

DOI: 10.20103/j.stxb.202503120557

王秋月,周梦瑶,丁国栋.雅鲁藏布江米林宽谷区典型落叶灌木滞尘能力分析.生态学报,2025,45(24):12337-12346.

Wang Q Y, Zhou M Y, Ding G D. Analysis of dust-retention capacity of typical deciduous shrubs in the widened valley area of the Milin section of the Yarlung Zangbo River. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(24): 12337-12346.

雅鲁藏布江米林宽谷区典型落叶灌木滞尘能力分析

王秋月,周梦瑶,丁国栋*

北京林业大学水土保持学院,北京 100083

摘要:雅鲁藏布江米林宽谷区是西藏高原沙尘活动最为频繁的地区之一,严重威胁着流域的生态和环境安全,而灌木冠层在削减大气颗粒物浓度和缓解沙尘灾害方面发挥着至关重要的作用。通过测定该区风沙期(4月和11月)典型落叶灌木单叶至单株尺度滞尘量及各粒径占比,结合叶面微结构观测分析,系统揭示了灌木形态特征与叶面微结构对植物滞尘量的协同调控机制。研究结果表明:(1)灌木叶片主要吸附的是粒径小于 $2.5 \mu\text{m}$ 的细颗粒物,其平均占总滞尘量的79.80%。(2)不同树种在不同季节的滞尘能力存在显著差异,11月各树种滞尘量均高于4月的对应值。(3)单株叶片总数、叶面积指数与单位叶面积滞尘量呈显著负相关($P<0.05$),与单叶滞尘量呈极显著负相关($P<0.01$);气孔开度对单叶滞尘量呈极显著正相关($P<0.01$)。(4)粗刺锦鸡儿和波密小檗的综合滞尘能力最强,可作为优先考虑的雅江米林宽谷区滞尘树种。上述研究结果以期为雅江宽谷区生态环境的改善提供理论依据和实践指导。

关键词:雅鲁藏布江;落叶灌木;叶面滞尘;形态特征;叶面微结构

Analysis of dust-retention capacity of typical deciduous shrubs in the widened valley area of the Milin section of the Yarlung Zangbo River

WANG Qiuyue, ZHOU Mengyao, DING Guodong*

College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: The Milin Wide Valley area of the Yarlung Zangbo River is one of the regions with the most frequent dust storm activity on the Tibetan Plateau, posing a significant threat to the ecological and environmental security of the basin. The Shrub canopies play a crucial role in reducing atmospheric particulate concentrations and mitigating dust storm disasters. This study systematically revealed the synergistic regulatory mechanism of shrub morphological characteristics and leaf surface microstructure on dust retention, by measuring the dust deposition from single leaf to single plant during the sandstorm periods (April and November) and analyzing the particle size distribution, in conjunction with leaf surface microstructure observations. The results are as follows: (1) The fine particles with diameters less than $2.5 \mu\text{m}$ were mainly adsorbed by shrub leaves, which accounted for 79.80% of the total dust retention. (2) There were also large differences in the dust-retention capacity of different tree species, with all species holding more dust in November than their April counterparts. (3) The total leaf number per plant and LAI were significantly negatively correlated with the dust retention per unit leaf area ($P<0.05$) and highly significantly negatively correlated with dust retention per leaf ($P<0.01$); stomatal aperture was highly significantly positively correlated with dust retention per leaf ($P<0.01$). (4) The comprehensive dust retention ability of *Caragana crassispina* and *Berberis gyalaica* was the strongest, which can be prioritized as dust-retention tree species in the Yarlung Zangbo River wide valley region. The results of this study are expected to provide a theoretical

基金项目:中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司项目(PA2230)

收稿日期:2025-03-12; 网络出版日期:2025-09-17

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: dch1999@263.net

basis and practical guidance for the improvement of the ecological environment in the Yarlung Zangbo River wide valley area.

Key Words: Yarlung Zangbo River; deciduous shrub; dust-retention capacity; morphological characteristics; leaf surface microstructure

大气颗粒物污染是全球关注的环境问题之一^[1],其对人类健康、生态系统和气候变化具有重要影响^[2]。植物在降低大气颗粒物浓度^[3]和缓解风沙灾害方面发挥着至关重要的作用,特别是在风沙频发的地区,植物能通过以叶片为主的器官有效地阻挡、过滤和吸附大气中的颗粒物,从而实现滞尘效果^[4]。

目前,国内外学者对植物滞尘的研究主要聚焦在植物叶面滞尘能力的对比、滞尘成分的分析^[5]、不同下垫面^[6]或植物配置^[7]对滞尘量的影响以及叶片生理性状与滞尘量的相关性^[8]等方面。然而,现有研究多集中于乔木,尤其是城市绿化树种对颗粒物的滞留作用^[9]。尽管已有部分研究开始关注灌木的滞尘作用^[10],但大多侧重于在单位叶面积尺度上评估所选灌木的滞尘性能,并且受特定地点、气候和时间等因素的影响较大^[11],针对风沙区灌木的综合滞尘能力及其滞尘量的影响机制研究尚不充分,亟待深入探索。

雅鲁藏布江米林段宽谷区由于受干热河谷气候的影响,风沙地貌分布广泛^[12],据本研究调查显示,风蚀区达 254.89 km²。裸露的松散沙物质在早春和晚秋大风季节极易成为风力侵蚀的基础物源。风沙活动不仅导致土地沙化退化,还降低了当地大气质量和空气能见度,对附近机场和城镇居民环境造成严重威胁,直接影响了区域生态环境和社会经济状况。通过前期植被调查结合群落结构分析,小叶野丁香(*Leptodermis microphylla*)、绢毛蔷薇(*Rosa sericea*)、粗刺锦鸡儿(*Caragana crassispina*)、波密小檗(*Berberis gyalaica*)、砂生槐(*Sophora moorcroftiana*)5 种落叶灌木是本区典型优势群落树种,也是雅鲁藏布江宽谷区生态保护和风沙治理建设优先选择的乡土树种。因此,本研究针对以上 5 种落叶灌木,通过开展风沙期单位叶面积、单叶、单株滞尘量以及叶表不同粒径颗粒物含量占比的差异性研究,探讨植物形态特征与叶表面微结构对滞尘能力的影响,以期筛选出滞尘能力强的灌木树种,为雅江宽谷区的生态环境优化和颗粒物污染缓解提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

米林市为西藏自治区林芝市的县级市,位于北纬 28°39'—29°50',东经 93°07'—95°12'之间,地处雅鲁藏布江流域的中下游。该地区为高原温带半湿润季风气候^[13],风季为每年 4 月与 11 月前后,同期降水少、气候干燥,河流消落期与区域风季重叠,导致扬沙和浮尘等天气灾害频发。

1.2 供试树种选择及样品采集

依据对雅江米林段宽谷区常见树种的统计资料和大量野外样方调查结果,选择优势种中的 5 种落叶灌木进行研究,各树种基本特征见表 1。

当降雨强度达 30 mm/h 时,可以冲刷掉叶片上 90% 的粉尘,然后重新开始粉尘积累^[14],所以分别于 2024 年 11 月与 2025 年 4 月进行采样。因研究区春季多降水,4 月采样时段内日均降水量为 3.34 mm。每个树种选择 3 株生长状况较一致的植株,在东南西北四个方向采集 20 g 左右成熟、完整的叶片。样品用塑封袋装好以避免其上沙尘损失,写好标签,以待处理。由于试验于春秋两季开展,秋季 5 种灌木均处于落叶前状态,完成全样本采集;春季因粗刺锦鸡儿尚未展叶,故仅对其余 4 种灌木进行叶片采样。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 树种单株叶片总数的计算

利用标准枝分层法对供试植株进行枝条等级分层^[15],分至可以容易计数叶片的标准小枝为止,对各层枝条数量进行随机抽样统计,在末级枝上从东、南、西、北 4 个方向分别选取标准小枝统计叶片数量,最后计算单

株叶片总数。

表1 供试植物基本信息

Table 1 Basic information of the test plants

树种 Species	科 Family	叶结构特征 Leaf architecture	月份 Month	冠幅 Grown width/m	树高 Height/m	单叶面积 Single leaf area/cm ²
小叶野丁香 <i>Leptodermis microphylla</i>	茜草科	叶革质或纸质,对生或假轮生, 卵形或长圆形	11 4	4.09±1.50 3.37±0.30	2.63±0.31 2.30±0.26	3.31±0.06 0.62±0.08
绢毛蔷薇 <i>Rosa sericea</i>	蔷薇科	叶纸质,羽状复叶,小叶卵形或 倒卵形	11 4	2.58±0.36 3.48±0.30	1.98±0.61 2.63±0.21	0.32±0.07 0.35±0.04
粗刺锦鸡儿 <i>Caragana crassispina</i>	豆科	叶厚革质或硬纸质,羽状复叶, 线状披针形或长椭圆形	11	2.88±0.19	1.85±0.23	0.24±0.09
波密小檗 <i>Berberis gyalica</i>	小檗科	叶纸质,单叶互生,倒卵状椭圆 形,偶每边具2—4刺齿	11 4	2.21±0.55 2.20±0.35	2.50±0.55 1.90±0.35	0.56±0.18 0.67±0.05
砂生槐 <i>Sophora moorcroftiana</i>	豆科	叶近革质,羽状复叶,小叶倒卵 形,两面被丝质柔毛或绒毛	11 4	2.81±0.55 3.12±0.45	1.37±0.16 1.58±0.19	0.27±0.05 0.14±0.01

1.3.2 叶片滞尘量测定

采用水洗-滤膜法测量叶片滞留的颗粒物质量^[16]。将清洗后的叶片用吸水纸吸干后置于扫描仪下进行扫描,使用Image J测定单叶面积。各样品PM₁₀、PM_{2.5}滞留量和总颗粒物(TSP)滞留量与所测总叶面积的比值即为单位叶面积颗粒物滞留量。单叶滞尘量为单位叶面积与平均叶面积的乘积,单株滞尘量则为单叶滞尘量与树种叶片总数的乘积^[17]。

1.3.3 叶面积指数的计算

根据单株叶片总数TLN、树冠垂直投影面积S和植株单叶平均面积SLA,按照如下公式计算叶面积指数^[18]。

$$\text{LAI} = \frac{\text{TLN} \times \text{SLA}}{S} \quad (1)$$

1.3.4 三维绿量的计算

三维绿量(Three-dimensional green volume, TDGV)指植物茎叶所占据的空间体积^[19],根据不同冠形分类,计算公式有所不同。本研究树种均为椭圆形树冠,计算公式如下^[20]。

$$\text{TDGV} = \frac{\pi \times L \times W \times H}{6} \quad (2)$$

式中,L为灌丛长轴,W为灌丛短轴,H为灌丛高度。

1.3.5 叶面微观结构观测

选取经烘干(48h 60℃)的健康叶片上下表面并避开主叶脉,随机割取5 mm×5 mm的样品,用导电胶带黏在样品台上,随后使用扫描电子显微镜(JCM-6000)在适当的放大倍数下(200倍、500倍和1000倍)随机选取单位面积(0.1 mm×0.1 mm)对叶片的正反面气孔数量和密度、单个气孔的面积和叶表绒毛数量等指标进行测量统计,按照如下公式进行气孔开度和形状系数的计算^[21]。

$$\text{SAP} = \frac{SW}{SL} \quad (3)$$

$$SF = \frac{SL}{2 \sqrt{\pi SAR}} \quad (4)$$

式中,SAP为气孔开度,SW为气孔宽度,SL为气孔长度,SF为形状系数,SAR为气孔面积。

1.4 数据分析

运用Excel 2010进行数据预处理,利用SPSS 27(IBM, USA)软件进行数据处理,Canoco 5.0进行冗余分析

(RDA)。不同树种叶面滞尘量用单因素方差分析法(one-way ANOVA)进行差异分析(水平设定为 $\alpha=0.05$)，若差异显著则用LSD法(least-significant difference)进行多重比较。对各树种滞尘量能力进行系统聚类分析，其中距离区间选择“欧式距离”。运用Origin 2021绘制图表。

2 结果与分析

2.1 各树种的滞尘量与粒径分布

通过各树种滞尘量的对比数据图(图1)，可以看出各树种在不同季节和滞尘量计量单位下的滞尘能力具有差异性。具体而言，在11月所测的5个灌木树种中，波密小檗、粗刺锦鸡儿和绢毛蔷薇的单位面积滞尘量较大；各树种平均单叶滞尘量为3.35—48.04 mg/片，表现为小叶野丁香>波密小檗>绢毛蔷薇>粗刺锦鸡儿>砂生槐；各树种平均单株滞尘量为260.85—895.83 g/株，表现为绢毛蔷薇>粗刺锦鸡儿>小叶野丁香>波密小檗>砂生槐。在4月份，小叶野丁香和砂生槐的单位叶面积滞尘量显著高于其它树种($P<0.05$)；各树种平均单叶滞尘量为0.02—0.29 mg/片，表现为小叶野丁香>砂生槐>绢毛蔷薇>波密小檗；各树种平均单株滞尘量为1.67—15.06 g/株，表现为小叶野丁香>砂生槐>绢毛蔷薇>波密小檗。11月的各树种滞尘量均高于4月，其原

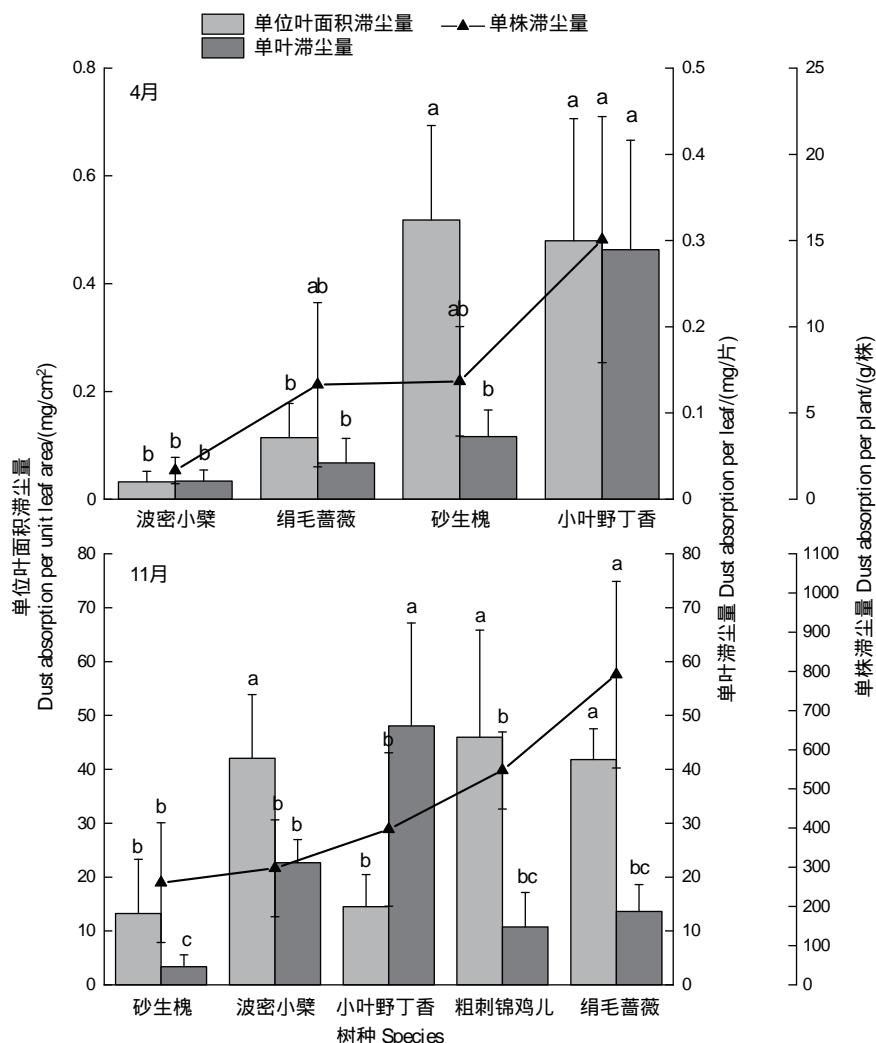


图1 不同月份树种的单位叶面积、单叶、单株滞尘量

Fig.1 Dust retention per unit leaf area, per leaf, per plant for different tree species in different months

不同字母表示不同树种间指标差异显著($P<0.05$)

因可能是4月为研究区植被生长期,叶片的数量以及大小均小于成熟期,进而导致叶片滞尘量的月份差距。

根据各粒径颗粒物滞尘量比较图所示(图2),所测树木叶片吸附的主要是一粒径小于2.5 μm的细颗粒物,11月和4月的占比分别达到了87.1%与66.42%。粗颗粒物($PM_{>10}$)在4月的相对占比提升至29.41%,较11月增幅达22.19个百分点。对比分析表明树种对于小粒径颗粒物展现出更为显著的滞尘效果,且季节更替对树木叶片的滞尘量具有重要的影响作用。如图3所示,11月波密小檗、粗刺锦鸡儿、绢毛蔷薇与砂生槐、小叶野丁香在单位叶面积细颗粒物 $PM_{2.5}$ 滞尘量上存在显著差异($P<0.05$)。其中粗刺锦鸡儿的单位叶面积细颗粒物滞尘量最大,为39.16 mg/cm²;而砂生槐最小,为11.54 mg/cm²。4月小叶野丁香与砂生槐的 $PM_{>10}$ 含量显著大于其它树种($P<0.05$),其中小叶野丁香的单位叶面积粗颗粒物滞尘量最大,达0.18 mg/cm²;波密小檗最小,仅有0.08 mg/cm²。砂生槐的单位叶面积细颗粒物滞尘量最大,为0.36 mg/cm²,是最低的波密小檗(0.02 mg/cm²)的15倍多。

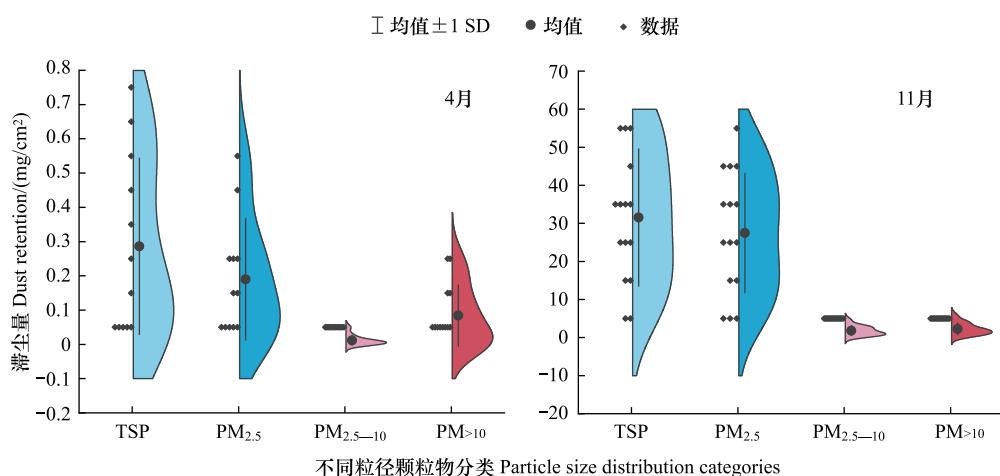


图2 不同月份树种的各粒径颗粒物滞尘量比较

Fig.2 Comparison of particulate matter dust retention by particle size for tree species in different months

2.2 各树种的叶表面微形态结构特征

通过观察叶表微结构电镜图可知(图4),叶片的叶脉、气孔与绒毛周围附着大量颗粒物。通过测算,各植物气孔面积在29.39—199.87 μm²之间,其中小叶野丁香的气孔面积最大,是面积最小的砂生槐的5倍左右;气孔开度和密度的最大值均出现在波密小檗,分别为0.64 μm²和650 PCS/mm²;既是气孔开度最小的砂生槐(0.47 μm²)的1.38倍,也是气孔密度最小的小叶野丁香(168 PCS/mm²)的3倍多;可以看出植物叶气孔面积、开度和密度越大的植物其滞留颗粒物量较大。粗刺锦鸡儿、砂生槐、绢毛蔷薇与小叶野丁香的叶片上均被有细长绒毛,绒毛密度排序为:粗刺锦鸡儿>砂生槐>小叶野丁香>绢毛蔷薇。相比于秋季,春季树种叶片的气孔面积和开度有增大的趋势,表明植物为了适应较高的光照和气体交换需求,气孔更为扩张和开放。绢毛蔷薇、砂生槐等在4月的叶片绒毛数有所增加,这可能与植物在春季加强防护结构相关。

2.3 灌木形态特征与叶面微结构对滞尘量的影响

为了解影响滞尘量的植物形态特征与叶面微结构因素,本文采取相关性热图来展现各个因子对单位叶面积、单叶、单株滞尘量的影响。由图5可知,单株叶片总数、LAI与单位叶面积滞尘量呈显著负相关($P<0.05$),表明灌木形态特征是叶片滞留颗粒物的主要因素之一,叶片总数越多、叶面积指数越大,越不利于颗粒物的滞留。单叶滞尘量不仅与叶片总数与LAI成极显著负相关($P<0.01$),还与气孔开度呈极显著正相关($P<0.01$)。单株滞尘量与所列植物形态特征和叶面微结构因子均未达到显著性相关性($P>0.05$)。

进一步采用冗余分析(RDA)揭示上述显著相关的因子对植物滞尘能力的影响(图6)。RDA1和RDA2分别解释了植物形态特征和叶面微结构对灌木滞尘能力贡献率的23.12%和1.48%。结果显示DR1、DR2、

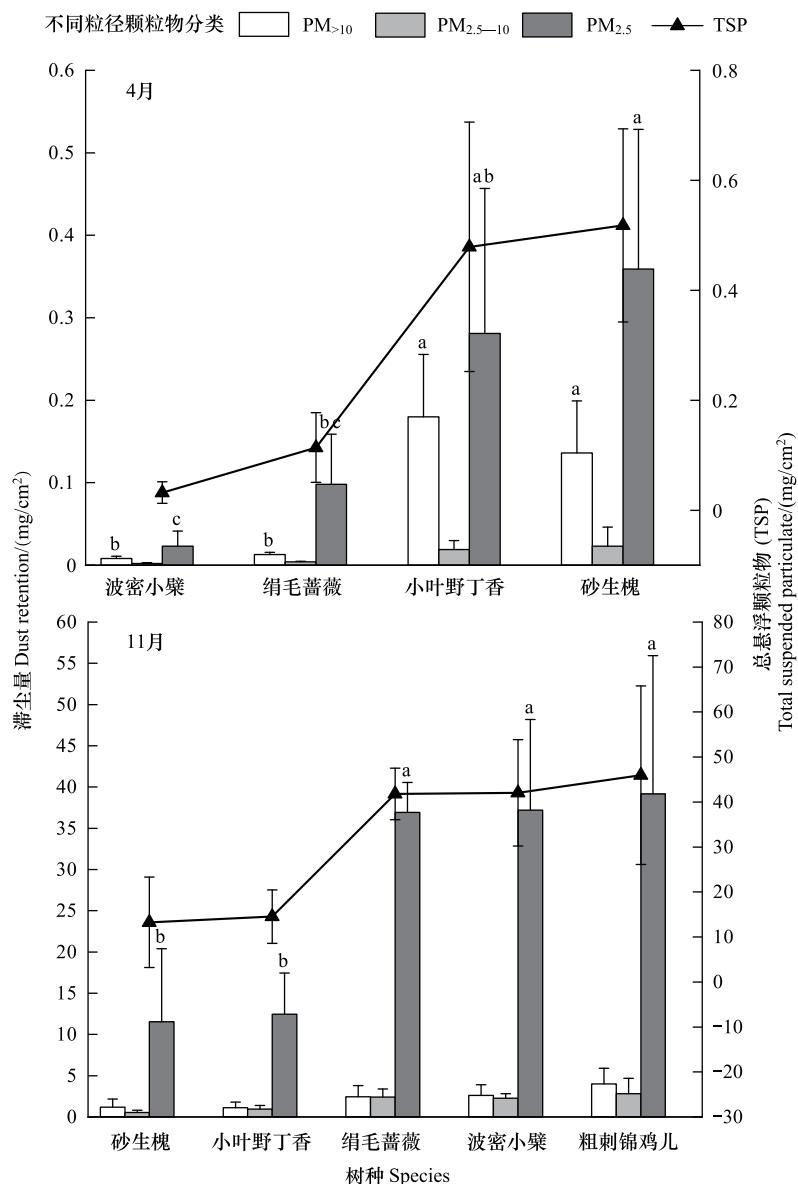


图 3 不同月份树种单位叶面积附着不同粒径颗粒物含量

Fig.3 Content of particulate matter of different particle sizes attached to tree species per unit leaf area in different months

不同字母表示不同树种间指标差异显著($P<0.05$)

DR3 与 SAP 呈正相关,与 LAI、TLN 呈负相关。由表 2 可知,各影响因素中解释度最大且 P 值最小的为 SAP ($P<0.05$),表明气孔开度是影响植物滞尘能力的主要因素。

2.4 植物滞尘能力的综合聚类分析

由图 7 可知,根据不同月份进行树种滞尘能力的聚类分析,最终得到的树种滞尘能力分组各不相同。最后将所有影响因子均加入到聚类分析中,结果表明粗刺锦鸡儿和波密小檗具有最强的滞尘效果,分为第一类;第二类为绢毛蔷薇,滞尘能力较强;第三和第四类分别为砂生槐和小叶野丁香,二者滞尘能力较弱。

表 2 影响因子对植物滞尘能力的解释量和显著性检验结果

Table 2 The explanatory power and significance test results of the impact factor on the dust retention ability of plants

影响因子 impact factor	解释度 Explains/%	F	P
SAP	19.1	5.9	0.01
TLN	4.5	1.4	0.252
LAI	1.0	0.3	0.744

SAP:气孔开度 Stomatal aperture; TLN:单株叶片总数 Total Leaf Number per plant; LAI:叶面积指数 Leaf area index

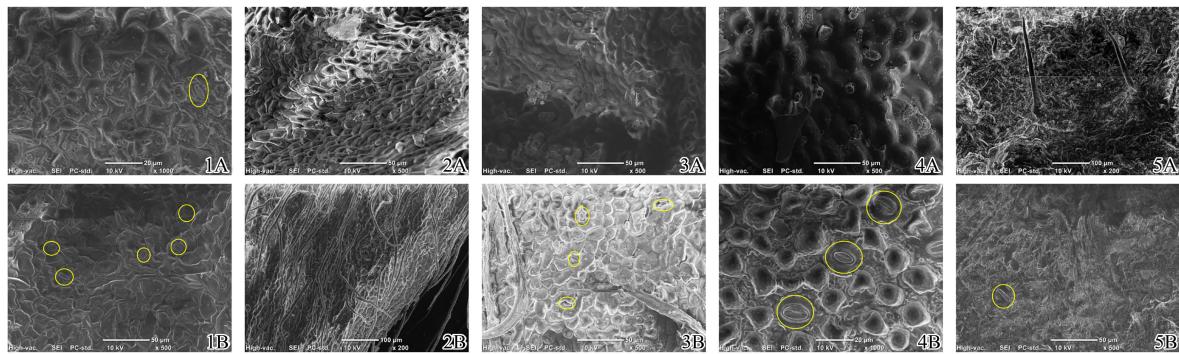


图4 5种植物叶片微结构的电镜扫描图像

Fig.4 Electron microscope scanning images of leaf microstructure of five plant species

1: 绢毛蔷薇 *Rosa sericea*; 2: 粗刺锦鸡儿 *Caragana crassispina*; 3: 砂生槐 *Sophora moorcroftiana*; 4: 波密小檗 *Berberis gyalaica*; 5: 小叶野丁香 *Leptodermis microphylla*; A: 叶片正面; B: 叶片背面; 2B 放大 200 倍, 1A、4B 放大 1000 倍, 其余图像均放大为 500 倍; 电镜图内的标记处为气孔

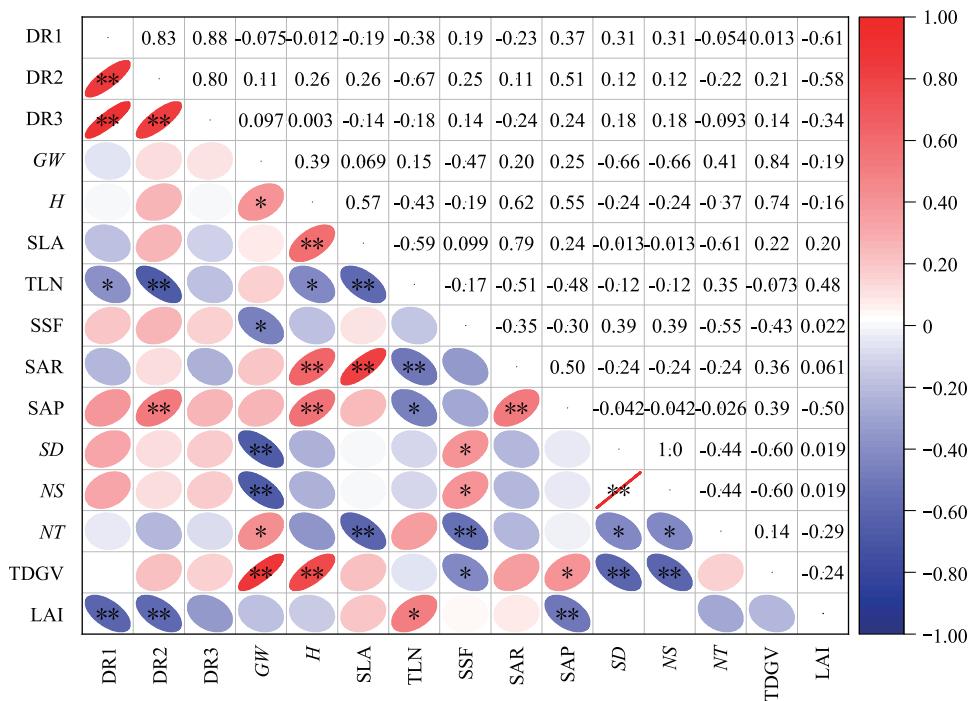


图5 不同计量单位滞尘量与影响因子的相关性热图

Fig.5 Heatmap of correlation between dust deposition in different measurement units and influencing factors

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, 相关性热图显示不同计量单位滞尘量与影响因子之间的关系; 黑色和白色分别表示变量之间的正相关关系和负相关关系; 椭圆大小表示相关性强弱, 椭圆指向表示相关性正负; DR1: 单位叶面积滞尘量 Dust retention per unit leaf area; DR2: 单叶滞尘量 Dust retention per leaf; DR3: 单株滞尘量 Dust retention per plant; GW: 冠幅 Grown width; H: 树高 Height; SLA: 单叶面积 Single leaf area; TLN: 单株叶片总数 Total Leaf Number per plant; SSF: 气孔形状系数 Stomatal shape factor; SAR: 气孔面积 Stomatal area; SAP: 气孔开度 Stomatal aperture; SD: 气孔密度 Stomatal density; NS: 气孔数量 Number of stomas; NT: 绒毛数量 Number of trichomes; TDGV: 三维绿量 Three-dimensional green volume; LAI: 叶面积指数 Leaf area index

3 讨论

3.1 各树种对不同粒径颗粒物滞留能力的比较

不同树种对各粒径颗粒物的滞留能力存在显著差异。Weerakkody 等^[22]指出, 叶片捕获的颗粒物总量随

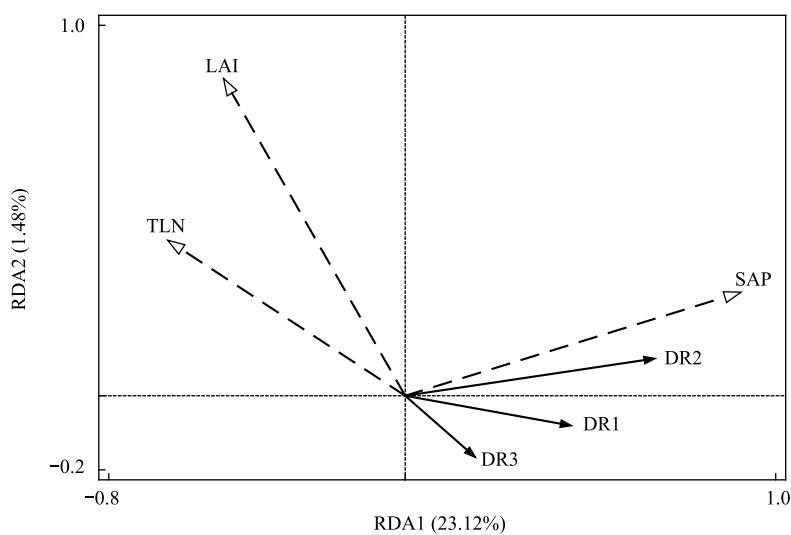


图 6 植物形态特征和叶面微结构对灌木滞尘能力的冗余分析

Fig.6 Redundancy analysis of plant morphological characteristics and foliar microstructure on dust retention capacity of shrubs

RDA1:冗余分析 1 轴 Redundancy Analysis axis 1; RDA2:冗余分析 2 轴 Redundancy Analysis axis 2

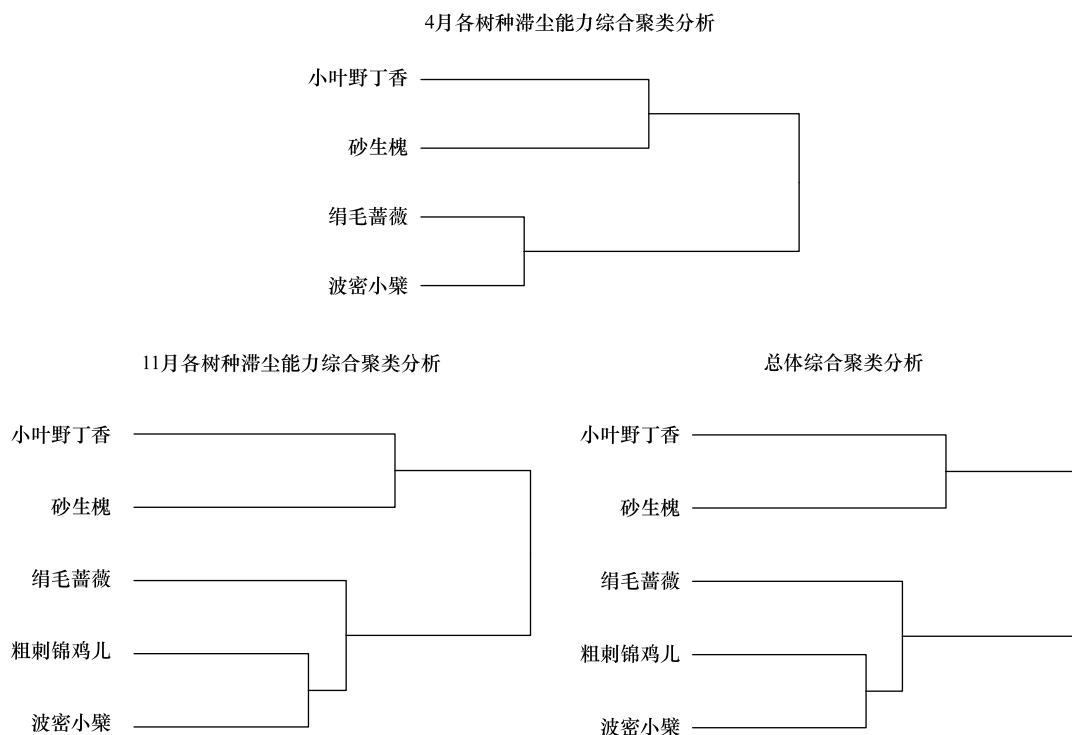


图 7 不同分类下的聚类分析图

Fig.7 Cluster analysis chart under different classifications

着颗粒物直径的减小而增加。本研究中,供试树种叶片上的颗粒物以 $PM_{2.5}$ 为主,与上述研究结果相符。然而,李海梅等^[23]对杭州市 5 种植物滞留不同粒径颗粒物的研究发现,叶片滞留的颗粒物主要为大颗粒物($d > 10 \mu m$),粒径 $d \leq 2.5 \mu m$ 的细颗粒物占比最少。研究结果的不同可能与不同研究区域的大气悬浮颗粒物来源、粒径组成和大小,以及植物叶表结构的差异有关。Popek 等^[24]评估了气象条件对可吸入颗粒物沉积、冲刷和再悬浮的影响,发现树叶上的滞尘量主要受降水和风的影响,外界从叶片表面去除的成分主要是粒径较

大的颗粒物($10\text{--}100\ \mu\text{m}$)，而粒径较小的颗粒物($0.2\text{--}2.5\ \mu\text{m}$)可以更永久地保留^[25]。由此推测，因本研究区风季风沙较大，大颗粒物容易被风吹走或从植物叶片上脱落，小颗粒物则能在叶片表面滞留较长时间，最后导致细颗粒物在叶片总滞尘量中占比最高。

3.2 树种滞尘能力的变化分析

单从单位叶面积滞尘量去评估植物的滞尘能力会忽视叶片大小、数量等因素对滞尘量的影响^[26]。本研究数据显示，选择不同的滞尘量计量单位会导致树种滞尘能力排序的变化。该结果与范舒欣等^[27]的研究结论一致，即单位叶面积滞尘量较大的树种，其单叶或单株滞尘量并不一定较大。孙晓丹等^[28]通过对比10种灌木的滞尘量得出，植物的单位体积滞尘量受单位体积内总叶面积影响，单位叶面积滞尘量较大的火棘(*Pyracantha fortuneana*)因其单位体积总叶面积较小，所以单位体积滞尘量的排序靠后。晏增等^[29]计算了12个常绿树种的单位叶面积、单叶和单位面积树冠滞尘量，也表明植物个体叶片和单位面积树冠滞尘能力差异较大。所以植物滞尘能力的研究应从多个维度综合分析，以实现对其更为客观和全面的量化评估^[30]。

3.3 植物滞尘能力与其影响因子的关系

不同树种的滞尘能力受植物形态结构和叶片表面微观结构的影响^[31]。本文发现单位叶面积、单叶滞尘量与单株叶片总数和叶面积指数呈显著负相关，可能是植物叶片数量过多致使外层叶片阻碍了颗粒物到达靠近冠层中心的叶片，从而导致整体叶片滞尘量的降低。在叶面微型态方面，有研究^[32]表明叶表具有大量的沟槽和突起结构的植物滞尘能力较强；叶片粗糙度^[33]和接触角^[34]都会影响植物的滞尘量。本文通过扫描电镜发现灌木叶片的气孔开度越大，叶片的滞尘量越大，此结果与李耀华等^[35]的研究发现相符，即叶面气孔的形态特征对滞尘能力有显著影响。

此外，本研究的冗余分析结果表明，两个主成分轴共同解释了24.60%的数据变异，意味着尽管所选的影响因子对响应变量的变异有显著贡献，但仍有部分变异未能得到充分解释。这种未解释的变异可能来源于以下几个方面：一是所选影响因子未能涵盖所有与植物滞尘能力相关的重要变量；二是数据收集在空间和时间尺度上存在不足。因此，本文建议在后续研究中增加更多可能影响植物滞尘能力的因素^[36]，适当扩大数据收集的空间范围或延长时间跨度^[37]，通过这些改进，有望进一步提升研究结果的解释力。

4 结论

本研究表明，叶表附着不同粒径颗粒物含量占比不同；不同滞尘量计量单位下树种的滞尘能力差异较大；植物形态特征与叶面微结构是影响灌木滞尘能力的关键因素。植物形态特征中的单株叶片总数、叶面积指数与叶面微结构中的气孔开度对灌木的滞尘能力均有显著影响。这些发现为雅江宽谷区滞尘树种的选择提供了科学依据，强调了在选择植被时考虑其形态特征和叶面微结构的重要性。在未来的研究中，引入更多相关变量和拓展数据收集的时空范围可以更全面的揭示影响植物滞尘能力的关键因素。

参考文献(References)：

- [1] 李家馨, 韩立建, 张志明, 周伟奇, 李伟峰, 钱雨果. 中国主要城市森林对大气PM_{2.5}的削减量及其占大气PM_{2.5}总量比例. 生态学报, 2023, 43(7): 2640-2649.
- [2] 阿芸, 张金青, 张海娟, 董瑞珍. 植物吸附大气颗粒物的影响因素及响应机制的研究进展. 应用生态学报, 2024, 35(7): 2013-2024.
- [3] Kong Q W, Zhang J, Chen S W, Zhang J, Jin X J, Chen J. Effects of periodic drought with severe exhaust exposure on particle retention capacity and physiological responses of *Photinia x fraseri* Dress. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 241: 113807.
- [4] Khalilimoghadam B, Siadat S A, Yusefi A, Negarest K. Atmospheric particle adsorption rates of plants in an industrial city of southwest Iran. Aeolian Research, 2021, 53: 100752.
- [5] Hariram M, Sahu R, Elumalai S P. Impact assessment of atmospheric dust on foliage pigments and pollution resistances of plants grown nearby coal based thermal power plants. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2018, 74(1): 56-70.
- [6] 余欣璐, 高吉喜, 张彪. 基于城市绿地滞尘模型的上海市绿色空间滞留PM_{2.5}功能评估. 生态学报, 2020, 40(8): 2599-2608.
- [7] 李笑寒, 穆森, 张祥, 席子菡, 姜博, 王森, 邱玲, 高天. 北方城市绿地对大气颗粒物浓度的削减作用对比研究. 生态学报, 2024, 44(10): 4051-4063.

- [8] Li H M, Zhu X, Kong W H, Zheng M Y, Guo X, Wang T. Physiological response of urban greening shrubs to atmospheric particulate matter pollution: An integral view of ecosystem service and plant function. *Environmental and Experimental Botany*, 2023, 213: 105439.
- [9] Zhou S J, Zhang Z M, Hipsey M R, Liu J K, Zhang M X. Differences in mass concentration and elemental composition of leaf surface particulate matter: Plant species and particle size ranges. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 175: 599-610.
- [10] 贺丹, 王翼飞, 原江琴, 李朝梅, 王晨旭, 雷雅凯, 刘艺平, 李永华. 郑州市常绿灌木滞留颗粒物能力及季节差异. *西北林学院学报*, 2024, 39(3): 257-265.
- [11] 董正虎, 马瑞, 王安林, 田永胜, 刘腾, 柴巧弟. 甘肃省民勤县荒漠绿洲过渡带典型灌丛植物的滞尘量效应. *水土保持通报*, 2024, 44(3): 36-45.
- [12] 褚佳琦, 严平, 苏志珠, 袁文杰, 王晓旭, 张潇, 赵华刚. 雅鲁藏布江米林段爬坡沙丘形态演变及移动规律. *中国沙漠*, 2024, 44(6): 220-230.
- [13] 陈豪爽, 兰玲, 王协康. 雅鲁藏布江米林段小流域土壤侵蚀特征. *工程科学与技术*, 2025, 57(2): 115-124.
- [14] 刘辰明, 张志强, 陈立欣, 邹瑞, 张璐, 高源, 李冬梅. 降雨对北方城市5种典型城市绿化树种叶面滞尘的影响. *生态学报*, 2018, 38(7): 2353-2361.
- [15] 范舒欣, 蔡好, 董丽. 北京市8种常绿阔叶树种滞尘能力. *应用生态学报*, 2017, 28(2): 408-414.
- [16] 龚嘉莲. 沈阳市6种绿化植物叶片滞尘能力与叶片性状结构关系[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
- [17] 赵东方, 陈苗, 马蕊, 周守航, 吕瑞恒, 张衡. 荒漠绿洲红枣经济林滞尘时空特征分析. *西北林学院学报*, 2025, 40(1): 218-225.
- [18] 凯丽比努尔·努尔麦麦提, 玉米提·哈力克, 阿丽亚·拜都热拉, 娜斯曼·那斯尔丁. 阿克苏市街道绿地主要树种滞尘特征及价值估算. *林业科学*, 2017, 53(1): 101-107.
- [19] 邱瑶, 罗涛, 王琼, 蒋思雨. 夏热冬暖地区绿量构成对城市热环境的影响——以福州居住区为例. *应用生态学报*, 2023, 34(7): 1932-1940.
- [20] 闫宇, 郭强, 党晓宏, 蒙仲举, 高永, 翟波, 王紫薇, 刘子剑. 西鄂尔多斯地区四合木与红砂灌丛的阻沙能力对比研究. *水土保持通报*, 2024, 44(2): 137-145+154.
- [21] 程雨萌, 王云琦, 王玉杰, 张会兰, 梁丹. 北京市5种典型植物滞尘特征及影响因素. *环境化学*, 2016, 35(8): 1690-1697.
- [22] Weerakkody U, Dover J W, Mitchell P, Reiling K. Quantification of the traffic-generated particulate matter capture by plant species in a living wall and evaluation of the important leaf characteristics. *Science of the Total Environment*, 2018, 635: 1012-1024.
- [23] 李海梅, 党宁, 禹靓倩, 张涵丹, 陈光才. 5个园林树种滞尘能力与叶表形态及颗粒物粒径的关系. *林业科学研究*, 2021, 34(4): 84-94.
- [24] Popek R, Haynes A, Przybysz A, Robinson S A. How Much Does Weather Matter? Effects of Rain and Wind on PM Accumulation by Four Species of Australian Native Trees. *Atmosphere*, 2019, 10(10): 633.
- [25] Xu L S, He P, Duan Y H, Yu Z T, Yang F. Synergy of different leaf traits determines the particulate matter retention capacity and its susceptibility to rain wash-off. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167365.
- [26] 李朝梅, 王军梦, 王腾飞, 王祖星, 雷雅凯, 贺丹. 郑州市常见公园绿化植物的滞尘能力及叶片性状分析. *西北林学院学报*, 2021, 36(2): 123-129.
- [27] 范舒欣, 晏海, 齐石茗月, 白伟岚, 皮定均, 李雄, 董丽. 北京市26种落叶阔叶绿化树种的滞尘能力. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 736-745.
- [28] 孙晓丹, 李海梅, 郭霄, 孙丽. 10种灌木树种滞留大气颗粒物的能力. *环境工程学报*, 2017, 11(2): 1047-1054.
- [29] 晏增, 赵蓬晖, 杨淑红, 马永涛, 张江涛. 冬季郑州市12个常绿树种的光合特性及滞尘能力. *广西植物*, 2021, 41(9): 1433-1442.
- [30] 杨建欣, 郭帅龙, 马长乐, 李瑞, 高灿, 康新玲, 李福泷. 桂花滞尘效应及其生理生态响应研究进展. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(2): 1-11.
- [31] Xu L S, Yan Q, He P, Zhen Z L, Jing Y D, Duan Y H, Chen X X. Combined effects of different leaf traits on foliage dust-retention capacity and stability. *Air Quality Atmosphere and Health*, 2022, 15(7): 1263-1274.
- [32] 罗建平, 王宁, 宋菲菲, 魏汉博, 原白玉, 唐钰鑫. 大庆市6种绿化树种对SO₂、NO₂的消减及滞尘效应. *生态学报*, 2023, 43(11): 4561-4569.
- [33] Gao Z W, Qin Y H, Yang X B, Chen B. PM₁₀ and PM_{2.5} dust-retention capacity and leaf morphological characteristics of landscape tree species in the northwest of Hebei province. *Atmosphere*, 2022, 13(10): 1657.
- [34] Tan X Y, Liu L, Wu D Y. Relationship between leaf dust retention capacity and leaf microstructure of six common tree species for campus greening. *International Journal of Phytoremediation*, 2022, 24(11): 1213-1221.
- [35] 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.
- [36] Zhou S J, Yan G X, Wu Y N, Zhai J X, Cong L, Zhang Z M. The PM removal process of wetland plant leaves with different rainfall intensities and duration. *Journal of Environmental Management*, 2020, 275: 111239.
- [37] Sawarkar R, Shakeel A, Kumar T, Ansari S A, Agashe A, Singh L. Evaluation of plant species for air pollution tolerance and phytoremediation potential in proximity to a coal thermal power station; implications for smart green cities. *Environmental Geochemistry and Health*, 2023, 45(10): 7303-7322.