

王翠丽, 赵旭, 赵鹏, 等. 不同补光灯对日光温室辣椒生长发育及品质的影响 [J]. 福建农业学报, 2019, 34 (9): 1047-1052.

WANG C L, ZHAO X, ZHAO P, et al. Effects of Supplemental Light on Growth, Physiology, and Quality of Chili Peppers Cultivated in Solar Greenhouse [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34 (9): 1047-1052.

不同补光灯对日光温室辣椒生长发育及品质的影响

王翠丽¹, 赵旭¹, 赵鹏², 杨世梅¹, 陈亮¹, 严宗山¹, 谢忠清^{1*}, 张肖凌¹

(1. 甘肃省农业工程技术研究院, 甘肃 武威 733000; 2. 柳树沟乡农业和畜牧业发展中心, 新疆 哈密 839000)

摘要:【目的】探究不同补光灯对辣椒生长发育及品质的影响, 为日光温室辣椒补光提供理论依据。【方法】以“37-94”辣椒为试材, 研究3种补光灯(植物补光灯、LED补光灯红:蓝=5:1、LED补光灯红:蓝:白=3:1:1)条件下, 不同补光灯对辣椒生长发育及品质的影响。【结果】与对照相比, LED补光灯红:蓝:白=3:1:1处理下, 辣椒株高、茎粗、叶长、叶宽和叶绿素含量显著增加; 净光合速率(Pn)、可溶性糖、可溶性蛋白和维生素C(Vc)含量较对照分别提高63.72%、70%、77%、8.2%; 红:蓝=5:1处理下, 辣椒叶片的气孔导度(Gs)、胞间二氧化碳(Ci)和蒸腾速率(Tr)最高, 较对照提高幅度依次是73.33%、12.94%、35.83。【结论】LED补光灯红:蓝:白=3:1:1组合光能够提高辣椒光合特性, 促进光合产物的积累, 进而提高果实品质。

关键词: 辣椒; 补光; 光合特性; 品质

中图分类号: S 641

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2019) 09-1047-06

Effects of Supplemental Light on Growth, Physiology, and Quality of Chili Peppers Cultivated in Solar Greenhouse

WANG Cui-li¹, ZHAO Xu¹, ZHAO Peng², YANG Shi-mei¹, CHEN Liang¹,
YAN Zong-shan¹, XIE Zhong-qing^{1*}, ZHANG Xiao-ling¹

(1. Gansu Academy of Agricultural Engineering & Technology, Wuwei, Gansu 733000, China; 2. Agricultural and Animal Husbandry Development Center of Liushugou, Hami, Xinjiang 839000, China)

Abstract: 【Objective】 Effects of supplemental light on the growth, photosynthesis, and quality of chili peppers cultivated in a solar greenhouse were studied. 【Method】 In the greenhouse, Chili Pepper 37-94 plants were exposed to supplemental light emitted from LEDs at red:blue=5:1, LEDs at red:blue:white=3:1:1, or a plant supplementary lamp for observations and measurements on the responses of the plants. 【Result】 The plant height, stem girth, leaf length, leaf width, and chlorophyll content of the treated plants were significantly greater than those of control. Under the LEDs at red:blue:white=3:1:1 treatment, the net leaf photosynthetic rate increased by 63.72%, and the contents of soluble sugar, soluble protein, and Vc of the chilis rose 70%, 77%, and 8.2%, respectively, over those of control. Among the 3 treatments, LEDs at red:blue=5:1 produced the highest Gs, Ci, and Tr in the leaves with increases of 73.33%, 12.94%, and 35.83, respectively, over those of control. 【Conclusion】 Exposure of LEDs at red:blue:white=3:1:1 promoted the photosynthesis increasing the chlorophyll formation and accumulation in the chili pepper plants that enhanced the plant growth and improved chili quality.

Key words: Chili pepper; light exposure; photosynthesis; chili quality

0 引言

【研究意义】光照影响植物生长发育、光合产

物和产量的形成, 是植物生长最重要的环境因子之一。冬春季节, 由于连续的阴雨雪天气, 造成设施内部光照严重不足, 不能满足蔬菜作物生长发育的

收稿日期: 2019-05-09 初稿; 2019-08-06 修改稿

作者简介: 王翠丽(1989-)女, 硕士, 研究实习员, 主要从事设施蔬菜栽培生理与生长调控研究(E-mail: wangcl1116@163.com)

* 通信作者: 谢忠清(1967-), 男, 高级农艺师, 主要从事设施作物生长调控研究(E-mail: 1072207627@qq.com)

基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(145RJZH192); 甘肃省科技计划项目(17CX2JA013、1605JTC009); 甘肃省省属科研院所条件建设专项(18JR2TA008)

需求,使设施内出现植株幼苗徒长,生长发育缓慢,落花落果,果实膨大受阻,蔬菜产量下降,品质变差等问题^[1]。因此,利用人工补光,调控设施光环境已成为一种必然趋势。辣椒 *Capsicum annuum* L.,茄科辣椒属植物,喜温、喜光、耐旱、怕涝,在世界各地广泛种植^[2-3]。辣椒是中国北方设施主栽蔬菜之一,果实中含有丰富的可溶性固形物、维生素 C、胡萝卜素、辣椒素,是食品制作中的调味品,深受人们的喜爱^[4-5]。但是由于冬季光照时间短,春季阴雨天气多,光照强度大于 30 000 lx 的平均时间为 4.5 h^[6-7],长时间的弱光造成辣椒幼苗徒长,生长发育不良,果实畸形,品质变差,进而导致减产^[8]。LED 补光灯是一种节能、环保、体积小、寿命长、可近距离照射植物的冷光源,可作为日光温室植物补光最理想光源^[9]。【前人研究进展】日光温室是我国北方地区冬春季节主要种植园艺作物的设施类型^[10],光照是作物进行光合作用的能源,影响着温室内温度湿度的形成^[11]。有研究表明,光照在植物茎的生长、叶绿素的合成、诱导开花和果实生长过程中起重要的作用^[12];另外,植物生长发育不仅受光强的制约,也受光质及其组成比例的影响^[13]。研究认为通过补光可以有效缓解设施内光照不足的情况,改善设施作物生长环境,促进作物生长发育、改善品质以及提高产量^[14]。有研究认为一定比例的红蓝组合光可以有效提高辣椒、茄子的茎粗^[15];补充红光和红蓝光均可提高辣椒幼苗茎粗、鲜重、干重及壮苗指数^[16];另有研究表明补充黄光有利于彩色甜椒培育壮苗,补充绿光可以提高辣椒株高、鲜重和干重^[17]。【本研究切入点】我国北方地区,冬春季日照时间短,连续的阴雨天气,使设施内出现低温弱光现象,严重影响作物的生长发育,因此,通过人工补光,提高设施内光照环境,已成为设施补光的必要条件,但是利用白光与其他光质组合对辣椒进行暗期补光,研究补光对辣椒生长发育及品质的影响方面报道较少。【拟解决的关键问题】本研究利用 LED 红蓝白 3 种组合光和植物补光灯,对辣椒进行补光试验,旨在探究不同补光灯对辣椒生长发育及品质的影响,以期对辣椒补光技术提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验设计

试验于 2018 年 9 月至 2019 年 1 月在甘肃省武威市古浪县黄花滩国家产业扶贫园区日光温室内进行。供试辣椒品种为 37-94。LED 光源由山东贵翔光电有限公司生产的 LED 植物生长灯,植物补光灯由杭州佳遇公司提供,额定功率为 36 W,辣椒采用黄

沙基质栽培,2017 年 9 月 10 日定植,10 月 15 日开始补光处理。共设置 4 个处理,分别为 T1:红光:蓝光=5:1;T2:红光:蓝光:白光=3:1:1;T3:植物补光灯;CK 对照:不补光。单因素区组设计,每处理 3 次重复,按“S”形选取 9 株植株测定相关指标,于 9 月 28 日进行第一次指标测定,以后每 30 d 测定 1 次,共测定 5 次,至 2019 年 1 月 10 日补光结束。

1.2 补光设置

光源设置在作物行间(垄面垂直方向)距作物顶部 30 cm 处,光源高度随辣椒生长进行调整,T1、T2、T3 处理每垄安装 2 盏补光灯,每处理之间设置 2 垄保护行,避免处理之间相互影响。补光时间为 18:00—22:00,补光灯光强为 $37.5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

1.3 测试指标及测试方法

株高:用卷尺测定辣椒茎基部至生长点的长度。

茎粗:用数显卡尺测定茎基部第一节处的茎粗。

叶长和叶宽:选取生长点向下第 3 片功能叶固定测量。

叶绿素含量:用日本叶绿素计 SPAD-502 测定。

光合指标:辣椒盛果期(11 月 28 日),进行辣椒叶片光合生理指标的测定。白天上午 9:30~11:30,夜间 19:30~21:30,用 Li-6400 便携式光合测定仪测定辣椒叶片 Pn、Tr、Ci 和 Gs 等光合参数。选取自生长点下数第 3~4 片完全展开、生长良好的辣椒叶片,测定光强为 $1\,000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,CO₂ 浓度为 $380 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,相对湿度为 75%。

果实品质:盛果期,采取辣椒果实进行品质测定,可溶性糖含量:采用蒽酮法^[18];可溶性蛋白含量:采用考马斯亮蓝 G-250 溶液法^[19];维生素 C 含量:采用 2,6-二氯酚靛酚钠染色法^[15]测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 软件对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同补光灯对辣椒生长的影响

2.1.1 不同补光灯对辣椒株高的影响 表 1 可以看出,整个生育期,不同补光条件下辣椒的株高均高于 CK 处理。定植 30 d、60 d、120 d 后,T2 处理辣椒株高较 CK 和 T1 处理显著增加,增幅分别为 21.22%、13.68%;28.43%、15.69%;33.05%、12.58%,与 T3 处理之间无显著性差异。定植 90 d 时,T2 处理株高较 CK、T1、T3 处理分别提高 25.67 cm、9.67 cm、7.67 cm;120 d 时,CK、T1、T2、T3 处理株高依次为 80.67 cm、95.33 cm、107.33 cm、103.00 cm。

2.1.2 不同补光灯对辣椒茎粗的影响 从表 2 可知,

表 1 不同补光灯对辣椒株高的影响

Table 1 Effect of supplemental light on height of chili pepper plants

处理 Treatment	30 d	60 d	90 d	120 d
CK	48.67±0.88 c	72.67±1.61 c	78.33±3.84 b	80.67±2.33 c
T1	52.33±1.33 bc	80.67±1.20 b	94.33±1.15 a	95.33±2.33 b
T2	59.00±1.52 a	93.33±1.76 a	104.00±3.01 a	107.33±0.88 a
T3	55.83±2.40 ab	83.67±3.93 ab	96.33±3.38 a	103.00±1.00 a

注：表中同列不同字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different letters on a same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

随着辣椒生育周期延长，各处理茎粗均呈现增大趋势。定植 30 d，T2 处理辣椒茎粗显著高于 CK、T1 和 T3 处理，分别增大 1.28 cm、1.22 cm、0.41 cm，定植 60 d 时，T2 处理显著高于 CK 处理，增幅为 25.08%；拉秧期（定植 120 d），各处理茎粗表现为：T2>T1>T3>CK。

表 2 不同补光灯对辣椒茎粗的影响

Table 2 Effect of supplemental light on stem girth of chili pepper plants

处理 Treatment	30 d	60 d	90 d	120 d
CK	8.38±0.10 b	9.85±0.28 c	10.47±0.20 b	12.38±0.21 c
T1	8.44±0.10 b	10.80±0.14 ab	13.28±0.46 a	14.35±0.70 ab
T2	9.67±1.08 a	12.32±0.34 a	14.33±0.41 a	14.97±0.50 a
T3	9.25±0.04 b	10.28±0.73 ab	13.50±0.32 a	13.26±0.39 bc

注：表中同列数据后不同字母表示不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$)，下同。

Note: Different letters on a same column indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$). Same for the following.

2.1.3 不同补光灯对辣椒叶长的影响 从表 3 可以看出，不同补光灯影响辣椒叶片的伸长生长。叶片叶长在整个生育期呈现先升高后降低的趋势。60 d 时，各处理叶片叶长最大，3 种补光处理比较，T3 处理叶长较 T1 分别提高 11.22%、9.67%，较 T2 处理分别提高 3.16%、8.93%；在整个生育期 T3 处理显著高于对照，120 d 较对照增加 31.12%。

表 3 不同补光灯对辣椒叶长的影响

Table 3 Effect of supplemental light on leaf length of chili pepper plants

处理 Treatment	30 d	60 d	90 d	120 d
CK	6.97±0.23 c	9.00±0.06 c	8.33±0.33 bc	5.68±0.31 b
T1	7.63±0.68 bc	9.80±0.31 bc	9.27±0.15 ab	6.68±0.07 b
T2	9.67±0.21 a	10.90±0.18 a	10.17±0.60 a	7.45±0.06 a
T3	9.00±0.12 ab	10.57±0.47 ab	9.39±0.10 ab	7.12±0.19 ab

2.1.4 不同补光灯对辣椒叶宽的影响 由表 4 可知，不同补光灯影响辣椒叶片叶宽生长，整个生育期均表现为 T3 处理叶宽高于其他处理，在定植 60 d，T3 处理叶宽最大，为 6.97 cm，显著高于对照，较对照提高 39.40%，在整个生育期，叶宽的变化幅度为先增大后减小的趋势。

表 4 不同补光灯对辣椒叶宽的影响

Table 4 Effect of supplemental light on leaf width of chili pepper plants

处理 Treatment	30 d	60 d	90 d	120 d
CK	3.10±0.15 c	4.00±0.05 c	4.75±0.33 b	3.62±0.05 b
T1	4.30±0.15 b	5.67±0.17 bc	5.33±0.12 a	3.74±0.15 b
T2	5.13±0.22 a	6.97±0.55 a	5.83±0.60 a	4.12±0.02 a
T3	4.73±0.08 ab	6.23±0.27 ab	5.65±0.47 a	3.90±0.06 ab

2.2 不同补光灯对辣椒叶绿素含量的影响

由图 1 可知，随着辣椒生育周期的变化，叶绿素含量呈先上升后降低的趋势，3 种补光灯下叶绿素含量显著高于对照，尤其以 T2 处理叶绿素含量为最高；定植 60 d 时，各处理辣椒叶绿素含量达到最高值，T2 处理叶绿素含量最高，CK 处理叶绿素含量最低；随着生育期的延长，辣椒叶片光合作用能力下降，叶片中叶绿素含量也逐渐降低，定植 120 d 时，各处理叶绿素含量表现为：T2>T1>T3>CK；因此，可以看出在红光和蓝光的基础上补充白光可以提高辣椒叶片叶绿素 a、b 的含量。

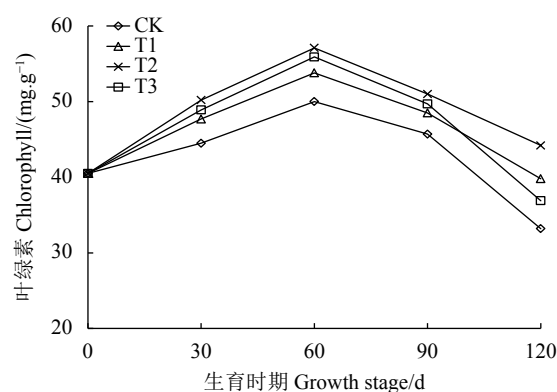


图 1 不同补光灯对辣椒叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effect of supplemental light on chlorophyll in leaves of chili pepper plants

2.3 不同补光灯对辣椒光合作用的影响

表 5 可知，不同补光条件下，T1、T2 和 T3 处理叶片净光合速率 (P_n) 显著高于 CK，分别较 CK 提高 63.72%、18.06%、25.08%，说明补光均能有效提高辣椒叶片光合作用，而且 T2 处理补光的效果最

好,表明红蓝白 3 种组合光更有利于提高辣椒叶片光合作用。各处理辣椒叶片胞间 CO_2 浓度 (C_i) 差异不显著,其中 T3 处理高于其他处理,为 $0.25 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$;不同补光条件对辣椒叶片气孔导度 (G_s) 和蒸腾速率 (Tr) 影响相似, T3 处理的气孔导度和蒸腾速率

均最大,为 $399.29 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$ 显著高于 CK; T1 和 T2 处理均能显著增强辣椒叶片的气孔导度和蒸腾速率,且气孔导度较 CK 处理分别提高 2.85% 和 8.29%。可见,不同补光灯对辣椒净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均有显著的影响。

表 5 不同补光灯对辣椒光合作用的影响
Table 5 Effect of supplemental light on photosynthesis of chili pepper plants

处理 Treatment	夜间 Night (18:00—22:00)			
	$P_n / \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$	$C_i / \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	$G_s / \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$	$Tr / \text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2}$
CK	2.10 ± 0.01 c	0.03 ± 0.02 a	353.53 ± 69.51 b	0.24 ± 0.14 c
T1	6.95 ± 0.01 b	0.07 ± 0.04 a	363.60 ± 159.30 b	0.57 ± 0.28 b
T2	7.87 ± 0.02 a	0.12 ± 0.06 a	382.83 ± 71.22 ab	0.84 ± 0.36 ab
T3	6.21 ± 0.08 ab	0.25 ± 0.20 a	399.29 ± 115.11 a	1.10 ± 0.71 a

2.4 不同补光灯对辣椒品质的影响

由表 6 可知,不同补光灯对辣椒品质有显著影响, T2 处理的可溶性糖,可溶性蛋白和 Vc 含量都显著高于对照,较对照分别提高 70%、77%、8.2%。

不同补光条件下, T2 处理的可溶性糖显著高于 T1 处理,较 T1 处理提高 32.47%,但与 T3 处理之间差异不显著。

表 6 不同补光灯对辣椒品质的影响
Table 6 Effect of supplemental light on chili quality

处理 Treatment	可溶性糖 Content of soluble sugar/%	可溶性蛋白 Content of soluble protein/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	Vc Content of Vc/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)
CK	0.60 ± 0.03 c	0.54 ± 0.02 c	1.34 ± 0.01 b
T1	0.77 ± 0.12 bc	0.72 ± 0.03 b	1.44 ± 0.01 a
T2	1.02 ± 0.03 a	0.96 ± 0.02 a	1.45 ± 0.01 a
T3	0.96 ± 0.05 ab	0.77 ± 0.02 b	1.37 ± 0.01 b

3 讨论与结论

光是植物生长发育重要的环境因子之一,影响蔬菜的生长发育。曲溪等^[20]研究表明红光促进植物根系生长,蓝光促进茎和叶柄的伸长生长。陈星星等^[21]研究发现 LED 光源不同光质比对白掌组培苗生长的影响,在 80% 红光+20% 蓝光处理下,白掌组培苗的叶长、叶幅、根数、最大根长、根系活力、整株鲜重、地上鲜重和地下鲜重都达到最大值。本试验中 LED 红:蓝:白=3:1:1 处理下,辣椒株高、茎粗、叶长和叶宽显著高于其他处理,这与文莲莲在番茄上的研究结果相似。

叶绿素在植物光合作用中能够捕获光能,其含量直接影响植物光合能力的强弱^[22]。光质影响着植物气孔数目,大小及开闭以及光合色素的合成^[22]。杜洪涛等^[23]利用 5 种(红、黄、蓝、绿、白) $30 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的补光灯照射不同品种的彩色甜椒

幼苗,发现 LED 蓝光可以有效促进各品种彩色甜椒幼苗叶绿素含量的积累。陈星星等^[21]在 LED 光源不同光质比对白掌组培苗生长的影响试验中发现,蓝光处理下白掌组培苗的叶绿素含量最高。周成波等^[17]在补光光质对叶用莴苣光合特性的影响研究中发现白+蓝光处理下 P_n 较对照提高 21.7%。本试验研究发现红:蓝:白=3:1:1 处理下,辣椒叶片中叶绿素含量最高,可见红:蓝:白=3:1:1 有利于辣椒叶片叶绿素的积累,这与周成波在莴苣上的研究结果一致。对于光合特性的研究发现,夜间补光情况下,相比对照,红:蓝=5:1 处理下的辣椒叶片 P_n 、 G_s 、 Tr 显著提高,红:蓝:白=3:1:1 处理下的 P_n 、 G_s 、 C_i 和 Tr 最高。说明不同补光灯处理对辣椒光合特性作用效果不同。

可溶性糖、可溶性蛋白质和 Vc 含量是反映蔬菜营养品质的重要指标,其含量高低决定着蔬菜的品质^[24],吴根良等^[25]对不同 LED 光源对设施越冬辣

椒果实品质和产量的影响研究表明，红：蓝=8：3可促进可溶性总糖、Vc和可溶性蛋白的形成。王晓芬^[26]等研究发现LED蓝光可促使辣椒中Vc含量显著升高。本试验中，红：蓝：白=3：1：1和普通植物补光灯处理均能显著提高辣椒果实Vc含量，这与吴根良^[26]、蒲高斌等^[27]和闻婧等^[28]研究结果一致，说明不同光质对Vc合成是不一样的。光质对植物可溶性总糖含量有重要影响^[29]，本试验中，红：蓝：白=3：1：1处理能显著提高辣椒果实中可溶性糖的含量，这与蒲高斌等^[27]研究结果一致。因此，不同补光灯处理下，红：蓝：白=3：1：1可显著增加辣椒植株株高、茎粗、叶长、叶宽和叶绿素含量，增强光合作用，促进光合产物的积累，提高果实中可溶性糖、可溶性蛋白和Vc含量，进而改善果实品质。

参考文献：

- [1] 刘再亮, 马承伟, 杨其长. 设施环境中红光与远红光比值调控的研究进展 [J]. *农业工程学报*, 2004, 20 (1): 270-273.
LIU Z L, MA C W, YANG Q C. Review on controlling the ratio of red light to far-red light in protected environment [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20 (1): 270-273. (in Chinese)
- [2] ROSSO F, ZOPPELLARI F, SALA G, et al. Effect of rhizospheric microorganisms inoculum on sweet pepper quality [J]. *Journal of Biotechnology*, 2010, 150 (6): 273.
- [3] 李素霞, 谢朝阳, 季斌, 等. 不同改良剂在镉与硝酸盐复合污染下对辣椒品质的影响 [J]. *西南农业学报*, 2011, 24 (4): 1480-1483.
LI S X, XIE Z Y, JI B, et al. Effects of Several Modifiers on Quality of Pepper in Interactive of Nitrogen Nutrition and Cadmium Contamination Soil [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24 (4): 1480-1483. (in Chinese)
- [4] 贾文燕, 梁银丽, 白彩虹, 等. 前茬作物对辣椒生长发育及产量和品质的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38 (5): 119-124, 130.
JIA W Y, LIANG Y L, BAI C H, et al. Effect of fore crops on growth, yield and quality of hot pepper [J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*, 2010, 38 (5): 119-124, 130. (in Chinese)
- [5] 李莉萍, 王军, 段泽敏, 等. 有机肥、无机肥与微肥配施对色素辣椒品质的影响 [J]. *热带作物报*, 2009, 30 (12): 1759-1763.
LI L P, WANG J, DUAN Z M. Effects of Combined Application of Organic, Inorganic and Trace Elements Fertilizers on the Development and Yield of Pigment Pepper [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2009, 30 (12): 1759-1763. (in Chinese)
- [6] 祁光斌, 颀建明, 郁继华, 等. 河西走廊GN-N10B型石墙钢架日光温室温光环境分析 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2016, 51 (1): 84-89.
QI G B, XIE J M, YU J H, et al. Analysis on temperature and light of solar greenhouse called Hexi corridor GN-N10B stone wall steel [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2016, 51 (1): 84-89. (in Chinese)
- [7] 祁娟霞, 韦峰, 董艳, 等. 不同补光时间对温室番茄生长发育的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44 (8): 245-248.
QI J X, WEI F, DONG Y, ET al. Effects of different Light-replenishing time on the growth and Development of Tomato in greenhouse [J]. *Jiangsu agricultural science*, 2016, 44 (8): 245-248. (in Chinese)
- [8] 王洪安. 北方温室人工补光光源特性及优化配置研究 [J]. *吉林农业*, 2011 (1): 33-34.
WANG H A. Study on characteristics and optimal allocation of artificial Light Source for greenhouse in North China [J]. *Jilin agriculture*, 2011 (1): 33-34. (in Chinese)
- [9] 刘文科. LED补光对日光温室番茄生长和产量的影响 [J]. *农业工程技术*, 2016, 36 (4): 40-41.
LIU W K. Effects of LED Light supplementation on Tomato growth and yield in Solar greenhouse [J]. *Agricultural engineering technology*, 2016, 36 (4): 40-41. (in Chinese)
- [10] 曹阳. 冬季温室补光对果菜类作物生长发育的影响(综述) [J]. *河北农业科学*, 2009, 13 (3): 10-12.
CAO Y. Effects of greenhouse Light supplementation on the growth and Development of Fruit and vegetable crops in Winter [J]. *Hebei agricultural science*, 2009, 13 (3): 10-12. (in Chinese)
- [11] 谢景, 刘厚诚, 宋世威, 等. 光源及光质调控在温室蔬菜生产中的应用研究进展 [J]. *中国蔬菜*, 2012 (2): 1-7.
XIE J, LIU H C, SONG S W, et al. Research Progresses in Application of Artificial Supplement Light Source in Greenhouse Vegetable Production [J]. *Chinese vegetables*, 2012 (2): 1-7. (in Chinese)
- [12] 廖祥儒, 张蕾徐, 景智, 等. 光在植物生长发育中的作用 [J]. *河北大学学报: 自然科学版*, 2001, 21 (3): 341-346.
LIAO X R, ZHANG G X, JING Z, et al. Role of Light in Plant Development [J]. *Journal of Hebei University(Natural Science Edition)*, 2001, 21 (3): 341-346. (in Chinese)
- [13] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响 [J]. *植物生理学报*, 2015, 51 (8): 1217-1234.
XU D Q, GAO W, RUAN J. Effects of Light Quality on Plant Growth and Development [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51 (8): 1217-1234. (in Chinese)
- [14] OUYANG J, WANG X D, ZHAO B, et al. Light intensity and spectral quality influencing the callus growth of *Cistanche deserticola* and biosynthesis of phenylethanoid glycosides [J]. *Plant Science*, 2003, 165 (3): 657-661.
- [15] 王芳, 高芳云, 吕顺, 等. 不同比例红蓝LED灯对蔬菜育苗的补光效应 [J]. *热带作物学报*, 2015, 36 (8): 1398-1402.
WANG F, GAO F Y, LV S, et al. Supplementing Light Effects of Light Emitting [J]. *Diodes on Vegetable Seedling*, 2015, 36 (8): 1398-1402. (in Chinese)
- [16] 崔瑾, 马志虎, 徐志刚, 等. 不同光质补光对黄瓜、辣椒和番茄幼苗生长及生理特性的影响 [J]. *园艺学报*, 2009, 36 (5): 663-670.
CUI J, MA Z H, XU Z G, et al. Effects of Supplemental Lighting with Different Light Qualities on Growth and Physiological Characteristics of Cucumber, Pepper and Tomato Seed-lings [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, 36 (5): 663-670. (in Chinese)

- [17] 周成波, 张旭, 刘彬彬, 等. 补光光质对叶用莴苣光合特性的影响 [J]. 植物生理学报, 2015, 51 (12): 2255-2262.
ZHOU C B, ZHANG X, LIU B B, et al. The Effect of Supplementary Light Quality on Physiological Characteristics of Lettuce [J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51 (12): 2255-2262. (in Chinese)
- [18] 叶尚红, 张志明, 陈疏影, 等. 植物生理生化实验教程[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2004.
- [19] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [20] 曲溪, 叶方铭, 宋杰琼, 等. LED灯在植物补光领域的效用探究 [J]. 灯与照明, 2008 (2): 41-45.
QU X, YE F M, SONG J Q, et al. Study on the utility of LED lamp in the field of plant light supply [J]. *Lamp and lighting*, 2008 (2): 41-45. (in Chinese)
- [21] 陈星星, 邵秀丽, 何松林. LED光源不同光质比对白掌组培苗生长的影响 [J]. 北方园艺, 2015 (6): 86-89.
CHEN X X, SHAO X L, HE S L. Effect of different light quality ratios of LED growth of spathiphyllum in vitro [J]. *Northern Horticulture*, 2015 (6): 86-89. (in Chinese)
- [22] 郑洁, 胡美君, 郭延平. 光质对植物光合作用的调控及其机理 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (7): 1619-1642.
ZHENG J, HU M J, GUO Y P. Regulation of photosynthesis by light quality and its mechanism in plants [J]. *Journal of applied ecology*, 2008, 19 (7): 1619-1642. (in Chinese)
- [23] 杜洪涛, 刘世琦, 张珍. 光质对彩色甜椒幼苗生长及酶活性影响 [J]. 华北农学报, 2005, 20 (2): 45-48.
DU H T, LIU S Q, ZHANG Z. Effects of Light Qualities on Growth and Activity of Enzymes in Leaves of Color Pimientos Seedling [J]. *Journal of North China Agriculture*, 2005, 20 (2): 45-48. (in Chinese)
- [24] 汤宏, 张杨珠, 曾掌权, 等. 施用有机肥对蔬菜品质影响的研究进展 [J]. 湖南农业科学, 2009 (6): 69-72.
TANG H, ZHANG Y Z, ZENG Z Q, et al. Research Progress of the Effects of Organic Fertilizers Application on the Quality of Vegetables [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2009 (6): 69-72. (in Chinese)
- [25] 吴根良, 郑积荣, 李许可. 不同LED光源对设施越冬辣椒果实品质和产量的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31 (2): 246-253.
WU G L, ZHENG J R, LI X K. Effect of different LED sources on the quality and yield of overwintering pepper in the greenhouse [J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2014, 31 (2): 246-253. (in Chinese)
- [26] 王晓芬, 邵海燕, 吴伟杰, 等. LED蓝光对辣椒采后色泽及品质的影响 [J]. 核农学报, 2019, 33 (1): 112-119.
WANG X F, GAO H Y, WU W J, et al. Effect of Light-emitting Diode Blue Light on Pepper Post Harvest Quality [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33 (1): 112-119. (in Chinese)
- [27] 蒲高斌, 刘世琦, 杜洪涛, 等. 光质对番茄果实转色期品质变化的影响 [J]. 中国农学通报, 2005 (4): 176-178, 187.
PU G B, LIU S Q, DU H T, et al. Effect of light quality on tomato fruit qualities in turning-color period [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005 (4): 176-178, 187. (in Chinese)
- [28] 闻婧, 杨其长, 魏灵玲, 等. 不同红蓝LED组合光源对叶用莴苣光合特性和品质的影响及节能评价 [J]. 园艺学报, 2011, 38 (4): 761-769.
WEN J, YANG Q C, WEI L L, et al. Effects of different Red and Blue LED combination Light sources on photosynthetic characteristics and quality of Leaf lettuce and Evaluation of Energy Saving [J]. *Journal of Horticulture*, 2011, 38 (4): 761-769. (in Chinese)
- [29] LI S S, PAN R C. Effect of blue light on the metabolism of carbohydrate and protein in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings [J]. *Acta Phytophysiol Sin*, 1995, 21 (1): 22-28.

(责任编辑: 林海清)