

6 种园林植物耐旱性分析

陈嘉欣^{1,2}, 张玲玲¹, 张国庆³, 张超³, 甄伟磊³, 刘东明^{1*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广州 510642; 3. 河北曲港高速公路开发有限公司, 河北 定州 073000)

摘要: 为选择耐旱性较强的园林绿化植物, 选择 6 种常见的园林植物: 金银木(*Lonicera maackii*)、紫荆(*Cercis chinensis*)、紫薇(*Lagerstroemia indica*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和构树(*Broussonetia papyrifera*), 进行盆栽控水试验, 对植株外观形态和土壤含水率、叶片叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)含量进行比较。结果表明, 随干旱胁迫时间的延长, 土壤含水量均呈下降趋势, 金银木、胡枝子和荆条的长势较好; 紫薇、紫荆和构树出现叶片萎蔫、掉落现象, 6 种植物叶片的光合色素含量呈先上升后下降的趋势, 除紫薇外, SOD 活性总体均呈上升趋势, MDA 含量持续上升。可见, 金银木、胡枝子和荆条的耐旱性较强, 紫薇、紫荆和构树的耐旱性较弱。

关键词: 园林植物; 耐旱性; 干旱胁迫; 道路绿化

doi: 10.11926/jtsb.4128

Drought Tolerance of Six Garden Species

CHEN Jia-xin^{1,2}, ZHANG Ling-ling¹, ZHANG Guo-qing³, ZHANG Chao³, ZHEN Wei-lei³, LIU Dong-ming^{1*}

(1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Hebei qugang Expressway Development Co., Ltd., Dingzhou 073000, Hebei, China)

Abstract: In order to select garden species with strong drought tolerance, six common garden species, such as *Lonicera maackii*, *Cercis chinensis*, *Lagerstroemia indica*, *Vitex negundo* var. *heterophylla*, *Lespedeza bicolor*, and *Broussonetia papyrifera*, were used by water control test in pots, and the morphology, soil water content, contents of chlorophyll and propylene dialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD) activity in leaves were studied. The results showed that soil water content decreased with the extension of drought stress time. The growth of *Lonicera maackii*, *Lespedeza bicolor* and *V. negundo* var. *heterophylla* look like better, while that of *Lagerstroemia indica*, *C. chinensis* and *B. papyrifera* showed wilting and falling. Photosynthesis pigment contents of six species rose at first and then fall, the activity of SOD showed general upward trend except for *Lagerstroemia indica*, and the content of MDA rose continuously under drought stress. Therefore, the drought resistance of *Lonicera maackii*, *Lespedeza bicolor* and *V. negundo* var. *heterophylla* is strong, and that of *Lagerstroemia indica*, *C. chinensis* and *B. papyrifera* is weak.

Key words: Garden species; Drought resistance; Drought stress; Road greening

植被是陆地生态系统的重要组成部分, 在调节全球和区域气候、维持生态环境健康等方面发挥至关重要的作用。随着我国高速公路建设的不断发

展, 高速公路沿线及其周边的生态环境质量日益受到人们的重视。至 2018 年底我国高速公路通车里程已达 1.4×10^5 km, 然而由于部分园林植物无法适

收稿日期: 2019-08-13 接受日期: 2020-01-09

基金项目: 河北省交通运输厅科技攻关项目(QG2018-10)资助

This work was supported by the Project for Science and Technology of Department of Communications and Transportation of Hebei Provincial (Grant No. QG2018-10).

作者简介: 陈嘉欣, 硕士研究生, 主要从事园林植物应用研究。E-mail: 632207570@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: liudm@scbg.ac.cn

应高速公路路域干旱贫瘠环境致使其生长不良甚至枯死,因此,我国高速公路绿化景观普遍存在树种选择单调、造景形象单一等问题。我国大部分地区的高速公路都存在季节性干旱、风大、高污染环境特点^[1],其中限制植物生长的最重要因素之一就是季节性干旱,因此通过植物的耐旱性试验,筛选出适宜栽植于高速公路绿化区域的耐旱植物就显得尤为重要,选用耐旱性较强的植物对于减轻用水压力、改善公路绿化景观具有十分重要的意义,同时也有利于高速公路长远的发展。

对于植物耐旱性已从不同方面进行了研究,超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)含量等与植物耐旱性有密切关系,能有效清除 O_2^- 、 $OH\cdot$ 、 H_2O_2 等自由基,防御膜脂过氧化,从而达到保护细胞膜的作用^[2]。叶绿素在植物光合作用中将光能转化为化学能,其含量的多少反映植物光合作用的强弱,植物遭遇干旱胁迫时叶绿素合成受抑制,最终导致植物叶片变黄、萎蔫。类胡萝卜素作为一种辅助色素也具有抗氧化的作用,因此常用叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)和类胡萝卜素(Car)含量变化反映植物受胁迫的程度。然而植物对于干旱胁迫的响应和适应是多方面的,仅从某一个或几个指标来鉴定植物的耐旱性有一定局限性^[3],因此对树木耐旱性强弱的判定常需要测定多个指标综合评价植物的耐旱性。采用多指标进行综合评价可以消除个别指标带来的片面性,提高筛选的可靠性。

本文运用盆栽控水试验法,对金银木(*Lonicera maackii*)、紫荆(*Cercis chinensis*)、紫薇(*Lagerstroemia indica*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和构树(*Broussonetia papyrifera*)共6种常见园林植物进行自然干旱,观察植株形态和土壤含水率的变化,并对叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量进行测量,对6种植物的耐旱性进行综合评价,以期在高速公路绿化建设中科学合理地选择耐旱性强、观赏性好的植物种类提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

选用3 a生的金银木(*Lonicera maackii*)、紫荆(*Cercis chinensis*)、紫薇(*Lagerstroemia indica*)、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)、胡枝子(*Lespe-*

deza bicolor)和构树(*Broussonetia papyrifera*)为材料。金银木为忍冬科(Caprifoliaceae)忍冬属落叶灌木,主要观赏花和果;紫荆为豆科(Leguminosae)紫荆属丛生或单生灌木,以观花为主;紫薇为千屈菜科(Lythraceae)紫薇属落叶灌木或小乔木,以观花为主;荆条为马鞭草科(Verbenaceae)牡荆属灌木或小乔木,主要观赏叶和花;胡枝子为豆科胡枝子属直立灌木,以观花为主;构树为桑科(Moraceae)构属乔木,主要观赏树形和果。2018年3月开始对苗木进行日常浇水施肥管理,待养护良好后选取长势一致、生长健壮的苗木将其移植于25 cm×30 cm的塑料花盆中,每盆1株,栽培基质为种植土:河沙:珍珠岩:泥炭:椰糠=6:2:1:1:1。

1.2 方法

试验地点设在中国科学院华南植物园的实验大棚内,该地区位于珠江三角洲,夏季高温多雨,秋季干旱少雨,属于典型的亚热带季风气候。从天气晴好的2018年10月13日开始进行干旱胁迫试验,当天浇透水后不再浇水,而对照每天正常浇水。每个处理设3个重复。

分别于干旱处理的0、3、7、14、21和28 d用数码相机拍照,比较植株形态变化;土壤含水量用Delta-T便携式土壤水分仪测量,将探针插入盆土中心处避开植物根部进行测量,每处理测量3次,以体积比(%)表示。

叶片叶绿素含量采用80%丙酮浸提法测定^[4],分别于干旱处理的0、3、7、14、21、28 d选取5片成熟功能叶片,用直径6 mm的打孔器分别打20个叶圆片,放入20 mL 80%丙酮中暗处浸提7 d,至叶圆片完全变白后,使用分光光度计(USA)分别在663、645和440 nm波长下测定OD值,计算Chl a、Chl b和Car含量。

超氧化物歧化酶活性(SOD)采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定,冰浴下研磨,用pH 7.8磷酸缓冲液提取,10 000×g冷冻离心10 min后进行还原反应,使用分光光度计在560 nm波长下比色测定,以抑制NBT光化还原50%所需酶量为1个活性单位(U);丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[5],以质量摩尔浓度表示。

试验数据采用Excel 2019进行统计和绘制图表,使用SPSS 19.0进行ANOVA方差分析和Duncan法多重比较,以 $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果和分析

2.1 干旱胁迫对形态和土壤含水率的影响

随着干旱时间的延长，干旱胁迫程度不断加深，土壤含水率逐渐下降(表 1)。金银木、紫荆、胡枝子、构树的土壤含水率显著降低($P<0.05$)，但胁迫 21 和 28 d 的差异不显著。紫薇、荆条在干旱胁迫 3 和 7 d 的土壤含水率显著降低，但胁迫 14、21 和 28 d 的差异不显著。6 种植物干旱胁迫 14 d，土壤含水率均下降到 25%以下，比起始含水率减少

20.3%~25.8%，干旱胁迫 28 d，土壤含水率均降到 10%左右，处于严重干旱状态。胁迫处理相同时间，金银木、紫荆和胡枝子的土壤含水率相对较高，土壤中具有较多的可利用水分；而紫薇、荆条和构树的土壤含水率较低，土壤中可利用水分较少。

从图 1 可见，干旱胁迫 28 d，6 种植物均出现了不同程度的萎蔫和落叶现象。金银木、荆条和胡枝子叶片的萎蔫程度和枝叶掉落状况均较轻，紫荆、紫薇和构树则出现了较严重的叶片萎蔫和凋落，成为“光杆树”。

表 1 干旱胁迫对土壤含水率(%)的影响

Table 1 Effect of drought stress on soil moisture content (%)

时间 Day	金银木 <i>Lonicera maackii</i>	紫荆 <i>Cercis chinensis</i>	紫薇 <i>Lagerstroemia indica</i>	荆条 <i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>	胡枝子 <i>Lespedeza bicolor</i>	构树 <i>Broussonetia</i> <i>papyrifera</i>
0	47.65 ±1.88	34.37 ±1.40	35.09 ±1.54	35.49 ±2.03	40.54 ±2.24	41.78 ±1.36
3	44.04 ±1.72	26.58 ±0.50	27.00 ±3.20	26.74 ±1.28	33.98 ±1.76	35.52 ±1.66
7	34.24 ±2.56	19.54 ±1.86	18.33 ±2.80	18.01 ±1.34	28.44 ±2.77	23.37 ±2.41
14	24.27 ±2.14	14.56 ±1.76	12.21 ±1.55	12.27 ±1.84	18.76 ±3.56	16.34 ±1.63
21	14.09 ±1.00	10.34 ±2.37	9.15 ±0.65	11.95 ±0.39	12.26 ±1.40	13.15 ±0.35
28	13.92 ±0.17	10.88 ±0.59	9.92 ±0.12	9.94 ±0.72	10.60 ±0.60	10.47 ±1.56



图 1 干旱胁迫对植物形态的影响。A, C, E, G, I, K: 对照; B, D, F, H, J, L: 干旱胁迫 28 d; A, B: 金银木; C, D: 紫荆; E, F: 紫薇; G, H: 荆条; I, J: 胡枝子; K, L: 构树。

Fig. 1 Effect of drought stress on morphology of species. A, C, E, G, I, K: Control; B, D, F, H, J, L: Drought stress for 28 d; A, B: *Lonicera maackii*; C, D: *Cercis chinensis*; E, F: *Lagerstroemia indica*; G, H: *Vitex negundo* var. *heterophylla*; I, J: *Lespedeza bicolor*; K, L: *Broussonetia papyrifera*.

2.2 干旱胁迫对叶片叶绿素含量的影响

植物吸收太阳光能进行光合作用主要是依靠叶绿体中的光合色素^[6]，其中叶绿素、类胡萝卜素与光合作用的关系密切^[7]，其含量在一定程度上能反映植物同化物质的能力，从而影响植物的生长^[8]。

从图 2 可见，6 种植物在干旱胁迫时，叶片光合色素含量的变化程度不同。随着干旱胁迫的增强，金银木的 Chl a、Chl b 和 Car 含量变化不大，总

体呈缓慢上升的趋势，但差异不显著，说明金银木叶片的光合作用并未受到干旱胁迫的影响。紫荆和胡枝子的 Chl a、Chl b 和 Car 含量先上升后下降，紫荆胁迫 28 d 的 Chl a、Chl b 和 Car 含量分别比 21 d 时显著减少 76.72%、55.71%和 95.31%，胡枝子胁迫 7 d 的 Chl a、Chl b 和 Car 含量与胁迫 14、21 和 28 d 的达显著差异，说明紫荆和胡枝子在缺水状态下通过迅速改变光合色素含量来缓解干旱环境的

限制。

随着干旱胁迫的增强,紫薇、荆条和构树的 Chl a、Chl b 和 Car 含量呈先上升后下降趋势。紫薇胁迫 7 d 的 Chl b 含量比对照显著提高 64.27%,胁迫 14 d 比胁迫 7 d 的显著提高 72.15%,而且在胁迫 21 和 28 d 时叶片全部掉落,表明紫薇叶片的叶绿素含量变化受干旱胁迫影响较大。荆条胁迫 3 d 的 Car 含量比对照显著提高 92.83%,但 Chl a、Chl b 含量的差异不显著,总体随胁迫时间的延长波动下降。在干旱胁迫下,构树的光合色素含量逐渐上升,胁迫 7 d 时达到最大值,Chl a、Chl b 和 Car 含量分别比对照显著提高 48.83%、143.00%和 91.15%。

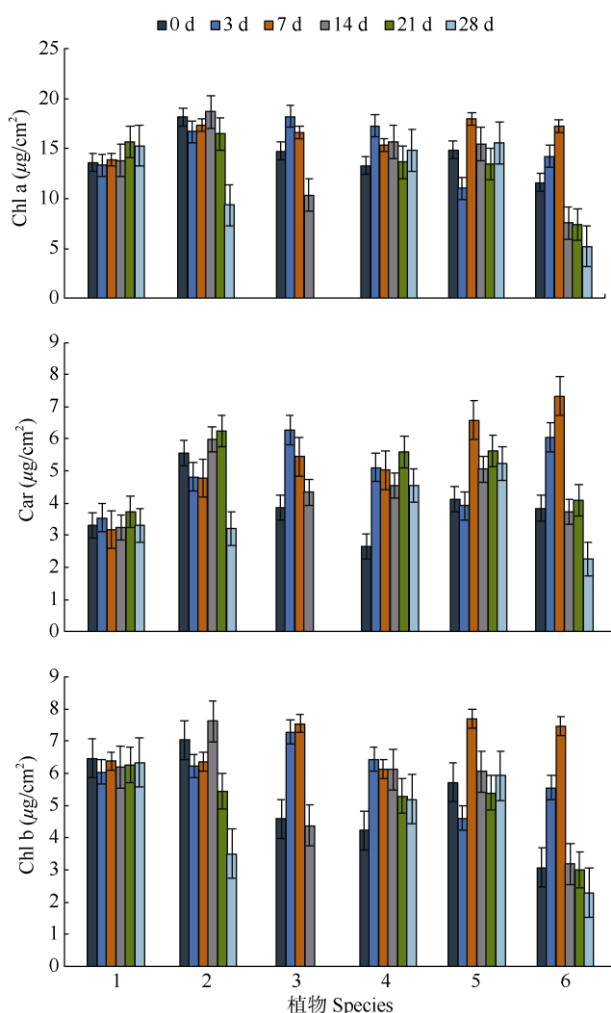


图2 干旱胁迫对叶片叶绿素和胡萝卜素含量的影响。1: 金银木; 2: 紫荆; 3: 紫薇; 4: 荆条; 5: 胡枝子; 6: 构树。下同。

Fig. 2 Effect of drought stress on chlorophyll and carotenoid contents in leaves. 1: *Lonicera maackii*; 2: *Cercis chinensis*; 3: *Lagerstroemia indica*; 4: *Vitex negundo* var. *heterophylla*; 5: *Lespedeza bicolor*; 6: *Broussonetia papyrifera*. The same is following Figures.

2.3 干旱胁迫对 SOD 活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)活性是植物抗旱性的重要指标之一。当植物受到干旱胁迫时,叶片中 O_2^- 浓度增大,进而诱导超氧化物歧化酶活性的增强。通过消除 O_2^- ,维持了活性氧代谢的平衡,保护膜结构,从而使植物在一定程度上忍耐、减缓或抵抗水分胁迫^[9]。随干旱胁迫程度的加深,6种植物叶片的 SOD 活性变化不一致。金银木、构树的 SOD 活性总体呈上升趋势,紫荆、荆条和胡枝子的呈先下降后上升的趋势;而紫薇的呈下降趋势。

金银木在干旱胁迫 21 d 内, SOD 活性一直维持在较低水平,胁迫 28 d 迅速上升至 235.85 U/g Fw,达显著差异($P < 0.05$),这表明一定时间内的干旱胁迫对金银木叶片的 SOD 活性影响较小。随胁迫时间的延长,构树的 SOD 活性呈上升的变化趋势,胁迫 21 d 时达到最高值,比胁迫 0、3 和 7 d 的显著提高 491.55%、346.44%和 117.36%;胁迫 28 d 时叶片掉落。

紫荆和荆条在胁迫 14 d 内的 SOD 活性逐渐下降,胁迫 3、7、14 和 21 d 间的 SOD 活性均达显著差异,胁迫 7 和 14 d 的 SOD 活性最低,以后又升高。胡枝子在干旱胁迫 3 d 的 SOD 活性与对照无显著差异,胁迫 7 d 时达最高,比胁迫 3 d 的显著提高 68.94%,胁迫 14 d 时最低,与胁迫 7 和 21 d 的差异显著;胁迫 21 d 后又缓慢上升,这与贾瑞丰等^[10]的研究结果相似,表明在持续干旱 7~14 d 内,紫荆、荆条和胡枝子叶片能通过增加 SOD 活性来抵御外界不利条件,但干旱持续延长后叶片的保护酶活性下降,表现出一定的耐旱能力。

在干旱胁迫下,紫薇的 SOD 活性逐步下降,胁迫 7 d 比胁迫 3 d 时显著下降 16.52%,胁迫 21 和 28 d 时叶片掉落,这表明紫薇在干旱胁迫下清除超

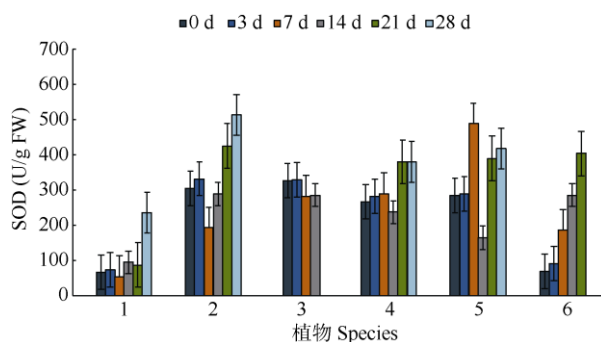


图3 干旱胁迫对 SOD 活性的影响

Fig. 3 Effects of drought stress on SOD activity

氧阴离子的能力较弱, 叶片易受害, 难以抵抗长时间的干旱环境。

2.4 干旱胁迫对 MDA 含量的影响

植物在正常生长状况下体内活性氧的产生与清除往往处于动态平衡的状态, 当遭遇干旱胁迫时, 植物体内自由基大量产生并积累, 形成有毒的过氧化产物丙二醛(MDA)^[11]。一般情况下, 干旱胁迫时植株的 MDA 含量呈上升趋势。从图 4 可以看出, 随着干旱胁迫时间的延长, 6 种植物的 MDA 含量总体呈上升趋势, 但紫荆、紫薇(第 21、28 天因叶片掉落无法检测)、荆条和构树(第 28 天因叶片掉落无法检测)在胁迫 7 d 内出现了不同程度的下降。除荆条外, 金银木、紫荆、紫薇、胡枝子和构树干旱胁迫后的 MDA 含量均明显高于对照, 金银木、紫荆和胡枝子胁迫 28 d 的 MDA 含量分别比对照提高 105.65%、58.93% 和 114.91%, 紫薇处理 14 d 的 MDA 含量比对照提高 193.26%, 构树处理 21 d 的 MDA 含量比对照提高 47.12%。方差分析表明, 金银木、紫薇和构树在不同干旱胁迫时间的叶片 MDA 含量差异显著, 紫荆在胁迫 0、3、7、14 和 21 d 间的 MDA 含量差异均达显著水平; 荆条胁迫 7 d 的叶片 MDA 含量与对照达显著差异; 胡枝子的 MDA 含量在胁迫 7、14、21、28 d 间达显著差异。

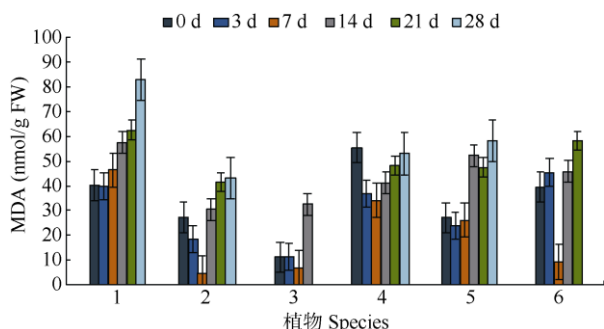


图 4 干旱胁迫对 MDA 含量的影响

Fig. 4 Effect of drought stress on MDA content

3 结论和讨论

植物在遭遇干旱胁迫时, 植株外观形态和内部生理生化特性都会发生变化, 因此在实际研究中往往应用多种测定指标综合判断植物的耐旱性强弱^[12]。本试验将植株形态变化、土壤含水率作为外观形态指标, Chl a、Chl b、Car 含量、SOD 活性

和 MDA 含量作为内部生理指标, 综合评价 6 种植物的耐旱性。

当处于干旱环境时, 较小的叶片可以减少水分的散失, 减弱蒸腾作用, 从而使植株体内保持一定水分。从外观形态来看, 植物在遭遇轻度干旱时往往出现叶片下垂、卷边; 当干旱持续时, 植株会出现叶片萎蔫、老叶掉落、新叶不萌发的现象。6 种植物耐旱性的差异主要表现在土壤含水率下降和外观形态上。本研究中金银木在长达 28 d 的持续干旱环境下, 土壤含水率缓慢下降, 总体长势良好; 这与金银木的长期水分利用效率较高, 具有优良的节水特性^[13]相符。有研究表明, 处于苗期的 2 a 生灌木荆条在土壤含水量为 30%~35% 和 10%~15% 的耐旱性表现良好^[14], 叶片保水力较强^[15], 这与本研究中荆条的表现相符。本研究结果表明, 表现耐旱性表现较好的金银木、胡枝子和荆条均为灌木, 说明植株较小的灌木相对于高大乔木来说, 体内同化物的合成和输出均较快, 对于干旱条件的响应和调控更加灵活。

6 种植物的生理生化指标对干旱环境的响应不同, 对植株体内活性氧的产生与清除时间也有差异。金银木在干旱环境下, 叶片叶绿素、类胡萝卜素含量变化不大, SOD 活性、MDA 含量均显著上升, 可见干旱胁迫对金银木的光合作用没有显著影响, 说明金银木耐旱性总体表现优良。荆条的 SOD 活性在干旱胁迫中始终保持较高水平且持续上升, MDA 含量也呈上升趋势, 说明荆条耐旱性表现较好。

有研究表明, 豆科植物具有较好的耐旱性^[16], 维持在较高水平并持续下降的 SOD 活性是胡枝子对抗干旱的主要对策^[17], 本试验中豆科植物胡枝子遭遇干旱时, 叶片萎蔫程度很低, 叶片叶绿素、类胡萝卜素含量先升高后降低, SOD 活性先下降后升高, 表现出较强的耐旱性。同样是豆科植物的紫荆受干旱胁迫时土壤含水率为 10% 左右, 叶片萎蔫、掉落严重, 叶片 SOD 活性较高, MDA 含量显著提高, 说明干旱环境下紫荆对外界的响应较迅速, 但只能忍耐短期干旱。

本试验中, 紫薇受干旱胁迫 14 d 就大量落叶, 叶绿素含量先上升后下降, SOD 活性下降, MDA 含量上升, 表明紫薇耐旱性较差, 无法忍受较长时间的干旱环境。有研究表明紫薇幼苗是通过减少地上部分生长、增加地下部分生长的方式来适应干旱胁迫的^[18]。

构树在为期 28 d 的干旱胁迫试验中, 叶片光合色素先上升后下降, SOD 活性和 MDA 含量显著上升, 这表明构树是通过落叶降低光合作用的效率, 在干旱初期清除活性氧能力较强, 后期体内的平衡体系被打破, 受害较严重。有研究认为, 构树以中光合-低蒸腾-高水分利用率的模式适应干旱环境^[19], 这与本试验结果相符。

本研究结果表明, 6 种植物的耐旱性不同, 较强的有金银木、胡枝子、荆条; 较弱的有紫薇、紫荆、构树。目前全球面临着水资源短缺、气候变化不稳定的严峻情况, 因此在城市绿地建设中大力倡导种植耐旱性强的植物, 对涵养水源和提高水资源利用率有着重要意义。

参考文献

- [1] LI G Q, TANG Z W, YIN L. Application of "Open Forest Grassland" in expressway landscapes: With design of landscapes on Lechang-Guangzhou expressway in Guangdong [J]. Technol Highway Trans, 2015(6): 130-134. doi: 10.13607/j.cnki.gljt.2015.06.028.
李国庆, 唐正伟, 阴磊. "疏林草地"在高速公路景观中的应用——以广东乐昌至广州高速公路景观设计为例 [J]. 公路交通技术, 2015(6): 130-134. doi: 10.13607/j.cnki.gljt.2015.06.028.
- [2] WANG Y T, LI J Y. Screening and Evaluation of Drought-Resistant and Water-Saving Tree Species in Northern Cities [M]. Beijing: China Forestry Press, 2011: 139.
王玉涛, 李吉跃. 北方城市抗旱节水树种的筛选与评价 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2011: 139.
- [3] QIAN T H, LEI J L, ZHUANG X Y. Comparative research on drought resistance of 8 common garden ground cover plants in South China [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 2012, 32(4): 759-766. doi: 10.3969/j.issn.1000-4025.2012.04.019.
钱瑯瑯, 雷江丽, 庄雪影. 华南地区 8 种常见园林地被植物抗旱性比较研究 [J]. 西北植物学报, 2012, 32(4): 759-766. doi: 10.3969/j.issn.1000-4025.2012.04.019.
- [4] LIN Z F, LI S S, WANG W, et al. The photosynthetic pathway of papaya (*Carica papaya*) [J]. Acta Phytophysiol Sin, 1984, 10(1): 91-96.
林植芳, 李双顺, 王伟, 等. 番木瓜的光合作用途径 [J]. 植物生理学报, 1984, 10(1): 91-96.
- [5] CHEN J X, WANG X F. Guidance of Plant Physiology Experiments [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002.
陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [6] YANG T. The Research on drought-resistance of ten species of evergreen seeding and comprehensive evaluation [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
杨涛. 10 种常绿苗木的抗旱性研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
- [7] CAO J. Effects of different water stress on the photosynthesis and physiological characteristics of *Photinia fraseri* seedlings [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
曹晶. 不同水分逆境对红叶石楠幼苗光合作用及相关生理特性的影响研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- [8] XUE Y B, QIN H, ZHANG K. Comparative study of drought-resistance on three kinds vine of ground cover plants [J]. Chin Agric Sci Bull, 2010, 26(9): 239-243.
薛彦斌, 秦华, 张科. 3 种藤本地被植物抗旱性比较 [J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 239-243.
- [9] CHENG Y Y. Response of the plants in the karst rocky desertification control areas to drought stress: Examples of *Lonicera japonica* Thunb, *Juglans regia* L., *Zanthoxylum bungeanum* Maximand, *Rosa roxburghii* Tratt [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2014.
程媛媛. 喀斯特石漠化治理区植物对干旱胁迫的响应研究——以金银花、核桃、花椒、刺梨为例 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2014.
- [10] JIA R F, XU D P, YANG Z J, et al. Photosynthesis physiological characteristics of *Dalbergia odorifera* seedlings under drought stress [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2013, 33(6): 1197-1202. doi: 10.3969/j.issn.1000-4025.2013.06.018.
贾瑞丰, 徐大平, 杨曾奖, 等. 干旱胁迫对降香黄檀幼苗光合生理特性的影响 [J]. 西北植物学报, 2013, 33(6): 1197-1202. doi: 10.3969/j.issn.1000-4025.2013.06.018.
- [11] HE Q. Evaluation and selection on *Populus tomentosa* superior clones with drought resistance and water-saving [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
何茜. 毛白杨抗旱节水优良无性系评价与筛选 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [12] WANG Q, SONG G L, HAN L B, et al. Comprehensive evaluation of drought resistance of 5 wild plant species applied to slope eco-engineering [J]. J Fujian Agric For Univ (Nat Sci), 2008, 37(2): 153-157.
王琼, 宋桂龙, 韩烈保, 等. 5 种野生护坡植物的抗旱综合性评价 [J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2008, 37(2): 153-157.
- [13] WANG Y T. Selection and evaluation on superior plant materials for drought resistant and water-saving in Beijing [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2008.
王玉涛. 北京城市优良抗旱节水植物材料的筛选与评价研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [14] XIE F, YAN Q Q, GUO X, et al. Evaluation and analysis of drought

- resistant ability of five shrubs in dry valley at the Bailongjiang River of Gansu Province [J]. *J CS Univ For Technol*, 2018, 38(8): 51–56. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.08.008.
- 谢飞, 闫倩倩, 郭星, 等. 白龙江干旱河谷 5 种灌木抗旱性评价及分析 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2018, 38(8): 51–56. doi: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.08.008.
- [15] YANG Y, LENG P S, ZHANG B, et al. Studies on drought resistance of 3 side slope greening plants [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 26(13): 272–278.
- 杨泱, 冷平生, 张博, 等. 3 种边坡绿化植物抗旱性研究 [J]. *中国农学通报*, 2010, 26(13): 272–278.
- [16] PAN X, QIU Q, LI J Y, et al. Physiological indexes of six plant species from the Tibetan plateau under drought stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, 34(13): 3558–3567.
- 潘昕, 邱权, 李吉跃, 等. 干旱胁迫对青藏高原 6 种植物生理指标的影响 [J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3558–3567.
- [17] SHI H J. Physiological and ecological characteristics of six common plants under water stress in loess area [D]. Yangling: Northwest Agricultural & Forestry University, 2010.
- 时慧君. 黄土区六种常见植物对水分胁迫的生理生态响应 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [18] SU Y Y, PAN J, ZHOU X Q, et al. Seed germination of *Lagerstroemia indica* under drought stress simulated by PEG [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2014, 42(32): 11372–11373. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2014.32.055.
- 苏有谊, 潘健, 周肖琴, 等. 紫薇种子萌发对 PEG 模拟干旱胁迫的响应 [J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(32): 11372–11373. doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2014.32.055.
- [19] LI H, WU Y Y. The responses of leaf photosynthesis and photo-respiration to the simulated drought by two Moraceae plants [J]. *Earth Environ*, 2019, 47(2): 141–150. doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.025.
- 李环, 吴沿友. 两种桑科植物叶片光合及光呼吸对模拟干旱的响应 [J]. *地球与环境*, 2019, 47(2): 141–150. doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2019.47.025.