



陈仁, 丁雨腾, 刘思卉, 王振伟, 王可禹, 刘文科, 王勉. 远红光绿光侧面补光对水培番茄幼苗生长质量的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(10):120-130.  
CHEN Ren, DING Yuteng, LIU Sihui, WANG Zhenwei, WANG Keyu, LIU Wenke, WANG Mian. Effects of side lighting with far-red and green light on the growth quality of hydroponic tomato seedling[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(10):120-130.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.10.10

## 远红光绿光侧面补光对水培番茄幼苗生长质量的影响

陈仁<sup>1,2</sup> 丁雨腾<sup>1,2</sup> 刘思卉<sup>1,2</sup> 王振伟<sup>1,2</sup> 王可禹<sup>1,2</sup> 刘文科<sup>1,3\*</sup> 王勉<sup>4</sup>

(1. 佛山科学技术学院 物理与光电工程学院/粤港澳智能微纳光电技术联合实验室, 广东 佛山 528225;

2. 佛山科学技术学院 食品科学与工程学院, 广东 佛山 528225;

3. 中国农业科学院 农业环境与可持续发展研究所/农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100081;

4. 佛山皓徕特光电有限公司, 广东 佛山 528000)

**摘要** 为提高植物工厂番茄育苗壮苗指数和生理指标,以‘京研’番茄作为研究对象,顶部照明LED光源的红蓝光配比设定为3:1,红光波长(660±10)nm,蓝光波长(450±10)nm,光合光子通量密度(PPFD)为250 μmol/(m<sup>2</sup>·s),光周期14 h/10 h,设置7个处理:无侧面补光(CK)、绿光单侧补光(G<sub>u</sub>)、远红光单侧补光(F<sub>u</sub>)、绿光+远红光单侧补光(GF<sub>u</sub>)、绿光双侧补光(G<sub>b</sub>)、远红光双侧补光(F<sub>b</sub>)、绿光+远红光双侧补光(GF<sub>b</sub>),番茄育苗47 d后收获,测定各处理下番茄幼苗生长指标和生理指标参数。结果表明:与CK组相比,F<sub>b</sub>处理的矮生红番茄茎粗、地上部干重、地下部干重和壮苗指数提高,其中壮苗指数2提高了33.6%;绿光补光G<sub>u</sub>和G<sub>b</sub>处理下番茄的生长指标显著降低,其中G<sub>b</sub>处理的壮苗指数1下降了53.1%;绿光补光G<sub>u</sub>和G<sub>b</sub>处理增加矮生红番茄叶绿素含量,而远红光补光F<sub>u</sub>和F<sub>b</sub>处理显著降低矮生红番茄叶绿素含量;绿光补光G<sub>u</sub>和G<sub>b</sub>处理显著降低矮生红番茄硝态氮含量,绿光或远红光补光显著提高矮生红番茄叶片的可溶性蛋白含量。综上,绿光补光抑制矮生红番茄幼苗的生长,远红光则促进生长,双侧补光效果强于单侧补光,远红光双侧补光促进作用最佳。

**关键词** 植物工厂; 矮生红番茄; 远红光; 绿光; 单双侧补光; 生长质量

中图分类号 S625.4

文章编号 1007-4333(2024)10-0120-11

文献标志码 A

## Effects of side lighting with far-red and green light on the growth quality of hydroponic tomato seedling

CHEN Ren<sup>1,2</sup>, DING Yuteng<sup>1,2</sup>, LIU Sihui<sup>1,2</sup>, WANG Zhenwei<sup>1,2</sup>, WANG Keyu<sup>1,2</sup>,  
LIU Wenke<sup>1,3\*</sup>, WANG Mian<sup>4</sup>

(1. Guangdong-Hong Kong-Macao Joint Laboratory of Intelligent Micro-Nano Optoelectronic Technology/School of Physics and Optoelectronic Engineering, Foshan University of Science and Technology, Foshan 528225, China;

2. School of Food Science and Engineering, Foshan University of Science and Technology, Foshan 528225, China;

3. Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture/Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

4. Foshan Haolaite Optoelectronics Co., Ltd., Foshan 528000, China)

**Abstract** The aim of this study was improving the seedling index and physiological indicators of tomato in

收稿日期: 2023-12-29

基金项目: 粤港澳智能微纳光电技术联合实验室项目(2020B1212030010); 2023年佛山基地联合培养扶持项目; 广东省大学生科技创新培育专项资金资助项目(pdjh2023b0548)

第一作者: 陈仁(ORCID:0009-0004-2086-7573), 讲师, 主要从事植物工厂与植物照明研究, E-mail: chenren@fosu.edu.cn

通讯作者: 刘文科(ORCID:0000-0003-4066-8120), 研究员, 主要从事植物工厂与植物照明研究, E-mail: liuwenke@caas.cn

plant factory. To explore the effects of side supplementary lighting with far-red and green light on the growth quality of hydroponic dwarf red tomato seedlings, Jingyan tomato was used as the research object. The ratio of red and blue light of the LED light lamps from the top lighting was set as 3 to 1. The red light wavelength was  $(660\pm 10)$  nm, the blue light wavelength was  $(450\pm 10)$  nm, and the light intensity (PPFD) was  $250\ \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , with the photoperiod of 14 h/10 h. Seven treatments were set up, which were no lateral lighting supplement (CK), green light unilateral lighting supplement ( $G_u$ ), far red light unilateral lighting supplement ( $F_u$ ), green light+far red light unilateral lighting supplement ( $GF_u$ ), green light bilateral lighting supplement ( $G_b$ ), far red light bilateral lighting supplement ( $F_b$ ), and green light+far red light bilateral lighting supplement ( $GF_b$ ). Tomato seedlings were harvested after 47 days, and the growth index and physiological index parameters of tomato seedlings under each treatment were determined. The results showed that: compared with CK group, the stem diameter, aboveground dry weight, underground dry weight and strong seedling index of dwarf red tomato treated with  $F_b$  increased, and the strong seedling index 2 increased by 33.6%; The growth indexes of tomato under  $G_u$  and  $G_b$  treatments decreased significantly, and the strong seedling index 1 of GB treatment decreased by 53.1%; The  $G_u$  and  $G_b$  treatments with green light supplementation increased the chlorophyll content of dwarf red tomatoes, while the far red light supplementation treatment of  $F_u$  and  $F_b$  significantly reduced the chlorophyll content of dwarf red tomatoes; Green light supplementation with  $G_u$  and  $G_b$  significantly reduced the nitrate nitrogen content in dwarf red tomatoes, while green or far red light supplementation significantly increased the soluble protein content in the leaves of dwarf red tomato. In summary, the green light supplementation inhibits the growth of dwarf red tomato seedlings, while far red light promotes the growth. The bilateral supplementation has stronger effect than unilateral supplementation, and far red light with bilateral supplementation has the best promoting effect.

**Keywords** plant factories; dwarf red tomato; far red light; green light; unilateral and bilateral fill light; growth quality

植物工厂是以农业设施为载体,采用智能控制技术和生物技术,通过人工光照、温湿度和营养液等环境因子调控农作物生长,实现农作物的高产、优质和高效栽培<sup>[1]</sup>。同时,植物工厂番茄育苗具有生长周期短、育苗质量高、初始投资和电力成本较低等优点。这些优点促进了植物工厂在育苗方面的发展和应⤵用。LED光源具有效率高、调光响应速度快和寿命长等优点<sup>[2]</sup>,可通过光质、光强、光周期、光照角度和补光方式等调控方法,显著促进植物工厂番茄等植株生长光环境,并进一步降低照明能耗。

由于空间资源的稀缺,植物工厂一般采用多层栽培方法。植物工厂种植矮小的植物(叶菜、种苗和草莓等),利用顶部照明来实现从上到下的空间分布。这种顶部照明的方式具有生物光合效率高、安装和操作方便等优点。然而,叶菜等矮小的植物种植密度高,在生长后期相互压缩,导致叶片浓密。通过使用顶部照明,来自冠层上部的LED灯不能穿透整个植株冠层。在植物生长的后期,冠层光不足,冠层内的垂直空间光不均匀,特别是种植板边缘的垂直光不足。这加速了冠层底部和外叶的老化,增加了叶片分选造成的人工成本,降低了植株

整体光合效率,导致产量的降低<sup>[3-4]</sup>。而增加侧方光照不仅能增强生菜、草莓和菊花等植物的光合作用,显著调控其形态生理,还能促进叶片形成、分枝形成和缩短开花周期<sup>[5-6]</sup>。植物顶部照明与侧面照明相结合,可显著提高植物冠层垂直空间照明强度和均匀性,增加植物冠层截光面积和利用效率,提升植物产量和品质,改善种植架中间植物和边缘植物的生长形态。本试验在顶部照明的基础上采用了单侧补光和双侧补光。在单侧补光下,植物通过单侧光源照射植物的树干或叶子,不会产生多个侧枝<sup>[7]</sup>。单侧补光适用于光照不足的植物如葡萄、辣椒,可提高侧方光照强度,促进叶片生长和光合作用,提高植物产量<sup>[8-10]</sup>。而双侧补光通过植物两侧光源照射,促进植物产生多个侧枝,增加叶片光照强度<sup>[11-12]</sup>,形成更大冠幅和更高产量<sup>[13-14]</sup>。

植物对光的反应可能因光强度、光周期和光质量而异。在光谱特性研究中,从蓝色到红色的光谱调控对植物生长发育的影响已被广泛研究,例如可以增强生物量和调整形态<sup>[15-16]</sup>。特别是,补充远红光已被有效地用于控制植物生长和形态发生<sup>[17]</sup>。随着远红光强度的增加,番茄植株的株高、节间长

度、茎粗和生物量受到显著影响<sup>[18]</sup>,远红光显著影响红辣椒幼苗等植物的生长和光形态发生<sup>[19-22]</sup>。绿光是植物生长和开花的关键因素。绿光可以促进植物的光合作用,促进植物的细胞分裂和形态发生,抑制植物的气孔开放<sup>[23-25]</sup>,抑制植物生长激素的合成<sup>[26]</sup>,使植物的抗逆性增强、生长周期缩短,进而提升产量和营养品质<sup>[27]</sup>。绿光和远红光是影响植物生长发育、产量和营养品质的重要光属性,然而,在绿光、远红光LED光质条件下,通过侧方补光提高水培番茄苗育苗质量的研究尚未见报道。本研究通过设置远红光、绿光和远红光绿光组合光侧面补光,探究最佳远红光和绿光侧方补光光质以加快番茄育苗速率和提升苗的质量,同时对番茄苗生长和质量进行综合分析,以期为植物工厂番茄高质量育苗提供具有指导意义的侧方补光光谱。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验于2023年4月在佛山科学技术学院物理与光电工程学院植物工厂内进行。试验采用水培方式进行,栽培环境温度为 $26\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为 $55\%\pm 5\%$ , $\text{CO}_2$ 浓度为 $450\text{ }\mu\text{mol/mol}\pm 50\text{ }\mu\text{mol/mol}$ 。将‘京研’番茄(*Solanum lycopersicum* L.)种子接种于海绵块上,将海绵块浸泡在塑料发芽盘的霍格兰

营养液中,在黑暗中培养2 d。在顶部白色LED灯板提供的 $250\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 光合光子通量密度(PPFD)下,幼苗萌发15 d,光周期为14 h(8:00—22:00),悬挂高度在种植植物板上方45 cm处。LED灯板的尺寸为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ (中山中富工厂技术有限公司,中国)<sup>[28]</sup>。白色LED分别由15.8%的蓝光( $400\sim 500\text{ nm}$ )、22.0%的绿光( $500\sim 600\text{ nm}$ )、50.4%的红光( $600\sim 700\text{ nm}$ )和11.8%的远红光( $700\sim 800\text{ nm}$ )组成。在第二片叶片完全展开后,将幼苗从萌发盘移植到循环水培系统中持续培养30 d。该系统由7套水培培养床、营养循环系统、顶部照明LED面板和自动控制照明系统组成(图1)。幼苗在霍格兰配方营养液中生长,在深层流动的水培循环系统中生长,营养液电导率EC值为 $(1.8\pm 0.1)\text{ dS/m}$ ,pH为 $6.8\pm 0.2$ 。每组有1行,每行有8棵番茄,在14 h光周期下,平均PPFD为 $250\text{ }\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。顶部的照明LED面板提供了峰值波长为 $660\text{ nm}\pm 2\text{ nm}$ 的红光、 $445\text{ nm}\pm 2\text{ nm}$ 的蓝光,红蓝光强度PPFD的比值为3:1。LED面板尺寸为 $50\text{ cm}\times 50\text{ cm}$ (佛山皓徕特光电有限公司,中国)。LED面板安装在种植植物板上方32 cm处。侧方照明线条灯采用远红光和绿光LED元件组合(佛山皓徕特光电有限公司,中国)。侧方照明线条灯尺寸为 $50\text{ cm}\times 3.6\text{ cm}\times 2.4\text{ cm}$ ,远红光波长为

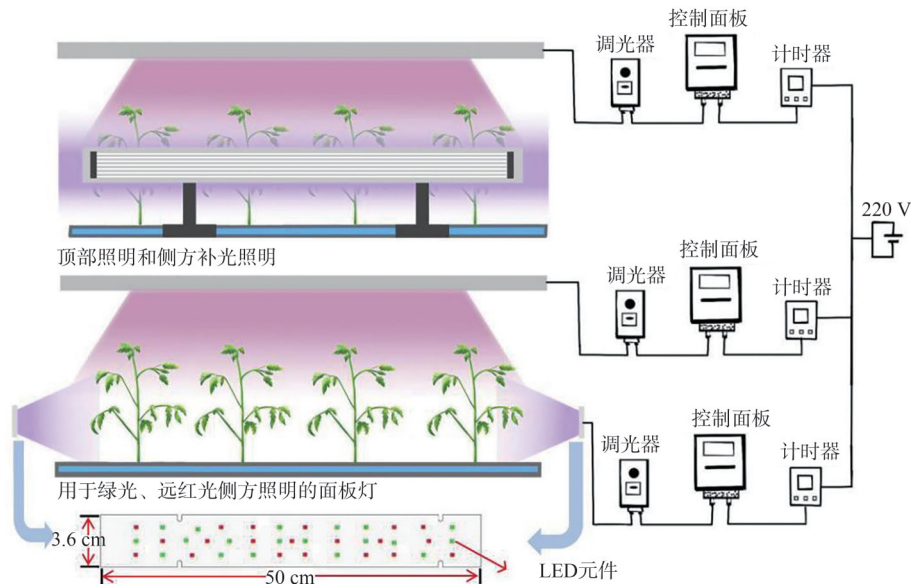


图1 绿光、远红光及其组合光单双侧补光处理番茄苗光照系统

Fig. 1 The lighting system of tomato seedlings with green light, far red light, and its combination of unilateral or bilateral supplementation

730 nm $\pm$ 5 nm, 绿光波长为 530 nm $\pm$ 10 nm。使用 LI-1500 辐照度测量仪器(LI-COR, USA)监测顶部照明和侧方照明的平均 PPFD 和光谱。

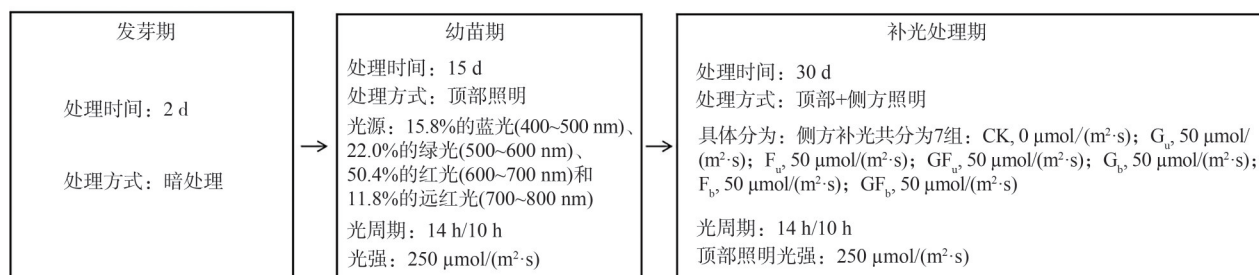
## 1.2 试验设计

先将种子用 40 $^{\circ}$ C $\pm$ 2 $^{\circ}$ C 的温水浸泡 30 min(软化种子外壳, 增加种子的发芽率), 均匀铺洒于放有育苗纸的育苗盆后, 用另一张育苗纸覆盖, 均匀洒水后进行 2 d 暗处理, 暗处理期间保持育苗纸湿润(图 2)。种子露白后, 用镊子轻夹置于 2 cm $\times$ 2 cm 的海绵块, 于育苗盘中在对应的光处理下清水种植 5 d, 待发芽后定植于水培系统的种植篮中, 每组 56 株。番茄种子出芽到第 1 片真叶展开期间, 使用 1/3 浓度霍格兰营养液, 待第 1 片真叶展平后使用 2/3

浓度霍格兰营养液, 第 2 片真叶展开后使用标准浓度霍格兰营养液。

## 1.3 光周期处理

在光处理期, 侧方增加绿光、远红光和绿光远红光组合光补光处理, 每侧绿光光合光子通量密度或远红光光子通量密度(PFD)均为 50  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。共设 7 组绿光和远红光不同单双侧的补光组合试验, 分别为: 无侧面补光(CK)、绿光单侧补光( $G_u$ )、远红光单侧补光( $F_u$ )、绿光+远红光单侧补光( $GF_u$ )、绿光双侧补光( $G_b$ )、远红光双侧补光( $F_b$ )、绿光+远红光双侧补光( $GF_b$ )。光暗周期设置为 14 h/10 h(光期时间段: 8:00—22:00)。本试验统一连续培养 47 d 进行苗期采收。



CK: 无侧面补光;  $G_u$ : 绿光单侧补光;  $F_u$ : 远红光单侧补光;  $GF_u$ : 绿光+远红光单侧补光;  $G_b$ : 绿光双侧补光;  $F_b$ : 远红光双侧补光;  $GF_b$ : 绿光+远红光双侧补光。不同小写字母表示不同处理之间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

CK: No side fill light;  $G_u$ : Green light unilateral light;  $F_u$ : Far red light unilateral light;  $GF_u$ : Green light+Far red light unilateral light;  $G_b$ : Green double-sided fill light;  $F_b$ : Far red light double fill light;  $GF_b$ : Green light+Far-red light. Different lowercase letters indicated significant differences between different treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图 2 绿光、远红光及其组合光单双侧补光处理番茄试验流程

Fig. 2 Experimental process of tomato treatment with green light, far-red light and their combination of single and double light supplements

## 1.4 测定方法

### 1.4.1 生长指标测定

在第 47 天时取样, 各处理随机选取 6 株番茄植株, 使用直尺测量株高, 利用游标卡尺测量植株茎粗。用吸水纸擦干番茄表面水分, 使用电子天平(Si-234, USA)称量地上部和地下部鲜重。将番茄植株在 100 $^{\circ}$ C 下杀青 30 min, 以 80 $^{\circ}$ C 烘干至恒重, 用分析天平分别称取地上部干重和根干重, 并计算壮苗指数<sup>[29]</sup>。计算公式如下:

$$\text{壮苗指数 1} = \text{茎粗} / \text{株高} \times \text{全株鲜重} \times 10 \quad (1)$$

$$\text{壮苗指数 2} = \text{茎粗} / \text{株高} \times \text{全株干重} \times 10 \quad (2)$$

### 1.4.2 生理指标测定

番茄叶片的叶绿素含量采用 SPAD 叶绿素仪(SPAD-502, Konica Minolta, 日本)测定, 硝态氮的

测定采用水杨酸分光光度计比色法, 可溶性蛋白的测定采用考马斯亮蓝光度计比色法<sup>[30]</sup>。

## 1.5 数据统计及分析

采用 Excel 进行数据整理, 利用 SPSS 8.0 软件对数据进行显著性分析,  $P<0.05$  表示差异显著。运用 Graph Pad Prism 9.0 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 远红光绿光侧面补光对番茄苗株高和茎粗的影响

株高是分析水培矮生红番茄生长动态的重要指标。通过测量株高, 可以了解植株在不同生长阶段的高度变化, 进而评估其生长速度和生长势。由图 3(a)可知,  $G_u$  和  $GF_u$  处理的株高与 CK 相比分别

显著降低了20.1%和14.4% ( $P < 0.05$ );  $F_u$ 、 $F_b$ 与CK差异不显著;  $G_b$ 和 $GF_b$ 处理显著降低水培矮生红番茄的株高,比CK处理组分别降低了38.3%和27.3% ( $P < 0.05$ )。绿光和绿光远红光组合光单侧补光水培矮生红番茄的株高高于双侧补光。由此可知,绿光补光对番茄植株的株高增长起抑制作用,远红光补光对番茄植株株高的促进作用不显著。

茎粗是描述作物在营养生长阶段非生物胁迫

下生长的重要参数<sup>[31]</sup>。茎在水的运输和碳水化合物的易位中起着关键作用<sup>[27]</sup>。由图3(b)可知,与CK相比, $F_b$ 处理对水培矮生红番茄茎粗起促进作用,比CK处理提升了29.1%; $F_u$ 处理与CK相比差异不显著; $G_u$ 、 $GF_u$ 、 $G_b$ 和 $GF_b$ 处理与CK相比略降低了水培矮生红番茄的茎粗。由此可知,绿光对水培矮生红番茄植株茎粗的生长有抑制作用,远红光双侧补光对于水培矮生红番茄植株茎粗的生长有促进作用。

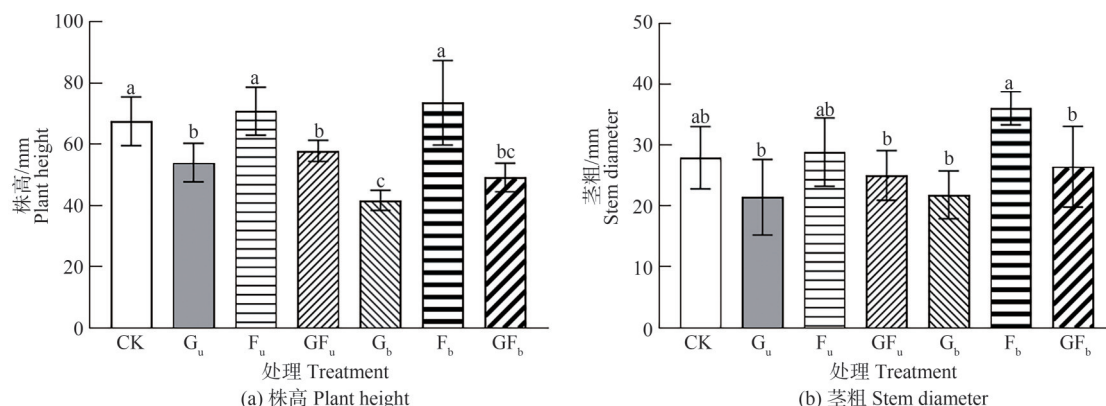


图3 不同光处理下矮生红番茄幼苗的株高和茎粗

Fig. 3 Plant height and stem diameter of dwarf red tomato seedlings under different light treatments

## 2.2 远红光绿光侧面补光对水培矮生红番茄地上部和地下部鲜重、干重和壮苗指数的影响

植株的鲜重和干重也能反映其营养状况。植物的生长需要吸收养分,而干鲜重的比值可以计算出植物的干物质含量,这是植物吸收和积累养分的直接体现。水培矮生红番茄地上部和地下部的鲜重随着绿光比例增大而减少。由图4(a)和(b)可知, $F_u$ 与 $F_b$ 处理水培矮生红番茄地上部的鲜重与CK对比差异不显著; $G_u$ 和 $GF_u$ 处理水培矮生红番茄地上部和地下部鲜重相比CK显著下降,分别下降了35.0%和33.1% ( $P < 0.05$ ); $G_b$ 处理的地上部和地下部鲜重相比CK显著下降了64.6%和70.4% ( $P < 0.05$ ),抑制效果最为显著。说明绿光补光对水培矮生红番茄植株地上部和地下部的鲜重起抑制作用,且绿光双侧补光的抑制作用最显著。水培矮生红番茄地上部和地下部的干重随着绿光比例增大而减少。由图4(c)和(d)可知, $F_u$ 和 $F_b$ 处理地上部和地下部干重与CK相比提升了3.2%、8.2%和17.6%、22.0%。 $GF_u$ 处理地上部和地下部干重与CK相比下降了31.9%和20.8%。 $G_u$ 、 $GF_u$ 和 $G_b$ 处理地上部

和地下部干重与CK相比下降最为显著,分别下降了31.9%、36.2%、61.7%和39.7%、41.0%、62.5% ( $P < 0.05$ );在这3种处理中, $G_b$ 处理对于地上部和地下部干重的影响最为显著。 $G_u$ 、 $GF_u$ 和 $G_b$ 处理番茄植株地上部和地下部干重显著低于对照,远红光补光对番茄植株地上部和地下部干重积累有轻微的促进作用,添加绿光对植物地上部和地下部干重积累有抑制作用,且随绿光总量增大抑制作用增强。水培矮生红番茄地上部和地下部干重组间规律与番茄植株地上部鲜重和地下部鲜重规律一致。

壮苗指数是评价番茄育苗质量的重要指标。它综合考虑了植株的茎粗、株高、地上部和地下部干鲜重等多个因素,能够全面评估植株的生长状况和发育潜力。由图5(a)和(b)可知, $F_b$ 处理壮苗指数1和2比CK提高了17.5%和33.6%, $GF_b$ 和 $GF_u$ 处理的壮苗指数1与2比CK下降了30.7%、26.0%和24.4%、30.0%, $G_b$ 和 $G_u$ 处理的壮苗指数1与2均比CK下降了53.1%、34.4%和50.0%、35.5%。可见远红光补光对番茄壮苗指数具有促进作用,且远红光双侧补

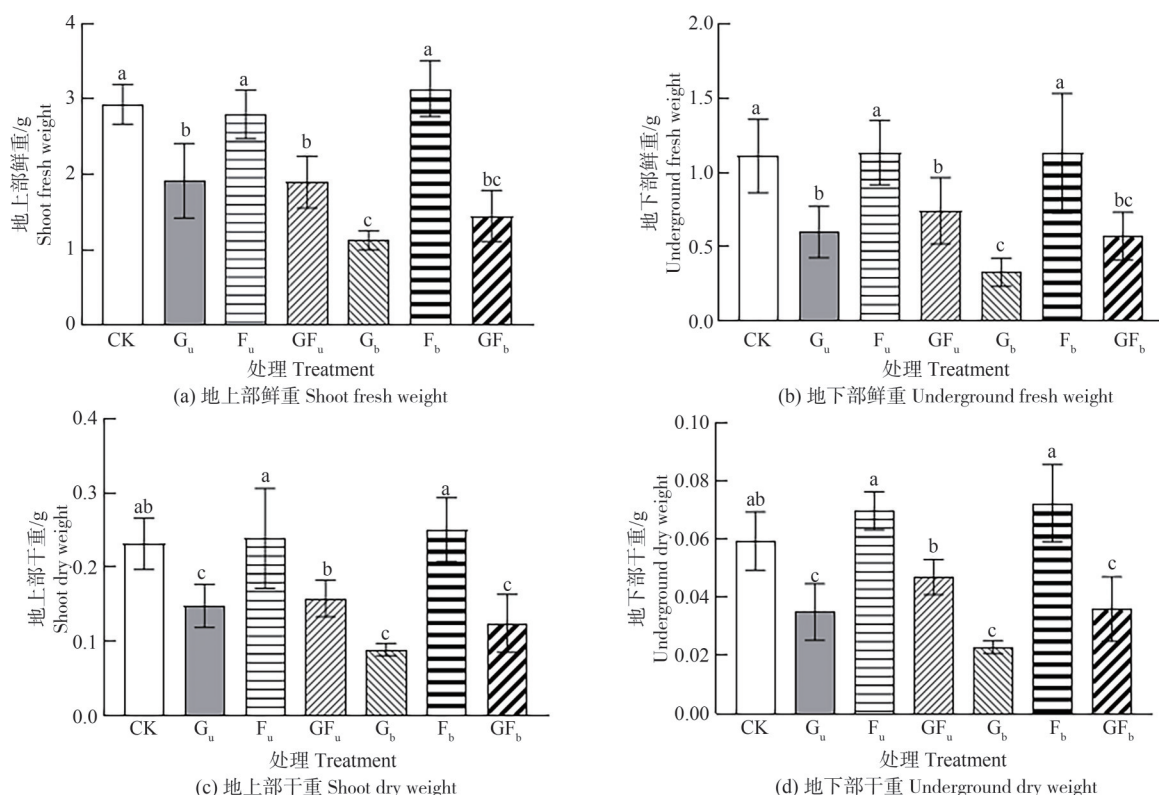


图 4 不同光处理下矮生红番茄幼苗的地上部、地下部鲜重与干重

Fig. 4 Fresh and dry weights of aboveground and underground parts of dwarf red tomato seedlings under different light treatments

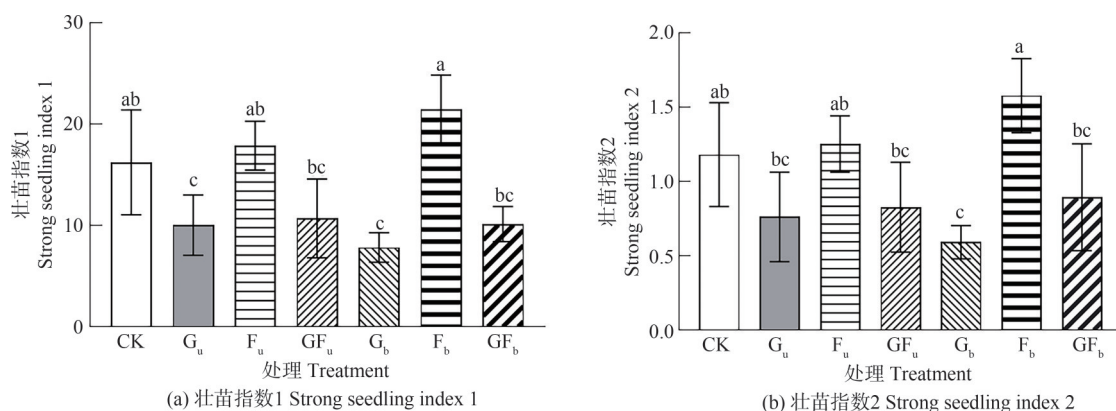


图 5 不同光处理下矮生红番茄幼苗的壮苗指数

Fig. 5 Strong seedling index of dwarf red tomato seedlings under different light treatments

光对番茄的壮苗指数促进作用最显著;绿光双侧补光对番茄的壮苗指数抑制显著。

### 2.3 远红光绿光侧面补光对番茄幼苗叶绿素含量的影响

叶绿素是光合作用的关键物质,能够促进植株的光合作用和生长发育。由图 6 可知, G<sub>u</sub>、GF<sub>u</sub>、G<sub>b</sub>和 GF<sub>b</sub>处理的矮生红番茄叶绿素含量均略高于 CK, F<sub>u</sub>和 F<sub>b</sub>处理的矮生红番茄叶片叶绿素含量略低于

CK。说明远红光补光处理对番茄叶绿素含量有抑制作用,与其在株高、茎粗的作用效果相反;绿光补光处理组与之相反。

### 2.4 远红光绿光侧面补光对番茄苗生理指标的影响

硝态氮指硝酸盐中所含有的氮元素,被人体摄入后,大约会有 5% 被转化为亚硝酸盐,对人体有极大的危害<sup>[32]</sup>。光照条件的变化可以通过光合过程

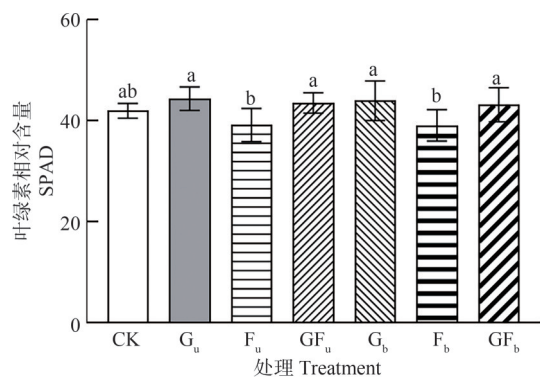
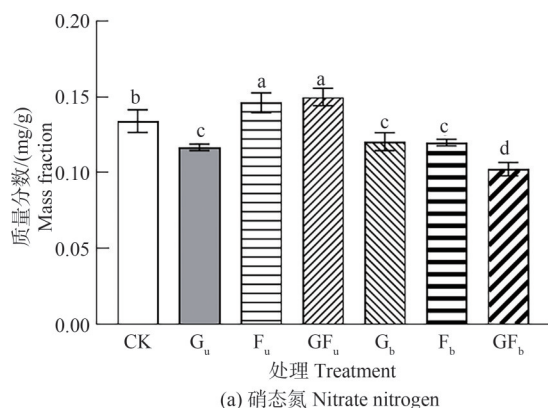


图6 不同光处理下矮生红番茄幼苗的叶绿素相对含量

Fig. 6 Relative chlorophyll content of dwarf red tomato seedlings under different light treatments

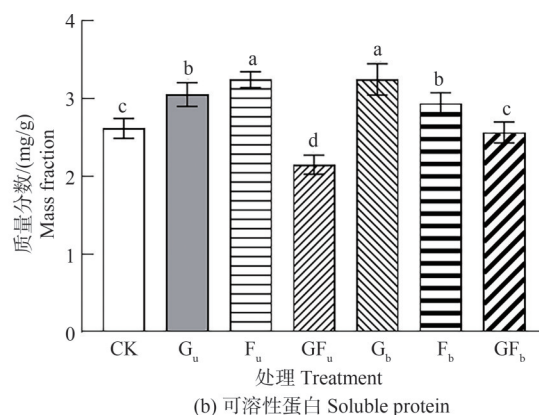
影响植物对硝态氮的吸收、转运和代谢过程<sup>[33]</sup>。由图7(a)可知,GF<sub>u</sub>和F<sub>u</sub>处理番茄的硝态氮含量与CK相比分别显著提升11.83%和9.02% ( $P < 0.05$ ),其他处理均显著低于CK;GF<sub>b</sub>处理对番茄硝



(a) 硝态氮 Nitrate nitrogen

态氮含量的抑制效果最显著,比CK处理降低了23.65% ( $P < 0.05$ )。说明添加绿光补光对番茄硝态氮含量有抑制作用,远红光补光对番茄硝态氮含量有促进作用。远红光及其与绿光组合光单侧补光对番茄硝态氮含量有促进作用,而其双侧补光则具有抑制作用。

可溶性蛋白是植物体内氮素存在的主要形式,其含量的多少与植物体代谢和衰老有密切的关系<sup>[34]</sup>。由图7(b)可知,F<sub>u</sub>和G<sub>b</sub>处理番茄叶片的可溶性蛋白含量相比于CK提升最为显著,两组都提升了24.0% ( $P < 0.05$ );G<sub>u</sub>和F<sub>b</sub>处理相比于CK分别提升了16.6%和12.3% ( $P < 0.05$ );GF<sub>b</sub>处理与CK没有显著差异;GF<sub>u</sub>处理相比于CK显著下降了17.9% ( $P < 0.05$ )。在6种不同补光处理下,番茄叶片的可溶性蛋白含量在远红光和绿光单双侧补光处理下提升显著,但在绿光和远红光组合单侧补光下效果不显著且含量降低。



(b) 可溶性蛋白 Soluble protein

图7 不同光处理下矮生红番茄幼苗的硝态氮和可溶性蛋白质量分数

Fig. 7 Nitrate nitrogen and soluble protein mass fraction of dwarf red tomato seedlings under different light treatments

### 3 讨论

#### 3.1 绿光侧面补光对水培番茄苗生长质量的影响

绿光是植物生长和开花的关键,它可以促进植物的光合作用,促进植物的细胞分裂和形态发生,抑制植物的气孔开放与植物生长激素的合成,增强植物的抗逆性,缩短生长周期,提升产量和品质<sup>[35]</sup>。适量的绿光可以促进植物的生长,Razzak等<sup>[36]</sup>发现适当强度的绿光( $30 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )结合红光和蓝光,可以提高生菜的鲜重。Bian等<sup>[37]</sup>发现用红光和蓝光补充绿光可以上调光合作用相关基因*Psba*和*LHCb*的表达,对维持光合能力有积极作用。此外,

绿光已被证明可以逆转蓝光对气孔张开的影<sup>[38]</sup>。使用绿光可以缓解气孔张开并调节*SIHA1*、2和4,这验证了绿光对提高番茄抗旱性的积极作用<sup>[39]</sup>。在本试验中,G<sub>u</sub>和G<sub>b</sub>处理相比CK处理叶绿素含量提升显著。但是,绿光多被用作辅助光,过高的绿光导致产量下降。Kim等<sup>[40]</sup>发现补充较高比例的绿光即76和129  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 会降低生菜的鲜重,Razzak等<sup>[36]</sup>也发现过强的绿光( $\geq 50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )会产生类似的情况。本试验中,与CK处理相比,绿光补光G<sub>u</sub>和G<sub>b</sub>处理的矮生红番茄生长指标显著降低,其中壮苗指数1降低了50.0%和53.1% ( $P < 0.05$ )。这可能是绿光照射的番茄幼苗受到光刺激

信号的影响,导致茎和叶片不能正常生长发育,从而抑制矮生红番茄幼苗的生长。

### 3.2 远红光侧面补光对水培番茄苗生长质量的影响

在弱光下,远红光刺激叶绿体靠近细胞膜,增加它们对光合作用所需的其它颜色光的吸收,光敏色素的光感受器会从活性形式(Pr)转变为非活性形式(Pfr)改变细胞膜电位,激活赤霉素激素,刺激细胞伸长,导致茎变长<sup>[41]</sup>。远红光对植物形态表现出多方面的影响。在白光 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  条件下补充远红光(3 和 6  $\text{W}/\text{m}^2$ )显著增加了羽衣甘蓝的株高、节间长度、茎直径和生物量<sup>[42]</sup>。远红光诱导白菜下胚轴细胞伸长<sup>[43]</sup>。在红蓝光混合光强 PPFD 值为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  条件下,补充 50  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$  远红光显著增加了生菜的总生物量和叶面积<sup>[44]</sup>。总叶面积取决于叶面积除以叶质量(SLA)和生物量分配,在高远红光条件下更倾向于将生物量分配给茎<sup>[45]</sup>。Zou 等<sup>[44]</sup>发现补充远红光可以降低叶绿素含量,提高净光合速率从而增强植物对光能的吸收。但是,研究表明额外的远红光补光对光合作用有不同的影响。Yang 等<sup>[19]</sup>在大豆中观察到补充远红光后光合作用增加。Ji 等<sup>[46]</sup>与 Zhang 等<sup>[47]</sup>发现远红光补光对番茄和生菜的光合作用没有影响。此外,Ji 等<sup>[46]</sup>与 Kalaitzoglou 等<sup>[48]</sup>都得出结论,远红光对光合作用的长期影响是有限的。本试验中, $F_0$ 和 $F_0$ 处理的干重与 CK 相比提升了 20.8% 和 30.2%; $F_0$ 处理对水培矮生红番茄生长茎粗有促进作用,比 CK 处理提升了 29.1%。这可能是侧方补充远红光刺激叶片伸长、茎粗增粗,促进了矮生红番茄幼苗的生长,提高了幼苗壮苗指数。

### 3.3 绿光远红光侧面补光对水培番茄苗生理指标的影响

硝态氮是植物主要的无机氮源之一,植物通过根系吸收硝态氮后,经过一系列生物化学反应,最终将其转化为氨基酸,进而合成蛋白质<sup>[49]</sup>。因此,硝态氮的供应直接影响到植物体内可溶性蛋白的合成速度和数量。GS(谷氨酰胺合成酶)和 GOGAT(谷氨酸合成酶)是植物氮同化的 2 种关键酶。当植物体内的氨基充足时,GS 可以将氨基转化为谷氨酰胺,然后 GOGAT 再将谷氨酰胺转化为谷氨酸。谷氨酸是植物体内氮同化过程的重要中间产物,它可以进一步参与蛋白质的合成等生化过

程<sup>[50]</sup>。研究发现,绿光比例在氮代谢中发挥着重要作用。当氨基供应受限时,GS/GOGAT 循环会改变其反应模式,生成的谷氨酸可能无法进入后续的氮同化反应。然而,绿光强度的增加可以促进 GOGAT 的活性。这意味着绿光可能通过增强 GOGAT 的活性来影响氮同化过程<sup>[51]</sup>。绿光比例对叶类蔬菜的氮积累具有调节作用<sup>[52]</sup>。在本试验中,与 CK 处理相比, $G_0$ 和 $G_0$ 处理硝态氮含量显著降低,可溶性蛋白含量提升显著。Zou 等<sup>[44]</sup>发现远红光导致总氮和叶绿素含量降低,减少叶片光吸收,在下调叶片光合能力方面发挥着重要作用。植物光敏色素是一种可溶性的色素——蛋白质复合体,远红光照射可以促使光敏色素从红光吸收型(Pr)转变为远红光吸收型(Pfr),这种转换进一步影响植物的生长和发育过程。本试验中,与 CK 处理相比,远红光 $F_0$ 和 $F_0$ 处理降低矮生红番茄叶绿素含量,显著提高矮生红番茄叶片的可溶性蛋白含量。

### 3.4 远红光绿光组合侧方补光对水培番茄苗生长质量的影响

在研究中发现,远红光与绿光的组合相较于单一绿光照射,能够显著减弱绿光的抑制作用。这种效果的产生,既涉及到光信号的作用,也包括光强度变化的影响。远红光对植物生长发育的影响主要是通过影响光感知系统,尤其是植物中的光素和隐花色素,从而调节一系列下游生理和发育过程,如形态建成、伸长生长以及代谢途径的改变<sup>[53-54]</sup>。这些变化反映了远红光在植物光信号转导中的核心作用,以及它如何通过激活特定的光敏色素引发植物对光照环境的细致调节。同时,远红光的加入改变了光照环境中的光强度和光质比例,降低绿光所占比重,从而减少了绿光的抑制效果。这种抑制减弱不仅是由于光质的直接调整,还可能因为光照强度的总体分配变化,为植物创造了一个更优化的光照环境。因此,远红光与绿光组合对植物生长的正面影响,是远红光作为光信号调节植物光敏色素活性的结果,同时也是由于光强度调整对植物生长条件的改善。在本试验中, $GF_0$ 相比 $G_0$ 处理地上部与地下部干鲜重、壮苗指数均有提升。

另外,在单侧补光试验中,植物只能从一边受光,另一侧可能会受光不足,补光对植物的光合作用、生长和发育影响效果不显著。而相比单侧补光,双侧补光可以使植物两侧受光的影响更加明

显。在本试验中,双侧远红光补光 $F_b$ 处理下的番茄株高、茎粗、地上部和地下部干鲜重、壮苗指数等生长指标比单侧远红光 $F_u$ 处理提升效果更佳。双侧绿光补光 $G_b$ 处理与单侧绿光补光 $G_u$ 处理对于番茄生长指标的抑制作用更为显著。

## 4 结 论

绿光补光对水培矮生红番茄生长抑制作用明显,且随绿光光强增加其抑制作用增强,绿光双侧补光抑制作用大于绿光单侧补光。远红光补光对水培矮生红番茄生长有促进作用,随远红光光强增加,对植株生长的促进作用增强,远红光双侧补光增强作用大于远红光单侧补光,远红光双侧补光效果最佳。

## 参考文献 References

- [1] 魏灵玲, 杨其长, 刘水丽. LED在植物工厂中的研究现状与应用前景[J]. 中国农学通报, 2007, 23(11): 408-411  
Wei L L, Yang Q C, Liu S L. Review on research and developing trends of light-emitting diode in plant factory[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, 23(11): 408-411 (in Chinese)
- [2] Bantis F, Smirnakou S, Ouzounis T, Koukounaras A, Ntagkas N, Radoglou K. Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 235: 437-451
- [3] Zhang G, Shen S Q, Takagaki M, Kozai T, Yamori W. Supplemental upward lighting from underneath to obtain higher marketable lettuce (*Lactuca sativa*) leaf fresh weight by retarding senescence of outer leaves [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 1110
- [4] Joshi J, Zhang G, Shen S Q, Supaibulwatana K, Watanabe C K A, Yamori W. A combination of downward lighting and supplemental upward lighting improves plant growth in a closed plant factory with artificial lighting[J]. *HortScience*, 2017, 52(6): 831-835
- [5] Wang M Z, Wei H, Jeong B R. Lighting direction affects leaf morphology, stomatal characteristics, and physiology of head lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(6): 3157
- [6] 胡永光, 李萍萍, 邓庆安, 毛罕平. 温室人工补光效果的研究及补光光源配置设计[J]. 江苏理工大学学报:自然科学版, 2001, 22(3): 37-40  
Hu Y G, Li P P, Deng Q A, Mao H P. Study on the effect of artificial lighting in greenhouse and disposition design of light source[J]. *Journal of Jiangsu University of Science and Technology*, 2001, 22(3): 37-40 (in Chinese)
- [7] Stamford J D, Stevens J, Mullineaux P M, Lawson T. LED lighting: A grower's guide to light spectra[J]. *HortScience*, 2023, 58(2): 180-196
- [8] 白先进, 林玲, 马广仁, 张瑛, 刘金标. 补光明显增大大棚反季节巨峰葡萄果实简报[J]. 广西农学报, 2010, 25(3): 14-15  
Bai X J, Lin L, Ma G R, Zhang Y, Liu J B. Reporting on fruit-enlargement of off-season Jufeng grape by light complement in plastic greenhouse[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2010, 25(3): 14-15 (in Chinese)
- [9] 杨碧云, 徐永, 陈艺群. 人工补光在促进设施瓜果生产上的应用探讨[J]. 农业工程技术, 2022, 42(13): 23-26  
Yang B Y, Xu Y, Chen Y Q. Discussion on the application of artificial light supplement in promoting the production of protected melons and fruits[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, 42(13): 23-26 (in Chinese)
- [10] 盖淑杰, 王奕雄, 李兰, 刘硕谦, 李银花, 程孝, 夏茂, 刘仲华, 周智. 茶树生长光调控研究进展[J]. 茶叶科学, 2022, 42(6): 753-767  
Gai S J, Wang Y X, Li L, Liu S Q, Li Y H, Cheng X, Xia M, Liu Z H, Zhou Z. Research progress of tea plant (*Camellia sinensis*) growth under light regulation [J]. *Journal of Tea Science*, 2022, 42(6): 753-767 (in Chinese)
- [11] 李雪, 王峥, 张文婧, 熊清, 李蔚, 孙朝华. 浅液流(NFT)水培芝麻菜栽培技术[J]. 农业工程技术, 2022, 42(10): 16-19  
Li X, Wang Z, Zhang W Q, Xiong Q, Li W, Sun Z H. Cultivation techniques of arugula in shallow flow (NFT) hydroponics [J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, 42(10): 16-19 (in Chinese)
- [12] 王佳佳, 聂雅琳, 蔡景瀚, 高一琛, 汤洪豪. 基于物联网的智能花苗培育箱设计[J]. 工业控制计算机, 2022, 35(7): 49-52  
Wang J J, Nie Y L, Cai J H, Gao Y C, Tang H H. Design of intelligent flower seedling incubator based on internet of things [J]. *Industrial Control Computer*, 2022, 35(7): 49-52 (in Chinese)
- [13] 丁小涛, 姜玉萍, 王虹, 周强, 何立中, 余纪柱. LED株间补光对番茄生长和果实品质的影响[J]. 上海农业学报, 2016, 32(6): 48-51  
Ding X T, Jiang Y P, Wang H, Zhou Q, He L Z, Yu J Z. Effects of LED supplementary lighting among plants on tomato growth and fruit quality [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2016, 32(6): 48-51 (in Chinese)
- [14] 谢淑琴, 马彦霞, 曹力强, 张晶, 李春花. 日光温室栽培杏LED灯补光效果研究[J]. 中国果树, 2015(1): 36-38  
Xie S Q, Ma Y X, Cao L Q, Zhang J, Li C H. Study on light supplement effect of LED lamp for apricot cultivation in solar greenhouse[J]. *China Fruits*, 2015(1): 36-38 (in Chinese)
- [15] Li Q, Kubota C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2009, 67(1): 59-64
- [16] Carvalho S D, Schwieterman M L, Abrahan C E, Colquhoun T A, Foltá K M. Light quality dependent changes in morphology, antioxidant capacity, and volatile production in sweet basil (*Ocimum basilicum*) [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7: 1328
- [17] Cope K R, Bugbee B. Spectral effects of three types of white light-emitting diodes on plant growth and development: Absolute versus relative amounts of blue light[J]. *HortScience*, 2013, 48(4): 504-509
- [18] Chia P L, Kubota C. End-of-day far-red light quality and dose requirements for tomato rootstock hypocotyl elongation[J]. *HortScience*, 2010, 45(10): 1501-1506
- [19] Yang F, Feng L Y, Liu Q L, Wu X L, Fan Y F, Ali Raza M, Cheng Y J, Chen J X, Wang X C, Yong T W, Liu W G, Liu J, Du J B, Shu K, Yang W Y. Effect of interactions between light intensity and red-to-far-red ratio on the photosynthesis of soybean leaves under shade condition [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 150: 79-87
- [20] Shibuya T, Endo R, Kitaya Y, Hayashi S. Growth analysis and photosynthesis measurements of cucumber seedlings grown under light with different red to far-red ratios [J]. *HortScience*, 2016, 51(7): 843-846
- [21] Barreiro R, Guamet J J, Beltrano J, Montaldi E R. Regulation of the

- photosynthetic capacity of primary bean leaves by the red: Far-red ratio and photosynthetic photon flux density of incident light[J]. *Physiologia Plantarum*, 1992, 85(1): 97-101
- [22] Demotes-Mainard S, Péron T, Corot A, Bertheloot J, Le Gourrierc J, Pelleschi-Travier S, Crespel L, Morel P, Huché-Thélier L, Boumaza R, Vian A, Guérin V, Leduc N, Sakr S. Plant responses to red and far-red lights, applications in horticulture[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2016, 121: 4-21
- [23] Chen R, Wang Z W, Liu W K, Ding Y T, Zhang Q S, Wang S R. Side lighting of red, blue and green spectral combinations altered the growth, yield and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv “Yidali”) in plant factory[J]. *Plants*, 2023, 12(24): 4147
- [24] 张曦文. 不同光质配比对莧菜叶片光合作用的影响研究[J]. 特种经济动植物, 2021, 24(11): 14-15, 23  
Zhang X W. Effects of different light-quality ratios on photosynthesis of amaranth leaves [J]. *Special Economic Animals and Plants*, 2021, 24(11): 14-15, 23 (in Chinese)
- [25] 徐琳煜. 光质对三叶青生长及黄酮类化合物合成的影响研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018  
Xu L Y. Effect of light quality on the growth and synthesis of flavonoids of tetrastigmatis hemsleyani diels et gilg [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2018 (in Chinese)
- [26] 齐连东, 刘世琦. 光质对植物光形态建成、品质及延缓衰老的影响[R]. 山东: 中国园艺学会, 2006  
Qi L D, Liu S Q. The effect of light quality on plant photomorphogenesis, quality, and delayed aging[R]. Shandong: China Horticultural Society, 2006 (in Chinese)
- [27] Ichiro T, Takashi F, Takeshi I, Wah S C, Riichi O. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light-terashima[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2009, 50(4): 684-697
- [28] Zhou C B, Shao M J, Liu W K, Li B S, Wang Q, Liu J Y, Wen Y, Yang Q C. Regulation of ascorbate accumulation and metabolism in lettuce by end-of-production high light irradiation provided by red and blue LEDs [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021, 189: 104567
- [29] 张凯, 魏敏芝, 陈青云, 高丽红. 黄瓜穴盘苗壮苗指标的初步研究[C]//2004 年中国设施园艺学会学术年会论文集. 武汉: 中国设施园艺学会, 2004: 244-248  
Zhang K, Wei M Z, Chen Q Y, Gao L H. Study on the healthy index of the plug seedlings of the cucumber [C]. In: *Proceedings of the 2004 Annual Academic Meeting of the China Protected Horticulture Society*. Wuhan: China Protected Horticulture Society, 2004: 244-248 (in Chinese)
- [30] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000  
Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [31] 杨再强, 邱译萱, 刘朝霞, 陈艳秋, 谭文. 土壤水分胁迫对设施番茄根系及地上部生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 748-757  
Yang Z Q, Qiu Y X, Liu Z X, Chen Y Q, Tan W. The effects of soil moisture stress on the growth of root and above-ground parts of greenhouse tomato crops[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(3): 748-757 (in Chinese)
- [32] Santamaria P. Nitrate in vegetables: Toxicity, content, intake and EC regulation[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(1): 10-17
- [33] Chaput V, Martin A, Lejay L. Redox metabolism: The hidden player in carbon and nitrogen signaling[J]. *Journal of experimental botany*, 2020, 71(13): 3816-3826
- [34] Zhang T, Shi Y Y, Piao F Z, Sun Z Q. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce[J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 2018, 134(2): 231-240
- [35] Kaiser E, Weerheim K, Schipper R, Dieleman J A. Partial replacement of red and blue by green light increases biomass and yield in tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 271-279
- [36] Razzak M A, Asaduzzaman M, Tanaka H, Asao T. Effects of supplementing green light to red and blue light on the growth and yield of lettuce in plant factories[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 305: 111429
- [37] Bian Z H, Cheng R F, Yang Q C, Wang J, Lu C G. Continuous light from red, blue, and green light-emitting diodes reduces nitrate content and enhances phytochemical concentrations and antioxidant capacity in lettuce[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2016, 141(2): 186-195
- [38] Frechilla S, Talbott L D, Bogomolni R A, Zeiger E. Reversal of blue light-stimulated stomatal opening by green light [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2000, 41(2): 171-176
- [39] Bian Z H, Zhang X Y, Wang Y, Lu C G. Improving drought tolerance by altering the photosynthetic rate and stomatal aperture via green light in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) seedlings under drought conditions [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 167: 103844
- [40] Kim H H, Goins G D, Wheeler R M, Sager J C. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes[J]. *HortScience: A Publication of the American Society for Horticultural Science*, 2004, 39(7): 1617-1622
- [41] Park Y, Runkle E S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 136: 41-49
- [42] Li Y M, Jiang H Z, Gao M F, He R, Liu X J, Su W, Liu H C. Far-red-light-induced morphology changes, phytohormone, and transcriptome reprogramming of Chinese kale (*Brassica alboglabra* bailey) [J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(6): 5563
- [43] Procko C, Crenshaw C M, Ljung K, Noel J P, Chory J. Cotyledon-generated auxin is required for shade-induced hypocotyl growth in *Brassica rapa* [J]. *Plant Physiology*, 2014, 165(3): 1285-1301
- [44] Zou J, Zhang Y T, Zhang Y Q, Bian Z H, Fanourakis D, Yang Q C, Li T. Morphological and physiological properties of indoor cultivated lettuce in response to additional far-red light[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 257: 108725
- [45] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, Oleksyn J, Poot P, Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. *The New Phytologist*, 2012, 193(1): 30-50
- [46] Ji Y R, Ouzounis T, Courbier S, Kaiser E, Nguyen P T, Schouten H J, Visser R G F, Pierik R, Marcelis L F M, Heuvelink E. Far-red radiation increases dry mass partitioning to fruits but reduces *Botrytis cinerea* resistance in tomato [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 168: 103889
- [47] Zhang Y T, Zhang Y Q, Yang Q C, Li T. Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under intra-canopy lighting with LEDs [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(1): 62-69
- [48] Kalaitzoglou P, van Ieperen W, Harbinson J, van der Meer M, Martinakos S, Weerheim K, Nicole C C S, Marcelis L F M. Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth,

- morphology, light absorption, and fruit production [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 322
- [49] Forde B G, Lea P J. Glutamate in plants: Metabolism, regulation, and signalling[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, 58(9): 2339-2358
- [50] Kishorekumar R, Bulle M, Wany A, Gupta K J. An overview of important enzymes involved in nitrogen assimilation of plants [J]. *Methods in Molecular Biology*, 2020, 2057: 1-13
- [51] Liu H, Wu Z Z, Zhang W Z, Wang L S, Li Z M, Liu H. Synergistic effect between green light and nitrogen concentration on nitrate primary metabolism in lettuce (*Lactuca sativa* L) [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 328: 112848
- [52] Terashima I, Fujita T, Inoue T, Chow W S, Oguchi R. Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the enigmatic question of why leaves are green[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2009, 50(4): 684-697
- [53] Paradiso R, Proietti S. Light-quality manipulation to control plant growth and photomorphogenesis in greenhouse horticulture: The state of the art and the opportunities of modern LED systems [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2022, 41(2): 742-780
- [54] Niu Y Y, Lv H H, Liu X Y, Zhang M, Li H. Effects of supplemental lighting duration and matrix moisture on net photosynthetic rate of tomato plants under solar greenhouse in winter [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 198: 107102

责任编辑:董金波



**第一作者简介:** 陈仁,博士,佛山科学技术学院物理与光电工程学院光源与照明系主任兼任党支部书记,佛科院优秀党支部书记、优秀教师。曾在飞利浦任职照明设计师,在南方电网任职照明节能设计和产品光学设计组长。主要从事健康照明、植物照明、光环境设计与植物生理学研究。主持项目经费200多万。2010年获得中国照明学会一等奖和三等奖,2020年被评为优秀党支部书记,2020年获教学质量优秀教师。已发表20篇专业论文,其中包括7篇以第一作者身份发表的SCI论文。申请授权专利22个,发明专利8个。曾主持负责2010年亚运场馆、2011年大运场馆共计77个体育转播照明系统设计与建设工程。参编了广东省照明学会《幼儿园及幼教场所室内照明技术规范》团体标准。已指导40多名本科毕业生论文,其中获优秀毕业论文的共9篇;培养研究生6名;获得互联网+国赛铜奖等奖项23项,学生承担科研项目20多项。



**通讯作者简介:** 刘文科,博士,中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所研究员,博士生导师。现任中国照明学会农业照明专业委员会委员、中国农机学会种业装备分会委员、中国照明学会学术工作委员会委员、教育部学位中心学位论文评议专家、中国科协财政项目评审专家、中国科协科技人才奖项评审专家、中国照明学会科普工作委员会委员、国家自然科学基金及黑龙江省自然科学基金项目评审专家、佛山大学岭南讲座教授、河北省矿区生态修复产业技术研究院专家指导委员会委员。现为《照明工程学报》《中国照明电器》编委。主持完成国家863课题、国家自然科学基金面上项目和国家重点研发计划项目课题等科研任务10余项,企业委托项目10余项。至今,以第一作者和通讯作者发表文章350余篇,其中SCI收录期刊上发表46篇。以第一作者撰著《植物工厂LED照明理论与应用》等著作6部。获得国家科技进步奖2项、北京市科学技术奖2项、其他省部级科技奖励7项。已培养硕博研究生20余人。