

## 补光光质对叶用莴苣光合特性的影响

周成波<sup>1</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 刘彬彬<sup>2</sup>, 艾希珍<sup>1,2</sup>, 毕焕改<sup>1,2</sup>, 李清明<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup>山东农业大学园艺科学与工程学院, 山东泰安271018; <sup>2</sup>作物生物学国家重点实验室, 山东泰安271018; <sup>3</sup>农业部黄淮海设施农业工程科学观测实验站, 山东泰安271018

**摘要:** 以‘大速生’叶用莴苣为试材, 采用LED光源配置白色、白+红、白+蓝、白+红+蓝4个光配方, 研究了在白光基础上补充不同比例红/蓝光对叶用莴苣生长及光合特性的影响。结果表明: 白+红(WR)处理下叶用莴苣的株高比对照显著增加9.5%, 白+蓝(WB)处理下地上部鲜重较对照提高10%; 白+蓝(WB)处理下净光合速率较对照提高21.7%; 白+红(WR)或白+蓝(WB)处理均显著提高了羧化效率(CE)和RuBP羧化酶活性, 提高了光化学效率, 增强了PSII中心活性, 从而提高了光合性能。而同时补充红光和蓝光(WRB)则不利于叶用莴苣干物质的积累和对光能的有效利用。因此, 可将红光或蓝光作为单色光用于叶用莴苣的补光栽培, 以提高光合性能, 增加产量。

**关键词:** 叶用莴苣; 光质; 光合特性

## The Effect of Supplementary Light Quality on Physiological Characteristics of Lettuce

ZHOU Cheng-Bo<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, LIU Bin-Bin<sup>2</sup>, AI Xi-Zhen<sup>1,2</sup>, BI Huan-Gai<sup>1,2</sup>, LI Qing-Ming<sup>1,2,3,\*</sup>

<sup>1</sup>College of Horticulture Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Crop Biology, Tai'an, Shandong 271018, China; <sup>3</sup>Scientific Observing and Experimental Station of Environment Controlled Agricultural Engineering in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture, Tai'an, Shandong 271018, China

**Abstract:** In order to investigate the effect of light quality on growth and photosynthetic characteristics of lettuce, the cultivar ‘Dasusheng’ was used as experimental material, LED was used as light source, we designed four different combinations of light quality: white (W), white plus red (WR), white plus blue (WB), white plus red and blue (WRB). The results showed that plant height increased by 9.5% under white plus red light, the fresh weight of lettuce increased by 10% under white plus blue light; the net photosynthetic rate increased by 21.7% under white plus blue light; WR or WB enhanced carboxylation efficiency (CE) and RuBP carboxylase activity, improved photochemical efficiency, enhanced the activity of PSII center, so improved the photosynthetic performance. But white plus red and blue (WRB) decreased dry matter accumulation and the effective use of light energy. In conclusion, red or blue light can be used as monochromatic light to light-supplement cultivation for lettuce to improve photosynthetic performance and yield.

**Key words:** lettuce (*Lactuca sativa* L.); light quality; photosynthetic characteristics

光是植物进行光合作用的基本能源, 也是植物生长发育的重要调节因子。植物的生长发育不仅受光强的制约, 而且受光质及其组成比例的影响(许大全等2015)。光不仅调控植物生长发育的整个过程, 还影响内源激素的变化和基因的表达以及植物的抗逆和衰老等(Dissanayake等2010)。光合器官的正常发育长期受光质调控, 红光可通过抑制光合产物从叶中的输出来增加叶片的淀粉积累(Saebo等1995), 蓝光则调控叶绿素形成、叶绿体发育与气孔开启以及光合节律等生理过程(李韶山和潘瑞焱1994)。

发光二极管(light emitting diode, 简称LED)作为设施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光源呈现良

收稿 2015-09-15 修订 2015-11-19

资助 “十二五”科技支撑计划项目(2012BAD11B01)、公益性行业(农业)专项(201303108)、中国博士后科学基金第四批特别资助(201104646)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2013CM008)和山东省高等学校科技计划项目(J14LF06)。

\* 通讯作者(E-mail: gslqm@sdau.edu.cn)。

好的发展前景(崔瑾等2008; 魏灵玲等2007)。随着设施农业的快速发展, 研究不同光质LED光源对园艺作物生长发育、物质代谢和形态建成的影响已成为热点, 温室补光已成为设施园艺生产的一项关键技术。

目前有关不同光质LED光源的研究主要集中在单色光或者红、蓝不同比例对植物生长发育、光合特性及碳氮代谢等方面。储钟稀等(1999)研究发现, 红光下黄瓜叶片具有较高的光系统II(PSII)活性和放氧速率, 而蓝光下叶片具有较高的光系统I(PSI)活性, 说明光质对调节蔬菜叶片PSI和PSII的发育、光合活性及光合放氧速率具有重要作用。红蓝比为3:1的LED复合光可以作为设施培育黄瓜幼苗的适宜光谱(徐文栋等2015), 红光比例为70%时最有利于姜黄次生代谢产物的生成(刘建福等2014)。蓝光和紫光也可以使叶片维持较高的抗氧化酶水平, 从而延缓植株的衰老(王虹等2010)。我国以日光温室和塑料大棚为主的设施补光技术主要是在光照不足的情况下增加室内光强, 而在光质调节方面的研究相对较少。我们对芹菜的研究结果表明, 在白光基础上增加红光比例可促进碳的同化、转化及氮的吸收, 加速物质积累, 增加蓝光比例可增强氮代谢(宁宇等2015)。本文利用新型LED光源, 实现波长和强度的精确调控, 在白光的基础上补充不同比例红光和(或)蓝光, 研究了不同光配方对叶用莴苣的生长及光合特性的影响, 旨在为莴苣的设施生产及专用有色膜的研制提供理论依据和技术参数。

## 材料与方法

### 1 供试材料与试验设计

本试验于2013年5月在山东农业大学科技创新园进行, 试材叶用莴苣(*Lactuca sativa* L.)品种为‘大速生’, 将种子点播于装满育苗基质(土:基质:鸡粪=4:2:1)的穴盘(72孔, 总长53.5 cm, 总宽27.5 cm, 穴4 cm×4 cm)中, 置于温室内育苗, 待幼苗达到两叶一心时定植于直径15 cm、高20 cm的小花盆, 转移到人工气候室(浙江求是, 杭州)中, 每个处理栽培面积0.48 m<sup>2</sup>, 共种植叶用莴苣16株, 每个处理设3个重复, 常规管理, 在人工气候室中处理35~40 d后取样测定, 重复3~5次, 取平均值。

光源采用新型LED管状植物生长光源(吉士科技照明公司, 广东中山), 每根灯管长1.2 m, 直径4 cm, 灯管颜色包括白(white, W)、红(red, R)、蓝(blue, B), 每根灯管功率18 W。每个光配方处理光源采用灯管并排组合的方式, 分别设白+红(WR, 白光:红光=4:1)、白+蓝(WB, 白光:蓝光=4:1)、白+红+蓝(WRB, 白光:蓝光:红光=3:1:1)和白(W, 对照)4个光配方(宁宇等2015)。通过调整LED灯管数和培养架高度使各配方处理光量子通量密度(photosynthetic photon flux density, PPF)均为(250±10) μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 人工气候室通过计算机对植物生长发育过程的温度、湿度、CO<sub>2</sub>浓度以及光周期自动调节和监控, 各项环境指标为: 昼温(25±1) °C、夜温(17±1) °C、湿度60%~80%、CO<sub>2</sub>浓度为380~400 μL·L<sup>-1</sup>, 光周期为12 h·d<sup>-1</sup>。

### 2 测定方法

各处理光谱用UNISPECTM-DC光谱分析仪(PP-Systems, 英国)测定, 测定波段为300~1 100 nm, 扫描波长间隔为3.3 nm, 输出的光谱值是光电流信号比特。光量子通量密度(PPFD)用3415FX光度计(Spectrum Technologies, 美国)测定; 叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量采用80%丙酮浸提法(李合生2002)测定; 气体交换参数用CIRAS-2型光合仪(PP-Systems, 英国)测定, 测定时选用外数第4片叶, 测定时间为上午9~11时, 测定光强为800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, CO<sub>2</sub>浓度为400 μL·L<sup>-1</sup>; 叶绿素荧光参数用FMS-2型调制式叶绿素荧光仪(英国Hansatech公司)测定, 光反应参数均在光强800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>测定, 暗适应30 min后进行暗反应参数的测定; 叶绿素快速荧光诱导动力学曲线用连续激发式荧光仪(Handy PEA, 英国Hansatech公司)测定, 暗适应30 min后进行测定; 光合-光响应曲线(P<sub>n</sub>-PPFD)用Ciras-2型光合作用测定系统测定, 测定时CO<sub>2</sub>浓度400 μL·L<sup>-1</sup>, 叶温(25±1) °C, 相对湿度70%~80%, PPF范围50~1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 变化梯度为50 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> (300 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>以下)和100 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> (300 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>以上)。光饱和点和光补偿点采用回归法求得, 表观量子效率(AQY)为光合-光响应曲线初始直线部分的斜率; 光合-CO<sub>2</sub>浓度响应曲线(P<sub>n</sub>-CO<sub>2</sub>)用Ciras-2型光合作用测定系统测定, 测定时PPFD为1 000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, CO<sub>2</sub>浓度范围

50~500  $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ , 变化梯度为50  $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$ , 羧化效率(CE)为其初始直线部分的斜率; RuBP羧化酶(RuB-PCase)活性按照上海杰美基因医药科技有限公司生产的试剂盒说明书测定。

### 3 数据处理

数据均取每个处理下3次重复的平均值, 采用Microsoft excel和SigmaPlot 10.0软件处理数据和作图, 用方差分析软件对数据进行单因素方差分析, 并运用Duncan's检验法对显著性差异( $P<0.05$ )进行多重比较。

## 实验结果

### 1 不同光配方处理光谱特性

与CK相比, 各处理在蓝紫光、绿光和红橙光区光谱比例有明显改变。白+红(WR)处理的红橙光比例较CK增加了5.2%, 但蓝紫光下降了5.2%, 紫外光、绿光和远红光区与CK无明显差异; 白+蓝(WB)处理蓝紫光较CK增加了5.5%, 绿光和红橙光的比例分别较CK降低了4.8%和0.8%; 白+红+蓝(WRB)处理, 蓝紫光光谱比例增加了14.6%, 绿光和红橙光区则降低了10.9%和3.2%, 紫外光和远红光与CK差异不大。可见, 不同处理光谱比例变化主要发生在400~700nm之间, 且WR处理主要增加

了红橙光比例, WB处理和WRB处理均增加了蓝紫光比例, WRB处理下蓝紫光比例较WB处理增加了9.1%, 红橙光比例降低了2.4%, 各处理对紫外光、近红光和远红光没有显著的影响(表1)。

### 2 补光光质对叶用莴苣生长及光合特性的影响

#### 2.1 补光光质对叶用莴苣生长的影响

光质对植物生长发育有很大的影响, 株高、叶幅是叶用莴苣重要形态指标。由表2可以看出, 白+红(WR)处理下叶用莴苣的株高比对照(CK)增加9.5%, 差异显著。白+红+蓝(WRB)处理下叶用莴苣的叶幅显著小于CK, 白+蓝(WB)处理则与CK无显著性差异。白+蓝(WB)处理较其他处理鲜重显著增加, 较CK增加10%, 而白+红+蓝(WRB)处理下干重则显著低于其他处理。说明在白光基础上补充红光或蓝光有利于叶用莴苣的生长, 同时补充红光和蓝光则会抑制叶用莴苣的生长, 不利于干物质的积累。

#### 2.2 补光光质对叶用莴苣叶片色素含量的影响

由表3可以看出, 白+红+蓝(WRB)处理下的叶用莴苣叶片叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量均最高, 显著高于CK (W), 白+蓝(WB)处理下三者则显著低于CK (W), 而白+红(WR)处理下则与CK (W)无显著性差异; 各处理叶绿素a/b之间差异不显

表1 不同光配方LED灯光谱分析

Table 1 Analysis of the LED light spectrum of different light recipe

处理	%					
	紫外光 (300~400 nm)	蓝紫光 (400~510 nm)	绿光 (510~610 nm)	红橙光 (610~720 nm)	远红光 (720~780 nm)	近红外 (780~1 100 nm)
W (CK)	0.1	30.6	53.4	14.6	0.9	0.4
WR	0.1	25.4	53.4	19.8	0.9	0.4
WB	0.1	36.1	48.6	13.8	0.8	0.5
WRB	0.1	45.2	42.3	11.4	0.7	0.4

表2 补光光质对叶用莴苣生长的影响

Table 2 Effect of supplementary light quality on the growth of lettuce

处理	株高/cm	叶幅/cm	鲜重/g·株 <sup>-1</sup>	干重/g·株 <sup>-1</sup>
W (CK)	18.02±0.35 <sup>b</sup>	28.2±0.46 <sup>a</sup>	85.77±3.78 <sup>b</sup>	5.15±0.79 <sup>a</sup>
WR	19.74±0.21 <sup>a</sup>	25.1±0.54 <sup>b</sup>	88.16±3.01 <sup>b</sup>	5.81±0.17 <sup>a</sup>
WB	18.10±0.38 <sup>b</sup>	27.8±0.64 <sup>a</sup>	94.40±3.62 <sup>a</sup>	5.66±0.05 <sup>a</sup>
WRB	17.10±0.60 <sup>c</sup>	22.4±0.36 <sup>c</sup>	86.55±0.55 <sup>b</sup>	3.43±0.40 <sup>b</sup>

同列不同字母表示差异达显著水平( $P<0.05$ ), 下同。

著。因此, 在白光的基础上同时补充红光和蓝光可以显著提高叶用莴苣叶片叶绿素a、b以及类胡萝卜素的含量。

#### 2.3 补光光质对叶用莴苣气体交换参数的影响

由图1-A可知, 白+蓝(WB)处理下叶用莴苣的净光合速率( $P_n$ )最高, 较CK高21.7%, 而白+红+蓝(WRB)处理的 $P_n$ 最低, 较对照CK低30.4%, 白+红(WR)与CK差异不显著。白+蓝(WB)处理下叶用

表3 补光光质对叶用莴苣色素含量的影响

Table 3 Effect of supplementary light quality on pigments content of lettuce

处理	叶绿素a/mg·g <sup>-1</sup> (FW)	叶绿素b/mg·g <sup>-1</sup> (FW)	叶绿素a+b/mg·g <sup>-1</sup> (FW)	叶绿素a/b	类胡萝卜素/mg·g <sup>-1</sup> (FW)
W (CK)	0.52±0.03 <sup>b</sup>	0.12±0.01 <sup>b</sup>	0.64±0.04 <sup>b</sup>	4.35±0.20 <sup>a</sup>	0.12±0.007 <sup>b</sup>
WR	0.54±0.02 <sup>b</sup>	0.12±0.01 <sup>b</sup>	0.67±0.04 <sup>b</sup>	4.36±0.34 <sup>a</sup>	0.13±0.006 <sup>b</sup>
WB	0.42±0.01 <sup>c</sup>	0.09±0.008 <sup>c</sup>	0.52±0.02 <sup>c</sup>	4.73±0.35 <sup>a</sup>	0.10±0.003 <sup>c</sup>
WRB	0.63±0.03 <sup>a</sup>	0.14±0.01 <sup>a</sup>	0.78±0.04 <sup>a</sup>	4.39±0.17 <sup>a</sup>	0.15±0.005 <sup>a</sup>

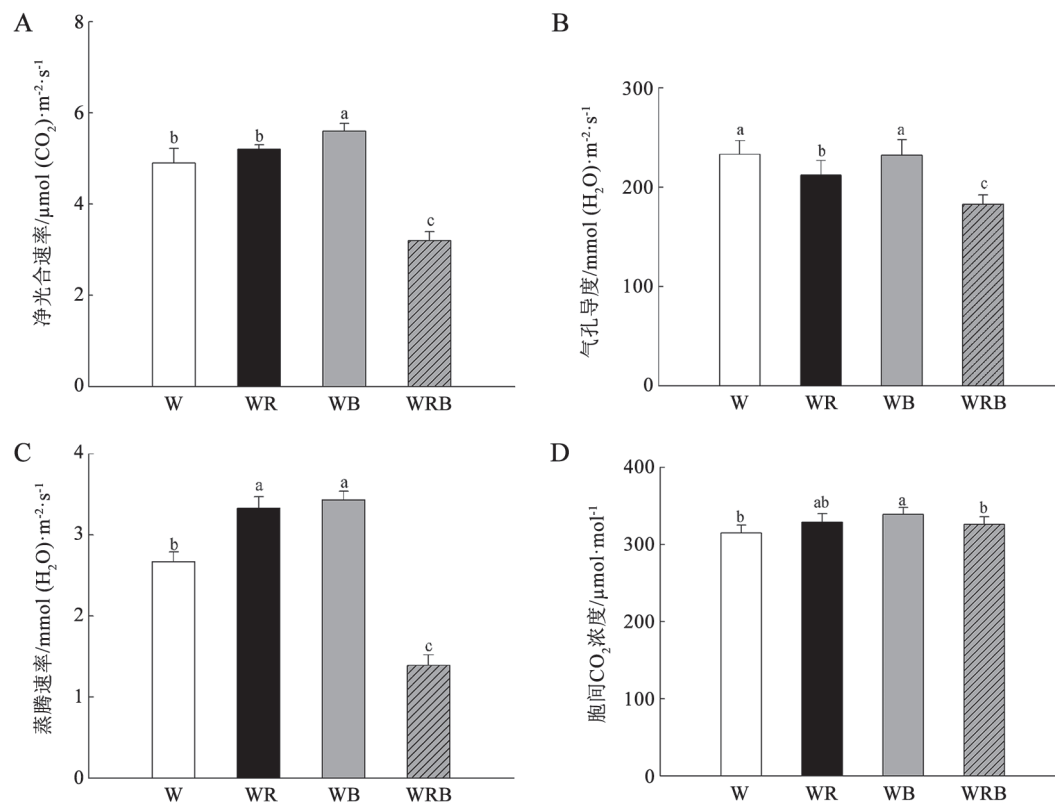


图1 补光光质对叶用莴苣气体交换参数的影响

Fig.1 Effect of supplementary light quality on gas exchange parameters of lettuce

莴苣的气孔导度( $G_s$ )较大,而WR和WRB处理的 $G_s$ 显著低于CK(图1-B)。蒸腾速率( $T_r$ )则为WR、WB均显高于对照,WRB则显著低于CK(图1-C)。胞间 $\text{CO}_2$ 浓度( $C_i$ )除白+蓝(WB)处理明显高于CK外,其他处理均与CK无显著差异(图1-D)。

#### 2.4 补光光质对叶用莴苣光饱和点、光补偿点及表观量子效率的影响

由表4可以看出,光饱和点各处理之间差异不显著,说明各处理下叶用莴苣对强光的耐性一致;WB处理下的叶用莴苣光补偿点最高,其他三个处理无显著性差异,说明补充蓝光的叶用莴苣对弱光的

利用能力有所下降。WRB处理下表观量子效率和最大光合速率较其他处理均显著下降,说明同时补充红光和蓝光不利于叶用莴苣对光能的有效利用。

#### 2.5 补光光质对叶用莴苣的羧化效率和RuBP羧化酶活性的影响

羧化效率(CE)可代表叶片中活化的Rubisco量的多少,反映植株对胞间 $\text{CO}_2$ 的利用能力。图2-A表明,白+红(WR)、白+蓝(WB)处理下叶用莴苣的羧化效率显著大于CK,分别较CK提高18.6%和16.5%,白+红+蓝(WRB)处理下叶用莴苣的羧化效率显著小于CK,较CK降低了8.2%,且白+红(WR)、



表4 补光光质对叶用莴苣光合参数影响

Table 4 Effects of supplementary light quality on the photosynthetic parameters of lettuce

处理	光饱和点/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	光补偿点/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	表观量子效率(AQY)	最大光合速率( $A_{\text{max}}$ )
W (CK)	552±7.77 <sup>a</sup>	53.36±0.87 <sup>c</sup>	0.0275±0.003 <sup>a</sup>	13.3±0.28 <sup>a</sup>
WR	545±41.7 <sup>a</sup>	56.99±0.87 <sup>b</sup>	0.0233±0.001 <sup>a</sup>	13.3±1.13 <sup>a</sup>
WB	601±15.5 <sup>a</sup>	63.15±0.98 <sup>a</sup>	0.0225±0.001 <sup>a</sup>	13.2±0.98 <sup>a</sup>
WRB	583±4.24 <sup>a</sup>	49.18±1.39 <sup>d</sup>	0.0197±0.001 <sup>b</sup>	11.8±0.35 <sup>b</sup>

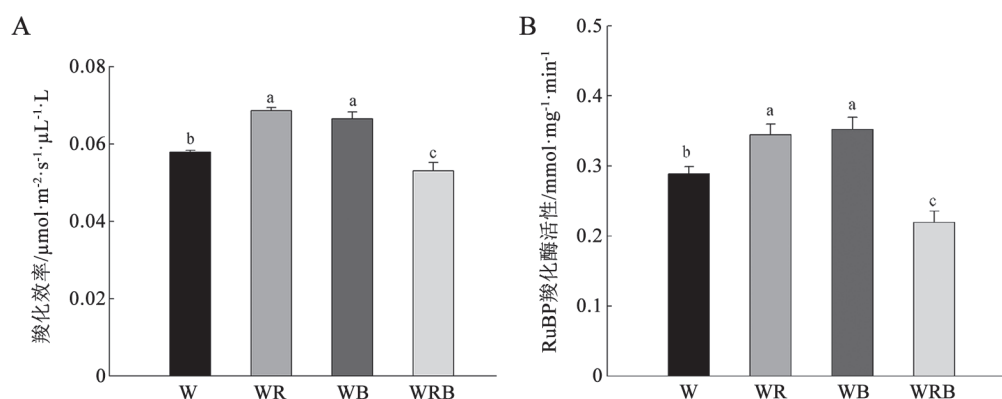


图2 补光光质对叶用莴苣羧化效率(CE)和RuBP羧化酶活性的影响

Fig.2 Effects of supplementary light quality on carboxylation efficiency and RuBP carboxylase activity of lettuce

白+蓝(WB)处理之间无显著性差异。Rubisco是光合碳同化的关键酶,其活性的高低直接影响植物的光合速率。不同LED光配方处理下,叶用莴苣叶片的Rubisco羧化酶活性的趋势与羧化效率一致(图2-B),说明补充红光或蓝光都能显著提高叶用莴苣叶片羧化效率和Rubisco羧化酶活性,从而提高光合性能,而同时补充红光和蓝光则不利于羧化反应的进行。

## 2.6 补光光质对叶用莴苣叶绿素快速荧光诱导动力学曲线及电子传递能力的影响

植物快速叶绿素荧光诱导曲线O-J-I-P中包含着大量关于PSII反应中心原初光化学反应的信息,通过对曲线荧光参数的分析,可以知道在环境因子影响下植物材料光合机构的变化(李鹏民等2005)。图3中A表示时间坐标对数化后的叶绿素荧光诱导曲线, B则表示标准化后的叶绿素荧光诱

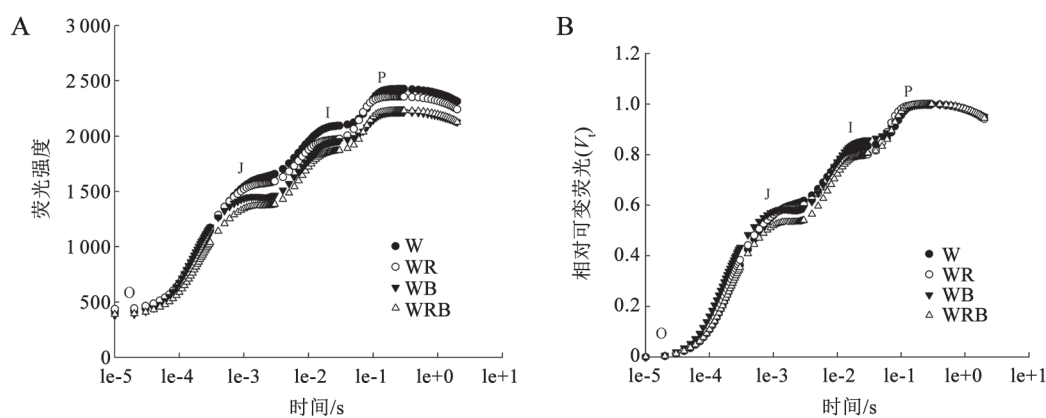


图3 补光光质对叶用莴苣O-J-I-P荧光诱导曲线的影响

Fig.3 Effect of supplementary light quality on the fluorescence curve O-J-I-P of lettuce

导曲线。O点是PSII作用中心完全开放时,即所有的电子受体( $Q_A$ 、 $Q_B$ 、PQ等)处于最大程度氧化态时的荧光, O点荧光强弱与天线色素含量的多少及作用中心的活性状态有关。各处理在O点处无显著性差异,说明在O点处作用中心活性状态无差异。J点是PSII的电子受体 $Q_A$ 第一次被完全还原时的荧光,各处理在J点处较CK都有所下降,说明电子从 $Q_A$ 向 $Q_B$ 的传递顺畅。I点反应了PQ库的异质性,即快还原型PQ库和慢还原型PQ库的大小,各处理I点处与J点一致,都低于CK,说明不同光质下各处理慢还原型PQ的比例减少,所以I点下降。P点反应了PSII的电子受体( $Q_A$ 、 $Q_B$ 、PQ等)处于最大程度还原态时的荧光,各处理在P点无显著性差异。

通过JIP-测定可以分析光合机构的比活性,即活跃的单位反应中心(RC)的各种量子效率,其可以更确切地反映植物的光合器官对光能的吸收、转化和耗散等状况(李鹏民等2005),  $ABS/RC$ 、 $TR_o/RC$ 、 $ET_o/RC$ 、 $RE_o/RC$ 分别反映PSII吸收电子、捕获电子、传递电子、传递到PSI末端的能力(Strasser等2004)。由表5可知,白+蓝(WB)处理下叶用莴苣叶片PSII吸收、捕获电子的能力显著大于CK,其他处理与CK无显著性差异。电子传递则是白+蓝(WB)、白+红+蓝(WRB)处理显著大于对照,白+红(WR)处理与对照无显著差异。在PSII电子传递的最后一环,不同处理与之前趋势不一致,

白+红(WR)、白+红+蓝(WRB)处理下叶用莴苣从PSII传递到PSI末端的能力显著优于对照,白+蓝(WB)处理与CK无显著性差异。

## 2.7 补光光质对叶用莴苣叶片叶绿素荧光参数的影响

由表6可见,  $F_v/F_m$ 是暗适应下PSII最大光化学效率,各光配方处理下叶用莴苣的 $F_v/F_m$ 均与CK无显著差异。白+红(WR)、白+蓝(WB)处理下叶用莴苣的实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )与CK无显著性差异,白+红+蓝(WRB)处理下叶用莴苣 $\Phi_{PSII}$ 显著小于CK。不同LED光配方处理下,开放的PSII反应中心激发能捕获效率( $F_v'/F_m'$ ),除白+红(WR)处理与CK无显著性差异外,其他两个处理均显著小于CK。白+蓝(WB)处理下叶用莴苣的PSII反应中心的开放程度( $qP$ )显著小于CK,其他两个处理与CK均无显著性差异,然而不同光配方处理下叶用莴苣叶片的PSII反应中心的关闭程度( $NPQ$ )差异显著,白+红+蓝(WRB)处理下叶用莴苣PSII关闭程度最严重,白+红(WR)处理次之,白+蓝(WB)处理则是开放程度最大。 $ETR$ 定量体现PSII的电子传递效率,从表6可知,白+红(WR)、白+蓝(WB)处理下PSII的电子传递效率显著大于CK,白+红+蓝(WRB)处理下叶用莴苣PSII的电子传递效率最小。因此,补充红光或蓝光有利于提高叶用莴苣叶片的光化学效率,增强PSII中心活性。

## 讨 论

光合色素是光合作用的基础(Tholen等2007; 张秋英等2005; 杨富军等2013),气孔导度影响光合作用中底物 $CO_2$ 的传导,光质直接影响着色素的合成,对气孔大小、数目、开闭有调节作用(郑洁等2008)。蓝光和红光处理下的豌豆幼苗和黄瓜幼苗叶绿素含量显著大于对照(刘文科等2012),而本实验中白+红+蓝处理下,叶绿素a、叶绿素b和类胡

表5 补光光质对叶用莴苣电子传递能力的影响

Table 5 Effect of supplementary light quality on the electron transfer ability of lettuce

处理	$ABS/RC$	$TR_o/RC$	$ET_o/RC$	$RE_o/RC$
W (CK)	2.47±0.07 <sup>b</sup>	2.13±0.13 <sup>b</sup>	0.82±0.05 <sup>b</sup>	0.357±0.02 <sup>b</sup>
WR	2.65±0.05 <sup>b</sup>	2.23±0.07 <sup>b</sup>	0.83±0.04 <sup>b</sup>	0.432±0.02 <sup>a</sup>
WB	2.97±0.06 <sup>a</sup>	2.44±0.12 <sup>a</sup>	0.93±0.06 <sup>a</sup>	0.342±0.01 <sup>b</sup>
WRB	2.49±0.05 <sup>b</sup>	2.15±0.05 <sup>b</sup>	0.91±0.04 <sup>a</sup>	0.426±0.02 <sup>a</sup>

表6 补光光质对叶用莴苣叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 6 Effects of supplementary light quality on the chlorophyll fluorescence parameters of lettuce

处理	$F_v/F_m$	$F_v'/F_m'$	$\Phi_{PSII}$	$qP$	$NPQ$	$ETR$
W (CK)	0.853±0.004 <sup>a</sup>	0.613±0.01 <sup>a</sup>	0.352±0.02 <sup>a</sup>	0.574±0.02 <sup>b</sup>	2.356±0.003 <sup>c</sup>	122.08±3.61 <sup>c</sup>
WR	0.851±0.007 <sup>a</sup>	0.658±0.01 <sup>a</sup>	0.375±0.02 <sup>a</sup>	0.575±0.02 <sup>b</sup>	2.400±0.007 <sup>b</sup>	139.66±1.82 <sup>a</sup>
WB	0.849±0.002 <sup>a</sup>	0.566±0.01 <sup>b</sup>	0.367±0.02 <sup>a</sup>	0.621±0.01 <sup>a</sup>	2.180±0.006 <sup>d</sup>	128.91±2.33 <sup>b</sup>
WRB	0.854±0.005 <sup>a</sup>	0.518±0.03 <sup>c</sup>	0.296±0.02 <sup>b</sup>	0.555±0.01 <sup>b</sup>	2.982±0.012 <sup>a</sup>	101.58±1.01 <sup>d</sup>

萝卜素的含量显著大于其他处理, 与王虹等(2010)、占镇等(2014)、洪佳华等(1995)等研究结果一致, 可能是由于白+红+蓝处理下的叶用莴苣植株相对矮小、紧凑导致的“浓缩机制”, 其色素含量虽然高, 但其净光合速率、羧化效率却最低, 说明叶片光合能力的强弱不仅与色素含量有关(张秋英等2005), 还与气孔导度等其他因素有关系。

Kim等(2004)研究表明生菜在宽频光谱下气孔导度较大, 而本试验结果表明, 白+蓝处理下叶用莴苣的净光合速率和气孔导度最大, 叶用莴苣叶片中气孔对蓝光更为敏感, 白+蓝处理下叶用莴苣叶片的光补偿点也最高, 说明在蓝光下生长的植物一般具有阳生植物的特性(蒲高斌等2005; 许莉等2007)。从表2数据也可以看出, 白+蓝处理下莴苣的鲜重大于对照, 而干重与对照差异不显著, 暗示补充蓝光可提高净光合速率, 也有助于提高植株的含水量, 其生理机制有待进一步研究。白+蓝处理下叶用莴苣的羧化效率与RuBP羧化酶活性趋势一致, 高于其他处理, 这与柯学等(2012)在烟草中的结果一致。Hogewoning等(2010)研究表明, 在红光中添加一定比例的蓝光可以有效增大黄瓜的净光合速率。Li和Kubota (2009)研究表明, 白光基础上补充蓝光可以增加生菜叶片中类胡萝卜素和叶黄素含量, 而补充红光可以增加生菜抗氧化能力。闻婧等(2009)等研究表明, 红蓝比为8:1时, 有利于生菜叶片中类胡萝卜素的积累, 有效降低生菜叶片中的硝酸盐含量, 增加生菜叶片中Vc含量。在同样光强( $300 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )下菠菜、小萝卜和莴苣生长21 d后, 在白光(冷白荧光灯)下生长的植株叶片光合速率、气孔导度和植株总干重都高于红光(LED)、红光(LED)+蓝光(荧光灯, 10%蓝光)下生长的植株, 仅红光补充蓝光还不足以实现最大生长(Yorio等2001)。本试验结果表明, 白+蓝处理下叶用莴苣的净光合速率和羧化效率最大, 白+红+蓝处理却最小, 可能是因为白+蓝、白+红+蓝两种处理中蓝光所占比例不同所致, 白+蓝处理中, 蓝光较对照增加了17.9%, 白+红+蓝处理中蓝光较对照增加了30%, 说明补充蓝光可在一定程度上增加气孔导度, 提高羧化效率, 从而提高光合能力, 但是净光合速率增加与蓝光比例的增加也不是成正相关的关系, 超过阈值反而会使光合速率

下降(Hogewoning等2010), 其具体临界值有待进一步研究。白+蓝处理的 $G_s$ 与对照差异不显著, 而 $C_i$ 显著高于对照, 暗示补充蓝光在一定程度上降低了二氧化碳的同化, 但羧化效率、RuBP羧化酶活性和 $P_n$ 又高于对照, 这是否也与蓝光所占比例有关, 有待进一步研究。

快速叶绿素荧光诱导动力学曲线主要反映了PSII的原初光化学反应及光合机构的结构和状态等的变化, 而下降的阶段主要反映了光合碳代谢的变化, 随着光合碳代谢速率的上升, 荧光强度逐渐下降(Krause和Weis 1991; Strasser等2004)。光质通过影响不同类型叶绿体蛋白的形成以及光系统间电子传递来调节光合作用(Shin等2008)。白+蓝处理下叶用莴苣 $qP$ 、 $ABS/RC$ 、 $TR_o/RC$ 、 $ET_o/RC$ 最大, 说明白+蓝光处理下PSII开放程度大, 吸收、捕获及传递电子的能力强, 即PSII活性高。白+红处理下 $ETR$ 最大, 说明白+红处理下PSII电子传递效率最大, 与快速叶绿素荧光曲线中的 $RE_o/RC$ 相吻合, 说明白+红光处理能增强PSII传递电子到PSI末端的能力, 这与储钟稀(储钟稀等1999)等研究一致, 即在白光基础上添加红光或蓝光有利于提高PSII的活性, 促进叶用莴苣的原初光化学反应和光合碳代谢, 提高光合性能。

因此, 可将红光或蓝光作为单色光用于叶用莴苣的补光栽培, 以提高光合性能, 增加产量。

## 参考文献

- 储钟稀, 童哲, 冯丽洁, 张群, 温晓刚, 宋森田, 朱孝凤(1999). 不同光质对黄瓜叶片光合特性的影响. 植物学报, 41 (8): 867-870
- 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
- 洪佳华, 马月华, 刘明孝, 王铁生, 王化民, 孟繁莹(1995). 光强、光质对人参光合的影响. 中国农业气象, 16 (1): 19-22
- 柯学, 李军营, 徐超华, 龚明(2012). 不同光质对烟草叶片组织结构及Rubisco羧化酶活性和 $rbc$ 、 $rca$ 基因表达的影响. 植物生理学报, 48 (3): 251-259
- 李合生(2002). 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社
- 李鹏民, 高辉远, Strasser RJ (2005). 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用. 植物生理与分子生物学学报, 31 (6): 559-566
- 李韶山, 潘瑞焜(1994). 蓝光对水稻幼苗生长效应的研究. 中国水稻科学, 8 (2): 115-118
- 刘建福, 王明元, 唐源江, 范燕萍, 钟书淳, 陈钦(2014). 光质对姜黄生理特性及根茎次生代谢的影响. 植物生理学报, 50 (12):

- 1871~1879
- 刘文科, 杨其长, 邱志平, 赵姣姣(2012). LED光质对豌豆苗生长光合色素和营养品质的影响. 中国农业气象, 33 (4): 500~504
- 宁宇, 邓惠惠, 李清明, 米庆华, 韩宾, 艾希珍(2015). 红蓝光质对芹菜碳氮代谢及其关键酶活性的影响. 植物生理学报, 51 (1): 112~118
- 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
- 王虹, 姜玉萍, 师恺, 周艳虹, 喻景权(2010). 光质对黄瓜叶片衰老与抗氧化酶系统的影响. 中国农业科学, 43 (3): 529~534
- 魏灵玲, 杨其长, 刘水利(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
- 闻婧, 鲍顺淑, 杨其长, 崔海信(2009). LED光源R/B对叶用莴苣生理性状及品质的影响. 中国农业气象, 30 (3): 413~416
- 许大全, 高伟, 阮军(2015). 光质对植物生长发育的影响. 植物生理学报, 51 (8): 1217~1234
- 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
- 徐文栋, 刘晓英, 焦学磊, 徐志刚(2015). 不同红蓝配比的LED光调控黄瓜幼苗的生长. 植物生理学报, 51 (8): 1273~1279
- 杨富军, 赵长星, 闫萌萌, 王月福, 王铭伦(2013). 栽培方式对夏直播花生叶片光合特性及产量的影响. 应用生态学报, 24 (3): 747~752
- 占镇, 李军营, 马二登, 张云贵, 彭友, 李志宏(2014). 不同光质对烤烟质体色素含量及相关酶活性的影响. 中国烟草科学, 35 (2): 49~54
- 张秋英, 李发东, 刘孟雨(2005). 冬小麦叶片叶绿素含量及光合速率变化规律的研究. 中国生态农业学报, 13 (3): 95~98
- 郑洁, 胡美君, 郭延平(2008). 光质对植物光合作用的调控及其机理. 应用生态学报, 19 (7): 1619~1642
- Dissanayake P, George DL, Gupta ML (2010). Effect of light, gibberellic acid and abscisic acid on germination of guayule (*Parthenium argentatum* Gray) seed. Ind Crop Prod, 32 (2): 111~117
- Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W, Harbinson J (2010). Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. J Exp Bot, 61 (11): 3107~3117
- Kim HH, Goins GD, Wheeler RM, Sager JC (2004). Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. Ann Bot, 94 (5): 691~697
- Krause GH, Weis E (1991). Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: The basics. Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 42 (1): 313~349
- Li Q, Kubota C (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environ Exp Bot, 67 (1): 59~64
- Saebo A, Krekling T, Appelgren M (1995). Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets *in vitro*. Plant Cell Tiss Org Cult, 41 (2): 177~185
- Shin K, Murthy H, Heo J, Hahn E, Paek K (2008). The effect of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured doriaenopsis plants. Acta Physiol Plant, 30 (3): 339~343
- Strasser RJ, Tsimill-Michael M, Srivastava A (2004). Analysis of the chlorophyll a fluorescence transient. In: Papageorgiou GC, Govindjee (eds). A Signature of Photosynthesis. The Netherlands: KAP Press, 1~42
- Tholen D, Pons TL, Voeselek LACJ, Poorter H (2007). Ethylene insensitivity results in down-regulation of rubisco expression and photosynthetic capacity in tobacco. Plant Physiol, 144 (3): 1305~1315
- Yorio NC, Goins GD, Kagie HR (2001). Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. HortScience, (36): 380~383