

不同生育期补光对温室甜椒生长、产量及品质的影响

段青青¹, 张禄祺^{1,2}, 张自坤^{1,*}

¹德州市农业科学研究院, 山东德州253015

²河北农业大学园艺学院, 河北保定071001

*通信作者(13853455807@163.com)

摘要: 本文以甜椒‘奥黛丽’为试材, 以自然不补光为对照(CK), 通过利用3种不同光质(红蓝2:1: 2R1B; 红蓝4:1: 4R1B; 红蓝8:1: 8R1B)的LED补光灯补光, 研究了不同生育期(苗期、花期和果期)补光对甜椒生长、产量及品质的影响, 以期筛选出适宜不同生育期的补光光质。结果显示, 与对照相比, 苗期补光, 4R1B处理的茎粗、叶面积、果实糖酸比、VC和可溶性糖含量显著增加, 8R1B处理的地上部生物量最高、硝酸盐含量最低, 且4R1B和8R1B处理的单株果实数、单果重和单产显著高于2R1B。花期补光, 3种光质处理的硝酸盐含量显著降低, 糖酸比和可溶性糖含量显著升高, 单果重和单产无显著变化, 且2R1B处理的叶面积、鲜重、地上干重、VC、糖酸比和可溶性糖含量最高。果期补光, 3种光质处理的可溶性糖含量显著升高, 8R1B处理的地上干、鲜重、VC和可溶性糖含量最高, 硝酸盐含量最低, 且4R1B和8R1B处理的单株果实数、单果重、单产和糖酸比显著高于2R1B。采用隶属函数法分别对甜椒不同生育期补光处理的产量品质指标进行综合评价, 苗期、花期和果期的综合得分排序分别为4R1B>8R1B>2R1B>CK、2R1B>8R1B>4R1B>CK、8R1B>4R1B>2R1B>CK。综上, LED光质对甜椒的影响因生育期不同有所差异, 苗期最佳补光光质是4R1B, 花期最佳补光光质是2R1B, 果期最佳补光光质是8R1B。

关键词: 甜椒; 补光; 光质; 产量; 品质; 综合评价

Effects of supplemental illumination at different growth stages on growth, yield and fruit quality of greenhouse sweet pepper

DUAN Qingqing¹, ZHANG Luqi^{1,2}, ZHANG Zikun^{1,*}

¹Dezhou Academy of Agricultural Sciences, Dezhou, Shandong 253015, China

²College of Horticulture, Hebei Agricultural University, Baoding, Hebei 071001, China

*Corresponding author (13853455807@163.com)

Abstract: The effects of LED supplementary lighting at different growth stages on growth, yield and fruit quality of sweet pepper (*Capsium annuum*) were conducted to select the optimal light quality with cultivar ‘Aodaili’ as experimental material. Plants were treated under 3 kinds of light quality with red (R): blue (B) ratio at 2:1 (2R1B); 4:1 (4R1B) and 8:1 (8R1B) at seedling, flowering and fruiting stage respectively, with no supplemental light as control (CK). Results showed that the stem diameter, leaf area, sugar-acid ratio, Vitamin C content and soluble sugar content of 4R1B treatment increased significantly compared with CK at the seedling stage. However, the shoot biomass was the highest, but the nitrate content was the lowest under 8R1B treatment. Additionally, the fruit number, single fruit weight and yield were significantly higher

收稿 2020-12-11 修定 2021-02-01

资助 现代农业产业技术体系(CARS-24-G-12)、山东省现代农业产业技术体系专项基金(SDAIT-05-03)和山东省重点研发计划项目(2019GNC21331)。

under 4R1B and 8R1B treatments than those under 2R1B treatment. At the flowering stage, the nitrate content significantly decreased, while the sugar-acid ratio and soluble sugar content significantly increased under three light treatments, but there was no significant difference in single fruit weight and yield among different treatments. Moreover, the leaf area, fresh weight, shoot dry weight, Vitamin C content, sugar-acid ratio and soluble sugar content were the highest under 2R1B treatment. In contrast with CK, the soluble sugar content was significantly increased under three light treatments at the fruiting stage. Furthermore, the shoot fresh weight, shoot dry weight, Vitamin C content and soluble sugar content were the highest, but the nitrate content was the lowest under 8R1B treatment. In addition, the fruit number, single fruit weight, yield and sugar-acid ratio were significantly higher under 4R1B and 8R1B treatments than that of CK. We used all indexes of yield and fruit quality to analyze the effect of light quality on plant growth at different development stages based on the fuzzy membership function. The comprehensive scores were in the order of 4R1B>8R1B>2R1B>CK, 2R1B>8R1B>4R1B>CK and 8R1B>4R1B>2R1B>CK in seedling stage, flowering stage and fruiting stage, respectively. These results showed that the influences of LED light quality on sweet pepper cultivation vary owing to different growth periods. In conclusion, the optimal supplemental lighting recipe for the cultivation of greenhouse sweet pepper is 4R1B at the seedling stage, 2R1B at the flowering stage and 8R1B at the fruiting stage.

Key words: sweet pepper (*Capsium annuum*); supplemental illumination; light quality; yield; fruit quality; comprehensive evaluation

光是植物进行光合作用的直接能量来源,是影响植物生长发育必不可少的环境因子,调控植物的形态发生及最终的产量(陆海洋等2015; Zoratti等2014)。在北纬度地区,冬季设施内的光照强度和光照时间受天气因素影响往往严重不足,通过补充光照提高设施内作物的生长发育和产品品质成为冬季温室生产的重要手段(崔晓辉等2017; Wojciechowska等2015)。发光二极管(light emitting diode, LED)作为一种新型人工光源,能够促进多种作物的生长发育及果实品质的提升(阳圣莹等2016; 孙娜等2014; 谢景等2013)。草莓上的研究发现,苗期采用红蓝黄7:2:1的光质补光,光合色素含量、果实产量和固酸比最高(刘庆等2015);花期红蓝3:1光质补光的草莓单果质量、VC和可溶性糖含量显著提高(阳圣莹等2016);而果期补光,红蓝4.9:1光质处理下草莓的株高、叶片数、单果重、产量和可溶性固形物含量高于红蓝3:1的光质(钱舒婷2018)。但番茄上的研究认为,果期补充红蓝3:1光质的番茄株高、茎粗、产量、VC和可溶性糖含量与红蓝4.9:1的光质无显著差异(钱舒婷2018)。在黄瓜方面已有研究证明,苗期补充红蓝7:3光质可

显著提高黄瓜幼苗的根系活力,促进干物质积累,利于培育壮苗(闫晓花等2016);花期补充红蓝3:1光质的黄瓜株高、叶片数、瓜长、瓜重、可溶性蛋白和可溶性糖含量显著提高(苏立芳2018);而果期补充红蓝8:1光质处理的黄瓜瓜长、瓜重、可溶性糖含量及氨基酸总量最优(谢景等2013)。

综上所述,不同蔬菜作物在不同生育期采用LED补光均有较好的效果,但不同蔬菜作物适宜的补充光质因生育期不同存在差异。甜椒(*Capsium annuum*)作为中国设施栽培的主要蔬菜种类之一,冬春设施内的弱光寡照环境会导致甜椒生育期延迟,坐果数减少(马维源等2009)。研究表明,与对照相比,甜椒苗期采用红蓝7:3的光质补光显著增加植株的株高和地上部干重,单产量提升14.81%(傅国海等2017);而张子鹏等(2016)的研究认为,苗期采用红蓝8:1的光质补光,甜椒的单株结果数显著增加,产量提升82.81%,且补光效果存在时间累积效应,甜椒产量表现为苗期补光>花期补光>果期补光。以上结果说明在甜椒同一生育期,光质不同会造成补光效果有差异;同一光质在不同生育期的补光效果也因补光时间不同存在差异。因此,

研究寻找适宜甜椒不同生育期的最佳补光光质显得尤为重要。本文通过对日光温室甜椒苗期、花期、果期进行LED补光, 研究不同生育期补充不同光质对甜椒生长、产量及品质的影响, 并对补光效果进行综合评价, 以期找出甜椒栽培不同生育期的最佳补光光质, 为日光温室甜椒栽培光调控技术提供理论和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于2018年9月至2019年1月在德州市农业科学研究院平原科技创新园15号日光温室进行。供试甜椒(*Capsium annuum* L.)品种‘奥黛丽’, 2018年7月16日播种, 采用穴盘基质育苗, 育苗基质为草炭:珍珠岩:蛭石(体积比7:3:1), 于8月30日(苗龄45 d)定植于日光温室内。

试验光源为定制LED植物补光灯, 购于惠州可道科技股份有限公司, 单灯功率100 W, 每盏灯由高亮度的红色(R, 630 nm)和蓝色(B, 460 nm)灯珠组成。

1.2 试验设计

本试验设3个不同红光(R)、蓝光(B)比例处理, 分别为2R1B (R:B=2:1)、4R1B (R:B=4:1)和8R1B (R:B=8:1), 以不补光为对照(CK), 共计4个处理。每个处理设3次重复, 每个重复为一个小区, 小区面积为15.6 m², 甜椒株距35 cm, 大小行种植(大行80 cm, 小行40 cm), 每个小区栽种60株, 小区随机排列。补光灯悬挂于温室内, 每个小区2支灯, 不同小区间用遮光布进行隔离。补光时间为18:00~次日2:00, 每天补光8 h, 补光光强为55 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 通过上下调节光源与植株顶端的垂直距离, 使各处理到达幼苗冠层的光量子通量密度相等, 根据植株生长高度适时调整光源位置, 补光时间由定时器控制。补光期间日光温室内的光温条件如图1, 各处理光质光谱分布见图2。

补光试验分为苗期、花期和果期3个时期进行, 每个生育期补光试验周期为70 d。苗期补光开始于2018年9月25日, 此时甜椒已过缓苗期, 株高(20 $\pm$ 2) cm, 茎粗(6 $\pm$ 1) mm; 花期补光开始于2018年10月9日, 此时期为甜椒开花期, 株高(29 $\pm$ 2) cm, 茎粗(8 $\pm$ 1) mm; 果期补光开始于2018年10月25日, 此

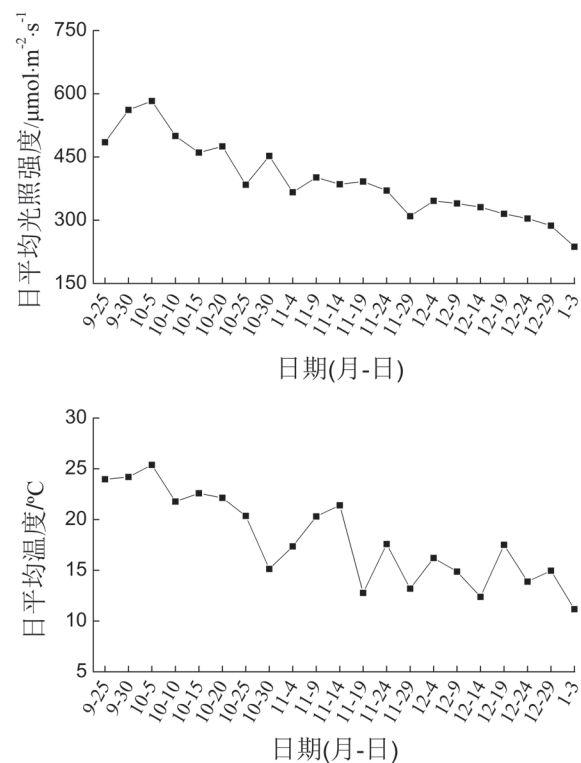


图1 日光温室内日平均光照强度和温度变化

Fig. 1 Changes of daily average light intensity and air temperature in solar greenhouse

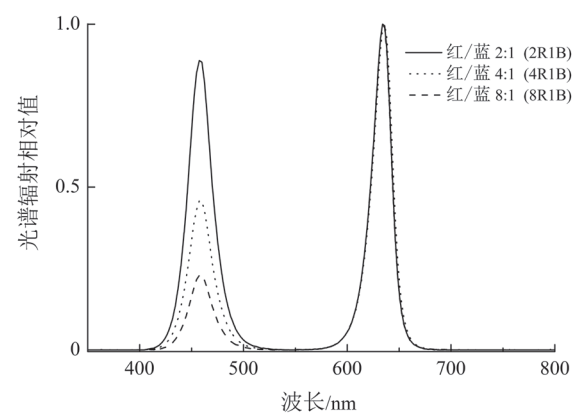


图2 不同光质的光谱分布

Fig. 2 Spectral distribution of different light qualities

时期为甜椒初果期, 株高(42 $\pm$ 2) cm, 茎粗(10 $\pm$ 1) mm。每隔14 d取样测定各项生长指标。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 甜椒植株生长指标分析

不同生育期补光试验, 每隔14 d进行取样及指

标测定。每处理选取10株植株,用卷尺测量株高、用游标卡尺测量茎粗;选取5株植株,每株选择相同部位的5片新生叶(叶片>2 cm),用直尺测量其叶长和叶宽,根据刘浩等(2009)的方法计算叶片的单叶叶面积。同时采用SPAD-502 Plus叶绿素仪(柯尼卡美能达,日本)测定叶片的叶绿素含量。

1.3.2 甜椒生物量分析

补光70 d后,每处理选取3株甜椒植株测定生物量,分离地上部(茎、叶、果实)和地下部(根),用天平测定各部分鲜质量,烘干后测定各部分干质量。

1.3.3 甜椒产量品质分析

每处理选取长势一致的20株甜椒植株进行挂牌标记,累计记录采收产量、采收果数,并计算单株产量及每平米单产。

每处理选取相同结果部位的3个果实进行品质测定,测定部位为果实中部果肉。可溶性糖采用蒽酮比色法测定,可滴定酸采用指示剂滴定法(GB/T12293-1990)测定,维生素C采用2,6-二氯酚靛酚比色法测定,硝酸盐含量采用水杨酸比色法测定(张子鹏等2016;李合生2000)。

1.4 数据统计分析

采用Excel 2010软件进行数据处理,用IBM SPSS-Statistics 21.0 (SPSS Inc, 美国)统计软件进行方差分析,差异显著性分析采用Tukey法进行检验($P<0.05$),用Origin 8.1软件作图,利用模糊隶属函数法对每个生育期补光试验的所有产量品质指标进行综合评价(申宝营等2014)。隶属函数分析:将原始指标进行隶属函数分析,隶属函数值计算公式如下(范晓丹等2015)。

正向指标计算: $U(X_{ij})_{\text{正}} = (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$

负向指标计算: $U(X_{ij})_{\text{负}} = 1 - (X_{ij} - X_{j\min}) / (X_{j\max} - X_{j\min})$

式中, i 表示某个处理, j 表示某个指标, $U(X_{ij})$ 表示第 i 个处理第 j 个指标的隶属函数值, X_{ij} 为第 i 个处理第 j 个指标的数值, $X_{j\min}$ 表示第 j 个指标的最小值, $X_{j\max}$ 表示第 j 个指标的最大值。

根据指标的变异系数求出各指标的权重(王春萍等2017),计算公式为:

$$W_j = CV_j / \sum_{j=1}^n CV_j$$

式中, W_j 值表示第 j 个指标的权重, CV_j 为第 j 个指标的变异系数。

综合评价计算公式为:

$$D = \sum_{j=1}^n [U(X_{ij}) \times W_j]$$

式中, D 值为每个处理用综合指标评价所得的补光效应综合评价值。

2 实验结果

2.1 不同生育期LED补光对甜椒株高的影响

补光70 d后,各光质处理的植株表型如图3所示。苗期补光,光质4R1B处理的植株长势较好;花期补光,各光质处理的植株表型并无显著差异;果期补光,CK的植株长势明显弱于补光处理。

由图4可知,LED补光期间,甜椒的株高呈逐渐增加的趋势,光质对株高的影响因生育期不同有所差异。苗期补光,整个补光期间,4R1B处理的株高较高,与CK无显著差异;补光前期,3种光质处理的株高无显著差异,42 d开始,2R1B处理的株高显著低于4R1B和8R1B。花期补光,整个补光期间,3种光质处理的株高无显著差异;42 d开始,8R1B处理的株高最低,显著低于CK,但2R1B和4R1B处理的株高均与CK无显著差异。果期补光,整个补光期间,3种光质处理的株高基本无显著差异,且与CK之间差异不大,但到补光70 d,4R1B和8R1B处理的株高显著高于CK。综上,苗期LED补光,2R1B处理对甜椒株高的生长不利;而花期和果期LED补光,3种光质处理对株高的影响不大,整体上看,不同生育期补光,4R1B处理有助于甜椒株高的增加。

2.2 不同生育期LED补光对甜椒茎粗的影响

如图5所示,LED补光期间,甜椒的茎粗呈逐渐增加的趋势,光质对茎粗的影响因生育期不同略有差异。苗期补光,4R1B处理的茎粗较大,与8R1B处理总体上差异不显著,但从补光28 d开始,4R1B处理的株高显著高于2R1B和CK。花期补光,3种光质处理的茎粗基本无显著差异,与CK相比差异均不显著。果期补光,4R1B和8R1B处理的茎粗较粗,在补光14 d时显著高于2R1B,在补光28和56 d时显著高于CK;补光70 d,3种光质处理的茎粗均无显

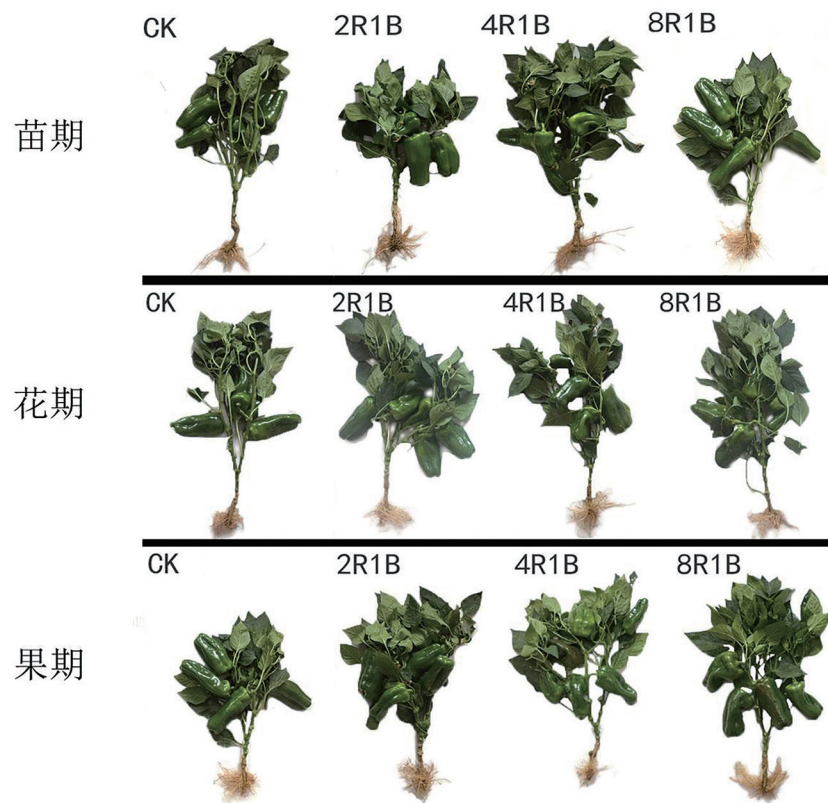


图3 不同生育期LED补光后甜椒植株表型

Fig. 3 The phenotype of sweet pepper after supplemental LED light at different growth stages

著差异, 且与CK之间差异均不显著。综上, 苗期补光, 4R1B处理能显著增加甜椒的茎粗, 花期和果期补光对甜椒茎粗影响较小。

2.3 不同生育期LED补光对甜椒叶面积的影响

LED补光, 不同LED光质处理对甜椒叶面积的影响因补光时期的不同有所差异(图6)。苗期补光, 整个补光期间, 4R1B和8R1B处理的叶面积较大, 两者无显著差异, 且在补光42 d之前, 二者均显著高于2R1B处理和CK; 至补光70 d, 3种光质处理的叶面积均显著高于CK。花期补光, 2R1B处理的叶面积最大, 始终显著高于CK, 且到补光后期, 显著高于4R1B和8R1B处理; 补光期间, 4R1B和8R1B处理的叶面积与CK之间均无显著差异。果期补光, 补光28 d后, 4R1B和8R1B处理的叶面积最大, 二者之间差异不显著, 但均高于2R1B处理, 且3种光质处理的叶面积均显著高于CK。可见, 苗期和果期补光, 4R1B和8R1B处理有利于增加甜椒的叶

面积; 花期补光, 2R1B处理有助于增加甜椒的叶面积。

2.4 不同生育期LED补光对甜椒SPAD值的影响

如图7所示, 不同生育期补光, SPAD值的表现趋势有差异, 苗期补光SPAD值呈逐渐上升的趋势, 而花期和果期补光SPAD值呈先上升后下降的趋势, 可能与生育后期叶片开始衰老有关。苗期补光, 4R1B和8R1B处理的SPAD值较高, 但整体上与2R1B处理的差异不显著; 补光期间, 3种光质处理的SPAD值与CK之间均无显著差异。花期补光, 整个补光期间, 3种光质处理的SPAD值无显著差异, 且与CK之间差异均不显著。果期补光, 8R1B处理的SPAD值高于4R1B和2R1B处理, 但总体上三者之间差异不显著; 与CK相比, 补光前期, 3种光质处理的SPAD值与CK差异不显著, 56 d开始, 均显著高于CK。综上, 苗期和花期补光, 不同光质处理对甜椒SPAD值的影响较小; 果期补光, 与CK相比, 补

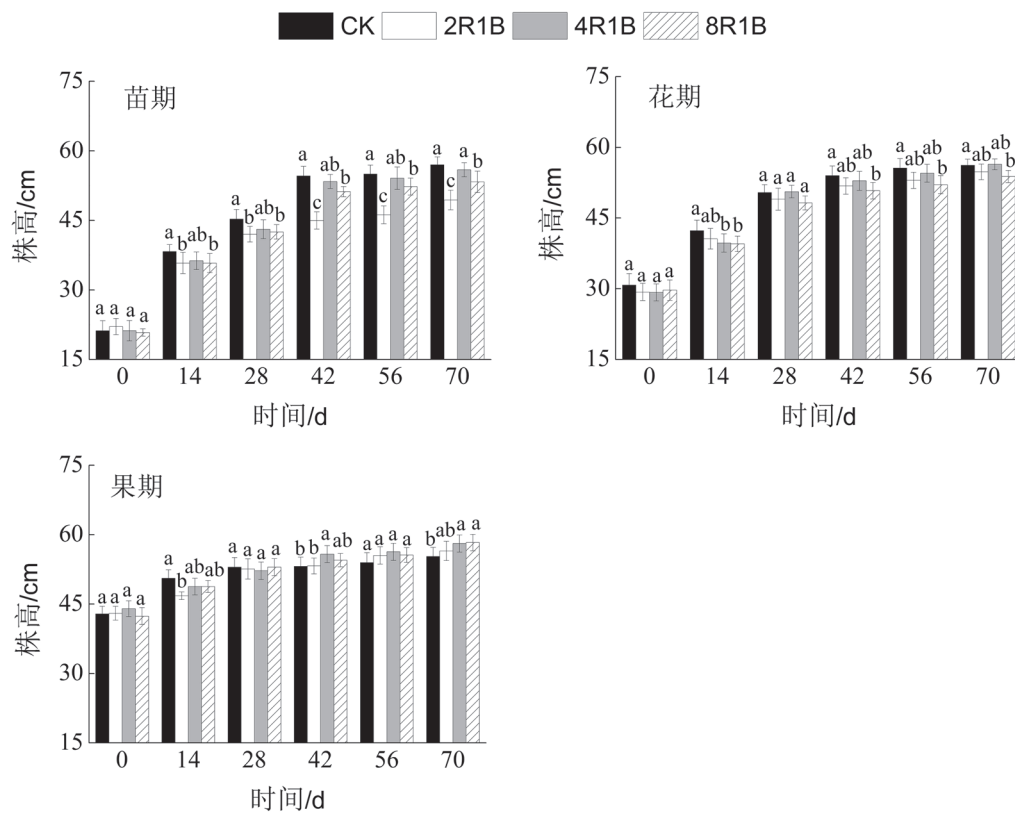


图4 不同生育期LED补光对甜椒株高的影响

Fig. 4 Effects of supplemental LED light at different growth stages on plant height of sweet pepper

不同小写字母分别表示同一时间不同光质处理间存在显著差异($P < 0.05$), 下同。

光处理能显著延缓SPAD值的降低。

2.5 不同生育期LED补光对甜椒生物量的影响

如图8所示, 不同生育期LED补光对甜椒生物量的影响不同。苗期补光, 3种光质处理的甜椒地上和地下部鲜重及干重均显著高于CK; 8R1B处理的地上部干、鲜重最高, 显著高于4R1B和2R1B处理, 但地下部干、鲜重显著低于4R1B和2R1B处理。花期补光, 3种光质处理的地上和地下部干、鲜重均显著高于CK; 2R1B和4R1B处理的地上及地下部鲜重显著高于8R1B处理, 但三者之间的地下部干重无显著差异。果期补光, 8R1B处理的地上部鲜重、地上部干重及地下部鲜重最高, 显著高于2R1B、4R1B处理和CK; 2R1B处理的地上部干、鲜重均显著低于CK。可见, 苗期和花期3种光质处理均可显著促进甜椒生物量的积累; 而果期补光, 光质2R1B不利于甜椒生物量的积累。

2.6 不同生育期LED补光对甜椒产量的影响

LED补光对甜椒产量性状的影响因不同生育期有所差异。如表1所示, 苗期补光, 4R1B和8R1B处理的单株果实数、单果重和单产无显著差异, 但均显著高于2R1B处理; 与CK相比, 2R1B处理的单株果实数、单果重和单产均显著低于CK, 而4R1B处理的单株果实数、单果重和单产与CK差异不显著, 8R1B处理的单产显著高于CK。花期补光, 2R1B、4R1B和8R1B3种光质处理的单株果实数、单果重和单产均无显著差异; 4R1B处理的单株果实数显著高于CK, 2R1B和8R1B处理的单株果实数与CK无显著差异, 并且3种光质处理的单果重和单产均与CK无显著差异。果期补光, 4R1B和8R1B处理的单株果实数、单果重和单产显著高于2R1B处理和CK, 且4R1B处理的单株果实数和单产显著高于8R1B处理。可见, 苗期补光, 光质8R1B有利于提

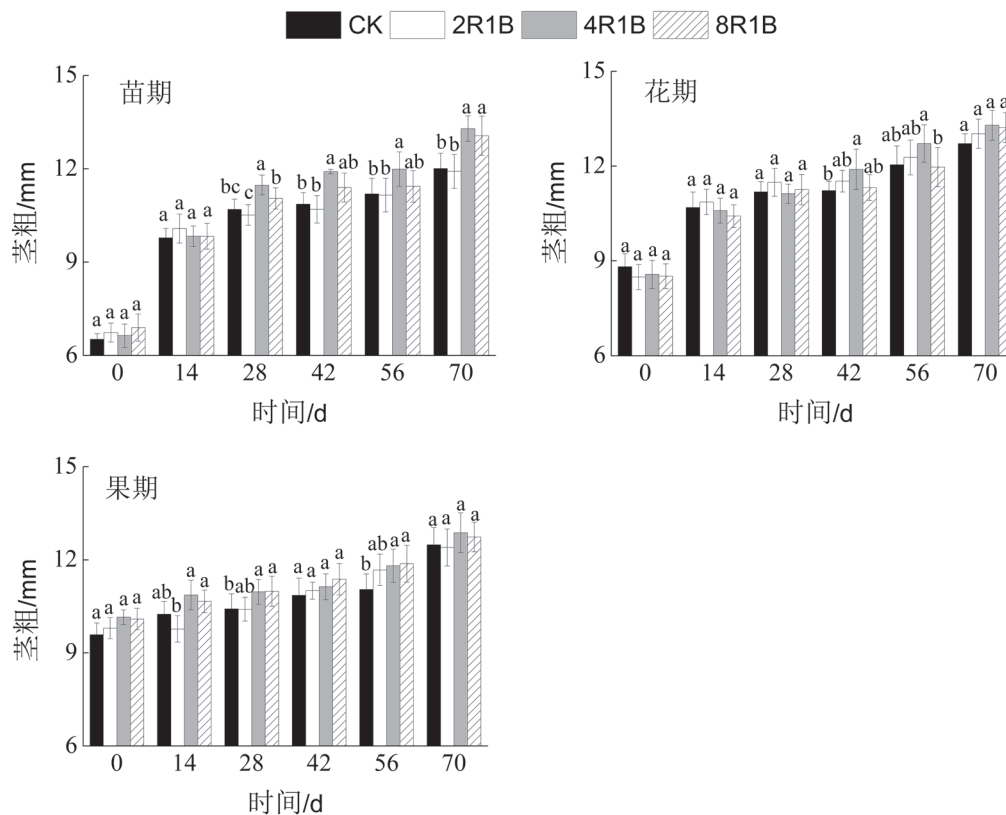


图5 不同生育期LED补光对甜椒茎粗的影响

Fig. 5 Effects of supplemental LED light at different growth stages on stem diameter of sweet pepper

高甜椒产量; 花期补光, 光质对甜椒产量影响较小; 果期补光, 光质4R1B最有利于甜椒产量的提高。

2.7 不同生育期LED补光对甜椒果实品质的影响

不同光质LED补光对甜椒果实品质的影响因生育期不同有所差异。如表2所示, 苗期补光, 3种光质处理的VC和可溶性糖含量均无显著差异, 但4R1B处理的VC和可溶性糖含量显著高于CK; 3种光质处理的可滴定酸含量均显著低于CK, 糖酸比显著高于CK, 其中4R1B处理的糖酸比最高, 显著高于2R1B和8R1B处理; 8R1B处理的硝酸盐含量最低, 显著低于CK, 但2R1B和4R1B处理的硝酸盐含量与CK无显著差异。花期补光, 3种光质处理的硝酸盐含量显著低于CK, 可溶性糖含量和糖酸比显著高于CK; 3种光质处理的VC和可滴定酸含量均无显著差异, 但2R1B处理的VC、可溶性糖含量和糖酸比最高, 显著高于CK。果期补光, 3种光质处理的可溶性糖含量无显著差异, 但均显著高于CK;

2R1B处理的可滴定酸含量最高, 显著高于4R1B、8R1B和CK; 8R1B处理的VC含量和糖酸比最高, 显著高于2R1B和CK。硝酸盐和可滴定酸含量对甜椒的果实品质有负效应, 而VC、可溶性糖含量和糖酸比越高, 甜椒的果实品质越好(刘庆等2015)。综合来看, 苗期补光, 光质4R1B有助于改善甜椒的果实品质; 花期补光, 光质2R1B有利于甜椒果实品质的提高; 而果期补光, 光质8R1B对甜椒果实的品质有利。

2.8 不同生育期LED补光对甜椒果实产量品质影响的综合评价

本试验中, 每个生育期补光70 d, 每天补光8 h, 补光灯的单灯功率100 W, 每个小区用灯2支, 如果按当地农业电价0.5元·度⁻¹计算, 每个小区的用电投入是3.59元·m⁻², 由于每个补光处理的补光天数、补光时长和用灯数是相同的, 因此每个处理的用电投入是一致的。考虑到不同地区电价不一, 甜椒

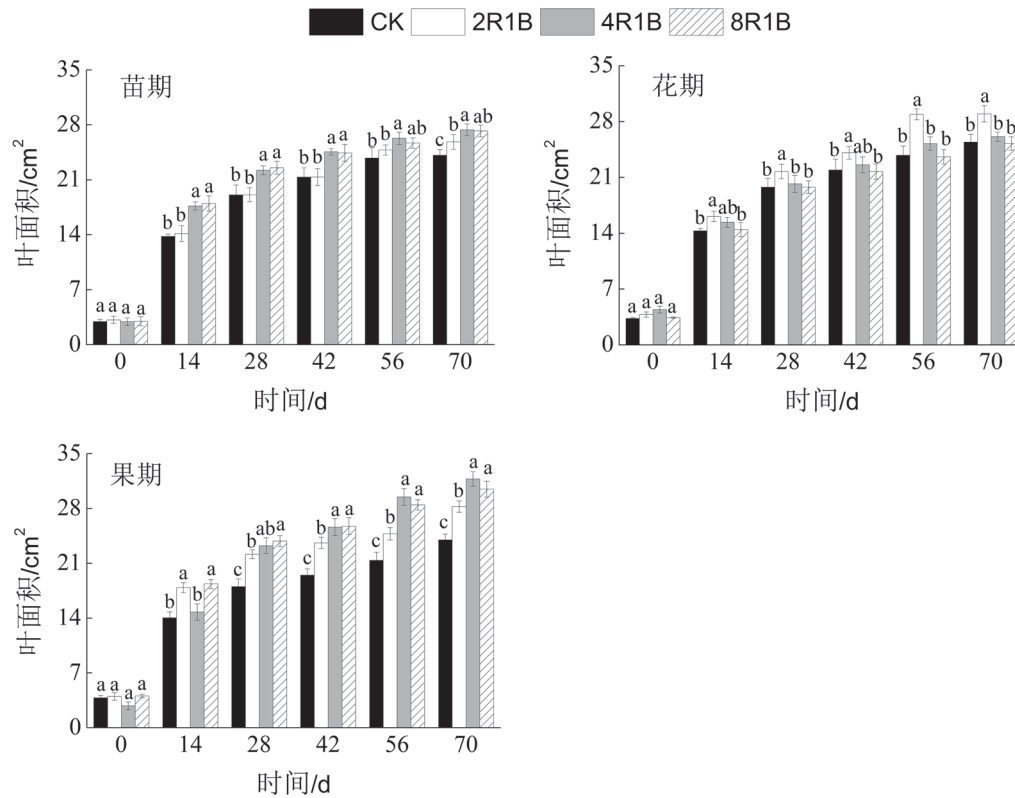


图6 不同生育期LED补光对甜椒叶面积的影响

Fig. 6 Effects of supplemental LED light at different growth stages on leaf area of sweet pepper

价格有波动, 从而导致用电投入、增加产值和产投比是变化的, 因此没有将此部分数据用作综合评价的指标。

不同生育期补光, 光质不同对甜椒产量、品质指标的影响存在差异, 单纯根据某一指标难以确定最佳光质, 本文采用模糊隶属函数法对产量、品质指标进行综合评价, 以期找到适宜甜椒各生育期的最佳补光光质。通过计算甜椒产量品质指标的隶属函数值, 并利用变异系数法确定各指标的权重, 最后计算出各处理的综合得分。结果如表3所示, 无论哪个生育期补光, 补光处理的得分均高于CK。苗期、花期和果期补光, 得分最高的处理分别是光质4R1B、2R1B和8R1B, 综合得分分别为0.94、0.93和0.88。由此可见, 最佳补光光质的选择取决于甜椒的生育期, 苗期开始补光时, 光质4R1B能较大程度上提高甜椒的产量品质; 花期补光, 最佳补光光质是2R1B; 果期补光, 最佳补光光质是8R1B。

3 讨论

近年来, LED人工补光技术在设施栽培中越来越广泛应用。不同光质对作物生长发育的影响不同, 红光有利于增加色素的含量, 促进干物质的积累, 使植物提早开花、结实(倪纪恒等2009); 蓝光能促进气孔的开放, 抑制茎的伸长, 延迟植物开花并促进营养器官生长(Spalding和Folta 2005); 红蓝混合光质促进作物生长发育和提升品质的效果优于单一光质(崔晓辉等2017; 陈祥伟等2014)。本研究中, 补光对甜椒植株生长、产量品质的影响因光质及补光时生育阶段不同有所差异。

苗期补光, 光质4R1B处理能提高甜椒株高、茎粗、叶面积和SPAD值, 光质8R1B处理的地上部生物量最大, 补光后期4R1B和8R1B处理的茎粗、叶面积和地上部生物量均显著高于2R1B。这与乌塌菜(陈祥伟等2014)、甜瓜(崔晓辉等2017)和辣椒(王芳等2015)的报道一致, 说明适当增加红光比例

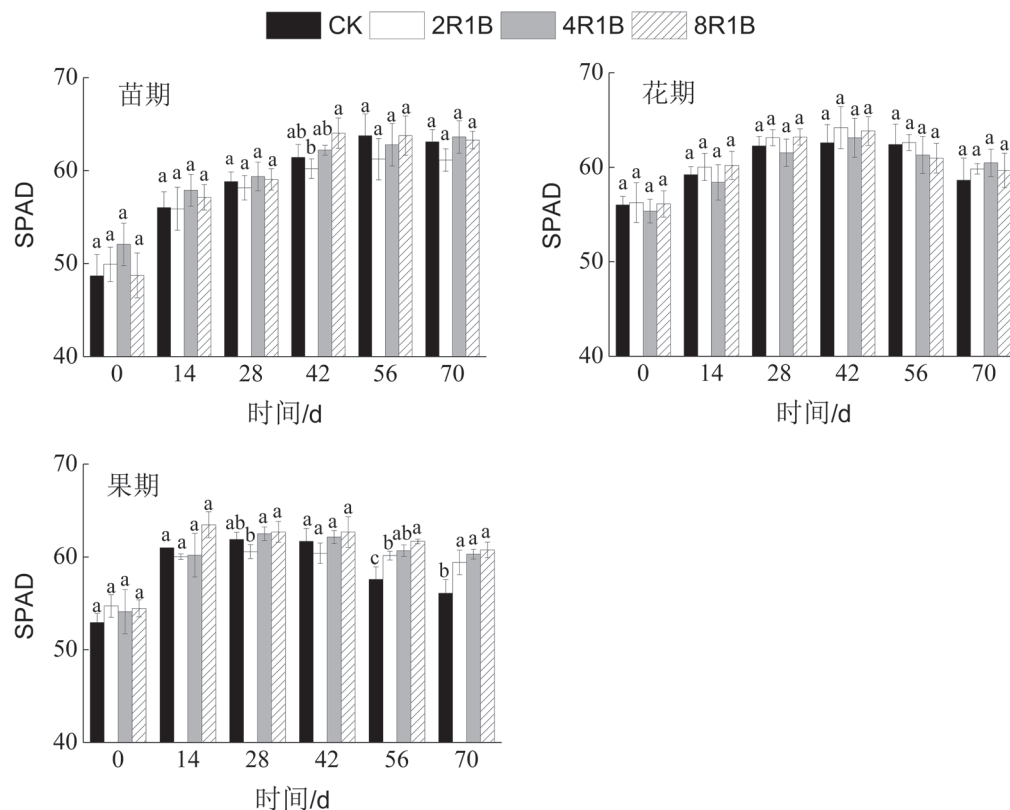


图7 不同生育期LED补光对甜椒SPAD值的影响

Fig. 7 Effects of supplemental LED light at different growth stages on SPAD of sweet pepper

对植株的株高、茎粗、叶面积、叶绿素总量和生物量有促进作用。LED补光光质的不同会引起作物产量和品质的变化,甜椒苗期补光,光质4R1B处理拥有较高的VC、可溶性糖含量和糖酸比,光质8R1B处理有较低的硝酸盐含量,但光质4R1B和8R1B处理的单株果实数、单果重和单产显著大于2R1B,说明苗期补光时适当增加红光比例有助于增加甜椒的产量,改善甜椒的品质,这与前人对生菜(孙洪助2014)、乌塌菜(陈祥伟等2014)和草莓(刘庆等2015)的研究结果一致。采用隶属函数法对甜椒苗期补光效果进行综合评价,综合得分排序为光质4R1B>8R1B>2R1B>CK,说明最有利于甜椒产量品质的苗期补光光质为4R1B。

花期补光,2R1B、4R1B和8R1B 3种光质对甜椒株高、茎粗和SPAD值的影响总体上没有显著差异;但2R1B处理拥有较高的叶面积和鲜重,并且地上干重显著高于其他处理和CK,说明蓝光比例增

大有利于增加叶面积和生物量。普遍认为,红光促进叶面积增大和生物量积累,而蓝光则相反(杨玉凯等2018;倪纪恒等2009)。但也有研究发现红蓝混合光源中蓝光比例多少对作物的生长发育有显著影响,14.3%的蓝光显著增加白菜的生物量(Fan等2013),25%~50%的蓝光显著促进莴苣叶面积增大和生物量提高,并且改善了莴苣的品质(徐文栋等2015)。本研究中2R1B光质处理的叶面积和生物量优于其他处理,说明是促进甜椒生长的适宜光质。研究表明,补光提高果实产量、改善果实品质,但不同光质对产量品质的影响不一致。孙娜等(2014)研究发现补充红蓝1:1光质的番茄单株产量与对照无显著差异,但可溶性糖和VC含量高于对照;而补充红蓝2:1光质的番茄产量和可溶性糖含量显著高于对照,硝酸盐含量显著低于对照(岳钉伊2017)。本试验结果显示,3种光质处理的单果重和单产均与CK无显著差异;硝酸盐含量显著低于

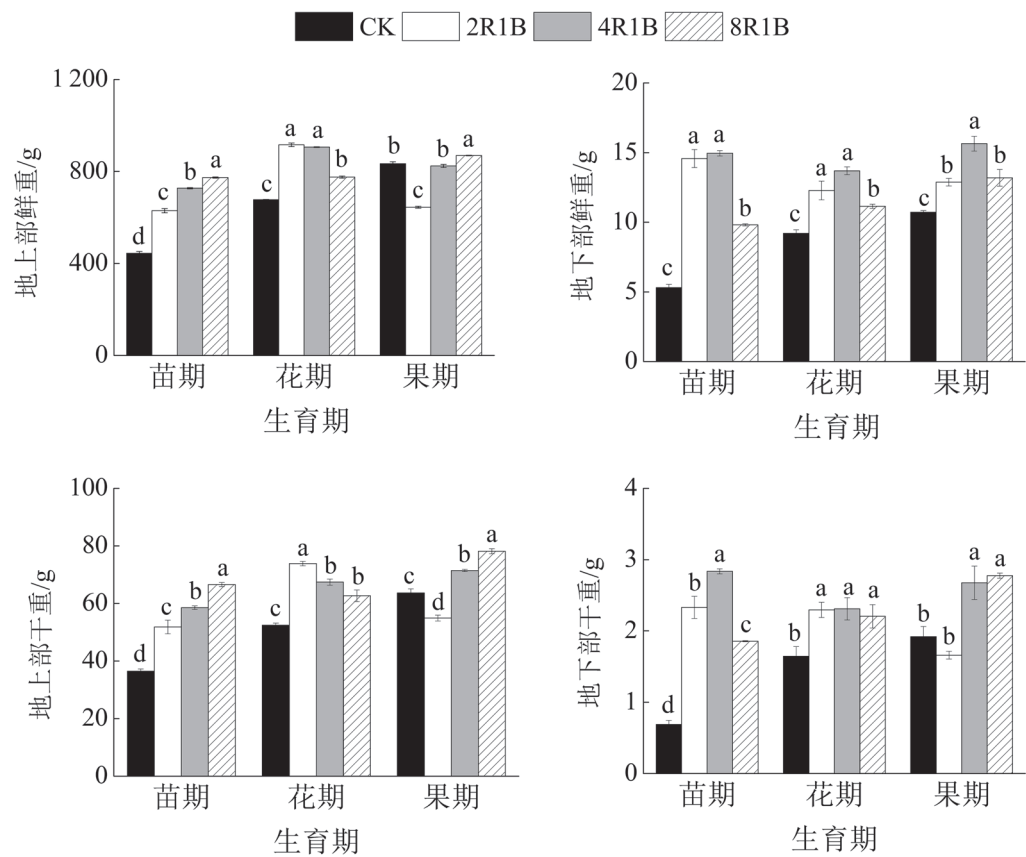


图8 不同生育期LED补光对甜椒生物量的影响

Fig. 8 Effects of supplemental LED light at different growth stages on biomass of sweet pepper

表1 不同生育期LED补光对甜椒产量的影响

Table 1 Effects of supplemental LED light at different growth stages on yield of sweet pepper

生育期	补光处理	单株果实数/个	单果重/g	单产/kg·m ⁻²
苗期	CK	5.81±0.12 ^a	169.80±6.78 ^a	3.79±0.08 ^b
	2R1B	5.28±0.16 ^b	151.38±3.24 ^b	3.08±0.05 ^c
	4R1B	5.83±0.26 ^a	179.31±4.48 ^a	4.02±0.10 ^{ab}
	8R1B	5.95±0.13 ^a	179.65±6.67 ^a	4.11±0.14 ^a
花期	CK	5.98±0.03 ^b	176.69±5.82 ^a	4.07±0.15 ^a
	2R1B	6.13±0.13 ^{ab}	174.92±11.89 ^a	4.12±0.21 ^a
	4R1B	6.31±0.09 ^a	179.17±4.47 ^a	4.35±0.17 ^a
	8R1B	6.15±0.13 ^{ab}	181.72±8.57 ^a	4.30±0.23 ^a
果期	CK	6.27±0.06 ^c	171.56±5.01 ^b	4.13±0.10 ^c
	2R1B	5.99±0.05 ^d	174.20±0.53 ^b	4.01±0.02 ^c
	4R1B	7.11±0.07 ^a	188.79±4.13 ^a	5.17±0.16 ^a
	8R1B	6.47±0.03 ^b	192.83±3.34 ^a	4.80±0.10 ^b

同列不同小写字母表示同一生育期不同光质处理在P<0.05水平上差异显著,下同。

表2 不同生育期LED补光对甜椒果实品质的影响
Table 2 Effects of supplemental LED light at different growth stages on fruit quality of sweet pepper

生育期	补光处理	硝酸盐含量/mg·kg ⁻¹	VC含量/mg·g ⁻¹	可溶性糖含量/%	可滴定酸/%	糖酸比
苗期	CK	117.37±4.95 ^a	1.18±0.09 ^b	1.81±0.13 ^b	0.34±0.017 ^a	5.36±0.11 ^c
	2R1B	114.08±3.54 ^a	1.72±0.14 ^a	2.36±0.20 ^{ab}	0.18±0.005 ^{bc}	13.18±0.72 ^b
	4R1B	110.61±4.42 ^{ab}	1.77±0.12 ^a	2.61±0.14 ^a	0.15±0.010 ^c	17.82±0.24 ^a
	8R1B	93.06±5.06 ^b	1.36±0.10 ^{ab}	2.01±0.16 ^{ab}	0.20±0.009 ^b	10.35±1.27 ^b
花期	CK	136.46±3.82 ^a	1.06±0.11 ^b	1.44±0.11 ^c	0.20±0.009 ^a	7.25±0.23 ^c
	2R1B	48.98±3.80 ^d	1.45±0.11 ^a	2.77±0.11 ^a	0.17±0.008 ^{ab}	16.48±1.47 ^a
	4R1B	70.35±3.94 ^c	1.17±0.14 ^{ab}	2.10±0.14 ^b	0.18±0.008 ^{ab}	11.63±1.25 ^b
	8R1B	99.81±3.89 ^b	1.26±0.18 ^{ab}	2.14±0.18 ^b	0.15±0.007 ^b	14.25±0.50 ^{ab}
果期	CK	84.54±4.60 ^a	1.66±0.13 ^b	1.91±0.13 ^b	0.17±0.007 ^{bc}	11.24±0.32 ^b
	2R1B	75.47±4.07 ^{ab}	1.95±0.17 ^b	2.79±0.17 ^a	0.24±0.008 ^a	11.45±0.33 ^b
	4R1B	78.65±3.54 ^a	1.83±0.18 ^b	2.63±0.18 ^a	0.15±0.005 ^c	17.14±0.66 ^a
	8R1B	61.77±3.54 ^b	2.57±0.21 ^a	3.15±0.21 ^a	0.18±0.006 ^b	17.53±0.56 ^a

表3 不同生育期LED补光对甜椒产量品质影响的综合评价
Table 3 Comprehensive evaluation of supplemental LED light at different growth stages on yield and quality of sweet pepper

生育期	补光处理	单株果实数	单果重	单产	硝酸盐	VC	可溶性糖	可滴定酸	糖酸比	综合评价值	排名
苗期	CK	0.79	0.65	0.69	0	0	0	0	0	0.12	4
	2R1B	0	0	0	0.14	0.92	0.68	0.83	0.63	0.59	3
	4R1B	0.83	0.99	0.91	0.28	1.00	1.00	1.00	1.00	0.94	1
	8R1B	1.00	1.00	1.00	1.00	0.31	0.25	0.75	0.40	0.60	2
花期	CK	0	0.26	0	0	0	0	0	0	0	4
	2R1B	0.46	0	0.20	1.00	1.00	1.00	0.63	1.00	0.93	1
	4R1B	1.00	0.62	1.00	0.76	0.28	0.50	0.36	0.47	0.56	3
	8R1B	0.51	1.00	0.82	0.42	0.52	0.53	1.00	0.76	0.60	2
果期	CK	0.25	0	0.10	0	0	0	0.82	0	0.17	4
	2R1B	0	0.12	0	0.40	0.32	0.71	0.00	0.03	0.22	3
	4R1B	1.00	0.81	1.00	0.26	0.18	0.59	1.00	0.94	0.70	2
	8R1B	0.42	1.00	0.68	1.00	1.00	1.00	0.71	1.00	0.88	1

CK、可溶性糖含量和糖酸比显著高于CK, 说明甜椒花期补光对产量影响不大, 但明显改善了果实的品质, 这与前人在番茄上的研究结果相似(孙娜等2014)。对甜椒花期补光效果进行综合评价, 综合得分排序为光质2R1B>8R1B>4R1B>CK, 说明最有利于甜椒产量品质的花期补光光质为2R1B。

果期补光, 补光后期3种光质处理的株高、叶面积和SPAD值均显著高于CK, 但光质4R1B和8R1B处理的生物量显著高于2R1B和CK, 说明果期补光促进了甜椒的营养生长, 但高比例蓝光对

生物量的积累不利。这与甜椒花期补光结果相反, 可能是因为光质在不同生育期的表现存在差异, 如草莓花期补充红蓝3:1光质的单果质量、VC和可溶性糖含量最高(阳圣莹等2016); 而果期补充红蓝4.9:1光质的单果重和可溶性固形物含量高于红蓝3:1 (钱舒婷2018)。研究表明, 红光利于增加可溶性糖含量, 降低硝酸盐含量, 蓝光增加可滴定酸含量(高波等2015), 而适宜的红蓝比例光质提高VC含量(阳圣莹等2016)。本研究发现, 3种光质处理的可溶性糖含量均显著高于CK; 8R1B处理的硝

酸盐含量最低, VC含量最高; 2R1B处理的可滴定酸含量最高; 4R1B处理的单株果实数和单产显著高于其他处理和CK。这与前人的报道相符(吴根良等2014), 即果期补光适当提高红光比例显著增加甜椒的结果率和产量, 提高果实中可溶性糖和VC含量。对甜椒果期补光效果进行综合评价, 综合得分排序为光质8R1B>4R1B>2R1B>CK, 说明最有利于甜椒产量品质的果期补光光质为8R1B。

参考文献(References)

- Chen XW, Liu SQ, Wang Y, et al (2014). Effects of different LED light qualities on growth, photosynthetic characteristics and nutritional quality of savoy. *Chin J Appl Ecol*, 25 (7): 1955–1962 (in Chinese with English abstract) [陈祥伟, 刘世琦, 王越等(2014). 不同LED光源对乌塌菜生长, 光合特性及营养品质的影响. *应用生态学报*, 25 (7): 1955–1962]
- Cui XH, Guo XO, Sun TY, et al (2017). Effects of LED supplementary lighting on seedling growth and fruit quality of oriental melon. *Plant Physiol J*, 53 (4): 657–667 (in Chinese with English abstract) [崔晓辉, 郭小鸥, 孙天宇等(2017). LED补光对薄皮甜瓜幼苗生长及果实品质的影响. *植物生理学报*, 53 (4): 657–667]
- Duan QQ, Zhang LQ, Zhang ZK, et al (2019). Effects of spectrum and duration of supplemental illumination on growth, yield and fruit quality of greenhouse sweet pepper. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 35 (24): 213–222 (in Chinese with English abstract) [段青青, 张禄祺, 张自坤等(2019). 补光时间及光质对温室甜椒生长及产量品质的影响. *农业工程学报*, 35 (24): 213–222]
- Fan XD, Liu F, Wang YA, et al (2015). Evaluation of zinc deficiency tolerance in different kinds of apple rootstocks. *Chin J Appl Ecol*, 26 (10): 3045–3052 (in Chinese with English abstract) [范晓丹, 刘飞, 王衍安等(2015). 不同苹果砧木对缺锌胁迫的耐性评价. *应用生态学报*, 26 (10): 3045–3052]
- Fan XX, Zang J, Xu ZG, et al (2013). Effects of different light quality on growth, chlorophyll concentration and chlorophyll non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). *Acta Physiol Plant*, 35 (9): 2721–2726
- Fu GH, Yang QC, Liu WK (2017). Effect of LED supplemental lighting and root zone heating on growth and yield of soil ridged substrate-embedded sweet pepper in solar greenhouses in China. *Chin J Eco-Agric*, 25 (2): 230–238 (in Chinese with English abstract) [傅国海, 杨其长, 刘文科(2017). LED补光和根区加温对日光温室起垄内嵌式基质栽培甜椒生长及产量的影响. *中国生态农业学报*, 25 (2): 230–238]
- Gao B, Yang ZC, Li WQ, et al (2015). Effects of three different red and blue LED light ratio on growth and quality of celery. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 24 (12): 125–132 (in Chinese with English abstract) [高波, 杨振超, 李万青等(2015). 3种不同LED光质配比对芹菜生长和品质的影响. *西北农业学报*, 24 (12): 125–132]
- Li HS (2000). *Principles and technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments*. Beijing: Higher Education Press (in Chinese) [李合生(2000). *植物生理生化实验原理和技术*. 北京: 高等教育出版社]
- Liu H, Sun JS, Duan AW, et al (2009). Simple model for tomato and green pepper leaf area based on AutoCAD software. *Chin Agric Sci Bull*, 25 (5): 287–293 (in Chinese with English abstract) [刘浩, 孙景生, 段爱旺等(2009). AutoCAD软件确定番茄与青椒叶面积的简易方法. *中国农学通报*, 25 (5): 287–293]
- Liu Q, Lian HF, Liu SQ, et al (2015). Effects of different LED light qualities on photosynthetic characteristics, fruit production and quality of strawberry. *Chin J Appl Ecol*, 26 (6): 1743–1750 (in Chinese with English abstract) [刘庆, 连海峰, 刘世琦等(2015). 不同光质LED光源对草莓光合特性, 产量及品质的影响. *应用生态学报*, 26 (6): 1743–1750]
- Lu HY, Liu XY, Si CC, et al (2015). Effects of different PPFD on growth and quality of non-heading Chinese cabbages. *Plant Physiol J*, 51 (6): 909–915 (in Chinese with English abstract) [陆海洋, 刘晓英, 司聪聪等(2015). 不同光密度对不结球白菜的生长与品质的影响. *植物生理学报*, 51 (6): 909–915]
- Ma WY, Liu GJ, Zhang YA, et al (2009). Effects of low light on the growth and development of different sweet pepper varieties. *China Veg*, (20): 55–58 (in Chinese with English abstract) [马维源, 刘光基, 张延安等(2009). 弱光对不同甜椒品种生长发育的影响. *中国蔬菜*, (20): 55–58]
- Ni JH, Chen XH, Chen CH, et al (2009). Effects of supplemental different light qualities on growth, photosynthesis, biomass partition and early yield of greenhouse cucumber. *Sci Agric Sin*, 42 (7): 2615–2623 (in Chinese with English abstract) [倪纪恒, 陈学好, 陈春宏等(2009). 补充不同光质对温室黄瓜生长发育、光合和前期产量的影响. *中国农业科学*, 42 (7): 2615–2623]
- Qian ST (2018). Effects of different supplemental lighting on photosynthesis, growth, yield and quality of strawberry and tomato in greenhouse (dissertation). Yangling, Shanxi: Northwest A&F University (in Chinese with English abstract) [钱舒婷(2018). 不同补光灯对设施草莓、番茄光合生长及产量品质的影响(学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学]
- Shen BY, Li YN, Zhao SQ, et al (2014). Effect of dark period

- lighting regulation on cucumber seedling morphology and comprehensive evaluation analysis and comprehensive evaluation. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 30 (22): 201–208 (in Chinese with English abstract) [申宝营, 李毅念, 赵三琴等(2014). 暗期补光对黄瓜幼苗形态调节效果及综合评价. *农业工程学报*, 30 (22): 201–208]
- Spalding EP, Folta KM (2005). Illuminating topics in plant photobiology. *Plant Cell Environ*, 28 (1): 39–53
- Su LF (2018). The influence of LED light on the growth, physiological indicators and qualities of the cucumbers in solar greenhouse (dissertation). Handan, Hebei: Hebei University of Engineering (in Chinese with English abstract) [苏立芳(2018). LED补光对日光温室黄瓜生长、生理指标及品质的影响(学位论文). 河北邯郸: 河北工程大学]
- Sun HZ (2014). Effects of proportions of red and blue light on physiological characteristics and quality in leafy greens (dissertation). Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [孙洪助(2014). 红蓝光比例对绿叶蔬菜生理特性及品质的影响(学位论文). 江苏: 南京农业大学]
- Sun N, Li Y, Wei M, et al (2014). Effect of supplementary lighting on growth, quality and yield of tomato overwintering stand in greenhouse. *Tianjin Agric Sci*, 20 (3): 91–93 (in Chinese with English abstract) [孙娜, 李岩, 魏珉等(2014). 补光对日光温室越冬番茄生长及产量品质的影响. *天津农业科学*, 20 (3): 91–93]
- Wang CP, Zhang SC, Lei KR, et al (2017). Studies of indexes and evaluation of low nitrogen tolerance of pepper at seedling stage. *Acta Horti Sin*, 44 (12): 2318–2326 (in Chinese with English abstract) [王春萍, 张世才, 雷开荣等(2017). 辣椒苗期耐低氮指标与评价方法研究. *园艺学报*, 44 (12): 2318–2326]
- Wang F, Gao FY, Lü S, et al (2015). Supplementing light effects of light emitting diodes (LEDs) on vegetable seedling. *Chin J Trop Crops*, 36 (8): 1398–1402 (in Chinese with English abstract) [王芳, 高芳云, 吕顺等(2015). 不同比例红蓝LED灯对蔬菜育苗的补光效应. *热带作物学报*, 36 (8): 1398–1402]
- Wojciechowska R, Długosz-Grochowska O, Kolton A, et al (2015). Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. *Sci Horti*, 187: 80–86
- Wu GL, Zheng JR, Li XK (2014). Effect of different LED sources on the quality and yield of overwintering pepper in the greenhouse. *J Zhejiang A&F Univ*, 31 (2): 246–253 (in Chinese with English abstract) [吴根良, 郑积荣, 李许可(2014). 不同LED光源对设施越冬辣椒果实品质和产量的影响. *浙江农林大学学报*, 31 (2): 246–253]
- Xie J, Liu HC, Song SW, et al (2013). Effects of different light qualities interlighting on growth and quality of cucumber (*Cucumis sativus* L. cv. Shenchun) fruit in greenhouse. *J Shenyang Agric Univ*, 44 (5): 616–621 (in Chinese with English abstract) [谢景, 刘厚诚, 宋世威等(2013). 侧面补光对温室黄瓜(*Cucumis sativus* L. cv. Shenchun)果实生长和品质的影响. *沈阳农业大学学报*, 44 (5): 616–621]
- Xu WD, Liu XY, Jiao XL, et al (2015). Effect of blue light quantity on growth and quality of lettuce. *J Nanjing Agric Univ*, 38 (6): 890–895 (in Chinese with English abstract) [徐文栋, 刘晓英, 焦学磊等(2015). 蓝光量对莴苣生长和品质的影响. *南京农业大学学报*, 38 (6): 890–895]
- Yan XH, Yu JH, Jie JM (2016). Effects of supplemental light quality and durations of illumination on growth and root activity of cucumber seedling. *J Nucl Agric Sci*, 30 (6): 1211–1217 (in Chinese with English abstract) [闫晓花, 郁继华, 颀建明(2016). 补光时间及光质对黄瓜幼苗生长及根系活力的影响. *核农学报*, 30 (6): 1211–1217]
- Yang SY, Bai S, Jiang HH, et al (2016). Effects of different supplemental light treatments on photosynthetic characteristics and fruit quality of strawberry in greenhouse. *J Shanxi Agric Sci*, 44 (9): 1298–1303 (in Chinese with English abstract) [阳圣莹, 白胜, 蒋浩宏等(2016). 不同补光处理对设施草莓光合特性及果实品质的影响. *山西农业科学*, 44 (9): 1298–1303]
- Yang YK, Lin BY, Shen BY, et al (2018). Effects of nighttime LED light supplementation on the growth and photosynthesis of tomato seedlings. *Subtrop Agric Res*, 14 (4): 247–252 (in Chinese with English abstract) [杨玉凯, 林碧英, 申宝营等(2018). LED夜间补光对番茄幼苗生长及光合作用的影响. *亚热带农业研究*, 14 (4): 247–252]
- Yue DY (2017). Effects of interaction of elevated CO₂ and LED supplement on photosynthesis and yield and quality of greenhouse tomato (dissertation). Yangling, Shanxi: Northwest A&F University (in Chinese with English abstract) [岳钉伊(2017). 增施CO₂与LED补光互动对日光温室番茄光合作用和产量及品质的影响(学位论文). 陕西杨凌: 西北农林科技大学]
- Zhang ZP, Wen JX, Huang AZ, et al (2016). Effects of LED supplementary lighting on the yield and quality of pimiento in greenhouse. *J Anhui Agric Sci*, 44 (29): 24–25 (in Chinese with English abstract) [张子鹏, 温健新, 黄爱政等(2016). LED灯补光对温室甜椒产量及品质的影响. *安徽农业科学*, 44 (29): 24–25]
- Zoratti L, Karppinen K, Luengo Escobar A, et al (2014). Light-controlled flavonoid biosynthesis in fruits. *Front Plant Sci*, 5: 534