

光质对大豆芽苗菜生长和大豆异黄酮含量及 PAL 活性的影响

张晓燕, 鲁燕舞, 魏圣军, 崔 瑾

(南京农业大学 生命科学院, 江苏 南京 210095)

摘 要:采用发光二极管(light emitting diode, LED)精确调制光谱能量分布,以黑暗培养为对照,研究不同光质对大豆芽苗菜品种菜豆6号和苏鲜豆21的生长、大豆异黄酮含量及PAL活性的影响。结果表明:黄光有利于大豆芽苗菜鲜重的增加;随着光质处理时间的延长,两个品种大豆芽苗菜子叶中的大豆异黄酮含量总体呈先增加后降低或持续降低的趋势,而下胚轴中的大豆异黄酮含量则总体呈先降低后增加的趋势;培养至第6天时,下胚轴中的大豆异黄酮含量高于子叶中的含量;与黑暗培养相比,光照处理显著提高了下胚轴中的大豆异黄酮含量,其中UV-B的作用效果最显著,且下胚轴中PAL活性在UV-B下显著提高。

关键词:大豆芽苗菜;光质;大豆异黄酮;PAL活性

中图分类号:S565.1

文献标识码:A

文章编号:1000-9841(2014)01-0046-07

Effects of Light Quality on Growth, Soy Isoflavone Content and PAL Activity of Soybean Sprouts

ZHANG Xiao-yan, LU Yan-wu, WEI Sheng-jun, CUI Jin

(College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: Light emitting diode(LED) was applied to accurately modulate light spectral energy distribution. The effects of light quality on the growth, total soybean isoflavone content and PAL activity of Caidou 6 and Suxiandou 21 soybean sprouts were studied. Dark was used as the control. The results showed that yellow light promoted the accumulation of the fresh weight. With the increasing of culture time, the total soybean isoflavone content first increased and then decreased or decreased continuously in the cotyledons, while the total soybean isoflavone content first decreased and then increased in the hypocotyls. On the sixth day of culture, the total soybean isoflavone content of both soybean sprouts varieties were higher in hypocotyls than in cotyledons. Compared with the control, light treatment significantly promoted the content of total soybean isoflavone in the hypocotyls, wherein the role of UV-B was the most significant, and UV-B treatment significantly promoted the PAL activity in hypocotyls of both two soybean sprouts varieties.

Key words: Soybean sprouts; Light quality; Soy isoflavone; PAL activity

大豆(*Glycine max* L. Merrill)及大豆制品是大豆异黄酮的主要来源^[1]。大豆异黄酮(soybean isoflavones, SI)是大豆中重要的次生代谢产物,具有雌性激素活性和抗氧化活性。研究发现,大豆异黄酮能有效预防更年期综合征,防治骨质疏松、动脉硬化和心血管疾病,并能治疗癌症^[2-6]。因此,如何提高大豆及大豆制品中的大豆异黄酮含量受到了国内外研究者的广泛关注。大豆异黄酮的生物合成以苯丙氨酸为前体物质,苯丙氨酸解氨酶(PAL, EC. 4.3.1.5)是大豆异黄酮合成的关键酶之一,它是一种诱导酶,光(红光、蓝光、紫外光)可以在转录水平上诱导PAL基因的表达^[7]。研究发现, PAL活性受白光、蓝光、红光等光质的调节^[8-9]。适当光照条件

下生产的绿化型大豆芽苗菜,其外观翠绿鲜亮、口味清香爽口,含有丰富的膳食纤维及其他生物活性物质,越来越受到消费者的喜爱^[10]。LED(light emitting diode)作为第四代新型照明光源,具有光谱能量调制便捷、节能环保、发热量少、体积小、寿命长和易于分散或组合控制等诸多优点,已成为植物工厂化生产中最具应用潜力的光源^[11-12]。已有文献报道绿化型大豆芽苗菜中的总大豆异黄酮含量高于黄化型大豆芽苗菜^[13-15],但有关不同LED光质对大豆芽苗菜生长、大豆异黄酮含量影响及相关机理研究的报道尚未多见。

现应用LED精确调制光谱能量分布,探讨不同光质对大豆芽苗菜生长和大豆异黄酮含量及PAL

收稿日期:2013-07-06

基金项目:国家自然科学基金(31171998);国家基础科学人才培养基金(J1310015)。

第一作者简介:张晓燕(1988-),女,硕士,主要从事植物光生物学研究。E-mail:201116009@njau.edu.cn。

通讯作者:崔瑾(1974-),女,博士,教授,主要从事设施栽培环境调控机理研究。E-mail:cuijin@njau.edu.cn。

活性的影响,以期为大豆芽苗菜品质的提高和工业化生产光环境调控技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试大豆品种为菜豆 6 号和苏鲜豆 21,由南京农业大学国家大豆改良中心提供。

1.2 试验设计

挑选饱满度好、成熟度高、大小均匀、无残损的大豆种子,25℃ 黑暗下浸种 6 h 后催芽 24 h,待种子充分吸水、种皮充分膨胀后,选择大小及生活力基本一致的种子播种于蛭石中,播量每盘 50 粒,播后每天浇 4 次自来水,暗培养 1 d 后置于不同光质下进行处理。培养箱内相对湿度为(75 ± 5)%,温度

为(25 ± 2)℃。

光源为 LED 冷光源培养箱(浙江联合赛福实验仪器科技有限公司)内顶置 LED 光源,培养箱光谱能量分布主要技术参数如表 1 所示,可发出白光(W)、红光(R)、黄光(Y)、蓝光(B)及紫外光(UV-B)(图 1),由于目前国内市场中 LED 产品中 UV-B 价格昂贵且不易购买,故用 UV-B 紫外窄谱灯管(PHILIPS,PL-S 9W/01/2P)替代。对照组(黑暗培养,CK)在普通培养箱内黑暗下培养。调节电流、占空比以及光源与植株的距离,使用光量子计(GLZ-A,浙江托普仪器有限公司)测量光强,使光强均为(30 ± 3) μmol·m⁻²·s⁻¹左右,光照 12 h·d⁻¹,培养至第 6 天测量各项指标。

表 1 不同 LED 光谱能量分布的主要技术参数

Table 1 Major technique parameters of light spectral energy distribution under LED

| 光质 Light quality | 光谱能量分布 Light spectral energy distribution | 峰值波长 λ _p /nm | 波长半宽 Δλ/nm | 光强 Light intensity/μmol·m ⁻² ·s ⁻¹ |
|---------------------|--|----------------------------|---------------|---|
| W | 100% 白光 100% White | 380 ~ 750 | — | 30 ± 3 |
| R | 100% 红光 100% Red | 658 | 5 | 30 ± 3 |
| Y | 100% 黄光 100% Yellow | 585 | 5 | 30 ± 3 |
| B | 100% 蓝光 100% Blue | 460 | 5 | 30 ± 3 |
| UV-B | 100% 紫外光 100% UV-B | 311 | 20 | 30 ± 3 |



图 1 光源小区示意图

Fig. 1 General view of LED light plot

1.3 测定项目与方法

可食鲜重、全株鲜重、可食干重和全株干重用万分之一天平(Sartorius,BSA 124S)测定;可食率(%)=可食鲜重/全株鲜重×100;大豆异黄酮含量采用三波长紫外分光光度法测定^[16];PAL 酶活性参照刘金等^[17]和 Lister 等^[18]的方法测定。

1.4 数据分析

随机取样,生长指标测定设 6 次重复,生理特性指标测定设 3 次重复。采用 Excel 2003 进行数据整理,SPSS 17.0 进行方差分析,Origin 8.0 进行绘图,显著性测验采用邓肯氏新复极差法(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 光质对大豆芽苗菜生长的影响

由表 2、图 2 和图 3 可知,光质对两个品种的大豆芽苗菜生长的影响不完全相同。菜豆 6 号大豆芽苗菜的全株鲜重在白光和黄光处理下显著高于对照和其他光质处理,而苏鲜豆 21 在红光和黄光处理下显著高于对照和其他光质处理。苏鲜豆 21 大豆芽苗菜的可食鲜重在黄光处理下最大,且显著高于对照和其他光质处理。除蓝光处理外,各光质处理下两个品种大豆芽苗菜的可食率均显著低于对照。

表 2 光质对大豆芽苗菜生长的影响

Table 2 Effects of light quality on the growth of soybean sprouts

| 品种 | 处理 | 可食鲜重 | 全株鲜重 | 可食干重 | 全株干重 | 可食率 |
|------------------------|-----------|-----------------------|----------------------|---------------------|--------------------|-----------------|
| Variety | Treatment | Edible fresh weight/g | Total fresh weight/g | Edible dry weight/g | Total dry weight/g | Edible rate/% |
| 菜豆 6 号 Caidou 6 | CK | 1.029 ± 0.031 ab | 1.106 ± 0.028 b | 0.258 ± 0.015 a | 0.264 ± 0.015 a | 93.01 ± 0.94 a |
| | W | 1.198 ± 0.057 a | 1.372 ± 0.069 a | 0.210 ± 0.016 a | 0.222 ± 0.016 a | 87.37 ± 0.87 b |
| | R | 1.001 ± 0.076 b | 1.153 ± 0.089b | 0.209 ± 0.024 a | 0.217 ± 0.024 a | 86.88 ± 1.07 bc |
| | Y | 1.174 ± 0.049 a | 1.412 ± 0.064 a | 0.228 ± 0.009 a | 0.240 ± 0.010 a | 84.36 ± 1.15 cd |
| | B | 1.044 ± 0.024 ab | 1.188 ± 0.030 b | 0.233 ± 0.011 a | 0.241 ± 0.011 a | 87.92 ± 0.56 b |
| | UV-B | 0.993 ± 0.072 b | 1.173 ± 0.072 b | 0.207 ± 0.026 a | 0.217 ± 0.026 a | 83.23 ± 0.42 d |
| 苏鲜豆 21 Suxiandou 21 | CK | 1.221 ± 0.029 bc | 1.300 ± 0.034 b | 0.233 ± 0.009 a | 0.240 ± 0.008 a | 94.03 ± 0.85 a |
| | W | 1.116 ± 0.037 bc | 1.269 ± 0.052 b | 0.196 ± 0.012 a | 0.206 ± 0.012 a | 88.09 ± 0.92 b |
| | R | 1.291 ± 0.059 b | 1.521 ± 0.078 a | 0.200 ± 0.010 a | 0.216 ± 0.011 a | 85.02 ± 0.74 c |
| | Y | 1.463 ± 0.077 a | 1.725 ± 0.110 a | 0.203 ± 0.007 a | 0.221 ± 0.008 a | 85.12 ± 1.32 c |
| | B | 1.178 ± 0.077 bc | 1.287 ± 0.087 b | 0.219 ± 0.026 a | 0.227 ± 0.026 a | 91.69 ± 1.21 a |
| | UV-B | 1.059 ± 0.047 c | 1.267 ± 0.062 b | 0.195 ± 0.005 a | 0.210 ± 0.006 a | 83.71 ± 0.80 c |

同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著,下同。
Values within a column followed by different lowercase letters are significantly different at 0.05 level,the same below.

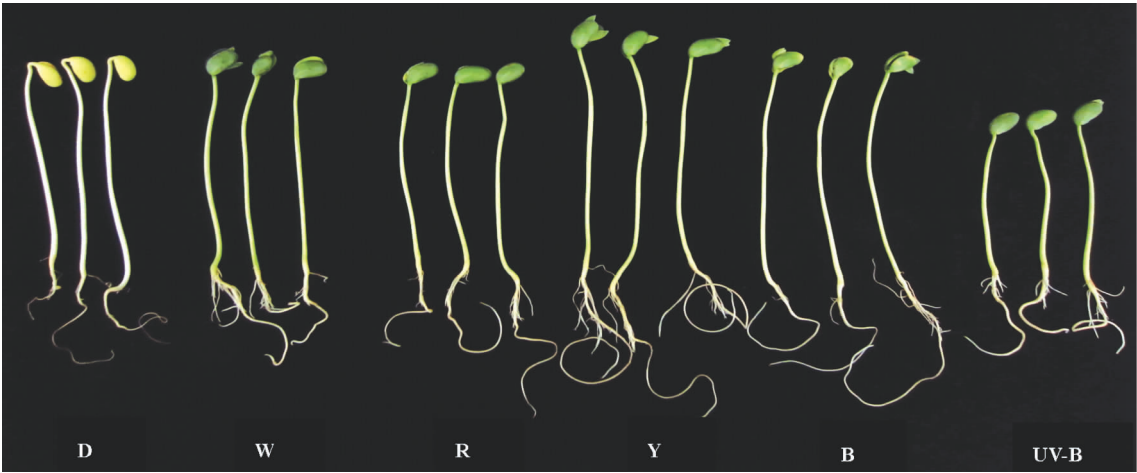


图 2 光质对大豆芽苗菜菜豆 6 号生长的影响

Fig. 2 Effects of light quality on the growth of Caidou 6 soybean sprouts

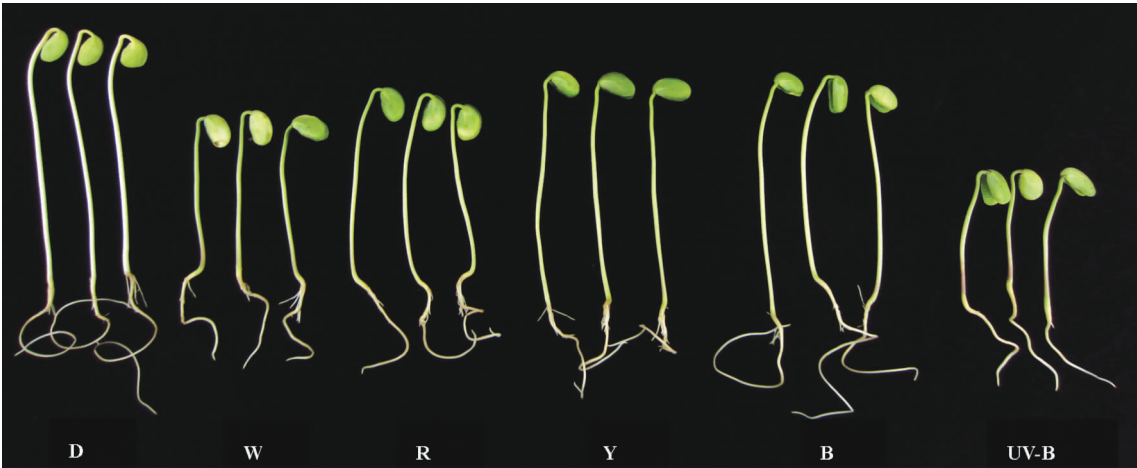


图 3 光质对大豆芽苗菜苏鲜豆 21 生长的影响

Fig. 3 Effects of light quality on the growth of Suxiandou 21 soybean sprouts

2.2 光质对大豆芽苗菜大豆异黄酮含量的影响

由图 4 可知,两个品种大豆芽苗菜子叶中大豆异黄酮含量对光质的响应特点不同。随着培养时间的增加,菜豆 6 号大豆芽苗菜子叶中的大豆异黄酮含量总体呈现先增加后降低的趋势,而苏鲜豆 21 则总体呈现降低趋势,仅在培养的第 4 天略有增加。

由图 5 可知,两个品种大豆芽苗菜下胚轴中大

豆异黄酮含量对光质的响应特点基本相同。随着培养时间的增加,下胚轴中大豆异黄酮含量均呈现先降低后增加的趋势。从培养的第 2 天开始,各光质处理下的两个品种大豆芽苗菜下胚轴中的大豆异黄酮含量均高于黑暗培养,其中紫外光处理的大豆异黄酮含量最高且增加的趋势最明显。

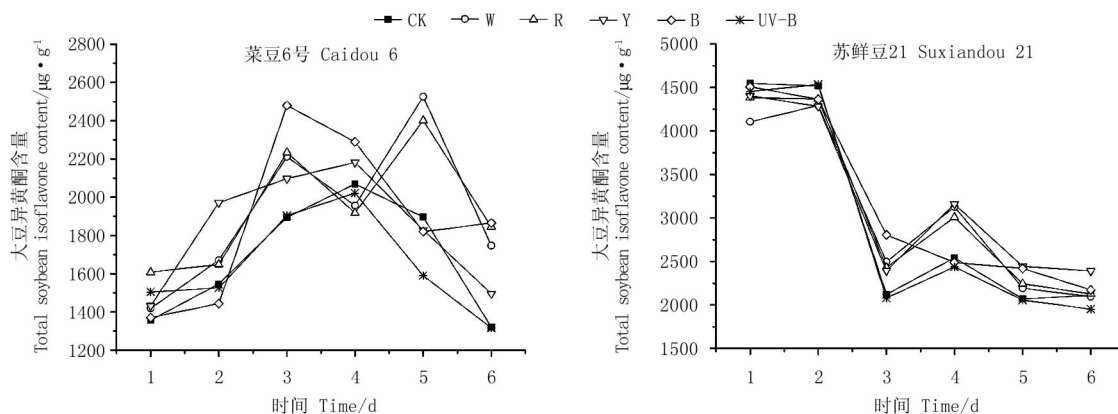


图 4 大豆芽苗菜子叶中大豆异黄酮含量的变化

Fig. 4 Change of total soybean isoflavone content in cotyledons of soybean sprouts

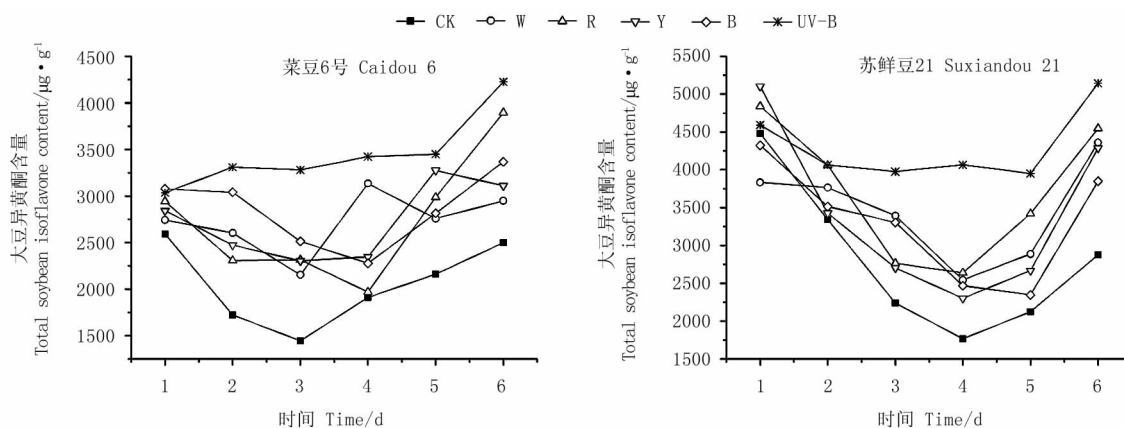


图 5 大豆芽苗菜下胚轴中大豆异黄酮含量的变化

Fig. 5 Change of total soybean isoflavone content in hypocotyls of soybean sprouts

由图 6 可知,培养至第 6 天采收期时,两个品种大豆芽苗菜下胚轴中的大豆异黄酮含量均比子叶中的含量高。各光质处理下,菜豆 6 号大豆芽苗菜子叶中的大豆异黄酮含量均显著高于黑暗培养,红光和蓝光处理达到最高值且显著高于其他光质处理;而苏鲜豆 21 则在黄光处理下显著高于对照和其他光质处理。此外,各光质处理下,两个品种大豆芽苗菜下胚轴中的大豆异黄酮含量均显著高于黑暗培养,并且在紫外光处理下达到最高值且显著高于其他光质处理。

2.3 光质对大豆芽苗菜 PAL 活性的影响

如图 7 所示,培养至第 6 天采收期时,两个品种的大豆芽苗菜子叶中的 PAL 活性均比下胚轴中的高。菜豆 6 号大豆芽苗菜子叶中的 PAL 活性在白光处理下最大且显著高于对照和其他光质处理;而苏鲜豆 21 大豆芽苗菜子叶中的 PAL 活性无差异。

除 Y 处理外,其他光质处理下两个品种大豆芽苗菜下胚轴中的 PAL 活性均显著高于对照;其中紫外光处理下两个品种大豆芽苗菜下胚轴中的 PAL 活性均最大且显著高于对照和其他光质处理。

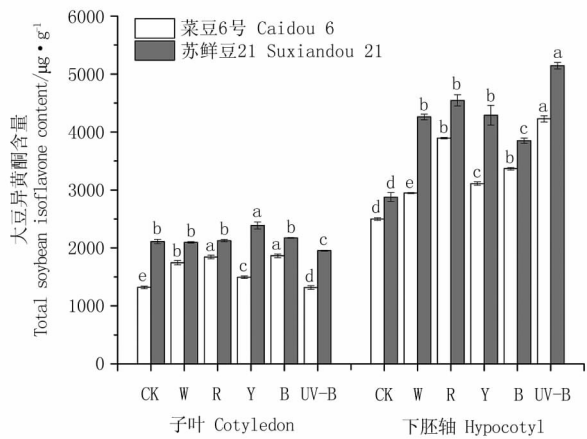


图6 培养第6天时光质对大豆芽苗菜子叶和下胚轴中大豆异黄酮含量的影响

Fig. 6 Effects of light quality on total soybean isoflavone content in cotyledons and hypocotyls of soybean sprouts on the sixth day of culture

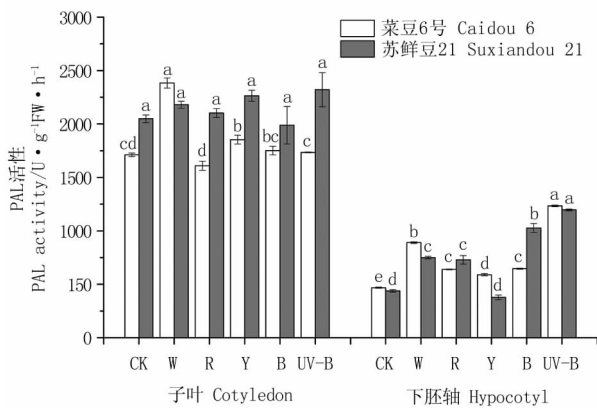


图7 培养第6天时光质对大豆芽苗菜PAL活性的影响

Fig. 7 Effects of light quality on PAL activity of soybean sprouts on the sixth day of culture

3 结论与讨论

3.1 光质对大豆芽苗菜生长的影响

本试验表明黄光显著提高两个品种大豆芽苗菜可食鲜重和全株鲜重,这与杜洪涛等^[19]对彩色甜椒幼苗、Islam等^[20]对兰花和刘晓英等^[21]对菠菜的研究结果一致。Kozak等^[22]研究认为,黄光有利于鲜重的增加,但目前关于黄光的研究较少,黄光有利于植物生物量提高的相关机理有待进一步研究。本试验中,除蓝光处理外,其他光质处理下两个品种大豆芽苗菜的可食率均显著低于对照。这可能是因为光照促进了根的生长^[23],从而改变了大豆芽苗菜的生物量在地上部分和地下部分的分配,而蓝光不利于根系的生长^[24],但可以提高幼苗地上部分的生物量^[25]。

3.2 光质对大豆芽苗菜大豆异黄酮含量及PAL活性的影响

光质对大豆芽苗菜中异黄酮含量的影响因品种和器官而异。菜豆6号子叶中的大豆异黄酮含量在1~3 d时逐渐增加,这与Schmidt等^[26]和Ribeiro等^[27]的研究结果一致。而苏鲜豆21芽苗菜子叶中的大豆异黄酮含量持续下降,这可能是由大豆品种间的差异造成的。两个品种大豆芽苗菜下胚轴中的大豆异黄酮含量对光质处理的响应特点基本一致,随着培养时间的延长均呈先降低后增加的趋势。子叶与下胚轴的生理功能不同,因此二者的物质代谢途径也不同,在大豆发芽的过程中,子叶为下胚轴及胚根的生长发育提供营养物质^[27]。大豆芽苗菜子叶和下胚轴中的大豆异黄酮含量在光质处理下呈现的这两种相反的趋势,可能是因为子叶中贮存的大豆异黄酮逐渐向下胚轴转移,并且下胚轴中的大豆异黄酮合成逐渐增强所致^[28-29]。

陈振等^[30]研究认为大豆异黄酮的含量和种类在大豆子叶和下胚轴中均有显著差异,下胚轴中大豆异黄酮的含量比子叶中的高。本试验中,对两个品种的大豆芽苗菜而言,在相同的处理下,下胚轴中的大豆异黄酮含量均比子叶中的高,与黑暗培养相比,光照处理可以显著提高下胚轴中的大豆异黄酮含量,这与Phommalth等^[15]的研究结果一致。其中UV-B的促进作用最显著,其次是红光、黄光和白光。下胚轴是大豆芽苗菜的主要食用部分^[31],下胚轴中大豆异黄酮含量的提高可以显著提升大豆芽苗菜的营养品质。

研究表明,PAL活性受到光质的调节,并且PAL活性的高低与黄酮类物质的合成有密切的关系。本试验也发现,在UV-B处理下,两个品种的大豆芽苗菜下胚轴中的PAL活性均显著高于对照和其他光质处理,同时大豆异黄酮含量也均显著高于对照和其他光质处理,这与谢灵玲等^[7]对大豆的研究结果一致。大豆异黄酮具有清除自由基和抗氧化的作用,它作为UV-B辐射诱导下的重要次生代谢产物,可以减少UV-B辐射对植物的伤害^[32]。本试验中,两个品种的大豆芽苗菜下胚轴中PAL活性在白光、蓝光和红光处理下显著提高,这分别与徐茂军等^[1]对发芽大豆、王莉等^[33]对长鞭红景天和梁宗锁等^[34]对丹参的研究结果一致。白光、蓝光和红光可能是通过提高PAL基因的转录水平而提高了PAL

的活性^[35-36]。此外,两个品种的大豆芽苗菜子叶中的 PAL 活性均比下胚轴中的高,但只有下胚轴中的 PAL 活性在光照处理下显著提高,表明光照处理对 PAL 活性的影响存在组织特异性。

3.3 LED 光调控在芽苗菜工厂化生产中的应用前景

试验发现黄光处理有利于大豆芽苗菜的生长,紫外光处理有利于大豆芽苗菜下胚轴中 PAL 活性和大豆异黄酮含量的提高。研究结果证明了光调控技术应用于绿化型或半绿化型芽苗菜蔬菜生产实际中的可能性。

利用 LED 光调控技术来培育芽苗菜是一项节能环保、经济且简便易行的新方法,可有效提高芽苗菜产量和品质,产生显著的社会、经济效益。因此,今后应深入研究光量、光质、光周期的协同作用、光质参数的优化、植物光形态建成机理以及光环境结合其他环境因素对植物生长发育的影响等问题,为芽苗菜生产等设施栽培光环境调控技术的发展提供科学依据。

参考文献

- [1] 徐茂军,朱睦元,顾青. 发芽大豆中异黄酮积累的光诱导作用研究[J]. 中国粮油学报,2003,18(1):74-77. (Xu M J, Zhu M Y, Gu Q. Light-induced accumulation of isoflavone in soybean sprouts[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2003,18(1):74-77.)
- [2] 陈宣钦,张乐,徐慧妮,等. 大豆异黄酮生物合成关键酶及其代谢工程研究进展[J]. 中国生物工程杂志,2012,32(7):133-138. (Chen X Q, Zhang L, Xu H N, et al. Key enzymes in soybean isoflavones biosynthesis and its metabolic engineering[J]. China Biotechnology, 2012,32(7):133-138.)
- [3] Ye Y B, Wang Z L, Zhou S Y, et al. Soy germ isoflavones improve menopausal symptoms but have no effect on blood lipids in early postmenopausal Chinese women: a randomized placebo-controlled trial[J]. The Journal of the North American Menopause Society, 2012,19(7):791-798.
- [4] Ma D F, Qin L Q, Wang P Y, et al. Soy isoflavone intake increases bone mineral density in the spine of menopausal women: meta-analysis of randomized controlled trials[J]. Clinical Nutrition, 2008, 27:57-64.
- [5] 徐春华,张治广,谢明杰. 大豆异黄酮的抗氧化和抗肿瘤活性研究[J]. 大豆科学,2010,29(5):870-873. (Xu C H, Zhang Z G, Xie M J. Research on antioxygenic and antitumor activities of soybean isoflavones [J]. Soybean Science, 2010, 29 (5): 870-873.)
- [6] Boucher B A, Cotterchio M, Anderson L N, et al. Use of isoflavone supplements is associated with reduced postmenopausal breast cancer risk [J]. International Journal of Cancer, 2013, 132: 1439-1450.
- [7] 谢灵玲,赵武玲,沈黎明. 光照对大豆叶片苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 基因表达及异黄酮合成的调节[J]. 植物学通报,2000, 17(5):443-449. (Xie L L, Zhao W L, Shen L M. Light regulation of the expression of PAL gene in soybean leaves and isoflavone synthesis[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2000, 17(5):443-449.)
- [8] Ensminger P A, Schaefer E. Blue and ultraviolet-B light photoreceptors in parsley cells [J]. Photochemistry and Photobiology, 1992, 55:437-447.
- [9] 赵德修,李茂寅,邢建民,等. 光质、光强和光期对水母雪莲愈伤组织生长和黄酮生物合成的影响[J]. 植物生理学报,1999, 25(2):127-132. (Zhao D X, Li M Y, Xing J M, et al. Effects of light on cell growth and flavonoids biosynthesis in callus cultures of *Saussurea medusa* Maxim [J]. Acta Phytophysiologica Sinica, 1999, 25(2):127-132.)
- [10] 张颖. 绿瓣大豆芽菜生产技术研究[D]. 南京:南京农业大学, 2008:1-2. (Zhang Y. Study on the technology of green soybean sprouts production[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2008:1-2.)
- [11] 崔瑾,徐志刚,邸秀茹. LED 在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报,2008,24(8):249-253. (Cui J, Xu Z G, Di X R. Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(8):249-253.)
- [12] Nhut D T, Don N T, Tanaka M. Light-emitting diodes as an effective lighting source for *in vitro* banana culture [C]//Jain S M, Häggman H. Protocols for micropropagation of woody trees and fruits. Berlin: Springer Netherlands, 2007:527-541.
- [13] Chi H Y, Roh J S, Kim J T, et al. Light quality on nutritional composition and isoflavones content in soybean sprouts [J]. Korean Journal of Crop Science, 2005, 50:415-418.
- [14] Kim E H, Kim S H, Chung J I, et al. Analysis of phenolic compounds and isoflavones in soybean seeds (*Glycine max* L. Merrill) and sprouts grown under different conditions [J]. European Food Research and Technology, 2006, 222:201-208.
- [15] Phommalth S, Jeong Y S, Kim Y H, et al. Effects of light treatment on isoflavone content of germinated soybean seeds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56:10123-10128.
- [16] 鞠兴荣,袁建,汪海峰. 三波长紫外分光光度法测定大豆异黄酮含量的研究[J]. 食品科学,2001,22(5):46-48. (Ju X R, Yuan J, Wang H F. Study on determination of soybean isoflavones content by three-wavelength, UV spectrophotometry [J]. Food Science, 2001, 22(5):46-48.)
- [17] 刘金,魏景立,刘美艳,等. 早熟苹果花青苷积累与其相关酶活性及乙烯生成之间的关系[J]. 园艺学报,2012,39(7):1235-1242. (Liu J, Wei J L, Liu M Y, et al. The relationships between

- the enzyme activity of anthocyanin biosynthesis, ethylene release and anthocyanin accumulation in fruits of precocious apple cultivars[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(7): 1235-1242.)
- [18] Lister C E, Lancaster J E. Developmental changes in enzymes of flavonoid biosynthesis in the skins of red and green apple cultivars [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1996, 71, 313-330.
- [19] 杜洪涛,刘世琦,蒲高斌. 光质对彩色甜椒幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. *西北农业学报*, 2005, 14(1): 41-45. (Du H T, Liu S Q, Pu G B. Effects of light qualities on growth and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of color pepper seedling [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2005, 14(1): 41-45.)
- [20] Islam M O, Matsui S, Ichihashi S. Effects of light quality on seed germination and seedling growth of *Cattleya orchids in vitro* [J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 1999, 68(6): 1132-1138.
- [21] 刘晓英,徐志刚,焦学磊,等. 可调 LED 光源系统设计及其对菠菜生长的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(1): 208-121. (Liu X Y, Xu Z G, Jiao X L, et al. Design on LED flexible light system and its effect on growth of spinach[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(1): 208-121.)
- [22] Kozak D. The influence of light quality and BA on *in vitro* growth and development of *Gardenia jasminoides* Ellis [J]. *Acta Scientiarum Polonorum. Hortorum Cultus*, 2011, 10(4): 65-73.
- [23] Dyachok J, Zhu L, Liao F Q, et al. SCAR mediates light-induced root elongation in *Arabidopsis* through photoreceptors and proteasomes [J]. *The Plant Cell*, 2011, 23(10): 3610-3626.
- [24] 唐大为. LED 光源不同光质对黄瓜幼苗生长及生理化的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010. (Tang D W. Effect of different LED light quality on growth and physiological and biochemical of cucumber seedlings [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2010.)
- [25] 刘文科,杨其长,邱志平,等. LED 光质对豌豆苗生长、光合色素和营养品质的影响[J]. *中国农业气象*, 2012, 3(4): 500-504. (Liu W K, Yang Q C, Qiu Z P, et al. Effects of LED light quality on growth, photosynthetic pigments and nutritional quality of pea seedlings [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 3(4): 500-504.)
- [26] Schmidt B, Quirnbach M. Content of selected isoflavones in plants and plant cell cultures of soybean [J]. *Current Topics in Phytochemistry*, 2002, 5: 91-98.
- [27] Ribeiro M L L, Mandarino J M G, Carrão-panizzi M C, et al. β -glucosidase activity and isoflavone content in germinated soybean radicles and cotyledons [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2006, 30: 453-465.
- [28] 孙君明,丁安林,沈黎明. 光照对大豆幼苗组织中异黄酮含量和分布的影响[J]. *植物学报*, 1998, 40(11): 1015-1021. (Sun J M, Ding A L, Shen L M. Light effect on the tissue contents and distribution of isoflavones in the developing seedling of soybean [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(11): 1015-1021.)
- [29] Lee S J, Ahn J K, Khanh T D, et al. Comparison of isoflavone concentrations in soybean (*Glycine max* L. Merrill) sprouts grown under two different light conditions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(23): 9415-9421.
- [30] 陈振,康玉兄. 豆类种子及萌发过程中功效性成分研究概述 [J]. *中国食物与营养*, 2012, 18(10): 27-32. (Chen Z, Kang Y X. Research advancement of bioactive compounds in legumes seeds and their germinated products [J]. *Food and Nutrition in China*, 2012, 18(10): 27-32.)
- [31] 刘炳仁,于瑞兰,刘坤,等. 豆芽优质生产新技术 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 2006: 7. (Liu B R, Yu R L, Liu K, et al. New technology of high-production soybean sprouts [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 2006: 7.)
- [32] 卢洪,习岗,杨初平,等. 应用 BPAT 研究 UV-B 诱导下大豆愈伤异黄酮含量的变化 [J]. *大豆科学*, 2010, 29(5): 863-866. (Lu H, Xi G, Yang C P, et al. Reveal isoflavone contents changes of soybean callus induced by UV-B radiation with Biophoton Analytical Technology [J]. *Soybean Science*, 2010, 29(5): 863-866.)
- [33] 王莉,史玲玲,刘玉军. 不同光质对长鞭红景天悬浮细胞生长及苯丙氨酸解氨酶活性的影响 [J]. *林业科学*, 2007, 43(6): 52-56. (Wang L, Shi L L, Liu Y J. Effects of different light treatments on growth and PAL activity of the suspension-cultured cells of *Rhodiola fastigiata* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(6): 52-56.)
- [34] 梁宗锁,李倩,徐文晖. 不同光质对丹参生长及有效成分积累和相关酶活性的影响 [J]. *中国中药杂志*, 2012, 37(14): 2055-2060. (Liang Z S, Li Q, Xu W H. Effects of different light quality on growth, active ingredients and enzymes activities of *Salvia miltiorrhiza* [J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2012, 37(14): 2055-2060.)
- [35] Kubashek W L, Shirley B W, McKillop A, et al. Regulation of flavonoid biosynthetic genes in germinating *Arabidopsis* seedlings [J]. *The Plant Cell*, 4(10): 1229-1236.
- [36] Sreelakshmi Y, Sharma R. Differential regulation of phenylalanine ammonia lyase activity and protein level by light in tomato seedlings [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2008, 46(4): 444-451.