

引用格式:

张卉, 沈守云, 廖秋林, 朱宁华. 基于代谢组学分析的紫色和白粉色花的鹿角杜鹃呈花色物质差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(4): 430–435.

ZHANG H, SHEN S Y, LIAO Q L, ZHU N H. Metabolomics-based analysis of flower color differences between white-pink *Rhododendron latoucheae* and purple *Rhododendron latoucheae*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(4): 430–435.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基于代谢组学分析的紫色和白粉色花的 鹿角杜鹃呈花色物质差异

张卉, 沈守云*, 廖秋林, 朱宁华

(中南林业科技大学风景园林学院, 湖南 长沙 410004)

摘 要: 于紫色花和白粉色花鹿角杜鹃开花过程中全绿期、露红期、初花期、盛花期, 采用超高效液相色谱-串联质谱技术, 测定鹿角杜鹃花瓣代谢物的含量; 通过正交偏最小二乘判别法(OPLS-DA)分析筛选出差异代谢物, 利用 KEGG 数据库对差异代谢物进行富集分析, 进一步筛选与花色相关的关键代谢物, 通过相关性分析验证关键代谢物与鹿角杜鹃花色的相关性。结果表明: 在鹿角杜鹃的花瓣中共检测到 1057 种代谢物, 其中差异代谢物 243 种, 差异代谢物在类黄酮和花青素代谢通路中显著富集; 紫色花鹿角杜鹃花瓣中锦葵色素-3-O-葡萄糖苷的含量远高于白粉色花鹿角杜鹃的。推测锦葵色素-3-O-葡萄糖苷是鹿角杜鹃花瓣呈紫色的关键花青苷, 二氢杨梅素和没食子儿茶素可能通过类黄酮合成通路影响鹿角杜鹃花青素的合成, 进而影响鹿角杜鹃的花色。

关 键 词: 鹿角杜鹃; 花色; 代谢组学; 超高效液相色谱-串联质谱; 类黄酮合成通路

中图分类号: S685.21

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)04-0430-06

Metabolomics-based analysis of flower color differences between white-pink *Rhododendron latoucheae* and purple *Rhododendron latoucheae*

ZHANG Hui, SHEN Shouyun*, LIAO Qiulin, ZHU Ninghua

(College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: The purple flowers and white pink flowers of *Rhododendron latoucheae* were selected during the flowering process including all-green stage, showing red stage, early flowering stage and full blooming stage. Determination of metabolites of *Rhododendron latoucheae* petals was conducted based on ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry(UPLC-MS/MS). The differential metabolites were screened by orthogonal partial least squares discriminant analysis(OPLS-DA), and the key differential metabolites associated with flower color were screened by enrichment analysis using the KEGG database, and the correlation analysis was used to verify the correlation between the key metabolites and flower color of *Rhododendron latoucheae*. The results showed that a total of 1057 metabolites were detected in the petals of *Rhododendron latoucheae*, including 243 differential metabolites, which were significantly enriched in flavonoid and anthocyanin metabolic pathways, and the content of malvidin-3-O-glucoside in the petals of purple-flowered *Rhododendron latoucheae* was much higher than that of white-pink-flowered *Rhododendron latoucheae*. Therefore, it is speculated that malvidin-3-O-glucoside is the key anthocyanin for the purple color of *Rhododendron*

收稿日期: 2022-02-20

修回日期: 2022-05-08

基金项目: 中央财政林业科技推广示范项目(XLK202213)

作者简介: 张卉(1996—), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事风景园林规划与设计研究, 782263079@qq.com; *通信作者, 沈守云, 博士, 教授, 主要从事风景园林规划与设计、生态恢复工程研究, shenshouyun@sina.com

latoucheae petals. Dihydropyricetin and galocatechin affect the synthesis of anthocyanins through the flavonoid synthesis pathway, which in turn affects the flower color of *Rhododendron latoucheae*.

Keywords: *Rhododendron latoucheae*; petal color; metabolomics; ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry(UPLC-MS/MS); flavonoid pathway

鹿角杜鹃的花色是其重要的观赏性状, 常见花色为白粉色^[1]。笔者所在课题组在野外调研时发现了紫色花鹿角杜鹃植株, 随后对其进行迁地保护, 通过定期、定株的物候观测发现, 紫色花鹿角杜鹃长势良好, 花色性状稳定, 观赏性比白粉色花的更高^[2]。植物花瓣呈紫色与花青素的含量相关, 紫色野生百合(*Lilium brownii*)主要呈色物质为花青素^[3]。花青素还是贴梗海棠(*Chaenomeles speciosa*)呈现红色及紫色的原因^[4]。王禹等^[5]发现, 多数杜鹃花科植物的花色取决于类黄酮物质的种类, 其中花青素对花色起关键作用, 黄酮醇起辅助呈色的作用。锦绣杜鹃(*Rhododendron pulchrum*)花瓣中主要呈色物质是花青素和黄酮醇^[6]。白色锦绣杜鹃中也存在少量飞燕草素和矢车菊素, 粉色锦绣杜鹃花瓣中的矢车菊素-3-O-芸香糖苷是紫色锦绣杜鹃花瓣的 6 倍^[7]。西藏东南部雪山 10 种高山杜鹃花瓣中花青素的含量与其花瓣的颜色相关, 其中紫罗兰色雪层杜鹃(*Rhododendron nivale*)和紫色山育杜鹃(*Rhododendron oreotrephes*)主要呈色代谢物为锦葵色素^[8]。尖叶杜鹃(*Rhododendron mucronulatum*)花瓣中含有矢车菊素、芍药花素、锦葵素^[9]。马缨杜鹃(*Rhododendron delavayi*)花瓣含有四种 3-O-糖基化的花青苷^[10]。

笔者采用超高效液相色谱-串联质谱(UPLC-MS/MS)技术, 测定白粉色花和紫色花鹿角杜鹃开花过程中花瓣代谢物的含量, 通过正交偏最小二乘判别法(OPLS-DA)分析筛选出差异代谢物, 进一步筛选紫色花鹿角杜鹃花瓣的呈色主要代谢物, 并对差异代谢物进行富集分析, 找出关键代谢物, 通过相关性分析验证关键代谢物与鹿角杜鹃花色表型的相关性, 以期对鹿角杜鹃花色改良提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选择湖南株洲市茶陵县移植 6 年且长势良好的紫色花、白粉色花鹿角杜鹃植株, 参考 YANG 等^[11]的研究, 采集全绿期(S1)、露红期(S2)、初花期(S3)、盛花期(S4)花瓣。

1.2 方法

1.2.1 杜鹃花瓣花色的测定

用色差仪对花瓣中颜色最均匀的部位进行测定。利用 CIE 体系中的 Lab 颜色模型对花瓣色彩进行量化^[12]。

1.2.2 杜鹃花瓣代谢物的测定

参照 CHEN 等^[13]的方法, 提取杜鹃花瓣代谢物; 参照杨赟^[14]的方法, 采用超高效液相色谱及质谱测定代谢物的含量。

1.3 数据处理

CIE-Lab 颜色系统中, L 值表示亮度, a 值表示红绿, b 值表示黄蓝, C 值表示彩度, $C = \sqrt{a^2 + b^2}$ ^[15]。利用 Analyst 1.6.1 和 MassBank、KNAPSAcK、MoToDB 和 METLIN 数据库^[16]进行花瓣代谢物鉴定。差异代谢物分析利用 R 语言, 进行正交偏最小二乘判别分析并对模型进行交叉验证^[17], 用 Q^2 表示 OPLS-DA 模型预测的能力: $Q^2 > 0.5$ 时, 表示模型预测能力较好; $Q^2 > 0.9$ 时, 为出色的模型。挑选 T -test 中 $P < 0.05$ 且 $VIP \geq 1$ 的显著差异代谢产物^[18], 运用 KEGG 数据库对差异代谢物进行富集分析, 最后运用 Python 3.9 Pandas 库对关键代谢物及花色性状数据进行 Pearson 相关性分析^[19]。

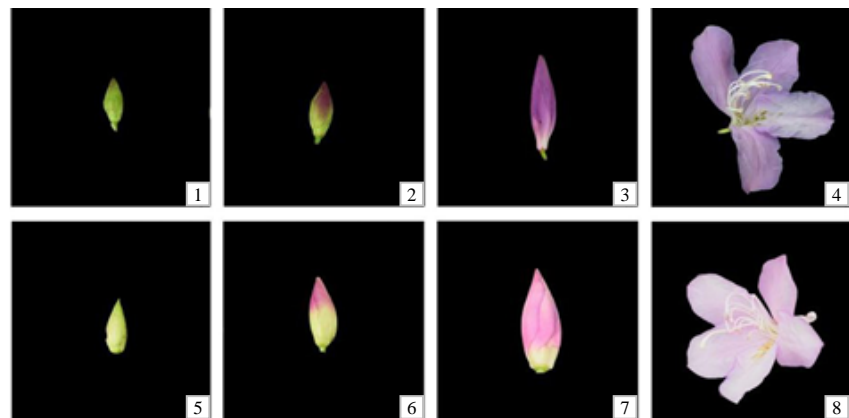
2 结果与分析

2.1 鹿角杜鹃的花色差异

紫色花和白粉色花鹿角杜鹃在开花过程中花瓣颜色存在色差(图 1), 紫色花和白粉色花鹿角杜鹃花瓣在露红期的 L 值差异不大(表 1), 但在初花期紫色花瓣亮度低于白粉色花瓣, 表明紫色花鹿角杜鹃进入初花期后花色开始明显深于白粉色花。紫色花和白粉色花鹿角杜鹃全绿期 a 值为负数, 花瓣颜色为绿, 露红期白粉色花鹿角杜鹃的 a 值比紫色花的大, 但初花期白粉色花鹿角杜鹃的 a 值开始减少, 而紫色花的 a 值在初花期达最高, 表明在初花期紫色花鹿角杜鹃红色增加, 而白粉色花鹿角杜鹃红色开始下降, 进而导致了初花期和盛花期紫色花鹿角杜鹃花色比白粉色花鹿角杜鹃花色鲜艳。从 b 值可

以看出, 紫色花和白粉色花鹿角杜鹃在全绿期偏黄, 其他时期都几乎偏蓝, 且紫色花杜鹃的蓝调更重。结合图 1 及表 1 花瓣 Lab 值, 可以看出白粉色

花、紫色花鹿角杜鹃在初花期和盛花期色差最大。由此可见, 初花期和盛花期是白粉色花与紫色花鹿角杜鹃花色显现差异的关键时期。



1 紫色花鹿角杜鹃全绿期花朵; 2 紫色花鹿角杜鹃露红期花朵; 3 紫色花鹿角杜鹃初花期花朵; 4 紫色花鹿角杜鹃盛花期花朵; 5 白粉色花鹿角杜鹃全绿期花朵; 6 白粉色花鹿角杜鹃露红期花朵; 7 白粉色花鹿角杜鹃初花期花朵; 8 白粉色花鹿角杜鹃盛花期花朵。

图 1 白粉色花和紫色花鹿角杜鹃 4 个时期花朵

Fig.1 Photos of white -pink flowers and purple flowers of *Rhododendron latoucheae* in four stages

表 1 白粉色花和紫色花鹿角杜鹃花瓣色彩表型参数

Table 1 The parameters of petal color phenotype of white-pink flowered and purple flowered <i>Rhododendron latoucheae</i>					
材料	时期	<i>L</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>C</i>
紫色花鹿角杜鹃	全绿期	(72.97±0.80)c	(−21.95±0.21)g	(47.78±0.13)b	(52.58±0.04)b
	露红期	(43.91±0.22)f	(29.11±0.10)c	(−7.50±0.24)d	(30.06±0.10)e
	初花期	(42.31±0.15)g	(45.11±0.23)a	(−27.35±0.19)c	(52.75±0.12)b
	盛花期	(65.04±0.62)e	(27.70±0.24)d	(−16.83±0.03)g	(32.41±0.21)d
白粉色花鹿角杜鹃	全绿期	(69.17±0.13)d	(−26.23±0.10)h	(59.23±0.20)a	(64.78±0.18)a
	露红期	(43.98±0.21)f	(40.63±0.07)b	(−10.38±0.26)f	(41.94±0.13)c
	初花期	(77.63±0.22)b	(22.99±0.64)e	(−9.62±0.26)e	(24.92±0.63)f
	盛花期	(84.58±0.49)a	(5.73±0.16)f	(−7.65±0.08)d	(9.56±0.06)g

同列不同字母表示材料间不同生育期差异有统计学意义($P < 0.05$)。

2.2 鹿角杜鹃花瓣代谢物的种类

从鹿角杜鹃花瓣中共检测到 1057 种代谢物。最主要的代谢物为类黄酮、酚酸、氨基酸等。黄酮类代谢物 285 种, 占 26.96%; 酚酸类代谢物 164 种, 占 15.52%; 脂质 126 种, 占 11.92%; 氨基酸衍生代谢物 96 种, 占 9.08%; 有机酸 73 种, 占 6.91%; 萜类 67 种, 占 6.34%; 核苷酸及其衍生物 58 种, 占 5.49%; 生物碱 46 种, 占 4.35%; 木脂素和香豆素 30 种, 占 2.84%; 鞣质 11 种, 占 1.04%; 醌类 6 种, 占 0.56%; 其他类 95 种, 占 8.99%。

2.3 不同生育期鹿角杜鹃花瓣代谢物的数量差异

将鹿角杜鹃花瓣代谢物数据进行 OPLS-DA 分析和交叉验证, 结果显示, 全绿期、露红期、初花期、盛开期的 Q^2 值分别为 0.983、0.980、0.981、0.979,

都大于 0.900, 表明模型建立良好。

根据 T -test $P < 0.05$ 且 $VIP \geq 1$ 挑选差异代谢物, 并对差异代谢物进行统计, 发现在全绿期显著差异代谢物共 110 种, 其中上调的为 29 种, 下调的为 81 种; 露红期显著差异代谢物共 110 种, 其中上调的为 27 种, 下调的为 83 种; 初花期显著差异代谢物共 100 种, 其中上调的为 40 种, 下调的为 60 种; 在盛花期显著差异代谢物共 112 种, 其中上调的为 46 种, 下调的为 66 种。

2.4 差异代谢物的 KEGG 富集分析

运用 KEGG 数据库对差异代谢物进行富集分析(图 2)。结果表明, 鹿角杜鹃各时期的差异代谢物在类黄酮通路中显著富集, 其中盛花期在花青素通路中显著富集。

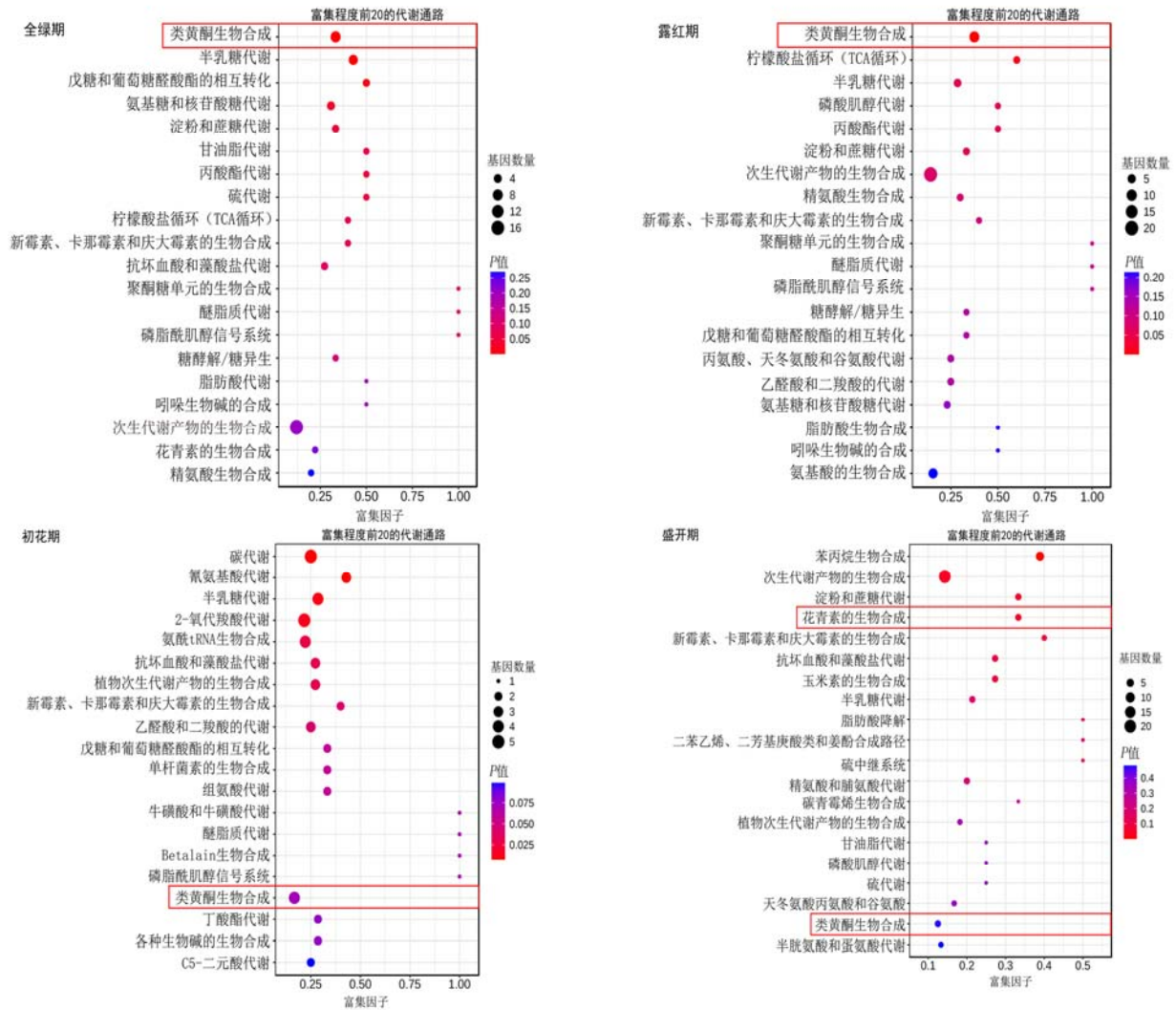


图 2 鹿角杜鹃花瓣差异代谢物代谢通路富集

Fig 2 KEGG enrichment map of differential metabolites in the petals of *Rhododendron latoucheae*

分析富集在类黄酮及花青素通路中的差异代谢物(表 2),发现全绿期及露红期差异花青素为矢车菊素-3,5-二-O-葡萄糖苷和锦葵色素-3-O-葡萄糖苷;初花期和盛花期紫色花鹿角杜鹃花青素的含量显著高于白粉色花的,其中芍药花素-3-O-葡萄糖苷和锦葵色素-3-O-葡萄糖苷含量差别最大。

表 2 鹿角杜鹃类黄酮及花青素合成途径中差异代谢物的差异值

Table 2 Differential value of differential metabolites in the synthesis pathway of flavonoids and anthocyanins in <i>Rhododendron latoucheae</i>							
开花期	差异代谢物	VIP	log ₂ (FC)	开花期	差异代谢物	VIP	log ₂ (FC)
全绿期	圣草酚	2.43	-1.38	初花期	二氢槲皮素	1.78	-0.64
	二氢槲皮素	2.72	-1.10		没食子儿茶素	5.59	-1.07
	二氢杨梅素	2.66	-0.57		二氢杨梅素	1.99	0.48
	锦葵色素-3-O-葡萄糖苷	1.25	1.85		芍药花素-3-O-葡萄糖苷	2.67	1.22
	矢车菊素-3,5-二-O-葡萄糖苷	1.96	-0.71		锦葵色素-3-O-葡萄糖苷	7.02	1.49
露红期	柚皮素	4.46	-1.25	盛花期	二氢杨梅素	1.69	0.72
	圣草酚	3.08	-2.07		芍药花素-3-O-葡萄糖苷	1.70	0.77
	二氢山奈酚	2.91	-0.88		锦葵色素-3-O-葡萄糖苷	5.90	1.69
	二氢槲皮素	2.41	-1.22				
	矢车菊素-3,5-二-O-葡萄糖苷	1.62	-0.46				

调控网络图(图 3)可以发现,全绿期和露红期,类黄酮合成通路上游代谢物如柚皮素、圣草酚、二氢山奈酚、二氢杨梅素的含量存在差异;初花期和盛花期,类黄酮合成通路下游的代谢物存在差异,

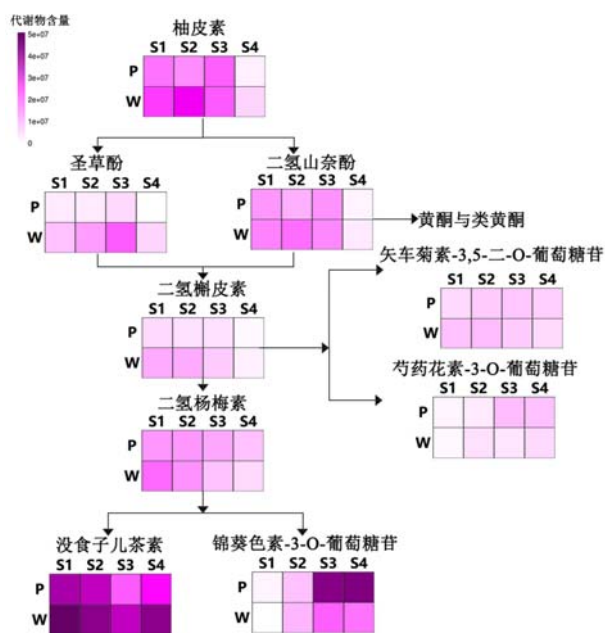


图 3 鹿角杜鹃花瓣差异类黄酮可能的合成网络推测

Fig.3 Speculation on the possible synthetic network of flavonoids in the petals of *Rhododendron latoucheae*

表 3 鹿角杜鹃花瓣关键代谢物与花色的 Pearson 相关性系数

花瓣色彩表型	Pearson 相关性系数							
	圣草酚	二氢槲皮素	二氢杨梅素	锦葵色素-3-O-葡萄糖苷	柚皮素	二氢山奈酚	没食子儿茶素	芍药花素-3-O-葡萄糖苷
C	0.27	0.15	0.98	0.82	0.48	0.50	-0.97	0.79
L	-0.17	-0.11	-0.93	-0.85	-0.37	-0.38	0.96	-0.86
a	0.31	0.21	0.99	0.80	0.52	0.55	-0.97	0.74
b	-0.11	0.05	-0.91	-0.87	-0.31	-0.33	0.95	-0.89

3 结论与讨论

类黄酮是调控植物花色的重要色素,花青苷又是类黄酮化合物中的关键呈色代谢物^[20]。在白粉色花和紫色花鹿角杜鹃花瓣中共检测到 1057 种代谢物,其中有 285 种类黄酮物质,占总代谢物的 26.96%,这 2 种花色的鹿角杜鹃在开花过程中的差异代谢物在类黄酮代谢通路上显著富集,说明类黄酮代谢物含量的差异可能对鹿角杜鹃花色造成影响。

对鹿角杜鹃花色进行量化处理,发现白粉色花和紫色花鹿角杜鹃花色差异大的时期是在初花期和盛花期。分析花瓣代谢物的含量,发现开花过程中 2 种花色的鹿角杜鹃在类黄酮及花青素合成通路存在差异,在初花期和盛花期含量差别最大的花青苷是锦葵色素-3-O-葡萄糖苷,这可能是紫色花鹿角杜鹃花色呈紫色的关键代谢物。根据 KEGG 数据库绘制出鹿角杜鹃在类黄酮与花青素生物合成途径差异代谢物的调控网络热图,发现白粉色花和紫

如锦葵色素-3-O-葡萄糖苷、没食子儿茶素、芍药花素-3-O-葡萄糖苷、二氢杨梅,其中紫色花鹿角杜鹃花瓣的芍药花素-3-O-葡萄糖苷、锦葵色素-3-O-葡萄糖苷、二氢杨梅素等代谢物的含量显著高于白粉色花的。

2.5 花瓣关键代谢物与花色的相关性

对初花期和盛花期关键代谢物的含量与花色表型性状作相关性分析,结果(表 3)显示,圣草酚、二氢山奈酚、柚皮素、二氢槲皮素等与鹿角杜鹃花色的相关性较弱;二氢杨梅素、锦葵色素-3-O-葡萄糖苷、芍药花素-3-O-葡萄糖苷与鹿角杜鹃花色的 C 值、a 值呈显著正相关;没食子儿茶素与鹿角杜鹃颜色的 C 值、a 值呈负相关。

据此,二氢杨梅素、锦葵色素-3-O-葡萄糖苷、没食子儿茶素、芍药花素-3-O-葡萄糖苷是影响鹿角杜鹃花瓣初花期和盛花期花色的关键代谢物。

色花鹿角杜鹃在二氢杨梅素代谢途径的分支中差异很大,锦葵色素-3-O-葡萄糖苷在初花期和盛花期显著上升,没食子儿茶素则显著下降,它们的合成底物均为二氢杨梅素,推测可能是由于紫色花鹿角杜鹃将二氢杨梅素转化成有色的锦葵色素-3-O-葡萄糖苷,白粉色花则将二氢杨梅素转化成的无色没食子儿茶素,从而导致了花色的差异。Pearson 相关性分析结果进一步验证了这一推论。

有研究者对杜鹃 7 个亚属的花色及花青素含量进行研究^[20],发现矢车菊素能使部分杜鹃花瓣偏红,锦葵色素和飞燕草素能使花瓣呈紫色。红紫色及红色的三花杜鹃主要的显色代谢物是矢车菊素,而紫罗兰色雪层杜鹃和紫色山育杜鹃主要色素为锦葵色素^[8]。其他植物中紫色花的形成也与锦葵色素等花青苷相关,紫色报春苣苔(*Primulina tabacum*)花瓣中含量最高的花青苷为锦葵色素^[21]。紫色鸳鸯茉莉(*Brunfelsia latifolia*)主要呈色物质为锦葵色素-3-O-

葡萄糖苷, 花瓣越紫, 则锦葵色素含量越多^[22]。紫色系牡丹(*Paeonia suffruticosa*)中含有大量芍药色素^[23], 锦葵色素-3-O-葡萄糖苷的增加会使紫鹃花瓣呈紫色^[24]。这些研究从一定程度上印证了鹿角杜鹃紫色花色可能受类黄酮代谢途径中二氢杨梅素分支的影响, 其中锦葵色素-3-O-葡萄糖苷可能对鹿角杜鹃花色呈紫色的影响最大。

鹿角杜鹃的观赏价值主要体现在开花及花色上, 在后续研究中将以类黄酮代谢途径中的二氢杨梅素分支为研究重点, 从分子层面进一步分析不同花色鹿角杜鹃锦葵色素-3-O-葡萄糖苷含量上存在差异的原因。

参考文献:

- [1] 廖菊阳, 彭春良, 黄滔, 等. 珍稀园林植物鹿角杜鹃新品种选育[J]. 湖南林业科技, 2012, 39(5): 57–59.
- [2] 黄地歌. 鹿角杜鹃迁地保护及繁育技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [3] 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.
- [4] 张洁. 四种观赏植物花青苷分析及其花色形成机制[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] WANG S Z, HUANG S Y, YANG J, et al. Metabolite profiling of violet, white and pink flowers revealing flavonoids composition patterns in *Rhododendron pulchrum* Sweet[J]. *Journal of Biosciences*, 2021, 46: 3.
- [8] 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(1): 250–256.
- [9] 赵歌. 杜鹃(*Rhododendron ripense* M.) 花色素的研究与应用[D]. 苏州: 苏州大学, 2012.
- [10] 徐德. 类黄酮-3-O-糖基转移酶调控马缨杜鹃花色呈色的机制研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.
- [11] YANG F S, NIE S, LIU H, et al. Chromosome-level genome assembly of a parent species of widely cultivated azaleas[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 5269.
- [12] 廖望仪, 沈芳杰, 周洋丽, 等. 石蒜属种质资源花色多样性与花色苷相关性分析[J]. 植物生理学报, 2021, 57(10): 2024–2032.
- [13] CHEN W, GONG L, GUO Z L, et al. A novel integrated method for large-scale detection, identification, and quantification of widely targeted metabolites: application in the study of rice metabolomics[J]. *Molecular Plant*, 2013, 6(6): 1769–1780.
- [14] 杨赞. ‘华仲 12 号’杜仲叶片呈红色的代谢组和转录组分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
- [15] 尹旭敏, 曾小峰, 商桑, 等. 基于 Lab 色空间分析塔罗科血橙果酒陈酿中色泽的变化[J]. 南方农业, 2020, 14(1): 45–49.
- [16] ZHU Z J, SCHULTZ A W, WANG J H, et al. Liquid chromatography quadrupole time-of-flight mass spectrometry characterization of metabolites guided by the METLIN database[J]. *Nature Protocols*, 2013, 8(3): 451–460.
- [17] BOCCARD J, RUTLEDGE D N. A consensus orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) strategy for multiblock Omics data fusion[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2013, 769: 30–39.
- [18] ZHANG Z H, HE J Q, NIN W W, et al. Biomarkers of obstructive nephropathy using a metabolomics approach in rat[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2018, 296: 229–239.
- [19] 余金. Python 语言在数据分析处理中的应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2022(6): 18–20.
- [20] DU H, LAI L M, WANG F, et al. Characterization of flower colouration in 30 *Rhododendron* species via anthocyanin and flavonol identification and quantitative traits[J]. *Plant Biology*, 2018, 20(1): 121–129.
- [21] 胡彬. 报春苣苔属植物花色变异的生化基础及转基因体系的构建[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2017.
- [22] 李敏, 罗宇婷, 卢小草, 等. 鸳鸯茉莉开花过程中花青素组成的变化[J]. 热带亚热带植物学报, 2018, 26(6): 627–632.
- [23] 张宝智, 胡永红, 韩继刚, 等. 七个江南牡丹品种花瓣中类黄酮物质分析[J]. 北方园艺, 2013(2): 61–65.
- [24] 夏溪, 龚睿, 张春英. 不同颜色锦绣杜鹃花瓣中花青素组成及呈色机制[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 207–213.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗 维