

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.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.22.026

鸡爪槭叶色变化机制研究

罗安才, 阎晓灵, 李利霞, 赵正武, 唐安军

(重庆师范大学生命科学学院, 重庆 400047)

摘要:以鸡爪槭为材料, 研究其叶色变化机制, 通过检测与叶色相关的生理指标, 探究其与叶色变化的相关性; 并用 SRAP 分子标记技术对鸡爪槭的叶色基因初步定位。结果显示, 鸡爪槭叶色变化和含水量没有显著相关性; 与叶绿素含量呈显著的负相关性; 但与花色素苷与叶绿素的比值呈正相关关系。花色素苷含量越高, 叶片越红; 可溶性糖和苯丙氨酸解氨酶与花色素苷的合成相关, 其含量或活性的高低和叶片颜色变化有显著相关性。5-氨基酮戊氨酸和胆色素原与叶绿素的合成相关, 其含量越低, 叶片越红。SRAP 标记未能定位到鸡爪槭的叶色基因。

关键词:鸡爪槭; 叶色; 生理指标; SRAP

中图分类号: S184; S687.01 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)22-0118-05

鸡爪槭(*Acer palmatum*)是槭树科槭属植物, 典型的彩叶树种, 随着秋季光合作用产物的变化, 叶片中色素种类、含量和比例会发生相应改变, 从而导致叶片颜色改变^[1]。但是目前关于槭树科植物叶色变化的研究主要集中在环境因素、色素含量及可溶性糖等生理指标变化方面^[2-7], 没有关于某一特定品种鸡爪槭叶色变化的系统性研究, 如关于细叶鸡爪槭叶片常年是绿色而紫红叶鸡爪槭叶片常年是红色的原因是什

么, 还不曾有人进行探究; 分子方面关于颜色变化相关基因准确定位的研究也没有报道。本研究以 3 种鸡爪槭为研究材料, 测量鸡爪槭变色期相关生理指标, 通过对比及差异性分析, 探究紫红叶鸡爪槭叶片变红的机制, 并用 SRAP 分子标记技术^[8]初步探索控制鸡爪槭叶片颜色改变的基因, 从而为鸡爪槭在景观配置中多彩化和合理化应用提供一定的参考, 为彩叶植物新品种的引进提供参考依据。

收稿日期: 2017-06-16

基金项目: 重庆市教委科技项目(编号: KJ1400526)。

作者简介: 罗安才(1962—), 男, 四川叙永人, 博士, 教授, 主要研究方向为植物生理学。E-mail: XINLAC2013@aliyun.com。

温度 T_a 与光合有效辐射 PAR 呈显著正相关, 说明影响空气温度的主要因子可能是光合有效辐射。

参考文献:

- [1] 中国科学院植物研究所. 秦岭植物志(第 1 卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1970: 386.
- [2] 康廷国. 中药鉴定学[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2003: 231–232.
- [3] 杨 伞, 何 平, 段才绪, 等. 外源物质亚精胺对射干种子萌发及幼苗光合特征的影响[J]. 中草药, 2014, 45(15): 2235–2241.
- [4] 展 锐, 焦正花, 王红丽, 等. 射干的药理作用研究概况[J]. 甘肃中医, 2011, 24(1): 78–80.
- [5] 高 超, 闫文德, 田大伦, 等. 杜仲光合速率日变化及其与环境因子的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(5): 100–104.
- [6] 杨晓玲, 杨 晴, 郭守华, 等. 燕龙板栗光合作用及其相关因素的日变化[J]. 经济林研究, 2008, 26(1): 67–70.
- [7] 闫 年, 吴文友, 刘桂华, 等. 四个杨树品系夏季光合作用日变化[J]. 林业科技开发, 2011, 25(2): 48–52.
- [8] 刘 巍, 蔺胜军, 丁 勇, 等. 5 种不同杨树光合指标日变化分析[J]. 西南林业大学学报, 2015(6): 19–25.
- [9] 栾金花. 干旱胁迫下三江平原湿地毛茛草光合作用日变化特性研究[J]. 湿地科学, 2008, 6(2): 223–228.

1 材料与方法

1.1 研究材料

研究材料采自重庆市南山植物园, 取生长条件相同的紫红叶鸡爪槭(*Acer palmatum* cv. *atm-purpureum*)、细叶鸡爪槭

- [10] Martin C A, Stabler L B. Plant gas exchange and water status in urban desert landscapes[J]. Journal of Arid Environments, 2002, 51(2): 235–254.
- [11] 吕爱霞, 杨吉华, 夏江宝, 等. 3 种阔叶树气体交换特性及水分利用效率影响因子的研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 188–191.
- [12] 杨学军, 武菊英, 滕文军, 等. 青绿苔草光合作用日变化及季节动态[J]. 草业科学, 2014, 31(1): 102–107.
- [13] 许大全. 光合作用气孔限制分析中的一些问题[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(4): 241–244.
- [14] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology, 1982, 33(3): 317–345.
- [15] Sam O, Jerdz E, Dell-Amico J, et al. Water stress induced changes in anatomy of tomato leaf epidermis[J]. Bologia Plantarum, 2000, 43(2): 275–277.
- [16] 廖 行, 王百田, 武 晶, 等. 不同水分条件下核桃蒸腾速率与光合速率的研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 30–34.
- [17] 樊卫国, 李迎春. 梨属 4 个重要种的光合特性及水分利用效率[J]. 西南农业学报, 2006, 19(6): 1144–1146.
- [18] 孙惠玲, 马剑英, 王绍明, 等. 准格尔盆地荒漠植物碳同位素组成研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(6): 972–976.

(*Acer pahnatum* cv. *dissectum*) 和血红枫 (*Acer pahnatum* cv. *atropurpureum*) 的新鲜叶片, 于 2014 年 5—11 月共 7 个月, 每月的 28 日 10:00 定时采集, 并迅速带回实验室贮存于 -80°C 的超低温冰箱中。

1.2 生理指标的测定

将采集的新鲜叶片洗净擦干, 去掉叶脉和叶柄, 剪碎后混合均匀, 作为样品以备后续试验。每组试验测量 3 次, 测得数据用 Excel 作图, 用 SPSS 19.0 进行差异显著性分析 ($\alpha=0.05$ 或 $\alpha=0.01$)。

1.2.1 含水量的测定 称量样品的鲜质量 (FW), 105°C 烘箱内烘烤 8 h, 称其干质量 (DW)。含水量 (RWC) 的计算公式: $RWC = (FW - DW) / FW \times 100\%$ 。

1.2.2 叶绿素含量的测定 精准称取 0.1 g 样品烘干, 加 10 mL 无水乙醇和 80% 丙酮混合液提取^[9], 以 80% 丙酮为对照测上清液分别在 645、663 nm 下的吸光度 (D)。计算公式:

$$\text{可溶性糖含量}(\mu\text{g/g}) = \frac{\text{从标准曲线查得糖的量}(\mu\text{g}) \times \text{提取液体积}(\text{mL}) \times \text{稀释倍数}}{\text{测定用样品液的体积}(\text{mL}) \times DW \times 10^6}$$

1.2.5 苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 活性的测定 精准称取 0.5 g 样品烘干, 加 5 mL 提取液提取粗酶液^[12], 取 1 mL 粗酶液加 1 mL 苯丙氨酸 (0.02 mol/L) 和 2 mL 硼酸缓冲液, 30°C 恒温水浴 1 h, 用 0.2 mL HCl (6 mol/L) 终止反应, 检测 290 nm 处的吸光度。以测定管反应液吸光度 1 h 增加 0.01 为 1 个酶活性单位 (U)^[13]。

PAL 活性 $[U/(g \cdot h)] = D_{290\text{ nm}} \times V_t \times V / (0.01 \times V_s \times DW \times t)$ 。式中: V_t 表示酶液总体积, mL; V_s 表示测定时取酶液的量, mL; V 表示反应液总体积, mL; t 表示反应时间, h。

1.2.6 胆色素原 (PBG) 含量的测定 精准称量 0.5 g 样品烘干, 加 5 mL 提取液后沸水浴 10 min, 冷却后加 2 mL Ehrlich-Hg 显色^[14-16], 测 553 nm 处的 D 值。

PBG 含量 ($\mu\text{g/g}$) = $D_{553\text{ nm}} \times 47 \times \text{稀释倍数}$ 。

1.2.7 5-氨基酮戊氨酸 (ALA) 含量的测定 精准称取 0.5 g 样品充分研磨, 加 5 mL 提取液提取, 离心后取上清液加显色剂显色^[17], 测 553 nm 处的 D 值。

ALA 含量 ($\mu\text{g/g}$) = $D_{553\text{ nm}} \times 47 \times \text{稀释倍数}$ 。

1.3 分子标记

1.3.1 DNA 的提取 用 TaKaRa 公司提供的试剂盒, 按试剂盒所示步骤提取鸡爪槭叶片 DNA。

1.3.2 SRAP 反应体系 SRAP 反应体系组成详见表 1。SRAP-PCR 程序: 94°C 预变性 5 min; 前 5 个循环以 94°C 变性 1 min, 35°C 复性 1 min, 72°C 延伸 1 min 进行, 接着将退火温度升至 50°C , 其他条件不变, 进行 35 个循环; 最后 72°C 再延伸 5 min, 于 4°C 冰箱保存备用。

表 1 SRAP 反应体系

成分	用量
Premix Taq (TaKaRa Taq TM Version 2.0 plus dye)	25 μL
模板	2 μL
引物 1 (20 $\mu\text{mol/L}$)	1 μL
引物 2 (20 $\mu\text{mol/L}$)	1 μL
灭菌蒸馏水	补足至 50 μL

1.3.3 SRAP 标记引物的筛选和 PCR 产物的检测 SRAP 引物由上海生物工程技术有限公司合成, 取 DNA 质量较好的样

叶绿素 a 含量 (mg/g) = $(12.71D_{663\text{ nm}} - 2.59D_{645\text{ nm}}) \times V / (1\ 000\ DW)$;

叶绿素 b 含量 (mg/g) = $(22.88D_{645\text{ nm}} - 4.67D_{663\text{ nm}}) \times V / (1\ 000\ DW)$;

叶绿素总含量 (mg/g) = $(8.04D_{663\text{ nm}} + 20.29D_{645\text{ nm}}) \times V / (1\ 000\ DW)$ 。

1.2.3 花色素苷、类黄酮和总酚含量的测定 精准称取 0.1 g 样品烘干, 加 5 mL 0.1% 的盐酸乙醇混合液提取^[10], 以提取液作对照, 分别测定 530 nm、320 nm、280 nm 处的吸光度。

花色素苷相对含量 (mg/g) = $D_{530\text{ nm}} / DW$;

类黄酮相对含量 (mg/g) = $D_{320\text{ nm}} / DW$;

总酚相对含量 (mg/g) = $D_{280\text{ nm}} / DW$ 。

1.2.4 可溶性糖含量的测定 精准称取 0.1 g 样品烘干, 用蒽酮比色法^[11]测量叶片中可溶性糖的含量。

品 (细叶鸡爪槭) 用 1.2% 的琼脂糖凝胶电泳进行初步的引物筛选, 较好的引物组合再进行复选。再用 2% 的琼脂糖凝胶检测 PCR 扩增产物, 用银染法对凝胶进行染色, 再用相机记录差异条带。

1.3.4 差异条带的切割与纯化和二次 PCR 切下差异条带进行称量, 1 g 凝胶对应 1 mL Binding Buffer, 然后 $55 \sim 60^{\circ}\text{C}$ 水浴至胶溶解, 再按步骤纯化 DNA。同样体系中以纯化后的 DNA 为模板进行二次 PCR, 用丙烯酰胺凝胶电泳验证条带大小及单一性。

1.3.5 测序和比对分析 将二次 PCR 后的样品送到上海英俊生物公司进行测序, 测序结果用 NCBI 数据库进行 Blast 数据比对分析。

2 结果与分析

2.1 生理指标测定结果与分析

由图 1-A 可知, 紫红叶鸡爪槭和细叶鸡爪槭的含水量均在 7 月达到最高值, 分别为 66.32% 和 65.78%, 在 11 月降到最低, 分别为 15.26% 和 10.47%。2 个材料变化趋势相近, 不存在显著性差异。

由图 1-B 可知, 在观察期内 2 种鸡爪槭的叶绿素 a 和 b 的含量随时间均呈现呈升—降变化趋势, 细叶鸡爪槭和紫红叶鸡爪槭的叶绿素 a 含量均在 7 月最高, 分别为 10.29、3.03 mg/g; 在 11 月含量最低, 分别为 0.59、0.62 mg/g。2 种鸡爪槭的叶绿素 a 在 5—8 月内存在显著性差异 ($P < 0.05$), 8 月份后差异不显著。细叶鸡爪槭和紫红叶鸡爪槭的叶绿素 b 含量在 7 月最高, 分别为 11.04、3.63 mg/g; 在 11 月含量最低, 分别为 1.09、0.91 mg/g。2 种鸡爪槭的叶绿素 b 含量仅在 5、6 月存在显著性差异 ($P < 0.05$)。综合得知, 2 种鸡爪槭叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量都是嫩叶和老叶含量低, 成熟叶片含量高。

由图 1-C 得知, 在整个研究过程中, 细叶鸡爪槭叶绿素总含量呈单峰值, 紫红叶鸡爪槭则随时间呈双峰值。细叶鸡爪槭总叶绿素含量最高在 10 月, 达到 10.15 mg/g, 最低在 5 月, 只有 3.83 mg/g; 紫红叶鸡爪槭的总叶绿素含量最高在 7

月,有6.64 mg/g,这与夏季高温返青现象有关,最低在11月,仅有1.56 mg/g。在5月后,细叶鸡爪槭的叶绿素总含量总是大于紫红叶鸡爪槭,这与细叶鸡爪槭常年绿色相关。2种鸡爪槭叶绿素总含量在6、9、10这3个月存在显著性差异($P < 0.05$),7、8月间差异不显著。

分析图1-D,在整个观察期,2种鸡爪槭花色苷的相对含量变化趋势因品种不同而存在显著差异。细叶鸡爪槭花色苷的相对含量在5—6月略微升高,嫩叶呈淡淡的紫红色;6—9月缓慢下降,达到最低值(2.28 mg/g),成熟叶片呈绿色;10月花色苷的相对含量上升,达到最高值(5.01 mg/g),老叶变黄;11月下降。紫红叶鸡爪槭在5、8、10月含量较高,8月最高,达10.01 mg/g,叶片鲜艳,适宜观赏;6、9、11月含量低,9月最低,为3.12 mg/g,叶片颜色变成紫红色。

花色素苷含量和叶绿素含量的比值是评价叶色变化的标准之一,比值越大,叶片颜色越红^[18]。由图1-E可知,紫红叶鸡爪槭的比值总是大于细叶鸡爪槭,细叶鸡爪槭的比值趋于稳定,而紫红叶鸡爪槭比值在每个时期都变化显著,11月达到最大值2.857,7月比值最小,仅0.789。

由图1-F可知,细叶鸡爪槭类黄酮的相对含量呈升—降趋势,紫红叶鸡爪槭呈降—升—降趋势。2种鸡爪槭都是11月含量最低,分别为5.35、5.59 mg/g;但细叶鸡爪槭7月含量最高,达到11.82 mg/g,紫红叶鸡爪槭5月含量最高,达15.98 mg/g。分析得知,2个品种的鸡爪槭在整个变色过程中类黄酮的相对含量没有显著性差异。

分析图1-G,在整个变色过程中,细叶鸡爪槭总酚的相对含量呈升—降趋势,紫红叶鸡爪槭呈降—升—降趋势。2

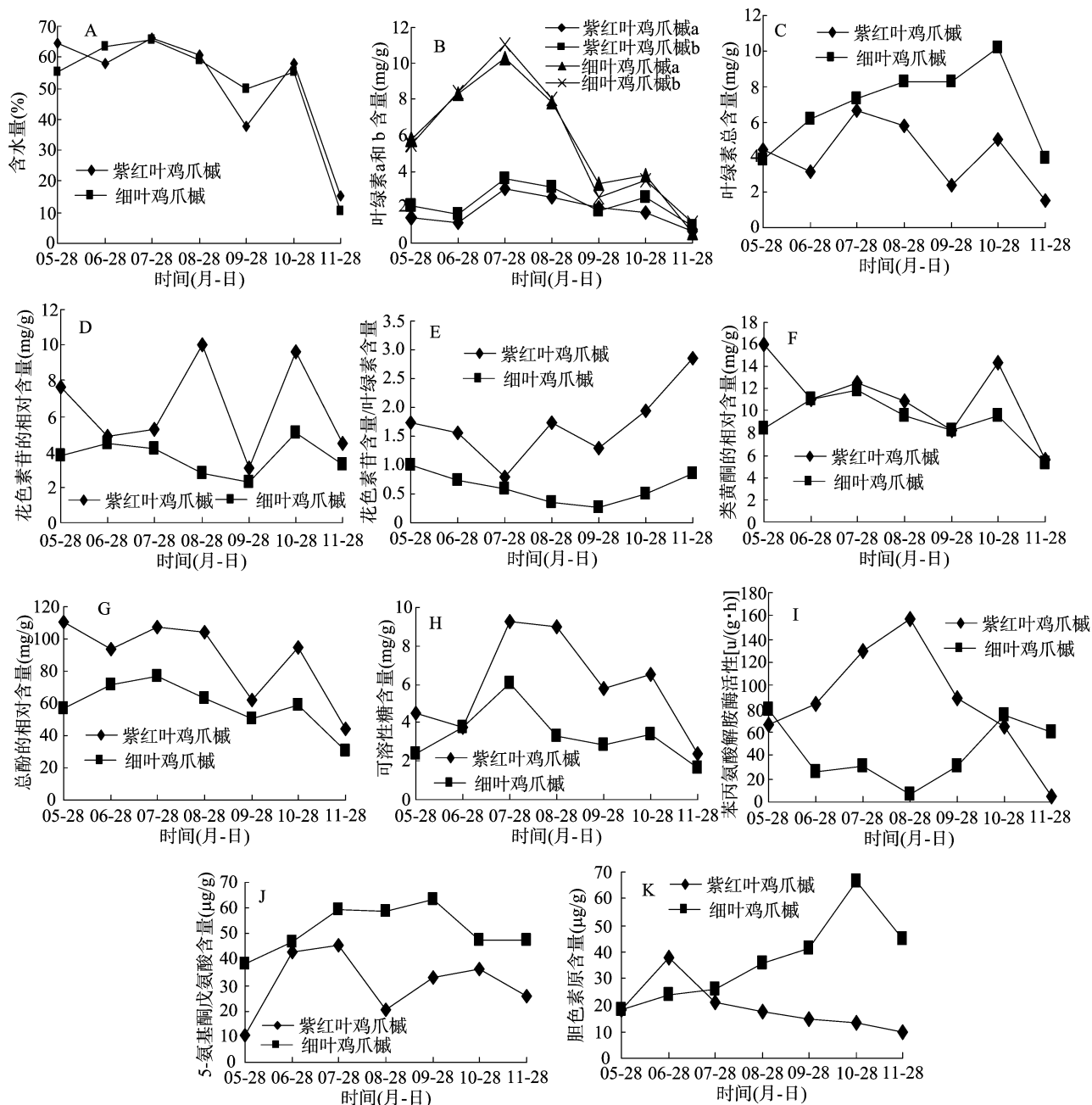


图1 鸡爪槭不同品种不同时期生理指标的变化

个品种都是在 11 月含量最低,分别为 30.46、43.74 mg/g;细叶鸡爪槭总酚含量最高在 7 月,达到 76.46 mg/g,而紫红叶鸡爪槭最高在 5 月,达 110.99 mg/g。分析可知,2 种鸡爪槭总酚的相对含量变化没有显著性差异。

分析图 1-H,在整个观察期,紫红叶鸡爪槭的可溶性糖含量均高于细叶鸡爪槭,呈升—降趋势。两者均在 7 月达到最高值,分别为 9.26、6.09 $\mu\text{g/g}$;在 11 月降到最低,分别为 2.35、1.64 $\mu\text{g/g}$ 。分析可知,2 种鸡爪槭的可溶性糖含量在 7—10 月存在显著差异($P < 0.05$)。

由图 1-I 可知,细叶鸡爪槭的 PAL 活性呈降—升—降趋势,5 月升至最高值,达到 80.12 $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{h})$,在 8 月时降到最低,只有 6.80 $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{h})$,紫红叶鸡爪槭则呈上升—下降趋势,8 月份升到最高值 157.05 $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{h})$,11 月则降到最低值 4.45 $\text{U}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。分析可知,2 种鸡爪槭的 PAL 活性呈显著负相关,两者间只有 10 月份差异不显著,其余时间差异极显著($P < 0.01$)。

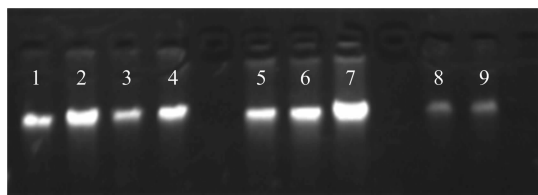
由图 1-J 可知,在整个研究过程中,细叶鸡爪槭的 ALA 含量呈升—降趋势,5 月含量最低,为 38.29 $\mu\text{g/g}$,9 月份升至最高,达到 63.61 $\mu\text{g/g}$;而紫红叶鸡爪槭呈升—降—升变化趋势,5 月含量最低,仅 10.57 $\mu\text{g/g}$,7 月含量最高,有 45.31 $\mu\text{g/g}$ 。整个调查期内细叶鸡爪槭的 ALA 含量均高于紫红叶鸡爪槭,两者间在 5 月份差异不显著,但在 6、7 月份差异极显著($P < 0.01$)。

由图 1-K 可知,2 种鸡爪槭的 PBG 含量均呈升—降趋势,但细叶鸡爪槭的 PBG 含量最高在 10 月,达到 66.36 $\mu\text{g/g}$,最低在 5 月,为 18.42 $\mu\text{g/g}$;而紫红叶鸡爪槭 PBG 含量最高在 6 月,达 37.79 $\mu\text{g/g}$,最低在 11 月,降至 9.59 $\mu\text{g/g}$ 。只有在 6 月份的时候细叶鸡爪槭的胆色素原含量低于紫红叶鸡爪槭,其余时间都高于紫红叶鸡爪槭。2 种鸡爪槭的 PBG 含量在 5、7 月差异不显著,在 8—11 月存在显著差异性($P < 0.05$)。

2.2 SRAP 结果分析

2.2.1 DNA 的提取

DNA 的浓度和纯度用 Spectrophotometer ND-100 全波长紫外分光光度仪进行检测,电泳图如图 2 所示。



1~4—细叶鸡爪槭; 5~7—紫红叶鸡爪槭; 8~9—血红枫

图2 DNA电泳图

2.2.2 引物的筛选

上下游引物各 64 条,共设计引物组合 648 对,其中 246 对引物组合初步筛选具有条带。按照多态性好、条带清晰、扩增稳定的原则进行引物的初步筛选^[19],筛选出的引物组合分别为 FM18-RM33、FM19-RM10、FM20-RM14、FM20-RM32、FM20-RM46、FM20-RM60、FM43-RM37、FM25-RM43、FM44-RM14、FM44-RM30、FM44-GM39、FM44-RM47、FM54-RM16。

2.2.3 差异条带的切割和其引物组合

聚丙烯酰胺凝胶电泳共扩增出 2 591 条清晰的条带,其中 1 093 条细叶鸡爪槭、

721 条紫红叶鸡爪槭、777 条血红枫。各个引物组合间存在较大差异,最多的可以扩增出高达 15 条带,最少的仅有 1 条。按照细叶鸡爪槭没有而紫红叶鸡爪槭和血红枫有,或细叶鸡爪槭有而紫红叶鸡爪槭没有的原则进行差异条带的选取,从所有扩增条带中切割出 42 条不同品种的差异条带,其中细叶鸡爪槭占 40.48%,紫红叶鸡爪槭和血红枫的共同差异条带占 5.52%。

2.2.4 二次 PCR

二次 PCR 后筛选出 13 个单一且清晰的条带进行测序,拼接出 6 个条带的序列,详见表 2。

表 2 拼接序列引物

序号	上游引物序列(5'→3')	下游引物序列(5'→3')
3	TAGGTCCAAACCGGCAT	GACTGCGTACGAATTATC
7	TAGGTCCAAACCGGGGG	GACTGCGTACGAATTGCA
8	TAGGTCCAAACCGGCGA	GACTGCGTACGAATTGGG
9	TAGGTCCAAACCGGGGT	GACTGCGTACGAATTATC
11	TAGGTCCAAACCGGGGT	GACTGCGTACGAATTGCG
13	TAGGTCCAAACCGGTCC	GACTGCGTACGAATTATT

2.2.5 测序及其分析比对

用 NCBI 数据库进行核酸 Blast 数据比对分析,但由于没有完整的鸡爪槭数据库,所以只能进行相似序列的比对分析。比对结果显示:拼接出的 6 条序列没有发现同源序列,没有找到相对应的信息,说明这部分序列还没有相关研究,下一步可以作为研究的重点。

3 讨论

3.1 生理指标测定结果讨论

含水量反映了植物组织水分生理状况,直接影响植物的生长。检测鸡爪槭叶片含水量可知,2 种鸡爪槭都是新鲜成熟叶片含水量高于老叶,这表明新陈代谢越旺盛,含水量越高,而植物叶片含水量与叶片颜色变化没有显著相关性。

植物叶片颜色一般由叶绿素和花色素苷的含量和分布决定^[5]。本研究中细叶鸡爪槭的叶绿素总含量总是大于紫红叶鸡爪槭,所以细叶鸡爪槭叶片常年比紫红叶鸡爪槭绿。而 2 种鸡爪槭的花色素苷的相对含量变化趋势因品种不同而存在显著差异,当叶片中花色素苷含量占绝对优势时(60%~80%),叶片呈红色^[7]。但是胡敬志等认为花色素苷含量稳定,叶片 pH 值下降是叶片变红的主要原因^[20],这与前人的结论存在差异。

花色素苷和叶绿素的比值是评价叶色变化的标准,本研究中紫红叶鸡爪槭的比值在 5、8、10、11 月比值最大,此时叶片颜色最鲜艳;细叶鸡爪槭的比值趋于平稳,故叶色没有较大变化。由此可见,叶片变红程度与花色素苷含量与叶绿素含量比值呈正相关关系,这与前人的研究结果^[21]一致。

有研究表明,花色素苷在多酚氧化酶、过氧化物酶、花色素苷酶等的作用下可以降解成酚类物质^[22-24],总酚是所有酚类物质,类黄酮也属于酚类。在本研究中,2 种鸡爪槭的总酚和类黄酮含量变化没有显著差异,故与叶片颜色变化没有显著相关性。

可溶性糖是植物组织中所存储的营养物质,供植物生长发育使用,是植物代谢活动的主要参与者。赵建锋发现秋季植物体内一些复杂的有机物转化为糖类,直接促进了花青素的累积,叶片就呈现红色^[25]。本研究中紫红叶鸡爪槭的可溶

性糖含量随叶片变红而逐渐增加,而细叶鸡爪槭由于常年绿色,可溶性糖含量在整个观察期都低于紫红叶鸡爪槭,这与聂庆娟等的研究结果^[26]一致,表明可溶性糖含量的增加可显著促进叶片中花色素苷的积累,进而影响叶片颜色变化。这与李倩等研究早熟桃叶叶色变化得到的结果^[27]相同。

苯丙氨酸解氨酶是控制初级代谢转变为次级代谢的分支点,是形成酚类化合物中的一个重要调节酶^[13],而酚类物质的含量与花色素苷的降解有关。在本研究中细叶鸡爪槭的 PAL 活性随时间呈降—升—降变化趋势,紫红叶鸡爪槭则呈升—降的变化趋势,这可能是由于秋季花色素苷的大量合成消耗了大量的 PAL^[28]。2 种鸡爪槭的 PAL 活性呈显著的负相关性,与叶色变化具有显著相关性。

叶绿素的合成分为 4 个阶段^[29],ALA 和 PBG 都是叶绿素合成前期必不可少的物质,它们的含量与叶绿素含量正相关,ALA 和 PBG 含量越低,叶片越红。

3.2 SRAP 结果分析讨论

分子实验一共扩增出 1 093 条细叶鸡爪槭条带,721 条紫红叶鸡爪槭和 777 条血红枫条带,其中筛选出 42 条特异性条带,最终选择来自 13 对引物组合的 13 条清晰稳定的差异条带进行测序,有 6 对引物组合测序成功。

由于槭树科植物没有数据库提供比对序列,只能进行相似序列的比对。结果没有找到相似度较高的同源序列,可能是因为目前没有该序列的相关研究,需要进一步深入研究;也可能是因为筛选的引物数量不够,还不足够说明问题,后续实验中可以加大引物筛选的数量以及差异条带的数量,选择出更有意义的序列。

4 结论

含水量和鸡爪槭叶色变化没有显著相关性。叶绿素含量越高,叶片颜色越绿。5-氨基酮戊氨酸和胆色素原与叶绿素的合成相关。ALA 和 PBG 含量越低,叶片越鲜艳。花色素苷是叶片呈现红色的主要因素,含量越高叶片越红。可溶性糖的累积有利于花色素苷的合成,其含量越高,叶片越红。苯丙氨酸解氨酶是控制花色素苷合成的第 1 个但不是唯一的關鍵酶,是类黄酮和酚类化合物合成的关键酶和控制酶,其含量的高低和叶片颜色有显著的相关性,和花色素苷的含量呈一定的相关性,所以变色期紫红叶鸡爪槭要比细叶鸡爪槭鲜艳。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 肖婷婷,刘广林,张鑫,等. 不同光照度对美国红枫幼苗生长和叶色变化的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):220-223.
- [3] 张鑫,肖婷婷,李根,等. 水分胁迫对美国红枫幼苗生长及叶色变化的影响[J]. 江苏农业科学,2016,44(3):224-227.
- [4] 蔡雁雁,李厚华,李玲,等. 鸡爪槭叶片色素组成及叶色变化[J]. 东北林业大学学报,2015,43(7):63-67.
- [5] 荣立苹,李倩中,李淑顺,等. 鸡爪槭黄色品种叶片转色期生理变化[J]. 西北农业学报,2012,21(1):187-191.
- [6] 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.
- [7] 楚爱香,张要战,王萌萌. 4 种槭树属(*Acer*)植物秋色叶变化与色

- 素含量和可溶性糖的关系[J]. 江西农业大学学报,2013,35(1):108-111,137.
- [8] 袁卫明,宋虎卫,杨益花,等. 枇杷 SRAP 标记体系优化及对枇杷矮化杂交种的鉴定[J]. 江苏农业科学,2015,43(12):36-40.
- [9] 波钦诺克 X H. 植物生物化学分析方法[M]. 北京:高等教育出版社,1981:255-259.
- [10] 唐前瑞. 红榿木遗传多样性及其叶色变化的生理生化研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2001.
- [11] 萧浪涛,王三根. 植物生理学实验技术[M]. 北京:中国农业出版社,2005:152-153.
- [12] 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植物苯丙氨酸解氨酶和肉桂酸 4-羧化酶活性变化及其伴随性的影响[J]. 植物生理学报,1981,7(4):373-379.
- [13] 李荣林,胡云飞,杨亦扬,等. 小分子化合物诱导茶树抗虫性相关生理指标的变化[J]. 西南农业学报,2016,29(7):1600-1606.
- [14] Dei M. Benzyladenine-induced stimulation of 5-aminolevulinic acid accumulation under various light intensities in levulinic acid-treated cotyledons of etiolate cucumber[J]. Plant Physiology,1985,64(2):153-160.
- [15] Klein S, Katz E, Neeman E. Induction of δ -ALA formation in etiolated maize leaves controlled by two light systems[J]. Plant Physiology,1977,60:333-338.
- [16] Mauzerall D, Granick S. The occurrence and determination of δ -aminolevulinic acid and porphobilinogen in urine[J]. Journal of Biological Chemistry,1956,219(1):435-446.
- [17] Bogorad L. Porphyrin synthesis[M]//Daron H H, Gunsalus I C. Methods in enzymology. New York: Academic Press,1962:885-895.
- [18] 杜凤国,王戈戎. 东北地区秋色叶树木在园林中的应用价值研究[J]. 北华大学学报,2004,5(1):65-69.
- [19] 张宇,黄国弟,黄强. 部分枳果种质资源遗传多样性的 SRAP 和 ISSR 分析[J]. 西南农业学报,2016,29(9):2045-2051.
- [20] 胡敬志,田旗,鲁心安. 枫香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):219-223.
- [21] 陈延惠,李跃霞,郭晓丽,等. 园艺植物叶色变化机制研究进展[J]. 河南农业科学,2011,40(12):30-34.
- [22] Underhill S, Crit C. Physiological, biochemical and anatomical changes in lychee (*Litchi chinensis* Sonn) pericarp during storage[J]. Hort Science,1993,68(3):327-335.
- [23] 林植芳,李双顺,张东林,等. 采后荔枝果皮色素、总酚及有关酶活性的变化[J]. 植物学报,1988,30(1):40-45.
- [24] 张昭其,庞学群,段学武,等. 荔枝采后果皮花色素苷的降解与花色素苷酶活性变化[J]. 中国农业科学,2003,36(8):945-949.
- [25] 赵建锋. 花、叶、果的颜色控制因素和颜色变化[J]. 生物学教学,2009,34(11):57-58.
- [26] 聂庆娟,史宝胜,孟朝,等. 不同叶色红栎叶片中色素含量、酶活性及内含物差异的研究[J]. 植物研究,2008,28(5):599-602.
- [27] 李倩,张立军,张旭,等. 糖对植物花色素苷合成和积累的调节[J]. 生命的化学,2009,29(2):218-222.
- [28] 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):1271-1277.
- [29] 潘瑞炽,董愚得. 植物生理学[M]. 北京:高等教育出版社,1958:92-97.