

网络出版时间:2017-11-06 13:53

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2017.12.015

网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171106.1353.030.html

弱光条件下LED补光灯的频率和占空比对生菜生长的影响

王晓旭,何蔚,陈丹艳,陈乐涵,胡晓婷,杨振超

(西北农林科技大学园艺学院 农业部西北设施园艺工程重点实验室,陕西 杨凌 712100)

[摘要] 【目的】研究不同频率和占空比的间歇光对生菜生长及电能转换效率的影响,进一步细化适宜生菜生长的光频率和占空比。【方法】以生菜品种‘香港玻璃’为材料,以LED为光源,在保证日累积光量一致的情况下,通过调节频率、占空比和照光时间,设置1 Hz/50%/24 h(T1),1 Hz/75%/16 h(T2)和10 kHz/75%/16 h(T3)3个间歇光处理,以连续光处理10 kHz/100%/12 h作对照(CK),研究不同频率和占空比的间歇光对生菜生长、品质、叶绿素含量、净光合速率及电能转换效率的影响。【结果】除T1处理外,间歇光可使生菜的株高、茎粗、叶片数、叶面积、地上和地下鲜干质量及生长速率较对照均有所增加。各处理间可溶性蛋白含量无显著差异;T1处理硝酸盐含量最高,其余各处理间差异不显著;间歇光处理的Vc含量均较对照有所提升。低频率、低占空比的间歇光会使生菜叶绿素含量降低并且不利于生菜的光合作用。T2和T3处理的电能转换效率显著高于CK,较CK分别提高了92.50%和82.50%。【结论】考虑能源消耗并兼顾生菜干物质积累和品质,认为实际生产以频率为1 Hz、占空比为75%、照光时间为16 h的处理(T2)为好。

[关键词] 弱光条件;间歇光;LED;光照强度;电能转换效率;生菜

[中图分类号] S636.205⁺.9

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2017)12-0103-09

Effect of frequencies and duty ratios of LED on lettuce growth under low photon flux intensity

WANG Xiaoxu, HE Wei, CHEN Danyan, CHEN Lehan,
HU Xiaoting, YANG Zhenchao

(Key Laboratory of Protected Horticulture Engineering in Northwest China, College of Horticulture,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】Effects of frequencies and duty ratios on growth of lettuce and power convention efficiency were studied to obtain the optimal scheme for growth of lettuce. 【Method】‘Xianggangboli’ lettuce was planted under LEDs. With the control group of continuous LED light (CK), three treatment groups with frequency, duty ratio and daily light-on hours combinations of 1 Hz/50%/24 h (T1), 1 Hz/75%/16 h (T2) and 10 kHz/75%/16 h (T3) were investigated. Daily light integral was the same for all treatments. Effects of different frequencies and duty ratios on the growth, quality, chlorophyll content, net photosynthetic rate of lettuce and energy conversion efficiency were studied. 【Result】Height, stem diameter, leaf number, leaf area, fresh weight and dry weight of aerial and root, as well as relative growth rate were increased under intermittent light treatments except T1. There was no significant difference in soluble

[收稿日期] 2016-10-21

[基金项目] 国家“863”高新技术产业与发展计划项目“植物工厂营养液管理与蔬菜品质调控技术装备研究”(2013AA103004)

[作者简介] 王晓旭(1992—),女,内蒙古赤峰人,硕士,主要从事设施环境工程研究。E-mail:347576727@qq.com

[通信作者] 杨振超(1976—),男,天津人,副教授,主要从事设施农业光环境研究。E-mail:yangzhenchao@nwsuaf.edu.cn

protein content among all treatments. Nitrate content of T1 was the highest and there was no significant difference among other treatments. Vc content was improved under all treatments compared to CK. Intermittent light at low frequency and duty ratio was less advantageous than continuous light for chlorophyll content and photosynthesis. The power conversion efficiencies of T2 and T3 were significantly higher than those of CK, with the increases of 92.50% and 82.50%, respectively. 【Conclusion】 Considering the energy consumption and growth of lettuce, T2 was the most suitable for practical production.

Key words: low photon flux density; intermittent light; LED; intensity; power conversion efficiency; *Lactuca sativa* L.

光是植物生长发育过程中主要的能量来源之一,植物通过光合作用将光能转化为自身可以利用的化学能,光还作为一种信号作用于植物并调节植物的分化、生长和发育,使其能更好地适应外界环境^[1]。然而一直以来,光对植物的影响研究多采用连续光,而关于间歇光对植物影响的研究很少。实际上,植物在自然条件下,群落下层叶片感受到的光源并不是连续的,而是透过上部层层叶片斑驳的光点,或是由于上部叶片摆动的间歇光源,这些在非连续光源下的植物生长状态良好^[2]。

关于间歇光的研究最早开始于 1905 年, Brown 和 Escombe 利用旋转的圆盘在不改变光质的情况下使光照强度减少 25%, 而光合速率未下降^[3]。1919 年 Warburg^[4]发现,在光强较高,频率 0.067~133 Hz、占空比 50% 的间歇光下,小球藻的单位数量光氧气产量较连续光提高了 10%~100%。Yoshioka 等^[5]分别用 104 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的连续光和平均光强为 52 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的不同光质间歇光培养球绿藻,结果显示在平均光强相同的条件下,蓝色间歇光下细胞密度最高,脂类含量相对于连续光提高了 58.16%。栅藻在瞬时光强为 375 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、频率为 10 kHz 脉冲光下的生物量是相同平均光强连续光的 3 倍以上^[6]。Xue 等^[7]用间歇光培养钝顶螺旋藻类的研究表明,与连续光相比,间歇光下钝顶螺旋藻的生长速率和光能利用率更高,且光强越大这种促进效果越明显。在蔬菜方面的研究有: Mori 等^[8]发现,在平均光照强度均为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,占空比为 50%、频率为 2.5 kHz 的间歇光下生菜的生长速率和光合速率较连续光下提高 20% 以上;在间歇光频率保持 2.5 kHz 不变的情况下,占空比为 33% 时生菜的生长速率还会有小幅提升。Tennessen 等^[9]报道,当 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的平均光强以 1.5 μs 、5 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的脉冲、周期为 150 μs 的间歇光照射在完整的番茄叶片上时,其光合速率与在 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的连

续光下相同。间歇光对草莓花青素的合成与代谢及小果咖啡的咖啡因产量均有影响^[10-11]。

早期间歇光研究所用多为传统光源,如 Brown 等^[3]所用光源为煤气灯, Warburg^[4]所用光源为荧光灯, Morita 等^[12]所用光源为金属卤化物灯,这些光源主要通过控制圆盘的旋转速度和圆盘的阴影面积来调节频率和占空比,缺点是耗电量大、发热量高、寿命短,并且整个设备复杂,不适宜应用在设施生产中。而新型光源 LED 使用直流电源,同时具有光强、频率与占空比可调的特性,因而可产生连续光源或间歇光源。LED 的照射光可以发出 1 μs 以下的短周期脉冲光,使用脉冲光照射不仅可以省电,对 LED 芯片的耐久性也会产生有益的影响^[13]。从 1995 年 Tennessen 等^[9]首次使用 LED 研究番茄植株在连续光和间歇光下的光利用效率开始,LED 逐渐成为间歇光研究光源,如 Yoshioka 等^[5]、Lunka 等^[6]和 Xue 等^[7]对藻类的培养, Mori 等^[8]对生菜的栽培,以及 Tennessen 等^[9]对番茄的栽培,都是以 LED 发射间歇光;又如 Jao 等^[14]利用红色和蓝色 LED 间歇光培养马铃薯组培苗,与荧光灯相比电能转换效率提高了 110%~140%。

目前对于间歇光的研究多是在高光强环境下进行的,而有关弱光条件下间歇光对植物影响的研究较少。为此,本试验在弱光条件下,以 LED 光源发射间歇光,研究不同频率和占空比的间歇光对生菜生长及其光合特性的影响,以期找到间歇光最佳频率和占空比组合,为进一步细化适宜生菜生长的光频率和占空比提供依据,进而达到节约能源和优质高产的目的。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 植物材料 供试植物为生菜 (*Lactuca sativa* L.), 品种‘香港玻璃’。

1.1.2 试验光源 试验所用 LED 光板 (ISL-

305X302-RFHGHBLED Light Units, ISL series, CCS Inc)的规格为 30 cm×30 cm,由 1 512 个红、远红、绿、蓝 4 种颜色灯珠组成,波峰分别是 660,735,525 和 470 nm。控制系统是 ISC-101-4 (ISL series, CCS Inc.),距离光板下方 10 cm 处的光谱分布如图 1 所示,由光纤光谱仪 (BLACK-Comet UV-VIS Spectrometer, StellarNet, Inc.)测得,瞬时光照强度为 $(130\pm6.4)\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 。光源系统固定于人工气候箱顶部,并用遮光布和黑布遮盖以避免光污染。

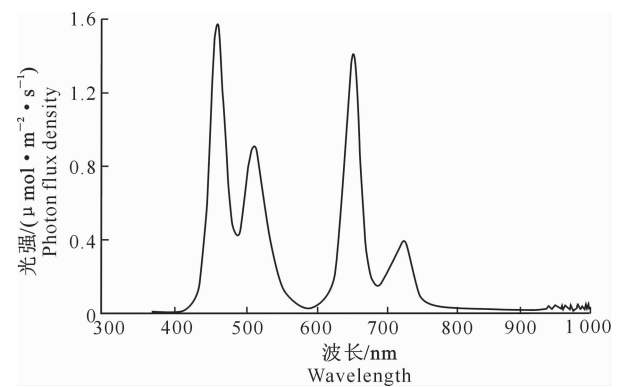


图 1 试验光板的光谱分布

Fig. 1 Emission spectrum of the LED used for lettuce cultivation

1.2 方 法

将生菜种子在 20℃催芽 24 h 后播于 50 孔穴盘中,基质采用内蒙古蒙肥生物科技有限公司生产的育苗基质。置于人工气候箱中育苗,育苗条件为:光周期昼/夜时间 12 h/12 h,昼/夜温度 22℃/19℃,白天空气相对湿度 70%,夜间空气相对湿度 60%。播种 10 d 后选取长出 2~3 片真叶的幼苗定植于营养钵(7 cm×7 cm×7 cm)中,然后置于光板下方 10 cm 处开始光照处理,所用基质为 V(草炭):V(蛭石):V(珍珠岩)=3:1:1 的混合基质。营养液采用日本园式通用配方,pH 值为 6.0±0.5,EC 值(2±0.5) mS/cm,每 3 d 浇 1 次营养液。环境条件为:白天温度(21±2)℃,空气相对湿度(55±5)%;夜间温度(19±2)℃,空气相对湿度(50±5)%。

本试验在保证各试验处理的光量子通量密度(photon flux density, PFD, 单位 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$)一致的情况下,采用 ISC-101-4 控制系统调节 LED 光源系统的占比、频率和照光时间,共设定 4 个试验处理(表 1),每个处理 25 株生菜。各处理每天实际接受的光量子数(DAL)均为 $5.62\text{ mol}/\text{m}^2$ 。本试验

重复 3 次,分别于 2016-03-29—2016-05-02,2016-05-15—2016-06-12,2016-07-13—2016-08-11 在西北农林科技大学园艺学院设施园艺重点实验室进行。

表 1 间歇光占比、频率、照光时间对生菜生长影响的试验设计

Table 1 Experimental design for effects of duty ratio, frequency and irradiation time of intermittent light on lettuce growth			
处理 Treatment	占比/% Duty ratio	频率/Hz Frequency	(照光时间/黑暗时间)/h Light on/light off
CK	100	10 000	12/12
T1	50	1	24/0
T2	75	1	16/8
T3	75	10 000	16/8

1.3 测定项目与方法

定植后每 7 d 从各个处理选取 6 株长势一致的生菜,测定茎叶鲜质量和根鲜质量,然后将鲜样置于 105℃烘箱杀青 30 min,75℃烘干至恒质量后测定茎叶干质量和根干质量,同时计算根冠比(根冠比=茎叶干质量/根干质量)和单株干质量增量(单株干质量增量= W_2-W_0 , W_0 和 W_2 分别是定植前和定植 28 d 时的茎叶干质量)。定植 28 d 时,除测定上述指标外,还用钢尺测定植株的株高,数显游标卡尺测定子叶下方茎粗,叶片数为主茎上所有功能叶片(黄化面积<50%的叶片)的数量,根据 Bradshaw 等^[15]的方法计算主茎上所有功能叶片的叶面积。另外按照 Matsuda 等^[16]的方法,用定植 14 d 和 28 d 的数据计算相对生长速率。

相对生长速率= $\frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}$ 。

式中: W_2 和 W_1 分别表示定植 28 d 和 14 d 的茎叶干质量, t_2 和 t_1 分别表示定植 28 和 14 d。

处理期间用 DDS686 型单相电子式电能表测定 LED 平板灯及控制器日耗电量,计算各处理单株 28 d 耗电量(单株日耗电量×28),并进一步计算各处理的电能转换效率(生菜地上部分干质量增量与耗电量的比值)。

定植 28 d 后,每个处理挑选 6 株长势一致的生菜,利用 LI-6400XT 光合仪测定生长点以下第 3 或第 4 片真叶的净光合速率(P_n)。叶绿素含量参考李磊等^[17]的方法用体积分数 95%乙醇测定,每个处理随机选取 6 片真叶。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定, V_c 含量采用钼蓝比色法测定,硝酸盐含量采用水杨酸比色法测定^[18]。

1.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 数据处理软件对 3 次试验的平

均值进行方差分析,采用邓肯氏新复极差法检验差异显著性($P<0.05$),用 Excel 2010 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 间歇光频率及占空比对生菜形态的影响

由表 2 可以看出,处理 28 d 后 CK 的株高、茎粗

最小,且与间歇光各处理的株高有显著差异,与除 T1 外的其余间歇光处理的茎粗有显著差异。T1 处理的叶片数和叶面积最小,与 CK 相比,T2、T3 处理的叶面积分别增加了 78.62%和 56.80%。在日辐射量相同的情况下,T2、T3 处理可促进生菜的伸长生长。

表 2 间歇光频率及占空比对生菜形态的影响

Table 2 Effects of frequency and duty ratio of intermittent light on morphology of lettuce

处理 Treatments	株高/cm Shoot length	茎粗/mm Shoot diameter	叶片数 Leaf number	叶面积/cm ² Leaf area
CK	6.89±0.44 c	4.71±0.12 b	8.6±0.3 b	370.6±25.2 c
T1	28.09±0.56 a	4.88±0.17 b	6.9±0.5 c	351.6±19.1 c
T2	15.76±2.12 b	6.25±0.46 a	10.7±0.3 a	662.0±23.3 a
T3	16.05±0.87 b	6.18±0.12 a	9.2±0.3 b	581.3±22.3 b

注:同列数据后标不同字母者表示差异达显著水平($P<0.05$)。下表同。
Note: Different letters in each column mean significant difference among treatments at $P<0.05$. The same below.

2.2 间歇光频率及占空比对生菜生长的影响

如图 2 所示,生菜茎叶鲜、干质量,根鲜、干质量均随处理时间的增加而升高,前 3 周升高趋势缓慢,各处理之间差距不明显;第 4 周均迅速上升,差距扩大。采收时 CK 与间歇光处理的茎叶鲜质量及根鲜

质量均无显著差异,但 T2、T3 的茎叶鲜质量分别比 CK 增加 59.02%和 60.68%,根鲜质量比 CK 增加 54.18%和 67.19%。CK 的茎叶干质量和根干质量最小,与 T2、T3 处理间差异显著。

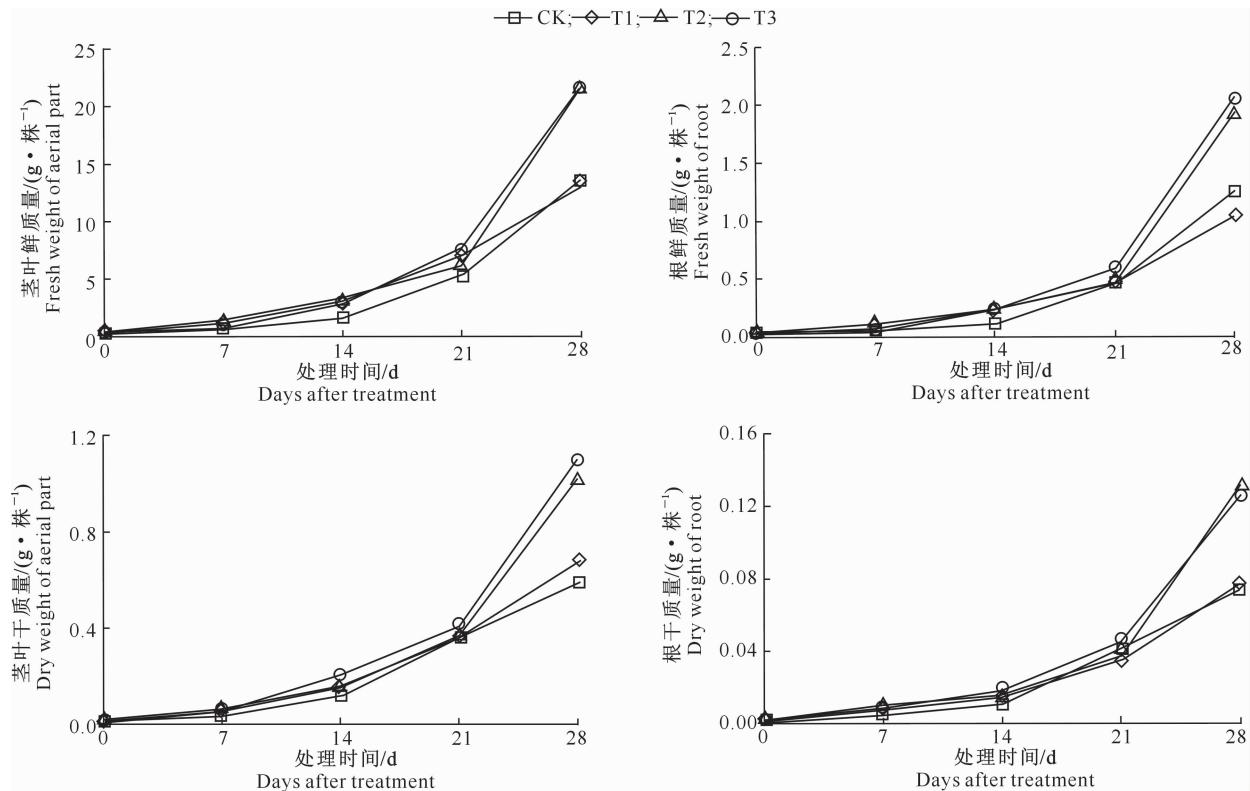


图 2 间歇光频率及占空比对生菜茎叶和根干鲜质量的影响

Fig. 2 Effects of frequency and duty ratio of intermittent light on dry and fresh weight of aerial part and root of lettuce
由图 3 可知,根冠比的大小顺序为 T2>CK>T3>T1,各间歇光处理与 CK 间无显著差异。从图 4 可以看出,与 CK 相比,除 T1 以外的间歇光处理提高了生菜的相对生长速率,但各间歇光处理与 CK 间差异不显著。

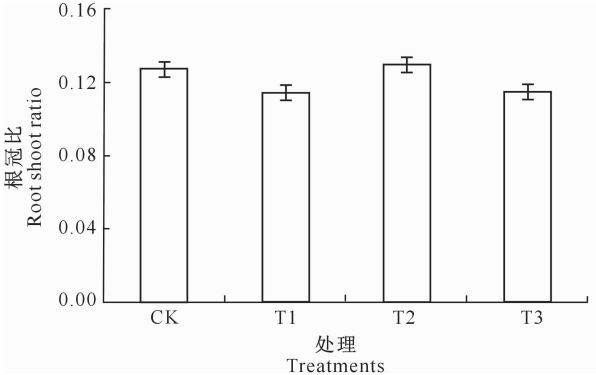


图 3 间歇光频率及占比对采收时生菜根冠比的影响

Fig. 3 Effects of frequency and duty ratio of intermittent light on root-shoot ratio of lettuce in harvest

2.3 间歇光频率及占比对生菜品质的影响

由图 5 可以看出,CK 的可溶性蛋白含量与各间歇光处理间没有显著差异,T2 处理较对照提高了 11.18%。间歇光处理提高了生菜叶片的 Vc 含量,T1、T2、T3 处理的 Vc 含量较 CK 分别提高了

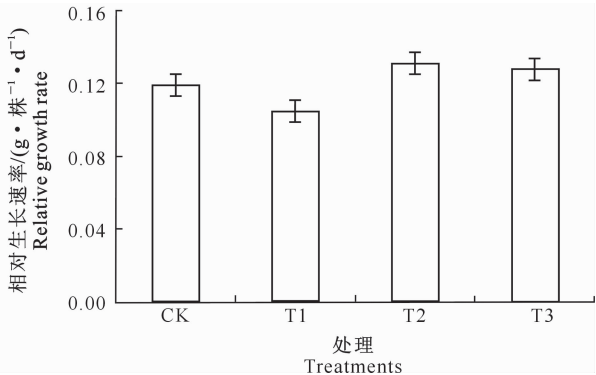
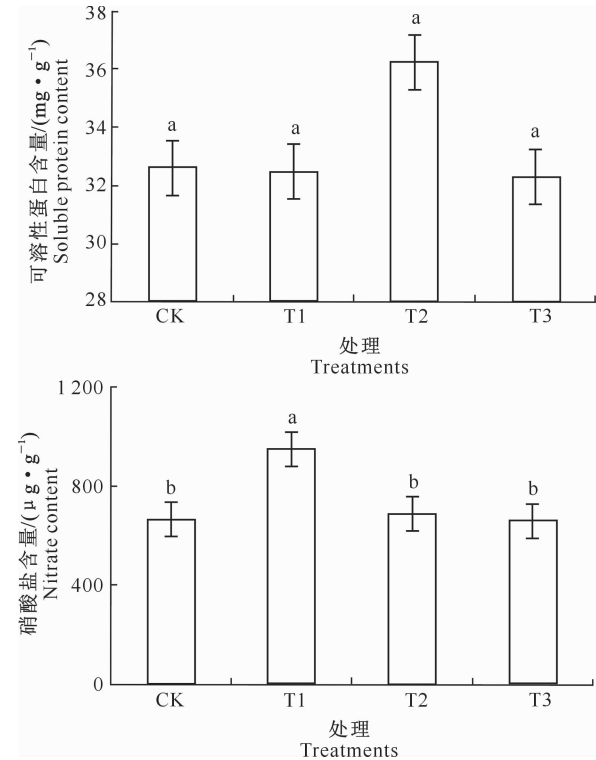


图 4 间歇光频率及占比对生菜相对生长速率的影响

Fig. 4 Effects of frequency and duty ratio of intermittent light on relative growth rate of lettuce

8.78%,14.25%和 20.15%,间歇光处理之间 Vc 含量差异不显著,CK 与 T3 处理有显著差异。处理 T1 叶片的硝酸盐含量显著高于其他处理,CK 与 T2、T3 处理间均差异不显著。



柱上标不同小写字母表示处理间差异达显著水平 ($P<0.05$)
Different letters indicate significant difference among treatments at $P<0.05$

图 5 间歇光频率及占比对生菜品质的影响

Fig. 5 Effects of frequency and duty ratio of intermittent light on lettuce quality

2.4 间歇光频率及占比对生菜叶绿素含量和净光合速率的影响

间歇光频率及占比对生菜叶绿素含量和净光

合速率的影响如表 3 所示。由表 3 可以看出,T3 处理的叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素 (a+b) 含量均最高,其次是 CK,且二者之间差异显著。T1 和 T2 处

理的叶绿素 a 含量与 CK 有显著差异,叶绿素 b、叶绿素(a+b)含量与 CK 无显著差异。各间歇光处理与 CK 的叶绿素 a/b 无显著差异,且间歇光处理之

间差异也不显著。CK 的净光合速率(P_n)显著高于各间歇光处理,间歇光各处理间的净光合速率差异不显著。

表 3 间歇光频率及占空比对生菜叶绿素含量和净光合速率的影响

Table 3 Effects of frequency and duty ratio of intermittent light on content of chlorophyll and net photosynthetic rate of lettuce					
处理 Treatments	叶绿素 a/(mg · g ⁻¹) Chl a	叶绿素 b/(mg · g ⁻¹) Chl b	叶绿素 a/b Chlorophyll a/b	叶绿素(a+b)/(mg · g ⁻¹) Chl(a+b)	净光合速率/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) P_n
CK	0.85±0.01 b	0.38±0.00 b	2.31±0.02 a	1.23±0.02 b	5.59±0.34 a
T1	0.77±0.01 c	0.35±0.01 b	2.29±0.07 a	1.12±0.00 b	3.58±0.10 b
T2	0.78±0.03 c	0.34±0.02 b	2.45±0.10 a	1.11±0.04 b	3.86±0.25 b
T3	1.02±0.02 a	0.44±0.03 a	2.39±0.16 a	1.45±0.05 a	3.61±0.20 b

2.5 间歇光频率及占空比对生菜干质量增量和电能转换效率的影响

由表 4 可见,单株 28 d 耗电量以 T3 处理最高, T1、T2 处理耗电量分别比 CK 少 12.30% 和

9.09%。处理 28 d 后,T2、T3 处理单株干质量增量显著高于 CK,T1 处理与 CK 差异不显著。与 CK 相比,T1、T2 和 T3 的电能转换效率分别提高了 32.50%,92.50%和 82.50%。

表 4 间歇光频率及占空比对耗电量、生菜干质量增量和电能转换效率的影响

Table 4 Effects of frequency and duty ratio of intermittent light on relative power consumption, dry weight increment and power conversion efficiency				
处理 Treatment	单株 28 d 耗电量/(kW · h) Relative power consumption per plant	单株干质量增量/g Relative dry weight increment per plant	电能转换效率 Power conversion efficiency	电能转换效率提升/% Improvement of PCE
CK	1.44	0.58±0.05 b	0.40±0.03 b	—
T1	1.26	0.67±0.03 b	0.53±0.02 ab	32.50
T2	1.31	1.01±0.15 a	0.77±0.11 a	92.50
T3	1.48	1.09±0.14 a	0.73±0.09 a	82.50

3 讨 论

3.1 间歇光频率和占空比对生菜生长的影响

本试验结果显示,间歇光处理的生菜株高、茎粗均大于 CK,除 T1 以外的间歇光处理的生菜叶片数和叶面积均有所增加,且 T1 叶面积与 CK 差异不显著,这说明间歇光可以促进生菜株高、茎粗和叶面积的增加,这与丁娟娟^[19]的研究结果基本一致。通过比较 T2 和 T3 可以看出间歇光频率对生菜生长的影响,即高频率促进株高增加,但抑制叶片数量增加和叶面积的扩大。这与王达菲^[20]的研究结果“当频率在 0.1 Hz~10 kHz 时,黄瓜的株高随频率增加有减小的趋势,而叶面积则随频率增加而增大”不同;而与 Jao 等^[14]的“间歇光频率在 60~720 Hz 时,马铃薯幼苗的株高随频率增大而增大”的结论相同。

Chen 等^[21]用连续光和间歇光照射小麦,发现占空比为 70%和 80%的处理单位面积产量、收获指数及千粒质量与连续光处理均无显著差异。Yago 等^[22]用连续光和 10 kHz、50%的间歇光培养球等鞭金藻,发现蓝色间歇光下球等鞭金藻的细胞数量和

脂肪酸含量约为白色连续光下的 2 倍。Mori 等^[8]研究发现,当占空比为 50%,频率从 100 Hz 升至 50 kHz 的过程中,生菜的相对生长速率先升高后下降,在频率为 2.5 kHz 时相对生长速率值最大。Sims 等^[23]报道,脉冲光下海芋的相对生长速率与连续光下无异。本试验中处理 T2、T3 的生菜地上、地下干鲜质量及相对生长速率均高于 CK,说明适宜频率、占空比和照光时数的间歇光照不会抑制作物的生长,反而能加速作物生长,提高作物产量。根冠比能反映作物的生长状况及环境条件对根系与地上部分生长的不同影响^[24]。萝卜根系的生长在间歇光下受抑制,根冠比低于连续光下^[12],丁娟娟^[19]对生菜的试验也得出相似的结论。但本试验结果与前人研究不完全一致,如间歇光处理 T2 的根冠比高于 CK,这可能是植物种类不同,也可能是光强不同所致。

3.2 间歇光频率及占空比对生菜品质的影响

植物叶片中可溶性蛋白的合成是受光调控的。严妍^[25]在不同温度下研究光周期对生菜品质的影响,发现每天照光 8 h 和每天照光 12 h 的可溶性蛋白质含量无显著差异,但每天照光 24 h 显著降低。

余意等^[26]发现,红叶生菜在 20 h 连续光照下可溶性蛋白含量显著降低。本试验中处理 T1、T3 虽然接受间歇光照,但感受光信号的时间比 CK 多,所以可溶性蛋白含量比 CK 低,而 T2 可溶性蛋白含量突然升高可能是频率降低的原因。本试验的间歇光处理提高了生菜叶片中 Vc 含量,这与间歇光提高草莓花青素和小果咖啡的咖啡因产量,及间歇光提高球等鞭藻脂脂肪酸含量的结果类似^[10-11,22]。Kurata 等^[11]认为,光作为一种开关调控与植物生长发育及次生代谢有关基因的表达,而这个开关有 2 种类型,即可逆型和不可逆型,前者可随时开关,后者一旦被触发则不能关闭。咖啡因和花青素的合成并未因细胞处于黑暗中就停止,故此时光作为不可逆开关起作用,间歇光可以维持高产量的咖啡因和花青素合成,直到光激发过程减弱。受光信号激发的次生代谢物产量都可能在间歇光下提高。

硝酸盐极易在蔬菜特别是叶菜类蔬菜中大量积累,被人体摄入后,约有 5% 会转化为亚硝酸盐,对人体健康具有极大的潜在危害^[27]。本试验中处理 T1 显著提高了硝酸盐含量,这与周晚来等^[28]对水培生菜连续照光 72 h 后硝酸盐含量大幅降低的结果不同,这可能是因为间歇光光强过低导致。低光照强度下,光合作用强度低,不能提供足够的有机化合物和硝酸还原所需的能量,硝态氮会替代有机化合物和有机酸在液泡中大量累积以维持细胞的渗透压。因此从提高可溶性蛋白和 Vc 含量、降低硝酸盐含量来看,处理 T2 效果最好。

3.3 间歇光频率及占空比对生菜光合作用的影响

叶绿素含量反映了植物对光能的利用和调节能力,是评价植物生长发育状况的一项基础指标^[29]。丁娟娟^[19]和王达菲^[20]的研究结果显示,间歇光处理的叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素(a+b)含量均高于连续光处理,且叶绿素 a、b 及叶绿素 a/b 与占空比成反比,与频率成正比。这是因为在平均光强一致的情况下,间歇光的瞬时光照强度高于连续光,且占空比越小、频率越大,一个周期内的光强相对越高。植物为应对短时间内的高光强提高叶绿素含量,就能增加用于吸收光能的捕光色素蛋白的相对含量,从而提高光合能力。而本试验结果与丁娟娟^[19]和王达菲^[20]的结果不同:除 T3 以外的其他间歇光处理的叶绿素含量均小于 CK,但差异不显著。造成这种不同的原因是光强差异过大,相对于上述试验光强,本试验是在弱光环境下进行的。前人的研究结果表明,大多数情况下植物面对弱光环境会增加

叶绿素含量以捕获更多的光能^[30-32]。但也有研究认为,遮荫后叶绿素含量下降并伴随净光合速率的降低^[33-35]。植物为适应低光强的环境会提高叶绿素 b 的含量,从而导致叶绿素 a/b 值下降,这是因为叶绿素 b 含量的提高有利于植物吸收弱光环境下的蓝光和远红光,维持植物自身的光合能力。

同理,本试验中间歇光处理的净光合速率显著低于连续光处理也是由弱光引起的。根据瞬时光强与平均光强的关系可知,本试验中一个周期内接受的光量子数的大小顺序为 CK>T2=T3>T1,平均光强分别是 130, 97.5 和 65 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。而前人的研究多为高光强,如 Jishi 等^[36]对生菜的研究,间歇光的平均光强设置为 200 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,而瞬时光强高达 800 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;Ernesto 等^[37]研究脉冲光对番茄叶绿素荧光特性的影响时,平均光强采用 (750 ± 15) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;又如 Lunka 等^[6]用间歇光对藻类生物量影响的研究中,虽然平均光强只有 75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,但瞬时光强分别为 175, 275 和 375 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。Chen 等^[21]研究发现,平均光强为 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、占空比为 80%、周期为 1 ms 的间歇光可以提高小麦叶片净光合速率。而 Tennessen 等^[9]则认为,在平均光照强度相同的情况下,植物在间歇光下的净光合速率大多低于其在连续光下的值,该值随间歇光的占空比和频率的减小而下降,并且在高光强时下降速度更快。如生菜在占空比为 25%、频率从 0.1~12.8 kHz 的间歇光下,其 CO_2 吸收速率均显著低于相同平均光强(100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)的连续光下的吸收速率^[38]。因此间歇光对植物净光合速率的影响不仅取决于频率和占空比,而且与光强有关,特别是瞬时光强的大小。在本试验中,T2 与 T3 的净光合速率差异不显著,说明在占空比较高的情况下不同频率的间歇光对生菜光合作用的影响很小,这与 Mori 等^[8]的研究结果基本一致。

3.4 间歇光频率及占空比与节能的关系

LED 光源的总功耗为静态功耗和动态功耗之和,当电压和电流一定时,静态功耗与占空比呈正相关,动态功耗与频率呈正比^[14]。由于发射连续光不需要设置频率,故无额外的动态功耗,因此 T3 的单株 28 d 耗电量高于 CK。频率一致时,动态功耗相同,则间歇光的占空比越大总功耗越高;占空比一致时,静态功耗相同,则间歇光的频率越高总功耗越大,因此本试验中间歇光处理的 28 d 单株耗电量顺序为 T3>T2>T1。

电能转换效率为生菜地上部分的干质量增量与电能消耗的比值,由于 CK 的干质量增量最低,而电能消耗较高,所以 CK 的电能转换效率最低;尽管 T1 消耗电能最少,但 28 d 内的干质量增加量较小,所以电能转换效率与 CK 无显著差异。根据 Blackman 的观点,植物的光合作用分为光反应和暗反应,光反应期间光合色素分子捕获光量子,而暗反应期间合成碳水化合物不需要光照,所以连续光的部分光量子在植物的暗反应期间不仅不能被植物有效利用,而且还可能对植物造成伤害。相反,间歇光的光期为植物暗期同化物的合成提供了足够的光能,既可提高光能利用率,又能避免高光强对植物造成伤害。在日辐射量相同的情况下,各间歇光处理比 CK 光照时间长,所以进行光合作用的时间延长,同化产物积累多。而处理 T1 的干质量增量显著小于 T2、T3,可能是因为 24 h 持续接受光照,影响了生菜同化产物的积累和运输。Jao 等^[14]对马铃薯组培苗的研究结果表明,日辐射量相同的条件下,长周期的弱光要比短周期强光生物量更高。沈韫贻等^[39]也发现,相同的光能输入量下,低光照强度+长光照时间处理的小麦收获指数、粒叶比和产量均显著高于高光照强度+短光照时间的处理,这与本试验的研究结果相似。

4 结 论

LED 光源连续光 and 不同频率及占空比的间歇光处理,对生菜的形态、生物量、品质和光合特性的影响各异。在日辐射量相同的情况下,间歇光处理总体上促进了生菜的株高、茎粗、叶面积和生长速率。低频率、低占空比的间歇光不利于叶绿素的合成与光合作用,但耗电量低,且有利于干物质积累,故电能转换效率较连续光高。3 个间歇光处理中,频率为 1 Hz、占空比为 75%、每天照光 16 h 的 T2 处理净光合速率最高,干物质积累仅次于具有相同占空比和照光时间、频率为 10 kHz 的 T3 处理,但 T2 的电能转换效率更高,而且有较高的可溶性蛋白和 Vc 含量,硝酸盐含量与 CK 差异不显著,故最适于应用于实际生产中。

【参考文献】

[1] 杨有新,王 峰,蔡加星,等. 光质和光敏色素在植物逆境响应中的作用研究进展 [J]. 园艺学报,2014,41(9):1861-1872.
Yang Y X, Wang F, Cai J X, et al. Recent advances in the role of light quality and phytochrome in plant defense resistance against environmental stresses [J]. Acta Horticulturae Sinica,

2014,41(9):1861-1872.
[2] 张小全,徐德应. 杉木中龄林针叶光合作用对光斑的响应 [J]. 植物生态学报,2000,24(5):534-540.
Zhang X Q, Xu D Y. Response of net photosynthetic rate in 18-year-old China fir shoots to lightflecks [J]. Acta Phytocologica Sinica, 2000, 24(5):534-540.
[3] Brown H T, Escombe F. Researches on some of the physiological processes of green leaves, with special reference to the interchange of energy between the leaf and its surroundings [J]. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 1905, 76(76):29-111.
[4] Warburg O. Über die Geschwindigkeit der photochemischen Kohlen säurezersetzung in lebenden Zellen [J]. Biochem Z, 1919, 100:230-270.
[5] Yoshioka M, Yago T, Yoshie-Stark Y, et al. Effect of high frequency of intermittent light on the growth and fatty acid profile of *Isochrysis galbana* [J]. Aquaculture, 2012, 338-341: 111-117.
[6] Lunka A A, Bayless D J. Effects of flashing light-emitting diodes on algal biomass productivity [J]. Journal of Applied Phycology, 2013, 25(6):1679-1685.
[7] Xue S, Su Z, Cong W. Growth of *Spirulina platensis*, enhanced under intermittent illumination [J]. Journal of Biotechnology, 2011, 151(3):271-277.
[8] Mori Y, Takatsuji M, Yasuoka T. Effects of pulsed white led light on the growth of lettuce [J]. Journal of Society of High Technology in Agriculture, 2002, 14(3):136-140.
[9] Tennessen D J, Bula R J, Sharkey T D. Efficiency of photosynthesis in continuous and pulsed light emitting diode irradiation [J]. Photosynthesis Research, 1995, 44(3):261-269.
[10] Kurata H, Mochizuki A, Okuda N, et al. Intermittent light irradiation with second- or hour-scale periods controls anthocyanin production by strawberry cells [J]. Enzyme & Microbial Technology, 2000, 26(8):621-629.
[11] Kurata H, Achioku T, Furusaki S. The light/dark cycle operation with an hour-scale period enhances caffeine production by *Coffea arabica*, cells [J]. Enzyme & Microbial Technology, 1998, 23(7/8):518-523.
[12] Morita K, Yonemori T, Urashita M, et al. Effects of intermittent illumination on the plant growth [J]. Memoirs of the Faculty of Agriculture Kagoshima University, 1996, 32: 79-91.
[13] 魏灵玲,杨其长,刘水丽. LED 在植物工厂中的研究现状与应用前景 [J]. 中国农学通报,2007,23(11):408-411.
Wei L L, Yang Q C, Liu S L. Review on research and developing trends of light-emitting diode in plant factory [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(11):408-411.
[14] Jao R C, Fang W. Effects of frequency and duty ratio on the growth of potato plantlets *in vitro* using light-emitting diodes [J]. Hortscience, 2004, 39(2):375-379.
[15] Bradshaw J D, Rice M E, Hill J H. Digital analysis of leaf surface area, effects of shape, resolution, and size [J]. Journal of

- the Kansas Entomological Society, 2007, 80(4): 339-347.
- [16] Matsuda R, Yamano T, Murakami K, et al. Effects of spectral distribution and photosynthetic photon flux density for over-night LED light irradiation on tomato seedling growth and leaf injury [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 198: 363-369.
- [17] 李 磊, 李向义, 林丽莎, 等. 两种生境条件下 6 种牧草叶绿素含量及荧光参数的比较 [J]. *植物生态学报*, 2011, 35(6): 672-680.
- Li L, Li X Y, Lin L S, et al. Comparison of chlorophyll content and fluorescence parameters of six pasture species in two habitats in China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2011, 35(6): 672-680.
- [18] 余 意, 杨其长, 刘文科. LED 短期连续光照与氮营养对水培生菜品质的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(11): 3361-3366.
- Yu Y, Yang Q C, Liu W K. Effects of short-term continuous lighting with LED lamps and nitrogen nutrition conditions on quality of hydroponically grown purple lettuce [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(11): 3361-3366.
- [19] 丁娟娟. LED 不同占空比对生菜生长、产量、品质及光合特性的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- Ding J J. Effects of different duty ratio on growth, production, quality and photosynthetic characteristics of lettuce using lighting-emitting diodes (LED) [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2014.
- [20] 王达菲. LED 连续光 and 不同频率间歇光对黄瓜幼苗生长及光合荧光特性的影响 [D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- Wang D F. Effects of continuous light and intermittent light with different frequencies on growth, photosynthesis and fluorescence of cucumber seedlings using lighting-emitting diodes (LED) [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016.
- [21] Chen D, Shao L, Liu G, et al. Photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield of wheat exposed to intermittent light irradiation with millisecond-scale periods [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2015, 184: 28-36.
- [22] Yago T, Arakawa H, Morinaga T, et al. Effect of wavelength of intermittent light on the growth and fatty acid profile of the haptophyte *Isochrysis galbana* [M]. *Global Change: Man-kind-Marine Environment Interactions*, 2011: 43-45.
- [23] Sims D A, Pearcy R W. Sunfleck frequency and duration affects growth rate of the understorey plant, *Alocasia macrorrhiza* [J]. *Functional Ecology*, 1993, 7(6): 683-689.
- [24] 王艳哲, 刘秀位, 孙宏勇, 等. 水氮调控对冬小麦根冠比和水分利用效率的影响研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2013, 1(3): 282-289.
- Wang Y Z, Liu X W, Sun H Y, et al. Effects of water and nitrogen on root/shoot ratio and water use efficiency of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 1(3): 282-289.
- [25] 严 妍. 温度和光周期对水培生菜生长的影响及生长模型初探 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
- Yan Y. Effects of temperature and photoperiod on the growth of hydroponic lettuce and primary research on growth modeling [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008.
- [26] 余 意, 刘文科. 弱光条件下光质和光周期对水培生菜生长与品质的影响 [J]. *中国农业气象*, 2015(6): 739-745.
- Yu Y, Liu W K. Influence of light quality and photoperiod on growth and nutritional quality of three leaf-color lettuce cultivars under weak light [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2015(6): 739-745.
- [27] Santamaria P. Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2006, 86(1): 10-17.
- [28] 周晚来, 刘文科, 杨其长. 光对蔬菜硝酸盐累积的影响及其机理 [J]. *华北农学报*, 2011, 26(S2): 125-130.
- Zhou W L, Liu W K, Yang Q C. Effect of light on nitrate accumulation in vegetables and the mechanism thereof [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(S2): 125-130.
- [29] 闻 靖, 杨其长, 魏灵玲, 等. 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 [J]. *园艺学报*, 2011, 38(4): 761-769.
- Wen J, Yang Q C, Wei L L, et al. Influence of combined lighting with different red and blue led on photosynthetic characteristics and quality of lettuce and evaluation of energy consumption [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(4): 761-769.
- [30] 王 瑞, 刘国顺, 陈国华, 等. 光强对苗期烤烟光合作用及干物质生产的影响 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(8): 2072-2077.
- Wang R, Liu G S, Chen G H, et al. Effects of light intensity on photosynthesis and dry matter production of flue-cured tobacco at its seeding stage [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(8): 2072-2077.
- [31] 赵玉萍, 邹志荣, 杨振超, 等. 不同温度和光照对温室番茄光合作用及果实品质的影响 [J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(5): 125-130.
- Zhao Y P, Zou Z R, Yang Z C, et al. Effect of temperature and light to tomato photosynthesis and quality in greenhouse [J]. *Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed)*, 2010, 38(5): 125-130.
- [32] 吴飞燕, 伊力塔, 李修鹏, 等. 不同光照强度对石栎幼苗叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响 [J]. *东北农业大学学报*, 2012, 43(4): 88-92.
- Wu F Y, Yi L T, Li X P, et al. Effect of different light intensity on chlorophyll content and chlorophyll fluorescence in *Lithocarpus glaber* [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2012, 43(4): 88-92.
- [33] 赵 平, Wrie K, 张志权. 欧洲 3 种常见乔木幼苗在两种光环境下叶片的气体变换、叶绿素含量和氮素含量 [J]. *热带亚热带植物学报*, 1999, 7(2): 133-139.
- Zhao P, Wrie K, Zhang Z Q. Gas exchange, chlorophyll and nitrogen contents in leaves of three common trees in middle Europe under two contrasting light regimes [J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1999, 7(2): 133-139.

[21] 肖 望. ‘过山车’香蕉胚性悬浮细胞原生质体分离的方法研究 [J]. 现代生物医学进展, 2009, 19(6): 1079-1081.
Xiao W. Research on protoplast isolation of embryogenic cell suspensions of *Musa silk* cv. Guoshanxiang (ABB) [J]. Progress in Modern Biomedicine, 2009, 19(6): 1079-1081.

[22] 余 露, 杨 英, 李 硕, 等. 甘草悬浮细胞的玻璃化法超低温保存研究 [J]. 植物科学学报, 2007, 25(5): 462-466.
Yu L, Yang Y, Li S, et al. The research of cryopreservation of tobacco suspension cells by vitrification [J]. Plant Science Journal, 2007, 25(5): 462-466.

[23] 吕建军, 胡高升, 李经奎, 等. 前体饲喂和真菌诱导子对肉苁蓉悬浮培养细胞次生代谢产物的影响 [J]. 中药材, 2009, 32(2): 171-173.
Lü J J, Hu G S, Li J K, et al. Effects of precursor feeding and fungal elicitor on secondary metabolites of cell suspension cultures of *cistanche* [J]. Chinese Herbal Medicines, 2009, 32(2): 171-173.

[24] Larrick J W, Thomas D W. Producing proteins in transgenic plants and animals [J]. Curr Opin Biotechnol, 2001, 12: 411-418.

[25] 李爱玲, 孙瑛勋, 洪海燕, 等. 利用基因重组抗原研制人 CD20 单克隆抗体及其功能的研究 [J]. 中华微生物学和免疫学杂志, 2002, 22(4): 385-388.
Li A L, Sun Y X, Hong H Y, et al. Development of human monoclonal antibody against human CD20 by gene recombinant antigen and its function [J]. Chinese Journal of Microbiology and Immunology, 2002, 22(4): 385-388.

(上接第 111 页)

[34] 王惠哲, 庞金安, 李淑菊, 等. 弱光处理对春季温室不同品种黄瓜生长发育的影响 [J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(2): 156-160.
Wang H Z, Pang J A, Li S J, et al. Effects of weak light treatments on growth and development of different varieties of *Cucumis sativus* L. in spring greenhouse [J]. Journal of Henan Agriculture University, 2006, 40(2): 156-160.

[35] 贾士芳, 李从锋, 董树亭, 等. 弱光胁迫影响夏玉米光合效率的生理机制初探 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(12): 1439-1447.
Jia S F, Li C F, Dong S T, et al. Physiological mechanism of shading stress on photosynthetic efficiency in summer maize (*Zea mays*) [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2010, 34(12): 1439-1447.

[36] Jishi T, Matsuda R, Fujiwara K. A kinetic model for estimating net photosynthetic rates of cos lettuce leaves under pulsed light [J]. Photosynthesis Research, 2015, 124(1): 107-116.

[37] Ernesto O G, Daniel A L, Rumen I T, et al. Chlorophyll fluorescence emission of tomato plants as a response to pulsed light based LEDs [J]. Plant Growth Regulation, 2013, 69(2): 117-123.

[38] Jishi T, Fujiwara K, Nishino K, et al. Pulsed light at lower duty ratios with lower frequencies is less advantageous than continuous light for CO₂ uptake in cos lettuce [J]. Journal of Light & Visual Environment, 2012, 36(3): 88-93.

[39] 沈韫曦, 郭双生, 艾为党, 等. 密闭系统中光强和光照时间对小麦的交互作用 [J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(4): 280-285.
Shen Y Z, Guo S S, Ai W D, et al. Effects of light intensity and illumination time on wheat growth in a closed system [J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2014, 27(4): 280-285.