

补光对出口模拟贮运人参榕叶片 生长和光合作用的影响

陈小玲, 王 威, 吴雪娥, 张 瑶, 陈清西*

(福建农林大学 园艺学院, 福州 350002)

摘 要:为减轻出口人参榕贮运暗胁迫下叶片的黄化与脱落,以人参榕(接穗为泰国榕)为材料,采用 28 W 荧光灯补充光照,研究不同补光时长($0\sim 12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$)处理 28 d 后对模拟贮运人参榕生长和光合作用的影响,以探索人参榕贮运期间适宜的补光时长。结果显示:(1)模拟暗贮运 28 d 时,补光 $0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 处理的人参榕落叶率、黄化指数分别为 89.64%、0.52,而补光 $8\sim 12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 处理的落叶率、黄化指数显著下降,落叶率比对照($0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$)分别显著下降为 35.7%、39.19%、26.08%,黄化指数分别显著下降为 0.25、0.28、0.19。(2)随着补光时间的延长,人参榕叶片的相对含水量(RWC)显著降低,而比叶重(SLW)显著升高;其叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)含量、类胡萝卜素含量、叶绿素 a/b、净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)均呈上升趋势,且在补光 $8\sim 12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 处理下各指标均明显高于其他处理,但胞间二氧化碳浓度(C_i)呈下降趋势。(3)相关分析显示,模拟贮运人参榕的落叶率与黄化指数呈极显著正相关;落叶率、黄化指数均与其叶绿素含量、 P_n 呈极显著负相关,与 C_i 呈极显著正相关;且叶片 P_n 与叶绿素含量、 G_s 呈显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关。研究表明,通过补光措施可显著减缓贮运人参榕叶片的黄化与脱落,28 W 荧光灯光照 $8\sim 12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 的补光效果均较好,综合考虑成本认为在实际人参榕贮运过程中最适补光时长为 $8\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$;贮运时较长时间的暗胁迫环境对人参榕叶片光合系统造成损伤并导致 P_n 下降,其主要是叶绿素含量降低的非气孔限制因素所致。

关键词:人参榕;模拟贮运;补光时长;叶片生长;光合特性

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Prolonging Light Duration on Growth and Photosynthesis in Leaves of Exported *Ficus microcarpa* during Storage

CHEN Xiaoling, WANG Wei, WU Xuee, ZHANG Yao, CHEN Qingxi*

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

Abstract: In order to relief exported *Ficus microcarpa* leaves chlorosis and defoliation under dark stress during storage, with *F. microcarpa* (cion was Thailand banyan) as material and suppling light with fluorescent lamps (28 W), we investigated the effects of different supplemental lighting time lengths ($0\sim 12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$) on growth and photosynthesis in leaves of *F. microcarpa* after 28 d simulative storage. The results showed that: (1) When the time of simulative storage was 28 d, the defoliation rate and chlorosis index of *F. microcarpa* which were supplemental lighting for $0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ were 89.64% and 0.52, respectively. While the treatments with supplemental lighting for $8\sim 12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ significantly decreased defoliation rate and chlorosis index. As compared with supplemental lighting $0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$, defoliation rate of the treatments with supplemen-

收稿日期: 2014-05-21; 修改稿收到日期: 2014-12-18

基金项目: 科技部 2013 年科技富民强县专项行动计划项目(财教[2013]144 号)

作者简介: 陈小玲(1989—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事花卉生理生态研究。E-mail: 928723907@qq.com

* 通信作者: 陈清西, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事园艺植物栽培生理的教学和科研工作。E-mail: cqx0246@163.com

tal lighting for 8—12 h · d⁻¹ were 35.7%, 39.19% and 26.08%, respectively. And chlorosis index were 0.25, 0.28 and 0.19, respectively. (2) With the extending supplement lighting time length, relative water content (RWC) of *F. microcarpa* leaves decreased significantly, while the specific leaf weight (SLW) increased significantly. The Chl a, Chl b, Chl (a+b), carotenoid content, Chl a/b content, net photosynthetic rate (P_n) and stomatal conductance (G_s) increased with the extending supplement lighting time length and the treatments with supplemental lighting for 8—12 h · d⁻¹ were significantly higher than that of other treatments. While intercellular CO₂ (C_i) decreased. (3) Correlation analysis indicated that a significant positive correlation was found between *F. microcarpa* leaf defoliation rate and chlorosis index during simulative storage. Defoliation rate and chlorosis index were significantly negatively correlated with chlorophyll content and P_n , while they were significantly positively correlated with C_i . And P_n was significantly positively correlated with chlorophyll content and C_i . However it had an outstanding negative correlation to C_i . The study indicated that the measures of supplemental lighting time could significantly decreased *F. microcarpa* leaf defoliation rate and chlorosis index during storage. The better effect of supplemental lighting time was 8—12 h · d⁻¹ which were supplied by 28 W fluorescent lamp. Considering the cost, the fittest supplemental lighting time of *F. microcarpa* should be 8 h · d⁻¹. And the long time of dark storage condition destroyed photosynthetic system in leaves of *F. microcarpa* and made them photosynthetic rate decrease. It was the major reason that photosynthetic pigment content which non-stomatal limitation factor decreased.

Key words: *Ficus microcarpa*; simulative storage; supplemental lighting time; leaf growth; photosynthesis

光对植物的生长发育起着重要的作用。目前, 人工补光已广泛应用于蔬菜、花卉等园艺植物, 因考虑成本, 生产中多数采用荧光灯。荧光灯的光谱中不含红外线, 其光谱能量中, 红橙光占 45%, 蓝紫光占 15%, 黄绿光占 40%, 其能被植物吸收的光能占辐射总量的 75%~80%, 是较为适宜的植物生长补光灯^[1]。国内外已有学者应用荧光灯进行光环境调控, 研究其对大白菜^[2]、水稻幼苗^[3]、黄瓜^[4]、菊花^[5-6]、长寿花^[6]、黑云杉^[7]、辣椒^[8]生长发育的影响, 证实了荧光灯光环境调控对植物的生物学效应。

人参榕 (*Ficus microcarpa* L. f.) 为桑科榕属, 是福建省主要的出口花卉品种, 2010 年占全省花卉出口总额 33%^[9]。但由于较长时间断光、断水的海运环境 (30 d 左右), 易造成人参榕叶片黄化与脱落, 影响其到岸商品性状, 给生产者带来较大的经济损失。黑暗环境会抑制植株的光合作用, 降低色素含量, 减少光合产物, 最终导致叶片的黄化脱落^[10]。目前对人参榕贮运的研究主要集中在温度、基质、肥料、保水剂、植物生长调节剂和根结线虫等方面^[11-12], 而对其贮运期间人工补光光合特性的研究尚未见报道。本研究旨在探讨模拟贮运期间不同补光时长对人参榕叶片的黄化指数、落叶率、相对含水量 (RWC)、比叶重 (SLW)、光合色素含量及气体交换参数的影响, 以摸索合适的补光时长, 从而改善人参榕模拟贮运期间叶片黄化脱落的问题, 为生产实践提供技术支持及一定的理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料与处理

供试的材料为符合出口要求的人参榕 (接穗为泰国榕) 植株, 于 2013 年 10 月 5 日购自漳州恒隆园艺有限公司, 选择无病害、健壮、长势一致的人参榕植株, 规格 200 g。试验于 2013 年 10 月 21 日至 11 月 20 日在室内进行, 植株于模拟贮运前浇透水 1 次, 后置于模拟集装箱的黑暗贮运环境 (温度 16 °C、湿度 65%), 处理 28 d。补光光源采用 T5 荧光灯 (灯管长 120 cm, 功率为 28 W), 每个处理 2 根荧光灯, 光强 $(8 \pm 2) \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (灯下 11 cm)。补光时长设置 0、2、4、6、8、10 及 12 h · d⁻¹ 等 7 个水平处理, 每处理 23 株。于模拟贮运第 28 天观察叶片黄化脱落情况和测定相关指标。

1.2 测定指标及方法

1.2.1 落叶率 模拟贮运前统计植株总叶片数 N_1 , 每 7 d 再统计植株的叶片数 N_2 。

$$\text{落叶率} = (N_1 - N_2) / N_1 \times 100\%$$

1.2.2 黄化指数 叶片黄化指数参照李英慧等^[13]、徐连生等^[14]的方法测定: 将每周掉落的叶片黄化状态分为 6 级 (图 1), 即未黄化 (1 级, 绿色)、轻微黄化 (2 级, 绿黄色)、中等黄化 (3 级, 黄绿色)、较重黄化 (4 级, 带有轻微的斑点)、严重黄化 (5 级, 带有褐色斑点)、枯萎 (6 级)。取每株所有落叶, 确定其黄化级数, 按以下公式计算:

$$\text{黄化指数} = [\sum (\text{黄化级值} \times \text{相应黄化级值叶片})]$$



图 1 人参榕落叶黄化等级的代表图
从左至右依次为:未黄化(1级,绿色)、轻微黄化(2级,绿黄色)、中等黄化(3级,黄绿色)、较重黄化(4级,带有轻微的斑点)、严重黄化(5级,带有褐色斑点)、枯萎(6级)

Fig. 1 Respective images of defoliation chlorosis index of *F. microcarpa*
From left: no chlorosis(First level, green), a litter chlorosis (Second level, green-yellow), secondary chlorosis(Third level, yellow-green), serious chlorosis(Fourth level, leaf with a slight spots), more serious chlorosis(Fifth level, leaf with brown spots) and withered(Sixth level)

数)/(每株植株的总叶片数×6)]

1.2.3 比叶重和相对含水量 参照赵世杰^[15]的方法,略作改动。用打孔器($d=1.5\text{ cm}$)打取 15 个圆叶片,计算出叶片的总面积,用分析天平称取叶片鲜重 W_1 ;之后, $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 15 min 后,置于 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$,直至衡重,称取叶片干重 W_2 ;分别按下式计算:

比叶重(SLW) = $W_2(\text{mg})/\text{叶面积}(\text{cm}^2)$
相对含水量(RWC) = $[(W_1 - W_2)/W_1] \times 100\%$

1.2.4 光合色素含量 采用朱广廉的乙醇-丙酮混合液提取法^[16]。随机选取植株健康的功能叶片并将其剪碎,称取 0.2 g ,放入 15 mL 的离心管,加入 10 mL 的混合提取液(丙酮:乙醇:水 = $4.5:4.5:1$)中,旋好盖子,置于室温暗处避光浸提直至材料完

全褪色(约 24 h)。之后过滤到 25 mL 容量瓶中(多次润洗离心管和滤纸)并定容。用 TU-1810 型分光光度计测定叶片浸提液在波长为 663 nm 、 645 nm 和 440 nm 处的吸光值。计算叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素(a+b)、类胡萝卜素含量。

1.2.5 光合参数 模拟贮运处理 28 d 后,随机选取植株生长一致、健康的功能叶片,选择天气晴朗的上午 $9:00\sim12:00$,利用美国 CID 公司生产的 CI-340 便携式光合作用分析仪,测定净光合速率(P_n)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、气孔导度(G_s)和蒸腾速率(T_r)等参数。每处理 3 株,每株读取 5 次数据,5 次数据的平均值用以相关数据计算。

1.3 数据统计分析
原始数据用 Excel 2003 整理、统计、做图,用 DPS v7.05 版对数据进行单因素方差分析,采用最小显著差异法(LSD)进行处理间多重比较。

2 结果与分析

2.1 补光时长对模拟贮运人参榕叶片生长的影响
不同补光时长对模拟贮运人参榕落叶率、黄化指数、相对含水量的影响规律基本一致,即随着补光时间的延长这 3 个指标均呈下降趋势(表 1,图 2)。尤其在补光 $8\sim12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 条件下下降最显著,落叶率比对照($0\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$)分别下降 60% 、 56% 、 71% ,黄化指数分别下降 52% 、 45% 、 64% ,相对含水量分别下降 8.0% 、 8.6% 、 9.5% ,并与其他处理差异显著($P<0.05$)。同时,随着补光时间的延长,人参榕叶片比叶重却呈上升趋势,且当补光 $8\sim12\text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ 时上升最显著,并与其他处理差异显著($P<0.05$)。以上结果说明人参榕在模拟贮运暗胁迫下叶片黄化

表 1 不同补光时长下模拟贮运人参榕叶片生长的变化

Table 1 The growth appearance of <i>F. microcarpa</i> leaves with different supplemental lighting time				
补光时长 Supplement light time/($\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$)	落叶率 Defoliation rate/%	黄化指数 Chlorosis index	相对含水量 RWC/%	比叶重 SLW/($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$)
0(CK)	$89.64\pm5.66\text{a}$	$0.52\pm0.06\text{a}$	$80.56\pm0.79\text{a}$	$4.32\pm0.18\text{e}$
2	$84.73\pm4.68\text{a}$	$0.51\pm0.07\text{a}$	$80.02\pm0.88\text{a}$	$4.56\pm0.20\text{de}$
4	$69.84\pm5.01\text{b}$	$0.45\pm0.08\text{ab}$	$77.55\pm0.95\text{b}$	$4.75\pm0.19\text{cd}$
6	$53.46\pm3.98\text{c}$	$0.39\pm0.05\text{b}$	$77.35\pm0.63\text{b}$	$5.01\pm0.21\text{c}$
8	$35.71\pm4.55\text{d}$	$0.25\pm0.04\text{c}$	$74.12\pm0.71\text{c}$	$5.49\pm0.22\text{ab}$
10	$39.19\pm2.32\text{d}$	$0.28\pm0.07\text{c}$	$73.63\pm0.58\text{c}$	$5.37\pm0.17\text{b}$
12	$26.08\pm2.02\text{e}$	$0.19\pm0.06\text{c}$	$72.88\pm0.62\text{c}$	$5.75\pm0.19\text{a}$

注:表中数值为 3 个重复的平均值±标准差;同列数据后不同小写字母表示处理之间在 0.05 水平存在显著差异;下同。
Note: Data are means±SD($n=3$). Within a column, values followed by different lowercases are significantly different among treatments at 0.05 level. The same as below.

脱落严重,模拟贮运时补光 8~12 h·d⁻¹可有效减轻模拟贮运暗胁迫下人参榕叶片光合产物的消耗,从而显著降低落叶率、叶片黄化指数。

2.2 不同补光时长对模拟贮运人参榕叶片光合色素含量的影响

随着补光时间的延长,模拟贮运人参榕叶片叶绿素总量(叶绿素 a、b)、类胡萝卜素含量及叶绿素 a/b 比值均呈上升趋势(表2)。尤其在补光8、10及12 h·d⁻¹条件下上升最显著,叶绿素总量分别比 CK(0 h·d⁻¹)显著上升 14.69%、15.39%、23.08%,叶绿素 a/b 分别显著上升24.10%、27.56%、20.24%,类胡

萝卜素分别显著上升17.55%、15.00%、22.51%,但补光 8~12 h·d⁻¹处理间的光合色素含量和叶绿素 a/b 无显著差异。这说明增加日补光时长有利于模拟贮运人参榕叶片色素的合成。

2.3 不同补光时长对模拟贮运人参榕叶片气体交换参数的影响

不同补光时长对模拟贮运人参榕叶片 P_n 、 G_s 的影响规律基本一致,即随着补光时间延长总体呈上升趋势(表3)。其中,除补光 2 h·d⁻¹ 处理外,其余处理 P_n 均显著高于对照(0 h·d⁻¹),尤其在补光 8、10及12 h·d⁻¹ 条件下分别比对照显著上升181%、

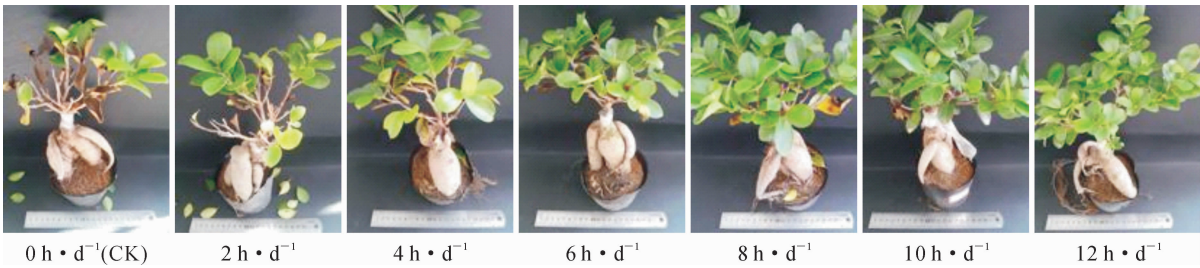


图2 不同补光时长下模拟贮运人参榕落叶率变化

Fig. 2 The effects on defoliation rate of *F. microcarpa* under different supplemental lighting time

表2 不同补光时长下模拟贮运人参榕叶片色素含量的变化

Table 2 The pigment contents of *F. microcarpa* leaves with different supplemental lighting time

补光时长 Supplement light time/(h·d ⁻¹)	叶绿素 a 含量 Chl a content /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 b 含量 Chl b content /(mg·g ⁻¹)	叶绿素(a+b)含量 Chl(a+b) content /(mg·g ⁻¹)	叶绿素 a/b 比值 Chl a/b content	类胡萝卜素含量 Carotenoid content /(mg·g ⁻¹)
0(CK)	0.68±0.09c	0.27±0.02ab	0.95±0.11cd	2.50±0.06b	0.13±0.01d
2	0.71±0.08bc	0.28±0.02ab	0.99±0.06bcd	2.59±0.14b	0.14±0.01bcd
4	0.69±0.05c	0.22±0.02c	0.91±0.07d	3.10±0.07a	0.14±0.01cd
6	0.80±0.05ab	0.25±0.02b	1.05±0.06bc	3.09±0.11a	0.15±0.01abcd
8	0.83±0.04a	0.26±0.02ab	1.09±0.05ab	3.11±0.06a	0.16±0.01ab
10	0.84±0.03a	0.26±0.02ab	1.10±0.05ab	3.19±0.02a	0.15±0.01abc
12	0.88±0.06a	0.29±0.01a	1.17±0.06a	3.01±0.18a	0.16±0.01a

表3 不同补光时长下模拟贮运人参榕叶片气体交换参数的变化

Table 3 The gas exchange parameters of *F. microcarpa* leaves with different supplemental lighting time

补光时长 Supplement light time/(h·d ⁻¹)	净光合速率 P_n /($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO ₂ 浓度 C_i /($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r /($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
0(CK)	1.90±0.40c	6.27±0.78f	327.34±35.66a	0.22±0.05c
2	2.09±0.43c	9.51±1.51e	281.75±25.23b	0.84±0.11b
4	4.64±0.76b	15.48±2.07d	175.46±20.31c	0.87±0.09b
6	4.65±0.52b	17.96±1.88c	109.51±20.01e	1.37±0.09a
8	5.34±0.61ab	31.09±3.15a	75.78±14.56f	1.59±0.16a
10	5.30±0.72ab	26.10±2.95b	122.51±20.39d	0.81±0.19b
12	6.12±0.67a	31.92±4.11a	70.26±10.74f	0.61±0.23b

表 4 不同补光时长条件下人参榕叶片黄化脱落与光合特性的相关矩阵
Table 4 Correlation coefficients of defoliation rate, chlorosis index and photosynthetic parameters
of *F. microcarpa* leaves treated with different supplemental lighting time

项目 Item	落叶率 Defoliation rate	黄化指数 Chlorosis index	叶绿素(a+b)含量 Chl(a+b) content	叶绿素 a/b 比值 Chl a/b content	P_n	T_r	G_s	C_i
落叶率 Defoliation rate	1							
黄化指数 Chlorosis index	0.99**	1						
叶绿素(a+b)含量 Chl(a+b) content	-0.89**	-0.91**	1					
叶绿素 a/b 比值 Chl a/b content	-0.79*	-0.71*	0.47	1				
P_n	-0.94**	-0.91**	0.71*	0.91**	1			
T_r	-0.63	-0.54	0.42	0.73*	0.65	1		
G_s	-0.69	-0.61	0.48	0.73*	0.71*	0.97**	1	
C_i	0.95**	0.90**	-0.75*	-0.90**	-0.97**	-0.80*	-0.84**	1

注: * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平的显著相关性。
Note: * and ** showing significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

179%、222%($P<0.05$);同时,各补光处理 G_s 均显著高于对照($P<0.05$),补光 8 和 12 h·d⁻¹ 上升最显著,分别比对照上升 181%、222%,并与其他处理差异显著($P<0.05$)。同时,模拟贮运人参榕叶片 C_i 却呈相反的变化趋势,即随着补光时间的延长总体呈下降趋势,且各补光处理均显著低于对照(0 h·d⁻¹)($P<0.05$)(表 3)。尤其是补光 8 和 12 h·d⁻¹ 处理下降最显著,分别比对照下降 76.85%、78.54%,并与其他处理差异显著($P<0.05$)。这说明在较长时间模拟贮运暗胁迫下,人参榕叶片 P_n 的下降主要是由于非气孔限制因素所引起的。

此外,随着补光时长的增加,模拟贮运人参榕叶片 T_r 的变化趋势为先升高后降低的凸形曲线,并在补光 8 h·d⁻¹ 处理下达到最大值(表 3)。其中,叶片 T_r 在补光 0~8 h·d⁻¹ 的范围内随补光时长的增加呈上升趋势,而在补光 8~12 h·d⁻¹ 的范围内随补光时长的增加呈下降趋势;补光 6 和 8 h·d⁻¹ 的 T_r 平均值较大,分别较对照显著上升 524%、623%,且与其他处理差异显著($P<0.05$)。

2.4 模拟贮运人参榕落叶率、黄化指数、叶绿素及光合参数指标的相关分析

对不同补光时长条件下人参榕叶片落叶率、黄化指数、叶绿素及主要光合参数指标进行相关分析得相关矩阵(表 4)。由表 4 可见,模拟贮运人参榕落叶率、黄化指数与其叶绿素含量、 P_n 呈极显著负相关($P<0.01$),与其叶绿素 a/b 呈显著负相关($P<0.05$),与 C_i 呈极显著正相关($P<0.01$);同时,叶片 P_n 与叶绿素含量、 G_s 呈显著正相关,与叶绿素 a/b 呈极显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关。这说

明在人参榕模拟贮运过程中,其叶片的黄化脱落可能是由于长期的黑暗环境导致色素分解,吸收光能的能力减弱,光合速率减小,碳同化作用减弱,而使 C_i 上升。因此,在模拟贮运时给予一定的光照可以有效地提高人参榕植株的光合作用,缓解叶片的黄化脱落。

3 讨 论

3.1 补光时间与模拟贮运人参榕叶片黄化脱落的关系

叶片脱落是植株衰老的一个重要表现,它既依赖于自身的生长发育进程,又受到外界环境因素的影响,包括光照、温度、水分等^[17]。低温、弱光及黑暗是诱导植株衰老的主要外因,其中以黑暗环境对植株的影响最为明显^[18-22]。研究表明,植株自然衰老与黑暗诱导衰老具有许多相同之处(超过 75% 基因表达是一致)^[23]。本研究中,人参榕植株落叶率在黑暗处理中最大(89.64%),但随着补光时间增加又呈下降趋势,并以补光 8~12 h·d⁻¹ 下降最显著,说明黑暗环境可诱导植株叶片衰老,通过补光时间的延长可延缓植株叶片的衰老。程瑞锋^[24]在对黄瓜的研究发现,补光时间越长、光照强度越大,衰老脱落叶指数越小,本研究结果与之一致。

目前认为,叶片黄化的主要原因是浇水施肥过多^[25]、干旱胁迫^[26]、缺 Fe 和 Mg 等微量元素^[27-28]、光照不足^[29]、病虫害^[30]等。本试验结果表明,随着补光时间增加,人参榕叶片的黄化指数呈下降趋势,与落叶率呈极显著正相关,说明模拟贮运植株叶片的黄化脱落主要是由于光照不足造成的,通过适当

的补光措施能促进植株的生长,显著减轻植株叶片的黄化脱落。这与栾征等^[31]在茶苗上的研究结果相一致。

本试验还发现,随着补光时长的增加,模拟贮运人参榕植株叶片比叶重(SLW)上升,与落叶率、黄化指数呈极显著负相关,而与光合速率呈极显著正相关,说明补光时间的延长有利于植株光合产物的积累,增加植株叶干重,这与裴海霞等^[32]、陈华蕊等^[33]的试验结果相一致。但随着补光时间的增加,叶片相对含水量(RWC)呈下降趋势,且与蒸腾速率、气孔导度的变化趋势相反,说明补光时间的延长可提高植株叶片的气孔导度,加强蒸腾作用,从而导致叶片相对含水量的下降。

3.2 补光时间与模拟贮运人参榕叶片光合色素含量及光合作用的关系

光合色素在光合作用中具有重要作用,绝大部分的光合色素具有吸收和传递光能的作用,并且极少数特殊状态的叶绿素 a 分子具有光化学活性,可将光能转化为电能。因此,光合色素含量的变化不仅可以反映光合作用的强弱,也可以反映出植物组织器官在不利环境下的衰老程度^[34]。陈敏等^[35]在茄子幼苗上的研究结果表明,延长光照时间可增加叶绿素含量。本试验中,随着补光时长增加,模拟贮运人参榕叶片叶绿素含量、类胡萝卜素含量及叶绿素 a/b 均呈上升趋势,这与前人的研究结果一致。进一步相关性分析表明,人参榕叶片叶绿素含量与落叶率、黄化指数呈极显著负相关,与 P_n 呈显著正相关;叶绿素 a/b 与落叶率、黄化指数呈显著负相关,与 P_n 呈极显著正相关。说明在较长时间暗胁迫条件下,人参榕叶片的黄化脱落的主要原因之一是光合色素含量减少,补光有利于叶绿素的合成,从而提高植株的光合作用能力。同时,类胡萝卜素可保护叶绿素免受伤害^[36]。在对茄子幼苗^[35]、油葵芽苗菜^[37]的研究中均发现延长光照时间有利于提高植株类胡萝卜素含量,本试验与之相符。说明延长补光时长有利于人参榕叶片类胡萝卜素合成,降低叶绿素受伤害的程度,进而保护叶片光合机能。

光合作用是形成植物生物产量的基础,在逆境胁迫下植株的光合速率一般会下降^[38-41]。光合速率的大小不仅受光合色素含量的影响,还显著地受到 G_s 、 T_r 、 C_i 的影响^[42]。目前认为,光合速率下降主要是由两个因素引起:一是受气孔因素,即气孔导度下降,阻止 CO_2 供应;二是非气孔因素,即植株自身光合能力下降,使叶肉细胞利用 CO_2 的能力降低,从而导致胞间 CO_2 浓度升高^[43]。研究表明,判断光合速率下降的原因,既要看看 G_s 的大小,还要看看 C_i 的变化。当 P_n 与 C_i 呈正相关,而与 G_s 呈负相关时,说明 P_n 下降主要是由于气孔限制因素引起的;但当 P_n 与 C_i 呈负相关,而与 G_s 呈正相关时,则说明非气孔限制因素是 P_n 下降主要原因^[44]。本研究中,叶片 P_n 与叶绿素含量、 G_s 呈显著正相关,与 C_i 呈极显著负相关,表明较长时间模拟贮运暗胁迫环境已对人参榕的光合系统造成损伤,且主要是非气孔限制因素(叶绿素分解)导致 P_n 降低。裴海霞等^[32]认为,延长光照时间可提高德国鸢尾‘Royal touch’的 P_n 。本试验中,随着补光时长增加, P_n 也呈上升趋势,说明通过延长补光时间可有效减轻模拟贮运暗胁迫环境对人参榕光合系统的损伤,与前人的研究结果一致。

3.3 人工补光在人参榕模拟贮运中的应用前景

本试验发现通过补光措施可显著减缓贮运人参榕叶片黄化与脱落,且随着补光时间增加,植株的落叶率、黄化指数均呈下降趋势。其中,补光时长大于 $8\text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 效果较好,可显著改善人参榕叶片黄化脱落,但考虑成本及灯管发热量等因素,最适补光时长为 $8\text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 。同时,综合考虑电费、荧光灯安装费用及灯管使用寿命,补光 $8\text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 模拟贮运成本将增加 0.5 元/株,而由于模拟贮运落叶造成人参榕到岸后养护或耗损将增加的额外费用为 3 元/株,以目前人参榕 20 000 株/柜出口情况计,预计将减少损失 50 000 元/柜,经济效益显著。因此,对于长时间海运的出口人参榕补光 $8\text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 在生产中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHU J X(朱静娴). Influence of artificial supplement of light on plant growth and development[J]. *Crop Research* (作物研究), 2012, 26 (1): 74-78(in Chinese).
- [2] YU Y J(余阳俊), ZHANG F L(张凤兰), ZHAO X Y(赵岫云), *et al.* Effect of day length and supplementary light luminosity at night on

- bolting and florescence of *Brassica campestris* L. [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica* (华北农学报), 2007, **22**(6): 114—118 (in Chinese).
- [3] FU CH M(付传明), HUANG N ZH(黄宁珍), ZHAO ZH G(赵志国), *et al.* Effect of different light qualities and illumination supplement on growth and photosynthetic rate of rice seedling[J]. *Cuihaia*(广西植物), 2007, **27**(2): 255—259 (in Chinese).
- [4] SHIBUYA T, ENDO R, HAYASHI N, *et al.* High-light-like photosynthetic responses of *Cucumis sativus* leaves acclimated to fluorescent illumination with a high red;far-red ratio;interaction between light quality and quantity[J]. *Photosynthetica*, 2012, **50**(4): 623—629.
- [5] 王春听. 光对切花菊‘神马’生长和开花的影响[D]. 南京:南京农业大学, 2012.
- [6] CHUNG H K, SANG B L, BYOUNG R J, *et al.* Photoperiodic responses of *Kalanchoe* and *Chrysanthemum* to radiation by an infrared lamp[J]. *Horticulture, Environment, Biotechnology*, 2012, **53**(6): 484—489.
- [7] OUYANG F Q(欧阳芳群), ZHANG SH G(张守攻), WANG J H(王军辉), *et al.* Effects of supplemental lighting treatments on seedling growth of varied provenances in black spruce[J]. *Journal of Beijing Forestry University*(北京林业大学学报), 2010, (5): 82—87 (in Chinese).
- [8] BROWN C S, SCHUERGER A C, SAGER J C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1995, **120**(5): 808—813.
- [9] CHAI X T(柴喜堂). Flower export to move higher in Fujian Province[J]. *China Flower Gardening* (中国花卉园艺), 2011, (5): 11—12 (in Chinese).
- [10] DUAN Q Q(段青青), XIA H Y(夏含嫣), DING M(丁 明), *et al.* Effects of short-term darkness on leaf photosynthetic structure and functions of *Petunia hybrida* seedlings[J]. *Acta Agriculturae Shanghai*(上海农业学报), 2009, **25**(4): 64—69 (in Chinese).
- [11] 韩 娜. 人参榕贮运过程中落叶的原因及改善措施研究[D]. 福州:福建农林大学, 2008.
- [12] 洪志方. 出口盆栽榕树贮运系统技术研究[D]. 福州:福建农林大学, 2008.
- [13] LI Y H(李英慧), HAN ZH H(韩振海), XU X F(许雪峰). Fe-efficient traits and their relationships to chlorosis index in genus *Malus* [J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2004, **31**(3): 350—352 (in Chinese).
- [14] XU L SH(徐连生), WANG L(王 磊), WANG R(王 然), *et al.* Segregation of tolerance to iron deficiency in apomictic and hybrid progeny of *Malus xiaojinensis*[J]. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2012, **29**(5): 770—775, 961 (in Chinese).
- [15] 赵世杰. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2002.
- [16] 朱广廉, 钟海文. 植物生理学实验[M]. 北京:北京大学出版社, 1990: 51—52.
- [17] LIM P O, KIM H J, NAM H G. Leaf senescence[J]. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2007, **58**: 115—136.
- [18] YAO SH SH(姚珊珊), ZHU X Y(朱晓宇), ZHAO E W(赵二卫), *et al.* *In vivo* study in dark-induced senescence in individual tobacco leaf[J]. *Acta Tabacaria Sinica* (中国烟草学报), 2010, **16**(2): 36—39 (in Chinese).
- [19] CHENG X X, DAI X M, ZENG H M, *et al.* Gene expression involved in dark-induced leaf senescence in *Zoysia grass* (*Zoysia japonica*) [J]. *Plant Biotechnol Rep.*, 2009, **3**: 285—292.
- [20] MISHEV K, STEFANOV D, ANANIEVA K, *et al.* Different effects of dark treatment on pigment composition and photosystem I and II activities in intact cotyledons and primary leaves of *Cucurbita pepo* (zucchini)[J]. *Plant Growth Regulation*, 2009, **58**(1): 61—71.
- [21] KEECH O, PESQUET E, AHAD A, *et al.* The different fates of mitochondria and chloroplasts during dark-induced senescence in *Arabidopsis* leaves[J]. *Plant Cell Environ.*, 2007, **30**(12): 1 523—1 534.
- [22] KALINA A, EVGUENI D A, SNEJANA D, *et al.* Local induction of senescence by darkness in *Cucurbita pepo* (zucchini) cotyledons or the primary leaf induces opposite effects in the adjacent illuminated organ[J]. *Plant Growth Regul.*, 2011, **65**: 459—471.
- [23] GRAAFF V D, SCHWACKE R, SCHNEIDER A, *et al.* Transcriptional analysis of *Arabidopsis* membrane transporters and hormone pathways during developmental and induced leaf senescence[J]. *Plant Physiol.*, 2006, **141**: 776—792.
- [24] 程瑞锋. 外源补光解决温室黄瓜早衰问题的研究[D]. 陕西杨陵:西北农林科技大学, 2004.
- [25] REN B ZH(任佰朝), ZHANG J W(张吉旺), LI X(李 霞), *et al.* Effect of waterlogging on leaf senescence characteristics of summer maize in the field[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(4): 1 022—1 028 (in Chinese).
- [26] LI J H(李金花), SUN M SH(孙敏善), ZHANG CH Y(张春艳), *et al.* The drought tolerance related characteristics of transgenic wheat with the TPSP fusion gene[J]. *Plant Physiology Journal* (植物生理学报), 2012, **48**(1): 81—84 (in Chinese).
- [27] WANG C L(王翠玲), YANG X M(杨晓明), CAO Z Y(曹孜义). Effects of Fe-deficient chlorosis on growth and fruit quality of grapevine [J]. *Journal of Fruit Science* (果树学报), 2007, **24**(1): 26—29 (in Chinese).
- [28] ZHANG G Y(张广越), PENG L ZH(彭良志), CHUN CH P(淳长品), *et al.* Seasonal changes in leaf magnesium and boron contents and their relationships to leaf yellowing of navel orange (*Citrus sinensis* Osbeck)[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2010, **37**(8):

- 1 317—1 324(in Chinese).
- [29] QIN Y ZH(秦玉芝), XING ZH(邢 铮), ZOU J F(邹剑锋), *et al.* Effects of sustained weak light on seeding growth and photosynthetic characteristics of potato seedlings[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2014, **47**(3): 537—545(in Chinese).
- [30] YU W G(余文贵), ZHAO T M(赵统敏), YANG M L(杨玛丽), *et al.* Research progress on tomato yellow leaf curl disease and resistance breeding[J]. *Jiangsu J. of Agr. Sci.* (江苏农业学报), 2009, **25**(4): 925—930(in Chinese).
- [31] LUAN ZH(栾 征), CAO Q J(曹前进), CHENG H(成 浩), *et al.* Impacts of increasing temperature and prolonging light duration on growth of tea cuttings in winter[J]. *Journal of Zhejiang University* (Agric & Life Sci) (浙江大学学报), 2007, **33**(5): 519—524(in Chinese).
- [32] PEI H X(裴华霞), SHI L(石 雷), ZHANG J ZH(张金政), *et al.* Effects of different photoperiods on flower bud differentiation and photosynthesis in *Iris germanica* 'Royal touch'[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2006, **14**(6): 477—481(in Chinese).
- [33] CHEN H R(陈华蕊), CHEN Y Y(陈业渊), GAO A P(高爱平), *et al.* Study on relationship between chlorophyll, specific leaf weight and net photosynthetic rate of mango[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), 2010, **23**(6): 1 848—1 850(in Chinese).
- [34] JIAO J Y(焦娟玉), LIU Y(刘 裕), YIN CH Y(尹春英), *et al.* Effects of soil water condition on photosynthesis, ultrastructure and physiological characteristics of *Jatropha curcas* L. seedlings[J]. *Chin. J. Appl. Environ Biol.* (应用与环境生物学报), 2010, **16**(4): 483—488(in Chinese).
- [35] CHEN M(陈 敏), LI H Y(李海云). Effects of Zn stress on physiological characteristics of Melon seedlings[J]. *Northern Horticulture* (北方园艺), 2010, (16): 53—55(in Chinese).
- [36] MA J Y(马俊莹), ZHOU R(周 睿), CHENG B S(程炳嵩). The relationship between carotenoid and activated oxygen metabolism[J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 1997, **28**(4): 518—522(in Chinese).
- [37] ZHANG H(张 欢), ZHANG L L(章丽丽), LI W(李 薇), *et al.* Effects of photoperiod under red LED on growth and quality of sunflower sprouts[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2012, **39**(2): 297—304(in Chinese).
- [38] MAO W G(毛炜光), WU ZH(吴 震), HUANG J(黄 俊), *et al.* Effects of moisture and light intensity on ecophysiological characteristics of musk melon seedlings[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18**(11): 2 475—2 479(in Chinese).
- [39] HE Y H(何炎红), GUO L SH(郭连生), TIAN Y L(田有亮). Photosynthetic rates and chlorophyll fluorescence of *Nitraria tangutorum* at different leaf water potentials[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2005, **25**(11): 2 226—2 233(in Chinese).
- [40] ZHANG SH T(张顺堂), ZHANG G L(张桂莲), CHEN L Y(陈立云), *et al.* Effects of high temperature stress on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence parameters of flag leaf in rice[J]. *Chin. J. Rice Sci.* (中国水稻科学), 2011, **25**(3): 335—338(in Chinese).
- [41] WANG R L(王仁雷), HUA CH(华 春), LUO Q Y(罗庆云), *et al.* Na^+ and Cl^- accumulation in chloroplasts results in a decrease in net photosynthetic rate in rice leaves under salt stress[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology* (植物生理与分子生物学学报), 2002, **28**(5): 385—390(in Chinese).
- [42] LIU X Y(刘晓英), XU ZH G(徐志刚), CHANG T T(常涛涛), *et al.* Growth and photosynthesis of cherry tomato seedling exposed to different low light of LED light quality[J]. *Acta Bot. Boreal. -Occident. Sin.* (西北植物学报), 2010, **30**(4): 645—651(in Chinese).
- [43] JIN Y Q(金雅琴), LI D L(李冬林), DING Y L(丁雨龙), *et al.* Effects of salt stress on photosynthetic characteristics and chlorophyll content of *Sapium sebiferum* seedlings[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Nat. Sci. Edi.) (南京林业大学学报·自然科学版), 2011, **35**(1): 29—33(in Chinese).
- [44] XU D Q(许大全). Some problems in stomatal limitation analysis of photosynthesis[J]. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 1997, **33**(4): 241—244(in Chinese).

(编辑:裴阿卫)