

红花槭‘艳红’与‘金色秋天’叶色 相关化学成分的比较研究

任杰^{1,2}, 陈竹¹, 唐菲¹, 宣云¹, 杨帆², 陆小雨^{1,2}, 傅松玲^{1,2*}

(1 安徽省农业科学院农业工程研究所, 合肥 230031; 2 安徽农业大学林学与园林学院, 合肥 230036)

摘要: ‘艳红’、‘金色秋天’均是从红花槭实生群体中选育得到的良种, 其秋叶分别呈现艳红色和金黄色。为了揭示红花槭秋季叶片变红或变黄的生化水平代谢机制, 以这两个无性系良种为试材, 分别在5个不同发育阶段对叶片中的叶绿素、花青素苷、类胡萝卜素、可溶性糖的含量及叶片pH值进行测定, 并对变色后的花青素苷的成分进行定量分析。在转色期, 两者叶片的叶绿素含量均呈下降趋势, 其中‘金色秋天’在转色末期叶片的叶绿素含量仅为 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$; 在相同时期, 两者叶片中的类胡萝卜素含量差异不显著, 其含量随变色过程呈下降趋势; 两者可溶性糖的含量均呈现先上升后下降的趋势, 在转色中期达到峰值; 叶片pH值变化不显著; 分光光度法检测表明, 变色后, ‘艳红’的花青素苷含量上升约3倍, 而‘金色秋天’的花青素苷含量上升幅度较小。液相色谱(HPLC)分析表明, 两个良种叶片中花青素苷均以矢车菊素为主, 占95%以上, 另含少量飞燕草色素; 叶片转色后, ‘艳红’中的矢车菊素含量是‘金色秋天’的2.6倍。结果显示, 叶绿素含量的降低与矢车菊素类花青素苷的合成是红花槭叶片秋季呈色的主要决定因素, 其中红叶的形成与矢车菊素含量的倍增密切相关。

关键词: 红花槭; 花青素苷; 叶绿素; 叶色

中图分类号: S792.35

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2019)03-0420-06

Study on leaf color related chemicals components based on comparing *Acer rubum* L. cv. ‘Yanhong’ and ‘Jinseqiutian’

REN Jie^{1,2}, CHEN Zhu¹, TANG Fei¹, XUAN Yun¹, YANG Fan², LU Xiaoyu^{1,2}, FU Songling^{1,2}

(1. Institute of Agricultural Engineering, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031;

2. School of Forestry and Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

Abstract: The red leaf line ‘Yanhong’ and the yellow leaf line ‘Jinseqiutian’ are excellent horticultural varieties of red maple (*Acer rubum* L.). To reveal the biochemical metabolic mechanism of the leaf color transition to yellow or red for red maple, the contents of chlorophyll, anthocyanin, carotenoid, soluble sugar and pH value in the leaves at 5 development stages in autumn were surveyed. Moreover, the anthocyanin composition in colored leaves was quantified. The content of chlorophyll was declined in different lines during the leaf color formation phase. Chlorophyll content in ‘Jinseqiutian’ reduced to $0.06 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ in the middle of November. There was no difference in the carotenoid content between the 2 lines in the same time points. The carotenoid content was decreased slightly, when the leaf turned color. During the five stages, the content of soluble sugar increased in the early autumn and then decreased slightly in both lines, peaked at the midst of leaf coloring period. The change of pH value in leaf was not significant. The analysis of spectrophotometric showed that the anthocyanins content in ‘Yanhong’ had a rise about 3 times, while that of the yellow group increased a little. The HPLC analysis result showed that cyanidin accounted for more than 95% of anthocyanins, with a little of delphinidin being quantified in both lines. And the cyanidin was detected in ‘Yanhong’ at a concentration of 2.6 times higher than that in ‘Jinseqiutian’ in the colored leaves. These results suggested that the degradation of chlorophyll and the synthesis of cyanidin were the two major determinants for

收稿日期: 2018-10-09

基金项目: 安徽省自然科学基金(1708085MC57), 国家自然科学基金(31600543)和安徽省农业科学院团队项目(2019YL055)共同资助。

作者简介: 任杰, 博士, 副研究员。E-mail: renjie329@aliyun.com

* 通信作者: 傅松玲, 教授, 博士生导师。E-mail: fusongl001@163.com

the transition of red maple leaf color in autumn, and the formation of the red leaf was closely related to the multiplication of the cyanidin content.

Key words: *Acer rubrum* L.; anthocyanins; chlorophyll; leave color

植物叶色变异的生理机制比较复杂, 其中叶片细胞中色素的含量、种类均会对叶色产生影响。高等植物叶片中的色素主要包括以下 3 大类: ①以花色素苷类为主的类黄酮类; ②类胡萝卜素类; ③以叶绿素 a 和 b 为主的叶绿素类。当叶片中的叶绿素含量高于类胡萝卜素含量时, 叶片呈现常规的绿色; 而当叶片中叶绿素、花青素、类胡萝卜素的种类、含量以及分布发生变化时则会形成多彩的叶色^[1-2]。

有关植物器官呈色的研究多集中在花、果实等器官上, 其呈现红色或紫色的生理机制在于各类花青素苷的不断累积和变化^[3-5]; 花青素苷在花瓣中的呈色还跟液泡 pH、助色素、金属离子的络合作用等有关^[6-7]。植物中, 常见的花青苷主要是矢车菊素糖苷、天竺葵素糖苷、飞燕草素糖苷和芍药素糖苷, 其中, 矢车菊素糖苷呈红色, 飞燕草素糖苷多呈紫色 (pH 5.0 左右会呈蓝色), 天竺葵素糖苷多呈橘黄色, 芍药素糖苷多呈红褐色^[8-9]。有报道, 鸡爪槭叶片颜色鲜红时, 即 4 至 6 月以及 9 至 10 月, 叶片矢车菊素-3-O-葡萄糖苷 (cyanidin 3-glucoside) 的含量较高, 此时观赏性状最佳^[14]。糖类或是花青素苷生物合成的能源物质和前体物质, 或作为信号分子参与花青素的合成^[10-11]。

红花槭叶片大而靓丽, 秋天叶色由绿色可变成黄色、橙黄色、紫红色、红色或其中间色, 叶色丰富多彩^[12-13]。关于何红花槭秋季叶片可以形成如此

丰富的颜色, 目前还没有对该树种不同叶色形成机理的研究报道。‘艳红’^[14]与‘金色秋天’^[15]均是从红花槭 (*Acer rubrum*) 实生苗中选育得到的良种, 已通过安徽省林木良种审定委员会审定。10 月下旬, ‘艳红’叶片逐渐转为艳红色; ‘金色秋天’转色后为金黄色。两者叶色对比鲜明, 观叶期达到 30 d, 是秋季赏叶的优良品种。以往多数类似的研究, 部分区分了黄叶、红叶, 但缺乏叶色对比鲜明的无性系良种材料^[16-18]。因此, 本研究以叶色对比明显的红花槭无性系良种‘艳红’和‘金色秋天’为材料, 研究叶色相关物质的变化规律, 以期找出红花槭叶色形成的关键因子, 为红花槭的叶色改良奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料

以位于安徽中部的舒城试验基地种植的红花槭‘艳红’、‘金色秋天’无性系良种变色期前后的叶片为试验材料。观测、记录采样期试验地每旬的极端温度、平均湿度, 见表 1 所示。从 6~8 年生树龄, 每个叶色取 5 株, 从中选取不同方位 (叶色相同)、通风透光良好、生长健壮的叶片, 9 月中旬至 11 月中旬, 每 15 d 采 1 次, 依次采集 5 个变色时期的完整中位叶。取样设 3 个生物学重复, 以上叶片置于一 80℃ 冰箱保存、待测。

表 1 9 月至 11 月各旬试验地最高温度、最低温度及平均湿度

Table 1 The highest temperature, the lowest temperature and medial humidity from September to November in the experimental fields

时间 Time	最高温度/℃ Max. temperature	最低温度/℃ Min. temperature	平均湿度/% Mean humidity
9 月上旬 Early Sept.	31.2	18.8	75.5
9 月中旬 Mid Sept.	28.3	15.3	69.7
9 月下旬 Late Sept.	29.1	18.4	72.1
10 月上旬 Early Oct.	24.9	9.4	75.6
10 月中旬 Mid Oct.	28.2	9.1	68.8
10 月下旬 Late Oct.	26.1	8.3	70.1
11 月上旬 Early Nov.	26.2	5.4	74.3
11 月中旬 Mid Nov.	19.3	8.0	75.2
11 月下旬 Late Nov.	18.2	-3.1	67.8

1.2 仪器和试剂

主要仪器: 可见-紫外分光光度计 (型号: TU-1800SPC); pH 计 (型号: Mettler Toledo FE20 Five Easy); 安捷伦 1100 高效液相色谱仪; 水浴锅;

匀浆机; 超声波清洗机; 粉碎机。试验所涉分析纯采购于 Sigma 公司。

1.3 方法

1.3.1 叶绿素的测定 叶绿素的测定参考文献

[19], 并按公式计算。

1.3.2 花青素苷总量的测定 参考文献对待测幼叶片进行花青素苷测定并计算^[20]。

1.3.3 花青素苷成分及含量的测定 (1) 测定。材料为转色后的叶片(10月30日取样), 采用四分法分取样品, 过筛(250 μm)。

根据样品中花青素含量, 称取5g样品于50 mL比色管中, 加入提取液(无水乙醇:水:盐酸=2:1:1), 定容, 摇匀1 min后, 超声提取30 min。超声提取后, 于沸水浴中水解1 h, 取出冷却后, 用提取液再次定容。静置, 取上清液, 用0.45 μm水相滤膜过滤, 待测。

测定方法和色谱参考条件。a) 色谱柱: C₁₈柱, 250 mm×4.6 mm×5 μm; b) 流动相 A 为含1%甲酸水溶液, 流动相 B 为含1%甲酸乙腈溶液; c) 检测波长: 530 nm; d) 柱温: 35℃; e) 进样量: 20 μL; f) 梯度洗脱条件: 见表2。

表2 梯度洗脱
Table 2 Gradient elution

时间/min Time	流速/mL·min ⁻¹ Flow rate	流动相 A/% Mobile phase A	流动相 B/% Mobile phase B
0.0	0.8	92.0	8.0
2.0	0.8	88.0	12.0
5.0	0.8	82.0	18.0
10.0	0.8	80.0	20.0
12.0	0.8	75.0	25.0
15.0	0.8	70.0	30.0
18.0	0.8	55.0	45.0
20.0	0.8	20.0	80.0
22.0	0.8	92.0	8.0
30.0	0.8	92.0	8.0

(2) 色谱分析。分别将标准溶液和试样溶液, 注入液相色谱仪中, 以保留时间定性, 以样品溶液峰面积与标准溶液峰面积比较定量。

(3) 结果计算。样品中花青素含量为6种花青素含量之和。其含量以质量分数 ω 计, 单位为 mg·kg⁻¹, 按下述公式计算:

$$\omega = \frac{\rho \times V}{m}$$

式中: ρ 为待测液中各花青素的质量浓度, 单位为 mg·L⁻¹; V 为定容体积, 单位为 mL; m 为试样质量, 单位为 g。

测定结果取2次测定的算术平均值, 计算结果保留3位有效数字。

1.3.4 可溶性总糖的测定 采用蒽酮比色法, 参考文献^[21]。

1.3.5 叶片细胞液 pH 值测定 上述样品去叶脉后, 液氮研磨, 取0.5 g, 在4℃, 18 400 g 离心5 min。将上清液转移至1.5 mL离心管中, 用pH计在室温测定上清液pH值^[22]。重复3次。

1.3.6 数据统计分析 数据的统计方法采用 Student's *t* test 检验, 用“SSR”方法比较差异显著性, 实验数据计算用 SAS 9.0 软件完成。实验数据采用平均值±SEM (Standard errors of the mean)。当 *P*<0.05 时, 视作差异显著; 同一列数据后, 不同小写字母表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 变色过程中叶片叶绿素的含量

试验所用材料为嫁接繁育而成的良种无性系, 于10月中下旬开始转色(变色初期), 11月上旬为变色中期, 11月中旬为变色末期, 叶色变化多年稳定。结果显示, 进入变色初期, 叶片中的叶绿素开始大量降解, 其艳丽的红色或黄色才能得以显现。其中‘金色秋天’在变色末期(11月14日), 几乎降解殆尽, 含量(FW)仅为0.06 mg·g⁻¹(见表3)。

表3 转色期‘艳红’和‘金色秋天’叶片的叶绿素含量
Table 3 Chlorophyllin contents in colored leaves of ‘Yanhong’ and ‘Jinseqiutian’ mg·g⁻¹

时间(月-日) Time(Month-date)	艳红 Yanhong	金色秋天 Jinseqiutian
09-15	2.50±0.41 ^a	2.28±0.32 ^a
09-30	2.35±0.35 ^a	2.01±0.25 ^b
10-15	1.69±0.31 ^b	1.46±0.30 ^c
10-30	0.73±0.13 ^c	0.18±0.04 ^d
11-14	0.25±0.04 ^d	0.06±0.01 ^e

2.2 变色过程中叶片类胡萝卜素的含量

在相同时期, 两个红花槭良种叶片中的类胡萝卜素含量差异不显著, 随变色过程其含量呈下降趋势, 其中红花槭黄叶良种‘金色秋天’的类胡萝卜素下降幅度较大, 达65.6%(表4)。

2.3 变色过程中叶片花青素苷的含量

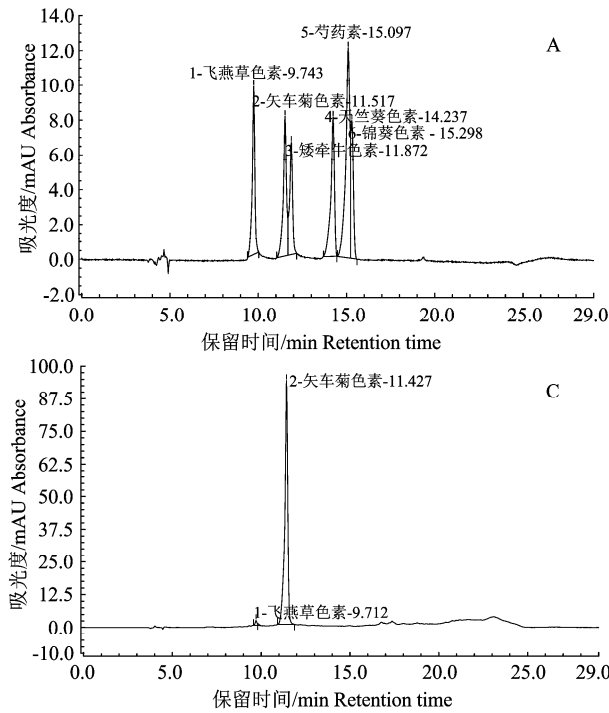
10月上中旬, 旬平均最低气温降低至10℃以下(表1), 红花槭叶片逐渐转色。叶片变色后, ‘艳红’的花青素苷含量上升幅度最大, 为变色前的3倍左右(表5); 而‘金色秋天’的花青素苷含量在变色后期小幅降低。结果显示, 花青素含量的倍增是红花槭红叶形成的关键因素之一。

表 4 转色期‘艳红’和‘金色秋天’叶片的类胡萝卜素含量
Table 4 Carotenoid contents in colored leaves of ‘Yanhong’ and ‘Jinseqiutian’ mg·g⁻¹

时间(月-日) Time(Month-date)	艳红 Yanhong	金色秋天 Jinseqiutian
09-15	0.34±0.04 ^a	0.32±0.06 ^a
09-30	0.32±0.06 ^{ab}	0.30±0.05 ^{ab}
10-15	0.29±0.07 ^b	0.28±0.04 ^b
10-30	0.20±0.13 ^c	0.18±0.04 ^c
11-14	0.13±0.04 ^d	0.11±0.02 ^d

表 5 转色期‘艳红’和‘金色秋天’叶片的花青素苷的含量
Table 5 Cyanin contents in colored leaves of ‘Yanhong’ and ‘Jinseqiutian’ mg·kg⁻¹

时间(月-日) Time(Month-date)	艳红 Yanhong	金色秋天 Jinseqiutian
09-15	4.54±0.52 ^c	4.42±0.36 ^b
09-30	4.68±0.48 ^c	4.58±0.55 ^{ab}
10-15	6.13±0.57 ^b	4.61±0.48 ^{ab}
10-30	14.31±1.32 ^a	4.98±0.52 ^a
11-14	15.25±1.48 ^a	4.31±0.45 ^b



A、B 为 6 种花青素苷标准品峰值出现的时间；C、D 分别为‘艳红’及‘金色秋天’

A and B represent the peak time of 6 kinds of cyanin. C is the HPLC result of ‘Yanhong’, and D is that of ‘Jinseqiutian’

图 1 ‘艳红’和‘金色秋天’叶片转色后花青素苷成分的 HPLC 分析

Figure 1 Analysis of cyanin composition in colored leaves of ‘Yanhong’ and ‘Jinseqiutian’

表 6 转色后‘艳红’和‘金色秋天’叶片中花青素苷成分及含量
Table 6 The composition and content of cyanin in colored leaves of ‘Yanhong’ and ‘Jinseqiutian’ mg·kg⁻¹

花青素苷 Anthocyanin glycosides	艳红 Yanhong	金色秋天 Jinseqiutian
飞燕草色素 Del	12.3±2.0	9.3±0.5
矢车菊色素 Cya	687.5±97.3	262.5±31.4
矮牵牛色素 Pet	n.d	n.d
天竺葵色素 Pel	n.d	n.d
芍药色素 Peo	n.d	n.d
锦葵色素 Mal	n.d	n.d

注：6 类花青素苷在叶片变色第 4 阶段的相对积累量，n.d 表示没有检测到。

Note: Relative accumulation of six kinds of cyanins at the 4th stage of leaf color transition, and n.d means not detected.

2.4 变色后花青素苷成分测定及含量分析

选取 10 月 30 日叶片材料，处理后用 HPLC 分析，结果表明‘艳红’及‘金色秋天’的主峰均为矢车菊素，另有一小峰为飞燕草素（图 1）。叶片转色后，‘艳红’及‘金色秋天’花青素苷均以矢车菊素为主，占 95% 以上，此外还含有少量的飞燕草素；‘艳红’中的矢车菊素是‘金色秋天’的 2.6 倍（见表 6）。两个良种叶片均未检测到矮牵牛色素、天竺葵色素、芍药色素和锦葵色素。

2.5 变色过程中叶片可溶性糖的含量

表 7 显示，9 月至 10 月，两无性系叶片中的可溶性糖含量均小幅上升；变色中期，叶片可溶性糖含量达到最大；进入变色后期，两无性系叶片的可溶性糖的含量均显著下降。

表7 转色期‘艳红’和‘金色秋天’叶片的可溶性糖的含量
Table 7 Soluble sugar contents in colored leaves of ‘Yanhong’ and ‘Jinsequitian’
mg·g⁻¹

时间(月-日) Time(Month-date)	艳红 Yanhong	金色秋天 Jinsequitian
09-15	10.26±0.92 ^c	10.55±0.82 ^c
09-30	11.82±1.28 ^b	10.96±0.98 ^c
10-15	14.21±1.34 ^a	13.03±0.86 ^b
10-30	15.48±1.26 ^a	16.08±0.93 ^a
11-14	12.05±1.52 ^b	12.31±0.85 ^b

2.6 叶片 pH 值

经测定,‘艳红’与‘金色秋天’叶片 pH 值均在 5.75~5.98 之间(具体数据未展示),差异不显著,表明液泡 pH 值与其叶色无关。

3 讨论与结论

进入变色期,红花槭‘艳红’、‘金色秋天’叶片分别转变为红色和金黄色。期间,二者叶绿素均逐渐降解,其中‘金色秋天’在变色末期,叶绿素含量仅为变色前的 3%左右;‘艳红’、‘金色秋天’的类胡萝卜素的浓度均显著降低,但相同时期黄叶、红叶红花槭良种叶片中类胡萝卜素浓度差异不明显;完全变色后,‘艳红’叶片的花青素苷含量逐渐上升,分光光度法检测其含量约是变色前的 3 倍,而‘金色秋天’的花青素苷含量上升较少。HPLC 检测结果表明,变色后期两个良种叶片中均含矢车菊素和飞燕草素,且矢车菊素苷含量占 95%以上;‘艳红’中矢车菊素花青素苷的含量是‘金色秋天’的 2.6 倍,是红叶形成的关键因子之一。

植物叶片颜色是叶绿素、花青素及类胡萝卜素等色素综合作用的结果。色素相关基因的差异表达引起的色素种类及含量变化决定着叶片颜色^[7,23]。细胞形状和色素分布模式可通过影响光线折射改变人们的感知^[12,24]。研究显示,秋季叶色变红是叶片大量积累花青素苷的结果^[25]。9 至 10 月鸡爪槭(*Acer palmatum*)转色期叶片中叶绿素含量下降、花青素苷含量上升^[26]。黄栌(*Cotinus coggygria*)叶色变红与叶绿素质量百分数的下降及花青素苷的上升有关,而与类胡萝卜素含量无显著相关性^[27]。随着叶片转色,槭树可溶性糖含量先升后降,呈单峰曲线,其峰值出现在花色素苷的峰值前,暗示可溶性糖是花青素苷合成的前体物质^[3],细胞中花青素苷的生物合成与糖类的含量密切相关^[14]。而对鸡爪槭变色期叶片的研究显示,花青素苷与可溶性糖含量之间不具有正相关性^[15]。

本研究显示,可溶性糖的合成与红花槭不同叶色良种有一定的关联性,在‘艳红’大量积累花青素苷的时,其可溶性糖含量略低于‘金色秋天’,暗示着可溶性糖有可能是花青素苷合成的前体物质;pH 值差异不显著,两者叶片呈色与 pH 值无关。基于本研究结果,叶绿素含量的降低与矢车菊素类花青素苷的合成,是红花槭叶片秋季呈色的主要决定因素,其中红叶的形成与矢车菊素含量的较大幅度上升密切相关。

‘艳红’、‘金色秋天’均是从红花槭实生群体中选育的良种,叶色分明,遗传背景清晰,可较好的解析内含物质的变化对叶片变色的影响。本研究可丰富对叶色转色生理机制的认识,今后拟从分子上进一步探明其表达机制。

参考文献:

- [1] 唐菲,丁增成,任杰,等.红花槭新品种‘艳红’[J].园艺学报,2014,41(6):1281-1282.
- [2] 任杰,丁增成,唐菲,等.红花槭新品种‘金色秋天’[J].园艺学报,2015,42(2):403-404.
- [3] 楚爱香,张要战,王萌萌,等.四种槭树属(*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.
- [4] 郁敏,张亚辉.槭树叶呈色机理研究进展[J].世界林业研究,2016,29(3):30-34.
- [5] LI S S, LI Q Z, RONG L P, et al. Gene expressing and sRNA sequencing show that gene differentiation associates with a yellow *Acer palmatum* mutant leaf in different light conditions[J]. Bio Res Int, 2015, 2015(4):843470.
- [6] 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.
- [7] LI Y, ZHANG Z Y, WANG P, et al. Comprehensive transcriptome analysis discovers novel candidate genes related to leaf color in a *Lagerstroemia indica* yellow leaf mutant[J]. Genes Genom, 2015, 37(10):851-863.
- [8] JIN X H, HUANG H, WANG L, et al. Transcriptomics and metabolite analysis reveals the molecular mechanism of anthocyanin biosynthesis branch pathway in different *Senecio cruentus* cultivars[J]. Front Plant Sci, 2016, 7(107):1307.
- [9] LOU Q, LIU Y L, QI Y Y, et al. Transcriptome sequencing and metabolite analysis reveals the role of delphinidin metabolism in flower colour in grape hyacinth[J]. J Exp Bot, 2014, 65(12):3157-3164.
- [10] ZHOU H, KUI L W, WANG H L, et al. Molecular genetics of blood-fleshed peach reveals activation of anthocyanin biosynthesis by NAC transcription factors[J]. Plant J, 2015, 82(1):105-121.
- [11] 戴思兰,洪艳.基于花青素苷合成和呈色机理的观赏植物花色改良分子育种[J].中国农业科学,2016,49(3):529-542.

- [12] TANAKA Y. Flower colour and cytochromes P450[J]. *Phytochem Rev*, 2006, 5(2/3): 283-291.
- [13] TANAKA Y, OHMIYA A. Seeing is believing: engineering anthocyanin and carotenoid biosynthetic pathways[J]. *Curr Opin Biotech*, 2008, 19(2): 190-197.
- [14] 高东菊, 张凤娥, 仲肇森, 等. 血红鸡爪槭红色素提取及稳定性[J]. *东北林业大学学报*, 2013, 41(5): 105-108.
- [15] 陈继卫, 沈朝栋, 贾玉芳, 等. 红枫秋冬转色期叶色变化的生理特性[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2010, 36(2): 181-186.
- [16] 杨少华, 王丽, 穆春, 等. 蔗糖调节拟南芥花青素的生物合成[J]. *中国生物化学与分子生物学报*, 2011, 27(4): 364-369.
- [17] LAMBERS J H R, CLARK J S. The benefits of seed banking for red maple (*Acer rubrum*): maximizing seedling recruitment[J]. *Can J Forest Res*, 2005, 35(4): 806-813.
- [18] 任杰, 丁增成, 唐菲, 等. 数控温室下红花槭的嫩枝扦插技术[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(22):10-14.
- [19] 李得孝, 郭月霞, 员海燕, 等. 玉米叶绿素含量测定方法研究[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(6): 153-155.
- [20] 袁明, 万兴智, 杜蕾, 等. 红花檵木叶色变化机理的初步研究[J]. *园艺学报*, 2010, 37(6): 949-956.
- [21] 周斌, 陈菊移, 忻旸, 等. 蒽酮-硫酸比色法测定九华山地区黄精中多糖含量[J]. *中国药业*, 2009, 18(16): 24-25.
- [22] 庞学群, 张昭其, 段学武, 等. pH值和温度对荔枝果皮花色素苷稳定性的影响[J]. *园艺学报*, 2001, 28(1): 25-30.
- [23] SHEN J Z, ZOU Z W, ZHANG X Z, et al. Metabolic analyses reveal different mechanisms of leaf color change in two purple-leaf tea plant (*Camellia sinensis* L.) cultivars[J]. *Hortic Res*, 2018, 5: 7.
- [24] TANAKA Y, SASAKI N, OHMIYA A. Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids[J]. *Plant J*, 2008, 54(4): 733-749.
- [25] LEV-YADUN S, K. HOLPAINEN J. Why red-dominated autumn leaves in America and yellow-dominated autumn leaves in Northern Europe?[J]. *New Phytol*, 2009, 183: 506-512.
- [26] 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.
- [27] 葛雨萱, 周肖红, 刘洋. 黄栌属种质资源, 栽培繁殖, 化学成分, 叶色调控研究进展[J]. *园艺学报*, 2014, 41(9): 1833-1845.