

李芹梅, 李文祥, 曹孟会, 等. 铜离子对滇水金凤花色变化的生理生化研究 [J]. 福建农业学报, 2021, 36 (11): 1323–1329.

LI Q M, LI W X, CAO M H, et al. Physiological and Biochemical Correlations between Color of *Impatiens uliginosa* Flower and Nutrient Supply on Copper [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (11): 1323–1329.

铜离子对滇水金凤花色变化的生理生化研究

李芹梅, 李文祥, 曹孟会, 刘 松, 张天谣, 汪 琼, 黄美娟*, 黄海泉*

(西南林业大学园林园艺学院/国家林业和草原局西南风景园林工程技术研究中心/云南省功能性花卉资源及产业化技术工程研究中心/西南林业大学园林园艺花卉研发中心, 云南 昆明 650224)

摘 要:【目的】探讨滇水金凤花色对重金属铜离子的响应。【方法】以滇水金凤为试验材料, 研究其在不同含量 Cu^{2+} (0、5、10、15、20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 处理下盛花期花瓣的色度值、细胞液 pH 值、色素和基础代谢物含量的变化, 并分析 Cu^{2+} 、各生理生化指标与花色之间的关系。【结果】(1) 花色苷、总黄酮和可溶性糖含量随 Cu^{2+} 含量增加而下降, 与对照比均达显著差异性 ($P<0.05$); (2) 随 Cu^{2+} 含量增加, 可溶性蛋白含量不断增加, 与对照比均达显著差异性 ($P<0.05$); (3) Cu^{2+} 含量在 0~15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 类胡萝卜素和脯氨酸含量无明显变化; (4) 相关性分析表明, 不同含量 Cu^{2+} 处理下花瓣色度值、花色苷、总黄酮、可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白等几个指标间均存在极显著相关性; (5) 运用逐步回归分析发现, 色相 a^* 值、 b^* 值主要受花色苷、可溶性糖和脯氨酸等因子影响。【结论】花色苷含量是影响滇水金凤花色变化的直接因素; 而 Cu^{2+} 是通过调控滇水金凤花色苷的生物合成来影响花瓣呈色。

关键词: 滇水金凤; Cu^{2+} ; 花色; 色素; 基础代谢物

中图分类号: S 681.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2021) 11-1323-07

Physiological and Biochemical Correlations between Color of *Impatiens uliginosa* Flower and Nutrient Supply on Copper

LI Qinmei, LI Wenxiang, CAO Menghui, LIU Song, ZHANG Tianyao,
WANG Qiong, HUANG Meijuan*, HUANG Haiquan*

[College of Landscape Architecture and Horticulture Sciences/Southwest Research Center for Engineering Technology of Landscape Architecture (State Forestry and Grassland Administration)/Yunnan Engineering Research Center for Functional Flower Resources and Industrialization/Research and Development Center of Landscape Plants and Horticulture Flowers, Southwest Forestry University, Kunming Yunnan 650224, China]

Abstract: 【Objective】 Response of *Impatiens uliginosa* to copper ions on the floral color with respect of the physiological and biochemical properties of the petals was investigated. 【Method】 Under treatments of varied Cu^{2+} concentrations (i.e., 0, 5, 10, 15, and 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) in culture medium, the chromaticity, pH of cell fluid, pigments, and basal metabolites of flower petals of the *I. uliginosa* at full blooming stage were determined. The correlations among Cu^{2+} , physiological and biochemical indices, and flower color were analyzed. 【Result】 (1) The contents of anthocyanins, flavonoids, and soluble sugars in petals decreased significantly in comparison to control as the Cu^{2+} concentration increased ($P<0.05$). (2) Soluble protein increased significantly over control with increasing Cu^{2+} at $P<0.05$. (3) In the range of 0-15 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Cu^{2+} exerted no significant effect in the contents of carotenoids and proline. (4) There were extremely significant correlations among the color values, anthocyanins, flavonoids, soluble sugar, proline, and soluble protein of petals on the plants treated by Cu^{2+} at different concentrations. (5) The stepwise regression analysis showed that the flower chromaticity a^* and b^* were mainly affected by anthocyanins, soluble sugar and proline. 【Conclusion】 Anthocyanin appeared to directly govern the color of *I. uliginosa*

收稿日期: 2021-05-22 初稿; 2021-10-12 修改稿

作者简介: 李芹梅 (1992-), 女, 硕士研究生, 主要从事风景园林植物资源及应用研究 (E-mail: 466433251@qq.com)

* 通信作者: 黄美娟 (1972-), 女, 博士, 教授, 主要从事园林植物研究 (E-mail: xmhhq2001@163.com); 黄海泉 (1974-), 男, 博士, 教授, 主要从事园林植物研究 (E-mail: haiquan@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32060364、32060366、31860230); 云南省重点研发计划项目 (2018BB013); 云南省教育厅科学研究基金项目 (2021Y262); 云南省中青年学术和技术带头人培养项目 (2015HB046、2018HB024); 云南省高校园林植物与观赏园艺科技创新团队项目 (51700204)

flowers. Cu^{2+} seemed to affect the petal color through regulating anthocyanin biosynthesis in *I. uliginosa*.

Key words: *Impatiens uliginosa*; Cu^{2+} ; flower color; pigments; basal metabolite

0 引言

【研究意义】凤仙花属 (*Impatiens* L.) 植物以花色多样化和具有两侧对称花为主要特征, 被认为是“双子叶兰科植物”^[1]。滇水金凤 (*Impatiens uliginosa*) 是凤仙花科的一年生或多年生植物, 其花形奇特, 花期长, 适应性广, 具有很高的观赏价值^[2]。关于滇水金凤研究主要集中在花色及花发育调控基因克隆^[3-4]、叶绿体全基因组^[5]和金属元素测定^[6]等, 目前缺少非生物胁迫, 尤其是重金属胁迫下滇水金凤花色的变化研究。因此, 本研究以滇水金凤为试验材料, 探讨不同含量 Cu^{2+} 对其花色及各生理生化指标的影响, 有助于进一步为滇水金凤的新品种选育提供参考依据。【前人研究进展】花色是观赏植物重要特征之一^[7-8]。花颜色是由多种因素共同决定的, 如色素种类及含量、液泡 pH 值、共色素、金属离子含量等^[9-10]。其中花色苷成分和含量是影响花色最重要的因素^[11], 吴艳梅等^[12]认为花色苷成分影响红色丽格海棠 (*Rieger Begonia*) 花色深浅; 江洁蓓等^[13]认为花色苷含量是影响粉红珙桐 (*Davidia involucrata*) 花色关键因素。目前金属离子对花色的影响仅集中在少数金属对指定植物。如, Ito 等^[14-15]发现 Al^{3+} 、 K^{+} 、绣球蓝复合物和共色素分布在绣球花 (*Hydrangea macrophylla*) 萼片组织中从而形成蓝色萼片; Takeda 等^[16]发现 Fe^{3+} 、矢车菊素-3-5-葡萄糖苷和黄酮醇络合为共色复合体形成蓝花矢车菊 (*Centaurea cyanus*); Yoshida 等^[17]研究发现大绿绒蒿 (*Meconopsis horridula*) 的黄酮醇与 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 作用导致其花瓣呈蓝色; 李荣华^[18]发现红色新几内亚凤仙花 (*Impatiens hawkeri*) 花色受 Cu^{2+} 、 Al^{3+} 影响发生了改变。此外, 基础代谢物含量对花色影响也引起了研究者们关注, 植物体内重要基础代谢物是可溶性蛋白、脯氨酸和作为花色苷合成的前体和信号物质的糖, 这些物质含量变化均会影响花瓣呈色^[13, 19]。【本研究切入点】课题组前期对铜胁迫下滇水金凤的生理响应和富集特征研究发现, 不同含量 Cu^{2+} 处理下滇水金凤花色发生明显改变, 肉眼观测到花色随 Cu^{2+} 含量增加花色逐渐变淡, 但其花色变化的影响途径有待深入探讨。【拟解决的关键问题】测定在不同含量 Cu^{2+} 处理下滇水金凤盛花期花瓣色度值、细胞液 pH 值、色素和基础代谢物含量, 分析 Cu^{2+} 、各生理生化指标与花色之间的关系, 为金属离子调控花色

提供一定理论数据和参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

滇水金凤的种子采自云南省昆明市捞鱼河湿地公园 (E102°46'02", N24°49'34"), 供试重金属为 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 处理液均用去离子水进行配置。试验采用水培法, 于 2020 年 9~12 月进行。在西南林业大学树木园进行播种、育苗, 挑选性状一致、生长健壮的滇水金凤植株, 株高约 30 cm, 用去离子水将根部土壤冲洗干净后移入水培箱 (4 L) 水培一周, 再用 1/2 改良 Hoagland (不含 CuSO_4) 驯化一周开始试验处理。基于课题组前期研究共设置 5 个铜 (Cu^{2+}) 浓度梯度: 0 (CK)、5、10、15、20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 每个处理 5 个重复, 每重复 10 株, 每 3 d 更换一次营养液, 以此保证铜浓度。在铜 (Cu^{2+}) 处理 30 d 后, 采集盛花期花瓣开展后续相关试验。

1.2 试验方法

参考陈小红^[20]的方法测定花瓣明度 L^* 、色相 a^* 值和 b^* 值、彩度 C^* 和色相角 h° ; 细胞液 pH 值测定参考 Grlesbach^[21] 的方法; 花色苷 (Anthocyanin content)、总黄酮 (Flavonoid content) 和类胡萝卜素 (Carotenoid content) 含量测定参考陈小红^[20]的方法; 可溶性糖 (Soluble sugar content)、可溶性蛋白 (Soluble protein content) 和脯氨酸 (Proline content) 含量测定参考李合生^[22]的方法。

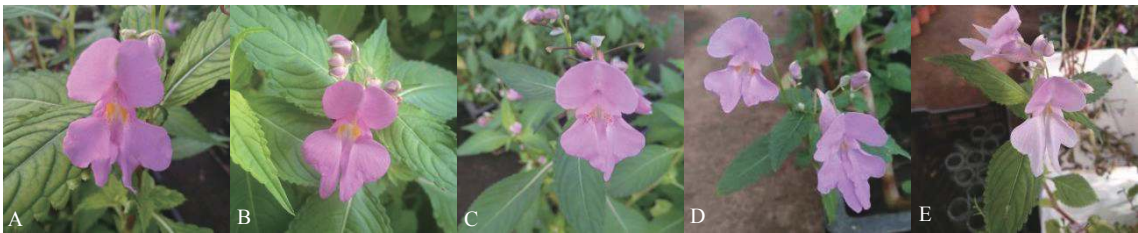
1.3 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 26.0 软件进行数据分析, 采用 Origin 2018 进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同含量 Cu^{2+} 处理下滇水金凤花瓣色度值变化

从图 1 可知, 在不同含量 Cu^{2+} 处理下, 滇水金凤花瓣颜色发生变化, 表现为花色随 Cu^{2+} 含量增加逐渐变淡, 花瓣色度值也发生了较大变化 (表 1)。明度 L^* 在 51.60~56.86, 色相 a^* 值范围介于 17.60~29.27, 色相 b^* 值范围介于 -8.06~-14.73。在 Cu^{2+} 含量 20 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 明度 L^* 、色相 a^* 值和 b^* 值数值均最小, 且与其他组比呈显著差异 ($P < 0.05$); 彩度 C^* 值逐渐变小, 表明彩度变淡, 与肉眼观察结果一致。色相角 h 变化不明显, 仅在 Cu^{2+} 含量为 10 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时急剧增大, 其余都在 -25° 左右。



注：A、B、C、D、E 的 Cu²⁺ 含量分别为 0 (CK)、5、10、15、20 mg·L⁻¹。
Note: Cu²⁺ concentrations: A=0 mg·L⁻¹ (CK); B=5 mg·L⁻¹; C=10 mg·L⁻¹; D=15 mg·L⁻¹; E=20 mg·L⁻¹.

图 1 不同含量 Cu²⁺ 处理下滇水金凤花瓣颜色变化

Fig. 1 Variation of petal color of *I. uliginosa* treated with different concentrations of Cu²⁺

表 1 不同含量 Cu²⁺ 处理下滇水金凤花瓣色度值变化

Table 1 Flower petal chromaticity of *I. uliginosa* treated with different concentration of Cu²⁺

Cu ²⁺ 含量 Cu ²⁺ concentration/ (mg·L ⁻¹)	L*	a*	b*	C*	h (°)
0 (CK)	56.61±0.94 a	29.27±1.25 a	-13.75±1.08 c	32.34±1.55 a	-25.16±1.02 a
5	56.86±1.28 a	24.26±0.15 c	-11.66±0.65 b	26.93±0.26 c	-25.68±1.30 a
10	55.20±1.12 a	25.76±0.70 b	-14.73±1.68 c	29.69±1.42 b	-29.70±2.23 b
15	56.63±2.04 a	22.46±0.25 d	-11.03±0.77 b	25.03±0.12 d	-26.16±1.84 a
20	51.60±0.26 b	17.60±0.43 e	-8.06±0.15 a	19.36±0.45 e	-24.63±0.24 a

注：同列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Data with different lowercase letters on same column indicate significant difference at $P<0.05$.

2.2 不同含量 Cu²⁺ 处理下滇水金凤花瓣细胞液 pH 变化

从图 2 可知，滇水金凤花瓣细胞液 pH 值均为弱酸性，其花瓣细胞液 pH 值变化分为两个阶段：Cu²⁺ 含量为 0~5 mg·L⁻¹，pH 值升高；Cu²⁺ 含量为 10~20 mg·L⁻¹，pH 值逐渐下降，而花色开始变淡。Cu²⁺ 含

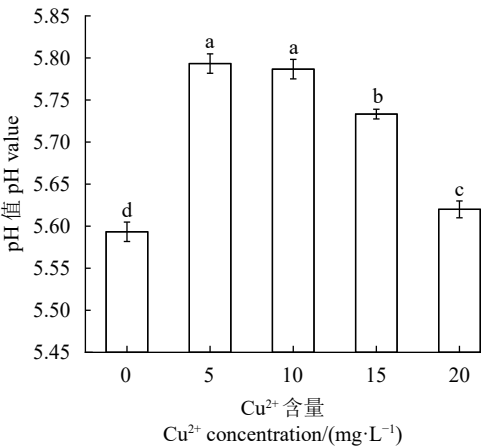
量为 5 mg·L⁻¹ 和 10 mg·L⁻¹ 时，pH 值差异不显著 ($P>0.05$)，据 2.1 花色测定结果可知，这两个 Cu²⁺ 含量下花瓣色相 a* 值变化不大，以上结果表明细胞液 pH 值大小可能影响花色苷稳定性。

2.3 不同含量 Cu²⁺ 处理下滇水金凤花瓣花色素含量的变化

色素是植物呈色的物质基础，随 Cu²⁺ 含量增加，肉眼观测到花色逐渐变淡。从图 3 -A 可以看出，花色苷含量不断下降，与对照组比，均达显著性差异 ($P<0.05$)；Cu²⁺ 含量 20 mg·L⁻¹ 时，花色苷含量最低，比 CK 少 54.7%。总黄酮含量随 Cu²⁺ 含量增加总体呈下降趋势，与对照比，均达显著性差异 ($P<0.05$)；Cu²⁺ 含量 20 mg·L⁻¹ 时，总黄酮含量最低，比 CK 少 40.91% (图 3-B)。因此，花色苷和总黄酮含量减少是影响滇水金凤花色变淡的关键因素。随 Cu²⁺ 含量增加，类胡萝卜素含量先下降再升高，在 Cu²⁺ 含量 20 mg·L⁻¹ 时，类胡萝卜素含量最高，达 0.13 mg·g⁻¹，与其他组差异显著 ($P<0.05$)，表明类胡萝卜素可能影响滇水金凤花色变化 (图 3-C)。

2.4 不同含量 Cu²⁺ 处理下滇水金凤花瓣基础代谢物含量的变化

糖作为花色苷合成的前体和信号物质，对花色形成有重要影响。可溶性糖含量随 Cu²⁺ 含量增加而



注：不同小写字母表示差异显著水平 ($P<0.05$)，图 3~4 同。
Note: Data with different lowercase letters indicate significant difference at $P<0.05$. Same for Figs. 3 and 4.

图 2 不同含量 Cu²⁺ 处理下滇水金凤花瓣细胞液 pH 变化

Fig. 2 Petal cell fluid pH of *I. uliginosa* treated with different concentrations of Cu²⁺

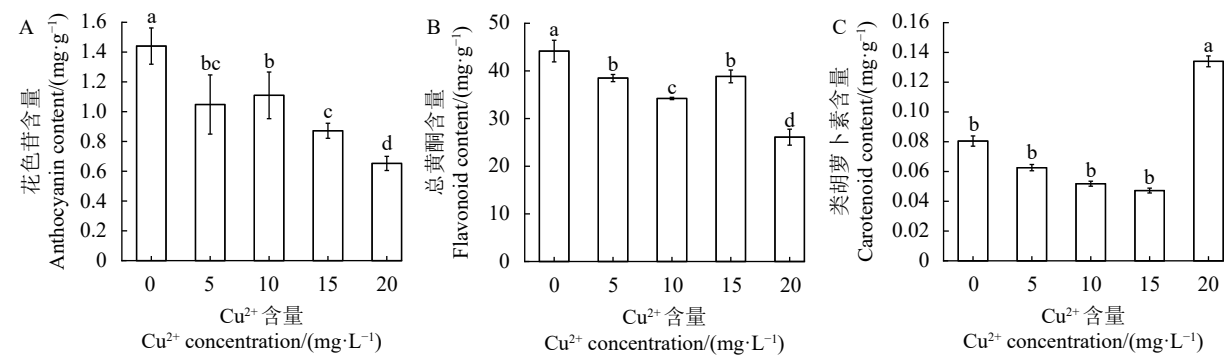


图 3 不同含量 Cu^{2+} 处理下滇水金凤花瓣花色素的变化

Fig. 3 Anthocyanidins in petals of *L. uliginosa* treated with different concentrations of Cu^{2+}

下降,与对照比,均存显著性差异 ($P<0.05$); Cu^{2+} 含量 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,可溶性糖含量最低,比 CK 少 48.5%,说明可溶性糖含量下降,在一定程度上抑制了花色苷的合成 (图 4-A)。随 Cu^{2+} 含量增加,可溶性蛋白含量先降后升, Cu^{2+} 含量 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,可溶性蛋白含量最高,为 $7.47\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,是 CK 的 2.10 倍 (图 4-B)。脯氨酸是植物体内渗透调节物质, Cu^{2+} 含量在 $0\sim 15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,与对照比,脯氨酸含量无

显著差异 ($P<0.05$); Cu^{2+} 含量 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,脯氨酸含量低至 $98.42\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,与其他组比呈显著性差异 ($P<0.05$) (图 4-C)。综上所述,基础代谢物质含量变化与滇水金凤花色变化有着密切关系。

2.5 Cu^{2+} 、各生理生化指标与花色之间的关系

2.5.1 简单相关分析 由表 2 可以看出 Cu^{2+} 、各生理生化指标与花色之间存在着相关性。 Cu^{2+} 与色相 b^* 值呈极显著正相关,与色相 a^* 值呈极显著负相关

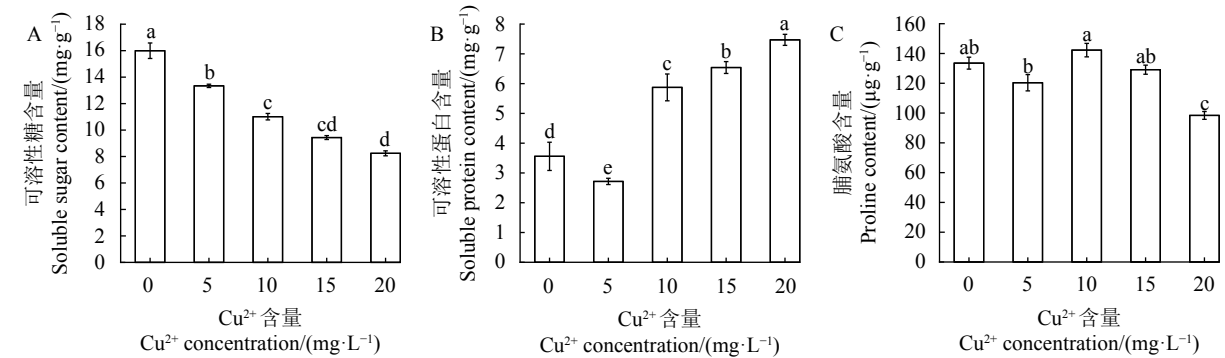


图 4 不同含量 Cu^{2+} 处理下滇水金凤花瓣基础代谢物含量的变化

Fig. 4 Basal metabolites in petals of *L. uliginosa* treated with different concentrations of Cu^{2+}

表 2 Cu^{2+} 、各生理生化指标与花色之间的相关关系

Table 2 Correlation between Cu^{2+} , physiological and biochemical indices, and flower color

指标 Index	Cu^{2+}	L^*	a^*	b^*	pH	AC	CC	FC	SS	SP	Pro
Cu^{2+}	1										
L^*	-0.535*	1									
a^*	-0.884**	0.364	1								
b^*	0.709**	-0.475	-0.886**	1							
pH	0.033	0.124	-0.09	-0.065	1						
AC	-0.927**	0.479	0.939**	-0.821**	-0.099	1					
CC	0.196	-0.439	-0.243	0.475	-0.353	-0.296	1				
FC	-0.775**	0.514*	0.646**	-0.418	-0.243	0.679**	-0.264	1			
SS	-0.971**	0.625*	0.854**	-0.725**	-0.022	0.921**	-0.211	0.732**	1		
SP	0.884**	-0.632*	-0.675**	0.589*	-0.301	-0.779**	0.246	-0.604*	-0.918**	1	
Pro	-0.499	0.336	0.729**	-0.715**	0.004	0.567*	-0.366	0.46	0.449	-0.248	1

注: *和**分别表示在0.05和0.01水平上相关性显著。

Note: * and ** indicate significant correlations at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

($P<0.01$), 与明度 L^* 呈显著负相关 ($P<0.05$); 明度 L^* 与总黄酮、可溶性糖呈显著正相关, 与可溶性蛋白呈显著负相关 ($P<0.05$)。色相 a^* 值与花色苷、总黄酮、可溶性糖和脯氨酸极显著正相关, 与可溶性蛋白极显著负相关 ($P<0.01$); 色相 b^* 值与可溶性蛋白呈显著正相关 ($P<0.05$), 与花色苷、可溶性糖、脯氨酸极显著负相关 ($P<0.01$)。 Cu^{2+} 与可溶性蛋白呈显著正相关 ($P<0.05$), 与花色苷、总黄酮、可溶性糖呈极显著负相关 ($P<0.01$)。可见, Cu^{2+} 通过影响滇水金凤色素、基础代谢物含量来调控花瓣呈色。

2.5.2 逐步回归分析 在相关性分析中 Cu^{2+} 、各生理

生化指标与花色之间表现出显著差异性影响因素较多, 进一步从各生理生化指标进行逐步回归分析, 分别找到受 Cu^{2+} 影响最显著的因子及影响色相 a^* 值、色相 b^* 值最显著的因子 ($P<0.05$)。逐步回归方程 (表 3) 表明, Cu^{2+} 与可溶性蛋白含量呈显著正相关, 与色相 a^* 值呈显著负相关 ($P<0.05$), 表明 Cu^{2+} 对色相 a^* 值和可溶性蛋白含量有直接影响。色相 a^* 值与花色苷、脯氨酸呈正相关 ($P<0.05$); 色相 b^* 值与可溶性糖呈显著正相关, 与色相 a^* 值呈显著负相关 ($P<0.05$), 表明显著影响滇水金凤花瓣呈色因素有花色苷、脯氨酸和可溶性糖含量。

表 3 Cu^{2+} 、各生理生化指标与花色之间的逐步回归分析
Table 3 Stepwise regression on Cu^{2+} , physiological and biochemical indices, and flower color

指标Index	逐步回归方程Stepwise regression equation	F值F value	复相关系数Multiple correlation coefficient
Cu^{2+}	$Cu^{2+}=23.313-0.997a^*+2.007A$	188.228	0.969
a^*	$a^*=2.807+10.054B+0.086C$	89.103	0.937
b^*	$b^*=3.071-0.856a^*+0.476D$	33.387	0.848

注: A 为可溶性蛋白含量; B 为花色苷含量; C 为脯氨酸含量; D 为可溶性糖含量。
Note: A: soluble protein content; B: anthocyanin content; C: proline content; D: soluble sugar content.

3 讨论与结论

为更直观、准确地研究 Cu^{2+} 、各生理生化指标与花色之间的相关性, 对花色 Lab 进行测定, 可使花色描述由模糊变为量化^[23]。本研究发现随 Cu^{2+} 含量增加滇水金凤花瓣颜色变淡, 相关性分析表明 Cu^{2+} 与色相 b^* 值呈极显著正相关, 与色相 a^* 值呈极显著负相关 ($P<0.01$), 且逐步回归分析中发现 Cu^{2+} 与色相 a^* 值呈显著负相关 ($P<0.05$), 表明 Cu^{2+} 是影响色相值的重要因素。

花瓣颜色受细胞液 pH 值调控, 如日本牵牛 (*Pharbitis nil*) 在花蕾期紫红色细胞液 pH 为 6.6, 在开花期蓝色细胞液 pH 为 7.7^[24]。本研究发现滇水金凤紫红色细胞液 pH 值均为弱酸性, 随 Cu^{2+} 含量增加, pH 值先增后减, 与花色苷含量相关性不显著, 表明细胞液 pH 值变化对花色调节作用不明显, 与金银花 (*Lonicera japonica*)^[25] 研究结果较为一致。

虽然影响花瓣呈色原因众多, 但最主要原因是色素种类在植物细胞中的存在, 影响植物花色色素主要有 3 类: 类黄酮化合物、类胡萝卜素和甜菜色素^[16, 26]。花色苷属于类黄酮化合物, 是影响植物色彩呈现关键因素^[27], 如在腊梅 (*Chimonanthus praecox*)^[28]、玉兰 (*Magnolia*)^[29]、丽格海棠^[12] 等研究中发现花色苷含量变化是影响植物花瓣呈色的

主要因素。本研究发现随 Cu^{2+} 含量增加滇水金凤花瓣颜色变淡, 总黄酮、花色苷、脯氨酸、可溶性糖含量呈下降趋势, 相关性分析表明影响色相 a^* 值、 b^* 值因素有花色苷、总黄酮、可溶性糖、脯氨酸和可溶性蛋白含量, 且逐步回归分析中色相 a^* 值与花色苷、脯氨酸含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 色相 b^* 值与可溶性糖呈显著正相关 ($P<0.05$), 表明花色苷、脯氨酸含量是直接影响力相 a^* 值的重要因素, 可溶性糖含量是影响色相 b^* 值的重要因素。因此, 花色苷和基础代谢物含量是影响花瓣呈色的关键因素。

花色苷是由色素和各种糖自然形成, 故其生物合成与糖含量高低有密切关系^[9]。本研究发现随 Cu^{2+} 含量增加可溶性糖含量下降, 其与花色苷含量极显著正相关 ($P<0.01$), 表明可溶性糖含量的减少抑制了花色苷积累, 与江洁蓓^[13]、张超^[29] 研究结果一致。脯氨酸是植物体内渗透调节物质, 逆境胁迫下能调节植物生长发育^[30], 本研究发现随 Cu^{2+} 含量增加脯氨酸含量下降, 其与花色苷含量呈显著正相关 ($P<0.05$), 表明脯氨酸含量影响花色苷合成, 与琪桐^[31] 苞片研究一致。不同植物的可溶性蛋白和花色苷含量表现出很大差异性, 如红栌 (*Cotinus coggygria* ‘Royal Purple’) 中两者显著正相关 ($P<0.05$)^[32], 矮牵牛 (*Petunia hybrida*) 研究表明可溶性

蛋白和花色苷含量之间没有直接关系^[33]。本研究发现随 Cu^{2+} 含量增加可溶性蛋白含量明显上升, 其与花色苷含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 表明可溶性蛋白抑制了滇水金凤花色苷合成, 与粉红珙桐^[13] 研究结果一致。因此, 基础代谢物含量影响花色苷合成。

不同浓度不同金属离子对植物的影响是不一样的^[34], 如李荣华^[18] 发现红色新几内亚亚花色受 Cu^{2+} 和 Al^{3+} 浓度影响, 当 Cu^{2+} 浓度为 $3.2 \times 10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其花色均最深; 随 Al^{3+} 浓度增加, 其花色先变浅后又逐渐加深; Schreiber 等^[35] 发现绣球花发蓝所需 Al^{3+} 阈值为 $40 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, $10 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \text{Al}^{3+}$ 足以让萼片颜色从红向紫变化。本研究肉眼观测到随 Cu^{2+} 浓度增加滇水金凤花色逐渐变浅, 当 Cu^{2+} 含量为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 花色最浅。相关性分析表明 Cu^{2+} 与可溶性蛋白呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与花色苷、总黄酮、可溶性糖呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 逐步回归分析发现 Cu^{2+} 与可溶性蛋白含量呈显著负相关 ($P < 0.05$), 表明 Cu^{2+} 含量影响基础代谢物含量。

综上所述, 花色苷含量是影响滇水金凤花色变化的主要因素, Cu^{2+} 浓度影响控制合成花色苷的基础代谢物含量, 推测 Cu^{2+} 是通过调控滇水金凤花色苷的生物合成来影响花瓣呈色。本研究仅分析 Cu^{2+} 、各生理生化指标与花色之间的关系, 今后研究还应从解剖结构、分子遗传等方面对滇水金凤花色变化机制进行深入研究。

参考文献:

- [1] SONG Y, YUAN Y M, KÜPFER P. Chromosomal evolution in Balsaminaceae, with cytological observations on 45 species from Southeast Asia [J]. *Caryologia*, 2003, 56 (4): 463–481.
- [2] 于胜祥. 中国凤仙花 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.
- [3] 李洋, 黄武略, 林福永, 等. 滇水金凤CHI基因的克隆及表达分析 [J]. 江西农业大学学报, 2020, 42 (3): 468–474.
- LI Y, HUANG W L, LIN F Y, et al. Cloning and expression analysis of CHI genes in *Impatiens uliginosa* [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2020, 42 (3): 468–474. (in Chinese)
- [4] 刘应丽, 冯志熙, 朱佳鹏, 等. 滇水金凤花发育AP3/DEF同源基因的克隆及表达分析 [J]. 分子植物育种, 2020, 18 (20): 6626–6632.
- LIU Y L, FENG Z X, ZHU J P, et al. Cloning and expression analysis of AP3/DEF homologous genes associated with floral development in *Impatiens uliginosa* [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18 (20): 6626–6632. (in Chinese)
- [5] LUO C, HUANG W, ZHU J P, et al. The complete chloroplast genome of *Impatiens uliginosa* Franch., an endemic species in Southwest China [J]. *Mitochondrial DNA Part B, Resources*, 2019, 4 (2): 3846–3847.
- [6] 郭佳伟, 黄奇, 马明兰, 等. 不同花色云南野生凤仙花花瓣中金属元素测定 [J]. *安徽农业科学*, 2019, 47 (2): 179–181.
- GUO J W, HUANG Q, MA M L, et al. Determination of metal elements in the petals of Yunnan wild *Impatiens* in different colors [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47 (2): 179–181. (in Chinese)
- [7] KIANI M, MOHAMMADI S, BABAEI A, et al. Iran supports a great share of biodiversity and floristic endemism for *Fritillaria* spp. (Liliaceae): A review [J]. *Plant Diversity*, 2017, 39 (5): 245–262.
- [8] DEGUCHI A, OHNO S, HOSOKAWA M, et al. Endogenous post-transcriptional gene silencing of flavone synthase resulting in high accumulation of anthocyanins in black *Dahlia* cultivars [J]. *Planta*, 2013, 237 (5): 1325–1335.
- [9] MORITA Y, HOSHINO A. Recent advances in flower color variation and patterning of Japanese morning glory and *Petunia* [J]. *Breeding Science*, 2018, 68 (1): 128–138.
- [10] OHMIYA A. Molecular mechanisms underlying the diverse array of petal colors in *Chrysanthemum* flowers [J]. *Breeding Science*, 2018, 68 (1): 119–127.
- [11] NODA N. Recent advances in the research and development of blue flowers [J]. *Breeding Science*, 2018, 68 (1): 79–87.
- [12] 吴艳梅, 吴艺萍, 金雪花, 等. 丽格海棠花青素苷成分及分布对花色的影响 [J]. 西北植物学报, 2020, 40 (1): 58–68.
- WU Y M, WU Y P, JIN X H, et al. Effects of anthocyanin composition and distribution on flower color of rieger *Begonia* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2020, 40 (1): 58–68. (in Chinese)
- [13] 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): 2019–2027.
- JIANG J B, LIANG L, ZHANG T J, et al. Seasonal dynamic of physiological characteristics of pink *Davidia involucrata* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39 (11): 2019–2027. (in Chinese)
- [14] ITO T, OYAMA K I, YOSHIDA K. Direct observation of *Hydrangea* blue-complex composed of 3-O-glucosyldelphinidin, Al^{3+} and 5-O-acylquinic acid by ESI-mass spectrometry [J]. *Molecules*, 2018, 23 (6): 1424.
- [15] ITO T, AOKI D, FUKUSHIMA K, et al. Direct mapping of *Hydrangea* blue-complex in sepal tissues of *Hydrangea macrophylla* [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9 (1): 1–9.
- [16] TAKEDA K, TOMINAGA S. The anthocyanin in blue flowers of *Centaurea cyanus* [J]. *The Botanical Magazine = Shokubutsu-Gakuzasshi*, 1983, 96 (4): 359–363.
- [17] YOSHIDA K, KITAHARA S, ITO D, et al. Ferric ions involved in the flower color development of the Himalayan blue poppy, *Meconopsis grandis* [J]. *Phytochemistry*, 2006, 67 (10): 992–998.
- [18] 李荣华. 铜和铝对新几内亚凤仙生长发育及花色的影响 [D]. 保定: 河北农业大学, 2005.
- LI R H. *Effects of copper and aluminium on growth and flower color of Impatiens hawkeri* [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- [19] 王小菁, 孟祥春, 彭建宗. 花色形成与花生长的调控 [J]. 西北植物

- 学报, 2003, 23 (7): 49–54.
- WANG X J, MENG X C, PENG J Z. Regulation of flower growth and pigmentation [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, 23 (7): 49–54. (in Chinese)
- [20] 陈小红, 韦莉, 黄玉琼, 等. 鸳鸯茉莉花色变化过程中的生理生化特性研究 [J]. 植物科学学报, 2018, 36 (4): 595–602.
- CHEN X H, WEI L, HUANG Y Q, et al. Study on the physiological and biochemical characteristics of *Brunfelsia acuminata* petals during flowering [J]. *Plant Science Journal*, 2018, 36 (4): 595–602. (in Chinese)
- [21] GRLESBACH R J. The inheritance of flower color in *Petunia hybrida* vilm [J]. *Journal of Heredity*, 1996, 87 (3): 241–245.
- [22] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134–263.
- [23] 李力, 张盛楠, 刘亚敏, 等. 基于Lab模型的北美红枫呈色生理因素探究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45 (9): 87–94.
- LI L, ZHANG S N, LIU Y M, et al. Lab model based analysis on physiological factors affecting color of *Acer rubrum* L [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45 (9): 87–94. (in Chinese)
- [24] YOSHIDA K, KAWACHI M, MORI M, et al. The involvement of tonoplast proton pumps and $\text{Na}^+(\text{K}^+)/\text{H}^+$ exchangers in the change of petal color during flower opening of morning glory, *Ipomoea tricolor* cv. heavenly blue [J]. *Plant and Cell Physiology*, 2005, 46 (3): 407–415.
- [25] 付林江, 李厚华, 李玲, 等. 金银花花色变化原因分析 [J]. 林业科学, 2013, 49 (10): 155–161.
- FU L J, LI H H, LI L, et al. Reason of flower color change in *Lonicera japonica* [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2013, 49 (10): 155–161. (in Chinese)
- [26] PRIMKA E J, SMITH W K. Synchrony in fall leaf drop: Chlorophyll degradation, color change, and abscission layer formation in three temperate deciduous tree species [J]. *American Journal of Botany*, 2019, 106 (3): 377–388.
- [27] KARANJALKER G R, RAVISHANKAR K V, SHIVASHANKARA K S, et al. A study on the expression of genes involved in carotenoids and anthocyanins during ripening in fruit peel of green, yellow, and red colored mango cultivars [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2018, 184 (1): 140–154.
- [28] 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): 1331–1338.
- GE Y X, WANG L S, XU Y J, et al. Flower color, pigment composition and their changes during flowering in *Chimonanthus praecox* link [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, 35 (9): 1331–1338. (in Chinese)
- [29] 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. (in Chinese)
- [30] 陈华, 陈永快, 王涛, 等. 水杨酸对锡胁迫下不结球白菜幼苗生长及生理的响应 [J]. 福建农业学报, 2020, 35 (12): 1321–1329.
- CHEN H, CHEN Y K, WANG T, et al. Effects of salicylic acid on growth and physiology of non-heading Chinese cabbage seedlings under cadmium stress [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2020, 35 (12): 1321–1329. (in Chinese)
- [31] 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 involucreata* bracts and leaves with different colors [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2020, 40 (4): 505–513. (in Chinese)
- [32] 聂庆娟, 史宝胜, 孟朝, 等. 不同叶色红栌叶片中色素含量、酶活性及内含物差异的研究 [J]. 植物研究, 2008, 28 (5): 599–602.
- NIE Q J, SHI B S, MENG Z, et al. The enzyme activities, pigment and inclusion contents in different leaves color of *Cotinus coggygia* 'royal purple' in autumn [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28 (5): 599–602. (in Chinese)
- [33] 孟祥春, 张玉进, 王小菁. 矮牵牛花瓣发育过程中花色素苷、还原糖及蛋白质含量的变化 [J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2001 (2): 96–99.
- MENG X C, ZHANG Y J, WANG X J. Changes of anthocyanin, reducing sugar and protein contents during petal development in *Petunia hybrida* [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2001 (2): 96–99. (in Chinese)
- [34] AKBARI R, HATAMZADEH A, SARIRI R et al. Analysis of petal pH and metal ions to investigate the mechanism of colour development in *Gerbera hybrid* [J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2013, 7 (7): 941–947.
- [35] SCHREIBER H D, JONES A H, LARIVIERE C M, et al. Role of aluminum in red-to-blue color changes in *Hydrangea macrophylla* sepals [J]. *BioMetals*, 2011, 24 (6): 1005–1015.

(责任编辑：于洪杰)