

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201606019

引文格式: 丁印龙, 杨盛昌, 周群, 等. 干旱胁迫下三种三角梅的生理反应 [J]. 广西植物, 2017, 37(9): 1168-1175

DING YL, YANG SC, ZHOU Q, et al. Physiological responses of three cultivar seedlings of *Bougainvillea* under drought stress [J]. *Guihaia*, 2017, 37(9): 1168-1175

干旱胁迫下三种三角梅的生理反应

丁印龙¹, 杨盛昌², 周群¹, 刘雪霞¹, 王振¹

(1. 厦门市园林植物园, 福建 厦门 361003; 2. 厦门大学 环境与生态学院, 福建 厦门 361102)

摘要: 该研究对勤花三角梅(*Bougainvillea buttiana* ‘Miss Manila’)、樱花三角梅(*B. glabra* ‘Imperial Delight’)和金心鸳鸯三角梅(*B. peruviana* ‘Thimma’)三个三角梅品种的幼苗进行人工干旱胁迫, 分析了干旱胁迫对三角梅品种的外观形态和生理生化水平的影响, 探讨了不同品种三角梅对干旱胁迫的适应能力。结果表明: 随着干旱时间的延长, 三角梅品种的叶片出现下垂、皱缩、变黄、脱落, 最后植株死亡; 过氧化物酶 POD 活性先升高后降低, 而超氧化物歧化酶 SOD 活性则逐渐降低, 降低速度因品种而异; qP 值降低、 qN 值升高、PS II 反应中心光化学效率(F_v/F_m)、PS II 潜在活性(F_v/F_o) 均呈现降低。该研究结果为三角梅的栽培应用和品种选择提供了依据。

关键词: 三角梅, 干旱胁迫, 生长, 叶绿素荧光

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2017)09-1168-08

Physiological responses of three cultivar seedlings of *Bougainvillea* under drought stress

DING Yin-Long¹, YANG Sheng-Chang², ZHOU Qun¹, LIU Xue-Xia¹, WANG Zhen¹

(1. Xiamen Botanical Garden, Xiamen 361003, Fujian, China; 2. College of the Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian, China)

Abstract: Seedlings of *Bougainvillea buttiana* ‘Miss Manila’, *B. glabra* ‘Imperial Delight’ and *B. peruviana* ‘Thimma’ were treated to study the physiological responses under drought stress. The results showed that the plant leaves began to droop, gradually shrink, yellow in color, and fell off, all of the treatment seedlings died finally under the long drought. The results showed that the peroxidase activities (POD) were increased at beginning, and decreased finally, while the superoxide dismutase (SOD) activities were gradual decreased, but the reduction rates were different in the three cultivar seedlings. The research on chlorophyll fluorescence parameters showed that qP value was decreased, while qN value was increased, and the photochemical efficiency of PS II reaction center (F_v/F_m) and potential activity of PS II (F_v/F_o) were decreased under drought stress. This study provides information for breeding application and choosing cultivars of *Bougainvillea*.

Key words: *Bougainvillea*, drought stress, growth, chlorophyll fluorescence

收稿日期: 2016-11-28 修回日期: 2016-12-17

基金项目: 厦门市科学技术局资助项目 (3502Z20124013) [Supported by the Scientific and Technological Bureau of Xiamen City (3502Z20124013)].

作者简介: 丁印龙(1975-), 男, 福建建宁人, 高级农艺师, 主要从事园艺植物的栽培和管理工作的 E-mail: xmylding@163.com。

人为活动加剧了温室气体的排放,使得全球气候逐渐变暖。温度增高加剧了森林的蒸腾作用和土壤水分的蒸发,土壤因水分蒸发而导致的干旱提高了森林的死亡率(Allen et al 2010)。土壤干旱胁迫对植物的影响及其植物的响应机制是科学家们一直关注的热点之一,相关研究反映在植物光合作用(Tattini et al 2014)、抗氧化还原酶系统、类胡萝卜素、脯氨酸、可溶性糖、蛋白质含量以及相关基因表达及调控等多个方面(Mohammadpour et al 2015)。

三角梅(*Bougainvillea*)隶属于紫茉莉科(Nyctaginaceae),又称簕杜鹃、叶子花,全世界约有14~18种,自然分布于南美洲的巴西、秘鲁、厄瓜多尔、阿根廷、哥伦比亚等地区(徐夙侠等 2008)。目前,具有较高园艺价值的三角梅观赏品种已超过300个,分属于3个自然种以及1个杂交种,其中自然种为普通三角梅(*B. spectabilis*)、光叶三角梅(*B. glabra*)以及秘鲁三角梅(*B. peruviana*),杂交种为杂交三角梅(*B. buttiana*),前两个种较为常见,杂交品种花色较多(周群,2008)。三角梅喜阳光、水分充足的环境,水分控制可以调节其花期(邵志芳等 2006),谢志南等(2009)研究了失水胁迫对三角梅插穗叶片光合作用的影响。有关三角梅的研究主要集中在栽培养护技术(吴淑梅,2002;何礼军等 2011)、花卉繁殖技术(周群,2008)以及低温胁迫响应(邢海盈,2013)等方面。三角梅在中国南方等地区大面积栽培,并在天桥绿化等方面应用逐渐增多,但三角梅的定期维护不容易,因此筛选出抗旱性较强的三角梅品种具有广泛的应用价值,而不同品种三角梅对干旱胁迫的适应能力尚未见有相关报道。本研究从干旱胁迫对三角梅的外观形态和生理生化水平影响的角度出发,探究不同品种三角梅对干旱胁迫的适应能力,以期对三角梅的栽培应用和品种选择提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为勤花三角梅(*Bougainvillea buttiana* ‘Miss Manila’)、樱花三角梅(*B. glabra* ‘Imperial Delight’)、金心鸳鸯三角梅(*B. peruviana* ‘Thimma’)三个品种。均为半年生、长势一致、健壮的盆栽扦插苗

(每盆1棵)栽培基质为田园土:腐殖土(1:1),扦插盆内径20 cm,高度30 cm,于厦门市园林植物园隔离温室常规培养。

1.2 方法

1.2.1 干旱处理 试验于2014年7月3日在厦门市园林植物园隔离温室内进行,温室内白天平均气温为36℃,夜晚平均气温为28℃,平均相对湿度为42.2%。针对各三角梅品种,取48盆(每品种)参试植株进行控水干旱处理,试验前一次性浇透水,之后终止补充水分,每隔3 d观察并记录三角梅的外观形态变化,测定土壤相对含水量(土壤相对含水量=土壤含水量/田间持水量),同时采摘植株的成熟叶片(第5至第8位功能叶片),对不同控水时间的参试植株进行叶片含水量、SOD酶活性、POD酶活性以及叶绿素荧光参数的测定。以定期浇水,未受控水干旱胁迫处理的植株为对照。

1.2.2 生理指标测定 记录叶子形态:观察叶子是否发黄、皱缩、下垂、萎蔫等。

土壤相对含水量:烘干法。

叶片含水量:叶片含水量=(鲜重-85℃烘至恒重时的重量)/鲜重×100%。

叶片的SOD酶活性:采用氮蓝四唑光还原法(吕金印和郭涛,2010)。

叶片的POD酶活性:采用愈创木酚法(吕金印和郭涛,2010)。

叶绿素荧光参数:采用便携式叶绿素荧光仪(PAM-2100),按照仪器使用手册进行叶片最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学量子产量(Yield)、PS II潜在活性(F_v/F_o)、PS II光化学猝灭系数(qP)和PS II非光化学猝灭系数(qN)等指标的测定。以上指标的测定叶片为采取随机采样,数量10片,取3个重复,每隔3 d测定1次,每次测3个平行。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下三种三角梅的形态变化

三种三角梅的外观形态随着干旱时间的延长而变化如表1所示,三角梅叶片的外观形态变化见图1。控水干旱处理3 d(土壤相对含水量为37.6%)时,樱花三角梅和金心鸳鸯三角梅两种三角梅植株均开始受到干旱胁迫的影响,主要表现为叶子的下垂。随着

表 1 干旱胁迫下三种三角梅的植物形态变化
Table 1 Morphology changes of three cultivars of *Bougainvillea* under drought stress

| 干旱时间 Drought stress time (d) | 土壤相对 含水量 Relative content of soil water (%) | 勤花三角梅 <i>B. buttiana</i> 'Miss Manila' | 金心鸳鸯三角梅 <i>B. peruviana</i> 'Thimma' | 樱花三角梅 <i>B. glabra</i> 'Imperial Delight' |
|---------------------------------------|--|---|--|---|
| 0 | 100 | 叶子灰绿色 Gray-green leaves | 叶子浅绿色 Light green leaves | 叶子绿色 Green leaves |
| 3 | 37.6 | 正常 Normal | 1/4 叶片下垂 1/4 of leaves drooped | 叶子开始下垂 卷曲 Leaves began to droop and roll |
| 6 | 17.2 | 1/2 叶子下垂 1/2 of leaves drooped | 1/2 叶子下垂,少数叶子卷曲 1/2 of leaves drooped, leaves began to roll | 2/3 叶子卷曲,叶子变黄脱落 2/3 of leaves began to roll and leaves began to shedding |
| 9 | 9.3 | 2/3 叶子下垂 2/3 of leaves drooped | 2/3 叶子下垂 卷曲 2/3 of leaves drooped, rolled | 叶子脱落,几乎死亡 Leaves shedding and almost being dead |
| 12 | 7.5 | 2/3 叶子卷曲 枯干 2/3 of leaves drooped and withered | 叶子死亡脱落 Leaves died | 枯死 Plants died |

处理间的延长,叶子开始卷曲、发干变黄、脱落,直至死亡。其中,樱花三角梅处理第 9 天时(土壤相对含水量为 9.3%),多数叶片发生脱落,第 12 天时(土壤相对含水量为 7.5%),植株全部枯死。勤花三角梅在干旱胁迫处理 6 d 时(土壤相对含水量为 17.2%),出现部分叶片下垂现象,至 12 d 时(土壤相对含水量为 7.5%),多数叶子发生卷曲。对比三种三角梅,其抗旱能力从强到弱依次为勤花三角梅、金心鸳鸯三角梅、樱花三角梅。

2.2 干旱胁迫下三种三角梅叶片的含水量变化

三种三角梅的叶片含水量均随着干旱程度的加剧而降低,但降低幅度不同。金心鸳鸯三角梅的叶片含水量呈下降趋势,但整体下降较为平缓,而勤花三角梅和樱花三角梅在干旱胁迫 3 d 时,叶片含水量急剧下降,与对照相比,下降幅度分别为 16.14% 和 25.67%。随着干旱程度的加剧,叶片含水量继续下降,当干旱 9 d 时,勤花三角梅、金心鸳鸯三角梅、樱花三角梅的叶片含水量分别为对照组的 71.91%、83.57% 和 55.87%,说明樱花三角梅对干旱胁迫更敏感。

2.3 干旱胁迫对三种三角梅叶片抗氧化酶活性的影响

2.3.1 干旱胁迫对三种三角梅叶片 SOD 酶活性的影响 三种三角梅的 SOD 酶活性均随着干旱时间的延长而减小,因此,干旱胁迫会抑制三角梅的 SOD

酶活性。其中金心鸳鸯三角梅降幅最大,干旱处理 9 d 后 SOD 酶活性仅为对照的 20.83%,差异性显著。勤花三角梅品种则缓慢降低,樱花三角梅减缓速度居中。由于干旱处理第 12 天时,各品种叶片萎蔫严重,故未测定相关生理指标。

2.3.2 干旱胁迫对三种三角梅叶片 POD 酶活性的影响 三种三角梅的 POD 酶活性随着干旱时间的延长先增加后降低,说明短时间干旱胁迫可诱导三角梅 POD 酶活性的增加,但随着干旱胁迫的加剧,POD 酶活性开始降低。樱花三角梅的 POD 酶活性变化幅度最大,干旱处理 3 d 时达到最高,之后显著下降,干旱处理 9 d 后 POD 酶活性降为对照的 44%;勤花三角梅的 POD 酶活性至干旱处理 6 d 时达到最高,之后降低。金心鸳鸯三角梅的 POD 酶活性变化不大,对干旱敏感度低。

2.4 干旱胁迫对三种三角梅叶片叶绿素荧光参数的影响

2.4.1 干旱胁迫对三种三角梅叶片 F_v/F_m 的影响 随着干旱处理时间的增长,三种三角梅叶片的 F_v/F_m 呈现降低的趋势,其中勤花三角梅在干旱处理第 6 天时, F_v/F_m 达到最大值,其后下降。樱花三角梅在第 9 天之后成熟功能叶完全干旱死亡,其 F_v/F_m 为 0,金心鸳鸯三角梅的叶片 F_v/F_m 下降速度比勤花三角梅的 F_v/F_m 下降速度快。

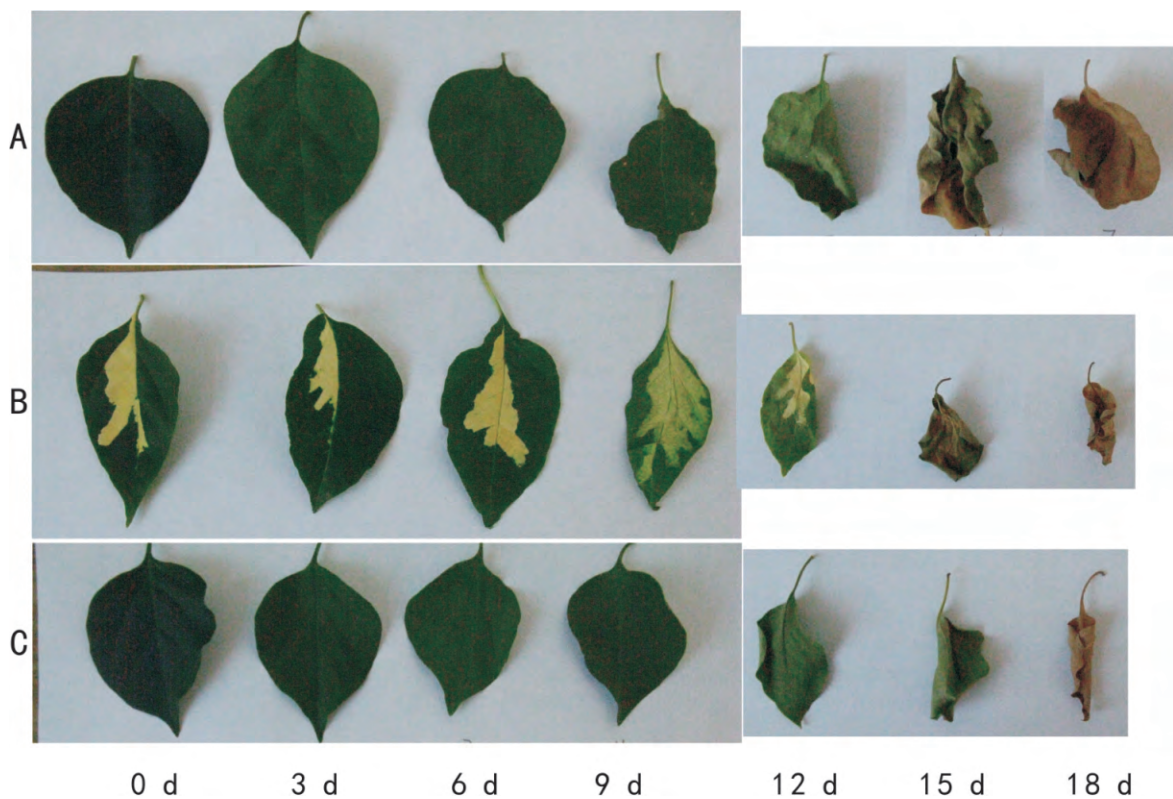


图 1 干旱胁迫下三种三角梅叶片的外观形态变化 A. 樱花三角梅; B. 金心鸳鸯三角梅; C. 勤花三角梅。
 Fig. 1 Morphology changes of three cultivars of *Bougainvillea* under drought stress A. *B. glabra* 'Imperial Delight'; B. *B. peruviana* 'Thimma'; C. *B. buttiana* 'Miss Manila'.

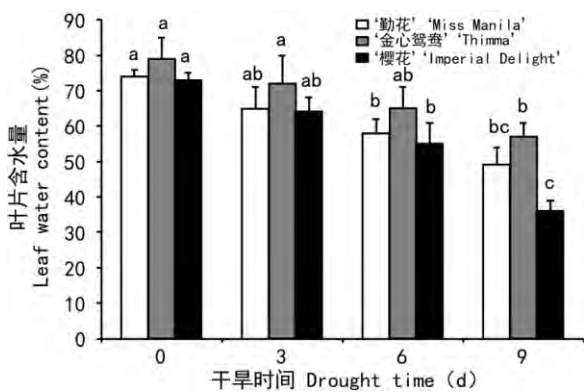


图 2 干旱胁迫对三种三角梅叶片含水量的影响
 Fig. 2 Effects of drought stress on the leaf water content of three cultivars of *Bougainvillea*

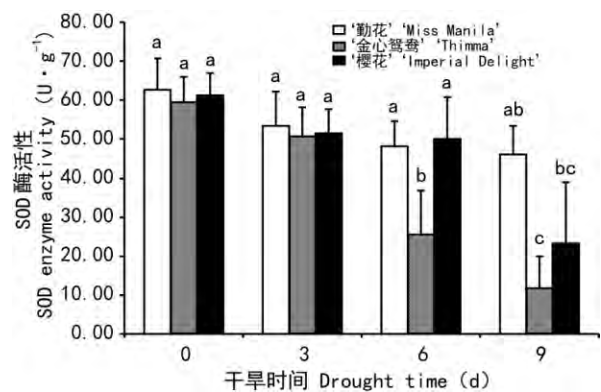


图 3 干旱胁迫对三种三角梅 SOD 酶活性的影响
 Fig. 3 Effects of drought stress on the SOD enzyme activity of three cultivars of *Bougainvillea*

2.4.2 干旱胁迫对三种三角梅叶片光化学量子产量的影响 干旱胁迫显著降低了三种三角梅的光化

学量子产量。前 6 天干旱胁迫过程中,勤花三角梅变化幅度最小,金心鸳鸯三角梅居中,樱花三角梅

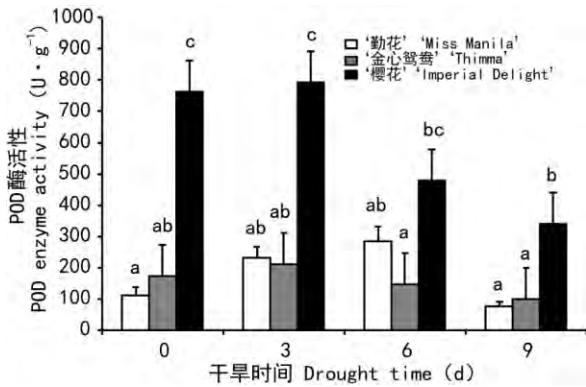


图 4 干旱胁迫对三种三角梅 POD 酶活性的影响
Fig. 4 Effects of drought stress on the POD enzyme activity of three cultivars of *Bougainvillea*

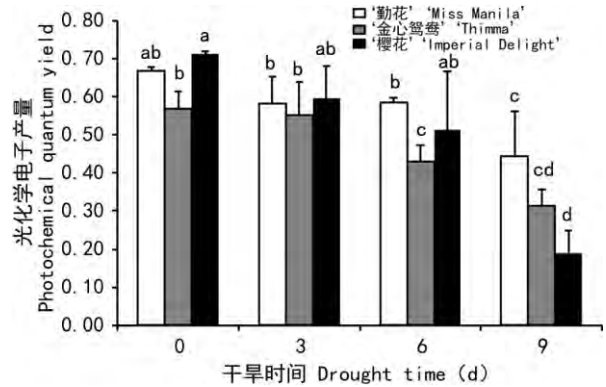


图 6 干旱胁迫对三种三角梅叶片光化学量子产量的影响
Fig. 6 Effects of drought stress on the photochemical quantum yield of three cultivars of *Bougainvillea*

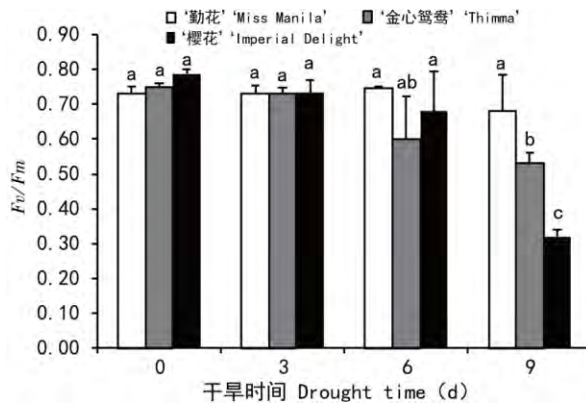


图 5 干旱胁迫对三种三角梅 F_v/F_m 的影响
Fig. 5 Effects of drought stress on the F_v/F_m of three cultivars of *Bougainvillea*

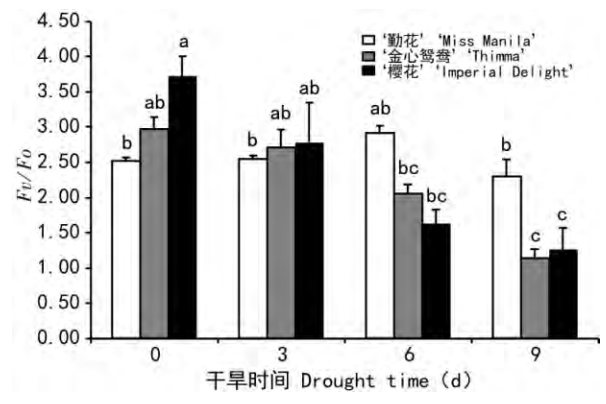


图 7 干旱胁迫对三种三角梅叶片 F_v/F_o 的影响
Fig. 7 Effects of drought stress on the F_v/F_o of three cultivars of *Bougainvillea*

的光化学量子产量变化幅度最大; 干旱处理 9 d 时, 勤花三角梅、金心鸳鸯三角梅和樱花三角梅的光化学量子产量分别为对照的 65.71%、54.92%、36.16%。

2.4.3 干旱胁迫对三种三角梅叶片 PS II 潜在活性 F_v/F_o 的影响 三角梅的 F_v/F_o 受干旱胁迫影响的变化趋势和 F_v/F_m 的变化趋势大致相似, 勤花三角梅品种的 F_v/F_o 随着时间的增长先升高再降低, 而樱花三角梅和金心鸳鸯三角梅均表现出下降的趋势, 其中樱花三角梅 F_v/F_o 的下降速度比金心鸳鸯三角梅 F_v/F_o 的下降速度快, 分别降至对照的

43.26%、38.18%。

2.4.4 干旱胁迫对三种三角梅叶片 qP 、 qN 的影响 热耗散可以防御光抑制带来的破坏, 是植物保护光系统 II (PS II) 免受伤害的重要机制。干旱胁迫对三种三角梅叶片的 qP 、 qN 的影响如表 2 所示。干旱胁迫对植物叶片的光化学猝灭系数 qP 和非光化学猝灭系数 qN 的影响不同。三种三角梅的 qP 均表现出逐渐降低的趋势, 但降低的程度不同, 干旱处理 6 d 时, 樱花三角梅、勤花三角梅、金心鸳鸯三角梅叶片的 qP 分别为对照的 85.36%、97.27%、88.62%。三角梅叶片的 qN 则均随着干旱处理时间的延长而逐渐升高, 樱花

表 2 干旱胁迫对三种三角梅叶片 qP 、 qN 的影响
Table 2 Effects of drought stress on the qP and qN of three cultivars of *Bougainvillea*

| 干旱时间 Drought time (d) | 金心鸳鸯三角梅 <i>B. peruviana</i> 'Thimma' | | 勤花三角梅 <i>B. buttiana</i> 'Miss Manila' | | 樱花三角梅 <i>B. glabra</i> 'Imperial Delight' | |
|-----------------------------|---|------------|---|------------|--|------------|
| | qP | qN | qP | qN | qP | qN |
| 0 | 0.91±0.03a | 0.06±0.01a | 0.77±0.08a | 0.05±0.01a | 0.92±0.02a | 0.05±0.01a |
| 3 | 0.87±0.12a | 0.07±0.02a | 0.78±0.11a | 0.05±0.01a | 0.84±0.06ab | 0.12±0.03b |
| 6 | 0.80±0.10ab | 0.07±0.01a | 0.75±0.13ab | 0.06±0.03a | 0.78±0.07b* | 0.19±0.04c |
| 9 | 0.65±0.08b* | 0.08±0.01b | 0.61±0.07b* | 0.08±0.01b | 0.37±0.09d** | 0.12±0.02d |

注: 同一指标的不同字母表示差异性显著。

Note: Different letters of the same indicators mean significant differences.

三角梅的 qN 在干旱第 6 天时最大。

3 讨论与结论

3.1 干旱胁迫对三角梅外观形态和抗氧化酶活性的影响

干旱胁迫对三角梅所有生理指标的影响均会综合反映在叶特征的变化上,所以干旱胁迫下叶特征变化可作为胁迫反应中的重要指标。本研究中三种三角梅叶片对干旱胁迫的敏感程度不一致,樱花三角梅在第 9 天时,叶片死亡,对干旱胁迫较为敏感,而勤花三角梅在干旱胁迫第 12 天时,叶片接近枯死,对干旱胁迫相对不敏感。SOD 和 POD 作为植物体内酶促防御系统的重要保护酶,在植物受到低程度的干旱胁迫时,活性氧的形成和清除保持一种动态平衡。三种三角梅叶片的 POD 活性呈现先升高后降低的规律,而 SOD 活性则逐渐降低,这与时忠杰等(2007)研究板栗幼苗叶片对水分胁迫的活性氧代谢和周广等(2010)研究井冈山杜鹃叶片对高温胁迫的响应研究的结果不一致,这说明在三角梅中,干旱胁迫造成的膜系统损伤,主要由 POD 酶进行修复,随着干旱程度的加剧,三角梅不同品种的 SOD 活性和 POD 活性对干旱敏感度不同,樱花三角梅的 POD 酶活性比勤花三角梅和金心鸳鸯三角梅的 POD 酶活性高 3~4 倍,而 SOD 酶活性相差不大,说明在樱花三角梅中,干旱胁迫造成的损伤主要由 POD 酶进行修复,并在一定的胁迫范围内,

维持植株正常生理活动的进行。剧烈的干旱胁迫造成两种抗氧化酶活性的降低,且降低的速度不同,这与小麦幼苗在干旱胁迫下的两种保护酶活性变化相一致(姜山等,2011),这可能是由于过度的干旱胁迫引起膜脂过氧化作用,破坏了两种酶的结构、活性中心或抑制酶的表达(Wang et al, 2009)。罗宏海等(2013)研究了干旱和复水对棉花根系及叶片内源激素含量的影响,文章指出干旱处理结束后复水,根系及叶片的 ABA 含量并未随着土壤水分条件的改善而降低,所以后续研究干旱胁迫对三角梅的影响,可开展复水对三角梅扦插苗生理活性的影响。

3.2 干旱胁迫对三角梅光合特性的影响

叶绿素荧光参数中,叶绿素荧光的可变部分(F_v)与最大荧光值(F_m)的比值(F_v/F_m)反映了开放的 PS II 反应中心捕获激发能的效率,是研究植物胁迫的重要参数(Huang et al, 2013)。 F_v/F_m 与光合作用的净产率呈正相关,光化学效率的高低直接决定叶片光合作用的高低。因此,由于逆境因素造成的光化学效率降低会成为光合作用的重要限制因子(Krause & Wise, 1991; Filek et al, 2015)。对叶绿素荧光参数的研究表明:干旱胁迫下三角梅 PS II 反应中心光化学效率(F_v/F_m)、PS II 潜在活性(F_v/F_o)降低, qP 值逐渐降低,而 qN 值逐渐升高,这与张国伟等(2011)研究盐胁迫对棉花光合生理响应的结论一致。总体上抗旱性强的勤花三角梅在干旱胁迫的一定范围内,勤花三角梅叶片的 PS II

反应中心电子传递活性受干旱胁迫的影响在三者中较小,光合机构的受损程度较低。干旱胁迫降低了 F_v/F_m 值,继而降低了植物的光合作用的净光合速率,即植物正常的生长受到了限制。三种三角梅品种的叶绿素荧光变化与韩瑞宏等(2007)研究紫花苜蓿实验的结果相吻合,即干旱胁迫影响了三角梅光合速率的大小,限制了三角梅的正常生长。综合各项指标的测定结果,可知三种三角梅的抗干旱胁迫的能力从高到低依次为勤花三角梅、金心鸳鸯三角梅、樱花三角梅。

刘瑞显等(2008)研究了干旱条件下花铃期棉花对氮素的生理响应,指出棉花花铃期土壤干旱条件下增施氮肥虽然有利于水分利用效率(WUE)的提高,但却降低了棉花的光合性能。干旱胁迫引起三角梅一系列生理水平的变化,以及三角梅各项生理指标的变化和分子机制的响应,探究干旱胁迫对三角梅的各代谢通路和应激机制水平的影响,鉴定不同三角梅品种的抗旱能力,对寻求提高三角梅抗旱性的方法,具有很大的应用意义。

参考文献:

- ALLEN CD, MACALADY AK, CHENCHOUNI H, et al, 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests [J]. *For Ecol Manag*, 259(4): 660-684.
- FILEK M, ŁABANOWSKA M, KOŚCIELNIAK J, et al, 2015. Characterization of barley leaf tolerance to drought stress by chlorophyll fluorescence and electron paramagnetic resonance studies [J]. *J Agron Crop Sci*, 201(3): 228-240.
- HAN RH, LU XS, GAO GJ, et al, 2007. Photosynthetic physiological response of alfalfa (*Medicago sativa*) to drought stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 27(12): 5230-5237. [韩瑞宏, 卢欣石, 高桂娟, 等, 2007. 紫花苜蓿对干旱胁迫的光合生理响应 [J]. *生态学报*, 27(12): 5230-5237.]
- HE LJ, HE Y, LI BB, et al, 2011. Review of the studies on *Bougainvillea*'s introduction and cultivation in China [J]. *Hubei Agric Sci*, 50(8): 1519-1521. [何礼军, 何野, 黎八保, 等, 2011. 三角梅在我国引种栽培的研究综述 [J]. *湖北农业科学*, 50(8): 1519-1521.]
- HUANG C, ZHAO S, WANG L, et al, 2013. Alteration in chlorophyll fluorescence, lipid peroxidation and antioxidant enzymes activities in hybrid ramie (*Boehmeria nivea* L.) under drought stress [J]. *Aust J Crop Sci*, 7(5): 594.
- JIANG S, ZHU QZ, ZHANG ZH, et al, 2011. Effects of chitosan on wheat germination and activities of protective enzyme in seedlings under drought stress [J]. *Agric Res Arid Areas*, 29(1): 206-209. [姜山, 朱启忠, 张真豪, 等, 2011. 壳聚糖对小麦种子萌发及干旱胁迫下幼苗保护酶活性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 29(1): 206-209.]
- KRAUSE GH, WEIS E, 1991. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The Basics [J]. *Ann Rev Plant Phys Plant Mol Biol*, 1(42): 313-349.
- LIU RX, GUO WQ, CHEN BL, et al, 2008. Physiological responses of cotton plant to fertilizer nitrogen at flowering and boll-forming stages under soil drought [J]. *Chin J Appl Ecol*, 19(7): 1475-1482. [刘瑞显, 郭文琦, 陈兵林, 等, 2008. 干旱条件下花铃期棉花对氮素的生理响应 [J]. *应用生态学报*, 19(7): 1475-1482.]
- LU JY, GUO T, 2010. Effects of water stress on activities of protective enzyme and physiological characteristics in seedlings of two varieties of sweet sorghum [J]. *Agric Res Arid Areas*, 28(4): 89-93. [吕金印, 郭涛, 2010. 水分胁迫对不同品种甜高粱幼苗保护酶活性等生理特性的影响 [J]. *干旱地区农业研究*, 28(4): 89-93.]
- LUO HH, HAN HY, ZHANG YL, et al, 2013. Effects of drought and re-watering on endogenous hormone contents of cotton roots and leaves under drip irrigation with mulch [J]. *Chin J Appl Ecol*, 24(4): 1009-1016. [罗宏海, 韩焕勇, 张亚黎, 等, 2013. 干旱和复水对膜下滴灌棉花根系及叶片内源激素含量的影响 [J]. *应用生态学报*, 24(4): 1009-1016.]
- MOHAMMADPOUR M, NEGAHBAN M, SAEEDFAR S, et al, 2015. Effect of drought stress on some of the biochemical characteristics of three achillea populations (*Achillea vermicularis*) [J]. *Russ J Biol Res*, 4(2): 68-80.
- SHAO ZF, YANG YB, QIU SS, et al, 2006. The study advance of flowering time regulator of *Bougainvillea glabra* [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 22(5): 326-329. [邵志芳, 杨义标, 邱少松, 等, 2006. 叶子花花期调控技术研究进展 [J]. *中国农学通报*, 22(5): 326-329.]
- SHI ZJ, DU AP, HU ZS, et al, 2007. Effect of soil water stress on active oxygen metabolism of chestnut seedling leaves [J]. *For Res*, 20(5): 683-687. [时忠杰, 杜阿朋, 胡哲森, 等, 2007. 水分胁迫对板栗幼苗叶片活性氧代谢的影响 [J]. *林业科学研究*, 20(5): 683-687.]
- TATTINI M, VELIKOVA V, VICKERS C, et al, 2014. Isoprene production in transgenic tobacco alters isoprenoid, non-structural carbohydrate and phenylpropanoid metabolism, and protects photosynthesis from drought stress [J]. *Plant Cell Environ*, 37(8): 1950-1964.
- WANG X, PENG Y, SINGER JW, et al, 2009. Seasonal changes in photosynthesis, antioxidant systems and ELIP expression in a thermonastic and non-thermonastic *Rhododendron* species: a comparison of photoprotective strategies in overwintering plants [J]. *Plant Sci*, 177(6): 607-617.
- WU SM, 2002. Preliminary study on the management technology and application of *Bougainvillea* [J]. *Xiamen Technol*, 4: 60

- 62. [吴淑梅, 2002. 三角梅的养护技术及应用初探 [J]. 厦门科技, 4: 60-62.]
- XIE ZN, ZHONG ZH, ZHANG XQ, et al, 2009. Effects of water loss stress on leaf photosynthesis of *Bougainvillea spectabilis* cuttings [J]. Jiangxi Acta Agric, 21(4): 36-38. [谢志南, 钟赞华, 张雪芹, 等, 2009. 失水胁迫对三角梅插穗叶片光合作用的影响 [J]. 江西农业学报, 21(4): 36-38.]
- XING HY, 2013. Physiological changes and regulation mechanism of *Bougainvillea* under low temperature stress [D]. Fuzhou: Fujian A & F University. [邢海盈, 2013. 低温胁迫下三角梅的生理变化及其调控机理的研究 [D]. 福州: 福建农林大学.]
- XU SX, WANG LS, SHU QY, et al, 2008. Progress of study of the biology of the resource plant *Bougainvillea* [J]. Chin Bull Bot, 25(4): 483-490. [徐夙侠, 王亮生, 舒庆艳, 等, 2008. 三角梅属植物的生物学研究进展 [J]. 植物学通报, 25(4): 483-490.]
- ZHANG GW, ZHANG L, TANG MX, et al, 2011. Diurnal variation of gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of cotton functional leaves under effects of soil salinity [J]. Chin J Appl Ecol, 22(7): 1771-1781. [张国伟, 张雷, 唐明星, 等, 2011. 土壤盐分对棉花功能叶气体交换参数和叶绿素荧光参数日变化的影响 [J]. 应用生态学报, 22(7): 1771-1781.]
- ZHOU G, SUN BT, ZHANG HL, et al, 2010. Responses of antioxidant system in leaves of *Rhododendron jinggangshanicum* to high temperature stress [J]. Acta Bot Boreal-Occident Sin, 30(6): 1149-1156. [周广, 孙宝腾, 张乐华, 等, 2010. 井冈山杜鹃叶片抗氧化系统对高温胁迫的响应 [J]. 西北植物学报, 30(6): 1149-1156.]
- ZHOU Q, 2008. Research on germplasm resource and propagational technique of *Bougainvillea* L. in China [J]. Chin Agric Sci Bull, 24(12): 321-324. [周群, 2008. 中国叶子花属植物种质资源及其繁殖技术研究 [J]. 中国农学通报, 24(12): 321-324.]