

不同 LED 光照对柑橘幼苗生长的影响¹

李燕^{1,2#}, 樊正炎^{2#}, 张曼², 吴平治², 朱从一², 张瑞敏², 杨转英^{1*}, 曾继吾^{2*}

(¹广东海洋大学滨海农业学院, 湛江 524088; ²广东省农业科学院果树研究所, 农业农村部亚热带果树生物学与遗传资源利用重点实验室, 广东省热带亚热带果树研究重点实验室, 广州 510640)

摘要: 【目的】探究不同 LED 光质及光组合对柑橘实生幼苗生长的影响, 筛选适宜柑橘幼苗生长的高效光配方参数。【方法】以茶枝柑和红柠檬实生幼苗为材料, 设置 9 种不同光质处理, 分析不同光质对柑橘实生幼苗株高、茎粗、叶面积和生物量等指标的影响; 并在此基础上, 设置光周期、光质和光照强度 3 因素 3 水平正交试验, 研究不同光照组合对柑橘幼苗生长形态、生物量、叶绿素含量、光合荧光参数等指标的影响, 通过隶属函数进行综合分析。【结果】光质试验结果表明, 红蓝光 4:1 处理能显著促进茶枝柑幼苗株高、叶片数、叶面积、生物量的增长, 白红光 1:1 处理显著促进红柠檬幼苗株高、茎粗、叶面积、生物量的增长; 正交试验结果表明, 延长光照时间能有效促进幼苗营养生长, 茶枝柑幼苗在光周期为 16 h/8 h 昼/夜, 白红蓝 1:4:1, 光强为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验组合下, 株高、茎粗、鲜质量、干质量、叶绿素含量和光系统II实际光化学效率显著提高, 红柠檬幼苗在光周期为 18 h/6 h 昼/夜, 白红 1:1 和光强为 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的试验组合下, 株高、茎粗、叶片数、叶面积和鲜质量数值最大。【结论】通过 LED 补光可有效促进茶枝柑和红柠檬幼苗的生长, 不同品种对光质、光强和光周期补光需求存在差异, 通过合理补光, 可以加快柑橘幼苗生长, 缩短育苗周期, 该研究可为快速育苗提供理论和实践参考。

关键词: 柑橘; LED; 光照; 生长发育; 光合特性

中图分类号: S666 文献标志码: A 文章编号: 1009-9980(2024)09-0001-08

Effects of different LED light on the growth of Citrus seedlings

LI Yan^{1,2#}, FAN Zhengyan^{2#}, ZHANG Man², WU Pingzhi², ZHU Congyi², ZHANG Ruimin², YANG Zhuanying^{1*}, ZENG Jiwu^{2*}

(¹College of Coastal Agricultural Sciences, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, Guangdong, China; ²Fruit Tree Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of South Subtropical Fruit Biology and Genetic Resource Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Tropical and Subtropical Fruit Tree Research, Institute of Fruit Tree Research, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: 【Objective】Light significantly influences plant growth and development. LED light sources are frequently employed in plant lighting due to their energy-saving property and high efficiency. Consequently, the present study

收稿日期: 2024-05-10 接受日期: 2024-07-11

基金项目: 该研究得到国家重点研发计划 (2022YFB3604604), 广东省重点领域研发计划 (2022B0202070002), 国家现代农业 (柑橘) 产业技术体系 (No. CARS-26), 广东省乡村振兴战略专项种业振兴行动项目 (2022-NPY-00-033, 2022-NBH-00-017) 作者简介: 李燕, 女, 在读研究生, E-mail: 1952378610@qq.com. #为共同第一作者。

*通信作者 Author for correspondence. 杨转英, 女, 博士, 副教授, 研究方向为果树栽培生理及分子生物学。Tel: 07592383252, E-mail: 332933829@qq.com. 曾继吾, 男, 博士, 研究员, 研究方向为柑橘等果树育种与配套栽培技术研究。Tel: 020-85283702, E-mail: jiwuzeng@163.com

employed LED light sources to examine the impact of distinct LED light qualities and light combinations on the growth of citrus seedlings, with the objective of identifying the optimal parameters of efficient light formulations conducive to the growth of citrus seedlings. **【Methods】** In this experiment, The total of 9 light qualities including white light (W), red light (R), blue light (B), and polychromatic light(WR1:1,WB1:1,RB4:1,WRB2:1:1,WRB5:4:1,WRB5:4:1+FR)were selected. The impact of varying light quality on the growth of seedlings was investigated. The changes in plant height, stem diameter, leaf area and biomass were quantified and analysed. The spectral proportions suitable for optimising seedling growth were identified according to the growth indexes. The experimental results indicated that a three-factor, three-level orthogonal experiment would be the most appropriate methodology used to investigate the effects of different light combinations on the morphology, biomass, chlorophyll content, photosynthetic characteristics, and chlorophyll fluorescence characteristics of the seedlings. The orthogonal experimental factors and levels are specifically described as follows: photoperiod (12 h/12 h, 16 h/8 h, 18 h/6 h light/dark cycle), light quality (WR1:1, WRB2:1:1, WRB1:4:1) and light intensity (100, 150, 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). Finally, the synthesis was carried out by applying the affiliation function. **【Results】** The results demonstrated that different light quality treatments had a significant impact on the growth of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ and Red limonia seedlings. Specifically, the RB4:1 treatment significantly promoted the growth of plant height, leaf number, leaf area, fresh weight and dry weight of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ seedlings. Conversely, the WR1:1 treatment significantly promoted the growth of plant height, stem diameter, leaf area, fresh weight and dry weight of Red limonia seedlings. In comparison to monochromatic light, the combined light quality was more conducive to the growth of seedlings. Furthermore, increasing the proportion of red light in the composite light can significantly promote the vegetative growth of seedlings. The results of orthogonal experiments demonstrated that an extended period of light exposure could effectively promote the vegetative growth of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ and Red limonia seedlings. The plant height, stem diameter, fresh weight, dry weight, chlorophyll content and actual photosynthetic efficiency photosystem II (ΦPSII) of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ seedlings significantly increased under L6 combination (light period 16/8 h light/dark cycle, light quality white:red:blue 1:4:1, light intensity 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). The Red limonia seedlings exhibited the highest plant height, stem diameter, leaf number, leaf area and fresh weight at L7 combination (photoperiod 18 h/6 h light/dark cycle, light quality white:red 1:1, light intensity 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$). The results demonstrated that the light combinations treatments had no promoting effect on the photosynthesis of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ and Red limonia seedlings. The duration of illumination and the proportion of red light had a negative impact on the stomatal conductance (G_s), transpiration rate (T_r) and photosynthetic electron transfer rate (ETR) of seedling leaves, as well as the photosynthetic efficiency of the seedlings. **【Conclusion】** The study found that the growth of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ and Red limonia seedlings could be effectively promoted through photoregulation. It is evident that different varieties have specific light quality, light intensity, and photoperiod supplemental light needs. The identification of these differences can provide a theoretical reference for the rapid breeding of seedlings. The RB4:1 and L6 treatments can be used as a reference for the light supplement of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ seedlings, the WR1:1, and L7 treatments can be used as reference parameters for Red limonia seedlings to supplement light. By reasonably supplementing light, the growth of citrus seedlings can be accelerated and the nursery cycle can be

shortened. This study can provide theoretical and practical references for rapid nursery.

Key words: Citrus; LED; Light; Growth and development; Photosynthesis characteristics

茶枝柑 (*Citrus reticulata* ‘chachi’) 又名大红柑、新会柑, 原产于广东新会区, 是道地药材广陈皮的原料, 具有极高的食药价值^[1]。红柠檬 (*Citrus limonia* Osbeck) 原产于华南地区, 适应广、抗病性强, 与大多数柑橘品种嫁接亲和性好, 常用作茶枝柑等广东主栽柑橘品种的砧木。近年来, 柑橘黄龙病等病害在中国南方柑橘产区迅速蔓延, 损失严重。实践证明, 种植柑橘无病毒种苗, 是防止柑橘重大病虫害蔓延的有效方法, 因此, 柑橘无病毒种苗市场需求大。柑橘无病毒种苗培育从砧木播种到嫁接苗出圃, 一般需要 2 年甚至更长时间, 周期长, 效率低。通过改进育苗基质、砧木类型、嫁接方法等措施可以一定程度缩短柑橘育苗周期^[2], 但如何通过光配方提高苗木生长速度, 在柑橘育苗中研究较少。

发光二极管 (LED) 具有节能高效、光质光强可控等优势, 已广泛应用于园艺作物设施栽培上。通过调控植物生长的光环境, 提高幼苗生长速率, 不仅可以缩短育苗周期, 且易于实现工厂化生产和集约化管理, 是培育优质苗木的有效途径之一^[3]。光是植物生长发育的能量和信号来源, 光质、光照强度和光周期是光影响植物生长的三个重要因素。不同波长的光对植物生长具有明显不同的生物学效应, 通过补充不同比例的红蓝光, 可明显提高生菜^[4]、红桔^[5]和越橘^[6]等植物的光合效率和营养生长水平, 促进樱桃^[7]和苹果^[8]等果实品质的提升。生产中在红蓝光中添加一定比例的白光, 不仅可以平衡光环境, 而且白光中的其他光质也会影响植物生长发育^[9]。红蓝光中加入少量白光, 能显著改善番茄幼苗叶片结构, 提高光合效率, 促进植株生物量的积累^[10]。光照强度影响植物的叶片形态、主干分枝、生物量积累和光合速率等性状^[11]。适宜范围的光照强度能有效提高植物光能利用效率, 高光强水平和深度遮阴均不利于云南蓝果树幼苗的生长及光合作用, 适度遮阴有利于幼苗个体发育^[12]。光周期影响植物同化物的生产、积累和分配, 与植物生物量积累直接相关。适当延长光照时间能显著缩短西瓜^[13]的成苗时间、加快樱桃萝卜^[14]和番茄^[15]等植物的生长。相同光质条件下, 青钱柳苗木的株高、茎粗和生物量等指标随光强增加而上升^[16], 在相同光强下, 延长光周期可以提高生菜光合速率, 促进生长^[17], 光质、光强和光周期三个因素相互作用, 共同影响植物的生长与发育。

前人对不同柑橘品种叶片光合特性进行研究, 发现不同品种光合生理参数和光合酶活性存在显著差异^[18]。枳幼苗在红黄蓝 4:1:1 的光质下地上部分快速生长^[19], 红桔幼苗的生长适宜光质为红蓝 1:1^[20]。适宜茶枝柑和红柠檬幼苗生长的补光参数未见报道, 红柠檬是茶枝柑的主要砧木品种, 笔者在本研究中以茶枝柑和红柠檬为试验材料, 通过研究不同光质和光照组合处理对幼苗生长形态和光合特性的影响, 筛选出适宜幼苗生长的光配方参数, 以期对茶枝柑设施化育苗高效补光高提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

试验于广东省农业科学院果树研究所植物生长室中进行, 供试柑橘品种为茶枝柑和红柠檬。不同光质处理试验所用材料为播种 180 d 的茶枝柑和红柠檬实生幼苗, 由于处理前红柠檬幼苗初始高度离光源较近, 故对红

柠檬幼苗进行统一修剪；不同光照组合处理试验所使用的材料为播种 60 d 的茶枝柑和红柠檬实生幼苗。处理前选取高度与茎粗一致的幼苗移栽入盆钵中，每个处理重复 24 株，缓苗 7 d 后进行光照处理。

试验中使用的 LED 灯板和控制系统从杭州光合智能装备有限公司购入，植物培养架顶部安装 LED 灯板，灯板四色光源分别为全光谱白光、红光（660 nm）、蓝光（450 nm）、远红光（740 nm），通过灯光控制程序可以调控光源的光谱比例和光照强度，试验期间各处理间使用遮光布隔开，避免其他光源干扰。

1.2 试验设计

光质：设置 9 个处理，分别是白光（W）、红光（R）、蓝光（B）、白光：红光 1：1（W1R1）、白光：蓝光 1：1（W1B1）、红光：蓝光 4：1（R4B1）、白光：红光：蓝光 2：1：1（W2R1B1）、白光：红光：蓝光 5：4：1（W5R4B1）、白光：红光：蓝光 5：4：1 光照结束后再补照 1h 远红光（W5R4B1FR）。除光质外其余培养条件一致，光照强度 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，光周期 12 h/12 h（昼/夜），培养室温度（ 25 ± 2 ） $^{\circ}\text{C}$ 。

正交试验：在不同光质处理试验结果基础上，以光周期、光质和光强作为 3 个因素，选取 3 个水平，光周期 12 h/12 h、16 h/8 h、18 h/6 h（昼/夜）；光质白光：红光 1：1（W1R1）、白光：红光：蓝光 2：1：1（W2R1B1）、白光：红光：蓝光 1：4：1（W1R4B1）；光强 100、150、200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，进行 3 因素 3 水平正交试验，一共 9 个光照组合（表 1）。以光周期 12 h/12 h（昼/夜）、光质白光（W）、光强 $150 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 组合为对照（CK），除光照外其余培养条件一致。

表 1 L₉（3³）正交试验方案
Table 1 L₉（3³）Orthogonal test design scheme

处理 Treatment	A（光周期） A（Photoperiod） /（light/dark）	B（光质） B（Light quality）	C（光强） C（Light intensity） /（ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）
CK	-(12/12)	-(W)	-(150)
L1	1(12/12)	1(W1R1)	1(100)
L2	1(12/12)	2(W2R1B1)	2(150)
L3	1(12/12)	3(W1R4B1)	3(200)
L4	2(16/8)	1(W1R1)	2(150)
L5	2(16/8)	2(W2R1B1)	3(200)
L6	2(16/8)	3(W1R4B1)	1(100)
L7	3(18/6)	1(W1R1)	3(200)
L8	3(18/6)	2(W2R1B1)	1(100)
L9	3(18/6)	3(W1R4B1)	2(150)

1.3 测定方法

植物经过光照处理 60 d 时，每个处理随机选取 6 株幼苗，用直尺测量幼苗株高、游标卡尺测量叶下端茎粗。清洗植株，待表面水分蒸干后，用电子天平称量植株叶片、茎、根的鲜质量，记录单株叶片数量，扫描叶片，通过 ImageJ 计算像素得到单株总叶面积，将植株各部分放入烘箱烘干至恒重，称量叶片、茎、根的干质量，计算得到植株鲜质量、干质量、比叶重。叶绿素含量测定：每个处理随机选取 6 株幼苗，取基部以上第 5~6 枚成熟叶（位于植株中上部，能完整接受到光照），使用 95%乙醇浸提至叶片发白，取上清用酶标仪测定

663 nm 和 645 nm 处吸光度，计算得到叶绿素 a (Chl a)、叶绿素 b (Chl b)、总叶绿素 (Chl) 的含量和叶绿素 a/b 比值 (Chl a/b)。光合参数测定：每个处理随机选取 5 株幼苗，使用 LI-6800 便携式光合测定仪 (LI-COR Inc. USA)，测定基部以上第 5 枚成熟叶的净光合速率 (P_n)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)，测量时光强设置与各处理光强一致。叶绿素荧光参数测定：每个处理随机选取 5 株幼苗，采用 LI-6800 便携式光合测定仪，测定基部以上第 5 枚叶的叶绿素荧光参数。将植株暗处理一个晚上，测量时关闭作用光，设置矩形闪光，脉冲光 $8000 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ，测定 F_o 和 F_m ，植物在光下适应 1 h 后，打开作用光，测定 F_o' 、 F_m' 和 F_s ，计算得到光系统 II 实际光合效率 (Φ_{PSII})、电子传递速率 (ETR)、光化学淬灭系数 (qP) 和非光化学淬灭系数 (NPQ)。

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据处理和绘图，SPSS 27.0 进行参数的差异显著性比较。综合评价采用模糊数学隶属函数值的方法计算^[21]，

$$\chi_{(ij)} = (\chi_{ij} - \chi_{jmin}) / (\chi_{jmax} - \chi_{jmin})$$

式中， $\chi_{(ij)}$ 表示 i 种类 j 指标的隶属值； χ_{ij} 表示 i 种类 j 指标的测定值； χ_{jmax} ， χ_{jmin} 分别为指标的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 不同光质对茶枝柑和红柠檬幼苗生长的影响

以白光为对照，设置单色红光、单色蓝光和不同比例混合光分别处理茶枝柑和红柠檬幼苗，结果如表 2 所示。与白光处理相比，单色红光和蓝光显著降低茶枝柑幼苗株高，说明单色红光和蓝光不利于茶枝柑幼苗植株生长。复合光质处理中，W1B1 处理下茶枝柑幼苗株高、叶面积、干质量显著降低，而 W1R1、R4B1、W5R4B1 3 种处理则显著提高幼苗的株高、叶片数和叶面积，W2R1B1 处理显著促进茶枝柑幼苗茎粗增长。除了 W1B1 处理，其他光质组合均可以促进幼苗生长，其中 R4B1 处理茶枝柑幼苗株高、叶片数、叶面积、干质量数值均达到最大；在红柠檬处理试验中，与白光处理相比，单色红光和蓝光均促进红柠檬幼苗的生长，红光处理显著促进幼苗株高、叶面积和鲜质量增长，蓝光处理促进幼苗株高、茎粗、叶片数量、叶面积、干质量和鲜质量增长，这与茶枝柑在单色光处理下生长受到抑制不同，表明不同柑橘品种对光质的生长响应存在差异。复合光处理中，各处理均可显著促进红柠檬幼苗株高增长，其中 W2R1B1 处理后株高数值最大，高于对照 23.80%，而 W1R1、W1B1、W2R1B1、W5R4B1FR 4 组处理尤显著促进红柠檬幼苗茎粗增长，其中 W1R1 处理下茎粗值最大，高于对照 23.64%。对于生物量，除了 R4B1 处理与白光处理无显著变化，其它组合光均显著促进幼苗鲜质量和干质量增长，其中 W1R1 处理下红柠檬幼苗生物量最大。总体来看，茶枝柑在 R4B1 光质条件下生长量最大，红柠檬幼苗在 W1R1 光质条件下生长量最大。

表 2 不同光质对茶枝柑和红柠檬幼苗生长形态及生物量的影响

Table 2 Effects of different light quality on growth morphology and biomass of *Citrus reticulata* ‘chachi’ and red limonia seedlings

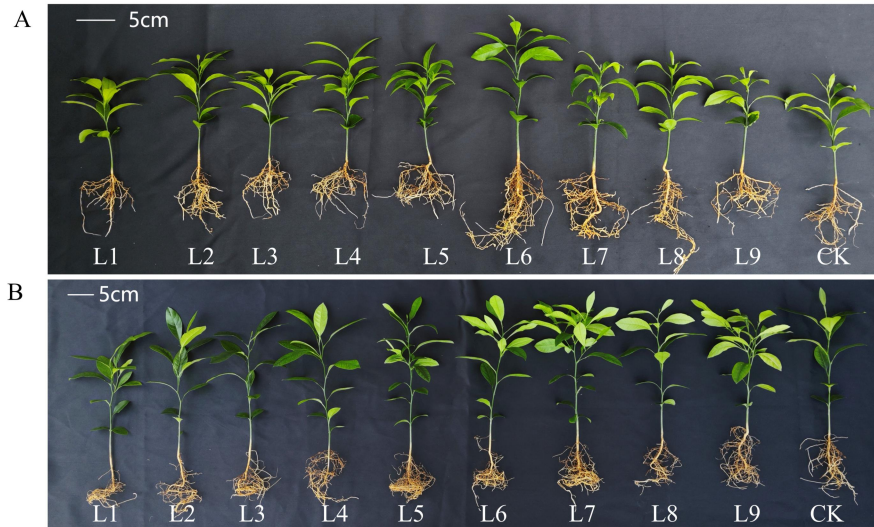
品种 Cultivar	处理 Treatment	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /mm	叶片数 Leaf number	叶面积 Leaf area /cm ²	比叶重 Leaf mass area / (g·m ⁻²)	鲜质量 Fresh weight/g	干质量 Dry weight/g
茶枝柑 <i>Citrus reticulata</i> 'chachi'	W	33.00±1.63 d	2.89±0.17 bc	24.25±1.50 cd	217.38±3.89 c	52.41±5.53 ab	7.70±0.45 bc	2.45±0.20 bc
	R	31.33±2.86 e	3.04±0.21 abc	23.00±0.00 d	228.02±24.23 bc	46.45±2.68 b	7.62±0.74 bc	2.31±0.18 cd
	B	25.45±1.67 f	2.74±0.18 c	23.00±1.73 d	147.90±12.46 d	53.33±2.53 ab	6.87±0.88 c	1.83±0.25 e
	W1R1	38.17±1.61 c	3.11±0.12 ab	28.33±1.15 b	275.97±19.57 a	48.45±1.89 b	9.46±0.16 a	2.53±0.14 bc
	W1B1	29.00±1.22 e	2.90±0.21 abc	25.75±1.71 bcd	171.55±14.03 d	51.42±2.23 ab	6.99±1.12 c	2.00±0.16 de
	R4B1	43.25±3.95 a	3.23±0.31 ab	32.00±4.36 a	292.15±14.93 a	52.25±1.49 ab	9.32±1.66 a	3.42±0.44 a
	W2R1B1	37.78±0.48 c	3.23±0.15 a	28.00±1.15 b	231.06±10.55 bc	52.72±5.99 ab	8.95±0.61 ab	2.71±0.16 bc
	W5R4B1	39.43±0.98 b	3.07±0.03 ab	32.00±1.00 a	247.88±21.80 b	60.49±12.47 a	8.85±0.48 ab	2.86±0.36 b
	W5R4B1FR	34.88±3.37 d	2.95±0.22 abc	27.00±3.00 bc	230.67±21.52 bc	52.13±1.53 ab	8.24±0.06 abc	2.56±0.06 bc
红柠檬 <i>Red limonia</i>	W	20.92±0.95 c	3.30±0.15 c	14.60±1.14 b	121.96±10.97 b	60.30±8.43 a	5.20±0.38 f	1.58±0.11 d
	R	24.16±0.90 ab	3.64±0.50 bc	15.00±2.00 b	158.06±14.42 a	61.58±5.62 a	6.03±0.53 de	2.00±0.38 cd
	B	24.76±1.31 ab	3.69±0.17 b	18.60±1.67 a	160.00±15.58 a	70.21±9.19 a	7.63±0.74 bc	2.35±0.27 ab
	W1R1	25.22±1.56 ab	4.08±0.21 a	15.60±2.51 ab	173.80±27.69 a	65.63±10.52 a	8.97±0.79 a	2.80±0.26 a
	W1B1	25.04±2.16 ab	3.84±0.18 ab	16.60±2.30 ab	167.91±16.89 a	65.23±3.31 a	7.74±0.77 b	2.35±0.29 ab
	R4B1	23.00±1.42 b	3.49±0.37 bc	16.60±2.88 ab	146.40±35.65 ab	63.62±6.12 a	5.92±0.91 ef	2.05±0.51 cd
	W2R1B1	25.90±2.47 a	3.69±0.29 b	16.60±1.95 ab	167.96±29.05 a	70.26±17.09 a	8.71±0.22 a	2.58±0.42 ab
	W5R4B1	23.24±1.05 b	3.54±0.35 bc	16.25±1.26 ab	161.23±32.43 a	60.68±4.00 a	6.69±0.66 cde	2.24±0.49 bc
	W5R4B1FR	24.16±1.40 ab	3.67±0.08 b	15.75±1.71 ab	150.13±21.84 ab	65.20±4.11 a	6.94±0.44 bcd	2.16±0.21 bc

注：表中数据（平均值±标准差）不同字母表示差异显著（ $p<0.05$ ）。下同。

Note: The values (mean ± standard deviation) different letters are significant difference level ($p<0.05$). The same below.

2.2 不同光照处理对茶枝柑和红柠檬幼苗生长的影响

株高和茎粗是衡量柑橘苗木是否达到嫁接粗度和出圃标准的重要指标。不同光照组合处理对茶枝柑和红柠檬幼苗的株高、茎粗、叶片数量、叶面积等指标均产生了明显影响（图 1，表 3）。由表 3 可知，在茶枝柑幼苗中，L6（光周期 16 h/8 h，光质白红蓝 1:4:1，光强 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）处理下幼苗株高显著增长，L4、L6、L7、L8、L9 均能显著促进茎粗的生长，其中 L7（光周期 18 h/6 h，光质白红 1:1，光强 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）处理下茎粗值最大，高于对照 30.46%。各处理对茶枝柑幼苗叶片的数量和面积影响不大。L4、L5、L7、L8 处理下叶片的比叶重显著增大。对于生物量，除了 L1、L2、L3 处理之外，其它处理均能促进幼苗生物量的积累，L6、L7、L8 处理显著提高幼苗鲜质量，L4、L5、L6、L7、L8、L9 显著提高幼苗干质量；在红柠檬幼苗处理试验中，L1、L3 处理下幼苗株高降低，其它处理间差异不显著。对于茎粗，除了 L1、L6 处理外，其余组合均显著促进茎粗生长，其中 L7 处理下茎粗值达到最大，高于对照 26.67%。对于叶片生长，L7 处理下叶片数显著增多，各处理叶面积与对照相比差异不显著，L4、L5、L8、L9 显著提高了叶片的比叶重。L7、L9 处理使幼苗干质量显著增大。总体来看，茶枝柑幼苗在 L6 处理下株高和鲜质量值最大，在 L7 处理下茎粗和干质量值最大；红柠檬幼苗在 L7 处理下株高、茎粗、叶片数、叶面积、鲜质量值达到最大，适当延长光照时间、提高红光比例可有效促进幼苗营养生长。



A. 茶枝柑; B. 红柠檬

A. *Citrus reticulata* 'chachi'; B. Red limonia

图 1 不同光照处理下对茶枝柑和红柠檬幼苗生长情况

Fig. 1 Growth of *Citrus reticulata* 'chachi' and Red limonia seedlings under different light combinations

表 3 不同光照处理对茶枝柑和红柠檬幼苗生长形态及生物量的影响

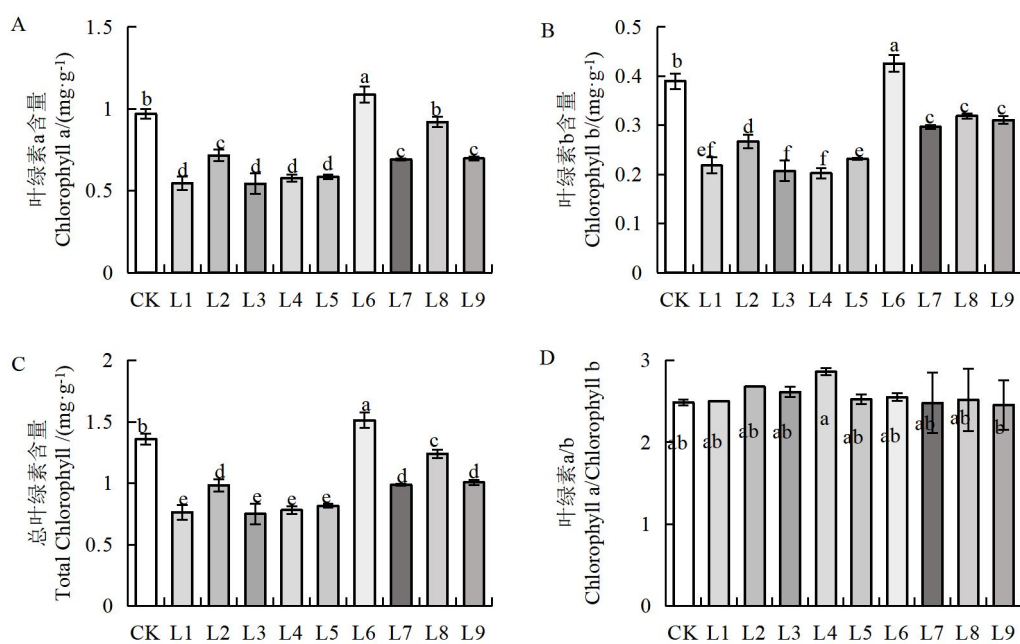
Table 3 Effects of different light combinations on growth morphology and biomass of *Citrus reticulata* 'chachi' and Red limonia seedlings

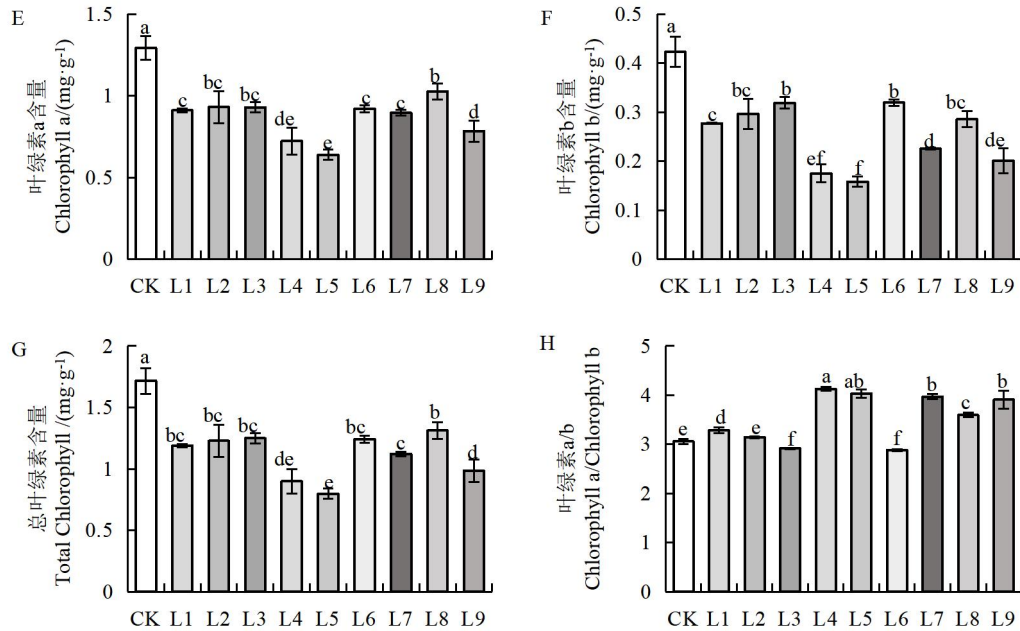
品种 Cultivar	处理 Treatment	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /mm	叶片数 Leaf number	叶面积 Leaf area /cm ²	比叶重 Leaf area mass / (g·m ⁻²)	鲜质量 Fresh weight/g	干质量 Dry weight/g
茶枝柑 <i>Citrus</i> 'chachi'	CK	12.26±1.18 b	1.74±0.14 e	13.00±1.79 abc	65.68±12.95 ab	49.97±0.40 d	2.43±0.33 cd	0.58±0.08 e
	L1	10.15±1.15 c	1.75±0.09 e	11.83±3.49 c	52.57±15.60 b	55.63±1.31 cd	2.05±0.38 d	0.50±0.07 e
	L2	11.16±1.36 bc	1.78±0.09 de	13.83±2.79 abc	61.27±14.02 ab	55.87±0.27 cd	2.55±0.55 bcd	0.63±0.12 de
	L3	9.84±0.90 c	1.73±0.07 e	14.83±2.64 abc	59.60±6.04 ab	48.11±0.34 d	2.20±0.18 d	0.51±0.03 e
	L4	12.17±0.92 b	2.08±0.21 b	16.80±3.63 a	70.32±15.26 ab	66.27±1.13 bc	3.10±0.35 abc	0.84±0.03 bc
	L5	11.36±1.64 bc	1.83±0.13 cde	16.33±2.50 ab	57.39±11.33 ab	81.85±2.68 a	2.69±0.56 abcd	0.77±0.05 cd
	L6	13.84±1.62 a	2.02±0.18 b	15.50±3.27 abc	73.47±5.30 a	59.18±0.51 cd	3.42±0.67 a	0.94±0.16 ab
	L7	12.35±0.51 b	2.27±0.17 a	13.50±2.43 abc	57.13±8.56 ab	76.57±0.92 ab	3.39±0.44 a	1.01±0.18 a
	L8	11.92±1.17 b	1.93±0.12 bed	15.50±2.51 abc	67.45±16.15 ab	66.48±0.56 bc	3.26±0.73 ab	0.86±0.20 abc
	L9	11.38±1.54 bc	1.99±0.10 bc	12.67±4.41 bc	61.92±21.23 ab	66.65±1.03 bc	2.97±1.08 abc	0.81±0.17 bc
红柠檬 Red limonia	CK	21.16±2.10 a	2.25±0.20 d	11.83±1.17 bcd	121.80±8.39 ab	46.02±0.55 d	4.72±0.73 ab	1.30±0.24 cd
	L1	17.55±2.76 c	2.43±0.22 cd	10.67±1.86 d	96.54±17.18 b	51.29±0.42 cd	3.72±0.46 b	1.00±0.27 d
	L2	19.76±2.13 ab	2.47±0.21 c	11.67±1.03 cd	124.63±26.82 ab	53.48±0.43 cd	4.66±0.96 ab	1.35±0.35 bcd
	L3	18.13±3.76 bc	2.64±0.26 bc	11.33±1.63 d	134.72±16.92 ab	52.83±0.24 cd	5.35±1.14 a	1.58±0.33 abc
	L4	21.15±1.34 a	2.63±0.28 bc	14.83±2.71 abcd	140.05±24.19 ab	57.37±0.68 bc	5.89±0.84 a	1.76±0.30 abc
	L5	20.58±2.27 a	2.81±0.25 ab	15.67±4.27 abcd	104.02±15.19 b	66.05±0.41 a	5.54±1.55 a	1.74±0.40 abc
	L6	20.48±1.59 a	2.45±0.15 cd	12.33±2.50	135.03±35.07	50.69±0.40	4.94±0.73 ab	1.50±0.18

			abcd	ab	cd		abc
L7	21.44±1.74 a	2.85±0.26 a	17.00±5.40 a	152.81±42.89 a	53.45±0.80	6.26±1.32 a	1.82±0.41 ab
L8	19.88±2.60 ab	2.48±0.16 c	16.50±6.28 abc	126.89±39.88	58.05±0.33	5.16±1.65 ab	1.53±0.43
L9	19.55±2.38 abc	2.84±0.30 a	16.83±6.11 ab	131.66±48.92 ab	63.76±1.20 ab	6.11±1.92 a	1.96±0.59 a

2.3 不同光照处理对茶枝柑和红柠檬幼苗叶绿素含量的影响

对不同光照处理后对茶枝柑和红柠檬幼苗叶片叶绿素的含量进行分析，从图 2-A~D 可知，L6 处理显著提高茶枝柑幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 以及总叶绿素含量，其他处理下叶绿素含量降低，叶绿素 a/b 比值无显著变化；从图 2-E~H 中可知，与对照相比，所有处理均不利于红柠檬叶绿素的合成，使叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素含量均下降，L3、L6 处理下叶绿素 a/b 比值降低。总体来看，相同光周期下，降低光照强度低或加入蓝光，有利于茶枝柑和红柠檬叶片叶绿素含量增加。





A~D. 茶枝柑叶绿素含量；E~H. 红柠檬叶绿素含量。不同小写字母代表差异显著 ($p < 0.05$)。
A~D. Chlorophyll contents of *Citrus reticulata* 'chachi'; E~H. Chlorophyll contents of Red limonia. Different small letters represent significant difference ($p < 0.05$).

图2 不同光照处理对茶枝柑和红柠檬幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 2 Effects of different light combinations on Chlorophyll contents of *Citrus reticulata* 'chachi' and Red limonia seedlings

2.4 不同光照处理对茶枝柑和红柠檬幼苗叶片光合气体交换的影响

对不同光照处理后叶片光合气体交换情况进行分析，结果如表4所示，茶枝柑幼苗在L1处理下 P_n 显著降低，其余处理与对照相比无显著差异；L1、L7、L8、L9处理下， G_s 、 T_r 显著降低；红柠檬幼苗中，与CK相比，除了L2处理外，其余处理叶片 P_n 都降低，L4、L6、L7、L9处理下 G_s 显著降低，L1、L2、L4、L6、L7、L8、L9处理下 T_r 下降， C_i 与对照相比变化不明显。在茶枝柑和红柠檬幼苗中都发现，相同光周期下，光质W1R1的组合 G_s 、 T_r 最低，并且随着光照时间延长，18h光照时长下叶片 G_s 、 T_r 降低。结果表明所有光组合处理均不能显著促进幼苗光合速率，并且部分组合下气体交换受阻，光照时间长、红光比例高的组合下茶枝柑和红柠檬叶片气孔开放受阻，进而影响 P_n 。

表4 不同光照处理对茶枝柑和红柠檬幼苗叶片光合气体交换参数的影响

Table 4 Effects of different light combinations on the gas exchange parameters of *Citrus reticulata* 'chachi' and Red limonia seedlings

品种 Cultivars	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 / ($\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 T_r / ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 C_i / ($\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$)
茶枝柑	CK	2.85±0.69 ab	0.10±0.02 a	1.45±0.31 a	328.16±56.24 a
<i>Citrus reticulata</i> 'chachi'	L1	1.34±0.24 c	0.03±0.01 d	0.54±0.09 c	318.31±28.78 a
	L2	3.56±1.18 a	0.07±0.01 abc	1.08±0.13 abc	285.79±27.61 a
	L3	2.48±0.44 abc	0.07±0.03 abcd	1.03±0.43 abc	299.23±17.66 a
	L4	2.11±0.70 bc	0.06±0.03 abcd	0.85±0.43 bc	303.57±21.42 a
	L5	2.53±0.97 abc	0.07±0.03 abcd	0.94±0.39 abc	294.39±31.41 a

	L6	2.90±0.87 ab	0.10±0.05 ab	1.30±0.62 ab	309.87±14.41 a
	L7	1.91±0.54 bc	0.04±0.01 cd	0.60±0.21 c	282.63±32.01 a
	L8	2.24±0.19 bc	0.06±0.02 bcd	0.82±0.38 bc	311.62±46.98 a
	L9	1.60±1.29 bc	0.05±0.01 cd	0.75±0.20 bc	332.10±50.52 a
红柠檬	CK	4.52±0.27 a	0.09±0.01 abc	1.82±0.63 a	316.02±47.82 ab
Red limonia	L1	2.12±0.19 cd	0.08±0.03 bcd	1.11±0.35 bc	343.72±25.04 a
	L2	4.30±0.56 a	0.10±0.01 abc	1.34±0.12 b	319.2±19.20 ab
	L3	3.28±1.01 b	0.11±0.01 a	1.51±0.19 ab	343.16±12.85 a
	L4	2.05±0.58 d	0.04±0.02 f	0.51±0.25 d	283.84±10.07 b
	L5	3.10±0.64 bc	0.10±0.02 ab	1.41±0.23 ab	343.59±71.18 a
	L6	2.46±0.22 bcd	0.05±0.01 ef	0.54±0.14 d	306.24±16.24 ab
	L7	2.26±1.08 bcd	0.04±0.01 ef	0.55±0.13d	308.50±31.75 ab
	L8	2.27±0.21 bcd	0.07±0.01 cde	0.84±0.14 cd	344.31±33.04 a
	L9	3.17±0.61 b	0.06±0.02 def	0.71±0.28 cd	300.66±14.23 ab

2.5 不同光照处理对茶枝柑和红柠檬幼苗荧光特性的影响

不同光照处理后茶枝柑和红柠檬幼苗叶绿素荧光参数的变化如表 5 所示，L6 处理显著提高茶枝柑叶片的光系统II实际光合效率 (Φ_{PSII})，除 L2 外其他处理下 Φ_{PSII} 降低。L1、L7、L8、L9 处理后电子传递速率 (ETR) 显著降低，光合电子传递效率受到影响。L3、L5、L7、L9 处理下 qP 降低，NPQ 与对照相比差异不显著；在红柠檬幼苗中，除了 L2 组合，其余处理下 Φ_{PSII} 降低，ETR、 qP 除 L2 处理外都下降，NPQ 各处理间无明显差异，光化学淬灭系数 (qP) 反应光系统II吸收的能量中用于光化学反应的比例，提高光强和红光比例降低红柠檬幼苗光化学淬灭系数。综合来看，L6 处理对茶枝柑幼苗光合活性有一定促进作用，其余大部分处理都使茶枝柑和红柠檬幼苗光系统活性下降。

表 5 不同光照处理对茶枝柑和红柠檬幼苗荧光参数的影响

Table 5 Effects of different light combinations on chlorophyll fluorescence of *Citrus reticulata* 'chachi' and Red limonia seedlings

品种 Cultivars	处理 Treatment	光系统II实际光合效率 Φ_{PSII}	电子传递速率 ETR	光化学淬灭系数 qP	非光化学淬灭系数 NPQ
茶枝柑 <i>Citrus reticulata</i> 'chachi'	CK	0.43±0.11 bc	27.43±7.17 ab	0.79±0.08 ab	0.33±0.04 abcd
	L1	0.16±0.05 f	7.91±3.96 e	0.70±0.03 bc	0.39±0.16 ab
	L2	0.51±0.14 ab	32.34±8.92 a	0.85±0.05 a	0.25±0.03 bcd
	L3	0.25±0.05 ef	20.88±4.31 bcd	0.67±0.04 c	0.47±0.10 a
	L4	0.32±0.08 cde	20.38±4.90 bcd	0.72±0.07 bc	0.21±0.04 cd
	L5	0.29±0.08 de	24.07±6.68 bc	0.68±0.08 c	0.37±0.17 abc
	L6	0.56±0.10 a	23.49±4.41 bc	0.85±0.08 a	0.21±0.06 cd
	L7	0.23±0.07 ef	19.33±5.78 cd	0.65±0.04 c	0.34±0.16 abcd
	L8	0.39±0.04 cd	16.38±1.50 cd	0.70±0.06 bc	0.19±0.05 d
	L9	0.22±0.02 ef	13.85±1.57 de	0.64±0.05 c	0.19±0.03 d
红柠檬 Red limonia	CK	0.50±0.04 a	31.59±2.48 a	0.78±0.02 a	0.22±0.05 ab
	L1	0.38±0.12 bc	15.93±4.96 d	0.71±0.27 a	0.25±0.13 ab
	L2	0.50±0.05 a	31.70±2.95 a	0.79±0.03 a	0.24±0.04 ab
	L3	0.37±0.07 bc	31.08±5.96 a	0.62±0.11 ab	0.25±0.03 ab
	L4	0.27±0.10 cd	17.10±6.55 d	0.47±0.24 bc	0.24±0.04 ab
	L5	0.33±0.07 c	28.00±5.97 ab	0.64±0.17 ab	0.32±0.14 a

L6	0.46±0.13 ab	19.53±5.57 cd	0.76±0.07 a	0.18±0.07 b
L7	0.20±0.06 d	16.76±5.00 d	0.36±0.10 c	0.21±0.04 ab
L8	0.45±0.09 ab	19.05±3.69 cd	0.74±0.11 a	0.17±0.05 b
L9	0.38±0.07 bc	23.92±4.20 bc	0.69±0.08 ab	0.21±0.10 ab

2.6 不同光照处理隶属函数法综合评价

为了探明不同处理对茶枝柑和红柠檬幼苗的综合影响，对茶枝柑和红柠檬幼苗的9个生长指标进行隶属函数分析。由表6可知，茶枝柑在L6处理下平均隶属函数值最高，为0.87，其次为L8、L4、L7，在L1处理下平均隶属函数值最低，为0.01；如表7所示，红柠檬在L7处理下平均隶属函数值最高，为0.70，其次是L9，在L1处理下最低，为0.14。根据平均隶属函数值排序可得，L6处理下茶枝柑幼苗生长综合性状最优，L7处理下红柠檬幼苗生长综合性状最优。

表6 茶枝柑幼苗的隶属函数法综合评价
Table 6 Comprehensive evaluation of *Citrus reticulata* 'chachi'

处理 Treatment	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	叶片数 Leaf number	叶面积 Leaf area	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	叶绿素 Chl	净光合速率 P_n	光系统II实际光合效率 Φ_{PSII}	平均隶属函数值	排序
CK	0.60	0.02	0.23	0.63	0.28	0.16	0.80	0.68	0.69	0.45	5
L1	0.08	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	10
L2	0.33	0.09	0.40	0.42	0.37	0.25	0.31	1.00	0.88	0.45	6
L3	0.00	0.00	0.60	0.34	0.11	0.02	0.00	0.51	0.21	0.20	9
L4	0.58	0.64	1.00	0.85	0.76	0.67	0.04	0.35	0.40	0.59	3
L5	0.38	0.18	0.91	0.23	0.47	0.53	0.09	0.54	0.31	0.40	7
L6	1.00	0.54	0.74	1.00	1.00	0.86	1.00	0.70	1.00	0.87	1
L7	0.63	1.00	0.34	0.22	0.98	1.00	0.31	0.26	0.16	0.54	4
L8	0.52	0.37	0.74	0.71	0.88	0.72	0.64	0.41	0.57	0.62	2
L9	0.38	0.48	0.17	0.45	0.67	0.60	0.34	0.12	0.14	0.37	8

表7 红柠檬幼苗的隶属函数法综合评价
Table 7 Comprehensive evaluation of Red limonia

处理 Treatment	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	叶片数 Leaf number	叶面积 Leaf area	鲜质量 Fresh weight	干质量 Dry weight	叶绿素 Chl	净光合速率 P_n	光系统II实际光合效率 Φ_{PSII}	平均隶属函数值	排序
CK	0.93	0.00	0.18	0.45	0.39	0.31	1.00	1.00	0.99	0.58	3
L1	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.43	0.03	0.59	0.14	10
L2	0.57	0.37	0.16	0.50	0.37	0.37	0.47	0.91	1.00	0.52	7
L3	0.15	0.65	0.11	0.68	0.64	0.61	0.49	0.50	0.56	0.48	9
L4	0.93	0.63	0.66	0.77	0.86	0.79	0.11	0.00	0.24	0.55	5

L5	0.78	0.93	0.79	0.13	0.72	0.77	0.00	0.43	0.44	0.55	6
L6	0.75	0.33	0.26	0.68	0.48	0.52	0.48	0.17	0.87	0.50	8
L7	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.86	0.35	0.08	0.00	0.70	1
L8	0.60	0.38	0.92	0.54	0.57	0.56	0.56	0.09	0.84	0.56	4
L9	0.51	0.98	0.97	0.62	0.94	1.00	0.20	0.45	0.59	0.69	2

3 讨论

光质是植物生长发育的重要调控因子，红光有利于细胞伸长、增加株高、叶面积、地上部分生物量，蓝光通常会抑制细胞的分化和伸长，从而缩短植株节间、减少叶面积^[22]。笔者在本试验中用不同光质处理后，发现红光下茶枝柑和红柠檬幼苗叶片扩张，面积增大；蓝光的影响在不同柑橘品种中存在差异，蓝光和蓝白 1:1 处理使茶枝柑幼苗的株高、叶面积显著降低，却有利于红柠檬幼苗生长。前人的研究发现蓝光可以促进红柠檬幼苗的株高和茎粗生长^[23]，与本研究结果一致，表明红柠檬幼苗可以适应较高比例的蓝光环境。对于大多数植物，单纯的红光或蓝光通常不能满足生长需要，不同比例复合光可促进植物的生长，红蓝白 1:0.5:1 可促进番茄光合色素和生物量的积累^[24]，红蓝 5:1 显著促进葡萄试管苗的营养生长^[25]。本试验结果表明，白红蓝 2:1:1 显著促进茶枝柑幼苗茎粗和红柠檬幼苗株高的生长，红蓝 4:1 下茶枝柑幼苗株高、叶片数、叶面积达到最大，白红 1:1 处理下红柠檬幼苗茎粗、叶面积、干质量鲜质量显著提高且数值达到最大。结果表明，在复合光中适当提高红光比例，能显著促进茶枝柑和红柠檬幼苗的营养生长。

光质、光强、光周期共同影响植物的生长发育，最佳光谱下需要的光强和光周期范围需要系统研究。为了筛选适合茶枝柑和红柠檬植株生长的最佳光照组合。笔者在本研究中采用正交试验设计，研究 3 个变量对柑橘幼苗植株生长和光合特性的影响。结果表明，光周期是茶枝柑和红柠檬幼苗生长量的重要影响因素，光照时间 16 h、18 h 的组合均能有效促进幼苗生长。光周期影响植物叶片能够进行光合作用的时间，与植物光合产物的积累直接相关，适当延长光周期，可以促进植株生长代谢和生理过程，促进生物量的积累^[26]。长日照和短日照植物在长日照条件下都可以具有更高的生长速率^[27]，番杏各农艺性状随光照时间的增加而增长^[28]，延长光照时间能提高甜椒幼苗的生长速率、茎粗和根冠比^[29]，与本研究结果一致。光强和光周期共同影响植物接收到的光能总量，不同植物对两者的响应存在差异^[30]。茶枝柑和红柠檬在 L1 处理下均生长最慢，可能是因为光周期 12 h/12 h 和光强 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 组合下，日累积光照量不能满足生长所需，形成的同化力不足，抑制幼苗生长。而相同光强下，适当延长光照时间使日累计光照量进一步增加，同时缓解弱光带来的环境胁迫，从而促进柑橘幼苗茎叶的生长，提高生物量积累。

光合作用是植物生长发育过程中有机物积累的基础，不同光通过影响植物光合色素含量、光合气体交换、光合系统的性能等进而影响植物的光合效率。叶绿素与叶绿体类囊体薄膜中的补光天线蛋白结合，负责光能的捕获、传递和转换，光环境直接影响着植物叶绿素的含量和组成^[31]。在本研究中，当光周期一致时，光照强度低的组合处理叶绿素含量更高，因为弱光条件下，植物通过降低比叶重、提高单位质量叶绿素含量以增加对

光能的吸收。CO₂通过气孔进入植物细胞，为光合碳同化提供原料，而气孔开放受保卫细胞中钾离子和可溶性渗透物调控，蓝光可以通过调节细胞内渗透压，促使气孔快速打开，加入蓝光组份有利于提高气孔导度^[32]。在红光基础上添加蓝光可有效提高生菜叶片的光合性能，并且随着蓝光比例的增加 G_s 和 P_n 增大^[33]。笔者在本研究中发现，同样光周期的条件下，光质为白红 1: 1 的处理下茶枝柑和红柠檬幼苗叶片的 G_s 和 T_r 都低于其他处理，缺少蓝光抑制气孔开放，进而使叶片 P_n 降低。光能过剩也会引起柑橘光合作用的下调^[34]，高温高光抑制使温州蜜柑叶片电子传递和光化学效率下降^[35]。光照时间延长至 18 h 时，茶枝柑及红柠檬幼苗 G_s 、 T_r 、ETR 降低，长时间光照使幼苗气孔性能和电子传递能力下降。

运用综合分析评价可以全面客观的反应幼苗总体生长状况，隶属函数综合分析评价结果显示，红柠檬在 L7（光周期 18 h/6 h，光质白红 1: 1，光强 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）组合下表现最优，植株株高、茎粗、叶面积、鲜质量均达到最高。草莓植株在光强 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、光质红蓝 7: 3、光周期 16 h/8 h 光照/黑暗下株高、根长、芽鲜质量和干质量、叶绿素 a、总叶绿素/类胡萝卜素含量以及大多数植物产量参数最高^[36]，与本研究结果相似，高红光成分的光质、高光照强度和长时间的光照使植物生长量达到最大。而茶枝柑的最优组合是 L6（光周期 16 h/8 h，光质白红蓝 1: 4: 1，光强 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ），与红柠檬生长适宜范围不同，相比红柠檬，茶枝柑幼苗更适宜在中等光照时长和低光强下组合下生长，L6 组合能够提高茶枝柑幼苗叶绿素含量和光合系统活性，促进幼苗光合效率，进而促进幼苗同化物质积累。本研究中部分处理下幼苗光合受到抑制，但生长没有受限，可能由于光对植物光合产物积累的影响表现在质量和数量上，光质、光强、光周期共同影响植株光能利用效率和能够利用的光能总量。延长光照时间、提高红光比例，虽然降低了茶枝柑和红柠檬幼苗单位面积净光合速率，但促进了植株叶片数量和叶面积的增长。叶片是植物进行光合作用的主要器官，叶片的扩张使植物能够捕获更多的光能，同时随着光照时间延长植物日照积累量增加，进而提高光合产物总量，促进营养生长。

4 结论

通过合理的光配方处理，可有效促进柑橘幼苗生长。本试验结果表明，适宜茶枝柑幼苗生长的光质是红蓝 4:1，适宜红柠檬幼苗生长的光质是白红 1: 1。通过隶属函数综合分析表明，不同组合光中，茶枝柑幼苗在 L6 光照组合处理（光周期 16 h/8 h 昼/夜，光质白红蓝 1: 4: 1，光强 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）下综合生长情况最优，红柠檬幼苗在 L7 光照组合（光周期 18 h/6 h 昼/夜，光质白红 1: 1，光强 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ）条件下综合生长情况最优，可以作为茶枝柑和红柠檬培育壮苗的补光参数。

参考文献 References:

- [1] LIANG S J, ZHANG J B, LIU Y F, WEN Z J, LIU X X, DANG F L, XIE T X, WANG J X, WANG Z Q, WU H. Study on flavonoids and bioactivity features of pericarp of *Citrus reticulata* ‘Chachi’ at different harvest periods[J]. *Plants*, 2022, 11(23): 3390.
- [2] 郭文武, 叶俊丽, 邓秀新. 新中国果树科学研究 70 年: 柑橘[J]. *果树学报*, 2019, 36(10): 1264-1272.
GUO Wenwu, YE Junli, DENG Xiuxin. Fruit scientific research in New China in the past 70 years: *Citrus*[J]. *Journal of Fruit Science*, 2019, 36(10): 1264-1272.

- [3] 刘文科. LED 植物工厂光质生物学研究与应用现状[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(10): 9-14.
- LIU Wenke. Research on spectral biology of plant factory with LED lighting and application status[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(10): 9-14.
- [4] BIAN Z H, YANG Q C, LI T, CHENG R F, BARNETT Y, LU C G. Study of the beneficial effects of green light on lettuce grown under short-term continuous red and blue light-emitting diodes[J]. *Physiologia Plantarum*, 2018, 164(2): 226-240.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 李都岳, 吴延军. 补光对设施栽培樱桃果实成熟和糖分积累的影响[J]. 果树学报, 2023, 40(10): 2183-2194.
- LI Duyue, WU Yanjun. Effects of supplementary light on ripening and sugar accumulation of cherry under protected cultivation[J]. *Journal of Fruit Science*, 2023, 40(10): 2183-2194.
- [8] 王竞, 唐雪东, 程存刚, 周江涛, 陈艳辉, 李鑫, 张艳珍, 刘炳含. 不同光质补光对富士苹果果实品质的影响[J]. 果树学报, 2024, 41(3): 459-469.
- WANG Jing, TANG Xuedong, CHENG Cungang, ZHOU Jiangtao, CHEN Yanhui, LI Xin, ZHANG Yanzhen, LIU Bingham. Effects of light quality on Fuji apple fruit quality[J]. *Journal of Fruit Science*, 2024, 41(3): 459-469.
- [9] PARK Y, RUNKLE E S. Spectral effects of light-emitting diodes on plant growth, visual color quality, and photosynthetic photon efficacy: White versus blue plus red radiation[J]. *PLoS One*, 2018, 13(8): e0202386.
- [10] 文莲莲, 李岩, 秦利杰, 周鑫, 倪秀男, 刘淑侠, 焦娟, 魏珉. 白光与红蓝光比例对番茄壮苗及光合特性的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(7): 1223-1232.
- WEN Lianlian, LI Yan, QIN Lijie, ZHOU Xin, NI Xiunan, LIU Shuxia, JIAO Juan, WEI Min. Effects of proportions of white, red and blue light qualities on the strong plants and photosynthetic characteristics in tomato seedlings[J]. *Plant Physiology Journal*, 2018, 54(7): 1223-1232.
- [11] POORTER H, NIINEMETS Ü, NTAGKAS N, SIEBENKÄS A, MÄENPÄÄ M, MATSUBARA S, PONS T. A meta-analysis of plant responses to light intensity for 70 traits ranging from molecules to whole plant performance[J]. *The New Phytologist*, 2019, 223(3): 1073-1105.
- [12] 张珊珊, 杨文忠, 康洪梅, 诺苏那玛. 光强和土壤含水量对云南蓝果树幼苗生长及光合特征的影响[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(3): 16-23.
- ZHANG Shanshan, YANG Wenzhong, KANG Hongmei, NUO Sunama. Effects of light intensities and water conditions on growth and photosynthetic characteristics of *Nyssa yunnanensis* seedlings[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2018, 46(3): 16-23.
- [13] 黄雯, 魏猷刚, 甘小虎, 方思明, 徐明喜, 李昀晔, 胡静, 阎庆久, 杨会玲. 弱光条件下不同光周期对西瓜幼苗生长发育的

影响[J]. 上海蔬菜, 2021(4): 86-87.

HUANG Wen, WEI Yougang, GAN Xiaohu, FANG Siming, XU Mingxi, LI Yunye, HU Jing, YAN Qingjiu, YANG Huiling. Effects of different photoperiod on growth and development of watermelon seedlings under low light conditions[J]. Shanghai Vegetables, 2021(4): 86-87.

- [14] 陈冰星, 王晓倩, 刘涛, 王苏苏, WANGPRUSKI G, 赖钟雄, 郭容芳. 不同光质光周期对樱桃萝卜生长发育及营养品质的影响[J]. 西北植物学报, 2020, 40(1): 77-86.

CHEN Bingxing, WANG Xiaoqian, LIU Tao, WANG Susu, WANGPRUSKI G, LAI Zhongxiong, GUO Rongfang. Effect of different light quality and photoperiods on growth development and nutritional quality of cherry radish[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(1): 77-86.

- [15] 何蔚, 陈丹艳, 胡晓婷, 王晓旭, 陈乐涵, 张海春, 杨振超. 不同光周期与光质对比对番茄植株生长发育的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(4): 562-570.

HE Wei, CHEN Danyan, HU Xiaoting, WANG Xiaoxu, CHEN Lehan, ZHANG Haichun, YANG Zhenchao. Effects of different photoperiods and photon flux ratios of red and blue LEDs on growth and development of tomato plants[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(4): 562-570.

- [16] 秦健, 刘洋, 方升佐, 杨万霞, 管玲玲, 尚旭岚. 光质和光强对青钱柳生长和抗氧化酶活性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2017, 41(4): 13-18.

QIN Jian, LIU Yang, FANG Shengzuo, YANG Wanxia, GUAN Lingling, SHANG Xulan. Effects of light quality and intensity on growth and antioxidative activities of *Cyclocarya paliurus* seedlings[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2017, 41(4): 13-18.

- [17] 刘杰, 胡笑涛, 王文娥, 冉辉, 方舒玲, 杨鑫. 光强和光周期对水培生菜光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8): 1784-1790.

LIU Jie, HU Xiaotao, WANG Wen'e, RAN Hui, FANG Shuling, YANG Xin. Effects of light intensity and photoperiod on photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence of hydroponic lettuce[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(8): 1784-1790.

- [18] 邱霞, 叶霜, 熊博, 廖玲, 孙国超, 荣毅, 罗近予, 代琳, 汪志辉. 十三个柑橘品种叶片光合特性研究[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(6): 917-925.

QIU Xia, YE Shuang, XIONG Bo, LIAO Ling, SUN Guochao, RONG Yi, LUO Jinyu, DAI Lin, WANG Zhihui. Photosynthetic characteristics of 13 citrus cultivars[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(6): 917-925.

- [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 trifoliate orange seedlings[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(3): 708-714.

- [20] 李思静. 不同 LED 光对先锋橙和红桔幼苗生长发育及生理特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018.

LI Sijing. Effects of different LED light on the growth and physiological characteristics of Pioneer Orange and Tangerine Seedlings[D]. Chongqing: Southwest University, 2018.

- [21] 李凤, 孙娅楠, 刘富华, 赵杨. 不同光质对皂荚幼苗生长及皂荚刺相关生理指标影响[J]. 植物生理学报, 2024, 60(4): 653-662.

LI Feng, SUN Yanan, LIU Fuhua, ZHAO Yang. Effects of different light qualities on seedlings growth and physiological

- indicators associated with throns of *Gleditsia sinensis*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2024, 60(4): 653-662.
- [22] 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.
- [23] 陈光彩, 闵庆宇, 李家健. 不同光质对新会柑砧木‘红柠檬’生长的影响[J]. *中国照明电器*, 2024(1): 6-11.
- CHENG Guangcai, MIN Qingning, LI Jiajian. Effect of different light quality on the growth of *Citrus limon* (L.) Burm. F.[J]. *China Light & Lighting*, 2024(1): 6-11.
- [24] YAN J R, LIU J, YANG S D, JIANG C H, LIU Y N, ZHANG N, SUN X, ZHANG Y, ZHU K Y, PENG Y X, BU X, WANG X J, AHAMMED G J, MENG S D, TAN C H, LIU Y F, SUN Z P, QI M F, WANG F, LI T L. Light quality regulates plant biomass and fruit quality through a photoreceptor-dependent HY5-LHC/CYCB module in tomato[J]. *Horticulture Research*, 2023, 10(12): uhad219.
- [25] 杨忠义, 郭雯岩, 李成彦, 董志刚, 乔治军, 纪薇. 不同光质对‘秋红宝’葡萄试管苗生长的影响[J]. *果树学报*, 2020, 37(6): 838-847.
- YANG Zhongyi, GUO Wenyan, LI Xuyan, DONG Zhigang, QIAO Zhijun, JI Wei. Effect of light quality on the growth of *in vitro* seedling of ‘QiuHongbao’ grape[J]. *Journal of Fruit Science*, 2020, 37(6): 838-847.
- [26] 陈永快, 王涛, 兰婕, 黄语燕, 康育鑫. 植物工厂内 LED 光调控在作物栽培中的研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2020, 48(23): 40-46.
- CHEN Yongkuai, WANG Tao, LAN Jie, HUANG Yuyan, KANG Yuxin. Research progress of LED light regulation in plant factories in crop cultivation[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(23): 40-46.
- [27] GENDRON J M, STAIGER D. New horizons in plant photoperiodism[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2023, 74: 481-509.
- [28] 张瑞洁, 贺忠群, 李春燕, 莫建超, 谢永东. 植物工厂中光周期对番杏光合特性及品质的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(4): 989-994.
- ZHANG Ruijie, HE Zhongqun, LI Chunyan, MO Jianchao, XIE Yongdong. Effects of photoperiod on photosynthetic characteristics and quality of *Tetragonia tetragonoides* (Pall.) Kuntze in a plant factory[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(4): 989-994.
- [29] 董秀霞, 刘瑞岭, 安林林, 史晓燕, 赵春燕. 不同光周期对甜椒幼苗生长的影响[J]. *农业科技通讯*, 2023(1): 111-113.
- DONG Xiuxia, LIU Ruiling, AN Linlin, SHI Xiaoyan, ZHAO Chunyan. Effects of different photoperiod on growth of sweet pepper seedling[J]. *Bulletin of Agricultural Science and Technology*, 2023(1): 111-113.
- [30] 崔佳维, 雷炳富, 刘厚诚. 光合有效辐射日总量(DLI)对植物生长发育的影响[J]. *园艺学报*, 2019, 46(9): 1670-1680.
- CUI Jiawei, LEI Bingfu, LIU Houcheng. Effect of daily light integral on plant growth and development[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2019, 46(9): 1670-1680.
- [31] CUTOLO E A, GUARDINI Z, DALL’OSTO L, BASSI R. A paler shade of green: engineering cellular chlorophyll content to enhance photosynthesis in crowded environments[J]. *The New Phytologist*, 2023, 239(5): 1567-1583.
- [32] SHIMAZAKI K I, DOI M, ASSMANN S M, KINOSHITA T. Light regulation of stomatal movement[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2007, 58: 219-247.
- [33] 王君. 红蓝光下不同光强和光质对比对生菜光合能力影响机理[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.

WANG Jun. Mechanism of effects of light intensity and light quality under the combination of red light and blue light on photosynthetic capacity of Lettuce[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.

[34] 胡美君, 郭延平, 沈允钢, 张良诚. 柑橘属光合作用的环境调节[J]. 应用生态学报, 2006, 17(3): 535-540.

HU Meijun, GUO Yanping, SHEN Yungang, ZHANG Liangcheng. Environmental regulation of *Citrus* photosynthesis[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(3): 535-540.

[35] 郑洁, 郭延平, 胡美君. 光温交互作用对柑橘植株叶绿素荧光和 D1 蛋白的影响[J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2008, 34(6): 629-634.

ZHENG Jie, GUO Yanping, HU Meijun. Interacting effects of radiation and temperature on chlorophyll fluorescence and D1 protein in *Satsuma* mandarin plants[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences), 2008, 34(6): 629-634.

[36] GUIAMBA H D S S, ZHANG X W, SIERKA E, LIN K, ALI M M, ALI W M, LAMLOM S F, KALAJI H M, TELESINIŃSKI A, YOUSEF A F, XU Y. Enhancement of photosynthesis efficiency and yield of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) plants via LED systems[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 918038.