

doi:10.11937/bfyy.20233292

黄系伦,唐婷婷,金睿,梁娥,李静,张来.竹节参果实呈色生理机制研究[J].北方园艺,2024(06):100-107.

## 竹节参果实呈色生理机制研究

黄系伦<sup>1,2</sup>,唐婷婷<sup>1,2</sup>,金睿<sup>1,2</sup>,梁娥<sup>2</sup>,李静<sup>2</sup>,张来<sup>2</sup>

(1.贵州师范大学生命科学学院,贵州 贵阳 550000;2.安顺学院 贵州省山地特色高效农业创新中心,贵州 安顺 561000)

**摘要:**以5个不同呈色时期竹节参果实为试材,采用酶标仪检测法,研究了竹节参果实生长发育过程中叶绿素、类胡萝卜素、花色苷、类黄酮和总酚含量对果实呈色的影响,以期揭示竹节参果实呈色生理机制提供参考依据。结果表明:果实、果皮叶绿素含量变化规律随果实转色呈逐渐降低趋势,果实绿果期含量最高 $1.060\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;类胡萝卜素含量变化规律与叶绿素含量变化规律呈相反趋势,果皮成熟期含量最高 $0.234\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ;花色苷含量的变化规律与类胡萝卜素含量变化相似呈逐渐上升趋势,果皮成熟期含量最高 $3.393\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。而果实总酚、类黄酮含量合成变化规律呈先升高后降低再升高的趋势,均是成熟时期果皮含量最高,总酚为 $2.790\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ,类黄酮为 $7.256\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。因此,竹节参果实从绿果期进入转色期时,果实中的叶绿素逐渐被破坏,类胡萝卜素开始在果皮显现出来,花色苷也开始合成,总酚与类黄酮物质对竹节参果实呈色为正向调控作用。

**关键词:**竹节参果实;色素含量;花色苷;类黄酮;总酚

中图分类号:S 853.75 文献标识码:A 文章编号:1001-0009(2024)06-0100-08

竹节参(*Panax japonicus* C. A. Mey.)为五加科多年生草本植物,以干燥根茎入药<sup>[1]</sup>,化学成分主要为三萜皂苷类,其中齐墩果烷型皂苷含量

第一作者简介:黄系伦(1995-),男,硕士研究生,研究方向为竹节参生理生态。E-mail:1938232158@qq.com.

责任作者:张来(1977-),男,博士,教授,现主要从事竹节参次生代谢产物调控等研究工作。E-mail:975575681@qq.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31660252);贵州省科技厅科技资助项目(黔科合基础-ZK(2023)重点002)。

收稿日期:2023-09-24

最高。除此之外还有多糖类、氨基酸、挥发油、无机元素和多炔类等<sup>[2-5]</sup>。药理作用包括抗炎镇痛<sup>[6-8]</sup>、免疫调节<sup>[9]</sup>、抗心肌缺血<sup>[10-11]</sup>、降血糖<sup>[12]</sup>;竹节参药理作用对多种疾病均有较广泛的临床应用,尤其对风湿病和心脑血管疾病<sup>[13]</sup>的治疗疗效显著。竹节参从种子萌发到种子完成一个生命周期需4年,方可正常结实<sup>[14]</sup>。因此,竹节参作为一味名贵的中草药,有着重要的药用价值与经济价值。

果色是评价果实品质的重要指标,果实转色是一个复杂性状,不同颜色由不同色素决定。竹节参果实转色是果实成熟的一个信号,其主要取

plantlets at 92.67%, and the optimum medium at 1/2MS+NAA 0.5 mg·L<sup>-1</sup>+sugar 3.0%. The system of plant regeneration and multiplication of *Astragalus mongholicus* was established in this experiment, which provided a powerful technical reference for its germplasm resources preservation, rapid seedling breeding and development, which has important popularizing value in the production practice of *Astragalus mongholicus*.

**Keywords:** *Astragalus mongholicus*; callus induction; regenerated plants; proliferation; germplasm resources

决于果皮中色素的种类、含量和比例。为探究竹节参果实呈色生理机制,该试验对竹节参果实呈色生理生态方面进行研究,分析影响竹节参果实呈色生理指标叶绿素、类胡萝卜素、花色苷、类黄酮和总酚含量变化,以期揭示竹节参果实呈色生理机制研究提供参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

供试材料:取于贵州省安顺市安顺学院“贵州省山地特色高效农业创新中心”竹节参栽培试验地,选取竹节参大小一致的绿果期、黄色着色期、红色着色期、紫黑色着色期、成熟期共5个不同呈色时期的果实,用蒸馏水洗净,用滤纸吸干多余水分,利用手术刀将一部分果实的种子去除留下果皮,另一部分果实液氮速冻15 min,将样品果实及去除种子的果皮研磨成粉末,置于-80℃冰箱保存待用。

供试仪器:分析电子天平(奥豪斯AR224CN),超声波清洗机(JP-040)洁盟,酶标仪(北京凯奥科K6600-A)。

### 1.2 试验方法

于-80℃超低温冰箱中取出5个不同呈色时期的果实及果皮粉末样品,每个样品称取3份0.1 g质量样品,依照购买于北京索莱宝科技有限公司(solarbio)试剂盒的方法对竹节参果实及果皮进行叶绿素(BC0995)、类胡萝卜素(BC4335)、花色苷(BC1385)、类黄酮(BC1335)、总酚TP(BC1345)含量的测定。

### 1.3 项目测定

#### 1.3.1 竹节参果实、果皮叶绿素和类胡萝卜素含量的测定

叶绿素含量提取液制备:将无水乙醇:丙酮(V:V)=1:2混合待用;类胡萝卜素含量提取液制备:将丙酮与蒸馏水(V:V)=4:1混合待用。0.1 g样品中加入制备提取液10 mL,置于黑暗条件下浸提3 h以上,直至样品残渣颜色接近于白色则提取完全。在每个样品中取上层浸提液200 μL于96孔板中,提取液调零,利用酶标仪测定吸光值。

叶绿素总含量(mg·g<sup>-1</sup>,质量)=0.01×(33.7×A<sub>645</sub>+13.4×A<sub>663</sub>)×F/W;

类胡萝卜素含量(不含绿色)(mg·g<sup>-1</sup>,质量)=0.067×ΔA<sub>440</sub>×F/W;

类胡萝卜素含量(含有绿色)(mg·g<sup>-1</sup>,质量)=0.01×Cc×F/W;

类胡萝卜素浓度 Cc(mg·L<sup>-1</sup>)=7.278×ΔA<sub>470</sub>-0.014×Ca-0.454×Cb;

Ca(mg·L<sup>-1</sup>)=20.35×ΔA<sub>663</sub>-4.83×ΔA<sub>646</sub>; Cb(mg·L<sup>-1</sup>)=33.55×ΔA<sub>646</sub>-8.38×ΔA<sub>663</sub>。

式中:F为稀释倍数;W为样本质量,g。

#### 1.3.2 竹节参果实、果皮花色苷含量的测定

提取液由北京索莱宝科技有限公司(solarbio)提供的酸性乙醇,在0.1 g样品中加入1 mL提取液,60℃水浴弱光条件浸提30 min,期间每5 min震荡1次。12 000 r·min<sup>-1</sup>、常温离心10 min,取上清液200 μL于96孔板中,蒸馏水调零,利用酶标仪测定吸光值。

花色苷含量(mg·g<sup>-1</sup>,质量)=0.062×ΔA×F/W。

式中:F为稀释倍数;W为样本质量,g。

#### 1.3.3 竹节参果实、果皮类黄酮和总酚含量的测定

类黄酮含量测定:标准样品为芦丁,在0.1 g样品中,加入1 mL 60%乙醇作为提取液,用240 W、40 kHz、温度60℃超声提取30 min。12 000 r·min<sup>-1</sup>、25℃离心10 min,取上清液至新的1.5 mL的EP中用提取液定容至1 mL,取200 μL于96孔板中,蒸馏水调零,利用酶标仪测定吸光值。

类黄酮含量(mg·g<sup>-1</sup>,质量)=X/W;线性方程y=0.5689x-0.0298(R<sup>2</sup>=0.9974)。

式中:W为样本质量,g。X为浓度,mg·mL<sup>-1</sup>。

总酚含量提取:标准样品为没食子酸,在0.1 g样品中,加入2.5 mL 60%乙醇作为提取液,用240 W、40 kHz、温度60℃超声提取30 min。12 000 r·min<sup>-1</sup>、25℃离心10 min,取上清液至新的5 mL的EP中用提取液定容至2.5 mL,取200 μL于96孔板中,蒸馏水调零,利用酶标仪测定吸光值。

总酚 TP 含量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , 质量) =  $2.5X/Q.1$ ; 线性方程  $y = 6.4748x - 0.0219$  ( $R^2 = 0.9974$ )。

式中:  $X$  为浓度,  $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。

#### 1.4 数据分析

利用 Excel 2003 软件进行数据统计, 采用 Graphpad Prism 9 软件进行差异分析及作图。

## 2 结果与分析

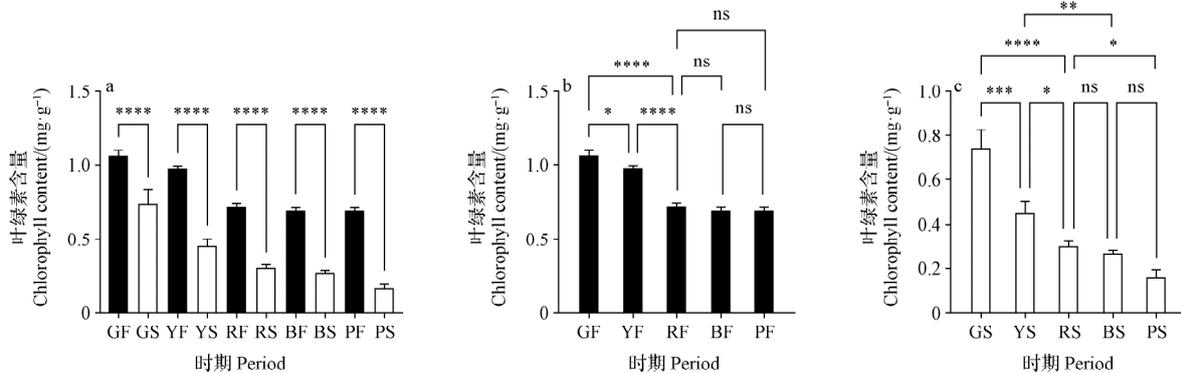
### 2.1 竹节参果实叶绿素含量

植物叶绿素广泛存在于绿色植物组织中, 是光合作用的细胞器。其叶绿素含量与光合作用、营养状况密切相关, 是影响果实呈色的重要指标之一<sup>[15]</sup>。由图 1a 可知, 在 5 个不同呈色期之间竹节参果实叶绿素含量均极显著高于果皮的叶绿素含量。由图 1b 可知, 竹节参果实叶绿素含量在 5 个不同呈色期呈逐渐降低趋势, 其中果实的叶绿素含量降低趋势分为 2 个时期, RF 之前竹节参果实的叶绿素含量降低速度较快, RF 之后竹节参果实的叶绿素含量降低速度减缓。竹节参果实 5 个不同呈色期的叶绿素含量在  $0.696 \sim 1.060 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 其中 GF 含量最高为  $1.060 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从显著性差异分析可知, 竹节

参果实叶绿素含量 GF 相对于 YF 有显著差异, 相对于 RF、BF、PF 有极显著差异。YF 果实叶绿素含量相对于 RF、BF、PF 有极显著差异; RF 果实叶绿素含量相对于 BF、PF 无显著差异; BF 果实叶绿素含量相对于 PF 无差异显著。5 个呈色期以 GF 平均叶绿素含量最高, YF 平均叶绿素含量次之, PF 平均叶绿素含量最低。由图 1c 可知, 竹节参果皮叶绿素含量由 GS 至 PS 一直呈降低趋势。竹节参果皮在 5 个不同呈色期的叶绿素含量在  $0.164 \sim 0.743 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ; 其中 GS 含量最高为  $0.743 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从显著性差异分析可知, 竹节参果皮叶绿素含量 GS 相对于 YS 有非常显著差异; GS 果皮叶绿素含量相对于 RS、BS、PS 有极显著差异; YS 果皮叶绿素含量相对于 RS 有显著差异, YS 相对于 BS 有较显著差异; RS 果皮叶绿素含量相对于 PS 有显著差异, RS 相对于 BS 和 BS 相对于 PS 无差异显著。5 个呈色期以 GS 平均叶绿素含量最高, YS 平均叶绿素含量次之, PS 平均叶绿素含量最低。

### 2.2 竹节参果实类胡萝卜素含量

类胡萝卜素(carotenoid)是一类重要的天然色素, 普遍存在于高等植物的黄色、橙红色或红色



注: a. 竹节参果实与果皮呈色过程中叶绿素含量; b. 竹节参果实呈色过程中叶绿素含量; c. 竹节参果皮呈色过程中叶绿素含量。GF、YF、RF、BF、PF 为果实绿果期、黄色着色期、红色着色期、黑色着色期、成熟期; GS、YS、RS、BS、PS 为果皮绿果期、黄色着色期、红色着色期、黑色着色期、成熟期。T 检验,  $P > 0.05$  无差异 ns;  $P < 0.05$  \*;  $P < 0.01$  \*\*;  $P < 0.001$  \*\*\*;  $P < 0.0001$  \*\*\*\*。下同。

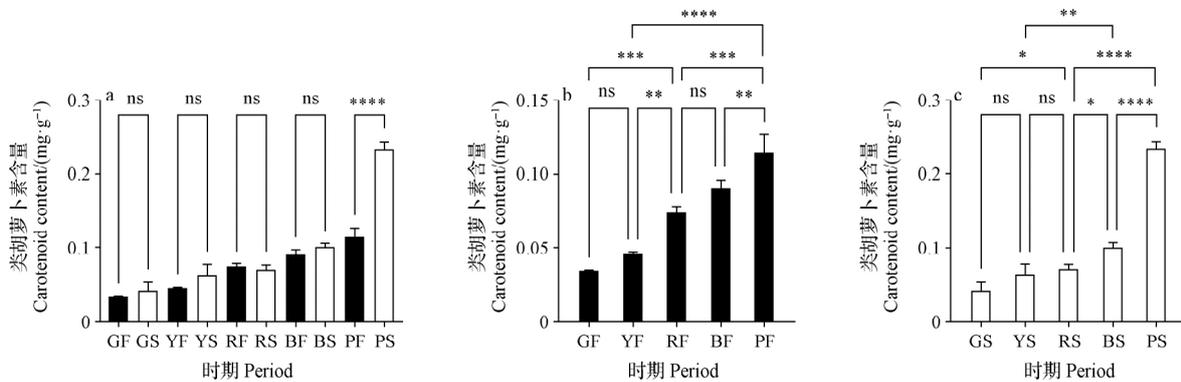
Note: a. chlorophyll content in the process of fruit and peel coloration of *Panax japonicus*; b. chlorophyll content in the process of coloration of *Panax japonicus* fruit; c. chlorophyll content in the peel coloration process of *Panax japonicus*. GF, YF, RF, BF, PF are green fruit period, yellow coloring period, red coloring period, black coloring period, mature period; GS, YS, RS, BS, PS are peel green fruit period, yellow coloring period, red coloring period, black coloring period, mature period. T test,  $P > 0.05$  no difference ns;  $P < 0.05$  \*;  $P < 0.01$  \*\*;  $P < 0.001$  \*\*\*;  $P < 0.0001$  \*\*\*\*. The same as below.

图 1 竹节参果实不同呈色期叶绿素含量

Fig. 1 Chlorophyll content of *Panax japonicus* fruit at different coloration stages

的色素之中,具有抗氧化、免疫调节、抗癌、减轻心血管疾病及着色剂等作用。从图 2a 可以看出,在 5 个不同呈色期之间竹节参果皮 PS 类胡萝卜素含量极显著高于果实 PF 的类胡萝卜素含量,另外 4 个时期竹节参果实与果皮类胡萝卜素含量表现为差异不显著。由图 2b 可知,竹节参果实类胡萝卜素含量在 5 个不同呈色期呈增长趋势,含量为  $0.035 \sim 0.115 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;其中 PF 含量最高为  $0.115 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从显著性差异分析来看,竹节参果实类胡萝卜素含量 PF 相对于 BF 有较显著差异,相对于 BF 有非常显著差异,相对于 RF、YF、GF 有极显著差异;BF 果实类胡萝卜素含量相对于 RF 表现无显著差异,RF 相对于 YF 有较显著差异,相对于 GF 有非常显著差异;YF 果实类胡萝卜素含量相对于 GF 无显著差异。5 个呈色期以 PF 平均类胡萝卜素含量最高,BF 平均类

胡萝卜素含量次之,GF 平均类胡萝卜素含量最低。由图 2c 可知,竹节参果皮类胡萝卜素含量由 GS 至 PS 呈增长趋势。但 GS 至 BS 果皮类胡萝卜素含量合成速度缓慢,在 PS 果皮类胡萝卜素含量达到最高值。竹节参果皮在 5 个不同呈色期的类胡萝卜素含量在  $0.042 \sim 0.234 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;其中 PS 含量最高为  $0.234 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从显著性差异分析可知,果皮类胡萝卜素含量 PS 相对于 BS、RS、YS、GS 有极显著差异;BS 果皮类胡萝卜素含量相对于 RS 有显著差异,相对于 YS 有较显著差异;RS 果皮类胡萝卜素含量相对于 YS 表现无显著差异,相对于 GS 有显著差异;YS 果皮类胡萝卜素含量相对于 GS 有无显著差异。5 个呈色期以 PS 平均类胡萝卜素含量最高,BS 平均类胡萝卜素含量次之,GS 平均类胡萝卜素含量最低。



注:a.竹节参果实与果皮呈色过程中类胡萝卜素含量;b.竹节参果实呈色过程中类胡萝卜素含量;c.竹节参果皮呈色过程中类胡萝卜素含量。

Note:a. carotenoid content in the process of coloration of fruit and peel of *Panax japonicus*; b. carotenoid content in the process of coloration of *Panax japonicus* fruit; c. carotenoid content in the peel coloration process of *Panax japonicus*.

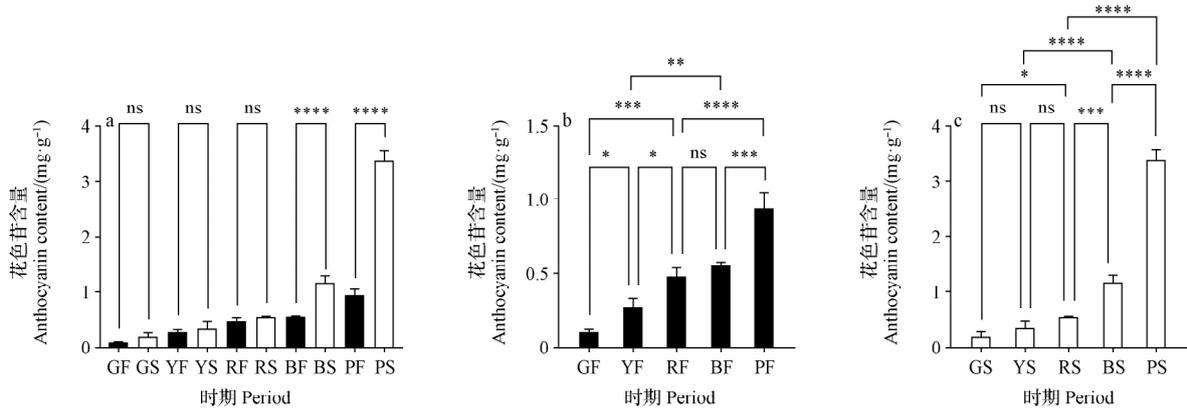
图 2 竹节参果实不同呈色期类胡萝卜素含量

Fig 2 Carotenoid content of *Panax japonicus* fruit at different coloration stages

### 2.3 竹节参果实花色苷含量

花色苷能使植物绚丽多彩,是植物自身发育过程中极为重要的化合物;具有多种保健作用,在天然食用色素、保健品和医药行业均有着广泛的应用。从图 3a 可以看出,5 个不同呈色期之间竹节参果皮花色苷含量 BS 极显著高于竹节参果实 BF、PS 极显著高于 PF,另外 3 个呈色期之间花色苷含量表现差异不显著。由图 3b 可知,竹节参果实花色苷含量在 5 个呈色期呈逐渐增加趋势,花

色苷含量为  $0.103 \sim 0.942 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ;其中 PF 含量最高为  $0.942 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。从显著性差异分析可知,竹节参果实花色苷含量 PF 相对于 BF 有非常显著差异,相对于 RF、YF、GF 有极显著差异;BF 果实花色苷含量相对于 RF 表现无显著差异,相对于 YF 有较显著差异;RF 果实花色苷含量相对于 YF 有显著差异,相对于 GF 有非常显著差异;YF 果实花色苷含量相对于 GF 无显著差异。5 个呈色期以 PF 平均花色苷含量最高,BF 平均花色苷含量次之,GF 平均花色苷含量最低。由



注:a. 竹节参果实与果皮呈色过程中花色苷含量;b. 竹节参果实呈色过程中花色苷含量;c. 竹节参果皮呈色过程中花色苷含量。

Note:a. anthocyanin content in the coloration process of fruit and peel of *Panax japonicus*; b. anthocyanin content in the process of coloration of *Panax japonicus* fruit; c. anthocyanin content in the peel coloration process of *Panax japonicus*.

图3 竹节参果实不同呈色期花色苷含量

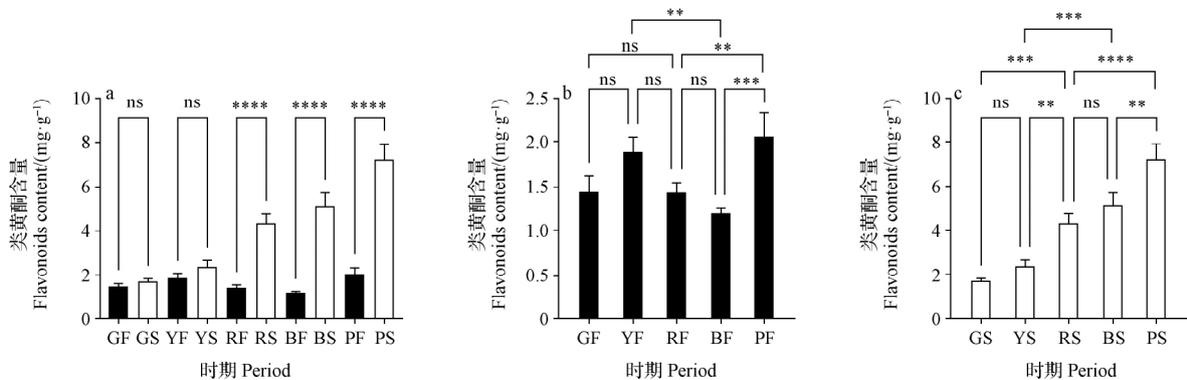
Fig. 3 Anthocyanin content of *Panax japonicus* fruit at different coloration stages

图3c可知,竹节参果皮花色苷含量由GS至PS呈逐渐增长趋势。从GS至BS合成速度缓慢,在PS果皮花色苷含量达到最高。竹节参果皮在5个呈色期的花色苷含量在0.200~3.393 mg·g<sup>-1</sup>;其中成熟期含量最高为3.393 mg·g<sup>-1</sup>。从显著性差异分析可知,竹节参果皮花色苷含量PS相对于BS、RS、YS、GS有极显著差异;BS果皮花色苷含量相对于RS有非常显著差异,相对于YS有极显著差异;RS果皮花色苷含量相对于YS无显著差异,相对于GS有显著差异;YS果皮花色苷含量相对于GS无显著差异。5个呈色期以PS平

均花色苷含量最高,BS平均花色苷含量次之,GS平均花色苷含量最低。

#### 2.4 竹节参果实类黄酮含量

类黄酮是多苯类化合物,植物次生代谢产物,对人体具有消炎、抗菌、降血脂、预防癌症等多种作用<sup>[16]</sup>。由图4a可知,5个不同呈色期之间竹节参果皮类黄酮含量PS极显著高于果实PF,BS极显著高于BF,RS极显著高于RB,另外3个时期竹节参果实与果皮表现为差异不显著。由图4b可知,竹节参果实类黄酮的含量在5个呈色期呈先增加后降低再增加的趋势,类黄酮含量为



注:a. 竹节参果实与果皮呈色过程中类黄酮含量;b. 竹节参果实呈色过程中类黄酮含量;c. 竹节参果皮呈色过程中类黄酮含量

Note:a. flavonoid content in the process of coloration of fruit and peel of *Panax japonicus*; b. flavonoids content in the process of coloration of *Panax japonicus* fruit; c. flavonoids content in the peel coloration process of *Panax japonicus*.

图4 竹节参果实不同呈色期类黄酮含量

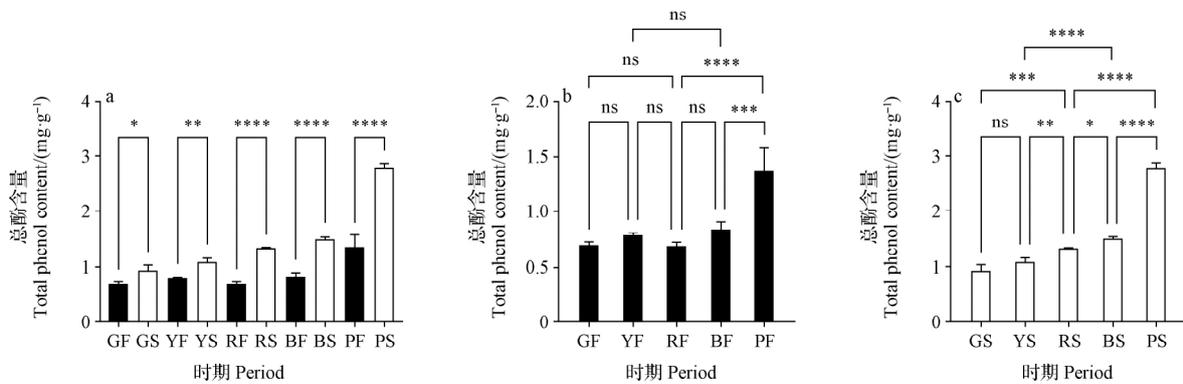
Fig. 4 Flavonoids content of *Panax japonicus* fruit at different coloration stages

1.444~2.065 mg·g<sup>-1</sup>;其中成熟期含量最高为 2.065 mg·g<sup>-1</sup>。从显著性差异分析可知,竹节参果实类黄酮含量 PF 相对于 BF 有非常显著差异,相对于 RF、YF、GF 有极显著差异;BF 果实类黄酮含量相对于 RF 无显著差异,相对于 YF 有较显著差异;RF 果实类黄酮含量相对于 YF 有显著差异,相对于 GF 有较显著差异;YF 果实类黄酮含量相对于 GF 无显著差异。5 个呈色期以 PF 平均类黄酮含量最高,YF 平均类黄酮含量次之,BF 平均类黄酮含量最低。由图 4c 可知,竹节参果皮类黄酮含量的合成由 GS 到 PS 呈指数增长趋势。竹节参果皮在 5 个呈色期过程中类黄酮含量在 1.713~7.256 mg·g<sup>-1</sup>;其中成熟期含量最高为 7.256 mg·g<sup>-1</sup>。从显著性差异分析可知,竹节参果皮类黄酮含量 PS 相对于 BS、RS、YS、GS 有极显著差异;BS 果皮类黄酮含量相对于 RS 有非常显著差异,相对于 YS 有极显著差异;RS 果皮类黄酮含量相对于 YS 无显著差异,相对于 GS 有显著差异;YS 果皮类黄酮含量相对于 GS 无显著差异。5 个呈色期以 PS 平均类黄酮含量最高,BS 平均类黄酮含量次之,GS 平均类黄酮含量最低。

### 2.5 竹节参果实总酚含量

植物中的酚类物质具有抗氧化抗衰老的作用,广泛应用于化妆品、食品、医药等领域。由图 5a 可知,5 个不同呈色期之间竹节参果皮与竹节参果实的总酚含量存在差异,GS 显著高于 GF、YS 显著高于 YF,RS 极显著高于 RF,BS 时

期极显著高于 BF,PS 极显著高于 PF;由此说明,随着果实不断地转色果皮总酚含量在红色着色期、黑色着色期、成熟期高于果实总酚含量。5 个呈色期以 PF 平均总酚含量最高,BF 平均总酚含量次之,GF 平均总酚含量最低。由图 5b 可知,竹节参果实总酚含量合成随果实由绿果期到 3 次转色期再到成熟期呈现先增加后降低再升高的变化趋势,在 BF 之前各时果皮总酚含量变化趋于稳定,在 PF 总酚含量达到最高,竹节参果实在 5 个呈色期总酚含量呈先升高后降低再升高的变化趋势,为 0.700~1.369 mg·g<sup>-1</sup>;其中成熟期含量最高为 1.369 mg·g<sup>-1</sup>。从显著性差异分析来看,竹节参果实总酚含量 PF 相对于 BF 有非常显著差异,相对于 RF 有较显著差异;BF 果实总酚含量相对于 RF 无显著差异,相对于 YF 有较显著差异;竹节参果实总酚含量在 RF 与 BF、GF 与 RF、YF 与 BF 表现无显著差异。5 个呈色期以 PF 平均总酚含量最高,BF 平均总酚含量次之,RF 平均总酚含量最低。由图 5c 可知,竹节参果皮总酚含量的合成由 GS 至 BS 呈缓慢增长趋势,在 PS 总酚含量达到最高。竹节参果皮在 5 个呈色期中总酚含量在 0.940~2.790 mg·g<sup>-1</sup>;其中成熟期含量最高为 2.790 mg·g<sup>-1</sup>。从显著性差异分析可知,竹节参果皮总酚含量 PS 相对于 BS 有较显著差异,相对于 RS、YS、GS 有极显著差异;BS 果皮总酚含量相对于 RS 无显著差异,相对于 YS 有较显著差异;RS 果皮总酚含量相对于



注:a.竹节参果实与果皮呈色过程中总酚含量;b.竹节参果实呈色过程中总酚含量;c.竹节参果皮呈色过程中总酚含量。

Note:a. total phenol content in the process of coloration of *Panax japonicus* fruit and peel;b. total phenol content in the process of coloration of *Panax japonicus* fruit;c. total phenol content in the peel coloration process of *Panax japonicus*.

图 5 竹节参果实不同呈色期总酚含量

Fig. 5 Total phenol content of *Panax japonicus* fruit at different coloration stages

YS 有较显著差异,相对于 GS 有极显著差异;YS 果皮总酚含量相对于 GS 无显著差异。5 个呈色期以 PS 平均总酚含量最高,BS 平均总酚含量次之,GS 平均总酚含量最低。

### 3 结论与讨论

竹节参果实在生长发育过程中呈色期不同,所含有的色素种类及含量也有明显差异。另外,在 5 个呈色期中果实叶绿素含量均显著高于果皮叶绿素含量;叶绿素含量随果实转色呈逐渐降低趋势,绿果期果实和果皮叶绿素含量最高,分别为  $1.060 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.743 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。成熟期果皮类胡萝卜素含量显著高于果实类胡萝卜素含量。类胡萝卜素含量的变化规律与叶绿素呈反向关系,即呈逐渐上升趋势,成熟期含量最高,果实为  $0.115 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,果皮为  $0.234 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。成熟期与黑色着色期果皮花色苷含量显著高于果实花色苷含量;花色苷含量的变化规律与类胡萝卜素相似,呈逐渐上升趋势,成熟期含量最高,果实含量为  $0.942 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,果皮含量为  $3.393 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。成熟期、黑色呈色期和红色呈色期竹节参果皮类黄酮含量显著高于果实类黄酮含量,其变化规律随果实生长发育转色呈指数增长趋势;而果实类黄酮含量合成变化规律呈现先升高后降低再升高的变化趋势,成熟期类黄酮含量最高,果实含量为  $2.065 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,果皮含量为  $7.256 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。成熟期、黑色着色期、红色着色期果皮总酚含量显著高于果实总酚含量;竹节果实与果皮总酚含量变化随生长发育转色呈现先升高后降低再升高的趋势,果皮总酚含量则呈缓慢增长趋势;成熟时期总酚含量最高,果实为  $1.369 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,果皮为  $2.790 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

竹节参果实发育过程中从绿果期进入转色期时,果实中的叶绿素逐渐被破坏,类胡萝卜素开始在果皮显现出来,花色苷也开始逐渐合成使竹节参果实绚丽多彩,郭咏梅<sup>[17]</sup>在对观赏辣椒果实呈色机制探析中,表明色素变化为叶绿素和花青素降解,类胡萝卜素则快速积累;黄春辉等<sup>[18]</sup>表明在黄肉猕猴桃果实发育盛花后 120 d,果肉叶绿素降解,类胡萝卜素与叶绿素含量之比迅速上升,使黄肉猕猴桃呈现黄色;阮美颖等<sup>[19]</sup>发现不同颜色樱桃番茄果实内总叶绿素含量随着果实的成熟而下降,胡萝卜素含量随着果实成熟而上升。随竹

节参果实成熟叶绿素含量与类胡萝卜素含量均表现相同的变化规律。马晓华等<sup>[20]</sup>在研究 6 个紫薇品种白色系、红色系和紫色系,结果表明紫薇花瓣花色苷总含量较高。谢倩等<sup>[21]</sup>在研究辣椒和豇豆中表明,紫辣椒中果皮花色苷含量最高。张晓晓等<sup>[22]</sup>也表明高海拔地区的环境条件更利于蓝莓果实中花色苷的合成和积累。该研究花色苷含量变化结果与之相符。LI 等<sup>[23]</sup>和 KARPPINEN 等<sup>[24]</sup>表明蓝莓着色与黄酮类代谢产物及花青素的生物合成密切相关。周兰<sup>[25]</sup>表明苹果果实类黄酮在果皮中含量较高,总黄酮含量会随着果实的膨大而下降;刘晴晴等<sup>[26]</sup>研究表明紫色桑葚样品中类黄酮、花青素物质含量比白色桑葚多,但是白色桑葚中常见酚酸含量明显高于紫色桑葚。王俊青等<sup>[27]</sup>以红秋葵果实发育转色期为研究对象,进行转录组测序,获得花青素生物合成的相关酶基因,从分子层面揭示红秋葵果实发育转色的机理。该研究中类黄酮含量的变化符合前人研究结果规律,而总酚含量变化则相反,可能是竹节参果实呈色机制不同,生态环境等综合因素所致,值得进一步深入研究。

### 参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.
- [2] 孟艳, 宋雪成, 郝润璇, 等. 土家药复方竹节参片的研究进展[J]. 中国民间疗法, 2019, 27(21): 13-14.
- [3] 鲁文杰, 袁德培, 曾楚华. 竹节参作用的研究进展[J]. 生物技术世界, 2016, 13(5): 236.
- [4] 马玲, 谭德福. 竹节参的研究概况[J]. 时珍国医国药, 2005, 16(12): 1306-1307.
- [5] MORITA T, TANAKA O, KOHDA H. Saponin composition of rhizomes of *Panax japonicus* collected in South Kyushu, Japan, and its significance in oriental traditional medicine[J]. Chemical and Pharmaceutical Bulletin, 1985, 33(9): 3852-3858.
- [6] 陈龙全, 郗红利. 复方竹节参片对大鼠佐剂性关节炎治疗作用的实验研究[J]. 中国实验方剂学杂志, 2003, 9(3): 25-26.
- [7] 陈龙全, 袁德培, 孟卫星, 等. 复方竹节参片镇痛、抗炎作用的实验研究[J]. 江苏中医, 1998, 30(9): 47-48.
- [8] 鄢丰, 杨频. 从竹节三七、肉桂、大黄中提纯的天然活性成分的镇痛作用研究[J]. 中国新医药, 2003, 2(5): 19-20.
- [9] 陈龙全, 陈朝俊. 复方竹节参片抗风湿作用的免疫调节机制研究[J]. 中国医药学报, 2003, 18(4): 247-248.
- [11] 刘家兰, 李德清, 刘红. 竹节人参提取物对实验性心肌缺血的保护作用[J]. 湖北民族学院学报(医学版), 1999, 16(1): 6-8.

- [12] 彭邦瑜,刘毅,邢宏志. 中西医结合治疗Ⅱ型糖尿病 94 例[J]. 湖北中医杂志,2001,23(4):17.
- [13] 陈龙全,袁德培,刘红. 复方竹节参片治疗类风湿性关节炎 30 例临床研究[J]. 中医杂志,2003,44(5):362-363.
- [14] 林先明,刘海华,郭杰,等. 竹节参生物学特性研究[J]. 中国野生植物资源,2007,26(1):5-7,38.
- [15] ZHU F Y, CHEN M X, CHAN W L, et al. SWATH-MS quantitative proteomic investigation of nitrogen starvation in *Arabidopsis* reveals new aspects of plant nitrogen stress responses [J]. Journal of Proteomics, 2018, 187: 161-170.
- [16] WANG Y, GAO S, HE X, et al. Response of total phenols, flavonoids, minerals, and amino acids of four edible fern species to four shading treatments[J]. PeerJ, 2020(8): e8354.
- [17] 郭咏梅. 观赏辣椒果实呈色机制探析[D]. 太谷:山西农业大学,2021.
- [18] 黄春辉,高洁,张晓慧,等. 黄肉猕猴桃果实发育期间色素变化及呈色分析[J]. 果树学报,2014,31(4):617-623.
- [19] 阮美颖,叶青静,周国治,等. 不同颜色樱桃番茄果实成熟过程中色素的变化[J]. 浙江农业科学,2013,54(5):526-528.
- [20] 马晓华,陈春青,叶胜忠,等. 不同花色紫薇花瓣的花色苷化合物组分及含量比较[J]. 亚热带农业研究,2023,19(1):56-63.
- [21] 谢倩,阳晓婷,杨薇,等. 新品种紫辣椒和紫豇豆果皮花色苷含量测定[J]. 江汉大学学报(自然科学版),2020,48(6):72-77.
- [22] 张晓晓,黄午阳,於虹,等. 不同种植地区蓝莓果中花色苷的分布[J]. 中国食品学报,2022,22(10):314-324.
- [23] LI Y, LI H, WANG S, et al. Metabolomic and transcriptomic analyses of the flavonoid biosynthetic pathway in blueberry (*Vaccinium* spp.) [J]. Frontiers in Plant Science, 2023(14): 1082245.
- [24] KARPPINEN K, LAFFERTY D J, ALBERT N W, et al. MYBA and MYBPA transcription factors co-regulate anthocyanin biosynthesis in blue-coloured berries[J]. The New Phytologist, 2021, 232(3): 1350-1367.
- [25] 周兰. 苹果果实发育中类黄酮含量变化及相关基因的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2013.
- [26] 刘晴晴,李勇,张明霞,等. 紫色桑葚和白色桑葚总酚含量、抗氧化能力及代谢指纹图谱差异分析[J]. 江苏农业学报,2022, 38(3):813-820.
- [27] 王俊青,张彦辉,易婉莹等. 基于转录组测序红秋葵果实转色期花青素生物合成相关基因研究[J]. 北方园艺,2022(14):9-16.

## Study on the Physiological Mechanism of Fruit Coloration of *Panax japonicus*

HUANG Xilun<sup>1,2</sup>, TANG Tingting<sup>1,2</sup>, JIN Rui<sup>1,2</sup>, LIANG E<sup>2</sup>, LI Jing<sup>2</sup>, ZHANG Lai<sup>2</sup>

(1. School of Life Science, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550000; 2. Innovation Center for Efficient Agricultural of Guizhou Mountain Characteristic, Anshun University, Anshun, Guizhou 561000)

**Abstract:** Taking *Panax japonicus* fruits from 5 different colored periods as test materials, the effects of chlorophyll, carotenoids, anthocyanins, flavonoids, and total phenols content on the color of *Panax japonicus* fruit during growth and development were studied using an enzyme-linked immunosorbent assay (ELISA), in order to provide reference for revealing the physiological mechanism of color formation in the fruit of *Panax japonicus*. The results showed that the chlorophyll content of fruit and peel decreased gradually with the color change of fruit, and the highest content was  $1.060 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  in the green fruit period. The change rule of carotenoid content was opposite to that of chlorophyll content, and the highest content was  $0.234 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  at the mature period of peel. The change rule of anthocyanin content was similar to that of carotenoid content, which showed a gradual upward trend, and the highest content was  $3.393 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$  at the mature period of peel. The content of total phenol and flavonoids in the fruit increased first, then decreased and then increased again. The content of peel was the highest in the mature period, the total phenol was  $2.790 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ , and the flavonoid was  $7.256 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ . Therefore, when the fruit of *P. japonicus* enters the color-changing period from the green fruit period, the chlorophyll in the fruit was gradually destroyed, the carotenoids begin to appear in the peel, and the anthocyanins begin to synthesize. The total phenol and flavonoid substances had a positive regulatory effect on the color of the fruit of *P. japonicus*.

**Keywords:** *Panax japonicus* fruit; pigment content; anthocyanins; flavonoids; total phenol