

## 光质对姜黄生理特性及根茎次生代谢的影响

刘建福<sup>1,2</sup>, 王明元<sup>2</sup>, 唐源江<sup>2</sup>, 范燕萍<sup>1,\*</sup>, 钟书淳<sup>2</sup>, 陈钦<sup>2</sup>

<sup>1</sup>华南农业大学园艺学院, 广州510642; <sup>2</sup>华侨大学生物工程与技术系, 福建厦门361021

**摘要:** 以发光二极管(LED)为光源研究不同光质对姜黄生理、姜黄素生物合成关键酶活性、有机酸和姜黄素类化合物含量的影响。试验结果表明: 红光有利于提高姜黄素含量; 蓝光提高姜黄叶片蛋白质, 激活苯丙氨酸解氨酶(PAL)、肉桂酸-4-羟化酶(C4H)和4-香豆酸: 辅酶A连接酶(4CL)活性, 促进肉桂酸、对香豆酸、咖啡酸和阿魏酸生成, 提高姜黄素、双去甲氧基姜黄素和去甲氧基姜黄素含量; 绿光则抑制相关酶活性、降低有机酸和姜黄素类化合物含量。红蓝组合光提高PAL、C4H和4CL活性, 促进肉桂酸、对香豆酸、咖啡酸和阿魏酸的生成, 提高姜黄素类化合物含量; 红光比例为50%~70%时提高姜黄叶绿素和类胡萝卜素含量, 可溶性糖和蛋白质含量; 红光比例为70%时姜黄素类化合物含量达到最大值, 姜黄根茎的姜黄素、去甲氧基姜黄素和双去甲氧基姜黄素含量分别比对照显著提高77.39%、44.32%和43.80%。因此, 蓝光和红蓝组合光处理有利于姜黄次生代谢产物的生成; 红光比例为70%时最有利于姜黄次生代谢产物的生成, 而绿光和远红光则不利于姜黄次生代谢产物的积累。

**关键词:** 光质; 姜黄; 酶活性; 苯丙烷类有机酸; 姜黄素类化合物

## Effects of Light Qualities on Physiological Characteristics and Accumulation of Secondary Metabolites in Rhizomes of *Curcuma longa* L.

LIU Jian-Fu<sup>1,2</sup>, WANG Ming-Yuan<sup>2</sup>, TANG Yuan-Jiang<sup>2</sup>, FAN Yan-Ping<sup>1,\*</sup>, ZHONG Shu-Chun<sup>2</sup>, CHEN Qin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; <sup>2</sup>Department of Biological Engineering and Technology, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

**Abstract:** The effects of different light qualities generated by light emitting diodes (LED) on the key enzymatic activity of secondary metabolic pathways, the content of organic acid and curcuminoids of *Curcuma longa* were studied. The results showed that red light increased curcumin content in *Curcuma longa*. The blue light enhanced the contents of protein and activated the activities of phenylalanin ammonia-lyase (PAL), cinnamic acid-4-hydroxylase (C4H) and 4-coumaric acid: CoA ligase (4CL), promoted the accumulation of cinnamic acid, *p*-coumaric acid, coffee acid and ferulic acid, and then improved the content of curcumin and demethoxycurcumin, bisdemethoxycurcumin. While green light inhibited the activity of related enzyme, reduced the content of metabolic intermediates and curcuminoids. Combined light with red and blue advanced the activity of PAL, C4H and 4CL, promoted the accumulation of cinnamic acid, *p*-coumaric acid, coffee acid and ferulic acid, and advanced the content of curcumin and demethoxycurcumin, bisdemethoxycurcumin. Red light ratio for 50%–70% raised the contents of chlorophyll, carotenoid, soluble sugar and protein in *Curcuma longa*. It was obvious that red light ratio for 70% significantly enhanced the content of curcuminoids. The contents of curcumin and demethoxycurcumin, bisdemethoxycurcumin significantly increased 77.39%, 44.32% and 43.80%, respectively. It suggested that red light ratio for 70% was the optimum for secondary metabolite accumulation in *Curcuma longa*, while green light and far red light were not conducive to the accumulation of secondary metabolites in *Curcuma longa*.

**Key words:** light qualities; *Curcuma longa* L.; metabolic synthase enzymes activities; organic acid for phenylpropanoid; curcuminoids

姜黄(*Curcuma longa*)为姜科姜黄属多年生宿根草本植物。原产于热带和亚热带, 盛产于东南亚和澳大利亚北部, 中国主产于广西、四川、福建、广东、云南、贵州及台湾等省区(肖小河等2004; 杨晨等2014)。姜黄药用成分主要包含挥发

收稿 2014-10-15 修定 2014-11-25

资助 国家自然科学基金项目(31101512)、中央高校基本科研业务费专项基金项目(JB-ZR1151)和泉州市科技计划项目(2014Z111)。

\* 通讯作者(E-mail: fanyanping@scau.edu.cn; Tel: 021-85288266)。

油和姜黄素类化合物,其中姜黄素具有抗炎、抗氧化、抗癌等药理作用(刘红艳等2012),可以改善糖尿病、代谢性疾病、自身免疫疾病、动脉粥样硬化、关节炎、中风、外周神经病、肠炎和脑外伤等多种疾病症状(Aggarwal和Harikumar 2009),对阿尔茨海默病等神经变性病具有很强的神经保护作用(Begum等2008)。姜黄素具有较好的临床应用价值和研发潜力,已成为国内外的研究热点(陈福北等2007)。

光质是植物生长发育重要的环境因子,光质对植物的生理代谢(曹刚等2013;林小苹等2008;Momokawa等2011)、光周期反应(Maibam等2013)、形态建成(Jao等2005)、物质代谢以及基因表达均有调控作用(张真等2008;柯学等2012)。光质对植物次生代谢物含量影响显著,不同光质可以调控不同次生代谢产物的分配(Fan等2013;罗晓铮等2012;张欢等2010);因此,通过改变光质来调控药材有效成分含量有可能成为一种常用的安全高效的手段。

目前,国内外尚未见光质对姜黄有效成分影响的研究报道。本实验以LED为光源,探索不同光质对姜黄生长、相关酶活性和次生代谢产物的影响,对于姜黄种苗低碳高效生产、姜黄药材优质高效培育具有重要的理论和实践意义。

## 材料与方 法

### 1 试验材料

供试材料姜黄(*Curcuma longa* L.)为姜科姜黄属植物,由广西药用植物研究所提供。试验在福建省厦门市华侨大学温室中进行,2013年4月选取生长势一致的组培苗移植于直径26 cm×高28 cm的圆形塑料盆中,每盆2株;取草炭与园土1:1混合作为栽培土,每盆装土4.0 kg;2013年5月待幼苗生长株高约20 cm时,进行不同光质处理。试验期间按常规进行水肥管理。

### 2 试验设计

LED光源采用广州万晶半导体照明有限公司生产的LED灯管,功率为8 W,每盏灯管由120颗超高亮度的LED灯珠组成,红蓝组合光灯管按照不同红蓝光比例均匀交叉排布灯珠,每个处理采用3盏灯管。试验设11种光质处理:红光[(660±5) nm,

R]、蓝光[(460±5) nm, B]、绿光[(520±5) nm, G]、黄光[(590±5) nm, Y]、远红光[(850±5) nm, FR]、红光/蓝光=7/1 (7R/1B, 红光比例87.5%)、红光/蓝光=8/2 (8R/2B, 红光比例80%)、红光/蓝光=3/1 (3R/1B, 红光比例75%)、红光/蓝光=7/3 (7R/3B, 红光比例70%)、红光/蓝光=5/5 (5R/5B, 红光比例50%),以白光(310~750 nm, W)作为对照(CK)。各光质处理用反光布隔开,LED灯置于钢架顶部,高度可调,通过调节光源与幼苗的距离,使光强保持在 $280 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;光照时间为 $13 \text{ h}\cdot\text{d}^{-1}$ (6:00~19:00)。每处理10盆,3次重复,各处理采用随机排列,植株的摆放以不相互遮荫为原则。

### 3 生长生理特性测定

不同LED光质处理60 d后,每处理随机取样5株。选取姜黄功能叶片(从上往下第2片)测定相关生理指标。叶绿素含量和类胡萝卜素含量采用乙醇浸提-分光光度计法测定;可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;蛋白质含量采用紫外吸收法测定。苯丙氨酸解氨酶(phenylalanin ammonia-lyase, PAL)活性测定采用紫外比色法(杨宁等2012)。肉桂酸-4-羟化酶(cinnamic acid-4-hydroxylase, C4H)活性测定参照Lamb和Rubery (1976)。4-香豆酸:辅酶A连接酶(4-coumaric acid: CoA ligase, 4CL)活性测定参照Knobloch和Hahlbrock (1975)。

### 4 次生代谢产物含量的测定

于2013年12月取姜黄根茎进行有机酸和姜黄素类化合物含量的测定。肉桂酸、阿魏酸、咖啡酸和对香豆酸等有机酸含量测定采用HPLC法。色谱条件:色谱柱为Inertsil-ODS  $C_{18}$  (250 mm×4.6 mm, 5  $\mu\text{m}$ ),流动相为乙腈(A)和0.2%乙酸(B),流速 $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,检测波长300 nm,柱温 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进样量100  $\mu\text{L}$ 。采用梯度洗脱:0~5.4 min, 28% A; 5.4~5.5 min, 28%~33% A; 5.5~10 min, 33%~38% A; 10~11 min, 38%~45% A; 11~16 min, 45%~60% A; 18 min end。双去甲氧基姜黄素、去甲氧基姜黄素和姜黄素含量测定采用HPLC法(李明等2008)。色谱条件:色谱柱Inertsil-ODS柱 $C_{18}$  (250 mm×4.6 mm, 5  $\mu\text{m}$ ),流动相为乙腈(A)和0.2%乙酸(B),流速 $1.0 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ,检测波长425 nm,柱温 $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,进样量100  $\mu\text{L}$ 。采用梯度洗脱,0~15 min, 53%~60% A; 18 min end。

## 5 数据处理

采用 Excel 2007 和 SPSS18.0 统计软件进行数据整理和统计分析, 采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和 Duncan 法进行多重比较及差异显著性分析( $\alpha=0.05$ )。

## 实验结果

### 1 不同光质对姜黄叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

不同光质条件下姜黄叶片叶绿素和类胡萝卜素含量存在显著差异(表1)。5R/5B、7R/3B和3R/1B处理有利于光合色素含量的提高, 黄光、绿光和远红光降低姜黄光合色素含量, 其他处理与对照差异不显著。单色光中黄光、绿光和远红光的叶绿素和类胡萝卜素含量均显著低于白光(对照), 其总叶绿素含量分别比对照降低31.59%、21.81%和38.79%, 类胡萝卜素分别降低38.31%、42.86%和33.08%; 而红光和蓝光的光合色素含量与对照差异不显著。红蓝组合光中5R/5B、7R/3B和3R/1B的叶绿素和类胡萝卜素含量均显著高于白光(对照); 其中, 总叶绿素含量分别比对照增加25.63%、47.88%和23.02%, 类胡萝卜素分别增加27.60%、53.92%和24.03%; 7R/1B和8R/2B处理与对照差异不显著。红蓝组合光中随着红光比例的增加, 姜黄的叶绿素和类胡萝卜素含量呈现出先增加后降低的变化; 红光比例为70% (7R/3B)时, 叶绿素和类胡萝卜素含量达到最高值, 显著高于其他处理。

可见, 红蓝组合光中50%~75%红光时促进姜黄叶绿素和类胡萝卜素的生成, 而绿光、黄光和远红光则抑制姜黄叶绿素和类胡萝卜素的生成。

### 2 不同光质对姜黄叶片可溶性糖和蛋白质含量的影响

由图1-A可以看出, 单色光中红光和蓝光的可溶性糖含量均与对照差异不显著; 而黄光、绿光和远红光的可溶性糖含量分别比对照降低20.66%、19.04%和23.26%, 均显著低于对照。红蓝组合光中随着红光比例的增加, 姜黄叶片可溶性糖含量呈现出先增加后降低的变化; 红光比例为70% (7R/3B)时, 可溶性糖含量达到最高值, 比对照增加22.22%; 其中, 5R/5B和7R/3B处理的可溶性糖含量显著高于对照, 8R/2B和3R/1B处理的可溶性糖含量与对照差异不显著, 7R/1B处理的可溶性糖含量显著低于对照。

由图1-B可以看出, 单色光中蓝光的蛋白质含量高于对照27.80%, 与对照差异显著; 红光和远红光的蛋白质含量与对照差异不显著; 黄光的蛋白质含量低于对照22.98%, 与对照差异显著。红蓝组合光中随着红光比例的增加, 姜黄叶片蛋白质含量逐渐降低; 5R/5B、7R/3B和3R/1B蛋白质含量分别高于对照20.80%、15.05%和15.40%, 与对照差异显著; 8R/2B和7R/1B处理的可蛋白质含量与对照差异不显著。可见, 蓝光有利于含氮化合物的生成与积累, 红蓝组合光5R/5B和7R/3B在一定程度上提高姜黄碳水化合物和含氮化合物的含量。

表1 不同光质对姜黄叶片叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

Table 1 Effects of different light qualities on the contents of chlorophyll and carotenoid in leaves of *Curcuma longa*

光质	叶绿素a/mg·kg <sup>-1</sup>	叶绿素b/mg·kg <sup>-1</sup>	总叶绿素/mg·kg <sup>-1</sup>	类胡萝卜素/mg·kg <sup>-1</sup>
W (CK)	239.62±19.48 <sup>c</sup>	102.89±3.89 <sup>bc</sup>	342.51±27.79 <sup>c</sup>	37.54±1.87 <sup>c</sup>
Y	165.48±14.59 <sup>d</sup>	68.85±3.96 <sup>d</sup>	234.32±18.48 <sup>d</sup>	23.16±2.11 <sup>d</sup>
G	189.12±15.70 <sup>d</sup>	78.68±2.08 <sup>d</sup>	267.80±19.66 <sup>d</sup>	21.45±1.24 <sup>d</sup>
FR	147.19±16.55 <sup>d</sup>	62.47±5.31 <sup>d</sup>	209.66±25.87 <sup>d</sup>	25.12±1.73 <sup>d</sup>
R	263.26±17.96 <sup>bc</sup>	112.72±9.32 <sup>b</sup>	375.98±19.77 <sup>c</sup>	40.22±3.48 <sup>bc</sup>
B	230.54±23.19 <sup>c</sup>	90.75±1.81 <sup>c</sup>	321.29±25.93 <sup>c</sup>	32.42±2.04 <sup>c</sup>
5R/5B	306.42±15.23 <sup>b</sup>	123.88±2.74 <sup>b</sup>	430.30±36.79 <sup>b</sup>	47.90±1.58 <sup>b</sup>
7R/3B	356.35±21.44 <sup>a</sup>	150.16±3.64 <sup>a</sup>	506.51±36.18 <sup>a</sup>	57.78±1.37 <sup>a</sup>
3R/1B	298.84±17.94 <sup>b</sup>	122.52±1.56 <sup>b</sup>	421.36±21.58 <sup>b</sup>	46.56±2.64 <sup>b</sup>
8R/2B	248.07±21.24 <sup>c</sup>	88.16±4.74 <sup>c</sup>	336.22±25.80 <sup>c</sup>	37.46±2.73 <sup>c</sup>
7R/1B	252.13±11.29 <sup>c</sup>	98.99±4.56 <sup>c</sup>	351.12±23.37 <sup>c</sup>	36.54±1.53 <sup>c</sup>

R: 红光; B: 蓝光; G: 绿光; Y: 黄光; FR: 远红光; 8R/2B: 红光/蓝光=8/2; 7R/1B: 红光/蓝光=7/1; 3R/1B: 红光/蓝光=3/1; 7R/3B: 红光/蓝光=7/3; 5R/5B: 红光/蓝光=5/5; W (CK): 白光(对照)。不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ ), 下同。

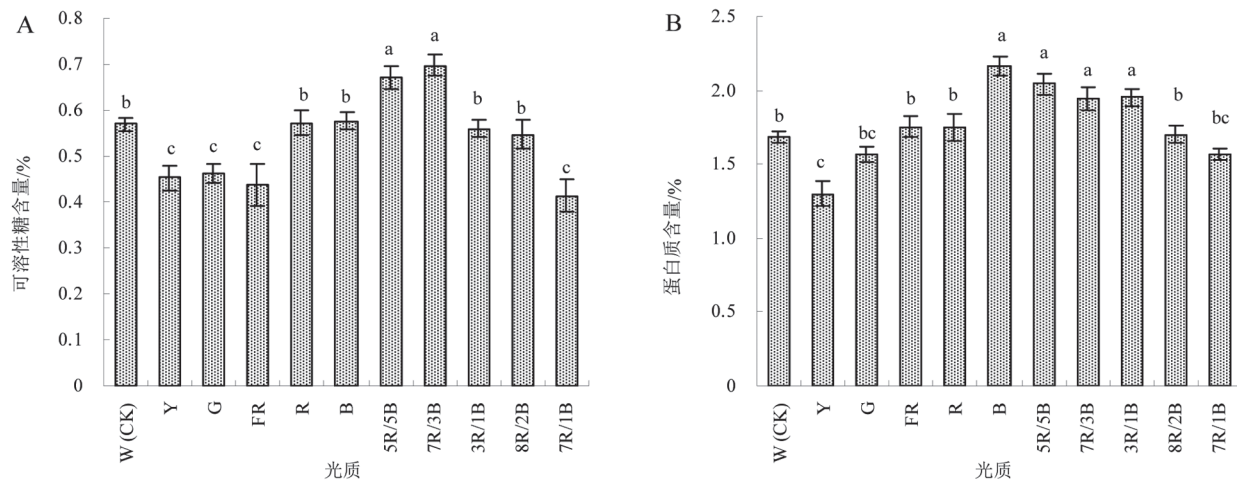


图1 不同光质对姜黄叶片可溶性糖和蛋白质含量的影响

Fig.1 Effects of different light qualities on the contents of soluble sugar and protein in leaves of *Curcuma longa*

### 3 不同光质对姜黄叶片姜黄素合成关键酶活性的影响

分别提取不同光质处理下的植株叶片总蛋白,进行姜黄素合成关键酶的活性测定。由图2-A可以看出,单色光处理下蓝光的苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性显著高于对照,黄光处理与对照差异不显著,其他处理均显著低于对照。蓝光的PAL活性比对照增加14.22%,绿光、远红光和红光的PAL活性分别比对照降低30.40%、27.84%和18.32%。红蓝组合光中,5R/5B处理的PAL活性为最高,比对照提高13.55%,显著高于对照;其他处理均显著低于对照,处理间差异不显著。可见,蓝光和5R/5B红蓝组合光的PAL活性为最高,黄光和红光比例为70%~87.5%组合光次之,而绿光、远红光和红光的PAL活性为最低。

不同光质对姜黄叶片肉桂酸-4-羟化酶(C4H)活性有着明显影响(图2-B)。单色光中蓝光的C4H活性显著高于对照,比对照增加20.27%;黄光与对照差异不显著,其他处于低于对照;绿光、远红光和远红光的C4H活性分别比对照降低38.74%、11.05%和18.32%,与对照差异显著。单色光的C4H活性表现为:蓝光>黄光>红光和远红光>绿光。红蓝组合光有利于提高姜黄C4H活性,且随着红光比例的增加呈现出先上升后下降;红光比例为50%~75%时姜黄的C4H活性均显著高于对照,7R/3B时姜黄的C4H活性为最高,且与对照差异显

著;8R/2B和7R/1B的C4H活性为最低,与对照差异不显著。红蓝组合光的C4H活性表现为:7R/3B>5R/5B和3R/1B>8R/2B和7R/1B。

由图2-C可以看出,单色光中蓝光的4CL活性比对照提高24.90%,而远红光的4CL活性比对照降低27.70%;蓝光和远红光处理与对照差异显著,而黄光、绿光和红光处理与对照差异不显著。红蓝组合光中姜黄4CL活性均显著高于对照,4CL活性随着红光比例的增加呈现出先上升后下降。红光比例为70%(7R/3B)时,姜黄4CL活性达到最高值,比对照增加42.08%;其中,3R/1B和8R/2B处理的4CL活性显著高于对照,5R/5B和7R/1B处理的4CL活性与对照差异不显著。

### 4 不同光质对姜黄根茎有机酸含量的影响

由图3-A可知,单色光中蓝光的肉桂酸含量比对照提高43.79%,与对照差异显著;绿光、远红光和红光的肉桂酸含量分别比对照下降48.45%、46.78%和48.60%,与对照差异显著;黄光处理与对照差异不显著。红蓝组合光中5R/5B处理的肉桂酸含量比对照增加86.18%,与对照差异显著;7R/3B处理与对照差异不显著;其他处理显著低于对照。

由图3-B可知,单色光中蓝光处理的对香豆酸含量高于对照47.86%,绿光处理比对照降低52.03%,与对照差异显著;黄光、远红光和红光与对照差异不显著。红蓝组合光中,对香豆酸含量随着红光比例的增加呈现出先上升后下降的

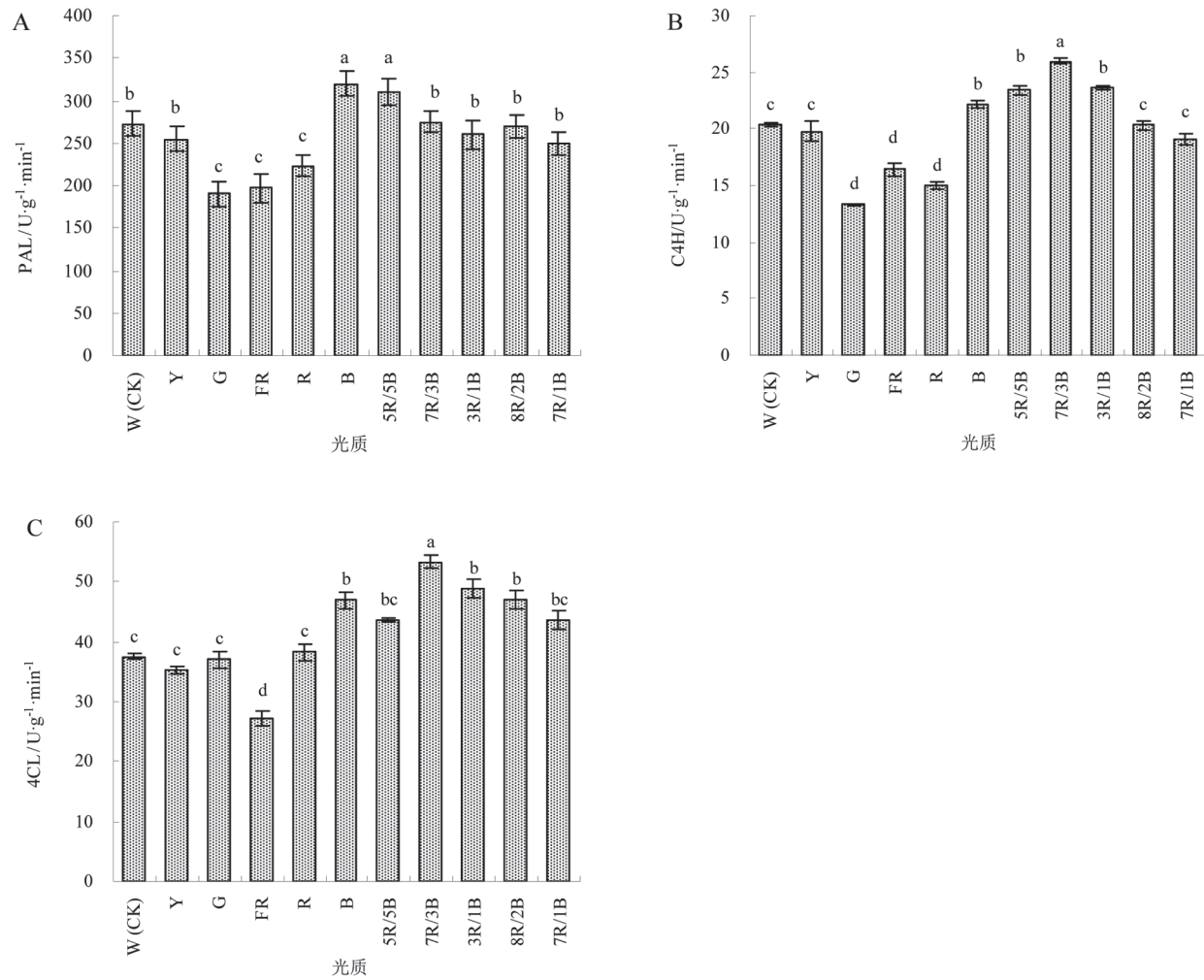


图2 不同光质对姜黄叶片姜黄素合成关键酶PAL、C4H和4CL活性的影响

Fig.2 Effects of different light qualities on the activities of PAL, C4H and 4CL in leaves of *Curcuma longa*

变化;红光比例为50%~70%时对香豆酸含量显著高于对照,其中7R/3B处理的对香豆酸含量为最高,比对照增加68.99%;其他处理的对香豆酸含量与对照差异不显著。

由图3-C可知,单色光处理下蓝光的咖啡酸含量显著高于对照;其他处理均显著低于对照,而黄光、绿光、远红光和红光处理之间的咖啡酸含量差异不显著。红蓝组合光中,咖啡酸含量随着红光比例的增加呈现出先上升后下降的变化;红光比例为50%~75%时咖啡酸含量均显著高于对照;其中红光比例为70% (7R/3B)时,姜黄咖啡酸含量达到最高值,比对照增加90.96%,与对照差异显著;7R/1B处理的咖啡酸含量为最低值,比对照降低26.84%。

由图3-D可知,单色光处理下蓝光处理的阿魏酸含量比对照提高48.99%;其他处理与对照差异不显著,且处理间差异不显著。红蓝组合光中,阿魏酸含量随着红光比例的增加呈现出先上升后下降的变化;红光比例为50%~75%时阿魏酸含量均显著高于对照;红光比例为70% (7R/3B)时,姜黄阿魏酸含量达到最高值,比对照增加135.34%,与对照差异显著;8R/2B和7R/1B处理的阿魏酸含量与对照差异不显著。

### 5 不同光质对姜黄根茎姜黄素类化合物含量的影响

由图4-A可知,单色光中红光和蓝光处理的姜黄素含量分别比对照增加14.51%和37.24%,与对照差异显著;而绿光和远红光处理显著低于对照,黄光处理与对照差异不显著。红蓝组合光中,随

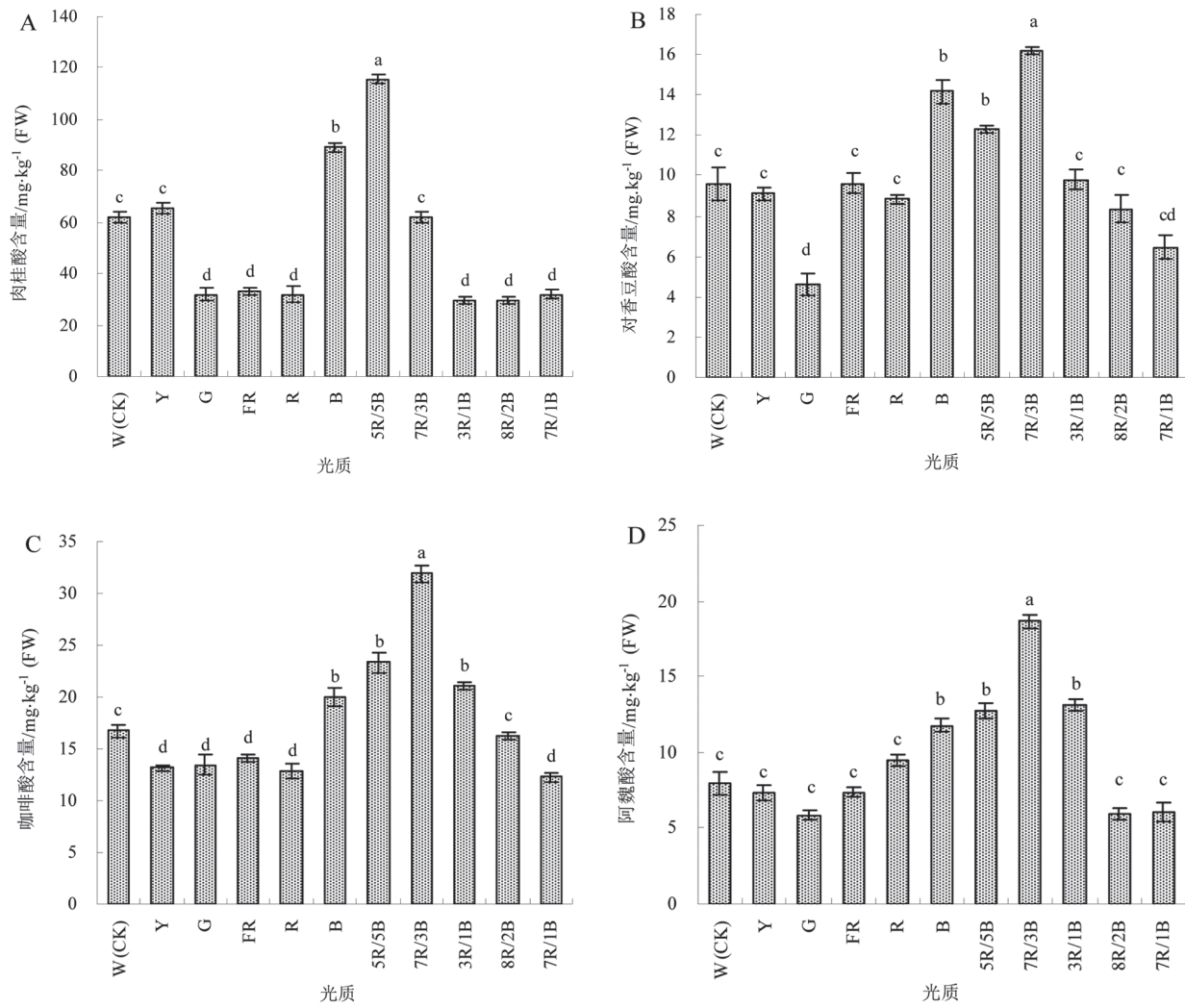


图3 不同光质对姜黄根茎有机酸含量的影响

Fig.3 Effects of different light qualities on the organic acid contents in rhizomes of *Curcuma longa*

随着红光比例的增加姜黄素含量呈现出先上升后下降的变化。红光比例为70% (7R/3B)时, 姜黄素含量达到最高值, 比对照增加77.39%, 与对照差异显著; 其中, 5R/5B、3R/1B和8R/2B处理的姜黄素含量均显著高于对照, 7R/1B处理的姜黄素含量与对照差异不显著。可见, 红光、蓝光和红蓝组合光有利于姜黄素的生成和累积, 绿光和远红光抑制姜黄素的生成和累积。

由图4-B可知, 单色光中蓝光处理的去甲氧基姜黄素含量比对照增加27.28%, 与对照差异显著; 而黄光和绿光处理显著低于对照, 红光和远红光处理与对照差异不显著。红蓝组合光中, 随着红光比例的增加姜黄素含量呈现出先上升后下降

的变化。红光比例为70% (7R/3B)时, 去甲氧基姜黄素含量达到最高值, 比对照增加44.32%, 与对照差异显著; 5R/5B处理的去甲氧基姜黄素含量显著高于对照, 3R/1B和8R/2B处理与对照差异不显著, 7R/1B处理显著低于对照。可见, 蓝光和红蓝组合光5R/5B和7R/3B有利于去甲氧基姜黄素的生成和累积, 黄光和绿光抑制去甲氧基姜黄素的生成和累积。

由图4-C可知, 单色光处理下蓝光的去甲氧基姜黄素含量比对照显著提高18.75%; 绿光和远红光处理均显著低于对照, 红光和黄光处理与对照间差异不显著。红蓝组合光中, 姜黄的去甲氧基姜黄素含量随着红光比例的增加呈现出

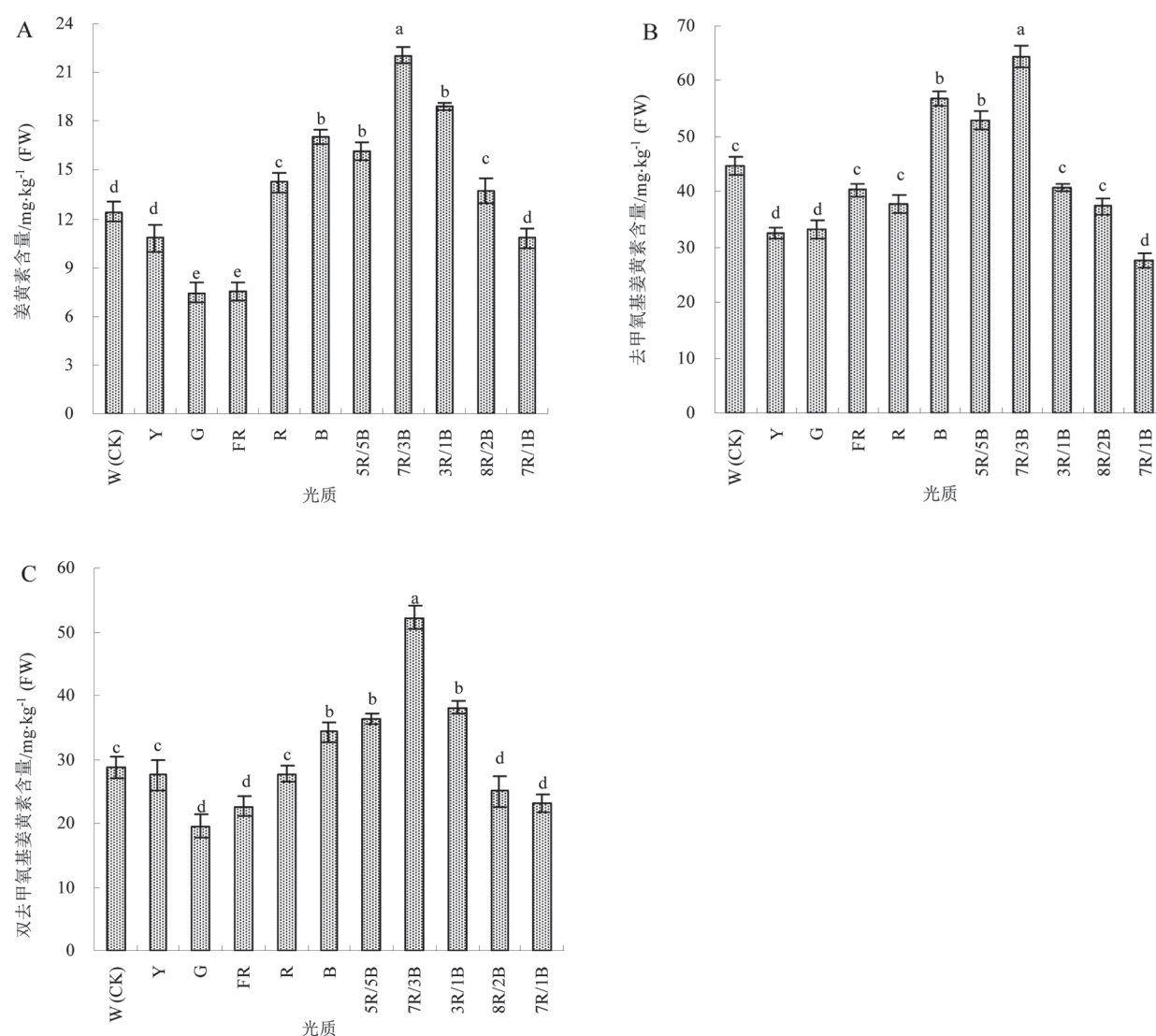


图4 不同光质对姜黄根茎姜黄素类化合物含量的影响

Fig.4 Effects of different light qualities on curcuminoids contents in rhizomes of *Curcuma longa*

先上升后下降的变化; 红光比例为50%~75%时, 双去甲氧基姜黄素含量显著高于对照; 7R/3B时达到最高值, 比对照增加43.80%; 8R/2B和7R/1B处理显著低于对照。可见, 红蓝组合光中7R/3B处理最有利于提高姜黄的双去甲氧基姜黄素含量。

## 讨 论

红光有利于提高叶绿素含量, 蓝光有利于类胡萝卜素的合成, 保护叶绿素不受光氧化损害(邱秀茹等2008; 唐大为等2011)。红光与蓝光对姜黄叶绿素含量有一定调节作用。本试验结果表明, 红光与蓝光互作有利于叶绿素和类胡萝卜素的生

成, 红光比例为50%~75%时效果显著; 而绿光、黄光和远红光则降低叶绿素和类胡萝卜素含量。因此, 红蓝组合光促进姜黄的生长, 而绿光和远红光则降低姜黄植株的生物量。叶绿素含量直接影响着光合作用, 可溶性糖和蛋白质是植物光合作用产物, 可以反映出植株的碳素营养和氮素营养代谢水平(陈俊毅等2014; 柯学等2011)。本试验中红光比例为50%~70%时也显著提高姜黄碳水化合物和含氮化合物的含量。

姜黄素类化合物属于酚酸类物质, 其生物合成是通过苯丙烷类代谢途径完成。苯丙氨酸解氨酶(PAL)、4-香豆酸: 辅酶A连接酶(4CL)和肉桂

酸-4-羟化酶(C4H)是苯丙烷类代谢途径的关键酶。PAL 催化苯丙氨酸脱氨基生成肉桂酸, 肉桂酸在C4H等一系列酶的催化下生成其羟基衍生物或甲氧基衍生物。随后这些物质在4CL催化下生成相应的辅酶A酯, 进入苯丙烷类衍生物支路合成途径(Anterola等2002)。研究表明, 各种类型的光(白光、红光、蓝光、紫外光、紫外线)均可以在转录水平上诱导PAL活性的提高, 且CH4和4CL活性变化与PAL活性变化存在着伴随性(杨冬冬和黄丹枫2006)。干旱胁迫促进蒙古扁桃叶PAL和C4H活性提高, 其活性与植物的抗旱性呈正相关(金丽萍等2009); 适宜温度提高黄芩种子的PAL和C4H活性(Liu等2010); 水杨酸提高厚皮甜瓜PAL、4CL和C4H的活性(范存斐等2012); 茶胁迫诱导红树植物秋茄体内C4H基因在转录水平上的表达调控(宋晖和王友绍2012)。可见, PAL、C4H和4CL都属于诱导酶, 其活性受到外界环境条件的调控。本试验表明, 蓝光促进姜黄植物细胞中的PAL、C4H和4CL活性; 红光、绿光和远红光则抑制PAL和C4H活性, 远红光显著抑制4CL活性。红蓝组合光总体上有利于PAL、C4H和4CL活性的提高, 不同红光比例对酶活性的影响存在差异; 其中红光比例为50%时显著提高PAL活性, 50%~75%红光比例显著提高C4H活性, 50%~87.5%红光比例显著提高4CL活性。

肉桂酸、对香豆酸、阿魏酸和咖啡酸均是生物合成姜黄素类化合物途径中重要的苯丙酸类有机酸。苯丙氨酸在PAL作用下脱氨基形成肉桂酸, 肉桂酸在C4H催化下发生羟基化反应产生对香豆酸, 然后在4CL和咖啡酰辅酶A甲基转移酶(caffeoyl-CoA-O-methyltransferase, CCOMT)等酶催化下生成咖啡酸和阿魏酸等代谢中间产物。研究表明, 苯丙烷途径代谢关键酶PAL、C4H和4CL活性与中间代谢产物肉桂酸、对香豆酸、咖啡酸和阿魏酸含量呈正相关(王斌等2013; 郭银生等2011)。本试验中, 蓝光促进姜黄植物细胞中的肉桂酸、对香豆酸、阿魏酸和咖啡酸的生成; 红光促进对香豆酸, 抑制肉桂酸和咖啡酸; 绿光则降低肉桂酸、香豆酸、阿魏酸和咖啡酸含量。苯丙酸类有机酸含量的变化与PAL、C4H和4CL活性变化趋势基本一致; 红光比例为50%时显著提高肉桂酸

含量, 50%~70%红光比例显著提高对香豆酸含量, 50%~75%红光比例显著提高咖啡酸和阿魏酸含量。

光质是影响植物细胞内活性物质生物合成的主要因素, 光质对次生代谢的影响较为复杂, 不同种类次生代谢物质积累与光质类型密切相关, 通过改变光质提高药材有效成分含量是一种安全高效的方法。已有研究表明, 红光诱导生物碱的积累(季彦林等2010; 李玲等2014)、促进绞股蓝总皂甙积累(李馨芸等2011)、提高丹参中丹酚酸B含量(梁宗锁等2012); 蓝光促进水母雪莲愈伤组织黄酮合成(赵德修等1999), 提高喜树叶片中的喜树碱含量(戴绍军等2004)。本试验表明, 蓝光显著提高姜黄中的姜黄素、去甲氧基姜黄素和双去甲氧基姜黄素含量, 而绿光抑制姜黄素类化合物的生成; 红蓝组合光中红光比例为50%~70%时, 促进姜黄素、去甲氧基姜黄素和双去甲氧基姜黄素的累积。由此可见, 光质对姜黄次生代谢产物积累有显著影响, 在实际生产中可以根据需要, 用不同光质对药材进行照射。本研究中光质对姜黄植株的培养中仅仅研究光的波长是不够的, 还应注意光照强度、光照时间、植株生长发育阶段等问题, 这有待于今后的进一步研究。

### 参考文献

- 曹刚, 张国斌, 郁继华, 马彦霞(2013). 不同光质LED光源对黄瓜苗期生长及叶绿素荧光参数的影响. 中国农业科学, 46 (6): 1297~1304
- 陈福北, 黄初升, 刘红星(2007). 姜黄属植物中姜黄素类化合物的研究概况. 广西师范学院学报(自然科学版), 24 (2): 95~101
- 陈俊毅, 朱晓宇, 蒯本科(2014). 绿色器官衰老进程中叶绿素降解代谢及其调控的研究进展. 植物生理学报, 50 (9): 1315~1321
- 戴绍军, 王洋, 阎秀峰, 马梅芳(2004). 滤光膜对喜树幼苗生长和喜树碱含量的影响. 生态学报, 24 (5): 869~875
- 邸秀茹, 焦学磊, 崔瑾, 刘晓英, 孔燕, 徐志刚(2008). 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. 植物生理学报, 44 (4): 661~664
- 范存斐, 毕阳, 王云飞, 任亚琳, 杨志敏, 王毅(2012). 水杨酸对厚皮甜瓜采后病害及苯丙烷代谢的影响. 中国农业科学, 45 (3): 584~589
- 郭银生, 谷艾素, 崔瑾(2011). 光质对水稻幼苗生长及生理特性的影响. 应用生态学报, 22 (6): 1485~1492
- 季彦林, 王旺田, 王蒂, 张金文, 王威, 李瑛, 张菲菲(2010). 不同光质对马铃薯块茎糖苷生物碱积累的诱导效应. 江苏农业学报, 26 (1): 40~45
- 金丽萍, 崔世茂, 杜金伟, 金彩霞, 吴玉峰, 其日格(2009). 干旱胁迫对不同生态条件下蒙古扁桃叶片PAL和C4H活性的影响. 华北农学报, 24 (5): 118~122



- 柯学, 李军营, 李向阳, 鄢春芳, 徐超华, 晋艳, 龚明(2011). 不同光质对烟草叶片生长及光合作用的影响. 植物生理学报, 47 (5): 512~520
- 柯学, 李军营, 徐超华, 龚明(2012). 不同光质对烟草叶片组织结构及Rubisco羧化酶活性和 $rbc$ 、 $rca$ 基因表达. 植物生理学报, 48 (3): 251~259
- 李玲, 贾书华, 金青, 汪曙, 蔡永萍, 林毅(2014). 光对霍山石斛试管苗光合特性、生长及有效成分积累的影响. 植物生理学报, 50 (7): 989~994
- 李明, 周欣, 赵超, 陈华国, 胡晓娜(2008). HPLC同时测定姜黄中3种姜黄素的含量. 药物分析杂志, 28 (11): 1810~1814
- 李馨芸, 刘世彪, 唐克华, 袁志忠(2011). 滤光膜对绞股蓝和五柱绞股蓝的生长和总皂甙积累的影响. 热带作物学报, 32 (5): 915~920
- 梁宗锁, 李倩, 徐文晖(2012). 不同光质对丹参生长及有效成分积累和相关酶活性的影响. 中国中药杂志, 37 (14): 2055~2060
- 林小苹, 赖钟雄, 黄浅(2008). 不同光质对龙眼胚性愈伤组织生长和细胞膜保护酶活性的影响. 福建农林大学学报(自然科学版), 37 (3): 253~256
- 刘红艳, 王海燕, 叶松, 郭静明(2012). 姜黄素药理作用及其机制研究进展. 中国现代医学杂志, 22 (6): 48~51
- 罗晓铮, 董诚明, 叶娟(2012). 光质对冬凌草无菌苗生长及冬凌草甲素含量的影响. 时珍国医国药, 23 (2): 405~407
- 宋晖, 王友绍(2012). 蔡胁迫下秋茄 $MnSOD$ 基因和 $C4H$ 基因的实时定量表达分析. 生态科学, 31 (2): 104~108
- 唐大为, 张国斌, 张帆, 潘香梅, 郁继华(2011). LED光源不同光质对黄瓜幼苗生长及生理生化特性的影响. 甘肃农业大学学报, 46 (1): 44~48
- 王斌, 张楠, 闫冲冲, 金青, 林毅, 蔡永萍, 张金云(2013). 套袋对砀山酥梨果实石细胞发育及木质素代谢的影响. 园艺学报, 40 (3): 531~539
- 肖小河, 钟国跃, 舒光明, 李隆云, 方清茂, 陈善壖, 苏中武(2004). 国产姜黄属药用植物的数值分类学研究. 中国中药杂志, 29 (1): 15~24
- 杨晨, 刘建福, 王明元, 王奇志, 唐源江, 钟书淳(2014). NaCl胁迫对姜黄组培苗生理特性的影响. 生态学杂志, 33 (2): 388~393
- 杨冬冬, 黄丹枫(2006). 西瓜嫁接体发育中木质素合成及代谢相关酶活性的变化. 西北植物学报, 26 (2): 290~294
- 杨宁, 李翠霞, 李志忠, 张继(2012). 诱导子对百里香再生植株中苯丙氨酸解氨酶活性的影响. 西北植物学报, 32 (2): 330~335
- 张欢, 徐志刚, 崔瑾, 谷艾素, 郭银生(2010). 光质对番茄和莴苣幼苗生长及叶绿体超微结构的影响. 应用生态学报, 21 (4): 959~965
- 张真, 李胜, 李唯, 刘媛, 吴兵, 张青松, 李婷(2008). 不同光质光对葡萄愈伤组织增殖和白藜芦醇含量的影响. 植物生理学通讯, 44 (1): 106~108
- 赵德修, 李茂寅, 邢建民, 童哲(1999). 光质、光强和光期对水母雪莲愈伤组织生长和黄酮生物合成的影响. 植物生理学报, 25 (2): 127~132
- Aggarwal BB, Harikumar KB (2009). Potential therapeutic effects of curcumin, the anti-inflammatory agent, against neurodegenerative, cardiovascular, pulmonary, metabolic, autoimmune and neoplastic diseases. Int J Biochem Cell Biol, 41 (1): 40~59
- Anterola AM, Jeon JH, Davin LB, Lewis NG (2002). Transcriptional control of monolignol biosynthesis in *Pinus taeda*: factors affecting monolignol ratios and carbon allocation in phenylpropanoid metabolism. J Biol Chem, 277: 18272~18280
- Begum AN, Jones MR, Lim GP, Frautschy SA (2008). Curcumin structure-function, bioavailability, and efficacy in models of neuroinflammation and alzheimer's disease. J Pharmacol Exp Ther, 32 (1): 196~208
- Fan XX, Zang J, Xu ZG, Guo SR, Jiao XL, Liu XY, Gao Y (2013). Effects of different light quality on growth, chlorophyll concentration and chlorophyll biosynthesis precursors of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.). Acta Physiol Plant, 35 (9): 2721~2726
- Jao RC, Lai CC, Fang W, Chang SF (2005). Effects of red light on the growth of *Zantedeschia* plantlets *in vitro* and tuber formation using light-emitting diodes. Hort Sci, 40 (2): 436~438
- Knobloch KH, Hahlbrock K (1975). Isoenzymes of *p*-coumarate: CoA ligase from cell suspension cultures of *Glycine max*. Eur J Biochem, 52: 311~320
- Lamb CJ, Rubery PH (1976). Phenylalanine ammonia-lyase and cinnamic acid 4-hydroxylase: Product repression of the level of enzyme activity in potato tuber discs. Planta, 130: 283~290
- Liu JH, Li J, Zhang YQ (2010). Germination characteristics and secondary metabolism regulation of *Scutellaria baicalensis* Georgi seeds under different temperatures. Agri Sci Technol, 11 (9-10): 213~216
- Maibam P, Nawkar GM, Park JH, Sahi VP, Lee SY, Kang CH (2013). The influence of light quality, circadian rhythm, and photoperiod on the CBF-mediated freezing tolerance. Int J Mol Sci, 14 (6): 11527~11543
- Momokawa N, Kadono Y, Kudoh H (2011). Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris*. Ann Bot, 108 (7): 1299~1306