

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

闻 婧^{1,2,*}, 杨其长², 魏灵玲², 程瑞锋², 刘文科², 鲍顺淑², 周晚来²

(¹江苏省农业科学院蔬菜研究所, 南京 210014; ²中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部农业环境与气候变化开放实验室, 北京 100081)

摘 要: 为了探求适合叶用莴苣生长的节能高效的光源参数, 采用红、蓝光波峰组合分别为红光 (R) 660 nm + 蓝光 (B) 450 nm 的 LEDA 型和红光 (R) 630 nm + 蓝光 (B) 460 nm 的 LEDB 型光源, 每种光源设置 R/B 分别为 6、8 和 10 的 3 种比例, 处理叶用莴苣。结果表明: LEDA 型与 LEDB 型光源处理的叶用莴苣光合速率、蒸腾速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、维生素 C、总糖和硝酸盐含量均无显著差异, 但均较荧光灯光源 (对照) 显著提高了光合速率。两种光源不同 R/B 处理的上述指标变化趋势一致, 均表现为 R/B = 8 时 (LEDA2、LEDB2) 最优, 其中 LEDA2 处理比荧光灯处理光合速率提高 38%, 维生素 C 含量增加 8.3%, 硝酸盐含量降低 9.2%; LEDB2 处理时光合速率提高 48%, 硝酸盐含量降低 6.5%。LEDA 型光源处理的叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量显著高于 LEDB 型光源处理, 且分别表现为 LEDA3 和 LEDB2 处理的含量最高。此外, 对光源装置耗电量的计算表明, LEDB 型光源的单株耗电量比 LEDA 型和荧光灯 (对照) 分别节省 53.3% 和 27.7%。因此, 红、蓝光波峰分别为 630 nm + 460 nm 的组合 LED 光源, R/B = 8 的条件下, 在提高叶用莴苣光合速率和品质以及降低耗电量 3 个方面体现优势。

关键词: 叶用莴苣; 光合特性; 发光二极管; LED; 波峰; R/B

中图分类号: S 636.2

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2011) 04-0761-09

Influence of Combined Lighting with Different Red and Blue LED on Photosynthetic Characteristics and Quality of Lettuce and Evaluation of Energy Consumption

WEN Jing^{1,2,*}, YANG Qi-chang², WEI Ling-ling², CHENG Rui-feng², LIU Wen-ke², BAO Shun-shu², and ZHOU Wan-lai²

(¹Institute of Vegetable Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; ²Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, CAAS/Key Open Laboratory for Agro-environment and Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: To research the energy-saving and high-efficiency lighting parameters suitable for lettuce growth, LEDA and LEDB lighting were used. LEDA lighting was composed of red with peak at 660 nm (R) and blue with peak at 450 nm (B), LEDB lighting was composed of red with peak at 630 nm (R) and blue with peak at 460 nm (B). Treatments with R/B ratio of 6, 8, 10 were performed with LEDA and

收稿日期: 2011-01-11; 修回日期: 2011-03-22

基金项目: 科技部国际合作重点项目 (2010DFB30550); 农业部 '948' 项目 (2011-Z7)

* E-mail: wenjing123006@sina.com

LEDB respectively. Results showed that photosynthetic rate of lettuce was significantly higher under LED lighting than under fluorescent lamp. There were no significant differences in photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, vitamin C, total sugar and nitrate content of lettuce between LEDA and LEDB. All those indices showed the same change trend with R/B, and they were the best at the R/B ratio of 8 (LEDA2, LEDB2). Compared with fluorescent treatment, photosynthetic rate and vitamin C content increased 38% and 8.3% respectively, while nitrate content decreased 9.2% in LEDA2 treatment, and photosynthetic rate increased 48% and nitrate content decreased 6.5% in LEDB2 treatment. The content of chlorophyll a, b and (a + b) were significant higher under LEDA lighting than under LEDB lighting, and were the highest under LEDA3 and LEDB2 treatments, respectively. In addition, results of power consumption of lighting device showed, compared with LEDA lighting and fluorescent, the power consumption per plant of LEDB lighting decreased 53.3% and 27.2%, respectively. Thus, LED lighting composed of red with peak at 630 nm and blue with peak at 460 nm, while R/B = 8, not only could improve photosynthesis rate and quality, but also is more energy-saving than other treatments. The aim of efficient and energy-saving was achieved from above three aspects.

Key words: lettuce; photosynthetic characteristics; light emitting diode; LED; peak wavelength; R/B

发光二极管 (Light emitting diode, 简称 LED) 作为农业领域内的一种新型人工光源正备受关注。LED 具有节能环保、使用寿命长、体积小、安全稳定、易于组合安装等许多其他光源不具备的特点, 在植物设施栽培中作为补光源呈现良好的发展前景(王声学 等, 2006; 魏灵玲 等, 2007; 崔瑾 等, 2008)。

已有研究证明, 红光有助于植物干物质的积累, 促进光合速率, 提高总糖含量; 蓝光具有抑制茎伸长, 增加叶面积, 提前花期等作用 (Tenessen et al., 1994; 魏胜林 等, 1998; 廖祥儒 等, 2001; 蒲高斌 等, 2005; Janet, 2005; Enrique & Paul, 2008)。有关单色光对叶用莴苣生理影响的研究也表明红光有促进其光合速率, 提高叶绿素含量的作用 (许莉 等, 2007, 2010; 李雯琳 等, 2010)。红蓝光组合比单色光更有利于植株的生长发育, 不同的植物对红蓝光组合的需要不同, 对于叶用莴苣的适当红蓝光组合还没有定论 (Yanagi et al., 1996a, 1996b; Okamoto et al., 1996, 1997; Nhut et al., 2003; 张明毅 等, 2007)。此外, 在现有研究中, 红蓝光波峰的使用存在差异, 其中红光主要集中在 660 nm, 蓝光则从 440 到 480 nm 各有不同 (Puspa et al., 2008; 崔瑾 等, 2009; 倪纪恒 等, 2009; 段奇珍 等, 2010), 但鲜见有关不同波峰对植物生长发育影响的报道。不同波峰 LED 的电能转化率存在较大差异, 这直接影响 LED 的发光效能和耗电量 (陈元灯, 2007), 对于 LED 在农业上的使用和推广也具有重要影响, 但对其不同光源的使用能耗情况未见报道。

植物对光的吸收存在 660 nm 和 450 nm 两个吸收波峰 (Okamoto et al., 1996; Fang et al., 2002; 方炜和饶瑞佶, 2004; Tamulaitis et al., 2005; 潘瑞焱 等, 2006; 刘水丽, 2007)。但是目前波峰为 660 nm (红色) 和 450 nm (蓝色) 的 LED 产品稀缺, 价格昂贵; 市场上使用广、价格低、电能转化率高的红色和蓝色 LED 的波峰分别为 630 nm 和 460 nm。因此, 本试验中同时选用了 660 nm + 450 nm 的 LEDA 型和 630 nm + 460 nm 的 LEDB 型光源 (饶瑞佶和方炜, 2000), 利用两组光源进行叶用莴苣的栽培试验, 旨在探明两种波峰下不同 R/B 的 LED 光源对叶用莴苣生长发育的影响, 并结合不同 LED 光源的能耗情况, 期望找到适合叶用莴苣生长的节能高效的 LED 光源参数, 为 LED 光源在叶用莴苣栽培中的应用提供理论基础。

1 材料与amp;方法

1.1 光源设计参数

LEDA 型和 LEDB 型植物生长光源板由中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所与中国科学院半导体研究所合作开发研制。LEDA 型光源板由波峰为 660 nm 的红光 LED 与 450 nm 的蓝光 LED 组成, LEDB 型光源板由波峰为 630 nm 的红光 LED 与 460 nm 的蓝光 LED 组成。两种光源均可以根据试验需要调节红蓝光比例、光合有效光量子流密度、光周期及灯板距作物的高度。LED 光源的发光面积由栽培槽面积决定, 每个 120 cm × 60 cm 的栽培槽使用两块光源板即可。根据前期荧光灯的光强试验, 最大光合有效光量子流密度达到 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 即可满足常见叶菜类生产和果菜类育苗需要。

根据植物对 610 ~ 720 nm 的红、橙光辐射的吸收约占生理辐射光能的 55%, 对 400 ~ 510 nm 的蓝、紫光辐射的吸收约占生理辐射光能的 8% 左右 (刘水丽, 2007), 并结合红蓝光分布的均匀性, 设计了两种光源红蓝光的最大光合有效光量子流密度, 具体两种光源的参数如表 1 所示。LEDB 型光源红、蓝光的电能转化效率比 LEDA 型光源分别提高了 317.9% 和 38.5%, 而且 LEDB 型光源中 LED 灯珠个数比 LEDA 型光源减少了 1.8 Number · cm⁻²。

表 1 LED 光源的性能参数
Table 1 Performance parameter of LED light source

型号 Model	光源 Light source	波峰/nm Peak of wave	灯珠数/ (Number · cm ⁻²) LED quantity	最大光合有效光量子流密度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Maximun photosynthetic photon flux density (PPFD)	电能转化效率/% Conversion rate of electric energy	发光面/cm ² Lighting area	质量/kg Weight
LEDA	红光 Red light	660	1.82	288	6.7	1 512	15
	蓝光 Blue light	450	0.20	29	13		
LEDB	红光 Red light	630	0.14	256	28	1 512	10
	蓝光 Blue light	460	0.11	42	18		

1.2 材料与环境条件

试验地点在北京 (中国农业科学院作物科学研究所重大科学工程温室, 39°57'63.67"N, 116°19'26.51"E)。

以叶用莴苣 ‘RIJK ZWAAN Foandrica RZ’ 为材料, 2007 年 12 月 2 日播种于装满蛭石的育苗盘中, 浇灌营养液 [pH (6.5 ± 0.1), EC (1.3 ± 0.1) mS · cm⁻¹], 置于温室内育苗, 待幼苗两叶一心时定植于温室植物工厂内。该植物工厂为密闭式植物生长系统, 通过计算机对植物生育过程中温度、湿度、CO₂ 浓度以及营养液循环等进行自动调节和监控。试验采用 DFT (Deep Flow Technique, 深液流水培技术) 水耕栽培方式 (潘杰, 2003; 杨其长和张成波, 2005) 培育叶用莴苣。试验过程中各项环境指标为: 昼温 (25 ± 1) °C, 夜温 (15 ± 1) °C, 湿度 60% ~ 80%, CO₂ 浓度 (1 500 ± 30) $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 营养液 pH (6.5 ± 0.1)、EC (1.3 ± 0.1) mS · cm⁻¹, 每小时累计供液 10 min。

1.3 处理

将 LED 光源置于叶用莴苣顶部 20 cm 处。对照使用松下 36 W 三基色荧光灯 (YZ36RR6500K,

北京松下照明光源有限公司) 作为光源, 根据灯管的开启个数调节光强, 置于叶用莴苣顶部 30 cm 处。

试验设置 6 个光质处理区 (表 2) 和 1 个荧光灯对照区 (总光强为 $154 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 其中 610~720 nm 波段的光合有效光量子流密度占 27%, 为 $42 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 400~510 nm 波段的光合有效光量子流密度占 18%, 为 $28 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。6 个处理与 1 个对照均设光周期为 12 h·d⁻¹ (7: 00—19: 00)。每个处理设 3 个小区, 对照无重复, 每小区长 × 宽为 120 cm × 60 cm, 设 LED 光源板两块, 种植叶用莴苣 12 株。

表 2 光质处理有效光量子流密度设置
Table 2 Treatment settings of photosynthetic photon flux density / ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)

处理 Treatment	红光 LED Red LED (R)	蓝光 LED Blue LED (B)	总合 Total	R/B
LEDA1	132	22	154	6/1
LEDA2	136	17	153	8/1
LEDA3	140	14	154	10/1
LEDB1	131	23	154	6/1
LEDB2	136	17	153	8/1
LEDB3	139	14	153	10/1
对照 Control	-	-	-	-

1.4 数据观测与处理方法

叶用莴苣经不同处理 30 d 后, 随机选取同一处理中 3 株, 每株中间层完全展开的叶片 3 片, 使用美国生产的 LI-6400 便携式光合测定仪测定其净光合速率、气孔导度和蒸腾速率等生理指标。每个处理取 1 kg 鲜样送农业部蔬菜品质监督检验测试中心, 检测维生素 C、总糖和硝酸盐含量。每个处理取鲜样 1 g, 采用比色法测定叶绿素含量 (李合生 等, 2000)。采用普通民用电表计量各处理下培育单株叶用莴苣的光源耗电量。

试验数据采用 3 个重复的平均值 ± 标准差, 用 DPS v3.01 数据处理软件进行统计分析, 用 *t* 检验进行各处理间的显著性差异分析。

2 结果与分析

2.1 LED 两种波峰和 R/B 对叶用莴苣光合指标的影响

如表 3 所示, LED 光源处理下叶用莴苣叶片光合速率均显著高于荧光灯对照, 其中 LEDB2 处理的光合速率显著高于其他处理; LEDA2 处理的蒸腾速率最大, 但与 LEDB2 无显著差异, 两处理均显著高于其他处理; LEDB2 处理的气孔导度显著高于其他处理; LEDA2 处理的胞间 CO₂ 浓度显著高于其他处理。整体而言, LED 光源比荧光灯对照提高叶用莴苣的光合速率, 且 LEDA2 与 LEDB2 两处理的各项光合指标高于其他处理。

在整体水平上 LEDA 型光源处理的叶用莴苣光合指标与 LEDB 型光源处理无显著差异。LEDB 型光源各处理的光合指标变化幅度大于 LEDA 型光源各处理, 但是变化趋势相同, 均表现为 R/B 为 8 的处理 (LEDA2、LEDB2) 显著优于 R/B 为 6 和 10 的处理。

表 3 不同处理叶用莴苣叶片光合指标比较

Table 3 The compare of photosynthetic indexes during different treatments

处理 Treatment	光合速率/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Photosynthetic rate	蒸腾速率/ $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Transpiration rate	气孔导度/ $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ Stomatal conductance	胞间 CO_2 浓度/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$ Intercellular CO_2 concentration
LEDA1	7.63 ± 0.031 bc	2.11 ± 0.114 cd	0.078 ± 0.0040 d	247.8 ± 7.58 d
LEDA2	7.88 ± 0.073 b	3.86 ± 0.613 a	0.165 ± 0.0322 b	332.8 ± 16.98 a
LEDA3	7.30 ± 0.177 c	2.42 ± 0.046 bc	0.098 ± 0.0024 d	294.8 ± 4.66 b
LEDB1	7.57 ± 0.096 bc	1.88 ± 0.036 d	0.053 ± 0.0027 e	275.9 ± 9.87 c
LEDB2	8.44 ± 0.514 a	3.62 ± 0.168 a	0.188 ± 0.0126 a	270.2 ± 16.40 c
LEDB3	6.45 ± 0.281 d	2.58 ± 0.153 b	0.137 ± 0.0200 c	295.2 ± 20.18 b
对照 Control	5.70 ± 0.138 e	2.52 ± 0.025 b	0.086 ± 0.0034 d	306.8 ± 1.40 b
LEDA	7.60 ± 0.291 a	2.80 ± 0.932 a	0.114 ± 0.0456 a	291.8 ± 42.58 a
LEDB	7.49 ± 0.998 a	2.69 ± 0.876 a	0.126 ± 0.0682 a	280.4 ± 13.10 a

注: 同列的不同小写字母代表 $P < 0.05$ 水平显著性检验。LEDA 和 LEDB 分别代表两种波长处理的整体水平。

Note: Different letters in the same column indicate statistically significant difference at $P < 0.05$. LEDA and LEDB indicate overall level of two wave crest treatments.

2.2 LED 两种波峰和 R/B 对叶用莴苣叶绿素含量的影响

如表 4 所示, LED 各处理叶绿素 a、b 和 (a + b) 的含量与荧光灯对照均没有显著差异, 其中 LEDA3 处理的叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量最高, 与 LEDA1 和 LEDB3 处理的存在显著差异。

在整体水平上 LEDA 型光源处理的叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量显著高于 LEDB 型光源处理, 两种光源处理的叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量的变化趋势不同。对于 LEDA 型光源, LEDA3 处理叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量最高, 与 LEDA1 存在显著差异; 对于 LEDB 型光源, LEDB2 处理的叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量最高, 与 LEDB3 存在显著差异。

表 4 不同处理叶用莴苣叶片叶绿素含量

Table 4 The content of chlorophyll during different treatments

处理 Treatment	叶绿素 a/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ Chlorophyll a	叶绿素 b/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ Chlorophyll b	叶绿素 (a + b) / $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ Chlorophyll (a + b)	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
LEDA1	0.81 ± 0.09 bc	0.31 ± 0.02 bc	1.12 ± 0.11 bc	2.56 ± 0.11 ab
LEDA2	0.91 ± 0.01 ab	0.37 ± 0.02 ab	1.29 ± 0.03 ab	2.45 ± 0.07 ab
LEDA3	1.07 ± 0.20 a	0.42 ± 0.09 a	1.49 ± 0.29 a	2.59 ± 0.13 ab
LEDB1	0.88 ± 0.01 abc	0.32 ± 0.01 bc	1.20 ± 0.01 abc	2.70 ± 0.13 a
LEDB2	0.92 ± 0.11 ab	0.37 ± 0.04 ab	1.29 ± 0.14 ab	2.48 ± 0.25 ab
LEDB3	0.64 ± 0.26 c	0.28 ± 0.06 c	0.93 ± 0.32 c	2.19 ± 0.54 b
对照 Control	1.05 ± 0.06 a	0.40 ± 0.02 a	1.45 ± 0.08 a	2.61 ± 0.04 ab
LEDA	0.93 ± 0.05 a	0.37 ± 0.03 a	1.30 ± 0.07 a	2.54 ± 0.07 a
LEDB	0.81 ± 0.12 b	0.33 ± 0.03 b	1.14 ± 0.15 b	2.47 ± 0.17 a

注: 同列的不同小写字母代表 $P < 0.05$ 水平显著性检验。LEDA 和 LEDB 分别代表两种波长处理的整体水平。

Note: Different letters in the same column indicate statistically significant difference at $P < 0.05$. LEDA and LEDB indicate overall level of two wave crest treatments.

2.3 LED 两种波峰和 R/B 对叶用莴苣维生素 C、总糖和硝酸盐含量的影响

如表 5 所示, 在整体上, LEDA 型和 LEDB 型光源各处理的维生素 C、硝酸盐和总糖含量无显著差异, 但变化趋势一致, 均表现为当 R/B = 8 (LEDA2、LEDB2) 时, 维生素 C 和总糖含量高于同一波峰的其他处理, 硝酸盐含量低于同一波峰的其他处理。

表 5 不同处理叶用莴苣维生素 C、总糖和硝酸盐含量
Table 5 The contents of vitamin C, total sugar and nitrate during different treatments

处理 treatment	维生素 C/(mg · kg ⁻¹) Vitamin	总糖/% Total sugar	硝酸盐/(g · kg ⁻¹) Nitrate
LEDA1	75.2 ± 2.2 b	0.49 ± 0.074 c	3.61 ± 0.072 ab
LEDA2	81.5 ± 2.8 a	0.64 ± 0.028 b	2.96 ± 0.272 c
LEDA3	78.5 ± 2.7 ab	0.62 ± 0.027 b	3.31 ± 0.496 abc
LEDB1	67.2 ± 1.5 c	0.50 ± 0.085 c	3.83 ± 0.190 a
LEDB2	80.1 ± 3.2 a	0.71 ± 0.065 ab	3.34 ± 0.287 abc
LEDB3	69.2 ± 2.5 c	0.68 ± 0.052 ab	3.75 ± 0.343 ab
对照 Control	75.2 ± 3.4 b	0.76 ± 0.036 a	3.26 ± 0.217 bc
LEDA	78.4 ± 3.1 a	0.58 ± 0.081 a	3.29 ± 0.325 a
LEDB	72.2 ± 6.9 a	0.63 ± 0.114 a	3.64 ± 0.263 a

注: 同列的不同小写字母代表 $P < 0.05$ 水平显著性检验。LEDA 和 LEDB 分别代表两种波长处理的整体水平。

Note: Different letters in the same column indicate statistically significant difference at $P < 0.05$. LEDA and LEDB indicate overall level of two wave crest treatments.

2.4 不同处理用光源板耗电量情况

从图 1 可知, 不同波峰与不同 R/B 配比的 LED 光源处理叶用莴苣单株耗电量均有不同, LEDA 型光源的耗电量均高于 LEDB 型光源和荧光灯对照, 而 LEDB2 和 LEDB3 处理的耗电量最低, 比荧光灯对照节省耗电量 27.7%, 比 LEDA 型光源节省耗电量 53.3%。

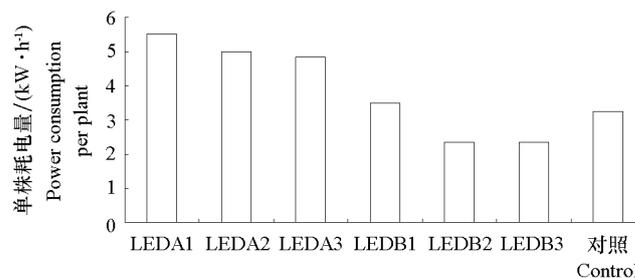


图 1 不同处理 LED 光源耗电比较

Fig. 1 The compare of power consumption of LED lighting source during different treatments

3 讨论

光合速率是影响植物产量的重要因素 (Sui et al., 2010)。试验中, LED 光源处理的光合速率均显著高于荧光灯处理, 这是由于植物在红蓝两个波段存在吸收波峰, LED 为植株提供了其吸收率最大的光, 所以红蓝 LED 光源有效促进了叶用莴苣的光合速率, 与 Goins 等 (1997) 研究结果相符, 认为红、蓝 LED 组合可以提高将光合速率。不同波峰的 LEDA 型与 LEDB 型光源处理叶用莴苣, 在整体上无显著差异, 但是 LEDA 型光源下的 3 个处理光合指标变化幅度小, 而 LEDB 型光源处理

的变化幅度大, 原因可能是植株对不同波峰的敏感性不同, 表现出了不同的适应性, 但有待于进一步研究验证。在不同 R/B 处理中, 光合指标有显著变化, 说明不同 R/B 对叶用莴苣光合特性具有调节作用, 其中 R/B = 8 时光合指标显著优于其他处理, 这与张明毅等 (2007) 的研究结果相符。

虽然 LED 光源有效促进了光合速率, 但是作为植物进行光合作用的主要色素, LED 处理中叶绿素 a、b 和 (a + b) 的含量却低于荧光灯处理, 这也说明了叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量的高低不能直接反应光合速率的高低, 这与蒲高斌等 (2005) 的研究结果相似, 其研究认为是由于蓝光促进了叶片的气孔开放, 增加了胞间 CO₂ 浓度, 但本试验中红蓝 LED 处理的胞间 CO₂ 浓度并没有显著增加, 具体原因有待于进一步研究。660 nm + 450 nm 的 LEDA 型光源和 630 nm + 460 nm 的 LEDB 型光源, 分别是 R/B = 10 时和 R/B = 8 时叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量最高, 且 LEDA 型光源下叶绿素 a、b 和 (a + b) 含量呈现随着 R/B 的增加而增加的趋势, LEDB 型光源则呈现先增加后降低的趋势。说明不同波峰下需要不同的 R/B 才能更有利于叶绿素含量的增加。试验中, LEDA 型光源整体的叶绿素含量显著高于 LEDB 型光源, 说明 660 nm + 450 nm 的 LEDA 型光源比 630 nm + 460 nm 的 LEDB 型光源更有利于叶绿素含量的增加, 更符合叶绿素的光吸收波峰。

两种光源处理下, 叶用莴苣维生素 C、硝酸盐和总糖含量的变化趋势一致, 说明两种波峰 LED 光源对叶用莴苣品质的调节作用一致。LEDA 型光源处理下的叶用莴苣维生素 C 高于 LEDB 型光源处理, 硝酸盐含量低于 LEDB 型光源处理, 说明 LEDA 型光源比 LEDB 型光源更有利于叶用莴苣品质的提高。而不同 R/B 的处理间的维生素 C、总糖以及硝酸盐含量具有明显变化, 说明不同 R/B 对叶用莴苣的营养品质具有调节作用, 其中 R/B = 8 时, 营养品质表现良好, 且显著高于荧光灯对照, 这与王绍辉等 (2006) 研究认为红光与蓝光有利于提高黄瓜果实维生素 C 含量的结果相吻合。

此外, 在总有效光子流密度基本一致的情况下, R/B = 8 时, LEDA 型光源比荧光灯处理提高光合速率 38%, 提高维生素 C 含量 8.3%, 降低硝酸盐含量 9.2%; LEDB 型光源提高光合速率 48%, 降低硝酸盐含量 6.5%, 维生素 C 含量与荧光灯相近, 两种光源均能有效促进植株生长发育和提高品质。同时通过对光源装置耗电量的计算, LEDB 型光源的单株耗电量可比荧光灯节省 27.7%, 降低了运行成本。因此, LED 光源在 630 nm + 460 nm 的波长组合和 R/B = 8 的条件下, 在提高光合速率和品质以及降低耗电量 3 个方面体现了高效节能的优势。

References

- Chen Yuan-deng. 2007. LED manufacturing technology and application. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. (in Chinese)
- 陈元灯. 2007. LED 制造技术与应用. 北京: 电子工业出版社.
- Cui Jin, Xu Zhi-gang, Di Xiu-ru. 2008. Applications and prospects of light emitting diode in plant protected culture. Transactions of the CSAE, 24 (8): 249 - 253. (in Chinese)
- 崔 瑾, 徐志刚, 邸秀茹. 2008. LED 在植物设施栽培中的应用和前景. 农业工程学报, 24 (8): 249 - 253.
- Cui Jin, Ma Zhi-hu, Xu Zhi-gang, Zhang Huan, Chang Tao-tao, Liu Hai-jun. 2009. Effects of supplemental lighting with different light qualities on growth and physiological characteristics of cucumber, pepper and tomato seedlings. Acta Horticulturae Sinica, 36 (5): 663 - 670. (in Chinese)
- 崔 瑾, 马志虎, 徐志刚, 张 欢, 常涛涛, 刘海俊. 2009. 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. 园艺学报, 36 (5): 663 - 670.
- Duan Qi-zhen, Qu Mei, Gao Li-hong. 2010. Effect of different light emitting diode sources on the quality of cucumber seedlings. Northern Horticulture, 15: 125 - 128. (in Chinese)
- 段奇珍, 曲 梅, 高丽红. 2010. 不同 LED 光源对黄瓜幼苗质量的影响. 北方园艺, 15: 125 - 128.
- Enrique Lopez-juez, Paul F Devlin. 2008. Light and the control of plant growth. Plant Cell Monographs, 10: 224 - 264.
- Fang W, Jao R C, Lee D H. 2002. Artificial lighting apparatus for young plants using light emitting diodes as light source. USA, US6474838 B2.

- Fang Wei, Rao Rui-ji. 2004. Application of high-brightness LEDs in biology industry. *Journal of The Agricultural Association of China*, 5 (5): 432 - 434. (in Chinese)
- 方 炜, 饶瑞洁. 2004. 高亮度二极体在生物产业之应用. *中华农学会报*, 5 (5): 432 - 434.
- Goins G D, Yorio N C, Sanwo M M, Brown C S. 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis and seed yield of wheat plants grown under light emitting diodes (LEDs) with or without supplemental blue lighting. *J Exp Bot*, 48: 1407 - 1413.
- Janet E A Seabrook. 2005. Light effects on the growth and morphogenesis of potato (*Solanum tuberosum*) *in vitro*: A review. *Amer J of Potato Res*, 82 (5): 353 - 367.
- Li Wen-lin, Yu Ji-hua, Zhang Guo-bin, Yang Qi-chang. 2010. Effects of light quality on parameters of gas exchange and chlorophyll fluorescence in lettuce leaves by using LED. *Journal of Gansu Agricultural University*, 45 (1): 47 - 51. (in Chinese)
- 李雯琳, 郁继华, 张国斌, 杨其长. 2010. LED 光源不同光质对叶用莴苣幼苗叶片气体参数和叶绿素荧光参数的影响. *甘肃农业大学学报*, 45 (1): 47 - 51.
- Li He-sheng, Sun Qun, Zhao Shi-jie, Zhang Wen-hua. 2000. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 李合生, 孙 群, 赵世杰, 章文华. 2000. 植物生理生化试验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.
- Liao Xiang-ru, Zhang Lei, Xu Jing. 2001. Role of light in plant development. *Journal of Hebei University: Natural Science Edition*, 21 (3): 341 - 346. (in Chinese)
- 廖祥儒, 张 蕾, 徐 景. 2001. 光在植物生长发育中的作用. *河北大学学报: 自然科学版*, 21 (3): 341 - 346.
- Liu Shui-li. 2007. Study on artificial lighting used in the closed plant factory[M. D. Dissertation]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences. (in Chinese)
- 刘水丽. 2007. 人工光源在闭锁式植物工厂中的应用研究[硕士论文]. 北京: 中国农业科学院.
- Nhut D T, Takamura T, Watanabe H, Okamoto K, TanaKa M. 2003. Responses of strawberry plantlets cultured *in vitro* under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 73: 43 - 52.
- Ni Ji-heng, Chen Xue-hao, Chen Chun-hong, Xu Qiang. 2009. Effects of supplemental different light qualities on growth, photosynthesis, biomass partition and early yield of greenhouse cucumber. *Scientia Agricultura Sinica*, 42 (7): 2615 - 2623. (in Chinese)
- 倪纪恒, 陈学好, 陈春宏, 徐 强. 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.
- Okamoto K, Yanagi T, Kondo S. 1997. Growth and morphogenesis of lettuce seedlings raised under different combinations of red and blue light. *Acta Hort*, 435: 149 - 157.
- Okamoto K, Yanagi T, Takita S, Tanaka M, Higuchi T, Ushida Y, Watanabe H. 1996. Development of plant growth apparatus using blue and red as artificial light source. *Acta Hort*, 440: 111 - 116.
- Pan Jie. 2003. Study on hydroponic technology of lettuce[M. D. Dissertation]. Henan: Henan Agricultural University. (in Chinese)
- 潘 杰. 2003. 水培生菜技术研究[硕士论文]. 河南: 河南农业大学.
- Pu Gao-bin, Liu Shi-qi, Liu lei, Ren Li-hua. 2005. Effects of different light qualities on growth and physiological characteristics of tomato seedlings. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (3): 420 - 425. (in Chinese)
- 蒲高斌, 刘世琦, 刘 磊, 任丽华. 2005. 不同光质对番茄幼苗生长和生理特性的影响. *园艺学报*, 32 (3): 420 - 425.
- Pan Rui-chi, Wang Xiao-jing, Li Niang-hui. 2006. Plant physiology. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 潘瑞焜, 王小菁, 李娘辉. 2006. 植物生理学. 北京: 高等教育出版社.
- Puspa Raj Poudel, Ikuo Kataoka, Ryosuke Mochioka. 2008. Effect of red-and blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell Tiss Organ Cult*, 92: 147 - 153.
- Rao Rui-ji, Fang Wei. 2000. Simulation of light environment under blue and red LEDs. *Journal of Agricultural Machinery*, 9 (3): 51 - 63. (in Chinese)
- 饶瑞洁, 方 炜. 2000. 组合式红、蓝光发光二极体灯具之给光环境模拟. *农业机械学报*, 9 (3): 51 - 63.
- Sui Na, Li Meng, Meng Qing-wei, Tian Ji-chun, Zhao Shi-jie. 2010. Photosynthetic Characteristics of a super high yield cultivar of winter during late growth period. *Agricultural Sciences in China*, 9 (3): 346 - 354.

- Tamulaitis G, Duchovskis P, Bliznikas I Z, Breive I K, Ulinskait R, Brazaityt A, Novickovas I A, Zukauskas A. 2005. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38: 3182 – 3187.
- Tennessen Daniel J, Singasaas Eric L, Sharkey Thomas D. 1994. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. *Photosynthesis Research*, 39: 85 – 92.
- Wang Shao-hui, Kong Yun, Chen Qing-jun, Cheng Ji-hong, Xu Li-lin. 2006. The effects of different light qualities on cucumber fruit quality and yield in greenhouse. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 4 (14): 119 – 121. (in Chinese)
王绍辉, 孔云, 陈青君, 程继鸿, 徐利林. 2006. 不同光质补光对日光温室黄瓜产量与品质的影响. *中国生态农业学报*, 4 (14): 119 – 121.
- Wang Sheng-xue, Wu Guang-ning, Jang Wei, Bian Shan-shan, Li Sheng-lin. 2006. The application and prospect of LED in facility cultivation. *Lamp and Lighting*, 30 (4): 32 – 35. (in Chinese)
王声学, 吴广宁, 蒋伟, 边珊珊, 李生林. 2006. LED 原理及其照明应用. *灯与照明*, 30 (4): 32 – 35.
- Wei Ling-ling, Yang Qi-chang, Liu Shui-li. 2007. Review on research and developing trends of light-emitting diode in plant factory. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 23 (11): 408 – 411. (in Chinese)
魏灵玲, 杨其长, 刘水丽. 2007. LED 在植物工厂中的研究现状与应用前景. *中国农学通报*, 23 (11): 408 – 411.
- Wei Sheng-lin, Wang Jia-bao, Li Chun-bao. 1998. Effects of blue light and red light on dendranthema growth and flowering. *Acta Horticulturae Sinica*, 25 (2): 203 – 204. (in Chinese)
魏胜林, 王家保, 李春保. 1998. 蓝光和红光对菊花生长和开花的影响. *园艺学报*, 25 (2): 203 – 204.
- Xu Li, Liu Shi-qi, Qi Lian-dong, Liang Qing-ling, Yu Wen-yan. 2007. Effects of light quality on leaf lettuce photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 23 (1): 96 – 100. (in Chinese)
许莉, 刘世琦, 齐连东, 梁庆玲, 于文艳. 2007. 不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响. *中国农学通报*, 23 (1): 96 – 100.
- Xu Li, Wei Hui, Qi Lian-dong, Hao Shu-qin, Liang Qing-ling, Yu Wen-yan, Liu Shi-qi. 2010. Effect of different light quality on growth and quality in lettuce. *China Fruit & Vegetable*, 4: 19 – 22. (in Chinese)
许莉, 尉辉, 齐连东, 郝树芹, 梁庆玲, 于文艳, 刘世琦. 2010. 不同光质对叶用莴苣生长和品质的影响. *中国果蔬*, 4: 19 – 22.
- Yanagi T, Okamoto K, Takita S. 1996a. Effect of blue, red and blue/red lights on two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. *Acta Hort*, 440: 117 – 122.
- Yanagi T, Okamoto K, Takita S. 1996b. Effect of blue and red light intensity on photosynthetic rate of strawberry leaves. *Acta Hort*, 440: 371 – 376.
- Yang Qi-chang, Zhang Cheng-bo. 2005. An introduction to plant factory. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press. (in Chinese)
杨其长, 张成波. 2005. 植物工厂概论. 北京: 中国农业科学技术出版社.
- Zhang Ming-yi, Jian Jun-liang, Wu Jia-qi, Xu Shuo-ting, Liu Yun-shan, Fang Wei. 2007. The research about the application of different light quality of high-brightness LED in the industrial lettuce production//Proceedings of symposium on machinery and mechatronics for agriculture and bio-systems engineering in 2007. 55 – 56. (in Chinese)
张明毅, 简君良, 邬家琪, 许硕庭, 刘瑜珊, 方炜. 2007. 不同光质的高亮度 LED 应用于莴苣水耕工厂化生产之研究//2007 年农机与生机论文发表会论文摘要集. 中国台北: 中华农业机械学会: 55 – 56.