

基于PEG胁迫的美丽异木棉等园林景观树种抗旱性评价*

陈水钦^{1,2} 叶龙华³ 莫云豹³ 陈新宇¹
张卫华¹ 潘文¹ 朱报著¹

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东广州 510520;
2. 仲恺农业工程学院农业与生物学院, 广东广州 510225; 3. 广东省林业科技推广总站, 广东广州 510173)

摘要 为探究水分胁迫对南方常用园林景观树种生理特性的影响, 文章以美丽异木棉 *Ceiba speciosa* 等 27 种南方常用园林树种为材料, 采用 PEG 水分胁迫模拟干旱处理, 设置轻度、中度、重度 3 种胁迫方式, 测定其相对电导率、相对含水量以及相对水分亏缺生理指标, 进行抗旱性评价。结果表明, 随着干旱胁迫程度的增加, 27 个树种叶片相对电导率值呈增加趋势; 在轻度胁迫下, 不同处理时间间无显著差异, 而 27 个树种间差异达到极显著 ($P < 0.01$); 中度胁迫下, 27 个树种间差异达到极显著 ($P < 0.01$), 不同处理时间间达到显著 ($P < 0.05$); 当胁迫程度达到重度时, 树种间和不同处理间均达到极显著差异 ($P < 0.01$)。选取相对含水量和相对水分亏缺指标, 采用模糊隶属函数值法综合评价了 27 个树种的抗旱性。在园林植物耐旱、节水配置中可以优选穗花棋盘脚 *Barringtonia racemosa*、蓝花楹 *Jacaranda mimosifolia*、黄槐 *Cassia surattensis*、红花荷 *Rhodoleia championii*、蓝花风铃木 *Tabebuia impetiginosa*、杜鹃红山茶 *Camellia azalea*、深山含笑 *Michelia maudiae*、本地木棉 *Bombax malabaricum*、美花红千层 *Callistemon citrinus*、澳洲火焰木 *Brachychiton acerifolius* 等树种。

关键词 园林景观树种; 生理特性; 抗旱性

中图分类号: S792 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2021) 02-0040-07

Drought Resistance Evaluation of *Ceiba speciosa* and Other Landscape Tree Species Based on PEG Stress

CHEN Shuiqin^{1, 2} YE Longhua³ MO Yunbao³ CHEN Xinyu¹
ZHANG Weihua¹ PAN Wen¹ ZHU Baozhu¹

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. College of Agriculture and Biology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou, Guangdong 510225, China; 3. Guangdong Provincial Forestry Technology Extension Station, Guangzhou, Guangdong 510173, China)

Abstract In order to explore the effect of water stress on physiological characteristics of landscape tree species in South China, drought resistance was evaluated. Twenty seven landscape tree species in South China, such as *Ceiba speciosa*, were used to simulate drought treatment under PEG water stress. Three stress modes, namely mild, moderate and severe, were set up to measure the relative electrical conductivity, relative water content and relative water deficit physiological indexes. The results showed that the relative electrical

* 基金项目: 广东省科技计划项目 (2016A020206011)。

第一作者: 陈水钦 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为林木遗传改良, E-mail: chenshuiqing95@163.com。

通信作者: 张卫华 (1977—), 女, (教授级) 高级工程师, 主要从事林木遗传改良工作, E-mail: zwh523@sinogaf.cn。

conductivity of 27 tree species increased with the increase of stress degree. Under mild stress, there was no significant difference among different treatment time, but the difference among 27 tree species reached extremely significant. Under moderate stress, the difference between 27 tree species reached extremely significant ($P < 0.01$), and reached significant between different treatment time ($P < 0.05$). When the stress degree reached severe stress, the difference was significant. There were significant differences among tree species and different treatments. According to the relative water content and relative water deficit, the drought resistance of 27 tree species was comprehensively evaluated by fuzzy membership function value method. In the drought resistant and water-saving configuration of garden plants, we can select some tree species, such as *Barringtonia racemosa*、*Jacaranda mimosifolia*、*Cassia surattensis*、*Rhodoleia championii*、*Tabebuia impetiginosa*、*Camellia azalea*、*Michelia maudiae*、*Bombax malabaricum*、*Callistemon citrinus* and *Brachychiton acerifolius*.

Key words landscape tree species; physiological characteristics; drought resistance

水分是树木生产及正常生长代谢的基础^[1-2], 全世界约有 1/3 的土地面积属于干旱和半干旱区域, 而我国的干旱半干旱地区约占全国土地面积的 1/2^[3]。由于环境恶化, 我国可利用的水资源快速减少, 干旱现象日益严重^[4]。干旱是严重影响植物生长发育的重要环境胁迫因子之一^[5]。干旱胁迫已经成为植物生长的主要限制因素^[6]。近年来, 城市绿地面积不断增加, 城市绿化用水量不断攀升, 城市绿化用水与水资源紧张的矛盾也日趋突出, 使用节水、耐旱园林树种是节约用水的有效途径, 也是建设节水型城市绿地的最直接、有效的方式^[7]。北方对园林植物的抗旱性研究起步较早, 对五角枫 *Acer truncatum*、紫叶小檗 *Berberis thunbergii*、紫丁香 *Syringa oblata* 等 73 种常用园林树木分析了抗旱性强弱^[8-10]。相比于北方树种, 南方地区的园林树种抗旱研究存在树种偏少、分析方法简单等现状, 主要集中在紫荆 *Cercis chinensis*、紫薇 *Lagerstroemia indica*^[11-12] 等树种, 远远无法满足目前抗旱园林绿化树种需求。另外, 所有园林植物对水分胁迫都有一定的耐受性, 但园林树木的抗旱性程度随物种不同有所差异^[13], 因此本研究以南方常用的 27 个园林树种为研究对象, 开展 PEG 水分胁迫模拟干旱处理, 测定了不同胁迫程度以及不同胁迫时间下生理指标的变化, 综合评价抗旱能力, 以期在城市绿化提供抗旱树种, 提升绿地持有量。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验地在广东省林业科学研究院苗圃

(23°36'5"N、113°9'35"E) 内进行, 该地属亚热带季风性气候类型, 年平均年降水量 2 015 mm, 平均相对湿度为 69%。7—9 月气温较高, 平均最高气温可达 32.8℃, 平均年日照时数为 1 636.8 h, 年平均气温 22.3℃。

1.2 试验材料

采用播种育苗, 选取生长健壮, 苗高相对一致的美丽异木棉 *Ceiba speciosa*、黄花风铃木 *Handroanthus chrysanthus*、蓝花风铃木 *Tabebuia impetiginosa*、金花风铃木 *Tabebuia autea*、火焰木 *Spathodea campanulata*、蓝花楹 *Jacaranda mimosifolia*、本地木棉 *Bombax malabaricum*、广宁红花油茶 *Camellia semiserrata*、杜鹃红山茶 *Camellia azalea*、小叶紫薇 *Lagerstroemia indica*、大叶紫薇 *Lagerstroemia speciosa*、黄槐 *Cassia surattensis*、无忧树 *Saraca asoca*、宫粉羊蹄甲 *Bauhinia variegata*、红花羊蹄甲 *Bauhinia blakeana*、铁刀木 *Cassia siamea*、腊肠树 *Cassia fistula*、仪花 *Lysidice rhodostegia*、凤凰木 *Delonix regia*、穗花棋盘脚 *Barringtonia racemosa*、美花红千层 *Callistemon citrinus*、深山含笑 *Michelia maudiae*、樱花 *Prunus serrulata*、红花银桦 *Grevillea banksii*、国庆花 *Koelreuteria bipinnata*、澳洲火焰木 *Brachychiton acerifolius*、红花荷 *Rhodoleia championii* 27 种木本花卉为材料, 株高 30 cm。

1.3 试验方法

采用 PEG 水分胁迫来模拟干旱处理, 每个树种选取 3 株生长较为一致的健壮苗木, 进行水分胁迫处理, 以单株为 1 个重复, 共计 3 次重复。先在 1/2 Hoagland 营养液中过渡 2 d, 然后用 1/2

Hoagland 营养液和汕头华大进口分装的聚乙二醇 6 000 (Polyethylene glycol 6 000) 配制以下渗透势的溶液: 0 MPa (CK), -0.3 MPa (相当于 PEG-6 000 含量 50 g/L), -0.5 MPa (相当于 PEG-6 000 含量 150 g/L), -2.0 MPa (相当于 PEG-6 000 含量 300 g/L)。在实验室把苗木洗净后放入不同渗透势的 PEG 溶液中, 分别进行轻度胁迫、中度胁迫、重度胁迫水分处理, 每种胁迫分别处理 12、24、36 h, 同时以不加 PEG 的 1/2 Hoagland 营养液中的苗木作为对照。各处理均在实验室内进行, 室内温度为 26 ℃左右, 相对湿度为 75%~85%。不同树种、处理的相同指标均选择早上 8:00 时同时取样进行指标测定。

1.4 测定方法

1.4.1 电导率测定 取幼苗第 2~6 片展开叶 (自上而下数), 取样后将叶片先用自来水冲洗除去表面污物, 然后用去离子水冲洗 2 遍, 再用滤纸吸干叶片表面水分, 避开主叶脉, 用打孔器打取 3 个直径为 0.8 cm 的圆片, 用去离子水冲洗 3 次, 放入内有 20 mL 去离子水的三角瓶中, 室温放置 15 h, 用电导仪 (DDS-307 型) 在室温下测定溶液的电导率值 (R), 再盖上瓶盖, 在富华仪器有限公司生产的 420 型三用水箱中沸水浴 30 min, 将组织全部杀死后冷却至室温, 在同样的条件下测定各瓶溶液的电导率值 (R_1), 以叶片杀死前的电导率占杀死后的电导率的百分数来表示膜的相对透性。

$$\text{相对电导率} = R/R_1 \times 100$$

1.4.2 相对含水量 (RWC) 和相对水分亏缺 (RWD) 测定 采样后称取鲜叶质量后用蒸馏水浸泡叶片 24 h, 然后称饱和鲜质量, 最后在 105 ℃下烘 8 h 称干质量, 根据公式计算: $RWC = (\text{鲜叶质量} - \text{干质量}) / (\text{饱和鲜质量} - \text{干质量}) \times 100$, $RWD = (1 - RWC) \times 100$ 。

1.5 数据分析

数据采用 Excel 2007 和 SPSS 软件分析。本文的条形图使用 R 语言 ggplot2 包绘制, 系统聚类图使用 R 语言基础包绘制, R 语言版本为 4.0.2^[4]。

采用多维空间 (欧几米德) En 多向量理论综合评定抗旱性, 在每一个指标中找出最大的标准值, 用其做除数分别除其他各数值, 求得的商构成“矩阵坐标表”, 然后根据公式 $P_i^2 = (1 - a_{ij})^2$ (P : “矩阵坐标表”中商的离差; a : 矩阵坐标; $i: 1 \sim 27$; $j: 1 \sim 2$) 计算离差平方, 最后按横行将各指

标的离差平方求和, 根据离差平方和的大小排出评价序号。

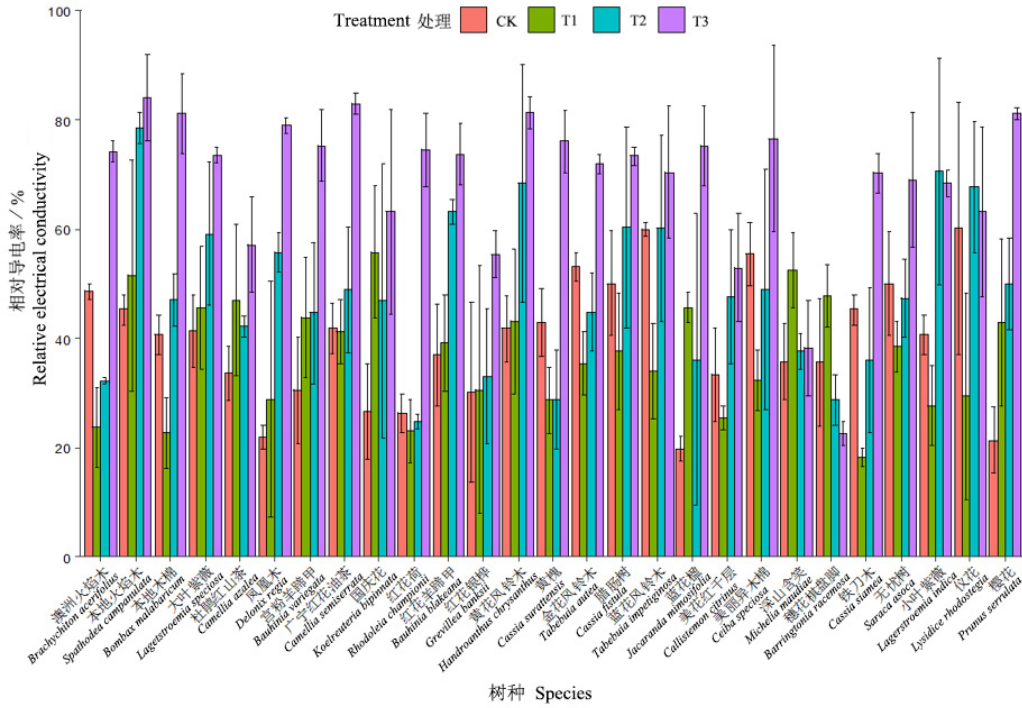
2 结果与分析

2.1 水分胁迫对生长状况的影响

27 个树种幼苗经轻度、中度、重度水分胁迫后, 通过外部生长状况比较可以看出, 在轻度水分胁迫下, 各树种生长状况差异不明显, 都能正常生长; 在中度水分胁迫下, 27 个树种表现各异, 出现不同程度的失水状态, 其中黄花风铃木、金花风铃木、本地木棉叶片萎蔫, 变枯黄, 穗花棋盘脚、美花红千层、红花银桦、蓝花风铃木、澳洲火焰木、红花荷、国庆花、蓝花楹正常生长; 在重度胁迫下, 大部分树种叶片萎蔫严重, 胁迫处理 10 d 后穗花棋盘脚、红花荷、深山含笑、红千层、红花银桦、蓝花风铃木、澳洲火焰木生长正常, 其他树种出现死亡。由此可见, 从外部形态对水分胁迫的耐受能力上来看, 穗花棋盘脚、红花荷、深山含笑、美花红千层、红花银桦、蓝花风铃木、澳洲火焰木具有较高的耐旱能力。

2.2 水分胁迫对相对电导率的影响

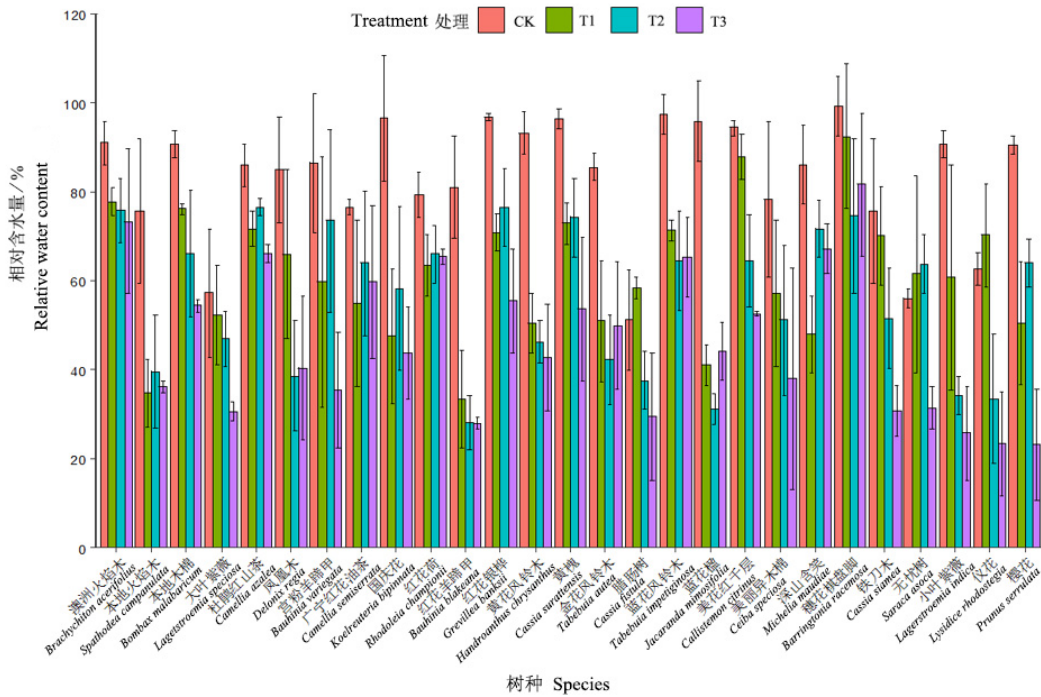
细胞膜是细胞与环境进行物质交换的主要通道, 对维持细胞微环境和正常代谢起着非常重要的作用, 逆境条件下的细胞膜相对电导率 (relative electrical conductivity, REC) 反映了膜的稳定性。相对电导率方差分析表明, 27 个树种之间和不同处理间以及树种和处理的交互作用都达到了极显著差异 ($P < 0.01$)。同时对电导率值进行分析, 由图 1 看出, 随着胁迫程度的增加, 27 个树种叶片的相对电导率值均呈增加趋势。没有进行水分胁迫时, 27 个树种叶片相对电导率介于 21.912%~59.977% 之间, 经轻度水分胁迫时, 大多数树种出现相对电导率降低的现象, 说明在树种在遭受胁迫初期, 对于干旱胁迫产生一定的防疫反应, 使细胞膜得到修复, 但是随着胁迫程度的逐渐加深, 电导率迅速增大, 质膜进一步破坏, 叶片也出现萎蔫水渍状。中度水分胁迫后, 27 个树种的相对电导率值显著增加, 分别是对照的 1.64、1.00、0.84、1.73、1.83、1.16、0.88、1.17、1.26、1.74、1.43、0.67、0.95、1.13、1.71、0.80、1.20、1.13、2.54、0.81、1.43、1.06、2.35、1.10、1.76、0.66、0.94 倍, 其中凤凰木和樱花和对照相比, 增加到 2 倍以上, 说明其细胞膜已经遭到较大破坏。



注：图中误差线为标准差 (n=3)。
 Note: the error bar is standard error (n=3) .

图 1 不同水分胁迫处理对园林植物叶片相对电导率的影响

Fig. 1 Effects of different water stress treatments on relative electrical conductivity of garden plant leaves



注：图中误差线为标准差 (n=3)。
 Note: the error bar is standard error (n=3) .

图 2 不同水分胁迫处理对园林植物叶片相对含水量的影响

Fig. 2 Effects of different water stress treatments on relative water content of garden plant leaves

黄槐、澳洲火焰木、穗花棋盘脚、红花荷、铁刀木、金花风铃木、美丽异木棉、无忧树 8 个树种的叶片相对电导率和对照相比,增加的倍数小于 1,其中澳洲火焰木和黄槐仅增加 0.66 倍和 0.67 倍。当进行重度胁迫后,叶片电导率值增加到 50% 以上,和对照相比樱花增加到 3.5 倍,凤凰木 3.8 倍,穗花棋盘脚表现出较强的耐受能力。

2.3 水分胁迫对相对含水量的影响

对 27 个树种不同胁迫处理下的相对含水量进行方差分析表明,27 个树种之间和不同处理间

以及树种和处理的交互作用都达到了极显著差异 ($P < 0.01$)。

从图 2 可以看出,未进行水分胁迫时,27 个树种叶片相对含水量都高于 70%,水分胁迫后 27 个树种的 RWC 值都有所降低,严重水分胁迫后,27 个树种叶片相对含水量显著下降,其中红花荷下降了 13.949%,澳洲火焰木下降了 17.641%,说明具有较高的抗脱水能力,樱花失水最快,严重胁迫后失水达到 67%,将 27 个树种抗脱水能力从高到底进行排序为红花荷 > 广宁红花油茶 > 澳洲

表 4 抗旱能力综合评定 Tab. 4 Comprehensive evaluation of drought resistance

树种 Species	相对电导率 REC	相对含水量 RWC	离差平方和 SS	排序 Number
黄花风铃木 <i>Handroanthus chrysanthus</i>	0.076	0.218	0.294	23
蓝花风铃木 <i>Tabebuia impetiginosa</i>	0.005	0.120	0.125	13
金花风铃木 <i>Tabebuia autea</i>	0.083	0.154	0.237	19
本地火焰木 <i>Spathodea campanulata</i>	0.177	0.398	0.575	27
蓝花楹 <i>Jacaranda mimosifolia</i>	0.04	0.065	0.105	9
本地木棉 <i>Bombax malabaricum</i>	0.011	0.057	0.068	7
美丽异木棉 <i>Ceiba speciosa</i>	0.091	0.178	0.269	22
广宁红花油茶 <i>Camellia semiserrata</i>	0.030	0.122	0.152	14
杜鹃红山茶 <i>Camellia azalea</i>	0.010	0.038	0.048	5
小叶紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	0.063	0.137	0.200	16
大叶紫薇 <i>Lagerstroemia speciosa</i>	0.120	0.222	0.343	24
黄槐 <i>Cassia surattensis</i>	0.040	0.065	0.104	8
无忧树 <i>Saraca asoca</i>	0.066	0.136	0.202	15
宫粉羊蹄甲 <i>Bauhinia variegata</i>	0.121	0.140	0.261	18
红花羊蹄甲 <i>Bauhinia blakeana</i>	0.082	0.169	0.25	20
铁刀木 <i>Cassia siamea</i>	0.084	0.102	0.186	12
腊肠树 <i>Cassia fistula</i>	0.205	0.311	0.516	26
仪花 <i>Lysidice rhodostegia</i>	0.158	0.262	0.419	25
凤凰木 <i>Delonix regia</i>	0.067	0.104	0.171	11
穗花棋盘脚 <i>Barringtonia racemosa</i>	0.000	0.000	0.000	1
美花红千层 <i>Callistemon citrinus</i>	0.005	0.013	0.018	2
深山含笑 <i>Michelia maudiae</i>	0.023	0.035	0.058	4
樱花 <i>Prunus serrulata</i>	0.084	0.137	0.221	17
红花银桦 <i>Grevillea banksii</i>	0.067	0.099	0.166	10
国庆花 <i>Koelreuteria bipinnata</i>	0.122	0.170	0.292	21
澳洲火焰木 <i>Brachychiton acerifolius</i>	0.000	0.027	0.028	3
红花荷 <i>Rhodoleia championii</i>	0.045	0.048	0.093	6

火焰木 > 红花银桦 > 深山含笑 > 杜鹃红山茶 > 腊肠树 > 穗花棋盘脚 > 无忧树 > 大叶紫薇 > 蓝花风铃木 > 金花风铃木 > 本地木棉 > 仪花 > 本地火焰木 > 美丽异木棉 > 美花红千层 > 黄槐 > 铁刀木 > 黄花风铃木 > 宫粉羊蹄甲 > 蓝花楹 > 红花羊蹄甲 > 凤凰木 > 国庆花 > 小叶紫薇 > 樱花。

2.4 水分持续胁迫对相对电导率和相对含水量的影响

对不同胁迫处理分别处理 12、24、36 h 后,测定各处理下的 27 个树种的相对电导率和相对含水量。通过对同一胁迫处理下不同处理时间进行方差分析表明,在轻度胁迫下,不同处理时间无显著差异,而 27 个树种间差异达到极显著 ($P < 0.01$); 中度胁迫下,27 个树种间差异达到极显著,不同处理时间达到显著 ($P < 0.05$),说明随着胁迫程度的加深,27 个树种胁迫不同时间,表现出不同的耐受力;当胁迫程度达到重度胁迫时,树种间和不同处理间均达到极显著差异。

2.5 抗旱能力综合评估

采用多维空间(欧几米德)En 多向量理论综合评定 27 个树种的抗旱性,根据离差平方和大小排出评价序号。离差平方和的值越小说明抗旱能力强,反之则树种抗旱性差。将 27 个树种不同处理水平下的值取平均值,计算离差平方和进行抗旱性的综合排序,见表 4。

从表 4 可知,27 个树种的抗旱性能力大小排序为:穗花棋盘脚 > 美花红千层 > 澳洲火焰木 > 深山含笑 > 杜鹃红山茶 > 红花荷 > 本地木棉 > 黄槐 > 蓝花楹 > 红花银桦 > 凤凰木 > 铁刀木 > 蓝花风铃木 > 广宁红花油茶 > 无忧树 > 小叶紫薇 > 樱花 > 宫粉羊蹄甲 > 金花风铃木 > 红花羊蹄甲 > 国庆花 > 美丽异木棉 > 黄花风铃木 > 大叶紫薇 > 仪花 > 腊肠树 > 本地火焰木。

3 结论与讨论

植物抗旱性是通过抗旱鉴定指标来体现的,以生理生化指标开展抗旱性研究是最为活跃的领域。所涉及的指标较多,包括水分生理指标(叶水势、相对水分亏缺、叶持水力 P-V 技术测出的各种水分参数)、膜透性、根系活力、酶活性、渗透调节物质、净光合速率、水分利用效率、干旱

条件下的荧光特性等。目前许多学者对于抗旱性鉴定的生理生化指标做了大量的研究^[15-17]。耿云红^[16]研究表明植物叶片电解质损失超过 50% 后,即使恢复水分供应,植物也将会受到永久损伤导致无法完全恢复。同时原生质膜透性对逆境反应较为敏感,在许多逆境条件下均观察到膜透性增大。逆境条件下的膜透性可以反映了膜的稳定性。通过判别植物组织受伤害程度,测定在水分胁迫下的电解质渗出率的变化程度来鉴别其抗旱性的研究已有很多报道^[19-20]。对植物抗旱生理尤其水分生理的研究表明,相对含水量、叶片保水力、束缚水含量以及束缚水/自由水是评价植物抗旱性强弱的重要指标^[21-25];张卫华等^[26]利用主成分分析确定了 9 个指标对抗旱性的贡献率,表明影响相思抗旱性的主要原因是与渗透调节有关的相对电导率、相对含水量、自然水分亏缺和可溶性糖、游离脯氨酸 5 个指标,其中相对电导率、相对含水量、自然水分亏缺可以作为研究抗旱性的主要指标。本文研究结果得出同样的结论,在干旱胁迫下,抗旱性强的植物可保持较高的组织含水量。相对电导率、相对含水量^[27]、自然水分亏缺^[28]等植物的水分生理指标是判别植物抗旱性强弱的重要依据。

27 个树种的抗旱性能力大小排序为:穗花棋盘脚 > 美花红千层 > 澳洲火焰木 > 深山含笑 > 杜鹃红山茶 > 红花荷 > 本地木棉 > 黄槐 > 蓝花楹 > 红花银桦 > 凤凰木 > 铁刀木 > 蓝花风铃木 > 广宁红花油茶 > 无忧树 > 小叶紫薇 > 樱花 > 宫粉羊蹄甲 > 金花风铃木 > 红花羊蹄甲 > 国庆花 > 美丽异木棉 > 黄花风铃木 > 大叶紫薇 > 仪花 > 腊肠树 > 本地火焰木。深圳市日昇园林绿化有限公司测定了香樟、火力楠、美丽异木棉等 12 个园林树种的净光合速率等指标进行抗旱性评价,结果显示美丽异木棉、大叶紫薇等抗旱性较差^[11];田治国等^[29]对紫薇、银杏、紫叶李等 9 种乔木抗旱性研究显示紫薇的抗旱性最差,均与本试验结果一致。因此,在园林植物耐旱、节水配置中可以优选穗花棋盘脚、蓝花楹、黄槐、红花荷、蓝花风铃木、杜鹃红山茶、深山含笑、本地木棉、美花红千层、澳洲火焰木等树种。

参考文献

- [1] 陈明涛, 赵忠. 干旱对4种苗木根系特征及各部分物种分配的影响[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(1): 16-22.
- [2] 陈闻, 赵颖, 叶正钱, 等. 干旱胁迫对5个海岛树种生长及生理特性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(4): 490-498.
- [3] 任磊, 赵夏陆, 许靖, 等. 4种茶菊对干旱胁迫的形态和生理响应[J]. 生态学报, 2015, 35(15): 5131-5139.
- [4] 宋新山, 邓伟, 闫百兴, 等. 我国可持续发展中的水资源问题及对策[J]. 国土与自然资源研究, 2001(1): 1-4.
- [5] 万东石, 李红玉, 张立新, 等. 植物体内干旱信号的传递与基因表达[J]. 西北植物学报, 2003, 23(1): 151-157.
- [6] 陈立明, 尹艳豹. 干旱区园林植物抗旱机制研究进展[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(4): 73-76.
- [7] 韩若霜. 呼和浩特几种园林树木水分生理特性及耐旱性评价[D]. 包头: 内蒙古农业大学, 2014.
- [8] 何丹丹. 73种园林树木抗旱性的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
- [9] 韩若霜, 王林和, 张国胜, 等. 13种园林树木PV曲线水分参数的比较[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(7): 134-139.
- [10] 赵晶怡. 9种园林树木抗旱性生理指标的测定及评价[D]. 临汾: 山西师范大学, 2012.
- [11] 王岚, 安勤颖, 王自在, 等. 12种绿化乔木苗期抗旱性评价[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(7): 1279-1283.
- [12] 陈嘉欣, 张玲玲, 张国庆, 等. 6种园林植物耐旱性分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(3): 310-316.
- [13] 王斌, 杨秀珍, 戴思兰. 4种园林树木抗旱性的综合分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 95-102.
- [14] 林元震. R与ASReml-R统计学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2016: 381-415.
- [15] 郭连生, 田有亮. 对几种针阔叶树种耐旱性生理指标的研究[J]. 林业科学, 1989, 25(5): 389-394.
- [16] 李吉跃. 太行山区主要造林树种耐旱特性的研究(Ⅲ~Ⅵ)[J]. 北京林业大学学报, 1991, 13(增2): 230-279.
- [17] GLYNN C P, COLIN N S. Identification of drought tolerant woody perennials using chlorophyll II fluorescence[J]. J. of Arboriculture, 2002, 28(5): 215-221.
- [18] 耿云红. 干旱胁迫对绿化木本植物抗逆性研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(1): 15-21.
- [19] LIN K H, TSOU C C, HWANG S Y, et al. Paclobutrazol pretreatment enhanced flooding tolerance of sweet potato[J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163(7): 750-760.
- [20] 王育红, 姚宇卿, 张灿军, 等. 旱稻抗旱性鉴定方法与指标研究[J]. 干旱地区农业研究, 2005, 23(4): 134-137.
- [21] 何丹丹, 张文革, 郭太君, 等. 75种园林树木水分生理特性与抗旱性研究[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(1): 116-121.
- [22] 刘君娣, 王有科, 贺春燕, 等. 三个杏品种叶片主要抗旱生理指标的比较[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(6): 71-75.
- [23] 何海燕, 许国辉, 马国强, 等. 青海东部主要造林树种的水分生理研究[J]. 西北林学院学报, 2003, 18(2): 9-12.
- [24] 朱春云, 赵越, 刘霞, 等. 锦鸡儿等旱生树种抗旱生理的研究[J]. 干旱区研究, 1996, 13(1): 59-63.
- [25] 阮成江, 李代琼, 姜峻, 等. 半干旱黄土丘陵区沙棘的水分生理生态及群落特性研究[J]. 西北植物学报, 2000, 20(4): 621-627.
- [26] 张卫华, 张方秋, 张守攻, 等. 3种相思幼苗抗旱性研究[J]. 林业科学研究, 2005, 18(6): 695-700.
- [27] 王佳嵩, 王健恩, 罗先强, 等. 3种华南乡土地被植物的耐旱性研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(1): 91-98.
- [28] 刘伟新, 郑会全, 胡德活, 等. PEG6000模拟水分胁迫对杉木家系苗木生理生化指标的影响[J]. 林业与环境科学, 2018, 34(2): 19-24.
- [29] 田治国, 杨艳, 王飞. 九种园林乔木对自然失水胁迫的生理响应[J]. 北方园艺, 2017(2): 67-71.