

两种叶色青钱柳叶片色素、多酚含量及光合特性差异

徐展宏, 朱莹, 金慧颖, 孙操稳, 方升佐*

摘要: 【目的】青钱柳是多功能树种, 通过比较分析两种不同叶色青钱柳叶片色素、黄酮和单宁两类多酚含量及其光合特性的差异, 为青钱柳良种选育提供理论依据。【方法】按照季节动态分别采集红叶青钱柳和绿叶青钱柳的新叶和成熟叶测定花色苷、叶绿素、类胡萝卜素、单宁和黄酮含量, 并定期测定 4 种叶型的净光合速率 (Pn) 和 PSII 最大光化学效率 (Fv/Fm), 并采用单因素方差分析比较不同叶型间的差异。【结果】红叶青钱柳的新叶花色苷含量显著高于其他 3 种叶型 ($P < 0.05$), 但叶绿素和类胡萝卜素含量显著低于红叶青钱柳和绿叶青钱柳的成熟叶片 ($P < 0.05$); 红叶青钱柳和绿叶青钱柳的成熟叶片中的黄酮和单宁含量在多数采样时间均无显著差异 ($P > 0.05$), 但在秋季, 红叶青钱柳成熟叶片的单宁含量显著高于绿叶青钱柳的成熟叶片 ($P < 0.05$); 红叶青钱柳的新叶虽然由于积累高花色苷含量而含有较低总叶绿素含量, 但其 Pn 与绿叶青钱柳的新叶不存在显著差异 ($P > 0.05$), 且红叶青钱柳和绿叶青钱柳成熟叶片的 Pn 也无显著差异 ($P > 0.05$)。

【结论】较高浓度的花色苷是红叶青钱柳新叶呈现红色的主要原因; 红叶青钱柳和绿叶青钱柳叶中单宁与黄酮的含量存在一定差异, 但总体上差异不显著; 红叶青钱柳新叶阶段多酚类物质含量较高, 但在成熟叶阶段与绿叶青钱柳成熟叶无显著差异 ($P > 0.05$)。因此, 红叶这一表型性状仅可为青钱柳药用优良单株的评价筛选提供一定参考, 但红叶青钱柳在 7-8 月叶片仍保持较高花色苷含量而呈现红色, 比绿叶青钱柳具有更高的观赏价值。

关键词: 青钱柳; 叶色; 花色苷; 黄酮; 单宁; 光合特性

Variations in the contents of leaf pigments and polyphenols and photosynthesis traits in two kinds of *Cyclocarya paliurus* with different leaf colors

XU Zhanhong, ZHU Yin, JIN Huiying, SUN Caowen, FANG Shengzuo*

Abstract: 【Objective】*Cyclocarya paliurus* is a multi-function tree species. To provide a theoretical basis for the breeding of *C. paliurus*, the variations in the contents of leaf pigments, flavonoids and tannins as well as photosynthesis traits in two kinds of *C. paliurus* with different leaf colors were compared and analyzed. 【Method】Based on seasonal dynamics of the leaf growth, the fresh and mature leaves of red-leaf *C. paliurus* and green-leaf *C. paliurus* were collected respectively to determine the contents of anthocyanins, chlorophyll, carotenoids, tannins and flavonoids, and the net photosynthetic rate (Pn) and PSII maximum photochemical efficiency (Fv/Fm) of the four leaf types. And then, the collected data were analyzed and compared across different leaf types by one-way analysis of variance. 【Results】The content of anthocyanin in red fresh leaves (RF) was significantly higher than that in the other three leaf types ($P < 0.05$), and the contents of chlorophyll and carotenoid in RF were significantly lower than that in the red mature leaves (RM) and green mature leaves (GM) ($P < 0.05$), but the differences between RF and green fresh leaves (GF) were not consistently significant. There were no significant differences in flavonoids and tannins contents between RM and GM at most sampling times ($P > 0.05$), but the tannins content of RM was significantly higher than that of GM in autumn ($P < 0.05$). Although RF had a lower total chlorophyll content due to the accumulation of high anthocyanin content, there was no significant difference in net photosynthetic rate (Pn) between RF and GF ($P > 0.05$), as well as between RM and GM ($P > 0.05$). 【Conclusion】High concentration of anthocyanin is the main reason for the red coloration of RF. There existed some differences in the contents of tannin and flavonoids between red leaf and green leaf of *C. paliurus*, but generally no significant difference was observed between them. During the RF phase, polyphenols content was higher, whereas there was no significant difference between red-leaf *C. paliurus* and the green-leaf *C. paliurus* during most of the mature leaf phase ($P > 0.05$). Therefore, the phenotypic character of red leaf can only provide certain reference for screening superior individual of *C. paliurus* in medicinal utilization. However, in July and August, the content of anthocyanin in the leaves of *C. paliurus* leaves still remained relatively high and the leaves showed red color, showing a higher and

relatively stable ornamental value compared with green-leaf *C. paliurus*.

Keywords: *Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja; delayed greening; anthocyanins; flavonoid; tannins; photosynthesis traits

植物的新叶泛红现象也被称为“延迟变绿”，被认为是植物在叶片最脆弱的展叶阶段选择的一种生态适应策略，以此来应对害虫、病菌、强光、低温等外界胁迫因素的侵袭^[1-2]。植物“延迟变绿”是通过延缓叶片展叶阶段的叶绿体发育，并合成高浓度的花色苷实现的，然而这种适应策略降低了光能的利用效率^[3]。目前，关于延迟绿化的意义尚无定论，早期研究认为黄酮类物质（包括花色苷）会拦截过剩的光能从而起到光保护的作用^[4]，高浓度花色苷使叶片在强光或高温胁迫下表现出更高的抗性，也有研究认为新叶积累花色苷是抵御害虫和真菌^[5-6]，红色新叶可能会同时积累其他抗性相关次生代谢物，如单宁类和黄酮类化合物^[7-10]，这些多酚物质除了可提高抗逆性，还可通过共色效应提高花色苷的稳定性和显色效果^[11]。

青钱柳 [*Cyclocarya paliurus* (Batal.) Iljinskaja] 是我国特有的多功能珍稀树种^[12-15]。已有研究证明，青钱柳次生代谢物含量在种源、家系内部存在较大变异^[16-18]，因此，应从单株水平开展青钱柳特异性种质资源的评价筛选，以求精准筛选优良个体，并进行无性繁殖。目前，课题组前期研究发现收集的青钱柳种质资源中存在少量红叶个体，其嫩梢新叶呈现显眼的红色，相对绿色新叶个体有更丰富的景观效果，具有更高观赏价值，且红叶个体的青钱柳在总黄酮、总三萜和多糖等生物活性物质与绿叶青钱柳个体存在差异^[19]。然而，红叶青钱柳的叶色转变与光合特性、次生代谢物的累积规律间的关系尚不明确。因此，本文通过测定红色新叶和绿色新叶两种不同表型青钱柳叶花色苷、类胡萝卜素和叶绿素三类主要呈色色素，以及黄酮、单宁两类抗性物质含量及净光合速率 (Pn) 和 PSII 最大光化学效率 (Fv/Fm)，比较红叶青钱柳与绿叶青钱柳的差异，分析两者叶主要色素、多酚类物质含量和光合特性间的关系，以期为青钱柳高生长、高抗性、高质量优良单株筛选提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验材料

试验地设在江苏南京市溧水区南京林业大学白马教学科研基地 (31°35'N, 119°09'E)，处于由北亚热带向中亚热带的过渡区。该区四季分明、气候温和湿润、雨量充沛、光照充足、无霜期长、水热同季，年平均气温 15.4 ℃，全年无霜期 237 d，年平均日照指数 2240 h，年平均降雨量 1087.4 mm。

试验材料取自白马基地青钱柳种质资源圃 4 年生同龄林，造林株行距为 2 m×3 m。在青钱柳种质资源圃内选取 3 个具红、绿 2 种叶色类型的家系单株（分别为浙江千岛湖家系 2 号、湖北五峰家系 1 号和 2 号）。每个家系分别选取 2 株红色新叶个体代表青钱柳红叶类群（简称为 RWW，red wheel wingnut）和 2 株绿色新叶个体代表青钱柳绿叶类群（简称为 GWW，green wheel wingnut）进行取样，即从 12 个单株取样，红叶和绿叶青钱柳各 6 株。力求个体间长势相近、无病虫害，每个单株标记不同方向的 3 枝一级侧枝供后续采样。

1.2 研究方法

1.2.1 采样方法

分别于 2020 年 6 月 7 号、6 月 18 日、6 月 30 日、7 月 25 日和 8 月 30 日采集标记侧枝当年生枝条的新叶和成熟叶。将枝条第 2、3 片完全展开的叶作为新叶（红色新叶记作 RF，red fresh，绿色新叶记作 GF，green fresh），将枝条上第 6、7 片叶当作成熟叶（红色成熟叶记作 RM，red mature，绿色成熟叶记作 GM，green mature），每根一级侧枝采 5 片成熟叶、5 片新叶。剪下小叶，混匀后放入自封袋于 4 ℃ 保存，用于花色苷、叶绿素、类胡萝卜素、单宁和黄酮含量的测定。

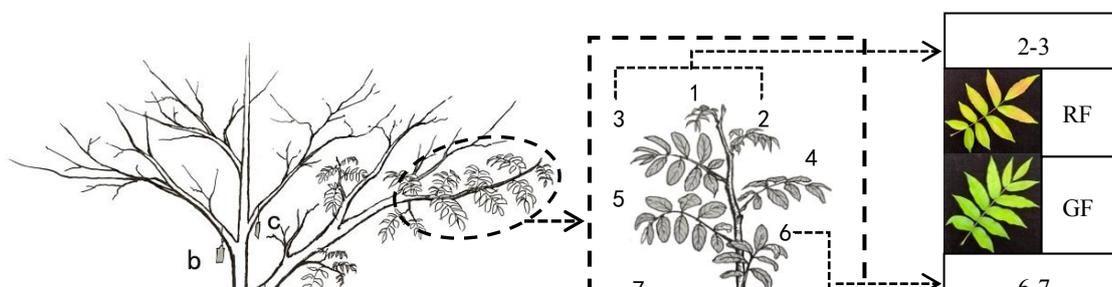


图1 青钱柳叶采样示意图(照片摄于2020年8月30日)

Figure1 Schematic diagram of *C. paliurus* leaf sampling.

1.2.2 花色素苷、叶绿素和类胡萝卜素含量测定

将取回的样品,用纸巾擦净表面污物,除去中脉,然后剪成2 mm左右的细丝并混匀,用于测定花色素苷、叶绿素和类胡萝卜素含量。

花色素苷的提取和含量测定参照唐前瑞等^[20]的方法,略有修改。用电子天平准确称取0.5 g剪好混匀的叶片细丝,置于10 mL离心管中;加入5 mL 0.1 mol·L⁻¹盐酸提取液,32 ℃恒温箱中提取4 h,离心20 min, 1 000 r·min⁻¹, 4 ℃;准确吸取200 μL上清液到96孔不可拆酶标板,用SynergyLX多功能微孔板检测仪(SynergyLX multi-mode reader,美国伯腾仪器有限公司)于530 nm测定吸光度值,重复3次。以提取液作对照。以每克鲜重在10 mL提取液中0.1 OD为1个色素单位(pigment unit),计算花色素苷相对含量(pigment unit)为: $A=0.1 \text{OD}_{535} \cdot g^{-1} \text{FW}(10 \text{ mL})^{-1} \cdot (0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ 盐酸提取液})$ 。

叶绿素和类胡萝卜素提取参照刘洋^[21]的方法,然后按照Porra等^[22]的方法计算叶片中总叶绿素(Chl)和类胡萝卜素(Car)的浓度(mg·g⁻¹)。

1.2.3 单宁和黄酮含量测定

将小叶放入鼓风烘干箱中以65 ℃烘干至恒重,粉碎后过60目筛,混匀过筛后的粉末用于单宁和黄酮含量的测定。单宁含量的测定参照袁红娥等^[23]和徐伟^[24]的方法。黄酮的提取和测定参照岳喜良等^[25]的方法。

1.2.4 净光合速率(Pn)与PSII最大量子产率(Fv/Fm)测定

于8月30日上午(9:00~10:00),用CIRAS-II型便携光合作用仪(CIRAS-3II Portable Photosynthesis System,美国PP SYSTEMS公司)在每株树的三根标记枝条各选取1片新叶和1片成熟叶测定光合参数,使用开放式气路和人工LED光源(光强1000 μmol·m⁻²·s⁻¹,气流速度500 μmol·s⁻¹、CO₂浓度为400 μmol·mol⁻¹)测定净光合速率(Pn)。

分别于2020年7月25日和8月30日天气晴朗的下午(1:00~2:00)在每株树的3根标记枝条各选取1片新叶和1片成熟叶,用暗适应夹取每片复叶上中下三个部位的小叶,暗处理30 min,用FMS-2便携调制式荧光仪(FMS-2 Pulse Modulated Fluorometer,英国Hansatech公司生产)对同一叶片的叶绿素a荧光特性进行估算。在连续测量光(1200 μmol quanta·m⁻²·s⁻¹)下测得最小荧光(F₀),然后在5000 μmol·m⁻²·s⁻¹的脉冲光化光下测得最大荧光(F_m)。按 $Fv/Fm = (Fm - F0) / Fm$ 计算PSII最大量子产率。

1.3 数据处理

采用单因素方差分析方法比较不同叶色青钱柳不同叶型及不同时期的色素含量、次生代谢物含量差异,并用Duncan's新复极差法分析不同叶型间和同一叶型不同时期各项指标的差异显著性;用Pearson相关模型分析各指标间的关系。数据统计分析均采用SPSS 22.0软件。

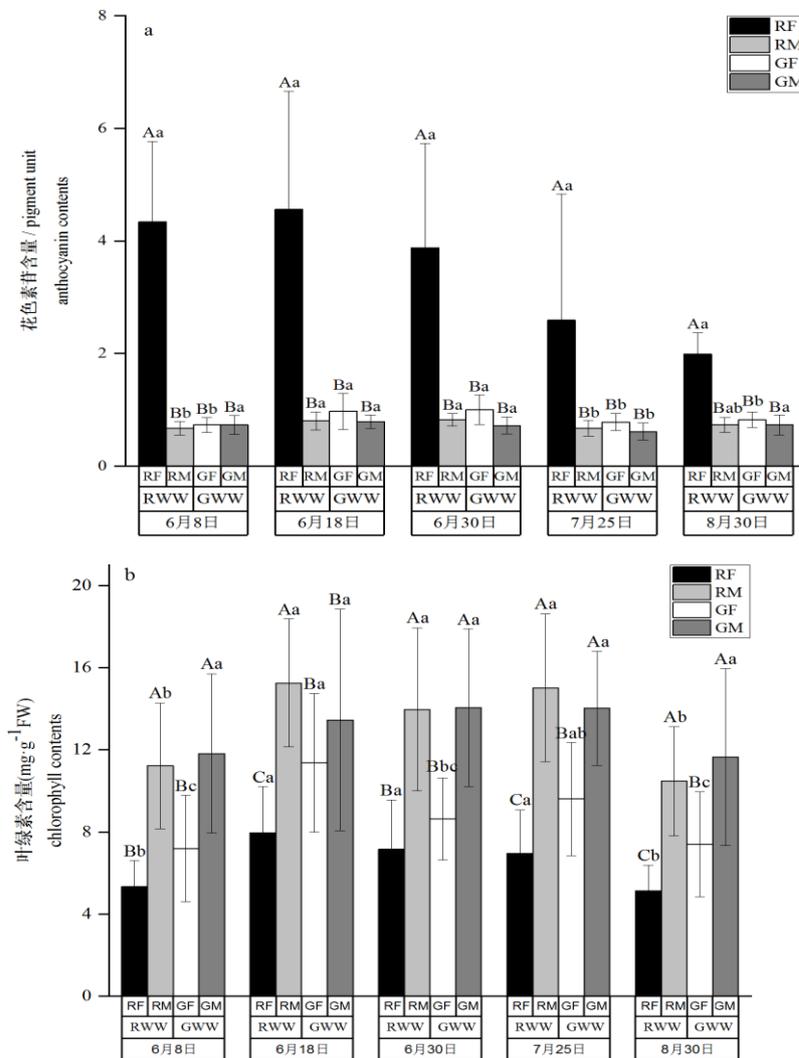
2 结果与分析

2.1 不同叶色青钱柳叶色素含量的动态变化与差异

方差分析表明,RF花色素苷含量在各采样时期均显著高于其他3种叶型($P < 0.05$,图2a),变异范

围约为 1.99~4.56 pigment unit (色素单位)。RM、GF 和 GM 的花色素苷含量之间无显著差异 ($P > 0.05$), 3 种叶中花色素苷含量平均值相较 RF 分别低 79%、75%和 79%。同一类型叶型花色素苷含量在不同月份有显著变异 (图 2a), 从 6 月初到 8 月末大致呈现出下降趋势。如 RF 叶花色素苷含量最高值出现在 6 月 18 日 (4.56 pigment unit), 比 8 月 30 日 (1.99 pigment unit) 高出约 1.79 倍, 与叶的颜色特征一致。即在 6 月 RF 叶片呈现明显的红色, 之后叶色逐渐变绿; 而其他 3 种叶型花色素苷含量在各自不同采样时期虽存在显著差异, 但 3 者花色素苷含量在取样期间始终较低, 叶色一直为绿色。

红色新叶青钱柳和绿色新叶青钱柳两个类群的成熟叶 (RM 和 GM) 叶绿素含量均显著高于其新叶 (RF 和 GF), 但 RM 和 GM 两种成熟叶叶绿素含量无显著差异 ($P < 0.05$, 图 2b)。RF 叶绿素含量始终低于 GF, 各月平均值约低 26%。4 种叶型叶绿素含量基本上呈现抛物线型的季节变化模式。如 RF 叶中叶绿素含量在 6 月 18 日 ($7.96 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$) 达到峰值, 而 6 月 8 日和 8 月 30 日含量最低, 比 6 月 18 日分别低 33%和 36%。4 种叶型类胡萝卜素含量的差异、变化趋势与其叶绿素含量的变化趋势相似 (图 2b 和图 2c)。



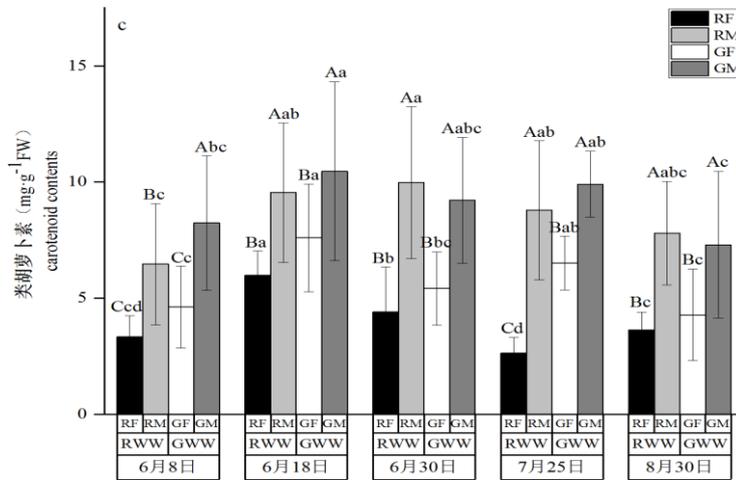


图2 红叶青钱柳和绿叶青钱柳叶花色素(a)、叶绿素(b)和类胡萝卜素(c)含量的差异 (n=60)

Figure 2 Differences in anthocyanin (a), chlorophyll (b), and carotenoid (c) contents of red-leaf and green-leaf *C. paliurus* (n=60)

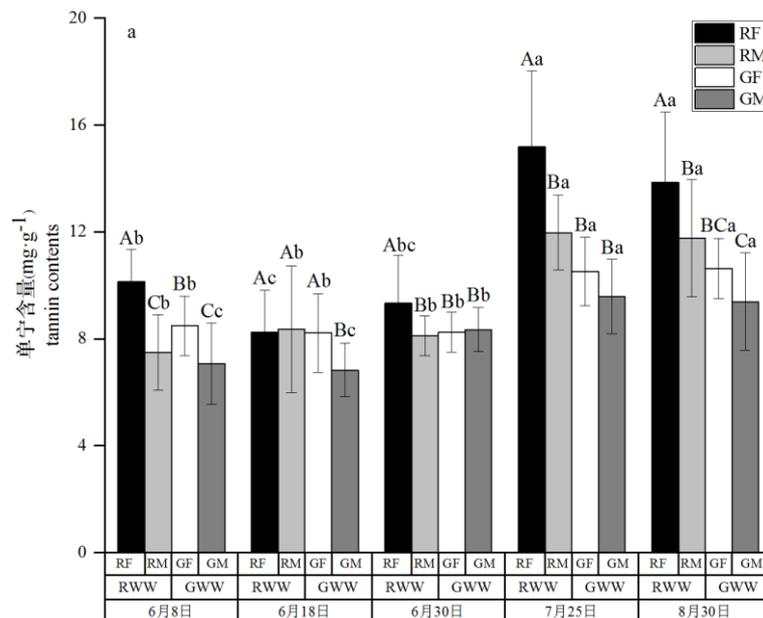
注: 不同大写字母为同一取样时间不同叶型在 0.05 水平上差异显著;不同小写字母为同一叶型不同取样时间在 0.05 水平上差异显著。下同。

Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$). Different small letters indicate the same leaf type at different time sampling at the 0.05 levels significantly different. Different capital letters indicate the difference kinds of leaf types at the same time sampling at the 0.05 levels significantly different. The same below.

综上所述,青钱柳叶色的变化主要取决于不同发育阶段叶各种色素含量的高低。发育初期红色新叶(RF)花色素苷含量显著高于成熟叶(RM),而叶绿素含量显著低于RM,叶色为红色;但随时间推移,花色素苷含量逐渐下降。

2.2 不同叶色青钱柳叶单宁和黄酮含量的动态变化与差异

RF、RM、GF、和GM四种叶型的单宁含量在6月8日~8月30日均呈现上升趋势,RF、RM和GM均在7月25日达到峰值,分别为 $15.18 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $11.97 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 和 $10.52 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,GF单宁含量于8月30日达到峰值 $10.63 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。RF单宁含量在多数采样期(6月8日、6月30日、7月25日和8月30日)均显著高于其他三种叶型($P < 0.05$,图3a),RM在6月18日、7月28日和8月30日均显著高于GM($P < 0.05$),其他采样期无显著差异($P > 0.05$)。



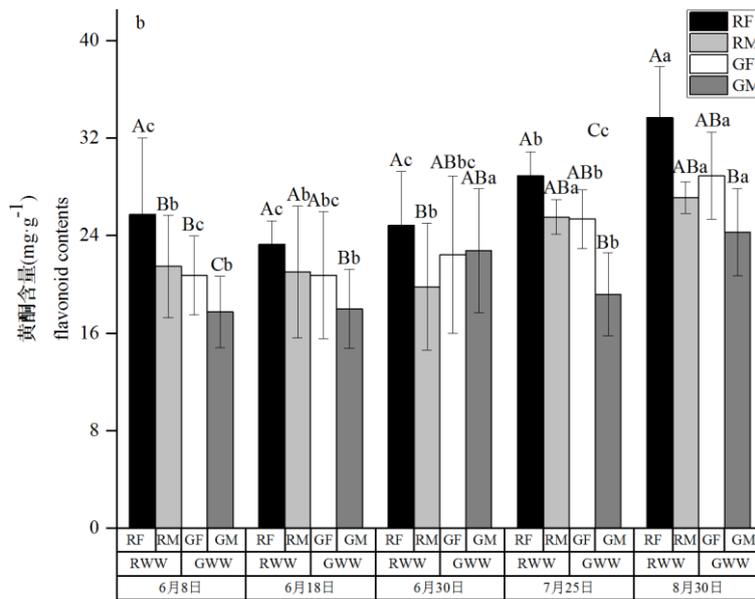


图3 红叶青钱柳和绿叶青钱柳在不同时间叶单宁 (a) 和黄酮 (b) 含量的差异 (n=60)

Figure 3 Differences in leaf tannin(a) and flavonoid(b) contents of red-leaf and green-leaf *C. paliurus* (n=60)

RF 的黄酮含量在各采样时期均高于其他三种叶型 (图 3b), 但只在 6 月 8 日存在显著差异 ($P < 0.05$), 就新叶而言, RF 黄酮含量在大多数时期 (6 月 8 日、6 月 18 日、7 月 25 日和 8 月 30 日) 均高于 GF, 但只有在 6 月 8 日和 6 月 18 日两者存在显著差异 ($P < 0.05$), 就成熟叶而言, RM 黄酮含量在 6 月 8 日和 6 月 18 日显著高于 GM, 但在 6 月 30 日、7 月 25 日和 8 月 30 日两者均无显著差异。

2.3 不同叶色青钱柳 PSII 最大光化学效率 (Fv/Fm) 和净光合速率 (Pn) 的差异

不同青钱柳叶型 PSII 最大光化学效率 (Fv/Fm) 的差异如图 4。4 种叶型的 Fv/Fm 存在显著差异, 其中 RF 叶的 Fv/Fm 最低, 显著低于其他 3 种叶型 ($P < 0.05$), 但 RM 和 GM 这 2 种成熟叶的之间 Fv/Fm 不存在显著差异 ($P > 0.05$)。

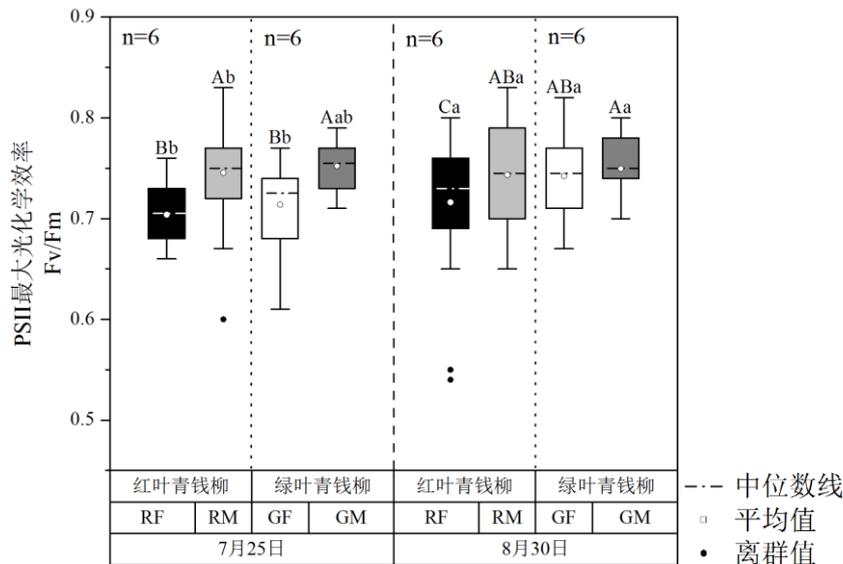


图4 红叶青钱柳和绿叶青钱柳 PSII 最大光化学效率 (Fv/Fm) 的差异

Figure 4 Differences in Fv/Fm of red-leaf and green-leaf *C. paliurus*

不同大写字母为同一测量时间不同叶型在 0.05 水平上差异显著;不同小写字母为同一叶型不同测量时间在 0.05 水平上差异显著, 下同。Different capital letters indicate significant differences ($P < 0.05$; Duncan-test). Different small letters indicate the same leaf type at different time measuring at the 0.05 levels significantly different. Different capital letters indicate the difference kinds of leaf types at the same time measuring at the 0.05 levels significantly

different. The same below.

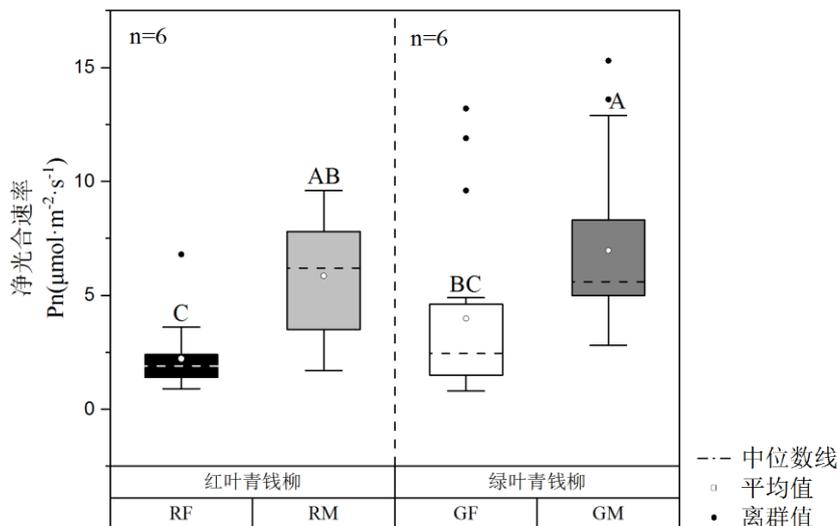


图5 红色新叶和绿色新叶青钱柳新叶和成熟叶净光合速率 (Pn) 的差异

Figure 5 Differences in Pn of red-leaf and green-leaf of *C. paliurus*

不同青钱柳叶型净光合速率 (Pn) 的差异见图 5。方差分析表明, RF 的 Pn 最低, 显著低于 RM 的 Pn ($P < 0.05$), 但与 GF 无显著差异 ($P > 0.05$), 与 RF 的 Pn 平均值相比, GF、GM 和 RM 分别高出 79%、214% 和 164%。

2.4 青钱柳叶花色苷含量与多酚含量的关系

花色苷含量与其它色素以及多酚含量的相关性分析见表 1。叶绿素和类胡萝卜素两类色素含量与花色苷含量呈显著负相关, 但花色苷含量与单宁和黄酮两类物质含量呈现显著正相关。叶绿素和类胡萝卜素两类色素含量显著正相关 ($P < 0.01$, $R^2=0.856$), 单宁和黄酮两类物质含量也显著正相关 ($P < 0.01$, $R^2=0.506$), 但叶绿素和类胡萝卜素含量与多酚类物质含量 (黄酮和单宁) 均为显著负相关。

表 1 青钱柳叶色素含量与多酚类物质含量的相关性分析 (n=60)

Table 1 Correlation analysis of pigment content and polyphenols content in leaves of *C. paliurus* (n=60)

因子 factors	花色苷含量 anthocyanin content	类胡萝卜素含量 carotenoid content	叶绿素含量 chlorophyll content	单宁含量 tannin content
类胡萝卜素含量 carotenoid content	-0.385**			
叶绿素含量 chlorophyll content	-0.351**	0.856**		
单宁含量 tannin content	0.221**	-0.289**	-0.223**	
黄酮含量 flavonoid content	0.233**	-0.345**	-0.325**	0.506**

注: * . $P < 0.05$; ** . $P < 0.01$ 。

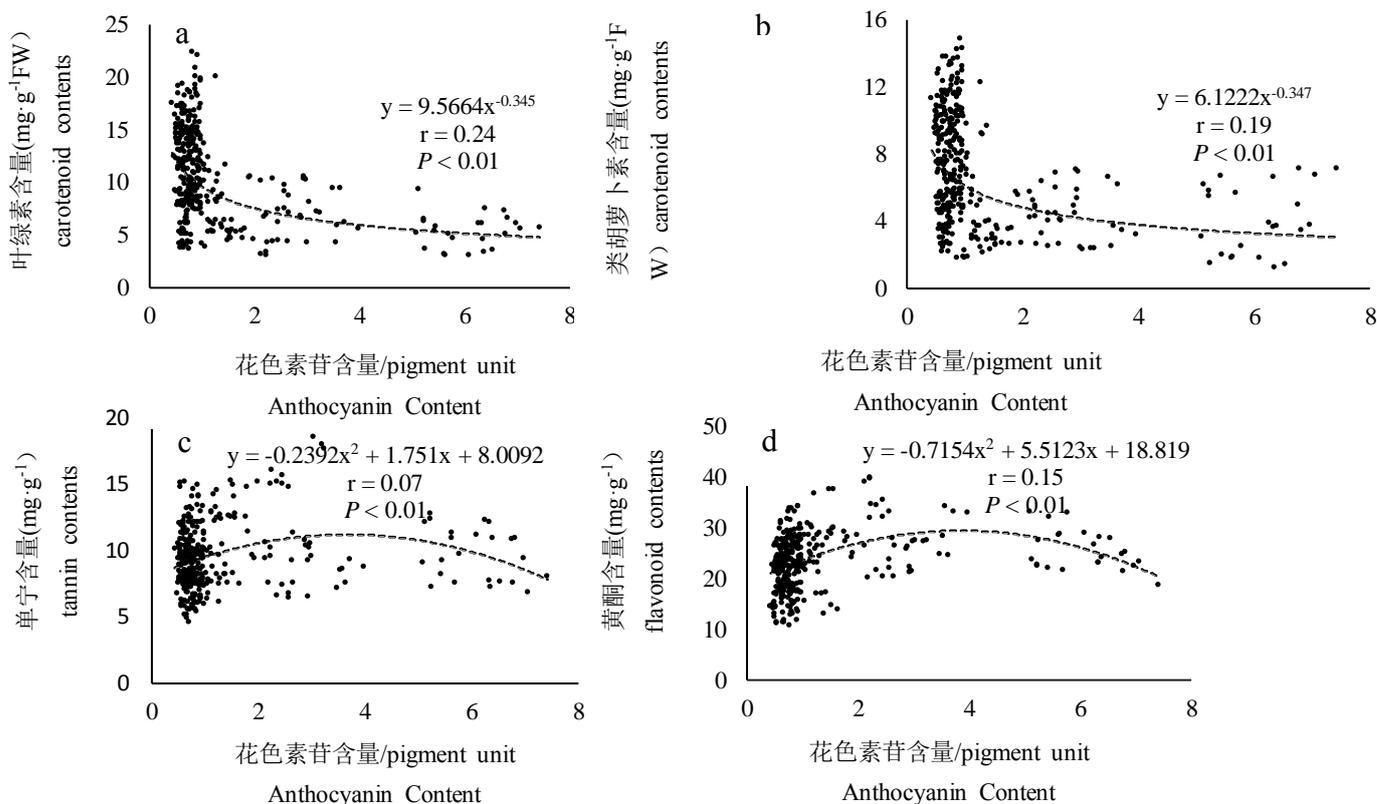


图6 青钱柳叶花色苷含量、叶绿素含量、类胡萝卜素含量、单宁含量和黄酮含量相关性的回归分析

Figure 6 Regression analysis of the correlation between anthocyanin content and chlorophyll content, carotenoid content, tannin content and flavonoid content in *C. paliurus* leaves

回归分析表明，青钱柳叶类胡萝卜素和叶绿素含量与花色苷均呈现显著幂函数相关 ($P < 0.01$)， R^2 分别为 0.24 和 0.19，前两者含量随花色苷含量上升均呈现逐渐平缓的下降趋势 (图 6a 和图 6b)。单宁含量和黄酮含量与花色苷含量均存在显著二项式相关 ($P < 0.01$)， R^2 分别为 0.07 和 0.15，前两者含量随花色苷含量上升呈现先上升后下降的趋势 (图 6c 和图 6d)。

2.5 青钱柳叶色素含量与光合特性的关系

青钱柳叶花色苷、叶绿素、类胡萝卜素、单宁和黄酮含量与 F_v/F_m 的相关性分析见表 2。 F_v/F_m 和花色苷、类胡萝卜素含量不存在相关关系 ($P < 0.05$)，但 F_v/F_m 和叶绿素含量呈显著负相关 ($P < 0.05$)； F_v/F_m 和单宁含量极显著负相关 ($P < 0.01$) 和黄酮含量显著负相关 ($P < 0.05$)。

表 2 青钱柳叶色素及多酚含量与 F_v/F_m ($n=24$) 及净光合速率 ($n=12$) 的相关性分析

Table 2 Correlation between the contents of pigment and polyphenols and F_v/F_m ($n=24$) as well as between the contents of pigment and polyphenols and P_n ($n=12$) in the leaves of *C. Paliurus*

因子 factors	最大量子产率 F_v/F_m	净光合速率 P_n
花色苷含量 anthocyanin content	-0.036	-0.252*
类胡萝卜素含量 chlorophyll content	0.244**	0.464**
叶绿素含量 carotenoid content	0.180*	0.314**
单宁含量 tannin content	-0.183*	-0.033
黄酮含量 flavonoid content	-0.250**	-0.243*

注：* . $P < 0.05$; ** . $P < 0.01$ 。

青钱柳叶 (RF、RM、GF 和 GM) 的花色苷含量、叶绿素含量、类胡萝卜素含量、黄酮含量、单宁含量

与 Pn 之间的相关性分析见表 2。Pn 和花色苷含量呈显著负相关，而单宁含量和 Pn 不存在相关关系，黄酮含量和 Pn 显著负相关 ($P < 0.05$)，类胡萝卜素含量、叶绿素含量与 Pn 极显著正相关 ($P < 0.05$)。

5 讨论

本试验初步结果表明，RF 的花色素苷含量显著高于其 RM、GF 和 GM，但其叶绿素含量低于其他三种叶型，这是红叶青钱柳新叶泛红的主要原因。自 6 月末到 8 月末，RF 由红转绿的过程中，花色苷和叶绿素含量均呈现下降的趋势，由此推断花色苷含量的下降是这一时期青钱柳新叶变绿的关键原因，袁明等^[26]和路买林等^[27]对其他红叶树叶色转绿的原因也得出相同结论，而花色苷含量逐渐下降的原因可能是高温降低了花色苷的稳定性，加速了其分解^[28-29]。此外，由于 RF 从 6 月初到 8 月末，花色苷浓度呈下降趋势，但其浓度均处于较高的水平而呈现深浅不一的红色，因此红叶青钱柳在观赏中可归为“常色叶树种”，具有较长的观赏期，相对绿叶青钱柳具有更丰富多变的景观效果。

本研究中发现，RF 的单宁含量在多数时候显著高于其他 3 种叶型 ($P < 0.05$)，且 RF 黄酮含量在多数时候也高于其他 3 种叶型。以往研究认为一些黄酮和单宁类物质被认为是花色苷的辅色素，可以增强其稳定性^[30-31]，近年的研究表明植物幼叶中高浓度的水解单宁可以抑制过氧化物酶介导的花色素苷降解，并可以通过辅色作用增加花色苷的稳定性^[32]。因此，本研究中黄酮和单宁两类多酚化合物同时在青钱柳红色新叶相对富集具有一定合理性。史宝胜等^[33]发现遮荫后光照处理使得紫叶李叶花色苷、类黄酮、多酚三者含量均急剧上升。但黄酮、单宁和花色苷含量并非线性相关，而是花色苷在相对低浓度范围时，其含量和单宁、黄酮含量呈现正相关，而超过一定范围后，随着花色苷含量升高，黄酮、单宁含量呈现下降趋势，这与 Gong 等^[4]的研究结果有差异，可能由于研究对象种类和数量的差异导致。本文研究对象是青钱柳种内红、绿叶表型个体，而 Gong 等人的研究对象是不同科、属、种的红、绿色新叶表型树木类群研究。此外，7、8 月叶片黄酮含量较高时，花色苷含量最低，这可能是其他一些黄酮类物质在高浓度时，其与花色苷的共显色作用同花色苷自聚合效应发生竞争，导致其稳定性降低^[34]。

不少研究指出，由于叶绿素含量较低，对光能的吸收转化能力较弱，相比成熟叶往往更易遭受强光和高温的胁迫，夏季过度的光照甚至会引起光氧化损伤^[35]。黄酮类物质（尤其是花色苷）被认为起到抵御强光和高温胁迫的作用^[36]。本研究结果表明，RF 的 Fv/Fm 在 7 月 25 日和 8 月 30 日均低于其他三种叶型，在 8 月 30 日差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)，而这一时期 RF 的花色素苷和黄酮含量均高于其他三种叶型，说明青钱柳花色苷和黄酮并不能在高温强光环境下起到显著的保护效果。Lee^[37]对杧果和咖啡红色新叶的解剖发现，花色苷集中分布于靠近叶片下表皮的位置，并由此推测花色苷与光合作用和光保护并无直接联系；Dominy 等^[38]调查了新加坡、墨西哥和哥斯达黎加三国的几处热带林分延迟绿化树种发现，受到更强烈光照的林冠上层树叶并没有比下层树叶含有更多的花色苷。

新叶积累大量花色苷，因此损失了部分光合作用的功能。本研究发现 RF 的 Pn 低于其他 3 种叶型，但和 GF 无显著差异 ($P > 0.05$)，说明青钱柳红色新叶延迟绿化策略而带来的光合损失较小，这与李小康^[39]对中红杨和亲本 2025 的 Pn 差异研究结果一致。庄猛^[40]发现红叶桃和红叶李的 Pn 在春、夏季显著低于绿叶桃和绿叶李，而在秋季红叶与绿叶品种间没有显著差异 ($P > 0.05$)；也有研究发现红叶或紫叶品种虽然有的时段 Pn 低于绿叶桃，但其的全天净光合总值大于绿叶品种^[41]。本研究的相关性分析表明，花色苷含量与 Pn 为负相关，与先前很多研究^[42-43]的结果一致。树木的光合作用主要依靠成熟叶，因此红叶青钱柳和绿叶青钱柳两类青钱柳树木整体的光合差异还需进一步研究。此外，关于红叶青钱柳生长、代谢生理以及遗传方面的差异和抗性、生态以及生产实际方面的意义，未来还需进行进一步探讨。