

不同 LED 红蓝光质处理对枳幼苗生长的影响

周铮荣^{1,2}, 赵和国^{1,2}, 苏翰英^{1,2}, 罗旭钊^{1,2}, 孙紫青^{1,2}, 马先锋^{1,2}, 朱亦赤^{1,2*}

(¹园艺作物种质创新与新品种选育教育部工程研究中心, 长沙 410128; ²湖南农业大学园艺学院·国家柑橘改良中心长沙分中心, 长沙 410128)

摘要【目的】本研究旨在探究不同红蓝光 LED 组合对枳幼苗生长发育的影响。【方法】以无补光为对照 (CK), 采用红蓝光比例为 RB1:2 (红蓝光质比为 1:2, 下同)、RB4:1、RB6:1、RB8:1 四个不同比例红蓝光对枳幼苗进行补光处理, 并比较其形态和生理生化变化。【结果】经过补光处理 210 d 后, 与对照组相比, 四个补光处理在株高、茎粗、总根长、平均根直径、根尖数和干物质积累量方面均表现更显著的提升, 而根冠比略有降低。叶长和叶宽呈下降趋势, 但其长宽比相近。分枝数增加, 分枝高度降低。光合参数优化改善, 在其中 RB6:1 的气孔导度和净光合速率达到最高水平。在对照和四个补光处理组中, RB6:1 的 MDA 含量最低, 显示出较强的抗性。经过补光处理 120 d 后, 四个补光处理组的叶片花青苷含量显著高于对照组; 在补光处理 90 至 210 d 期间, SPAD 值逐渐增大, 而色差 a* 值逐渐减小, 并且花青苷含量逐渐降低。【结论】在长沙地区, 从 11 月上旬至次年 3 月上旬和 3 月上旬至 6 月上旬分别采用 RB8:1、RB6:1 的补光方案, 可以实现枳幼苗生长效果的最佳化, 并达到茎粗增长量的最大化。

关键词: 枳; 茎粗; LED 补光组合; 生长形态; 氧化酶活性

中图分类号: S666.4 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2024)11-0001-08

Effects of different LED red and blue quality treatments on the growth of *Poncirus trifoliata* seedlings

ZHOU Zhengrong^{1,2}, ZHAO Heguo^{1,2}, SU Hanying^{1,2}, LUO Xuzhao^{1,2}, SUN Ziqing^{1,2}, MA Xianfeng^{1,2}, ZHU Yichi^{1,2*}

(¹College of Horticulture, Hunan Agricultural University/National Center for Citrus Improvement-Changsha, Changsha 410128, Hunan, China; ²Hunan Academy of Agricultural Sciences/Hunan Horticultural Research Institute, Changsha 410125,)

Abstract: 【Objective】Citrus is the predominant fruit crop in China, with a plantation area of 2,923,000 hm² and yielding 55,956,000 tons annually as of 2021. The breeding cycle of citrus virus-free container seedlings spans two years, from the initial rootstock sowing to grafting and subsequent nursery cultivation. The protracted breeding cycle leads to a disconnect between citrus seedling supply and demand, resulting in sporadic instances of inadequate availability. Therefore, the citrus seedlings are insufficient to meet the demand of updating and iteration of citrus orchards in China. The extended breeding period also escalates the production costs of citrus virus-free container seedlings, impeding its widespread adoption. Furthermore, limited light exposure is

收稿日期: 2024-03-22

接受日期: 2024-08-26

基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD1200100)、湖南省教育厅科学研究项目 (23C0068)

作者简介: 周铮荣, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为果树生理生态。Tel: 18670307452, E-mail:

1462035275@qq.com

*通信作者 Author for correspondence. E-mail: 1015349693@qq.com

observed during the early spring and autumn/winter seasons in most citrus producing regions. The use of greenhouses for seedling production exacerbates the light deprivation experienced by citrus rootstocks. The implementation of supplemental lighting stands out as a viable strategy to improve the light condition, which may be a key initiative to accelerate the citrus rootstock breeding cycle and promote resilient citrus rootstocks. The mechanism by which the mixed red and blue light spectrum modulates the photosynthesis and photomorphogenesis of *Poncirus trifoliata* seedlings remains unclear. The objective of this study was to determine the optimal supplemental light conditions to improve the growth and development of *Poncirus trifoliata* seedlings. These results will provide a theoretical insight for accelerating the cycle of citrus virus-free container seedling breeding and improving seedling quality. **【Methods】** *Poncirus trifoliata* seedlings obtained from Dongkou of Hunan province were used as the experimental material. Five light-supplementing treatments were designed, including RB4:1 (red to blue light ratio of 4:1), RB6:1, RB8:1, RB1:2, and no light supplementation (CK). Seedlings with similar growth potential were selected and transplanted in 14 rows, each containing 7 plants, thereby yielding a total of 98 plants for each treatment. The supplementary light was positioned directly above the *Poncirus trifoliata* seedlings, and its intensity was maintained at $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ by adjusting its distance from the average height of the seedlings. The seeds were sown in the seedbed on August 12, 2021, and then it transplanted into nutrient bags on September 20, 2021. Supplemental light was applied on November 12, 2021, with a cycle of 6:00 AM to 10:00 PM, and ended on June 12, 2022. The supplemental light cycle was completed on June 12, 2022. Plant height and stem thickness were measured monthly between December 2021 and June 2022. SPAD and Chromatic Aberration a^* values were measured in February, April, May, and June 2022. Anthocyanin content was measured monthly from March to June 2022. In June 2022, measurements were taken for leaf length, leaf width, leaf area, total root length, average root diameter, root volume, root surface area, number of root tips, LAI value, fresh weight, dry weight, dry weight of underground part, dry weight of above ground part, root-crown ratio, photosynthetic parameters, chlorophyll fluorescence parameters, soluble protein content, soluble sugar content, superoxide dismutase (SOD) activity, peroxidase (POD) activity, catalase (CAT) activity, and malondialdehyde (MDA) content. **【Results】** After 210 days of supplemental light treatment, all four treatments resulted in higher plant height, stem thickness, total root length, average root diameter, number of root tips, and dry matter accumulation as compared to the control. The root-crown ratio exhibited a slight decrease. Leaf length and width displayed a declining trend, however, the aspect ratio of the leaf remained unchanged. The number of branches increased whereas the branch height decreased. The photosynthetic parameters were enhanced with RB6 demonstrating the highest stomatal

conductance and net photosynthetic rate. The MDA content of RB6:1 was significantly lower than that of other treatments. Additionally, the soluble protein content, soluble sugar content and the antioxidant enzyme activities (SOD, POD, and CAT) of RB6:1 were significantly higher than those of the control, which may indicate the plants with strong resistance. After 120 days of supplemental light treatment, the anthocyanin contents of RB4:1, RB6:1, RB8:1, RB1:2 were significantly higher than that of the control in leaves. Between 90 and 210 days of the supplemental light treatment, the SPAD values of the four treatments as a whole gradually increased, while their Chromatic Aberration a^* and anthocyanin contents gradually decreased. This study focused on the stem thickness of the seedlings. RB8:1 showed the fastest growth between 30 and 120 days of supplemental light treatment. In addition, RB6:1 exhibited the highest stem thickness between 120 and 210 days of treatment, reaching 2.46 mm. At the end of 210 days of treatment, RB6:1 exhibited the greatest stem thickness at 5.03 mm. 【 Conclusion 】 In the Changsha region, optimal growth and maximum stem diameter growth of *Poncirus trifoliata* seedlings can be achieved by using RB8:1 and RB6:1 light supplementation from early November to early March and from early March to early June, respectively.

Keywords: *Poncirus trifoliata*; Stem diameter; LED fill light combination; Growth form; Oxidase activity

柑橘是世界第一大水果，也是我国第一大水果^[1]。2020年，世界柑橘种植面积1007万 hm^2 ，产量1.58亿 t ^[2]；2022年，我国柑橘种植面积299.58万 hm^2 ，年产量6003.89万 t 。作为多年生果树，一旦种下多年不需要重新种植，在柑橘产业中选择合适的种苗是至关重要的环节。由于新建和重建柑橘果园以及病树和虫树砍伐后补栽等原因，我国每年对柑橘种苗的需求量巨大。无病毒容器苗具有成活率高、长势好、根系发达、不带病毒、投产早和果实品质优良等优点，受到政府和专家的极力推荐，逐渐被柑橘企业和种植户广泛接受。一般情况下，无病毒容器苗从8月开始播种砧木，翌年9—10月进行嫁接，并在第三年秋季出圃，整个过程耗时两年，繁育周期较长。正是由于这一较长的繁育周期，使得柑橘种苗供求衔接不紧，需求供应不足或供应需求疲软的情况时有发生，导致一些柑橘无病毒容器苗圃举步维艰、生存困难。另外，较长的繁育周期也使得育苗成本较高，在一定程度上阻碍了柑橘无病毒容器苗推广。寻找更高效的途径提高育苗水平，降低育苗成本已经成为柑橘产业发展的迫切需求。

在我国柑橘产区，初春和秋冬季节光照较弱，加之柑橘无病毒容器苗的繁育全程在大棚内进行，进一步减弱了柑橘砧木获得的光照。补光是改善光照条件的有效途径^[3]，是缩短柑橘砧木繁育周期、培育粗壮柑橘砧木可以优先考虑的措施。研究表明，植物的光合作用在蓝光区（波峰440 nm）和红光区（波峰为620 nm）达到峰值^[4]。红蓝光质对植物生长发育、生理活动以及叶片光合速率的影响已经成为国内外专家学者研究的重要内容。枳作为一种优

良的柑橘砧木，具有适应性广、抗性强等优点，其在圃时间 14 个月左右，占了整个柑橘种苗繁育时间的 50% 以上。由于自然界中大多数植物生长初期被迫在遮荫条件下进行，较高的植物会吸收光谱中大部分红光和蓝光，这导致了光照质量的下降^[5]。人工添加红蓝光补光可有效改善幼苗所处的光环境，在一定程度上促进幼苗的生长。

发光二极管 (light emitting diode, LED) 具有光谱精准可调、光利用效率高和功率转换效率大等优点，广泛应用于黄瓜^[6]、番茄^[7-9]、辣椒^[10]、杨梅^[11]、葡萄^[12-14]和火龙果^[15]等园艺作物。补光在柑橘栽培的应用上少有报道，已有研究表明 150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下，LED 灯 RB1:1 (红蓝光质比为 1:1) 更利于金秋砂糖橘新梢生长发育、物质积累和光合作用^[16]，RGB4:1:1 (红绿蓝光质比为 4:1:1) 更有利于红橘的生长^[17]；150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强下，LED 灯 RYB4:1:1 (红黄蓝光质比为 4:1:1) 最有利于枳幼苗的物质合成与地上部分生长^[18]；适宜先锋橙幼苗生长的 LED 光质为 RB4:1，适宜红橘幼苗生长的 LED 光质为 RB1:1。目前，LED 光对柑橘育苗的影响研究主要在培养室内进行，将 LED 光应用于柑橘大棚育苗上的研究还很少。湖南农业大学柑橘科研团队 2020 年在塑料大棚内进行了 LED 补光对枳幼苗生长影响的初步研究，结果表明，LED 红蓝复合光较 LED 白光更有利于枳幼苗的生长。

有关红蓝光如何调节枳幼苗叶片光合作用和植物光形态发生的机制少有研究，适宜枳生长发育的红蓝光补光条件还有待探寻。本研究通过在初春和秋冬季节在长沙地区育苗大棚内对枳幼苗进行补光，希望通过比较不同比例红蓝复合光处理下枳幼苗形态和生理生化变化，筛选出促进枳幼苗生长发育的最适宜补光条件，以期加快枳幼苗茎的生长，提早嫁接时间，促进柑橘无病毒容器苗的推广。

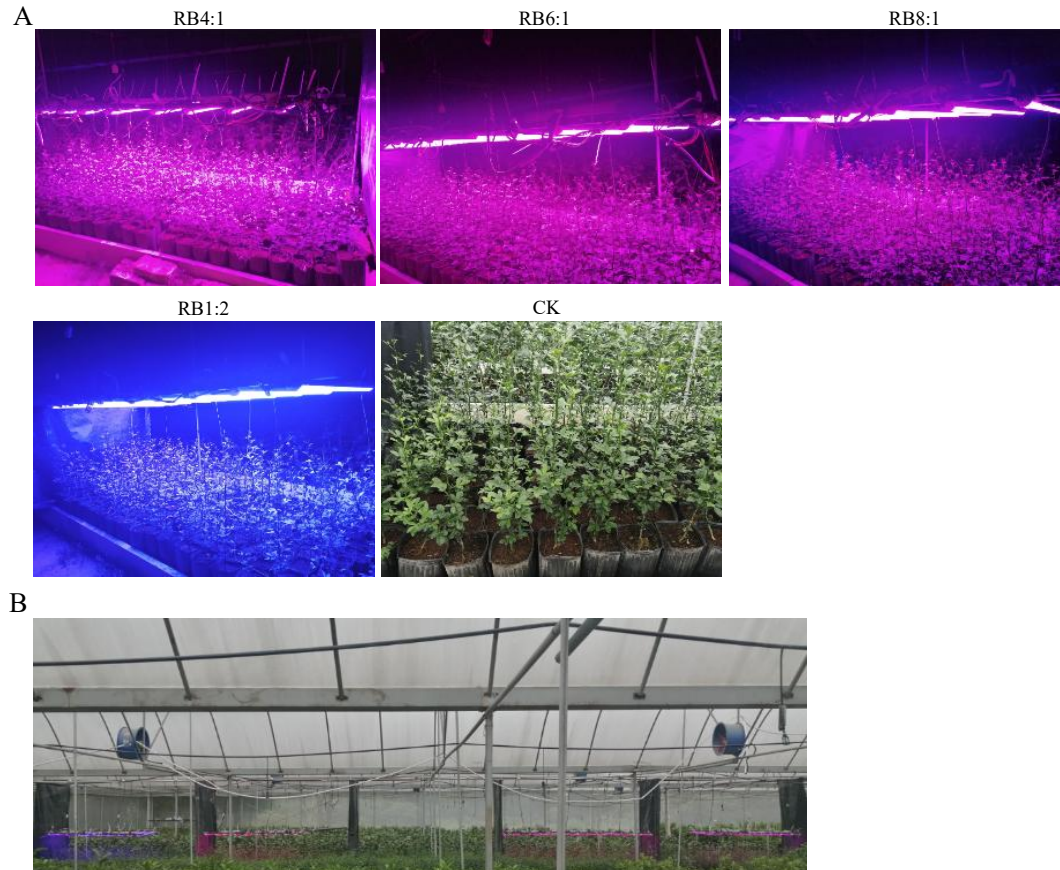
1 材料和方法

1.1 试验材料

试验在湖南农业大学长安基地 (28°09'N, 113°13'E) 进行，供试枳 (*Poncirus trifoliata*) 来源于湖南洞口。选取饱满的枳嫩籽 5000 粒，经 1% 次氯酸钠消毒 10 min 后，于 2021 年 8 月 12 日播种于苗床育苗基质中，9 月 20 日选取生长势相同，平均株高为 7 cm 的枳幼苗 1215 株移栽到育苗袋。缓苗后，控水保持土壤湿润，每月施加一次柑橘专用湖南金叶众望科技股份有限公司的金叶 2 代复合肥料 (N-P₂O₅-K₂O, 18-9-18)，培养基质购买于湖南省湘晖农业技术开发有限公司。

1.2 试验设计

试验设计不补光 (CK) 和 RB4 : 1 (红蓝光质比为 4 : 1, 下同)、RB6 : 1、RB8 : 1、RB1 : 2 四个补光处理, 共五个处理 (图 1)。每个处理选择生长势一致, 平均株高为 11 cm, 平均直径为 2 mm (播种后 90 d) 的枳幼苗 14 行, 每行 7 株, 共 98 株。在枳幼苗正上方悬挂补光灯, 通过调节补光灯到枳幼苗平均高度处的距离使补光光强保持在 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2021 年 11 月 12 日开始补光, 每天补光时间段为 6:00—22:00, 2022 年 6 月 12 日结束。试验所用补光灯由深圳承越科技有限公司提供, 红光波段峰值为 445 nm, 蓝光波段峰值为 660 nm, 红蓝光波长设置参考刘敏竹等^[17]对红桔幼苗的研究。



A. 五个处理: RB4 : 1、RB6 : 1、RB8 : 1、RB1 : 2、CK; B. 五个处理总览图。

A. Five treatments: RB1 : 2, RB4 : 1, RB6 : 1, RB8 : 1, CK; B. Five processing overviews.

图 1 补光设置图

Fig. 1 Fill light setting diagram

1.3 试验方法

1.3.1 株高、茎粗、分支高度、叶面积、叶片 LAI、根系测量 补光处理后每隔 30 d, 每个处理随机选择 14 株枳幼苗, 采用卷尺测量株高, 每株测量 2 次取平均值; 采用游标卡尺测量茎粗, 每株测量 2 次取平均值。补光处理 210 d 后, 采用卷尺测量土面到第一个侧枝处的高度为分枝高度, 每株测量 2 次取平均值; 每个处理随机选择 20 株枳幼苗, 每株取中

上部成熟叶片 1 片，采用图像处理软件 ImageJ（版本:FIJI）测量叶长、叶宽和叶面积；每个处理随机选取 4 个长势均匀的测量点，采用 LAI-2200C 冠层分析仪（美国 LI-COR 公司）测量 LAI 值，3 次重复；每个处理随机选取 4 株枳幼苗，采用 GYX-A 植物根系分析仪（浙江托普云农科技股份有限公司）分析根系扫描图片获得总根长、根平均直径、根体积、根表面积、投影面积和根尖数。

1.3.2 鲜质量、干质量测量 补光处理 210 d 后，每个处理随机选择 5 株枳幼苗，采用电子天平测量地上部分、地下部分干质量和鲜质量；地下部分干质量与地上部分干质量的比值为根冠比。

1.3.3 光和参数、叶绿素荧光参数、叶绿素含量、色差、花青苷含量测量 补光处理 210 d 后，每个处理随机选择 3 株枳幼苗，每株取植株中上部 2022 年萌生的叶 3 片，采用 LI-6400XT 便携式光合仪（美国 LI-COR 公司）测定光合参数，采用 Fluor Pen FP110 手持式叶绿素荧光仪（捷克 FluorCam 公司）测定叶绿素荧光参数。补光处理 90 d 后，每个处理随机选择 10 株枳幼苗，每株取植株下部 2021 年萌生的叶 1 片；补光处理 150 d、180 d、210 d 后，每个处理随机选择 10 株枳幼苗，每株取植株中上部 2022 年萌生的叶 1 片，采用美能达 SPAD-502Plus 叶绿素仪（日本美能达公司）测定 SPAD 值，采用 NR110+型色差仪（广东三恩时科技有限公司）测定色差 a^* 值。在补光处理 150 d 后，每个处理随机选择 4 株枳幼苗，每株取植株下部 2021 年萌生的叶 2 片；在补光处理 150 d、180 d、210 d 后，每个处理随机选取 4 株枳幼苗，每株取植株中上部 2022 年萌生的叶 2 片，采用徐强^[9]的方法测定花青苷含量。

1.3.3 可溶性蛋白、SOD、POD、CAT、MDA 测量 可溶性蛋白的含量采用考马斯亮蓝法测定，可溶性糖的含量采用蒽酮比色法测定，超氧化物歧化酶（SOD）的活性采用 NBT 法测定，过氧化物酶（POD）的活性采用愈创木酚法测定，过氧化氢酶（CAT）的活性采用过氧化氢分解量法测定，丙二醛（MDA）的含量采用使用苏州科铭生物技术有限公司丙二醛含量试剂盒（货号 MDA-1-Y）测定。

1.4 数据处理与分析

数据采用 Excel 2019 进行数据汇总与显著性分析，绘图使用 Chiplot Online（<https://www.chiplot.online/>）。

2 结果与分析

2.1 不同比例红蓝光处理对枳幼苗形态变化的影响

2.1.1 对株高的影响 由表 1 可知，处理后的前 120 d 内，枳幼苗株高增长量较小。比较处理第 30 天、第 60 天、第 90 天后的 3 次测量结果，四个补光处理的株高与 CK 无显著性差异。处理 120 d 后，RB8 : 1 的株高显著高于 CK 和其他处理。处理后 120 d 后至 210 d，枳幼苗株高增长迅速；处理 210 d 后，RB4 : 1、RB6 : 1 的株高分别是 CK 的 115.75%、119.38%，差异显著；RB8 : 1、RB1 : 2 的株高分别是 CK 的 108.72%、103.42%，无显著性差异。

根据表 1 数据, 可以将试验期间枳幼苗株高的增长分为两个阶段, 第一个阶段是缓慢增长阶段, 即处理后第 30 天至第 120 天, 在此阶段 RB8:1 的株高均值最高, RB6:1 的株高均值最低; 处理 120 d 后, RB8:1 的株高显著高于 CK 和其他补光处理。第二个阶段是迅速增长阶段, 即处理后第 120 天至第 210 天, 在此阶段, RB6:1 的株高增长量最高; 处理 210 d 后, 其株高均值显著高于 CK、RB8:1、RB1:2。

表 1 不同处理对枳幼苗株高的影响

Table 1 Effects of different light supplement treatments on plant height of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	株高 Plant height/cm						
	2 021.12 (30 d)	2 022.1 (60 d)	2 022.2(90 d)	2 022.3 (120 d)	2 022.4 (150 d)	2 022.5 (180 d)	2 022.6 (210 d)
CK	11.03±0.88 a	11.03±0.81 a	11.15±1.03 a	11.27±0.84 b	18.85±1.75 a	35.09±6.02 a	48.19±6.76 c
RB4:1	11.06±0.74 a	11.07±0.80 a	11.09±0.84 a	11.34±0.96 b	18.99±1.59 a	36.11±3.58 a	55.78±6.03 ab
RB6:1	10.92±1.02 a	10.94±1.08 a	10.94±1.05 a	11.19±1.05 b	18.45±1.89 ab	36.98±5.67 a	57.53±5.98 a
RB8:1	11.15±1.07 a	11.51±0.82 a	11.58±0.90 a	12.17±0.56 a	19.26±2.10 a	35.58±6.44 a	52.39±7.02 bc
RB1:2	11.09±0.99 a	11.09±0.77 a	11.22±0.74 a	11.27±0.89 b	17.21±2.49 b	33.54±4.97 a	49.84±4.88 c

The data in the table are the means ± SDs (n=14); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments (P<0.05).

2.1.2 对茎粗的影响 由表 2 可知, 处理后的前 120 d 内, 枳幼苗茎粗增长量较小, RB8:1 的茎粗增长量最高, CK 最低, 分别为 0.4 mm、0.3 mm。处理 120 d 后, RB8:1 茎粗值最大, 显著高于 CK 和 RB1:2。处理后第 120 天至第 210 天, 枳幼苗茎粗增长迅速; 补光 210 d 后, RB4:1、RB6:1、RB8:1、RB1:2 的茎粗分别是 CK 的 110.78%、115.37%、114.68%、113.53%, RB6:1 茎粗值最大。

表 2 不同处理对枳幼苗茎粗的影响

Table 2 Effects of different light supplement treatments on Stem diameter of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	茎粗 Stem diameter/mm						
	2 021.12 (30 d)	2 022.1 (60 d)	2 022.2(90 d)	2 022.3 (120 d)	2 022.4 (150 d)	2 022.5 (180 d)	2 022.6 (210 d)
CK	2.04±0.21b	2.18±0.20b	2.18±0.20b	2.34±0.24c	2.63±0.29b	3.34±0.43c	4.36±0.44b
RB4:1	2.24±0.15a	2.42±0.17a	2.42±0.19a	2.59±0.17ab	2.85±0.31a	3.78±0.54b	4.83±0.61a
RB6:1	2.23±0.17a	2.39±0.17a	2.43±0.15a	2.57±0.14ab	2.96±0.22a	3.94±0.42ab	5.03±0.52a
RB8:1	2.31±0.1a	2.5±0.15a	2.56±0.14b	2.71±0.16a	3.04±0.22a	4.18±0.38a	5.00±0.41a
RB1:2	2.17±0.25ab	2.39±0.27a	2.41±0.30a	2.52±0.24b	2.91±0.28a	3.93±0.38ab	4.95±0.50a

The data in the table are the means ± SDs (n=14); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments (P<0.05).

2.1.3 对分枝数和叶片的影响 由表 3 可知, 四个补光处理的分支数均高于 CK, 差异显著, RB4:1、RB6:1、RB8:1、RB1:2 的分支数分别是 CK 的 162.5%、218.75%、225.00%、212.50%。各补光处理分枝高度均显著低于 CK, 分别是 CK 的 62.82%、44.04%、59.09%、51.26%, RB6:1 分支高度最低。

四个补光处理的叶片数均显著高于 CK，RB6：1 的叶片数最多。RB4：1、RB6：1、RB8：1 叶长、叶宽和叶面积与 CK 均无显著性差异；CK 的叶面积最大，RB4：1 叶长、叶宽最接近 CK；RB1：2 的叶长、叶宽和叶面积均显著小于 CK。各补光处理的叶片长宽比与 CK 接近，均无显著性差异。以上数据表明补光处理促进了枳幼苗的分枝，降低了分枝高度，有促进叶片数的增加、抑制叶片增大的趋势，对叶片长宽比无明显影响。

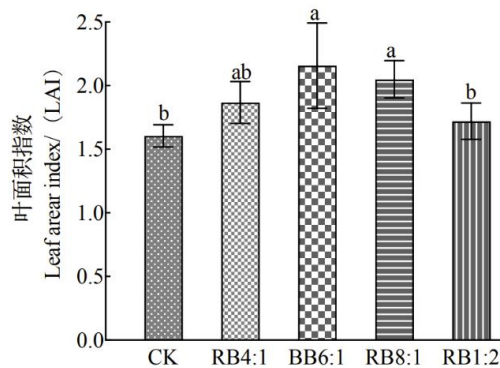
表 3 不同处理对枳幼苗分枝数和叶片的影响

Table 3 Effects of different treatments on branch number and leaves of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	分枝数 Branch number	分枝高度 Branch height/cm	叶片数 Leaf number	叶长 Leaf length/cm	叶宽 Leaf width/cm	长宽比 Length-Width ratio	叶面积 Leaf area/cm ²
CK	1.60±0.70b	8.31±3.16a	42.8±8.23c	3.11±0.39a	1.35±0.15a	2.32±0.26a	2.76±0.54a
RB4：1	2.60±1.35ab	5.22±4.05b	57.7±9.57b	3.12±0.26a	1.35±0.08a	2.33±0.21a	2.71±0.28a
RB6：1	3.50±1.08a	3.66±4.01b	72.4±10.07a	2.97±0.25a	1.27±0.11ab	2.37±0.26a	2.50±0.27ab
RB8：1	3.60±1.58a	4.91±4.32b	63.3±16.51ab	2.91±0.40a	1.25±0.15ab	2.34±0.22a	2.39±0.51ab
RB1：2	3.40±1.43a	4.26±4.09b	55.6±11.89b	2.71±0.26b	1.16±0.02b	2.34±0.17a	2.12±0.12b

The data in the table are the means ± SDs (n=20); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). The parameters measured included Branch number, Branch height(cm), Leaf number, Leaf length(cm), Leaf width(cm), Length-Width ratio and Leaf area(cm²).

2.1.4 对叶面积指数的影响 由图 2 可知，各补光处理促进了叶面积指数的增大，RB6：1、RB8：1 的叶面积指数分别是 CK 的 134.16%、127.33%，差异显著。RB4：1、RB1：2 的叶面积指数分别是 CK 的 116.15%、106.83%，无显著性差异。



Difference in lower-case letters indicates significant difference at $p < 0.05$.

图 2 不同处理对枳幼苗叶面积指数的影响

Fig. 2 Effects of different light treatments on leaf area index (LAI) of *P. trifoliata* seedlings

2.1.5 对根系形态的影响 由表 4 可知，各补光处理均促进了根系生长。RB6：1 的总根长、根体积、总根表面积、投影面积的值均最大，显著高于 CK；平均根直径、根尖数与 CK 无显著性差异。RB4：1、RB8：1、RB1：2 的总根长、平均根直径、根体积、总根表面积、投影面积、根尖数均高于 CK，无显著性差异。

表 4 不同处理对枳幼苗根系形态的影响

Table 4 Effects of different light supplement treatments on roots of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	总根长 Total root length/cm	平均根直径 Average root Diameter/mm	根体积 Root volume/cm ³	总根表面积 Total root area/cm ²	投影面积 Root Projected area/cm ²	根尖数 Tip number
CK	146.77±64.66 b	0.35±0.01 a	0.21±0.10 b	16.19±7.65 b	5.16±2.44 b	381.5±100.85 b
RB4 : 1	209.41±46.37 ab	0.37±0.05 a	0.37±0.17 ab	24.85±7.16 ab	7.91±2.28 ab	584.25±137.23 ab
RB6 : 1	287.37±39.49 a	0.38±0.03 a	0.48±0.14 a	34.89±7.25 a	11.11±2.31 a	546.00±104.47 ab
RB8 : 1	240.50±56.10 ab	0.37±0.01 a	0.36±0.11 ab	27.60±6.89 ab	8.79±2.19 ab	615.75±160.69 a
RB1 : 2	246.61±102.91 ab	0.35±0.04 a	0.35±0.23 ab	27.79±14.49 ab	8.85±4.61 ab	592.5±146.83 ab

The data in the table are the means ± SDs (n=4); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments (P<0.05). The parameters measured included Total root length(cm), Average root Diameter(mm), Root volume(cm³), Total root area(cm²), Root Projected area (cm²) and Tip number.

2.2 不同比例红蓝光处理对枳幼苗生物量的影响

2.2.1 对生物量的影响 由表 5 可知,各补光处理均促进了生物量的积累, RB6 : 1、RB8 : 1 的鲜质量、干质量、地上部分干质量、地下部分干质量均大于 CK, 差异显著。RB4 : 1、RB1 : 2 的鲜质量、干质量、地上部分干质量、地下部分干质量均大于 CK, 无显著性差异。RB4 : 1 的根冠比与 CK 相近; RB6 : 1、RB8 : 1、RB1 : 2 的根冠比均小于 CK, 无显著性差异。

表 5 不同处理对枳幼苗生物量的影响

Table 5 Effects of different light supplement treatments on biomass of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	鲜质量 Fresh mass/g	干质量 Dry mass/g	地上部分干质量 Shoot dry mass/g	地下部分干质量 Root dry mass/g	根冠比 Root/shoot ration
CK	12.94±4.82 b	4.14±1.45 b	3.24±1.22 b	0.90±0.27 b	0.290±0.07 a
RB4 : 1	15.24±3.89 ab	5.21±1.34 ab	4.02±0.96 ab	1.19±0.42 ab	0.290±0.05 a
RB6 : 1	21.57±2.16 a	7.24±0.81 a	5.69±0.70 a	1.55±0.18 a	0.272±0.04 a
RB8 : 1	21.12±4.89 a	6.85±1.66 a	5.35±1.42 a	1.51±0.29 a	0.288±0.04 a
RB1 : 2	17.48±6.44 ab	5.48±1.99 ab	4.33±1.47 ab	1.14±0.54 ab	0.254±0.06 a

The data in the table are the means ± SDs (n=4); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments (P<0.05). The parameters measured included Fresh weight(g), Dry weight(g), Shoot dry weight(g), Root dry weight(g) and Root/shoot ration.

2.3 同比例红蓝光处理对枳幼苗叶色的影响

2.3.1 对 SPAD 值和色差 a*值的影响 由表 6 可知,各处理叶片的叶绿素相对含量呈上升趋势。用于测定处理 90 d 后 SPAD 值的叶片为 2021 年萌生的叶, 各处理 SPAD 值均小于 CK, 其中 RB6 : 1、RB8 : 1 显著低于 CK。用于测定处理 150 d、180 d、210 d 后 SPAD 值的叶片为 2022 年萌生的叶。处理 150 d 后, 四个补光处理的 SPAD 值均低于 CK, 无显著性差异。处理 180 d、210 d 后, 各补光处理的 SPAD 值均高于 CK, RB1 : 2 的 SPAD 值均为最大。

由表 6 可知, 各处理叶片的色差 a*值呈现先下降在上升趋势。用于测定处理 90 d 后色

差 a*值的叶片为 2021 年萌生的叶，用于测定处理 150 d、180 d、210 d 后色差 a*值的叶片为 2022 年萌生的叶。处理 90 d 后，四个补光处理的色差 a*值均显著高于 CK，叶片偏红，CK 叶片偏绿，RB6：1 的 a*值最大。处理 150 d、180 d、210 d 后，色差 a*值均为负数，叶色呈现为绿色；处理 150 d 后，四个补光处理的 a*值均大于 CK，无显著性差异；处理 180 d 后，RB1：2 的 a*值显著大于 CK，RB4：1、RB8：1 的 a*值小于 CK，均无显著性差异；处理 210 d 后，四个补光处理的 a*值均小于 CK，无显著性差异。

表 6 不同处理对枳幼苗 SPAD 值和色差 a*值的影响

Table 6 Effects of different light supplement treatments on SPAD value and color index a* value of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value				色差 a*值 color index a* value			
	2 022.2 (90 d)	2 022.4 (150 d)	2 022.5 (180 d)	2 022.6 (210 d)	2 022.2 (90 d)	2 022.4 (150 d)	2 022.5 (180 d)	2 022.6 (210 d)
CK	75.41±5.22 a	72.17±4.33 a	71.34±4.55 b	75.20±1.98 b	-1.85±1.29 b	-4.53±1.51 a	-6.30±0.99 ab	-4.69±0.49 a
RB4：1	69.36±5.18 bc	71.63±5.15 a	76.19±3.72 a	76.82±2.77 ab	3.58±2.76 a	-4.36±1.57 a	-6.68±0.74 ab	-4.90±0.61 a
RB6：1	66.93±5.58 c	71.78±4.09 a	75.25±4.07 a	76.14±2.03 ab	4.33±2.31 a	-3.77±0.85 a	-6.07±1.30 ab	-4.90±0.64 a
RB8：1	66.85±3.43 c	70.37±3.45 a	77.24±2.96 a	77.06±3.70 ab	3.86±2.76 a	-3.72±1.47 a	-6.95±0.62 b	-4.86±0.67 a
RB1：2	71.64±5.13 ab	71.48±2.89 a	78.10±3.39 a	78.52±3.96 a	3.97±3.12 a	-3.89±1.29 a	-5.89±0.82 a	-4.83±0.54 a

The data in the table are the means ± SDs (n=10); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments (P<0.05). The parameters measured included SPAD value and color index a* value.

2.4 不同比例红蓝光处理对枳幼苗光合作用的影响

2.4.1 对光合参数的影响 由表 7 可知，四个补光处理的净光合速率、气孔导度、胞间二氧化碳浓度和蒸腾速率与 CK 均无显著性差异，但 RB6：1 气孔导度最大、净光合速率最大、光合性能最好。RB4：1、RB6：1、RB8：1、RB1：2 的净光合速率分别是 CK 的 87.51%、101.06%、80.12%、76.08%，气孔导度分别是 CK 的 100.00%、102.78%、100.00%、94.44%，胞间二氧化碳浓度分别是 CK 的 102.39%、100.65%、102.91%、103.04%，蒸腾速率分别是 CK 的 103.70%、97.70%、98.98%、92.09%。

表 7 不同处理对枳幼苗光合参数的影响

Table 7 Effects of different light supplement treatments on photosynthetic parameters of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	净光合速率 P_n /($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s /($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳 C_i /($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r /($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
CK	10.41±2.30a	0.36±0.08a	334.87±6.84a	7.84±1.56a
RB4：1	9.11±1.01a	0.36±0.08a	342.88±5.74a	8.13±1.34a
RB6：1	10.52±2.69a	0.37±0.04a	337.06±10.97a	7.66±1.16a
RB8：1	8.34±0.55a	0.36±0.04a	344.6±6.56a	7.76±0.58a
RB1：2	7.92±1.44a	0.34±0.03a	345.06±9.11a	7.22±0.88a

The data in the table are the means ± SDs (n=3); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments (P < 0.05). The parameters measured included P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), G_s ($\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$) and T_r ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

2.4.2 对叶绿素荧光参数的影响 由表 8 可知,各处理的原始荧光 (F_o) 无显著性差异。RB4 : 1、RB6 : 1 的最大荧光 (F_m) 分别是 CK 的 96.33%、100.78%, 无显著性差异; RB8 : 1、RB1 : 2 的 F_m 分别是 CK 的 85.94%、85.39%, 差异显著。四个补光处理的可变荧光 (F_v) 均低于 CK, RB4 : 1、RB6 : 1 与 CK 无显著性差异; RB8 : 1、RB1 : 2 与 CK 差异显著。四个补光处理的电子传递活性 (F_m/F_o) 均低于 CK, RB4 : 1、RB6 : 1、RB8 : 1 与 CK 无显著性差异; RB1 : 2 的 F_m/F_o 是 CK 的 85.26%, 差异显著。四个补光处理的最大光合潜能 (F_v/F_o) 均低于 CK, RB4 : 1、RB6 : 1、RB8 : 1 与 CK 无显著性差异; RB1 : 2 的 F_v/F_o 是 CK 的 81.88%, 差异显著。RB4 : 1、RB6 : 1、RB8 : 1 的最大量子产额 (F_v/F_m) 与 CK 无显著性差异; RB1 : 2 的 F_v/F_m 是 CK 的 96.30%, 差异显著。

表 8 不同处理对枳幼苗叶绿素荧光参数的影响

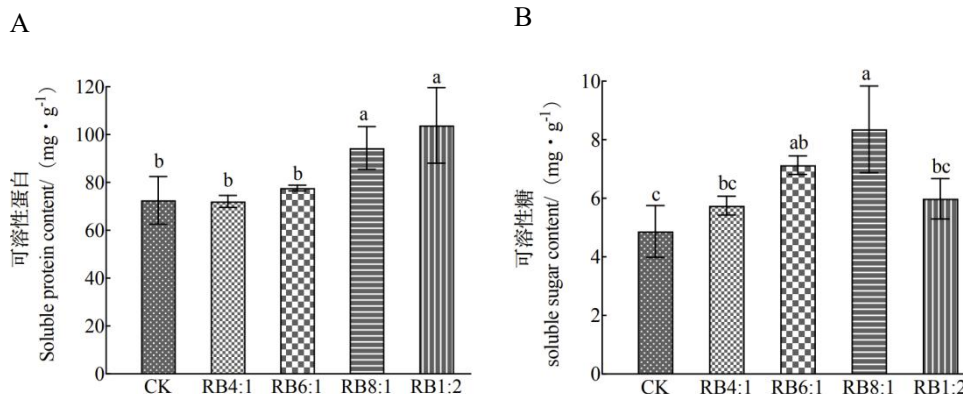
Table 8 Effects of different light supplement treatments on Chlorophyll fluorescence parameters of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	原始荧光 F_o	最大荧光 F_m	可变荧光 F_v	电子传递活性 F_m/F_o	最大光合潜能 F_v/F_o	最大量子产额 F_v/F_m
CK	3807±167 a	20 380±1357 a	16 574±1301 a	5.36±0.34 a	4.36±0.34 a	0.81±0.01 a
RB4 : 1	3719±429 a	19 633±2307 ab	15 914±2204 a	5.31±0.70 a	4.31±0.70 a	0.81±0.02 a
RB6 : 1	4040±544 a	20 538±1970 a	16 498±1678 a	5.12±0.48 ab	4.12±0.48 ab	0.80±0.02 ab
RB8 : 1	3802±585 a	17 515±909 b	13 713±827 b	4.67±0.55 ab	3.67±0.55 ab	0.78±0.03 ab
RB1 : 2	3809±323 a	17 402±2025 b	13 593±1845 b	4.57±0.41 b	3.57±0.41 b	0.78±0.02 b

The data in the table are the means ± SDs ($n=3$); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The parameters measured included F_o , primary fluorescence; F_m , maximum fluorescence; F_v , F_m/F_o , electron transfer rate; F_v/F_o electron transfer rate, potential activity of PSII and F_v/F_m , potential activity of PSII.

2.5 不同比例红蓝光 LED 补光对枳幼苗抗性的影响

2.5.1 对可溶性蛋白、可溶性糖含量的影响 由图 3 可知, RB4 : 1、RB6 : 1 的可溶性蛋白含量与 CK 无显著性差异; RB8 : 1、RB1 : 2 的可溶性蛋白含量与 CK 差异显著, 分别是 CK 的 130.12%、143.17%, RB1 : 2 的可溶性蛋白含量最高。RB4 : 1、RB1 : 2 的可溶性糖含量与 CK 无显著性差异; RB6 : 1、RB8 : 1 的可溶性糖含量与 CK 差异显著, 分别是 CK 146.41%、171.66%, RB8 : 1 的可溶性糖含量最高。



A. 可溶性蛋白统计; B. 可溶性糖统计。小写字母的差异表示差异显著 ($p < 0.05$)

A. statistics of Soluble protein; B. statistics of soluble sugar. Difference in lower-case letters indicates significant difference at $p < 0.05$.

图 3 不同处理对枳幼苗可溶性蛋白和可溶性糖的影响

Fig. 3 Effects of different light supplement treatments on statistics of Soluble protein and statistics of soluble sugar of *P. trifoliata* seedlings

2.5.2 对花青苷含量的影响 由表 9 可知, 处理 120 d 后, 各处理的叶片花青苷含量均显著高于 CK, 分别是 CK 的 250.00%、220.63%、188.89%、225.40%, RB4:1 的花青苷含量最高。处理后 150 d 至 210 d, 各处理叶片花青苷含量呈下降趋势, 各补光处理叶片花青苷含量略高于 CK, 无显著性差异。

表 9 不同处理对枳幼苗花青苷含量的影响

Table 9 Effects of different light supplement treatments on the content of anthocyanin of *P. trifoliata* seedlings

处理 Treatment	花青苷含量 Anthocyanin content/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)			
	2022.3 (120 d)	2022.4 (150 d)	2022.5 (180 d)	2022.6 (210 d)
CK	1.26±0.23 b	1.21±1.25 a	0.94±0.94 a	0.73±0.06 a
RB4:1	3.15±0.64 a	1.66±0.71 a	0.94±0.94 a	0.76±0.04 a
RB6:1	2.78±0.64 a	2.00±1.22 a	1.13±1.13 a	0.79±0.07 a
RB8:1	2.38±0.20 a	1.47±1.47 a	1.08±0.71 a	0.79±0.01 a
RB1:2	2.84±0.55 a	1.48±0.94 a	1.24±1.24 a	0.75±0.05 a

The data in the table are the means \pm SDs ($n=4$); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

2.5.3 对抗氧化酶活性与 MDA 含量的影响 由表 10 可知, RB4:1 的 MDA 含量是 CK 的 88.70%, RB8:1、RB1:2 的 MDA 含量分别是 CK 的 120.78%、104.54%, 无显著性差异; RB6:1 时 MDA 含量最低, 显著低于 CK, 是 CK 的 60.93%。

四个补光处理的 SOD 活性均显著高于 CK, 分别是 CK 的 108.68%、108.98%、111.34%、122.14%, RB1:2 有最高值。RB4:1、RB8:1 的 CAT 活性与 CK 无显著性差异; RB6:1、RB1:2 的 CAT 活性分别是 CK 的 108.99%、113.80%, 差异显著。四个补光处理的 POD 活性, 与 CK 无显著性差异, RB4:1 的 POD 活性最低, RB6:1 的 POD 活性最高。

表 10 不同处理对枳幼苗抗氧化酶活性与 MDA 含量的影响

Table 10 Effects of different light supplement treatments on antioxidase activities and MDA content

处理 Treatment	MDA 含量	SOD 活性	CAT 活性	POD 活性
	MDA content/ ($\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}$)	SOD activity/ ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$)	CAT activity/ ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	POD activity/ ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)
CK	17.61±1.32 ab	1 125.73±52.87 c	3160±226.52 bc	56 288±11 494.46 a
RB4:1	15.62±3.35 b	1 223.42±52.91 b	2788±232.17 c	53 928±10 090.53 a
RB6:1	10.73±0.79 c	1 226.76±13.46 b	3444±156.00 ab	58 912±3 363.50 a
RB8:1	21.27±3.59 a	1 253.40±83.28 b	2920±232.79 c	54 928±10 305.63 a

RB1:2	18.41±1.53 ab	1 374.97±70.96 a	3596±163.8a	58 528±13 821.04 a
-------	---------------	------------------	-------------	--------------------

The data in the table are the means ± SDs ($n=3$); different lowercase letters in each column indicate significant differences between treatments ($p<0.05$). The parameters measured included MDA content ($\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}$), SOD activity ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$), CAT activity ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$) and POD activity ($\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$).

3 讨论

3.1 不同比例红蓝光 LED 补光对枳幼苗形态建成的影响

不同光质处理会诱导植物发生不同的形态和生理变化,营养生长可以直观反映植物的生长^[20]。红光照射促进菊花幼苗的株高增长、干鲜质量积累^[21],也有利于花生幼苗的主根生长和侧根形成^[22]。蓝光可以诱导烟草茎的伸长^[23],但会抑制黄瓜^[24]和番茄^[25-26]茎的生长,同时降低两者幼苗的叶面积。使用不同光质处理草莓时,发现蓝光会显著抑制其根系发育^[27]。而红蓝复合光综合了红光和蓝光的优点,更能促进植物的营养生长。株高和茎粗是衡量砧木的重要指标,本四个补光处理的株高和茎粗均高于 CK,说明补光能促进枳幼苗的生长,与前人在黄瓜^[24]、番茄^[25-26]、杨梅^[11]和越橘^[28]上的研究结果相似。本研究发现,可以将试验期间枳幼苗茎的增粗分为两个阶段,第一个阶段是缓慢增长阶段,即处理后 30 d 至处理 120 d,在此阶段, RB8:1 的茎粗一直最大,CK 的茎粗一直最小;处理 120 d 后, RB8:1 茎粗和茎粗增长量最大。第二个阶段是迅速增长阶段,即处理后 120 d 至 210 d,在此阶段, RB6:1 的茎粗增长量最高,为 2.46 mm;处理 210 d 后, RB4:1、RB6:1、RB8:1、RB1:2 的茎粗都显著高于 CK;其中, RB6:1、RB8:1 的茎粗达到 5 mm 以上,说明在气温升高后, RB6:1 促进枳幼苗茎增粗效果更好。有研究发现,越橘^[28]在 RB3:1 处理下茎粗增长最快。蓝莓在 RB4:1 处理下株高和茎粗显著增加^[29],牛角椒在 RB5:1 处理下净光合速率和干物质积累量最高^[30],与本研究 RB8:1、RB6:1 可获得较佳的枳幼苗生长效果不同,可能是因物种差异所致。

四个补光处理均促进了分枝,这可能是由于补光处理获得的光照度较 CK 高,较高的光强促进侧芽生长促进分枝^[31-33],从而进一步促进分枝高度下降,叶片数增多。补光处理有抑制叶面积的趋势,但叶片长宽比几乎不变,这符合最优分配理论的观点,弱光下的植物往往倾向于增加光获取构件的投资,分配更多的光合产物用于构建地上部分^[34],但这一结果与很多前人在蔬菜^[35-37]上的研究结果相反,可能是因植物种类不同所致。四个补光处理的叶面积指数均高于 CK, RB6:1、RB8:1 较 CK 差异显著, RB4:1、RB1:2 较 CK 无显著性差异,这与分枝数和叶片数的差异趋势基本一致。

四个补光处理的总根长、平均根直径、根体积、总根表面积、投影面积、根尖数都要高于 CK,与前人在黄瓜^[38]、番茄^[39]、水稻^[40]上的研究结果相似。RB6:1 的总根长、根体积、总根表面积、投影面积的值均最大;四个补光处理的鲜质量、地上部分干质量、地下部分干质量均高于 CK,与前人在金钱莲^[41]和甜椒^[36]的研究结果相似,其中 RB6:1 干物质积累量最高;表明四个补光处理中 RB6:1 促进了枳幼苗干物质积累效果更加明显,这可能是 RB6:1 通过促进地下部分的生长,从而促进根系对养分的吸收促进了地上部分的茎的增粗。四个补光处理的根冠比小于或等于 CK,与前人在黄瓜^[42]上的研究结果相似,表明补光处理有促进

干物质向地上部分分配的趋势。

3.2 不同比例红蓝光 LED 补光对枳幼苗叶色的影响

叶绿素是吸收光能的主要物质,直接影响着植被光合作用的光能利用率。SPAD 值表示植物叶绿素的相对含量或者是植物绿色程度的一个参数值^[43-44]。处理 180 d 和 210 d 后,四个补光处理的 SPAD 值均高于 CK,这与前人在番茄^[45]、越橘^[28]、甜瓜^[37]上的研究结果基本一致,说明补光会促进 SPAD 值的增加。色差仪所测的 a^* 值为红绿度, $-a$ 表示向绿色方向变化, $+a$ 表示向红色方向变化^[45]。补光处理 90 d 后,四个处理的 a^* 值均为正数,叶片偏向红色;补光 180 d 后,四个处理的 a^* 值均为负数,叶片呈现绿色。花青苷是决定植物花、果实、种皮和叶片等颜色的重要色素之一,也能在一定程度上反应植物受到胁迫的状态。部分植物叶片在正常衰老时花青苷含量会增加,当植物叶片遭遇低温、干旱等环境胁迫时也会产生应激反应导致花青苷含量的增加^[46]。各补光处理在处理 120 d 后,叶片花青苷含量均显著增加,这可能是因为光照时间的延长和光强的增加导致植株受到了光胁迫^[46],促进了花青苷的积累。花青苷含量从冬季到次年春夏季逐渐降低,可能与低温会诱导花青素苷合成相关基因的表达,高温会抑制花青素苷合成相关基因的表达有关^[47-48]。补光处理后的 150 d 内,SPAD 值较小, a^* 值主要为正值,花青苷含量较高;补光处理 150 d 以后的 SPAD 值较大, a^* 值主要为负值,花青苷含量较低,这与 2022 年 4 月前叶片偏红色,2022 年 4 月后叶片呈现绿色相吻合。

3.3 不同比例红蓝光 LED 补光对枳幼苗光合作用的影响

四个补光处理较 CK 的光合参数无显著性差异,这与前人在草莓^[27]上的研究结果基本一致。但由于四个补光处理的叶片数显著多于 CK,以及补光处理的枳幼苗处理光强高于 CK,故补光处理总的光合产物应高于 CK,这一推论与四个补光处理的生物量显著高于 CK 的结果相吻合。叶绿素荧光检测被广泛用于研究植物的光合生理和逆境胁迫生理研究,叶绿素荧光参数指标能够反映植物叶片光系统II对光能的吸收、传递和耗散等状况^[49]。四个补光处理与 CK 的 F_o 无显著性差异,说明叶绿素含量没有显著性差异,这与同月所测 RB4:1、RB6:1、RB8:1 和 CK 的 SPAD 值的显著性一致,仅同月所测 RB1:2 的 SPAD 值显著高于其他处理和 CK,可能与 SPAD 值与叶绿素含量的相关性大小有关。 F_o 的上升能有效避免 PSII 活性中心发生不可逆转的毁坏, RB6:1 的 F_o 最高,说明其光合性能较好^[50]。RB8:1、RB1:2 的 F_m 、 F_v 显著低于 CK,说明 RB8:1、RB1:2 可能受到了一定的光抑制,PSII 电子传递最大潜能小于 CK。RB8:1 的 F_m/F_o 、 F_v/F_o 显著低于 CK,说明 RB8:1 的 PSII 潜在光化学活性和光合能力相对较差。一般植物在不受胁迫的情况下, F_v/F_m 的值在 0.80 至 0.84 之间^[51], RB8:1、RB1:2 的 F_v/F_m 均为 0.78,说明枳幼苗在测量时间点可能受到了轻微光胁迫, RB4:1、RB6:1 补光组合较为理想。

3.4 不同比例红蓝光 LED 补光对枳幼苗抗性的影响

可溶性蛋白、可溶性糖是重要的渗透调节物质和营养物质,能有效调节细胞的渗透压,

可以作为衡量植物抗性的判定指标^[52-54]。除 RB4:1 的可溶性蛋白含量低于 CK 外,其余补光处理的可溶性蛋白含量和可溶性糖含量均高于 CK,这一结果与前人在番茄^[45]、黄瓜^[55]上的研究结果基本一致,说明补光有助于枳幼苗抗性的增强。

植物在生长发育过程中,因为代谢和逆境环境会产生活性氧。光作为一种调节因子,可以激活植物体内的抗氧化防御系统,进而合成抗氧化物。SOD、POD、CAT 及其他酶类相互协作,能有效清除活性氧,使植物体内活性氧维持在一个低水平上,从而防止活性氧引起的膜脂过氧化及其他伤害过程。四个补光处理的 SOD 活性均显著高于 CK, RB6:1、RB1:2 的 CAT 活性和 POD 活性也高于 CK,与前人在番茄^[45]、黄瓜^[6]上的研究结果基本一致。

MDA 是膜脂过氧化的产物,其含量是鉴定逆境对膜伤害的重要指标。RB6:1 的 MDA 含量显著低于所有处理,说明 RB6:1 膜损伤程度最低,抗逆性最好。RB6:1 和 RB4:1 的 MDA 含量低于 CK,与前人在番茄^[45]、黄瓜^[6]上的研究结果基本一致,红蓝光补光处理可以降低提高抗氧化酶活性降低 MDA 含量。RB8:1、RB1:2 的 MDA 含量高于 CK,这可能与 RB8:1、RB1:2 受到了轻微光胁迫有关。

4 结论

在长沙地区,11 月上旬至次年 3 月上旬,四个补光处理中, RB8:1 最有利于枳幼苗茎粗增加;3 月上旬至 6 月上旬气温上升,四个补光处理中, RB6:1 可显著增加枳幼苗茎粗,提高光合性能,增强抗性,是最适宜的红蓝光补光组合。

参考文献

- [1] 朱亦赤,李娜,李大志,龙桂友,邓子牛.影响柑桔生产者价格变动的主要因素分析[J].中国南方果树,2021,50(2):177-184.
ZHU Yichi, LI Na, LI Dazhi, LONG Guiyou, DENG Ziniu. The main factors affecting the variation of price of *Citrus* fruit from producer[J]. South China Fruits, 2021, 50(2): 177-184.
- [2] 奎国秀,祁春节.基于社会网络分析的世界柑橘贸易格局演化研究[J].世界农业,2022(6):18-30.
KUI Guoxiu, QI Chunjie. Study on the evolution of world citrus trade pattern based on social network analysis[J]. World Agriculture, 2022(6): 18-30.
- [3] WANG S Y, FANG H, XIE J M, WU Y, TANG Z Q, LIU Z C, LV J, YU J H. Physiological responses of cucumber seedlings to different supplemental light duration of red and blue LED[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 709313.
- [4] 任毛飞,毛桂玲,刘善振,王慰亲,郑华斌,唐启源.光质对植物生长发育、光合作用和碳氮代谢的影响研究进展[J].植物生理学报,2023,59(7):1211-1228.
REN Maofei, MAO Guiling, LIU Shanzhen, WANG Weiqin, ZHENG Huabin, TANG Qiyuan. Research progress on the effects of light quality on plant growth and development, photosynthesis, and carbon and nitrogen metabolism[J]. Plant Physiology Journal, 2023, 59(7): 1211-1228.
- [5] PASHKOVSKIY P, KRESLAVSKI V D, IVANOV Y, IVANOVA A, KARTASHOV A, SHMAREV A, STROKINA V, KUZNETSOV V V, ALLAKHVERDIEV S I. Influence of light of different spectral compositions on the growth, photosynthesis, and expression of light-dependent genes of Scots pine seedlings[J]. Cells, 2021, 10(12): 3284.

- [6] 陈琦, 潘好芹, 亓延凤, 李婷婷, 杨凤娟, 宋少恒. 不同 LED 补光对日光温室黄瓜生长、产量及品质的影响[J]. 北方园艺, 2022(21): 50-57.
CHEN Qi, PAN Haoqin, QI Yanfeng, LI Tingting, YANG Fengjuan, SONG Shaoheng. Effects of different LED light supplements on growth, yield and quality of cucumber in solar greenhouse[J]. Northern Horticulture, 2022(21): 50-57.
- [7] 马肖静, 刘勇鹏, 黄松, 张婵, 孙凯乐, 王永, 申顺善, 孙治强, 朴凤植, 张涛. 不同 LED 光照度夜间补光对番茄幼苗生长发育的影响[J]. 植物生理学报, 2022, 58(12): 2411-2420.
MA Xiaojing, LIU Yongpeng, HUANG Song, ZHANG Chan, SUN Kaile, WANG Yong, SHEN Shunshan, SUN Zhiqiang, PIAO Fengzhi, ZHANG Tao. Effects of different LED illumination intensity at night on the growth and development of tomato seedlings[J]. Plant Physiology Journal, 2022, 58(12): 2411-2420.
- [8] 苏泽阳, 杨再强, 龙宇芸, 张瑶, 姜雨函, 徐若涵. 寡照条件下补光频率对番茄幼苗叶片光合特性的影响[J]. 中国农业气象, 2022, 43(9): 720-731.
SU Zeyang, YANG Zaiqiang, LONG Yuyun, ZHANG Yao, JIANG Yuhan, XU Ruohan. Effect of light supplementation frequency on photosynthetic characteristics of tomato seedling leaves under weak light[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2022, 43(9): 720-731.
- [9] 齐振宇, 王婷, 桑康琪, 刘玥, 王明钦, 喻景权, 周艳虹, 夏晓剑. 设施番茄不同叶位补光对植株形态、光合及激素合成的影响[J]. 园艺学报, 2021, 48(8): 1504-1516.
QI Zhenyu, WANG Ting, SANG Kangqi, LIU Yue, WANG Mingqin, YU Jingquan, ZHOU Yanhong, XIA Xiaojian. Effects of supplemental lighting at different positions on tomato plant morphology, photosynthesis and endogenous hormone biosynthesis under low-light environment[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2021, 48(8): 1504-1516.
- [10] 董桑婕, 葛诗蓓, 李岚, 贺丽群, 范飞军, 齐振宇, 喻景权, 周艳虹. 不同光质补光对辣椒幼苗生长、丛枝菌根共生和磷吸收的影响[J]. 园艺学报, 2022, 49(8): 1699-1712.
DONG Sangjie, GE Shibe, LI Lan, HE Liqun, FAN Feijun, QI Zhenyu, YU Jingquan, ZHOU Yanhong. Effects of supplemental lighting on growth, root colonization by arbuscular mycorrhizal fungi and phosphorus uptake in pepper seedlings[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2022, 49(8): 1699-1712.
- [11] 任海英, 甘振, 戚行江, 王剑, 郑锡良, 张淑文, 俞浙萍. 补光对设施栽培杨梅营养生长和果实品质的影响[J]. 果树学报, 2022, 39(6): 1072-1080.
REN Haiying, GAN Zhen, QI Xingjiang, WANG Jian, ZHENG Xiliang, ZHANG Shuwen, YU Zheping. Effects of light supplement on vegetative growth and fruit quality of bayberry(*Myrica rubra*) in facility cultivation[J]. Journal of Fruit Science, 2022, 39(6): 1072-1080.
- [12] 刘帅, 张亚红, 刘鑫, 袁苗, 摆虹霞, 黄嘉俊. 不同光源补光对设施红地球葡萄果实品质的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(4): 949-956.
LIU Shuai, ZHANG Yahong, LIU Xin, YUAN Miao, BAI Hongxia, HUANG Jiajun. Effects of different supplementary light sources on fruit quality of Red Globe grape under protected cultivation[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2021, 37(4): 949-956.
- [13] 刘帅, 徐伟荣, 张亚红, 刘鑫, 郭松涛, 胡莉. 基于转录组研究补光对设施‘红地球’葡萄萌芽的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(3): 305-317.
LIU Shuai, XU Weirong, ZHANG Yahong, LIU Xin, GUO Songtao, HU Li. Effects of supplementary light on the bud burst of ‘Red Globe’ grape under protected cultivation based on transcriptome sequencing[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(3): 305-317.

- [14] 黄秋凤, 陈立, 李敏, 谢蜀豫, 曹慕明, 李玮, 黄羽, 管敬喜, 黄竞, 陈国品. 夜间延时补光调控对巨峰葡萄春果生长发育及光合特性的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(8): 2227-2233.
- HUANG Qiufeng, CHEN Li, LI Min, XIE Shuyu, CAO Muming, LI Wei, HUANG Yu, GUAN Jingxi, HUANG Jing, CHEN Guopin. Effects of late time illumination delayed regulation at night on growth and photosynthetic characteristics of spring berry of Kyoho grape[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(8): 2227-2233.
- [15] 谢佐沐, 蔡英健, 余若莹, 俞超, 汪财生, 付美, 郭斌. 不同光质补光对火龙果茎生理特性及开花结果的影响[J]. 广西植物, 2022, 42(2): 191-198.
- XIE Zuomu, CAI Yingjian, YU Ruoying, YU Chao, WANG Caisheng, FU Mei, GUO Bin. Effects of different supplemental light qualities on physiological characteristics, flowering and fruiting of pitaya stem[J]. Guihaia, 2022, 42(2): 191-198.
- [16] 杨超, 刘敏竹, 李强, 韩涛, 彭良志, 凌丽俐, 付行政, 淳长品, 曹立, 何义仲. 发光二极管(LED)光质对金秋砂糖橘幼苗生长发育和光合特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(1): 89-97.
- YANG Chao, LIU Minzhu, LI Qiang, HAN Tao, PENG Liangzhi, LING Lili, FU Xingzheng, CHUN Changpin, CAO Li, HE Yizhong. Effects of different light-emitting diode (LED) light quality on growth, development and photosynthetic characteristics of Jinqiu Shatangju seedlings[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2022, 34(1): 89-97.
- [17] 刘敏竹, 李强, 杨超, 韩涛, 凌丽俐, 付行政, 淳长品, 曹立, 何义仲. LED光质对红桔幼苗生长发育和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国南方果树, 2021, 50(2): 1-7.
- LIU Minzhu, LI Qiang, YANG Chao, HAN Tao, LING Lili, FU Xingzheng, CHUN Changpin, CAO Li, HE Yizhong. Effects of different light quality of LED on growth, development and chlorophyll fluorescence characteristics of *Citrus* tangerine seedlings[J]. South China Fruits, 2021, 50(2): 1-7.
- [18] 李思静, 易晓瞳, 李有芳, 王君秀, 凌丽俐, 彭良志. 不同LED光质对枳壳幼苗生长发育的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(3): 708-714.
- LI Sijing, YI Xiaotong, LI Youfang, WANG Junxiu, LING Lili, PENG Liangzhi. Effects of different LED light qualities on the growth of trifoliate orange seedlings[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 708-714.
- [19] HUANG D, WANG X, TANG Z Z, YUAN Y, XU Y T, HE J X, JIANG X L, PENG S, LI L, BUTELLI E, DENG X X, XU Q. Subfunctionalization of the Ruby2-Ruby1 gene cluster during the domestication of *Citrus*[J]. Nature Plants, 2018, 4(11): 930-941.
- [20] 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): 1217-1234.
- XU Daquan, GAO Wei, RUAN Jun. Effects of light quality on plant growth and development[J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8): 1217-1234.
- [21] 魏星, 顾清, 戴艳娇, 徐志刚. 不同光质对菊花组培苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12): 344-349.
- WEI Xing, GU Qing, DAI Yanjiao, XU Zhigang. Different Light Qualities on Growth of *Chrysanthemum (Dendranthema morifolium)* Plantlets in vitro[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(12): 344-349.
- [22] 闫萌萌, 王铭伦, 王洪波, 王月福, 赵长星. 光质对花生幼苗根系生长与根系活力的影响[J]. 农学学报, 2013, 3(8): 17-20.

YAN Mengmeng, WANG Minglun, WANG Hongbo, WANG Yuefu, ZHAO Changxing. Effect of light quality on the growth and vitality of peanut seedling root system[J]. Journal of Agriculture, 2013, 3(8): 17-20.

[23] 孟霖, 徐宜民, 宋文静, 王程栋, 刘晓冰, 梁盟, 王树声. 红蓝单色光对水培烟草幼苗生长发育及生理特性的影响[J]. 中国烟草学报, 2015, 21(5): 55-61.

MENG Lin, XU Yimin, SONG Wenjing, WANG Chengdong, LIU Xiaobing, LIANG Meng, WANG Shusheng. Effects of red and blue monochromatic lights on growth, development and physiological characters of hydroponic tobacco seedlings[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2015, 21(5): 55-61.

[24] 朱鹿坤, 陈俊琴, 赵雪雅, 王正林, 齐明芳. 红蓝绿 LED 延时补光对日光温室黄瓜育苗的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(4): 402-409.

ZHU Lukun, CHEN Junqin, ZHAO Xueya, WANG Zhenglin, QI Mingfang. Effect of extended photoperiod with red, blue and green LED supplementary lighting on the growth of cucumber seedlings in solar greenhouse[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2020, 51(4): 402-409.

[25] 刘志强, 朱新红, 刘勇鹏, 王清, 李春, 张婵, 姜俊. 夜间不同 LED 补光时段对番茄幼苗生长生理指标的影响[J]. 中国瓜菜, 2022, 35(8): 79-85.

LIU Zhiqiang, ZHU Xinhong, LIU Yongpeng, WANG Qing, LI Chun, ZHANG Chan, JIANG Jun. LED lighting periods at night affects the growth and development of tomato seedlings[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2022, 35(8): 79-85.

[26] 黄志午, 俞亦章, 徐志刚, 朱为民, 钱春花. 冬季设施补光对苏州地区岩棉培番茄生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 1034-1041.

HUANG Zhiwu, YU Yizhang, XU Zhigang, ZHU Weimin, QIAN Chunhua. Effects of winter facility light supplement on the growth of stone wool cultivated tomato in Suzhou area[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2022, 38(4): 1034-1041.

[27] 钱舒婷, 李建明. 补光灯类型对设施草莓光合特性与产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 41-48.

QIAN Shuting, LI Jianming. Effects of supplement light type on photosynthetic characteristics and yield of strawberry in greenhouse[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2019, 47(4): 41-48.

[28] 王佳淇, 何莹钰, 韦晓桐, 李永强, 杨莉, 陈文荣, 廖芳蕾, 郭卫东. LED 补光组合对大棚越橘生长发育的影响[J]. 园艺学报, 2020, 47(6): 1183-1193.

WANG Jiaqi, HE Yingyu, WEI Xiaotong, LI Yongqiang, YANG Li, CHEN Wenrong, LIAO Fanglei, GUO Weidong. Effects of LED supplemental light on the growth and development of blueberry in greenhouse[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2020, 47(6): 1183-1193.

[29] 施杰, 杨海燕, 吴文龙, 闫连飞, 樊苏帆, 李维林. 不同光质对蓝莓生长发育及生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2022(6): 15-23.

SHI Jie, YANG Haiyan, WU Wenlong, LÜ Lianfei, FAN Sufan, LI Weilin. Effects of different light quality on the growth and physiological characteristics of blueberry[J]. Northern Horticulture, 2022(6): 15-23.

[30] 张谨薇, 高亚新, 李恭峰, 马万成, 孟清波, 李青云. LED 光源不同光强对冀星 9 号辣椒幼苗生长和光合特性的影响[J]. 现代农业科技, 2022(3): 61-66.

ZHANG Jinwei, GAO Yaxin, LI Gongfeng, MA Wancheng, MENG Qingbo, LI Qingyun. Effects of different LED light intensities on growth and photosynthetic characteristics of jixing-9 pepper

- seedlings[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2022(3): 61-66.
- [31] KAWAMURA K, TAKEDA H. Light environment and crown architecture of two temperate *Vaccinium* species: Inherent growth rules versus degree of plasticity in light response[J]. *Canadian Journal of Botany*, 2002, 80(10): 1063-1077.
- [32] SU H W, ABERNATHY S D, WHITE R H, FINLAYSON S A. Photosynthetic photon flux density and phytochrome B interact to regulate branching in *Arabidopsis*[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2011, 34(11): 1986-1998.
- [33] 夏雨桐, 王琛, 郝宁, 武涛. 植物分枝性研究进展及其在蔬菜育种中的应用[J]. *中国蔬菜*, 2022(1): 31-40.
- XIA Yutong, WANG Chen, HAO Ning, WU Tao. Research progress on plant branchiness and its application in vegetable breeding[J]. *China Vegetables*, 2022(1): 31-40.
- [34] 唐玉瑞, 赵成章, 赵辉, 候刚, 马敏, 赵婷婷, 王毓芳, 曾红霞. 不同光环境下洮河护岸林沙棘叶干重与叶面积、叶厚度间的关系[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(9): 2745-2753.
- TANG Yurui, ZHAO Chengzhang, ZHAO Hui, HOU Gang, MA Min, ZHAO Tingting, WANG Yufang, ZENG Hongxia. The relationship between leaf dry mass and leaf area, leaf thickness of *Hippophae rhamnoides* under different light conditions in Taohe River riparian forest[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(9): 2745-2753.
- [35] 申宝营, 李毅念, 赵三琴, 丁为民, 惠娜, 李洁. 暗期补光对黄瓜幼苗形态调节效果及综合评价[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(22): 201-208.
- SHEN Baoying, LI Yinian, ZHAO Sanqin, DING Weimin, HUI Na, LI Jie. Effect of dark period lighting regulation on cucumber seedling morphology and comprehensive evaluation analysis and comprehensive evaluation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22): 201-208.
- [36] 段青青, 张禄祺, 张自坤. 不同生育期补光对温室甜椒生长、产量及品质的影响[J]. *植物生理学报*, 2021, 57(4): 950-962.
- DUAN Qingqing, ZHANG Luqi, ZHANG Zikun. Effects of supplemental illumination at different growth stages on growth, yield and fruit quality of greenhouse sweet pepper[J]. *Plant Physiology Journal*, 2021, 57(4): 950-962.
- [37] 崔晓辉, 郭小鸥, 孙天宇, 齐红岩. LED 补光对薄皮甜瓜幼苗生长及果实品质的影响[J]. *植物生理学报*, 2017, 53(4): 657-667.
- CUI Xiaohui, GUO Xiaoou, SUN Tianyu, QI Hongyan. Effects of LED supplementary lighting on seedling growth and fruit quality of oriental melon[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(4): 657-667.
- [38] 闫晓花, 郁继华, 颀建明. 补光时间及光质对黄瓜幼苗生长及根系活力的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(6): 1211-1217.
- YAN Xiaohua, YU Jihua, XIE Jianming. Effects of supplemental light quality and durations of illumination on growth and root activity of cucumber seedling[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2016, 30(6): 1211-1217.
- [39] 文莲莲, 李岩, 张聘丘, 黄世杰, 秦利杰, 宋甲斌, 韩吉书, 魏珉. 冬季温室补光时长对番茄幼苗生长、光合特性及碳代谢的影响[J]. *植物生理学报*, 2018, 54(9): 1490-1498.
- WEN Lianlian, LI Yan, ZHANG Danqiu, HUANG Shijie, QIN Lijie, SONG Jiabin, HAN Jishu, WEI Min. Effects of supplemental light duration on the growth, photosynthetic characteristic and carbon metabolism of tomato seedlings in winter under solar greenhouse[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(9): 1490-1498.

[40] 刘萍, 张粟, 黄丹丹, 张士秀. LED 补光对水稻秧苗生长及产量因子的影响[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(10): 4-9.

LIU Ping, ZHANG Su, HUANG Dandan, ZHANG Shixiu. Effect of light-emitting diodes on the seedling growth and yield factor of rice[J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(10): 4-9.

[41] 王伟, 苏明华, 李惠华, 常强, 曾碧玉, 赖钟雄. 蓝光补光对福建金线莲生长及药用成分的影响[J]. 热带作物学报, 2018, 39(5): 894-899.

WANG Wei, SU Minghua, LI Huihua, CHANG Qiang, ZENG Biyu, LAI Zhongxiong. Effects of blue light compensation on growth and accumulation of medicinal components in *Anoectochilus roxburghii* from Fujian Province[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2018, 39(5): 894-899.

[42] 王冰华, 孙凤清, 李娟起, 田永强, 高丽红. 不同时段补光对日光温室冬春茬黄瓜幼苗质量的影响[J]. 中国蔬菜, 2017(12): 23-29.

WANG Binghua, SUN Fengqing, LI Juanqi, TIAN Yongqiang, GAO Lihong. Effects of supplementary light at different time on quality of cucumber seedlings in solar greenhouse[J]. China Vegetables, 2017(12): 23-29.

[43] 项倩, 吴磊, 徐若涵, 杨再强. 不同温度下染病番茄叶片 SPAD 和叶绿素含量的相关性[J]. 北方园艺, 2022(18): 8-15.

XIANG Qian, WU Lei, XU Ruohan, YANG Zaiqiang. Correlation between SPAD and chlorophyll content in infected tomato leaves at different temperatures[J]. Northern Horticulture, 2022(18): 8-15.

[44] 陈晓娜, 赵庚星, 周雪, 张颖, 宿宝巍. 基于高光谱的小麦冠层叶绿素(SPAD 值)估测模型[J]. 天津农业科学, 2018, 24(2): 60-65.

CHEN Xiaona, ZHAO Gengxing, ZHOU Xue, ZHANG Ying, SU Baowei. Estimation model of wheat canopy chlorophyll content (SPAD value) based on hyperspectral technology[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2018, 24(2): 60-65.

[45] 马肖静, 刘志强, 刘勇鹏, 张婵, 孙凯乐, 黄松, 孙治强, 朴凤植, 张涛. 不同红蓝光质组合夜间补光对番茄幼苗生长生理指标的影响[J]. 山东农业科学, 2022, 54(2): 51-56.

MA Xiaojing, LIU Zhiqiang, LIU Yongpeng, ZHANG Chan, SUN Kaile, HUANG Song, SUN Zhiqiang, PIAO Fengzhi, ZHANG Tao. Effects of night light supplementation with different red and blue spectrum combinations on growth and physiological characters of tomato seedlings[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(2): 51-56.

[46] 于士军, 何玲艳, 万国平, 王伟, 李向东, 吴宗庆, 曾婷婷, 王维坤. 不同干燥方式对培养蝉花孢梗束品质的影响[J]. 基因组学与应用生物学, 2020, 39(6): 2712-2721.

YU Shijun, HE Lingyan, WAN Guoping, WANG Wei, LI Xiangdong, WU Zongqing, ZENG Tingting, WANG Weikun. Effects of different drying methods on the quality of cultured synnemata of *Isaria cicadae*[J]. Genomics and Applied Biology, 2020, 39(6): 2712-2721.

[47] 胡可, 韩科厅, 戴思兰. 环境因子调控植物花青素苷合成及呈色的机理[J]. 植物学报, 2010, 45(3): 307-317.

HU Ke, HAN Keting, DAI Silan. Regulation of plant anthocyanin synthesis and pigmentation by environmental factors[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2010, 45(3): 307-317.

[48] 占丽英, 王晶, 林义章. 光影响植物花青素苷合成研究[J]. 北方园艺, 2016(12): 197-201.

ZHAN Liying, WANG Jing, LIN Yizhang. Effect of light on anthocyanin synthesis in plant[J]. Northern Horticulture, 2016(12): 197-201.

[49] TRUEMAN S J, RICHARDSON D M. Propagation and chlorophyll fluorescence of

- Camptotheca acuminata cuttings[J]. Journal of Medicinal Plants Research, 2011, 5(1): 1-6.
- [50] 王香菲, 张大毛, 张霞, 刘洁, 李涛, 李卫东, 于晓英, 李炎林. 不同实生变异和常规檫木光合特性的比较[J]. 经济林研究, 2020, 38(3): 216-224.
WANG Xiangfei, ZHANG Damao, ZHANG Xia, LIU Jie, LI Tao, LI Weidong, YU Xiaoying, LI Yanlin. Comparison of photosynthetic characteristics of different seed propagated variations and normal *Loropetalum chinense*[J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(3): 216-224.
- [51] 张大毛, 张霞, 王香菲, 刘洋, 杨期宏, 李卫东, 于晓英, 李炎林. 红花檫木短枝和开花缺失型变异株系的光合特性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 180-184.
ZHANG Damao, ZHANG Xia, WANG Xiangfei, LIU Yang, YANG Qihong, LI Weidong, YU Xiaoying, LI Yanlin. Photosynthetic characteristics of short-branched and flowering-deficient mutation lines of *Loropetalum chinense* var. *rubrum*[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2021, 47(2): 180-184.
- [52] 尹梦雅, 杨艳, 汤玉喜, 李志辉, 叶传财, 秦平书, 吴兴华. 配方施肥对黄栀子幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(5): 83-90.
YIN Mengya, YANG Yan, TANG Yuxi, LI Zhihui, YE Chuancai, QIN Pingshu, WU Xinghua. Effects of formula fertilization on the growth and physiological characteristics of *Gardenia jasminoides* seedlings[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(5): 83-90.
- [53] 杜旭, 黄平升, 杨梅. 不同磷肥对尾巨桉 DH3229 苗木生长及抗性生理的影响[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 526-533.
DU Xu, HUANG Pingsheng, YANG Mei. Phosphorus fertilizers on the growth and resistance physiology of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* DH3229 seedlings[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(5): 526-533.
- [54] 孙常青, 杨艳君, 郭志利, 屈非. 施肥和密度对杂交谷可溶性糖、可溶性蛋白及硝酸还原酶的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1169-1177.
SUN Changqing, YANG Yanjun, GUO Zhili, QU Fei. Effects of fertilization and density on soluble sugar and protein and nitrate reductase of hybrid foxtail millet[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1169-1177.
- [55] 闫晓花, 郁继华. LED 补光对温室黄瓜幼苗抗衰老及抗氧化酶系统的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(2): 392-398.
YAN Xiaohua, YU Jihua. Effects of supplemental LED light on photosynthetic pigment contents and antioxidant enzyme activities of cucumber seedling leaves[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(2): 392-398.