



## 光质对菜用大豆苗期光形态建成及根冠比的影响

方临志<sup>1</sup>, 马稚昱<sup>2</sup>, 年海<sup>1,3</sup>, 吴卓晏<sup>1</sup>, 王巧彬<sup>4</sup>, 马启彬<sup>1,3</sup>, 程艳波<sup>1,3</sup>, 牟英辉<sup>1,3</sup>

(1. 华南农业大学 农学院, 广东 广州 510642; 2. 仲恺农业工程学院 机电学院, 广东 广州 510225; 3. 华南农业大学 国家大豆改良中心 广东分中心, 广东 广州 510642; 4. 广州市光机电技术研究院, 广东 广州 510663)

**摘要:** 发光二极管(LED)已被广泛地应用于温室栽培作物及科研的光源。本研究以上海青、华夏7号和浙鲜豆5号3个品种菜用大豆品种为供试材料,采用LED植物生长灯为光源,研究相同光照强度( $180 \pm 5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )下,不同光质对菜用大豆光形态建成和根冠比的影响。结果表明:与白光相比,以红光为主的光质处理显著提高了菜用大豆的株高和下胚轴长度,随着组合光中红光比例的增加,植株的复叶面积逐渐增大;蓝光及以蓝光为主的组合光明显促进了根系的生长;相对于单色光组合光能提高菜用大豆地上部生物量、地下部生物量及根冠比;菜用大豆对光质的响应存在着品种间差异。

**关键词:** 菜用大豆; 光质; 光形态建成; 根冠比

## Effects of Light Quality on the Photomorphogenesis and the Root-shoot Ratio of Soybean at Seedlings Stage

FANG Lin-zhi<sup>1</sup>, MA Zhi-yu<sup>2</sup>, NIAN Hai<sup>1,3</sup>, WU Zhuo-yan<sup>1</sup>, WANG Qiao-bin<sup>4</sup>, MA Qi-bin<sup>1,3</sup>, CHENG Yan-bo<sup>1,3</sup>, MU Ying-hui<sup>1,3</sup>

(1. College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Faculty of Mechanic and Electrical Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China; 3. Guangdong Subcenter of National Soybean Improvement Center, Guangzhou 510642, China; 4. Guangzhou Research Institute of O-M-E Technology, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Light-emitting diode (LED) has been widely used in crop cultivation in greenhouse and scientific research. The effects of light quality on the photomorphogenesis and root-shoot ratio of vegetable soybean seedlings (Shanghaiqing, Huaxia 7 and Zhexiandou 5) were investigated under the same light intensity ( $180 \pm 5 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) with LED irradiation. The result indicated that compared with white light, the combinations based on red light could significantly promote the stem and hypocotyl of soybean seedlings, and with the increase of the ratio of red light in the combination, trifoliate leaves also expanded more. Blue light together with the combinations based on blue light could significantly stimulate the growth of the root. Contrast to the single wavelength light, the biomass of the shoot, root and root-shoot ratio increased under the treatments of the combinations. Intraspecific variations in the responses were observed.

**Keywords:** Vegetable soybean; Light quality; Photomorphogenesis; Root-shoot ratio

菜用大豆(*Glycine max*)又称毛豆,是指在大豆鼓粒盛期至初熟期采收鲜嫩豆荚作为食用的大豆,是一种特用大豆。菜用大豆营养丰富,美味可口。20世纪90年代以来,随着人们健康意识的增强和对大豆保健功能的不断认识,菜用大豆在亚洲、美国和世界其它地区受到消费者的青睐,仅美国,每年菜用大豆的消费量就达到了25 000~30 000 t<sup>[1-2]</sup>。

光是植物生长最重要的环境因子之一,是植物生命活动的能量来源,同时也是一种关键的信号分

子,调控着植物的许多生命活动<sup>[3]</sup>。植物在长期的进化过程中建立起了一系列生理的和形态的机制来适应光环境的变化。研究表明光可以调控植物体地上部的形态建成,如生长在纯红光条件下的小麦在营养生长阶段茎长缩短,而在收获期却增长<sup>[4]</sup>。而且,光不仅可以经过植物茎的维管组织,也可以穿透土壤传导至植物的根系,活化根系的感光因子—光敏色素B,从而调节植物根系的生长发育<sup>[5-7]</sup>。目前,光质对菜用大豆生长发育调控,尤其

收稿日期:2018-01-06

基金项目:国家自然科学基金(31171508);广州市科技计划项目(201508020067);国家现代农业产业技术体系建设专项(CARS-04-PS09)。

第一作者简介:方临志(1991-),男,硕士,主要从事设施栽培研究。E-mail:1054310773@qq.com。

通信作者:牟英辉(1975-),男,博士,副教授,主要从事大豆栽培生理研究。E-mail:youhymoon@scau.edu.cn。

是根系生长调控的报道较少。

根冠比(植物地下部与地上部生物量的比值)是揭示植物体光合作用产物在体内分配的指标,是衡量植物体内干物质分配最常用的指标<sup>[8]</sup>。LED 灯寿命长,光电效率高,是一种被广泛地应用于温室栽培作物及科研的光源<sup>[9-11]</sup>。本研究以 LED 灯为光源,研究不同光质对 3 个品种菜用大豆苗期光形态建成和根冠比的影响,旨在探明光质对菜用大豆苗期光形态建成和干物质分配的效应,为设施栽培菜用大豆提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验于 2017 年在华南农业大学国家大豆改良中心广东分中心人工气候室进行,光源为订制光源,灯管规格为 33 mm×36 mm×1 200 mm,每个培养架 4 层,每层容积 0.35 m<sup>3</sup>,光照强度均为 180±5 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。供试菜用大豆品种为华南农业大学(国家大豆改良中心广东分中心)提供的浙鲜豆 5 号、上海青和华夏 7 号。

1.2 试验设计

试验设 8 个不同光质处理,分别为纯红光(R),红光 6:蓝光 1(R6:B1),红光 5:蓝光 1(R5:B1),红光 1:蓝光 1:白光 1(R1:B1:W1),红光 1:蓝光 7(R1:B7),红光 1:蓝光 12(R1:B12),蓝光(B),白光(W)为对照。其中数字表示单色光的相对光合有效辐射通量,但 R1:B1:W1 中含有白色 LED 灯珠,其光谱为复合光谱,数字为灯珠数量比(图 1)。培养架的每一层为 1 个处理,各培养架及每层之间做遮光处理,防止不同光源间产生干涉。选取大小一致且饱满圆润的菜用大豆种子,播于长 100 mm,宽 100 mm,高 85 mm 的塑料培养盆中,基质用椰糠与蛭石(1:1),每盆播 5 粒,分别置于不同 LED 光质处理中培养,出苗后每盆保留健壮的幼苗 3 株。光周期为 12 h(光照)/12 h(黑暗),环境温度为 25℃/21℃(昼/夜),湿度为 75%±5%。播后 20 d,收获整株植株,在子叶节处将植株的根系与地上部剪断,分别装入纸袋中。

1.3 测定项目与方法

叶片面积的测定参照刘关君等<sup>[12]</sup>的方法,先利用扫描仪(HP LaserJet M1005 MFP)扫描每一植株复叶,再利用图形处理软件 Image Pro Plu 6.0 计算单株复叶总面积<sup>[13]</sup>。利用扫根仪(EPSON EX-PRESSION 1000)扫描根系,再利用根系处理软件 WinRHZO 处理扫描结果,计算根系总根长、表面积、

根尖数和根体积等指标。测定以上参数后,将地上部和根系分装,放入电热鼓风干燥烘箱(上海一恒科学仪器有限公司 DHG-9240A 型)中经 105℃杀青 30 min 后,60℃下烘干 2 d,再利用分析天平称重,计算根冠比(根系干重/地上部干重)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和数据处理软件 SPSS 23 进行数据处理和统计分析,并用 Tukey 检验法进行差异显著性分析( $P<0.05$ )。

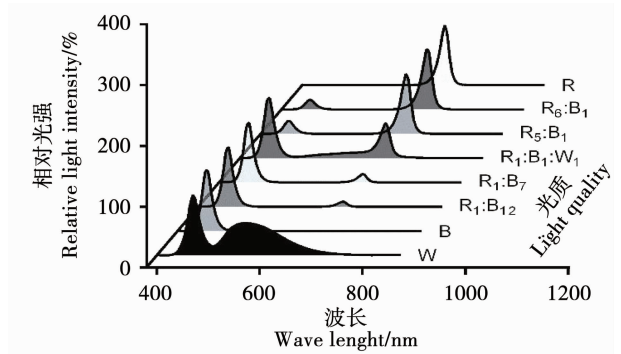


图 1 LED 灯相对光谱分布  
Fig. 1 Relative spectral distribution of the LEDs

2 结果与分析

2.1 光质对菜用大豆苗期地上部光形态建成的影响

由表 1 可知,光质显著影响了大豆的地上部光形态建成、生物量积累、根冠比及根系的生长发育,且各品种菜用大豆地上部形态、根冠比及根系形态存在显著差异,但是,品种间的地上部生物量与根系生物量差异不显著。

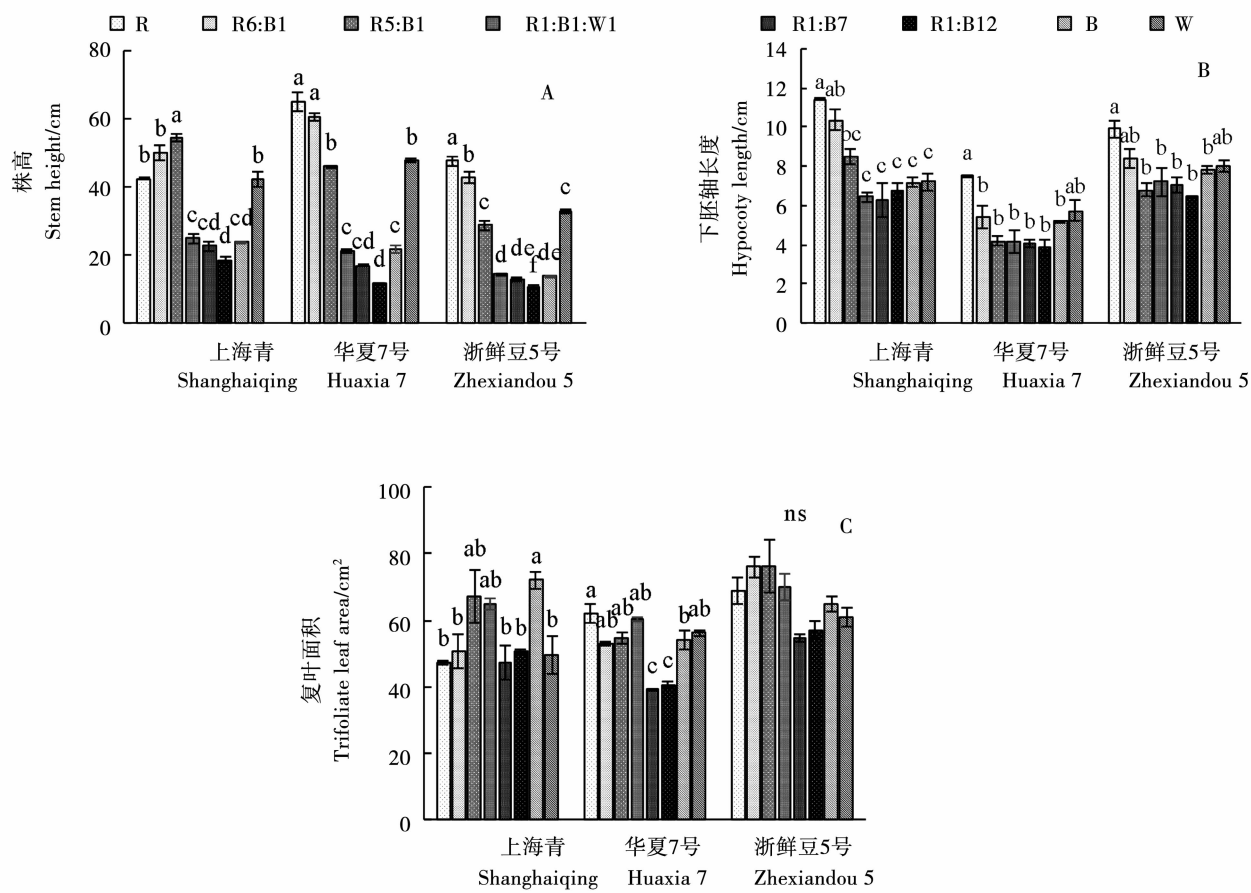
2.1.1 株高 R5:B1 处理的上海青株高显著高于 W 及其它光质处理;与 W 相比,R1:B1:W1、B、R1:B7 和 R1:B12 显著抑制了株高, R 和 R6:B1 两个处理对株高无显著影响;R 和 R6:B1 处理显著增加了华夏 7 号和浙鲜豆 5 号的株高;R1:B1:W1、B、R1:B7 和 R1:B12 则显著抑制了株高,R5:B1 处理的株高与 W 之间无显著差异(图 2A)。

2.1.2 下胚轴长度 R 和 R6:B1 处理上海青植株下胚轴显著长于 W,R5:B1 处理与 W 无显著差异,其余处理均显著缩短了下胚轴长度(图 2B)。除 R 与 W 无明显差异外,其余处理均抑制华夏 7 号下胚轴伸长。R 和 R6:B1 处理浙鲜豆 5 号与 W 无差异,其余处理则明显不利于下胚轴伸长。

表 1 光质对菜用大豆光形态建成和根冠比的影响的主效应分析

Table 1 Main effects of light quality on the photomorphogenesis and the root-shoot ratio of vegetable soybean										
光质	株高	下胚轴长度	复叶面积	地上部生物量	根系生物量	根冠比	总根长	根表面积	根体积	根尖数
Light quality	Stem height	Hypocotyl length	Trifoliolate leaf area	Shoot biomass	Root biomass	Root-shoot ratio	Total root length	Root area	Root volume	No. of root tip
光质	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
Light quality	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
品种	***	***	***	NS	NS	*	**	**	**	**
Cultivar	***	***	***	NS	NS	*	**	**	**	**
光质×品种	***	**	**	***	**	***	***	***	***	***
Light quality × Cultivar	***	**	**	***	**	***	***	***	***	***

\* 表示在  $P < 0.05$  时显著, \*\* 表示在  $P < 0.01$  时显著, \*\*\* 表示在  $P < 0.001$  时显著和 NS 表示不显著。  
\* indicates significance at  $P < 0.05$ , \*\* indicates significance at  $P < 0.01$ , \*\*\* indicates significance at  $P < 0.001$ , NS;not significance.



不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。  
Different lowercase mean significant difference among treatments at 0.05 level. The same as below.

图 2 光质对菜用大豆苗期地上部光形态建成的影响  
Fig. 2 Effects of light quality on the above photomorphogenesis of vegetable soybean seedlings

2.1.3 复叶面积 各光质处理中,只有 B 处理相对于 W 显著促进了上海青复叶面积的增加,其余处理均无明显差异(图 3C)。R1:B7 和 R1:B12 处理相对于 W 明显抑制了华夏 7 号植株叶片的生长,其它处理与 W 间的差异不显著,且以红光为主的组合光显著地促进了叶片的生长。不同光质处理对浙鲜豆 5 号植株叶片的效应无明显差异。

总的来说,红光对菜用大豆的株高起促进作用,而蓝光则抑制茎伸长;多数光质处理不利于下胚轴的伸长;纯蓝光利于复叶伸展,但是以蓝光为主的组合光质则起了抑制作用。

2.2 光质对菜用大豆根冠比的影响

2.2.1 地上部生物量 光质对浙鲜豆 5 号的影响与上海青相同:R1:B1:W1 和 R1:B7 处理在一定程度上提高了植株的地上部生物量,与 W 间的差异并不显著,但显著高于 R 处理,略高于其它处理(图 3A)。R,R1:B1:W1、R1:B7 和 B 处理比 W 显著降低了华夏 7 号地上部生物量,且略低于其它处理,其它处理与 W 无显著差异。

2.2.2 根系生物量 R1:B7 和 B 两个处理对上海

青根系生物量的提高最显著,明显高于 W,R1:B1:W1 和 R1:B12 处理上海青根系生物量也明显比 W 高,R 和 R6:B1 处理植株根系生物量低于 W,但不显著(图 3B)。对华夏 7 号,R6:B1、R5:B1、R1:B1:W1、R1:B7、R1:B12 及 B 处理根系生物量显著高于 W,而 R 处理则明显减少了根系生物量,但无显著差异。与 W 相比,R5:B1 处理显著提高浙鲜豆 5 号根系生物量,其余处理对浙鲜豆 5 号根系生物量的增加作用不明显。

2.2.3 根冠比 除 R 和 R6:B1 外,其余光质处理均比 W 显著提高上海青的根冠比,且以蓝光为主的光质处理根冠比比其它处理都高(图 3C)。对于华夏 7 号,除 R 外其余各光质处理均显著提高植株的根冠比,且以 R1:B1:W1 和 R1:B7 最显著。7 个处理中,只有 R5:B1 处理的浙鲜豆 5 号植株根冠比显著高于 W,其余处理与 W 间均无显著差异。

总之,红光很显著不利于植株生物量的积累,以及生物量向根系的输入,组合光质和蓝光则能够起到积极的作用,且光质对植株的生物量积累及分配的影响存在种间差异。

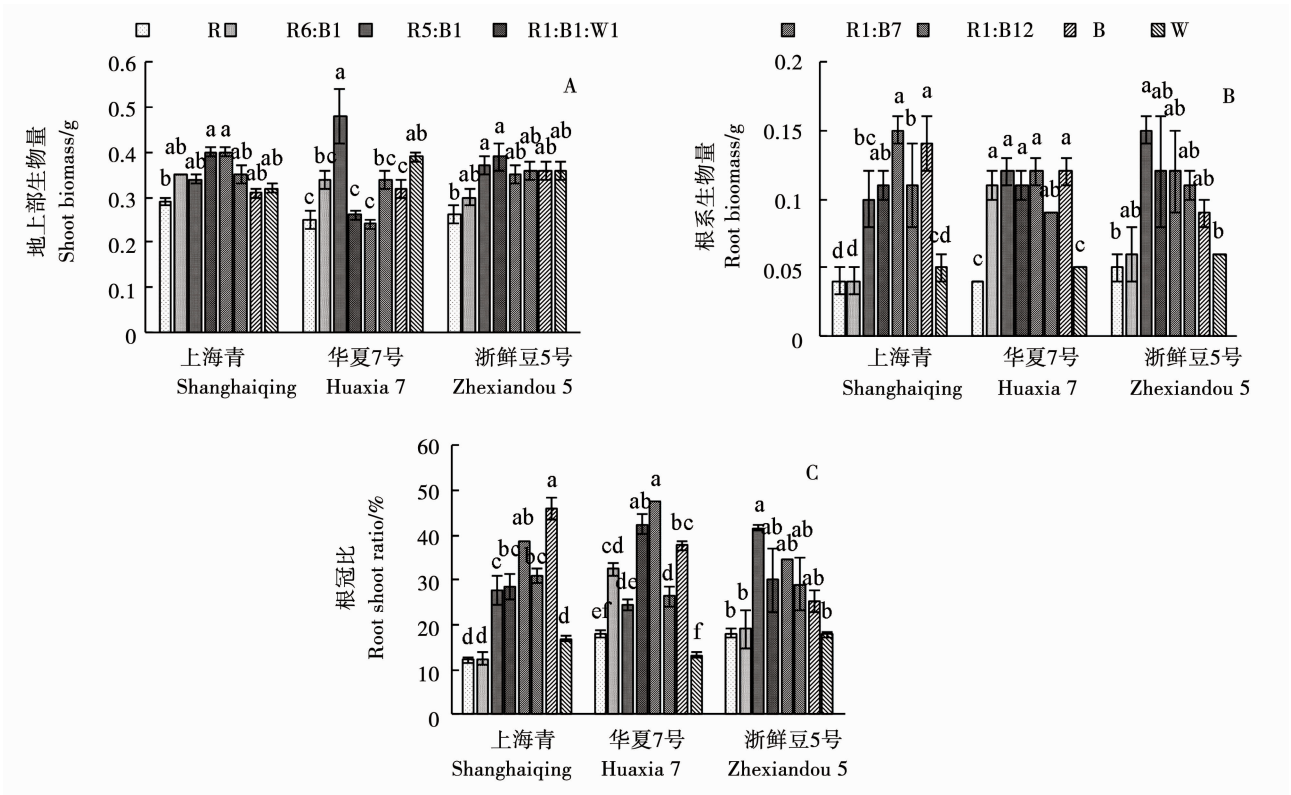


图 3 光质对菜用大豆根冠比的影响

Fig. 3 Effects of light quality on root-shoot ratio of vegetable soybean seedlings

2.3 光质对菜用大豆根系形态的影响

2.3.1 总根长 R1:B7 和 B 两个处理的上海青植株总根长明显高于 W,其余处理均与 W 无明显差异(图 4A)。R5:B1、R1:B1:W1、R1:B7 和 B 4 个处理华夏 7 号总根长明显比对照长,其余均与处理无差异。只有 R5:B1 和 R1:B1:W1 比 W 显著增加了浙鲜豆 5 号总根长,其它处理与 W 均无明显差异。蓝光和组合光质有利于菜用大豆根的伸长,而红光则起抑制作用。

2.3.2 根表面积 与 W 相比, R1:B7 和蓝光显著增加上海青的根表面积,而 R 和 R6:B1 处理根系生长明显受到抑制,其余处理对植株根表面积无显著影响(图 4B)。R5:B1、R1:B1:W1、R1:B7 和 B 处理的华夏 7 号根表面积显著高于 W,其余处理与 W 无显著差异。只有 R1:B1:W1 处理的浙鲜豆 5 号根表面积明显高于 W,其它处理与 W 之间均无显著

差异。

2.3.3 根体积 R5:B1、R1:B1:W1、R1:B7 和 B 处理上海青植株根体积明显高于 W,其余光质处理上海青根体积与 W 无明显差异(图 4C)。除了 R 和 R1:B12 与 W 间无明显差异外其它光质处理均明显有利于华夏 7 号根系体积的增加。R1:B1:W1 处理明显增加了浙鲜豆 5 号植株根系体积,其余处理则与 W 之间的差异不明显。

2.3.4 根尖数 各处理中只有 B 处理的上海青根尖数显著高于 W,其余处理与 W 均无显著差异(图 4D)。R、R6:B1 和 R1:B12 处理对华夏 7 号植株根尖数量无显著效应,其它处理均能显著增加植株的根尖数。浙鲜豆 5 号根尖数对光质的响应与 W 之间均无明显差异。总之,蓝光和组合光质对菜用大豆根的生长起促进作用,而红光起抑制作用,但这种效应存在种间差异。

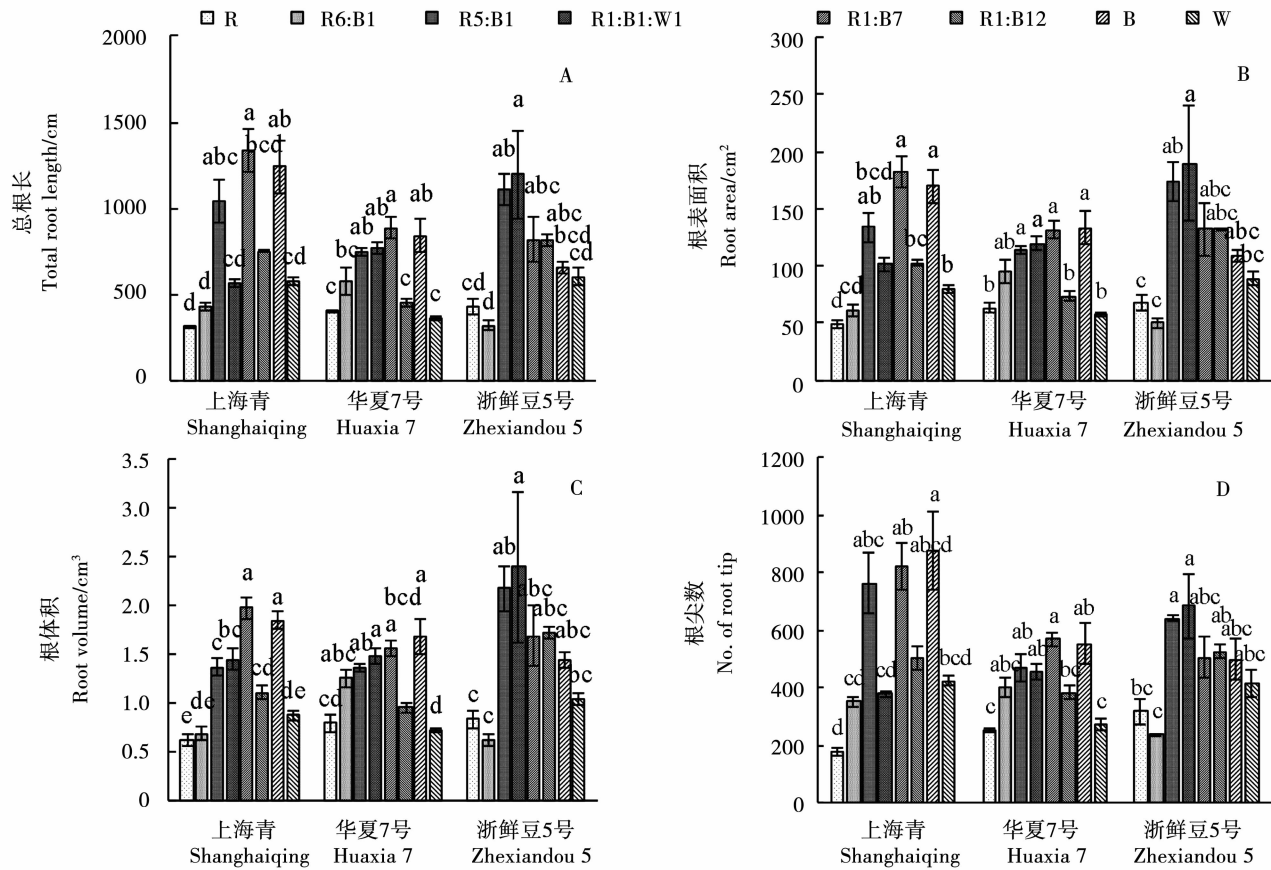


图 4 光质对菜用大豆根系形态建成的影响

Fig. 4 Effects of light quality on total root morphology of vegetable soybean seedlings

3 讨论

光是植物最重要的环境因子之一,是植物生命

活动的能量来源。植物经过长期的演化,形成了感知生长环境中的各种光信号如光通量、光质和方向等的的能力。从种子萌发,到幼苗光形态建成、向光

性、向重力性、叶绿体运动、避荫现象、光周期现象及成花诱导等,植物在各个生育阶段都会对光信号的变化作出响应<sup>[3]</sup>。研究发现,以红光为主蓝光为辅的组合光可增加小麦的节间长和茎长<sup>[7]</sup>,蓝光会显著抑制水稻幼苗茎的伸长生长<sup>[14]</sup>。本研究结果表明,以红光为主的组合光显著提高了大豆的株高和下胚轴长,并且蓝光显著抑制了茎和下胚轴的生长。张勇等<sup>[15]</sup>研究发现红蓝组合光能增加大豆幼苗的叶片面积。Wang 等<sup>[16]</sup>研究发现,随着组合光中红光比例的增加,植株叶片数量和面积逐渐增大,这与本试验中华夏 7 号和浙鲜豆 5 号结果相一致。但是蓝光也显著提高了上海青的叶片面积,这与 Zheng 等<sup>[17]</sup>在试验中发现不同菊花品种对光质的响应存在差异的结果一致,表明菜用大豆对光质的响应也存在种间差异。

相对于纯红光,红蓝组合光能提高菜用大豆地上部生物量、地下部生物量及根冠比。这与前期证明组合光对植物叶片伸长和生物量积累非常重要的研究相一致<sup>[18-20]</sup>。例如,红蓝组合光可提高水稻<sup>[21]</sup>和草莓<sup>[22]</sup>的鲜重和干重。但是,本试验中组合光对 3 个品种菜用大豆生长积累量的促进效应是存在差异的,各个品种的最佳光质有差别,这说明作物品种间的遗传特性差异也可能是决定最佳光质组合的因素之一。

在植物的光信号感应器体系中,隐花色素和向光素是蓝光和 UV-A 受体,而光敏色素负责感受红光/远红光<sup>[23-25]</sup>。光敏色素 B 在红光诱导的根系响应中发挥着主要作用。Molas 等<sup>[26]</sup>在试验中发现植物的蓝光传导途径和红光传导途径在根系中是相互作用的。Zeng 等<sup>[27]</sup>证明了拟南芥体内的隐花色素-1 通过抑制生长素的极性运输限制根系的生长。而陈玲等<sup>[28]</sup>在花生中的试验也发现红光促进根长,蓝光抑制根系生长,而红蓝光组合产生的互补效应有利于根系形态建成和活力提高。但是,林叶春等<sup>[29]</sup>的研究结果表明,蓝光照射下烤烟幼苗根系发育最好。本试验中,蓝光及红光与蓝光的组合光相对于红光也能明显促进根系的生长,这表明不同作物对光质的响应是不一样的,其中蕴含着复杂的调控机理,并且它必然与植物的种类及其生长环境的光环境特点之间存在着密切的联系<sup>[30]</sup>。

## 4 结 论

光质对菜用大豆苗期光形态建成及生物量积累和分配的效应对探索设施栽培菜用大豆最佳生

长模型从而实现高产优质栽培的目标至关重要。试验表明,红光对菜用大豆根系的生长和生物量的积累都起到抑制作用,也不利于生物量分配的均衡,而红光和蓝光的组合光质及蓝光对菜用大豆根系的生长及生物量的积累均起到促进的作用,但最佳的光质仍需进一步探究。

## 参考文献

- [1] 韩天富,盖钧镱. 世界菜用大豆生产、贸易和研究的进展[J]. 大豆科学,2002, 21(4):278-284. (Han T F, Gai J Y. Advances in production, trade, and research of vegetable soybean in the world[J]. Soybean Science, 2002, 21(4):278-284. )
- [2] Jeannie N. US soybean farmers see growth potential in edamame [EB/OL]. <https://finance.yahoo.com/news/us-soybean-farmers-see-growth-070453380.html>,2013-03-29/2017-09-09.
- [3] Jiao Y, Lau O S, Deng X W. Light-regulated transcriptional networks in higher plants[J]. Nature Reviews Genetics, 2007, 8(3): 217-230.
- [4] Goins D, Yorio N C, Sanwo M M, et al. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plant grown under red light-emitting diodes (LED) with and without supplemental blue lighting[J]. Journal of Experimental Botany, 1997, 48(7): 1407-1413.
- [5] Sun Q, Yoda K, Suzuki H. Internal axial light conduction in the stems and roots of herbaceous plants[J]. Journal of Experimental Botany, 2005, 56(409):191-203.
- [6] Lee H J, Ha J H, Kim S G, et al. Stem-piped light activates phytochrome B to trigger light responses in *Arabidopsis thaliana* roots[J]. Science Signaling, 2016, 9(452): 106.
- [7] Sun Q, Yoda K, Suzuki M, et al. Vascular tissue in the stem and roots of woody plants can conduct light[J]. Journal of Experimental Botany, 2003, 54(387): 1627-1635.
- [8] Poorter H, Nikla K J, Reich P B, et al. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control[J]. New Phytologist, 2012, 193(1): 30-50.
- [9] Wu M C, Hou C Y, Jiang C M, et al. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings[J]. Food Chemistry, 2007, 101(4): 1753-1758.
- [10] Brown C S, Schuerger A C, Sager J C. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1995, 120(5): 808-813.
- [11] Massa G, Graham T, Haire T, et al. Light-emitting diode light transmission through leaf tissue of seven different crops[J]. Horticulture, 2015, 50(3):501-506.
- [12] 刘关君,王大海,郭晓瑞,等. 植物叶面积的快速精确测定方法[J]. 东北林业大学学报, 2004, 32: 82-83. (Liu G J, Wang D H, Guo X R, et al. A rapid and accurate method for determi-



ning leaf area[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2004, 32: 82-83. )

[13] 郭茹, 温仲明, 王红霞, 等. 沿河流域植物叶性状间的关系及其在不同植被带的表达[J]. 应用生态学报, 2015, 26(12): 3627-3633. (Guo R, Wen Z M, Wang H X, et al. Relationships among leaf traits and their expression in different vegetation zones in Yanhe River basin, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12): 3627-3633. )

[14] 郭银生, 谷艾素, 崔瑾. 光质对水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(6): 1485-1492. (Guo Y S, Gu A S, Cui J. Effects of light quality on rice seedlings growth and physiological characteristics[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22: 1485-1492. )

[15] 张勇, 叶芝兰, 杨峰, 等. 不同光质配比对大豆幼苗形态及光合生理参数的影响[J]. 中国油料作物学报, 2014, 36(3): 343-348. (Zhang Y, Ye Z L, Yang F, et al. Effects of different light qualities on morphological and photosynthetic physiological parameters of soybean seedlings[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(3): 343-348. )

[16] Wang J, Lu W, Tong Y, et al. Leaf morphology, photosynthetic performance, chlorophyll fluorescence, stomatal development of lettuce (*Lactuca sativa* L.) exposed to different ratios of red light to blue light[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7(250): 1-10.

[17] Zheng L, van Laneke M C. Chrysanthemum morphology, photosynthetic efficiency and antioxidant capacity are differentially modified by light quality[J]. Journal of Plant Physiology, 2017, 213: 66-74.

[18] Hongewoning S W, Touwborst G, Maljaars H, et al. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(11): 3107-3117.

[19] Chang S, Li C, Yao X, et al. Morphological, photosynthetic, and physiological responses of rapeseed leaf to different combinations of red and blue lights at the rosette stage[J]. Frontiers in Plant Science, 2016, 7(1144): 1-12.

[20] He J, Qin L, Chong E L, et al. Plant growth and photosynthetic characteristics of *Mesembryanthemum crystallinum* grown aeroponically under different blue-and red-LEDs[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8(361): 1-13.

[21] Matsuda R, Ohashi-Kaneko K, Fujiwara K, et al. Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light[J]. Plant & Cell Physiology, 2004, 45(12): 1870-1874.

[22] Nhut D T, Takamura T, Watanabe H, et al. Responses of strawberry plantlets cultured *in vitro* under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs) [J]. Plant Cell Tissue & Organ Culture, 2003, 73(1): 43-52.

[23] Lin C T, Dror S. Cryptochrome structure and signal transduction [J]. Annual Review of Plant Biology, 2003, 54(1): 469-496.

[24] Sharrock R A, Quail P H. Novel phytochrome sequences in *Arabidopsis thaliana*: Structure, evolution, and differential expression of a plant regulatory photoreceptor family [J]. Genes & Development, 1989, 3(11): 1745-1757.

[25] Briggs W R, Beck C F, Cashmore A R, et al. The phototropin family of photoreceptors[J]. Plant Cell, 2001, 13(5): 993-997.

[26] Molas M L, Kiss J Z, Correll M J. Gene profiling of the red light signalling pathways in roots[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 57(12): 3217-3229.

[27] Zeng J, Wang Q, Lin J, et al. *Arabidopsis* cryptochrome-1 restrains lateral roots growth by inhibiting auxin transport[J]. Journal of Plant Physiology, 2010, 167(8): 670-673.

[28] 陈玲, 张晓军, 王月福, 等. 红蓝组合光源对花生幼苗根系生长的影响[J]. 花生学报, 2016, 45(1): 15-19. (Chen L, Zhang X J, Wang Y F, et al. Different combination of red and blue light on the growth and vitality of peanut seedling root system[J]. Journal of Peanut Science, 2016, 45(1): 15-19. )

[29] 林叶春, 陈伟, 薛原, 等. 光质对立体浮盘培育烟苗叶片光合特性及根系生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(1): 87-92. (Lin Y C, Chen W, Xue Y, et al. Effects of light qualities on the photosynthetic responses of tobacco seedling and root growth in a float system[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19: 87-92. )

[30] Darwin C. The origin of species: by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life[J]. Nature, 1968, 5(2): 971-972.