

# 蜡梅‘美人醉’花色变化过程中生理生化特性研究

谢 燕<sup>1,3</sup>, 贺 英<sup>1,3</sup>, 周宁智<sup>1,3</sup>, 颜玉娟<sup>1,3\*</sup>, 黄 宇<sup>2,4</sup>

(1 中南林业科技大学 风景园林学院, 长沙 410004; 2 南宁学院, 南宁 530200; 3 湖南省自然保护地风景资源大数据工程技术研究中心, 长沙 410004; 4 南宁学院 人居环境与绿色低碳城市研究所, 南宁 530200)

**摘 要:** 该研究以成年乔种蜡梅‘美人醉’ [*Chimonanthus praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’] 5 个时期 (蕾期、萌动期、初花期、盛花期和末花期) 的花瓣内被片为材料, 考察开花过程中花瓣色度值、花色素含量、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量及其超氧化物歧化酶 (SOD)、苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性的变化, 并探讨各指标之间的相关性, 以揭示蜡梅花色变化过程中生理生化指标的变化特征。结果显示: (1) ‘美人醉’花瓣的色度值从蕾期到末花期, 花瓣红度  $a^*$  值急剧减小, 亮度  $L^*$  值、黄度  $b^*$  值和彩度  $C^*$  值、色相角  $h^*$  值逐渐增大。(2) 在‘美人醉’开花过程中, 花瓣类黄酮、花色苷、叶绿素含量逐渐减少, 类胡萝卜素含量先增加后减少。(3) ‘美人醉’花瓣可溶性蛋白含量在萌动期和盛花期显著下降, 而可溶性糖含量在初花期降到最低值。(4) ‘美人醉’花瓣 PAL 活性随着开花进程呈先下降后上升的趋势, 而 SOD 活性先显著上升, 后保持平稳。(5) ‘美人醉’花瓣色度值与其类黄酮、叶绿素、花色苷、可溶性蛋白含量以及 PAL 活性均具有显著相关关系。研究表明, 蜡梅‘美人醉’花色变化是花色苷、类黄酮、叶绿素共同作用的结果, 但花色苷含量的变化起着最直接的作用; 花瓣可溶性蛋白、SOD、PAL 通过一定的生理代谢途径对花色变化起着间接的影响。

**关键词:** 蜡梅; ‘美人醉’; 花瓣; 花色; 色度值; 生理生化

**中图分类号:** Q945.6<sup>+</sup>4; S685.99 **文献标志码:** A

## Study on the Physiological and Biochemical Characteristics of *Chimonanthus praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’ Petals during Flowering

XIE Yan<sup>1,3</sup>, HE Ying<sup>1,3</sup>, ZHOU Ningzhi<sup>1,3</sup>, YAN Yujuan<sup>1,3\*</sup>, HUANG Yu<sup>2,4</sup>

(1 College of Landscape Architecture, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2 Nanning University, Nanning 530200, China; 3 Hunan Big Data Engineering Technology Research Center of Natural Protected Areas Landscape Resources, Changsha 410004, China; 4 Institute of Hunan Settlements and Green Low-carbon Cities, Nanning University, Nanning 530200, China)

**Abstract:** In this study, using the inner petals of *Chimonanthus praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’ in five flowering stages (budding, germination, initial flowering, full blooming and final flowering) as materials, we investigated the change of the chromaticity value, the contents of anthocyanidin, soluble proteins, soluble sugar and the activities of superoxide dismutase (SOD), phenylalanine lyase (PAL) during flowering, and analyzed the correlation between the indicators, so as to reveal the characteristics of physiological and biochemical indexes during the floral color change of *C. praecox* (L.) Link. The results showed that: (1) from budding stage to final flowering stage, the hue  $a^*$  of ‘Meirenzui’ petals decreased sharply, while the

收稿日期: 2022-09-06; 修改稿收到日期: 2023-03-22

基金项目: 国家林业局重点学科 (林人发[2016]21 号); 湖南省“双一流”培育学科 (湘教通[2018]469 号)

作者简介: 谢 燕 (1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事园林植物与应用研究。E-mail: 814160068@qq.com

\* 通信作者: 颜玉娟, 副教授, 硕士生导师, 主要从事园林植物及其应用研究。E-mail: 1964610285@qq.com

value of brightness  $L^*$ , hue  $b^*$ , chroma  $C^*$  and hue angle  $h^\circ$  increased gradually. (2) During the flowering process of 'Meirenzui', the contents of flavonoids, anthocyanins and chlorophyll in petals gradually decreased, while the contents of carotenoids increased first and then decreased. (3) The soluble protein content of 'Meirenzui' petals decreased significantly in the germination stage and full blooming stage, while the soluble sugar content decreased to the lowest value in the initial flowering stage. (4) The PAL activity of 'Meirenzui' petals decreased first and then increased with the flowering process, while the SOD activity increased significantly first and then remained stable. (5) There was a significant correlation between the chromaticity value of 'Meirenzui' petals and the contents of flavonoids, chlorophyll, anthocyanin, soluble protein and PAL activity. The results showed that *C. praecox* (L.) Link 'Meirenzui' floral color change is the result of the joint action of anthocyanins, flavonoids and chlorophyll, but the change of anthocyanin content plays the most direct role, soluble protein, SOD and PAL play an indirect role in the change of floral color through physiological metabolic pathways.

**Key words:** *Chimonanthus praecox* (L.) Link; 'Meirenzui'; petal; flower color; chromaticity value; physiology and biochemistry

花色是被子植物最具观赏价值的性状之一,也是衡量观赏植物品质的重要指标之一,花色的优劣直接关系到其观赏价值和商业价值。植物花色常常表现为单一色相,从花开放到凋萎,花色常变浅或变深。研究表明,内部遗传和外部理化因子共同影响,使花瓣的组织结构和生理生化代谢水平发生改变,导致花色发生变化。内部遗传主要指由基因差异导致的花色不同,或开花过程中基因表达量不同导致的花色变化<sup>[1]</sup>。外部理化因子主要指物理环境与化学因子通过一定的生理生化代谢影响花色的变化。花色素种类、含量与比例的不同是引起开花过程中花色变化的直接原因,其中主要有叶绿素、类胡萝卜素、类黄酮与生物碱。花色呈黄色主要是类黄酮、类胡萝卜素等色素的积累,而花色变红是大量花色苷合成直接导致的。目前,花色变化中生理生化代谢过程逐渐引起关注,其中相关化学物质和相关活性酶的研究较多。如可溶性糖、可溶性蛋白等植物中的渗透调节物质是花色素合成的前体物质,其含量对花色素的合成起到重要作用<sup>[2]</sup>。花色苷合成途径属于类黄酮代谢途径,苯丙氨酸解氨酶(PAL)是该合成途径的第一个活性酶,在花色苷的合成中起重要作用<sup>[3]</sup>。超氧化物歧化酶(SOD)活性也能够影响植物花色苷的合成等<sup>[4]</sup>。

蜡梅 [*Chimonanthus praecox* (L.) Link], 是中国传统的观赏植物,其内被片花色丰富,具有很高的观赏价值。程红梅等依据内被片颜色将蜡梅分为素心品种群、乔品种群、红心品种群<sup>[5]</sup>。国外关于蜡梅的相关研究集中于种质资源、生物碱、挥发物、花青素、传粉相关的露尾甲科昆虫,以及杂交育种等方面<sup>[6]</sup>;国内研究集中于品种分类<sup>[7]</sup>、花香<sup>[8]</sup>、化学

成分<sup>[9]</sup>等。目前蜡梅花色的研究停留在花色素种类、含量以及基因调控上<sup>[10]</sup>,而关于乔种蜡梅花色变化的生理生化特征未见报道。'美人醉' (*C. praecox* 'Meirenzui', 以下简称'美人醉')属于乔种品种群,中被片为黄色,内被片具有红晕且在开花过程中具有花色变化,因此本研究选取乔种蜡梅'美人醉'为研究对象,测定其内被片开花过程中色度值、花色素含量、相关渗透调节物质、相关酶活性等,探讨其花色变化规律,为乔种蜡梅花色变化规律及其品种群花色改良提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

实验材料为中南林业科技大学校内成年植株'美人醉'的内被片。参照吴昌陆等<sup>[11]</sup>,根据花被片颜色、雄蕊开张或闭合,将蜡梅花期分为蕾期(I)、萌动期(II)、初花期(III)、盛花期(IV)、末花期(V)5个时期。于2022年1月1日至20日上午8:00—10:00时,采集花色纯正、无明显损伤、不同花期的花朵10朵,立即装入塑封袋,放入冰盒中,迅速带回实验室。一部分花朵用于测量花色数据,剩余花朵液氮保存用于测量其他指标。

### 1.2 花色色度值测定

取新鲜花瓣,在实验室进行解剖。内被片与中被片分离,取内被片进行测定。采用CM-700d型号色差仪(Konica minolta, Japan)对花瓣正面中部测定花色的明度 $L^*$ 、红度 $a^*$ (红蓝参数)、黄度 $b^*$ (黄绿参数),测色光斑直径设置为3 mm,观测角度为 $10^\circ$ ,光源D65,记录参数。每个内被片自动测量3次,系统自动计算平均值,手动重复3次,并依据

公式计算如下参数:

$$C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$$

$$h^\circ = \arctan(b^*/a^*)^{[12]}$$

式中: $C^*$ 代表彩度; $h^\circ$ 表示色相角。

### 1.3 生理指标测定

叶绿素和类胡萝卜素含量的测定采用95%乙醇浸提法;类黄酮、花色苷含量测定参照李彦慧<sup>[13]</sup>的方法,采用1%盐酸甲醇(V/V)提取法;可溶性糖含量测定采用蒽酮法,可溶性蛋白含量的测定采用考马斯亮蓝法,超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑法<sup>[14]</sup>;苯丙氨酸解氨酶(PAL)提取与测定参照 Lister<sup>[15]</sup>的方法。

### 1.4 数据处理

采用 Excel 2020 和 SPSS 13.0 以及 Origin 进行数据处理,采用 Duncan 进行平均数多重比较,皮尔逊法进行相关性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 ‘美人醉’开花过程中花瓣色度值变化特征

‘美人醉’的花色从蕾期到初花期的变化较为明显,盛花期到末花期变化较小。蕾期为带有红晕的黄绿色,萌动期与初花期红晕减淡,黄色加深,盛花期与末花期红晕基本消失(图1)。花瓣内被片色度值在整个过程中发生了较大的变化(表1),在不同花期之间具有显著性差异( $P < 0.05$ )。其中,从蕾期到末花期,花瓣的明度 $L^*$ 和黄色度 $b^*$ 值均逐渐增大,末花期分别达到56.43和32.19,分别较蕾期显著上升了140.54%和63.98%;同时,花瓣的红色度 $a^*$ 值不断减小,末花期时较蕾期显著下降了89.31%;另外,花瓣彩度 $C^*$ 和色相角 $h^\circ$ 也均不断增大,末花期分别较蕾期显著增大了25.37%和84.59%。以上结果说明,从蕾期到末花期,花朵的红色逐渐变淡,而黄色逐渐加深,花色由带有红晕的黄绿色向黄色

变化,即‘美人醉’花朵在开花过程中,红色减小,黄色、明度和彩度增大,这与肉眼观察的结果一致。

### 2.2 ‘美人醉’开花过程中花瓣花色素含量变化特征

‘美人醉’开花过程中花瓣叶绿素含量变化显著( $P < 0.05$ ),总体呈现逐渐下降的趋势(图2,A)。其中,蕾期的含量最高( $0.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),并与其余时期差异显著;在萌动期和初花期显著下降,相较于蕾期降幅分别达到21.43%和71.43%;在盛花期和末花期含量继续减少,但变化幅度与初花期相比不显著( $P > 0.05$ )。同时,花瓣类胡萝卜素含量随着开花过程呈现显著的先上升后下降的趋势(图2,A),并以萌动期含量最高( $0.08 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),相较于蕾期显著上升了33.06%,也同样显著高于其余时期;初花期与蕾期无显著差异,但显著高于盛花期和末花期;盛花期下降至 $0.03 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,以后慢慢趋于稳定。另外,图2,B显示,花瓣类黄酮含量随着花期变化不断降低,但蕾期-盛花期之间均变化不显著( $P > 0.05$ ),直至末花期才显著降低( $30.01 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ );花瓣花色苷含量随着花期不断降低,且变化显著,其表现与叶绿素含量相似,从蕾期( $0.35 \text{ mg} \cdot$



I. 蕾期; II. 萌动期; III. 初花期; IV. 盛花期; V. 末花期。下同

图1 ‘美人醉’开花过程中颜色的变化

I. Budding stage; II. Germination stage; III. Initial flowering stage; IV. Full blooming stage; V. Final flowering stage. The same as below

Fig. 1 The change of color during flowering of *Chimonanthus praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’

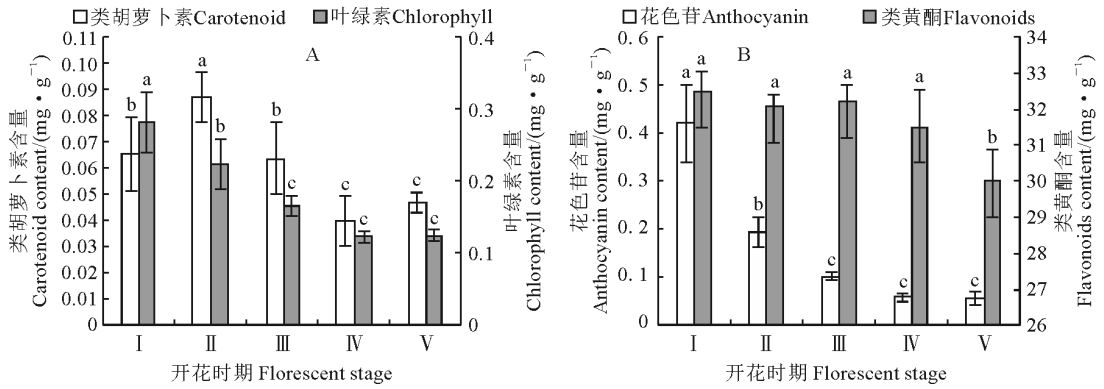
表1 ‘美人醉’开花过程中花瓣色度值的变化

Table 1 The variation of floral color indexes during the flowering of *C. praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’

花期 Flowering stage	亮度( $L^*$ ) Lightness	红色( $a^*$ ) Hue $a^*$	黄色( $b^*$ ) Hue $b^*$	彩度( $C^*$ ) Chroma	色相角( $h^\circ$ ) Hue angle
蕾期 Budding stage(I)	23.46±2.73c	16.560±1.72a	19.63±2.39c	25.78±0.99c	46.40±1.29d
萌动期 Germination stage(II)	31.80±3.49b	16.480±2.92a	23.87±3.52b	29.20±1.84b	58.47±6.00c
初花期 Initial flowering stage(III)	35.57±1.22b	7.978±1.58b	28.58±1.58a	29.71±1.12b	74.32±3.71b
盛花期 Full blooming stage(IV)	35.84±1.58b	2.860±0.34c	30.60±0.99a	30.73±1.00a	84.67±0.57a
末花期 Final flowering stage(V)	56.43±1.20a	1.770±0.21c	32.19±0.59a	32.32±0.41a	85.65±3.64a

注:同列不同小写字母表示处理组间在0.05水平上差异显著

Note: The different lowercase letters within same column indicate significant differences among flowering stages at the 0.05 level



不同小写字母表示处理组间在 0.05 水平上差异显著。下同

图 2 ‘美人醉’开花过程中花色素含量的变化

The different lowercase letters indicate significant differences among flowering stages at the 0.05 level. The same as below

Fig. 2 Changes of flower pigment contents in *C. praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’ during flowering

g<sup>-1</sup>)到萌动期显著降低,盛花期至末花期继续降低,且均与萌动期差异显著( $P < 0.05$ ),但后 3 个时期间无显著差异。可见,从蕾期到盛花期,随着花瓣的展开,红色逐渐变浅,直至盛花期无明显红色,花色苷呈现显著性下降的趋势,盛花期至末花期已下降不显著。

### 2.3 ‘美人醉’开花过程中花瓣可溶性蛋白与可溶性糖含量变化特征

蛋白和糖是花色苷合成的重要底物之一,其含量的多少在不同程度上影响到色素的合成。随着开花过程的推进,‘美人醉’花瓣可溶性蛋白与可溶性糖含量的变化趋势不一致(图 3)。其中,花瓣可溶性蛋白含量随着开花过程呈现不断下降的趋势且变化显著( $P < 0.05$ );与蕾期相比,可溶性蛋白含量在萌动期和盛花期显著下降,降幅分别达到 14.86%和 27.22%,盛花期和末花期较萌动期和盛花期又显著降低,表明花瓣可溶性蛋白含量在蕾期最高,到末花期时达到最低。花瓣可溶性糖含量随着开花过程呈现先下降后上升再下降的趋势,分别在蕾期和盛花期达到两次峰值,且两峰值之间相近,但其余 3 个时期较这两个时期均显著降低,而后三者之间无显著差异;花瓣可溶性糖含量从蕾期到萌动期含量显著下降 22.89%,初花期到盛花期又显著上升至与蕾期相近水平;后随着花朵衰老,到末花期又显著下降,并达到与初花期相近水平。

### 2.4 ‘美人醉’开花过程中花瓣相关酶活性变化特征

花瓣中的抗氧化系统能抵御自由基对花瓣产生的危害,其中超氧化物歧化酶(SOD)在缓解膜脂过氧化过程中起重要的保护作用。苯丙氨酸解氨酶(PAL)是花色苷合成途径的关键酶,对植物花色的

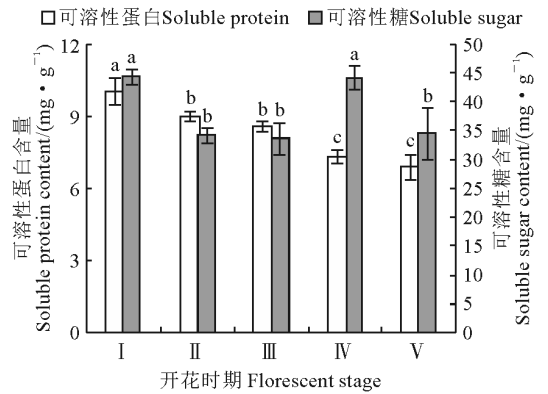


图 3 ‘美人醉’开花过程中可溶性蛋白和可溶性糖含量的变化

Fig. 3 Changes of soluble protein and soluble sugar contents in *C. praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’ during flowering

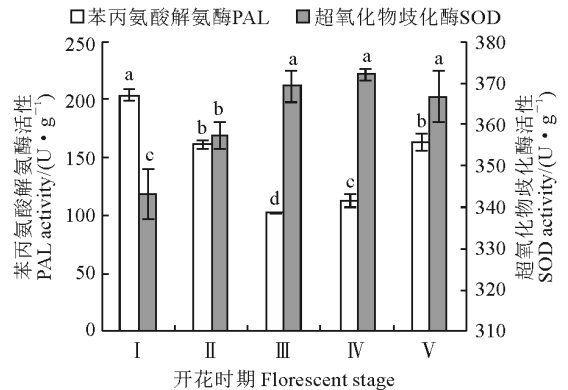


图 4 ‘美人醉’开花过程中酶活性的变化

Fig. 4 Changes of enzyme activities in *C. praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’ during flowering

形成有显著影响。‘美人醉’在开花过程中,其花瓣中两种酶活性的变化规律不一致(图 4);SOD 活性由蕾期到初花期显著升高( $P < 0.05$ ),在盛花期再

表 2 ‘美人醉’开花过程中各指标间的相关系数

Table 2 The correlation coefficient between the indicators during flowering of *C. praecox* (L.) Link ‘Meirenzui’

指标 Index	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$h^\circ$	FC	AC	CC	Chl	SP	SS	PAL	SOD
$L^*$	1												
$a^*$	-0.787**	1											
$b^*$	0.827**	-0.932**	1										
$C^*$	0.853**	-0.802**	0.946**	1									
$h^\circ$	0.790**	-0.957**	0.950**	0.864**	1								
FC	-0.807**	0.595*	-0.552*	-0.587*	-0.581*	1							
AC	-0.637*	0.742**	-0.763**	-0.741**	-0.847**	0.482	1						
CC	-0.341	0.673*	-0.447	-0.301	-0.532*	0.383	0.273	1					
Chl	-0.759**	0.920**	-0.919**	-0.842**	-0.969**	0.604*	0.933**	0.494	1				
SP	-0.781**	0.861**	-0.812**	-0.772**	-0.879**	0.676**	0.837**	0.493	0.907**	1			
SS	-0.434	0.02	-0.227	-0.351	-0.204	0.284	0.413	-0.383	0.217	0.16	1		
PAL	-0.207	0.549*	-0.625*	-0.51	-0.664**	-0.019	0.752**	0.165	0.711**	0.46	0.213	1	
SOD	0.537*	-0.753**	0.779**	0.720**	0.840**	-0.334	-0.896**	-0.36	-0.894**	-0.828**	0.239	-0.839**	1

注: \* 和 \*\* 分别表示在 0.05 和 0.01 水平上相关性显著

Note: \* indicates significant correlation at the 0.05 level, \*\* indicates significant correlation at the 0.01 level

次显著升高并达到峰值,此后至末花期再无显著变化,始终保持在较高水平;PAL 活性随着花期变化呈现先下降后上升的趋势,并在初花期降到最低值( $102.5 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ ),此时仅为蕾期的 50%左右,且与其余时期均差异显著;在末花期黄度值变大时,花瓣 PAL 活性又升高至与萌动期相近水平。

### 2.5 ‘美人醉’开花过程中花瓣各指标间相关性分析

色度值是花色的量化指标,可以直接反映花色,因此有必要对各色度值之间以及其他指标与色度值的相关性进行分析(表 2)。首先,‘美人醉’开花过程中花瓣各色度值之间均呈现极显著相关性。 $L^*$  与  $a^*$ ,  $a^*$  与  $b^*$ 、 $C^*$ 、 $h^\circ$  呈极显著负相关;  $L^*$  与  $b^*$ 、 $C^*$ 、 $h^\circ$ , 以及  $b^*$  与  $C^*$ 、 $h^\circ$  均呈极显著正相关;  $a^*$ 、 $b^*$  与  $C^*$  均呈现极显著相关,通过彩度公式可知  $a^*$  与  $b^*$  比值的不同导致开花过程中  $C^*$  的差异。其次,类黄酮(FC)、叶绿素(Chl)和花色苷(AC)3 种花色素与色度值之间呈极显著的相关性,类胡萝卜素(CC)与之无明显相关性,表明类胡萝卜素含量对花色变化影响不大。 $a^*$  值与类黄酮含量呈显著正相关、与花色苷含量呈极显著正相关,表明类黄酮含量是影响  $a^*$  的因素之一,而花色苷的含量主要影响红色的深浅;花色苷和叶绿素含量与各色度值之间呈极显著相关,表明其为影响花色变化的重要因素。再次,可溶性蛋白(SP)含量与各项色度值呈现极显著的相关性,可溶性糖(SS)与各项指标皆无显著相关性。表明可溶性蛋白较可溶性糖对于花色的变化

具有更大影响。可溶性蛋白含量与  $a^*$  呈极显著正相关,与  $L^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$ 、 $h^\circ$  值呈极显著负相关,这和  $a^*$  与花色苷含量呈正相关的结果是一致的。由此可知,可溶性蛋白可通过间接或直接的方式影响花色苷合成,进而影响花色的改变。

另外,PAL、SOD 活性与部分指标之间具有一定相关性,SOD 活性同时与 PAL 活性呈极显著负相关。 $a^*$ 、花色苷含量和叶绿素含量与 PAL 活性呈极显著正相关,与 SOD 活性呈极显著负相关,表明 PAL 活性通过影响花色苷含量的生成来调控红色的深浅。SOD 活性与  $b^*$ 、 $C^*$ 、 $h^\circ$  呈极显著正相关,表明 SOD 活性主要影响黄色的深浅,活性增大导致  $b^*$  值增大, $C^*$ 、 $h^\circ$  随之增大。综合各指标的相关性表明,‘美人醉’花瓣花色素含量的变化决定着其花色变化,同时可溶性蛋白、SOD 和 PAL 活性可通过影响花色素的合成来引起花色变化。

### 3 讨论与结论

类黄酮化合物的主要类群是黄酮和黄酮醇类色素,统称为花黄素,呈现白色至深黄的颜色。花色苷是类黄酮化合物中另一个重要的类群,使植物呈现红、红紫、紫和蓝色<sup>[16]</sup>。本研究发现,‘美人醉’花瓣中类黄酮含量远远大于类胡萝卜素、叶绿素、花色苷含量,说明花瓣呈色物质主要为类黄酮,是形成其花色的主要色素,这与前人研究结果相同<sup>[17]</sup>。花瓣花色苷和类黄酮含量与亮度  $L^*$  呈负相关,表明其含

量越高,亮度越低,这与二乔玉兰研究结果<sup>[18]</sup>一致。红度  $a^*$  值直接反映红绿变化,黄度  $b^*$  值直接反映黄蓝变化,彩度  $C^*$  反映彩色程度,色相角  $h^\circ$  反映花色深浅。本研究发现随着  $a^*$  值减小,花色苷含量不断减少,表明花色苷含量直接影响其红色的深浅。 $b^*$  值与  $C^*$ 、 $h^\circ$  呈极显著正相关,与花色苷含量呈极显著负相关,表明随着红色减淡,花瓣黄色加深,彩度变大。花色变化前期,‘美人醉’花瓣的叶绿素含量显著下降,导致花色苷与叶绿素的比值发生变化,有研究表明花色苷和叶绿素的比值对花色变化的影响显著<sup>[19]</sup>。在‘美人醉’开花过程中,红色的变化大于黄色,因而对黄色花影响较大的类胡萝卜素色素群与花色各指标之间的相关性较小。

可溶性蛋白和可溶性糖作为花色苷的前体物质或信号分子,影响花色苷的合成与降解。已有研究表明,不同植物中可溶性蛋白含量与花色苷含量的关系不同。粉红珙桐(*Pink Davidia involucrata*) 色彩转红时,可溶性蛋白与花色苷含量呈正相关<sup>[20]</sup>。红花玉兰(*Yulania sprengeri* ‘Wufengensis Group’)与粉红珙桐表现相反,花色由深至浅时可溶性蛋白含量减少,与花色苷含量呈负相关<sup>[21]</sup>。本研究表明,随着花色变化,‘美人醉’花瓣由带有红晕的黄绿色逐渐变为无红晕的黄色时,可溶性蛋白逐渐减少,抑制了花色苷合成,可溶性蛋白含量与花色苷含量、 $a^*$  呈显著正相关,这与粉红珙桐的研究结果一致;可溶性糖与大部分指标并无明显的相关性,但盛花期可溶性糖有短暂的上升,这可能与花瓣展开有关。有研究表明,随着花瓣展开,光照增加导致代谢能力增强,有利于碳水化合物积累,进而影响可溶性糖的生成<sup>[22]</sup>,这与本研究结果一致。

花色变化是花衰老的进程,而活性氧的堆积是

导致花提前衰老的重要原因。抗氧化酶起到延缓衰老的重要作用,其中 SOD 是调节花色苷降解速率的关键酶<sup>[23]</sup>,对花色的变化有着重要的影响。本研究中,‘美人醉’花瓣 SOD 活性随着花期变化呈小幅度的上升,同时与各指标具有一定的相关性,说明其在清除活性氧方面的能力加强,对于缓解花衰老具有一定作用,花色控制方面作用明显。随着 SOD 活性的升高,花色苷和叶绿素不断减少,表明 SOD 参与一定的生理代谢来影响花色苷和叶绿素的合成,引起花色的变化。同时,植物还可以通过调节色素合成相关酶来控制色素种类与含量,达到色泽改变的目的。类黄酮和花色苷作为次生代谢产物, PAL 是合成途径中的第一个酶,是控制其合成的重要酶。有研究认为, PAL 活性与花色苷合成呈正相关,也有研究认为 PAL 活性与花色苷合成并无相关性,这可能与植物特性相关<sup>[24]</sup>。本实验中,‘美人醉’花瓣 PAL 活性随着花期变化呈先下降后上升的趋势,类黄酮和花色苷含量在蕾期达到最大值,与 PAL 活性变化一致,表明 PAL 活性在类黄酮和花色苷合成过程中有重要的调控作用。PAL 活性在盛花期和末花期出现了小幅度上升的现象,可能是因为 PAL 在提高植物的抗逆性方面起重要作用,具有一定的清除活性氧的能力<sup>[25]</sup>。

综上所述,蜡梅‘美人醉’花瓣花色变化虽然是花色苷、类黄酮和叶绿素共同作用的结果,但花色苷含量的变化起着最直接的作用;可溶性蛋白、SOD、PAL 通过一定的生理代谢途径对花色变化起着间接的影响。此外,影响花色变化除了以上的因素,还有花瓣组织结构<sup>[26]</sup>、植物 pH<sup>[27]</sup>、共色作用、金属离子络合作用等,今后对于花色变化的生理特性研究尚需要进行更细致的研究。

## 参考文献:

[1] 邓 娇, 苏梦月, 刘雪莲, 等. 基于转录组分析揭示双色花莲‘大酒锦’花色形成机理[J]. 园艺学报, 2022, **49**(2): 365-377.  
DENG J, SU M Y, LIU X L, *et al.* Transcriptome analysis revealed the formation mechanism of floral color of lotus ‘Dasajin’ with bicolor petal[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2022, **49**(2): 365-377.

[2] 杨 暖. 北美豆梨叶色变化及生理特性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2016.

[3] 路买林, 陈梦娇, 张嘉嘉, 等. ‘红叶’杜仲叶色转变过程中叶片生理指标变化[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, **45**(1): 86-92.  
LU M L, CHEN M J, ZHANG J J, *et al.* Leaf physiological indi-

cator changes in the transformation of leaves color of *Eucommia ulmoides* ‘Hongye’[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2021, **45**(1): 86-92.

[4] 程 怡, 张云婷, 王清明, 等. 月季花发育过程中花色变化的生理生化研究[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(4): 733-739.  
CHENG Y, ZHANG Y T, WANG Q M, *et al.* Correlation analysis of flower color during flower development of *Rosa hybrida*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, **34**(4): 733-739.

[5] 程红梅, 周耘峰. 蜡梅品种分类研究[J]. 北京林业大学学报, 2012, **34**(Z1): 132-136.  
CHENG H M, ZHOU Y F. Cultivar classification of winter-sweet[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, **34**

- (Z1): 132-136.
- [6] 柏小娟. 美国蜡梅容器育苗关键技术研究[D]. 南京:南京林业大学, 2018.
- [7] 王森博. 蜡梅品种分类及系统构建研究[D]. 南京:南京林业大学, 2013.
- [8] MA L, LI H F, PENG C C, *et al.* Cloning of SAMT gene cDNA from *Chimonanthus praecox* and its expression in *Escherichia coli* [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2012, **13**(1): 82-87.
- [9] 沈植国, 孙 萌, 袁德义, 等. 蜡梅科 6 种植物嫩梢挥发性成分的 HS-SPME-GC-MS 分析[J]. *园艺学报*, 2020, **47**(12): 2 349-2 361.
- SHEN Z G, SUN M, YUAN D Y, *et al.* HS-SPME-GC-MS analysis of volatile components in tender shoots from six plants of Calycanthaceae[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2020, **47**(12): 2 349-2 361.
- [10] 葛雨萱, 王亮生, 徐彦军, 等. 蜡梅的花色和花色素组成及其在开花过程中的变化[J]. *园艺学报*, 2008, **35**(9): 1 331-1 338.
- GE Y X, WANG L S, XU Y J, *et al.* Flower color pigment composition and their changes during flowering in *Chimonanthus praecox* (L.) Link [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, **35**(9): 1 331-1 338.
- [11] 吴昌陆, 胡南珍. 蜡梅花部形态和开花习性研究[J]. *园艺学报*, 1995, **22**(3): 277-282.
- WU C L, HU N Z. Studies on the flower form and blooming characteristics of the wintersweet [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 1995, **22**(3): 277-282.
- [12] 王 欢, 孔 滢, 窦晓莹, 等. 不同类型双色百合的花色形成分析[J]. *西北植物学报*, 2021, **41**(4): 606-614.
- WANG H, KONG Y, DOU X Y, *et al.* Analysis of flower color formation in different types of bicolor lilies [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(4): 606-614.
- [13] 李彦慧. 李属彩叶树种耐 SO<sub>2</sub> 机制研究[D]. 河北保定: 河北农业大学, 2008.
- [14] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [15] LISTER C E, LANCASTER J E, WALKER J R L. Phenylalanine ammonialyase (PAL) activity and its relationship to anthocyanin and flavonoid levels in New Zealand-grown apple cultivars [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1996, **121**: 281-285.
- [16] 樊荣辉, 黄敏玲. 花青素苷调控研究进展[J]. *中国细胞生物学学报*, 2013, **35**(5): 741-746.
- FAN R H, HUANG M L. Progress in regulation of anthocyanins [J]. *Chinese Journal of Cell Biology*, 2013, **35**(5): 741-746.
- [17] 周明芹, 陈龙清. 蜡梅花色素种类的初步分析[J]. *华中农业大学学报*, 2010, **29**(1): 107-110.
- ZHOU M Q, CHEN L Q. Preliminary analysis of the flower pigments of *Chimonanthus praecox* [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2010, **29**(1): 107-110.
- [18] 张 超, 陈 光, 李彦慧. 二乔玉兰开花过程中花色变化的生理生化机制[J]. *西北植物学报*, 2012, **32**(4): 716-721.
- ZHANG C, CHEN G, LI Y H. Physiological and biochemical mechanism of flower color variation during flowering season in *Yulania* × *soulangeana* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2012, **32**(4): 716-721.
- [19] 余秋岫, 刘彩贤, 金晓玲, 等. 紫花含笑开花进程中花被生理生化与色素变化[J]. *东北林业大学学报*, 2021, **49**(3): 39-43.
- YU Q X, LIU C X, JIN X L, *et al.* Changes of physiological indexes and pigment during the flowering process in the perianth of *Michelia crassipes* [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, **49**(3): 39-43.
- [20] 梁 玲, 江洁蓓, 张腾驹, 等. 不同色彩珙桐苞片与叶片的生理特性研究[J]. *植物研究*, 2020, **40**(4): 505-513.
- LIANG L, JIANG J B, ZHANG T J, *et al.* Physiological characteristics of *Davidia involucreta* bracts and leaves with different colors [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2020, **40**(4): 505-513.
- [21] 贺窑青, 马履一, 桑子阳. 红花玉兰花色形成的初步研究[J]. *西北植物学报*, 2010, **30**(11): 2 252-2 257.
- HE Y Q, MA L Y, SANG Z Y. Preliminary study on formation of flower color in *Magnolia wuf* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2010, **30**(11): 2 252-2 257.
- [22] 王西成, 吴伟民, 王 博, 等. 果袋类型对‘紫金红霞’葡萄果实品质及花色苷合成相关基因表达的影响[J]. *西北植物学报*, 2021, **41**(12): 2 113-2 121.
- WANG X C, WU W M, WANG B, *et al.* Effect of bag types on fruit quality and anthocyanin biosynthesis related genes expression of ‘Zijinhongxia’ grape berry [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(12): 2 113-2 121.
- [23] 江洁蓓, 梁 玲, 张腾驹, 等. 粉红珙桐叶片呈色相关生理特性的季节变化[J]. *西北植物学报*, 2019, **39**(11): 2 019-2 027.
- JIANG J B, LIANG L, ZHANG T J, *et al.* Seasonal dynamic of physiological characteristics of pink *Davidia involucreta* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(11): 2 019-2 027.
- [24] BAR-AKIVA, OVADIA R, ROGACHEV I, *et al.* Metabolic networking in *Brunfelsia calycina* petals after flower opening [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2010, **61**(5): 1 393-1 403.
- [25] 张 超, 高金锋, 李彦慧, 等. 低温对 2 种玉兰花色及相关酶活性的影响[J]. *林业科学*, 2012, **48**(7): 56-60.
- ZHANG C, GAO J F, LI Y H, *et al.* Effect of low temperature on flower color and relevant enzymes activity of two *Magnolia* species [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, **48**(7): 56-60.
- [26] 余秋岫, 金晓玲, 罗 峰, 等. 紫花含笑花被呈色过程中色素含量与超微结构的变化特征[J]. *西北植物学报*, 2021, **41**(1): 123-131.
- YU Q X, JIN X L, LUO F, *et al.* Changes of pigment content and ultrastructure of perianth during color formation in *Michelia crassipes* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2021, **41**(1): 123-131.
- [27] 李元鹏, 张英杰, 朱志奇, 等. 遮荫对不同色系月季发育过程中花色变化的影响[J]. *西北植物学报*, 2022, **42**(4): 664-673.
- LI Y P, ZHANG Y J, ZHU Z Q, *et al.* Influence of shade on the color change of different *Rosa chinensis* during their development [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, **42**(4): 664-673.