

李 奥,张京伟,宫子惠,等. 玉簪组培苗对发光二极管光源的生理响应[J]. 江苏农业科学,2019,47(15):166–169.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2019.15.039

玉簪组培苗对发光二极管光源的生理响应

李 奥^{1,2}, 张京伟¹, 宫子惠^{1,2}, 孙纪霞¹, 杨晓芬^{1,2,3}, 罗珍珍⁴, 张英杰¹, 刘学庆¹

(1. 山东省烟台市农业科学研究院, 山东烟台 265500; 2. 烟台大学, 山东烟台 264005;

3. 中国科学院植物研究所, 北京 100093; 4. 烟台市园林管理处科研所, 山东烟台 264000)

摘要:以“宠物”(Hosta ‘Love Pat’)玉簪组培苗为试验材料,设置 5 个发光二极管(LED)光质处理(100% 红光、70% 红光 + 30% 蓝光、50% 红光 + 50% 蓝光、30% 红光 + 70% 蓝光、100% 蓝光)以及 40、100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 2 个光照度处理,以荧光灯为对照,研究不同光质光照度对玉簪生长及光合特性的影响。结果表明,“宠物”玉簪组培苗的增殖效果随着蓝光比例的增加而增强,在纯红光条件下效果最差,在 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 光照度条件下的增殖效果强于 40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 条件的;红光有利于玉簪的伸长生长,对鲜质量、干质量也有促进作用,叶片数在纯蓝光条件下达到最大值。红光比例高的复合光条件较单质光更有利于光合速率、光化学量子效率的提高以及叶绿体色素的形成,在 7R3B(70% 红光 + 30% 蓝光)条件下,净光合速率最高,达到 1.342,且此时胁迫程度最轻。

关键词:玉簪;光质;光照度;增殖;光合特性

中图分类号: S682.1⁺90.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002–1302(2019)15–0166–04

玉簪别称白萼,是百合科玉簪属的多年生宿根植物。玉簪耐寒冷,性喜阴湿环境,不耐强烈日光照射,是重要的耐阴地被植物^[1]。玉簪在欧美等国家的园林建设中已经应用了很多年,常用于湿地及水岸边绿化,是世界上销量最大的草本

花卉之一^[2]。目前,国内外对玉簪的研究主要集中在组织培养、栽培管理等方面^[3],尚未系统地研究光源对其增殖生长和光合特性的影响,难以满足市场对玉簪规模化生产等的需求^[4]。

光质为不同波长的太阳光谱,在植物生长发育生理代谢、基因表达、光合作用等生理过程中起着重要的调节作用,是植物生长过程中重要的环境因子^[5]。发光二极管(LED)是一种新型人工光源,相比于普通的日光灯、高压钠灯,具有环保、寿命长、使用安全、成本低等优点^[6]。目前发达国家已经积极开展 LED 光源技术在植物设施栽培中的应用,而我国还处于植

收稿日期:2018–08–26

基金项目:山东省烟台市科技计划(编号:2018NCGY056)。

作者简介:李 奥(1995—),男,山东临沂人,硕士研究生,主要从事植物组培快繁技术研究。E-mail:liaol110@qq.com。

通信作者:刘学庆,博士,研究员,主要从事花卉生产栽培与品种选育研究工作。E-mail:lxqflower@163.com。

[11] Wang Y C, Qiao M, Liu Y X, et al. Comparison of polycyclic aromatic hydrocarbon uptake pathways and risk assessment of vegetables from waste–water irrigated areas in northern China[J]. Journal of Environmental Monitoring, 2011, 13(2): 433–439.

[12] Lu H X, Cai Q Y, Jones K C, et al. Levels of organic pollutants in vegetables and human exposure through diet; a review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2014, 44(1): 1–33.

[13] 杨海燕, 郭金鹏, 卢少勇, 等. 水葫芦多环芳烃含量及其与脂肪含量的关系[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 467–472.

[14] 凌婉婷, 朱利中, 高彦征, 等. 植物根对土壤中 PAHs 的吸收及预测[J]. 生态学报, 2005, 25(9): 2320–2325.

[15] 谢 峰, 严重玲, 卢豪良, 等. 菲与芘在砂基培养的红树植物秋茄中的分布与可视化定位[J]. 台湾海峡, 2012, 31(4): 489–494.

[16] 沈 菲, 朱利中. 钢铁工业区附近农田蔬菜 PAHs 的浓度水平及分布[J]. 环境科学, 2007, 28(3): 669–672.

[17] Brady C A, Gill R A, Lynch P T. Preliminary evidence for the metabolism of benzo(a) pyrene by *Plantago lanceolata* [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2003, 25(1): 131–137.

[18] Gao Y Z, Zhang Y, Liu J, et al. Metabolism and subcellular

distribution of anthracene in tall fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) [J]. Plant and Soil, 2013, 365(1/2): 171–182.

[19] Kang F, Chen D, Gao Y, et al. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in subcellular root tissues of ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) [J]. BMC Plant Biology, 2010, 10(1): 210–216.

[20] 尹春芹, 蒋 新, 杨兴伦, 等. 多环芳烃在土壤–蔬菜界面上的迁移与积累特征[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3240–3245.

[21] 熊冠男, 张云惠, 段永红, 等. 山西晋中焦化基地多环芳烃排放对周边大田卷心菜的影响[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(2): 473–483.

[22] Wild E, Dent J, Thomas G O, et al. Visualizing the air–to–leaf transfer and within–leaf movement and distribution of phenanthrene: further studies utilizing two–photon excitation microscopy [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(3): 907–916.

[23] 陈 静, 王学军, 陶 澍, 等. 天津地区土壤多环芳烃在剖面中的纵向分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(2): 286–290.

[24] 丁爱芳, 潘根兴, 李恋卿. 南京和宜兴市土壤中多环芳烃(PAHs)的纵向分布[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 115–118.

物栽培领域 LED 光源技术的发展阶段^[7-8]。因此,本试验以“宠物”玉簪为材料,选用 LED 灯、荧光灯 2 种光源,通过设置不同光质、光照度处理,研究其对植株增殖和光合特性的影响,以期 LED 光源在玉簪栽培上的应用提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试玉簪品种为中国科学院植物研究所于 1985 年从欧洲引进的“宠物”(Hosta ‘Love Pat’)玉簪(通过杂交培育的玉簪品种),本试验于 2018 年于中国科学院植物研究所进行。

1.2 试验方法

以“宠物”(Hosta ‘Love Pat’)玉簪组培苗为试验材料,锥形瓶容积为 100 mL,每瓶分装 2 个芽,培养基配比为 MS + 0.1 mg/L IBA + 2 mg/L 6-BA + 30 g/L 蔗糖 + 4 g/L 琼脂,调节 pH 值为 5.8~6.2,相对湿度为 75%,培养温度为 26℃。采用 30 W 可调节的 LED 灯和飞利浦 T5×28W 型号的荧光灯,将“宠物”玉簪分别放置在 5 种不同光质(100% 红光、70% 红光 + 30% 蓝光、50% 红光 + 50% 蓝光、30% 红光 + 70% 蓝光、100% 蓝光,分别简称 R、7R3B、RB、3R7B、B)下,同时以荧光灯为对照(CK),设 40、100 μmol/(m²·s) 2 个不同梯度的光照度,光源距离瓶口 20 cm,光照时间为 10 h/d,每种处理设 15 瓶,3 个重复,每 5 d 观察 1 次并记录观察结果。增殖芽数的测定取生长 50 d 后的玉簪,测量并计算平均值。形态指标的测定取生长 50 d 后的玉簪,每个处理各取 5 瓶,分别测定鲜质量、干质量。叶绿体色素含量的测定参考 Arnon 的

方法^[9]。净光合速率参数的测定和叶绿素荧光参数的测定均使用 LI-6400 便携式光合仪(LICOR Inc,USA)。

1.3 处理与分析

用 Excel 2017 对数据进行处理,用 IBM SPSS Statistics21 对数据进行方差分析,用 Duncan’s 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 光照对“宠物”(Hosta ‘Love Pat’)玉簪组培苗增殖和生长的影响

由表 1 可知,不同光质对“宠物”(Hosta ‘Love Pat’)玉簪组培苗的影响较小,芽的数量(由增殖率看出)随着蓝光的增加呈逐渐上升的趋势,当蓝光比例达到 100% 时,增殖率为 3.56,此时增殖效果最好,较荧光灯提高了 16.34%;当红光比例达到 100% 时,增殖率为 2.62,此时增殖效果最差,较荧光灯对照组降低了 14.38%。不同光质对株高、叶数、鲜质量、干质量均有显著影响,株高整体上随着红光比例的增加而显著提高,最高达到 72.19 mm,较荧光灯对照组增加了 30.54%。在 3R7B 的光质条件下株高最低,较对照组降低了 5.17%,仅为 52.44 mm。叶片数在纯蓝光培养下达到最大值 14.28 张,较荧光灯对照组增加了 24.17%,在纯红光下最少,为 11.20 张,较对照组减少了 2.61%。鲜质量在纯红光条件下达到最高值 1.298 g,较荧光灯对照组增加了 74.70%,荧光灯对照组鲜质量最小,仅为 0.743 g。干质量在纯蓝光条件下达到最大值 0.122 g,较对照组增加了 43.53%,在 3R7B 条件下最低,仅为 0.084 g,较对照组减少了 1.18%。

表 1 不同光质对玉簪增殖和生长的影响

处理	增殖率	形态指标			
		株高(mm)	叶数(张)	鲜质量(g)	干质量(g)
R	2.62b	72.19a	11.20c	1.298a	0.121ab
7R3B	3.26ab	57.50bc	13.36ab	0.900bc	0.092ab
RB	3.10ab	58.65b	12.60abc	0.945bc	0.118ab
3R7B	3.28ab	52.44d	12.56abc	0.850bc	0.084b
B	3.56a	53.79cd	14.28a	1.206ab	0.122a
CK	3.06ab	55.30bcd	11.50bc	0.743c	0.085b

注:同列数据后标有不同小写字母表示不同光质处理间存在显著差异($P<0.05$)。下表同。

由表 2 可知,不同光照度则对“宠物”玉簪的影响较大,在 100 μmol/(m²·s) 光照度条件下的增殖率为 3.42,较 40 μmol/(m²·s) 光照度处理增加了 19.16%。光照度对株高、叶片数、鲜质量、干质量也有较显著的影响,在低光照度下的株高较高,在光照度为 40 μmol/(m²·s) 时达到 59.56 cm,较 100 μmol/(m²·s) 时增加了 4.38%。叶片数随着光照度的提高而有所增加,在 100 μmol/(m²·s) 时,叶片数为 12.97 张,较 40 μmol/(m²·s) 时增加了 6.40%。光照度对鲜质量、干质量均没有显著影响。由表 3 可知,不同光质和光照度对“宠物”玉簪的增殖具有显著影响,在 3R7B×100 μmol/(m²·s) 时效果最好,增殖率达到 3.76;在 CK×

40 μmol/(m²·s) 时效果最差,增殖率为 2.40。组培苗株高在 R×40 μmol/(m²·s)、B×100 μmol/(m²·s) 处理时分别达到最大值 78.46 mm 与最小值 50.39 mm。在 B×100 μmol/(m²·s) 处理下叶片数最多,在 CK×40 μmol/(m²·s) 处理下叶片数最少,分别为 15.08、9.24 张。在 R×40 μmol/(m²·s) 处理下的鲜质量最大,为 1.673 g;在 3R7B×100 μmol/(m²·s) 处理下鲜质量最低,为 0.686 g。在 B×100 μmol/(m²·s) 处理下的干质量最大,为 0.150 g,在 3R7B×100 μmol/(m²·s) 处理下的干质量最小,为 0.080 g。

表 2 不同光照度对玉簪增殖和生长的影响

光照度 [μmol/(m ² ·s)]	增殖率	形态指标			
		株高(cm)	叶数(张)	鲜质量(g)	干质量(g)
100	3.42a	57.06a	12.97a	0.925a	0.105a
40	2.87b	59.56b	12.19a	1.056a	0.102a

表 3 不同光质和光强对玉簪增殖和生长的影响

光质 × 光照度 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	增殖率	形态指标			
		株高 (mm)	叶数 (张)	鲜质量 (g)	干质量 (g)
R × 100	2.68b	65.92b	10.56cd	0.924bc	0.101abc
R × 40	2.56b	78.46a	11.84bcd	1.673a	0.140ab
7R3B × 100	3.40ab	63.45ab	14.08ab	1.006bc	0.096bc
7R3B × 40	3.12ab	51.54cd	12.64abc	0.795c	0.088bc
RB × 100	3.24ab	59.66ab	11.64bcd	0.800c	0.116abc
RB × 40	2.96ab	57.63bc	13.56abc	1.089bc	0.120abc
3R7B × 100	3.76a	52.09bc	12.72abc	0.686c	0.080c
3R7B × 40	2.80ab	52.80cd	12.40abc	1.013bc	0.087bc
B × 100	3.72a	50.39d	15.08a	1.408ab	0.150a
B × 40	3.40ab	57.19bcd	13.48abc	1.005bc	0.095bc
CK × 100	3.72a	50.86cd	13.76ab	0.725c	0.086bc
CK × 40	2.40b	59.74ab	9.24d	0.762c	0.101abc

2.2 光照对“宠物”(Hosta ‘Love Pat’)玉簪组培苗叶绿体色素含量的影响

由表 4 可知,光照度对“宠物”玉簪叶绿体色素含量的影响较小,但光质对叶绿素 b、叶绿素 a + b、类胡萝卜素含量的影响较大,在 RB 处理下含量较高,荧光组(CK)较低,B × 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 组也较低。在 3R7B 处理下,叶绿素 b 的含量大于荧光组和纯蓝光组。光质和光照度的相互作用对叶绿素 b、叶绿素 a + b、类胡萝卜素含量同样具有显著影响,均在 3R7B × 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理下达到最大值,分别为 0.270、0.220、1.351 mg/g。对叶绿素 a 的影响较小,这与单因素光质对叶绿素含量的影响相同。结果表明,在复合光培养条件下有利于叶绿体色素的形成,在一定范围内,叶绿体色素含量随着红光比例的提高而增加。

2.3 光照对“宠物”(Hosta ‘Love Pat’)玉簪组培苗净光合速率的影响

由表 4 还可以看出,不同光质对“宠物”玉簪的净光合速率影响显著,在复合光条件下净光合速率增高,在 7R3B × 40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理下最高,较荧光灯条件有明显的提高;在纯蓝光条件下最低,为 0.309 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较对照组降低了 14.17%。不同光照度对净光合速率也有显著影响,玉簪在光照度为 40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的净光合速率为 1.241 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,较光照度为 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时提高了 244.7%。在光质和光照度的相互作用下,“宠物”玉簪在 7R3B × 40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 条件下的净光合速率最高,达到 1.342 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,在 B × 40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 条件下的净光合速率最低,为 0.344 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

表 4 不同光质和光照度对玉簪叶绿体色素及净光合速率的影响

光质 × 光照度 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	叶绿素 a 含量 (mg/g)	叶绿素 b 含量 (mg/g)	叶绿素 a + b 含量 (mg/g)	类胡萝卜素含量 (mg/g)	净光合速率 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]	光化学量子效率
R × 100	0.374c	0.109e	0.076c	0.482d	1.090bc	0.730ab
R × 40	1.014a	0.256ab	0.209a	1.271a	0.738cde	0.673cde
7R3B × 100	0.859abc	0.213abcde	0.170abc	1.072abcd	0.797cd	0.774a
7R3B × 40	0.891abc	0.242abc	0.193ab	1.133abc	1.342ab	0.723ab
RB × 100	0.834abc	0.228abcde	0.165abc	1.062abcd	0.556def	0.753ab
RB × 40	0.971ab	0.236abcd	0.210a	1.207ab	0.833cd	0.714abc
3R7B × 100	0.845abc	0.270a	0.220a	1.351a	0.504def	0.627efg
3R7B × 40	0.695abc	0.201abcde	0.141abc	0.897abcd	1.063bc	0.688bcd
B × 100	0.454bc	0.128cde	0.106bc	0.583cd	0.309f	0.647def
B × 40	0.667abc	0.170abcde	0.129abc	0.837abcd	0.344ef	0.588g
CK × 100	0.468bc	0.111de	0.097bc	0.578bc	0.360ef	0.609fg
CK × 40	0.490bc	0.138bcde	0.099bc	0.628bcd	1.241a	0.696bcd

2.4 光照对“宠物”(Hosta ‘Love Pat’)玉簪组培苗光化学量子效率的影响

从单因素看,光质对“宠物”玉簪的影响显著,随着蓝光的增加,植株受胁迫的程度越严重。光照度对玉簪光化学量子效率的影响较小,在 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的受胁迫程度较 40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时的轻。从光质和光照度的相互作用来看,玉簪在 7R3B × 100 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理下未受到胁迫,在

B × 40 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理下的受胁迫程度最重,分别为 0.774、0.588。

3 讨论

近年来,许多学者在有关光质对植物组培的作用方面进行了相应研究,杨长娟等通过研究 LED 不同光质对洋桔梗组培苗增殖的影响,得出红蓝混合光质处理的组培苗增殖量高

于单质光的结论^[10]。李黎等对菊花组培苗的研究也得出,在红蓝光比例为 2:1 的条件下,组培苗的增殖效果最好^[11]。此外,对高山杜鹃^[12]、蝴蝶兰的研究^[13]均得出类似结论。由上述研究结果看出,复合光源更能促进组培苗的增殖效果,本研究也得出类似的结论。另有研究显示,红蓝复合光质有利于植株叶绿体色素的形成,马蹄莲^[14]、黄瓜^[15]、蝴蝶兰^[13]、棉花^[16]植株内的叶绿体色素含量随着蓝光比例的提高而增加,即在复合光中,蓝光更有利于叶绿体色素的形成。这与本试验得到的结果有所不同,“宠物”玉簪在复合光质处理中红光比例较大的情况下,叶绿体色素含量也较高,这可能与叶片颜色有关,“宠物”玉簪的叶片颜色与其他玉簪品种不同,呈蓝灰色,因而对光谱中蓝色光反射得较多,吸收得较少,对红光吸收得较多。因此在复合光质中,“宠物”玉簪的叶绿体色素含量及净光合速率随着红光比例的提高而增加,这与蒲高斌等对番茄的研究结果^[17]一致。

光合作用产生的能量主要作用于热能、光合驱动和叶绿体荧光。其中叶绿体荧光产量是表示植物是否受到胁迫的最早表现。通过叶绿素荧光技术可以快速了解植物的受害状况、抗逆性强弱。光系统Ⅱ中的电子流动可以表现出总体的光合速率特征^[18]。在暗适应中测得的 F_v/F_m 可以反映潜在 PSⅡ的最大量子效率,用于植物光合能力灵敏程度的指示。储钟希等研究表明,复合光质中红光条件下的黄瓜叶片 PSⅡ活性和原初光能转换效率比其他光质条件下的高,受到的胁迫程度较轻^[19],与本试验得到的结果相似。

4 结论

本试验以“宠物”玉簪为试验材料,通过不同光质、光照度的设置,分析得出 LED 光质对玉簪的增殖具有显著影响,在纯蓝光质时组培苗的增殖效果最好,增殖率在光照度为 $100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时较光照度为 $40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时明显提高。在光质和光照度的共同作用下,分析得出最适合“宠物”玉簪增殖的光照条件为 $3\text{R}7\text{B} \times 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。对玉簪叶片数、鲜质量、干质量、株高的研究结果表明,在 $\text{R} \times 40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理下,株高、鲜质量最大,在 $\text{B} \times 100 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理下,叶片数、干质量达到最大值。LED 光质和光照度同样对叶绿体含量具有显著影响,在复合光质中红光比例较大的条件下,叶绿体色素含量最高。本试验同样得出,当红蓝光比例为 7:3 时,玉簪的受胁迫程度最低,在 $7\text{R}3\text{B} \times 40 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 处理下未受到胁迫,此时植株的光合速率利用率最高,光抑制程度也最低。

当然,植物的生长还受到激素、微量元素、温度等其他因素的影响^[20-22],本试验仅着重研究 LED 光源对玉簪增殖生长及光合特性的影响,未对其他因素作出验证。因此,下一步将结合其他因素的协同影响,对玉簪组培苗发育作出更加全面的测定分析,为 LED 光技术在玉簪栽培上的应用提供一定的理论依据。

参考文献:

[1] 张金政,施爱萍,孙国峰,等. 玉簪属植物研究进展[J]. 园艺学

报,2004,31(4):549-554.

[2] 关梦茜,董 然. 玉簪属植物研究进展及园林应用[J]. 北方园艺,2013(19):182-185.

[3] 徐庆祥. 玉簪属植物生理生态学研究进展[J]. 安徽农业科学,2017,45(15):6-8,13.

[4] 张金政. 栽培条件对玉簪属植物生长和光合作用的影响研究[D]. 长春:吉林农业大学,2013.

[5] 陈祥伟,刘世琦,刘 庆,等. 不同 LED 光源对小白菜生长及光合特性的影响[J]. 北方园艺,2013(22):1-4.

[6] 崔 瑾,徐志刚,邸秀茹. LED 在植物设施栽培中的应用和前景[J]. 农业工程学报,2008,24(8):249-253.

[7] 郭云香,项丽敏,黄 宏,等. LED 在生物产业中的应用研究[J]. 现代农业科技,2012(10):26-27,32.

[8] 闫新房,丁林波,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.

[9] Arnon D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. Plant Physiology,1949,24(1):1-15.

[10] 杨长娟,凌 青,任兴平,等. LED 不同光质对洋桔梗组培苗增殖的影响[J]. 北方园艺,2011(18):154-156.

[11] 李 黎,陈 菲,唐焕伟,等. LED 不同光质对菊花组培苗的影响[J]. 国土与自然资源研究,2015(4):82-83.

[12] 刘晓青,苏家乐,陈尚平,等. 高山杜鹃叶片再生和试管苗生长对不同 LED 光质的响应特征[J]. 江苏农业学报,2013,29(6):1451-1455.

[13] 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(1):81-88.

[14] Jao R C, Lai C C, Fang W, et al. Effects of red light on the growth of *Zantedeschia plantlets in vitro* and tuber formation using light-emitting diodes[J]. HortScience,2005,40(2):436-438.

[15] Hernández R, Kubota C. Physiological responses of cucumber seedlings under different blue and red photon flux ratios using LEDs[J]. Environmental & Experimental Botany,2016,121(1):66-74.

[16] Li H M, Xu Z G, Tang C M. Effect of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets *in vitro*[J]. Plant Cell Tissue and Organ Culture,2010,103(2):155-163.

[17] 蒲高斌,刘世琦,刘 磊,等. 不同光质对番茄幼苗生长和生理特性的影响[J]. 园艺学报,2005,32(3):420-425.

[18] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报,1999,16(4):444.

[19] 储钟稀,童 哲,冯丽洁,等. 不同光质对黄瓜叶片光合特性的影响[J]. 植物学报,1999,41(8):867-870.

[20] 赵 凤,王小乐,房伟民,等. 外源激素和温度对切花菊侧芽萌发与内源激素含量的影响[J]. 江苏农业学报,2018,34(1):145-151.

[21] 樊海潮,顾万荣,尉菊萍,等. 植物生长调节剂增强玉米抗倒伏能力的机制[J]. 江苏农业学报,2017,33(2):253-262.

[22] 魏淑云,陈建华,张 获,等. ‘里昂城’铁线莲组培体系的建立[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2017,35(1):22-28,33.