

引文格式: 宗亚倩, 全伟, 李建平, 等. 红茎与绿茎紫花苜蓿色素及缩合单宁含量的比较分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(6): 1067–1072. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202210026](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202210026)

红茎与绿茎紫花苜蓿色素及缩合单宁含量的比较分析*

宗亚倩¹, 全伟², 李建平¹, 何承刚¹, 姜华^{1**}

(1. 云南农业大学 动物科学技术学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南省农村科技服务中心, 云南 昆明 650021)

摘要:【目的】探究红茎紫花苜蓿的色素成分和呈色机理。【方法】以红茎和绿茎紫花苜蓿为材料, 采用化学显色法和紫外分光光度计法测定茎和叶中的色素种类以及叶绿素、类胡萝卜素、花青素苷和缩合单宁的含量。【结果】红茎紫花苜蓿茎中主要含花青素苷和类黄酮, 绿茎紫花苜蓿茎中不含花青素苷; 红茎和绿茎紫花苜蓿叶中的叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均显著高于茎中的含量 ($P<0.05$), 但不同颜色茎间、叶间的差异不显著 ($P>0.05$); 红茎紫花苜蓿茎中的花青素苷和缩合单宁含量及花青素苷与总叶绿素比值均显著高于绿茎紫花苜蓿茎中的对应指标 ($P<0.05$)。【结论】花青素苷和缩合单宁含量增加是紫花苜蓿茎秆呈现红色的主要原因。

关键词: 紫花苜蓿; 叶绿素; 类胡萝卜素; 花青素苷; 缩合单宁

中图分类号: S963.223.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-390X (2023) 06-1067-06

Comparative Analysis of Pigment and Condensed Tannin Content between Red-stem and Green-stem Alfalfa

ZONG Yaqian¹, QUAN Wei², LI Jianping¹, HE Chenggang¹, JIANG Hua¹

(1. Faculty of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Yunnan Rural Science and Technology Service Center, Kunming 650021, China)

Abstract: [Purpose] To explore the pigment composition and color mechanism of red-stem alfalfa. [Methods] Red-stem and green-stem alfalfa were used as materials, the pigment components, and the contents of chlorophyll, carotenoid, anthocyanin and condensed tannin in stems and leaves were determined by chemical chromogenic method and spectrophotometer. [Results] The stem of red-stem alfalfa mainly contained anthocyanin and flavonoids, and the stem of green-stem alfalfa had not anthocyanin. The contents of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll and carotenoid were significantly higher in leaves of red-stem and green-stem alfalfa than those in stems ($P<0.05$). However, the differences between different colors of stems and leaves were not significant ($P>0.05$). The contents of anthocyanin glycosides and condensed tannins, and ratio of anthocyanin glycosides to total chlorophyll in the stem of red-stem alfalfa were significantly higher than those in the stem of green-

收稿日期: 2022-10-17

修回日期: 2023-11-24

网络首发日期: 2024-01-11

*基金项目: 云南省农业联合基金重点项目 (202101BD070001-026); 云南省技术创新人才 (2018HB075); 国家自然科学基金项目 (31660682)。

作者简介: 宗亚倩 (1994—), 女, 山东青岛人, 在读博士研究生, 主要从事草地植物资源与遗传育种研究。E-mail: 731217892@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 姜华 (1976—), 女, 吉林梅河口人, 博士, 教授, 主要从事牧草种质资源与遗传育种研究。E-mail: jianghua15@163.com

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/53.1044.S.20240110.1552.002>



stem alfalfa ($P<0.05$). [Conclusion] The increase of anthocyanin and condensed tannin contents are the main reason for red coloration of alfalfa stems.

Keywords: alfalfa; chlorophyll; carotenoid; anthocyanin; condensed tannins

紫花苜蓿 (*Medicago Sativa* L.) 是豆科 (Leguminosae) 多年生草本植物, 其分布广泛、营养丰富、适口性好、适应性强, 而且还具有固氮、提高土壤肥力、提高土壤有机质含量和改善土壤理化性质的作用, 既是优良的牧草, 又是优良的绿肥作物资源, 被誉为“牧草之王”^[1-3]。此外, 紫花苜蓿还具有较好的生态价值, 是生态修复研究的重要植物^[4]。课题组发现紫花苜蓿存在红茎和绿茎个体, 且两者仅茎色存在差异。植物茎色变化通常是多种因素协同作用的结果, 其中最重要的影响因素是色素的种类及含量^[5]。探明红茎紫花苜蓿茎中的色素种类和含量, 可以为紫花苜蓿新品种的培育提供理论依据。

植物呈色主要受叶绿素、类胡萝卜素、甜菜红素和类黄酮化合物等色素群在植物体内的种类、含量和比例调控^[6-8]。叶绿素和类胡萝卜素作为光合色素在植物光合作用中起重要作用, 是使植物呈绿色和橙黄色的主要色素^[9]。当叶绿素含量高于类胡萝卜素含量时, 叶片呈绿色, 反之叶片表现为黄色^[10]。胡永红等^[11]研究表明: 秋色叶的叶色变化主要是由于光合产物发生改变, 引起植物叶片内各种色素的比例发生变化, 致使叶片呈现不同色彩。甜菜红素是使植物呈现黄色、红色和紫色的色素, 多存在于石竹目 (Caryophyllales) 的大部分科中, 通常与花青素相互排斥^[12]。花青素属于黄酮类化合物, 多存在于花、果实、茎、叶和储藏器官中, 常通过糖苷键与糖基结合形成结构更为稳定的花青素苷^[13], 是使植物呈红橙色到蓝紫色的物质基础^[14]。不同色系的菊花 (*Dendranthema morifolium*) 正是由于花青苷含量的差异而表现出不同的花色, 其花青素苷含量越高花色越深^[15]。安欣等^[16]通过分光光度法测定色素含量与彩色树种紫叶稠李 (*Prunus wilsonii*)、春雪海棠 (*Malus* ‘Spring snow’)、王族海棠 (*Malus* ‘Royalty’)、火焰卫矛 (*Euonymus alatus* ‘Compacta’) 和银白槭 (*Acer saccharinum*) 叶片颜色的关系, 发现花青素在紫 (红) 色系彩叶植物叶片的呈色中占主导作用。此外, 花青素苷与叶绿素含量的比值越大, 叶片颜色越红^[17]。LUO 等^[18]发现: 花青

素含量增加、叶绿素和类胡萝卜素含量降低是牡丹 (*Paeonia suffruticosa* Andrews) 新叶呈红色的原因。缩合单宁 (原花青素) 大部分由儿茶素和表儿茶素构成, 一般呈红棕色^[19], 广泛地分布于植物的不同器官和组织中^[20]。刘玉皎^[21]研究发现: 蚕豆 (*Vicia faba* L.) 种皮颜色与缩合单宁的含量呈正相关。缩合单宁和花青素在生物合成过程前期受到相同基因控制, 由此推测缩合单宁可能是使紫花苜蓿茎秆颜色产生差异的原因之一。

目前对于植物外在颜色差异的探究主要集中在鲜花^[14]、彩叶植物^[22-24]和部分深色水果中^[25], 对于紫花苜蓿茎呈红色的机制未见报道。因此, 本研究通过测定 2 种茎色紫花苜蓿茎和叶中的色素种类以及色素和缩合单宁的含量, 分析其与红茎紫花苜蓿形成的相关性, 旨在揭示红茎紫花苜蓿呈色的生理基础, 以期阐明其呈色机理提供初步的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以云南农业大学草业科学实践教学基地 (N25°8', E102°45') 的 3 年生 WL525 紫花苜蓿为研究材料, 采用小区种植, 小区面积 10 m², 等距离条播, 行距 10 cm, 田间管理一致。于 2022 年 3 月 3 日分别选取长势一致、无病虫害的开花初期红茎和绿茎 WL525 紫花苜蓿各 5 株, 单株为 1 个重复, 装入自封袋密封带回实验室。

1.2 试验方法

1.2.1 色素定性分析

取新鲜茎和叶各 0.1 g, 液氮研磨后分别加入各装有 5 mL 石油醚、26~28% 氨水和 10% 盐酸的试管中, 过滤后对其滤液颜色进行观察并记录, 每份材料重复 3 次。根据颜色判断是否含有类胡萝卜素、花青素苷和类黄酮等成分。

1.2.2 叶绿素和类胡萝卜素含量的测定

采用丙酮浸提法^[26]提取。称取茎和叶约 0.1 g, 放入装有丙酮—乙醇 (体积比为 1:2) 提取液 10 mL 的试管中, 避光浸提, 直到紫花苜蓿组织完全变白后再测定吸光度。叶绿素 a、叶绿

素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量采用 ARNON^[27] 的方法计算。

1.2.3 花青素苷含量的测定

采用盐酸乙醇浸提法提取花青素苷。分别称取新鲜紫花苜蓿的茎和叶 0.1 g, 在液氮中研磨成粉状, 放入装有盐酸—乙醇 (体积比为 15 : 85) 提取液 10 mL 的试管中, 在黑暗、4 ℃ 下萃取 24 h, 然后在 12 000 r/min 下离心 10 min, 取上清液, 测定 530、620 和 650 nm 处的吸光度。根据公式 $(OD_{530}-OD_{620})-0.1\times(OD_{650}-OD_{620})$ 计算花青素苷的吸光度, 按照 0.1 个吸光度为 1 个花青素苷单位, 计算出紫花苜蓿茎和叶中的花青素苷含量^[28]。

1.2.4 缩合单宁含量的测定

采用香草醛—盐酸法提取缩合单宁, 利用苏州格锐思生物科技有限公司原花青素含量试剂盒测定其含量。

1.3 数据统计与分析

各指标重复测定 3 次。采用 Excel 2013 整理数据和绘制图表; 采用 SPSS 20 进行统计分析 & 显著性检验; 茎间、叶间以及同一植株不同部位之间的差异采用独立样本 *T* 检验分析。

2 结果与分析

2.1 红茎与绿茎紫花苜蓿的色素类型

由表 1 可知: 从类胡萝卜素特征显色反应来看, 红茎与绿茎紫花苜蓿的茎均显示为无色, 叶分别显示为浅黄色和黄色, 说明这 2 种材料茎中无类胡萝卜素, 叶中可能含有或少量含有类胡萝

卜素; 从类黄酮特征显色反应来看, 红茎紫花苜蓿的茎和叶以及绿茎紫花苜蓿的叶显示为黄色, 说明其中含有类黄酮成分, 而绿茎紫花苜蓿的茎显示为浅黄色, 说明它含有极少量类黄酮; 从花青素苷特征显色反应来看, 红茎紫花苜蓿的茎显示为紫红色, 说明其茎中应该含有大量花青素苷, 而绿茎紫花苜蓿的茎和叶显示为无色和浅黄色, 表明它们不含和含有极少量花青素苷。可见, 2 种茎色紫花苜蓿所含有的类黄酮和花青素苷种类或含量可能不同。

2.2 红茎与绿茎紫花苜蓿的叶绿素含量

由表 2 可知: 2 种茎色紫花苜蓿叶绿素 a 含量范围为 0.09~0.89 mg/g, 其中茎中叶绿素 a 含量范围为 0.09~0.11 mg/g, 而叶中叶绿素 a 含量范围为 0.86~0.89 mg/g; 红茎和绿茎紫花苜蓿叶中叶绿素 a 含量均显著高于茎中的含量 ($P<0.05$), 2 种茎色的紫花苜蓿茎间、叶间叶绿素 a 含量的差异均不显著 ($P>0.05$)。2 种茎色紫花苜蓿叶绿素 b 含量的变化范围为 0.03~0.15 mg/g, 其中茎中叶绿素 b 含量范围为 0.03~0.04 mg/g, 而叶中叶绿素 b 含量为 0.15 mg/g; 红茎和绿茎紫花苜蓿叶中叶绿素 b 的含量均显著高于茎中的含量 ($P<0.05$), 2 种茎色的紫花苜蓿茎间、叶间叶绿素 b 含量的差异均不显著 ($P>0.05$)。2 种茎色紫花苜蓿总叶绿素含量的范围为 0.12~1.15 mg/g, 其中茎中总叶绿素含量范围为 0.12~0.15 mg/g, 而叶中总叶绿素含量范围为 1.12~1.15 mg/g; 红茎和绿茎紫花苜蓿叶中总叶绿素的含量均显著高

表 1 红茎与绿茎紫花苜蓿茎和叶类胡萝卜素、类黄酮和花青素苷显色反应

Tab. 1 Color reaction of carotenoid, flavonoid and anthocyanin glycosides in stems and leaves of red-stem and green-stem alfalfa

色素 pigment	材料 material	部位 parts	显色 coloration
类胡萝卜素 carotenoid	红茎紫花苜蓿 red-stem alfalfa	茎 stem	无色 colourless
		叶 leave	浅黄色 pale yellow
	绿茎紫花苜蓿 green-stem alfalfa	茎 stem	无色 colourless
		叶 leaf	黄色 yellow
类黄酮 flavonoid	红茎紫花苜蓿 red-stem alfalfa	茎 stem	黄色 yellow
		叶 leaf	黄色 yellow
	绿茎紫花苜蓿 green-stem alfalfa	茎 stem	浅黄色 pale yellow
		叶 leaf	黄色 yellow
花青素苷 anthocyanin	红茎紫花苜蓿 red-stem alfalfa	茎 stem	紫红色 amaranth
		叶 leaf	粉红色 pink
	绿茎紫花苜蓿 green-stem alfalfa	茎 stem	无色 colourless
		叶 leaf	浅黄色 pale yellow

表 2 红茎与绿茎紫花苜蓿茎和叶的叶绿素含量
Tab. 2 Chlorophyll contents in stems and leaves of red-stem and green-stem alfalfa

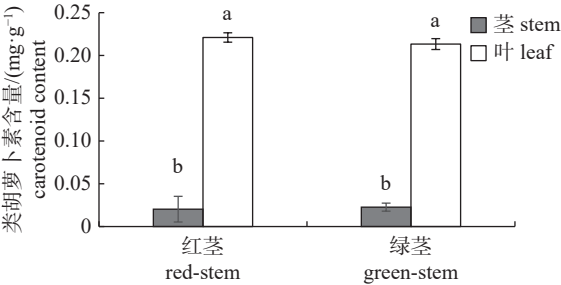
材料 material	部位 parts	叶绿素 a chlorophyll a	叶绿素 b chlorophyll b	总叶绿素 total chlorophyll
红茎紫花苜蓿 red-stem alfalfa	茎 stem	0.09±0.01 b	0.03±0.00 b	0.12±0.01 b
	叶 leaf	0.86±0.02 a	0.15±0.01 a	1.12±0.02 a
绿茎紫花苜蓿 green-stem alfalfa	茎 stem	0.11±0.00 b	0.04±0.01 b	0.15±0.02 b
	叶 leaf	0.89±0.02 a	0.15±0.01 a	1.15±0.02 a

注：不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences ($P<0.05$).

于茎中含量 ($P<0.05$)，2 种茎色的紫花苜蓿茎间、叶间总叶绿素含量的差异均不显著 ($P>0.05$)。

2.3 红茎与绿茎紫花苜蓿的类胡萝卜素含量

由图 1 可知：红茎和绿茎紫花苜蓿叶中的类胡萝卜素含量显著高于茎中的含量 ($P<0.05$)，其叶中的类胡萝卜素含量分别为 0.22 和 0.21 mg/g，分别是同株紫花苜蓿茎中类胡萝卜素含量的 9.48 倍和 9.41 倍；2 种茎色的紫花苜蓿茎间、叶间类胡萝卜素含量的差异均不显著 ($P>0.05$)。



注：不同小写字母表示同一植物不同部位的含量差异显著 ($P<0.05$)；下同。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences of contents in different parts of the same plant ($P<0.05$); the same as below.

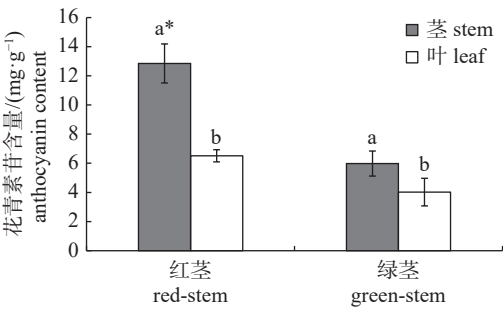
图 1 红茎与绿茎紫花苜蓿茎和叶的类胡萝卜素含量
Fig. 1 Carotenoid contents in stems and leaves of red-stem and green-stem alfalfa

2.4 红茎与绿茎紫花苜蓿的花青素苷含量

由图 2 可知：2 种茎色紫花苜蓿茎中的花青素苷含量均显著高于叶中 ($P<0.05$)，且红茎紫花苜蓿茎中的花青素苷含量显著高于绿茎紫花苜蓿的茎 ($P<0.05$)，且是绿茎的 8.80 倍；红茎与绿茎叶片之间花青素苷含量无显著差异 ($P>0.05$)；

2.5 红茎与绿茎紫花苜蓿的缩合单宁含量

由图 3 可知：红茎紫花苜蓿茎中的缩合单宁含量是绿茎紫花苜蓿茎中含量的 5.05 倍 ($P<0.05$)，但两者叶片的缩合单宁含量无显著差异 ($P>0.05$)；



注：“*”表示不同植物同一部位的含量差异显著 ($P<0.05$)；下同。
Note: “*” indicates the significant differences of contents in the same part of different plants ($P<0.05$); the same as below.

图 2 红茎与绿茎紫花苜蓿茎和叶花青素苷含量
Fig. 2 Anthocyanin glycosides contents in stems and leaves of red-stem and green-stem alfalfa

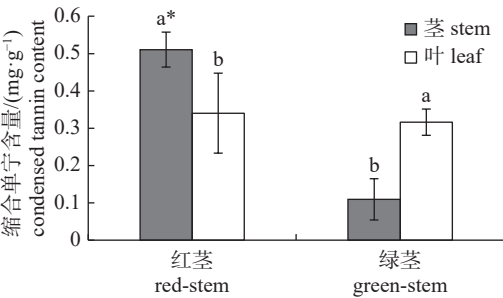


图 3 红茎与绿茎紫花苜蓿茎和叶缩合单宁含量
Fig. 3 Condensed tannins contents in stems and leaves of red-stem and green-stem alfalfa

红茎紫花苜蓿茎中的缩合单宁含量显著高于叶中 ($P<0.05$)，而绿茎紫花苜蓿茎与叶间则呈相反现象 ($P<0.05$)。

2.6 红茎与绿茎紫花苜蓿不同部位花青素苷与总叶绿素的比值

由图 4 可知：2 种茎色紫花苜蓿叶中花青素苷与总叶绿素的比值较小，说明叶中花青素苷含量相对较低，叶绿素含量相对较高，叶片表现为绿色；就同一植物的茎和叶而言，2 种茎色紫花

苜蓿茎中花青素占比均显著高于其叶中 ($P<0.05$), 尤其是红茎最为明显, 这与2种紫花苜蓿中花青素含量的差异规律一致。

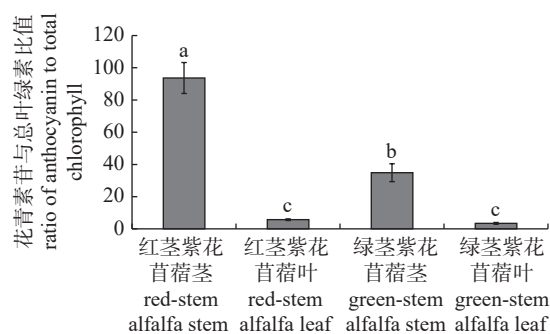


图4 不同部位花青素苷与总叶绿素比值

Fig. 4 Ratio of anthocyanin glycosides to total chlorophyll of different parts

3 讨论

植物颜色形成机制复杂, 涉及叶绿素、类胡萝卜素、花青素等诸多色素物质^[5]。有研究表明: 植物黄绿程度与类黄酮、类胡萝卜素和叶绿素的含量显著正相关, 红色程度则与花青素苷含量显著相关^[29-31]。本研究中, 2种茎色的WL525紫花苜蓿叶中的叶绿素和类胡萝卜素含量均显著高于茎中的含量, 这是因为叶绿素和类胡萝卜素是进行光合作用的主要色素, 两者在叶片中的含量占绝对优势, 使得叶片呈绿色, 这与大多数植物的显色规律一致^[9]。

本研究发现: 红茎紫花苜蓿茎中的花青素苷和缩合单宁含量均显著高于绿茎。已有研究表明: 一些黄酮和单宁类物质可能作为花青素苷的共色素, 有助于增强其稳定性^[32], 共同影响植物颜色。徐展宏等^[33]和GONG等^[34]在对红叶青钱柳(*Cyclocarya paliurus*)柳叶泛红和热带地区幼叶短暂变红的研究中发现: 叶片呈现红色的主要原因与花青素和缩合单宁含量增加有关。廖金花等^[19]的研究也表明: 颜色越深的植物, 单宁含量越高。虽然红茎紫花苜蓿茎中的花青素苷含量较高, 但是植物呈色是多种色素综合作用的结果。因此, 将植物不同部位的花青素苷与总叶绿素的比值进行比较, 其比值越大, 颜色越红。红茎中花青素苷与叶绿素的比值最大, 说明红茎中花青素的绝对含量最高, 这一结果与孙宜等^[35]的观点一致, 即比值越大, 颜色越红。

花青素和缩合单宁含量受遗传性状和外界环境的双重影响。两者在生物合成过程的前期受到相同基因控制^[36], 若在合成过程中基因作用的方式发生改变, 可能会导致红茎紫花苜蓿茎中调控花青素的合成与分解的某个基因发生改变; 另外, 植物花青素和缩合单宁的积累与其生长过程的外界环境密切相关^[37-38]。低温、全日照、干旱均可促进植物器官花青素苷的积累和颜色加深^[39]。紫叶小檗(*Berberis thunbergii*)叶在全光照下为深红色, 随光强降低、花青素含量减少而逐渐变浅^[40]。曹晶等^[41]研究发现: 植物体内水分降低到一定范围时会加快花青素的合成, 使其含量增加。本研究材料来自同一个品种, 且栽培条件相同, 因此, 红茎紫花苜蓿茎中的花青素苷和缩合单宁含量显著高于绿茎, 这可能是基因变异所致, 还需要从红茎紫花苜蓿花青素生物合成的分子机制进行深入研究。

4 结论

红茎和绿茎紫花苜蓿叶中的叶绿素和类胡萝卜素含量较高, 花青素苷和缩合单宁含量增加是出现红茎紫花苜蓿的主要原因。

[参考文献]

- [1] 杨青川, 康俊梅, 张铁军. 苜蓿种质资源的分布、育种与利用[J]. 科学通报, 2016, 61(2): 261. DOI: 10.1360/N972015-00879.
- [2] 冯光燕, 高洪文, 张新全, 等. 16个紫花苜蓿品种维生素E含量测定与分析[J]. 草业科学, 2015, 32(9): 1444. DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2015-0007.
- [3] 洪绶曾. 苜蓿科学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009.
- [4] 张杨杨, 李希铭, 高鹏, 等. 不同浓度镉胁迫下6种草本植物的耐性及富集特征比较[J]. 草地学报, 2021, 29(6):1265. DOI:10.11733/j.issn.1007-0435.2021.06.017.
- [5] TANAKA Y, SASAKI N, OHMIYA A. Biosynthesis of plant pigments: anthocyanins, betalains and carotenoids[J]. The Plant Journal, 2008, 54(4): 733. DOI: 10.1111/j.1365-3113X.2008.03447.x.
- [6] 梁玲, 黄玉琼, 陈小红. 不同色彩珙桐叶片和苞片解剖结构及色素含量比较研究[J]. 西北植物学报, 2020, 40(9):1539. DOI:10.7606/j.issn.1000-4025.2020.09.1539.
- [7] MLODZIŃSKA E. Survey of plant pigments: molecular and environmental determinants of plant colors[J]. Acta Biologica Cracoviensia Series Botanica, 2009, 51(1): 7.
- [8] 冉海榕, 李佳欣, 傅玉凡, 等. 不同基因型甘薯叶片酚类质量分数及PPO, POD活性的差异[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(10): 54. DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.10.006.
- [9] CHEN L, LI L N, DAI Y P, et al. De novo transcriptome

- analysis of *Osmanthus serrulatus* Rehd. flowers and leaves by Illumina sequencing[J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2015, 61: 531. DOI: [10.1016/j.bse.2015.07.027](https://doi.org/10.1016/j.bse.2015.07.027).
- [10] 梁俊林, 李俭, 代鑫, 等. 施加 Fe^{2+} 和 Cu^{2+} 对鸡爪槭叶色变化的生理影响[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(3): 549. DOI: [10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.02039](https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.02039).
- [11] 胡永红, 秦俊, 蒋昌华, 等. 上海地区秋色叶成因的调查与分析[J]. *东北林业大学学报*, 2004, 32(5): 84. DOI: [10.13759/j.cnki.dlxb.2004.05.30](https://doi.org/10.13759/j.cnki.dlxb.2004.05.30).
- [12] BROCKINGTON S F, WALKER R H, GLOVER B J, et al. Complex pigment evolution in the Caryophyllales[J]. *New Phytologist*, 2011, 190(4): 854. DOI: [10.1111/j.1469-8137.2011.03687.x](https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2011.03687.x).
- [13] 陈雪菲, 张映雪, 黄贤燕, 等. 蕨类植物花青素和原花青素成分及含量分析[J]. *植物科学学报*, 2020, 38(6): 820. DOI: [10.11913/PSJ.2095-0837.2020.60820](https://doi.org/10.11913/PSJ.2095-0837.2020.60820).
- [14] MARTIN C, GERATS T. Control of pigment biosynthesis genes during petal development[J]. *The Plant Cell*, 1993, 5(10): 1253. DOI: [10.1105/tpc.5.10.1253](https://doi.org/10.1105/tpc.5.10.1253).
- [15] 孙卫, 李崇晖, 王亮生, 等. 菊花不同花色品种中花青素苷代谢分析[J]. *植物学报*, 2010, 45(3): 327. DOI: [10.3969/j.issn.1674-3466.2010.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-3466.2010.03.004).
- [16] 安欣, 王亚芸, 任建武, 等. 环境因素对彩叶植物色素含量的相关影响[J]. *中国园艺文摘*, 2013, 29(11): 19. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0873.2013.11.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0873.2013.11.009).
- [17] 郭瀚成, 金晓玲. 外源蔗糖对3种色系榉树秋季叶色变化的影响[J]. *植物生理学报*, 2020, 56(11): 2487. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2019.0500](https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2019.0500).
- [18] LUO J R, SHI Q Q, NIU L X, et al. Transcriptomic analysis of leaf in tree peony reveals differentially expressed pigments genes[J]. *Molecules*, 2017, 22(2): 324. DOI: [10.3390/molecules22020324](https://doi.org/10.3390/molecules22020324).
- [19] 廖金花, 刘泽厚, 朱建清. 水稻种皮花青素和原花青素合成相关研究进展[J]. *种子*, 2015, 34(9): 47. DOI: [10.16590/j.cnki.1001-4705.2015.09.047](https://doi.org/10.16590/j.cnki.1001-4705.2015.09.047).
- [20] DIXON R A, LIU C, JUN J H. Metabolic engineering of anthocyanins and condensed tannins in plants[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2013, 24(2): 329. DOI: [10.1016/j.copbio.2012.07.004](https://doi.org/10.1016/j.copbio.2012.07.004).
- [21] 刘玉皎. 不同基因型蚕豆原花青素含量分析[J]. *湖北农业科学*, 2009, 48(10): 2389. DOI: [10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2009.10.047](https://doi.org/10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2009.10.047).
- [22] 楚爱香, 张要战, 王萌萌. 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. DOI: [10.13836/j.jjau.2013020](https://doi.org/10.13836/j.jjau.2013020).
- [23] 代泽娅, 谭准, 孙海菁, 等. 5种北美栎树秋冬季叶色变化机理分析[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2021, 41(4): 56. DOI: [10.11929/j.swfu.202006055](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202006055).
- [24] 张敏, 黄利斌, 周鹏, 等. 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. DOI: [10.11707/1001-7488.20150806](https://doi.org/10.11707/1001-7488.20150806).
- [25] 黄勇, 钟广炎, 程春振, 等. 柑桔果实呈色机理研究进展[J]. *中国南方果树*, 2011, 40(2): 24. DOI: [10.13938/j.issn.1007-1431.2011.02.016](https://doi.org/10.13938/j.issn.1007-1431.2011.02.016).
- [26] 王卓渊, 林香凤. 银杏叶叶绿素荧光特性及其含量测定研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(31): 134. DOI: [10.13989/j.cnki.0517-6611.2017.31.042](https://doi.org/10.13989/j.cnki.0517-6611.2017.31.042).
- [27] ARNON D I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1949, 24(1): 1. DOI: [10.1104/pp.24.1.1](https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1).
- [28] 陈婷婷, 符卫蒙, 余景, 等. 彩色稻叶片光合特征及其与抗氧化酶活性、花青素含量的关系[J]. *中国农业科学*, 2022, 55(3): 467. DOI: [10.3864/j.issn.0578-1752.2022.03.004](https://doi.org/10.3864/j.issn.0578-1752.2022.03.004).
- [29] 彭凯, 王国霞, 孙育平, 等. 植物缩合单宁抗氧化作用机制的研究进展[J]. *饲料工业*, 2020, 41(13): 49. DOI: [10.13302/j.cnki.fi.2020.13.009](https://doi.org/10.13302/j.cnki.fi.2020.13.009).
- [30] 赵蔚, 王昊, 陈英, 等. NaCl胁迫对翅碱蓬色素积累的影响[J]. *现代农业科技*, 2020(8): 191. DOI: [10.3969/j.issn.1007-5739.2020.08.120](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-5739.2020.08.120).
- [31] 梁晓婕, 李越鲲, 秦小雅, 等. 不同种质黄果枸杞数量性状及其颜色差异比较[J]. *北方园艺*, 2022(1): 101. DOI: [10.11937/bfy.20213063](https://doi.org/10.11937/bfy.20213063).
- [32] SHAFIQ M, SINGH Z. Pre-harvest spray application of phenylpropanoids influences accumulation of anthocyanin and flavonoids in 'Cripps Pink' apple skin[J]. *Scientia Horticulturae*, 2018, 233: 141. DOI: [10.1016/j.scienta.2018.01.020](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.01.020).
- [33] 徐展宏, 朱莹, 金慧颖, 等. 不同叶色青钱柳叶片色素、多酚含量及光合特性的差异[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(2): 103. DOI: [10.12302/j.issn.1000-2006.202105048](https://doi.org/10.12302/j.issn.1000-2006.202105048).
- [34] GONG W C, LIU Y H, WANG C M, et al. Why are there so many plant species that transiently flush young leaves red in the tropics[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2020, 11: 83. DOI: [10.3389/fpls.2020.00083](https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00083).
- [35] 孙宜, 李鹏. 几种新优彩叶植物秋季叶色素变化的研究[J]. *山东林业科技*, 2015, 45(5): 1. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2724.2015.05.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2724.2015.05.001).
- [36] WANG C N, WANG L, YE J B, et al. Fruit quality of *Vitis vinifera*: how plant metabolites are affected by genetic, environmental, and agronomic factors[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 305(1): 111404. DOI: [10.1016/j.scienta.2022.111404](https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111404).
- [37] 支伟特, 赵昶灵, 陈中坚, 等. 花色苷对高等植物器官颜色的决定及其影响因素[J]. *热带亚热带植物学报*, 2012, 20(3): 303. DOI: [10.3969/j.issn.1005-395.2012.03.015](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-395.2012.03.015).
- [38] 孙健, 张鸿翎, 韩涛. 4种彩叶树春季叶片转色期色素含量变化研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2022, 42(11): 158. DOI: [10.11929/j.swfu.202108009](https://doi.org/10.11929/j.swfu.202108009).
- [39] 庄维兵, 刘天宇, 束晓春, 等. 植物体内花青素苷生物合成及呈色的分子调控机制[J]. *植物生理学报*, 2018, 54(11): 1630. DOI: [10.13592/j.cnki.ppj.2018.0231](https://doi.org/10.13592/j.cnki.ppj.2018.0231).
- [40] 陈爱华. 不同光照处理对紫叶小檗叶片颜色及生理指标变化的影响[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(15): 9. DOI: [10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2019.15.005](https://doi.org/10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2019.15.005).
- [41] 曹晶, 姜卫兵, 翁忙玲, 等. 夏秋季旱涝胁迫对红叶石楠光合特性的影响[J]. *园艺学报*, 2007, 34(1): 163. DOI: [10.16420/j.issn.0513-353x.2007.01.033](https://doi.org/10.16420/j.issn.0513-353x.2007.01.033).

责任编辑: 何承刚