

# 黄山栾树新品种‘金焰彩栾’叶片呈色的生理特性及影响因子分析

吕运舟<sup>1</sup>, 董筱昀<sup>1</sup>, 杨小鑫<sup>2</sup>, 孙海楠<sup>1</sup>, 何开跃<sup>2</sup>, 黄利斌<sup>1,①</sup>

(1. 江苏省林业科学研究院, 江苏 南京 211153; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:**以黄山栾树(*Koelreuteria bipinnata* Franch.)实生苗为对照,对来源于黄山栾树天然黄化突变体的新品种‘金焰彩栾’(‘Jinyan’) 在叶片发育期过程中叶色的变化进行了观察,并对其叶色参数(包括  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值)以及叶片的叶绿素  $a$  (Chla)、叶绿素  $b$  (Chlb)、总叶绿素(Chl)、类胡萝卜素(Car)和花色苷(Acy)含量及比值,含水量,细胞液 pH 值和可溶性糖含量的变化进行了测定和分析。结果表明:‘金焰彩栾’叶色呈现“橙红色—黄绿色—金黄色”的变化规律。‘金焰彩栾’叶片的  $L^*$  值在 10 月 28 日最高(82.94),  $a^*$  值在 4 月 14 日最高(56.93),  $b^*$  值在 11 月 27 日最高(46.35),且  $L^*$  和  $b^*$  值基本上极显著( $P<0.01$ )高于实生苗。整个实验期间,‘金焰彩栾’叶片的 Chla、Chlb、Chl、Car 和 Acy 含量基本上极显著低于实生苗,而 Chla/Chlb、Car/Chl 和 Acy/Chl 值基本上显著( $P<0.05$ )或极显著高于实生苗;总体上看,叶片含水量高于实生苗,而细胞液 pH 值和可溶性糖含量却低于实生苗。多元逐步线性回归分析结果表明:‘金焰彩栾’叶片的  $a^*$  值与 Chl 含量显著负相关, $L^*$  和  $b^*$  值与 Car 含量显著正相关。综上所述,‘金焰彩栾’叶色的适宜观赏期为春季和秋季,其叶色变化是多种因子综合作用的结果,其中,Chl 和 Car 含量及 Car/Chl 值为主要影响因子。

**关键词:** 黄山栾树; 黄化突变体; 叶色参数; 色素含量; 生理生化指标; 多元逐步线性回归分析

中图分类号: Q949.755.5; S684 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2020)06-0051-06

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2020.06.06

**Analyses on physiological characteristics and influence factors of leaf color of new cultivar ‘Jinyan’ of *Koelreuteria bipinnata*** LYU Yunzhou<sup>1</sup>, DONG Xiaoyun<sup>1</sup>, YANG Xiaoxin<sup>2</sup>, SUN Hainan<sup>1</sup>, HE Kaiyue<sup>2</sup>, HUANG Libin<sup>1,①</sup> (1. Jiangsu Academy of Forestry, Nanjing 211153, China; 2. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2020, 29(6): 51-56

**Abstract:** Taking seedlings of *Koelreuteria bipinnata* Franch. as the control, the change in leaf color of new cultivar ‘Jinyan’ originated from yellow mutant of *K. bipinnata* during leaf development process was observed, and the changes in its leaf color parameters (including  $L^*$ ,  $a^*$ , and  $b^*$  values), and contents and ratios of chlorophyll  $a$  (Chla), chlorophyll  $b$  (Chlb), total chlorophyll (Chl), carotenoid (Car) and anthocyanin (Acy), water content, pH value of cell sap, and soluble sugar content in leaf were assayed and analyzed. The results show that leaf color of ‘Jinyan’ shows a variation law of “orange red–yellow green–golden yellow”.  $L^*$  value in leaf of ‘Jinyan’ is the highest (82.94) on October 28th,  $a^*$  value is the highest (56.93) on April 14th,  $b^*$  value is the highest (46.35) on November 27th, and  $L^*$  and  $b^*$  values are extremely significantly ( $P<0.01$ ) higher than those of seedling in general. During the whole experimental period, Chla, Chlb, Chl, Car, and Acy contents in leaf of ‘Jinyan’ are extremely significantly lower than those of seedling in general, while Chla/Chlb, Car/Chl, and Acy/Chl values are significantly ( $P<0.05$ ) or extremely significantly higher than those of seedling in general;

收稿日期: 2020-03-02

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20141041)

作者简介: 吕运舟(1983—),男,安徽六安人,博士研究生,副研究员,从事观赏植物育种研究。

①通信作者 E-mail: lky209210@outlook.com

overall, leaf water content is higher than that of seedling, while pH value of cell sap and soluble sugar content are lower than those of seedling. The multiple stepwise linear regression analysis result shows that  $a^*$  value in leaf of 'Jinyan' is significantly negatively correlated with Chl content, while  $L^*$  and  $b^*$  values are significantly positively correlated with Car content. Taken together, the suitable ornamental periods of leaf color of 'Jinyan' are spring and autumn, and the change in its leaf color is comprehensive action result of multiple factors, in which, Chl and Car contents and Car/Chl value are the dominant influence factors.

**Key words:** *Koelreuteria bipinnata* Franch.; yellow mutant; leaf color parameters; pigment content; physiological and biochemical indexes; multiple stepwise linear regression analysis

随着人们对居住环境要求的不断提高,彩叶观赏植物逐渐成为现代园林配置的重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。叶色变异植株为植物彩叶新品种选育提供了理想材料<sup>[3]</sup>,并在光合作用机制<sup>[4]</sup>、激素调控<sup>[5]</sup>和功能基因组学<sup>[6]</sup>等研究领域得到广泛应用。叶片色素是叶色形成的物质基础和关键因子,多数植物叶片黄化主要是因为遗传和环境因子共同作用,影响叶绿素的合成和稳定性,从而影响不同色素间的比例<sup>[7-8]</sup>。

黄山栾树(*Koelreuteria bipinnata* Franch.)隶属于无患子科(Sapindaceae)栾树属(*Koelreuteria* Laxm.),为高大乔木,是中国优良的乡土树种之一。该种具有多种经济价值和园林观赏价值,是园林绿化、庭院配植的理想树种<sup>[9]</sup>。'金焰彩栾'('Jinyan')为黄山栾树的一个新品种,来源于黄山栾树的天然黄化突变体,枝干呈橙黄色,秋季全株金黄,观赏价值极高<sup>[9]</sup>。迄今为止,研究者已经初步鉴定出'金焰彩栾'体内部分表达模式与黄山栾树存在差异的色素合成基因<sup>[10-11]</sup>,并对其呈色期叶片色素含量进行了初步测定和分析<sup>[12]</sup>,但关于'金焰彩栾'叶片呈色的具体生理生化机制仍不清楚,有待深入研究。

鉴于此,以黄山栾树实生苗为对照,对'金焰彩栾'叶片发育过程中叶色参数以及叶片的色素含量和比值、含水量、细胞液 pH 值及可溶性糖含量的变化进行了研究,并对叶色参数与色素含量进行了多元逐步线性回归分析,以期明确影响'金焰彩栾'叶片呈色的主要因子,为探讨其叶片呈色的生理机制及选育栾树属植物彩叶新品种奠定理论基础。

## 1 研究地概况和研究方法

### 1.1 研究地概况

实验地设在江苏省林业科学研究院苗圃地内,该苗圃地位于南京市江宁区南部,具体地理坐标为东经

118°46'、北纬 31°51'。该区域属北亚热带季风气候,年均温 15.4 °C,年降水量 1 031 mm,无霜期 227 d。土壤为黄棕壤,呈酸性(pH 5 至 pH 6),肥力中等。

### 1.2 材料

在苗圃地内分别选取 3 株树龄 4 a、长势一致的'金焰彩栾'嫁接苗和黄山栾树实生苗作为样株。根据'金焰彩栾'叶片呈色的变化特征<sup>[9]</sup>,分别于 2015 年的 4 月 14 日、4 月 27 日、5 月 19 日、6 月 16 日、7 月 15 日、8 月 26 日、9 月 17 日、10 月 28 日和 11 月 27 日观察样株的叶色并拍照,同时,采集样株树梢中上部枝条上的成熟功能叶(即侧枝上第 3 对复叶的第 3 至第 5 枚完全展开的小叶),每株采集 3 枚小叶。将采集的小叶置于冰盒中带回实验室,待测。

### 1.3 方法

1.3.1 叶色参数及色素含量测定 参照杨淑红等<sup>[13]</sup>的方法,采用 CR-410 彩色色差仪(日本 Konica Minolta 公司)测定叶片中部(避开叶脉)的叶色参数(包括  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值)。参照 Lichtenthaler 等<sup>[14]</sup>的方法测定叶片中叶绿素  $a$ (Chla)、叶绿素  $b$ (Chlb)和类胡萝卜素(Car)的含量,参照 Pirie 等<sup>[15]</sup>的方法测定叶片中花色素苷(Acy)含量,并根据测定结果计算总叶绿素(Chl)含量(即 Chla 和 Chlb 含量之和)以及 Chla/Chlb、Car/Chl 和 Acy/Chl 值。各指标均重复测定 3 次。

1.3.2 含水量、细胞液 pH 值及可溶性糖含量测定 取新鲜叶片,先使用梅特勒-托利多 AL204 电子天平(精度 0.1 g)称量鲜质量(FW),再置于 105 °C 条件下杀青 15 min,然后在 75 °C 条件下烘干至恒质量,称量干质量(DW),根据称量结果计算叶片含水量(WC),计算公式为  $WC = [(FW - DW) / FW] \times 100\%$ 。参照马树华等<sup>[16]</sup>的方法测定叶片的细胞液 pH 值。参照郑恬静等<sup>[17]</sup>的方法测定叶片的可溶性糖含量。各指标均重复测定 3 次。

### 1.4 数据统计与分析

使用 EXCEL 2003 和 SPSS 13.0 软件进行数据统计和分析,采用 one-way ANOVA 法进行单因素方差分析,采用 Duncan’s 新复极差法进行多重比较。

## 2 结果和分析

### 2.1 叶色变化

观察(图 1)发现,‘金焰彩栾’的新叶在 3 月下旬

至 4 月下旬呈橙红色,成熟叶在 5 月上旬至 9 月下旬一直呈黄绿色,在 10 月上旬至 11 月下旬呈金黄色;而实生苗叶片在整个生长过程中基本呈绿色,仅在 11 月中旬开始变为黄色。

### 2.2 叶色相关指标变化

2.2.1 叶色参数变化 叶色参数变化统计结果(表 1)表明:‘金焰彩栾’叶片的  $L^*$  值在 4 月 14 日至 6 月 16 日相对稳定,自 7 月 15 日开始持续显著 ( $P<0.05$ ) 升高,于 10 月 28 日达到最高值(82.94),随后显著降



A,B,C: 分别示‘金焰彩栾’在春季、夏季和秋季的叶片颜色 Showing leaf color of ‘Jinyan’ in spring, summer, and autumn, respectively; D,E,F: 分别示实生苗在春季、夏季和秋季的叶片颜色 Showing leaf color of seedling in spring, summer, and autumn, respectively.

图 1 黄山栾树的新品种‘金焰彩栾’及实生苗在叶片发育过程中叶片颜色的变化  
Fig. 1 Change in leaf color of new cultivar ‘Jinyan’ and seedling of *Koelreuteria bipinnata* Franch. during leaf development process

表 1 黄山栾树的新品种‘金焰彩栾’及实生苗叶色参数的变化 ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>  
Table 1 Change in leaf color parameters of new cultivar ‘Jinyan’ and seedling of *Koelreuteria bipinnata* Franch. ( $\bar{X}\pm SD$ )<sup>1)</sup>

日期 Date (MM-DD)	$L^*$		$a^*$		$b^*$	
	金焰彩栾 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栾 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栾 Jinyan	实生苗 Seedling
04-14	48.18±0.11a**	37.10±0.12b	56.93±0.74g**	-8.74±0.03e	24.24±0.08c**	13.84±0.02d
04-27	46.79±0.04a	45.15±0.18c	40.19±0.16f**	-19.42±0.20abc	20.46±0.03b	17.82±0.20e
05-19	49.98±0.07b**	35.15±0.03b	-10.29±0.02c**	-18.48±0.07a	19.69±0.02a**	12.20±0.03c
06-16	46.85±0.03a**	40.74±0.08c	-15.46±0.04bc	-15.27±0.02ab	22.26±0.03b**	10.19±0.02bc
07-15	58.39±0.02c**	28.91±0.03a	-18.75±0.06ab**	-8.55±0.02e	26.88±0.05d**	4.54±0.01a
08-26	60.71±0.13d**	37.69±0.05b	-21.54±0.09a**	-10.90±0.02de	32.04±0.10e**	10.08±0.01b
09-17	69.03±0.03e**	41.79±0.04c	-19.83±0.08ab**	-11.91±0.05cde	39.62±0.06f**	11.54±0.04bc
10-28	82.94±0.11g**	46.78±0.05d	0.27±0.74d**	-15.49±0.03abc	45.37±0.08g**	22.24±0.03f
11-27	79.55±0.04f**	61.62±0.08e	7.81±0.16e**	-13.69±0.04bcd	46.35±0.03g**	32.66±0.05g

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示同一材料同一指标在不同日期间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference in the same index of the same material among different dates; \*\*: 表示同一指标在同一日期不同材料间差异极显著 ( $P<0.01$ ) Indicating the extremely significant ( $P<0.01$ ) difference in the same index among different materials on the same date.

低;  $a^*$  值在4月14日达到最高值(56.93), 随后持续降低, 在8月26日降到最低值(-21.54), 随后持续回升, 至11月27日达到7.81;  $b^*$  值在整个实验期间呈先降低后升高的变化趋势, 在5月19日降到最低值(19.69), 并在11月27日达到最高值(46.35)。

整个实验期间, ‘金焰彩栎’的  $L^*$  和  $b^*$  值均为正值, 并且, 除4月27日外, ‘金焰彩栎’的  $L^*$  和  $b^*$  值在其余日期均极显著 ( $P < 0.01$ ) 高于实生苗。‘金焰彩栎’的  $a^*$  值在4月14日、4月27日、10月28日和11月27日为正值, 在其余日期为负值, 而实生苗的  $a^*$  值始终为负值; 且‘金焰彩栎’的  $a^*$  值在6月16日至9月17日低于或极显著低于实生苗, 在其余日期极显著高于实生苗。

2.2.2 色素组成及比值变化 叶片色素组成及比值变化统计结果(表2)表明: 整个实验期间, ‘金焰彩栎’叶片叶绿素  $a$  (Chla)、叶绿素  $b$  (Chlb) 和总叶绿素 (Chl) 含量大体呈先升高后降低的趋势, 且一直维

持在较低水平。‘金焰彩栎’叶片 Chla、Chlb 和 Chl 含量均在4月14日降到最低值(分别为0.05、0.01和0.06  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 并随着时间推移而升高, 在9月17日达到最高值(分别为1.95、0.28和2.23  $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ), 随后降低。整个实验期间, ‘金焰彩栎’叶片 Chla、Chlb 和 Chl 含量基本上极显著低于实生苗。此外, 整个实验期间, ‘金焰彩栎’叶片 Chla/Chlb 值始终高于实生苗, 且除11月27日外, 其余日期‘金焰彩栎’和实生苗间的 Chla/Chlb 值均差异显著或极显著。

整个实验期间, ‘金焰彩栎’叶片类胡萝卜素 (Car) 和花色苷 (Acy) 含量均呈明显的波动变化, 分别在4月27日和10月28日达到最高值, 在11月27日分别为4月14日的3.4和1.3倍; 而‘金焰彩栎’叶片 Car/Chl 和 Acy/Chl 值则大体呈“迅速降低—保持稳定—逐渐升高”的趋势。另外, 整个实验期间, ‘金焰彩栎’叶片 Car 和 Acy 含量极显著低于实生苗, 而叶片 Car/Chl 和 Acy/Chl 值却显著或极显著

表2 黄山栎树的新品种‘金焰彩栎’及实生苗叶片色素含量及比值的变化 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Change in content and ratio of leaf pigments of new cultivar ‘Jinyan’ and seedling of *Koelreuteria bipinnata* Franch. ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

日期 Date (MM-DD)	Chla/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )		Chlb/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )		Chl/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )		Chla/Chlb	
	金焰彩栎 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栎 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栎 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栎 Jinyan	实生苗 Seedling
04-14	0.05±0.01a**	1.25±0.12a	0.01±0.00a**	0.21±0.03a	0.06±0.01a**	1.46±0.15a	5.00±2.13a*	5.93±0.28e
04-27	1.24±0.13de**	2.21±0.07b	0.12±0.02bc**	0.45±0.02abc	1.36±0.14e**	2.66±0.09d	10.38±1.74b**	4.91±0.13cd
05-19	0.79±0.07bc**	1.91±0.06b	0.08±0.02bc**	0.30±0.03ab	0.87±0.09c**	2.21±0.08b	10.05±1.29b**	6.26±0.40ef
06-16	1.31±0.01e**	2.20±0.06b	0.19±0.14ef**	0.42±0.03abc	1.50±0.05f**	2.62±0.09d	7.02±1.51a*	5.23±0.32d
07-15	1.35±0.05f**	2.46±0.05c	0.17±0.01fg**	0.48±0.01cd	1.51±0.05f**	2.94±0.05e	8.11±0.22ab**	5.08±0.10cd
08-26	1.12±0.02de**	3.08±0.02d	0.14±0.01ce**	0.79±0.01d	1.26±0.01e**	3.87±0.02g	8.18±0.86ab**	3.88±0.03b
09-17	1.95±0.07f**	3.87±0.03e	0.28±0.01g**	1.38±0.05e	2.23±0.08g**	5.25±0.08h	7.07±0.11a**	2.80±0.08a
10-28	1.02±0.02cd**	2.98±0.01c	0.07±0.01b**	0.64±0.03bcd	1.09±0.02d**	3.61±0.04f	15.35±0.90c**	4.69±0.19c
11-27	0.64±0.02b**	2.07±0.02b	0.09±0.01bc**	0.31±0.02ab	0.73±0.01b**	2.38±0.04c	6.88±1.06a	6.68±0.38f

  

日期 Date (MM-DD)	Car/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )		Acy/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )		Car/Chl		Acy/Chl	
	金焰彩栎 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栎 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栎 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栎 Jinyan	实生苗 Seedling
04-14	0.13±0.01a**	0.47±0.03a	1.85±0.16a**	4.37±0.84c	2.37±0.38c**	0.32±0.15g	30.83±7.80e**	2.99±0.62e
04-27	0.47±0.05f**	0.61±0.02c	2.81±0.10c**	3.87±0.20a	0.35±0.01a**	0.23±0.02e	2.07±0.14b**	1.46±0.08ab
05-19	0.24±0.02b**	0.48±0.01a	1.95±0.43a**	4.60±0.29c	0.28±0.01a**	0.22±0.01d	2.24±0.31bc*	2.08±0.14cd
06-16	0.34±0.01de**	0.53±0.01b	2.16±0.18ab**	4.05±0.39b	0.23±0.02a	0.20±0.01c	1.44±0.16a	1.55±0.16b
07-15	0.36±0.01e**	0.62±0.01c	3.24±0.59d**	5.64±0.10e	0.24±0.01a*	0.21±0.01cd	2.15±0.44b*	1.92±0.06c
08-26	0.27±0.01bc**	0.66±0.01d	2.85±0.42c**	5.19±0.17d	0.22±0.01a*	0.17±0.02b	2.27±0.35bc**	1.34±0.05a
09-17	0.45±0.05f**	0.81±0.01g	3.32±0.29d**	6.78±0.41f	0.20±0.03a*	0.15±0.01a	1.49±0.16a*	1.29±0.07a
10-28	0.31±0.01cd**	0.72±0.01f	2.38±0.15bc**	5.54±0.84e	0.29±0.01a*	0.20±0.02c	2.20±0.15bc**	1.53±0.08b
11-27	0.44±0.02f**	0.69±0.02e	3.70±0.14e**	5.15±0.24d	0.60±0.03b**	0.29±0.01f	5.06±0.22d**	2.17±0.11d

<sup>1)</sup> Chla: 叶绿素  $a$  含量 Chlorophyll  $a$  content; Chlb: 叶绿素  $b$  含量 Chlorophyll  $b$  content; Chl: 总叶绿素含量 Total chlorophyll content; Car: 类胡萝卜素含量 Carotenoid content; Acy: 花色苷含量 Anthocyanin content. 同列中不同小写字母表示同一指标在同一材料不同日期间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference in the same index of the same material among different dates; \*, \*\*: 分别表示同一指标在同一日期不同材料间差异显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) Indicating the significant ( $P < 0.05$ ) or extremely significant ( $P < 0.01$ ) difference in the same index among different materials on the same date, respectively.

高于实生苗(6月16日除外)。

2.2.3 含水量、细胞液 pH 值和可溶性糖含量变化统计结果(表3)表明:整个实验期间,‘金焰彩栾’叶片含水量大体呈逐渐降低的趋势;细胞液 pH 值大体呈先降低后升高的趋势;可溶性糖含量大体呈“降低—升高—降低—升高”的趋势,在4月27日降到最低值( $10.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),在7月15日达到最高值( $24.89 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )。

除11月27日外,其余日期‘金焰彩栾’和实生

苗间的叶片含水量均差异显著或极显著,且除8月26日外,‘金焰彩栾’叶片含水量均高于实生苗。‘金焰彩栾’叶片细胞液 pH 值在4月27日极显著高于实生苗,在5月19日和7月15日极显著低于实生苗,在9月17日和10月28日显著低于实生苗。‘金焰彩栾’叶片可溶性糖含量在4月14日和11月27日均极显著高于实生苗,在8月26日极显著低于实生苗,在6月16日和9月17日显著低于实生苗。

表3 黄山栾树的新品种‘金焰彩栾’及实生苗叶片含水量、细胞液 pH 值和可溶性糖含量的变化( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Change in water content, pH value of cell sap, and soluble sugar content in leaf of new cultivar ‘Jinyan’ and seedling of *Koelreuteria bipinnata* Franch. ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

日期 Date (MM-DD)	含水量/% Water content		细胞液 pH 值 pH value of cell sap		可溶性糖含量/( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ) Soluble sugar content	
	金焰彩栾 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栾 Jinyan	实生苗 Seedling	金焰彩栾 Jinyan	实生苗 Seedling
04-14	76.27±1.30f**	69.00±0.80f	5.34±0.05bc	5.46±0.16bc	22.06±0.17f**	18.00±0.71f
04-27	72.99±0.53e**	67.79±1.66f	5.22±0.13b**	4.99±0.11a	10.63±0.24a	10.74±0.33a
05-19	73.62±0.66e**	68.07±0.64f	4.81±0.24a**	5.39±0.05bc	14.22±0.94b	14.07±0.38b
06-16	66.38±1.10d**	53.33±2.66b	4.74±0.06a	4.85±0.11a	15.80±0.59c*	17.13±0.28cd
07-15	62.36±1.81c*	58.06±2.29d	4.87±0.12a**	5.52±0.02c	24.89±0.24g	24.86±0.36g
08-26	57.42±1.60b*	62.34±1.58e	5.12±0.02b	5.11±0.11ab	15.72±0.13c**	17.65±0.66def
09-17	66.65±1.51d**	59.26±6.46d	5.22±0.02b*	5.59±0.20c	15.54±0.66c*	17.17±0.34cde
10-28	58.55±3.14bc*	55.30±3.62bc	5.33±0.03bc*	5.51±0.15c	17.57±0.42d	17.94±0.37ef
11-27	51.42±2.27a	50.12±2.98a	5.35±0.13bc	5.21±0.14b	19.16±0.60e**	16.47±0.18c

<sup>1)</sup> 同列中不同小写字母表示同一指标在同一材料不同日期间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference in the same index of the same material among different dates; \*, \*\*: 分别表示同一指标在同一日期不同材料间差异显著( $P < 0.05$ )或极显著( $P < 0.01$ ) Indicating the significant ( $P < 0.05$ ) or extremely significant ( $P < 0.01$ ) difference in the same index among different materials on the same date, respectively.

### 2.3 多元逐步线性回归分析

分别以  $L^*$ 、 $a^*$  和  $b^*$  值为因变量,‘金焰彩栾’叶片总叶绿素(Chl)、类胡萝卜素(Car)和花色素苷(Acy)含量为自变量,进行多元逐步线性回归分析,获得的回归方程分别为  $L^* = 32.776 + 100.583\text{Car}$  ( $R = 0.619, P < 0.05$ )、 $a^* = 38.829 - 30.399\text{Chl}$  ( $R = 0.724, P < 0.05$ ) 和  $b^* = 9.414 + 78.124\text{Car}$  ( $R = 0.533, P < 0.05$ ),说明‘金焰彩栾’叶片的叶色参数与 Chl 和 Car 含量密切相关。其中, $a^*$  值与 Chl 含量显著负相关,即随着 Chl 含量增加,叶片绿色调增强; $L^*$  和  $b^*$  值与 Car 含量显著正相关,即随着 Car 含量增加,叶片黄色调和整体明度增强。

## 3 讨论和结论

研究表明:色素类型和含量是影响植物叶色的最主要和最直接的因子<sup>[18-20]</sup>,多数植物叶色突变体表

型由叶绿素含量下降引起<sup>[21-23]</sup>。本研究结果也表明:在整个实验期间,黄山栾树新品种‘金焰彩栾’叶片的叶绿素  $a$  (Chla)、叶绿素  $b$  (Chlb) 和总叶绿素(Chl)含量基本上极显著低于实生苗,而‘金焰彩栾’叶片的 Chla/Chlb 值却基本上显著或极显著高于实生苗,说明‘金焰彩栾’叶片的叶绿素合成通路可能受阻,且 Chlb 含量的降幅更大。然而,关于‘金焰彩栾’叶片叶绿素合成受阻及调控通路的分子机制尚不清楚,有待进一步深入研究。叶绿素  $a$  酸酯氧化酶(chlorophyllide  $a$  oxygenase, CAO)是催化 Chla 转化成 Chlb 的关键酶<sup>[24]</sup>,‘金焰彩栾’叶片 CAO 基因的表达水平显著低于实生苗<sup>[10]</sup>,说明‘金焰彩栾’可通过调控 CAO 基因的转录表达水平调控 Chlb 的合成,从而提高 Chla/Chlb 值,使叶片呈现黄色。另外,多元逐步线性回归分析结果表明:‘金焰彩栾’叶片  $a^*$  值与 Chl 含量显著负相关, $L^*$  和  $b^*$  值与 Car 含量显著正相关,说明‘金焰彩栾’叶片呈色与 Chl 和 Car 含

量密切相关。

郁万文等<sup>[25]</sup>的研究结果表明:Car/Chl 值升高是银杏 (*Ginkgo biloba* Linn.) 金叶品种‘万年金’(‘Wannianjin’)半同胞子代无性系叶片呈黄色的主要原因。本研究中,实验开始时(即4月14日),‘金焰彩栎’叶片的Chl含量极低( $0.06 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ),但Car/Chl和Acy/Chl值却最大,叶片呈橙红色;随后,Car/Chl值持续下降,当Car/Chl值低于0.28时,叶片呈黄绿色或绿色;入秋后,Chl含量下降,但Car/Chl值升高,叶片呈金黄色。说明‘金焰彩栎’叶片呈色与Car/Chl值有关。

综上所述,‘金焰彩栎’叶色的适宜观赏期为春季和秋季,夏季叶片出现复绿现象,观赏价值降低。‘金焰彩栎’叶色变化是多种因子综合作用的结果,Chl和Car含量及Car/Chl值为主要影响因子。

#### 参考文献:

- [1] 侯元凯. 彩叶植物研究进展[J]. 世界林业研究, 2010, 23(6): 24-28.
- [2] 王 炜, 郑 伟, 徐晓丹, 等. 基于转录组测序的滇山茶花叶呈色机理分析[J]. 西北植物学报, 2017, 37(9): 1720-1727.
- [3] 刘新亮, 李先民, 何小三, 等. 植物叶色黄化突变分子机理的研究进展[J]. 南方农业学报, 2017, 48(8): 1358-1366.
- [4] 孔可可, 许孟歌, 王亚琪, 等. 大豆黄绿叶突变体NJ9903-5性状表现与基因定位研究[J]. 大豆科学, 2017, 36(4): 494-501.
- [5] FAMBRINI M, CASTAGNA A, VECCHIA F D, et al. Characterization of a pigment-deficient mutant of sunflower (*Helianthus annuus* L.) with abnormal chloroplast biogenesis, reduced PS II activity and low endogenous level of abscisic acid[J]. Plant Science, 2004, 167(1): 79-89.
- [6] YARONSKAYA E, ZIEMANN V, WALTER G, et al. Metabolic control of the tetrapyrrole biosynthetic pathway for porphyrin distribution in the barley mutant *albostrians*[J]. The Plant Journal, 2003, 35(4): 512-522.
- [7] 何 梅, 王 华, 胡玉安, 等. 彩叶树种研究与开发利用现状[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1134-1144.
- [8] 冯 露, 吴际洋, 鞠易倩, 等. 紫叶紫薇呈色生理及光合特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 93-101.
- [9] 黄利斌, 梁珍海, 窦全琴, 等. 观赏栎树新品种‘金焰彩栎’[J]. 林业科学, 2015, 51(5): 165.
- [10] LYU Y Z, DONG X Y, HUANG L B, et al. *De novo* assembly of *Koeleria* transcriptome and analysis of major gene related to leaf etiolation [J]. South African Journal of Botany, 2017, 113: 355-361.
- [11] 吕运舟, 董筱昀, 黄利斌. 黄山栎树实时荧光定量PCR内参基因的筛选[J]. 分子植物育种, 2019, 17(2): 553-560.
- [12] 黄利斌, 施大伟, 周 鹏, 等. 金焰彩栎色素组成与叶片呈色的关系[J]. 江苏林业科技, 2015, 42(1): 8-10, 39.
- [13] 杨淑红, 朱延林, 马永涛, 等. 生长季全红杨叶色与色素组成的相关性[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(7): 63-68.
- [14] LICHTENTHALER H K, WELLBURN A R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents [J]. Biochemical Society Transactions, 1983, 11: 591-592.
- [15] PIRIE A, MULLINS M G. Changes in anthocyanin and phenolics content of grapevine leaf and fruit tissues treated with sucrose, nitrate, and abscisic acid[J]. Plant Physiology, 1976, 58(4): 468-472.
- [16] 马树华, 王庆成, 李亚藏. 汽车尾气污染对四种北方阔叶树苗木膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(12): 2330-2336.
- [17] 郑恬静, 王克凤, 桑瀚旭, 等. 两种海棠秋季叶色变化的生理机制研究[J]. 湖北农业科学, 2017, 56(15): 2908-2912.
- [18] 荣立苹, 李倩中, 李淑顺, 等. 三角枫及其变异株转色期叶色变化生理[J]. 江苏农业学报, 2011, 27(5): 1089-1092.
- [19] SONG L, MA Q, ZOU Z, et al. Molecular link between leaf coloration and gene expression of flavonoid and carotenoid biosynthesis in *Camellia sinensis* cultivar ‘Huangjinya’ [J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 803.
- [20] 杨小鑫, 吕运舟, 董筱昀, 等. ‘金焰彩栎’与黄山栎树光合特性比较[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2016, 40(4): 74-80.
- [21] 张灵敏, 吕文彦, 张丽霞. 高粱浅绿叶突变体 *sl1* 的农艺性状和生理生化特性 [J]. 植物生理学报, 2014, 50(9): 1401-1405.
- [22] ZHONG X M, SUN S F, LI F H, et al. Photosynthesis of a yellow-green mutant line in maize [J]. Photosynthetica, 2015, 53(4): 499-505.
- [23] LI C, HU Y, HUANG R, et al. Mutation of *FdC2* gene encoding a ferredoxin-like protein with C-terminal extension causes yellow-green leaf phenotype in rice [J]. Plant Science, 2015, 238: 127-134.
- [24] 吴自明, 张 欣, 万建民. 叶绿素生物合成的分子调控[J]. 植物生理学通讯, 2008, 44(6): 1064-1070.
- [25] 郁万文, 祝遵凌, 曹福亮, 等. 金叶银杏半同胞子代无性系的叶色和色素含量变化及呈色机制分析[J]. 植物资源与环境学报, 2016, 25(1): 43-53.

(责任编辑: 佟金凤)