



# 粉红珙桐叶片呈色相关生理特性的季节变化

江洁蓓,梁 玲,张腾驹,黎蕴洁,陈小红\*

(四川农业大学 林学院,成都 611130)

**摘要:**以四川省珙县王家镇同一生境下不同季节的粉红与绿叶珙桐叶片为试材,对其色素含量、渗透调节物质含量及相关酶活性进行测定,分析其季节性变化规律,从生理角度探寻影响珙桐叶片呈色的关键因素,以期为粉红珙桐的选育和合理栽培提供理论依据和技术参考。结果显示:(1)粉红珙桐叶片花色苷含量在春夏秋季均极显著高于绿叶珙桐,在夏季时含量最低;粉红珙桐叶片总叶绿素含量在夏季和秋季极显著低于绿叶珙桐,从春季过渡至秋季过程中逐渐上升;两者的类胡萝卜素和类黄酮含量差异不明显且在季节间较平稳。(2)粉红珙桐叶片的可溶性糖和可溶性蛋白含量略高于绿叶珙桐,夏季时达到最高;其脯氨酸含量也高于绿叶珙桐,且从春季到秋季缓慢上升。(3)粉红珙桐叶片苯丙氨酸解氨酶活性(PAL)、苯基苯乙烯酮黄烷酮异构酶(CHI)和超氧化物歧化酶活性(SOD)都显著高于绿叶珙桐,过氧化物酶(POD)活性则相反;从春季到秋季过程中,两种珙桐叶片PAL活性先减弱后增强,其POD和SOD活性则先增强后减弱,但粉红珙桐CHI活性逐渐减弱,绿叶CHI活性则先上升后下降。(4)粉红珙桐叶片花色苷含量与叶绿素含量、可溶性蛋白含量以及CHI、POD和SOD活性呈显著负相关关系。研究表明,叶片花色苷含量的增加和叶绿素含量的减少是粉红珙桐呈色的决定因素,CHI、SOD和POD活性是调节花色苷降解速率的关键酶。

**关键词:**珙桐;叶色变化;色素;渗透调节物质;酶活性

中图分类号:Q945.79

文献标志码:A

## Seasonal Dynamic of Physiological Characteristics of *Pink Davidia involucrata*

JIANG Jiebei, LIANG Ling, ZHANG Tengju, LI Yunjie, CHEN Xiaohong\*

(College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** With the leaves of pink and green *Davidia involucrata* in Gongxian as test materials, we measured the physiological indexes including the pigment, osmotic regulator and related enzymes, and analyzed the correlation. In order to provide the theoretical basis and technical reference for the breeding and rational cultivation of pink *D. involucrata*, the study investigated the key factors affecting the coloration of *D. involucrata* from physiological characteristics. The results showed: (1) the content of anthocyanin in pink plants was extremely significantly higher than that of green plants in spring, summer and autumn. Its content reaches its lowest in summer. The total content of chlorophyll of pink plants were extremely significantly lower than that of green plants in summer and autumn. The difference of carotenoid and flavonoid content was no significant, and their yearly changes were stable. (2) There was also no significant difference in soluble sugar and soluble protein content, its content reaches its lowest in summer. The proline

收稿日期:2019-07-16;修改稿收到日期:2019-10-22

基金项目:国家林业局第二次全国重点野生植物资源调查项目(003Z0304);四川农业大学大学生创新训练计划(201710626039)

作者简介:江洁蓓(1997—),女,硕士,主要从事植物生理生化研究。E-mail:jiangjiebeijjb@126.com

\* 通信作者:陈小红,副教授,硕士生导师,从事植物生理生化研究。E-mail:xiaohong-chen@scau.edu.cn

content of the pink was significantly higher, slowly increasing with the seasonal change. (3) The activities of phenylalanine ammonia-lyase (PAL), chalone isomerase (CHI), and superoxide dismutase (SOD) of pink plants were significantly higher than that of green plants. PAL, CHI and SOD played the role of decomposing chlorophyll and promoting anthocyanin synthesis, while the effect of peroxidase (POD) was opposite. The activity of PAL in two plants firstly weakened and then increased with the seasonal change, while the activities of POD and SOD were opposite. The activity of CHI of pink-color plants gradually decreased, and the green ones increased and then decreased. (4) Anthocyanin was negatively correlated with chlorophyll, flavonoids, soluble proteins, CHI, SOD and PAL. In conclusion anthocyanin was the determining factor of leaf color change. CHI, SOD and POD were the main enzymes that regulated anthocyanin degradation rate.

**Key words:** *Davidia involucrata*; leaf color change; pigment; osmotic regulator; enzyme activity

叶色变化增加了植物色彩的观赏效果,使植物具有观赏期长、抗逆性强、易栽培等特点,因此全国掀起了一股“色叶植物热”<sup>[1]</sup>。植物叶色变化受内在遗传和外部环境因子的共同影响,使其叶片的细胞微观结构与生理生化代谢水平等发生改变<sup>[2-4]</sup>。目前叶片呈色方向的研究主要集中在叶色呈色机理和相关化学物质两个方面,其中色素种类、比例和分布是导致叶色变化的直接原因<sup>[5]</sup>。通常树木叶色变红的直接原因是叶片中合成了大量的花色苷<sup>[6]</sup>,也有研究表明<sup>[7]</sup>,当叶绿素总含量较少时,花色苷主导的红色更易显现。同时,叶片中类胡萝卜素和类黄酮类含量变化也能影响叶片呈色<sup>[8]</sup>。现阶段,化学物质与相关酶对植物叶色的影响逐渐引起了研究者的关注,叶片中的化学物质,如可溶性糖和可溶性蛋白等可为花色苷的形成提供物质基础,脯氨酸可调节氧化还原反应影响花色苷的含量,苯丙氨酸解氨酶(PAL)和苯基苯乙烯酮黄烷酮异构酶(CHI)能直接催化花色苷的生物合成<sup>[9]</sup>,过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性能影响花色苷的降解速率<sup>[10]</sup>。许多学者对植物叶色变化进行了研究,但多以常见园林栽培植物为主,如鸡爪槭<sup>[11]</sup>、红继木<sup>[12]</sup>、红叶石楠<sup>[13]</sup>、紫叶李<sup>[14]</sup>等,而针对野生植物的叶片呈色机理研究甚少。

珙桐(*Davidia involucrata* Baill.)为珙桐科珙桐属落叶乔木,是中国特有的单型属珍稀濒危孑遗植物、国家一级重点保护植物,被誉为“林海中的珍珠”和植物界的“活化石”,具有极高的观赏与科学价值<sup>[15]</sup>。2016年4月,四川省宜宾市珙县政府在王家镇发现了近20株苞片为粉红色的珙桐,其叶片也呈淡淡的猩红色,此发现尚属世界首例。“粉红珙桐”的发现,为选育园林造景彩叶植物新品种提供了重要途径。本研究旨在探讨野生粉红珙桐叶色变异的生理调节机制及季节变化规律,以期为珙桐的品

种选育、栽培技术和景观培育提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试供材料

本试验选取叶片为粉红色的珙桐植株(粉红珙桐)作为供试材料,并以叶片为绿色的珙桐植株(绿叶珙桐)为对照。2种叶色珙桐均来源于四川省宜宾市珙县王家镇的同一珙桐群落,该群落位于N27°54'20.351",E104°50'24.287",年平均气温18℃,年平均降水量为1143.6 mm,海拔1505 m,分布区为亚热带湿润性季风气候,具有多雨多雾潮湿、夏凉冬寒的特点。林区郁闭度为0.6,土壤类型为黄棕壤,土壤厚度40~50 cm,pH值5.0~6.7。珙桐为该群落的乔木层优势树种,零星伴生有灯台(*Bothrocaryum controversum*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、野桐(*Mallotus japonicus*)、柃木(*Eurya japonica*)等乔木树种,灌木层主要有川莓(*Rubus setchuenensis*)、乌泡子(*Rubus parkeri*)、细枝柃(*Eurya loquaiana*)、筇竹(*Qiongzhuera tumidinoda*)等,草本主要有姬蕨(*Hypolepis punctata*)、毛蕨(*Cyclosorus interruptus*)等,藤本主要有中华猕猴桃(*Actinidia chinensis*)等。

在珙桐群落中随机选取长势良好的粉红和绿叶植株各6株(平均树高8 m,胸径30~40 cm)并做好标记,即6次重复。在2017年春季(4月下旬)、夏季(7月下旬)、秋季(9月下旬)3次取样,于上午9:00~10:00在东南西北四个方向的树冠外围选取向阳处枝条第3到第5枚正常成熟叶片各3枚,每株共采集12枚叶片。同一植株的叶片洗净擦干后混合装袋,经液氮处理后放入-80℃冰箱待测。为保障粉红珙桐性状的稳定性,于2018年再次重复采样进行测定。

### 1.2 测定项目及其方法

叶片叶绿素(Chl)、类胡萝卜素(Car)、花色苷

(ACY)与类黄酮(FC)的提取与测定参照唐前瑞<sup>[12]</sup>和Rafaela<sup>[16]</sup>的分光光度法;可溶性糖(SS)及脯氨酸(Pro)的提取与测定参照李合生的茚三酮法<sup>[17]</sup>,可溶性蛋白(SP)的提取与测定参照李合生<sup>[17]</sup>的考马斯亮蓝G-25染色法;苯丙氨酸解氨酶(PAL)和苯基苯乙烯酮黄烷酮异构酶(CHI)的提取与测定参照王敬文<sup>[18]</sup>的分光光度法;过氧化物酶(POD)的提取与测定参照郑炳松的愈创木酚法<sup>[19]</sup>;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑法<sup>[17]</sup>测定。

### 1.3 数据处理

利用Excel 2010和SPSS 20.0进行数据处理,结合LSD与Duncan法进行方差分析与差异显著性分析,各指标间采用Spearman系数进行相关分析,采用Origin Pro 8作图及Excel 2010作表。

## 2 结果与分析

### 2.1 2种珙桐叶片色素含量的季节性变化特征

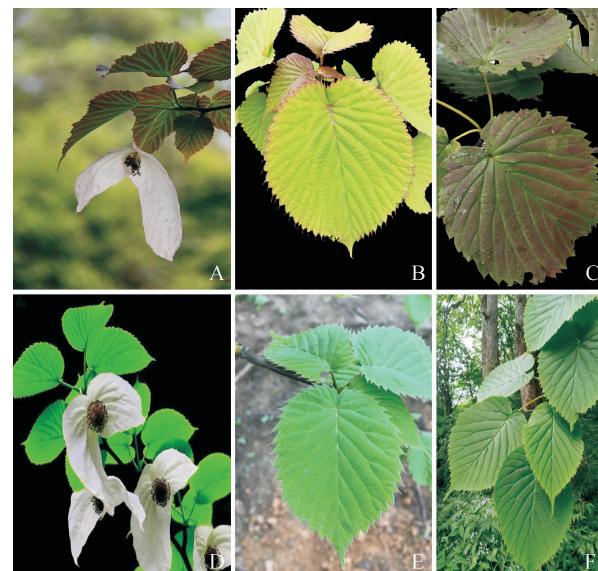
粉红珙桐和普通珙桐的主要区别在于开花时前者的苞片为粉红色,后者为白色,实际上在春季、夏季、秋季的叶片色彩也表现出了明显差异。春季粉红珙桐的叶片为猩红色,与春季普通珙桐叶片差异明显(图1,A、D);夏季粉红珙桐叶色变浅,仅叶片边缘呈粉红色(图1,B、E);秋季粉红珙桐叶片出现“返红”,与同时期普通珙桐差异较为明显(图1,C、F)。

如图2所示,从春季(4月)过渡至秋季(9月)过程中,2种珙桐叶片的叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素和类胡萝卜素含量随着叶片发育均呈逐渐上升的趋势,绿叶珙桐始终不同程度地高于同期粉红珙桐;2种珙桐叶片类黄酮含量均呈逐渐下降趋势,且粉色珙桐不同程度高于绿色珙桐;绿色珙桐叶片花色苷含量也呈降低趋势,而粉红珙桐花色苷含量却先降后升,在夏季最低,秋季最高,但粉色珙桐均始终显著高于绿色珙桐。其中,绿叶珙桐的叶绿素a在季节间变化幅度较大,秋季含量高出春季71.27%;绿叶珙桐的叶绿素a含量在春季、夏季、秋季均显著高于同期粉红珙桐( $P<0.05$ ),增幅分别为12.39%、72.08%、68.75%。2种珙桐叶绿素b含量在季节间的变化幅度较小,而绿叶珙桐的叶绿素b含量也始终高于粉红珙桐,但仅在秋季时有极显著差异( $P<0.01$ )。2种珙桐的叶绿素总量在夏季和秋季都有极显著差异,绿叶珙桐分别高出粉红珙桐86.13%、64.13%。粉红珙桐类胡萝卜素在转秋季时上升幅度明显,是春季的2.28倍;绿叶珙桐的类

胡萝卜素含量仅在秋季显著高于粉红珙桐33.26%。2种珙桐类黄酮含量从夏季向秋季过渡时降幅较大,粉红珙桐和绿叶珙桐分别达67.49%和58.82%;粉红珙桐的类黄酮含量在春季极显著高于绿叶珙桐,其余季节两者并无显著差异,即在红叶形成过程中类黄酮影响较弱。粉红珙桐的花色苷含量在夏季仅为春季的20.07%;2种珙桐的花色苷含量则在春季、夏季、秋季都呈极显著差异,粉红珙桐分别是绿叶珙桐的3.67、2.35、14.34倍,表明花色苷对叶色有极大的促进作用,有利于红色的显现。

### 2.2 2种珙桐叶片渗透调节物质含量的季节性变化特征

可溶性糖和可溶性蛋白是参与各种代谢的重要底物,也是叶片合成花色苷必不可少的成分,对花色苷合成、叶色变化可起到促进作用。首先,粉红珙桐的可溶性糖含量在夏季达到最高,在春季转夏季时变化幅度明显,为春季含量的2.23倍,到秋季时小幅度下降,而绿叶珙桐可溶性糖含量则呈平稳上升趋势;粉红珙桐可溶性糖含量在各个季节均不同程度地高于绿叶珙桐,但仅在春季极显著高于绿叶珙桐44.44%,而在夏季和秋季两者差异不大,对叶色影响较为微弱(图3,A)。其次,两种珙桐的可溶性

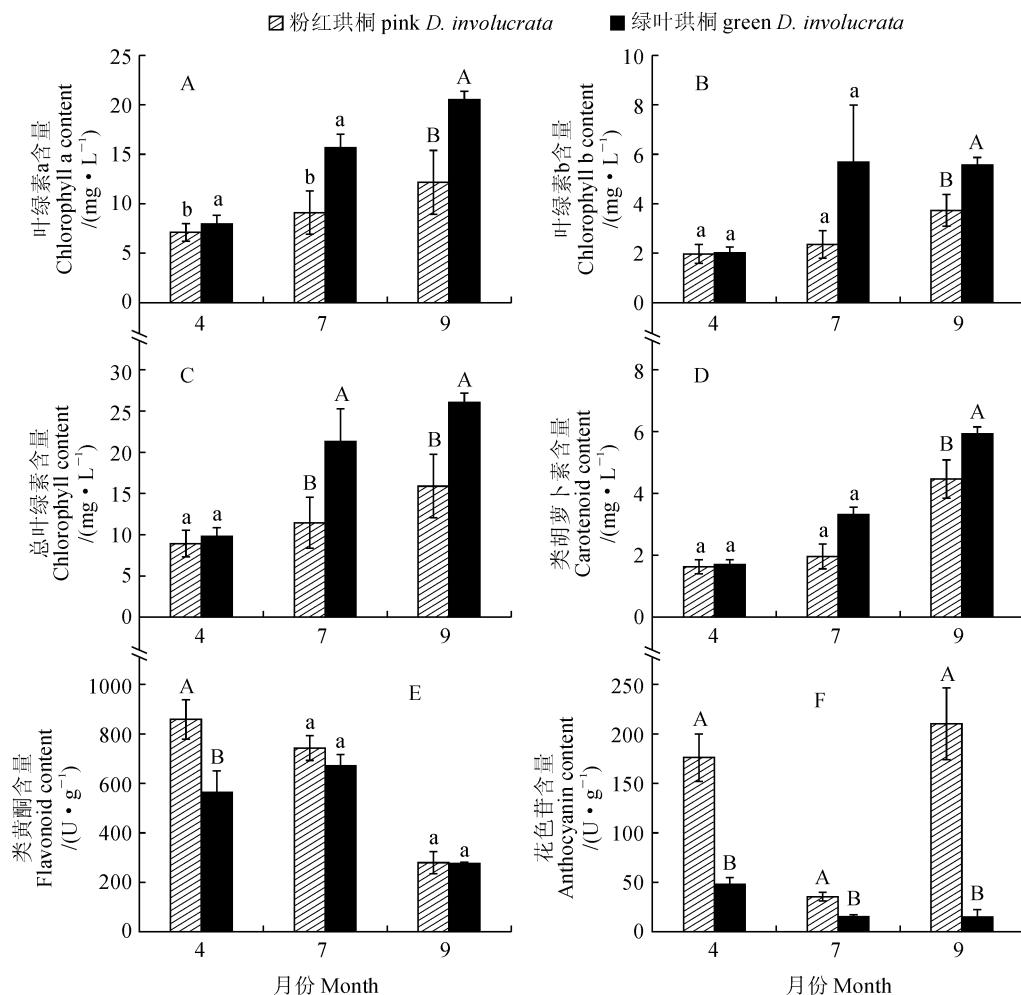


A~C. 粉红珙桐叶片;A. 春季;B. 夏季;C. 秋季;D~F. 普通珙桐叶片;D. 春季;E. 夏季;F. 秋季(A和D图源自搜狐网)

图1 2种珙桐春夏秋三季叶片色彩变化

A~C. Leaf of pink *D. involucrata*; A. In spring; B. In summer; C. In autumn; D~F. Leaf of green *D. involucrata*; D. In spring; E. In summer; F. In autumn (Figures A and D are from Sohu. com)

Fig. 1 Variations on leaf color in spring, summer and autumn of two types of *D. involucrata*



同期不同小写和大写字母分别表示树种间在 0.05 和 0.01 水平上的差异显著性,下同

图 2 2 种珙桐叶片色素含量随季节的变化

Value with the different normal and capital letters within same stage indicate significant differences between tree types at the 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same as below

Fig. 2 Seasonal variations on the pigment contents in leaves of two types of *D. involucrata*

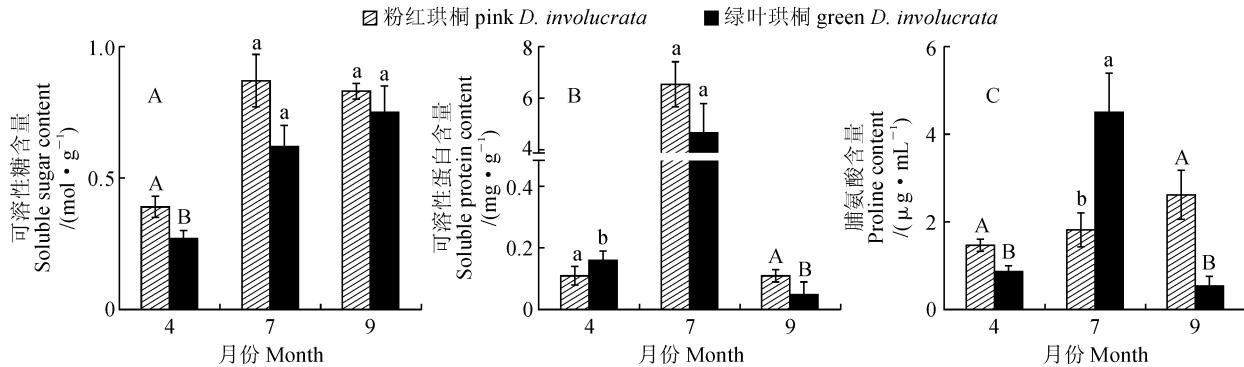


图 3 2 种珙桐叶片渗透调节物质含量随季节的变化

Fig. 3 Seasonal variations on the osmotic regulator contents in leaves of two types of *D. involucrata*

蛋白含量都在夏季达到最高并且远高于春秋季节,粉红珙桐和绿叶珙桐从夏季转秋季时分别降低达 98.32%、98.93%;粉红珙桐可溶性蛋白含量与绿叶

珙桐在春季和秋季形成显著差异,秋季是绿叶珙桐的 2.20 倍,对叶色变化有一定的影响(图 3,B)。另外,脯氨酸是植物蛋白质的组分之一,有助于提高植

物的抗逆性,还可调节细胞氧化还原反应。粉红珙桐叶片中的脯氨酸含量呈平稳上升趋势,秋季含量高出春季含量 78.23%,绿叶珙桐的脯氨酸含量先上升后下降,在春季转夏季变化幅度明显,夏季含量高出春季 4.17 倍;粉红珙桐叶片的脯氨酸含量在春季和秋季均极显著高于绿叶珙桐,在夏季反而显著低于绿叶珙桐,但其在秋季是绿叶珙桐的 4.85 倍,与其可溶性蛋白含量表现相似,都可为相关反应提供底物,有利于叶片偏向红润(图 3,C)。

### 2.3 2 种珙桐叶片相关酶活性的季节性变化特征

PAL 是花色素合成的第一个关键酶,CHI 是催化花色素苷前体黄烷酮合成的酶,都对叶色的形成起着重要作用。2 种珙桐叶片 PAL 活性都呈先下降后上升趋势,其中绿叶珙桐升降幅度较大,其 PAL 活性从春季到夏季下降了 60.81%,其秋季活性是夏季的 4.06 倍;粉红珙桐的 PAL 活性在各个季节均不同程度地高于绿叶珙桐,且在春季和夏季达到显著水平,此时粉红珙桐 PAL 活性分别显著高于绿叶珙桐 19.37% 和 63.06%,这为红叶的形成提供了有利条件(图 4,A)。同时,粉红珙桐叶片中 CHI 活性从春季至秋季逐渐减弱,降低了 57.72%,而绿叶珙桐叶片 CHI 活性变化则不明显;粉红珙桐叶片 CHI 活性在各季节均显著高于绿叶珙桐,其

CHI 活性在春季、夏季和秋季分别高出绿叶珙桐 177.36%、38.21% 和 41.40%,CHI 对叶片呈色反应具有明显的催化作用(图 4,B)。

POD 是植物体内一种重要的保护酶,参与多种代谢活动,其活性大小可影响花色苷的合成。2 种珙桐叶片的 POD 活性在夏季达到最高,且粉红珙桐变化幅度较为明显,从春季转夏季升幅达 50.06%,到秋季则下降了 49.54%;绿叶珙桐叶片的 POD 活性在各个季节均不同程度地高于粉红珙桐,且在夏季和秋季差异达到显著水平,此时分别为粉红珙桐的 6.94 倍和 6.17 倍,POD 活性增强可使粉红珙桐的抗性增强,为花色苷的合成提供稳定的场所(图 4,C)。另外,SOD 具有分解叶绿素的作用,同时可消除体内不断增加的自由基含量,从而增强树体抵抗自由基及其衍生物和外界自然环境造成伤害的能力。粉红珙桐的 SOD 活性在夏季最高并明显高于春秋两季,夏季是春季的 4.62 倍,秋季明显比夏季下降了 75.89%,而绿叶珙桐 SOD 活性的季节变化则不明显;2 种珙桐的 SOD 活性在夏季和秋季均有极显著差异,粉红珙桐的 SOD 活性在夏季是绿叶珙桐的 2.41 倍,但在秋季仅为绿叶珙桐 60.34%。

### 2.4 粉红珙桐叶片相关生理指标的相关性

由表 1 可以看出,珙桐各生理指标之间存在着

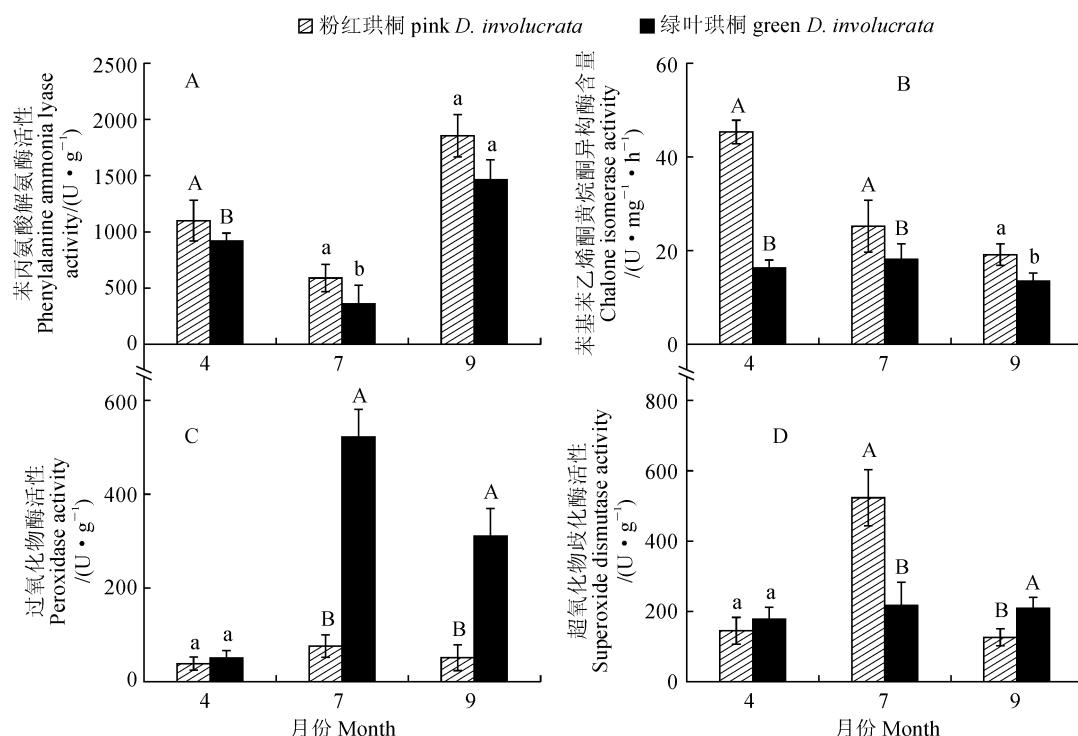


图 4 2 种珙桐叶片相关酶活性随季节的变化

Fig. 4 Seasonal variations on the related enzyme activities in leaves of two types of *D. involucrata*

表 1 粉红珙桐叶片各生理指标之间的相关系数  
Table 1 The correlation coefficient between various physiological indexes of pink *D. involucrata*

指标 Index	叶绿素 a Chl a	叶绿素 b Chl b	总叶绿素 Chl	类胡萝卜素 Car	花色苷 ACY	类黄酮 FC	可溶性糖 SS	可溶性蛋白 SP	脯氨酸 Pro	苯丙氨酸 PAL	苯基苯乙烯 PAL	苯基黄烷酮 PAL	异构酶 CHI	过氧化物酶 POD	超氧化物 SOD
Chl a	1														
Chl b	0.532**	1													
Chl	0.935**	0.796**	1												
Car	0.720**	0.356**	0.474**	1											
ACY	-0.354**	-0.221*	-0.344**	0.029	1										
FC	-0.408**	-0.161	-0.357**	-0.598**	-0.250*	1									
SS	0.171	0.003	0.129	0.256*	0.086	-0.034	1								
SP	-0.067	0.013	-0.039	-0.314**	-0.532**	0.635**	0.488**	1							
Pro	0.169	0.224*	0.117	-0.060	-0.170	0.226*	0.124	0.375**	1						
PAL	0.183	0.011	0.141	0.215*	0.203	0.016	0.613**	0.457**	0.191	1					
CHI	0.544**	0.258*	0.256*	0.147	-0.553**	0.223*	0.113	0.178	0.223*	0.456**	1				
POD	0.539**	0.469**	0.580**	0.171	-0.366**	0.034	-0.116	0.161	0.352**	0.094	0.364**	1			
SOD	-0.192	-0.146	-0.194	-0.256*	-0.449**	0.294*	0.560**	0.857**	0.083	0.521**	0.497**	-0.092	1		

注: \* 代表在 0.05 水平上显著相关; \*\* 代表在 0.01 水平上显著相关

Note: \* means significant correlation at 0.05 level; \*\* mean significant correlation at 0.01 level

许多相关性,叶绿素与类胡萝卜素含量间显著正相关,并与花色苷和类黄酮含量显著负相关,叶绿素的降解可能是引起叶色变化的主要原因;类胡萝卜素也是植物叶片中的重要色素,它与类黄酮含量显著负相关,但与花色苷含量之间没有显著相关性;花色苷作为类黄酮中的一部分,虽含量甚微,但却是影响叶色变化的重要色素,其与类黄酮和叶绿素含量都显著负相关。叶片可溶性糖含量仅与类胡萝卜素含量显著正相关;可溶性蛋白含量与类黄酮含量显著正相关,还与类胡萝卜素、花色苷含量显著负相关,其含量下降有利于红色的显现;脯氨酸含量与叶绿素b、类黄酮含量正相关。叶片PAL活性与类胡萝卜素含量正相关;CHI活性与叶绿素、花色苷、类黄酮含量存在显著的相关性;POD活性作为提高抗逆性的酶因子,与叶绿素含量存在显著正相关关系,与花色苷含量显著负相关;SOD活性能有效清除活性氧,与类黄酮含量正相关,与类胡萝卜素、花色苷含量负相关。

### 3 讨 论

植物叶片的呈色与细胞内色素的种类和含量有关<sup>[20]</sup>,通常叶片变红是由于叶片内花色苷的大量合成,使叶片中的色素种类和比例发生改变<sup>[21-22]</sup>。本试验中,粉红珙桐叶片的花色苷含量极显著高于绿叶珙桐,且与其他生理指标存在相关性,成为叶色改变的关键因素。春季叶片开始发育,粉红珙桐叶片叶绿体含量较少且为发育未完全,使得红色能够有效的显现;夏季光合作用旺盛,叶绿素含量上升,花色苷含量下降,使得红色变浅,叶片变为淡红色;秋季叶片开始衰老,叶绿素开始分解,花色苷含量上升且比重增大,叶片更加红润,这与红叶杜仲(*Eucommia ulmoides* 'Hongye')研究<sup>[23-24]</sup>结果一致。

彩叶植物的叶色也随可溶性糖含量、蛋白质组分等改变发生变化<sup>[25-26]</sup>。本研究中粉红珙桐叶片可溶性糖含量与类胡萝卜素、可溶性蛋白含量以及PAL、SOD活性显著正相关,与花色苷含量显著负相关,花色苷含量的季节变化过程与可溶性糖含量相反,表明在花色苷的形成过程中消耗了叶片中的部分可溶性糖<sup>[27]</sup>。可溶性蛋白是花色苷的前体物质或信号分子,同时作为渗透调节因子调节细胞渗透势,促进植物花色苷的积累<sup>[27]</sup>。本研究中可溶性蛋白的含量显著影响着花色苷的合成和SOD的活

性,可溶性蛋白和SOD活性都在花色苷明显下降的夏季明显上升,可能夏季的温度和光照对花色苷的合成反应有较大抑制影响。王翠平等<sup>[28]</sup>认为,逆境胁迫条件下脯氨酸可能起到兼容性渗透调节剂、蛋白质和亚细胞结构稳定剂、活性氧清除剂和氧化还原平衡剂的作用。本研究中粉红珙桐叶片的脯氨酸秋季含量高出绿叶珙桐3.85倍,脯氨酸有助于清除活性氧,调节渗透压以保持内环境的稳定,增强自身的抗逆性,从而有利于花色苷形成。

PAL作为花色苷合成第一步的关键酶,该途径的最终产物包括类黄酮、花色苷和木质素等多种物质,因此它的活性与花色苷相关因子之间存在着相关性,会受到其他产物合成的影响<sup>[29]</sup>。本研究中粉红珙桐叶片花色苷含量与PAL活性间无显著相关性,但PAL活性从春季到秋季的变化与花色苷一致,可能对叶色改变有一定的影响,还需今后更深入的研究。CHI是催化花色素苷前体黄烷酮合成的酶,粉红珙桐叶片中的CHI活性明显高于绿色珙桐叶片,并随着季节变化而下降,为光合色素比例的下降提供有利条件,这与张敏<sup>[30]</sup>的研究结果一致。POD活性可影响着红栌(*Cotinus coggygria* 'Royal Purple')叶片中多酚含量,促进紫红色叶片中花色苷的合成,使叶片显现红色<sup>[31]</sup>。本研究中,粉红珙桐叶片的POD活性明显低于绿色珙桐叶片,且与花色苷含量负相关,表明POD活性可能参与并影响了叶片花色苷的积累,其显著变化也可使叶片呈色更迅速。花色苷具有很强的抗氧化功能,可通过调节酶活性来达到抗氧化的作用<sup>[31]</sup>,本研究中粉红珙桐叶片SOD活性与花色苷含量显著负相关,两者的季节变化趋势也正好相反,表明SOD对叶片花色苷的合成有抑制作用。

粉红珙桐与绿叶珙桐两者所处生境相似,排除了立地条件对叶色的影响,叶色出现差异的原因在于叶片色素含量、营养成分与相关酶活性发生了变化,其中叶绿素和花色苷含量是叶色变化的决定性因素,直接影响了叶色的变化。朱书香等<sup>[32]</sup>发现较高的花色苷含量能够起到保护叶片细胞光合结构、提高植株抗旱抗菌能力的作用。花色苷含量的上升可能使粉红珙桐更能适应环境的变化,今后应在粉红珙桐的繁殖和品种选育上加大投入力度,使得粉红珙桐应用于园林绿化中。

## 参考文献:

- [1] 罗玉兰,张国兵,张爱明.“金边”北美鹅掌楸不同叶色结构特征比较[J].植物研究,2013,33(3):282-286.
- LUO Y L, ZHANG G B, ZHANG A M. Comparison of leaf structures in the green and yellow parts of *Liriodendron tulipifera* ‘Aureo marginatum’[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2013, 33(3): 282-286.
- [2] BECKER C, KLAERING H P, KROH LW, et al. Cool-cultivated red leaf lettuce accumulates cyaniding-3-o-(6'-o-malonyl)-glucoside and caffeoylmalic acid[J]. *Food Chemistry*, 2014, 146: 404-411.
- [3] LEV-YADUN S, YAMAZAKI K, HOLOPAINEN J K, et al. Spring versus autumn leaf colours: evidence for different selective agents and evolution in various species and floras[J]. *Flora*, 2012, 207(1): 80-85.
- [4] LI C F, XU Y X, MA J Q, et al. Biochemical and transcriptomic analyses reveal different metabolite biosynthesis profiles among three color and developmental stages in ‘Anji Baicha’ (*Camellia sinensis*) [J]. *Bmc Plant Biology*, 2016, 16(1): 195-196.
- [5] 张亚平,金晓玲,曾艳,等.植物叶色呈色机理及化学物质的调控[J].北方园艺,2017,(14):180-184.
- ZHANG Y P, JIN X L, ZENG Y, et al. Chemicals on plant leaf color regulations and research progress of leaf color[J]. *Northern Horticultural Journal*, 2017, (14): 180-184.
- [6] VAKNIN H, BARAKIVA A, OVADIA R, et al. Active anthocyanin degradation in *Brunfelsia calycina* (yesterday-to-day-tomorrow) flowers[J]. *Planta*, 2005, 222(1): 19-26.
- [7] 卓启苗,丁彦芬,余慧,等.欧洲卫矛秋冬转色期叶色变化的生理机制[J].西北植物学报,2018,38(6):1 072-1 079.
- ZHUO Q M, DING Y F, YU H, et al. Physiological characters of *Euonymus europaea* leaves during color-changing period in autumn and winter [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica*, 2018, 38(6): 1 072-1 079.
- [8] KIM J S, LEE B H, KIM S H, et al. Responses to environmental and chemical signals for anthocyanin biosynthesis in non-chlorophyllous corn (*Zear mays* L.) leaf[J]. *J Plant Biol*, 2006, 49(1): 16-25.
- [9] 杨暖,姜琳,赵明远,等.北美豆梨叶变色期花色苷含量与相关酶活性的研究[J].山东林业科技,2015,45(6):9-12.
- YANG N, JIANG L, ZHAO M Y, et al. Anthocyanin content and the relevant enzymes activities during leaf color changing of *Pyrus calleryana* Deene[J]. *Shandong Forestry Science and Technology*, 2015, 45(6): 9-12.
- [10] 曹盼盼,贾桂霞.两种变异类型沙地柏冬季叶色变化及其与抗氧化系统的关系[J].植物生理学报,2015,(5):763-770.
- CAO P P, JIA G X. Changes of leaf color and relationship with antioxidant system in two types of *Sabina vulgaris* in winter[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, (5): 763-770.
- [11] 罗安才,阎晓灵,李利霞,等.鸡爪槭叶色变化机制研究[J].江苏农业科学,2018,46(22):118-122.
- LUO A C, YAN X L, LI L X, et al. Study on the mechanism of leaf color change of *Acer palmatum*[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(22): 118-122.
- [12] 唐前瑞,陈德富,陈友云,等.红檵木叶色变化的生理生化研究[J].林业科学,2006,42(2):111-115.
- TANG Q R, CHEN D F, CHEN Y Y, et al. Changes of physiology and biochemistry during leaf color transformation in *Loropetalum chinense* var. *rubrum*[J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2006, 42(2): 111-115.
- [13] 孔祥海,李思,丁力,等.红叶石楠叶片发育的形态特征及色素含量变化[J].北方园艺,2015,(24):51-55.
- KONG X H, LI S, DING L, et al. Variation of morphology and pigment content in leaf development of *Photinia* × *fraseri*[J]. *Northern Horticultural Journal*, 2015, (24): 51-55.
- [14] 汪娟,张华,张杰,等.紫叶李叶片春季成熟过程中花青素含量和光合功能变化研究[J].林业科技,2018,43(3):13-17.
- WANG J, ZHANG H, ZHANG J, et al. The changes of anthocyanin content and photosynthetic function of *Prunus cerasifera* leaves during the development process in spring [J]. *Forestry Science & Technology*, 2018, 43(3): 13-17.
- [15] 傅立国.中国植物红皮书[M].北京:科学出版社,1991:474-475.
- [16] GONZÁLEZMONTELONGO RAFAELA, GLORIA L M, GONZÁLEZ MÓNICA. Antioxidant activity in banana peel extracts: testing extraction conditions and related bioactive compounds[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119 (3): 1 030-1 039.
- [17] 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,2000:184-261.
- [18] 王敬文,薛应龙.植物苯丙氨酸解氨酶的研究 I.植物激素对甘薯块根苯丙氨酸解氨酶和肉桂酸 4-羟化酶活性变化及其伴随性的影响[J].植物生理学报,1981,(4):373-380.
- WANG J W, XUE Y L. Studies on plant phenylalanine ammon-lyase I. The effect of phytohormone on the increase in phenylalanine ammon-lyase (PAL) and cinnamic acid 4-hydroxylase (EA4H) activity and the sequence of concomitant changes of enzyme activities in sweet potato root tuber discs [J]. *Plant Physiology Journal*, 1981, (4): 373-380.
- [19] 郑炳松.现代植物生理生化技术研究[M].北京:气象出版社,2006, 41-42, 91-92.
- [20] 洪丽,王金刚,龚束芳.彩叶植物叶色变化及相关影响因子研究进展[J].东北农业大学学报,2010,41(6):152-156.
- HONG L, WANG J G, GONG S F. Progress in color changes and its influencing factors of color leaf plants[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41 (6):

- 152-156.
- [21] 刘晓东,于晶.紫叶风箱果叶片花色素苷的提取及其稳定性[J].东北林业大学学报,2011,39(2):38-39.  
LIU X D, YU J. Extraction of anthocyanin from *Physocarpusopulifolius* 'Diabolo' and its stability[J]. *Journal Northeast Forestry University*, 2011, 39(2): 38-39.
- [22] 吴驭帆,于萍,祝遵凌.春季不同叶色鹅耳枥叶片生理生化特性的研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(5):120-126.  
WU Y F, YU P, ZHU Z L. Physiological and biochemical characteristics of *Carpinus turczaninowii* leaves with different colors in spring[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Nat. Sci. Ed.), 2016, 44(5): 120-126.
- [23] 朱景乐,李芳东,杜红岩,等.三个观赏型杜仲无性系叶片色素含量比较[J].林业科学,2014,27(4):562-564.  
ZHU J L, LI F D, DU H Y, et al. Comparison of leaf pigment content among three ornamental *Eucommia ulmoides* varieties[J]. *Forest Research*, 2014, 7(4): 562-564.
- [24] 朱景乐,苗作云,张少伟,等.3个观赏型杜仲品种叶片生理特征的比较[J].东北林业大学学报,2017,45(8):10-13.  
ZHU J L, MIAO Z Y, ZHANG S W, et al. Leaf physiological characteristics of three ornamental *Eucommia ulmoides* Oliver varieties[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2017, 45(8): 10-13.
- [25] 葛雨萱,周肖红,刘洋,等.黄栌属种质资源、栽培繁殖、化学成分、叶色调控研究进展[J].园艺学报,2014,41(9):1 833-1 845.  
GE Y X, ZHOU X H, LIU Y, et al. Recent advances in germplasm, cultivation, propagation, chemical components and leaf color regulation of *Cotinus*[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(9): 1 833-1 845.
- [26] 楚爱香,张要战,田永芳.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,2012,40(11):40-43.  
CHU A X, ZHANG Y Z, TIAN Y F. Physiological changes of leaves of several fall color trees during color changing period in autumn and winter[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(11): 40-43.
- [27] 姜琳,杨暖,姜官恒,等.栎属4个树种秋冬叶色与生理变化的关系[J].中国农学通报,2015,31(19):13-18.  
JIANG L, YANG N, JIANG G H, et al. Relationship between leaf color in autumn and winter and physiological changes of four species of *Quercus*[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(19): 13-18.
- [28] 王翠平,严莉,乔改霞,等.脯氨酸通过活性氧信号抑制植物生长[J].植物生理学报,2017,53(9):1 788-1 794.  
WANG C P, YAN L, QIAO G X, et al. Proline inhibits plant growth by reactive oxygen species signaling[J]. *Plant Physiology Journal*, 2017, 53(9): 1 788-1 794.
- [29] 谢智华,姜卫兵,韩键,等.早熟桃夏季红叶现象的生理机制研究[J].园艺学报,2012,39(7):1 271.  
XIE Z H, JIANG W B, HAN J, et al. Studies on physiological mechanism of red leaf phenomena of early maturing peach in summer[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2012, 39(7): 1 271.
- [30] 张敏,黄利斌,周鹏,等.榉树秋季转色期叶色变化的生理生化[J].林业科学,2015,51(8):44-51.  
ZHANG M, HUANG L B, ZHOU P, et al. Physiological and Biochemical Changes in *Zelkova serrata* leaves during leaf color transformation in autumn[J]. *Scientia Silvae Sinica*, 2015, 51(8): 44-51.
- [31] 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 C, et al. The enzyme activities, pigment and inclusion contents in different leaves color of *Cotinus coggygria* 'Royal Purple' in autumn[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2008, 28(5): 599-602.
- [32] 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):1 663-1 669.  
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-Occidentalis Sinica*, 2009, 29(8): 1 663-1 669.

(编辑:裴阿卫)