

# 北京市3种道路防护林春季滞尘规律研究

马远<sup>1</sup>, 贾雨龙<sup>2</sup>, 王成<sup>1\*</sup>, 刘文军<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 北京市通州区园林绿化局, 北京 101149; 3. 北京市海淀区气象局, 北京 100080)

**摘要:** [目的] 研究不同道路防护林的滞尘能力及滞尘的动态变化和空间分布规律。[方法] 在春季对3种道路防护林(油松林、圆柏林、银杏林)距道路不同宽度的滞尘量进行连续观测, 对比3种道路防护林滞尘能力, 分析降雨、极大风速、相对湿度、PM<sub>10</sub>等因子对滞尘动态的影响以及3种道路防护林滞尘的空间分布特征。使用单位叶干质量滞尘量(mg·g<sup>-1</sup>)表征叶面滞尘能力。[结果] 表明:(1)3种植物叶面滞尘能力差异显著, 圆柏>银杏>油松, 分别为4.79±0.20、2.48±0.07、1.42±0.04 mg·g<sup>-1</sup>, 单株和单位林分面积滞尘量均为圆柏林>油松林>银杏林;(2)3种道路防护林在外界影响下滞尘量处于动态变化之中, 油松林具有比银杏和圆柏林更高的滞尘稳定性;(3)降雨量较低时3种道路防护林滞尘量均增加, 降雨量较高时3种道路防护林滞尘量均降低, 油松和银杏林的滞尘量更容易受降雨影响而降低; 随着风速增大, 3种道路防护林滞尘作用不断加强, 风速继续增大时, 油松和圆柏林滞尘量均有减少, 银杏林滞尘量仍有显著增加。(4)3种道路防护林滞尘量在五环路侧(北)均高于香山路侧(南), 油松和圆柏林均呈现为道路防护林中间位置为最低点, 银杏林中间位置滞尘量最高。(5)油松和圆柏林滞尘量外部比内部变化大, 银杏林滞尘量内部比外部变化大。[结论] 道路防护林的滞尘效益受树种、林分结构、所处环境、天气条件等多方面因素共同影响, 在建设和管理过程中应充分考虑各种因素, 充分发挥滞尘作用。

**关键词:** 道路防护林; 滞尘; 动态变化; 空间分布

中图分类号: S731.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)02-0147-09

## Dust-retention Effect of 3 Road Protection Forests in Spring in Beijing

MA Yuan<sup>1</sup>, JIA Yu-long<sup>2</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, LIU Wen-jun<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Beijing Tongzhou District Landscaping Bureau, Beijing 101149, China;

3. Beijing Haidian District Meteorological Bureau, Beijing 100080, China)

**Abstract:** [Objective] To study the dust-retention ability, dynamic change and spatial distribution characteristics among three road protection forests. [Method] Three types of road protection forests (*Pinus tabulaeformis* forest, *Sabina chinensis* forest and *Ginkgo biloba* forest) were observed continuously in spring at different distances from the road, and the dust retention ability of the road protection forests was compared. Rainfall, wind speed and relative humidity, PM<sub>10</sub> and other factors influencing the dynamics and spatial distribution characteristics of dust retention was analyzed. [Result] (1) There were significant differences in leaf dust retention ability among the three plant species, *S. chinensis* > *G. biloba* > *P. tabulaeformis*, with 4.79 ± 0.20 mg·g<sup>-1</sup>, 2.48 ± 0.07 mg·g<sup>-1</sup>, and 1.42 ± 0.04 mg·g<sup>-1</sup>, respectively; (2) The dust retention amount in the three road protection forests changed with the outside influencing factors, and the dust retention of *P. tabulaeformis* forest had higher stability than that of the other two species. (3) The amount of dust retention increased when the rainfall was less, and decreased when rainfall became more. The dust retention of *P. tabulaeformis* and *G. biloba* forests was more susceptible to rainfall.

收稿日期: 2017-02-10

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项经费课题“增强森林滞留PM<sub>2.5</sub>等颗粒物的能力调控技术研究”(201304301-05)

作者简介: 马远, 在读博士研究生. 主要研究方向: 城市林业.

\* 通讯作者.

With the increase of wind speed, the dust retention of three road protection forests was strengthened continuously. When wind speed continued to increase, the amount of dust retention of *P. tabulaeformis* and *Sabina chinensis* forests decreased, while that of *G. biloba* forest significantly increased. (4) The amount of dust retention in the three forests was higher in the north side of the Fifth Ring Road than that in the south of Xiangshan Road. The dust retention in the middle position of *P. s. tabulaeformis* and *S. chinensis* forests was the lowest, while that in the middle position of *G. biloba* forest had higher volume. (5) The change of dust retention in the outside part of *P. tabulaeformis* and *S. chinensis* forests was more active than that in the interior, while the change of dust retention in interior *G. biloba* forest was more active than the outside part. [ **Conclusion** ] Dust retention efficiency of road protection forests is affected by tree species, forest structure, environment and weather conditions. In the construction and management of urban plants, relevant factors should be taken into account to achieve full dust retention effect.

**Keywords:** road protection forest; dust retention; dynamic change; spatial distribution

受工业发展、施工建设、燃煤供暖、汽车尾气排放等的影响,空气颗粒物污染已成为许多地区面临的主要环境问题,引起了社会各界的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。

城市森林能够通过其复杂的叶面结构和冠层结构吸附、阻滞空气颗粒物,是“天然的空气过滤器”<sup>[2]</sup>。张新猷研究得出1995年北京市城市近郊区居住区绿地总滞尘量2 170 t<sup>[4]</sup>;邱媛研究发现惠州市建成区植被全年滞尘量高达4 430.7t<sup>[5]</sup>;Tallis研究发现大伦敦地区城市植被可减少空气中0.7%~2.6%的PM<sub>10</sub>含量<sup>[6]</sup>。正是因为城市森林所产生巨大的滞尘效益,国内外学者广泛开展了相关研究。目前滞尘效益研究的热点主要集中于植物滞尘能力对比<sup>[7-9]</sup>、滞尘机理研究<sup>[10-12]</sup>、滞尘成分分析<sup>[13-14]</sup>等方面,取得了许多研究成果,但多数研究的着眼点均为叶面尺度,对林分尺度的滞尘特性研究相对匮乏。

研究表明,林带的宽度、高度、种植密度、疏透度、郁闭度等因素对滞尘作用均有影响<sup>[15-17]</sup>;不同群落结构的滞尘作用也有较大差异,多数研究均表明具有复层结构的绿地比结构单一的绿地具有更好的滞尘效果<sup>[17-19]</sup>。可见,林分滞尘除了树木自身的滞尘特性之外还受林分结构的影响。此外,树木滞尘受气象因子等的影响处在动态变化之中,王会霞研究了女贞、珊瑚树等植物的滞尘与气象因子的关系,结果显示不同植物的滞尘作用对各气象因子的响应不同<sup>[20]</sup>,王蕾也得出类似结果<sup>[21]</sup>;还有学者通过模拟试验研究不同气象因子在不同强度下对滞尘的影响<sup>[22-24]</sup>。林分滞尘是林分结构与气象等外界因素共同作用的结果,不同林分结构有何滞尘特征?气象因子等外界因素在不同林分结构之下对滞尘有何种影响?目前该方面的研究尚比较薄弱。

道路防护林是城市森林的重要组成部分<sup>[25]</sup>。本研究以北京市3种具有代表性的道路防护林为研究对象,以道路防护林滞尘的动态变化规律及滞尘量的空间分布特征为切入点进行研究,旨在探索气象因子对不同道路防护林滞尘的影响,以及不同林分结构与滞尘的关系,以期为今后道路防护林的营建提供参考。

## 1 研究地与研究方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于北京市海淀区香山路316医院至正蓝旗区间,北侧为香山路,南侧为北五环路,附近有著名的香山公园和北京市植物园,地理位置116°14'6"~116°14'52" E,40°0'8"~40°0'12" N。北京市为暖温带大陆性季风气候,年均温度11.6℃,年降水量630 mm,春季气候多变,具有降雨量少、干燥多风、风向不固定等特点。香山路和五环路为去往香山方向的主要道路,春季旅游旺季两条道路均有较高车流量。本次研究的3种道路防护林(油松林、圆柏林、银杏林)均为人工纯林,营建于2003年,使用5年生苗造林,隶属于北京市第一道绿化隔离带,养护较为粗放,树木基本无修剪,各林分内树木的树龄、长势基本一致,总面积约6.7 hm<sup>2</sup>(图1,表1)。

### 1.2 研究方法

1.2.1 采样点布置 在3种道路防护林内,选取树木空间分布、长势均匀的区域,根据林带宽度(表1),自北向南,以距离香山路0 m处为起始点,10、20、30 m……,以此类推,每隔10 m设置采样点,向南到达五环路边缘,油松、圆柏、银杏3种林分采样点数量分别为6、5、10个。(图1)

1.2.2 采集方法 2016年4月22至5月27日,每

隔3天进行连续采样,采样当天如遇大风、降雨天气则延后至晴天,共进行11次采样(图2)。采样均在上午进行,以距离采样点最近的树为目标树。根据树冠高度,将树冠等分为上、中、下3部分,使用枝剪在树冠东、西、南、北4个方向及上、中、下3个高度共12个方位采集等量健康叶片,油松、圆柏各采集30g左右(试验地圆柏全为刺形叶),银杏采集80~100片,小心装入自封袋带回实验室等待处理。每个采样点重复采集3次。



图1 研究地位置及采样点分布

Fig. 1 The sketch map of experiment and sampling point layout

表1 3种林分的基本特征

Table 1 The stand characteristics of study land

林分类型 Forest types	郁闭度 Crown density	株距 Seed spacing/m	行距 Row spacing/m	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	枝下高 Shoot height/m	冠幅 Crown width/(m × m)	林带宽度 Width/m
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.6	5	5	13.54 ± 0.09	3.8 ± 0.20	0.5	2.8 × 2.9	50
圆柏林 <i>Sabina chinensis</i>	0.5	5	5	11.35 ± 0.12	3.9 ± 0.09	0.4	1.9 × 2.1	40
银杏林 <i>Ginkgo biloba</i>	1.0	5	5	14.42 ± 0.13	6.5 ± 0.18	1.8	2.5 × 2.5	90

1.2.3 叶片处理 将采集回来的叶片置入1000 mL烧杯中,用蒸馏水浸泡2h,然后使用小毛刷清洗叶面后再用蒸馏水冲洗干净,用镊子将叶片小心夹出。夹出的叶片在80℃下烘干至恒质量<sup>[14]</sup>,使用1/1000电子天平称质量(M)。叶片浸洗液使用事先烘干称质量(M<sub>1</sub>)的微孔滤膜(0.22 μm)过滤,再将微孔滤膜于60℃下烘干至恒质量<sup>[26]</sup>,使用1/10000电子天平称质量(M<sub>2</sub>), (M<sub>2</sub> - M<sub>1</sub>)/M即为叶片单位质量滞尘量(mg · g<sup>-1</sup>)<sup>[14]</sup>,以下简称单位滞尘量。

1.2.4 植物绿量计算 将测得胸径数据代入北京市常用园林植物绿量模型<sup>[27]</sup>,该模型通过对北京市常用园林植物进行大量的实地测定而建立,其中:S

为总叶面积(m<sup>2</sup>),G为总叶质量(kg),W为胸径(cm)。通过100片叶子的总干质量除以总叶面积测得银杏的比叶质量  $LMA_{\text{银杏}} = 0.07 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $G_{\text{银杏}} = S_{\text{银杏}} \cdot LMA_{\text{银杏}}$ 。

$$G_{\text{油松}} = 0.85W_{\text{油松}} + 16.29 \quad (1)$$

$$G_{\text{圆柏}} = 1.70W_{\text{圆柏}} - 8.571 \quad (2)$$

$$S_{\text{银杏}} = 11.42W_{\text{银杏}} - 79.84 \quad (3)$$

1.2.5 区域气象数据和PM10浓度数据收集 从中国气象数据网<sup>[28]</sup>下载采样期间距离研究地最近的海淀区气象站的气象数据,包括降水、极大风速、极大风速风向和平均相对湿度(图2);从北京市空气质量发布平台网站<sup>[29]</sup>收集采样期间海淀区每日PM<sub>10</sub>浓度数据。

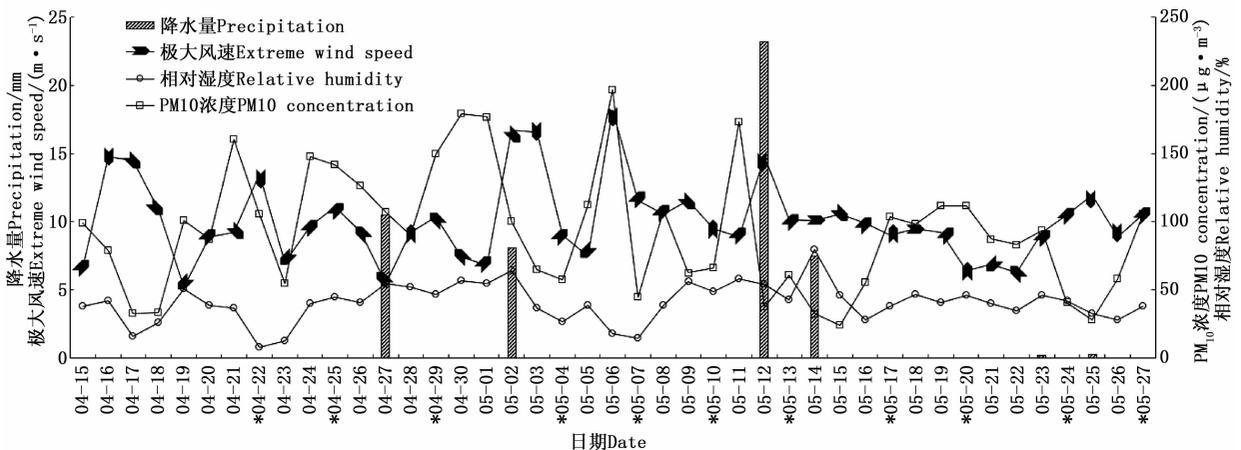


图2 采样期间的天气情况及PM<sub>10</sub>浓度(\*为采样日期)

Fig. 2 Weather and PM<sub>10</sub> condition during sampling

(\* represent sampling date)

1.2.6 数据分析 对采样期间3种树种的叶面滞尘量、各采样点滞尘量进行单因素方差分析,并用Duncan法进行多重比较。所有统计分析均采用SPSS19.0 (SPSS, IBM, USA) 软件,差异显著性水平设为0.05。

## 2 结果

### 2.1 不同道路防护林滞尘能力

2.1.1 不同树种叶面滞尘能力 3种树种春季单位滞尘量差异显著(图3)。圆柏滞尘能力最强,银杏次之,油松滞尘能力最低,单位滞尘量分别为 $4.79 \pm 0.20$ 、 $2.48 \pm 0.07$ 、 $1.42 \pm 0.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

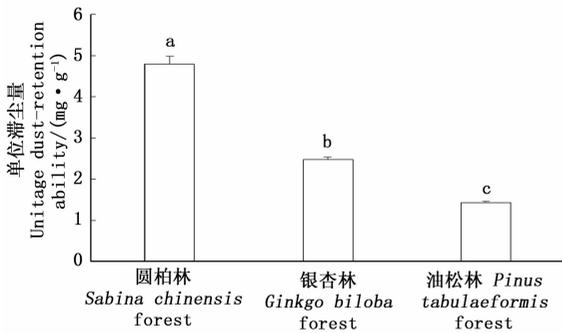


图3 3种植物叶面滞尘能力

Fig.3 Dust retention capacity of 3 tree types

2.1.2 单株和林分滞尘能力 通过北京市园林植物绿量模型得出的单株绿量与单位滞尘量相乘,得到研究地3个树种的单株滞尘量,圆柏(51.36 g) > 油松(39.47 g) > 银杏(13.05 g);单株滞尘量和单位林分面积(hm<sup>2</sup>)株数(3种道路防护林均为每公顷400株)相乘,得到单位林分面积(hm<sup>2</sup>)滞尘量为圆柏林(20.54 kg) > 油松林(15.79 kg) > 银杏林(5.22 kg)。

### 2.2 道路防护林滞尘的动态变化

2.2.1 3种道路防护林滞尘量动态变化特征 如图4所示,3种道路防护林的单位滞尘量随着时间变化处于不断变化之中,银杏、圆柏的单位滞尘量和油松相比波动较大,变化幅度具有明显差异。单次采集样品的平均单位滞尘量油松为 $0.63 \sim 1.92 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,圆柏为 $3.00 \sim 6.56 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,银杏为 $0.85 \sim 4.24 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。进一步分析3个树种单位滞尘量的变异系数(CV),得出银杏(0.46) > 圆柏(0.45) > 油松(0.37),说明相对于油松,银杏和圆柏在滞尘过程中受外界因素的影响更大,即银杏、圆柏滞尘的稳定性较差,滞尘量增加或减少的速率更大。

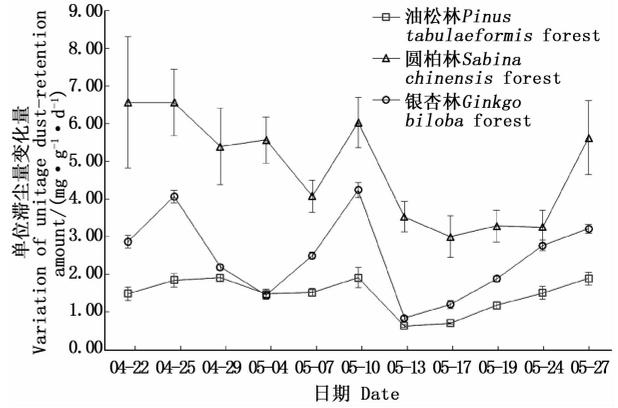


图4 3种道路防护林滞尘量动态变化

Fig.4 Dynamic change of dust retention in 3 forests

2.2.2 区域气象条件和PM<sub>10</sub>浓度对林分滞尘的影响 (1)降雨量 采样期间共出现6次降雨天气(图2),对3种道路防护林每次降雨前后的单位滞尘量分别进行对比(图5),结果发现:油松林在小于7.5 mm降雨量时,单位滞尘量均有显著增加,分别增加 $0.33$ 、 $0.39$ 、 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,降雨量为大于8.1 mm时单位滞尘量显著降低;圆柏林单位滞尘量在降雨量0.3 mm时显著升高( $2.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ),7.5 ~ 8.1 mm时变化不显著,大于10.5 mm时降低较明显( $1.17 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ),23.2 mm时显著降低( $2.50 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ );银杏林滞尘量随着降雨量的升高有明显的降低趋势,雨量为0.2、0.3、7.5 mm时单位滞尘量显著升高 $0.89$ 、 $0.44$ 、 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ,在雨量为8.1、10.5、23.2 mm时显著降低,分别为 $0.75$ 、 $1.87$ 、 $3.39 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。此外,3种林分对不同降雨量的响应程度也不同,油松和银杏林在降雨量大于8.1 mm时滞尘量开始有显著下降,圆柏林在雨量10.5 mm时才表现出下降趋势。

(2)极大风速 选取每次采样间隔的极大风速数据,分析其对3种道路防护林滞尘量的影响(图5)。随着极大风速的增大,3种道路防护林滞尘量变化也不同。油松林滞尘量在极大风速为小于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,滞尘量有显著增加,极大风速为 $11.6 \sim 13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时滞尘量增高,但不显著,极大风速大于 $14.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,滞尘量显著降低;圆柏林随着极大风速的升高,滞尘量呈现出先增加再降低的趋势,在极大风速小于 $11.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时变化不显著,极大风速为 $11.6$ 、 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时滞尘量显著增加,在极大风速为 $13.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时基本无变化,极大风速 $18.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,滞尘量显著下降;排除降雨天气影响,银杏

林的滞尘量在极大风速为  $9.2 \sim 18.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时均显著增长,其增长幅度随着极大风速的升高呈现出先升高后下降趋势,其中极大风速为  $11.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,滞尘量增长幅度最大。结果表明,风力对银杏林滞尘有较好的促进作用,低风速对油松林滞尘作用促进较为明显,对圆柏林影响不大,中等风速对油松林和圆柏林滞尘均有促进,高风速时油松林和圆柏林滞尘量降低,银杏林滞尘量增加幅度也有所减小。

(3) 相对湿度 选取每次采样间隔的  $\text{PM}_{10}$  平均数据和日均相对湿度的平均值分析 3 种道路防护林

滞尘量和  $\text{PM}_{10}$  浓度、相对湿度的关系(图 5)。结果发现,3 种道路防护林滞尘量和相对湿度均无明显相关规律,可能是因为北京市春季  $\text{PM}_{10}$  浓度及相对湿度整体水平较低,在其他影响因素(降雨、风)较为明显的情况下,难以呈现出较好的相关规律。

(4)  $\text{PM}_{10}$  浓度 选取每次采样间隔的日均  $\text{PM}_{10}$  浓度的平均值分析 3 种道路防护林滞尘量和相对湿度的关系(图 5)。结果发现,3 种道路防护林滞尘量和空气中  $\text{PM}_{10}$  浓度均无明显相关规律。

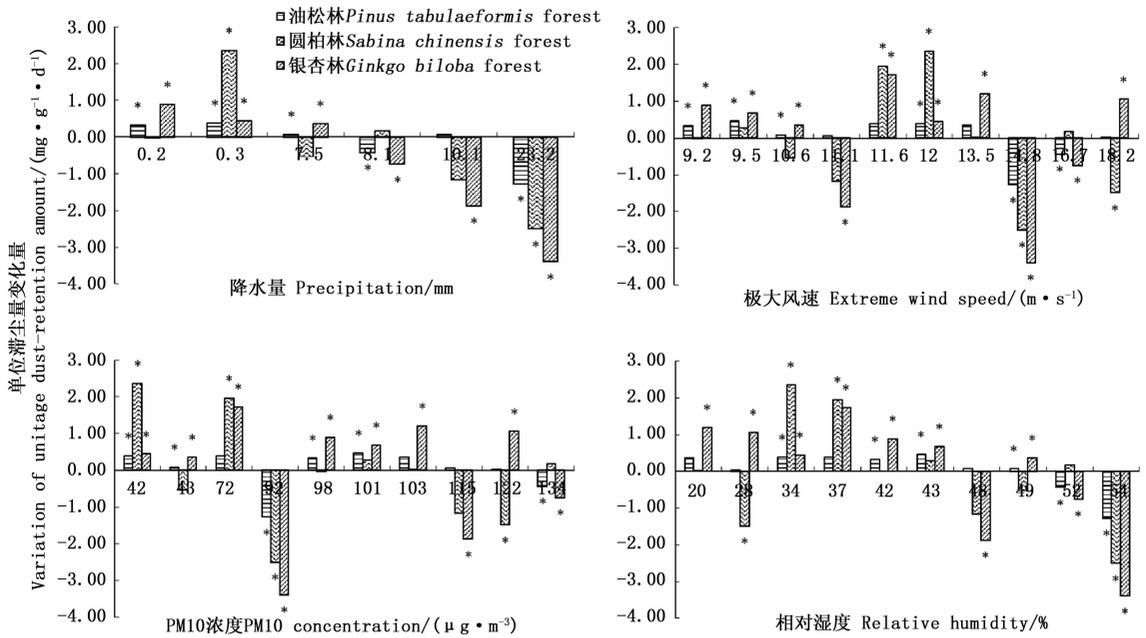


图 5 区域气象条件和  $\text{PM}_{10}$  浓度对滞尘变化的影响(\*表示前后对比显著)

Fig. 5 The effect of weather and  $\text{PM}_{10}$  condition on dust retention change(\* represents significant difference)

## 2.3 3种道路防护林滞尘量的空间分布

2.3.1 滞尘量的空间分布特征 由图 6 可以看出,油松和圆柏林从香山路(北侧)到五环路(南侧),单位滞尘量均表现为“先降低,后升高”,从香山路侧 0 m 处到林分中间位置单位滞尘量缓慢降低,最低点均位于林分中间位置前后,后快速升高,最高点均为五环路侧,且与其它位置相比均较显著。

银杏林的滞尘量分布特征表现为“中间高,两头低”(图 6)。单位滞尘量最高点位于靠近林分中间的 40 m 处。从 0 m 到 40 m 单位滞尘量呈上升趋势,从 40 m 到 90 m 单位滞尘量呈降低趋势。单位滞尘量在五环路侧(南侧)的 70、80、90 m 处均明显高于香山路侧(北侧)的 0、10、20 m 处。林内所有位置的单位滞尘量相互之间均无显著差异。

3 种道路防护林滞尘量空间分布的相似之处为

南侧(五环路侧)均高于北侧(香山路侧),不同之处在于油松林和圆柏林在南端(五环路)的滞尘量均显著高于其他位置,银杏林各位置滞尘量均无显著差异;此外,银杏林滞尘量的高点位于林分中间,而油松和圆柏林中间位置均为低点。

2.3.2 林内不同位置滞尘量的变化特征 3 种道路防护林滞尘量在各空间位置随着外界影响也处于不断变化之中,不同位置的变化特性也不相同。对 3 种道路防护林采样期间各采样点单位滞尘量的变异系数加以分析,得到图 7 结果。可以看出,油松林和圆柏林内各位置变异系数的特征为“外部高,内部低”,说明油松和圆柏两种防护林外部比内部滞尘量变化更活跃,这可能是由于外部树木受到风力及道路扬尘等因素的影响更大,内部树木距离道路较远,且外部林分的防护作用也使其受外界因素干扰较

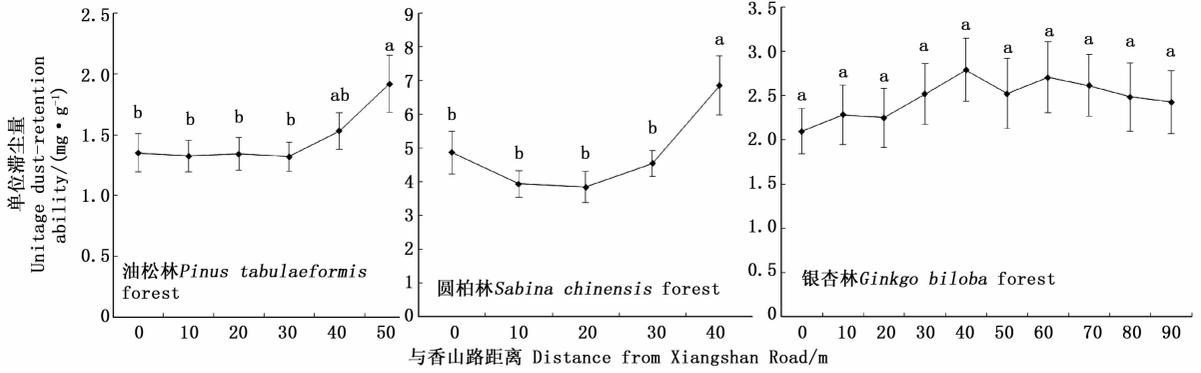


图6 3种道路防护林单位滞尘量的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of dust retention amount in 3 forests

小。银杏林内各位置滞尘量的变异程度与油松、圆柏林相比均处于较高水平,呈现出“外部低,内部高”的特征,即内部滞尘量变化比外部更为活跃,这可能是因为银杏林相对于油松和圆柏两种林分,枝下高较高,具有冠层郁闭、底层空旷的特点,一方面较高的疏透度使林分地表受风力等因素影响更易起尘,另一方面基本完全郁闭的冠层使扬尘难以扩散至外部空间,从而导致林内滞尘量变化更加活跃。

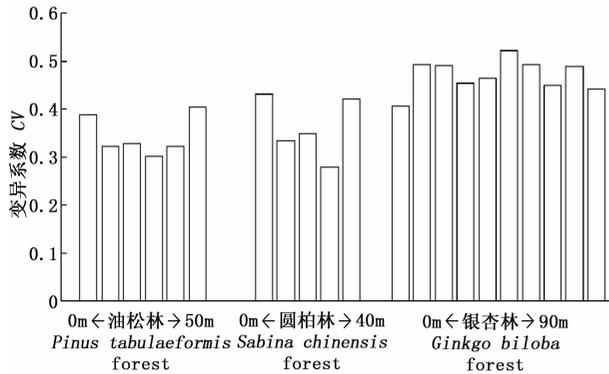


图7 采样期间3种道路防护林不同水平位置单位滞尘量变异系数

Fig. 7 CV of dust retention amount in different site in 3 forests

### 3 讨论

#### 3.1 不同林分的滞尘能力

3.1.1 不同植物叶片的滞尘能力 植物叶片的滞尘能力受叶片的粗糙程度、绒毛形状和数量、叶面积大小、表皮细胞和气孔排列方式、润湿性、叶片表面自由能及其极性和色散分量等多方面因素共同影响<sup>[30]</sup>,呈现出较大的物种差异,不同植物滞尘能力可达2~3倍以上<sup>[3]</sup>。郭鑫比较了圆柏、油松叶片

的横断面,发现两种植物叶片弧面的弧度具有差异,圆柏弧度小更利于滞尘<sup>[31]</sup>;陈玮研究认为油松叶表面细胞结构排列整齐,叶表面光滑,不利于滞尘<sup>[32]</sup>;王会霞发现银杏叶片表面色散分量占表面自由能比例高达90%以上,对滞尘贡献较大<sup>[30]</sup>;还有学者发现叶面积较小的植物具有较高滞尘能力<sup>[32]</sup>,这也可能是圆柏叶片滞尘能力较高的原因。植物的滞尘量处在不断变化之中,是一个复杂的动态过程,因此,仅通过比较平均值得出不同植物滞尘能力大小是不全面的,滞尘能力的变化特性也应是滞尘能力比较的关键内容。本研究通过对比3种植物滞尘的动态变化特征,发现变异系数(CV)银杏(0.46)≈圆柏(0.45) > 油松(0.37),说明银杏、圆柏叶片单位质量滞尘量虽然较高,但其滞尘稳定性较差,滞尘量增加或减少的速率更大。油松叶片滞留颗粒物的方式主要以黏附为主,研究发现油松叶面分泌的粘性油脂使颗粒物形成更为稳定的颗粒团<sup>[14]</sup>,银杏、圆柏叶面没有分泌物,其滞尘主要方式为停着和附着,因此油松叶片具有更好的滞尘稳定性。说明相对于油松,银杏和圆柏在滞尘过程中受外界因素的影响更大,即银杏、圆柏虽具有较高的滞尘能力,但其滞尘的稳定性较差,滞尘量增加或减少的速率更大。可见,仅通过比较平均值得出不同植物滞尘能力大小是不全面的,滞尘能力的变化特性也应是滞尘能力比较的重要内容。叶片滞尘的方式主要有停着、附着和黏附<sup>[3]</sup>,一般认为,靠植物叶片分泌物的黏附滞尘效果最为稳定,附着次之,停着最弱<sup>[33]</sup>。研究发现油松叶面分泌的粘性油脂使颗粒物形成更为稳定的颗粒团<sup>[20]</sup>,其滞留颗粒物的方式主要以黏附为主,银杏、圆柏叶面没有分泌物,其滞尘主要方式为停着和附着,这可能是油松叶片具有更好的滞尘稳

定性的原因。

**3.1.2 单株滞尘能力和林分滞尘能力** 本研究中根据3个树种的基本测量数据通过绿量模型计算出3个树种单株滞尘量,得出该研究地中18年树龄的3种树木单株滞尘量圆柏>油松>银杏,通过3种林分的株、行距计算单位林地面积的种植数量,得出单位林地面积滞尘量为圆柏林>油松林>银杏林。以上结果与叶面滞尘能力的排序并不一致,说明树木滞尘能力不能脱离绿量,仅通过叶片滞尘能力选择滞尘效益高的绿化树种显然是不够的。树木绿量受生长环境、个体差异等多方面因素影响,不同林分所处的外环境、林分空间结构、树木状况、地表覆盖状况等对林分的滞尘作用都具有较大影响,因此植物单株滞尘量和单位林地面积滞尘量不可一概而论。不同植物单株滞尘量在不同生长阶段、生长环境下具有何种差异,不同林分特征对林地滞尘量有何种影响有待于今后进一步研究。

### 3.2 林分滞尘的动态变化

植物的滞尘受外界的影响,滞尘与降尘同时发生,是一个复杂的动态变化过程<sup>[25]</sup>,具有“饱和性”和“可塑性”<sup>[1]</sup>。以下讨论降雨、风力、相对湿度等气象因子和PM<sub>10</sub>浓度在本研究中对林分滞尘动态变化的影响。

**3.2.1 降雨** 总体来说,降雨量对3种道路防护林滞尘量的影响总体趋势为降雨量低时,滞尘量增大,降雨量高时,滞尘量降低,这可能由于雨量较低时,一方面加快了空气颗粒物的沉降速度,从而使落在叶面的颗粒物增多,另一方面使植物叶面更加润湿,但并不足以产生叶面径流,从而增加对灰尘的吸附能力。3种林分对降雨响应程度不同,随着雨量的增加,油松林和银杏林的滞尘量更易受到降雨的影响而降低,可能是由于:1)3种植物的树形差异较大,圆柏由于其枝叶紧凑密集,相比于油松和银杏,其截留降雨能力更强,较小雨量难以穿透。2)3种植物的叶面特征差异较大,银杏表面的疏水蜡质使其不易润湿<sup>[34]</sup>,油松较长的针叶使雨水难以在其表面滞留,反之圆柏的轮生刺形叶则形成了一定的储水空间使其在雨量相对较高时仍难以形成叶表径流。

**3.2.2 风力** 不同风速对植物滞尘的作用具有很大差别。Ould-Dada发现风速小于5 m·s<sup>-1</sup>时叶面滞尘不会被吹落<sup>[22]</sup>;Freer-Smith等借助风洞实验研究发现,风速为9 m·s<sup>-1</sup>时滞尘量和灰尘沉降速率

均高于3 m·s<sup>-1</sup>时<sup>[23]</sup>;Beckett等研究发现风速小于8 m·s<sup>-1</sup>时叶面颗粒物沉降速率随风速的增大而增大,高于该值时则可能导致叶面滞尘及颗粒物沉降速率降低<sup>[24]</sup>。油松林和圆柏林的滞尘量和风速的关系与上述研究较为契合,而银杏林在风力高达18.2 m·s<sup>-1</sup>时滞尘量仍有显著增加,可能是由于:1)相对于油松(50 m)和圆柏(40 m)两种林分,银杏林的宽度较大(90 m),风力在冠层的阻挡下逐步衰减,反而促进了林分内部树木的滞尘作用。2)银杏林基本完全郁闭,大风作用下林内产生的扬尘难以扩散出去,导致整个林分滞尘量的增加,相比之下油松和圆柏两种林分郁闭度较低,扬尘很容易扩散至外部空间。

**3.2.3 相对湿度** Ruijgrok研究发现湿度增大有利于空气颗粒物凝聚,同时易吸收空气中的水分变大,从而有利于颗粒物的沉降<sup>[35]</sup>;包红光研究发现PM<sub>2.5</sub>浓度与空气相对湿度呈极显著正相关<sup>[36]</sup>;王会霞认为相对湿度的增加使植物叶片更加润湿,且蒸腾作用加强,对于提高植物滞尘能力是有利的<sup>[20]</sup>。但在本研究中并未发现相对湿度和植物滞尘量的相关性,可能是因为1)北京市春季气候较为干燥,相对湿度整体较低,不足以对植物滞尘量造成明显影响。2)相对湿度和风力往往呈负相关,高相对湿度虽有利于滞尘,但往往伴随较低风速,导致颗粒物的沉降效率降低。

**3.2.4 PM<sub>10</sub>浓度** 研究发现,植物叶片表面灰尘中,PM<sub>10</sub>占绝大部分比例<sup>[21,37]</sup>。Mori研究发现高速公路防护林的滞尘量分布特征和PM<sub>10</sub>浓度相关性较高,和PM<sub>2.5</sub>相关性较差,认为是由于PM<sub>10</sub>粒径较大而具有更高的沉降速率<sup>[38]</sup>。王会霞发现在PM<sub>10</sub>浓度为474 μg·m<sup>-3</sup>时,女贞和珊瑚树滞尘量显著增加<sup>[20]</sup>。Beckett研究发现不同树种滞留PM<sub>10</sub>的能力也存在较大差异<sup>[24]</sup>。本研究中未发现PM<sub>10</sub>浓度和林分滞尘量之间的相关性,可能是因为采样期间北京市春季空气颗粒物浓度整体较低,在其他影响因素(降雨、风)较为明显的情况下,难以呈现出较好的相关规律。

### 3.3 林分滞尘的空间分布

Prusty的研究表明道路防护林的滞尘量随着车流量的增加呈现增加趋势<sup>[26]</sup>,Kardel也得出同样观点<sup>[39]</sup>。本研究中3种道路防护林南侧(五环路侧)的滞尘量均高于北侧(香山路侧),这可能是因为:1)五环路是快速路,相对于香山路而言车流量更大。

2) 低风速有利于道路防护林滞尘, 高风速会使滞尘量降低<sup>[24]</sup>, 北京市春季风向变化频繁, 但从采样期间的区域气象条件(图2)来看, 大风天气多为北风, 小风天气多为南风, 因此, 北侧(香山路)易受大风天气影响使滞尘量降低, 南侧(五环路)在低风速南风的影响下滞尘量较高。

树木滞尘还受到来自垂直方向的影响。阿丽亚研究得出二球悬铃木叶片不同高度滞尘量  $1\text{ m} > 2\text{ m} > 4\text{ m}$ <sup>[40]</sup>; 高金晖研究发现植物叶片滞尘量低位明显高于中位和高位<sup>[11]</sup>; 多数学者发现受垂直高度的影响, 不同生活型植物滞尘能力的顺序为草本 > 灌木 > 乔木; Prusty 认为汽车尾气对道路防护林的污染主要在较低位置, 低矮植物更容易受影响<sup>[26]</sup>, 说明了垂直高度越大, 受地面尘源的影响越小。竹涛认为随着垂直高度的增加, 道路扬尘中较大的颗粒以重力沉降为主, 并呈现出递减趋势, 而细颗粒物以布朗运动为主, 随着高度增加变化不大<sup>[41]</sup>。本研究中, 油松和圆柏两种道路防护林滞尘量在五环路和香山路两端均有显著差异, 而银杏林各位置的差异均不显著, 这可能是由于其树冠位置较高, 林冠上层颗粒物分布较平均, 而林下疏透度高, 低位的污染易在林分中扩散, 使整个冠层接受降尘量无显著差异。

树木滞尘量还和污染源的水平距离有关。陈玮研究了桧柏在不同位置滞尘量的变化, 得出机动车道与自行车分车道 > 自行车与人行道分车道, 甚至单棵树的滞尘量在靠近街道方向明显高于背离街道方向<sup>[32]</sup>, Mori 研究发现北美云杉(*Picea sitchensis*)和樟子松(*Pinus sylvestris* L.)两种林分的总颗粒物滞留量随着和高速公路距离的增加而呈现出降低趋势<sup>[38]</sup>, 充分证明植物的滞尘能力受其和污染源距离的影响显著, 越靠近污染源, 滞尘量越高。本研究中油松林和圆柏林滞尘量低点均位于林分中间位置, 可能是由于中间位置距离两侧道路均较远, 受污染程度较低。银杏林中间位置是滞尘量的高点, 这可能是由于相对于油松和圆柏林, 银杏林郁闭度较高的原因。王成研究发现林分郁闭度较高时林内颗粒物难以扩散<sup>[42]</sup>; 陈俊刚研究发现五环路旁毛白杨防护林内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在林分中的分布呈抛物线状, 中间位置浓度最高<sup>[43]</sup>; 包红光发现城市公园外侧阔叶乔木林内  $\text{PM}_{2.5}$  浓度高于针叶乔木林<sup>[36]</sup>, 以上研究均表明林分的树冠结构使其具有阻挡颗粒物扩散的功能, 郁闭度越高颗粒物越不易扩散。油松林树冠稀疏, 圆柏林冠幅较小, 均不能够良好地阻挡林内颗粒

物扩散, 而银杏林基本完全郁闭, 可能是导致中间位置颗粒物难以扩散而滞尘量高的原因。

## 4 结论

(1) 3种植物叶面滞尘能力差异显著, 圆柏叶面滞尘能力最强, 银杏次之, 油松最低, 单位叶质量滞尘量分别为  $4.79 \pm 0.20\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $2.48 \pm 0.07\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $1.42 \pm 0.04\text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 单株和单位林地面积滞尘量均为圆柏 > 油松 > 银杏。

(2) 3种道路防护林的滞尘的变化特性不同, 油松林滞尘较为稳定, 圆柏和银杏林的滞尘易受外界影响产生较大变化。

(3) 降雨量较低时有利于树木滞尘, 降雨量高时油松和银杏更易受到降雨影响滞尘量降低; 低风速有助于滞尘, 随着风速增大滞尘作用不断强化, 当风速继续增大时, 油松和圆柏林滞尘量均有减少, 银杏林的滞尘效率也有所降低。

(4) 3种道路防护林滞尘量的空间分布为五环路侧滞尘量更高, 这个趋势在郁闭度低、树木低矮的油松和圆柏林中比较显著, 在基本完全郁闭、树木较高的银杏林中没有显著差异; 3种道路防护林中油松和圆柏林滞尘量外部比内部变化活跃, 银杏林滞尘量变化内部比外部活跃。

## 参考文献:

- [1] 郭二果, 王成, 鄧光发, 等. 城市空气悬浮颗粒物时空变化规律及影响因素研究进展[J]. 城市环境与城市生态, 2010, (5): 34-37.
- [2] 王晓磊, 王成. 城市森林调控空气颗粒物功能研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(8): 1910-1921.
- [3] 柴一新, 祝宁, 韩焕金. 城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1121-1126.
- [4] 张新献, 古润泽, 陈自新, 等. 北京城市居住区绿地的滞尘效益[J]. 北京林业大学学报, 1997, 19(4): 12-17.
- [5] 邱媛, 管东生, 宋巍巍, 等. 惠州城市植被的滞尘效应[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2455-2462.
- [6] Tallis M, Taylor G, Sinnott D, et al. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments[J]. Landscape & Urban Planning, 2011, 103(2): 129-138.
- [7] 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: 自然科学, 2013, 28(6): 905-912.
- [8] 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(2): 408-414.
- [9] 阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 等. 干旱区绿洲城市主要绿化树种最大滞尘量对比[J]. 林业科学,

- 2015, 51(3):57-64.
- [10] 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):4547-4553.
- [11] 高金晖, 王冬梅, 赵亮, 等. 植物叶片滞尘规律研究——以北京市为例[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(2):94-99.
- [12] 杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 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, 2015, 28(3):384-392.
- [13] 张志丹, 席本野, 曹治国, 等. 植物叶片吸附PM<sub>2.5</sub>等大气颗粒物定量研究方法初探——以毛白杨为例[J]. 应用生态学报, 2014, 25(8):2238-2242.
- [14] 王蕾, 高尚玉, 刘连友, 等. 北京市11种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J]. 应用生态学报, 2006, 17(4):597-601.
- [15] 蔺银鼎, 武小刚, 郝兴宇, 等. 城市机动车道颗粒物扩散对绿化隔离带空间结构的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(21):6561-6567.
- [16] 殷杉, 蔡静萍, 陈丽萍, 等. 交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益[J]. 生态学报, 2007, 27(11):4590-4595.
- [17] 栗志峰, 刘艳, 彭倩芳. 不同绿地类型在城市中的滞尘作用研究[J]. 干旱环境监测, 2002, 16(3):162-163.
- [18] Baker W L. A review of models of landscape change[J]. Landscape Ecology, 1989, 2(2):111-133.
- [19] 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, 20(3):77-79.
- [20] 王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化[J]. 生态学报, 2015, 35(6):1696-1705.
- [21] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 等. 北京市春季天气状况对针叶树叶面颗粒物附着密度的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(8):998-1002.
- [22] Ould-Dada Z, Baghini N M. Resuspension of small particles from tree surfaces[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(22):3799-3809.
- [23] Freer-Smith P H, El-Khatib A A, Taylor G. Capture of Particulate Pollution by Trees: A Comparison of Species Typical of Semi-Arid Areas (*Ficus Nitida* and *Eucalyptus Globulus*) with European and North American Species[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2004, 155(1):173-187.
- [24] Beckett K P, Freersmith P H, Taylor G. The capture of particulate pollution by trees at five contrasting urban sites. [J]. Arboricultural Association Journal, 2000, 24(2-3):209-230.
- [25] 王成, 蔡春菊, 陶康华. 城市森林的概念、范围及其研究[J]. 世界林业研究, 2004, 17(2):23-27.
- [26] Prusty B A, Mishra P C, Azeez P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India. [J]. Ecotoxicology & Environmental Safety, 2005, 60(2):228-35.
- [27] 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[J]. 中国园林, 1998, 14(1):57-60.
- [28] 中国气象数据网. 中国地面气象站逐小时观测资料[DB/OL]. <http://data.cma.cn>. [2016-04-15]
- [29] 北京市环境保护监测中心. 北京市空气质量发布平台[DB/OL]. <http://zx.bjmemc.com.cn>. [2016-04-15]
- [30] 王会霞, 石辉, 李秧秧. 城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12):3077-3082.
- [31] 郭鑫, 张秋良, 唐力, 等. 呼和浩特市几种常绿树种滞尘能力的研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(17):62-65.
- [32] 陈玮, 何兴元, 张粤, 等. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12):2113-2116.
- [32] 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.
- [33] 郭伟, 申屠雅瑾, 郑述强, 等. 城市绿地滞尘作用机理和规律的研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, 26(6):1465-1470.
- [34] Neinhuis C, Barthlott W. Seasonal changes of leaf surface contamination in beech, oak, and ginkgo in relation to leaf micromorphology and wettability[J]. New Phytologist, 1998, 138(1):91-98.
- [35] Ruijgrok W, Tieben H, Eisinga P. The dry deposition of particles to a forest canopy: A comparison of model and experimental results[J]. Atmospheric Environment, 1997, 31(3):399-415.
- [36] 包红光, 王成, 郟光发, 等. 城市公园外侧防护林结构对外源PM<sub>2.5</sub>的消减作用[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6):987-993.
- [37] 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.
- [38] Mori J, Hanslin H M, Burchi G, et al. Particulate matter and element accumulation on coniferous trees at different distances from a highway[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2014, 14(1):170-177.
- [39] Kardel F, Wuyts K, Maher B A, et al. Intra-urban spatial variation of magnetic particles: monitoring via leaf saturation isothermal remanent magnetisation (SIRM) [J]. Atmospheric Environment, 2012, 55:111-120.
- [40] 阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 等. 阿克苏市5种常见绿化树种滞尘规律[J]. 植物生态学报, 2014, 38(9):970-977.
- [41] 竹涛, 李冉冉, 李笑阳, 等. 北京市道路扬尘时空变化特征的研究[J]. 环境污染与防治, 2016, 38(12):38-42.
- [42] 王成, 郭二果, 郟光发. 北京西山典型城市森林内PM<sub>2.5</sub>动态变化规律[J]. 生态学报, 2014, 34(19):5650-5658.
- [43] 陈俊刚, 毕华兴, 许华森, 等. 北京市道路防护林带内外PM<sub>2.5</sub>质量浓度特征及与气象要素的相关性[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(3):1-8.

(责任编辑:崔贝)