

## LED红蓝光连续光照对五种生菜生长、光合和叶绿素荧光特性的影响

查凌雁, 刘文科\*

中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 农业部设施农业节能与废弃物处理重点实验室, 北京100081

**摘要:** 在环境可控的人工光植物工厂内, 以常规光照(光周期12 h/12 h、光强 $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , NL)为对照, 研究了LED红蓝光连续光照(光周期24 h/0 h、光强 $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , CL)对5种水培生菜生长、光合气体交换参数和叶绿素荧光特性的影响。结果表明, 与NL处理相比, CL处理15 d后5种生菜的地上部和根系干鲜重及干鲜比均显著增加。除‘紫悦’外4种生菜CL处理的茎粗、叶厚、比叶重、叶面积和叶片叶绿素含量均显著高于NL处理。除‘绿罗’外4种生菜CL处理的净光合速率相比NL显著下降。CL处理下5种生菜的气孔导度, ‘大速生’和‘紫珊’的胞间 $\text{CO}_2$ 浓度以及其余3种生菜的蒸腾速率均显著低于NL处理。CL处理下‘紫珊’的初始荧光( $F_0$ )和最大荧光产量( $F_m$ )以及‘绿罗’生菜的 $F_m$ 略有降低, 其余品种的 $F_0$ 和 $F_m$ 略有升高或无显著差异。CL处理使‘紫珊’生菜的PSII最大光化学效率( $F_v/F_m$ )和PSII潜在光化学效率( $F_v/F_0$ )显著降低, 其余品种略有降低或无显著变化。总之, CL处理15 d能够显著促进生菜生长, 但会导致光合速率的下降及不同程度的光抑制。5种生菜对CL光照适应性存在显著差异, 其中‘绿罗’生菜对CL的适应性最强。

**关键词:** LED; 连续光照; 光合气体交换参数; 叶绿素荧光; 生菜品种

光周期是调控植物生长发育的重要环境因子, 人工光下植物光周期可按照生产需求调制, 可以打破自然的昼夜明暗期变化, 获得较长照射时长甚至连续光照环境。通常, 连续光照是指打破植物24 h明暗期交替的光照模式, 给植物提供连续24 h的光照条件(Sysoeva等2010; Velez-Ramirez等2011)。研究证实, 连续光照能够显著提高设施栽培作物的产量(Ohyama等2005; Demers等1998)和品质(李海云等2009a, b; 周晚来等2011)、缩短生育周期(Gaudreau等1994), 在设施园艺人工光植物生产中具有潜在应用价值。传统光源如荧光灯、金属卤化物灯可以实施连续光照, 但无法调控光照的光质组成和光强大小。相比传统光源, 新型半导体LED光源在进行连续光照时, 可按生产需求调制光质和光强, 能更好地研究连续光照下园艺作物对连续光照的生理响应机理, 其研究结果也能为制定LED光照配方和照明策略提供生物学依据。

生菜是一种全球性蔬菜, 在设施园艺中栽培广泛。因生菜株型低矮、品种多样、生长速度快, 尤其适合在人工光植物工厂中规模化生产, 其栽培效率是露地生产的几十倍。光环境调控在人工光植物工厂水培生菜优质高产方面具有不可或缺的应用价值。研究表明, LED红蓝光能够较好地满足水培叶菜高产需求, 而且通过采收前连续光照处理也能降低叶菜中硝酸盐含量, 提高维生素C和可溶性糖的含量(Zhou等2012, 2013)。周晚来等(2011)、余意等(2015)研究表明短期连续光照(24–

72 h)能够提高生菜生物量、改善品质。因此, 通过连续光照调控设施栽培生菜的产量及品质对于实际生产意义重大。目前, 植物工厂栽培生菜品种繁多, 但不同品种生菜对连续光照的适应能力尚不清楚, 尤其是长期连续光照下的适宜程度有待考察。为了实现连续光照下生菜的优质高产, 必须筛选出适宜连续光照的生菜品种。此外, 有关长期连续光照对生菜生长和光合作用的影响及其品种差异机制尚不清楚, 有必要弄清并确立连续光照的应用策略。

因此, 在环境可控的植物工厂中, 本试验研究了LED红蓝光连续光照对5种水培生菜生长、光合气体交换参数及叶绿素荧光参数的影响, 以期从光合作用与叶绿素荧光角度来探明不同品种生菜对连续光照的适应性, 为植物工厂连续光照生产运用提供参考。

### 材料与方法

#### 1 试验材料

试验于2016年12月~2017年1月在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所试验植物工厂内进行。试验材料为生菜(*Lactuca sativa* L.), 供试品种为‘意大利耐抽薹’、‘绿罗’、‘美国大速生’、

收稿 2017-05-08 修定 2017-08-01

资助 国家自然科学基金(31672202)和国家高技术研究发展计划(“863”计划)(2013AA103001)。

\* 通讯作者(E-mail: liuwenke@caas.cn)。

‘汉斯206-紫悦’、‘紫珊’(后文简称:‘意大利’、‘绿罗’、‘大速生’、‘紫悦’、‘紫珊’)。5个品种生菜种类分别为绿叶结球生菜、绿叶直立生菜、绿叶皱叶生菜、紫叶直立生菜和紫叶直立生菜。2016年12月播种,育苗基质为蛭石,在光强 $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的白色LED灯下育苗至两叶一心(12月13日)后,移栽至水培槽( $45 \text{ cm}\times 45 \text{ cm}\times 10 \text{ cm}$ )中进行光照处理,每个处理移栽一槽,每槽移栽13株。营养液配方( $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ):  $0.75 \text{ K}_2\text{SO}_4$ 、 $0.5 \text{ KH}_2\text{PO}_4$ 、 $0.1 \text{ KCl}$ 、 $0.65 \text{ MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $1.0\times 10^{-3} \text{ H}_3\text{BO}_3$ 、 $1.0\times 10^{-3} \text{ MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ 、 $1.0\times 10^{-4} \text{ CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $1.0\times 10^{-3} \text{ ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 、 $5\times 10^{-6} (\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 、 $0.1 \text{ EDTA-Fe}$ 、 $3 \text{ Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (pH: 6.39; EC:  $928 \mu\text{m}\cdot\text{cm}^{-1}$ )。栽培环境温度为 $(25\pm 1)^\circ\text{C}/(22\pm 1)^\circ\text{C}$ (昼/夜),相对湿度为 $(65\pm 5)\%$ ,  $\text{CO}_2$ 浓度为大气 $\text{CO}_2$ 浓度。

## 2 试验设计

选用LED红蓝光组合灯板进行光照处理,灯板尺寸为 $50 \text{ cm}\times 50 \text{ cm}$ ,红光LED芯片主波长 $619 \text{ nm}$ ,蓝光芯片主波长为 $458 \text{ nm}$ 。每个品种设置2个光照处理:常规光照(normal light, NL)和连续光照(continuous light, CL)(见表1),5个品种共10个处理。每块灯板下放置一个栽培槽。采用LI 1500辐射照度测量仪和LI-190R光合有效辐射传感器(美国LI-COR公司)测定栽培槽中心上方 $5 \text{ cm}$ 处光强,通过光强调节旋钮先将蓝光光强调至测得光强为 $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,再调节红光光强,直至总光强达 $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

表1 试验光照处理方案

Table 1 The details of light treatments

光照处理	光周期/h	光强/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	光质比例(R:B)
常规光照(NL)	12/12	240	3:1
连续光照(CL)	24/0	240	3:1

## 3 取样与测定方法

移栽后15 d每个处理随机选择长势具有代表性的3株生菜测量地上部及根系干鲜重、叶厚、茎粗、叶面积、比叶重、叶绿素含量、光合气体交换及叶绿素荧光参数。叶厚、茎粗采用游标卡尺直接测量;叶面积测量采用剪纸称重法;比叶重采用直径 $7.5 \text{ mm}$ 的叶片打孔器打孔并称鲜重后计算得出;叶绿素含量采用SPAD-502叶绿素含量测定仪测定,分别在移栽后8和15 d各测1次;采用便携式光合仪(LI-6400XT, Lincoln, NE, USA)测定光合气体交换参数及荧光参数,光合气体交换参数测定时光合仪光参数设定为: $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、3R:1B。叶绿素荧光参数测定前植株暗适应 $20 \text{ min}$ 。

## 4 数据处理

采用Microsoft Excel 2013软件对数据进行处理,采用SPSS 16.0统计分析软件对数据进行差异性检验(LSD法,  $\alpha=0.05$ )。

## 实验结果

### 1 连续光照对5种生菜干鲜重的影响

由表2可知,与NL处理相比,CL处理15 d显著

表2 LED红蓝光连续光照对5种生菜干鲜重的影响

Table 2 Effect of continuous light on the fresh and dry weight of five lettuce cultivars

品种	光照处理	鲜重/g		干重/g		干鲜比/%
		地上部	根系	地上部	根系	
‘意大利’	NL	$7.9\pm 0.2^{\text{fg}}$	$2.2\pm 0.1^{\text{e}}$	$0.34\pm 0.01^{\text{e}}$	$0.07\pm 0.00^{\text{ef}}$	$4.1\pm 0.2^{\text{f}}$
	CL	$18.1\pm 1.4^{\text{b}}$	$4.6\pm 0.1^{\text{b}}$	$0.91\pm 0.11^{\text{b}}$	$0.19\pm 0.01^{\text{b}}$	$4.8\pm 0.2^{\text{de}}$
‘绿罗’	NL	$7.0\pm 0.6^{\text{g}}$	$1.4\pm 0.1^{\text{f}}$	$0.33\pm 0.03^{\text{e}}$	$0.06\pm 0.00^{\text{f}}$	$4.6\pm 0.0^{\text{e}}$
	CL	$15.2\pm 0.4^{\text{c}}$	$3.8\pm 0.0^{\text{c}}$	$0.84\pm 0.04^{\text{bc}}$	$0.16\pm 0.00^{\text{b}}$	$5.3\pm 0.1^{\text{bc}}$
‘大速生’	NL	$11.8\pm 0.3^{\text{d}}$	$2.5\pm 0.1^{\text{de}}$	$0.54\pm 0.02^{\text{d}}$	$0.10\pm 0.00^{\text{d}}$	$4.5\pm 0.0^{\text{ef}}$
	CL	$23.3\pm 0.9^{\text{a}}$	$5.4\pm 0.4^{\text{a}}$	$1.23\pm 0.04^{\text{a}}$	$0.24\pm 0.01^{\text{a}}$	$5.1\pm 0.1^{\text{cd}}$
‘紫悦’	NL	$6.2\pm 0.1^{\text{gh}}$	$1.5\pm 0.1^{\text{f}}$	$0.29\pm 0.01^{\text{e}}$	$0.05\pm 0.00^{\text{f}}$	$4.4\pm 0.1^{\text{ef}}$
	CL	$9.2\pm 0.7^{\text{ef}}$	$2.0\pm 0.2^{\text{e}}$	$0.49\pm 0.04^{\text{d}}$	$0.08\pm 0.01^{\text{de}}$	$5.1\pm 0.2^{\text{cd}}$
‘紫珊’	NL	$4.6\pm 0.5^{\text{h}}$	$1.3\pm 0.1^{\text{f}}$	$0.27\pm 0.02^{\text{e}}$	$0.05\pm 0.00^{\text{f}}$	$5.4\pm 0.1^{\text{b}}$
	CL	$11.0\pm 0.1^{\text{de}}$	$2.9\pm 0.3^{\text{d}}$	$0.72\pm 0.00^{\text{c}}$	$0.13\pm 0.01^{\text{c}}$	$6.1\pm 0.1^{\text{a}}$

同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ );表中每个值均以平均值 $\pm$ 标准误差表示( $n=3$ );表3同。

提高了5个生菜品种地上部和根系的干鲜重。除‘紫悦’外其余4个生菜品种的地上部和根系干鲜重均增加了近1倍及以上(97%~171%)。地上部和根系鲜重增加比例最高的分别是‘紫珊’和‘绿罗’品种,分别为139%和171%。地上部和根系干重增加比例最高的均是‘意大利’生菜,分别为168%和171%。‘紫悦’地上部和根系干鲜重增加比例均为最低(48%~69%)。且5种生菜CL处理后的干重增加比例均高于其鲜重增加比例。CL处理显著提高了5个品种生菜的干鲜比。

## 2 连续光照对5种生菜形态指标与叶绿素含量的影响

由表3可知,与NL处理相比,CL处理15 d显著提高了除‘紫悦’外其余4个品种生菜的茎粗、叶厚和比叶重,增加比例分别为31%~46%、10%~35%和13%~30%。CL处理对‘紫悦’的茎粗、叶厚和比叶重均无显著影响,仅显著提高了‘紫悦’的叶面积。但‘紫悦’CL处理后叶面积增加比率仍为5个品种中最低(36%)。CL处理8 d(12月21日)时,5个品种生菜的叶片叶绿素含量均是CL处理显著高于

表3 LED红蓝光连续光照对5种生菜形态指标与叶绿素含量的影响

Table 3 Effect of continuous light on the morphology and chlorophyll content of five lettuce cultivars

品种	光照处理	茎粗/mm	叶厚/mm	比叶重/mg·cm <sup>-2</sup>	叶面积/cm <sup>2</sup>	叶绿素含量(SPAD值)	
						12月21日	12月28日
‘意大利’	NL	4.37±0.14 <sup>c</sup>	0.27±0.03 <sup>c</sup>	28.4±1.3 <sup>bc</sup>	150±14 <sup>gh</sup>	23.1±0.3 <sup>g</sup>	24.6±1.9 <sup>f</sup>
	CL	6.19±0.17 <sup>a</sup>	0.35±0.02 <sup>a</sup>	36.9±0.8 <sup>a</sup>	249±30 <sup>cd</sup>	32.7±0.6 <sup>e</sup>	33.1±0.5 <sup>d</sup>
‘绿罗’	NL	3.84±0.15 <sup>d</sup>	0.23±0.01 <sup>d</sup>	26.1±1.4 <sup>cd</sup>	180±26 <sup>fg</sup>	38.5±0.3 <sup>d</sup>	40.9±0.8 <sup>c</sup>
	CL	5.51±0.11 <sup>b</sup>	0.31±0.01 <sup>b</sup>	30.9±2.0 <sup>b</sup>	272±9 <sup>c</sup>	51.7±0.6 <sup>a</sup>	52.3±1.9 <sup>a</sup>
‘大速生’	NL	3.84±0.18 <sup>d</sup>	0.20±0.01 <sup>ef</sup>	22.6±0.5 <sup>d</sup>	349±16 <sup>b</sup>	14.2±0.6 <sup>h</sup>	17.9±0.5 <sup>g</sup>
	CL	5.03±0.18 <sup>b</sup>	0.22±0.01 <sup>b</sup>	26.7±1.1 <sup>bcd</sup>	539±14 <sup>a</sup>	23.6±0.2 <sup>g</sup>	22.7±1.1 <sup>f</sup>
‘紫悦’	NL	3.78±0.32 <sup>d</sup>	0.31±0.01 <sup>b</sup>	27.9±1.7 <sup>bc</sup>	152±25 <sup>gh</sup>	29.0±0.4 <sup>f</sup>	30.9±1.9 <sup>e</sup>
	CL	3.87±0.61 <sup>d</sup>	0.31±0.01 <sup>b</sup>	29.5±3.6 <sup>bc</sup>	207±23 <sup>ef</sup>	42.8±1.2 <sup>b</sup>	41.8±1.2 <sup>c</sup>
‘紫珊’	NL	3.55±0.27 <sup>d</sup>	0.18±0.01 <sup>f</sup>	22.4±2.7 <sup>d</sup>	139±24 <sup>h</sup>	32.5±0.4 <sup>e</sup>	34.0±0.6 <sup>d</sup>
	CL	5.20±0.20 <sup>b</sup>	0.22±0.01 <sup>d</sup>	25.2±4.4 <sup>cd</sup>	232±14 <sup>de</sup>	40.6±0.5 <sup>c</sup>	45.2±0.4 <sup>b</sup>

NL处理。CL处理15 d(12月28日)时,随着光照处理时间的增加,5个品种生菜NL处理的叶绿素含量均维持着稳定增加的趋势,而CL处理下不同品种表现不一致。其中‘意大利’、‘绿罗’和‘紫珊’CL处理的叶绿素含量维持增加趋势,而‘大速生’和‘紫悦’CL处理的叶绿素含量均出现了下降现象。

## 3 相同DLI下连续光照对5种生菜光合气体交换参数的影响

由图1-A可知,与NL处理相比,15 d CL处理显著降低了除‘绿罗’外其余4个品种生菜的净光合速率( $P_n$ ),‘绿罗’生菜CL处理下的 $P_n$ 略低于NL处理,但差异不显著。CL处理下5个品种生菜相对于NL处理 $P_n$ 下降的比率由高到低依次是‘紫珊’(34%)、‘大速生’(28%)、‘紫悦’(17%)、‘意大利’(11%)和‘绿罗’(6%)。CL处理下‘大速生’和‘紫珊’的胞间CO<sub>2</sub>浓度( $C_i$ )显著低于NL处理,‘意大利’和‘紫悦’生菜略有降低(图1-B)。5个品种CL处理的气孔导度( $G_s$ )均显著低于NL处理(图1-C)。除‘大速生’和‘紫

珊’外其余品种的蒸腾速率( $T_r$ )均是CL处理的显著低于NL处理(图1-D)。

## 4 连续光照对5种生菜 $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_o$ 的影响

$F_o$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $F_v/F_o$ 是几个重要的叶绿素荧光参数。 $F_o$ 和 $F_m$ 是全部光系统II反应中心完全开放和完全关闭时的荧光强度。从图2-A可以看出15 d CL处理下‘意大利’和‘紫悦’生菜的 $F_o$ 分别略有上升和显著上升。CL对‘绿罗’和‘大速生’生菜的 $F_o$ 无显著影响,但略降低了‘紫珊’生菜的 $F_o$ 。CL处理下‘意大利’、‘大速生’和‘紫悦’生菜的 $F_m$ 略高于NL处理,但‘绿罗’和‘紫珊’生菜的 $F_m$ 略低于NL处理(图2-B)。 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_o$ 分别是光系统II的最大光化学效率和潜在活性。5个品种生菜CL处理的 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_o$ 值均低于NL处理,其中‘意大利’生菜CL和NL处理间无显著差异,而‘紫珊’生菜两个处理间差异显著。‘绿罗’和‘大速生’的 $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_o$ 以及‘紫悦’的 $F_v/F_m$ CL处理下略低于NL(图2-C和D)。

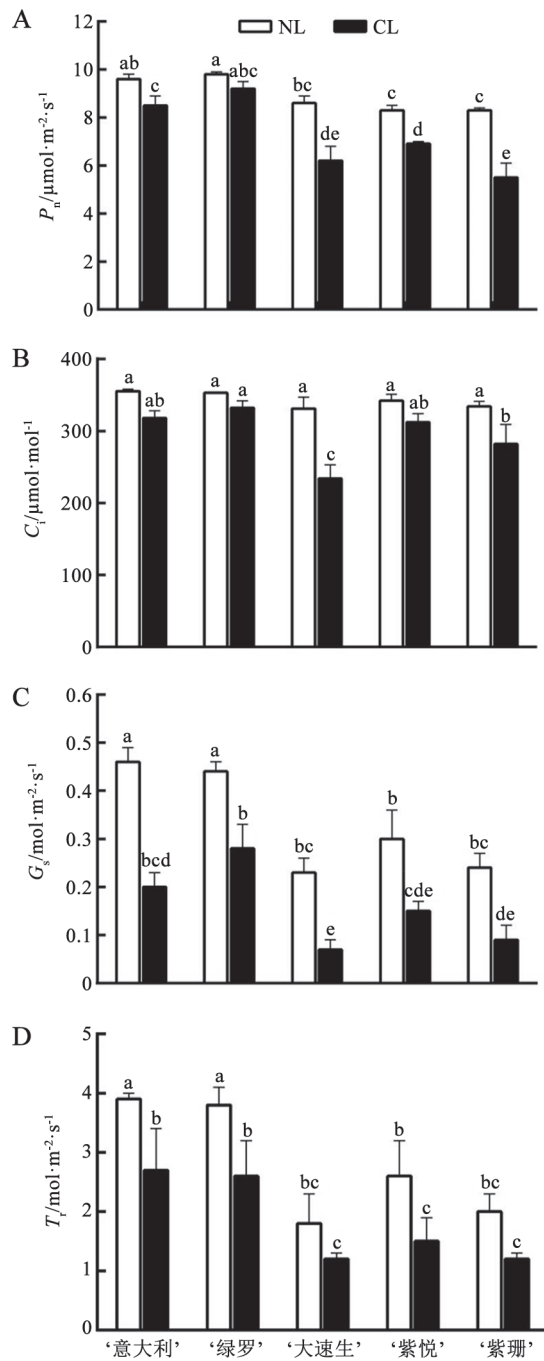


图1 LED红蓝光连续光照对5种生菜光合气体交换参数的影响

Fig.1 Effect of continuous light on the gas exchange parameters of five lettuce cultivars

图中数据表示为平均值 $\pm$ 标准误差,  $n=3$ , 同一指标各柱形上不同小写字母标识表示差异显著( $P < 0.05$ ), 图2同。

## 讨 论

CL处理最大限度地延长了植株生长的光合作

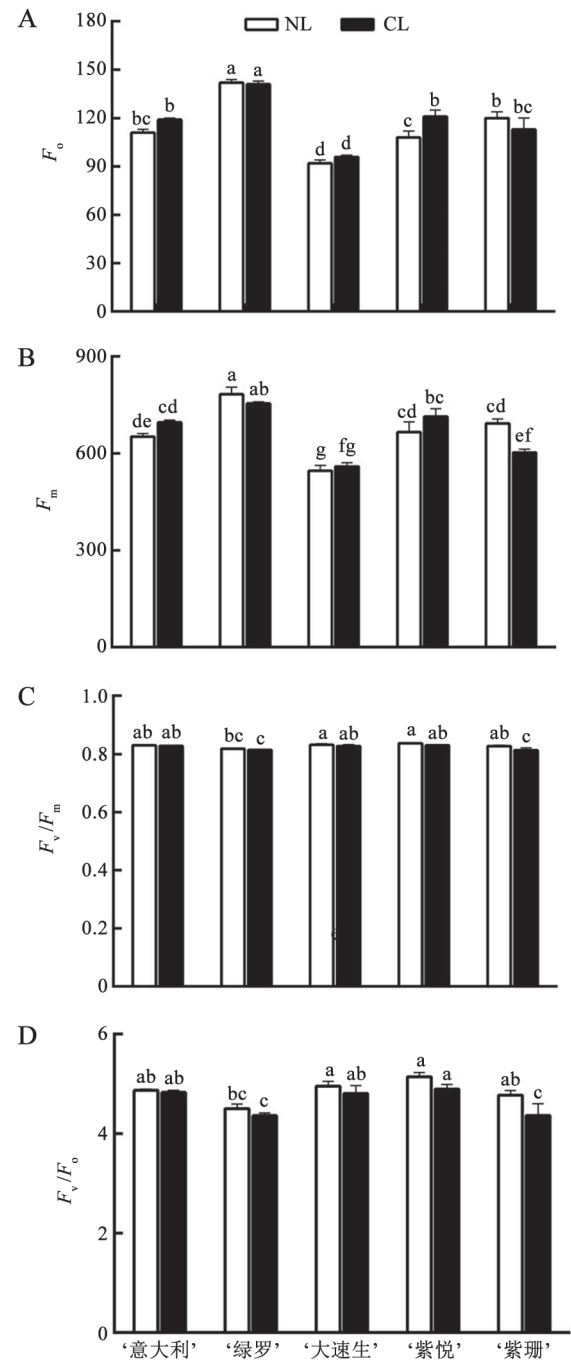


图2 LED红蓝光连续光照对5种生菜 $F_o$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 及 $F_v/F_o$ 的影响

Fig.2 Effect of continuous light on  $F_o$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$  and  $F_v/F_o$  of five lettuce cultivars

用时间, 因此适宜的CL理论上能够增加设施作物产量(Velez-Ramirez等2012)。本研究结果表明, 在光能投入增加1倍的情况下, 移栽15 d后CL处理能够显著提高5种生菜的地上部和根系干鲜重, 且除

‘紫悦’外均增加了近1倍及以上(97%~171%)。Kitaya等(1997)也提出在相同的光照强度下,将光照时间从16 h延长至24 h可使生菜干重增加25%~100%。说明与NL处理相比,生菜生长初期15 d的CL处理能获得相比光能增投幅度更高的生物量。吴泽英等(2015)也发现全光期比半光期照光下番茄植株干物质累积增加了近1倍的效应。此外,本研究结果还表明,相比鲜重,CL处理无论是对地上部还是根系干重的增加效果都更为显著。究其原因,可能是因为CL处理增加了光合作用的时间,同时避免了暗期的呼吸作用的消耗,从而增加了干物质的累积。干鲜比的增加同时也意味植株含水率的降低,Arve等(2013)研究发现番茄在CL处理下气孔的保水能力显著低于20 h光周期处理。上述试验结果表明在生菜生长初期,240  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 光强条件下,15 d的CL处理能够显著提高生菜干鲜重。

本研究中,CL处理下,除‘紫悦’外其余4个品种生菜的茎粗、叶厚、叶面积和比叶重显著增大。其中叶面积的增加比率最高(36%~67%),更接近鲜重的增加比率。且‘紫悦’生菜在CL处理下叶面积也显著增加了36%。说明5种生菜生物量的增加主要是由于叶面积的增大。Langton等(2003)也曾指出连续光照下,植物叶面积增大和单位面积的叶绿素显著升高可能是连续光照促进一些植物生物量增加的重要原因。

本研究中7 d CL处理显著提高了5种生菜的叶绿素含量,但随着光照处理时间增加,多个品种的叶绿素含量出现了下降的现象。Murage和Masuda(1997)发现茄子经CL处理4 d后出现叶片萎黄、叶绿素浓度迅速降低的现象,同时抗氧化酶活性也迅速增加。彭皎凤和张磊(2000)提出当植物光合器官吸收的光能超过光合作用所能利用的能量,则会引起光氧化,从而导致光合色素降解。说明在一定时间内CL处理能够提高叶绿素含量,但长期CL处理可能会破坏光合色素。本研究中CL处理下除‘绿罗’外4种生菜的 $P_n$ 显著低于NL处理。Stutte等(1996)研究发现,与12 h光照相比,24 h光照处理导致马铃薯叶片光合能力降低33%。研究证实CL处理对植物产生的不利影响除了引起叶片失绿外(Cushman和Tibbitts 1996),还会导致光合能力的降低(Petterson等2010; Van Gestel等2005)。引起

$P_n$ 降低的因素主要有气孔限制和非气孔限制两类(杨华庚和林位夫2009)。Farquhar和Sharkey(1982)观点,当 $G_s$ 和 $C_i$ 同时下降时, $P_n$ 的降低主要由气孔限制因素引起;而当叶片 $P_n$ 的降低伴随 $C_i$ 的提高和 $G_s$ 的降低时,可以判断光合作用的主要限制因素是非气孔因素,而是叶肉细胞光合活性的下降。本试验研究结果表明CL处理下4个品种生菜 $P_n$ 显著降低的同时均伴随着 $G_s$ 、 $C_i$ 、 $T_p$ 的降低,说明CL处理导致生菜光合速率的下降的主要原因可能是气孔因素,这与Rowell等(1999)报道的24 h光周期下花生的净光合速率和气孔导度均低于12 h光周期结果相似。除了气孔因素外,相关研究中也指出CL处理下植物光合速率的下降的原因是由于光合产物过量积累,对光合作用产生负反馈抑制(Demers等1998; Dorais等1996)以及活性氧生成导致光氧化伤害(Velez-Ramirez等2011)。本研究中CL处理下,生菜干重显著增加,可能就是光合产物大量积累的表现。由此可见,CL处理导致的植物光合能力的下降是多种原因综合作用的结果。

光合作用受到伤害的原初部位与PSII有密切关系。初始荧光( $F_0$ )是判断PSII反应中心运转情况的重要指标, $F_0$ 上升表明PSII反应中心受到破坏或失活(Xu等1999)。多种环境胁迫都会导致 $F_0$ 增加(吕星光等2016; 金立桥等2015)。最大荧光( $F_m$ )反映通过PSII的电子传递情况(张守仁1999)。李晶等(2011)研究表明, $F_m$ 值增加,说明叶绿素含量增加,叶绿素荧光发射能力提高。本试验结果表明CL处理下‘意大利’、‘大速生’和‘紫悦’的PSII反应中心受到破坏。PSII最大光化学效率 $F_v/F_m$ 作为反映PSII活性中心的光能转换效率参数,一般维持在 $0.832\pm 0.004$ ,只有在发生光抑制时才会降低(Krause和Weis 1991)。 $F_v/F_0$ 表示PSII的潜在活性。本试验CL处理下‘紫珊’、‘绿罗’和‘大速生’ $F_v/F_m$ 和 $F_v/F_0$ 显著或略有降低。这说明CL对‘紫珊’、‘绿罗’和‘大速生’生菜PSII反应中心产生抑制,PSII潜在活性降低。其中‘绿罗’和‘大速生’生菜PSII反应中心受抑制的程度小于‘紫珊’生菜。

综合生物量、形态、光合及荧光指标可以看出,不同品种生菜对CL的适应性存在一定的差异。5个品种中‘绿罗’生菜CL处理下生物量、形态指标和叶绿素含量均显著提高,且 $P_n$ 和 $C_i$ 没有像其

他4个品种出现显著降低的现象。CL处理虽然导致‘绿罗’PSII反应中心产生抑制,但程度相对较轻。说明‘绿罗’生菜对CL处理的适应性最强。

综上所述,在光强 $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 的条件下对生菜进行15 d的连续光照能够显著提高生菜的干鲜重,促进干物质积累和生长,但会导致光合速率等气体交换参数以及PSII最大光化学效率( $F_v/F_m$ )和潜在活性( $F_v/F_o$ )不同程度的降低。表明连续光照是提高植物工厂水培生菜产量的可行方法,但长期连续光照可能会导致光合活性的降低,使PSII反应中心受到破坏引起光抑制。因此长期乃至全生育期连续光照在植物工厂中的应用需进一步研究。不同品种生菜对CL处理光照适应性差异显著,其中‘绿罗’对连续光照的适应能力最强。

### 参考文献

- Arve LE, Terfa MT, Gislørød HR, Olsen JE, Torre S (2013). High relative air humidity and continuous light reduce stomata functionality by affecting the ABA regulation in rose leaves. *Plant Cell Environ*, 36 (2): 382–392
- Cushman KE, Tibbitts TW (1996). Size of tuber propagule influences injury of ‘Kennebec’ potato plants by constant light. *HortScience*, 31 (7): 1164–1166
- Demers DA, Dorais M, Wien CH, Gosselin A (1998). Effects of supplemental light duration on greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) plants and fruit yields. *Sci Hort*, 74 (4): 295–306
- Dorais M, Yelle S, Gosselin A (1996). Influence of extended photoperiod on photosynthate partitioning and export in tomato and pepper plants. *New Zeal J Crop Hort*, 24 (1): 29–37
- Farquhar GD, Sharkey TD (1982). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annu Rev Plant Physiol*, 33: 317–345
- Gaudreau L, Charbonneau J, Vézina LP, Gosselin A (1994). Photoperiod and photosynthetic photon flux influence growth and quality of greenhouse-grown lettuce. *HortScience*, 29 (11): 1285–1289
- Jin LQ, Che XK, Zhang ZS, Gao HY (2015). The relationship between the changes in  $W_k$  and different damage degree of PSII donor side and acceptor side under high temperature with high light in cucumber. *Plant Physiol J*, 51 (6): 969–976 (in Chinese with English abstract) [金立桥, 车兴凯, 张子山, 高辉远(2015). 高温、强光下黄瓜叶片PSII供体侧和受体侧的伤害程度与快速荧光参数 $W_k$ 变化的关系. *植物生理学报*, 51 (6): 969–976]
- Kitaya Y, Niu G, Ohashi M, Kozai T (1997). Effects of photosynthetic photon flux, photoperiod, and CO<sub>2</sub> enrichment on the growth and morphogenesis of lettuce plug transplants. *HortScience*, 32 (3): 542–543
- Krause GH, Weis E (1991). Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annu Rev Plant Phys*, 42: 313–349
- Langton FA, Adams SR, Cockshull KE (2003). Effects of photoperiod on leaf greenness of four bedding plant cultivars. *J Hort Sci Biotech*, 78 (3): 400–404
- Li HY, Han GH, Ren QP, Lü FT (2009a). The effect of different photoperiod on growth of cucumber seedling. *Acta Agric Boreal-Occident Sin*, 18 (3): 201–203 (in Chinese with English abstract) [李海云, 韩国徽, 任秋萍, 吕福堂(2009a). 不同光周期对黄瓜幼苗生长的影响. *西北农业学报*, 18 (3): 201–203]
- Li HY, Li CX, Zhang FJ, Qi H (2009b). The effect of different photoperiod on growth of summer squash seedling. *Nor Hort*, (5): 17–19 (in Chinese with English abstract) [李海云, 李长新, 张复君, 齐辉(2009b). 不同光周期对西葫芦幼苗生长的影响. *北方园艺*, (5): 17–19]
- Li J, Li SS, Fu C, Xu WZ, Lu YS, Wei S (2011). Effect of density and nitrogen on chlorophyll fluorescence characters of triticale. *J Trit Crops*, 31 (1): 143–148 (in Chinese with English abstract) [李晶, 李双双, 付驰, 许为证, 芦玉双, 魏滢(2011). 密度和施氮水平对小黑麦叶绿素荧光特性的影响. *麦类作物学报*, 31 (1): 143–148]
- Lü XG, Zhou MD, Li M (2016). Effects of low temperature stress on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence in leaves of grafted and own root muskmelon seedlings. *Plant Physiol J*, 52 (3): 334–342 (in Chinese with English abstract) [吕星光, 周梦迪, 李敏(2016). 低温胁迫对甜瓜嫁接苗及自根苗光合及叶绿素荧光特性的影响. *植物生理学报*, 52 (3): 334–342]
- Murage EN, Masuda M (1997). Response of pepper and eggplant to continuous light in relation to leaf chlorosis and activities of antioxidative enzymes. *Sci Hort*, 70 (4): 269–279
- Ohyama K, Omura Y, Kozai T (2005). Effects of air temperature regimes on physiological disorders and floral development of tomato seedlings grown under continuous light. *HortScience*, 40 (5): 1304–1306
- Peng JF, Zhang L (2000). Causes for the formation and reduction mechanisms of photooxidation. *Life Sci Res*, 4 (2): 84–91 (in Chinese with English abstract) [彭皎凤, 张磊(2000). 光氧化的成因及其削减机制. *生命科学研究*, 4 (2): 84–91]
- Pettersen RI, Torre S, Gislørød HR (2010). Effects of leaf aging and light duration on photosynthetic characteristics in a cucumber canopy. *Sci Hort*, 125 (2): 82–87
- Rowell T, Mortley DG, Loretan PA, Bonsi CK, Hill WA (1999). Continuous daily light period and temperature influence peanut yield in nutrient film technique. *Crop Sci*, 39 (4): 1111–1114
- Stutte GW, Yorio NC, Wheeler RM (1996). Interacting effects of photoperiod and photosynthetic photon flux on net carbon assimilation and starch accumulation in potato leaves. *J Am Soc Hort Sci*, 121 (2): 264–268
- Sysoeva MI, Markovskaya EF, Shibaeva T (2010). Plants under continuous light: review. *Plant Stress*, 4: 5–17
- Van Gestel N, Nesbit AD, Gordon EP, Green C, Pare PW, Thompson L, Peffley EB, Tissue DT (2005). Continuous light may induce photosynthetic downregulation in onion—consequences for growth and biomass partitioning. *Physiol Plantarum*, 125 (2): 235–246
- Velez-Ramirez AI, Ieperen WV, Vreugdenhil D, Millenaar FF (2011). Plants under continuous light. *Trends Plant Sci*, 16 (6): 310–318
- Velez-Ramirez AI, Heuvelink E, van Ieperen W, Vreugdenhil D, Millenaar FF (2012). Continuous light as a way to increase green-

- house tomato production: expected challenges. *Acta Horti*, 956: 51–58
- Wu ZY, Xue ZJ, Gao ZK (2015). Effects of continuous photoperiod of white LED illumination on dry matter accumulation and photosynthetic performance of tomato seedling. *J Agric Univ Hebei*, 38 (4): 56–61 (in Chinese with English abstract) [吴泽英, 薛占军, 高志奎(2015). 全光期LED白光对番茄植株干物质累积及光合性能的影响. *河北农业大学学报*, 38 (4): 56–61]
- Xu CC, Li DQ, Zou Q, Zhang JH (1999). Effect of drought on chlorophyll fluorescence and xanthophylls cycle components in winter wheat leaves with different ages. *Acta Phytotaxonom Sin*, 25 (1): 29–37
- Yang HG, Lin WF (2009). The effect of low temperature stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristics in oil palm seedlings. *Chin Agric Bull*, 25 (24): 506–509 (in Chinese with English abstract) [杨华庚, 林位夫(2009). 低温胁迫油棕幼苗光合作用及叶绿素荧光特性的影响. *中国农学通报*, 25 (24): 506–509]
- Yu Y, Yang QC, Liu WK (2015). Effects of short-term continuous lighting with LED lamps and nitrogen nutrition conditions on quality of hydroponically grown purple lettuce. *Chin J Appl Ecol*, 26 (11): 3361–3366 (in Chinese with English abstract) [余意, 杨其长, 刘文科(2015). LED短期连续光照与氮营养对水培生菜品质的影响. *应用生态学报*, 26 (11): 3361–3366]
- Zhang SR (1999). A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance. *Bull Bot*, 16 (4): 444–448 (in Chinese with English abstract) [张守仁(1999). 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论. *植物学报*, 16 (4): 444–448]
- Zhou WL, Liu WK, Wen J, Yang QC (2011). Changes in and correlation analysis of quality indices of hydroponic lettuce under short-term continuous light. *Chin J Eco-Agric*, 19 (6): 1319–1323 (in Chinese with English abstract) [周晚来, 刘文科, 闻婧, 杨其长(2011). 短期连续光照下水培生菜品质指标变化及其关联性分析. *中国生态农业学报*, 19 (6): 1319–1323]
- Zhou WL, Liu WK, Yang QC (2012). Quality changes in hydroponic lettuce grown under pre-harvest short-duration continuous light of different intensities. *J Hortic Sci Biotech*, 87: 429–434
- Zhou WL, Liu WK, Yang QC (2013). Reducing nitrate content in lettuce by pre-harvest continuous light delivered by red and blue light-emitting diodes. *J Plant Nutr*, 36 (3): 481–490

## Effect of continuous light with red and blue LED lamps on growth and characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence of five lettuce cultivars

ZHA Ling-Yan, LIU Wen-Ke\*

*Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Lab of Energy Conservation and Waste Management of Agricultural Structures, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China*

**Abstract:** An experiment was conducted in an environmentally-controlled plant factory equipped with red and blue LED lamps to investigate the effects of continuous light (photoperiod 24 h/0 h, light intensity  $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , CL) on five hydroponic lettuce cultivars compared with normal light (photoperiod 12 h/12 h, light intensity  $240 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , NL). The results showed that the fresh and dry weight of five lettuce cultivars were significantly improved under CL treatments compared with NL treatment. CL treatment significantly increased stem diameter, leaf thickness, specific leaf weight, leaf area and chlorophyll content of all lettuce cultivars except ‘Ziyue’ cultivar. The net photosynthetic rate significantly decreased under CL treatment in all cultivars except ‘Lüluo’ cultivar. Stomatal conductance of all cultivars, intercellular  $\text{CO}_2$  concentration of ‘Dasusheng’ and ‘Zishan’ cultivars and transpiration rate of other three cultivars were significantly lower under CL. CL slightly decreased the  $F_o$  and  $F_m$  of ‘Zishan’ cultivar and  $F_m$  of ‘Lüluo’ cultivar. While  $F_o$  and  $F_m$  of other cultivars were slightly increased or not be effected. The  $F_v/F_m$  and  $F_v/F_o$  of ‘Zishan’ cultivar was significantly decreased by CL. While  $F_v/F_m$  and  $F_v/F_o$  of other cultivars were slightly decreased or not be effected. In short, CL significantly promoted the growth of lettuce, but reduced the photosynthetic rate and induced photoinhibition at the same time. The adaptability of five cultivars to CL was different, and ‘Lüluo’ cultivar was the most adaptable cultivar among five lettuce cultivars.

**Key words:** LED; continuous light; photosynthetic gas exchange parameters; chlorophyll fluorescence; lettuce cultivar

Received 2017-05-08 Accepted 2017-08-01

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31672202) and the National High-tech R&D Program of China (“863” program) (Grant No. 2013AA103001).

\*Corresponding author (E-mail: liuwenke@caas.cn).