

桂花滞尘效应及其生理生态响应研究进展

杨建欣¹, 郭帅龙¹, 马长乐^{1,2*}, 李瑞¹, 高灿¹, 康新玲¹, 李福泷¹

(1.西南林业大学园林园艺学院, 云南 昆明 650224; 2.国家林业和草原局
西南风景园林工程技术研究中心, 云南 昆明 650224)

摘要: 植被通过“直接”和“间接”两种方式实现对空气颗粒物的有效移除, 不同作用方式和移除过程有着明显不同的作用机制。桂花(*Osmanthus fragrans*)是我国十大传统名花之一, 广泛分布于秦岭以南的亚热带地区, 对其滞尘效应的研究表明, 桂花能有效滞留大气颗粒物, 对消减大气颗粒物污染并改善空气质量具有重要的作用。笔者在对桂花种质资源与形态结构分析的基础上, 重点关注桂花单位叶面积滞尘量、单叶滞尘量等重要量化指标, 以及叶片对不同粒径颗粒物的滞留能力, 综合分析了桂花滞尘效应的时空变化规律, 滞尘对光谱特性、形态结构和生理生态的影响等, 认为不同品种或不同生境的桂花因遗传特性和环境资源的差异, 受环境大气污染程度、叶片形态结构、叶面积、叶序、叶面倾角和冠形等因素的影响, 其叶片滞尘量差异较为显著, 具体表现为: ①单位面积滞尘量与环境污染背景值正相关; ②单叶滞尘量与叶片形态特征、环境因子等因素直接相关, 但单叶面积大小与滞留颗粒物能力无显著相关; ③由于不同规格、不同生长季节、不同健康状况等条件下总叶面积的差异, 不同城市及不同采样点桂花的单株滞尘量有较大差别; ④桂花叶片对粗颗粒物的滞纳能力较细颗粒物大, 且滞尘效应存在一定的时空变化规律, 即日变化和季节变化特征与大气颗粒物的日变化、季节变化趋势基本一致, 达到饱和滞尘量的时间有物种特异性和地域差异; ⑤颗粒物的滞留可使桂花叶片光谱特性发生改变, 也会影响叶形态特征和功能性状, 进而影响对颗粒物的吸附能力, 并对桂花生理生态、生长发育和花香产生影响, 削弱其观赏价值。

关键词: 桂花; 滞尘效应; 大气颗粒物; 形态特征; 生理响应

中图分类号: S685.13; S731.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-2006(2025)02-0001-11

Research progress on the dust retention effect and physiological-ecological response of *Osmanthus fragrans*

YANG Jianxin¹, GUO Shuailong¹, MA Changle^{1,2*}, LI Rui¹, GAO Can¹, KANG Xinling¹, LI Fulong¹

(1.College of Landscape Architecture and Horticulture Sciences, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2.Southwest Research Center for Engineering Technology of Landscape Architecture,
National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, China)

Abstract: Vegetation effectively removes airborne particulate matter through “direct” and “indirect” pathways, each with distinct mechanisms and processes. *Osmanthus fragrans*, one of the top ten traditional flowers in China, is widely distributed in south of the Qinling Mountains across the subtropical regions. Research results indicate that this species plays a significant role in mitigating atmospheric particulate pollution and improving air quality by retaining particulate matter. We analyzed and summarized advancements in understanding the dust retention capacity of *O. fragrans*, emphasizing key quantitative indicators such as dust retention per unit leaf area, per single leaf, and the ability to retain particulates of various sizes. This study also explored spatiotemporal variations in dust retention and its impact on spectral characteristics, morphological structure, and physiological ecology. Differences in dust retention among *O. fragrans* varieties and habitats were attributed to genetic traits and environmental factors, including air pollution levels, leaf morphology, leaf area, phyllotaxy, inclination angle and crown shape. Key findings include the following:

收稿日期 Received: 2023-08-08

修回日期 Accepted: 2023-12-13

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2023Y0757, 2023Y0743); 云南省农业联合专项面上项目(202101BD070001-100)。

第一作者: 杨建欣(la8099@qq.com), 博士生。* **通信作者:** 马长乐(mcl@swfu.edu.cn), 教授。

引文格式: 杨建欣, 郭帅龙, 马长乐, 等. 桂花滞尘效应及其生理生态响应研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2025, 49(2): 1-11. YANG J X, GUO S L, MA C L, et al. Research progress on the dust retention effect and physiological-ecological response of *Osmanthus fragrans*[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2025, 49(2): 1-11. DOI:10.12302/j.issn.1000-2006.202308013.

(1) Correlation with environmental pollution. Dust retention per unit leaf area was positively correlated with the background level of air pollution. (2) Influence of morphological traits; dust retention per single leaf was determined by leaf morphology and environmental conditions, though no significant correlation was found between single-leaf area and particulate retention capacity. (3) Plant-level variation. Total dust retention varied significantly among plants due to differences in leaf area across growth stages, health conditions, and locations. (4) Particulate size specificity. Leaves retained coarse particulates more effectively than fine ones, and dust retention showed predictable spatiotemporal variation. Diurnal and seasonal trends aligned with fluctuations in airborne particulate matter, with species- and region-specific saturation times. (5) Impact on leaf traits. Particulate retention altered leaf spectral characteristics, affecting morphology, functional traits, and adsorption capacity. These changes influenced physiological ecology, growth, floral fragrance, and ornamental value.

Keywords: *Osmanthus fragrans*; dust-retention effect; air particulate matter; morphological characteristics; physiological response

植物可以通过“直接”和“间接”两种方式实现对大气颗粒物的有效移除。直接方式指植物茂密复杂的冠层结构和枝叶特性对颗粒物的迁移产生阻力,可在降低风速的同时使颗粒物发生沉降和滞留,这一方式的实现主要与植物的宏观形态和微观结构有关^[1-2];间接方式指植物通过遮阴和蒸腾作用创造出有利于颗粒物自然沉降的微环境^[3]。滞尘作用包括停留、附着和黏附3种方式。造成颗粒物停留是植物滞尘的主要方式,这一方式易受降雨和大风等外界因素的影响;附着效果主要决定于叶片性能,表面粗糙湿润或有角质的叶片滞尘效果一般较稳定^[4];黏附则是靠植物叶表面分泌的特殊液体黏滞颗粒物,该方式的滞尘效果最为稳定。

桂花(*Osmanthus fragrans*)为我国十大传统名花之一,在秦岭以南的广大亚热带地区集中分布与广泛栽培^[5],观赏价值与实用价值兼备,为成都和苏州等20多个城市的市树或市花^[6-7]。在空气污染日趋复杂的背景下,园林植物消减大气污染物的潜力及抗性研究逐渐成为热点。桂花是当前研究最多、关注度最高的园林植物,相关研究表明,形态特征^[8]、叶表面结构^[9-10]、空间位置^[10]、时间差异^[8,10]和气象因素^[11]等都会影响其滞尘能力,表现为单位叶面积滞尘量^[8,12]、单叶滞尘量^[12]、单株滞尘量^[13]等方面的显著差异。此外,桂花对有毒有害气体有较强抗性^[14],也能吸附环境中的重金属离子^[15]。由于我国幅员辽阔,区域气候条件和空气质量等差异较大,在特定城市或特定地区获得的研究结果不一定符合其他区域的实际情况。为此,笔者系统总结国内不同城市和地区的研究数据,分析对比桂花滞尘能力的多角度评估结果,探讨其时空变化规律、滞尘后的生理响应及光谱特性等方面内容,明确桂花滞尘效应的普遍规律和地域特点,分析目前滞尘效应及生理生态响应研究中存

在的突出问题,据此提出未来的重点研究方向,为合理应用桂花这一优良的园林植物提供科学依据。

为全面掌握桂花滞尘效应及其生理生态响应的研究现状,笔者对截至2023年6月发表的中英文文献进行全面检索(文献检索数据库为CNKI及Web of Science),共检索到桂花滞尘效应研究文献181篇,其中英文文献28篇、中文文献153篇(中文核心期刊68篇,普通期刊56篇,学位论文29篇),其他植物滞尘研究文献925篇作为辅助分析材料。上述文献涉及的研究地点有南京、上海、杭州、武汉、重庆等17个城市。相对于正常气候条件而言,沙尘暴、严重雾霾等极端天气会导致大气颗粒物的组成成分发生阶段性改变。在沙尘天气下,风速垂直梯度增大,湍流输送强烈,大颗粒物浓度骤增,粒径分布发生明显变化;严重雾霾时,空气稳定且不易发生对流,大气中细小颗粒物的含量增多。因此,这些极端天气条件下的滞尘数据并不能准确反映桂花的滞尘能力,需进行必要的文献筛选。经详细分析,确认检索到的相关研究均在正常气象条件下开展,可保证桂花滞尘数据真实可靠。若数据无法从正文直接获取,则用Engauge Digitizer 12.1从文献图表中提取(每个数据点提取3次取平均值)。采用IBM SPSS Statistics 25.0(IBM Corp., USA)和Microsoft Excel 2021处理数据,利用GraphPad Prism 9(GraphPad Software, USA)进行数据可视化。

1 桂花种质资源与形态结构

1.1 桂花种质资源及滞尘研究现状

桂花原产我国西南,分为金桂品种群(*O. fragrans* Luteus group)、银桂品种群(*O. fragrans* Albus group)、丹桂品种群(*O. fragrans* Aurantiacus group)和四季桂品种群(*O. fragrans* Asiaticus group)^[5]。

适生范围主要为南岭以北至秦岭以南的广大中亚热带和北亚热带地区^[16],已形成杭州、成都、苏州、桂林和咸宁“五大桂花产区”。由于栽培管理技术的发展及气候变化等因素的共同驱动,桂花分布区范围进一步扩大,现已覆盖我国50%以上的省份^[7]。MaxEnt模型预测显示,当前环境条件下,桂花在我国主要分布于北纬33°以南地区,潜在分布区总面积为 $2.2423 \times 10^6 \text{ km}^2$ ^[17]。虽然栽培品种多、分布范围广,但当前研究仅限于少数常用品种,如桂花(*O. fragrans*)、金桂(*O. fragrans* var. *thunbergii*)、四季桂(*O. fragrans* ‘Semperflorens’)。本文中若未特别说明,涉及的研究对象均为桂花。研究地域主要位于江苏、湖北、浙江、重庆和上海等省市,但不同城市、不同品种滞尘能力的对比研究尚缺乏具体实证。此外,当前研究所选城市具有较大随机性,并未能根据所在城市空气污染的实际开展试验观测,除了省会城市和直辖市,鲜见其他城市的研究数据。对于空气污染物来源较为复杂的珠三角等地区的研究十分薄弱。

1.2 叶片形态结构及滞尘能力

形态特征和叶片结构直接影响植物叶片对颗粒物的吸附能力^[18]。植物种植密度对叶片滞尘量也有显著影响,不同密度下植物生长过程中所能获取的光照和水热等环境资源条件不同^[19],导致呼吸作用及光合作用等基本生理代谢的强度改变,进而调控其叶面形态结构,主要表现为叶表粗糙度、气孔密度等微形态特征的差异性,导致叶片对颗粒物的滞尘量发生改变^[20]。总之,植物形态结构和环境因子对植物滞留大气颗粒物的能力存在协同作用^[21]。在一定范围内,植物叶表面越粗糙、皱褶或沟槽(沟壑)越多,越能够增加植物与颗粒物之间的接触面积和物理作用力,越容易滞留粗颗粒物;沟壑投影面积比与不同粒径颗粒物的相关性不同,粒径越大则正相关性越显著;保卫细胞影响气孔开闭,可以增加对颗粒物的吸附面积,加强叶片的滞尘作用,单位叶面积滞尘量与气孔密度成正比^[9]。这是植物微观结构特征与滞尘能力的普适性关系。

关于桂花的研究表明,其叶表面的叶脉(叶脉密度达 $1183.47 \mu\text{m}/\text{cm}^2$)和褶皱较多且突出,叶柄长度较短,不易被风吹动,叶面颗粒物受风力的干扰较小。此外,叶片上表面覆有蜡质层和分布均匀的腺点,气孔密度显著高于其他树种且开口较大^[22],这些特征均为大气颗粒物停留的有利条件。实验分析发现桂花叶面颗粒物中水溶性离子含量相对较高,也进一步验证了其叶面较易滞留大气颗

颗粒物^[14];但叶片上表皮为蜡质且光滑,基本无绒毛,下表面气孔周围沟槽较浅,气孔排列无规律、无明显的起伏且张开程度较大^[23],这是滞留颗粒物的不利条件。虽然相关研究较多,但由于实验条件等因素的限制,对桂花微观结构的数值量化和解释十分有限,且由于指标选取没有统一标准(或单位不统一),桂花生长的立地环境、采样时的生长阶段、分析测试误差等原因,在不同城市、不同功能区实验得到的微观结构量化数据存在较大差异,部分结论之间甚至相互矛盾^[9-10,24-25]。

2 桂花滞尘能力的定量评估

2.1 评估方法

滞尘能力的准确评估是开展植物滞尘效应研究的基础性工作,应处理好实验观测中的两项关键问题,一是植物叶片的科学采集和颗粒物的准确完整收集;二是植物叶面积的准确测量。关于桂花滞尘的定量评估方法较多,主要有电镜扫描法^[9]、气溶胶再发生器法^[10]、质量差减法(水洗或擦拭)^[12]等,但目前尚无统一的标准。当前主要采用的叶面积测定方法有质量法、方格网法、软件测定法(AutoCAD、Photoshop、Image J、Digimizer)和叶面积仪法等,不同测量方法存在不同程度的误差。桂花滞尘定量评估中存在的主要问题有:①采样环节不规范,如未能收集采样时脱落的粉尘,未能正确保存样本,采集叶片不全面(未涵盖不同方位、不同高度、不同年龄的叶片等)。这一问题将导致对颗粒物总量测定的不准确。②叶片颗粒物收集不完全。一些颗粒物牢固滞留于桂花叶面的沟槽和气孔中,通过常规的清洗难以将颗粒物完全洗脱,采用气溶胶再发生器法也很难将叶面颗粒物全部吹起。由于吸滞于植物叶片上的大气颗粒物包括滞留在叶片表面的颗粒物和吸附在叶片蜡质层的颗粒物两部分^[26],后者很难通过简单的清洗完全冲洗掉。另外,目前关于桂花滞尘能力的定量评估很少考虑蜡质层对颗粒物的吸收固定和叶面结构的影响。颗粒物收集不完整将会导致颗粒物总量测定不准确和粒径分布测定的偏差。③叶面积测量误差大,将会导致单叶滞尘量、单位叶面积滞尘量、单株滞尘量等指标的计算不准确。为妥善解决上述问题,需要对桂花滞尘能力的评估方法做出优化:①采样环节优化,如在采样时收集脱落的粉尘,并尽可能全面收集树体不同空间位置 and 不同年龄的叶片;在保存和运输环节应采用保鲜措施;②颗粒物收集环节优化,如在常规叶片清洗方法的基础上,增加超

声波振荡清洗步骤,通过预实验明确最佳的超声清洗参数组合,以尽可能将叶片表面的颗粒物洗脱;
③叶面积测量优化,如在实验开始前对比分析各种叶面积测定方法的误差情况,选择最适合于特定桂花品种且误差最小的叶面积测量方法。

2.2 评估指标

不同植物滞尘能力的评估指标具有不同的侧重点,旨在从不同的尺度去了解植物叶片对颗粒物的滞纳能力,属于滞尘能力的量化标准。不少学者已经试图从单位叶面积滞尘量^[27]、单叶滞尘量^[12]、干质量滞尘量^[28]、单位绿地(林地)面积滞尘量^[29]、单株滞尘量^[13,30]等多种角度开展桂花滞尘能力的研究,其中研究较多的是单位叶面积滞尘量、单叶滞尘量和单株滞尘量,而单位绿地(林地)面积滞尘量和干质量滞尘量等指标在桂花滞尘效应的研究中还不多见。

2.2.1 单位叶面积滞尘量

单位叶面积滞尘量是定量评估植物滞尘能力最基本、最常用的指标,可以更科学地反映不同植物的滞尘能力,同时便于在此标准下进行对比性研究。受环境空气污染程度、植物叶片形态结构、叶面积、叶序、叶面倾角和冠层形状等因素的影响,植物叶片单位叶面积滞尘量差异较为显著。通过对文献研究结果的筛选,选取不同城市不同功能区(代表不同污染背景的生境)桂花单位叶面积滞尘量(颗粒物总质量)做对比研究,结果发现,植物单位叶面积滞尘量与环境污染背景值呈正相关,污染程度越严重,则单位叶面积滞尘量的实测值越大,在武汉等7个城市均表现出相同的规律,其中最大值为重庆永川城区道路绿地,桂花滞尘量为 9.437 g/m^2 ^[31],最小值为华中农业大学校园,桂花滞尘量为 0.200 g/m^2 ^[21],最大值为最小值的47.18倍。

2.2.2 单叶滞尘量

不同品种或不同生境的桂花因遗传特性和环境资源差异,叶片大小不同,表现为单叶滞尘量的区别。单叶滞尘量与叶片的形态特征、环境因子等因素直接相关,但单叶面积大小与植物滞留大气颗粒物的能力并无显著的相关性^[32]。对武汉、合肥、上海、岳阳、株洲等5个城市桂花单叶滞尘量的对比分析表明,单叶滞尘量与不同区域的污染程度呈正相关关系,污染程度越严重则单叶滞尘量的实测值越大。桂花单叶滞尘量的最大值出现在上海莘庄立交道路绿地,滞尘量达 9.882 mg ^[12],最小值出现在武汉华中农业大学校园,为 0.497 mg ^[33],最大值为最小值的19.88倍。

2.2.3 单株滞尘量

单株滞尘量为单位叶面积滞尘量与单株植物总叶面积之积,也表示为单位叶面积滞尘量与平均单叶面积及单株树木的总叶片数之积。单株滞尘量也可通过单叶滞尘量与单株植物三维绿量相乘得到。单株滞尘量计算的关键问题主要是平均单叶面积和总叶面积或三维绿量的准确估算。平均单叶面积采用 Image J 软件或 Digimizer 直接测定扫描图像的方法获取(取多次测量均值),单株树木总叶片数用标准枝调查法统计^[34]。单株滞尘量也可以采用高丹丹^[13]提出的计算公式进行,即单株滞尘量 $G_i = G \cdot \pi \cdot (P/2)^2 \cdot S_{LAI}$ (G 为平均单位叶面积滞尘量, P 为冠幅, S_{LAI} 为叶面积指数)。因不同规格、不同生长季节、不同健康状况等条件下桂花总叶面积存在差异,因此在不同城市、不同采样点测定得到的单株滞尘量有较大差别,例如在长沙、合肥、西安、南昌获取的单株滞尘量分别为 0.68 、 0.28 、 0.17 和 0.021 kg ^[35-39]。

3 不同粒径颗粒物在桂花叶片的滞留量及分布特点

植物叶表面微结构、颗粒物与叶面的作用方式是影响颗粒物粒径分布特征的重要因素。植物叶表面气孔周围、叶表面褶皱区、沟槽(沟壑)周围及叶片绒毛部位都是颗粒物最容易聚集的区域。桂花叶片微结构的研究证实其叶片比相对光滑的叶片能够吸附和阻滞更多的颗粒物,但桂花叶片没有绒毛,相对具有绒毛的叶片其滞尘能力稍逊。

植物叶表面颗粒物一般分为细颗粒物、粗颗粒物和大颗粒物3类,对应的粒径(d)范围分别为 $0.2 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 、 $>2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 和 $>10 \sim 100 \mu\text{m}$ ^[40]。当前研究对桂花滞尘能力的评估涉及 $\text{PM}_{2.5}$ ($d \leq 2.5 \mu\text{m}$)、 PM_{10} ($d \leq 10 \mu\text{m}$)、 $\text{PM}_{d \geq 10}$ 、 TSP ($d \leq 100 \mu\text{m}$)、 $\text{PM}_{2.5-10}$ 和 PM_1 ($d \leq 1 \mu\text{m}$) 等多种粒径分级方式。笔者仅选取最常见的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 数据作对比分析。结果(表1)发现,各城市不同采样点的桂花叶片对上述3种颗粒物的滞留量(质量)以 TSP 最多, PM_{10} 次之, $\text{PM}_{2.5}$ 最少^[29,41-42],表明桂花叶片对粗颗粒物的滞纳能力比对细颗粒物的大。关于南京^[43]、长沙^[44]、杭州^[22]、郑州^[45] 和南宁^[46] 的研究均表明,桂花滞留粗颗粒物的质量或体积明显大于细颗粒物,与采样区域的污染背景值有关,且存在季节性变化。关于颗粒物数量分布特征的研究则认为,滞留在桂花叶片表面的颗粒物以粒径范围 $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 的为主(占比 95.58%),

其次为粒径 0.1~0.5 μm 的颗粒物(占比 3.40%) 和 2.5~5.0 μm 的颗粒物(占比 1.02%)^[47]。另有研究认为,细颗粒物、粗颗粒物、大颗粒物在近轴端的占比分别为 97.17%、2.69% 和 0.14%,在远轴端的占比分别为 95.18%、4.75% 和 0.07%^[42]。总之,关于桂花对不同粒径颗粒物滞留量(质量和数量)及其分布特点的基本观点是一致的。大颗粒物和粗颗粒物的质量分数大,在质量方面处于优势;而细颗粒物质量分数较小,相同叶面空间所能容纳的数量较多,在数量方面占据主导地位^[23]。另外,由于灌木类桂花的植株高度较低,地面二次扬尘所产生的较大粒径颗粒物会直接降落到叶片表面,而乔木类桂花的高度较高,空气中的细颗粒物在扩散过程中会被阻滞而停留到叶表面^[44]。关于银杏(*Ginkgo biloba*)、碧桃(*Prunus persica*)、白皮松(*Pinus bungeana*)等植物的研究也得到相同结果^[48]。若研究选取的桂花生活型不同,其滞尘效应机理会有一些差异。因此,根据现有研究结果,在不同粒径颗粒物污染的环境中究竟选择何种生活型的桂花品种才能更好地发挥滞尘效果,还有待进一步验证。

表 1 桂花与尘源不同水平距离的颗粒物滞留量
Table 1 Particle retention capacity of *Osmanthus fragrans* at different horizontal distances from dust sources

颗粒物类型 particle type	与尘源不同水平距离的滞尘量/($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) dust retention capacity at different horizontal distances from dust source		
	0~1 m	3~4 m	9~10 m
	PM _{2.5}	0.027 3	0.017 0
PM ₁₀	0.216 2	0.110 0	0.105 3
TSP	1.336 5	0.809 2	0.668 4

植物滞留在叶片表面的颗粒物只是一个暂时的过程,随着外界环境条件的变化,尤其是降雨和风的影响,叶表面颗粒物会被淋洗或吹拂而脱落,进入土壤或悬浮进入大气环境中。自然界的风雨过程对植物叶表面不同粒径颗粒物的淋洗和再悬浮作用是其恢复滞尘能力的关键过程^[38]。这一过程与植物种类、叶面微结构、风速和降雨特性(强度和持续时间)密切相关。当前采用自然采样实验和室内模拟等方法分析降雨和风对植物滞留颗粒物质量和粒径组成影响的研究较多^[11,49],不同植物表现出滞留能力的不同阈值,但尚未见桂花在风雨作用下滞尘量动态变化的相关研究。

4 桂花滞尘效应的时空变化规律

4.1 时间变化特征

植物对大气颗粒物的阻滞效率受到时间参数

的直接或间接影响,一般用颗粒物存量的变化予以表征。因植物种类、林分结构、气象因子、人为活动干扰程度、污染背景值等因素的差异而呈现出不同变化规律^[50-51],主要包括日变化、周期性变化和季节变化等方面。

1) 日变化。日变化除了受植物本身生理特性的影响,最主要的影响因素是所处环境的气象因子(如温度、湿度、风速等)、空气污染背景值以及人流量、车流量等。一般而言,人车流量大的时段(如早晚通勤高峰期)环境颗粒物浓度较高,若与高湿度、低风速等气象条件相叠加,植物就会表现出对颗粒物的高吸附量。相关研究发现,桂花滞留颗粒物的日变化特征为“双峰单谷型”,与大气颗粒物量的日变化趋势一致,即 8:00 滞尘量较高,随后逐渐降低,在 12:00 前后出现最低值,后续逐渐递增,16:00 达到峰值。出现这一变化规律可能的原因是中午时段受到风的影响,颗粒物出现二次悬浮;在 16:00 出现最大值的原因是由于单位叶面积滞尘量随着时间的积累而增加^[52],也有可能是大气颗粒物浓度的变化导致滞尘量随之变化。此外,由于植物滞尘与粉尘脱落是同时存在的,因此叶片每天所累积的颗粒物并不一定随着时间的增加而线性增加^[8],并且不同时段对不同粒径颗粒物的吸附量有着明显的差异,如果受到不同天气的影响,滞尘规律会表现得更加复杂。目前关于桂花滞尘效应日变化的研究较为薄弱,还有待进一步丰富和完善。

2) 周期性变化。植物叶片对大气颗粒物的截留和吸附是暂时的,随着下一次降雨或者大风天气到来,部分颗粒物可能由于外力作用而被冲刷或重新返回空气中,叶片随即开始新一轮滞尘,即植物滞尘的周期性变化。雨水只能冲刷掉粒径较大或黏附不紧密的部分颗粒物,对细颗粒物及黏附紧密颗粒物的影响较小,但会导致其形态发生变化和水溶性成分溶解^[53]。研究显示,植物吸附颗粒物的周期性变化规律有一定差异,达到饱和滞尘量的时间有物种特异性差异和地域差异^[8,35-36]。在重庆连续 12 天没有发生降雨的滞尘周期内,每 3 天测定一次桂花的滞尘量,在不同时间尺度下桂花的滞尘量分别为 0.193 g/m^2 (3 d)、0.379 g/m^2 (6 d)、0.235 g/m^2 (9 d)、0.795 g/m^2 (12 d),呈现出随着时间的变化而“增加—减少—增加”的规律;在南昌的研究也发现相同的变化趋势,而在许昌、长沙、福州、杭州、贵阳和西安等城市的研究却发现桂花的滞尘量随着时间的延长呈逐渐增加的趋势,最后

一次测定的滞尘量最大^[54-57],可能的原因是相关研究并未排除气象因素如风速、空气湿度和温度的影响;也有可能是不同城市空气污染背景值不同,或不同城市 and 不同采样点桂花生理代谢能力的差异所致,具体原因尚有待证实。

3) 季节变化。季节变化属于周期性变化的特殊情况。不同季节植物的生长速度、枝叶量和代谢能力存在差异。研究发现,植物滞尘能力基本与植物生长期一致,即夏季生长旺盛,叶片生理代谢增强,与外界物质和能量交换效率高,吸收大气颗粒物的机会增多,滞尘能力较强;秋冬季则相反^[58]。然而,也有研究认为春秋两季降水量相对稀少,叶片滞纳的颗粒物较多;夏季降雨较多,雨水冲刷导致颗粒物滞留量减少,但随着时间的推移,冬季可达到全年滞尘量的最大值,植物的滞尘量基本与大气颗粒物含量季节动态变化相一致^[59]。在南京、长沙、昆明等城市的研究证实桂花滞尘的季节变化符合上述规律;但植物滞留颗粒物有一个最大限度,若超过上限,滞尘效果就会逐渐下降,最终处于动态平衡^[60]。此外,伴随城市下垫面性质的改变、大气污染物来源的复杂化以及城市微气候的变化等,植物生理生化过程甚至物候期都会受到一定影响,进而影响植物对大气颗粒物的调控能力^[61]。但目前鲜见关于桂花物候期与滞尘能力相关的研究。

4.2 空间变化特征

植物滞尘效应的空间变化包括水平空间和垂直空间变化。

1) 水平空间变化。由于与尘源的距离不同,植物对大气颗粒物的滞留量在水平方向上呈现出一定的变化规律。消减不同粒径颗粒物的林带有效宽度表现为细颗粒物大于粗颗粒物,且存在明显的季节性差异(夏季>秋季>冬季>春季)和距离效应,即由道路外缘向内呈递减趋势,距离越远降幅越小^[62]。在空气质量等级或气象条件不同时,不同的林带宽度位置有着复杂的颗粒物消减及变化规律,总体上表现为空气污染加重时,消减颗粒物的有效宽度变小,但不同研究获取的林带宽度数值不同^[63]。目前关于桂花滞尘效应距离衰减规律的研究十分鲜见。研究表明,由于TSP颗粒物质量偏大,受重力和湍流撞击的影响较明显,因此传输距离短,能够更多地积累并滞留在距离尘源较近区域的植物叶片表面^[47,64];而PM₁₀和PM_{2.5}相对粒径较小,能够传输到更远的距离,因此在一定的距离范围内,植物滞尘量的距离衰减效应不明显(表1)。但也有观点认为距离行车道不同水平位置的

桂花,其单位叶面积滞尘量并未表现出明显规律性^[8],道路绿带内PM_{2.5}的衰减率不会随着与道路边缘距离增加而增加,衰减效果并无明显的有效半径^[65]。总之,当前对桂花滞尘水平变化规律的研究取得一定进展,认为水平距离并不是决定植物滞尘量的唯一因素,但诸多观点存在争议,尚未形成统一的意见。

2) 垂直空间变化。不同垂直高度植物叶片对大气颗粒物的吸附量存在显著差异。白皮松和侧柏(*Platycladus orientalis*)两种植物在开敞式环境(道路)不同垂直高度的滞尘量差异显著,而在封闭式环境(校园)的滞尘量差异较小,同株植物叶片滞尘量的垂直分布规律大致表现为“低位”大于“高位”和“中位”^[58],主要的原因是校园环境车流量较少,极少出现道路扬尘;道路环境中的车流量较大,距离地面较近位置的叶片必然滞留较多的灰尘。桂花在不同垂直高度的滞尘量也表现出相同规律^[66],即在不同观测区域,垂直高度越高,叶面滞尘量越小,这一规律在污染越严重的区域差异愈加显著。为进一步探讨不同粒径颗粒物的滞留特征,通过对不同垂直高度(高位0.6~0.9 m,低位0.2~0.5 m)PM_{2.5}、PM₁₀及TSP滞留量^[65]的分析发现,海桐(*Pittosporum tobira*)和凌霄(*Campsis grandiflora*)对PM_{2.5}和PM₁₀的滞留量均表现为“高位”大于“低位”;桂花则相反,全部测试树种在冠层“低位”的TSP滞留量高于冠层“高位”,其原因可能是桂花冠层形状、枝叶疏密程度等因素改变了风速和方向,影响颗粒物的传输和沉降,冠层较高位置的风速相对更大,更有利于PM₁₀等大颗粒物的传输与干沉降,但确切原因有待验证。总体而言,当前关于桂花滞尘效应垂直空间变化特征的研究稍显薄弱。当前研究选取的垂直高度均为相对高度(根据研究对象规格特征确定,无具体选择标准),若要进行不同生长地点某一具体高度颗粒物特征的对比分析,则应选择绝对高度,此时桂花滞尘机理的垂直变化特征可能会有所不同,具体规律还有待进一步明确。

5 滞尘对桂花叶片光谱特性、形态结构和生理生态等的影响

5.1 对叶片光谱特性的影响

高光谱遥感技术是一种定量研究植物生化参数特征的非破坏性方法,已被广泛应用于估算或反演植物叶片含水量、色素含量、生物量和叶面积等,并能高效监测植物长势,采用该技术研究植物叶面

滞尘也是当前的热点领域。植物的反射光谱主要是由叶片内部结构各种生物化学成分(水分、色素等)对光的反射而形成的^[67-69]。当植物叶片受到外界环境生物因素或非生物因素胁迫时,其结构和成分会发生一定变化,表现为光谱特征变化,因此利用光谱反射技术就可较为准确地进行大气颗粒物对植物生理生态影响的相关分析。研究表明,叶面滞尘对植物叶片的高光谱特征及反射率具有明显的影响,且滞尘量的多少与光谱数据之间具有极大相关性^[33]。在 780 ~ 1 300 nm 和 > 1 300 ~ 1 600 nm 波段,金桂叶片在有尘状态的光谱反射率均明显低于无尘状态,而在 490 ~ 700 nm 波段,有尘状态和无尘状态叶片的光谱反射率相差不大^[32];在空气污染区域桂花叶片的光谱反射率和红边斜率均小于清洁区^[69],该结果表明大气颗粒物的滞留可使植物叶片光谱特性发生较大的改变。此外,叶面颗粒物所含元素种类对植物叶片光谱反射率也有一定的影响,但这方面的研究还处于探索阶段^[70]。总体来看,当前对于桂花滞尘效应与光谱特性间相互关系的研究较少,很难为深入探讨叶面滞留颗粒物对其生理生态特性的影响提供依据。

5.2 对叶功能性状与形态特征的影响

为适应持续污染的生境条件,植物会对自身功能性状进行适度调整,若长期处于颗粒物污染的环境中,会普遍呈现出较低的比叶面积(specific leaf area, SLA)和叶绿素含量(chlorophyll content, Chla、Chlb、Chl a+b)、较高的叶干物质含量(leaf dry matter content, LDMC)等性状。研究显示,污染区的比叶面积较清洁区有所上升,色素含量(Chla、Chlb、Chl a+b 和类胡萝卜素)均较清洁区有所降低,但上升或下降幅度在不同植物间表现各异^[33],且由于 Chlb 比 Chla 更易被破坏分解,Chl a/b 比值上升^[71]。此外,大多数植物叶片的 pH 较清洁区没有发生明显的变化;部分植物叶片的相对含水量(relative water content, RWC)较清洁区低,表明植物的水分代谢也明显受到颗粒物的影响^[72]。对于桂花而言,除 pH 外,SLA、色素含量、RWC 等指标的变化均与其他植物一致。此外,大气颗粒物污染程度较重区域植物叶面的吸附量较大,叶面粗糙度和峰谷值均大于清洁区,表明外界大气环境对植物叶面形态结构有着重要影响。颗粒物污染可导致植物叶片绒毛、表面纹理、气孔、蜡质层、角质层和表皮细胞等发生一定程度的改变,植物叶片绒毛变长,气孔增大,叶片纹理粗糙度增加,叶片外表皮细胞收缩^[29]。研究表明,大气污染程度与桂花叶片

的粗糙度成正比,粗糙度随污染程度加重而增大^[61],导致叶片吸附颗粒物的能力增强,这是桂花对污染环境条件的响应。但当前对桂花滞尘与叶片形态特征的研究较为有限,有待今后继续深化和拓展。

5.3 对植物生理生态、生长发育和花香的影响

大气颗粒物滞留量越多对桂花的生理生态影响越显著。颗粒物的遮蔽会阻碍叶面对光能的吸收,也会阻塞或抑制气孔开放,形成气体扩散阻力,限制光合底物进入叶片内部,对植物的光合作用产生显著影响,直接导致最大净光合速率、表观量子效率、光饱和点等指标随大气颗粒物污染程度的增加而降低^[47],生长发育和生理生态特征发生明显异常。颗粒物中的重金属会导致植物的各种新陈代谢过程紊乱,阻碍花粉萌发,降低生物量^[71];颗粒物污染还会降低叶片气孔导度,抑制蒸腾速率,进而导致叶表面温度升高,影响光合作用正常进行。此外,叶面颗粒物富含氮磷等元素,可为苔藓、地衣等附生植物的生长提供必要的养分^[73]。附生植物的生长会造成叶片与外界物质及能量交换效率降低,影响植物生长发育。从植物群落的角度而言,颗粒物的滞留会阻塞气孔、遮挡光线而干扰生理代谢,严重抑制横向生长,导致细胞结构和组成发生变化^[74]。关于桂花滞尘效应与生理指标相关性的研究显示^[45-47],桂花滞尘量与过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性极显著正相关,与多酚氧化酶(PPO)活性和可溶性糖(soluble sugar, SS)含量显著正相关,与比表面积和叶面积指数(leaf area index, LAI)呈极显著正相关,与比叶重呈显著正相关,与脯氨酸(PRO)含量呈极显著负相关,与丙二醛(MDA)含量呈正相关。以上这些指标的变化情况及其与滞尘的相关性表明,叶面颗粒物对桂花生理代谢有显著影响。值得注意的是,叶片颗粒物的滞留与植物生理生态特征存在一定的周期性变化规律和物种间的差异性^[75]。

花香是桂花观赏性状的重要组成部分,与生理生态和生长发育有密切联系,受到遗传因素、激素及生长发育阶段的影响,也与光照、温湿度等外界环境条件密切相关。但不同品种花香对外界环境的响应有明显差异。在颗粒物污染的环境中,桂花能够获取的光照条件受到一定限制,气孔导度下降,叶面温度升高;当温度升高时,烷烃类化合物的释放增多,香气会受到一定程度的稀释。桂花香气物质的分泌与其花被微结构有关,花被表面呈柱状

结构、有明显的褶皱和气孔^[76],也是滞留大气颗粒物的重要部位。由此可以推断,在蒙尘状态下,桂花的花香会受到明显影响。

通过叶片生理指标的测定能科学掌握植物对颗粒物污染的敏感程度和植物生长环境的污染状况,可以据此进行抗污染植物的选择或采取有效措施消减颗粒物的负面影响,最大程度地发挥植物的观赏价值和生态效益。在不同颗粒物污染条件下开展植物叶功能性状、叶片结构特征、生理特性等方面的研究,能够明确滞尘对叶片结构和植物生长发育的影响,为高效滞尘植物的选择应用提供科学依据。关于桂花生理生态特征与滞尘效应的研究尚缺乏植物生长不同阶段的研究数据,对不同季节植物滞尘效应与生理生态响应之间耦合关系、滞尘与花香的相关研究还有待进一步深入。

6 展 望

综合桂花滞尘效应的相关研究可知,当前研究地点主要为江苏、湖北、浙江、重庆、上海等重点省市,而对于珠三角等部分空气污染来源较为复杂的地区却较少涉及。桂花滞尘效应机理与其他植物的差异主要表现在垂直空间变化规律和叶片 pH 的变化情况,其他方面的特征则相差不大。然而,在滞尘定量评估中存在一些问题,导致滞尘数据与实际滞尘量有一定偏差,无法准确反映出滞尘效应与叶片光谱特性、结构特征和生理生态的关系。鉴于此,为更准确地度量桂花的滞尘能力,更好发挥这一重要园林植物的生态效益,建议今后重点开展以下研究和探索:

1) 加强重点城市桂花的滞尘研究,逐步扩展到秦岭以南的广大亚热带地区,并对比不同功能区、不同城市之间的滞尘差异,明确其在不同地域滞尘规律的共性和个性,探讨其与产业布局、空气区域性污染、大气颗粒物成分之间的耦合关系,并关注颗粒物与空气微生物、空气负离子浓度之间的内在联系,为桂花的“适地适树”及最大限度发挥绿化、美化、香化价值提供科学依据。针对当前叶片微观结构与滞尘相关性研究误差较大的问题,建议今后开展研究时遵循统一标准,并统一计量单位,在立地环境、采样时的生长阶段、分析测试等方面尽可能避免误差,提高不同城市、不同功能区实验数据的科学性。

2) 植物滞尘是一个复杂的循环过程,其滞尘效率取决于大气颗粒物质量浓度、景观异质性(如冠层结构、景观基底等)及局部空气流动特性等因

素。虽然目前对桂花及其滞尘机理的研究较多,但对于滞尘能力直接、间接和整体作用机制的研究尚有欠缺,大多数研究将植物与环境人为隔离,并未考虑到植物与环境之间复杂的作用关系,也未将滞尘与吸收有毒有害气体及滞纳重金属相联系,对植物群落结构与功能的分析探讨不足,并不能较为准确全面地揭示滞尘的过程与机理。对于叶面颗粒物也主要见于 PM_{2.5}、PM₁₀、TSP 等常见粒径的分析,少见关于超细颗粒(ultrafine particles, UFP)等对人体健康危害更大的颗粒物的研究。建议加强颗粒物组成成分、粒径分级与植物生态系统结构与功能相结合的研究。此外,当前对桂花滞尘效应时空变化规律的研究虽有所涉及,但大多只是基于单一因素,水平方向与垂直方向相结合的三维空间特征与滞尘规律的研究十分鲜见。对于桂花滞尘能力影响因素的探讨也不全面,缺乏对城市绿地结构和植物规格大小等方面的综合考量。

3) 在现有研究的基础上,应继续加强滞尘对桂花叶功能性状、生理特性、形态特征和生长发育影响的研究,深入了解桂花各品种(群)在颗粒物污染环境下的生理生态响应和形态变化。此外,干旱、内涝、高温、冻害等城市环境常见胁迫对桂花生长发育和功能发挥有极大影响,尤其是灌木状的桂花品种更为敏感,但目前还鲜见逆境胁迫条件下桂花滞尘效应的机理及其变化规律的相关研究。今后应考虑到城市环境的特殊性,结合生理生态响应的研究逐渐明确逆境胁迫对桂花滞尘效应的影响及其应对措施。如可人工模拟不同污染源的环境,在人为控制环境变量的条件下测定植物滞尘前后对环境胁迫的响应机理。此外,为充分发挥桂花的观赏价值和环境效益,应综合应用多种信息技术手段提前获取大气颗粒物浓度变化趋势,在污染胁迫时确保水肥管理到位,必要时采取叶片冲洗和人工补光等方式缓解颗粒物对植物的负面影响。

4) 当前对桂花滞尘效应的研究大多仅对颗粒物进行质量分析,少见采用数量和体积分析的方法,在量化评估时并不能全面地揭示桂花综合滞尘能力,甚至与部分研究结果及观点相互矛盾。衡量颗粒物的标准有质量、数量、体积和化学组成 4 个方面,4 个方面相结合才能更加客观、全面地评估植物的滞尘能力。对桂花滞尘效应的评估指标主要是单位叶面积滞尘量和单叶滞尘量,而单株滞尘量、单位绿地面积滞尘量和干质量滞尘量较少涉及,量化评估还处于单一评价的阶段。此外,当前开展植物滞尘效应的研究方法较多,这也是造成研

究结果差异较大的原因。因此,建议今后制定一套科学的滞尘能力评价标准,探索多方法结合、多角度综合的滞尘能力研究方法,弥补现有研究的缺陷,提高结果的可靠性和普适性。

5)虽然桂花种质资源丰富,具有数以百计的栽培品种,但目前在城市园林中使用的品种十分有限。在评价桂花品种的综合价值时,建议在花色、花香、形态等传统指标的基础上增加滞尘性能评估指标。结合桂花种质资源的开发应用,逐步研究明确不同品种(群)滞尘能力的差别。当前植物分子生物学领域已经取得瞩目成绩,但相关技术尚未应用于高滞尘植物的筛选和定向培育。定向选育是提高植物吸附空气颗粒物能力的有效方法,对植物调控空气颗粒物有较大的潜在价值。今后可根据不同区域空气颗粒物的成分差异,通过研究其在植物体内的代谢途径及基因表达情况,通过分子生物学的手段定向选育具有高滞尘性能的园林植物。该方法对于桂花这类分布范围广、应用频率高和适应能力强的园林植物具有不可估量的潜力。

参考文献(reference):

- [1] KIM K, JEON J, JUNG H, et al. PM_{2.5} reduction capacities and their relation to morphological and physiological traits in 13 landscaping tree species [J]. Urban For Urban Green, 2022, 70: 127526. DOI: 10.1016/j.ufug.2022.127526.
- [2] SONG Y S, MAHER B A, LI F, et al. Particulate matter deposited on leaf of five evergreen species in Beijing, China; source identification and size distribution [J]. Atmos Environ, 2015, 105: 53-60. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2015.01.032.
- [3] MCDONALD A G, BEALEY W J, FOWLER D, et al. Quantifying the effect of urban tree planting on concentrations and depositions of PM₁₀ in two UK conurbations [J]. Atmos Environ, 2007, 41 (38): 8455-8467. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2007.07.025.
- [4] 殷杉,蔡静萍,陈丽萍,等.交通绿化带植物配置对空气颗粒物的净化效益[J].生态学报,2007,27(11):4590-4595. YIN S, CAI J P, CHEN L P, et al. Effects of vegetation status in urban green spaces on particles removal in a canyon street atmosphere [J]. Acta Ecol Sin, 2007, 27 (11): 4590-4595. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2007.11.026.
- [5] 臧德奎,向其柏.中国桂花品种分类研究[J].中国园林,2004,20(11):40-49. ZANG D K, XIANG Q B. Studies on the cultivar classification of Chinese sweet *Osmanthus* [J]. J Chin Landsc Archit, 2004, 20 (11): 40-49. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6664.2004.11.011.
- [6] 郑涛.福建省桂花古树资源调查与园林应用研究[D].北京:中国林业科学研究院,2015. ZHENG T. Fujian Province ancient sweet *Osmanthus* trees resource investigation and landscape application research [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [7] 郑妍妍.广东桂花资源调查与遗传分析[D].广州:华南农业大学,2020. ZHENG Y Y. Investigation and genetic analysis on resources of *Osmanthus fragrans* in Guangdong Province [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020.
- [8] 张灵芝.城市主干道路绿带滞尘效应研究[D].重庆:西南大学,2015. ZHANG L Y. Research on dust-retention effect of urban road greenbelts [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [9] 刘宇,张楠,王晓立,等.冬季苏北8种常绿乔木吸滞颗粒物能力与叶表微结构关系[J].西北林学院学报,2021,36(3):80-87,127. LIU Y, ZHANG N, WANG X L, et al. The relationship between the adsorption capacity of 8 evergreen arbors in northern Jiangsu Province and the micro structure of leaf surface [J]. J Northwest For Univ, 2021, 36 (3): 80-87, 127. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2021.03.12.
- [10] 刘延惠,侯怡菊,舒德远,等.贵阳市主要绿化树种叶面吸滞颗粒物特征及其时空变化[J].林业科学,2020,56(6):12-25. LIU Y H, HOU Y J, SHU D Y, et al. Properties and spatio-temporal variation of leaf retained particulate matters of the main tree species planted in Guiyang City [J]. Sci Silvae Sin, 2020, 56 (6): 12-25. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20200602.
- [11] 郭若妍,王会霞,石辉.模拟降雨对常绿植物叶表面滞留颗粒物的影响[J].生态学杂志,2019,38(7):1991-1999. GUO R Y, WANG H X, SHI H. Effects of simulated rainfall on leaf particulate matter of different size fractions of evergreen plants [J]. Chin J Ecol, 2019, 38 (7): 1991-1999. DOI: 10.13292/j.1000-4890.201907.018.
- [12] SUN Y, LIN W P, LI Y, et al. Dust deposition on vegetation leaves in Shanghai, China [J]. Int J Environ Health Res, 2020: 1-14. DOI: 10.1080/09603123.2020.1714559.
- [13] 高丹丹.武汉市主要绿化植物滞尘及含硫能力分析[D].武汉:湖北大学,2017. GAO D D. The Analysis about main plants dust and sulfur capacity in Wuhan City [D]. Wuhan: Hubei University, 2017.
- [14] 吴艳.桂花园林应用价值及其前景探析[J].园艺与种苗,2023,43(1):44-45,48. WU Y. Discussion on garden application value and prospect of *Osmanthus fragrans* [J]. Horticult Seed, 2023, 43 (1): 44-45, 48. DOI: 10.16530/j.cnki.cn21-1574/s.2023.01.018.
- [15] 金文芬,方晰,唐志娟.3种园林植物对土壤重金属的吸收富集特征[J].中南林业科技大学学报,2009,29(3):21-25. JIN W F, FANG X, TANG Z J. Absorption and accumulation characteristics of 3 ornamental plants to soil heavy metals [J]. J Cent South Univ For Technol, 2009, 29 (3): 21-25. DOI: 10.3969/j.issn.1673-923X.2009.03.008.
- [16] 赵宏波,郝日明,胡绍庆.中国野生桂花的地理分布和种群特征[J].园艺学报,2015,42(9):1760-1770. ZHAO H B, HAO R M, HU S Q. Geographic distribution and population characteristics of *Osmanthus fragrans* [J]. Acta Horticult Sin, 2015, 42 (9): 1760-1770. DOI: 10.16420/j.issn.0513-353x.2014-0939.
- [17] 武耀星,张梅,杨勇,等.气候变化对桂花分布的影响研究[J].西北林学院学报,2022,37(4):129-134. WU Y X, ZHANG M, YANG Y, et al. Effects of climate changes on the distribution of *Osmanthus fragrans* [J]. J Northwest For Univ, 2022, 37 (4): 129-134. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2022.04.17.
- [18] 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]. Environ Pollut, 2013, 178: 395-402. DOI: 10.1016/j.envpol.2013.03.050.
- [19] 陈徽尼,凌雷,仲怡铭,等.甘肃省典型树种滞尘能力及影响因素[J].西北林学院学报,2023,38(2):235-242. CHEN Z N, LING L, ZHONG Y M, et al. Dust retention capacity and influencing factors of typical tree species in Gansu Province [J]. J Northwest For Univ, 2023, 38 (2): 235-242. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2023.02.33.
- [20] XIE C K, GUO J K, YAN L B, et al. The influence of plant morphological structure characteristics on PM_{2.5} retention of leaves under different wind speeds [J]. Urban For Urban Green, 2022, 71: 127556.
- [21] 谢延翠,赵明,何静,等.不同径阶青杆林和油松林滞尘能力研究[J].西北林学院学报,2020,35(6):17-24. XIE Y C, ZHAO M, HE J, et al. Dust-retaining ability of *Picea wilsonii* and *Pinus tabulaeformis* forests with different diameter classes [J]. J Northwest For Univ, 2020, 35 (6): 17-24. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2020.06.03.
- [22] DANG N, ZHANG H D, ABDUS SALAM M M, et al. Foliar dust particle retention and metal accumulation of five garden tree species in Hangzhou: seasonal changes [J]. Environ Pollut, 2022,

- 306;119472.DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119472.
- [23] 查燕,马华升,俞祥群,等.城市绿化植物对不同粒径大气颗粒物的吸附特征研究[J].环境污染与防治,2020,42(7):807-811,819.ZHA Y,MA H S,YU X Q,et al.The adsorbing characteristic of urban greening plant on depositing size-fractionated particles[J]. Environ Pollut Contr, 2020, 42(7): 807-811, 819. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2020.07.002.
- [24] LI Y M, WANG S J, CHEN Q B. Potential of thirteen urban greening plants to capture particulate matter on leaf surfaces across three levels of ambient atmospheric pollution[J]. Int J Environ Res Public Health, 2019, 16(3): 402.
- [25] JIA M Y, ZHOU D Q, LU S P, et al. Assessment of foliar dust particle retention and toxic metal accumulation ability of fifteen roadside tree species: relationship and mechanism[J]. Atmos Pollut Res, 2021, 12(1): 36-45. DOI: 10.1016/j.apr.2020.08.003.
- [26] SGRIGNA G, SÆBØ A, GAWRONSKI S, et al. Particulate Matter deposition on *Quercus ilex* leaves in an industrial city of central Italy[J]. Environ Pollut, 2015, 197: 187-194. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.11.030.
- [27] 俞学如.南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其与叶面结构的关系[D].南京:南京林业大学,2008. YU X R. The characteristic of foliar dust of main afforestation tree species in Nanjing and association with leaf's surface micro-structure[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [28] 方颖,张金池,王玉华.南京市主要绿化树种对大气固体悬浮物净化能力及规律研究[J].生态与农村环境学报,2007,23(2):36-40. FANG Y, ZHANG J C, WANG Y H. Dustfall adsorbing capacity of major species of greening trees in Nanjing and its law[J]. J Ecol Rural Environ, 2007, 23(2): 36-40. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4831.2007.02.008.
- [29] 吴翠蓉,江波,张露,等.杭州8种绿化树种滞纳TSP和PM₁、PM_{2.5}、PM₁₀的效应研究[J].浙江林业科技,2020,40(5):13-20. WU C R, JIANG B, ZHANG L, et al. Study on adsorption of TSP, PM₁, PM_{2.5} and PM₁₀ by 8 greening tree species in Hangzhou[J]. J Zhejiang For Sci Technol, 2020, 40(5): 13-20. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3776.2020.05.003.
- [30] 张灵芝,秦华.城市道路行道树绿带对PM_{2.5}的滞尘效应及其变化分析[J].中国园林,2015,31(5):106-110. ZHANG L Y, QIN H. Analysis of dust-retention effect on PM_{2.5} in city avenue greenbelts[J]. Chin Landsc Archit, 2015, 31(5): 106-110. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6664.2015.05.024.
- [31] 王建辉,刘奕清,邹敏.永川城区主要绿化植物的滞尘效应[J].环境工程学报,2013,7(3):1079-1084. WANG J H, LIU Y Q, ZOU M. Dust detaining effect of main urban vegetation in Yongchuan, Chongqing[J]. Chin J Environ Eng, 2013, 7(3): 1079-1084.
- [32] SÆBØ A, POPEK R, NAWROT B, et al. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces[J]. Sci Total Environ, 2012, 427/428: 347-354. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.03.084.
- [33] 肖慧玲.粉尘污染下园林植物的光谱特征及光合特性研究[D].武汉:华中农业大学,2013. XIAO H L. Research on the spectral and photosynthetic characteristics of landscape plants under dust pollution[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [34] 朱天燕.南京雨花台区主要绿化树种滞尘能力与绿地花境建设[D].南京:南京林业大学,2007. ZHU T Y. Dust retention ability of main greening tree species and the construction of green flower border in Yuhuatai District of Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2007.
- [35] 李冰冰.长沙市常见行道树固碳释氧滞尘效益研究[D].长沙:中南林业科技大学,2012. LI B B. The Study on common street trees fixing carbon and releasing oxygen sluggish dust benefits in Changsha[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2012.
- [36] 王珍珍.南昌市道路绿地的植物配置及滞尘效应[D].南昌:东华理工大学,2019. WANG Z Z. Plant configuration and dust retention effect of road green space in Nanchang City[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [37] 吴中能,于一苏,边艳霞.合肥主要绿化树种滞尘效应研究初报[J].安徽农业科学,2001,29(6):780-783. WU Z N, YU Y S, BIAN Y X. Preliminary report on dust retention effect of main greening trees in Hefei[J]. J Anhui Agric Sci, 2001, 29(6): 780-783. DOI: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2001.06.042.
- [38] SCHAUBROECK T, DECKMYN G, NEIRYNCK J, et al. Multilayered modeling of particulate matter removal by a growing forest over time, from plant surface deposition to washoff via rainfall[J]. Environ Sci Technol, 2014, 48(18): 10785-10794. DOI: 10.1021/es5019724.
- [40] 余新晓.森林对PM_{2.5}等颗粒物的调控功能与技术[M].北京:科学出版社,2017. YU X X. Regulatory function of forest on PM_{2.5} and other particulate matters & related technology[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [41] 李海梅,党宁,禹靓倩,等.5个园林树种滞尘能力与叶表形态及颗粒物粒径的关系[J].林业科学研究,2021,34(4):84-94. LI H M, DANG N, YU L Q, et al. The relationships between the dust-olding capacity and the leaf surface structure & particle size in five evergreen tree species locates in Hangzhou[J]. For Res, 2021, 34(4): 84-94. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.04.010.
- [42] LI X L, ZHANG T R, SUN F B, et al. The relationship between particulate matter retention capacity and leaf surface micromorphology of ten tree species in Hangzhou, China[J]. Sci Total Environ, 2021, 771: 144812. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.144812.
- [43] 张俊叶,邹明,刘晓东,等.南京城市森林植物叶面颗粒物的含量特征[J].环境污染与防治,2019,41(7):837-843. ZHANG J Y, ZOU M, LIU X D, et al. Content characteristics of particulate matter on the leaf surface of Nanjing urban forest plant[J]. Environ Pollut Contr, 2019, 41(7): 837-843. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2019.07.019.
- [44] 李巧云,黄雅奇,刘艳,等.中亚热带绿化植物滞留颗粒物效应[J].西北林学院学报,2021,36(6):79-84. LI Q Y, HUANG Y Q, LIU Y, et al. Effects of particulate matter retention by common green plants in central tropical Asia[J]. J Northwest For Univ, 2021, 36(6): 79-84. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7461.2021.06.11.
- [45] 夏冰,马晓.郑州市绿化植物滞尘效应及其生理特征响应[J].江苏农业科学,2017,45(6):127-131. XIA B, MA X. Dust retention effect of greening plants in Zhengzhou City and its physiological characteristics response[J]. Jiangsu Agric Sci, 2017, 45(6): 127-131. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2017.06.032.
- [46] 高传友.南宁市典型园林植物滞尘效应及生理特性研究[J].水土保持研究,2016,23(1):187-192. GAO C Y. Research on dust retention capacities and physiological properties of different typical green plants in Nanning City[J]. Res Soil Water Conserv, 2016, 23(1): 187-192. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.01.028.
- [47] 刘玲.淮南市空气悬浮颗粒特征及污染物的树木监测[D].南京:南京林业大学,2013. LIU L. Characteristics of air suspended particulate matter in Huainan and monitoring pollutant by trees[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [48] 史军娜,张罡,安海龙,等.北京市16种树木吸附大气颗粒物的差异及颗粒物研究[J].北京林业大学学报,2016,38(12):84-91. SHI J N, ZHANG G, AN H L, et al. Differences in atmospheric particle accumulation on leaf surface in sixteen tree species in Beijing and characteristics of particles[J]. J Beijing For Univ, 2016, 38(12): 84-91. DOI: 10.13332/j.1000-1522.20160053.
- [49] PRZYBYLSZ A, SÆBØ A, HANSLIN H M, et al. Accumulation of particulate matter and trace elements on vegetation as affected by pollution level, rainfall and the passage of time[J]. Sci Total Environ, 2014, 481: 360-369. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.072.
- [50] TOMASEVIC M, VUKMIROVIC Z, RAJSIC S, et al. Characterization of trace metal particles deposited on some deciduous tree leaves in an urban area[J]. Chemosphere, 2005,

- 61(6):753-760.DOI: 10.1016/j.chemosphere.2005.03.077.
- [51] NOWAK D J, CRANE D E, STEVENS J C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States [J]. *Urban For Urban Green*, 2006, 4(3/4): 115-123. DOI: 10.1016/j.ufug.2006.01.007.
- [52] 江胜利. 杭州地区常见园林绿化植物滞尘能力研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012. JIANG S L. The common green plants in landscape architecture and the study on its dust retention capacity in Hangzhou [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2012.
- [53] 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 [J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 327-330. WANG Z H, LI J B. Capacity of dust uptake by leaf surface of *Euonymus japonicus* Thunb. and the morphology of captured particle in air polluted city [J]. *Ecol Environ*, 2006, 15(2): 327-330. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2006.02.027.
- [54] 石登红, 黄静, 杨爱玲, 等. 贵阳学院主要绿化植物滞尘能力的研究 [J]. *贵阳学院学报 (自然科学版)*, 2014, 9(1): 75-78. SHI D H, HUANG J, YANG A L, et al. Study on the dust catching property of the campus plants in Guiyang University [J]. *J Guiyang Univ (Nat Sci)*, 2014, 9(1): 75-78. DOI: 10.16856/j.cnki.52-1142/n.2014.01.021.
- [55] 闫淑君, 雷少飞, 秦一芳. 福州市常用乔木绿化树种秋季滞尘能力研究 [C]// 孟兆桢, 陈晓丽. 中国风景园林学会 2013 年论文集: 下册. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 410-415. YAN S J, LEI S F, QIN Y F. Study on the dust retention ability of common tree greening trees in Fuzhou in autumn [C]// MENG Z Z, CHEN X L. Chinese Society of Landscape Architecture. Proceedings of the 2013 Annual Meeting of Chinese Society of Landscape Architecture: Volume II. Beijing: China Architecture and Building Press, 2013: 410-415.
- [56] 江胜利, 金荷仙, 华晓莉, 等. 杭州常见绿化植物滞尘能力研究 [J]. *林业科技开发*, 2013, 27(5): 47-50. JIANG S L, JIN H X, HUA X L, et al. A study on the dust retention capacity of the landscape plants in Hangzhou [J]. *China For Sci Technol*, 2013, 27(5): 47-50. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3776.2011.06.009.
- [57] ZHENG J G. Study on the dust-retention capacity resulting from greenbelt of the main roads in Xuchang [J]. *Adv Mater Res*, 2013, 726/727/728/729/730/731: 1805-1808. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.726-731.1805.
- [58] 高金晖. 北京市主要植物滞尘影响机制及其效果研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2007. GAO J H. Influence mechanism and effectiveness of the plants semi-arid on detaining dust in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2007.
- [59] PRAJAPATI S K, TRIPATHI B D. Seasonal variation of leaf dust accumulation and pigment content in plant species exposed to urban particulates pollution [J]. *J Environ Qual*, 2008, 37(3): 865-870. DOI: 10.2134/jeq2006.0511.
- [60] 洪秀玲. 社区散生林木叶片滞留 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015. HONG X L. Studies on leaves of trees scattered in communities in retention of $PM_{2.5}$ and other atmospheric particulate matters [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [61] 罗佳, 周小玲, 田育新, 等. 长沙市不同污染程度区域桂花和樟叶表面 $PM_{2.5}$ 吸附量及其影响因素 [J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 503-510. LUO J, ZHOU X L, TIAN Y X, et al. $PM_{2.5}$ adsorption capacity of *Osmanthus fragrans* and *Cinnamomum camphora* leaf surface and influencing factors under different pollution levels in Changsha, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2019, 30(2): 503-510. DOI: 10.13287/j.1001-9332.201902.003.
- [62] 王会霞, 石辉, 王彦辉, 等. 城市绿化树种女贞对 $PM_{2.5}$ 的滞留能力 [J]. *生态科学*, 2014, 33(4): 749-753. WANG H X, SHI H, WANG Y H, et al. $PM_{2.5}$ removal by plant leaves: taking *Ligustrum lucidum* as an example [J]. *Ecol Sci*, 2014, 33(4): 749-753. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2014.04.018.
- [63] CAVANAGH J A E, ZAWAR-REZA P, WILSON J G. Spatial attenuation of ambient particulate matter air pollution within an urbanised native forest patch [J]. *Urban For Urban Green*, 2009, 8(1): 21-30. DOI: 10.1016/j.ufug.2008.10.002.
- [64] VIIPPOLA V, WHITLOW T H, ZHAO W L, et al. The effects of trees on air pollutant levels in peri-urban near-road environments [J]. *Urban For Urban Green*, 2018, 30: 62-71. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.01.014.
- [65] 刘启红. 武汉狮子山校园几种常见树种滞尘研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2018. LIU Q H. Study on dust retention of several common tree species in Shizishan campus of Wuhan [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [66] 李艳梅, 陈奇伯, 李艳芹, 等. 昆明 10 个绿化树种对不同污染区的滞尘及吸净效应 [J]. *西南林业大学学报*, 2016, 36(3): 105-110. LI Y M, CHEN Q B, LI Y Q, et al. Study on the effect of absorption and purification air pollution of 10 common greening species at different polluted area in Kunming [J]. *J Southwest For Univ*, 2016, 36(3): 105-110. DOI: 10.11929/j.issn.2095-1914.2016.03.018.
- [67] DUZGOREN-AYDIN N S, WONG C S C, AYDIN A, et al. Heavy metal contamination and distribution in the urban environment of Guangzhou, SE China [J]. *Environ Geochem Health*, 2006, 28(4): 375-391. DOI: 10.1007/s10653-005-9036-7.
- [68] 孙悦. 基于多光谱影像的植被滞尘分布评估 [D]. 上海: 上海师范大学, 2021. SUN Y. Estimation of vegetation dust deposition distribution based on multispectral image [D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2021.
- [69] 张金恒. 植物大气污染响应高光谱监测实例研究 [J]. *中国环境监测*, 2008, 24(5): 40-43. ZHANG J H. Study of hyperspectral application to monitoring vegetation response of air pollution [J]. *Environ Monit China*, 2008, 24(5): 40-43. DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2008.05.011.
- [70] GARTY J, TAMIR O, HASSID I, et al. Photosynthesis, chlorophyll integrity, and spectral reflectance in lichens exposed to air pollution [J]. *J Environ Qual*, 2001, 30(3): 884-893. DOI: 10.2134/jeq2001.303884x.
- [71] 姚俊. 粉尘污染对城市典型绿化树种的生理生态影响 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009. YAO J. The physiological and ecological impacts of urban typical afforestation trees polluted by dust [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [72] CHEN X P, ZHOU Z X, TENG M J, et al. Accumulation of three different sizes of particulate matter on plant leaf surfaces: effect on leaf traits [J]. *Arch Biol Sci*, 2015, 67(4): 1257-1267. DOI: 10.2298/ABS150325102C.
- [73] 黄峰. 高速公路尘污染对植物叶片光合作用的影响 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007. HUANG F. Effect of highway dust pollution on photosynthesis in plant leaves [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2007.
- [74] 吴春燕, 王雪峰. 叶面尘对植物反射光谱及生理生态的影响研究进展 [J]. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(6): 1132-1138. WU C Y, WANG X F. Effects of foliar dust on plant reflectance spectra and physiological ecology: a review [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, 20(6): 1132-1138. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2014.03044.
- [75] BUI H T, ODSUREN U, KIM S Y, et al. Seasonal variations in the particulate matter accumulation and leaf traits of 24 plant species in urban green space [J]. *Land*, 2022, 11(11): 1981. DOI: 10.3390/land11111981.
- [76] 施婷婷, 杨秀莲, 王良桂. 3 个桂花品种花香组分动态特征及花被片结构解剖学观测 [J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2020, 44(4): 12-20. SHI T T, YANG X L, WANG L G. Dynamic characteristics of floral components and anatomical observation of petals in three cultivars of *Osmanthus fragrans* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed)*, 2020, 44(4): 12-20. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.202003047.