

辽西北部主要绿化树种对粉尘污染的生理响应研究

淑 敏¹, 敖敦格日乐¹, 胡和珠拉¹, 李慧芳¹, 王东丽², 连 昭²

(1 内蒙古民族大学 蒙医药学院, 内蒙古 通辽 028000; 2 辽宁工程技术大学 环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

摘 要:为探究乡土和外来树种对城市不同污染环境的适应性,选取阜新市工业区、道路、矿区和公园绿地共有的10种树种作为研究对象,采用洗脱法测定了各树种单位叶面积滞尘量,并测定了叶片滞尘前后生理指标的变化,探讨不同树种叶片滞尘效应,以及叶片滞尘后对植物生理活动的影响。结果表明:(1)在4个功能区的不同树种单位叶面积滞尘量均不同,其中新疆杨单位叶面积滞尘量都较高、均值为 1.45 g/m^2 ,银杏单位叶面积滞尘量都较低、均值仅有 0.92 g/m^2 。(2)叶片滞尘之后生理指标分析显示,叶片SPAD值呈显著下降趋势,渗透调节物质(脯氨酸、可溶性蛋白、可溶性糖)含量和细胞膜透性(MDA、Rec)均呈上升趋势,而抗氧化酶活性(SOD和POD)呈下降趋势但下降率不明显。(3)银杏和五角枫滞尘量与各生理指标之间有显著相关关系,更适合从生理方面检测城市粉尘污染环境指示物。(4)4个功能区不同树种滞尘能力与抗尘能力聚类分析显示,新疆杨、紫丁香、山皂荚和臭椿的滞尘能力和抗尘能力均较强;阜新市外来树种新疆杨、紫叶李、臭椿等的滞尘和抗尘能力均与乡土树种相当。研究认为,在长期粉尘污染胁迫下,各绿化树种可能通过提高渗透调节物质含量和抗氧化酶的活性等来缓解粉尘污染的伤害,外来树种与乡土树种同样在各污染环境中表现出较强的适应能力;在不造成生物入侵危害的前提下应该积极引进能够有效滞尘和治沙防风的外来树种。

关键词:乡土树种;外来树种;生理特性;不同功能区;抗尘能力

中图分类号:Q945.78

文献标志码:A

Physiological Response of Main Greening Tree Species to Dust Pollution in Northwest of Liaoning Province

SHU Min¹, AO Dungerile¹, HU Hezhula¹, LI Huifang¹, WANG Dongli², LIAN Zhao²

(1 Mongolian Medicine College, Inner Mongolia University for Nationalities, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China; 2 College of Environmental Sciences and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

Abstract: To explore the native and exotic species of adaptability to different environmental pollution in the city, in this study, we selected 10 tree species in the industrial area, road, mining area and park green space of Fuxin City as the research objects. We measured the dust retention per leaf area of tree species and the changes of physiological indexes of leaves before and after dust retention by the elution method, and discussed the dust detention effect of leaves in different trees and the influence of leaves on physiological activities of plants after the dust detention effect. The results indicate that: (1) different tree species have different dust retention per unit area. The dust retention of *Populus bolleana* was 1.45 g/m^2 which is higher than that of others and *Ginkgo biloba* was only 0.92 g/m^2 which is lower than that of others in all

收稿日期:2020-06-11;修改稿收到日期:2020-10-06

基金项目:辽宁省自然科学基金(2019-ZD-0050);辽宁省教育厅项目(LJ2019JL028)

作者简介:淑 敏(1984—),女,博士,讲师,主要从事城市绿化树种方面的研究。E-mail:bcym1984@163.com

10 tree species. (2) SPAD value of leaves showed a significant downward trend, contents of osmotic regulatory substances (proline, soluble protein, soluble sugar) and membrane permeability (MDA, Rec) showed an upward trend, while activities of antioxidant enzymes (SOD and POD) showed a downward trend, but the rate of decline was not obvious. (3) There was a significant correlation between the amount of dust held by *G. biloba* and *Acer mono*. It was more suitable to detect the indicators of urban dust pollution from the physiological aspect. (4) According to the clustering analysis of dust retention and dust resistance of different tree species in four functional areas, the dust retention and dust resistance of *P. bolleana*, *Syringa oblata*, *Gleditsia japonica* and *Ailanthus altissima* were both strong. The dust retention and dust resistance of foreign tree species in Fuxin City were similar to that of native tree species. Therefore, under the long-term dust pollution stress, each tree species may alleviate the damage of dust pollution by increasing the contents of osmotic regulation substances and the activities of antioxidant enzymes. The foreign tree species and native tree species both show strong adaptability and are not sensitive to environmental pollution. Therefore, it is a strong guarantee for the safe and healthy development of urban landscape in arid areas to introduce foreign tree species which can effectively hold dust and control sand and prevent wind without causing biological invasion.

Key words: native tree species; exotic tree species; physiological characteristics; different functional areas; dust resistance

随着城市化和工业化的迅速发展,粉尘污染带来了新的生存危机^[1-2]。中国大量城市大气粉尘超标现象严重,对植物个体的新陈代谢和生长发育,乃至整个植被造成了不可估量的损伤^[3]。植物叶片是与周围环境进行气体交换的主要器官,也是最易受大气污染伤害的部分。粉尘在叶表上形成外壳,在阻碍光合作用的同时也限制了叶片外界层的气体交换,降低叶片净光合速率和蒸腾速率^[4],从而使植物的光合能力下降^[5-6]。近年来,植物抗尘能力方面的研究越来越受到重视,且主要集中在植物生理反应方面,如借助叶绿素含量、细胞膜透性^[7]以及叶片气体交换、光合功能和酶活性变化来探讨植物受害机理或比较不同种类植物的抗耐性^[8-10]。也有研究表明,植物生理指标的变化可一定程度上反映当地的空气质量水平^[11-12]。在城市绿地类型中,工业区绿地和交通绿地是受污染胁迫较严重的两种典型绿地^[13],因此更有效地利用绿色植物防治大气颗粒物污染,需要将植物滞尘与抗尘能力相结合,筛选出适合城市绿地(工业区和交通区)生长的植物种类,对构建节约型城市绿地和受污染地区生态系统植被恢复具有重要的意义。

辽西北部受地域自然生境和植物分布的地带性规律制约,乡土树种种类不多,因此有必要在不造成生物入侵危害的前提下积极引进外来种,藉以丰富该地区的生物多样性以及提高城市空气质量。近年来,随着全球环境的恶化,关于植物对环境胁迫生理响应的相关研究越来越多,对植物在胁迫条件下适应机理的研究也愈益成熟。但大多数的研究都是在

控制环境中进行,如丛者福^[14]通过人工施入 SO₂ 气体探索其对几种行道树叶绿素含量的影响,冯兆忠等^[15]研究了油菜叶片经 O₃ 熏蒸后的气体交换特征。同时,前人研究多集中在某种植物对胁迫条件的若干生理指标的反应^[16-17],或几种植物对单一污染成分单个生理指标的比较研究^[18],而综合比较与评价乡土树种和外来树种对实际污染环境反应的研究较少^[19-20]。辽西北部阜新市是以煤电为主导产业的典型的重工业城市,长期存在着严重的煤烟、沙尘、浮尘天气等粉尘污染。鉴于此,本研究以阜新市的主要城区长期受粉尘污染的具有代表性的 4 个功能区共有树种(乡土和外来)为研究对象,分别从不同功能区采取不同树种的成熟叶片进行滞尘量和生理指标的测定,分析不同树种滞尘能力的差异和蒙尘后生理响应,以期对不同树种在粉尘污染胁迫下抗污染的机理及其适应性提供参考。以便寻找出适合阜新市抗粉尘污染的树种,为乡土和外来植物在生态景观功能性植物的配置方面提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 样点和材料选择

本次试验于夏季 7~8 月份进行。采样地点按土地利用性质,对阜新市功能分区进行分层次随机抽样调查,共设 4 个采样试验区。植物受粉尘污染从大到小的顺序为工业区(IA)(宏达供热电厂,建筑工地)、商业交通区(TA)(人民大街,红树路,新华街)、露天矿区(OP)(海州露天矿)和清洁区(CA)(人民公园,辽工大校园,辽工大教师公寓)^[13]。选

定不同污染区域,可防止研究环境单一造成研究结果的片面性。此外,可以通过不同区的研究对比分析,考察不同污染条件下同树种对粉尘附着能力。研究采样材料包括乡土树种紫丁香(*Syringa oblata*)、榆树(*Ulmus pumila*)、山皂荚(*Gleditsia japonica*)、五角枫(*Acer mono*)、榆叶梅(*Amygdalus triloba*),以及外来树种银杏(*Ginkgo biloba*)、紫叶李(*Prunus cerasifera*)、新疆杨(*Populus bolleana*)、京桃(*Prunus persica*)和臭椿(*Ailanthus altissima*)。

1.2 叶片样品采集

每功能区每种树种各选取 3 株生长状况良好、林龄相近的个体植株。在 7~8 月间 10 d 左右没有降雨的情况下,在乔木生长高度 2~3 m、灌木生长高度 1~1.5 m 处,于树冠外围各个方向上根据叶片大小,在每株树上采集不等量叶片。采摘的叶片要求完整、无病虫害,且皆为当年生叶片。把采摘下来的叶片立即封存于自封袋中,及时带回实验室进行指标测量。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 单位叶面积滞尘量 每种树种各取适量叶片放入盛有蒸馏水的烧杯中浸泡 2 h 以上,然后用软刷轻轻刷洗,将叶片上的附着物充分浸洗下来。叶片用镊子轻轻的夹出,放在纸上晾干。浸洗液用 60 ℃下已烘干称取干重(W_1)的微孔滤膜($\varphi 0.25\ \mu\text{m}$)过滤,然后将滤留物与滤膜一起放入 60 ℃烘箱内,烘干后用精度 1 μg 的天平称取干重(W_2),即获得滞尘量($W_2 - W_1$)。夹出的叶片晾干后,经数码相机(Canon, Japan)照相后,将图像导入计算机中,用 Photoshop 7.0 软件处理后,计算出叶面积^[21],再采用经验公式估算阔叶树种单株树木的叶片总叶面积^[22],最后计算单位面积滞尘量和单株滞尘量。

单位叶面积滞尘量 = ($W_2 - W_1$) / 叶面积 (1)

单株总叶面积(Y) = $\text{Exp}(0.631 + 0.238H + 0.691D - 0.0123S) + 0.182$ (2)

单株滞尘量 = 单株总叶面积 × 单位叶面积滞尘量 (3)

(2)式中 Y 为叶面积总量 (m^2), H 为树冠高度 (m), D 为树冠直径 (m), $S = D(H + D)/2$ (m^2); (3)式中单位叶面积滞尘量为 4 个功能区的平均滞尘量。

1.3.2 叶片生理指标 选择对粉尘污染较敏感的生理指标进行测定以及综合定量评价^[21,23]。各树种选择具有代表性的 3 株,在每株树木的不同方位

采摘完全展开的 4 张健康叶片,利用 SPAD-502 型便携式叶绿素计(Minolta, Japan)测定 SPAD 值,在每个叶片上均匀选取 6 个点进行观测,计算平均值(叶绿素含量)。测完 SPAD 值的叶片迅速摘取下来放入便携式冰盒带回实验室,先把叶片洗净后测定其他生理指标。可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝-G250 染色法测定;游离脯氨酸(Pro)采用酸性茚三酮法测定;相对电导率(Rec)采用雷磁 DJS-ID 电导率仪测定;丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[24]。

1.3.3 粉尘抗性综合评价 综合评价采用隶属函数法对树木在自然界蒙尘后抗性资料进行统计^[25]。如果某一生理指标与粉尘抗性呈正相关关系,计算公式为: $R(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$;如果某一指标与抗尘性呈负相关关系,则计算公式为: $R(X_i) = 1 - (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。式中, X 表示某一指标的测定值, $X_{\max}$ 表示某一指标测定值中的最大值, $X_{\min}$ 表示某一指标测定值中的最小值。

各指标隶属函数值计算公式为: $R_i = 1/n \sum_{i=1}^n R_i$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 2017 软件进行绘图。采用 SPSS 19 软件进行数据分析,用单因素方差分析(one-way ANOVA)检测物种之间最大滞尘量的差异显著性,若有显著差异,则用最小显著差异法(LSD)进行多重比较。两变量之间的相关性采用 Pearson 检验。差异显著性水平设定为 0.05。

2 结果与分析

2.1 不同树种单位叶面积滞尘量和单株滞尘量

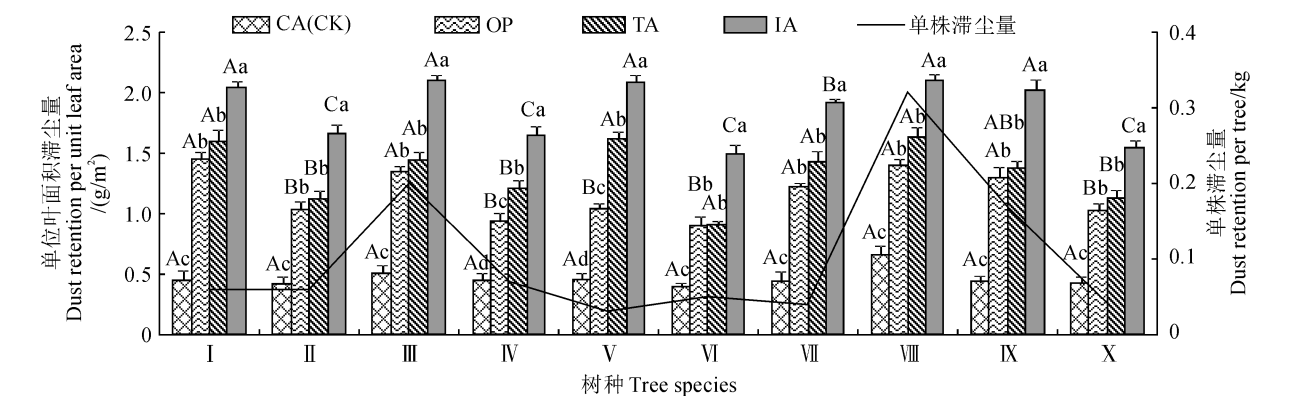
在 4 个功能区的不同树种单位叶面积滞尘量变化范围在 0.39~2.11 g/m^2 ,其中新疆杨单位叶面积滞尘量都较高(均值为 1.45 g/m^2),银杏滞尘量都较低(均值仅有 0.92 g/m^2)(图 1)。同一个树种单位叶面积滞尘量在 4 个功能区均表现为工业区 > 商业交通区 > 露天矿区 > 清洁区($P < 0.05$),即随着环境粉尘污染程度增大而增加。其中,在清洁区的不同树种单位叶面积滞尘量之间没有显著差异($P > 0.05$);在露天矿区紫丁香、山皂荚、紫叶李、新疆杨和臭椿等树种的单位叶面积滞尘量显著大于其他树种($P < 0.05$);在商业交通区表现为紫丁香、山

皂荚、榆叶梅、紫叶李、新疆杨和臭椿等树种的单位叶面积滞尘量显著大于其他树种($P<0.05$);在工业区则表现为紫丁香、山皂荚、榆叶梅、新疆杨和臭椿等树种的单位叶面积滞尘量都显著大于其他树种($P<0.05$)。即在相同环境下不同树种单叶面积滞尘量在清洁区差异不大,而在其他区差异显著($P<0.05$)。

同时,根据经验公式得出的不同树种单株总滞尘量从大到小为新疆杨(0.32 kg)>山皂荚(0.21 kg)>臭椿(0.17 kg)>五角枫(0.07 kg)>榆树(0.06 kg)>紫丁香(0.06 kg)银杏>(0.05 kg)>紫叶李(0.04 kg)>京桃(0.04 kg)>榆叶梅(0.03 kg)。其中新疆杨单株滞尘量最大,是最小的榆叶梅单株滞尘量的 10 倍。总之,新疆杨、山皂荚

和臭椿等树种的单位叶面积滞尘量和单株滞尘量在清洁区以外的功能区都显著大于其他树种。

2.2 粉尘污染对绿化树种生理指标的影响
2.2.1 叶片 SPAD 值 叶片叶绿素相对含量在不同污染环境下的动态变化特点是衡量树种抗性大小的有效指标之一^[26]。本研究中的 10 种树种叶片 SPAD 值随着功能区粉尘污染程度的加重均呈逐渐下降的趋势,均表现为清洁区>露天矿区>交通区>工业区(图 2)。在清洁区,紫丁香、五角枫、榆叶梅、新疆杨和臭椿等树种的叶片 SPAD 值显著大于其他树种,而紫叶李 SPAD 值显著小于其他树种($P<0.05$)。与清洁区相比较,工业区的榆树、五角枫、银杏和京桃等树种叶片 SPAD 值的下降率为 19%~24%,且这些树种叶片 SPAD 值在不同功能区之



CA. 清洁区;OP. 露天矿区;TA. 商业交通区;IA. 工业区; I. 紫丁香; II. 榆树; III. 山皂荚; IV. 五角枫; V. 榆叶梅; VI. 银杏; VII. 紫叶李; VIII. 新疆杨; IX. 臭椿; X. 京桃;同一树种内不同小写字母表示不同功能区间在 0.05 水平存在显著差异,同一功能区区内不同大写字母表示不同树种间在 0.05 水平存在显著差异;下同

图 1 各树种单位叶面积和单株滞尘量

CA. Clean area; OP. Open-pit mine; TA. Traffic area; IA. Industrial area; I. *Syringa oblata*; II. *Ulmus pumila*; III. *Gleditsia japonica*; IV. *Acer mono*; V. *Amygdalus triloba*; VI. *Ginkgo biloba*; VII. *Prunus cerasifera*; VIII. *Populus bolleana*; IX. *Ailanthus altissima*; X. *Prunus persica*; Different normal letters within same tree species indicate significant difference among different functional zones at 0.05 level, while different capital letters within same functional zones meant significant difference among different tree species at 0.05 level. The same as below

Fig. 1 Dust retention per leaf area and per plant of each tree species

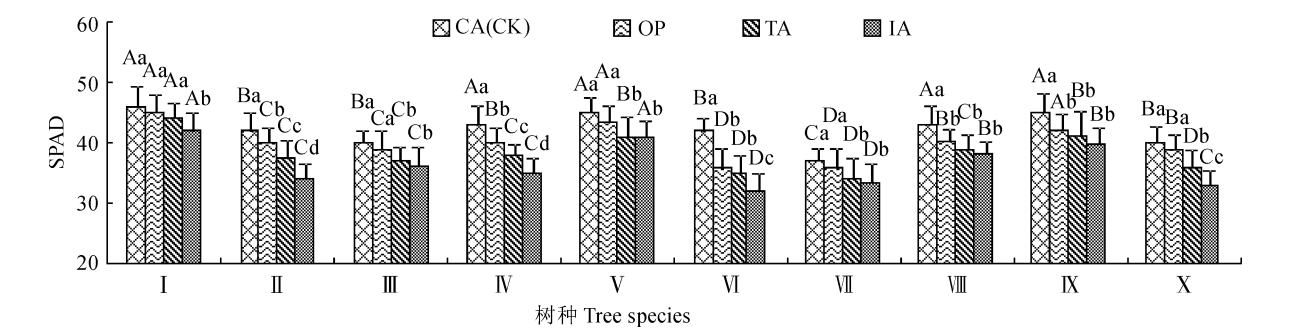


图 2 各树种叶片 SPAD 值在不同功能区的变化

Fig. 2 Changes in laef SPAD values of various tree species in different functional areas

间均有显著差异($P<0.05$);而工业区的紫丁香、山皂荚、榆叶梅、紫叶李、新疆杨和臭椿等树种叶片 SPAD 值比清洁区平均下降率仅为 9.6%,较为稳定状态,且在露天矿区和交通区与清洁区之间基本没有显著差异。另外,紫丁香、榆叶梅、新疆杨和臭椿等树种叶片 SPAD 值在粉尘污染最重的工业区也显著高于其他树种。从以上结果可以看出,五角枫、榆树和京桃等在粉尘污染环境抗性较差,而紫丁香、榆叶梅、新疆杨和臭椿等树种对粉尘污染环境抗性较强。

2.2.2 叶片细胞渗透调节物质含量 渗透调节是植物抵抗环境胁迫的一种重要生理机制,细胞质中可溶性蛋白、可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质含量的增加,可以提高植物细胞的渗透调节能力,降低质膜受伤害的程度^[27]。从表 1 可以看出,与清洁区相比较,10 种树种蒙尘后的叶片可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量均有小幅度增加,并均在工业区达到最大值,三者含量变化范围分别在 0.28~0.85、128.5~184.5 和 5.01~8.56 $\mu\text{g/g}$,累积率范围分别在 24%~67%、8%~23% 和 14%~62%。其中,紫丁香、山皂荚、榆叶梅、新疆杨和臭椿叶片的可溶性糖、可溶性蛋白以及脯氨酸含量随着粉尘污染程度的加重而积累率相对较小,在不同污染环境下含量较稳定;而榆树、五角枫、银杏、紫叶李和京桃叶片的可溶性糖、可溶性蛋白以及脯氨酸含量的积累率随着粉尘污染程度的加重而变化相对较大,尤其以脯氨酸含量变化最为明显。通过多重比较发现,叶片可溶性糖含量、可溶性蛋白含量以及脯氨酸含量在相同功能区各树种间以及相同树种不同功能区均存在显著差异($P<0.05$)。

2.2.3 叶片细胞膜透性 丙二醛(MDA)含量高低和相对电导率(Rec)的大小都是膜脂过氧化强弱和质膜破坏程度的重要指标^[28]。从表 2 可以看出,与清洁区相比较,蒙尘后的各树种叶片 MDA 含量和 Rec 均有不同程度的增加,同样也均在工业区达到最大值,两者变化范围分别在 4.54~9.01 $\mu\text{mol/g}$ 和 42.2%~93.4%,累积率范围分别在 13%~69% 和 18%~53%。其中,紫丁香、山皂荚、新疆杨和臭椿叶片的 MDA 和 Rec 随着污染程度的加重而积累率相对较小,不同污染环境下水平较稳定;而榆树、五角枫、银杏、榆叶梅、紫叶李和京桃的积累率相对较大,水平变化较明显。同时,叶片 MDA 含量和 Rec 在相同功能区不同绿化树种间和相同树种不同功能区均存在显著差异($P<0.05$)。

2.2.4 叶片 POD 和 SOD 活性 POD 和 SOD 是膜脂过氧化防御系统的主要保护酶,能清除体内的 H_2O_2 ,在植物逆环境中有着非常重要的作用^[29]。表 3 显示,在不同功能区粉尘污染条件下,10 种树种叶片 SOD 和 POD 活性的变化趋势基本一致,均随着污染程度加重呈现降低的趋势;叶片 SOD 和 POD 活性在相同树种不同功能区间和相同功能区不同树种间均差异显著($P<0.05$)。其中,各树种叶片的 POD 和 SOD 活性在清洁区均较高,在工业区均达到最小值,且比清洁区显著下降;与清洁区相比较,其他区各树种叶片 POD 和 SOD 活性下降幅度在 9%~16%之间。

2.3 各绿化树种单位叶片滞尘量与其抗逆生理特性相关性

从表 4 可以看出,银杏叶片滞尘量与其 SPAD 值、SOD 和 POD 活性之间有极显著负相关关系($P<0.01$),与可溶性蛋白、可溶性糖、MDA 含量及 Rec 之间有显著正相关关系($P<0.05$);五角枫叶片滞尘量与其 SPAD 值、SOD 和 POD 活性之间有极显著负相关关系($P<0.01$),与其可溶性蛋白、脯氨酸和 MDA 含量及 Rec 之间有显著正相关关系($P<0.05$);京桃、榆树和紫叶李叶片滞尘量与其 SPAD 值之间有极显著负相关关系($P<0.01$),与脯氨酸和 MDA 含量之间有显著正相关关系($P<0.05$),与 SOD 活性之间有显著负相关关系($P<0.05$);其他树种叶片滞尘量与其个别生理指标之间也有显著的相关关系。

2.4 树种抗尘能力的综合评价

植物遭受到逆境胁迫时,其生理变化是错综复杂的,并受到多种因素的影响,孤立地用一个指标评价植物抗尘能力很难真实反映其抗性本质。因此,为综合评价各树种的抗尘能力,采用隶属函数法,以各项指标隶属度的平均值作为树木抗性能力综合鉴定标准进行比较。由于 MDA 和 Rec、SOD 和 POD 活性表征植物受损程度,与植物抗性呈负相关,分析时采用反隶属函数值;Pro、可溶性糖和可溶性蛋白含量表征植物对逆境的适应能力,分析时采用隶属函数值^[30]。从表 5 可以看出,依据综合评价值的大小,各树种抗尘性表现为山皂荚>紫丁香>新疆杨>臭椿>紫叶李>榆树>榆叶梅>五角枫>京桃>银杏,这个结果与各树种单位叶面积滞尘量和单株滞尘量的大小顺序并不一致。但从这个结果也可以看出,山皂荚、新疆杨、紫丁香和臭椿等树种单位叶面积滞尘量、单株滞尘量以及抗尘能力都较强。

表 1 不同功能区各树种叶片细胞渗透调节物质含量的变化

Table 1 Changes of osmotic regulator contents in leaf cells of different tree species in different functional zones

树种 Tree species	可溶性糖含量 Soluble sugar content/%				可溶性蛋白含量 Soluble protein content/(μg/g)				脯氨酸含量 Proline content/(μg/g)			
	CA(CK)	OP	TA	IA	CA(CK)	OP	TA	IA	CA(CK)	OP	TA	IA
I	0.31±0.08Bc	0.33±0.09ABc	0.35±0.12Ab	0.39±0.11Ac	135.1±24.5Cb	138.1±26.5BCc	143.1±34.2Bc	149.1±38.2Ac	6.34±1.56Ab	6.84±1.54Ab	7.01±1.89Ab	7.34±1.92Ac
II	0.54±0.11Da	0.62±0.16Ca	0.71±0.17Ba	0.78±0.18Aab	142.7±23.6Cab	152.7±27.4Bb	166.7±37.6Ab	173.7±36.5Ab	5.32±1.78Bc	5.98±2.01Bc	6.78±2.22Ac	6.95±1.98Ac
III	0.32±0.06Ac	0.35±0.10Ac	0.39±0.15Ab	0.40±0.16Ac	134.7±23.5Cb	136.8±31.2BCcd	142.3±39.2Bc	150.7±35.4Ac	6.07±0.99Bb	6.37±0.93ABb	6.82±1.01ABc	7.01±0.91Ac
IV	0.57±0.13Ca	0.63±0.17Ca	0.72±0.19Ba	0.84±0.21Aa	150.4±30.5Ca	155.4±31.2Cab	165.4±33.4Bb	179.4±40.5Aab	5.11±1.12Bc	5.87±1.15ABc	5.92±1.19Ac	5.99±1.67Ac
V	0.28±0.05Bc	0.29±0.09ABc	0.34±0.14Ab	0.47±0.17Ac	128.5±31.2Bc	132.5±34.6Bd	139.7±35.2ABc	145.3±38.7Acd	7.12±1.78Ba	7.45±1.86ABa	7.99±1.65Aa	8.09±1.71Ab
VI	0.54±0.09Ca	0.59±0.12Cab	0.71±0.18Ba	0.85±0.19Aa	151.6±34.5Da	159.4±38.7Ca	171.6±36.4Ba	182.3±38.6Aa	5.01±1.16Dc	6.11±1.34Cc	7.35±1.67Bb	8.11±1.82Ab
VII	0.45±0.11Db	0.53±0.12Cb	0.66±0.18Ba	0.75±0.20Ab	144.2±33.4Da	152.5±39.2Cb	165.3±36.1B	176.2±35.4Ab	5.23±1.45Cc	6.13±1.67Bc	7.87±1.88Aa	8.23±1.91Aab
Ⅲ	0.31±0.08Bc	0.34±0.11ABc	0.37±0.16ABb	0.40±0.16Ac	131.3±27.6Bbc	137.4±32.3Ac	139.3±32.4Ac	142.4±32.3Ad	7.07±1.98Ba	7.98±1.78Aa	8.07±2.01Aa	8.65±2.22Aa
IX	0.33±0.07Bc	0.36±0.09ABc	0.39±0.13ABb	0.41±0.16Ac	135.9±23.4Bb	138.9±37.2Bc	142.4±31.2ABc	148.1±35.4Ac	6.89±2.11Aa	7.12±2.14Aab	7.59±1.97Aab	8.28±1.67Aa
X	0.48±0.14Cab	0.55±0.14Cb	0.69±0.15Ba	0.79±0.19Aab	149.5±25.4Da	159.5±36.1Ca	171.3±34.2Ba	184.5±37.6Aa	5.56±1.33Dc	6.55±1.43Cb	7.23±1.78Bb	8.56±1.98Aa

注:同一树种内不同大写字母表示不同功能区间在 0.05 水平存在显著差异,同一功能区不同小写字母表示不同树种间在 0.05 水平存在显著差异

Note: Different capital letters within same tree species indicate significant difference among different functional zones at 0.05 level, while different normal letters within same functional zone indicate significant difference among different species at 0.05 level; the same as below

表 2 不同功能区各树种叶片细胞膜透性变化

Table 2 Changes of membrane permeability in leaves of different tree species in different functional zones

树种 Species	丙二醛含量 MDA content/(μmol/g)				相对电导率 Relative electric conductivity/%			
	CA(CK)	OP	TA	IA	CA(CK)	OP	TA	IA
I	4.78±1.09Bbc	5.22±0.92ABb	5.34±0.87ABc	5.98±0.98Ac	43.2±9.02Bc	46.5±11.2Bd	51.4±11.4Ad	51.2±11.2Ac
II	5.14±0.92Cb	6.03±1.13Bab	7.01±1.12ABb	7.99±1.15Ab	56.5±15.4Db	70.3±9.87Cb	75.6±10.8Bb	80.4±15.6Ab
III	4.54±1.12Bc	4.87±1.05Ac	4.92±0.78Ac	5.13±0.87Ad	42.2±13.4Cc	43.2±12.3BCd	45.6±9.7Bd	49.8±13.4Ac
IV	5.67±0.87Ca	6.78±0.89Ba	7.98±0.83Aa	8.86±1.32Aa	61.1±16.5Da	76.7±11.7Cab	82.3±16.7Ba	90.4±17.4Aa
V	4.98±0.56Bb	5.12±1.13Bbc	6.13±1.09ABc	6.78±1.08Ac	46.4±17.2Bc	57.4±10.8Ac	59.3±12.5Ac	57.2±15.4Ac
VI	5.89±0.92Ca	6.56±0.97Ca	7.98±1.19Ba	9.01±0.92Aa	68.3±10.5Da	83.4±15.6Ca	88.9±16.2Ba	93.4±16.5Aa
VII	6.01±1.05Ca	5.99±1.21Cab	6.98±1.03Bb	8.67±0.81Aab	55.1±15.2Db	72.3±16.4Cb	80.3±17.6Bab	84.1±15.4Aab
VIII	4.98±0.76Ab	4.58±1.09Ac	5.34±1.12Ac	5.78±0.79Acd	43.2±12.3Bc	47.3±9.3ABd	49.5±12.3A	50.2±11.4Ac
IX	4.92±0.71Ab	5.25±1.12Ab	5.44±0.94Ac	6.03±0.67Ac	47.1±11.7Cc	48.7±8.6Cd	52.3±11.6Bcd	55.4±9.76Ac
X	5.32±0.95Dab	6.34±0.96Ca	7.78±1.21Ba	8.89±1.12Aa	59.3±12.3Dab	74.3±14.5Cb	78.2±15.4Bab	81.2±13.4Ab

表 3 不同功能区各树种叶片抗氧化酶活性变化

Table 3 Changes of leaf antioxidant enzyme activities of different tree species in different functional zones								
树种 Species	SOD 活性 SOD activity/($\mu\text{g/g}$)				POD 活性 POD activity/($\mu\text{g/g}$)			
	CA(CK)	OP	TA	IA	CA(CK)	OP	TA	IA
I	299 $\pm$ 32Ae	282 $\pm$ 26Be	273 $\pm$ 32Bc	260 $\pm$ 33Cc	234 $\pm$ 27Acd	224 $\pm$ 32ABd	218 $\pm$ 26Bd	203 $\pm$ 28Cc
II	324 $\pm$ 38Ad	312 $\pm$ 31Acd	291 $\pm$ 27Bb	278 $\pm$ 37Cb	289 $\pm$ 33Aa	272 $\pm$ 27Bb	265 $\pm$ 28Bb	253 $\pm$ 23Ca
III	267 $\pm$ 27Aa	260 $\pm$ 27ABf	251 $\pm$ 24Bd	238 $\pm$ 29Cd	212 $\pm$ 39Ae	201 $\pm$ 21ABe	193 $\pm$ 22Be	189 $\pm$ 20Bd
IV	365 $\pm$ 39Aa	343 $\pm$ 30Ba	320 $\pm$ 38Cab	308 $\pm$ 39Da	272 $\pm$ 34Ab	261 $\pm$ 24Bc	246 $\pm$ 25Cc	231 $\pm$ 22Db
V	312 $\pm$ 36Ae	301 $\pm$ 31Ad	289 $\pm$ 33Bbc	282 $\pm$ 27Bb	223 $\pm$ 30Ad	216 $\pm$ 29ABd	208 $\pm$ 21Bd	199 $\pm$ 19Cc
VI	345 $\pm$ 41Ab	324 $\pm$ 39Bb	302 $\pm$ 36Cb	289 $\pm$ 31Db	301 $\pm$ 29Aa	289 $\pm$ 31Ba	272 $\pm$ 19Cab	260 $\pm$ 27Da
VII	335 $\pm$ 43Ac	323 $\pm$ 42Bb	314 $\pm$ 37Ba	301 $\pm$ 35Ca	292 $\pm$ 26Aa	286 $\pm$ 34Aa	273 $\pm$ 23Bab	261 $\pm$ 31Ca
VIII	298 $\pm$ 28Ae	290 $\pm$ 28ABe	282 $\pm$ 26Bc	276 $\pm$ 30Bb	205 $\pm$ 22Ae	197 $\pm$ 20ABe	189 $\pm$ 20Be	181 $\pm$ 21Bd
IX	312 $\pm$ 26Ae	302 $\pm$ 28ABd	291 $\pm$ 32Bb	282 $\pm$ 32Bb	243 $\pm$ 27Ac	235 $\pm$ 26ABd	229 $\pm$ 24Bd	220 $\pm$ 19Bb
X	340 $\pm$ 37Ab	328 $\pm$ 39Bb	312 $\pm$ 36Ca	300 $\pm$ 34Da	298 $\pm$ 24Aa	287 $\pm$ 29Ba	276 $\pm$ 29Ca	261 $\pm$ 26Da

表 4 各树种叶片滞尘量与生理指标之间的相关性

Table 4 The correlation between the amount of dust in leaves of various tree species and physiological indexes										
指标 Index	叶片滞尘量 Amount of dust on leaves									
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
SPAD	0.603	-0.803**	0.624	-0.901**	0.532	-0.876**	-0.718*	0.456	0.552	-0.792**
SP	0.367	0.567	0.482	0.767*	0.223	0.671*	0.687*	0.334	0.378	0.587
SS	0.597	0.507	0.391	0.571	0.428	0.737*	0.497	0.497	0.567	0.469
Pro	0.478	0.708*	0.477	0.678*	0.724*	0.548	0.727*	0.644*	0.398	0.678*
MDA	0.514	0.702*	0.724*	0.701*	0.293	0.714*	0.676*	0.488	0.410	0.714*
Rec	0.492	0.592	0.892	0.721*	0.702*	0.692*	0.492	0.392	0.292	0.582
SOD	-0.761*	-0.761*	-0.721*	-0.861**	-0.361	-0.922**	-0.661*	-0.706*	-0.553	-0.765*
POD	-0.503	-0.577	-0.356	-0.803**	-0.403	-0.876**	-0.605	-0.543	-0.643*	-0.522

注:SPAD. 叶绿素含量;SP. 可溶性蛋白含量;SS. 可溶性糖含量;Pro. 脯氨酸含量;MDA. 丙二醛含量;Rec. 相对电导率;SOD. SOD 活性; POD. POD 活性;下同;* 和 * 分别表示 0.01 和 0.05 水平上显著相关性

Note: SPAD. Chlorphyll content; SP. Soluble protein content; SS. Soluble sugar content; Pro. Proline content; MDA. MDA content; Rec. Relative electric conductivity; SOD. SOD activity; POD. POD activity; The same as below; * * and * represent significant correlation relationship at 0.01 and 0.05 levels, respectively

表 5 滞尘后植物抗尘性的综合评价

Table 5 Comprehensive evaluation of plant dust resistance after dust retention										
树种 Tree species	隶属函数值 Membership function value								综合评价 Comprehensive evaluation	排序 Sort
	SPAD	SP	SS	Pro	MDA	Rec	SOD	POD		
I	0.854	0.378	0.443	0.654	0.732	0.234	0.191	0.106	0.449	3
II	0.598	0.206	0.298	0.545	0.678	0.201	0.136	0.087	0.344	6
III	0.887	0.432	0.345	0.776	0.824	0.662	0.356	0.123	0.551	1
IV	0.645	0.146	0.195	0.543	0.564	0.167	0.116	0.078	0.307	8
V	0.514	0.132	0.196	0.567	0.708	0.093	0.204	0.103	0.314	7
VI	0.543	0.102	0.087	0.554	0.448	0.019	0.101	0.076	0.241	10
VII	0.865	0.345	0.254	0.445	0.667	0.256	0.107	0.098	0.380	5
VIII	0.807	0.405	0.563	0.665	0.788	0.447	0.265	0.115	0.507	2
IX	0.802	0.445	0.328	0.554	0.768	0.221	0.207	0.119	0.431	4
X	0.567	0.112	0.076	0.605	0.487	0.087	0.107	0.091	0.267	9

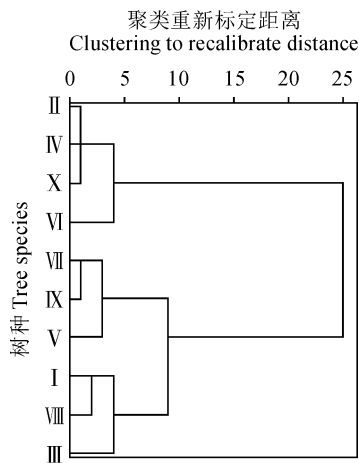


图 3 绿化树树种滞尘与抗尘能力的聚类分析
Fig. 3 Cluster diagram of dust retention and dust resistance of green tree species

为了更科学地筛选出阜新市的耐尘树种,将试验树种进行适当的分类,采用 SPSS 软件的平均聚类法进行各树种滞尘量和抗尘能力(滞尘量和生理指标综合评价)进行聚类分析,输出谱系聚类图(图 3)。根据聚类分析结果来看,可将所测的 10 种树种滞尘量和生理指标综合评价的结果划分为 3 大类。其中,滞尘能力及抗尘能力较强的树种有紫丁香、新疆杨和山皂荚;中等的树种有榆叶梅、臭椿、紫叶李;较弱的树种有银杏、五角枫、京桃和榆树。

3 讨 论

粉尘污染对植物生理指标的影响是一个复杂生理过程^[31]。在自然环境下,植物被认为是可以通过不间断地感应外界环境和调节气孔至合适的开度以维持光合作用与水分散失之间的平衡^[32]。但从粉尘污染影响的研究中发现,植物生理指标在污染过程中发生明显改变,随着粉尘污染的加重,叶片各生理指标变化较大,这主要是由于粉尘沉降改变了植物叶片的微环境,影响叶绿素合成等各种生理生化指标,从而使得植物光合产物积累受影响^[33]。植物叶绿素含量减少表明植物的光合能力下降,对粉尘环境适应性较弱^[34-35]。本试验的 10 种树种叶片 SPAD 值在不同程度粉尘污染环境下差异较大,在 3 个污染区比清洁区显著下降的树种有银杏、五角枫、榆树、京桃等,说明这些树种对粉尘污染较为敏感,适应性较弱。同时,细胞渗透调节物质可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸在植物体内累积是抵御逆境的现象^[36]。随着粉尘污染加重,本试验中各树种

叶片可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸含量均呈现上升趋势,这与陈志成^[37]对臭椿、五角枫、黄连木的相关研究结果相一致。这结果可能是叶片蒙尘后,产生大量自由基,植物体内抗氧化酶与抗氧化物质活性提高,而可溶性蛋白和可溶性糖含量以及脯氨酸含量会积累^[38-39]。但是不同树种对粉尘的反应不同,在细胞内积累的各渗透调节物质比例也不同,如五角枫叶片可溶性糖含量的增长率相对最大、脯氨酸含量的增长率相对较小,而紫丁香可溶性糖含量的增长率较小、脯氨酸含量的增长率相对较大,这说明蒙尘后五角枫细胞内积累的主要渗透调节物质是可溶性糖,而紫丁香是脯氨酸。

也有研究证实,当植物细胞受到粉尘污染时,叶片最先受影响的是细胞膜,细胞膜透性的破坏引起电解质外渗,其中主要是钾离子的大量渗出,从而使叶片外渗液的电导率随污染程度的增大有不同程度的增加^[10]。且相对电导率(Rec)越高、丙二醛(MDA)积累越多植物受伤程度越大,说明该地区污染越严重^[40]。因此,在环境胁迫条件下,细胞膜稳定性越好,说明植物对环境胁迫的耐受力就越高。本研究中粉尘污染区 10 种树种叶片膜脂过氧化产物 MDA 含量和 Rec 均比清洁区明显增加,支持了前人的研究结果^[41];同时,抗尘性强的紫丁香、山皂荚、新疆杨和臭椿叶片在蒙尘后的 Rec 和 MDA 含量积累率相对较小,抗尘性弱的榆树、五角枫、银杏、榆叶梅、紫叶李和京桃叶片 Rec 和 MDA 含量增长率相对较大。有关研究发现植物受粉尘污染胁迫时,其叶片 SOD 和 POD 合成受抑制,活性出现下降,清除活性氧效率也随之降低^[42-43]。本试验中的 10 种树种叶片 SOD 和 POD 活性均随着粉尘污染程度的加重表现出逐渐减小的变化趋势,这与吴芹等^[44]对山杏、沙棘、油松的研究结果一致。但与清洁区相比较,在本研究的其他 3 个污染区各树种叶片 SOD 和 POD 活性下降率都不大。这结果说明,在长期粉尘污染下绿化树种叶片 SOD 和 POD 活性的响应不太敏感。可见,在长期粉尘污染胁迫下,各绿化树种主要通过提高渗透调节物质含量和提高抗氧化酶的活性等保护自身免遭粉尘污染的伤害^[38-39],从而表现出抗尘能力;同时,各树种叶片的质膜都受到了粉尘伤害,且随着粉尘污染的加重伤害也逐渐加大,并通过启动抗氧化酶系统和积累渗透调节物质来减轻粉尘污染的伤害。

对绿化树种滞尘能力研究的同时也要关注树种本身的抗尘性,只有本身的滞尘量大且受粉尘污染

影响小的树种,才是真正滞尘能力强,也适合作为城市功能区的滞尘植物。本研究中各树种综合评价(聚类分析)结果表明,紫丁香、新疆杨、山皂荚等单位叶面积滞尘量相对较大,抗尘性也较强,可作为阜新市抗尘的优良绿化植物;银杏和五角枫等树种单位叶面积滞尘量相对较小,抗尘性较差,在粉尘污染较严重的区域不适宜种植该树种;榆叶梅单位叶面积滞尘量相对较大,但其抗尘性较弱,可以作为大气粉尘污染的监测植物。许多园林植物都可作为大气污染或是其他污染的指示植物,可根据污染环境中植物叶片的生理生态指标的变化及受损害的程度等来对周围环境污染做出相应的判断。总之,植物滞尘能力的差异是由外界环境、叶片的形态结构和空气粉尘理化性质等综合因素共同决定的。本试验大多数树木都能够感知粉尘污染,并调节自身生理指标变化来回应粉尘污染,但不同树木存在着各个生理指标变化的不协同性和复杂性,有待进一步探讨。

城市绿化树种滞尘效应及其对人居环境的改善作用是显著并长期的。鉴于辽西北地区干旱缺水、严寒多风、易扬尘等自然条件,应将树木的滞尘价值和耐尘能力纳入到绿化树种选配指标体系中,多选能够有效滞尘、治沙防风的乡土与外来树种,为干旱区绿洲城市景观安全与健康发展提供有力保障。

参考文献:

[1] 杜敏华,张乃群,李玉英,等. 大气污染对城市绿化植物叶片叶绿素含量的影响[J]. 中国环境监测, 2007, **23**(2): 86-88.
DU M H, ZHANG N Q, LI Y Y, *et al.* Effect of atmosphere pollution on chlorophyll content in greening plant leaves[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, **23**(2): 86-88.

[2] 冯 强,胡 聃,王绍斌,等. 城市环境对城市植物影响的研究[J]. 安徽农业科学, 2007, **35**(35): 11 562-11 565.
FENG Q, HU D, WANG S B, *et al.* Study on the impacts of urban environment on urban plant[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, **35**(35): 11 562-11 565.

[3] KIM J, YOON S C, JEFFERSON A, *et al.* Aerosol hygroscopic properties during Asian dust, pollution, and biomass burning episodes at Gosan, Korea in April 2001[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(8): 1 550-1 560.

[4] 王 兵,鲁绍伟. 中国经济林生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(2): 417-425.
WANG B, LU S W. Evaluation of economic forest ecosystem services in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(2): 417-425.

[5] VERMA V, PAKBIN P, CHEUNG K L, *et al.* Physico-

4 结 论

不同树种单位叶面积滞尘量在 4 个粉尘污染程度不同的功能区存在明显差异,其中新疆杨单位叶面积滞尘量在各功能区都较高(平均为 1.45 g/m²),银杏滞尘量都较低(均值仅有 0.92 g/m²)。随着功能区粉尘污染的加重,10 种树种叶片 SPAD 值显著下降,渗透调节物质(脯氨酸、可溶性蛋白和可溶性糖)含量和细胞膜透性(MDA 和 Rec)均呈上升趋势,而抗氧化酶活性(SOD 和 POD)虽呈下降趋势、但下降率并不明显。其中,银杏和五角枫叶片滞尘量与各生理指标之间有显著相关关系,更适合作为生理检测城市粉尘污染环境的指示物。在 8 个生理指标综合评价的基础上,依据 4 个功能区不同树种滞尘能力与抗尘能力进行聚类分析的结果得知,新疆杨、紫丁香、山皂荚和臭椿等树种的滞尘能力和抗尘能力都较强。阜新市外来树种中新疆杨、紫叶李、臭椿等滞尘和抗尘能力都与乡土树种相当。从城市绿化角度来看,外来树种与乡土树种同样在各污染环境中表现出较强的适应能力,对环境污染不敏感。因此,在不造成生物入侵危害的前提下应该积极引进域外来树种,藉以丰富该地区的生物多样性以及提高城市空气质量。

chemical and oxidative characteristics of semi-volatile components of quasi-ultrafine particles in an urban atmosphere[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(4): 1 025-1 033.

[6] SIMKHOVICH B Z, KLEINMAN M T, KLONER R A. Air pollution and cardiovascular injury[J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2008, **52**(9): 719-726.

[7] 樊后保,臧润国. 女贞种子和幼苗对模拟酸雨的反应[J]. 林业科学, 2000, **36**(6): 90-94.
FAN H B, ZANG R G. Responses of seeds and seedlings of *Ligustrum lucidum* to simulated acid rain[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, **36**(6): 90-94.

[8] 高厚强,张晓玲. 合肥市大气污染对植物叶绿素(a,b)含量比例的影响[J]. 安徽农业科学, 2003, **31**(3): 367-368.
GAO H Q, ZHANG X L. Effect of atmosphere pollution in Hefei City on proportion of chlorophyll of plant leaf[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2003, **31**(3): 367-368.

[9] 苏 行,胡迪琴,林植芳,等. 广州市大气污染对两种绿化植物叶绿素荧光特性的影响[J]. 植物生态学报, 2002, **26**(5): 599-604.
SU X, HU D Q, LIN Z F, *et al.* Effect of air pollution on the chlorophyll fluorescence characters of two afforestation plants

- in Guangzhou[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, **26**(5): 599-604.
- [10] 彭长连,温达志,孙梓健,等.城市绿化植物对大气污染的响应[J].热带亚热带植物学报,2002,**10**(4): 321-327.
PENG C L, WEN D Z, SUN Z J, *et al.* Response of some plants for municipal greening to air pollutants[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, **10**(4): 321-327.
- [11] 刘荣坤,李世承. SO_2 对蓖麻叶质膜透性、叶绿素含量和花粉生长的影响[J].中国环境科学,1982,**9**(2): 39-45.
LIU R K, LI S C. Effects of SO_2 on membrane permeability, chlorophyll content and pollen growth of castor bean leaves[J]. *China Environmental Science*, 1982, **9**(2): 39-45.
- [12] 赵丽娟,陈文德,彭培好.重庆都市经济圈土壤重金属的分布和评价[J].天津农业科学,2008,**14**(4): 34-37.
ZHAO L J, CHEN W D, PENG P H. Distribution and evaluation of heavy metal in Chongqing metropolitan economic circle[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2008, **14**(4): 34-37.
- [13] 淑 敏,斯日木极,姜 涛,等.辽西北部主要绿化树种对空气颗粒物滞留能力研究[J].水土保持学报,2018,**32**(4): 297-309.
SHU M, SI R M J, JIANG T, *et al.* Research of retentive capacity of atmospheric particles for the main urban afforest plant species in Northwest of Liaoning Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, **32**(4): 297-309.
- [14] 丛者福. SO_2 气体对树木叶片叶绿素含量的影响[J].干旱环境监测,2000,**14**(3): 181-182, 190.
CONG Z F. The influence of SO_2 in air environment on chlorophyll content of tree leaf blade[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2000, **14**(3): 181-182, 190.
- [15] 冯兆忠,王效科,郑启伟,等.油菜叶片气体交换对 O_3 浓度和熏蒸方式的响应[J].生态学报,2006,**26**(3): 823-829.
FENG Z Z, WANG X K, ZHENG Q W, *et al.* Response of gas exchange of rape to ozone concentration and exposure regimes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(3): 823-829.
- [16] 黎 明,马焕成,李复秀,等.城市大气污染对云南拟单性木兰苗期气体交换及叶绿素荧光的影响[J].西北林学院学报,2005,**20**(2): 46-50.
LI M, MA H C, LI F X, *et al.* Effects of urban air pollution on air exchange behavior and chlorophyll fluorescence in leaves of *Parakmeria yunnanensis* seedlings [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2005, **20**(2): 46-50.
- [17] 刘 爽,王庆成,刘亚丽,等.土壤酸度对脂松苗木光合和叶绿素荧光的影响[J].应用生态学报,2009,**20**(12): 2 905-2 910.
LIU S, WANG Q C, LIU Y L, *et al.* Effects of soil acidity on *Pinus resinosa* seedlings photosynthesis and chlorophyll fluorescence[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, **20**(12): 2 905-2 910.
- [18] 曹 玲,王庆成,崔东海.土壤镉污染对四种阔叶树苗木叶绿素荧光特性和生长的影响[J].应用生态学报,2006, **17**(5): 769-772.
- CAO L, WANG Q C, CUI D H. Impact of soil cadmium contamination on chlorophyll fluorescence characters and biomass accumulation of four broad-leaved tree species seedlings [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, **17**(5): 769-772.
- [19] 温达志,朱剑云,曹洪麟,等.三种相思植物对短期大气污染的回应[J].生态科学,2002,**21**(4): 306-309.
WEN D Z, ZHU J Y, CAO H L. Responses of three acacia species seedlings exposed to short-term air pollution[J]. *Ecologic Sciences*, 2002, **21**(4): 306-309.
- [20] 任 引.遵义市城区行道树结构优化分析[D].南京:南京林业大学,2005.
- [21] 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]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, **23**(1): 187-192.
- [22] 温达志,孔国辉,张德强,等.30种园林植物对短期大气污染的生理生态反应[J].植物生态学报,2003,**27**(3): 311-317.
WEN D Z, KONG G H, ZHANG D Q, *et al.* Ecophysiological responses of 30 gardens plant species exposed to short-term air pollution[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(3): 311-317.
- [23] 王 凯,朱教君,于立忠,等.遮阴对黄波罗幼苗的光合特性及光能利用效率的影响[J].植物生态学报,2009, **33**(5): 1 003-1 012.
WANG K, ZHU J J, YU L Z, *et al.* Effects of shading on the photosynthetic characteristics and light use efficiency of *Phellodendron amurense* seedlings[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2009, **33**(5): 1 003-1 012.
- [24] 赵晶怡.9种园林树木抗旱性生理指标的测定及评价[D].山西临汾:山西师范大学,2012.
- [25] 刘 丹,陈保军,杨永贵,等.4种幼树对二氧化硫胁迫的抗性生理回应[J].西北植物学报,2013,**33**(12): 2 441-2 450.
LIU D, CHEN B J, YANG Y G, *et al.* Resistant physiological responses of four species young trees to sulfur dioxide stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, **33**(12): 2 441-2 450.
- [26] DATT B. A new reflectance index for remote sensing of chlorophyll content in higher plants: tests using *Eucalyptus* leaves[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1999, **154**(1): 30-36.
- [27] 王国霞,陈丽培,寇刘秀,等.高温胁迫对25个油茶品种渗透调节物质的影响[J].河南农业科学,2012,**41**(4): 59-62.
WANG G X, CHEN L P, KOU L X, *et al.* Effects of high temperature stress on osmotic adjustment substances of 25 varieties of *Camellia oleifera* [J]. *Journal of Henan Agricultural Science*, 2012, **41**(4): 59-62.
- [28] 刘志梅,蒋文伟,杨广远,等.干旱胁迫对3种金银花叶绿素荧光参数的影响[J].浙江农林大学学报,2012, **29**(4): 533-539.
LIU Z M, JIANG W W, YANG G Y, *et al.* Chlorophyll flu-

orescence parameters under drought stress in three plants of *Lonicera*[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 2012, **29**(4): 533-539.

[29] 夏宗良,刘全军,武 轲,等. 二氧化硫胁迫对玉米幼苗叶片膜脂过氧化和抗氧化酶的影响[J]. *玉米科学*, 2009, **17**(4): 51-54.

XIA Z L, LIU Q J, WU K, *et al.* Effects of sulfur dioxide hydrate stress on lipid peroxidation and activities of antioxidant enzymes in leaves of maize seedlings[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2009, **17**(4): 51-54.

[30] 李彦慧,李向应,白瑞琴,等. 4 种李属彩叶树木对 SO₂ 的抗性[J]. *林业科学*, 2008, **44**(2): 28-33.

LI Y H, LI X Y, BAI R Q, *et al.* Resistance to sulfur dioxide of four colored-leaf species in *Prunus*[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008, **44**(2): 28-33.

[31] 何绿萍,刘 耘,冯采芹. 城市绿地的防尘效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992.

[32] PRUSTY B A K, MISHRA P C, AZEEZ P A. Dust accumulation and leaf pigment content in vegetation near the national highway at Sambalpur, Orissa, India[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, **60**(2): 228-235.

[33] 王亚超. 城市植物叶面尘理化特性及源解析研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2007.

[34] 张 楠,贺学林,韩 英. 榆林市城区常绿针叶植物滞尘能力的研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, **37**(26): 12 519-12 520.

ZHANG N, HE X L, HAN Y. Study on the dust catching property of the evergreen coniferophyte in Yulin City[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, **37**(26): 12 519-12 520.

[35] 王蓉丽,方英姿,马 玲. 金华市主要城市园林植物综合滞尘能力的研究[J]. *浙江农业科学*, 2009, **50**(3): 574-577.

WANG R L, FANG Y Z, MA L. Study on comprehensive dust catching property of garden plants in Jinhua City[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2009, **50**(3): 574-577.

[36] 刘 洋. 盘锦市农村生态环境污染现状及防治措施[J]. *现代农业科技*, 2011, (6): 308-310.

LIU Y. Pollution situation and control countermeasures of rural ecological environment in Panjin city[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2011, (6): 308-310.

[37] 陈志成. 8 个树种对干旱胁迫的生理回应及抗旱性评价[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2013.

[38] 黄靖懿,黄 泽,刘慧婧,等. 哈尔滨市 12 种常见树木的滞尘能力比较[J]. *江苏农业科学*, 2017, **45**(8): 117-121.

HUANG J Y, HUANG Z, LIU H J, *et al.* Comparison of dust retention ability of 12 common trees in Harbin City[J]. *Journal of Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, **45**(8): 117-121.

[39] 周春玲,王远森,邹助熊,等. 叶女贞对 3 种粉尘滞留及蒙尘后生理响应[J]. *湖北农业科学*, 2014, **53**(2): 369-372.

ZHOU C L, WANG Y S, ZOU Z X. Physiological response of *Ligustrum vicaryi* to three types of dust retention and dust[J]. *Journal of Hubei Agricultural Sciences*, 2014, **53**(2): 369-372.

[40] 狄丽英. 环境污染与绿化植物的选择[J]. *山西农业科学*, 2007, **35**(12): 113-114.

DI L Y. Environment pollution and green plant choice[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2007, **35**(12): 113-114.

[41] 赵丽英,王 伟,宋玉伟. 土壤水分胁迫下油菜光合特性变化和膜伤害研究[J]. *河南农业科学*, 2010, (8): 33-35.

ZHAO L Y, WANG W, SONG Y W. Changes of photosynthesis and membrane damage of *Brassica napus* L. under soil water stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2010, (8): 33-35.

[42] 张 倩,何 婧,王 桢,等. 中华芦荟在不同胁迫下的丙二醛和可溶性糖含量的变化[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2009, **35**(2): 290-292.

ZHANG Q, HE J, WANG Z, *et al.* The changes of the contents of malonaldehyde and soluble sugar under the various stress in *Aloe vera* L. var *chinensis* (Haw.) [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities* (Natural Science Edition), 2009, **35**(2): 290-292.

[43] 薛 亮,高 暝,史胜青,等. 四种抗污染木本植物对镉的生理响应及积累特征研究[J]. *生态环境学报*, 2014, **23**(8): 1 344-1 350.

XUE L, GAO M, SHI S Q, *etal.* Physiological response and accumulation characters of four anti-pollution woody plants under antimony stress[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(8): 1 344-1 350.

[44] 吴 芹,张光灿,裴 斌,等. 3 个树种对不同程度土壤干旱的生理生化响应[J]. *生态学报*, 2013, **33**(12): 3 648-3 656.

WU Q, ZHANG G C, PEI B, *et al.* Physiological and biochemical responses to different soil drought stress in three tree species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(12): 3 648-3 656.

(编辑:裴阿卫)