > 鸡蛋花($0.15 \pm 0.10 \text{ g/m}^2$); 2) 6种园林植物滞尘以粒径 $\alpha > 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物为主, 质量占比为59.21%~88.92% (黄金榕除外), 鹅掌藤对 $\alpha > 10 \mu\text{m}$ 颗粒物的滞尘能力最强($0.34 \pm 0.20 \text{ g/m}^2$), 黄金榕对 $3 \mu\text{m} < \alpha < 10 \mu\text{m}$ ($0.51 \pm 0.15 \text{ g/m}^2$) 和 $0.15 \mu\text{m} < \alpha < 3 \mu\text{m}$ ($0.14 \pm 0.07 \text{ g/m}^2$) 颗粒物的滞留能力最强; 3) 6种园林植物叶表面的气孔、褶皱、沟槽、絮状凸起和绒毛等微观形貌有利于叶片对颗粒物的截留, 叶片滞留颗粒物的元素组成主要为O, Si和Al; 4) 6种园林植物叶表滞留的大颗粒物($\alpha > 10 \mu\text{m}$)易受风速和温度的影响。研究结果对深圳市园林植物配置具有指导意义, 并可为通过植物滞尘效应改善空气质量提供一定的理论依据。

关键词 单位叶面积滞尘量; 园林植物; 叶表面微观结构; 颗粒物粒径; 环境因子

Study on the Dust Retention Effect of Common Garden Plants in Shenzhen

YIN Zhuojun, SHEN Xiaoxue, LI Ruili, GAO Huihui, YU Lingyun, ZHOU Lin, WU Hailun, CAO Ye[†]

School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055;

[†] Corresponding author, E-mail: cykaiyang@163.com

Abstract Taking six most common garden plants in Shenzhen were used as research objects, the amount of dust retention per unit leaf area and the particle size composition of dust were studied. The microscopic morphology and the structure of leaf surface as well as the composition and distribution characteristics of the retained particles were investigated. The influence of meteorological factors on the dust retention characteristics of plants was clarified. The results showed that: 1) The dust retention amount per unit leaf area of different plant types was *Ficus microcarpa* ($0.74 \pm 0.21 \text{ g/m}^2$) > *Schefflera arboricola* ($0.42 \pm 0.26 \text{ g/m}^2$) > *Ficus hispida* ($0.24 \pm 0.26 \text{ g/m}^2$) > *Ixora chinensis* ($0.20 \pm 0.07 \text{ g/m}^2$) > *Ophiopogon bodinieri* ($0.18 \pm 0.10 \text{ g/m}^2$) > *Plumeria rubra* ($0.15 \pm 0.10 \text{ g/m}^2$). 2) The six types of garden plants were mainly composed of particles with particle size $\alpha > 10 \mu\text{m}$. The weight of particles with size $\alpha > 10 \mu\text{m}$ accounts for 59.21%~88.92% (except for *F. microcarpa*) of the total weight. *S. arboricola* had the strongest dust-retaining ability for particles with size $\alpha > 10 \mu\text{m}$ ($0.34 \pm 0.20 \text{ g/m}^2$). *F. microcarpa* had the strongest dust-retaining ability for particles with size $3 \mu\text{m} < \alpha < 10 \mu\text{m}$ ($0.51 \pm 0.15 \text{ g/m}^2$) and $0.15 \mu\text{m} < \alpha < 3 \mu\text{m}$ ($0.14 \pm 0.07 \text{ g/m}^2$). 3) Stoma, fold, groove, flocculent protuberance and villi on the surface were conducive to the retention of dust. The main elements of the retained particles were O, Si and Al. 4) The large particles ($\alpha > 10 \mu\text{m}$) detained by the leaves of the six garden plants were susceptible to wind speed and temperature. The results of this study can be used to guide the arrangement of garden plants in Shenzhen and provide a scientific evidence for the plant dust retention effect to improve air quality.

Key words amount of dust retention per leaf area; garden plants; leaf morphological characteristic; particle size; environmental factor

目前,空气颗粒物(particulate matters, PMs)是大多数城市的主要空气污染物^[1]。其中,PM_{2.5}污染成为中国城市化发展面临的严重环境问题之一^[2-3]。PM_{2.5}可以在大气中长时间悬浮,并通过大气环流大规模扩散^[4]。同时,因其较大的比表面积,PM_{2.5}容易滞留重金属和有毒有机化合物,进入人体呼吸系统,并可以通过血液渗入肺泡,引发各种疾病(如心肺疾病、肺癌、过敏和脑损伤),严重影响人类健康^[5-6]。因此,控制PM_{2.5}浓度已成为城市发展急需解决的重要环境问题之一。

城市绿地可以滞留PMs,进而有效地降低大气颗粒物的浓度,可为改善城市空气质量和缓解大气污染压力提供一种有效的方法^[7-9]。当前,对植物滞尘的相关研究以植物叶片滞尘特征为主^[10-13]。由于不同植物的叶片形态特征各异,叶片保留PMs的能力也因植物种类而异^[14],植物的形态结构特征,如叶片的形状、类型以及叶片表面是否被毛,直接影响植物滞尘^[15-17]。Guerrero-Leiva等^[18]发现,具有粗糙叶面的植物比光滑的叶片表面滞留PMs的能力更强。树冠结构、枝条密度、叶面倾角及叶片的形态结构特征是影响植物单位叶面积滞尘量的主要因素,外界环境因子(水、风向和风速等)也会影响植物滞尘量^[19-21]。Xie等^[22]通过人工降雨模拟实验发现,降雨对阔叶树木叶片表面滞留PM_{2.5}的冲洗效率比针叶树更高,并且高降雨强度会缩短叶片表面滞留PM_{2.5}的循环周期。Beckett等^[23]通过风洞试验发现,10 m/s的风速对松、柏树、枫树、白木和白杨滞尘均有促进作用。

深圳市具有丰富的植物资源,其中常用的园林植物有750余种^[24]。随着深圳经济快速发展,城市规模不断扩大,常住人口汽车保有量迅速增加,霾天气等生态环境问题随之而来。当前,深圳市园林植物滞尘能力的相关研究主要关注单位叶面积滞尘量以及滞尘方式,对植物滞尘粒径组成、组分特征以及滞尘能力差异形成原因的研究存在不足^[25-26]。本研究以深圳市6种常见园林植物为对象,通过水洗脱粒径分级法,研究不同植物单位面积滞尘量及滞尘粒径组成特征,探究叶片表面的微观形貌结构、滞留颗粒物的元素组成和分布特征,分析环境因子(温度、湿度、风速、风向、PM_{2.5}和PM₁₀浓度)对不同植物滞尘特征的影响,以期在城市园林植物的选择提供科学依据,有助于指导合理配置园林植物,提升城市空气质量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

深圳市为亚热带海洋性气候,夏季高温,冬季温暖,气温年较差小。降水年际变化小,季节变化大^[27]。多年平均降雨量为1830 mm,每年4—9月的降雨量约占全年的85%。受地形影响,降水量空间分布不均匀。地带性植被代表类型为热带常绿季雨林型,园林绿化植物多为常绿阔叶植物,植物群落基本上是乔木、灌木与草本植物的组合^[28]。本研究采样地点位于深圳市南山区北京大学深圳研究生校园内(22°35'43.70"N, 113°58'21.11"E),周围5 km内无高污染行业,校园内植被覆盖率高,车流量较小。

1.2 植物选择和采样方法

根据张哲等^[29]对深圳市园林植物使用频度的调查研究结果,选取使用频度大于50%的乔木、灌木和草本共6种常见园林植物。其中,乔木包括对叶榕(*Ficus hispida*)和鸡蛋花(*Plumeria rubra*),灌木包括龙船花(*Ixora chinensis*)、黄金榕(*Ficus microcarpa*)和鹅掌藤(*Schefflera arboricola*),草本为沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)。

采样时间为2019年6月16, 20和27日,3个日期采集的植物分别为龙船花和沿阶草、黄金榕和鹅掌藤以及对叶榕和鸡蛋花。乔木采取不同方位分层采样方法,每株乔木共12个采集点,每个采集点获取20片叶片。灌木采样根据实际情况,每株/丛灌木随机选取4个采集点,每个采集点获取20片叶片。草本用等距采样方法,在1 m×1 m样方内均匀地分布9个采集点,每个采集点获取20片叶片。采样日期的同步气象数据来源于校内E栋楼顶气象监测站,空气质量数据来源于距离研究样地最近的华侨城监测站(<http://kqzl.meeb.sz.gov.cn/pages/szepb/kqzl/TGzfwHjKqzlsMain1.jsp>)。

1.3 单位叶面积滞尘量测定

采用水洗脱法测量单位叶面积滞留的颗粒物质量^[30],步骤如下。

1) 通过水洗脱法粒径分级测量,得到样品不同粒径总滞尘量 w 。将采集的完整叶片放入有蒸馏水的烧杯内浸泡,静置2小时后,用镊子取出叶片并用洗瓶冲洗,将洗液并入浸泡液中,叶片自然晾干。对比预实验中操作前后叶片表面扫描电子显微镜图像,发现经2小时静置浸泡和冲洗后,叶片表

面无颗粒物附着,效果理想,且未造成叶片结构的物理损伤。冲洗液分别用已称重的不同孔径(10、3和0.15 μm)滤纸,依次过滤,然后将滤纸置于60℃烘箱24小时,烘干后采用精度为1/10000的电子分析天平称重。

2) 同步地,设立3组空白平行实验,即用相同体积的蒸馏水代替浸泡液,重复上述步骤,由式(1)计算得到因为抽滤导致的滤纸质量变化量 Δw :

$$\Delta w = w_{B2} - w_{B1}, \quad (1)$$

式中, w_{B1} 和 w_{B2} 分别表示空白实验滤纸抽滤前后的质量(g)。

3) 两次质量之差减去滤纸变化量均值 $\overline{\Delta w}$,即为样品上附着的颗粒物质量 w 。分别计算在滤纸上聚集的不同粒径($\alpha > 10 \mu\text{m}$, $3 \mu\text{m} < \alpha < 10 \mu\text{m}$ 和 $0.15 \mu\text{m} < \alpha < 3 \mu\text{m}$)颗粒物的质量:

$$w = w_{T2} - w_{T1} - \overline{\Delta w}, \quad (2)$$

式中, w_{T1} 和 w_{T2} 分别表示实验组滤纸抽滤前后的质量(g)。

4) 叶面积测定采用纸称量法。取一张规则的面积 $S_1(\text{m}^2)$ 已知的A4纸,称取其重量 W_1 ,将叶片置于纸上,用笔描出其轮廓,然后沿着轮廓剪下,称取其重量 W ,通过计算质量比得到待测叶面积 $S(\text{m}^2)$,计算公式如下:

$$S = W / W_1 \times S_1, \quad (3)$$

5) 根据叶片面积计算单位叶面积对不同粒径颗粒物的滞尘量 $C_a(\text{g}/\text{m}^2)$:

$$C_a = w / S. \quad (4)$$

1.4 叶面形貌特征与组分分析

在收集好的叶子上,避开主叶脉,随机从上、下表面切下5 mm×5 mm的样片。将样片置于60℃的烘箱中48小时至其完全干燥。将样片用导电粘合剂粘在样品台上,用离子溅射仪(JEC-3000FC,日本JEOL公司)溅射涂覆Pt。在扫描电子显微镜SEM(7800F,日本JEOL公司)下观察叶子的表面形貌以及操作前后叶片表面滞留颗粒物的变化。

同步地,对样片进行X射线能谱(EDS)(INCA X-MAX,英国OXFORD公司)扫描。通过面扫描,分析叶片表面颗粒物的分布特征;通过点扫描;分析叶片上、下表面颗粒物的元素组成,进而分析滞尘的来源。

1.5 数据处理

数据均为平均值±标准差。使用SPSS 17.0软件进行数据统计分析。采用单因素方差分析法(One way-ANOVA)和多重比较法(DUNCAN),分析常见园林植物单位叶面积滞尘量的差异显著性以及不同植物滞尘粒径组成的差异显著性($P < 0.05$)。采用Pearson相关分析法,分析环境因子对单位叶面积滞尘以及不同粒径滞尘的影响。用Origin 2017软件制图。

2 结果与讨论

2.1 深圳6种园林植物单位叶面积滞尘量及其粒径组成特征

如表1所示,深圳市6种常见园林植物单位叶面积滞尘量从大到小排序为黄金榕($0.74 \pm 0.21 \text{ g}/\text{m}^2$)>鹅掌藤($0.42 \pm 0.26 \text{ g}/\text{m}^2$)>对叶榕($0.24 \pm 0.26 \text{ g}/\text{m}^2$)>龙船花($0.20 \pm 0.07 \text{ g}/\text{m}^2$)>沿阶草($0.18 \pm 0.10 \text{ g}/\text{m}^2$)>鸡蛋花($0.15 \pm 0.10 \text{ g}/\text{m}^2$)。黄金榕叶片单位面积滞尘量显著高于其他植物,大约为鸡蛋花的5倍。在张丽华^[31]对福州市主要绿地植物滞尘能力的研究中,黄金榕滞尘能力($\alpha \geq 10 \text{ g}/\text{m}^2$)较强,他们建议将黄金榕等灌木用于廊道绿化。因此,黄金榕可以作为深圳市滞尘植物配置的候选园林植物。江胜利等^[32]和Cai等^[33]发现,单位叶面积滞尘量常表现为灌木较高,乔木次之,草本最低,本文单位叶面积滞尘量灌木($0.45 \text{ g}/\text{m}^2$)>乔木($0.20 \text{ g}/\text{m}^2$)>草本($0.18 \text{ g}/\text{m}^2$)的研究结果与此一致。原因可能是灌木整体上冠层叶片较密集,且灌木的高度易于扬尘的阻滞^[34-35]。并且,与乔木和草本相比,灌木滞尘量整体上相对稳定,受环境因素的影响较小^[36]。

同种植物对不同粒径颗粒物的单位叶面积滞尘

表1 6种常见园林植物的单位叶面积滞尘量
Table 1 Particle size distribution of retained dust on leaves of the six garden plants

类别	植物	单位叶面积滞尘量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
乔木	对叶榕	0.24 ± 0.26^c
	鸡蛋花	0.15 ± 0.10^c
灌木	龙船花	0.20 ± 0.07^c
	黄金榕	0.74 ± 0.21^a
	鹅掌藤	0.42 ± 0.26^b
草本	沿阶草	0.18 ± 0.10^c

说明:上角标不同的字母表示单位叶面积滞尘量差异显著($P < 0.05$),字母相同表示无显著性差异。

量差异显著(图1, $P<0.05$)。植物滞尘以粒径 $\alpha>10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物为主, 质量占比为59.21%~88.92%(黄金榕除外, 其对粒径 $\alpha>10\ \mu\text{m}$ 颗粒物滞留的质量占比为14.72%, 见图1)。王琴等^[37]研究表明, 武汉市15种阔叶乔木滞留的颗粒物粒径分布以大于 $10\ \mu\text{m}$ 的粗颗粒为主。这种现象可能是由不同粒径颗粒物受气象因子影响程度不同、叶片不同形貌特征滞尘能力有异以及粗颗粒物单位面积质量更高等原因所致^[38-39]。通常将 $3\ \mu\text{m}<\alpha<10\ \mu\text{m}$ 的颗粒物划归为 PM_{10} , $0.15\ \mu\text{m}<\alpha<3\ \mu\text{m}$ 的颗粒物划归为 $\text{PM}_{2.5}$ ^[37-39]。本研究中, 龙船花、黄金榕、鹅掌藤和对叶榕更容易滞留 $\text{PM}_{2.5}$, 沿阶草和鸡蛋花更容易滞留 PM_{10} , 可能与其叶表面结构^[23]以及不同粒径级别颗粒物的垂直分布相关^[40]。其中, 黄金榕的 $0.15\ \mu\text{m}<\alpha<3\ \mu\text{m}$ 单位叶面积滞尘量占其单位叶面积总滞尘量的67.23%, 大于其他两个粒径组分。段嵩岚等^[40]发现黄金榕对 $\text{PM}_{2.5}$ 的滞尘量($1.77\pm0.80\ \text{mg}/\text{片}$)可达到总滞尘量($2.71\pm0.87\ \text{mg}/\text{片}$)的65.33%, 说明黄金榕更容易滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 。

不同植物对同粒径级别颗粒物的单位面积滞尘量差异显著(图1, $P<0.05$)。6种植物中, 黄金榕的 $3\ \mu\text{m}<\alpha<10\ \mu\text{m}$ 和 $0.15\ \mu\text{m}<\alpha<3\ \mu\text{m}$ 单位叶面积滞尘量最大值分别为 0.14 ± 0.07 和 $0.51\pm0.14\ \text{g}/\text{m}^2$, 而鹅掌藤对大粒径颗粒物($\alpha>10\ \mu\text{m}$)的滞尘能力最强。刘璐等^[36]通过研究广州市的园林植物, 发现鹅掌藤具有较明显的滞留大粒径颗粒物能力, 单位叶

面积滞尘量为 $0.25\ \text{g}/\text{m}^2$ ($\alpha>4.5\ \mu\text{m}$)。这可能是因为鹅掌藤叶片表面的褶皱增大了叶片表面的粗糙度, 有利于粗颗粒物的附着^[37]。

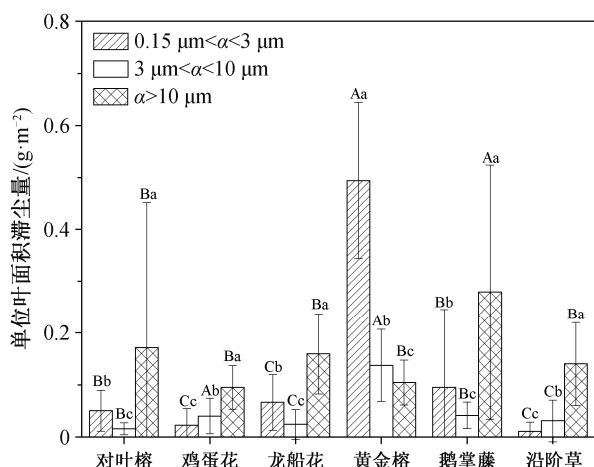
2.2 叶表形貌及其滞尘特征

深圳市6种园林植物的叶表形貌特征见图2和表2。6种植物的叶表面均无气孔分布。对叶榕叶片下表面有绒毛, 附着大量颗粒物。鸡蛋花和龙船花叶表面结构相似, 上表面具有深沟槽和絮状凸起, 沟槽内滞留较多颗粒物。沿阶草叶片的上表面有条形凸起, 且凸起之间具有深槽; 下表面结构较简单, 呈现清晰的滞留颗粒物的包络槽。黄金榕下表面具有气孔密、气孔开口大的形貌特征, 利于细颗粒物的滞留^[35], 因此更容易滞留 $0.15\ \mu\text{m}<\alpha<3\ \mu\text{m}$ 的细颗粒物。鹅掌藤下表面有密集的褶皱和较深的沟槽间隙, 有利于大颗粒物附着^[40], 因此对 $\alpha>10\ \mu\text{m}$ 大粒径颗粒物滞尘能力较强。

综上所述, 植物滞尘能力受叶表形貌影响, 叶表面的气孔、褶皱、沟槽、絮状凸起和绒毛有利于颗粒物的截留和滞留^[21]。因此, 上述叶片微观形貌特征可作为空气颗粒物污染改善功能园林植物筛选的重要依据。此外, 密集的气孔分布和较大的气孔开口有利于细颗粒物的截留和滞留^[12,36]。叶片表面褶皱密集以及较深的沟槽间隙利于粗颗粒物的附着, 絮状凸起可以形成复杂的微结构, 容易滞留不同尺寸的小颗粒, 小颗粒可以容易地聚集成大颗粒^[38]。因此, 可基于不同粒径级别颗粒物的污染特征来配置适用的园林植物, 以期提高植物滞尘效果。例如, 将叶片表面气孔密且气孔开口大的植物种植于城市道路旁 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高的区域, 有利于改善该区域的空气质量^[40]; 在以大粒径颗粒物污染为主的区域, 可选用具有较深沟槽间隙且褶皱密集的植物。

2.3 叶片表面滞尘的元素组成

为了探明表面滞留颗粒物的元素组成及其分布特征, 对叶片的上下表面进行X射线能谱扫描分析, 结果见图3和4。对叶榕、鸡蛋花和沿阶草叶片的上表面褶皱中有较多的滞尘颗粒物, 龙船花、黄金榕和鹅掌藤叶片的上表面沟槽中有大量的滞尘颗粒物, 滞尘颗粒物主要聚集在鹅掌藤和黄金榕的气孔以及气孔间的沟槽中, 龙船花絮状凸起和对叶榕绒毛中滞留大量的颗粒物, 沿阶草下表面的褶皱中有部分滞尘颗粒物, 进一步说明叶表面的气孔、褶皱、沟槽、絮状凸起和绒毛有利于颗粒物的滞留。



不同的大写字母表示不同的植物对同粒径级别颗粒物的单位面积滞尘量差异显著($P<0.05$), 不同的小写字母表示同一种植物对不同粒径级别颗粒物的单位面积滞尘量差异显著($P<0.05$)

图1 6种园林植物叶片滞尘粒径分布特征

Fig. 1 Distribution characteristics of retained particles' sizes of the six garden plants

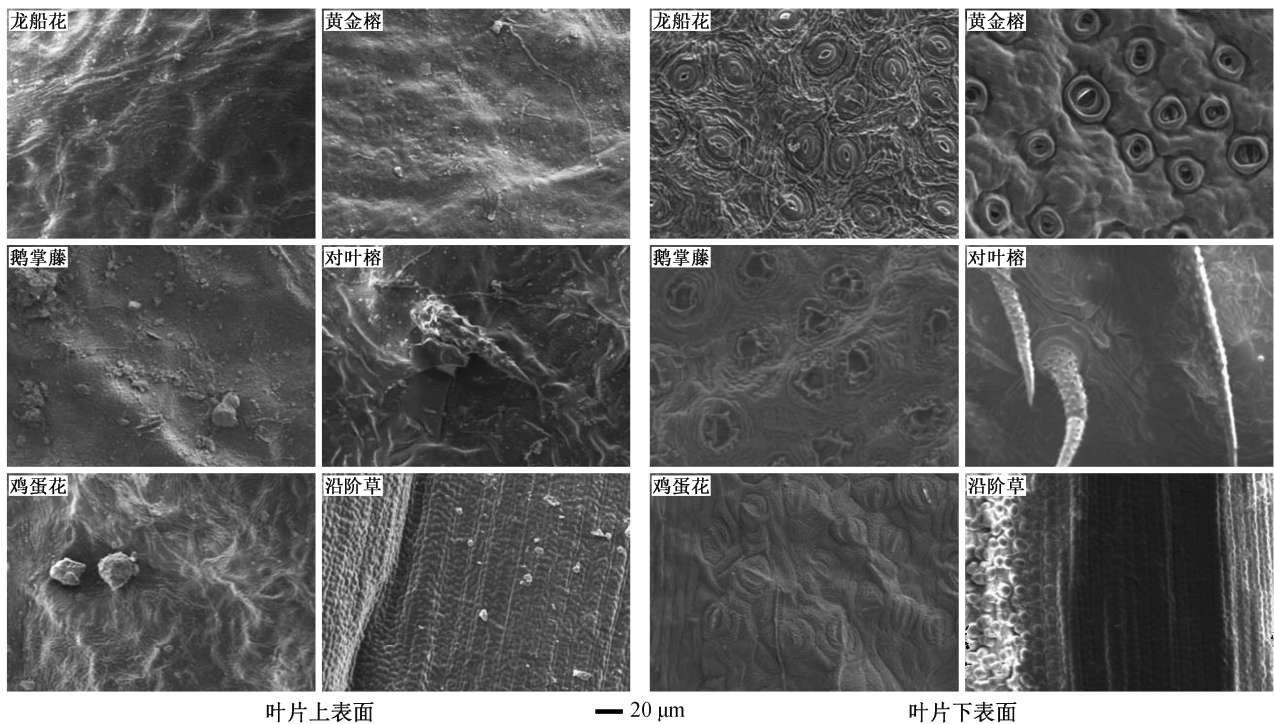


图 2 6 种园林植物叶片表面扫描电镜图
Fig. 2 Scanning electron microscopy images of the six garden plants

表 2 6 种园林植物叶片表面微观形貌特征
Table 2 Leaf surface's mico-morphology characteristics of the six garden plants

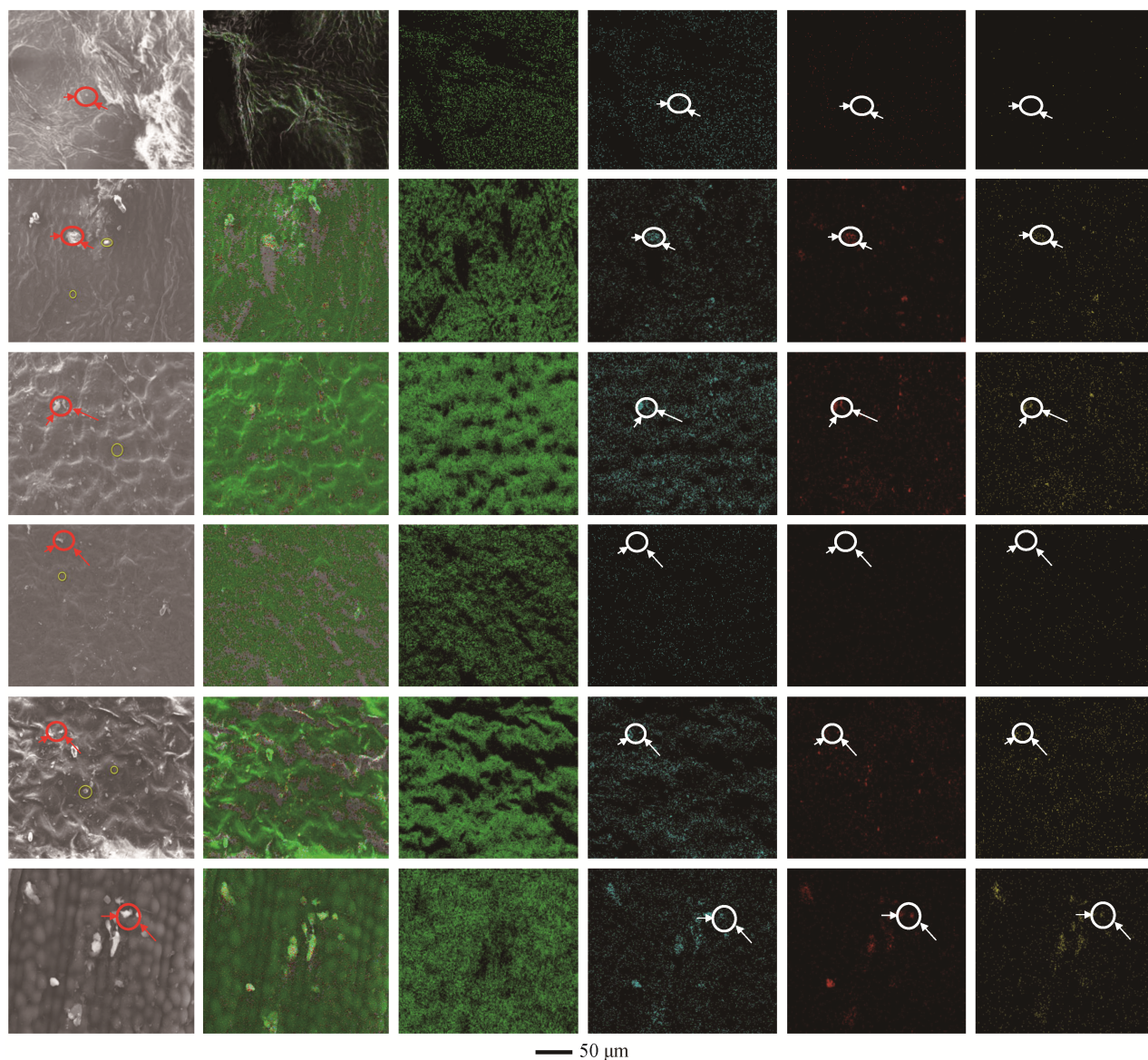
植物	叶形	上表面特征	下表面特征
对叶榕	卵状长椭圆形或倒卵状矩形	覆盖密集绒毛, 褶皱紧密	气孔分布紧密, 有纤毛和蜂窝状凹坑组织
鸡蛋花	长圆状倒披针形或长椭圆形	絮状凸起, 深凹槽	气孔, 褶皱分布紧密
龙船花	披针形, 长圆状披针形	絮状凸起, 深凹槽	气孔, 褶皱分布紧密
黄金榕	椭圆形或倒卵形	褶皱紧密	气孔, 褶皱分布紧密, 深槽
鹅掌藤	倒卵状长圆形或长圆形	褶皱紧密	气孔, 褶皱分布紧密, 深槽
沿阶草	禾叶状, 边缘具细锯齿	条形凸起, 深槽	包络槽

Kang^[41]等发现, 近年来珠江三角洲区域的大气颗粒物污染主要来源为总悬浮颗粒物(total suspended particulate, TSP)。大气颗粒物污染中, TSP 的粒径范围为 $10\text{ }\mu\text{m}<\alpha<100\text{ }\mu\text{m}$ ^[42]。本研究中, 深圳主要园林植物叶片滞尘以 $\alpha>10\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒物为主, 质量占比为 59.21%~88.92%(黄金榕除外), 说明园林植物滞尘粒径与该区域大气颗粒污染物的粒径组成一致, 滞尘主要来源为 TSP(黄金榕除外)。同时, 能谱分析结果显示, O, Si 和 Al 为园林植物滞尘的主要元素, 与 Bonifacio 等^[43]TSP 金属元素组成主要为 Al, Fe, Mg, Zn 和 Cu (其中 Al 为首要组成元素)的结论一致。

此外, 我们发现只有黄金榕滞尘颗粒物的粒径

以 $0.15\text{ }\mu\text{m}<\alpha<3\text{ }\mu\text{m}$ ($0.14\pm0.07\text{ g/m}^2$)为主, 质量占比达到 67.14%。6 种园林植物叶片表面的能谱分析结果显示, 黄金榕叶片的上下表面 K 含量最高, 分别为 0.43%和 0.39%。根据 Huang 等^[44]对深圳市 PM_{2.5} 颗粒物的分析结果, 金属元素为主要污染成分之一, 其中 K 占比最高, 占总成分的 1.46%。本文研究结果与之有较好的一致性。

如图 5 所示, 深圳市 6 种园林植物叶片上表面颗粒物元素组成的排序为 C($72.91\%\pm12.72\%$)>O($21.82\%\pm8.04\%$)>Si($2.62\%\pm4.93\%$)>Ca($1.32\%\pm1.80\%$)>K($0.82\%\pm0.54\%$)>Cl($0.33\%\pm0.32\%$)>Al($0.21\%\pm0.11\%$)>S($0.12\%\pm0.14\%$), 下表面颗粒物元素组成排序为 C($71.72\%\pm13.02\%$)>O($23.74\%\pm8.63\%$)>Si



第1~2列分别为扫描电镜和能谱分析图像,第3~6列分别为C、O、Si和Al元素能谱分析图像;
第1~6行分别为对叶榕、鸡蛋花、龙船花、黄金榕、鹅掌藤和沿阶草。图4同

图3 叶片上表面滞尘颗粒物中4种元素的能谱分析结果(面扫描)

Fig. 3 Energy spectrum analysis results of four elements on the six garden plants leaves' upper surfaces (surface scanning)

(2.21%±3.22%)>K(1.00%±0.82%)>Ca(0.62%±0.61%)>Al(0.52%±1.23%)>Cl(0.21%±0.32%)>S(0.13%±0.14%)。其中,C和O含量最高,其次是Si,Al,Ca和K。与上表面相比,叶片下表面O,K和Al的占比相对增加,C,Si,Ca和Cl的占比相对减少,S的占比保持稳定,说明深圳市6种园林植物叶片上下表面对不同组分颗粒物的滞留存在差异。

植物叶片表面滞留颗粒物的物质成分主要为石英(SiO_2)、方解石(CaCO_3)、白云石($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$)、食盐(NaCl)、生石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、熟石膏

($2\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)和赤铁矿(Fe_2O_3)等^[45]以及其他的污染物^[46]。本研究中,不同植物滞留颗粒物的元素组成与比例均存在差异(图5)。与其他植物相比,对叶榕叶片表面滞留颗粒物中Si和Cl元素占比最高,上表面Si和Cl占比分别为9.12%和0.82%,下表面Si和Cl含量占比分别为13.62%和0.73%。与上表面相比,对叶榕叶片的下表面具有易滞留细颗粒物的绒毛,石英、黏土矿物、方解石、盐分等可能是其滞留细颗粒物的主要组分。沿阶草叶片的上表面滞留颗粒物中Ca占比(5.32%)最高,下表面滞留颗

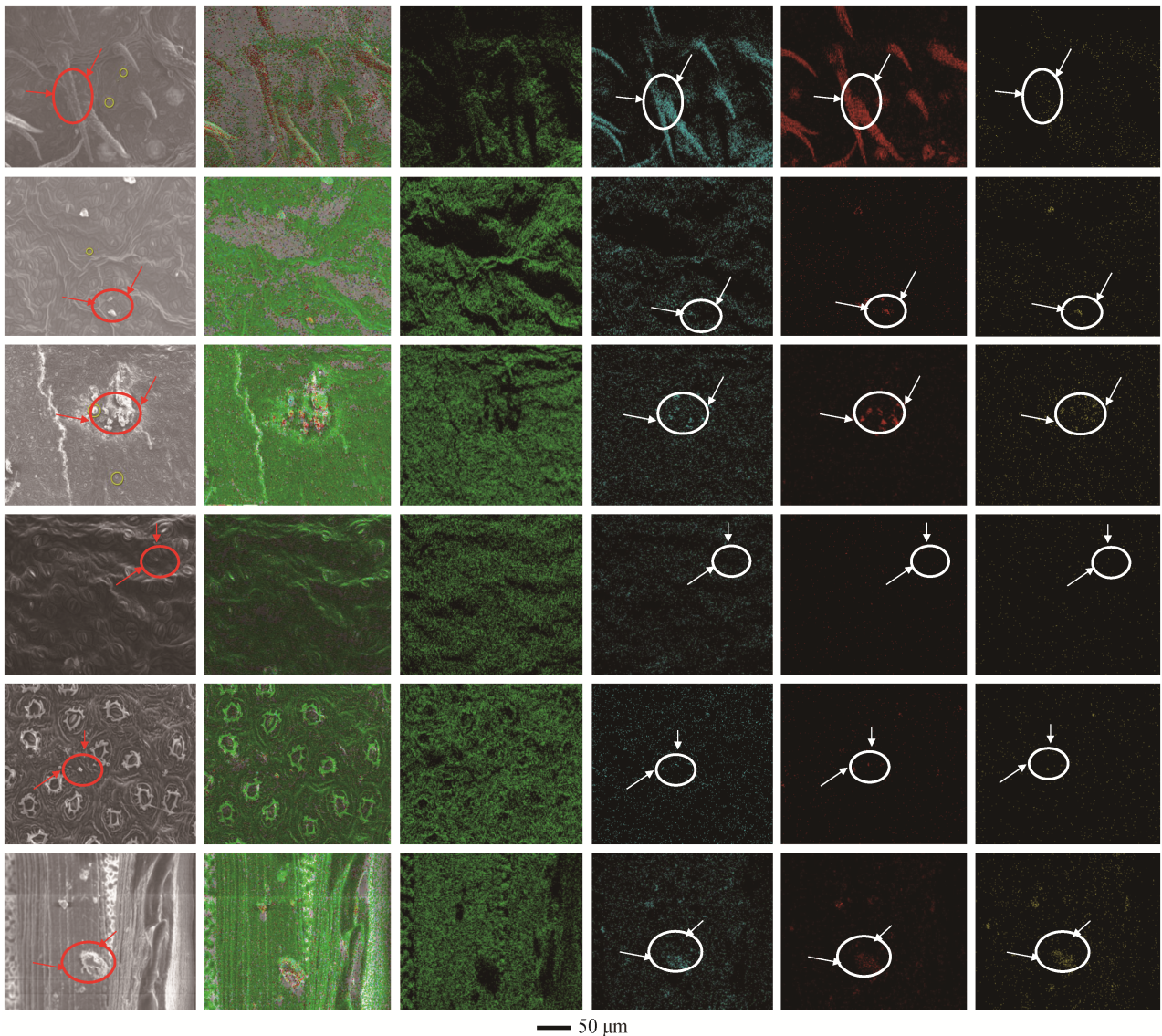


图4 叶片下表面滞尘颗粒物中4种元素的能谱分析结果(面扫描)

Fig. 4 Energy spectrum analysis results of four elements on the six garden plants leaves' lower surfaces (surface scanning)

颗粒物中Al占比(3.62%)最高,原因可能是沿阶草接近地面,易受地面扬尘的影响,滞留来自土壤的颗粒物,如黏土矿物等^[47]。鸡蛋花滞留颗粒物中K占比最高,且上表面(2.42%)高于下表面(1.93%)。在鸡蛋花和鹅掌藤叶片的上表面以及龙船花叶片的下表面检测到S。Kulmala等^[48]发现细颗粒物中硫酸盐含量较高,主要为来自扬尘的 $K_2Fe(SO_4)_2$ 。据此推测,本研究中鸡蛋花的滞尘颗粒物可能主要来自扬尘。

2.4 环境因子对深圳6种园林植物滞尘的影响

植物叶片滞尘能力受当时当地气象条件和空气质量的影响^[36]。同步气象参数(表3)显示,本研究中植物滞尘采样时降雨较多,空气湿度较大,空气

质量良好。环境因子与园林植物单位叶面积总滞尘量以及各粒径级别单位叶面积滞尘量的相关性分析结果(表4)显示,仅 $\alpha > 10 \mu m$ 的粗颗粒物单位叶面积滞尘量与温度和风速显著负相关($P < 0.05$),说明叶表滞留粗颗粒物易受风速和温度的影响。贾彦等^[38]发现,通过气孔等结构滞尘的叶片,滞尘能力受环境因素的影响较小;通过叶表面和纤毛滞尘的叶片,滞尘能力受环境因素的影响较大。本研究中,除黄金榕外,其余植物易滞尘 $\alpha > 10 \mu m$ 的粗颗粒物,且主要分布在叶表面绒毛和褶皱处,因此容易受到风速影响。空气温度与植物滞尘量间也存在显著的负相关关系,可能是由于空气升温会降低湿度,进而导致滞尘量下降^[49]。

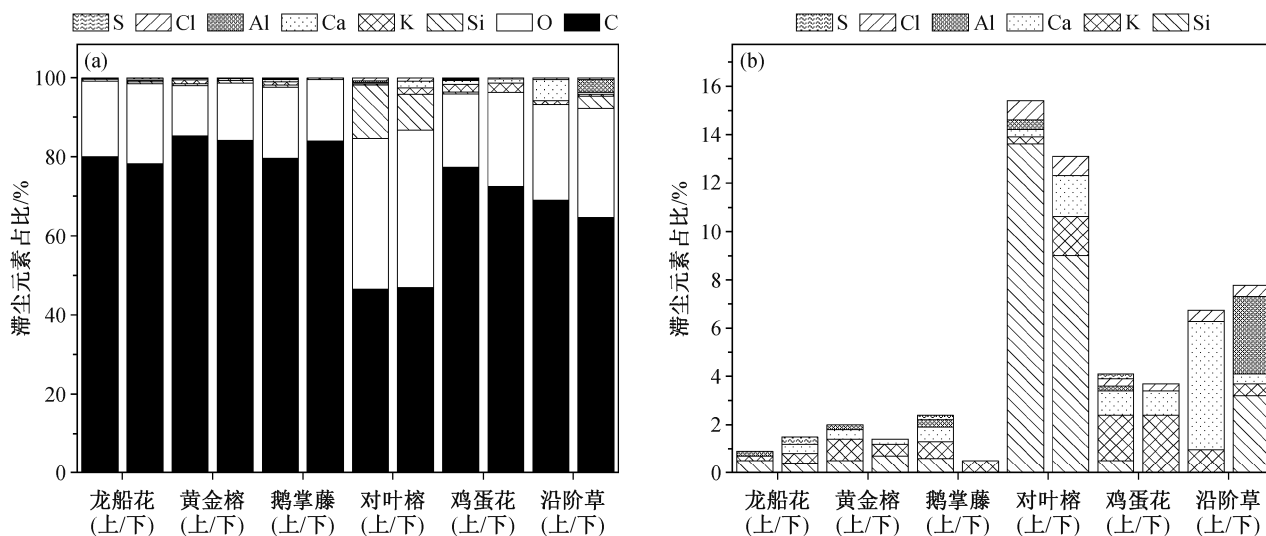


图 5 6 种园林植物叶片上、下表面滞尘元素组成特征能谱分析结果(点扫描)(a)和滞尘元素组成特征(C 和 O 除外)(b)
Fig. 5 Energy spectrum analysis results of element component characteristics of retained particles on the upper and lower leaves of the six garden plants (point scanning) (a) and composition characteristics of dust retention elements (except for C and O) (b)

表 3 6 种园林植物滞尘采样时的气象和空气质量参数
Table 3 Meteorological parameters and air quality parameter of the six garden plants during sampling

采样植物	温度/℃	湿度/%	主风向	风速/(m·s ⁻¹)	PM _{2.5} /(μg·m ⁻³)	PM ₁₀ /(μg·m ⁻³)
对叶榕和鸡蛋花	29.02±1.44	92.11±4.94	南西南	1.11±1.10	9.12±2.10	19.03±9.04
黄金榕和鹅掌藤	29.62±1.42	89.03±5.92	南西南	2.32±1.83	9.22±2.02	22.12±6.03
龙船花和沿阶草	29.21±2.62	76.84±12.62	东北	2.52±1.22	12.01±7.21	32.45±13.26

说明: 气象数据来源于校内 E 栋楼顶气象监测站, 空气质量数据来源于距研究样地较近的华侨城监测站, 均为采样前 24 小时内数据。

表 4 环境因子及园林植物滞尘特征的相关性分析
Table 4 Correlation coefficients between the environmental factors and the dust retention characteristics of garden plants

环境因子	单位叶面积总滞尘量	单位叶面积滞尘量		
		$\alpha > 10 \mu\text{m}$	$3 \mu\text{m} < \alpha < 10 \mu\text{m}$	$0.15 \mu\text{m} < \alpha < 3 \mu\text{m}$
温度	0.55	-0.82*	-0.13	0.80
湿度	-0.02	0.55	0.44	0.23
主风向	0.08	0.39	0.41	0.38
风速	0.38	-0.96**	-0.42	0.35
PM _{2.5} 浓度	-0.08	-0.39	-0.41	-0.38
PM ₁₀ 浓度	0.04	-0.58	-0.45	-0.21

注: *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

3 结论

本文通过野外采样、实验分析、显微观测和数据分析, 研究深圳市 6 种常见园林植物的滞尘能力, 分析污染物颗粒的粒径和元素组成以及环境因子对植物滞尘的影响, 得到如下结论。

1) 深圳市 6 种园林植物的滞尘能力排序为黄金

榕>鹅掌藤>对叶榕>龙船花>沿阶草>鸡蛋花。

2) 6 种园林植物的滞尘以 $\alpha > 10 \mu\text{m}$ 的粗颗粒物为主, 质量占比为 59.21%~88.92% (黄金榕除外)。鹅掌藤对粗颗粒物的滞尘能力最强 ($0.34 \pm 0.20 \text{ g/m}^2$), 黄金榕对粒径为 $3 \mu\text{m} < \alpha < 10 \mu\text{m}$ ($0.51 \pm 0.15 \text{ g/m}^2$) 以及 $0.15 < \alpha < 3 \mu\text{m}$ ($0.14 \pm 0.07 \text{ g/m}^2$) 颗粒物的滞留能力最强。

3) 6种园林植物叶片表面的气孔、褶皱、沟槽、絮状凸起和绒毛有利于颗粒物的滞留, 滞尘颗粒物的主要元素组成为O, Si和Al。

4) 6种园林植物叶片表面滞留的大颗粒物($\alpha > 10 \mu\text{m}$)易受风速和温度的影响, 较小粒径($3 \mu\text{m} < \alpha < 10 \mu\text{m}$ 和 $0.15 \mu\text{m} < \alpha < 3 \mu\text{m}$)的颗粒物受环境因子的影响较小。

参考文献

- [1] Kampa M, Castanas E. Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 2008, 151(2): 362–367
- [2] Han L, Zhou W, Li W. Increasing impact of urban fine particles (PM_{2.5}) on areas surrounding Chinese cities. *Scientific Reports*, 2015, 5: 12467
- [3] WHO. Air quality guidelines — global update 2005 [EB/OL]. (2005–10–20) [2014–08–04]. http://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/index.html
- [4] Yin H, Xu L. Comparative study of PM₁₀/PM_{2.5}-bound PAHs in downtown Beijing, China: concentrations, sources, and health risks. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 177: 674–683
- [5] Maher B A, Ahmed I A M, Karloukovski V, et al. Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(39): 10797–10801
- [6] Yin H, Pizzol M, Jacobsen J B, et al. Contingent valuation of health and mood impacts of PM_{2.5} in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 630: 1269–1282
- [7] Liu J, Cao Z, Zou S, et al. An investigation of the leaf retention capacity, efficiency and mechanism for atmospheric particulate matter of five greening tree species in Beijing, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 616: 417–426
- [8] Muñoz D, Aguilar B, Fuentealba R, et al. Environmental studies in two communes of Santiago de Chile by the analysis of magnetic properties of particulate matter deposited on leaves of roadside trees. *Atmospheric Environment*, 2017, 152: 617–627
- [9] Selmi W, Weber C, Rivière E, et al. Air pollution removal by trees in public green spaces in Strasbourg city, France. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 17: 192–201
- [10] Nowak D J, Hirabayashi S, Bodine A, et al. Modeled PM_{2.5} removal by trees in ten US cities and associated health effects. *Environmental Pollution*, 2013, 178: 395–402
- [11] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, et al. Evaluating the impact of individual leaf traits on atmospheric particulate matter accumulation using natural and synthetic leaves. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 30: 98–107
- [12] Wang L, Gong H, Liao W, et al. Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *Science of the Total Environment*, 2015, 532: 420–434
- [13] Yan J, Lin L, Zhou W, et al. Quantifying the characteristics of particulate matters captured by urban plants using an automatic approach. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 39: 259–267
- [14] Shao F, Wang L, Sun F, et al. Study on different particulate matter retention capacities of the leaf surfaces of eight common garden plants in Hangzhou, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 652: 939–951
- [15] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, et al. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 2012, 427: 347–354
- [16] Perini K, Ottelè M, Giuliani S, et al. Quantification of fine dust deposition on different plant species in a vertical greening system. *Ecological Engineering*, 2017, 100: 268–276
- [17] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 20: 249–253
- [18] Guerrero-Leiva N, Castro S A, Rubio M A, et al. Retention of atmospheric particulate by three woody ornamental species in Santiago, Chile. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2016, 227(12): 1–9
- [19] 高君亮, 张景波, 孙非, 等. 内蒙古磴口县10种园林绿化树种单位叶面积滞尘量研究. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(8): 176–180
- [20] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 等. 细颗粒物(PM_{2.5})与植被关系的研究综述. *生态学杂志*, 2013, 32(8): 2203–2210
- [21] 俞学如. 南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其与叶面结构的关系[D]. 南京: 南京林业大学, 2008
- [22] Xie C, Yan L, Liang A, et al. Understanding the wash off processes of PM_{2.5} from leaf surfaces during

- rainfall events. *Atmospheric Environment*, 2019, 214: 116844
- [23] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology*, 2000, 6(8): 995–1003
- [24] 刘灿. 深圳市园林植物多样性与植物景观构成研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006
- [25] 禹海群, 李楠, 林平义, 等. 深圳市常见园林植物滞尘效应初步研究. *江苏林业科技*, 2012, 39(2): 1–5
- [26] 王凤珍, 李楠, 胡开文. 景观植物的滞尘效应研究. *现代园林*, 2006(6): 37–41
- [27] 俞文政, 刘海涛. 近35年深圳市气候变化与城市化发展的关联性. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 50(1): 85–91
- [28] 黄叶梅. 珠三角地区立体绿化植物选择与配置研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016
- [29] 张哲, 蒋冬月, 徐艳, 等. 深圳市公园绿地植物配置. *东北林业大学学报*, 2011, 39(3): 102–105
- [30] Rodríguez S, Querol X, Alastuey A, et al. Comparative PM₁₀-PM_{2.5} source contribution study at rural, urban and industrial sites during PM episodes in Eastern Spain. *Science of the Total Environment*, 2004, 328(1/2/3): 95–113
- [31] 张丽华. 福州市廊道绿化植被生态建设研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010
- [32] 江胜利, 金荷仙, 许小连. 杭州市常见道路绿化植物滞尘能力研究. *浙江林业科技*, 2011(6): 48–52
- [33] Cai M, Xin Z, Yu X. Spatio-temporal variations in PM leaf deposition: a meta-analysis. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 207–218
- [34] 黄向华, 陈光水, 陈丽梅, 等. 大学园区主要道路绿化树种滞尘效应研究. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11(1): 9–13
- [35] 蔡燕徽. 城市基调树种滞尘效应及其光合特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010
- [36] 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): 288–298
- [37] 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. *生态学报*, 2020, 40(1): 1–10
- [38] 贾彦, 吴超, 董春芳, 等. 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
- [39] 张灵芝. 城市主干道路绿带滞尘效应研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015
- [40] 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. *西南林业大学学报*, 2017, 37(4): 47–53
- [41] Kang P, Yang Y, Junyu Z, et al. Emission factor and inventory of paved road fugitive dust sources in the Pearl River Delta region. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10): 2657–2663
- [42] Lee C S L, Li X D, Zhang G, et al. Heavy metals and Pb isotopic composition of aerosols in urban and suburban areas of Hong Kong and Guangzhou, South China — evidence of the long-range transport of air contaminants. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(2): 432–447
- [43] Bonifacio H F, Maghirang R G, Trabue S L, et al. TSP, PM₁₀, and PM_{2.5} emissions from a beef cattle feedlot using the flux-gradient technique. *Atmospheric Environment*, 2015, 101: 49–57
- [44] Huang X F, Yun H, Gong Z H, et al. Source apportionment and secondary organic aerosol estimation of PM_{2.5} in an urban atmosphere in China. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(6): 1352–1362
- [45] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 等. 北京市6种针叶树叶面附着颗粒物的理化特征. *应用生态学报*, 2007, 18(3): 487–492
- [46] 张俊叶, 俞菲, 刘晓东, 等. 城市森林植物叶面颗粒物中重金属和多环芳烃的研究进展. *中国农业科技导报*, 2019, 21(10): 140–147
- [47] 庄大伟, 周春玲, 孙学武. 常用草坪的滞尘能力研究. *现代园艺*, 2013(1): 15–16
- [48] Kulmala M, Vehkamäki H, Petaja T, et al. Formation and growth rates of ultrafine atmospheric particles: a review of observations. *Journal of Aerosol Science*, 2004, 2(2): 143–176
- [49] 张斌斌, 伍文忠, 孙丰宾, 等. 冬季不同植物配植类型绿地内PM_{2.5}致变因素研究. *中国城市林业*, 2019, 17(5): 25–30