

夏 溪, 龚 睿, 张春英. 不同颜色锦绣杜鹃花瓣中花青素苷组成及呈色机制[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 207-213.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2022.01.025

不同颜色锦绣杜鹃花瓣中花青素苷组成及呈色机制

夏 溪, 龚 睿, 张春英

(上海植物园, 上海城市植物资源开发应用工程技术中心, 上海 200231)

摘要: 以 5 个不同花色的锦绣杜鹃品种为研究材料, 通过超高效液相色谱-离子淌度-四极杆飞行时间质谱联用仪(UPLC-Q-TOF-MS)方法对其花瓣中含有的花青素苷成分和含量进行分析。结果表明, 5 个样品花瓣中含有的花青素苷组成和含量存在明显差异。矢车菊素类糖苷是锦绣杜鹃的主要糖苷类型, 紫粉色的粉鹤品种和紫红色的紫鹤品种中含有的花青素苷种类最多, 紫红色的紫鹤品种中飞燕草素类、锦葵素类、矮牵牛素类这 3 类的花青素苷种类和含量最高。玫红色的玫瑰琉球红品种中含有的花青素苷总量最高, 推测玫红色系中可能存在一些转录因子上调花色素生物合成途径的关键基因。研究发现飞燕草素 3-半乳糖苷与花瓣的红色着色相关, 矢车菊素 3-阿拉伯糖苷与花瓣的玫红色着色相关, 矮牵牛素 3-O-阿拉伯糖苷与加深花瓣的紫色着色相关。

关键词: 锦绣杜鹃; 花色; 花青素苷

中图分类号: S685.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)01-0207-07

Anthocyanin composition and coloration mechanism in petals of *Rhododendron pulchrum* with different colors

XIA Xi, GONG Rui, ZHANG Chun-ying

(Shanghai Botanical Garden, Shanghai Urban Plant Resources Development and Application Engineering Research Center, Shanghai 200231, China)

Abstract: In this study, using *Rhododendron pulchrum* with five different colors as the research materials to analyze the components and contents of anthocyanin in petals by ultra-performance liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-Q-TOF-MS). The results showed that there were significant differences in the composition and content of anthocyanin in petals of five samples. Cyanidin glycosides were the main glycosides of *Rhododendron pulchrum*. Fenhe and Zihe contained the most anthocyanins. The contents and types of delphinidin, malvidin and petunidin were highest in Zihe. Meiguiliuqihong contained the highest total amount of anthocyanins, which suggested that there may be some transcription factors up-regulating key genes in anthocyanin biosynthesis pathway. Delphinidin 3-galactoside is associated with red coloring of petals, cyanidin 3-arabinoside is associated with rose magenta coloring of petals, and the petunidin 3-O-arabinoside is associated with purpleness of petals in *Rhododendron pulchrum*.

Key words: *Rhododendron pulchrum*; flower color; anthocyanin

花色是植物的主要观赏性状。色素是植物花色呈现的基础, 植物体内的色素类群主要为类黄酮、类胡萝卜素、甜菜色素和叶绿素, 其中类黄酮是最主要

的色素。花青素苷是水溶性类黄酮色素中最重要的一类, 广泛存在于绝大部分陆生植物的液泡中, 花卉中的主要呈色物质大部分与之有关^[1]。目前发现的天然花青素有天竺葵素(Pelargonidin)、矢车菊素(Cyanidin)、芍药色素(Peonidin)、飞燕草素(Delphinidin)、锦葵素(Malvidin)、矮牵牛素(Petunidin)和报春花素(Hirsutidin)等。目前应用多种技术已在植物中鉴定了多种花青素苷的结构^[2-5], 共鉴定出

收稿日期: 2021-05-07

基金项目: 上海市科学技术委员会科技计划项目(20392000700)

作者简介: 夏 溪(1984-), 女, 江苏铜山人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为观赏植物育种。(E-mail) xiaxi@shbg.org

通讯作者: 张春英, (E-mail) zhangchunying@shbg.org

700多种不同的花青素苷衍生物^[6]。

杜鹃花属(*Rhododendron*)植物花色丰富,具有很高的观赏价值,关于其花青素苷的研究结果时有报道。目前已在杜鹃花中检测出矢车菊素、天竺葵素、芍药色素、锦葵素、飞燕草素和矮牵牛素等,其中主要以矢车菊素和飞燕草素为主^[7],这些花青素多以3-单糖苷和3,5-双糖苷的形式存在^[8]。在杜鹃花属植物花瓣花青素苷成分方面已有部分研究^[9-11],研究人员发现在杜鹃花开花过程中,其花青素苷种类不变但含量差异极为显著^[12]。以上研究结果显示,花青素苷种类和含量具有物种特异性。锦绣杜鹃(*Rhododendron pulchrum*)属于杜鹃花科(Ericaceae)杜鹃花属映山红亚属(*Rhododendron* Subgenus *Tsutsusi*)植物^[13],广泛栽培于欧洲温带地区、亚洲和北美^[14],是中国常见的栽培杜鹃花类群^[15],具有较强的抗逆性,在长三角地区以及福建省、湖南省、广东省的绿地栽培中应用广泛。Mizuta等认为映山红亚属(*Rhododendron* Subgenus *Tsutsusi*)的红色系花花青素以矢车菊素和芍药色素为主,蓝色系花花青素以飞燕草素、矮牵牛素和锦葵素为主^[16]。目前关于锦绣杜鹃的研究主要集中在生物学、生理学^[15,17-20]和分子标记^[21]等方面,有关花青素苷的研究多集中于提取方法^[22]和抗氧化性^[23]等,关于其花青素苷成分的分析仅见于钱大伟等的研究,该研究发现锦绣杜鹃紫色花瓣中主要花青素是芍药色素,粉色花瓣中主要花青素是天竺葵素,而白色花瓣中未检测到花青素^[24]。但该研究仅分析了不同颜色锦绣杜鹃中含有的花青素类型,对每种花青素的具体糖苷结构并未做进一步的解析。

本研究以5种不同花色的锦绣杜鹃为研究对象,采用比色卡和色差仪描述植物花色的表型,利用超高效液相色谱-离子淌度-四极杆飞行时间质谱联用仪(UPLC-Q-TOF-MS)方法对5种锦绣杜鹃花瓣中的花青素苷成分进行分析,通过探讨锦绣杜鹃花色和花青素苷组成及含量间的关系,为解析其呈色机理及新奇花色品种选育奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以白鹤(Baihe)、粉鹤(Fenhe)、大红琉球红(Dahongliuqiuhong)、玫瑰琉球红(Meigui-liuqi-

uhong)、紫鹤(Zihe)5个锦绣杜鹃品种的花瓣为试验材料,进行花青素苷的组分和定量分析。试验材料均栽植于上海植物园杜鹃园内。

1.2 试验方法

1.2.1 比色和测色方法 取完全绽放的花瓣,在自然光下将花瓣中央部分与英国皇家园艺学会比色卡(RHSCC比色卡)进行比较,使用色差仪(三恩施NR10QC)测定花色的CIE表色系统中的 L^* 、 a^* 、 b^* 值,每个品种随机取3个单株作为重复。 L^* 表示亮度, L^* 的数值与亮度呈正相关。 a^* 反映红色到绿色, a^* 为正值表示偏红, a^* 为负值表示偏绿。 b^* 反映黄色到蓝色, b^* 为正值表示偏黄, b^* 为负值表示偏蓝^[25]。彩度 C 和色相角 h 分别根据公式 $C = 1/2(a^{*2} + b^{*2})$ 和 $h = \arctan(b^*/a^*)$ 计算^[26]。

1.2.2 花青素苷成分的UPLC-Q-TOF-MS分析

采用Waters公司的超高效液相色谱-离子淌度-四极杆飞行时间质谱联用仪(ACQUITY UPLC I Class UPLC/2D H Class&Vion IMS QTOF MS, UPLC-Q-TOF-MS),对花瓣花青素苷结构进行分析。称取0.3 g花瓣样品置于液氮中,加入2 ml 0.1%盐酸甲醇提取液(甲醇:水=70:30,体积比)后涡旋2 min,转置于KQ-500DE超声波清洗仪中25℃振荡40 min,4℃避光提取2 h,期间每隔30 min涡旋混匀一次。随后吸取含色素的上清液至新的离心管,于SIGMA 3K15离心机中,4℃,12 000 r/min离心10 min,重复2次,取50 μl上清液于进样瓶上机检测。色谱柱为WATERS ACQUITY UPLC BEH C18反相硅胶柱(2.1 mm×100.0 mm, 1.7 μm)。最佳分析条件为:流速为0.4 ml/min,柱温45℃,进样体积1 μl,检测波长520 nm。流动相组成为:A相,0.1%甲酸水;B相,0.1%甲酸乙腈。梯度洗脱程序为:0 min,5% B相;3 min,20% B相;10 min,100% B相;12 min,100% B相;15 min,95% B相;19 min,95% B相。质谱分析条件:电喷雾离子源,采用正离子扫描模式,扫描范围为50~1 000 m/z;毛细管电压为2 000 V,锥孔电压为40 V,锥孔气流量为50 L/h,雾化气流量为900 L/h,离子源温度为115℃,干燥温度为450℃,碰撞能量为6 eV/20~45 eV。利用Waters Mass Lynx V4.1分析质谱结果。

1.2.3 花青素苷相对含量分析 以标准品矢车

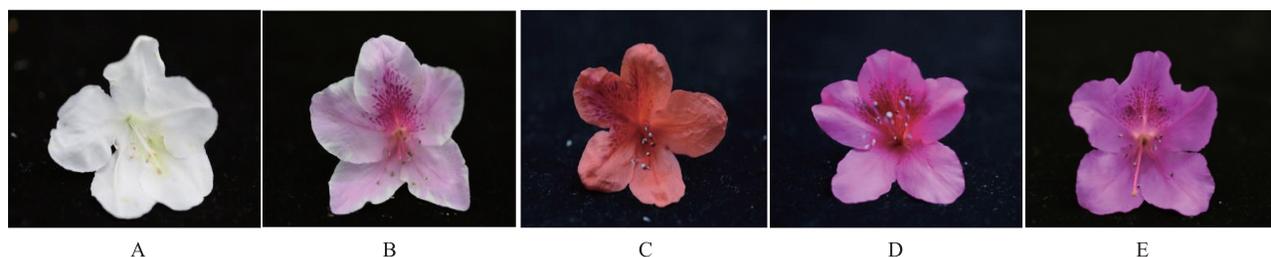
菊素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药色素-3-*O*-葡萄糖苷、飞燕草素-3-*O*-葡萄糖苷、锦葵素-3-*O*-葡萄糖苷和矮牵牛素-3-*O*-葡萄糖苷作为标准品(购自 Sigma 公司),对花青素苷各组份进行相对定量分析,重复 3 次。

1.2.4 数据分析 用 SPSS Statistics 22.0 和 Microsoft Office Excel 2007 进行数据整理及作图。

2 结果与分析

2.1 锦绣杜鹃花瓣花色表型

白鹤、粉鹤、大红琉球红、玫瑰琉球红、紫鹤 5 个杜鹃品种的花瓣颜色分别为白色、紫粉色、红色、玫红色和紫红色(图 1)。各个品种的 a^* 值、 b^* 值、 L^* 值、 C 值、 h 值见表 1。



A: 白色; B: 紫粉色; C: 红色; D: 玫红色; E: 紫红色。

图 1 5 种不同花色的锦绣杜鹃

Fig.1 *Rhododendron pulchrum* with five different colors

表 1 5 种不同颜色锦绣杜鹃花瓣颜色和花色参数

Table 1 Petal colors and color parameters of *Rhododendron pulchrum* with five different colors

品种名	英国皇家园艺学会比色卡 (RHSCC)	CIE 表色系统 (CIELAB)				
		a^*	b^*	L^*	C	h ($^\circ$)
白鹤	White Group NN155D	-0.22	-2	86.44	2.01	1.46
粉鹤	Red Purple Group 73C	19.78	-10.33	75.56	22.31	-0.48
大红琉球红	Red Purple 50B	60.67	41.22	62.78	73.35	0.60
玫瑰琉球红	Red Purple Group 61C	68.67	20.89	53.56	71.77	0.30
紫鹤	Red Purple 71D	52.56	-8.33	44.78	53.21	-0.16

5 种锦绣杜鹃中,显示红度的 a^* 值在红色和玫红色品种中最高,白色品种中最低。显示黄蓝值的 b^* 值在红色品种中最高,玫红色品种中次之,紫粉色品种中最低。与亮度相关的 L^* 值在白色品种中最高,紫红色品种中最低。 C 值表示彩度, C 值越大,颜色越纯,5 个品种中红色品种的 C 值最高,白色品种最低。5 个锦绣杜鹃品种中的 a^* 值与 b^* 值、 a^* 值与 L^* 值、 b^* 值与 L^* 值、 C 值与 L^* 值的线性拟合曲线见图 2, a^* 与 L^* 呈显著负相关关系 ($R^2 = 0.8332$), C 值与 L^* 值呈显著负相关关系 ($R^2 = 0.7422$),说明锦绣杜鹃花瓣的红度和彩度越高,亮度越低。

2.2 锦绣杜鹃花瓣花青素苷的结构

碎片离子峰 m/z 271.06、287.05、303.05、

301.07、317.06、331.08 分别对应天竺葵素 (Pg)、矢车菊素 (Cya)、飞燕草素 (Dp)、芍药色素 (Pn)、矮牵牛素 (Pt) 和锦葵素 (Mv) 苷元。花青素苷的糖基化常见有阿拉伯糖、葡萄糖、半乳糖、果糖和木糖等,糖基化反应通常最先发生在 3-羟基部位。根据花青素苷的特征质荷比、分子离子峰、保留时间和 $A_{440}/A_{vis-max}$ 值来推定花青素苷的结构。花青素苷的分子离子峰裂解释放 m/z 132 对应为阿拉伯糖, m/z 162 对应一分子的己糖残基。葡萄糖和半乳糖是参与花青素苷的常见己糖,由于花青素半乳糖苷洗脱时间小于葡萄糖苷^[27],因此花青素半乳糖苷出峰时间早于花青素葡萄糖苷,由此区分两种糖苷类型。当 $A_{440}/A_{vis-max} > 30\%$ 时,其花青素苷为 3-*O*-糖苷类型。

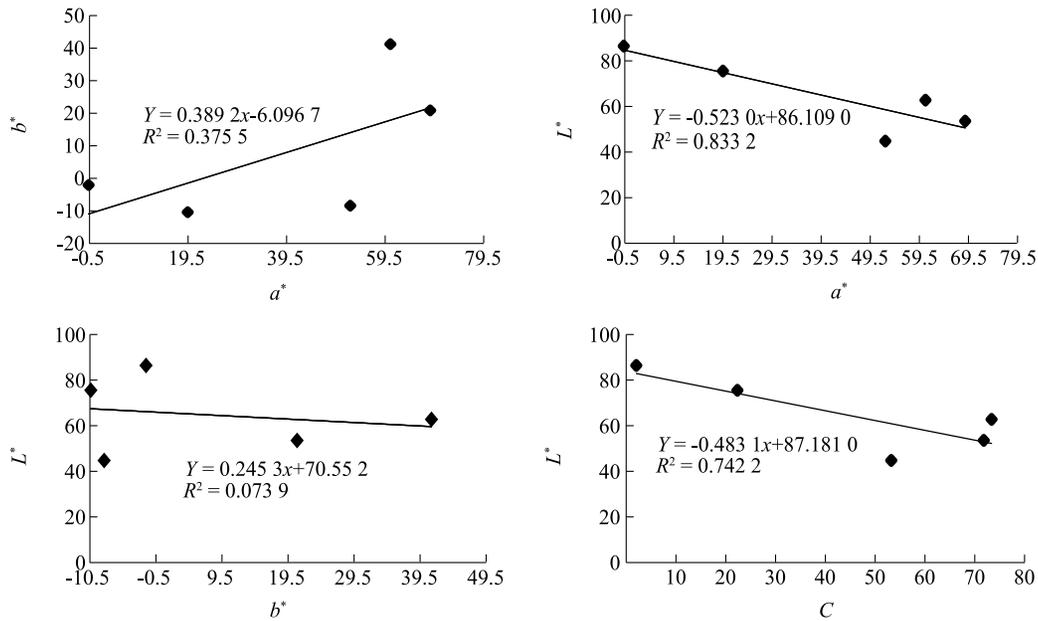


图2 锦绣杜鹃花瓣 CIE 表色系统参数间的相关关系

Fig.2 The correlation between the CIE Lab coloration parameters of *Rhododendron pulchrum*

5个不同花色的锦绣杜鹃花瓣在520 nm波长下检测出14种花青素苷,以C1~C14为编号,见表2。其中C1、C2、C3是矢车菊素类糖苷,C4、C5、C6

是芍药色素类糖苷,C7、C8、C9是飞燕草素类糖苷,C10、C11是锦葵素类糖苷,C12是矮牵牛素类糖苷,C13是飞燕草素苷元,C14是矮牵牛素苷元。

表2 锦绣杜鹃花瓣花青素苷 UPLC-Q-TOF-MS 分析及结构推测

Table 2 UPLC-Q-TOF-MS analysis and structural presumption of the anthocyanins in petals of *Rhododendron pulchrum*

花青素苷	分子离子([M] ⁺) 质荷比(m/z)	碎片离子([Y ₀] ⁺ 或[Y ₀ +H] ⁺)质荷比(m/z)	保留时间 (min)	推测结构
C1	419.097 8 [M] ⁺	287.055 21 [Y ₀ , M-132] ⁺	5.65	矢车菊素 3-阿拉伯糖苷 (Cyanidin 3-arabinoside)
C2	449.108 0 [M] ⁺	287.055 45 [Y ₀ , M-162] ⁺	5.45	矢车菊素 3-O-葡萄糖苷 (Cyanidin 3-O-glucoside)
C3	449.107 8 [M] ⁺	287.055 22 [Y ₀ , M-162] ⁺	5.17	矢车菊素 3-O-半乳糖苷 (Cyanidin 3-O-galactoside)
C4	433.113 1 [M] ⁺	301.070 84 [Y ₀ , M-132] ⁺	6.49	芍药色素 3-阿拉伯糖苷 (Peonidin 3-arabinoside)
C5	463.123 6 [M] ⁺	301.071 19 [Y ₀ , M-162] ⁺	6.29	芍药色素 3-O-葡萄糖苷 (Peonidin 3-O-glucoside)
C6	463.123 4 [M] ⁺	301.069 90 [Y ₀ , M-162] ⁺	6.05	芍药色素 3-O-半乳糖苷 (Peonidin 3-O-galactoside)
C7	435.092 2 [M] ⁺	303.050 25 [Y ₀ , M-132] ⁺	5.20	飞燕草素 3-阿拉伯糖苷 (Delphinidin 3-arabinoside)
C8	465.102 6 [M] ⁺	303.050 08 [Y ₀ , M-162] ⁺	4.97	飞燕草素 3-O-葡萄糖苷 (Delphinidin 3-O-glucoside)
C9	465.102 5 [M] ⁺	303.050 02 [Y ₀ , M-162] ⁺	4.73	飞燕草素 3-半乳糖苷 (Delphinidin 3-galactoside)
C10	463.123 7 [M] ⁺	331.081 66 [Y ₀ , M-132] ⁺	6.78	锦葵素 3-阿拉伯糖苷 (Malvidin 3-arabinoside)
C11	493.134 0 [M] ⁺	331.081 58 [Y ₀ , M-162] ⁺	6.55	锦葵素 3-O-葡萄糖苷 (Malvidin 3-O-glucoside)
C12	449.107 7 [M] ⁺	317.064 99 [Y ₀ , M-132] ⁺	6.05	矮牵牛素 3-O-阿拉伯糖苷 (Petunidin 3-O-arabinoside)
C13	/	303.051 1 [M] ⁺	10.15	飞燕草素苷元 (Delphinidin)
C14	/	317.067 1 [M] ⁺	8.77	矮牵牛素苷元 (Petunidin)

C1~C14为花青素苷编号。M:糖苷分子;[M]⁺:糖苷分子离子;Y₀:苷元;[Y₀]⁺:苷元分子离子。/:不含有分子离子峰。

2.3 锦绣杜鹃花瓣花青素苷的组成和含量

5个杜鹃品种中含有的花青素苷种类从少到高

多分别是白鹤、玫瑰琉球红、大红琉球红、粉鹤、紫鹤。红度较高的玫瑰琉球红和大红琉球红中均未检

测到锦葵素类糖苷。除白色品种外,其余品种中均含有较多种矢车菊素类糖苷,红度最高的玫瑰琉球红中含有的矢车菊素类糖苷种类最少。偏紫色调的粉鹤和紫鹤中含有的锦葵素类、飞燕草素类糖苷种类在所有品种中最多。

采用花青素苷标准品计算花瓣中花青素苷的相对含量。5个品种的花瓣中含有的花青素苷总量从低到高分别是白鹤、紫鹤、粉鹤、大红琉球红、玫瑰琉球红。红度最高的玫瑰琉球红和大红琉球红的花青素苷总量最高,分别为200.47 $\mu\text{g/g}$ 和141.02 $\mu\text{g/g}$,

矢车菊素类糖苷是这2个品种的主要花青素苷,分别占其总量的89.03%和98.42%。其中矢车菊素3-*O*-葡萄糖苷在大红琉球红中占比最高,占总花青素苷含量的62.58%,而此糖苷在红度最高的玫瑰琉球红中未检测到。粉鹤和紫鹤中含有的飞燕草素类、锦葵素类糖苷总量最高,这2类糖苷在紫鹤中的含量分别是在粉鹤中的7.04倍、5.24倍。5个品种中部分花青素苷由于响应值太低计算的含量为负数,未列入表中(表3中定性检测显示“+”,定量未显示数值)。

表3 锦绣杜鹃花青素苷组分的定性定量分析

Table 3 Qualitative and quantitative analysis of anthocyanin components in *R. pulchrum*

品种	比色卡 (RSHCC)	组分1 C1	组分2 C2	组分3 C3	组分4 C4	组分5 C5	组分6 C6	组分7 C7	组分8 C8	组分9 C9	组分10 C10	组分11 C11	组分12 C12	组分13 C13	组分14 C14
白鹤	NN155D	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+
粉鹤	73C	+17.85	+17.18	+13.99	+3.97	+12.48	+1.76	+0.74	-	-	-	+1.88	+0.92	-	-
大红琉球红	50B	+31.55	+88.25	+18.99	+	-	-	+	-	+1.47	-	-	+0.76	-	-
紫鹤	72B	+3.37	+3.46	+	+0.79	-	+0.74	+2.08	+3.13	-	+2.19	+7.66	+1.15	-	-
玫瑰琉球红	61C	+102.9	-	+75.57	+13.49	-	+7.90	-	-	-	-	-	+0.61	-	-

C1~C14为花青素苷编号,见表2。“+”表示检测到,未定量。“-”表示未检测到。数值为该化合物的相对含量(ng/g)。

3 讨论

本研究中红度最高的2个品种中矢车菊素类糖苷含量最高,说明矢车菊素类糖苷是锦绣杜鹃花瓣红色至紫红色的主要呈色物质。红色的大红琉球红中积累了高浓度的矢车菊素3-*O*-葡萄糖苷,而此糖苷在玫红色的玫瑰琉球红中并未检测到,说明矢车菊素3-*O*-葡萄糖苷与加深花瓣的红色着色相关。矢车菊素3-阿拉伯糖苷在玫瑰琉球红中的含量最高,推测矢车菊素3-阿拉伯糖苷可能与锦绣杜鹃花瓣的玫红色着色相关。矢车菊素和芍药色素在锦绣杜鹃花瓣中的呈色与其他植物一致,它们的积累会影响花色的红度^[28]。飞燕草素决定花色蓝色到蓝紫色的变化^[29],但本研究发现并非所有的飞燕草素类色素都与蓝紫色着色相关,飞燕草素3-阿拉伯糖苷、飞燕草素3-*O*-葡萄糖苷显示与紫色着色相关,而飞燕草素3-半乳糖苷仅在红色样品大红琉球红中检测到,说明其可能有助于花瓣红色的呈现。锦葵素类花青素苷仅在2个紫色品种中检测到,这2个品种中还存在高含量的矮牵牛素3-*O*-阿拉伯糖苷,说明矮牵牛素3-*O*-阿拉伯糖苷和锦葵素类花青素苷会使花瓣呈现紫红色或蓝紫色^[30]。白鹤中检

测到花青素,猜测由于类黄酮3-*O*-葡萄糖基转移酶基因等下游基因的缺陷,导致无色不稳定的花青素无法转化成有色稳定的花青素苷^[16]。其花瓣中间的绿色斑点,目前从花青素苷组成和含量水平上尚不能解释其形成的原因。斑点成因复杂而且在不同品系中机制不同^[31],也有可能和转座子的活性有关^[32]。

锦绣杜鹃的花色缺少蓝紫色,创新花色是锦绣杜鹃育种的主要目标之一。一般认为飞燕草素、锦葵素、矮牵牛素是培育蓝紫色花卉的主要色素。然而本研究发现仅飞燕草素3-阿拉伯糖苷、飞燕草素3-*O*-葡萄糖苷、锦葵素3-阿拉伯糖苷、锦葵素3-*O*-葡萄糖苷和矮牵牛素3-*O*-阿拉伯糖苷这5种花青素苷含量的增加会促进花瓣蓝紫色化的程度。因此,选择积累较高含量的蓝紫色相关花青素苷和较少红色相关花青素苷的样本,可作为培育蓝紫色锦绣杜鹃的理想亲本。pH值也是影响杜鹃花色的重要因素,研究表明只有蓝紫色相关花青素苷存在且表皮组织pH大于4的情况下,才能产生蓝紫色^[33]。黄酮和黄酮醇是重要的助色素物质,对花色也有重要的影响。Heursel等认为由于黄酮醇的存在导致映山红杂交后代中出现了蓝色调的花色^[34]。因此,

调节花青素苷和黄酮醇的合理比例,增加助色素含量,有助于扩大花色的变异。利用基因工程技术积累花瓣中的飞燕草色素培育蓝色花已有相关报道^[35],可为锦绣杜鹃的分子育种提供借鉴。

4 结论

5种不同花色的锦绣杜鹃中共检测到5种花青素,分别为矢车菊素、芍药色素、飞燕草素、锦葵素和矮牵牛素。这5种花青素进一步糖基化形成12种花青素苷。矢车菊素类糖苷是锦绣杜鹃的主要糖苷类型,其中飞燕草素3-半乳糖苷有助于花瓣红色的呈现,矢车菊素3-O-葡萄糖苷与加深花瓣的红色着色相关。矢车菊素3-阿拉伯糖苷可能与锦绣杜鹃花瓣的玫红色着色相关。飞燕草素3-阿拉伯糖苷、飞燕草素3-O-葡萄糖苷、矮牵牛素3-O-阿拉伯糖苷和锦葵素类花青素苷有助于花瓣蓝紫色的呈现。本研究结果为进一步研究花色的分子调控机制和花色新品种的培育提供了依据。

参考文献:

- [1] DASILVA F L, ESCRIBANO-BAILÓN M T, PÉREZALONSO J J, et al. Anthocyanin pigments in strawberry[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(2): 374-382.
- [2] DU Q Z, JERZ G, WINTERHALTER P. Isolation of two anthocyanin sambubiosides from bilberry (*Vaccinium myrtillus*) by high-speed counter-current chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 2004, 1045(1): 59-63.
- [3] ZHANG J J, WANG L S, SHU Q Y, et al. Comparison of anthocyanins in non-blotches and blotches of the petals of Xibei tree peony[J]. Scientia Horticulture, 2007, 114(2): 104-111.
- [4] LI C H, DU H, WANG L S, et al. Flavonoid composition and antioxidant activity of tree peony (*Paeonia* section Moutan) yellow flowers[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2009, 57: 8496-8503.
- [5] NGUYEN THI THU H, MIYAJIMA I, URESHINO K, et al. Anthocyanins of wild *Rhododendron simsii* Planch. flowers in Vietnam and Japan[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 2011, 80: 206-213.
- [6] DIACONEASA Z, STIRBU I, XIAO J B, et al. Anthocyanins, vibrant color pigments, and their role in skin cancer prevention[J]. Biomedicine, 2020, 8: 336.
- [7] 王禹, 张广辉, 赫京生, 等. 杜鹃花色研究进展[J]. 世界林业研究, 2020, 33(5): 19-24.
- [8] LI J B, HASHIMOTO F, SHIMIZU K, et al. Anthocyanins from red flowers of *Camellia* cultivar 'Dalicha' [J]. Phytochemistry, 2008, 69(18): 3166-3171.
- [9] DE L. The flower pigments of the belgian hybrids of *Rhododendron simsii* and other species and varieties from *Rhododendron* subseries obtusum[J]. Phytochemistry, 1969, 8(1): 253-259.
- [10] ASEN S, BUDIN P S. Cyanidin-3-arabinoside-5-glucoside, an anthocyanin with a new glycosidic pattern, from flowers of 'Red Wing' azaleas[J]. Phytochemistry, 1966, 5(6): 1257-1261.
- [11] 郑茜子, 赵冰, 曾慧敏, 等. 3种不同颜色秦岭美容杜鹃花瓣中色素组成和含量比较分析[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 62-68.
- [12] 李崇辉, 王亮生, 舒庆艳, 等. 迎红杜鹃花色色素组成及花色在开花过程中的变化[J]. 园艺学报, 2008, 35(7): 1023-1030.
- [13] 朱春艳, 李志炎, 鲍淳松, 等. 我国杜鹃花资源的保护与开发利用[J]. 中国野生植物资源, 2007, 26(2): 28-30.
- [14] GALLE F C. Azaleas-plants, habits, flowers, and leaves [M]. Portland: Azaleas Timber Press, 1987: 35-51.
- [15] 唐源江, 武晓燕. 锦绣杜鹃盛花期叶的光合特性研究[J]. 北方园艺, 2010(21): 68-71.
- [16] MIZUTA D, BAN T, MIYAJIMA I, et al. Comparison of flower color with anthocyanin composition patterns in evergreen azalea[J]. Scientia Horticulturae, 2009, 122(4): 594-602.
- [17] 张超仪. 杜鹃花属植物杂交亲和性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.
- [18] 黄天雄, 何颖, 郁书君. 锦绣杜鹃花芽分化与叶片物质变化的相关性研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(4): 709-714.
- [19] 徐宝贵, 李松慧, 宋明霞. 锦绣杜鹃花抗菌、抗炎活性及其有效部位研究[J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2018, 31(3): 86-92.
- [20] 赵健, 仇硕, 李秀娟, 等. 不同激素对锦绣杜鹃的催花作用[J]. 广西植物, 2009, 29(1): 92-95.
- [21] 王书珍, 张羽佳, 黄诗颖, 等. 基于锦绣杜鹃花蕾转录组的 SSR 标记开发及应用[J]. 林业科学研究, 2019, 32(3): 97-104.
- [22] 沈腾滨, 张梅, 唐旭艳, 等. 基于均匀设计的锦绣杜鹃花色苷提取工艺优选[J]. 井冈山大学学报, 2016, 37(5): 21-24.
- [23] 张梅. 锦绣杜鹃花色苷稳定性和抗氧化性研究[J]. 南阳理工学院学报, 2017, 9(2): 104-108.
- [24] 钱大伟, 陈小梅, 李敏, 等. 锦绣杜鹃花瓣色素及总酚含量分析[J]. 亚热带农业研究, 2020, 16(1): 29-34.
- [25] 周蓉, 蒋芳玲, 梁梅, 等. 用色差仪法定量分析番茄果实番茄红素的含量[J]. 江西农业学报, 2012, 24(9): 45-48, 50.
- [26] WANG L S, HASHIMOTO F, SHIRAISHI A, et al. Chemical taxonomy of the Xibei tree peony from China by floral pigmentation [J]. Journal of Plant Research, 2004, 117(1): 47-55.
- [27] 孟晗, 付灯祥, 吴艳梅, 等. 花毛茛和银莲花花瓣中花青素苷组成及含量与其花色的关系[J]. 园艺学报, 2020, 47(12): 2362-2372.
- [28] TANAKA Y, OHMIYA A. Seeing is believing: engineering anthocyanin and carotenoid biosynthetic pathways[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2008, 19(2): 190-197.
- [29] 李霞, 吴钰滢, 封晔. 风信子不同花色品种花青素苷含量及相关基因表达分析[J]. 分子植物育种, 2020, 18(14): 4562-

- 4571.
- [30] LIU L, ZHANG L Y, WANG S L, et al. Analysis of anthocyanins and flavonols in petals of 10 *Rhododendron* species from the Sygera Mountains in Southeast Tibet[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 104(7): 250-256.
- [31] SHAHIN A, ARENS P, VAN H A W, et al. Genetic mapping in *Lilium*: mapping of major genes and quantitative trait loci for several ornamental traits and disease resistances[J]. *Plant Breeding*, 2010, 130(3): 372-382.
- [32] DE S S, DEBERGH P, VAN B E, et al. Molecular characterisation of flower color genes in azalea sports (*Rhododendron simsii* hybrids)[J]. *Acta Horticulturae*, 2001, 552: 143-150.
- [33] ASEN S, NORRIS K H, STEWART R N. Effects of pH and concentration of the antho-cyanin-flavonol complex on the color of 'Better Times' rose[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1971, 96: 770-773.
- [34] HEURSEL J. Diversity of flower colours in *Rhododendron simsii* Planch and prospects for breeding[J]. *Euphytica*, 1981, 30(1): 9-14.
- [35] KATSUMOTOY, FUKUCHI-MIZUTANI M, FUKUI Y, et al. Engineering of the rose flavonoid biosynthetic pathway successfully generated blue-hued flowers accumulating delphinidin[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2007, 48(11): 1589-1600.

(责任编辑:张震林)