

卢帅杰, 尹若勇, 秦欣如, 等. 5 个紫薇品种花色呈色的生理研究 [J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(4): 577-586.

LU Shuaijie, YIN Ruoyong, QIN Xinru, et al. Physiological study on the flower color formation of five varieties of *Lagerstroemia indica*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(4): 577-586.

5 个紫薇品种花色呈色的生理研究

卢帅杰, 尹若勇, 秦欣如, 吴梦佳, 奚如春, 邓小梅

(华南农业大学 林学与风景园林学院/广东省森林植物种质创新与应用重点实验室, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探讨不同花色紫薇开花过程中的颜色变化及其影响因素。【方法】通过测定 5 个花色 (红色、白色、淡粉色、粉色和紫色) 紫薇在开花过程中 4 个时期的花瓣色度值, 总叶绿素、类胡萝卜素、花色苷、总黄酮、可溶性糖和可溶性蛋白含量以及 pH 等理化指标, 探讨影响紫薇呈色的生理因素。【结果】不同花色紫薇在开花过程中 L^* (明度) 持续下降, a^* (红绿值) 和 c^* (饱和度) 先上升后下降, b^* (黄蓝值) 和 h (色调) 变化趋势各异; 白色花的 L^* 和 h 最高, 最大值分别为 61.61 和 1.45, 而红色花的 a^* 、 b^* 和 c^* 最高, 最大值分别为 44.83、7.39 和 45.44; 盛花期时, 红色花中花色苷含量最高, 为 $1.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 而在白色花和淡粉色花中含量较低, 仅为 0.04 和 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 粉色花的总黄酮含量最高, 在开花过程中平均含量为 $4.17 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。各色紫薇均在花芽期和初花期 pH 较高, 而在盛花期和末花期 pH 显著下降 ($P < 0.05$)。色度值受色素含量调控, 其中 L^* 与总叶绿素、类胡萝卜素和花色苷含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$); a^* 和 c^* 与这 3 种色素含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$); b^* 与总黄酮含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与总叶绿素和类胡萝卜素含量呈显著正相关 ($P < 0.05$)。【结论】色素含量影响花瓣的色度, pH 通过影响花色苷稳定性进而影响花色, 可溶性糖间接影响花色表现。本研究为揭示影响紫薇花色形成的生理因素提供了科学依据。

关键词: 紫薇; 花色; 色素含量; 呈色; 生理因素

中图分类号: S685.99

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2025)04-0577-10

Physiological study on the flower color formation of five varieties of *Lagerstroemia indica*

LU Shuaijie, YIN Ruoyong, QIN Xinru, WU Mengjia, XI Ruchun, DENG Xiaomei

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University/Guangdong Key Laboratory for Innovative Development and Utilization of Forest Plant Germplasm, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】This study aims to explore the color changes and influencing factors of *Lagerstroemia indica* flowers with different flower colors during the blooming process. 【Method】The color values, contents of total chlorophyll, carotenoids, anthocyanins, total flavonoids soluble sugar, and soluble protein, as well as pH were measured at four stages for five flower colors (red, white, light pink, pink and purple). The physiological factors influencing the flower color expression of *L. indica* were investigated. 【Result】The L^* (brightness) of *L. indica* flowers with different colors continuously decreased during the blooming process. The a^* (red-green

收稿日期: 2024-12-12 网络首发时间: 2025-05-12 09:07:35

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20250509.1356.002>

作者简介: 卢帅杰, E-mail: lu15538126986@126.com; 通信作者: 邓小梅, 主要从事林木遗传育种研究, E-mail: dxmei2006@scau.edu.cn

基金项目: 广东省林业科技创新项目 (2023KJCX002)

value) and c^* (saturation value) first increased and then decreased. The b^* (yellow-blue value) and h (hue) exhibited varying trends. The white flowers had the highest L^* and h , with the maxima of 61.61 and 1.45, respectively, while the red flowers had the highest a^* , b^* and c^* , with the maxima of 44.83, 7.39, and 45.44 respectively. At the full blooming stage, the anthocyanin content in red flowers was the highest at $1.55\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, whereas it remained relatively low in white and light pink flowers with 0.04 and $0.05\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, respectively. Pink flowers displayed the highest total flavonoid content, with an average of $4.17\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ during the blooming process. The pH of *L. indica* flowers of all colors were relatively high at the bud and early blooming stages, but significantly decreased at the full and late blooming stages ($P < 0.05$). The color values of *L. indica* flowers were regulated by pigment contents. Specifically, the L^* exhibited a highly significant negative correlation with total chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents ($P < 0.01$). The a^* and c^* showed highly significant positive correlations with these three pigments ($P < 0.01$). The b^* showed a highly significant negative correlation with total flavonoid content ($P < 0.01$) and a significant positive correlation with total chlorophyll and carotenoid contents ($P < 0.05$). 【Conclusion】 Pigment content influences petal color, pH affects flower color by influencing anthocyanin stability, and soluble sugars indirectly affect color expression. This study provides scientific evidence for understanding the physiological factors that influence the color formation of *L. indica* flowers.

Key words: *Lagerstroemia indica*; Flower color; Pigment content; Coloration; Physiological factor

紫薇 *Lagerstroemia indica* 因其花量大、色彩鲜艳而有极高的观赏价值,是重要的园林景观植物和行道树种^[1]。花色是紫薇育种的重要目标之一,紫薇品种众多,不同品种之间的花色也有一定差异^[2],紫薇的花色主要表现为白色、红色、粉色、紫色和复色^[3-4]。目前,紫薇的研究主要集中于品种选育^[5-7]、逆境胁迫^[8-9]、栽培技术^[10-11]和不育特性^[12-13]等方面,对于影响紫薇花色的研究较少,且均仅研究了单个时期的某一类物质,主要是黄酮和花青素^[14-16],对不同花色品种紫薇在开花过程中的呈色因子及动态变化特征鲜见报道。

花色作为紫薇的重要观赏性状之一,其形成受多种理化因子的共同影响,其中,色素种类及含量起着关键作用。植物中的色素主要包括总叶绿素、类胡萝卜素、花青苷和黄酮类物质等^[17]。花青素能够赋予花瓣红、蓝和紫等颜色,黄酮可使花朵呈现粉红、粉和黄等颜色,叶绿素主要呈现绿色,而类胡萝卜素则主要呈现黄色和橙色等色调^[18]。研究表明,在红色系和紫色系紫薇中,花瓣主要的呈色色素为花青素苷,白色紫薇的花色苷含量较低而黄酮类物质含量相对较高^[14]。林启芳等^[15]对紫薇花瓣类黄酮代谢物测定分析发现,红色和紫色花瓣的主要色素为花青素苷,而白色花瓣中的黄酮和黄酮醇类主要代谢物为木犀草素和槲皮素,这是导致花色不同的关键因素。除色素种类和含量外,植物的其他理化性质也会影响花瓣的呈色。如,花瓣的 pH 会影响色素稳定性和颜色表达^[19]。在酸性条件下,花

青素的分子结构通常处于质子化状态,视觉上会呈现出红色或紫色,随着 pH 升高,花青素的分子结构发生变化,酚羟基失去质子,导致颜色发生变化,出现紫色、蓝色和无色等情况^[20-21];此外,可溶性糖不仅是植物中色素合成的底物和供能物质,还能通过影响花青素的糖基化过程进而影响色素的稳定性和色彩浓度。花青素分子中的糖基化修饰可增强其水溶性,同时可提高其结构稳定性和色彩表现。当葡萄糖或其他糖分子通过共价键与花青素糖苷键结合时,会导致电子效应改变花青素分子的光吸收特性,从而使其呈现不同的色泽^[22-23];可溶性蛋白参与色素合成的生理过程,花青素合成途径中的多个酶(如醛酮还原酶、二氢黄酮合成酶等)均属于可溶性蛋白,它们催化花青素的形成与转化^[24]。

本文通过分析不同花色紫薇在开花过程中花瓣的表型差异,测定色素、可溶性糖及可溶性蛋白含量,阐明并揭示紫薇在开花过程中,其花色多样性的形成机制及影响花瓣呈色的生理生化因素,期为紫薇种质资源利用与创制提供理论和技术支撑,并与其他观赏植物的花色研究提供参考与借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区域位于华南农业大学紫薇种质资源圃(113°21'26"E, 23°9'26"N)。该区域属亚热带季风气候,温暖多雨、光热充足、夏季长、霜期短。年平均气温为 $21.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,各月平均气温均在 $13.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,最

冷为1月, 平均气温为13.3℃, 最热为8月, 平均气温28.8℃。年均降水量1600mm左右, 降水集中中在4—9月份, 以5—8月份最高, 占全年的62%, 年平均湿度为79%。全年水热同期, 雨量充沛。

1.2 试验材料

于2024年3月, 在紫薇资源圃内选取5个不同花色的紫薇品种作为试验材料, 分别为: 红花品种‘丹红紫叶’(‘Ebony Embers’)、白花品种‘飞雪紫叶’(‘Ebony and Ivory’)、淡粉花品种‘Near East’、粉花品种‘Tuscarora’、紫花品种‘紫悦’(‘Ziyue’)。各参试品种均为2年生扦插苗, 采用30cm×25cm的无纺布容器种植, 基质为泥炭和

黄心土(体积比为2:1), 实行一致的常规田间管理。于2024年6—8月, 选择长势较好且相对一致的植株, 分别采集5个不同品种和4个发育阶段的花瓣样品。4个发育阶段为: 1) 花芽期, 花芽饱满, 但还未开裂, 花瓣不可见; 2) 初花期, 花芽开裂, 花瓣开始出现, 雄蕊不可见; 3) 盛花期, 花朵完全张开, 雄蕊直立且呈黄色, 观赏价值最高; 4) 末花期, 花瓣开始枯萎, 雄蕊发黑、脱落且卷曲(图1)。样品采样时间均在晴天的9:00—11:00, 采集后鲜样置于冰盒保存, 用于拍照、比色和色彩指标的测定, 其余样品-80℃冷冻保存, 用于色素及生化指标的测定, 样品采集重复3次。

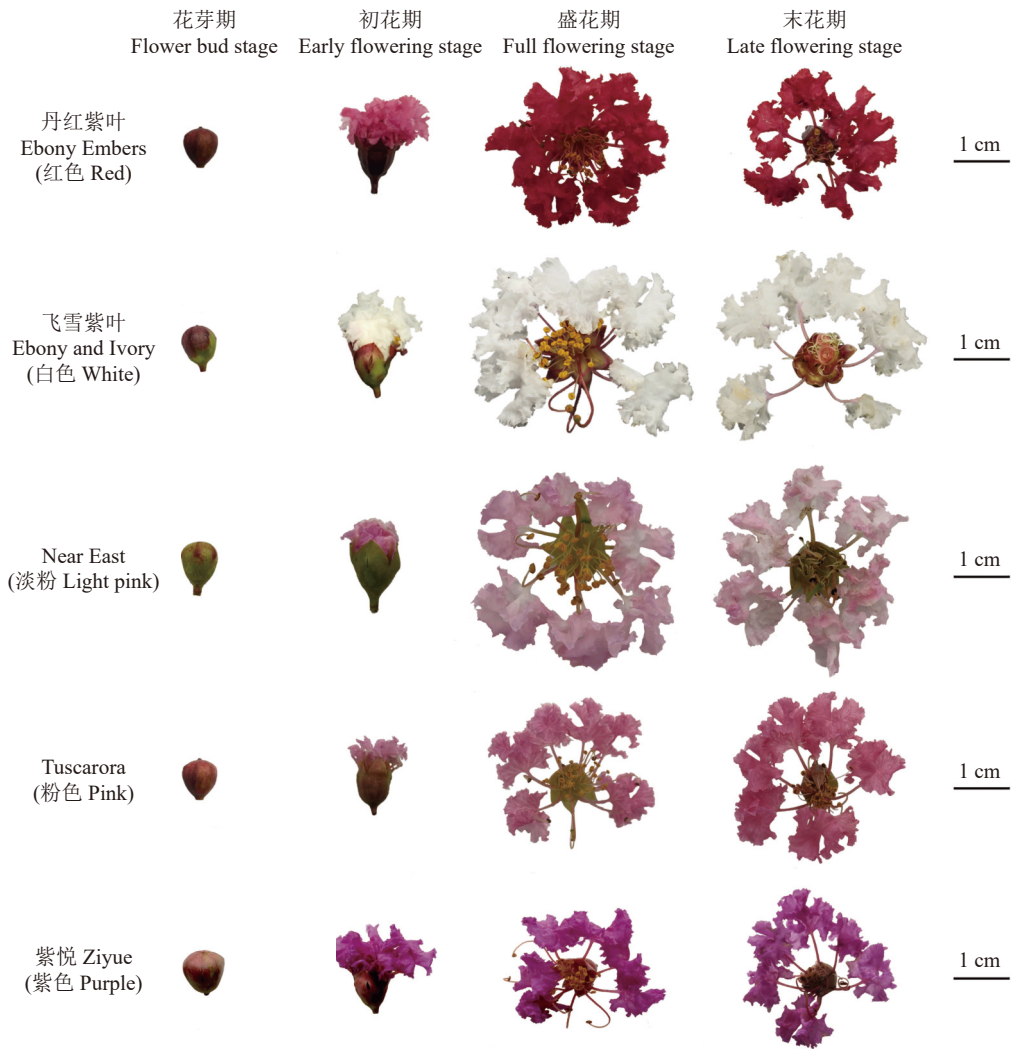


图1 5个品种紫薇开花阶段图

Fig. 1 Flowering stages of five varieties of *Lagerstroemia indica*

1.3 测定内容与方法

1.3.1 花器官表型指标测定 使用英国皇家园艺学会比色卡与各时期新鲜紫薇花瓣的中间部位颜色进行对比, 并使用分光色差仪(CM-2300d, 柯尼卡美能达)测定花色的明度L*、色相值a*、b*, 计

算饱和度c*和色调h: $c^*=(a^{*2}+b^{*2})^{1/2}$, $h=\arctan(b^*/a^*)^{[25]}$ 。每个试验组测定5朵花, 取平均值, 组间重复3次。

1.3.2 色素含量测定 总花色苷含量采用pH示差法^[26]测定。花瓣经冷冻研磨机研磨后, 使用体积分

数为 1% 的盐酸甲醇溶液在超声清洗仪中提取 30 min, 离心后添加 pH 分别为 1.0 和 4.5 的缓冲液, 反应后测定 $D_{530\text{ nm}}$ 和 $D_{700\text{ nm}}$ 。

总黄酮含量采用分光光度法^[27]测定。花瓣经冷冻研磨机研磨后使用体积分数为 70% 的乙醇溶液浸提 48 h, 离心后取上清液加入 $50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaNO_2 、 $100\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 和 $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaOH , 反应后测定 $D_{510\text{ nm}}$, 计算样品溶液浓度。

总叶绿素和类胡萝卜素使用体积分数为 95% 的乙醇溶液提取, 使用分光光度法测定 $D_{665\text{ nm}}$ 、 $D_{649\text{ nm}}$ 和 $D_{470\text{ nm}}$, 并计算总叶绿素和类胡萝卜素含量^[26]。

1.3.3 花瓣 pH 测定 取各时期新鲜花瓣 0.5 g 并加 2 mL 双蒸水 (不加石英砂) 研磨成匀浆, 置于离心管中, 用平面笔式 pH 计 (PHS-3C 型 pH 计, 上海仪电科学仪器有限公司) 测量花瓣匀浆 pH^[28]。每个试验组测定 5 次, 取平均值, 组间重复 3 次。

1.3.4 可溶性糖和可溶性蛋白含量测定 可溶性糖含量的提取与测定采用蒽酮比色法。花瓣研磨

后, 经 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 20 min, 离心后取上清液加入蒽酮溶液, 再 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴加热 10 min 后, 测定 $D_{620\text{ nm}}$, 计算样品溶液浓度。可溶性蛋白含量的提取与测定采用考马斯亮蓝 G-250 染色法^[29], 花瓣经磷酸缓冲液 (PBS) 冰浴研磨, 离心后加入考马斯亮蓝 G-250 溶液, 测定 $D_{620\text{ nm}}$, 计算样品溶液浓度。

1.4 数据分析

文中数据以组间平均值±标准偏差表示, 使用 Microsoft Excel 2021 和 SPSS Statistics 27 软件进行统计分析, 并使用 Origin 2021 软件进行绘图。采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 对不同开花阶段和不同花色指标进行分析。使用 Pearson 相关性分析来评估各指标之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 各花色品种表型指标的差异

不同紫薇品种花瓣花色的变化情况如表 1 所示。不同品种紫薇的 L^* 变化范围为 19.49~61.61,

表 1 不同花色紫薇表型变化¹⁾
Table 1 Phenotypic changes in *Lagerstroemia indica* varieties with different flower colors

品种 Cultivar (颜色 Color)	时期 Period	RHSCC	明度 L^*	红绿值 a^*	黄蓝值 b^*	饱和度 c^*	色调 h
丹红紫叶 Ebony Embers (红色 Red)	花芽期	67B	37.04±2.24Ca	11.57±0.44Bd	1.24±0.19Bc	11.63±0.46Bd	0.11±0.01Cc
	初芽期	67C	26.21±3.84Db	22.46±1.58Ac	4.69±0.85Bb	22.96±1.42Ac	0.21±0.05Ca
	盛花期	60A	20.58±1.41Cc	44.83±1.15Aa	7.39±0.94Aa	45.44±1.20Aa	0.16±0.02Bab
	末花期	60B	19.49±0.99Dc	41.42±1.82Ab	5.32±0.51Ab	41.75±1.88Ab	0.13±0.01Cbc
飞雪紫叶 Ebony and Ivory (白色 White)	花芽期	NN155B	61.61±1.31Aa	0.59±0.09Db	4.99±0.52Aa	5.03±0.51Da	1.45±0.03Aa
	初芽期	NN155B	60.79±1.06Aa	0.58±0.08Db	4.10±0.69Bb	4.14±0.69Db	1.43±0.02Aab
	盛花期	NN155C	54.58±0.97Ab	0.89±0.13Ea	3.82±0.23Bb	3.92±0.25Db	1.34±0.02Ad
	末花期	NN155C	54.67±0.95Ab	0.37±0.07Ec	1.82±0.20Cc	1.86±0.18Ec	1.37±0.06Acd
Near East (淡粉 Light pink)	花芽期	62D	51.14±3.56Ba	5.60±0.54Cb	-4.36±0.93Ca	7.15±0.19Cb	-0.66±0.15Db
	初芽期	62B	46.99±4.79Ba	10.52±1.29Ca	-3.30±0.08Ca	11.03±1.24Ca	-0.31±0.03Da
	盛花期	62C	49.97±8.74Aa	9.34±1.62Da	-4.22±1.93Ca	10.33±2.02Ca	-0.41±0.15Ca
	末花期	62D	48.76±4.82Ba	8.72±1.30Da	-3.13±0.67Da	9.27±1.44Dab	-0.34±0.03Da
Tuscarora (粉色 Pink)	花芽期	54C	29.67±3.86Dab	24.41±2.12Aa	4.17±0.58Ab	24.77±2.10Aa	0.17±0.03Cb
	初芽期	54D	37.04±3.65Ca	14.15±1.38Bc	6.04±0.24Aa	15.40±1.25Bc	0.41±0.04Ba
	盛花期	54C	34.26±1.27Bab	24.64±1.45Ba	4.07±0.63Bb	24.98±1.44Ba	0.16±0.03Bb
	末花期	54B	29.36±3.97Cb	20.01±0.77Bb	4.35±0.53Bb	20.48±0.86Bb	0.21±0.02Bb
紫悦 Ziyue (紫色 Purple)	花芽期	N155B	50.32±2.60Ba	2.10±0.35Dd	1.00±0.20Ba	2.34±0.27Ed	0.45±0.13Ba
	初芽期	N80B	33.66±2.99Cb	10.75±1.00Cc	-3.61±0.52Cb	11.34±1.11Cc	-0.32±0.02Db
	盛花期	N80A	23.86±2.54Cc	21.44±1.72Ca	-9.07±0.66Dc	23.30±1.41Ba	-0.40±0.05Cbc
	末花期	N80B	24.70±2.00CDc	15.66±0.47Cb	-9.18±0.15Ec	18.15±0.40Cb	-0.53±0.02Dc

1) 表中数据为3次组间重复的平均值±标准偏差;RHSCC: 皇家园艺学会比色卡; 同列数据后的不同大写和小写字母分别代表不同花色和不同时期差异显著($P<0.05$, Duncan's法)。

1) Data in the table represent the means ± standard deviations of three inter-group replicates. RHSCC: Royal Horticultural Society color card; Different uppercase and lowercase letters of the same column represent significant differences among different flower colors and different periods, respectively ($P<0.05$, Duncan's method).

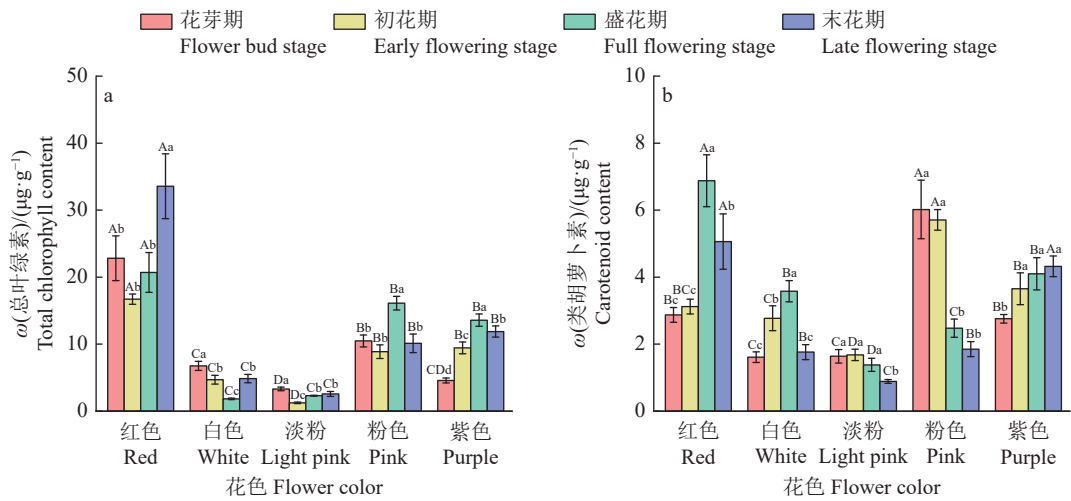
*L**从高到低总体表现为: 白色>淡粉>紫色、粉色>红色; 随着开花时期延长, 各品种紫薇 *L**总体上呈现下降趋势。不同品种紫薇的 *a**变化范围为 0.37~44.83, *a**从高到低总体表现为: 红色>粉色>紫色>淡粉>白色; 随着开花时期延长, 各品种紫薇 *a**总体上呈现先上升后下降的趋势。不同品种紫薇的 *b**变化范围为-9.18~7.39, *b**从高到低总体表现为: 红色、粉色>白色>淡粉>紫色; 随着开花时期延长, 各品种紫薇 *b**变化趋势各异。不同品种紫薇的 *c**变化范围为 1.86~45.44, *c**从高到低总体表现为: 红色>粉色>紫色>淡粉>白色; 随着开花时期延长, 红色、淡粉和紫色紫薇 *c**总体上呈现先上升后下降, 白色紫薇表现为持续下降的趋势。不同品种紫薇的 *h*变化范围为-0.66~1.45, *h*从高到低总体表现为: 白色>粉色>红色>紫色、淡粉; 随着开花时期延长, 各品种紫薇 *h*变化趋势各异。

2.2 总叶绿素和类胡萝卜素含量的差异

不同花色紫薇总叶绿素含量变化情况如图 2a

所示。不同花色紫薇的总叶绿素含量变化范围为 1.24~33.58 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 总叶绿素含量从高到低总体表现为: 红色>粉色>紫色>白色>淡粉; 红色、白色和淡粉色的紫薇花瓣中总叶绿素呈现先下降后上升的趋势, 而紫色花瓣则表现为先上升后下降, 粉色花瓣则在盛花期时候显著高于其余时期 ($P<0.05$)。

不同花色紫薇类胡萝卜素含量变化情况如图 2b 所示。不同花色紫薇的类胡萝卜素含量变化范围为 0.89~6.88 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 在花芽期和初花期以粉色紫薇中含量最高, 盛花期和末花期在红色紫薇中含量最高, 初花期—末花期均在淡粉紫薇中含量最低。各花色的变化趋势有一定差异, 红色和白色紫薇的类胡萝卜素含量总体上表现为先上升后下降, 且均在盛花期时显著高于其余时期 ($P<0.05$), 淡粉和粉色在花芽期和初花期含量较高, 之后不断下降, 紫色紫薇则表现为持续上升, 且在末花期达到最大值。



各图中, 柱子上方的不同大写和小写字母分别代表不同花色和不同时期间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)。

In each figure, different uppercase and lowercase letters on bars represent significant differences among different flower colors and different periods, respectively ($P<0.05$, Duncan's method).

图 2 不同花色紫薇总叶绿素和类胡萝卜素含量变化

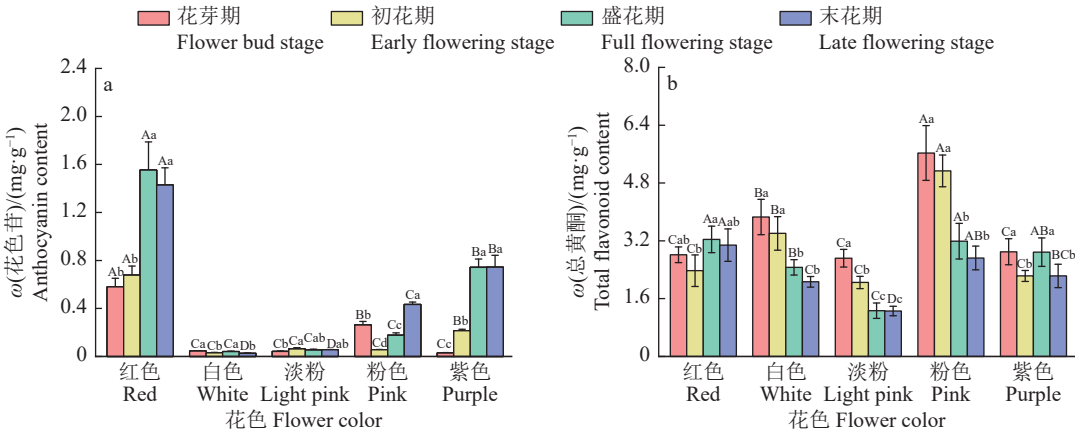
Fig. 2 Changes in total chlorophyll and carotenoid contents in *Lagerstroemia indica* varieties with different flower colors

2.3 花色苷和总黄酮含量的差异

不同花色紫薇花色苷含量变化情况如图 3a 所示。不同花色紫薇的花色苷含量变化范围为 0.03~1.55 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 花色苷含量从高到低总体表现为: 红色>紫色>粉色>淡粉>白色。红色和紫色紫薇的花色苷含量在盛花期最高, 显著高于花芽期和初花期 ($P<0.05$), 粉色花色苷含量呈先下降后上升趋势, 在初花期显著低于其余时期 ($P<0.05$), 白色紫薇在花芽期含量最高, 淡粉色则在初花期含量

最高。

不同花色紫薇总黄酮含量变化情况如图 3b 所示。不同花色紫薇的总黄酮含量变化范围为 1.26~5.63 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 在花芽期和初花期以粉色紫薇中含量最高, 盛花期和末花期在红色紫薇中含量最高, 各时期均在淡粉紫薇中含量最低。其中白色、淡粉和粉色的总黄酮含量均表现为持续下降, 且花芽期和初花期均显著高于盛花期和末花期 ($P<0.05$), 红色和紫色紫薇中总黄酮含量则表现为“下



各图中，柱子上方的不同大写和小写字母分别代表不同花色和不同时期间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)。

In each figure, different uppercase and lowercase letters on bars represent significant differences among different flower colors and different periods, respectively ($P<0.05$, Duncan's method).

图 3 不同花色紫薇花色苷和总黄酮含量变化

Fig. 3 Changes in anthocyanin and total flavonoid contents in *Lagerstroemia indica* varieties with different flower colors

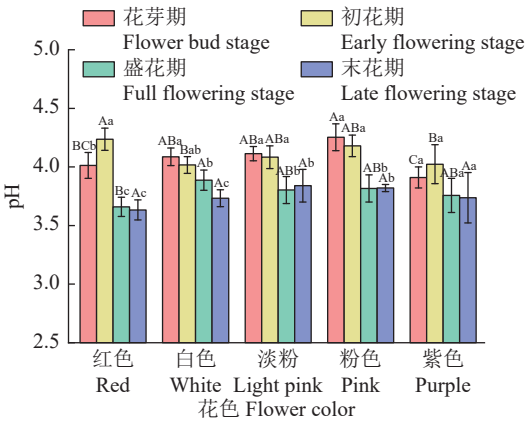
降-上升-下降”，且均在盛花期达到最大值。

2.4 花瓣 pH 的差异

不同花色紫薇 pH 变化情况如图 4 所示。不同花色紫薇的 pH 变化范围为 3.63~4.25。各个颜色紫薇均表现为在花芽期和初花期 pH 较高，其中红色和紫色紫薇在初花期最高，而白色、淡粉和粉色紫薇则在花芽期最高。在盛花期和末花期 pH 出现显著下降 ($P<0.05$), 其中红色、白色和紫色紫薇在末花期最低，而粉色和淡粉紫薇则在盛花期最低。

2.5 可溶性糖和可溶性蛋白含量的差异

不同花色紫薇可溶性糖含量变化情况如图 5a 所示。不同花色紫薇的可溶性糖含量变化范围为 11.48~45.82 $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，可溶性糖含量在粉色花中最高，在白色花中相对最低。各花色可溶性糖含量总体上均表现为花芽期至初花期基本稳定，在盛花期

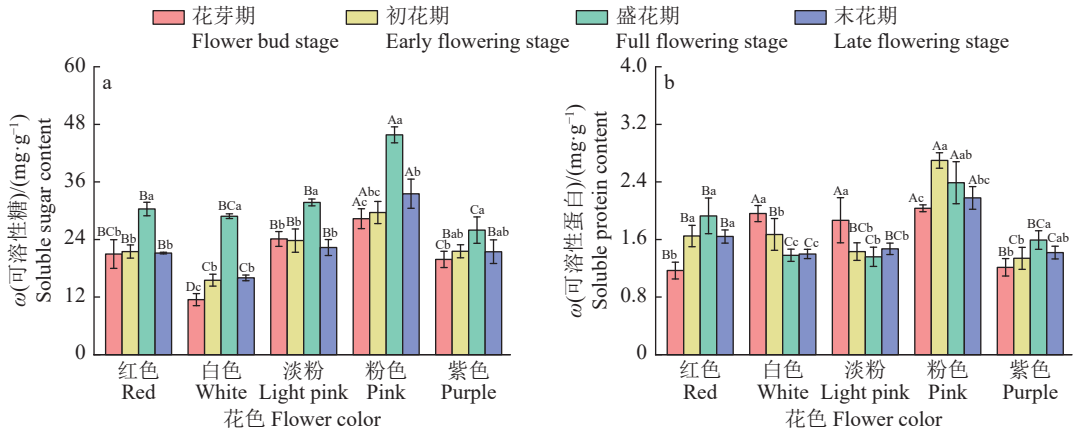


柱子上方的不同大写和小写字母分别代表不同花色和不同时期间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)。

Different uppercase and lowercase letters on bars represent significant differences among different flower colors and different periods, respectively ($P<0.05$, Duncan's method).

图 4 不同花色紫薇 pH 变化

Fig. 4 pH changes in *Lagerstroemia indica* varieties with different flower colors



各图中，柱子上方的不同大写字母和小写字母分别代表不同花色和不同时期间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)。

In each figure, different uppercase and lowercase letters represent significant differences among different flower colors and different periods, respectively ($P<0.05$, Duncan's method).

图 5 不同花色紫薇可溶性糖和可溶性蛋白含量变化

Fig. 5 Changes in soluble sugar and soluble protein contents in *Lagerstroemia indica* varieties with different flower colors

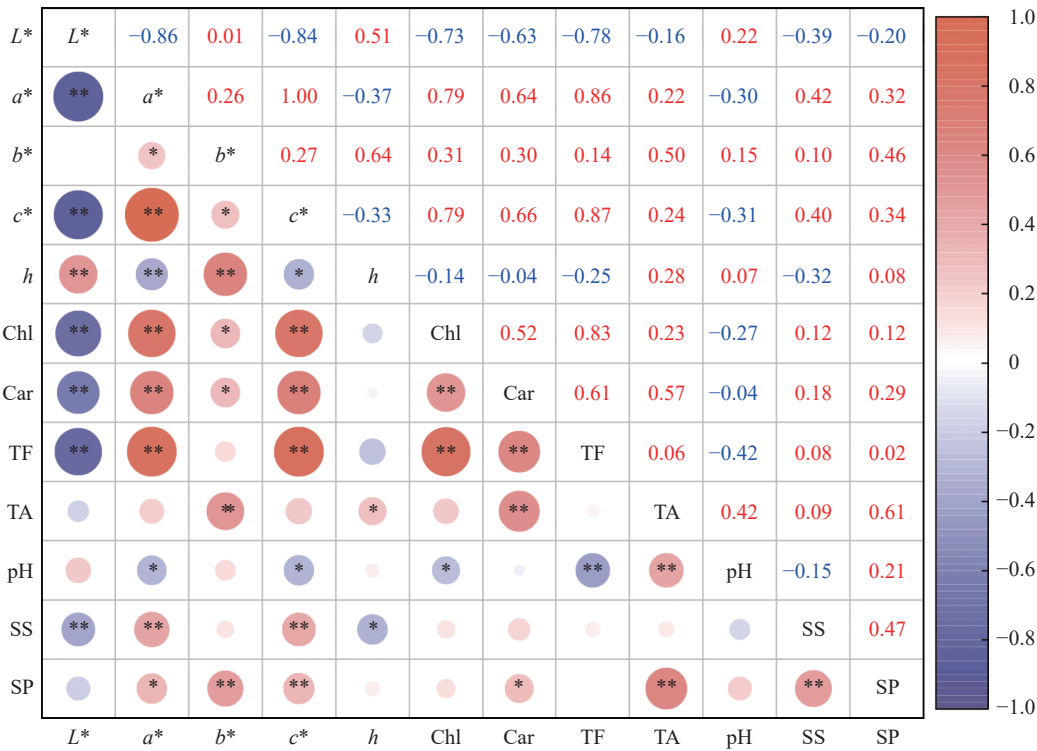
显著增加 ($P<0.05$), 在末花期下降。

不同花色紫薇可溶性蛋白含量变化情况如图 5b 所示。不同花色紫薇的可溶性蛋白含量变化范围为 $1.17\sim2.70\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 可溶性蛋白含量各时期均在粉色花中最高。红色、粉色和紫色紫薇表现为先上升后下降, 其中红色和紫色紫薇在盛花期达到最大值, 而粉色紫薇在初花期最高, 白色和淡粉紫薇则表现为前期下降, 之后稳定。

2.6 各指标的相关性分析

不同花色在开花过程中各指标的相关性分析结果如图 6 所示。 L^* 与 a^* 、 c^* 、总叶绿素、类胡萝卜素、花色苷和可溶性糖含量呈极显著负相关, 与 h 呈极显著正相关 ($P<0.01$); 而 a^* 和 c^* 均与总叶绿

素、类胡萝卜素、花色苷和可溶性糖含量呈极显著正相关, 与 h 呈极显著负相关 ($P<0.01$); b^* 与 h 、总黄酮含量和可溶性蛋白含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与 c^* 、总叶绿素和类胡萝卜素含量呈显著正相关 ($P<0.05$); 总叶绿素、类胡萝卜素和花色苷含量之间均呈现极显著正相关 ($P<0.01$); pH 与叶绿素含量呈显著负相关 ($P<0.05$), 与花色苷含量呈极显著负相关, 与总黄酮含量呈极显著正相关 ($P<0.01$); 可溶性糖含量与各色素含量之间均无显著相关关系; 可溶性蛋白含量与类胡萝卜素含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 与总黄酮和可溶性糖含量呈极显著正相关 ($P<0.01$)。



Chl: 总叶绿素含量; Car: 类胡萝卜素含量; TA: 花色苷含量; TF: 总黄酮含量; SS: 可溶性糖含量; SP: 可溶性蛋白含量; *和**分别代表在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平显著相关 (Pearson 法)。
Chl: Total chlorophyll content; Car: Carotenoid content; TA: Anthocyanin content; TF: Total flavonoid content; SS: Soluble sugar content; SP: Soluble protein content; * and ** indicate significant correlations at the levels of $P<0.05$ and $P<0.01$ respectively (Pearson method).

图 6 紫薇开花过程中各指标的相关性

Fig. 6 Correlation of various indicators during flowering process of Lagerstroemia indica

3 讨论与结论

3.1 呈色与花瓣表型发育

花色是园艺植物品种改良中的关键特征之一, 它不仅在不同品种之间存在差异, 而且在开花过程中也会发生颜色的变化。然而对于色彩的评定通常带有一定主观性, 为了客观量化色彩指标, 英国皇家园艺学会比色卡和色差计被广泛应用于花色的

测定^[30]。色彩参数包括 L^* 、 a^* 、 b^* 、 c^* 和 h , L^* 代表明度, 值越大颜色越亮; a^* 表示红绿轴的颜色特征, 值越大越偏红, 反之偏绿; b^* 表示黄蓝轴, 值越大越偏黄, 反之偏蓝; c^* 表示颜色饱和度, 值越高颜色越鲜艳; h 表示色调的变化^[31]。本研究结果表明, 在各花色紫薇开花过程中, L^* 总体上呈现下降趋势, 且白色花的 L^* 最高, 说明随着花瓣内色素的积累和花色的加深, 花朵的明度会减小; a^* 和 c^* 总体均表现

为红色>粉色>紫色>淡粉>白色,且二者之间呈现极显著正相关,说明 a^* 和 c^* 可以作为表示紫薇花色鲜艳程度的客观指标。该结果与周兵等^[27] 的研究结果一致。另外,紫色、白色和淡粉色紫薇在花芽期颜色较淡,在初花期逐渐加深,而粉色和红色紫薇则在花芽期就已经呈现较深的颜色,在木槿 *Hibiscus syriacus*^[32] 中,红花品种同样在花芽期便出现较深花色,这主要是由于此时期花色苷累积导致,且以锦葵素-3-O-葡萄糖苷含量最高,在鸡蛋花 *Plumeria rubra*^[33] 中也出现了花色由深变浅再加深的现象。通过对紫薇花瓣 L^* 、 a^* 、 b^* 、 c^* 和 h 的变化进行分析,可以揭示不同花色紫薇在开花过程中的色彩演变规律,为分析紫薇花色随开花进程的变化和紫薇品种的选育提供了理论依据。

3.2 呈色与色素含量变化

色素的种类与含量会直接影响花瓣呈色,不同种类的色素通过吸收和反射不同波长的光,从而形成花瓣的色彩^[34]。一般叶绿素呈绿色,类胡萝卜素和类黄酮呈黄色至橙红色,而花色苷则呈红色、蓝色和紫色^[15, 18, 27]。在本研究中,紫薇中叶绿素、类胡萝卜素和花色苷含量与 L^* 均呈现极显著负相关,与 a^* 和 c^* 均呈极显著正相关,说明色素含量在一定程度上决定了紫薇花瓣的整体亮度和色调。除花色苷外,其余色素含量均与 b^* 呈现显著正相关,表明在紫薇中,花色苷并未呈现蓝色,这可能是因为紫薇的 pH 始终处于弱酸性,在此 pH 下,花色苷仅呈现红色或紫色^[35],这与董胜君等^[18] 和关超等^[33] 的研究结果基本一致。另外, pH 与花色苷含量呈现极显著负相关,这可能是因为酸性条件下花色苷更稳定。综上所述,紫薇花色的形成并非仅仅由单一某种色素决定,而是由其花瓣内部的酸性环境和多种色素类型共同决定的。

3.3 呈色与花色苷合成

花色苷是重要的呈色色素,是造成植物颜色差异的主要原因之一^[36]。本研究结果表明,白色和淡粉色花中的花色苷含量较低,红花和紫花中花色苷含量较高,这与马晓华等^[14] 研究结果一致。Yu 等^[4] 通过转录组分析发现,在颜色更深的紫薇中色素生物合成基因更为活跃;同样, Hong 等^[37] 发现,与白色花相比,花青素通路基因在有色样品中更活跃,说明花色苷是造成花色差异的关键物质,浅色花中花青素的合成通路基因活性低是造成花色苷含量差异的原因;而紫薇中 $F3'H$ 和 $F3'5'H$ 的基因表达水平不同可能是造成紫薇呈现不同颜色的原

因,二者竞争同一种底物, $F3'H$ 参与的反应生成矢车菊素,可能导致红色花的形成, $F3'5'H$ 主要生成飞燕草素,可能导致紫色花的形成。此外, $LibZIP31$ 、 $LibZIP65$ 、 $LibZIP34$ 、 $LiWRKY16$ 、 $LiWRKY25$ 、 $LiWRKY40$ 和 $LiWRKY67$ 也可能在紫薇花色形成中发挥重要作用^[38]。紫薇不同花色之间的差异可以归因于花色苷含量的不同,而花青素合成通路的基因表达则是调控这一过程的关键,未来的研究可以通过定向设计探索如何调控相关基因的表达,从而为植物花色的定向育种提供理论依据。

3.4 呈色与黄酮含量变化

黄酮是一类广泛存在于植物中的天然代谢产物,不仅在植物的抗氧化、防御等生理功能中起着重要作用,还负责植物中色调的形成。在本研究中,总黄酮含量与 L^* 、 a^* 、 c^* 和 h 之间均无显著相关性。这可能是因为颜色较淡的花色中黄酮与黄酮醇类代谢物主要以木犀草素与槲皮素为主,而红色系和紫色系花瓣中主要呈色色素为花青素苷^[15],代谢产物种类的多样性造成了颜色参数的差异。许芳祺等^[39] 发现龙船花 *Ixora chinensis* 中以粉色龙船花的类黄酮含量最高,红色最低;海棠 *Malus spp.*^[40] 的花发育过程中,总黄酮含量会表现为持续下降或先上升后下降;董胜君等^[18] 同样发现随着杏树 *Prunus sibirica* 花的发育,类黄酮含量持续下降,且表现为粉色>白色。本研究中,总黄酮含量总体上呈现下降趋势,表现为:粉色>白色>红色、紫粉>淡粉,与前人研究结果基本一致。此外,本研究还发现,紫薇中总黄酮含量与 b^* 呈极显著正相关,说明在紫薇中,黄酮类物质或许可以作为其黄色色调的重要来源^[15]。目前,无论是自然界还是人工培育的品种中,都未见到黄色花瓣的紫薇。查尔酮是黄酮类物质,也是黄薇属 *Heimia* 花朵呈现黄色的主要原因^[15]。这为将来培育黄色花瓣的紫薇提供了新的思路,未来通过调控黄酮的合成可能培育新的紫薇花瓣颜色。

3.5 呈色与可溶性糖含量变化

可溶性糖是植物开花过程和花色形成中不可或缺的能量物质和信号分子。Zhang 等^[41] 发现可溶性糖的增加可以改善牡丹 *Paeonia suffruticosa* 的花瓣颜色,表现为 L^* 的降低、 a^* 和 c^* 的升高。本研究也发现,可溶性糖含量与 L^* 呈极显著负相关,而与 a^* 和 c^* 呈极显著正相关,但却与各色素含量之间无显著相关性,说明可溶性糖虽然不直接影响紫薇花瓣中色素的形成,但仍然会通过其他途径影响花的呈色。此外,本研究中还发现各花色的可溶性糖含

量均在盛花期时显著增加, 总体上均表现为先上升后下降的趋势。这可能是因为紫薇花瓣极薄, 因此在其开花过程中易导致水分迅速蒸发^[42], 可溶性糖作为植物体内关键的渗透调节物质之一, 能够通过增加细胞液的渗透压, 帮助植物在胁迫条件下维持水分平衡并防止细胞内水分的过度蒸发^[43]。同样, 末花期时, 可溶性糖含量下降, 使得花瓣开始枯萎, 花瓣的色泽减弱。因此, 可溶性糖在紫薇花色形成过程中具有重要作用, 可溶性糖虽然不直接参与花瓣中色素的合成, 但它仍通过调节植物的水分平衡、参与植物生理过程和色素的修饰, 对花瓣的颜色和开花表现产生影响。

3.6 结论

紫薇花瓣在开花过程中, L^* 总体呈下降趋势, a^* 和 c^* 表现为先上升后下降。白花紫薇的 L^* 和 h 最高, 最大值分别为 61.61 和 1.45, a^* 、 b^* 和 c^* 均在红色花中最高, 最大值分别为 44.83、7.39 和 45.44。紫薇花瓣的叶绿素、类胡萝卜素和花色苷含量均在红色花中最高, 最大值分别为 $33.58\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $6.88\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $1.55\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, 总黄酮含量则在粉色花中最高, 最大值为 $5.63\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。pH 在花芽期和初花期较高, 而在盛花期和末花期显著下降。可溶性糖含量在盛花期显著上升, 与花瓣 L^* 呈极显著负相关, 与 a^* 和 c^* 呈极显著正相关, 表明可溶性糖在维持花瓣形态和色彩稳定性方面发挥着重要作用。总叶绿素、类胡萝卜素和花色苷含量与 L^* 呈极显著负相关, 与 a^* 和 c^* 呈极显著正相关, 总黄酮含量与 b^* 呈极显著正相关, 与 h 呈显著正相关, 可能是紫薇花瓣黄色调的重要来源。本研究揭示了影响紫薇呈色的生理机制, 为理解不同品种花色差异和品种创新提供了科学依据。

参考文献:

[1] 张林娟, 李向茂, 奉树成. 紫薇种质资源与应用研究进展[J]. 广东农业科学, 2024, 51(2): 81-91.

[2] 顾帆, 郑绍宇, 沈鸿明, 等. 基于灰色关联度分析评价紫薇品种花部观赏性状[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(24): 93-100.

[3] 乔中全, 王小明, 李永欣, 等. 38 个紫薇品种亲缘关系的 ISSR 分析[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(4): 565-571.

[4] YU C M, LIAN B L, FANG W, et al. Transcriptome-based analysis reveals that the biosynthesis of anthocyanins is more active than that of flavonols and proanthocyanins in the colorful flowers of *Lagerstroemia indica*[J]. *Biologia Futura*, 2021, 72(4): 473-488.

[5] 乔中全, 王小明, 蔡能, 等. 紫薇新品种‘丹霞’[J]. 园艺学报, 2019, 46(10): 2069-2070.

[6] 王梦瑶, 顾翠花. 紫薇品种间杂交亲和性分析[J]. 分子

植物育种, 2022, 20(7): 2366-2371.

[7] XU W, CAI M, PAN H T, et al. Novel hybrids with floral scent between *Lagerstroemia caudata* and three *L. indica* cultivars[J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 316: 112017.

[8] WANG Y X, GU C H, BAI S B, et al. Cadmium accumulation and tolerance of *Lagerstroemia indica* and *Lagerstroemia fauriei* (Lythraceae) seedlings for phytoremediation applications[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(11): 1104-1112.

[9] 王湘莹, 魏溧姣, 王晓明, 等. 淹水胁迫对紫薇苗生长及生理特性的影响[J]. 北方园艺, 2024(15): 60-66.

[10] 胡卫霞, 邱国金, 王红梅. 3 个彩叶紫薇品种的扦插繁殖对比试验[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(7): 99-103.

[11] WU Y J, LU Q Y, GONG Y, et al. Optimizing nitrogen, phosphorus, and potassium fertilization levels for container plants of *Lagerstroemia indica* ‘whit III’ based on the comprehensive quality evaluation[J]. *HortScience*, 2023, 58(2): 222-230.

[12] ZHOU W, WANG X M, CHEN J H, et al. Abortion categories and characteristics of acarpous crape myrtle floral organs[J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2019, 144(6): 387-393.

[13] 周围, 陈建华, 王晓明, 等. 结实与不结实紫薇花芽发育形态及生理特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(10): 148-157.

[14] 马晓华, 陈春青, 叶胜忠, 等. 不同花色紫薇花瓣的花色苷化合物组分及含量比较[J]. 亚热带农业研究, 2023, 19(1): 56-63.

[15] 林启芳, 刘婷婷, 刘洁茹, 等. 紫薇属与黄薇属植物花瓣类黄酮组成及含量分析[J]. 园艺学报, 2021, 48(10): 1956-1968.

[16] ZHANG J, WANG L S, GAO J M, et al. Determination of anthocyanins and exploration of relationship between their composition and petal coloration in crape myrtle (*Lagerstroemia hybrid*)[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2008, 50(5): 581-588.

[17] 谢燕, 贺英, 周宁智, 等. 蜡梅‘美人醉’花色变化过程中生理生化特性研究[J]. 西北植物学报, 2023, 43(4): 611-617.

[18] 董胜君, 范雯萱, 张云程, 等. 粉花西伯利亚杏花色变化的生理特性研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(2): 140-148.

[19] 何娜, 杨祎凡, 江皓, 等. 观赏海棠花色与花瓣 pH、表皮细胞形态特征的关系[J]. 福建农业学报, 2021, 36(9): 1025-1032.

[20] JIANG T, MAO Y, SUI L S, et al. Degradation of anthocyanins and polymeric color formation during heat treatment of purple sweet potato extract at different pH[J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 460-470.

[21] SIGURDSON G T, ROBBINS R J, COLLINS T M, et al. Spectral and colorimetric characteristics of metal chelates of acylated cyanidin derivatives[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1088-1095.

[22] MENG L S, XU M K, WAN W, et al. Sucrose signaling regulates anthocyanin biosynthesis through a MAPK cascade in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Genetics*, 2018, 210(2): 607-619.

[23] JIN Z Q, WANG Y D, SI C C, et al. Effects of shading intensities on the yield and contents of anthocyanin and soluble sugar in tubers of purple sweet potato[J]. *Crop Science*, 2023, 63(5): 3013-3024.

[24] ZHANG D L, XIE A Q, YANG X, et al. Analysis of physiological and biochemical factors affecting flower color of herbaceous peony in different flowering periods[J]. *Horticulturae*, 2023, 9(4): 502.

[25] 周琦, 赵峰, 张慧会, 等. 香水莲开花过程中花色变化规律研究[J]. *热带作物学报*, 2024, 45(1): 122-133.

[26] 袁美静, 马誉, 巫瑞, 等. 影响月季花瓣呈色的理化因子及花色苷组分分析[J]. *西北植物学报*, 2024, 44(2): 255-269.

[27] 周兵, 闫小红, 雷艺涵, 等. 紫茉莉开花过程中花色和花色素的变化规律[J]. *植物研究*, 2022, 42(3): 475-482.

[28] 蒋朵朵, 李林. 2 种茄科植物花色变化的生理生化机制[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(8): 133-145.

[29] 勾昕, 胡薇薇, 范亚飞, 等. 文心兰切花不同开放阶段花被的生理生化变化[J]. *热带生物学报*, 2016, 7(1): 70-75.

[30] ONDER S, TONGUC M, ONDER D, et al. Flower color and carbohydrate metabolism changes during the floral development of *Rosa damascena*[J]. *South African Journal of Botany*, 2023, 156: 234-243.

[31] ZHOU Y W, YIN M, ABBAS F, et al. Classification and association analysis of *Gerbera* (*Gerbera hybrida*) flower color traits[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 779288.

[32] 李浙浙, 张一丹, 王波, 等. 木槿开花过程中花色素的变化规律及其影响因素[J]. *植物研究*, 2023, 43(4): 550-561.

[33] 关超, 潘占冬, 孙阳, 等. 3 种鸡蛋花开花过程中花色与花色素的变化规律[J/OL]. *分子植物育种*, 2023: 1-23. (2023-05-18)[2024-12-08]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230517.1427.026.html>.

[34] 刘智媛, 叶康, 杜习武, 等. 藤本月季花瓣形态结构和色素含量相关性分析[J]. *北京农学院学报*, 2022, 37(1): 1-10.

[35] LUNA-VITAL D, LI Q, WEST L, et al. Anthocyanin condensed forms do not affect color or chemical stability of purple corn pericarp extracts stored under different pHs[J]. *Food Chemistry*, 2017, 232: 639-647.

[36] ZHOU X Y, XIE W, JING H, et al. Analysis of anthocyanins and total flavonoids content in functional rice and its recombination inbred lines[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1113618.

[37] HONG S D, WANG J, WANG Q, et al. Decoding the formation of diverse petal colors of *Lagerstroemia indica* by integrating the data from transcriptome and metabolome[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 970023.

[38] GU C H, HONG S D, WANG J, et al. Identification and expression analysis of the bZIP and WRKY gene families during anthocyanins biosynthesis in *Lagerstroemia indica* L[J]. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 2024, 65: 169-180.

[39] 许芳祺, 柯玲俊, 余惠文, 等. 不同龙船花的花色与色素含量分析[J]. *福建热作科技*, 2024, 49(3): 30-33.

[40] 韩美玲, 赵宇珩, 李厚华, 等. 开花过程中不同海棠花瓣酚类物质动态变化与花色淡化原因分析[J]. *北方园艺*, 2023(16): 64-70.

[41] ZHANG C, FU J X, WANG Y J, et al. Glucose supply improves petal coloration and anthocyanin biosynthesis in *Paeonia suffruticosa* ‘Luoyang Hong’ cut flowers[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2015, 101: 73-81.

[42] GUO Y Z, QIU Y J, HU H, et al. Petal morphology is correlated with floral longevity in *Paeonia suffruticosa*[J]. *Agronomy*, 2023, 13(5): 1372.

[43] WANG X Y, WU Z H, ZHOU Q, et al. Physiological response of soybean plants to water deficit[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 809692.

【责任编辑 庄 延】