

不同海拔与冠层高度对榆树叶片滞留颗粒物能力的影响

苏比努尔·沙吾尔丁¹, 张凯迪^{1,2}, 玉米提·哈力克^{1*}, 李耀华¹

(1. 新疆大学 生态与环境学院/绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 中钢集团武汉安全环保研究院有限公司, 湖北 武汉 430080)

摘要:探究园林植物叶片对大气颗粒物的滞留能力在不同海拔与冠层高度上的差异,以乌鲁木齐荒山绿化示范区—雅玛里克山榆树(*Ulmus pumila*)人工林为研究对象,通过叶面尘收集、叶面积测定、洗脱过滤称重等监测方法及多因素方差分析法,对比分析不同海拔、不同冠层高度的榆树叶片对不同粒径大气颗粒物的滞纳能力差异。结果表明,1)榆树单位叶面积 $PM_{0.2\sim3}$ 、 $PM_{3\sim10}$ 滞纳量随着海拔升高呈现出“先减后增”的趋势,在海拔 960 m 处滞尘效果最佳;而叶片对 $PM_{>10}$ 的滞纳量则随海拔的增加呈现出典型的双峰型变化趋势,在海拔 844 m 处滞尘效果最佳。2)树冠不同高度上叶片滞尘量随时间推移而增多,且叶片对 $PM_{0.2\sim3}$ 的滞纳量受冠层高度差异的影响,冠层高度 2 m 处的榆树叶片对 $PM_{0.2\sim3}$ 的滞留量明显高于 4 m 和 6 m 处的叶片滞尘量($P<0.05$),但不同冠层高度叶片对 $PM_{3\sim10}$ 、 $PM_{>10}$ 的滞纳量无显著差异($P>0.05$)。3)多因素方差分析表明,海拔、冠层高度、观测天数、海拔×试验天数及海拔×冠层高度×试验天数的交互作用都对榆树单位叶面积 $PM_{0.2\sim3}$ 、 $PM_{3\sim10}$ 、 $PM_{>10}$ 滞纳量有显著影响($P<0.01$)。榆树叶片滞留颗粒物的能力不仅受到冠层高度的影响,也受海拔差异的影响。因此,在园林树种选配和城市绿化规划工作中应考虑冠层差异和海拔梯度对园林植物滞尘能力的影响。研究结果可为干旱区城市园林绿化实践提供数据支撑。

关键词:海拔梯度;冠层;榆树;大气颗粒物;乌鲁木齐

中图分类号:S719

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0054-07

Influence of Different Altitudes and Canopy Heights on the PM Retention Capacity of Elm Leaves

Subinur SAWIRDIN¹, ZHANG Kai-di^{1,2}, Ümüt HALIK^{1*}, LI Yao-hua¹

(1. College of Ecology and Environment/Ministry of Education Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China; 2. Sinosteel Wuhan Safety & Environment Protection Research Institute, Wuhan 430080, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the difference of atmospheric particulate matter retention capacity of plant leaves in different tree canopy layers at different elevations, we selected the elm (*Ulmus pumila*) plantations with different altitude gradients of the barren greening area in Yamalik Mountain in Urumqi as the research objects. The elm trees at different altitudes and canopy heights in Yamalik urban forest parks were studied by using the methods of leaf dust collection, leaf area measurement, elution filtration and weighing. The results showed that 1) the retention amount of elm leaves to $PM_{0.2-3}$ and PM_{3-10} decreased first and then increased with the increase of altitude, and the optimum value was at 960 m above sea level. The retention amount of $PM_{>10}$ on the leaves showed a typical two two-peak trend with the increase of altitude, and the best value was at 844 m above sea level. 2) The amount of dust retention on the leaves with differ-

收稿日期:2022-09-20 修回日期:2022-10-30

基金项目:新疆维吾尔自治区区域协同创新专项项目(2022278346);国家自然科学基金项目(31770750)。

第一作者:苏比努尔·沙吾尔丁。研究方向:城市生态。E-mail:verisa@qq.com

*通信作者:玉米提·哈力克,教授,博士生导师。研究方向:干旱区资源与环境。E-mail:halik@xju.edu.cn

ent canopy heights increased with time, and there was significant difference in $PM_{0.2-3}$ on the leaves with different canopy heights. The retention of $PM_{0.2-3}$ at 2 m canopy layer was significantly higher than those at 4 and 6 m of canopy layer ($P < 0.05$), no significant differences were found for PM_{3-10} and $PM_{>10}$ ($P > 0.05$). 3) Multivariate variance analysis showed that the interaction of altitude, canopy height, survey days, altitude \times survey days and altitude \times canopy \times survey days had significant effects on the amount of $PM_{0.2-3}$, PM_{3-10} and $PM_{>10}$ ($P < 0.01$). The benefits of elm leaves stagnating particulate matter differ not only by the change of canopy height, but also by the change of altitude gradient, so this difference needs to be considered in the planning and construction of urban park green belts. The results can provide data support for urban greening practices in arid regions.

Key words: altitude gradient; canopy layer; elm (*Ulmus pumila*); atmospheric particulate matter; Urumqi

大气颗粒物是影响空气质量的主要污染物。特别是 $PM_{2.5}$ 通过血液进入肺泡,引发心肺疾病、肺癌和脑损伤等疾病,严重影响人体健康^[1-2]。植物叶面比其他暴露表面更有效地吸收气体化合物,并通过拦截、撞击或沉积作用滞累微颗粒物。城市树木及其叶片被广泛用作生物过滤器,滞留空气中的颗粒物^[3]。由于叶表面、叶形和分枝结构不同,植物对 PM 的滞留能力因物种而异^[4]。植物通过叶片蒸腾和遮荫能降低空气温度和湿度,从而促进颗粒物滞留在叶片上^[5]。Liu 等^[6]采用超声波清洗叶片的方法对北京 5 种绿化树种滞尘大气颗粒物能力、效率及机理进行研究,发现超声清洗的 PM 洗脱效果是稳定的,并应以具体的情况为不同的树种选择合适的超声参数。Lu 等^[7]的研究结果表明,植物滞留大气颗粒的能力与叶片的表面粗糙度、形态等微形态结构密切相关,这种结构差异使针叶树的单位叶面积粉尘吸附能力增强,而叶片有光泽的树种的滞尘能力较弱。Nowak 等^[8]为了估算美国 10 个城市的园林树木对 $PM_{2.5}$ 的去除效果,应用 Ben MAP 模型预测了 $PM_{2.5}$ 浓度变化对人类发病率和死亡率的影响以及估算了树木滞尘的经济价值,证明了树木覆盖率与 $PM_{2.5}$ 的密切关系,并建议应最大程度地降低 $PM_{2.5}$ 的暴露程度。凯丽比努尔·努尔麦麦提等^[9]对乌鲁木齐市快速路不同绿化树种叶片结构对微颗粒物的滞尘量进行对比分析,证明了不同叶片形状、叶面积、叶面微结构(气孔密度、凹凸度、绒毛、黏度)对 PM 有不同程度的削减作用。目前,有关园林植物叶片滞尘量的研究主要集中在叶面形态、植物种类和植物配置结构上^[10],而不同海拔梯度下城市树木对大气颗粒物滞纳量的时空变化研究却鲜少报道。

乌鲁木齐市大气中 $PM_{2.5}$ 的主要来源为燃煤源、汽车尾气和石油等混合源^[11]。雅玛里克山地处乌鲁木齐市沙依巴克区辖区内,面积约 40 km²。由于植被稀少,水土流失严重,大量沙尘从山上刮入市

区,造成空气污染。经过 20 余年的荒山绿化,现绿化面积达 200 hm²,已成为乌市的“绿肺”,对城市空气质量的改善起到了关键作用。本研究对乌鲁木齐市雅玛里克公园不同海拔榆树叶片滞纳颗粒物能力进行对比分析,阐释城市森林对大气颗粒物的净化作用,揭示园林树木对不同粒径颗粒物($PM_{0.2-3}$ 、 PM_{3-10} 、 $PM_{>10}$)滞纳量在海拔与冠层高度上的差异,为干旱区城市生态建设及园林绿化方案的优化提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

雅玛里克山森林公园位于乌鲁木齐市西北部(87°33'16"—87°34'56" E, 43°45'44"—43°47'25" N)(图 1),地势南高北低,平均海拔为 850 m,主峰为青年峰,高达 1 397.6 m,属中温带荒漠气候区,夏季干旱、春秋较湿润、温差大、降水稀少,年均气温 6.6℃,年均降水量 266.9 mm,蒸发量 2 731 mm^[12,15]。受干旱大陆性气候影响,植被以耐旱的乡土乔灌木为主,群落结构单一,主要树种有榆树(*Ulmus pumila*)、小叶白蜡(*Fraxinus bungeana*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)等,主要灌木包括刺叶锦鸡儿(*Caragana acanthophylla*)、小蓬(*Nanophyton erinaceum*)等。随着乌鲁木齐渐渐西扩,雅玛里克山森林公园逐渐从城市周边演变成为城市中心,是乌鲁木齐的一大生态屏障。且选样考虑到雅玛里克森林公园面积较大,树木距燃煤和汽车尾气排放等污染源较远,加上植物类型单一、年龄长势均匀,相比城市其他类型绿地,其立地条件较为近自然并稳定,可有效避免不同海拔以外因素的影响。

1.2 样木选择

榆树是北方主要园林绿化树种,冠大荫浓,树体高大,适应性强,是北方城镇、农村“四旁”绿化的主要树种,具有抗污染性,叶面滞尘能力强等功能,也是防风固沙、水土保持和盐碱地造林的重要树

种^[13]。榆树也是雅玛里克山森林公园的优势树种,在公园内大面积栽植。本研究选择林龄相近的榆树作为研究对象,根据研究区海拔梯度变化、实地地形地貌以及树木分布和年龄、长势情况,为了便于采样操作和安全性,在 5 个不同海拔(844、869、910、930、960 m)分别选取 3 棵榆树样木,测量其树高、胸径、冠幅等树形参数。海拔统计分析结果 Z 为 0.369, P 为 $0.999 > 0.05$ (sig 2-tailed),呈近似正态分布,基本信息如表 1 所示。

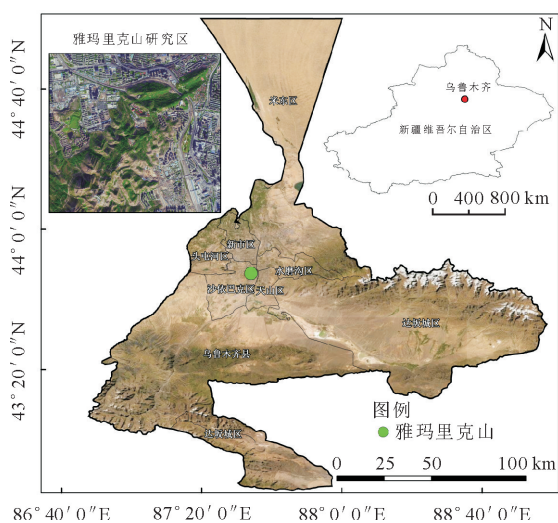


图 1 研究区位置

Fig. 1 The location of study area

表 1 不同海拔榆树样木的基本信息

Table 1 Basic information of elm sample trees at different altitudes

| 海拔/ m | 平均 树高/m | 平均 胸径/cm | 平均冠幅/m | |
|----------|------------|-------------|-----------|-----------|
| | | | 东西 | 南北 |
| 844 | 6.94±0.81 | 20.31±0.41 | 4.68±0.24 | 3.22±0.31 |
| 869 | 7.52±0.68 | 19.58±0.25 | 5.11±0.36 | 4.05±0.22 |
| 910 | 7.68±0.32 | 16.94±0.56 | 5.88±0.27 | 3.22±0.36 |
| 930 | 6.81±0.76 | 18.45±0.36 | 5.24±0.25 | 3.51±0.45 |
| 960 | 6.76±0.55 | 19.12±0.27 | 4.65±0.42 | 4.78±0.33 |

1.3 叶片采集

每个海拔分别选择 3 棵林龄相近的样木,分别从样木树冠 2、4、6 m 高度的东、南、西、北 4 个方向均衡采集健康成熟的叶片 20~40 个(图 2),将采集的叶片迅速装入保鲜袋中,并标记采样海拔、时间、冠层高度;样品带回实验室后,通过叶面尘收集、叶面积测定、洗脱过滤称重等方法获取叶片表面滞留的大气颗粒物。前人研究表明,15 mm 的降水或 $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的大风可冲走叶片上滞留的灰尘^[14]。因此,为了降低雨水冲刷对叶片滞尘造成的误差,将雨后第 4 天首次采样,随后以每 4 d 为采样间隔,累计采样 5 次,共 20 d。

1.4 单位叶面积颗粒物滞留量测定

将采集的叶片放在 500 mL 蒸馏水中浸泡 30 min 后,轻刷叶片上的黏附颗粒物,洗好的叶片放在 A4 纸上晾干 48 h,晾干后对叶片进行扫描,再利用 Image J 软件测定其叶面积(A)。浸洗液用孔径为 10.0、3.0、0.2 μm 的微孔滤膜(M_1)抽滤,滤膜滞留的颗粒物分别视为 $\text{PM}_{>10}$ 、 $\text{PM}_{3\sim10}$ 、 $\text{PM}_{0.2\sim3}$ 。将过滤后的滤膜放入 60 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干至恒重,再用万分之一电子秤称重(M_2),2 次质量之差($M_2 - M_1$)即为各粒径级叶面滞留颗粒物的量^[15]。单位叶面积滞留量 X ($\mu\text{m}/\text{cm}^2$) 计算公式为

$$X = (M_2 - M_1) / A$$

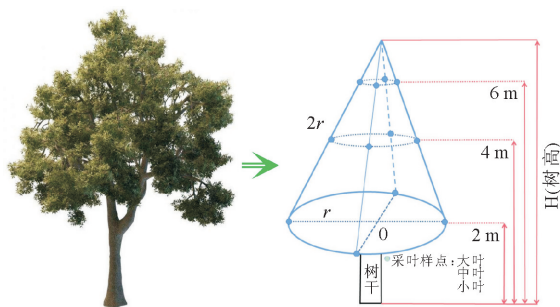


图 2 树冠不同采样点示意图

Fig. 2 Sampling points in different canopy heights

1.5 数据处理

采用 Excel 软件进行数据整理,并完成制表;运用 SPSS 19 软件对数据进行单因素方差分析和差异检验,同时对榆树在不同海拔不同冠层的单位叶面积滞留量进行多重比较;利用 Origin 2018C 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同高度冠层叶片的滞纳量

不同高度冠层叶片单位叶面积对不同粒径颗粒物的滞纳量变化趋势呈现一致性(图 3),即雨后滞尘量随时间的推移逐渐增加,在采集的第 1 天(雨后第 4 天)为最低,最后一天(雨后第 20 天)达最高值,但榆树不同高度冠层叶片滞尘量差异并无明显变化。如图 3A 所示,榆树距地面 2 m 处叶片对 $\text{PM}_{0.2\sim3}$ 的滞纳量显著高于 4 m 和 6 m 处的叶片 ($P < 0.05$),而距地面 4 m 和 6 m 高度之间叶片对 $\text{PM}_{0.2\sim3}$ 的滞纳量没有显著差异 ($P > 0.05$)。由图 3B 和图 3C 可知,榆树距地面 2 m 处叶片对 $\text{PM}_{3\sim10}$ 、 $\text{PM}_{>10}$ 滞纳量虽然高于 4 m 和 6 m 处的叶片,但无显著性差异 ($P > 0.05$)。可见,不同冠层高度叶片对不同粒径颗粒物的滞纳作用有明显差异。

2.2 不同海拔榆树叶面颗粒物滞纳量

由图 4 可知,榆树单位叶面积 $\text{PM}_{0.2\sim3}$ 、 $\text{PM}_{3\sim10}$

的滞纳量随海拔的增加呈现出先减少后增加的趋势。在海拔为 910 m 时,距地面 2 m 和 4 m 处冠层单位叶面积滞纳 $PM_{0.2\sim3}$ 、 $PM_{3\sim10}$ 效果最差,而距地面 6 m 处冠层叶片在海拔为 869 m 时滞纳能力较差,其不同冠层叶片对 $PM_{0.2\sim3}$ 、 $PM_{3\sim10}$ 的滞纳量都在海拔 960 m 处达到最佳。而叶片对 $PM_{>10}$ 的滞纳量则随海拔的增加呈现典型的双峰型变化趋势。即叶片滞尘量从海拔 844 m 开始下降,到海拔 910 m 时滞尘量最低,高于 910 m 后叶片对 $PM_{>10}$ 滞纳量逐渐增大,在海拔 930 m 处达第 2 个峰值,之后随海拔增加叶片对 $PM_{>10}$ 的滞纳量逐渐减少。对单位叶面积 $PM_{>10}$ 滞纳效果进行比较,发现海拔为 844 m 时不同冠层叶片滞纳 $PM_{>10}$ 效果最佳。由上可知,海拔梯度对滞尘量影响较大,且对不同粒径大气颗粒物的滞纳能力不尽相同。大致在海拔 910 m 处叶片对不同粒径大气颗粒物滞纳能力均较差,而叶片对不同粒径大气颗粒物最佳滞纳量在海拔上存在明显不同。

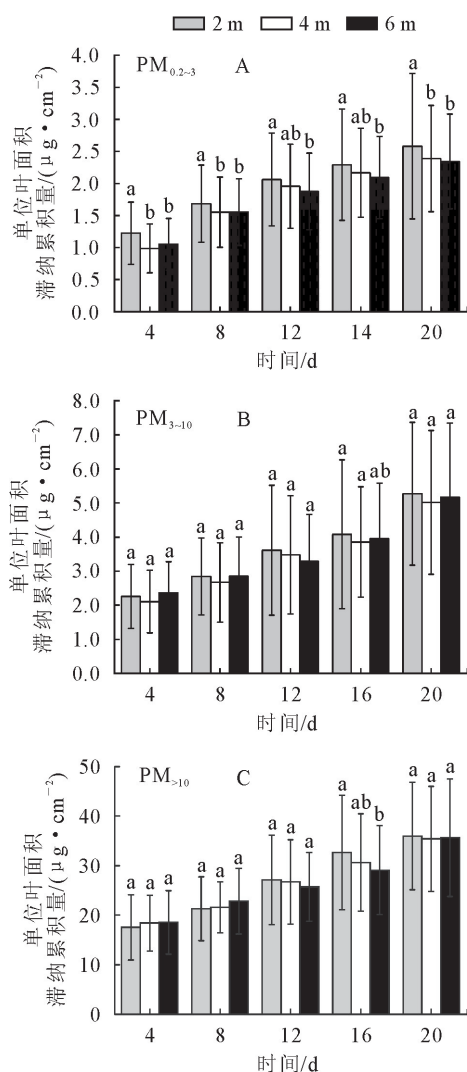


图3 不同冠层高度单位叶面积滞尘量变化

Fig. 3 Variation of leaf dust content per unit leaf area of different canopy heights

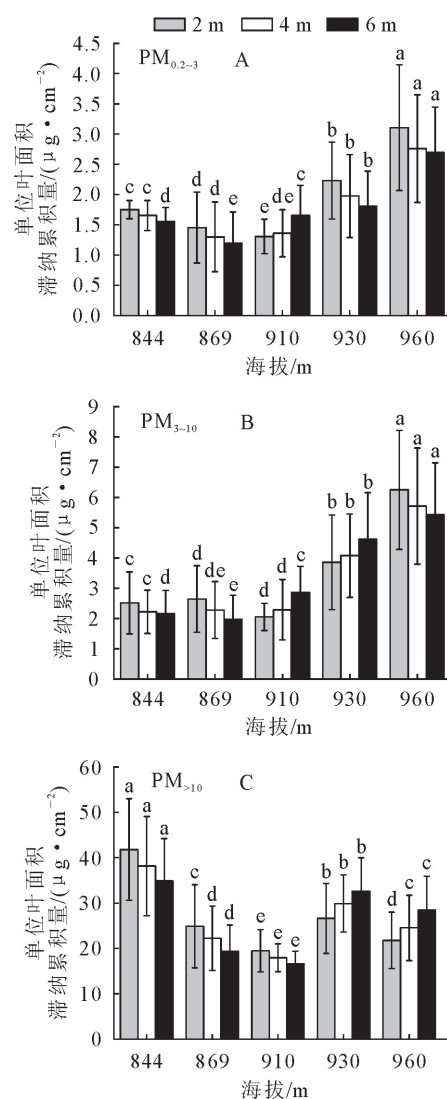


图4 不同海拔榆树不同冠层高度的叶片滞尘量对比

Fig. 4 Comparison of PM retention amount of elm leaves in different canopy layers under altitude gradients

2.3 叶面颗粒物滞纳量随时间变化分析

不同海拔榆树叶面颗粒物滞纳量随观测时间的增长而递增,并且每隔时间段的变化差异较为明显。以滞尘量最小与最大时对应的海拔为例,由图 5 可知,在雨后 4 d,海拔 960 m 与 869 m 单位叶面积 $PM_{0.2\sim3}$ 滞纳量相差 $1.04 \mu\text{m}$,12 d 相差量为 $1.51 \mu\text{m}$,到 20 d 时相差量增至 $2.03 \mu\text{m}$ 。单位叶面积 $PM_{3\sim10}$ 滞纳量在海拔 960 m 与 910 m 雨后 4 d 相差 $2.16 \mu\text{m}$,雨后 12 d 相差 $3.49 \mu\text{m}$,雨后 20 d 差值增至 $4.86 \mu\text{m}$ 。而海拔 844 m 与 910 m 单位叶面积 $PM_{>10}$ 滞纳量在雨后 4 d 相差 $13.91 \mu\text{m}$,雨后 12 d 相差 $20.05 \mu\text{m}$,雨后 20 d 差值增为 $28.61 \mu\text{m}$,差值发生显著变化。由此可知,随时间变化,不同海拔滞尘量差异逐渐增大,其中单位叶面积 $PM_{>10}$ 滞纳量差异最为显著,且各海拔滞尘量均在雨后 20 d 达到最大值。

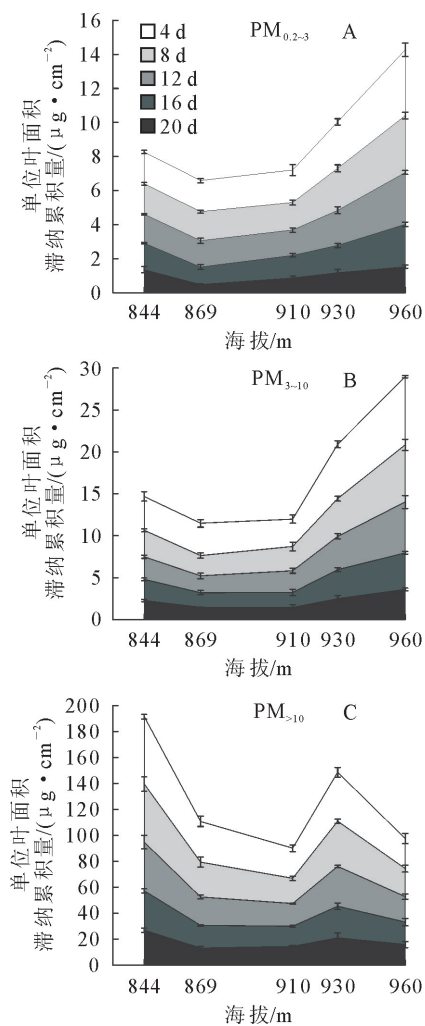


图5 不同海拔榆树叶面颗粒物滞留量时间变化

Fig. 5 The time variation of PM retention amount of elm leaves under different altitude gradients

2.4 叶片不同粒径颗粒物滞纳量影响因素分析

基于上述分析结果,针对2、4、6 m 3个冠层高度,844、869、910、930、960 m 5个海拔,观测第4、8、12、16、20天对榆树叶面不同粒径颗粒物滞纳量进行方差分析(表2)。结果表明,海拔和观测天数对叶面不同粒径颗粒物滞纳量的影响呈现显著性($P<0.01$)。海拔和观测天数的交互作用及海拔、冠层和观测天数三者的交互作用对榆树叶片表面不同粒径颗粒物滞纳量亦为显著性($P<0.01$)。榆树不同冠层高度的叶片,只对 $PM_{0.2\sim3}$ 的滞纳量有显著的影响($P<0.05$),而对其他粒径颗粒物滞纳量的影响不明显。

3 结论与讨论

3.1 结论

榆树叶片滞纳大气颗粒物的能力不仅受所处海拔的影响,也受冠层高度和观测天数的影响。

1)随着观测时间的推移,树冠不同高度滞尘量

表2 不同因子对榆树叶片表面不同粒径颗粒物

滞留量方差分析

Table 2 Multivariate variance analysis for different particle sizes on the surface of elm leaves

| | $PM_{0.2\sim3}$ | $PM_{3\sim10}$ | $PM_{>10}$ |
|------------|-----------------|----------------|------------|
| 海拔 | 56.386** | 71.321** | 52.906** |
| 冠层 | 3.982* | 0.207 | 0.056 |
| 观测天数 | 32.302** | 26.851** | 35.421** |
| 海拔×冠层 | 0.191 | 1.786 | 3.278** |
| 海拔×观测天数 | 20.418** | 18.046** | 6.990** |
| 冠层×观测天数 | 0.104 | 0.066 | 0.259 |
| 海拔×冠层×观测天数 | 200** | 1 112** | 15 184** |

注: * 表示在 0.05 水平显著, ** 表示在 0.01 水平显著,

$PM_{0.2\sim3}$ 代表粒径 $>0.2\mu m<3\mu m$ 的颗粒物, $PM_{3\sim10}$ 代表粒径 $>3\mu m<10\mu m$ 的颗粒物, $PM_{>10}$ 代表粒径 $>10\mu m$ 的颗粒物。

逐渐增高,但其对不同粒径颗粒物滞纳量的影响程度不同。距地面2 m处的榆树冠层叶片对 $PM_{0.2\sim3}$ 的滞留量显著高于4 m和6 m处的叶片滞留量,并有显著的差异性($P<0.05$);不同冠层高度的叶片对 $PM_{3\sim10}$ 、 $PM_{>10}$ 的滞留量虽然有所不同,但其差异并不显著。

2)榆树叶片单位叶面积对 $PM_{0.2\sim3}$ 、 $PM_{3\sim10}$ 的滞纳量在海拔960 m处达到最大值,而对 $PM_{>10}$ 的滞纳量在海拔844 m处达到最大值;单位叶面积对不同粒径微颗粒物的滞纳量,且在雨后观测的第20天达到最高值,并随着观测时间的增加,不同海拔高度生长的榆树叶片滞尘量差异增大。

3)海拔、冠层高度和观测天数三者的交互作用对榆树单位叶面积不同粒径颗粒物($PM_{0.2\sim3}$ 、 $PM_{3\sim10}$ 、 $PM_{>10}$)的滞纳量有显著影响($P<0.01$),在榆树冠层不同高度上,叶片对 $PM_{0.2\sim3}$ 的滞纳量受其影响达到显著水平($P<0.05$)。

3.2 讨论

叶片对颗粒物的滞纳量,首先受冠层不同高度的影响^[16]。本研究表明,不同冠层高度叶片对 $PM_{0.2\sim3}$ 、 $PM_{3\sim10}$ 、 $PM_{>10}$ 的滞纳量呈现出相似的规律。叶片单位面积滞纳量在冠层2 m处达到峰值,且最小值均出现在冠层4 m和6 m处,其原因可能是冠层低部的叶片容易受到地面扬尘的影响,而冠层高处的叶片更容易受到强风的扰动,使已滞留的颗粒物逐渐着陆,降低其滞尘总量。Zhai等^[17]对3个不同冠层高度(1.5、6、10 m)的叶片滞尘量进行对比分析得知,不同冠层叶片滞尘量随高度的增加而明显减少,树冠最下层滞尘量最高。本研究在前人的研究基础上针对单位叶面积对不同粒径颗粒物滞纳量进行对比而得出更为全面的结论,即由文中方差分析结果可知,只有叶片单位叶面积滞纳 $PM_{0.2\sim3}$ 的量受冠层高度的影响达到显著水平($P<$

0.05),而对 $PM_{3\sim 10}$ 、 $PM_{>10}$ 的滞留量在冠层高度上并无显著性差异,这与Wang等^[18]的研究结果接近。

不同海拔植物叶片对大气颗粒物滞纳量有较大的差异^[19]。本研究获取的数据显示,榆树叶片对 $PM_{>10}$ 的滞纳量最高值出现在海拔844 m处;海拔910 m时,冠层高度2、4 m的叶片对 $PM_{0.2\sim 3}$ 、 $PM_{3\sim 10}$ 的滞纳量最低,树冠不同高度叶片对 $PM_{>10}$ 的滞纳效果普遍最差。这是因为随海拔的增高,大气颗粒物浓度逐渐降低以及气温、气压的变化导致单位叶面积颗粒物滞纳量随海拔增高逐渐减少^[20]。但本研究结果显示,叶片对 $PM_{0.2\sim 3}$ 、 $PM_{3\sim 10}$ 的滞纳量却在海拔为960 m时达到最佳效果,其原因可能为环境突变所导致。海拔在930 m处靠近道路,960 m处设有景点,故在车辆行驶等人为活动的扰动下,即车辆自身排放的污染物颗粒及地面灰尘的扬起使空中颗粒污染物浓度加大,导致其叶片的滞尘量发生突变。陈玮等^[21]的研究也证实了道路附近的树木叶片滞留的颗粒物含量比远处树木叶片的要高,可见植物滞纳颗粒污染物的能力,与环境的污染水平也有关联,频繁的人为活动所产生并积累的二次颗粒物成分中,粒径偏小的细颗粒物可能占多数,导致其细颗粒物滞留量不断加大,并随时间的推移其滞尘量差异逐渐增大。

多数研究表明^[22-26],叶片滞尘量受气象因素、颗粒物累积时间、人类活动强度及植物本身微形态特征,如:叶面绒毛、毛状体、蜡、气孔、形状等的影响,当然所得出的数据结果也因所用试验技术的不同而有所差异。海拔、冠层高度和观测天数作为影响因素,对树木叶片表面不同粒径颗粒物滞纳量所进行的方差分析表明,海拔和观测天数对其叶片吸附不同粒径颗粒物有极其显著的影响($P<0.01$)。这可能是由于随着海拔的变化,大气压、温度和湿度等气象因子随之改变,导致植物生长环境的不同,使其叶表面特征发生差异^[27-28],进而影响叶片吸附或滞留不同粒径颗粒物的能力。故海拔和观测天数及海拔、观测天数和冠层高度的交互作用都对植物叶片滞尘量具有极其显著的影响($P<0.01$)。Qiu等^[29]研究还表明,树叶自身因素也会影响颗粒物滞尘量,叶面绒毛会拦截颗粒物,让颗粒物在叶片上运动时更难脱落使之颗粒物积累量更大。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。

参考文献:

[1] 张维康,王兵,牛香.北京不同污染地区园林植物对空气颗粒物的滞纳能力[J].环境科学,2015,36(7):57-64.

ZHANG W K, WANG B, NIU X. Adsorption capacity of the air particulate matter in urban landscape plants in different polluted regions of Beijing[J]. Environmental Science, 2015, 36(7):57-64. (in Chinese)

[2] 李沛.北京市大气颗粒物污染对人群健康的危害风险研究[D].兰州:兰州大学,2016.

[3] TERZAGHI E, WILD E, ZACCHELLO G, et al. Forest filter effect: Role of leaves in capturing/releasing air particulate matter and its associated PAHs[J]. Atmospheric Environment, 2013, 74:378-384.

[4] 李朝梅,王军梦,王腾飞,等.郑州市常见公园绿化植物的滞尘能力及叶片性状分析[J].西北林学院学报,2021,36(2):123-129.

LI C M, WANG J M, WANG T F, et al. Dust-retention capability and leaf traits of common park greening plant species in Zhengzhou city[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(2):123-129. (in Chinese)

[5] RYU J, KIM J J, BYEON H, et al. Removal of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) via atmospheric humidity caused by evapotranspiration[J]. Environmental Pollution, 2018, 245:253-259.

[6] LIU J Q, CAO Z G, ZOU S Y, et al. An investigation of the leaf retention capacity, efficiency and mechanism for atmospheric particulate matter of five greening tree species in Beijing, China[J]. Science of The Total Environment, 2018, 616-617:417-426.

[7] LU S W, YANG X B, LI S N, et al. Effects of plant leaf surface and different pollution levels on $PM_{2.5}$ adsorption capacity[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2018, 34:64-70.

[8] NOWAK D J, HIRABAYASHI S, BODINE A, et al. Modeled $PM_{2.5}$ removal by trees in ten U. S. cities and associated health effects[J]. Environmental Pollution, 2013, 178:395-402.

[9] 凯丽比努尔·努尔麦提,玉米提·哈力克,娜斯曼·那斯尔丁,等.乌鲁木齐市快速路绿化树种滞尘量与叶片结构特性分析[J].西北林学院学报,2022,37(2):60-67.

NURMAMAT K, HALIK U, NASIERDING N, et al. Dust retention amount and leaf micro morphological structure of the greening species in the frost-belt along the expressway in Urumqi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2):60-67. (in Chinese)

[10] 郑铭浩.重庆主城区常见树种及植物群落对空气颗粒物的调控作用研究[D].重庆:西南大学,2017.

[11] 祁倩倩,吴智慧,彭小武,等.乌鲁木齐市大气 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃的污染特征研究[J].新疆环境保护,2020,42(4):11-16.

[12] 李耀华,玉米提·哈力克,木尼拉·阿不都木太力甫,等.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[J].生态学报,2022,42(6):2228-2236.

LI Y H, HALIK U, ABUDUMUTAILIPU M, et al. Effects of leaf microstructure characteristics of urban trees on atmospheric particulates retention capacity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6):2228-2236. (in Chinese)

[13] 吴静.干旱、半干旱地区城市山体公园绿地建设发展研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2016.

[14] 张畅,姜卫兵,韩健.论榆树及其在园林绿化中的应用[J].中国农学通报,2010,26(10):211-215.

ZHANG C, JIANG W B, HAN J. *Ulmus pumila* Linn. and its

- application in landscape architecture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(10): 211-215. (in Chinese)
- [15] 张凯迪, 何秉宇, 凯丽比努尔·努尔买买提, 等. 雅玛里克山榆树林叶片滞纳 $PM_{2.5}$ 的能力研究[J]. 环境与发展, 2020, 32(8): 193-194.
- [16] SUN Y, SONG T, TANG G Q, *et al.* The vertical distribution of $PM_{2.5}$ and boundary-layer structure during summer haze in Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2013, 74: 413-421.
- [17] ZHAI J, CONG L, YAN G, *et al.* Dry Deposition of Particulate Matter and Ions in Forest at Different Heights[J]. International Journal of Environmental Research, 2019, 13(1): 117-130.
- [18] WANG J, ZHOU M, LIU B S, *et al.* Characterization and source apportionment of size-segregated atmospheric particulate matter collected at ground level and from the urban canopy in Tianjin[J]. Environmental Pollution, 2016, 219: 982-992.
- [19] ALVAREZ H B, ECHEVERRIA R S, ALVAREZ P S, *et al.* Air quality standards for particulate matter (PM) at high altitude cities[J]. Environmental Pollution, 2013, 173: 255-256.
- [20] LEENA P P, VIJAYAKUMAR K, *et al.* Analysing temporal variability of particulate matter and possible contributing factors over mahabaleshwar, a high-altitude station in Western Ghats, India[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2017, 164: 105-115.
- [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.
- CHEN W, HE X Y, ZHANG Y, *et al.* Dust absorption effect of urban conifers in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2113-2116. (in Chinese)
- [22] 路艳, 卞贵建, 季洪亮. 道路绿化树种滞尘的季节效应与叶片特征关系[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(3): 269-275.
- LU Y, BIAN G J, JI H L. Relationship between seasonal effects of dust retention and leaf characteristics of tree species for road greening[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(3): 269-275. (in Chinese)
- [23] PRUSTY B A K, MISHARA P C, AZEEZ P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(2): 228-235.
- [24] 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[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2507-2513.
- ZHANG W K, WANG B, NIU X. The leaf microstructure of different trees and its impact on air particles-capturing ability[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2507-2513. (in Chinese)
- [25] SGRIGNA G, BALDACCHINI C, DREVECK S, *et al.* Relationships between air particulate matter capture efficiency and leaf traits in twelve tree species from an Italian urban-industrial environment[J]. Science of the Total Environment, 2020, 718(20): 137310.
- [26] 胡选萍, 吉成均, 安丽华. 青藏高原草地主要单子叶植物的叶表面特征[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 134-143.
- HU X P, JI C J, AN L H. Leaf epidermis characteristics of the main grassland monocotyledonous plant species on the Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(20): 134-143. (in Chinese)
- [27] 王琴, 冯晶红, 黄奕, 等. 武汉市 15 种阔叶乔木滞尘能力与叶表微形态特征[J]. 生态学报, 2020, 40(1): 213-222.
- WANG Q, FENG J H, HUANG Y, *et al.* Dust-retention capability and leaf surface micromorphology of 15 broad-leaved tree species in Wuhan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(1): 213-222. (in Chinese)
- [28] 贺丹, 王翼飞, 汪安印, 等. 郑州市 11 种常绿灌木滞尘与抑菌综合能力评价[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(5): 266-272.
- HE D, WANG Y F, WANG A Y, *et al.* Comprehensive evaluation on dust-retention and antimicrobial capabilities of 11 evergreen shrubs in Zhengzhou city[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(5): 266-272. (in Chinese)
- [29] QIU Y, GUAN D S, SONG W W, *et al.* Capture of heavy metals and sulfur by foliar dust in urban Huizhou, Guangdong Province, China[J]. Chemosphere, 2009, 75(4): 447-452.