

不同LED红蓝光质处理对枳幼苗生长的影响

周铮荣,赵和国,苏翰英,罗旭钊,孙紫青,马先锋,朱亦赤*

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

摘要:【目的】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等4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CK相比,4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显著提升,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,其中RB6:1的气孔导度和净光合速率达到最高水平。在CK和4个补光处理中,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,4个补光处理的叶片花青苷含量显著高于CK;在补光处理90~210 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)12-2498-14

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

ZHOU Zhengrong, ZHAO Heguo, SU Hanying, LUO Xuzhao, SUN Ziqing, MA Xianfeng, ZHU Yichi*
(Engineering Research Center of Horticultural Crop Germplasm Innovation and New Variety Breeding, Ministry of Education/National Center for Citrus Improvement-Changsha/College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 4101258, Hunan, China)

Abstract: 【Objective】Citrus is the predominant fruit crop in China, with a plantation area of 2 923 000 hm² and a yield of 55 956 000 tons annually as of 2021. The breeding cycle of citrus virus-free container seedlings frequently spans two years, from the initial rootstock sowing to grafting and subsequent nursery cultivation. The protracted breeding cycle leads to a disconnection 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 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

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。E-mail:1462035275@qq.com

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

supplemental light conditions to improve the growth and development of *P. 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】** *P. 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 *P. 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, but 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 and 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 *P. 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.

Key words: *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 $\text{t}^{[2]}$;2022年,我国柑橘种植面积299.58万 hm^2 ,产量6 003.89万 $\text{t}^{[3]}$ 。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,并在第三年秋冬季出圃,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的推广。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^[4],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620 nm)达到峰值^[5]。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、抗性等优点,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阴条件下,较高的植物会吸收光谱中大部分红光和蓝光,导致了光照质量的下降^[6]。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、光利用效率和功率转换效率高等优点,广泛应用于黄瓜^[7]、番茄^[8-10]、辣椒^[11]、杨梅^[12]、葡萄^[13-15]和火龙果^[16]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 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照度下,LED灯RB1:1(红蓝光质比为1:1)更利于

金秋砂糖橘新梢生长、物质积累和光合作用^[17],RGB4:1:1(红绿蓝光质比为4:1:1)更有利于红橘的生长^[18];150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光照度下,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生长^[19];适宜先锋橙幼苗生长的LED光质为RB4:1^[20],适宜红橘幼苗生长的LED光质为RB1:1^[18]。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的研究较少。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研究较少,适宜枳生长发育的红蓝光补光条件还有待探寻。笔者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差异,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。

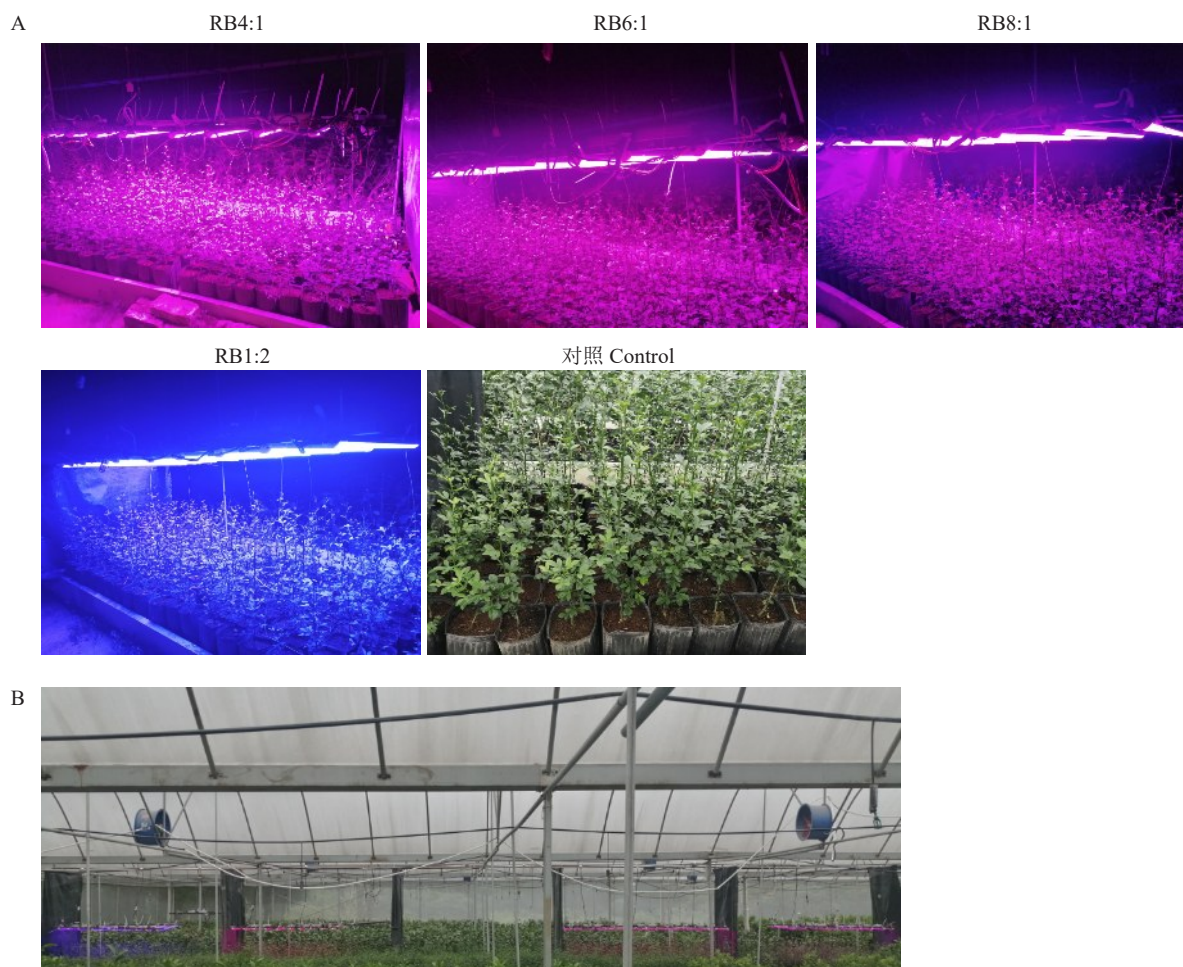
1 材料和方法

1.1 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的由湖南金叶众望科技股份有限公司生产的金叶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(对照)和RB4:1(红蓝光质比为4:1,下同)、RB6:1、RB8:1、RB1:2等4个补光处理,共5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照度保持在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06:00—



A. 5个处理:RB4:1、RB6:1、RB8:1、RB1:2、对照;B. 5个处理总览图。

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

图1 补光设置图

Fig. 1 Fill light setting diagram

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660 nm,蓝光波段峰值为445 nm,红蓝光波长设置参考刘敏竹等^[18]对红橘幼苗的研究。

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,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、180、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、180、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 Huang 等^[21]的方法测定花青苷含量。

1.3.4 生理指标测量 采用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量^[22],采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[22],采用 NBT 法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[21],采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[20],采用过氧化氢分解量法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[20],采用苏州科铭生物技术有限公司的丙二醛含量试剂盒(货号 MDA-1-Y)测定丙二醛(MDA)含量。

1.4 数据分析

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

图。

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 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,4 个补光处理的株高与对照无显著差异。处理 120 d 后, RB8:1 的株高显著高于对照和其他处理。处理后 120~210 d,枳幼苗株高增长迅速;处理 210 d 后, RB4:1、RB6:1 的株高分别比对照高 15.75%、19.38%,差异显著; RB8:1、RB1:2 的株高分别比对照高 8.72%、3.42%,无显著差异。

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。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 的株高增长量最大;处理 210 d 后,其株高均值显著高于对照、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	处理时间 Treatment time/d						
	30	60	90	120	150	180	210
对照 Control	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

注:不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference between treatments at 0.05 level. The same below.

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,对照最低,分别为 0.40 mm、0.30 mm。处理 120 d 后, RB8:1 茎粗值最大,显著高于对照和

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	处理时间 Treatment time/d						
	30	60	90	120	150	180	210
对照 Control	2.04±0.21 b	2.18±0.20 b	2.18±0.20 b	2.34±0.24 c	2.63±0.29 b	3.34±0.43 c	4.36±0.44 b
RB4:1	2.24±0.15 a	2.42±0.17 a	2.42±0.19 a	2.59±0.17 ab	2.85±0.31 a	3.78±0.54 b	4.83±0.61 a
RB6:1	2.23±0.17 a	2.39±0.17 a	2.43±0.15 a	2.57±0.14 ab	2.96±0.22 a	3.94±0.42 ab	5.03±0.52 a
RB8:1	2.31±0.10 a	2.50±0.15 a	2.56±0.14 a	2.71±0.16 a	3.04±0.22 a	4.18±0.38 a	5.00±0.41 a
RB1:2	2.17±0.25 ab	2.39±0.27 a	2.41±0.30 a	2.52±0.24 b	2.91±0.28 a	3.93±0.38 ab	4.95±0.50 a

RB1:2。处理后120~210 d,枳幼苗茎粗增长迅速;补光210 d后,RB4:1、RB6:1、RB8:1、RB1:2的茎粗分别是对照的110.78%、115.37%、114.68%、113.53%,均显著高于对照,RB6:1茎粗值最大。

2.1.3 对分枝数和叶片的影响 由表3可知,4个补光处理的分枝数均高于对照,差异显著(RB4:1除

外),RB4:1、RB6:1、RB8:1、RB1:2的分枝数分别是对照的162.5%、218.75%、225.00%、212.50%。各补光处理分枝高度均显著低于对照,分别是对照的62.82%、44.04%、59.09%、51.26%,RB6:1的分枝高度最低。

4个补光处理的叶片数均显著高于对照,RB6:1

表3 不同处理对枳幼苗分枝数和叶片的影响

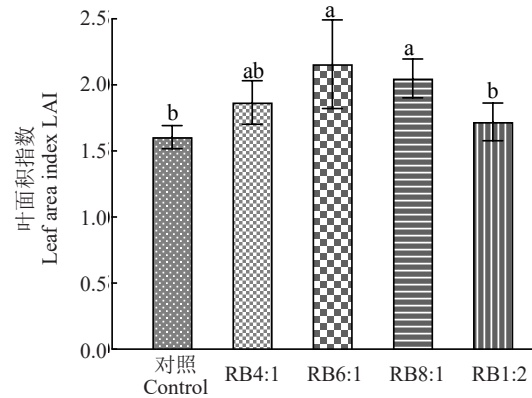
Table 3 Effects of different treatments on branch number and leaves of *P. trifoliata* seedlings

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
对照 Control	1.60±0.70 b	8.31±3.16 a	42.8±8.23 c	3.11±0.39 a	1.35±0.15 a	2.32±0.26 a	2.76±0.54 a
RB4:1	2.60±1.35 ab	5.22±4.05 b	57.7±9.57 b	3.12±0.26 a	1.35±0.08 a	2.33±0.21 a	2.71±0.28 a
RB6:1	3.50±1.08 a	3.66±4.01 b	72.4±10.07 a	2.97±0.25 a	1.27±0.11 ab	2.37±0.26 a	2.50±0.27 ab
RB8:1	3.60±1.58 a	4.91±4.32 b	63.3±16.51 ab	2.91±0.40 a	1.25±0.15 ab	2.34±0.22 a	2.39±0.51 ab
RB1:2	3.40±1.43 a	4.26±4.09 b	55.6±11.89 b	2.71±0.26 b	1.16±0.02 b	2.34±0.17 a	2.12±0.12 b

的叶片数最多。RB4:1、RB6:1、RB8:1叶长、叶宽和叶面积与对照均无显著差异;对照的叶面积最大,RB4:1的叶长、叶宽最接近对照;RB1:2的叶长、叶宽和叶面积均显著小于对照。各补光处理的叶片长宽比与对照接近,均无显著差异。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,促进叶片数的增加,抑制叶片增大,对叶片长宽比无明显影响。

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的叶面积指数分别比对照高34.45%、27.73%,差异显著。RB4:1、RB1:2的叶面积指数分别比对照高16.39%、7.17%,无显著差异。

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,显著高于对照;平均根直径、根尖数与对照无显著差异。RB4:1、RB8:1、RB1:2的总根长、平均根直径、根体积、总根表面



不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Different lowercase letters indicates significant difference at $p < 0.05$. The same below.

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

积、投影面积、根尖数均高于对照,但无显著差异。

2.2 不同比例红蓝光处理对枳幼苗生物量的影响

由表5可知,各补光处理均促进了生物量的积

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
对照 Control	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	381.50±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	592.50±146.83 ab

累, RB6:1、RB8:1 的鲜质量、干质量、地上部分干质量、地下部分干质量均显著大于对照。RB4:1、RB1:2 的鲜质量、干质量、地上部分干质量、地下部分干

质量均大于对照, 但无显著差异。RB4:1 的根冠比与对照相近; RB6:1、RB8:1、RB1:2 的根冠比均小于对照, 但无显著差异。

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 ratio
对照 Control	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

2.3 不同比例红蓝光处理对枳幼苗叶色的影响

由表 6 可知, 各处理叶片的叶绿素相对含量整体上呈上升趋势。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 值均小于对照, 其中 RB4:1、RB6:1、RB8:1 显著低于对照。用

于测定处理 150、180、210 d 后 SPAD 值的叶片为 2022 年萌生的叶。处理 150 d 后, 4 个补光处理的 SPAD 值均低于对照, 但无显著差异。处理 180、210 d 后, 各补光处理的 SPAD 值均高于对照, 其中 RB1:2 的 SPAD 值均为最大, 显著高于对照。

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			
	90 d	150 d	180 d	210 d	90 d	150 d	180 d	210 d
对照 Control	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

由表 6 可知, 各处理叶片的色差 a^* 值呈先下降后上升的趋势。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、180、210 d 后色差 a^* 值的叶片为 2022 年萌生的叶。处理 90 d 后, 4 个补光处理的色差 a^* 值均显著高于对照, 叶片偏红, 对照叶片偏绿, RB6:1 的 a^* 值最大。处理 150、180、210 d 后, 色差 a^* 值均为负数, 叶色呈现为绿色; 处理 150 d 后, 4 个补光处理的 a^* 值均大于对照, 但无显著差异; 处理 180 d 后, RB1:2 的 a^* 值显著大于对照, RB4:1、RB8:1 的 a^* 值小于对照, 均无显著差异; 处理 210 d 后, 4 个补光处理的 a^* 值均小于对照, 但无显著差异。

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, 4 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对照均无显著差异, 但 RB6:1 气孔导度和净光合速率最大, 光合性能最好。RB4:1、RB6:1、RB8:1、RB1:2 的净光合速率分别是对照的 87.51%、101.06%、80.12%、76.08%, 气孔导度分别是对照的 100.00%、102.78%、100.00%、94.44%, 胞间二氧化碳浓度分别是对照的 102.39%、100.65%、102.91%、103.04%, 蒸腾速率分别是对照的 103.70%、97.70%、98.98%、92.09%。

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_0) 无显著差异。RB4:1、RB6:1 的最大荧光 (F_m) 分别是对照的 96.33%、100.78%, 无显著差异; RB8:1、RB1:2 的 F_m 分别是对照的 85.94%、85.39%, 显著低于对照。4 个补光处理的可变荧光 (F_v) 均低于对照, 其中 RB4:1、RB6:1 与对照

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 / ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	气孔导度 G_s / ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳浓度 C_i / ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r / ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
对照 Control	10.41±2.30 a	0.36±0.08 a	334.87±6.84 a	7.84±1.56 a
RB4:1	9.11±1.01 a	0.36±0.08 a	342.88±5.74 a	8.13±1.34 a
RB6:1	10.52±2.69 a	0.37±0.04 a	337.06±10.97 a	7.66±1.16 a
RB8:1	8.34±0.55 a	0.36±0.04 a	344.60±6.56 a	7.76±0.58 a
RB1:2	7.92±1.44 a	0.34±0.03 a	345.06±9.11 a	7.22±0.88 a

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
对照 Control	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 b
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

无显著差异;RB8:1、RB1:2显著低于对照。4个补光处理的电子传递活性(F_m/F_o)均低于对照, RB4:1、RB6:1、RB8:1与对照无显著差异;RB1:2的 F_m/F_o 是对照的85.26%,差异显著。4个补光处理的最大光合潜能(F_v/F_o)均低于对照, RB4:1、RB6:1、RB8:1与对照无显著差异;RB1:2的 F_v/F_o 是对照的81.88%,差异显著。RB4:1、RB6:1的最大量子产额(F_v/F_m)与对照无显著差异;RB1:2、RB8:1的 F_v/F_m 均是对照的96.30%,差异显著。

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对照无显著差异;RB8:1、RB1:2的可溶性蛋白含量显著高

于对照, 分别是对照的130.12%、143.17%, RB1:2的可溶性蛋白含量最高。RB4:1、RB1:2的可溶性糖含量与对照无显著差异;RB6:1、RB8:1的可溶性糖含量显著高于对照, 分别是对照的146.41%、171.66%, RB8:1的可溶性糖含量最高。

2.5.2 对花青苷含量的影响 由表9可知, 处理120 d后, 各处理叶片的花青苷含量均显著高于对照, 分别是对照的250.00%、220.63%、188.89%、225.40%, RB4:1的花青苷含量最高。处理后150~210 d, 各处理叶片的花青苷含量呈下降趋势, 各补光处理叶片的花青苷含量略高于对照, 但无显著差异。

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含量是对照的88.70%, RB8:1、RB1:2的MDA含量分别是对照的120.78%、

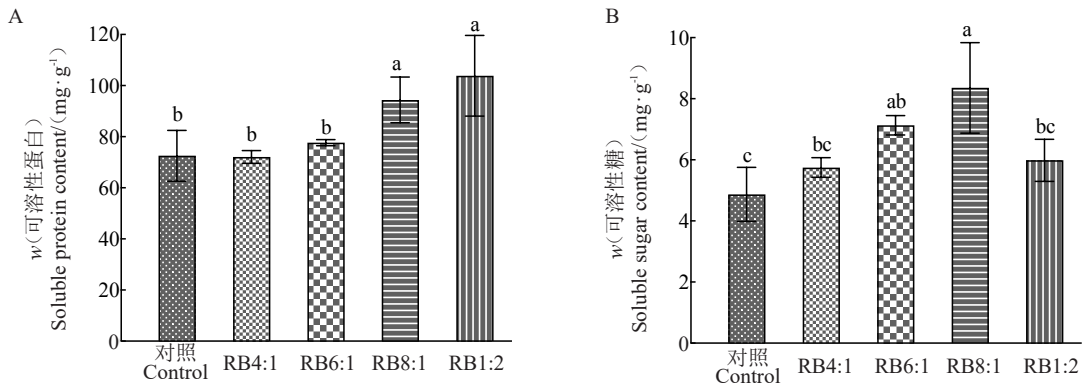


图3 不同处理对枳幼苗可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

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

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	处理时间 Treatment time/d			
	120	150	180	210
对照 Control	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

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	b(丙二醛) MDA content/(nmol·g ⁻¹)	SOD活性 SOD activity/(U·g ⁻¹)	CAT活性 CAT activity/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)	POD活性 POD activity/(U·g ⁻¹ ·min ⁻¹)
对照 Control	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±163.80 a	58 528±13 821.04 a

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状态^[23]。红光照射促进菊花幼苗的株高增长、干鲜质量积累^[24],也有利于花生幼苗的主根生长和侧根形成^[25]。蓝光可以诱导烟草茎的伸长^[26],但会抑制黄瓜^[27]和番茄^[28-29]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^[30]。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状况的重要指标,本研究4个补光处理的株高和茎粗均高于对照,说明补光能促进枳幼苗的生长,与前人在黄瓜^[27]、番茄^[28-29]、杨梅^[12]和越橘^[31]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30~120 d,在此阶段,RB8:1的茎粗一直最大,对照的茎粗一直最小;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120~210 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的茎粗都显著高于对照,其

104.54%,均无显著差异;RB6:1的MDA含量最低,显著低于对照,是对照的60.93%。

4个补光处理的SOD活性均显著高于对照,分别是对照的108.68%、108.98%、111.34%、122.14%,RB1:2最高。RB4:1、RB6:1、RB8:1的CAT活性与对照无显著差异;RB1:2的CAT活性是对照的113.80%,差异显著。4个补光处理的POD活性与对照无显著差异,RB4:1的POD活性最低,RB6:1的POD活性最高。

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^[31]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^[32],牛角椒在RB5:1处理下净光合速率和干物质积累量最高^[33],与本研究RB8:1、RB6:1可获得较佳的枳幼苗生长效果不同,可能是物种差异所致。

4个补光处理均促进了分枝,这可能是因为补光处理获得的光照度较对照高,较高的光照度促进侧芽生长和分枝^[34-36],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^[37],但这一结果与很多前人在蔬菜^[38-40]上的研究结果相反,可能是植物种类不同所致。4个补光处理的叶面积指数均高于对照,RB6:1、RB8:1与对照差异显著,RB4:1、RB1:2与对照无显著差异,这与分枝数和叶片数的差异趋势基本一致。

4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、根尖数都要高于对照,与前人在黄瓜^[41]、番茄^[42]、水稻^[43]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;4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对照,与前人在金钱莲^[44]和甜椒^[39]上的研究结果相似,其中RB6:1干物质积累量最高;表明4个补光处理中RB6:1促进枳幼苗干物质积累的效果更加明显,这可能是RB6:1通过促进地下部分的生长,促进根系对养分的吸收,从而促进了地上部分茎的增粗。4个补光处理的根冠比小于或等于对照,与前人在黄瓜^[45]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色素,直接影响植株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^[46-47]。处理180 d和210 d后,4个补光处理的SPAD值均高于对照,这与前人在番茄^[48]、越橘^[31]、甜瓜^[40]上的研究结果基本一致,说明补光会促进SPAD值的增大。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^[48]。补光处理90 d后,4个处理的 a^* 值均为正数,叶片偏向红色;补光180 d后,4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映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^[49]。各补光处理在处理120 d后,叶片花青苷含量增加,这可能是由于光照时间的延长和光照度的增加导致植株受到了光胁迫^[49],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^[50-53]。补光处理后的90 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

4个补光处理与对照的光合参数无显著差异,这与前人在草莓^[30]上的研究结果基本一致。但由于4个补光处理的叶片数显著多于对照,以及补光处理的枳幼苗处理光照度高于对照,故补光处理总的

光合产物应高于对照,这一推论与4个补光处理的生物量显著高于对照的结果相吻合。叶绿素荧光检测被广泛用于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^[52]。4个补光处理与对照的 F_v 无显著差异,说明叶绿素含量没有显著差异,这与同月所测RB4:1、RB6:1、RB8:1和对照的SPAD值的差异显著性一致,仅同月所测RB1:2的SPAD值显著高于其他处理和对照,可能与SPAD值与叶绿素含量的相关性有关。 F_v 的上升能有效避免PS II活性中心发生不可逆转的毁坏,RB6:1的 F_v 最高,说明其光合性能较好^[53]。RB8:1、RB1:2的 F_m 、 F_v 显著低于对照,说明RB8:1、RB1:2可能受到了一定的光抑制,PS II电子传递最大潜能小于对照。RB1:2的 F_m/F_o 、 F_v/F_o 显著低于对照,说明RB1:2的PS II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0.80~0.84之间^[54],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^[55-57]。除RB4:1的可溶性蛋白含量低于对照外,其余补光处理的可溶性蛋白和可溶性糖含量均高于对照,这一结果与前人在番茄^[48]、黄瓜^[58]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与其他酶类相互协作,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。4个补光处理的SOD活性均显著高于对照,RB6:1、RB1:2的CAT活性和POD活性也高于对照,与前人在番茄^[48]、黄瓜^[7]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含量显著低于对照和其他处理,说明RB6:1膜损伤程度最低,抗逆性最强。RB6:1和RB4:1的MDA含量低于对

照,与前人在番茄^[48]、黄瓜^[7]上的研究结果基本一致,红蓝光补光处理可以提高抗氧化酶活性和降低MDA含量。RB8:1、RB1:2的MDA含量高于对照,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,4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,4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 References:

- [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] FAO. FAO database[DB/OL]. [2024-03-22]. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/qcl>.
- [4] 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.
- [5] 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 Guilin, 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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光照强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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 黄秋凤, 陈立, 李敏, 谢蜀豫, 曹慕明, 李玮, 黄羽, 管敬喜, 黄竟, 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 刘敏竹, 李强, 杨超, 韩涛, 凌丽俐, 付行政, 淳长品, 曹立, 何义仲. LED光质对红橘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.
- [19] 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 trifoliolate orange seedlings[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 708-714.
- [20] 李思静. 不同LED光对先锋橙和红橘幼苗生长发育及生理特性的影响[D]. 重庆:西南大学, 2019.
- LI Sijing. Effects of different LED light on the growth and physiological characteristics of Pioneer orange and Tangerine seedlings[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [21] 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.
- [22] 王涛, 黄涛, 孙李勇, 彭大庆, 朱长红, 陈小溪, 李淑娴. 不同激素处理和扦插时间对幼化乌桕嫩枝扦插生根的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(3):44-55.
- WANG Tao, HUANG Tao, SUN Liyong, PENG Daqing, ZHU Changhong, CHEN Xiaoxi, LI Shuxian. Effects of different hormone treatment and cutting times on rooting of *Sapium sebiferum* softwood cutting after juvenile treatment[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(3):44-55.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 钱舒婷, 李建国. 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 申宝莹, 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.
- [39] 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.
- [40] 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 Xiaou, 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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 Zhongxiang. 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] 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.
- [48] 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.
- [49] 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.
- [50] 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.
- [51] 占丽英, 王晶, 林义章. 光影响植物花青苷合成研究[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.
- [52] 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.
- [53] 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櫟木光合特性的比较[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.
- [54] 张大毛, 张霞, 王香菲, 刘洋, 杨期宏, 李卫东, 于晓英, 李炎林. 红花櫟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.
- [55] 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 Chuancail, 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.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.