

# 基于扫描电镜定量评价植物滞留大气颗粒物能力

李新宇<sup>1</sup>,赵松婷<sup>1</sup>,郭佳<sup>1</sup>,李延明<sup>1\*</sup>,于秋雅<sup>2</sup>

(1. 北京市园林科学研究院,园林绿地生态功能评价与调控技术北京市重点实验室,北京 100102;

2. 河北农业大学 园林与旅游学院,河北 保定 071000)

**摘要:**选择适合城市发展的、滞留颗粒物能力强的树种,可以为城市绿地规划、设计、建设提供重要依据。利用扫描电镜观测的图片定量评价园林植物滞留细颗粒物能力的方法,并对北京市常用园林乔木滞留颗粒物能力进行评价。结果表明:乔木单位叶面积滞尘量差异较大,落叶乔木银杏( $1.619 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )为绦柳( $0.079 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )的 20 倍,常绿乔木雪松( $3.405 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )是油松( $0.663 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )的 5 倍;比较植物整株滞尘量,单周滞尘量较多的植物有元宝枫、圆柏、银杏、臭椿、国槐、小叶朴、家榆、毛白杨、雪松、栾树和刺槐;比较植物单位叶面积每周滞留  $\text{PM}_{2.5}$  的质量,落叶乔木中,元宝枫( $0.606 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )滞留  $\text{PM}_{2.5}$  的能力最强,滞留  $\text{PM}_{2.5}$  的质量是绦柳( $0.016 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )的 38 倍,常绿乔木中,雪松( $0.144 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )单位叶面积滞留  $\text{PM}_{2.5}$  的能力最强,是油松( $0.077 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )的 20 倍;对比整株植物每周滞留  $\text{PM}_{2.5}$  的质量,滞留  $\text{PM}_{2.5}$  质量较多的植物有元宝枫、柿树、国槐、银杏、臭椿、白玉兰、楸树、小叶朴、圆柏、杜仲、家榆、毛白杨、栾树、刺槐,整株树每周滞留  $\text{PM}_{2.5}$  质量均在 10 g 以上,最弱的为紫叶李、碧桃、北京丁香、绦柳、山桃、丝绵木。

**关键词:**园林植物;乔木;扫描电镜;滞尘能力;细颗粒物

**中图分类号:**X513      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2016)01-0286-06

Evaluation of the Retention Capability of Air Particulates by Common Trees Based on SEM

LI Xin-yu<sup>1</sup>, ZHAO Song-ting<sup>1</sup>, GUO Jia<sup>1</sup>, LI Yan-ming<sup>1\*</sup>, YU Qiu-ya<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Landscape Architecture, Beijing Key Laboratory of Ecological Function Assessment and Regulation Technology of Green Space, Beijing 100102, China; 2. College of Landscape and Tourism, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071000, China)

**Abstract:** In order to study the atmospheric particulates including TSP (total suspended particulate) and  $\text{PM}_{2.5}$  retaining capability of different trees, 31 species of representative trees in Beijing were chosen to systematically analyze the particulate accumulation for 7 days on the leaves and the particulate retention of the whole plants in the same open surroundings by using direct sampling, SEM (scanning electron microscopy) and statistical analysis methods. Clustering method was used to evaluate the particle retaining capability of plants. The results showed that: there were significant differences in TSP retention capability among plant individuals in every unit leaf area for 7 days, Deciduous tree of *Ginkgo biloba* ( $1.619 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) was 20 times more than *Salix pendula* ( $0.079 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), evergreen tree of *Cedus deodara* ( $3.405 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) was 5 times more than *Pinus tabuliformis* ( $0.663 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Tree species with high retention amounts TSP were *Acer truncatum*, *Sabina chinensis*, *Ginkgo biloba*, *Ailanthus altissima*, *Sophora japonica*, *Celtis bungeana*, *Ulmus pumila*, *Populus tomentosa*, *Cedus deodara*, *Koelreuteria paniculata*, *Robinia pseudoacacia*. There were also significant differences in 7-day retention amount of  $\text{PM}_{2.5}$  in every unit leaf area among different tree species, Deciduous tree of *A. truncatum* ( $0.606 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) was 38 times more than *Salix pendula*.

收稿日期:2015-08-10 修回日期:2015-09-10

基金项目:国家科技支撑计划课题:北京地区扬尘抑制技术研发及示范应用(2013BAC17B03)。

作者简介:李新宇,女,高级工程师,研究方向:园林植物生态功能评价。E-mail:lxy09618@163.com

\* 通信作者:李延明,男,教授级高工,研究方向:园林生态。E-mail:liyanming\_beijing@hotmail.com

( $0.016 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ), evergreen tree of *C. deodara* ( $0.144 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) was 20 times more than *P. tabuliformis* ( $0.077 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ). Tree species by which the 7-day PM<sub>2.5</sub> retention amounts were over 10 g were *A. truncatum*, *Diospyros kaki*, *S. japonica*, *G. biloba*, *Ailanthus altissima*, *Magnolia denudata*, *Catalpa bungei*, *C. bungeana*, *S. chinensis*, *Eucommia ulmoides*, *U. pumila*, *P. tomentosa*, *K. paniculata*, *R. pseudoacacia*. On the contrary, tree species that exhibited low 7-day PM<sub>2.5</sub> retention amount (less than 1 g) were *Prunus cerasifera*, *Prunus persica*, *Syringa reticulata*, *S. pendula*, *P. davidiana*, *Euonymus maackii*.

**Key words:** garden plant species; tree; scanning electron microscope (SEM); particle retaining ability; fine particle (PM<sub>2.5</sub>)

大气颗粒物污染已经成为城市的主要环境问题,尤其细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>, 空气动力学当量直径 $\leqslant 2.5 \mu\text{m}$ )能够在大气中停留很长时间,并可随呼吸进入体内,积聚在气管或肺中,影响身体健康<sup>[1]</sup>。目前尚不能完全依赖污染源治理以解决环境问题,借助自然界的清除机制是缓解城市大气污染压力的有效途径,城市园林绿化就是其一,即利用园林植物吸附和滞留悬浮在空气中的颗粒物,降低空气中颗粒物的浓度<sup>[2-4]</sup>。研究城市园林绿化植物的滞尘能力,为选择和优化城市绿化的种类,降低城市大气颗粒污染物和提高空气质量具有重要的参考意义。近年来,国内外学者在城市植物滞留大气颗粒物机理和改善城市环境等方面进行了一些开拓性的工作<sup>[5-9]</sup>,初步得出了植物滞尘的一些规律。但对于植物滞留细颗粒物能力的系统研究尚显薄弱,对于植物滞留的细颗粒物质量缺乏简易可操作的检测方法,大多为定性评价或相对比较,不能更准确比较自然状态下,不同植物对细颗粒物的吸附能力。

有鉴于此,本文提出一种基于扫描电镜观测结果,计算植物滞留细颗粒物质量的方法,并研究北京市园林绿化中常用的不同植物材料对治理颗粒物污染的差异,筛选出治理效果好的植物种类,为建立科学有效的定量评价植物滞留细颗粒物计算方法、改善生态环境提供必要的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验观测在2013年北京市园林科学研究院的植物科普园及周边公园内开展,试验区地处北京市东四环边,39.97°N、116.46°E,面积约为1 hm<sup>2</sup>。北京市气候为典型的暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。年均温8.5~9.5 °C,夏季各月平均气温都在24 °C以上,年降水量540 mm,年平均蒸发量约为730 mm。全年降水量的80%主要集中在5月下旬至8月上旬,春秋两季干旱少雨。

北京地区2013年降水量为508.4 mm,比常年

减少6.9%。大范围强降水过程主要集中在7月中旬,分别是7月1—2日、7月8—10日、7月15—16日。其中,7月15—16日出现2013年最大降雨过程,全市平均降雨量为58.1 mm,达暴雨量级,年降水日数接近常年。观象台年降水日数为71 d。日降水量在15 mm以上的天数为7 d。

### 1.2 供试植物种选择

根据北京市第6次绿化普查数据,选取在北京市园林绿化中应用频率较高的31种乔木进行研究<sup>[10]</sup>。对选定的常用绿化植物进行植物叶片滞留颗粒物能力的评价,每种植物均选择生长状况良好且具有代表性的植株(表1)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 园林植物滞尘试验

1.3.1.1 样品采集与测定 一般认为,15 mm的降雨量就可以冲掉植物叶片的降尘,然后重新滞尘。根据北京市的降雨特点,于雨量>15 mm后7 d进行采样。全年内共采集到7 d滞尘样本3次<sup>[11]</sup>。

对选好的树种依据其自身特点从树冠四周及上中下各部位均匀采集,阔叶植物采集30片,针叶植物采集300针。采集时选择生长状态良好且具有代表性的叶片,对每种树种进行3次重复采样,并立即用封存于干净防尘盒内以防挤压或叶毛被破坏。

1.3.1.2 叶片处理 叶片用蒸馏水浸泡2 h以浸洗掉附着物,并用不掉毛的软毛刷刷掉叶片上残留的附着物,最后用镊子将叶片夹出;浸洗液用已烘干称重(W1)的滤纸抽滤,将滤纸于80 °C下烘24 h,再以1/10 000天平称重(W2),2次重量之差即为采集样品上所附着的降尘颗粒物重量<sup>[12]</sup>。

夹出的叶片晾干后用Li-3000c叶面积仪求算叶面积A。

#### 1.3.1.3 单位叶面积滞尘量(LW)计算方法:

$$LW = (W2 - W1)/A$$

1.3.1.4 植物绿量的计算 绿量是指(植物叶片面积)总量的大小。本研究对31种植物材料个体的叶面积与胸径、冠幅进行实际测量,并将各参数代入

表 1 选定的 31 种园林绿化树种规格

Table 1 The life form, leaf traits and DHB of the selected plant species

乔木	生活型	叶习性	叶型	胸径/cm	冠径/m
旱柳 ( <i>Salix matsudana</i> )	乔木	落叶	单叶	28.20±3.50	6.45±0.77
杜仲 ( <i>Eucommia ulmoides</i> )	乔木	落叶	单叶	15.00±1.21	4.10±0.23
雪松 ( <i>Cedrus deodara</i> )	乔木	常绿	针叶	17.20±1.65	5.22±0.41
银杏 ( <i>Ginkgo biloba</i> )	乔木	落叶	单叶	33.27±3.71	7.66±0.77
柿树 ( <i>Diospyros kaki</i> )	乔木	落叶	单叶	28.20±2.51	6.70±0.66
元宝枫 ( <i>Acer truncatum</i> )	乔木	落叶	单叶	14.85±1.46	5.84±0.53
小叶朴 ( <i>Celtis bungeana</i> )	乔木	落叶	单叶	40.20±3.41	10.05±1.22
紫叶李 ( <i>Prunus cerasifera</i> )	小乔木	落叶	单叶	20.20±1.31	4.15±0.06
北京丁香 ( <i>Syringa reticulata</i> )	小乔木	落叶	单叶	53.00±3.00	7.65±0.66
白玉兰 ( <i>Magnolia denudata</i> )	乔木	落叶	单叶	47.80±7.80	7.48±0.96
国槐 ( <i>Sophora japonica</i> )	乔木	落叶	复叶	25.17±2.61	7.78±0.34
黄栌 ( <i>Cotinus coggygria</i> )	乔木	落叶	单叶	30.00±5.00	4.25±0.26
毛白杨 ( <i>Populus tomentosa</i> )	乔木	落叶	单叶	41.23±2.11	5.57±0.23
圆柏 ( <i>Sabina chinensis</i> )	乔木	常绿	刺叶及鳞叶	11.90±0.87	3.15±0.24
栾树 ( <i>Koelreuteria paniculata</i> )	乔木	落叶	复叶	23.73±0.30	2.68±0.14
家榆 ( <i>Ulmus pumila</i> )	乔木	落叶	单叶	20.35±0.85	7.25±0.38
樱花 ( <i>Prunus serrulata</i> )	乔木	落叶	单叶	16.27±1.09	2.91±0.18
白蜡 ( <i>Fraxinus chinensis</i> )	乔木	落叶	奇数羽状复叶	29.63±2.10	7.35±0.73
碧桃 ( <i>Prunus persica</i> )	小乔木	落叶	单叶	23.73±2.70	5.97±0.65
刺槐 ( <i>Robinia pseudoacacia</i> )	乔木	落叶	羽状复叶	37.40±3.22	6.32±0.69
七叶树 ( <i>Aesculus chinensis</i> )	乔木	落叶	掌状复叶	22.30±1.20	4.49±0.51
垂柳 ( <i>Salix babylonica</i> )	乔木	落叶	单叶	36.93±2.92	6.61±0.51
臭椿 ( <i>Ailanthus altissima</i> )	乔木	落叶	奇数羽状复叶	34.80±2.73	9.04±1.02
西府海棠 ( <i>Malus micromalus</i> )	乔木	落叶	单叶	19.00±0.50	4.25±0.22
油松 ( <i>Pinus tabuliformis</i> )	乔木	常绿	针叶	19.30±0.96	6.46±0.66
山桃 ( <i>Prunus davidiana</i> )	乔木	落叶	单叶	22.50±1.31	6.25±0.51
楸树 ( <i>Catalpa bungei</i> )	乔木	落叶	阔叶	21.03±0.26	2.84±0.15
流苏 ( <i>Chionanthus retusus</i> )	乔木	落叶	阔叶	32.65±0.65	8.55±0.78
构树 ( <i>Broussonetia papyrifera</i> )	乔木	落叶	单叶	10.20±2.18	5.02±0.41
丝绵木 ( <i>Euonymus maackii</i> )	乔木	落叶	阔叶	49.10±3.54	7.25±0.81
绦柳 ( <i>Salix pendula</i> )	乔木	落叶	单叶	47.40±2.65	8.84±0.31

北京市常用园林植物个体一元、二元绿量计算回归模型,计算得出植株绿量( $G$ )<sup>[13]</sup>。

### 1.3.1.5 单株植物滞尘量( $PW$ )计算方法:

$$PW = LW \times G$$

### 1.3.2 园林植物滞留 $PM_{2.5}$ 试验方法

1.3.2.1 细颗粒物统计分析 研究采用 Hitachi 台式 TM3000 电镜观测叶片表面,每一观测叶片均是在叶片上随机裁剪的直径<70 mm 的部分叶片。由于观测影像上叶片颗粒物多为不规则形状且数量较多,所以在对其进行提取时首先利用 Erdas、Photoshop 等软件对影像进行增强处理,提取出颗粒物的栅格图像,再利用 ArcGIS 等软件对处理后的影像进行二值化、重分类等处理,提取出叶面颗粒物的矢量图像,并做进一步统计分析计算得出观测叶面积上总颗粒物体积(SV)以及  $PM_{2.5}$  的体积(V)。

1.3.2.2 园林植物滞留  $PM_{2.5}$  能力研究:由于较高密度和不规则形状的抵消效应,扬尘的空气动力学

直径与物理直径大致可以认为是相等的<sup>[14]</sup>。颗粒物密度近似相同, $PM_{2.5}$  体积百分比即  $PM_{2.5}$  质量百分比。

园林植物单位叶面积滞留  $PM_{2.5}$  的量  $LW_{2.5}$  ( $g \cdot m^{-2}$ ) =  $LW \times SV/V$ ; 园林植物整株树滞留  $PM_{2.5}$  的量( $g \cdot 周^{-1}$ ) =  $PW \times SV/V$ 。

利用 SPSS17.0 软件进行多重方差两两比较( $S - N - K$ )分析,对整株植物的滞尘能力及滞留  $PM_{2.5}$  的能力进行分类。

## 2 结果与分析

### 2.1 园林植物单位叶面积滞尘量比较

图 1 给出了 31 种北京市常用园林植物单位叶面积滞尘量排序。由图 1 可以看出,个体之间滞尘能力有很大的差异,单位面积滞尘量最多的雪松 ( $3.405 g \cdot m^{-2}$ ) 是单位面积滞量最少的绦柳 ( $0.079 g \cdot m^{-2}$ ) 的 43 倍,按照落叶乔木与常绿乔木

木划分比较,落叶乔木银杏( $1.619 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )为绦柳( $0.079 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )20倍;常绿乔木雪松( $3.405 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )是油松( $0.663 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )的5倍。

## 2.2 单株植物滞尘量比较

综合考虑不同植株的绿量大小,计算园林植物整株树每周的滞尘能力,分析个体之间滞尘能力差异(图2)。对比落叶乔木整株树每周的滞尘能力,元宝枫(263.055 g)是丝绵木(0.962 g)的273倍;常绿乔木圆柏(216.076 g)是油松(74.206 g)的2.9倍。利

用SPSS13.0软件进行多重方差两两比较(S-N-K)分析,可以将31种乔木的整株滞尘能力从大到小依次分为1~5组( $p<0.05$ )(表2),乔木中单周滞尘量较多的植物有元宝枫、圆柏、银杏、臭椿、国槐、小叶朴、家榆、毛白杨、雪松、栾树和刺槐,整株树每周滞尘量均在100 g以上,较弱的为绦柳、樱花、紫叶李、西府海棠、北京丁香、碧桃、山桃和丝绵木,每周滞尘量均在10 g以下。

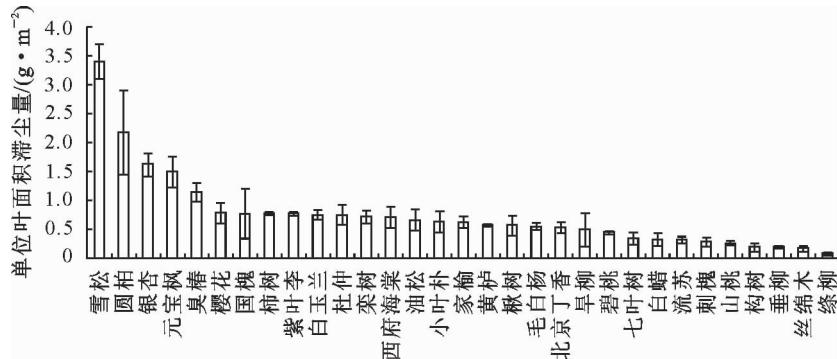


图1 乔木单位叶面积滞尘能力大小比较

Fig. 1 Particles retained by trees in every unit leaf area every week

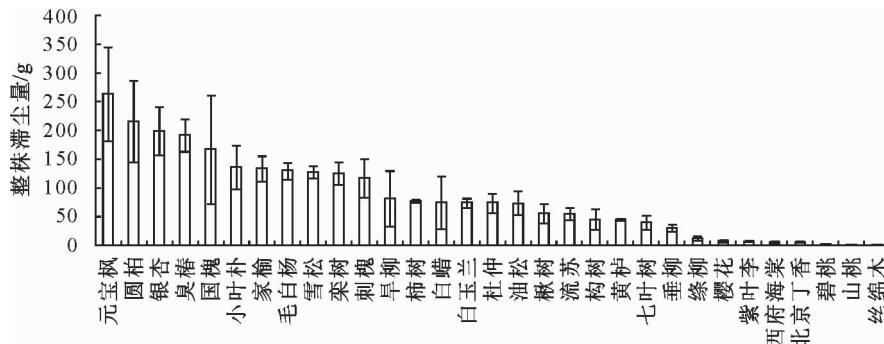


图2 乔木整株树每周滞尘量

Fig. 2 TSP retained by the whole trees every week

表2 乔木整株滞尘能力的两两S-N-K比较

Table 2 S-N-K test of TSP retained by the whole trees

滞尘能力 /(g·周⁻¹)	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组
	>167.0	117.0~167.0	74.0~81.0	31.0~56.0	<10.0
乔木	TD1~TD5	TD6~TD11	TD12~TD17	TD18~TD23	TD24~TD31
	0.100	0.248	0.098	0.068	0.109

注:按照滞尘能力大小,将31种乔木分别标记为TD1~TD31,例元宝枫为TD1,丝绵木为TD31。表3同。

## 2.3 园林植物单位叶面积PM<sub>2.5</sub>滞留量比较

通过对植物滞尘量计算的基础上,结合电镜观测结果,计算得出单位叶面积滞留PM<sub>2.5</sub>的质量。由图3可以看出,不同植物个体之间滞留PM<sub>2.5</sub>的能力有很大的差异,落叶乔木中,元宝枫单位叶面积滞留PM<sub>2.5</sub>的能力最强,达到 $0.606 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,滞留PM<sub>2.5</sub>的能力最弱的仍是绦柳,滞留量为 $0.016 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ ,元宝枫单位叶面积滞留PM<sub>2.5</sub>的质量是绦柳的

38倍;常绿乔木中,雪松( $0.144 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )是油松( $0.077 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ )的20倍。

## 2.4 单株植物PM<sub>2.5</sub>滞留量比较

同滞尘能力分析相同,考虑不同植株的绿量大小,计算园林植物整株树每周的滞留PM<sub>2.5</sub>的能力,分析个体之间滞尘能力差异(图4)。分别对比落叶乔木与常绿乔木,元宝枫(106.336 g)整株树每周的滞留PM<sub>2.5</sub>的质量是丝绵木(0.403 g)的263倍;

常绿乔木圆柏(17.178 g)是雪松(5.406 g)的3倍。多重方差两两比较(S-N-K)分析,可以将31种乔木的整株PM<sub>2.5</sub>滞留量从大到小依次分为1~5组( $p<0.05$ )(表3),乔木中单周滞尘量最强的是元宝枫,达到100 g及以上,滞留PM<sub>2.5</sub>质量较多的植

物还有柿树、国槐、银杏、臭椿、白玉兰、楸树、小叶朴、圆柏、杜仲、家榆、毛白杨、柰树、刺槐，整株树每周滞留 PM<sub>2.5</sub> 质量均在 10 g 以上，最弱的为紫叶李、碧桃、北京丁香、绦柳、山桃、丝绵木，滞尘量均在 1 g 以下。

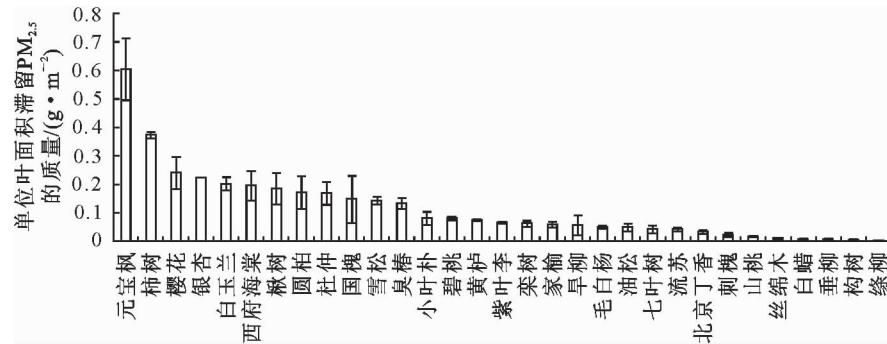


图 3 乔木单位叶面积  $PM_{2.5}$  滞留量比较

Fig. 3 PM<sub>2.5</sub> retained by trees in every unit leaf area every week

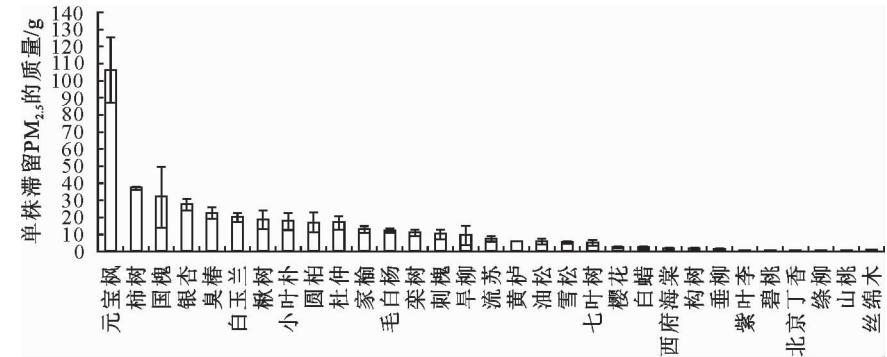


图 4 乔木整株  $PM_{2.5}$  滞留量比较

Fig. 4 PM<sub>2.5</sub> retained by the whole trees every week

表 3 乔木整株  $PM_{2.5}$  滞留量的两两 S-N-K 比较

Table 3 S-N-K test of PM<sub>2.5</sub> retained by the whole trees

滞尘能力 /(g·周 <sup>-1</sup> )	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组
	>100.0	15.0~37.0	10.0~13.0	1.0~10.0	<1.0
乔木	TP1	TP2~TP10	TP11~TP14	TP15~TP25	TP26~TP31
	1	0.162	0.098	0.068	0.109

### 3 讨论

植物通过巨大的叶总面积、复杂的叶表面的细微结构和叶的分泌组织以附着、吸附或直接拦截等方式进行滞尘<sup>[7]</sup>。此外，植物能随着生长不断扩大叶面积，年年更新新叶，这是其他界面所不能比的。因此，从滞留颗粒物方面对树种进行选择很有意义。可以根据污染物性质不同，划分不同区域，筛选区域代表树种并对比各代表树种对颗粒物的阻滞吸收的效果，确定各区域利于吸滞颗粒物的优势树种，还应<sup>1</sup>对吸滞效果显著的具体树种进行定量分析，明确各个树种单位面积上颗粒物的滞留数和滞留量，最后

根据树种滞留颗粒物能力的排名,选择相应的树种来治理城市环境污染<sup>[15]</sup>。根据研究结果,对于有利于附着粗颗粒的树种,可以在以降尘为主的城市推广此树种;而对于有利于附着细颗粒物的树种,可在以飘尘为主的城市推广此树种。

叶片滞留大气颗粒物的能力除了与植物的叶面积有关外,也与叶片的微形态结构有关,结合分析每一种植物的微观形态特征,可以有助于滞尘树种筛选与应用<sup>[16-18]</sup>。如果在城市中栽植、引进滞尘能力强的树种,能形成群落或森林植被,通过测定对每种群落结构的生态功能进行估算、比较和评价,再进行合理的结构设计,则对减轻城市中各种降尘更有重要意义。

## 4 结论

本研究首先提出一种植物滞留细颗粒物质量的计算方法,其可以应用于评估不同种类的植物对细颗粒物的吸附滞留能力,解决了目前缺乏有效检测方法的问题。

经测定,单位叶面积的滞尘量而言,落叶乔木银杏为绦柳 20 倍;常绿乔木雪松是油松的 5 倍。计算不同植物整株滞尘量,乔木中单周滞尘量较多的有元宝枫、圆柏、银杏、臭椿、国槐、小叶朴、家榆、毛白杨、雪松、栾树和刺槐。

不同植物个体之间滞留 PM<sub>2.5</sub> 的能力有很大的差异,落叶乔木中,元宝枫单位叶面积滞留 PM<sub>2.5</sub> 的能力最强,单位叶面积滞留 PM<sub>2.5</sub> 的质量是绦柳的 38 倍;常绿乔木中,雪松是油松的 20 倍。整株树每周滞留 PM<sub>2.5</sub> 的能力较强的有元宝枫、柿树、国槐、银杏、臭椿、白玉兰、楸树、小叶朴、圆柏、杜仲、家榆、毛白杨、栾树、刺槐,最弱的为紫叶李、碧桃、北京丁香、紫叶李、山桃和丝绵木。

## 参考文献:

- [1] 田刚,黄玉虎,樊守彬.扬尘污染控制[M].北京:中国环境出版社,2013.
- [2] 陈自新,苏雪痕,刘少宗,等.北京城市园林绿化生态效益的研究(3)[J].中国园林,1998,14(3):53-56.
- [3] BECKRTT K P,FREER-SMITH P H,TAYLOR G. The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites[J]. Arboricultural Journal,2000,24:209-230.
- [4] 孙淑萍,古润泽,张晶.北京城区不同绿化覆盖率和绿地类型与空气中可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>)[J].中国园林,2004(3):77-79.  
SUN S P, GU R Z, ZHANG J. Inhalable particulate matter (PM<sub>10</sub>) related to different green cover percentage and green-belt types in Beijing[J]. Journal of Chinese Landscape Architecture, 2004(3):77-79. (in Chinese)
- [5] FREER SMITH P H,HOLLOWAY S,GOODMAN A. The uptake of particulates by an urban woodland: site description and particulate composition[J]. Environment Pollution, 1997, 95(1) :27-35.
- [6] 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 [J]. Environmental Pollution, 2005, 133 (1) :157-167.
- [7] BECKETT K P, FREER-SMITH P H, TAYLOR G. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution[J]. Environmental Pollution, 1998, 99(3):347-360.
- [8] 周志翔,邵天一,王鹏程,等.武钢厂区绿地景观类型空间结构及滞尘效应[J].生态学报,2002,22(12) :2036-2040.
- [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[J].生态学报,2013,33(8) :2604-2614.
- [10] LIU L, GUAN D S, CHEN Y Q. Morphological structure of leaves and dust-retaining capability of common street trees in Guangzhou Municipality [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (8):2604-2614. (in Chinese)
- [11] 北京市园林绿化局.北京市城市园林绿化普查资料汇编(2005)[M].北京:北京出版社,2006.
- [12] 李新宇,赵松婷,李延明,等.北方常用园林植物滞留颗粒物能力评价[J].中国园林,2015(3):72-75.
- [13] LI X Y,ZHAO S T,LI Y M,et al. The evaluation of particulate matter retention capability of common ornamental plants in the north of China[J]. Journal of Chinese Landscape Architecture, 2015(3) :72-75. (in Chinese)
- [14] 尤旭阳,胡耀升,刘艳红.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.
- [15] 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)
- [16] 古润泽,李延明,谢军飞.北京城市园林绿化生态效益的定量经济评价[J].生态科学,2007,26(6):519-524.
- [17] GU R Z, LI Y M, XIE J F. Quantitative evaluation on ecological benefit of garden afforestation in Beijing[J]. Ecological Science, 2007, 26(6):519-524. (in Chinese)
- [18] WESTERN GOVERNORS' ASSOCIATION (WGA). Wrap fugitive dust handbook[R]. Denver, Colorado: Western Governors' Association, 2004.
- [19] 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.
- [20] WANG B, ZHANG W K, NIU X, et al. Particulate matter adsorption capacity of 10 evergreen species in Beijing[J]. Environmental Science, 2015, 36(2):408-414. (in Chinese)
- [21] 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(3):487-492.
- [22] WANG L, HA S, LIU L Y, et al. Physico-chemical characteristics of ambient particles settling upon leaf surface of six conifers in Beijing[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007 (3):487-492. (in Chinese)
- [23] 赵松婷,李新宇,李延明.园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律[J].生态环境学报,2014,23(2):271-276.
- [24] ZHAO S T, LI X Y, LI Y M. The characteristics of deposition of airborne particulate matters with different size on certain plants[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(2): 271-276. (in Chinese)
- [25] 余海龙,黄菊英.城市绿地滞尘机理及其效应研究进展[J].西北林学院学报,2012,27(6):238-241.
- [26] YU H L, HUANG J Y. Research advances in mechanism and effect of dust retention of urban green areas[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27 (6): 238-241. (in Chinese)