

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202004056

唐生森, 陈虎, 覃永康, 等. 枫香秋季变色期叶色变化及其生理基础 [J]. 广西植物, 2021, 41(12): 2061–2068.

TANG SS, CHEN H, QIN YK, et al. Physiological basis of *Liquidambar formosana* leaves during leaf color transformation in autumn [J]. *Guihaia*, 2021, 41(12): 2061–2068.

## 枫香秋季变色期叶色变化及其生理基础

唐生森<sup>1</sup>, 陈虎<sup>1</sup>, 覃永康<sup>2</sup>, 杨章旗<sup>1\*</sup>, 汪挺<sup>3</sup>, 韦兵览<sup>2</sup>

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院, 南宁 530002; 2. 环江毛南族自治县华山林场, 广西 环江 547100; 3. 广西师范大学 生命科学学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 为探究秋季枫叶呈色的关键生理因素, 该文以转色期叶色为绿色、黄色和红色的枫香单株为试材, 研究了  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值变化与叶片色素、可溶性糖及可溶性蛋白质含量变化的相关性。结果表明: (1) 在变色期, 3 种色彩枫香叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素均大量降解, 花色素苷不同程度积累。(2) 绿色叶单株叶绿素和类胡萝卜素始终保持较高含量, 花色素苷含量上升 4.2 倍, 叶片内色素含量比值始终保持稳定; 黄色叶单株叶绿素和类胡萝卜素含量最低, 花色素苷含量上升 4.4 倍,  $b^*$  值与叶绿素含量极显著负相关, 与类胡萝卜素含量显著负相关, 与花色素苷/类胡萝卜素含量比值极显著正相关; 红色叶单株叶绿素和类胡萝卜素含量略高于黄色叶单株, 花色素苷含量上升 27.2 倍,  $a^*$  值与叶绿素含量、类胡萝卜素含量极显著负相关, 与花色素苷含量显著正相关, 与色素含量比值无显著相关性。(3) 红色叶单株具有较高的可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量。因此, 在枫香叶片变色期, 保持较高的叶绿素和类胡萝卜素含量, 维持色素含量比值稳定使叶片呈现绿色; 叶绿素和类胡萝卜素的大量降解, 以及花色素苷/类胡萝卜素含量比值的升高使叶片呈现黄色; 叶绿素的降解和花色素苷的大量合成使叶片呈现红色。

**关键词:** 枫香, 叶色, 色素, 可溶性糖, 可溶性蛋白质

中图分类号: Q945; S718. 43 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2021)12-2061-08

## Physiological basis of *Liquidambar formosana* leaves during leaf color transformation in autumn

TANG Shengsen<sup>1</sup>, CHEN Hu<sup>1</sup>, QIN Yongkang<sup>2</sup>, YANG Zhangqi<sup>1\*</sup>, WANG Ting<sup>3</sup>, WEI Binglan<sup>2</sup>(1. *Guangxi Forestry Research Institute*, Nanning 530002, China; 2. *Huashan Forest Farm*, Huanjiang 547100, Guangxi, China; 3. *College of Life Sciences*, *Guangxi Normal University*, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** To investigate the key physiological mechanisms of leaf colorization of *Liquidambar formosana* in autumn, the plants with three leaf colors (green, yellow and red) were used as the experimental material. The contents of leaf-color parameters ( $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ ), pigment, soluble sugar and soluble protein were determined, and their correlations were analyzed. The results were as follows: (1) During leaf discoloration period, the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoids were greatly decreased, and anthocyanin content was accumulated in large

收稿日期: 2020-04-28

基金项目: 广西科技基地和人才专项(桂科 AD19254004); 广西八桂学者专项经费项目(2019A026); 环江科学研究与技术开发计划项目(1701011) [ Supported by Guangxi Science and Technology Base and Special Fund for Talents (AD19254004); Bagui Scholar Program of Guangxi (2019A026); Scientific Research and Technology Development Program of Huanjiang (1701011) ].

作者简介: 唐生森(1986-), 硕士, 工程师, 主要从事森林培育研究, (E-mail) 369386222@qq.com。

\*通信作者: 杨章旗, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事林木遗传育种研究, (E-mail) yangzhangqi@163.com。

quantities. (2) The contents of chlorophyll and carotenoids remained high in the green-colored leaves, and the anthocyanin content increased by 4.2 times, and the proportion of pigment remained stable. The contents of chlorophyll and carotenoid were the lowest in yellow-colored leaves, and the anthocyanin content increased by 4.4 times. The leaf-color parameters  $b^*$  content was significantly negatively correlated with the contents of chlorophyll and carotenoid, but significantly positively correlated with the ratio of anthocyanin to carotenoid. The contents of chlorophyll and carotenoid in the red-colored leaves was slightly higher than the yellow-colored leaves, and the anthocyanin content increased by 27.2 times. The leaf-color parameters  $a^*$  content was significantly negatively correlated with contents of chlorophyll and carotenoid, and significantly positively correlated with anthocyanin content, but not significantly correlated with the ratio of pigment. (3) The contents of soluble sugar and soluble protein were higher in the red-colored leaves. The contents of chlorophyll and carotenoid were kept high to keep the green leaves during the discoloration period, and the pigment ratio remained stable. Extensive degradation of chlorophyll and carotenoids, and the increasing ratio of anthocyanin to carotenoid results in yellow leaves. Chlorophyll degradation and anthocyanin synthesis results in red leaves.

**Key words:** *Liquidambar formosana*, leaf color, pigment, soluble sugar, soluble protein

植被色彩是森林景观的重要构成要素,是森林生态美学直观展现(钟永德等,2004)。植物叶色的季相变化主要是在外部环境刺激和内部遗传调控的共同作用下所引起的叶片内色素含量、比例和分布的改变,从而呈现不同的色彩(Chalker-Scott, 1999; 姜卫兵等,2005; Ge et al., 2019; Wu et al., 2020)。植物叶片色素主要有三类:一是叶绿素,主要包括蓝绿色的叶绿素 a 和黄绿色的叶绿素 b;二是类胡萝卜素,主要包括橙黄色的类胡萝卜素和黄色的叶黄素;三是类黄酮类色素,主要以花色素苷类为主,为植物提供丰富多彩的颜色(姜卫兵等,2005;朱秀红等,2019)。 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  颜色参数可以有效地将叶片颜色进行精确地量化表达, $L^*$  值由小变大表示颜色由暗转亮, $a^*$  值由负转正表示由绿色转向红色, $b^*$  值由负转正表示由蓝色转向黄色(张少露,2017)。糖类为花色素苷合成的前体和信号物质,可溶性蛋白为植物体内重要渗透调节物质,通过一定生理代谢来调节花色素苷的形成(梁玲等,2020)。

枫香(*Liquidambar formosana*)为金缕梅科枫香树属落叶乔木,秋季叶色变化最终呈色主要有红色、紫色、橙黄色和保持绿色等类型(王建军等,2015;周卫荣等,2019),叶片一般在落叶前迅速变色脱落。目前,国内主要开展了枫香彩叶单株选择(巫健民和陈步先,2016)、培育(林昌礼,2011)和新品种(王建军等,2015;周卫荣等,2019)认定工作,也有探讨秋季叶片颜色由绿色转为红色过程中色素含量的变化特征(胡敬志等,2007;刘儒等,2017),及其与环境因子的相关性(李效文等,

2011)研究,对其他色彩叶片中色素含量变化的研究还未见报道。

本文以秋季叶片最终呈色为绿色、黄色和红色的枫香单株叶片为试材,分析秋季变色期枫香叶片颜色参数、色素含量、可溶性糖和可溶性蛋白质含量变化及其相关性,以期从生理角度探讨影响枫香不同叶色呈色的关键因素,为枫香优良观赏株系选育提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

本试验选取叶片秋季最终呈色分别为绿色、黄色和红色的枫香单株作为试材,3 种色彩单株均位于同一枫香天然群落内。该群落位于广西环江毛南族自治县北部的明伦镇山区(108°28'25.25" E、25°6'16.64" N),海拔 377 m,喀斯特地貌。该山区属于亚热带湿润性季风气候,年均气温 15.7 °C,历年最低气温 -5.2 °C,无霜期 290 d,年降雨量 1 402.1 mm,相对湿度 79%(张凯选等,2019)。在 2019 年 10 月 25 日—12 月 21 日期间,每隔 15~20 d 采集一次样品,共采集 4 次,3 个单株均选择相同冠层和朝向的叶片擦拭干净,用液氮速冻固定后,于 -80 °C 保存备用(梁玲等,2020)。

### 1.2 方法

叶色参数测定参照 Wang et al. (2001) 的方法;叶绿素和类胡萝卜素含量测定参照仓晶和赵会杰(2013)的方法;花色素苷的提取与测定参照李力(2016)的方法;可溶性糖含量测定采用苏州

科铭生物技术有限公司提供的 BCA 法蛋白含量测定试剂盒检测;可溶性蛋白质含量测定采用苏州科铭生物技术有限公司提供的植物可溶性糖含量试剂盒检测。

### 1.3 数据处理

数据分析采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0, 作图采用 Origin 9.0, 对 3 种色彩枫香叶片各项生理指标进行单因素方差分析和 Duncan 多重比较, 各项指标间采用 Spearman 系数进行双变量相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 枫香秋季变色期叶色参数变化特征

由图 1 可知, 在秋季枫香叶片变色期, 绿色叶单株叶片由深绿色转为浅绿色, 叶片出现少量枯死斑块后自然脱落; 黄色叶单株在 11 月 14 日出现轻微色变, 12 月 4 日至 12 月 21 日为主要变色期; 红色叶单株在 10 月 25 日开始出现红色斑点色变, 11 月 14 日至 12 月 4 日为主要变色期, 叶面完全转红, 较黄色叶单株变色早、叶色持续时间长。

在秋季枫叶变色期, 不同单株叶色参数及变化差异较大(图 2)。绿色叶单株第 1 次采集的叶片  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值与后 3 次采集的数据均存在显著差异, 而后 3 次采集的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值, 各自均差异不显著, 说明 11 月 14 日后, 绿色叶单株的叶色参数基本维持稳定。黄色叶单株叶片的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  值在变色期均呈上升趋势,  $L^*$  值和  $b^*$  值变化规律基本一致, 各时期参数差异显著,  $L^*$  值和  $b^*$  值均显著大于其他 2 个色彩(差异显著), 且随着时间推移增大, 说明黄色叶单株叶片随着颜色变化越发明亮和橙黄;  $a^*$  值在 12 月 4 日出现增长, 在主要变色期出现大幅度上升, 说明黄色叶片中夹带红色呈现。红色叶单株叶片的  $L^*$ 、 $b^*$  值在变色期均呈下降趋势, 在 11 月 14 日后, 均成为 3 个色彩单株中最小值(各色彩差异显著), 说明红色叶单株叶片随着变色越发暗沉;  $a^*$  值呈现大幅度上升趋势, 在 11 月 14 日后显著高于其他色彩, 是叶片呈现红色的关键。

### 2.2 枫香秋季变色期叶片色素含量变化特征

不同单株枫香叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量均随秋季变色时间推移下降, 花色素苷含量均随时间推移上升(图 3)。在整个变色期, 受试单株的叶绿素含量和类胡萝卜素含量大小均表现为绿色叶单株 > 红色叶单株 > 黄色叶单株(差异显著)。在

10 月 25 日, 3 个色彩叶片, 花色素苷含量差异不显著, 于 11 月 14 日开始出现显著差异, 红色叶单株的花色素苷含量大幅度上升, 绿色叶和黄色叶单株均呈小幅度上升, 黄色叶单株的花色素苷含量在变色末期略高于绿色叶单株(差异显著)。

在变色末期, 绿色叶单株的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总含量、类胡萝卜素含量分别下降了 45.7%、57.2%、49.7%、45.7%, 花色素苷含量增长 4.2 倍; 黄色叶单株的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总含量、类胡萝卜素含量分别下降了 95.1%、88.5%、93.0%、71.3%, 花色素苷含量增长 4.4 倍; 红色叶单株的叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总含量、类胡萝卜素含量分别下降了 88.8%、88.2%、88.6%、66.1%, 花色素苷含量增长 27.2 倍。

综合比较受试单株叶片色素含量变化及其下降幅度可以发现, 在整个变色期, 绿色叶单株的叶绿素和类胡萝卜素的含量降幅最小, 整体保持着最高含量, 其花色素苷含量增幅最小, 整体保持最低含量; 黄色叶单株的叶绿素和类胡萝卜素的含量降幅最大, 整体处于最低含量, 花色素苷含量整体略高于绿色叶单株; 红色叶单株的叶绿素和类胡萝卜素的含量降幅略低于黄色叶单株, 花色素苷含量大幅度增高, 显著高于其他色彩单株。

### 2.3 枫香秋季变色期叶片色素含量比值变化特征

绿色叶单株在变色期的类胡萝卜素/叶绿素比值、花色素苷/叶绿素比值均差异不显著(图 4), 花色素苷/类胡萝卜素比值在变色中后期有小幅度上升, 说明绿色叶植株叶片内色素比例在变色期基本保持稳定。黄色叶单株的类胡萝卜素/叶绿素比值和花色素苷/叶绿素比值均只在变色末期出现显著差异, 比值大幅度上升, 与黄色叶在 12 月 4 日后快速变色一致, 说明类胡萝卜素/叶绿素比值和花色素苷/叶绿素比值变化与黄色叶呈色关系密切; 其类胡萝卜素/叶绿素比值在各变色末期均差异显著, 说明类胡萝卜素/叶绿素比值对黄色叶呈色也有一定的影响。红色叶单株的类胡萝卜素/叶绿素比值在 12 月 4 日开始出现差异, 比值小幅度上升; 花色素苷/叶绿素比值和花色素苷/类胡萝卜素比值在变色期均差异显著, 比值在 12 月 4 日出现大幅度上升, 与叶片变色动态一致, 说明花色素苷/叶绿素比值和花色素苷/类胡萝卜素比值均为决定红色叶单株呈色的关键因子。

绿色 Green



黄色 Yellow



红色 Red



2019-10-25

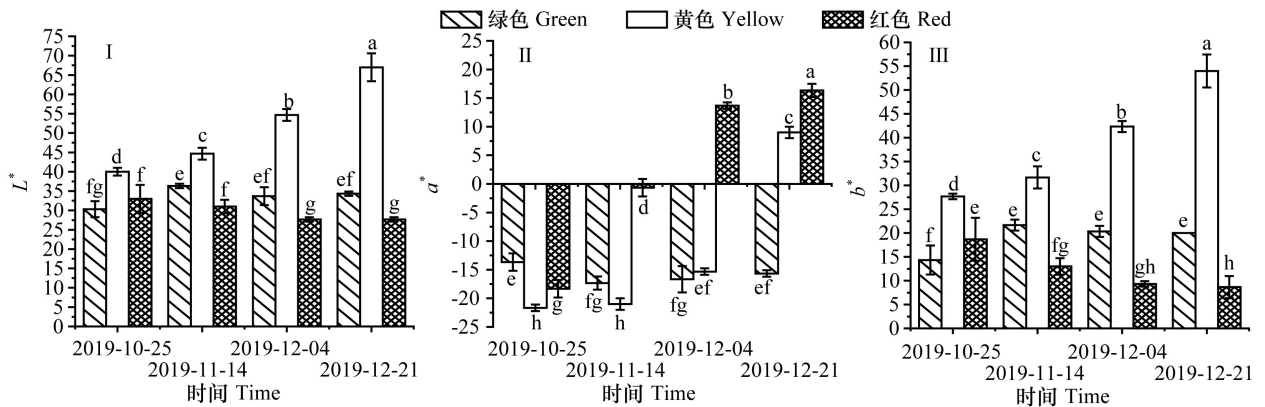
2019-11-14

2019-12-04

2019-12-21

图 1 不同单株叶色变化规律

Fig. 1 The change law of leaf color of different individual trees



用 Duncan 法进行多重比较;不同小写字母表示组间差异显著 ( $P < 0.05$ );相同小写字母表示组间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。下同。  
 Duncan method was used for multiple comparisons; Different lowercase letters indicate significant differences between groups ( $P < 0.05$ ); The same lowercase letters indicate no significant differences between groups ( $P > 0.05$ ). The same below.

图 2 不同单株叶色参数变化

Fig. 2 Changes of leaf color parameters in different individual trees

### 2.4 枫香秋季变色期叶片可溶性糖和可溶性蛋白质含量变化特征

在 3 个色彩枫香叶片内,可溶性糖含量和可溶

性蛋白质含量均存在显著差异(图 5)。其中,红色叶单株叶片内可溶性糖和可溶性蛋白质含量均显著高于其他单株,黄色叶单株叶片内可溶性糖



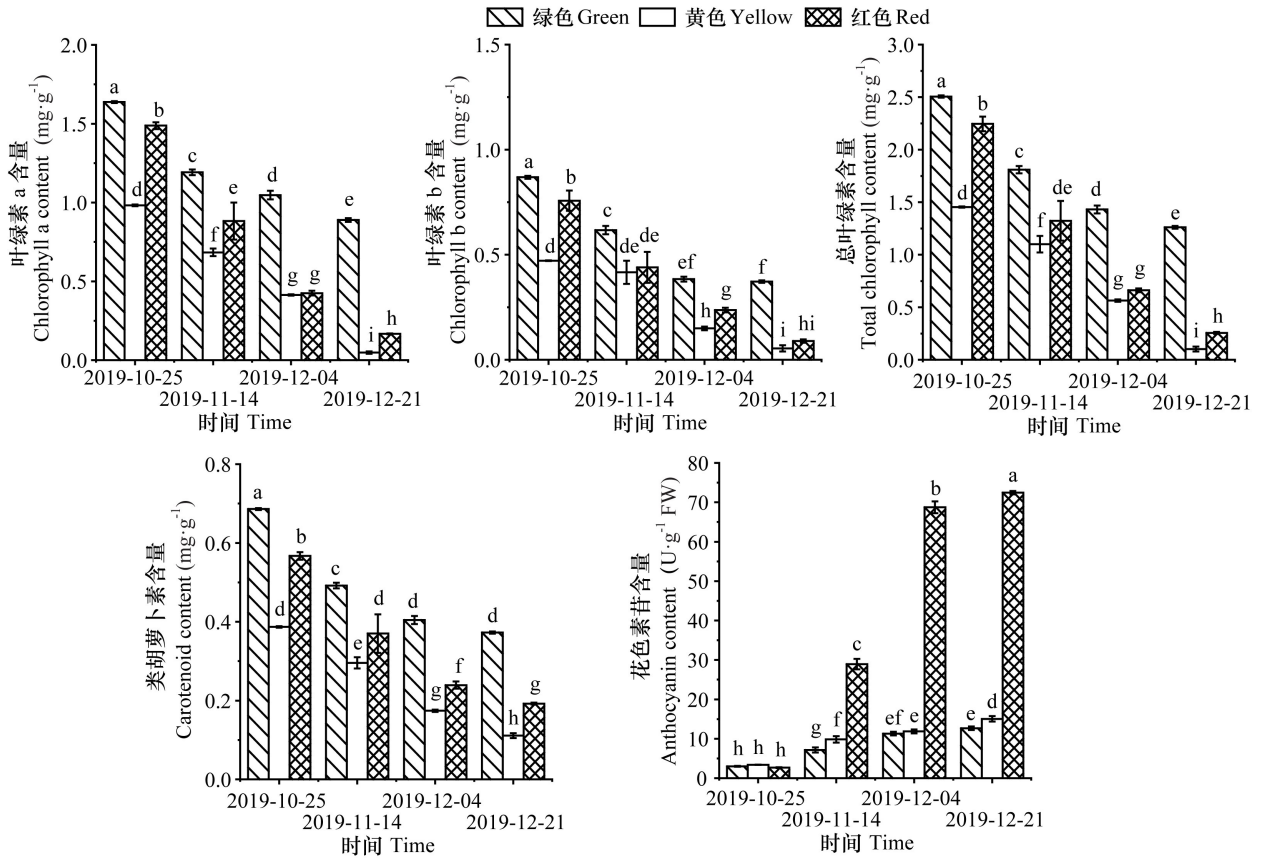


图 3 不同色彩单株叶片中色素含量的变化

Fig. 3 Changes of pigment contents in the leaves of different individual trees

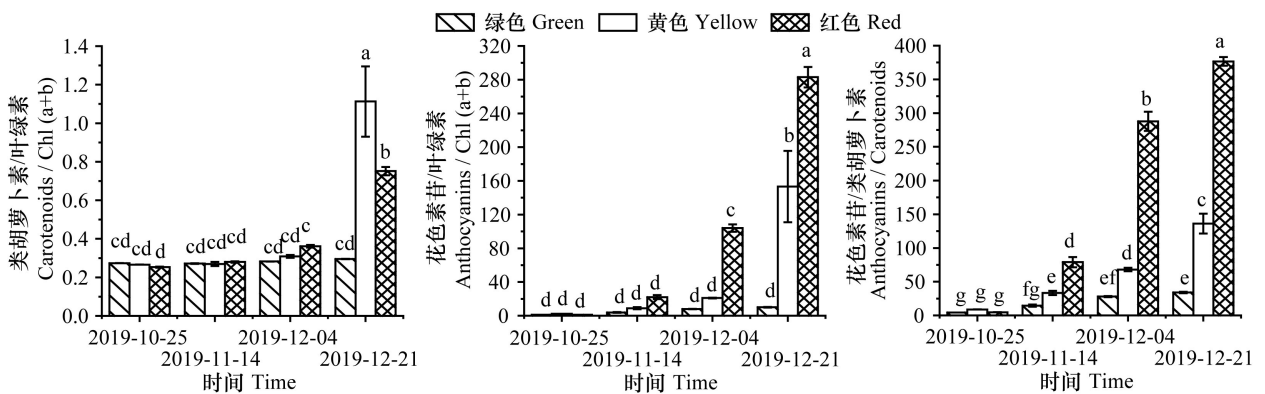


图 4 不同色彩单株叶片中色素含量比值分析

Fig. 4 Analysis of pigment ratio in the leaves of different individual trees

和可溶性蛋白质含量均偏低。在秋季变色期,3个色彩枫香单株叶片内可溶性糖含量均显著增加,黄色叶和红色叶单株可溶性糖含量在变色末期均显著下降。Pearson相关性分析显示,3个色彩枫

香叶片内可溶性糖含量、可溶性蛋白质含量与各色素含量相关性均不显著( $P>0.05$ ),说明叶片内可溶性糖含量、可溶性蛋白质总量的变化未对叶片内色素含量变化构成显著影响。

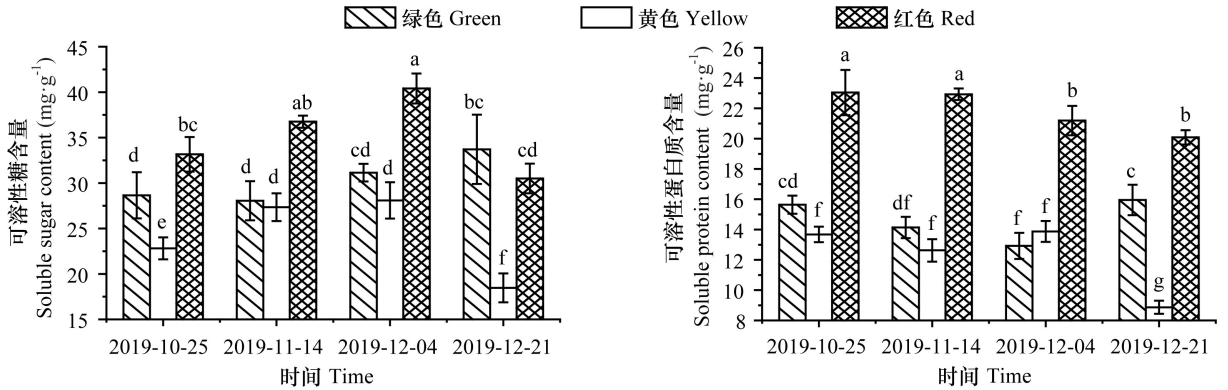


图 5 不同单株叶片中可溶性糖和可溶性蛋白质含量变化

Fig. 5 Changes of soluble sugar and protein contents in leaves of different individual trees

## 2.5 枫香秋季变色期叶色参数与色素含量及比例相关性分析

Pearson 相关性分析(表 1)显示,在 3 个色彩枫香单株中,叶色参数与叶片内色素含量及色素含量比值的相关性并不一致。绿色叶单株叶色参数与色素含量、色素含量比值均无显著相关性。 $L^*$  值在黄色叶单株中,与总叶绿素含量极显著负相关,与类胡萝卜素含量显著负相关,与花色素苷/类胡萝卜素比值极显著正相关,说明黄色叶单株叶片在叶绿素和类胡萝卜素的降解、花色素苷/类胡萝卜素比值升高的共同作用下变得更为明亮,以总叶绿素含量的下降和花色素苷/类胡萝卜素比值的升高效果最明显;在红色叶单株中, $L^*$  值与总叶绿素含量、类胡萝卜素含量显著负相关,与花色素苷含量极显著负相关,与花色素苷/类胡萝卜素比值显著负相关,其相关性与在黄色叶单株中完全相反,可能花色素苷含量大幅度上升对叶色亮度造成的影响已经远超其他色素造成的影响,使叶色变得暗沉。 $a^*$  值与黄色叶单株中叶片色素含量无显著相关性,与色素含量比值显著相关,主要受色素含量比值的影响;红色叶单株中正好相反, $a^*$  值与叶片色素含量显著相关,与色素比值无显著相关性,主要受色素含量的影响。 $b^*$  值在黄色叶单株中与总叶绿素含量极显著负相关,与类胡萝卜素含量显著负相关,与花色素苷/类胡萝卜素比值极显著正相关;在黄色叶单株中, $b^*$  值与总叶绿素含量显著正相关,与类胡萝卜素含量极显著正相关,与花色素苷含量极显著负相关,与色素含量比值无显著相关性。综上所述,不同色

彩叶色参数值与叶片色素含量和比值的相关性并不一致,黄色叶单株叶色参数受色素含量和色素比值共同影响,红色叶单株叶色参数主要受色素含量的影响。

## 3 讨论与结论

色素是植物叶片呈色的物质基础和根本原因,叶片中以叶绿素为主,类胡萝卜素和花色素苷含量较低时,叶片呈现绿色;当叶片中叶绿素大量降解,类胡萝卜素比例提高时,叶片呈现黄色;而叶片中叶绿素大量降解,花色素苷大量合成,花色素苷/叶绿素含量比值越大,叶片越红(潘丽芹等, 2019)。在本研究中,3 种色彩枫香叶片中叶绿素、类胡萝卜素随季相变化均出现不同程度的降解,而花色素苷则不断合成。其中,绿色叶单株在整个季相变化过程中,叶绿素含量和类胡萝卜素含量始终处于较高水平,花色素苷含量在变色末期只是变色前的 4.2 倍,合成量不大,植株叶片内色素比例在变色期基本保持稳定。保持叶片内叶绿素的高含量使叶片呈现绿色(楚爱香等, 2012),维持叶片内色素比例稳定是绿色叶枫香始终呈现绿色的关键因子。黄色叶单株在变色期与绿色叶单株的主要区别,在于叶绿素和类胡萝卜素含量极低,花色素苷含量在变色末期只是变色前的 4.4 倍,增幅与绿色叶单株相似;其叶色参数  $b^*$  值与叶绿素含量极显著负相关,与类胡萝卜素含量显著负相关,与花色素苷/类胡萝卜素比值极显著正相关,说明叶绿素、类胡萝卜素的大量降解和花色素

表 1 不同色彩单株叶色参数与色素含量及色素含量比值的相关性分析

Table 1 The correlation analysis of color parameters with pigment content and pigment proportion between different color leaves

类型 Type	叶色参数 Leaf color parameter	总叶绿素 Total chlorophyll	类胡萝卜素 Carotenoids	花色素苷 Anthocyanins	类胡萝卜素/ 总叶绿素 Carotenoids/ Total chlorophyll	花色素苷/ 总叶绿素 Anthocyanins/ Total chlorophyll	花色素苷/ 类胡萝卜素 Anthocyanins/ Carotenoids
绿色 Green	$L^*$ 值	-0.650	-0.689	0.535	0.118	0.447	0.470
	$a^*$ 值	0.654	0.701	-0.549	-0.018	-0.434	-0.468
	$b^*$ 值	-0.796	-0.831	0.703	0.249	0.612	0.638
黄色 Yellow	$L^*$ 值	-0.991 **	-0.967 *	0.913	0.882	0.909	0.995 **
	$a^*$ 值	-0.888	-0.825	0.775	0.989 *	0.995 **	0.963 *
	$b^*$ 值	-0.991 **	-0.967 *	0.907	0.875	0.903	0.992 **
红色 Red	$L^*$ 值	0.972 *	0.976 *	-0.999 **	-0.703	-0.799	-0.969 *
	$a^*$ 值	-0.992 **	-0.998 **	0.989 *	0.713	0.797	0.949
	$b^*$ 值	0.989 *	0.998 **	-0.979 *	-0.689	-0.773	-0.929

注: \* . 在 0.05 水平(双侧)上显著相关; \*\* . 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

Note: \* . Significant difference at 0.05 level; \*\* . Significant difference at 0.01 level.

苷/类胡萝卜素比值的升高是黄色叶呈色的关键因子。红色叶单株的叶绿素含量和类胡萝卜素含量在变色期均高于黄色叶单株,花色素苷含量在变色末期是变色前的 27.2 倍,叶片  $a^*$  值与叶绿素含量、类胡萝卜素含量极显著负相关,与花色素苷含量显著正相关,与色素含量比值无显著相关性,和大量红色叶植株的研究结果一致(潘丽芹等, 2019; 齐睿等, 2019),表明红色叶的呈色主要受叶绿素和类胡萝卜素降解、花色素苷大量合成影响,花色素苷含量对红色叶呈色起主导作用。

在变色期,红色叶片中具有较高的可溶性糖含量和可溶性蛋白含量(聂庆娟等, 2008)。本研究结果也表明,红色叶单株在变色期具有最高的可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量,黄色叶单株在变色期则呈现低可溶性糖含量和低可溶性蛋白质含量。枫香叶片变色期可溶性糖含量和可溶性蛋白质含量与叶片内色素含量相关性不显著,这与张敏等(2015)对榉树的研究、聂庆娟等(2008)对红栌的研究存在出入。可溶性糖和可溶性蛋白质对花色素苷合成的影响,有待进行更深入的探讨和研究。

## 参考文献:

CANG J, ZHAO HJ, 2013. Plant physiology experiment course [M]. Beijing: Higher Education Press: 57-59. [仓晶, 赵

会杰, 2013. 植物生理实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社: 57-59.]

CHALKER-SCOTT L, 1999. Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses [J]. Photochem & Photobiol, 70(1): 1-9.

CHU AX, ZHANG YZ, TIAN YF, 2012. Physiological changes of leaves of several fall color trees during color changing period in autumn and winter [J]. J NE For Univ, 40(11): 40-43. [楚爱香, 张要战, 田永芳, 2012. 几种秋色叶树种秋冬转色期叶色变化的生理特性 [J]. 东北林业大学学报, 40(11): 40-43.]

GE W, WANG XX, LI JY, et al., 2019. Regulatory mechanisms of leaf color change in *Acer pictum* subsp. mono [J]. Genome, 62(12): 793-805.

HU JZ, TIAN Q, LU XA, 2007. Relationship between changes of the pigments content and leaf color changing in *Liquidambar formosana* [J]. J NW A & F Univ (Nat Sci Ed), 35(10): 219-223. [胡敬志, 田旗, 鲁心安, 2007. 枫香叶片色素含量变化及其与叶色变化的关系 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 35(10): 219-223.]

JIANG WB, ZHUANG M, HAN HZ, et al., 2005. Progress on color emerging mechanism and photosynthetic characteristics of colored-leaf plants [J]. Acta Horti Sin, (2): 352-358. [姜卫兵, 庄猛, 韩浩章, 等, 2005. 彩叶植物呈色机理及光合特性研究进展 [J]. 园艺学报, (2): 352-358.]

LI L, 2016. Study on the formation and regulation of leaf color from *Acer rubrum* L. [D]. Chongqing: Southwest University. [李力, 2016. 北美红枫呈色生理机制及叶色调控 [D]. 重庆: 西南大学.]

LI XW, CHEN QX, ZHENG J, 2011. The change of pigment in

- autumn leaves of *Liquidambar formosana* and its relationship with environmental factors [J]. *Zhejiang Agric Sci*, (2): 279-282. [李效文, 陈秋夏, 郑坚, 2011. 枫香秋叶色素变化及与环境因子的关系 [J]. *浙江农业科学*, (2): 279-282.]
- LIANG L, JIANG JP, ZHANG TJ, et al., 2020. Physiological characteristics of *Davidia involucreta* bracts and leaves with different colors [J]. *Bull Bot Res*, 40(4): 1-9. [梁玲, 江洁蓓, 张腾驹, 等, 2020. 不同色彩珙桐苞片与叶片的生理特性研究 [J]. *植物研究*, 40(4): 1-9.]
- LIN CL, 2011. Research and popularization of the breeding and reproduction technology of new varieties of *Liquidambar formosana* [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University. [林昌礼, 2011. 枫香彩叶新品种选育及繁殖技术研究与推广 [D]. 杭州: 浙江农林大学.]
- LIU R, YUAN QQ, YUAN XP, et al., 2017. The relationship with change of pigment content in leaves of different *Liquidambar formosana* families and change of leaf color [J]. *S Chin For Sci*, 45(4): 46-49. [刘儒, 原勤勤, 袁小平, 等, 2017. 不同枫香家系叶片色素含量变化及其与叶色变化的关系 [J]. *南方林业科学*, 45(4): 46-49.]
- NIE QJ, SHI BS, MENG C, et al., 2008. The enzyme activities, pigment and inclusion contents in different leaves color of *Cotinus coggygia* 'Royal Purple' in autumn [J]. *Bull Bot Res*, 28(5): 599-602. [聂庆娟, 史宝胜, 孟朝, 等, 2008. 不同叶色红栎叶片中色素含量、酶活性及内含物差异的研究 [J]. *植物研究*, 28(5): 599-602.]
- PAN LQ, LI JY, WEI HZ, et al., 2019. Correlation analysis on pigment content and leaf color parameters of *Camellia japonica* cultivars [J]. *Mol Plant Breed*, 17(12): 1-8. [潘丽芹, 李纪元, 韦海忠, 等, 2019. 红叶山茶叶片色素含量与叶色参数的相关性分析 [J]. *分子植物育种*, 17(12): 1-8.]
- QI R, LI XH, SHI BY, et al., 2019. Analysis on the relationship of leaf color parameters and pigments contents in *Photinia × fraseri* dress with veraison stage [J]. *J Henan Agric Sci*, 48(4): 93-101. [齐睿, 李小红, 石博雨, 等, 2019. 红叶石楠转色期叶片色彩参数与色素含量的相关性分析 [J]. *河南农业科学*, 48(4): 93-101.]
- WANG JJ, ZHANG B, ZHANG WS, 2015. A new variety, *Liquidambar formosana* 'Jinjue' [J]. *Sci Silv Sin*, 51(10): 154. [王建军, 张波, 张望舒, 2015. 枫香新品种 '金珏' [J]. *林业科学*, 51(10): 154.]
- WANG L, SHIRAISHI A, HASHIMOTO F, et al., 2001. Analysis of petal anthocyanins to investigate flower coloration of *Zhongyuan* (chinese) and *Daikon Island* (japanese) tree peony cultivars [J]. *J Plant Res*, 114(1): 33-43.
- WU JM, CHEN BX, 2016. Selection of ornamental Use *Liquidambar formosana* and collection of germplasm resources [J]. *Anhui Agric Sci*, 44(31): 171-172. [巫健民, 陈步先, 2016. 观赏用枫香优树选择与种质资源收集 [J]. *安徽农业科学*, 44(31): 171-172.]
- WU SJ, GAO YH, FAHEEM AM, et al., 2020. Comparative proteomic analysis by itraq reveals that plastid pigment metabolism contributes to leaf color changes in tobacco (*Nicotiana tabacum*) during curing [J]. *Pubmed*, 21(7): 390-394.
- ZHANG KX, FAN PP, WANG JB, et al., 2019. Study on vegetation changes and climate factors in a karst region of Southwest China [J]. *Ecol Environ Sci*, 28(6): 1080-1091. [张凯选, 范鹏鹏, 王军邦, 等, 2019. 西南喀斯特地区植被变化及其与气候因子关系研究 [J]. *生态环境学报*, 28(6): 1080-1091.]
- ZHANG M, HUANG LB, ZHOU P, et al., 2015. Physiological and biochemical changes in *Zelkova serrata* leaves during leaf color transformation in autumn [J]. *Sci Silv Sin*, 51(8): 44-51. [张敏, 黄利斌, 周鹏, 等, 2015. 榉树秋季转色期叶色变化的生理生化 [J]. *林业科学*, 51(8): 44-51.]
- ZHANG SL, 2017. Preliminary study on leaf structure and physiological and biochemical characteristics of *Photinia fraseri* during leaf color change [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University. [张少露, 2017. 红叶石楠叶色变化过程中叶结构和生理特征研究 [D]. 雅安: 四川农业大学.]
- ZHONG YD, LUO MC, YUAN JQ, 2004. Development of for aesthetics and its application in forest landscape planning [J]. *J Cent S For Univ*, 24(4): 82-87. [钟永德, 罗明春, 袁建琼, 2004. 森林美学的发展及其在森林景观规划中的应用 [J]. *中南林学院学报*, 24(4): 82-87.]
- ZHOU WR, XIA WS, CHEN Z, et al., 2019. A new *Liquidambar formosana* cultivar 'Fulu Zifeng' [J]. *Acta Horti Sin*, 46(S2): 2922-2923. [周卫荣, 夏文胜, 陈竹, 等, 2019. 枫香新品种 '福禄紫枫' [J]. *园艺学报*, 46(S2): 2922-2923.]
- ZHU XH, YANG JJ, WEN DY, et al., 2019. Photo protective effects of anthocyanins in leaves of color-leaved poplar [J]. *SW Chin J Agric Sci*, 33(5): 958-965. [朱秀红, 杨金橘, 温道远, 等, 2020. 彩叶杨树叶片中花色素苷的光保护作用 [J]. *西南农业学报*, 33(5): 958-965.]

(责任编辑 何永艳)