

网络出版时间:2020-03-13 14:44 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2020.09.015  
网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.s.20200312.0929.012.html

# 不同光质组合对生菜生长和能量利用效率的影响

李 列<sup>1</sup>, 仝宇欣<sup>1,2</sup>, 李 锦<sup>3</sup>, 杨其长<sup>1,2</sup>

(1 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100089; 2 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京 100089;  
3 国家电光源质量监督检验中心(北京), 北京 100022)

**【摘要】**【目的】筛选较优的光质组合, 提高人工光植物工厂生菜产量和能量利用效率。【方法】以光强为 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , R/B 为 4/1 的红蓝光(RB)为对照, 在光强为 150  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , R/B 为 4/1 的红蓝背景光基础上, 分别添加 50  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的绿光(G)、黄光(Y)、橙光(O)和远红光(FR)组成 4 种不同光质组合处理, 分别用 RBG、RBY、RBO 和 RBFR 表示, 对不同光质组合处理生菜的生长及形态、光合能力、能量利用效率等指标进行比较研究。【结果】RBG、RBO 和 RBFR 处理生菜地上部鲜质量较 RB 处理分别增加 14.5%, 14.5% 和 30.8%, 地上部干质量分别增加 13.3%, 24.1% 和 29.9% ( $P < 0.05$ )。RBG 处理可以增加生菜的株高、总叶面积、净光合速率和能量利用效率。与 RB 处理相比, RBY 处理对生菜的地上部干、鲜质量影响不显著; RBO 处理可以提高生菜叶片的光合能力和能量利用效率。RBFR 处理可以增加生菜的地上部干、鲜质量, 但在实际生产中, 生菜叶片较易出现烧尖现象。【结论】RBG 和 RBO 是工光植物工厂生产中较为合适的光质组合。

**【关键词】** 生菜; 人工光植物工厂; 光质; 光合能力; 光能利用效率

**【中图分类号】** S634

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2020)09-0114-07

## Effect of different combinations of light wavelengths on growth and energy use efficiency of lettuce

LI Lie<sup>1</sup>, TONG Yuxin<sup>1,2</sup>, LI Jin<sup>3</sup>, YANG Qichang<sup>1,2</sup>

(1 Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100089, China;  
2 Key Laboratory of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100089, China; 3 National Lighting Test Centre (Beijing), Beijing 100022, China)

**Abstract:** 【Objective】To improve lettuce yield and energy use efficiency in a plant factory with artificial light, the optimal combination of light wavelengths for lettuce was selected. 【Method】The mixture of red (R, 662 nm) and blue (B, 447 nm) light with an R/B ratio of 4 : 1 and light intensity of 200  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  was set as the control (RB) and four treatments were set up by supplementing the control with 50  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  green light (G, 525 nm, RBG), yellow light (Y, 592 nm, RBY), orange light (O, 605 nm, RBO) and far-red light (FR, 742 nm, RBFR), respectively. Growth, morphology, photosynthetic ability and energy use efficiency of lettuce were investigated. 【Result】Compared with RB, RBG, RBO and RBFR increased shoot fresh weight of lettuce by 14.5%, 14.5%, and 30.8%, and increased shoot dry weight by 13.3%, 24.1% and 29.9%, respectively. RBG increased height, total leaf area, net photosynthetic rate of lettuce and energy use efficiency. RBY had no significant influence on growth. RBO increased photosynthetic ability of lettuce and energy use efficiency. RBFR increased yield, but led to easy injury of tip burn.

**【收稿日期】** 2019-08-23

**【基金项目】** 科技部科技伙伴计划项目(KY201702008); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2019XK21-02)

**【作者简介】** 李 列(1993-), 男, 山西晋城人, 硕士, 主要从事设施农业环境工程研究。E-mail: 2523386516@qq.com

**【通信作者】** 仝宇欣(1982-), 女, 山东菏泽人, 副研究员, 博士, 主要从事设施园艺环境工程研究。E-mail: tongyuxin@caas.cn

【Conclusion】RBG and RBO can be considered as suitable combinations of light wavelengths for lettuce production in a plant factory with artificial light.

**Key words:** lettuce; plant factory with artificial light; light quality; photosynthetic ability; light use efficiency

人工光植物工厂因其生产环境高度可控,周年连续稳定生产及产品安全可靠等诸多优势正在世界各国迅速发展<sup>[1]</sup>。在人工光植物工厂中,人工光源是植物生长唯一的光能来源,因此为植物筛选出较优的生长光源尤为重要。相对于高压钠灯、金属卤化物灯、白炽灯等传统光源,荧光灯较为节能且有较多蓝光波段的光质。所以在以往人工光植物工厂中,应用较多的光源是荧光灯<sup>[2]</sup>。然而荧光灯的光谱范围较广,包含了部分对植物生长作用不明显的光质,且光质比例不能根据植物的需求进行调节<sup>[3]</sup>。此外,当荧光灯距离植株较近时,较高的热辐射还可能使植物组织受到伤害。与荧光灯和其他传统光源相比,LED(light-emitting diode)光源具有许多独特的优势。LED光源可调制出植物生理有效辐射波长(300~800 nm)任意单色光质和光质组合,还可根据植物生长需要进行光环境(光质、光强和光周期)调控。LED光源还具有发热少、发光效率高、寿命长等优势<sup>[4]</sup>。因此,近年来,随着LED价格的不断下降,LED光源逐渐被应用到人工光植物工厂中,从而实现了植物工厂光环境的精准调控。

植物的生长发育不仅受光强和光周期的影响,还会受到光质即不同波长及组成和比例的影响。目前,在植物工厂生产中,人工光光源多以红蓝组合光为主。这是因为红光和蓝光作为叶绿素吸收最多的光,较其他光质能更有效地促进植物叶片的光合作用<sup>[5]</sup>。目前的一些研究也主要是围绕红、蓝光及其不同组合比例对植物生长的影响而展开。然而,许多研究已经表明,不同光质对植物的生长发育具有明显不同的生物学效应,如对植物的形态建成、叶片结构、光合能力和化学组成等有不同影响<sup>[5-6]</sup>。红光(R,620~700 nm)促进叶片增大,延迟花分化;蓝光(B,400~500 nm)促进气孔的开放<sup>[7]</sup>;绿光(G,500~580 nm)促进叶片深层和冠层以下叶片的光合作用,尤其是具有多层叶片结构的植物,如生菜<sup>[8]</sup>;黄光(Y,580~600 nm)抑制植物的生长<sup>[9]</sup>;橙光(O,600~620 nm)虽然也属于光合有效辐射,但研究较少;远红光(FR,700~780 nm)可以调节植物的花期<sup>[7]</sup>;UV(280~400 nm)会对植物叶片造成损伤,但能调节植株的形态,且有利于植物叶片花青素等次生代谢物质的积累<sup>[10]</sup>。然而以红蓝光为主要

光质,绿、黄、橙、远红等光质为辅助光质的组合对植物生长影响的研究仍不明确。为此,本研究通过对不同光质组合下生菜(*Lactuca sativa* cv. 'Tiberius')的生长及形态,光合作用能力,叶片总碳、氮含量和能量利用效率进行研究,以期为人造光植物工厂筛选出较为合适的光质组合,为生产提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

栽培对象为生菜(*Lactuca sativa* cv. 'Tiberius');育苗营养液采用日本山崎配方,pH $\approx$ 5.8,EC $\approx$ 0.8 mS/cm,光源为光强 $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的荧光灯,光周期为16 h/d。当第2片真叶完全展开后,选择长势一致的生菜幼苗随机分配,并移栽至人工光植物工厂中。试验以R:B为4:1,总光强 $200 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的红光(R,662 nm)和蓝光(B,447 nm)组合RB作为对照,将R:B=4:1,光强 $150 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的红蓝光(RB)分别与光强 $50 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的绿光(G,525 nm)、黄光(Y,592 nm)、橙光(O,605 nm)和远红光(FR,742 nm)组合成RBG、RBY、RBO和RBFR的不同光质组合,作为试验处理。每个处理栽培32株生菜,栽培密度为 $32 \text{株}/\text{m}^2$ 。试验光周期为16 h/d,明暗期温度分别为24和20 $^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度为70%,CO<sub>2</sub>浓度为 $1\,000 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。试验期间,采用日本山崎营养液配方和深液流栽培方式,营养液每天循环1~2 h,其中pH $\approx$ 5.8,EC $\approx$ 0.8 mS/cm。试验栽培周期为移栽后21 d,试验重复3次。

### 1.2 生长与形态指标的测定

在移栽后第21天,对生菜随机取样并进行破坏性测量,每个处理取5株。用剪刀将生菜地上部和地下部分离,用尺子测量地上部高度为株高,地下部长度为根长,并记录生菜地上部的叶片数。用电子天平(Si-234, Denver Instrument, NY, USA)测定地上部的鲜质量,用叶面积仪(LI-3100C, Lincoln, NE, USA)测量每株生菜的总叶面积,随后将地上部放入烘箱,在80 $^{\circ}\text{C}$ 下烘至恒质量,测定其干质量。

### 1.3 光合作用参数的测定

对生菜自上而下完全展开的第2片叶进行测定,测定仪器为便携式光合仪(LI-6400XT, Lincoln,

NE, USA), 采用透明叶室在实际作用光下进行测量。设定叶室的环境温度为 24 °C、CO<sub>2</sub> 浓度为 1 000 μmol/mol、相对湿度为 70%。当操作界面上净光合速率 ( $P_n$ , μmol/(m<sup>2</sup> · s)) 和气孔导度 ( $G_s$ , mol/(m<sup>2</sup> · s)) 的值稳定时采集数据, 每个处理重复测定 3 次。试验结束后导出数据, 统计并分析不同处理下生菜叶片的  $P_n$ 、 $G_s$ 、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 ( $C_i$ , μmol/mol) 和蒸腾速率 ( $T_r$ , mmol/(m<sup>2</sup> · s))。

#### 1.4 光响应曲线及相关参数的测定

光响应曲线使用便捷式光合仪 (LI-6400XT, Lincoln, NE, USA) 对生菜自上而下完全展开的第 2 片叶, 采用红蓝光叶室进行测量。从 0 到 1 200 μmol/(m<sup>2</sup> · s), 设置 8 个不同光强梯度获取光响应曲线。起始光照强度为 200 μmol/(m<sup>2</sup> · s), 其后设置为 100, 50, 0, 400, 800, 1000 和 1200 μmol/(m<sup>2</sup> · s)。设定叶室的环境光质为 R : B = 4 : 1, 温度为 24 °C、CO<sub>2</sub> 浓度为 1 000 μmol/mol、相对湿度为 70%。在每个光强设定值下, 当  $P_n$  和  $G_s$  达到稳定状态时, 采集数据。每个处理重复测定 3 次。运用 Excel 2019 (Microsoft, USA) 对光响应曲线进行拟合<sup>[11]</sup>, 拟合参数包括暗呼吸速率 ( $R_d$ , μmol/(m<sup>2</sup> · s))、低光强下的光化学效率 ( $\alpha$ ) 和饱和光强下的净光合速率 ( $P_{max}$ , μmol/(m<sup>2</sup> · s))。

#### 1.5 叶片全碳、全氮含量测定及光合氮利用效率的计算

植物叶片全碳、全氮含量均使用元素分析仪 (Isoprime GC5, Italy) 进行测定<sup>[12-13]</sup>, 分别用  $C_c$  和  $C_N$  表示。光合氮利用效率 (Photosynthetic nitrogen use efficiency, PNUE) 为光合作用强度与单位叶面积含氮量之比<sup>[14]</sup>, 按下式计算:

$$PNUE = \frac{P_n \times LA}{SDW \times C_N}$$

式中:  $LA$  为总叶面积,  $SDW$  为地上部干质量。

#### 1.6 能量和水分利用效率的计算

光能消耗 (Light energy consumption, LEC)、电能消耗 (Electric energy consumption, EEC) 和水分利用效率 (Water use efficiency, WUE) 按下式计算:

$$LEC = PFD \times T / (W_j \times D)$$

$$EEC = P \times T / (W_j \times D)$$

$$WUE = P_n / T_r \times 100\%$$

式中:  $LEC$  表示生产单位质量生菜所需要的光量子数, mol/g;  $PFD$  (Photon flux density) 表示光量子通量密度, μmol/(m<sup>2</sup> · s);  $T$  表示整个生育期对应光质的光照射时间, s;  $W_j$  表示采收时生菜地上部分的干质量, g/株;  $D$  表示栽培密度, 株/m<sup>2</sup>;  $EEC$  表示单位面积生产单位质量生菜所消耗的电能, MJ/g;  $P$  为光源的实时工作功率, W。

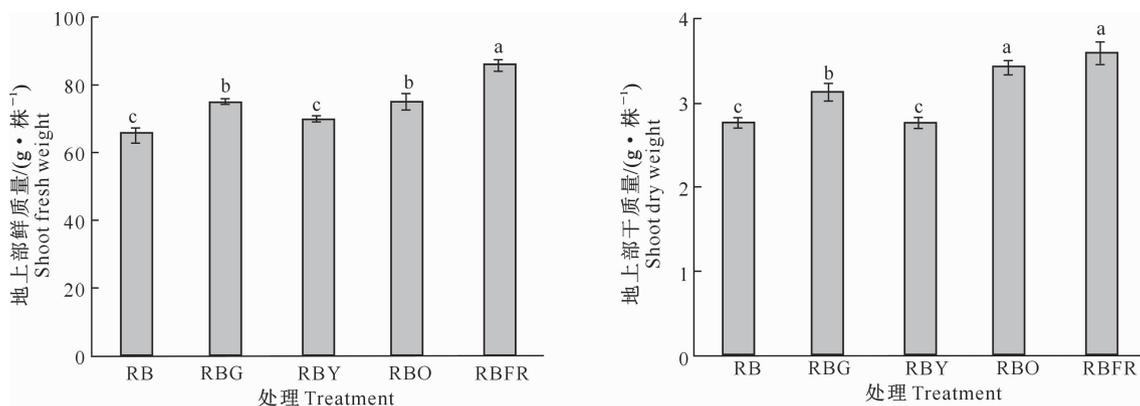
#### 1.7 数据统计与分析

用 SPSS 21 (SPSS Inc., Chicago, USA) 对试验数据进行显著性分析, 采用 Duncan 氏多重比较, 显著水平  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同光质组合对生菜生长及形态的影响

由图 1 可知, 与 RB 相比, RBG、RBO 和 RBFR 处理生菜地上部鲜质量分别增加 14.5%, 14.5% 和 30.8%, 地上部干质量分别增加 13.3%, 24.1% 和 29.9% ( $P < 0.05$ ), 可知 RBG、RBO 和 RBFR 处理有利于生菜产量的形成和干物质的积累。RBY 处理地上部鲜质量和干质量与 RB 处理均无显著差异。



图柱上标不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。图 3 和图 4 同

Different lowercase letters show significant differences at level of 0.05. The same for Fig. 3 and 4

图 1 不同光质组合对生菜地上部鲜质量和干质量的影响

Fig. 1 Effect of different combinations of light wavelengths on shoot fresh weight and shoot dry weight of lettuce

由表 1 可知,不同光质组合对生菜的形态也有影响。RBG 和 RBFR 处理生菜株高分别是 RB 处理的 1.3 和 1.8 倍。RBY 和 RBFR 处理生菜根长

分别是 RB 处理的 1.1 和 1.3 倍。各处理间的叶片数无显著差异。与 RB 处理相比,RBG 和 RBFR 处理总叶面积分别增加了 17.8%和 27.2%。

表 1 不同光质组合对生菜形态的影响

Table 1 Effect of different combinations of light wavelengths on lettuce morphology

| 处理<br>Treatment | 株高/cm<br>Plant height | 根长/cm<br>Root length | 叶片数<br>Leaf number | 总叶面积/cm <sup>2</sup><br>Leaf area |
|-----------------|-----------------------|----------------------|--------------------|-----------------------------------|
| RB              | 11.0 d                | 31.2 c               | 21.0 ab            | 1 033.8 c                         |
| RBG             | 14.2 b                | 33.2 bc              | 21.0 ab            | 1 217.4 b                         |
| RBY             | 12.9 c                | 35.7 b               | 21.8 a             | 1 046.9 c                         |
| RBO             | 10.6 d                | 32.7 bc              | 22.6 a             | 1 027.7 c                         |
| RBFR            | 19.7 a                | 40.4 a               | 22.8 a             | 1 314.5 a                         |

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。下表同。

Note: Different lowercase letters show significant differences at level of 0.05. The same below.

### 2.2 不同光质组合对生菜光合能力的影响

由表 2 可知,与 RB 处理相比,RBG 和 RBO 处理生菜叶片的  $P_n$  显著增加,而 RBFR 处理  $P_n$  较 RB 处理降低了 23.2%。RBY 和 RBO 处理  $G_s$  较 RB 处理分别增加了 88.9%和 77.8%。RBG、RBY、RBO 和 RBFR 处理  $C_i$  与 RB 均无显著差异。RBY 和 RBO 处理  $T_r$  较 RB 处理分别增加了 78.8%和 68.7%。

由图 2 可知,不同光质组合处理生菜  $P_n$  随光强的增强不断增大,当光强大于 1 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,再增加光强, $P_n$  几乎没有变化。由表 2 可以看出,对于光响应曲线拟合参数,RB、RBG、RBY 和

RBO 处理  $R_d$  没有显著差异,而相较于 RB 处理, RBFR 处理  $R_d$  降低了 68.1%。RB、RBG 和 RBO 处理  $\alpha$  无显著差异,但相较于 RB 处理,RBY 处理  $\alpha$  增加了 15.6%,RBFR 处理  $\alpha$  降低了 15.6%。RB、RBG 和 RBY 处理  $P_{\text{max}}$  无显著差异,但相较于 RB 处理,RBO 处理  $P_{\text{max}}$  增加了 15.9%,RBFR 处理  $P_{\text{max}}$  降低了 23.9%。

由图 3 可知,与 RB 处理相比,RBG 处理生菜叶片光合氮利用效率(PNUE)增加了 17.7% ( $P < 0.05$ ),RBFR 处理的生菜叶片 PNUE 降低了 31.0% ( $P < 0.05$ ),而 RB、RBY 与 RBO 处理之间无显著差异。

表 2 不同光质组合对生菜光合作用和光响应曲线拟合参数的影响

Table 2 Effect of different combinations of light wavelengths on photosynthesis of lettuce leaf and fitting parameters of photosynthetic light response curves

| 处理<br>Treatment | $P_n/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $G_s/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $C_i/(\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1})$ | $T_r/(\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $R_d/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ | $\alpha$ | $P_{\text{max}}/(\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ |
|-----------------|---|--|---|---|---|----------|--|
| RB              | 7.27 b  | 0.09 bc  | 834.88 ab                                   | 0.99 bc   | 1.44 a  | 0.064 b  | 22.64 b  |
| RBG             | 7.78 a  | 0.11 ab  | 857.56 ab                                   | 1.22 ab   | 1.39 a  | 0.058 b  | 21.30 b  |
| RBY             | 7.38 ab   | 0.17 a   | 897.97 a                                    | 1.77 a  | 1.32 a  | 0.074 a  | 23.17 b  |
| RBO             | 7.88 a  | 0.16 a   | 882.51 a                                    | 1.67 a  | 1.22 a  | 0.062 b  | 26.23 a  |
| RBFR            | 5.58 c  | 0.04 c   | 755.28 b                                    | 0.39 c  | 0.46 b  | 0.054 c  | 17.23 c  |

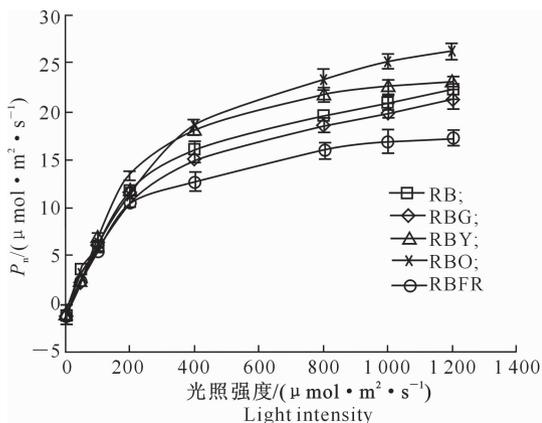


图 2 不同光质组合处理生菜叶片的光响应曲线

Fig. 2 Photosynthetic light response curves of lettuce leaf under different combinations of light wavelengths

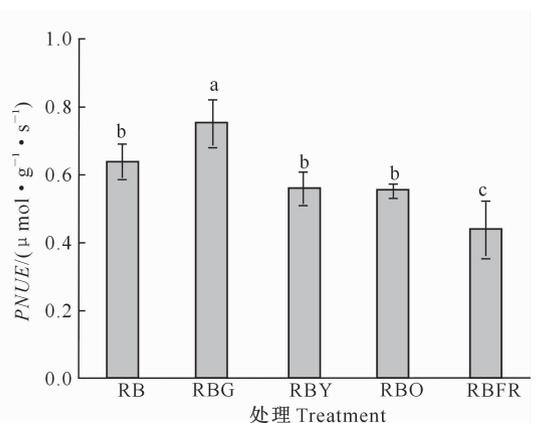
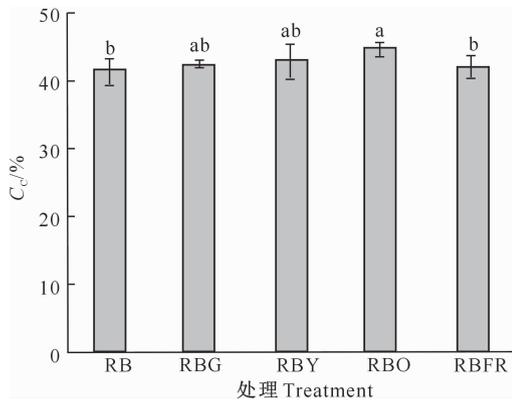


图 3 不同光质组合对生菜 PNUE 的影响

Fig. 3 Effect of different combinations of light wavelengths on PNUE of lettuce

### 2.3 不同光质组合对叶片总碳、氮含量的影响

由图 4 可知,与 RB 处理相比,RBO 处理生菜叶片总碳含量( $C_c$ )增加了 7.9%( $P < 0.05$ ),而 RB、RBG、RBY 和 RBFR 处理生菜叶片总碳含量间无显



著差异。与 RB 处理相比,RBO 和 RBFR 处理生菜叶片总氮含量( $C_N$ )分别显著降低 8.5%和 10.9%,而 RB、RBG 和 RBY 处理间无显著差异。

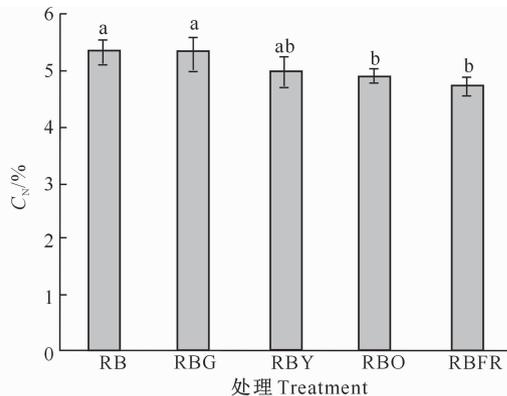


图 4 不同光质组合对生菜叶片总碳、氮含量的影响

Fig. 4 Effect of different combinations of light wavelengths on content of total carbon and nitrogen of lettuce leaf

### 2.4 不同光质组合对生菜能量和水分利用效率的影响

由表 3 可得,与 RB 处理相比,RBG、RBO 和 RBFR 处理生菜光能消耗( $LEC$ )分别降低 17.9%,20.9%和30.6%,而 RBY 与 RB 处理无显著差异。与 RB 处理相比,RBG、RBY、RBO 和 RBFR 处理生菜电能消耗( $EEC$ )分别降低 17.7%,13.9%,20.7%和 22.0%( $P < 0.05$ )。说明 RBG、RBO 和 RBFR 处理可以提高生菜生产的光能和电能利用效率。与 RB 处理相比,RBFR 处理生菜  $WUE$  提高了 93.3%,而 RBY 处理  $WUE$  降低了 44.0%( $P < 0.05$ )。RB、RBG 和 RBO 处理之间无显著差异。

表 3 不同光质组合对生菜能量和水分利用效率的影响

Table 3 Effect of different combinations of light wavelengths on energy and water use efficiency of lettuce

| 处理 Treatment | $LEC/(\text{mol} \cdot \text{g}^{-1})$ | $EEC/(\text{MJ} \cdot \text{g}^{-1})$ | $WUE/\%$ |
|--------------|--|---------------------------------------|----------|
| RB           | 2.69 a                                 | 19.15 a                               | 0.75 b   |
| RBG          | 2.20 bc                                | 15.77 b                               | 0.68 bc  |
| RBY          | 2.40 ab                                | 16.49 b                               | 0.42 c   |
| RBO          | 2.12 bc                                | 15.19 b                               | 0.51 bc  |
| RBFR         | 1.86 c                                 | 14.94 b                               | 1.45 a   |

## 3 讨论

光作为植物生长的信号和能量来源,在植物的生长和发育中起着关键性作用。植物能够感知生长环境中不同的光质、光强和光周期等,并启动在该环境中生存所必需的生理和形态结构的变化<sup>[7]</sup>。植物对不同光质在生长和形态上的响应也不尽相同<sup>[15]</sup>。在本试验中,RBG 和 RBFR 光质组合处理显著影响

生菜生长和形态结构,显著增加生菜干鲜质量、株高和叶面积。Zhang 等<sup>[16]</sup>也发现绿光和远红光可促使拟南芥叶片面积增加、茎长伸长和叶片向上生长。也有研究指出,远红光可以被非光合色素-光敏色素吸收,影响植物的形态建成,并改变植物的形态结构,如叶片的向上生长等<sup>[17]</sup>。本研究中,RBY 处理生菜地上部干鲜质量与 RB 处理无显著差异。这一结果与 Wang 等<sup>[18]</sup>和 Zhang 等<sup>[19]</sup>“黄光抑制生菜生长”的研究结论不一致,可能是由于这个研究中所用的光源为单一黄光,而本试验是以有利于植物生长的红蓝光为背景光,辅助添加了黄光作为光质组合进行研究。虽然 RBO 组合光质对生菜的形态无显著影响,但 RBO 处理生菜地上部干鲜质量都较 RB 组合光质显著增加,原因是 RBO 组合光质显著提高了生菜叶片的  $P_n$ 。

光合作用是植物捕获光能的唯一生物学途径,也是植物生长能量来源的途径,因此通过探究不同光质组合对生菜光合能力的影响来筛选植物工厂较优的光源具有重要的意义<sup>[20]</sup>。本研究中,RBG 和 RBO 处理生菜叶片  $P_n$  较对照都显著提高。RBG 处理  $PNUE$  较 RB 处理显著提高,这一结果可以解释 RBG 比 RB 光质更有利于光合作用<sup>[14]</sup>。这是因为超过一半的叶片氮会被分配到叶绿体中参加光合作用<sup>[21]</sup>,植物叶片的光合氮利用效率越高,越能促进叶片光合作用的高效进行。此外,有研究表明,红蓝光在植物冠层就被吸收,而绿光可以进入叶片深层,为植物中下层叶片进行光合作用提供光能<sup>[8]</sup>。本研究中 RBO 处理生菜叶片  $G_s$  和  $T_r$  都较 RB 处

理显著增加,这可能是RBO处理 $P_n$ 较高的原因,并因此促进生菜叶片C元素的积累,从而使RBO处理 $C_c$ 较RB处理显著提高。氮元素是植物体内重要的元素,它是构成氨基酸、氨基酸化合物、蛋白质、核酸、核苷酸、酶等物质的基础元素。充分的氮素供应有助于植物的光合作用,维持体内碳氮平衡和循环,促进植物生长发育<sup>[20]</sup>。本研究中,RBFR处理的 $C_N$ 和 $PNUE$ 均较RB处理显著降低,导致分配到叶绿体的氮缺乏,使诱导光合抑制物增加,阻碍光合进程和光合速率的提高<sup>[14]</sup>。这一结果导致RBFR处理 $P_n$ 较RB处理显著降低,但其地上部干鲜质量较RB都显著增加。Wang等<sup>[22]</sup>和Hernández等<sup>[23]</sup>在研究中也发现了这种现象。可能的原因是本试验中的 $P_n$ 不能代表整株植物的光合作用。在本试验中,RBFR处理生菜产量的增加是由远红光引起的植物叶面积增大、株高增高等形态的变化,从而使生菜叶片可以截获更多光量子造成的。这一结果与Park和Runkle<sup>[24]</sup>发现的“远红光可以促进植物叶片增大并提高整株植物的光能截获量”类似。然而本研究发现,RBFR处理生菜较易出现烧尖现象,经济效益会明显降低。

通过改变光照强度来测定完整叶片的 $P_n$ ,并据此建立的光响应曲线可以揭示出叶片的光合作用特性<sup>[20]</sup>。当没有光照时,也没有光合碳同化作用产生,但由于线粒体呼吸作用存在,植物仍会持续产出 $CO_2$ 。此时的光合速率为叶片的暗呼吸速率( $R_d$ ),本试验中RBFR处理 $R_d$ 最低,可能是由于RBFR处理 $G_s$ 较低,呼吸作用减弱导致。在光补偿点以上,光照强度与 $P_n$ 保持线性关系。在光响应曲线的线性关系部分,光合作用是受光强限制的,光照强度的增加会刺激光合作用成比例增强。光响应曲线线性部分的斜率 $\alpha$ 揭示了叶片光合作用的量子最大产额(Maximum quantum yield)。本研究中,RBY处理 $\alpha$ 较对照RB处理显著提高,但其地上部干鲜质量却与RB无显著差异,可能是由于RBY处理生菜叶片羧化效率较低导致的。在更高的光照强度下,光合作用的光反应逐渐稳定下来,并最终达到饱和状态。超出光饱和点后,再增加光照强度对 $P_n$ 的提高不显著,表明此时不再是入射光强,而是一些其他因素,如电子传递速率、Rubisco活性等,成为光合作用的限制因素。RBO处理 $R_d$ 和 $\alpha$ 与RB处理均无显著差异,但 $P_{max}$ 却较RB处理显著增加,这可能是由于RBO处理叶片进行光合作用时电子传递速率和Rubisco活性较高,这可能是RBO处理

$P_n$ 较RB处理高的原因。

能量利用效率是人工光植物工厂光质的重要评价指标<sup>[25]</sup>。本试验结果表明,RBG、RBO和RBFR处理 $LEC$ 和 $EEC$ 都较RB处理显著降低,说明RBG、RBO和RBFR处理生菜每积累1g干物质较RB处理消耗更少光能和电能,其光能和电能的利用效率更高,应用于人工光植物工厂中将会更节能。RBFR处理 $WUE$ 较RB处理显著增加,其原因可能是RBFR处理生菜叶片面积较大。

## 4 结 论

本研究对不同光质组合处理下生菜的生长及形态、光合能力、叶片碳氮含量和能量利用效率进行了研究,得出以下结论:RBG、RBO和RBFR组合光质可以提高人工光植物工厂的光能和电能利用效率,以及生菜的干、鲜质量。RBG主要是通过提高生菜株高、叶面积、 $PNUE$ 和 $P_n$ 来提高地上部干、鲜质量。RBO组合光质主要是通过提高生菜的光合能力来提高地上部干、鲜质量。虽然RBFR组合光质可以增加株高和叶面积并因此提高地上部干、鲜质量,但是在实际生产中烧尖现象较为严重,影响了其商业价值。综上所述,RBG和RBO是人工光植物工厂较为合适的光质组合。

## [参考文献]

- [1] 王 君,全宇欣,杨其长. LED光源红蓝光配比对生菜光合作用及能量利用效率的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(14):234-240.  
Wang J, Tong Y X, Yang Q C. Photosynthesis and energy use efficiency for lettuce exposed to different ratios of red to blue light [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 234-240.
- [2] Bantis F, Smirnakou S, Ouzounis T, et al. Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs) [J]. Scientia Horticulturae, 2018, 235: 437-451.
- [3] Smith H L, Mcausland L, Murchie E H. Don't ignore the green light: exploring diverse roles in plant processes [J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(9): 2099-2110.
- [4] Nelson J A, Bugbee B. Economic analysis of greenhouse lighting: light emitting diodes vs. high intensity discharge fixtures [J]. PLoS One, 2014, 9(6): e99010.
- [5] 刘文科. LED植物工厂光质生物学研究与应用现状[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(10): 9-14.  
Liu W K. Research on spectral biology of plant factory with LED lighting and application status [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(10): 9-14.
- [6] 邢阿宝, 崔海峰, 俞晓平, 等. 光质及光周期对植物生长发育的影响[J]. 北方园艺, 2018(3): 163-172.

- Xing A B, Cui H F, Yu X P, et al. Effects of different lights qualities and photoperiods on plant growth and development [J]. Northern Horticulture, 2018(3):163-172.
- [7] 许大全, 高伟, 阮军. 光质对植物生长发育的影响 [J]. 植物生理学报, 2015, 51(8):1217-1234.
- Xu D Q, Gao W, Ruan J. Effects of light quality on plant growth and development [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8):1217-1234.
- [8] Wang Y, Folta K M. Contributions of green light to plant growth and development [J]. American Journal of Botany, 2013, 100(1):70-78.
- [9] Dougher T A, Bugbee B. Evidence for yellow light suppression of lettuce growth [J]. Photochem Photobiol, 2001, 73(2):208-212.
- [10] Shi S, Zhu W, Li H, et al. Photosynthesis of *Saussurea superba* and *Gentiana straminea* is not reduced after long-term enhancement of UV-B radiation [J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 51(1):75-83.
- [11] Thornley J H M. Mathematical models in plant physiology: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology [M]. London: Academic Press, 1976.
- [12] 陈雅涵, 谢宗强. 样品保存条件对土壤与植物全碳全氮含量的影响 [J]. 植物生态学报, 2017, 41(6):632-638.
- Chen Y H, Xie Z Q. Effects of storage conditions on total carbon and nitrogen contents of soil and plant samples [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2017, 41(6):632-638.
- [13] 范志影, 周陈威. 杜马斯燃烧定氮法在农产品品质检测中的应用 [J]. 现代科学仪器, 2006, 16(1):45-46.
- Fan Z Y, Zhou C W. Application of Dumas combustion method for nitrogen analysis on agricultural products [J]. Modern Scientific Instruments, 2006, 16(1):45-46.
- [14] 史作民, 唐敬超, 程瑞梅, 等. 植物叶片氮分配及其影响因子研究进展 [J]. 生态学报, 2015, 35(18):5909-5919.
- Shi Z M, Tang J C, Cheng R M, et al. A review of nitrogen allocation in leaves and factors in its effects [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(18):5909-5919.
- [15] 刘文科, 杨其长. 植物工厂 LED 照明应用的几点思考 [J]. 照明工程学报, 2015, 26(4):98-102.
- Liu W K, Yang Q C. Insights into some key technological issues on LED lighting in plant factory [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2015, 26(4):98-102.
- [16] Zhang T, Maruhnich S A, Folta K M. Green light induces shade avoidance symptoms [J]. Plant Physiology, 2011, 157(3):1528-1536.
- [17] Chen X, Xue X, Guo W, et al. Growth and nutritional properties of lettuce affected by mixed irradiation of white and supplemental light provided by light-emitting diode [J]. Scientia Horticulturae, 2016, 200:111-118.
- [18] Wang H, Gu M, Cui J, et al. Effects of light quality on CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus* [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology, 2009, 96(1):30-37.
- [19] Zhang T, Shi Y, Piao F, et al. Effects of different LED sources on the growth and nitrogen metabolism of lettuce [J]. Plant Cell, Tissue and Organ Culture, 2018, 134(2):231-240.
- [20] Lincoln Taiz, Eduardo Z. Plant physiology [M]. 5th ed. Sunderland, Massachusetts USA: Sinauer Associates Inc. 2015.
- [21] Warren C R, Adams M A. Phosphorus affects growth and partitioning of nitrogen to Rubisco in *Pinus pinaster* [J]. Tree Physiology, 2002, 22(1):11-19.
- [22] 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.
- [23] Hernández R, Kubota C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs [J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 121:66-74.
- [24] Park Y, Runkle E S. Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation [J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 136:41-49.
- [25] Kozai T. Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: concept, estimation and application to plant factory [J]. Proceedings of the Japan Academy (Series B), 2013, 89(10):447-461.