

# 北京市26种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力

范舒欣<sup>1</sup> 晏海<sup>1</sup> 齐石茗月<sup>1</sup> 白伟岚<sup>2</sup> 皮定均<sup>3</sup> 李雄<sup>1</sup> 董丽<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>城乡生态环境北京实验室 北京林业大学园林学院, 北京 100083; <sup>2</sup>中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; <sup>3</sup>北京市朝阳区城市管理监督指挥中心, 北京 100020

**摘要** 为筛选适用于北京市的具有优良滞尘能力的绿化物种, 提高城市植被滞尘效应, 选取北京市园林绿化应用最广泛的26种落叶阔叶树种, 应用质量差值法, 于2014年夏季对不同树种单位叶面积滞尘量进行测定, 计算单叶滞尘量与单株滞尘量, 并对树种滞尘能力进行了相应的聚类分析。结果表明: 不同树种间滞尘能力存在较大差异, 选择不同的滞尘量计量单位, 树种滞尘量排序会相应地发生变化。对26种北京市常用落叶阔叶树种从叶片、植株与综合滞尘能力三个方面的聚类分析均可得到相应的分类, 各类别代表不同级别的滞尘能力水平。研究分析认为, 植物滞尘能力与其叶表特征、滞尘方式、株型结构、整株叶量及所处环境含尘量等密切相关, 评价树种滞尘能力时应进行综合考虑。

**关键词** 落叶阔叶树种, 叶片滞尘能力, 植株滞尘能力, 综合滞尘能力, 滞尘量计量单位

**引用格式:** 范舒欣, 晏海, 齐石茗月, 白伟岚, 皮定均, 李雄, 董丽 (2015). 北京市26种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力. 植物生态学报, 39, 736–745. doi: 10.17521/cjpe.2015.0070

## Dust capturing capacities of twenty-six deciduous broad-leaved trees in Beijing

FAN Shu-Xin<sup>1</sup>, YAN Hai<sup>1</sup>, QI Shi-Ming-Yue<sup>1</sup>, BAI Wei-Lan<sup>2</sup>, PI Ding-Jun<sup>3</sup>, LI Xiong<sup>1</sup>, and DONG Li<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, College of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; <sup>2</sup>China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100120, China; and <sup>3</sup>Urban Administration and Control Center of Chaoyang District, Beijing 100020, China

### Abstract

**Aims** Aiming at providing basic informations on dust capturing capacity of different tree species and criterions for selecting trees in landscape design, this study selected 26 deciduous broad-leaved tree species widely used in urban landscaping in Beijing to measure the dust capturing both in field and indoor experiments.

**Methods** The dust deposition per unit leaf area of each species was quantified by determining the mass difference before and after the treatment of blades. The dust deposition per leaf and plant were further calculated for each species. Based on the dust capturing capacity measured in three different units, cluster analysis on different tree species was carried out from distinct dimensions.

**Important findings** Results showed that the dust capturing capacity differed significantly among tree species, and the ranking changed with measurement units selected in the experiments. For different specific evaluation focuses, choosing a diverse unit combination as clustering factor, the 26 deciduous broad-leaved tree species were broadly divided into different categories representing different dust capturing capacity level. Dust capturing capacity was closely related to the surface characteristics of leaves, the dust capturing method, the plant structure, the leaf amount of whole plant, the dust content of the environment, etc. Therefore, multiple factors should be taken into account in the assessment of dust capturing capacity of different tree species.

**Key words** deciduous broad-leaved trees, dust capturing capacity of leave, dust capturing capacity of plant, comprehensive dust capturing capacity, measurement unit of the dust capturing

**Citation:** Fan SX, Yan H, Qi SMY, Bai WL, Pi DJ, Li X, Dong L (2015). Dust capturing capacities of twenty-six deciduous broad-leaved trees in Beijing. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 736–745. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0070

近年来, 随着城市化的快速发展, 城市生态环境遭到诸多破坏, 城市近地面的物质与能量平衡发

生了极大的变化(莫莉等, 2014), 粉尘、烟雾与有害气体增多, 大气颗粒物已成为城市环境空气污染的

首要污染物,对城市居民的健康造成威胁(钱孝琳和阚海东, 2005; Nowak *et al.*, 2014)。空气中粉尘颗粒物含量过高,会造成雾霾天气,降低大气能见度,甚至引发大气光化学烟雾,加剧局地“热岛效应”,从而带来一系列环境问题(贺克斌等, 2009)。目前,完全依赖污染源治理解决环境问题尚不现实,借助自然界的清除机制已成为缓解城市大气污染压力的有效途径(王赞红和李纪标, 2006)。

国内外诸多研究已经证实,绿地在城市生态系统中具有显著的环境效能与生态效应。其中,净化空气减滞粉尘是其极为重要的单项生态服务功能之一(Paoletti *et al.*, 2011; 苏泳娴等, 2011)。Givoni (1991)认为城区绿地通过植被枝叶的直接吸滞作用与改变绿地和空地间的空气流通作用实现降尘。因此,合理利用绿化植物的滞尘作用可以有效地降低城市大气颗粒物污染(Beckett *et al.*, 1998; Tallis *et al.*, 2011)。然而,不同绿化树种净化空气颗粒物污染的能力一般不同,这与树木所处的生长区域、季节、环境因子及树木自身特征等均存在一定的关联(Beckett *et al.*, 2000a; 王蕾等, 2006; 贺勇等, 2010; Schaubroeck *et al.*, 2014),这导致不同地区针对树种净化空气颗粒物能力的研究结果往往差异很大,且应用并不广泛。以往研究多针对不同树种单位叶面积滞尘能力进行比较,虽在某种程度上可反映树种滞尘能力,但离全面反映树种滞尘能力的差异尚有一定距离。因此,找出不同计量单位下植物滞尘能力间的差异与联系,探索综合全面地评价树种滞尘能力的方法,是本研究集中关注的切入点。

在现今的城市绿地规划设计中,选择树种已不能仅仅考虑其观赏性,尤其应注重其生态效应(Jim & Chen, 2008)。本文选择北京市26种常用落叶阔叶树种,对其进行滞尘能力的测定与分析排序,并综合多个滞尘量计量单位,对其进行不同等级的分类,试图筛选北京地区具有较强滞尘能力的园林绿化树种,为日后依据滞尘能力选择和优化城市绿化树种提供理论参考,对缓解城市空气颗粒物污染提升空气质量起到积极的促进作用。

## 1 研究区和研究方法

### 1.1 研究区概况

北京市地处中纬度地带, 39.91° N, 116.42° E, 属于典型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,春秋较短,气温变化迅速,四季分明。年平均气温12.3℃,最冷月(1月)平均气温-3.7℃,最热月(7月)平均气温26.2℃。全年无霜期180至200天。降水存在区域差异,且分配不均,主要集中在夏季,占全年降水的74%,年降水量571.9 mm。北京市冬季多刮北风、西北风,夏季多为偏南风,风向存在明显的季节性变化特征,年平均风速可达2-3 m·s<sup>-1</sup>。

### 1.2 供试树种选择

基于对北京市城市绿地现有绿化树种的基础调查,遵循所选树种在北京市应用广泛、具有典型性、适生性且乔灌兼顾的原则,选取北京市26种主要落叶阔叶绿化树种,对其进行滞尘能力的监测。其中乔木15种,灌木11种,详见表1。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 样品采集

采样地点设置在北京市海淀区,以东王庄小区、静淑苑小区和768创意园区为3个核心样区,根据采样需要可向其周边以200 m为半径向外扩展,采样区域可充分代表北京市建成区内的城市环境,所选样本植株随机分布在采样区域绿地内,为避免局地环境含尘量较高干扰实验结果,所选样株避开城市机动车道与建筑工地。采样区域分布如图1所示。

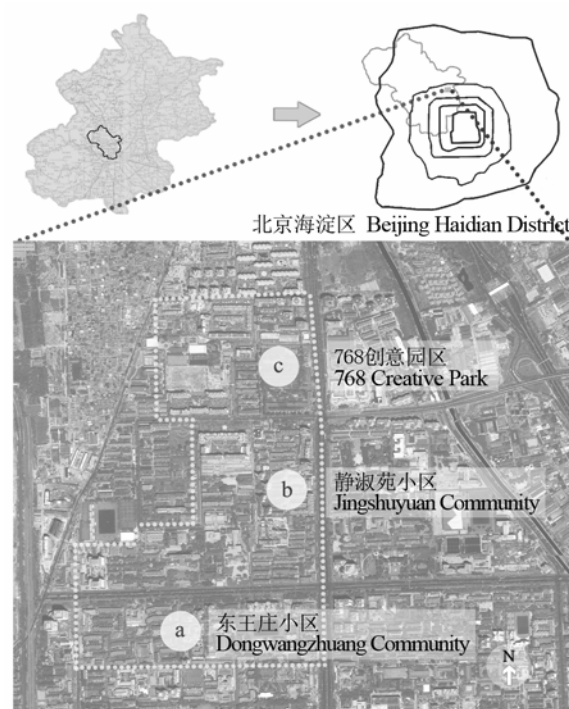


图1 采样区域分布示意图。

Fig. 1 The distribution of sampling area in the study.

表1 试验树种  
Table 1 Tree species in the experiment

植物生活型 Life form of plant	序号 No.	树种 Species	科 Family
落叶阔叶乔木 Deciduous broad-leaved trees	1	银杏 <i>Ginkgo biloba</i>	银杏科 Ginkgoaceae
	2	三球悬铃木 <i>Platanus orientalis</i>	悬铃木科 Platanaceae
	3	杜仲 <i>Eucommia ulmoides</i>	杜仲科 Eucommiaceae
	4	毛白杨 <i>Populus tomentosa</i>	杨柳科 Salicaceae
	5	加杨 <i>Populus × canadensis</i>	杨柳科 Salicaceae
	6	缘柳 <i>Salix matsudana</i> ‘Pendula’	杨柳科 Salicaceae
	7	红叶碧桃 <i>Amygdalus persica</i> ‘Atropurpurea’	蔷薇科 Rosaceae
	8	紫叶李 <i>Prunus cerasifera</i>	蔷薇科 Rosaceae
	9	刺槐 <i>Robinia pseudoacacia</i>	蝶形花科 Papilionaceae
	10	槐 <i>Sophora japonica</i>	蝶形花科 Papilionaceae
	11	石榴 <i>Punica granatum</i>	石榴科 Punicaceae
	12	栾树 <i>Koelreuteria paniculata</i>	无患子科 Sapindaceae
	13	臭椿 <i>Ailanthus altissima</i>	苦木科 Simaroubaceae
	14	美国红栎 <i>Fraxinus pennsylvanica</i>	木犀科 Oleaceae
	15	白蜡树 <i>Fraxinus chinensis</i>	木犀科 Oleaceae
落叶阔叶灌木 Deciduous broad-leaved shrubs	16	紫叶小檗 <i>Berberis thunbergii</i> ‘Atropurpurea’	小檗科 Berberidaceae
	17	木槿 <i>Hibiscus syriacus</i>	锦葵科 Malvaceae
	18	榆叶梅 <i>Amygdalus triloba</i>	蔷薇科 Rosaceae
	19	棣棠花 <i>Kerria japonica</i>	蔷薇科 Rosaceae
	20	西府海棠 <i>Malus spectabilis</i> ‘Riversii’	蔷薇科 Rosaceae
	21	华北珍珠梅 <i>Sorbaria kirilowii</i>	蔷薇科 Rosaceae
	22	紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	千屈菜科 Lythraceae
	23	紫丁香 <i>Syringa oblata</i>	木犀科 Oleaceae
	24	连翘 <i>Forsythia suspense</i>	木犀科 Oleaceae
	25	迎春花 <i>Jasminum nudiflorum</i>	木犀科 Oleaceae
	26	金银忍冬 <i>Lonicera maackii</i>	忍冬科 Caprifoliaceae

15 mm以上的降雨可将植物叶片上的灰尘清洗干净。根据北京市降雨主要集中在夏季,冬、春两季降水较少的特点,本研究于2013年6–8月夏季雨后第7天进行3次采样。每次采样各供试树种设置5个重复,重复样本植株胸径、树高、树龄、生长状况等基本保持一致。在树冠外围东、西、南、北4个方向及中部枝条的上、中、下部随机多点采集可充分接受粉尘的植物叶片30–50枚(小叶60–80枚),将叶样密封后避免震动,带回实验室处理。

1.3.2 叶片处理

利用1/10000天平对叶样进行第一次带尘称量,测得含尘叶片质量 $W_1$ ,利用蒸馏水湿润过的酒精棉球对叶片表面进行彻底擦拭,清除叶片所滞粉尘后,对干净叶片进行第二次称量,测得不含尘叶片质量

$W_2$ ,每次测定设置3组重复。

1.3.3 树种叶面积测定

经过相应的叶片处理后,采用CI-203手持式激光叶面积仪(CI-203, CID, USA)对各供试树种叶样进行叶面积测定,每片单叶重复测定6次,平均值代表平均叶面积 $S_0$ 。

1.3.4 树种全株叶量计算

采用标准枝分层法,对供试植株以目测法进行枝条等级分层,分至可以方便计数叶片的标准小枝为止,对各层枝条数量进行随机抽样统计,在末级枝上从东、南、西、北4个方向分别选取30 cm长的标准小枝,统计其叶片数量,每次统计重复3次,取其平均值用以计算全株叶片数量。

1.3.5 树种滞尘能力计算

目前,树木叶片滞尘量计算尚无统一的标准方

法, 常采用质量差值法进行叶片滞尘量的分析测定。经过相应的公式换算, 可得到树种单位叶面积滞尘量、单叶滞尘量与单株滞尘量。其中, 单位叶面积滞尘量为单位叶面积在单位时间内滞留的粉尘量, 单位为 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ; 单叶滞尘量为一个独立叶片在单位时间内滞留的粉尘量, 单位为 $\text{g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ ; 而单株滞尘量指一个独立植株在单位时间内滞留的粉尘总量, 单位为 $\text{kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 。具体计算方法如下:

阔叶树种单位叶面积滞尘量( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) =  $(W_1 - W_2)/N_0S$

阔叶树种单叶滞尘量( $\text{g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ ) =  $(W_1 - W_2)S_0/N_0S$

阔叶树种单株滞尘量( $\text{kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) =  $N(W_1 - W_2)/N_0$

式中,  $W_1$ 为叶片擦拭前质量,  $W_2$ 为叶片擦拭后质量,  $S$ 为供试叶样平均叶面积,  $S_0$ 为供试树种平均叶面积,  $N_0$ 为供试叶样数,  $N$ 为阔叶树全株叶片总数。

#### 1.4 统计分析

运用SPSS 18.0软件, 对树种间各滞尘量指标的差异进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 采用Tukey固定极差检验法进行多重比较, 两变量间进行Pearson检验( $p = 0.05$ )。利用K平均值聚类法对不同滞尘量计量单位进行系统聚类分析。采用

SigmaPlot 12.0和Excel 2010软件绘制图表。

## 2 结果和分析

### 2.1 单位叶面积滞尘量

供试26种落叶阔叶树种平均单位叶面积滞尘量的比较见图2, 其变化范围在 $0.145\ 4\text{--}1.459\ 9\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间, 平均为 $0.471\ 2\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。方差分析表明不同树种间单位叶面积滞尘量差异极显著( $p < 0.01$ )。其中, 紫叶李(*Prunus cerasifera*)单位叶面积滞尘量最大, 为 $1.459\ 9\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 紫薇(*Lagerstroemia indica*)次之, 为 $1.110\ 3\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ , 金银忍冬(*Lonicera maackii*)居第三, 为 $0.954\ 5\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。平均滞尘量在 $0.20\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 以下的树种有绦柳(*Salix matsudana* 'Pendula')、美国红栎(*Fraxinus pennsylvanica*)、杜仲(*Eucommia ulmoides*)、华北珍珠梅(*Sorbaria kirilowii*)、西府海棠(*Malus spectabilis* 'Riversii')和石榴(*Punica granatum*), 分别为 $0.194\ 5$ 、 $0.182\ 6$ 、 $0.180\ 3$ 、 $0.174\ 3$ 、 $0.145\ 4$ 和 $0.103\ 1\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。平均单位叶面积滞尘量在 $0.20\text{--}0.90\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间的树种有榆叶梅(*Amygdalus triloba*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、紫丁香

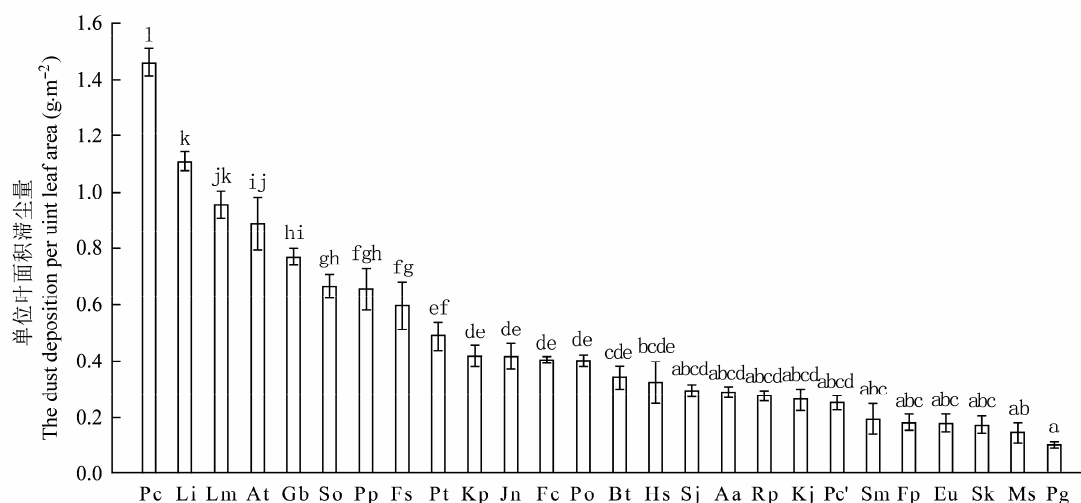


图2 26种落叶阔叶树种单位叶面积滞尘量比较(平均值 $\pm$ 标准偏差,  $n = 3$ )。Aa, 臭椿; At, 榆叶梅; Bt, 紫叶小檗; Eu, 杜仲; Fc, 白蜡树; Fp, 美国红栎; Fs, 连翘; Gb, 银杏; Hs, 木槿; Jn, 迎春花; Kj, 棣棠花; Kp, 栾树; Li, 紫薇; Lm, 金银忍冬; Ms, 西府海棠; Pc, 紫叶李; Pc', 加杨; Pg, 石榴; Po, 三球悬铃木; Pp, 红叶碧桃; Pt, 毛白杨; Rp, 刺槐; Sk, 华北珍珠梅; Sj, 槐; Sm, 绦柳; So, 紫丁香。不同小写字母表示差异极显著( $p < 0.01$ )。

Fig. 2 Comparison of the dust deposition per unit leaf area of 26 deciduous broad-leaved species (mean  $\pm$  SD,  $n = 3$ ). Aa, *Ailanthus altissima*; At, *Amygdalus triloba*; Bt, *Berberis thunbergii* 'Atropurpurea'; Eu, *Eucommia ulmoides*; Fc, *Fraxinus chinensis*; Fp, *Fraxinus pennsylvanica*; Fs, *Forsythia suspensa*; Gb, *Ginkgo biloba*; Hs, *Hibiscus syriacus*; Jn, *Jasminum nudiflorum*; Kj, *Kerria japonica*; Kp, *Koelreuteria paniculata*; Li, *Lagerstroemia indica*; Lm, *Lonicera maackii*; Ms, *Malus spectabilis* 'Riversii'; Pc, *Prunus cerasifera*; Pc', *Populus  $\times$  canadensis*; Pg, *Punica granatum*; Po, *Platanus orientalis*; Pp, *Amygdalus persica* 'Atropurpurea'; Pt, *Populus tomentosa*; Rp, *Robinia pseudoacacia*; Sk, *Sorbaria kirilowii*; Sj, *Sophora japonica*; Sm, *Salix matsudana* 'Pendula'; So, *Syringa oblata*. Different lowercase letters indicate significant differences ( $p < 0.01$ ).

(*Syringa oblata*)、红叶碧桃(*Amygdalus persica* ‘Atropurpurea’)和连翘(*Forsythia suspensa*)等17种,单位叶面积滞尘量极值,紫叶李与石榴之间相差13.2倍。

此外,落叶阔叶乔木与灌木之间,单位叶面积滞尘量整体排序分布较为均匀,并未因植物类型不同出现明显的排序分化现象,但在以 $0.50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 为界的总体排序的前1/3内,紫薇、金银忍冬、榆叶梅等灌木占62.5%,乔木树种仅有紫叶李、银杏与红叶碧桃三种,占37.5%。

## 2.2 单叶滞尘量

26种常用落叶阔叶树种平均单叶滞尘量排序情况见图3,其变化范围在 $0.000\ 04\text{--}0.007\ 79 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ 之间,平均为 $0.001\ 26 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ 。不同树种间单叶滞尘量存在较大差异。其中三球悬铃木(*Platanus orientalis*)最大( $0.007\ 79 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ ),榆叶梅次之( $0.002\ 84 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ ),毛白杨(*Populus tomentosa*)第三( $0.002\ 63 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ )。平均单叶滞尘量在 $0.001\ 5 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ 以上的树种共8种,分别是三球悬铃木、榆叶梅、毛白杨、红叶碧桃、紫叶李、紫丁香、紫薇和银杏;平均单叶滞尘量介于 $0.000\ 3\text{--}0.001\ 5 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ 之间的树种有金银忍冬、杜仲和加杨(*Populus \times canadensis*)等10种,单叶滞尘能力表现居中;而低于 $0.000\ 3 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ ,平均单叶滞尘量表现最差的树种则为美国红栌、华北珍珠梅、迎春花(*Jasminum nudiflorum*)、槐(*Sophora japonica*)等8种。其中,紫叶小檗(*Berberis thunbergii* ‘Atropurpurea’)最小,仅为 $0.000\ 04 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ ,与最大

者三球悬铃木相差达194倍。

整体排序情况表明落叶阔叶乔木与灌木之间单叶滞尘量排序分布仍较为均匀,因植物类型不同可能带来的排序分化现象不明显,但在以银杏( $0.001\ 45 \text{ g}\cdot\text{leaf}^{-1}$ )为界的排序前1/3内,灌木树种仅有榆叶梅、紫薇和紫丁香,所占比例明显下降,为37.5%,而三球悬铃木、毛白杨、红叶碧桃等乔木所占比例为62.5%,成为优势生活型。

## 2.3 单株滞尘量

26种落叶阔叶树种经计算得到的单株滞尘量大小排序情况如图4,单株滞尘量变化范围在 $0.000\ 4\text{--}0.352\ 2 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 之间,平均为 $0.046\ 9 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 。不同树种间存在较大差异。三球悬铃木以 $0.352\ 2 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 为最大单株滞尘量,毛白杨次之,为 $0.152\ 6 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ ,银杏居第三,为 $0.117\ 8 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 。除此之外,高于 $0.05 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 的树种还有紫叶李、加杨、槐、白蜡树(*Fraxinus chinensis*)、紫丁香等,介于 $0.005\text{--}0.050 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 之间的树种有刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、榆叶梅、杜仲和美国红栌等11种, $0.005 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 以下的树种有紫叶小檗、棣棠花(*Kerria japonica*)、连翘(*Forsythia suspensa*)等7种。其中,石榴( $0.000\ 7 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ )与华北珍珠梅( $0.000\ 4 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ )最弱,未达到 $0.001 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 。由此看出,不同树种间单株滞尘量存在很大差异。

整体排序情况表明,落叶阔叶乔木与灌木之间单株滞尘量排序分布较为不均。排序较为靠前的树种多为乔木,而灌木以后段居多。不同植物类型的

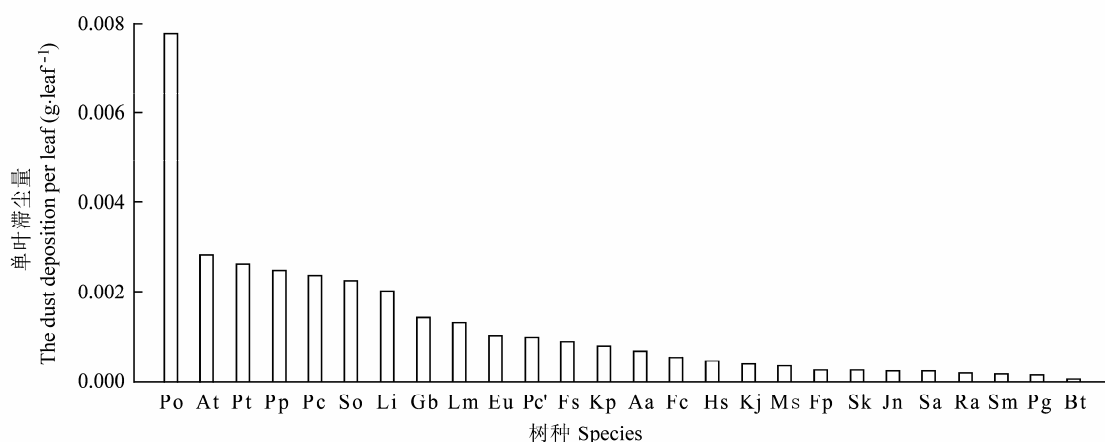


图3 26种落叶阔叶树种单叶滞尘量比较。树种缩写详见图2。

Fig. 3 Comparison of the dust deposition per leaf of 26 deciduous broad-leaved species. Refer caption in Fig. 2 for abbreviation of species names.

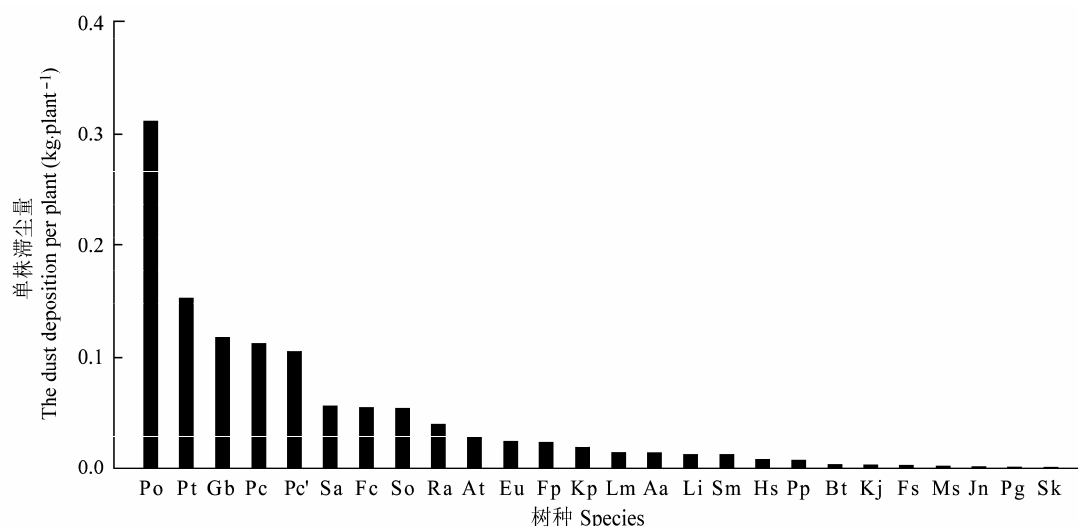


图4 26种落叶阔叶树种单株滞尘量比较。树种缩写详见图2。

Fig. 4 Comparison of the dust deposition per plant of 26 deciduous broad-leaved species. Refer caption in Fig. 2 for abbreviation of species names.

排序分化情况较为明显,在以 $0.05 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ 为界的前1/3排序内,三球悬铃木、毛白杨、银杏等乔木占很大比例,为87.5%,灌木树种仅有紫丁香,占12.5%。

## 2.4 树种间滞尘能力综合比较

以上分析表明,选择不同的滞尘量计量单位,树种滞尘能力排序会有所差异。利用K平均值聚类法从不同角度侧重对北京市26种主要落叶阔叶树种进行滞尘能力聚类分析,根据多次预分析结果,最终设定聚类类别为5,分类结果如下:

(1)基于单位叶面积滞尘量和单叶滞尘量双因子进行植物叶片滞尘能力聚类分析的结果显示:26种落叶阔叶树种大致可分为5类。第一类:紫叶李,叶片滞尘能力强;第二类:榆叶梅、紫薇和金银忍冬,滞尘能力较强;第三类:银杏、红叶碧桃、紫丁香和连翘,叶片滞尘能力中等;第四类:迎春花、木槿(*Hibiscus syriacus*)、紫叶小檗、白蜡树、臭椿(*Ailanthus altissima*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、槐、毛白杨、三球悬铃木,叶片滞尘能力较弱;第五类:杜仲、加杨、绦柳、刺槐、石榴、美国红栎、棣棠花、西府海棠和华北珍珠梅,叶片滞尘能力弱。

(2)基于单株滞尘量进行植物植株滞尘能力聚类分析的结果显示,26种落叶阔叶树种可大致分为5类。第一类:三球悬铃木,植株滞尘能力强;第二类:毛白杨,植株滞尘能力较强;第三类:银杏、加杨和紫叶李,植株滞尘能力中等;第四类:刺槐、

槐、白蜡树、榆叶梅和紫丁香,植株滞尘能力较弱;第五类:杜仲、绦柳、红叶碧桃、石榴、栾树、臭椿、美国红栎、金银忍冬、迎春花、紫叶小檗、木槿、西府海棠、棣棠花、紫薇、华北珍珠梅和连翘,植株滞尘能力弱。

(3)综合考虑单位叶面积滞尘量、单叶滞尘量以及单株滞尘量3个因子的聚类分析,将北京市居住区绿地常用落叶阔叶树种大致分为5类。第一类:紫叶李,综合滞尘能力强;第二类:银杏、榆叶梅、紫薇、金银忍冬,综合滞尘能力较强;第三类:毛白杨、红叶碧桃、栾树、白蜡树、紫丁香、连翘和迎春花,综合滞尘能力中等;第四类:三球悬铃木,综合滞尘能力较弱;第五类:杜仲、加杨、绦柳、刺槐、槐、石榴、臭椿、美国红栎、紫叶小檗、木槿、棣棠花、西府海棠和华北珍珠梅,综合滞尘能力弱。

## 3 讨论

以2014年上半年为例,北京地区PM<sub>2.5</sub>平均浓度为 $92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;PM<sub>10</sub>平均浓度为 $125 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,粉尘颗粒物污染严重(中国环境监测总站,2014)。植物滞尘作为极有效的生物滞尘途径,在北京地区主要由落叶阔叶树种承担,落叶阔叶树种一般无特殊分泌物,主要通过叶片的细微结构截留降尘。不同树种的单位叶面积滞尘能力主要取决于树种叶片结构特征、叶表面粗糙程度、被毛情况及滞尘方式等(柴一

表2 不同落叶阔叶树种以单位叶面积滞尘量和单叶滞尘量为标准的聚类分析结果  
Table 2 The cluster analysis of the dust deposition per unit leaf area and per leaf for different deciduous broad-leaved species

排序 Sequence	聚类中心 Cluster center		距离 Distance	树种 Species
	单位叶面积滞尘量 Dust deposition per unit leaf area (g·m <sup>-2</sup> )	单叶滞尘量 Dust deposition per leaf (g·leaf <sup>-1</sup> )		
1	1.459 9	0.002 37	无 None	Pc
2	1.110 3	0.002 03	0.475	At, Li, Lm
3	0.665 9	0.002 26	0.788	Fs, So, Pp, Gb
4	0.402 8	0.007 79	1.084	Po, Pt, Sj, Kp, Aa, Fc, Bt, Hs, Jn
5	0.103 1	0.000 14	1.203	Pe, Eu, Sm, Rp, Pg, Fp, Kj, Mm, Sk

树种缩写详见图2。  
Refer caption in Fig. 2 for abbreviation of species names.

表3 不同落叶阔叶树种以单株滞尘量为标准的聚类分析结果  
Table 3 The cluster analysis of the dust deposition per plant for different deciduous broad-leaved species

排序 Sequence	聚类中心 Cluster center	距离 Distance	树种 Species
	单株滞尘量 Dust deposition per plant (kg·plant <sup>-1</sup> )		
1	0.352 2	无 None	Po
2	0.152 6	0.200	Pt
3	0.117 8	0.241	Gb, Pe, Pc
4	0.055 5	0.306	Rp, Sj, Fc, At, So
5	0.000 4	0.343	Li, Lm, Pp, Fs, Kp, Jn, Bt, Hs, Aa, Kj, Mm, Sm, Fp, Eu, Sk, Pg

树种缩写详见图2。  
Refer caption in Fig. 2 for abbreviation of species names.

表4 不同落叶阔叶树种以单位叶面积滞尘量、单叶滞尘量以及单株滞尘量综合为标准的聚类分析结果  
Table 4 The cluster analysis results among different deciduous broad-leaved species in all the dust deposition per unit leaf area, the dust deposition per leaf and the dust deposition per plant

排序 Sequence	聚类中心 Cluster center			距离 Distance	树种 Species
	单位叶面积滞尘量	单叶滞尘量	单株滞尘量		
	Dust deposition per unit leaf area (g·m <sup>-2</sup> )	Dust deposition per leaf (g·leaf <sup>-1</sup> )	Dust deposition per plant (kg·plant <sup>-1</sup> )		
1	1.459 9	0.002 37	0.112 0	无 None	Pc
2	0.931 3	0.001 91	0.043 2	0.533	At, Li, Lm, Gb
3	0.521 0	0.001 41	0.041 5	0.942	Jn, Fs, So, Fc, Kp, Pp, Pt
4	0.402 8	0.007 79	0.352 2	1.084	Po
5	0.232 1	0.000 40	0.022 4	1.231	Eu, Pe, Sm, Rp, Sj, Pg, Aa, Fp, Bt, Hs, Kj, Mm, Sk

树种缩写详见图2。  
Refer caption in Fig. 2 for abbreviation of species names.

新等, 2002; Liu *et al.*, 2012); 而单叶滞尘能力是基于单位叶面积滞尘量与单叶面积共同计算得到的, 侧重于反映叶片形状特征与大小对植物滞尘的影响, 这就导致单位叶面积滞尘能力一般的树种有可能因为宽大、开展的叶片形态而有较强的单叶滞尘能力; 反之, 单位叶面积滞尘能力强的树种, 也有可能因叶面积狭小而表现出较弱的单叶滞尘能力, 故树种单位叶面积滞尘量与单叶滞尘量的排序情况一般不同。因此, 在对植物叶片滞尘能力进行评价时, 不应单一依据某一个计量单位的结果。本研究

发现不同树种间叶片滞尘能力(单位叶面积滞尘能力与单叶滞尘能力)存在显著差异。例如, 榆叶梅和紫丁香有超出较弱者几倍甚至几十倍的单位叶面积滞尘能力与单叶滞尘能力, 这可能是由于榆叶梅叶表具纤毛和浅沟, 浅沟内颗粒物能长时间保留, 但纤毛上的颗粒物易被风雨冲刷, 而紫丁香叶表气孔周围具脊状突起, 同时二者的滞尘方式均为附着, 故它们的叶片滞尘能力较强(柴一新等, 2002)。同理, 紫薇、金银忍冬叶表存在沟状组织, 粗糙有皱褶; 紫叶李、银杏、红叶碧桃叶表则有粗糙被毛, 沟状、

密集脊状突起等结构特征,滞尘方式均为附着,加之叶片面积适中,故其单位叶面积滞尘能力与单叶滞尘能力较强。而毛白杨单位叶面积滞尘能力为 $0.489\ 3\ \text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,在排序中仅位于中段偏上,但其单叶滞尘能力却十分突出,有研究证明这是因为其叶表虽具有沟槽,但较浅(王蕾等,2006),影响其单位叶面积滞尘能力,然而宽大平展的叶片弥补了其劣势,故整体叶片滞尘能力仍较强,三球悬铃木与其情况相似。此外,臭椿叶片上表面有起伏较小的波状突起;槐叶片上表面结构条状突起有一定宽度,起伏较小,且相互交错;加杨叶片上表面气孔与形状不规则的小室交错排列,小室间凹槽较浅。上述三者叶面微形态特征均不利于滞尘,单位叶面积滞尘量较低(Beckett *et al.*, 2000b; Pal *et al.*, 2002),但因它们叶面积特征不同,单叶滞尘能力差别明显,臭椿、加杨单叶滞尘量中等,而槐较差。同理,刺槐、绦柳、石榴等叶表面光滑无皱褶,停着式滞尘,且叶片多狭小柔软,叶片滞尘能力较弱。

研究发现树种间植株滞尘能力同样存在差异。树冠茂密,枝叶适度紧密且叶量大的树种,一般其植株滞尘能力明显比叶量较小的树种强,这种通过叶量积累实现的整体滞尘效应,甚至可以使一些叶片滞尘能力微弱的树种借助充足的叶量表现出较强的植株滞尘能力。本研究中紫叶李、紫丁香、银杏、毛白杨等单株滞尘量较高是因为突出的叶片滞尘能力结合枝叶繁多的冠型结构;而槐、三球悬铃木和加杨等树种,在叶片滞尘能力并不占优势的情况下,因其全株叶量较大,表现出较强的植株滞尘能力。与之相反,叶片滞尘能力较强的红叶碧桃、紫薇、榆叶梅等,由于叶量较小、枝冠结构较通透,导致植株滞尘能力下降;珍珠梅、西府海棠、绦柳、棣棠花、石榴等则因为较弱的叶片滞尘能力,加之总叶量相差很多,导致植株滞尘能力较弱。这些均与高金晖等(2007)和Nowak等(2006)提出的植物滞尘能力与植物株型叶量等关联较大的观点相吻合。

本研究还发现,在单位叶面积滞尘量与单叶滞尘量方面,不同树种类型间并无明显的排序分化现象,乔、灌木树种的排序分布较均匀。但在总体排序的前1/3内灌木树种所占比例较大,部分灌木树种的叶片滞尘能力明显优于众多乔木树种,排名相对靠前。这与李海梅和刘霞(2008)、方颖等(2007)和Beckett等(2000b)的研究结果一致,主要是因为植

物叶片滞尘能力不仅与植物叶表结构、叶片形状大小及叶片倾角有关,还与空气含尘量有关。当含尘气流通过复层绿地,乔木层通常距地面较高,粉尘受到枝叶的阻挡、摩擦,加之空气黏性的影响,促使所携大颗粒粉尘沉降,灌木层相对低矮,周围粉尘含量更高一些,同时受到机动车排放和地面扬尘的影响,尤其是生长高度为1–2 m的灌木,其叶片所在位置在距地10 m范围内空气颗粒物浓度最大(高金晖等,2007)。因此灌木层周围的粉尘较多,导致其叶片拦截能力较强。但在单株滞尘量方面,乔、灌木树种的排序则存在明显分化,乔木树种普遍排序靠前,在总体排序的前1/3内占较大比重,灌木树种则多集中在后段。这主要是因为:乔木树种枝冠结构茂密,叶量繁多,多表现出很强的植株滞尘能力,而灌木树种普遍整体叶量较少,故植株滞尘能力明显逊于乔木树种。同时高大乔木层的树冠可降低环境风速,利于粉尘沉降。因此,就植株滞尘能力而言,乔木层是生长季环境滞尘的主力。这与方颖等(2007)、李寒娥等(2006)的研究结果基本一致。因此我们认为,根据特定环境空间,采取适当的乔、灌木树种搭配,有利于更好地发挥绿地综合滞尘效应。

纪惠芳等(2008)针对不同滞尘量指标的研究也发现,选择不同的滞尘量计量单位,则树种滞尘能力的排序与分类不同,通过综合考虑不同滞尘量计量单位的聚类分析可以得到在不同侧重角度下的树种滞尘能力的分类结果,本研究也得到了相似的结论。

## 4 结论

本研究认为北京市主要落叶阔叶树种对空气中的粉尘颗粒物均具有显著的阻挡、截留与吸滞作用,且不同树种间在叶片滞尘能力(单位叶面积滞尘量与单叶滞尘量)与植株滞尘能力(单株滞尘量)方面均存在明显差异。使用不同的计量单位树种滞尘能力的排序与分类均存在变化。从不同的衡量角度,可从排序中分别选出不同的优势树种。分析认为这与绿化树种叶表特征、滞尘方式、株型结构、整株叶量及植株所处环境含尘量等因素密切相关。

目前,绿化植物滞尘能力及其滞尘机理已成为城市绿地规划设计时树种选择的重要依据(Cavanagh *et al.*, 2009; 王会霞等, 2010; 阿丽亚·拜都热拉等, 2014),因此,根据实际情况选择或组合



不同的滞尘能力评价指标, 可以有针对性、全面系统地评价树种滞尘能力, 指导树种选择。合理配置不同类型的乔、灌、草植物, 既可形成不同群落配置模式, 增加景观效果, 又可有效地提升绿地滞尘效应, 缓解空气污染, 改善城市环境质量。

**基金项目** 国家科技支撑计划课题(2013BAJ-02B04)、“十二五”农村领域国家科技计划课题(2012BAJ24B05-2)和“北京朝阳区社区绿化滞尘降噪及降温增湿生态效益评价方法研究及标准设计”项目。

**致谢** 感谢北京林业大学园林学院郭晨晓、张皖清、李晓鹏等在试验采样工作中给予的帮助。

## 参考文献

- Badrulla A, Halik U, Aishan T, Ubul A, Zhayumu K, Jin H (2014). Patterns of dust retention by five common tree species for urban greening in Aksu City, Northwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 970–977. (in Chinese with English abstract) [阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 艾克热木·吾布力, 喀哈尔·扎依木, 金华 (2014). 阿克苏市5种常见绿化树种滞尘规律. 植物生态学报, 38, 970–977.]
- Beckett KP, Freer-Smith PH, Taylor G (1998). Urban woodlands: Their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*, 99, 347–360.
- Beckett KP, Freer-Smith PH, Taylor G (2000a). The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. *Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry*, 24, 209–230.
- Beckett KP, Freer-Smith PH, Taylor G (2000b). Particulate pollution capture by urban trees: Effect of species and windspeed. *Global Change Biology*, 6, 995–1003.
- Cavanagh J-AE, Zawar-Reza P, Wilson JG (2009). Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch. *Urban Forestry & Urban Greening*, 8, 21–30.
- Chai YX, Zhu N, Han HJ (2002). Dust removal effect of urban tree species in Harbin. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 13, 1121–1126. (in Chinese with English abstract) [柴一新, 祝宁, 韩焕金 (2002). 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例. 应用生态学报, 13, 1121–1126.]
- China National Environmental Monitoring Centre (2014). The air quality status report of 74 cities in first half of 2014. [http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news\\_42241.html](http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news_42241.html). Cited 22 July 2014. (in Chinese) [中国环境监测总站(2014). 2014年上半年74个城市空气质量状况报告. [http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news\\_42241.html](http://www.cnemc.cn/publish/totalWebSite/news/news_42241.html). 引用时间2014年7月22日.]
- Fang Y, Zhang JC, Wang YH (2007). Dustfall adsorbing capacity of major species of greening trees in Nanjing and its law. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 23(2), 36–40. (in Chinese with English abstract) [方颖, 张金池, 王玉华 (2007). 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, 23(2), 36–40.]
- Gao JH, Wang DM, Zhao L, Wang GD (2007). Airborne dust detainment by different plant leaves: Taking Beijing as an example. *Journal of Beijing Forestry University*, 29(2), 94–99. (in Chinese with English abstract) [高金晖, 王冬梅, 赵亮, 王国栋 (2007). 植物叶片滞尘规律研究——以北京市为例. 北京林业大学学报, 29(2), 94–99.]
- Givoni B (1991). Impact of planted areas on urban environmental quality: A review. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 25, 289–299.
- He KB, Jia YT, Ma YL, Lei Y, Zhao Q, Tanaka S, Okuda T (2009). Regionality of episodic aerosol pollution in Beijing. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 29, 482–487. (in Chinese with English abstract) [贺克斌, 贾英韬, 马永亮, 雷宇, 赵晴, Tanaka S, Okuda T (2009). 北京大气颗粒物污染的区域性本质. 环境科学学报, 29, 482–487.]
- He Y, Li L, Li JY, Li WX, Mu LQ (2010). Air purification efficiency of thirty species of landscape trees in northern China. *Journal of Northeast Forestry University*, 38(5), 37–39. (in Chinese with English abstract) [贺勇, 李磊, 李俊毅, 李伟星, 穆立蓄 (2010). 北方30种景观树种净化空气效益分析. 东北林业大学学报, 38(5), 37–39.]
- Ji HF, Zhang LJ, Yan HX, Huang DZ, Su XY, Huang QX, Liu L (2008). Study on dust catching property of major green tree species in northern China. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 36, 10869–10871. (in Chinese with English abstract) [纪惠芳, 张立娟, 阎海霞, 黄大庄, 苏筱雨, 黄秋娟, 刘丽 (2008). 几种我国北方绿化树种滞尘能力的研究. 安徽农业科学, 36, 10869–10871.]
- Jim CY, Chen WY (2008). Assessing the ecosystem service of air pollutant removal by urban trees in Guangzhou (China). *Journal of Environmental Management*, 88, 665–676.
- Li HE, Wang ZY, Tan JD, Hu XC, Lu YD, Li PS (2006). Effects of main urban landscape plants on dust blocking in Foshan. *Ecologic Science*, 25, 395–399. (in Chinese with English abstract) [李寒娥, 王志云, 谭家得, 胡羨聪, 陆耀东, 李佩珊 (2006). 佛山市主要城市园林植物滞尘效益分析. 生态科学, 25, 395–399.]
- Li HM, Liu X (2008). Relationships between leaf epidermal morphology and dust-retaining capability of main garden trees in Chengyang District of Qingdao City. *Chinese Journal of Ecology*, 27, 1659–1662. (in Chinese with English abstract) [李海梅, 刘霞 (2008). 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. 生态学杂志, 27, 1659–1662.]
- Liu L, Guan DS, Peart MR (2012). The morphological structure of leaves and the dust-retaining capability of afforested plants in urban Guangzhou, South China. *Environmental Science and Pollution Research*, 19, 3440–3449.
- Mo L, Yu XX, Zhao Y, Sun FB, Mo N, Xia HL (2014). Correlation analysis between urbanization and particle pollution in Beijing. *Ecology and Environmental Sciences*, 23, 806–811. (in Chinese with English abstract) [莫莉, 余新晓, 赵阳, 孙丰宾, 莫楠, 夏洪磊 (2014). 北京市区域城市化程度与颗粒物污染的相关性分析. 生态环境学报, 23, 806–811.]
- Nowak DJ, Crane DE, Stevens JC (2006). Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, 4, 115–123.
- Nowak DJ, Hirabayashi S, Bodine A, Greenfield E (2014). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, 119–129.
- Paoletti E, Bardelli T, Giovannini G, Pecchioli L (2011). Air quality impact of an urban park over time. *Procedia Environmental Sciences*, 4, 10–16.
- Pal A, Kulshreshtha K, Ahmad KJ, Behl HM (2002). Do leaf surface characters play a role in plant resistance to auto-exhaust pollution? *Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 197, 47–55.
- Qian XL, Gan HD (2005). Epidemiological research progress of the effects of atmospheric particulate pollution on the cardiovascular system. *Chinese Journal of Epidemiology*, 26, 999–1001. (in Chinese) [钱孝琳, 阚海东 (2005). 大气颗粒物污染对心血管系统影响的流行病学研究进展. 中华流行病学杂志, 26, 999–1001.]
- Schaubroeck T, Deckmyn G, Neiryneck J, Staelens J, Adriaenssens S, Dewulf J, Muys B, Verheyen K (2014). Multilayered modeling of particulate matter removal by a growing forest over time, from plant surface deposition to washoff via rainfall. *Environmental Science & Technology*, 48, 10785–10794.
- Su YX, Huang GQ, Chen XZ, Chen SS, Li ZS (2011). Research progress in the eco-environmental effects of urban green spaces. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 7287–7300. (in Chinese with English abstract) [苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森, 李智山 (2011). 城市绿地的生态环境效应研究进展. 生态学报, 31, 7287–7300.]
- Tallis M, Taylor G, Sinnett D, Freer-Smith P (2011). Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 103, 129–138.
- Wang HX, Shi H, Li YY (2010). Relationships between leaf surface characteristics and dust-capturing capability of urban greening plant species. *Journal of Applied Ecology*, 21, 3077–3082. (in Chinese with English abstract) [王会霞, 石辉, 李秧秧 (2010). 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响. 应用生态学报, 21, 3077–3082.]
- Wang L, Gao SY, Liu LY, Ha S (2006). Atmospheric particle-retaining capability of eleven garden plant species in Beijing. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 17, 597–601. (in Chinese with English abstract) [王蕾, 高尚玉, 刘连友, 哈斯 (2006). 北京市11种园林植物滞留大气颗粒物能力研究. 应用生态学报, 17, 597–601.]
- Wang ZH, Li JB (2006). Capacity of dust uptake by leaf surface of *Euonymus japonicus* Thunb. and the morphology of captured particle in air polluted city. *Ecology and Environment*, 15, 327–330. (in Chinese with English abstract) [王赞红, 李纪标 (2006). 城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态. 生态环境, 15, 327–330.]

责任编辑: 蒋高明 责任编辑: 王 葳