

2 种刺柏属彩色树叶色参数与色素变化

王 玥^{1,2}, 裴顺祥^{1,2}, 孙敬爽^{1,2}, 郭 慧^{1,2}, 吴 莎^{1,2}, 吴 迪^{1,2}, 褚 洋^{1,2}, 辛学兵^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院 华北林业实验中心, 北京 102300; 2. 中国林业科学研究院 华北林业实验中心 北京九龙山暖温带森林国家长期科研基地, 北京 102300)

摘要: 【目的】研究刺柏属 *Juniperus* 彩色树叶色参数与色素变化规律。【方法】以欧洲刺柏‘金叶疏枝’ *Juniperus communis* ‘Gold Cone’ (JC) 和鹿角桧‘金叶’ *Juniperus × media* ‘Pfitzeriana Aurea’ (JM) 2 年生扦插苗为对象, 测定不同季节叶色参数 (L^* 、 a^* 、 b^*)、光合色素 (叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素) 质量分数和花色素苷相对含量, 并进行相关分析, 建立叶色参数和色素含量的回归方程。【结果】①不同季节欧洲刺柏‘金叶疏枝’和鹿角桧‘金叶’的叶色参数变化趋势不同。‘金叶疏枝’的 L^* 、 b^* 值变化趋势相同, 始终为正值, a^* 值秋冬季显著升高, 由负变正; ‘金叶’的 L^* 值春夏显著上升, a^* 值波动幅度不明显, 色相始终偏绿, b^* 值春夏显著上升, 秋冬季无波动, 色相始终偏黄; 春夏秋季‘金叶疏枝’的 L^* 、 b^* 值显著高于‘金叶’。②‘金叶疏枝’的花色素苷相对含量与 L^* 、 b^* 值呈极显著负相关, 与 a^* 值呈极显著正相关; ‘金叶’的光合色素与 b^* 值呈极显著负相关。③逐步回归结果表明: a^* 值与 b^* 值可以准确预估‘金叶疏枝’花色素苷相对含量的年变化和秋季变化, b^* 值和 L^* 值可以准确预估‘金叶’光合色素质量分数的年变化和夏季色素变化。【结论】2 种刺柏属彩色树的叶色参数与色素含量关系显著相关, 不同树种不同时期存在差异; ‘金叶疏枝’叶色观赏性整体好于‘金叶’。建立的叶色参数与色素含量回归方程, 可以实现以叶色参数精确预估叶片色素含量。图 2 表 4 参 32

关键词: 彩色树; 叶色参数; 叶绿素; 类胡萝卜素; 花色素苷

中图分类号: S682.36 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2021)01-0138-09

Change of color parameters and pigment content of colored leaves of two *Juniperus* cultivars

WANG Yue^{1,2}, PEI Shunxiang^{1,2}, SUN Jingshuang^{1,2}, GUO Hui^{1,2}, WU Sha^{1,2}, WU Di^{1,2},
CHU Yang^{1,2}, XIN Xuebing^{1,2}

(1. Experimental Center of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China; 2. National Permanent Scientific Research Base for Warm Temperature Zone Forestry of Jiulong Mountain in Beijing, Experimental Center of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China)

Abstract: [Objective] Aimed at a study of the color parameters and the pigment content of *Juniperus* colored leaves. [Method] Two-year-old cutting seedlings of *Juniperus communis* ‘Gold Cone’ (JC) and *Juniperus × media* ‘Pfitzeriana Aurea’ (JM) were used to determine the leaf color parameters (L^* , a^* , b^*), relative content of photosynthetic pigments (chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoids) and anthocyanins, with a correlation analysis conducted to establish the regression equation of leaf color parameters and pigment content. [Result] (1) The changing trends of leaf color parameters of JC and JM are different in different seasons: the L^* and b^* values of JC have the same changing trend and are always positive, and the a^* value increases significantly in autumn and winter from negative to positive. The L^* value of JM rises significantly in spring and summer, with

收稿日期: 2020-03-03; 修回日期: 2020-10-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2019ZC006)

作者简介: 王玥, 从事彩色针叶树良种培育研究。E-mail: 1097561187@qq.com。通信作者: 辛学兵, 副研究员, 博士, 从事生态系统结构与功能研究。E-mail: xinx01@163.com

the fluctuation of a^* value unobvious, the hue always greenish whereas the b^* value rises significantly in spring and summer with no fluctuation in autumn and winter, and the hue always yellow. The L^* and b^* values of JC in spring, summer and autumn are significantly higher than those of JM. (2) The relative content of anthocyanin in JC has a very significant negative correlation with L^* and b^* values, and a very significant positive correlation with a^* value while JM photosynthetic pigments have a very significant negative correlation with b^* value. (3) The results of the stepwise regression equation show that the a^* and b^* values can accurately predict the annual and autumn changes of the anthocyanin content of JC, and the b^* and L^* values can accurately predict the annual and summer changes in the photosynthetic pigment content of JM pigment changes. [Conclusion] The relationship between leaf color parameters and pigment content of the two color trees of *Juniper* genus is significantly correlated with differences in different tree species during in different periods and the leaf color of JC generally better than that of JM. The established regression equation of leaf color parameters and pigment content can help make an accurate estimation of leaf pigment content based on leaf color parameters. [Ch, 2 fig. 4 tab. 32 ref.]

Key words: leaf color parameters; chlorophyll; carotenoids; anthocyanins;

近年来,随着园林布景、环境绿化要求的日益提高,彩色针叶树的需求量也随之增大。彩色针叶树株型丰富多姿,叶色明亮多彩,观赏期长,是家庭、城市、园林及道路环境绿化的优良植物材料,尤其为北方园林增添了丰富的景观色彩^[1-2]。因此,引进彩色针叶树种,研究并提高其引种适应性、生长繁殖能力和观赏价值是科研和园艺工作的热点方向。目前,国内外关于彩色针叶树的研究主要集中在引种适应性^[3]、扦插繁殖^[4-5]、生长生理^[6-7]以及光合特性^[8]等方面,对观赏性状如叶色变化的研究甚少。对彩色阔叶树研究发现:许多树种叶色变化与其色素含量显著相关,建立两者的回归方程能够通过叶色参数准确预测色素含量的变化,为实现人工调控彩色植物叶色变化、选育优良观赏植物品种提供了理论基础和技术支撑^[9-14]。欧洲刺柏‘金叶疏枝’*Juniperus communis* ‘Gold Cone’和鹿角桧‘金叶’*Juniperus×media* ‘Pfitzeriana Aurea’是引种自比利时的彩色针叶树种,作为彩色针叶树中的金叶植物代表,不同季节均有很高的观赏价值,弥补了园林景观及环境绿化色彩单调的缺憾^[15]。本研究以欧洲刺柏‘金叶疏枝’和鹿角桧‘金叶’为研究对象,测定不同季节 2 种树的叶色参数和色素变化,比较两者观赏性状差异;分析叶色参数与色素的相关关系,建立回归模型。本研究将为‘金叶疏枝’和‘金叶’的叶色变化生理机制研究提供基础,也为叶色调控技术研发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

欧洲刺柏‘金叶疏枝’和鹿角桧‘金叶’来自中国林业科学研究院华北林业实验中心,均为 2 年生扦插苗。

1.2 试验设计

选择生长情况相近的 2 年生‘金叶疏枝’和‘金叶’各 180 株,分别分成 3 个重复;于 2019 年春季、夏季、秋季和冬季,随机采集各重复内 1~2 株扦插苗(整株),用塑封袋封好,放入冰盒,立即带回实验室测定其叶片的叶色参数、光合色素(叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素)质量分数和花色素苷相对含量。

1.3 测定指标

1.3.1 叶色参数测定 参照 1970 年国际照明委员会推出的 CIELab 表色系统,以明亮度(L^*)、色相(a^*)、色相(b^*)表示色彩。 L^* 值从 0 升至 100,表示亮度逐渐增加, a^* 值由小变大,表示由绿色逐渐变为红色, b^* 值由小到大,表示由蓝色逐渐变成黄色。参照黄可等^[11]的方法,采用 EPSON 扫描仪(日本)扫描 2 种刺柏属彩色树扦插苗鲜叶,运用 Adobe Photoshop(CS6, Adobe, 美国)软件的拾色功能,记录叶尖、中心点、叶柄基部等 8 个点的 L^* 、 a^* 、 b^* 的值,取平均值作为叶色参数。

1.3.2 叶片光合色素含量测定 叶绿素上清液的制备参照王学奎等^[16]和陈明等^[17]的方法,并略有改

动。以体积分数 95% 的乙醇为对照, 采用分光光度计分别在波长 665、649 和 470 nm 测定上清液吸光度, 分别计算光合色素的质量分数。叶绿素 a 质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $C_a = 13.95D(665) - 6.88D(649)$, 叶绿素 b 质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $C_b = 24.96D(649) - 7.32D(665)$, 叶绿素总质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $C_{\text{总}} = C_a + C_b$ 。类胡萝卜素质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$): $C_c = [1\,000D(470) - 2.05C_a - 114.8C_b]/245$ 。叶绿体色素质量分数 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$): $(C \times V_{\text{提取液}} \times \text{稀释倍数}) / (m_{\text{样品}} \times 1\,000)$ 。其中: $D(665)$ 、 $D(649)$ 和 $D(470)$ 分别表示叶绿素溶液在波长 665、649 和 470 nm 处的吸光度, $V_{\text{提取液}}$ 为提取液体积, $m_{\text{样品}}$ 为样品质量。

1.3.3 花色素苷相对含量测定 花色素苷提取液的制备参照张洁等^[18]和唐前瑞等^[19]的方法, 以体积分数 1% 的盐酸乙醇为对照, 测定提取液在 520 nm 波长下的吸光度, 以 1 g 叶片鲜质量 (m_{FW}) 在 10 mL 提取液中改变 0.1 个吸光度值作为 1 个色素单位, 则花色素苷相对含量表示为: $A = D(520) / (0.1m_{\text{FW}})$ 。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 和 SPSS 20.0 统计分析软件处理数据, 采用单因素方差 (one-way ANOVA) 分析并采用最小显著性差异法 (LSD) 检验不同季节 2 种刺柏属彩色树叶色参数和色素含量的差异显著性。对叶色参数与色素含量进行 Pearson 相关性检验, 建立 2 种刺柏属彩色树的叶色参数与其色素含量的回归模型。

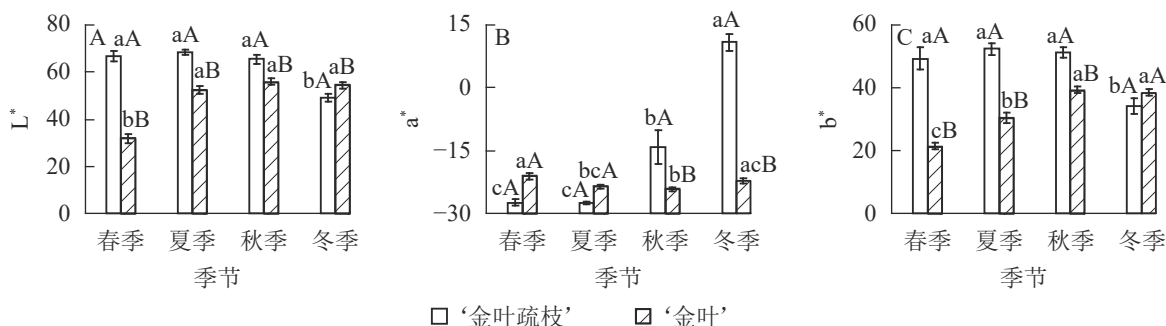
2 结果与分析

2.1 不同季节 2 种刺柏属彩色树叶色参数变化

由图 1A 可知: ‘金叶疏枝’在春、夏、秋 3 季 L^* 值差异不显著 ($P > 0.05$), 冬季显著低于其他季节 ($P < 0.05$), 最高值出现在夏季, 最低值在冬季; ‘金叶’在夏、秋、冬 3 季 L^* 值变化不显著 ($P > 0.05$), 春季显著低于其他季节 ($P < 0.05$), 最高值出现在秋季, 最低值在春季; 春、夏、秋 3 季 ‘金叶疏枝’ L^* 值均显著高于 ‘金叶’ ($P < 0.05$), 冬季 ‘金叶疏枝’ 显著低于 ‘金叶’ ($P < 0.05$)。

由图 1B 可知: ‘金叶疏枝’的 a^* 值在春、夏、秋 3 季均为负值, 且数值逐渐变大, 冬季变为正值; 其绝对值在夏季最高, 春、夏季无显著差异 ($P > 0.05$), 秋季绝对值显著低于春、夏季 ($P < 0.05$); 冬季绝对值最低, 显著低于其他季节 ($P < 0.05$)。‘金叶’的 a^* 值在 4 季均为负值, 数值先减小后增大; 春、冬季无显著性差异 ($P > 0.05$), 夏季分别与秋、冬季无显著性差异 ($P > 0.05$); 绝对值最高出现在秋季, 且显著高于春冬季 ($P < 0.05$), 最低出现在春季。春、夏 2 季 2 树种 a^* 值的绝对值无显著性差异 ($P > 0.05$); 秋季 ‘金叶疏枝’ 绝对值显著低于 ‘金叶’ ($P < 0.05$); 冬季 ‘金叶疏枝’ a^* 值为正值, ‘金叶’ 仍为负值, 且绝对值显著高于 ‘金叶疏枝’ ($P < 0.05$)。

由图 1C 可知: ‘金叶疏枝’的 b^* 值 4 季均为正值, 春、夏、秋 3 季之间无显著差异 ($P > 0.05$), 冬季显著低于其他季节 ($P < 0.05$)。‘金叶’ b^* 值 4 季也均为正值, 秋、冬季无显著差异 ($P > 0.05$); 春、夏、秋 3 季呈递进式显著增高 ($P < 0.05$), 秋季最高, 且显著高于春、夏季 ($P < 0.05$); 其次是冬季, 也显著高于春、夏季 ($P < 0.05$); 绝对值最低出现在春季。春、夏、秋 3 季 ‘金叶疏枝’ b^* 值均显著高于 ‘金叶’ ($P < 0.05$); 冬季 2 种彩色针叶树 b^* 值无显著性差异 ($P > 0.05$)。



不同小写字母表示同一树种不同季节差异显著 ($P < 0.05$),
不同大写字母表示同一季节不同树种差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 不同季节 2 种刺柏属彩色树 L^* 、 a^* 、 b^* 值变化

Figure 1 Changes of L^* , a^* , b^* values of two *Juniperus* colored trees in different seasons

2.2 不同季节 2 种刺柏属彩色树色素含量变化

由图 2A 可知: ‘金叶疏枝’叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素在不同季节变化趋势相同, 秋、冬季显

著降低 ($P < 0.05$)。其中, 叶绿素 a 质量分数在夏季最高, 比秋、冬季显著高 156.52%、168.18% ($P < 0.05$); 其次是春季, 比秋、冬季显著高 126.08%、136.36% ($P < 0.05$), 冬季最低。总叶绿素质量分数夏季最高, 比秋、冬季显著高 129.41%、143.75% ($P < 0.05$), 冬季最低。叶绿素 b 质量分数在夏、秋季间显著下降 ($P < 0.05$), 春夏、秋冬之间无显著性差异; 夏季最高, 比秋、冬季显著高 90.00%、111.11% ($P < 0.05$); 其次是春季, 比冬季显著高 100.00% ($P < 0.05$)。‘金叶疏枝’类胡萝卜素质量分数呈现先增大后减小再增大趋势; 夏季最高, 比春、秋、冬 3 季显著高 33.33%、140.00%、20.00% ($P < 0.05$); 其次是冬季, 比秋季显著高 100.00% ($P < 0.05$), 秋季最低。‘金叶疏枝’花色素苷相对含量在春、夏、秋季均无显著性差异 ($P > 0.05$), 冬季比前 3 季显著高 246.82%、192.59%、130.84% ($P < 0.05$)。

由图 2B 可知: ‘金叶’的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素质量分数随季节变化趋势相同, 均为先增大后减小, 且在夏季达到最高值。夏季叶绿素 a 比春、秋、冬季显著高 36.06%、159.37%、144.11% ($P < 0.05$), 叶绿素 b 比其他 3 季高 63.63%、176.92%、200.00% ($P < 0.05$), 总叶绿素比其他 3 季高 42.85%、160.86%、160.86% ($P < 0.05$); 春季叶绿素 a 比秋、冬显著高 90.62%、79.41% ($P < 0.05$), 叶绿素 b 比秋、冬季高 69.23%、83.33% ($P < 0.05$), 总叶绿素比秋、冬季高 82.60%、82.60% ($P < 0.05$); 秋冬季无显著性差异 ($P > 0.05$)。‘金叶’类胡萝卜素质量分数随季节变化呈先增大后减小再增大趋势, 夏季分别比春、秋、冬季显著高 60.00%、128.57%、77.77% ($P < 0.05$); 春、冬季无显著性差异 ($P > 0.05$), 但分别比秋季高 42.85%、28.57%; 秋季显著低于其他季节 ($P < 0.05$)。花色素苷相对含量呈现“V”字形变化, 春到夏季显著降低 ($P < 0.05$), 秋冬季显著增高 ($P < 0.05$), 夏季比春、冬季显著低 34.13%、26.90% ($P < 0.05$)。

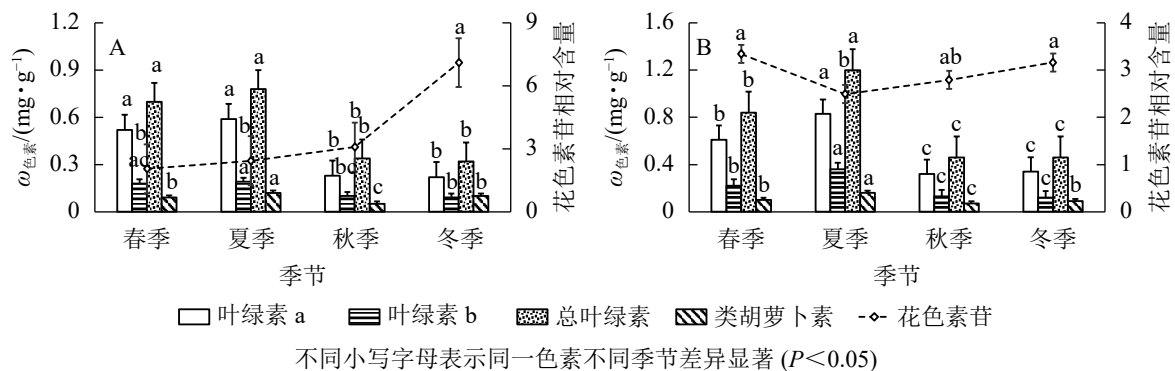


图 2 不同季节 2 种刺柏属彩色树色素变化

Figure 2 Changes of pigment content of two *Juniperus* colored trees in different seasons

2.3 2 种刺柏属彩色树叶色参数与色素含量的相关性分析

对 2 种刺柏属彩色树叶色参数与色素含量年变化的 Pearson 相关性分析 (表 1) 可知: ‘金叶疏枝’的 L^* 、 b^* 值与花色素苷相对含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$); a^* 值与叶绿素 a、总叶绿素质量分数呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与花色素苷相对含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。‘金叶’的 L^* 值与叶绿素 a 质量分数呈显著负相关 ($P < 0.05$); b^* 值与所有光合色素含量均呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。

对 2 种刺柏属彩色树叶色参数与色素含量的季节性变化进行 Pearson 相关性分析, 由表 2 可知: 春季 ‘金叶疏枝’ 和 ‘金叶’ 的叶色参数与色素含量相关性均不显著。夏季 ‘金叶疏枝’ a^* 值与叶绿素 b、总叶绿素质量分数呈显著正相关 ($P < 0.05$), b^* 值与花色素苷相对含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)。夏季 ‘金叶’ L^* 值与所有光合色素含量均呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与花色素苷相对含量呈显著负相关 ($P < 0.05$); a^* 值与类胡萝卜素质量分数呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与花色素苷相对含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$); b^* 值与叶绿素 a、总叶绿素、类胡萝卜素质量分数以及花色素苷相对含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$), 与叶绿素 b 质量分数呈显著负相关 ($P < 0.05$)。秋季 ‘金叶疏枝’ L^* 值与花色素苷相对含量呈显著负相关 ($P < 0.05$); a^* 值与类胡萝卜素质量分数呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与花色素苷相对含量呈极显著正相关 ($P < 0.01$); b^* 值与花色素苷相对含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。冬季 ‘金叶疏枝’ L^* 值与光合色素呈显著负相关 ($P < 0.05$), ‘金叶’ 叶色参数与色素含量秋冬季相关性均不显著 ($P > 0.05$)。

表1 2种刺柏属彩色树叶色参数与色素含量相关性分析

Table 1 Correlation analysis between color parameters and pigment content of two *Juniperus* colored leaves

植物	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
‘金叶疏枝’	L*	0.606	0.542	0.602	0.021	-0.975 ^{▲▲}
	a*	-0.682 [▲]	-0.573	-0.668 [▲]	-0.144	0.934 ^{▲▲}
	b*	0.408	0.302	0.388	-0.097	-0.956 ^{▲▲}
‘金叶’	L*	-0.831 [▲]	-0.311	-0.363	-0.292	-0.519
	a*	0.457	0.063	0.069	0.164	0.595
	b*	-0.983 ^{▲▲}	-0.980 ^{▲▲}	-0.984 ^{▲▲}	-0.949 ^{▲▲}	-0.212

说明：数据上的[▲]、^{▲▲}分别表示在0.05、0.01水平上显著相关

表2 不同季节2种刺柏属彩色树叶色参数与色素含量相关性分析

Table 2 Correlation analysis between color parameters and pigment content of two *Juniperus* colored leaves in different seasons

季节	植物	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
春季	‘金叶疏枝’	L*	0.668	0.395	0.614	0.747	0.098
		a*	-0.693	-0.325	-0.614	-0.857	0.495
		b*	0.657	0.441	0.618	0.709	-0.593
	‘金叶’	L*	0.073	0.015	0.057	0.071	0.671
		a*	0.388	0.411	0.395	0.321	-0.095
		b*	-0.117	-0.131	-0.121	-0.058	0.311
夏季	‘金叶疏枝’	L*	-0.141	0.258	0.045	-0.449	0.005
		a*	0.450	0.562 [▲]	0.558 [▲]	-0.086	0.303
		b*	-0.471	-0.408	-0.492	-0.024	-0.585 [▲]
	‘金叶’	L*	-0.679 ^{▲▲}	-0.723 ^{▲▲}	-0.713 ^{▲▲}	-0.647 ^{▲▲}	-0.628 [▲]
		a*	0.456	0.473	0.474	0.610 [▲]	0.648 ^{▲▲}
		b*	-0.649 ^{▲▲}	-0.597 [▲]	-0.644 ^{▲▲}	-0.755 ^{▲▲}	-0.771 ^{▲▲}
秋季	‘金叶疏枝’	L*	0.298	0.146	0.246	-0.017	-0.624 [▲]
		a*	-0.446	-0.424	-0.458	0.580 [▲]	0.901 ^{▲▲}
		b*	0.246	0.185	0.232	-0.214	-0.715 ^{▲▲}
	‘金叶’	L*	-0.079	0.040	-0.050	0.007	0.039
		a*	-0.313	-0.374	-0.333	-0.316	0.007
		b*	-0.359	-0.426	-0.381	-0.127	0.306
冬季	‘金叶疏枝’	L*	-0.645 [▲]	-0.637 [▲]	-0.645 [▲]	-0.642 [▲]	-0.468
		a*	-0.017	-0.090	-0.035	0.020	-0.170
		b*	-0.466	-0.544	-0.488	-0.536	-0.525
	‘金叶’	L*	-0.173	-0.091	-0.152	-0.076	-0.498
		a*	-0.469	-0.540	-0.491	-0.010	-0.265
		b*	-0.506	-0.426	-0.488	-0.368	-0.358

说明：数据上的[▲]、^{▲▲}分别表示在0.05、0.01水平上显著相关

2.4 2种刺柏属彩色树叶色参数与色素含量回归模型

为进一步探索刺柏属彩色树叶色参数与色素含量的关系，本研究建立了叶色参数与色素含量间的回归模型，为不同叶色期色素含量提供预测。

2.4.1 ‘金叶疏枝’叶色参数与色素含量逐步回归模型 根据表1和表2中‘金叶疏枝’的叶色参数与色素含量相关性分析，以叶色参数L*、a*、b*的数值(l , a , b)为自变量，以与叶色参数有极显著相关关系的花色素苷相对含量为因变量(y)，进行逐步线性回归拟合，得到叶色参数与花色素苷的年变化和秋季变化(其他季节回归方程均不显著)回归模型。由表3可知：年变化回归模型拟合系数为0.967，方

程拟合度高，因此以 a^* 值为自变量 (L^* 、 b^* 值作为变量被剔除) 的回归模型可以准确预测 ‘金叶疏枝’ 的花色素苷相对含量年变化。季节变化逐步回归方程拟合系数为 0.884， a^* 值和 b^* 值共同决定秋季 ‘金叶疏枝’ 花色素苷相对含量的变化。

2.4.2 ‘金叶’ 叶色参数与色素含量逐步回归模型 根据表 1 和表 2 中 ‘金叶’ 的叶色参数与色素含量相关性分析，以叶色参数 L^* 、 a^* 、 b^* 的数值 (l ， a ， b) 为自变量，分别以与其有极显著相关关系的色素含量值为因变量 (y)，进行逐步线性回归拟合，得到叶色参数与色素含量年变化和夏季变化 (其他季节回归方程均不显著) 回归模型。由表 4 可知： b^* 值与叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素及类胡萝卜素质量分数的年变化回归模型的方程拟合系数均大于 0.850，拟合程度高，因此认为以 b^* 值为自变量的回归方程能够准确预测 ‘金叶’ 的光合色素含量的年变化。此外，夏季 b^* 值能准确预测叶绿素 a 质量分数和花色素苷相对含量的变化，夏季 L^* 值能准确预测叶绿素 b、总叶绿素以及类胡萝卜素质量分数的变化。

3 讨论

3.1 2 种刺柏属彩色树叶色参数变化与观赏性分析

彩色植物的叶片色泽是评价其观赏性和综合美景度的重要指标之一^[20]，色泽鲜亮、呈色周期长的彩色植物通常是园林造景和环境绿化的优势树种^[20-21]。通过测定彩色树的叶色参数，量化叶片色泽数值，可减小主观评价对植物观赏价值评估产生的误差^[22]。本研究中，欧洲刺柏 ‘金叶疏枝’ 的 L^* 、 b^* 值变化趋势相同，均在春、夏、秋 3 季保持较高水平， b^* 值在 4 季中均为正值，即整年中色相始终偏黄，认为最佳观赏季为春、夏、秋 3 季，与前人研究^[6] 基本一致；夏季明度和偏黄程度最高，叶色最为鲜亮，认为夏季观赏价值最高。本研究中，鹿角桧 ‘金叶’ 的 L^* 值春季最低，之后显著增高，且在夏、秋、冬 3 季无明显差异， b^* 值在 4 季中均为正值，即色相始终偏黄，且秋季黄色相程度最深；认为最佳观赏季为夏、秋 2 季，与前人研究一致^[8]； a^* 值始终为负值，即整年中色相始终偏绿，冬季并未出现褐色变化，与前人研究有差异，可能是供试植株为 2 年生扦插苗，与成年株的越冬生长有差异。

对 ‘金叶疏枝’ 和 ‘金叶’ 叶色参数的差异比较发现：前者 L^* 、 b^* 值在春、夏、秋 3 季明显高于后者。结合前人研究^[23]，认为春、夏、秋 3 季 ‘金叶疏枝’ 的叶色观赏性高于 ‘金叶’；两者的 a^* 值在春、夏季无明显差异，秋、冬季前者叶色转红而后者仍旧为绿色叶，认为冬季两者因叶色不同而具有不同观赏价值。

3.2 2 种刺柏属彩色树色素含量变化

植物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，而色素种类和含量的变化受内在遗传因子和外部环境因子共同影响^[23-25]。本研究中，2 种彩色树的叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素变化趋势相同，与季鹏章等^[26] 的研究结果一致。受秋冬季温度降低和光照减少影响，秋、冬 2 季 ‘金叶疏枝’ 叶绿素分解加快，叶绿素显著减少；而低温诱导了花色素苷的合成加快^[19, 27]，花色素苷在冬季显著增加。春季 ‘金叶’ 花色素苷相对含量较高，可能是因为春季叶片始萌，受春季较大昼夜温差影响，花色素苷分解速度减缓；至夏季，光照增加和温度上升使得叶绿素显著增加，占主导

表 3 欧洲刺柏 ‘金叶疏枝’ 叶色参数与色素含量逐步回归模型

Table 3 Stepwise regression model for leaf color parameter and pigment content of <i>J. communis</i> ‘Gold Cone’			
色素	逐步回归方程	拟合系数(R^2)	P
(年变化)花色素苷	$y=5.782+0.126a$	0.967	<0.001
(秋季)花色素苷	$y=6.283+0.047a-0.049b$	0.884	<0.001

说明： a 、 b 分别为叶色参数 a^* 、 b^* 的数值

表 4 鹿角桧 ‘金叶’ 叶色参数与色素含量逐步回归模型

Table 4 Stepwise regression model for leaf color parameters and pigment content of <i>J. ×media</i> ‘Pfitzeriana Aurea’			
色素	逐步回归方程	拟合系数(R^2)	P
(年变化)叶绿素a	$y=1.757-0.036b$	0.958	<0.001
叶绿素b	$y=0.801-0.017b$	0.950	0.001
总叶绿素	$y=2.558-0.054b$	0.959	<0.001
类胡萝卜素	$y=0.324-0.006b$	0.875	0.004
(夏季)叶绿素a	$y=1.148-0.011b$	0.847	0.002
叶绿素b	$y=0.943-0.011l$	0.743	0.008
总叶绿素	$y=2.384-0.022l$	0.806	0.004
类胡萝卜素	$y=0.233-0.002l$	0.856	0.005
花色素苷	$y=5.568-0.093b$	0.844	0.018

说明： l 、 b 分别为叶色参数 L^* 、 b^* 的数值

优势^[28-29], 叶色发生变化。

3.3 2种刺柏属彩色树叶色参数与色素含量相关关系

研究表明, 许多彩色植物叶色参数与色素种类及含量存在显著相关关系, 建立线性回归模型能较准确地通过叶色参数变化预估色素含量变化^[9, 13]。但不同时期彩色植物色素变化不同, 叶色参数波动也存在差异^[30]。本研究中, 秋季‘金叶疏枝’光合色素质量分数显著下降, 花色素苷相对含量小幅度上升, 此时叶色参数 L*值、b*值无明显波动, a*值显著上升, 说明花色素苷的变化影响 a*值, 但此时光合色素仍占主导, 故色相仍旧偏绿。而秋冬之际花色素苷显著增加, L*值和 b*值显著降低, a*值从负变正, 叶色转红; 分析发现花色素苷相对含量与 a*值极显著正相关, 与 L*值和 b*值呈极显著负相关, 与郭欢欢等^[12]对秋季黄连木 *Pistacia chinensis* 色素含量与叶色参数的研究结果和齐睿等^[13]对红叶石楠 *Photinia×fraseri* 上位叶色参数与花色素苷含量的研究结果相似。

本研究发现: 夏季‘金叶’光合色素质量分数显著增加, 花色素苷相对含量显著下降; L*值和 b*值显著上升, a*值显著下降; 植物表现为叶色鲜亮, 黄绿色加深, 观赏价值提高。推测在春夏之际色素含量基本相同的变化幅度下, 花色素苷相对含量变化对 L*值和 b*值的影响程度更高, 且为负相关。夏秋之际光合色素质量分数显著下降, 花色素苷相对含量无明显变化; 同时 L*值无明显变化, b*值显著上升, a*值无明显波动。说明夏秋之际光合色素的变化显著影响 b*值, 且呈负相关。冬季类胡萝卜素质量分数上升, 花色素苷相对含量显著上升, 但叶色参数几乎没有变化。推测此时叶绿素质量分数较高, 仍占主导, 而类胡萝卜素质量分数和花色素苷相对含量的上升也对植物老叶细胞越冬起到一定保护作用^[31-32]。

朱书香等^[9]研究了 4 种李属 *Prunus* 彩叶植物的叶色参数与色素含量的关系, 发现尽管色素变化趋势基本相似, 但叶色参数和色素含量的关系却因树种各异不尽相同。本研究发现: 欧洲刺柏‘金叶疏枝’和鹿角桧‘金叶’属刺柏属, 光合色素变化趋势基本相同; 但‘金叶疏枝’叶色参数主要受花色素苷相对含量影响, 以 a*值为自变量建立的回归模型可以较准确预估花色素苷相对含量, 以 a*和 b*的值为自变量建立的回归模型可以较准确预估秋季花色素苷相对含量。‘金叶’的光合色素主要影响 L*和 b*的值, 尤其是 b*值, 以 b*的值为自变量建立的回归方程可以较准确预估光合色素的变化。

‘金叶疏枝’和‘金叶’为彩色植物中的彩色针叶树代表性树种。对彩色阔叶树的研究发现, 叶片微观结构和生理代谢因子可调控叶色变化。彩色针叶树和普通彩色阔叶树的叶片微观结构不同, 光合生理也不尽相同, 因此开展彩色针叶树叶色变化周期内内部生理因子调控作用研究很有必要。

4 小结

不同季节欧洲刺柏‘金叶疏枝’和鹿角桧‘金叶’的叶色参数变化趋势不同。2 种刺柏属彩色树的叶色参数与色素含量关系显著, 但不同树种不同时期存在差异; ‘金叶疏枝’花色素苷相对含量与 L*、b*值呈极显著负相关, 与 a*值呈极显著正相关; ‘金叶’光合色素与 b*值呈极显著负相关。欧洲刺柏‘金叶疏枝’和鹿角桧‘金叶’的叶色参数与色素含量回归方程的建立, 证明彩色针叶树的叶色参数可以精确预估色素含量, 为人工调控彩色针叶树叶色变化及优良彩色针叶树的选育提供了理论基础。

5 参考文献

- [1] 孙敬爽, 陶霞娟, 贾桂霞, 等. 4 种观赏型针叶树在北京地区的引种适应性[J]. 北方园艺, 2013(12): 75 - 78.
SUN Jingshuang, TAO Xiajuan, JIA Guixia, et al. Introduction evaluation of four ornamental conifers in Beijing [J]. *Northern Hortic*, 2013(12): 75 - 78.
- [2] BITNER R L. *Conifers for Gardens: An Illustrated Encyclopedia* [M]. Portland: Timber Press, 2007.
- [3] MEGHAN S. Branches green delight us [J]. *Horticulture*, 2012, 109(2): 60 - 61.
- [4] 杜蕊. 矮生彩色针叶树扦插繁殖年龄效应及栽培技术研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
DU Rui. *Studies on the Age Effect of Cutting and the Cultivation Techniques of Dwarf Colorful Conifers* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012.
- [5] 杜蕊, 贾桂霞. 2 种矮生彩色针叶树扦插繁殖年龄效应[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(3): 24 - 27.

- DU Rui, JIA Guixia. Age effect of cutting propagation for two dwarf colorful conifers [J]. *J Northeast For Univ*, 2012, **40**(3): 24 – 27.
- [6] 周鹏, 李介文, 段苏薇, 等. Pt 菌剂与独脚金内酯对‘金叶疏枝’欧洲刺柏幼苗生长的影响[C]//中国园艺学会观赏园艺专业委员会、国家花卉工程技术研究中心. 中国观赏园艺研究进展 2017. 成都: 中国园艺学会, 2017: 588 – 592.
- [7] 陶霞娟, 孙敬爽, 余海, 等. 彩色针叶树 N、P、K 施肥比例初探[J]. *安徽农业科学*, 2012, **40**(23): 11721 – 11722.
- TAO Xiajuan, SUN Jingshuang, YU Hai, *et al.* Preliminary study of the N, P, K fertilization ratio of *Juniperus communis* ‘Gold Cone’ [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2012, **40**(23): 11721 – 11722.
- [8] 孙敬爽, 王华, 郑红娟, 等. 4 种彩色针叶树光合特性及耐阴性的比较研究[C]//2006 全国博士生学术论坛: 林业及生态建设领域相关学科论文集. 北京: 北京林业大学, 2006: 2467 – 2473.
- [9] 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 Shuxiang, YANG Jianmin, WANG Zhonghua, *et al.* Relationship between pigment contents and leafcolor parameters of four leaf-colored species of *Prunus* [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2009, **29**(8): 1663 – 1669.
- [10] 杨暖, 姜琳, 姜官恒, 等. 北美豆梨秋冬叶色与生理变化的关系[J]. *农学学报*, 2015, **5**(11): 73 – 78.
- YANG Nuan, JIANG Lin, JIANG Guanheng, *et al.* The relationship between leaf color in autumn and physiological changes of *Pyrus calleryana* Decne [J]. *J Agric*, 2015, **5**(11): 73 – 78.
- [11] 黄可, 王小德, 柳翼飞, 等. 红枫春季叶色变化与色素含量的相关性[J]. *浙江农林大学学报*, 2012, **29**(5): 734 – 738.
- HUANG Ke, WANG Xiaode, LIU Yifei, *et al.* Leaf color changes in *Acer palmatum* ‘Atropurpureum’ and relations to pigment content [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2012, **29**(5): 734 – 738.
- [12] 郭欢欢, 刘勇, 姚飞, 等. 不同种源黄连木秋季色素含量与叶色参数的关系[J]. *西北植物学报*, 2017, **37**(10): 2003 – 2009.
- GUO Huanhuan, LIU Yong, YAO Fei, *et al.* Relationship between pigment contents and leaf color parameters of *Pistacia chinensis* Bunge of different provenances in autumn [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2017, **37**(10): 2003 – 2009.
- [13] 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): 99 – 107.
- QI Rui, LI Xiaohong, SHI Boyu, *et al.* Analysis on the relationship of leaf color parameters and pigments contents in *Photinia ×fraseri* Dress with veraison stage [J]. *J Henan Agric Sci*, 2019, **48**(4): 99 – 107.
- [14] 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.
- YANG Shuhong, ZHU Yanlin, MA Yongtao, *et al.* Correlation between leaf color and pigment composition of the *Populus × euramericana* ‘Quanhong’ leaves in growing season [J]. *J Northeast For Univ*, 2013, **41**(7): 63 – 68.
- [15] 胡海姿, 张睿, 尚爱芹, 等. 金叶植物色素含量对光强的响应[J]. *园艺学报*, 2007, **34**(3): 717 – 722.
- HU Haizi, ZHANG Rui, SHANG Aiqin, *et al.* Response of pigment content of golden-leaf plants to light intensity [J]. *Acta Horti Sin*, 2007, **34**(3): 717 – 722.
- [16] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- [17] 陈明, 孙洁梅, 李敏. 水体中藻类叶绿素 a 提取方法的比较[J]. *环境监测管理与技术*, 2017, **29**(4): 57 – 59.
- CHEN Ming, SUN Jiemei, LI Min. Comparison for extracting chlorophyll-a from algae in water [J]. *Administration Tech Environ Monitoring*, 2017, **29**(4): 57 – 59.
- [18] 张洁, 王亮生, 高锦明, 等. 贴梗海棠花青苷组成及其与花色的关系[J]. *园艺学报*, 2011, **38**(3): 527 – 534.
- ZHANG Jie, WANG Liangsheng, GAO Jinming, *et al.* Identification of anthocyanins involving in petal coloration in *Chaenomeles speciosa* cultivars [J]. *Acta Horti Sin*, 2011, **38**(3): 527 – 534.
- [19] 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 Qianrui, CHEN Defu, CHEN Youyun, *et al.* Changes of physiology and biochemistry during leaf color transformation in *Loropetalum chinense* var. *rubrum* [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42**(2): 111 – 115.
- [20] 董建文, 廖艳梅, 许贤书, 等. 秋季观赏植物单株美景度评价[J]. *东北林业大学学报*, 2010, **38**(3): 44 – 48.
- DONG Jianwen, LIAO Yanmei, XU Xianshu, *et al.* Scenic beauty estimation of ornamental plants in autumn [J]. *J Northeast For Univ*, 2010, **38**(3): 44 – 48.
- [21] 薛会雯, 金晓玲, 刘海洋. 春色叶树种在植物造景中的应用[J]. *北方园艺*, 2010(24): 119 – 122.

- XUE Huiwen, JIN Xiaoling, LIU Haiyang. Application of spring color-leaved trees in plant landscaping [J]. *Northern Hortic*, 2010(24): 119 – 122.
- [22] 李卫星, 杨舜博, 何智冲, 等. 植物叶色变化机制研究进展[J]. 园艺学报, 2017, **44**(9): 1811 – 1824.
- LI Weixing, YANG Shunbo, HE Zhichong, *et al.* Research advances in the regulatory mechanisms of leaf coloration [J]. *Acta Hortic Sin*, 2017, **44**(9): 1811 – 1824.
- [23] 萧力争, 李勤, 谭正初, 等. 茶树紫色芽叶分级标准研究[J]. 云南农业大学学报, 2008, **23**(5): 668 – 672.
- XIAO Lizheng, LI Qin, TAN Zhengchu, *et al.* Study on the classification standard of purple tea shoot [J]. *J Yunnan Agric Univ*, 2008, **23**(5): 668 – 672.
- [24] LEE D W. Anthocyanins in autumn leaf senescence [J]. *Adv Bot Res*, 2002, **37**(4): 147 – 165.
- [25] LEV Y 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.
- [26] 季鹏章, 梁名志, 宋维希, 等. 茶树珍稀品种‘紫娟’的叶片色素含量与叶色变化的关系研究[J]. 西南农业学报, 2010, **23**(6): 98 – 100.
- JI Pengzhang, LIANG Mingzhi, SONG Weixi, *et al.* Relationship between changes of pigments content and leaf-color changing in ‘Zijuan’ (*Camellia sinensis* var. *assamica*) [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2010, **23**(6): 98 – 100.
- [27] OUGHAM H J, MORRIS P, THOMAS H. The colors of autumn leaves as symptoms of cellular recycling and defenses against environmental stresses [J]. *Curr Topics Dev Biol*, 2005, **66**: 135 – 160.
- [28] 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 Weibing, ZHUANG Meng, HAN Haozhang, *et al.* Progress on color emerging mechanism and photosynthetic characteristics of colored-leaf plants [J]. *Acta Hortic Sin*, 2005, **32**(2): 352 – 358.
- [29] 孙晓方, 何家庆, 黄训端, 等. 不同光强对加拿大一枝黄花生长和叶绿素荧光的影响[J]. 西北植物学报, 2008, **28**(4): 752 – 758.
- SUN Xiaofang, HE Jiaqing, HUANG Xunduan, *et al.* Growth characters and chlorophyll fluorescence of goldenrod (*Solidago canadensis*) in different light intensities [J]. *Acta Bot Boreali-Occident Sin*, 2008, **28**(4): 752 – 758.
- [30] 陈芳, 唐秀光, 董倩, 等. 金叶白蜡色素含量与叶色参数的年变化规律研究[J]. 河北农业大学学报, 2012, **35**(5): 20 – 24.
- CHEN Fang, TANG Xiuguang, DONG Qian, *et al.* Study on the seasonal change rules of pigment content and leaf color parameters of *Fraxinus* [J]. *J Agric Univ Hebei*, 2012, **35**(5): 20 – 24.
- [31] HUGHES N M. Winter leaf reddening in ‘evergreen’ species [J]. *New Phytol*, 2011, **190**(3): 573 – 581.
- [32] 韩雅珊. 类胡萝卜素的功能研究进展[J]. 中国农业大学学报, 1999, **4**(1): 5 – 9.
- HAN Yashan. Advances of the function of beta-carotene and carotenoid [J]. *J China Agric Univ*, 1999, **4**(1): 5 – 9.