

文章编号: 1000-5641(2016)06-0027-11

上海常见绿化树种叶片上PM_{2.5} 干沉降速率及影响因素

章旭毅^{1,2,4}, 殷杉^{1,2,3,4}, 江畅^{1,2,3}, 熊峰^{1,2}, 朱鹏华^{1,3,4}, 周丕生^{1,2}

- (1. 上海交通大学 农业与生物学院, 上海 200240;
2. 上海城市森林生态系统国家定位观测研究站, 上海 200240;
3. 上海交通大学 低碳农业研究中心, 上海 200240;
4. 农业部都市农业(南方)重点实验室, 上海 200240)

摘要: 利用城市的绿化和植被来削减大气中细颗粒物(PM_{2.5})污染, 是城市应对大气污染的措施之一. 本研究首先通过强风吹脱的方法, 在不同季节测定了上海市15种常见园林树种叶片表面的PM_{2.5}干沉降速率, 并且对各植物叶片的蜡质含量、表面粗糙度和表面自由能等参数进行了测定, 建立回归模型, 研究植被滞尘能力与植物叶片自身特性的关系. 结果表明, 广玉兰、圆柏和罗汉松等树种的叶片具有较高的PM_{2.5}干沉降速率, 滞尘能力较强; 叶片蜡质含量、表面自由能色散分量、表面自由能极性分量、轮廓算术平均偏差(*Ra*)这4项指标对于常绿树种的滞尘能力具有显著影响; 叶片的表面自由能极性分量对落叶树种具有显著性影响; 各指标对针叶树种都不具有显著影响. 因此, 为提高植物对大气的净化作用, 可选滞尘能力较好用针叶树种的和紫叶李、广玉兰以及槐等阔叶树种.

关键词: 细颗粒污染物(PM_{2.5}); 绿化树种; 干沉降速率; 叶片特性

中图分类号: O157.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2016.06.002

PM_{2.5} deposition velocity and impact factors on leaves of typical tree species in Shanghai

ZHANG Xu-yi^{1,2,4}, YIN Shan^{1,2,3,4}, JIANG Chang^{1,2,3}, XIONG Feng^{1,2},
ZHU Peng-hua^{1,3,4}, ZHOU Pi-sheng^{1,2}

- (1. *School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*
2. *Shanghai Urban Forest Research Station, State Forestry Administration, Shanghai 200240, China*
3. *Research Centre of Low Carbon Agriculture, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*
4. *Key Laboratory for Urban Agriculture (South), Ministry of Agriculture, Shanghai 200240, China*)

收稿日期: 2016-05

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(31400605); 上海交通大学现代农业交叉基金(2014007)

第一作者: 章旭毅, 男, 硕士研究生, 主要从事城市植被与大气环境的研究.

E-mail: gloomyforever@sjtu.edu.cn.

通信作者: 殷杉, 男, 讲师, 主要研究领域为城市森林生态系统服务. E-mail: yinshan@sjtu.edu.cn.

Abstract: The use of urban vegetation has become one of the most important measures to reduce fine particles pollution ($PM_{2.5}$) in the atmosphere. In this study, $PM_{2.5}$ dry deposition velocities of 15 common-planted greening trees in Shanghai were firstly measured through strongly blowing method. Wax content, surface roughness and surface free energy of each plant leaves were determined, and the regression model was built to explore the relationship between leaves' characters and their abilities to detain particles. The results has shown that leaves of *Magnolia grandiflora*, *Podocarpus macrophyllus*, *Sabina chinensis* and some other tree species have a higher $PM_{2.5}$ dry deposition velocity, which has strong capability of detaining dust; wax content, polar component, dispersion component and arithmetical mean deviation of the profile (Ra) are significant to evergreen trees while insignificant to conifers, and polar component is significant to deciduous trees. Therefore, to improve the particles purification of plants, it is highly recommended that coniferous tree species, broad-leaved trees, such as *Prunus cerasifera*, *Magnolia grandiflora* and *Sophora japonica* and some other trees of high dust retention abilities, should be better options in practice.

Key words: fine particles pollution ($PM_{2.5}$); greening tree species; dry deposition velocity; leaves characters

0 引 言

随着城市化水平的提高和城市规模的不断扩大,我国城市面临着大气环境恶化的状况,尤以上海、北京和广州等特大型城市更为严峻^[1].其中细颗粒污染物($PM_{2.5}$)由于其粒径微小,可以进入人体呼吸道和肺部,从而导致许多疾病的产生,包括过早死亡、肺炎、动脉硬化加速以及心脏功能的改变^[2-5].城市森林和绿地对大气污染具有良好的削减和防控作用.植物的叶片可以吸附空气中的颗粒物,使其从大气中迁移到叶片上,达到改善空气质量的效果^[6-7].研究表明,干沉降(dry deposition)是植被净化大气颗粒物的主要机制^[8].植物的滞尘量可以用单位面积植物叶片上 $PM_{2.5}$ 的干沉降通量(F)来表示:

$$F = V_d \times C. \quad (1)$$

式中 V_d 为干沉降条件下植物叶片吸滞 $PM_{2.5}$ 的速率(m/h或cm/s),随植物种类及环境因素的不同而不同; C 为当地大气中 $PM_{2.5}$ 本底浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

$PM_{2.5}$ 被植物叶片表面截留并捕获的过程中,不能忽视的一点就是植物叶片的形态特征和微观特性的影响.如Wagner等观察到海芋*Alocasia macrorrhiza*叶片表面有很多突起,对单个突起的扫描则能清晰地观察到角质层折叠基础上的精细结构^[9].Burton等在研究莲叶*Nelumbo nucifera*和芋叶*Colocasia esculenta*的表面结构和机械属性时,观察到叶片表面有很多突起,定量测定得到突起的峰谷值($P-V$)分别为 $9\ \mu\text{m}$ 和 $5\ \mu\text{m}$ ^[10].Perkins等观察了桂樱桃*Prunus laurocerasus*叶片在纳米尺度上的微结构,计算得到粗糙部分和平滑部分的平均粗糙度分别为 $5.6\ \text{nm}$ 和 $1.4\ \text{nm}$ ^[11].刘璐等对广州市常见行道树种叶片表面形态的研究发现:易润湿的植物叶接触角较小,使得粉尘与植物叶片接触面积较大,粉尘不易从叶面脱落,滞尘能力较强;接触角较大叶片由于其特殊的表面结构和疏水的蜡质使颗粒物不易吸附在植物叶片上,因此滞尘能力较弱^[12].

综合这些已有的研究来看,叶片表面的粗糙程度、润湿性等微观特性确实是植物滞尘效果的影响因素,但是,尚未有研究关注这些因子对叶片上PM_{2.5}的干沉降速率的影响,对这些特性的综合影响的研究也尚不多见。

上海地处长江三角洲前沿,属于北亚热带季风性气候,气候温和湿润,春秋较短,冬夏较长;雨量充沛,全年70%左右的雨量集中在5至9月的汛期。上海市境内天然植被残剩不多,而绿化植被绝大部分为人工栽培,以樟树、广玉兰、银杏、水杉、龙柏和圆柏等为主。本文选取了15种上海常见的绿化树种,在一年不同季节,用吹脱的方法对植物叶片表面PM_{2.5}干沉降速率进行了测定,并且对各植物叶片表面的蜡质含量、表面粗糙度和表面自由能等参数进行了测定,建立回归模型,探索植被滞尘能力与植物叶片自身特性的关系,进而筛选出影响叶片上PM_{2.5}沉降速率的关键因素,从而为更好地选择滞尘功能的绿化树种、缓解城市大气污染、建设宜居城市提供技术依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点及树种的选择

本文选取了15种上海常见园林绿化树种(见表1),取样地点位于上海市闵行区剑川路2号吴泾公园内。吴泾公园紧邻吴泾工业区,濒临黄浦江及申嘉湖高速公路,周边有相对固定的混合污染源。公园内树木种类丰富,长势正常,受游客干扰较小,是叶片采集的良好试验地点。

表1 本文选择的15种上海常见园林树种

Tab. 1 Tree species chosen in the thesis

常绿		落叶	
针叶	阔叶	阔叶	
雪松	樟树	二球悬铃木	银杏
<i>Cedrus deodara</i>	<i>Cinnamo mumcamphora</i>	<i>Platanus acerifolia</i>	<i>Ginkgo biloba</i>
圆柏	女贞	无患子	槐
<i>Sabina chinensis</i>	<i>Ligustrum lucidum</i>	<i>Sapindus saponaria</i>	<i>Sophora japonica</i>
罗汉松	广玉兰	梧桐	垂柳
<i>Podocarpus macrophyllus</i>	<i>Magnolia grandiflora</i>	<i>Firmiana simplex</i>	<i>Salix babylonica</i>
龙柏	杜英	紫叶李	
<i>Sabina chinensis</i> cv. <i>Kaizuka</i>	<i>Elaeocarpus decipiens</i>	<i>Prunus cerasifera</i> f. <i>atropurpurea</i>	

1.2 植物叶片上PM_{2.5}干沉降速率的测定方法

叶片表面的PM_{2.5}干沉降速率 V_d 表示在单位时间内,单位叶面积在单位本底浓度下所能沉降PM_{2.5}的质量。

$$V_d = M / (C \times T \times LA), \quad (2)$$

其中 M 是叶片吸附的PM_{2.5}总质量,单位是 μg ; C 是空气中PM_{2.5}的本底浓度,单位是 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; T 是叶片沉降PM_{2.5}的总时间,单位是h; LA 是参与沉降PM_{2.5}的叶片的总面积,单位是 m^2 。

在2015年7月至2016年1月间,在每季度规定时间前5—7d,在采样点选取树种向阳面约2/3高度处的新鲜叶片约20片(针叶约20g左右),将测试树种叶片用清水淋洗若干遍(正反面)并做好标记,作为一组样品。每一树种需制备3组样品。经过连续不降雨5d后,将标记的叶片样品采回实验室迅速进行PM_{2.5}吸附量的测定。测定方法依照王兵等人^[13-16]基于风蚀原理的吹脱法,即采用气溶胶再发生器(QRJZFSQ-I),将试验叶片上所吸滞的颗粒物再吹起后混

匀,并用静电处理防止颗粒物的吸附.通过连接在气溶胶再发生器的 Dustmate 粉尘颗粒物检测仪,检测出悬浮颗粒物的浓度以及气溶胶再发生器内的颗粒物浓度,并测得气溶胶再发生器内容积体积,计算出试验叶片的滞尘量.最后通过样品叶面积和叶片自然沉降期间样地附近大气中 $PM_{2.5}$ 的平均浓度,计算得到干沉降速率 V_d .

1.3 叶片表面微观特性的测定

本研究选取的植物叶片微观指标为叶片的表面粗糙度、表面自由能和蜡质含量.叶片样品的采集方法与前述相同.将采集好的叶片用自封袋包装好并排出自封袋内的空气,带回实验室立即进行测定.在试验开始前,用去离子水清洗叶片表面 2—3 次,等水分完全蒸发后开始试验.

1.3.1 叶片表面粗糙度的测定

叶片表面粗糙度的测定使用的是大气下原子力显微镜(AFM)扫描叶片上的部分区域,处理图像后得到轮廓算数平均偏差 R_a .首先剪取 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 大小的叶片(针叶叶片剪取 1 cm 长度即可)粘贴在载物片上放置于工作台上,利用电脑控制 AFM 微探针,可以在叶片表面上扫描 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 范围,软件处理后可得到该区域的二维图像和三维图像,并直接运算得到叶片的轮廓算数平均偏差 R_a 的数值.

1.3.2 叶片表面自由能的测定

叶片表面自由能可通过光学接触角测量仪进行测量.方法为分别以水和二碘甲烷作为探测液,在光学接触角测量仪上测得两种液滴在不同树种叶片表面的接触角,得到相关的图像并记录数据后,通过软件计算得到叶片表面自由能的极性分量和色散分量数值,相加可得表面自由能.

1.3.3 叶片蜡质含量的测定

将新鲜叶片剪成 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的形状(针叶样品剪成 1 cm 长度即可),记录准确质量,放置于已知重量的培养皿中,加入 30 mL 三氯甲烷浸泡 60 s 后,立即将叶片取出并将培养皿置于通风橱内,至三氯甲烷完全蒸发,再次记录培养皿的质量,2 次质量的差值即为叶片蜡质的质量.将蜡质的质量除以样品的质量即可得到蜡质的含量(mg/g).

1.4 数据的处理与统计

在得到以上结果的基础上,通过微软 Excel 和 SPSS v21.0 等软件,建立多元回归方程,分析叶片表面微观特性对植被叶片上 $PM_{2.5}$ 干沉降速率的影响

2 结果与讨论

2.1 15 种绿化植物叶片上 $PM_{2.5}$ 的干沉降速率

从图 1 可知,2015 年夏季 $PM_{2.5}$ 干沉降速率最大的树种是广玉兰,其次是圆柏、罗汉松和雪松等,而 $PM_{2.5}$ 的干沉降速率相对较低的树种有槐、樟树和银杏,最低的是梧桐;秋季 $PM_{2.5}$ 干沉降速率最大的树种是紫叶李,其次是广玉兰、槐和圆柏等,而 $PM_{2.5}$ 的干沉降速率相对较低的树种有女贞、无患子和银杏,最低的是龙柏;冬季 $PM_{2.5}$ 干沉降速率最大的树种是罗汉松,其次是广玉兰和圆柏等,而 $PM_{2.5}$ 的干沉降速率相对较低的树种有女贞和龙柏,最低的是樟树.

综合 3 个季度的结果来看,松柏类树种叶片表面 $PM_{2.5}$ 的干沉降速率 V_d 要强于一般阔叶树种;从树种的滞尘效果来看,秋季要高于夏季和冬季.可能是由于上海夏季盛行季风以东南风为主,可将较为干净的空气吹向内陆,且有助于大气颗粒物的扩散,秋季气候依然较为潮湿,使植物叶片表面依然较为容易形成水化膜,但是大气环境质量开始下降,使颗粒物更容易被吸附且不易脱落.冬季的大气环境状况较差, $PM_{2.5}$ 浓度通常处于一年最高水平^[17],因此增加了植物叶片与 $PM_{2.5}$ 的接触几率,干沉降速率增大.此外,阔叶树种的滞尘能力相差不大,但其中广玉兰的干

沉降速率大于其余的阔叶树种.

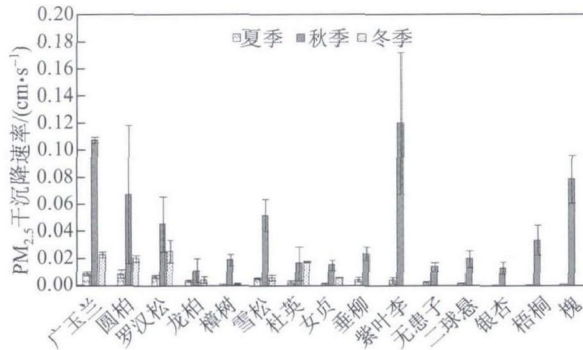


图 1 2015年夏、秋、冬季不同树种叶片 PM_{2.5} 干沉降速率

Fig.1 PM_{2.5} dry deposition rate of different tree leaves in summer, autumn and winter in 2015

2.2 叶片表面粗糙度的差异

通过 AFM 扫描叶片表面的部分区域, 得到叶片表面粗糙度的二维图像和三维图像. 如图2所示:

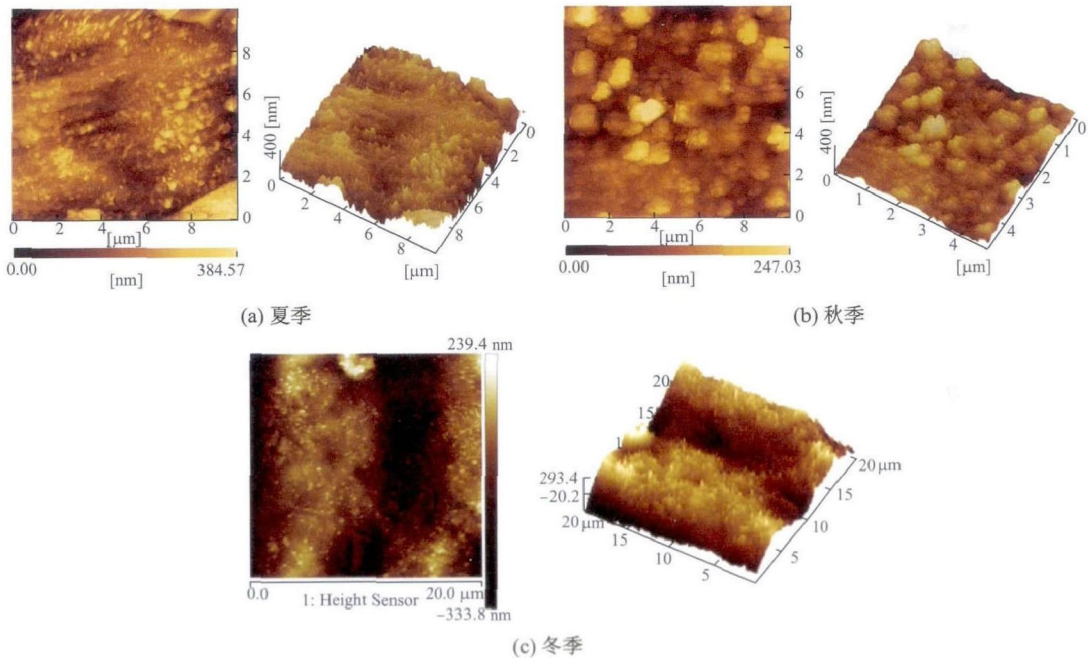


图 2 2015 年樟树叶片表面的二维和三维图像

Fig.2 2- and 3-Dimensional images of the surface of *Cinnamomum camphora* in 2015

二维图像上亮度高的地方表示在叶片上该区域较高, 呈峰状; 亮度低的地方表示在叶片上该区域较低, 呈谷状. 三维图像可以更直观地呈现出该区域的空间结构和峰谷变化. 图 3 表示了不同树种在 3 个季节的轮廓算数平均偏差 R_a .

由图 3 可知, 夏季 R_a 值普遍高于秋季和冬季, 这可能是由于夏季强光导致叶片增厚, 气孔密度增大引起的^[18].

2.3 叶片蜡质含量的差异

各季度中, 15 种树种叶片的蜡质含量如图 4 所示:

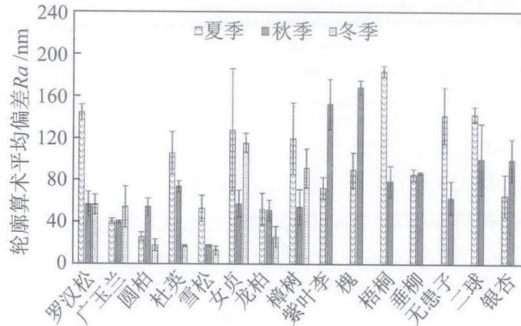


图3 2015年夏、秋、冬季叶片表面轮廓算术平均偏差 R_a

Fig. 3 R_a of different tree leaves in summer, autumn and winter in 2015

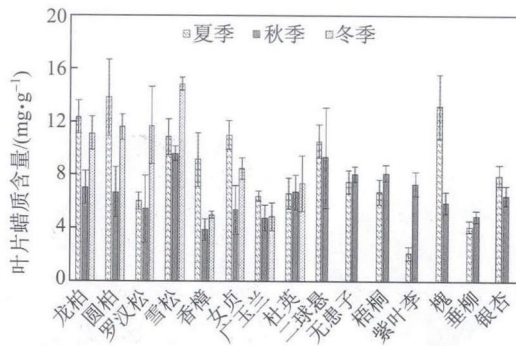


图4 2015年夏、秋、冬季叶片蜡质含量

Fig. 4 Wax content of different tree leaves in summer, autumn and winter in 2015

由图 4 可知, 植物叶片蜡质含量普遍呈现夏季最高, 秋季最低, 而冬季植物叶片蜡质含量的规律性较差. 叶片的蜡质含量与植物对水分的利用具有很大的作用, 研究表明, 蜡质在限制水分蒸腾方面发挥了重要作用; 蜡质与植物对水分的利用效率具有重要的作用^[19]. 蜡质含量较高的树种对水分的保持较好.

2.4 叶片表面自由能的差异

通过光学接触角测量仪分别得到水和二碘甲烷在叶片表面上的接触角图像, 如图 5 所示.

图中左边的图片表示以二碘甲烷作为探测液, 测得的接触角; 右边的图片表示以水作为探测液得到的接触角. 根据 Young 方程进行计算, 得到不同树种不同季节叶片表面的色散分量、极性分量和表面自由能.

图 6 为各树种叶片上表面自由能色散分量的比较. 由图可知, 针叶树种 3 个季度的变化趋势明显不同于阔叶树种. 但是同一树种 3 个季度的变化量无明显规律.

图 7 为各树种叶片上表面自由能极性分量的比较. 由图可知, 15 种树种叶片表面的极性分量普遍在秋季达到最大, 而夏冬两季的数值彼此较为接近, 且明显小于秋季的数值.

2.5 大气 PM_{2.5}在叶片上沉降速率多元回归方程的建立

2.5.1 总体多元回归分析

首先以所有树种为对象, 将干沉降速率作为因变量, 蜡质含量、色散分量、极性分量

和 R_a 等因子作为自变量, 建立回归模型, 结果如表 2 所示.

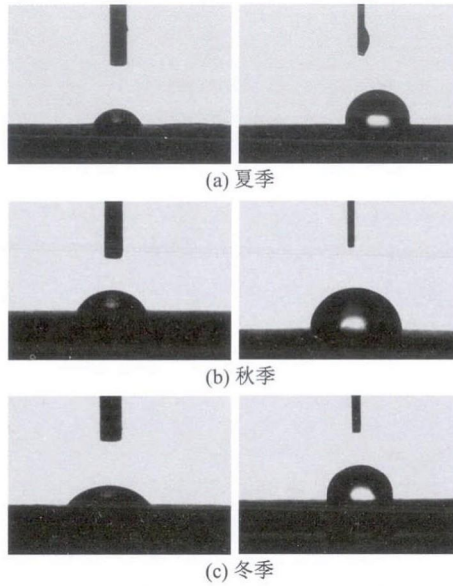


图 5 2015 年香樟叶片表面接触角图像

Fig. 5 Images of the contact angles of *Cinnamo mumcamphora* in 2015

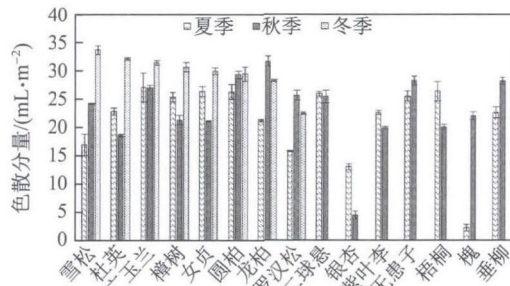


图 6 2015年夏、秋、冬季叶片表面自由能色散分量

Fig. 6 Dispersion component of the surface of of different tree leaves in summer, autumn and winter in 2015

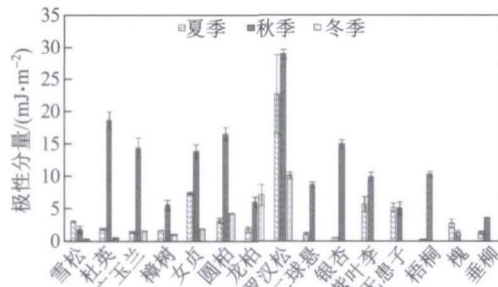


图 7 2015年夏、秋、冬季叶片表面自由能极性分量

Fig. 7 Polar component of the surface of different tree leaves in summer, autumn and winter in 2015

表 2 所有树种的多元回归分析

Tab. 2 Regression analysis of all tree species

模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.
	α	标准误差			
常量	-0.002	0.017		-0.137	0.891
蜡质含量	-0.001	0.002	-0.104	-1.133	0.260
色散分量	0.001	0.001	0.172	1.783	0.078
极性分量	0.002	0.000	0.420	4.369	0.000
R_a	-3.758×10^{-5}	0.000	-0.057	-0.616	0.539

从表 2 中可知, 蜡质含量、色散分量和 R_a 的显著性水平均大于 0.05, 只有极性分量的显著水平小于 0.05. 因此, 对于所有树种的多元回归模型的数据意义并不大. 我们认为, 不同类型的树种的沉降机制存在差异. 因此, 将树种分为针叶树种和阔叶树种、常绿树种和落叶树种分别进行多元回归分析.

2.5.2 针叶树种的多元回归分析

将雪松、龙柏、圆柏和罗汉松等针叶树种的干沉降速率和蜡质含量、色散分量、极性分量、轮廓算术平均偏差进行拟合得到表 3 所示结果.

表 3 针叶树种的多元回归分析

Tab. 3 Regression analysis of conifers

模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.
	α	标准误差			
常量	0.047	0.036		1.297	0.204
蜡质含量	-0.003	0.002	-0.391	-1.952	0.060
色散分量	0.001	0.001	0.104	0.541	0.592
极性分量	0.001	0.001	0.372	1.639	0.111
R_a	0.000	0.000	-0.397	-1.653	0.108

从表 3 可知, 对于针叶树种, 蜡质含量、色散分量、极性分量和 R_a 的显著性水平均大于 0.05, 无法判断干沉降速率与表面粗糙度、色散分量和极性分量的相关性.

2.5.3 阔叶树种的多元回归分析

表 4 阔叶树种的多元回归分析

Tab. 4 Regression analysis of broad-leaved trees

模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.
	α	标准误差			
常量	-0.023	0.022		-1.071	0.288
蜡质含量	-0.002	0.002	-0.149	-1.275	0.207
色散分量	0.001	0.001	0.245	1.969	0.053
极性分量	0.003	0.001	0.544	4.376	0.000
R_a	7.225×10^{-5}	0.000	-0.397	0.859	0.394

从表 4 可知, 对于阔叶树种, 只有极性分量的显著性水平在 0.05 以下, 因此认为极性分量对干沉降速率的影响是显著的, 从回归系数 α 来看, 干沉降速率与极性分量呈正相关关系; 蜡质含量、色散分量和 R_a 的显著性水平分别为 0.207、0.053 和 0.394, 表明干沉降速率蜡质含量、色散分量和 R_a 无显著的相关性, 但相关性都有所提升.

2.5.4 常绿树种的多元回归分析

将雪松、龙柏、圆柏、罗汉松、女贞、樟树、广玉兰和杜英的干沉降速率和蜡质含量、色散分量、极性分量和 R_a 进行拟合得到如下表格。

表 5 常绿树种的多元回归分析

Tab. 5 Regression analysis of evergreen trees

模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.
	α	标准误差			
常量	0.006	0.021		0.286	0.755
蜡质含量	-0.002	0.001	-0.217	-2.098	0.040
色散分量	0.001	0.001	0.220	2.034	0.046
极性分量	0.002	0.000	0.495	4.486	0.000
R_a	0.000	0.000	-0.337	-3.271	0.002

从表 5 可知, 对于常绿树种, 4 项指标的显著性水平均在 0.05 以下, 因此认为蜡质含量、色散分量、极性分量、 R_a 对常绿树种叶片干沉降速率的影响是显著的, 从回归系数 α 来看, 干沉降速率与色散分量、极性分量、 R_a 呈正相关关系, 而与蜡质含量呈负相关关系。但是 R_a 的系数接近于 0, 说明轮廓算术平均偏差与常绿树种叶片干沉降速率的关系不大。

2.5.5 落叶树种的多元回归分析

表 6 落叶树种的多元回归分析

Tab. 6 Regression analysis of deciduous trees

模型	非标准化系数		标准系数	t	Sig.
	α	标准误差			
常量	-0.036	0.030		-1.187	0.244
蜡质含量	-0.001	0.002	-0.075	-0.475	0.651
色散分量	0.001	0.001	0.153	0.832	0.412
极性分量	0.004	0.001	0.506	2.777	0.009
轮廓算术平均偏差	0.000	0.000	0.278	1.685	0.102

从表 6 可知, 对于落叶树种, 只有极性分量的显著性水平在 0.05 以下, 因此认为极性分量对干沉降速率的影响是显著的, 从回归系数 α 来看, 干沉降速率与极性分量呈正相关关系。

2.5.6 分析与讨论

综合上述结果发现: 蜡质含量、色散分量、极性分量和 R_a 这 4 项指标对于常绿树种而言是显著的; 对于阔叶和落叶树种而言, 只有极性分量对两者都是显著的; 4 项指标对针叶树种而言都是不显著的。我们认为是有以下几方面原因造成的。

(1) 叶片蜡质含量高的树种, 其表面不易湿润, 导致滞尘能力下降^[12]。落叶植物叶片多数为纸质, 表面的角质层或蜡质层较少。常绿植物叶片表面多数为角质层或蜡质层较厚, 使水分在其表面不易铺展, 导致滞尘能力下降^[20-22]。

(2) 叶片的表面自由能和界面湿润有直接关系。一般认为自由能色散分量的高低与非极性分子的湿润黏附密切相关, 而极性分量主要与极性分子有关^[23]。田军等人对管道涂层的研究表明非极性液体与具有较低表面能色散分量的极性涂层表面有较大的接触角^[24], 这说明非极性液体较难在极性涂料上进行铺展。而大气中较为常见的液体为水汽, 虽然表面能色散分量对极性的水分子有一定的作用, 但远不及极性分量的对其的作用。叶片滞尘能力可能主要与表面自由能的极性分量有较大的关系。

(3) 叶片表面粗糙的叶片通常具有较强的滞尘能力。张家洋等人的试验发现紫薇和紫叶李等叶表面粗糙、具有沟状组织或呈现明显的脊状褶皱, 可以深藏或滞留许多颗粒物; 对于接触角

较小的润湿叶片, 叶片表面的微观结构凹凸不平, 使得颗粒物与叶面的接触面积较大, 故叶片滞留颗粒物的能力相对较强^[25].

此外, 植物叶片上 $PM_{2.5}$ 的干沉降速率的影响因素还有很多, 除了上述3种叶片的微观特性之外, 可能还与叶片一些微观结构有关, 如叶片的表皮毛、气孔等因素. 如杨佳等研究发现叶片气孔密度($>189 N/mm^2$)较大有利于滞尘, 且具有绒毛的叶片的 $PM_{2.5}$ 滞尘能力更强^[26]. 王蕾等人发现叶表皮具沟状组织、密集纤毛的树种滞尘能力强, 叶表皮具瘤状或疣状突起的树种滞尘能力较差^[27]. 除此之外, 外界大气环境也应当是植物叶片上 $PM_{2.5}$ 的干沉降速率的重要影响因素, 如温度、湿度、 $PM_{2.5}$ 浓度, 还有风速对 $PM_{2.5}$ 的干沉降也具有影响.

在本文中, 将针叶和阔叶树种、常绿和落叶树种分别进行多元回归分析后, 发现不同划分类别的树种受到的影响因素都有差异, 因此认为不同类型树种的沉降机制存在差异性^[28], 这可能与它们的生物学形态结构有关.

根据上述结果, 可对园林绿化植物的配置提供以下参考: 基础树种应以针叶树种为主, 且由于针叶树种大部分较为高大, 可作为绿化设施的背景树种; 背景树种前可适当种植广玉兰等滞尘力较好的常绿乔木, 以填补背景树种种植的间隙; 一些滞尘能力较强的中小型乔木, 例如槐和紫叶李等, 可以列植、间植或者混植, 且能提供季相变化和色彩变化; 日本五针松等株型优美且滞尘力较高的小型乔木可采用孤植, 成为绿色设施的景观焦点; 下层可用灌木和草坪相结合的种植方式, 减少地面扬尘. 另外, 需定期用水对植物外表进行喷洒, 使植物能极大地发挥其滞尘的效果.

3 总 结

(1) 植物叶片 $PM_{2.5}$ 干沉降速率基本为秋季最高, 冬季次之, 而夏季最低, 可能是由外部的气候因素与内部植物自身因素共同导致的, 且各种树种的滞尘效果也不尽相同: 针叶树种的滞尘能力较好, 而阔叶树种内, 紫叶李、广玉兰以及槐的滞尘能力较强. 因此, 在上海以空气污染物为目标的生态治理, 可多选用针叶树种和紫叶李、广玉兰等.

(2) 蜡质含量、色散分量、极性分量和 R_a 这4项指标与叶片的滞尘能力有一定的关系, 对于常绿植物而言皆为显著性指标, 但对于针叶树种却皆不显著. 虽然蜡质含量的显著性较差, 但是从拟合系数可以得知, 叶片蜡质含量与其滞尘能力大小成负相关. 而叶片的极性分量也正好印证这一点. 由此我们认为, 蜡质含量越低, 叶片表面自由能的极性分量发挥的作用越大, 有利于叶片表面水分的湿润, 从而有助于滞纳更多的颗粒物.

本文从城市大气污染问题的关键因子 $PM_{2.5}$ 出发, 研究上海常见绿化树种对大气颗粒物的防控功能, 通过叶片表面微观特性的表征, 筛选滞尘效果较好的树种并总结了影响因素. 本文测定的叶片表面特性因子还比较少, 后续的研究可进一步量化植物叶片气孔及表皮毛等的微观结构因子, 从而进一步探讨植物滞尘关键的影响因素.

[参 考 文 献]

- [1] 宁红兵, 陈媛媛, 张鹏. $PM_{2.5}$ 污染的研究进展及防治对策 [J]. 广东化工, 2015(5): 13-17.
- [2] FANN N, RISLEY D. The public health context for $PM_{2.5}$ and ozone air quality trends[J]. Air Quality, Atmosphere and Health, 2013, 6(1): 1-11.
- [3] SCHEERS H, JACOBS L, CASAS L, et al. Long-term exposure to particulate matter air pollution is a risk factor for stroke: Meta-analytical evidence[J]. Stroke: A Journal of Cerebral Circulation, 2015, 46(11): 3058-3066.
- [4] KLOOG I, ZZNOBETTI A, NORDIO F, et al. Effects of airborne fine particles ($PM_{2.5}$) on deep vein thrombosis admissions in the northeastern United States [J]. Journal of Thrombosis and Haemostasis, 2015, 13(5): 768-774.
- [5] ROSSNER P J., TULUPOVAA E, ROSSNEROVAA A, et al. Reduced gene expression levels after chronic exposure to high concentrations of air pollutants [J]. Mutation Research, 2015, 780: 60-70.

- [6] YANG J, YU Q, GONG P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42: 7266-7273.
- [7] 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): 115-123.
- [8] PULLMAN M. Conifer PM_{2.5} deposition and re-suspension in wind and main events[D]. Ithaca: Cornell University, 2009.
- [9] WAGNER P, FÜRSTNER R, BARTHLOTT W, et al. Quantitative assessment to the structural basis of water repellency in natural and technical surfaces [J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(385): 1295-1303.
- [10] BURTON Z, BHUSHAN B. Surface characterization and adhesion and friction properties of hydrophobic leaf surfaces [J]. Ultramicroscopy, 2006, 106(8/9): 709-719.
- [11] PERKINS M C, ROBERTS C J, BRIGGS D, et al. Surface morphology and chemistry of *Prunus laurocerasus* L. leaves: A study using X-ray photoelectron spectroscopy, time-of-flight secondary-ion mass spectrometry, atomic-force microscopy and scanning electron microscopy [J]. Planta, 2005, 221(1): 123-134.
- [12] 刘璐, 管东生, 陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态 [J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [13] 王兵, 王晓燕, 牛香, 等. 北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能 [J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2005-2007.
- [14] 陈波, 刘海龙, 赵东波, 等. 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 [J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 777-784.
- [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 [J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 110-115.
- [16] 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)[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2015(12): 9623-9638.
- [17] 新华社. 我国霾污染具有季节性、地域性特点 [EB/OL]. [2016-04-08]. <http://www.envir.gov.cn/info/2016/3/39927.htm>, 2016-03-09/2016-5-5.
- [18] 游文娟, 张庆贵, 夏楠. 城市绿化植物叶片结构对光强的响应 [J]. 西北林学院学报, 2008, 23(5): 22-25.
- [19] 石辉, 王会霞, 李秩秩. 植物叶表面的润湿性及其生态学意义 [J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4287-4298.
- [20] NEINHUIS C, BARTHLOTT W. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability. New Phytologist, 1998, 138(1): 91-98.
- [21] HANBA Y T, MORIYA A, KIMURA K. Effect of leaf surface wetness and wettability on photosynthesis in bean and pea [J]. Plant, Cell and Environment, 2004, 27(4): 413-421.
- [22] KOCH K, BHUSHAN B, BARTHLOTT W. Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics [J]. Progress in Materials Science, 2009, 54(2): 137-178.
- [23] 玉亚, 石辉. 石墨粉末润湿特性及其表面自由能的研究 [J]. 安全与环境学报, 2007, 7(1): 60-61.
- [24] 田军, 薛群基. 涂层表面能色散分量和极性分量对涂层与液体石蜡间润湿性的影响 [J]. 石油与天然气化工, 1998, 27(2): 113-114.
- [25] 张家洋, 刘兴洋, 邹曼, 等. 37种道路绿化树木滞尘能力的比较 [J]. 云南农业大学学报, 2013, 28 (6): 905-912.
- [26] 杨佳, 王会霞, 谢滨洋, 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, 2005, 28(3): 384-392.
- [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] 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): 659-662.

(责任编辑: 张 晶)