

DOI: 10.5846/stxb201403190487

石婕, 刘庆倩, 安海龙, 曹学慧, 刘超, 尹伟伦, 郭惠红, 夏新莉. 不同污染程度下毛白杨叶表面 $PM_{2.5}$ 颗粒的数量及性质和叶片气孔形态的比较研究. 生态学报, 2015, 35(22): - .

Shi J, Liu Q Q, An H L, Cao X H, Liu C, Yin W L, Guo H H, Xia X L. A comparative study of the stomata and $PM_{2.5}$ particles on the leaf surface of Chinese white poplar (*Populus tomentosa* Carr.) in different polluted places. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): - .

不同污染程度下毛白杨叶表面 $PM_{2.5}$ 颗粒的数量及性质和叶片气孔形态的比较研究

石 婕, 刘庆倩, 安海龙, 曹学慧, 刘 超, 尹伟伦, 郭惠红, 夏新莉*

北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083

摘要: 本文选择了北京市环境 $PM_{2.5}$ 浓度不同的两个采样点的毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)作为研究对象, 利用环境扫描电镜及 X-射线能谱仪对杨树叶片表面滞留的 $PM_{2.5}$ 颗粒进行了观察、统计和成分分析, 并研究了叶片气孔对环境颗粒物污染的适应性变化。结果表明: 夏秋两季西直门叶片样品上下表面的 $PM_{2.5}$ 数量均多于森林公园样品, 这说明环境 $PM_{2.5}$ 浓度是影响叶片表面滞留颗粒物数量的主要原因; 其中叶片上表面是滞留 $PM_{2.5}$ 颗粒的主要区域。森林公园样品中 $PM_{2.5}$ 颗粒性质比较单一, 硅铝酸盐颗粒和石英颗粒占很大比例, 二者的主要来源均为天然源, 如土壤扬尘、矿物颗粒等; 而西直门采样点叶片样品滞留的 $PM_{2.5}$ 颗粒的元素组成更为复杂, 其中 50% 以上的硅铝酸盐颗粒检测出了明显的铜、钾、氯、钠等元素的谱峰, 其来源主要是工业排放; 西直门样品 $PM_{2.5}$ 的含硫量高于森林公园样品, 且夏季明显高于秋季。研究还发现有少数 $PM_{2.5}$ 颗粒进入了毛白杨叶片的气孔, 而且不同污染程度下气孔的形态特征存在差异。与森林公园毛白杨叶片的气孔相比, 西直门处的毛白杨叶片气孔的长度、宽度、面积和气孔密度均较小, 说明较高的 $PM_{2.5}$ 污染程度对毛白杨叶片的形态发育有一定影响。本文的研究结果可以为揭示植物叶片阻滞、吸收大气颗粒污染物的机制、合理选择和优化城市绿化树种从而改善空气质量提供一定的科学理论依据。

关键词: 毛白杨; 叶片; $PM_{2.5}$; 气孔; 环境扫描电镜; X-射线能谱分析

A comparative study of the stomata and $PM_{2.5}$ particles on the leaf surface of Chinese white poplar (*Populus tomentosa* Carr.) in different polluted places

SHI Jie, LIU Qingqian, AN Hailong, CAO Xuehui, LIU Chao, YIN Weilun, GUO Huihong, XIA Xinli*

College of Biological Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Observation and analysis of $PM_{2.5}$ particles on a leaf surface can help us explore the correlation between $PM_{2.5}$ particles and environmental factors and the response of stomata to particulate pollution in the air. This not only provides an important scientific reference for elucidating the mechanism of $PM_{2.5}$ retention and absorption by leaves, but is also helpful for reasonably selecting and optimizing urban greening tree species to reduce particulate matter pollution and improve the atmospheric environment in the city. In Beijing, National Olympic Forest Park and Xizhimen traffic hub are two representative sites for monitoring the environment. In June and September 2013, we measured the atmospheric $PM_{2.5}$ level of these monitoring sites using a real-time $PM_{2.5}$ monitoring instrument, and found that the average atmospheric $PM_{2.5}$ level in Xizhimen traffic hub was about 1.5 times higher than that in the National Olympic Forest Park. In this study, $PM_{2.5}$ particles retained on the leaf surface of Chinese white poplar (*Populus tomentosa* Carr.) from these two sites were identified, counted, and analyzed by using an environmental scanning electron microscope (ESEM) and an X-ray energy

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201304301)

收稿日期: 2014-03-19; 网络出版日期: 2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xiaxl@bjfu.edu.cn

dispersive spectrometer (EDS). At the same time, the adaptive response of leaf stomata to the $\text{PM}_{2.5}$ pollution was studied. These results showed that the numbers of $\text{PM}_{2.5}$ particles on both the adaxial and abaxial surfaces of leaf samples at the Xizhimen traffic hub were more than those in the National Olympic Forest Park in both summer and autumn, indicating that the number of $\text{PM}_{2.5}$ particles adsorbed by leaves is largely affected by the atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ concentration. The adaxial surface of leaves is the main area of $\text{PM}_{2.5}$ retention. The number of $\text{PM}_{2.5}$ particles on the autumn samples was more than that on the summer samples. The $\text{PM}_{2.5}$ particles on the leaves from the National Olympic Forest Park were mainly composed of aluminosilicate particles and quartz grains, and these particles are mainly from soil dust and mineral particles. However, the composition of $\text{PM}_{2.5}$ particles from the Xizhimen traffic hub samples was more complex. The spectral peaks of Cu, Na, K, Cl, and other elements were found in the energy spectra in most aluminosilicate particles. These elements are mainly from industrial emissions. The sulfur content of $\text{PM}_{2.5}$ from the Xizhimen traffic hub samples was higher than that from the National Olympic Forest Park samples in both summer and autumn. Moreover, the sulfur content was higher in summer than in autumn. Our results indicate that the amount and composition of particulate matter are affected by environmental factors to a great extent. It was also observed that a few $\text{PM}_{2.5}$ particles are present in the stomata of *P. tomentosa* leaves. Also, the morphological characteristics of stomata varied at different atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ levels. The length, width, area, and density of stomata of the Xizhimen traffic hub samples were smaller than those of the National Olympic Forest park samples due to more serious $\text{PM}_{2.5}$ pollution. Additionally, the secondary electron image and the back-scattering image were combined to better locate, observe, and analyze $\text{PM}_{2.5}$ particles on the leaf surface of *P. tomentosa*.

Key Words: *Populus tomentosa* Carr.; leaf; $\text{PM}_{2.5}$; stomata; environmental scanning electron microscopy; X-ray energy dispersive spectrum analysis

随着我国城市雾霾天气频频爆发,造成雾霾的 $\text{PM}_{2.5}$ 已成为公众日益关注的热点。 $\text{PM}_{2.5}$ 是指悬浮在大气中直径小于及等于 $2.5\ \mu\text{m}$ 的细颗粒物。它是表征城市大气复合型污染的首要污染物,是近年来颗粒物污染研究的重点。植物因其叶片能够阻滞、吸收大气颗粒物而在改善空气质量方面起着主导作用。近年来,虽有一些研究通过收集叶面粉尘干样分析了不同植物种类之间的滞尘能力的差异^[1-3],如邱媛等比较了广东省惠州市不同功能区 4 种主要绿化乔木的滞尘能力。但目前对不同污染程度下植物叶片滞留 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒的数量及性质差异的比较研究,以及气孔形态特征的比较研究还未见报道。扫描电镜-X 射线能谱分析(scan electron microscope and X-ray energy dispersive spectrometer, SEM-EDS)是研究颗粒物形态特征、化学组成及含量的主要方法^[4],但该方法对样品的前处理过程及在高真空状态下的观察会对植物叶片样品产生较大的损伤。利用环境扫描电镜与 X 射线能谱仪结合(environmental scan electron microscope and X-ray energy dispersive spectrometer, ESEM-EDS),在低真空下直接对植物叶片和叶表面滞留的颗粒物进行显微观察和能谱分析,可以较好地反应自然状态下植物叶表面结构和颗粒物形貌与成分^[5]。毛白杨(*Populus tomentosa* Carr.)是北京市主要园林绿化植物之一,是常见的行道树种,在城区广为种植,对大气颗粒物有较高的阻滞能力^[6]。因此,本文以滞尘能力较强的毛白杨为试材,利用 ESEM-EDS 分析技术,比较研究北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度不同的两个实验点的毛白杨叶片表面滞留的 $\text{PM}_{2.5}$ 的数量及性质和叶片气孔的形态特征,旨在探寻最直观、有效的叶表面 $\text{PM}_{2.5}$ 观察及分析方法,探讨叶表面 $\text{PM}_{2.5}$ 的数量及性质与大气污染之间的关系,及其对叶片气孔发育的影响,以为揭示植物叶片阻滞、吸收大气颗粒污染物的机制、合理选择和优化城市绿化树种从而改善空气质量提供一定的科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 采样

采样地点分别位于北京市朝阳区奥林匹克森林公园内和西城区西直门北大街。森林公园采样点附近道

路均为人行道,无机动车辆行驶。而西直门北大街毗邻西直门交通枢纽,是北京市 5 个交通污染控制点之一,该采样点附近道路机动车流量较大。在 2013 年 1 月、3 月、6 月和 9 月我们对两采样点 PM_{2.5} 浓度的实时监控中,西直门采样点环境空气 PM_{2.5} 浓度平均约为森林公园采样点的 1.5 倍(表 1)。

采样对象为毛白杨叶片。在两采样点所选择的毛白杨均为行道树,生长于主要道路路边,行道树间距为 5 m 左右。两地所选择的毛白杨生长状况良好,树龄相仿。森林公园处毛白杨平均胸径 40.81 cm,平均树高 12.3 m;西直门处毛白杨平均胸径 41.20 cm,平均树高 12.7 m。

采样分别于 2013 年 6 月和 9 月进行,为避免雨水对叶表面沉积颗粒物的冲洗所造成的差异,采样时间统一为降雨后一周。在晴朗无风的天气,选择树冠中下部迎风面的成熟叶片均匀采样。采样高度平均约为 5.5 m。

1.2 样品处理与分析

叶片样品放入信封中自然干燥 2—3 d 后,两地各选择三个大小接近的健康叶片作为重复,在样品的相同位置(叶片中部中脉两侧)取 5 mm×5 mm 的小块,分为上下表面分别制样。在清华大学电子显微镜实验室利用 QUANTA 200 FEG 型场发射环境扫描电镜(FEI,美国)和 X-射线能谱仪(ESEM-EDS)对样品进行观察和分析。在相同的放大倍数下,每个视野内随机选择 3 个 PM_{2.5} 颗粒,对其进行能谱分析。将获得的能谱图和元素含量与典型颗粒物能谱图进行比对^[7-9],结合环境扫描电镜图像,判断颗粒物性质。叶片气孔各项指标的测量和计算方法参照 Di Baccio 等的方法^[10]。

在 5000 倍下对图像中的 PM_{2.5} 颗粒进行计数。颗粒物数量、元素含量和气孔形态指标数据的统计采用 Excel 2007 软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 观察方法的优化

通过环境扫描电镜的二次电子成像可以获得叶表面结构及 PM_{2.5} 的清晰形貌图片(图 1a)。我们在环境扫描电镜观察时加入了背散射分析,这种方法特别适用于轻基体如叶片表面的重杂质元素分析。它可以使样品平均原子序数大的部位产生较强的背散射电子信号,在图像上形成较亮的区域,而平均原子序数较低的部位则形成较暗的区域^[11]。使颗粒物,尤其是含有原子序数较大的重金属元素的颗粒物与叶表面结构形成高衬度的反差像(图 1b)。这非常有利于我们对 PM_{2.5} 颗粒的形态观察、计数及成分分析。因此,在本次实验中,样品均采用了二次电子形貌图和背散射分析图相结合的方法,对单颗粒进行识别与分析。

2.2 夏秋两季两采样点毛白杨叶片阻滞 PM_{2.5} 的研究

2.2.1 PM_{2.5} 颗粒物观察及数量对比分析

从图片中可以观察到有 PM_{2.5} 颗粒直接进入了处于张开状态的气孔(图 2c 中箭头所示),说明植物叶表拦截的 PM_{2.5} 颗粒物有部分可以进入气孔。叶片表面结构影响着植物叶片对大气颗粒物的阻滞与吸收,通过叶表沟状组织、气孔等结构滞尘的叶片其滞尘能力强于表面光滑的叶片^[12]。毛白杨叶片下表面的气孔周围,尤其是副卫细胞上面角质层的皱折处是颗粒物最为密集的区域(图 2g 和图 2h)。

直接观察和统计结果均表明(图 2 和表 2),夏秋两季西直门叶片上下表面的 PM_{2.5} 数量均多于森林公园样品,说明环境 PM_{2.5} 浓度是影响叶片表面滞留颗粒物数量的主要原因。夏秋两季两采样点叶片上表面 PM_{2.5} 数量均明显高于下表面,表明叶片上表面是滞留 PM_{2.5} 颗粒的主要区域。秋季样品的 PM_{2.5} 数量高于夏季,这可能是因为秋季颗粒物沉积时间较长,并与北京夏季多雨的气象特点有关。

表 1 两采样点环境 PM_{2.5} 浓度(μg/m³)

Table 1 Concentration of atmospheric PM_{2.5} in two plots(μg/m³)

地点 Place	1 月 January	3 月 March	6 月 June	9 月 September
森林公园 Forest Park	172	88.3	135	101
西直门 Xizhimen	229.8	147	209.4	146

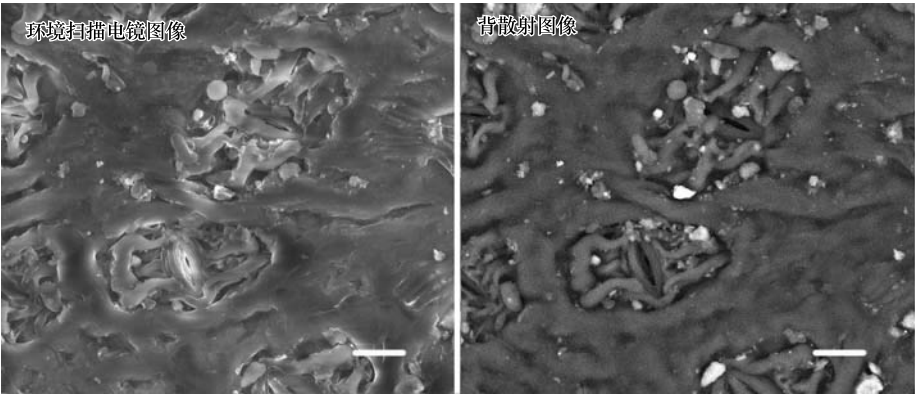


图1 环境扫描电镜图像与背散射图像的比较。图示为毛白杨叶片下表面(×3000)

Fig. 1 Comparison of ESEM picture and back scattering picture.of theabaxial surface of *P.tomentosa* leaf(×3000)

a;环境扫描电镜图像;b:背散射图像。Bar=10μm

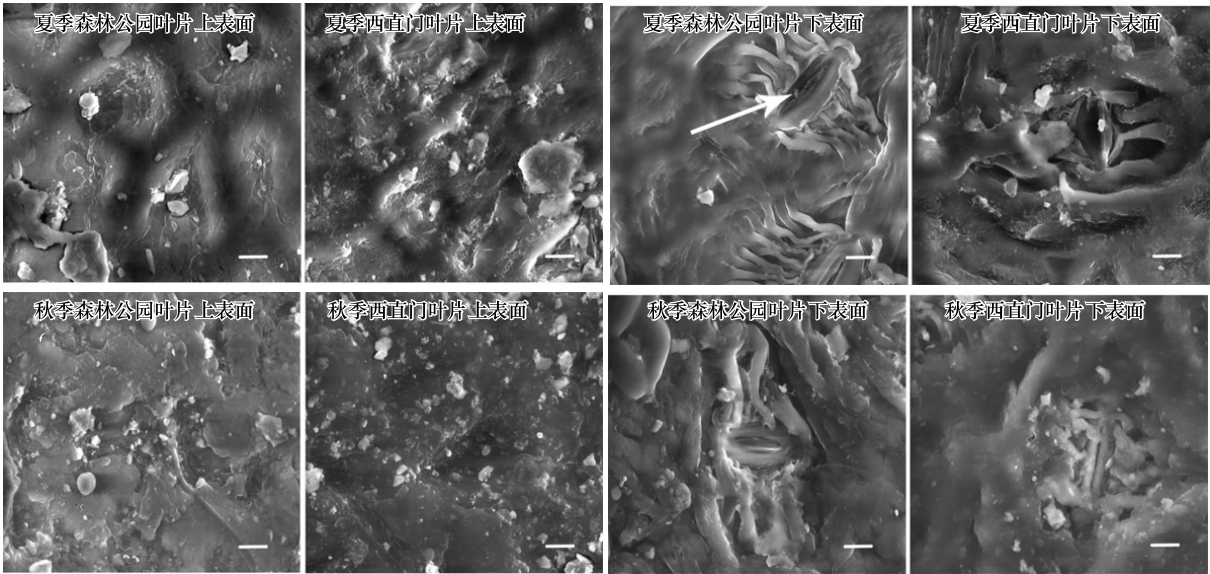


图2 两采样点毛白杨叶片表面环境扫描电镜图(×5000)

Fig. 2 Scanning electron micrographs of micro-configurations of leaf epidermis of *P. tomentosa* in two plots at ×5,000 magnification

a: 夏季森林公园叶片上表面,b: 夏季西直门叶片上表面,c: 夏季森林公园叶片下表面,d: 夏季西直门叶片下表面,e: 秋季森林公园叶片上表面,f: 秋季西直门叶片上表面,g: 秋季森林公园叶片下表面,h: 秋季西直门叶片下表面。图1c中箭头示进入气孔的PM_{2.5}颗粒。Bar=5μm。

表2 两采样点毛白杨叶片表面PM_{2.5}数量比较(个)

Table 2 Number of PM _{2.5} on the surfaces of <i>P. tomentosa</i> leaves in two plots.(pcs)			
地点 Place	季节 Season	上表面颗粒物数量(×10 ³ 个/mm ²) Particle number on the adaxial surface	下表面颗粒物数量(×10 ³ 个/mm ²) Number of particles on the abaxial surface
森林公园 Forest Park	夏季	8.03±0.5	4.21±0.3
	秋季	10.46±0.3	7.38±0.6
西直门 Xizhimen	夏季	19.02±1.2	11.34±0.9
	秋季	22.37±1.1	15.17±1.2

注:数值为×5000倍下15个视野内计数的平均。

2.2.2 PM_{2.5}颗粒成分的能谱分析

通过扫描电镜-能谱系统可以得到颗粒物的形貌、大小和成分,从而进行单颗粒的识别与来源解析。如我们将西直门样品上的PM_{2.5}颗粒物形貌图及其元素谱峰、含量与已知典型颗粒物的形貌和能谱图相比对,鉴定

了所测 3 个 PM_{2.5}颗粒分别为氧化铁颗粒、硅铝酸盐颗粒和硫酸钙颗粒(图 3)。

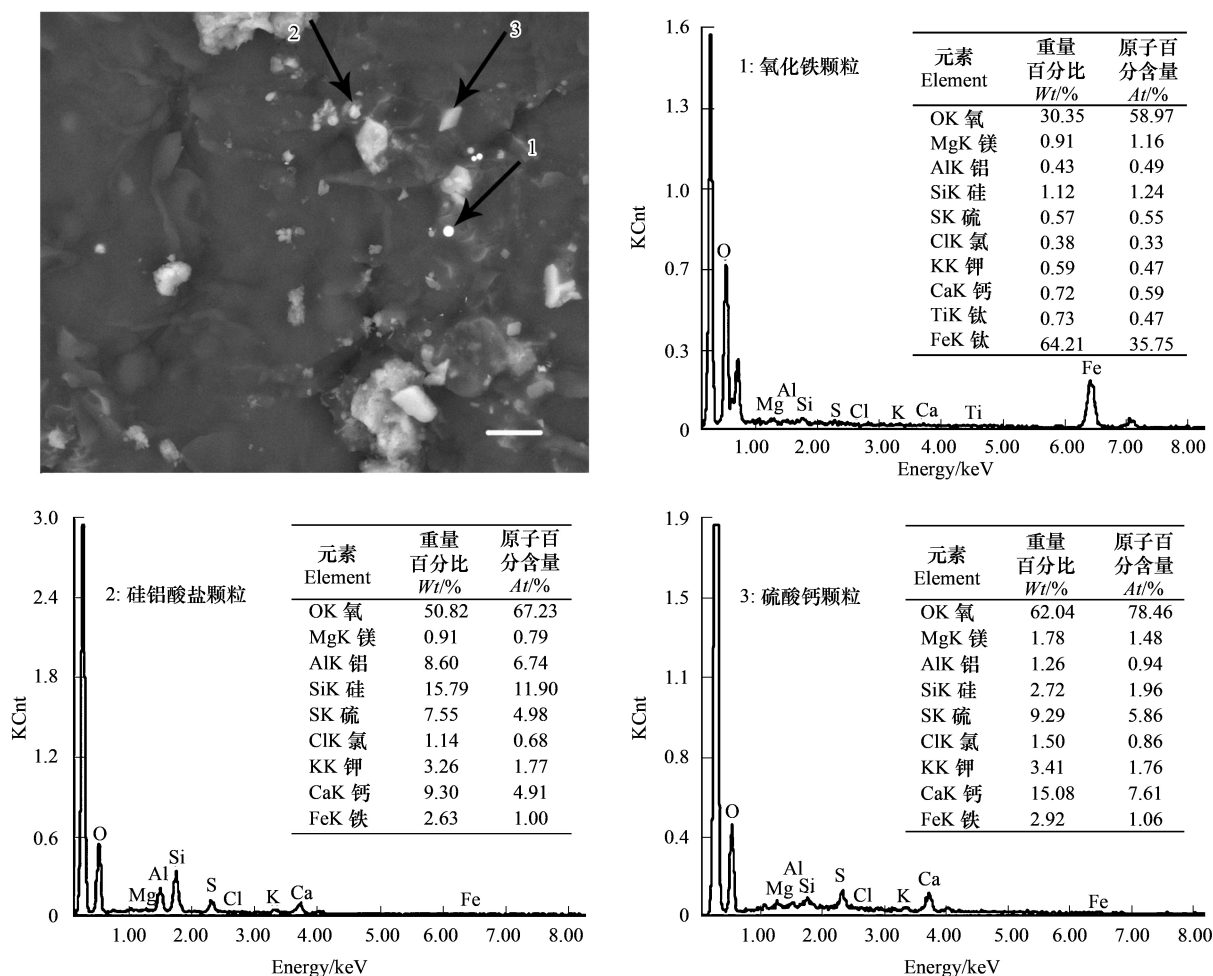


图 3 ×5000 倍下叶表面背散射图像及 3 个 PM_{2.5}颗粒的能谱图与元素含量

Fig. 3 Back scattering micrographs of *P. tomentosa* leaf and energy spectrum analysis of 3 particles

(示例为来自西直门采样点的样品). Bar = 5 μm

通过以上方法,我们对夏秋两季两采样点的毛白杨叶片所滞留的 PM_{2.5}颗粒性质进行了鉴定及统计分析(表 3)。结果显示,森林公园样品中 PM_{2.5}颗粒性质比较单一,硅铝酸盐颗粒和石英颗粒占很大比例,二者的主要来源均为天然源,如土壤扬尘、矿物颗粒等。而西直门样品 PM_{2.5}颗粒物的性质更为复杂,其中高锰颗粒和硫酸钙颗粒仅出现于西直门样品上。尽管土壤扬尘也是 Mn 元素的主要来源,但细颗粒物中 Mn 的富集仍然被认为主要来自于燃煤、金属冶炼和汽油抗爆剂甲基环戊二烯三羰基锰等^[13]。硫酸钙颗粒则被认为来自于大气反应生成的二次粒子。大气中的 SO₂气体通过均相或多相反应氧化成硫酸盐,ESEM-EDS 检出的硫酸钙颗粒很可能是水泥和建材工业排放的一次颗粒物与 SO₂气体或酸性气溶胶颗粒反应而产生的^[14]。叶片上表面和下表面的颗粒物性质则并无明显差异。

在污染程度不同的两地,性质相同的 PM_{2.5}颗粒在元素组成及含量上存在一定差异,如图 4 所示,同样是以硅铝元素为主的 PM_{2.5}颗粒中,来自西直门的样品颗粒同时还含有多种其他元素。在本次实验所检测的西直门样品,50%以上的硅铝酸盐颗粒检测出了明显的铜、钾、氯等元素的谱峰。铜元素主要来源于燃煤、燃油和金属冶炼,而钾元素是生物质燃烧污染的指示元素,氯元素与汽车尾气和有机污染物相关^[15-16]。这些元素表明,样品中这些颗粒可能是来自天然源的矿质颗粒与来自燃煤飞灰、有机质燃烧等人为源物质的混合颗粒^[17]。

表 3 毛白杨叶片表面 PM_{2.5} 颗粒物的性质
Table 3 Properties of PM_{2.5} on the surfaces of *P. tomentosa* leaves

颗粒物性质 Properties of PM _{2.5}	森林公园 Forest Park				西直门 Xizhimen			
	夏季 Summer		秋季 Autumn		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	上表面 Adaxial surface	下表面 Abaxial surface	上表面 Adaxial surface	下表面 Abaxial surface	上表面 Adaxial surface	下表面 Abaxial surface	上表面 Adaxial surface	下表面 Abaxial surface
硅铝酸盐颗粒 Aluminosilicate	6	6	5	6	6	5	2	6
石英颗粒 Quartz	2	1	3	2	1			
铁氧化物颗粒 Iron oxide		2	1	1	1	1	2	1
硫酸钙颗粒 Calcium sulfate					1	2	2	2
高钛颗粒 Titanium enriched particle	1						3	
高锰颗粒 Manganese enriched particle						1		

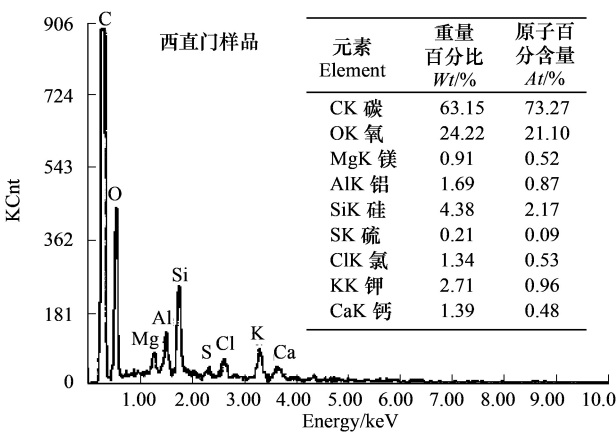
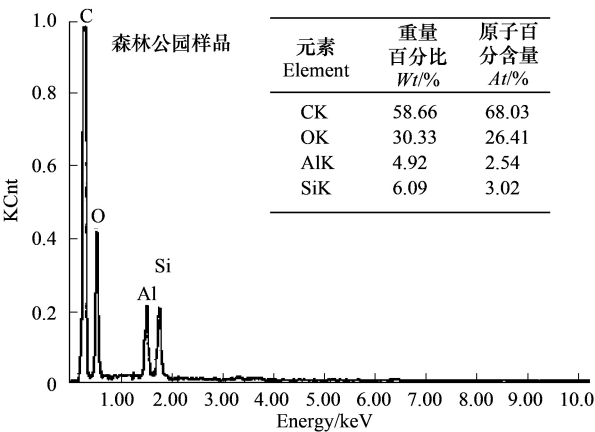


图 4 两采样点的硅铝酸盐颗粒元素组分及含量对比
Fig. 4 Comparison of the element and composition of aluminosilicate particles in two plots
a: 森林公园样品, b: 西直门样品

硫元素为大气颗粒物污染最主要的污染元素之一，来自于燃烧排放和二次反应的含硫化合物对酸沉降和硫酸盐气溶胶的形成有重要贡献,其浓度和时空分布直接影响着酸雨和光化学烟雾等污染的形成。在我们的研究中,PM_{2.5}颗粒含硫量夏季高于秋季;西直门样品含硫量高于森林公园样品(表 4)。这是因为北京市夏季多雨,空气温度和湿度较高,在一定的 SO₂ 浓度下,大气湿度越大,颗粒物表面硫化现象越明显^[18]。因此,造成这种颗粒物硫含量季节差异的主要是环境因素。而两采样点之间的差异则来自于西直门交通枢纽的人为排放。

2.3 夏秋两季两采样点毛白杨叶片气孔形态观察

气孔是植物与环境相联系的门户,能够通过保卫细胞对环境污染做出响应,其生长发育也受到环境因素的影响,气孔的长度、宽度、密度以及角质层的厚度均可以因环境污染程度不同而发生变化^[19]。在我们的研究中,两地毛白杨叶片气孔形态类别一致,其副卫细胞的

表 4 含硫颗粒在 PM_{2.5} 颗粒中所占百分比 (%)
Table 4 The percentages of sulfur containing particles in PM_{2.5} (%)

地点与季节 Place and season	含硫颗粒 (%) Sulfur containing particle (%)	硫元素为常量或主要元素的颗粒/% Particle contains sulfur as constant element or major element
森林公园夏季 Forest Park in summer	80±3	33±2
西直门夏季 Xizhimen in summer	93±5.5	46±2
森林公园秋季 Forest Park in autumn	25±6.5	0±0
西直门秋季 Xizhimen in autumn	61±4	27±3

角质层均呈辐射细皱折状^[20],但是西直门样品气孔周围的角质层皱折相对更粗且形状不规则(图5)。气孔各项指标的对比显示,夏秋两季西直门样品的气孔密度、气孔长度、宽度和面积均小于森林公园样品(表5)。这些差异表明,西直门采样点处的毛白杨长期经受更严重的颗粒物污染,这对其叶片气孔的生长发育产生了一定影响。

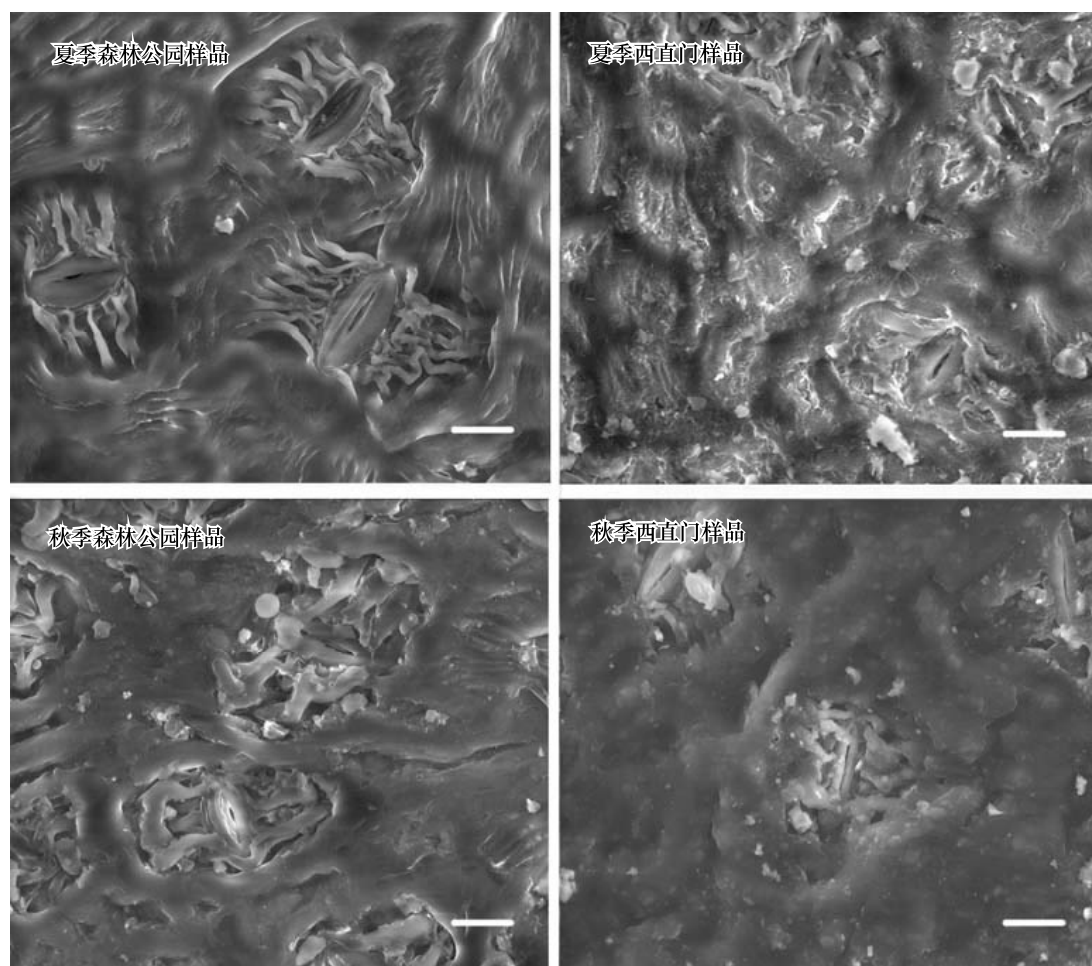


图5 毛白杨叶片下表面环境扫描电镜图($\times 3000$)

Fig. 5 Scanning electron micrographs of micro-configurations of the adaxial surface of leaf epidermis of *P. tomentosa* at $\times 3,000$ magnification (a:夏季森林公园样品;b:夏季西直门样品;c:秋季森林公园样品;d:秋季西直门样品)。Bar = $10\mu\text{m}$ 。

表5 毛白杨叶片下表面气孔数量及形态指标比较

Table 5 Comparison of Stomatal Features of the adaxial surface of leaf epidermis of *P. tomentosa*.

地点 Place	季节 Season	气孔密度/个/ mm^2 Stomatal density	气孔长度/ μm Stomatal length	气孔宽度/ μm Stomatal width	气孔面积/ μm^2 Stomatal area
森林公园 Forest Park	夏季	335.37 ± 5.3	17.53 ± 0.33	7.59 ± 0.22	133.41 ± 0.67
	秋季	365.85 ± 3.6	17.38 ± 0.23	7.88 ± 0.5	115.17 ± 1.02
西直门 Xizhimen	夏季	228.66 ± 3.4	14.15 ± 0.21	7.45 ± 0.34	109.34 ± 0.74
	秋季	228.66 ± 6	14.4 ± 0.46	6.21 ± 0.12	72.63 ± 0.55

注:数值为三个视野内气孔数据统计的平均值。

3 讨论

SEM-EDS 在大气颗粒物的识别分析中占有重要地位,国内外研究者已成功地将应用于颗粒物的质量浓度、微观形貌、粒径与成分分析^[21-22]。但我们在研究中发现,SEM-EDS 的样品前处理过程涉及固定、清洗等

操作,且 SEM 的样品室只能在高真空度下进行观察,这对叶片样品表面的颗粒物损伤非常严重。而采用环境扫描电镜能够在低真空下观察含有适量水分的新鲜生物^[23],将环境扫描电镜与能谱分析结合,可以在完全不破坏叶片样品原始状态的条件下获得叶表面及颗粒物形貌的清晰图像,并对颗粒物的元素组成和含量进行分析。在实验过程中,我们进一步加入了背散射分析,使含有 Fe、Mn 等金属元素的颗粒其位置与分布更清晰地显示于图像上,便于快速准确地对颗粒物元素成分进行定量分析。通过将环境扫描电镜形成的二次电子图像与背散射图像相结合进行分析,能够获得完整的植物叶片表面结构和叶面颗粒物的形貌、成分信息,这对我们的研究起到了关键的作用。

在环境 PM_{2.5} 浓度较高的西直门采样点,叶片样品表面 PM_{2.5} 数量明显高于森林公园样品。PM_{2.5} 颗粒的性质和元素成分也反映出,相较于远离城市中心区的森林公园采样点,处于城市交通枢纽的西直门采样点处 PM_{2.5} 更多地来自于工业排放、燃油排放等人为源。这说明通过对城市植物叶表面的颗粒物进行元素分析和来源解析,能够清晰直观地反映出当地大气颗粒物污染状况,从而为当地大气污染的防治提供科学依据

硫元素是我国城市颗粒物污染中最主要的元素之一,是二次粒子的指示元素。一般认为我国城市 SO₂ 排放秋冬季节高于夏季。但在我们的实验中,两地夏季含硫颗粒的比例分别达到了 93% 和 80%,而秋季这一比例有明显的下降。我们分析这很可能是因为北京夏季温度、湿度高,雷雨多的气候特征有利于大气中二次粒子反应的发生,从而使 SO₂ 更多地转化为了硫酸盐或与其他颗粒结合形成含硫颗粒所致^[24]。这显示出大气颗粒物的组成在很大程度上受环境因素的影响。城市环境 PM_{2.5} 防治宜利用绿化植物的生物指示作用,参考不同地区的环境条件特点做出应对。

本实验结果证实了毛白杨能够通过气孔等叶表面结构阻滞、吸收 PM_{2.5} 颗粒,且较重程度的 PM_{2.5} 污染对毛白杨叶片的形态发育产生了一定影响。其他研究者在对悬铃木等树种的实验中同样证实,颗粒物在叶面的遮挡作用会影响植物的光合作用,污染物被植物吸收也会影响植物的表面形态和生理参数^[25]。环境大气颗粒物浓度高会导致植物叶片光合速率减小,气孔数减少、气孔导度降低和角质层损伤^[26-27],这同样是影响植物阻滞吸收大气颗粒物的能力的重要因素。未来关于不同植物叶片对 PM_{2.5} 的耐受能力的研究,应当作为我们选择园林绿化植物的重要参考。

参考文献 (References):

- [1] 贺勇,李磊,李俊毅,李伟星,穆立蕾. 北方 30 种景观树种净化空气效益分析. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 37-39.
- [2] 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.
- [3] Dzierżanowski K, Popek R, Gawrońska H, Sæbø A, Gawrońska S W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037-1046.
- [4] 李玉武,刘咸德,董树屏. 单一颗粒物扫描电镜能谱定量分析方法的研究. 分析化学, 2006, 34(12): 1723-1728.
- [5] 何黎平. 几种新鲜生物样品的环境扫描电镜观察. 电子显微学报, 2003, 22(6): 669-670.
- [6] 王蕾,高尚玉,刘连友,哈斯. 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, 2006, 17(4): 597-601.
- [7] 刘咸德,贾红,齐建兵,张冀强,马倩如. 青岛大气颗粒物的扫描电镜研究和污染源识别. 环境科学研究, 1994, 7(3): 10-17.
- [8] 董树屏,李金香,李球. 应用扫描电镜-能谱系统对大气颗粒物中单颗粒的观测和识别. 电子显微学报, 2006, 25(B08): 328-329.
- [9] 杨仪方,钱枫,张慧峰,边森,唐玉佳. 北京市交通干线周围可吸入大气颗粒物的污染特性. 中国环境科学, 2010, 30(7): 962-966.
- [10] Di Baccio D, Minnoccia A, Sebastiani L. Leaf structural modifications in *Populus×euramericana* subjected to Zn excess. Biologia Plantarum, 2010, 54(3): 502-508.
- [11] Goldstein J I, Newbury D E, Joy D C, Lyman C E, Echlin P, Lifshin E, Sawyer L, Michael J R. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. 3rd ed. Springer, 2003.
- [12] 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): 4548-4553.
- [13] 谭吉华,段青春. 中国大气颗粒物重金属污染、来源及控制建议. 中国科学院研究生院学报, 2013, 30(2): 145-155.
- [14] 朱先磊,张远航,曾立民,王玮. 北京市大气细颗粒物 PM_{2.5} 的来源研究. 环境科学研究, 2006, 18(5): 1-5.
- [15] 杨丽萍,陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究. 环境科学学报, 2002, 22(4): 499-502.
- [16] 宋宇,唐孝炎,方晨,张远航,胡敏,曾立民. 北京市大气细粒子的来源分析. 环境科学, 2002, 23(6): 11-16.

- [17] 任福民, 高明, 张玉磊, 于敏, 许兆义, 汝宜红. 生物质垃圾与煤混烧飞灰颗粒的微观形态特征及能谱研究. 太阳能学报, 2009, 30(11): 1550-1553.
- [18] 李泽熙, 邵龙义, 樊景森, 胡颖, 侯聪. 北京市不同天气条件下单颗粒形貌及元素组成特征. 中国环境科学, 2013, 33(9): 1546-1552.
- [19] 何培明, 孔国辉. 叶片组织结构特征对氯气、二氧化硫的抗性研究. 生态学报, 1986, 6(1): 21-34.
- [20] 杜凤国. 毛白杨气孔的初步研究. 吉林林学院学报, 1991, 7(3): 22-26.
- [21] 何国锦, 刘成东, 杨帆, 郭国林. 南昌市降尘颗粒物形貌特征和来源电子探针研究. 东华理工大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4): 344-348.
- [22] McGee J K, Chen L C, Cohen M D, Chee G R, Prophete C M, Haykal-Coates N, Wasson S J, Conner T L, Costa D L, Gavett S H. Chemical analysis of World Trade Center fine particulate matter for use in toxicologic assessment. Environmental Health Perspectives, 2003, 111(7): 972-980.
- [23] Muscarello L, Rosso F, Marino G, Giordano A, Barbarisi M, Cafiero G, Barbarisi A. A critical overview of ESEM applications in the biological field. Journal of Cellular Physiology, 2005, 205(3): 328-334.
- [24] Song Y, Tang X Y, Xie S D, Zhang Y H, Wei Y J, Zhang M S, Zeng L M, Lu S H. Source apportionment of PM_{2.5} in Beijing in 2004. Journal of Hazardous Materials, 2007, 146(1-2): 124-130.
- [25] Nanos G D, Ilias I F. Effects of inert dust on olive (*Olea europaea* L.) leaf physiological parameters. Environmental Science and Pollution Research-International, 2007, 14(3): 212-214.
- [26] Rai A, Kulshreshtha K, Srivastava P K, Mohanty C S. Leaf surface structure alterations due to particulate pollution in some common plants. Environmentalist, 2010, 30(1): 18-23.
- [27] Pourkhabbaz A, Rastin N, Olbrich A, Langenfeld-Heyser R, Polle A. Influence of environmental pollution on leaf properties of urban plane trees, *Platanus orientalis* L. Bulletin of Environment Contamination and Toxicology, 2010, 85(3): 251-255.