

万仁平, 罗德义, 张少露, 岩旺, 谢雨洁, 李宛真, 潘先益, 钟宇. 红罗宾石楠叶色变化及色素含量动态[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29 (4): 954-960
Wan RP, Luo DY, Zhang SL, Yan W, Xie YJ, Li WZ, Pan XY, Zhong Y. Changes in color and pigment content of the *Photinia × fraseri* 'Red Robin' [J].
Chin J Appl Environ Biol, 2023, 29 (4): 954-960

红罗宾石楠叶色变化及色素含量动态

万仁平¹ 罗德义² 张少露³ 岩旺¹ 谢雨洁¹ 李宛真¹ 潘先益¹ 钟宇¹✉

¹四川农业大学林学院 成都 611130

²贵州省湄潭县林业局 遵义 564100

³四川省金堂县农业农村局 成都 610400

摘 要 研究红罗宾石楠叶色年变化规律及叶色变化与色素含量间的内在关联, 可为红罗宾石楠造景应用和栽培管理提供理论依据。以红罗宾石楠‘红罗宾’品种2年生苗为试验材料, 于2020年3月至11月在完全随机选取的3块面积大小相同、栽培管理基本一致的人工栽培小区中, 采用随机取样和五点取样法共6次测定红罗宾石楠叶片的叶色参数值、色素含量、叶片相对含水量、干湿比和叶片pH值, 并进行单因素方差分析和相关性分析。结果显示, 在红罗宾石楠生长过程中, 从3月至11月叶色由深红色渐变为深绿色, 颜色指数趋于负值; 花青素含量下降, 与颜色指数的变化趋于一致, 而类胡萝卜素与叶绿素含量均呈增加趋势; 叶片含水量的变化趋势不明显; 叶片细胞液pH在11月达最大值4.99; 叶片颜色指数与花青素含量和相对含水量呈显著的正相关, 而与叶绿素含量、类胡萝卜素含量以及pH值均呈显著的负相关, 相对含水量与花青素含量呈显著的正相关, 但是叶片细胞液的pH值与花青素含量和颜色指数均呈显著的负相关。本研究表明红罗宾石楠的红叶期为3-4月, 夏季叶色完全转绿, 叶色变绿主要跟叶片细胞液pH上升引起的花青素含量下降, 而叶片发育引起的叶绿素和类和胡萝卜素含量上升有关。田间叶色观测结果与色差分析结果具有良好一致性, 表明用颜色指数来对彩叶植物色彩进行量化是比较可靠的。(图6 表1 参42)

关键词 红罗宾石楠; 叶色; 色素含量; 叶色参数; pH; 颜色指数

Changes in color and pigment content of the *Photinia × fraseri* 'Red Robin'

WAN Renping¹, LUO Deyi², ZHANG Shaolu³, YAN Wang¹, XIE Yujie¹, LI Wanzhen¹, PAN Xianyi¹ & ZHONG Yu¹✉

¹ College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

² Forestry Bureau of Meitan County, Guizhou Province, Zunyi 564100, China

³ Jintang Agricultural and Rural Bureau, Sichuan Province, Chengdu 610400, China

Abstract This study aimed to investigate the annual color change patterns of *Photinia fraseri*, specifically focusing on the relationship between leaf color change and pigment content, to provide a theoretical basis for the landscaping application and cultivation management of *Photinia × fraseri*. Three randomly selected artificial cultivation plots, each with the same area and similar cultivation management practices, were utilized in this study. Two-year-old seedlings of *Photinia × fraseri* 'Red Robin' served as the test material. From March to November 2020, leaf color parameters, pigment content, leaf relative water content, dry-wet ratio, and leaf pH value of 'Red Robin' were measured six times using random sampling and the five point sampling method. Subsequently, one-way ANOVA and correlation analysis were conducted. The results showed a gradual color change of the *Photinia × fraseri* 'Red Robin' leaves from dark red to dark green during their growth process from March to November. The color index tended to be negative. The anthocyanin content decreased and exhibited consistency with the color index change, while the carotenoid and chlorophyll content showed an increasing trend. Leaf water content did not display a distinct pattern of change. The pH value of leaf cell sap reached its maximum of 4.99 in November. The leaf color index showed a significantly positive correlation with anthocyanin content and relative water content and a significantly negative correlation with chlorophyll and carotenoid content and pH value. Relative water content displayed a significant positive correlation with relative anthocyanin content, whereas the pH value of leaf cell sap exhibited a significant negative correlation with anthocyanin content and color index. Based on the study, the red leaf period of *Photinia × fraseri* 'Red Robin' was observed to be from March to April, with leaves completely transitioning to green during summer. The leaf color turning green was primarily associated with the decrease in anthocyanin content caused by the increase in pH value

收稿日期 Received: 2022-06-21 接受日期 Accepted: 2022-08-15

四川省科技计划项目(2016NYZ0035)资助 Supported by the Sichuan Science and Technology Program Project (2016NYZ0035)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: zhongyu315@163.com)

of leaf cell sap as well as the increase in chlorophyll and carotenoid content caused by leaf development. The study findings also highlight the reliability of the color index for quantifying the color of coleus plants, as there was good consistency between field observations of leaf color and the results of color difference analysis.

Keywords *Photinia × fraseri* 'Red Robin'; leaf colour; pigment content; leaf colour parameter; pH; colour index

随着生态文明理念深入人心,彩叶植物在城市生态园林造景上越来越重要,有着不可替代的地位^[1]。在实际的园林造景应用中,其叶色多样,变化复杂。彩叶植物叶色受到叶片中花青素、叶绿素和类胡萝卜素3类色素含量和比例的调控^[2-3],而红色系植物的叶片呈色主要由花青素的积累引起^[4],同时受花青素含量与叶绿素和类胡萝卜素含量比值的影响^[5-6]。叶色变化也归因于季节变化,秋季温度较低导致叶绿素净含量下降,而类胡萝卜素和花色素苷的稳定性较好,如‘北陆’越橘(*Vaccinium corymbosum* L. × *V. angustifolium* Aiton)叶片秋季花色素苷含量稳定呈现红色^[7]。也有研究指出生长点细胞的基因表达发生差异或者形成遗传嵌合体也可以造成各种各样的叶色类型^[8],同时环境因素变化也可能干扰叶绿素的正常合成,引起永久或暂时的叶片变色反应^[9-10]。此外,彩叶植物叶色也受到叶片含水量、和液泡pH的变化影响,其中叶片含水量与植物光合密切相关,而液泡中pH变化会影响花色素苷的结构从而导致其叶色发生变化^[11-12]。在这些复杂的变化中,也有可能是多种因素共同作用的结果。因此,针对彩叶植物不同的呈色机制,需要针对特定材料进行个别研究。

红叶石楠是蔷薇科植物石楠(*Photinia serrulata*)和光叶石楠(*Photinia glabra*)的杂交种或选育的栽培种的统称^[13-14],是我国园林建设中色彩营造材料的首选^[15],其中红罗宾石楠(*Photinia × fraseri* 'Red Robin')因其色彩艳丽持久,易于栽培和修剪造景,大量运用于我国城市园林造景中。

叶色的判断目前主要是通过分析叶片色素含量与叶色参数的相关性来实现^[16],通过分析刺柏(*Juniperus formosana* Hayata)的叶绿素、类胡萝卜素和花青素含量与叶色参数(*L*、*a*、*b*)间的相关性,选出在栽培管理方面,可培育伸展型品种,使整株树体充分受光,以期达到最佳的观赏效果^[17-18]。有研究表明色差法在测定色素含量方面应用广泛,如定量分析番茄(*Solanum lycopersicum* L.)果实番茄红素的含量^[19],也有用分光光度计和色差仪对叶绿素、类胡萝卜素、花色素含量及叶色参数(*L*、*a*、*b*)进行测定分析,以期探讨黄连木(*Pistacia chinensis* Bunge)秋季色素含量与叶色参数的关系^[20]。此外,色差法也常用于颜色判断,可以使色彩判断由主观变为客观的数量化,也可以弥补肉眼对于微小颜色区分不清的缺点。

目前,红叶石楠叶色变化规律的研究仅针对同一植株不同部位的叶片^[21],而缺乏红叶石楠叶色年变化规律以及叶片呈色机理的研究,也缺乏对叶色的分析,这可能会导致认识不足,亟待深入研究。因此,本研究测定3月至11月叶片转色期间光合色素含量、花青素含量、pH值和含水量的变化,用色差法表示叶片色泽的颜色指数来定量描述叶片的叶色变化,以期验证颜色指数量化叶片色彩的可行性;并且分析颜色指数与色素含量、pH值和含水量之间的相关性,阐明不同彩叶植物色素含量与叶色变化间的关联以及影响叶色变化的因子,为城市植物季相景观配置和栽培管理提供科学依据,对彩叶植物的选育和城市园林造景具科学意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

四川农业大学试验基地,地处成都温江(103°51'28"E, 30°42'19"N, 海拔537.25 m),该地年平均气温15.9℃,最热月7月平均气温为28℃,最冷月1月平均气温为5.4℃。年平均日照时数为1 161.5 h,年平均降雨量为1 012.4 mm,雨日和雨量均为夏多冬少,春季为176.1 mm,夏季为588.0 mm,秋季218.4 mm,冬季为29.9 mm。土壤以水稻土为主, pH为6.30 ± 0.78。

1.2 试验设置

采用完全随机的方法选取3块2年生面积大小相同、栽培管理一致的红罗宾石楠人工栽培小区,试验地10 m²周边无树体遮挡。在每块试验地中随机选取30株健壮、无病虫害且未被人为修剪等干扰的红罗宾石楠作为固定取样木,在每一植株上吊上树牌作为标记。

1.3 试验方法与指标测定

试验于2020年3月15日至2020年11月15日进行,采样时间为3-11月,根据叶片颜色变化一共进行6次采样。从新叶长出开始,当观察当叶片颜色由亮红色变为淡红色时,选择天气晴朗的上午(9:00-10:00)对固定取样木进行取样^[22],在同一朝向距地面30 cm高的冠层外侧随机选取3片叶片,在每株最上部的功能叶采用五点取样法,在东、西、南、北、中5个方向各取1片,每株共采集8片叶片,擦掉叶片表面的灰尘,放入4℃的冰箱保存,并陆续进行各指标的测定^[23]。完成叶色参数测量后,将每株红罗宾石楠采集的8片叶片用医用剪刀剪碎至合适大小,混合均匀后根据不同指标要求进行称量,用锡箔纸包好后,放置液氮中保存,每株样品3次重复。

叶色参数的测定参照李力等的方法^[24]进行。用Epson数字扫描仪(Expression10000XL1.0)对新鲜叶片进行扫描,然后在Adobe Photoshop5拾色器中采用Lab模式,记录*L*、*a*、*b*值^[25-26],代入公式(1)计算颜色指数(CI)对红叶石楠叶片颜色进行量化^[27]。其中*L*表示明亮,范围从黑到白;*a*表示红绿,范围从绿(负值)到红(正值);*b*表示蓝黄,范围从蓝(负值)到黄(正值)^[28-29]。以上测定步骤各3次重复。

$$CI = 2000a/L(a^2 + b^2)^{1/2} \quad (1)$$

花青素含量用UV-1750型紫外分光光度计,采用紫外分光光度法^[30]测定。

光合色素的测定采用Arnon法^[31]。用UV-1750型分光光度计测量665、649和470 nm波长下的吸光度(*A_x*)值,再依据公式(2)、(3)、(4)计算Chl *a*、Chl *b*和Car的含量(mg/g)。

$$Chl_a = 13.95A_{665} - 6.88A_{649} \quad (2)$$

$$Chl_b = 24.96A_{649} - 7.32A_{665} \quad (3)$$

$$Car = (1000A_{470} - 2.05Chl_a - 114.8Chl_b)/245 \quad (4)$$

叶片水分指标测定使用等效水分厚度(EWT)表征叶片的水分状况。剪取一定面积(LA)的红罗宾石楠叶片,称量鲜质

量(FM),将叶片放入烘箱内105℃杀青30 min,最后保持65℃的温度烘至恒量,称干叶质量(DM),按照公式(5)计算样品叶片的EWT^[32].

$$EWT = (FM - DM)/LA \quad (5)$$

叶片pH值的测定根据马树华等测定叶片汁液pH值的方法^[33].

光照强度的测量与计算,根据加阿斯特拉的资料^[34],太阳辐射强度与光照强度之间的换算系数为250 lx/(W·m⁻²)^[35].因此,通过中国气象数据库(气象数据源码C501),查询2020年试验基地每月份10 km精度(103°45'E, 30°45'N)、(103°51'E, 30°39'N)、(103°51'E, 30°45'N)3个位点的平均太阳辐射强度(W/m).

1.4 数据处理与统计分析

采用Excel 2013进行数据统计.运用SPSS version 18.0软件进行整理与分析,用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同时间内色素含量的差异显著性.用GraphPad Prism 8.0.2(GraphPad软件)绘制条形图、百分比堆积条形图以及折线图.用R version 3.4.3(R Core Team 2017)绘制相关矩阵图,先通过cor函数得到各因素间的相关系数并进行显著性检验,再用corplot(TaiyunWei, Viliam Simko.2017)包中的corplot函数绘制而成.

2 结果与分析

2.1 红罗宾石楠叶色变化

3月红罗宾石楠刚萌发的新叶呈亮红色(图1),此时叶片的颜色指数为正值且在整个生长期达到最大值(图1);4月叶肉部分的红色开始褪去,仅叶脉和叶缘部分呈红色,叶片的颜色指数降至0附近;6月份时叶片已完全转绿,叶片的颜色指数由正值转为负值,在6-11月叶片呈绿色且颜色随时间的推移而逐渐加深,颜色指数呈逐渐降低的趋势.3-6月红叶石楠的叶色变化最明显,颜色指数的下降幅度达最大,而6-11月,叶色变化不明显,颜色指数的下降幅度也较缓慢,叶片颜色指数的变化趋势与叶色变化具有良好的一致性.

2.2 红罗宾石楠色素含量的动态变化

2.2.1 光合色素 红罗宾石楠叶片中光合色素含量随季节变化显现出明显的差异,总体呈先升高后降低的趋势(表1).3月红叶石楠叶片呈红色时,叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素以及类胡萝卜素的含量均达最小值,叶绿素a/b小于3.10.3-6

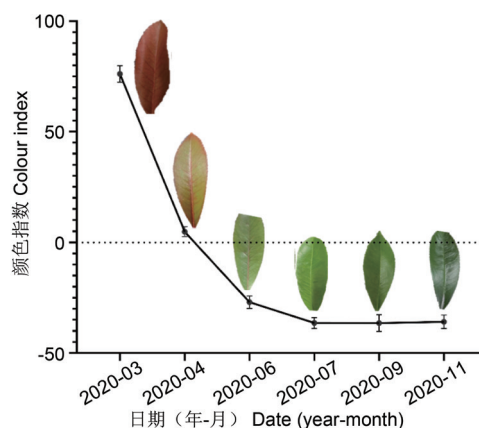


图1 不同时期叶片颜色指数变化.

Fig. 1 Changes of leaf colour index in the different periods.

月叶色变化最明显时,仅叶绿素a与叶绿素a/b显著增加,叶绿素b和类胡萝卜素也呈增加的趋势,但差异不显著($P < 0.05$).6-7月,随着绿色的加深光合色素含量以及叶绿素a/b均显著增加且在7月时达到最大值,叶绿素a/b在此时最接近3.10.7-9月光合色素含量呈下降趋势,除类胡萝卜素外均显著降低,而叶绿素a/b增加,表明在这期间叶绿素b的下降幅度高于叶绿素a.9-11月光合色素含量又增加但变化差异不显著,叶绿素a/b又降至3.10附近.

2.2.2 花青素含量 花青素含量在叶色转变过程中总体呈下降趋势,春季变化幅度较大,夏季相对稳定(图2).3月花青素含量为全年最大值,3-4月显著下降;4-7月趋于稳定,变化差异不显著,但总体仍呈下降趋势;7月花青素含量已降至2.40 mg/g;但在刚入秋时出现了一次明显的波动(9月),使得花青素含量先升高再降至最小值2.36 mg/g.此外,3-6月伴随着光照强度的增强,叶绿素含量和类胡萝卜素含量,伴随着光照强度的增加而逐渐增加,而花青素含量逐渐减少;7-11月色素含量变化与光照强度无明显的一致性.总体而言,红叶石楠叶色转变过程中,花青素含量与颜色指数的变化趋势一致,均随时间的推移而逐渐降低;而叶绿素含量和类胡萝卜素含量的变化与花青素含量的变化相反,随着时间的推移而逐渐增加,光照强度在春季对色素含量产生明显的影响.

2.2.3 色素含量百分比的变化 花青素含量所占比例在红叶石楠叶片由红转绿期间不断下降,3-4月下降最快,红叶石楠刚萌发时,花青素含量所占比例最大,其次是叶绿素,类胡萝

表1 红罗宾石楠光合色素含量的年变化(均值±标准差)

Table 1 Annual variation in photosynthetic pigment content of *Photinia × fraseri* 'Red Robin' (mean ± standard deviation)

时间(年-月) Date (year-month)	叶绿素a Chlorophyll a (w/mg g ⁻¹ FW)	叶绿素b Chlorophyll b (w/mg g ⁻¹ FW)	叶绿素 Chlorophyll (w/mg g ⁻¹ FW)	叶绿素a/b Chlorophyll a/b (w/mg g ⁻¹ FW)	类胡萝卜素 Carotenoid (w/mg g ⁻¹ FW)
2020-03	0.27 ± 0.01d	0.10 ± 0.004c	0.38 ± 0.01c	2.68 ± 0.03c	0.23 ± 0.004b
2020-04	0.39 ± 0.01cd	0.12 ± 0.01c	0.52 ± 0.02c	3.15 ± 0.10bc	0.33 ± 0.01b
2020-06	0.60 ± 0.02c	0.11 ± 0.003c	0.71 ± 0.06c	5.44 ± 0.11a	0.38 ± 0.005b
2020-07	1.22 ± 0.04a	0.41 ± 0.02a	1.63 ± 0.06a	2.96 ± 0.11c	0.95 ± 0.02a
2020-09	0.89 ± 0.21b	0.25 ± 0.07b	1.15 ± 0.09b	3.58 ± 0.24b	0.75 ± 0.18a
2020-11	1.11 ± 0.10ab	0.36 ± 0.07ab	1.47 ± 0.07ab	3.13 ± 0.34bc	0.81 ± 0.04a

采用LSD的方法进行多重比较,同列数据中不同字母(a, b, c)表示生长季节内同一色素含量变化差异显著($P < 0.05$),同一字母表示同一色素含量变化差异不显著($P > 0.05$).

The LSD method was used to conduct multiple comparisons. According to the data in the same column, different letters (a, b, c) indicate significant differences in the same pigment content within the growing season ($P < 0.05$), and the same letters indicate no significant difference in the same pigment content within the growing season ($P > 0.05$).

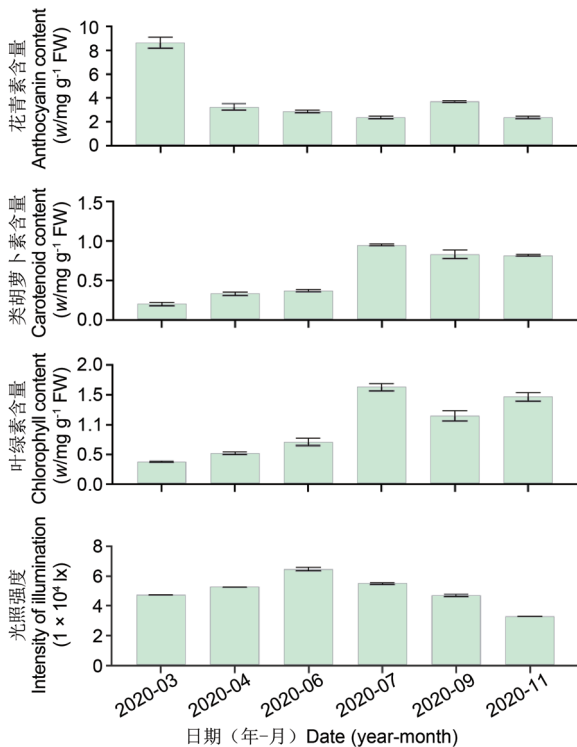


图2 不同时期叶片花青素、类胡萝卜素、叶绿素含量和光照强度的变化。
Fig. 2 Changes of leaf anthocyanin, carotenoid, chlorophyll contents, and intensity of illumination in different periods.

色素所占比例最小,且此时叶绿素a和叶绿素b的比例相等。随着叶片不断成熟,叶片中各色素含量的比例也随之开始变化,3-7月花青素所占比例逐渐降低,类胡萝卜素和叶绿素所占比例增加,7-9月花青素出现波动时叶绿素和类胡萝卜素所占比例均减小,其中叶绿素b的降幅最大,达到19.85%,说明花青素含量的增加受到叶绿素b的影响较大。9-11月时花青素所占比例降低,类胡萝卜素所占比例基本保持不变,叶绿素所占比例增加,叶绿素b的增幅较大。总体而言,叶片中类胡萝卜素和叶绿素所占比例均随花青素所占比例的减少而增加(图3)。

2.3 红罗宾石楠叶片含水量的变化

红罗宾石楠叶片由红转绿的过程中,叶片含水量的变化趋势不明显,相对含水量逐渐下降,干湿比呈上升趋势(图4)。红罗宾石楠叶片的相对含水量在3-7月份呈下降趋势,在9月份时出现了一次波动,11月又降至最小值,叶片的干湿比在3-7月份的变化趋势与相对含水量恰好相反,呈上升趋势,同样在9月份时出现了一次波动,11月又增加至最大值,叶片含水量在9月时也出现了波动。

2.4 红罗宾石楠叶片细胞液pH值的变化

红罗宾石楠叶片细胞液的pH值随着季节的变化而呈上升趋势,叶片细胞全年均处于酸性环境中(图5)。红罗宾石楠刚萌发时,叶片细胞液的pH值为一年中最小值3.68,随着叶色的转变以及时间的推移pH值逐渐上升,其中夏季(6-7月)pH值增加显著($P < 0.05$),而春秋两季pH值增加较缓慢,差异不显著,11月细胞液pH值达最大值4.99,仍呈酸性。

2.5 相关性

除等效水厚度和光照强度与各指标间均无显著相关性外,其余各指标间均存在显著的相关性($P < 0.05$)(图6)。其中,叶片的颜色指数与花青素含量和相对含水量均呈显著的正相关,与干湿比、pH值、类胡萝卜素含量、叶绿素a含量和总

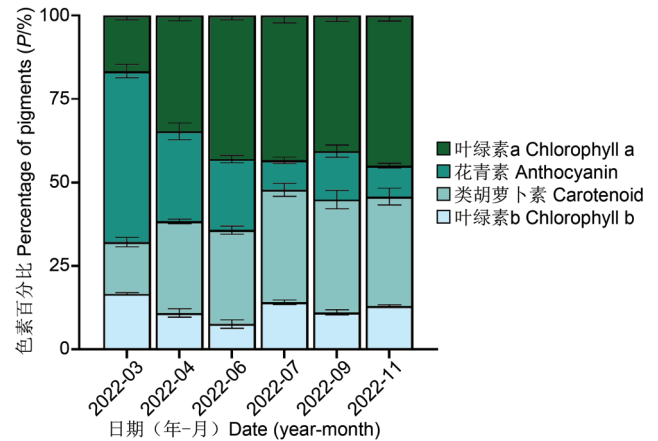


图3 不同时期叶片色素含量百分比的变化。
Fig. 3 Changes of leaf pigment percentage in different periods.

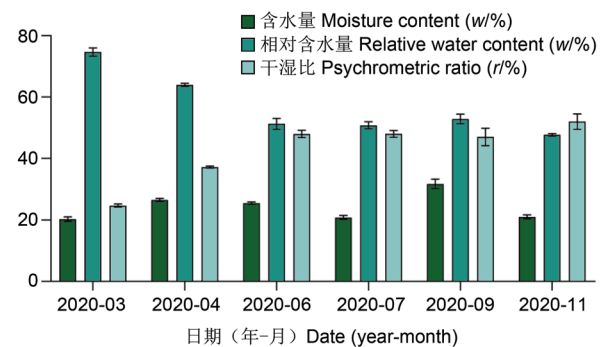


图4 不同时期叶片含水量、相对含水量和干湿比的变化。
Fig. 4 Changes of leaf water content, relative water content, and dry-wet ratio in different periods.

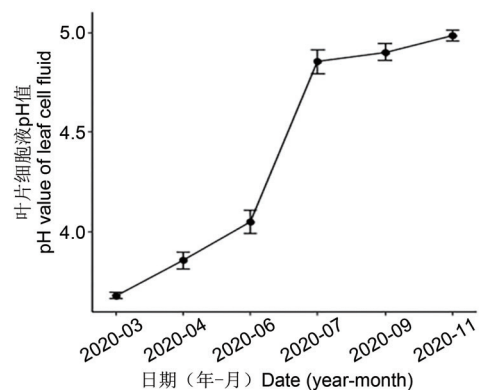


图5 叶片细胞液不同时期pH值的变化。
Fig. 5 Changes in pH values of leaf cell fluid in different periods.

叶绿素含量均呈显著的负相关关系,且相对含水量和花青素含量与各指标间的相关性与颜色指数和各指标间的相关性趋于一致。此外,叶片细胞液pH值与类胡萝卜素含量、叶绿素总量、叶绿素a以及干湿比间存在显著的正相关。

3 讨论与结论

3.1 红罗宾石楠叶色的季节性动态变化

红罗宾石楠叶片从幼嫩到成熟的过程中其叶色由亮红色逐渐变为深绿色,3月红罗宾石楠新梢刚萌发时观赏价值最高,持续时间约为2个月,夏秋两季叶片完全转绿,观赏价值欠缺,这与孔祥海等的研究结果^[16]相类似。此外本研究对叶色的观

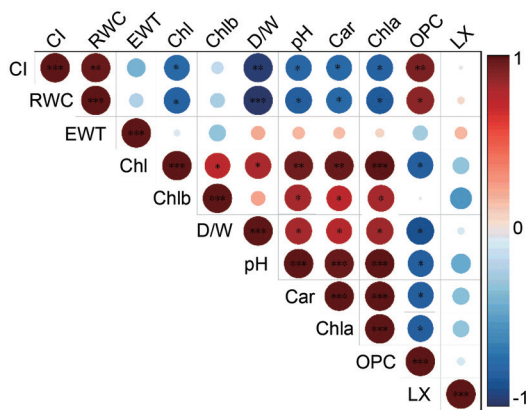


图6 红罗宾石楠各指标间相关关系。字母缩写：颜色指数 (CI)；相对含水量 (RWC)；等效水厚度 (EWT)；总叶绿素 (Chl)；叶绿素b (Chlb)；干湿比 (D/W)；细胞液pH (pH)；类胡萝卜素 (Car)；叶绿素a (Chla)；花青素 (OPC)；光照强度 (LX)。* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$ 。红色表示正相关关系，蓝色表示负相关关系。

Fig. 6 Correlation among indexes of *Photinia x fraseri* 'Red Robin'. Letter abbreviation: CI, Colour index; RWC, Relative water content; EWT, Equivalent water thickness; Chlb, Chlorophyll b; D/W, Psychrometric ratio; pH, pH value; Car, Carotenoid; Chla, Chlorophyll a; Chl, Total chlorophyll; OPC, Cyanidin; LX, Intensity of illumination. *** Significant at the 0.001 level, ** significant at the 0.01 level, and * significant at the 0.05 level. Red represents a positive correlation and blue represents a negative correlation.

测结果与色差分析结果具有良好一致性，这种一致性在李属 (*Prunus* L.) 彩叶植物^[4]和红枫^[9]等树种上也得到了验证。颜色指数将彩叶植物的色彩进行量化，避免了肉眼的主观误差，使色彩判断更加科学，说明使用颜色指数来对彩叶植物色彩进行量化比较可靠。根据红罗宾石楠叶色变化周期以及结合萌芽性强的特点，在实际生产应用中可在6月对枝条进行适时的修剪，以促进新叶的萌发，延长红叶期。

3.2 红罗宾石楠色素动态

叶片由红转绿的过程中花青素含量逐渐减少，且花青素含量与叶片颜色指数呈显著的正相关。这表明红罗宾石楠新叶的红色主要是由花青素的存在而引起的，这与王振兴等的研究结果^[4]相同。叶绿素和类胡萝卜素含量的变化与孔祥海等的研究结果^[21]类似，均呈低—高—低的变化趋势。叶绿素的这种变化可能与叶片中叶绿体的发育程度有关，春季叶片幼嫩，叶绿体发育不完全导致叶绿素含量较低，夏季叶绿体发育完全以及有较强的光合作用，使得叶绿素含量增加，而秋季叶片衰

老导致叶绿素开始降解^[4, 36]；也有可能与植物为维持正常光合生长有关，彩叶杨 (*Populus deltoids* Quanhon) 这类常色彩叶植物，就因叶绿素合成受阻，导致光合作用低，栽培困难^[37]。此外，相关性分析结果显示花青素与叶绿素呈显著的负相关，故叶片中叶绿素含量的增加可能会抑制花青素含量的表达，由此花青素含量在9月份出现的波动可能与叶绿素含量的下降有关。其中下降幅度最大的为叶绿素b，这可能是由于秋季光照时长变短，温度降低加之叶绿素b的稳定性较差，极易受到温度和光强的影响而导致降解^[21, 38]。

叶色转变伴随着叶片相对含水量的减少和干重的增加，且相对含水量与花青素含量呈显著的正相关，对红花檵木 (*Loropetalum chinense* var. *rubrum* Yieh)^[39]的研究也得到类似的变化趋势。可能是叶片在转绿的过程中光合作用增加，细胞内干物质逐渐积累而导致水分逐渐消耗^[21]，故在实际生产中应注重红叶石楠水分的供应，以增加其观赏效果。

叶片细胞液的pH值与花青素含量和颜色指数均呈显著的负相关，且叶片细胞液在整个生长过程中均处于酸性环境中。而花色素苷是一种类黄酮类水溶性色素^[40-41]，在弱酸性环境中极为稳定，故叶片细胞液中pH值的增加可能会改变花色素苷四种结构之间的平衡，从而加速花色素苷的降解速率^[12, 42]。而pH值的增加可能是由于叶片发育过程中，光合色素含量增加，光合作用增强以至光合产物积累造成的^[21]。

综上所述，(1) 红罗宾石楠在一年生长中，叶色由亮红色变成深绿色，颜色指数与花青素含量和相对含水量呈显著的正相关关系，叶色变绿主要跟叶片细胞液pH上升引起的花青素含量下降，而叶片发育引起的叶绿素和类胡萝卜素含量上升有关。(2) 叶色的观测结果与色差分析结果具有良好一致性，说明使用颜色指数来对彩叶植物色彩进行量化是比较可靠的。在一年的生长季内，红罗宾石楠叶片在3月呈色最佳，且叶色持续期约为2个月，为了延长红罗宾石楠的观赏期或提高其观赏价值，应在6月以后对其进行适当的整形修剪；此外，夏季叶片细胞逐渐失水，故在夏季养护管理方面应注重水分供应。然而，彩叶植物叶色变化和呈色机理是多方面因素作用的结果，其中涉及很多关键基因的表达调控，目前尚未有系统的研究与报道，而温度、土壤水分含量等都会直接或者间接影响叶色变化，他们之间的作用关系目前尚不清楚。因此，需加强环境因子对彩叶植物叶色变化相互作用机理的研究，进一步为城市植物季相景观配置提供参考与理论依据。

参考文献 [References]

- 钟乐, 章政, 张婧雅. 城市与自然共生的新理念——伦敦国家公园城市建设的启示[J]. 北京林业大学学报(社会科学版), 2019, 20 (3): 18-23 [Zhong L, Zhang Z, Zhang QY. An innovative path of inter growth of cities and nature: inspirations from London National Park City [J]. J BJ For Univ, 2019, 20 (3): 18-23]
- 刘儒, 原勤勤, 袁小平, 周新华. 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, 2017, 45 (4): 46-49 [Liu R, Yuan QQ, Yuan XP, Zhou XH. The relationship with change of pigment content in leaves of different *Liquidambar formosana* families and change of leaf color [J]. S Chin For Sci, 2017, 45 (4): 46-49]
- 宋倩, 黎榕, 刘小平, 幸新妹, 黄赞, 刘其亮, 张远福. 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 [Song Q, Li R, Liu XP, Xing XM, Huang Y, Liu QL, Zhang YF. Relationship between changes of the pigments content and leaf color changing in *Lagerstroemia indica* [J]. S Chin For Sci, 2017, 45 (3): 13-15]
- 王振兴, 于云飞, 陈丽, 秦红艳, 刘雪迎, 艾军, 赵滢. 彩叶植物叶片色素组成、结构以及光合特性的研究进展[J]. 植物生理学报, 2016, 51 (1): 1-7 [Wang ZF, Yu YF, Chen L, Qin HY, Liu XY, Ai J, Zhao Y. Advances in research on pigment composition, structure and photosynthetic characteristics of colorful leaf plants [J]. Plant Physiol J, 2016, 51 (1): 1-7]
- 张亚平, 曾艳, 林雪莹, 金晓玲, 刘晓玲. 榉树叶色和色素组成的相互关

- 系研究[J]. 河南农业科学, 2017, **46** (6): 116-119 [Zhang YP, Zeng Y, Lin XY, Jin XL, Liu XL. Correlation between leaf color and pigments composition of *Zelkova schneideriana* [J]. *J HN Agric Sci*, 2017, **46** (6): 116-119]
- 6 郑恬静, 王克凤, 桑瀚旭, 董然. 两种海棠秋季叶色变化的生理机制研究[J]. 湖北农业科学, 2017, **56** (15): 2908-2912 [Zheng TJ, Wang KF, Sang HX, Dong R. Study on physiological mechanism of leaf color change in autumn for two species of *Malus baccata* [J]. *Hubei Agric Sci*, 2017, **56** (15): 2908-2912]
- 7 李彬彬, 杨俊枫, 高源, 潘美娜, 候智霞. 越橘叶片秋季变色期间花青苷和叶绿素的变化特性[J]. 园艺学报, 2017, **44** (12): 2361-2371 [Li BB, Yang JF, Gao Y, Pan MN, Hou ZX. Variations of anthocyanin and chlorophyll contents and composition in *Vaccinium* spp. leaf throughout the color changing process in autumn [J]. *Acta Horticult Sin*, 2017, **44** (12): 2361-2371]
- 8 姜文龙, 范俊俊, 张丹丹, 李千惠, 武启飞. 观赏海棠不同叶位色彩特征及特异种质挖掘[J]. 园艺学报, 2017, **44** (6): 1135-1144 [Jiang WL, Fan DD, Zhang DD, Li QH, Wu QF. Color characteristics of different leaf positions of *Ornamental malus* and specific germplasm mining [J]. *Acta Horticult Sin*, 2017, **44** (6): 1135-1144]
- 9 崔晓静, 肖建忠, 关楠, 兰海波, 李丽. 不同遮光处理对红叶石楠叶色表现的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, **36** (10): 153-157 [Cui XJ, Xiao JZ, Guan N, Lan HB, Li L. Effect of different shading treatments on the leaf color expression of *Photinia fraseri* dress [J]. *J NW For Univ (Nat Sci Ed)*, 2008, **36** (10): 153-157]
- 10 Mingcong F, Weijia L, Tingting L. Metabolomics approach reveals discriminatory metabolites associating with the blue pigments from *Vaccinium bracteatum* thunb. Leaves at different growth stages [J]. *Crops Prod*, 2020 (147): 112252.
- 11 程海燕, 李德红. 光、糖与激素影响植物花色素苷合成与积累的研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2010, **39** (3): 82-86 [Cheng HY, Li DH. Progress in effects of light, saccharide and hormones on the anthocyanin synthesis and accumulation in plants [J]. *Subtr Plant Sci*, 2010, **39** (3): 82-86]
- 12 田广, 张衡, 贺学勤. pH和微量元素对中国石竹花色及花色素苷含量的影响[J]. 北方园艺, 2021, **24**: 78-83 [Tian G, Zhang H, He XQ. Effects of pH and trace elements on flower colors and anthocyanin contents in *Dianthus chinensis* L. [J]. *North Horticult*, 2021, **24**: 78-83]
- 13 王真真, 王卫娜, 徐国超, 李留振. 红叶石楠研究现状及发展前景[J]. 黑龙江农业科学, 2011 (6): 150-153 [Wang ZZ, Wang WN, Xu GC, Li LZ. Research status and development prospects of *Photinia fraseri* [J]. *Heilongjiang Agric Sci*, 2011 (6): 150-153]
- 14 Larraburu EE, Apóstolo NM, Llorente BE. Anatomy and morphology of *Photinia fraseri* *in vitro* plants inoculated with rhizobacteria [J]. *Trees*, 2010 (24): 635-642
- 15 王红星. 彩叶树木在湖南衡阳市园林绿化美化中的应用[J]. 现代园艺, 2021 (4): 47 [Wang HX. Application of colored leaves trees in landscape and beauty in Hengyang City, Hunan Province [J]. *Mod Horticult*, 2021 (4): 47]
- 16 李力. 北美红枫呈色生理机制及叶色调控[D]. 重庆: 西南大学, 2016 [Li L. Study on the formation and regulation of leaf color from *Acer rubrum* L. [D]. Chongqing: Southwest University, 2016]
- 17 王玥, 裴顺祥, 孙敬爽, 郭慧, 吴沙. 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 [Wang Y, Pei SX, Sun JS, Guo H, Wu S. Change of color parameters and pigment content of colored leaves of two *Juniperus cultivars* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2021, **38** (1): 138-146]
- 18 Yan YY, Liu YM, Liu YM. Long-term banding modifies the changes to foliar coloration of *Acer rubrum* L. 'Brandywine' [J]. *Sci Horticult*, 2018 (228): 167-180
- 19 周蓉, 蒋芳玲, 梁梅, 邹涛, 刘小娟. 用色差仪法定量分析番茄果实番茄红素的含量[J]. 江西农业学报, 2012, **24** (9): 45-48 [Zhou R, Jiang FL, Liang M, Zhou T, Liu XJ. Quantitative analysis of *Lycopersicon esculentum* Miller content in tomato fruit by using colorimeter method [J]. *Acta Agric Jiangxi*, 2012, **24** (9): 45-48]
- 20 郭欢欢, 刘勇, 姚飞, 李世安, 宋协海. 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 HH, Liu Y, Yao F, Li SA, Song XH. Relationship between pigment contents and leaf color of *Pistacia chinensis* Bunge of different provenances parameters in autumn [J]. *J NW Bot*, 2017, **37** (10): 2003-2009]
- 21 孔祥海, 李思, 丁力, 邱丰艳. 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 XH, Li S, Ding L, Qiu FY. Variation of morphology and pigment content in leaf development of *Photinia fraseri* [J]. *N Horticult*, 2015 (24): 51-55]
- 22 孙忆, 李玺, 丁苏芹, 史益敏, 唐东芹. 小苍兰开花特性与繁育系统研究[J]. 园艺学报, 2018, **45** (2): 299-308 [Sun Y, Li X, Ding SY, Shi YM, Tang DW. Studies on flowering characteristics and breeding system of *Freesia hybrida* [J]. *Acta Horticult Sin*, 2018, **45** (2): 299-308]
- 23 郭卫珍. 五个山茶新品种叶色变化及景观灯对其影响研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014 [Guo WZ. Leaf color changes of five camellia varieties and effect of landscape lamp on them [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014]
- 24 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 YY. Lab model based analysis on physiological factors affecting color of *Acer rubrum* L. [J]. *J NW For Univ (Nat Sci Ed)*, 2017, **45** (9): 87-94]
- 25 郭鑫, 成仿云, 钟原, 成信云, 陶熙文. 紫斑牡丹花色表型数量分类研究[J]. 园艺学报, 2022, **49** (1): 86-99 [Guo X, Cheng FY, Zhong Y, Cheng XY, Tao XW. The quantitative classification of flower color phenotype in *Paeonia rockii* (flare tree peony) [J]. *Acta Horticult Sin*, 2022, **49** (1): 86-99]
- 26 陈玺中. 全红杨呈色物质机理的研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2014 [Chen XZ. A study of the coloration substances mechanism in the red-leaved mutant *Populus deltoids* *Quanhong* [D]. Chendu: Sichun Agricultural University, 2014]
- 27 Richardson C, Hobson GE. Compositional changes in normal and mutant tomato fruit during ripening and storage [J]. *J Sci Food Agric*, 1987, **40**: 245-252
- 28 张敏, 黄利斌, 周鹏, 钱猛, 窦全琴. 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 LB, Zhou P, Qian M, Dou QQ. Physiological and biochemical changes of leaf color of *Zelkova* in autumn [J]. *For Sci*, 2015, **51** (8): 44-51]
- 29 宋鹏, 丁彦芬, 卓启苗, 李涵, 王亚楠. 3种卫矛属植物叶片秋冬季转色期生理生化特征研究[J]. 西北植物学报, 2019 (4): 669-676 [Song P, Ding YF, Zhuo QM, Li H, Wang YN. Physiological and biochemical characteristics of leaves of three *Euonymus* species during color-changing period in autumn and winter [J]. *J NW Bot*, 2019 (4): 669-676]
- 30 王宗成, 路大中, 王守敏, 杨丽华, 罗小芳. 山茶油中原花青素的提取工艺优化及含量测定[J]. 中国粮油学报, 2020, **35** (4): 61-70 [Wang

- ZC, Lu DS, Wang SM, Yang LH, Luo XF. Optimization of extraction technology and determination of procyanidins from *Camellia* oil [J]. *J Chin Cer Oils Assoc*, 2020, **35** (4): 61-70]
- 31 Arnon DI. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris* [J]. *Plant Physiol*, 1949 (24): 1
- 32 刘畅, 孙鹏森, 刘世荣, 陈志成, 刘晓静. 穿透雨减少下锐齿栎叶片光合色素季节动态及其反射光谱响应[J]. 应用生态学报, 2017, **28** (4): 1077-1086 [Liu C, Sun PS, Liu SR, Chen ZC, Liu XJ. Leaf photosynthetic pigment seasonal dynamic of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* and its spectral reflectance response under through fall elimination [J]. *J Appl Ecol*, 2017, **28** (4): 1077-1086]
- 33 马树华, 王庆成, 李亚藏. 汽车尾气污染对四种北方阔叶树苗木膜脂过氧化和保护酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (12): 2330-2336 [Ma SH, Wang QC, Li YZ. Impact of automobile exhaust on membrane lipid peroxidation and protective enzyme activities in seedlings foliage of four northern broadleaved tree species [J]. *J Appl Ecol*, 2004, **15** (12): 2330-2336]
- 34 孙莹, 石锦安, 邵小鹏, 李帆, 李青, 高遐, 钟秋, 赵文舟. 不同生境条件下光照强度对蓝花楹光合色素含量及开花的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21** (6): 1150-1156 [Sun Y, Shi JA, Shao XP, Li F, Li Q, Gao X, Zhong Q, Zhao WZ. Effects of light intensity on photosynthetic pigment content and flowering of *Jacaranda mimosifolia* D. Don in different habitats [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21** (6): 1150-1156]
- 35 张福漫. 设施园艺学[M]. 第3版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 129 [Zhang FM. Protected horticulture [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2001: 129]
- 36 Archetti M. Phylogenetic analysis reveals a scattered distribution of autumn colour [J]. *Annal Bot*, 2009, **103** (5): 703-713
- 37 黄金亮, 张帆, 万雪琴, 钟宇. 芽变突变体彩叶杨光合特性及叶绿体超微结构的研究[J]. 核农学报, 2019, **33** (5): 855-862 [Huang JL, Zhang F, Wan XQ, Zhong Y. Study on photosynthetic characteristics and chloroplast ultrastructure of bud mutant of color-leaved poplar [J]. *J Nuclear Agric Sci*, 2019, **33** (5): 855-862]
- 38 胡敬志, 田旗, 鲁心安. 枫香树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), 2007, **35** (10): 219-224 [Hu JZ, Tian Q, Lu XA. Relationship between changes of the pigments content and leaf color changing in *Liquidambar formosana* [J]. *J NW Univ (Nat Sci Ed)*, 2007, **35** (10): 219-224]
- 39 袁明, 贾学静, 段振华. 红花檵木叶色变化过程中叶形态特征和色素含量变化[J]. 四川农业大学学报, 2010, **28** (1): 73-77 [Yuan M, Jia XJ, Duan ZH. Variation of leaf morphology and pigment content in the process of leaf color transformation in *Loropetalum chinense* var. *rubrum* [J]. *J Sichuan Agric Univ*, 2010, **28** (1): 73-77]
- 40 李义龙, 肇涛澜, 陈立超, 赵亚茹, 权太勇. 花色素苷生物合成及花色的调控[J]. 生命科学, 2008, **20** (1): 147-152 [Li YL, Zhao TL, Chen LC, Zhao YR, Quan TY. Regulation in pigment biosynthesis and color variation of flowers [J]. *Chin Bull Life Sci*, 2008, **20** (1): 147-152]
- 41 Ping H, Fu RL, Bin L. Hybrid-Transcriptome sequencing and associated metabolite analysis reveal putative genes involved in flower color difference in rose mutants [J]. *Plants*, 2019 (8): 267
- 42 Lee DW, Gould KS. Why leaves turn red [J]. *Am Sci*, 2002, **90** (6): 524-531