



5种野牡丹属植物花色色素成分及影响花色呈色因子分析

余智城, 何雪娇, 林秀香, 陈振东, 邹龙运

引用本文:

余智城,何雪娇,林秀香,陈振东,邹龙运. 5种野牡丹属植物花色色素成分及影响花色呈色因子分析[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(5): 687–696.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.4534>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

冬季南亚热带森林演替中后期优势树种幼叶光保护策略

Photoprotection Strategies in Young Leaves of Dominant Species in Mid- and Late-Successional Stages of Low Subtropical Forest in Winter

热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 171–179 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4264>

不同遮荫度对‘红叶,南天竹叶色变化及矿质营养积累的影响

Effect of Shading on Changes in Leaf Color and Nutrient Accumulation of *Nandina domestica* 'Hongye'

热带亚热带植物学报. 2017, 25(4): 339–347 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3700>

鸳鸯茉莉开花过程中花青素组成的变化

Changes in Composition of Anthocyanins in *Brunfelsia acuminata* Flowers

热带亚热带植物学报. 2018, 26(6): 627–632 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3878>

干旱死亡叶片与自然凋落叶化学性质对比研究

Comparison of Chemical Traits between Drought-dead and Natural Litter Leaves

热带亚热带植物学报. 2022, 30(1): 79–87 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4401>

蚕豆花水提取物的UPLC-ESI-QTOF质谱联用分析及抗氧化活性研究

UPLC-ESI-QTOF Mass Spectrometry Analysis and Antioxidant Activity of Water Extract from *Vicia faba* Flowers

热带亚热带植物学报. 2022, 30(5): 663–675 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4596>

向下翻页，浏览PDF全文

5 种野牡丹属植物花色素成分及影响花色呈色因子分析

余智城, 何雪娇, 林秀香, 陈振东*, 邹龙运

(福建省热带作物科学研究所, 福建 漳州 363001)

摘要: 为明确野牡丹属(*Melastoma*)植物花瓣的色素成分和呈色机理, 对 5 种野牡丹属植物的花色素成分及含量进行测定, 观察花瓣表皮细胞的显微结构和分布特点, 并分析花瓣 pH 值、可溶性糖和可溶性蛋白含量等对花色的影响。结果表明, 野牡丹属植物花瓣不含叶绿素和类胡萝卜素, 紫罗兰色系主要含花青素苷和黄酮类化合物, 白色系主要含黄酮类化合物。野牡丹(*M. candidum*)和毛稔(*M. sanguinrum*)花瓣的花色素分布于上、下表皮, 印度野牡丹(*M. malabathricum*)的花色素分布于上、下表皮和栅栏组织, 白花野牡丹(*M. candidum* f. *albiflorum*)和白花印度野牡丹(*M. malabathricum* var. *alba*)花瓣未见色素积累; 紫罗兰色系野牡丹上表皮细胞呈圆锥形突起, 白色系野牡丹上表皮细胞呈不规则的扁平状, 两色系下表皮细胞均呈不规则的扁平状。野牡丹属植物花色明度(L^*)随花瓣颜色加深而降低, L^* 与红度(a^*)呈极显著负相关、与蓝度(b^*)呈极显著的正相关。花瓣中花青素苷含量与其 L^* 和 b^* 呈显著负相关, pH 值与花瓣 a^* 呈现显著的负相关。因此, 野牡丹属植物花色主要由花青素苷决定, 花青素苷含量、色素分布、上表皮细胞形状等是引起花色呈现多样的主要因子。

关键词: 野牡丹属; 花色; 花青素苷; 呈色因子

doi: 10.11926/jtsb.4534

Analysis of Anthocyanin Composition and Color Factors in Five Species of *Melastoma*

YU Zhicheng, HE Xuejiao, LIN Xiuxiang, CHEN Zhendong*, ZOU Longyun

(Fujian Institute of Tropical Crops, Zhangzhou 363001, Fujian, China)

Abstract: In order to clarify the pigment composition and color mechanism of petals of *Melastoma*, the anthocyanins in 5 species were determined, the structure and distribution of petal epidermal cells were observed, and the influence of pH value, soluble sugar and soluble protein content on flower color was analyzed. The results showed that the petals of *Melastoma* had not chlorophyll and carotenoid, violet color mainly contained anthocyanin and flavonoids, and flavonoids in white color. The anthocyanins distributed in upper and lower epidermis of *M. candidum* and *M. sanguinrum* petals, and also in palisade tissue of *M. malabathricum*, but the petals of *M. candidum* f. *albiflorum* and *M. malabathricum* var. *alba* had no pigment accumulation. The cells in upper epidermis of violet *Melastoma* show conical protrusions, which in white *Melastoma* show irregular flat shape, and those in lower epidermis of both colors show irregular flat shape. The brightness (L^*) of flower color decreased with the deepening of petal color, which was negatively correlated with the redness (a^*) and positively with the blueness (b^*). The anthocyanin content had significantly negative correlation with L^* and b^* , and as well as pH and a^* . Therefore, anthocyanin was the main determinant of flower color in genus *Melastoma*, anthocyanin

收稿日期: 2021-09-23

接受日期: 2022-01-17

基金项目: 福建省公益类科研院所专项基金(2019R1010-3); 漳州市自然科学基金项目(ZZ2021J14)资助

This work was supported by the Project for Special Project for Public Welfare Research Institutes in Fujian (Grant No. 2019R1010-3), and the Project for Natural Science in Zhangzhou City (Grant No. ZZ2021J14).

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: czd89@126.com

content, pigment distribution and shape of upper epidermis cells were the main factors that cause color diversity.

Key words: *Melastoma*; Flower color; Anthocyanidin; Color factor

野牡丹属(*Melastoma*)是野牡丹科(*Melastomataceae*)中最具观赏价值的属,全世界约有 100 种,分布于亚洲南部至大洋洲北部及太平洋诸岛。我国野牡丹属植物有 9 种 1 变种,分布于长江流域以南各省区,花色以粉红色、红色和紫红色为主^[1]。野牡丹作为乡土树种,具有栽培难度低、花期长等特点,近年来受到越来越多的关注。目前国内对野牡丹属植物的研究主要集中在资源调查及评价^[2-5]、繁殖技术^[6-10]、传粉生物学^[11-12]、育种^[13-14]、系统分类与演化^[15-17]、药用开发^[18-19]等方面。花色作为观赏植物最重要的观赏性状之一,直接影响其观赏价值和经济价值。花瓣中的单体酚成分及含量变化、表皮细胞形状、组织结构色素分布、细胞液的 pH 值、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、色素与金属离子的结合形态等都会引起花朵颜色的不同变化,其中最重要的影响因素是色素成分及含量^[20-21]。有关野牡丹属植物花瓣色素成分及影响花色呈现因子等相关研究鲜见报道。本文以 5 种野牡丹属植物为材料,采用测色法、化学显色法、徒手切片法和紫外

分光光度法,从花瓣花色表型、花色素成分和含量、色素分布、表皮细胞形态、pH 值、可溶性糖含量和可溶性蛋白含量对花色进行综合分析,以期阐明野牡丹属植物花色呈色机理奠定基础 and 花色育种提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

5 种野牡丹属植物(图 1)为野牡丹(*M. candidum*)、白花野牡丹(*M. candidum* f. *albiflorum*)^[22]、印度野牡丹(*M. malabathricum*)、白花印度野牡丹(*M. malabathricum* var. *alba*)和毛稔(*M. sanguinrum*)。白花野牡丹是野牡丹的变种,花为白色^[22];印度野牡丹、白花印度野牡丹为国外种。野牡丹、白花野牡丹和毛稔的花期在 6—8 月,印度野牡丹和白花印度野牡丹则周年开花。本试验于 2021 年 7—8 月进行,材料均取自福建省热带作物科学研究所野牡丹科植物种质资源圃。



图 1 5 种野牡丹属植物。A: 野牡丹; B: 白花野牡丹; C: 印度野牡丹; D: 白花印度野牡丹; E: 毛稔。

Fig. 1 Five species *Melastoma*. A: *M. candidum*; B: *M. candidum* f. *albiflorum*; C: *M. malabathricum*; D: *M. malabathricum* var. *alba*; E: *M. sanguinrum*.

1.2 方法

1.2.1 花色描述及测定

每种植物选取 3 株,每株取 3 朵盛开期的花,迅速带回实验室。在光线良好的室内(避免日光直射),用 RHSCC 比色卡和色差仪(Ci6X Spectrophotometer Microchip Technology Inc.)以光源 C/2°为条件对花瓣中部着色均匀部位进行测色,取平均值。

1.2.2 花瓣色素特征颜色反应

花色素定性分析:取新鲜花瓣 0.1 g,液氮研磨后放入 10 mL 离心管中,分别加入石油醚、10%盐

酸和 30%氨水各 5 mL,观察颜色并进行记录^[23]。

类黄酮的特征颜色反应:取新鲜花瓣 0.1 g,液氮研磨后用盐酸化甲醇溶液(HCl:MeOH)=1:99 (V/V)提取 15 h,过滤,定容至 25 mL,取 2 mL 提取液进行显色反应,观察颜色变化^[24-25]。

1.2.3 花瓣花青素苷含量和类黄酮含量测定

参照程怡等^[21]和李平等^[26]的方法,取新鲜花瓣 0.1 g,液氮研磨后立即以含 1% HCl 的甲醇溶液提取,定容后,于 600、530 (花青素苷)和 325 nm (类黄酮)处测定吸光度值 A_{600} 、 A_{530} 、 A_{325} 。以 $U1 = (A_{530} -$

A₆₀₀)/g FW=0.1 作为 1 个花青素苷单位, 类黄酮含量 U2 以 A₃₂₅/g FW 表示。

1.2.4 花瓣组织结构和色素分布

花瓣横截面的观察: 采用徒手切片法切取新鲜花瓣中间部分横截面, 在目镜 10 倍和物镜 4 倍的光学显微镜下观察拍照记录。

花瓣表皮细胞的观察: 用镊子撕取花瓣上表皮和下表皮于蒸馏水中展开, 在目镜和物镜均为 10 倍的光学显微镜下观察拍照记录。

1.2.5 花瓣生理指标测定

参照翟宇慧等^[27]的方法测定花瓣 pH。采用苏州科铭生物技术有限公司的植物可溶性糖含量试剂盒和 BCA 法蛋白含量试剂盒测定可溶性糖含量和可溶性蛋白含量。

2 结果和分析

2.1 花色描述

从表 1 可见, 白花野牡丹和白花印度野牡丹属于白色系, 野牡丹、印度野牡丹和毛稔属于紫罗兰色系。供试样品花色在 CIE 表色系统坐标系上分布广泛。白色系的明度(L*)较大, 约为 85; 紫罗兰色系的 L* 相对较小, 为 53~61, 以毛稔最小, 仅为 53.02,

印度野牡丹最大, 为 60.58。白色系野牡丹的红度(a*)值均为负且相近, 呈现极弱的绿色; 紫罗兰色系的 a* 值为正(21~36), 呈现红色, 以毛稔的最大, 红度最强, 为 35.55, 印度野牡丹的最小, 红度最弱。白色系野牡丹的蓝度(b*)值均为正且相近, 表现极弱的黄色; 紫罗兰色系的 b* 值为负, 呈现不同程度的蓝色, 毛稔的 b* 值绝对值最大, 蓝色最强, 印度野牡丹的最小, 蓝色最弱。白色系的彩度(C*)值约为 6; 紫罗兰色系的 C* 值较大, 为 32~46, 以毛稔的最大, 印度野牡丹的最小。白色系的色相角(h°)约为 110; 紫罗兰色系的较大, 为 312~322。综合来看, 白色系野牡丹的 L*、a*、b*、C* 和 h° 的数值相近, 且 a*、C* 和 h° 的变化趋势一致。

2.2 花色素定性分析

2.2.1 花色素的特征颜色反应

从表 2 可见, 石油醚测试的花瓣提取液均为无色, 说明花瓣中不含类胡萝卜素。10% 盐酸测试的紫罗兰色系花瓣提取液呈粉色, 说明花瓣中含有花青素苷; 而白色系花瓣提取液均无色, 说明花瓣中不含花青素苷或花青素苷含量较少。30% 氨水测试的花瓣提取液均呈黄色, 表明花瓣中均含有黄酮类化合物。

表 1 5 种野牡丹属植物的花色数据

Table 1 Petal color data of 5 *Melastoma* species

植物 Species	色系 Color group	比色卡代码 RHSCC code	CIEL*a*b*				
			明度 (L*) Brightness	红度 (a*) Redness	蓝度 (b*) Blueness	彩度 (C*) Chroma	色相角 (h°) Hue angle
野牡丹 <i>M. candidum</i>	紫罗兰 Violet	N82 B	56.08	25.37	-24.95	35.24	315.24
白花野牡丹 <i>M. candidum</i> f. <i>albiflorum</i>	白 White	NN155 D	84.68	-2.08	5.63	6.00	110.72
印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i>	紫罗兰 Violet	N84 A	60.58	21.47	-23.37	32.01	312.35
白花印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i> var. <i>alba</i>	白 White	NN155 B	85.14	-2.06	5.46	5.95	109.99
毛稔 <i>M. sanguinrum</i>	紫罗兰 Violet	N80 A	53.02	35.55	-27.92	45.19	321.74

表 2 花瓣花色素颜色反应

Table 2 Color reaction of petal pigments

植物 Species	C ₆ H ₆	10% HCl	30% NH ₃ ·H ₂ O
野牡丹 <i>Melastoma candidum</i>	无色 Colorless	粉色 Pink	黄色 Yellow
白花野牡丹 <i>M. candidum</i> f. <i>albiflorum</i>	无色 Colorless	无色 Colorless	黄色 Yellow
印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i>	无色 Colorless	粉色 Pink	黄色 Yellow
白花印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i> var. <i>alba</i>	无色 Colorless	无色 Colorless	黄色 Yellow
毛稔 <i>M. sanguinrum</i>	无色 Colorless	粉色 Pink	黄色 Yellow

2.2.2 类黄酮的显色反应

(1) 浓盐酸-镁粉反应: 紫罗兰色系呈不同程度

的粉红色或红色, 说明可能含有黄酮、黄酮醇、二氢黄酮或花青素苷类化合物; 白色系呈现黄色, 说

明可能含有查耳酮或异黄酮。

(2) 浓盐酸-锌粉反应: 紫罗兰色系呈现粉红色, 表明其可能含有黄酮和花青素苷类物质, 白色系花呈现淡黄色, 说明含有黄酮类物质。

(3) 醋酸铅反应: 均出现无色沉淀, 说明可能含有类黄酮化合物, 且可能具有邻二酚羟基, 或 4-酮基、3-OH 或 4-酮基、5-OH 结构。

(4) 三氯化铁反应: 均为深绿色, 说明类黄酮中含有酚羟基。

(5) 三氯化铝反应: 紫罗兰色系呈粉红色, 说明含有花青素苷; 白色系呈黄色, 说明含有黄酮类化合物。

(6) 碳酸钠反应: 供试样品均出现黄色, 且通气后颜色没有变化, 可能不含二氢黄酮醇。

(7) 氨性氯化锶反应: 供试样品均出现棕黄色无沉淀, 说明不含邻二酚羟基结构的黄酮类化合物。

(8) 浓硫酸反应: 供试样品均出现棕褐色, 可能含有黄酮类化合物或者黄酮。

综合来看, 白色系和紫罗兰色系野牡丹都含有黄酮类物质, 而紫罗兰色系野牡丹还含有花青素苷。紫罗兰色系野牡丹可能含有的黄酮类物质有黄酮、黄酮醇等。白色系野牡丹可能含有的黄酮类物质有查耳酮、异黄酮等。

表3 花瓣中类黄酮的显色反应

Table 3 Color reaction of flavonoid in petals

试剂 Reagent	野牡丹 <i>Melastoma candidum</i>	白花野牡丹 <i>M. candidum</i> f. <i>albiflorum</i>	印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i>	白花印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i> var. <i>alba</i>	毛稔 <i>M. sanguinrum</i>
浓盐酸-镁 HCl-Mg	红色 Red	黄色 Yellow	粉红色 Pink	黄色 Yellow	粉红色 Pink
浓盐酸-锌 HCl-Zn	粉红色 Pink	淡黄色 Light yellow	粉红色 Pink	淡黄色 Light yellow	粉红色 Pink
醋酸铝 Pb(CH ₃ COO) ₂	白色沉淀 White precipitate	白色沉淀 White precipitate	白色沉淀 White precipitate	白色沉淀 White precipitate	白色沉淀 White precipitate
三氯化铁 FeCl ₃	深绿色 Dark green	深绿色 Dark green	深绿色 Dark green	深绿色 Dark green	深绿色 Dark green
三氯化铝 AlCl ₃	粉红色 Pink	黄色 Yellow	粉红色 Pink	黄色 Yellow	粉红色 Pink
碳酸钠 NaCO ₃	黄色 Yellow	黄色 Yellow	黄色 Yellow	黄色 Yellow	黄色 Yellow
氨性氯化锶 SrCl ₂	棕黄色 Brownish yellow	棕黄色 Brownish yellow	棕黄色 Brownish yellow	棕黄色 Brownish yellow	棕黄色 Brownish yellow
浓硫酸 H ₂ SO ₄	棕褐色 Sepia	棕褐色 Sepia	棕褐色 Sepia	棕褐色 Sepia	棕褐色 Sepia

2.3 花瓣中花青素苷和类黄酮含量

由表4可见, 白色系花瓣的花青素苷含量为0; 紫罗兰色系为9~15, 以野牡丹的最高, 印度野牡丹次之, 毛稔的最少, 且呈显著差异。白色系和紫罗兰色系野牡丹花瓣都含有类黄酮, 白花野牡丹的类黄酮含量最高, 为12.91, 白花印度野牡丹的最低, 为8.78; 而紫罗兰色系约为10.5, 三者间无显著差异。说明花青素苷是直接决定野牡丹属植物花色的

因子, 类黄酮作为辅助色素, 对花色影响较小。

2.4 花瓣的生理生化指标

白色系和紫罗兰色系花瓣的pH值为4~4.16(表4), 呈弱酸性, 白色系高于紫罗兰色系, 白花印度野牡丹与毛稔间有显著差异, 野牡丹、白花野牡丹和印度野牡丹间无显著差异。白色系和紫罗兰色系花瓣的可溶性糖和可溶性蛋白含量相近, 均无显著差异。

表4 花瓣的pH值、花青素苷、类黄酮、可溶性糖和可溶性蛋白含量

Table 4 pH, contents of anthocyanins, flavonoids, soluble sugar and soluble protein in petals

植物 Species	pH	花青素苷 Anthocyanin	类黄酮 Flavonoid	可溶性糖 (mg/g) Soluble sugar	可溶性蛋白 (mg/g) Soluble protein
野牡丹 <i>Melastoma candidum</i>	4.07±0.03b	14.67±0.21a	10.61±0.45b	2.26±0.29a	50.02±4.21a
白花野牡丹 <i>M. candidum</i> f. <i>albiflorum</i>	4.12±0.02ab	0.00±0.00d	12.91±0.07a	2.52±0.31a	54.29±3.64a
印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i>	4.10±0.02b	13.37±0.25b	10.48±0.27b	2.71±0.34a	57.43±4.35a
白花印度野牡丹 <i>M. malabathricum</i> var. <i>alba</i>	4.16±0.02a	0.00±0.00d	8.78±0.36c	2.55±0.31a	55.53±0.67a
毛稔 <i>M. sanguinrum</i>	4.00±0.04c	9.03±0.12c	10.49±0.03b	3.14±0.39a	57.58±2.64a

同列数据后不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Data followed different letters within column indicate significant difference at 0.05 level.

2.5 花色相关性分析

由表5可见,花瓣 L^* 与 a^* 和花青素含量呈极显著、显著的负相关关系、与 b^* 呈极显著的正相关关系,即随着 b^* 值降低, a^* 值和花青素含量升高,花色变暗;

花瓣 a^* 与 b^* 、pH值呈极显著或显著负相关关系,即随着 b^* 值升高及pH值增强,花瓣越来越红。花瓣 b^* 与花青素含量呈显著的负相关关系,即随着花青素含量升高,花瓣越来越蓝。

表5 花色和生理生化指标间的相关性分析

Table 5 Correlation analysis among indicators of flower color

指标 Index	L^*	a^*	b^*	AN	FL	pH	SS	SP
L^*	1							
a^*	-0.987**	1						
b^*	0.996**	-0.978**	1					
AN	-0.908*	0.832	-0.927*	1				
FL	0.112	-0.120	0.130	-0.118	1			
pH	0.849	-0.908*	0.814	-0.572	-0.142	1		
SS	-0.343	0.471	-0.341	0.003	-0.097	-0.598	1	
SP	0.000	0.097	-0.036	-0.185	-0.188	-0.125	0.845	1

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2.6 花瓣的解剖结构和色素分布

野牡丹花瓣的解剖结构和色素分布见图2。紫罗兰色系野牡丹均发现有色素分布,分布位置稍有差异,野牡丹、毛稔的花色素分布在花瓣的上、下表皮,栅栏组织和海绵组织均没有色素分布;印度野牡丹花色素分布在上、下表皮和栅栏组织,海绵组织没有色素分布;白色系野牡丹花瓣没有色素分布。从花瓣表皮细胞的形状看,白色系上、下表皮细胞均为不规则的扁平状,紫罗兰色系上表皮细胞呈圆锥形小突起,下表皮细胞则呈不规则的扁平状。

于衡量花色的明暗程度,决定花色的因子为色相值 a^* 和 b^* [29-30]。本研究中野牡丹花瓣的 L^* 与 a^* 呈极显著的负相关性,而 L^* 与 b^* 呈极显著正相关性,与付尧[31]对溪荪(*Iris sanqinea*)的研究结果一致。王东栋[32]指出须苞石竹(*D. barbatus*)花瓣的 L^* 与 a^* 和 b^* 均呈极显著负相关关系。李群[29]的研究表明,宫粉紫荆(*Bauhinia variegata*)花瓣的 L^* 与 a^* 呈极显著负相关关系,表明其花色的明暗程度主要受花瓣的红色影响,羊蹄甲(*B. purpurea*)花瓣的 L^* 与 b^* 呈极显著正相关关系,表明其花色的明暗程度主要受花瓣的蓝色影响。这说明花色的明暗度与植物自身的特性有关。

3 结论和讨论

3.1 花色表型

花色是观赏植物最重要的观赏性状之一,也是品种分类的重要依据。目前主要测色方法有目测、比色卡比色和色差仪测色。目测法不受空间场地限制但受限于测试人员的视觉偏差,很难准确对花色特别是交叉色系进行描述。比色卡比色法是园林植物测色研究应用最广的方法,但对测试人和测色环境要求较高[28]。色差仪测色法具有精度高、环境因素影响小、颜色数据化和操作简便等优点,已在观赏植物花色测定中广泛应用。因此,在目测的基础上使用RHSCC比色卡结合色差仪能够更加准确便捷对花色进行评价。本试验中野牡丹花瓣正反面花色有差异,为保证测定结果的科学性均选取盛花期正面花瓣中部进行测量。“CIELAB”系统中 L^* 值用

3.2 色素成分及含量对花色的影响

植物花色色素主要有叶绿素、类胡萝卜素、类黄酮以及甜菜色素[33]。本研究中花瓣色素成分属于类黄酮化合物,紫罗兰色系为黄酮和花青素苷类物质,白色系主要为黄酮类物质。类靶向代谢组研究表明,白花野牡丹也含有花青素苷,但含量很少(未发表),故在色素定性显色反应中不易辨识。野牡丹花瓣不含叶绿素和类胡萝卜素,表明花青素苷是决定野牡丹属植物花瓣呈色的物质。花青素苷含量与 L^* 呈显著负相关性,说明花色会随花青素苷含量增加而变暗,这与丽格海棠(*Rieger begonias*)[34]、瓜叶菊(*Senecio cruentus*)[35]、蝴蝶石斛兰(*Dendrobium phalaenopsis*)[36]、石竹[37]的研究结论一致,表明花青素苷含量是影响野牡丹属植物花色明暗度的因

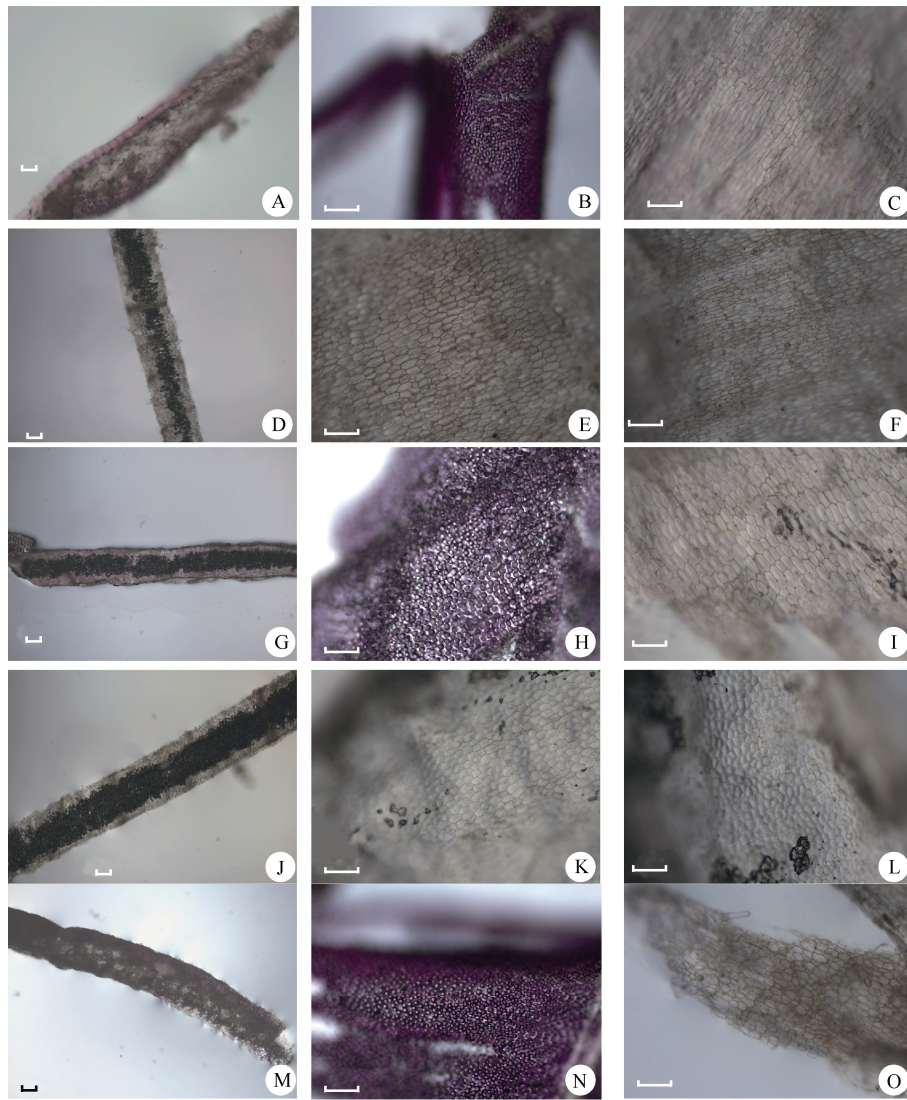


图2 花瓣横切面, 示上、下表皮细胞形态。A~C: 野牡丹; D~F: 白花野牡丹; G~I: 印度野牡丹; J~L: 白花野牡丹; M~O: 毛稔。标尺 = 100 μm

Fig. 2 Cross section of petal, showing upper and lower epidermis. A~C: *Melastoma candidum*; D~F: *M. candidum* f. *albiflorum*; G~I: *M. malabathricum*; J~L: *M. malabathricum* var. *alba*; M~O: *M. sanguinrum*. Bars = 100 μm

素之一。不同花色野牡丹花瓣的类黄酮含量差异显著, 但与花色表型相关性并不显著, 类黄酮中除花青素苷以外的物质主要作为辅助色素, 其种类和含量的变化对花瓣呈色作用不明显。

3.3 花瓣色素分布和表皮细胞形状对花色的影响

花瓣是花色呈现的最终载体, 本研究表明, 野牡丹和毛稔色素分布于花瓣的上下表皮细胞, 印度野牡丹花色素分布于上下表皮和栅栏组织; 白色系花瓣的上下表皮细胞没有色素分布, 表明花瓣中花色素的分布会影响花色呈现, 这与阿依木古丽等^[38]和 Kobayashi 等^[39]的研究结果一致; 而李群^[29]和伏静等^[40]则认为花色与色素分布无关。吴艳梅等^[34]

和 Gorton 等^[41]指出含色素细胞多的花瓣在光线射入时会使花色显得更深, 本研究中印度野牡丹色素细胞分布最多, 花色最深, 与其观点相符。本研究观察到紫罗兰色系野牡丹花瓣上表皮细胞呈圆锥形小突起, 白色系上表皮细胞呈不规则的扁平状, 两色系下表皮细胞均呈不规则的扁平状, 表明野牡丹属植物花色呈现与花瓣表皮细胞的形状有关。花瓣上表皮细胞圆锥化是宫粉紫荆红^[29]、丽格海棠红色和红白色品种^[34]、黑色蔷薇(*Rosa multiflora*)^[42]花瓣呈色加深的一个重要原因, 细胞锥形化程度越高颜色越暗^[43], 而扁平状会使花色变浅^[43-44]。对蝴蝶兰(*Phalaenopsis* sp.)^[45]、彩色马蹄莲(*Zantedeschia hybrida*)^[46]和风信子(*Muscari latifolium*)^[47]的研究表

明, 花色与花瓣表皮细胞形状无关。因此花瓣组织结构中色素分布和表皮细胞形状与花瓣呈色的关系因不同植物而异, 野牡丹属植物花瓣呈色受色素分布和表皮细胞形状的影响。

3.4 生理指标对花色的影响

花青素苷元通过糖苷键与1个或多个糖苷结合形成花青素苷, 是花朵呈现多色的主要色素来源。花青素在自然界中至少有27种, 但较为常见为矢车菊素(cyanidin)、天竺葵素(pelargonidin)、芍药素(peonidin)、飞燕草素(delphinidin)、锦葵素(malvidin)和矮牵牛素(petunidin)等, 矢车菊素通常呈现粉色, 飞燕草素通常呈现蓝色至蓝紫色, 天竺葵素通常呈现橙红至红色^[23], 紫罗兰色系野牡丹花青素苷含量较高, 是否是由于矢车菊素、飞燕草素、天竺葵素等色素积累而成, 还有待进一步研究。曾有报道糖类对花青素苷的合成有一定影响。糖结合的位置和数目及结合于糖残基上的芳香酸或脂肪酸的数目性质等都影响着花青素苷的形成。孟祥春等^[48]的研究表明矮牵牛花瓣发育过程中的花青素苷和还原糖的变化趋势一致, 陈段芬等^[49]认为几内亚凤仙花开放之前的可溶性糖含量随花青素苷含量的增加而增加, 而可溶性蛋白含量下降。本研究结果表明, 可溶性糖和可溶性蛋白含量与花色无显著相关。前人^[50-51]的研究表明, 除可溶性糖、激素外, 细胞的pH值也是影响花色呈现的内因。本研究中花瓣pH值与 a^* 呈显著的负相关关系, 表明pH值对花瓣颜色影响显著。白色系花瓣的pH值较紫红色系高, 但差值很小, 说明pH值的微小变化也能影响花色呈现。翟宇慧等^[27]认为欧洲报春(*Primula vulgaris*)花瓣呈色受花瓣细胞液pH值影响, 李群^[29]指出pH值对宫粉紫荆和羊蹄甲花色影响极显著。而外界环境pH值对花青苷的稳定性影响也较大。卓毓光等^[52]的研究表明酸性环境有利于花青苷的保存; 唐东芹等^[53]认为在强酸环境中花青苷性质稳定, 而在高pH值环境中性质不稳定, 颜色偏蓝; 魏秀清等^[54]认为当外部环境碱性增强时, 花青苷的稳定性易遭到破坏, 发生褐变。

综上所述, 本研究分析了5种野牡丹属植物花瓣花色类型, 紫罗兰色系主要含黄酮类和花青素苷, 白色系野牡丹主要含黄酮类物质; 花瓣色素分布和表皮细胞形状也是花瓣呈色的重要影响因子; 花瓣明度、红度、蓝度、花青素苷含量和pH值之间

存在相关性。本文主要探讨了野牡丹属植物花色差异形成的因素及机制, 为野牡丹属植物分子调控花色机理研究及花色种质创新提供参考依据。

参考文献

- [1] Delectis Florae Reipublicae Popularis Sinicae, Agendae Academiae Sinicae Editta. Florae Reipublicae Popularis Sinicae, Tomus 53(1) [M]. Beijing: Sinicae Press, 1984: 135-293.
中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志, 第53卷第1分册 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 135-293.
- [2] DAI S P, LIU L H, LIU H, et al. Investigation and evaluation on the wild ornamental resource of Melastomataceae in Guangdong [J]. J Fujian For Sci Technol, 2012, 39(4): 121-126. doi: 10.3969/j.issn.1002-7351.2012.04.32.
代色平, 刘连海, 刘慧, 等. 广东省野牡丹科植物资源调查与评价 [J]. 福建林业科技, 2012, 39(4): 121-126. doi: 10.3969/j.issn.1002-7351.2012.04.32.
- [3] LIN X X, SU J Q, HUANG A F. A Preliminary investigation and evaluation about the plant resource of Melastomaceae in Fujian [J]. Fujian Sci Technol Trop Crops, 2003, 28(4): 17-19. doi: 10.3969/j.issn.1006-2327.2003.04.008.
林秀香, 苏金强, 黄阿凤. 福建野牡丹科植物资源初步调查及评价 [J]. 福建热作科技, 2003, 28(4): 17-19. doi: 10.3969/j.issn.1006-2327.2003.04.008.
- [4] LIN Q J, LIN X X, SU J Q, et al. Comprehensive appraisal on ornamental characteristics and adaptability of plants in family Melastomataceae [J]. J SW For Coll, 2010, 30(5): 33-37. doi: 10.3969/j.issn.2095-914.2010.05.008.
林秋金, 林秀香, 苏金强, 等. 16种野牡丹科植物观赏性及适应性综合评价 [J]. 西南林学院学报, 2010, 30(5): 33-37. doi: 10.3969/j.issn.2095-914.2010.05.008.
- [5] QIU S, ZHAO J, ZHANG C P, et al. Research status and prospect of Melastomataceae ornamental plants germplasm resources in China [J]. J Anhui Agric Sci, 2008, 36(22): 9471-9472. doi: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2008.22.108.
仇硕, 赵健, 张翠萍, 等. 中国野牡丹科观赏植物种质资源的研究现状与展望 [J]. 安徽农业科学, 2008, 36(22): 9471-9472. doi: 10.13989/j.cnki.0517-6611.2008.22.108.
- [6] LUO S, LIU X Z, WANG Y Q, et al. The differences in rooting of Melastoma L. varieties cuttings [J]. Chin J Trop Agric, 2019, 39(5): 30-35. doi: 10.12008/j.issn.1009-2196.2019.05.007.
罗帅, 刘晓洲, 王永淇, 等. 不同野牡丹品种的扦插技术研究 [J]. 热带农业科学, 2019, 39(5): 30-35. doi: 10.12008/j.issn.1009-2196.

- 2019.05.007.
- [7] CHEN Y S. Research on effects of different treatments on propagation of *Melastoma sanguineum* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014.
陈永晟. 不同处理对毛茛繁殖的影响研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2014.
- [8] HUANG H. Plant regeneration and rapid propagation of *Melastoma intermedium* Linn. [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2012.
黄晖. 细叶野牡丹再生与快繁体系建立研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [9] LIN X X. Study on cuttage propagation of *Melastoma intermedium* [J]. J SW For Coll, 2009, 29(1): 42–44. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2009.01.010.
林秀香. 细叶野牡丹扦插繁殖技术研究 [J]. 西南林学院学报, 2009, 29(1): 42–44. doi: 10.3969/j.issn.2095-1914.2009.01.010.
- [10] CHEN M X, ZHU C, HUANG X M, et al. A study on the seed germination and storage characteristics of *Melastoma affine* D. Don [J]. Guangdong Landsc Arch, 2007, 29(1): 54–57. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2007.01.012.
陈妙贤, 朱纯, 黄雪梅, 等. 多花野牡丹种子萌发和贮藏特性的研究 [J]. 广东园林, 2007, 29(1): 54–57. doi: 10.3969/j.issn.1671-2641.2007.01.012.
- [11] JIN H, JIAO G L, CHEN G. Observation on flowering process, floral morphology and flower visiting insects of *Melastoma candidum* f. *albiflorum* [J]. J Plant Resour Environ, 2015, 24(2): 73–79. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.02.11.
金红, 焦根林, 陈刚. 白花野牡丹的开花进程、花部形态特征及访花昆虫观察 [J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(2): 73–79. doi: 10.3969/j.issn.1674-7895.2015.02.11.
- [12] PENG D H, LAN S R, WU S S. Pollination biology and breeding system of *Melastoma dendrisetosum* [J]. For Res, 2014, 27(1): 11–16. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2014.01.003.
彭东辉, 兰思仁, 吴沙沙. 中国特有种枝毛野牡丹传粉生物学及繁育系统研究 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(1): 11–16. doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2014.01.003.
- [13] JIANG M T. Hybridization breeding technics of several species of *Melastoma* Linn [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.
江鸣涛. 几种野牡丹属植物杂交育种技术研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [14] DAI S P, ZHANG J F, HE M M, et al. Two new *Melastoma* cultivars ‘Tianjiao’ and ‘Xinyuan’ [J]. Acta Hort Sin, 2016, 43(9): 1847–1848. doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2016-0027.
代色平, 张继方, 贺漫媚, 等. 野牡丹属新品种‘天骄’和‘心愿’ [J]. 园艺学报, 2016, 43(9): 1847–1848. doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2016-0027.
- [15] LIU T, CHEN Y Y, CHAO L F, et al. Extensive hybridization and introgression between *Melastoma candidum* and *M. sanguineum* [J]. PLoS One, 2014, 9(5): e96680. doi: 10.1371/journal.pone.0096680.
- [16] CHAO L F, CHEN Y Y, WANG S Q, et al. One species or two? Multilocus analysis of nucleotide variation of *Melastoma penicillatum* and *Melastoma sanguineum* (Melastomataceae) in Hainan, China [J]. Biochem Syst Ecol, 2014, 55: 275–282. doi: 10.1016/j.bse.2014.03.037.
- [17] BAI Y F. The systematic study on Chinese species of genus *Melastoma* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.
白岳峰. 中国野牡丹属植物系统分类研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
- [18] CHANG Z F, WU J R, TENG Y X, et al. Study on nature, function and indication of melastomataceae plants in China [J]. China J Chin Mat Med, 2008, 33(7): 854–859. doi: 10.3321/j.issn:1001-5302.2008.07.039.
常章富, 吴嘉瑞, 滕云霞, 等. 中国野牡丹科药用植物性能主治的研究 [J]. 中国中药杂志, 2008, 33(7): 854–859. doi: 10.3321/j.issn:1001-5302.2008.07.039.
- [19] ZHAO X, ZHANG D Q, HUANG R L, et al. Study on the antioxidant activity of extract from *Melastoma candidum* [J]. Drug Eval Res, 2014, 37(4): 317–321. doi: 10.7501/j.issn.1674-6376.2014.04.006.
赵鑫, 张冬青, 黄荣林, 等. 野牡丹提取液的抗氧化活性研究 [J]. 药物评价研究, 2014, 37(4): 317–321. doi: 10.7501/j.issn.1674-6376.2014.04.006.
- [20] ZHU M L, WANG L S, ZHANG H J, et al. Relationship between the composition of anthocyanins and flower color variation in hardy water lily (*Nymphaea* spp.) cultivars [J]. Chin Bull Bot, 2012, 47(5): 437–453. doi: 10.3724/sp.j.1259.2012.00437.
朱满兰, 王亮生, 张会金, 等. 耐寒睡莲花瓣中花青素苷组成及其与花色的关系 [J]. 植物学报, 2012, 47(5): 437–453. doi: 10.3724/sp.j.1259.2012.00437.
- [21] CHENG Y, ZHANG Y T, WANG Q M, et al. Correlation analysis of flower color during flower development of *Rosa hybrida* [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2014, 34(4): 733–739. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.04.0733.
程怡, 张云婷, 王清明, 等. 月季花发育过程中花色变化的生理生化研究 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(4): 733–739. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.04.0733.
- [22] ZHANG X J, DAI J H, LIU X Z, et al. Lectotypification of the name *Melastoma candidum* f. *albiflorum* and its taxonomic status [J]. Phyto-

- Keys, 2020, 146: 47–52. doi: 10.3897/phytokeys.146.49929.
- [23] AN T Q. Physiology and Biochemistry of Flower Color [M]. FU Y L translated. Beijing: China Forestry Press, 1989: 15–54.
安田齐. 花色的生理生物化学 [M]. 傅玉兰, 译. 北京: 中国林业出版社, 1989: 15–54.
- [24] XIA T, GENG X M, LUO F X. Components of flower pigments in the petals of wild *Lilium* in China [J]. J NE For Univ, 2013, 41(5): 109–113. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.2013.05.021.
夏婷, 耿兴敏, 罗凤霞. 不同花色野生百合色素成分分析 [J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(5): 109–113. doi: 10.13759/j.cnki.dlxb.2013.05.021.
- [25] GAO J M. Phytochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2002: 165–169.
高锦明. 植物化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 165–169.
- [26] LI P, ZHENG R Q, WEN H L, et al. Effects of bagging on pigments and total phenol in Xinshiji guava fruit skin [J]. J Fruit Sci, 2003, 20(2): 120–123. doi: 10.3969/j.issn.1009-9980.2003.02.011.
李平, 郑润泉, 温华良, 等. 套袋对新世纪番石榴果皮色素及酚类物质的影响 [J]. 果树学报, 2003, 20(2): 120–123. doi: 10.3969/j.issn.1009-9980.2003.02.011.
- [27] ZHAI Y H, LÜ J Q, LI X, et al. Effects of cell sap pH on the flower color formation in *Primula vulgaris* [J]. Acta Hort Sin, 2020, 47(3): 477–491. doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2019-0228.
翟宇慧, 吕嘉琪, 李想, 等. 欧洲报春细胞液 pH 对花色形成的作用机理初探 [J]. 园艺学报, 2020, 47(3): 477–491. doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2019-0228.
- [28] BAI X X, HU K, DAI S L, et al. Components of flower pigments in the petals of different color *Chrysanthemum morifolium* Ramat. cultivars [J]. J Beijing For Univ, 2006, 28(5): 84–89. doi: 10.3321/j.issn:1000-1522.2006.05.014.
白新祥, 胡可, 戴思兰, 等. 不同花色菊花品种花色成分的初步分析 [J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(5): 84–89. doi: 10.3321/j.issn:1000-1522.2006.05.014.
- [29] LI Q. Analysis of anthocyanin composition and color factors in three species of *Bauhinia* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.
李群. 三种羊蹄甲花色成分及呈色因子分析 [D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [30] LIN C Y. Quantitative color trends based on kansei engineering [J]. Packag Eng, 2015, 36(18): 70–73. doi: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2015.18.016.
林晨晔. 基于感性工学的定量化色彩趋势研究 [J]. 包装工程, 2015, 36(18): 70–73. doi: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2015.18.016.
- [31] FU Y. The preliminary study on coloring mechanism of *Iris sanguinea* with different flower colors and making technology of three-dimensional drying flowers [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2016.
付尧. 不同花色溪荪呈色机制初探及立体干燥花制作技术研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [32] WANG D D. Studies of heterosis and genetic characteristics of main ornamental traits in *Dianthus barbatus* [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
王东栋. 切花须苞石竹杂种优势及主要观赏性状遗传效应分析 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- [33] ZHANG J. Determination of anthocyanins and exploration of relationship between their composition and petal coloration in crape myrtle (*Lagerstroemia hybrid*) [D]. Yangling: Northwest Agricultural & Forestry University, 2007.
张洁. 紫薇花青素成分分析及其成色机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
- [34] WU Y M, WU Y P, JIN X H, et al. Effects of anthocyanin composition and distribution on flower color of rieger begonia [J]. Acta Bot Boreali-Occid Sin, 2020, 40(1): 58–68. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2020.01.0058.
吴艳梅, 吴艺萍, 金雪花, 等. 丽格海棠花青素成分及分布对花色的影响 [J]. 西北植物学报, 2020, 40(1): 58–68. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2020.01.0058.
- [35] SUN W, LI C H, WANG L S, et al. Anthocyanins present in flowers of *Senecio cruentus* with different colors [J]. Acta Hort Sin, 2009, 36(12): 1775–1782. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2009.12.009.
孙卫, 李崇晖, 王亮生, 等. 花青苷成分对瓜叶菊花色的影响 [J]. 园艺学报, 2009, 36(12): 1775–1782. doi: 10.3321/j.issn:0513-353X.2009.12.009.
- [36] LI C H, REN Y, HUANG S R, et al. Floral colors of phalaenopsis type dendrobium and their flavonoid composition [J]. Acta Hort Sin, 2013, 40(1): 107–116. doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2013.01.014.
李崇晖, 任羽, 黄素荣, 等. 蝴蝶石斛兰花色表型及类黄酮成分分析 [J]. 园艺学报, 2013, 40(1): 107–116. doi: 10.16420/j.issn.0513-353x.2013.01.014.
- [37] WANG Z D, FAN K, HE X Q. Analysis of pigment composition in different flowers of *Dianthus chinensis* L. [C]// Compilation of Papers of the Sixth National Conference on the Development of Protected Horticulture Industry and Safe and Efficient Cultivation Techniques. Urumqi: Chinese Society for Horticultural Science, 2017: 92–97.
王志达, 范琨, 贺学勤. 中国石竹不同花色色素成分分析 [C]// 第六届全国设施园艺产业发展与安全高效栽培技术交流会论文集汇编. 乌鲁木齐: 中国园艺学会, 2017: 95–100.
- [38] AYMUGURI, CAI Y. Biochemistry and Molecular Biology Techniques

- [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- 阿依木古丽, 蔡勇. 生物化学与分子生物学实验技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [39] KOBAYASHI H, OIKAWA Y, KOIWA H, et al. Flower-specific gene expression directed by the promoter of a chalcone synthase gene from *Gentiana triflora* in *Petunia hybrida* [J]. *Plant Sci*, 1998, 131(2): 173–180. doi: 10.1016/S0168-9452(97)00236-7.
- [40] FU J, LIU L Z, DAI S L. The anatomic observation on ray flowers of different color *Chrysanthemum varieties* [C]// *Advances in Ornamental Horticulture of China*. Changsha: China Forestry Publishing House, 2016: 119–126.
- 伏静, 刘琳子, 戴思兰. 不同花色菊花品种舌状花解剖结构观察 [C]// *中国观赏园艺研究进展*. 长沙: 中国林业出版社, 2016: 119–126.
- [41] GORTON H L, VOGELMANN T C. Effects of epidermal cell shape and pigmentation on optical properties of antirrhinum petals at visible and ultraviolet wavelengths [J]. *Plant Physiol*, 1996, 112(3): 879–888. doi: 10.1104/pp.112.3.879.
- [42] DAI S L. *Genetics of Garden Plant* [M]. 2nd ed. Beijing: China Forestry Press, 2010: 191–192.
- 戴思兰. 园林植物遗传学 [M]. 第2版. 北京: 中国林业出版社, 2010: 191–192.
- [43] BAUMANN K, PEREZ-RODRIGUEZ M, BRADLEY D, et al. Control of cell and petal morphogenesis by R2R3 MYB transcription factors [J]. *Development*, 2007, 134(9): 1691–1701. doi: 10.1242/dev.02836.
- [44] LIN D G, ZENG L, PEI F, et al. Anatomical structures of vegetative organs and ray floret in *Tagetes erecta* L. [J]. *J Shanghai Jiaotong Univ (Agric Sci)*, 2015, 33(4): 59–64. doi: 10.3969/j.issn.1671-9964.2015.04.009.
- 林登贵, 曾丽, 裴峰, 等. 万寿菊营养器官及舌状花解剖结构的研究 [J]. *上海交通大学学报(农业科学版)*, 2015, 33(4): 59–64. doi: 10.3969/j.issn.1671-9964.2015.04.009.
- [45] XIAO W F, LI Z, CHEN H M, et al. Comparing the petal micro-structure of different color *Phalaenopsis* [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2017, 33(7): 104–111.
- 肖文芳, 李佐, 陈和明, 等. 不同颜色蝴蝶兰花瓣表皮细胞形态差异比较 [J]. *中国农学通报*, 2017, 33(7): 104–111.
- [46] LEI T. *The studies on the pigments material and their distribution characteristics in Zantedeschia hybrida* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- 雷霆. 彩色马蹄莲佛焰苞呈色物质及其分布特征研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
- [47] QI Y Y, LOU Q, LI H B, et al. Anatomical and biochemical studies of bicolored flower development in *Muscari latifolium* [J]. *Protoplasma*, 2013, 250(6): 1273–1281. doi: 10.1007/s00709-013-0509-8.
- [48] MENG X C, ZHANG Y J, WANG X J. Content changes of anthocyanin, reducing sugar and soluble protein during the flower development of *Petunia hybrida* [J]. *J South China Norm Univ (Nat Sci)*, 2001, 33(2): 96–99.
- 孟祥春, 张玉进, 王小菁. 矮牵牛花瓣发育过程中花色素苷、还原糖及蛋白质含量的变化 [J]. *华南师范大学学报(自然科学版)*, 2001, 33(2): 96–99.
- [49] CHEN D F, ZHANG Y, FANG Z. Study on the content of anthocyanin and related biochemical substances during the petal development in *Impatiens×hawkerii* [J]. *J Agric Univ Hebei*, 2008, 31(3): 28–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-1573.2008.03.006.
- 陈段芬, 张岩, 方正. 新几内亚凤仙花瓣发育过程中花色素苷及其相关生化物质含量的研究 [J]. *河北农业大学学报*, 2008, 31(3): 28–32. doi: 10.3969/j.issn.1000-1573.2008.03.006.
- [50] ZHAO C L, GUO W M, CHEN J Y. Formation and regulation of flower color in higher plants [J]. *Chin Bull Bot*, 2005, 22(1): 70–81.
- 赵昶灵, 郭维明, 陈俊愉. 植物花色形成及其调控机理 [J]. *植物学通报*, 2005, 22(1): 70–81. doi: 10.3969/j.issn.1674-3466.2005.01.013.
- [51] FU L J, LI H H, LI L, et al. Reason of flower color change in *Lonicera japonica* [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, 49(10): 155–161. doi: 10.11707/j.1001-7488.20131024.
- 付林江, 李厚华, 李玲, 等. 金银花花色变化原因分析 [J]. *林业科学*, 2013, 49(10): 155–161. doi: 10.11707/j.1001-7488.20131024.
- [52] ZHUO Y G, LIU R H, GU F S, et al. The factors influencing anthocyanins stability and progress on application research [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2018, 45(24): 70–72. doi: 10.3969/j.issn.1007-1865.2018.24.037.
- 卓毓光, 刘儒华, 古福生, 等. 花青素稳定性影响因素与应用研究进展 [J]. *广东化工*, 2018, 45(24): 70–72. doi: 10.3969/j.issn.1007-1865.2018.24.037.
- [53] TANG D Q, XU Y Q, YUAN Y, et al. Effects of physical and chemical factors on anthocyanin stability in *Hyacinthus* [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2016, 40(4): 69–73. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.04.011.
- 唐东芹, 徐怡倩, 袁媛, 等. 理化因素对风信子花色苷稳定性的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2016, 40(4): 69–73. doi: 10.3969/j.issn.1000-2006.2016.04.011.
- [54] WEI X Q, XU L, ZHANG X J, et al. Identification of anthocyanins and their stability and antioxidant activity in wax apple [J]. *J Fruit Sci*, 2019, 36(2): 203–211. doi: 10.13925/j.cnki.gsxb.20180285.
- 魏秀清, 许玲, 章希娟, 等. 莲雾花色苷组分鉴定及其稳定性和抗氧化性 [J]. *果树学报*, 2019, 36(2): 203–211. doi: 10.13925/j.cnki.gsxb.20180285.