

网络出版时间:2017-06-06 13:46

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2017.07.010

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20170606.1346.020.html>

不同红蓝光质比和光照强度对金娃娃萱草 试管苗生长的影响

尚文倩¹, 王 政¹, 何松林^{1,2}, 孟新亚¹, 宋盈龙¹

(1 河南农业大学 林学院, 河南 郑州 450002; 2 河南科技学院 园艺园林学院, 河南 新乡 453003)

【摘 要】【目的】研究 LED 红蓝不同光质比和光照强度对金娃娃萱草试管苗生长的影响, 为提供高品质的金娃娃萱草试管苗提供理论依据。【方法】采用 LED 光源的红光 R(主波长 640 nm)、蓝光 B(主波长 464 nm), 设计 5 种不同光质配比(100% R、80% R+20% B、70% R+30% B、50% R+50% B、100% B), 以普通荧光灯作为对照(CK), 从中筛选出最佳光质比; 在最佳光质比条件下, 设置不同光照强度(30, 40, 50, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$), 测定不同光质比和光照强度处理下金娃娃萱草试管苗的形态指标、叶绿素、类胡萝卜素、可溶性糖、可溶性蛋白含量以及根系活力。【结果】金娃娃萱草株高和可溶性蛋白含量以单一蓝光处理最大, 最大根长和可溶性糖含量以单一红光处理最大, 叶数、叶绿素、类胡萝卜素含量和根系活力均以 70% R+30% B 处理最大, 根数和干鲜质量均以 80% R+20% B 处理最大。株高、叶数、根数、干鲜质量、叶绿素及可溶性蛋白含量均以光照强度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理最大, 最大根长以光照强度为 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理最大, 可溶性糖含量和根系活力以光照强度为 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理最大。【结论】当 LED 红蓝光质比为 70% R+30% B、光照强度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 更适于金娃娃萱草试管苗的生长及品质的提高。

【关键词】 LED; 红蓝光; 光强; 金娃娃萱草; 试管苗

【中图分类号】 S682.1⁺9

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2017)07-0090-07

Effects of light quality ratio and intensity of red/blue light on growth of *Hemerocallis middendorffii* plantlets *in vitro*

SHANG Wenqian¹, WANG Zheng¹, HE Songlin^{1,2}, MENG Xinya¹, SONG Yinglong¹

(1 College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou, Henan 450002, China;

2 College of Horticulture and Landscape Architecture, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, Henan 453003, China)

Abstract: 【Objective】The effects of different light quality ratios and intensities of LED red/blue light on growth of *Hemerocallis middendorffii* plantlets *in vitro* were studied to provide theoretical evidence for cultivating high-quality *Hemerocallis middendorffii* plantlets *in vitro*. 【Method】The *Hemerocallis middendorffii* plantlets *in vitro* were cultured under five different LED ratios (100% R, 80% R+20% B, 70% R+30% B, 50% R+50% B, and 100% B). Using ordinary fluorescent lamps as control (CK), the best quality ratio was screened. With the best quality ratio, different light intensities (30, 40, 50, and 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) were tested to examine the effects on morphology, chlorophyll content, carotenoid content, soluble sugar content, soluble protein content, and root activity. 【Result】The plant height and soluble protein content reached maximum under monochromatic 100% B while the root length and soluble sugar content

〔收稿日期〕 2016-05-20

〔基金项目〕 河南省产学研合作项目(162107000068); 国家农业科技成果转化资金项目(2012D0001018)

〔作者简介〕 尚文倩(1987—), 女, 河南孟津人, 在读博士, 主要从事园林植物生物技术研究。

〔通信作者〕 何松林(1965—), 男, 河南淮阳人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事园林植物生物技术研究。

reached maximum under monochromatic 100% R. The leaf number, chlorophyll content, carotenoid content and root activity reached maximum in 70% R+30% B treatment. The root number and dry and fresh quality reached maximum in 80% R+20% B. The plant height, leaf number, root number, dry and fresh quality, chlorophyll content and soluble protein content all reached maximum with 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ intensity, the root length reached maximum under 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ intensity, and the sugar content and root activity reached maximum under 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ intensity. 【Conclusion】 The plantlets *in vitro* grew well under 70% R+30% B and 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ intensity.

Key words: LED; red/blue light; light intensity; *Hemerocallis middendorffii*; plantlets *in vitro*

金娃娃萱草(*Hemerocallis middendorffii*), 属百合科萱草属植物, 多年生宿根花卉, 其花色艳丽, 适应性广, 是城市绿化不可多得的优良材料^[1]。萱草广泛应用于园林景观中, 有将近 4 000 个注册品种^[2]。萱草的繁殖方式有分株繁殖、播种繁殖、分芽繁殖等, 但萱草结实率低, 一般采用分蘖等无性繁殖方式进行增殖, 但其繁殖速度较慢, 难以适应市场商品化需求^[3]。组织培养具有生长周期短、繁殖系数高、利于工厂化和自动化控制等优点, 国内外学者对萱草组织培养开展了大量研究, 主要集中在品种^[1,4]、外植体类型^[5]、激素类型^[6-7]、琼脂类型^[8]、蔗糖浓度^[9]等方面, 但如何提高萱草试管苗品质仍是一个需要继续深入研究的课题。

光源作为组织培养关键技术之一, 研究其对植物试管苗的生长发育具有重要意义。光质和光强对组培植物的形态学、光合作用、内源激素及叶片结构具有显著影响^[10-11]。研究表明, 光质、光强能够调节光合作用不同类型叶绿体蛋白质复合物的形成以及光系统 I(PSI)和光系统 II(PSII)间的电子传递, 通过光质来控制植株的生长^[12-13]。植物生长所吸收的主要光谱为波长 610~720 nm 的红橙光及 400~510 nm 的蓝紫光, 而传统荧光灯的发射光谱在红橙光区域很低^[14]。LED (light emitting diodes) 光源因其无可比拟的优势而受到人们的青睐^[15-17], 国内外已有学者采用 LED 对菊花^[18]、文心兰^[11]、黄瓜^[19]和番茄^[20]等进行研究, 并取得初步成果, 但有关 LED 光源对萱草的影响尚未见报道。本试验以金娃娃萱草为材料, 研究不同红蓝光质比和光照强度对其生长的影响, 以期高品质金娃娃萱草试管苗的商业化生产提供依据, 也为 LED 在植物组培中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材 料

供试材料为金娃娃萱草(高约 1 cm), 购于山西

农科所。将试管苗接种于 MS+0.2 mg/L 6-BA+0.2 mg/L KT+0.05 mg/L NAA+30 g/L 蔗糖+7 g/L 琼脂(pH=5.8)培养基上, 常规培养条件(温度 $(24\pm1)^{\circ}\text{C}$ 、光照强度 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、光照时间 12 h/d)下壮苗培养。1 个月(苗高约 2 cm), 随机选取生长状况及规格一致的试管苗(去掉根)备用。

1.2 试验设计

试验所用 LED 光源为超高亮度红光(R)LED (HFR405CP, 主波长 640 nm, 厦门华联电子有限公司)和蓝光(B)LED (HFBA05011CP-15, P4E6, 主波长 464 nm, 厦门华联电子有限公司), 此系统由河南农业大学自主设计, 采用并联的方法构成 LED 阵列, 通过电压连续可调的开关电源实现对 LED 光质比和光照强度的调控。选用 100 mL 三角瓶, 将供试试管苗在无菌条件下接种于 1/2MS+0.5 mg/L IBA+30 g/L 蔗糖+7 g/L 琼脂(pH=5.8)固体培养基上, 每瓶接种 5 株试管苗, 每处理接种 20 瓶。预培养 1 周后分别置于 100% R、80% R+20% B、70% R+30% B、50% R+50% B、100% B 5 种不同光质比的光照系统中, 光照强度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。调节系统光质、光强、光周期满足试验需要, 并以普通荧光灯作为对照(CK), 培养 40 d 后统计结果, 筛选最佳光质比。

将试管苗放置于筛选的最佳光质比及光照强度分别为 30, 40, 50, 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的光照系统上, 培养条件同上, 40 d 后统计结果, 筛选最佳光照强度。

1.3 测定指标及方法

先测株高、叶数、根数、最大根长、鲜质量等指标, 测定时均随机选取 15 株试管苗; 然后将试管苗放入 105 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱内杀青 30 min, 60 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温干燥 48 h 后测定干质量。叶绿素和类胡萝卜素含量用无水乙醇和丙酮混合液提取法^[21]测定; 可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝法^[21]测定; 可溶性糖含量用苯酚法^[22]测定; 根系活力用 TTC 法^[22]测定。以上各个生理

指标均随机从各处理选取 10 株试管苗混合均匀后测定,重复 3 次。

1.4 数据处理与分析

所有数据处理均采用邓肯氏新复极差法(SSR 法)检测其差异显著性,显著性水平 $P<0.05$ 。数据统计采用 DPS 软件 3.01 版和 Excel 2003 进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同光质比对金娃娃萱草试管苗形态的影响

由表 1 可知,蓝光能够促进金娃娃萱草株高增

加,红光与之相反。红蓝光配合使用有利于叶数的增多,其中 70% R+30% B 处理叶数最大,但各处理间差异不显著。单一红光有利于最大根长的生长。红蓝光配合使用处理根数多于单一红光和蓝光处理及对照,其中 80% R+20% B 处理最大,对照根数最小,二者差异显著。干、鲜质量均以 80% R+20% B 处理最大,其次是 50% R+50% B 处理,且红蓝光配合使用处理干、鲜质量均高于单一红光和蓝光处理,单一蓝光不利于萱草干物质的积累。

表 1 不同光质比对金娃娃萱草试管苗形态的影响

Table 1 Effects of different light quality ratios on morphology of *Hemerocallis middendorffii* test-tube plantlets

处理 Treatment	株高/mm Plant height	叶数/株 ⁻¹ No. of leaves	最大根长/mm Maximum root length	根数/株 ⁻¹ No. of roots	鲜质量/ (mg·株 ⁻¹) Fresh quality	干质量/ (mg·株 ⁻¹) Dry quality
100% R	50.11±3.98 cd	3.50±0.29 a	45.04±5.36 a	3.00±0.41 abc	177.93±20.72 c	23.73±0.40 bc
80% R+20% B	54.84±5.41 bc	3.33±0.33 a	23.12±1.96 b	4.33±0.23 a	499.73±40.68 a	48.17±0.85 a
70% R+30% B	65.63±3.73 ab	4.00±0.58 a	42.99±3.69 a	3.67±0.88 abc	291.27±35.64 ab	28.47±1.07 bc
50% R+50% B	53.56±6.00 cd	3.75±0.25 a	27.83±3.53 ab	4.00±1.08 ab	372.73±32.69 ab	42.17±0.21 ab
100% B	77.73±4.62 a	3.00±0.58 a	30.48±5.46 ab	2.33±0.88 bc	150.40±14.29 c	9.30±0.05 c
CK	38.27±3.98 d	3.20±0.37 a	26.68±2.85 ab	2.00±0.45 c	190.18±20.93 c	21.54±0.24 c

注:同列数据后标不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。
Note: Different letters show significant difference between treatments at $P<0.05$. The same below.

2.2 不同光质比对金娃娃萱草试管苗色素含量的影响

由表 2 可知,红蓝光配合使用对金娃娃萱草叶绿素和类胡萝卜素含量有一定影响,叶绿素 a 和 b 及类胡萝卜素含量均以 70% R+30% B 处理最高;

100% R 处理叶绿素 a 含量低于 100% B 处理,叶绿素 b 含量则与之相反。100% R 处理降低了金娃娃萱草的类胡萝卜素含量,但除 70% R+30% B 处理外,其余各处理间差异不显著;100% B 处理叶绿素 a/b 值最高,且显著高于其他处理。

表 2 不同光质比对金娃娃萱草色素含量的影响

Table 2 Effects of different light quality ratios on pigment content of *Hemerocallis middendorffii* test-tube plantlets

处理 Treatment	叶绿素 a/(mg·g ⁻¹) Chl a	叶绿素 b/(mg·g ⁻¹) Chl b	类胡萝卜素/(mg·g ⁻¹) Car	叶绿素(a/b) Chl a/Chl b
100% R	1.04±0.19 ab	0.40±0.03 b	3.64±0.18 b	2.60±0.20 b
80% R+20% B	0.84±0.09 b	0.37±0.06 bc	4.80±0.33 ab	2.27±0.28 b
70% R+30% B	1.23±0.07 a	0.58±0.07 a	5.20±0.42 a	2.19±0.26 b
50% R+50% B	0.93±0.11 ab	0.32±0.03 bc	4.62±0.39 ab	2.91±0.03 b
100% B	1.08±0.04 ab	0.21±0.01 c	4.63±0.13 ab	5.14±0.25 a
CK	1.03±0.11 ab	0.47±0.03 ab	4.54±0.21 ab	2.19±0.14 b

2.3 不同光质比对金娃娃萱草试管苗可溶性蛋白、可溶性糖、根系活力的影响

由表 3 可知,当红蓝光配合使用时,蓝光比例与金娃娃萱草中的可溶性蛋白含量呈正相关,且 100% B 处理最高,与对照差异显著,说明蓝光有助于金娃娃萱草可溶性蛋白的积累,红光则有利于金娃娃萱草可溶性糖的积累。其中 100% R 处理最大,100% B 处理最小,且二者差异显著。在根系活力方面,红蓝光配合使用处理整体优于单一光处理,其中 70% R+30% B 处理最高,与其他处理差异显

著;100% B 处理对金娃娃萱草根系活力起抑制作用。综合以上分析可知,最佳光质比为 70% R+30% B。

2.4 不同光照强度对金娃娃萱草试管苗形态的影响

由表 4 可知,在 70% R+30% B 最佳光质条件下,不同光照强度对金娃娃萱草的生长影响明显。光照强度从 30 μmol/(m²·s)提高至 50 μmol/(m²·s)时,株高和叶数呈升高趋势;当光照强度高于 50 μmol/(m²·s)时,株高和叶数又降低。低光

照强度(30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)有利于根的伸长,高光照强度(60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$)抑制其生长,且二者差异显著。当光照强度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,根数、鲜质量及干质量均最大。

表 3 不同光质比对金娃娃萱草试管苗可溶性蛋白、可溶性糖及根系活力的影响

Table 3 Effects of different light quality ratios on soluble protein content, soluble sugar content, and root activity of <i>Hemerocallis middendorffii</i> test-tube plantlets			
处理 Treatment	可溶性蛋白/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Soluble protein content	可溶性糖/% Soluble sugar content	根系活力/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Root activity
100% R	0.33±0.07 a	4.25±0.04 a	637.70±36.17 b
80% R+20% B	0.30±0.02 a	2.44±0.22 b	604.46±30.12 bc
70% R+30% B	0.35±0.01 a	3.48±0.36 a	884.32±33.38 a
50% R+50% B	0.36±0.02 a	2.57±0.21 b	676.21±12.07 b
100% B	0.40±0.02 a	2.42±0.26 b	397.42±23.58 c
CK	0.16±0.01 b	2.60±0.10 b	628.97±54.01 b

表 4 不同光照强度对金娃娃萱草试管苗形态指标的影响

Table 4 Effects of different light intensities on morphology of <i>Hemerocallis middendorffii</i> test-tube plantlets						
光照强度/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$) Light intensity	株高/mm Plant height	叶数/株 ⁻¹ No. of leaves	最大根长/mm Maximum root length	根数/株 ⁻¹ No. of roots	鲜质量/ ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$) Fresh quality	干质量/ ($\text{mg} \cdot \text{株}^{-1}$) Dry quality
30	27.78±2.34 c	2.40±0.24 b	47.73±3.33 a	2.84±0.17 a	149.40±11.27 b	15.62±1.23 b
40	30.08±1.75 c	3.33±0.33 ab	32.01±2.08 bc	1.40±0.24 b	142.30±19.17 b	18.94±3.40 b
50	65.63±3.73 ab	4.00±0.58 a	42.99±3.69 a	3.67±0.88 abc	291.27±35.64 ab	28.47±1.07 bc
60	46.78±2.94 b	2.80±0.37 b	22.91±1.78 c	1.80±0.20 b	250.08±19.71 a	28.54±2.72 a

2.5 不同光照强度对金娃娃萱草试管苗色素含量的影响

由表 5 可知,在适宜的范围内(30~50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$),随着光照强度的增强,金娃娃萱草的叶绿素和类胡萝卜素含量逐渐升高,当光照强度为 50

$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时最高,且总体显著高于其他处理,说明在一定范围内提高光照强度有利于其叶绿素和类胡萝卜素的合成,且叶绿素 a、b 及类胡萝卜素含量和叶绿素 a/b 呈正相关。

表 5 不同光照强度对金娃娃萱草色素含量的影响

Table 5 Effects of different light intensities on pigment content of <i>Hemerocallis middendorffii</i> test-tube plantlets				
光照强度/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$) Light intensity	叶绿素 a/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chl a	叶绿素 b/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Chl b	类胡萝卜素/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Car	叶绿素(a/b) Chl a/Chl b
30	0.55±0.04 c	0.31±0.05 b	3.63±0.22 b	1.89±0.19 a
40	0.81±0.06 b	0.38±0.03 b	4.57±0.23 ab	2.17±0.15 a
50	1.23±0.07 a	0.58±0.07 a	5.20±0.42 a	2.19±0.26 b
60	0.93±0.08 b	0.43±0.03 ab	4.95±0.19 a	2.16±0.02 a

2.6 不同光照强度对金娃娃萱草试管苗可溶性蛋白、可溶性糖、根系活力的影响

由表 6 可知,随着光照强度的增大,金娃娃萱草可溶性蛋白含量呈先升高后降低的趋势,且以光照强度 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理最低,光照强度 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理最高,二者差异显著,说明过低和过高的光照强度均不利于可溶性蛋白的积累;在

可溶性糖含量方面,光照强度为 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理最高,但各处理间无显著差异,说明光照强度对可溶性糖积累影响不显著;在根系活力方面,随着光照强度的增加呈先降低后升高趋势,光照强度为 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理最高,光照强度 40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理根系活力最低,且二者差异显著,说明不同光照强度对金娃娃萱草根系活力影响有差异。

表 6 不同光照强度对金娃娃萱草试管苗可溶性蛋白、可溶性糖、根系活力的影响

Table 6 Effects of different light intensities on soluble protein content, soluble sugar content, and root activity of <i>Hemerocallis middendorffii</i> test-tube plantlets			
光照强度/($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}$) Light intensity	可溶性蛋白/($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) Soluble protein content	可溶性糖/% Soluble sugar content	根系活力/($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) Root activity
30	0.17±0.01 c	3.81±0.04 a	841.45±61.04 ab
40	0.26±0.01 b	3.65±0.12 a	451.93±38.42 b
50	0.35±0.01 a	3.48±0.36 a	884.32±33.38 ab
60	0.27±0.01 b	3.97±0.12 a	1 454.42±53.46 a

3 讨 论

光质和光强对植物的生长、形态建成、光合作用、物质代谢及基因表达均有调控作用。研究表明,红蓝光组合提高了番茄幼苗干物质积累、蔗糖、淀粉含量及壮苗指数^[23]。本研究比较了 LED 不同光质比和光强对金娃娃萱草试管苗生长的影响,结果表明,在光质方面,金娃娃萱草株高在单一蓝光下达到最大值,说明蓝光对萱草伸长生长和叶片扩张有促进作用,这与徐文栋等^[19]对黄瓜的研究结果一致,与任桂萍等^[24]对蝴蝶兰、曹刚^[25]对甘蓝的研究结果相反,可能与植物品种有关;根长在单一红光处理下达到最大值,根数在 80% R+20% B 处理下达到最大值,说明红光有利于萱草根生长,这与唐大为等^[26]对黄瓜的研究结果一致;叶数和干鲜质量分别在 70% R+30% B、80% R+20% B 处理下达到最大值,说明红蓝光配比使用较单一光更有利于金娃娃萱草的形态建成及光合产物的运转和积累,这与柳红^[27]、曹刚^[25]及唐大为等^[26]的研究结果一致。

光合色素能够吸收、传递和转化光能,是植物进行光合作用的物质基础,不同光质对植物叶片中叶绿素形成的影响差异显著。叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量与 R/B 呈正相关^[28]或负相关^[29],表明不同植物对光质的敏感性和响应不同。本试验中,叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量均在 70% R+30% B 处理下达到最大值,说明当红蓝光配比使用有利于叶绿素的合成,其中类胡萝卜素含量在单一红光下达到最小值,说明红光能降低金娃娃萱草中的类胡萝卜素含量,这与 Anna 等^[30]对风信子的研究结果一致;叶绿素 a/b 在单一蓝光下达到最大值,说明蓝光培养的植物具有阳生植物特性,这与曹刚^[25]、徐凯等^[29]的研究结果一致。

有研究表明,红光有利于可溶性糖和淀粉的积累,而蓝光能够逆转此效应^[26],本试验研究结果与此一致,金娃娃萱草在单一蓝光处理下可溶性蛋白含量最高;可溶性糖含量在单一红光处理最大值。在根系活力方面,70% R+30% B 处理的根长最大,说明红蓝光配比使用有助于萱草根系的生长,而在单一蓝光处理下根系活力最小,说明蓝光对萱草根系生长具有抑制作用。综上表明,当 LED 红蓝光质比为 70% R+30% B,最有利于金娃娃萱草试管苗的生长。

不同光照强度对不同植物试管苗生长的影响各异。研究表明,高光强使江西铅山红芽芋试管苗的

新生芽数、新生根数、新生根长、株高、总叶绿素含量、SOD 和 POD 活性显著增加^[31]。本试验中,金娃娃萱草的株高、叶数、根数和干鲜质量均以光照强度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理最大,且株高和叶数在一定范围内随着光照强度的增加逐渐变大,说明适当增大光照强度有助于试管苗的形态生长,这与杨艳琼等^[32]对灯笼花的研究结果一致。本研究中,最大根长在光照强度为 30 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理下达到最大值,说明低光强有助于萱草根系的伸长生长;随着光照强度的增大,叶绿素和可溶性蛋白含量先升高后降低,且在光照强度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下达到最大值,说明适当提高光照强度有利于萱草叶片叶绿素合成及蛋白积累,这与王政等^[33]对彩色马蹄莲的研究结果一致。本研究中,可溶性糖含量和根系活力均在光照强度为 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 下达到最大值,表明提高光照强度有助于金娃娃萱草可溶性糖的积累和根系活力的提高。由上述可知,当光照强度为 50 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,最适于金娃娃萱草试管苗的生长。但 LED 不同光质比和光照强度对金娃娃萱草的作用机理,还有待于进一步研究。

[参考文献]

- [1] 兰丽婷,李 冲,任爽英,等.萱草新品种组培再生体系的建立[J].东北林业大学学报,2011,39(4):14-17.
Lan L T, Li C, Ren S Y, et al. Establishment of tissue culture regeneration system of *Hemerocallis* 'Fooled Me' [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(4): 14-17.
- [2] Tomkins J P, Wood T C, Barnes L S, et al. Evaluation of genetic variation in the daylily (*Hemerocallis* spp.) using AFLP markers [J]. Theoretical and Applied Genetics, 2001, 102(4): 489-496.
- [3] 柏文琴,李 韵,李荣荣.大花萱草组培苗的生根诱导研究[J].山西师范大学学报(自然科学版),2007,21(4):87-91.
Bo W Q, Li Y, Li R R. Root induced in callus culture of *Hemerocallis middendorffii* [J]. Journal of Shanxi Normal University (Natural Science), 2007, 21(4): 87-91.
- [4] 张伟丽,金欣庆.大花萱草新品种'奶油卷'的组织培养和生产应用[J].植物生理学通讯,2007,43(1):129-130.
Zhang W L, Jin X Q. Tissue culture and application of *Hemerocallis middendorffii* Trautv. et Mey. cv. Betty wods [J]. Plant Physiology Communications, 2007, 43(1): 129-130.
- [5] 李秀华,杜 贞,武银玉,等.大花萱草组培快繁体系的研究[J].植物研究,2009,29(6):757-762.
Li X H, Du Z, Wu Y Y, et al. Research on tissue culture regeneration of *Hemerocallis middendorffii* [J]. Bulletin of Botanical Research, 2009, 29(6): 757-762.
- [6] 刘志洋,李海涛,朱祥春,等.大花萱草组织培养研究[J].东北农业大学学报,2008,39(1):43-45.

- Liu Z Y, Li H T, Zhu X C, et al. Study on tissue culture of *Hemerocallis fulva* [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(1): 43-45.
- [7] 张洁茹, 刘晓嘉, 陈丽飞, 等. 矮壮素对萱草组培苗生根及移栽的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(7): 95-99.
- Zhang J R, Liu X J, Chen L F, et al. Rooting and transplanting in tissue culture of *Hemerocallis* 'Nameless Pink' [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(7): 95-99.
- [8] Chen J, Hall D E, De L V. Effects of the growth retardant paclobutrazol on large-scale micropropagation of daylily (*Hemerocallis* spp) [J]. *In Vitro Cellular Development Biology-Plant*, 2005, 41(1): 58-62.
- [9] Adelberg J, Delgado M, Tomkins J. *In vitro* sugar and water use in diploid and tetraploid genotypes of daylily (*Hemerocallis* spp.) in liquid medium as affected by density and plant growth regulators [J]. Hort Science, 2007, 42(2): 325-328.
- [10] Lian M L, Murthy H N, Paek K Y. Effects of light emitting diodes on the *in vitro* induction and growth of bulblets of Lili-um oriental hybrid 'Pesaro' [J]. Scientia Horticulturae, 2002, 94(3): 365-370.
- [11] Shin K S, Murthy H N, Heo J W, et al. The effect of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured *Doritaenopsis* plants [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2008, 30(3): 339-343.
- [12] Kim J H, Glick R E, Melis A. Dynamics of photosystem stoichiometry adjustment by light quality in chloroplasts [J]. Plant Physiology, 1993, 102(102): 181-190.
- [13] Patil G G, Oi R, Gissinger A, et al. Plant morphology is affected by light quality selective plastic films and alternating day and night temperature [J]. Gartenbauwissenschaft, 2001, 66(2): 53-60.
- [14] Goins G D, Yorio N C, Sanwo M M, et al. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting [J]. Journal Experimental Botany, 1997, 48(7): 1407-1413.
- [15] Bula R J, Morrow T W, Tibbitts T W, et al. Light-emitting diodes as a radiation source for plants [J]. Hort Science, 1991, 26(2): 203-205.
- [16] Brown C S, Schuerger A C, Sager J C, et al. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting [J]. Journal of the American Society of Horticultural Science, 1995, 120(5): 808-813.
- [17] 闫新房, 丁义波, 丁 义, 等. LED 光源在植物组织培养中的应用 [J]. 中国农学通报, 2009, 25(12): 42-45.
- Yan X F, Ding Y B, Ding Y, et al. The application of LED light source in plant tissue culture [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(12): 42-45.
- [18] 张 欢, 徐志刚, 崔 瑾, 等. 不同光谱能量分布对菊花试管苗增殖及生根的影响 [J]. 园艺学报, 2010, 37(10): 1629-1636.
- Zhang H, Xu Z G, Cui J, et al. Effects of light spectral energy distribution on multiplication and rooting of chrysanthemum plantlets *in vitro* [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2010, 37(10): 1629-1636.
- [19] 徐文栋, 刘晓英, 焦学磊, 等. 不同红蓝配比的 LED 光调控黄瓜幼苗的生长 [J]. 植物生理学报, 2015, 51(8): 1273-1279.
- Xu W D, Liu X Y, Jiao X L, et al. Different ratio of red and blue LED regulation development of cucumber seedlings [J]. Plant Physiology Journal, 2015, 51(8): 1273-1279.
- [20] Fan X X, Xu Z G, Liu X Y, et al. Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light [J]. Science Horticultural, 2013, 153: 50-55.
- [21] 张志良, 翟伟菁. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004: 67-69, 159-160.
- Zhang Z L, Zhai W J. Plant physiology experiment guidance [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 67-69, 159-160.
- [22] 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, 2000: 195-197.
- Li H S. Plant physiology and biochemistry experiment principle and technology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 195-197.
- [23] 孙 娜, 魏 珉, 李 岩, 等. 光质对番茄幼苗碳氮代谢及相关酶活性的影响 [J]. 园艺学报, 2016, 43(1): 80-88.
- Sun N, Wei M, Li Y, et al. Effects of light quality on carbon and nitrogen metabolism and enzyme activities in tomato seedlings [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2016, 43(1): 80-88.
- [24] 任桂萍, 王小菁, 朱根发. 不同光质的 LED 对蝴蝶兰组织培养增殖及生根的影响 [J]. 植物学报, 2016, 51(2): 81-88.
- Ren G P, Wang X J, Zhu G F. Effect of LED in different light qualities on growth of *Phalaenopsis* plantlets [J]. Bulletin Botany, 2016, 51(2): 81-88.
- [25] 曹 刚. 不同 LED 光质对黄瓜和结球甘蓝苗期生长、光合特性及内源激素的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013: 66-68.
- Cao G. Effects of different LED light qualities on cucumber and head cabbage seedling growth, photosynthetic characteristics and endogenous hormones [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013: 66-68.
- [26] 唐大为, 张国斌, 张 帆, 等. LED 光源不同光质对黄瓜幼苗生长及生理生化特性的影响 [J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 44-48.
- Tang D W, Zhang G B, Zhang F, et al. Effect of different LED light qualities on growth and physiological and biochemical characteristics of cucumber seedlings [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(1): 44-48.
- [27] 柳 红. LED 光源对马铃薯组培苗的影响研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2012: 28-30.
- Liu H. Effect of LED light source on potato tissue cultured seedlings [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012: 28-30.
- [28] 邸秀茹, 焦学磊, 崔 瑾, 等. 新型光源 LED 辐射的不同光质配比光对菊花组培苗生长的影响 [J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(4): 661-664.

Di X R, Jiao X L, Cui J, et al. Effects of different light quality ratios of LED on growth of *Chrysanthemum* plantlets *in vitro* [J]. Plant Physiology Communications, 2008, 44(4): 661-664.

[29] 徐 凯, 郭延平, 张上隆. 不同光质对草莓叶片光合作用和叶绿素荧光的影响 [J]. 中国农业科学, 2005, 38(2): 369-375.

Xu K, Guo Y P, Zhang S L. Effect of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in strawberry leaves [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(2): 369-375.

[30] Anna B, Alicja K. Effect of light quality on somatic embryogenesis in *Hyacinthus orientalis* L. ‘Delft’s blue’ [J]. Biological Bulletin of Poznan, 2001, 38(1): 103-107.

[31] 尹明华, 王艾平. 光照时间和光照强度对红芽芋试管苗生长发育的影响 [J]. 贵州农业科学, 2013, 41(9): 63-65.

Yin M H, Wang A P. Effects of light duration and intensity on the growth of red bud plantlets [J]. Guizhou Agricultural Science, 2013, 41(9): 63-65.

[32] 杨艳琼, 王 荔, 陈疏影, 等. 不同光照强度对灯盏花无糖组培苗生长发育的影响 [J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2007, 22(3): 323-326.

Yang Y Q, Wang L, Chen S Y, et al. Effect of different light intensity on development of plantlet in sugar-free tissue culture of *Erigeron breviscapus* [J]. J of Yunan Agricultural University(Natural Science), 2007, 22(3): 323-326.

[33] 王 政, 郭玉珍, 何松林. 不同光照强度对彩色马蹄莲试管苗生长的影响 [J]. 西北林学院学报, 2011, 26(3): 84-87.

Wang Z, Guo Y Z, He S L. Effects of illumination on the growth of colored *Zantedeschia* shoots *in vitro* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2011, 26(3): 84-87.

(上接第 89 页)

[23] 王润佳, 高世铭, 张绪成. 高大气 CO₂ 浓度下 C3 植物叶片水分利用效率升高的研究进展 [J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(6): 190-195.

Wang R J, Gao S M, Zhang X C. Advances in the research on the increase of water use efficiency of C3 plants under high atmospheric CO₂ concentration [J]. Agricultural Research in Arid Area, 2010, 28(6): 190-195.

[24] 王红玉, 曲英华, 周士力, 等. CO₂ 增施与养分交互作用对日光温室番茄生长的影响 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(S1): 182-188.

Wang H Y, Qu Y H, Zhou S L, et al. Effects of CO₂ and nutrient interaction on the growth of tomato in solar greenhouse [J]. Chinese Journal of Agricultural Machinery, 2014, 45(S1): 182-188.

[25] Matsuda R, Ohashi-Kaneko K, Fujiwara K, et al. Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light [J]. Plant & Cell Physiology, 2004, 45(12): 1870-1874.

[26] Yelle S, Beeson R C, Trudel M J, et al. Duration of CO₂ enrichment influences growth, yield, and gas exchange of two tomato species [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1989, 115: 52-57.

[27] 陈 强, 刘世琦, 张自坤, 等. 不同 LED 光源对番茄果实转色期品质的影响 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(5): 156-161.

Chen Q, Liu S Q, Zhang Z K, et al. Effect of different LED light sources on the quality of tomato fruit during the transition period [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(5): 156-161.