网络出版时间:2026-04-08 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.10.013

不同花色刺毛杜鹃花瓣花青素靶向代谢组学研究

杨华[1,2],宋绪忠[1,2]

(1 浙江省林业科学研究院,浙江 杭州 310023;2 浙江省全省林木育种重点实验室,浙江 杭州 310023)

[摘 要] 【目的】对刺毛杜鹃不同花色的代谢通路及关键代谢产物变化进行研究,以探明刺毛杜鹃花色差异的代谢机理,为刺毛杜鹃花色改良和分子育种提供科学参考。【方法】以14年生盆栽刺毛杜鹃为材料,采用超高效液相色谱-质谱(UPLC-MS/MS)技术对白色(C-5)、浅红色(C-3)和深红色(C-1)刺毛杜鹃花瓣的花青素进行测定,在此基础上,采用靶向代谢组学筛选不同花色刺毛杜鹃差异代谢物,并采用京都基因与基因组百科全书(Kyoto encyclopedia of genes and genomes,KEGG)数据库对筛选得到的差异代谢物进行富集通路分析。【结果】在3种花色刺毛杜鹃花瓣中共检测到83种花青素物质,主要包含19种矢车菊素,15种飞燕草素,14种天竺葵素,13种矮牵牛素,8种芍药花素,6种锦葵色素,6种原花青素,槲皮素、柚皮素各1种。C-1_vs_C-3、C-1_vs_C-5和C-3_vs_C-5组中显著差异代谢物分别有24,43和38种,3个比较组共有的显著差异代谢物质有6种。KEGG通路注释发现,差异代谢物质在花青素生物合成通路中明显富集。【结论】锦葵色素-3-O-阿拉伯糖苷和锦葵色素-3-O-半乳糖苷是刺毛杜鹃花紫色调差异产生的关键代谢物,而芍药花素-3-O-阿拉伯糖苷是红色调差异产生的关键代谢物。

[关键词] 刺毛杜鹃;代谢组学;代谢通路;花青素;代谢差异

[中图分类号] S685.21 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)10-0122-08

Targeted metabolomics study of anthocyanins in the petals of *Rhododendrons championae* with different flower colors

YANG Hua[1,2],SONG Xuzhong[1,2]

(1 *Zhejiang Academy of Forestry*,*Hangzhou*,*Zhejiang* 310023,*China*;
2 *Zhejiang Key Laboratory of Forest Genetics and Breeding*, *Hangzhou*,*Zhejiang* 310023,*China*)

Abstract:【Objective】The metabolic pathways and key metabolite changes of different flower colors of *R. championae* were studied and the metabolic mechanism of flower color differences of *R. championae* was expounded, to provide certain scientific references for the subsequent flower color improvement and molecular breeding of *R. championae*.【Method】Taking 14-year-old potted *R. championae* as the material, the anthocyanins in the petals of white (C-5), pink (C-3) and dark red (C-1) *R. championae* were determined by UPLC-MS/MS technology. On this basis, targeted metabolomics was used to screen the differential metabolites of *R. championae* among different flower colors. The enrichment pathway analysis was conducted on the screened differential metabolites by using the Kyoto encyclopedia of genes and genomes (KEGG) database.【Result】A total of 83 types of anthocyanin substances were detected in the three samples, primarily including 19 cyanidins, 15 delphinidins, 14 pelargonidins, 13 petunidins, 8 peonidins, 6 malvidins, 6 proanthocyanidins, 1 quercetin and 1 naringenin. There were 24 significantly differentiated metabolites in the C-1_vs_C-3 group, 43 in C-1_vs_C-5 group, and 38 in C-3_vs_C-5 group. And there were 6 significantly differentiated metabolites shared by the three

[收稿日期] 2025-08-18 [修回日期] 2025-10-27
[基金项目] 浙江省科技计划省属科研院所扶持专项(2024F1065-4);浙江省农业新品种重大专项花卉育种专项(2021C02071-2)
[作者简介] 杨华(1976—),女,江苏扬州人,副研究员,博士,主要从事林木遗传育种及森林培育研究。E-mail:ynpsta@126.com

comparison groups. KEGG pathway analysis revealed significant enrichment of differential metabolites in the anthocyanin biosynthesis pathway.【Conclusion】Malvidin-3-O-arabinoside and malvidin-3-O-galactoside were identified as the key metabolite responsible for flower purple color variation and peonidin-3-O-arabinoside for red color in *R. championae*.

Key words: *Rhododendrons championae*; metabolomics; metabolic pathway; anthocyanin; difference of metabolism

植物花色多种多样，是植物吸引传粉者的重要视觉信号，花色还帮助植物适应环境，如高紫外线地区的植物可能产生更多花青素，花色一般较深（如紫色、蓝色），以达到保护组织的目的。植物花色主要由类黄酮（如花青素）、类胡萝卜素和生物碱等色素决定。其中花青素是较常见的色素，其化学结构和细胞 pH 值的变化会导致花色从红到蓝转变。花色的形成受多个基因调控，涉及色素合成、转运和沉积等过程，如 *MYB*、*bHLH* 和 *WD40* 等基因在色素合成途径中起重要作用[1-4]，DNA 甲基化和组蛋白修饰等表观遗传机制也影响花色[5-7]。目前对植物花色研究涵盖生化、遗传、生态和应用等多个领域，不仅揭示了花色形成的机制，还在园艺、生态保护和生物技术中广泛应用[8-10]。

杜鹃花（*Rhododendron spp.*）是我国的传统名花，因其丰富的遗传多样性备受人们关注，特别是其花色从白、粉、红、紫到黄、橙，甚至蓝黑色，是研究物种分化的理想材料。杜鹃属植物育种的核心目标也是围绕花部性状开展，特别是花色的改良，色素组成是影响花色最关键的因素。从已有研究报道中可知，杜鹃属花瓣的色素成分包括花青素和黄酮醇[11]。不同花色杜鹃的主要色素并不相同，如缺少红色的杜鹃是因为不含有天竺葵色素，‘百合’（*R. pulchrum*‘baihe’）杜鹃花瓣中仅含少量飞燕草素（delphinidin）与矢车菊素（cyanidin）[12]，‘粉鹤’（*R. pulchrum*‘fenhe’）杜鹃花瓣中的矢车菊素-3-O-芸香糖苷（cyanidin-3-O-rutinoside）含量是‘紫鹤’（*R. pulchrum*‘zihe’）的 6 倍[13]。

刺毛杜鹃（*Rhododendrons championae*）属杜鹃属（*Rhododendron*）马银花亚属（*Rhododendrons subgen.* Azaleastrum），分布在我国东南 6 省，伞形花序有 2～7 朵花，盛花时满树是花十分壮观，且花香浓郁，是值得开发利用的一种乡土杜鹃[14]，但目前学者只对其繁殖技术[15-16]、抗逆性[17]、花香挥发性成分[18]、生态学特征[19]等方面开展了少量研究，关于其花色从白色向深红色变化机理还未见研究。为此，本研究对 3 种花色差异较明显的刺毛杜鹃进行花青素靶向代谢组学分析，阐明其花色多样的机理，以期为刺毛杜鹃花色改良和分子育种提供一定的科学参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

14 年生盆栽刺毛杜鹃，栽种于杭州（30°13.145′ N，120°1.438′ E），4 月底到 5 月初始花，于 2024 年 5 月 9 日 10：00 前采集处在盛开期的 3 种花色（白色 C-5RHSNN155D、浅红色 C-3RHS76C、深红色 C-1RHS75B，分别用 C-5、C-3 和 C-1 表示）花瓣（图 1），每种花色采集 1 株 1 朵花为一个样本，3 次重复，迅速放入干冰中，带回实验室用液氮冷冻 8～10 min，置于－80 ℃超低温冰箱备用。



C-1　　C-3　　C-5

C-1、C-3 和 C-5 分别表示深红色、浅红色和白色刺毛杜鹃。

C-1, C-3 and C-5 represent dark red, light red and white, respectively.

图 1　3 个花色刺毛杜鹃花瓣的表型性状

Fig. 1　Phenotypic traits of *R. championae* flowers of three colors

1.2　主要试剂与仪器

主要试剂有 Merck 甲醇、Sigma-Aldrich 甲酸、ExtraSynthese 标准品。Q-Trap 6500＋LC-MS/MS 购自 SCIEX，5424R 离心机购自 Eppendorf，MM400

球磨仪购自Retsch。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理 首先将超低温贮藏样品冷冻干燥处理后研磨(30 Hz,1.5 min),称取50 mg样品加入500 μL离心管,涡旋10 min,4 ℃离心3 min(12 000 r/min),吸取上清液,重复操作1次,用微孔滤膜(0.22 μm)过滤样品,用于超高效液相色谱-质谱(UPLC-MS/MS)技术分析,3次重复。

1.3.2 代谢物检测 根据文献[20-21]的方法进行代谢物检测。(1)UPLC检测条件。色谱柱:ACQUITY BEH C18 1.7 μm,规格2.1 mm×100 mm;流动相:A相为超纯水(加入体积分数0.1%甲酸),B相为甲醇(加入体积分数0.1%甲酸);洗脱梯度:0.00 min B相比例为5%,6.00 min增至50%,12.00 min增至95%并保持2 min,14 min降至5%,并平衡2 min;流速0.35 mL/min;柱温40 ℃;进样量2 μL。

(2)MS/MS检测条件。电喷雾离子源(electrospray ionization,ESI)温度550 ℃,正离子模式下质谱电压5 500 V,气帘气(curtain gas,CUR)241 kPa(35 psi)。在Q-Trap 6500+中,根据优化的去簇电压(declustering potential,DP)和碰撞能(collision energy,CE)进行样品扫描检测。

1.4 数据处理

根据MWDB(Metware Database)数据库对检测数据进行定性分析。在线(https://cloud.metware.cn/#/home)进行主成分分析(PCA)。采用Analyst 1.6.3软件处理质谱数据,获得差异倍数(fold change,FC),以lb(FC)≥1或lb(FC)≤-1作为筛选标准,筛选差异代谢物。采用京都基因与基因组百科全书(Kyoto encyclopedia of genes and genomes,KEGG)数据库,对筛选得到的差异代谢物进行富集通路分析。

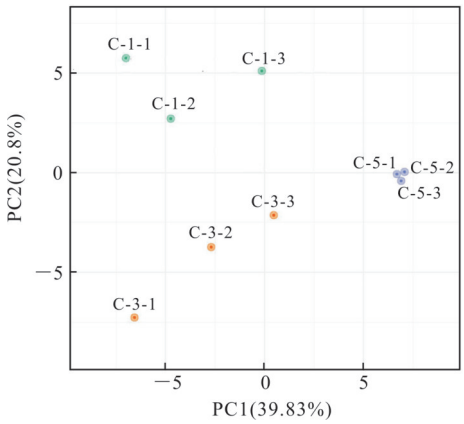
2 结果与分析

2.1 不同花色刺毛杜鹃花瓣花青素代谢物质的种类

从刺毛杜鹃花瓣中共检测到83种花青素物质,分别为19种矢车菊素,15种飞燕草素,14种天竺葵素,13种矮牵牛素,8种芍药花素,6种锦葵色素,6种原花青素,槲皮素、柚皮素各1种。对3种花色刺毛杜鹃花青素代谢物质开展聚类分析,结果显示相同花色样本聚为一类,说明各样本组内的生物学重复性较好,其中C-1和C-3先聚为一类,说明这两种偏红色花的代谢物质更相似。

2.2 不同花色刺毛杜鹃花瓣花青素代谢物质的差异分析

对3种花色刺毛杜鹃花瓣花青素代谢物数据进行主成分分析,结果(图2)显示,3个样品在二维图上表现出明显的分离趋势。根据lb(FC)≥1或lb(FC)≤-1筛选显著差异代谢物质,结果见表1。



C-1、C-3和C-5分别表示深红色、浅红色和白色刺毛杜鹃,其后的数字1,2,3表示重复。下同。

C-1, C-3 and C-5 represent dark red, light red and white, respectively, and the numbers 1, 2 and 3 following them indicate repetition. The same below.

图2 3种花色刺毛杜鹃花青素代谢物质的主成分(PCA)得分散点图

Fig. 2 Score scatter plot for PCA of anthocyanin metabolites of *R. championae* flowers of three colors

表1 3个花色刺毛杜鹃花瓣花青素的差异代谢物筛选结果

Table 1 Differential anthocyanin metabolite in *R. championae* petals of three colors

组名 Group name	显著差异数量 No. of significant difference	下调数量 No. of down regulated	上调数量 No. of up regulated
C-1_vs_C-3	24	10	14
C-1_vs_C-5	43	7	36
C-3_vs_C-5	38	7	31

表1显示,C-1_vs_C-5组的显著差异代谢物最多,有43种,主要表现为上调,从表型上也能看出C-1花色明显比C-5红。

3种花色刺毛杜鹃各比较组差异物质的韦恩图如图3所示。图3显示,3个比较组共有的显著差异代谢物质有6种,分别为飞燕草素-3-O-葡萄糖苷-5-O-半乳糖苷、矮牵牛素-3-O-(6″-O-咖啡酰)鼠李糖苷、天竺葵素-3-O-阿拉伯糖苷、矮牵牛素-3-O-阿拉伯糖苷、槲皮素-3-O-葡萄糖苷(异槲皮苷)和矢车菊素-3-O-阿拉伯糖苷-葡萄糖苷。

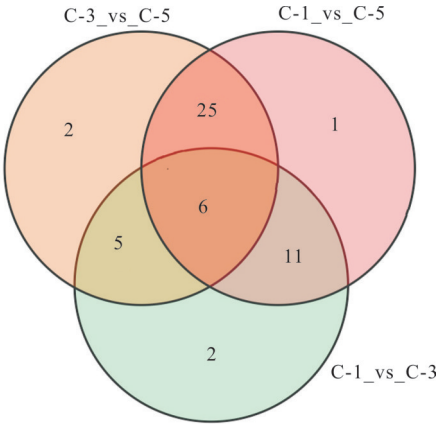


图 3　3种花色刺毛杜鹃各比较组差异物质的韦恩图

Fig. 3　Venn diagram of differential metabolites in each comparison group of *R. championae* flowers of three colors

6种显著差异代谢物中，飞燕草素-3-O-葡萄糖苷-5-O-半乳糖苷和矮牵牛素-3-O-(6″-O-咖啡酰)鼠李糖苷在3组中都上调，C-1、C-3和C-5中以上2种物质的含量分别为0.516 0，0.106 8，0和0.063 4，0.001 1，0 μg/g，均表现为C5＜C3＜C1；天竺葵素-3-O-阿拉伯糖苷和矮牵牛素-3-O-阿拉伯糖苷在C-1_vs_C-3组中下调，在C-1_vs_C-5和C-3_vs_C-5组中上调，C-1、C-3和C-5中以上2种物质的含量分别为0.552 9，1.798 3，0.092 1和1.868 6，3.874 3，0 μg/g，均表现为C5＜C1＜C3；槲皮素-3-O-葡萄糖苷(异槲皮苷)在C-3_vs_C-5和C-1_vs_C-5组中均下调，在C-1_vs_C-3组中上调，C-1、C-3和C-5中该物质的含量分别为9.478 5，4.579 0，35.916 4 μg/g，表现为C3＜C1＜C5；矢车菊素-3-O-阿拉伯糖苷-葡萄糖苷在C-1_vs_C-3和C-1_vs_C-5组中均下调，在C-3_vs_C-5组中上调，C-1、C-3和C-5中该物质的含量分别为0.008 0，0.052 3，0.016 1 μg/g，表现为C1＜C5＜C3。

在C-1_vs_C-3组中，矢车菊素-3-O-(丙二酰)(葡萄糖苷)半乳糖苷、矢车菊素-3-(6-O-p-对香豆酰)-葡萄糖苷、飞燕草素-3-O-(6-O-丙二酰-β-D-葡萄糖苷)、天竺葵素-3-O-(6″-O-木糖基)半乳糖苷等4种物质在C-1中未检测到，矢车菊素-3-芥子酰-鼠李糖苷、天竺葵素-3-O-(乙酰)(丙二酰)葡萄糖苷、芍药花素-3-O-(6″-O-乙酰-丙二酰)葡萄糖苷、矮牵牛素-3-O-葡萄糖苷、矮牵牛素-3-O-半乳糖苷、原花青素A2等6种物质在C-3中未检测到。矮牵牛素-3-O-桑布双糖苷-5-O-葡萄糖苷下调最显著，lb(FC)达－5.78；矢车菊素-3-O-阿拉伯糖苷-葡萄糖苷下调较显著，lb(FC)为－2.71；矮牵牛素-3-O-(6″-O-咖啡酰)鼠李糖苷上调最显著，lb(FC)为5.83(图4)。

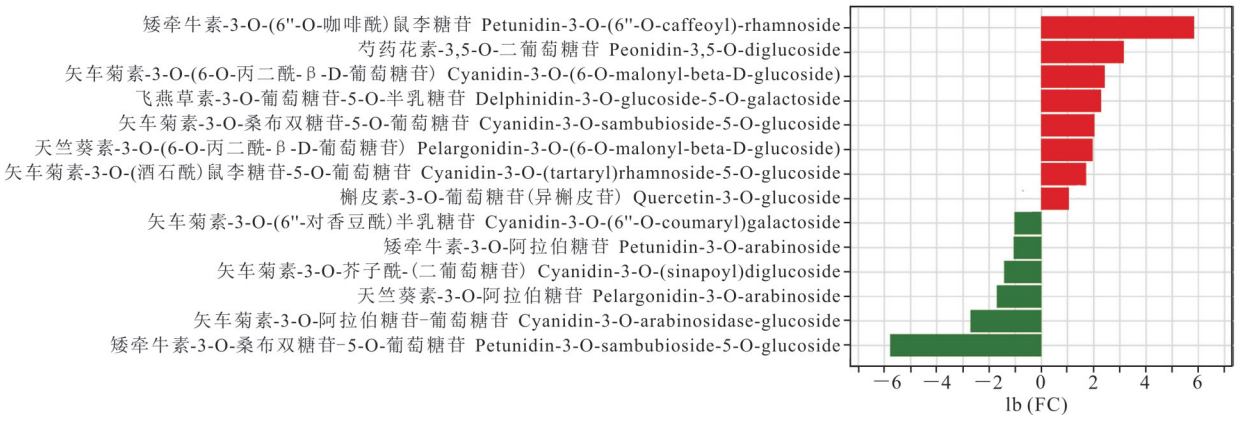


图 4　C-1_vs_C-3组刺毛杜鹃花瓣差异代谢物质比较

Fig. 4　Comparison of differential metabolites in C-1_vs_C-3 group

在C-1_vs_C-5组中，矢车菊素-3-O-(6″-O-丙二酰)半乳糖苷、飞燕草素-3-O-葡萄糖苷、锦葵色素-3-O-葡萄糖苷等3种物质在C-1中未检测到，矢车菊素-3-芥子酰-鼠李糖苷、矢车菊素-3-O-(6-O-丙二酰-β-D-葡萄糖苷)、矢车菊素-3-O-桑布双糖苷-5-O-葡萄糖苷、飞燕草素-3-O-葡萄糖苷-5-O-半乳糖苷、飞燕草素-3-O-半乳糖苷、飞燕草素-3-O-阿拉伯糖苷、天竺葵素-3-O-(乙酰)(丙二酰)葡萄糖苷、天竺葵素-3-O-(6-O-丙二酰-β-D-葡萄糖苷)、天竺葵素-3-O-(6″-阿魏酰桑布双糖苷)-5-O-(丙二酰基)-葡萄糖苷、芍药花素-3-O-(6″-O-乙酰-丙二酰)葡萄糖苷、芍药花素-3-O-木糖苷、芍药花素-3-O-(6″-O-咖啡酰)桑布双糖苷、芍药花素-3,5-O-二葡萄糖苷、矮牵牛素-3-O-葡萄糖苷、矮牵牛素-3-O-半乳糖苷、矮牵牛素-3-O-(6″-O-咖啡酰)鼠李糖苷、矮牵牛素-3-O-阿拉伯糖苷、原花青素A2

等18种物质在C-5中未检测到。柚皮素下调最显著,lb(FC)为-2.05;锦葵色素-3-O-阿拉伯糖苷上调最显著,lb(FC)为9.92;锦葵色素-3-O-半乳糖苷和芍药花素-3-O-阿拉伯糖苷上调较显著,lb(FC)分别为9.47和6.83(图5)。

C-3_vs_C-5组刺毛杜鹃花瓣差异代谢物质比较见图6。

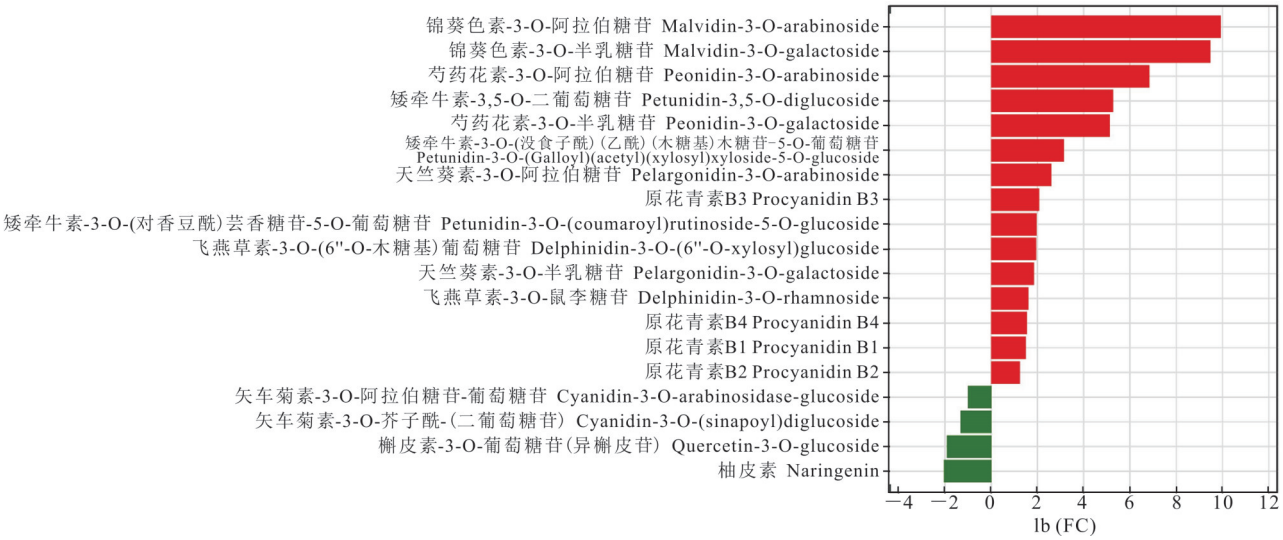


图5 C-1_vs_C-5组刺毛杜鹃花瓣差异代谢物质比较

Fig. 5 Comparison of differential metabolites in C-1_vs_C-5 group

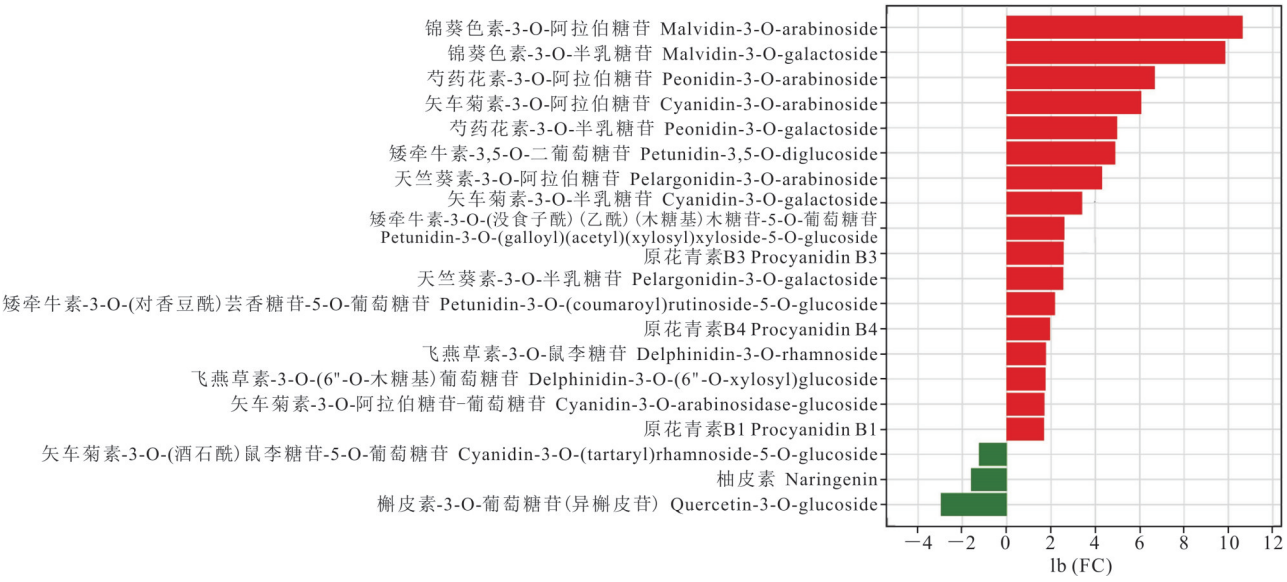


图6 C-3_vs_C-5组刺毛杜鹃花瓣差异代谢物质比较

Fig. 6 Comparison of differential metabolites in C-3_vs_C-5 group

在C-3_vs_C-5组中,矢车菊素-3-O-(6″-O-丙二酰)半乳糖苷、飞燕草素-3-O-葡萄糖苷、锦葵色素-3-O-葡萄糖苷、芍药花素-3-O-(乙酰)(丙二酰)半乳糖苷等4种物质在C-3中未检测到,矢车菊素-3-O-(丙二酰)(葡萄糖苷)半乳糖苷、飞燕草素-3-O-葡萄糖苷-5-O-半乳糖苷、飞燕草素-3-O-半乳糖苷、飞燕草素-3-O-阿拉伯糖苷、飞燕草素-3-O-(6-O-丙二酰-β-D-葡萄糖苷)、天竺葵素-3-O-(6″-O-木糖基)半乳糖苷、天竺葵素-3-O-(6″-阿魏酰桑布双糖苷)-5-O-(丙二酰基)-葡萄糖苷、芍药花素-3-O-木糖苷、芍药花素-3-O-(6″-O-咖啡酰)桑布双糖苷、矮牵牛素-3-O-桑布双糖苷-5-O-葡萄糖苷、矮牵牛素-3-O-(6″-O-咖啡酰)鼠李糖苷、矮牵牛素-3-O-阿拉伯糖苷等12种物质在C-5中未检测到。槲皮素-3-O-葡萄糖苷(异槲皮苷)下调最显著,lb(FC)为-2.97;锦葵色素-3-O-阿拉伯糖苷上调

最显著，lb（FC）达 10.63，其次是锦葵色素-3-O-半乳糖苷，lb（FC）为 9.86；矢车菊素-3-O-阿拉伯糖苷、芍药花素-3-O-阿拉伯糖苷上调也较显著，lb（FC）均大于 6（图 6）。

2.3　不同花色刺毛杜鹃花瓣花青素差异代谢物质的 KEGG 功能注释及富集分析

运用 KEGG 数据库对差异代谢物质进行功能注释及富集分析，结果见图 7。图 7 显示，在 C-1_vs_C-3、C-1_vs_C-5 和 C-3_vs_C-5 组中，差异代谢物质分别被注释到 4，6 和 6 条通路中，花青素生物合成通路中注释的差异代谢物质数量均最高，分别有 6，6 和 3 种；其次是次生代谢物生物合成通路，差异代谢物质分别有 2，3 和 3 种，占比分别为 28.57%，37.50% 和 60.00%。在 C-1_vs_C-3、C-1_vs_C-5 和 C-3_vs_C-5 组中，注释的差异代谢物数量分别为 10，14 和 11 种，可知花色表型差异越大，注释的差异代谢物个数越多。在富集的差异代谢物中，矢车菊素-3-O-（6-O-丙二酰-β-D-葡萄糖苷）、天竺葵素-3-O-（6-O-丙二酰-β-D-葡萄糖苷）、矢车菊素-3-O-桑布双糖苷-5-O-葡萄糖苷在深红色刺毛杜鹃中含量高，锦葵色素-3-O-葡萄糖苷、飞燕草素-3-O-葡萄糖苷在白色刺毛杜鹃中含量高（图 8）。

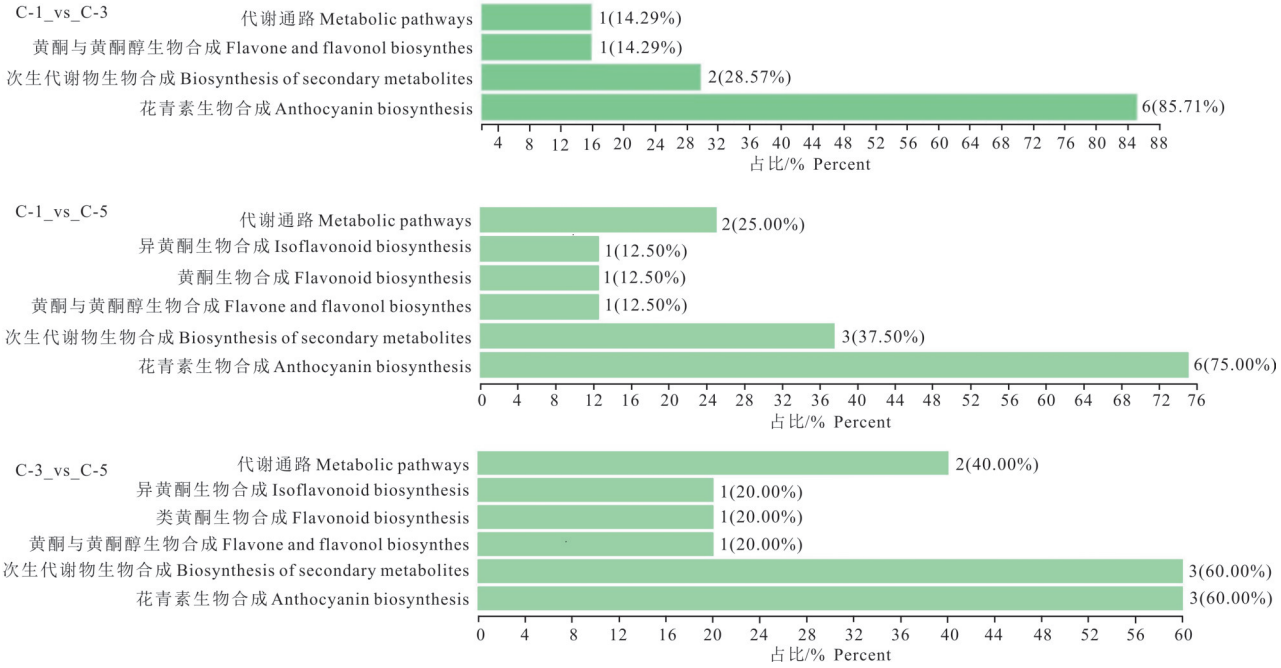
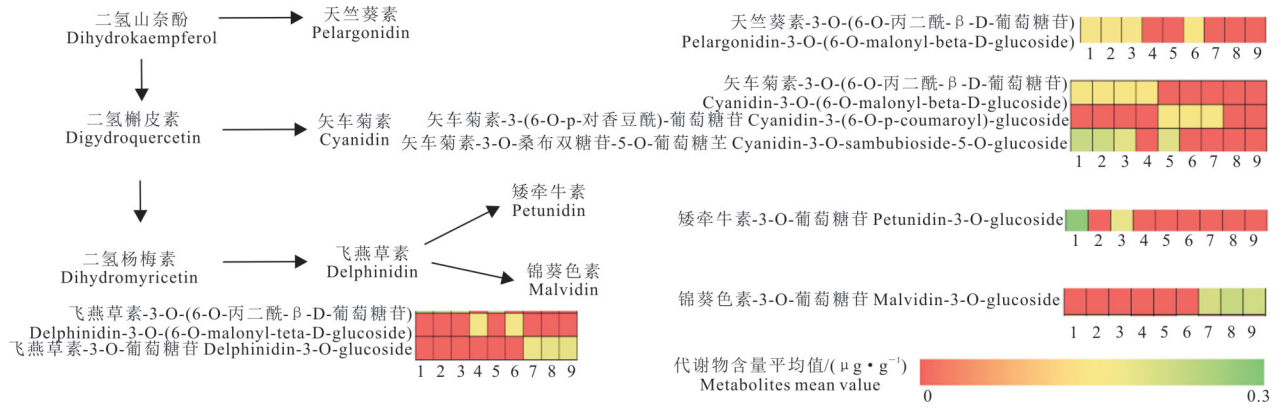


图 7　3 种花色刺毛杜鹃花瓣差异代谢物 KEGG 分类图

Fig. 7　KEGG classification diagram of differential metabolites in *R. championae* petals of three colors



1～3 为 C-1 的 3 个重复，4～6 为 C-3 的 3 个重复，7～9 为 C-5 的 3 个重复。

1－3 are three repetitions of C-1，4－6 are three repetitions of C-3，and 7－9 are three repetitions of C-5.

图 8　刺毛杜鹃花瓣花青素合成通路

Fig. 8　Synthesis pathway of anthocyanin of *R. championae*

3 讨 论

刺毛杜鹃作为一种尚未开发的乡土杜鹃,人们对其了解甚少,对其花色的分析,将有助于推进其开发利用进程。本研究中,刺毛杜鹃的色素物质包括6大类花青素。LIU等[22]研究10种杜鹃,在红紫色杜鹃中只检测出2~3种矢车菊素类色素;MEANCHAIPIBOON等[23]研究平户杜鹃栽培品种,发现其花瓣中仅含矢车菊素衍生物、矢车菊素和飞燕草素衍生物及黄酮醇等4类物质:可知与多数杜鹃相比,本研究检测出的花青素种类明显更多,也说明了刺毛杜鹃花色有较多开发利用价值。

花青素以矢车菊素、天竺葵素、飞燕草素以及芍药花素、锦葵色素、矮牵牛素等物质为主,其中矢车菊素影响紫红色,天竺葵素影响橘红色,飞燕草素影响蓝紫色,芍药花素影响红色,锦葵色素、矮牵牛素影响紫色。本研究对3种花色差异较明显的刺毛杜鹃进行花青素靶向代谢组学研究,结果发现,C-1_vs_C-3组中,矮牵牛素-3-O-(6″-O-咖啡酰)鼠李糖苷上调最显著;C-1_vs_C-5和C-3_vs_C-5组中,锦葵色素-3-O-阿拉伯糖苷和锦葵色素-3-O-半乳糖苷均上调最显著,而锦葵色素、矮牵牛素影响紫色,说明C-1较C-3和C-5、C-3较C-5偏紫,在紫色色调上有显著差异。C-3_vs_C-5和C-1_vs_C-5组中,芍药花素-3-O-阿拉伯糖苷均上调较显著,而芍药花素影响红色,表明C-1和C-3在红色色调上强于C-5。综上,C-1和C-3较C-5在紫色和红色色调上均差异明显,C-1较C-3在紫色色调上差异明显。

前人在研究鹿角杜鹃(*R. latoucheae*)不同花色物质差异时推测,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[24-25]。在分类中,刺毛杜鹃和鹿角杜鹃亲缘关系相近,同属于马银花亚属长蕊组(*Sect. Choniastrum*),但在本研究中只在白色刺毛杜鹃中检测到锦葵色素-3-O-葡萄糖苷,在2种红色刺毛杜鹃花瓣中芍药花素-3-O-半乳糖苷含量最高,其次是锦葵色素-3-O-半乳糖苷。近年来,研究者对杜鹃花色及花青素含量的研究结果显示,紫色花杜鹃花瓣主要是含有锦葵色素和飞燕草素,如雪层杜鹃(*R. nivale*)、山育杜鹃(*R. oreotrephes*)[22];红色花杜鹃花瓣主要含有矢车菊色素和芍药色素[11]。本研究中,深红色刺毛杜鹃花瓣中芍药花素和锦葵色素含量较高,分别为318.94和131.75 μg/g,这与前人研究[22,24]相近。但夏溪等[26]研究锦绣杜鹃时发现,飞燕草素-3-半乳糖苷与花瓣红色相关,矢车菊花素-3-阿拉伯糖苷与花瓣玫红色相关,矮牵牛素-3-O-阿拉伯糖苷与花瓣紫色相关,这与其他学者[13]的研究有所不同,可能因为杜鹃的采样时间、分析方法存在差异所致。

研究发现,杜鹃的花色在不同时期也会有所不同[27-28],而且看似花色相同的不同杜鹃,可能在花色上也存在一些肉眼无法分辨的差异,本研究只是对花色差异明显的3个刺毛杜鹃植株个体进行了代谢组分析,虽然具有代表性,但并不能涵盖所有类型刺毛杜鹃花色代谢组特点,后期可以增加样本数量开展分析,并结合转录组学,进一步深入了解刺毛杜鹃的花色特点。

[参考文献]

[1] WANG S Q, ZHOU X L, LYU Z Y, et al. Anthocyanin accumulation underlies petal blotch coloration in *Rhododendron rex* and its medicinal potential[J]. Industrial Crops and Products, 2025, 224: 120335.

[2] NAKATSUKA T, MISHIBA K I, KUBOTA A, et al. Genetic engineering of novel flower colour by suppression of anthocyanin modification genes in gentian[J]. Journal of Plant Physiology, 2009, 167(3): 231-237.

[3] YANG S Y, WANG Y, WANG W X, et al. Analysis of *WD40* genes in kiwifruit reveals the key role of the light-induced AcTTG1-AcMYB75-AcbHLH2 complex in anthocyanin accumulation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 297: 139758.

[4] JING S Q, XIA Y S, ZHANG B, et al. LcbHLH107 actively suppresses the expression of *LcDFR* to repress anthocyanin biosynthesis in *Litchi chinensis* Sonn[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 308: 142396.

[5] 王秀军. 蜡梅5种花色的成分鉴定及红色'朝霞跳枝'形成分子机理研究[D]. 北京:北京林业大学, 2022.
WANG X J. Identification of the components of the five flower colours and the molecular mechanism of the formation of red *Chimonanthus* praecox 'Zhaoxia Tiaozhi'[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[6] 孙玉莹, 于璐佳, 张杰. 苹果属植物DNA去甲基化基因MdIDM1参与低温促进花色素苷的积累[J]. 北京农学院学报, 2021, 36(1): 1-7.
SUN Y Y, YU L J, ZHANG J. DNA demethylated gene MdIDM1 promoted anthocyanin accumulation in *Malus* plants under low-temperature stress[J]. Journal Beijing University of Agriculture, 2021, 36(1): 1-7.

[7] 马康迅. 组蛋白去甲基化修饰酶基因*AcJMJ10*、*AcJMJ18*对红肉猕猴桃花色苷生物合成的调控[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学, 2021.
MA K X. Regulation of Anthocyanin biosynthesis by histone de-

methylase genes *AcJMJ10* & *AcJMJ18* in red-fleshed kiwifruit (*Actinidia chinensis*) [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2021.

[8] 李雨晴，吴楠，罗建让. 卵叶牡丹花色苷合成相关基因*bHLH*的克隆与功能分析[J]. 生物技术通报，2024，40(8)：174-185.
LI Y Q, WU N, LUO J R. Cloning and functional analysis of *bHLH* gene related to anthocyanin synthesis in *Paeonia qiui* [J]. Biotechnology Bulletin, 2024, 40(8): 174-185.

[9] 郭媛，姜牧炎，哈力马提·巴合太力，等. 黑果枸杞茎叶响应NaCl胁迫合成花色苷的转录组学分析[J]. 生物技术通报，2022，38(10)：173-183.
GUO A, JIANG M Y, HALIMATI B H T L, et al. Transcriptome analysis of *Lycium ruthenicum* Murr. shoots in anthocyanin biosynthesis response to salt stress [J]. Biotechnology Bulletin, 2022, 38 (10): 173-183.

[10] 何世昊，高帅杰，孙浩男，等. 两色金鸡菊花色表型及色素含量变化分析[J]. 北方园艺，2025(17)：37-44.
HE S H, GAO S J, SUN H N, et al. Analysis of phenotype and pigment content changes of *Coreopsis tinctoria* Nutt [J]. Northern Horticulture, 2025(17): 37-44.

[11] 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.

[12] DU H, LAI L, WANG F, et al. Characterisation of flower colouration in 30 *Rhododendron* species via anthocyanin and flavonol identification and quantitative traits [J]. Plant Biology 2018, 20(1): 121-129.

[13] 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(1): 3.

[14] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志：第57卷. 第二分册[M]. 北京：科学出版社，1994：365-366.
China Flora Editorial Board of the CAS. Flora reipublicae popularis sinicae: volume 57. second volume[M]. Beijing: Science Press, 1994: 365-366.

[15] 吴林世，廖菊阳，彭春良，等. 刺毛杜鹃扦插扩繁试验研究[C]//2017全国植物与健康峰会暨中国植物园2017年年会论文集. 重庆：中国植物学会，2017：240-244.
WU L S, LIAO J Y, PENG C L, et al. Research on cutting propagation of *Rhododendron championae* [C]//Proceedings of the 2017 National Summit on Plants and Health and the 2017 Annual Conference of China Botanical Gardens. Chongqing: Botanical Society of China, 2017: 240-244.

[16] 朱春艳，朱丹华，顾宏辉. 刺毛杜鹃的组织培养与快速繁殖[J]. 园林科技，2012(2)：13-14.
ZHU C Y, ZHU D H, GU H H. Tissue culture and rapid propagation of *Rhododendron championae* [J]. Science & Technology of Landscape Architecture, 2012(2): 13-14.

[17] 杨华，宋绪忠，郑国良，等. 高温胁迫对刺毛杜鹃生理特征和生长的影响[J]. 江西农业大学学报，2020，42(2)：259-265.
YANG H, SONG X Z, ZHENG G L, et al. Effects of high temperature stress on physiological indexes and growth of *Rhododendron championae* [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2020, 42(2): 259-265.

[18] 杨华，宋绪忠，韩素芳. 刺毛杜鹃花蕾与花的挥发性成分分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2015，39(5)：179-182.
YANG H, SONG X Z, HAN S F. The volatile components of the buds and flowers of *Rhododendron championae* [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(5): 179-182.

[19] 魏依娜，刘亚，吴永彬，等. 毛棉杜鹃和刺毛杜鹃在广州的生长特性研究[J]. 广东园林，2014，36(2)：48-50.
WEI Y N, LIU Y, WU Y B, et al. Growth of *Rhododendron moulmainense* and *R. championae* in Guangzhou [J]. Guangdong Landscape Architecture, 2014, 36(2): 48-50.

[20] 户金鸽，白世践，潘绪兵，等. 不同砧木对马瑟兰葡萄酿酒品质的影响[J]. 华北农学报，2022，37(4)：141-150.
HU J G, BAI S J, PAN X B, et al. Effects of different rootstocks on wine quality in wine grapes marselan[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2022, 37(4): 141-150.

[21] 雍清青，姚响，周麟，等. 滇山茶'狮子头'及'大玛瑙'黄酮类物质的变化规律[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版)，2025，53(2)：59-71.
YONG Q Q, YAO X, ZHOU L, et al. Change rule of flavonoids in *Camellia reticulata* 'Shizitou' and 'Damanao' [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2025, 53(2): 59-71.

[22] 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: 250-256.

[23] MEANCHAIPIBOON S, KOBAYASHI N, NAKATSUKA A. Analyses of pigment compositions and anthocyanin biosynthesis gene expression in hirado Azalea cultivars[J]. The Horticulture Journal, 2020, 89(3): 284-291.

[24] 张卉，沈守云，廖秋林，等. 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, et al. 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.

[25] XIAO P, ZHANG H, LIAO Q L, et al. Insight into the molecular mechanism of flower color regulation in *Rhododendron latoucheae* franch: a multi-omics approach[J]. Plants, 2023, 12 (16): 2897.

[26] 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.
XIA X, GONG R, ZHANG C Y. Anthocyanin composition and coloration mechanism in petals of *Rhododendron pulchrum* with different colors[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2022, 38(1): 207-213.

（下转第 137 页）