沙尘天气下洛阳市常见园林地被植物叶片滞尘特征*

李肖艳 苏 维 吉瑞珂 何 围 郑桠文
河南科技大学园艺与植物保护学院 河南洛阳 471000

摘要：为充分了解沙尘天气下园林地被植物叶片滞尘量的变化和叶片质地对滞尘的影响，于 2023 年测定洛阳市常见的 16 种园林地被植物在沙尘天气后的单位叶面积滞尘量，分析园林地被植物之间叶片滞尘量差异的原因和叶片质地对滞尘量的影响。结果表明：1）日本珊瑚树的滞尘总量（0.221 6 mg·cm^{-2}）最大，其次为红叶石楠（0.192 6 mg·cm^{-2}），红花酢浆草（0.013 0 mg·cm^{-2}）最小；2）对于 PM0.1~2.5 的滞留量，以叶表具有毛状体的红花檵木（0.014 1 mg·cm^{-2}）最大，棣棠（0.000 5 mg·cm^{-2}）最小；3）革质叶、有毛状体叶的园林地被植物滞尘效果较好，其次是纸质叶，膜质叶最差；4）沙尘天气下，园林地被植物叶表滞留 PM10~100 的量比非沙尘天气显著升高，而 PM2.5~10 的滞留量变化不明显；5）沙尘天气下 PM10~100 在总悬浮颗粒物中的占比高于正常天气，而 PM0.1~2.5 的占比变小。因此，选用以防治空气污染为目标的园林地被植物时，建议选择日本珊瑚树、红叶石楠和红花檵木等滞尘能力较强的植物，叶片革质、厚实、有毛状体等特性更利于发挥滞尘效应。

关键词：园林地被植物；PM0.1~2.5；PM10~100；叶片质地；滞尘组分
DOI：10.12169/zgcsly.2023.07.28.0003

Dust Retention Characteristics of Common Ground Cover Plant Leaves in Luoyang City During Sandstorms

Li Xiaoyan Su Wei Ji Ruike He Wei Zheng Yawen
(College of Horticulture and Plant Protection, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, Henan, China)

Abstract: In order to fully understand the changes in dust-retention capacity of plant leaves in gardens during sandstorms and the impact of leaf texture on dust retention, the study measures the dust retention per unit leaf area of 16 ground cover plants commonly used for landscaping in Luoyang City after the sandstorm in 2023, analyze the reasons behind the differences in leaf dust retention among the ground cover plants, and summarizes the influences of leaf texture on dust retention. The results show that: 1) The total dust retention of *Viburnum awabuki* (0.221 6 mg·cm^{-2}) is the highest, followed by *Photinia*×*fraseri* Dress (0.192 6 mg·cm^{-2}), while the lowest is *Oxalis corymbosa* DC. (0.013 0 mg·cm^{-2}); 2) For the retention of PM0.1-2.5, *Loropetalum chinense* var. *rubrum* with trichome on the leaf surface retains the largest amount of dusts (0.014 1 mg·cm^{-2}), and the minimum (0.000 5 mg·cm^{-2}) is *Kerria japonica*; 3) Leafy leaves and hairy leaves have better dust-retention effects on the ground cover plants, followed by paper leaves, while membrane leaves are the worst; 4) The amount of PM10-100 retained on the leaf surface of the ground cover plants in dust weather is significantly higher than in non-dust weather, while the retention of PM2.5-10 show little significant change; and 5) The proportion of PM10-100 in total suspended particulate matters is higher in dust weather than in normal weather, while

收稿日期：2023-07-28
* 基金项目：河南科技大学 SRTP 项目（2022513）；河南科技大学博士启动基金项目（13480061）。
第一作者：李肖艳（2001-），女，本科生。E-mail：lixiaoyan17@ hnkjdx. wecom. work
通信作者：苏维（1979-），男，博士，讲师，研究方向为城市绿地生态功能。E-mail：suwei8405@ 126. com

the proportion of PM0.1-2.5 decreases. When ground cover plants for landscaping are selected with the goal of preventing air pollution, it is recommended to choose plants with high dust-retention abilities such as *V. awabuki*, *P. serrulata*, and *L. chinense* var. *rubrum* since their leathery, thick, and hairy leaves are more conducive to have higher dust-retention effects.

Keywords: ground cover plant; PM0.1-2.5; PM10-100; leaf texture; dust-retention content

近些年，随着我国城市化和工业化的快速推进，空气颗粒物（PM）造成的空气污染是一个重要的城市环境问题。空气颗粒物来源于工厂和机动车等石化燃料燃烧、野火和沙尘暴[1]。主要空气颗粒物有 TSP（总悬浮微粒）、PM10（可吸入颗粒物）和 PM2.5（细颗粒物）等，空气颗粒物及其对人类健康的有害影响在全球范围内引起了极大关注。一般来讲，空气颗粒物的粒径越小，其表面积越大、吸附能力越强，携带的有害有毒物质也就越多。PM2.5 可穿过呼吸道引起肺炎症反应、系统性炎症反应和自主神经功能障碍等疾病，对人体产生不良影响[2]，甚至还可以间接引发心血管疾病[3]。在空气污染严重的地区，高浓度的 PM2.5 中含有的金属造成毒害，可导致患者血压升高[4]，而沙尘天气会导致大气中 PM2.5 浓度快速上升，极大增加了危害人类健康的风险[5]。

早期学者认为园林地被植物特指那些在园林绿地中应用的能覆盖地面、起到保持水土和营造良好景观效果的低矮植物，包括具有较高观赏价值的草本、木本植物中低矮丛生的灌木和一些藤本等[6]。后来关于其定义大同小异，基本上都使用了低矮一词，其模糊的概念，国内较多学者将其定义为高度（自然生长或经过修剪后）不超过 1 m 的草本、灌木以及覆盖在构筑物或地表的藤本[7]。园林地被植物可通过叶片、枝条等器官拦截和滞留空气颗粒物，从而减小空气中颗粒物质量浓度。目前，对植物滞尘的相关研究集中在叶片滞尘特征方面[8~10]。不同园林地被植物的叶片形态特征各异，滞留不同粒径空气颗粒物的能力各有不同。园林地被植物叶表的微结构可影响其滞尘能力，如有毛状体、皱褶、密集深沟槽、蜡质、气孔、长枝条状结构和瘤状突起等结构的叶片有利于对颗粒物的截留，滞留颗粒物能力较强[11-12]。园林地被植物叶表粗糙度、气孔密度和开口大小、绒毛密度和分布特征是影响叶片滞尘能力的主要因素[13]。殷卓君等[14]研究发现园林植物叶片表面的气孔、褶皱、沟槽、絮状凸起和绒毛有利于颗粒物的滞留。魏文俊[15]研究表明随着叶龄增加，由于表皮蜡质层的机械磨损和化学破坏使得针叶的粗糙度增加，是导致叶片颗粒物滞纳能力增强的主要原因。王书恒等[9]对比 6 种常见园林植物的单位叶面积滞尘量，发现单位叶面积滞尘量仅与叶表沟壑数量正相关（$P<0.05$），与毛被密度、气孔密度及面积、粗糙程度无显著相关性。已有多位学者对植物滞留颗粒物的能力和机理进行了研究[14~16]，多通过电子显微镜或者结合 SEM/EDS 技术和 Image J 软件观测叶表气孔、凹槽、毛状体等叶表微观结构，并分析这些叶片微观结构对滞留颗粒物的影响，但对植物滞留不同粒径颗粒物的质量缺乏量化的数据支持，尤其在沙尘天气这种重污条件下，园林地被植物叶片单位面积滞尘效果如何、叶片滞留空气颗粒物的粒径组分特征是什么样的尚不清楚。

综上，在典型沙尘天气下，不同园林地被植物叶片滞尘量是否有差异？叶片滞留不同粒径颗粒物的组分特征是否发生变化？这些科学问题还需要进一步开展研究。本研究选取 16 种洛阳市常见园林地被植物，在典型沙尘天气后，采用微孔滤膜称质量法测定园林地被植物单位叶面积滞留不同粒径颗粒物的质量，分析叶片滞留不同粒径颗粒物的组分特征，以期了解沙尘天气下园林地被植物叶片单位面积滞尘量的变化和叶片质地对滞尘的影响。

1　研究区概况

洛阳市位于河南省西部（34°32′—34°45′E，112°16′—112°37′N），属温带季风气候，四季分明，春季多风、夏季炎热、秋季晴和、冬季干冷。本研究的具体采样地点位于洛阳市洛龙区河南科技大学校园内，在校园内的交通主干道（日新

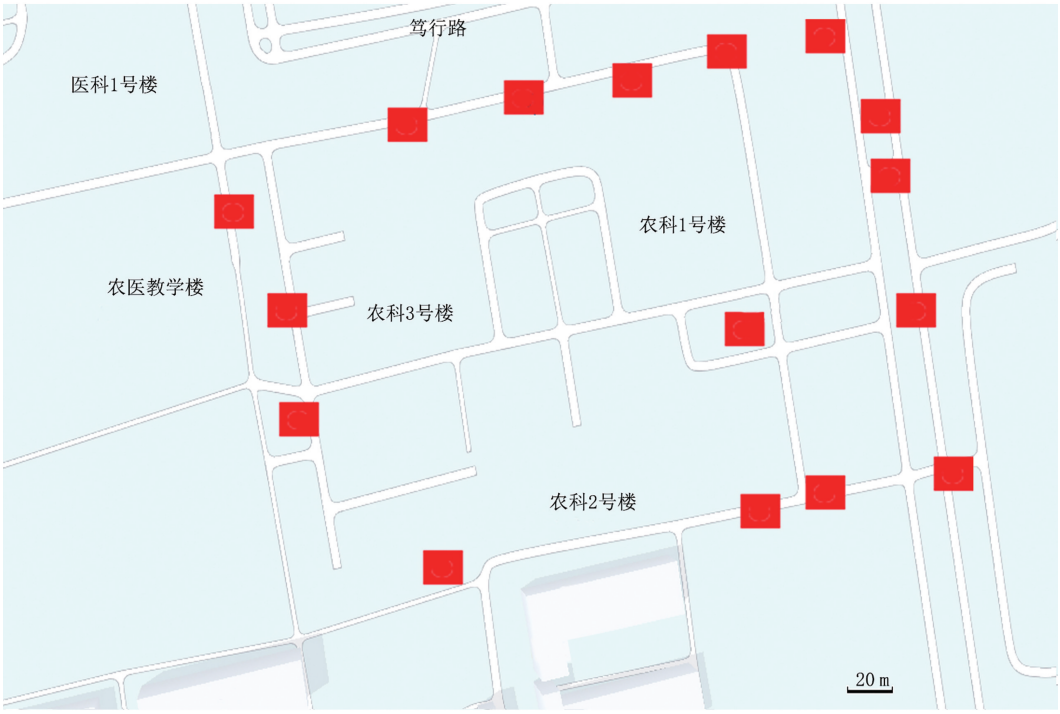
路、笃行路、博学路和明德路）周边绿地内进行园林地被植物叶片采样。

2 研究方法

2.1 研究对象选择与取样

本研究综合考虑在洛阳市城市园林中应用广泛、覆盖地表能力较强和地被植物高度不超过 1 m 等特性，选择洛阳市常见的 16 种园林地被植物叶片作为研究对象，分别为红花檵木（*Loropetalum chinense* var. *rubrum*）、日本珊瑚树（*Viburnum awabuki*）、海桐（*Pittosporum tobira*）、红叶石楠（*Photinia* × *fraseri* Dress）、小蜡（*Ligustrum sinense*）、常春藤（*Hedera nepalensis* var. *sinensis*）、金森女贞（*Ligustrum japonicum* ‘Howardii’）、小叶黄杨（*Buxus sinica* var. *parvifolia*）、南天竹（*Nandina domestica*）、八角金盘（*Fatsia japonica*）、金边黄杨（*Euonymus japonicus* ‘Aureamarginatus’）、牡丹（*Paeonia suffruticosa*）、紫叶小檗（*Berberis thunbergii* ‘Atropurpurea’）、月季花（*Rosa chinensis*）、红花酢浆草（*Oxalis corymbosa* DC.）和棣棠（*Kerria japonica*）。

2023 年 4 月 10—12 日发生沙尘天气（天气状况：多云转阴，北风 1~2 级），本研究于 2023 年 4 月 13 日（天气状况：阴，北风 1~2 级、西风 3~4 级），在沙尘天气结束后立即进行叶片采样。16 种园林地被植物分布于 16 个采样点，每种植物在采样点选取 5~10 株植株作为采样对象，园林地被植物与校园内交通主干道距离基本相同，且周边无遮挡，以保证植物受到的沙尘影响一致（图 1）。由于 16 种植物高度不同，选择距离地面 0.2~1.0 m 的高度，每种植物分别选植株的东、西、南、北 4 个方位的同一高度采集叶片，每种植物选择当年生的成熟叶片（根据叶片的大小，单叶较大者每组采集 20~30 片，较小者每组采集 40~60 片，每种植物采集 3 组叶片作为重复）。研究人员操作全程佩戴橡胶手套，采集时选择生长状态良好、枝叶繁茂，且无明显病害或物理损伤的植株，用修枝剪剪下带叶片的枝条，立即放入干净的密封袋中，采集结束后，防止抖动密封袋，带回实验室进行单位叶面积的滞尘量测定。



注：图中方块为 16 种植物采样地点，每种植物选择 5~10 株采集叶片

图 1 洛阳市 16 种园林地被植物采样地点分布

2.2 指标测定与计算

1）叶片表面滞留颗粒物量的测定。利用质量分析法测定叶表滞留颗粒物的质量[9]，每种园林地被植物叶片各设置 3 组重复，将每组叶

片放入已编码的烧杯中，注入 200～300 ml 蒸馏水浸没叶片，浸泡 5 min，将装有叶片的烧杯置于超声波清洗机内，不断搅拌，清洗 15 min，用镊子将叶片小心夹出，清洗液用孔径 100 μm 的钢网筛过滤，去除杂质后，依次用孔径为 10.0、2.5 和 0.1 μm 的微孔滤膜（提前置于 60 ℃烘箱烘干60 min 至恒质量，即 m_0）过滤，整个过滤流程采用微孔滤膜过滤装置完成，将过滤后的滤膜置于 60 ℃烘箱中烘干至恒质量，即 m_1，两次质量之差即叶面滞留空气颗粒物量。使用精度为 0.000 1 g 的分析天平称量，将孔径为 10.0 、2.5 和 0.1 μm 的微孔滤膜上的颗粒物分别视为粒径 10～100、2.5～10 和 0.1～2.5 μm 的颗粒物，则 TSP 质量即为 3 者质量之和，PM10 质量近似于粒径 2.5～10 μm 与粒径 0.1～2.5 μm 的颗粒物质量之和，PM2.5 质量近似为粒径 0.1～2.5 μm 的颗粒物质量（由于粒径 0.1μm 以下的颗粒物质量占收集颗粒物的比重非常小，可忽略）。

2）叶面积的测定。借鉴前人扫描与图像处理软件结合的方法[10]，将叶表滞留颗粒物量测定用过的园林地被植物叶片平展铺在 A4 纸上，放置于扫描仪中，扫描成彩色图片，用 Photoshop 图像处理软件打开扫描的图片，用魔棒工具选择所用叶片扫描的边缘，利用记录测量工具读取所选叶片的像素数据，再选取整张 A4 纸测量其像素数据，利用二者的比值乘以 A4 纸面积 623.70 cm^2，即可得到以 cm^2 为单位的叶片面积。此方法可以一次扫描、计算多个叶片，提高了工作效率，即使 16 种测试叶片形态各异（图 2），也能保证足够的测量精度。

3）单位叶面积滞留颗粒物量的测定。各粒径滞留颗粒物质量与叶片总面积的比值即为单位叶面积滞留颗粒物量（单位为 mg · cm^{-2}）。每一种园林地被植物设置 3 组重复，求平均值。

2.3　数据处理

采用 SPSS 19.0（IBM，USA）软件进行数据分析。不同园林地被植物叶片滞留各粒径颗粒物的数值比较采用单因素方差分析（Duncan）。差异显著性水平设定为 $P=0.05$。用 Excel2010 软件绘制图表。

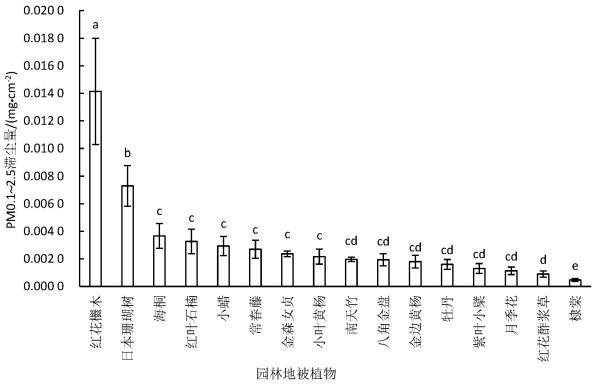


图 2　16 种园林地被植物叶片形态

3　结果与分析

3.1　各园林地被植物叶片表面 PM0.1～2.5 滞留量比较

沙尘天气后，16 种园林地被植物叶片单位叶面积 PM0.1～2.5 滞留量存在显著差异（图 3），表现为红花檵木>日本珊瑚树>海桐、红叶石楠、小蜡、常春藤、金森女贞、小叶黄杨>南天竹、八角金盘、金边黄杨、牡丹、紫叶小檗、月季花>红花酢浆草>棣棠。



注：不同小写字母表示经 Duncan 检验差异显著；下同。

图 3　16 种园林地被植物叶片表面单位面积 PM0.1～2.5 滞留量

3.2　各园林地被植物叶片表面 PM2.5～10 滞留量比较

沙尘天气后，16 种园林地被植物叶片单位叶面积 PM2.5～10 滞留量存在显著差异（图 4），表现为日本珊瑚树、红叶石楠>红花檵木、八角金

盘>海桐、金边黄杨、南天竹、小蜡、常春藤、棣棠、金森女贞、小叶黄杨>月季花、紫叶小檗、牡丹>红花酢浆草。

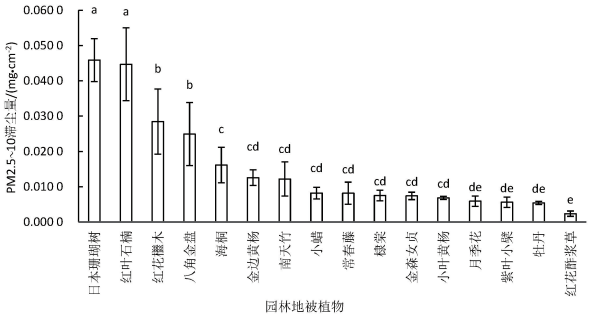


图 4 16 种园林地被植物叶片表面单位面积 PM2.5~10 滞留量

3.3 各园林地被植物叶片表面 PM10~100 滞留量比较

沙尘天气后，16 种园林地被植物叶片单位叶面积 PM10~100 滞留量存在显著差异（图 5），表现为日本珊瑚树、红叶石楠>红花檵木、海桐>常春藤、八角金盘>金边黄杨>月季花、南天竹、小蜡、金森女贞、棣棠、紫叶小檗、小叶黄杨>牡丹>红花酢浆草。

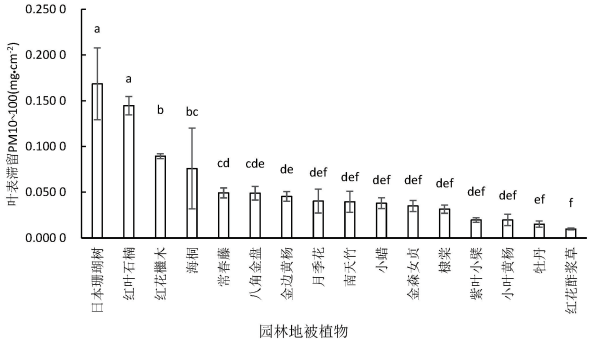


图 5 16 种园林地被植物叶片表面单位面积 PM10~100 滞留量

3.4 各园林地被植物叶片表面 TSP 滞留量比较

沙尘天气后，16 种园林地被植物叶片单位叶面积 TSP 滞留量存在显著差异（图 6），表现为日本珊瑚树、红叶石楠>红花檵木>海桐、八角金盘>常春藤、金边黄杨>南天竹、小蜡、月季花>金森女贞>棣棠、小叶黄杨、紫叶小檗>牡丹>红花酢浆草。

3.5 园林地被植物叶片的滞尘组分

由表 1 可知，不同园林地被植物单位叶面积滞留不同粒径颗粒物占比（不同粒径颗粒物质量占 TSP 质量的比例）存在明显差异：PM10~100 占比最高的为月季花，最低的为八角金盘，平均占比 75.02%；PM2.5~10 占比最高的为八角金盘，最低的为月季花，平均占比 20.27%；PM0.1~2.5 占比例最高的为红花檵木，最低的为棣棠，平均占比 4.67%。

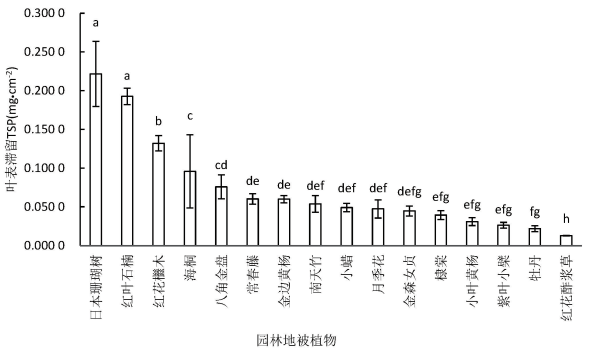


图 6 16 种园林地被植物叶片表面单位面积 TSP 滞留量

表 1 16 种园林地被植物叶面不同粒径颗粒物占比

%

物种	PM10~100	PM2.5~10	PM0.1~2.5
红花酢浆草	74.94	18.15	6.91
牡丹	68.41	24.36	7.23
紫叶小檗	73.93	21.16	4.91
小叶黄杨	68.61	23.86	7.53
棣棠	79.8	19.02	1.18
金森女贞	78.15	16.56	5.29
月季花	85.12	12.49	2.39
小蜡	77.29	16.73	5.98
南天竹	73.56	22.76	3.68
金边黄杨	75.99	20.98	3.03
常春藤	81.92	13.59	4.49
八角金盘	64.57	32.88	2.55
海桐	79.34	16.84	3.82
红花檵木	67.69	21.57	10.74
红叶石楠	75.09	23.21	1.70
日本珊瑚树	75.99	20.72	3.29
均值	75.02	20.31	4.67

4 讨论

4.1 不同园林地被植物叶表滞留不同粒径颗粒物的成因

园林地被植物叶表对不同粒径大气颗粒物的滞留量存在显著差异，TSP 滞留量最大的是日本珊瑚树，最小的是红花酢浆草；PM10~100 滞留量最大的是日本珊瑚树，其次为红叶石楠，最小的是红花酢浆草；PM2.5~10 滞留量最大的是日本珊瑚树，其次为红叶石楠，最小的是红花酢浆

草；PM0.1~2.5 滞留量最大的是红花檵木，最小的是棣棠。本研究呈现出常绿植物叶片滞尘量大于落叶植物的趋势，这是因为其叶表微观尺度上具有多样的粗糙结构，使其比落叶植物更有利于滞尘，且常绿植物叶片滞尘时间更长。但是由于叶表微观结构的差异，植物叶片滞留不同粒径颗粒物滞留量的表现并不一致，研究表明日本珊瑚树和红叶石楠滞尘能力强是由于这些植物叶表面粗糙度较大，且具有突出的叶脉[17]，叶表具有密集深沟槽、毛状体、皱褶、长枝条状结构和瘤状突起等结构更利于叶片捕获空气颗粒物[10]。本研究中具有毛状体的红花檵木叶片可以滞留更多细颗粒物，这是因为细颗粒物在毛状体周围容易聚集，使小粒径颗粒物不易脱离叶片表面，因此红花檵木叶片滞留 PM0.1~2.5 的量最大。

4.2　沙尘天气对园林地被植物叶表滞尘组分的影响

日本珊瑚树、红叶石楠和海桐等具有革质叶，且叶片较厚实的植物滞尘能力较强，红花檵木具有厚实纸质叶片且存在显著毛状体，滞尘能力次之，常春藤、金边黄杨等革质叶且较单薄的植物再次之，南天竹、紫叶小檗、牡丹、棣棠等纸质叶片的植物滞尘能力较低，红花酢浆草具有膜质叶片，滞尘能力最低。本研究得到滞尘能力表现为革质叶>纸质叶>膜质叶的规律与其他园林地被植物研究结果相似[18-19]。对比同类研究，金边黄杨滞尘总量显著高于太原的研究结果[20]，红叶石楠、南天竹的 PM0.1~2.5 滞留量与洛阳 2022 年夏季的研究结果较为近似或略有提高，但不同粒径颗粒物占比不同，本研究中植物滞留 PM10~100（较大颗粒物）占比的均值（75.02%）明显高于其他同类研究，PM10~100 的占比（20.31%）与同类研究相似，而细颗粒物 PM0.1~2.5 占比的均值（4.67%）显著低于其他同类研究[21]。沙尘天气主要发生在春未夏初季节，由于冬春季干旱区降水甚少，地表异常干燥松散，抗风蚀能力很弱，在有大风刮过时，就会将大量沙尘卷入空中，形成沙尘天气，近地层的沙尘浓度比较大，颗粒较粗。本研究采样于连续 3 天的沙尘天气之后进行，3 天的沙尘天气使空气质量达到严重污染，空气中大粒径颗粒物较正常天气下显著增多，且植物叶片滞尘是一个被动吸附过程，其滞留颗粒物的量直接反映了空气颗粒物来源的组成[22]。因此，本研究中 PM10~100 的占比远超同类研究的结果，正是沙尘天气下大粒径颗粒物增多造成的。叶表大粒径颗粒物滞留量大幅增加，使得 TSP 同样大幅增加，PM2.5~10 增幅较小，而 PM0.1~2.5 增幅很小，使得 PM0.1~2.5 在 TSP 中的占比明显减小。

5　结论

不同园林地被植物叶表颗粒物滞留量由高到低分别为：日本珊瑚树、红叶石楠、红花檵木、海桐、常春藤、八角金盘、金边黄杨、南天竹、小蜡、月季、金森女贞、棣棠、小叶黄杨、紫叶小檗、牡丹和红花酢浆草。日本珊瑚树、红叶石楠滞留较大粒径（PM>2.5）颗粒物的能力最强，红花檵木滞留细颗粒物（PM0.1~2.5）的能力最强。具有革质叶、有毛状体叶的园林地被植物滞尘效果较好，其次是纸质叶，滞尘能力最差的是膜质叶。

本研究仅对沙尘天气下园林地被植物叶片的滞尘特征进行了研究，今后可深入研究不同生活型植物滞留不同粒径颗粒物的差异，并进一步开展植物叶片微观性状对滞尘的影响研究，以期从不同自然条件、不同环境条件系统全面地分析植物滞留颗粒物能力的差异。

参考文献

[1] KELLY F J, FUSSELL J C. Global nature of airborne particle toxicity and health effects: a focus on megacities, wildfires, dust storms and residential biomass burning[J]. Toxicology Research, 2020, 9(4): 331-345.

[2] 索丹凤，曾三武. 空气细颗粒物 PM2.5 对人体各系统危害的研究[J]. 医学信息，2019，32(18)：32-34.

[3] JUNG I, PARK M, JEONG M H, et al. Transcriptional analysis of gasoline engine exhaust particulate matter 2.5-exposed human umbilical vein endothelial cells reveals the different gene expression patterns related to the cardiovascular diseases[J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2021, 29: 101190.

[4] WANG J J, WU S S, CUI J, et al. The influences of ambient fine particulate matter constituents on plasma hormones, circulating TMAO levels and blood pressure: a panel study in China[J]. Environmental Pollution, 2022, 296: 118746.

[5]安磊.沙尘暴的危害和治理路径[J].生态经济,2023,39(6):5-8.
[6]陈有民.园林树木学[M].北京:中国林业出版社,1988.
[7]邢建丽.郑州市园林地被植物物种多样性及应用研究[D].郑州:河南农业大学,2019.
[8]徐晓丹,马志影,张杰,等.植物叶表毛状体对空气 PM 净沉降的影响[J].中国城市林业,2021,19(6):35-40.
[9]王书恒,朱晓宇,田如男,等.南京市 6 种常见园林植物滞尘效益的综合分析[J].中国园林,2021,37(6):111-116.
[10]骆媛媛,彭巍,李明文,等.火山熔岩台地 8 种乔木树种吸附颗粒物能力研究[J].温带林业研究,2020,3(2):34-37.
[11]李晓璐,叶锦东,章剑,等.乔木滞留大气颗粒物能力及其与叶表面微结构关系[J].中国城市林业,2022,20(3):22-28,120.
[12]朱旭,李海梅,李彦华,等.8 种灌木对大气颗粒物污染的生理响应[J].生态环境学报,2022,31(3):535-545.
[13]孙应都,陈奇伯,李艳梅,等.昆明市 6 个绿化树种叶表微结构与滞尘能力的关系研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(3):78-85.
[14]殷卓君,沈小雪,李瑞利,等.深圳市常见园林植物滞尘效应研究[J].北京大学学报(自然科学版),2020,56(6):1081-1090.
[15]魏文俊.城市绿化树种滞尘机制与叶片功能性状的响应研究[D].北京:中国林业科学研究院,2021.
[16]张明晓,刘玥含,孟凡涛,等.6 种灌木滞尘能力与叶片表面结构研究[J].山东林业科技,2022,52(5):7-12.
[17]王军梦,汪安印,王翼飞,等.不同污染程度下树种滞尘能力与叶表微形态关系研究[J].林业调查规划,2022,47(5):16-21,37.
[18]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.
[19]刘国荣,王颖,郑歌.园林地被植物叶片滞尘效应研究[J].衡水学院学报,2021,23(4):21-24.
[20]王松,康红梅,王晋,等.山西太原常绿植物滞尘能力差异性及叶面微结构[J].北方园艺,2021,485(14):80-86.
[21]李舒蕾.洛阳市常见行道植物对道路细颗粒物的吸附研究[D].洛阳:河南科技大学,2023.
[22]JANHALL S.Review on urban vegetation and particle air pollution-deposition and dispersion[J].Atmospheric Environment,2015,150:130-137.

(上接第 156 页)

[12]TEDJA Y W,TSAIH L.Water soundscape and listening impression[J].The Journal of the Acoustical Society of America,2015,138:1750.
[13]XU X Q,WU H.Audio-visual interactions enhance soundscape perception in China's protected areas[J].Urban Forestry & Urban Greening,2021,61:127090.
[14]莫尔科夫基纳·达莉雅,刘海龙,许晓青.水声景与人的感知研究[J].中国园林,2020,36(7):99-104.
[15]SCHAFER R M.The tuning of the world:Toward a theory of soundscape design[M].Philadelphia:University of Pennsylvania Press,1977.
[16]WESTERKAMP H.Listening and soundmaking:A study of music-as-environment[D].Vancouver:University of British Columbia,1972.
[17]DIETZE L,RUEBSAAT N.Learning is living:Acoustic ecology as pedagogical ground[J].Acoustic Ecology Review,2000,1(1):20-22.
[18]奚露.基于视觉和听觉体验的西山国家森林公园典型景观评价研究[D].北京:中国林业科学研究院,2020.
[19]WHITTAKER R H.Evolution and measurement of species diversity[J].Taxon,1972,21(2/3):213-251.
[20]SUEUR J,FARINA A,GASC A,et al.Acoustic indices for biodiversity assessment and landscape investigation[J].Acta Acustica United with Acustica,2014,100(4):772-781.
[21]FARINA A,PIERETTI N,PICCIOLI L.The soundscape methodology for long-term bird monitoring:A Mediterranean Europe case-study[J].Ecological Informatics,2011,6(6):354-363.
[22]PIJANOWSKI B C,VILLANUEVA-RIVERA L J,DUMYAHN S L,et al.Soundscape ecology:the science of sound in the landscape[J].BioScience,2011,61(3):203-216.
[23]SUEUR J,PAVOINE S,HAMERLYNCK O,et al.Rapid acoustic survey for biodiversity appraisal[J].PLoS One,2008,3(12):e4065.
[24]KASTEN E P,GAGE S H,FOX J,et al.The remote environmental assessment laboratory's acoustic library:An archive for studying soundscape ecology[J].Ecological Informatics,2012,12:50-67.
[25]BOELMAN N T,ASNER G P,HART P J,et al.Multi-trophic invasion resistance in Hawaii:bioacoustics,field surveys,and airborne remote sensing[J].Ecological Applications,2007,17(8):2137-2144.
[26]AMBERGER A,SCHAPER S,EDER R,et al.Visitor mood,restorativeness and connectedness to nature across four unmanaged urban outdoor swimming sites of varying naturalness[J].Urban Forestry & Urban Greening,2024,95:128312.
[27]YE J,CHEN L,ZHENG Y.Effect of an artificial sound-based index on the perception of historical block environments[J].Buildings,2023,13(9):2372.
[28]LAWRENCE B T,HORNBERG J,SCHROER K,et al.Linking ecoacoustic indices to psychoacoustic perception of the urban acoustic environment[J].Ecological Indicators,2023,155:111023.