

引用格式: 张莹, 杨美英, 李建宾, 等. 山茶杂交后代花青苷变异特征分析[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(5): 994–1002.
ZHANG Ying, YANG Meiyong, LI Jianbin, et al. Analysis of anthocyanin variability characteristics of *Camellia* hybrids[J].
Journal of Zhejiang A&F University, 2025, 42(5): 994–1002.

山茶杂交后代花青苷变异特征分析

张莹¹, 杨美英^{1,2}, 李建宾², 李辛雷¹, 刘信凯³, 钟乃盛³, 黎艳玲³

(1. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400; 2. 云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201; 3. 肇庆棕榈谷花园有限公司, 广东 肇庆 526112)

摘要: 【目的】研究杜鹃红山茶 *Camellia azalea*、越南抱茎茶 *C. amplexicaulis* 及其杂交后代花瓣中主要花青苷的成分, 明确其花色形成的物质基础, 揭示主要花青苷成分与质量分数的变异特征, 为山茶花种质创新及高效利用提供科学依据。【方法】应用 CIE $L^*a^*b^*$ 表色系法进行花色测定, 利用高效液相色谱-二极管阵列检测 (HPLC-DAD) 和超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱 (UPLC-Q-TOF-MS) 联用技术定性定量分析花瓣中的花青苷成分与质量分数, 运用多元线性回归方法明确花色与花青苷之间的关系。【结果】在亲本及其 18 个杂交后代中共检测到 16 种花青苷。杂交后代的花青苷总量基本介于双亲之间; 花青苷矢车菊素-3-*O*-[6-*O*-(*E*)-*p*-香豆酰]-葡萄糖苷 (Cy3GEpC)、矢车菊素-3-*O*-[2-*O*-木糖基-6-*O*-(*E*)-*p*-香豆酰]-葡萄糖苷 (Cy3GEpCX) 和矢车菊素-3-*O*-[6-*O*-(*E*)-*p*-香豆酰]-半乳糖苷 (Cy3GaEpC) 变异较大, 其质量分数大部分高于亲本, 其他花青苷的质量分数基本介于双亲之间。【结论】杂交后代中含半乳糖苷和 2-*O*-木糖基的花青苷成分主要来源于杜鹃红山茶, 含葡萄糖苷及不含 2-*O*-木糖基的花青苷成分来源于双亲。矢车菊素-3-*O*-[2-*O*-木糖基-6-*O*-(*E*)-*p*-香豆酰]-半乳糖苷 (Cy3GaEpCX) 和矢车菊素-3-*O*-半乳糖苷 (Cy3Ga) 是影响杜鹃红山茶与越南抱茎茶杂交后代花色的主要花青苷, 与花色变异显著相关。图 2 表 3 参 37

关键词: 杜鹃红山茶; 越南抱茎茶; 杂交后代; 花青苷; 变异

中图分类号: S68 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)05-0994-09

Analysis of anthocyanin variability characteristics of *Camellia* hybrids

ZHANG Ying¹, YANG Meiyong^{1,2}, LI Jianbin², LI Xinlei¹, LIU Xinkai³, ZHONG Naisheng³, LI Yanling³

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China;
2. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, Yunnan, China;
3. Zhaoqing Zonglü Valley Garden Co., Ltd., Zhaoqing 526112, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] The object of this study is to determine anthocyanin components in petals from *Camellia azalea*, *C. amplexicaulis* and their hybrids. The material basis of their color formation is clarified and the variability characteristics of main anthocyanin components and contents are revealed, which will provide a basis for the germplasm innovation and their efficient utilization. [Method] Flower colors of *C. azalea*, *C. amplexicaulis* and their hybrids were measured by CIE $L^*a^*b^*$ scale. Anthocyanin components and contents of *C. azalea*, *C. amplexicaulis* and their hybrids were measured by high-performance liquid chromatography coupled with diode array detection (HPLC-DAD) and ultra-performance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-Q-TOF-MS). The relationship between the variation of flower colors and anthocyanin components was explored by multiple liner regression analyses. [Result] 16 anthocyanin components were detected in *C. azalea*, *C. amplexicaulis* and 18 hybrids. The total anthocyanin in hybrids was

收稿日期: 2025-08-20; 修回日期: 2025-09-19

基金项目: 浙江省农业 (花卉新品种选育) 新品种选育重大科技专项 (2021C02071-2)

作者简介: 张莹 (ORCID: 0009-0002-0021-5186), 助理研究员, 从事观赏植物育种与应用研究。E-mail: lingchenzy@163.com。通信作者: 李辛雷 (ORCID: 0000-0003-3694-4102), 研究员, 博士, 从事观赏植物遗传育种研究。E-mail: lixinlei2020@163.com

between the parents. The variation of Cy3GaEpC、Cy3GEpCX and Cy3GEpC in hybrids was large, and most of their contents were higher than that of parents, and the rest components were basically between parents. [Conclusion] Anthocyanins with galactoside in hybrids entirely came from *C. azalea*, and anthocyanins with 2-*O*-xylosyl mainly came from *C. azalea*. Anthocyanins with glucoside and without 2-*O*-xylosyl came from *C. azalea* and *C. amplexicaulis*. Cy3GaEpCX and Cy3Ga were the main anthocyanins affecting the hybrids flower color, and had significant correlation with color variation. [Ch, 2 fig. 3 tab. 37 ref.]

Key words: *Camellia azalea*; *C. amplexicaulis*; hybrids; anthocyanins; variation

花色是植物观赏价值的重要性状之一, 呈色主要取决于细胞内含有的色素^[1]。山茶 *Camellia* 的花色主要有红色、粉色和复色^[2], 其丰富的花色主要由花瓣中花青苷决定。目前山茶中已鉴定出 25 种花青苷^[3]。LI 等^[4-5] 利用核磁共振、质谱和紫外可见光谱等技术在滇山茶 *Camellia reticulata* 中鉴定出 5 种含 2-*O*-木糖基及相应不含 2-*O*-木糖基的花青苷, 在滇山茶 ‘大理茶’ *C. reticulata* ‘Dalicha’ 中鉴定出 10 种含 2-*O*-木糖基的花青苷, 在香港红山茶 *C. hongkongensis* 中鉴定出 8 种矢车菊素和 4 种飞燕草素花青苷。李辛雷等^[6-7] 在山茶品种中鉴定出 7 种矢车菊素花青苷, 发现随着山茶品种花色加深, 花瓣中主要花青苷的含量也在增加。山茶花青苷的研究为其花色形成机制及花色育种提供了科学依据。

杜鹃红山茶 *C. azalea* 和越南抱茎茶 *C. amplexicaulis* 花色艳丽, 花期较长, 具有较高的观赏价值, 是四季茶花新品种培育的优良亲本材料^[8]。肇庆棕榈谷花园有限公司以杜鹃红山茶为母本, 以越南抱茎茶为父本进行杂交, 获得杂交后代进而培育出四季茶花新品种^[9]。目前, 有关杜鹃红山茶的研究集中于生理特性、栽培、繁殖等方面^[10-11], 而越南抱茎茶主要是对其光合特性^[12]、无性繁殖等^[13]进行了研究。花青苷研究方面, 李辛雷等^[14] 通过特征颜色反应证明了杜鹃红山茶花瓣的红色源于花色素及其苷; 杨美英等^[15] 明确了杜鹃红山茶与山茶品种 ‘媚丽’ *C. japonica* ‘Meili’ 杂交后代花青苷的变化。本研究利用超高效液相色谱-质谱联用技术, 对杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其 18 个杂交后代花朵中花青苷的成分与质量分数进行分析, 研究其花色与花青苷的关系, 明确其花青苷遗传变异特征, 为山茶种质创新及高效利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料为母本杜鹃红山茶 (D)、父本越南抱茎茶 (Y) 及其 18 个杂交后代 (DY), 均来源于肇庆棕榈谷花园有限公司。选取生长环境相同、长势一致的植株各 5 株, 每株随机采集盛开花朵 3 朵, 用于花色测定及花青苷定性定量分析。

1.2 花色测定

从每份新鲜花朵中随机选取 5 朵, 应用 NF555 色差计对其外轮花瓣的上表皮中央部分进行花色测定。按照国际照明委员会 (CIE) 制定的 CIE $L^*a^*b^*$ 表色系法, 利用色差计对花瓣的明度 (L^*)、色相 (a^* 与 b^*)、彩度 (C^*) 和色调角 (h) 等指标进行数字化测定。 L^* 表示明暗变化程度; a^* 表示红绿色变化程度, a^* 为正值, 数值越大, 花色越红; b^* 表示黄蓝色变化程度, b^* 由负到正, 蓝色减退黄色增强; C^* 描述色彩的鲜艳程度, C^* 越大, 颜色越深。 h 表示颜色色调, 红色区域分布在 0° 附近, 逆时针旋转经过橙色到 90° , 其附近为黄色区域。样品测定重复 5 次, 取平均值^[16-17]。

1.3 花青苷定性分析

称取 2 g 新鲜花瓣, 液氮研磨成粉末, 加入 $V(\text{三氟醋酸}):V(\text{甲酸}):V(\text{水}):V(\text{甲醇})=1:2:27:70$ 的提取液 5 mL, 摇匀, 封口, 常温下浸提 24 h。使用 $0.22\ \mu\text{m}$ 的滤膜对浸提液进行过滤, 滤液转入 2 mL 棕色样品瓶中密封, -20°C 冰箱中保存备用^[18]。

利用高效液相色谱-光电二极管阵列检测 (HPLC-DAD) 和超高效液相色谱-四级杆-飞行时间质谱联用技术 (UPLC-Q-TOF-MS) 对花瓣中花青苷成分进行定性定量分析, 参照杨美英等^[15] 的方法进行流动相配制及梯度洗脱。

1.4 花青苷定量分析

利用 HPLC-DAD 方法，在 525 nm 处检测花瓣中花青苷。标准品矢车菊素-3-*O*- β -葡萄糖苷 (Cy3G) 和矢车菊素-3-*O*- β -半乳糖苷 (Cy3Ga)，采用标准品半定量法计算各样品中花青苷质量分数^[19]，重复 3 次。应用 SPSS 17.0 进行多元逐步回归分析。

2 结果与分析

2.1 杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代花色变异

如表 1 所示：杜鹃红山茶、越南抱茎茶的 L^* 分别为 44.65、50.17，9 个杂交后代 L^* 大于越南抱茎茶，其余均在 44.65 和 50.17 之间。除 DY35 外，杂交后代 a^* 均在双亲的 47.92 和 57.81 之间。13 个杂交后代 b^* 在双亲的 8.48 和 19.78 之间。16 个杂交后代 C^* 在双亲的 48.67 和 61.10 之间。18 个杂交后代 h 均小于杜鹃红山茶，分布在红色区域的 0° 和 20° 之间。说明杂交后代花色变异总体上介于母本杜鹃红山茶与父本越南抱茎茶之间。

表 1 杜鹃红山茶与越南抱茎茶及其杂交后代花色数据

Table 1 Data of flower colors in *C. azalea*, *C. amplexicaulis* and their hybrids

样品	L^*	a^*	b^*	C^*	h
D	44.65±1.53	57.81±0.35	19.78±0.76	61.10±0.56	18.88±0.57
Y	50.17±0.42	47.92±0.62	8.48±0.99	48.67±0.44	10.05±1.26
DY9	46.63±0.41	54.49±0.87	14.51±1.01	56.40±1.06	14.90±0.83
DY12	46.63±0.79	56.26±0.31	16.26±0.88	58.57±0.45	16.12±0.80
DY31	56.21±1.33	48.14±0.77	4.62±0.57	48.37±0.74	5.49±0.73
DY34	47.13±1.06	56.17±1.55	17.30±0.42	58.78±1.47	17.13±0.62
DY35	56.32±1.48	47.86±1.24	3.73±0.93	48.01±1.30	4.43±1.01
DY41	46.14±2.86	53.87±16.6	12.24±5.21	55.36±16.98	12.58±5.01
DY43	50.83±1.77	51.57±1.21	8.40±1.08	52.26±1.31	9.23±1.05
DY44	45.77±1.89	50.57±1.87	14.60±0.50	52.64±1.91	16.11±0.41
DY45	45.12±1.38	51.56±1.64	14.27±0.78	53.50±1.79	15.46±0.34
DY46	47.14±1.64	53.75±0.37	15.27±0.07	55.88±0.36	15.85±0.05
DY47	50.97±1.70	54.72±0.74	8.55±1.65	55.40±0.92	8.86±1.61
DY49	57.07±0.41	50.57±0.49	9.07±0.23	51.38±0.50	10.17±0.21
DY51	54.13±1.36	48.62±1.08	4.03±0.65	48.79±1.03	4.75±0.87
DY52	49.45±2.29	51.65±0.70	8.78±0.17	52.39±0.71	9.65±0.08
DY53	55.64±0.35	51.97±1.43	9.82±0.42	52.89±1.48	10.7±0.16
DY56	54.04±0.82	52.46±1.02	6.26±0.88	52.84±1.10	6.79±0.85
DY63	52.86±2.04	52.67±1.03	10.69±1.24	53.76±1.25	11.45±1.09
DY64	50.17±1.26	55.01±1.12	9.07±1.24	55.76±1.27	9.34±1.11

说明：数值为平均值±标准误。D. 杜鹃红山茶，Y. 越南抱茎茶，DY. 二者的杂交后代。

2.2 杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代花青苷鉴定

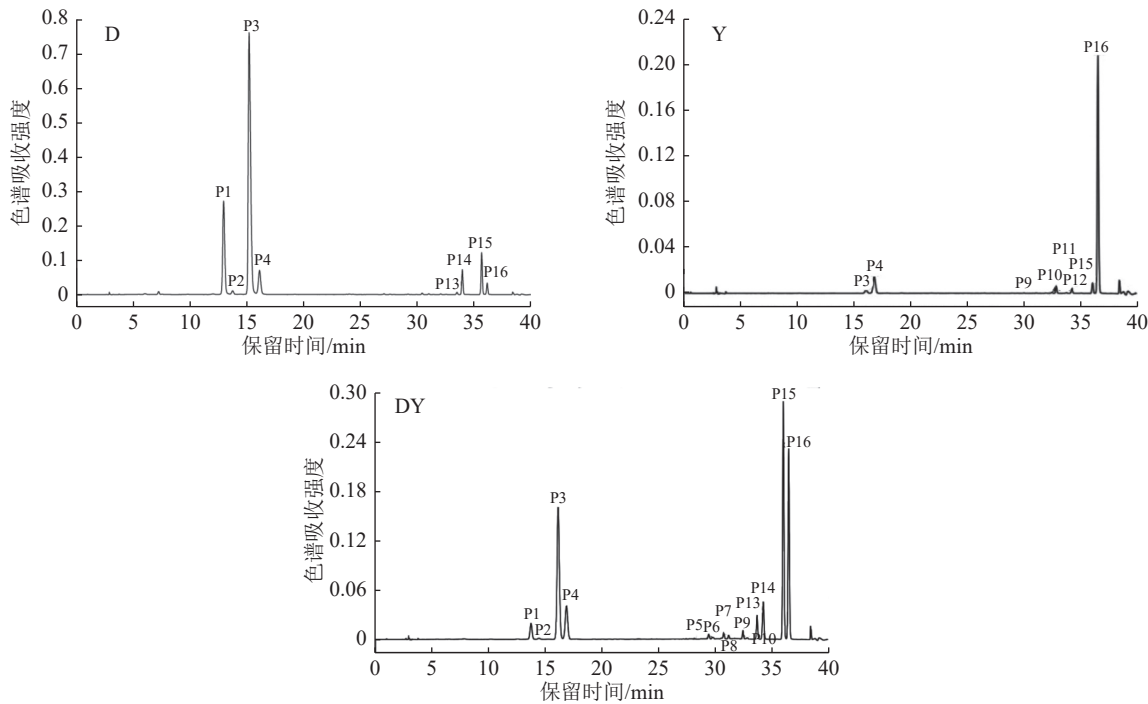
根据 UPLC-Q-TOF-MS 图谱及紫外-可见光谱共检测到杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代花瓣中 16 种花青苷成分 (图 1~2 和表 2)。根据矢车菊素 (Cy) 糖苷在 513~520 nm 有特征吸收峰及碎片离子 m/z 287，可推测 16 种花青苷均为 Cy 型花青苷^[20]；由于花青苷在 440 nm 与可见光最大吸收波长 ($\lambda_{\text{vis, max}}$) 2 处的吸光度之比为 31%~34%，因此确定这 16 种花青苷均为 3-*O*-糖苷类型^[19, 21]。

峰 P1 和 P3 质谱数据为分子离子 m/z 581，碎片离子 m/z 449、287， m/z 581 到 m/z 449 裂解释放 132 u， m/z 449 到 m/z 287 裂解释放 162 u，根据山茶相关文献 [4~5] 推定峰 P1 为矢车菊素-3-*O*-(2-*O*-木糖基)-半乳糖苷 (Cy3GaX)，峰 P3 为矢车菊素-3-*O*-(2-*O*-木糖基)-葡萄糖苷 (Cy3GX)。峰 P2 和 P4 的质谱数据相同，均含有分子离子 m/z 449 和碎片离子 m/z 287，根据峰 P2 和峰 P4 与标准品 Cy3Ga 和 Cy3G 的共洗脱



图 1 杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其代表性杂交后代

Figure 1 *C. azalea*, *C. amplexicaulis* and their representative hybrids



D. 杜鹃红山茶; Y. 越南抱茎茶; DY. 杜鹃红山茶与越南抱茎茶杂交后代。

图 2 花青苷成分 HPLC 图谱

Figure 2 HPLC chromatogram of anthocyanin components

表 2 杜鹃红山茶与越南抱茎茶杂交后代花青苷的紫外-可见吸收光谱与质谱数据

Table 2 Chromatographic and spectral data of anthocyanins in hybrids between *C. azalea* and *C. amplexicaulis*

色谱峰	保留时间/min	吸收波长(λ)/nm	$D(440)/D(\lambda_{vis, max})/\%$	分子离子 m/z	碎片离子 m/z	化合物
P1	13.72	281, 516	32	581	449, 287	Cy3GaX
P2	14.41	282, 516	31	449	287	Cy3Ga
P3	16.12	282, 516	33	581	449, 287	Cy3GX
P4	16.85	282, 514	32	449	287	Cy3G
P5	39.41	281, 315, 516	33	611	449, 287	Cy3GaECaf
P6	29.78	282, 315, 517	33	743	611, 449, 287	Cy3GaECafX
P7	30.74	284, 311, 515	34	727	595, 449, 287	Gy3GaZpCX
P8	31.17	285, 310, 516	34	595	449, 287	Gy3GaZpC
P9	32.43	283, 315, 515	33	743	611, 449, 287	Cy3GECafX
P10	32.82	283, 316, 515	33	611	449, 287	Cy3GECaf
P11	33.73	283, 314, 516	34	727	595, 449, 287	Cy3GZpCX
P12	34.21	283, 315, 516	34	595	449, 287	Cy3GZpC
P13	33.68	283, 313, 516	34	595	449, 287	Cy3GaEpC
P14	34.22	282, 312, 516	33	727	595, 449, 287	Cy3GaEpCX
P15	35.99	284, 314, 514	34	727	595, 449, 287	Cy3GEpCX
P16	36.47	283, 313, 515	34	595	449, 287	Cy3GEpC

特性,以及花青素半乳糖苷洗脱时间小于花青素葡萄糖苷的特性^[22],可判定峰 P2 为 Cy3Ga,峰 P4 为 Cy3G^[23-24]。

峰 P5 和 P10 质谱数据为分子离子 m/z 611,碎片离子 m/z 449、287, m/z 611 到 m/z 449 裂解释放 162 u, m/z 449 到 m/z 287 裂解释放 162 u,它们与山茶‘赤丹’*C. japonica* ‘Chidan’等品种中特定花青苷的裂解特征相同^[6-7],因此推测峰 P5 为矢车菊素-3-*O*-[6-*O*-(*E*)-咖啡酰]-半乳糖苷 (Cy3GaECaf),峰 P10 为矢车菊素-3-*O*-[6-*O*-(*E*)-咖啡酰]-葡萄糖苷 (Cy3GECaf)。峰 P6 和 P9 质谱数据为分子离子 m/z 743,碎片离子 m/z 611、449、287, m/z 743 到 m/z 611 裂解释放 132 u, m/z 611 到 m/z 449 裂解释放 162 u, m/z 449 到 m/z 287 裂解释放 162 u,参考 LI 等^[4-5]的研究,峰 P6 为矢车菊素-3-*O*-[2-*O*-木糖基-6-*O*-(*E*)-咖啡酰]-半乳糖苷 (Cy3GaECafX),峰 P9 为矢车菊素-3-*O*-[2-*O*-木糖基-6-*O*-(*E*)-咖啡酰]-葡萄糖苷 (Cy3GECafX)。

峰 P7、P11、P14 和 P15 质谱数据为分子离子 m/z 727 和碎片离子 m/z 595、449、287, m/z 727 到 m/z 595 裂解释放 132 u, m/z 595 到 m/z 449 裂解释放 146 u, m/z 449 到 m/z 287 裂解释放 162 u,参考 LI 等^[4-5]的研究,推定峰 P7 为矢车菊素-3-*O*-[2-*O*-木糖基-6-*O*-(*Z*)-*p*-香豆酰]-半乳糖苷 (Cy3GaZpCX),峰 P11 为矢车菊素-3-*O*-[2-*O*-木糖基-6-*O*-(*Z*)-咖啡酰]-葡萄糖苷 (Cy3GZpCX),峰 P14 为矢车菊素-3-*O*-[2-*O*-木糖基-6-*O*-(*E*)-*p*-香豆酰]-半乳糖苷 (Cy3GaEpCX),峰 P15 为矢车菊素-3-*O*-[2-*O*-木糖基-6-*O*-(*E*)-*p*-香豆酰]-葡萄糖苷 (Cy3GEpCX)。

峰 P8、P12、P13 和 P16 质谱数据为分子离子 m/z 595 和碎片离子 m/z 449、287, m/z 595 到 m/z 449 裂解释放 146 u, m/z 449 到 m/z 287 裂解释放 162 u;结合紫外吸光度 $D(440)/D(\lambda_{\text{vis,max}})$ 为 34% 及在 310、313 和 315 nm 波长下肩峰的出现,推测其为 Cy-3-*O*-芳香酸酰化型糖苷^[25];由于顺式花青苷洗脱时间小于反式花青苷及花青素半乳糖苷洗脱时间小于花青素葡萄糖苷的特性^[26-27],推测峰 P8 为矢车菊素-3-*O*-[6-*O*-(*Z*)-*p*-香豆酰]-半乳糖苷 (Cy3GaZpC),峰 P12 为矢车菊素-3-*O*-[6-*O*-(*Z*)-*p*-香豆酰]-葡萄糖苷 (Cy3GZpC),峰 P13 为矢车菊素-3-*O*-[6-*O*-(*E*)-*p*-香豆酰]-半乳糖苷 (Cy3GaEpC),峰 P16 为矢车菊素-3-*O*-[6-*O*-(*E*)-*p*-香豆酰]-葡萄糖苷 (Cy3GEpC)。

2.3 杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代花青苷变异特征

在杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其 18 个杂交后代中共检测到 16 种花青苷 (图 2 和表 2),杜鹃红山茶中质量分数较高的花青苷有 8 种 (表 3),其他花青苷质量分数均低于 $1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。在越南抱茎茶中检测到 8 种含葡萄糖苷的花青苷,未检测到含半乳糖苷的花青苷 (图 2),其中 Cy3GX、Cy3G、Cy3GECafX、Cy3GECaf、Cy3GEpCX 和 Cy3GEpC 这 6 种花青苷与杜鹃红山茶中花青苷相同, Cy3GZpCX 和 Cy3GZpC 仅在越南抱茎茶中发现;越南抱茎茶中 Cy3G、Cy3GX、Cy3GEpC 和 Cy3GEpCX 的质量分数较高,其余均较低。在杜鹃红山茶与越南抱茎茶 18 个杂交后代花瓣中检测到 7~8 种质量分数较高的花青苷,其余成分质量分数均较低或未被检测到。

杜鹃红山茶主要花青苷总量为 $735.81 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,越南抱茎茶为 $81.37 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,前者为后者的 9.04 倍。18 个杂交后代中,仅 DY41 的主要花青苷总量 ($754.47 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$) 高于杜鹃红山茶;其余后代花青苷总量均介于双亲之间,其中 DY51 的花青苷总量最低,约为越南抱茎茶的 1.74 倍。杜鹃红山茶中质量分数较高的为含 2-*O*-木糖基的花青苷 Cy3GX 和 Cy3GaX,分别为 466.23 、 $141.54 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而越南抱茎茶中质量分数较高的为不含 2-*O*-木糖基的花青苷 Cy3GEpC、Cy3G,分别为 68.73 、 $8.26 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。杂交后代中 Cy3GaX 等 4 种花青苷来源于杜鹃红山茶,其中 Cy3GaX、Cy3Ga 质量分数远低于杜鹃红山茶, Cy3GaEpC 的质量分数高于杜鹃红山茶 (除个别杂交后代外)。在杂交后代的主要花青苷中,除 DY56 的 Cy3G 质量分数高于杜鹃红山茶外,其余杂交后代的 Cy3GX、Cy3G 质量分数均介于双亲之间;13 个杂交后代的 Cy3GEpCX 质量分数高于杜鹃红山茶,9 个杂交后代 Cy3GEpC 质量分数高于越南抱茎茶。

根据花青苷的结构将 8 种主要花青苷分为含 2-*O*-木糖基的花青苷和不含 2-*O*-木糖基的花青苷,含 2-*O*-木糖基的花青苷包括 Cy3GaX、Cy3GX、Cy3GaEpCX 和 Cy3GEpCX,不含 2-*O*-木糖基的花青苷为相应的 Cy3Ga、Cy3G、Cy3GaEpC 和 Cy3GEpC。杜鹃红山茶花瓣中含 2-*O*-木糖基的花青苷总量为 $671.21 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,为不含 2-*O*-木糖基花青苷的 10.39 倍,而越南抱茎茶中不含 2-*O*-木糖基的花青苷总量是含 2-*O*-木糖基花青苷的 17.58 倍,18 个杂交后代中含 2-*O*-木糖基的花青苷总量均高于不含 2-*O*-木糖基的花青

表 3 杜鹃红山茶与越南抱茎茶杂交后代主要花青苷质量分数

样品	质量分数/(μg·g ⁻¹)								
	Cy3GaX	Cy3Ga	Cy3GX	Cy3G	Cy3GaEpC	Cy3GaEpCX	Cy3GEpCX	Cy3GEpC	总量
D	141.54±0.47	5.75±0.00	466.23±1.57	44.88±0.16	2.07±0.01	23.38±0.07	40.05±0.12	11.9±0.03	735.81±2.43
Y	—	—	1.50±0.01	8.26±0.33	—	—	2.88±0.04	68.73±2.47	81.37±2.17
DY9	14.29±0.33	—	124.47±4.00	10.14±0.36	5.28±0.09	24.83±0.71	135.63±4.31	25.72±1.34	340.38±11.15
DY12	5.99±0.04	—	180.81±3.05	10.16±0.03	17.57±0.32	16.88±0.53	149.3±3.92	40.02±1.83	420.72±9.65
DY31	9.52±0.14	—	187.92±2.58	11.96±0.25	10.75±0.16	22.26±0.32	170.97±2.52	69.00±1.25	482.38±7.22
DY34	9.51±0.15	0.65±0.03	89.98±2.35	24.42±0.69	8.89±0.21	16.81±0.59	90.52±2.90	71.49±3.81	312.26±10.72
DY35	6.31±0.08	—	251.83±2.74	42.14±0.46	0.70±0.02	3.88±0.06	39.58±0.37	15.35±0.09	359.79±3.78
DY41	13.38±0.52	—	382.97±14.91	36.78±1.27	2.12±0.08	23.57±0.91	189.78±7.08	105.88±3.56	754.47±28.32
DY43	3.18±0.07	—	114.04±3.07	8.51±0.10	17.36±0.46	16.31±0.41	166.08±4.57	93.51±2.22	419.01±10.89
DY44	7.87±0.15	1.66±0.05	83.32±1.93	41.60±1.16	2.83±0.06	11.90±0.39	65.32±2.04	92.14±4.71	306.65±10.48
DY45	5.21±0.09	0.56±0.02	118.98±2.60	31.47±0.72	10.28±0.27	15.40±0.55	140.4±4.76	102.39±5.49	424.70±14.50
DY46	7.47±0.00	0.87±0.01	101.58±0.86	32.60±0.33	5.99±0.05	11.43±0.22	67.15±1.14	72.97±2.61	300.05±5.22
DY47	9.39±0.28	—	275.28±9.31	24.70±0.63	3.03±0.11	18.16±0.58	135.44±4.49	119.67±3.45	585.67±18.84
DY49	5.99±0.23	—	100.55±1.38	10.39±0.09	5.18±0.08	6.75±0.16	57.46±1.29	26.06±1.05	212.37±4.26
DY51	1.66±0.04	—	66.88±0.92	8.65±0.05	6.91±0.16	4.81±0.13	36.82±1.09	16.20±0.78	141.92±3.16
DY52	9.42±0.28	0.36±0.04	159.55±3.79	33.28±1.04	2.78±0.05	2.90±0.09	18.34±0.53	7.42±0.36	234.06±6.10
DY53	3.17±0.13	—	122.24±2.93	19.79±0.62	1.77±0.03	1.42±0.04	11.20±0.30	2.86±0.12	162.45±4.17
DY56	7.69±0.14	0.28±0.07	133.01±2.40	51.66±1.16	1.71±0.03	4.40±0.13	8.31±0.23	13.72±0.62	220.78±4.79
DY63	2.46±0.06	0.23±0.01	123.42±2.64	32.72±0.88	6.14±0.11	7.79±0.23	86.22±2.41	46.55±2.15	305.53±8.46
DY64	3.65±0.03	—	210.03±0.44	30.31±0.07	3.41±0.00	10.82±0.01	153.25±0.19	106.55±0.34	518.02±0.37

说明：—表示未鉴定出。数值为平均值±标准误。D. 杜鹃红山茶，Y. 越南抱茎茶，DY. 二者的杂交后代。

苷。含葡萄糖苷的花青苷有 Cy3G、Cy3GX、Cy3GEpCX 和 Cy3GEpC，含半乳糖苷的花青苷为 Cy3GaX、Cy3Ga、Cy3GaEpCX 和 Cy3GaEpC。杜鹃红山茶中含葡萄糖苷的花青苷总量为 563.07 μg·g⁻¹，为含半乳糖苷花青苷的 3.26 倍，越南抱茎茶中未检测到含半乳糖苷的花青苷；18 个杂交后代含葡萄糖苷的花青苷总量均高于含半乳糖苷的花青苷。

2.4 杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代花色变异与花青苷的关系

以亲本及其 18 个杂交后代中的 8 种主要花青苷 Cy3GaX、Cy3Ga、Cy3GX、Cy3G、Cy3GaEpC、Cy3GaEpCX、Cy3GEpC 和 Cy3GEpCX 为自变量，分别对应 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 、 x_5 、 x_6 、 x_7 、 x_8 ，以 5 个花色指标 L^* 、 a^* 、 b^* 、 C^* 和 h 为因变量，进行多元逐步回归分析，研究杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代花色与花青苷关系。回归方程式 $L^*=-0.299x_6+53.985$ ， $r=0.560$ ， $P=0.010$ ； $a^*=0.210x_6+49.841$ ， $r=0.565$ ， $P=0.009$ ； $b^*=2.051x_2+9.812$ ， $r=0.566$ ， $P=0.009$ ； $C^*=0.275x_6+50.329$ ， $r=0.591$ ， $P=0.006$ 。回归方程的相关系数 r 及显著性 P 表明：杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代 L^* 与花青苷之间显著相关 ($P<0.05$)，其中 a^* 与 b^* 、 C^* 与花青苷极显著相关 ($P<0.01$)。

回归方程表明：Cy3GaEpCX 与 L^* 呈负相关， L^* 随着 Cy3GaEpCX 的质量分数增加而减小，表现为花色亮度降低。Cy3GaEpCX 与 a^* 呈正相关， a^* 随着 Cy3GaEpCX 的质量分数增加而增大，当 a^* 较大时 ($a^*>30$)， b^* 越大，花色越红^[19]；Cy3Ga 与 b^* 呈正相关， b^* 随 Cy3Ga 的质量分数增加而增大， b^* 越大花色越红。Cy3GaEpCX 与 C^* 呈正相关，随着 Cy3GaEpCX 质量分数的增加，花瓣由浅色变为深色。因此，Cy3GaEpCX 和 Cy3Ga 是影响杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代花色的主要成分，这 2 种主要花青苷的积累使花色从浅粉渐变为深红。

3 讨论

植物花色色素主要包括叶绿素、类黄酮、类胡萝卜素和生物碱^[28]，山茶花色色素成分主要为类黄

酮,其中黄色系山茶花主要为黄酮醇类^[29],红色系山茶花为花青素类^[30]。花青素作为天然的水溶性色素广泛存在于植物体内,主要分为6种,即矢车菊素、飞燕草素、天竺葵素、芍药素、矮牵牛素和锦葵色素^[31]。花青素种类及含量是植物花朵呈现丰富花色的重要原因,如天竺葵素通常显砖红色,矢车菊素通常显红色,飞燕草素通常显蓝紫色^[32]。植物花瓣中可能含一种或多种花青素,如换锦花 *Lycoris sprengeri* 花中含有矢车菊素、天竺葵素和飞燕草素^[33],山茶花中含有矢车菊素和飞燕草素^[4,34]。

研究植物花色遗传规律有助于了解杂交后代的选育过程,对提高杂交后代品质以及培育不同色系的新品种有重要意义。刘玉琪等^[35]发现夏蜡梅 *Sinicalycanthus chinensis*、光叶红蜡梅 *Calycanthus floridus* var. *glaucus* 及其杂交后代花瓣花色表型与代谢物质存在明显差异,3种植物之间主要以类黄酮为主的差异代谢物。本研究从杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代中共检测到16种矢车菊素类花青苷。杂交后代中含半乳糖苷的花青苷 Cy3GaX、Cy3Ga、Cy3GaEpC、Cy3GaEpCX 未在越南抱茎茶中检测到,表明其全部来源于杜鹃红山茶,而含葡萄糖苷的花青苷则来源于双亲。杂交后代中含2-O-木糖基的花青苷总量高于不含2-O-木糖基的花青苷,这与杜鹃红山茶和山茶‘媚丽’杂交后代的研究结果一致^[15]。越南抱茎茶中不含2-O-木糖基的花青苷总量是含2-O-木糖基花青苷的17.58倍,且含2-O-木糖基的花青苷中质量分数最高的 Cy3GEpCX 仅为 $2.88 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,远低于杜鹃红山茶中的 Cy3GEpCX ($40.05 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),表明杂交后代中含2-O-木糖基的花青苷主要来源于杜鹃红山茶,而不含2-O-木糖基的花青苷来源于双亲,具体情况有待进一步研究。

花青苷为山茶花色形成的物质基础,总花青苷和主要花青苷质量分数决定其花色,花色随花青苷质量分数的增加而加深^[36-37]。本研究中杜鹃红山茶主要花青苷总量为越南抱茎茶的9.04倍,杂交后代花青苷总量总体上介于双亲之间;杜鹃红山茶花鲜红色,越南抱茎茶花紫红色,杂交后代花色深浅不同,从浅粉红色、红色至深红色,表明花色变化与花青苷质量分数相关。多元逐步回归结果表明: Cy3GaEpCX 与 L^* 显著负相关,与 a^* 和 C^* 极显著正相关, Cy3GaEpCX 质量分数升高,花色趋向于更红更深; Cy3Ga 与 b^* 极显著正相关, Cy3Ga 的积累也使花色趋向于红色。

4 结论

本研究从杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代的花瓣中共鉴定出16种花青苷,在越南抱茎茶中首次检测到8种含葡萄糖苷的花青苷。杜鹃红山茶主要花青苷总量高于越南抱茎茶,杂交后代花青苷总量基本介于双亲之间, Cy3GaEpCX 和 Cy3Ga 是决定杜鹃红山茶、越南抱茎茶及其杂交后代花色的主要花青苷,其质量分数的差异影响花瓣的红色程度。

5 参考文献

- [1] GROTEWOLD E. The genetics and biochemistry of floral pigments [J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2006, **57**: 761–780.
- [2] 高继银,陈邵云,徐碧玉.世界名贵茶花[M].杭州:浙江科学技术出版社,1998:177.
GAO Jiying, CHEN Shaoyun, XU Biyu. *The World's Best Camellia Cultivars* [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Publishing House, 1998: 177.
- [3] 陈发棣,蒋甲福.观赏植物遗传育种学[M].北京:科学出版社,2023:309–311.
CHEN Fadi, JIANG Jiafu. *Genetics and Breeding of Ornamental Plants* [M]. Beijing: Science Press, 2023: 309–311.
- [4] LI Jianbin, HASHIMOTO F, SHIMIZU K, et al. Anthocyanins from red flowers of *Camellia reticulata* Lindl. [J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2007, **71**(11): 2833–2836.
- [5] LI Jianbin, HASHIMOTO F, SHIMIZU K, et al. A new acylated anthocyanin from the red flowers of *Camellia hongkongensis* and characterization of anthocyanins in the section *Camellia* species [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2009, **51**(6): 545–552.
- [6] 李辛雷,王佳童,孙振元,等.山茶‘赤丹’及其芽变品种花瓣中花青苷成分与花色的关系[J].林业科学,2019, **55**(10): 19–26.
LI Xinlei, WANG Jiatong, SUN Zhenyuan, et al. Anthocyanin components and their relationship with flower colors in petals

- of *Camellia japonica* 'Chidan' and its bud mutation cultivars [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2019, **55**(10): 19–26.
- [7] 李辛雷, 王洁, 殷恒福, 等. 山茶品种花色变异与花青苷的关系[J]. 生态与农村环境学报, 2019, **35**(10): 1307–1313.
LI Xinlei, WANG Jie, YIN Hengfu, *et al.* Variation of flower colors and their relationship with anthocyanins in cultivars of *Camellia japonica* [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, **35**(10): 1307–1313.
- [8] 高继银, 帕克斯, 杜跃强. 山茶属植物主要原种彩色图集[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2005: 34–35.
GAO Jiyin, PARKS C R, DU Yueqiang. *Collected Species of the Genus Camellia an Illustrated Outline*[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Thechnology Publishing House, 2005: 34–35.
- [9] 高继银, 刘信凯, 赵强民. 四季茶花杂交新品种彩色图集[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2016.
GAO Jiyin, LIU Xinkai, ZHAO Qiangmin. *Illustrations of the New Camellia Hybrids that Bloom Year-round*[M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Thechnology Publishing House, 2016.
- [10] 张方秋, 杨会肖, 徐斌, 等. 杜鹃红山茶的光响应特性及其最适模型筛选[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(10): 1599–1603.
ZHANG Fangqiu, YANG Huixiao, XU Bin, *et al.* Photosynthesis light response characteristics of *Camellia azalea* and fitting of application models [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, **24**(10): 1599–1603.
- [11] 李先民, 卜朝阳, 李春牛, 等. 杜鹃红山茶愈伤组织诱导条件的优化[J]. 江苏农业科学, 2021, **49**(23): 61–65.
LI Xianmin, BU Zhaoyang, LI Chunniu, *et al.* Optimization of callus induction conditions of *Camellia azalea* [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2021, **49**(23): 61–65.
- [12] 邓涛, 邹伶俐, 王燕, 等. 越南抱茎茶林下光合特性研究[J]. 江苏农业科学, 2013, **41**(5): 143–145.
DENG Tao, ZOU Lingli, WANG Yan, *et al.* Study on *Camellia amplexicaulis* photosynthetic characteristics under forest [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, **41**(5): 143–145.
- [13] 韦晓娟, 廖健明, 梁建昆, 等. 不同基质及生长调节剂对越南抱茎茶扦插生根的影响[J]. 北方园艺, 2015(1): 68–71.
WEI Xiaojuan, LIAO Jianming, LIANG Jiankun, *et al.* Effect of different substrate and growth regulator on the growth of cutting *Camellia amplexicaulis* (Pitard) Cohen Stuart [J]. *Northern Horticulture*, 2015(1): 68–71.
- [14] 李辛雷, 李纪元, 范正琪. 杜鹃红山茶花色色素提取及其性质[J]. 林业科学, 2011, **47**(1): 79–84.
LI Xinlei, LI Jiyuan, FAN Zhengqi. Extraction and characterization of the flower pigment of *Camellia azalea* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, **47**(1): 79–84.
- [15] 杨美英, 李建宾, 张莹, 等. 杜鹃红山茶与山茶‘媚丽’杂交后代花青苷变异特征[J]. 林业科学研究, 2022, **35**(4): 54–62.
YANG Meiyong, LI Jianbin, ZHANG Ying, *et al.* Variation characteristics of anthocyanin in hybrids between *Camellia azalea* and *Camellia japonica* 'Meili' [J]. *Forest Research*, 2022, **35**(4): 54–62.
- [16] UDDIN A F M J, HASHIMOTO F, MIWA T, *et al.* Seasonal variation in pigmentation and anthocyanidin phenetics in commercial Eustoma flowers [J]. *Scientia Horticulturae*, 2004, **100**(1/4): 103–115.
- [17] BYAMUKAMA R, JORDHEIM M, KIREMIRE B, *et al.* Anthocyanins from flowers of *Hippeastrum* cultivars [J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, **109**(3): 262–266.
- [18] HASHIMOTO F, TANAKA M, MAEDA H, *et al.* Characterization of cyanic flower color of *Delphinium* cultivars [J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 2000, **69**(4): 428–434.
- [19] 张洁, 王亮生, 高锦明, 等. 贴梗海棠花青苷组成及其与花色的关系[J]. 园艺学报, 2011, **38**(3): 527–534.
ZHANG Jie, WANG Liangsheng, GAO Jinming, *et al.* Identification of anthocyanins involving in petal coloration in *Chaenomeles speciosa* cultivars [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, **38**(3): 527–534.
- [20] da SILVA F L, ESCRIBANO-BAILÓN M T, PÉREZ ALONSO J J, *et al.* Anthocyanin pigments in strawberry [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, **40**(2): 374–382.
- [21] HARBORNE J B. Spectral methods of characterizing anthocyanins [J]. *Biochemical Journal*, 1958, **70**(1): 22–28.
- [22] FOSSEN T, ANDERSEN Ø M. Cyanidin 3-O-(6"-succinyl-β-glucopyranoside) and other anthocyanins from *Phragmites australis* [J]. *Phytochemistry*, 1998, **49**(4): 1065–1068.
- [23] VINHA A F, FERRERES F, SILVA B M, *et al.* Phenolic profiles of Portuguese olive fruits (*Olea europaea* L.): influences of cultivar and geographical origin [J]. *Food Chemistry*, 2005, **89**(4): 561–568.
- [24] DUEÑAS M, PÉREZ-ALONSO J J, SANTOS-BUELGA C, *et al.* Anthocyanin composition in fig (*Ficus carica* L.) [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2008, **21**(2): 107–115.

- [25] 张洁, 李崇晖, 王亮生, 等. 植物花青苷液质联用方法的分析鉴定[J]. 食品安全质量检测学报, 2013, 4(3): 760–768.
ZHANG Jie, LI Chonghui, WANG Liangsheng, *et al.* Golden rules of separation and characterization of plant anthocyanins by high pressure liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2013, 4(3): 760–768.
- [26] DOWNEY M O, ROCHFORD S. Simultaneous separation by reversed-phase high-performance liquid chromatography and mass spectral identification of anthocyanins and flavonols in Shiraz grape skin [J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1201(1): 43–47.
- [27] ZHANG Jie, WANG Liangsheng, GAO Jinming, *et al.* Rapid separation and identification of anthocyanins from flowers of *Viola yedoensis* and *V. prionantha* by high-performance liquid chromatography-photodiode array detection-electrospray ionisation mass spectrometry [J]. *Phytochemical Analysis*, 2012, 23(1): 16–22.
- [28] TANAKA Y, SASAKI N, OHMIYA A. Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids [J]. *The Plant Journal*, 2008, 54(4): 733–749.
- [29] LIU Weixin, YU Suhang, FENG Yi, *et al.* Comparative transcriptome and pigment analyses reveal changes in gene expression associated with flavonol metabolism in yellow *Camellia* [J/OL]. *Forests*, 2022, 13(7): 1094[2025-07-12]. DOI: [10.3390/f13071094](https://doi.org/10.3390/f13071094).
- [30] FAN Menglong, ZHANG Ying, YANG Meiyang, *et al.* Transcriptomic and chemical analyses reveal the hub regulators of flower color variation from *Camellia japonica* bud sport [J/OL]. *Horticulturae*, 2022, 8(2): 129[2025-07-12]. DOI: [10.3390/horticulturae8020129](https://doi.org/10.3390/horticulturae8020129).
- [31] DOONER H K, ROBBINS T P, JORGENSEN R A. Genetic and developmental control of anthocyanin biosynthesis [J]. *Annual Review of Genetics*, 1991, 25: 173–199.
- [32] 娄倩, 刘冰, 胡碧春, 等. 单子叶植物蓝色花呈色机理研究进展[J]. 园艺学报, 2021, 48(10): 2018–2030.
LOU Qian, LIU Bing, HU Bichun, *et al.* Research progress on the color development of blue flowers of monocots [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2021, 48(10): 2018–2030.
- [33] 刘跃平, 周洋丽, 高燕会, 等. 换锦花花色苷成分及其稳定性[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(3): 587–596.
LIU Yueping, ZHOU Yangli, GAO Yanhui, *et al.* Effects of physical and chemical factors on anthocyanin stability in *Lycoris sprengeri* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, 38(3): 587–596.
- [34] FAN Menglong, WEI Xiaojuan, SONG Zhixin, *et al.* GWAS-driven gene mining and genomic prediction of ornamental traits in flowering trees: a case study of *Camellia japonica* [J/OL]. *Horticultural Plant Journal*, 2024-12-27[2025-07-12]. DOI: [10.1016/j.hpj.2024.05.017](https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.05.017).
- [35] 刘玉琪, 杨丽媛, 王艺光, 等. 夏蜡梅、光叶红蜡梅及其杂交后代花色表型和色素积累特征的差异分析[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(4): 747–755.
LIU Yuqi, YANG Liyuan, WANG Yiguang, *et al.* Flower color phenotype and pigment accumulation characteristics of *Sinicalycanthus chinensis*, *Calycanthus floridus* var. *glaucus* and their hybrid progenies [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, 40(4): 747–755.
- [36] FAN Menglong, JIANG Hong, WU Si, *et al.* A high-efficiency transient expression system reveals that CjMYB5 positively regulates anthocyanin biosynthesis in *Camellia japonica* [J/OL]. *Horticulturae*, 2025, 11(7): 839[2025-07-12]. DOI: [10.3390/horticulturae11070839](https://doi.org/10.3390/horticulturae11070839).
- [37] 李辛雷, 殷恒福, 范正琪, 等. 山茶芽变花色与花青苷的关系[J]. 中国农业科学, 2019, 52(11): 1961–1969.
LI Xinlei, YIN Hengfu, FAN Zhengqi, *et al.* The relationship between anthocyanins and flower colors of bud mutation in *Camellia japonica* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2019, 52(11): 1961–1969.