

不同红光与远红光比值对盐胁迫下番茄光合能力的影响

高登国^{1,3}, 于捷², 邹志荣², 曹凯³, 鲍恩财³, 孟力力³, 李士照⁴, 叶林^{1*}

(1. 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2. 西北农林科技大学园艺学院, 农业部西北设施园艺工程重点实验室, 杨凌 712100;

3. 江苏省农业科学院农业设施与装备研究所, 农业部长江中下游设施农业工程重点实验室, 南京 210014;

4. 苏州普兆农业科技有限公司, 苏州 215000)

摘要: 为了研究不同红光与远红光比值 ($R:Fr$) 对番茄幼苗耐盐性的影响, 以 ‘Money Maker’ 番茄幼苗为试材, 研究在盐胁迫条件下不同 $R:Fr$ 比值对番茄幼苗形态、叶绿素含量、叶绿素荧光和光合速率的影响。结果表明, 在 NaCl 胁迫下, 适当降低番茄幼苗光环境中 $R:Fr$ 比值, 番茄幼苗的株高、叶面积、茎粗、地上地下部的干鲜重、净光合速率和叶绿素含量均显著升高 ($P < 0.05$), 促进了番茄幼苗的生长, 提高了番茄幼苗的耐盐性。植物叶片光系统 II (PSII) 反应中心的活性在盐胁迫下最易受到影响。番茄幼苗光环境中的 $R:Fr$ 比值降低, 使番茄叶片的 PSII 最大光化学效率 (F_v/F_m)、实际光化学量子产量 (F_v'/F_m)、PSII 反应中心实际光化学效率 (Φ_{PSII})、表观光合电子传递速率 (apparent photosynthetic electron transport rate, ETR) 和光化学淬灭系数 (qP) 显著升高, 而非光化学淬灭系数 (non-photochemical quenching, NPQ) 显著降低 ($P < 0.05$)。说明降低光环境中的 $R:Fr$ 比值, 使番茄叶片保持了较高 PSII 反应中心光化学效率。因此, 可以通过调控番茄植株光环境中的 $R:Fr$ 比值来调控番茄植株的耐盐性, 促进番茄植株的生长。

关键词: 番茄; 红光与远红光比; 盐胁迫; 光合速率; 叶绿素荧光

中图分类号: S641.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2021)04-0578-06

Effects of different red to far-red light ratios on tomato photosynthesis ability under salt stress

GAO Dengguo^{1,3}, YU Jie², ZOU Zhirong², CAO Kai³, BAO Encai³, MENG Lili³, LI Shizhao⁴, YE Lin¹

(1. College of Agronomy, Ningxia University, Yinchuan 750021; 2. Key Laboratory of Protected Horticultural Engineering in Northwest,

Ministry of Agriculture, College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling 712100; 3. Key Laboratory of Agricultural Engineering

in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Institute of Agricultural Facilities and Equipment, Jiangsu

Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014; 4. Suzhou Puzhao Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Suzhou 215000)

Abstract: In order to understand the effect of different ratios of red light to far red light ($R:Fr$) on salt tolerance of tomato seedlings, ‘Money Maker’ tomato seedlings were used as the test material to study the changes of tomato seedling morphology, chlorophyll content, chlorophyll fluorescence and photosynthetic rate induced by different $R:Fr$ ratios under salt stress conditions. The results showed that under NaCl stress, the reduced-ratio of $R:Fr$ in the light environment could increase the plant height, leaf area, stem diameter, dry and fresh weight of above and below ground, net photosynthetic rate and chlorophyll content of tomato seedlings ($P < 0.05$), which suggested that a suitable reduced-ratio of $R:Fr$ can promote the growth and improve the salt tolerance of tomato seedlings. The activity of photosystem II (PSII) reaction center in plant leaves is the most susceptible to salt stress. In this study, the reduced-ratio of $R:Fr$ significantly increased the maximal photochemical efficiency of PSII (F_v/F_m), the actual photochemical efficiency of the PSII reaction center (Φ_{PSII}), the electron transport rate (ETR) and the photochemical quenching coefficient (qP). However, the non-photochemical quenching (NPQ) was significantly reduced by the reduced-ratio of $R:Fr$ ($P < 0.05$), which suggested that reduced-ratio of $R:Fr$ in the light environment can keep the photochemical efficiency of the PSII at a relatively high level. Therefore, regulating the ratio of $R:Fr$ in the light environment can promote the salt tolerance and the growth of tomato plants.

收稿日期: 2020-10-22

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划 (2018BBF02009, 2018BBF03001, 2019BBF02005), 宁夏自然科学基金 (NZ17012) 和宁夏银川市西夏区科技计划项目共同资助。

作者简介: 高登国, 硕士研究生。E-mail: gdgxy9411@163.com

* 通信作者: 叶林, 副教授。E-mail: yelin.3993@163.com

Key words: tomato; red to far-red light ratio; salt stress; photosynthesis; chlorophyll fluorescence

番茄 (*Solanum lycopersicum* L.), 即西红柿, 广泛种植于世界各地, 是菜篮子中主要的蔬菜, 深受各国人民的喜爱, 同时还是研究者进行遗传学及抗逆生理生化研究所用的重要模式植物^[1]。近年来, 我国设施番茄栽培面积迅速扩大, 然而受温室半封闭环境条件和连年重茬种植、不合理灌溉、过量施肥等高度集约化经营方式的影响, 土壤次生盐渍化严重, 土壤中积累了大量盐分, 使得设施番茄受到盐胁迫, 最终导致减产及品质的降低^[2]。目前, 制约我国设施番茄高效、优质生产的重要原因是盐胁迫^[3]。盐胁迫使番茄的光合机构受到损害^[4], 阻碍了光合电子的传递, 严重伤害了番茄的生长发育^[5]。因此, 从改善设施番茄盐胁迫条件下的光合能力入手, 可以有效地提高设施番茄的抗盐能力, 对设施番茄抗盐高效栽培具有很重要的意义。

光是调节植物生长发育的重要环境因子, 不同光质对植物生长发育也会产生不同的影响, 并且与露天大田环境相比, 设施温室内的光质会发生较大的变化, 因此通过补光措施来改变温室内的光环境, 最终达到调节植物生长的效果^[6]。不同光源补光能显著改善设施番茄幼苗形态以及提高番茄幼苗全株的干鲜质量。王洪安^[7]的研究表明, 温室番茄人工补光可促进番茄提前成熟期, 畸形果较少, 番茄植株形态健壮, 品质优良。因此, 根据番茄对光质的需求, 提供最适宜其生长的光环境参数, 可提高 LED 光源的利用效率。当前, 对设施番茄生产中的 LED 光源重点在不同光质对比对番茄的光合、形态指标和生理指标等影响的研究。杨俊伟等^[8]研究表明, 不同红蓝光比可以促进番茄幼苗的鲜质量、叶绿素含量、根系活力等提高; 张现征等^[9]研究结果显示, 不同红蓝光比有利于番茄幼苗干物质的积累和壮苗指数, 而且有利于光合性能的提高。通常红光是指 655 ~ 665 nm 波长的光, 是植物叶绿素吸收较多的光, 远红光是指 725~735 nm 波长的光, 为植物光合提供辐射能以及作为信号调节植物整个生理过程^[10]。目前已有很多研究表明, 远红光和红光不仅可以促进番茄幼苗的生长^[11-12], 调节番茄开花时间、叶绿素含量和光合速率, 还能提高番茄产量和品质^[13-14]。然而, 目前对红光与远红光调节设施番茄抗逆的研究却较少。鉴于此, 本试验通过调节温室光环境中 LED 的 *R* 和 *Fr* 比例, 探究在盐胁迫下, 不同 *R:Fr* 比值对番茄幼苗生长的影响, 以期不同 *R:Fr* 比值的光质调控在设施蔬菜生产中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

本试验开展时间为 2016 年 4 月—2019 年 11 月, 开展地点为江苏省农业科学院农业农村部长江中下游设施农业工程重点实验室以及西北农林科技大学农业农村部西北设施园艺工程重点实验室。供试温室番茄品种为 ‘MoneyMaker’。

1.2 试验处理

利用去离子水浸泡番茄种子 3~5 h 后, 将番茄种子放在 4 层纱布的培养皿中并至于 25 °C 恒温培养箱中催芽 48~72 h, 将露白后的番茄种子播于 72 孔塑料穴盘中, 移入人工气候室进行培养, 白/昼两个阶段培养时间各为 12 h, 其中白天光照强度为 80 ~120 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 温度为 25 °C, 夜间温度为 20 °C, 湿度为 65%~70%。番茄长到 2 叶 1 心时, 将番茄根部基质冲洗干净后, 移栽至水培槽中, 进行下一步的深液流水培养。每 20 min 循环 1 次水槽中的营养液, 以 15 cm×10 cm 作为番茄幼苗的水培行株距。白天光照为 12 h, 温度为 26~28 °C, 光照强度为 (200±20) $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 湿度为 65%~70%, 白天打开风扇使空气实现环流。夜间 12 h, 温度为 18~20 °C, 湿度为 65%。由图 1 可知, 白色 LED 光源有 2 个波峰, 分别为 455 nm 和 570 nm, 白色 LED 的 *R:Fr* 为 7.4, LED 远红光的波峰在 730 nm 处。本实验对照组为白色 LED 光源, 处理组为在对照组的基础上添加不同数量的 LED 远红光光源, 形成了番茄幼苗生长发育的光环境中 *R:Fr* 值分别为 1.2 和 0.8, 本实验中其他光质的光谱分布和光照强度都一致。

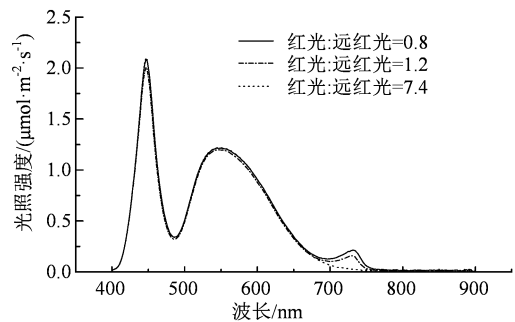


图 1 LED 光谱分布及光照强度

Figure 1 The spectrum distribution and light intensity of LED

缓苗 6 d 后开始进行如下处理: 1) CK, *R:Fr* = 7.4 + 正常水培; 2) T1, *R:Fr* = 7.4 + 盐胁迫; 3) T2, *R:Fr* = 1.2 + 盐胁迫; 4) T3, *R:Fr* = 0.8 + 盐胁迫。其中, 正常水培: 1/2 山崎营养液 (pH 值 6.2~6.5), 盐胁迫

迫处理:在 1/2 倍的山崎营养液中加入 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaCl 的。在盐处理的同时进行不同 $R:Fr$ 处理,每个处理 36 株番茄幼苗。

1.3 测定方法

测定 LED 光源:使用 Model PS-100 光谱辐射计 (Apogee Instruments Inc, Logan, Utah, US),采用五点法测定白色和远红色 LED 光源组合下的不同处理番茄幼苗冠层光谱分布及光照强度。

测定番茄幼苗生长指标:待处理完成后,每个处理随机选择 10 个植物样本。分别用游标卡尺和直尺测量番茄幼苗的株高(测量番茄幼苗茎基部至植株生长点的长度)与茎粗(测量距离水培槽面 1 cm 处的茎粗)。用去离子水小心将番茄样品冲洗干净,并擦干植株上的水分,将番茄植株根据叶、茎、根分开,分别测定其鲜重(精度为 0.01 g)。测量地上、地下部的干质量时,将番茄样品装入纸袋内,放至于烘箱中 $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 完全烘干至恒质量(约 48 h),分别测定干质量(精度为 0.001 g)。

测定番茄幼苗的叶面积:完成各光照处理后,随机挑选 10 个番茄幼苗,用直尺测量叶片的长度(L_c)和最大叶片宽度(L_k),再以经验公式分别计算单叶叶面积 $S^{[15]}$ 。公式为: $S = R \times (L_c \times L_k)$,式中 R 为叶面积系数,当 $0 < L_c < 20 \text{ cm}$ 时, R 取 0.378 2;当 $L_c > 20 \text{ cm}$ 时, R 取 0.318 4。

测定番茄幼苗的叶绿素含量及叶绿素荧光参数:分别经过 0、2、4、6 和 8 d 处理后,从每个处理中随机选择 5 个植物样本测定幼苗顶部向下的第 3 片功能叶片,用 45% 酒精 + 45% 丙酮 + 10% 蒸馏水提取叶绿素,用 UV-1800 分光光度计测定叶绿素含量 $^{[16]}$ 。同时用 Li-6800 光合仪 (LI-COR Inc., Lincoln, USA) 测定番茄植株叶片净光合速率设定 CO_2 浓度为 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,光照强度为 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,叶温为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度 65%~70%。在检测不同光照处理下的叶绿素荧光参数时,先将番茄幼苗置于黑暗条件中 1 h,使植株充分适应光照环境的变化。随后在每个处理下,选择番茄幼苗顶部向下第 3 片功能叶片,利用 Li-6800 便携式光合仪检测在暗适应下每个处理叶片的最大荧光(F_m)和初始荧光(F_o)。随后将各处理组的幼苗置于光下,活化叶片 1 h 后检测叶片在 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下的最小荧光(F_o')、最大荧光(F_m')与稳态荧光(F_s),每个处理 5 次重复。最终计算出不同处理下番茄叶片的各项荧光参数,包括:PS II 反应中心实际光化学效率($\Phi\text{PS II}$)、表观光合电子传递效率(ETR)、实际光化学量子产量(F_v'/F_m')、PS II 最大光化学

效率(F_v/F_m)、光化学淬灭系数(qP)和非光化学淬灭系数(NPQ) $^{[17]}$ 。

测定番茄叶片光响应曲线:利用 Li-6800 便携式光合仪测定番茄幼苗叶片光响应曲线,选择番茄幼苗顶部向下第 3 片功能叶片,将各个处理的待测叶片放至光下活化 1 h,设定番茄叶片的净光合速所需 CO_2 浓度为 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。光强度梯度设置为 0、20、50、100、150、200、500、800、1 100、1 400、1 700 和 $2\ 000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.4 数据处理与分析

试验所有数据采用 Excel 2019 进行统计分析,应用 SPSS20.0 进行试验数据方差及显著性分析,采用 Origin 8.5 进行图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同 $R:Fr$ 值对盐胁迫下番茄幼苗生长的影响

盐胁迫导致植物细胞渗透压增大,植物体内缺水而抑制其生长。由表 1 可知,与 CK 相比, T1 ($R:Fr = 7.4 +$ 盐胁迫)处理使得番茄幼苗的叶面积、茎粗、株高与地上部及地下部的干鲜重分别降低了 34.34%、28.40%、53.68%、43.28%和 52.02% ($P < 0.05$),说明番茄幼苗的生长受到显著抑制 ($P < 0.05$)。T2 ($R:Fr = 1.2 +$ 盐胁迫)处理条件下与 T1 处理相比番茄幼苗植株形态指标均显著升高,分别升高了 30.49%、18.56%、58.17%、40.99%和 48.19%,表明适当降低光环境中的 $R:Fr$ 值时,盐胁迫对番茄幼苗的伤害被显著缓解 ($P < 0.05$)。T3 ($R:Fr = 0.8 +$ 盐胁迫)处理条件下与 T1 相比番茄幼苗植株形态指标均显著升高 ($P < 0.05$),分别升高了 44.69%、35.73%、99.34%、71.60%和 95.18%。但是,与 CK 相比, T3 处理对番茄在盐胁迫下的生长指标差异不显著 ($P < 0.05$)。综上所述,在适宜范围内,降低番茄幼苗生长的光环境中的 $R:Fr$ 值能够显著提高番茄抵抗盐胁迫的能力,促进番茄幼苗正常生长发育。

2.2 不同 $R:Fr$ 值对盐胁迫下番茄幼苗叶片叶绿素含量和光合速率的影响

盐胁迫使得番茄幼苗叶片中叶绿素含量显著地降低,并且随着盐胁迫时间的增加,Chla 和 Chlb 的含量逐渐下降(图 2)。在盐处理并进行低 $R:Fr$ 值处理的初期,会导致番茄幼苗 Chla/b 升高,但随着时间的推移,Chla/b 逐渐降低。在盐胁迫处理 8 d 后,与 CK 相比, T1 处理中的番茄幼苗叶片 Chla、Chlb 以及 Chla/b 的值都分别下降了 28.89%、19.70%和 12.81%。比较 T3 处理与 T1 处理时发现, T3 处理的番茄幼苗叶片中, Chla、Chlb 以及 Chla/b 的含量显

著升高, 分别升高了 25.17%、16.51%和 7.50%。综上所述, 在适宜范围内, 降低番茄生长环境中 $R:Fr$ 值, 能够显著缓解盐胁迫导致的番茄叶片叶绿素含量的下降。

表 1 不同红光远红光处理对盐胁迫下番茄植株株高、茎粗、叶面积和干鲜质量的影响

Table 1 Effects of different $R:Fr$ values on the height, stem diameter, leaf area, fresh and dry mass of tomato plants under salt stress

处理	株高/cm	茎粗/mm	叶面积/cm ²	鲜质量/g			干质量/g		
				根	茎	叶	根	茎	叶
CK	18.23±1.25 ^a	6.02±0.07 ^a	435.31±49.21 ^a	5.32±0.31 ^a	5.42±0.26 ^a	13.22±0.54 ^a	0.28±0.02 ^a	0.29±0.02 ^a	1.16±0.05 ^a
T1	11.97±1.57 ^c	4.31±0.03 ^c	201.62±32.36 ^c	3.18±0.25 ^c	2.85±0.23 ^c	7.56±0.57 ^c	0.15±0.02 ^c	0.16±0.03 ^b	0.52±0.04 ^c
T2	15.62±1.17 ^b	5.11±0.13 ^b	318.91±47.28 ^b	4.33±0.28 ^b	4.47±0.28 ^b	10.36±0.57 ^b	0.21±0.02 ^b	0.23±0.03 ^a	0.79±0.05 ^b
T3	17.32±0.65 ^a	5.85±0.05 ^a	401.91±36.82 ^a	5.26±0.32 ^a	5.29±0.21 ^a	12.77±0.35 ^a	0.27±0.02 ^a	0.26±0.02 ^a	1.09±0.03 ^a

注: CK, 对照 $R:Fr = 7.4$ + 非盐胁迫; T1, $R:Fr = 7.4$ + 盐胁迫; T2, $R:Fr = 1.2$ + 盐胁迫; T3, $R:Fr = 0.8$ + 盐胁迫。同列不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

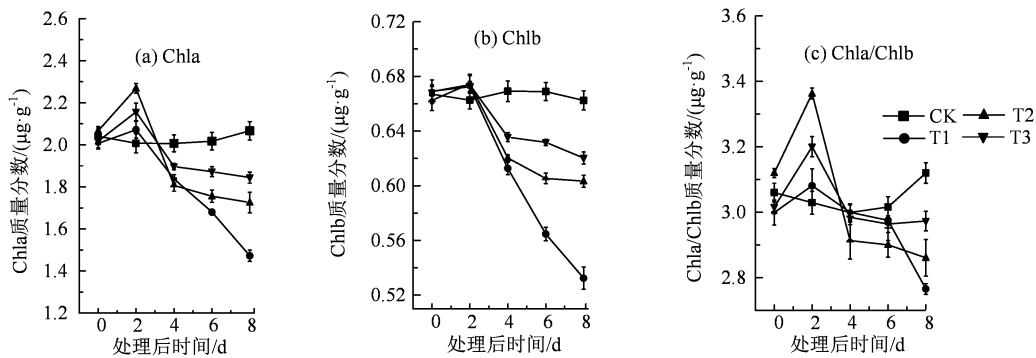


图 2 不同红光远红光处理对盐胁迫下番茄植株的叶绿素 a、b 的影响

Figure 2 Effects of different $R:Fr$ values on the content of chlorophyll a and b in tomato plants under NaCl stress

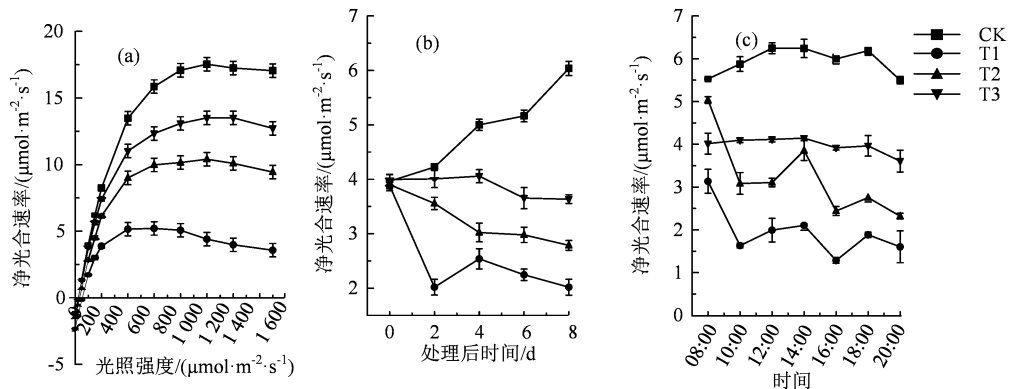


图 3 不同红光远红光处理对盐胁迫下番茄植株光合作用的影响

Figure 3 Effects of different $R:Fr$ values on photosynthesis in tomato plants under NaCl stress

各光照处理下番茄叶片的光合速率都被盐胁迫处理显著地影响。如图 3 (a) 所示, 在盐胁迫下, 光照强度在 $0 \sim 200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 范围内时, 各光照处理组中的番茄叶片净光合速率显著升高, CK、T1、T2 和 T3 的平均净光合速率分别为 8.24 、 3.87 、 6.14 和 $7.41 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 差异显著 ($P < 0.05$)。但是, 当光照强度达到 $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 各个处理番茄叶片的净光合速率基本保持不变, CK、T1、T2 和 T3 的平均净光合速率分别为 17.08 、 5.07 、 10.15 和 $13.09 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 差异显著 ($P < 0.05$)。图 3 (b) 和 (c) 中的光响应曲线表明: 不同处理的光饱和点

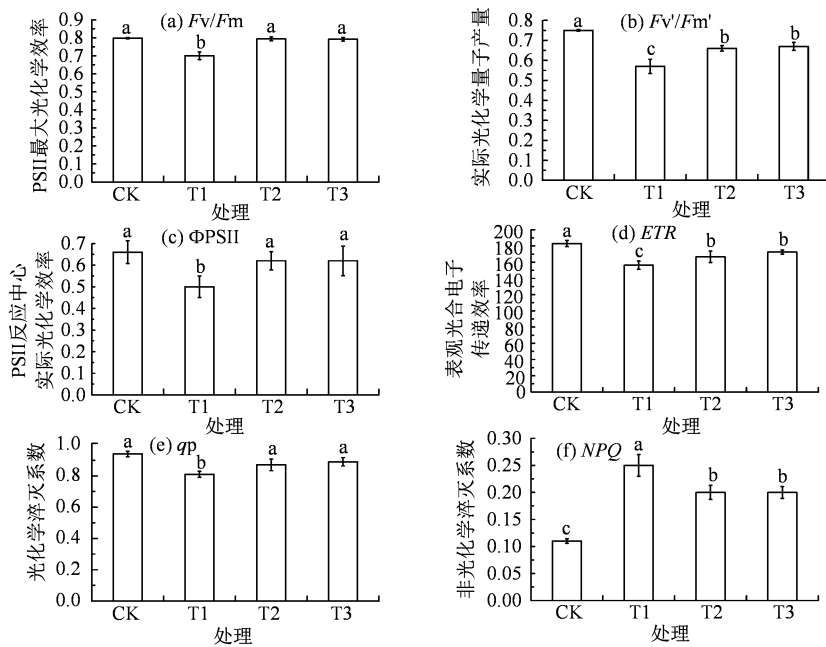
由大到小排列顺序为: CK、T3、T2 和 T1, 即降低盐胁迫下光环境中的 $R:Fr$ 比值能够显著提高番茄幼苗的光饱和点, 降低番茄幼苗的盐胁迫。同时, 随处理后时间的变化和光合日变化, 不同光质处理下番茄幼苗的光合速率由大到小的排列顺序也为: CK、T3、T2 和 T1。综上所述, 在盐胁迫下, 适宜范围内在 $R:Fr$ 值较低的光环境能够使得番茄叶片的净光合速率显著降低, 提高番茄幼苗的抗盐性。

2.3 不同 $R:Fr$ 值对盐胁迫下番茄幼苗叶片中叶绿素荧光参数的影响

盐胁迫能够导致植物细胞渗透压升高而损伤植

物体内的光合机构,最终严重影响植物的正常生长。由图4可知,NaCl胁迫下,番茄幼苗叶片的 F_v/F_m 、 $\Phi PSII$ 、 F_v'/F_m' 、 ETR 和 qP 都显著降低, NPQ 显著升高($P < 0.05$)。盐胁迫下适当降低光环境中的 $R:Fr$ 值,使得能量能够快速进入PSII反应中心。与T1相比,T3处理中 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PSII$ 、 ETR

和 qP 分别升高了12.86%、17.54%、24.00%、10.26%和11.25%, NPQ 降低了20.00%。结果表明,在适宜范围内,降低 $R:Fr$ 比值的光环境能够逐渐抑制盐胁迫对番茄幼苗PSII反应中心造成的损伤,从而缓解番茄幼苗的盐胁迫。



柱形图上的不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图4 不同红光远红光处理对盐胁迫下番茄幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

Figure 4 Effects of different $R:Fr$ values on the chlorophyll fluorescence parameters in leaves of tomato seedlings under NaCl stress

3 讨论与结论

在适宜范围内,降低植物生长光环境中的 $R:Fr$ 值时,会促使植物体内感受外界光源变化的受体发生变化,即光敏色素从Pfr型转化成为Pr型^[18]。当升高 $R:Fr$ 值,植物矮化,茎节变小,光合产物降低;反之,当 $R:Fr$ 比值降低时,则植物的茎节间距变大、徒长,光合产物降低^[19-20]。此外,降低光环境中 $R:Fr$ 的比值能够促进萝卜组培苗根系的生长^[21]。本试验中,在 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl胁迫下,适当降低 $R:Fr$ 比值,则番茄植株的形态指标均显著升高。当 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl胁迫下光环境中 $R:Fr$ 比值为0.8时,番茄植株的各生长指标与非盐胁迫下光环境中 $R:Fr$ 比值为7.4时基本一致,差异不显著。研究结果表明,在适宜范围内,降低 $R:Fr$ 比值能明显促进番茄地上部和地下部的生长,提高番茄植株的耐盐性。

NaCl胁迫对番茄幼苗有抑制作用,包括对净光合速率、叶绿素含量、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO_2 浓度均有着明显的抑制作用^[22]。

许多学者研究表明,叶绿素在盐胁迫下其含量

逐渐降低,但也有叶绿素含量升高,且叶绿素含量与光合作用效率呈正相关关系^[23]。盐胁迫下叶绿素类囊体膜受损使得合成叶绿素的含量降低,从而导致植株光合速率下降^[24]。在本试验中,适当地降低光环境中的 $R:Fr$ 值,盐胁迫下番茄叶片捕获光能的配比调整为对低 $R:Fr$ 值最适应的状态,从而缓解番茄叶片叶绿素含量的下降,以实现光能最大限度的捕获。Emerson等^[25]研究发现,当光源红光与远红光同时照射植物,光合效率大于这两种单独照射的效率之和。这是由于光系统I(PSI)主要吸收大于680nm的远红光,而光系统II(PSII)主要吸收680nm的红光^[26]。此外,远红光可以提高叶片的扩展度从而提高整株植物的光合能力^[27]。Zhen等^[28]的研究发现,增加Fr可以有效提高生菜PSII反应中心光化学效率,从而提高生菜产量。秦红艳等^[29]研究表明,盐胁迫下葡萄叶片的实际光化学效率、光化学淬灭系数以及表观光合电子传递速率显著降低,非光化学淬灭系数升高,而非光化学淬灭系数的升高保护了植株叶片正常进行光合,减少盐胁迫对植株的伤害。魏霞等^[30]研究发现,造成植物叶绿素含量降低

的原因主要是盐胁迫下类囊体膜的完整性受损, 低叶绿素值能提高植物对远红光的吸收从而缓解盐胁迫。唐玲等^[31]研究表明, 鸡爪槭叶片的 F_v/F_m 、 $\Phi PS II$ 、 ETR 和 qP 随盐浓度的增大而呈下降趋势, 而 NPQ 在低盐浓度时上升, 这是缓解盐胁迫的表现。本试验中, 在 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 胁迫下番茄叶片的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PS II$ 、 ETR 和 qP 下降, NPQ 升高, 表明番茄叶片主要是通过增加加热耗散形式来消耗过多的光能, 避免 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 胁迫下对光合机构造成的损害, 确保番茄植株的正常生长。在 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 胁迫下适当降低 $R:Fr$ 的比值, 番茄叶片的 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PS II$ 、 ETR 和 qP 显著升高, 同时显著抑制了 NPQ 。由此可见, 在适宜范围内, 较低的 $R:Fr$ 比值能够显著提高盐胁迫下番茄幼苗 PS II 反应中心的光化学效率。

在 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 胁迫下适当降低 $R:Fr$ 值, 能显著促进番茄幼苗的生长发育, 其中根茎叶干鲜质量、叶面积、茎粗、株高以及叶片叶绿素含量、净光合速率等显著升高; 叶绿素荧光参数中 F_v/F_m 、 F_v'/F_m' 、 $\Phi PS II$ 、 ETR 和 qP 显著升高, NPQ 显著降低。在 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 胁迫下, $R:Fr$ 比值为 0.8 时, 番茄植株的各生长指标与非盐条件下 $R:Fr$ 比值为 7.4 时基本一致; 在 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaCl}$ 胁迫下, 在适宜的低 $R:Fr$ 比值的光环境下可以减弱 PS II 的损伤, 促进 PS II 的电子传递。

参考文献:

- [1] 魏明. 中国番茄产业国际竞争力分析[J]. 农产品加工(创新版), 2009(5): 46-49.
- [2] 王俭珍, 刘倩, 高娅妮, 等. 植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5565-5577.
- [3] 王宇超, 王得祥. 盐胁迫对木本滨藜叶绿素合成及净光合速率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 151-158.
- [4] 赵艳艳, 燕飞, 胡立盼, 等. 5-氨基乙酰丙酸对 NaCl 胁迫下番茄幼苗光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2919-2926.
- [5] 贾婷婷, 常伟, 范晓旭, 等. 盐胁迫下 AM 真菌对沙枣苗木光合与叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1337-1347.
- [6] 曹凯, 于捷, 叶林, 等. 夜间 LED 红光处理促进设施育苗番茄营养生长提高产量[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 180-186.
- [7] 王洪安. 北方温室人工补光光源特性及优化配置研究[J]. 吉林农业, 2011(1): 33-34.
- [8] 杨俊伟, 鲍恩财, 张珂嘉, 等. 不同红蓝光比例对番茄幼苗叶片结构及光合特性的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(5): 716-726.
- [9] 张现征, 王丹, 董飞, 等. 不同比例红蓝光对番茄幼苗生长发育及光合特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 136-138.
- [10] 曹凯, 于捷, 叶林, 等. 暗前适宜 LED 远红光光照强度促进设施番茄种苗生长发育[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 171-176.
- [11] 杨有新, 王峰, 蔡加星, 等. 光质和光敏色素在植物逆境响应中的作用研究进展[J]. 园艺学报, 2014, 41(9): 1861-1872.
- [12] 张云婷, 宋霞, 叶云天, 等. 光质对低温胁迫下草莓叶片生理生化特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(5): 790-796.
- [13] 张晓梅, 胡超轶, 刘涛, 等. 不同光质对黄瓜幼苗抗旱性的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(1): 58-63.
- [14] DEMOTES-MAINARD S, PÉRON T, COROT A, et al. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture[J]. Environ Exp Bot, 2016, 121: 4-21.
- [15] LIU J, ZHANG F, ZHOU J J, et al. Phytochrome B control of total leaf area and stomatal density affects drought tolerance in rice[J]. Plant Mol Biol, 2012, 78(3): 289-300.
- [16] GAVASSI M A, MONTEIRO C C, CAMPOS M L, et al. Phytochromes are key regulators of abiotic stress responses in tomato[J]. Sci Hortic, 2017, 222: 126-135.
- [17] ADÁM É, HUSSONG A, BINDICS J, et al. Altered dark- and photoconversion of phytochrome B mediate extreme light sensitivity and loss of photoreversibility of the phyB-401 mutant[J]. PLoS One, 2011, 6(11): e27250.
- [18] INDORF M, CORDERO J, NEUHAUS G, et al. Salt tolerance (STO), a stress-related protein, has a major role in light signalling[J]. Plant J, 2007, 51(4): 563-574.
- [19] GURURANI M A, GANESAN M, SONG I J, et al. Transgenic turfgrasses expressing hyperactive Ser599Ala phytochrome A mutant exhibit abiotic stress tolerance[J]. J Plant Growth Regul, 2016, 35(1): 11-21.
- [20] 刘再亮, 马承伟, 杨其长. 设施环境中红光与远红光比值调控的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 270-273.
- [21] 崔瑾, 徐志刚, 邸秀茹. LED 在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 249-253.
- [22] 任乐, 罗新兰, 李天来, 等. 日光温室温度对番茄叶面积扩展的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(9): 2610-2612.
- [23] 王颖, 郭世荣, 束胜, 等. 外源亚精胺对盐胁迫下菠菜叶绿素合成前体含量的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(10): 2026-2034.
- [24] 罗黄颖, 高洪波, 夏庆平, 等. γ -氨基丁酸对盐胁迫下番茄活性氧代谢及叶绿素荧光参数的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(4): 753-761.
- [25] EMERSON R, LEWIS C M. The dependence of the quantum yield of *Chlorella* photosynthesis on wave length of light[J]. Am J Bot, 1943, 30(3): 165-178.
- [26] FRANKLIN K A, QUAIL P H. Phytochrome functions in *Arabidopsis* development[J]. J Exp Bot, 2010, 61(1): 11-24.
- [27] 黄薪历, 于捷, 艾楷棋, 等. 红光和远红光对番茄生长发育的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(3): 111-118, 127.
- [28] ZHEN S, VAN IERSEL M W. Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis[J]. J Plant Physiol, 2017, 209: 115-122.
- [29] 秦红艳, 艾军, 许培磊, 等. 盐胁迫对山葡萄叶绿素荧光参数及超微结构的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(6): 1159-1164.
- [30] 魏霞, 李守中, 郑怀舟, 等. 叶片气体交换和叶绿素荧光在植物逆境生理研究中的应用[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2007, 23(4): 124-128.
- [31] 唐玲, 李倩中, 荣立苹, 等. 盐胁迫对鸡爪槭幼苗生长及其叶绿素荧光参数的影响[J]. 西北植物学报, 2015, 35(10): 2050-2055.