

红蓝光下光强对生菜电能、光能利用效率及品质的影响

王君 杨其长 仝宇欣*

(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 通过调查红蓝 LED 光源下生菜的光能利用效率(LUE)和电能利用效率(EUE),以期确定人工光栽培环境下红蓝 LED 的优化光强参数。本试验 LED 光源的红蓝光配比设定为 1:1,光强分别为 200、300 和 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的 3 个处理(分别以 L200、L300 和 L400 表示),生菜定植 38 d 后收获。结果表明:1)定植至收获期间,对每次间苗所收获生菜的干重以及定植 38 d 后收获生菜的干重进行累计计算,处理 L300 下生菜 EUE 最大,为 0.948%,较处理 L200 和 L400 下生菜 EUE 分别高 5.22% 和 46.6%;处理 L200 下生菜 LUE 最大,为 4.17%,较处理 L300 和 L400 下生菜 LUE 分别高 12.0% 和 59.3%。2)定植 38 d 后处理 L300 下生菜地上部分的鲜干重最大,平均值分别为 41.3 和 2.58 g,较处理 L200 和 L400 下地上部分鲜重分别高 23.5% 和 25.2%;地上部分干重分别高 28.4% 和 12.8%。3)处理 L300 与处理 L200 相比,定植 38 d 后前者叶片的可溶性糖含量较高,硝酸盐含量较低;但与处理 L400 之间无显著性差异。综合考虑光能、电能利用效率及干重累积量,推荐 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 作为红蓝 LED 组合光源下生菜生长较优的光照强度。

关键词 生菜;LED;光强;光能利用效率;电能利用效率

中图分类号 S 644

文章编号 1007-4333(2016)08-0059-08

文献标志码 A

Effects on electric-energy and light use efficiency and quality for lettuce under different light intensities supplied with red light and blue light

WANG Jun, YANG Qi-chang, TONG Yu-xin*

(Institute of Environment and Sustainable in Agriculture/Key Laboratory for Energy Saving and Waste Disposal of Protected Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Science, Beijing 100081, China)

Abstract The aim of this study was to improve light use efficiency (LUE) and electric-energy use efficiency (EUE) by optimizing light intensities in a controlled environment. Three light intensities of 200, 300 and 400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ with the ratio of red and blue light (1:1) were set and described as L200, L300 and L400, respectively. The results showed that 1) By calculating dry weight obtained during the cultivation, EUE under L300 treatment was 0.948%, 5.22% and 46.6% higher than those under L200 and L400 treatments, respectively; LUE under L200 treatment was 4.17%, 12.0% and 59.3% higher than those under L300 and L400 treatments, respectively. 2) For lettuce harvested, fresh weight and dry weight were both the greatest under L300 treatment, which were 41.3 and 2.58 g respectively. The former was 23.5% and 25.2% higher than those under L200 and L400 treatments, respectively; the latter was 28.4% and 12.8% higher than those (under L200 and L400 treatments, respectively). 3) Meanwhile, the content of soluble sugar increased and nitrate decreased under L300 treatment compared with those under L200 treatment and no significant difference was found between L300 and L400 treatments. Based on the above analysis, it is concluded that the light intensity of 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ can be recommended as optimal light intensity under red and blue light for lettuce growth.

Keywords lettuce; light-emitting diode; light intensity; light use efficiency; electric-energy use efficiency

收稿日期: 2015-11-17

基金项目: 863 计划资助项目(2013AA103007); 引智项目(Y20150326002)和中罗国际合作项目(2014DFG32110)联合资助
第一作者: 王君, 博士研究生, E-mail: wangjun112209@163.com

通讯作者: 仝宇欣, 助研, 博士, 主要从事设施农业环境控制研究, E-mail: tongyuxin@caas.cn

植物生长环境精确可控的人工光栽培系统,因其具备可周年连续生产、土地利用效率高^[1-2]等优势,逐渐被公认为是一种有效的植物栽培方式。但由于目前人工光源能耗高,约占系统总能耗的40%~50%^[3],并且光能或电能利用效率(LUE或EUE)低,LUE约为理论最大值的30%左右^[4-5],限制了人工光植物栽培系统的推广应用。因此,降低人工光植物栽培系统中人工光源能耗,提高光能利用效率已成为推动人工光栽培系统进一步发展的关键。

光能利用效率和电能利用效率与光源类型、作物种类、环境条件和栽培密度等密切相关。目前对于改善LUE的途径主要包括:1)增强光源本身的发光效率,如使用光电转化效率较高的LED灯代替散热量较高的高压钠灯和荧光灯;2)提高植株冠层的光捕获量,如安装反光材料、增大栽培密度^[4,6];3)提高植物光合速率增加产量的方法,如改善冠层结构、减小光呼吸、优化环境(CO₂浓度、氮水平等)条件和应用基因技术^[7]。而针对环境可控的栽培系统中红蓝光作为人工光源的研究,多集中于不同光强或光质对植物生长和品质的影响^[8-12],有关不同LED光强下各生长阶段生菜对光源LUE和EUE的研究还鲜有报道。本试验通过设置不同的光强水平,旨在优化光强参数来降低人工光能耗,提高光能或电能的利用效率,结合对生菜产量和品质的综合分析,确定生菜栽培最佳的光强参数。

1 材料与方法

1.1 材料

以奶油生菜(*Lactuca sativa* L.)作为栽培对象,并采用深液流水耕栽培技术和营养液自动灌溉系统。以蛭石和草炭的体积比为3:1作为栽培基质,于2014年6月16日进行穴盘育苗,育苗光强为75 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,14 d后选择长势一致的幼苗分别定植于4组1 000 mm×600 mm(长×宽)的栽培板上。试验期间,明期和暗期空气设定温度分别为24和20 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度为75%±10%,CO₂浓度为(450±50) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,光照时间为10 h/d,每小时循环供液5 min,营养液pH为6.0±0.5,DAS20(DAS,day after seedling的简称,从定植之日算起为第1天)更换一次营养液。人工光源为光强和光质可精确调控的红蓝LED光源。为减小光环境均匀性对生菜生长的影响,每3 d对栽培板的位置和方向进行调换,并且始终保持光源与植物冠层的间距为25 cm。

1.2 试验设计

采用红蓝配比1:1的LED光源,其设置依据为该光配比可以提高植物的干鲜重^[13-15]和叶片的光合速率^[16],红蓝光的波峰分别为655和457 nm。光强分别设定为200、300和400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ^[17],具体的光源参数如表1所示。试验过程中,根据生菜的生长情况进行间苗以对栽培密度进行调整。表2为栽培密度随定植时间的变化情况,2次采样期间保持栽培密度不变。

表1 光源参数

Table 1 Parameters of light source

处理 Treatments	光强/ $(\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ Light intensity	功率/W Power	转换系数 Coefficient
L200	200	148	0.215
L300	300	179	0.254
L400	400	231	0.246

注:转换系数代表植物冠层表面所接收的光合有效辐射能与耗电量的比值。

Note: Coefficient represents the ratio of the photosynthetic active radiation received by the canopy and the electric-energy consumption.

1.3 仪器和测量方法

采用北电仪表(PowerBay-SSM,精度:0.1 W,中国)测量光源耗电量;采用光纤光谱仪(AvaSpec-2048-USB2,荷兰)测定光强。将生菜鲜样在85 $^{\circ}\text{C}$

下烘干至恒重后用电子天平(Sartorius BL610,精度:0.01 g,德国)称量。LED光源板(东莞生物光环境科技有限公司,东莞)红蓝光光强大小是通过调节供电直流电源的电流来实现的。

表 2 栽培密度随定植时间的变化

Table 2 Time course of cultivation density

时间 Time	栽培密度/ m^{-2} Cultivation density
DAS18	208
DAS26	143
DAS29	83
DAS32	65
DAS35	42
DAS38	25

注:1)时间均自定植之日算起。下同。2)栽培密度均为采样之前的数值。

Note:1)Time was counted from day of seedling.

The same as below. 2) Cultivation density was recorded before taking samples.

植物叶片中碳、氮含量采用杜马斯燃烧法^[18]测量; NO_3^- -N 含量采用水杨酸-硫酸法^[19]测量; 可溶性糖含量采用蒽酮硫酸法^[19]测量。在每个处理中随机选取 6 株生菜, 对完全展开的第二片叶利用光合仪(Li-cor 6400XT, USA)进行光合作用测量, 测量光强与处理光强一致。

1.4 计算方法

$$\text{EUE}_i = \frac{(\text{DW}_i - \text{DW}_{i-1}) \times W_{che} \times S \times D_i}{P \times t} \quad (1)$$

其中: EUE_i 为第 i 次与第 $i-1$ 次采样期间生菜的电能利用效率, %; i 为 1~6 的整数; $\text{DW}_i, \text{DW}_{i-1}$ 分别代表第 $i, i-1$ 次所取样品干重的平均值, g/株, 在本试验中忽略定植时幼苗的干重, 将 $\text{DW}_0 \approx 0$; W_{che} 为每克干重对应的化学能, $2 \times 10^4 \text{ J/g}^{[20]}$; D_i 为第 i 次采样时对应的栽培密度, 株/ m^2 , 该值参考表 1; P 为光源功率, W; t 为相邻 2 次采样期间累计总光照时间, s; S 为栽培面积, 为 0.6 m^2 。

$$\text{LUE}_i = \frac{(\text{DW}_i - \text{DW}_{i-1}) \times W_{che} \times D_i}{W_r \times t} \quad (2)$$

其中: LUE_i 为第 i 次与第 $i-1$ 次采样期间生菜的光能利用效率, %; W_r 为单位面积内植株冠层接收到的光合有效辐射能, W/m^2 。

$$\text{GR} = \frac{\text{DW}_i - \text{DW}_{i-1}}{d_i - d_{i-1}} \quad (3)$$

其中: GR 为干重增长速率, g/d; d_i, d_{i-1} 为分别代表第 $i, i-1$ 次采样的时间差, d。

$$p = \frac{\text{PAR} \times 38 \times 10 \times 3\,600/10^6}{\sum_{j=0}^5 W_j \times (D_j - D_{j+1}) + W_{\text{final}} \times D_6} \quad (4)$$

其中: p 为生产单位质量生菜所需要的光量子数, mol/g; W_j 为第 j 次采样所收获生菜样品干重的平均值, g/株; D_{j+1} 为第 $j+1$ 次采样时对应的栽培密度, 株/ m^2 , 该值参考表 2; W_{final} 为收获时生菜样品干重的平均值, g/株; D_6 为收获时栽培密度, 株/ m^2 ; PAR 为冠层处处理光强, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; 38 为总定植时间, d; $3\,600 \times 10$ 为明期总时间, s。

$$k = \frac{P \times 38 \times 10 \times 3\,600/1\,000\,000}{\sum_{j=0}^5 [W_j \times (D_j - D_{j+1}) \times S] + W_{\text{final}} \times D_6 \times S} \quad (5)$$

其中: k 为生产单位重量生菜所消耗的电能, MJ/g。

1.5 数据统计与分析

采用 Excel 进行数据整理, 利用 SAS 8.0 软件对数据进行显著性分析, 采用邓肯氏多重比较, 显著水平 $P \leq 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 LUE 和 EUE

EUE 和 LUE 是衡量植物对人工光源所消耗电能和接收光能利用程度的重要指标。从图 1 中可以看出, EUE 和 LUE 随定植时间的变化规律基本一致, 均出现先上升后下降再上升的趋势。LUE 数值约为 EUE 的 4~5 倍。在生菜幼苗定植 29 d 后, 所有处理的 EUE 和 LUE 均达到最大值。处理 L200 下生菜的 LUE 一直维持在最大值或与最大值无显著差异。处理 L300 下生菜的 EUE 一直维持在最大值或与最大值无显著差异。除 DAS35 测量结果外, 处理 L400 下生菜 EUE 和 LUE 在所有处理中最小。

以整个生长期(定植至收获)所收获生菜的干物重计算, 处理 L300 下生菜的 EUE 最大, 为 0.948%, 较处理 L200 和 L400 下生菜的 EUE 分别高 5.22% 和 46.6%; 处理 L200 下生菜的 LUE 最大, 为 4.17%, 较处理 L300 和 L400 下生菜的 LUE 分别高 12.0% 和 59.3%。由表 3 可知, 生产单位干鲜重生菜处理 L200 下光源消耗的光量子数最少, 处理 L300 次之, 处理 L400 最多。生产单位干重处理 L300 光源消耗的电量最少, 处理 L200 次之, 处理 L400 最多。

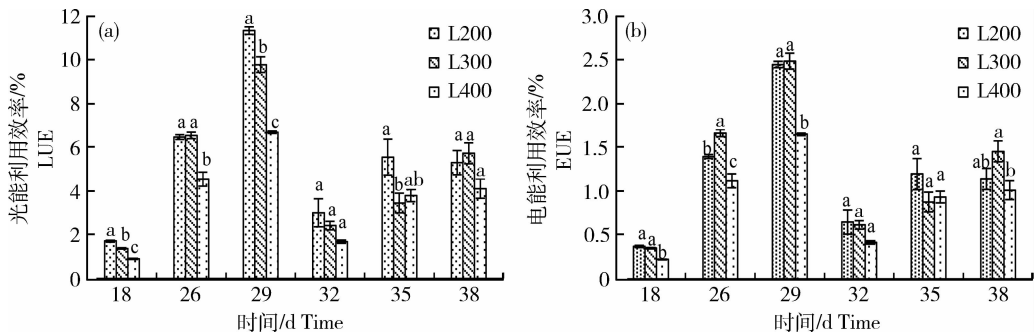


图1 LUE(a)和EUE(b)随定植时间的变化规律

Fig. 1 Time course of light use efficiency (LUE) and electric-energy use efficiency (EUE)

表3 生产单位质量生菜干鲜重所需要的光量子数及消耗电能

Table 3 Photons and electric-energy consumption for producing per unit fresh and dry weight

处理 Treatments	光量子需求量/(mol/g)		电能需求量/(MJ/g)	
	<i>p</i>		<i>k</i>	
	干重 Dry weight	鲜重 Fresh weight	干重 Dry weight	鲜重 Fresh weight
L200	2.14	0.112	2.22	0.116
L300	2.41	0.126	2.11	0.110
L400	3.42	0.206	3.09	0.186

2.2 地上部分干重增长速率 GR

增长速率是表征植株生长快慢的指标。地上和地下部分干鲜重增长速率变化趋势一致(数据未列出),均表现为先上升后下降再上升的趋势,与LUE和EUE随定植时间的变化趋势一致(图1和图2)。由图2可知,在生菜幼苗定植29d之前,各处理地上干重增长速率的大小顺序为L300>L400>L200。在生菜幼苗定植时间为29d时,各处理地上干重GR达到第一次峰值,处理L300下GR较处理L200和L400下GR分别高23.0%和17.0%;但生

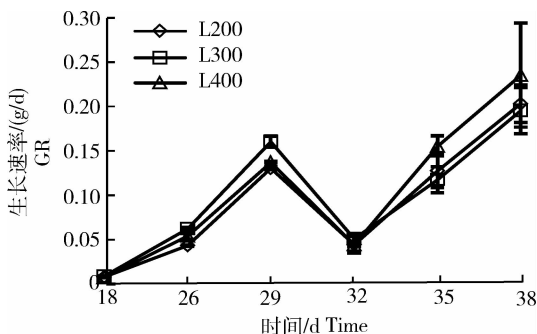


图2 地上部分干重增长速率随定植时间的变化规律

Fig. 2 Time course of growth rate of dry weight

菜幼苗定植29d之后,各处理下地上干重GR之间无显著差异。

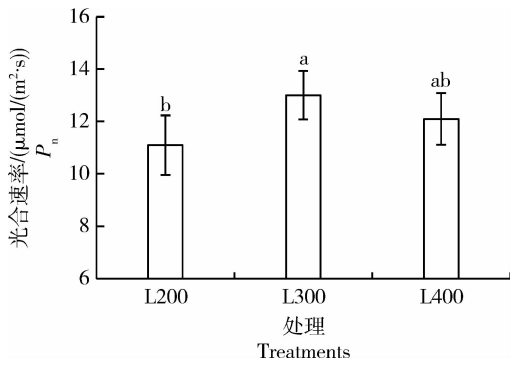
对于最后收获的生菜而言,从定植至收获的整个生长阶段,处理L300下地上部分的鲜干重最大,分别为 (41.3 ± 0.70) g和 (2.58 ± 0.14) g;并且,地上鲜重GR日变化平均值最大,为1.09 g/d(计算时忽略定植前鲜重),较处理L200和L400下地上鲜重GR分别高23.5%和25.2%;处理L300下地上干重GR亦如此,为0.068 g/d(计算时忽略定植前干重),较处理L200和L400下地上干重GR分别高28.4%和12.8%。

2.3 叶片光合作用

光合速率是影响植株产量和固定化学能的重要因素。从图3中可以看出,处理L300下叶片的 P_n 最大,处理L400次之,且二者之间无显著差异,其次为处理L200,该结果与生菜幼苗定植29d后各处理下生菜GR和干鲜重的大小顺序一致。

2.4 叶片总碳、总氮含量变化

碳、氮代谢直接影响着植物光合速率和生长发育,并最终影响产量和光能利用效率。因二者还原需要叶片的光合系统提供能量,故其代谢均取决于



数据取自生长速率 GR 第一次达到峰值的时间，即定植后的第 29 天。

Data were recorded from the 29th day after seedling.

图 3 不同光强处理下生菜叶片的光合作用
Fig. 3 Photosynthetic rate under different light intensities treatments

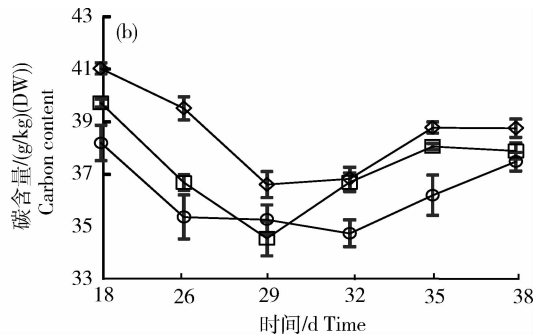
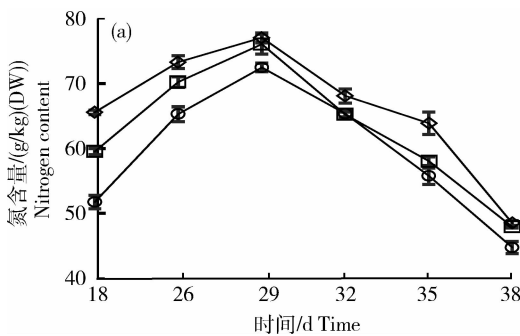


图 4 生菜地上部分总碳和总氮含量随定植时间变化规律

Fig. 4 Time course of total carbon and total nitrogen contents during the day after seedling

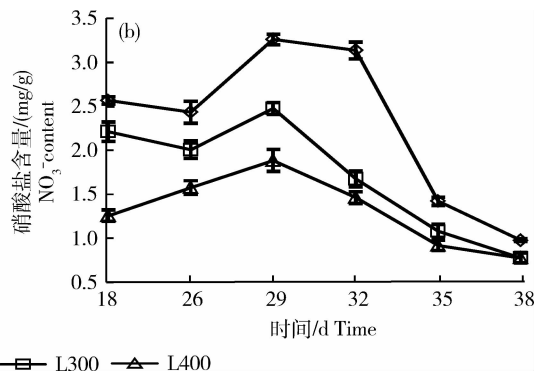
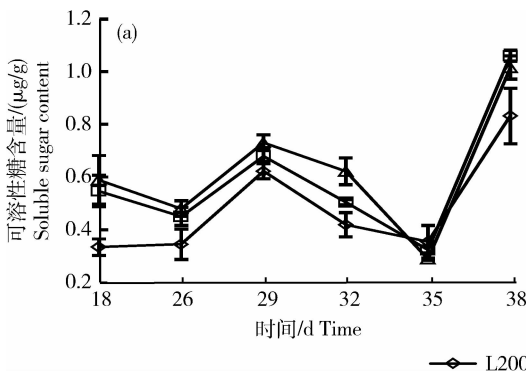


图 5 生菜叶片可溶性糖和硝态氮浓度随定植时间的变化规律

Fig. 5 Time course of soluble sugar and nitrate nitrogen contents during the day after seedling

硝酸盐被人体摄入后，大约会有 5% 被转化为亚硝酸盐，对人体有极大的危害^[21-22]。硝酸盐含量高低已成为评估蔬菜营养价值的重要指标之一^[23]。如图 5(b) 所示，硝酸盐浓度随定植时间呈先上升后

光照水平。从图 4 中可以看出，地上干重总 N 含量总体上随定植时间呈现先上升后下降的变化趋势。各处理地上干重总氮含量大小变化顺序为 L200 > L300 > L400。地上干重总碳含量总体上随定植时间呈现先下降后上升的变化趋势，与总氮含量随定植时间变化趋势相反；并且，各处理地上干重总碳含量大小变化顺序为 L400 > L300 > L200。

2.5 可溶性糖和硝酸盐变化

可溶性糖是植株重要的碳代谢产物，与光合生产、碳代谢和氮代谢密切相关。如图 5(a) 所示，可溶性糖浓度总体上随定植时间呈现先增长后下降再上升的趋势。并且，对于红蓝 LED 处理，随光强增加可溶性糖浓度增加，大小顺序为 L400 > L300 > L200。对于定植 38 d 后收获的生菜而言，处理 L300 和 L400 间叶片可溶性糖浓度没有显著性差异。

下降趋势，远低于鲜重硝态氮 3 000 mg/kg 的浓度标准^[24]。并且随光强增大，硝酸盐含量降低。对于定植 38 d 后收获的生菜而言，处理 L300 和 L400 间叶片硝酸盐浓度均降到最低，并且不存在显著性差异。

3 讨 论

本试验研究结果表明 LUE 数值高于 EUE, 其原因为前者是由植物冠层表面接收的光合有效辐射能决定, 后者是由光源消耗的电能转化为光能的效率决定, 而电能并不能完全转化为光能, 大部分是以热的形式损失, 故后者小于前者。在收获之前, 处理 L200 下生菜的 LUE 高于处理 L300 和 L400, 与 Fu 等^[17]研究发现在弱光下实际光化学量子效率越高引起光能利用效率越高的结果一致。而处理 L300 下生菜的 EUE 高于处理 L200 和 L400, 即生产单位干鲜重消耗的电能最少, 与前人^[25-26]研究结果中随光强增大电能利用效率先升高后降低的结果一致。从图 1 可以看出, 在生菜幼苗定植 29 d 之前, 处理 L400 下 LUE 和 EUE 一直为所有处理中最小值, 其原因可能为生长初期 $400 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照强度对于生菜幼苗过高, 叶片光合器官吸收过高的光能不能及时消散, 降低光合速率同时引起光抑制, 甚至损害光反应中心的缘故。在生菜幼苗定植 29 d 之后, 处理 L400 下 EUE 和 LUE 与其他处理之间不存在显著性差异(定植 38 d 获得的 EUE 除外), 其原因可能为随着生菜叶片生长发育形成了适应该光照强度的光合器官和细胞结构, 促进了光合产物的不断积累, 图 2 中 29 d 之后处理 L400 下地上部分干重增长速率最大也印证了这一点。同时, 本试验结果中处理 L200 和 L300 下生菜 LUE 分别为 4.17% 和 3.72%, 均高于前人荧光灯处理下植物光能利用效率约 3%^[4]的研究结果, 其原因为红蓝 LED 的发光光谱均在植物光合色素吸收的波峰区域, 极大提高了植物对光能的利用程度。

生菜的 LUE 和 EUE 之所以在定植 29 d 之前一直处于上升趋势, 是因为植株的干重累积速率要高于栽培密度的下降速率。如在定植 29 d 获得的 LUE 和 EUE 数据, 尽管定植 26 d 采样之前栽培密度是定植 29 d 采样之前的 1.7 倍, 但是在定植时间为 26~29 d, 生菜干物质累积速率是定植 26 d 测量结果的 2.5~3.0 倍, 故定植时间为 26~29 d 内植株干重累积量与栽培密度的乘积达到最大值, 从而使生菜幼苗在定植 29 d 后各处理 EUE 和 LUE 达到峰值。之后植株生长进入平稳期, 干重累积速度放缓, 随着栽培密度的减小, LUE 和 EUE 也随之下降。在定植 32 d 之后, 由于栽培密度不断下降, 叶片水平方向伸展捕获更多的光合有效辐射, 生长速

率再次获得提高, 从而提高了 LUE 和 EUE。

植株体内碳、氮代谢是植物正常生长发育的物质基础, 碳、氮是参与植物生命代谢的重要物质^[27]。图 3 中地上部分总碳、总氮含量随定植时间变化趋势相反是由于碳、氮代谢相互制约。地上部分总氮含量呈先上升后下降变化趋势, 原因为前期氮充足时叶片中的氮转化为蛋白质积累起来, 提高氮代谢水平; 后期随着氮素消耗, 氮代谢逐渐转向碳代谢, 从而引起碳水化合物迅速积累, 这与刘国顺等^[28]研究结果一致。随着营养液中氮素消耗, 定植 32 d 后, 地上部氮素以氨基酸的形式反馈到根部, 并且植株向根系投入较多的碳同化物质, 促进根系生长发育, 使根系吸收更多的养分和水分, 导致植株根冠比增加。处理 L200、L300 和 L400 根冠比(地下干重/地上干重)分别从 0.112 ± 0.001 、 0.103 ± 0.010 和 0.120 ± 0.018 增加到 0.153 ± 0.003 、 0.173 ± 0.010 和 0.173 ± 0.009 。同时, 碳同化产物向根部的转移也造成了叶片可溶性糖含量的降低。而可溶性糖含量与总碳含量变化趋势不一致的原因可能为光强影响了碳代谢中非结构性碳水化合物合成的途径。随着光强增加, 植株合成碳水化合物的能力增加, 碳含量增加, 氮含量降低, 与前人^[29-30]的研究结果一致。而处理 L200 下总氮含量高于其他处理, 干重积累却最低的原因可能为叶片氮同化增强, 与碳代谢竞争光合作用光反应产生的同化力, 即 ATP 和 NADPH; 并且由呼吸作用所提供碳架的能力也会被削弱, 造成 CO_2 同化速率下降^[31], 进而造成该处理下生菜干重偏低, 图 3 中处理 L200 下叶片在各处理中 P_n 最低也印证了这一点。因此, 适宜的光照强度才能维持碳氮代谢平衡, 获得更多的生物量积累。

光强与可溶性糖和硝酸盐含量密切相关。对于红蓝 LED 组合光源, 随着光强增加, 可溶性糖含量增加, 与王志敏等^[32]研究结果一致。光强增加降低了硝酸盐的含量, 原因是提高了硝酸还原酶的活性, 增加了氮素同化能力^[33]; 同时, 可溶性糖和硝酸盐之间存在负反馈, 随着光强增加, 可溶性糖含量升高, 硝酸盐含量降低, 部分原因可能是因为糖引起硝酸还原酶信使 RNA 的积累^[34]。生菜幼苗定植 32~38 d, 硝酸盐含量迅速下降另外的原因可能为营养液中氮素不断的消耗, 植株体内贮存库的 NO_3^- 向代谢库转移被生长利用和地上部分生物量积累所引起的“稀释”作用。

4 结 论

本研究通过采用红蓝配比为 1 : 1 的 LED 组合光源研究不同光强对生菜的电能利用效率、光能利用效率及其品质的影响, 结果发现:

1) 适宜的光强有利于获得较优的 EUE, 光强过高反而会抑制生长, 造成积累单位干重所消耗电能的增加。

2) 适当地增加光强不仅可以提高生菜产量和叶片可溶性糖含量, 还可以降低硝酸盐含量。

在红蓝 LED 不同光强对生菜光能与电能利用效率及干重累积量影响的基础上, 结合对品质的综合分析, 推荐 $300 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 作为红蓝配比为 1 : 1 的 LED 组合光源下生菜生长的光照强度。

参 考 文 献

- [1] 杨其长, 张成波. 植物工厂概论[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004
Yang Q C, Zhang C B. *An Introduction to Plant Factory*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004 (in Chinese)
- [2] Kozai T, Kubota C, Chun C, Afreen F, Ohshima K. *Transplant Production in the 21st Century* [M]. Beilun: Springer Netherlands, 2000
- [3] 王君. 人工光植物工厂风机和空调协同降温节能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013
Wang J. Reduction in electric-energy consumption for cooling in plant factory with artificial light [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013 (in Chinese)
- [4] 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, Physical and Biological Sciences*, 2013, 89(10): 447-461
- [5] Long S P, Zhu X G, Naidu S L, Ort D R. Can improvement in photosynthesis increase crop yields? [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2006, 29(3): 315-330
- [6] Kozai T, He D X, Chun C. Commercialized closed system with artificial lighting for high quality plant production at low cost [C]. In: 2004 CIGR International Conference Beijing. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2004, 50: 6
- [7] Zhu X G, Long S P, Ort D R. Improving photosynthetic efficiency for greater yield [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2010, 61: 235-261
- [8] 闻婧, 杨其长, 魏灵玲, 程瑞锋, 刘文科, 鲍顺淑, 周晚来. 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, Cheng R F, Liu W K, Bao S S, Zhou W L. 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 (in Chinese)
- [9] 余意, 杨其长, 刘文科. LED 红蓝光质对三种蔬菜苗期生长和光合色素含量的影响[J]. 照明工程学报, 2015, 26(4): 107-110
Yu Y, Yang Q C, Liu W K. Effects of LED red and blue light ratio on growth photosynthetic pigment contents of pea, cucumber and tomato seedlings [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2015, 26(4): 107-110 (in Chinese)
- [10] 张毅华, 张晓燕, 崔瑾. 光强对黑豆芽苗菜生长和营养品质的影响[J]. 中国蔬菜, 2013, 16: 49-54
Zhang Y H, Zhang X Y, Cui J. Effects of light intensity on growth and nutritional quality of black soybean sprouts [J]. *China Vegetables*, 2013, 16: 49-54 (in Chinese)
- [11] 陈文昊, 徐志刚, 刘晓英, 杨杨, 王志敏, 宋非非. LED 光源对不同品种生菜生长和品质的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(7): 1434-1440
Chen W H, Xu Z G, Liu X Y, Yang Y, Wang Z M, Song F F. Effect of LED light source on the growth and quality of different lettuce varieties [J]. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2011, 31(7): 1434-1440 (in Chinese)
- [12] 刘文科, 杨其长, 邱志平, 赵姣姣. 光质对豌豆苗生长、光合色素和营养品质的影响[J]. 中国农业气象, 2012, 33(4): 500-504
Liu W K, Yang Q C, Qiu Z P, Zhao J J. Effects of LED light quality on growth, photosynthetic pigments and nutritional quality of pea seedlings [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2012, 33(4): 500-504 (in Chinese)
- [13] Lian M L, Murthy H N, Paek K Y. Effect of light emitting diodes (LEDs) on the in vitro induction and growth of bulblets of *Lilium oriental* hybrid 'Pesaro' [J]. *Scientia Horticulturae*, 2002, 94(3): 365-370
- [14] Kim S J, Hahn E J, Heo J W, Paek K Y. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of *Chrysanthemum* plantlets in vitro [J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, 101(1): 143-151
- [15] Liu X Y, Guo S R, Xu Z G, Jiao X L, Takafumi T. Regulation of chloroplast ultrastructure, cross-section anatomy of leaves and morphology of stomata of cherry tomato by different light irradiations of LEDs [J]. *Hortscience*, 2011, 46(2): 217-221
- [16] Lee S H, Tewari R K, Hahn E J, Paek K Y. Photon flux density and light quality induce changes in growth, stomatal development, photosynthesis and transpiration of *Dunal* plantlets [J]. *Plant cell, Tissue and Organ Culture*, 2007, 90(2): 141-151
- [17] Fu W, Li P, Wu Y. Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce [J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 135: 45-51
- [18] 范志影, 周陈维. 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

- 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 (in Chinese)
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007
- Li H S. *Principle and Technology of Plant Physiological and Biochemical Experiments* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007
- [20] Yokoi S, Kozai T, Ohyama K, Hasegawa T, Chun C, Kubota C. Effects of leaf area index of tomato seedling populations on energy utilization efficiencies in a closed transplant production system [J]. *Journal of Society of High Technology in Agriculture*, 2003, 15(4): 231-238 (in Japanese)
- [21] Santamaria P. Review nitrate in vegetables: Toxicity, content, intake and EC regulation [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2006, 86(1): 10-17
- [22] Eichholzer M, Gutzwiller F. Dietary nitrates, nitrites, and N-nitroso compounds and cancer risk; A review of the epidemiologic evidence [J]. *Nutrition Reviews*, 1998, 56(4): 95-105
- [23] 周秋月. 设施弱光对叶用莴苣生长和硝酸盐积累的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2008
- Zhou Q Y. Effects of low light stress on the growth and nitrate accumulation of lettuce in greenhouse [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008 (in Chinese)
- [24] GB 19338—2003. 蔬菜中硝酸盐的限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003
- GB 19338—2003. Tolerance limit for nitrate in vegetables[S]. Beijing: Standard Press of China, 2003 (in Chinese)
- [25] Fan X X, Xu Z G, Liu X Y, Tang C M, Wang L W, Han X L. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light [J]. *Scientia Horticulture*, 2013, 153: 50-55
- [26] 沈韞毓, 郭双生, 艾为党, 唐永康. 红蓝 LED 光照强度对密闭生态系统中生菜生长状况及光合速率的影响 [J]. *载人航天*, 2014, 20(3): 273-278
- Shen Y Z, Guo S S, Ai W D, Tang K Y. Effects of the red and blue light intensity on lettuce growth and photosynthetic rate in a closed system [J]. *Manned Spaceflight*, 2014, 20(3): 273-278 (in Chinese)
- [27] 马志远, 段九菊, 康黎芳, 张超, 王云山, 曹冬梅. 不同光照强度对观赏凤梨生长发育的影响 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(31): 189-193
- Ma Z Y, Duan J J, Kang L F, Zhang C, Wang Y S, Cao D M. Effect of different light intensity on growth and development of *Bromeliaceae* [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(31): 189-193 (in Chinese)
- [28] 刘国顺, 云菲, 史宏志, 王可, 张春华, 宋晶. 光、氮及其互作对烤烟含氮化合物含量、抗氧化系统及品质的影响 [J]. *中国农业科学*, 2010, 43(18): 3732-3741
- Liu G S, Yun F, Shi H Z, Wang K, Zhang C H, Song J. Effects of cooperation of light and nitrogen on the content of nitric compound, antioxidant system and quality of flue-cured tobacco [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(18): 3732-3741 (in Chinese)
- [29] 肖春生, 陈颐, 钟越峰, 杨虹琦, 何命军, 李帆, 裴晓东. 不同比例红蓝光对烟苗生长及碳氮代谢的影响 [J]. *中国农学通报*, 2013, 29(22): 160-166
- Xiao C S, Chen Y, Zhong Y F, Yang H Q, He M J, Li F, Pei X D. The effect on different proportion of red blue light to growth and carbon and nitrogen metabolism of the tobacco seedling [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(22): 160-166 (in Chinese)
- [30] 周忆堂. 不同光强对长春花 (*Catharanthus roseus*) 光合作用及次生代谢的影响研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2008
- Zhou Y T. Studies on the effect of different light intensity on the photosynthesis and secondary metabolite of *Catharanthus roseus* [D]. Chongqing: Xinan University, 2008 (in Chinese)
- [31] 曹翠玲, 李生秀, 苗芳. 氮素对植物某些生理生化过程影响的研究进展 [J]. *西北农业大学学报*, 1999, 27(4): 96-101
- Cao C L, Li S X, Miao F. The research situation about effects of nitrogen on certain physiological and biochemical process in plants [J]. *Acta Universitatis Agriculturae Boreali-Occidentalis*, 1998, 27(4): 96-101 (in Chinese)
- [32] 王志敏, 宋非非, 徐志刚, 刘晓英, 杨杨. 不同红蓝 LED 光照强度对叶用莴苣生长和品质的影响 [J]. *中国蔬菜*, 2011, 1(16): 44-49
- Wang Z M, Song F F, Xu Z G, Liu X Y, Yang Y. Effect of red and blue LED light intensity on growth and quality of lettuce [J]. *China Vegetables*, 2011, 1(16): 44-49 (in Chinese)
- [33] 王强, 钟旭华, 黄农荣, 郑海波. 光、氮及其互作对作物碳氮代谢的影响研究进展 [J]. *广东农业科学*, 2006(2): 37-40
- Wang Q, Zhong X H, Huang N R, Zheng H B. Interactions of nitrogen with light in the photosynthetic traits and metabolism of carbon and nitrogen of crop [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2006(2): 37-40 (in Chinese)
- [34] Lillo C. Light regulation of nitrate reductase in green leaves of higher plants [J]. *Physiologia Plantarum*, 1994, 90(3): 616-620