

# GA<sub>3</sub> 和 Ca<sup>2+</sup> 对安祖花佛焰苞花青苷含量及花梗 PAL 活性的影响

夏春华<sup>1</sup> 蔡世英<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 湛江海洋大学园林系, 湛江 524088; <sup>2</sup> 华南热带农业大学园艺学院, 儋州 571737)

**摘要:** 以安祖花 (*Anthurium andraeanum* Lind.) 为试材, 探讨了环境条件对佛焰苞花青苷含量的影响及弱光下 Ca<sup>2+</sup>、GA<sub>3</sub> 处理改善花朵品质的效应。研究表明, 光照不足是导致花青苷含量下降的主要原因, 5.4 mmol · L<sup>-1</sup> 的 CaCl<sub>2</sub>、1.16 mmol · L<sup>-1</sup> 的 GA<sub>3</sub> 单独及复合处理均能有效地提高弱光下安祖花佛焰苞花青苷含量与花梗苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性。通过钙调蛋白、RNA 及蛋白质等的不同抑制剂处理, 发现抑制剂均可抑制安祖花离体花梗 CaM 含量与 PAL 活性, 讨论了 Ca<sup>2+</sup>、GA<sub>3</sub> 的可能作用机理。

**关键词:** 安祖花; 钙; 赤霉素; 花青苷; PAL; 钙调蛋白; 抑制剂

**中图分类号:** S 682.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2004) 03-0343-04

## Effects of GA<sub>3</sub>, Ca<sup>2+</sup> on Anthocyanin and Phenylalanine Amonia Lyase in Stem of *Anthurium andraeanum*

Xia Chunhua<sup>1</sup> and Cai Shiyong<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Landscape Architecture, Zhanjiang Ocean University, Zhanjiang 524088, China; <sup>2</sup> College of Horticulture, South China University of Tropical Agriculture, Danzhou 571737, China)

**Abstract:** Effects of the environmental factors on the anthocyanin content in spathes and of improving flower quality with Ca<sup>2+</sup>, GA<sub>3</sub> treatments under weak light were investigated in *Anthurium andraeanum*. The results indicated that weak light was the main reason resulting in the lower anthocyanin content. Ca<sup>2+</sup> (5.4 mmol · L<sup>-1</sup>), GA<sub>3</sub> (1.16 mmol · L<sup>-1</sup>) or Ca<sup>2+</sup> + GA<sub>3</sub>, respectively, significantly increased the anthocyanin content in spathes and the phenylalanine amonia lyase (PAL) activity in stem of *Anthurium* under weak light. It is found that the calmodulin contents and PAL activity in vitro stem of *Anthurium* were inhibited with different inhibitors of calmodulin, RNA and protein, and the probable mechanisms of Ca<sup>2+</sup>, GA<sub>3</sub> were discussed.

**Key words:** *Anthurium andraeanum*; Ca<sup>2+</sup>; GA<sub>3</sub>; Anthocyanin; PAL; Calmodulin; Inhibitor

安祖花 (*Anthurium andraeanum* Lind.) 是热带花卉, 常因设施遮荫及冬季低温阴雨导致佛焰苞褪色或蓝化, 影响观赏品质。花青苷含量是苞片品质的重要指标之一。据报道苯丙氨酸解氨酶 (Phenylalanine Amonia Lyase, PAL) 活性与花青苷含量呈正相关, 光强、激素等可诱导 PAL 活性上升<sup>[1,2]</sup>, 植物激素对 Ca<sup>2+</sup>-CaM 第二信号转导系统起调控作用<sup>[3]</sup>。Higaki 等研究发现, 缺钙会引起安祖花褪色, 通过 X 射线分析发现, 褪色与钙含量密切相关, 补充钙能明显地改善这种失调的状况<sup>[4,5]</sup>。对 GA<sub>3</sub>、Ca<sup>2+</sup>、CaM、PAL 及花青苷之间关系的系统研究, 目前尚未见报道。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料及温度与光照条件的筛选

供试的安祖花取自华南热带农业大学园艺学院教学基地, 为 3 年生红色品种 ‘Tropical’ 的盆栽

收稿日期: 2003-12-29; 修回日期: 2004-03-24

基金项目: 海南省教育厅科研基金资助项目 (HjKj200221); 农业部热带作物植物生理学重点实验室项目

(每盆 1 株) 植株, 其新叶已露出叶鞘 1 周, 古铜色。为无机械损伤、无病虫害、花梗长 5 cm 的花枝, 其中佛焰苞用于花青苷测定, 花梗用于 PAL 测定。在适宜的光通量密度 (PFD 值为  $760 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 下, 将盆栽植株置于不同温度范围 (即  $13 \sim 15^\circ\text{C}$ 、 $16 \sim 22^\circ\text{C}$ 、 $23 \sim 29^\circ\text{C}$ ) 的光照培养箱中连续处理 14 d, 每处理 30 盆。在  $16 \sim 22^\circ\text{C}$ 、 $23 \sim 29^\circ\text{C}$  的温度下, 将盆栽植株分别置于具 2、3、4、5 层 75% 遮荫网的网室下, 测定 PFD 值分别为 760、220、84、76  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  (每天 8 时、11 时、16 时所测数据的平均值), 连续处理 14 d, 观察佛焰苞颜色, 筛选试验所用弱光条件的 PFD 值。

## 1.2 盆栽植株的处理

在  $16 \sim 22^\circ\text{C}$  和  $23 \sim 29^\circ\text{C}$ ,  $220 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  光照条件下, 分别用 0、1.8、3.6、5.4、7.2  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度的  $\text{CaCl}_2$  与 0、0.58、1.16、1.73、2.31  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度的  $\text{GA}_3$ , 在佛焰苞出现前 14 d 开始滴注处理, 每次将 1 mL 处理液滴入鳞片 (防止外界因素干扰), 每周滴 2 次, 共 4 次。用于佛焰苞花青苷<sup>[6]</sup>、含水量、可溶性糖 ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FM}$ )、可溶性蛋白<sup>[7]</sup> ( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}\text{FM}$ ) 及花梗 PAL<sup>[8]</sup> 的测定。

## 1.3 离体花梗的处理

将洗净的花梗剪为长 2~3 mm 的小段, 混合取样, 随机分成若干组, 每组称取 0.2 g, 分别置于 0、5.8、11.6、17.3、23.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{GA}_3$  和 0、1、2、3、4  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的  $\text{CaCl}_2$  溶液中, 常温 ( $25^\circ\text{C}$ ) 浸泡处理 10 h。RNA 合成抑制剂放线菌素-D ( $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )、蛋白质合成抑制剂环己亚胺 ( $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 处理同上, CaM 抑制剂 CPZ (氯丙嗪, Chlopromazine)、EGTA [乙二醇双乙胺醚-N, N'-四乙酸, Ethyleneglycol-bis (2-aminoe-thylether) -N, N'-tetraacetic acid] 则在  $25^\circ\text{C}$  下振荡保温 4 h, 测定 PAL 活性和 CaM 含量<sup>[9]</sup>。  $\text{Ca}^{2+}$  ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )、 $\text{GA}_3$  ( $11.6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 减压渗透 ( $0.53 \text{ Pa}$ , 3 min) 处理离体花梗, 测定  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性<sup>[10]</sup>。

差异显著性的方差分析和标准曲线的回归方程采用国际通用统计软件 SAS 6.12。

# 2 结果与分析

## 2.1 温度对盆栽安祖花生发育及佛焰苞花青苷含量的效应

安祖花正常光照 ( $760 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )、不同温度的对比试验表明,  $30^\circ\text{C}$  以上植株受到严重灼伤, 花芽死亡。 $10 \sim 15^\circ\text{C}$  出现严重黄叶现象, 不能正常开花。 $16 \sim 22^\circ\text{C}$  和  $23 \sim 29^\circ\text{C}$  能开花, 且处理间佛焰苞花青苷含量差异不显著, 佛焰苞颜色不变, 其大小与形状等观赏品质不受影响。

## 2.2 光照对盆栽安祖花佛焰苞花青苷含量与花梗 PAL 活性的效应

在适宜温度 (分别在  $16 \sim 22^\circ\text{C}$ 、 $23 \sim 29^\circ\text{C}$ ) 和供试光照范围内, 光照越强, 佛焰苞花青苷含量与花梗 PAL 活性越高 (表 1); 反之, 光照不足时佛焰苞褪色甚至蓝化, 当光照低于  $76 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  时不开花。这表明低光照是导致佛焰苞花青苷含量与花梗 PAL 活性下降的主要原因之一。

## 2.3 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$ 提高安祖花佛焰苞花青苷含量与花梗 PAL 活性的效应

盆栽植株在  $220 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的光照条件下 ( $16 \sim 22^\circ\text{C}$ 、 $23 \sim 29^\circ\text{C}$ ),  $5.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  促进佛焰苞花青苷含量的作用最显著, 而较低或较高浓度的  $\text{Ca}^{2+}$  对于花梗 PAL 活性均无显著的促进作用。在离体试验中,  $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  浓

表 1 PFD 对盆栽安祖花佛焰苞花青苷含量与花梗 PAL 活性的影响  
Table 1 Effect of PFD treatments on anthocyanin contents of spathe and PAL activity of stem in potted *Anthurium*

| PFD<br>( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 花青苷<br>Anthocyanin ( $\text{OD}_{530}$ ) | PAL<br>( $\text{OD}_{290} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) |
|--|--|--|
| 760  | 1.81 aA                                  | 0.375 aA   |
| 220  | 1.11 bB                                  | 0.268 abAB   |
| 84   | 0.88 cC                                  | 0.165 cAB  |
| 76   | 0.00 dD                                  | 0.000 dC   |

表 2  $\text{Ca}^{2+}$  对安祖花佛焰苞花青苷含量与花梗 PAL 活性的影响  
Table 2 Effect of  $\text{Ca}^{2+}$  on anthocyanin contents of spathe and PAL activity of stem of *Anthurium*

| 盆栽试验 In potted  |   |  | 离体试验 In vitro   |  |
|---|---|--|---|--|
| $\text{Ca}^{2+}$<br>( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 花青苷<br>Anthocyanin<br>( $\text{OD}_{530}$ ) | PAL<br>( $\text{OD}_{290} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $\text{Ca}^{2+}$<br>( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | PAL<br>( $\text{OD}_{290} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) |
| 0   | 1.11 bABC                                   | 0.270 aA   | 0   | 0.079 cC   |
| 1.8   | 0.44 cC                                     | 0.170 aA   | 1   | 0.064 cC   |
| 3.6   | 1.22 abAB                                   | 0.283 aA   | 2   | 0.093 cC   |
| 5.4   | 1.67 aA                                     | 0.285 aA   | 3   | 0.180 aA   |
| 7.2   | 0.84 bcBC                                   | 0.268 aA   | 4   | 0.133 bAB  |

度的  $\text{Ca}^{2+}$  显著促进花梗 PAL 活性(表 2)。

$\text{GA}_3$  处理盆栽植株,以  $1.16 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  提高佛焰苞花青苷含量效果最佳。离体试验中以  $11.6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理对花梗 PAL 活性效果最好(表 3)。

## 2.4 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{GA}_3$ 对盆栽安祖花品质的效应

与对照相比,以  $\text{Ca}^{2+} 5.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{GA}_3 1.16 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  单独或复合处理盆栽植株,佛焰苞的含水量、可溶性糖及可溶性蛋白含量有明显变化(表 4)。特别是  $\text{Ca}^{2+} + \text{GA}_3$  复合处理差异明显,含水量稍低、可溶性糖较高、可溶性蛋白下降。

## 2.5 $\text{Ca}^{2+}$ 与 $\text{GA}_3$ 提高花青苷含量机理的探讨

2.5.1  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  对离体花梗  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性的影响  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  的减压渗透试验结果(表 5)表明,与对照相比,单独  $\text{Ca}^{2+}$  或  $\text{GA}_3$  处理,  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性均提高,但  $\text{Ca}^{2+} + \text{GA}_3$  复合处理时,活性更明显提高,体现了协同效应。

2.5.2  $\text{Ca}^{2+}$  对离体花梗 PAL 活性和 CaM 含量的影响 如图 1 所示,  $\text{Ca}^{2+}$  与其螯合剂 EGTA 复合处理离体花梗的 PAL 活性比  $\text{Ca}^{2+}$  单独处理时显著下降,证实  $\text{Ca}^{2+}$  对 PAL 活性具有促进作用。 $\text{Ca}^{2+}$  又能促进佛焰苞花青苷的合成(表 2),暗示了花青苷含量的变化与 PAL 活性改变有密切关系,其相关系数  $R=0.762 > R_{0.05}$ , 呈显著相关。

如图 2 所示,  $\text{Ca}^{2+}$  能提高离体花梗 CaM 含量,而 CaM 抑制剂 CPZ、 $\text{Ca}^{2+}$  螯合剂 EGTA 则一定程度上抑制了  $\text{Ca}^{2+}$  的效应,使 CaM 含量下降。 $\text{Ca}^{2+}$  与 EGTA、CPZ 交叉复合使用,其结果与单独使用 EGTA、CPZ 类同,表明  $\text{Ca}^{2+}$  能诱导 CaM 含量提高。

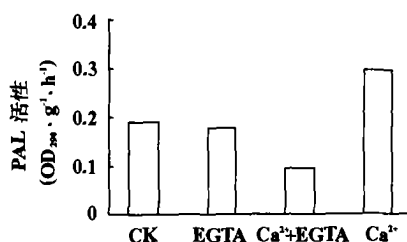


图 1  $\text{Ca}^{2+}$  ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 与 EGTA ( $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 对离体花梗 PAL 活性的影响

Fig. 1 Effect of  $\text{Ca}^{2+}$  ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), EGTA ( $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) on PAL activity in vitro stem

表 3  $\text{GA}_3$  对安祖花佛焰苞花青苷含量与花梗 PAL 活性的影响

Table 3 Effect of  $\text{GA}_3$  on anthocyanin contents of spathe and PAL activity of stem of *Anthurium*

| 盆栽试验 In potted   |   |  | 离体试验 In vitro  |  |
|--|---|--|--|--|
| $\text{GA}_3$<br>( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 花青苷<br>(Anthocyanin<br>( $\text{OD}_{530}$ )) | PAL<br>( $\text{OD}_{290} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | $\text{GA}_3$<br>( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | PAL<br>( $\text{OD}_{290} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) |
| 0  | 0.88 bcAB                                     | 0.268 aA   | 0  | 0.102 dC   |
| 0.58   | 1.02 abcAB                                    | 0.268 aA   | 5.8  | 0.120 cdBC   |
| 1.16   | 1.23 aA                                       | 0.313 aA   | 11.6   | 0.269 aA   |
| 1.73   | 1.11 abAB                                     | 0.287 aA   | 17.3   | 0.176 bB   |
| 2.31   | 0.74 cB                                       | 0.258 aA   | 23.1   | 0.148 bcBC   |

表 4  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  处理对盆栽安祖花佛焰苞相关指标的影响

Table 4 Effect of  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  treatments on relative parameters of spathe in potted *Anthurium*

| 处理<br>Treatments<br>( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 含水量<br>Content of water<br>(%) | 糖含量<br>Sugar<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FM}$ ) | 蛋白质含量<br>Protein<br>( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FM}$ ) |
|---|--------------------------------|---|---|
| 对照 Control  | 84.2 aA                        | 0.330 bB  | 0.379 aA  |
| $\text{GA}_3 1.16$  | 83.6 abA                       | 0.338 bAB   | 0.336 abA   |
| $\text{Ca}^{2+} 5.4$                                      | 83.7 abA                       | 0.348 abAB  | 0.246 bcA   |
| $\text{Ca}^{2+} 5.4 + \text{GA}_3 1.16$                   | 83.0 bA                        | 0.361 aA  | 0.236 cA  |

表 5  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  减压渗透对安祖花离体花梗  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性的影响

Table 5 Effect of  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  by hypobaric infiltration on  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase activity in vitro stem of *Anthurium*

| 处理<br>Treatments( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase<br>( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) |
|---|---|
| 对照 Control  | 0.270 dD  |
| $\text{Ca}^{2+} 3$                                    | 0.645 cC  |
| $\text{GA}_3 0.0116$                                  | 1.140 bB  |
| $\text{Ca}^{2+} 3 + \text{GA}_3 0.0116$               | 1.605 aA  |

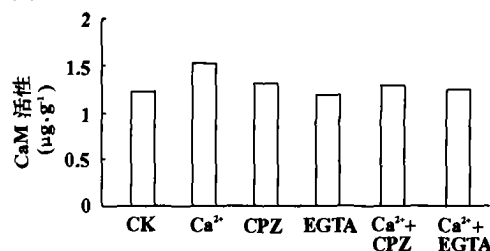


图 2  $\text{Ca}^{2+}$  ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 与 CPZ ( $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 及 EGTA ( $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 对离体花梗 CaM 含量的影响

Fig. 2 Effect of  $\text{Ca}^{2+}$  ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ), CPZ ( $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) and EGTA ( $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) on CaM content in vitro stem

2.5.3  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  分别与放线菌素-D、环己亚胺复合处理对安祖花离体花梗 PAL 活性的效应  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  单独处理均使安祖花离体花梗 PAL 活性增加,而  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  分别与 RNA 抑制剂放线菌素-D、蛋白质合成抑制剂环己亚胺一起使用时,离体花梗 PAL 活性明显降低, PAL 合成受阻(表 6)。表明 PAL 的合成在转录水平被放线菌素-D 抑制,在翻译过程被环己亚胺抑制,说明  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  调

节 PAL 的活性,很可能是通过调控 PAL 合成的有关基因的表达而实现的。

2.5.4  $\text{GA}_3$  对外源  $\text{Ca}^{2+}$  吸收的影响  $\text{GA}_3$  处理安祖花离体花梗表明  $\text{GA}_3$  促进了  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收 (图 3)。这一过程可由  $\text{GA}_3$  促进花梗 CaM 的含量及依赖  $\text{Ca}^{2+}$  起作用的  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性增强得到证实 (表 5)。

表 6  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  及抑制剂放线菌素-D、环己亚胺处理

对安祖花离体花梗 PAL 活性的影响

Table 6 Effect of  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$ 、Actinomycin-D or Cycloheximide treatments on PAL activity in vitro stem of *Anthurium*

| 处理 Treatments  | PAL ( $\text{OD}_{290} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ) |
|--|---|
| 对照 Control   | 0.090 bedBC   |
| $\text{Ca}^{2+}$ ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )  | 0.195 aA  |
| $\text{Ca}^{2+}$ + 放线菌素 Actinomycin                        | 0.038 dC  |
| $\text{Ca}^{2+}$ + 环己亚胺 Cycloheximide                      | 0.055 cdC   |
| $\text{GA}_3$ ( $11.6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) | 0.135 bAB   |
| $\text{GA}_3$ + 放线菌素 Actinomycin                           | 0.053 cdC   |
| $\text{GA}_3$ + 环己亚胺 Cycloheximide                         | 0.040 dC  |

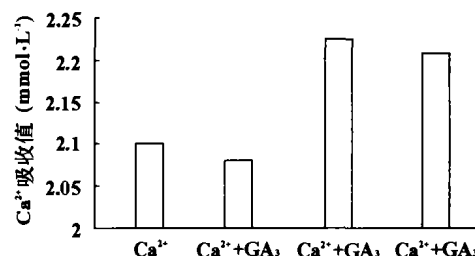


图 3  $\text{GA}_3$  ( $5.8, 11.6, 17.3 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 处理对离体花梗  $\text{Ca}^{2+}$  ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 吸收的影响

Fig. 3 Effect of  $\text{GA}_3$  ( $5.8, 11.6, 17.3 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) treatments on absorption of  $\text{Ca}^{2+}$  ( $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) in vitro stem

### 3 讨论

安祖花佛焰苞花青苷含量下降的主要原因是光照不足,采用  $\text{CaCl}_2$   $5.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{GA}_3$   $1.16 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、或同浓度  $\text{CaCl}_2$  及  $\text{GA}_3$  组合处理,能提高花梗 PAL 活性、佛焰苞花青苷及可溶性糖含量,证明  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{GA}_3$  能克服由于光照不足而导致光合产物 (主要是糖) 积累的下降与 PAL 活性降低,为花青苷合成提供充足的前体物质,促进关键酶的活性,从而提高花青苷含量 (与前人结论<sup>[11]</sup>一致)。

$\text{Ca}^{2+}$  能提高 CaM 含量、 $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 与 PAL 活性,而用  $\text{Ca}^{2+}$  螯合剂 EGTA、CaM 抑制剂 CPZ 却能降低它们的含量与活性。说明当  $\text{Ca}^{2+}$  进入细胞后能促进 CaM 含量在一定程度上的增加,并与 CaM 结合,启动  $\text{Ca}^{2+}$ -CaM 信号传递系统,导致  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性增强,并引发与 PAL 活性提高有关的生理生化反应。放线菌素-D、环己亚胺一定程度抑制了  $\text{Ca}^{2+}$  对 PAL 活性的促进作用,暗示了 PAL 活性的影响最终可能来源于转录水平的调节,即  $\text{Ca}^{2+}$  通过  $\text{Ca}^{2+}$ -CaM 信号传导系统调节了控制 PAL 合成的有关基因的表达。

$\text{GA}_3$  促进了  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收,促进了 CaM 含量与  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性的提高,而用  $\text{GA}_3$  分别与 EGTA、CPZ、放线菌素-D、环己亚胺复合处理时,上述效应明显受抑制,证明  $\text{GA}_3$  具有与  $\text{Ca}^{2+}$  相似的效应。当外施  $\text{Ca}^{2+}$  时,  $\text{GA}_3$  很可能是促进  $\text{Ca}^{2+}$  的吸收,提高  $\text{Ca}^{2+}$  跨膜进入胞内的数量,进而实现功能调控的,这表明  $\text{Ca}^{2+}$ -CaM 信号转导系统有可能与  $\text{GA}_3$  促进 PAL 与花青苷的合成相关。 $\text{Ca}^{2+}$ -CaM 信使系统与 PAL 活性相关的机理细节尚待进一步研究。

### 参考文献:

- 何奕昆, 奚 惕. 凤仙花中花色素苷累积与苯丙氨酸解氨酶的关系. 植物生理学通讯, 1989, 25 (2): 35~38
- 童 哲, 梁伯潘. 光对尾穗苋幼苗花红素合成的诱导. 植物生理学报, 1989, 15 (1): 1~5
- 孙大业, 郭艳林, 马力耕. 细胞信号转导. 第2版. 北京: 科学出版社, 1997. 111~118
- Higaki T, Tasmussen H P, Carpenter W J. Color breakdown in *Anthurium* spathes caused by calcium deficiency. J. Amer. Soc. Hort. Sci., 1980, 105 (3): 441~444
- Henny R J, Hamilton R L. Flowering of *Anthurium* following treatment with gibberellic acid. HortScience, 1992, 27 (12): 1328
- 华东师范大学生物系生理教研组主编. 植物生理学实验指导. 北京: 人民教育出版社, 1980. 169
- Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Analytical Biochem., 1976, 72: 248~254
- 欧阳光察. 苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性的测定. 见: 上海植物生理学会主编. 植物生理学实验手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 191 页
- 赵升皓, 于宏林, 张明志, 等. 钙调素的酶联免疫测定法. 徐州医学院学报, 1988, 8 (1): 54~58
- 缪 颖, 曹家树, 蒋有条, 等. 大白菜干烧心发生过程中心叶组织  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase 活性的变化. 园艺学报, 1998, 25 (1): 50~55
- 王合理. 低温贮藏对安祖花含糖量和呼吸速率及其品质的影响. 植物生理学通讯, 1999, 35 (6): 458~460