

DOI: 10.5846/stxb201506111180

张 玲, 陈沅江. 基于红外热像检测的粉尘环境植物适生性评价. 生态学报, 2016, 36(24): - - .

Zhang L., Chen Y. J. Evaluation of plant tolerance to environmental dust pollution based on infrared thermography. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): - - .

基于红外热像检测的粉尘环境植物适生性评价

张 玲*, 陈沅江

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要: 植物防尘是一类多功能复合、有很高环保经济价值的防尘技术, 其关键是要优选出在不同粉尘污染环境中具强适生性的优势树种。为此, 以我国南方某工业园区内 4 种常见灌木为研究对象, 在室内仿真模拟的工业粉尘污染环境中, 对盆栽植物样本的滞尘能力及其引起的叶表温度变化进行跟踪监测和适生性分析。实验结果表明, 叶片滞尘会普遍引起叶表温度升高, 不同粉尘环境中的叶表温度变化存在明显差异, 含碱性物质和重金属元素的粉尘对植物的影响较为显著。所研究的 4 种样本植物在实验粉尘环境中的适生性大小顺序为: 桂花、鹅掌柴、红继木、茶树。在工业园区绿化建设规划设计时, 应在充分考虑粉尘污染环境特点的基础上, 对计划引进植物进行适生性评价, 选择粉尘阻滞吸附能力强且滞尘后叶片温度变化平缓的树种, 从而更有效的利用绿色植物防治大气颗粒物污染。

关键词: 粉尘污染环境; 滞尘能力; 叶表温度; 植物防尘; 适生性评价

Evaluation of plant tolerance to environmental dust pollution based on infrared thermography

ZHANG Ling*, CHEN Yuanjiang

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract: The effects of dust pollution on plant species depends largely on the plant's natural 'dustproofing' ability, which is a kind of multifunctional composite dust-control technology that has great value for both the environment and economy. Our study intended to determine which dominant tree species showed the greatest tolerance and adaptability in different dust pollution environments. We conducted long term monitoring and an adaptability analysis on four kinds of shrubs (osmanthus fragrans, schefflera octophylla, loropetalum chinense var. rubrum and camellia sinensis) commonly found in industrial parks in southern China. Our study used potted plant samples in an indoor environment where we simulated industrial dust pollution. We measured the dust-retaining capability and leaf temperature of our potted plants using biological microscopic image analysis and a thermal infrared imager. Our results showed that leaf temperature increased as leaves were covered in dust, and this varied according to the amount of dust in the environment. Dust that contained alkaline matter and heavy metal elements had a stronger influence on our test plants. Thus, we suggest that any adaptability analysis of plants should take the specific characteristics of dust pollution into full consideration. Our results suggest that osmanthus fragrans was most tolerant to dust pollution, followed by schefflera octophylla, loropetalum chinense var. rubrum, and finally camellia sinensis. Selecting plant species that have high dust-retaining capability, and low physiological and ecological responses to dust pollution is important for industrial parks. However, planners and designers of green spaces in industrial parks also need to consider the composition and quantity of dust pollution within each site, as this varies by type and frequency of business enterprises within each industrial park and will help inform plant selection decisions. Our results show that leaf surface

收稿日期: 2015-06-11; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 891780664@qq.com

temperature is an important predictor of a plant's physiological and ecological response to dust pollution, and further research should investigate how variation in leaf surface temperature could be used to develop an index of plant tolerance to environmental dust pollution. For existing industrial parks containing plants with relatively poor adaptability to dust pollution, we suggest implementing regular watering, cleaning and other manual dust removal methods to reduce the negative effects of dust particulate matter on plants. Meanwhile, the effects of dust (especially heavy metal dust), on plant root systems should be investigated. To ensure implementation of scientific management of green spaces in industrial parks, we advise creating a temperature alert and maintenance schedule that includes regular protective cleaning of plants.

Key Words: environmental dust pollution; dust-retaining capability; leaf temperature; plant dustproof; adaptability analysis; industrial park landscaping

植物防尘投入成本低,抑尘效果好,且兼有净化空气、保持水土、改善生态环境、调节小气候、促进人的身心健康等生态效益和社会价值,是治理大气颗粒污染物的有效措施。近年来,国内外学者以不同地区、不同气候类型的代表植物为研究对象,通过现场采样和实验模拟,对植物叶片对不同粒径颗粒物的阻滞吸附量^[1-5]、植物滞尘机理及其影响因素^[6-12]等方面进行了比较分析,确定了不同环境条件下吸滞颗粒物的优势树种。针对部分植物在粉尘环境中失绿、坏死等现象,研究人员通过测试分析,发现植物在滞留粉尘颗粒的同时,粉尘的遮蔽阻塞会改变植物的光谱特征^[13-16],降低光合效率和蒸腾速率^[17-24],抑制正常生理代谢反应,对植物生长造成不良影响,甚至引发病理危害。因此,为了更有效地利用绿色植物防治大气颗粒物污染,需要将植物滞留与耐受粉尘的能力相结合,找出特定环境下滞尘能力强且抗逆性高的植物。

工业生产粉尘是城市大气颗粒污染物的主要来源之一,且由于具有复杂的物理化学性质,对生物体的破坏作用远大于普通颗粒物粉尘。研究表明,对比商贸区、文教区等其他区域,工业区内的植物光合生理指标下降幅度最多,生长受限最为明显^[19]。因此,在工业园区绿化景观规划设计时,需要对植物的适生防尘性质进行评估,择优选出在该环境中滞尘能力强且适生性好的优势树种,对城市大气颗粒物污染起到有效的源头防治作用。

当前,国内外研究人员主要针对粉尘污染环境下的植物光谱特征和生理生态反应的变化进行了研究分析^[25]。研究结果表明,粉尘会改变植物在可见光波段和红外波段的反射率^[13,15],叶片只吸收小部分太阳辐射进行正常光合生理反应,大部分热能被叶片吸收,导致叶面温度升高^[26];粉尘的遮蔽阻塞导致植物气体交换受阻,使长波辐射、热对流和水分蒸腾等散热机制受到抑制,无法对叶片温度变化进行调节,若无雨水、大风等外界环境干扰,叶片温度会持续升高^[27]。由此可见,叶片叶表温度的升高是叶面尘对植物反射光谱和生理生态反应影响的综合结果。以叶片滞尘前后的叶面温度变化作为植物生理反应指标,可以全面反应粉尘颗粒物对植物的影响,同时温度异常可以在植物发生明显的失绿、坏死等病理危害前及时检测出来,以采取必要措施,防止或减缓粉尘对植物的影响。因此,本文即以叶片叶表温度变化情况作为粉尘环境中植物的适生性评价指标,考虑到灌木滞尘能力较强且高度位于行人呼吸范围内^[28],选择长沙主要工业园区内4种典型灌木作为研究对象,在模拟环境中利用实地采集的粉尘样对室内盆栽植物样本进行滞尘实验,应用红外热像仪对叶面温度变化进行非接触式测量,以避免破坏被测植物叶表粉尘分布及温度场,同时应用显微图像分析系统对叶片滞尘能力进行分析,综合植物滞尘能力和叶片叶表温度变化,对植物在粉尘污染环境下的适生性进行评估,为城市工业园区绿化建设和维护提供一定的参考和建议。

1 研究方案的确定

1.1 研究地点和被测植物的选择

本文的目的在于通过模拟滞尘实验评估工业粉尘污染环境中的植物的适生性,为了保证实验结果与实际情况尽可能相吻合,需要有针对性地选择生产现场有代表性的工业粉尘环境作为实验背景,进行实地粉尘采样

及相关环境因素的测量。调查发现,长沙市长年 PM_{10} 年平均浓度超过国家二级标准($100\mu g/m^3$),是我国中部大气颗粒物污染严重的代表性城市之一^[29]。在对该市主要工业园区的企业生产经营类型和污染物排放情况进行实地调查和研究分析的基础上,选择暮云工业园区木材加工厂、金井工业园区粮油面粉加工厂、望城经济开发区金属粉末加工厂和天心工业园区水泥加工厂等四处典型的工业粉尘颗粒污染物排放源作为粉尘采样地点,以代表 4 种典型的工业生产粉尘,即木糠、面粉、金属粉末和水泥。

在样本植物的选取方面,综合四处采样地点共有植物的基础上,考虑到灌木的高度通常位于行人的呼吸范围内,其滞留的大气颗粒物粉尘对行人的影响较大^[28],选择桂花、红继木、茶树、鹅掌柴等 4 种植物作为研究对象,在实验模拟工业粉尘环境中应用长势相似的植物盆栽作为研究对象,进行滞尘能力及叶片叶表温度变化的测量和分析。

1.2 研究手段及采用的具体步骤

利用本实验室现有的环境参数基本恒定的大型人机环境仿真模拟室,对所选研究地点植物生长的粉尘污染气象环境进行人工再造仿真,通过滞尘实验探讨长期无雨水、大风的恶劣气候下植物在其中对粉尘的耐受和适应特性。该人机模拟室的可控环境参数范围如下:温度范围 $0\sim 70^{\circ}C$,湿度范围 $0\sim 100\%$,风速范围 $0\sim 10m/s$,气压范围 $5000\sim 3000Pa$;测量叶片叶表温度所用仪器为 FILR SC7300 红外热像仪,其波长范围为 $8\sim 14\mu m$,测温范围为 $-20\sim 55^{\circ}C$,室温下温度分辨率小于 $0.05^{\circ}C$,温度统计分析采用其附带的 Altair 辐射测量软件;测量叶片滞尘能力所用仪器为 XSJ-HS 型生物显微图像电脑分析系统,该系统由光学系统、视频系统、计算机系统及软件系统组成,显微镜选用高清晰度摄像专用主机,摄像部分采用日本原装高分辨率彩色摄像机,滞尘能力分析采用其中的显微分析软件系统。具体实验步骤如下:

(1) 粉尘采样及浓度测量

连续一周(雨水、大风天气除外)应用粉尘收集器和微电脑粉尘浓度测定仪自 $9:00\sim 17:00$ (采样地点工业企业正常运营时间)对 4 处研究地点的粉尘颗粒物进行连续采样和浓度测量,以收集到的粉尘作为实验粉尘来源,以粉尘平均浓度作为模拟滞尘浓度。

(2) 模拟环境滞尘实验

a) 在每组实验进行前,根据长沙市年平均温度($17.6^{\circ}C$)、湿度(78%)、风速($2.6m/s$)、气压($1027hpa$)等基本气象环境因素值^[30]对人机模拟室的环境参数进行调节,确认各项参数已稳定在预设值附近后,将叶表洗净擦干的样本植物在其中放置 3d,使其充分适应实验环境;

b) 滞尘开始前,进行第一组采样,作为空白对照组;

c) 将粉尘颗粒均匀倒入粉尘发射器中,根据测量得到的粉尘平均浓度值($0.953mg/m^3$ 、 $0.944 mg/m^3$ 、 $0.994 mg/m^3$ 、 $0.993 mg/m^3$)设置出口浓度,进行模拟滞尘实验。在实验进行过程中,间歇性安排人员走动以模拟现实环境中人车走动产生的二次扬尘。每组实验滞尘 6d,滞尘时间为 $9:00\sim 17:00$ 。采样时间为第二天开始滞尘前,从植物冠部四周及上、中、下各部位均匀采集 5 片树叶,并注意预留一部分叶柄,以便后续温度测量。采样时佩戴一次性塑料薄膜手套,避免对叶片及滞留粉尘的破坏,采样过程轻拿轻放,以防滞留粉尘的滑落;

d) 每组实验结束后,对残留粉尘进行清理,以确保对后续试验不产生影响;

e) 重复上述步骤,共进行 16 组模拟滞尘实验。

(3) 叶片叶表温度测量

采样后立即用红外热像仪对叶片温度进行测量,以防长期未处理导致叶片水分丢失,叶表温度发生变化。测量前,调节环境温度使之与人机模拟室一致,以避免环境温度变化对叶片温度的影响。测量时,为避免粉尘滑落,用透明胶带粘贴叶片叶柄,使其固定平放于载玻片上;在下方放置电热台板,调节至 $25^{\circ}C$,使红外图像中叶片与背景环境的温度对比更加明显,方便统计分析,同时保证电热台板与叶片的距离,避免其辐射作用对叶片温度的影响。

(4) 滞尘能力分析

在不影响粉尘分布的前提下,对滞尘叶片做切片处理,采用对角线法在每个叶片切片上选取 5 个观测点,应用显微图像分析系统进行图像采集和二值图像处理,计算出各观测点叶片上所有粉尘颗粒面积与选区内叶表面积的比值,以表征滞尘能力的大小。

(5) 适生性分析

根据模拟实验测量数据,绘制植物叶片叶表温度和滞尘能力随时间的变化的曲线图,结合图表对四种植物在对应粉尘环境下植物的适生性大小进行分析。

2 实验结果及分析

2.1 叶片叶表温度变化分析

如图 1 为实验所得滞尘叶片红外热像图及对应温度统计分析图。现以叶片叶表温度变化作为抗逆性指标,将试验周期内叶片的平均温度变化记录于表 1 中。

表 1 4 种植物覆盖粉尘后叶片温度变化统计(温度变化值 $\pm$ 标准差, $^{\circ}\text{C}$)

Table 1 Statistics of the change of leaf temperature (temperature change $\pm$ standard deviation, $^{\circ}\text{C}$) of four kinds of plants covered with dust

粉尘类型 Dust type	滞尘时间 Dust retention time	树种 Tree species			
		茶树 Tea plant	桂花 Fragrans	红继木 Loropetal	鹅掌柴 Schefflera
面粉厂粉尘样 Dust sample of flour mill	滞尘第一天	0.235 $\pm$ 0.068	0.155 $\pm$ 0.051	0.198 $\pm$ 0.059	0.201 $\pm$ 0.068
	滞尘第二天	0.506 $\pm$ 0.112	0.343 $\pm$ 0.102	0.441 $\pm$ 0.105	0.500 $\pm$ 0.115
	滞尘第三天	0.842 $\pm$ 0.136	0.599 $\pm$ 0.122	0.749 $\pm$ 0.117	0.931 $\pm$ 0.151
	滞尘第四天	1.302 $\pm$ 0.167	0.947 $\pm$ 0.142	1.152 $\pm$ 0.154	1.417 $\pm$ 0.153
	滞尘第五天	1.859 $\pm$ 0.171	1.402 $\pm$ 0.163	1.672 $\pm$ 0.144	1.946 $\pm$ 0.165
	滞尘第六天	2.581 $\pm$ 0.191	1.974 $\pm$ 0.166	2.301 $\pm$ 0.143	2.523 $\pm$ 0.153
木材加工厂粉尘样 Dust sample of timber mill	滞尘第一天	0.194 $\pm$ 0.059	0.135 $\pm$ 0.041	0.174 $\pm$ 0.057	0.123 $\pm$ 0.042
	滞尘第二天	0.444 $\pm$ 0.106	0.301 $\pm$ 0.068	0.354 $\pm$ 0.106	0.309 $\pm$ 0.085
	滞尘第三天	0.735 $\pm$ 0.145	0.507 $\pm$ 0.114	0.564 $\pm$ 0.136	0.538 $\pm$ 0.120
	滞尘第四天	1.096 $\pm$ 0.144	0.761 $\pm$ 0.134	0.828 $\pm$ 0.144	0.816 $\pm$ 0.151
	滞尘第五天	1.486 $\pm$ 0.149	1.105 $\pm$ 0.102	1.173 $\pm$ 0.153	1.171 $\pm$ 0.143
	滞尘第六天	1.940 $\pm$ 0.168	1.470 $\pm$ 0.102	1.583 $\pm$ 0.146	1.541 $\pm$ 0.141
金属加工厂粉尘样 Dust sample of metal-fabrication	滞尘第一天	0.256 $\pm$ 0.079	0.248 $\pm$ 0.061	0.243 $\pm$ 0.075	0.246 $\pm$ 0.079
	滞尘第二天	0.580 $\pm$ 0.123	0.554 $\pm$ 0.116	0.567 $\pm$ 0.110	0.567 $\pm$ 0.130
	滞尘第三天	0.995 $\pm$ 0.156	0.911 $\pm$ 0.115	1.012 $\pm$ 0.137	0.974 $\pm$ 0.186
	滞尘第四天	1.505 $\pm$ 0.155	1.349 $\pm$ 0.138	1.683 $\pm$ 0.142	1.522 $\pm$ 0.198
	滞尘第五天	2.223 $\pm$ 0.201	1.896 $\pm$ 0.140	2.457 $\pm$ 0.169	2.118 $\pm$ 0.200
	滞尘第六天	3.062 $\pm$ 0.179	2.541 $\pm$ 0.143	3.463 $\pm$ 0.168	2.822 $\pm$ 0.200
水泥厂粉尘样 Dust sample of cement mill	滞尘第一天	0.329 $\pm$ 0.091	0.289 $\pm$ 0.078	0.261 $\pm$ 0.074	0.309 $\pm$ 0.091
	滞尘第二天	0.734 $\pm$ 0.144	0.636 $\pm$ 0.134	0.615 $\pm$ 0.114	0.714 $\pm$ 0.144
	滞尘第三天	1.272 $\pm$ 0.181	1.090 $\pm$ 0.139	1.101 $\pm$ 0.144	1.220 $\pm$ 0.173
	滞尘第四天	1.970 $\pm$ 0.209	1.653 $\pm$ 0.140	1.759 $\pm$ 0.145	1.849 $\pm$ 0.180
	滞尘第五天	2.854 $\pm$ 0.196	2.289 $\pm$ 0.129	2.613 $\pm$ 0.161	2.564 $\pm$ 0.187
	滞尘第六天	3.893 $\pm$ 0.189	2.930 $\pm$ 0.138	3.662 $\pm$ 0.181	3.423 $\pm$ 0.195

由表可见,同一植物滞留不同粉尘或不同植物滞留同一粉尘,其温度变化有较明显的差异,但总体趋势均随着滞尘天数的增加而升高,且温度上升速率均随着滞尘时间逐渐增大,这可能是因为实验环境无雨水、大风等外界因素干扰,叶片粉尘滞留量逐渐增多,对植物的影响越来越明显,植物正常生理代谢功能紊乱,从而导致温度加速上升。对应同一植物,水泥厂和金属加工厂粉尘导致的温度升高远大于其他两种粉尘,这可能是

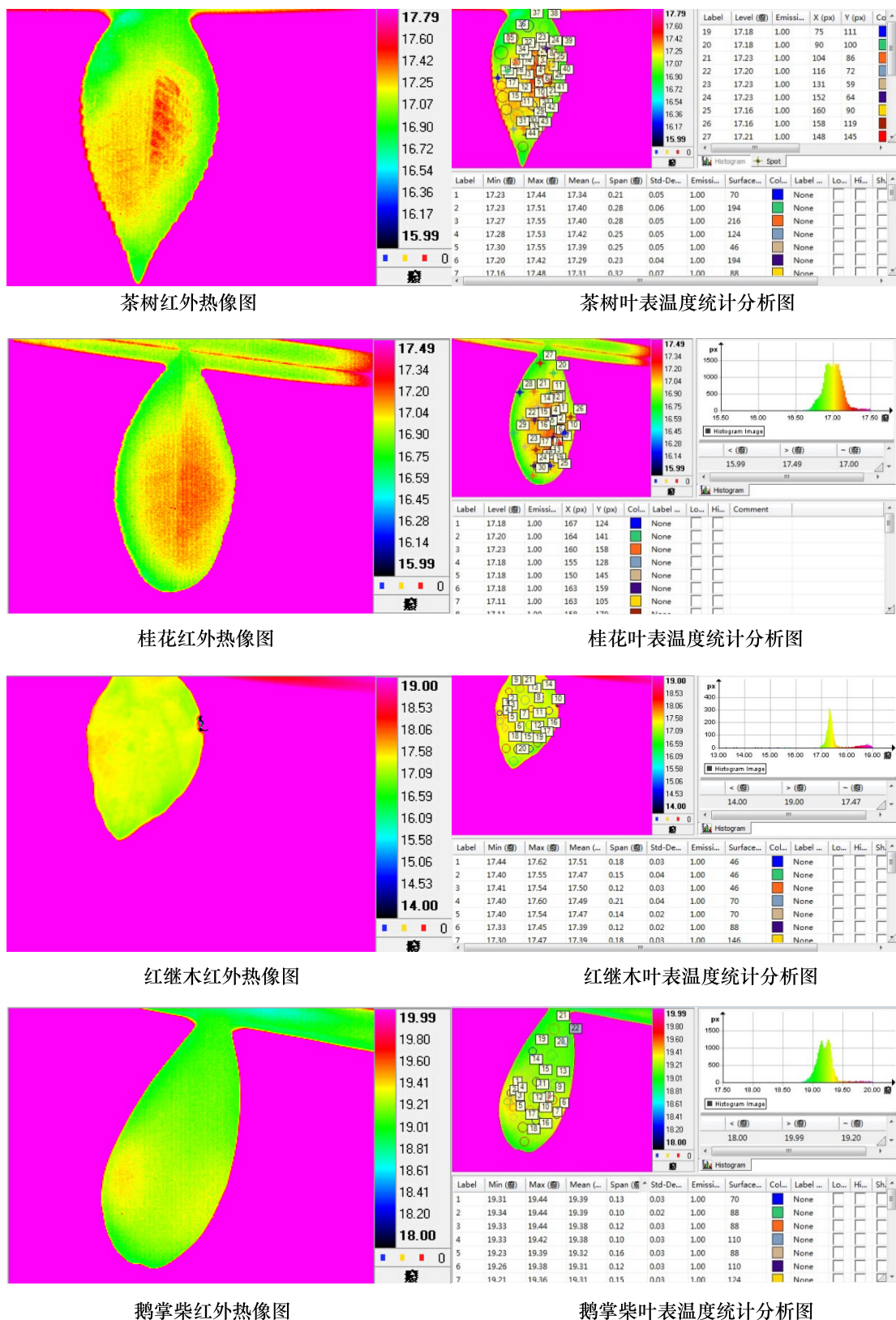


图 1 4 种植物叶片表面红外热像图及其温度分布统计分析

Fig.1 Infrared thermal images of leaf surface and corresponding statistical analysis of temperature distribution of four kinds of plants

由于水泥厂粉尘样中含有碱性物质,金属加工厂粉尘样中含有重金属元素,相对于其他粉尘样,对叶片会产生直接伤害作用,对光合作用和蒸腾作用的抑制更强,因而导致温度增幅更大^[31-32]。对应同一粉尘,茶树覆盖粉尘后的温度增幅较大;桂花的温度增幅明显小于其他3种植物;鹅掌柴的温度变化介于之间;红继木在面粉厂和木材加工厂粉尘环境中温度增幅与鹅掌柴相似,而对应金属加工厂和水泥厂尘样,其温度增幅在4种植物中最高。这些温度变化的差异可能是由于不同植物在不同环境中的抗逆性差异导致的,同时也可能与部分植物滞尘能力较强有关。因此,对于四种植物在粉尘环境中的适生性的评估,还需要对叶片滞尘能力进行分析。

2.2 叶片滞尘能力分析

应用显微图像电脑分析系统对叶片切片进行观测分析和二值图像处理,得到如图2所示滞尘叶片显微图像及对应二值化图像。叶片滞尘能力是指植物单位叶面积在单位时间内滞留的粉尘量。在本实验中,根据显微分析系统工作原理,规定单位叶表面积滞尘能力用显微图像选区内所有粉尘颗粒面积与选区内叶表面积比来表示,滞尘量用显微图像选区内粉尘颗粒面积表示^[2]。应用显微分析系统计算出各叶片切片滞尘面积比,以表征植物滞尘能力,实验周期内的四种植物在对应粉尘环境下的叶片滞尘能力平均值记录于表2。

表2 粉尘环境下4种植物叶片滞尘能力(%)统计

Table 2 Statistics of leaf dust-retaining capability (%) of four kinds of plants in dust environment

粉尘类型 Dust type	滞尘时间 Dust retention time	树种 Tree species			
		茶树 Tea plant	桂花 Fragrans	红继木 Loropetal	鹅掌柴 Schefflera
面粉厂粉尘样 Dust sample of flour mill	空白对照组	0.018 ± 0.005	0.027 ± 0.007	0.048 ± 0.009	0.018 ± 0.004
	滞尘第一天	0.214 ± 0.018	0.205 ± 0.027	0.219 ± 0.015	0.211 ± 0.017
	滞尘第二天	0.240 ± 0.020	0.237 ± 0.021	0.254 ± 0.018	0.241 ± 0.018
	滞尘第三天	0.276 ± 0.023	0.270 ± 0.021	0.291 ± 0.019	0.269 ± 0.023
	滞尘第四天	0.306 ± 0.031	0.292 ± 0.022	0.327 ± 0.024	0.298 ± 0.022
	滞尘第五天	0.328 ± 0.027	0.324 ± 0.028	0.349 ± 0.023	0.319 ± 0.025
	滞尘第六天	0.342 ± 0.031	0.346 ± 0.028	0.376 ± 0.022	0.339 ± 0.025
木材加工厂粉尘样 Dust sample of timber mill	空白对照组	0.024 ± 0.007	0.018 ± 0.004	0.036 ± 0.006	0.020 ± 0.004
	滞尘第一天	0.193 ± 0.019	0.202 ± 0.025	0.211 ± 0.018	0.193 ± 0.016
	滞尘第二天	0.213 ± 0.022	0.227 ± 0.015	0.235 ± 0.020	0.218 ± 0.021
	滞尘第三天	0.233 ± 0.025	0.254 ± 0.020	0.264 ± 0.024	0.248 ± 0.023
	滞尘第四天	0.256 ± 0.021	0.283 ± 0.024	0.287 ± 0.023	0.270 ± 0.023
	滞尘第五天	0.276 ± 0.024	0.309 ± 0.019	0.308 ± 0.025	0.290 ± 0.021
	滞尘第六天	0.295 ± 0.026	0.323 ± 0.018	0.326 ± 0.025	0.312 ± 0.023
金属加工厂粉尘样 Dust sample of metal-fabrication	空白对照组	0.019 ± 0.005	0.030 ± 0.008	0.057 ± 0.009	0.020 ± 0.003
	滞尘第一天	0.206 ± 0.020	0.217 ± 0.016	0.211 ± 0.017	0.190 ± 0.016
	滞尘第二天	0.227 ± 0.021	0.244 ± 0.019	0.242 ± 0.020	0.225 ± 0.027
	滞尘第三天	0.252 ± 0.025	0.286 ± 0.019	0.284 ± 0.020	0.250 ± 0.026
	滞尘第四天	0.273 ± 0.023	0.306 ± 0.019	0.307 ± 0.022	0.264 ± 0.026
	滞尘第五天	0.294 ± 0.029	0.331 ± 0.022	0.328 ± 0.028	0.276 ± 0.026
	滞尘第六天	0.310 ± 0.026	0.357 ± 0.023	0.358 ± 0.026	0.290 ± 0.027
水泥厂粉尘样 Dust sample of cement mill	空白对照组	0.020 ± 0.006	0.033 ± 0.008	0.064 ± 0.008	0.028 ± 0.004
	滞尘第一天	0.215 ± 0.020	0.223 ± 0.020	0.217 ± 0.021	0.215 ± 0.020
	滞尘第二天	0.243 ± 0.024	0.251 ± 0.023	0.253 ± 0.020	0.243 ± 0.024
	滞尘第三天	0.277 ± 0.026	0.285 ± 0.024	0.292 ± 0.023	0.277 ± 0.026
	滞尘第四天	0.301 ± 0.027	0.316 ± 0.023	0.327 ± 0.023	0.301 ± 0.027
	滞尘第五天	0.323 ± 0.033	0.343 ± 0.024	0.352 ± 0.028	0.323 ± 0.032
	滞尘第六天	0.342 ± 0.030	0.372 ± 0.023	0.384 ± 0.031	0.343 ± 0.032

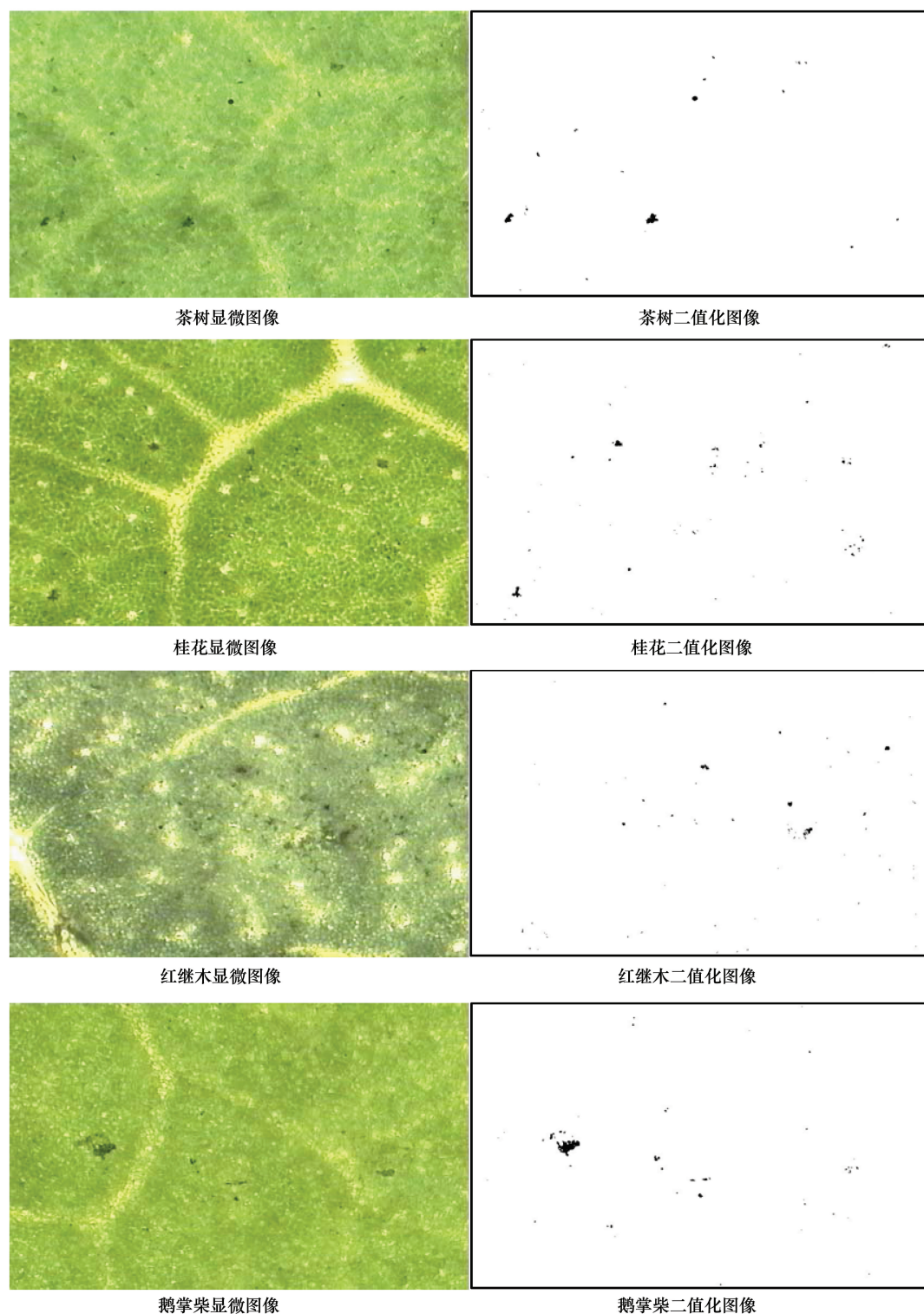


图2 滞尘叶片显微图像及二值化图像

Fig.2 Microscopic images and binary images of dust-catching leaves

由表2可见,四种植物中,桂花和红继木的滞尘能力要明显强于茶树和鹅掌柴,这可能是由于植物的叶表面形态结构差异所导致的。红继木叶表粗糙,且布满极细的浅沟状组织并有少量纤毛,有利于小粒径颗粒物粉尘的滞留;桂花虽然叶表面较光滑,但密布无规则排列的气孔且有脊状突起,滞尘能力也较强;茶树和鹅掌柴叶表面平滑且无其他特殊结构,滞尘能力一般^[2]。不同粉尘环境下同一植物的滞尘能力有所不同,这可能

与颗粒物的粒径大小、形态特征差异有关^[5,10]。为对粉尘环境下植物的适生防尘效果进行评价,需筛选出滞尘能力强且滞尘后温度升高不甚显著的树种,为此下文将叶表温度变化和滞尘能力两个因素结合进行综合分析。

2.3 不同粉尘环境下植物的适生性评价

为进一步探究所选样本植物在实验粉尘环境中的适生性大小,如图3所示,绘制四种粉尘环境下的植物叶片滞尘能力和叶表温度随时间变化的曲线图,综合曲线图及其变化趋势对植物的适生性进行评价。

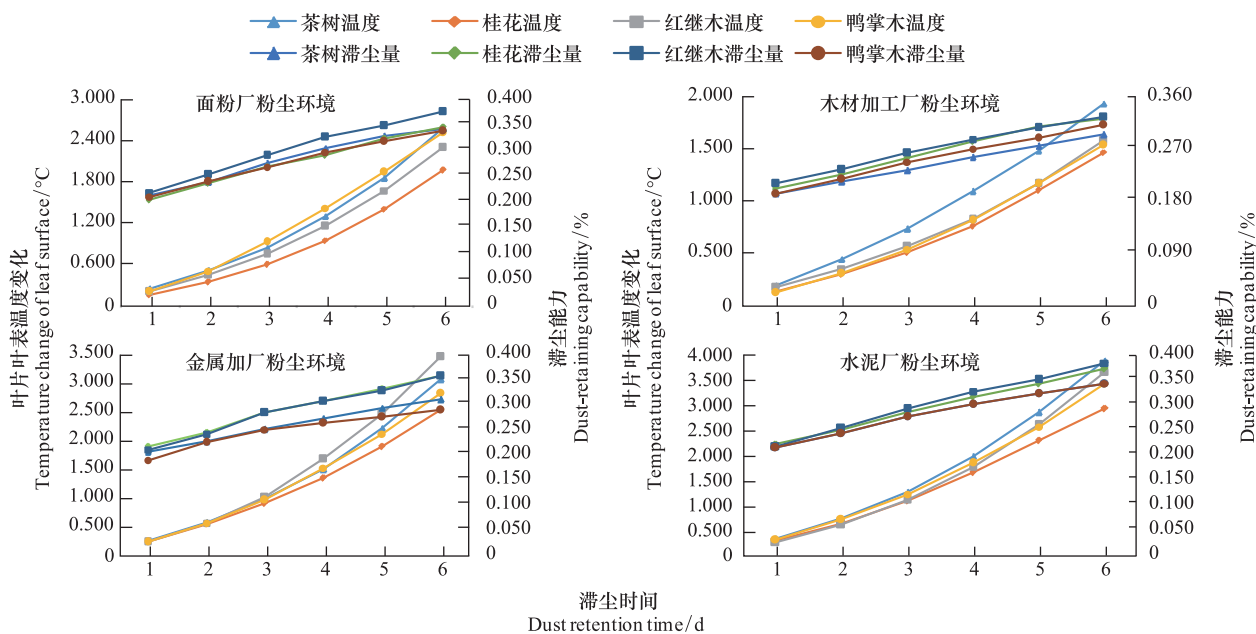


图3 不同粉尘环境下4种植物叶片滞尘能力和叶表温度变化曲线图

Fig.3 Curve diagrams of dust-retaining capability and temperature change of four kinds of plants in different dust environment

由图3-a可见,在面粉厂粉尘环境中,红继木滞尘能力最强,且温度变化较小,适生性最好;桂花、鹅掌柴、茶树滞尘能力相似,且桂花的温度变化明显小于另外两种植物,适生性较好;鹅掌柴与茶树温度变化相近,但茶树温度上升速度大于鹅掌柴,可以预见,若滞尘实验继续,茶树的温度会超过鹅掌柴。因此,在面粉厂粉尘环境中,4种植物的适生性大小排序为:红继木>桂花>鹅掌柴>茶树。

由图3-b可见,在木材加工厂粉尘环境中,茶树滞尘能力最差,温度升幅最高,适生性最差;红继木与桂花滞尘能力相似,均大于其他两种植物,但桂花的温度升幅小于红继木,所以桂花在木材加工厂粉尘环境中的适生性更强;鹅掌柴两项实验数据均介于4种植物之间,适生性一般。因此,在木材加工厂粉尘环境中,4种植物的适生性大小排序为:桂花>红继木>鹅掌柴>茶树。

由图3-c可见,在金属加工厂粉尘环境中,桂花滞尘能力最强,温度变化最小,适生性最好;红继木滞尘能力与桂花相似,但温度升幅也最高,且上升速度明显大于其他3种植物,可以预计,如果环境中金属粉尘浓度较高,且长期无雨水大风等外界干扰,红继木由于温度持续上升将导致严重病变,所以,在金属粉尘浓度较高的工业园区内,不适宜种植红继木;鹅掌柴和茶树滞尘能力一般,温度变化也介于4种植物中间,适生性相似。因此,在金属加工厂粉尘环境中,4种植物的适生性大小排序为:桂花>鹅掌柴≈茶树>红继木。

由图3-d可见,在水泥厂粉尘环境中,桂花、茶树、红继木的滞尘能力均较强,其中,桂花温度变化远小于茶树和红继木,适生性最强;茶树和红继木温度变化远大于桂花和鹅掌柴,且茶树的温度升高幅度更大,所以在水泥粉尘浓度较大的区域,茶树和红继木均不宜种植,其中茶树适生性更差;鹅掌柴滞尘能力较差,但温度升高幅度相对茶树和红继木较为缓和,适生性一般,也不宜大范围种植。因此,在水泥厂粉尘环境中,4种植物的适生性排序为:桂花>鹅掌柴>红继木>茶树。

综合 4 种粉尘环境下叶片滞尘能力及叶表温度变化的统计分析结果,4 种植物中,桂花滞尘能力较强,且受粉尘覆盖影响较小,适生性最好;红继木滞尘能力较强,但在含有碱性物质或重金属元素的粉尘环境中抗逆性较差;茶树和鹅掌柴滞尘能力相似,而鹅掌柴适生防尘效果更好。由此可知,同一植物在不同环境,不同植物在同一环境的适生防尘性质均有所差异。因此,在工业园区绿化建设规划设计时,应根据园区内企业的生产经营类型预估颗粒物污染情况,选择该环境下滞尘能力强且抗逆性高的植物,以最大限度的抑制粉尘颗粒物污染。对应本实验中的 4 种植物 and 对应粉尘环境,桂花可以考虑种植,鹅掌柴可以适度引进,若粉尘中碱性物质或金属元素含量较少,红继木也可以考虑种植,而茶树则不宜应用。对于绿化建设已完善的成熟工业园区,若已种植抗逆性较差的植物,需注意及时对叶面尘进行保护性清洗,利用水分冲刷等方法在一定程度上减少粉尘对植物的影响,同时需注意尽量避免粉尘清洗后流到植物根部,对植株生长造成影响。

3 结论与讨论

植物叶片以其特殊的表面性能,可以有效的截取和固定大气颗粒污染物,但也会因为粉尘的遮蔽阻塞影响自身正常生长。因此,针对具体环境在绿化建设中选择滞尘能力强且粉尘耐受性好的树种是充分发挥绿色植物滞尘效应的关键。研究表明,树种间滞尘能力的差异是由叶片的形态结构特征决定的,叶表面粗糙多皱,绒毛、沟槽、突起等微形态结构越密集,深浅差别越大,植物滞尘能力越强^[1,10]。本文模拟工业粉尘环境中,表面粗糙程度高的红继木滞尘能力最强,气孔密集且有脊状突起的桂花滞尘能力也较强,而叶表面光滑无特殊结构的茶树和鹅掌柴滞尘能力一般,这与王建辉、郑鹏、于曼、陈芳等人植物滞尘能力的研究结果基本一致^[33-36],而贾彦等则认为红继木滞尘能力较差,这主要是由于其采样时间为 4—6 月,正值长沙多雨水大风天气,滞留于浅沟组织和纤毛上的粉尘受外界影响,波动性较大,滞尘量相对较小^[2],这说明植物滞尘能力的比较需要结合具体环境进行评价分析。

在大气颗粒物污染浓度较高的环境中,有较强适生性的植物能够更有效的发挥滞尘作用。曾青松对比人工扬尘实验前后桂花叶绿素及各项活性指标的变化情况,证明桂花具有极高的抗大气污染能力,这与本文得到的桂花适生防尘效果较好的结果是一致的^[37]。孔国辉、温达志等对园林绿化植物在粉尘复合污染环境下的空气污染敏感性进行了评价分析,发现桂花、鹅掌柴、茶树等植物叶片生长正常,仅少数叶片脱落,抗大气污染能力强^[38-39],而本文研究结果表明茶树粉尘耐受性较差,这可能与具体实验环境中的大气污染物的性质差异有关。在不同大气污染环境下,同种植物叶片对于不同种类颗粒物元素的吸滞情况不同,不同种类的颗粒污染物对于植物体生理生态反应的影响程度也有所差异^[25]。水泥、石灰等碱性物质灰尘与水作用会从气孔浸入叶组织,影响细胞内的正常代谢过程^[31];重金属元素的吸收和富集则会直接抑制叶片的气体交换,破坏叶肉组织^[32]。因而在含有碱性物质的水泥厂粉尘环境和含有重金属元素的金属粉末加工厂粉尘环境中,四种植物受粉尘遮蔽阻塞作用导致的叶片叶表温度升高更加明显。粉尘对植物的影响还与其粒径大小有关。叶面尘粒径越小,遮蔽堵塞作用越明显,产生的遮光效应越大,对植物的影响越大^[40-41]。红继木的浅沟状组织对滞留颗粒物粒径有筛选作用,主要吸附小粒径颗粒粉尘^[2],且由于叶表粗糙度较高滞留颗粒物不易清理,会导致部分粉尘长时间积聚,因而在对植物生长影响较大的含碱性物质和重金属元素的水泥厂和金属粉末加工厂粉尘环境中,生理生态反应变化极为明显,抗逆性较差。植物对粉尘的吸附类型同样会影响植物的抗逆性,气孔吸附主导型的植物主要吸附细颗粒物,且大多分布在气孔及其附近,受粉尘的影响大于表皮吸附主导型的植物^[42]。因此,对于植物在大气污染环境下的抗性研究,需要结合植物所处环境的大气颗粒物污染的理化性质,植物叶面滞尘特点,植物的生理生态反应变化等因素,找出特定环境下滞尘能力强且耐受粉尘的植物树种,起到有效的削减大气颗粒物污染的目的。

综上所述,本文通过模拟滞尘实验对长沙市工业园区四种典型灌木在粉尘环境中的适生性进行了综合评价,得到如下结论:

(1) 4 种植物在实验粉尘环境中的适生性从高到低为:桂花、鹅掌柴、红继木、茶树。其中,桂花在四种粉

尘环境下滞尘能力均较强,且滞尘后温度变化较小,适宜于在工业园区推广种植;鹅掌柴滞尘能力一般,粉尘对其影响相对较缓和,可以考虑适当种植;红继木滞尘能力强,但在碱性物质或金属元素含量较高的水泥厂和金属加工厂粉尘环境中温度上升幅度大且增速较快,需要结合工业园区具体生产经营类型决定是否引进;茶树滞尘能力一般且在四种粉尘环境下温度变化均较大,不宜在工业园区内种植。

(2) 不同植物在同一粉尘环境中或同一植物在不同粉尘环境中,其适生性均有较大差异。在工业园区绿化建设规划设计时,需要根据企业经营类型确定颗粒污染物的成分和数量,择优选出在对应粉尘环境中滞尘能力强且抗逆性高的植物,以有效地减缓大气粉尘颗粒污染。对于已有实例或评价分析证明具有较强适生性的树种,需要比较工业园区大气颗粒物污染特征是否与之相似,在此基础上决定是否引入该树种;对于尚未有记录证明具粉尘颗粒污染抗性的植物,可以考虑设计模拟滞尘实验,分析其在无雨水大风等外界干扰的极端天气情况的生理生态反应变化。在粉尘环境中植物的抗逆性指标选取方面,叶片叶表温度变化是粉尘对植物光谱特征和生理生态反应变化的综合结果,能全面反映粉尘对植物的影响,可以考虑在今后的研究分析中推广使用。

(3) 对于绿化建设已完善的工业园区,如因规划设计时未充分考虑植物对颗粒物粉尘的耐受性质而引入适生性较差的植物,需要及时采取保护性措施进行人工除尘,以减缓粉尘对植物生长的影响,同时需注意清洗后流到根部的粉尘,尤其是重金属粉尘对植株生长的影响。必要时可以设置警戒温度,确定保护性清洗周期,实现工业园区绿化维护的科学化管理。

参考文献 (References):

- [1] 赵松婷, 李新宇, 李延明. 园林植物滞留不同粒径大气颗粒物的特征及规律. 生态环境学报, 2014, 23(2): 271-276.
- [2] 贾彦, 吴超, 董春芳, 李常平, 廖慧敏. 7 种绿化植物滞尘的微观测定. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(11): 4547-4553.
- [3] 王会霞, 石辉, 张雅静, 段骏, 王彦辉. 大叶女贞叶面结构对滞留颗粒物粒径的影响. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 258-262.
- [4] 张志丹, 席本野, 曹治国, 贾黎明. 植物叶片吸滞 $PM_{2.5}$ 等大气颗粒物定量研究方法初探——以毛白杨为例. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2238-2242.
- [5] Dzierzanowski K, Popek R, Gawrońska H, Sæbø A, Gawroński S W. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(10): 1037-1046.
- [6] 杨佳, 王会霞, 谢滨泽, 石辉, 王彦辉. 北京 9 个树种叶片滞尘量及叶面微形态解释. 环境科学研究, 2015, 28(3): 384-392.
- [7] 刘璐, 管东生, 陈永勤. 广州市常见行道树种叶片表面形态与滞尘能力. 生态学报, 2013, 33(8): 2604-2614.
- [8] 赵晨曦, 王玉杰, 王云琦, 张会兰. 细颗粒物 ($PM_{2.5}$) 与植被关系的研究综述. 生态学杂志, 2013, 32(8): 2203-2210.
- [9] 王会霞, 石辉, 王彦辉. 典型天气下植物叶面滞尘动态变化. 生态学报, 2015, 35(6): 1696-1705.
- [10] Räsänen J V, Holopainen T, Joutsensaari J, Ndam C, Pasanen P, Rinnan Å, Kivimäenpää M. Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees. Environmental Pollution, 2013, 183: 64-70.
- [11] Sæbø A, Popek R, Nawrot B, Hanslin H M, Gawronska H, Gawronski S W. Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces. Science of the Total Environment, 2012, 427-428: 347-354.
- [12] Tallis M, Taylor G, Sinnett D, Freer-Smith P. Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 129-138.
- [13] 罗娜娜, 赵吉文, 晏星. 在滞尘影响下的植被叶片光谱变化特征研究. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10): 2715-2720.
- [14] 王涛, 刘洋, 吴海云, 左月明. 叶面尘对作物反射光谱及氮营养监测的影响. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(7): 1895-1898.
- [15] 吴春燕, 王雪峰. 叶面滞尘量对大叶黄杨反射光谱的影响. 林业科学, 2015, 51(3): 49-56.
- [16] Newete S W, Erasmus B F N, Weiersbye I M, Cho M A, Byrne M J. Hyperspectral reflectance features of water hyacinth growing under feeding stresses of *Neochetina* spp. and different heavy metal pollutants. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(3): 799-817.
- [17] 帕提古力·麦提提, 巴特尔·巴克, 海利力·库尔班. 沙尘胁迫对阿月浑子光合作用及叶绿素荧光特性的影响. 生态学报, 2014, 34(22): 6450-6459.
- [18] 赵华军, 王立, 赵明, 杨自辉, 王强强. 沙尘暴粉尘对不同作物气体交换特征的影响. 水土保持学报, 2011, 25(3): 202-206.
- [19] 于裕贤, 陈进生, 任引, 李方一, 崔胜辉. 大气悬浮颗粒物污染对厦门市行道树芒果光合生理指标的影响. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1231-1237.

- [20] 黄慧娟,袁玉欣,杜炳新,李国栋. 保定 5 种主要绿化树种叶片滞尘对气体交换特征的影响. 西北林学院学报, 2008, 23(6): 50-53.
- [21] 王琰,陈建文,狄晓艳. 不同油松种源光合和荧光参数对水分胁迫的响应特征. 生态学报, 2011, 31(23): 7031-7038.
- [22] Doğanlar Z B, Atmaca M. Influence of airborne pollution on Cd, Zn, Pb, Cu, and Al Accumulation and physiological parameters of plant leaves in Antakya (Turkey). Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 214(1/4): 509-523.
- [23] Popek R, Gawrońska H, Wrochna M, Gawroński S W, Sæbø A. Particulate matter on foliage of 13 woody species: deposition on surfaces and phytostabilisation in Waxes - a 3-year study. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(3): 245-256.
- [24] Honour S L, Bell J N, Ashenden T W, Cape J N, Power S A. Responses of herbaceous plants to urban air pollution: Effects on growth, phenology and leaf surface characteristics. Environmental Pollution, 2009, 157(4): 1279-1286.
- [25] 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. 应用与环境生物学报, 2014, 20(6): 1132-1138.
- [26] Eller B M. Road dust induced increase of leaf temperature. Environmental Pollution (1970), 1977, 13(2): 99-107.
- [27] Chaston K, Doley D. Mineral particulates and vegetation: Effects of coal dust, overburden and flyash on light interception and leaf temperature. Clean Air & Environmental Quality, 2006, 40(1): 40-44.
- [28] 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. 生态环境, 2006, 15(2): 327-330.
- [29] 邓启红,黄柏良,唐猛,周松梅,刘蔚巍. 长沙市大气颗粒物 PM₁₀ 质量浓度的统计分布特性. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(4): 1567-1573.
- [30] 廖春花,刘甜甜,林海,马晶昊,朱明辉. 长沙近 57 年气温变化特征分析. 气象与环境科学, 2008, 31(4): 21-24.
- [31] Brandt C J, Rhoades R W. Effects of limestone dust accumulation on composition of a forest community. Environmental Pollution (1970), 1972, 3(3): 217-225.
- [32] Krupa Z, Baszynski T. Some aspects of heavy metals toxicity towards photosynthetic apparatus-direct and indirect effects on light and dark reactions. Acta Physiologiae Plantarum, 1995, 17(2): 177-190.
- [33] 王建辉,刘奕清,邹敏. 永川城区主要绿化植物的滞尘效应. 环境工程学报, 2013, 7(3): 1079-1084.
- [34] 郑鹏,史红文,邓红兵,廖建雄. 武汉市 65 个园林树种的生态功能研究. 植物科学学报, 2012, 30(5): 468-475.
- [35] 于曼,王正祥,雷耘,李中强,谭庆. 武汉市主要绿化树种滞尘效应研究. 环境工程学报, 2009, 3(7): 1333-1339.
- [36] 陈芳,周志翔,郭尔祥,叶贞清. 城市工业区园林绿地滞尘效应的研究——以武汉钢铁公司厂区绿地为例. 生态学杂志, 2006, 25(1): 34-38.
- [37] 曾青松. 四个桂花品种对大气污染抗性生理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009: 43-44.
- [38] 孔国辉,陈宏通,刘世忠,张德强,彭长连,温达志,胡羨聪,薛克娜,陆耀东,吴芝扬. 广东园林绿化植物对大气污染的反应及污染物在叶片的积累. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 297-315.
- [39] 温达志,陆耀东,旷远文,胡羨聪,张德强,薛克娜,孔国辉. 39 种木本植物对大气污染的生理生态反应与敏感性. 热带亚热带植物学报, 2003, 11(4): 341-347.
- [40] Hirano T, Kiyota M, Aiga I. Physical effects of dust on leaf physiology of cucumber and kidney bean plants. Environmental Pollution, 1995, 89(3): 255-261.
- [41] Paling E I, Humphries G, McCaule I, Thomson G. The effects of iron ore dust on mangroves in Western Australia: lack of evidence for stomatal damage. Wetlands Ecology and Management, 2001, 45(9): 363-370.
- [42] 刘玲,方炎明,王顺昌,谢影,杨聃聃. 7 种树木的叶片微形态与空气悬浮颗粒吸附及重金属累积特征. 环境科学, 2013, 34(6): 2361-2367.