

刘林峰,林玲,周阳,等. 茶树紫色芽叶花色苷富集特性研究[J]. 江苏农业科学,2019,47(14):169-172.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.14.039

# 茶树紫色芽叶花色苷富集特性研究

刘林峰<sup>1,2</sup>, 林玲<sup>1,2</sup>, 周阳<sup>1,2</sup>, 肖文军<sup>1,2,3</sup>, 龚志华<sup>1,2</sup>

(1. 湖南农业大学茶学教育部重点实验室, 湖南长沙 410128; 2. 湖南农业大学国家植物功能成分利用工程技术研究中心, 湖南长沙 410128;

3. 湖南农业大学湖南省植物功能成分利用协同创新中心, 湖南长沙 410128)

**摘要:**以红芽佛手、自选 9803、安 73 等 3 个紫芽茶树品种(系)的 1 芽 3 叶茶梢为研究对象,采用紫外-可见光谱和高效液相色谱技术,分析研究不同品种(系)、不同部位、不同生长季节茶树紫色芽叶花色苷的富集特性,以期茶树紫色芽叶及其花色苷的高值化利用提供参考。结果表明,不同品种(系)、不同部位、不同生长季节茶树对花色苷的富集能力存在显著差异;不同茶树品种(系)富集能力由强到弱依次为自选 9803 > 安 73 > 红芽佛手,不同部位富集能力由强到弱依次为第 1 > 第 2 > 芽头 > 第 3,同时 3 个茶树品种(系)随春末、夏初、夏中、夏末、秋初、秋中的季节变化对花色苷的富集呈现出先上升后下降的趋势,自选 9803 叶片在夏末花色苷含量达到最高值(14.24 mg/g),安 73 在夏末达到最大值(12.63 mg/g),红芽佛手则在夏初达到最高值(7.33 mg/g)。

**关键词:**茶叶;紫芽;花色苷;富集特性

**中图分类号:**S571.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2019)14-0169-03

茶树紫色芽叶是由茶叶花色苷引起的,花色苷属多酚类物质,多以糖苷形式存在<sup>[1]</sup>,易溶于水和乙醇、甲醇等醇类化合物,不溶于乙醚、氯仿等有机溶剂,在酸性条件下稳定,其颜色随 pH 值的变化而变化<sup>[2]</sup>。研究证实,花色苷具有抗氧化、清除自由基、护肝解毒等<sup>[3-7]</sup>多种生物活性,被广泛用于食品、饮料、医药、化工、纺织等<sup>[8]</sup>领域,是近年茶树种质资源及功能成分利用的研究热点。云南省农业科学院茶叶研究所选育了高花色苷茶树品种紫娟;刘富知等发现,4.35% 的安化群体茶树品种具有高花色苷特征<sup>[9]</sup>;萧力争等比较了 5 个特定紫芽茶树品种春梢芽叶中花色苷含量的差异<sup>[10]</sup>;李燕丽等检测了不同季节紫娟茶花色苷相对含量<sup>[11]</sup>;Lai 等分析了紫芽茶树品种紫娟花色苷的累积情况<sup>[12]</sup>。然而,鲜见对花色苷及组分在不同品种(系)、不同部位、不同生长季节茶树中富集特性的系统研究。本研究以红芽佛手、自选 9803、安 73 等 3 个紫芽茶树品种(系)的 1 芽 3 叶茶梢为对象,采用紫外-可见光谱和高效液相色谱(HPLC)技术,分析不同品种(系)、不同部位、不同生长季节茶树紫色芽叶花色苷及其组分的富集特性,以期茶树紫色芽叶及其花色苷的高值化利用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

从 2016 年 4 月中下旬开始至 2016 年 9 月中旬每 15 d 采摘 1 次湖南农业大学长安教学实践基地茶园中易紫芽化自选

9803、红芽佛手和安 73 等 3 个茶树品种(系)的 1 芽 3 叶,并将其芽头、第 1 叶、第 2 叶和第 3 叶分开收集,冷冻干燥后制成干粉,塑料袋密封后保存于冰箱中,备用。

### 1.2 试剂及仪器设备

试剂:乙腈、甲醇(分析纯)、甲醇(色谱纯)、无水乙醇(分析纯)均购于天津市恒兴化学试剂制造有限公司;标准品矢车菊素-3-O-葡萄糖苷、天竺葵素-3-O-葡萄糖苷购于北京谱析科技有限公司;飞燕草素-葡萄糖苷购于西宝生物科技(上海)股份有限公司;超纯水自制;酸性乙醇水溶液(85 mL 无水乙醇加 15 mL 1% 盐酸水)自配。

仪器设备: C<sub>18</sub> ECOSIL HPLC COLUMN 色谱分析柱(250.0 mm × 4.6 mm, 5.0 μm, 日本 ECOSIL 公司)、UV754N 紫外可见分光光度计(德国 Thermo Scientific 公司)、高效液相色谱仪 A20(日本岛津公司)、精密电子天平(瑞士 Starorius 公司)、pH 计(瑞士梅特勒-托利多公司)、超低温冰箱(美国 Thermo 公司)、DSY-2-8 水浴锅(北京国华医疗器械厂)。

### 1.3 方法

1.3.1 花色苷提取 参照文献和预试验结果,采用回流提取方法提取茶叶干粉中的花色苷,提取条件为 80% 乙醇(添加 1% 冰乙酸水溶液)、1 g : 50 mL 料液比,80 ℃ 下回流提取 60 min,过滤取滤液<sup>[13-15]</sup>。

1.3.2 紫外-可见光谱检测花色苷总量 参照报道文献,采用单一 pH 法,吸取 4 mL 样品提取滤液用酸性乙醇水溶液定容至 10 mL 以酸性乙醇水溶液为空白对照,显色 30 min,在 535 nm 波长下测定吸光度,重复 3 次<sup>[16-17]</sup>,根据以下公式<sup>[18]</sup>计算花色苷总量:

花色苷总量 =  $[(D_{\text{试液}} - D_{\text{对照液}}) \times 101.83] / [\text{吸取溶液量} / \text{样品干质量}]^{[19]}$ 。

式中:101.83 为摩尔消光系数。

1.3.3 HPLC 外标法检测茶叶花色苷组分 色谱柱为 C<sub>18</sub> 柱(250.0 mm × 4.6 mm, 5.0 μm),柱温 30 ℃,检测波长

收稿日期:2018-03-21

基金项目:国家重点研发计划(编号:2017YFD0400803);湖南省重点研发计划(编号:2016NK2102);湖南省长沙市科技重大专项(编号:kq1703003)。

作者简介:刘林峰(1991—),男,湖南岳阳人,硕士研究生,主要从事茶叶功能成分利用研究。E-mail:1484322232@qq.com。

通信作者:龚志华,博士,副教授,主要从事茶树生理生化与品质化学研究。E-mail:gzh041211@163.com。

520 nm,流动相为 0.2% 磷酸水溶液(A) - 乙腈(B),梯度洗脱(0 ~ 60 min,10% ~ 40% B),流速为 0.8 mL/min,进样量为 10  $\mu$ L,系统平衡 10 min 后再次进样。

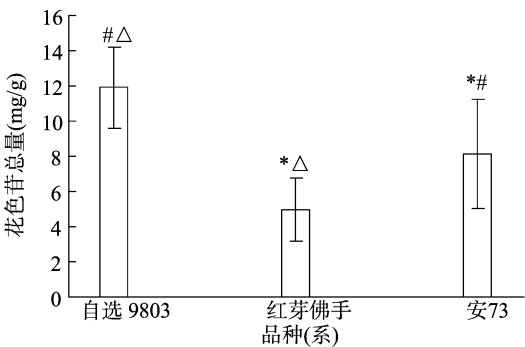
1.3.4 统计方法 数据以平均值  $\pm$  标准差表示,采用 SPSS Statistics 22.0 进行方差分析,各处理组间采用最小显著差数法(LSD 法)比较, $P < 0.05$  时表示具有统计学显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同茶树品种(系)花色苷富集差异比较

图 1 显示,不同茶树品种(系)所富集的花色苷总量存在显著差异( $P < 0.05$ ),花色苷总量由高到低的品种(系)依次为自选 9803(11.90 mg/g) > 安 73(8.11 mg/g) > 红芽佛手(4.98 mg/g);同时,3 个品种(系)样品和 3 种标准品混合标样的 HPLC 图谱相比,茶树紫色芽叶中的花色苷组分与其他常见植物中的花色苷组分并不相同,组分 1 ~ 7 为 3 个品种(系)所共有(图 2),表示这 7 个组分可作为茶树紫色芽叶中的特征花

色苷组分,且以组分 5 和组分 6 含量较高,但其分子结构有待进一步探究;也进一步说明在外界环境差异不大的情况下,茶树对花色苷的富集主要取决于品种(系)的遗传因素。



\* 表示与自选 9803 比较在 0.05 水平上差异显著; # 表示与红芽佛手比较在 0.05 水平上差异显著;  $\Delta$  表示与安 73 比较在 0.05 水平上差异显著。图 3 同

图 1 不同茶树品种(系)花色苷总量富集差异比较

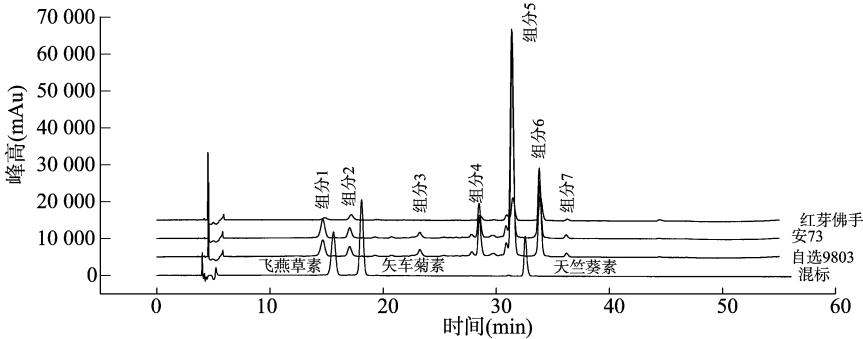


图 2 不同品种(系)样品和混合标样的花色苷组分对比

表 1 表明,同一生长季节,不同茶树品种(系)的花色苷总量存在显著差异。自选 9803 花色苷富集能力最强,在各生长季节与红芽佛手均存在显著性差异( $P < 0.05$ );安 73 富集

能力次之,在春秋(除秋初外)2 季富集明显不如 9803( $P < 0.05$ ),在夏中和夏末则明显强于红芽佛手( $P < 0.05$ ),说明茶树对花色苷的富集也受生长季节等环境因素的影响。

表 1 不同茶树品种(系)随生长季节变化的花色苷总量比较

品种	花色苷总量(mg/g)					
	春末	夏初	夏中	夏末	秋初	秋中
自选 9803	9.78 $\pm$ 5.23 <sup>#<math>\Delta</math></sup>	11.93 $\pm$ 5.31 <sup>#<math>\Delta</math></sup>	13.04 $\pm$ 6.84 <sup>#</sup>	14.24 $\pm$ 7.11 <sup>#</sup>	10.83 $\pm$ 4.50 <sup>#</sup>	11.90 $\pm$ 5.00 <sup>#<math>\Delta</math></sup>
红芽佛手	5.60 $\pm$ 1.20 <sup>*</sup>	7.33 $\pm$ 3.42 <sup>*</sup>	5.36 $\pm$ 1.50 <sup>*<math>\Delta</math></sup>	5.01 $\pm$ 1.14 <sup>*<math>\Delta</math></sup>	3.41 $\pm$ 0.71 <sup>*<math>\Delta</math></sup>	2.15 $\pm$ 0.53 <sup>*</sup>
安 73	5.48 $\pm$ 3.74 <sup>*</sup>	5.96 $\pm$ 3.65 <sup>*</sup>	10.41 $\pm$ 3.20 <sup>#</sup>	12.63 $\pm$ 7.46 <sup>#</sup>	6.88 $\pm$ 1.60 <sup>#</sup>	4.31 $\pm$ 3.41 <sup>*</sup>

注: \* 表示与自选 9803 比较在 0.05 水平上差异显著; # 表示与红芽佛手比较在 0.05 水平上差异显著;  $\Delta$  表示与安 73 比较在 0.05 水平上差异显著。

图 3 表明,芽头部分自选 9803 的花色苷总量显著高于安 73 和红芽佛手( $P < 0.05$ ),第 1 叶部分第 3 个品种(系)之间差异显著( $P < 0.05$ ),第 2 叶部分红芽佛手富集能力显著低于其他 2 个品种( $P < 0.05$ ),第 3 叶部分 3 个品种(系)含量差异不显著;由此提示,不同茶树品种(系)对花色苷的富集还与芽叶分化成熟度有关。

2.2 不同部位花色苷富集差异比较

图 4 显示,茶树紫色芽叶花色苷在第 1 中富集最多,在第 3 叶中富集最少,并与其他部位有显著性差异( $P < 0.05$ ),芽头和第 2 叶对花色苷的富集差异不显著;各部位花色苷总量由高到低依次为第 1 叶(13.88 mg/g) > 第 2 叶(7.44 mg/g) > 芽头(6.91 mg/g) > 第 3 叶(4.46 mg/g),猜测茶树对花色苷的富集可能与叶片基因的表达受叶片成熟度的影响有关。

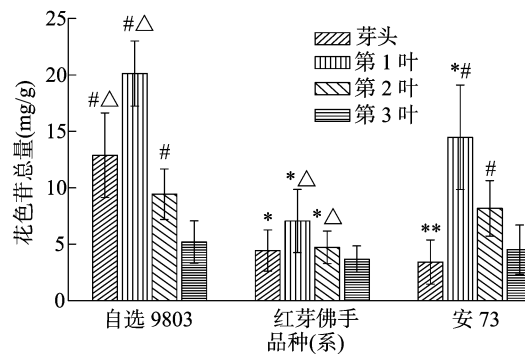
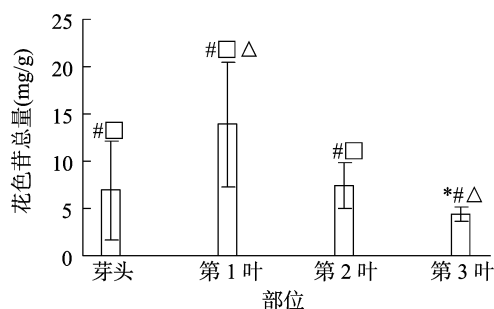


图 3 不同茶树品种(系)随部位变化的花色苷总量比较

由表 2 可知,同一生长季节不同茶树芽叶部位对花色苷的富集能力存在显著差异,其中第 1 叶富集能力最强,在各生长



\* 表示与芽头比较在 0.05 水平上差异显著; # 表示与第 1 叶比较在 0.05 水平上差异显著; Δ 表示与第 2 叶比较在 0.05 水平上差异显著; □ 表示与第 3 叶比较在 0.05 水平上差异显著

图4 不同部位花色苷总量差异比较

表2 茶树不同部位随生长季节变化的花色苷总量比较

部位	花色苷总量(mg/g)					
	春末	夏初	夏中	夏末	秋初	秋中
芽头	6.31 ± 3.84 <sup>#□</sup>	7.62 ± 4.57 <sup>#</sup>	8.37 ± 3.79 <sup>#□</sup>	8.51 ± 4.90 <sup>#</sup>	6.19 ± 4.50 <sup>#□</sup>	4.22 ± 2.83 <sup>#□</sup>
第1叶	12.16 ± 5.02 <sup>*Δ□</sup>	15.82 ± 3.52 <sup>*Δ□</sup>	15.56 ± 7.39 <sup>*Δ□</sup>	18.50 ± 10.2 <sup>*Δ□</sup>	12.03 ± 7.35 <sup>*Δ□</sup>	8.31 ± 6.39 <sup>*Δ□</sup>
第2叶	6.50 ± 2.52 <sup>#□</sup>	7.86 ± 2.11 <sup>#□</sup>	8.78 ± 3.85 <sup>#□</sup>	9.41 ± 4.26 <sup>#□</sup>	6.50 ± 2.52 <sup>#□</sup>	4.55 ± 2.18 <sup>#□</sup>
第3叶	3.59 ± 1.31 <sup>*#Δ</sup>	4.66 ± 0.76 <sup>#Δ</sup>	5.71 ± 0.92 <sup>*#Δ</sup>	6.06 ± 2.13 <sup>#Δ</sup>	3.44 ± 0.86 <sup>*#Δ</sup>	2.11 ± 0.18 <sup>*#Δ</sup>

注: \* 表示与芽头比较在 0.05 水平上差异显著; # 表示与第 1 叶比较在 0.05 水平上差异显著; Δ 表示与第 2 叶比较在 0.05 水平上差异显著; □ 表示与第 3 叶比较在 0.05 水平上差异显著。

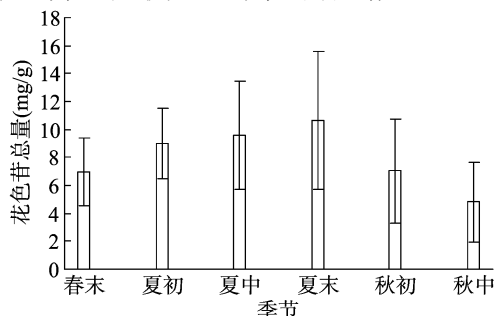


图5 不同生长季节花色苷总量差异比较

### 3 讨论

茶叶花色苷是花青素与糖苷的结合物,其中花青素是由查尔酮合成的,具有多种生物活性,研究茶树对花色苷的富集特性对选育高花色苷茶树品种、高产优质栽培茶树以及开发利用茶叶花色苷具有重要的理论与实践意义<sup>[19]</sup>。资料表明,植物叶片在不同的发育期对逆境胁迫敏感度不同,且不同叶片花色苷关键代谢酶的表达量和累积量不同<sup>[20-21]</sup>;在茶树花青素合成途径中部分关键酶基因在嫩叶中的表达水平明显高于老叶<sup>[22]</sup>。本研究发现不同品种(系)、不同部位、不同生长季节茶树中的花色苷总量存在显著差异,与前人研究结果<sup>[21-24]</sup>相符。3个茶树品种(系)对花色苷的富集能力由强到弱依次为自选 9803 > 安 73 > 红芽佛手,不同部位富集能力由强到弱依次为第 1 叶 > 第 2 叶 > 芽头 > 第 3 叶,同时随着由春末至秋中的季节变化,茶树对花色苷的富集总体上呈现出先上升后下降的趋势,其中,自选 9803 叶片在夏末花青素含量达到最高值(14.24 mg/g),安 73 在夏末达到最大值(12.63 mg/g),红芽佛手则在夏初达到最高值(7.33 mg/g),与前人对光照等环境因子调控茶树紫色芽叶的研究结果<sup>[23-24]</sup>相一致,说明茶树紫色芽叶对花色苷的富集同时受到

季节与其他部位均存在显著差异( $P < 0.05$ );各部位的花色苷总量均随生长季节的变化而表现先升后降趋势,其中,第 1、2 中的花色苷总量随季节变化相对明显,而芽头和第 3 叶花色苷总量随季节变化不明显,表明茶树不同芽叶部位随生长季节变化而对花色苷的富集差异主要体现在第 1、2 叶的差异上。

#### 2.3 不同生长季节花色苷富集差异比较

图 5 表明,茶树在不同生长季节对花色苷富集特性呈现出由春季到夏季缓慢升高,夏末后逐渐降低的变化趋势,说明光照、温度等环境因素的变化对茶树富集花色苷影响较大,这可能是由于光照度、光质、气温、湿度等影响了茶树花色苷代谢途径中相关酶基因的表达,从而使得茶树在夏季对花色苷的富集作用增强。

茶树种质、生长环境、分化发育程度等多种因素的调控。芽头的嫩度最好,但花色苷富集能力却较第 1 叶弱的原因,有必要后期从茶树芽叶不同部位中花色苷代谢途径关键酶基因层面开展深入研究。另一方面,本研究通过 HPLC 检测到的 7 个茶树紫芽花色苷组分尚未作分离鉴定,后续研究可通过应用最新分离纯化技术获得花色苷组分单体,以便进一步探究茶树紫色芽叶花色苷的化学密码。

#### 参考文献:

- [1] 汪恒武. 茶树红紫芽叶形成及其控制的探讨[J]. 茶叶通讯, 1979(3): 6-15.
- [2] 汪慧华, 赵晨霞. 花青素结构性质及稳定性影响因素研究进展[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2009(9): 32-35.
- [3] Pantelidis G E, Vasilakakis M, Manganaris G. Antioxidant capacity, phenol, anthocyanin and ascorbic acid contents in raspberries, blackberries, red currants, gooseberries and cornelian cherries[J]. Food Chemistry, 2007, 102(3): 777-783.
- [4] Azuma K, Ohyama A, Ippoushi K, et al. Structures and antioxidant activity of anthocyanins in many accessions of eggplant and its related species[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(21): 10154-10159.
- [5] 刘宵宵, 简美玲, 毛润乾. 花色苷类物质降血脂机制研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2012, 43(3): 139-144.
- [6] Yang Y, Andrews M C, Hu Y, et al. Anthocyanin extract from black rice significantly ameliorates platelet hyperactivity and hypertriglyceridemia in dyslipidemic rats induced by high fat diets[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(12): 6759-6764.
- [7] Xue Y L, Miyakawa T, Hayashi Y, et al. Isolation and tyrosinase inhibitory effects of polyphenols from the leaves of persimmon, diospyros kaki[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(11): 6011-6017.

高宁, 李建明, 孔政. 番茄秸秆堆肥发酵特性及对冬季大棚环境的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 172–177.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.14.040

# 番茄秸秆堆肥发酵特性及对冬季大棚环境的影响

高宁<sup>1,2</sup>, 李建明<sup>1</sup>, 孔政<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学园艺学院, 陕西杨凌 712100; 2. 榆林职业技术学院, 陕西榆林 719000)

**摘要:**以番茄秸秆为主要的发酵材料, 分别选取菇渣、牛粪、猪粪、菇渣+牛粪和菇渣+猪粪为调理材料, 研究不同调理剂对番茄秸秆发酵特性的影响, 探讨番茄秸秆堆肥酿热对冬季大棚环境的调控作用。结果表明, 在番茄秸秆堆肥过程中, 以猪粪为调理剂时发酵产热维持时间最长, 35℃以上维持天数可达44 d。发酵过程中, 各处理堆肥都呈碱性, 发酵结束时各处理 EC 值均高于 3.6 mS/cm, 其中以猪粪为调理剂的堆体 EC 值始终最高。发酵腐熟后, 各处理容重差异不大, 以猪粪为调理剂的堆体大小孔隙比最大, 而以菇渣为调理剂的堆体大小孔隙比最小。环境试验结果表明, 试验期间利用番茄秸秆和猪粪混合堆肥产生的热量可使冬季大棚的日平均气温提高 4.2℃, 日最低气温平均提高 4.6℃。在晴天和阴雪天酿热棚较对照棚的夜间气温和 CO<sub>2</sub> 浓度均有提高, 空气湿度变化不大。表明以猪粪为调理剂进行的番茄秸秆堆肥, 在调整 EC 值后可作为理想的栽培基质, 且利用其发酵产生的热量可改善大棚中的环境条件。

**关键词:** 番茄; 秸秆; 调理剂; 发酵; 堆肥酿热; 大棚环境

**中图分类号:** S141.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2019)14-0172-06

在我国北方地区, 蔬菜作物的设施栽培主要是利用日光温室和塑料大棚, 但在实际生产中日光温室和塑料大棚均存在一定的不足。日光温室保温性能较好, 但由于后墙的遮挡,

内部光照条件较差, 影响作物的生长; 塑料大棚内光照充足, 但保温性差, 在冬季无法进行蔬菜作物的栽培<sup>[1]</sup>。为此, 王明喜等设计建造了无墙体结构的大跨度保温大棚, 但在冬季需要增加供热设施<sup>[2]</sup>。堆肥发酵可以产生大量的热量, 冬季利用其作为供热来源可以节省生产成本。孙亚文等通过建造秸秆发酵示范蔬菜大棚发现, 利用秸秆发酵可以提高大棚温度, 促进蔬菜生长<sup>[3]</sup>。但不同堆肥原料产热效果不同, 酿热物对大棚内环境变化有很大的影响。因此, 在冬季大棚中利用堆肥作为供热源时, 选择适宜的堆肥原料至关重要。

番茄是我国设施栽培主要的蔬菜作物之一。据统计,

收稿日期: 2018-03-26

基金项目: 国家现代农业产业技术体系建设专项(编号: CARS-23-C05); 陕西省重点研发计划(编号: 2017ZDXM-NY-003)。

作者简介: 高宁(1968—), 女, 陕西西脂人, 硕士, 高级讲师, 主要从事设施园艺研究。E-mail: ylg212@sina.com。

通信作者: 李建明, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事设施园艺研究。E-mail: lijianming66@163.com。

[8] Rashid K, Wachira F N, Nyariki J N, et al. Kenyan purple tea anthocyanins and coenzyme - Q<sub>10</sub> ameliorate post treatment reactive encephalopathy associated with cerebral human African trypanosomiasis in murine model [J]. *Parasitology International*, 2014, 63(2): 417–426.

[9] 刘富知, 黄建安, 付冬和, 等. 茶树上红紫色芽叶部分生化特性的研究[J]. *湖南农业大学学报*, 2000, 26(1): 41–42, 57.

[10] 萧力争, 苏晓倩, 李勤, 等. 紫芽品种茶树芽叶多酚类物质组成特征[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2008, 34(1): 77–79.

[11] 李燕丽, 罗琼仙, 关文玉, 等. 紫娟茶花色苷的类型、组成及其质量分数的季节性变化[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2016, 38(6): 1–6.

[12] Lai Y S, Li S, Tang Q, et al. The dark - purple tea cultivar ‘Ziyan’ accumulates a large amount of delphinidin - related anthocyanins [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(13): 2719–2726.

[13] 王秋霜, 凌彩金, 刘淑媚, 等. 红紫芽茶叶花青素提取分离及 pH 稳定性初探[J]. *中国农学通报*, 2014, 30(9): 291–296.

[14] 李璐, 倪婷婷, 关文玉, 等. 基于响应面法提取‘紫娟’茶花青素最佳工艺的优化研究[J]. *西南农业学报*, 2014, 27(4): 1704–1709.

[15] 罗正飞, 梁名志, 王立波. “紫娟”茶花青素提取工艺研究[J]. *滇西科技师范学院学报*, 2011, 33(4): 111–114.

[16] 孙建霞, 张燕, 孙志健, 等. 花色苷的资源分布以及定性定量分析方法研究进展[J]. *食品科学*, 2009, 30(5): 263–268.

[17] 陈琼, 陆瑞琼. 茶树芽叶花色苷含量测定方法的研究[J]. *北京工商大学学报(自然科学版)*, 2011, 29(2): 41–44.

[18] 黄意欢. 茶学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 125–126.

[19] Holton T A, Cornish E C. Genetics and biochemistry of anthocyanin biosynthesis[J]. *The Plant Cell*, 1995, 7(7): 1071–1083.

[20] Wei K, Zhang Y Z, Wu L Y, et al. Gene expression analysis of bud and leaf color in tea[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2016, 107: 310–318.

[21] 张佩佩, 张亮, 郑风霞, 等. 植物叶片中花青素的积累规律及生物学作用[J]. *北方园艺*, 2014(20): 188–192.

[22] 周琼琼, 孙威江. 茶树芽叶紫化的生理生化分析及其关键酶基因的表达[J]. *生物技术通报*, 2015, 31(1): 86–91.

[23] 金琦芳, 孙威江, 陈志丹. 光照对紫色芽叶茶花青素合成的调控机理[J]. *生物技术通报*, 2015, 31(6): 20–27.

[24] 李智. 不同环境因子调控茶树紫色芽叶形成的分子机制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014: 54–58.