

# 光质对甜椒幼苗生长生理及抗氧化性的影响

白生文<sup>1</sup>, 许耀照<sup>1</sup>, 张文斌<sup>2</sup>, 陈修斌<sup>1</sup>, 祖廷勋<sup>1</sup>, 李翊华<sup>1</sup>, 张芬琴<sup>1</sup>

(1. 河西学院农业与生物技术学院, 甘肃省河西走廊特色资源利用重点实验室, 甘肃 张掖 734000;

2. 甘肃省张掖市经济作物技术推广站, 甘肃 张掖 734000)

**摘要:** 采用基质培养法, 研究了 LED 蓝光和紫光对黄色甜椒幼苗生长及其光合特性、叶绿素荧光参数和抗氧化能力等生理生化特征的影响。结果表明: (1) 与白光处理相比, 蓝光处理使黄色甜椒的幼苗株高、茎粗、鲜重、干重、叶片气孔开度、蒸腾速率、气孔导度、光合速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、瞬时水分利用效率、瞬时羧化效率、瞬时光能利用率、PS II 光合性能指数 (PI)、抗坏血酸 (ASA) 和还原型谷胱甘肽 (GSH) 含量明显增加, 其中增加幅度较大的是植株干重、叶片蒸腾速率、光合速率、瞬时光能利用率和抗坏血酸 (ASA) 含量, 其值均在白光处理的 2 倍以上。与此同时, 叶片中超氧阴离子 (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) 产生速率、过氧化氢 (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) 和膜质过氧化产物 (TBARS) 积累分别降低到白光处理的 50.26%、44.60% 和 55.88%; (2) 紫光处理使黄色甜椒幼苗叶片中的类胡萝卜素含量增至白光处理的近 2 倍, 增幅显著, 但使其株高、根长、茎粗、鲜重、干重、叶片数、叶面积、叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素 a + b 含量、蒸腾速率、气孔导度、光合速率、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度、瞬时羧化效率、瞬时光能利用率和最小荧光 (F<sub>o</sub>) 值明显降低, 其中干重、蒸腾速率、气孔导度和 SOD 活性降幅较大, 分别为白光处理的 11.36%、47.44%、35.86% 和 49.04%; (3) 蓝光和紫光都没有影响叶片的叶绿素荧光参数 PS II 最大量子产额 (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) 和 PS II 潜在活性 (F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub>)。综上, 在 3 种 LED 光中, 蓝光更有利于黄色甜椒幼苗的生长, 紫光具有明显的抑制作用。

**关键词:** 光质; 黄色甜椒; 幼苗生长; 生理生化特性; 光合特性; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S641.3 文献标志码: A

## Effects of blue and purple light on the growth, photosynthetic characteristics and antioxidative activities in yellow sweet pepper seedling

BAI Sheng-wen<sup>1</sup>, XU Yao-zhao<sup>1</sup>, ZHANG Wen-bin<sup>2</sup>, CHEN Xiu-bin<sup>1</sup>, ZU Ting-xun<sup>1</sup>, LI Yi-hua<sup>1</sup>, ZHANG Fen-qin<sup>1</sup>

(1. College of Agriculture and Biotechnology, Hexi University, Key Laboratory of Hexi Corridor

Resources Utilization of Gansu, Zhangye, Gansu 734000, China; 2. Station for Popularizing

Commercial Crop of Zhangye, Zhangye, Gansu 734000, China)

**Abstract:** Effects of white, blue and purple light from LED on plant growth and development, chlorophyll fluorescence parameters, and other physiological characteristics were examined in the seedlings of yellow sweet pepper using substrate culturing method. It showed that, on the one hand, compared to the white light control, the treatment with blue light could improve most of the physiological and biochemical characteristics tested, including RuBP carboxylase activity, chlorophyll fluorescence parameters, lipid peroxidation, reactive oxygen species (ROS) accumulation, the activities of antioxidant enzymes, as well as the contents of antioxidant substances, such as ascorbic acid (ASA) and reduced glutathione (GSH), in the leaves. Blue light treatment also increased stem height and diameter, plant dry and fresh weights, root numbers, stomata opening, transpiration rate (*Tr*), stomatal conductance (*G<sub>s</sub>*), net photosynthetic rate (*P<sub>n</sub>*), intercellular CO<sub>2</sub> concentration (*C<sub>i</sub>*), instantaneous water utilization efficiency (IWUE), carboxylation efficiency (CE) and light utilization efficiency (LUE), PS II photosynthetic performance index (PI), the contents of ASA and GSH, the activities of RuBP carboxylase and antioxidant enzymes of leaves. Moreover, blue light treatment promoted bud formation and flowering, whereas it suppressed leaf stomatal limiting value (*L<sub>s</sub>*), superoxide anion (O<sub>2</sub><sup>-</sup>) production

收稿日期: 2016-09-02

修回日期: 2017-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31560072); 甘肃省高校协同创新科技团队支持计划资助 (2017C-18); 甘肃省科技支撑计划项目—农业类 (1304NKCG137); 河西学院校长基金项目 (XZ2015-13)

作者简介: 白生文 (1975—), 男, 甘肃民勤人, 学士, 讲师, 主要从事设施园艺方面的研究。E-mail: bsw4588384@163.com。

通信作者: 张芬琴 (1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事植物逆境生理生化方面的研究。E-mail: fenqinzh@163.com。

rate, the accumulation of  $H_2O_2$  and lipid peroxidation products (TBARS). However, the root long, branch number, leaf area and photosynthetic pigment content were not affected by blue light. On the other hand, purple light treatment showed the almost opposite effects compared to blue light, for example, it reduced the stem height and diameter, plant dry and fresh weights, the numbers of root and leaf, root length and leaf area. Purple light also suppressed the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and chlorophyll a + b, stomata opening,  $Tr$ ,  $G_s$ ,  $P_n$ ,  $C_i$ , IWUE, CE and LUE,  $F_o$ , the activities of RuBP carboxylase and antioxidant enzymes in the leaves. In addition, purple light treatment increased the carotenoid content, PI, and the accumulation of  $O_2^{\cdot-}$ ,  $H_2O_2$  and TBARS. However, both treatment of blue and purple light did not influence the maximum number of PS II quantum yield ( $F_v/F_m$ ) and potential activity of PS II ( $F_v/F_o$ ). The results overall suggest that blue light promoted the growth and development but purple light displayed inhibitory effects in yellow sweet pepper.

**Keywords:** light quality; yellow sweet pepper; seedling growt; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence parameters

众所周知,光是影响植物生长发育最重要的生态因子之一,它通过光质、光强和光照时间三方面来影响植物的生长发育和形态建成。绿色植物的光合作用与光强有关,形态建成与光质有关。光的波长不同,其性质亦不同。光质即不同波长的光谱,波长 200 ~ 800 nm 的辐射对植物有重要作用<sup>[1]</sup>。研究发现,光质不仅影响种子萌发<sup>[2]</sup>和幼苗生长<sup>[3]</sup>,而且还影响植物的光合特征<sup>[4]</sup>、物质代谢<sup>[5]</sup>和抗氧化水平<sup>[6]</sup>,甚至还影响基因表达<sup>[7]</sup>等。即使是同一种光质,其对于同一种类不同品种的生长发育的影响也不同<sup>[8]</sup>。

自发光二极管(light emitting diode, LED)问世以来,因其具有光质纯、光效高、波长类型丰富、光谱能量调制便捷、低发热、小体积和长寿命等突出优势,调节光环境已成为设施栽培领域新的研究热点<sup>[9]</sup>。不同波长的 LED 单色光越来越多地被应用在研究植物形态建成<sup>[10]</sup>、生长发育<sup>[11]</sup>、光合作用<sup>[7,12]</sup>、果蔬贮藏保鲜<sup>[13]</sup>、作物抗性<sup>[14]</sup>以及植物活性物质积累<sup>[15]</sup>等方面,这些研究无疑为 LED 单色光在设施栽培中的应用提供了理论依据。地处我国西北的河西走廊地区,干旱缺水,在此发展设施农业已经成为当地发展节水农业的战略目标。然而,在目前的生产实践中存在一些不利于设施栽培的因素,育苗正值低温弱光的冬季,一些防寒保温措施更降低了光照强度,缩短了光照时数,从而限制了幼苗的健壮生长;此外,夏、秋两季因太阳光照较强而导致设施内高温,遮阴后致使光强降低而不能满足作物正常生长等等。为此,本研究采用 LED 白光、蓝光和紫光处理,以黄色甜椒幼苗为试材,研究不同光质对其生长、光合特性以及抗氧化能力等的影响,以期找到适于甜椒幼苗健壮生长的光质资源,为设施栽培补光光质的选择提供依据,为河西走廊地区发展节水农

业、构建设施栽培新模式提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料处理与培养

供试材料为黄色甜椒 (*Capsicum annuum* var. *Grossum*, Thialf Rz)。挑选饱满、大小一致的种子经 0.1%  $HgCl_2$  表面消毒 2 min 后,用自来水冲洗数次,再用去离子水漂洗 3 次。将漂洗后的种子浸于去离子水中,待其吸胀后播种于装有育苗基质的穴盘中 (28 穴,  $50\text{ cm}^2 \cdot \text{穴}^{-1}$ ),每穴 5 粒,在日光温室內待其萌发。萌发期间,及时补充去离子水以保持基质湿润,待出苗后选取长势基本一致的 3 株幼苗继续培养。到幼苗长至二叶一心时,再选取长势较为一致的幼苗定植于底部带有小孔的塑料杯中 (1 株/杯),分别在 3 间可提供白光(用 w 表示)、LED 蓝光(简称蓝光,用 b 表示)和 LED 紫光(简称紫光,用 p 表示)的人工气候室中培养。白光、蓝光和紫光分别来自 3 台人工气候室顶部安装的 30 条 LED 白光 (540 nm) 灯带(每条灯带有 30 只白光 LED 贴片灯珠)、30 条 LED 蓝光 (460 nm) 灯带(每条灯带有 30 只蓝光 LED 贴片灯珠)和 30 条 LED 紫光 (390 nm) 灯带(每条灯带有 30 只紫光 LED 贴片灯珠)。培养期间,箱内相对湿度为  $(45 \pm 5)\%$ 、温度为  $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、光照强度为  $(500 \pm 3)\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,光照周期为昼 12 h/夜 12 h。培养至所有植株中有一株形成花蕾时取相同叶位的功能叶测定有关指标。

### 1.2 测定指标与方法

1.2.1 形态指标 株高和根长用绘图直尺测量,茎基粗用游标卡尺测量。鲜、干质量用感量千分之一的电子天平称量。叶面积用 YMJ-B 型便携式叶面积测定仪测量,气孔开度用扫描电镜 (Quanta 450 FEG) 观察并拍照。

1.2.2 光合参数 净光合速率 ( $P_n$ )、蒸腾速率 ( $Tr$ )、气孔导度 ( $G_s$ ) 和胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 用 TPS-2 便携式光合测定系统测定, 测定时  $CO_2$  由开放式气路供应, 相对湿度约 30%, 叶温为  $(25 \pm 1)^\circ C$ 。根据测定结果计算气孔限制值 ( $L_s$ )、瞬时水分利用效率 ( $WUE$ )、瞬时羧化效率 ( $CE$ ) 和瞬时光能利用率 ( $LUE$ )。其中,  $L_s = (1 - C_i/C_a) \times 100\%$  [16]、 $WUE = P_n/Tr$  ( $\mu mol \cdot mmol^{-1}$ ) [17]、 $CE = P_n/C_i$  ( $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ) [18]、 $LUE = P_n/PAR \times 1000$  ( $\mu mol \cdot mmol^{-1}$ )。

1.2.3 光合色素与 RuBPCase 参照王学奎等 [19] 之法测定光合色素含量, 参照 Lilley 等 [20] 之法测定 RuBPCase 活性。

1.2.4 叶绿素荧光参数 参照马跃等 [21] 之法, 采用 Handy PEA 植物效率分析仪, 选取与测定光合参数相同的功能叶, 在暗适应 30 min 后, 从仪器上直接读取最小荧光强 ( $F_o$ )、最大荧光强 ( $F_m$ )、可变荧光 ( $F_v$ )、暗适应下 PS II 的最大量子产额 ( $F_v/F_m$ )、叶片 PS II 潜在活性 ( $F_v/F_o$ ) 以及 PS II 光合性能指数  $PI$ 。

1.2.5 抗氧化指标 参照 Giannopolitis 等 [22] 之法测定超氧化物歧化酶 (SOD) 活性, 参照 Nakano 等 [23] 之法测定抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性, 参照 Schaedle 等 [24] 之法测定谷胱甘肽还原酶 (GR) 活性, 参照 Rao 等 [25] 之法测定过氧化氢酶 (CAT) 活性, 参照 Arakawa [26] 之法测定 ASC 含量, 参照 Griffith [27] 之法测定谷胱甘肽还原型 (GSH) 含量。

1.2.6 膜质过氧化指标 参照 Jiang 等 [28] 之法测定膜质过氧化产物总硫代巴比妥酸反应物 (thiobarbituric acid - reactive substance, TABRS) 的含量, 采用 Blum 等 [29] 之法测定电解质泄漏率。

1.2.7 活性氧检测 采用 NBT 染色法 [30] 检测  $O_2^{\cdot -}$  的生成, 采用 DAB 染色法 [30] 检测  $H_2O_2$  的积累。

### 1.3 数据分析方法

采用 DPS 9.50 和 Microsoft Excel 2003 软件进行数据计算与分析, 采用 Duncan's 新复极差法进行差异显著性分析, 显著性水平设置为  $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗生长发育及叶片气孔开度的影响

如图 1(见 150 页彩图)所示, 与白光相比, 蓝光明显促进了黄色甜椒幼苗伸长生长, 紫光对其有明显抑制作用。到处理第 23 d 时, 只有蓝光处理的植株有花蕾, 白光和紫光处理的无。此外, 蓝光处理后, 幼苗的株高、茎粗、株鲜和干重分别是白光处理

的 1.9 倍、1.2 倍、1.4 倍和 2.1 倍, 差异显著 ( $P < 0.05$ ), 其根长、分枝数和叶面积与白光处理的差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 但根数明显增多。与此相反, 紫光处理幼苗的株高、根长、茎粗、株鲜和干重、叶片数和叶面积分别是白光处理的 85.80%、88.41%、75.46%、31.81%、11.36%、56.11% 和 55.42%, 差异显著 ( $P < 0.05$ ) (表 1)。同时, 紫光抑制了黄色甜椒幼苗分枝的形成和根数的增加。扫描电镜观察发现, 在 3 种不同光质的处理中, 蓝光处理的叶片气孔开度最大, 分别是白光处理的近 2 倍、紫光处理的近 5 倍 (图 1 和表 1)。结果说明, 蓝光有利于黄色甜椒生长发育和光合作用气体交换。

### 2.2 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗叶片光合色素含量及 RuBPCase 活性的影响

图 2 结果显示, 与白光处理相比, 蓝光处理对黄色甜椒幼苗叶片的叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素 a + b 的含量无显著影响 ( $P > 0.05$ ), 但显著提高了 RuBPCase 的活性。紫光使叶绿素 a、叶绿素 b 以及叶绿素 a + b 的含量分别降低了 11.37%、17.27% 和 13.13%, 对叶片 RuBPCase 活性无显著影响 ( $P > 0.05$ ), 但使类胡萝卜素的含量提高到了白光的近 2 倍 ( $P < 0.05$ )。结果说明, 蓝光可通过提高 RuBPCase 活性增强黄色甜椒的光合作用, 紫光则通过降低叶绿素含量或加速叶绿素的分解而降低光合作用, 但其提高类胡萝卜素含量有利于光合作用进行。

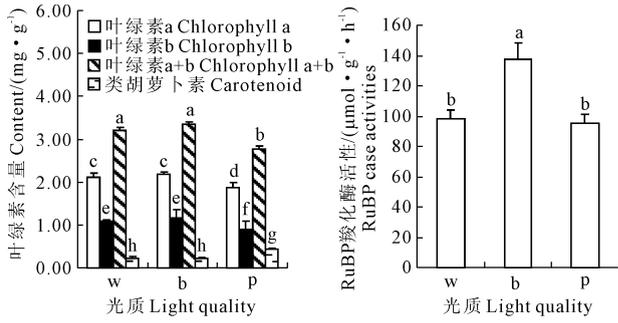
表 1 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗生长发育的影响

Table 1 Effect of blue light and purple light on the growth and development of yellow pepper seedling

指标 Index	处理 Treatment		
	w	b	p
气孔开度/ $\mu m$ Stomatal aperture	4.13 ± 0.24b	7.89 ± 0.62a	1.67 ± 0.10c
株高 Plant height/cm	18.03 ± 1.31b	34.67 ± 2.25a	15.47 ± 0.83c
根长 Root length/cm	4.83 ± 0.21a	4.87 ± 0.21a	4.27 ± 0.46b
分枝数 Branches/枝	2.89 ± 0.20a	2.88 ± 0.23a	0.00b
茎粗 Stem diameter/cm	3.79 ± 0.30b	4.60 ± 0.27a	2.86 ± 0.24c
株鲜重/g Plant fresh weight	19.30 ± 1.47b	27.07 ± 2.45a	6.14 ± 0.30c
株干重/g Plant dry weight	4.49 ± 0.28b	9.04 ± 0.79a	0.51 ± 0.04c
叶片数 Leaves/片	21.78 ± 1.56a	22.07 ± 1.58a	12.22 ± 0.83b
叶面积 Leaf area/ $cm^2$	4.06 ± 0.39a	3.92 ± 0.27a	2.25 ± 0.20b
花蕾数/个 Flowers or buds	0.00b	3.50 ± 0.07a	0.00b

注: 表中同行数据之后的不同字母表示在 5% 水平差异显著, 下同。

Note: Values with different letters within the same line are significantly different at 5% level, the same below, the same as below.



注:不同小写字母表示不同处理间 5% 水平差异显著,下同。

Note: Different small letters are significantly different at 5% level, the same as below.

图 2 蓝、紫对黄色甜椒叶片光合色素含量和 RuBP 羧化酶活性的影响

Fig.2 Effect of blue light and purple light on the photosynthetic pigment and RuBP carboxylase activity in the leaves of pepper seedling

### 2.3 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

由表 2 可见,黄色甜椒幼苗叶片的 PS II 最大量子产额 ( $F_v/F_m$ ) 和 PS II 潜在活性 ( $F_v/F_o$ ) 在各处理光间无明显差异 ( $P > 0.05$ )。蓝光处理使叶片 PS II 光合性能指数 ( $PI$ ) 显著增加,达白光处理的 1.69 倍,紫光对其无显著影响 ( $P > 0.05$ ),但使其最小荧光 ( $F_o$ ) 降低了 30%,差异显著 ( $P < 0.05$ )。说明不同光质对黄色甜椒幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响有所不同。

表 2 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响  
Table 2 Effect of blue light and purple light on the chlorophyll fluorescence parameters in the leaves of yellow pepper seedling

指标 Index	处理 Treatment		
	w	b	p
$F_o$	314.22 ± 5.56a	316.80 ± 8.43a	218.63 ± 6.07a
$F_v/F_m$	0.83 ± 0.00a	0.83 ± 0.00a	0.83 ± 0.00a
$F_v/F_o$	4.74 ± 0.16a	4.86 ± 0.16a	4.80 ± 0.15a
$PI$	2.03 ± 0.06b	3.44 ± 0.39a	1.88 ± 0.13c

表 3 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗叶片光合参数的影响

Table 3 Effect of blue light and purple light on the photosynthetic parameters in the leaves of yellow pepper seedling

指标 Index	处理 Treatment		
	w	b	p
蒸腾速率 $Tr/(mmol·m^{-2}·s^{-1})$	0.78 ± 0.050b	1.90 ± 0.250a	0.41 ± 0.040c
气孔导度 $G_s/(mmol·m^{-2}·s^{-1})$	70.88 ± 6.300b	332.00 ± 21.650a	25.42 ± 1.960c
光合速率 $P_n/(\mu mol·m^{-2}·s^{-1})$	2.31 ± 0.140b	7.38 ± 0.210a	1.26 ± 0.020c
胞间 $CO_2$ 浓度 $C_i/(\mu mol·mol^{-1})$	345.38 ± 24.700b	377.83 ± 24.340a	207.41 ± 10.310c
气孔限制值 $L_s/\%$	0.09 ± 0.001b	0.006 ± 0.001c	0.45 ± 0.030a
瞬时水分利用效率 $IWUE/(\mu mol·mmol^{-1})$	2.96 ± 0.110c	3.88 ± 0.230a	3.07 ± 0.190b
瞬时羧化效率 $CE/(mol·m^{-2}·s^{-1})$	0.007 ± 0.001b	0.014 ± 0.001a	0.006 ± 0.001b
瞬时光能利用率 $LUE/(\mu mol·mmol^{-1})$	0.77 ± 0.050b	2.46 ± 0.140a	0.42 ± 0.040c

### 2.4 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗叶片光合参数的影响

如表 3 所示,蓝光处理使黄色甜椒幼苗叶片的蒸腾速率、气孔导度、光合速率、胞间  $CO_2$  浓度、瞬时水分利用效率、瞬时羧化效率和瞬时光能利用率分别提高到白光处理的 2.44 倍、4.68 倍、3.20 倍、1.10 倍、1.30 倍、2.00 倍和 3.20 倍,使气孔的限制值降到白光处理的 6.6%,差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。紫光处理使黄色甜椒幼苗叶片的蒸腾速率、气孔导度、光合速率、胞间  $CO_2$  浓度、瞬时羧化效率和瞬时光能利用率分别降低到白光处理的 52.56%、35.86%、54.55%、60.05%、85.71% 和 54.55%,但使气孔的限制值和瞬时水分利用效率升到白光处理的近 5 倍和近 1 倍,差异达显著水平 ( $P < 0.05$ )。

### 2.5 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗抗氧化能力的影响

#### 2.5.1 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗叶片中活性氧积累的影响

根据活性氧  $O_2^-$  与 NBT 反应产生蓝色物质、 $H_2O_2$  与 DAB 反应产生棕红色聚合物的原理,将 3 种不同光质处理后的黄色甜椒幼苗叶片浸泡处理后的结果如图 3A 和图 3C 所示,蓝光处理的幼苗叶片上出现的蓝色和棕红色斑块(点)最少,紫光处理的叶片上出现的最多。图 3B 和图 3D 结果也分别表明,蓝光处理使叶片中  $O_2^-$  产生速率和  $H_2O_2$  含量降低到白光处理的 50.26% 和 44.60%,而紫光处理使其分别增加到白光的约 1.7 倍和约 1.4 倍,这说明蓝光处理降低了活性氧的积累,紫光处理则有促进作用。

#### 2.5.2 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗叶片膜质过氧化及其抗氧化系统的影响

膜质过氧化程度用组织中膜质过氧化产物硫代巴比妥酸生成物(TBARS)的多少来衡量。表 4 结果表明,蓝光处理使黄色甜椒幼苗叶片组织中的 TBARS 含量降为白光处理的 55.88%,紫光处理使叶片组织中的 TBARS 含量增为白光的 1.4 倍。



注:图右上角“—”代表 20  $\mu\text{m}$ ; w、b、p 分别代表白光、蓝光和紫光处理,下同。

Note: “—”, scale bar indicating 20  $\mu\text{m}$ ; w, b, p indicate white light, blue light and purple light treatment, the same as below.

图 1 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗生长及气孔开度的影响

Fig.1 Effects of blue light and purple light on the growth and development and stomatal aperture of yellow pepper seedling

表 4 蓝、紫光对黄色甜椒幼苗叶片膜质过氧化和抗氧化能力的影响

Table 4 Effect of blue light and purple light on the membrane lipid peroxidation and antioxidant capacity in the leaves of yellow pepper seedling

指标 Index	处理 Treatment		
	w	b	p
TBARS 含量 TBARS content/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$	1.70 $\pm$ 0.09b	0.95 $\pm$ 0.05c	2.30 $\pm$ 0.10a
电解质泄漏率 Electrolyte leakage rate/%	9.53 $\pm$ 0.90b	5.86 $\pm$ 0.31c	16.03 $\pm$ 1.22a
ASA 含量 ASA content/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	12.94 $\pm$ 0.09b	28.64 $\pm$ 2.04a	8.31 $\pm$ 0.79c
GSH 含量 GSH content/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$	137.37 $\pm$ 10.87b	186.23 $\pm$ 11.06a	58.98 $\pm$ 4.45c
SOD 活性 SOD activity/ $(\text{U}\cdot\text{g}^{-1})$	18.23 $\pm$ 0.14b	26.88 $\pm$ 2.54a	8.94 $\pm$ 0.52c
CAT 活性 CAT activity/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1})$	19.17 $\pm$ 0.11a	19.03 $\pm$ 2.29a	17.82 $\pm$ 0.10a
APX 活性 APX activity/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1})$	16.35 $\pm$ 0.09b	18.89 $\pm$ 1.08a	15.61 $\pm$ 1.00b
GR 活性 GR activity/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1})$	21.32 $\pm$ 2.09b	32.97 $\pm$ 1.56a	20.78 $\pm$ 1.36b

ASA 和 GSH 是植物体内重要的抗氧化物质。表 4 结果显示,蓝光处理使黄色甜椒幼苗叶片中的 ASA 和 GSH 分别提高到白光处理的 2.2 倍和 1.4 倍,而紫光处理则使其降低到白光处理的 64.22% 和 42.94%。SOD、CAT 和 APX 是植物体内清除活性氧的主要酶类,其活性高低与植物的抗氧化性强弱有关。表 4 结果显示,蓝光处理使黄色甜椒幼苗叶片的 SOD、CAT 和 APX 的活性分别提高到白光处理的 1.5 倍、1.4 倍和 1.2 倍,差异显著 ( $P < 0.05$ ),而

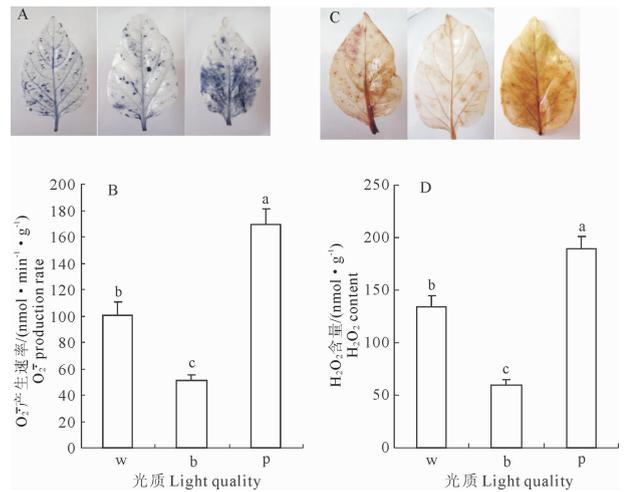


图 3 蓝、紫光对黄色甜椒叶片活性氧积累的影响

Fig.3 Effect of blue light and purple light on the active oxygen production or accumulation in the leaves of yellow pepper seedling

细胞膜完整性的丧失是膜质过氧化的表现,其可以通过检测电解质泄漏率来说明。如表 4 所示,蓝光处理使叶片电解质泄漏率降为白光处理的 61.49%,而紫光处理使其增加为白光的 1.68 倍。这些结果说明,在 3 种光质中,蓝光有利于维持细胞膜的完整性。

紫光处理使其下降到白光处理的 49.04%、92.96% 和 95.47%,差异显著 ( $P < 0.05$ )。GR 是 ASA - GSH 循环的关键酶,它通过维持较高的 GSH/GSSG 比率防止细胞遭受氧化胁迫。如表 4 所示,蓝光使黄色甜椒幼苗叶片中的 GR 活性提高到白光的 1.6 倍,紫光对其没有显著影响。

### 3 讨论

光是影响植物生长发育最重要的环境因子之

一,是叶绿素生物合成和叶绿体发育的必要条件,是光合作用的原动力。研究认为,光质对植物生长发育至关重要,它不仅作为一种能源控制光合作用,还作为触发信号影响植物生长发育,且不同光质触发不同的光受体,进而对植物生长发育产生不同影响<sup>[1,4]</sup>。本研究发现,LED白光、蓝光和紫光对黄色甜椒生长发育的影响有明显差异(图1)。与白光相比,蓝光明显促进了黄色甜椒茎的节间伸长和茎的加粗生长(表1),这与Hogewoning等<sup>[31]</sup>的结果是相似的,但与陈祥伟<sup>[1]</sup>的结果相反。闫萌萌等<sup>[4]</sup>的研究结果表明,蓝光可显著提高花生幼苗比叶面积和日本山葵幼苗的叶面积,与此不同,本研究中蓝光与白光相比,其对黄色甜椒叶面积的大小无明显影响,这可能与研究材料及光的来源与处理时间不同有关。与徐克章等<sup>[32]</sup>的研究结果相似,紫光对黄色甜椒的生长具有明显的抑制作用。本研究结果证实,蓝光通过促进黄色甜椒幼苗的节间生长而促使其地上部分的高度增加,一定长度的节间距离可使其保持较好的果形;紫光通过抑制黄色甜椒茎的伸长、分枝数的增加、叶片的扩展以及花蕾的形成而抑制其生长发育。本研究也证实,LED蓝光不仅显著提高了黄色甜椒的株高和干、鲜重,也明显加速了黄色甜椒花蕾的形成(表1)。

光合色素是光合作用的基础,光质直接影响光合色素的合成,从而影响植物的光合作用。研究已发现,蓝膜覆盖提高了柿子椒叶片的叶绿素含量<sup>[33]</sup>,LED蓝光不仅提高了四肩突四鞭藻细胞的叶绿素含量<sup>[34]</sup>,而且也提高了类胡萝卜素含量和叶绿素a/b值<sup>[4]</sup>。本研究表明,与白光相比,蓝光对黄色甜椒幼苗叶片的叶绿素a、叶绿素b以及叶绿素a+b含量无显著影响( $P > 0.05$ ),紫光却使此3项指标显著降低,相反却提高了叶片中的类胡萝卜素含量(图2),暗示蓝光下其光合速率的提高(表3)不是通过蓝光加速光合色素合成来实现的,紫光下其光合速率的降低(表3)与紫光降低叶片中的光合色素叶绿素a、叶绿素b以及叶绿素a+b含量却有直接关系;我们推测紫光下类胡萝卜素含量的增加是为了以非辐射的方式耗散光PSⅡ的过剩能量以保护叶绿素免受破坏。

有研究指出,最大光化学效率 $F_v/F_m$ 不仅是衡量光抑制程度的重要指标<sup>[35]</sup>,而且可用作表征PSⅡ原初光能转换效率的高低, $F_v/F_m$ 大幅度降低,则表明植物受到了光抑制<sup>[36]</sup>。与白光处理相比,蓝光提高了黄瓜幼苗叶片的 $F_v/F_m$ <sup>[7]</sup>。本研究发现,在白光、蓝光和紫光处理下,黄色甜椒叶片的

$F_v/F_m$ 没有显著变化,说明此3种光均未导致光抑制,这与徐凯等<sup>[37]</sup>的结果是一致的。同时,反应PSⅡ潜在活性的 $F_v/F_o$ 在3种光间无明显差异。 $F_o$ 是光系统Ⅱ反应中心处于完全开放时的荧光产量,它与叶片叶绿素浓度有关。本研究中,紫光降低了最小荧光值 $F_o$ ,这与其降低叶绿素的含量是相一致的。除此之外,本研究认为蓝光处理显著提高黄瓜幼苗叶片光合速率与其提高PSⅡ光合性能指数PI有一定的关系。

光也是影响气孔开闭最重要的外界因子之一。光诱导的气孔反应依赖于保卫细胞中三种光受体即叶绿素、隐花色素和光敏色素的共同作用。隐花色素、光敏色素和保卫细胞中的玉米黄素循环都与气孔运动的蓝光反应有关,蓝光刺激气孔开放。蓝光照射引起蚕豆叶片保卫细胞质膜 $H^+ - ATPase$ 将细胞内的 $H^+$ 泵出细胞,因而使保卫细胞外溶液酸化,酸化的结果导致保卫细胞的膨压发生改变,最终引起气孔的张开<sup>[38]</sup>。本研究用扫描电镜观察发现,在3种不同光质中,蓝光处理使叶片气孔开度增大到白光处理的近2倍、紫光处理的近5倍(图1和表1),这与用光合仪测得的蓝光处理下叶片气孔导度最大是相吻合的(表3)。由此推测,蓝光下黄色甜椒幼苗叶片的气孔保卫细胞也发生了如蚕豆叶片保卫细胞一样的一系列变化,故气孔的开度增大;在白光和紫光处理下,黄色甜椒幼苗叶片的气孔开度较小的原因与其保卫细胞中没有相应的光受体有关,但这仍需进一步的实验证明。与白光处理相比,蓝光照射提高了黄色甜椒幼苗叶片的气孔开度,这利于降低气孔限制值和推动气体交换使胞间 $CO_2$ 浓度升高和光合速率增加(表3)。武维华<sup>[38]</sup>认为,蒸腾作用也许是陆生植物为解决光合作用吸收 $CO_2$ 的需要而不得不付出的水分散失代价。本研究中,蓝光处理的黄色甜椒幼苗叶片蒸腾速率最高(表3),这正说明蓝光为了维持较强的光合作用(以光合速率衡量,表3)而付出了水分散失最大的代价。我们认为,也正是由于蓝光处理下有了比白光和紫光处理下较多的水分散失,所以蓝光处理下的黄色甜椒幼苗叶片以较高的瞬时水分利用效率、瞬时羧化效率和瞬时光能利用率(表3)以维持较高的光合速率。蓝光处理下,较高的RuBPCase活性(图2)也是瞬时羧化效率较高的原因之一。

$O_2$ 是光合作用的产物之一。在需氧生物利用 $O_2$ 的过程中,如果 $O_2$ 未被完全还原,就会产生某些氧化代谢产物及其衍生物如超氧阴离子( $O_2^{\cdot-}$ )、羟基自由基( $\cdot OH$ )、过氧化氢( $H_2O_2$ )以及单线态氧( $^1O_2$ )

等活性氧 (reactive oxygen species, ROS)。正常情况下,植物体内产生的 ROS 被其自身的抗氧化体系如抗氧化酶 SOD、APX、CAT 以及 GR 等和抗氧化物质如 GSH、ASA 和类胡萝卜素等清除掉,ROS 的产生与清除之间存在一个平衡。当植物受到胁迫时,ROS 的产生量增加,植物体要维持自身正常生理代谢就必须及时清除之。SOD 可使  $O_2^-$  歧化为  $H_2O_2$  和  $O_2$ , 由此产生的  $H_2O_2$  可由 CAT 直接清除,也可由 APX 和 GR 通过抗坏血酸和还原型谷胱甘肽循环加以清除。GSH、ASA 和类胡萝卜素等抗氧化物质,可以直接与 ROS 反应,也可以作为酶的底物出现在 ROS 的清除机制中。许多研究证实,在生物和非生物胁迫下植物体内活性氧增加的同时抗氧化酶活性增强。紫光和蓝光处理后,黄瓜叶片的 SOD、CAT 和 APX 等酶活性呈上升趋势,并减少了 MDA 的累积<sup>[39]</sup>。本研究结果显示,与白光相比,蓝光提高了黄色甜椒幼苗叶片中 SOD、APX 和 GR 活性和抗氧化剂 ASA 和 GR 的含量(表 4),降低了  $O_2^-$ 、 $H_2O_2$  和膜质过氧化化的产物 TBARS 在叶片中的产生或积累(图 3),且减少了电解质的泄漏(表 4);紫光则降低了 SOD、CAT、APX 和 GR 活性以及 ASA 和 GR 的含量(表 4),由此降低了黄色甜椒幼苗叶片的抗氧化性,从而使叶片中的  $O_2^-$  和  $H_2O_2$  有较多的积累,这不仅使膜的完整性受损、导致 TBARS 积累和电解质泄漏较多,而且也会损伤光合器官乃至整个光合系统,最终导致光合速率下降。由此说明,3 种光处理下,黄色甜椒幼苗的生长发育存在差异与其叶片的抗氧化能力强弱也有关。

## 4 结 论

综上所述,与白光处理相比,蓝光更有利于黄色甜椒幼苗的生长,紫光具有明显的抑制作用;LED 蓝光处理有利地增强了黄色甜椒幼苗叶片的光合作用和抗氧化能力,由此促进了其生长,且植株健壮,这可应用于黄色甜椒春季陆地播种前的工厂化育苗,但 LED 蓝光对黄色甜椒开花后的进一步发育以及对果实品质的影响如何尚待进一步研究;与他人研究相比,本研究还应在不同单色光之间进行时间、数量上的配比以及用不同单色光作为补光等方面进行进一步地探索,以期更好地为生产实践服务。

## 参 考 文 献:

- [1] 陈祥伟,刘世琦,王 越,等.不同 LED 光源对乌塌菜生长、光合特性及营养品质的影响[J].应用生态学报,2014,25(7):1955-1962.
- [2] Cho J Y, Son D M, Kim J M, et al. Effects of LEDs on the germination, growth and physiological activities of amaranth sprouts[J]. Korean Journal of Horticultural Science & Technology, 2008,26(2):106-112.
- [3] Macedo A F, Leal - Costa M V, Tavares E S, et al. The effect of light quality on leaf production and development of in vitro - cultured plants of *Alternanthera brasiliana* Kuntze[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011,70(1):43-50.
- [4] 闫萌萌,王铭伦,王洪波,等.光质对花生幼苗叶片光合色素含量及光合特性的影响[J].应用生态学报,2014,25(2):483-487.
- [5] Ceusters J, Borland A M, Taybi T, et al. Light quality modulates metabolic synchronization over the diel phases of crassulacean acid metabolism[J]. Journal of Experimental Botany, 2014,65(13):3705.
- [6] Dong C, Fu Y, Liu G, et al. Growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield and quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to LED light sources with different spectra combinations[J]. Journal of Agronomy and Crop Science, 2014,200(3):219-230.
- [7] Su N N, Wu Q, Shen Z G, et al. Effects of light quality on the chloroplastic ultrastructure and photosynthetic characteristics of cucumber seedlings[J]. Plant Growth Regulation: An International Journal on Natural and Synthetic Regulators, 2014,73(3):227-235.
- [8] Girault T, Leduc N, Laffaire M, et al. Rose development under blue light environment: Behaviour of three cultivars of rose bushes[J]. Acta Horticulturae, 2013,990:129-134.
- [9] 马 超,张 欢,郭银生,等.LED 在芽苗菜生产中的应用及前景[J].中国蔬菜,2010,(20):9-13.
- [10] Fixen K R, Thomas S C, Tong C B S. Blue light inhibition of plant morphological and developmental responses to light quality in a horticultural context in a day-neutral potato[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2012,31(3):342-350.
- [11] Yang Y T, Xiao P, Yang Q C. Effects of LED light quality R/B to growth of sweet potato plantlets in vitro and energy consumptions of lighting[J]. Acta Horticulturae, 2011,907:403-407.
- [12] Liu X Y, Chang T T, Guo S R, et al. Effect of different light quality of LED on growth and photosynthetic character in cherry tomato seedling[J]. Acta Horticulturae, 2011,907:325-330.
- [13] Ma G, Zhang L C, Setiawan C K, et al. Expression of genes related to ascorbate metabolism in postharvest broccoli[J]. Postharvest Biology and Technology, 2014,94:94-103.
- [14] Xu H L, Xu Q C, Li F L, et al. Applications of xerophytophysiology in plant production - LED blue light as a stimulus improved the tomato crop[J]. Scientia Horticulturae, 2012,148:190-196.
- [15] 鲁燕舞,张晓燕,耿殿祥,等.光质对萝卜芽苗菜总酚类物质含量及抗氧化能力的影响[J].园艺学报,2014,41(3):545-552.
- [16] Berry J A, Downton W J S. Environmental regulation of photosynthesis[C]//Govindjee. Photosynthesis Vol II, New York: Academia Press, 1982:263-343.
- [17] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the arid and semiarid zones[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1978,9:277-317.
- [18] 洪森荣,尹明华.红芽芋驯化苗对盐胁迫的光合及生理响应[J].西北植物学报,2013,33(12):2499-2506.
- [19] 王学奎,章文华,郝再彬,等.植物生理生化试验原理与技术[M].北京:高等教育出版社,2006:122-126.

- [20] Lilley R M, Walker D A. An improved spectrophotometric assay for ribulose biphosphate carboxylase[J]. *Biochimica Biophysica Acta*, 1974, 358:226-229.
- [21] 马跃,张蕾,李元源,等.‘寒富’苹果二倍体及其同源四倍体叶片超微结构和叶绿素荧光参数特征[J]. *西北植物学报*, 2012, 32(3):0477-0483.
- [22] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutase in higher plants[J]. *Plant Physiol*, 1977, 59:309-314.
- [23] Nakano Y, Asada K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant Cell Physiol*, 1981, 22:867-880.
- [24] Schaedle M, Bassham J A. Chloroplast glutathione reductase[J]. *Plant Physiol*, 1977, 59:1011-1012.
- [25] Rao M V, Paliyath G, Omrod D P. Ultraviolet-B and ozone induced biochemical changes in antioxidant enzymes of *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant Physiol*, 1996, 110:125-136.
- [26] Arakawa N, Tsutsumi K, Sanceda N G, et al. A rapid and sensitive method for the determination of ascorbic acid using 4, 7-diphenyl-1, 10-phenanthroline[J]. *Agric Biol Chem*, 1981, 45(5):1289-1290.
- [27] Griffith O W. Determination of glutathione and glutathione disulfide using glutathione reductase and 2-vinylpyridine[J]. *Anal Biochem*, 1980, 106:207-212.
- [28] Jiang M Y, Zhang J H. Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defence system and oxidative damage in leaves of maize seedlings[J]. *Plant Cell Physiol*, 2001, 11:1265-1273.
- [29] Blum A, Ebercon A. Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat[J]. *Crop Sci*, 1981, 21:43-47.
- [30] Romero-Puertas M C, Rodriguez-Serrano M, Corpas F J, et al. Cadmium-induced subcellular accumulation of  $O_2^-$  and  $H_2O_2$  in pea leaves[J]. *Plant Cell Environ*, 2004, 27:1122-1134.
- [31] Hogewoning S W, Jeong S W, Ieperen W V. Responses of supplemental blue light on flowering and stem extension growth of cut chrysanthemum[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 165:69-74.
- [32] 徐克章,唐树延.人参光生理研究 I.光质对人参植株形态、叶绿素含量和叶片结构的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 1987, 9(3):1-5.
- [33] Casierra-Posada F, Matallana-Diaz Y A, Zapata-Casierra E. Growth of bell pepper plants (*Capsicum annuum*) affected by coloured covers[J]. *Gesunde Pflanzen*, 2014, 66(4):149-155.
- [34] Fabian A, Giacomo S, Giovanni M, et al. Growth, photosynthetic efficiency, and biochemical composition of tetraselmis suecica F&M-M33 grown with LEDs of different colors[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2014, 111(5):956-964.
- [35] 王悦琳,宗晓娟,李德全.转玉米 ZmMPK7 基因烟草响应高盐胁迫的光合特性和抗氧化酶系统分析[J]. *核农学报*, 2010, 24(5):1086-1092.
- [36] 周艳虹,黄黎锋,喻景权.持续低温弱光对黄瓜叶片气体交换、叶绿素荧光猝灭和吸收光能分配的影响[J]. *植物生理与分子生物学报*, 2004, 30(2):153-160.
- [37] 徐凯,郭延平,张上隆.不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(2):369-375.
- [38] 武维华.植物生理学[M].北京:科学出版社, 2008:63-64.
- [39] 王虹,姜玉萍,师恺,等.光质对黄瓜叶片衰老与抗氧化酶系统的影响[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(3):529-534.

(上接第 139 页)

- [12] 张守仁.叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. *植物学通报*, 1999, 16(4):444-448.
- [13] Xu D Q, Zhang Y Z, Zhang R X. Photoinhibition of photosynthesis in plants[J]. *Plant Physiology Communications*, 1992, 28(4):237-243.
- [14] Gilmore A M, Yamamoto H Y. Zeaxanthin formation and energy dependent fluorescence quenching in pea chloroplasts under artificially mediated linear and cyclic electron transport[J]. *Plant Physiol*, 1991, 96(2):635-643.
- [15] 贺忠群,贺超兴,张志斌,等.不同丛枝菌根真菌对番茄生长及相关生理因素的影响[J]. *沈阳农业大学学报*, 2006, 37(3):308-312.
- [16] 刘润进,焦惠,李岩,等.丛枝菌根真菌物种多样性研究进展[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(9):2301-2307.
- [17] 曹岩坡,代鹏,戴素英,等.丛枝菌根真菌(AMF)对盐胁迫下芦笋幼苗生长及体内  $Na^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  含量和分布的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(6):1699-1704.
- [18] 曹刚,张国斌,郁继华,等.不同光质 LED 光源对黄瓜苗期生长及叶绿素荧光参数的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(6):1297-1304.
- [19] 刘会超,贾文庆.盐胁迫对白三叶幼苗叶片叶绿素含量和细胞膜透性的影响[J]. *广东农业科学*, 2008, (12):58-60.
- [20] Massacci A, Nabiev S M, Pietrosanti L, et al. Response of photosynthesis apparatus of cotton to the onset of drought stress under field conditions by gas change analysis and chlorophyll fluorescence imaging[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2008, 46(2):189-195.
- [21] Efeoglu B, Ekmekci Y, Cicek N. Physiological responses of three maize cultivars to drought stress and recovery[J]. *South African Journal of Botany*, 2009, 75(1):34-42.