

DOI: 10.5846/stxb201803020414

鲁绍伟, 蒋燕, 李少宁, 赵娜, 陈波. 北京西山绿化树种 $PM_{2.5}$ 吸附量及叶表面 AFM 特征分析. 生态学报, 2019, 39(10): - .

Lu S W, Jiang Y, Li S N, Zhao N, Chen B. Relationship between adsorption capacity of $PM_{2.5}$ and leaf surface characteristics of AFM for typical greening trees in the Western mountains of Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(10): - .

北京西山绿化树种 $PM_{2.5}$ 吸附量及叶表面 AFM 特征分析

鲁绍伟^{1,2,3}, 蒋 燕⁴, 李少宁^{1,2,3,*}, 赵 娜¹, 陈 波¹

1 北京市林业果树科学研究院, 北京 100093

2 北京燕山森林生态系统定位观测研究站, 北京 100093

3 北京林业生态环境功能提升协同创新中心, 北京 100093

4 西南林业大学生态与水土保持学院, 昆明 650224

摘要:以北京西山针阔叶树种(白皮松 *Pinus bungeana*、油松 *Pinus tabulaeformis*、柳树 *Salix babylonica*、五角枫 *Acer mono*、银杏 *Ginkgo biloba*、杨树 *Populus* spp.) 为研究对象, 应用气溶胶再发生器测定植物叶片夏秋季 $PM_{2.5}$ 吸附量, 同时用原子力显微镜 (AFM) 观察叶表面微形态特征, 并分析叶表面粗糙度等参数, 探讨树种叶表面特征与其 $PM_{2.5}$ 吸附能力间的相关性。结果表明: 针叶树种年均单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量 ($1.70 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 阔叶树种 ($0.48 \mu\text{g}/\text{cm}^2$); 各树种年均单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量大小排序为白皮松 ($1.71 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 油松 ($1.67 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 柳树 ($0.54 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 五角枫 ($0.51 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 银杏 ($0.47 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 杨树 ($0.39 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)。针叶树种单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量季节变化趋势为冬 ($2.86 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 春 ($1.39 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 秋 ($1.13 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 夏 ($0.96 \mu\text{g}/\text{cm}^2$); 而阔叶树种则是秋 ($0.56 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 夏 ($0.55 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 春 ($0.015 \mu\text{g}/\text{cm}^2$)。叶片粗糙度与单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量呈显著线性正相关 ($P < 0.01$), 其中, 针叶树种吸附 $PM_{2.5}$ 能力受粗糙度影响较明显。北京作为国际化大都市, 大气环境 $PM_{2.5}$ 污染趋于严重。因此, 本研究分析北京西山典型针阔叶树种 $PM_{2.5}$ 吸附量的季节差异及其影响因素, 探讨各树种叶片吸附 $PM_{2.5}$ 机理, 根据各树种吸附 $PM_{2.5}$ 特征及其与叶表面形态的关系, 对针阔叶树种进行合理配置, 充分发挥城市绿地系统的生态服务功能, 为城市绿化树种的科学选择提供参考。

关键词: 北京西山; 针阔叶树种; $PM_{2.5}$ 吸附量; AFM 特征; 粗糙度

Relationship between adsorption capacity of $PM_{2.5}$ and leaf surface characteristics of AFM for typical greening trees in the Western mountains of Beijing

LU Shaowei^{1,2,3}, JIANG Yan⁴, LI Shaoning^{1,2,3,*}, ZHAO Na¹, CHEN Bo¹

1 Forestry and Pomology Institute, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100093, China

2 Beijing Yanshan Forest Ecosystem Observation and Observation Station, Beijing 100093, China

3 Beijing Collaborative Innovation Center for Eco-Environmental Improvement with Forestry and Fruit Trees, Beijing 100093, China

4 College of Ecology and Water-soil Conservation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

Abstract: Six greening tree species (*Pinus bungeana*, *Pinus tabulaeformis*, *Salix babylonica*, *Acer mono*, *Ginkgo biloba*, *Populus* spp.) from the Western mountains of Beijing were selected as research materials. The $PM_{2.5}$ adsorption capacity of their leaves was measured in summer and autumn through the use of an aerosol generator. The surface micro-morphological

基金项目:北京市农林科学院科技创新能力建设资助项目 (KJ CX20160301, KJ CX20170601); 科技创新团队资助项目 (TWKST201609); 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) (PXM2017_014207_000024)

收稿日期: 2018-03-02; 网络出版日期: 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lishaoning@126.com

characteristics of the collected leaves were also analyzed by atomic force microscopy (AFM) to determine the leaf surface roughness parameters. The relationship between the $PM_{2.5}$ adsorption capacity and the micro-morphological characteristics of the collected leaves were investigated. The results showed that the average annual absorption capacity of $PM_{2.5}$ per unit leaf area of coniferous species ($1.70 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) was larger than that of broad-leaved trees ($0.48 \mu\text{g}/\text{cm}^2$). The order of the average annual absorption capacities of $PM_{2.5}$ per unit leaf area for these trees was *P. bungeana* ($1.71 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), *P. tabulaeformis* ($1.67 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), *Salix babylonica* ($0.54 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), *Acermono* ($0.51 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), *Ginkgo biloba* ($0.47 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), and *Populus* spp. ($0.39 \mu\text{g}/\text{cm}^2$). The seasonal adsorption capacities per unit leaf area of $PM_{2.5}$ for coniferous trees followed the order winter ($2.86 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), spring ($1.39 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), autumn ($1.13 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), and summer ($0.96 \mu\text{g}/\text{cm}^2$); and autumn ($0.56 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), summer ($0.55 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), and spring ($0.015 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) for broad-leaved trees. There was a significant positive linear correlation between leaf roughness and $PM_{2.5}$ adsorption per unit area ($P < 0.01$), and the adsorption capacities of $PM_{2.5}$ for coniferous species were significantly affected by leaf surface roughness. The atmospheric environment of Beijing, as an international metropolis, tends to be seriously polluted by $PM_{2.5}$. According to the seasonal characteristics of $PM_{2.5}$ adsorption and the relationship between adsorption capacity of $PM_{2.5}$ and the micro-morphological characteristics for collected leaves from these greening trees, a suitable allocation of coniferous and broad-leaf trees with their different adsorption capacities of $PM_{2.5}$ could be applied to urban green space system and provide basic data for the scientific screening of city greening tree species.

Key Words: Western mountains of Beijing; broad-leaf trees; adsorption capacities of $PM_{2.5}$; AFM characteristics; leaf surface roughness

空气颗粒物已成为大气首要污染物,引起环境空气质量下降,改变大气辐射平衡,危害森林和农作物、改变海岸带或流域养分平衡等^[1]。空气中的悬浮细颗粒物,特别是 $PM_{2.5}$ 因其表面积大、附着能力强,可携带大量病毒、病菌进入人体肺部和血液循环中,引发哮喘病、支气管炎、心脏病等疾病,对人体健康的危害极大^[2-5]。城市森林系统具有减尘、防尘、滞尘和阻尘功能,可净化大气、提高空气质量。Nowak 等^[6] 研究发现美国城市乔灌木植被每年滞移大气污染物约 711000 t,生态价值约 380 亿美元。王兵等^[7] 认为植物叶片可截留和固定污染颗粒物,已成为降低大气污染的重要滤体,且该净化功能与树木叶片特征、叶表结构、树叶密集程度、叶面倾斜度及本身润湿性关系密切^[8-10],刘璐等^[9] 研究得出植物叶片的滞尘能力主要受叶面蜡含量、气孔密度、叶片接触角大小影响。王会霞等^[11] 指出叶片表面绒毛数量、形态及分布状况对 $PM_{2.5}$ 滞尘量有重要影响,陈波等^[12] 发现白皮松 (*Pinus bungeana*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*) 叶表面凹凸起伏大,粗糙度大, $PM_{2.5}$ 滞尘量大;银杏、山杨因叶表面光滑、粗糙度小,且多为长圆形气孔, $PM_{2.5}$ 滞尘量小。这些研究主要集中在植物 $PM_{2.5}$ 吸附量大小及植物本身生理生态特征、叶片结构对吸附力的影响,缺乏专门对针阔叶树种 $PM_{2.5}$ 吸附量季节差异、叶表面微形态结构对树种 $PM_{2.5}$ 吸附能力影响的深入剖析。刘斌等^[13] 虽对南海子 11 种植物四季滞尘能力进行观察,但其重点关注自然和饱和状态下树种 $PM_{2.5}$ 滞尘量差异比较,缺乏对滞尘影响机理和季节差异性及影响因子方面的研究。

北京作为国际化大都市,空气颗粒物已成为最严重的环境污染问题之一。为此,笔者选择北京西山森林公园 6 种典型针阔叶树种 [(白皮松 *P. bungeana*、油松 *P. tabulaeformis*、柳树 *Salix babylonica*、五角枫 *Acermono*、银杏 *Ginkgo biloba*、杨树 *Populus* spp.)],运用气溶胶再发生器测叶片 $PM_{2.5}$ 吸附量,利用原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, 缩写为 AFM) 扫描不同树种叶表面图像,比较针阔叶树种吸附量季节差异,探讨不同树种叶片吸附 $PM_{2.5}$ 的机理及影响因素,为城市绿化树种的合理选择提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究地概况及样叶采集

北京西山国家森林公园 (116.26°E, 39.98°N) 位于北京西郊小西山,总面积 5970 hm^2 ,有林地 5196.8 hm^2 ,

林木覆盖率 87%, 年降雨量 634.2mm, 相对湿度 43%—79%, 是距北京市区最近的一座国家级森林公园; 公园空气质量相对于城区较好, 但整体空气质量不高, 全年 48.39% 的天数为污染天气。地带性植被为暖温带落叶阔叶林, 园内动植物资源丰富, 有植物共计 250 多种, 分属 73 科。主要乔木树种包括油松、侧柏 (*Platycladusorientalis*)、银杏 (*Ginkgo biloba*)、杨树 (*Populus spp.*) 等, 主要的灌木有女贞 (*Ligustrumlucidum*)、小檗 (*Berberisthunbergii*)、黄杨 (*Buxussinica*) 等。

在北京西山国家森林公园选择树龄相近, 海拔一致的 6 种针阔叶树种, 分别为银杏、柳树、杨树、五角枫、油松和白皮松 (表 1)。在采集叶片前, 先用喷雾器清洗树木采样部位, 以月为单位, 再清洗完 7 天以后, 每一树种选取 3 棵样树, 在同一时间段内, 分别从东、南、西、北及树冠上、中、下 3 个部位采集若干叶片; 如遇特殊天气时, 在特殊天气 7 天后采集样树叶片, 将采集叶片装于纸质采集袋 (无静电) 带回实验室处理。

表 1 样树基本信息
Table 1 Basic information of sample trees

树种 Tree species	树龄 Age	树高 Height/m	胸径 DBH/cm Diameter at breast height	冠幅 Grown/m	
				东西 East-west	南北 South-north
银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	12	8.78±0.45	7.65±0.23	2.25±0.58	2.12±0.16
杨树 <i>Populus</i> spp.	12	9.33±0.26	7.38±0.46	1.88±0.54	1.96±0.78
柳树 <i>Salix babylonica</i>	12	6.43±0.22	10.56±0.33	4.73±0.46	4.5±50.28
五角枫 <i>Acer mono</i>	12	6.15±0.26	9.28±0.23	2.79±0.76	2.65±0.76
油松 <i>P. tabulaeformis</i>	13	5.26±0.12	8.28±0.43	3.43±0.55	3.28±0.42
白皮松 <i>P. bungeana</i>	12	4.2±0.23	6.56±0.55	1.78±0.26	1.35±0.63

1.2 单位叶面积 PM_{2.5} 吸附量测算

目前, 气溶胶再发生器应用情况较好, 已得到学界认可^[14-15]。叶片 PM_{2.5} 吸附量主要应用气溶胶再发生器 (QRJZFSQ-1) 获得。采用气溶胶再发生器 (中国林业科学研究院自制) 分析不同树种叶片颗粒物剩余量, 气溶胶再发生器通过检测内腔室中颗粒物浓度的变化, 获得叶片附着的颗粒物浓度的量。仪器由两个部分组成: 气溶胶再发生装置和 Dustmate 手持 PM_{2.5} 检测仪。气溶胶再发生装置利用风蚀原理, 将待测树种叶片放入气溶胶再发生器的料盒内, 通过搅动、吹风、去静电等处理, 气溶胶再发生器将叶片上的颗粒物吹起, 使叶片上附着的颗粒物重新悬浮于内腔室中, 制成气溶胶; 该设备操作简单, 稳定性高, 发生器能将叶片上吸滞的 PM_{2.5} 重新释放出来, 形成稳定、密度均匀的气溶胶。Dustmate 粉尘颗粒物检测仪由英国 Turkey 公司生产, 能够检测出风处理前后箱内 PM_{2.5} 的变化, 获得叶片表面附着的颗粒物的质量, 因此再结合 Dustmate 手持 PM_{2.5} 检测仪获取制成气溶胶中的 PM_{2.5} 质量浓度, 进而推算出叶片上 PM_{2.5} 的吸附量, 每一树种重复进行 6 次; 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) 计算单位叶面积 PM_{2.5} 吸附量。

$$M = m / S \tag{1}$$

式中, M 为单位叶面积 PM_{2.5} 吸附量 (μg/cm²); m 为放入气溶胶再发生器叶片的 PM_{2.5} 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 (cm²)。但因一些颗粒物能够进入到叶片内部, 如叶表面蜡质层和气孔中, 这部分颗粒物气溶胶再发生器将不会被吹起制成气溶胶, 所以该实验存在相对误差。

1.3 数据获取

大气 PM_{2.5} 实时浓度值由北京市农林科学院林业果树研究所在西山国家森林公园油松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 ($T_a/^\circ\text{C}$)、相对湿度 ($RH/\%$)、风速 ($W/(m/s)$)、降雨 (P/mm) 等气象因子。

1.4 不同树种叶表面特征的 AFM 观察

将叶片带回实验室后, 用蒸馏水冲洗叶片正背面, 用吸水纸小心除去叶片表面水分, 选取叶片较平坦的表面并尽量避开叶脉, 制成约 5 mm×5 mm 的样本。在室温条件下, 用扫描探针显微镜 (SPI3800-SPA-400, Seiko

Instruments Inc.) 在原子力显微分析模式下以非接触模式,用金涂层 Si_3N_4 探针样品进行扫描和拍摄,扫描速率 0.5 Hz,横向分辨率为 0.2 nm,垂直分辨率为 0.01 nm,最大扫描范围为 $10\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ 。

2 结果与分析

2.1 绿化树种吸附 $\text{PM}_{2.5}$ 能力对比

2.1.1 不同树种吸附 $\text{PM}_{2.5}$ 能力差异性

因 1—3 月和 11—12 月不属于阔叶树种生长季节,不对冬季阔叶树种叶片 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量进行研究。从图 1 可得,针叶树种年均单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量 ($1.70\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) 大于阔叶树种 ($0.48\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$),比阔叶树种增加了 3.54 倍。各树种年均单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量表现为白皮松 ($1.71\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 油松 ($1.67\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 柳树 ($0.54\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 五角枫 ($0.51\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 银杏 ($0.47\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 杨树 ($0.39\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$)。白皮松吸附能力最强,杨树最弱,二者年均单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量相差 $1.32\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$,针叶树种吸附颗粒物能力总体上强于阔叶树种。主要是由于白皮松叶片上表面的突起和条状组织密布,气孔密度大且上表面沟槽的间隙距离也较大;杨树叶表面不仅光滑、粗糙度小,且自身的自净功能强^[16-17]。

2.1.2 绿化树种吸附 $\text{PM}_{2.5}$ 季节差异性

春季各树种单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量表现为油松 ($1.44\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 白皮松 ($1.34\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 柳树 ($0.023\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 五角枫 ($0.022\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 银杏 ($0.009\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 杨树 ($0.007\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$); 夏季为白皮松 ($1.10\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 油松 ($0.81\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 柳树 ($0.68\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 五角枫 ($0.56\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 银杏 ($0.53\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 杨树 ($0.45\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$); 秋季为白皮松 ($1.16\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 油松 ($1.09\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 五角枫 ($0.67\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 柳树 ($0.56\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 银杏 ($0.54\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 杨树 ($0.48\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$); 冬季为油松 ($2.93\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 白皮松 ($2.79\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$),针阔叶树种季节 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附能力变化趋势与年 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附能力变化趋势一致,都表现为针叶树种强于阔叶树种(图 1 和图 2)。白皮松单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量夏秋季高于油松,冬春却低于油松;柳树和五角枫在生长季的滞尘能力强于银杏和白皮松,柳树 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附能力最强,杨树最弱,但秋季五角枫 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量高于柳树。

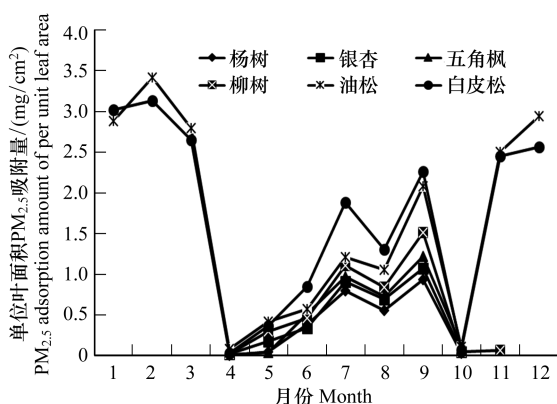


图 1 不同树种单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量

Fig.1 $\text{PM}_{2.5}$ adsorption amount of per unit leaf area for different tree species

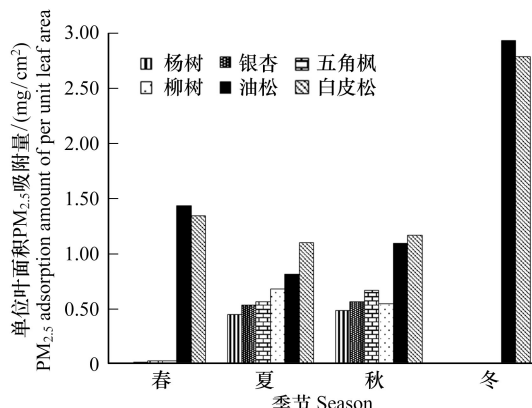


图 2 不同树种单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量季节变化

Fig.2 Seasonal variation of $\text{PM}_{2.5}$ adsorption amount of per unit leaf area for different tree species

针阔叶树种单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量季节变化趋势不一致,主要原因是初春阔叶树种叶片刚刚萌芽,其生理活动较夏秋弱。针叶树种单位叶面积 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量季节变化为冬 ($2.86\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 春 ($1.39\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 秋 ($1.13\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 夏 ($0.96\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$); 阔叶树种基本是秋 ($0.56\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 夏 ($0.55\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$) > 春 ($0.015\ \mu\text{g}/\text{cm}^2$),但夏季柳树 $\text{PM}_{2.5}$ 吸附量高于秋季,可能是因为秋季柳树叶片逐渐凋零,生理活动明显减弱,吸滞能力下降。蒋

燕等指出西山大气中 PM_{2.5}质量浓度四季变化为冬季(115.46 μg/cm³)>春季(112.39 μg/cm³)>秋季(106.37 μg/cm³)>夏季(81.87 μg/cm³)^[18],针叶树种 PM_{2.5}吸附能力冬季最强,夏季极弱,其 PM_{2.5}吸附能力与外界 PM_{2.5}质量浓度一致;但阔叶树种 PM_{2.5}吸附能力与外界 PM_{2.5}质量浓度并不具有一致性,可能与阔叶树种自身的生长季节有关。秋季大气中的 PM_{2.5}浓度高于夏季可能是阔叶树种在秋季 PM_{2.5}吸附量最高的主要原因。

2.2 不同树种叶表面特征分析

2.2.1 叶表面 AFM 扫描特征

因柳树 PM_{2.5}吸附量季节变化趋势与阔叶树种不一致,杨树 PM_{2.5}吸附量最低,且叶表面形态变化幅度不大,所以选白皮松、油松代表针叶树种,五角枫、银杏和杨树代表阔叶树种,以探讨叶表面特征与叶片 PM_{2.5}吸附量的相关性。通过 AFM 直接对叶片表面的观察,较好地保持了叶片表面原来的形态,而且可以在接近生理状态的条件下观察样品,并获取叶面的二维和三维微观结构图像,包括表皮细胞形态、气孔微结构、保卫细胞形态等以及用其他方法很难观察到的精细结构,为认识叶面的结构和功能提供了有力的技术支持^[12-13]。用 AFM 对样品进行扫描,得到图所示扫描范围为 10 μm×10 μm 的二维和三维形态图(图 3 和图 4)。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;三维图可以从各个角度观察物体,可以得到更直观形象的结果。

从图 3 和 4 中进一步分析可得:油松和白皮松峰谷值差异较柳树大,叶面有明显的细胞分布,凹凸不平,气孔呈椭圆形分布,气孔密度大,叶片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五角枫也存在突起和凹陷,但轮廓相对平缓;而吸附能力更弱的银杏,表面整体平滑,无明显突起或凹陷,粗糙度较小;且阔叶树种峰谷值差异较小,叶片上下表皮细胞差异较大,气孔只分布在叶下表皮,气孔下陷,表皮细胞形状无规则,外切向面明显向外隆起,而垂周壁略下陷。针阔叶树种 AFM 图像四季差异明显,但季节变化趋势却不一致,白皮松冬季突起和凹陷部位很多,高度相差大,大多属于条状突起和沟状凹陷,凹凸不平,粗糙度相对极高;夏秋两季凹凸起伏程度相对较小。五角枫在夏季叶表面峰谷值差异明显大于春秋两季,且凹槽和凸陷程度较春秋两季明显,褶皱起伏较大,数量也多于春秋。可见叶表面凹凸不平、气孔密度大且较为粗糙的树种 PM_{2.5}吸附能力较强,而叶表面凹凸不明显甚至平滑、气孔较少的树种吸附能力则较弱。

2.2.2 叶片表面的 AFM 扫描参数

在表征表面的粗糙度时常用的参数有轮廓算术平均偏差(Ra)、微观不平度十点高度(Rz)、峰谷值(P—V)和微粗糙度(RMS),其中 Ra 是最常用的粗糙度表征参数,最能代表叶表面结构与叶片 PM_{2.5}吸附量的关系。在表 3 中还包括表面积参数 S,用于测定粗糙度参数的面积,面积比 S ratio 是测定粗糙度参数的面积占整个视窗面积的比例。从表 2 可知:针叶树的粗糙度大于阔叶树,五角枫粗糙度 Ra 正面排序为夏季((150.23±37.44) nm)>秋季((115.49±54.72) nm)>春季((108.77±12.45) nm),背面排序也为夏季((80.18±10.45) nm)>秋季((71.99±3.46) nm)>春季((58.73±12.11) nm);银杏粗糙度 Ra 正面排序为夏季((104.84±24.78) nm)>秋季((81.72±14.43) nm)>春季((72.38±10.34) nm),背面排序则为秋季((79.95±11.39) nm)>夏季((71.82±9.47) nm)>春季((62.10±7.54) nm)。白皮松粗糙度 Ra 排序为冬季((189.12±31.69) nm)>春季((169.32±30.81) nm)>秋季((149.91±16.38) nm)>夏季((131.47±10.52) nm);油松粗糙度 Ra 排序为冬季((178.23±31.45) nm)>春季((165.84±30.78) nm)>夏季((159.83±32.86) nm)>秋季((124.47±10.52) nm)。阔叶树种正背面粗糙度基本表现为正面大于背面,针叶树种粗糙度季节变化与其叶片 PM_{2.5}吸附量基本完全一致,表现为冬季>春季>秋季>夏季,但阔叶树种粗糙度季节变化与其叶片 PM_{2.5}吸附量相关性不明显,主要是受阔叶树种生长季影响。P—V、RMS 和 Rz 等表示叶面形态的参数基本具有与 Ra 相似的变化特征。

2.3 绿化树种 PM_{2.5}吸附能力与叶表面 AFM 特征关系

针叶树种四季叶面粗糙度基本高于阔叶树种,针叶树种粗糙度年均值((158.52±19.45) nm)高于阔叶树种((88.18±14.45) nm),针阔叶树种年均单位叶面积 PM_{2.5}吸附量也表现为:针叶(1.70 μg/cm²)>阔叶(0.48 μg/cm²),且针叶四季 PM_{2.5}吸附量也均高于阔叶树种。将所选针阔叶树种叶片粗糙度取均值,再将其粗糙度

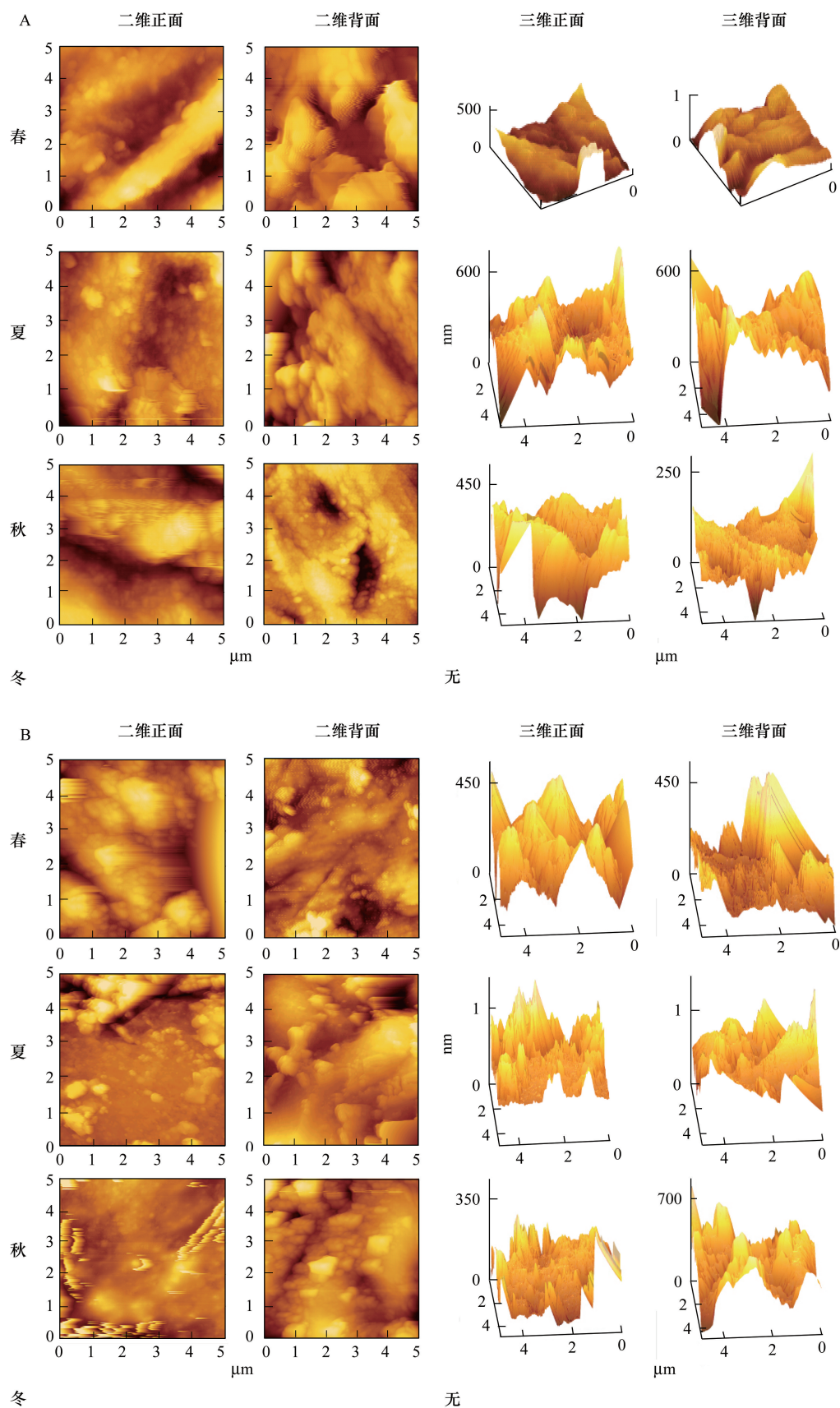


图3 阔叶树种四季原子力显微镜(AFM)图像二维和三维图

Fig.3 Two and three-dimensional AFM(Atomic force microscopy) images of broad-leaved trees

A、B 分别代表五角枫和银杏,二维正面和二维背面图分别是所测树种二维形态图的正背面,三维正面和三维背面图分别是所测树种三维形态图的正背面

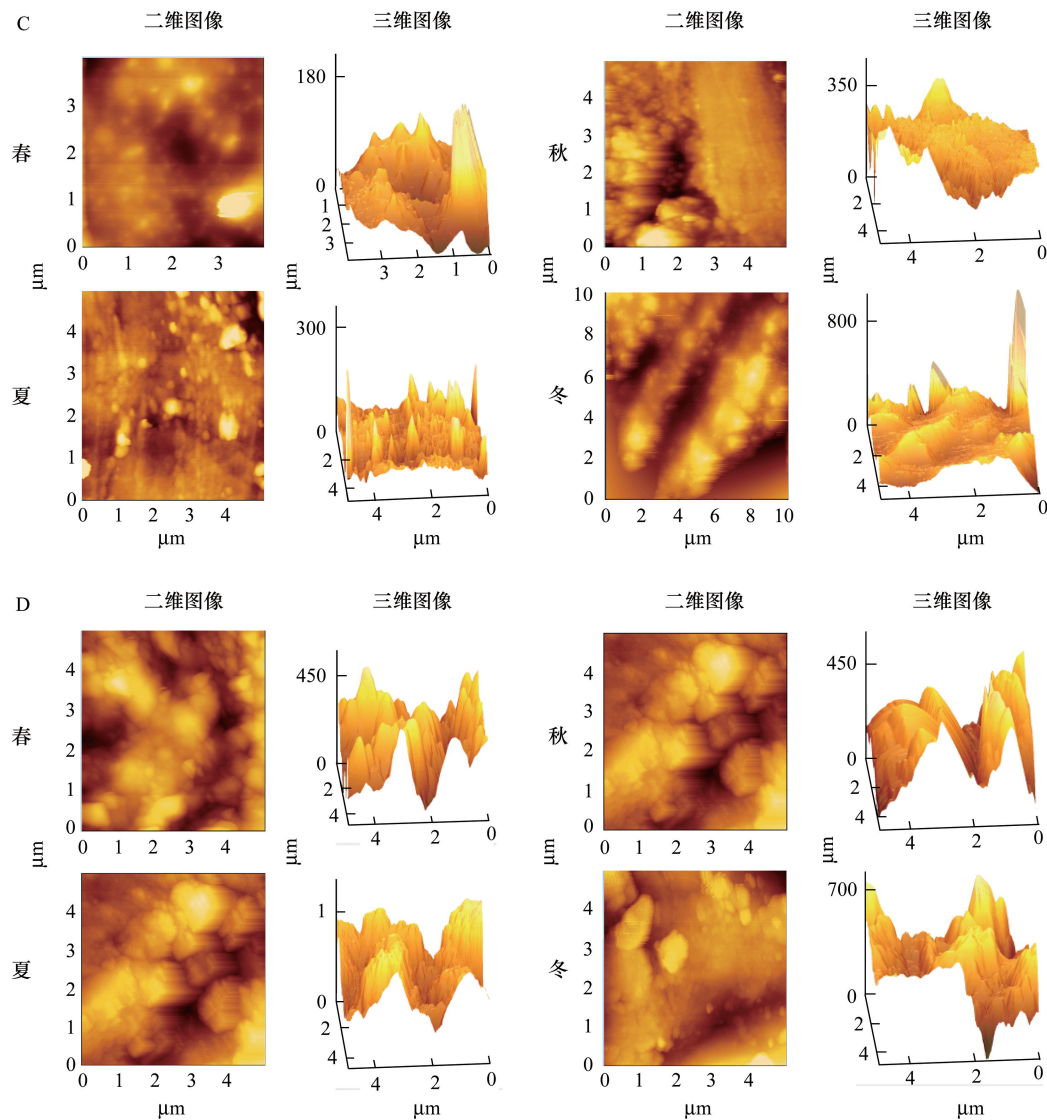


图 4 针叶树种四季 AFM 图像二维和三维图

Fig.4 Two and three-dimensional AFM images of coniferous species

C、D 分别代表白皮松和油松

表 2 不同树种叶片 AFM 观察参数

			Table 2 AFM parameters for leaves of different trees					
			正背面 Adaxial and abaxial side	轮廓算数 平均偏差 Ra/nm	峰谷值 P-V/nm	微粗糙度 RMS/nm	微观不平度 十点高度 Rz/nm	面积比 Area ratio
阔叶树种 Broad-leaved trees	五角枫	春	正面	108.77±12.45	599±203.66	154.3±3.01	417.5±70.26	1.09±0.01
			背面	58.73±12.11	513.13±140.12	74.55±14.51	205.27±37.67	1.04±0.02
		夏	正面	150.23±37.44	1069.3±244.61	154.00±25.36	434.13±109.50	1.53±0.06
			背面	80.18±10.45	828.87±48.10	97.34±11.70	425.23±42.80	1.27±0.02
		秋	正面	115.49±54.72	614.73±367.26	77.59±69.66	686.53±482.83	1.12±0.04
			背面	71.99±3.46	534.00±140.88	90.22±3.13	322.17±35.49	1.15±0.08
		冬	无					
银杏	春	正面	72.38±10.34	384.43±29.72	67.09±12.95	212.31±30.29	1.16±0.01	1.11±0.01
		背面		62.10±7.54	331.54±29.88	49.74±4.23	287.09±26.38	

续表

		正背面 Adaxial and abaxial side	轮廓算数 平均偏差 Ra/nm	峰谷值 P-V/nm	微粗糙度 RMS/nm	微观不平度 十点高度 Rz/nm	面积比 Area ratio
针叶树种 Coniferous species	夏	正面	104.84±24.78	960.87±209.95	144.33±32.63	428.60±122.07	1.40±0.16
		背面	71.82±9.47	749.50±123.97	76.43±17.40	366.93±158.06	1.23±0.09
	秋	正面	81.72±14.43	385.23±102.27	82.44±7.89	246.33±98.59	1.18±0.14
		背面	79.95±11.39	480.27±31.96	103.99±14.30	460.43±154.65	1.13±0.02
	冬	无					
	白皮松	春	169.32±30.81	1128.53±212.25	236.17±25.13	715.6±90.39	1.89±0.05
		夏	131.47±10.52	782.70±38.02	222.34±1.85	608.35±8.97	1.13±0.05
	油松	秋	149.91±16.38	898.90±16.71	252.26±7.69	677.27±9.10	1.15±0.01
		冬	189.12±31.69	1366.72±279.85	262.09±49.31	733.03±128.26	1.91±0.03
		春	165.84±30.78	1118.60±209.46	228.30±27.37	700.21±81.16	1.27±0.03
		夏	159.83±32.86	1098.53±202.11	220.17±29.90	682.6±90.39	1.06±0.05
		秋	124.47±10.52	766.70±37.87	219.55±1.90	611.79±9.62	1.01±0.004
		冬	178.23±31.45	1254.00±279.19	243.30±49.71	709.76±128.54	1.68±0.02

Ra: profile arithmetic average error、P-V: peak and valley value、RMS: micro roughness 和 Rz: ten point height of irregularities

Ra 与之对应的单位叶面积 PM_{2.5} 吸附量做线性回归分析(见表 3)可知,阔叶回归方程为 $y = 92.82 + 1.26x$ ($F = 32.13, Sig = 0.00$ 。其中, y 代表单位叶面积 PM_{2.5} 吸附量, x 代表粗糙度 Ra); 针叶回归方程为 $y = 159.08 + 2.03x$, 并且显著性强($\alpha = 0.05, F = 41.69, Sig = 0.00$); 可见针阔叶树种 PM_{2.5} 吸附量与其粗糙度正相关性显著, 随着树种叶片粗糙度增大, 其单位叶面积 PM_{2.5} 吸附量也增大; 且针叶树种显著性高于阔叶树种, 即其滞尘能力受叶表面粗糙度影响更明显。

表 3 叶片粗糙度与单位叶面积 PM_{2.5} 吸附量回归分析
Table 3 Regression analysis of Ra(roughness) and PM_{2.5} adsorption amount of per unit leaf area

项目 Items	阔叶树种 Broad-leaved trees					针叶树种 Coniferous species				
	R^2	df	F	Sig	非标准化 系数	R^2	df	F	Sig	非标准化 系数
回归 Regression	4783.29	1	32.13	0.00		6572.02	1	41.69	0.00	
残差 residuals	2198.70	138				4100.97	138			
合计 Totals	6981.99	139				10672.99	139			
常量 Contants					92.82					159.08
粗糙度 Roughness					1.26					2.03

R^2 、 df 、 F 和 Sig 全称分别为 the sum of the squares、degrees of freedom、F-statistics 和 significance level, 分别代表平方和、自由度、 F 统计量和显著性水平, 均为该回归方程可靠性的验证统计量

3 讨论

3.1 不同树种吸附 PM_{2.5} 差异

针叶树种 PM_{2.5} 吸附能力强于阔叶树种, 各树种叶片 PM_{2.5} 吸附量排序为白皮松>油松>柳树>五角枫>银杏>杨树。陈波等^[12] 对夏秋季西山同种类树种 PM_{2.5} 吸附量进行研究, 得出白皮松单位叶面积 PM_{2.5} 吸附量 ((2.44±0.22) μg/cm²) 最大, 山杨最小 ((0.97±0.03) μg/cm²), 与本文结果基本一致。植物个体间滞尘能力差异显著主要受植物形体大小和枝叶自身特性的影响, 这种差异既表现在单位面积滞尘量, 也表现在全株最大滞尘量方面^[19-20]。针叶树种表面粗糙度、气孔密度均大于阔叶树种^[14], 且气孔开口较大, 使得叶面上的污染物很难在自然力作用下被带走, 能稳定滞尘, 又因气孔密集, 滞尘量增大; 且针叶树种叶表的各种凹凸组织、

气孔、绒毛增加了叶表面粗糙度,绒毛会卡住停留在叶面上的污染物,粗糙叶面也会增大空气污染颗粒物与叶表的接触面积,故其滞尘能力增强^[21]。北京针叶树种基本是常绿林,阔叶树种大多属于温带落叶阔叶林,冬春季阔叶树种叶片逐渐凋零,生理活动渐弱,使得针叶树种叶片滞尘能力冬春季明显高于阔叶树种。

针叶树种单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量季节变化为冬季>春季>秋季>夏季。主要原因:①冬季为北京采暖季, $PM_{2.5}$ 环境背景值高,阔叶植物凋零,针叶树种植物能从外界吸附的颗粒物多^[22];②冬季比前 3 个季节污染物积累的时间更长,叶片吸滞污染物的时间也较长,虽然每次采样均进行深度清洗叶片,但仍不能彻底清除叶片表面颗粒物,更细小的粒子被固定在叶片表皮;③夏季北京 $PM_{2.5}$ 污染最轻,空气中 $PM_{2.5}$ 浓度最低,又阔叶树种在夏季生理活动最为旺盛, $PM_{2.5}$ 吸滞能力较强,吸收了大气中一定含量的 $PM_{2.5}$,使得针叶树种能吸附的颗粒物相对减少。Zhang 等^[23]指出在不同污染区下,叶片结构发生了重要的适应性变化,相对于轻污染区,在重污染区植物叶片外表皮细胞收缩,叶片表皮纹理变的更加粗糙,气孔频度和绒毛长度增加。

3.2 不同树种叶表面微形态特征与吸滞 $PM_{2.5}$ 关系

叶片表面微形态特征,如叶片蜡质含量、气孔形状、密度、分布状况、叶面粗糙度、叶片结构及叶表面自由能等对叶表面滞尘能力产生不同程度的作用,此作用同时受外界环境的干扰,其中表面自由能和叶面粗糙度是决定因素^[9,12],本研究也得出叶表面粗糙度与其 $PM_{2.5}$ 滞留量呈显著正相关。Freer-Smith 等^[24]也将针叶树和阔叶树吸附积累颗粒物的差异归因于树种叶片结构的差异。贾彦等^[17]对树种观察得出粗糙程度大、微形态结构密集和深浅差别大的叶面,会增加其与颗粒物的接触面积,使得叶片对颗粒物的滞留量较高;叶表面光滑平整,蜡质含量高,大气颗粒物在该叶面易脱落,和叶表面的接触面积小,颗粒物不宜在叶面停留,从而叶片对 $PM_{2.5}$ 的滞留量相对较低^[21]。Koch K 等^[25]发现表面表皮细胞突起会降低 $PM_{2.5}$ 和叶面的接触面积, $PM_{2.5}$ 在该树种叶表面滞留量减小;本研究针叶树种叶片表面的突起和条状组织密布,气孔大且密度高,表面存在粘液油脂,阔叶树种叶表面较为平整,基本无绒毛分布,粗糙度较低,使得针叶 $PM_{2.5}$ 吸滞能力显著高于阔叶。针阔叶树种 $PM_{2.5}$ 吸附量随着叶片粗糙度增大而升高,针叶树种滞尘能力受叶表面粗糙度影响更明显,与以往学者的研究结果完全一致^[26-27]。Sabin 等研究也表明表面粗糙的叶片,且具有绒毛、沟状凸起、粘液油脂或较短的叶柄,其吸附 $PM_{2.5}$ 等颗粒物的能力则较强^[28]。

针叶树种叶表面粗糙度季节变化与其叶片 $PM_{2.5}$ 吸附量完全一致,表现为冬季>春季>秋季>夏季,在空气质量最差的冬季,叶片结构发生了重要的适应性变化,叶片外表皮细胞收缩,气孔增大,褶皱起伏和凹凸程度增强,绒毛长度增加,叶片表皮纹理变的更加粗糙,叶表面粗糙度增加^[23],使得针叶树种叶面 $PM_{2.5}$ 吸附量在冬季大,其是针叶树种 $PM_{2.5}$ 吸滞能力在冬季最强的重要原因之一。阔叶树种叶表面粗糙度季节变化与其叶片 $PM_{2.5}$ 吸附量不一致,其粗糙度正背面排序为夏季>秋季>春季,而吸附量排序基本是秋季>夏季>春季^[29],二者的季节变化趋势不一致,即证实了叶表面粗糙度对针叶树种滞尘能力影响更高。主要是因针叶树种和其他固体的接触面积大,导致其表面结构和微形态受季节环境影响大,再加叶面粗糙程度是叶面 $PM_{2.5}$ 吸附量的决定因素,使得其叶面粗糙度和滞尘能力季节变化一致^[11,30],Takamatsu 等在日本的研究发现:长期生长在污染环境中的雪松叶面滞留大量污染颗粒物,因其和雪松叶表面发生相互物理及化学作用使得表面蜡质含量减少,润湿性增加,从而增强滞尘能力^[22]。但李少宁等指出针叶树种叶表面存在油脂,致使其滞留的颗粒物不易被冲刷,从而受外界影响较小,与本文研究不一致^[13],可能原因是:研究地大气污染程度不同,进而影响树种叶面吸附 $PM_{2.5}$ 能力。

4 结论

针叶树种全年 $PM_{2.5}$ 吸附能力强于阔叶树种,即叶表面凹凸不平、气孔密度大且较为粗糙的树种 $PM_{2.5}$ 吸附能力较强,而叶表面凹凸不明显甚至平滑、气孔较少的树种吸附能力则较弱。各树种全年 $PM_{2.5}$ 吸附量排序基本为白皮松>油松>柳树>五角枫>银杏>杨树,季节分布上稍有差异。针叶树种单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量季节变化为冬季>春季>秋季>夏季,阔叶树种是秋季>夏季>春季。针阔叶树种 $PM_{2.5}$ 吸附能力受叶表面微形态

特征和季节影响明显,其中粗糙度为关键因素之一,叶片粗糙度与单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量呈显著正相关,不同树种正背面粗糙度均值排序为与其单位叶面积 $PM_{2.5}$ 吸附量排序基本一致,针叶树种 $PM_{2.5}$ 吸附量受粗糙度影响更为显著。因此我们在进行城市园林绿化树种选择及规划时,应充分考虑各树种本身生理活动特征、叶面滞尘能力及其影响因素;如可在颗粒物污染严重区域多考虑种植针叶树,同时应考虑选择叶表面形态有利于吸附颗粒物的柳树和五角枫等阔叶树种,统筹兼顾各树种滞尘能力的季节变化特征,合理优化配置针阔叶绿化树种,充分发挥绿化树种的生态效益。

参考文献 (References):

- [1] Myhre G. Consistency between satellite-derived and modeled estimates of the direct aerosol effect. *Science*, 2009, 325(5937): 187-190.
- [2] 李雪,刘子锐,任希岩. 2007 和 2008 年夏季北京奥运馆大气 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 质量浓度变化特征. *大气科学学报*, 2012, 35(2): 197-204.
- [3] Clark N A, Demers P A, Karr C J, Koehoorn M, Lencar C, Tamburic L, Brauer M. Effect of early life exposure to air pollution on development of childhood asthma. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(2): 284-290.
- [4] Yoshizaki K, Brito J M, Toledo A C, Nakagawa N K, Piccin V S, Junqueira M S, Negri E M, Carvalho A L N, De Oliveira A P L, De Lima W T, Saldiva P H N, Mauad T, Macchione M. Subchronic effects of nasally instilled diesel exhaust particulates on the nasal and airway epithelia in mice. *Inhalation Toxicology*, 2010, 22(7): 610-617.
- [5] Dai W, Cao J Q, Cao C, Ouyang F. Chemical composition and source identification of $PM_{2.5}$ in the suburb of Shenzhen, China. *Atmospheric Research*, 2013, 122: 391-400.
- [6] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 4(3/4): 115-123.
- [7] 王兵,鲁绍伟. 中国经济林生态系统服务价值评估. *应用生态学报*, 2009, 20(2): 417-425.
- [8] Prajapati S K, Tripathi B D. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(3): 865-870.
- [9] 刘璐,管东生,陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力. *生态学报*, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [10] 王会霞,王彦辉,杨佳,谢滨泽,石辉. 不同绿化树种滞留 $PM_{2.5}$ 质量等颗粒污染物能力的多尺度比较. *林业科学*, 2015, 51(7): 9-20.
- [11] 王会霞,石辉,李秧秧. 城市绿化植物叶表面特征对滞尘能力的影响. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3077-3082.
- [12] 陈波,刘海龙,赵东波,陈鹏飞,鲁绍伟,李少宁. 北京西山绿化树种秋季滞纳 $PM_{2.5}$ 能力及其与叶表面 AFM 特征的关系. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 777-784.
- [13] 李少宁,鲁绍伟,刘斌,鲁笑颖,陈军丽,李辉. 北京主要绿化树种叶表面微形态与 $PM_{2.5}$ 吸滞能力. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(8): 98-107.
- [14] 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. *环境科学*, 2015, 36(7): 2381-2388.
- [15] 房瑶瑶,王兵,牛香. 叶片表面粗糙度对颗粒物滞纳能力及洗脱特征的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 110-115.
- [16] 杨佳,王会霞,谢滨泽. 北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 384-392.
- [17] 贾彦,吴超,董春芳,李常平,廖慧敏. 7 种绿化植物滞尘的微观测定. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(11): 4547-4553.
- [18] 蒋燕,陈波,鲁邵伟,李少宁. 北京城市森林 $PM_{2.5}$ 质量浓度特征及影响因素分析. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 447-457.
- [19] 俞学如. 南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其叶面结构的关系. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [20] 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. *生态与农村环境学报*, 2007, 23(2): 36-40.
- [21] 陈波,蒋燕,鲁绍伟,李少宁,陈鹏飞,刘海龙,赵东波. 北京西山不同树种夏秋季 $PM_{2.5}$ 吸附量与润湿性关系. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2018, 42(2): 113-119.
- [22] Takamatsu T, Sase H, Takada J. Some physiological properties of *Cryptomeria japonica* leaves from Kanto, Japan: potential factors causing tree decline. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(4): 663-672.
- [23] Zhang W K, Wang B, Niu X. Study on the adsorption capacities for airborne particulates of landscape plants in different polluted regions in Beijing (China). *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(8): 9623-9638.
- [24] Freer-Smith P H, Beckett K P, Taylor G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* × *trichocarpa* 'Beaupre', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 2005, 133(1): 157-167.
- [25] Koch K, Bhushan B, Barthlott W. Multifunctional surface structures of plants: an inspiration for biomimetics. *Progress in Materials Science*, 2009, 54(2): 137-178.
- [26] Hwang H J, Yook S J, Ahn K H. Experimental investigation of submicron and ultrafine soot particle removal by tree leaves. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(38): 6987-6994.
- [27] 安海龙,刘庆倩,曹学慧,张罡,王慧,刘超,郭惠红,夏新莉,尹伟伦. 不同 $PM_{2.5}$ 污染区常见树种叶片对 PAHs 的吸收特征分析. *北京林业大学学报*, 2016, 38(1): 59-66.
- [28] Sabin L D, Lim J H, Venezia M T, Winer A M, Schiff K C, Stolzenbach K D. Dry deposition and resuspension of particle-associated metals near a freeway in Los Angeles. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(39): 7528-7538.
- [29] Chen B, Lu S W, Zhao Y G, Li S N, Yang X B, Wang B, Zhang H J. Pollution remediation by urban forests: $PM_{2.5}$ reduction in Beijing, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2016, 25(5): 1873-1881.
- [30] Liu J K, Zhu L J, Wang H H, Yang Y L, Liu J T, Qiu D D, Ma W, Zhang Z M, Liu J L. Dry deposition of particulate matter at an urban forest, wetland and lake surface in Beijing. *Atmospheric Environment*, 2016, 125: 178-187.