

# 北京市典型道路防护林滞尘时空分布及其 影响因素分析

马远<sup>1</sup>, 贾雨龙<sup>2</sup>, 王成<sup>1\*</sup>, 杜万光<sup>3</sup>, 刘文军<sup>4</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 国家林业局城市森林研究中心 北京 100091;  
2. 北京市通州区园林绿化局, 北京 101149; 3. 北京市园林绿化局, 北京 100013; 4. 北京市海淀区气象局, 北京 100080)

**摘要:** [目的] 研究北京海淀区3种道路防护林(油松林、圆柏林、银杏林)的滞尘能力、林内滞尘的空间分布规律、滞尘作用与气象因子和PM<sub>10</sub>浓度的相关性。[方法] 滞尘量的测定用单位叶干质量滞尘量(mg·g<sup>-1</sup>)表征叶面滞尘能力。于冬、春、夏、秋4季对3种道路防护林内距道路不同距离处的滞尘量进行连续观测, 比较3种道路防护林滞尘能力, 分析3种道路防护林滞尘的空间分布特征及降雨等气象因子及PM<sub>10</sub>浓度与滞尘作用的相关性。[结果] (1) 3种道路防护林总体单位滞尘量圆柏林(4.20±0.19 mg·g<sup>-1</sup>) > 银杏林(1.98±0.07 mg·g<sup>-1</sup>) > 油松林(1.71±0.07 mg·g<sup>-1</sup>); 油松和圆柏林的单位滞尘量冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季, 银杏林的单位滞尘量春季和秋季基本无差异, 夏季最低; 3种道路防护林的单位滞尘量在各季节均为圆柏林最高, 银杏林次之, 油松林最低。(2) 3种道路防护林空间分布的总体特征为: 油松和圆柏林的滞尘空间分布均表现为“两端高、中间低”, 银杏林单位滞尘量林分中间位置略高于两侧; 不同季节表现为冬季北侧高, 春季南侧高, 夏、秋季南北侧差异不显著。(3) 降水量对3种道路防护林滞尘作用影响最大, 是3种道路防护林滞尘的最主要限制因子, 极大风速、气温、相对湿度和PM<sub>10</sub>浓度对3种道路防护林滞尘均具有不同程度的正的直接作用。[结论] 在相同配置模式(5 m×5 m)及林龄(18年)下, 林地尺度滞尘量油松林最大、圆柏林次之、银杏林最低。道路防护林迎风一侧往往具有较高滞尘量, 可根据盛行风向强化迎风侧的树木配置。降雨是树木滞尘的主要限制因子, 冬季和春季降雨少, 树木滞尘量较大, 可结合人工冲洗措施使其发挥更大滞尘作用。

**关键词:** 道路防护林; 滞尘; 动态变化; 空间分布

中图分类号: S727.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)05-0110-08

## Spatio-temporal Distribution and Impact Analysis on Dust-retention Effect of Typical Road Protection Forests in Beijing

MA Yuan<sup>1</sup>, JIA Yu-long<sup>2</sup>, WANG Cheng<sup>1</sup>, DU Wan-guang<sup>3</sup>, LIU Wen-jun<sup>4</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry; Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration; Urban Forest Research Center, State Forestry Administration, Beijing 100091, China;  
2. Beijing Tongzhou District Landscaping Bureau, Beijing 101149, China; 3. Beijing Gardening and Greening Bureau, Beijing 100013, China; 4. Beijing Haidian District Meteorologic Bureau, Beijing 100080, China)

**Abstract:** [Objective] To study the dust-retention ability, spatial distribution characteristics and the relevance with meteorological and PM<sub>10</sub> condition in three kinds of road protection forests (*Pinus tabulaeformis* forest, *Sabina chinensis* forest and *Ginkgo biloba* forest). [Method] The dust-retention amount was determined by gravimetric method and using dust-retention amount per unit dry weight (mg·g<sup>-1</sup>) to express the leaf dust-retention capacity.

收稿日期: 2017-03-09 修回日期: 2018-07-03

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目“美丽城镇森林景观的构建技术研究与示范”(编号:201404301)

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.

From winter to autumn, the three kinds of road protection forests were observed continuously from different distance of the road, and the dust retention ability of these road protection forests was compared. The relevance between dust-retention effect and rainfall, wind speed, relative humidity,  $PM_{10}$  and spatial distribution characteristics of dust retention of three kinds of road protection forests was analyzed too. [ **Result** ] (1) The dust retention ability among the three tree species was *S. chinensis* > *G. biloba* > *P. tabulaeformis*, which were  $4.20 \pm 0.19 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $1.98 \pm 0.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,  $1.71 \pm 0.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , respectively. The dust amount of *P. tabulaeformis* and *S. chinensis* forest showed a characteristic of winter > spring > autumn > summer; there was no significant difference in the dust amount of *G. biloba* between spring and autumn, and summer was the lowest season; the dust-retention ability of 3 kinds of road protection forests in four seasons all showed *S. chinensis* > *G. biloba* > *P. tabulaeformis*. (2) The spatial distribution of the 3 kinds of road protection forests are as follows: the spatial distribution of dust in *P. tabulaeformis* and *S. chinensis* forest was “high at both ends and low in the middle”, and the middle position of *G. biloba* forest was slightly higher than the both sides. The spatial distribution of different seasons showed that: north side was higher in winter, south side was higher in spring, and no significant differences in the north and south sides in spring and autumn. (3) The precipitation was the most negative factor to dust-retention, while the wind speed, temperature, relative humidity and  $PM_{10}$  had positive direct effect to dust-retention. [ **Conclusion** ] Under the same configuration mode (5 m × 5 m) and stand age (18 years), *Pinus tabulaeformis* forest had the largest dust-retention ability, followed with *Sabina vulgaris* and *Ginkgo biloba* forest. Winward side always had more dust-retention amount, so configuration of winward trees should be optimized. Precipitation was the most negative factor to dust-retention, and in winter and spring, which caused more dust-retention amount in winter and spring forest, and artificial rinsing measures could be taken to exert more 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>。目前已有许多学者针对城市森林的滞尘效益开展了相关研究,主要集中于植物叶面滞尘能力对比<sup>[4-6]</sup>、植物滞尘机理研究<sup>[7-9]</sup>、滞尘成分分析<sup>[10-11]</sup>等方面,取得了许多研究成果,但以往研究多着眼于叶面尺度,对林分尺度的滞尘特性研究相对匮乏。

道路防护林是城市森林的重要组成部分<sup>[12]</sup>,对主要由汽车尾气引起的颗粒物污染有较好的防护作用。本文以北京市3种具有代表性的道路防护林为研究对象,对其滞尘动态变化及滞尘空间分布规律进行研究,旨在探索不同道路防护林的滞尘特性,以期今后道路防护林的营建提供参考。

## 1 研究方法

### 1.1 采样点分布

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,研究地

3种道路防护林(油松林、圆柏林、银杏林)均为人工纯林,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>,林分特征及采样点分布同文献[13]。

### 1.2 采样与分析方法

采样方法、叶片处理方法、植物绿量计算方法及单株、单位林地面积滞尘量计算方法同文献[13]。

1.2.1 采样时间 采样于2015年冬季(2015年12月—2016年1月)和2016年春季(4—5月)、夏季(8月)、秋季(10月)进行(表1),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。由于银杏秋季落叶,仅在春季、夏季及秋季黄叶之前进行采样。

1.2.2 区域气象数据和  $PM_{10}$  浓度数据收集 从中国气象数据网<sup>[14]</sup>获取距研究地最近的海淀区气象站在采样期间的相关气象数据,包括气温、降水、风速、风向、相对湿度等数据;从北京市空气质量发布平台网站<sup>[15]</sup>获取采样期间海淀区的每日  $PM_{10}$  浓度数据。(表1)

1.2.3 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LSD

表1 采样期间的天气状况和 PM<sub>10</sub> 浓度Table 1 Weather and PM<sub>10</sub> condition during sampling

季节 Season	采样日期 Date	气温 Temperature/°C	风速 Wind speed /(m·s <sup>-1</sup> )	降水 Precipitation /mL	相对湿度 Relative humidity /%	PM <sub>10</sub> /(μg·m <sup>-3</sup> )
冬季 Winter	2015-12-11—2016-01-14	-1.93 ± 1.68	1.44 ± 0.35	2次, 2.50	54.58 ± 17.11	141.16 ± 95.62
春季 Spring	2016-04-22—2016-05-27	19.93 ± 2.19	1.66 ± 0.23	4次, 46.70	46.42 ± 11.29	87.39 ± 30.02
夏季 Summer	2016-08-01—2016-08-29	27.04 ± 2.17	1.12 ± 0.18	6次, 55.70	68.16 ± 8.62	60.14 ± 16.84
秋季 Autumn	2016-10-13—2016-10-26	13.07 ± 2.99	0.83 ± 0.16	1次, 13.40	79.63 ± 4.55	123.84 ± 76.98

法进行多重比较。所有统计分析均采用 SPSS 19.0 (SPSS, IBM, USA) 软件, 差异显著性水平设为 0.05。

## 2 结果

### 2.1 3种道路防护林滞尘能力对比

2.1.1 3种道路防护林滞尘能力 (1) 总体滞尘能力 3种道路防护林总体单位滞尘量圆柏林(4.20 ± 0.19 mg·g<sup>-1</sup>) > 银杏林(1.98 ± 0.07 mg·g<sup>-1</sup>) > 油松林(1.71 ± 0.07 mg·g<sup>-1</sup>), 其中油松林和银杏林总体单位滞尘量差异不显著, 圆柏林总体单位滞尘量明显高于其它两种林分, 差异极显著(P < 0.001)(图1)。

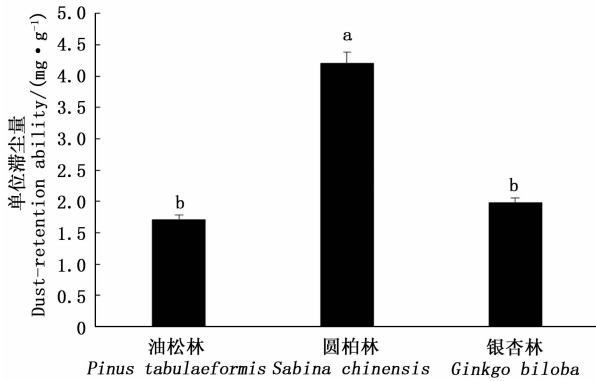


图1 3种道路防护林总体滞尘能力

Fig. 1 Average unitage dust-retention ability of 3 forests

(2) 不同季节单位滞尘量 油松和圆柏林均有冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的特征, 其中油松林冬季

显著高于其它季节, 春、秋季差异不显著, 圆柏林四季单位滞尘量均有显著差异; 银杏林的单位滞尘量春季和秋季基本无差异。3种道路防护林单位滞尘量夏季均显著低于其它季节。3种道路防护林的单位滞尘量在各季节均为圆柏林最高, 银杏林次之(不含冬季), 油松林最低, 且均显著低于圆柏和银杏林; 圆柏仅春季显著高于银杏林, 夏、秋两季与银杏林差异不显著。(图2、表2)

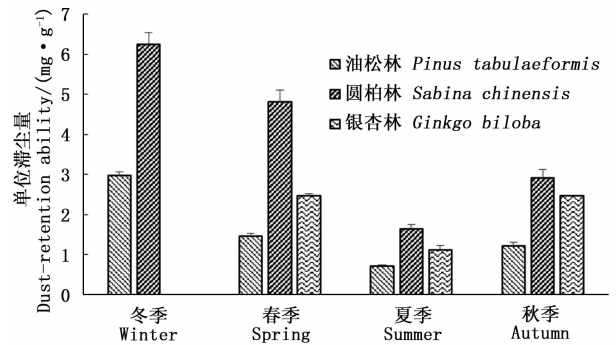


图2 3种道路防护林不同季节滞尘能力

Fig. 2 Unitage dust-retention ability of 3 forests in different seasons

2.1.2 单株和单位林地面积滞尘能力 单株滞尘量和单位林地面积滞尘量的总体值均为油松林 > 圆柏林 > 银杏林; 不同季节3种道路防护林的单株和单位林地面积滞尘量排序有所不同, 冬、夏、秋季为油松林 > 圆柏林 > 银杏林, 春季则为圆柏林 > 油松林 > 银杏林(表2)。

表2 3种道路防护林叶面、单株、单位林地面积滞尘能力的对比

Table 2 Comparison of plant scale and unit area scale dust-retention ability among 3 forests

	单株滞尘能力 Plant scale dust-retention ability/g			单位林地面积滞尘能力 Unit area dust-retention ability/(kg·hm <sup>-2</sup> )		
	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	圆柏林 <i>Sabina chinensis</i>	银杏林 <i>Ginkgo biloba</i>	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	圆柏林 <i>Sabina chinensis</i>	银杏林 <i>Ginkgo biloba</i>
总体 Total	47.44	44.98	10.43	18.98	17.99	4.17
冬季 Winter	82.78	67.01	-	33.11	26.80	-
春季 Spring	39.47	51.36	13.05	15.79	20.54	5.22
夏季 Summer	19.97	17.65	5.90	7.99	7.06	2.36
秋季 Autumn	33.95	31.24	13.05	13.58	12.50	5.22

## 2.2 3种防护林滞尘的空间分布

2.2.1 总体分布情况 如图3所示,圆柏林内各位置单位滞尘量均明显高于油松和银杏林。此外,油松和圆柏林的滞尘空间分布均表现为“两端高、中间低”的模式,即从香山路到五环路单位滞尘量为先下降后升高,其中圆柏林两端单位滞尘量显著高于中间位置,呈明显的“U”形分布,而油松林内各位置并无显著差异;银杏林单位滞尘量林分中间位置略高于两侧,各位置均无显著差异。

2.2.2 不同季节分布情况 总体来说,各季节单位滞尘量的空间分布与年总体分布情况类似(图4),

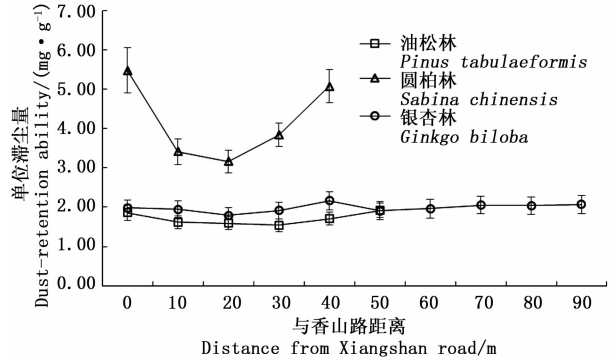


图3 3种道路防护林单位滞尘量的总体空间分布  
Fig.3 Annual unitage dust-retention amount spatial distribution of 3 forests

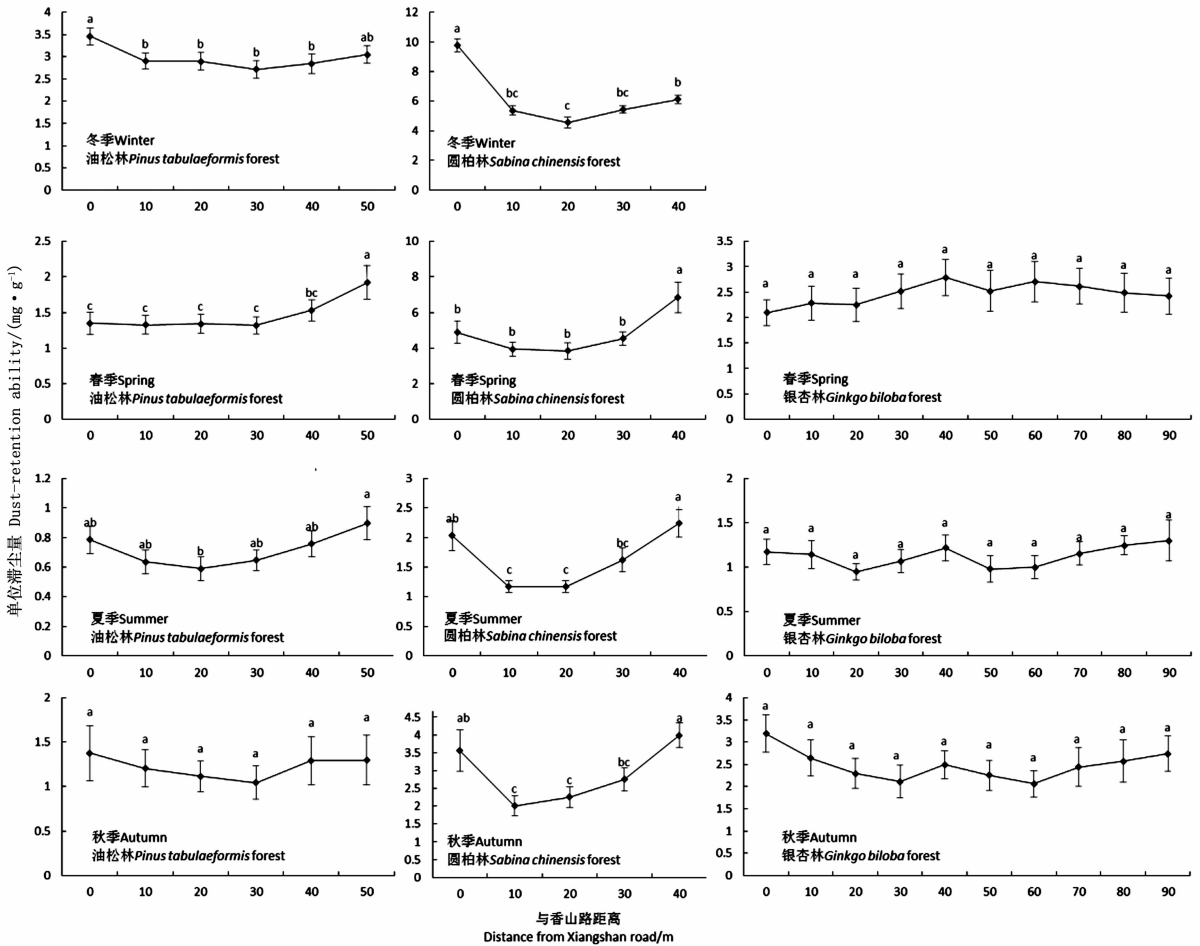


图4 3种道路防护林内单位滞尘量各季节的空间分布特征

Fig.4 Unitage dust-retention amount spatial distribution of 3 forests in dirrenent seasons

油松和圆柏林内均呈现出“两头高,中间低”的趋势,即从香山路侧到五环路侧,单位滞尘量先降低后升高,低点均位于林分中间位置前后;各季节银杏林内各位置单位滞尘量均无显著差异。但不同季节3种道路防护林内各位置单位滞尘量的分布特征仍有不同特点:

(1)冬季 油松和圆柏两种林分内单位滞尘量

均为距香山路0 m处(北)最高,五环路侧(南)为单位滞尘量的次高点。从香山路到五环路单位滞尘量先是降低,在林分中间的30 m、20 m处降至最低点后缓慢升高,两种林分两端单位滞尘量均显著高于低点。

(2)春季 油松和圆柏两种林分从香山路(北)到五环路(南),单位滞尘量也是先降低后升高,但

与冬季不同的是,这2种林分的单位滞尘量均为五环路(南)最高,显著高于香山路(北)侧,距香山路0 m处(北)与林分中间其它位置差异均不显著。银杏林内各位置的单位滞尘量则呈现出中间高于两端的特征,五环路侧(南)的70、80、90 m处均高于香山路侧(北)的0、10、20 m,但林内各位置之间差异均不显著。

(3)夏季 3种道路防护林内单位滞尘量五环路侧(南)均略微高于香山路侧(北),但均无显著差异。油松和圆柏林从香山路(北)到五环路(南)依然有明显的先降低后升高趋势;银杏林则呈现出“W”形分布特征,两侧和中间为高点。

(4)秋季 油松和圆柏林内各位置的单位滞尘量从香山路(北)到五环路(南),仍是先降低再升

高,油松林各位置差异均不显著,圆柏林两端显著高于中间位置;银杏林内各位置单位滞尘量差异均不显著,和夏季相同呈现出“W”形分布,不同的是林分两端单位滞尘量明显高于中间位置。

### 2.3 3种防护林滞尘量与区域气象条件的关系分析

道路防护林的滞尘作用除了与林分自身的树种、空间结构等有关外,还受多种外界因素共同影响,气象因子和空气颗粒物浓度是重要的影响因素。通过对每次采样前后3种道路防护林单位滞尘量的变化率和极大风速( $x_1$ )、降水量( $x_2$ )、气温( $x_3$ )、相对湿度( $x_4$ )和 $PM_{10}$ ( $x_5$ )浓度5个因子进行通径分析,得出以下关系(见表3)。

表3 各因子对3种道路防护林滞尘的相关性及通径作用

Table 3 Path analysis and correlation analysis of factors affecting dust-retention of 3 forests

因子 Factor	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>		圆柏林 <i>Sabina chinensis</i>		银杏林 <i>Ginkgo biloba</i>	
	简单相关系数 Correlation coefficient	通径系数(直接作用) Path coefficient	简单相关系数 Correlation coefficient	通径系数(直接作用) Path coefficient	简单相关系数 Correlation coefficient	通径系数(直接作用) Path coefficient
$x_1$	0.012 0	0.052 0	-0.155 6	0.120 7	0.104 5	0.166 5
$x_2$	-0.844 8	-0.905 6	-0.668 6	-0.815 9	-0.881 7	-0.879 2
$x_3$	-0.021 1	0.208 3	-0.005 8	0.088 2	0.143 9	0.122 6
$x_4$	-0.214 9	0.029 5	0.017 0	0.370 5	-0.317 1	0.053 1
$x_5$	0.093 7	0.006 2	0.101 4	0.127 4	0.166 3	0.068 2

表3结果表明,极大风速( $x_1$ )、降水量( $x_2$ )、气温( $x_3$ )、相对湿度( $x_4$ )、 $PM_{10}$ 浓度( $x_5$ )5种气象因子对于油松林滞尘的直接作用依次为:降水量(-0.905 6) > 气温(0.208 3) > 极大风速(0.052 0) > 相对湿度(0.029 5) >  $PM_{10}$ 浓度(0.006 2);对于圆柏林滞尘的直接作用依次为:降水量(-0.815 9) > 相对湿度(0.370 5) >  $PM_{10}$ 浓度(0.127 4) > 极大风速(0.120 7) > 气温(0.088 2);对于银杏林滞尘的直接作用依次为:降水量(-0.879 2) > 极大风速(0.166 5) > 气温(0.122 6) >  $PM_{10}$ 浓度(0.068 2) > 相对湿度(0.053 1)。

## 3 讨论

### 3.1 3种道路防护林滞尘能力

不同植物叶片滞尘能力具有很大差异,可达2~3倍以上<sup>[3]</sup>。王会霞认为银杏叶表疏水蜡质及其特殊的表面结构使其具有“自洁性”<sup>[16]</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>[17]</sup>;此外,也有学者发现叶面积较小的植物具有较高滞尘能

力<sup>[18]</sup>;本课题组在调查中发现,圆柏细小的轮生刺叶所形成的空间结构中常有大量灰尘附着,其枝叶结构也对圆柏林单位滞尘量有所贡献。

3种道路防护林的单位滞尘量在不同季节具有较大差异。气候条件、大气污染程度、周围环境等因素均是植物滞尘作用季节差异的重要原因<sup>[2]</sup>。从采样期间的天气情况来看,冬季干燥少雨、风速较大,易产生扬尘;夏季空气湿度大且降雨频繁、雨量大、空气湿润,不易产生扬尘,在降雨冲刷作用下单位滞尘量较低。此外,林下地被植物可有效抑制地表扬尘的作用<sup>[19]</sup>,冬季林下草本植物枯落,抑尘能力大幅减弱也是造成冬、夏季滞尘能力差异的重要因素。

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,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。结果显示该研究地3种道路防护林总体单株滞尘量和单位林地面积滞尘量均为油松 > 圆柏 > 银杏,这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开绿量,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今后进一步研究。

### 3.2 3种防护林滞尘的空间分布

树木滞尘量与距污染源的距离有关。Mori 研究发现北美云杉和樟子松两种林分的滞尘量随着和高速公路距离的增加而呈现出降低趋势<sup>[20]</sup>,陈玮发现机动车道与自行车车道的圆柏滞尘量大于自行车与人行道车道的,甚至单株的滞尘量在靠近街道方向也明显高于背离街道方向<sup>[21]</sup>,说明植物的滞尘能力与污染源距离有关,越靠近污染源,滞尘量越高。本研究中3种道路防护林两侧为香山路和五环路均有较高车流量,是主要污染源来源,油松和圆柏林滞尘量低点均位于林分中间位置,这和中间位置距离两侧道路均较远,受外源污染程度较低有关。

树木滞尘与距污染源的垂直距离也有关系。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>[22]</sup>;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,浓度随着高度增加变化不大<sup>[23]</sup>,说明了随着垂直高度的增大,颗粒物分布趋向于更均匀。本研究中,油松和圆柏两种道路防护林滞尘量冬、春季在五环路和香山路两端均有显著差异,而银杏林各位置间差异均不显著,这可能因为其树冠位置较高,林冠上层颗粒物分布较平均。此外银杏林林下疏透度较高,低位的颗粒物易在林分中扩散,使整个冠层接受降尘量无显著差异。

银杏林相对于油松和圆柏林,冠层郁闭度较高。王成研究发现林分郁闭度较高时林内颗粒物难以扩散<sup>[24]</sup>;陈俊刚研究发现五环路旁毛白杨防护林内PM<sub>2.5</sub>浓度在林分中的分布呈抛物线状,中间位置浓度最高<sup>[25]</sup>,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,均不能够有效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单位滞尘量较高的原因。

此外,本研究中3种道路防护林单位滞尘量的

空间分布还具有季节差异。冬季油松和圆柏林的单位滞尘量分布均为香山路侧(北)显著高于其它位置,而春季均为五环路侧(南)显著高于其它位置。这种现象可能与风力有关,研究发现,在一定范围内随着风速升高,植物的滞尘作用加强<sup>[26-28]</sup>。而道路防护林的防风作用使林内各位置受风力影响不同,除去极端大风天气之外,林分的迎风面应更有利于滞尘,采样期间冬季盛行北风,春季风向变化频繁,以南风为主,这可能是油松和圆柏林单位滞尘量冬季北侧高,春季南侧高的原因,银杏林在春季也微弱表现出了南侧高北侧低的趋势。夏、秋季3种道路防护林各位置除秋季圆柏林两端与中间位置有显著差异外其余均不显著,可能是因为空气湿度大,不易产生扬尘,风力较小,林分外侧接受扬尘量降低的原因。银杏林春季与夏、秋季的差异在于春季为中间高两端低,夏、秋季两端与中间形成了3个高点,可能是因为银杏林树冠高,林下空间疏透,春季天气干燥多风,加之地被草本植物尚未生长繁茂,极易产生土壤扬尘,夏、秋季林下地表湿润,且地被草本植物长势较好,从而有效抑制了林内土壤扬尘,3季节林内中间位置的高点可能是由于银杏林冠层几乎完全郁闭,林内扬尘难以扩散出去的原因。

### 3.3 3种防护林滞尘量与区域气象条件的关系

(1)气温 气温对3种道路防护林滞尘的直接作用均表现为促进,原因可能是气温升高时植物的蒸腾作用随之加强,蒸腾作用会使植物叶表更加润湿,从而有利于滞尘<sup>[29]</sup>,但主要由于降雨对气温的降低作用使气温的简单相关系数较低,甚至出现了负相关的现象。

(2)降水量 降雨量对3种道路防护林的滞尘均表现为明显的负影响,是3种道路防护林滞尘的最主要限制因子。这说明了降雨对于植物滞尘能力再生的重要意义,因此,在降雨较少的地区或时段,对道路防护林进行人工冲洗是保持其滞尘能力的重要手段。

(3)风速 极大风速对3种道路防护林滞尘的影响也具有明显不同。其直接作用对3种道路防护林的滞尘作用均有促进。由于极大风速与相对湿度为显著负相关,其与相对湿度的共同作用往往具有相反的间接作用。3种道路防护林中极大风速对银杏林滞尘的促进作用最为明显,可能是由于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。

(4)相对湿度 相对湿度对油松林滞尘的直接作用不明显,但对圆柏林和银杏林的滞尘有明显的直接正作用。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>[30]</sup>;包红光研究发现  $PM_{2.5}$  浓度与空气相对湿度呈极显著正相关<sup>[31]</sup>;王会霞认为相对湿度的增加使植物叶片更加润湿,对于提高植物滞尘能力是有利的<sup>[29]</sup>。在本研究中油松和银杏林滞尘与相对湿度的简单相关关系均呈现出负相关,主要原因是相对湿度与极大风速的负相关关系产生的相反间接作用。

(5) $PM_{10}$ 浓度  $PM_{10}$ 浓度对3种道路防护林滞尘直接影响均体现为正效应,但影响程度不高。 $PM_{10}$ 是道路防护林滞尘的重要来源,研究发现,植物叶片表面灰尘中, $PM_{10}$ 占绝大部分比例<sup>[32]</sup>;Mori 研究发现高速公路防护林的滞尘量分布特征和  $PM_{10}$  浓度相关性较高<sup>[33]</sup>,但  $PM_{10}$ 由于与极大风速之间的强烈负相关作用,间接效果导致  $PM_{10}$ 对滞尘量的变化影响较低。

## 4 结论

(1)3种道路防护林总体滞尘能力圆柏林( $4.20 \pm 0.19 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) > 银杏林( $1.98 \pm 0.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) > 油松林( $1.71 \pm 0.07 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),圆柏林显著高于油松和银杏林。油松和圆柏林的单位滞尘量均有冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的特征,银杏林的单位滞尘量春季和秋季基本无差异,夏季最低。

(2)3种道路防护林空间分布的总体特征为:油松和圆柏林的滞尘空间分布均表现为“两端高、中间低”,银杏林单位滞尘量林分中间位置略高于两侧。3种道路防护林的单位滞尘量林分内部分布特征不同季节表现为冬季北侧高,春季南侧高,夏、秋季各位置差异不显著。

(3)对3种道路防护林叶面滞尘与气象因子之间进行关系分析,结果表明降水量对3种道路防护林滞尘作用影响最大,是3种道路防护林滞尘的最主要限制因子,极大风速、气温、相对湿度和  $PM_{10}$  浓度对3种道路防护林滞尘均具有不同程度的直接作用。

## 参考文献:

[1] 郭二果,王成,郟光发,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:自然科学版, 2013, 28(6):905-912.
- [5] 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.
- [6] 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(3):57-64.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 张志丹,席本野,曹治国,等. 植物叶片吸滞  $PM(2.5)$  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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 马远,贾雨龙,王成,等. 北京市3种道路防护林春季滞尘规律研究[J]. 林业科学研究, 2018, 31(2):147-155.
- [14] 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]
- [15] 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]
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王成,郟光发,彭镇华. 有机地表覆盖物在城市林业建设中的应用价值[J]. 应用生态学报, 2005, 16(11):2213-2217.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 王成, 郭二果, 鄯光发. 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.
- [25] 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.
- [26] Ould-Dada Z, Baghini N M. Resuspension of small particles from tree surfaces[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(22):3799-3809.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 包红光, 王成, 鄯光发, 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.
- [32] 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.
- [33] 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.

(责任编辑:崔 贝)