

黄碧阳,林碧英,李彩霞,等. LED 红蓝光配比对菠菜生长及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(7):131-135.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.07.031

# LED 红蓝光配比对菠菜生长及品质的影响

黄碧阳,林碧英,李彩霞,申宝营,廖自月,刘亚男,刘旭,尚英杰

(福建农林大学园艺学院,福建福州 350002)

**摘要:**通过设置红、蓝光质比为 1:1、1:3、3:1 的 3 组光源,以白色荧光灯为对照,研究 LED 红蓝光配比对菠菜生长及品质的影响,为 LED 光源在菠菜生产上的应用和推广提供理论依据。结果表明,相比于白光,红蓝混合光可以提高菠菜可溶性糖、蛋白质及维生素 C 的含量,显著降低硝酸盐的积累。红蓝混合光中适宜的红光比例有利于茎的伸长和叶片发育,适宜的蓝光比例能促进叶片发育和茎的生长变粗,过高蓝光比例则降低植株的叶面积。当红、蓝光比例为 3:1 时,菠菜可溶性糖含量、生物产量、株高有最大值,最大叶面积和叶片数有次高值,蛋白质含量较高,硝酸盐含量最低;且具有适合的根冠比,菠菜地下部和地上部生长平衡,有利于提高产量。因此,红、蓝光比例为 3:1,菠菜的生长和品质较佳,适用于菠菜的 LED 光源栽培。

**关键词:**菠菜;红蓝光比例;生长;品质;设施栽培

**中图分类号:** S636.104 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)07-0131-05

发光二极管(LED)是一种固态的半导体器件,由镓与砷、磷、氮、镉的化合物制成的二极管,可直接将电能转变为光能。LED 光源具有传统光源无法比拟的光电特性和光谱优势,如体积小,寿命长,节能环保<sup>[1]</sup>;弥补了传统光源补光效率低的问题<sup>[2]</sup>;可以精确地调控光强、光质和光周期,适宜工厂化生产<sup>[3]</sup>等。张欢等研究结果表明,LED 光谱调控应用到农业与生物领域具有可行性,可替代荧光灯大范围应用于设施育苗、植物组织培养和芽苗菜生产中<sup>[4]</sup>。到目前为止,LED 已经成功用于莴苣<sup>[5]</sup>、小麦<sup>[6]</sup>、草莓<sup>[7]</sup>等多种作物的设施栽培。LED 灯在作物栽培领域的应用,为设施农业生产提供了智能化的光环境调控,实现光质、光强和光周期的按需调控的可行性。

菠菜,属藜科菠菜属,一二年生草本植物,别称波斯草、赤根菜、角菜<sup>[8]</sup>,含有丰富的维生素 C、维生素 E 和 Fe、Zn 等矿物质,营养丰富,颇受人们的喜爱。光质作为影响植物生长的

重要因素,对植物的形态、代谢活动、发育情况及产品品质的调节作用非常强烈<sup>[9-11]</sup>。红光照射有助于提高菠菜的碳水化合物含量和产量,蓝光下菠菜叶片的氮代谢升高,红光、蓝光和紫光能降低菠菜地上部硝酸盐含量,提高品质,以红光处理最佳<sup>[12]</sup>。但是,关于 LED 混合光对菠菜生长发育影响的相关方面研究偏少。因此,本试验采用 LED 固态照明,通过设置 3 种不同的红蓝光质配比,研究红蓝混合光对菠菜生长及品质的影响,探索适合菠菜生长的红蓝光质配比,以期对菠菜的 LED 光源栽培提供相关理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及设备

1.1.1 试验材料 三季丰菠菜王,原产于荷兰,购于山东省昌邑市海涛种业有限公司。

1.1.2 设备 自主设计 LED 光源栽培架,每个隔间大小为 90 cm×60 cm×60 cm,采用 LED 灯固态照明,光源为波长为 660 nm 的红光和 460 nm 的蓝光,可以根据试验的需要调节红蓝光组合,以 410~760 nm 的白色荧光灯为对照,光谱曲线如图 1 所示。

### 1.2 试验方法

试验于 2016 年 12 月—2017 年 1 月在福建农林大学园艺

花器官损伤形态学观察[J]. 安徽农业大学学报,2015,42(5): 831-835.

[27]李疆,罗淑萍,杨序德,等. 花期低温对仁用杏花器官危害程度[J]. 新疆农业大学学报,2001,24(4):22-24.

[28]马吉福,刘丰,王才. 番茄花果脱落的原因及防治[J]. 农民致富之友,2007(3):23-23.

[29]蔡倩,孙占祥,郑家明,等. 花期低温对仁用杏花粉活力及坐果率的影响[J]. 湖北农业科学,2016,55(9):2272-2274.

[30]杨为海,邹明宏,曾辉万,等. 模拟低温对龙眼果实发育及其果皮 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 代谢的影响[J]. 热带作物学报,2017,38(3):432-437.

收稿日期:2017-07-29

基金项目:福建省科技厅重大专项(编号:2014NZ0002-2);福建省福州市科技局农业科技项目(编号:2017-N-40)。

作者简介:黄碧阳(1992—),男,福建泉州人,硕士研究生,研究方向为设施农业栽培与生理。E-mail:944876435@qq.com。

通信作者:林碧英,教授,从事蔬菜栽培及生理与设施环境调控及无土栽培技术研究。E-mail:lby3675878@163.com。

[21]王孝宣,李树德. 低温胁迫对番茄苗期和花期若干性状的影响[J]. 园艺学报,1996,23(4):349-354.

[22]黄伟,任华中,张福漫. 低温弱光对番茄苗期生长和光合作用的影响[J]. 中国蔬菜,2002,1(4):15-17.

[23]杨咪. 弱光环境对新疆甜瓜植株形态和生理特性的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2014:33-34.

[24]袁伟. 亚低温对温室黄瓜生长发育及产量的影响[D]. 扬州:扬州大学,2006:19-21.

[25]白光志,刘寿东,余焰文,等. 花期低温对晚稻干物质积累及分配的影响[J]. 中国农业气象,2016,37(2):206-212.

[26]张超,郭黄萍,郝国伟,等. 梨品种花期冻害差异及低温诱导

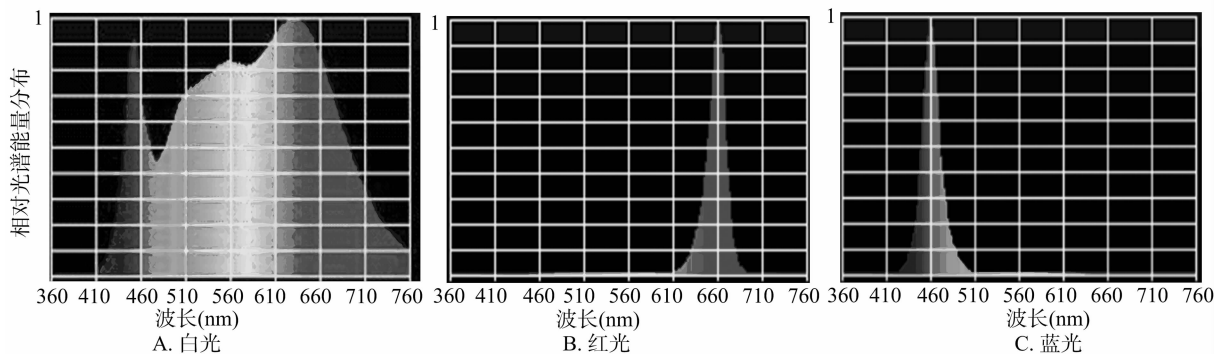


图1 不同光谱分布

学院实验基地及实验室中完成。

2016 年 12 月 4 日开始浸种催芽,12 月 7 日将大部分露白的种子播于 72 孔的育苗穴盘里,育苗基质为草炭:蛭石:珍珠岩 = 3:1:1(体积比)的混合基质。育苗期间,给予苗充足的水分和光照条件。等到长出 2 张真叶后,选择大小一致、生长健壮的幼苗,定植在 10 cm × 10 cm 的营养钵。缓苗 2 d 后,将植株移到 LED 光源栽培架,设置 4 种不同的光质环境,分别为白光(CK),红光:蓝光 = 1:1(RB),红光:蓝光 = 1:3(RB1),红光:蓝光 = 3:1(RB2),调节光强为 120  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光周期为 12 h。生长过程温度控制在 18~20  $^{\circ}\text{C}$ ,每隔 5 d 浇灌 30 mL 的华南农业大学 B 营养液配方。在光质处理后 3、13、23、33 d 测量菠菜的株高、茎粗、最大叶面积和叶片数;在处理后的 11、22、33 d 测量菠菜的生物产量及其根冠比;在处理后的 33 d 测量菠菜的生长品质指标。

### 1.3 测定项目及方法

各处理随机取样,3 次重复,测量菠菜的形态指标;测量生理指标则采取相同处理,混合取样的方法。其中,株高(从茎基部到生长点)用直尺测量;茎粗(子叶下端 1 cm 处)用游标卡尺测量;最大叶面积采用 EPSON Expression 11000XL 进行扫描测量;地上部鲜质量和地下部鲜质量用电子天平测量;可溶性糖含量用蒽酮比色法<sup>[13]</sup>测定,蛋白质含量用考马斯亮蓝法 G-250 法<sup>[13]</sup>测定,维生素 C 含量用二甲苯萃取比色法<sup>[14]</sup>测定,硝酸盐含量用水杨酸法<sup>[15]</sup>测定。

### 1.4 数据处理

试验数据采用 DPS 的 LSD 多重比较进行差异显著性分析,用 Microsoft Excel 处理数据和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同红蓝光配比对菠菜生长形态的影响

2.1.1 株高 由图 2 可知,在菠菜生长初期,各处理菠菜株高没有明显的差异,随着生育期的延长,菠菜的株高在不同的生长阶段呈现不同幅度的增长趋势。各处理间的株高在生长 13 d 时,有最大的增长幅度,为 RB > RB2 > RB1 > CK;生长 23 d 时,株高的增幅相近;生长 33 d 时,各处理间菠菜株高差异最大,由大到小为 RB2 > RB > CK > RB1, RB2 处理下菠菜株高增幅明显大于其他处理。

2.1.2 茎粗 在整个生长过程中,菠菜茎粗的变化如图 3 所示。生长 13 d 时, RB1 处理下菠菜茎粗略低于 RB2 处理;13 d 以后的生长阶段,各处理间菠菜茎粗出现一致增长趋势,为 RB1 > RB > CK > RB2。生长 33 d 时,菠菜茎粗差异达

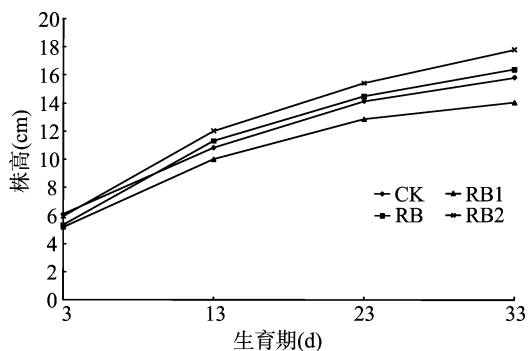


图2 不同红蓝光质比对菠菜株高的影响

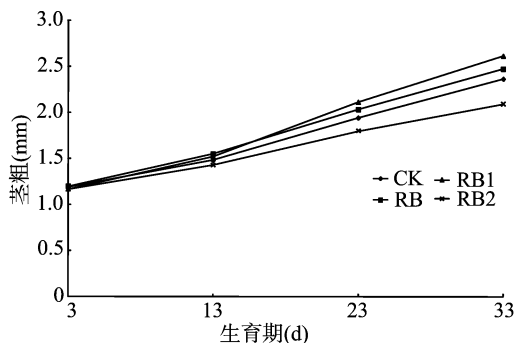


图3 不同红蓝光质比对菠菜茎粗的影响

到最大, RB1 处理茎粗最大, 为 2.61 cm, 分别为 RB2、CK、RB 处理的 1.25、2.36、1.08 倍。菠菜茎粗的变化与株高正好相反, 在红蓝混合光环境下红光所占的比例逐渐减少, 蓝光比例逐渐增加, 菠菜茎粗不断增加。

2.1.3 最大叶面积和叶片数 对处理后菠菜最大叶面积和叶片数调查结果如图 4 所示。整个生长过程中, RB 和 RB2 处理菠菜叶片生长较快, 始终高于 CK 和 RB1 处理; 生长 23 d 时, RB 与 CK、RB1、RB2 间的差异达到最大, 分别为 5.11、5.56、2.55  $\text{cm}^2$ ; 生长 33 d 时, RB 处理最大叶面积略大于 RB2, 且均大于 CK 处理, RB1 低于 CK 处理。相比最大叶面积, 不同处理下菠菜叶片数变化及差异不明显。生长 13 d 时, 红蓝光处理的叶片数多于白光; 13 d 以后的生长阶段, RB1 和 CK 处理下叶片增加较快, RB1 明显大于 CK; 其次是 RB2 和 RB; 生长 33 d 时, 处理间的叶片数高低大小为 RB1 > RB2 > CK > RB, RB1 处理的叶片数明显多于其他处理。

### 2.2 不同红蓝光配比对菠菜生物量及根冠比的影响

在整个菠菜生长发育过程中, 地上部鲜质量和地下部鲜质量变化过程如表 1 所示。生长 11 d 时, RB2 处理下地上部

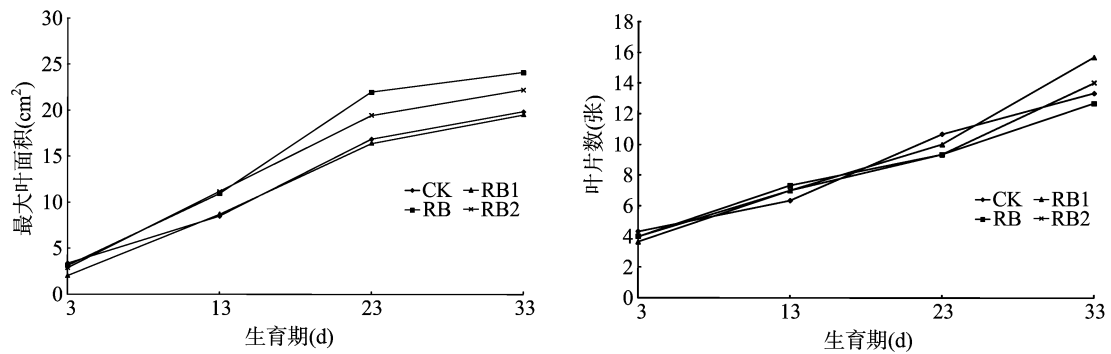


图4 不同红蓝光质对比菠菜最大叶面积(A)和叶片数(B)的影响

鲜质量略大于其他处理,为 2.016 3 g,与其他处理差异显著或极显著;地下部鲜质量以 RB1 处理较高,且与 RB2 处理差异不显著。生长 22 d 时,CK、RB 和 RB2 处理在地上鲜质量方面差异不显著,而与 RB1 处理差异极显著;在地下部鲜质量上,RB1 处理最高,与其他处理存在显著性差异。生长 33 d 时,地上部鲜质量从大到小为 RB2 > RB > RB1 > CK,地下部鲜质量则是 RB1 > RB2 > RB > CK,红蓝光处理显著高于对

照。表 1 还反映了菠菜在 3 个不同时期根冠比的变化情况,生长 11 d 时,红蓝混合光处理下菠菜根冠比差异不显著,但与 CK 处理都存在极显著差异;生长 22 d 时,各处理开始出现差异,由大到小为 RB1 > RB > RB2 > CK,RB1 与其他处理间均存在极显著差异,RB2 与 CK 差异不显著;生长 33 d 时,RB1 处理根冠比最高,为 0.057 2,与其他处理存在显著或极显著差异,其他处理之间则差异不显著。

表 1 不同红蓝光质对比菠菜生物量及根冠比的影响

处理	处理时间 (d)	地下部鲜质量 (g)	地上部鲜质量 (g)	根冠比
CK	11	0.024 7 ± 0.002 1cB	1.382 0 ± 0.018 3cC	0.017 9 ± 0.000 9bB
	22	0.130 3 ± 0.004 2cC	3.861 0 ± 0.140 9aA	0.033 7 ± 0.000 8cC
	33	0.251 3 ± 0.003 5cB	5.162 7 ± 0.235 3cB	0.048 7 ± 0.001 7bB
RB	11	0.053 0 ± 0.006bA	1.810 0 ± 0.039 7bAB	0.029 3 ± 0.003 3aA
	22	0.139 0 ± 0.011 0cB	4.012 7 ± 0.202 1aA	0.045 5 ± 0.003 7bB
	33	0.289 0 ± 0.018 4bAB	5.960 0 ± 0.106 5abA	0.049 5 ± 0.003 1bB
RB1	11	0.061 7 ± 0.003 2aA	1.686 7 ± 0.074 7bB	0.033 5 ± 0.003 2aA
	22	0.213 0 ± 0.007 5aA	3.449 3 ± 0.101 7bB	0.057 1 ± 0.004 8aA
	33	0.331 3 ± 0.008 6aA	5.799 7 ± 0.053 2bA	0.057 2 ± 0.001 8aA
RB2	11	0.056 3 ± 0.003 5abA	2.016 3 ± 0.168 5aA	0.030 8 ± 0.004 2aA
	22	0.192 3 ± 0.007 2bC	3.937 7 ± 0.122 8aA	0.035 3 ± 0.002 3cC
	33	0.311 0 ± 0.022 1abA	6.166 0 ± 0.069 4aA	0.050 4 ± 0.003 3bAB

注:同列不同大写字母、小写字母分别表示相同处理时间处理间在 0.01、0.05 水平存在显著差异。

2.3 不同红蓝光质对比菠菜生长品质的影响

2.3.1 可溶性糖含量 由图 5 可知,生长 33 d 时,红蓝混合光处理的菠菜可溶性糖含量均高于白光处理,且与 CK 处理均存在显著差异。RB2 处理的菠菜可溶性糖含量最高,为 11.68 mg/g,与 RB1 处理差异不显著,与 RB、CK 处理间差异显著。

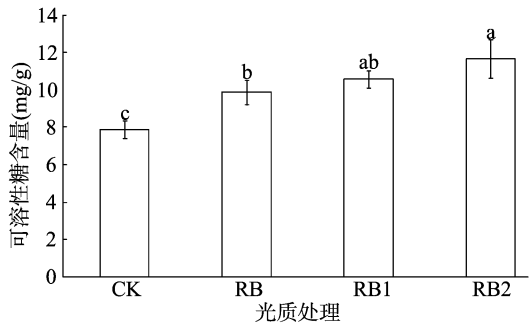


图5 不同红蓝光质对比菠菜可溶性糖含量的影响

2.3.2 蛋白质含量 由图 6 可知,不同光质处理对菠菜蛋白质含量的影响不同。生长 33 d 时,各处理下菠菜蛋白质含量由高到低依次为 RB > RB1 > RB2 > CK;RB 处理的含量最高,为 12.58m g/g,与 RB1、RB2 和 CK 处理之间差异显著,RB2 和 CK 处理的蛋白质含量相近,差异不显著。

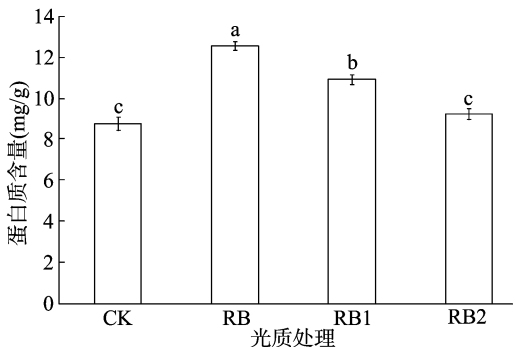


图6 不同红蓝光质对比菠菜蛋白质含量的影响

**2.3.3 维生素 C 含量** 由图 7 可知,菠菜的维生素 C 含量在各处理间存在显著差异,红蓝混合光处理下,菠菜维生素 C 含量均高于 CK 处理,分别为 CK 处理的 1.38、1.34、1.05 倍。RB 处理的菠菜维生素 C 含量最高,为 43.30  $\mu\text{g/g}$ 。

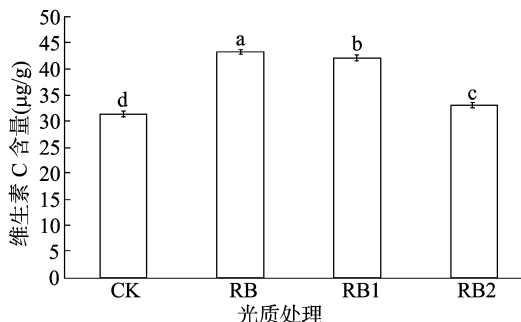


图7 不同红蓝光质对比对菠菜维生素 C 含量的影响

**2.3.4 硝酸盐含量** 由图 8 可知,不同光质处理的菠菜硝酸盐含量不同,各处理之间差异显著。CK 处理的菠菜硝酸盐含量最高,为 325.87  $\text{mg/g}$ ,显著高于其他处理;在红蓝混合光中,硝酸盐含量由大到小为  $\text{RB1} > \text{RB} > \text{RB2}$ ,RB2 处理的菠菜硝酸盐含量最低,为 63.83  $\text{mg/g}$ 。说明随着红光比例的减少,蓝光比例的增加,硝酸盐含量有增加的趋势。

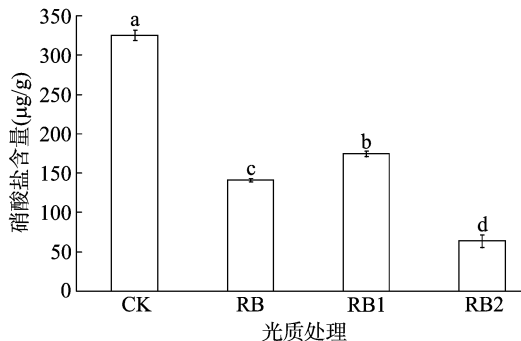


图8 不同红蓝光质对比对菠菜硝酸盐含量的影响

### 3 讨论

#### 3.1 不同红蓝光对比对菠菜生长形态的影响

光环境的变化,如光照强度、光照时间和光谱成分的改变,都会对植物产生深刻的影响<sup>[16]</sup>。至今为止,关于不同光质及光质组合对蔬菜栽培影响的研究层出不穷,在番茄<sup>[17]</sup>、黄瓜<sup>[18]</sup>、生菜<sup>[19]</sup>等多种蔬菜的研究指出,红蓝光及其组合能够影响植株生长、形态建成及品质等。国内外都有相关研究,Tadayoshi 等研究指出,红光能够加速生菜叶片的发育<sup>[20]</sup>;Dougher 等研究发现,蓝光能够促进生菜叶片的生长,限制茎的伸长生长<sup>[21]</sup>。高波对芹菜的光质栽培试验结果表明,芹菜的株高、叶柄长随着 R/B 比例的增大而增大,芹菜的叶片数和和茎粗则随着红蓝光复色光中蓝光比例的增加有增大的趋势<sup>[22]</sup>。本试验研究表明,RB2 处理下菠菜生长较快,株高增幅较大,略大于 RB,RB1 处理最小,明显低于 CK 处理;而茎粗在 RB1 处理下最大,在 RB2 处理下最小,明显小于 CK 处理。说明适当的红蓝光比例才会促进菠菜茎的伸长和生长,过高或过低都会起抑制作用。以红光为主的复合光更能促进菠菜叶柄的伸长,当逐渐增加蓝光比例,株高不断降低,会抑

制菠菜茎的生长;茎粗的变化规律与株高相反。

菠菜叶片在 RB 和 RB2 处理生长较快,生长 33 d 时,各处理的最大叶面积大小为  $\text{RB} > \text{RB2} > \text{CK} > \text{RB1}$ ;在整个生长过程中,处理间叶片数差值不明显,生长 33 d 后,RB1 和 RB2 处理叶片数大于 CK 处理,RB 处理最少。可见,在红蓝混合光中,红光有利于叶片的生长,过高的蓝光比例会降低植株的叶面积;适当增加红蓝光配比中红光或蓝光的比例都有利于促进叶片的发育。

#### 3.2 不同红蓝光质对比对菠菜生物量及根冠比的影响

许多研究显示,光质与植物本身同化产物的积累息息相关,如菊花<sup>[23]</sup>、马铃薯<sup>[24]</sup>、草莓<sup>[25]</sup>等植物光质栽培研究表明,红光也有利于植物干物质的积累,提高产量;蓝光则能矮化植物,提高其品质。闻婧等研究报道,黄瓜幼苗的干鲜质量、叶面积等随着 R/B 值的增加呈现先增加后减小的趋势<sup>[26]</sup>;张旭研究指出,红膜处理下菠菜鲜质量最大,即红膜有利于菠菜的生长<sup>[27]</sup>。闫萌萌等研究指出,红光促进花生幼苗根系生长,蓝光则相反<sup>[28]</sup>;石岭等研究指出,红光和红蓝混合光对河套密瓜根系生长发育有显著促进作用,蓝光也具有一定的促进作用,但与对照差异不显著<sup>[29]</sup>。本试验研究表明,菠菜处理的 3 个时期,地上部鲜质量在 RB2 和 RB 这 2 个处理相近,在 RB1 处理下最低,说明随着红蓝复色光中红光比例的增大,菠菜地上部鲜质量增大,与杜健芳等研究结果<sup>[30]</sup>相吻合。地下部鲜质量变化中,红蓝混合光处理始终大于对照,在 3 个处理时期,RB1 均最大,RB2 次之;生长 33 d 时,RB1 与 RB2 差异不显著,与其他 2 个处理间存在显著或极显著差异。可以得出,在红蓝混合光中,适当提高红光或者蓝光的比例均能够促进根系生长。根冠比体现了植物地下部分与地上部分的生长相关性<sup>[31]</sup>,反映了植物的生长状况及环境条件对根系与地上部的不同影响<sup>[32]</sup>。本试验研究表明,在生长过程中,RB1 处理菠菜根冠比始终最大,RB 和 RB2 处理下菠菜的根冠比均大于 CK 处理,RB 和 RB2 处理在生长 33 d 时差值不大。综合比较菠菜生物产量及根冠比的变化情况得出,RB2 和 RB 处理能够使菠菜地下部和地上部生长平衡,有利于提高产量。

#### 3.3 不同红蓝光质对比对菠菜生长品质的影响

不同光质对植物品质有较大的调控作用<sup>[33-35]</sup>,通过调节蔬菜碳氮代谢、光合作用等过程来影响植物糖、蛋白质等营养物的积累。陈强等研究指出,蓝光能促进番茄维生素 C 含量、可溶性蛋白含量的提高,红光和红蓝光混合光有利于番茄果实中可溶性糖的积累<sup>[36]</sup>。陈炯等研究报道,不同比例红蓝混合光能显著提高韭菜可溶性糖含量,蓝光处理可以促进韭菜维生素 C 含量和可溶性蛋白含量的增加,红光能降低韭菜硝酸盐含量,蓝光和红蓝混合光则相反<sup>[37]</sup>。本试验结果表明,红蓝复色光有利于提高可溶性糖含量,RB2 和 RB1 处理下菠菜可溶性糖含量高于 RB 处理。说明在混合光中,红蓝光间不同比例对菠菜可溶性糖含量的影响存在相互作用,适当增加混合光中红光或蓝光的比例,有利于增加菠菜可溶性糖含量。蛋白质和维生素 C 的含量变化相同,从大到小为  $\text{RB} > \text{RB1} > \text{RB2} > \text{CK}$ 。由此可知,红蓝混合光中,适当增加蓝光比例对促进蛋白质和维生素 C 积累的效果显著,过高则促进作用降低。相比于 CK 处理,红蓝混合光能显著降低菠

菜硝酸盐的含量,随着混合光中红光比例的增加,蓝光比例的减少,硝酸盐含量逐渐降低。

综上,红蓝混合光处理下菠菜生长品质优于 CK 处理,其中, RB2 和 RB1 处理的菠菜可溶性糖含量较高; RB 和 RB1 处理下蛋白质含量和维生素 C 含量高于 RB2, RB2 处理下硝酸盐含量最低。综合比较株高、茎粗、最大叶面积和叶片数 4 项指标,可知, RB1 和 RB2 处理下,菠菜的生长形态较好。由菠菜生物产量及根冠比的变化情况得出, RB2 和 RB 能够使菠菜地下部和地上部生长平衡,有利于提高产量。综合考虑不同红蓝光比例对菠菜生长、生物量及品质的影响, RB2 处理更有利于菠菜的生长和品质的提高,适用于菠菜的 LED 光源栽培。

#### 参考文献:

- [1] 刘文科, 杨其长. LED 植物光质生物学与植物工厂发展[J]. 科技导报, 2014, 32(10): 25–28.
- [2] 徐景致, 李同凯, 葛大勇, 等. 植物生长发育对光波段选择性吸收的研究进展[J]. 河北林果研究, 2002, 17(2): 180–184.
- [3] 刘文科, 杨其长. 人工光在植物工厂中的应用[J]. 照明工程学报, 2014, 25(4): 50–53, 61.
- [4] 张 欢. 光环境调控对植物生长发育的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [5] Hoenecke M E, Bula R J, Tibbitts T O. Photon levels for lettuce seedlings grown under red – light – emitting diodes[J]. HortScience: a Publication of the American Society for Horticultural Science, 1992, 27(5): 427–430.
- [6] Goins G D, Yorio N C, Sanmo M M, et al. Photomorphogenesis, photosynthesis and seed yield of wheat plants grown under red light – emitting diodes (LED) with and without supplemental blue lighting [J]. Journal of Experimental Botany, 1997, 48(312): 1407–1413.
- [7] Tan N D, Takamura T, Watanabe H, et al. Light emitting diodes (LEDs) as a radiation source for micropropagation of strawberry [M]//Kubota C, Chun C. Transplant production in the 21st Century. Dordrecht: Springer, 2000: 114–118.
- [8] 张 南. 菠菜种质资源遗传多样性及耐寒性鉴定[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
- [9] Taiz L, Zeiger E. Plant physiology [M]. New York: Benjamin/Cummings Publishing Co., 1991.
- [10] Ward J M, Cufr C A, Denzel M A, et al. The Dof transcription factor OBP3 modulates phytochrome and cryptochrome signaling in Arabidopsis[J]. Plant Cell, 2005, 17(2): 475–485.
- [11] Anderson J M. Insights into the consequences of grana stacking of thylakoid membranes in vascular plants: a personal perspective[J]. Australian Journal of Plant Physiology, 1999, 26(7): 625–639.
- [12] 齐连东. 光质对菠菜生理特性及其品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2007.
- [13] 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.
- [14] 张治安, 陈展宇. 植物生理学实验技术[M]. 长春: 吉林大学出版社, 2008.
- [15] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [16] 王 艺, 韦小丽. 不同光照对植物生长、生理化和形态结构影响的研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2010, 29(4): 353–359, 370.
- [17] 常涛涛, 刘晓英, 徐志刚, 等. 不同光谱能量分布对番茄幼苗生长发育的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1748–1756.
- [18] 谢 景, 刘厚诚, 宋世威, 等. 不同光质 LED 灯对黄瓜幼苗生长的影响[J]. 长江蔬菜, 2012(6): 23–25.
- [19] 陈文昊, 徐志刚, 刘晓英, 等. LED 光源对不同品种生菜生长和品质的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1434–1440.
- [20] Tadayoshi H, Wakanori A, Hiroyuki W. Effect of monochromatic light irradiation by LED on the internodal stem elongation of seedling in eggplant, leaf lettuce and sunflower [J]. Shokubutsu Kankyo Kogaku, 2006, 18(2): 160–166.
- [21] Dougher T, Bugbee B. Long – term blue light effects on the histology of lettuce and soybean leaves and stems[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 2004, 129(4): 467–472.
- [22] 高 波. 不同 LED 光质和营养液对芹菜生长、产量、品质及光合特性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [23] 魏胜利, 王家保, 李春保. 蓝光和红光对菊花生长和开花的影响[J]. 园艺学报, 1998, 25(2): 100–101.
- [24] Jea S. Light effects on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum*) in vitro: a review [J]. American Journal of Potato Research, 2005, 82(5): 353–367.
- [25] 崔文华, 杨立娜, 崔清华. 草莓用 LED 组合光源研究[J]. 农业技术与装备, 2012(17): 62–64.
- [26] 闻 婧, 鲍顺淑, 杨其长, 等. LED 光源 R/B 对叶用莴苣生理性状及品质的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(3): 413–416.
- [27] 张 旭. 光质对叶用莴苣与菠菜生长及生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2015.
- [28] 闫萌萌, 王铭伦, 王洪波, 等. 光质对花生幼苗根系生长与根系活力的影响[J]. 农学学报, 2013, 3(8): 17–20.
- [29] 石 岭, 霍秀文, 郝春光. 不同光质对河套蜜瓜器官培养的影响[J]. 内蒙古农牧大学学报(自然科学版), 1999, 2(2): 76.
- [30] 杜建芳, 廖祥儒, 叶步青, 等. 光质对油菜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 植物学通报, 2002, 19(6): 743–745.
- [31] 高 波, 杨振超, 李万青, 等. 3 种不同 LED 光质配比对芹菜生长和品质的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(12): 125–132.
- [32] 王艳哲, 刘秀位, 孙宏勇, 等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 282–289.
- [33] 肖林霞, 卢其能, 李润根. 光质、光强和外植体对虎杖愈伤组织增殖及白藜芦醇积累的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(11): 60–63.
- [34] 牛萍娟, 李艳艳, 田会娟, 等. 基于 LabVIEW 的智能 LED 植物补光照明系统设计[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(10): 394–398.
- [35] 刘 丹, 刘晓英, 焦学磊, 等. 不同 LED 光源对温室黄瓜幼苗生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(8): 238–242.
- [36] 陈 强, 刘世琦, 张自坤, 等. 不同 LED 光源对番茄果实转色期品质的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 156–161.
- [37] 陈 娟, 刘世琦, 孟凡鲁, 等. 不同光质对韭菜营养品质的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2012, 43(3): 361–366.