

6 个紫薇品种叶片色彩变化及其与色素含量的相关性

邵雯雯¹, 何 钢^{2*}, 乔中全², 曾慧杰³, 蔡 能³, 石炳霖³

(1. 中南林业科技大学 生命科学与技术学院, 湖南 长沙 410004; 2. 湖南省林业科学院 林木无性系育种湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;
3. 长沙市木本花卉工程技术研究中心, 湖南 长沙 410004)

摘 要:探究 6 个紫薇品种不同试验阶段的叶片色素变化规律,以“紫精灵、红火箭、紫莹、赤红、丹红、玲珑红”6 个紫薇品种为实验材料,比较不同时期紫薇叶片的色彩参数 L^* 、 a^* 、 b^* 值以及叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素质量分数和花色素苷含量。结果表明,紫薇叶片明度(L^*)值变化不大,而红度(a^*)、黄度(b^*)值变化明显。‘紫莹’‘丹红’‘赤红’3 个紫叶紫薇品种的 a^* 显著降低($P < 0.05$),‘玲珑红’ a^* 值呈升高趋势。 b^* 值在绿叶紫薇品种中呈显著性升高($P < 0.05$),在紫叶紫薇品种中无显著性变化。随着试验阶段的变化,‘紫精灵’‘红火箭’‘玲珑红’绿叶紫薇品种叶片叶绿素含量(质量分数,下同)逐渐升高,花色素苷含量逐渐降低,并且叶绿素含量始终高于其他色素含量,‘紫莹’‘丹红’‘赤红’则相反。在叶片色彩参数与色素含量的相关性分析中结果表明:‘紫莹’‘丹红’‘赤红’的花色素苷含量与叶片 a^* 呈显著或极显著正相关,类胡萝卜素含量与叶片 b^* 呈显著正相关。

关键词:紫薇;叶绿素;花色素苷;叶色

中图分类号:S731.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)05-0104-07

Leaf Color Changes of Six *Lagerstroemia indica* Cultivars and Their Correlations with Pigment Content

SHAO Wen-wen¹, HE Gang^{2*}, QIAO Zhong-quan², ZENG Hui-jie³, CAI Neng³, SHI Bing-lin³

(1. College of Life Science & Biotechnology, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, Hunan, China;
2. Hunan Key Laboratory for Breeding of Clonally Propagated Forest Trees, Hunan Academy of Forestry, Changsha 410004, Hunan, China; 3. Changsha Woody Flower Engineering Technology Research Center, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: In order to understand the change regularities of leaf pigment in different growth stages, 6 cultivars of *Lagerstroemia indica* were taken as the research objects, including ‘Zi Jingling’, ‘Red Rocket’, ‘Zi Ying’, ‘Ebony Fire’, ‘Ebony Embers’, and ‘Ling Longhong’. The values of color parameters, such as L^* , a^* , b^* , the contents of chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids and anthocyanin were measured. The results showed that the leaf brightness (L^*) values of all the 6 cultivars of *L. indica* changed little, while a^* and b^* changed significantly. The a^* values of ‘Zi Ying’, ‘Ebony Embers’ and ‘Ebony Fire’ decreased significantly ($P < 0.05$) along with the development of growth stages, while the a^* value of cultivar “Ling Longhong” tended to increase. The b^* values increased significantly in the leaves of green-leaved cultivars ($P < 0.05$), but there was no significant change in purple-leaved cultivars. With the change of growth stage, the chlorophyll contents in the leaves of green-leaved cultivar ‘Zi Jingling’, ‘Red Rocket’ and ‘Ling Longhong’ gradually increased, anthocyanin content gradually decreased, and chlorophyll content was always higher than other pigment content, while cultivar ‘Zi Ying’, ‘Ebony Fire’, and ‘Ebony Embers’ were opposite. In the correlation

收稿日期:2021-07-30 修回日期:2021-11-27

基金项目:国家重点研发计划(2019YFD1001000)。

第一作者:邵雯雯。研究方向:生物工程。E-mail:952502171@qq.com

* 通信作者:何 钢,教授,硕士生导师。研究方向:生物化学与分子生物学。E-mail:hegang262@163.com

analysis between leaf color parameters and pigment contents showed that the anthocyanin contents of 'Zi Ying', 'Ebony Fire', and 'Ebony Embers' were significantly or extremely significantly and positively correlated with leaf a^* value, and the carotenoid contents were significantly and positively correlated with leaf b^* value.

Key words: *Lagerstroemia indica*; chlorophyll; anthocyanin; leaf color

紫薇 (*Lagerstroemia indica*) 是千屈菜科 (Lythraceae) 紫薇属 (*Lagerstroemia*) 落叶小乔木^[1], 具有花繁色艳、花色多变、花期长等特点, 紫薇花开在夏季少花的季节, 具有树姿优美、花色艳丽、花期长、抗污染等优点, 集形态美、色彩美和风格美于一身, 在园林绿化中应用广泛^[2], 研究表明, 紫薇叶片色素的种类、比值及分布决定了叶片的呈色^[3]。当前, 国内外关于紫薇的研究主要集中在育种、抗病性、药用价值等方面, 对叶色变化少有深入研究^[4-6], 仅查阅到王淑安等^[7]和王莹等^[8]关于紫薇叶色的变异机制相关研究报道, 宋倩等^[9]对3种美国紫薇的叶色变化研究以及乔东亚等^[10]光照对紫薇叶片的影响, 为紫薇优良彩叶品种选育及其园林栽培配置提供理论依据^[11], 针对紫薇叶片在生长中的叶色变化规律特征, 以及色彩参数与色素含量相关性研究并不多见。因此, 本研究通过‘紫精灵’ (*L. indica* ‘Zi Jingling’), ‘红火箭’ (*L. indica* ‘Red Rocket’), ‘紫莹’ (*L. indica* ‘Zi Ying’), ‘赤红’ (*L. indica* ‘Ebony Fire’), ‘丹红’ (*L. indica* ‘Ebony Embers’), ‘玲珑红’ (*L. indica* ‘Ling Longhong’) 6个湖南省试验林场的紫薇品种作为试验材料, 对其嫩芽、幼叶、新叶时期的叶片, 进行了色彩参数明度 (L^*)、红度 (a^*)、黄度 (b^*) 的测定和分析; 并测定每个时期叶片中叶绿素、类胡萝卜素和花色素苷的含量, 与其色彩参数进行相关性分析, 揭示色素含量对紫薇叶色变化的影响, 为提升紫薇景观价值的研究利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为湖南省林业科学院试验林场紫薇种质资源圃内 (28°07'5.83"N, 113°03'31.36"E) 的6个紫薇品种, 分别为‘紫精灵’、‘红火箭’、‘紫莹’、‘赤红’、‘丹红’、‘玲珑红’, 选取生长健壮、无虫害、长势相同、苗高50 cm左右的1年生扦插苗。

1.2 试验方法

采集新鲜的紫薇叶片, 3月20日首次采样测定, 以后每隔20 d测定一次, 采样时间为9:00, 随机选择树冠南向的健康叶片, 采后立即放入冰盒内带回实验室测定各指标, 每个指标的测定3次重复。

1.3 叶片颜色观测

擦净叶片表面, 在室内自然光下与 RHSCC (royal horticultural society colour chart, 英国皇家园艺学会比色卡) 进行颜色对比^[12], 待测样品对准色卡圆孔^[13], 记录与叶色相对应的色卡颜色。

1.4 仪器和试剂

主要仪器: 可见-紫外分光光度计 (型号: TU-1800SPC); pH计 (型号: Mettler Toledo FE20Five Easy); 匀浆机; 3nh分光测色仪 NS800, 试验所涉分析纯采购于 Sigma 公司。

1.5 测定指标

1.5.1 叶色参数测定 用3nh分光测色仪 NS800测定叶色。测量孔径分别为4 mm和8 mm, 室内操作以排除外界光源的干扰。测定叶片与叶脉上的4个点, 分别记录色彩参数明度 (L^*)、红度 (a^*)、黄度 (b^*)。

1.5.2 叶片光合色素测定 叶绿素含量的测定参照王莹等^[14]的方法。

1.5.3 花色素苷含量等测定 花色素苷含量的提取参照崔舜等^[11]方法制备和测定。

1.6 数据分析

用 Excel 2007 对原始数据进行初步整理后用统计软件 SPSS 21.0 进行相关性和显著性分析。

2 结果与分析

2.1 紫薇叶片颜色变化

观察图1可知, ‘紫精灵’和‘玲珑红’嫩芽时期分别呈现为黄绿色、灰绿色, ‘红火箭’在幼叶时期是由红色逐渐转变为绿色, 幼叶期为转色期, 3个紫叶品种在整个周期内大都呈现出暗灰紫色和深紫色。结合图表可知, 在同一生长周期内, 不同的紫薇品种间色彩参数差异显著。对6个紫薇品种叶片的色彩特性进行对比分析, 发现在生长周期内, 紫薇品种叶片明度 L^* 变化不明显, 故对 a^* 和 b^* 进行分析比较。在嫩芽时期, 紫叶品种和绿叶品种的紫薇表现出差异性, ‘紫精灵’、‘玲珑红’皆呈现出绿色, 而‘红火箭’为红色, 其 a^* 最大为8.7, ‘紫精灵’ a^* 仅次于‘红火箭’为8.43, 而‘玲珑红’在此时期的 a^* 最小, 为-2.37, 表明不同紫薇品种在同一时期具有个体差异性, 其中紫叶品种‘赤红’的 a^* 最小, ‘丹红’的

b^* 最小,表明 a^* 可作为紫薇叶色呈现的主要值, b^* 是紫薇叶色变化的辅助值。在幼叶时期,‘紫精灵’、‘红火箭’、‘玲珑红’3 个品种叶片 a^* 在 $-4.91 \sim 0.51$, b^* 在 $7.02 \sim 9.81$,且随着试验阶段的变化, b^* 远远大于 a^* ,即叶片的红色渐退,呈现黄绿色。‘紫莹’、‘丹红’、‘赤红’3 个品种的 a^* 在 $0.79 \sim 3.1$, b^* 在 $2.01 \sim 4.37$,表明紫叶品种的 a^* 和 b^* 小于绿叶品种,则其叶片色彩鲜艳程度较低,其叶片以深紫色为主。在新叶时期,‘紫精灵’、‘红火箭’、‘玲珑红’3 个品种红绿色相 a^* 在 $-6.76 \sim -3.75$,黄绿色相 b^* 在 $8.24 \sim 21.24$,即 a^* 较低, b^* 较高,叶片呈现绿色。‘紫莹’、‘丹红’、‘赤红’3 个品种 a^* 在 $0.47 \sim 1$, b^* 在 $0.43 \sim 1.28$,即 a^* 和 b^* 越低,叶片色彩鲜艳程度越低。

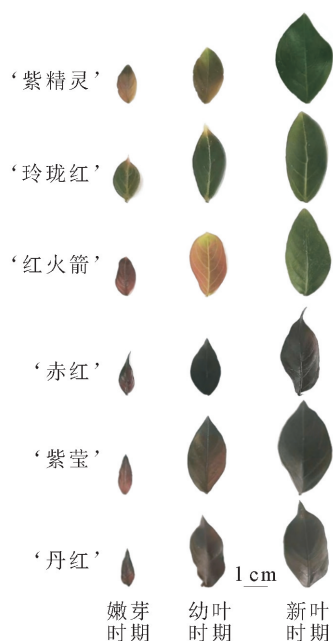


图 1 6 个紫薇品种叶片发育过程中叶片颜色的变化

Fig. 1 Changes of leaf color during leaf development of six *Lagerstroemia indica* cultivars

表 1 6 个紫薇品种的 RHSCC 色卡测量值

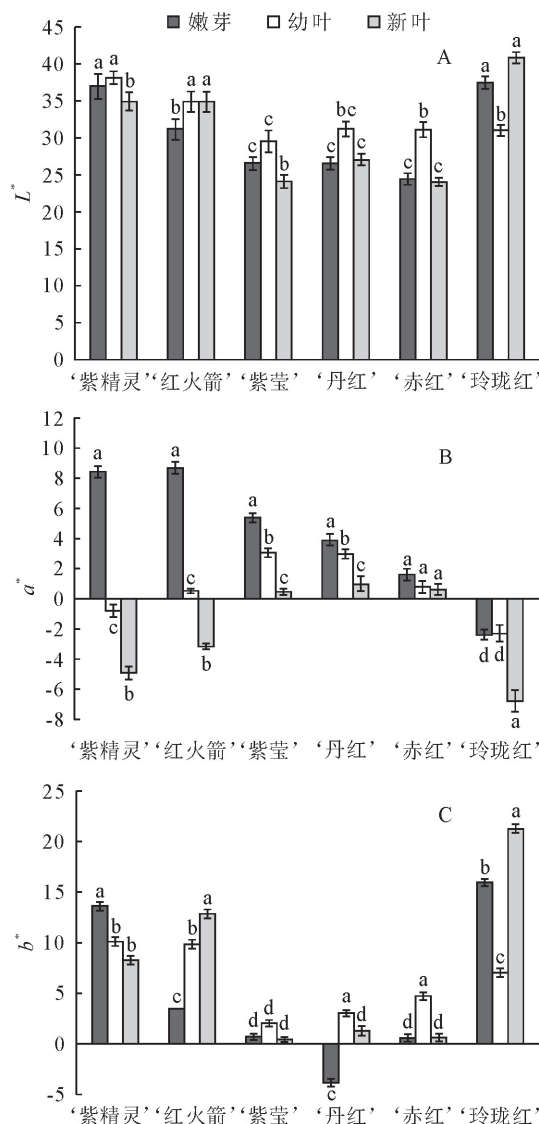
Table 1 RHSCC color card measurements of 6 *L. indica* cultivars

品种	时期		
	嫩芽	幼叶	新叶
‘紫精灵’	147B	137B	N137B
‘红火箭’	183A	60AA-147A	137A
‘紫莹’	187A	N186B	N186B
‘丹红’	187A	N186B	N186B
‘玲珑红’	139C	137A	137A

2.2 不同时期叶色参数规律变化

从图 2A 中可以看出,随着试验阶段的变化,不同紫薇叶片的明度变化幅度不大,表现较为稳定,其

中‘紫精灵’、‘红火箭’明度变化幅度较小,稳定性较好,而‘紫莹’、‘丹红’、‘赤红’3 个品种均表现为幼叶时期明度增加,新叶时期明度呈显著降低趋势,‘玲珑红’明度显著增加。



注:图 2A 表示 L^* 变化,图 2B 表示 a^* 变化,图 2C 表示 b^* 变化。短栅上不同小写字母表示同一品种于不同发育时期在 $P < 0.05$ 水平差异有统计学意义,下同。

图 2 不同发育时期紫薇叶片色彩参数分析

Fig. 2 Analysis of leaf color parameters of 6 *L. indica* cultivar at different development stages

由图 2B 可知,6 个紫薇品种叶片的 a^* 差异明显,且在各自的生长周期中,红绿色相 a^* 均呈现下降的趋势,其中在幼芽时期‘紫精灵’、‘红火箭’、‘玲珑红’3 个绿叶品种的 a^* 均比紫叶品种紫薇高,而随着叶片的生长,紫精灵’、‘红火箭’的 a^* 随着试验阶段的变化大幅度降低,并于新叶时期表现为负值,即叶片的红色程度大幅度下降,绿色程度显著增强,表明在生长过程中由嫩芽时期的红色转变为新叶时期的绿色,‘紫莹’、‘丹红’、‘赤红’3 个紫叶品种的 a^* 变

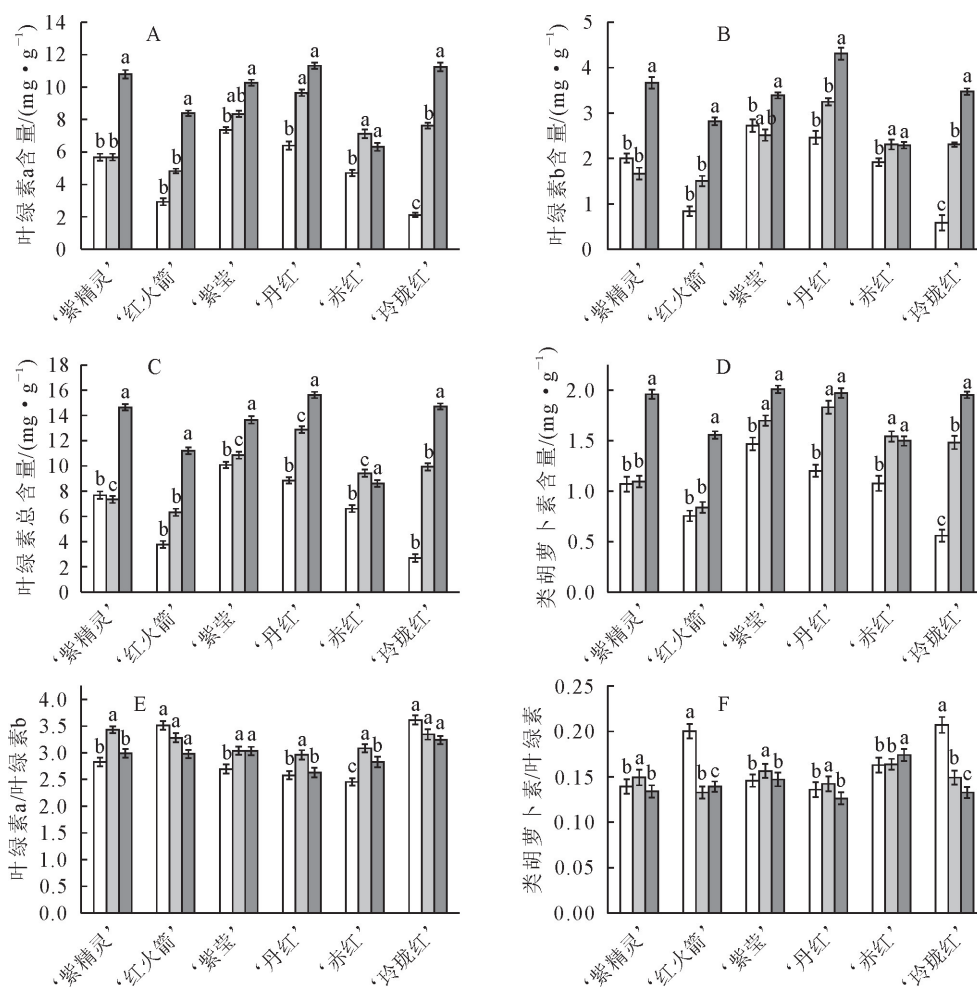
化幅度不明显,且 a^* 均为正值,说明其红色程度强于绿叶品种由图2C可以看出,6个紫薇品种除了‘紫莹’和‘赤红’以外其余皆表现为显著性差异,不同品种的 b^* 差异变化各不相同,‘紫精灵’‘红火箭’‘玲珑红’ b^* 3个时期内均为正值,且远远高于紫叶品种,表明其绿色程度强于紫叶品种。

2.3 6个紫薇光合色素含量(质量分数,下同)规律变化分析

不同紫薇品种的叶片不同生长时期的叶绿素含量不同。6个品种在嫩芽和幼叶时期色素含量变化明显,新叶时期呈现大幅度的增加,其中3个绿叶品种的叶绿素含量上升幅度最大。由图3看出叶绿素含量与生长时期呈现显著正相关。叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素色素含量变化总体呈上升趋势。

不同的紫薇叶片中叶绿素和类胡萝卜素含量均逐步上升,受试单株叶绿素含量和类胡萝卜素含量均表现为紫叶品种>绿叶品种。

幼叶时期,绿叶品种‘紫精灵’叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量和类胡萝卜素含量分别上升了0.17%、-20.61%、-4.67%和2.37%,紫叶品种丹红叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量和类胡萝卜素含量分别上升了33.67%、24.23%、31.31%和34.42%。在新叶时期,绿叶品种‘紫精灵’叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量和类胡萝卜素含量分别上升了46.39%、54.77%、49.87%和44.12%,紫叶品种‘丹红’叶绿素a、叶绿素b、叶绿素总含量和类胡萝卜素含量分别上升了14.8%、24.6%、17.5%和7.26%。



注:图3A为叶绿素a含量变化,图3B为叶绿素b含量变化,图3C为叶绿素总含量变化,图3D为类胡萝卜素含量变化,图3E为类胡萝卜素与叶绿素含量比值,图3F为叶绿素a与叶绿素b含量比值。

图3 为6个紫薇品种在不同时期下的叶绿素色素含量和类胡萝卜素含量动态及比值变化

Fig. 3 Dynamic changes of chlorophyll pigment contents and carotenoid contents of 6 *L. indica* cultivars in different developmental stages

综合比较叶片色素含量变化及其规律,在整个试验阶段,绿叶品种的叶绿素和类胡萝卜含量上升幅度最大,紫叶品种叶绿素和类胡萝卜含量上升幅

度最小。因此,对于不同紫薇品种来说,叶色并不是由叶绿素含量决定的,而是由类胡萝卜素、叶绿素a和叶绿素b共同决定。

‘紫精灵’‘丹红’‘赤红’的比值随着时间的推移变化趋势相同,呈现为先升高后降低,Chla/Chlb 值除赤红品种表现差异显著以外,其余品种均差异不明显。‘红火箭’和‘玲珑红’的类胡萝卜素和花色素苷含量比值均呈明显的差异变化,在嫩芽时期达到最高值,分别是幼叶时期的 1.87 倍和 1.37 倍,具有显著性差异。相对来说,绿叶品种较紫叶品种的比值变化波动明显,紫叶品种相对表现平稳。其中‘紫精灵’‘玲珑红’随着时间的变化,类胡萝卜素与叶绿素比值显著降低。表明随着叶片的生长,叶绿素对叶色的调控起到主要作用,而类胡萝卜素起辅助性作用。

2.4 6 个紫薇品种叶片花色素苷含量分析

6 个品种紫薇的花色素苷含量随着时间的变化而增加,呈现先下降再上升的趋势,‘紫精灵’‘红火箭’‘玲珑红’的花色素苷含量未发生显著性变化,表明花色素苷在调控紫薇叶色中起重要的作用。紫叶品种的花色素苷含量呈显著性增加,且‘赤红’的花色素苷含量最高,其次是‘丹红’和‘紫莹’。在新叶时期,‘紫莹’‘丹红’‘赤红’分别增加了 21.04%、42.37%和 63.56%,而‘紫精灵’‘红火箭’‘玲珑红’分别增加了-11.88%、15.68%和 27.49%,整体而言紫叶品种的花色素苷含量大幅度高于绿叶品种。

综合分析比较 6 个品种紫薇的色素苷含量变化,绿叶品种的色素苷增量幅度较高,而紫叶品种的花色素苷含量增长幅度较高,并具有显著性差异,表明花色素苷含量在紫薇叶片颜色变化中产生很大的影响。

2.5 6 个紫薇品种色彩参数与色素含量的相关性分析

为研究紫薇叶片色素含量对其叶片颜色的影响,将 6 个紫薇品种叶片色彩参数和叶绿素含量、花色素苷含量、类胡萝卜素含量进行相关性分析,从表可以看出‘紫精灵’‘红火箭’‘玲珑红’总叶绿素含量与 a^* 负相关,而其余 3 个紫叶表现相反,‘丹红’叶绿素 a 含量与 a^* 显著正相关,表明紫薇叶片的叶绿素含量对其红绿色相呈现具有正向作用。叶片的类胡萝卜素与 a^* 在紫叶与绿叶紫薇中表现不同,在绿叶紫薇中,类胡萝卜素含量与 a^* 呈现正相关,而紫叶紫薇中则为负相关,由此表明,叶绿素和类胡萝卜素同时对叶片的颜色产生了影响,并且这两者起到的作用相反。绿叶紫薇花色素苷含量对 a^* 呈显著负相关;其中‘红火箭’的花色素苷含量与 a^* 呈现显著负相关($P < 0.05$),‘紫精灵’的花色素苷含量与 a^* 呈极显著负相关($P < 0.01$),紫叶紫薇的花色素苷含量与 a^* 呈现为正相关;‘丹红’与其为显著正相

关,而‘赤红’为极显著相关。由表可以看出,3 个绿叶紫薇品种的叶绿素含量和类胡萝卜素含量与其 b^* 呈现显著负相关或极显著负相关;‘紫精灵’的总叶绿素含量与 b^* 为显著负相关,‘红火箭’则为极显著负相关。色彩明亮程度对紫叶紫薇品种影响较大,从表得出,叶绿素含量、类胡萝卜素含量在紫叶紫薇品种均表现为显著正相关。综上所述,6 个紫薇品种的叶片颜色受叶绿素、花色素苷、类胡萝卜素共同影响。

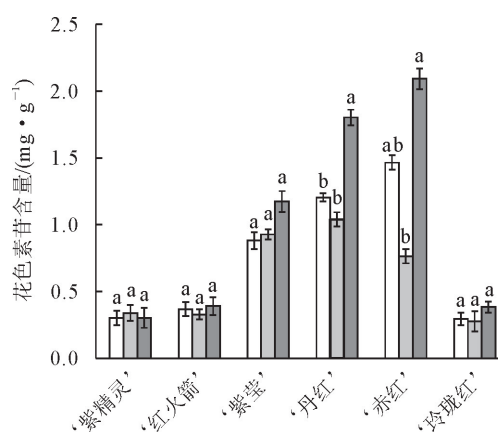


图 4 为 6 个紫薇品种在不同时期下的花色素苷含量动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of anthocyanin contents of 6 *L. indica* cultivar in different developmental stages

3 结论与讨论

3.1 结论

研究表明不同品种的紫薇叶色,其色素含量及色彩参数也不相同,杨小鑫^[35]等的研究结果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,其中 3 个绿叶紫薇品种‘紫精灵’‘玲珑红’‘红火箭’叶绿素的合成主要参与调控叶色的变化,类胡萝卜素起辅助作用,而在紫叶品种的紫薇则相反。对紫薇叶色参数与叶片色素含量相关性分析中发现,花色素苷含量和 a^* 呈显著正相关,紫叶紫薇的呈色要受叶绿素和类胡萝卜素、花色素苷大量合成影响,花色素苷含量对紫叶呈色起主导作用。

3.2 讨论

3.2.1 6 个紫薇品种的叶片色素含量生长变化特征 我国彩叶植物资源丰富,种类繁多,在园林景观的诸多构成要素中,植物占据着重要地位^[15]。彩叶植物具有鲜艳动人的色彩^[17],园林应用最多的是常色叶植物^[16],园林植物的色彩在园林中是第一性的^[18],彩叶植物呈现彩色的直接原因就是叶片中的色素种类和比例发生了变化^[19],叶色变化的直接原因是叶绿素、类胡萝卜素和花色素苷含量的时空分

布变化^[20],植物叶片色素组成是决定颜色的重要因素^[21],不同彩叶植物表达机理可能有所不同^[22],本研究采用了 3 个生长时期 6 个紫薇品种并测定了叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和花色素苷等色素含量,研究发现其中绿叶品种从幼叶至新叶转变过程中,叶绿素含量显著增加,测定期间 6 个紫薇品种叶绿素 a、叶绿素 b 与总叶绿素含量的动态变化趋势相似,均呈现上升的趋势,这与崔舜等^[11]对紫薇叶色变化研究结果一致。叶片中色素含量的变化是造成植物叶片颜色差异的直接原因^[23],类胡萝卜素在绿叶和紫叶品种中的表达具有显著性差异。叶绿素不能直接决定叶片颜色变化^[24],类胡萝卜素在调控紫薇叶片颜色的变化中也起重要的作用,而在花色素

苷含量的分析比较中^[25],紫叶品种和绿叶品种表现出显著性差异,李云飞^[26]在彩叶植物组织的解剖研究中发现,花色素苷在植物细胞中的分布也是造成叶片呈色差异的因素之一^[27],叶色是多种因素综合影响的结果^[28],这与冯露等^[29]研究结果一致,因此,花色素苷、类胡萝卜素、叶绿素的合成与紫薇叶片颜色变化有重要关系,叶绿素决定紫薇叶片基调色^[30],而类胡萝卜素和花色素苷是调控叶片由绿色转变成紫色的重要因素,彩叶植物的色彩变化受色素含量影响,齐睿等^[31]对红叶石楠叶色转变的研究表明叶绿素含量占主导,叶片始终呈现出绿色,如果非绿色色素含量发生变化,引起了色素含量比例的变化,则会呈现出五彩斑斓的叶色,与本研究结果相似。

表 2 紫薇叶片色彩参数与色素含量变化的相关性

Table 2 Correlation between color parameters and pigment contents of 6 *L. indica* leaves

品种	叶色参数	叶绿素 a	叶绿素 b	总叶绿素	类胡萝卜素	花色素苷
‘紫精灵’	<i>L</i> *	-0.977	-0.977	-0.994	-0.95	-0.812
	<i>a</i> *	0.616	0.716	0.638	0.783	-0.041 *
	<i>b</i> *	-0.964	-0.92	-0.956 *	-0.876	-0.907
‘红火箭’	<i>L</i> *	-0.987	-0.999 *	-0.994	-0.962	0.999 *
	<i>a</i> *	0.409	0.594	0.46	0.301	-0.578 * *
	<i>b</i> *	-1 *	-0.971	-0.997 * *	-0.996 * *	0.975
‘紫莹’	<i>L</i> *	0.95	0.94	0.948	0.991	-0.727
	<i>a</i> *	-0.263	-0.232	-0.255	-0.435	0.173
	<i>b</i> *	0.992	0.987	0.991	0.998 *	-0.842
‘丹红’	<i>L</i> *	0.584	0.921	0.267	0.939	-0.023
	<i>a</i> *	0.999 *	0.181	0.951	-0.804	0.847 *
	<i>b</i> *	0.421	-0.977	0.082	0.858	0.164
‘赤红’	<i>L</i> *	0.134	0.197	0.063	-0.01	-0.543
	<i>a</i> *	0.754	0.927	0.799	0.84	1 * *
	<i>b</i> *	0.317	-0.01	0.248	0.177	-0.376
‘玲珑红’	<i>L</i> *	-0.68	-0.53	-0.648	-0.738	1 * *
	<i>a</i> *	-0.417	-0.279	-0.279	0.158	-0.554
	<i>b</i> *	-0.679	-0.779	-0.779	-0.851	0.982

注: * 表示在 $P<0.05$ 水平显著相关; * * 表示在 $P<0.01$ 水平极显著相关。

3.2.2 6 个紫薇品种的叶色参数与叶色色素含量相关关系 研究表明,彩色植物叶色参数与色素种类及含量存在相关关系,但不同植物的叶色参数与其含量变化表现不相同。在本研究中,3 个绿叶紫薇和 3 个紫叶紫薇的叶片色素含量变化与 L^* 、 a^* 、 b^* 呈现出一定的相关性。其中紫叶紫薇的 a^* 与花色素苷含量呈正相关,表明花色素苷含量越高, a^* 越大,与韩文学等^[30]对海棠的叶片色彩变化和朱书香等^[27]对紫叶李、紫叶矮樱、黑杆樱李和美人梅 4 种彩叶植物叶色和色素的关系研究结果相似。新叶时期,紫叶紫薇品种的光合色素含量均比其高, a^* 中的紫叶紫薇品种均比绿叶紫薇品种高,而 b^* 则相反。因此,光合色素含量越高, a^* 则越高,则叶片色相偏紫,反之 b^* 则越高,叶片色相则偏绿。

3.2.3 6 个紫薇品种的色彩变化特征 本研究基于量化的色彩参数对 6 个紫薇品种叶色进行发现:随着叶片的生长,‘紫精灵’‘玲珑红’从嫩芽时期至新叶时期均为绿色,‘紫莹’‘丹红’‘赤红’嫩芽时期至新叶时期均为紫色^[24,32],‘红火箭’则是嫩芽时期至新叶时期由红变绿的过程,说明不同种紫薇存在差异,这与崔舜等^[11]、王珂等^[33]研究结果相似,对彩叶植物的良种选育具有重要意义^[34]。

参考文献:

[1] 王敏,宋平,任翔翔,等.紫薇资源与育种研究进展[J].山东林业科技,2008(2):66-68.
WANG M,SONG P,REN X X,et al. Recent advances in *Lagerstroemia indica* resources and breeding[J]. Journal of Shandong Forestry Science and Technology,2008(2):66-68. (in Chinese)

- [2] 许佳玉,景德珍,周春华. 紫薇在园林绿化中的应用[J]. 农业开发与装备,2020(9):221-222.
- [3] 楚爱香,张要战,王萌萌. 四种槭树属(*Acer*)植物秋色叶变化与色素含量和可溶性糖的关系[J]. 江西农业大学学报,2013,35(1):108-111,137.
- [4] 蔡明,王晓玉,张启翔,等. 紫薇品种与尾叶紫薇种间杂交亲和性研究[J]. 西北植物学报,2010,30(4):697-701.
CAI M, WANG X Y, ZHANG Q X, *et al.* Compatibility of interspecific crosses between *Lagerstroemia indica* cultivars and *Lagerstroemia caudata*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(4): 697-701. (in Chinese)
- [5] 顾翠花,包志毅,王守先,等. 南紫薇、福建紫薇和 37 个栽培品种亲缘关系的 AFLP 分析[J]. 分子植物育种,2010,8(4):730-735.
GU C H, BAO Z Y, WANG S X, *et al.* AFLP Analysis on the Genetic relationship of *Lagerstroemia subcostata*, *Lagerstroemia limii* and 37 Cultivated Varieties[J]. Molecular Plant Breeding, 2010, 8(4): 730-735. (in Chinese)
- [6] 唐婉,胡杏,徐婉,等. 几种紫薇属植物的抗寒性评价[J]. 西北农业学报,2012,21(9):121-126.
TANG W, HU X, XU W, *et al.* Assessing the Cold resistance of several crape myrtle (*Lagerstroemia* L.) species and cultivars[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2012, 21(9): 121-126. (in Chinese)
- [7] 王淑安,王鹏,张振宇,等. 紫薇叶片转录组分析及叶绿素和类胡萝卜素等途径基因的鉴定[J]. 分子植物育种,2016,14(5):1059-1066.
WANG S A, WANG P, ZHANG Z Y, *et al.* De novo Sequencing and Characterization of Genes Involved in Chlorophyll Metabolism and Carotenoid Metabolism in *Lagerstroemia indica*[J]. Molecular Plant Breeding, 2016, 14(5): 1059-1066. (in Chinese)
- [8] 王莹,李玉娟,李敏,等. 紫叶紫薇新品系叶色变化转录组分析[J]. 江苏农业学报,2018,34(5):1128-1137.
- [9] 宋倩,黎榕,刘小平,等. 紫薇叶片色素含量变化与叶色转变的关系[J]. 南方林业科学,2017,45(3):13-15,48.
- [10] 乔东亚,王鹏,王淑安,等. 紫薇金叶品种金幌叶色变化响应高光照的生理特性[J]. 江苏农业学报,2020,36(1):180-186.
- [11] 崔舜,邱国金,吴茜,等. 彩叶紫薇新品种红火球与仓山 1 号的叶色及生理变化特性[J]. 贵州农业科学,2020,48(9):16-21.
- [12] 沈星诚,周婷,范俊俊,等. 日本红枫春季叶片色彩评价[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2020,44(6):213-220.
SHEN X C, ZHOU T, FAN J J, *et al.* Leaf color evaluation of Japanese Red Maple in spring[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2020, 44(6): 213-220. (in Chinese)
- [13] 郑清冬,汪艳,王艺,等. 建兰萼片花色成分初步分析[J]. 热带作物学报,2021,42(1):1-11.
ZHENG Q D, WANG Y, WANG Y, *et al.* Preliminary Analysis of anthocyanidins in Sepals of *Cymbidium chinensis*[J]. Journal of Tropical Crops, 2021, 42(1): 1-11. (in Chinese)
- [14] 王莹,李敏,谈峰,等. 紫叶紫薇新品系叶色变化理化因素研究[J]. 江苏农业科学,2018,46(24):150-153.
- [15] 王永格,卜燕华,舒健骅,等. 光照强度对‘丽红’元宝枫秋季叶色变化的影响[J]. 西北林学院学报,2015,30(2):70-76.
WANG Y G, BU Y H, SHU J H, *et al.* Effect of light intensity on leaf color change of ‘Lihong’ yuanbao maple in Autumn[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(2): 70-76. (in Chinese)
- [16] 李团结,李淑娟,杨玉惠,等. 关中地区春季色叶植物观赏性评价[J]. 西北林学院学报,2014,29(6):255-259.
LI T J, LI S J, YANG Y H, *et al.* Evaluation on Ornamental Values of Spring Color-leaved Plants in Guanzhong Area[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(6): 255-259. (in Chinese)
- [17] 陈荣顺,蔡梅华. 彩叶植物在园林绿化中的应用分析[J]. 居舍,2021(8):110-111,131.
- [18] 杨善云. 春色叶树种资源的观赏性状综合评价与应用研究[J]. 西北林学院学报,2014,29(3):231-235.
YANG S Y. Prioritizing of ornamental characters and application on the resources of spring color-leaved trees[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 231-235. (in Chinese)
- [19] 姜卫兵,庄猛,韩浩章,等. 彩叶植物呈色机理及光合特性研究进展[J]. 园艺学报,2005,32(2):352-358.
JIANG W B, ZHUANG M, HAN H Z, *et al.* Progress on color emerging mechanism and photosynthetic characteristics of colored-leaf plants[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2005, 32(2): 352-358. (in Chinese)
- [20] 王玥,裴顺祥,孙敬爽,等. 2 种刺柏属彩色树叶色参数与色素变化[J]. 浙江农林大学学报,2021,38(1):138-146.
- [21] 张平. 几种常见彩叶植物的色素组成与叶色关系的研究[J]. 山东林业科技,2008(3):14-16.
- [22] 徐恩凯,田国行,秦佩. 彩叶植物在郑州地区的种类及应用调查[J]. 西北林学院学报,2010,25(1):191-197.
XU E K, TIAN G H, QIN P. Investigation on species and application of color-leaved plants in Zhengzhou[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(1): 191-197. (in Chinese)
- [23] FATINI M Y, SYAFAWATI Y J, NORMANIZA O, *et al.* Shading effects on leaf gas exchange, leaf pigments and secondary metabolites of polygonum minus huds., an Aromatic medicinal herb[J]. Plants, 2021, 10(3): 608. (in Chinese)
- [24] 吕运舟,董筱昀,杨小鑫,等. 黄山栎树新品种‘金焰彩栎’叶片呈色的生理特性及影响因子分析[J]. 植物资源与环境学报,2020,29(6):51-56.
- [25] ZHANG F, WAN X, ZHENG Y, *et al.* Physiological and related anthocyanin biosynthesis genes responses induced by cadmium stress in a new colored-leaf plant “Quanhong Poplar”[J]. Agroforestry Systems, 2014, 88(2): 343-355.
- [26] 李云飞. 土壤干旱胁迫对李属彩叶植物抗旱生理及叶色的影响[D]. 石家庄:河北农业大学,2008.
- [27] 朱书香,杨建民,王中华,等. 4 种李属彩叶植物色素含量与叶色参数的关系[J]. 西北植物学报,2009,29(8):1663-1669.
ZHU S X, YANG J M, WANG Z H, *et al.* Relationship between pigment contents and leaf color parameters of four leaf-colored species of *Prunus*[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2009, 29(8): 1663-1669. (in Chinese)

- [9] SPRIBILLE T, TUOVINEN V, RESL P, *et al.* Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens[J]. *Science*, 2016, 353(6298): 488-492.
- [10] CRESPO A, KAUFF F, DIVAKAR P K, *et al.* Phylogenetic generic classification of parmelioid lichens (Parmeliaceae, Ascomycota) based on molecular, morphological and chemical evidence[J]. *Taxonomy*, 2010, 59(6): 1735-1753.
- [11] PRINTZEN C. Lichen systematics: the role of morphological and molecular data to reconstruct phylogenetic relationships [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 233-275.
- [12] KELLY L J, HOLLINGSWORTH P M, COPPINS B J, *et al.* DNA barcoding of lichenized fungi demonstrates high identification success in a floristic context[J]. *New Phytologist*, 2011, 191(1): 288-300.
- [13] TRUONG C, DIVAKAR P K, YAHR R, *et al.* Testing the use of ITS rDNA and protein-coding genes in the generic and species delimitation of the lichen genus *Usnea* (Parmeliaceae, Ascomycota) [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2013, 68(2): 357-372.
- [14] 彭锋, 边静, 彭湃, 等. 松萝属地衣植物的研究进展[J]. *林产化学与工业*, 2012, 32(1): 111-118.
- [15] 苏印泉, 王海宏, 马养民, 等. 西藏长松萝浸提物抑菌作用研究[J]. *西北林学院学报*, 2006(5): 154-155, 159.
- SU Y Q, WANG H H, MA Y M, *et al.* Bacteriostasis of *Usnea longissima* extracts of Tibet[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2006(5): 154-155, 159. (in Chinese)
- [16] 杨东升, 苏印泉, 彭锋, 等. 几种松萝中松萝酸含量及提取物清除 DPPH 自由基能力测定[J]. *西北林学院学报*, 2007, 22(5): 135-138.
- YANG D S, SU Y Q, PENG F, *et al.* Measurement on content of usnic acid in several *Usnea* and the activity of the extractions scavenging DPPH free radical[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2007, 22(5): 135-138. (in Chinese)
- [17] 孙长霞, 苏印泉, 张柏林. 不同产地松萝中多糖的分子量及活性研究[J]. *西北林学院学报*, 2014, 29(1): 100-104.
- SUN C X, SU Y Q, ZHANG B L. Studies on the molecular weight distribution and biological activities of polysaccharide of *Usnea* from different locations[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2014, 29(1): 100-104. (in Chinese)
- [18] BRODO I M, SHARNOFF S D, SHARNOFF S. Lichen of north American[M]. New Haven and London: Yale University Press, 2001: 709-726.
- [19] 李博, 闫焱激, 石瑛. 历山国家级自然保护区地衣多样性及区系研究[J]. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2021, 41(2): 83-88.
- [20] 文雪梅, 阿地里江·阿不都拉, 热衣木·马木提, 等. 新疆北部松萝属地衣生态分布与地理区系成分分析[J]. *广西植物*, 2010, 30(04): 478-483.
- [21] 李博, 闫焱激, 石瑛. 中国石蕊科地衣多样性与区系研究[J]. *植物科学学报*, 2021, 39(1): 14-21.
- LI B, YAN T W, SHI Y. Species diversity and floristic elements of the lichen family Cladoniaceae in China[J]. *Plant Science Journal*, 2021, 39(1): 14-21. (in Chinese)

(上接第 110 页)

- [28] 刘桂林, 杜鸿云, 王艳, 等. 美国红栌叶片呈色差异的研究[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(4): 42-44, 51.
- LIU G L, DU H Y, WANG Y, *et al.* Comparison of physiological characteristic between the leaves with different colors of *Cotinus coggygria* 'Royal Purple'[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2008, 23(4): 42-44, 51. (in Chinese)
- [29] 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.
- FENG L, WU J Y, JU Y Q, *et al.* Study on Color Physiology and photosynthetic Characteristics of Crape Myrtle[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(12): 93-101. (in Chinese)
- [30] 韩文学, 江皓, 卞健, 等. 10 个观赏海棠品种叶片春季色彩变化及其与色素含量的相关性[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2020, 46(5): 562-570.
- HAN W X, JIANG H, BIAN J, *et al.* Leaf color variation and its correlation with pigment content of 10 ornamental begonia cultivars in spring[J]. *Journal of Zhejiang University Agriculture and Life Sciences*, 2020, 46(5): 562-570. (in Chinese)
- [31] 齐睿, 李小红, 石博雨, 等. 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*, 2019, 48(4): 93-101.
- [32] 杨秀莲, 华雅洁, 卢辰艳, 等. 海州常山花萼转色期生理变化研究[J]. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2019, 47(4): 58-64.
- YANG X L, HUA Y J, LU C Y, *et al.* Study on physiological changes of calyx during color transition in Changshan, Haizhou[J]. *Journal of Northwest University of agriculture and forestry science and Technology: Natural Science Edition*, 2019, 47(4): 58-64. (in Chinese)
- [33] 王珂, 周颖, 阙林仁, 等. 3 种法师系多肉植物秋季叶色表现及色素含量分析[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(11): 73-74.
- [34] 潘丽芹, 李纪元, 韦海忠, 等. 红叶山茶(*Camellia japonica*)叶片色素含量与叶色参数的相关性分析[J]. *分子植物育种*, 2020, 18(2): 579-585.
- PAN L Q, LI J Y, WEI H Z, *et al.* Correlation analysis between leaf pigment content and leaf color parameters of *Camellia japonica*[J]. *Molecular plant breeding*, 2020, 18(2): 579-585. (in Chinese)
- [35] 杨小鑫, 吕运舟, 董筱昀, 等. '金焰彩棠'与黄山栾树光合特性比较[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2016, 40(4): 74-80.
- YANG X X, LU Y Z, DONG X Y, *et al.* Comparison of photosynthetic characteristics between 'golden fireworks Luan' and Huangshan Luan[J]. *Journal of nanjing forestry university: Natural Science Edition*, 2016, 40(4): 74-80. (in Chinese)