

DOI: 10.5846/stxb201306051356

王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化. 生态学报, 2015, 35(6): 1696-1705.

Wang H X, Shi H, Wang Y H. Dynamics of the captured quantity of particulate matter by plant leaves under typical weather conditions. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6): 1696-1705.

典型天气下植物叶面滞尘动态变化

王会霞^{1,2}, 石 辉^{2,*}, 王彦辉¹

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

2 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055

摘要:在天气变化频繁的春季选择了几种典型天气观测了油松、女贞、珊瑚树和三叶草叶面滞尘动态变化及其与气象因子和空气中颗粒物浓度的关系。研究表明:(1)供试物种的叶面滞尘量(g/m^2)由大到小依次为油松(4.57—5.45),珊瑚树(2.23—5.85),女贞(2.14—4.27)和三叶草(0.12—0.38);(2)油松和三叶草叶面滞尘量无明显变化,而天气状况对女贞和珊瑚树叶面滞尘影响明显;(3)连续2d(17.1、14.8 mm)的降雨后,女贞和珊瑚树叶面滞尘量降低了50%以上;极大风速对女贞和珊瑚树叶面滞尘量的影响均呈现先升高后降低,在极大风速为14 m/s时达到峰值;相对湿度大于80%时,女贞和珊瑚树叶面滞尘量明显降低;空气中高浓度的颗粒物可使女贞和珊瑚树叶面滞尘在4—5 d达到饱和。

关键词:叶面润湿性;叶面微结构;滞尘效应;大气颗粒物;动态变化

Dynamics of the captured quantity of particulate matter by plant leaves under typical weather conditions

WANG Huixia^{1,2}, SHI Hui^{2,*}, WANG Yanhui¹

1 The Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

Abstract: The dynamics of particulate matter (PM) deposition and subsequently cleaning of the leaves during the season are probably greatly affected by weather conditions, such as precipitation, wind and extraneous dust storm. Such information is necessary for determining total PM deposition during a season or year. It may also be important in designing the surface of the ground under vegetation, which should be adapted to increase deposition and immobilization of pollutants and prevent further re-suspension. In a study carried out in spring under typical weather conditions (e.g., continuous sunny day, medium-rainfall, small rainfall, strong wind, extraneous dust storm), the ability of four plant species including *Pinus tabulaeformis*, *Ligustrum lucidum*, *Viburnum odoratissimum*, and *Trifolium repens* to accumulate PM from ambient air in urban area was investigated. The effects of rainfall, relative humidity, maximum wind speed and PM_{10} (particulate matter with an aerodynamic diameter less than $10\text{ }\mu\text{m}$) concentrations on PM deposition on foliage were also determined. The results showed that the amount of PM accumulated on leaves (g/m^2) differed considerably between plant species, and decreased in this order: *P. tabulaeformis* (4.57—5.45) > *V. odoratissimum* (2.23—5.85) > *L. lucidum* (2.14—4.27) > *T. repens* (0.12—0.38). The amount of PM accumulated on leaves of *P. tabulaeformis* and *T. repens* remained relatively constant in the whole spring. The species like *P. tabulaeformis* can emit sticky materials and makes the particulate matters hard to be removed by precipitation and wind. While the leaves of *T. repens* has water repellency characteristics and makes the

基金项目:国家林业局公益性行业科研专项(201304301-05)

收稿日期:2013-06-05; 网络出版日期:2014-07-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shihui06@126.com

particulate matters hard to be captured. Among the species analyzed, precipitation and wind removed a considerable proportion of PM accumulated on leaves of *V. odoratissimum* and *L. lucidum*. A decrease in the amount of PM accumulated on leaves was observed after two days of medium-rainfall (17.1, 14.8 mm) for *V. odoratissimum* (62%) and *L. lucidum* (50%), compared with the maximum values observed. Moreover, a decrease of about 30% in the amount of PM deposition was found after light rain and strong wind for *L. lucidum*. With the increase of the maximum wind speed, the PM retention amounts of *L. lucidum* and *V. odoratissimum* firstly increased and then decreased, and the peak value was reached at a maximum wind speed of 14 m/s. The influence of relative humidity on leaf PM retention amount only occurred when its value over 80%, leading to a decrease in leaf PM retention amount. The saturation of PM storage capacity of leaves of *L. lucidum* and *V. odoratissimum* could occur in four to five days in a heavily polluted condition. These results showed that both, the dynamics of deposition and PM removal by rain and wind during the season need to be considered when evaluating the total and actual effect of vegetation in pollutant remediation.

Key Words: leaf surface wettability; leaf surface micromorphology; dust capturing effect; particulate matter; dynamic variation

经济和城市化的迅速发展使城市空气中颗粒物、有毒有害气体等日趋增多,其中颗粒物污染已成为主要的城市环境问题之一。颗粒物因其影响大气能见度、产生光化学烟雾、加剧温室效应^[1-2],而且含有重金属、细菌、病毒、PAHs 等致癌物质严重影响人民健康^[3],已经成为国内外公众、政府和学者共同关注的重要问题。为了有效降低城市空气中的颗粒污染物和提高人居环境质量,各级政府大力营造城市森林,通过森林表面积巨大的叶片和枝干来滞尘、吸尘等发挥其滞尘效应。

城市植被对颗粒污染物的滞留已成为研究的热点^[4-9]。京西门头沟自然植被的年滞尘量可达 $39.47 \times 10^4 \text{ t}^{[4]}$ 。英国大伦敦地区的城市植被能降低 0.7%—2.6% 的可吸入颗粒物(PM_{10})^[5]。美国城市植被年滞留 PM_{10} 的量高达 $21.49 \times 10^4 \text{ t}^{[6]}$ 。在国内,也有学者关注不同植物单位叶面积/叶重的滞尘量以及年滞尘量^[7-9]。广州市 18 种行道树的滞尘量在 0.066—1.831 g/m^2 ^[7],其中大叶榕(*Ficus virens* var. *sublanceolata*)、小叶榕(*Ficus microcarpa*)、红花羊蹄甲(*Bauhinia blakeana*)和芒果(*Mangifera indica*)4 种乔木年滞尘量可达 8013 t^[8]。惠州建成区大叶榕、小叶榕、高山榕(*Ficus altissima*)和红花羊蹄甲单位叶面积的滞尘量分别为 0.98、0.75、0.64 和 0.41 g/m^2 ,年滞尘量为 4431 t^[9]。这些研究对植被的滞尘作用与效果提供了大量的量化数据,但大多为模拟或在特定时间(生长季中或生长季末)测定或计算所得。在实际环境中,受降雨、大风、沙尘等天气状况的影响,植物叶面滞尘量将发生变化^[10-11],因此这些数据在应用到具体规划设计及量化区域和时间尺度上的植被滞尘效应上时,其可操作性就显得较差了。因此,如何在综合考虑天气状况的影响下量化植被滞留大气颗粒物的作用就成为一个值得进一步研究的课题^[12]。

西安市(北纬 $34^\circ 10' - 34^\circ 25'$, 东经 $108^\circ 47' - 109^\circ 10'$)是典型的北方城市,颗粒物一直是其主要污染物^[13]。油松(*Pinus tabulaeformis*)、女贞(*Ligustrum lucidum*)、珊瑚树(*Viburnum odoratissimum*)和三叶草(*Trifolium repens*)是常见的常绿植物,对大气颗粒物消减尤为重要。本文在天气变化频繁的春季,选择典型天气条件,对 4 种植物动态观测了叶面滞尘量,探讨了天气状况对叶面滞尘的影响。这些研究有助于揭示叶面滞留大气颗粒物的机理和过程,并能为叶面滞尘量化评价提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究材料与样品采集

供试的 4 种植物(油松、女贞、珊瑚树和三叶草)分属 4 个科,其基本性状及第 1 次采样时的叶面接触角见表 1。

考虑到不同天气状况对叶面滞尘的影响,选择的采样日分别为 2010 年 3 月 21 日(连续 6d 晴天)、3 月 27

日(连续 12d 晴天)、4 月 3 日(2.3 mm 雨后 1d)、4 月 10 日(15.2 m/s 大风后 3d,当天 12.1 m/s 大风)、4 月 19 日(8.8 mm 雨后 4d)、4 月 22 日(连续 2d 雨后(17.1、14.8 mm))、4 月 26 日(1.2 mm 雨后 1d、沙尘天气、14.0 m/s 大风)和 5 月 3 日(连续 6d 晴天)。采样地点为紧邻雁塔北路的西安建筑科技大学校园内,在与道路距离相同的位置(约 50 m),每物种选择样树 3—6 株,在树冠不同方位的上、中、下不同部位分别采集叶样;根据叶片大小每株样树采集数量为 50—150 片/簇不等。三叶草则随机选取 40—50 株。用修枝剪剪下带叶枝条,插入装满水的烧杯中,带回实验室内测定叶面的滞尘量、接触角和微结构。

表 1 供试物种的基本性状和第 1 次采样时接触角大小

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

物种 Plant species	科 Family	生活型 Life form	叶习性 Leaf habit	叶型 Leaf type	叶形 Leaf shape	叶序 Phyllo- taxy	叶质 Leaf texture	单叶单 面面积 Single leaf area/cm ²	接触角 Contact angle/(°)	
									正面 Adaxial surface	背面 Abaxial surface
油松 <i>Pinus tabulaeformis</i>	松科	乔木	常绿	针叶	针形, 两针一束	簇生	革质	8.38±0.34 c	58.9±6.0 cA	60.7±7.9 cA
女贞 <i>Ligustrum lucidum</i>	木犀科	乔木	常绿	单叶	卵形至卵状披针形	对生	革质	35.60±10.55 a	69.4±9.3 bA	68.7±8.0 bA
珊瑚树 <i>Viburnum odoratissimum</i>	忍冬科	灌木	常绿	单叶	椭圆形至椭圆状矩圆形	对生	革质	28.30±6.61 b	73.5±5.7 bA	63.0±7.7 cB
三叶草 <i>Trifolium repens</i>	豆科	草本	—	复叶	具三小叶, 小叶倒卵状或倒心形	轮生	纸质	7.72±1.66 c	128.5±5.5 aA	76.3±5.7 aB

不同小写字母表示物种间的多重比较结果在 0.05 水平上差异显著, 不同大写字母表示各物种正背面接触角在 0.05 水平上差异显著

1.2 研究方法

1.2.1 滞尘量测定

滞尘量测定采用重量法^[14]。根据叶片面积大小选择试验叶片数量, 较大叶片及针叶选择 8—10 片/簇, 较小的选择 20—30 片, 每个树种各设 3 个重复。将选取的叶片放入盛有蒸馏水的烧杯中浸泡, 用小毛刷清洗叶片上的附着物, 然后用镊子将叶片小心夹出。浸洗液用已烘干称量(M_0)的微孔滤膜(0.22 μm)过滤, 将滤膜于 60℃ 下烘干至恒重, 再用 0.0001 g 分析天平称量(M_1), 2 次质量之差(M_1-M_0)即为叶片上所附着颗粒物的质量。对于阔叶树, 夹出的叶片晾干后, 置于扫描仪(HP Scanjet G2410, 日本)中扫描, 然后用 Image J (Version 1.40r, National Institutes of Health, USA)图像分析软件计算叶单面面积(S)。对于针叶树, 采用排水法并依据式 $S = 2L(1 + \frac{\pi}{n}) \sqrt{\frac{nV}{\pi L}}$ 计算叶面积^[15]。(M_1-M_0)/ S 即为单位叶面积的滞尘量。两次采样滞尘量的变化量为滞尘量的差值/两次采样时间间隔。

1.2.2 接触角测定

在室温条件下, 用静滴接触角/界面张力测量仪(JC2000C1, 上海中晨科技发展有限公司)分别在 15 片叶片上测定叶片表面与蒸馏水的接触角。已有研究表明, 液滴体积在 1—10 μL 时接触角不受液滴体积的影响^[16]。根据阔叶树和针叶树的叶面积大小, 本研究中液滴体积分别采用 6 μL 和 2 μL 。对于阔叶物种, 同一叶片沿中脉分开, 分别用作正面和背面接触角的测定。选取叶片较平坦的表面并尽量避开叶脉, 制成约 5 mm×5 mm 的样本。对于针叶物种, 制成约 10 mm 长的样本。将待测样本铺平后用双面胶粘于玻璃板上, 置于静滴接触角/界面张力测量仪的载物台上, 然后调节毛细管出水, 在叶面上分别形成约 6 μL 或 2 μL 大小的液滴。利用 CCD 成像后采用量角法测定接触角大小。接触角可以定量描述液体在固体表面上的润湿程度, $\theta < 110^\circ$ 时可润湿, $\theta > 110^\circ$ 时不润湿^[17]。

1.2.3 植物叶面的扫描电镜观察

将采集的叶样制成约 5 mm×5 mm (针叶长度约 10 mm) 的样本,铺平后用导电胶黏贴在扫描电镜载物台上,用 JSM-6510LV 型扫描电子显微镜 (JEOL, Japan) 观察并拍照。

1.3 数据来源

从中国气象科学数据共享服务网收集采样期间逐日降水、极大风速和平均相对湿度^[18] (图 1)。在西安市环境监测站网站获得采样期间空气中 PM₁₀ 数据^[13] (图 1)。

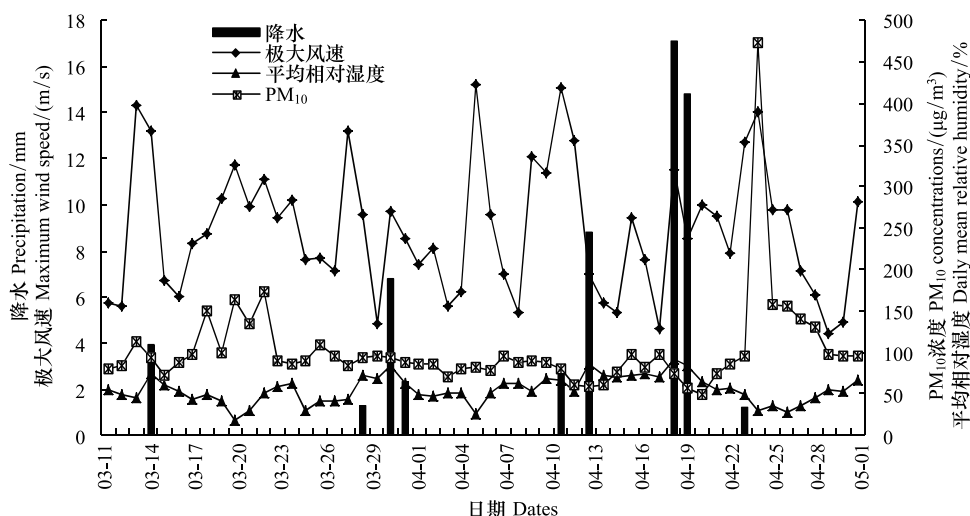


图 1 降水量、极大风速、可吸入颗粒物和平均相对湿度日变化

Fig.1 Diurnal variations of precipitation, maximum wind speed, PM₁₀ and mean relative humidity

1.4 数据处理

对不同物种叶面滞尘量、各物种不同采样时间叶面滞尘量、各物种单叶面积及叶面润湿性的差异,进行单因素方差分析,并用 Student-Newman-Keuls 法进行多重比较。各物种叶正背面润湿性的差异用 *t* 检验。所有统计分析均采用 SPSS19.0 (SPSS, IBM, USA) 软件。差异显著性水平设定为 0.05。

2 结果

2.1 供试植物叶面特征

4 种植物单叶面积、接触角均具有显著差异 (ANOVA, $P < 0.001$), 单叶面积 (cm²) 由大到小依次为女贞 (35.60±10.55) > 珊瑚树 (28.30±6.61) > 油松 (8.38±0.34) > 三叶草 (7.72±1.66)。植物叶片正背面接触角分别变化于: 58.9°—128.5°、60.7°—76.3° (表 1), 其中油松、女贞和珊瑚树叶面易润湿, 仅三叶草叶正面表现出疏水特征^[17]。

2.2 供试植物叶面微结构

油松叶正背面有平行排列的棱, 其间有大量小粒径的颗粒物。粒径较大的颗粒物多沉积在棱上, 有丝状物质将多个颗粒连接在一起而呈积聚态 (图 2a)。女贞叶正面较光滑, 表面被大量颗粒物覆盖; 背面有脊状突起, 在突起间和突起上有少量小颗粒物 (图 2b)。珊瑚树叶正面有大量颗粒物, 少量颗粒物呈积聚态; 背面气孔周围为脊状突起, 有少量颗粒物分布在气孔周围 (图 2c)。三叶草叶正面密被蜡质晶体, 极少有颗粒物; 背面表皮细胞突起, 有少量颗粒物 (图 2d)。女贞、珊瑚树和三叶草叶面上的颗粒物粒径多小于 10 μm, 且大部分小于 2.5 μm (图 2b—d)。

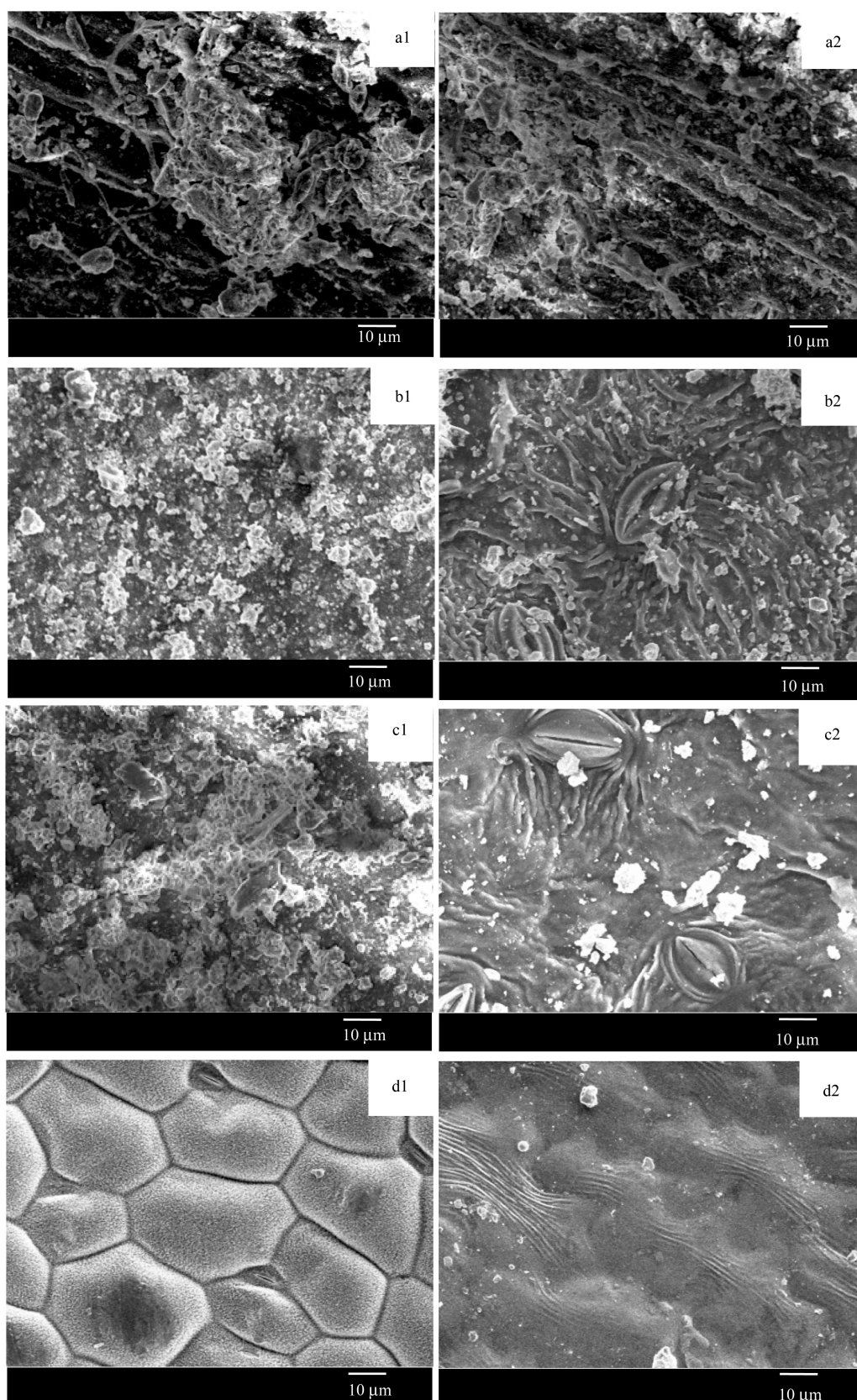


图2 供试植物叶面微结构($\times 1000$; a: 油松, b: 女贞, c: 珊瑚树, d: 三叶草; 1: 正面, 2: 背面)

Fig.2 The surface structure of the selected plant species with a magnification of 1000 (a: *Pinus tabulaeformis*, b: *Ligustrum lucidum*, c: *Viburnum odoratissimum*, d: *Trifolium repens*)

2.3 不同植物叶面滞尘量

4种植物叶面滞尘量具有显著差异(ANOVA, $P < 0.001$, 图3), 变化于 $0.12 \sim 5.85 \text{ g/m}^2$ 。油松叶面滞尘能力最强, 珊瑚树次之, 女贞居三, 而三叶草最小; 叶面滞尘量分别变化于 $4.57 \sim 5.45 \text{ g/m}^2$ 、 $2.23 \sim 5.85 \text{ g/m}^2$ 、 $2.14 \sim 4.27 \text{ g/m}^2$ 和 $0.12 \sim 0.38 \text{ g/m}^2$ (图3)。

2.4 植物叶面滞尘动态

受降雨、大风和沙尘等的影响, 女贞和珊瑚树叶面滞尘量变化明显, 而三叶草和油松叶面滞尘量变化不显著(图3)。4种植物在连续6d和12d晴天情况下, 叶面滞尘量均无明显变化(图3), 因此可代表其滞尘饱和量和量。2.3 mm的降水和 15.2 m/s 的大风使女贞叶面滞尘量降低了约30%(图3); 连续2d(17.1、14.8 mm)的降雨后, 女贞叶面滞尘量降低了约50%; 8.8 mm降水后4d, 女贞叶面滞尘量已恢复了80%以上(图3)。对珊瑚树而言, 仅连续2d的降水导致叶面滞尘量降低了62%(图3)。在1.2 mm降雨后1d的沙尘天气下, 珊瑚树和女贞的叶面滞尘量均达最大(图3)。

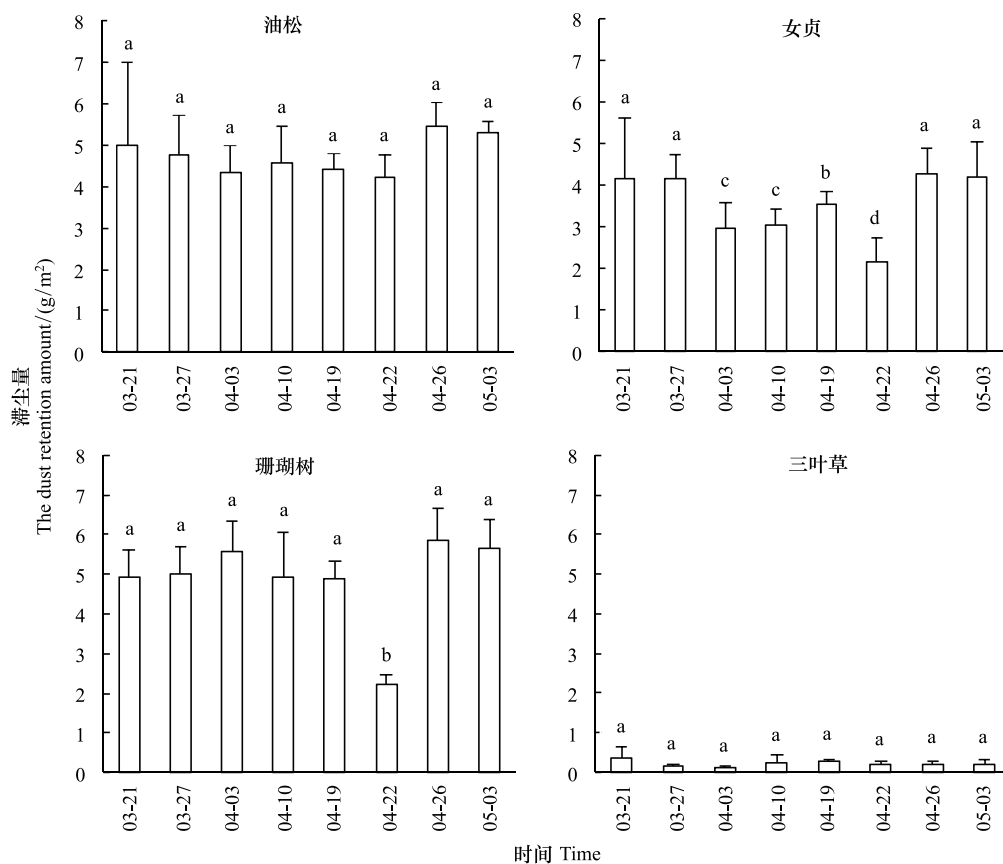


图3 不同采样时间叶滞尘量

Fig.3 Leaf captured dust quantity on different dates

均值±标准差, 不同小写字母表示各物种不同采样时间的多重比较结果在0.05水平上差异显著

2.5 植物叶面滞尘与空气中 PM_{10} 和气象因子的关系

空气中 PM_{10} 浓度高达 $474 \mu\text{g/m}^3$ 的沙尘天气时, 女贞和珊瑚树叶面滞尘量显著升高, 其变化量分别为 0.71 、 $1.21 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 油松叶面滞尘量微弱增加, 其增加量为 $0.41 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 而三叶草叶面滞尘量变化不明显(图4)。降水对油松和三叶草叶面滞尘量影响不明显; 降水量小于12 mm时, 女贞和珊瑚树叶面滞尘量缓慢降低; 随着降水量的增加女贞和珊瑚树叶面滞尘量迅速降低, 其变化量分别为 0.71 、 $1.32 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (图4)。相对湿度大于80%时, 女贞和珊瑚树叶面滞尘量明显降低(图4)。随着极大风速增加, 油松叶面滞尘量呈现为微弱变化, 而女贞和珊瑚树叶面滞尘量均呈现先升高后降低, 在极大风速为 14 m/s 时达到峰值(图4)。

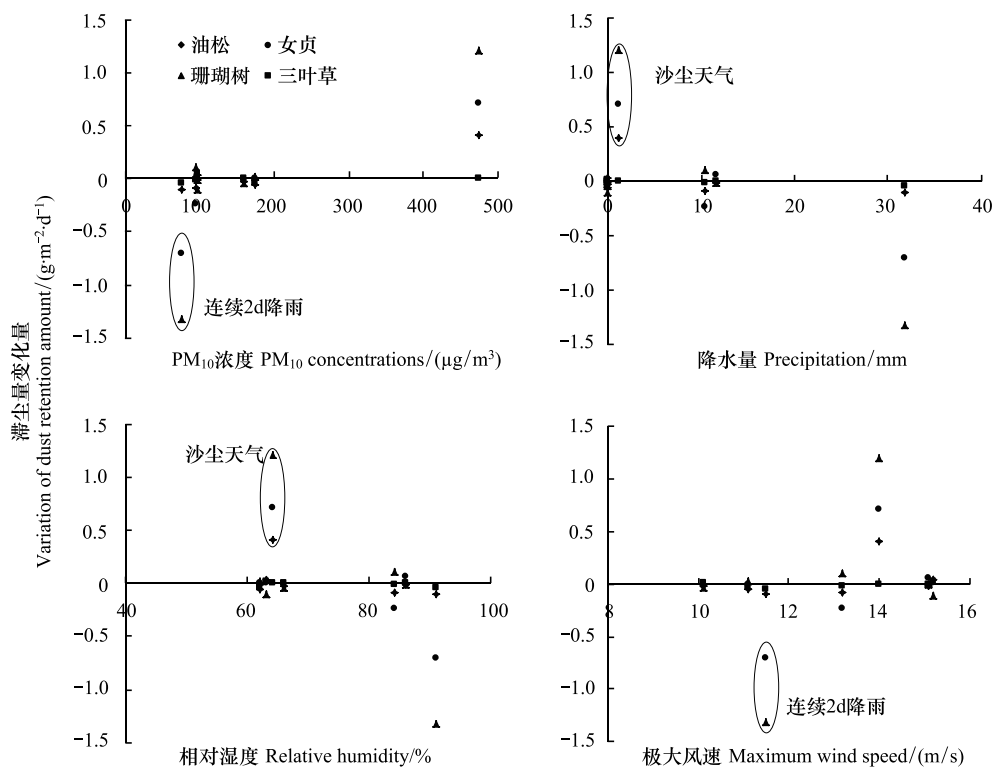


图4 供试植物叶面滞尘量变化量与采样期间降水量、极大风速、相对湿度和空气中 PM_{10} 的关系

Fig.4 The relationships between the variation of dust retention amount and daily precipitation, maximum wind speed, relative humidity and PM_{10} concentrations during the sampling period

3 讨论

3.1 不同物种叶面滞尘量

不同树种的叶面滞尘量受叶面粗糙度、分泌物、枝叶密集程度、叶面倾角、叶质地、颗粒物粒径以及气象条件(如降水、风速、沙尘等)等因素的影响^[7-8, 11, 14, 19]。在相同气象条件下,树种间滞尘能力的差异是由植物叶片的形态结构特征、叶面积等决定的^[7-9, 11]。如果叶子的表面粗糙,具绒毛和沟状脊状突起、粘液油脂和叶柄短等特征,则可吸附大量飘尘颗粒^[20]。而贾彦等^[21]认为叶表粗糙程度对颗粒物的滞留能力与叶表沟状结构的尺寸有关。叶面微结构尺寸对细颗粒物具有筛选作用;沟壑宽度小于或等于粉尘颗粒粒径时,将不会增强植物叶片的滞尘能力。Räsänen 等^[22]模拟测定了欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)、垂枝桦(*Betula pendula*)、欧洲桦(*Betula pubescens*)和欧洲椴(*Tilia vulgaris*)叶片的滞尘能力及叶面特征对其的影响,发现叶小的欧洲赤松具有高的滞尘能力;阔叶植物叶面若具有绒毛、易润湿和气孔密度低则有利于滞留颗粒物。本研究表明,4种植物中叶面积最小且易润湿的油松叶面滞尘量最高,而与其面积相当的三叶草叶面滞尘量最低,这与三叶草叶面的蜡质晶体导致了叶面的疏水特性有关。此外,颗粒污染物与叶表面的接触主要受气相阻力控制^[23];越粗糙的表面,边界层越厚,产生的相邻切变较多,因而气相阻力越大^[24]。边界层厚度的微小差别将影响污染物扩散到植物叶表面的速率,污染物更易从边界层薄的区域进入叶表面^[25]。因此,叶面粗糙度较高的女贞^[26]叶面滞尘量较珊瑚树低。

不同植物叶面的滞尘能力差异也与颗粒物与叶面的作用方式有关。颗粒物在叶面的滞留依赖于其粒径分布,粒径 $< 0.1 \mu\text{m}$ 的颗粒主要受扩散过程的影响,粒径 $0.1\text{--}10 \mu\text{m}$ 的颗粒受扩散过程和湍流撞击的双重影响,而粒径 $> 10 \mu\text{m}$ 的颗粒则以湍流撞击为主^[1]。珊瑚树、女贞和三叶草叶面上的颗粒物粒径多小于 $10 \mu\text{m}$,由此认为叶片滞尘主要由颗粒重力下降和微环境下空气湍流引起的撞击作用导致。油松叶面颗粒物以丝状

物为骨架形成的颗粒团为主,这主要是油松叶面分泌粘性油脂的作用结果。

3.2 不同物种叶面滞尘动态

受降水、大风、沙尘等天气的影响,叶面滞尘量变化频繁,其变化程度因物种而异。三叶草叶正面接触角较大,由于叶表皮细胞突起、蜡质晶体的微观形态结构及其疏水性质,使得叶片与颗粒物的接触面积较小,从而导致颗粒物与叶面的亲和力较小,不易在叶表面沉积^[27],因而其叶面滞尘量低且受外界环境变化干扰很小。油松叶面的棱状结构有利于小颗粒的附着,分泌的粘性油脂使小颗粒物积聚形成网状结构的颗粒团,在大风、降水、沙尘等天气事件发生时,叶面滞尘量也不会发生明显变化。

连续 2d 降水(17.1、14.8 mm)后,易润湿的珊瑚树和女贞的叶面滞尘量分别降低了 62%和 50%;小雨(2.3 mm)和大风(15.2 m/s)也使女贞叶面滞尘量降低了约 30%。一般认为,15 mm 的降水可冲掉叶面附着的颗粒物^[8],但叶面部分颗粒物附着牢固,较难被雨水冲掉。王蕾等^[11]认为 14.5 mm 的雨后侧柏(*Platyclusus orientalis*)、圆柏(*Sabina chinensis*)和云杉(*Picea asperata*)叶面颗粒物附着密度为冬季颗粒物附着密度的一半以上。小雨(1.2 mm)后 1d 的沙尘天气,可能通过以下几种方式影响叶面滞尘:1)携带入侵沙尘的气流速度较高,遇到植物产生强烈湍流,有利于叶面捕获颗粒物^[11, 28];2)空气污染程度对植物叶面滞尘量影响很大,高污染环境中叶面滞尘量较高^[14],而沙尘天气发生时空气中的颗粒物浓度很高;3)外来沙尘粒径较大,其密度较高^[1],对叶面滞尘量贡献较大;4)雨后叶面周围相对湿度较大,润湿的叶面更易于滞留颗粒物^[29-30];5)小颗粒物中可溶性的成分与水发生作用后粒径增大^[31],有利于小颗粒物滞留在叶面。

3.3 空气中 PM₁₀和气象因子对叶面滞尘的影响

3.3.1 空气中 PM₁₀

在大气颗粒物污染严重的时段,女贞和珊瑚树叶面滞尘量变化量分别为 0.71、1.21 g m⁻² d⁻¹,这说明在颗粒污染物浓度高的时段或区域女贞和珊瑚树叶面滞尘可在 4—5 d 达到饱和。空气中颗粒物的浓度会对植物叶面的滞尘量产生很大的影响。陈玮等^[32]的研究表明桧柏(*Sabina chinensis*)叶面的滞尘量以机动车道与自行车分车带最高,而公园内最低。邱媛等^[9]研究了广东省惠州市不同功能区的大叶榕、小叶榕、高山榕和红花羊蹄甲,发现叶面滞尘可在 20 d 达饱和,其滞尘量由大到小依次为:工业区 > 商业交通区 > 居住区 > 清洁区。王赞红等^[33]研究发现大叶黄杨(*Euonymus japonicus*)叶面可在 15 d 达到其滞尘饱和量。植物叶片受到外界环境的干扰,单位叶面积滞尘量的变异较大,说明即使在同一环境中叶面滞尘达到饱和的时间也会存在差异。

3.3.2 降水

研究发现,12 mm 以下的降水并不能有效去除叶面上滞留的颗粒物。31.9 mm(连续 2 d 降水,17.1、14.8 mm)的降水后,油松和三叶草叶面滞尘量变化不明显,而女贞和珊瑚树叶面上约 50%和 62%的颗粒物被洗除。Kaupp 等^[34]发现 20%的叶面污染物能够被水冲洗掉。欧洲赤松叶面 30%—40%的颗粒物能够被 20 mm 的降水冲洗掉^[35]。Rodríguez-Germade 等^[10]认为降水能够有效清洗掉悬铃木(*Platanus hispanica*)叶面上附着的颗粒物。王蕾等^[11]对北京市部分针叶树种叶面滞尘量进行了观测,发现侧柏和圆柏叶表面密集的脊状突起间的沟槽可深藏许多颗粒物,且颗粒物附着牢固,不易被中等强度(14.5 mm)的降水冲掉。然而,Beckett 等^[36]认为,降水并不能冲洗掉叶面上滞留的颗粒物。王赞红等^[33]对大叶黄杨叶片上表皮的滞尘颗粒物进行了扫描电镜观察,叶面颗粒物被清洗的程度与模拟降水的强度和降水量有关,即使深度清洗也不能去除叶面上粒径小于 1 μm 的颗粒物。降水对不同植物叶表面颗粒物的清洗作用因物种而异,与叶表面结构、叶表滞留颗粒物粒径和降水特性密切相关。自然界的降水过程对叶面上滞留颗粒物的冲洗作用是植物恢复滞尘功能的关键因素,但降雨洗刷叶面滞尘的作用大小与降雨量、降雨强度、降雨历时等有关,详细关系有待进一步研究。

3.3.3 相对湿度

本研究中相对湿度大于 80%时,女贞和珊瑚树叶面滞尘量明显降低。可从以下几方面考察空气相对湿

度对滞尘的影响。一方面,相对湿度的增大一般发生在降雨后,降雨可冲洗附着在叶面上的颗粒物,并能有效降低空气中颗粒物的含量并固化地面及其他物体表面可能扬起的灰尘,这样植物叶面的滞尘量将降低。另一方面,空气中的颗粒物因湿度的增加而相互凝结或因自身的润湿性吸收水分而增大^[31],从而有利于沉降或被植物叶片滞留。同时,空气湿度的增加以及植物的蒸腾作用也会使植物叶面更润湿,从而提高植物的滞尘能力。由于植物叶面的滞尘与粉尘脱落同时存在,相对湿度较高时,叶面颗粒物的脱落大于滞留,这样也可能导致叶面滞尘量的降低。

3.3.4 风

植物叶面滞尘量的大小除受其他因素外,还取决于空气中颗粒物的运动方式及运动速度。Freer-Smith 等^[28]借助风洞实验研究了风速对叶面滞尘及颗粒物沉降速率的影响,发现颗粒物在大风条件下(9 m/s)滞留量及沉降速率均较小风(3 m/s)时高。Beckett 等^[37]发现在风速小于 8 m/s,叶面滞尘及颗粒物沉降速率随风速的增大而增大,但风速的继续增大则可能导致叶面滞尘及颗粒物沉降速率的减小。Ould-Dada 和 Baghini^[38]发现风速小于 5 m/s 时并不能影响叶面上颗粒物的滞留量。王蕾等^[11]研究发现,10.4 m/s 的大风并不能吹掉侧柏、圆柏、油松和云杉叶面上滞留的颗粒物。只有在合适风速时,植物的滞尘功能才表现的最为突出,若在一段时间内风速过高,植物滞尘功能则降低。

综合来看,典型天气状况下植物叶面滞尘量变化是受多种因素综合影响的结果。在不同天气状况下是否多个因素共同起作用还是哪个因素起主要作用,还需要加强深入的研究。

4 结论与建议

(1)油松、女贞、珊瑚树和三叶草叶面滞尘量差异显著,其滞尘量分别变化于:4.57—5.45、2.14—4.27、2.23—5.85、0.12—0.38 g/m²。

(2)受降水、大风和沙尘等不同类型天气影响导致的叶面滞尘量变化存在很大的物种差异。珊瑚树和女贞叶面部分颗粒物易受外界环境条件的影响导致其滞尘量变化显著;而三叶草和油松滞尘量变化不明显,这与三叶草叶面的疏水特征和油松能够分泌粘性油脂有关。

(3)降雨和风吹能降低叶面滞尘量,如连续两天降水(17.1、14.8 mm)后的珊瑚树和女贞叶面滞尘量降低了 62%和 50%;小雨和大风也使女贞叶面滞尘量降低约 30%。极大风速对女贞和珊瑚树叶面滞尘量的影响呈现先升高后降低,在极大风速为 14 m/s 时达到峰值;相对湿度大于 80%时,女贞和珊瑚树叶面滞尘量明显降低;空气中高浓度的颗粒物可使女贞和珊瑚树叶面滞尘在 4—5 d 达到饱和。

(4)一般认为,当经过降雨量>15 mm 或风速>17 m/s 的天气后,植物叶面滞尘能力即可恢复,开始下一次滞尘过程,并以此为依据来推算植被滞尘量。但从本研究来看,降水和大风对叶面滞尘能力恢复程度的影响因物种而异。对易受降雨和大风影响的物种,推算植被滞尘效益时需考虑降雨和大风对叶面滞尘能力恢复程度的影响,此外如果有叶量变化时也需予以考虑。对于受降雨、大风影响小的物种,在推算叶面滞尘效应时,则需更多地考虑叶量的季节变化。在受沙尘影响大的地区评价植被滞尘时,还需考虑沙尘天气的出现频率和强度的影响。

参考文献(References):

- [1] Grantz D A, Garner J H B, Johnson D W. Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 2003, 29(2/3): 213-239.
- [2] 周凯,叶有华,彭少麟,栗娟. 城市大气总悬浮颗粒物与城市热岛. *生态环境*, 2006, 15(2): 381-385.
- [3] 肖以华,李炯,旷远文,佟富春,刁丹,陈步峰,史欣,裴英才,黄俊彪,潘勇军. 广州大夫山雨季林内外空气 TSP 和 PM_{2.5} 浓度及水溶性离子特征. *生态学报*, 2013, 33(19): 6209-6217.
- [4] 冯朝阳,高吉喜,田美荣,林栋,吕世海,刘尚华. 京西门头沟区自然植被滞尘能力及效益研究. *环境科学研究*, 2007, 20(5): 155-159.
- [5] Tallis M, Taylor G, Sinnett D, Freer-Smith P. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 103(2): 129-138.
- [6] Nowak D J, Crane D E, Stevens J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*,

- 2006, 4(3/4): 115-123.
- [7] 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. 生态学报, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [8] Liu L, Guan D S, Peart M R, Wang G, Zhang H, Li Z W. The dust retention capacities of urban vegetation—a case study of Guangzhou, South China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(9): 6601-6610.
- [9] 邱媛, 管东生, 宋巍巍, Peart M R. 惠州城市植被的滞尘效应. 生态学报, 2008, 28(6): 2455-2462.
- [10] Rodríguez-Germade I, Mohamed K J, Rey D, Rubio B, García Á. The influence of weather and climate on the reliability of magnetic properties of tree leaves as proxies for air pollution monitoring. *Science of the Total Environment*, 2014, 468-469: 892-902.
- [11] 王蕾, 哈斯, 刘连友, 高尚玉. 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. 生态学杂志, 2006, 25(8): 998-1002.
- [12] 刘福智, 刘加平. 植物对空气中可吸入颗粒物的量化控制及影响. 青岛理工大学学报, 2005, 26(5): 25-29.
- [13] 西安市环境保护局. 空气质量日报[EB/OL]. [2013-04-14]. <http://www.xaepb.gov.cn/hopeCMS/site/xaepb/index.gsp>.
- [14] Prusty B A K, Mishra P C, Azeez P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60(2): 228-235.
- [15] 李吉跃, 周平, 招礼军. 干旱胁迫对苗木蒸腾耗水的影响. 生态学报, 2002, 22(9): 1380-1386.
- [16] Knoll D, Schreiber L. Influence of epiphytic micro-organisms on leaf wettability: wetting of the upper leaf surface of *Juglans regia* and of model surfaces in relation to colonization by micro-organisms. *New Phytologist*, 1998, 140(2): 271-282.
- [17] Holder C D. Leaf water repellency of species in Guatemala and Colorado (USA) and its significance to forest hydrology studies. *Journal of Hydrology*, 2007, 336(1/2): 147-154.
- [18] 中国气象科学数据共享服务网. 中国地面国际交换站气候资料日值数据集[DB/OL]. <http://cdc.cma.gov.cn>. [2013-04-04].
- [19] Prajapati S K, Tripathi B D. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution. *Journal of Environmental Quality*, 2008, 37(3): 865-870.
- [20] Sabin L D, Lim J H, Venezia M T, Winer A M, Schiff K C, Stolzenbach K D. Dry deposition and resuspension of particle-associated metals near a freeway in Los Angeles. *Atmospheric Environment*, 2006, 40(39): 7528-7538.
- [21] 贾彦, 吴超, 董春芳, 李常平, 廖慧敏. 7 种绿化植物滞尘的微观测定. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4547-4553.
- [22] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, Ndam C, Pasanen P, Rinnan Å, Kivimäenpää M. Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees. *Environmental Pollution*, 2013, 183: 64-70.
- [23] Wild E, Dent J, Thomas G O, Jones K C. Visualizing the air-to-leaf transfer and within-leaf movement and distribution of phenanthrene: further studies utilizing two-photon excitation microscopy. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(3): 907-916.
- [24] Talay T A. Introduction to the aerodynamics of flight. Springfield, VA: The National Technical Information Service, 1975.
- [25] Barber J L, Thomas G O, Kerstiens G, Jones K C. Air-side and plant-side resistances influence the uptake of airborne PCBs by evergreen plants. *Environmental Science & Technology*, 2002, 36(15): 3224-3229.
- [26] 石辉, 王会霞, 李秧秧, 刘肖. 女贞和珊瑚树叶片表面特征的 AFM 观察. 生态学报, 2011, 31(5): 1471-1477.
- [27] Koch K, Bhushan B, Barthlott W. Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics. *Progress in Materials Science*, 2009, 54(2): 137-178.
- [28] 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. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2004, 155(1/4): 173-187.
- [29] 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.
- [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. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3077-3082.
- [31] Ruijgrok W, Tieben H, Eisinga P. The dry deposition of particles to a forest canopy: A comparison of model and experimental results. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(3): 399-415.
- [32] 陈玮, 何兴元, 张粤, 孙雨, 王文霏, 宁祝华. 东北地区城市针叶树冬季滞尘效应研究. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2113-2116.
- [33] 王赞红, 李纪标. 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, 2006, 15(2): 327-330.
- [34] Kaupp H, Blumenstock M, McLachlan M S. Retention and mobility of atmospheric particle-associated organic pollutant PCDD/Fs and PAHs in maize leaves. *New Phytologist*, 2000, 148(3): 473-480.
- [35] Przybysz A, Sæbø A, Hanslin H M, Gawroński S W. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time. *Science of the Total Environment*, 2014, 481: 360-369.
- [36] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Effective tree species for local air quality management. *Journal of Arboriculture*, 2000, 26(1): 12-19.
- [37] Beckett K P, Freer-Smith P H, Taylor G. Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed. *Global Change Biology*, 2000, 6(8): 995-1003.
- [38] Ould-Dada Z, Baghini N M. Resuspension of small particles from tree surfaces. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(22): 3799-3809.