

项蕾蕾, 李丹, 孙雪丽, 田娜, 刘范, 付帅, 陈裕坤, 林玉玲, 程春振, 王天池, 赖钟雄. LED补光对香蕉组培苗增殖和生理生化指标的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26 (3): 590-596

Xiang LL, Li D, Sun XL, Tian N, Liu F, Fu S, Chen YK, Lin YL, Cheng CZ, Wang TC, Lai ZX. Effects of LED supplementation on proliferation, and physiological and biochemical indices of tissue-cultured banana plantlets [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2020, 26 (3): 590-596

LED补光对香蕉组培苗增殖和生理生化指标的影响

项蕾蕾 李丹 孙雪丽 田娜 刘范 付帅 陈裕坤 林玉玲 程春振 王天池[✉]
赖钟雄[✉]

福建农林大学园艺学院, 园艺植物生物工程研究所 福州 350002

摘要 为研究补充不同光质的LED光源对香蕉组培苗增殖和相关生理生化指标的影响, 以‘天宝蕉’为材料, 通过设置普通荧光 + LED红光(R)、普通荧光 + LED蓝光(B)、普通荧光 + LED绿光(G)、普通荧光 + LED白光(W)、普通荧光 + LED暖白光(WW)、普通荧光 + LED暖黄光(WY), 对照组普通荧光7种处理, 比较不同LED补光对香蕉组培苗的增殖率、相关生理指标、叶绿素含量及叶绿素荧光参数的影响。结果显示, WY处理下香蕉组培苗的增殖系数最大, B处理下香蕉苗的增殖系数最小; R处理下, 植株高度最大, B处理下, 植株假茎最粗, WW处理下, 有最大的根长, W处理下根数、根粗、叶数、叶宽、叶长的数值最大, 同时鲜重和含水量最高, 壮苗系数最优。与CK相比, R、B和G处理会降低叶绿素以及类胡萝卜素含量, 而补充LED白光可以提高叶绿素以及类胡萝卜素含量。此外, LED补光, 尤其是R、W和G补光会引起香蕉组培苗叶片 F_v/F_o 、 F_v/F_m 和NPQ参数的显著增加和 $Y(II)$ 、ETR、和 q_p 等参数的降低。本研究表明在增殖培养阶段补充LED暖黄光, 香蕉组培苗的增殖率最高; 在生根培养阶段补充LED白光, 香蕉组培苗的叶绿素含量、chl a/chl b比值、类胡萝卜素含量最大, 同时光合效率和壮苗系数最高; 结果可为香蕉组培苗增殖和生根阶段的光质选择奠定基础。(图5 表4 参34)

关键词 香蕉; LED补光; 增殖系数; 生理生化指标; 叶绿素含量; 叶绿素荧光

Effects of LED supplementation on proliferation, and physiological and biochemical indices of tissue-cultured banana plantlets

XIANG Leilei, LI Dan, SUN Xueli, TIAN Na, LIU Fan, FU Shuai, CHEN Yukun, LIN Yuling, CHENG Chunzhen, WANG Tianchi[✉] & LAI Zhongxiong[✉]

College of Horticulture/Institute of Horticultural Biotechnology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

Abstract This study aimed to investigate the effects of LED supplementation on the proliferation, and physiological and biochemical indexes of tissue-cultured banana plantlets. ‘Tianbaojiao’ bananas were subjected to seven different LED treatments: ordinary fluorescence plus LED red light (R), ordinary fluorescence plus LED blue light (B), ordinary fluorescence plus LED green light (G), ordinary fluorescence plus LED white light (W), ordinary fluorescence plus LED warm white light (WW), ordinary fluorescence plus LED warm yellow light (WY), and ordinary fluorescence (CK). Treatment effects on growth rate, physiological indexes, chlorophyll content, and chlorophyll fluorescence of banana plantlets were then compared. The multiplication coefficient of banana plantlets was found to be the highest under WY treatment and the smallest under B treatment. Plantlets were tallest under R treatment, the largest pseudostem diameter was recorded under B treatment, and the root length was greatest under WW treatment. The maximum root length, root number, root diameter, leaf number, leaf width, and leaf length were greatest under W treatment. Moreover, CK, R, B, and G treatments resulted in inhibited chlorophyll and carotenoid accumulation, while white light supplementation increased chlorophyll and carotenoid content. Plants in the W group also showed the highest fresh weight, water content, and optimum seedling coefficient. Furthermore, R and G treatments with monochromatic light decreased chlorophyll and carotenoid content, while white LED supplementation increased chlorophyll and carotenoid content. In addition, supplemental LED light, especially red, white, and green light significantly increases the parameters of F_v/F_o , F_v/F_m , and NPQ, but inhibits the $Y(II)$, ETR, and q_p parameters. During multiplication culture processes, warm yellow light supplementation resulted in the highest plantlet growth rate. During rooting, white light LED

收稿日期 Received: 2019-08-25 接受日期 Accepted: 2019-10-21

国家自然科学基金项目(31601713)、国家现代农业产业技术体系专项资金(CARS-31-15)、科技创新专项基金(CXZX2018076)和科技创新专项基金(CXZX2017189)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31601713), the National Special Fund for Modern Agricultural Industry Technology system (CARS-31-15), the Special Fund for Scientific and technological Innovation (CXZX2018076) and the Special Fund for Scientific and technological Innovation (CXZX2017189)

[✉]通讯作者 Correspondence author (E-mail: Wangtchi@hortmail.com; laizx01@163.com)

supplementation is helpful for chlorophyll and carotenoid accumulation and provides the highest chl a/chl b ratio, photosynthetic efficiency, and seedling-strengthening coefficient. Our study provides a basis for future LED light supplementation in banana tissue culture.

Keywords banana; LED supplementation; proliferation coefficient; physiology and biochemistry index; chlorophyll content; chlorophyll fluorescence

植物生长发育受温度、光照、水分、养分等多种环境因素的影响,其中光照扮演着最重要的角色之一。光不仅可以作为植物的光合作用过程中的能量源,还能作为一种信号源调节植物的生长、分化与代谢^[1]。同样,光质是光的重要属性之一。在发展设施农业光调控技术过程中,光质是不可或缺的主要部分。长期以来,在农业照明领域内常用的人工光源主要有高压钠灯、荧光灯、金属卤化物光源等,这些光源均存在光效低、能耗高、寿命短等弊端^[2],而发光二极管(light emitting diode, LED)具有高光效、低功耗、低发热等方面的优势,应用前景广泛。

LED光源有不同的光质,而不同的光质对植物生长的影响显著不同^[3]。前人研究表明,补充光质可以提高在白光下生长的生菜的营养价值^[4];红蓝组合光下白菜鲜重和干重最大,红光处理下株高最高,蓝光处理下植株最低^[5]。Dierck等发现,菊花经过红光处理一般表现出芽增殖率增加和平均芽长增加^[6]。兰花原球茎在白色,蓝色和绿色光下,生长得更快^[7]。总体而言,与红蓝光和红蓝绿LED光源相比,白色LED提供更均匀的光谱分布,导致植物茎长和叶面积的减少,并保持或增加植物干重^[8]。Son等发现,红色LED可以改善莴苣生长特性,例如茎和根的鲜重和干重,单色LED绿光对莴苣有负面影响^[9-10]。单色LED蓝光处理下生长的番茄幼苗的株高,茎长和节间长度最高^[11],白光处理下菊花叶绿素含量和Chl a/b比值最高,红色LED处理下的最低。蓝光和红蓝光处理下, F_v/F_m 、 $\Phi PSII$ 参数值最高^[12]。Wang等的研究^[13]表明,与白光相比,在单色光处理下的黄瓜生长减缓、 $\Phi PSII$ 参数值减小。

LED在香蕉组培中的应用也有了一些报道。Nhut等发现,香蕉在80%红色+20%蓝色LED下可获得最高的植物总鲜重^[14];LED暖白光是最有利于香蕉试管苗增殖和叶绿素含量的积累^[15]。蓝光处理下香蕉组培苗分化芽最多、茎粗和茎叶鲜重均最大^[16]。余义强的研究表明,LED蓝光促进粉蕉试管苗的增殖,LED红、蓝光促进粉蕉试管苗的生长^[17]。目前已有的补光实验基本上都是研究补充光强、延长光周期或单色光,或两三种单色光的组合光对植物生长发育的影响,针对同一光照条件下再补充某一光质的研究相对较少。本研究在普通荧光灯(白光)的基础上再补充不同光质对香蕉组培苗增殖及生理生化指标的影响展开了研究,进而探讨在全色光下补充单一光质对香蕉组培苗生长发育的影响。预期本研究结果可为优化LED光源在植物中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料及处理

本研究所用‘天宝蕉’由福建农林大学园艺生物工程研究所提供。

为研究补充不同LED光质对香蕉组培苗增殖生根、香蕉叶绿素含量以及叶绿素荧光参数的影响,在普通荧光灯(产品名称:普通色直管荧光灯;产品商标:Panasonic;产品标准号:Q/DXSXM002)基础上补充不同光质的LED光源^[18]。试

验组光质包括:普通荧光+LED红光(R)、普通荧光+LED蓝光(B)、普通荧光+LED绿光(G)、普通荧光+LED白光(W)、普通荧光+LED暖白光(WW)、普通荧光+LED暖黄光(WY)和普通荧光(CK)。光照强度均为 $40 \pm 1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 补充不同光质的LED光源光谱见图1。

香蕉增殖培养的处理采用MS+5.0 mg/L 6-BA+0.3 mg/L NAA的固体增殖培养基,每个组培瓶中接种大小一致的无菌香蕉分化芽2个,每个处理接种20瓶,重复3次。将材料置于7种不同的光源下连续培养(图1),温度(25 ± 1)℃、光照时间为12 h/d。培养30 d后观察与计算分析香蕉组培苗的增殖情况。

香蕉生根培养的处理、叶绿素含量以及荧光参数的处理采用MS+0.3 mg/L NAA的固体生根培养基,每个组培瓶中接种大小一致的无菌香蕉幼苗1棵,每个处理接种20瓶,重复3次。将材料置于7种不同的光源下培养(图1),温度(25 ± 1)℃、光照时间12 h/d。培养30 d后,对香蕉组培苗进行叶绿素含量以及荧光参数的检测。

1.2 增值率的计算

培养30 d后,记录香蕉组培苗芽的分化数和生长情况,计算增殖率:增殖率=增殖的总芽数/接种的芽数^[19]。

1.3 生根培养下相关生长指标的测定

培养30 d后,每个处理随机选取6株香蕉组培苗进行生物量测量与分析,分别测定香蕉组培苗的叶片数量、叶片长与宽,记录叶色、株高、茎粗、根长、根数、根粗和鲜重。先用电子天平测定香蕉组培苗的鲜重,再放置80℃烘干箱干燥至恒重后测定干重。茎粗用游标卡尺测量,株高是测量植株顶部到茎的基部,根长是测量根尖到主茎的基部。壮苗系数按照下列公式计算:

壮苗系数=(茎粗/株高+地下干重/地上干重)×全株干重^[20]。

1.4 生根培养下叶绿素含量的测定

叶绿素含量测定方法参考Yuan等的方法^[21],具体步骤如下。取0.1 g香蕉组培苗叶片放入研钵中;研磨提取,向研钵中加入95%的乙醇2 mL,加适量碳酸钙和石英砂后充分研磨成匀浆,再加入95%乙醇3 mL继续研磨直至组织变白,然后静置3-5 min,然后过滤到25 mL容量瓶中,用滴管吸取95%乙醇清洗滤纸和研钵中残渣,直至滤纸变白,一同过滤到容量瓶,最后用95%乙醇定容至刻度;测定吸光值,将叶绿素提取液摇匀后倒入1 mL比色皿内,以95%乙醇作空白对照,分别测定665、649和470 nm下的吸光值。叶绿素浓度结果计算:Chl a (mg/L) = $13.95A_{665} - 6.88A_{649}$; Chl b (mg/L) = $24.96A_{649} - 7.32A_{665}$; Chl (a + b) = Chl a + Chl b; Carotenoids (mg/L) = $(1000A_{470} - 2.05\text{Chl a} - 114\text{Chl b})/245$ 。叶绿素含量结果计算:叶绿体色素含量(mg/g, FW) = [色素的浓度×提取液体积(mL)×稀释倍数]/[样品鲜重(g)×1000]。

1.5 生根培养下叶绿素荧光参数的测定

F_v/F_o 是暗适应下可变荧光与初始荧光的比率,比率值的大小可以表示PSII潜在光合效率。 F_v/F_m 是暗适应下PSII最大光合效率。NPQ为非光化学淬灭,它的定义是指天线色素的

矩阵模型,它反映天线色素系统对激发能的热耗散。NPQ是过剩光能的指示计,植物主要通过跨膜质子梯度介导的叶黄素循环来耗散多余光能,反映的是植物的光保护能力。同时,NPQ还能够反映类囊体膜的激发状态。 q_p 是光化学淬灭系数,反映的是PSII反应中心的开放程度,与植物的光合活性成正相关。 $Y(II)$ 是实际光合效率,ETR是相对光和电子传递速率。叶绿素荧光指标采用MINIPAM荧光计(Walz, Effeltrich, 德国)测量。测定温度(25 ± 1)℃处理下,补充不同光质下香蕉组培苗的第二叶的叶绿素荧光参数,包括PSII最大光合效率(F_v/F_m)、PSII潜在光合效率(F_v/F_o)、PSII光化学和非光化学淬灭系数(q_p 与NPQ)、实际光合效率 $Y(II)$ 和电子传递速率(ETR)等指标。测定前先对各处理叶片进行暗处理,将实验材料遮光20 min,以确保PSII反应中心完全开放,各组处理设置3次重复,每样品测定6个区域。检测光合有效辐射(PAR)为 $40 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 的光响应曲线,每20 s打开一次饱和脉冲,系统运行结束后自动给出参数值,PSII最大光合效率通过公式 $F_v/F_m = (F_m - F_o)/F_m$, PSII潜在光合效率通过公式 $F_v/F_o = (F_m - F_o)/F_o$ 计算获得。

1.6 数据统计分析

分别采用Microsoft Excel 2017和GraphPad-Prism-6软件处理实验所得数据和作图,并使用SPSS 17.0对试验所得数据进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 补充不同光质的LED光源对香蕉增殖的影响

补充不同光质的LED光源培养30 d后,对香蕉增殖的影响

情况如表1、图2所示。由表1可知,不同光质处理下的增殖系数与CK对比都有显著性差异,增殖系数大小是 $WY > R > CK > G > WW > W > B$,说明在普通荧光灯下补充LED暖黄光和LED红光均提高香蕉组培苗的增殖系数。其中,WY光照组香蕉组培苗的增殖系数最大,增殖系数为3.39,B光照组香蕉苗的增殖系数最小,增殖系数为2.17。

2.2 补充不同光质的LED光源对香蕉组培苗相关生长指标的影响

在生根培养处理下,经过补充不同光质后,香蕉组培苗

表1 补充不同光质对香蕉组培苗增殖的影响

Table 1 Effects of different light supplementation on banana plantlet proliferation (Mean $\pm$ SD)

组别 Group	光质 Light	光照强度 Light intensity ($\mu\text{mol/m}^2 \text{s}^{-1}$)	增殖系数 Proliferation coefficient
CK	普通荧光 OF	40 ± 1	$2.94 \pm 0.10c$
R	普通荧光 + LED红光 OF + LED Red	40 ± 1	$3.12 \pm 0.09b$
B	普通荧光 + LED蓝光 OF + LED Blue	40 ± 1	$2.17 \pm 0.05e$
W	普通荧光 + LED白光 OF + LED white	40 ± 1	$2.25 \pm 0.11e$
G	普通荧光 + LED绿光 OF + LED Green	40 ± 1	$2.42 \pm 0.05d$
WW	普通荧光 + LED暖白光 OF + LED warm white	40 ± 1	$2.28 \pm 0.05e$
WY	普通荧光 + LED暖黄光 OF + LED warm Green	40 ± 1	$3.39 \pm 0.04a$

同列数据后不同字母表示显著性差异($P < 0.05$)。

Different small letters in the same column following the data indicate significant differences ($P < 0.05$). OF: Ordinary fluorescence.

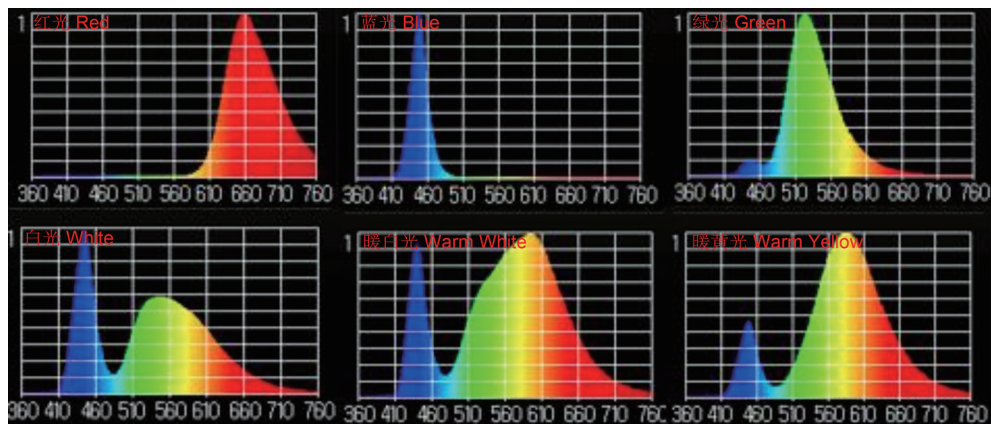


图1 补充光源光谱。横坐标为波长(频率),纵坐标为强度。

Fig. 1 Supplementary light source spectrum. The transverse coordinates are wavelength (frequency) and the longitudinal coordinates are strength.

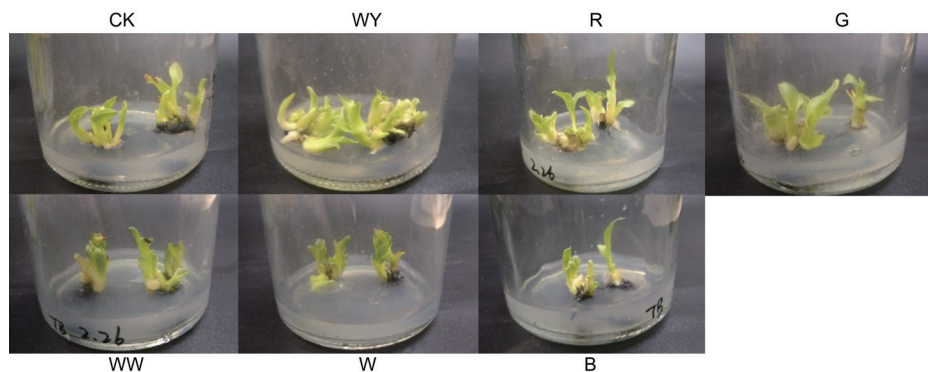


图2 补充不同光质后香蕉组培苗的增殖情况。

Fig. 2 Banana plantlets proliferation under different light supplementation treatments.

生长情况如图3所示, 相关生长指标的统计情况如表2所示, WW和WY处理组根长显著高于对照组; W处理组根数和根粗显著高于对照组和其他处理组; R组处理下的株高显著高于对照组和其他处理组, 比CK高6.2%; B组处理下的茎显著粗于对照组和其他处理组, 比CK高46.2%; 各补光处理之间以及和对照相比, 叶片数差异不显著; W处理组的叶宽和叶长显著高于对照组和其他处理组, 分别比CK高30.6%和33.6%。

在生根培养处理下, 经过补充不同光质后, 香蕉组培苗生物量和壮苗系数如表3所示, R、W和WW处理下, 植株鲜重显著增加, 分别增加9.8%、34.5%和19.7%。同样, R、W和WW处理下, 植株干重显著增加, 分别增加15.2%、19.1%和23.8%; W处理组下的香蕉植株含水量最高; 各补光处理之间的壮苗系数差异显著, 除G处理组外, 其他各处理组均有利于香蕉组培苗的壮根培养, 其中W组的壮苗系数最大, 比CK高65.3%。

2.3 补充不同光质对香蕉幼苗光合色素含量的影响

由图4可以知道, 不同光质处理下, 香蕉幼苗的叶绿素含量及类胡萝卜素含量变化趋势是不同的。在经过7种光质处理

后, 各组的叶绿素a含量大小是W > WW > CK > WY > G > R > B。其中, W光照组、B光照组的叶绿素a含量分别是最高和最低, 且与其他光照组的叶绿素a含量差异显著; WW、WY光照组的叶绿素a含量与CK光照组的差异不明显; R、G光照组的叶绿素a含量低于CK光照组的叶绿素含量且差异明显。在经过7种光质处理后, 各组的叶绿素b含量大小是CK > W > WY > WW > G > R > B。可以发现, CK、W、WY、WW光照组的叶绿素b含量变化与它们的叶绿素a含量虽然有差异, 但不明显, 所以可以说各组的叶绿素b含量变化趋势与叶绿素a的大致一致; 同样, 由图4可知, 叶绿素总含量(Chla + b)与叶绿素a、b的变化趋势一致, 叶绿素含量最高的是W组, 最低的是B组; 在经过7种光质处理后, 各光照组的类胡萝卜素含量大小是W > WW > WY > CK > G > R > B。其中, W光照组、B光照组的类胡萝卜素含量分别是最高和最低, 且其他处理组类胡萝卜素含量有明显差异。由图4可知, 在经过7种光质处理后, 各组的叶绿素a与叶绿素b含量比值大小是有一定差异的, 比值最大的是W、WW光照组, 且组间差异变化不明显; 而CK、WY、G、

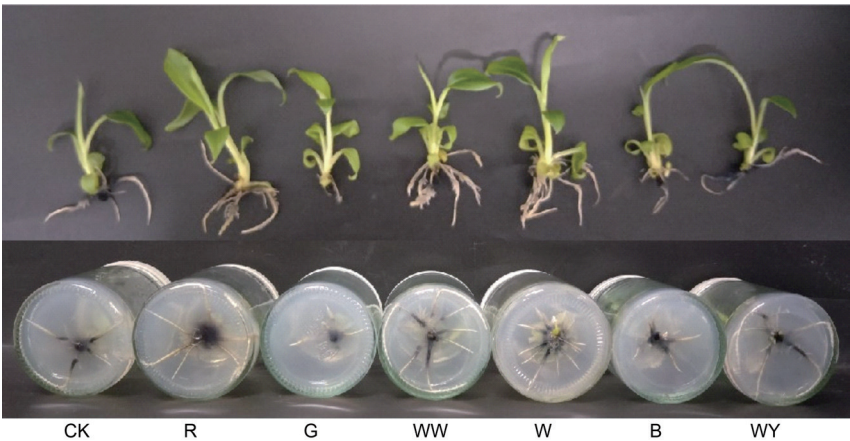


图3 补充不同光质后香蕉组培苗的生长情况。
Fig. 3 Growth of banana plantlets supplemented with different light.

表2 补充不同光质对香蕉组培苗相关生长指标的影响
Table 2 Effects of different light supplementation on the growth indexes of banana plantlets

组别 Group	根长(l/cm) Root length	生根数(N) Root number	根粗(d/mm) Root diameter	株高(h/cm) Plant height	茎粗(d/mm) Stem diameter	叶数(N) Leaf number	叶宽(b/cm) Leaf width	叶长(l/cm) Leaf length
CK	5.03 ± 0.02c	4.33 ± 0.07e	1.32 ± 0.02c	7.53 ± 0.03c	2.10 ± 0.01e	6.00 ± 0.0ab	1.57 ± 0.02d	3.93 ± 0.02e
R	5.07 ± 0.05c	5.33 ± 0.05c	1.24 ± 0.01d	8.00 ± 0.08a	2.07 ± 0.05e	5.33 ± 0.08b	1.80 ± 0.01b	4.27 ± 0.02d
B	4.90 ± 0.14d	5.33 ± 0.02c	1.18 ± 0.01e	6.37 ± 0.02e	3.07 ± 0.05a	6.00 ± 0.0ab	1.87 ± 0.05b	4.63 ± 0.05c
W	5.10 ± 0.07c	14.5 ± 0.14a	1.57 ± 0.02a	7.83 ± 0.05b	2.55 ± 0.04b	6.50 ± 0.71a	2.05 ± 0.04a	5.25 ± 0.04a
WW	6.65 ± 0.04a	11.5 ± 0.11b	1.43 ± 0.02b	7.65 ± 0.04c	2.43 ± 0.02c	6.50 ± 0.71a	1.85 ± 0.04b	4.80 ± 0.01b
WY	5.80 ± 0.07b	4.70 ± 0.09d	1.42 ± 0.01b	6.53 ± 0.06e	2.13 ± 0.02e	6.00 ± 0.0ab	1.70 ± 0.01c	4.30 ± 0.01d
G	4.23 ± 0.07e	4.33 ± 0.06e	0.87 ± 0.04f	6.73 ± 0.05d	2.23 ± 0.02d	5.33 ± 0.04b	1.27 ± 0.02e	3.17 ± 0.02f

同列数据后不同字母表示显著性差异 (P < 0.05)。
Different small letters in the same column following the data indicate significant differences (P < 0.05).

表3 补充不同光质对香蕉组培苗生物量和壮苗系数的影响
Table 3 Effects of different light supplementation on biomass and seedling strengthening coefficient of banana plantlets

组别 Group	重量 Weight (m/g)				含水量 Water content (r/%)	壮苗系数 Strong seedling index
	I	II	III	IV		
CK	1.93 ± 0.0141d	0.0928 ± 0.0004d	0.0806 ± 0.0008d	0.0131 ± 0.0001d	0.9518 ± 0.0003b	0.0412 ± 0.0002f
R	2.12 ± 0.0283c	0.1069 ± 0.0001c	0.0904 ± 0.0005b	0.0169 ± 0.0002c	0.9495 ± 0.0007c	0.048 ± 0.0001e
B	1.51 ± 0.0141f	0.0832 ± 0.0002e	0.0731 ± 0.0001e	0.0101 ± 0.0001e	0.9452 ± 0.0003e	0.0512 ± 0.0003d
W	2.595 ± 0.0071a	0.1105 ± 0.0007b	0.0851 ± 0.0001c	0.0253 ± 0.0004a	0.9578 ± 0.0004a	0.0681 ± 0.0001a
WW	2.31 ± 0.0141b	0.1149 ± 0.0001a	0.0949 ± 0.0002a	0.0201 ± 0.0001b	0.9502 ± 0.0003c	0.0609 ± 0.0002b
WY	1.59 ± 0.0141e	0.0825 ± 0.0007e	0.0629 ± 0.0001g	0.0202 ± 0.0002b	0.9478 ± 0.0004d	0.0532 ± 0.0003c
G	1.485 ± 0.0212f	0.08 ± 0.0007f	0.0698 ± 0.0002f	0.0103 ± 0.0005e	0.9458 ± 0.0003e	0.0379 ± 0.0001g

I: 总鲜重; II: 总干重; III: 地上部干重; IV: 地下部干重。
I: Total fresh weight; II: Total dry weight; III: Aboveground dry weight; IV: Underground dry weight.

R、B光照组组间差异不明显,但与W、WW光照组差异明显。

2.4 补充不同光质对香蕉组培苗叶绿素荧光参数的影响

补充不同光质后,各补光处理组之间 F_v/F_o 、 F_v/F_m 的比值差异不明显,但比值均高于CK光照组,且差异明显(表4)。同时由 F_v/F_m 的标准生成的叶绿素荧光成像结果(图5A)可以看出,不同光质处理后的成像结果与CK有差异,说明经过补充不同光质,对香蕉幼苗叶片光合系统有一定的正影响。补充不同光质后,对香蕉热耗散机能均有正影响(表4),同时由NPQ的标准生成的叶绿素荧光成像结果(图5B)可以看出,实验组与CK组的热耗散机能有明显差异,且W处理下,香蕉组培苗的光合效率最优。经过补充不同LED光源,6组香蕉组培苗的Y(II)和ETR值均有所下降,且下降趋势相似(表4),意味着经过补充不同LED光源,香蕉的实际光化学转化效率和光合电子传递速率的下降。同时由Y(II)的标准生成的叶绿素荧光成像结果(图5C)可以看出,实验组与CK组的实际光合效率有一定差异,且W处理下与CK成像差异明显。

3 讨论与结论

3.1 补充LED暖黄光最有利于香蕉组培苗的增殖

光源在植物组织培养过程中至关重要,不同的光质对植物的增殖影响不同。张真等研究表明,黄光最有利于葡萄愈伤组织的增殖^[22]。周吉源等研究证实,黄光有利于油菜芽的诱导^[23]。本研究发现,在普通荧光灯基础上补充不同光质对香蕉组培苗的增殖系数均与CK组存在显著差异,其中补充LED暖黄光和LED红光的增殖系数大于CK组,LED暖黄光最有利于天宝蕉的增殖。

3.2 补充LED白光最有利于香蕉组培苗的生根壮苗

光质对于植物的生长极其重要,而且植物对于不同光质的反应也有不同。研究发现,白菜^[5]、番茄^[24]、喜树^[25]、莴苣在红光处理下株高最大。杜洪涛等的研究表明,白光下彩色甜椒壮苗系数最好^[27]。梁浩虹等、Yorio等研究证实,白光下金线莲、萝卜和菠菜的总长势较好^[28-29]。本研究结果表明,R处理下,香蕉组培苗株高最高;W处理下香蕉组培苗根数、根粗、叶数、叶宽、叶长有最大值,同时有最大的鲜重,含水量,以及最优的壮苗系数。因此,LED白光补光最有利于香蕉组培苗生根壮苗。

3.3 补光对香蕉组培苗叶片叶绿素荧光参数有一定影响

叶绿素荧光参数指标间接反映了植物对不同环境的反应情况。研究发现,不同光质对小白菜^[18]、樱桃^[30]叶绿素荧光参数的影响不大。Yu等研究发现,红光促进了喜树的光合作用效率^[25]。徐凯等研究证明,红光提高草莓叶片 F_v/F_m 值^[31]。Liang等的研究表明,单色红光会导致菊花的 F_v/F_m 值下降^[32]。本研究表明,补充不同光质后,香蕉组培苗叶绿素荧光参数 F_v/F_o 和 F_v/F_m 各处理之间差异不显著,在LED红光处理下, F_v/F_o 和 F_v/F_m 参数值最大,这一点与徐凯等试验结论^[31]相符,而与Liang等的结果^[32]相反,说明补光对不同植物叶绿素荧光参数的影响因植物而异。就香蕉而言,红光有助于提高香蕉组培苗的最大光合效率。

3.4 补充LED白光最有利于香蕉组培苗光合色素的积累

叶绿素主要类别有叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素等,是一类可以衡量植物光合能力的重要绿色色素,是绿色植物进行光合作用时利用光能的主要物质。研究发现,白光处理有利于提高绿豆幼苗^[33]、半夏^[34]、菊花^[12]的叶绿素含量。本研究也

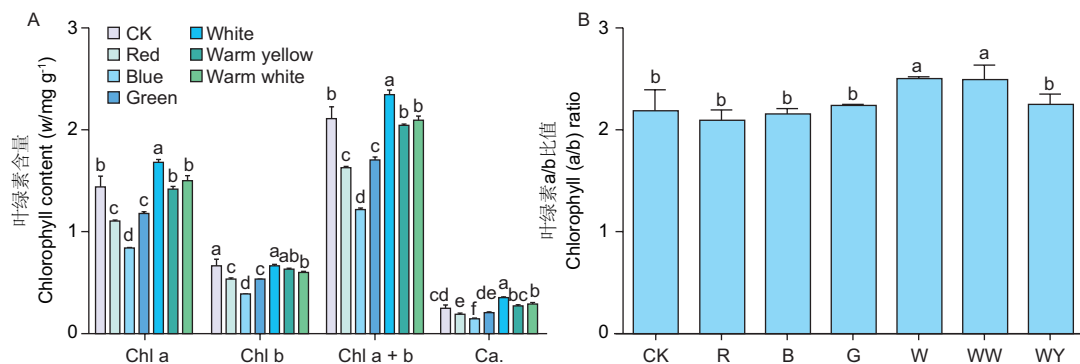


图4 补充不同光质对香蕉组培苗光合色素含量(A)和叶绿素含量a/b比值(B)的影响。Chl a: 叶绿素a; Chl b: 叶绿素b; Chl a+b: 叶绿素a加叶绿素b; Ca.: 类胡萝卜素。图柱上不同字母表示差异性显著($P < 0.05$)。

Fig. 4 Effects of different light supplementation on the photosynthetic pigment (A) and chlorophyll (a/b) ratio in banana plantlets. Chl a: Chlorophyll a; Chl b: Chlorophyll b; chl a + b: Chlorophyll a plus chlorophyll b; Ca: Carotenoid. Different small letters on the column indicate significant differences ($P < 0.05$).

表4 补充不同光质对香蕉组培苗叶绿素荧光参数的影响

Table 4 Effects of different light supplementation on chlorophyll fluorescence parameters of banana plantlets (Mean $\pm$ SD)

组别 Group	F_v/F_o	F_v/F_m	Y(II)	NPQ	q_p	ETR
CK	2.13 $\pm$ 0.02b	0.68 $\pm$ 0.00b	0.62 $\pm$ 0.02a	0.03 $\pm$ 0.00c	0.91 $\pm$ 0.02a	5.41 $\pm$ 0.19a
R	3.52 $\pm$ 0.40a	0.78 $\pm$ 0.02a	0.53 $\pm$ 0.02c	0.14 $\pm$ 0.05b	0.82 $\pm$ 0.01d	4.63 $\pm$ 0.19bc
B	3.23 $\pm$ 0.17a	0.76 $\pm$ 0.01a	0.57 $\pm$ 0.06abc	0.22 $\pm$ 0.13ab	0.90 $\pm$ 0.01a	5.08 $\pm$ 0.50ab
W	3.20 $\pm$ 0.05a	0.76 $\pm$ 0.00a	0.53 $\pm$ 0.02c	0.27 $\pm$ 0.05a	0.87 $\pm$ 0.02bc	4.72 $\pm$ 0.13bc
WW	3.28 $\pm$ 0.23a	0.77 $\pm$ 0.01a	0.56 $\pm$ 0.01bc	0.17 $\pm$ 0.01ab	0.85 $\pm$ 0.00c	5.00 $\pm$ 0.09abc
WY	3.28 $\pm$ 0.17a	0.77 $\pm$ 0.01a	0.60 $\pm$ 0.01ab	0.17 $\pm$ 0.02ab	0.89 $\pm$ 0.01ab	5.26 $\pm$ 0.12a
G	3.50 $\pm$ 0.28a	0.78 $\pm$ 0.01a	0.53 $\pm$ 0.03c	0.24 $\pm$ 0.03ab	0.82 $\pm$ 0.01d	4.60 $\pm$ 0.24c

同列数据后不同字母表示显著性差异($P < 0.05$)。

Different small letters in the same column of data indicate significant differences ($P < 0.05$).

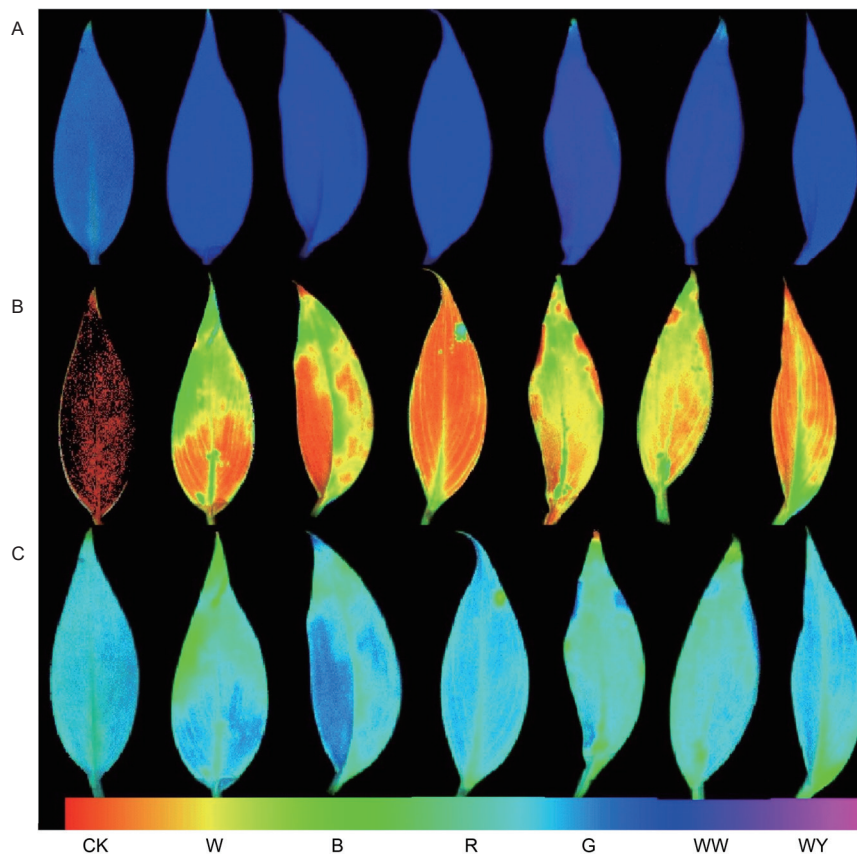


图5 补充不同光质对香蕉组培苗叶绿素荧光参数的影响。A: 由 F_v/F_m 的标准生成的叶绿素荧光成像结果; B: 由NPQ的标准生成的叶绿素荧光成像结果; C: 由Y(II)的标准生成的叶绿素荧光成像结果。

Fig. 5 Effects of different light supplementation on chlorophyll fluorescence parameters of banana plantlets. A: Chlorophyll fluorescence imaging result generated by the standard of F_v/F_m ; B: Chlorophyll fluorescence imaging result generated by the standard of NPQ; C: Chlorophyll fluorescence imaging result generated by the standard of Y(II).

发现补充LED白光有利于天宝蕉组培苗叶片叶绿素的积累。

综上所述, LED补光对香蕉组培苗生长影响较大, 且在不同阶段补充不同光质的效果不同。补充LED暖黄光最有利于香

蕉组培苗的增殖生长, 补充LED白光最有利于香蕉组培苗光合效率的提高以及香蕉组培苗壮苗生根。本研究可为香蕉组培苗增殖和生根阶段的光质和补光选择提供理论依据。

参考文献 [References]

- Wang YC, Zhang HX, Zhao B, Yun XF. Improved growth of *Artemisia annua* L. hairy roots and artemisinin production under red light conditions [J]. *Biotechnol Let*, 2001, **23** (23): 1971-1973
- 李青竹, 蔡友铭, 杨贞, 杨柳燕, 郑玉红, 孙翊, 李心, 许俊旭, 张永春. 不同LED光质对石蒜幼苗生长、生理和生物碱积累的影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, **25** (6): 1-10 [Li QZ, Cai YM, Yang Z, Yang LY, Zheng YH, Sun Y, Li X, Xu JX, Zhang YC. Effects of LED light quality on growth, physiology characteristics and alkaloids accumulations of *Lycoris radiata* [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2019, **25** (6): 1-10]
- Escobar MA, Franklin KA, Svenson AS, Salter MG. Light regulation of the *Arabidopsis* respiratory chain. Multiple discrete photoreceptor responses contribute to induction of type II NAD (P) H dehydrogenase genes [J]. *Plant Physiol*, 2004, **136** (1): 2710-2721
- Li Q, Kubota C. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce [J]. *Environ Exper Bot*, 2009, **67** (1): 59-64
- Fan XX, Zang J, Xu ZG, Guo SR, Jiao XL. Effects of different light quality on growth, chlorophyll concentration and chlorophyll biosynthesis precursors of non-heading Chinese cabbage [J]. *Acta Physiol Plant*, 2013, **35** (9): 2721-2726
- Dierck R, Dhooghe E, Van HJ, Dominique VDS, De KE. Light quality regulates plant architecture in different genotypes of, chrysanthemum morifolium, ramat [J]. *Sci Hortic*, 2017, **218**: 177-186
- Vogel IN, Macedo AF. Influence of IAA, TDZ, and light quality on asymbiotic germination, protocorm formation, and plantlet development of *Cyrtopodium glutiniferum* Raddi., a medicinal orchid [J]. *Plant Cell Tissue Organ Cult*, 2011, **104** (2): 147-155
- Cope KR, Bugbee B. Spectral effects of light-emitting diodes on plant growth and development, the importance of green and blue light [C]. *Hortic Sci*, 2013, **48** (4): 504-509
- Son KH, Park JH, Kim D, Oh MM. Leaf shape index, growth, and phytochemicals in two leaf lettuce cultivars grown under monochromatic light-emitting diodes [J]. *Korean J Hortic Sci Technol*, 2012, **30** (6): 664-672
- Son KH, Oh MM. Growth, photosynthetic and antioxidant parameters of two lettuce cultivars as affected by red, green, and

- blue light-emitting diodes [J]. *Hortic Environ Biotechnol*, 2015, **56** (5): 639-653
- 11 Kim EY, Park SA, Park BJ, Lee Y, Oh MM. Growth and antioxidant phenolic compounds in cherry tomato seedlings grown under monochromatic light-emitting diodes [J]. *Hortic Environ Biotechnol*, 2015, **55** (6): 506-513
 - 12 Zheng L, Van LMC. Chrysanthemum morphology, photosynthetic efficiency and antioxidant capacity are differentially modified by light quality [J]. *J Plant Physiol*, 2017, **213**: 66-74
 - 13 Wang H, Gu M, Cui J, Shi K, Zhou YH, Yu JQ. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus* [J]. *J Photochem Photobiol B Biol*, 2009, **96** (1): 30-37
 - 14 Nhut DT, Hong LTA, Watanabe H, Goi M, Tanaka M. Growth of banana plantlets cultured *in vitro* under red and blue light-emitting diode (LED) irradiation source [J]. *Acta Hortic*, 2002 (575): 117-124
 - 15 石颖. LED光源在连花高寒试管苗工厂化育苗上的应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2015 [Shi Y. Application of LED light source in industrial seedling raising of plantain plantlets *in vitro* in Tianbao [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2015]
 - 16 梁学芬, 蚊伟南, 颜梓兴, 肖安裕, 黄剑波. 不同光质的辅助光对香蕉组培苗的影响[J]. 中国南方果树, 2001, **30** (4): 34 [Liang XF, Yi WN, Yan ZX, Xiao AY, Huang JB. Effect of the supplement by different illumination on the growth of banana plantlets *in vitro* [J]. *South Chin Fruits*, 2001, **30** (4): 34]
 - 17 余义强. 固体、液体培养和LED光源对粉蕉工厂化试管育苗的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2015 [Yu YQ. Effects of solid, liquid culture and LED light source on plantain seedling *in vitro* [D]. Fuzhou: Fujian Agricultural and Forestry University, 2015]
 - 18 周成波, 张旭, 崔青青, 李曼, 张文东, 艾希珍, 毕焕改, 刘彬彬, 李清明. LED补光光质对小白菜生长及光合作用的影响[J]. 植物生理学报. 2017, **53** (6): 1030-1038 [Zhou CB, Zhang X, Cui QQ, Li M, Zhang WD, Ai XZ, Bi HG, Liu BB, Li QM. Effects of LED light supplementation on growth and photosynthesis of pakchoi [J]. *Plant Physiol J*, 2017, **53** (6): 1030-1038]
 - 19 刘建平, 王芳, 杜彩娟, 韩秀香, 张珂恒, 何建齐, 王悦萍. 香蕉新品种东蕉1号的组织培养技术研究[J]. 现代农业科技, 2018 (4): 68-69 [Liu JP, Wang F, Du CX, Han XX, Zhang KH, He JQ, Wang YP. Study on tissue culture techniques of new banana variety Dongjiao 1 [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2018 (4): 68-69]
 - 20 薛婷婷, 韩梅琳, 孙晓红, 王继华. 菌糠西瓜、甜瓜育苗试验[J]. 江苏农业科学. 2015, **43** (4): 191-192 [Xue TT, Han ML, Sun XH, Wang JH. Experiment on seedling raising of fungi watermelon and melon [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2015, **43** (4): 191-192]
 - 21 Yuan GF, Sun B, Yuan J, Wang QM. Effect of 1-methylcyclopropene on shelf life, visual quality, antioxidant enzymes and health-promoting compounds in broccoli florets [J]. *Food Chemistry*, 2010, **118** (3): 774-781
 - 22 张真, 李胜, 李唯, 刘媛, 吴兵, 张青松, 李婷. 不同光质光对葡萄愈伤组织增殖和白藜芦醇含量的影响[J]. 植物生理学报, 2008, **44** (1): 106-108 [Zhang Z, Li Sheng, Li W, Liu Y, Wu B, Zhang QS, Li Ting. Effects of different light quality on callus proliferation and resveratrol content in grape [J]. *Plant Physiol J*, 2008, **44** (1): 106-108]
 - 23 周吉源, 赵洁, 程井辰. 油菜花序轴组织培养中不同光质对形态发生的效应[J]. 植物学报, 1992 (s1): 24-24 [Zhou JY, Zhao J, Cheng JC. Effects of different light quality on morphology in cauliflower inflorescence axis tissue culture [J]. *Plant J*, 1992 (S1): 24]
 - 24 王丽伟, 李岩, 辛国凤, 魏珉, 米庆华, 杨其长. 不同比例红蓝光对番茄幼苗生长和光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2017, **28** (5): 1595-1602 [Wang LW, Li Y, Xin GF, Wei M, Mi QH, Yang QC. Effects of different proportions of red and blue light on the growth and photosynthesis of tomato seedlings [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28** (5): 1595-1602]
 - 25 Yu WW, Liu Y, Song LL, Jacobs DF, Du XH, Ying YQ, Shao QS, Wu JS. Effect of differential light quality on morphology, photosynthesis, and antioxidant enzyme activity in *Camptotheca acuminata* seedlings [J]. *J Plant Growth Reg*, 2016, **36**: 1-13
 - 26 周成波, 张旭, 刘彬彬, 艾希珍, 毕焕改, 李清明. 补光光质对叶用莴苣光合特性的影响[J]. 植物生理学报, 2015, **51** (12): 2255-2262 [Zhou CB, Zhang X, Liu BB, Ai XZ, Bi HG, Li QM. Effects of light supplementation and light quality on photosynthetic characteristics of leaf lettuce [J]. *Plant Physiol J*, 2015, **51** (12): 2255-2262]
 - 27 杜洪涛, 刘世琦, 蒲高斌. 光质对彩色甜椒幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北农业学报, 2005, **14** (1): 41-45 [Du HT, Liu SQ, Pu GB. Effects of light qualities on growth and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of color pepper seedling [J]. *Acta Agric Bor-occid Sin*, 2005, **14** (1): 41-45]
 - 28 梁浩虹, 牟英辉, 方临志, 黄启良, 温志鹏, 卢文艺, 李蕊, 马稚昱. LED光质对台湾金线莲生长及品质的影响[J]. 现代农业装备, 2018, **236** (5): 28-33+39 [Liang HH, Mou YH, Fang LZ, Huang QL, Wen ZP, Lu WY, Li R, Ma ZY. Influence of LED on the Growth and Quality of Taiwan [J]. *Mod Agric Equip*, 2018, **236** (5): 28-33+39]
 - 29 Yorio NC, Goins GD, Kagie HR, Wheeler RM, Sager JC. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (leds) with blue light supplementation [J]. *Hortic Sci*, 2001, **36** (2), 380-383.
 - 30 刘晓英, 徐志刚, 常涛涛, 郭世荣. 不同光质LED弱光对樱桃番茄植株形态和光合性能的影响[J]. 西北植物学报, 2010, **30** (4): 725-732 [Liu XY, Xu ZG, Chang TT, Guo SR. Effects of different light quality LED weak light on plant morphology and photosynthetic performance of cherry tomato [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2010, **30** (4): 725-732]
 - 31 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 YP, Zhang SL. Effect of light quality on photosynthesis and chlorophyll fluorescence in strawberry leaves [J]. *Sci Agric Sin*, 2005, **38** (2): 369-375]
 - 32 Zheng L, Van LMC. Effects of different irradiation levels of light quality on chrysanthemum [J]. *Sci Hortic*, 2018, **233**: 124-131
 - 33 赵占娟, 李光, 王秀生, 唐志远. 光质对绿豆幼苗叶片超微弱发光及叶绿素含量的影响[J]. 西北植物学报. 2009, **29** (7): 1465-1469 [Zhao ZJ, Li G, Wang XS, Tang ZY. Ultraweak biophoton emission and chlorophyll contents in leaves of mung bean seedlings under different spectrum lights [J]. *Acta Bot Bor-Occid Sin*, 2009, **29** (7): 1465-1469]
 - 34 陈韵, 朱国胜, 郭巧生, 王长林, 刘作易. 光质对半夏生长及其药材品质的影响[J]. 中国中药杂志, 2013, **38** (24): 4257-4262 [Chen Y, Zhu GS, Guo QS, Wang CL, Liu ZY. Effect of light quality on the growth and quality of *Pinellia ternata* [J]. *Chin J Chin Mat Med*, 2013, **38** (24): 4257-4262]