

引用格式: 夏梦雪, 杨钰, 宁奥祥, 等. 不同梅花品种花色表型与色素成分分析[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(5): 956–966.
XIA Mengxue, YANG Yu, NING Aoxiang, *et al.* Analysis of flower color phenotypes and pigment components in different *Prunus mume* cultivars[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(5): 956–966.

不同梅花品种花色表型与色素成分分析

夏梦雪^{1,2}, 杨钰^{1,2}, 宁奥祥^{1,2}, 肖政^{1,2}, 兰延钢^{1,2}, 赵宏波^{1,2}, 王艺光^{1,2}

(1. 浙江农林大学 风景园林与建筑学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江农林大学 南方园林植物种质创新与利用国家林业和草原局重点实验室, 浙江 杭州 311300)

摘要: 【目的】探索梅花 *Prunus mume* 不同品种群体间的色素组成及其对花色差异的影响, 为梅花花色育种提供研究基础。【方法】选取 15 个不同花色梅花品种, 利用英国皇家园艺学会比色卡测定花瓣花色表型, 并采用超高效液相色谱-串联质谱 (UPLC-MS/MS) 技术对梅花花瓣中类黄酮化合物进行定性和定量分析, 通过聚类分析、相关性分析、主成分分析和多元线性回归解析花色表型与色素组分的关联。【结果】聚类分析表明: 15 个梅花品种花色表型可分为白色系、浅粉色系、粉红色系和紫红色系。类黄酮化合物定性定量分析发现: 紫红、粉红、浅粉色系梅花品种均含有花青苷, 以矢车菊素和芍药花素糖苷为主, 其中矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷相对含量最高; 白色系梅花品种花青苷较少甚至缺失, 但大量类黄酮 (如异槲皮素) 富集。主成分分析表明: 花青苷 (主成分 1 的贡献率为 40.64%) 是梅花形成红色调核心色素, 且红绿色度 (a^*) 与芍药花素-3-*O*-芸香糖苷呈显著正相关 ($P < 0.05$), 总花青苷质量分数越高, 明度 (L^*) 越小, 花色越深; 其他类黄酮 (主成分 2 的贡献率为 19.87%) 次要调控。多元回归模型验证了花青苷主导呈色的机制: 总花青苷与 L^* 呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 芍药花素-3-*O*-芸香糖苷是 a^* 的关键贡献因子, 同时花青苷芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷与黄蓝色度 (b^*) 呈显著负相关 ($P < 0.05$)。【结论】梅花花色分化由“花青苷主导呈色-类黄酮协同调控”的代谢网络决定; 矢车菊素和芍药花素糖苷是梅花红色调形成的核心; 其他类黄酮可能在维持色素稳定性或环境适应中发挥次要作用。图 8 表 2 参 34

关键词: 梅花; 品种; 花色表型; 花青苷; 类黄酮

中图分类号: S68 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)05-0956-11

Analysis of flower color phenotypes and pigment components in different *Prunus mume* cultivars

XIA Mengxue^{1,2}, YANG Yu^{1,2}, NING Aoxiang^{1,2}, XIAO Zheng^{1,2}, LAN Yan'gang^{1,2},
ZHAO Hongbo^{1,2}, WANG Yiguang^{1,2}

(1. College of Landscape and Architecture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Germplasm Innovation and Utilization for Southern Garden Plants, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the pigment composition of different cultivar groups of *Prunus mume* and its impact on flower color variation, thereby providing a foundation for targeted breeding strategies focused on floral coloration. [Method] Fifteen different flower color cultivars of *P. mume* were selected. The flower color phenotypes of the petals were determined using the Royal Horticultural Society Color Chart of the United Kingdom. The ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS) technique was employed to qualitatively and quantitatively analyze the flavonoid compounds in the petals of *P.*

收稿日期: 2025-08-31; 修回日期: 2025-09-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2300900); 中央财政林业科技推广示范项目 ([2025] TS02); 浙江省农业新品种选育重大科技专项 (2021C02071)

作者简介: 夏梦雪 (ORCID: 0009-0000-9418-2615), 从事梅花育种研究。E-mail: 1666517947@qq.com。通信作者: 王艺光 (ORCID: 0000-0003-1940-135X), 讲师, 博士, 从事观赏植物遗传育种与分子生物学方面的研究。E-mail: wangyiguang1990@163.com

mume. The correlations between the flower color phenotypes and pigment components were analyzed through cluster analysis, correlation analysis, principal component analysis, and multiple linear regression. [Result] As results, cluster analysis categorized the flower color phenotypes of the 15 *P. mume* cultivars into four groups: white, light pink, pink, and purplish-red. Qualitative and quantitative analysis of flavonoids revealed that purplish-red, pink, and light pink cultivars contained anthocyanins, primarily cyanidin and peonidin glycosides, with cyanidin-3-*O*-rutinoside being the most abundant. In contrast, white cultivars lacked anthocyanins but exhibited substantial accumulation of other flavonoids, such as isoquercitrin. Principal component analysis indicated that anthocyanins (PC1 contribution rate: 40.64%) were the core pigments responsible for red hues in *P. mume*. Notably, red-green chromaticity (a^*) showed a significant positive correlation with peonidin-3-*O*-rutinoside ($P < 0.05$), while higher total anthocyanin content correlated with lower lightness (L^*), resulting in darker flower coloration. Other flavonoids (PC2 contribution rate: 19.87%) played a secondary regulatory role. The multiple regression model confirmed the dominance of anthocyanins in color determination: total anthocyanins negatively correlated with L^* ($P < 0.01$), peonidin-3-*O*-rutinoside was a key contributor to a^* , and peonidin-3-*O*-glucoside showed a negative correlation with yellow-blue chromaticity (b^* , $P < 0.05$). [Conclusion] The differentiation of *P. mume* flower colors is governed by a metabolic network characterized by “anthocyanin-driven pigmentation and flavonoid co-regulation”. Cyanidin and peonidin glycosides are core components for formation of red hue, while other flavonoids likely play secondary roles in pigment stability or environmental adaptation. [Ch, 8 fig. 2 tab. 34 ref.]

Key words: *Prunus mume*; cultivars; flower color phenotypes; anthocyanin; flavonoid

花色是植物最直观的观赏特性之一^[1]。花色可以吸引昆虫、鸟类、蜂类等各种传粉媒介,从而帮助植物进行有效传粉,有助于植物的繁殖和生存^[2]。花色还具有防止光氧化损伤以及提供对生物和非生物胁迫抵抗力的功能^[3]。除此之外,不同颜色的花卉使人感到愉悦放松,起到改善生活的作用。因此,花色改良和培育是观赏植物花色创新育种的重要目标。植物花色的形成是多种色素共同作用与积累的结果^[4]。影响花色的色素类型主要分为类黄酮化合物、类胡萝卜素和生物碱^[5]。其中,类黄酮中的花青苷是大多数观赏植物形成丰富花色的决定性色素群^[6],在菊花 *Chrysanthemums × morifolium*^[7]、大丽花 *Dahlia variabilis*^[8]、月季 *Rosa chinensis*^[9]、紫罗兰 *Matthiola incana*^[10] 等中都有过相关报道。

梅花 *Prunus mume* 是中国十大传统名花之一,具有树形多变、花香清新、花色多样等观赏特征,其中花色是最为明显的观赏性状,直接影响植株的景观表现与经济价值。目前梅花有紫红、粉红、白、绿白、淡黄、复色等颜色^[11]。赵昶灵等^[11]经化学显色反应及紫外-可见光谱分析,证实梅花花色色素属于黄酮类化合物。张芹^[12]对 41 个品种的花色苷分析表明:梅花花色表型可为 2 类,分别为含花青苷的粉、紫红色系与不含花青苷的白、淡黄色系,花色苷合成存在品种特异性分支选择,矢车菊素和芍药花素衍生物主导红色花形成;天竺葵素和飞燕草素衍生物参与部分紫红色花的呈色,而槲皮素衍物质则影响黄绿色花表型^[13-14]。此外,黄色花主要源于类胡萝卜素,尤其是叶黄素的积累,并受到类黄酮辅助色素的调控^[15]。探讨梅花不同品种花色素成分的差异,可揭示梅花花色的形成机制,为梅花品种资源开发和利用提供借鉴。本研究选取 15 个不同花色梅花品种,使用比色卡和色差仪测定花色表型,结合聚类分析分类花色;通过超高效液相色谱-串联质谱 (UPLC-MS/MS) 测定梅花花瓣花青苷与其他类黄酮化合物的质量分数,通过不同梅花品种花色表型与色素成分的关联分析,探讨梅花花色与花色素之间的关系,以为梅花高观赏性品种选育及花青苷代谢分子机制解析提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

参考陈俊愉等^[16]的方案,观察浙江农林大学种质资源库梅花的表型,在资源库中选择尽可能不同的品种群,对生长健壮、长势一致的 15 个不同花色的梅花品种 (表 1) 进行调查研究,测定不同品种盛花

期花瓣颜色表型并采样。取样时每个品种随机选取 5 株，每株采集至少 10 朵盛开花朵，均取自树冠外围中上部花枝，并仅取最外层花瓣。将同一品种的花瓣样品分 3 份混合均匀，作为生物学重复。混合样品标记后用锡箔纸包裹并立即用液氮速冻，放置于−80 ℃ 冰箱保存备用。

表 1 试验所用梅花品种

Table 1 List of <i>P. mume</i> cultivars analyzed in this study					
品种群	编号	品种	品种群	编号	品种
朱砂品种群	M1	‘晨晖朱砂’ ‘Chenhui Zhusha’	宫粉品种群	M10	‘春意早宫粉’ ‘Chunyizao Gongfen’
	M2	‘骨红朱砂’ ‘Guhong Zhusha’	玉蝶品种群	M11	‘六萼玉蝶’ ‘Liue Yudie’
	M3	‘粉红朱砂’ ‘Fenhong Zhusha’		M12	‘月光玉蝶’ ‘Yueguang Yudie’
	M4	‘先春朱砂’ ‘Xianchun Zhusha’	跳枝品种群	M13	‘单粉跳枝’ ‘Danfen Tiaozhi’
	M5	‘银红朱砂’ ‘Yinhong Zhusha’			
宫粉品种群	M6	‘桃红宫粉’ ‘Taohong Gongfen’	江梅品种群	M14	‘江梅’ ‘Jiangmei’
	M7	‘晓红宫粉’ ‘Xiaohong Gongfen’			
	M8	‘童颜宫粉’ ‘Tongyan Gongfen’	垂枝品种群	M15	‘单粉垂枝’ ‘Danfen Chuizhi’
	M9	‘早花宫粉’ ‘Zaohua Gongfen’			

1.2 花色表型测定

采用英国皇家园艺学会标准比色卡对 15 个不同花色梅花品种盛开期的花瓣进行颜色比对。使用色差仪测定花瓣的明度 (L^*)、红绿色度 (a^*)、黄蓝色度 (b^*)。 L^* 代表明暗程度，数值越高颜色越亮； a^* 的正值代表红色， a^* 越大颜色越红； b^* 的正值表示黄色。每个品种测 5 朵花作为生物学重复，离体测量，以白纸为背景，测最外层花瓣上表皮中央位置。

1.3 类黄酮化合物定性分析

将梅花花瓣取出后加入液氮充分研磨，精确称取 0.3 g，加入 $V(\text{甲醇}):V(\text{水}):V(\text{甲酸}):V(\text{四氢呋喃})=70:27:2:1$ 的提取液 3 mL，在 4 ℃ 冰箱内避光静置 24 h 后，超声 30 min，在 4 ℃、12 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min，吸取上清液。用 0.22 μm 过滤头过滤上清液后，避光保存在−20 ℃ 冰箱供上机分析。进行 UPLC-MS/MS 检测梅花花瓣类黄酮化合物组分，每个样品 3 个生物学重复。

色谱柱：ACQUITY UPLC HSS T3 (1.8 μm ，2.1 mm×100.0 mm)，柱温为 40 ℃，进样为 2 μL ，流速为 0.4 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ ，洗脱方式为梯度洗脱，流动相 A 为体积分数 1% 的甲酸，B 为纯乙腈 (洗脱程序百分值为体积分数)。梯度洗脱程序为：0 min，5%B；2.0 min，11%B；6.0 min，13%B；9.4 min，38%B；10.0 min，50%B；12.0 min，5%B；16.0 min，5%B。检测波长为 350 nm、520 nm。

质谱条件：电喷雾离子源 (ESI)，正/负离子模式扫描；扫描范围为 m/z 80~1 500；离子源温度：正模式为 600 ℃，负模式为 550 ℃；离子化电压为 5 500 V；一级扫描参数：去簇电压 (DP) 为 100 V；聚焦电压 (CE) 为 10 V；二级扫描采用 TOF MS-Product Ion-IDA 模式，碰撞诱导解离 (CID) 能量为 4 020 eV；进样前以校准液输送系统 (CDS) 泵校准质量轴，误差 $<2\times10^{-6}$ 。结合各色素组分的保留时间、离子大小、二级碎片大小和文献，推测梅花花色色素成分。花青苷结构参考文献 [13, 17–21]，类黄酮结构则参考文献 [22–24]。

1.4 类黄酮化合物定量分析

将标准品芦丁和矢车菊素 3-*O*-葡萄糖苷 (纯度质量分数 $>98\%$) 配制成 1 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的母液，将标准品稀释成不同的梯度，暂放−20 ℃ 冰箱保存待测。以标准品浓度 (x) 为横坐标，色谱峰面积 (y) 为纵坐标，绘制标准曲线。其中：矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷标准曲线为 $y=18\,871x-23\,280$ ， $R^2=0.999\,5$ ；芦丁标准曲线为 $y=9\,174.6x+6\,227.2$ ， $R^2=0.999\,8$ 。将待测样品 (鲜质量) 与标准品同步处理，按标准曲线计算总花青苷 (total anthocyanins, TA)、总黄酮 (total flavonoids, TF) 及各组分质量分数 ($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。

1.5 数据分析

使用 Excel 2021 进行数据整理，以平均值表示结果。使用 SPSS 27 对 15 个梅花品种花色表型参数 L^* 、 a^* 、 b^* 进行最远邻元素法系统聚类分析，对总花青苷、总类黄酮进行差异化分析，对类黄酮化合物

进行主成分分析, 筛选主要有效因子, 采用步进法对关键色素组分进行线性逐步回归分析。使用 GraphPad Prism 9 和 Origin 2025 绘图, 并对梅花花色表型与色素组分进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

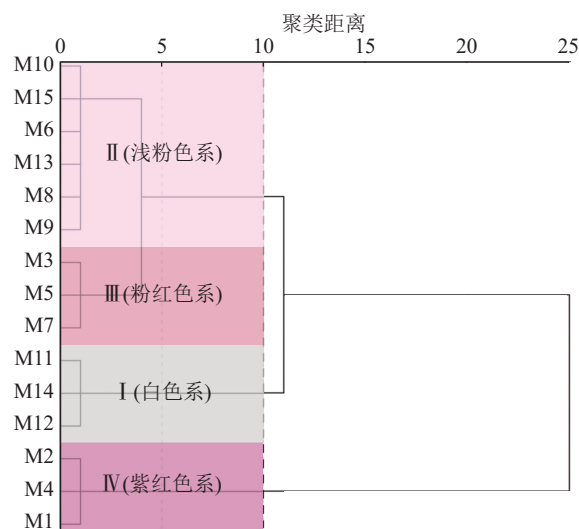
2.1 不同梅花品种花色表型分析

通过比色卡和色差仪测定 15 个梅花品种 (图 1) 的花色表型。根据花色表型 L^* 、 a^* 、 b^* , 对梅花品种进行聚类分析 (图 2)。聚类分析将花色分为 4 类, 结合比色卡将这 4 类花色定义为: 白色系 (M11、M12、M14); 浅粉色系 (M6、M8、M9、M10、M13、M15); 粉红色系 (M3、M5、M7); 紫红色系 (M1、M2、M4)。



图 1 梅花盛开期表型

Figure 1 Phenotypic characteristics of *P. mume* at full-bloom stage



编号M1~M15所表示的梅花品种见表1。

图 2 梅花品种花色表型的聚类分析

Figure 2 Cluster analysis of flower color phenotypes in *P. mume* cultivars

梅花品种紫红色系的 a^* 为 31.28~38.60, 包括‘先春朱砂’‘骨红朱砂’‘晨晖朱砂’, a^* 最高; 其次是粉红色系, a^* 为 17.72~23.52, 包括‘粉红朱砂’‘银红朱砂’‘晓红宫粉’; 然后是浅粉色系, 包括‘春意早宫粉’‘童颜宫粉’‘早花宫粉’‘桃红宫粉’‘单粉跳枝’‘单粉垂枝’; 白色系的 a^* 基本为负值。白色系的 L^* 为 84.88~86.92, 包括‘六萼玉蝶’‘月光玉蝶’‘江梅’; 紫红色系的 L^* 为 47.44~51.46, 说明白色系 L^* 最大, 紫红色系 L^* 最小。各色系的梅花 b^* 均不高, 其中白色系的 b^* 最高, 为 7.18~14.94。可见, 花瓣颜色越深, L^* 越低, a^* 越高。

在 a^* 和 b^* 二维分布图 (图 3A) 中, 白色系位于第 II 象限, 浅粉色系集中于第 I 象限, 紫红色系与粉红色系位于第 IV 象限。在 L^* 、 a^* 、 b^* 的三维分布图 (图 3B) 中, 各色系的参数分布集中、界限明显。

2.2 不同梅花品种类黄酮成分鉴定

利用超高效液相色谱法 (UPLC) 在不同梅花品种花瓣中共中检测出 6 种花青苷成分和 14 种黄酮类物质。图 4 以‘桃红宫粉’为例展示 UPLC 色谱图。根据 UPLC-MS/MS 的结果 (表 2), 推定 4 类花青素, 分别为矢车菊素、芍药色素、飞燕草素、矮牵牛素; 以及其他黄酮类物质, 分别为 2 类黄酮醇苷元 (槲皮素和异鼠李) 和 1 类黄酮醇苷元 (儿茶素)。

在 520 nm 区域的 6 个峰 (A1~A6) 中, 具体结构的判定主要依据分子离子峰 $[M]^+$ 、苷元碎片离子 $[Y0]^+$ 和糖基丢失规律。A1 和 A2 均产生 m/z 287 $[Y0]^+$ 碎片离子 (矢车菊素特征), 并分别因丢失 162 Da 葡萄糖基或 308 Da 芸香糖基被推定为矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷和矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷; A3 和 A4 则均产生 m/z 301 $[Y0]^+$ 碎片离子 (芍药色素特征), 推定为芍药色素-3-*O*-葡萄糖苷和芍药色素-3-*O*-芸香糖苷。A5 和 A6 基于 m/z 303 $[Y0]^+$ 碎片离子 (飞燕草素特征) 和 m/z 317 $[Y0]^+$ 碎片离子 (矮牵牛素特征) 及连续的糖基丢失模式推定为飞燕草素-3-*O*-芸香糖鼠李糖苷和矮牵牛素-3-*O*-芸香糖-5-*O*-鼠李糖苷。

在 350 nm 区域检测到 14 种类黄酮成分 (F1~F14), 其具体结构的判定主要依据去质子化分子离子峰

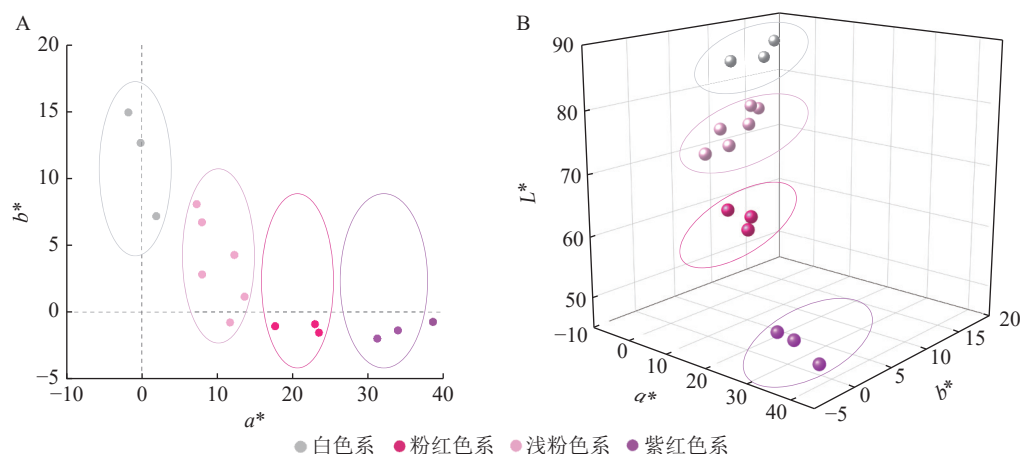


图3 梅花花色 a^* 、 b^* 二维象限 (A) 和 L^* 、 a^* 、 b^* 三维象限 (B) 分布图

Figure 3 Flower color distribution of *P. mume* in 2D quadrant of a^* , b^* (A) and 3D quadrant of L^* , a^* , b^* (B)

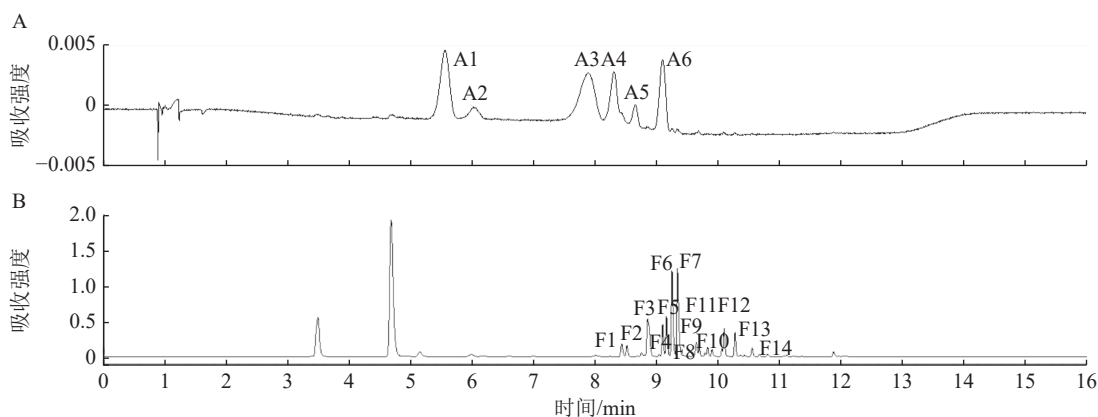


图4 梅花‘桃红宫粉’类黄酮提取物在波长 520 nm (A) 和 350 nm (B) 下的 UPLC 色谱图

Figure 4 UPLC chromatograms of flavonoid extract from *P. mume* ‘Taohong Gongfen’ at detection wavelengths of 520 nm (A) and 350 nm (B)

[M-H]⁻、苷元碎片离子[YO]⁻和糖基修饰规律。F1、F2、F3、F5、F6、F7、F12和F13均产生 m/z 301 [YO]⁻碎片离子(槲皮素特征), 通过不同的糖基组合, 如葡萄糖、鼠李糖、半乳糖及乙酰化修饰, 推定为槲皮素-3-*O*-半乳糖苷、槲皮素-3-*O*-芸香糖苷(芦丁)等多种糖苷形式; F4、F8、F9、F10和F14则均产生 m/z 315 [YO]⁻碎片离子(异鼠李素特征), 并据此推定为异鼠李素-3-*O*-葡萄糖苷等衍生物; F11基于其分子离子 m/z 613 [M-H]⁻及分子式被推定为儿茶素二己糖苷。具体鉴定结果见表2。

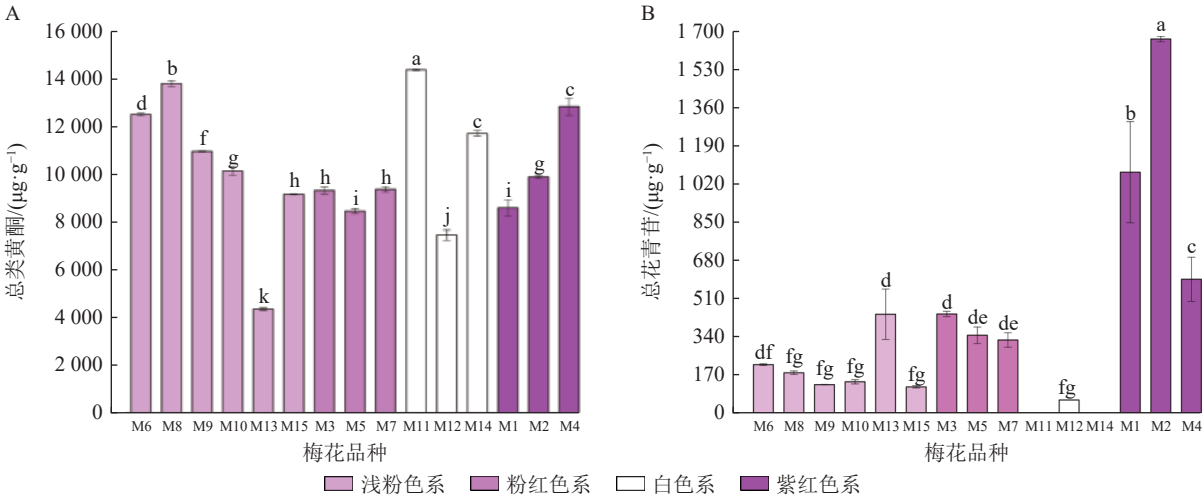
2.3 不同梅花品种类黄酮质量分数比较分析

不同梅花品种的总花青苷和总类黄酮积累模式有一定差异。紫红色系品种花瓣的总花青苷质量分数最高, 白色系品种不含或仅含有少量总花青苷; 总类黄酮在不同色系品种中的分布没有明显的规律(图5)。为更好比较不同品种梅花各单体类黄酮化合物的积累差异, 将鉴定出的6种花青苷化合物、14种类黄酮化合物进行热图分析, 对总花青苷和总类黄酮进行差异分析。如图6所示: 紫红、粉红、浅粉色系品种中均含有花青苷, 其中, 紫红色系‘骨红朱砂’‘晨晖朱砂’和浅粉色系‘单粉跳枝’的花青苷矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷、芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-芸香糖苷相对含量较高; 粉红色系‘粉红朱砂’‘银红朱砂’和紫红色系‘先春朱砂’的矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷、芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-芸香糖苷相对含量也较其他品种高。而4个色系的花青苷飞燕草素-3-*O*-芸香糖鼠李糖苷和矮牵牛素-3-*O*-芸香糖-5-*O*-鼠李糖苷相对含量均较低。

紫红、粉红、浅粉色、白色系品种中均含有类黄酮, 并且在前8个类黄酮成分中富集。类黄酮F1~F14中前10个成分是所有品种共有的成分, 后4个成分只在部分品种中出现。其中, 异槲皮素相对含量最高, 其次是槲皮素-3-*O*-(2"-*O*- α -L-鼠李糖)- β -D-吡喃葡萄糖苷和槲皮素-3-*O*-芸香糖苷。相对含量较

表 2 梅花类黄酮化合物 (花青苷和类黄酮) 的质谱数据

Table 2 LC-MS/MS parameters and identification of flavonoid compounds (anthocyanins and flavones) in <i>P. mume</i>					
峰	保留时间/min	分子 <i>m/z</i>	碎片	分子式	推定物质
A1	5.64	449.10	287.10	C ₂₁ H ₂₁ O ₁₁	矢车菊素-3- <i>O</i> -葡萄糖苷 cyanidin-3- <i>O</i> -glucoside
A2	6.13	595.17	287.10	C ₂₇ H ₃₁ O ₁₅	矢车菊素-3- <i>O</i> -芸香糖苷 cyanidin-3- <i>O</i> -rutinoside
A3	8.01	463.12	301.10	C ₂₂ H ₂₃ O ₁₁	芍药花素-3- <i>O</i> -葡萄糖苷 peonidin 3- <i>O</i> -glucoside
A4	8.35	609.18	301.10	C ₂₈ H ₃₃ O ₁₅	芍药花素-3- <i>O</i> -芸香糖苷 peonidin 3- <i>O</i> -rutinoside
A5	8.68	757.22	611.20, 303.10	C ₃₃ H ₄₁ O ₂₀	飞燕草素-3- <i>O</i> -芸香糖鼠李糖苷 delphinidin-3- <i>O</i> -rutinoside-rhamnoside
A6	9.11	771.24	625.20, 317.10	C ₃₄ H ₄₃ O ₂₀	矮牵牛素-3- <i>O</i> -芸香糖-5- <i>O</i> -鼠李糖苷 petunidin-3- <i>O</i> -rutinoside-5- <i>O</i> -rhamnoside
F1	8.42	755.21	301.00	C ₃₃ H ₄₀ O ₂₀	槲皮素3- <i>O</i> -(2,6"- <i>α</i> - <i>L</i> -吡喃鼠李糖)- <i>β</i> - <i>D</i> -吡喃半乳糖苷 quercetin 3- <i>O</i> -(2",6"- <i>α</i> - <i>L</i> -dirhamnopyranosyl)- <i>β</i> - <i>D</i> -galactopyranoside
F2	8.51	755.21	301.00	C ₃₃ H ₄₀ O ₂₀	槲皮素-3- <i>O</i> - <i>α</i> - <i>L</i> -鼠李糖- <i>β</i> - <i>D</i> -吡喃葡萄糖苷 quercetin 3- <i>O</i> - <i>α</i> - <i>L</i> -rhamnopyranosyl- <i>β</i> - <i>D</i> -glucopyranoside
F3	8.87	609.15	301.00	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	槲皮素3- <i>O</i> -(6"- <i>O</i> - <i>β</i> - <i>L</i> -鼠李糖)- <i>β</i> - <i>D</i> -吡喃葡萄糖苷 quercetin 3- <i>O</i> -(6"- <i>O</i> - <i>β</i> - <i>L</i> -rhamnopyranosyl)- <i>β</i> - <i>D</i> -galactopyranoside
F4	9.08	769.22	315.00	C ₃₄ H ₄₂ O ₂₀	香浦新苷 typhaneoside
F5	9.15	609.15	301.00	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	槲皮素-3- <i>O</i> -(2"- <i>O</i> - <i>α</i> - <i>L</i> -鼠李糖)- <i>β</i> - <i>D</i> -吡喃葡萄糖苷 quercetin-3- <i>O</i> -(2"- <i>O</i> - <i>α</i> - <i>L</i> -rhamnopyranosyl)- <i>β</i> - <i>D</i> -glucuronopyranoside
F6	9.24	609.15	301.00	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	槲皮素-3- <i>O</i> -芸香糖苷(芦丁) quercetin-3- <i>O</i> -rutinose(rutin)
F7	9.33	463.08	301.00	C ₂₁ H ₂₀ O ₁₂	异槲皮素 isoquercetin
F8	9.64	623.16	315.00	C ₂₈ H ₃₂ O ₁₆	异鼠李素-3- <i>O</i> - <i>α</i> - <i>L</i> -鼠李糖- <i>β</i> - <i>D</i> -吡喃半乳糖苷 isorhamnetin-3- <i>O</i> - <i>α</i> - <i>L</i> -rhamnopyranosyl- <i>β</i> - <i>D</i> -galactopyranoside
F9	9.82	477.11	315.00	C ₂₂ H ₂₂ O ₁₂	异鼠李素-3- <i>O</i> - <i>β</i> - <i>D</i> -半乳糖苷 isorhamnetin 3- <i>β</i> - <i>D</i> -galactopyranoside
F10	9.89	477.11	315.00	C ₂₂ H ₂₂ O ₁₂	异鼠李素-3- <i>O</i> -葡萄糖苷 isorhamnetin-3- <i>O</i> -glucoside
F11	9.97	613.18	145.00	C ₂₇ H ₃₄ O ₁₆	儿茶素二己糖苷 catechin dihexoside
F12	10.10	651.16	301.00	C ₂₉ H ₃₂ O ₁₇	槲皮素-3- <i>O</i> - <i>α</i> -鼠李糖-(1"-6")-(4"- <i>O</i> -乙酰)- <i>β</i> - <i>D</i> -半乳糖苷 quercetin-3- <i>O</i> - <i>α</i> - <i>L</i> -rhamnosyl-(1"-6")-(4"- <i>O</i> -acetyl)- <i>β</i> - <i>D</i> -galactoside
F13	10.27	505.10	301.00	C ₂₃ H ₂₂ O ₁₃	槲皮素-3- <i>O</i> -6"- <i>O</i> -乙酰- <i>β</i> - <i>D</i> -吡喃葡萄糖苷 quercetin 3- <i>O</i> -(6"- <i>O</i> -acetyl)- <i>β</i> - <i>D</i> -glucopyranoside
F14	10.56	665.18	315.00	C ₃₀ H ₃₄ O ₁₇	2"- <i>O</i> -乙酰-3'- <i>O</i> -甲基芦丁2"- <i>O</i> -acetyl-3'- <i>O</i> -methylrutin



编号M1~M15所表示的梅花品种见表1。不同小写字母表示不同梅花品种间差异显著($P<0.05$)。

图 5 不同梅花品种总花青苷 (A) 和总类黄酮 (B) 柱状图

Figure 5 Bar charts of total anthocyanins (A) and total flavonoids (B) of different *P. mume* cultivars

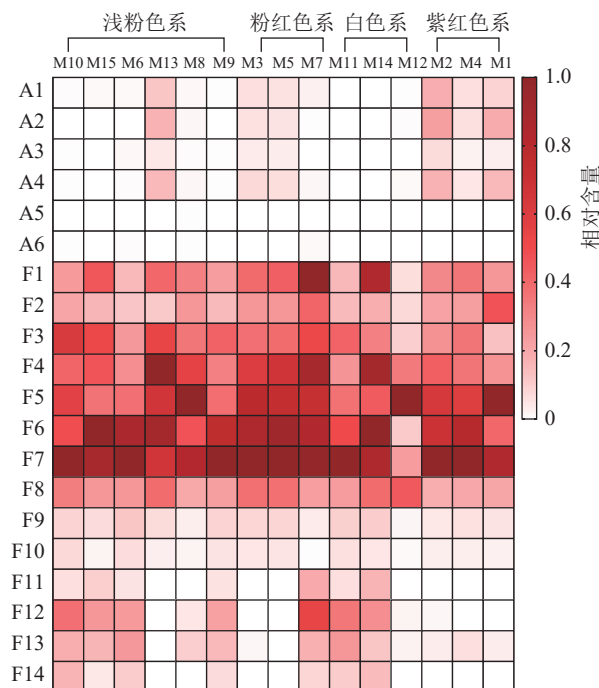
高的有香浦新甘、槲皮素-3-*O*- α -L-鼠李糖- β -D-吡喃葡萄糖苷、槲皮素-3-*O*-(2, 6"- α -L-吡喃鼠李糖)- β -D-吡喃半乳糖苷、异鼠李素-3-*O*- α -L-鼠李糖- β -D-吡喃半乳糖苷和 F2 槲皮素-3-*O*- α -L-鼠李糖- β -D-吡喃葡萄糖苷。

2.4 不同梅花品种花色表型与色素成分的关联分析

2.4.1 梅花花色表型和色素组分相关性分析

相关性分析(图7)显示: L^* 与矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷、芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-芸香糖苷和总花青苷呈极显著负相关($P < 0.01$)。 a^* 与矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷、芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-芸香糖苷和总花青苷呈极显著正相关($P < 0.01$)。 a^* 越高,花瓣颜色越红,说明这4种花青苷的积累对花瓣红色形成起作用。 b^* 与矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-芸香糖苷和总花青苷呈显著负相关($P < 0.05$)。

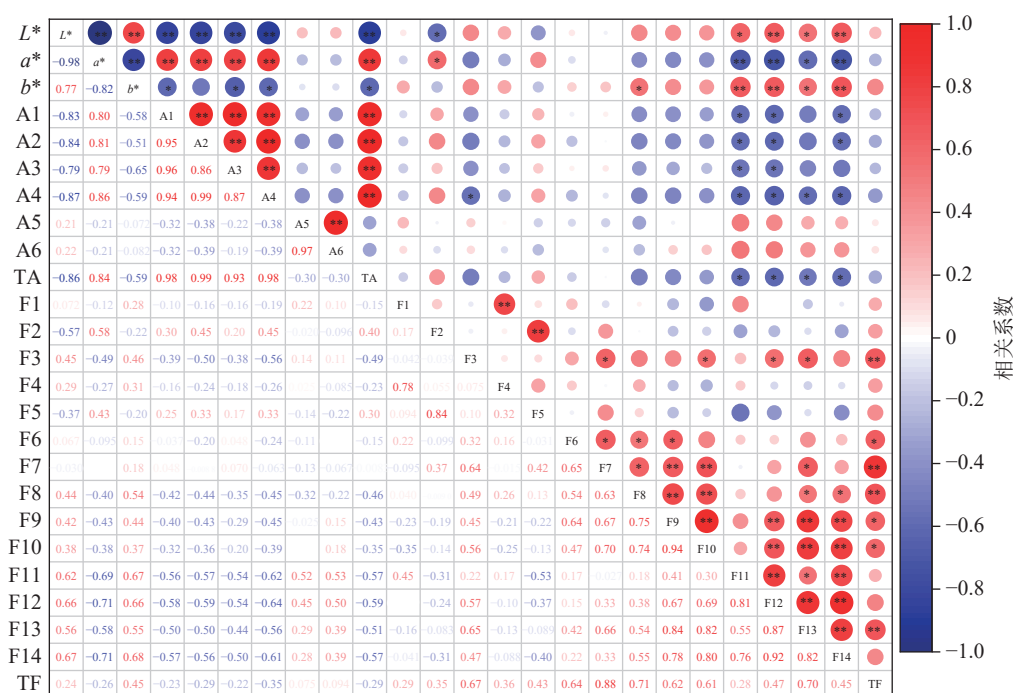
L^* 与槲皮素-3-*O*- α -鼠李糖-(1"-6")-(4"-*O*-乙酰)- β -D-半乳糖苷、2"-*O*-乙酰-3'-*O*-甲基芦丁呈极显著正相关($P < 0.01$);与儿茶素二己糖苷、槲皮素-3-*O*-6"-*O*-乙酰- β -D-吡喃葡萄糖苷呈显著正相关($P < 0.05$),表明这4种类黄酮组分积累会提高梅花花瓣亮度;但 L^* 与槲皮素-3-*O*- α -L-鼠李糖- β -D-吡喃葡萄糖苷呈显著负相关($P < 0.05$)。 a^* 与儿茶素二己糖苷、槲皮素-3-*O*- α -鼠李糖-(1"-6")-(4"-*O*-乙酰)- β -D-半乳糖苷和2"-*O*-乙酰-3'-*O*-甲基芦丁呈极显著负相关($P < 0.01$);与槲皮素-3-*O*-6"-*O*-乙酰- β -D-吡喃葡萄糖苷



编号M1~M15所表示的梅花品种见表1。A1~A6、F1~F14峰所表示的推定物质见表2。

图6 不同梅花品种类黄酮组分相对含量的热图分析

Figure 6 Heatmap analysis of flavonoid component content across *P. mume* cultivars



A1~A6、F1~F14峰所表示的推定物质见表2。TA表示总花青苷;TF表示总类黄酮。*表示相关显著($P < 0.05$);**表示相关极显著($P < 0.01$)。

图7 梅花花色表型和色素组分相关性分析

Figure 7 Correlation analysis between floral color phenotypes and pigment components in *P. mume*

呈显著负相关 ($P < 0.05$); 但与槲皮素-3-*O*- α -L-鼠李糖- β -D-吡喃葡萄糖苷呈显著正相关 ($P < 0.05$)。 b^* 与儿茶素二己糖苷、2"-*O*-乙酰-3'-*O*-甲基芦丁呈极显著正相关 ($P < 0.01$); 与槲皮素-3-*O*- α -鼠李糖-(1"-6")-(4"-*O*-乙酰)- β -D-半乳糖苷、槲皮素-3-*O*-6"-*O*-乙酰- β -D-吡喃葡萄糖苷呈显著正相关 ($P < 0.05$), 表明随着这 4 种类黄酮组分的增加, 花瓣黄色程度相应增强。

2.4.2 梅花花色表型和色素组分主成分分析 将梅花花色表型和色素组分进行主成分分析发现: 前 6 个主成分贡献率为 92.37%, 其中, 第 1 主成分 (PC1) 贡献率为 40.64%, 第 2 主成分 (PC2) 贡献率为 19.87%。筛选出 20 种主要色素、 a^* 和 b^* 。主成分因子载荷和得分图 (图 8) 显示: 后 4 个主成分贡献率较低, 可能仅在特定品种中发挥作用。第 1 主成分包括矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷、芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-芸香糖苷、总花青苷和 a^* , 说明花青苷是梅花红色调的主要贡献者, a^* 与上述花青苷相对含量高度相关, 说明矢车菊素和芍药花素衍生物主导红色花色。第 2 主成分包括是槲皮素 3-*O*-(6"-*O*- β -L-鼠李糖)- β -D-吡喃葡萄糖苷、槲皮素-3-*O*-芸香糖苷、异槲皮素、异鼠李素-3-*O*- β -D-半乳糖苷、异鼠李素-3-*O*-葡萄糖苷、槲皮素-3-*O*-6"-*O*-乙酰- β -D-吡喃葡萄糖苷、2"-*O*-乙酰-3'-*O*-甲基芦丁和总类黄酮。

2.4.3 梅花花色表型和色素组分多元线性回归分析

多元回归分析发现: (1) L^* 的回归方程为 $y = 87.151 - 0.012x_1 - 0.016x_2$ ($R^2 = 0.819$, $P < 0.05$), 其中, y 代表 L^* , x_1 代表总花青苷质量分数, x_2 代表槲皮素-3-*O*- α -L-鼠李糖- β -D-吡喃葡萄糖苷质量分数, 以上 2 种物质的积累可显著降低花瓣的亮度。(2) a^* 的回归方程为 $y = 7.065 + 0.081x$ ($R^2 = 0.746$, $P < 0.01$), 其中, y 代表 a^* , x 代表芍药花素-3-*O*-芸香糖苷质量分数, 其积累量可显著提高花瓣红色程度。(3) b^* 的回归方程为 $y = 7.104 - 0.061x$ ($R^2 = 0.363$, $P < 0.05$), 其中, y 代表 b^* , x 代表芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷质量分数, 其积累量可降低花瓣的黄色程度。可见, 梅花花色与色素组分之间显著相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

早前研究表明: 类黄酮化合物是影响梅花花色的主要色素, 红色梅花含花青苷和类黄酮, 白色梅花仅含类黄酮^[11]。张芹^[12]研究发现: 除白色系以外, 其他色系中也含有矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、矢车菊素-3-*O*-鼠李糖葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-鼠李糖葡萄糖苷 4 种核心花青苷, 并推断其他色系的代谢途径是矢车菊素苷分支。吴思惠等^[13]利用 HPLC-MS 等方法, 不仅验证白色梅花中芦丁、槲皮素等黄酮的特异性积累, 且揭示矢车菊素和芍药花素衍生物主导红色花色形成, 槲皮素衍生物影响黄绿花色。WANG 等^[14]研究发现: 在部分紫红色梅花品种中, 花青苷代谢途径是天竺葵素和飞燕草素分支。本研究通过 UPLC-MS/MS 技术验证了前人研究中矢车菊素与芍药花素糖苷的核心地位, 揭示特定花青苷组分和其他类黄酮组分对梅花花色差异的影响, 提出“花青苷主导-类黄酮协同”的代谢网络。

本研究表明: 在 15 个梅花品种花瓣中共检测出 6 种花青苷成分, 14 种类黄酮成分, 除已报道的矢车菊素和芍药色素外^[11], 还存在少量的飞燕草素和矮牵牛素。矢车菊素和天竺葵素多使花与果实呈现红色, 芍药素对植物呈现紫红色具有重要作用, 飞燕草素和矮牵牛素负责蓝色和蓝紫色^[25-27]。矢车菊素是大多植物中最常见的花青苷成分, 例如梅花^[12]、玫瑰 *Rosa rugosa*^[28] 和山茶 *Camellia japonica*^[29] 等。芍药色素在观赏植物花色形成中起关键作用, 如在牡丹 *Paeonia suffruticosa*^[30]、长春花 *Catharanthus roseus*^[31]、芍药 *Paeonia lactiflora*^[32] 等植物中, 该色素是红色系花色的主要呈色物质之一, 而在夏蜡梅

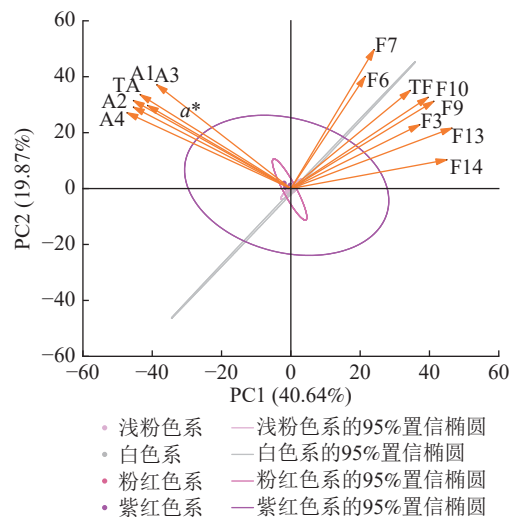


图 8 梅花花色表型和色素组分的主成分分析
Figure 8 Principal component analysis (PCA) of floral color phenotypes and pigment components in *P. mume*

Sinicalycanthus chinensis 和光叶红蜡梅 *Calycanthus floridus* var. *glaucus* 中, 紫红色花的形成则主要由矢车菊素主导^[33]。类似地, 换锦花 *Lycoris sprengeri* 的花色苷主要成分包括矢车菊素、天竺葵素和飞燕草素^[34]。本研究发现: 在梅花紫红、粉红、浅粉色系品种中均含有花青苷, 以矢车菊素和芍药花素为主, 其中矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷和芍药花素-3-*O*-芸香糖苷相对含量较高。白色系品种中几乎不含有花青素苷, 但类黄酮含量较高。

相关分析发现: L^* 与儿茶素二己糖苷、槲皮素-3-*O*- α -鼠李糖-(1"-6")-(4"-*O*-乙酰)- β -*D*-半乳糖苷、槲皮素-3-*O*-6"-*O*-乙酰- β -*D*-吡喃葡萄糖苷、2"-*O*-乙酰-3'-*O*-甲基芦丁呈显著正相关, 表明这4种类黄酮成分积累会提高梅花花瓣亮度。 a^* 与矢车菊素-3-*O*-葡萄糖苷、矢车菊素-3-*O*-芸香糖苷、芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷、芍药花素-3-*O*-芸香糖苷、总花青苷和槲皮素-3-*O*- α -*L*-鼠李糖- β -*D*-吡喃葡萄糖苷呈显著正相关, 说明这4种花青苷成分和类黄酮积累对梅花花瓣红色形成起一定作用。 b^* 与儿茶素二己糖苷、槲皮素-3-*O*- α -鼠李糖-(1"-6")-(4"-*O*-乙酰)- β -*D*-半乳糖苷、槲皮素-3-*O*-6"-*O*-乙酰- β -*D*-吡喃葡萄糖苷、2"-*O*-乙酰-3'-*O*-甲基芦丁呈显著正相关, 说明随着这4种类黄酮成分的增加, 花瓣黄色程度相应增强。

主成分分析表明: 决定梅花红色的色素主要为花青苷。多元线性回归分析表明: 总花青苷积累显著降低了 L^* 。 a^* 的核心贡献因子为芍药花素-3-*O*-芸香糖苷, 这与第1主成分中以芍药花素-3-*O*-芸香糖苷为重要载荷的结论一致。芍药花素-3-*O*-葡萄糖苷降低了 b^* , 证实花青苷主导核心呈色。

4 结论

本研究通过多维度分析揭示了梅花花色形成的代谢调控规律, 明确了花青苷是花色分化的核心色素。矢车菊素和芍药花素衍生物主导梅花红色花色形成, 其中芍药花素-3-*O*-芸香糖苷通过显著正向调控红度成为红色表型的关键贡献者。主成分分析与多元线性回归分析共同证实: 花青苷与 a^* 呈极显著正相关, 其积累通过降低 L^* 加深花色。

5 参考文献

- [1] NISHIHARA M, NAKATSUKA T. Genetic engineering of flavonoid pigments to modify flower color in floricultural plants [J]. *Biotechnology Letters*, 2011, **33**(3): 433–441.
- [2] CAMPBELL D R, BISCHOFF M, LORD J M, *et al.* Flower color influences insect visitation in alpine New Zealand [J]. *Ecology*, 2010, **91**(9): 2638–2649.
- [3] SAMANTA A, DAS G, DAS S K. Roles of flavonoids in plants [J]. *Carbon*, 2011, **6**(1): 12–35.
- [4] 刘国元, 方威, 余春梅, 等. 花青素调控植物花色的研究进展 [J]. 安徽农业科学, 2021, **49**(3): 1–4, 9.
LIU Guoyuan, FANG Wei, YU Chunmei, *et al.* Research progress on anthocyanins regulated plant flower color [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2021, **49**(3): 1–4, 9.
- [5] TANAKA Y, TSUDA S, KUSUMI T. Metabolic engineering to modify flower color [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1998, **39**(11): 1119–1126.
- [6] 赵云鹏, 陈发棣, 郭维明. 观赏植物花色基因工程研究进展 [J]. 植物学通报, 2003, **20**(1): 51–58.
ZHAO Yunpeng, CHEN Fadi, GUO Weiming. Advances in genetic engineering of flower color of ornamental plants [J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, **20**(1): 51–58.
- [7] CHEN S M, LI C H, ZHU X R, *et al.* The identification of flavonoids and the expression of genes of anthocyanin biosynthesis in the *Chrysanthemum* flowers [J]. *Biologia Plantarum*, 2012, **56**(3): 458–464.
- [8] THILL J, MIOSIC S, AHMED R, *et al.* ‘Le rouge et le noir’: a decline in flavone formation correlates with the rare color of black dahlia (*Dahlia variabilis* Hort.) flowers [J/OL]. *BMC Plant Biology*, 2012, **12**: 225 [2025-08-01]. DOI:10.1186/1471-2229-12-225.
- [9] SCHMITZER V, VEBERIC R, OSTERC G, *et al.* Color and phenolic content changes during flower development in groundcover rose [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2010, **135**(3): 195–202.
- [10] TATSUZAWA F, SAITO N, TOKI K, *et al.* Flower colors and their anthocyanins in *Matthiola incana* cultivars (Brassicaceae) [J]. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*, 2012, **81**(1): 91–100.
- [11] 赵昶灵, 郭维明, 陈俊愉. 梅花花色色素种类和含量的初步研究 [J]. 北京林业大学学报, 2004, **26**(2): 68–73.

- ZHAO Changling, GUO Weiming, CHEN Junyu. Preliminary study on the categories and contents of the flower color pigments of *Prunus mume* Sieb. et Zucc. [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, **26**(2): 68–73.
- [12] 张芹. 梅花花青苷合成调控基因 *R2R3-MYB* 的鉴定及功能分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2017.
- ZHANG Qin. *Identification and Functional Analysis of R2R3-MYB Regulators in the Anthocyanin Biosynthetic Pathway from Prunus mume*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2017.
- [13] 吴思惠, 朱欢欢, 张俊卫, 等. 梅花不同花色品种及开花阶段类黄酮代谢物测定与分析[J]. *中国农业科学*, 2023, **56**(9): 1760–1774.
- WU Sihui, ZHU Huanhuan, ZHANG Junwei, *et al.* Determination and analysis of flavonoids metabolites in different colors cultivars and blooming stages of *Prunus mume* [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2023, **56**(9): 1760–1774.
- [14] WANG Ruyi, YANG Xin, WANG Tao, *et al.* Integration of metabolomic and transcriptomic analyses reveals the molecular mechanisms of flower color formation in *Prunus mume*[J/OL]. *Plants*, 2024, **13**(8): 1077[2025-08-01]. DOI:10.3390/plants13081077.
- [15] 丁爱琴. *PmCCDs* 影响梅花黄色花性状形成的分子机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2023.
- DING Aiqin. *Study on the Molecular Mechanism of PmCCDs Affecting the Formation of Yellow Flower Traits in Plum Blossom*[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2023.
- [16] 陈俊愉, 陈瑞丹. 中国梅花品种群分类新方案并论种间杂交起源品种群之发展优势[J]. *园艺学报*, 2009, **36**(5): 693–700.
- CHEN Junyu, CHEN Ruidan. A new system for classifying China Mei cultivar groups, with special reference to developing superiorities of interspecific hybrid originated groups [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2009, **36**(5): 693–700.
- [17] ADJE F, LOZANO Y F, MEUDECE E, *et al.* Anthocyanin characterization of pilot plant water extracts of *Delonix regia* flowers [J]. *Molecules*, 2008, **13**(6): 1238–1245.
- [18] WILL F, DIETRICH H. Optimised processing technique for colour- and cloud-stable plum juices and stability of bioactive substances [J]. *European Food Research and Technology*, 2006, **223**(3): 419–425.
- [19] QIU Like, ZHENG Tangchun, LIU Weichao, *et al.* Integration of transcriptome and metabolome reveals the formation mechanism of red stem in *Prunus mume*[J/OL]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, **13**: 884883[2025-08-01]. DOI: 10.3389/fpls.2022.884883.
- [20] GARCIA-HERRERA P, PÉREZ-RODRÍGUEZ M L, AGUILERA-DELGADO T, *et al.* Anthocyanin profile of red fruits and black carrot juices, purees and concentrates by HPLC-DAD-ESI/MS-QTOF [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, **51**(10): 2290–2300.
- [21] CHEN Fangfang, SANG Jie, ZHANG Yao, *et al.* Development of a green two-dimensional HPLC-DAD/ESI-MS method for the determination of anthocyanins from *Prunus cerasifera* var. *atropurpurea* leaf and improvement of their stability in energy drinks [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, **53**(6): 1494–1502.
- [22] TOMÁS-BARBERÁN F A, GIL M I, CREMIN P, *et al.* HPLC-DAD-ESIMS analysis of phenolic compounds in nectarines, peaches, and plums [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, **49**(10): 4748–4760.
- [23] CRUPI P, GENCHI R, ANTONACCI D. In-time and in-space tandem mass spectrometry to determine the metabolic profiling of flavonoids in a typical sweet cherry (*Prunus avium* L.) cultivar from Southern Italy [J]. *Journal of Mass Spectrometry*, 2014, **49**(10): 1025–1034.
- [24] del CARMEN RAZOLA-DÍAZ M, AZNAR-RAMOS M J, BENÍTEZ G, *et al.* Exploring the potential of phenolic and antioxidant compounds in new Rosaceae fruits [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2024, **104**(6): 3705–3718.
- [25] 高燕会, 黄春红, 朱玉球, 等. 植物花青素苷生物合成及调控的研究进展[J]. *中国生物工程杂志*, 2012, **32**(8): 94–99.
- GAO Yanhui, HUANG Chunhong, ZHU Yuqiu, *et al.* Progress on plant anthocyanin biosynthesis and regulation [J]. *China Biotechnology*, 2012, **32**(8): 94–99.
- [26] 戴思兰, 洪艳. 基于花青素苷合成和呈色机理的观赏植物花色改良分子育种[J]. *中国农业科学*, 2016, **49**(3): 529–542.
- DAI Silan, HONG Yan. Molecular breeding for flower colors modification on ornamental plants based on the mechanism of anthocyanins biosynthesis and coloration [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, **49**(3): 529–542.
- [27] KHOO H E, AZLAN A, TANG Souteng, *et al.* Anthocyanidins and anthocyanins: colored pigments as food, pharmaceutical

- ingredients, and the potential health benefits[J/OL]. *Food & Nutrition Research*, 2017, **61**(1): 1361779[2025-08-01]. DOI:10.1080/16546628.2017.1361779.
- [28] 金晶, 阳鑫, 周薇, 等. 玫瑰类黄酮研究进展[J]. 安徽农业科学, 2019, **47**(16): 14–17.
JIN Jing, YANG Xin, ZHOU Wei, *et al.* Research progress of flavonoids on *Rosa rugosa* Thunb. [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, **47**(16): 14–17.
- [29] 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.
- [30] ZHANG Yanzhao, ZHANG Yan, DUAN Xujia, *et al.* Anthocyanins in tree peony (*Paeonia suffruticosa*) and their relationship with flower color [J]. *Horticultural Science and Technology*, 2020, **38**(6): 776–784.
- [31] XIAO Yuchen, TANG Yueli, HUANG Xianhui, *et al.* Integrated transcriptomics and metabolomics analysis reveal anthocyanin biosynthesis for petal color formation in *Catharanthus roseus*[J/OL]. *Agronomy*, 2023, **13**(9): 2290[2025-08-01]. DOI:10.3390/agronomy13092290.
- [32] 钟培星, 王亮生, 李珊珊, 等. 芍药开花过程中花色和色素的变化[J]. 园艺学报, 2012, **39**(11): 2271–2282.
ZHONG Peixing, WANG Liangsheng, LI Shanshan, *et al.* The changes of floral color and pigments composition during the flowering period in *Paeonia lactiflora* Pallas [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, **39**(11): 2271–2282.
- [33] 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.
- [34] 刘跃平, 周洋丽, 高燕会. 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. Effects of physical and chemical factors on anthocyanin stability in *Lycoris sprengeri* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2021, **38**(3): 587–596.