

## 7 种绿化灌木叶片表型及表皮超微形态与滞尘能力的关系

朱栗琼, 龙孟元, 杨凤兰, 吕佳峻, 招礼军\*

广西大学林学院/广西森林生态与保育重点实验室, 广西南宁 530004

**摘要:** 为选择滞尘能力优良的绿化植物, 以南宁市大学路分车隔离带栽植的软枝黄蝉 (*Allamanda cathartica*)、金叶假连翘 (*Duranta erecta* ‘Golden Leaves’)、黄金榕 (*Ficus microcarpa* ‘Golden Leaves’)、朱槿 (*Hibiscus rosa-sinensis*)、龙船花 (*Ixora chinensis*)、台琼海桐 (*Pittosporum pentandrum* var. *formosanum*) 和鹅掌藤 (*Heptapleurum arboricola*) 等 7 种灌木为研究对象, 观察植株叶片形态及叶片表皮的超微形态特征, 收集和测量单位叶面积滞尘量。结果表明: 该路段植物叶片冬季滞尘量多于夏季, 尘粒质量中大于  $PM_{10}$  的占比多于  $PM_{10}$  或  $PM_{2.5}$ ; 所研究的种类中, 金叶假连翘的滞尘能力最为突出, 龙船花和朱槿滞留大于  $PM_{10}$  颗粒物的能力较强, 而黄金榕和台琼海桐滞留  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  等细微颗粒的优势较明显; 经量化赋值后主成分分析, 叶片是否被毛、叶缘类型、一级侧脉数量、侧脉末梢网结状态和叶脉在叶面的分布状态 5 个指标包含了植物形态特征与滞尘能力关系的大部分信息; 叶片上表皮细胞垂周壁凸出和蜡质层饰纹呈颗粒状滞尘量大, 呈条纹状的角质层饰纹过粗或者过细、排列整齐的不利于滞尘功能的发挥, 下表皮气孔外拱盖外缘的角质层呈多层环状结构的有利于黏附更多尘粒。在滞尘策略上 7 种植物在叶片宏观和表皮超微形态特征上表现出一定差异性, 金叶假连翘的滞尘量大, 叶色多样, 景观效果突出, 值得大力推广; 大气颗粒较多且粒径大的环境, 推荐选用龙船花和朱槿, 在颗粒物较细等级占优的环境中可多栽植黄金榕和台琼海桐。

**关键词:** 绿化灌木; 叶片表型; 表皮超微形态; 滞尘能力; 生物净化; 植株形态

中图分类号: Q944.56

文献标识码: A

## Relationship Between Leaf Phenotype, Epidermal Ultrastructure and Dust Retaining Capability of Seven Greening Shrubs

ZHU Liqiong, LONG Mengyuan, YANG Fenglan, LYU Jiajun, ZHAO Lijun\*

College of Forestry, Guangxi University / Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation, Nanning, Guangxi 530004, China

**Abstract:** In order to select urban greening plants with excellent dust retaining capability, seven species of shrubs, including *Allamanda cathartica*, *Duranta erecta* ‘Golden Leaves’, *Ficus microcarpa* ‘Golden Leaves’, *Hibiscus rosa-sinensis*, *Ixora chinensis*, *Pittosporum pentandrum* var. *formosanum* and *Heptapleurum arboricola*, growing in the road green belt of University Road in Nanning, were studied to observe the leaf morphology and the ultrastructure characteristics of leaf epidermis, and collected and measured the dust retaining capability per unit leaf area at the same time. The results revealed that the plant leaves had more dust retaining in winter than in summer in this section of the road studied, and that dust particles greater than  $PM_{10}$  were accumulated more than  $PM_{10}$  or  $PM_{2.5}$ . Among the species studied, *D. erecta* GL had the most outstanding ability of dust retaining, *I. chinensis* and *H. rosa-sinensis* were more dust retaining capability with particle diameters more than  $PM_{10}$ , while *F. microcarpa* GL and *P. pentandrum* var. *formosanum* had more clear advantage in dust retaining with fine particles such as  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ . According quantified principal component analysis, the five characteristic including: whether the leaf blade was hairy or not, leaf margin type, the number of primary lateral veins, the netting status of the terminal lateral veins and the distribution status of the leaf veins on the leaf surface contained most of the information on the relationship between leaf morphological traits and

收稿日期 2022-07-04; 修回日期 2022-08-08

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 31560061, No. 31260093); 广西林业科技推广示范项目 (桂林科研[2022]第 1 号)。

作者简介 朱栗琼(1969—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 植物发育生物学及植物生理生态。\*通信作者 (Corresponding author): 招礼军 (ZHAO Lijun), E-mail: zhlj-70@163.com。

dust retaining capability. Among the ultrastructure features of the leaf epidermis, projecting anticlinal wall of the upper epidermal cell and granular ornamentation of waxy layer contributed to stronger dust retaining than flocculent ornamentation of waxy layer. Striped ornamentation of cuticle that was too thick or too thin and neatly arranged were not benefit to dust retaining. And the cuticle of the outer edge of stomatal outer arch of the lower epidermis of the leaf had a multilayered ring structure which facilitating the adhesion of more dust particles. The findings of this study could help to provide a reference for the selection of plants for greening and air purification in different types of atmospheric pollution environments and give us a theoretical basis for the study of plant dust retaining. In the strategy of dust retaining, seven plants showed some differences in the macro-morphological characteristics of leaves and ultrastructure of epidermis. *D. erecta* GL had the largest dust retaining capability, various leaf colors and outstanding landscape effects, so it is worth popularizing. In the dust environment dominated by large particulate matter, *I. chinensis* and *H. rosa-sinensis* are recommended, while in the environment with fine dust particles, *F. microcarpa* GL and *P. pentandrum* var. *formosanum* can be planted more.

**Keywords:** greening shrub; leaf phenotype; epidermal ultrastructure; dust retaining capability; bio-purification; plant morphology

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.06.023

随着工农业的发展及汽车的普及,我国大气污染日益严重<sup>[1-3]</sup>,据 2020 年国民经济和社会发展统计公报显示,纳入监测的 337 个城市中有 40.1%的城市空气质量未达标。劣质空气对环境、交通、城市建筑<sup>[4]</sup>及人类的身体健康影响极大,特别易引起呼吸道<sup>[5-6]</sup>和心血管等疾病<sup>[7]</sup>。因此,大气污染的治理迫在眉睫,各项治理工程中除减少污染物的排放外,植物因其具有得天独厚的净化和美化环境功能,在大气污染的防治,尤其是粉尘治理中具有重要作用。国内外对此也有不少的研究和报道,一方面已探明我国大气污染中的尘粒物主要包括 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 和 TSP (总悬浮颗粒)等<sup>[8]</sup>,粒径越细小治理越艰难,对人体健康的危害也越大<sup>[9]</sup>;另一方面掌握了植物减少大气颗粒物的原理,主要是通过叶片停滞、吸附、黏附等 3 种方式过滤和吸收大气颗粒物<sup>[10]</sup>;再有就是植物治理大气的效应上与多方面的因素有关,首先直接受污染类型及生态因子<sup>[11]</sup>等外因影响;其与覆盖率呈正比,汪洋等<sup>[12]</sup>报道城市中高密度的建设用地会导致污染程度增加,而随着林地面积的比重增加,大气颗粒物浓度相应降低,TALLIS 等<sup>[13]</sup>通过模型预测了伦敦 GLA 区域的植物滞尘能力,若将森林覆盖率提高到 30%,树冠层每年滞留的 PM<sub>10</sub>将达到 1109~2379 t;同时还与植物种类有极大关系<sup>[14]</sup>,在类群比较时,HWANG 等<sup>[15]</sup>认为针叶树种的滞尘能力普遍大于阔叶树种,乔木比灌木受到的关注更多,但也有研究认为,灌木滞尘能力强于乔木<sup>[14]</sup>,灌木是捕获 PM<sub>2.5</sub>效率最高的植物生活型类群之一<sup>[16]</sup>。

在植物个体特征比较时,宏观上植物的生长状态<sup>[17]</sup>、形态、高度、枝条着生角度等特征<sup>[18-19]</sup>,及微观上叶片的气孔密度和大小、叶表面的覆盖物,如表皮毛、蜡质层、角质层的存在与否、形态和数量等<sup>[20-22]</sup>均与植物的滞尘量相关。因此,在城市大气环境治理中,如何选择具有较强滞尘能力的植物种类进行绿化是一项重要和有意义的工作。本研究以南宁市城市道路分隔带常用的 7 种绿化灌木为研究对象,分别在夏季和秋季对这些植物的叶片滞尘量和颗粒物粒径进行测定,分析和探讨植株的宏观和叶片表皮超微形态特征与滞尘能力的关系,期望筛选出具有较强滞尘能力的绿化灌木,为相似生态环境的城市园林绿化植物的选择提供指导,为植物滞尘原理的研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

1.1.1 研究区概况 广西南宁市地处北回归线南侧,位于 107°45'~108°51'E、22°13'~23°32'N 之间,全市平均海拔 76.5 m。该市属湿润的亚热带季风性气候,气候温和,夏长冬短,年平均气温为 21.6 °C,最高温为 40.4 °C,最低温为 -2.4 °C,年均降水量为 1304.2 mm,夏季高温多雨,冬季温暖干燥。土壤为第四纪红土发育的赤红壤,有机质含量较低。植被丰富,四季常青,素有“绿城”的美誉<sup>[23]</sup>。

采样地点位于南宁市西侧的大学东路,广西大学与广西民族大学之间地段。研究对象为栽植

于机动车道与非机动车道之间隔离带的 7 种南宁市常用绿化灌木植物: 软枝黄蝉 (*Allamanda cathartica*)、金叶假连翘 (*Duranta erecta* ‘Golden Leaves’)、黄金榕 (*Ficus macrocarpa* ‘Golden Leaves’)、朱槿 (*Hibiscus rosa-sinensis*)、龙船花 (*Ixora chinensis*)、台琼海桐 (*Pittosporum pentandrum* var. *formosanum*) 和 鹅掌藤 (*Heptapleurum arboricola*), 所有植物均无乔木和建筑物遮挡, 处于全光照环境下, 生长正常, 高度基本一致, 绿化效果良好。

1.1.2 样品采集 于 2018 年 7 月(夏季)和 2019 年 1 月(冬季)雨后第 7 天在研究地点采集 7 种灌木叶片样品。每种灌木样株至少采集 10 株, 间距 5 m 以上, 于植株中上部外侧的各方向剪取健康完整的叶片(根据单叶面积大小采集数量 30~50 片), 剪取时尽量不要抖动, 并置于自封袋中, 带回实验室处理。另外各选取 5 棵样株, 在植株向阳面分别选择 4 个枝条, 剪取自顶芽向下数的第 5 节成熟健康叶片, 自封袋封装后, 置于冰盒内带回实验室, 用于叶表皮微形态观察。

## 1.2 方法

1.2.1 植株及叶片形态观察 野外观察记录研究植株的生长状况、枝条伸展方向等外形特征, 包括质地、被毛状况、叶形、叶缘、一级侧脉对数、与表皮细胞的相对位置、末梢网结状况等。根据物体重量运动及黏附原理, 参照前人的研究结果<sup>[14-21]</sup>, 现将上述定性特征结果进行赋值, 具体见表 1。

表 1 南宁市 7 种绿化灌木叶片形态特征量化值转换情况  
Tab. 1 Quantification of leaf morphological characteristics of seven greening shrubs in Nanning

形态 Form	编码值 Coded value	类型 Type
枝条方向	3: 平举; 2: 斜上; 1: 下垂	多态性状
叶片质地	3: 纸质; 2: 草质; 3: 革质	多态性状
叶面被毛	2: 疏毛; 1: 无毛	二元性状
叶片形态	3: 下宽; 2: 对称; 1: 上宽	多态性状
叶缘类型	3: 锯齿; 2: 波状; 1: 全缘	多态性状
一级侧脉对数	3: $\geq 20$ ; 2: 10-20; 1: $\leq 10$	多态性状
叶脉分布状态	3: 上凸; 2: 下凸; 1: 平	多态性状
叶脉末梢网结	3: 明显; 2: 不明显; 1: 分散	多态性状

1.2.2 叶片总滞尘量的测定 运用水洗-滤膜法<sup>[24]</sup>测定叶片滞尘中不同的粒径质量: 将叶片浸泡于蒸馏水中, 并清洗封口袋 3 次, 清洗液倒入浸泡液中, 每种植物进行 3 次重复。2 h 后, 将叶片捞出并洗净, 洗脱溶液与浸泡液一起为待测液。烘

干后用万分之一天平称重的滤纸过滤, 再将滤纸置于 60 °C 的烘箱中烘干至恒重, 滤膜烘干前后的质量差值即为叶片滞留粉尘的总质量。

1.2.3 叶片滞尘各粒径量及叶片滞尘量的测定 同 1.2.2 中方法获得的待测液置于过滤器中, 与真空泵相连接, 分别用孔径 10、2.5、0.2  $\mu\text{m}$  的滤膜依次过滤, 每次转换过滤器时需洗净前一过滤器上残留, 并转入下一过滤器。留在滤膜上的分别为粒径  $>10 \mu\text{m}$ 、 $2.5 \mu\text{m} < \text{粒径} \leq 10 \mu\text{m}$ 、粒径  $\leq 2.5 \mu\text{m}$  的颗粒物。将用后的滤膜置于 60 °C 的烘箱中烘干至恒重, 用万分之一天平称量, 滤膜烘干前后的质量差值即为叶片滞留不同粒径粉尘的质量。

1.2.4 叶面积的测定 使用 CI-203 手持式激光叶面积仪测量滞尘量的相应叶片面积, 采用单位叶面积滞留颗粒物质量来衡量植物的叶片滞尘能力。

1.2.5 叶片表皮超微形态观察制片 7 种灌木各选取 6 张洗净的样叶, 于其中部近主脉附近剪取 5 mm $\times$ 5 mm 左右的样品, 2.5% 的戊二醛溶液固定 1.5 h 后, 经磷酸缓冲液冲洗 3 次, 依次用 70%、80%、90%、95%、100% 乙醇溶液梯度脱水, 每级约 10~15 min。样品干燥后喷金, 置于 phenom 飞纳台式扫描电镜下观察和拍片, 观察叶片表皮超微形态特征。

## 1.3 数据处理

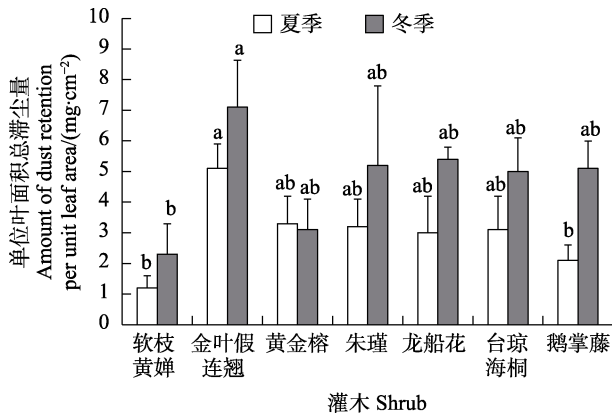
采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据整理, 采用 SPSS 23.0 软件进行统计分析, 采用 Origin 2018 软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶片滞尘量比较

南宁市 7 种灌木单位叶面积的滞尘量如图 1 所示。除黄金榕外, 其余种类在冬季的滞尘量均大于夏季, 但种间的滞尘量却存在差异。夏季的滞尘量高低顺序为金叶假连翘 $[(5.1\pm 0.8)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >黄金榕 $[(3.3\pm 0.9)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >朱槿 $[(3.2\pm 0.9)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >台琼海桐 $[(3.1\pm 1.1)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >龙船花 $[(3.0\pm 1.2)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >鹅掌藤 $[(2.1\pm 0.5)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >软枝黄蝉 $[(1.2\pm 0.4)\text{mg}/\text{cm}^2]$ 。其中金叶假连翘分别与鹅掌藤、软枝黄蝉达到显著差异 ( $P < 0.05$ ), 其余种间均差异不显著; 冬季的滞尘量高低顺序为金叶假连翘 $[(7.1\pm 1.5)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >龙船花 $[(5.4\pm 1.2)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >朱槿 $[(5.2\pm 2.6)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >鹅掌藤 $[(5.1\pm 0.9)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >台琼海桐 $[(5.0\pm 1.1)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >黄金榕 $[(3.1\pm 1.0)\text{mg}/\text{cm}^2]$ >软枝黄蝉 $[(2.3\pm 1.0)\text{mg}/\text{cm}^2]$ , 除金叶假连翘与软

枝黄蝉单位叶面积滞尘量存在显著差异 ( $P<0.05$ ) 外, 其余种间均差异不显著。由此可见, 无论夏季, 还是冬季, 7 种灌木的单位叶面积滞尘量均是金叶假连翘最大, 软枝黄蝉最小, 且二者差异显著。



不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicates significant difference ( $P<0.05$ ).

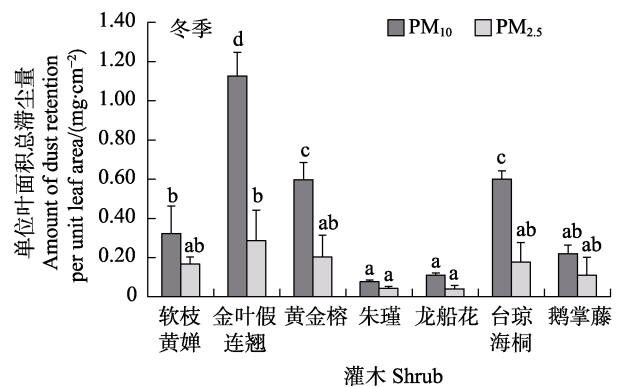
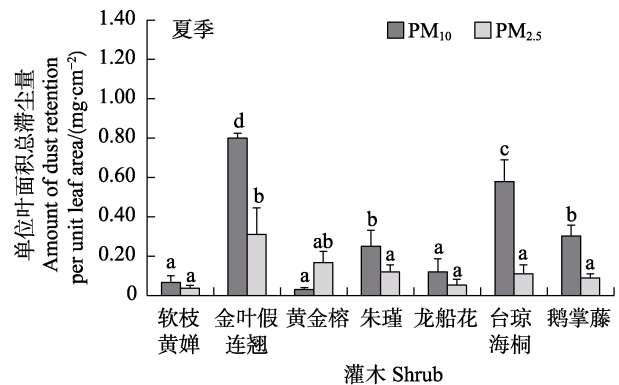
图 1 南宁市 7 种绿化灌木单位叶面积滞尘量

Fig. 1 Total dust retention per unit leaf area of seven greening shrubs in Nanning

## 2.2 叶片滞留不同粒径颗粒物的比较

南宁市 7 种绿化灌木叶片表面滞尘量不同, 而且滞留不同大小颗粒物的能力也不同 (图 2)。黄金榕在夏季滞留的  $\text{PM}_{2.5} > \text{PM}_{10}$ , 其余种类在夏、冬的滞尘粒径量均是  $\text{PM}_{10} > \text{PM}_{2.5}$ 。夏季金叶假连翘、软枝黄蝉、黄金榕单位面积内  $\text{PM}_{10}$  滞留量低于冬季, 其余 4 种灌木单位面积内  $\text{PM}_{10}$  滞留量呈夏季高于冬季的趋势。除朱瑾外, 其余灌木  $\text{PM}_{2.5}$  滞留量呈夏季高于冬季的趋势。在夏季, 滞留  $\text{PM}_{10}$  能力大小依次为金叶假连翘  $[(1.127 \pm 0.121)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  黄金榕  $[(0.597 \pm 0.088)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  台琼海桐  $[(0.600 \pm 0.043)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  鹅掌藤  $[(0.303 \pm 0.055)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  朱瑾  $[(0.250 \pm 0.082)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  龙船花  $[(0.120 \pm 0.067)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  软枝黄蝉  $[(0.067 \pm 0.034)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  黄金榕  $[(0.030 \pm 0.011)\text{mg}/\text{cm}^2]$ , 其中金叶假连翘和台琼海桐差异显著 ( $P<0.05$ ), 且分别与其他种类差异显著 ( $P<0.05$ ), 朱瑾与鹅掌藤二者间差异不显著, 但分别与其他 5 种灌木差异显著 ( $P<0.05$ ), 龙船花、软枝黄蝉、黄金榕两两之间差异不显著; 滞留  $\text{PM}_{2.5}$  的能力大小依次为金叶假连翘  $[(0.310 \pm 0.136)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  黄金榕  $[(0.167 \pm 0.058)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  朱瑾  $[(0.120 \pm 0.036)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  台琼海桐  $[(0.110 \pm 0.046)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  鹅掌藤  $[(0.090 \pm 0.021)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  龙船花  $[(0.053 \pm 0.030)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  软枝黄蝉  $[(0.037 \pm$

$0.015)\text{mg}/\text{cm}^2]$ , 除金叶假连翘和黄金榕二者间差异不显著外, 分别与其他 5 种灌木差异均显著 ( $P<0.05$ ), 而这 5 种灌木之间差异不显著。



不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

Different lowercase letters indicates significant difference ( $P<0.05$ ).

图 2 南宁市 7 种绿化灌木单位面积滞留  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  数量

Fig. 2 Amount of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  per unit leaf area of seven greening shrubs in Nanning

在冬季, 滞留  $\text{PM}_{10}$  能力大小依次为金叶假连翘  $[(1.127 \pm 0.121)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  黄金榕  $[(0.597 \pm 0.088)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  台琼海桐  $[(0.600 \pm 0.043)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  软枝黄蝉  $[(0.323 \pm 0.141)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  鹅掌藤  $[(0.220 \pm 0.044)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  龙船花  $[(0.110 \pm 0.011)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  朱瑾  $[(0.077 \pm 0.009)\text{mg}/\text{cm}^2]$ , 其中金叶假连翘与其他 6 种差异均显著 ( $P<0.05$ ), 黄金榕和台琼海桐二者间差异不显著, 但分别与其他灌木差异均显著 ( $P<0.05$ ), 其余二者间差异不显著; 滞留  $\text{PM}_{2.5}$  能力大小依次为金叶假连翘  $[(0.287 \pm 0.155)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  黄金榕  $[(0.203 \pm 0.111)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  台琼海桐  $[(0.177 \pm 0.100)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  软枝黄蝉  $[(0.167 \pm 0.037)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  鹅掌藤  $[(0.110 \pm 0.092)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  朱瑾  $[(0.043 \pm 0.010)\text{mg}/\text{cm}^2] >$  龙船花  $[(0.040 \pm 0.018)\text{mg}/\text{cm}^2]$ , 除金叶假连翘与黄金榕二者差异显著外, 其余种间差异均不显著。

## 2.3 绿化灌木的主要形态特征

2.3.1 枝条及叶片的形态特征 南宁市 7 种绿化灌木的枝条方向及叶片外形主要特征见表 2。软枝黄蝉的枝条呈斜下状态, 黄金榕和鹅掌藤略平举, 其余 3 种灌木斜举向上。叶片的质地分为纸质、草质和革质 3 种。叶片有 3 种灌木植物被毛, 基本位于叶背的主脉处, 均较稀少。叶形有对称的椭圆和非对称的披针形及倒卵形, 叶缘类型分别是全缘、锯齿和波状, 叶脉除朱槿有基生三出脉的趋势外, 均为羽状网脉, 朱槿和台琼海桐 2 种灌木的侧脉末梢游离于叶肉中, 处于近开放式状态外, 其余 4 种灌木的侧脉末梢在叶缘处形成明显或不太明显的封闭式网结。

2.3.2 主要形态特征的量化及主成分分析 叶片

主要形态特征经量化后应用主成分分析。叶片形态指标的特征根和特征向量如表 3 所示。前 3 个主成分的方差累积贡献率合计为 82.679%<sup>[25]</sup>, 可较好的解释几种灌木与滞尘关系的形态特征。其中叶片的叶面被毛和叶缘类型对第一主成分有较强的正向负荷, 说明这 2 个特征是第一主成分的主导因子; 一级侧脉数量和叶脉末梢网结对第二主成分有较强的正向负荷, 说明这 2 个特征是第二主成分的主导因子; 叶脉在叶面的分布状态对第三主成分有较强的正向负荷, 说明它是第三主成分的主导因子。在对叶片形态进行观察时应着重对这 5 个成分进行分析, 特别是第一主成分中的 2 个主导因子, 从而快速从形态上推断这几种灌木的滞尘能力。

表 2 南宁市 7 种绿化灌木叶片形态特征

Tab. 2 Leaf morphological characteristics of seven greening shrubs in Nanning

种类 Species	枝条方向 Branch aspect	质地 Leaf texture	被毛 Leaf hair	叶形 Leaf shape	叶缘 Leaf margin	一级侧脉特征 Primary lateral vein		
						对数 Pairs	分布状态 Distribution	末梢 Ending
软枝黄蝉	下垂	纸质	疏毛	长椭圆形	微波状	10±2	上平下凸	网结
金叶假连翘	斜上	纸质	稀柔毛	倒卵形	锯齿	3±1	上凸下平	不明显
黄金榕	平举	革质	无	椭圆形	全缘	20±3	上凸下平	网结
朱槿	斜上	草质	疏毛	卵形	锯齿	3±2	上平下凸	分散
龙船花	斜上	纸质	无	披针形	全缘	11±2	上平下凸	网结
台琼海桐	斜上	革质	无	倒卵形	全缘	7±3	上平下凸	分散
鹅掌藤	平举	革质	无	倒卵形	全缘	6±1	两面近平	不明显

表 3 形态特征定量化主成分分析

Tab. 3 Principal component analysis of morphological quantification

指标 Index	主成分 1 Principal component 1	主成分 2 Principal component 2	主成分 3 Principal component 3
枝条方向	-0.779	-0.092	0.347
叶片质地	0.812	0.362	-0.221
叶面被毛	0.939	-0.119	0.131
叶片形态	0.295	0.501	-0.422
叶缘类型	0.882	-0.258	0.277
一级侧脉对数	-0.257	0.924	0.142
叶脉分布状态	0.297	0.453	0.794
叶脉末梢网结	-0.079	0.901	-0.09
特征值	3.173	2.342	1.099
方差贡献率/%	39.659	29.279	13.741
累计贡献率/%	39.659	68.938	82.679

## 2.4 气孔及表皮细胞外纹饰超微特征

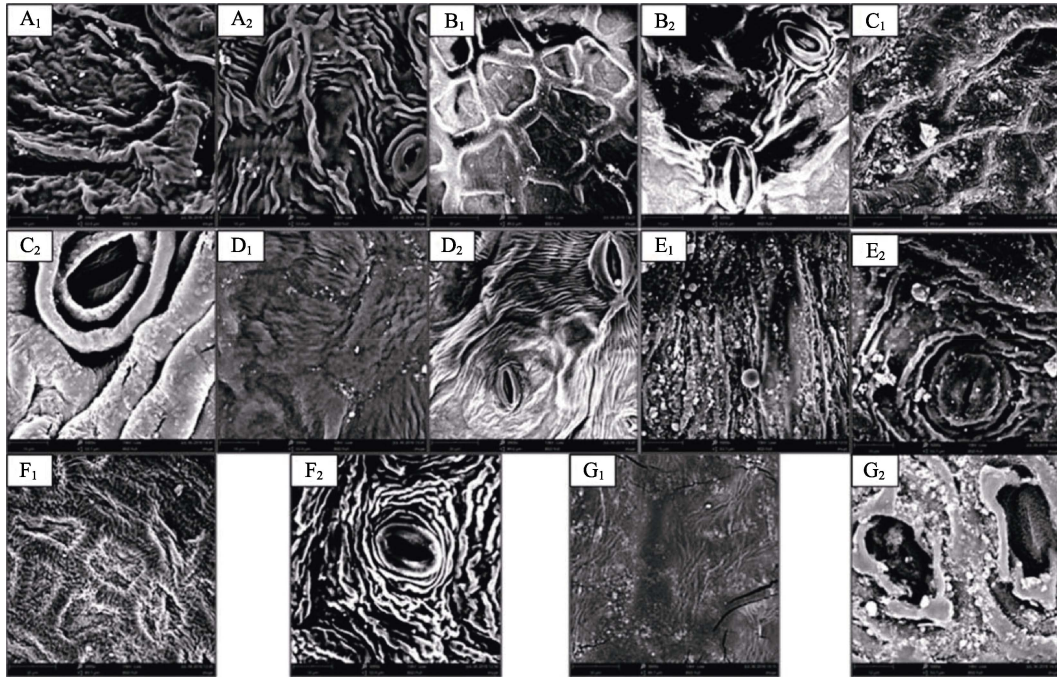
经观察发现, 7 种绿化灌木叶片的气孔均只分布于下表皮, 上表皮无气孔。叶片气孔及表皮

细胞结构见图 3, 表皮超微特征的主要差异见表 4。金叶假连翘和鹅掌藤的气孔陷于表皮细胞之下, 其余的均与表皮细胞持平。除黄金榕和鹅掌藤外, 其他 5 种灌木的气孔外拱盖的外缘角质层均构成 1~2 层环形结构。气孔外拱盖表面有平滑与粗糙 2 种。表皮的蜡质纹饰以颗粒状为主, 黄金榕则以絮状为主, 有的二者兼而有之。表皮的角质层纹饰均以条形为主, 但有粗、细之别, 大部分条纹无规则分布, 而朱槿的下表皮和台琼海桐的上表皮的角质层纹饰呈辐射状排列。

## 3 讨论

### 3.1 灌木叶片滞尘能力及南宁市大学路大气尘粒特点

从本研究结果看, 在相似的环境中, 金叶假连翘在不同季节、不同粒径等级的滞尘能力均是最大, 而软枝黄蝉则表现较差; 龙船花和朱槿在



A: 台琼海桐; B: 金叶假连翘; C: 朱槿; D: 龙船花; E: 软枝黄蝉; F: 鹅掌藤; G: 黄金榕。1: 叶片上表皮; 2: 叶片下表皮。软枝黄蝉和鹅掌藤上表皮放大 5000 倍, 其余放大 3000 倍。

A: *Pittosporum pentandrum* var. *formosanum*; B: *Duranta erecta* 'Golden Leaves'; C: *Hibiscus rosa-sinensis*; D: *Ixora chinensis*; E: *Allamanda cathartica*; F: *Heptapleurum arboricola*; G: *Ficus microcarpa* 'Golden Leaves'. 1: Upper epidermis of blade; 2: Lower epidermis of blade. The upper epidermis of *A. cathartica* and *H. arboricola* was magnified 5000 times, and the others were magnified 3000 times.

图 3 南宁市 7 种绿化灌木叶表皮超微形态

Fig. 3 Ultrastructure of leaf epidermis of seven greening shrubs in Nanning

表 4 气孔及表皮细胞外纹饰超微特征

Tab. 4 Ultrastructure characteristics of epidermal stomata and extracellular ornamentation

种类 Species	气孔 位置 Position of stomata	气孔外拱盖 外缘角质层 Outer margin of cuticle	气孔外 拱盖面 Outer stomata ledge	表皮蜡质层纹饰 Ornamentation of wax layer		表皮角质层纹饰 Ornamentation of cuticle	
				上表皮 Upper epidermis	下表皮 Lower epidermis	上表皮 Upper epidermis	下表皮 Lower epidermis
				软枝黄蝉	平	1 层, 环形	近平滑
金叶假连翘	平	1~2 层, 不完全环形	平滑	颗粒	颗粒	条纹	条纹
黄金榕	凹	1 层, 环形	粗糙	絮状	絮状	条纹	粗条纹
朱槿	平	多层, 环形	近平滑	颗粒	颗粒	条纹	辐射状粗条纹
龙船花	平	1 层, 环形	粗糙	颗粒	颗粒	条纹	条纹
台琼海桐	凹	无环形	近平滑	颗粒	絮状	细线纹	条纹
鹅掌藤	凹	1 层, 环形	粗糙	絮状	颗粒	辐射状粗条纹	粗条纹

单位面积上的滞尘量也位居前列,但在滞留  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  的能力上表现不佳,说明 2 种灌木滞留的粉尘主要由粒径大于  $PM_{10}$  的颗粒物组成;而黄金榕和台琼海桐则相反,滞留  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  等细微颗粒的能力较突出。当环境一致的状况下,植物对大气的影响主要还是与自身的性状相关,如叶片结构<sup>[14]</sup>、叶面积指数<sup>[22]</sup>及其他物种特征<sup>[26]</sup>。

除黄金榕外,其他 6 种灌木的单位叶面积滞尘量均是冬季大于夏季,说明南宁市该路段冬季

大气颗粒含量可能大于夏季,但也有可能是由于南宁市夏季雨量多于冬季,夏季叶片被雨水冲刷更干净等原因的影响。具体的分级称量时,在  $PM_{10}$  等级中,有 3 种灌木是夏季低于冬季,4 种灌木是夏季高于冬季;在  $PM_{2.5}$  等级中,除朱槿外,其他 6 种灌木均是夏季多于冬季。由此推算,在单位叶面积滞尘量中,大部分是由大于  $PM_{10}$  的尘粒贡献的,即该路段的大气污染颗粒质量还是以大于  $PM_{10}$  的为主。虽然  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  质量占

比无优势,但根据 GB3095—2012 标准,汪洋等<sup>[12]</sup>测出南宁市辖区 2014—2016 年中每一年约一半的时间  $PM_{2.5}$  超出一级标准,  $PM_{10}$  超出一级标准的时间到达近 80%, 空气质量堪忧。 $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  颗粒小, 数量多, 传播的距离远, 对环境和生物的危害也更大<sup>[9]</sup>, 应给予足够的关注。

### 3.2 灌木叶片形态特征与滞尘能力的关系

本研究中,唯一枝条下垂的灌木——软枝黄蝉的滞尘量是所有供试植物中最低的,证实了植物枝条下垂不利于粉尘的滞留。而枝条平举的黄金榕和鹅掌藤的滞尘量与枝条斜上的其他 4 种灌木相比差异不大,这可能还与树冠的通透性、叶柄伸展角度、叶片形态和大小等特征有关<sup>[17, 19]</sup>。MELESE-ENDALEW 等<sup>[27]</sup>利用流体动力学模型构建模拟实验,通过 3D 树冠不同构型形成冠内不同气流速度,达到颗粒物在树冠内停留时间增加,以此实现增强颗粒物滞留叶片的效果。TIWARI 等<sup>[28]</sup>也认为植物冠幅、冠层郁闭度等因子对植物的滞尘量有明显影响。在通过定量转换和主成分分析后,本研究认为叶面是否被毛、叶缘类型、一级侧脉数量、侧脉末梢网结状态和叶脉在叶面的分布状态 5 个指标在指示植物滞尘能力上有重要作用。VAN RENTERGHEM 等<sup>[29]</sup>认为叶片上的绒毛、自体分泌的粘液有利于吸附更多颗粒物;李超群<sup>[30]</sup>等也发现被毛的叶片或边缘有锯齿的叶片为滞尘量较大的植物类型。

### 3.3 灌木叶片表皮超微形态结构与滞尘能力的关系

大部分植物叶片的正面处于迎风面,因此上表皮细胞切向面的一些特性与滞尘关系密切。叶片的上表皮细胞垂周壁突起加强了叶表面的粗糙程度,利于滞尘,如金叶假连翘和台琼海桐;蜡质层和角质层饰纹形状与叶片的滞尘能力具有明显的相关性,蜡质层为絮状的,本身稳定性不够,因而对滞尘也不利,如软枝黄蝉和鹅掌藤;但如果数量多,对黏附细微颗粒也应该有利,如黄金榕。表皮角质层纹饰呈密集的条纹、方向不一致、粗细中等的滞尘量的较高,如金叶假连翘和台琼海桐;相反,软枝黄蝉和鹅掌藤的上表皮角质层纹饰排列方向较一致、条纹过粗或者过细。SIMON 等<sup>[21]</sup>认为气孔的大小和分布是影响叶片滞尘量的最重要因素,气孔越大越多,越有利于滞尘。本研究的 7 种绿化灌木植物的气孔仅分布

于下表皮,对滞尘量的影响分析尚缺乏数据说明,但发现气孔外拱盖外缘角质层呈现封闭的环形,特别是多层结构有利于颗粒的停留,滞尘量提高,如金叶假连翘和朱瑾。大气中的颗粒物可被吸附或被渗入进叶片表皮的蜡质或角质层中<sup>[20]</sup>。因此,研究叶片表皮及其附属物的形态结构有利于对植物滞尘能力的判断。

### 参考文献

- [1] 李宏姣, 梁桂云, 陈志明, 刘慧琳, 黄炯丽, 杨俊超, 莫招育, 张达标, 林华. 2015 年 10 月南宁市区典型大气污染过程成因分析[J]. 环境监测管理与技术, 2019, 31(1): 39-43. LI H J, LIANG G Y, CHEN Z M, LIU H L, HUANG J L, YANG J C, MO Z Y, ZHANG D B, LIN H. Formation mechanism of a typical air pollution process in October 2015 in Nanning[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2019, 31(1): 39-43. (in Chinese)
- [2] 薛亦峰, 周震, 聂滕, 齐珺, 聂磊, 王占山, 李云婷, 李雪峰, 田贺忠. 2015 年 12 月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1593-1601. XUE Y F, ZHOU Z, NIE T, QI J, NIE L, WANG Z S, LI Y T, LI X F, TIAN H Z. Exploring the severe haze in Beijing during December, 2015: pollution process and emissions variation [J]. Environmental Science, 2016, 37(5): 1593-1601. (in Chinese)
- [3] 梁俊宁, 高敏, 王珊. 西安市一次严重霾污染天气特征及气象条件分析[J]. 环境工程, 2016, 34(8): 104-109. LIANG J N, GAO M, WANG S. Analysis on meteorological condition and characteristics of a severe haze pollution in Xi'an, China[J]. Environmental Engineering, 2016, 34(8): 104-109. (in Chinese)
- [4] BALDWIN N, GILANI O, RAJA S, BATTERMAN S, GANGULY R, HOPKE P, BERROCAL V, ROBINS T, HOOGTERP S. Factors affecting pollutant concentrations in the near-road environment[J]. Atmospheric Environment, 2015, 115: 223-235.
- [5] FEIGIN V L, ROTH G A, NAGHAVI M, PARMAR P, KRISHNAMURTHI R, CHUGH S, MENSAH G A, NORRVING B, SHIUE I, NG M, ESTEP K, CERCY K, MURRAY C J L, FOROUZANFAR M H. Global burden of stroke and risk factors in 188 countries, during 1990—2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013[J]. The Lancet Neurology, 2016, 15(9): 913-924.
- [6] TONNE C, WILKINSON P. Long-term exposure to air pollution is associated with survival following acute coronary syndrome[J]. European Heart Journal, 2013, 34(17):

- 1306-1311.
- [7] COHEN A J, BRAUER M, BURNETT R, ANDERSON H R, FROSTAD J, ESTEP K, BALAKRISHNAN K, BRUNEKREEF B, DANDONA L, DANDONA R, FEIGIN V, FREEDMAN G, HUBBELL B, JOBLING A, KAN H D, KNIBBS L, LIU Y, MARTIN R, MORAWSKA L, POPE C A, SHIN H, STRAIF K, SHADDICK G, THOMAS M, VAN DINGENEN R, VAN DONKELAAR A, VOS T, MURRAY C J L, FOROUZANFART M H. Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015[J]. *The Lancet*, 2017, 389: 1907-1918.
- [8] VALAVANIDIS A, FIOTAKIS K, VLACHOGIANNI T. Airborne particulate matter and human health: toxicological assessment and importance of size and composition of particles for oxidative damage and carcinogenic mechanisms[J]. *Journal of Environmental Science & Health, Part C: Environmental Carcinogenesis Reviews*, 2008, 26: 339-362.
- [9] 潘璐, 倪洋, 许珺辉, 李宏宇, 董伟, 杨迪, 刘越, 朱益, 单娇, 杨玄, 陈亚红, 郭新彪, 邓芙蓉. 室内外 PM<sub>2.5</sub> 污染水平对慢性阻塞性肺病患者呼出气炎症指标的影响[J]. *环境与健康杂志*, 2016, 1(33): 1-4.
- PAN L, NI Y, XU J H, LI H Y, DONG W, YANG D, LIU Y, ZHU Y, SHAN J, YANG X, CHEN Y H, GUO X B, DENG F R. Effects of outdoor and indoor PM<sub>2.5</sub> on exhaled biomarkers of patients with chronic obstructive pulmonary disease[J]. *Journal of Environment and Health*, 2016, 1(33): 1-4. (in Chinese)
- [10] PRUSTY B A K, MISHRA P C, AZEEZ P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(2): 228-235.
- [11] 路艳, 卞贵建, 季洪亮. 道路绿化树种滞尘的季节效应与叶片特征关系[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(3): 269-275.
- LU Y, BIAN G J, JI H L. Relationship between seasonal effects of dust retention and leaf characteristics of tree species for road greening[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2020, 40(3): 269-275. (in Chinese)
- [12] 汪洋, 赵银军. 南宁市城区大气颗粒物变化与环境影响因素分析[J]. *环境工程*, 2018, 36(增刊): 211-217.
- WANG Y, ZHAO Y J. Atmospheric particulates variation and environmental influence factors analysis in Nanning city[J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(Supper): 211-217. (in Chinese)
- [13] TALLIS M, TAYLOR G, SINNETT D, FREER-SMITH P. 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.
- [14] 段嵩岚, 闫淑君, 田高飞, 金妍超, 靳莎, 吴艳芳, 刘震. 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, JIN Y C, JIN S, WU Y F, LIU Z. 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. (in Chinese)
- [15] HWANG H J, YOON S J, AHN K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(38): 6987-6994.
- [16] NGUYEN T, YU X X, ZHANG Z M, LIU M M, LIU X H. Relationship between types of urban forest and PM<sub>2.5</sub> capture at three growth stages of leaves[J]. *Journal of Environmental Science*, 2015, 27: 33-41.
- [17] 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[J]. *浙江林业科技*, 2011, 31(6): 45-49.
- JIANG S L, JIN H X, XU X L. Studies on dust retention capacity of road green plants in West Lake district of Hangzhou[J]. *Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology*, 2011, 31(6): 45-49. (in Chinese)
- [18] 贺勇, 李磊, 李俊毅, 李伟星, 穆立蕾. 北方 30 种景观树种净化空气效益分析[J]. *东北林业大学学报*, 2010, 38(5): 37-39.
- HE Y, LI L, LI J Y, LI W X, MU L Q. Air purification efficiency of thirty species of landscape trees in northern China[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2010, 38(5): 37-39. (in Chinese)
- [19] 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 capability of common street trees in Guangzhou municipality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(8): 2604-2614. (in Chinese)
- [20] DZIERZANOWSKI K, POPEK R, GAWROŃSKA H, SABO A, GAWROŃSKI S W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, 13(10): 1037-1046.
- [21] SIMON E, BARANYAI E, BRAUN M, CSERHÁTI C, FÁBIÁN I, TÓTHMÉRÉSZ B. Elemental concentrations in deposited dust on leaves along an urbanization gradient[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 490: 514-520.
- [22] MORAKINYO T E, LAM Y F. Simulation study of dispersion and removal of particulate matter from traffic by road-side vegetation barrier[J]. *Environmental Science and*

- Pollution Research, 2016, 23: 6709-6722.
- [23] 朱栗琼, 袁娟, 韦立迪, 韦艳春, 招礼军. 大花紫薇大小孢子的发生及雌雄配子体的发育[J]. 植物研究, 2018, 38(2): 182-188.  
ZHU L Q, YUAN J, WEI L D, WEI Y C, ZHAO L J. Sporogenesis and gametogenesis of *Lagerstroemia speciosa*[J]. Bulletin of Botanical Research, 2018, 38(2): 182-188. (in Chinese)
- [24] 洪秀玲, 杨雪媛, 杨梦尧, 仲禹璇, 李辰, 张桐, 刘玉军. 测定植物叶片滞留 PM<sub>2.5</sub> 等大气颗粒物质量的方法[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(5): 147-154.  
HONG X L, YANG X Y, YANG M Y, ZHONG Y X, LI C, ZHANG T, LIU Y J. A method of quantifying the retention of PM<sub>2.5</sub> and other atmospheric particulates by plant leaves[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(5): 147-154. (in Chinese)
- [25] 谢春平, 韩维栋, 王华辰, 刘大伟, 杨通文, 王章芬. 中国桃金娘的地理分布及气候限制性因子分析[J]. 热带作物学报, 2022, 43(2): 409-417.  
XIE C P, HAN W D, WANG H C, LIU D W, YANG T W, WANG Z F. Geographical distribution of *Rhodomyrtus tomentosa* and the limiting climate factors in China[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(2): 409-417. (in Chinese)
- [26] LEONARD R J, MCARTHUR C, HOCHULI D F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 20: 249-253.
- [27] MELESE-ENDALEW A, HERTOOG M, VERCAMMEN J, BAETENS K, DELETE M, BLOCKEN B, BAELMANS M, NICOLAI B, RAMON H, VERBOVEN P. Using integrated 3D canopy architecture and porous media models for prediction of orchard pesticide applications[J]. Aspects of Applied Biology, 2008, 84: 425-432.
- [28] TIWARI A, KUMAR P, BALDAUF R, ZHANG K M, PILLA F, DI SABATINO S, BRATTICH E, PULVIRENTI B. Considerations for evaluating green infrastructure impacts in microscale and macroscale air pollution dispersion models[J]. Science of the Total Environment, 2019, 672: 410-426.
- [29] VAN RENTERGHEM T, BOTTELDOOREN D, VERHEYEN K. Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth[J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(10): 2404-2425.
- [30] 李超群, 钟梦莹, 武瑞鑫, 刘月华, 潘多, 邵新庆. 常见地被植物叶片特征及滞尘效应研究[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 2050-2055.  
LI C Q, ZHONG M Y, WU R X, LIU Y H, PAN D, SHAO X Q. Study on leaf characteristics and dust-capturing capability of common ground cover plants[J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(12): 2050-2055. (in Chinese)