

不同光谱能量分布对菊花试管苗增殖及生根的影响

张欢¹, 徐志刚², 崔瑾^{1,*}, 谷艾素¹, 郭银生¹

(¹南京农业大学生命科学学院, 南京 210095; ²南京农业大学农学院, 南京 210095)

摘要: 采用发光二极管(LED)调制光质和光量, 研究光谱能量分布对菊花离体培养增殖和生根阶段的影响, 以荧光灯为对照。研究表明: 红光有助于增加株高、节间长, 且有利于生根试管苗可溶性糖、淀粉和碳水化合物的合成; 蓝光显著提高丛生苗的叶绿素b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量和生根试管苗游离氨基酸含量; 而红蓝黄复合光不仅有利于丛生苗分化和增殖, 也利于促生根组培苗色素形成、生长发育及根系活力。与荧光灯相比, 红蓝黄复合光质LED具有明显优势, 有利于提高增殖系数, 培育壮苗和降低能耗成本。

关键词: 菊花; 发光二极管; 光谱能量分布; 增殖; 生根

中图分类号: S 682.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 0513-353X (2010) 10-1629-08

Effects of Light Spectral Energy Distribution on Multiplication and Rooting of Chrysanthemum Plantlets *in Vitro*

ZHANG Huan¹, XU Zhi-gang², CUI Jin^{1,*}, GU Ai-su¹, and GUO Yin-sheng¹

(¹College of Life Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; ²College of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: The effects of different light spectral energy distribution of light-emitting diode (LED) on multiplication and rooting of chrysanthemum plantlets *in vitro* were studied. Fluorescent light was used as the control. The results showed that, red LED was in favour of enhancing plant height and internode length, and synthesizing soluble sugar, starch and carbohydrate; The content of chlorophyll b, chlorophyll a + b and carotenoid of shoots including content of amino acid of plantlets *in vitro* were significantly increased by blue LED; Complex of red, blue and yellow LED was not only suitable for differentiation and proliferation of shoots *in vitro*, but for pigment synthesis, growth and root vigor of plantlets *in vitro*. The results indicated that, as compared with fluorescent light, application of complex of red + blue + yellow LED was propitious to improve propagation coefficient, breed vigorous plantlets and decrease energy consumption.

Key words: chrysanthemum; light-emitting diode; light spectral energy distribution; multiplication; rooting

收稿日期: 2010-05-06; 修回日期: 2010-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(30800764); 国家‘863’计划项目(2006AA03A165)

* 通信作者 Author for correspondence (E-mail: cuijin@njau.edu.cn)

光质和光量对组培植物的生长发育具有显著影响 (Lian et al., 2002; Nhut et al., 2003; Le & Tanaka, 2004; Kurilčik et al., 2007; Guo et al., 2008; Shin et al., 2008)。

国内学者研究了光质对小苍兰 (车生泉 等, 1997)、香蕉 (梁学芬 等, 2001)、一品红 (焦海华和铁军, 2003)、草莓 (秦永华 等, 2005)、葡萄 (刘媛 等, 2009) 和马铃薯 (常宏 等, 2009) 等试管苗的影响, 证实了光质具有显著的生物学效应。但试验多采用有色膜、滤光片或荧光灯获得光谱, 无法定量精确调制光谱, 光量低且不一致, 影响到结论的可靠性和可比性。国内外已有学者采用发光二极管 (Light-emitting diode, LED) 调控光谱能量分布, 研究其对蝴蝶兰 (饶瑞估 等, 2003)、牡丹 (岳岚, 2008)、甘薯 (杨雅婷 等, 2009)、葡萄 (Kurilčik et al., 2007)、文心兰 (Lian et al., 2002)、香蕉 (Nhut et al., 2003)、兰花 (Le & Tanaka, 2004)、朵丽蝶兰 (Shin et al., 2008) 等试管苗生长发育的影响。LED 为新型半导体光源, 具有光质纯、光效高、波长类型丰富、光谱能量调制便捷、低发热、节能环保等突出优势, 是替代荧光灯用于植物组织培养领域的新一代节能环保型光源 (Guo et al., 2008)。

组培快繁是获取菊花优质商品种苗的主要途径 (Teixeira, 2004)。已有学者应用 LED 进行光环境调控, 研究其对菊花组培苗生长的效应 (Kim et al., 2004; Kurilčik et al., 2008), 但仅涉及红、蓝光质或较少的光质配比, 且缺乏对丛生苗增殖效应的研究。本试验中采用 LED 调制光质和光量, 研究多种光谱能量分布对菊花丛生苗增殖分化和生根苗生长的影响, 为其离体快繁的光环境改善和植物组培专用 LED 光源的研发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2008 年 9 月至 2009 年 5 月在南京农业大学农学院进行。菊花 [*Dendranthema morifolium* (Ramat.) Tzvel.] 为南京农业大学花卉研究所提供的 ‘32-12’ 组培苗。将三叶一心、株高 1.5 cm 左右的菊花无菌苗接种在增殖培养基 ($1/2\text{MS} + 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \text{BA} + 25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{蔗糖} + 6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{琼脂}$) 上, 培养 40 d, 获得丛生苗; 随后选取长势一致的丛生苗接种到生根培养基 ($1/2\text{MS} + 25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{蔗糖} + 6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{琼脂}$) 上, 培养 35 d 后, 获得生根试管苗。每瓶接种 6 株, 培养基 pH 5.8。

1.2 光谱能量分布

采用南京农业大学农学院自主研制 LED 植物光源及调控设施, 以华电公司制造的管状荧光灯作对照, 光谱能量分布如表 1 所示。

表 1 不同 LED 光谱能量分布的主要技术参数
Table 1 Major technique parameters of light spectral energy distribution under LED

处理 Treatment	光谱能量分布 Light spectral energy distribution	峰值波长/nm λ_p	波长半宽/nm $\Delta\lambda$	光强/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) Light intensity
R	红 Red	660	25	80
B	蓝 Blue	460	25	80
1RBY	红/蓝/黄 Red/blue/yellow (5:3:2)	660/460/590	25	80
2RBY	红/蓝/黄 Red/blue/yellow (6:3:1)	660/460/590	25	80
RBG	红/蓝/绿 Red/blue/green (5:3:2)	660/460/530	25	80
1RB	高红/蓝 High red/blue (3:1)	660/460	25	80
2RB	中红/蓝 Middle red/blue (1:1)	660/460	25	80
3RB	低红/蓝 Low red/blue (1:3)	660/460	25	80
RBFr	红/蓝/远红光 Red/blue/far-red (5:3:2)	660/460/715	25	80
对照 Control	荧光灯 Fluorescent	380~750	—	80

预培养 5 d 后随机分成 10 组, 每组 12 瓶, 分别置于 9 种光谱能量分布的 LED 光源小区和 1 个荧光灯对照区。调节电流、占空比以及光源与植株的距离, 使光量均为 $80 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右; 光照 $12 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ 。培养室温度为 $(25 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 。

1.3 指标测定

培养 35 d 后, 用直尺测定株高、根长, 游标卡尺测定茎粗。用硫酸纸剪纸称重法测定叶面积(冯东霞和施生锦, 2005)。分化率(%) = 分化出不定芽的叶块总数/接种的叶块总数 $\times 100$; 增殖系数 = 叶块发生的不定芽总数/接种的叶块总数。

以 80%丙酮提取法测定叶中叶绿素和类胡萝卜素含量; 考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量; 超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法测定; 过氧化物酶(POD)活性按愈创木酚法测定; 过氧化氢酶(CAT)活性采用滴定法测定; 可溶性糖和淀粉采用蒽酮比色法; 游离氨基酸采用茚三酮溶液显色方法(李合生, 2003)。

形态指标测定设 6 次重复, 生理生化指标设 3 次重复。采用 Excel 2003 软件进行数据整理, 用 SPSS16.0 进行方差分析, LSD 进行多重比较, $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同光谱能量分布对菊花离体培养增殖阶段的影响

2.1.1 丛生苗生长及分化率和增殖系数

表 2 所示, R 处理下的菊花丛生苗株高达到最大值, 且显著高于对照及其他处理, 茎粗和叶面积也都显著高于对照; B 处理下的叶面积最小, 且显著低于其他处理(1RBY 和 2RBY 除外); 1RBY、RBG 和 RBFr 处理下的丛生苗分化率达到最大值, 且显著高于其他处理和对照; 1RBY 处理下的丛生苗增殖系数也达到最大值, 且显著高于 2RB 处理。

表 2 不同光谱能量分布对菊花丛生苗生长及分化率、增殖系数的影响

Table 2 Effects of light spectral energy distribution on growth, differentiation and proliferation of chrysanthemum shoots *in vitro*

处理 Treatment	株高/cm Height	茎粗/cm Stem diameter	叶面积/cm ² Leaf area	分化率/% Differentiation rate	增殖系数 Propagation coefficient
B	3.867bc	0.154bc	0.293e	83.333c	3.683ab
R	5.167a	0.172ab	0.540ab	91.667b	2.792ab
1RBY	4.167b	0.185a	0.350de	100a	4.167a
2RBY	3.433c	0.131cde	0.393cde	91.667b	3.000ab
RBG	4.133b	0.111e	0.440bcd	100a	2.700ab
1RB	3.867bc	0.106e	0.535abc	91.667b	3.000ab
2RB	4.367b	0.118e	0.613a	81.667c	2.800ab
3RB	3.367c	0.119de	0.583a	83.333c	2.900ab
RBFr	3.700bc	0.116e	0.560ab	100a	2.917ab
对照 Control	3.400c	0.144cd	0.357de	91.667b	2.325b

注: 同列中相同小写字母表示在 5%水平上显著差异。下同。

Note: The same small letters in the same column means no significant difference at 5% level. The same below.

2.1.2 丛生苗色素含量

色素含量是光合能力的重要指标。从表 3 中可以看出, B 处理下菊花丛生苗的叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量达到最大值且显著高于对照; 而 2RB 处理下的色素含量均达到最低值且显著低于 B 处理。

表 3 不同光谱能量分布对菊花丛生苗色素含量的影响

Table 3 Effects of light spectral energy distribution on pigment contents of chrysanthemum shoots

处理 Treatment	叶绿素/ (mg · g ⁻¹ FW) Chl.			Chl. a/b	类胡萝卜素/ (mg · g ⁻¹ FW) Carotenoid
	a	b	a + b		
B	2.285a	1.123a	3.408a	2.041ab	0.847a
R	1.737abc	0.775cd	2.512bc	2.240a	0.605bc
1RBY	2.101ab	1.071ab	3.172ab	1.963ab	0.796ab
2RBY	1.826abc	0.848abcd	2.674abc	2.145ab	0.650abc
RBG	1.901abc	0.948abc	2.850ab	2.009ab	0.704abc
1RB	1.850abc	1.015abc	2.865ab	1.837b	0.670abc
2RB	1.301c	0.644c	1.946c	2.022ab	0.485c
3RB	1.850abc	0.860abcd	2.710abc	2.150ab	0.666abc
RBFr	1.597bc	0.762cd	2.359bc	2.097ab	0.587bc
对照 Control	1.662abc	0.793bcd	2.460bc	2.093ab	0.606bc

2.2 不同光谱能量分布对菊花离体培养生根阶段的影响

2.2.1 试管苗形态及生根

表 4 所示, R 处理下的菊花试管苗株高及第 3 节间距达到最大值且显著高于对照及其他处理; 1RBY 处理下的菊花试管苗呈现良好的生长形态, 茎粗达到最大且显著高于其他处理及对照, 叶面积显著高于对照; 根数在 RBG 处理下显著多于对照, 然后依次为 RBFr、1RB; 在 R 及 1RBY 处理下, 菊花试管苗根系活力均显著高于对照。

表 4 不同光谱能量分布对菊花试管苗形态及生根的影响

Table 4 Effects of light spectral energy distribution on morphology and rooting of chrysanthemum plantlets *in vitro*

处理 Treatment	株高/cm Height	茎粗/cm Stem diameter	根数 Root number	根长/cm Root length	根系活力/ (μg · g ⁻¹ · h ⁻¹) Root vigor	第 3 节间距 /cm Third internode length	叶面积 /cm ² Leaf area	鲜样质量 /g Fresh mass	干样质 量/g Dry mass
B	9.667def	0.103cd	7.667bc	3.633cde	0.894ab	0.800bc	0.49cd	0.377a	0.029a
R	16.833a	0.095de	7.667bc	4.500ab	1.235a	1.267a	0.38d	0.453a	0.038a
1RBY	11.200c	0.119a	6.000c	3.300e	1.214a	0.633c	0.837a	0.505a	0.041a
2RBY	10.500cd	0.099cde	6.000c	4.167abc	0.881ab	1.000b	0.753ab	0.484a	0.039a
RBG	10.333cde	0.113ab	13.667a	3.967bcd	0.759abc	1.000b	0.750ab	0.471a	0.039a
1RB	9.833def	0.101cd	11.667ab	4.667a	0.593bc	0.833bc	0.537cd	0.503a	0.046a
2RB	9.467ef	0.101cd	8.333bc	3.500de	0.618bc	0.733c	0.537cd	0.581a	0.048a
3RB	10.967c	0.101cd	8.000bc	3.400de	0.378c	0.667c	0.607bc	0.430a	0.036a
RBFr	13.067b	0.107bc	12.333ab	4.567a	0.448bc	0.100b	0.777ab	0.603a	0.052a
对照 Control	8.933f	0.091e	6.333c	3.367e	0.622bc	0.733c	0.420d	0.266a	0.026a

2.2.2 试管苗色素含量

如表 5 所示, 1RBY 处理下试管苗的叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素总量达到最大值且显著高于对照, 类胡萝卜素含量也显著高于对照; B 处理下试管苗的色素含量均显著高于对照; 而与其他处理相比, R 处理则明显降低色素含量。

2.2.3 试管苗叶片可溶性蛋白含量和抗氧化酶活性

如表 6 所示, 不同处理下的菊花试管苗叶片的可溶性蛋白质含量和 CAT 活性并没有显著性差异; B 处理下 POD 的活性最高且显著高于对照; 3RB 处理下的 SOD 活性显著低于 RBG 处理及对照。

表 5 不同光谱能量分布对菊花试管苗色素含量的影响

Table 5 Effects of light spectral energy distribution on pigment contents of chrysanthemum plantlets *in vitro*

处理 Treatment	叶绿素/ (mg · g ⁻¹ FW) Chl.			Chl. a/b	类胡萝卜素/ (mg · g ⁻¹ FW) Carotenoid
	a	b	a + b		
B	0.207ab	0.096ab	0.303ab	2.174a	0.078a
R	0.108c	0.049d	0.157d	2.190a	0.041c
1RBY	0.245a	0.131a	0.376a	1.886d	0.070a
2RBY	0.165bc	0.076bcd	0.241bcd	2.186a	0.062abc
RBG	0.177b	0.091bc	0.267bc	1.952cd	0.071abc
1RB	0.185ab	0.087bc	0.279b	2.127ab	0.072ab
2RB	0.188ab	0.091bc	0.279b	2.085abc	0.073ab
3RB	0.167bc	0.078bcd	0.244bcd	2.144ab	0.064abc
RBFr	0.114c	0.057cd	0.171cd	1.998bcd	0.046bc
对照 Control	0.110c	0.057cd	0.167 d	1.938cd	0.048bc

表 6 不同光谱能量分布对菊花试管苗叶片可溶性蛋白含量和酶活性的影响

Table 6 Effects of light spectral energy distribution on enzyme activities and protein of chrysanthemum plantlets *in vitro*

处理 Treatment	可溶性蛋白/ (mg · g ⁻¹ FW) Soluble protein	SOD/ (U · g ⁻¹ FW)	CAT/ (mmol · min ⁻¹ · g ⁻¹ FW)	POD/ (U · min ⁻¹ · g ⁻¹ FW)
B	7.559a	199.045ab	356.250a	23.723a
R	5.889a	150.358ab	298.125a	10.582b
1RBY	8.134a	177.566ab	346.875a	10.337b
2RBY	8.172a	179.714ab	303.750a	9.277b
RBG	9.703a	269.212a	307.500a	13.973ab
1RB	7.046a	181.862ab	296.250a	8.462b
2RB	8.103a	133.890ab	350.625a	14.364ab
3RB	9.393a	34.367b	335.625a	9.505b
RBFr	8.091a	80.191ab	324.375a	13.923ab
对照 Control	9.538a	255.609a	301.875a	9.130b

2.2.4 试管苗碳氮代谢

如表 7 所示，R 处理下菊花试管苗可溶性糖、淀粉及碳水化合物含量均达到最大值，但与其他处理及对照间基本无显著差异；B 处理下游离氨基酸含量达到最大值，且显著高于其他处理（对照及 3RB 处理除外）。

表 7 不同光谱能量分布对菊花试管苗碳氮代谢的影响

Table 7 Effects of light spectral energy distribution on metabolism of carbon and nitrogen of chrysanthemum plantlets *in vitro*

处理 Treatment	可溶性糖/ (mg · g ⁻¹) Soluble sugar	蔗糖/ (mg · g ⁻¹) Sucrose	游离氨基酸/ (mg · g ⁻¹) Amino acid	淀粉/ (mg · g ⁻¹) Starch	碳水化合物/ (mg · g ⁻¹) Carbohydrate	C/N
B	197.249a	32.881a	1 572.100a	123.884ab	354.014ab	0.231a
R	206.560a	25.698a	737.481bc	145.734a	383.506a	0.581a
1RBY	132.264a	28.420a	652.107bc	84.675ab	245.358ab	0.382a
2RBY	136.376a	31.689a	634.904bc	88.858ab	256.922ab	0.439a
RBG	126.904a	32.405a	441.288c	76.603b	235.912 ab	0.544a
1RB	165.378a	38.126a	603.083bc	103.623ab	307.127ab	0.558a
2RB	191.273a	44.670a	478.483bc	90.570ab	326.514ab	0.544a
3RB	205.306a	43.213a	967.602abc	111.910ab	360.420ab	0.283a
RBFr	149.003a	35.687a	606.495bc	121.439ab	306.128ab	0.430a
对照 Control	143.564a	26.883a	1 196.700ab	95.963ab	266.410ab	0.556a

3 讨论

3.1 红光在植物组培中的效应

本试验中，红光有助于增加菊花离体培养增殖和生根阶段的株高、节间长，这与在葡萄（Kurilčik

et al., 2007)、菊花 (Kim et al., 2004)、风铃木 (Morieria & Debergh, 1997) 等试管苗中的研究结果一致。Normanly (1997) 认为 POD 具有某些 IAA 氧化酶的功能, 红光会导致 POD 活性较低, 从而引起茎的伸长。本试验中红光下菊花丛生苗和组培苗株高显著高于蓝光下, 而 POD 酶活显著低于蓝光下, 印证了这一观点。

本试验结果还表明红光有利于菊花生根试管苗可溶性糖、淀粉及碳水化合物的积累, 这与在马铃薯 (常宏 等, 2009)、缕丝花 (王爱民 等, 2001)、葡萄 (Kurilčik et al., 2007) 和桦树 (Saebo et al., 1995) 试管苗中的研究结果相似。光敏色素或蓝光受体诱导的基因表达具有特定的时间顺序和空间位置效应, 使红光和蓝光在促进叶片中可溶性糖积累过程中有不同的效应 (Seibert et al., 1975; 江明艳和潘远智, 2006)。

3.2 蓝光在植物组培中的效应

有研究表明蓝光对于叶绿素的形成、叶绿体的发育等有重要作用 (Richter & Wessel, 1985; Shin et al., 2008)。本试验中, 蓝光显著促进菊花丛生苗色素的形成。车生泉等 (1997)、Anna 和 Alicja (2001) 等曾分别报道蓝光能促进小苍兰、风信子愈伤组织中叶绿素的形成。此外, 蓝光下菊花生根试管苗游离氨基酸含量达到最大值, 显著高于部分处理, 可能与蓝光有利于提高培养物中的蛋白质含量有关 (车生泉 等, 1997)。

3.3 复合光在植物组培中的效应

已有一些报道认为红蓝复合光对组培植物的生长发育产生积极影响 (Lian et al., 2002; Kim et al., 2004; Kong et al., 2008; Shin et al., 2008)。本试验结果发现在 1RBY 处理 (红: 蓝: 黄 = 5: 3: 2) 条件下, 不仅有利于菊花丛生苗分化和增殖, 也显著促进生根试管苗色素形成、生长发育及根系活力。徐志刚等 (2009) 曾报道黄光有利于文心兰原球茎分化出芽。许莉等 (2007) 的研究表明黄光最有利于叶用莴苣的生长发育。作者认为, 尽管黄光不是光合作用的高效吸收光谱, 但是在红蓝复合光中补充适量黄光可以产生协同增益效应, 利于菊花丛生苗的快繁及培养壮苗。

此外, 试验中 RGB 处理 (红: 蓝: 绿 = 5: 3: 2) 显著提高丛生苗的分化率和试管苗的生根数。Kim 等 (2004a, 2004b) 研究发现, 红蓝绿复合光促进了叶用莴苣的生长, 并认为绿光可以透过植物冠层照射底部叶片, 通过增加底部叶片的光合速率以增加植物生长的潜能。

本试验的结果发现, 与单色 LED 光和荧光灯相比, 复合 LED 光更适合应用于菊花组织培养, 尤其是红蓝黄复合 LED 光在菊花离体培养的增殖阶段和生根阶段都具有明显优势, 有利于提高增殖效率, 调控形态建成, 培育壮苗。

3.4 LED 光源在植物组织培养领域的应用及前景

LED 作为新型节能光源, 不仅显著降低植物组织培养的能耗, 同时由于 LED 具有光谱能量调制便捷、光谱类型丰富等优越性, 使得对植物光生物学的研究更加全面、深入, 在植物组织培养领域的应用具有广阔前景 (杨其长, 2008)。

同时, LED 光环境调控技术应结合其它环境因素, 如 CO₂ 浓度、温度、湿度等进行综合调控, 提高组培植物分化、增殖效率, 调控形态建成, 促进光合自养, 实现植物组培的高效发展。研究表明, 植物发育的许多过程都是通过光敏色素和植物激素来调控的 (Chory et al., 1996)。因此, 光谱能量分布和内源生长调节物质之间的相互作用对植株生长的影响也将成为下一步研究的重点。

References

- Anna B, Alicja K. 2001. Effect of light quality on somatic embryogenesis in *Hacinthus orientalis* L. 'Delfts Blue'. Biological Bulletin of Poznan, 38: 103 – 107.
- Chang Hong, Wang Yu-ping, Wang Di, Zhang Feng. 2009. Effects of light quality on microtuber induction of *Solanum tuberosum* L. Chinese Journal of Applied Ecology, 20 (8): 1891 – 1895. (in Chinese)
- 常 宏, 王玉萍, 王 蒂, 张 峰. 2009. 光质对马铃薯试管薯形成的影响. 应用生态学报, 20 (8): 1891 – 1895.
- Che Sheng-quan, Sheng Yue-ying, Qin Wen-ying. 1997. Effects of light quality on meristem of *Freesia refracta* test tube culture. Acta Horticulturae Sinica, 24 (3): 269 – 273. (in Chinese)
- 车生泉, 盛月英, 秦文英. 1997. 光质对小苍兰茎尖试管培养的影响. 园艺学报, 24 (3): 269 – 273.
- Chory J, Chatterjee M, Cook R K, Elich T, Fankhauser C, Li J Nagpal P, Neff M, Pepper A, Poole D, Reed J, Vitart V. 1996. From seed germination to flowering, light controls plant development via pigment phytochrome. Proc Natl Acad Sci USA, 93: 12066 – 12071.
- Feng Dong-xia, Shi Sheng-jin. 2005. Research on night measurement methods of leaf area. Chinese Agricultural Science Bulletin, 21 (6): 150 – 155. (in Chinese)
- 冯东霞, 施生锦. 2005. 叶面积测定方法的研究效果初报. 中国农学通报, 21 (6): 150 – 155.
- Guo S, Liu X, Ai W, Tang Y, Zhu J, Wang X, Wei M, Qin L, Yang Y. 2008. Development of an improved ground-based prototype of space plant-growing facility. Advances in Space Research, 41: 736 – 741.
- Jao Ruey-chi, Fang Wei, Tsai Tien-lung. 2003. Using super-bright red and blue LED in the production of *Phalaenopsis* plantlets *in vitro*. Applied Engineering in Agriculture, 12 (4): 93 – 100. (in Chinese)
- 饶瑞佑, 方 炜, 蔡田龙. 2003. 超高亮红、蓝光 LED 应用于蝴蝶兰栽培之研究. 农业机械学报, 12 (4): 93 – 100.
- Jiang Ming-yan, Pan Yuan-zhi. 2006. Effects of light quality on the photosynthetic characteristics and growth of *Poinsettia*. Acta Horticulturae Sinica, 33 (2): 338 – 343. (in Chinese)
- 江明艳, 潘远智. 2006. 不同光质对盆栽一品红光合特性及生长的影响. 园艺学报, 33 (2): 338 – 343.
- Jiao Hai-hua, Tie Jun. 2003. Effects of light quality on callus induction root and bud differentiation of *Euphorbia pulcherrima* willd. Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition, 32 (2): 168 – 170. (in Chinese)
- 焦海华, 铁 军. 2003. 不同光质对一品红幼茎愈伤组织的诱导和器官分化影响的研究. 内蒙古师范大学学报: 自然科学(汉文)版, 32 (2): 168 – 170.
- Kim S J, Hahn E J, Heo J W, Paek K Y. 2004. Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets *in vitro*. Scientia Horticulturae, 101: 143 – 151.
- Kim H H, Goins G D, Wheeler R M, John C S. 2004a. Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. Annals of Botany, 94: 691 – 697.
- Kim H H, Goins G D, Wheeler R M, Sager J C. 2004b. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes. Hort Science, 39 (7): 1617 – 1622.
- Kong S S, Hosakatte N M, Jeong W H, Eun H H, Kee Y P. 2008. The effect of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured *Doritaenopsis* plants. Acta Physiol Plant, 30: 339 – 343.
- Kurilčik A, Čanova R M, Žilinskaitė S, Dapkūnienė S, Duchovskis P, Kurilčik G, Tamulaitis G, Žukauskas A. 2007. *In vitro* cultivation of grape culture under solid-state lighting. Sodininkystė ir Daržininkystė, 26 (3): 235 – 245.
- Kurilčik A, Čanova R M, Dapkūnienė S, Žilinskaitė S, Kurilčik G, Tamulaitis G, Duchovskis P, Žukauskas A. 2008. *In vitro* culture of *Chrysanthemum* plantlets using light-emitting diodes. Cent Eur J Biol, 3 (2): 161 – 167.
- Le van T H, Tanaka M. 2004. Effects of red and blue light-emitting diodes on callus induction, callus proliferation, and protocorm-like body formation from callus in *Cymbidium* orchid. Environment Control in Biology, 42 (1): 57 – 64.
- Lian M L, Murthy H N, Paek K Y. 2002. Effects of light emitting diodes on the *in vitro* induction and growth of bulblets of *Lilium* oriental hybrid 'Pesaro'. Scientia Horticulturae, 94: 365 – 370.
- Li He-sheng. 2003. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment. Beijing: Higher Education Press. (in Chinese)
- 李合生. 2003. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.

- Liu Yuan, Li Sheng, Ma Shao-ying, Zhang Zhen, Zhang Qing-song, Luo Li-yuan, Xue Chong, Pei Xiao-li. 2009. Effects of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured grape plantlets. *Acta Horticulturae Sinica*, 36 (8): 1105 - 1112. (in Chinese)
- 刘 媛, 李 胜, 马绍英, 张 真, 张青松, 罗丽媛, 薛 冲, 裴晓利. 2009. 不同光质对葡萄试管苗离体培养生长发育的影响. *园艺学报*, 36 (8): 1105 - 1112.
- Liang Xue-fen, Yi Wei-nan, Gu Zi-xing, Xiao An-yu, Huang Jian-bo. 2001. Effect of different light quality of light assisted on banana test-tube plantlet. *South China Fruits*, 30 (4): 34. (in Chinese)
- 梁学芬, 蚁伟南, 顾梓兴, 肖安裕, 黄剑波. 2001. 不同光质的辅助光对香蕉组培苗的影响. *中国南方果树*, 30 (4): 34.
- Moreria M H, Debergh P C. 1997. The effect of light quality on the morphogenesis of *in vitro* cultures of *Azorina vidalii* (Wats.) Feer. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 51 (3): 187 - 193.
- Nhut D T, Takamura T, Watanabe H, Tanaka M. 2003. Efficiency of anovel culture system by using light-emitting diode (LED) on *in vitro* and subsequent growth of micropropagated banana plantlets. *ISHS Acta Horticulture*, 616: 121 - 127.
- Normanly J. 1997. Auxin metabolism. *Physiologia Plantarum*, 100: 431 - 442.
- Qin Yong-hua, Zhang Shang-long, Xu Kai, Wu Yan-jun, Qin Qiao-ping. 2005. A highly efficient system establishment of shoot regeneration from leaf explants of strawberry. *Acta Horticulturae Sinica*, 32 (1): 101 - 104. (in Chinese)
- 秦永华, 张上隆, 徐 凯, 吴延军, 秦巧平. 2005. ‘丰香’草莓叶片高效再生体系的建立. *园艺学报*, 32 (1): 101 - 104.
- Richter G, Wessel K. 1985. Red light inhibits blue-induced chloroplast development in cultured plant cells at the mRNA level. *Plant Mol Biol*, 5: 175 - 182.
- Saebo A, Krekling T, Appelgren M. 1995. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets *in vitro*. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 41: 177 - 185.
- Seibert M, Wetherbee P J, Job D D. 1975. The effects of light intensity and spectral quality on growth and shoot initiation in tobacco callus. *Plant Physiology*, 56: 130 - 139.
- Shin K S, Murthy H N, Heo J W, Hahn E J, Paek K Y. 2008. The effect of light quality on the growth and development of *in vitro* cultured *Doritaenopsis* plants. *Acta Physiol Plant*, 30: 339 - 343.
- Teixeira da Silva J A. 2004. Ornamental chrysanthemums: Improvement by biotechnology - Review of plant biotechnology and applied genetics . *Plant Cell Tiss Org*, 79: 1 - 18.
- Wang Ai-min, Xiao Wei, Du Wen-xue, Chen Xin-hua, Zhao Xiao-yan. 2001. The Effect of light quality on growth and development of the test-tube seedlings of *Gypsophila elegans*. *Journal of Xuzhou Normal University: Natural Science Edition*, 19 (4): 56 - 58. (in Chinese)
- 王爱民, 肖 炜, 杜文雪, 陈新华, 赵晓燕. 2001. 光质对缕丝花试管苗生长发育的影响. *徐州师范大学学报: 自然科学版*, 19 (4): 56 - 58.
- Xu Li, Liu Shi-qi, Qi Lian-dong, Liang Qing-ling, Yu Wen-yan. 2007. Effect of light quality on leaf lettuce photosynthesis and chlorophyll fluorescence. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 23 (1): 96 - 100. (in Chinese)
- 许 莉, 刘世琦, 齐连东, 梁庆玲, 于文艳. 2007. 不同光质对叶用莴苣光合作用及叶绿素荧光的影响. *中国农学通报*, 23 (1): 96 - 100.
- Xu Zhi-gang, Cui Jin, Di Xiu-ru. 2009. Effects of different spectral energy distribution on tissue culture of *Oncidium in vitro*. *Journal of Beijing Forestry University*, 31 (4): 45 - 50. (in Chinese)
- 徐志刚, 崔 瑾, 邸秀茹. 2009. 不同光谱能量分布对文心兰组织培养的影响. *北京林业大学学报*, 31 (4): 45 - 50.
- Yang Qi-chang. 2008. Application and prospect of light-emitting diode (LED) in agriculture and bio-industry. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 10 (6): 42 - 47. (in Chinese)
- 杨其长. 2008. LED 在农业与生物产业的应用与前景展望. *中国农业科技导报*, 10 (6): 42 - 47.
- Yang Ya-ting, Xiao Ping, Hu Yong-kui, Yang Qi-chang. 2009. Application of light-emitting diode (LED) in plant tissue culture. *Agriculture Engineering Technology · Greenhouse & Horticulture*, (7): 13 - 14. (in Chinese)
- 杨雅婷, 肖 平, 胡永述, 杨其长. 2009. LED 在植物组织培养中的应用. *农业工程技术 · 温室园艺*, (7): 13 - 14.
- Yue Lan. 2008. Effects on photoautotrophic culture and light-emitting diode (LED) *in vitro* *Paeonia Suffruticosa* shoots growth [M. D. Dissertation]. Zhengzhou: Henan Agricultural University. (in Chinese)
- 岳 岚. 2008. 光独立培养和新型组培光源 (LED) 对牡丹试管苗生长的影响 [硕士论文]. 郑州: 河南农业大学.