

DOI: 10.11913/PSJ.2095-0837.24087

CSTR: 32231.14.PSJ.2095-0837.24087

姬语潞, 陈春, 陈翔, 彭东辉, 高小坤, 廖荣丽. 白果蒲桃不同叶位的叶色表型差异及呈色生理因子分析[J]. 植物科学学报, 2025, 43 (2): 265~272

Ji YL, Chen C, Chen X, Peng DH, Gao XK, Liao RL. Analysis of phenotypic differences in leaf coloration and physiological factors of coloration in different leaf positions of *Syzygium album* Q. F. Zheng[J]. *Plant Science Journal*, 2025, 43 (2): 265~272

白果蒲桃不同叶位的叶色表型差异及呈色生理因子分析

姬语潞^{1,2}, 陈春¹, 陈翔¹, 彭东辉², 高小坤¹, 廖荣丽^{3*}

(1. 福建省林业科技试验中心, 福建漳州 363000; 2. 福建农林大学风景园林与艺术学院, 福州 350002;
3. 福州植物园, 福州 350012)

摘要: 为了研究白果蒲桃 (*Syzygium album* Q. F. Zheng) 不同叶位的叶色表型差异与呈色生理因子之间的相关性, 以同一生长发育期的白果蒲桃为研究对象, 对不同叶色表型进行 RHSCC 色彩测定、色差参数采集、pH 值、EC 值以及各色素组分和可溶性糖含量的测定与分析。结果显示: (1) 白果蒲桃不同叶位的叶片呈现显著的颜色差异, 从上到下叶色由红色到黄绿色再到绿色, 红度 (+a*) 逐渐下降, 绿度 (-a*) 和黄度 (+b*) 逐渐升高。(2) 叶片色泽亮度 (L*) 与 Chl/a/b 和类黄酮/叶绿素 (Fla/Chl) 比值系数呈极显著正相关, 与可溶性糖含量呈显著负相关; 叶色红/绿度 (a*) 与叶液 EC 值、花青素含量和花青素/类黄酮 (OPC/Fla) 比值系数呈极显著正相关, 与叶液 pH 值、叶绿素、类胡萝卜素和类黄酮含量呈显著负相关; 叶色彩度 (C*) 与可溶性糖含量为极显著负相关。(3) 白果蒲桃的叶片呈色差异不是由某一种色素决定的, 而是由各色素的相对组分含量和色素比值系数共同作用的结果。研究结果说明, 通过色差参数与色素比值系数的联合分析, 可以使叶色表型与色差程度数据化, 降低感官误差, 为彩叶树种的色差评价和呈色机理分析提供参考与借鉴。

关键词: 白果蒲桃; 叶色; 色相变化; 植物色素

中图分类号: Q949.762.2

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837 (2025) 02-0265-08

Analysis of phenotypic differences in leaf coloration and physiological factors of coloration in different leaf positions of *Syzygium album* Q. F. Zheng

Ji Yulu^{1,2}, Chen Chun¹, Chen Xiang¹, Peng Donghui², Gao Xiaokun¹, Liao Rongli^{3*}

(1. Fujian Forestry Science and Technology Experiment Center, Zhangzhou, Fujian 363000, China; 2. College of Landscape Architecture and Art, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Fuzhou Botanical Garden, Fuzhou 350012, China)

Abstract: This study investigated the relationship between phenotypic differences in leaf color and physiological factors influencing color expression in different leaf positions of *Syzygium album* Q. F. Zheng. To achieve this, *S. album* specimens at the same growth and developmental stage were selected for analysis. The study assessed leaf color using the Royal Horticultural Society Colour Chart (RHSCC), recorded color difference parameters, and measured pH and electrical conductivity (EC) values. In addition, pigment composition and soluble sugar content were quantified to examine their contributions to leaf coloration. Results revealed that: (1) Leaf color varied significantly across different positions, transitioning from red to yellow-green to green, with a gradual decrease in redness (+a*) and a gradual increase in green (-a*) and yellow (+b*). Leaf bright-

收稿日期: 2024-04-05, 接受日期: 2024-05-20。

基金项目: 福建省林业科技项目 (2022FKJ16); 漳州市自然科学基金项目 (ZZ2021J22)。

作者简介: 姬语潞 (1994-), 女, 博士研究生, 工程师, 研究方向为园林植物与观赏园艺 (E-mail: July55775@163.com)。

* 通信作者 (Author for correspondence. E-mail: Iriliaorongli@sina.com)。

ness (L^*) exhibited a highly significant positive correlation with both the Chla/b and Fla/Chl ratios ($P<0.01$) and a negative correlation with soluble sugar content ($P<0.05$). (2) Leaf red-green coloration (a^*) was significantly positively correlated with leaf fluid EC, anthocyanin content, and the OPC/Fla ratio, but significantly negatively correlated with leaf fluid pH, chlorophyll, carotenoid, and flavonoid content. Leaf coloration (C^*) was significantly negatively correlated with soluble sugar content. (3) Leaf color differences were not determined by a single plastid pigment but rather by the relative composition and ratio of multiple pigments. The combined analysis of color difference parameters and pigment ratio coefficients facilitated the reduction of perceptual errors in assessing leaf color phenotypes through data mining approaches. These findings provide a theoretical foundation for evaluating color difference parameters and elucidating the physiological mechanisms underlying color expression in colored-leaf tree species.

Key words: *Syzygium album*; Leaf color; Color phase change; Plant pigment

彩叶植物具有丰富多彩的叶色，可形成多样化景观，弥补热带地区常绿植物叶色和园林景观的单一缺陷^[1, 2]。近年来，彩色植物在城市绿地中的比例逐步增加，有望达到 15%~20%^[3]，在生态性能、种植管理和绿化应用等领域发挥重要作用^[4]，但彩叶植物对外界环境要求较高，且当地乡土树种资源利用不充分，导致其发展与应用较为缓慢。目前，彩叶植物的研究主要集中在植物色素的种类和含量变化、叶片组织结构以及光合特性等方面^[5, 6]，叶色变化是由内部调控机制和外界环境共同作用的结果，形成机制较为复杂，植物色素是彩叶植物叶片呈色的物质基础，通过不同植物色素的种类、含量以及分布比例形成了丰富多彩的叶色表型^[7, 8]，且不同品种、不同叶位和叶龄间的彩叶植物的叶色也存在差异。

白果蒲桃（*Syzygium album* Q. F. Zheng）隶属于桃金娘科蒲桃属（*Syzygium*），是福建省重点保护野生植物，为 1990 年发表在《福建植物志》第 4 卷上蒲桃属的新种^[9, 10]。通过近年来的观察记录，发现白果蒲桃树龄长、树形丰满、叶型优美、叶色多变，在自然生长状态下叶色变化主要发生在春季和秋季，春梢顶生新芽，侧枝不长叶，叶色变化为水黄色、浅黄绿色、浅绿色；秋梢新芽顶生或腋生，叶色变化为胭脂红色、赭红色、黄绿色、墨绿色等，具有较高观赏价值，是一种具有较大的发展前景与研究价值的特色乡土彩叶树种。目前对白果蒲桃的研究主要集中于种群结构^[11]、生态环境^[12, 13]及种苗繁殖^[14~16]等方面，并未对其叶色变化等观赏特性开展研究。为了揭示白果蒲桃的叶色表现差异性和呈色机理，本研究以白果蒲桃不同叶位的叶片为研究对象，通过 RHSCC

（Royal horticultural society color chart）色彩测定和色差参数对叶片色彩进行分析，以及测定其叶液的 pH 值和 EC 值、可溶性糖含量、相关的色素含量并分析其比例差异，利用数学色彩模型及相关性分析等统计学方法，探讨叶色表型与色差参数以及呈色生理因子之间的相关性，以期为彩叶树种的色差参数评价和呈色机理分析提供理论依据，并为特色彩叶乡土树种的开发和利用提供参考和借鉴。

1 材料与方法

植物材料来源于福建省林业科技试验中心白果蒲桃种苗试验圃，地处漳州市南靖县（ $24^{\circ}30'49''\text{N}$, $117^{\circ}19'12''\text{E}$, 海拔 90 m），地面温度年均值 24.9 ℃，年平均水量 1 821.1 mm，为亚热带海洋性季风气候。生长环境地势开阔、土质肥沃疏松、排水良好、光照充足。

1.1 实验材料

选取试验圃中的白果蒲桃扦插苗为实验材料。于 2023 年 1 月选取 10 株处于同一生长期、生长健壮、叶色表现均一的植株进行表型差异观测和采样。按照 4 个不同叶位（Y1~Y4）分别混合取样（图 1），并分为两组用于测定生理指标，一组为新鲜样品，另一组置于电热鼓风干燥箱中在 55 ℃下进行杀青干燥，用植物组织破壁机粉碎备用。

1.2 实验方法

1.2.1 叶色表型差异观测

采用英国皇家园艺学会比色卡 RHSCC 和色差仪（NH310，三恩时）对不同叶位（Y1~Y4）的新鲜植物叶片的叶色表型进行测定分析，选取 10 株，每株每个叶位做 3 次生物学重复。通过色

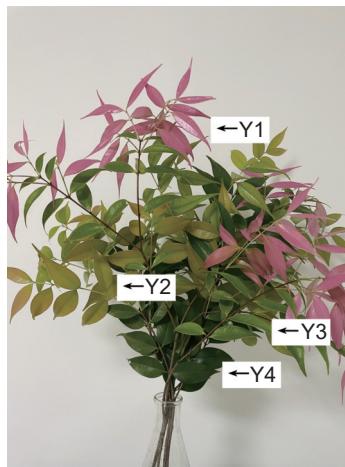


图 1 白果蒲桃不同叶位示意图

Fig. 1 Schematic of different leaf positions of *Syzygium album*

差仪分别采集 RGB 色彩和 Lab 颜色模式。根据 Matlab RGB 软件转化获取色值 HEX 实色效果；根据 Lab 模式采集叶片的明度参数 L^* 以及色相参数 a^* 、 b^* ，并根据 $C^* = (a^2 + b^2)^{1/2}$ 计算彩度值 C^* ，对其叶片表型色差参数进行数据量化^[17]。

1.2.2 叶片细胞液 pH 值和 EC 值的测定

取新鲜植株叶片 1 g，加入 0.1 g 石英砂后在液氮条件下充分研磨后转移至 15 mL 的离心管中，定容至 10 mL。定容后的溶液 4 °C，1 200 r/min 离心 2 min 后，取其上清液。采用台式 pH 计和电导率仪 (FE30K-PLUS, 梅特勒托利多) 测定其 pH 值和 EC 值。每个叶位做 3 个重复，取其平均值。

1.2.3 叶绿素与类胡萝卜素的提取与测定

取新鲜的白果蒲桃叶片，用打孔器避开叶脉取叶面积为 3 cm² 的叶片^[18]，加入 10 mL 混合提取液 (丙酮 : 乙醇 : 蒸馏水 = 4.5 : 4.5 : 1)^[19]，在黑暗环境下浸提 24 h，至叶片发白。使用紫外分光光度计 (UV1780, SHIMADZU)，分别在 665、642、474 nm 处测定溶液吸光度，并计算其叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、总叶绿素 (Chl)、叶绿素 a/b (Chla/b) 及类胡萝卜素 (Car) 的含量，每个叶位做 3 个重复，取其平均值。

1.2.4 类黄酮、花青素和可溶性糖生理指标的测定

将白果蒲桃叶片烘干至恒重，粉碎，过 30~50 目筛后，称取 0.1 g 采用 Solarbio 植物类黄酮 (Fla)、花青素和可溶性糖含量检测试剂盒进行测定。根据标准品浓度及其吸光度 (OD 值) 使用 ELISA Calc 回归拟合计算程序拟合曲线回归方

程 ($R^2 \geq 0.98$)，并根据拟合曲线计算实验样本的物质含量。

1.3 数据分析

本研究使用 Excel 2021 软件对所有数据进行统计整理。各生理指标相关数据采用 DPS 7.05 软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA) 和 LSD 多重比较方法分析，数据以平均值±标准误表示。使用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同叶位的叶色表型及颜色参数差异分析

本研究发现，白果蒲桃在同一时期不同叶位上呈现出显著的叶色差异 (图 2)，其叶色主要分为 4 种：Y1 为紫红色 (RHS2015-58A, Strong purplish red)，位于枝干最前梢；Y2 为深绿黄色 (RHS2015-152D, Dark greenish yellow)，位于枝干中上部；Y3 为亮黄绿色 (RHS2015-149A, Brilliant yellow green)，位于枝干中部；Y4 为深黄绿色 (RHS2015-139A, Dark yellowish green)，位于枝干下端。即白果蒲桃不同叶位从上到下 (Y1 至 Y4)，叶片红色消退，逐渐过渡为黄绿色和绿色。

白果蒲桃的不同叶色表型的明度值 L^* 、红/绿度值 a^* 、黄/蓝度 b^* 及彩度值 C^* 如图 3 所示。由图 3 可知，白果蒲桃叶色差异显著，Y1 和 Y2 叶片 a^* 值为正 (+)，颜色偏红，Y1 叶色红度 ($+a^*$) 显著最高；Y3 和 Y4 叶片 a^* 值为负 (-)，颜色偏绿，Y2、Y3 和 Y4 叶片的 b^* 值为正 (+)，颜色偏黄；Y3 的黄度 ($+b^*$)、色泽亮度 L^* 和纯度 C^* 皆显著较高。综合以上分析结果发现：当 a^* 值变为负值时，叶片由红色向绿色过渡， b^* 值变为正值时，叶片由红色向黄绿色过渡，从 Y1 到 Y4， b^*

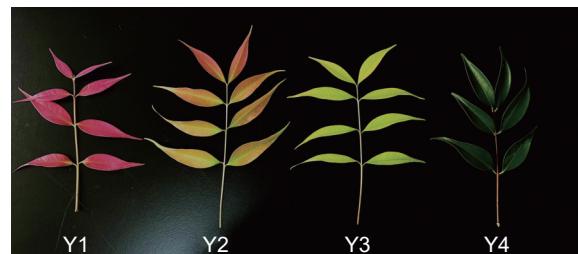


图 2 白果蒲桃不同叶位的叶色表型差异

Fig. 2 Phenotypic differences in leaf color at different leaf positions of *Syzygium album*

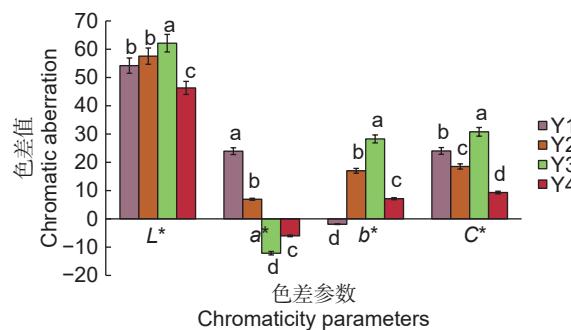


图 3 不同叶色表型的颜色参数
Fig. 3 Color parameters of different leaf color phenotypes

值先升高, 后降低。Y1 表现为显著偏红叶色; Y2 表现为“红-黄-绿”混合叶色; Y3 和 Y4 表现为不同程度的黄绿叶色, Y3 的黄度 ($+b^*$) 和亮度 (L^*) 高于 Y4, 而 Y4 的绿度 ($-a^*$) 高于 Y3, 即 Y3 为亮黄绿色, Y4 深黄绿色。这与 RHSCC 的表型观测一致。

2.2 不同叶色表型的 pH 值、EC 值以及可溶性糖 (SSC) 含量分析

由表 1 可知, 白果蒲桃不同叶色表型之间的叶液 pH 值、电导率 (EC 值) 和可溶性糖 (SSC) 含量有显著性差异。4 种叶色的叶液 pH 值均低于 5.0, 呈弱酸性; Y4 的叶液 pH 值显著较高, Y1 和 Y2 的叶液 pH 值差异并不显著。Y1 的 EC 值显著高于 Y2、Y3 和 Y4, 由 Y1 到 Y4, 叶液 pH 值逐渐升高, EC 值逐渐下降。Y4 的可溶性糖的含量显著较高, 而 Y1、Y2 和 Y3 之间的可溶性糖含量差异并不显著。

表 1 不同叶色表型的叶液 pH 值、EC 值和可溶性糖含量

Table 1 Leaf sap pH, EC, and soluble sugar content for different leaf color phenotypes

样品 Sample	pH 值 pH value	电导率 Electric conductivity / $\mu\text{S}/\text{cm}$	可溶性糖含量 Soluble sugar content / mg/g
Y1	$3.29 \pm 0.02\text{c}$	$1288.68 \pm 17.40\text{a}$	$2.45 \pm 0.18\text{b}$
Y2	$3.47 \pm 0.16\text{c}$	$1120.67 \pm 1.76\text{b}$	$2.93 \pm 0.11\text{b}$
Y3	$3.88 \pm 0.07\text{b}$	$981.00 \pm 13.45\text{c}$	$2.43 \pm 0.16\text{b}$
Y4	$4.83 \pm 0.08\text{a}$	$544.33 \pm 6.12\text{d}$	$4.06 \pm 0.35\text{a}$

注: Y1、Y2、Y3 和 Y4 表示不同叶位的白果蒲桃叶片。同列不同小写字母表示不同叶位间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Notes: Y1, Y2, Y3 and Y4 represent leaf of *Syzygium album* with different leaf positions. Different lowercase letters indicate significant ($P < 0.05$) differences between different leaf positions. Same below.

2.3 不同叶色的色素组成及其比值差异分析

白果蒲桃叶片的色素组成及含量变化如图 4 所示, 在同一生长阶段, 不同叶色的色素含量差异显著。Y4 叶片中的 Chla、Chlb、Chl、Car 和 Fla 含量均显著最高, 其中 Chla、Fla 含量差异显著, 即 $Y4 > Y3 > Y2 > Y1$; Y1、Y2 和 Y3 3 种叶片的 Chlb 和 Car 含量差异不显著, Y2 和 Y3 的总 Chl 含量差异不显著。4 种叶片中花青素 (OPC) 的含量差异显著, 即 $Y2 > Y1 > Y4 > Y3$, 表明白果蒲桃的叶色表型与色素组分和含量密切相关。

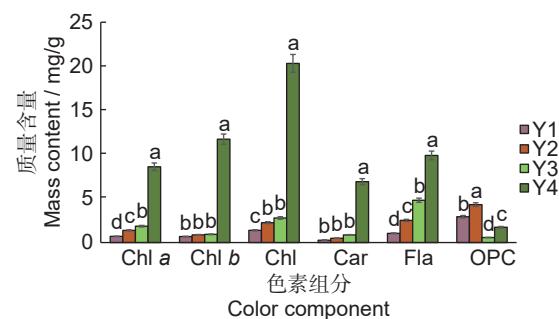


图 4 不同叶色的色素成分及含量变化
Fig. 4 Changes in pigment composition and content for different leaf colors

单向地比较和分析植物色素的组分和含量, 很难全面地解释叶色表型差异和呈色因子, 因此本研究通过色素均值来计算各植物色素组分之间的比值差异系数 (表 2), 分析各色素组分之间的相对占比情况。由表 2 可知: (1) Y1、Y2 和 Y3 的 Chla/b 系数均大于 1, 说明 Y1、Y2、Y3 的 Chla 占比大于 Chlb, Chla 为叶绿素的主要组分; (2) Y2 和 Y3 的 Fla/Chl 系数大于 1, 说明在 Y2 和 Y3 中其类黄酮的相对含量高于总叶绿素, 使其叶色表型呈现偏黄的绿色; (3) Y1 和 Y2 的 OPC/Chl 和 OPC/Fla 系数均大于 1, 接近 2, 说明

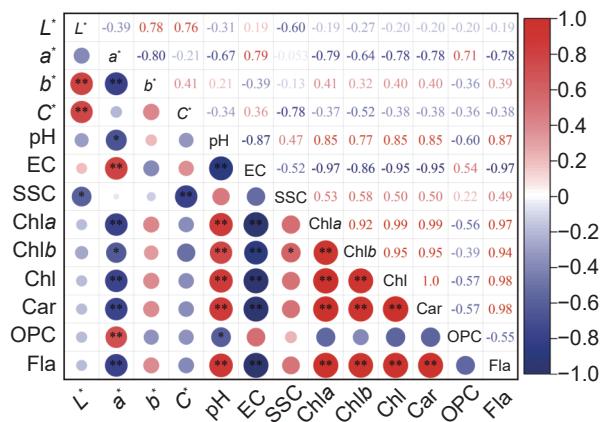
表2 不同叶色表型的色素比值系数
Table 2 Pigment ratio coefficients of different leaf color phenotypes

样品 Sample	Y1	Y2	Y3	Y4
叶绿素 a/b	1.03	1.58	2.01	0.73
类胡萝卜素/叶绿素	0.19	0.22	0.31	0.34
类黄酮/叶绿素	0.75	1.12	1.72	0.49
花青素/叶绿素	2.11	1.91	0.20	0.09
花青素/类黄酮	2.81	1.71	0.12	0.18

在Y1和Y2的色素组分中, 花青素为主要色素, 是叶片颜色呈红色和偏红色的原因。叶绿素之间以及总叶绿素与各植物色素之间的比值系数差异形成了不同的叶色表型。

2.4 叶色呈色生理因子的相关性分析

由图5中色差参数与各指标的相关性分析可知, 白果蒲桃的色泽亮度 L^* 值与黄/蓝度 b^* 值和彩度 C^* 值均呈极显著正相关, 与可溶性糖含量为显著负相关; 红/绿度 a^* 值与 EC 值和花青素含量呈极显著正相关, 与黄/蓝度 b^* 值、叶液 pH 值和叶绿素、类胡萝卜素、类黄酮的含量呈极显著负相关; 颜色彩度 C^* 值与可溶性糖含量为极显著负相关。叶液 pH 值与叶绿素、类胡萝卜素、类黄酮的含量为极显著正相关, 与 EC 值为极显著负相关; 类黄酮含量与叶绿素和类胡萝卜素含量呈极显著



*: $P \leq 0.05$, **: $P \leq 0.01$, 下同。红色表示正相关(+), 蓝色表示负相关(-); L^* : 明亮度; a^* : 红/绿度; b^* : 黄/蓝度; C^* : 颜色纯度; SSC: 可溶性糖; Chla: 叶绿素 a; Chlb: 叶绿素 b; Chl: 总叶绿素; Car: 类胡萝卜素; OPC: 花青素; Fla: 类黄酮。下同。

Red indicates positive correlation (+), blue indicates negative correlation (-). L^* : Bright; a^* : Red/Green; b^* : Yellow/Blue; C^* : Color purity; SSC: Soluble sugar; Chla: Chlorophyll a; Chlb: Chlorophyll b; Chl: Total chlorophyll; Car: Carotenoid; OPC: Anthocyanin; Fla: Flavonoid. Same below.

图5 色差参数与各生理指标的相关性分析

Fig. 5 Correlation analysis of color difference parameters with each physiological index

正相关。

通过叶片色差参数与色素比值系数相关性分析可以更加全面地了解叶片呈色因子及各色素组分之间的分布差异(图6)。本研究发现, 叶片色泽亮度 L^* 值与 $Chla/b$ 和 Fla/Chl 的比值系数呈极显著正相关; 红/绿度值 a^* 与 OPC/Fla 比值系数呈极显著正相关; Car/Chl 与 OPC/Chl 比值系数之间为极显著负相关。结合色差参数和色素比值差异分析可知, 若 Fla/Chl 系数大于 1, 颜色偏黄 ($+b^*$); 若 OPC/Chl 和 OPC/Fla 系数大于 1, 则颜色偏红 ($+a^*$)。

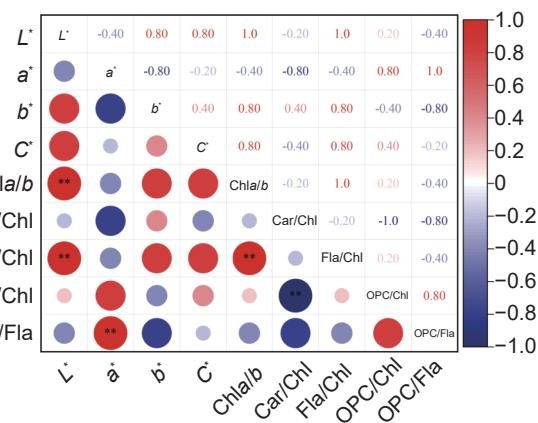


图6 色差参数与色素比值系数的相关性分析
Fig. 6 Correlation analysis of color difference parameters and pigment ratio coefficients

3 讨论

3.1 不同叶色表型的色素变化与比值系数分析

彩叶植物的叶色表现是由内部调控机制和外界环境共同作用的结果, 形成机制较为复杂^[22]。近几年关于叶色转换机制的研究主要探讨了叶色变化与各种色素含量变化之间的关系以及与色素合成相关的候选基因^[23, 24], 但对于不同植物色素组分之间的比例分布与色差参数的相关性还需进一步研究。研究发现, 植物色素是影响植物叶片呈色

的主要因素，包括叶绿素、类胡萝卜素和类黄酮类等色素^[25]，叶绿素主要包含 Chla 和 Chlb，是叶片呈绿色的主要色素；类胡萝卜素与叶绿素共同反应，使之呈黄色至橘黄色；类黄酮类色素主要包含花青素、花色苷、黄酮醇等色素，使叶片表现为红色至蓝色，而花青素是叶片呈红色至紫色的主要色素^[26]。植物叶色差异的直接原因是叶片中色素的种类和比例发生了变化，花青素直接影响叶片颜色，其他植物色素也会通过辅助素效应影响叶片颜色^[27,28]。本研究通过对不同植物色素间的比例分布与色差参数的相关性分析，发现呈色取决于花青素与叶绿素、类黄酮的比值系数及差异。当白果蒲桃的类黄酮/叶绿素比值系数大于 1，则叶片颜色偏黄（+b*）；当花青素/叶绿素和花青素/类黄酮的系数大于 1，则颜色偏红（+a*），花青素为主要色素，这也是叶片颜色呈红色和偏红色的原因。李玲^[29]通过对红枫（*Acer palmatum* ‘Atropurpureum’）、紫叶李（*Prunus cerasifera* ‘Atropurpurea’）、紫叶小檗（*Berberis thunbergii* ‘Atropurpurea’）、紫叶桃（*Prunus persica* ‘Ziye’）、王族海棠（*Malus* ‘Royalty’）等 5 种红叶植物，发现色素比例决定叶片颜色，当叶片中的花青素与叶绿素的比值大于 2 时，花青素的主导作用效果显著，叶绿素互补效应较弱，使叶片呈现红色。刘平等^[30]的研究发现，当美国红枫（*Acer×freemanii* ‘Autumn Blaze’）和元宝枫（*Acer truncatum* Bunge）的花青素/叶绿素比值系数大于 2.5 时，花青素占主导，呈红色。这与本研究的实验结果一致，植物叶片呈色差异不是某一色素含量变化所致，而是色素含量和比例变化对其叶色表型的综合效果，色素的含量变化和比值差异会直接影响叶片呈色表型^[31,32]，增加了叶色变化的多样性^[33]。综上所述，色素的比值系数可为叶片呈色与表型描述提供一个更加量化的参考指标。

3.2 叶片色差参数与各叶色生理指标间的关系

研究表明，通过植物色差仪可将叶片颜色进行量化测量，使色彩度和色差度数据化，降低个人视觉感官带来的误差^[34,35]。植物的色彩度具有重叠性，不同组分色素之间由于不同的比例系数变化，呈现不同的叶色表型。刘易超等^[36]通过对中华金叶榆（*Ulmus pumila* ‘ZhonghuaJinye’）叶

片色彩值及色素含量分析发现，叶绿素 b 对色彩值的 L*、b* 的影响较小，叶绿素 a 和类胡萝卜素是引起叶片颜色变化的主要因素。王改萍等^[37]发现在金叶银杏（*Ginkgo biloba* L.）中 Chla 和 Chlb 均与色差参数 L*、a*、b* 和 C* 呈负相关，Car 与色差参数 a* 呈显著正相关，与 b* 呈极显著正相关。本研究与前人的研究结果一致，叶片的色差参数与色素的种类和组分密切相关，而其他相关生理指标则是通过影响植物色素的形成与积累，间接影响叶片呈色表型和叶色差异的。安然等^[20]的研究发现，北美栎树（*Quercus* spp.）中可溶性糖积累有利于花青素的合成，与花青素含量显著相关，贾庆彬等^[38]在对拧筋槭（*Acer triflorum* Komarov）的 3 种叶色分析中发现，花青素与 Chlb、pH 值和 EC 值存在显著正相关，这表明可溶性糖的积累、pH 值和 EC 值的变化是通过影响花青素和叶绿素组分的积累，间接参与叶色变化。在白果蒲桃叶色形成与呈色差异的过程中，叶色参数、植物色素以及相关间接生理因子之间存在一定的耦合相关性，是相互作用影响的。通过对相关性的分析，了解表型性状与生理特性间的相互关系与关联程度，对探究性状间的互作效应、特定性状的选择等具有重要作用，也为今后彩叶树种的选育和观赏性状的评价提供参考与借鉴。

4 结论

综合叶片色差和色素组分差异分析可知，白果蒲桃不同叶位的叶片呈现显著的颜色差异，叶位从上到下，由红色到黄绿色再到绿色，叶色红度逐渐下降，绿度和黄度逐渐升高。结合叶片 RHSCC 色彩测定，表明使用植物色差仪进行叶色表型观测方法可行，不仅可以如实反映表型颜色状态，还可以定量数据化表征颜色与色泽在三维空间中的表现，进行精准量化评估，降低个人感官的误差。

不同叶色表型与其色素组分以及各色素之间的比值系数密切相关。叶片的呈色与色差变化也并不是由某一种色素单独所决定，而是色素组分、含量和比例变化对其叶色表型综合反映的结果。白果蒲桃不同叶色表型的呈色差异主要取决于花青素与叶绿素、类黄酮等植物色素组分之间的相对占比和分布。

参考文献:

- [1] 于晓南, 张启翔. 彩叶植物多彩形成的研究进展 [J]. 园艺学报, 2000, 27 (S1): 533-538.
- Yu XN, Zhang QX. Review of researches on leaf color Changing of color-leaved plants[J]. *Acta Horticulturæ Sinica*, 2000, 27 (S1): 533-538.
- [2] 刘秀文. 湖南彩叶树呈色机理及园林应用研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2007: 5-17.
- [3] 马晓. 榆树叶色变化的生理生化研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2006: 2-15.
- [4] Luo YY, He J, Long YL, Xu L, Zhang L, et al. The relationship between the color landscape characteristics of autumn plant communities and public aesthetics in urban parks in Changsha, China[J]. *Sustainability*, 2023, 15 (4): 3119.
- [5] 尹国平, 刘雄盛, 蒋懿, 王勇, 杨继生, 等. 枫香变红过程中叶片组织结构、光合特性及色素含量变化研究 [J]. 广西植物, 2022, 42 (7): 1213-1221.
- Yin GP, Liu XS, Jiang Y, Wang Y, Yang JS, et al. Changes of tissue structures, photosynthetic characteristics and pigment contents of *Liquidambar formosana* leaves in the process of turning red[J]. *Guizhou Forestry*, 2022, 42 (7): 1213-1221.
- [6] 潘丽芹, 李纪元, 韦海忠, 李绍翠, 何丽波. 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 LQ, Li JY, Wei HZ, Li SC, He LB. Correlation analysis on pigment content and leaf color parameters of *Camellia japonica* cultivars[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18 (2): 579-585.
- [7] 姜卫兵, 庄猛, 韩浩章, 戴美松, 花国平. 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 WB, Zhuang M, Han HZ, Dai MS, Hua GP. Progress on color emerging mechanism and photosynthetic characteristics of colored-leaf plants[J]. *Acta Horticulturæ Sinica*, 2005, 32 (2): 352-358.
- [8] 金丽丽, 张姣美, 陈建宇. 彩叶树种的研究概述 [J]. 中国林副特产, 2022 (3): 81-82.
- [9] 《福建植物志》编写组. 福建植物志: 第4卷: 种子植物 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1990: 19-102.
- [10] 郑清芳. 福建特有树种 [M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2014: 309.
- [11] 肖丽芳, 罗敏贤, 陈绪辉, 杨皖乔, 方镇福, 郑世群. 福建极小种群植物白果蒲桃生境群落特征和物种多样性 [J]. 东北林业大学学报, 2022, 50 (5): 26-31.
- Xiao LF, Luo MX, Chen XH, Yang WQ, Fang ZF, Zheng SQ. Habitat community characteristics and species diversity of *Syzygium album* minimal population in Fujian Province[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2022, 50 (5): 26-31.
- [12] 杨皖乔. 白果蒲桃生境群落特征与保护评价研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2018: 5-18.
- [13] 郑世群, 杨皖乔, 方镇福, 郑柠, 刘金福, 等. 极小种群植物白果蒲桃种群现状与保护评价 [J]. 应用生态学报, 2021, 32 (1): 103-112.
- Zheng SQ, Yang WQ, Fang ZF, Zheng N, Liu JF, et al. Population status and protection evaluation of *Syzygium album*, a species with extremely small population[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32 (1): 103-112.
- [14] 刘德朝, 江瑞荣, 陈孝丑, 方镇福. 白果蒲桃扦插快繁技术研究 [J]. 防护林科技, 2017 (8): 30-34.
- Liu DC, Jiang RR, Chen XC, Fang ZF. Rapid propagation technology of *Syzygium album* cutting[J]. *Protection Forest Science and Technology*, 2017 (8): 30-34.
- [15] 姬语潞. 极小种群野生植物白果蒲桃的种子萌发特性研究 [J]. 林业科技, 2023, 48 (6): 1-5.
- Ji YL. Seed germination characteristics of plant species with extremely small population *Syzygium album*[J]. *Forestry Science & Technology*, 2023, 48 (6): 1-5.
- [16] 陈春. 白果蒲桃组织培养技术 [J]. 亚热带农业研究, 2021, 17 (3): 200-204.
- Chen C. Tissue culture technique of *Syzygium album*[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2021, 17 (3): 200-204.
- [17] Suriano S, Balconi C, Valoti P, Redaelli R. Comparison of total polyphenols, profile anthocyanins, color analysis, carotenoids and tocots in pigmented maize[J]. *LWT*, 2021, 144: 111257.
- [18] 许大全. 叶绿素含量的测定及其应用中的几个问题 [J]. 植物生理学通讯, 2009, 45 (9): 896-898.
- Xu DQ. Several problems in measurement and application of chlorophyll content[J]. *Plant Physiology Communications*, 2009, 45 (9): 896-898.
- [19] 姬语潞, 杨维, 李涵, 曹桦, 陆琳, 等. 铁皮石斛叶色突变体的叶绿体超微结构、光合色素和叶绿素荧光特性的研究 [J]. 植物科学学报, 2020, 38 (2): 260-268.
- Ji YL, Yang W, Li H, Cao H, Lu L, et al. Study on chloroplast ultrastructure, photosynthetic pigments, and chlorophyll fluorescence characteristics of leaf color mutants in *Dendrobium officinale* Kimura et Migo[J]. *Plant Science Journal*, 2020, 38 (2): 260-268.
- [20] 安然, 王树凤, 陈益泰, 汪阳东, 傅火勇, 等. 栎树秋季叶色多样性及相关生理特性的变化 [J]. 林业科学研究, 2022, 35 (2): 78-88.
- An R, Wang SF, Chen YT, Wang YD, Fu HY, et al. Leaf color diversity and the change of physiological characteristics of *Quercus* spp. during the discoloration period in autumn[J]. *Forest Research*, 2022, 35 (2): 78-88.
- [21] 李力, 张盛楠, 刘亚敏, 刘玉民. 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 SN, Liu YM, Liu YM. Lab model based analy-

- sis on physiological factors affecting color of *Acer rubrum* L.[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science Edition), 2017, 45 (9): 87–94.
- [22] 张磊, 曹德美, 胡建军. 植物叶色形成调控机制研究进展 [J]. 植物遗传资源学报, 2021, 22 (2): 293–303.
- Zhang L, Cao DM, Hu JJ. Advance of the regulation mechanism of leaf color formation in plants[J]. *Journal of Plant Genetic Resources*, 2021, 22 (2): 293–303.
- [23] Bao YR, Nie TK, Wang DD, Chen Q. Anthocyanin regulatory networks in *Solanum tuberosum* L. leaves elucidated via integrated metabolomics, transcriptomics, and *StAN1* overexpression[J]. *BMC Plant Biol*, 2022, 22 (1): 228.
- [24] Huang GH, Liao XZ, Han Q, Zhou ZZ, Liang KN, et al. Integrated metabolome and transcriptome analyses reveal dissimilarities in the anthocyanin synthesis pathway between different developmental leaf color transitions in *Hopea hainanensis* (Dipterocarpaceae) [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 830413.
- [25] Chen XH, Liu HQ, Wang SJ, Zhang C, Liu LY, et al. Combined transcriptome and proteome analysis provides insights into anthocyanin accumulation in the leaves of red-leaved poplars[J]. *Plant Mol Biol*, 2021, 106 (6): 491–503.
- [26] 冯露, 吴际洋, 鞠易倩, 叶远俊, 程堂仁, 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 JY, Ju YQ, Ye YJ, Cheng TR, et al. Leaf color characteristics and photosynthetic characteristics of purple-leaved *Lagerstroemia indica* ‘Ebony Ember’[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39 (12): 93–101.
- [27] Lu XY, Chen Z, Gao JL, Fu SL, Hu HR, Ren J. Combined metabolome and transcriptome analyses of photosynthetic pigments in red maple[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2020, 154: 476–490.
- [28] Song LB, Ma QP, Zou ZW, Sun K, Yao YT, et al. Molecular link between leaf coloration and gene expression of flavonoid and carotenoid biosynthesis in *Camellia sinensis* cultivar ‘Huangjinya’[J]. *Front Plant Sci*, 2017, 8: 237409.
- [29] 李玲. 五种红色叶植物叶片色素分析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013: 1–6.
- [30] 刘平, 宋岩, 陆秀君, 曹宝慧, 刘思佳, 王玉涛. 美国红枫和元宝枫幼叶春季转色期生理特性研究 [J]. 生态环境学报, 2018, 27 (3): 452–458.
- Liu P, Song Y, Lu XJ, Cao BH, Liu SJ, Wang YT. Research of physiological characteristics in juvenile leaves of *Acer × freemanii* ‘Autumn Blaze’ and *Acer truncatum* during leaf color transformation in spring[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, 27 (3): 452–458.
- [31] 孙健, 张鸿翎, 韩涛. 4 种彩叶树春季叶片转色期色素含量变化研究 [J]. 西南林业大学学报, 2022, 42 (6): 158–163.
- Sun J, Zhang HL, Han T. A study on changes of pigment content in leaves of 4 color-leaved species during color changing period in spring[J]. *Journal of Southwest Forestry University*, 2022, 42 (6): 158–163.
- [32] Cooper CE, Vogel JG, Muir JP, Moore GW. Leaf functional trait responses to changes in water status differ among three oak (*Quercus*) species[J]. *Plant Ecol*, 2018, 219 (12): 1463–1479.
- [33] Tian YY, Wang HY, Sun P, Fan YG, Qiao MM, et al. Response of leaf color and the expression of photoreceptor genes of *Camellia sinensis* cv. Huangjinya to different light quality conditions[J]. *Sci Hortic*, 2019, 251: 225–232.
- [34] Itle RA, Kabelka EA. Correlation between L*a*b* color space values and carotenoid content in pumpkins and squash (*Cucurbita* spp.) [J]. *HortScience*, 2009, 44 (3): 633–637.
- [35] 沈平, 童德文, 陈郑邦, 陈炜, 石三三, 等. 基于叶色偏态分布模式的鲜烟叶成熟度判定 [J]. 烟草科技, 2021, 54 (8): 26–35.
- Shen P, Tong DW, Chen ZM, Chen W, Shi SS, et al. Maturity discrimination on fresh tobacco leaves based on skewed leaf color distribution patterns[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2021, 54 (8): 26–35.
- [36] 刘易超, 左力辉, 冯树香, 闫淑芳, 黄印冉, 杨敏生. 中华金叶榆不同位置叶片呈色分析 [J/OL]. 分子植物育种, 2025: 1–17. [2025-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220527.1558.008.html>.
- Liu YC, Zuo LH, Feng SX, Yan SF, Huang YR, Yang MS. Research on the color generated of leaf at different positions of *Ulmus pumila* ‘Zhonghuajinye’[J/OL]. *Molecular Plant Breeding*, 2025: 1–17. [2025-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.s.20220527.1558.008.html>.
- [37] 王改萍, 张磊, 姚雪冰, 祝遵凌. 金叶银杏叶色变化特性分析 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2020, 44 (5): 41–48.
- Wang GP, Zhang L, Yao XB, Zhu ZL. An analysis of color variation characteristics of golden leaf ginkgo[J]. *Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2020, 44 (5): 41–48.
- [38] 贾庆彬, 孙文生, 刘庚, 张海啸, 刘庆林. 3 种叶色型拧筋槭叶片生理特性比较 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2020, 21 (2): 157–162.
- Jia QB, Sun WS, Liu G, Zhang HX, Liu QL. Comparison of physiological feature of three leaf color types of *Acer triflorum*[J]. *Journal of Beihua University* (Natural Science), 2020, 21 (2): 157–162.