

DOI: 10.5846/stxb202103080635

李耀华, 玉米提·哈力克, 木尼拉·阿不都木太力甫, 陈晖, 阿丽亚·拜都热拉. 城市园林树木叶面微结构特征对大气颗粒物滞留能力的影响. 生态学报, 2022, 42(6): 2228-2236.

Li Y H, Ümüt Halik, Munila Abudumutailifu, Chen H, Aliya Baidurela. Effects of leaf microstructure characteristics of urban trees on atmospheric particulates retention capacity. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2228-2236.

城市园林树木叶面微结构特征对大气颗粒物滞留能力的影响

李耀华^{1,2}, 玉米提·哈力克^{1,2,*}, 木尼拉·阿不都木太力甫³, 陈晖³, 阿丽亚·拜都热拉⁴

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 新疆维吾尔自治区绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433

4 新疆农业大学林学与园艺学院, 乌鲁木齐 830052

摘要: 园林植物叶面微结构会影响其截留大气颗粒物的能力。选取乌鲁木齐市主干道 10 种常见落叶阔叶树种, 采用水洗滤膜法测定不同树种单位叶面积对空气总悬浮颗粒物 (TSP)、大颗粒物 ($PM_{>10}$)、粗颗粒物 (PM_{3-10}) 和细颗粒物 (PM_{1-3}) 的滞纳量, 探究不同粒径颗粒物含量及其占总颗粒物含量的百分比; 用高倍电子显微镜观察叶表面微形态特征 (绒毛长度、气孔半径、凹槽宽度等), 分析叶表面在微观结构下各形态特征与其不同粒径颗粒物吸附能力间的相关性。结果表明: 不同树种单位叶面积颗粒物滞纳量表现出较大差异, 其中榆树总颗粒物滞纳量最高 (53.38 ± 0.71) μg , 是红瑞木总颗粒物滞纳量 (4.90 ± 0.64) μg 的 10 倍; $PM_{>10}$ 颗粒物平均含量占 TSP 约 80%。榆树的 PM_{3-10} 、 PM_{1-3} 滞纳量最高, 达 (9.14 ± 1.08) μg 和 (7.75 ± 0.05) μg , 是其他树种的 3—5 倍。气孔数量与 TSP、 $PM_{>10}$ 颗粒物含量呈显著正相关性, 相关系数均为 0.51 ($P < 0.05$); 绒毛长度与 PM_{1-3} 含量具有显著负相关关系, 相关系数为 -0.57 ($P < 0.05$)。试验树种滞尘主要以大颗粒物为主, 且叶面微结构与大颗粒物滞尘量关系密切; 叶面凹槽与 TSP、 $PM_{>10}$ 、 PM_{1-3} 颗粒物含量呈负相关关系, 其中叶背面凹槽宽度与 $PM_{>10}$ 含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。通过测定 10 种树木叶片滞纳颗粒物含量发现, 榆树、山楂等树木的叶面微结构特征具有较强的颗粒物滞纳能力, 在乌鲁木齐市街道绿化工作中可作为优选物种应用。

关键词: 乌鲁木齐; 大气颗粒物; 滞纳量; 粒径; 叶面微结构

Effects of leaf microstructure characteristics of urban trees on atmospheric particulates retention capacity

LI Yaohua^{1,2}, ÜMÜT Halik^{1,2,*}, MUNILA Abudumutailifu³, CHEN Hui³, ALIYA Baidurela⁴

1 College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 MoE Key Laboratory of Oasis Ecology of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 830046, China

3 Department of Environment Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China

4 College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

Abstract: The leaf micro-structure of garden plants can affect their ability to intercept atmospheric particulate matters. In this study, 10 common deciduous broad-leaved tree species were selected from the main roads in Urumqi, Northwestern China. The retention of total suspended particulate matter (TSP), large particulate matter ($PM_{>10}$), coarse particulate

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31770750, 31971713)

收稿日期: 2021-03-08; 网络出版日期: 2021-11-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: halik@xju.edu.cn

matter (PM_{3-10}), and fine particulate matter (PM_{1-3}) of different tree species per unit leaf area were determined by using water-washed membrane method. The content of particulate matter in different particle classes and its percentage of the total particulate matter content was further investigated. The micro-morphological characteristics of the leaf surface (villi length, stomata radius, and groove width, etc.) were observed with an electron microscope. The correlation between the morphological characteristics of the leaf surface under the micro-structure and the adsorption capacity of different particle sizes was analyzed. The results showed that there were significant differences in the amount of particulate matter per unit leaf area among the 10 tree species, and the amount of total particulate matter in *Ulmus densa* was the highest (53.38 ± 0.71) μg . It is 10 times of the total amount of *Swida alba* (4.90 ± 0.64) μg ; The average content of $PM_{>10}$ particles accounted for about 80% of the TSP. *Ulmus densa* has the highest amount of PM_{3-10} and PM_{1-3} , which were (9.14 ± 1.08) μg and (7.75 ± 0.05) μg . It is 3—5 times of other tree species. There was a significantly positive correlation between the number of stoma and the content of TSP, $PM_{>10}$, and the correlation coefficients were both 0.51 ($P < 0.05$); There was a significantly negative correlation between villus length and PM_{1-3} content, the coefficients -0.57 ($P < 0.05$); The foliar dusts tested in this study were mainly dominated by large particles, and the foliar micro-structure was closely related to the amount of large particles; Leaf surface grooves were negatively correlated with TSP, $PM_{>10}$, and PM_{1-3} content; Among them, leaf abaxial epidermis groove width and $PM_{>10}$ content are correlated negatively, coefficients -0.32 ($P < 0.05$). It is found that the leaf microstructure characteristics of *Ulmus densa* and *Crataegus pinnatifida* lead to their strong dust retention ability, which could be used as preferred species in street greening work in Urumqi.

Key Words: Urumqi; atmospheric particulate matter; retention amount; grain size; leaf surface microstructure

空气中的颗粒污染物对人体健康,尤其是对肺部和心脏造成危害,同时对城市居民的生活质量构成威胁^[1-2]。随着我国城市大气颗粒物污染的加重,因中风、心脏病和肺癌导致的死亡率大幅增涨^[3]。因此,减轻并控制空气颗粒物污染是目前所面临任务中的重中之重。

研究表明,植物叶片可以有效过滤空气中的颗粒物。颗粒物通过重力沉降、扩散(布朗运动)或湍流转移沉积在叶片表面^[4]。树冠的结构会引起空气的湍流运动,从而增加颗粒物在叶片表面的沉积^[5]。不同绿化树种之间的特异性差异决定了其滞留颗粒物能力,主要取决于叶片的结构特征,如叶片绒毛、叶脉密度、叶面粗糙度或凸凹度等^[6]。Beckett 等^[7]发现,相较于叶片光滑的阔叶树种,叶片粗糙的阔叶树种能够更加有效地积累颗粒物。因此,在不同树种之间进行树木对颗粒物滞留能力的比较,有利于选取滞尘能力强的树种在城市绿化设计中优先推广应用^[8]。目前的研究多集中于大气颗粒物在叶片表面的积累^[9-11]。王琴等^[12]对比分析了武汉市 15 种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征之间的关系,但对于干旱、多风沙区域城市园林树木叶面微形态对颗粒物滞留的能力、途径和机制的研究较少^[13]。

干旱区典型绿洲城市——乌鲁木齐市近 20 年来的城市化速度极快,城市交通量增长迅速,因地形逆温所引起的冬季空气污染,导致其成为我国空气污染最严重的城市之一,大气中 $PM_{2.5}$ 含量一直处于全国省会城市前列,恶劣的空气环境对市民健康和生产生活造成不利影响^[14-15]。为科学选择园林绿化树种,提高城市空气质量,降低 $PM_{2.5}$ 等颗粒物污染,本文在乌鲁木齐市河滩快速路两侧选取 10 种常见绿化树种,测定其叶面滞留大颗粒 $PM_{>10}$ 、粗颗粒 PM_{3-10} 、细颗粒 $PM_{2.5}$ 的含量,对比分析各绿化树种滞留不同粒级颗粒物的能力,并探讨植物叶面微结构特征对不同粒级颗粒物拦截效果的影响机理。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

河滩快速公路是乌鲁木齐市南北方向最大的主干道及交通汇聚处,承担着乌鲁木齐市城市道路交通量的 47%,每天约有 30 万辆各类车辆通行^[16]。通过现场勘察,根据树种丰富度和生长状况观测结果,选择河滩快

速路东侧广汇桥底下往南 200 m 处,长 200 m、宽 50 m 的林带为采样带。在样带内,选取距主干道 10 m、25 m、40 m 处设采样点,选择常见的 10 种园林乔灌木,对其叶片滞留大气颗粒物的能力进行对比分析。

1.2 研究方法

1.2.1 树种选择

本文采样点有乔灌木近 30 种,基于对乌鲁木齐市绿地现有绿化树种的基础调查,以及园林树种在城市树种的使用频度、多度和健康状况,对研究样带主要绿化树种进行筛选,选取 10 个绿化树种作为代表性树种,测试它们叶片微结构、粗糙度对叶片滞尘能力的影响。供试的 10 个植物基本信息见表 1。

表 1 供试植物基本信息
Table 1 Basic information of the test plants

树种 Species	科 Family	生活型 Life form	叶习性 Leaf habit	叶型 Leaf type	叶形 Leaf shape	树高 Height/m	胸径 Diameter at breast height/cm	单叶面积 Single leaf area/cm ²
红瑞木 <i>Swida alba</i>	山茱萸科 Cornaceae	灌木	落叶	复叶	椭圆形	2.7	—	28.9
火炬树 <i>Rhus typhina</i>	漆树科 Anacardiaceae	乔木	落叶	复叶	长圆形至披针形	4	19.4	36.8
杨树 <i>Populus tomentosa</i>	杨柳科 Salicaceae	乔木	落叶	单叶	心形	8	89	77.5
山桃 <i>Amygdalus davidiana</i>	蔷薇科 Rosaceae	乔木	落叶	单叶	卵状披针形	5.7	27.9	60
白蜡 <i>Fraxinus rhynchophylla</i>	木犀科 Oleaceae	乔木	落叶	复叶	芽阔卵形或圆锥形	6.8	44	146
旱柳 <i>Salix matsudana</i>	杨柳科 Salicaceae	乔木	落叶	单叶	披针形	6.5	19.3	47.7
忍冬 <i>Lonicera japonica</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	灌木	落叶	复叶	卵心形至卵状长圆形	2.1	—	33
黄金树 <i>Catalpa speciosa</i>	紫葳科 Bignoniaceae	乔木	落叶	单叶	卵心形至卵状长圆形	5.5	22	436.7
山楂 <i>Crataegus pinnatifida</i>	蔷薇科 Rosaceae	乔木	落叶	单叶	宽卵形或三角状卵形	6.4	33.5	79
圆冠榆 <i>Ulmus densa</i>	榆科 Ulmaceae	乔木	落叶	复叶	倒卵状圆形、菱形或倒卵形	6.2	41	28.7

1.2.2 叶片采集方法

为确保取样条件的一致性,防止气象因子对取样的干扰,如雨水等环境因素对叶表面沉积颗粒物冲洗所造成的差异,本研究主要在 2018 年 7 月 30 日至 8 月 10 日期间无雨、晴朗、无风的天气下进行采样。采样前的整个 7 月份无降雨天气,期间空气颗粒物 PM_{2.5}、PM₁₀ 含量平均值为 19 μg/m³、56 μg/m³(www.aqistudy.cn/historydata)。供试样树均在距离道路 10 m 的范围内,选择树木生长状况良好,叶龄相近,无病虫害的健康叶片,所选树种个体长势情况(胸径、树高)保持大致一致。在植株的上、中、下部位及东南西北四个方向均匀采集,单叶较大者采集 20—30 片,较小者采集 40—50 片,每个树种分别选取 3 棵样树采样,样品采集后立即装入保鲜袋内,并尽快带回实验室转移至冰箱内保存。

1.2.3 叶面颗粒物滞留量测定

叶面颗粒物滞留量及其粒径组成采用水洗滤膜法测定。将选取植物叶片放入盛有 140 mL 蒸馏水的烧杯中,用毛刷仔细清洗叶片,随后小心夹出叶片,将清洗液依次通过已处理好的微孔滤膜 A₁(孔径分别为 10 μm、3 μm、1 μm),采用 SHZ—ⅢD 型循环水式真空泵进行抽滤,过滤后的滤膜送至 60 ℃烘箱中烘干至恒质量,再次取出后自然风干使滤膜在常温下进行固定,再用 0.0001 g 的电子天平称量,重量记作 A₂。所得的重量(A₂—A₁)记为叶片表面滞留的所有颗粒物质量,其中直径大于 10 μm 的颗粒物(标记为 PM_{>10}),直径在 3—10 μm 间的颗粒物(标记为 PM₃₋₁₀)、直径在 1—3 μm 间的颗粒物(标记为 PM₁₋₃),以及总颗粒物(TSP)

均可以得到。将清洗后的叶片用吸水纸吸干后置于扫描仪下进行扫描,然后用 Image J 图像处理软件 (Version 1.46, National Institutes of Health, USA) 测定单叶面积。各样品 $PM_{>10}$ 、 PM_{3-10} 、 PM_{1-3} 滞留量和 TSP 滞留量与单叶面积的比值即为单位叶面积颗粒物滞留量 ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$)。

1.2.4 叶面微结构观测

选取所测试树种叶片样品,其中有效样品 10 种,从样本主叶脉两侧中部切成 2—4 份面积约 1 cm^2 的小方块,使用 S3400N 型扫描电子显微镜 (E—1045 型离子溅射装置,日本,日立) 观测叶片表面气孔特征、绒毛特征、叶表面粗糙度、凹槽宽度等微观指标,并进行拍摄。

1.2.5 数据处理

运用 Excel 2016 进行数据预处理。利用 SPSS 22.0 对数据进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 若差异显著则用 LSD 法 (Least-significant difference) 进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同绿化树种叶片滞纳颗粒物比较

由图 1 可知,不同树种间的叶片单位面积颗粒物附着量存在显著差异 ($P<0.05$)。在所测的 10 个树种中总滞尘量 (TSP) 变化范围介于 $(4.90\pm 0.64) \sim (53.38\pm 0.71) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 之间。其中,榆树、山楂、黄金树叶片单位面积吸附量较大,分别达到 (53.38 ± 0.71) 、 (35.45 ± 4.54) 、 $(31.11\pm 0.64) \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 远超总平均滞尘量 $16.87 \mu\text{g}/\text{cm}^2$; 红瑞木叶片单位面积附着量最小,仅为 $(4.90\pm 0.64) \mu\text{g}/\text{cm}^2$; 其余 6 个树种,火炬、杨树、山桃、白蜡、旱柳、忍冬单位叶片颗粒物滞留量分别为 (12 ± 0.47) 、 (12.60 ± 1.43) 、 (13.87 ± 1.55) 、 (15.56 ± 0.9) 、 (19.36 ± 1.9) 、 $(23.8\pm 1.73) \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 与平均滞尘量接近; 根据 10 个树种单位面积叶片对不同粒径空气颗粒物的吸附百分比图所示,所测树木叶片吸附的主要是粒径大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的大颗粒物。10 个树种中,火炬、白蜡、山楂单位面积叶片上 $PM_{>10}$ 颗粒物含量最高,分别占 TSP 的 90.6%、92.9%、90.5%。旱柳、忍冬、榆树单位面积叶片 $PM_{>10}$ 颗粒物则相对较少,分别为 69.5%、69.7%、68.3%; 粗颗粒 PM_{3-10} 占 TSP 的 1%—17%, 其中火炬、白蜡含量最少,仅为 1.18% 和 3%; 细颗粒物 PM_{1-3} 在 TSP 含量中占比最少,单位叶面积颗粒物平均含量占 TSP 的 7.84%, 但各树种 PM_{1-3} 占 TSP 的含量差距较明显,其中黄金树占比最少,仅为 2.2%,旱柳占比最多,为 17.3%; 比较明显的是,旱柳、忍冬、榆树的粗颗粒物 PM_{3-10} 和细颗粒物 PM_{1-3} 含量在所测的 10 个树种中占比较高,原因可能是这三种树木的叶表面微结构对粗、细颗粒物具有更好的吸附性。

2.2 不同种类植物叶表面电镜扫描图

通过观察叶表面结构电镜图可知 (图 2), 火炬、忍冬、榆树气孔结构特征明显,多呈开启状态且气孔密度排列较为紧密,同时气孔周边存在颗粒物。火炬、白蜡、旱柳、榆树叶片正反面都有细长绒毛,且绒毛周边存在颗粒物。黄金树绒毛仅生长在叶片背面,山楂也只有在叶片正面存在绒毛。通过测算,所测树种的绒毛长度排序为:黄金树>山楂>火炬>旱柳>大白蜡>榆树。其中黄金树绒毛最长,为 $374.071\text{ }\mu\text{m}$, 其次是山楂,为 $202.549\text{ }\mu\text{m}$ 。榆树叶片绒毛最短,为 $71.279\text{ }\mu\text{m}$ 。红瑞木、黄金树、山楂、榆树叶片正反面均有沟槽,凹槽内部存在少量颗粒物。除山楂叶片正 ($3.245\text{ }\mu\text{m}$) 反 ($4.095\text{ }\mu\text{m}$) 面凹槽宽度较接近外,其余三个树种叶片凹槽均有一定差距。杨树叶片背面凹槽宽度在所测树种中最大,为 $6.89\text{ }\mu\text{m}$ 。通过以上统计发现,在单位面积叶表面结构中,气孔结构、绒毛长度、沟槽宽度等均与其滞尘量存在相关关系。

2.3 植物叶片滞纳空气颗粒物与其微结构的关系

不同叶片微结构特征能够直接影响叶片表面吸附颗粒物能力。如图 3 和表 2 所示,气孔的孔径长短、密度与单位叶面积滞留总悬浮颗粒物 (TSP) 和 PM_{1-3} 具有相关性,但相关性不显著 ($P>0.05$); 气孔数量、密度与 TSP、 PM_{1-3} 含量呈显著正相关 ($P<0.05$)。此外,绒毛长度、凹槽宽度与叶表面颗粒物含量呈负相关关系,除 PM_{1-3} 含量与绒毛长度呈显著负相关外 ($R=-0.57$; $P<0.05$), 其余粒级含量与绒毛长度相关性并不显著 ($P>0.05$)。总结以上分析,10 个绿化树种叶片微结构中的绒毛长度、气孔半径、凹槽宽度与单位面积各粒级颗粒

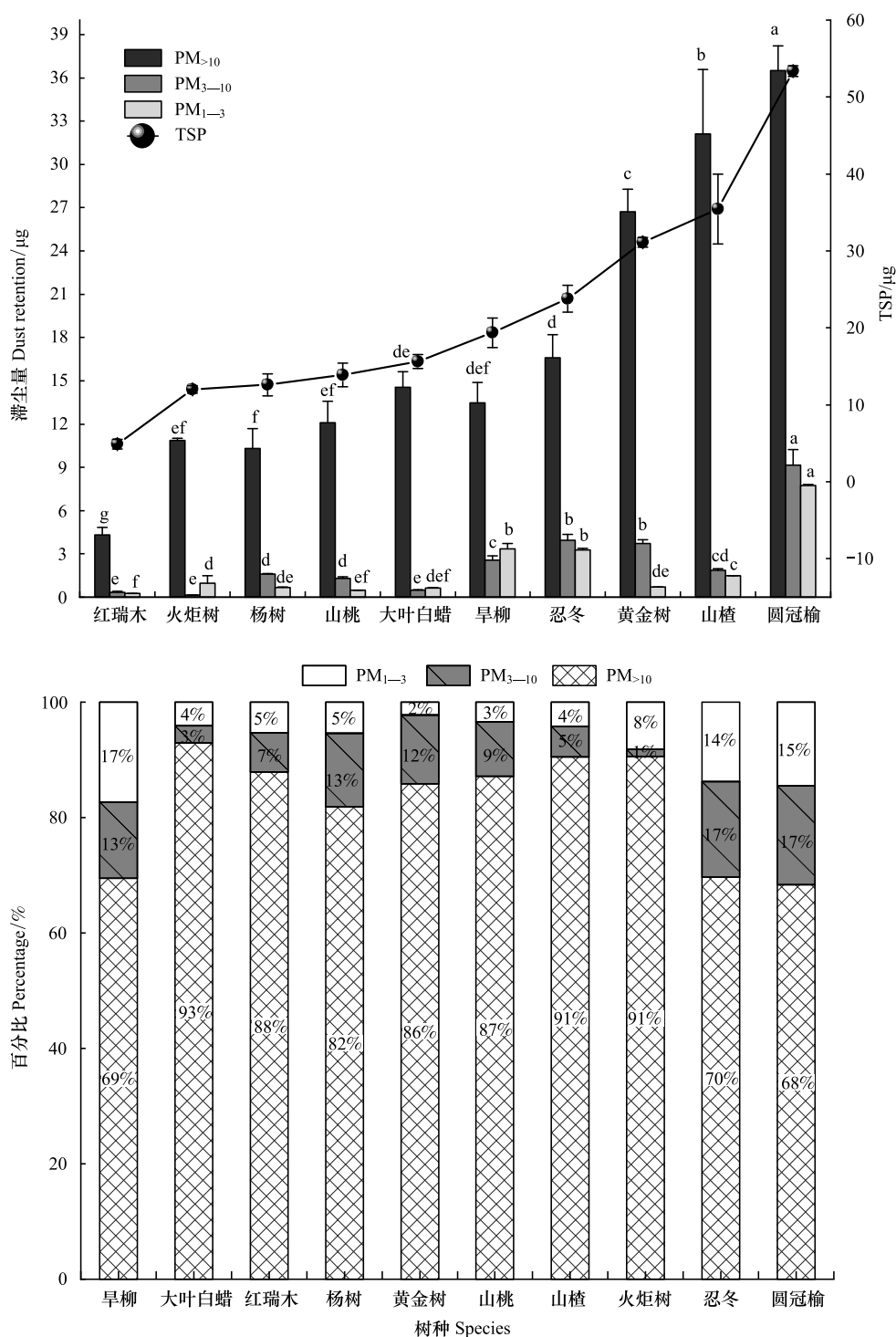


图1 不同树种叶片单位面积附着颗粒物含量

Fig.1 Particulate matter content per unit area of leaves of different tree species

不同字母表示滞尘量在 0.05 水平上显著; TSP: 空气总悬浮颗粒物 Total suspended particulate matter; PM₁₋₃: 细颗粒物 Fine particulate matter; PM₃₋₁₀: 粗颗粒物 Coarse particulate matter; PM₁₀: 大颗粒物 Large particulate matter

物滞留量的关系并不显著,绒毛长度与颗粒物滞留量关系也不显著 ($P>0.05$),气孔不管是长径或短径均不对颗粒物滞留量有直接影响,凹槽宽度越宽反而会造成颗粒物不易滞留,但气孔数量、密度却与颗粒物滞留量呈显著相关性,表明气孔数是叶片滞留颗粒物的主要因素之一,其原因可能与植物通过叶片进行呼吸有关。

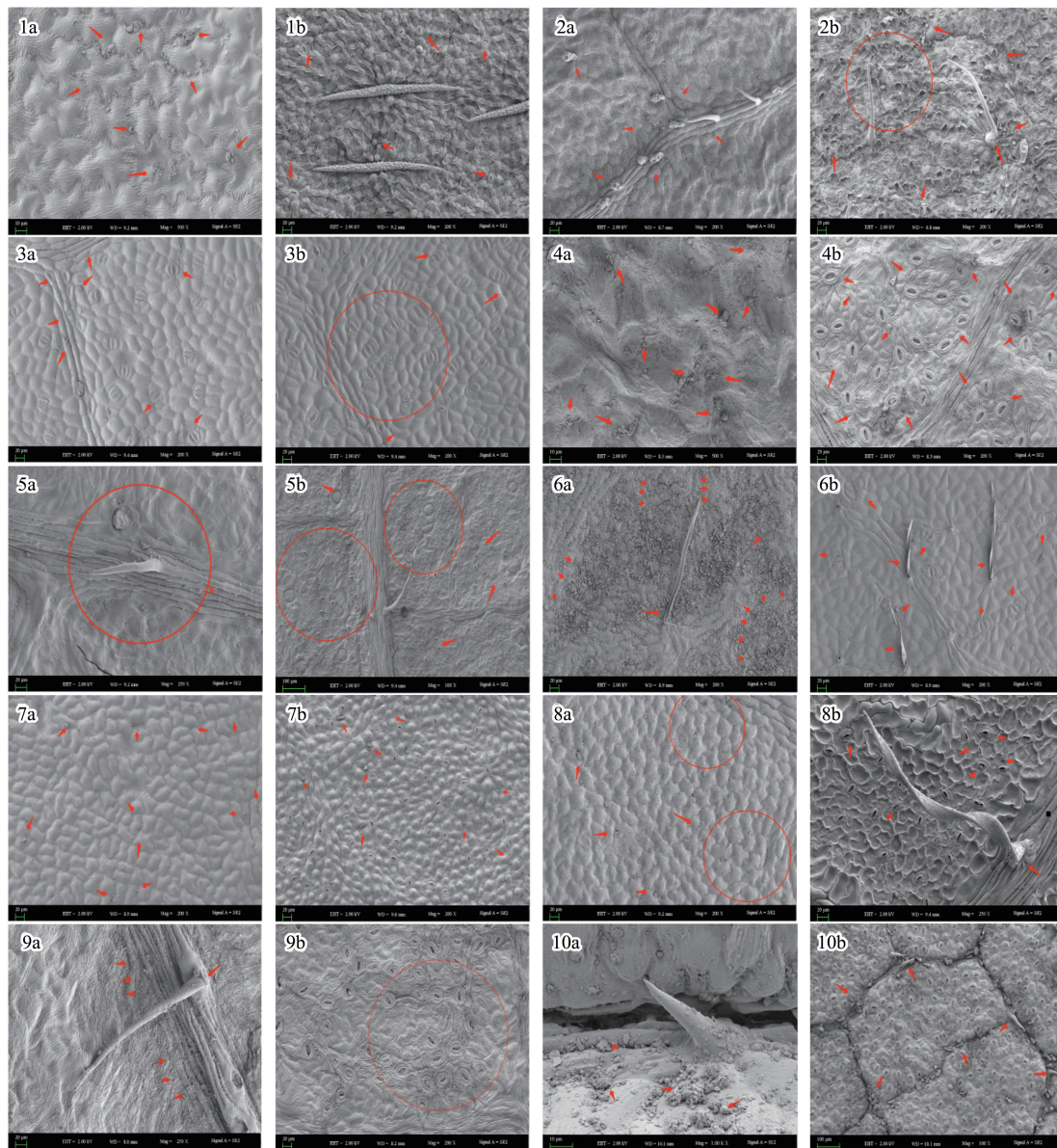


图 2 10 种植物叶面微结构不同倍数下的电镜扫描图像

Fig.2 Electron microscope scans of leaf surface microstructures of 10 plant species at different magnifications

1: 红端木 *S. alba*; 2: 火炬树 *R. typhina*; 3: 白杨树 *P. tomentosa*; 4: 山桃 *A. davidiana*; 5: 大叶白蜡 *F. rhynchophylla*; 6: 旱柳 *S. matsudana*; 7: 忍冬 *L. japonica*; 8: 黄金树 *C. speciosa*; 9: 山楂 *C. pinnatifida*; 10: 圆叶榆 *U. densa*; a: 叶片正面; b: 叶片背面; 1a、5a、8b、9a 放大 250 倍, 5b、10b 放大 100 倍, 4a 放大 500 倍, 10a 放大 1000 倍, 其余图像均放大为 200 倍; 电镜图内的标记处微结构特征明显且颗粒物滞留较密集

表 2 叶表面微结构特征与颗粒物滞留量之间相关性

Table 2 Correlation relationship between microstructural characteristics of leaf surface and particle retention

	气孔 Stomata		绒毛长度 Tomentum	气孔数量 Stomata number	气孔面积 Stomata area	气孔密度 Stomata density	凹槽宽度 Grooved	
	长径	短径					正面	背面
	Major radius	Short radius					Front	Back
PM _{>10}	0.07	0.37	0.13	0.46 *	0.01	0.46 *	-0.15	-0.25
PM ₃₋₁₀	0.13	0.04	-0.18	0.49 *	-0.13	0.49 *	-0.17	-0.33
PM ₁₋₃	0.12	-0.05	-0.57 *	0.51 *	-0.19	0.51 *	-0.10	-0.47
TSP	0.10	0.27	-0.05	0.51 *	-0.05	0.51 *	-0.16	-0.32

*: 在 0.05 级别 (双尾), 相关性显著; PM_{>10}: 大颗粒物 Large particulate matter; PM₃₋₁₀: 粗颗粒物 Coarse particulate matter; PM₁₋₃: 细颗粒物 Fine particulate matter; TSP: 空气总悬浮颗粒物 Total suspended particulate matter

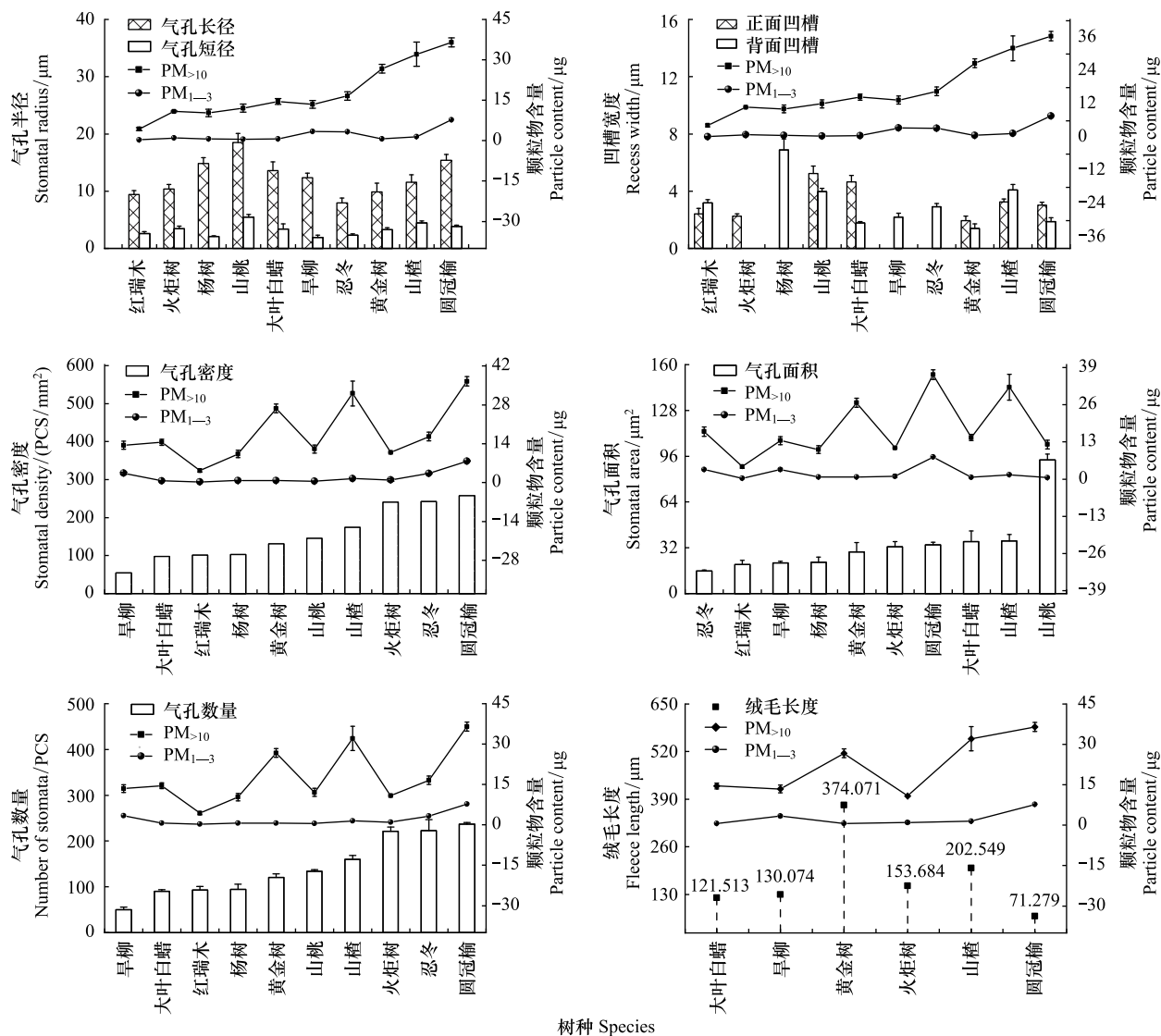


图3 测试树种的叶面微结构与滞尘含量变化

Fig.3 Variation of leaf surface microstructure and stagnant dust content of the tree species

3 讨论

3.1 环境因素对不同粒径颗粒物滞留量的影响

树木在滞留空气中颗粒物方面发挥着重要的作用,被称为“城市粉尘过滤器”,研究植被滞留 $PM_{2.5}$ 等颗粒物能力的差异,对城市园林绿化树种的选择具有重要意义^[17]。树木对颗粒物的吸附作用主要是植物叶片、树干等器官或某些特殊结构对 $PM_{2.5}$ 的滞留作用^[18]。本研究主要针对植物通过叶片滞留颗粒物的方式进行探讨。

查燕等^[19]以石楠(*Photinia serrulata*)、海桐(*Pittosporum tobira*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)和二球悬铃木(*Platanus orientalis*)为例对城市植被吸附不同粒径大气颗粒物进行了研究,发现叶面颗粒物以 PM_{10} 为主,其颗粒物所占质量分数最大,平均为 67.54%。王兵等^[20]对北京市 6 种典型落叶乔木树种单位面积叶片对空气总悬浮颗粒物、粗颗粒物、细颗粒物的滞纳量进行测定,发现栎树等单位叶面积粗颗粒物平均占 TSP 含量的 50%。张维康等^[21]对北京市主要的 20 种树种进行了测定,测得不同粒级颗粒物所占比例在树种间存在显著

差异,在叶表面滞纳颗粒物中, PM_{10} 占 TSP 的 58.74%—92.82%,而 PM_{1-3} 占 PM_{10} 的比例为 16.90%—63.75%。Sæbø 等^[22]对挪威 23 种绿化植物单位叶面积滞尘量的测定结果显示,细颗粒物(0.2—2.5 μm)占总滞尘量比例变化为 4.78%—36.09%,平均比例为 12.37%。以上结果与本实验结果相近,但本实验大颗粒物占 TSP 平均含量高于以上研究结果。本研究中,所测得 10 种植物叶片表面滞留的颗粒物以 $PM_{>10}$ 为主,其中 $PM_{>10}$ 颗粒物平均含量占 TSP 平均含量的 79.9%,火炬、白蜡、山楂的 PM_{10} 颗粒物平均含量甚至达到 TSP 含量的 90%。 PM_{1-3} 颗粒物的含量则相对较少,平均含量占 TSP 不到 10%。榆树不同粒级颗粒物滞留量是红瑞木滞留量的 9—11 倍之多,这表明叶片表面所滞留大颗粒物占总颗粒物的比例、细颗粒物占总颗粒物、细颗粒占大颗粒物的比例因树种差异而不同^[23],造成不同树种单位叶面积滞留颗粒物含量差异可能是植物特性、气候和其他环境因素之间复杂相互作用的结果^[24]。研究区位置的选取也是造成不同粒径颗粒物滞留差异的原因之一,本研究采样点选在快速公路主干道旁,较大的车流量携带着大量颗粒污染物,同时汽车尾气和轮胎磨损颗粒物会导致大颗粒污染物的含量在空气中明显增多^[25]。

3.2 叶面微结构特征对颗粒物滞留量的影响

通过观察试验植物叶片扫描电镜图发现,叶片表面微结构形态与颗粒物附着密度有着对应关系^[26—27]。叶片的气孔半径、密度、面积、数量、分布状况以及叶表面的绒毛与凹槽等对叶表面滞尘能力有不同程度的影响^[28]。鲁邵伟等^[29]通过观察叶表面微形态特征,并分析叶表面粗糙度等参数,发现叶片粗糙度与单位叶面积 PM_{1-3} 吸附量呈显著正相关($P<0.01$)。贾彦等^[30]认为粗糙程度大、微形态结构密集和深浅差别大的叶面,会增加其与颗粒物的接触面积,使得叶片对颗粒物的滞留量较高。本研究发现,叶表面气孔形态特征明显、气孔数量较多且密度较大等叶面微结构特征有利于滞留更多的颗粒物,故吸附 PM_{1-3} 及其他粒径颗粒物的能力较强,如黄金树、山楂、榆树等气孔数量较多的树种,其单位叶面积滞尘量在一同测试树种中位居前列,这与张鹏骞等^[31]研究发现,叶面气孔数量及其形态、分布特征对滞尘能力有重要影响结果相一致。植物叶表面微结构特征与滞留 TSP 含量之间存在相关性,其中 $PM_{>10}$ 平均颗粒物占 TSP 含量约 80%,两者与叶面微结构特征相关性几乎达到一致,说明大颗粒物滞留量与叶表面微结构特征有着密切关系^[32]。植物叶片气孔开度大且排列密集能增加颗粒物与叶片的接触面积,从而增加叶片对颗粒物的吸附作用^[33]。榆树、黄金树等树种叶表面气孔特征明显,气孔数量、密度均与滞尘量存在相关关系,其原因可能是上述植物叶表面气孔蒸腾作用强烈,部分亲水性颗粒物更易被吸附在叶表面^[34]。山桃、白杜等树种叶表面具有宽度较宽的沟槽,但其滞尘量远不及山楂、海棠树,同时通过数据对比发现这几种拥有较宽沟槽的树种与其滞尘量呈负相关关系,表明沟槽宽度过大会导致 TSP 及其中 PM_{1-3} 等颗粒物不易停留在沟槽处,即使存在颗粒物也不会停留很久,易松动脱落^[35]。

4 结论

本文通过使用高精度电子显微镜,对乌鲁木齐河滩快速路 10 种园林树木单位叶面积不同粒径滞留物含量进行测定,分析了树木叶表面微结构与滞留物含量之间的关系。主要研究结论如下:

(1) 所测试树种间不同粒级颗粒物含量差异明显,最高颗粒物滞留含量是最低颗粒物滞留含量的 10 倍。造成不同树种单位叶面积滞留颗粒物含量差异可能是植物特性、气候和其他环境因素之间复杂相互作用的结果。

(2) 植物叶表面气孔特征、绒毛长度、凹槽宽度会影响叶片对不同粒径颗粒物滞留效果,气孔特征越明显,气孔数量越多的叶片表面颗粒物含量较多,其原因可能是植物叶表面气孔蒸腾作用强烈,部分亲水性颗粒物更易被吸附在叶表面。叶片表面凹槽宽度越宽颗粒物含量反而降低,凹槽过大会导致 PM_{1-3} 等颗粒物不易停留。

(3) 对比所选 10 种城市园林树木叶面微结构对大气颗粒物的滞留能力,榆树滞留不同粒径颗粒物含量远超其他树种,在未来的城市绿化工作中可作为优先考虑的道路绿化树种。

参考文献 (References):

- [1] Freer-Smith P H, Beckett K P, Taylor G. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campestre*, *Populus deltoides* $\times$ *trichocarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and $\times$ *Cupressocyparis leylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the urban environment. *Environmental Pollution*, 2005, 133(1): 157-167.
- [2] 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.
- [3] Van Zelm R, Preiss P, Van Goethem T, Van Dingenen R, Huijbregts M. Regionalized life cycle impact assessment of air pollution on the global scale: damage to human health and vegetation. *Atmospheric Environment*, 2016, 134: 129-137.
- [4] Cavanagh J A E, Zawar-Reza P, Wilson J G. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2009, 8(1): 21-30.
- [5] McDonald A G, Bealey W J, Fowler D, Dragosits U, Skiba U, Smith R I, Donovan R G, Brett H E, Hewitt C N, Nemitz E. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM₁₀ in two UK conurbations. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(38): 8455-8467.
- [6] Shi J N, Zhang G, An H L, Yin W L, Xia X L. Quantifying the particulate matter accumulation on leaf surfaces of urban plants in Beijing, China. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(5): 836-842.
- [7] Beckett K P, Freer-Smith P, Taylor G. Effective tree species for local air-quality management. *Journal of Arboriculture*, 2000, 26(1): 12-19.
- [8] 王芳,熊善高,李洪远,李兰兰,张清敏,贺梦璇. 天津空港经济区绿化树种滞尘能力研究. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(1): 100-104.
- [9] 阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 阿不都拉·阿布力孜, Welp M. 新疆阿克苏市绿化树种滞尘能力及影响因素. *中国沙漠*, 2015, 35(2): 322-329.
- [10] 杨貌, 张志强, 陈立欣, 刘辰明, 邹瑞. 春季城区道路不同绿地配置模式对大气颗粒物的削减作用. *生态学报*, 2016, 36(7): 2076-2083.
- [11] 阿丽亚·拜都热拉, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 凯丽比努尔·努尔麦麦提. 干旱区绿洲城市主要绿化树种最大滞尘量对比. *林业科学*, 2015, 51(3): 57-64.
- [12] 王琴, 冯晶红, 黄奕, 王鹏程, 谢梦婷, 万好, 苏泽琳, 王仁鹏, 王征洋, 余刘思. 武汉市 15 种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征. *生态学报*, 2020, 40(1): 213-222.
- [13] Halik Ü. Urban Greening in Arid Regions: the Example of the Oasis Cities in Southern Xinjiang/China, with Special Consideration of Ecological, Socio-Economical, and Cultural Aspects[D]. Berlin: Technical University of Berlin, 2003.
- [14] 王鸥, 何秉宇. 基于灰色关联度的乌鲁木齐市 PM_{2.5} 与环境空气质量六要素关系的探讨. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(6): 176-181.
- [15] 李惠玲, 何秉宇, 玉米提·哈力克, 娜斯曼·那斯尔丁, 张凯迪. 干旱区城市森林大气颗粒物浓度变化特征及其与环境因子的关系. *江苏农业科学*, 2020, 48(18): 294-299.
- [16] 阿丽亚·拜都热拉, 甄敬, 潘存德, 张中远, 胡梦玲, 喀哈尔·扎依木. 乌鲁木齐市河滩快速路林带内颗粒物浓度变化特征. *新疆农业大学学报*, 2019, 42(5): 378-384.
- [17] Davila A F, Rey D, Mohamed K, Rubio B, Guerra A P. Mapping the sources of urban dust in a coastal environment by measuring magnetic parameters of *Platanus hispanica* leaves. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(12): 3922-3928.
- [18] 李海梅, 刘霞. 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*, 2008, 27(10): 1659-1662.
- [19] 查燕, 马华升, 俞祥群, 张银龙. 城市绿化植物对不同粒径大气颗粒物的吸附特征研究. *环境污染与防治*, 2020, 42(7): 807-811, 819-819.
- [20] 王兵, 王晓燕, 牛香, 张维康, 汪金松. 北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能. *环境科学*, 2015, 36(6): 2005-2009.
- [21] 张维康, 王兵, 牛香. 不同树种叶片微观结构对其滞纳空气颗粒物功能的影响. *生态学杂志*, 2017, 36(9): 2507-2513.
- [22] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin H M, Gawronska H, Gawronski S W. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. *Science of the Total Environment*, 2012, 427-428: 347-354.
- [23] 张少伟, 岳晨, 詹振枫, 段劼, 曹治国, 刘俊祥, 古琳. 4 种柳树叶片表面易去除与难去除颗粒物滞纳特征. *林业科学*, 2020, 56(6): 26-34.
- [24] Dzierzanowski K, Popek R, Gawronska H, Sæbø A, Gawronski 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.
- [25] Leonard R J, McArthur C, Hochuli D F. Particulate matter deposition on roadside plants and the importance of leaf trait combinations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2016, 20: 249-253.
- [26] 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 杨聘聘. 7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征. *环境科学*, 2013, 34(6): 2361-2367.
- [27] 李少宁, 鲁绍伟, 刘斌, 鲁笑颖, 陈军丽, 李辉. 北京主要绿化树种叶表面微形态与 PM_{2.5} 吸滞能力. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(8): 98-107.
- [28] 谢滨泽, 王会霞, 杨佳, 王彦辉, 石辉. 北京常见阔叶绿化植物滞留 PM_{2.5} 能力与叶面微结构的关系. *西北植物学报*, 2014, 34(12): 2432-2438.
- [29] 鲁绍伟, 蒋燕, 李少宁, 赵娜, 陈波. 北京西山绿化树种 PM_{2.5} 吸附量及叶表面 AFM 特征分析. *生态学报*, 2019, 39(10): 3777-3786.
- [30] 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.
- [31] 张鹏骞, 朱明溟, 刘艳菊, 杨峥. 北京路边 9 种植物叶片表面微结构及其滞尘潜力研究. *生态环境学报*, 2017, 26(12): 2126-2133.
- [32] 刘金强, 曹治国, 郭泽敏, 段劼, 康佳, 刘欢欢, 闫广轩, 席本野. 植物叶片表面水溶与非水溶性颗粒物滞纳量分离定量评估—以 5 种植物为例. *应用生态学报*, 2019, 30(5): 1763-1771.
- [33] 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): 7522-7530.
- [34] 木尼拉·阿不都木太力甫, 玉米提·哈力克, 塔依尔江·艾山, 买尔当·克依木, 娜斯曼·那斯尔丁, 艾力亚·艾尼瓦尔. 乌鲁木齐市主要大气污染物浓度变化特征研究. *生态环境学报*, 2018, 27(3): 533-541.
- [35] 吕铃钥, 李洪远, 杨佳楠. 植物吸附大气颗粒物的时空变化规律及其影响因素的研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(2): 524-533.