

# 夏季绿化树种滞留 PM<sub>2.5</sub> 与叶片微形态特征研究

赵云阁<sup>1</sup>, 鲁笑颖<sup>2</sup>, 刘斌<sup>1</sup>, 鲁绍伟<sup>3</sup>, 陈波<sup>3</sup>, 李少宁<sup>3</sup>

(1. 河北农业大学 林学院, 河北 保定 071000; 2. 北京市大兴区南海子郊野公园管理处, 北京 110000; 3. 北京市农林科学院 林业果树研究所 北京林果业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 100093)

**摘要:** 研究于夏季在北京大兴选取 6 个绿化树种(油松、白皮松、柳树、五角枫、银杏、杨树)为对象,应用气溶胶再发生器对林木叶片 PM<sub>2.5</sub> 吸附量进行定量分析,并应用原子力显微镜(AFM)观察叶表面微形态特征,测定叶表面粗糙度等参数,阐释植物叶片吸附 PM<sub>2.5</sub> 机制。结果表明:单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量排序为:油松[(0.057±0.004) μg/cm<sup>2</sup>] > 白皮松[(0.052±0.001) μg/cm<sup>2</sup>] > 柳树[(0.041±0.003) μg/cm<sup>2</sup>] > 五角枫[(0.036±0.007) μg/cm<sup>2</sup>] > 杨树[(0.021±0.002) μg/cm<sup>2</sup>] > 银杏[(0.018±0.003) μg/cm<sup>2</sup>];从月份变化来看,单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量表现为 9 月[(0.040±0.017) μg/cm<sup>2</sup>] > 7 月[(0.039±0.015) μg/cm<sup>2</sup>] > 8 月[(0.034±0.016) μg/cm<sup>2</sup>];针叶树种单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量高于阔叶树种。植物叶表面存在褶皱、沟槽,粗糙度相对较高的树种,吸附 PM<sub>2.5</sub> 能力较强;叶表面相对光滑,突起部位轮廓较平缓,粗糙度小的树种,其吸附 PM<sub>2.5</sub> 能力也相对较弱;6 个树种粗糙度大小与其吸附 PM<sub>2.5</sub> 能力大小顺序完全一致,呈显著正相关(R<sup>2</sup>=0.957)。因此,为提高城市植被的环境效应,可选择叶表面形态有利于吸滞 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物的油松、白皮松等针叶树种。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 叶表面微形态; 原子力显微镜(AFM); 气溶胶再发生器; 绿化树种

中图分类号: X173

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2016)06-0052-07

## Study on Four Kinds of Greening Tree Retention PM<sub>2.5</sub> and Leaf Surface Morphology During Summer in Beijing, China

ZHAO Yunge<sup>1</sup>, LU Xiaoying<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>1</sup>, LU Shaowei<sup>3</sup>, CHEN Bo<sup>3</sup>, LI Shaoning<sup>3</sup>

(1. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China;

2. Daxing District Nanhaizi Country Park Management Office of Beijing City, Beijing 110000, China;

3. Forestry and Pomology Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-environmental Improvement With Forestry and Fruit trees, Beijing 100093, China)

**Abstract:** Six kinds of greening tree species (*Pinus tabulaeformis*, *Pinus bungeana*, *Salix babylonica*, *Acer mono Maxim*, *Ginkgo biloba*, *Populus L.*) in Daxing District of Beijing were studied, aerosol generator was applied to quantitatively study leaves PM<sub>2.5</sub> adsorption, and atomic force microscopy (AFM) was used to observe leaf surface morphology, and analyze the leaf surface roughness parameters, interpret the PM<sub>2.5</sub> adsorbing mechanism of green plant. The results showed that the sequence of PM<sub>2.5</sub> adsorption capacity per unit leaf area was *Pinus tabulaeformis* [(0.057±0.004) μg/cm<sup>2</sup>] > *Pinus bungeana* [(0.052±0.001) μg/cm<sup>2</sup>] > *Salix babylonica* [(0.041±0.003) μg/cm<sup>2</sup>] > *Acer mono Maxim* [(0.036±0.007) μg/cm<sup>2</sup>] > *Populus L.* [(0.021±0.002) μg/cm<sup>2</sup>] > *Ginkgo biloba* [(0.018±0.003) μg/cm<sup>2</sup>], and the sequence of PM<sub>2.5</sub> adsorption capacity per unit leaf area in different months was September [(0.040±0.017) μg/cm<sup>2</sup>] > July [(0.039±0.015) μg/cm<sup>2</sup>] > August [(0.034±0.016) μg/cm<sup>2</sup>]; PM<sub>2.5</sub> adsorption of coniferous species was higher than that of broad-leaf species. Fluted or grooved leaves had greater roughness than those with smooth leaf surface, and PM<sub>2.5</sub> adsorption capacity enhanced with the increase of roughness of leaf surface. Tendency of PM<sub>2.5</sub> adsorption capacity consistently changed with leaves roughness, and the leaves roughness was significantly related to PM<sub>2.5</sub> adsorption capacity (R<sup>2</sup>=0.957). In order to improve the environmental effect of urban vegetation, the tree species whose leaf surface morphology is conducive to adsorb PM<sub>2.5</sub> and other particles should be planted, such as *Pinus tabulaeformis* and *Pinus bungeana*.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>; leaf surface morphology; Aerosol generator; atomic force microscopy; greening tree

收稿日期: 2016-04-19

修回日期: 2016-05-03

资助项目: 国家林业局林业公益性行业科研专项(20130430101);北京市农林科学院科技创新能力建设专项“北京燕山森林生态国家站基础数据平台建设”;科技创新服务能力建设—协同创新中心—林果业生态环境功能提升协同创新中心(2011 协同创新中心)(市级)(PXM2016\_014207\_000038)

第一作者: 赵云阁(1990—)女,河北阳原人,在读硕士,主要研究方向:森林经理学。E-mail: 675420514@qq.com

通信作者: 李少宁(1975—),男,河北滦县人,博士,副研究员,主要从事城市森林生态功能研究。E-mail: lishaoning@126.com

随着工业化、城市化进程的不断加快,城市空气环境日益恶化,大气颗粒物成为众多污染物中的首要污染物<sup>[1]</sup>。由于颗粒物不仅影响大气能见度,加剧温室效应<sup>[2]</sup>,而且含有重金属、致癌物质和细菌等,能够对人体健康产生极大危害<sup>[3-4]</sup>。尤其是可吸入颗粒物 PM<sub>2.5</sub>,又称为细颗粒物,由于其粒径小、比表面积大对人体危害尤为突出<sup>[5-7]</sup>。而北京地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度远高于发达国家大城市大气中的浓度,已经达到相当严重的污染程度<sup>[8]</sup>。因此,采取有效措施防治 PM<sub>2.5</sub> 污染对人类的危害已经成为一项刻不容缓的任务。

除减少污染源和空气污染物的排放量,利用城市园林植物对大气颗粒物的滞留作用也是一种净化大气环境的有效手段<sup>[9-10]</sup>,且在古罗马时期就被人们所认识<sup>[11]</sup>。到目前为止,许多国内外学者均证明林木可以降低大气污染程度,且作用非常明显<sup>[12]</sup>。如,McDonald 等<sup>[13]</sup>在英国的研究发现,一些城市地区的 1/4 种植树木可以使 PM<sub>10</sub> 浓度降低 2%~10%;有研究显示<sup>[14]</sup>:在芝加哥,如果城市树木占城市总面积的 11%,那么美国每年将清除 234 t PM<sub>10</sub>;在上海的一项研究结果表明<sup>[15]</sup>:与外部城市林地相比,在距离 50~100 m 的林内颗粒物浓度降低了 9.1%。因此,关于植物吸附 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物作用机制及影响因素的研究意义重大。而目前国内外有关植物滞尘效应的研究主要是 TSP 和 PM<sub>10</sub>,对 PM<sub>2.5</sub> 的研究涉及较少。本研究主要针对林木叶片吸附颗粒物的直接方式进行探讨,并利用原子力显微镜(Atomie Force Microscopy,缩写为 AFM)得到叶表面结构特征,探讨叶表面微形态对植物滞尘能力的影响,为筛选滞尘效果好的园林绿化树种提供依据,对降低城市大气颗粒污染物浓度和提高环境质量具有重要意义。

## 1 研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地选取位于大兴区东北部的南海子公园,是北京四大郊野公园之一,也是北京最大的湿地公园。地理坐标为东经 116°27'41",北纬 39°46'10",属于工业区与城乡结合部,人类活动频繁,交通量较大。园内主要乔木树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、桧柏(*Sabina chinensis*)、白皮松(*Pinus bungeana*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、国槐(*Sophora japonica*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*),主要灌木有大叶黄杨(*Buxus megistophylla*)、海棠(*Malus spectabilis*),主要草本有景天(*Sedum spectabilis*)、鸢尾(*Iris tectorum*)等。试验期间研究地内 PM<sub>2.5</sub> 污染情况由北京市农林科学院林业果树研究所在南海子国槐林内

建立的城市森林环境空气质量监测站获得(表 1)。

表 1 2014 年 7—9 月研究地内 PM<sub>2.5</sub> 污染情况

月份	一级 (0~35 μg/m <sup>3</sup> )	二级 (35~75 μg/m <sup>3</sup> )	超标 (≥75 μg/m <sup>3</sup> )	PM <sub>2.5</sub> 均值
7 月	0 d	4 d	27 d	98.23
8 月	3 d	10 d	18 d	69.31
9 月	0 d	8 d	22 d	92.57

### 1.2 数据采集

PM<sub>2.5</sub> 实时浓度值由北京市农林科学院林业果树研究所在南海子国槐林内建立的城市森林环境空气质量监测站获得,在监测站内设有米特(Meter)全自动气象站,可以实时观测气温  $T_a$ (°C)、相对湿度 RH(%)、风速  $W$ (m/s)、降水  $P$ (mm)等气象因子。

### 1.3 树种选择

以北京市常见绿化树种为基调,在北京市大兴区南海子公园选择常见且林龄相近、海拔一致的针叶乔木 2 种,阔叶乔木 4 种,见表 2:

表 2 试验树种基本情况

树种	拉丁学名	林龄/a	树高/m
油松	<i>Pinus tabulaeformis</i>	14	10.66±0.09
白皮松	<i>Pinus bungeana</i>	13	9.81±0.23
银杏	<i>Ginkgo biloba</i>	14	11.12±0.12
杨树	<i>Populus L.</i>	13	13.24±0.31
五角枫	<i>Acer elegantulum</i>	14	10.26±0.21
柳树	<i>Salix babylonica</i>	14	10.51±0.25

### 1.4 叶片采集

试验时间为 2014 年 7 月—9 月,在确定的每个树种中分别选择 3 棵样树(林龄相近),采集前对树木叶片进行了清洗标记,30 d 后,在树冠的上、中、下部位及东、南、西、北 4 个方向对标记过的叶片分别进行采集,将采集的叶片封存于纸质采集袋(无静电)中带回实验室处理。

### 1.5 单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量测定

叶片吸滞 PM<sub>2.5</sub> 含量是由气溶胶再发生器(QR-JZFSQ-D)<sup>[16]</sup>获得,将待测叶片放入气溶胶再发生器中,通过风蚀原理,通过搅动、吹风、去静电等处理,叶片上的颗粒物被吹起,制成气溶胶,之后利用 Dustmate 手持 PM<sub>2.5</sub> 监测仪测出制成气溶胶中 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度,每个树种进行三次重复,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的叶面积  $S$ (cm<sup>2</sup>),由公式(1)计算单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量  $M$ (μg/cm<sup>2</sup>)。

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

式中: $M$  为单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量(μg/cm<sup>2</sup>); $m$  为放入气溶胶再发生器叶片的 PM<sub>2.5</sub> 吸附量(μg); $S$  为放入气溶胶再发生器料盒中所有叶片的叶面积(cm<sup>2</sup>)。

## 1.6 叶表面特征观测

将样品叶片用蒸馏水冲洗叶片后,除去叶表面水分,尽量选取平坦的表面,避开叶脉。将阔叶树叶片制成约  $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  的样本,针叶树种制成长度约  $1\text{ cm}$  的样本。在室温条件下,利用原子力显微镜(SPI3800-SPA-400, Seiko Instruments Inc.)对样品进行扫描和拍摄,扫描速率  $0.5\text{ Hz}$ ,横向分辨率为  $0.2\text{ nm}$ ,垂直分辨率为  $0.01\text{ nm}$ ,最大扫描范围为  $10\text{ }\mu\text{m} \times 10\text{ }\mu\text{m}$ 。所有图像均是高度模式,未对做任何处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同树种叶片吸滞 $\text{PM}_{2.5}$ 能力分析

图 1 表明 6 种针阔叶乔木在不同月份单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量有明显差别。其中,7 月份各树种单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量介于  $0.021 \pm 0.001 \sim 0.058 \pm 0.011\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,其大小排序依次为:油松( $0.058 \pm 0.011\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) > 白皮松( $0.051 \pm 0.005\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) > 柳树( $0.042 \pm 0.006\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) > 五角枫( $0.039 \pm 0.002\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) > 杨树( $0.021 \pm 0.001\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) > 银杏( $0.021 \pm 0.001\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ),单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量最大的油松为吸附量最小的银杏的 2.76 倍;8 月份各树种单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量范围为  $0.016 \pm 0.001\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \sim 0.053 \pm 0.008\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,其吸附量大小排序与 7 月份相同,但总体吸附量低于 7 月;9 月份各树种单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量相较于前两月较高,吸附量值在  $0.017 \pm 0.002\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \sim 0.061 \pm 0.003\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,前两位分别是油松( $0.061 \pm 0.003\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) 和白皮松( $0.054 \pm 0.005\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ),其余阔叶树的吸附量(柳树、五角枫、杨树和银杏)依次为最大吸附量的 70.5%, 67.2%, 37.7% 和 27.9%。由此可得,在不同月份供试树种单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量大小整体排序一致,均为:油松 > 白皮松 > 柳树 > 五角枫 > 杨树 > 银杏。其中,针叶树种间单

位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量相差不大,且明显高于阔叶树种。这主要是由于针叶树种相较于阔叶树种,叶表面存在较多绒毛和沟壑,增大叶表面粗糙度,从而更易于颗粒物的富集;且针叶树种叶片多油脂,叶表面粘性大,对颗粒物具有良好的吸附作用。

从不同月份来看,不同树种单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量均值基本表现为 9 月最大,其次是 7 月,8 月吸附量最低,银杏除外,其单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量表现为 7 月( $0.021 \pm 0.001\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) > 9 月( $0.017 \pm 0.031\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ) > 8 月( $0.016 \pm 0.025\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$ )。其中,9 月和 7 月吸附量差别不大,但均明显高于 8 月的吸附量,二者分别为 8 月  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量的 1.18 倍和 1.15 倍。8 月份外界环境  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较低,可能是造成当月植物叶片  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量偏低的原因之一。

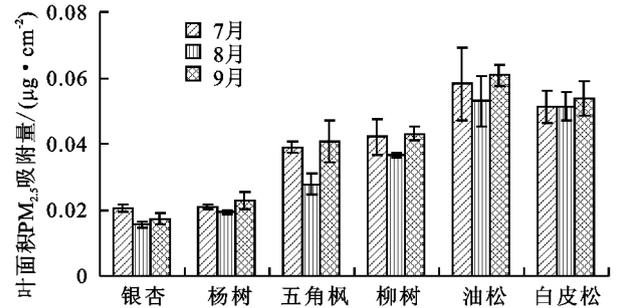


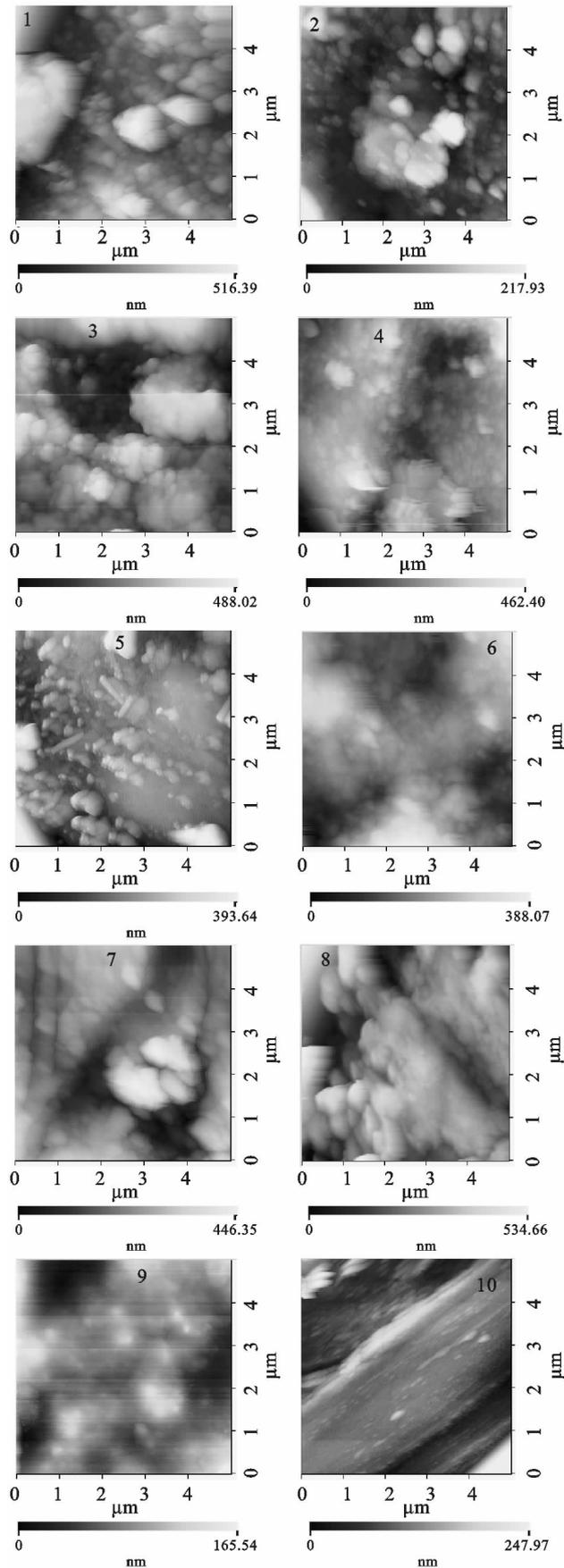
图 1 不同树种单位叶面积  $\text{PM}_{2.5}$  吸附量

### 2.2 不同树种叶表面 AFM 扫描特征

通过 AFM 对叶片表面进行观察,得到图 2 所示扫描范围为  $5\text{ }\mu\text{m} \times 5\text{ }\mu\text{m}$  的二维形态图。二维图以色度值的高低表示物体高度的变化,色度值越高表示高度越高,色度值越低表示高度越低。试验树种叶表面详细特征见表 3,吸附  $\text{PM}_{2.5}$  能力强的油松和白皮松表面均存在凹槽或沟状突起,粗糙度较大;吸附能力相对较弱的柳树和五角枫也存在突起和凹陷,但轮廓相对平缓;而吸附能力最弱的杨树和银杏,表面整体平滑,无明显突起或凹陷,粗糙度较小。

表 3 不同树种叶表面 AFM 扫描特征

树种	二维图像		三维图像	
	正面	背面	正面	背面
油松	高低不平,存在较多凹陷和突起,粗糙度较大		轮廓虽然不高,但突起和凹陷部位很多,粗糙度较高	
白皮松	存在条状突起和沟状凹陷		局部存在轮廓较高的突起和明显的凹陷,高度相差较大,粗糙度较高	
五角枫	局部存在突起,且突起的表面轮廓高度较大	存在高低不平的峰和谷,具有一定的粗糙度	存在褶皱,褶皱起伏较大、高低不平,有明显凹槽	存在许多轮廓不一致的突起,粗糙度较高
银杏	突起部位较光滑,局部存在轮廓较小的凹陷	叶片较平滑,无明显突起和凹陷	存在局部存在突起,但突起程度不大	表面整体平坦,无明显褶皱和突起部位
杨树	整体高度相差不大,无明显突起和凹陷,较为光滑	局部存在凹陷,凹陷程度不大,粗糙度相对较小	存在部分隆起和凹陷部位,但隆起部位间隙较大	存在少许突起和凹陷部位,但其表面轮廓均较小
柳树	存在沟槽状凹陷,突起部位轮廓值较高	叶表凹凸不平,粗糙度较大	突起部位较少,但中间部位存在较深的凹槽	存在高低不平的峰和谷,且突起的表面轮廓较大



注:1—8 分别为五角枫、银杏、杨树和柳树叶正面、背面的二维图像; 9—10 分别为油松和白皮松二维图像。

图 2 不同树种叶表面 AFM 扫描图像

### 2.3 不同树种叶表面 AFM 扫描参数

从 6 个不同树种叶表面粗糙度(见表 4)显示:整体上,叶表面粗糙度值介于  $47.46 \pm 14.52 \sim 81.75 \pm 3.06$  nm,其大小顺序为:油松( $81.75 \pm 3.06$  nm) > 白皮松( $75.01 \pm 4.48$  nm) > 柳树( $70.18 \pm 2.85$  nm) > 五角枫( $68.16 \pm 7.28$  nm) > 杨树( $58.20 \pm 3.94$  nm) > 银杏( $47.46 \pm 14.52$  nm),这与其单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量大小排序一致。从也表正反面观测度来看,阔叶树各树种叶表面正面粗糙度范围为  $59.79 \pm 7.23 \sim 69.91 \pm 3.13$  nm,粗糙度最大的是柳树,最小的则为银杏,两者间粗糙度值相差 10.12 nm;背面粗糙度排序同正面相同,均为柳树 > 五角枫 > 杨树 > 银杏,最大值为最小值的 1.17 倍。由上述数据可见,4 个阔叶树种叶表面粗糙度均表现为背面高于正面;其中柳树、五角枫和杨树的叶表面粗糙度正、背面无明显差别,而银杏、背面叶片粗糙度明显高于正面,其背面粗糙度为正面的 1.71 倍。此外,由表 4 中数据可以看出,峰谷值(P-V)、微粗糙度(RMS)和微观不平度十点高度(R<sub>z</sub>)三个特征值也均与叶片粗糙度(R<sub>a</sub>)具有相同变化趋势。

综上所述,树种叶片对 PM<sub>2.5</sub> 的吸附量与其表面粗糙度大小排序极为一致,且二者之间呈显著相关(见图 3)。由图可知,叶表面粗糙度最小值为 47.46 nm,其对应树种的单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量也为最小值( $0.018 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ );当叶表面粗糙度逐渐增大,相应树种叶片单位面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量也随之增大,粗糙度达到最大值(81.75 nm)时,其对应树种的单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量也达到最大( $0.057 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )。当叶表粗糙度值较低时,应树种叶片 PM<sub>2.5</sub> 吸附量变化幅度平缓,粗糙度较大时,PM<sub>2.5</sub> 吸附量急剧变化。由此说明,植物叶片对 PM<sub>2.5</sub> 的吸附能力因叶表面粗糙度的增大呈逐渐上升的趋势。

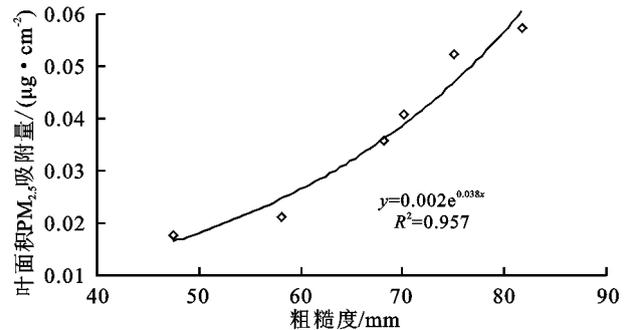


图 3 单位叶面积 PM<sub>2.5</sub> 吸附量与叶表面粗糙度的关系

## 3 讨论

### 3.1 不同树种吸附 PM<sub>2.5</sub> 特征

树木能够有效吸收和减少城市大气颗粒物,被称

为城市粉尘过滤器<sup>[17]</sup>。不同树种吸附 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物的能力有所不同,滞尘能力的差异主要由叶片的形态结构特征决定<sup>[18]</sup>,包括叶面粗糙度、叶表分泌物、绒毛的形状和数量、叶面倾角和叶质地等<sup>[19]</sup>。Beckett 等<sup>[20]</sup>的研究表明叶面的粗糙度影响细小颗粒物的滞留,而较大颗粒物的滞留主要受颗粒物与叶面之间的物理作用力影响。Sabin 等<sup>[21]</sup>认为表面粗糙的叶片,且具有绒毛、沟状凸起、粘液油脂或较短的叶柄,其吸附 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物的能力则较强。Freer-Smith 等<sup>[22]</sup>、认为叶表粗糙或凹凸不平、具有沟状组织、表面有褶皱等的植物叶片更容易使颗粒物聚集其中;石辉<sup>[23]</sup>等研究结果同样表明叶表面存在大量的沟状、孔状峰谷区域或凹陷,会导致叶表面粗糙度较高,从而有利于颗粒物的滞留。本研究中油松和白皮

松叶表面存在起伏较大的凸起,具有沟状组织,粗糙度较大,且二者吸附 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物能力最强,这与以上研究结论完全一致。而贾彦等<sup>[24]</sup>认为叶表面吸附 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物的能力叶表面沟状结构的尺寸有关,沟壑宽度小于或等于粉尘颗粒粒径时,将不会增强植物叶片的滞尘能力;王建辉等<sup>[25]</sup>对重庆市不同绿地的不同植物滞尘能力进行调查研究表明,叶表面被毛或呈不规则褶皱滞尘能力强,叶表面光滑或呈瘤状突起滞尘能力相对较弱。本研究中杨树和银杏表面具有少许突起部位,但突起部位间距较大,表面较为光滑,并不能有效滞留 PM<sub>2.5</sub> 等细小颗粒物,造成二者吸附 PM<sub>2.5</sub> 能力最弱。这与以往学者研究结果完全相同,故在城市环境污染严重的区域可以大量种植针叶树种油松和白皮松。

表 4 不同树种叶片 AFM 观察参数

树种	正背面	轮廓算数	峰谷值	微粗糙度/	微观不平度	表面积/	面积比
		平均偏差/nm	P-V/nm	nm	十点高度/nm	nm <sup>2</sup>	
五角枫	正面	66.69±9.00	529.73±25.64	94.80±7.64	259.07±51.21	2.92×10 <sup>7</sup> ±1.90×10 <sup>6</sup>	1.18±0.08
	背面	69.64±6.72	709.13±104.12	103.95±17.56	354.77±35.49	3.08×10 <sup>7</sup> ±5.00×10 <sup>5</sup>	1.24±0.02
	均值	68.16±7.28	619.43±119.39	99.37±13.11	306.92±65.58	3.00×10 <sup>7</sup> ±1.52×10 <sup>6</sup>	1.21±0.06
银杏	正面	35.14±4.33	321.72±16.73	45.91±4.23	159.77±18.58	2.57×10 <sup>7</sup> ±1.40×10 <sup>5</sup>	1.04±0.01
	背面	59.79±7.23	471.76±135.93	66.10±17.70	188.50±48.55	2.61×10 <sup>7</sup> ±5.11×10 <sup>5</sup>	1.05±0.02
	均值	47.46±14.52	396.74±119.40	56.01±15.96	174.13±36.45	2.59×10 <sup>7</sup> ±3.91×10 <sup>5</sup>	1.04±0.02
杨树	正面	57.84±5.19	513.20±24.53	74.27±5.12	271.47±30.23	2.78×10 <sup>7</sup> ±1.17×10 <sup>6</sup>	1.12±0.05
	背面	58.56±3.39	525.17±27.59	74.57±6.47	277.40±38.55	2.67×10 <sup>7</sup> ±4.24×10 <sup>5</sup>	1.08±0.02
	均值	58.20±3.94	519.18±24.25	74.42±5.22	274.43±31.15	2.72×10 <sup>7</sup> ±1.02×10 <sup>6</sup>	1.10±0.04
柳树	正面	69.91±3.13	651.87±30.50	90.36±16.10	294.63±23.28	2.71×10 <sup>7</sup> ±2.29×10 <sup>5</sup>	1.11±0.02
	背面	70.45±3.21	624.00±19.07	95.79±12.73	329.97±60.51	2.93×10 <sup>7</sup> ±3.40×10 <sup>6</sup>	1.18±0.14
	均值	70.18±2.85	637.93±27.40	93.08±13.31	312.30±45.34	2.82×10 <sup>7</sup> ±2.47×10 <sup>6</sup>	1.15±0.10
油松	均值	81.75±3.06	700.13±71.81	89.53±1.71	345.24±22.56	2.62×10 <sup>7</sup> ±1.30×10 <sup>6</sup>	1.08±0.09
白皮松	均值	75.01±4.48	684.17±68.86	91.84±4.93	336.23±10.25	2.68×10 <sup>7</sup> ±3.750×10 <sup>5</sup>	1.08±0.02

### 3.2 叶表面微形态与吸附 PM<sub>2.5</sub> 能力的关系

植物吸滞大气颗粒物能力差异与其叶片表面特性(绒毛分布密度、形态、粗糙程度等)差异密不可分<sup>[26]</sup>。AFM 能够对叶表面进行直接观察,且可以使叶表面保持原有形态,在临近生理状态下观看叶表特征结构。从叶表微结构特征对照图可以看出,叶片能够阻滞大气颗粒物主要是利用其细微结构。叶表面粗糙的树种滞尘能力较强,叶表面光滑的树种滞尘能力则相对较弱<sup>[1]</sup>。不同叶片吸附 PM<sub>2.5</sub> 能力有所差异,本研究中的油松和白皮松叶表面存在大量沟状、孔状峰谷区域,叶表面凹凸不平,叶表面粗糙度较高,这样的叶片结构有利于颗粒物的沉积,从而导致二者吸附 PM<sub>2.5</sub> 等颗粒物的能力明显强于其余 4 个树种。王蕾等<sup>[27]</sup>的研究表明,叶表面微形态粗糙程度越大,其吸附的颗粒物越

多;刘玲等<sup>[28]</sup>研究同样显示,叶片上下表皮凹凸不平可使叶表面呈现沟状,阻止颗粒物的再悬浮,因而使叶片吸附的颗粒物增多。本研究中的柳树和五角枫相对于杨树和银杏叶表面 AFM 图像呈现出多褶皱,凹凸不平,叶表面粗糙度明显高于杨树和银杏叶等特征,且二者对 PM<sub>2.5</sub> 等空气颗粒物的吸附作用也相对较大;而杨树和银杏叶表面特征则呈现出相对光滑,仅部分存在突起,但粗糙度不大的特征,致使其吸附 PM<sub>2.5</sub> 能力变弱,这与前人的研究结果一致。

Räsänen 等<sup>[29]</sup>模拟测定了欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)、垂枝桦(*Betula pendula*)、欧洲桦(*Betula pubescens*)和欧洲椴(*Tilia vulgaris*)叶片的滞尘能力及叶表面特征与滞尘的关系,发现叶小的欧洲赤松滞尘能力最高。Smith<sup>[30]</sup>和 Davidson 等<sup>[31]</sup>研究指出不同

植物截留粉尘的作用有明显差异,小叶或叶面粗糙的植物较之大叶或叶面光滑的植物具有更大的截留效益。有研究表明松科植物枝叶能分泌树脂、粘液等分泌物,从而促进颗粒物吸收,很难被雨水冲刷<sup>[32]</sup>。此外,研究发现大部分树种均无特殊分泌物存在<sup>[1,33]</sup>,这些均造成针叶树种相对阔叶树种来说具有较强的吸附颗粒物能力。研究中对针阔叶树种进行对比分析,发现在相同条件下针叶树种油松和白皮松单位叶面积  $PM_{2.5}$  吸附量明显大于其他阔叶树种,这与以往学者研究结果均一致。这充分说明叶片表面微结构特征是直接影响林木吸滞大气颗粒物的主要影响因子之一,因此,为了提高城市绿化树种吸滞大气颗粒物净化大气的的能力,需要进一步对叶表面结构开展定量化研究,来为城市生态绿化树种的选择配置提供参考。

## 4 结论

不同树种单位叶面积  $PM_{2.5}$  吸附量油松最大,白皮松次之,银杏最小,整体上表现为针叶树种大于阔叶树种;从不同月份来看,单位面积  $PM_{2.5}$  吸附量表现为9月>7月>8月。通过 AFM 观察和粗糙度计算,阐释了不同树种吸滞  $PM_{2.5}$  的机理,油松和白皮松叶表面存在沟槽和突起,粗糙度相对较高,吸附  $PM_{2.5}$  能力最强;银杏和杨树因其叶表面相对平整,突起部位均较为光滑,表面粗糙度较小,其吸滞  $PM_{2.5}$  能力也相对最弱;4个不同阔叶树种正背面粗糙度均值排序为与对应树种单位叶面积  $PM_{2.5}$  吸附量排序完全一致,单位叶面积  $PM_{2.5}$  吸附量随着粗糙度的增加而增大,P-V,RMS 和  $R_z$  参数具有与粗糙度  $R_a$  相同的变化特征。所以,在城市园林绿化建设中,选择滞尘能力相对较强的油松和白皮松等针叶树种,可以更好的吸附  $PM_{2.5}$  等空气污染物,从而产生更大的生态环境效益。

致谢:非常感谢南海子郊野公园在试验过程中给与的大力支持,特在此表示感谢!

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Christoforou C S, Salmon L G, Hannigan M P, et al. Trends in fine particle concentration and chemical composition in Southern California[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000,50(1):43-53.
- [3] David V B. Assessing the causality inference in the case of particulate pollution[J]. Environmental Health Perspectives, 2000,108(2):91-92.
- [4] 关欣,李巧云,文倩,等. 和田降尘与浮尘、扬尘、沙尘暴的关系研究[J]. 环境科学研究,2000,13(6):1-3.
- [5] Plaza J, Gomez-Moreno F J, Nunez L, et al. Estimation of secondary organic aerosol formation from semi-continuous OC-EC measurements in a Madrid suburban area [J]. Atmospheric Environment, 2006,40(6):1134-1147.
- [6] Hsu S C, Liu S C, Jeng W L, et al. Variations of Cd/Pb and Zn/Pb ratios in Taipei aerosols reflecting long-range transport or local pollution emissions[J]. Science of the Total Environment, 2005,347(1/3):111-121.
- [7] Deng W J, Louie P K K, Liu W K, et al. Atmospheric levels and cytotoxicity of PAHs and heavy metals in TSP and  $PM_{2.5}$  at an electronic waste recycling site in southeast China[J]. Atmospheric Environment, 2006,40(36):6945-6955.
- [8] 刘大猛,马永胜,高少鹏,等. 北京市区春季燃烧源大气颗粒物的污染水平和影响因素[J]. 现代地质,2005,19(4):627-633.
- [9] Beckett K P, Freer Smith P H, Taylor G. Effective tree species for local air quality management[J]. Journal of Arboriculture, 2000,26(1):12-19.
- [10] Chen Z X, Su X H, Liu S Z. Study of ecological effect of urban green space in Beijing [J]. Chin Landscape Architech, 1998,14(2):51-54.
- [11] Cowell F R. The garden as a fine art: From antiquity to modern times[M]. London: Weidenfeld and Nicolson, 1978.
- [12] Hwang H J, Yook 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.
- [13] McDonald A G, Bealey W J, Fowler D, et al. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of  $PM_{10}$  in two UK conurbations[J]. Atmospheric Environment, 2007,41(38):8455-8467.
- [14] McPherson E G, Nowak D J, Rowntree R A. Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago Urban Forest Climate Project. (Includes executive summary). Forest Service general technical report (Final)[R]. Delaware, OH (United States): Forest Service-Northeastern Forest Experiment Station, 1994.
- [15] Yin S, Shen Z, Zhou P, et al. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: An experimental approach in Shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2011,159(8):2155-2163.
- [16] 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(2):408-414.
- [17] 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.
- [18] Cai Y L, Song Y C. 2001. Adaptive ecology of lianas in

- tiantong evergreen broad-leaved forest, Zhejiang, China I. Leaf anatomical characters[J]. *Acta Phytocoecological Sinica*, 2001, 25(1):90-98.
- [19] 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]. *Ecotoxicity and Environmental Safety*, 2005, 60(2):228-235.
- [20] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Urban woodlands; their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 1998, 99(3):347-360.
- [21] Sabin L D, Hee Lim J, Teresa Venezia M, et al. Dry deposition and resuspension of particle-associated metals near a freeway in Los Angeles [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(39):7528-7538.
- [22] Free-Smith P H, Sophy H, Goodman A. The uptake of particulates by an urban woodland; Site description and particulate composition[J]. *Environmental Pollution*, 1997, 95(1):27-35.
- [23] 石辉, 王会霞, 李秧秧, 等. 女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察[J]. *生态学报*, 2011, 31(5):1471-1477.
- [24] 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):2362-2366.
- [25] 王建辉, 刘奕清, 邹敏. 永川城区主要绿化植物的滞尘效应[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(3):1079-1084.
- [26] 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.
- [27] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 等. 北京市六种针叶树叶面附着颗粒物的理化特征[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(3):487-492.
- [28] 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.
- [29] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, et al. Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees[J]. *Environmental pollution*, 2013, 183:64-70.
- [30] Smith W H. *Pollutant uptake by plants*[C]// Treshow M. *Air Pollution and Plant Life*. New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [31] Davidson C I, Wu Y L. Dry deposition of particles and vapors[J]. *Advances in Environmental Science*, 1990, 3(1):103-216.
- [32] Gao J H, Wang D M, Zhao L, et al. Airborne dust detainment by different plant leaves; Taking Beijing as an example[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(2):94-99.
- [33] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3):115-123.
- ~~~~~
- (上接第 51 页)
- [3] Lavelle P, Spain A V. *Soil ecology*[M]. Springer Science & Business Media, 2001.
- [4] Delgado-Baquerizo M, Maestre F T, Gallardo A, et al. Decoupling of soil nutrient cycles as a function of aridity in global drylands[J]. *Nature*, 2013, 502(7473):672-676.
- [5] Pauli H, Gottfried M, Dullinger S, et al. Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits[J]. *Science*, 2012, 336(6079):353-355.
- [6] Bagchi R, Gallery R E, Gripenberg S, et al. Pathogens and insect herbivores drive rainforest plant diversity and composition[J]. *Nature*, 2014, 506(7486):85-88.
- [7] 胥晓, 郑伯川, 陈友军. 嘉陵江流域植被景观的空间格局特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2007, 16(3):373-378.
- [8] 许炯心, 孙季. 嘉陵江流域年径流量的变化及其原因[J]. *山地学报*, 2007, 25(2):153-159.
- [9] 许炯心. 人类活动和降水变化对嘉陵江流域侵蚀产沙的影响[J]. *地理科学*, 2006, 26(4):432-437.
- [10] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法[J]. *生物多样性*, 1994, 2(4):231-239.
- [11] 鲍士旦. *土壤农化分析*[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [12] 王洪杰, 李宪文, 史学正, 等. 不同土地利用方式下土壤养分的分布及其与土壤颗粒组成关系[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(2):44-46.
- [13] 王国梁, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J]. *水土保持通报*, 2002, 22(1):1-5.
- [14] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J]. *生态学报*, 2005, 25(6):1299-1305.
- [15] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究[J]. *应用生态学报*, 2000, 11(4):557-563.
- [16] 白永飞, 陈佐忠. 锡林河流域羊草草原植物种群和功能群的长期变异性及其对群落稳定性的影响[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(6):641-647.
- [17] 李新荣, 张景光, 刘立超, 等. 我国干旱沙漠地区人工植被与环境演变过程中植物多样性的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(3):257-261.