

冬季苏北 8 种常绿乔木吸滞颗粒物能力与叶表微结构关系

刘 宇<sup>1</sup>,张楠<sup>1</sup>,王晓立<sup>1,2</sup>,周力行<sup>1</sup>,韩浩章<sup>1,3</sup>

(1. 宿迁学院 建筑工程学院,江苏 宿迁 223800;2. 南京林业大学 生物与环境学院,南京 210095;  
3. 南京农业大学 园艺学院,江苏 南京 210095)

**摘 要:**以冬季苏北地区 8 种常绿乔木(枇杷、石楠、龙柏、桂花、广玉兰、雪松、大叶女贞、香樟)为对象,采用水洗-滤膜法测定叶片对不同粒径颗粒物(PM、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>2.5~10</sub>、PM<sub>2.5</sub>)吸滞量,并用 S-3000N 型扫描电镜观察叶表微结构特征。结果表明,8 种常绿乔木单位叶面积的 PM、PM<sub>>10</sub>、PM<sub>2.5~10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量分别为 0.553 1~3.839 6、0.468 3~3.486 7、0.063 1~0.255 8、0.021 8~0.181 0 g·m<sup>-2</sup>;PM<sub>>10</sub>、PM<sub>2.5~10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量分别占 PM 质量的 85.68%、9.22%、5.10%;叶片有多条线状突起,皱褶较多,气孔较密集的枇杷、石楠、龙柏单位叶面积滞留颗粒物能力较强;叶面光滑平整的大叶女贞、香樟吸滞颗粒物能力较弱;叶面有较厚蜡质层、沟壑较少、气孔密集的雪松对粒径越小的颗粒物吸滞能力表现越优;沟壑投影面积增大能显著提高叶片对不同粒径颗粒物的吸滞量;保卫细胞面积与 PM 和 PM<sub>>10</sub> 吸滞量呈极显著正相关;气孔密度与 PM<sub>2.5~10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 吸滞量呈极显著正相关;沟壑投影面积、保卫细胞面积、气孔密度等叶片微结构是调控冬季 8 种常绿乔木叶片颗粒物吸滞能力的主要因素。

**关键词:**颗粒物;常绿乔木;叶表微结构;苏北

**中图分类号:**S718.55      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2021)03-0080-08

The Relationship between the Adsorption Capacity of 8 Evergreen Arbors in Northern Jiangsu Province and the Micro Structure of Leaf Surface

LIU Yu<sup>1</sup>,ZHANG Nan<sup>1</sup>,WANG Xiao-li<sup>1,2</sup>,ZHOU Li-xing<sup>1</sup>,HAN Hao-zhang<sup>1,3</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture of Suqian College,Suqian 223800,Jiangsu,China;  
2. College of Biological and Environmental,Nanjing Forestry University,Nanjing 210095,Jiangsu,China;  
3. College of Horticulture,Nanjing Agricultural University,Nanjing 210095,Jiangsu,China)

**Abstract:** Eight evergreen arbors (*Eriobotrya japonica*, *Photinia serrulata*, *Sabina chinensis*, *Osmanthus fragrans*, *Magnolia grandiflora*, *Cedrus deodara*, *Ligustrum lucidum*, and *Cinnamomum camphora*) occurring in Northern Jiangsu Province in winter were selected as research objects. The leaf adsorption capacity to particulate matter with different sizes (PM, PM<sub>>10</sub>, PM<sub>2.5~10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) was measured via water washing-membrane filtering method. The microstructures of the leaves were observed by the scanning electron microscope. The results suggested that the ranges of the absorption capacity of the leaves of 8 evergreen arbors to PM, PM<sub>>10</sub>, PM<sub>2.5~10</sub> and PM<sub>2.5</sub> per leaf area were 0.553 1—3.839 6, 0.468 3—3.486 7, 0.063 1—0.255 8, and 0.021 8—0.181 0 g·m<sup>-2</sup>, respectively. The absorption capacity of the leaves to PM<sub>>10</sub>, PM<sub>2.5~10</sub> and PM<sub>2.5</sub> by weight accounted for 85.68%, 9.22% and 5.10% of the total PM, respectively. *E. japonica*, *P. serrulata*, *S. chinensis* leaves, which had multiple linear protrusions, more wrinkles, and dense stoma had relatively stronger adsorption capacity to particulate matter and *L. lucidum*, and *C. cam-*



*phora* leaves with smooth and flat surface had relatively weaker adsorption capacity to particulate matter. *C. deodara* leaf surface featured by thick waxy layer, less furrows, and the dense pores displayed better performance in adsorbing stagnant particles with smaller particle size. The increase in gully projection area could significantly improve the adsorption capacity of particles in different sizes. The stomatal guard cell area of the leaves was extremely, significantly, positively correlated with PM and  $PM_{>10}$  adsorption and stomatal density was extremely significantly, and positively correlated with  $PM_{2.5-10}$  and  $PM_{2.5}$  adsorption. The microstructures of the leaves such as the gully projection area, the guard cell area and the stomatal density were the main factors that control the particulate matter adsorption capacity of the leaves of 8 evergreen arbors in winter.

**Key words:** particulate matter; evergreen tree; leaf surface microstructure; Northern Jiangsu;

冬季地面温度低,不利于空气上下对流,导致空气颗粒物不易扩散而逐渐聚集,易引发雾霾天气形成<sup>[1-3]</sup>。空气颗粒物(particulate matter, PM)是指悬浮在空气中的微小固体和液滴混合物,其中包含空气动力学直径 $<10\ \mu\text{m}$ 和 $2.5\ \mu\text{m}$ 的可吸入颗粒物<sup>[4]</sup>,相对于较粗的颗粒物,它粒径小,比表面积大,以气溶胶状态在大气中停留时间长,可携带大量毒素和致病菌引发人体呼吸道与肺部疾病,对人体和环境危害更大<sup>[5-6]</sup>。

植物具有减尘、防尘、吸附和阻尘功能,是净化空气颗粒物污染的一个重要途径<sup>[7]</sup>,研究表明<sup>[8-10]</sup>,植物滞留和吸附空气颗粒物与其叶表微结构关系密切,叶表的沟壑、气孔、绒毛以及褶皱情况导致植物对空气颗粒物的滞尘能力<sup>[11]</sup>、滞尘途径<sup>[3]</sup>、作用机制<sup>[12]</sup>存在差异。近些年,学者们对植物吸滞颗粒物能力以及与叶表微结构关系的研究很多,但仍存在一些需要继续探讨的地方,如在滞留不同粒径颗粒物方面,前人主要集中在总悬浮颗粒物<sup>[13-14]</sup>,对危害人体健康更大、粒径更小的颗粒物( $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$ )涉及较少,且某些问题还存在争议,如 P. Amitd *et al*<sup>[15]</sup>认为叶片主要通过皱褶和沟壑吸附,粗糙的叶表面能形成一个滞留的空间,且能卡住颗粒物。而孙应都等<sup>[16]</sup>认为影响叶片滞尘能力关键在气孔密度和开合度,因为其可以加强滞尘的稳定性。所以,关于植物叶表微结构特征与不同粒径颗粒物吸滞能力的关系还需要继续深入研究。由于不同地理环境条件、不同时间段污染源存在变化等影响,目前国内有关植物滞尘能力的研究多集中在北京<sup>[17-19]</sup>、青岛<sup>[20]</sup>、昆明<sup>[21]</sup>等地,苏北地区几乎没有。另外,苏北冬季空气颗粒物浓度高于其他季节<sup>[11]</sup>,落叶树种滞尘能力极大削弱,常绿乔木因其树体高大、树冠开展,相对于其他下层植物具有更好的滞尘效益。因此,针对以上问题,进一步进行冬季苏北地区常绿乔木滞尘能力研究尤为重要。

本研究以苏北8种常绿乔木为对象,研究树种

叶片吸滞不同粒径颗粒物的差异,更加深入地分析叶表的沟壑、褶皱、气孔、保卫细胞以及绒毛与叶片滞尘量的相关性,以期筛选滞尘能力强的绿化树种提供理论依据,从而提高城市植被吸附污染物,净化空气环境的能力。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验在江苏省宿迁市宿城区黄河南路宿迁学院内( $118^{\circ}17'36''\text{E}$ ,  $33^{\circ}56'10''\text{N}$ )进行。宿迁市位于江苏省北部,四季分明,属于暖温带季风性气候。受季风影响,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,每年平均气温 $14^{\circ}\text{C}$ 。年降水量约为 $9\ 000\ \text{mm}$ ,年日照时数为 $2271\ \text{h}$ ,年均风速 $3.7\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 1.2 供试树种

选择苏北地区应用广泛、树龄相近且生境一致的8种常绿乔木,包括2种常绿针叶树:雪松(*Cedrus deodara*)、龙柏(*Sabina chinensis*);2种常绿小乔木:枇杷(*Eriobotrya japonica*)、桂花(*Osmanthus fragrans*);4种高大常绿乔木:香樟(*Cinnamomum camphora*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、大叶女贞(*Ligustrum lucidum*)、石楠(*Photinia serrulata*)(表1)。

### 1.3 样品采集

一般认为,15 mm以上的降雨可将植物叶片上的灰尘冲洗干净<sup>[22]</sup>,且在冲洗7 d后滞尘再次饱和<sup>[23]</sup>。由于宿迁冬季降雨量较少,采用装有蒸馏水的喷壶清洗掉样品树种的叶片灰尘。于2018年12月—2019年2月,每月在清洗样品7 d后开始采样,将树冠在2~3 m高度分为东西南北不同方位,在各部位随机均匀取样。叶片较大的树种(广玉兰、枇杷、大叶女贞)采取15~20片,叶片较小的树种(石楠、桂花、香樟)采取30~40片,针叶树(雪松、龙柏)采取50~60片,采集后放于密封聚乙烯塑料袋内,避免震动,各采样点各树种均做3次重复。



1.4 样品测定

采用精度为 0.000 1 的天平(ZA12OR4)称重得到初始含尘叶片质量 W1,再将叶片逐片放入烧杯中清洗,用软毛刷轻轻刷去灰尘,用蒸馏水充分淋洗,用镊子拿出,自然风干称重得到叶片去尘后质量 W2,采用手持式激光叶面积仪(C1-203,CIDVSA)测量叶面积 S。叶片的单位面积吸附量( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )为:

$$\text{DPLA} = (\text{W1} - \text{W2}) / \text{S} \tag{1}$$

将含尘的蒸馏水分别用孔径 10.0、2.5  $\mu\text{m}$  的滤膜过滤,置于 50℃烘箱中烘 30 min,相互的差值

即为  $\text{PM}_{>10}$ 、 $\text{PM}_{2.5\sim10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ ,PM 的质量之和。

1.5 叶表微结构观察

选取健康样品叶片上、下表面,在叶脉两侧切取 5 mm×5 mm 的组织块,放入小玻璃瓶内,加入 FAA 固定液固定 4 h 以上,抽真空,采用 30%、50%、70%、90%、100%的梯度乙醇脱水处理,每次 10 min,再用叔丁醇固定 20 min,放入冷冻干燥机内进行真空干燥,完全干燥后取出样品进行贴台,镀金,用扫描电子显微镜(S-3000N)进行观察,拍摄不同放大倍数下植物叶表面结构照片。

表 1 树种基本情况  
Table 1 The basic situation of tree species

树种	科属	高度/m	冠幅/m	枝下高/m
枇杷	蔷薇科枇杷属	11.5±1.3	1.8±0.2	—
石楠	蔷薇科石楠属	4.5±0.9	3.7±0.7	—
龙柏	柏科圆柏属	4.4±0.7	3.4±0.8	0.9±0.2
桂花	木犀科木犀属	2.7±0.5	2.2±0.3	—
广玉兰	木兰科木兰属	8.9±1.1	6.5±0.9	2.0±0.7
雪松	松科雪松属	11.8±0.9	7.3±1.2	—
大叶女贞	木犀科女贞属	6.8±0.5	5.2±0.3	0.9±0.3
香樟	樟科樟属	9.3±0.9	5.7±0.6	2.2±0.2

1.6 数据处理

数据采用 SPSS 21.0 和 Image J 软件进行统计分析,并用最小显著差数法(LSD)检测数据之间的差异性,图表采用 Excel 2007 绘制,图像用 Photo-shop CS6 处理。

2 结果与分析

2.1 8 种常绿乔木单位叶面积滞尘分析

各树种单位叶面积  $\text{PM}$ 、 $\text{PM}_{>10}$ 、 $\text{PM}_{2.5\sim10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  吸滞量差异显著( $P<0.05$ )(表 2)。7 d 内  $\text{PM}$ 、 $\text{PM}_{>10}$ 、 $\text{PM}_{2.5\sim10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  吸滞量分别为 0.553 1~3.839 6、0.468 3~3.486 7、0.063 1~0.255 8、0.021 8~0.181 0  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中  $\text{PM}_{>10}$  吸滞量占  $\text{PM}$  重量的 67.14%~90.91%,平均值为 83.59%。 $\text{PM}$  和  $\text{PM}_{>10}$  的大小排序一致,都表现为:枇杷>石楠>龙柏>桂花>广玉兰>雪松>大叶女贞>香樟,且枇杷分别是香樟的 6.94、7.40 倍。经聚类分析,将吸滞  $\text{PM}$  和  $\text{PM}_{>10}$  能力强的枇杷分为第 1 类;桂花、龙柏、石楠分为第 2 类,吸滞能力较弱的香樟、大女叶贞、雪松、广玉兰分为第 3 类。

单位叶面积  $\text{PM}_{2.5\sim10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  吸滞量分别占  $\text{PM}$  重量的 5.57%~18.28%、2.96%~14.58%。其中  $\text{PM}_{2.5\sim10}$  按大小顺序表现为:石楠>雪松>枇杷>龙柏>广玉兰>桂花>大叶女贞>香樟,最大值是最小值的 4.05 倍。对其进行聚类分析,第 1 类(0.213 9~0.255 8  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )为枇杷、雪松和石楠;

第 2 类(0.187 9~0.207 9  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )为广玉兰、龙柏;第 3 类(0.063 1~0.164 5  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )为香樟、大叶女贞和桂花。粒径更小的  $\text{PM}_{2.5}$  按大小排序为:雪松>石楠>枇杷>龙柏>广玉兰>桂花>大叶女贞>香樟,且雪松是香樟的 8.30 倍。通过聚类分析,枇杷、石楠和雪松为第 1 类(0.139 0~0.181 0  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ );大叶女贞、桂花、广玉兰和龙柏并为第 2 类(0.046 6~0.107 4  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ );香樟单独为第 3 类(0.021 8  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )。

通过以上分析,8 种常绿乔木中,枇杷叶片吸滞不同粒径颗粒物的能力较强,在聚类分析中均处于第 1 类。香樟叶片吸滞颗粒物的能力较弱,一直排在第 8 位。雪松叶片对粗颗粒物吸滞能力较弱,排在第 6 位,但其对粒径越小的颗粒物吸滞能力表现越优,对  $\text{PM}_{2.5\sim10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  吸滞量分别排在第 2 位和第 1 位。

2.2 8 种常绿乔木叶表面微结构特征

利用扫描电镜对 8 种常绿乔木叶片的沟壑最大长度、沟壑投影面积比、气孔长度、气孔密度、保卫细胞面积、绒毛密度等叶片特征进行观察和统计(图 1 和表 3)。发现雪松和龙柏有数条气孔线,其他常绿阔叶乔木气孔均分布在叶下表皮,气孔周边均附着大量颗粒物。各树种气孔密度大小存在差异,将其划分为高(>300 个· $\text{mm}^{-2}$ )、中(200—300 个· $\text{mm}^{-2}$ )、低(<200 个· $\text{mm}^{-2}$ )3 个等级。其中,气孔密度最大的树种为石楠,达到 307 个· $\text{mm}^{-2}$ ,桂

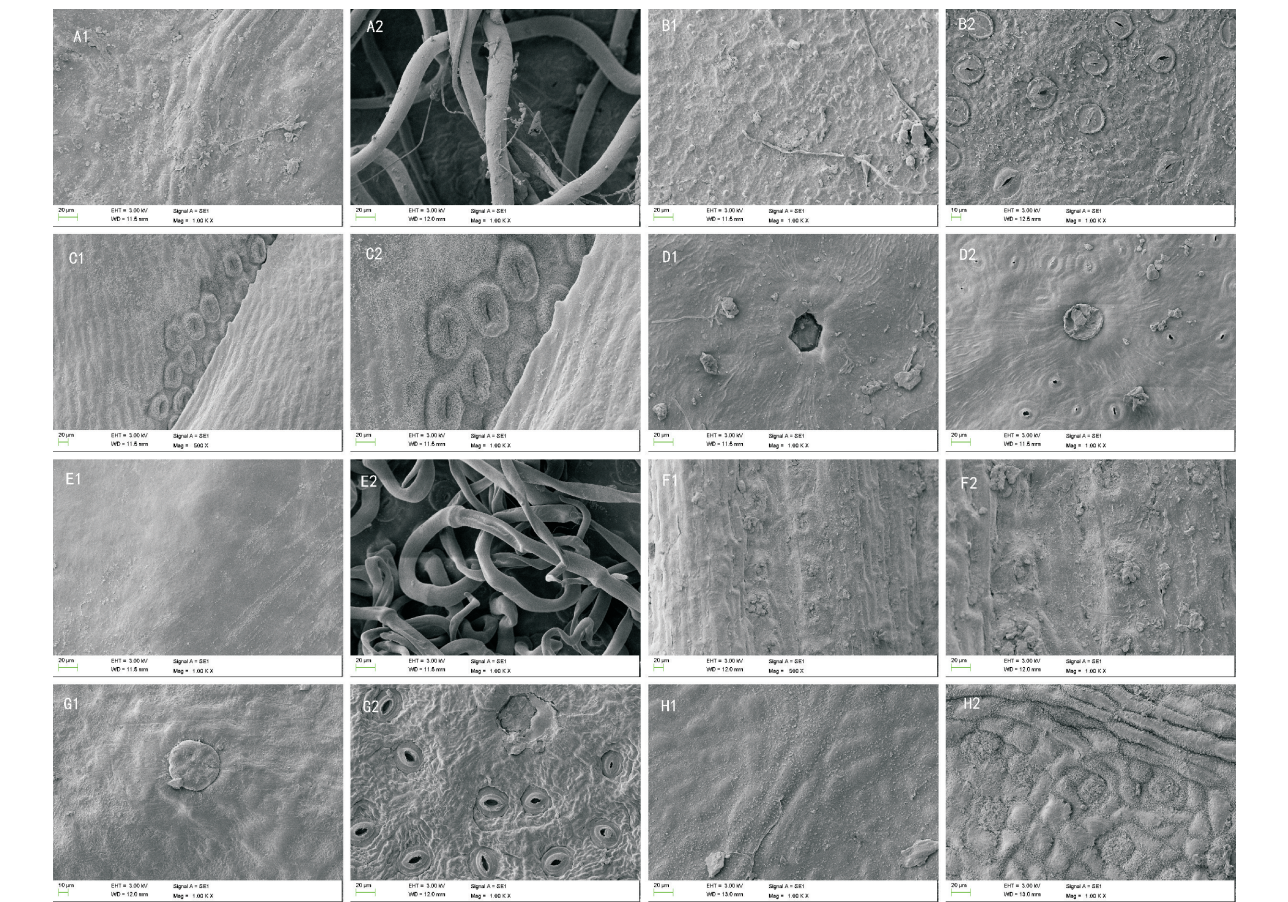


花、枇杷、雪松属于中,广玉兰、大叶女贞和香樟为低,最少的香樟仅有  $165\text{ 个}\cdot\text{mm}^{-2}$ 。根据保卫细胞面积将树种划分为大( $>500\text{ }\mu\text{m}^2$ )、中( $300\sim 500\text{ }\mu\text{m}^2$ )、小( $<300\text{ }\mu\text{m}^2$ )3 个等级,其中龙柏、石楠、枇杷的保卫细胞面积较大,广玉兰、桂花和雪松为中等,其他树种较小。

表 2 8 种常绿乔木单位叶面积颗粒吸滞能力

Table 2 Adsorption capacity to particulate matter per unit area of 8 kinds of evergreen arbors <span>(<math>\text{g}\cdot\text{m}^{-2}</math>)</span>								
树种	PM	聚类	PM <sub>&gt;10</sub>	聚类	PM <sub>2.5~10</sub>	聚类	PM <sub>2.5</sub>	聚类
枇杷	$3.8396\pm0.532^{\text{a}}$ (1)	1	$3.4867\pm0.495^{\text{a}}$ (1)	1	$0.2139\pm0.010^{\text{bc}}$ (3)	1	$0.1390\pm0.008^{\text{b}}$ (3)	1
石楠	$3.0951\pm0.487^{\text{b}}$ (2)	2	$2.6876\pm0.385^{\text{b}}$ (2)	2	$0.2558\pm0.018^{\text{a}}$ (1)	1	$0.1518\pm0.010^{\text{b}}$ (2)	1
龙柏	$2.4382\pm0.364^{\text{c}}$ (3)	2	$2.1230\pm0.269^{\text{c}}$ (3)	2	$0.2079\pm0.010^{\text{bc}}$ (4)	2	$0.1074\pm0.009^{\text{c}}$ (4)	2
桂花	$1.8676\pm0.323^{\text{d}}$ (4)	2	$1.6479\pm0.182^{\text{d}}$ (4)	2	$0.1645\pm0.008^{\text{d}}$ (6)	3	$0.0552\pm0.007^{\text{de}}$ (6)	2
广玉兰	$1.4581\pm0.248^{\text{e}}$ (5)	3	$1.1982\pm0.124^{\text{e}}$ (5)	3	$0.1879\pm0.009^{\text{c}}$ (5)	2	$0.0720\pm0.008^{\text{d}}$ (5)	2
雪松	$1.2413\pm0.163^{\text{e}}$ (6)	3	$0.8334\pm0.105^{\text{f}}$ (6)	3	$0.2269\pm0.015^{\text{ab}}$ (2)	1	$0.1810\pm0.011^{\text{a}}$ (1)	1
大叶女贞	$0.7047\pm0.107^{\text{f}}$ (7)	3	$0.5762\pm0.082^{\text{fg}}$ (7)	3	$0.0819\pm0.007^{\text{e}}$ (7)	3	$0.0466\pm0.004^{\text{e}}$ (7)	2
香樟	$0.5531\pm0.088^{\text{g}}$ (8)	3	$0.4683\pm0.061^{\text{g}}$ (8)	3	$0.0631\pm0.007^{\text{e}}$ (8)	3	$0.0218\pm0.003^{\text{f}}$ (8)	3

注:数据为平均值±标准差,括号中数字为滞尘能力从大到小的排序。不同小写字母表示不同树种的滞尘能力差异显著, $P<0.05$ 。



注:A1,A2:枇杷(*Eriobotrya japonica*); B1,B2:石楠(*Photinia serrulata*); C1,C2:龙柏(*Sabina chinensis*); D1,D2:桂花(*Osmanthus fragrans*); E1,E2:广玉兰(*Magnolia grandiflora*); F1,F2:雪松(*Cedrus deodara*); G1,G2:大叶女贞(*Ligustrum lucidum*); H1,H2:香樟(*Cinnamomum camphora*)。

图 1 8 种常绿乔木叶表面微结构特征

Fig.1 Surface microstructure characteristics of 8 kinds of evergreen arbors

根据叶片的粗糙程度将树种划分为粗糙(叶表面较皱褶、沟壑较多、有线状突起浅沟)、较平滑(叶表面皱褶较少、有部分浅沟)、平滑(叶表面平滑)3 个等级,得到石楠、枇杷、龙柏为粗糙,其中,枇杷的沟壑投影面积比最大,达到 38.25%。雪松、桂花、广玉兰为较平滑,雪松的沟壑较长,桂花气孔周围有

脊柱状突起,广玉兰叶片有微弱的波浪起伏。等级光滑为香樟和大叶女贞,两者的上下表皮凹陷结构均较浅,沟壑投影面积比皆 $<15\%$ 。另外,将各树种分为有绒毛和无绒毛 2 种,只有广玉兰和枇杷有绒毛,绒毛内附着有大量颗粒物。



表 3 8 种常绿乔木叶表面微结构参数及其评价

Table 3 Surface microstructure parameters of 8 kinds of evergreen arbors and their evaluation

树种	MLG / $\mu\text{m}$	PARG /%	AL / $\mu\text{m}$	SD /(个 $\cdot\text{mm}^{-2}$ )	GCA / $\mu\text{m}^2$	VD /(根 $\cdot\text{mm}^{-2}$ )	叶片特征
枇杷	106.57±20.68	38.25±6.46	9.09±2.76	245±57	546.33±49.12	167±44	有皱褶,表面有不规则突出,下表面密生绒毛,气孔密集
石楠	48.78±3.28	32.27±5.41	18.54±5.39	307±44	590.32±79.19	0	有多条线状突起浅沟,沟壑较多,下表面气孔密集
龙柏	124.69±49.54	36.89±4.87	30.27±6.65	213±33	606.88±80.51	0	皱褶较多,起伏较大,有数条气孔线
桂花	32.43±9.65	21.68±3.38	8.75±3.12	202±58	404.53±41.78	0	两面无毛,叶表面有起伏,气孔周围有突起形成,周边有不同粒径颗粒物
广玉兰	56.78±11.35	19.55±2.65	9.29±1.65	197±41	426.24±67.32	392±72	上表面光滑,有微微波浪起伏,下表面有绒毛,气孔周围抬高,与周边表皮细胞形成沟状组织
雪松	269.68±38.32	24.25±3.17	12.22±5.05	268±31	337.26±58.34	0	有较厚的蜡质层,沟壑较长,两侧各有气孔线,旁边附着大量颗粒物
大叶女贞	41.23±16.73	14.23±2.41	18.86±2.83	185±35	202.43±56.12	0	表面平滑、具厚蜡质,无绒毛,气孔微凹陷
香樟	97.21±18.43	9.67±1.52	16.73±9.43	165±26	151.25±35.64	0	上下表皮光滑,凹陷结构非常浅,颗粒物主要集中在气孔及其周边位置

注:数据为平均值 ± 标准差。沟壑最大长度(MLG);沟壑投影面积比(PARG);气孔长度(AL);气孔密度(SD);保卫细胞面积(GCA);绒毛密度(VD),下同。

2.3 叶表面微结构特征与滞尘量的关系

将 8 种常绿乔木单位叶面积颗粒物吸滞量与叶表面微结构参数进行相关性分析(表 4),结果表明:沟壑投影面积比与 PM、PM<sub>>10</sub> 吸滞量均呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 PM<sub>2.5~10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量呈显著正相关( $p<0.05$ )。线性回归分析表明(图 2),沟壑投影面积比与粒径越大的颗粒物拟合程度越好, $R^2$  分别为 0.840、0.801、0.676、0.548。说明一定范围内,叶表面越粗糙,皱褶越多,越容易吸滞粗颗粒物。结合表 2 和表 3,叶表面多皱、不规则突出较多的枇杷,聚类分析始终排在第 1 类。而叶片较平滑的大叶女贞和香樟颗粒物吸滞能力分别排在第 7、8 位,且对不同粒径颗粒物的吸滞能力均较弱,单

位叶面积 PM、PM<sub>>10</sub> 吸滞量与保卫细胞面积呈极显著正相关( $P<0.01$ )(表 4,图 3),拟合方程分别为  $y=0.006x-0.531$  ( $P<0.01$ ),  $y=0.005x-0.579$  ( $P<0.01$ ),  $R^2$  为 0.779 和 0.743。说明保卫细胞面积增大,影响气孔的开关,增大吸附颗粒物的面积,从而也能加强叶片对粗颗粒物的阻滞作用。各树种单位叶面积 PM<sub>2.5~10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量随气孔密度增加而显著上升(表 4,图 4),拟合方程分别为  $y=0.001x-0.104$  ( $P<0.01$ ),  $y=0.001x-0.135$  ( $P<0.01$ ),  $R^2$  分别为 0.738、0.750。雪松叶片有较厚的蜡质层,沟壑较长,但气孔密度达到 268 个 $\cdot\text{mm}^{-2}$ ,对 PM<sub>2.5</sub> 的吸滞能力排在第 1 位,说明粒径较小的颗粒物主要固滞在气孔口内和周边。

表 4 叶表面微结构参数与滞尘量之间相关性

Table 4 Correlation between leaf surface microstructure parameters and dust retention

	PM	PM <sub>&gt;10</sub>	PM <sub>2.5~10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	MLG	PARG	AL	SD	GCA	VD
PM	1	0.997**	0.739	0.612	-0.083	0.917**	-0.024	0.638	0.883**	0.131
PM <sub>&gt;10</sub>		1	0.684	0.551	-0.142	0.895**	-0.022	0.583	0.862**	0.132
PM <sub>2.5~10</sub>			1	0.857**	0.312	0.822*	-0.042	0.859**	0.660	0.166
PM <sub>2.5</sub>				1	0.644	0.740*	-0.059	0.866**	0.599	-0.01
MLG					1	-0.062	0.034	0.32	-0.036	-0.187
PARG						1	0.217	0.656	0.716*	0.03
AL							1	-0.032	0.189	0.476
SD								1	0.627	-0.135
GCA									1	0.176
VD										1

注: \* 表示在 0.05 水平相关显著; \*\* 表示在 0.01 水平相关显著。

3 结论与讨论

叶片有多条线状突起,皱褶较多,气孔较密集的

枇杷、石楠、龙柏单位叶面积滞留颗粒物能力较强;叶面光滑平整的大叶女贞、香樟吸滞颗粒物能力较弱;叶面有较厚蜡质层,沟壑较少、气孔密集的雪松



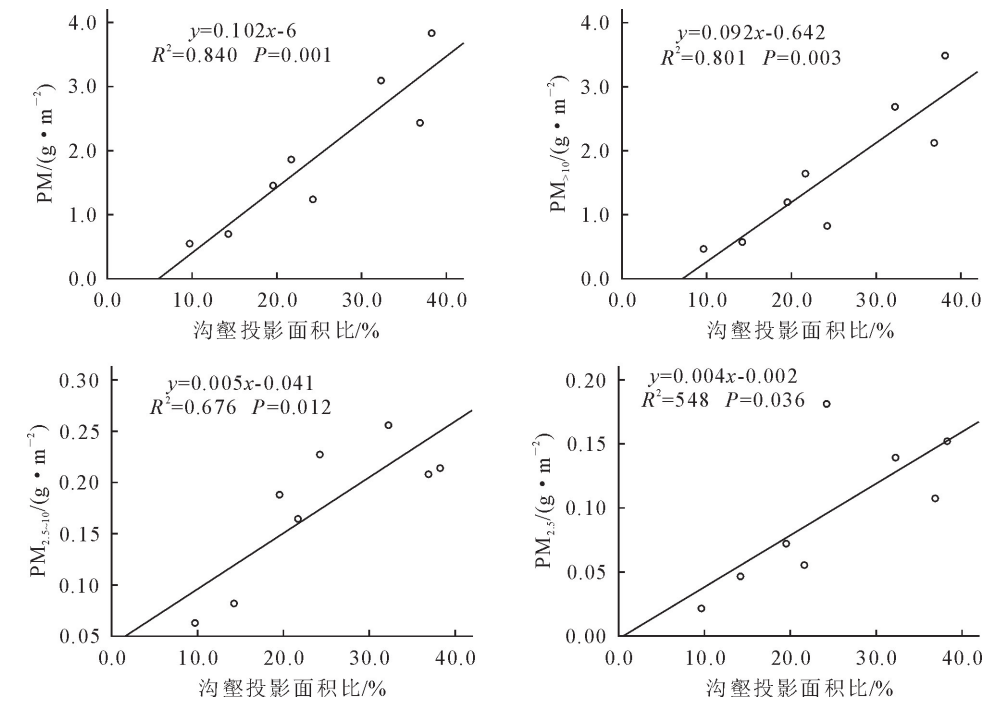


图 2 沟壑投影面积比与颗粒物吸附量拟合关系

Fig. 2 Fitting relationship between gully projection area ratio and particle adsorption

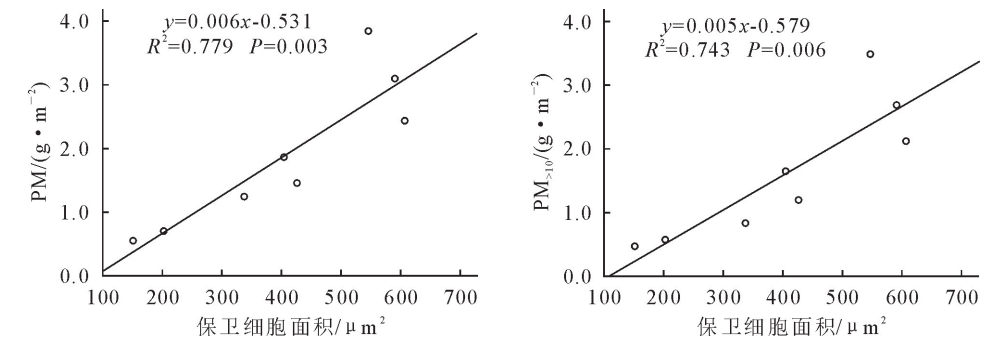


图 3 保卫细胞面积与滞尘能力拟合关系

Fig. 3 Fitting relationship between guard cell area and dust retention ability

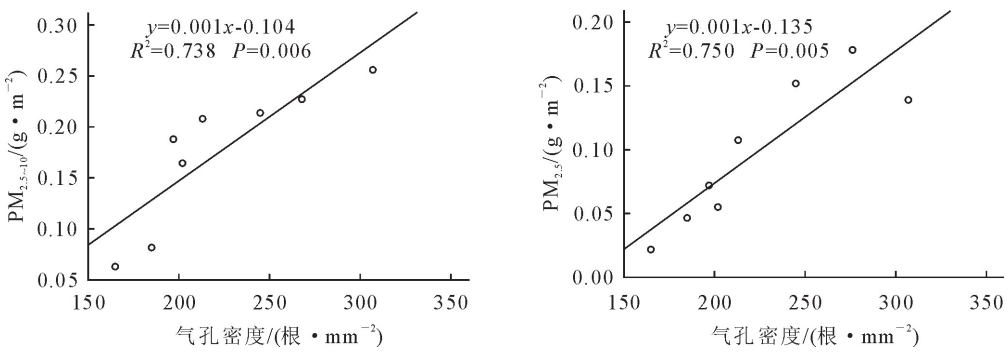


图 4 气孔密度与滞尘能力拟合关系

Fig. 4 Fitting relationship between stomatal density and dust holding ability

对粒径越小的颗粒物吸滞能力表现越优;沟壑投影面积增大能显著提高叶片对不同粒径颗粒物的吸滞量;保卫细胞面积与 PM 和 PM<sub>>10</sub> 吸滞量呈极显著正相关;气孔密度与 PM<sub>2.5~10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 吸滞量呈极

显著正相关;沟壑投影面积、保卫细胞面积、气孔密度等叶片微结构是调控冬季 8 种常绿乔木叶片颗粒物吸滞能力的主要因素。



3.1 不同树种叶片吸滞颗粒物能力差异

植物在滞留和吸附空气颗粒物方面发挥着不可替代的作用,被称为城市粉尘过滤器<sup>[24]</sup>。不同植物因各自独特的枝叶密度、叶表面特性和叶片着生角度,导致单位叶面积吸滞能力存在差异<sup>[25]</sup>。孙应都等<sup>[16]</sup>对昆明市 6 种常见绿化树种的滞尘能力进行分析,得到单位叶面积滞尘量为 0.73~4.53 g·m<sup>-2</sup>。王会霞等<sup>[26]</sup>研究了北京市 23 种常见绿化植物的吸附能力,得到单位叶面积的 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量分别为 0.40~3.44、0.51~3.05、0.06~0.39 g·m<sup>-2</sup>,且植物种间差异显著,最大差别分别达到 8.6、9.8、10.5 倍。本研究中,8 种常绿乔木单位叶面积 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量分别为 0.553 1~3.839 6、0.468 3~3.486 7、0.063 1~0.255 8、0.021 8~0.181 0 g·m<sup>-2</sup>,最大值分别为最小值的 6.94、7.4、4.05、8.30 倍,与上述结果基本一致。

K. Dzierzanowski *et al*<sup>[27]</sup>研究发现,叶面吸附以 10~100 μm 颗粒物为主,2.5~10 μm 颗粒物次之,0.2~2.5 μm 颗粒物最少。陈小平<sup>[28]</sup>也得到叶表面对不同粒径颗粒物滞留量的差异非常大,PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>0.2~2.5</sub> 分别占叶片表面总颗粒物重量的 85%、13% 和 2%,以降尘为主,PM<sub>2.5</sub> 仅占很小一部分。本研究中 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>0.2~2.5</sub> 吸滞量分别占 PM 的 85.68%、9.22%、5.10%,PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>0.2~2.5</sub> 吸滞量的差距相对较小,这可能是不同地区颗粒物来源的差异。研究表明<sup>[22,29]</sup>,叶表面吸滞的颗粒物数量主要是 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>。因为质量与粒径呈立方关系,说明降雨量较少的冬季,叶面滞留 PM<sub>2.5</sub> 的数量远大于 PM<sub>2.5~10</sub>。

3.2 叶表微结构与滞尘关系

树种的叶表微结构特征,如气孔形状、气孔密度、保卫细胞面积、叶片结构、叶表沟壑面积、沟壑深浅、绒毛、蜡质含量等对叶表颗粒物吸滞能力产生不同程度的作用<sup>[29]</sup>。多数学者<sup>[17,22,28]</sup>认为,叶表面有皱褶、沟槽、粗糙度较高的植物吸滞颗粒物能力较高。本研究也得出沟壑投影面积比与各树种单位叶面积 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量均呈极显著正相关( $P<0.01$ ),与 PM<sub>2.5~10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量呈显著正相关( $P<0.05$ )。但也有研究表明<sup>[30]</sup>,沟壑在一定程度上有利于固滞颗粒物,使其停留在不规则的沟槽内,不易抖落,但沟槽太宽或太窄会减少颗粒物与叶的接触面,从而降低叶表面的吸滞能力。

叶片表皮上的保卫细胞及其围合的气孔形状、数目、分布是影响植物叶片滞尘能力的重要因素,但不同学者对其影响程度结论不一致。孙晓丹等<sup>[32]</sup>、

张桐等<sup>[33]</sup>认为气孔开口大,气孔密度高,树种叶片的颗粒物吸滞能力强。李艳梅等<sup>[21]</sup>则认为,气孔密度与植物叶片滞尘能力关系不显著。本研究中,各树种单位叶面积 PM<sub>2.5~10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 吸滞量随着气孔密度增加而显著上升,而与粗颗粒物(PM<sub>10</sub>、PM<sub>>10</sub>)相关性不明显,说明气孔周边主要吸滞可吸入颗粒物。J. Burkhardt *et al*<sup>[34]</sup>等通过风洞试验证明,大多细小的颗粒物主要集中在气孔附近。刘玲等<sup>[10]</sup>也研究认为,气孔吸附主导型植物(叶面积小,无表皮毛阻挡、气孔密集、开口大)主要吸滞细颗粒物。这可能是粒径较小的颗粒物多是吸湿性颗粒,气孔周围的湿润环境会增强亲水性颗粒物的沉降<sup>[35]</sup>。

参考文献:

[1] 张衍桑,马国霞,於万,等. 2013 年 1 月灰霾污染事件期间京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 污染的人体健康损害评估[J]. 中华医学杂志, 2013,93(34):2707-2710.  
ZHANG Y S, MA G X, YU W, *et al*. Health damage assessment due to PM<sub>2.5</sub> exposure during haze pollution events in Beijing-Tianjin-Hebei region in January 2013[J]. National Medical Journal of China, 2013, 93(34): 2707-2710. (in Chinese)

[2] 王晓磊,王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1910-1921.  
WANG X L, WANG C. Research status and prospects on functions of urban forests in regulating the air particulate matter [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 1910-1921. (in Chinese)

[3] 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.  
CHAI Y X, ZHU N, HAN H J. Dust removal effect of urban tree species in Harbin [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(9): 1121-1126. (in Chinese)

[4] 唐效炎,张远航,邵敏. 大气环境化学[M]. 2 版. 北京:高等教育出版社, 2006: 5-10.

[5] 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. (in Chinese)

[6] POPE C A, BURNETT R T, THUN M J, *et al*. Lung cancer, cardio pulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. Journal of the American Medical Association, 2002, 287(9): 1132-1141.

[7] 么旭阳,胡耀升,刘艳红,等. 北京市 8 种常见绿化树种滞尘效应[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(3): 92-95.  
YAO X Y, HU Y S, LIU Y H. Dust-retention effect of 8 common greening tree species in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 92-95. (in Chinese)

[8] 张鹏骞,朱明渠,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.  
ZHANG P Q, ZHU M H, LIU Y J, *et al*. Leaf surface micro-



morphological features and its retention ability of particulate matters for 9 plant species at the roadside of Beijing[J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, 26 (12): 2126-2133. (in Chinese)

[9] 刘颖,李冬杰,李朝炜,等. 绿化植物叶面特征对滞尘效应的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 454-457.

[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 tress species[J]. Environmental Science, 2013, 34(6): 2361-2367. (in Chinese)

[11] 刘宇,王晓立,董蓉,等. 采暖季 4 种结构的城市绿地对 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的调控作用[J]. 生态环境学报, 2017, 26(12): 2134-2139.

LIU Y, WANG X L, DONG R, *et al.* Regulation of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in 4 types of urban greenbelt in heating season[J]. Ecology and Environment Sciences, 2017, 26 (12): 2134-2139. (in Chinese)

[12] 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.

[13] 邱玲,刘芳,张祥,等. 城市公园不同植被结构绿地削减空气颗粒物浓度研究[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1685-1694.

QIU L, LIU F, ZHANG X, *et al.* Reducing effect of air particulate matter concentration by green spaces with different vegetation structure in city parks[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1685-1694. (in Chinese)

[14] 刘延惠,丁访军,侯贻菊,等. 贵阳市图云关森林公园主要树种叶面滞尘量与叶形态结构的相关性研究[J]. 生态与农村环境报, 2019, 35(12): 1582-1592.

LIU Y H, DING F J, HOU Y J, *et al.* The leave PM retention and its relation to leaf micro-morphological structure of the major tree species in Tuyunguan forest park, Guiyang, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 5(12): 1582-1592. (in Chinese)

[15] AMIT P, KULSHRESHTHA K, AHMAD K J, *et al.* Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? [J]. Flora, 2002, 197(1): 47-55.

[16] 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, 2019, 39(3): 78-85. (in Chinese)

[17] 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 micro-morphological structures in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28 (3): 384-392. (in Chinese)

[18] 鲁绍伟,蒋燕,李少宁,等. 赵娜,陈波. 北京西山绿化树种 PM<sub>2.5</sub> 吸附量及叶表面 AFM 特征分析[J]. 生态学报, 2019, 39(10): 3777-3786.

LU S W, JIANG Y, LI S N, *et al.* Relationship between adsorption capacity of PM<sub>2.5</sub> and leaf surface characteristics of AFM for typical greening trees in the Western mountains of Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39 (10): 3777-3786. (in Chinese)

[19] 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, *et al.* Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species[J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3077-3082. (in Chinese)

[20] 孙晓丹,李海梅,郭霄,等. 10 种灌木树种滞留大气颗粒物的能力[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 1047-1054.

SUN X D, LI H M, GUO X, *et al.* Atmospheric particulates-retaining capacity of ten shrubs species[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(2): 1047-1054. (in Chinese)

[21] 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(5): 19-29.

LI Y M, CHEN Q B, WANG S J, *et al.* Effects of leaf surface micro-morphology structure on leaf dust-retaining ability of main greening tree species in Kunming City[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(5): 19-29. (in Chinese)

[22] 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.

[23] PAL A, KULSHRESHTHA K, AHMAD K J, *et al.* Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? [J]. Flora, 2002, 197(1): 47-55.

[24] DAVILA A F, REY D, MAHAMED K, *et al.* Mapping the sources of urban dust in a coastal environment by measuring magnetic parameters of Platanus hispanica leaves[J]. Environmental & Technology, 2006, 40(12): 3922-3928.

[25] WANG H J, YOOK S J, AHN K M. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45 (38): 6987-6994.

[26] 王会霞,王彦辉,杨佳,等. 不同绿化树种滞留 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物能力的多尺度比较[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 9-19.

WANG H X, WANG Y H, YANG J, *et al.* Multi-scale comparisons of particulate matter and its size fractions deposited on leaf surfaces of major greening tree species[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 9-19. (in Chinese)

[27] DZIERZANOWSKI K, POPEK R, GAWRO NSKA H, *et al.* 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.

[28] 陈小平. 武汉城市干道绿化隔离带消减颗粒物效应及优化建议[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.

[29] 王蕾,高尚玉,刘连友,等. 北京市 11 种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4): 597-601.

[30] 林星宇,李海梅,李彦华,等. 园林植物滞尘效益研究进展[J]. 江西农业学报, 2018, 30(10): 28-31.



ble nutrients and long-term fertilization on yield of Fuji apple orchard of Weibei area in Shaanxi,China[J]. *Acta Horticulturae Sinica*,2013,40(4):613-622. (in Chinese)

[21] 宋莎,李廷轩,王永东,等. 县域农田土壤有机质空间变异及其影响因素分析[J]. *土壤*,2011,43(1):44-49.

[22] 张亚鸽,史彦江,吴正保,等. 基于主成分分析的枣园土壤肥力综合评价[J]. *西南农业学报*,2016,29(5):1156-1160.

ZHANG Y G,SHI Y J,WU Z B,*et al.* Assessment on soil fertility status of jujube orchards based on principal component analysis[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*,2016,29(5):1156-1160. (in Chinese)

[23] 王康振,胡明,范逸飞,等. 大荔县农业土壤养分丰缺评价与分析[J]. *中国农学通报*,2018,34(29):64-68.

WANG K Z,HU M,FAN Y F,*et al.* Agricultural soil nutrients evaluation and analysis:Dali County[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2018,34(29):64-68. (in Chinese)

[24] 赵岳,郭瑞,郑险峰,等. 大荔冬枣园土壤肥力检测与评价[J]. *西北农业学报*,2019,28(4):649-656.

ZHAO Y,GUO R,ZHENG X F,*et al.* Soil fertility analysis and evaluation in *Ziziphus jujube* orchards in Dali[J]. *Acta*

*Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2019, 28 ( 4 ): 649-656. (in Chinese)

[25] 曹尚银,沈程清,张玲,等. 枣不同品种的耐盐性[J]. *经济林研究*,2008(3):29-33.

[26] 刘永青,李玉才,李明军. 土壤局部施加不同种类有机肥对苹果园土壤理化性质和果树养分利用率的改善[J]. *西北林学院学报*,2020,35(1):112-117.

LIU Y Q,LI Y C,LI M J. Improvement of soil physical and chemical properties and nutrient utilization rate of apple trees by localized application of different organic fertilizers[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 112-117. (in Chinese)

[27] 木合塔尔·扎热,哈地尔·依沙克,赵蕾,等. 有机肥与化肥配施对土壤微生物、土质及骏枣果实品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*,2017,35(5):182-188.

MUHTAR Z,ABDUKADIR I,ZHAO L. Effects of different application proportion of organic manure and chemical fertilizer on fruit quality of Jun jujube soil microorganism and properties[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2017,35(5):182-188. (in Chinese)

(上接第 87 页)

[31] 王会霞,石辉,张雅静,等. 大叶女贞叶面结构对滞留颗粒粒径的影响 [J]. *安全与环境学报*,2015,15(1):258-262.

WANG H X,SHI H,ZHANG Y J,*et al.* Influence of surface structure on the particle size distribution captured by *Ligustrum lucidum*[J]. *Journal of Safety and Environment*,2015,15(1):258-262. (in Chinese)

[32] 孙晓丹,李海梅,孙 丽,等. 8 种灌木滞尘能力及叶表面结构研究[J]. *环境化学*,2016,35(9):1815-1822.

SUN X D,LI H M,SUN L,*et al.* Study on the dust-retaining capability of eight shrubs and leaf surface structure[J]. *Environmental Chemistry*,2016,35(9):1815-1822. (in Chinese)

[33] 张桐,洪秀玲,孙立炜,等. 6 种植物叶片的滞尘能力与其叶面结构的关系[J]. *北京林业大学学报*,2017,39(6):70-77.

ZHANG T,HONG X L,SUN L W,*et al.* Particle-retaining characteristics of six tree species and their relations with micro-configurations of leaf epidermis. [J]. *Journal of Beijing Forestry University*,2017,39(6):70-77. (in Chinese)

[34] BURKHARDT J,PETERS K,CROSSLEY A. The presence of structural surface waxes on coniferous needles affects the pattern of dry deposition of fine particles [J]. *Journal of Experimental Botany*,1995,46(7):823-831.

[35] 余曼,汪正祥,雷耘,等. 武汉市主要绿化树种滞尘效应研究[J]. *环境工程学报*,2009,3(7):1333-1339.

YU M,WANG Z X,LEI Y,*et al.* Study on dust detaining effect of major species of greening trees in Wuhan[J]. *Journal of Environmental Engineering*,2009,3(7):1333-1339. (in Chinese)

(上接第 101 页)

[20] 龚垒. 杉木幼树冠层结构与生物量关系的初步研究[J]. *生态学报*,1984,4(3):248-258.

GONG L. A preliminary study on the relationship between canopy structures and biomass of young Chinese firs[J]. *ActaEcologica Sinica*,1984,4(3):248-258. (in Chinese)

[21] 刘兆刚,刘继明,李凤日,等. 樟子松人工林树冠结构的分形分析[J]. *植物研究*,2005,25(4):465-470.

LIU Z G,LIU J M,LI F R,*et al.* Fractal analysis of crown structure in *Pinussylvestrismongolica* plantation[J]. *Bulletin of Botanical Research*,2005,25(4):465-470. (in Chinese)

[22] 徐程扬. 不同光环境下紫椴幼树树冠结构的可塑性响应[J]. *应用生态学报*,2001,12(3):339-343.

XU C Y. Response of structural plasticity of *Tilia amurensis* sapling crowns to different light conditions[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*,12(3):339-343. (in Chinese)

[23] 朱春全,雷静品,刘晓东,等. 集约与粗放经营杨树人工林树冠

结构的研究[J]. *林业科学*,2000,36(2):60-68.

ZHU C Q,LEI J P,LIU X D,*et al.* Crown structure of poplar trees in intensive and extensive management plantations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*,2000,36(2):60-68. (in Chinese)

[24] 方升佐,徐锡增,唐罗忠. 水杉人工林树冠结构及生物生产力的研究[J]. *应用生态学报*,1995,6(3):225-230.

FANG S Z,XU X Z,TANG L Z. Studies on the crown structure and biomass production of *Metasequoia glyptostroboides* plantations[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6 ( 3 ): 225-230. (in Chinese)

[25] 郭诚,汪季,党晓宏,等. 吉兰泰盐湖不同造林方式下梭梭枝系构型特征分析[J]. *西北林学院学报*,2020,35(3):36-42.

GUO Y,WAGN J,DAGN X H,*et al.* Branching architecture analysis of *Haloxylon ammodendron* under different afforestation methods in Jilantai salt lake[J]. *Journal of Northwest Forestry University*,2020,35(3):36-42. (in Chinese)