



# 不同光照强度补光对模拟贮运三角梅 叶片脱落的缓解效应

洪燕红, 庄小芬, 叶清华, 王 威, 谢 倩, 陈清西\*

(福建农林大学 园艺学院, 福州 350002)

**摘 要:**以 3 年生‘大红’三角梅为材料进行为期一个月的模拟贮运, 期间采用荧光灯(管径 16 mm、28W、光照强度  $9.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )处理, 设置黑暗( $T_0$ , 无灯管)和光照强度低( $T_1$ , 1 个灯管)、中( $T_2$ , 2 个灯管)、高( $T_3$ , 3 个灯管)4 个补光( $8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ )处理, 考察各处理植株落叶率以及叶片光合色素含量、细胞膜透性、抗氧化酶活性等相关生理生化指标, 探讨补光对贮运期三角梅叶片脱落的影响, 为解决三角梅贮运过程严重落叶问题提供依据。结果表明: (1)模拟贮运第 28 天,  $T_0$  和  $T_3$  处理三角梅植株落叶严重, 落叶率达 87% 以上,  $T_1$  和  $T_2$  处理落叶率则显著低于  $T_0$  和  $T_3$  处理, 仅分别为 16.33% 和 16.92%;  $T_1 \sim T_3$  处理叶片比叶重均高于  $T_0$  处理, 叶片相对含水量则低于  $T_0$  处理。(2) $T_1$  和  $T_2$  处理叶片的相对电导率、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白质含量均显著低于  $T_0$  处理。(3) $T_0$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  处理的叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量和类胡萝卜素含量均呈先升后降趋势, 而  $T_1$  处理总体呈上升趋势, 变化幅度较小。(4)整个贮运期内, 各处理三角梅叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性均呈逐渐上升趋势, 过氧化氢酶(CAT)活性和过氧化物酶(POD)活性则均呈先升后降的趋势, CAT 活性在  $T_0$ 、 $T_1$  和  $T_2$  处理间差异不显著, POD 活性表现为  $T_1$  和  $T_2$  处理显著高于  $T_0$ ; 第 28 天,  $T_2$  处理叶片 SOD 活性显著高于  $T_1$ , 两者分别比第 0 天上升 60.86% 和 45.02%。研究发现, 每天采用一根荧光灯(光照强度  $9.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )对三角梅进行每天补光 8 h, 能够较大程度减轻贮运过程中黑暗胁迫对叶片细胞膜造成的损伤和光合色素含量的影响, 降低光合产物消耗和叶片黄化脱落, 使其在贮运过程中维持正常生长, 减少经济损失。

**关键词:**三角梅; 模拟贮运; 补光光照强度; 叶片脱落; 生理生化特性

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

## Mitigative Effects of Supplementary Light Intensity on the Leaves Shedding of *Bougainvillea spectabilis* during Storage and Transportation

HONG Yanhong, ZHUANG Xiaofen, YE Qinghua, WANG Wei, XIE Qian, CHEN Qingxi\*

(College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** With the fluorescent lamp (16 mm diameter, 28W, light intensity  $9.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) as light source to set up four supplementary treatments, including dark ( $T_0$ , without lamp) and low ( $T_1$ , one lamp), medium ( $T_2$ , two lamp) and high ( $T_3$ , three lamp) light intensities ( $8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ ), we simulated a one-month of storage of *Bougainvillea spectabilis* ‘Crimsonlake’, and measured the defoliation rate, photosynthetic pigment content, cell membrane permeability, antioxidant enzyme activity and other related physiological and biochemical indexes of leaves, so as to study the effect of supplementary treatments on the leaves of *B. spectabilis* and provide the basis for solving the serious defoliation problem during storage and transportation of *B. spectabilis*. The results showed that: (1) on the 28th day of simulated storage,

收稿日期: 2019-11-04; 修改稿收到日期: 2020-01-12

基金项目: 福建农林大学科技创新专项基金(CXZX2017186); 福建农林大学科技创新专项基金(CXZX2018087)

作者简介: 洪燕红(1994—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事花卉生理生态研究。E-mail: yh. hong@foxmail. com

\* 通信作者: 陈清西, 教授, 博士生导师, 主要从事园艺植物栽培生理研究。E-mail: cqx0246@fafu. edu. cn

the defoliation rates of  $T_0$  and  $T_3$  treatments were serious, reaching over 87%, and the defoliation rates of  $T_1$  and  $T_2$  treatments were significantly lower than that of  $T_0$  and  $T_3$  treatments, only 16.33% and 16.92%; The specific leaf weight of  $T_1 \sim T_3$  treatments is higher than that of  $T_0$  treatments, and the relative water content is lower than that of  $T_0$  treatments. (2) The relative conductivity, MDA content, soluble protein content of  $T_1$  and  $T_2$  treatments were significantly lower than that of  $T_0$  treatment. (3) The contents of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoid in leaves of  $T_0$ ,  $T_2$  and  $T_3$  treatments increased firstly and then decreased, while that of  $T_1$  treatment showed an upward trend with small changes. (4) During the whole storage and transportation period, the activity of superoxide dismutase (SOD) in the leaves showed a gradual increase, while the activities of catalase (CAT) and peroxidase (POD) increased firstly and then decreased. There was no significant difference in the CAT activity of leaves between  $T_0$ ,  $T_1$  and  $T_2$  treatments. POD activity of leaves treated with  $T_1$  and  $T_2$  was significantly higher than that of  $T_0$  treatment. On the 28th day, the SOD activity in the leaves of  $T_2$  treatment was significantly higher than that of  $T_1$  treatment, which increased by 60.86% and 45.02%, respectively, compared with the 0th day. The research indicated that the light intensity of  $9.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , i. e. a fluorescent lamp, could be used to compensate light for  $8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$  on the *B. spectabilis* during storage, which could reduce damages of the cell membrane and influences of the photosynthetic pigment caused by the dark stress in the process of storage. It was beneficial to reduce the wastage of photosynthetic product in the leaves and the yellowing of the leaves, so that the *B. spectabilis* could grow normally during storage to reduce economic losses.

**Key words:** *Bougainvillea spectabilis* Willd.; simulative storage and transportation; supplementary light intensity; leaves shedding; physiology and biochemistry characteristics

三角梅(*Bougainvillea spectabilis* Willd.),又名叶子花、九重葛、叶子梅、毛宝巾等<sup>[1]</sup>,为紫茉莉科(Nyctaginaceae)叶子花属(*Bougainvillea*)阳性植物,是近年来国内外市场需求量较大的花卉之一。中国是三角梅产业化规模最大的国家<sup>[2]</sup>,其中福建漳州是中国三角梅产业发展最早和最成熟的地区,2018年总产值达15亿元,除供应国内外,还出口到中东、印度、欧美等国家,是国内最大的三角梅产销基地之一;植物在贮运过程中,由于暗环境的胁迫,易因长期缺水缺光而发生叶片衰老脱落等现象,生理生化特性发生改变,影响植株的正常形态特征与生长发育<sup>[3]</sup>。三角梅在贮运过程中,也极易因长期黑暗环境导致叶片和苞片暗淡无光,生长迟缓,乃至脱落,影响其商品价值,造成经济损失。

在黑暗条件下,补光可有效控制植物生长所需的光照强度,荧光灯约75%~80%的光能可被植物吸收利用,光能利用率及成本均较LED低廉,是目前生产中应用较为普遍的植物补光灯<sup>[4]</sup>。因此,本试验采用人工补光技术对三角梅模拟贮运期间进行人为补光,研究不同光照强度补光对三角梅贮运期间叶片生长及生理特性的影响,以此确定最佳补光光照强度,延缓植株衰老,改善叶片脱落现象,减少生产者的经济损失,为生产实践及其他花卉贮运条件的选择提供一定的理论依据与借鉴。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料培养

供试品种为3年生‘大红’三角梅(*B. spectabilis* ‘Crimsonlake’),购自福州缤纷园艺场腾辉盆景花卉批发部,经4个多月常规养护管理(摘除花芽、每隔半月施一次营养肥),培植成健壮无病、长势大致相同的三角梅植株。

### 1.2 试验设计

三角梅植株于模拟贮运前浇透水,试验期间不再浇水。后将植株置于模拟集装箱(长1.50 m,宽0.50 m,高0.50 m,可放置6盆植株)的黑暗条件下(温度16℃,相对湿度65%),模拟贮运28 d<sup>[5]</sup>。补光光源为荧光灯(管径16 mm,长120 cm、功率28 W),补光时长 $8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ ,补光灯管数分别设置为0、1、2、3根,光照强度分别为0、9.45、15.53和21.20  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,分别记作 $T_0$ (CK)、 $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 补光处理。各处理3次重复,每重复4株。每7 d统计一次三角梅植株落叶情况,并采摘植株健康功能叶每株20片,用液氮速冻后置于-40℃保存,用于测定相关指标。

### 1.3 测定指标与方法

模拟贮运期间,每7 d统计1次三角梅植株落叶情况。落叶率(%) =  $N_n/N_1 \times 100\%$ 。式中, $N_1$

为贮运前每株植株总叶片数, $N_n$  为每次取样时每株植株的落叶数。叶片相对含水量(RWC)、比叶重(SLW)参照陈小玲<sup>[5]</sup>方法测定;相对电导率(REC)参照李合生<sup>[6]</sup>方法利用电导仪测定;丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白质(SP)含量和过氧化氢酶(CAT)活性参照王学奎<sup>[7]</sup>方法测定;超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)初酶液提取参照刘祖祺<sup>[8]</sup>方法,SOD 活性测定采用氮蓝四唑法<sup>[5]</sup>,POD 活性测定采用愈创木酚法<sup>[7]</sup>。叶片叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量参照朱广廉<sup>[9]</sup>方法测定。各指标均重复测定 3 次。

1.4 数据处理

试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 19.0 进行整理、制图和统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同光照强度补光对三角梅植株叶片生长的影响

2.1.1 落叶率 随模拟贮运时间的延长,补光可有效延迟三角梅植株落叶(图 1,A)。各处理三角梅落叶率随模拟贮运天数增加均呈上升趋势,且  $T_0$  和  $T_3$  处理的落叶率上升幅度显著大于  $T_1$  和  $T_2$  处理; $T_1$  与  $T_2$  处理的落叶率在各贮运时期始终维持在较低水平并低于  $T_0$  处理, $T_3$  处理的落叶率明显高于  $T_1$ 、 $T_2$  处理,但也只在第 28 天高于  $T_0$  处理。其中,模拟贮运第 14 天时, $T_0$  处理落叶率(40.50%)显著

高于 3 个补光处理( $P<0.05$ );在模拟贮运第 28 天, $T_0$  和  $T_3$  处理的植株落叶率分别为 87.20%和 100%,均显著高于  $T_1$ (16.33%)和  $T_2$ (16.92%)处理( $P<0.05$ ),而  $T_1$  与  $T_2$  处理间无显著差异。这说明通过补光可有效降低模拟贮运期三角梅植株落叶率,但补光光照强度不宜过高;贮运三角梅宜选用补光光照强度为  $9.45\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $T_1$ )或  $15.53\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $T_2$ ),从节能角度考虑宜选用光照强度为  $9.45\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.1.2 比叶重(SLW) 随模拟贮运天数增加,各处理三角梅叶片 SLW 均呈下降趋势,其中, $T_1\sim T_3$  处理各时期均不同程度高于  $T_0$ ,尤其是  $T_1$ 、 $T_2$  处理表现更明显(图 2,A)。在模拟贮运第 7 天, $T_2$  处理叶片 SLW 下降幅度显著小于其余处理( $P<0.05$ );在第 28 天, $T_0\sim T_3$  处理叶片 SLW 较第 0 天分别下降了 35.66%、33.84%、32.22%、30.29%。说明补光处理能够在一定程度上减少黑暗胁迫下三角梅叶片的光合产物消耗,且补光光照强度越高,缓解效果越明显。

2.1.3 相对含水量(RWC) 随模拟贮运天数增加,各处理三角梅叶片的 RWC 总体呈上升趋势(图 2,B)。其中,在模拟贮运第 7 天,各处理间叶片 RWC 差异显著( $P<0.05$ );在模拟贮运第 21 天, $T_2$  和  $T_3$  处理叶片的 RWC 显著低于  $T_0$  ( $P<0.05$ ), $T_1$  处理与  $T_0$  相近;但模拟贮运第 28 天, $T_3$  处理的叶片 RWC 突然急剧下降,并与其余处理差异显著( $P<$

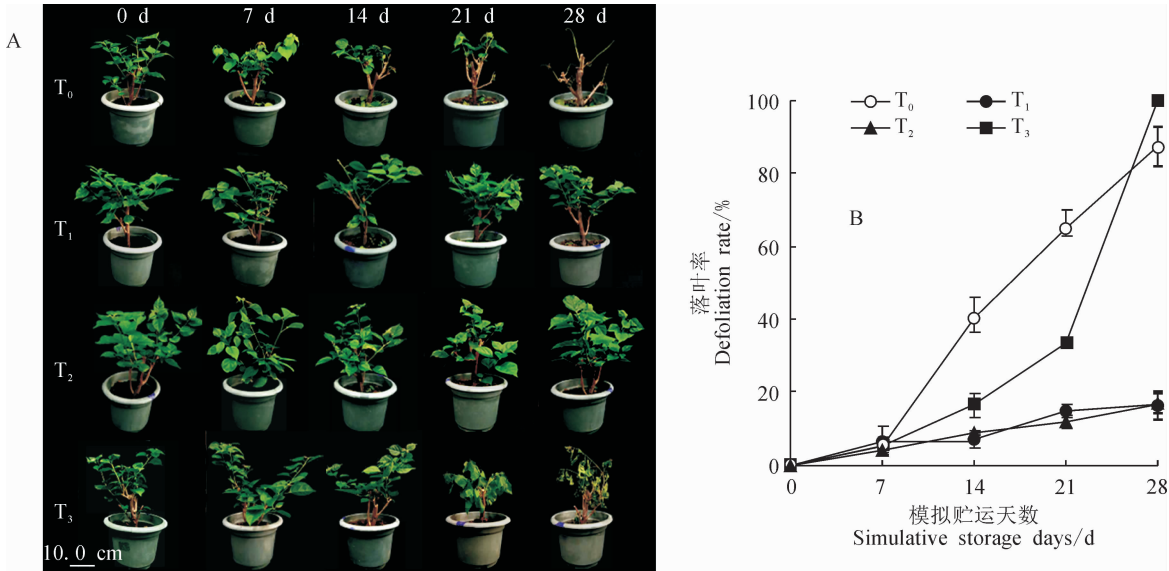


图 1 不同光照强度补光条件下模拟贮运三角梅植株生长情况和落叶率  
Fig. 1 The defoliation rate of *B. spectabilis* 'Crimsonlake' filled with different light intensities during simulative storage and transportation

0.05),而其余处理相近。可能是由于补光光照强度过高,长时间贮运导致三角梅叶片严重失水,影响其正常生理生化反应,致使其落叶率急速增加,落叶严重。故宜选用  $T_1$  或  $T_2$  光照强度对贮运三角梅进行补光处理。

2.2 不同光照强度补光对三角梅叶片细胞膜透性的影响

随模拟贮运天数增加,各处理三角梅叶片相对电导率(REC)及丙二醛(MDA)和可溶性蛋白(SP)含量整体均呈不同幅度的上升趋势,且  $T_1 \sim T_3$  处理的3个指标在各时期均低于  $T_0$  处理(图3)。其中,在模拟贮运第14~21天期间,  $T_1 \sim T_3$  处理叶片 REC 和 MDA 含量均显著低于  $T_0$  处理( $P < 0.05$ ), $T_1$ 、 $T_3$  处理叶片 SP 含量在第21天时也显著低于  $T_0$  处理;在模拟贮运第28天时,  $T_1$  处理叶片的 REC 显著低于  $T_0$  处理,同时  $T_1$  处理的 REC 在各时期均低于其余处理。在第28天时,由于  $T_0$  与  $T_3$  处理的三角梅落叶严重,故无叶片可测其 MDA 和 SP 含量;但与第0天相比,此时  $T_1$  和  $T_2$  处理叶片的 SP 含量分别显著上升 8.22% 和 9.94%,它们的 MDA 含量分别上升 27.22% 和 28.75%( $P < 0.05$ )。在本试验模拟贮运后期,  $T_2$  处理三角梅叶片 SP 含量较高,细胞膜脂过氧化程度较低,胞内电解质外渗量较少,叶片细胞膜受到黑暗胁迫的伤害程度较小。

2.3 不同光照强度补光对三角梅叶片光合色素含量的影响

在处理第0~21天,随模拟贮运天数增加,  $T_0$ 、 $T_2$  和  $T_3$  处理三角梅叶片光合色素含量基本呈先升后降趋势,说明三角梅补光初期叶片可正常合成叶

绿素,而后期叶绿素被分解,合成速率降低;  $T_1$  处理三角梅叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量总体呈上升趋势,类胡萝卜素含量变化趋势则与其余处理基本一致;  $T_3$  处理叶片光合色素含量及其变化幅度显著大于其余处理(图4)。 $T_0$  和  $T_3$  处理三角梅落叶严重,故模拟贮运第28天只测了  $T_1$  和  $T_2$  叶片光合色素含量,且  $T_2$  叶绿素总量高于  $T_1$ ,但二者差异不显著。可见,补光光照强度增加有利于三角梅叶片合成光合色素,进行光合作用合成光合产物,但光照强度不宜过高;在模拟贮运后期,  $T_2$  处理三角梅叶片叶绿素总量较高,光合系统受黑暗胁迫伤害较小,有利于叶片色素合成,减轻了黑暗胁迫对三角梅的伤害。

2.4 不同光照强度补光对三角梅叶片抗氧化酶活性的影响

首先,各处理三角梅叶片 SOD 活性随模拟贮运天数增加呈逐渐上升趋势,且在第0~21天的增加幅度小于第21~28天;整个模拟贮运时期,  $T_1 \sim T_3$  叶片 SOD 活性均低于  $T_0$  处理(图5,A)。其中,在第7天,  $T_1$  处理叶片的 SOD 活性显著低于  $T_0$  处理( $P < 0.05$ );在第21天,  $T_1$  和  $T_2$  处理叶片的 SOD 活性显著低于  $T_0$  处理;在第28天,  $T_2$  处理叶片 SOD 活性显著高于  $T_1$  处理,两者分别比第0天上升 60.86% 和 45.02%。其次,各处理三角梅叶片 CAT 和 POD 活性随模拟贮运天数增加均呈先升后降趋势(图5,B、C)。其中,在模拟贮运第0~7天,各处理叶片 CAT 和 POD 活性均呈上升趋势,且  $T_3$  处理的 CAT 活性上升幅度显著大于其余处理,而  $T_2$  处理的 POD 活性上升幅度显著大于其余处理( $P < 0.05$ );在第14~21天,各处理叶片 CAT 和 POD 活性逐渐下降,  $T_3$  处理的 CAT 活性显著高于其余处

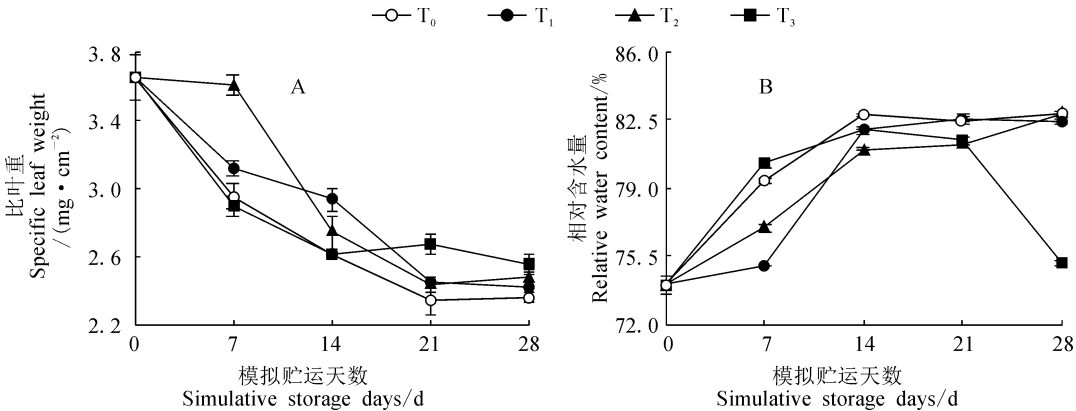


图2 不同光照强度补光条件下模拟贮运三角梅叶片比叶重和相对含水量  
Fig. 2 The specific leaf weigh and relative water content of the leaves of *B. spectabilis* 'Crimsonlake' filled with different light intensities during simulative storage and transportation

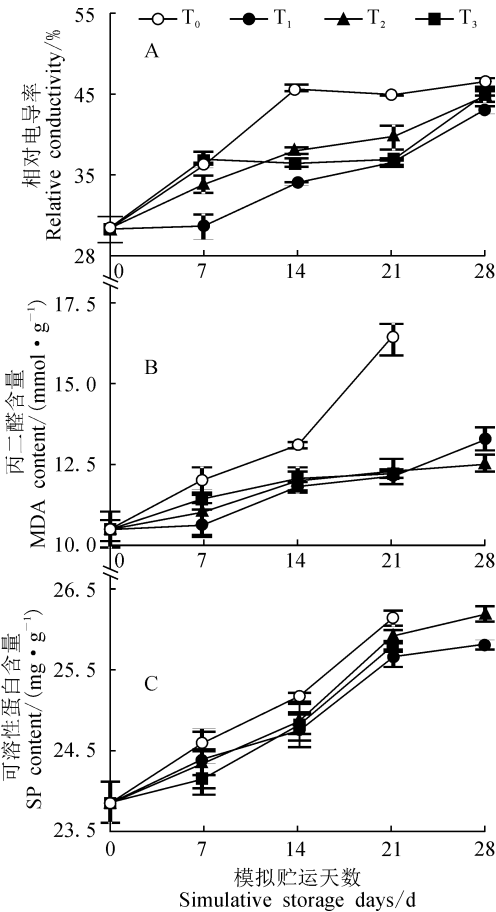


图3 不同光照强度补光条件下模拟贮运三角梅叶片相对电导率、MDA含量和可溶性蛋白含量

Fig. 3 The relative conductivity, MDA content and soluble protein content in leaves of *B. spectabilis* 'Crimsonlake' filled with different light intensities during simulative storage and transportation

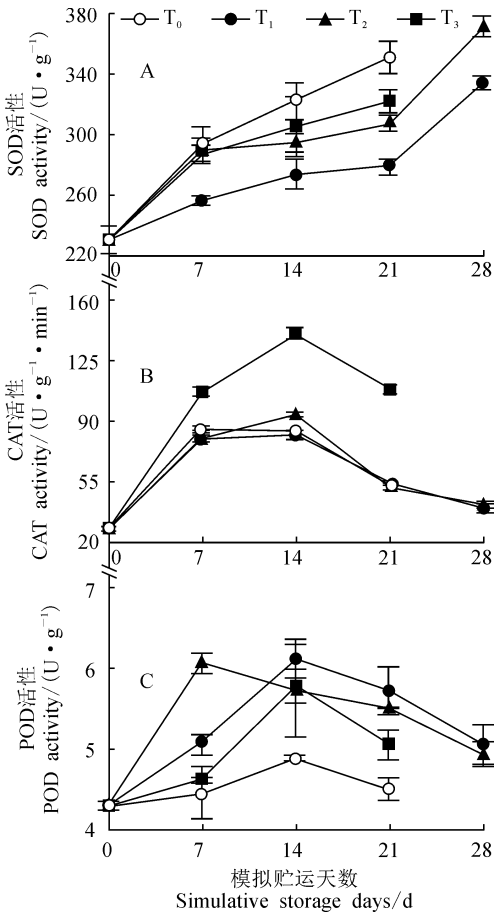


图5 不同光照强度补光条件下模拟贮运三角梅叶片SOD、CAT和POD活性

Fig. 5 The SOD, CAT and POD activities in leaves of *B. spectabilis* 'Crimsonlake' filled with different light intensities during simulative storage and transportation

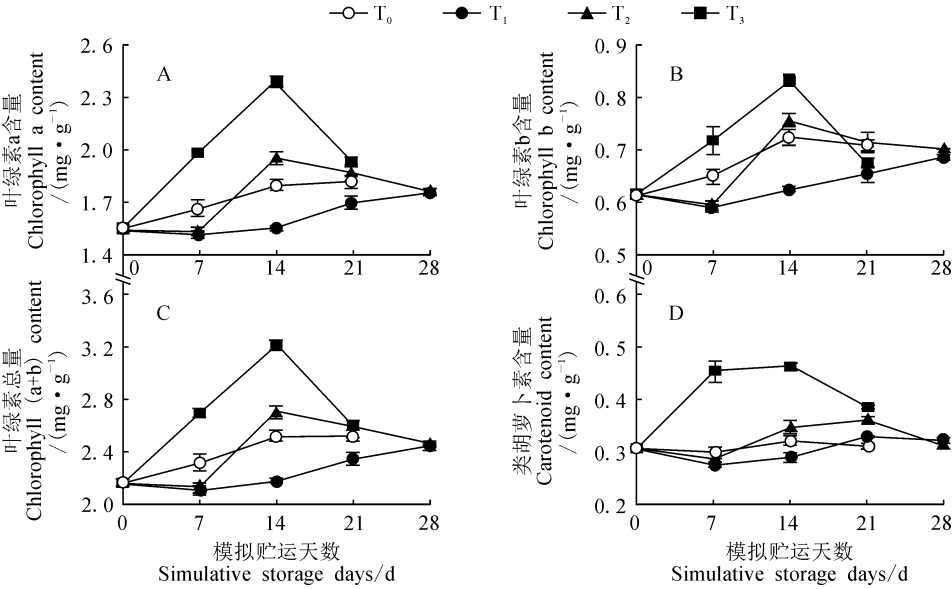


图4 不同光照强度补光条件下模拟贮运三角梅叶片光合色素含量

Fig. 4 The photosynthetic pigment content in leaves of *B. spectabilis* 'Crimsonlake' filled with different light intensities during simulative storage and transportation

理,  $T_1 \sim T_3$  处理的 POD 活性显著高于  $T_0$  处理 ( $P < 0.05$ ); 在第 28 天,  $T_0$  与  $T_3$  处理落叶严重而未测定 CAT 和 POD 活性,  $T_1$  和  $T_2$  处理的 CAT 和 POD 活性差异不显著, 但两者 CAT 活性比第 0 天分别上升 44.64% 和 51.79%。因此, 在模拟贮运试验后期,  $T_2$  补光处理三角梅在清除氧自由基、延缓衰老的效果上优于  $T_1$  处理, 遭受黑暗胁迫伤害的程度更小。

### 3 讨 论

对高等植物来说, 光照是植物生长发育的重要因素之一, 显著影响植物生长和养分积累。叶片是合成光合产物的重要器官, 直接关系到整体植株的生长发育, 叶片衰老脱落是叶片发育的最后阶段。叶片光合色素在植株光合作用中起着重要作用, 叶绿素含量和叶绿素 a 与 b 比值是影响叶片光合速率的主要因素之一, 其含量高低直接影响光合作用能力大小, 也可间接反映植株在逆境下的受伤和衰老程度<sup>[10-11]</sup>。大部分植株在弱光下, 叶片叶绿素含量相对升高, 以提高植株的捕光能力, 提高光合效率, 供给自身生长所需能量<sup>[12-13]</sup>。而由于在弱光下, 光照不足, 叶片光合效率降低, 光合产物合成量小于消耗量, 干物质大大减少, 植株在黑暗胁迫中易生长缓慢或迅速衰老、叶片脱落<sup>[14-15]</sup>, 而适度的低温补光, 可在一定程度上降低落叶率, 减缓植株衰老<sup>[16-18]</sup>。本研究中三角梅在模拟贮运过程中, 叶片中光合色素含量随模拟时间延长基本呈先升后降趋势, 而各处理比叶重随模拟贮运天数增加则逐渐降低, 且补光光照强度越低, 下降幅度越大。其本质是在弱光胁迫下, 三角梅叶片中合成光合产物的能力受到抑制, 同时光合产物被不断消耗, 叶片内干物质不断减少, 而光照强度愈低, 叶片中干物质的消耗与积累之比愈大, 这与前人研究结果一致<sup>[16]</sup>。另外, 随着补光光照强度增强, 叶片叶绿素和类胡萝卜素含量逐渐增加, 说明通过一定时长的补光处理, 能够提高模拟贮运条件下三角梅植株叶片的光合色素含量, 提高光合速率, 从而减轻黑暗胁迫对其的影响。而本研究中  $T_0$  与  $T_3$  处理三角梅叶片脱落情况都较严重, 说明黑暗胁迫会加速叶片的衰老, 而补光光照强度过高易导致叶片水分代谢旺盛, 植株叶片缺水受到胁迫, 从而导致叶片脱落。

细胞膜是动、植物细胞的重要组分, 具有选择透过性, 能保证细胞膜内外物质交流平衡。当植株处于逆境尤其是长期受胁迫时, 叶片细胞膜易遭破坏, 膜内自由基的生成与清除平衡被打破, 导致各种蛋

白质、酶结构被破坏, 膜脂中的不饱和脂肪酸过氧化, 严重损伤细胞膜, 细胞膜透性增大, 胞内离子大量外渗, 最终导致叶片衰老死亡<sup>[19-20]</sup>。MDA 是脂质过氧化的一种产物, MDA 含量愈高细胞膜损伤愈严重<sup>[21-22]</sup>。可溶性蛋白质是重要的营养和渗透调节物质, 其含量越高, 植物抗逆性越强<sup>[23]</sup>。随逆境胁迫时间延长, 植株体内蛋白质被降解的同时, 还可能有一部分新蛋白质合成, 适当弱光可促进细胞中可溶性蛋白质的合成与积累<sup>[24-25]</sup>。本研究中, 黑暗处理下三角梅叶片 MDA 和可溶性蛋白质含量及电解质外渗率均高于补光处理, 说明贮运时通过补光处理, 可有效降低黑暗胁迫下三角梅的膜脂过氧化程度和可溶性蛋白质的降解作用, 减少胞内离子外渗率, 从而减轻黑暗胁迫对细胞膜的伤害, 延缓其衰老。

植物在受到胁迫时, 体内的单线态氧 ( $^1O_2$ )、超氧自由基 ( $O_2^{\cdot -}$ )、过氧化氢 ( $H_2O_2$ )、羟基自由基 ( $OH\cdot$ ) 等活性氧 (ROS) 会增加, 与此同时抗氧化机制被激活, 抗氧化酶活力提高<sup>[26-27]</sup>。SOD、CAT 和 POD 等是抗氧化酶系统中的重要组成, 能有效地清除活性氧, 延缓植物衰老, 维持植物正常生长和发育<sup>[28,29]</sup>。Magdalena Simlat 等<sup>[30]</sup>认为, 补光会影响植物抗氧化酶活性。本研究中, 各处理三角梅叶片 SOD 活性随贮运天数增加而升高, 同时一定时间范围内, 补光光照强度越高, SOD 活性越高, 说明其清除氧自由基的能力提高, 这与前人研究结果一致<sup>[31-32]</sup>。另外, 各处理三角梅叶片 POD 与 CAT 的活性均随贮运天数增加呈先升后降趋势, 说明补光只能在一定程度上降低黑暗胁迫对三角梅植株叶片的损伤。在黑暗胁迫初期, 其二者活性升高是植物一种自我保护反应, 而随胁迫时间延长, 植株体内自由基、活性氧积累量超过自身所能抵御的限度, 抗氧化酶活性则降低<sup>[33]</sup>; 在高光照强度补光处理 ( $T_3$ ) 下, 三角梅叶片 CAT 活性较其余补光处理都高, 表明过高光照强度可能会诱发抗氧化系统的启动。因此, 适当光照强度的补光处理, 才能在一定程度上降低黑暗胁迫对叶片细胞带来的伤害。

植物叶片中 ROS 主要来源于叶绿体, 正常条件下, 由于抗氧化酶的清除作用, 植株中 ROS 的生成量被维持在一个较低水平。而当植株长期处于弱光胁迫下时, ROS 在植株中大量积累, 打破了这一平衡, 并逐渐破坏细胞大分子和生物膜结构, 膜脂过氧化作用加剧, MDA 含量增加, 同时抗氧化酶活力提高; 而 ROS、MDA 含量和 POD 活性与叶绿素含量均呈负相关, 参与了叶绿素的降解, 并破坏了叶绿体

结构,最终导致叶片光合能力受到抑制,无法正常合成光同化产物,加速了叶片的衰老脱落<sup>[34-35]</sup>。本研究中黑暗处理下的三角梅叶片脱落严重,正是由于上述一系列原因导致,而通过一定光照强度的补光处理,能有效地减少黑暗胁迫带来的 ROS、MDA 等有害物质的积累和叶绿素的降解,减轻了黑暗胁迫对生物膜的伤害,保证三角梅植株叶片的相对正常生长,从而起到了缓解三角梅黑暗胁迫下的叶片脱落问题。此外,植物生长发育及光合特性在受到光量或光照强度影响的同时,还受光质的影响,而一些

调控叶片衰老脱落基因的表达或许也影响了贮藏三角梅叶片的生长<sup>[36-40]</sup>。故在今后可从补光光质及相关调控基因的表达入手,研究不同补光光质对贮藏三角梅叶片生长的影响及调控作用。

综上所述,采用一根荧光灯(管径 16 mm,灯长 120 cm、功率 28 W,光照强度  $9.45 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )对贮藏期三角梅进行补光( $8 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ ),有利于促进叶片光合色素合成,减少叶片中光合产物消耗和叶片黄化脱落,降低黑暗胁迫对细胞膜造成的损伤,从而缓解模拟贮藏过程中三角梅叶片脱落的现象。

参考文献:

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会.《中国植物志》第二十六卷[M]. 北京:科学出版社,1996: 6-7.

[2] 常圣鑫,杨光穗,陈金花,等. 世界三角梅产业发展历史及趋势[J]. 热带农业科学, 2018, **38**(1): 71-77.  
CHANG S X, YANG G S, CHEN J H, *et al.* Development history and tendency of *Bougainvillea* industry all over the world [J]. *Chinese Journal of Tropical Agriculture*, 2018, **38**(1): 71-77.

[3] 韩 霜,陈发棣. 植物对弱光的响应研究进展[J]. 植物生理学报, 2013, **49**(4): 309-316.  
HAN S, CHEN F D. Research progress in plant response to weak light [J]. *Plant Physiology Journal*, 2013, **49**(4): 309-316.

[4] 朱静娴. 人工补光对植物生长发育的影响[J]. 作物研究, 2012, **26**(1): 74-78.  
ZHU J X. Influence of artificial supplement of light on plant growth and development [J]. *Crop Research*, 2012, **26**(1): 74-78.

[5] 陈小玲,王 威,张 瑶,等. 不同补光时长对贮藏暗胁迫下人参榕叶片生长和细胞膜的影响[J]. 北方园艺, 2014, (22): 165-169.  
CHEN X L, WANG W, ZHANG Y, *et al.* Effect of different supplement lighting time on growth and cytomembrane of *Ficus microcarpa* leaves under dark stress during storage[J]. *Northern Horticulture*, 2014(22): 165-169.

[6] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000: 261-263.

[7] 王学奎,黄见良. 植物生理生化实验原理和技术(第3版)[M]. 北京:高等教育出版社,2006: 282-283, 276-277, 284-285.

[8] 刘祖祺,张石诚. 植物抗性生理学[M]. 北京:中国农业出版社,1994: 369-385.

[9] 朱广廉. 植物生理学实验[M]. 北京:北京大学出版社,1990: 51-54.

[10] 安翠香,杨世梅,纪海波,等. 遮荫对甜瓜叶片光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2012, **32**(2): 342-347.  
AN C X, YANG S M, JI H B, *et al.* Photosynthetic characteristics of shading melon leaves[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, **32**(2): 342-347.

[11] GAO S H, GAO W J, LIAO X L, *et al.* The tomato WV gene encoding a thioredoxin protein is essential for chloroplast development at low temperature and high light intensity[J]. *BMC Plant Biology*, 2019, **19**(1): 265.

[12] 张光飞,杨 波,苏文华,等. 光强对珍稀濒危植物毛果木莲幼苗生长和叶绿素含量的影响[J]. 北方园艺, 2014, (17): 80-82.  
ZHANG G F, YANG B, SU W H, *et al.* Effect of light intensity on growth and chlorophyll contents of rare and endangered plant *Manglietia ventii* seedlings[J]. *Northern Horticulture*, 2014, (17): 80-82.

[13] 徐超华,李军营,崔明昆,等. 延长光照时间对烟草叶片生长发育及光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, **33**(4): 763-770.  
XU C H, LI J Y, CUI M K, *et al.* Effects of supplemental lighting on growth and photosynthesis of tobacco leaves[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2013, **33**(4): 763-770.

[14] CHENG X R, LIU J, SHU J, *et al.* Effects of different light intensity on the growth and nutrients content of gynura[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, **3248**(955): 3 766-3 769.

[15] 李 蒙,刘松虎,张 琰,等. 外源 24-表油菜素内酯对弱光胁迫下黄心菜光合特性和品质的影响[J]. 北方园艺, 2019, (10): 72-79.  
LI M, LIU S H, ZHANG Y, *et al.* Effects of exogenous 24-epibrassinolide on photosynthetic characteristics and quality of *Brassica pekinensis* under weak light stress[J]. *Northern Horticulture*, 2019, (10): 72-79.

[16] SAEID H, ZEINOLABEDIN T S, SEYED A M M S, *et al.* Effects of water stress and light intensity on chlorophyll fluorescence parameters and pigments of *Aloe vera* L. [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 106: 141-148.

[17] LI W, LIU Y, LIU M, *et al.* Sugar accumulation is associated with leaf senescence induced by long-term high light in wheat [J]. *Plant Science*, 2019, 287: 110 169.

[18] 陈小玲,王 威,吴雪娥,等. 补光对出口模拟贮藏人参榕叶片生长和光合作用的影响[J]. 西北植物学报, 2015, **35**(1): 153-160.  
CHEN X L, WANG W, WU X E, *et al.* Effect of prolonging light duration on growth and photosynthesis in leaves of exported *Ficus microcarpa* during storage[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, **35**(1): 153-160.

[19] 金桂宏,张明如,王立竹,等. 光强对盆栽芒果光响应过程与抗氧化酶系统的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(5): 836-844.  
JIN G H, ZHANG M R, WANG L Z, *et al.* Photosynthetic

- characteristics and enzymatic antioxidant system of *Dicranopteris dichotoma* differing light intensity[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2018, **35**(5): 836-844.
- [20] 关晓溪, 隋常玲, 胡海军, 等. 弱光胁迫对烟草幼苗抗氧化系统及相关基因表达的影响[J]. *南方农业学报*, 2019, **50**(5): 957-963.
- GUAN X X, SUI C L, HU H J, *et al.* Effects of low light intensity stress on tobacco seedlings antioxidant system and expression of involved genes[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, **50**(5): 957-963.
- [21] 李先民, 刘新亮, 李春牛, 等. 不同光照条件下杜鹃红山茶幼苗的生长效应及抗氧化生理响应[J]. *热带作物学报*, 2019, **40**(4): 688-692.
- LI X M, LIU X L, LI C N, *et al.* Growth and antioxidant physiology effects of *Camellia azalea* seedlings under different light conditions[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2019, **40**(4): 688-692.
- [22] LIU Q H, WU X, CHEN B C, *et al.* Effects of low light on agronomic and physiological characteristics of rice including grain yield and quality[J]. *Rice Science*, 2014, **21**(5): 243-251.
- [23] 何嘉琦, 陆顺教, 任羽, 等. 秋石斛“三亚阳光”幼苗对不同程度低温胁迫的生理响应[J]. *北方园艺*, 2017, (4): 62-66.
- HE J Q, LU S J, REN Y, *et al.* Physiology response of *Dendrobium* ‘Sonia Hiasakul’ seedling on different degrees of low temperature stress[J]. *Northern Horticulture*, 2017, (4): 62-66.
- [24] 覃泳智, 周智丽, 刘海涛, 等. 外源水杨酸对高温胁迫微型月季生理指标的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, **49**(10): 2 028-2 033.
- QIN Y Z, ZHOU Z L, LIU H T, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on physiological indexes in miniature rose under high[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, **49**(10): 2 028-2 033.
- [25] BROUWER B, ZIOLKOWSKA A, BAGARD M, *et al.* The impact of light intensity on shade-induced leaf senescence[J]. *Plant Cell and Environment*, 2012, **35**(6): 1084.
- [26] 刘聪, 董腊媛, 林建中, 等. 逆境胁迫下植物体内活性氧代谢及调控机理研究进展[J]. *生命科学研究*, 2019, **23**(3): 253-258.
- LIU C, DONG L A, LIN J Z, *et al.* Research advances on regulation mechanism of reactive oxygen species metabolism under stresses[J]. *Life Science Research*, 2019, **23**(3): 253-258.
- [27] CAVERZAN A, CASASSOLA A, BRAMMER S P. Reactive oxygen species and antioxidant enzymes involved in plant tolerance to stress[M]. *Abiotic and Biotic Stress in Plants-Recent Advances and Future Perspectives*, 2016.
- [28] 杨新元. 外源褪黑素对干旱胁迫下向日葵幼苗生长、光合及抗氧化系统的影响[J]. *华北农学报*, 2019, **34**(4): 113-121.
- YANG X Y. Effects of exogenous melatonin on growth, photosynthesis and antioxidant system of sunflower seedling under drought stress[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2019, **34**(4): 113-121.
- [29] 陈金峰, 王宫南, 程素满. 过氧化氢酶在植物胁迫响应中的功能研究进展[J]. *西北植物学报*, 2008, **28**(1): 188-193.
- CHEN J F, WANG G N, CHENG S M. Progress about catalase function in plant stress reactions[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, **28**(1): 188-193.
- [30] MAGDALENA S, PATRYCJA Ś, MARIA M, *et al.* The effect of light quality on seed germination, seedling growth and selected biochemical properties of *Stevia rebaudiana* Bertoni[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 211: 295-304.
- [31] CHERUTH A J, KSOURI R, RAGUPATHI G, *et al.* Antioxidant defense responses: physiological plasticity in higher plants under abiotic constraints[J]. *Acta Physiol Plant*, 2009, **31**(3): 427-436.
- [32] MARUTA T, TANOUCHI A, TAMOI M, *et al.* Arabidopsis chloroplastic ascorbate peroxidase isoenzymes play a dual role in photoprotection and gene regulation under photooxidative stress[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2009, **51**(2): 190-200.
- [33] 丁梦秋, 闻诗文, 陆卫平, 等. 结实期弱光胁迫对甜玉米籽粒灌浆和叶片衰老的影响[J]. *核农学报*, 2017, **31**(5): 964-971.
- DING M Q, WEN S W, LU W P, *et al.* Effects of weak-light stress after pollination on grain filling and leaf senescence in sweet maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, **31**(5): 964-971.
- [34] JAJIC I, SARNA T, STRZALKA K. Senescence, stress, and reactive oxygen species[J]. *Plants*, 2015, **4**(3): 393-411.
- [35] ROGERS H, MUNNE-BOSCH S. Production and scavenging of reactive oxygen species and redox signaling during leaf and flower senescence: similar but different[J]. *Plant Physiology*, 2016, **171**(3): 1 560-1 568.
- [36] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响[J]. *植物生理学报*, 2015, **51**(8): 1 217-1 234.
- XU D Q, GAO W, RUAN J. Effects of light quality on plant growth and development[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, **51**(8): 1 217-1 234.
- [37] 张晓敏, 黄旭光, 马跃峰, 等. 不同光质对三角梅开花及其生理指标的影响[J]. *南方农业学报*, 2018, **49**(2): 328-332.
- ZHANG X M, HUANG X G, MA Y F, *et al.* Effects of different light qualities on flowering and physiological indicators of *Bougainvillea spectabilis* Willd.[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, **49**(2): 328-332.
- [38] 彭亮, 赵停, 杨冰月, 等. 不同光质光强对远志生长和相关酶活性及成分的影响[J]. *中草药*, 2018, **49**(21): 5 004-5 009.
- PENG L, ZHAO T, YANG B Y, *et al.* Effects of light quality and intensity on growth, related enzymes activity, and components of *Polygala tenuifolia* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2018, **49**(21): 5 004-5 009.
- [39] LI Z, PENG J, WEN X, *et al.* Ethylene-insensitive3 is a senescence-associated gene that accelerates age-dependent leaf senescence by directly repressing *miR164* transcription in *Arabidopsis* [J]. *Plant Cell*, 2013, **25**(9): 3 311.
- [40] KIM T, KANG K, KIM S H, *et al.* OsWRKY5 promotes rice leaf senescence by upregulating senescence-associated NAC genes and abscisic acid biosynthesis[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2019, **20**: 4 437.