

## 花生红衣原花青素稳定性研究

刘睿杰<sup>1</sup>, 白欢欢<sup>1</sup>, 王珊珊<sup>2</sup>, 常明<sup>1</sup>, 金青哲<sup>1</sup>, 王兴国<sup>1</sup>

(1. 江南大学食品学院, 江苏省食品安全与质量控制协同创新中心, 江苏无锡 214122;

2. 山东鲁花集团有限公司 山东省花生油脂与蛋白精深加工技术重点实验室, 山东莱阳 265200)

**摘要:**以葡萄籽原花青素为参照, 研究 20% 乙醇花生红衣原花青素纯化物的水溶性和光照、温度、pH、金属离子及常见食品添加剂对其稳定性的影响。结果表明:花生红衣原花青素比市售葡萄籽原花青素溶解度高 8.75 个百分点, 水溶性优越;花生红衣原花青素受光照影响小, 在弱酸性条件下稳定, 但对高温敏感, 碱性环境不稳定, 易与  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  发生络合反应生成絮状沉淀, 可与除苯甲酸钠外的常用食品添加剂共存, 且较葡萄籽原花青素更加稳定。

**关键词:**花生红衣;原花青素;稳定性

中图分类号:TS229;TQ646

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2018)06-0126-06

### Stability of procyanidins from peanut skins

LIU Ruijie<sup>1</sup>, BAI Huanhuan<sup>1</sup>, WANG Shanshan<sup>2</sup>, CHANG Ming<sup>1</sup>,  
JIN Qingzhe<sup>1</sup>, WANG Xingguo<sup>1</sup>

(1. Synergetic Innovation Center of Food Safety and Quality Control in Jiangsu Province, School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Deep Processing Technology on Peanut Oil and Protein, Shandong Luhua Group Co., Ltd., Laiyang 265200, Shandong, China)

**Abstract:** The properties of 20% ethanol peanut skins procyanidins extracts were studied, such as water solubility, the stability in light, temperature, pH, metal iron and commonly food additives, compared with commercially available grape seeds procyanidins. The results showed that the water solubility of procyanidins in peanut skins was good, which was 8.75 percentage points higher than that of commercially available grape seeds procyanidins. Procyanidins in peanut skins were insensitive to light and stable under weak acid conditions, and could exist with other commonly food additives except sodium benzoate, but were sensitive to temperature and unstable under alkaline conditions. It could react with  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  to produce flocculent precipitation. Generally, procyanidins in peanut skins were more stable than that in grape seeds.

**Key words:** peanut skins; procyanidins; stability

花生红衣是花生油和花生蛋白加工过程的副产物,富含原花青素。国内外目前提取原花青素的主要原料为葡萄籽。研究表明<sup>[1]</sup>,花生红衣原花青素(PSPC)的化学结构主要为 A 型原花青素,单体为

(表)儿茶素,平均聚合度较低。其化学组成不同于葡萄籽原花青素(GPC),这可作为花生红衣原花青素产品开发的突破点。花生红衣原花青素分子结构中含多个酚羟基,抗氧化活性强<sup>[1]</sup>,具有多种药理学作用,如抗病毒、抗菌、抗癌、抗氧化及抗肿瘤等功效<sup>[2-7]</sup>,较白藜芦醇和抗坏血酸具有更强的清除自由基能力<sup>[8]</sup>。可广泛应用于保健品、药品和化妆品等行业中,发挥抗氧化、治疗心血管疾病、美容等功效。

原花青素在工业化生产和应用过程中受到氧气、光照、酸碱性等影响,导致稳定性下降<sup>[9]</sup>,因此

收稿日期:2017-08-11;修回日期:2018-01-08

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0401403)

作者简介:刘睿杰(1981),女,副教授,博士,研究方向为脂质营养与安全(E-mail)liuruijie163@163.com。

通信作者:金青哲,教授(E-mail)jqzwuxi@163.com。

需重视原花青素在制备和应用过程中的稳定性问题。原花青素的稳定性与其结构有关,不同植物来源、不同化学组成的原花青素,其对光、热、金属离子等因素的敏感程度存在差异。近年来,越来越多的科研工作者开始关注不同来源原花青素的稳定性问题。研究发现<sup>[10-11]</sup>,葡萄籽原花青素对光敏感,热稳定性较好,低 pH 条件下稳定存在,易被  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Sn}^{2+}$  破坏,抗坏血酸和亚硫酸氢钠可有效提高其稳定性。但花生红衣中原花青素鲜有研究,因此有效提高花生原花青素的抗氧化性和生物利用度,必须系统研究其稳定性。鉴于此,本文以葡萄籽原花青素为参照,研究 20% 乙醇花生红衣原花青素纯化物的水溶性和光照、温度、pH、金属离子及常见食品添加剂对其稳定性的影响,为正确认识花生红衣原花青素的功能提供数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

#### 1.1.1 原料与试剂

花生红衣,山东鲁花集团有限公司提供;原花青素标准溶液,购于美国 Sigma 公司;葡萄籽原花青素,购于山东金胜生物科技有限公司;甲醇、香草醛、磷酸二氢钾、氯化铜、柠檬酸等分析纯试剂,购于国药集团;实验所用超纯水(pH 7.0, 18 M $\Omega$ /cm)取自 Milli-Q SP 超纯水发生器。

#### 1.1.2 仪器与设备

Ascent 荧光化学发光分析仪,美国 Thermo 公司; $\alpha$ -1500 紫外可见分光光度计,上海谱元仪器有限公司;SE812 氮吹仪,上海安谱实验科技股份有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 花生红衣原花青素制备及纯化方法

参考文献[12]进行花生红衣原花青素的制备和纯化。

#### 1.2.2 花生红衣原花青素含量测定

采用香草醛-盐酸法<sup>[13]</sup>测定原花青素含量。

#### 1.2.3 花生红衣原花青素的水溶性分析

花生红衣原花青素水溶性的测定方法参照 Cano-Chauca 等<sup>[14]</sup>方法。量取 100 mL 蒸馏水于烧杯中,置于磁力搅拌器上,缓慢加入准确称重的 1.000 g 样品,搅拌 5 min。将溶液倒入离心管中离心,离心条件为 3 000 r/min, 10 min。取 25 mL 上清液至已烘干至恒重( $M_1$ )的培养皿中,于 105 °C 烘干至恒重,并称重记为  $M_2$ 。溶解度按下式计算:溶解度 =  $(M_2 - M_1) / 0.25 \times 100\%$ 。

#### 1.2.4 花生红衣原花青素的稳定性分析

##### 1.2.4.1 光照对花生红衣原花青素稳定性的影响

配制 5.0 mg/mL 的原花青素样品溶液,分别取 10 mL 置于透明玻璃样品瓶中,封口,分别置于暗处避光、室内灯光散射、室外阳光直射环境中,分别于 1、2、4、6、8、10 d 取样测定样品溶液中原花青素含量,以保存率表示原花青素稳定性,计算公式为保存率 =  $W_1 / W_2 \times 100\%$ 。式中: $W_1$ 为检测时样品中原花青素含量,%; $W_2$ 为初始样品中原花青素含量,%。

##### 1.2.4.2 温度对花生红衣原花青素稳定性的影响

配制 5.0 mg/mL 的原花青素样品溶液,分别取 10 mL 置于试管中,密封,将试管分别置于 4、20、40、60 °C 水浴中,其余步骤同 1.2.4.1。

##### 1.2.4.3 pH 对花生红衣原花青素稳定性的影响

配制 pH 为 1.5、5.0、7.4、10.0 的水溶液,用来配制 5.0 mg/mL 的原花青素样品溶液,分别取 10 mL 置于试管中,密封,避光 4 °C 下保存,其余步骤同 1.2.4.1。

##### 1.2.4.4 金属离子对花生红衣原花青素稳定性的影响

按食品标准配制 5 mg/L  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  盐溶液,分别加入 5.0 mg/mL 的原花青素样品溶液,各取 10 mL,在 4 °C 下避光保存,分别于 2、6、10 d 取样测定样品溶液中原花青素含量,其余步骤同 1.2.4.1。

##### 1.2.4.5 常见食品添加剂对花生红衣原花青素稳定性的影响

按食品标准配制蔗糖、食盐、柠檬酸、苯甲酸钠、抗坏血酸和亚硫酸氢钠溶液,分别加入 5.0 mg/mL 的原花青素样品溶液,取 10 mL,在 4 °C 下避光保存,其余步骤同 1.2.4.1。

## 2 结果与讨论

### 2.1 花生红衣原花青素的水溶性

原花青素的水溶性影响其在食品、药品和保健品领域的应用以及人体的吸收效率。原花青素水溶性高,可直接应用于工业化生产;若水溶性低,则需要通过进一步处理后方可应用。花生红衣原花青素与葡萄籽原花青素水溶性的比较见表 1。

表 1 花生红衣原花青素与葡萄籽原花青素水溶性的比较

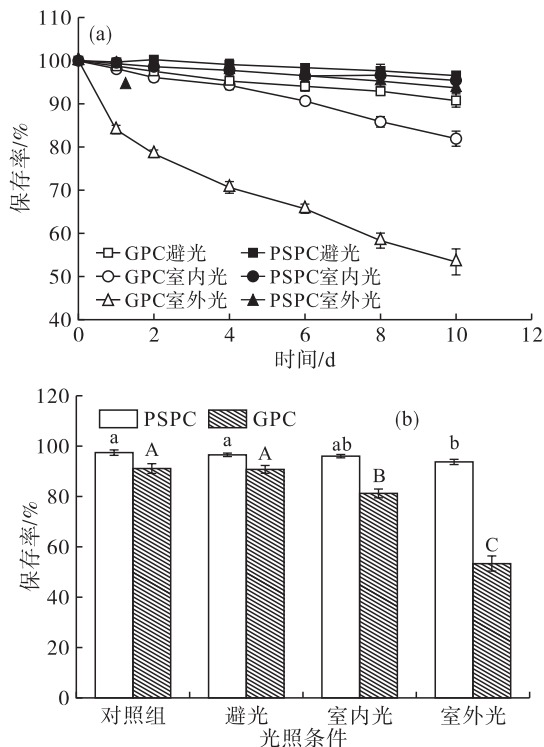
原花青素	溶解度/%
葡萄籽粗提物	66.10 ± 0.44
葡萄籽纯化物	88.30 ± 0.87
花生红衣粗提物	80.55 ± 0.93
花生红衣纯化物	97.05 ± 0.85

由表 1 可知,花生红衣原花青素粗提物的溶解度较低,随着进一步的纯化,溶解度有明显提高,提高了 16.50 个百分点。这可能是因为粗提物中含有

低分子糖类、其他多酚物质,可与水形成氢键,与原花青素产生竞争关系,降低了原花青素的水溶性。此外,花生红衣原花青素的水溶性优于葡萄籽原花青素。本实验室制备的花生红衣原花青素较市售葡萄籽原花青素的溶解度提高8.75个百分点,这是由两者结构不同造成的,花生红衣中主要为A型原花青素,其通过共价双键形成较B型原花青素更加延展的空间结构,可与水分子充分地接触,B型原花青素则通过C—C键进行有序的折叠,阻碍了内部酚羟基与水分子的接触<sup>[15]</sup>。因此,本实验室制备的花生红衣原花青素溶解性好,可应用于食品、饮料的生产,人体也较容易吸收。

## 2.2 光照对原花青素稳定性的影响

抗氧化物质暴露于空气中或受到太阳光直射会不稳定<sup>[16]</sup>,原花青素作为强抗氧化剂也会受光照影响。以葡萄籽原花青素为参照,分别于室外阳光直射、室内自然光和避光条件下研究花生红衣原花青素的稳定性以及与葡萄籽原花青素稳定性的差异,结果见图1。图1(a)为原花青素分别在避光、室内光和室外光条件下,1~10 d其保存率的变化;图1(b)为各样品10 d后测定的原花青素保存率做显著性差异分析得到的结果。



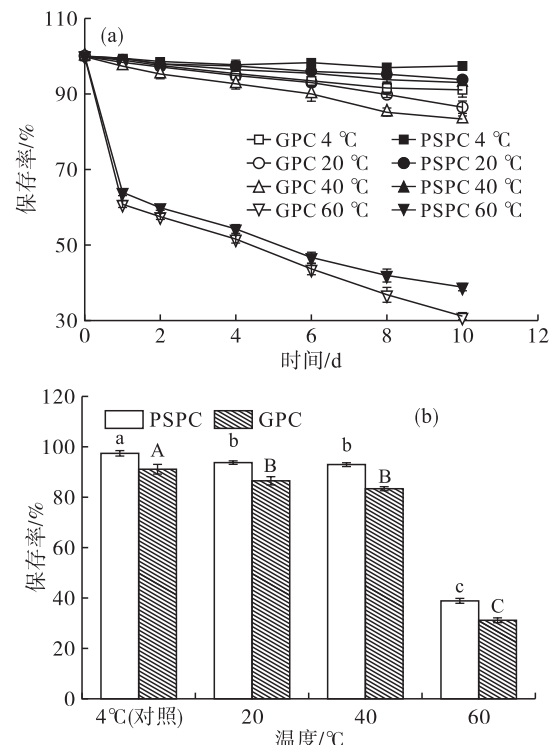
注:对照组为避光、4℃下储存的原花青素溶液;小写字母表示花生红衣原花青素在不同光照条件下数值之间的显著性( $p < 0.05$ ),大写字母表示葡萄籽原花青素在不同光照条件下数值之间的显著性( $p < 0.05$ )。

图1 光照对原花青素稳定性的影响

由图1可知,花生红衣原花青素受光照影响较小,在阳光直射条件下,花生红衣原花青素含量基本稳定,贮存10 d后,保存率仍在90%以上;室内自然光照条件贮存10 d后,保存率达95%;避光保存10 d后,保存率在95%以上。避光和室内光条件下花生红衣原花青素与对照组无显著性差异( $p > 0.05$ ),室内光和室外光间也无显著性差异( $p > 0.05$ ),而葡萄籽原花青素在室内光和室外光条件下,原花青素含量下降均较快,与对照组有显著性差异( $p < 0.05$ )。花生红衣原花青素中C—C键和C—O—C键,比只含有C—C键的葡萄籽原花青素更加稳定。由此可知,花生红衣原花青素较葡萄籽原花青素而言,对光不敏感,基本不受光照影响。

## 2.3 温度对原花青素稳定性的影响

在原花青素提取的过程中,必须避免高温并对提取溶剂进行脱气,因为高温和氧气会对原花青素的结构产生影响,使其含量下降。原花青素溶液的温度越高,稳定性越差,低于25℃条件下原花青素的稳定性较40℃(接近人体体温)高。因此,为了研究温度对花生红衣原花青素的具体影响,本实验分别设置4、20、40、60℃4个温度,以原花青素保存率和颜色变化为衡量指标,系统研究温度与花生红衣原花青素含量的关系,结果见图2。



注:小写字母表示花生红衣原花青素在不同温度时保存率之间的显著性( $p < 0.05$ ),大写字母表示葡萄籽原花青素在不同温度时保存率之间的显著性( $p < 0.05$ )。

图2 温度对原花青素稳定性的影响

图2(a)为原花青素样品分别在不同温度下1~10 d保存率的变化,图2(b)为各样品10 d后测定的原花青素保存率做显著性差异分析得到的结果。

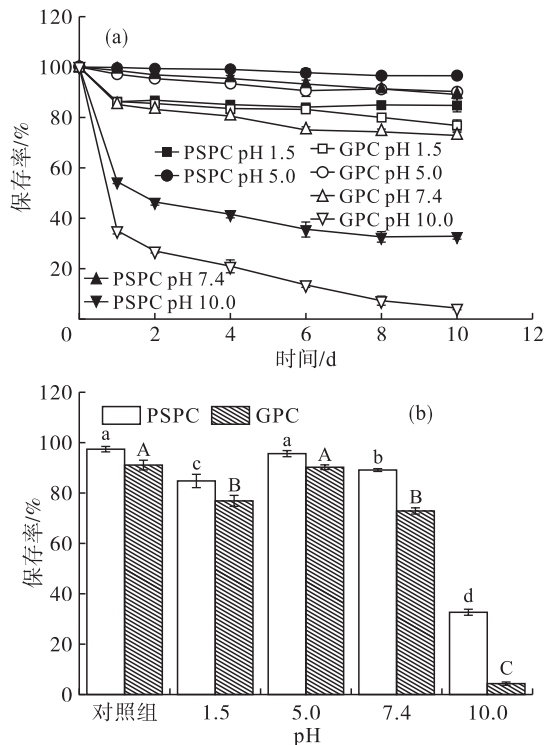
由图2可知,不同温度下花生红衣原花青素和葡萄籽原花青素含量随贮存时间延长均有不同程度的减少。其中,花生红衣原花青素在40℃以下较为稳定,保存率在90%以上,在60℃下保存率下降较快,贮存10 d后保存率下降至38.87%,且溶液颜色由红色变为红褐色。对贮存10 d后原花青素样品的保存率进行显著性差异分析可知,20、40、60℃与对照4℃下原花青素相比均有显著性差异( $p < 0.05$ )。在热稳定性方面,花生红衣原花青素与对照葡萄籽原花青素呈现出相似的趋势,即均对热敏感,但在不同温度条件下前者均较后者稳定。可能原因有二:其一,花生红衣原花青素单体间连接键为A型,包括C—C键和C—O—C键,比只含有C—C键的葡萄籽原花青素更加稳定<sup>[17]</sup>;其二,葡萄籽原花青素构成单体中ECG的稳定性差,ECG结构中存在邻位三酚羟基,较(E)C的邻位二酚羟基更活泼<sup>[18]</sup>。由此可知,原花青素在人体体温条件下会有一定的损失,花生红衣来源的原花青素损失率约为7%,而葡萄籽来源的约损失16%。此外,在提取和纯化过程中,应避免温度过高而造成原花青素的损失,并低温冷藏保存。

#### 2.4 pH对原花青素稳定性的影响

原花青素的稳定性与溶液pH有关,在弱酸性条件下稳定存在,在强酸性和碱性条件下其结构容易发生降解和差向异构化,致含量下降,影响其抗氧化活性。本实验选择pH为1.5、5.0、7.4、10.0共4个条件研究pH对花生红衣原花青素含量的影响及与葡萄籽原花青素稳定性的差异。实验之所以选择pH 1.5和pH 7.4,是因为它们分别是人体胃液和肠液的酸碱环境,这样便于真实地反映原花青素在人体中的摄入吸收情况。图3为pH对原花青素稳定性的影响,其中图3(a)为原花青素样品分别在pH为1.5、5.0、7.4和10.0条件下,1~10 d其保存率的变化,图3(b)为各样品10 d后测定的原花青素保存率做显著性差异分析得到的结果。

由图3(a)可知,花生红衣原花青素在pH为5.0时稳定存在,贮存10 d后保存率仍在95%以上;pH为1.5和7.4时较不稳定,贮存10 d后保存率为80%以上;pH为10.0时稳定性最差,贮存10 d后保存率下降至32.87%。由显著性差异分析可知,pH为5.0时和对照组(pH 7.0)无显著性差异

( $p > 0.05$ ),而其他组均存在显著性差异( $p < 0.05$ )。酸碱性对花生红衣原花青素与葡萄籽原花青素的影响呈现相似的趋势,但在不同pH环境中前者稳定性均较后者高,这是由于A型C—O—C键较B型C—C单键稳定。原花青素在强酸性条件下易发生解聚和差向异构化,弱酸性条件下稳定存在,碱性条件下易发生氧化反应。由此可知,原花青素在摄入人体流经胃液和肠液时,会有一部分损失,尤其是葡萄籽来源的原花青素。另外,原花青素应在弱酸性条件下贮存,在提取和纯化过程中需避免接触到碱性物质。

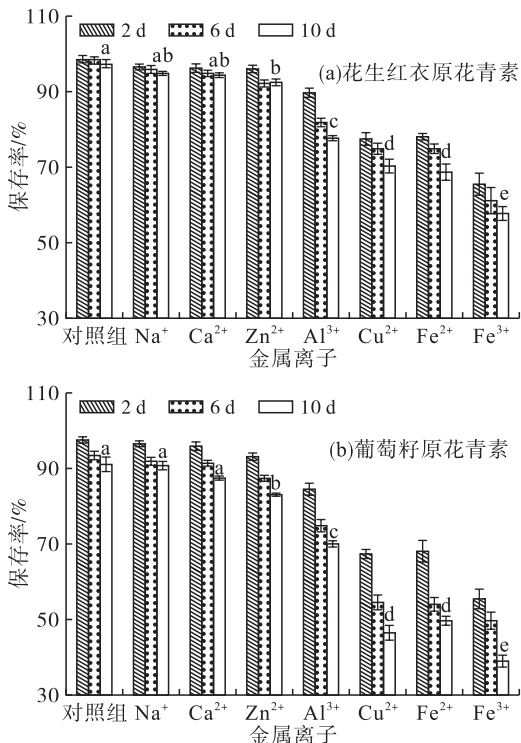


注:小写字母表示花生红衣原花青素在不同pH时保存率之间的显著性( $p < 0.05$ ),大写字母表示葡萄籽原花青素在不同pH时保存率之间的显著性( $p < 0.05$ )。

图3 pH对原花青素稳定性的影响

#### 2.5 金属离子对原花青素稳定性的影响

原花青素对金属离子敏感,在其提取、纯化和贮存过程中受金属离子影响较大,尤其是多价离子。多价金属离子可以与原花青素的邻二酚羟基发生络合反应,形成五元环螯合,多聚原花青素的络合能力较低聚原花青素高得多。因此,本实验选择了几种常见金属离子,以原花青素保存率和颜色变化为评价指标,研究金属离子对原花青素含量的影响。图4为原花青素样品分别在 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{3+}$ 金属离子存在条件下,第2、6、10 d保存率的变化,并以各样品10 d后测定的原花青素保存率做显著性差异分析。



注:对照组为无金属离子组;字母表示不同条件下 10 d 时数据之间的显著性( $p < 0.05$ )。

图 4 金属离子对原花青素稳定性的影响

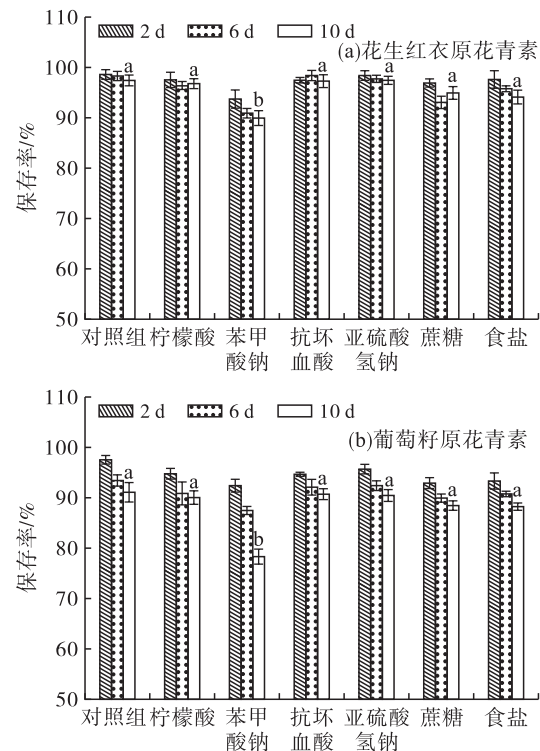
由图 4 可知,Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup> 对花生红衣原花青素溶液无显著性影响 ( $p > 0.05$ ),Zn<sup>2+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 均与对照组有显著性差异 ( $p < 0.05$ ),尤其是加入 Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 后出现絮状沉淀,Cu<sup>2+</sup> 溶液变为红褐色,Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 溶液迅速变为深褐色,原花青素含量下降明显,三者分别下降 29.70%、31.32% 和 42.26%。这是由于原花青素的邻二羟基与 Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 形成了不溶性的络合物。金属离子对葡萄籽原花青素的影响结果与对花生红衣原花青素的影响呈现相似的趋势,但在各金属离子环境中前者稳定性均较后者高。原花青素在提取、纯化和贮存过程中应避免接触 Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 金属离子。

## 2.6 常见食品添加剂对原花青素稳定性的影响

原花青素作为一种新型抗氧化剂,已广泛应用于食品的生产加工中,从而需要与食品添加剂共存。一些食品添加剂对原花青素有影响,尤其是偏碱性添加剂。因此,本实验选择了几种常见食品添加剂,以原花青素保存率为评价指标,未添加任何添加剂的原花青素溶液为对照组,研究食品添加剂对花生红衣原花青素含量的影响,结果见图 5。

由图 5 可知,常见的食品添加剂中柠檬酸、抗坏血酸、亚硫酸氢钠、蔗糖和食盐对花生红衣原花青素保存率的影响与对照组无显著性差异 ( $p > 0.05$ ),

贮存 10 d 后,原花青素保存率仍在 95% 左右;而苯甲酸钠与对照组存在显著性差异 ( $p < 0.05$ ),贮存 10 d 后,保存率为 89.94%,这可能是由于苯甲酸钠属于强碱弱酸盐,其水溶液呈碱性,从而使原花青素含量下降。食品添加剂对葡萄籽原花青素的影响结果与对花生红衣原花青素的影响呈现相似的趋势。因此,常用食品添加剂对花生红衣原花青素和葡萄籽原花青素影响不大,使用时应按照食品添加剂使用标准适量添加<sup>[19]</sup>。



注:字母表示不同条件下 10 d 时数据之间的显著性( $p < 0.05$ )。

图 5 常见食品添加剂对原花青素稳定性的影响

## 3 结论

花生红衣原花青素受光照影响小,对高温敏感,可在弱酸性条件下稳定存在,在碱性条件下不稳定,与 Cu<sup>2+</sup>、Fe<sup>2+</sup> 和 Fe<sup>3+</sup> 发生络合反应而产生絮状沉淀,除苯甲酸钠外可与常用食品添加剂共同存在。与葡萄籽原花青素相比,花生红衣原花青素稳定性好,由于两者的化学组成不同造成,即花生红衣原花青素中的 C—C 与 C—O—C 键较葡萄籽原花青素中的 C—C 稳定。

## 参考文献:

- [1] CONSTANZA K E, WHITE B L, DAVIS J P. Value-added processing of peanut skins: antioxidant capacity, total phenolics, and procyanidin content of spray-dried extracts [J]. J Agric Food Chem, 2012, 60(43): 10776-10783.
- [2] NIE L, SUN J. Relationship between the content of phenolic

- compounds and the taste of astringency and bitterness in apple fruit[J]. *Acta Horti Sin*, 2005, 32(5): 778-782.
- [3] ESQUENAZI D, WIGG M D, MIRANDA M. Antimicrobial and antiviral activities of polyphenolics from *Cocos nucifera* Linn. (Palmae) husk fiber extract[J]. *Res Microbiol*, 2002, 153(10): 647-652.
- [4] PARK J C, ITO H, YOSHIDA T. <sup>1</sup>H-NMR assignment of HIV protease inhibitor, procyanidin B3 isolated from *Rosa rugosa*[J]. *Nat Prod Sci*, 2003, 9(2): 49-51.
- [5] SHAHAT A A, COS P, DE BRUYNE T, et al. Antiviral and antioxidant activity of flavonoids and proanthocyanidins from *Crataegus sinaica* [J]. *Planta Med*, 2002, 68(6): 539-541.
- [6] FAN J, DING X, GU W. Radical-scavenging proanthocyanidins from sea buckthorn seed[J]. *Food Chem*, 2007, 102(1): 168-177.
- [7] JEREZ M, TOURINO S, SINEIRO J, et al. Procyanidins from pine bark: relationships between structure, composition and antiradical activity[J]. *Food Chem*, 2007, 104(2): 518-527.
- [8] MALDONADO P D, RIVERO-CRUZ I, MATA R, et al. Antioxidant activity of a-type proanthocyanidins from *Geranium niveum* (Geraniaceae)[J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(6): 1996-2001.
- [9] SHI J, NAWAZ H, POHORLY J, et al. Extraction of polyphenolics from plant material for functional foods - engineering and technology[J]. *Food Rev Int*, 2005, 21(1): 139-166.
- [10] 李斌, 孟宪军, 智红涛, 等. 葡萄籽中原花青素的稳定性研究[J]. *食品研究与开发*, 2007, 28(10): 71-73.
- [11] 洪新, 唐克, 鞠广龙. 葡萄籽中原花青素稳定性研究[J]. *粮油食品科技*, 2013, 21(4): 61-64.
- [12] 白欢欢, 刘睿杰, 王兴国, 等. 不同纯度花生红衣原花青素的制备工艺研究[J]. *中国油脂*, 2017, 42(7): 74-78.
- [13] LIU Z Q, YANG Q L, ZHANG C S, et al. Optimization of ultrasonic extraction technique of proanthocyanidin from peanut skin[J]. *Adv Mater Res*, 2010, 156-157: 778-784.
- [14] CANO-CHAUCA M, STRINGHETA P C, RAMOS A M, et al. Effect of the carriers on the microstructure of mango powder obtained by spray drying and its functional characterization[J]. *Innov Food Sci Emerg*, 2005, 6(4): 420-428.
- [15] VERSTRAETEN S V, HAMMERSTONE J F, KEEN C L, et al. Antioxidant and membrane effects of procyanidin dimers and trimers isolated from peanut and cocoa[J]. *J Agric Food Chem*, 2005, 53(12): 5041-5048.
- [16] IWASHINA T. The structure and distribution of the flavonoids in plants[J]. *J Plant Res*, 2000, 113(3): 287-299.
- [17] KHANBABAE K, VAN REE T. Classification and definition[J]. *Nat Prod Rep*, 2001, 18(6): 641-649.
- [18] KOSINSKA A, XIE Y, DIERING S, et al. Stability of phenolic compounds isolated from cocoa, green tea and strawberries in hank's balanced salt solution under cell culture conditions[J]. *Polish J Food Nutr Sci*, 2012, 62(2): 91-96.
- [19] 中华人民共和国卫生部中国国家标准化管理委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准: GB 2760-2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

(上接第114页)

- [3] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae[J]. *Biotechnol Adv*, 2007, 25(3): 294-306.
- [4] SINGH J G S. Commercialization potential of microalgae for biofuels production[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2010, 14(9): 2596-2610.
- [5] OSWALD W J. High rate ponds in waste disposal[J]. *Devel Ind Microb*, 1963, 4: 112-119.
- [6] 王翠红, 李日强, 辛晓芸. 钝顶螺旋藻处理氨氮废水的研究[J]. *上海环境科学*, 2002(12): 728-731.
- [7] 杨静. 造纸废水培养富油微藻的研究[J]. *生物质化学工程*, 2012, 46(4): 64-65.
- [8] 张森. 热带海洋富油微藻筛选、培养及采收初步研究[D]. 海口: 海南大学, 2014.
- [9] 朱俊英, 荣峻峰, 宗保宁. 影响微藻规模化培养的因素[J]. *催化学报*, 2013, 20(1): 80-100.
- [10] 王翠, 李环, 王钦琪, 等. pH对沼液培养的小球藻生长及油含量积累的影响[J]. *生物工程学报*, 2010, 26(8): 1074-1079.
- [11] 杨勋. 热带微藻产油性能的评价及油脂积累影响因素研究[D]. 海口: 海南大学, 2013.
- [12] MATA T M, MARTINS A A, CAETANO N S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review[J]. *Renew Sust Energy Rev*, 2010, 14(1): 217-232.
- [13] 王珊珊. 栅藻对重金属离子的富集及其机理的研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2013.