

吴雪仪,陈红跃,黄永芳,等. 干旱胁迫对6种园林灌木光合生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(22):142-147.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.22.032

# 干旱胁迫对6种园林灌木光合生理特性的影响

吴雪仪<sup>2</sup>, 陈红跃<sup>1</sup>, 黄永芳<sup>1</sup>, 潘 澜<sup>1</sup>, 曾 凤<sup>2</sup>, 谢腾芳<sup>2</sup>, 程冰冰<sup>2</sup>

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东广州 510642; 2. 广州普邦园林股份有限公司, 广东广州 510600)

**摘要:**以花叶鹅掌柴、龙船花、白蟾、狗牙花、软枝黄蝉和红背桂6种园林灌木为材料,研究人工模拟干旱胁迫环境对植物光合指标和叶绿素荧光动力参数的影响,结合主成分分析法综合评价其抗旱能力。结果表明,(1)干旱胁迫处理期间,6种灌木的净光合速率( $P_n$ )、气孔导度( $G_s$ )、胞间 $CO_2$ 浓度( $C_i$ )和蒸腾速率( $T_r$ )持续下降,复水后软枝黄蝉的 $C_i$ 未能得到有效恢复,其余植物各光合指标均有回升。(2)光合系统II(PS II)的有效光化学量子产量( $F_v'/F_m'$ )、实际光化学量子效率[Y(II)]、表观光合电子传递速率(ETR)、光化学淬灭( $q_p$ )随着胁迫强度加重而降低,复水后各项指标均有所恢复,其中花叶鹅掌柴的Y(II)、ETR和 $q_p$ 、毛杜鹃的 $F_v'/F_m'$ 和Y(II)、龙船花和红背桂的 $F_v'/F_m'$ 、狗牙花的ETR均恢复至对照水平。6种灌木的非光化学淬灭(NPQ)持续上升,复水后白蟾有所下降,但仍显著高于对照,其余植物均恢复到对照水平。(3)主成分分析结果表明,6种园林灌木的抗旱性强弱顺序为花叶鹅掌柴>白蟾>狗牙花>红背桂>软枝黄蝉>龙船花。

**关键词:**园林灌木;干旱胁迫;光合指标;叶绿素荧光动力参数;主成分分析

**中图分类号:** S684.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)22-0142-06

随着城市化快速发展进程,生态环境质量呈下降趋势。同时,由于城市自然空间的过度开发破坏了自然水循环过程<sup>[1]</sup>,城市有限的水资源在面对日益增长的城市园林绿化面积时变得更为紧缺。另外,城市特有的环境特征衍生出了多种新型绿化类型,如雨水花园、立体绿化和边坡绿化等,它们的生态环境决定了植物经常处于水分亏缺的状态<sup>[2-4]</sup>。光合系统II(PS II)对于干旱胁迫的响应非常敏感<sup>[5]</sup>。干旱胁迫会引起植物气孔部分或全部关闭,进而导致蒸腾速率以及 $CO_2$

吸收量、光合速率下降<sup>[6-7]</sup>,严重时外界 $CO_2$ 不能进入植物细胞内,继续照光引起植物体内光能过剩,导致光合器官受到破坏,进而影响光合系统II的活性、结构和功能。而具有抗旱性的植物会启动自身保护机制,通过光呼吸和热耗散等非光化学过程消耗过剩光能<sup>[8-10]</sup>。

本试验以华南地区常见的园林灌木花叶鹅掌柴(*Schefflera odorata* cv. *variegata*)、龙船花(*Ixora chinensis*)、白蟾(*Gardenia jasminoides* var. *fortuniana*)、狗牙花(*Ervatamia divaricata*)、软枝黄蝉(*Allemanda cathartica*)和红背桂(*Excoecaria cochinchinensis*)为材料,通过研究干旱胁迫对6种灌木的光合特性和叶绿素荧光参数的影响,揭示干旱胁迫对其光合生理的影响机制,为筛选耐旱性强的园林绿化植物与节水灌溉提供理论依据,对于城市绿化和城市可持续发展研究具有重大意义。

收稿日期:2018-08-08

基金项目:广东省广州市越秀区科技计划(编号:2017-GX-022)。

作者简介:吴雪仪(1993—),女,广东肇庆人,硕士,主要从事园林植物应用研究。E-mail:784891234@qq.com。

通信作者:潘 澜,女,博士,讲师,主要从事森林生态和城市绿化生态服务功能研究。E-mail:panlan@scau.edu.cn。

[8]蔡美萍,袁 媛,陈清西. 83个夏鹃品种的盆景应用综合评价[J]. 江苏农业科学,2018,46(1):76-81.

[9]周 媛,方林川,董艳芳,等. 干旱胁迫下不同杜鹃品种生理与光合响应[J]. 北方园艺,2017(7):69-73.

[10]高晓宁,赵 冰,刘旭梅,等. 4个杜鹃花品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 浙江农林大学学报,2017,34(4):597-607.

[11]李 娟,黄丽华,陈 训. 2种杜鹃对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价[J]. 西南农业学报,2015,28(3):1067-1072.

[12]胡肖肖,唐宇力,贾 梅,等. 干旱胁迫对13个杜鹃品种生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2017,45(6):101-105.

[13]刘晓青,苏家乐,李 畅,等. 杜鹃花新品种‘江南春早’[J]. 园艺学报,2015,42(5):1015-1016.

[14]苏家乐,刘晓青,李 畅,等. 杜鹃花新品种‘胭脂蜜’[J]. 园艺学报,2012,39(12):2555-2556.

[15]刘晓青,苏家乐,李 畅,等. 杜鹃花新品种‘紫金粉玉’[J]. 园艺学报,2016,43(10):2067-2068.

[16]国家林业局植物新品种保护办公室. 植物新品种特异性、一致性、稳定性测试指南 杜鹃花属映山红亚属和羊躑躅亚属:LY/T 1852—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.

[17]翟丽丽,房伟民,陈发棣,等. 国庆小菊观赏性和耐旱、涝性的综合评价[J]. 中国农业科学,2012,45(4):734-742.

[18]尹冬梅,白 露,陈靖宇,等. 36个杂交萱草品种在上海地区观赏性综合评价[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版),2016,16(2):199-204.

[19]何新杰,任国香,彭昭良,等. 华南地区耐热耐旱观赏草的筛选和评价[J]. 江西农业学报,2018,30(3):64-69.

[20]李 波,吴月燕,崔 鹏. 水分胁迫对2种基因型杜鹃生理生化特性的影响[J]. 浙江农业学报,2011,23(5):988-994.

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在华南农业大学板栗园温室大棚内进行,试验苗为花叶鹅掌柴、龙船花、白蟾、狗牙花、软枝黄蝉和红背桂的实生容器苗,营养袋直径 15 cm,高 15 cm,基质中荷兰土与黄土为 1:1。苗木生长基本情况见表 1。

表 1 6 种灌木的基本情况

树种	平均地径 (cm)	平均苗高 (cm)	平均冠幅 (cm)
花叶鹅掌柴	0.85±0.10	24.47±2.00	29.27±2.53
龙船花	1.60±0.20	39.97±3.25	31.87±4.41
白蟾	0.42±0.03	29.00±1.61	14.97±2.00
狗牙花	0.73±0.19	40.77±5.39	27.77±3.29
软枝黄蝉	0.86±0.08	55.33±8.34	43.10±5.98
红背桂	0.60±0.15	29.63±3.07	27.30±1.51

表 2 干旱胁迫期间土壤含水量变化

植物	土壤含水量变化(%)				
	0 d(对照)	4 d	8 d	12 d	16 d(R4)
花叶鹅掌柴	28.03±1.47	18.08±1.91	13.95±4.64	8.10±0.65	复水
龙船花	28.48±1.44	19.72±4.60	13.79±1.33	7.85±2.68	复水
白蟾	27.87±1.88	16.13±3.68	12.61±3.93	5.37±1.49	复水
狗牙花	27.52±1.23	20.41±0.74	15.76±3.57	7.53±1.67	复水
软枝黄蝉	28.33±1.00	17.73±2.09	12.97±3.20	8.84±1.52	复水
红背桂	27.73±3.06	19.15±3.23	14.50±4.22	8.46±2.02	复水

速率(ETR)。19:30—21:30(天黑后)测定叶片暗适应下的初始荧光( $F_0$ )和最大荧光( $F_m$ )。根据公式计算出以下荧光动力参数:PS II 有效光化学量子产量( $F_v'/F_m'$ )= $(F_m' - F_0')/F_m'$ ;光化学淬灭系数( $q_p$ )= $(F_m' - F')/(F_m' - F_0')$ ;非光化学淬灭系数( $NPQ$ )= $F_m/F_m' - 1$ 。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 和 IBM SPSS Statistics 19.0 软件对试验数据进行统计分析。对原始数据标准化后进行主成分分析,根据特征值>1 的提取原则确定主成分个数<sup>[1]</sup>。各主成分得分是其加权值,权重是主成分所对应的贡献率,根据主成分的特征向量计算出各抗旱指标的得分,按得分评定各树种

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 2017 年 10 月采用人工模拟自然干旱胁迫的方法,试验前 1 d 浇水至饱和状态,往后 11 d 内不再浇水,直至 12 d 时复水(即浇水至饱和状态)。在停水后 0(对照)、4、8、12 d 及复水后 4 d 测定各项光合指标和荧光指标。干旱胁迫期间 6 种灌木营养袋中土壤含水量变化见表 2。

1.2.2 测定方法 选取每株的第 3 张至第 8 张成熟功能叶挂牌标记,每次测定时间为 09:00—11:00,此期间光线充足且变化不大。光合指标的测定仪器为 LI-6400 便携式光合仪(LI-Cor, Inc, 美国),采用开放式气路,内置光源光照度为 1 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,空气流速 500 L/min,叶温 30  $^{\circ}\text{C}$ 。试验测定的光合指标有净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $G_s$ )和胞间  $\text{CO}_2$  浓度( $C_i$ )等参数,所有参数 9 次重复。

采用 PAM-2500 调制式叶绿素荧光仪(WALZ, 德国),于 09:00—11:00,在光适应下测定最大荧光( $F_m'$ )、最小荧光( $F_0'$ )、PS II 实际光化学量子效率  $Y(II)$ 、表观光合电子传递

的抗旱能力。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对 6 种灌木光合指标的影响

2.1.1 干旱胁迫对植物叶片净光合速率的影响 干旱胁迫处理期间,6 种植物的叶片净光合速率( $P_n$ )随干旱胁迫时间的延长急剧下降,均在胁迫 4、8、12 d 显著低于对照,并在胁迫 12 d 时降到最低值(图 1)。其中,以龙船花的下降幅度最大,降幅为 84.21%,其次是软枝黄蝉、白蟾和狗牙花,分别为 82.39%、70.42% 和 67.64%。经过 4 d 复水处理后,6 种灌木叶片的  $P_n$  均显著增加,但仍显著低于对照。

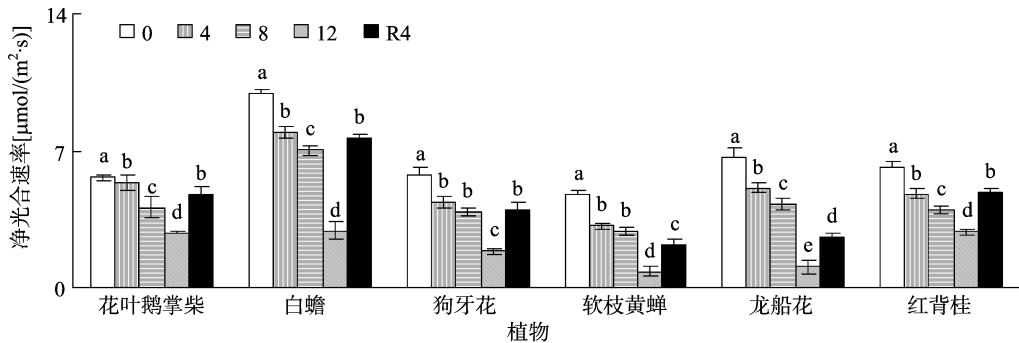


图1 干旱胁迫下 6 种植物净光合速率的变化

2.1.2 干旱胁迫对植物叶片气孔导度的影响 干旱胁迫处理期间,6 种参试植物叶片气孔导度( $G_s$ )均从胁迫 4 d 开始显著低于对照,均在 12 d 时到最低值(图 2)。其中,龙船花

叶片的  $G_s$  下降幅度最大,达到 87.80%,其次为白蟾和软枝黄蝉,分别为 86.67% 和 83.38%,下降幅度最小的是花叶鹅掌柴,只有 65.57%。复水后,6 种灌木植物叶片的  $G_s$  均明显

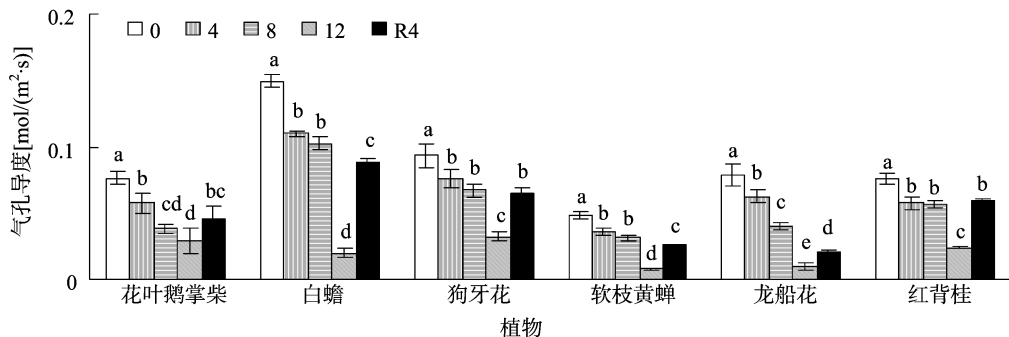
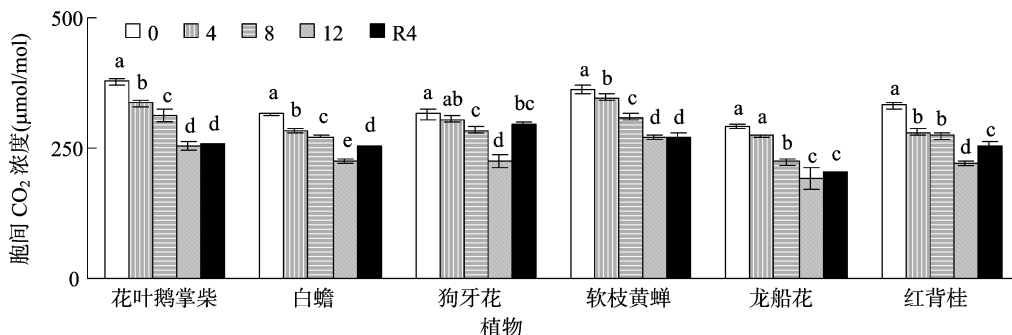


图2 干旱胁迫下 6 种植物气孔导度的变化

回升,但是仍然显著小于对照。

2.1.3 干旱胁迫对植物叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度的影响 干旱胁迫处理期间,各种植物叶片胞间  $\text{CO}_2$  浓度 ( $C_i$ ) 均持续下降,花叶鹅掌柴、白蟾、软枝黄蝉和红背桂在干旱胁迫后 4 d 时开始显著低于对照,并在 12 d 时达最低值(图 3)。龙船花和狗牙花叶片的  $C_i$  在干旱胁迫 8、12 d 时显著小于对照。6 种植

物中龙船花的降幅最大,其次为红背桂和花叶鹅掌柴,最小为软枝黄蝉,降幅分别为 34.34%、33.40%、32.71% 和 25.15%。复水 4 d 后,花叶鹅掌柴、龙船花、白蟾、狗牙花和红背桂叶片的  $C_i$  增加,但是仍然显著低于对照。软枝黄蝉叶片的  $C_i$  在复水后仍未回升,显著低于对照。

图3 干旱胁迫下 6 种植物胞间  $\text{CO}_2$  浓度的变化

2.1.4 干旱胁迫对植物叶片蒸腾速率的影响 干旱胁迫处理期间,白蟾、狗牙花、软枝黄蝉和红背桂叶片蒸腾速率 ( $T_r$ ) 持续下降,均在干旱 4、8、12 d 时显著低于对照(图 4)。花叶鹅掌柴和龙船花叶片的  $T_r$  在 8、12 d 时显著低于对照,均在

12 d 降到最小值。软枝黄蝉叶片  $T_r$  降幅高于其他 5 种植物,其次为白蟾和龙船花,狗牙花最小,降幅分别为 85.70%、82.85%、81.06% 和 59.71%。经过 4 d 复水处理后,6 种植物叶片  $T_r$  均显著上升,但仍显著低于对照。

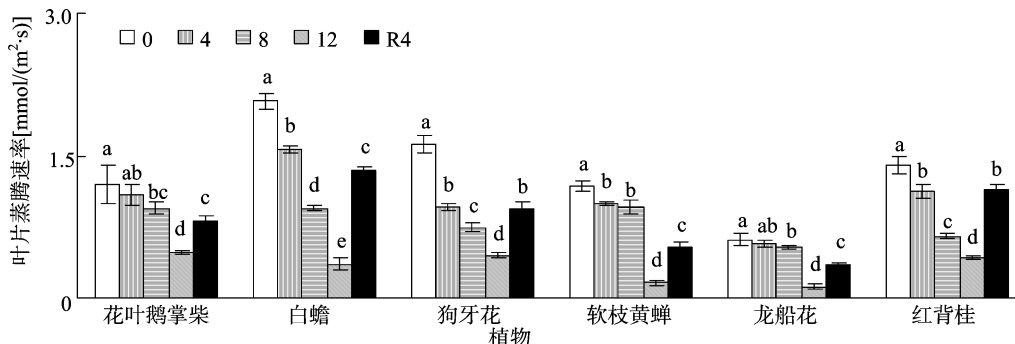


图4 干旱胁迫下 6 种植物叶片蒸腾速率的变化

## 2.2 干旱胁迫对叶绿素荧光动力参数的影响

### 2.2.1 干旱胁迫下植物 PS II 有效光化学量子产量的影响

干旱胁迫处理期间,狗牙花叶片的 PS II 有效光化学量子产量 ( $F_v'/F_m'$ ) 逐渐下降,在干旱 4、8、12 d 时显著小于对照,并在干旱后 12 d 的降幅达到 52.26% (图 5)。干旱 8、12 d 时,花叶鹅掌柴、白蟾、软枝黄蝉叶片的  $F_v'/F_m'$  显著小于对照,并在干旱后 12 d 的降幅分别为 55.61%、50.12%、49.67%。龙船花和红背桂叶片的  $F_v'/F_m'$  随着试验时间的延长逐渐降低,在

12 d 达到最小值并显著小于对照,其中龙船花降幅为 32.11%,红背桂降幅最小,为 27.29%。复水 4 d 后,龙船花、红背桂叶片的  $F_v'/F_m'$  逐渐上升并恢复到对照水平,其余植物虽有回升,但是仍显著小于对照。

### 2.2.2 干旱胁迫下植物 PS II 实际光化学量子产量的变化

干旱胁迫处理期间,软枝黄蝉、狗牙花、龙船花和白蟾叶片的 PS II 实际光化学量子效率 [ $Y(II)$ ] 在 4、8、12 d 时显著小于对照,并在 12 d 达到最小值,其中软枝黄蝉的降幅最大,为

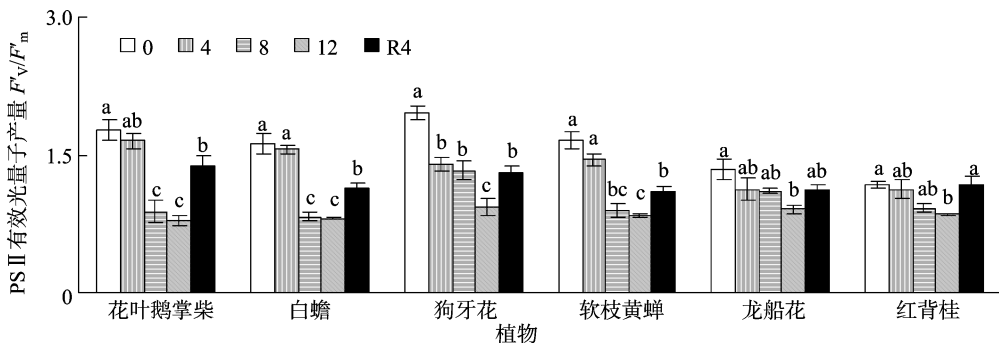


图5 干旱胁迫下植物 PS II 有效光量子产量的变化

66.77% (图 6)。红背桂叶片  $Y(II)$  在干旱胁迫前期 (0 ~ 8 d) 小幅下降, 12 d 时达到最低值并显著低于对照, 花叶鹅掌柴变化最小, 仅下降 4.81%, 与对照无显著差异。复水 4 d 后

6 种植物的  $Y(II)$  均有回升, 其中花叶鹅掌柴叶片的  $Y(II)$  恢复至对照水平, 其余植物仍显著小于对照。

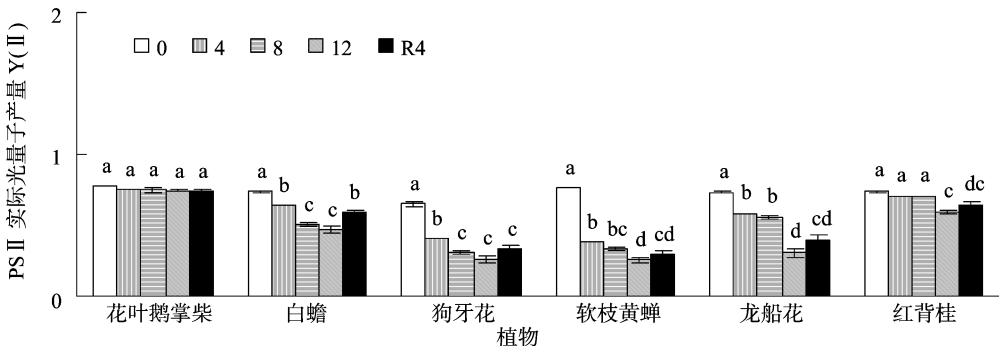


图6 干旱胁迫下 6 种植物叶片实际光量子产量的变化

2.2.3 干旱胁迫下植物表观光合电子传递速率的变化 干旱胁迫处理期间, 红背桂、狗牙花、软枝黄蝉和花叶鹅掌柴叶片的表观光合电子传递速率 (ETR) 从干旱胁迫后 4 d 开始显著下降, 并在 12 d 降到最低值, 其中以红背桂降幅最大, 为 57.59% (图 7)。龙船花和白蟾叶片 ETR 随着试验时间的延

长而逐渐降低, 在 8、12 d 时显著小于对照, 而白蟾的降幅与其他植物相比最小, 为 31.79%。经过 4 d 的复水处理后, 花叶鹅掌柴和狗牙花叶片的 ETR 逐渐增加, 与对照无显著差异, 其他植物仍然显著小于对照。

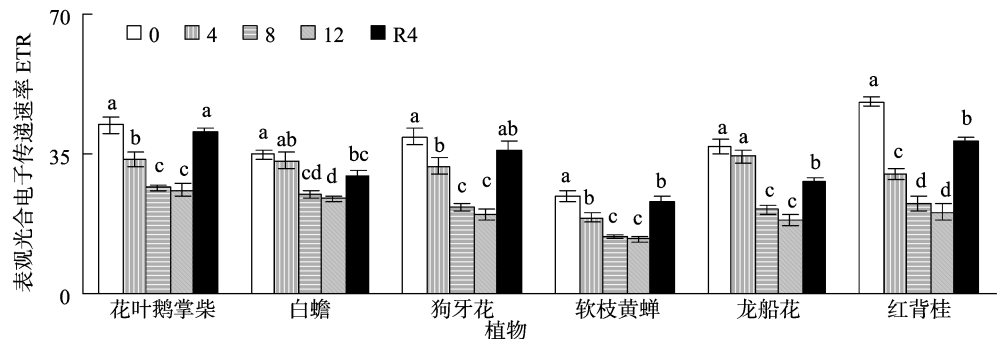


图7 干旱胁迫下 6 种植物叶片表观光合电子传递速率的变化

2.2.4 干旱胁迫下植物叶片的光化学淬灭系数的变化 干旱胁迫处理期间, 龙船花、白蟾、狗牙花、软枝黄蝉和红背桂叶片的光化学淬灭 ( $q_p$ ) 在胁迫后 4 d 开始显著低于对照, 花叶鹅掌柴叶片的  $q_p$  在 8、12 d 时显著小于对照, 并均在 12 d 时降到最低值 (图 8)。6 种植物间的降幅不同, 其中以软枝黄蝉降幅最大, 为 55.91%。经过 4 d 复水处理后, 花叶鹅掌柴叶片的  $q_p$  恢复到对照水平, 其余植物有所上升, 但是仍然显著小于对照。

2.2.5 干旱胁迫下植物叶片的非光化学淬灭的变化 干旱胁迫处理期间, 狗牙花、软枝黄蝉和红背桂叶片的非光化学淬

灭 (NPQ) 在干旱 4、8、12 d 时显著大于对照, 花叶鹅掌柴、龙船花和白蟾在 8、12 d 时显著大于对照, 所有植物均在 12 d 时达到最大值 (图 9)。复水 4 d 后, 白蟾有所下降, 但是仍显著高于对照, 其余植物均恢复到对照水平。

### 2.3 植物抗旱性综合评价

主成分分析法可以对植物抗旱能力进行全面准确的评价<sup>[11]</sup>。对 6 种植物的光合指标和荧光指标进行主成分分析, 按主成分特征值 > 1 的原则提取 3 个主成分, 累积贡献率达到 89.48%, 很大程度上代表了原始指标的信息。由表 3 可知, 主成分 1 的特征根为 4.540, 方差贡献率为 50.441%, 包

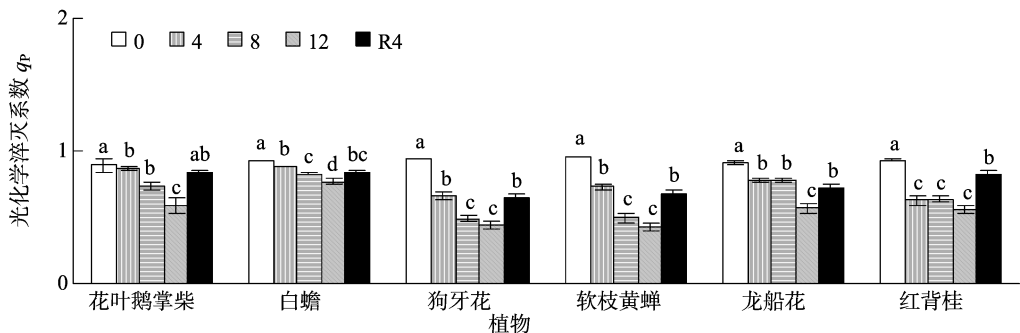


图8 干旱胁迫下植物叶片光化学淬灭系数的变化

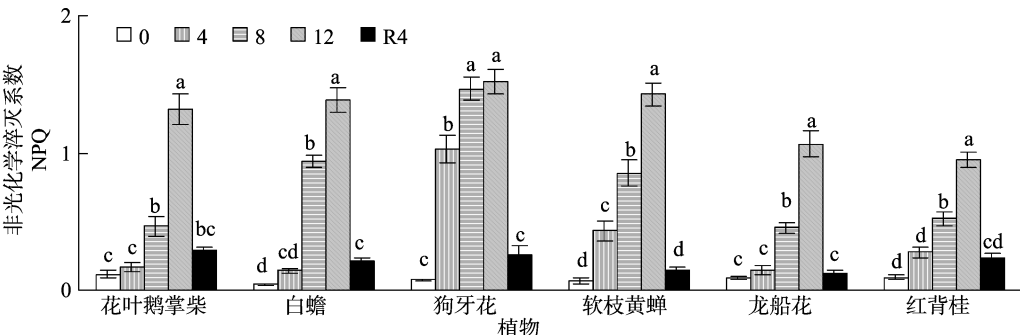


图9 干旱胁迫下 6 种植物叶片非光化学淬灭系数的变化

表 3 6 种灌木干旱胁迫的光合和叶绿素荧光指标的特征向量

指标	特征向量		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3
$F_v'/F_m'$	-1.210	-0.260	1.010
$Y(II)$	1.900	-0.110	-0.340
ETR	2.000	-0.160	0.110
$q_P$	-0.180	1.110	0.140
NPQ	-1.290	0.730	0.370
$P_n$	2.060	-0.120	0.050
$G_s$	1.540	0.430	0.780
$C_i$	0.100	1.170	-0.630
$T_r$	1.790	0.460	0.500
特征根	4.540	1.912	1.602
贡献率	50.441	21.241	17.800
累计贡献率	50.441	71.682	89.482

括了  $Y(II)$ 、ETR、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  等指标的信息;主成分 2 的特征根为 1.912,方差贡献率 21.24%,包括  $q_P$  和  $C_i$  这 2 个指标的信息,主成分 3 的特征根为 1.602,方差贡献率 17.80%,包括  $F_v'/F_m'$  和  $G_s$  信息,说明  $Y(II)$ 、ETR、 $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$ 、 $q_P$ 、 $C_i$ 、 $F_v'/F_m'$  是反映干旱胁迫的较为重要的指标。根据主成分的特征向量计算每种幼苗的抗旱得分,主成分得分值越大,说明植物抗旱性越强,反之则弱<sup>[12-13]</sup>。由表 4 可知,6 种灌木植物抗旱性从高到低的排序依次为花叶鹅掌柴>白蟾>狗牙花>红背桂>软枝黄蝉>龙船花。

3 讨论与结论

3.1 植物抗旱性与光合指标之间的关系

$P_n$  是反映植物光合生理对逆境响应能力的重要指标<sup>[14]</sup>,干旱胁迫下所有植物的  $P_n$  均会下降,且抗旱性强的植物  $P_n$  的降低程度低于抗旱性弱的植物<sup>[15]</sup>。6 种灌木的  $P_n$  均

表 4 干旱胁迫处理下 6 种灌木植物的综合评定结果

植物	总得分	排名
花叶鹅掌柴	1.59	1
白蟾	0.62	2
狗牙花	0.44	3
红背桂	0.43	4
软枝黄蝉	-1.48	5
龙船花	-1.61	6

随着干旱胁迫的加剧而逐渐下降,其中花叶鹅掌柴降幅最小,说明其抗旱性较强,而龙船花降幅最大,说明其抗旱性较差。干旱胁迫下  $P_n$  下降可能是因为干旱胁迫导致气孔关闭,使  $CO_2$  进入叶片受阻,即气孔限制(stomatal limitations)<sup>[16-17]</sup>;也可能是植物叶肉细胞光合活性下降所造成的非气孔限制(non-stomatal limitations)<sup>[18]</sup>。根据 Farquhar 等提出的观点<sup>[19]</sup>,当叶片的  $C_i$  和  $G_s$  变化趋势均为下降,则  $P_n$  下降为气孔限制所致, $C_i$  降低而  $G_s$  升高或不变的情况下为非气孔限制所致。本实验结果表明,干旱胁迫对 6 种植物叶片的  $G_s$ 、 $C_i$  与对  $P_n$  的影响基本一致,说明  $P_n$  的下降是由于气孔限制所导致的。 $G_s$  在干旱胁迫下的降低有利于减少水分蒸腾<sup>[20]</sup>,所以随着 6 种灌木  $G_s$  的不断下降,气孔开放程度持续降低,6 种灌木的  $T_r$  也随之下降。

复水后,6 种灌木植物叶片的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  均有所恢复,除了软枝黄蝉,其余植物叶片的  $C_i$  也有回升,说明随着干旱胁迫的解除,植物叶片的气孔开放, $CO_2$  进入叶片的量增加,植物光合作用开始恢复。虽然软枝黄蝉的  $G_s$  有回升,但是叶片的  $C_i$  恢复较慢,可能是其光系统受害严重和植物自身恢复能力有限所致。

3.2 植物抗旱性与叶绿素荧光动力参数的关系

干旱胁迫下,PS II 会主动调节光化学反应效率和 ETR 以

适应植物  $\text{CO}_2$  同化能力下降的情况,从而减少过剩光能对光合系统的伤害<sup>[21]</sup>。PS II 有效光化学量子产量( $F_v'/F_m'$ )代表植物光合反应中心 PS II 的光合效率,反映了开放的 PS II 反应中心原初光能捕获效率<sup>[22-23]</sup>。PS II 实际光化学量子产量  $Y(\text{II})$  反映了 PS II 反应中心在部分关闭下所具有的实际原初光能捕获效率,也反映着 PS II 反应中心的开放程度<sup>[24]</sup>。表观光合电子传递速率(ETR)值可以反映植物光合能量的传递速率,也可以表示植物光合能力<sup>[25]</sup>。化学淬灭( $q_p$ )代表了光合能量用于暗反应固定能量的部分<sup>[26]</sup>。干旱胁迫下,NPQ 的提高是光合器官在干旱胁迫下的自我保护机制,通过热耗散防御光抑制对 PS II 反应的破坏<sup>[27-28]</sup>。

在本试验中,6 种灌木的  $F_v'/F_m'$ 、 $Y(\text{II})$ 、ETR 以及  $q_p$  均随着干旱胁迫的增强而持续降低,并且同时期 NPQ 值持续上升,表明 6 种灌木 PS II 反应中心的开放程度、光能转化和利用效率均受到干旱胁迫的影响,其碳同化能力和激发能的捕捉效能也因此下降。 $q_p$  的下降反映了 6 种灌木 PS II 天线色素吸收的光能用于光合化学反应的比例降低,而 NPQ 的提高则表明 6 种植物均启动光破坏防御机制,通过增加热耗散防御过剩光能的破坏,保护光合器官。复水后,6 种植物各项荧光指标均有所恢复,其中花叶鹅掌柴叶片的  $Y(\text{II})$ 、ETR 和  $q_p$ 、龙船花和红背桂的  $F_v'/F_m'$ 、狗牙花的 ETR 均恢复至对照,除了白蟾外其他 5 种植物的 NPQ 均恢复至对照,表明 12 d 的干旱胁迫未对 6 种灌木的光合细胞造成不可逆转的损伤,且进一步表明花叶鹅掌柴在本试验中表现了较强的抗旱能力。

### 3.3 6 种灌木抗旱性综合评价

综上所述,6 种灌木的光合指标和叶绿素荧光动力参数均对干旱胁迫作出明显的响应。利用主成分分析法,根据对各个指标与植物抗旱性关系的分析得出,6 种灌木的抗旱能力由强到弱依次为花叶鹅掌柴 > 白蟾 > 狗牙花 > 红背桂 > 软枝黄蝉 > 龙船花。对各抗旱指标的分析表明,光合指标中的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  及叶绿素荧光动力参数中的  $Y(\text{II})$ 、ETR、 $q_p$  等指标在一定程度上可以反映植物受干旱的影响程度,可以作为比较 6 种灌木抗旱性的指标。

### 参考文献:

- [1] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划,2015,39(6):26-36.
- [2] 宋国萍,宋川. 边坡生态防护用灌木植物耐旱性试验研究与应用[J]. 四川环境,2010,29(1):1-8.
- [3] 周媛,徐冬云,董艳芳,等. 9 种轻型屋顶绿化景天属植物的抗旱性研究[J]. 中国农学通报,2012,28(25):294-301.
- [4] 单进,戴子云. 雨水花园植物选择与搭配研究[J]. 山西建筑,2017,43(1):207-209.
- [5] 李志军,罗青红,伍维模,等. 干旱胁迫对胡杨和灰叶胡杨光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 干旱区研究,2009,26(1):45-52.
- [6] Lawlor D W, Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants

- [J]. Plant, Cell & Environment, 2002, 25(2): 275-294.
- [7] 周宇飞,王德权,陆樟铤,等. 干旱胁迫对持绿性高粱光合特性和内源激素 ABA、CTK 含量的影响[J]. 中国农业科学,2014,47(4):655-663.
- [8] 马瑞丽,胥生荣,陈垣,等. 干旱胁迫对黄芩叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 中药材,2018,41(3):531-534.
- [9] 胡宏远,王振平. 干旱胁迫对赤霞珠葡萄叶片水分及叶绿素荧光参数的影响[J]. 干旱区资源与环境,2017,31(4):124-130.
- [10] Ahmed S, Nawata E, Hosokawa M, et al. Alterations in photosynthesis and some antioxidant enzymatic activities of mungbean subjected to waterlogging[J]. Plant Science, 2002, 163(1):117-123.
- [11] 林丽,李以康,张法伟,等. 青藏高原高寒矮蒿草草甸退化演替主成分分析[J]. 中国草地学报,2012,34(1):24-30.
- [12] 马新,李铭,朱耀军,等. 干旱胁迫下文冠果光合指标的变化研究[J]. 河南农业科学,2017,46(1):122-126.
- [13] 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等. 紫花苜蓿抗旱性主成分及隶属函数分析[J]. 草地学报,2006,14(2):142-146.
- [14] 刘泽彬,程瑞梅,肖文发,等. 水淹胁迫对植物光合生理生态的影响[J]. 世界林业研究,2013,26(3):33-38.
- [15] Ao H, Zhang Y. Effects of water stress on photosynthetic characteristics of spruce[J]. Bulletin of Botanical Research, 2007, 27(4):445-451.
- [16] 魏清江,冯芳芳,马张正,等. 干旱复水对柑橘幼苗叶片光合、叶绿素荧光和根系构型的影响[J]. 应用生态学报,2018,29(8):2485-2492.
- [17] 谭晓风,卢钲. 干旱胁迫对两种油桐幼苗生长、气体交换及叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报,2017,37(5):1515-1524.
- [18] 张林春,郝扬,张仁和,等. 干旱及复水对不同抗旱性玉米光合特性的影响[J]. 西北农业学报,2010,19(5):76-80.
- [19] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1982, 33(3):317-345.
- [20] 卢广超,许建新,薛立,等. 干旱胁迫下 4 种常用植物幼苗的光合和荧光特性综合评价[J]. 生态学报,2013,33(24):7872-7881.
- [21] 朱弘,温国胜. 不同竹龄毛竹冠层叶片 PS II 叶绿素荧光特性的比较[J]. 中南林业科技大学学报,2017,37(1):12-19.
- [22] 张仁和,郑友军,马国胜,等. 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响[J]. 生态学报,2011,31(5):1303-1311.
- [23] 尤鑫,龚吉蕊. 叶绿素荧光动力学参数的意义及实例辨析[J]. 西部林业科学,2012,41(5):90-94.
- [24] 鲁松. 叶绿素荧光动力学在植物抗逆性研究中的应用[J]. 四川林业科技,2013,34(4):69-71.
- [25] 陈建明,俞晓平,程家安. 叶绿素荧光动力学及其在植物抗逆生理研究中的应用[J]. 浙江农业学报,2006,18(1):51-55.
- [26] 刘艳,黄乔乔,马博英,等. 高温干旱胁迫下香根草光合特性等生理指标的变化[J]. 林业科学研究,2006,19(5):638-642.
- [27] 黄承建,魏刚,徐建俊,等. 干旱胁迫对苎麻叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国麻业科学,2014,36(1):41-45.
- [28] 孙景宽,张文辉,陆兆华,等. 干旱胁迫下沙枣和孩儿拳叶绿素荧光特性研究[J]. 植物研究,2009,29(2):216-223.