

## 杭州 8 种绿化树种滞纳 TSP 和 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的效应研究

吴翠蓉<sup>1</sup>, 江波<sup>1</sup>, 张露<sup>2</sup>, 孙华江<sup>1</sup>, 黄玉洁<sup>1</sup>

(1. 浙江省林业科学研究院, 浙江 杭州 310023; 2. 武义县自然资源和规划局, 浙江 武义 321200)

**摘要:**为研究杭州市绿化树种叶片对各径级大气颗粒物的滞纳效应,以银杏 *Ginkgo biloba*, 海棠花 *Malus spectabilis*, 东京樱花 *Cerasus × yedoensis*, 玉兰 *Yulania denudate*, 枫香树 *Liquidambar formosana*, 樟 *Cinnamomum camphora*, 木犀 *Osmanthus fragrans* 和乐昌含笑 *Michelia chapensis* 8 个树种为研究材料,使用气溶胶再生器对其叶片上 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1</sub> 的滞留量进行测定,从单位叶面积和单位绿化面积尺度比较各树种对各粒级颗粒物的滞留能力,并通过扫描电镜观察比较样本叶片的微观结构,分析气孔密度、气孔面积、绒毛密度等叶面特征对植物滞尘能力的影响。结果表明,从单位叶面积滞尘量来看,木犀和海棠花单位叶面积滞纳 TSP 和 PM<sub>10</sub> 能力最强,樟最低,滞纳 PM<sub>2.5</sub> 能力海棠花显著高于其他树种 ( $P < 0.05$ ),其次为木犀,枫香树和樟较低,各树种叶片滞纳 PM<sub>1</sub> 的能力排序与 PM<sub>2.5</sub> 基本一致;从单位绿地面积滞尘量来看,木犀滞纳 TSP 和 PM<sub>10</sub> 能力最强,显著高于其他树种 ( $P < 0.05$ ),海棠花、樟和银杏较低,PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 滞纳能力趋势一致,均为木犀最高,其次为海棠花、枫香树、乐昌含笑、银杏、东京樱花,樟和玉兰较低;银杏和海棠花叶片对粒径 2.5 μm 及以下小颗粒占总滞尘量的比例显著高于其他树种 ( $P < 0.05$ ),樟和玉兰较低;不同树种单位叶面积颗粒物滞留量与气孔密度、气孔面积和绒毛密度呈正相关关系;气孔密度与 TSP 含量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ )。

**关键词:** 绿化树种; 杭州; 滞尘量; 叶面积; 叶片微观结构

**中图分类号:** X173      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3776(2020)05-0013-08

## Study on Adsorption of TSP, PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> by 8 Greening Tree Species in Hangzhou

WU Cui-rong<sup>1</sup>, JIANG Bo<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>2</sup>, SUN Hua-jiang<sup>1</sup>, HUANG Yu-jie<sup>1</sup>

(1. Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, China; 2. Wuyi Natural Resources and Planning Bureau of Zhejiang, Wuyi 321200, China)

**Abstract:** In May 2019, leaves of *Ginkgo biloba*, *Malus spectabilis*, *Cerasus × yedoensis*, *Yulania denudate*, *Liquidambar formosana*, *Cinnamomum camphora*, *Osmanthus fragrans* and *Michelia chapensis* in 2 places in Hangzhou, Zhejiang province were collected 7 days after rain. Determinations on TSP, PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> content were implemented by aerosol regenerator. The result showed that on the terms of per unit leaf area, *O. fragrans* and *M. spectabilis* had the strongest ability to absorb TSP and PM<sub>10</sub>, while *C. camphora* was the lowest. The ability of *M. spectabilis* to absorb PM<sub>2.5</sub> was significantly higher than that of the other tree species ( $P < 0.01$ ), followed by *O. fragrans*, *L. formosana* and *C. camphora* were lowest, the PM<sub>1</sub> adsorption capacity was similar with that of PM<sub>2.5</sub>. On the terms of per unit green area, the contents of TSP and PM<sub>10</sub> of *O. fragrans* was significantly higher than that of other tree species. *M. spectabilis*, *C. camphora* and *G. biloba* had lower content. PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> adsorption capacity of *O. fragrans* was the highest, followed by *M. spectabilis*, *L. formosana*, *M. chapensis*, *G. biloba*, *C. × yedoensis*, *C. camphora* and *Y. denudate*. The proportion of small particles with size of 2.5 μm or less in *G. biloba* and *M. spectabilis* was significantly higher than that in the other tree species, while that in *C. camphora* and *Y. denudate* was the lowest. The retention of particulate matter per unit leaf area had positive relation with stomatal density, stomatal area and villus density of different tree species. There was a significant positive correlation between stomatal density and TSP content.

**Key words:** greening tree species; Hangzhou; particulates adsorption capacity; leaf area

收稿日期: 2020-03-21; 修回日期: 2020-07-26

基金项目: 浙江省科技厅省属科研院所扶持专项(2019F1065-8)

作者简介: 吴翠蓉, 硕士研究生, 从事大气环境分析检测; E-mail: 546768336@qq.com。通信作者: 黄玉洁, 副研究员, 从事森林生态研究; E-mail: yujie2004\_h@163.com。

随着我国城市化进程的快速推进和现代工业与经济水平的迅速发展,能源和资源的消耗量不断增高,大气颗粒物 PM (Particulate matter) 污染已经成为当前最严重的环境问题之一<sup>[1]</sup>,已经严重威胁到人类的健康和生活<sup>[2]</sup>,尤其是空气动力学当量直径( $D$ ) $D \leq 2.5 \mu\text{m}$ 和 $2.5 \mu\text{m} < D \leq 10 \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物 PM<sub>2.5</sub>和 PM<sub>10</sub><sup>[3]</sup>。PM<sub>10</sub>易进入呼吸道,对人体健康产生影响;而细颗粒物 PM<sub>2.5</sub>可以穿过肺部存留在肺的深处,是对人体健康危害最大的污染物之一<sup>[4]</sup>。此外,城市中过量的总悬浮颗粒物(TSP)还会对大气能见度造成较明显的影响,其中,粒径较小的细颗粒物可能会引起区域灰霾以及光化学烟雾现象,进而加剧温室效应<sup>[5]</sup>。有研究表明,植物可吸附捕捉大气颗粒物,从而在一定程度上消纳、减轻大气污染,对改善空气质量具有显著的效果<sup>[6]</sup>。植物叶片因其表面性能(绒毛、气孔等结构)可以有效地滞留和固定空气中的悬浮颗粒物,使其脱离大气环境<sup>[7]</sup>,因此,植物的滞尘能力已经逐渐变成城市园林绿化树种选择的一个重要指标<sup>[4]</sup>。目前,我国学者在不同植物在滞留大气颗粒物能力及机理等方面已开展了一些研究,柴一新等<sup>[8]</sup>、方颖等<sup>[9]</sup>、栗志峰等<sup>[10]</sup>、贺勇等<sup>[11]</sup>、王兵等<sup>[12]</sup>、刘玲等<sup>[13]</sup>、江胜利<sup>[14-15]</sup>等、李恩宝<sup>[16]</sup>分别对哈尔滨、南京、北京、杭州等地不同树种的颗粒物滞尘能力做了对比分析,结果表明不同树种、不同地点植物的滞尘作用均不相同。不同树种滞尘能力差异基本表现为:乔木>灌木>草地,针叶树种>阔叶树种,常绿阔叶林>落叶阔叶林。

由于不同城市的大气污染特征不同,植物分布也存在明显差异,针对地域特性和植物分布特点,本文选取杭州市 8 种绿化树种,使用气溶胶再发生器对其叶片上各径级颗粒物的滞留量进行测定,结合叶面微观结构,探讨不同树种吸附颗粒物的能力,筛选出具有较强滞尘能力的植物种类,以期在城市绿化中的植物种类配置与优化提供理论依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 采样点选择

供试树种所在地点位于杭州植物园和武林小广场万向公园,其中,杭州植物园,植被覆盖率达 80%以上,并且采样点距离周围道路较远,园内植物受汽车尾气、工厂以及人类活动影响相对较少;武林小广场万象公园附近行人密度大,车流量大,受机动车排放尾气影响较大。

### 1.2 供试材料及采集方法

根据采样点现有植物种类进行树种选择和样品采集,在武林小广场和杭州植物园选择树龄相近、生长未受其他树木干扰的 8 种杭州市常见园林绿化植物进行叶片采样,其中包括 5 种落叶乔木:银杏 *Ginkgo biloba*, 海棠花 *Malus spectabilis*, 东京樱花 *Cerasus × yedoensis*, 玉兰 *Yulania denudate*, 枫香树 *Liquidambar formosana*; 3 种常绿乔木:樟 *Cinnamomum camphora*, 木犀 *Osmanthus fragrans*, 乐昌含笑 *Michelia chapensis*, 见表 1。

选择 2019 年 5 月中距最近一次降雨 7 天后采样,所有样品采集均在一天内完成。采样时每个树种选择树龄相近,植株生长良好、叶面无病虫害,且胸径、树高、冠幅相近的样本,在树冠外围东、南、西、北 4 个不同方向均匀采集生长良好的足量叶片,采样高度在 2~6 m。每个树种选择 5 株做样本,采集的叶样合并,得到混合样品,叶片采集下来后尽量小心不抖动迅速装入保鲜袋后封好,标明采样时间和地点,带回实验室进行处理。

### 1.3 单位叶面积颗粒物滞留量

叶片样品的 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 吸附量使用气溶胶再发生器(QRJZFSQ-I)通过风蚀原理测得<sup>[18]</sup>。将待测叶片样本放入气溶胶再发生器的料盒内,通过搅动、吹强风再去静电等处理将叶片上的颗粒物再次吹起,制成气溶胶,再结合 Dustmate 粉尘颗粒物检测仪(英国 Turkey 公司生产)获取制成气溶胶中的 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 质量浓

表 1 供试植物基本性状  
Table 1 Species, tree height, crown diameter and single leaf area of tested plants

植物种类	树高/m	冠幅直径/m	单叶面积/cm <sup>2</sup>
银杏	10.0±2.5	4.5±1.5	27.98±11.5
樟	14.5±2.0	11.5±3.5	32.73±6.8
木犀	4.5±1.7	4.0±1.5	24.05±10.8
海棠花	3.5±0.8	3.0±0.5	18.96±4.2
东京樱花	4.5±1.0	3.0±0.5	35.4±16.1
玉兰	8.5±2.5	4.0±1.5	99.64±40.6
枫香树	18±1.5	13.0±2.5	65.85±21.5
乐昌含笑	5.5±1.6	4.5±1.5	37.15±10.1

度, 进而推算出其在叶片上的吸附量, 每个树种 3 次重复; 再利用叶面积扫描仪和叶面积软件计算放入料盒中所有叶片叶面积, 由式 (1) [18] 计算单位叶面积的 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 吸附量。

$$M = m/S \quad (1)$$

式中,  $M$  为单位叶面积的 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 吸附量 ( $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ );  $m$  为放入气溶胶再发生器叶片的 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub> 吸附量 ( $\mu\text{g}$ );  $S$  为放入气溶胶再发生器料盒中所有叶片的叶面积 ( $\text{cm}^2$ )。

#### 1.4 叶面积指数

每个树种选取 3 株标准植物作为样本, 以  $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 30\text{ cm}$  作为一个单位样方, 在每个样本的树冠上随机选择 3 个样方, 计算每个样方内的叶片平均数  $C$ ; 随机从样本树冠的不同部位剪下 15 片叶片测量其叶面积, 取平均值作为该树种的单位叶面积  $A$  ( $\text{cm}^2$ ); 该树种的叶面积指数  $LAI$  [21-22] 为:

$$LAI = C \times A / (30 \times 30) \quad (2)$$

#### 1.5 单位绿地面积滞尘量

单位绿地面积滞尘量 ( $W$ ) 的计算公式为:

$$W = Q \times LAI \quad (3)$$

式中,  $Q$  是供试树种单位叶面积的颗粒物滞纳量。

#### 1.6 叶表面微观结构观察

另取各树种生长状况良好的健康叶片, 立即封存于塑料袋内带回实验室。选取样本叶片上、下表面避开主叶脉, 随机从不同部位用刀片切割成  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$  的样品, 用双面胶黏在样品台上, 经过喷金处理后, 用 Quanta 200FEG 场发射环境扫描电子显微镜 (美国 FEI 公司) 在低真空模式下观察叶片表面结构, 选择适当的比例进行拍摄。选择 10 张放大 500 倍的扫描电镜图, 计算叶片下表面 (上表面未发现气孔) 的气孔密度以及叶片上、下表面的绒毛密度。用 ImageJ 图像处理软件, 随机选择 50 个气孔, 测量其长、宽、面积以及部分树种叶表面微形态结构的尺寸 [20]。

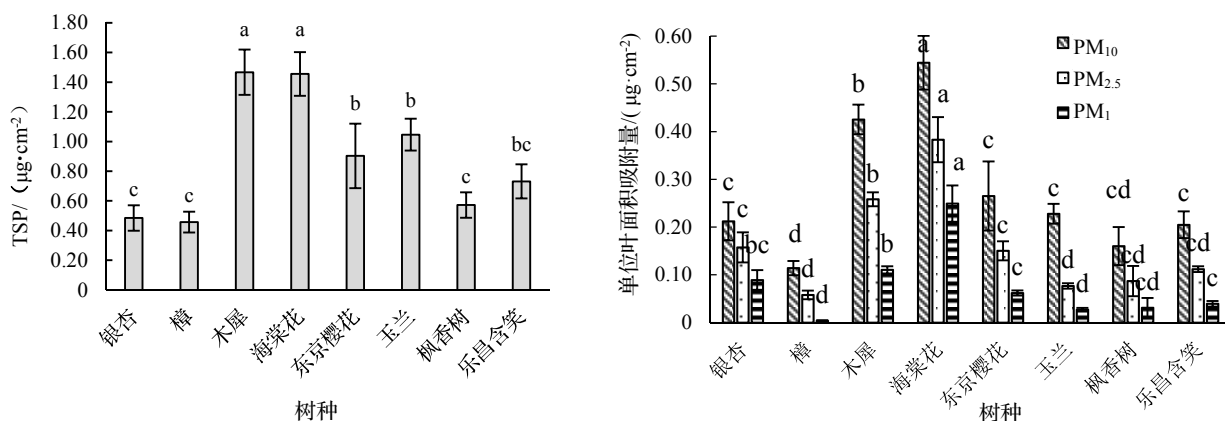
#### 1.7 数据处理

利用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析法、多重比较和相关性分析, 图表使用 Excel 2007 绘制完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同树种单位叶面积滞尘量比较

从图 1 可看出, 不同树种对不同粒径颗粒物的滞纳能力存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。滞纳 TSP 的能力排序为木犀 > 海棠花 > 玉兰 > 东京樱花 > 乐昌含笑 > 枫香树 > 银杏 > 樟, 其中, 木犀和海棠花单位叶面积滞纳 TSP 的能力最强, 分别为  $(1.46 \pm 0.15) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和  $(1.45 \pm 0.14) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 玉兰、东京樱花和乐昌含笑次之, 分别为  $(1.04 \pm 0.11)$ 、 $(0.90 \pm 0.22)$ 、 $(0.73 \pm 0.12) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 枫香树、银杏和樟最小, 分别为  $(0.57 \pm 0.09)$ 、 $(0.48 \pm 0.08) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和  $(0.46 \pm 0.07) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 单位叶面积滞纳 TSP 最大的木犀是樟的 3.17 倍; 各树种叶片滞纳 PM<sub>10</sub> 的能力排序与 TSP 基本一致, 叶片滞纳 PM<sub>10</sub> 能力最强的树种为海棠花和木犀, 分别为  $(0.54 \pm 0.06)$ 、 $(0.43 \pm 0.03) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 其次是东京樱花、玉兰和银杏, 分别为  $(0.27 \pm 0.07)$ 、 $(0.23 \pm 0.02)$ 、 $(0.21 \pm 0.04) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 能力较弱的为枫香树和樟, 仅为  $(0.16 \pm 0.04)$ 、 $(0.11 \pm 0.01) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ; 滞纳 PM<sub>2.5</sub> 能力排序为海棠花 > 木犀 > 银杏 > 东京樱花 > 乐昌含笑 > 枫香树 > 玉兰 > 樟, 其中, 海棠花和木犀单位叶面积滞纳 PM<sub>2.5</sub> 的能力最强, 分别为  $(0.38 \pm 0.07) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和  $(0.25 \pm 0.04) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 银杏、东京樱花、乐昌含笑和枫香树次之, 分别为  $(0.16 \pm 0.03)$ 、 $(0.15 \pm 0.02)$ 、 $(0.11 \pm 0.01)$ 、 $(0.09 \pm 0.03) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 玉兰和樟最小, 分别为  $(0.07 \pm 0.02) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和  $(0.05 \pm 0.01) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 海棠滞纳 PM<sub>2.5</sub> 的能力显著高于其他树种 ( $P < 0.05$ ); 各树种叶片滞纳 PM<sub>1</sub> 的能力排序与 PM<sub>2.5</sub> 一致, 其中, 海棠花和木犀单位叶面积滞纳 PM<sub>1</sub> 的能力最强, 分别为  $(0.25 \pm 0.04) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和  $(0.11 \pm 0.01) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 银杏、东京樱花、乐昌含笑和枫香树次之, 分别为  $(0.09 \pm 0.02)$ 、 $(0.06 \pm 0.01)$ 、 $(0.04 \pm 0.01)$ 、 $(0.03 \pm 0.02) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 玉兰和樟最小, 分别为  $(0.03 \pm 0.004) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  和  $(0.01 \pm 0.002) \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 樟叶片滞纳 PM<sub>1</sub> 的能力最弱。



注：不同小写字母表示树种间单位叶面积颗粒物吸附量差异显著（ $P<0.05$ ），下同。

图1 8个树种单位叶面积 TSP,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  和  $PM_1$  的吸附量

Figure 1 TSP,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and  $PM_1$  concentrations of unit leaf area of 8 tree species

## 2.2 单位绿地面积滞尘量比较

由图2可知，木犀单位绿地面积滞纳 TSP 量显著高于其他树种（ $P<0.05$ ），其次是玉兰、乐昌含笑、枫香树和东京樱花，海棠花、樟和银杏的单位绿地面积的滞尘量相对较小。从8个树种的单位绿地面积滞尘量与其单位叶面积滞尘量排序来看，海棠花单位叶面积的滞尘量相对较大，但其单位绿地面积的滞尘量在8个树种中仅排在第6位；木犀单位叶面积的滞尘量显著高于其他树种，且因为木犀的枝叶生长繁密，所以其单位绿地面积的滞尘量也显著高于其他树种（ $P<0.05$ ）。

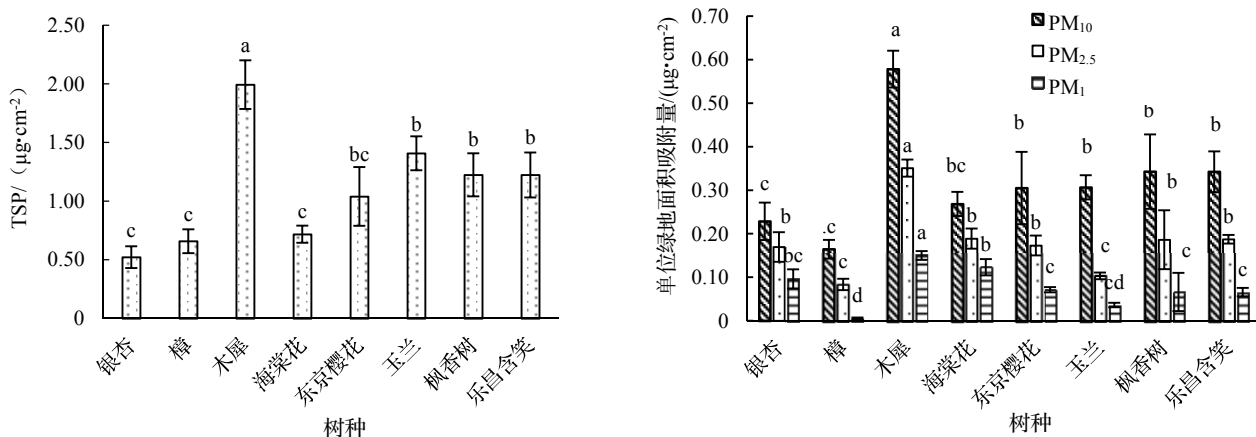


图2 单位绿地面积 TSP、 $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_1$  的吸附量

Figure 2 TSP,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and  $PM_1$  concentrations of unit green land area

## 2.3 不同采样点单位叶面积滞尘量比较

由表2可知，杭州植物园8个树种的 TSP 滞尘量在  $0.26 \sim 1.33 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  之间，而武林小广场 TSP 含量在  $0.56 \sim 1.75 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$  之间。两个采样点单位叶面积滞尘量较大者均为海棠花和木犀。

同一植物的单位叶面积滞尘量在不同采样点表现出明显的差异，武林小广场的乐昌含笑、枫香树、木犀和银杏叶片的 TSP 量高于植物园的，海棠花与樟的变化不大，玉兰和东京樱花的稍低于植物园的滞尘量。

从不同粒径在总滞尘量中的占比看，杭州植物园8个树种的  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$  在 TSP 滞留量中的占比平均均为 27.68%, 14.41%, 6.25%；武林小广场8个树种  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_1$  的滞留量分别占 TSP 滞留量的比例平均均为 32.43%, 20.60%, 9.47%，均高于杭州植物园中的树种。银杏和海棠叶片滞留粒径小于  $10 \mu\text{m}$  小颗粒的占比高于其他树种，玉兰叶片对粒径小于  $2.5 \mu\text{m}$  的小颗粒滞留能力较低，这与植物叶片自身的形态结构特征有关。

表 2 不同采样点树种单位叶面积滞尘量对比  
Table 2 Comparison of dust retention per unit leaf area of 8 species tested in different area

树种	杭州植物园				武林小广场			
	TSP/(μg·cm <sup>-2</sup> )	PM <sub>10</sub> /TSP/%	PM <sub>2.5</sub> /TSP/%	PM <sub>1</sub> /TSP/%	TSP/(μg·cm <sup>-2</sup> )	PM <sub>10</sub> /TSP/%	PM <sub>2.5</sub> /TSP/%	PM <sub>1</sub> /TSP/%
银杏	0.32±0.13	40.63	28.13	15.63	0.68±0.20	44.12	33.82	20.59
樟	0.38±0.11	26.32	13.16	2.63	0.56±0.15	23.21	12.50	1.79
木犀	1.19±0.27	22.69	9.24	4.20	1.75±0.13	33.14	23.43	9.71
海棠花	1.33±0.26	29.32	18.05	11.28	1.58±0.30	44.30	32.91	22.15
东京樱花	1.00±0.78	25.00	11.00	4.00	0.81±0.04	34.57	23.46	9.88
玉兰	1.06±0.21	20.75	7.55	2.83	1.03±0.23	23.30	6.80	1.94
枫香树	0.26±0.04	26.92	11.54	7.69	0.89±0.18	28.09	15.73	5.62
乐昌含笑	0.27±0.11	29.63	14.81	7.41	1.19±0.29	27.73	15.97	5.04

2.4 树种叶片的微观结构比较

2.4.1 不同树种叶片比较 由图 3 可知, 银杏叶片的上表面有条状细胞凸起, 排列较紧密整齐, 表面粗糙度较高, 下表面气孔呈近圆形, 孔径较大, 气孔边缘呈瘤状凸起形成沟槽, 增加了叶片下表面的粗糙度; 樟叶片的上表面光滑, 无明显凹凸结构、下表面气孔呈椭圆形, 气孔边缘突起; 木犀叶片的上表面有条形凸起和沟槽, 分布腺点, 纹理不规则, 有利于颗粒物的粘附, 下表面气孔呈近圆形, 孔径较小密集分布在下表面腺点周围; 海棠花叶片的上表面被小柔毛, 绒毛上粘连阻滞了较多细颗粒物, 叶面无明显沟槽结构, 下表面有较浅的线型纹饰, 气孔呈梭形且较密集分布; 东京樱花叶片的上表面有稀疏脉络分布, 沟槽较浅, 下表面气孔周围被毛呈网络结构, 包裹在气孔周围; 玉兰叶片的上表面呈网格状皱褶, 皱褶较浅, 沟槽较窄, 但叶表面被毛, 毛体直立较硬, 下表面气孔周围被毛, 叶毛较硬较长, 均匀分布; 枫香树叶片的上表面呈网格状皱褶, 凸起较明显, 且更均匀紧凑, 下表面有较浅网格状突起, 气孔孔径大小不一, 均匀分布; 乐昌含笑叶片的上表面网格皱褶最浅, 分布较玉兰和乐昌含笑稀疏, 下表面无明显凹凸结构。

表 3 各树种叶面特征  
Table 3 Leaf surface characteristics of different species

树种	下表面气孔密度/(N·mm <sup>-2</sup> )	下表面气孔面积/μm <sup>2</sup>	下表面沟槽宽度/μm	上表面沟槽宽度/μm	绒毛密度/(N·mm <sup>-2</sup> )
银杏	77.66±2.8	268.60±11.5	8.59±1.5	12.87±1.5	—
樟	204.33±4.5	48.28±6.5	4.01±0.5	—	—
木犀	549.66±1.5	15.02±2.8	—	—	—
海棠花	282.33±6.5	49.33±4.5	—	2.32±0.5	46.00±4.5
东京樱花	370.33±9.5	28.30±3.7	2.66±0.7	—	26.66±5.3
玉兰	388.33±2.1	87.67±9.5	14.88±3.5	20.02±6.5	18.50±5.3
枫香树	398±8.5	34.55±5.5	11.57±2.3	21.30±7.5	—
乐昌含笑	288.66±2.6	32.50±5.3	—	19.69±4.5	—

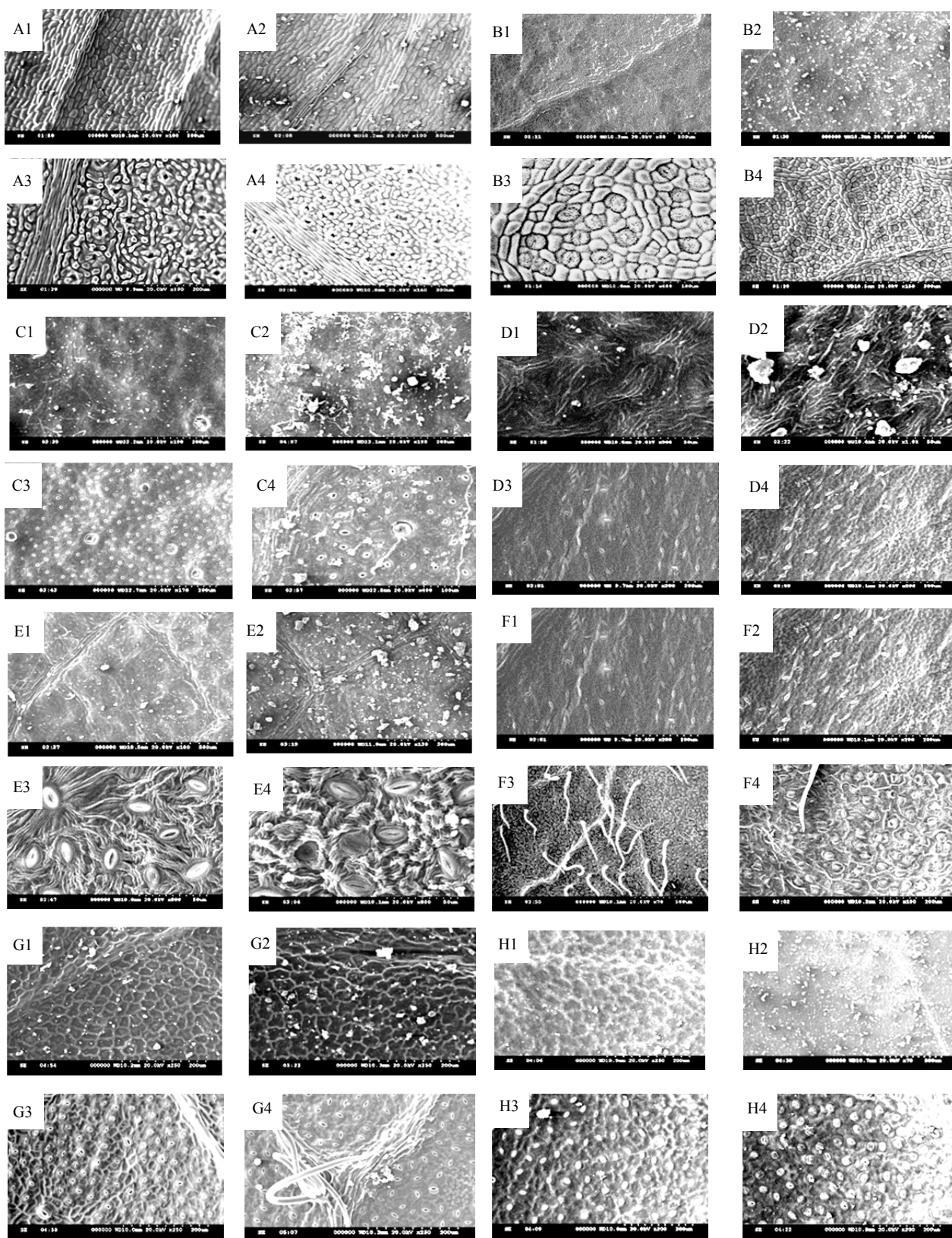
从表 3 和表 4 可以看出, 在 8 个树种中以木犀的气孔密度最大, 其次为枫香树、玉兰、东京樱花、乐昌含笑、海棠花和樟, 银杏的气孔密度最小; 银杏的气孔面积最大, 木樨气孔面积较小。不同树种单位叶面积颗粒物滞留量与气孔密度、气孔面积和绒毛密度呈正相关关系。气孔密度与 TSP 含量呈显著正相关 ( $P<0.05$ )。

2.4.2 不同采样点叶片对比 对比杭州植物园和武林小广场树种叶片的上表面, 可以发现武林小广场各树种叶片上表面黏附的颗粒物明显变多, 海棠花和玉兰叶片的上表面绒毛变细变长, 增加了叶片的粗糙度, 柔毛结构卡住了更多颗粒物, 木犀叶片的上表面腺点变少; 枫香树叶片的上表面的网格状皱褶变乱且不规则, 皱褶加深, 沟槽宽度变大, 皱褶中滞留了更多颗粒物。对比观察两个采样点树种叶片下表面的变化, 可以看出, 相比杭州植物园的树种叶片样品, 武林小广场的木犀、东京樱花、玉兰、乐昌含笑叶片下表面的气孔很多都塞满颗粒物, 气孔形状变得不规则, 边缘松弛; 东京樱花叶片下表面气孔周围的绒毛结构变得黏连板结, 缝隙间附满颗粒物; 枫香树叶片下表面叶毛变得细长卷曲, 更有利于卡住颗粒物; 而玉兰叶片下表面绒毛也变长, 但绒毛密度降低。

表 4 叶面特征与滞尘量相关性分析  
Table 4 Correlation analysis on leaf characteristics and dust retention

叶面特征	TSP	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>
气孔密度	0.702*	0.500	0.392	0.171
气孔面积	0.312	0.477	0.427	0.510
绒毛密度	0.500	0.440	0.324	0.385
上表面沟槽宽度	-0.504	0.132	0.026	0.200
下表面沟槽宽度	-0.246	-0.050	-0.084	-0.020

注: \*表示在  $P<0.05$  水平上显著相关。



A—银杏；B—樟；C—木犀；D—海棠花；E—东京樱花；F—玉兰；G—枫香树；H—乐昌含笑；  
叶片上表面（1. 杭州植物园 2. 武林小广场）；叶片下表面（3. 杭州植物园 4. 武林小广场）。

图3 不同采样点叶片上、下表面微观结构比较

Figure 3 Microstructure of leaves of 8 different tree species in different area

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

3.1.1 树种单位叶面积滞尘量与单位绿地面积滞尘量比较 树种的叶面积指数和单位叶面积的滞尘量都会影响一个树种的滞尘能力<sup>[22]</sup>。8 个树种的单位绿地面积滞尘量排序较单位叶面积滞尘量发生了变化,木犀与海棠花的单位叶面积滞尘量显著高于其他树种,但木犀的枝叶生长繁密,单叶面积也相对较大,所以其单位绿地面积滞尘量同样显著高于其他树种,海棠花因单叶面积小、叶量较少,与其单位叶面积滞尘量相比,单位绿地面积滞尘量在 8 个树种中的排序显著下降。范舒欣<sup>[36]</sup>等对北京 26 种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力研究发现槐 *Styphnolobium japonicum*, 三球悬铃木 *Platanus orientalis* 等树种,在叶片滞尘能力并不占优势的情况下,因其全株叶量较大,表现出较强的植株滞尘能力;而叶片滞尘能力较强的红叶碧桃 *Amygdalus persica* 'Atropurpurea', 紫薇 *Lagerstroemia indica* 等,由于叶量较小、枝冠结构较通透,导致植株滞尘能力下降。考虑到树体大小、叶面积、叶量及林木健康状况,单位叶面积颗粒物滞留量与叶面积指数的乘积即单位绿地面积颗粒物滞留量是评价植物滞留颗粒物功能的合理指标<sup>[21]</sup>。

3.1.2 各树种不同粒径粉尘颗粒物滞留能力比较 本研究中不同树种单位叶面积的 TSP, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>1</sub> 含量分别为 0.46~1.46, 0.11~0.54, 0.05~0.38, 0.003~0.25  $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 不同树种间相差 2~4 倍。王会霞<sup>[25]</sup>等研究表明西安城市绿化树种的滞尘能力为 0.8~38.6  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 物种间的差距最高达 40 倍以上,该研究将叶片滞纳的所有粒径的颗粒物包含在内,导致其结果高于本研究结果。另外,一些研究表明水洗称量法的结果会略大于气溶胶法。柴一新<sup>[8]</sup>等对哈尔滨市 28 个树种进行滞尘测定的结果表明,树种之间的滞尘能力可相差 2~3 倍,与本研究结果基本吻合。

本研究结果表明,东京樱花、乐昌含笑和枫香树的单位叶面积的 TSP 滞留量均大于银杏,其单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 的滞留量却均小于银杏;玉兰单位叶面积的 TSP 滞留量居第 3 位,而其 PM<sub>2.5</sub> 滞留量却居第 7 位。贾彦<sup>[27]</sup>等研究也发现,木犀叶片上 TSP 的滞纳量是红花檵木 *Loropetalum chinense* var. *rubrum* 的 2 倍,但是两个树种叶片单位叶面积的 PM<sub>2.5</sub> 滞纳量却相差不大,这说明树种单位叶面积的滞尘能力不能决定其对不同粒径颗粒物的滞纳能力。

3.1.3 叶表面微观结构对树种滞尘能力的影响 植物吸附滞纳空气颗粒物主要以叶片为载体,因此,叶片表面的微观结构,包括纹理结构、蜡质层和气孔的大小密度、绒毛的长短都会对植物叶片滞纳颗粒物的能力产生影响。刘璐等<sup>[34]</sup>研究表明,叶片表面气孔密度越大,滞尘能力越强。本研究中,木犀叶片的上表面覆有蜡质层和均匀分布的腺点,利于粉尘粘附,且其气孔密度显著高于其他树种,整体滞尘能力也高于其他树种;柴一新<sup>[8]</sup>等研究发现,植物叶表面的绒毛越细长,越有利于卡住颗粒物,使其难以脱离从而加强滞尘效果。叶表面粗糙<sup>[28]</sup>、具有大量沟槽和凸起结构<sup>[29]</sup>可以增大叶表面与空气中粉尘颗粒物之间的接触面积和物理作用力,有利于颗粒物在叶面上附着,使颗粒物不易脱落<sup>[30]</sup>;叶表面光滑或具有平滑片状组织的植物对粉尘颗粒物吸附能力较差<sup>[31]</sup>;海棠花的叶片边缘具有腺齿,且沿叶脉被有柔毛,当粉尘与叶片接触时,会被腺齿和柔毛卡住,从而有利于粉尘的滞留;而叶片表面较为平整光滑以及没有沟槽、绒毛等其他结构的樟、乐昌含笑的滞尘能力则相对较弱,而且樟的叶片边缘呈微波状,陈玮<sup>[32]</sup>等以单位叶片干质量对应的滞尘量表征不同树种的滞尘能力,结果发现叶型平阔的树种颗粒物滞纳功能较高,这与本研究结果吻合。对比不同区域的树种叶片微观结构,发现相对污染较重区域的各树种叶片绒毛及纹理有一定程度改变。Pal<sup>[23]</sup>等研究发现,植物叶片绒毛在重污染情况下会变长,叶片纹理会变得更加粗糙,这是植物为了更好地适应污染环境变化的应对策略。张维康<sup>[24]</sup>通过观察植物叶片的微观形态结构发现,污染区植物叶片外表皮细胞收缩,叶片表皮的纹理变得更加粗糙,气孔频度和绒毛长度增加。

#### 3.2 结论

(1) 杭州市 8 种绿化树种的滞尘能力差异显著 ( $P<0.05$ )。从单位叶面积的滞尘量来看,木犀和海棠花单位叶面积滞纳 TSP 的能力最强,玉兰和东京樱花次之,银杏和樟最小,单位叶面积滞纳 TSP 最大的木犀是樟的 3.17 倍。从单位绿地面积的 TSP 含量来看,木犀显著高于其他树种,其次为玉兰、乐昌含笑、枫香树和东京樱



花, 海棠花、樟和银杏相对较小。

(2) 各径级颗粒物的滞纳能力, 单位叶面积叶片滞纳  $PM_{10}$  能力最强的树种为海棠花和木犀, 能力较弱的为樟和枫香树; 滞纳  $PM_{2.5}$  的能力, 海棠花显著高于其他树种 ( $P<0.05$ ), 其次为木犀, 枫香树和樟较低。各树种叶片滞纳  $PM_1$  的能力排序与  $PM_{2.5}$  基本一致, 樟叶片滞纳  $PM_1$  的能力最低。

从单位绿地面积的滞尘量来看,  $PM_{10}$  的滞纳能力, 木犀显著高于其他树种, 其次为枫香树、乐昌含笑、玉兰、东京樱花和海棠花, 银杏、樟较低;  $PM_{2.5}$  和  $PM_1$  的滞纳能力趋势一致, 均为木犀最高, 其次为海棠花、枫香树、乐昌含笑、银杏、东京樱花, 樟和玉兰较低; 银杏和海棠花叶片粒径  $2.5\ \mu m$  及以下小颗粒占总滞尘量的比例显著高于其他树种, 樟、玉兰对粒径小于  $2.5\ \mu m$  及以下小颗粒滞留能力较低。

(3) 不同树种单位叶面积颗粒物滞留量与气孔密度、气孔面积和绒毛密度呈正相关关系。气孔密度与 TSP 含量呈显著正相关。

### 参考文献:

- [1] 陈仁杰, 陈秉衡, 阚海东. 我国 113 个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. 中国环境科学, 2010, 30 (03): 410–415.
- [2] BECKETT KP, FREER-SMITH PH, TAYLOR G. Effective tree species for local air quality management[J]. J Arboricult, 2000, 26 (1): 12–19.
- [3] 王辉, 刘春兰. 国内外  $PM_{2.5}$  控制和治理措施评述[J]. 城市与减灾, 2015 (02): 34–37.
- [4] 陶燕, 刘亚梦, 米生权, 等. 大气细颗粒物的污染特征及对人体健康的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (03): 592–597.
- [5] 申进朝, 陈纯, 多克辛, 等. 郑州市环境空气细颗粒物浓度、组成及评价[J]. 环境科学与技术, 2012, 35 (S2): 237–239.
- [6] NOWAK DJ, CRANE DE, STEVENS JC. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. Urban For Urban Green, 2006, 4 (3): 115–123.
- [7] LIU L, GUAN DS, PEART MR, *et al.* The dust retention capacities of urban vegetation—a case study of Guangzhou, South China[J]. Environ Sci Pollut Res, 2013, 20 (9): 6601–6610.
- [8] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例[J]. 应用生态学报, 2002, 13 (9): 1121–1126.
- [9] 方颖, 张金池, 王玉华. 南京市主要绿化树种对大气固体悬浮物净化能力及规律研究[J]. 生态与农村环境学报, 2007 (02): 36–40.
- [10] 栗志峰, 刘艳, 彭倩芳. 不同绿地类型在城市中的滞尘作用研究[J]. 干旱环境监测, 2002 (03): 162–163.
- [11] 贺勇, 李磊, 李俊毅, 等. 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.
- [12] 王兵, 张维康, 牛香, 等. 北京 10 个常绿树种颗粒物吸附能力研究[J]. 环境科学, 2015, 36 (02): 408–414.
- [13] 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 (06): 2361–2367.
- [14] 江胜利, 金荷仙, 周金富, 等. 杭州地区常见行道树滞尘效益研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28 (10): 282–288.
- [15] 江胜利, 金荷仙, 华晓莉, 等. 杭州常见绿化植物滞尘能力研究[J]. 林业科技开发, 2013, 27 (05): 47–50.
- [16] 李恩宝, 刘美华, 吕连宏, 等. 临安市 8 种绿化植物滞尘能力及光合响应差异[J]. 森林与环境学报, 2017, 37 (02): 236–240.
- [17] 史晓丽. 北京市行道树固碳释氧滞尘效益的初步研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [18] 张维康, 王兵, 牛香. 北京市常见树种叶片吸附颗粒物能力时间动态研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36 (10): 3840–3847.
- [19] 房瑶瑶, 王兵, 牛香. 4 种树种叶片表面颗粒物洗脱特征与其微观形态的关系[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44 (8): 119–126.
- [20] 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 (03): 384–392.
- [21] 王会霞, 王彦辉, 杨佳, 等. 不同绿化树种滞留  $PM_{2.5}$  等颗粒污染物能力的多尺度比较[J]. 林业科学, 2015, 51 (07): 9–20.
- [22] SUN XD, LI HM, GUO X, *et al.* Capacity of six shrub species to retain atmospheric particulates with different diameters[J]. Environ Sci Pollut Res, 2018, 25 (3): 2643–2650.
- [23] PAL A, KULSHRESHTHA K, AHMAD KJ, *et al.* Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution?[J]. Flora, 2002, 197 (1): 47–55.
- [24] 张维康, 王兵, 牛香. 北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力[J]. 环境科学, 2015, 36 (07): 2381–2388.
- [25] 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.
- [26] 王赞红, 李纪标. 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态[J]. 生态环境, 2006 (02): 327–330.
- [27] 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.
- [28] WANG H J, YOOK S J, AHN K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves[J]. Atmos Environ, 2011, 45 (38): 6987–6994.
- [29] SPEAK AF, ROTHWELL JJ, LINDLEY SJ, *et al.* Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a UK city[J]. Atmos Environ, 2012, 61 (none): 283–293.
- [30] 李艳梅, 陈奇伯, 王邵军, 等. 昆明市主要绿化树种叶片滞尘能力的叶表微形态学解释[J]. 林业科学, 2018, 54 (05): 18–29.
- [31] 李少宁, 鲁绍伟, 刘斌, 等. 北京主要绿化树种叶表面微形态与  $PM_{2.5}$  吸滞能力[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37 (08): 98–107.
- [32] 陈玮, 何兴元, 张粤, 等. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14 (12): 2113–2116.
- [33] 张鹏骞, 朱明溥, 刘艳菊, 等. 北京路边 9 种植物叶片表面微结构及其滞尘潜力研究[J]. 生态环境学报, 2017, 26 (12): 2126–2133.
- [34] 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 (08): 2604–2614.
- [35] 王会霞, 石辉, 刘剑华, 等. 西安城区 2 种女贞叶面滞尘和叶片形态结构[J]. 安全与环境学报, 2018, 18 (06): 2344–2351.
- [36] 范舒欣, 晏海, 齐石茗月, 等. 北京市 26 种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力[J]. 植物生态学报, 2015, 39 (7): 736–745.