研究论文

脱味紫薯花色苷色素的稳定性

孙文娟[1]，　张　慜[*1]，　毛培成[2]

（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 海通食品集团股份有限公司，浙江 慈溪 315300）

摘要：研究了 pH 值、金属离子及有机酸对脱味紫薯花色苷色素溶液颜色特征及其稳定性的影响。结果表明，pH 3.0 附近时脱味紫薯花色苷色素溶液最稳定；低浓度 Fe^{3+}有较强的增色作用，高浓度且随着时间延长 Fe^{3+}会导致花色苷降解；Fe^{2+}不仅无增色效果，还会导致脱味紫薯花色苷降解褐变；低浓度的 Ca^{2+}、Mn^{2+}和 Cu^{2+}对脱味紫薯花色苷色素有一定的辅色作用。草酸、丙二酸和 L-苹果酸对紫薯花色苷色素有较好的辅色作用，提高了脱味紫薯花色苷色素的热稳定性，其中草酸辅色最显著，其次是丙二酸和 L-苹果酸；柠檬酸和阿魏酸的增色效果不显著，抗坏血酸具有减色作用。

关键词：紫薯；花色苷色素；脱味；稳定性

中图分类号：TS 202.3；TS 215　**文献标志码**：A　**文章编号**：1673—1689(2014)12—1278—06

Studies on Stability of Deodorized Anthocyanins from Purple Sweet Potato

SUN Wenjuan[1]，　*ZHANG Min*[*1]，　*MAO Peicheng*[2]

（1. School of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. Haitong Food Group Company，Cixi 315300，China）

Abstract：The effects of pH-value，metal ions and organic acids on the color characteristics and stability of anthocyanins off-flavor from purple sweet potato were studied in this manuscript. The results showed that the anthocyanins was most stable when pH lower 3.0；Fe^{3+} in lower concentration could increase the color intense most largely. But it could accelerate anthocyanins to degrade and brown in high concentration over extended time.Fe^{2+} led to degradation.Ca^{2+}，Mn^{2+} and Cu^{2+} in low concentration had good copigmentation effects. Oxalic acid，malonic acid，and L-malic acid could enhanced the absorbance values and improved the thermal stability，which showed an increased tendency with organic acids concentration. Among the three organic acids，oxalic acid showed the best copigmentation effects，followed by L-malic acid and malonic acid.However，ferulic acid and citric acid had no significant copigmentation effect. Ascorbic acid was subtractive.

Keywords：purple sweet potato，anthocyanins，deodorize，stability

紫甘薯为旋花科(Convolulacae)番薯属一年生　　草本植物[1]，其块根呈紫色，俗称为“黑红薯”，富含

收稿日期：2014-03-21

基金项目：国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD27803-2)。

* **通信作者**：张　慜(1962—)，男，浙江平湖人，工学博士，教授，博士研究生导师。主要从事农产品加工与贮藏工程研究。

E-mail：min@jiangnan.edu.cn

大量碳水化合物，矿物质（钙、镁、钾和锌），维生素（VB_1、VB_2、VC 和 VE），膳食纤维，还含有抗癌物质硒、黄酮、果胶、绿原酸、糖蛋白质等对人体有益的活性成分[1-5]。另外，还富含具有生理功效的花色苷。据报道，紫甘薯花色苷主要由矢车菊素和芍药素组成，与其他非酰基化天然色素相比，由于具有酰基化结构，紫薯花色苷类色素的稳定性更强。作为一种天然着色剂，除可赋予食品和药品等制品红、橙、黄、紫、蓝、绿等色彩外，还具有抗氧化、抗肿瘤、改善视力、预防糖尿病、治疗心血管疾病等生理活性作用，具有较大的药用潜力[4-10]。总体来说，与人工合成色素相比，天然花色苷色素的稳定性较低，在生产应用及贮藏中易受环境因素（如温度、氧、pH 值、光、辅色剂、酶、金属离子、氧化还原剂及防腐剂等）影响而发生聚合或降解，从而导致制品颜色不可接受，因此研究天然花色苷的稳定性和辅色效果已成为当今热点。据国内外文献报道，光辐射与加热处理对花色苷类色素的稳定性有较大影响，其光和热降解一般遵循一级动力学方程。近些年通过辅色剂的辅色作用来提高花色苷对光、pH 值、温度等因素的稳定性已逐渐得到关注，但研究中采用的辅色剂种类不多，研究内容也不够系统，尤其是对脱味紫薯花色苷类色素的辅色研究报道还不多[7-13]。

目前为止，多采用最大吸收波长下的吸光值来表征颜色强度，用可见光范围最大吸收波长漂移来度量花色苷的颜色变化。但这些并不能完全反映出花色苷的颜色变化。颜色的基本描述参数有色调、光亮度和饱和度，可用色差计测定相应亨特参数 L^*、a^*、b^* 值，并计算色角 $H°$和饱和度 C^*，其中 L^*、$H°$ 和 C^* 可以较好地反映花色苷溶液的颜色变化。

综合考察紫薯花色苷溶液的光谱特征和颜色特征规律[2,8]，主要研究了不同 pH 值对脱味紫薯花色苷类色素色泽及其光谱特性的影响；金属离子与有机酸的种类及其浓度对紫薯花色苷稳定性的影响。旨在了解脱味紫薯花色苷的特性，为其应用提供理论依据和实际指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

脱味紫薯花色苷色素浓缩液：将真空干燥、粉碎后的 60~80 目紫薯粉与质量分数 0.5%盐酸溶液按 1:20（g/mL）混合，搅拌均匀，微波辅助提取（功率 420 W、处理时间 5 min），混合液冷却至室温，加入与混合液体积比 1:1 的体积分数 95%乙醇，再用低频超声波处理（超声频率 20~25 kHz，工作 5 s 间歇 10 s，保护温度 60 ℃）；醇沉 3 h 后，以 4 500 r/min 离心 10 min，对残渣进行二次提取（条件同上），合并上清液并旋蒸（37 ℃）；用 AB-8 大孔吸附树脂对其纯化（40~50 ℃下静态吸附，体积分数 75%乙醇洗脱），最后旋蒸洗脱液得试验所需浓缩液。

所用试剂：盐酸、氢氧化钠、氯化钾、邻苯二甲酸氢钾、磷酸二氢钾、硼砂、磷酸氢二钠、一水合柠檬酸、抗坏血酸、氯化钙、硫酸锰、硫酸亚铁、氯化铁、硫酸铜、丙二酸、阿魏酸、草酸、L-苹果酸等，均为分析纯试剂，购自国药集团化学试剂有限公司；AB-8 大孔吸附树脂，净品级，天津南开大学化工厂制品。

1.2 仪器与设备

MF-2270EG 海尔微波炉，青岛海尔公司制造；FE20 型 pH 计，PL203 型电子天平，梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司制造；德国 IKA 旋转蒸发仪，广州仪科实验室技术有限公司提供；SHB-ⅢA 循环水式多用真空泵，上海豫康科教仪器设备有限公司制造；RJ-LDL-50G 型低速大容量多管离心机，HH-S 型水浴锅，郑州长城科工贸有限公司提供；UV2600 型紫外可见分光光度计，上海天美科学仪器有限公司制造；CR-400 型全自动测色色差计，柯尼卡美能达（中国）投资有限公司提供；DZF-6050 型真空干燥箱，上海精宏实验设备有限公司制造；高速万能粉碎机，上海旗箭粉碎机公司制造；三次元振动筛分过滤机，中国新乡市未来机械设备有限公司制造；以及具活塞层析柱（20 mm×500 mm）等。

1.3 实验方法

1.3.1 不同 pH 值对脱味紫薯花色苷类色素稳定性的影响 配制 pH 值分别为 1.1、2.2、3.0、4.1、5.1、6.0、6.9、8.0、8.9、9.9、10.5 的缓冲液[11]。用缓冲液稀释色素浓缩液至 50 倍体积，室温平衡 1 h 后，以相应缓冲液为空白，分别扫描不同 pH 值色素溶液的可见吸收光谱（390~750 nm），计算颜色密度（CD）、颜色强度（CI）、降解指数（DI）及颜色色调（CT）；并测定 L^*、a^*、b^* 值，计算 $H°$和 C^*。将用 pH 值分别为 2.2、3.0、4.1、5.1 缓冲液稀释的色素溶液于室温避光放置，每隔一段时间测定其吸光度，计算脱味紫薯花色苷的保存率。

1.3.2 金属离子对脱味紫薯花色苷类色素稳定性的影响 用 pH 3.0 柠檬酸–磷酸氢二钠缓冲液稀释浓缩液至 100 倍体积，向其中添加金属离子 Ca^{2+}、Fe^{2+}、Fe^{3+}、Cu^{2+}和 Mn^{2+}，分别使金属离子最终浓度为 1.2 mmol/L 和 2.4 mmol/L，将加入金属离子的色素溶液于室温避光贮藏，以未添加金属离子的色素溶液为对照(CK)，测定吸收光谱变化。

1.3.3 有机酸对脱味紫薯花色苷色素溶液稳定性的影响

1）有机酸种类对脱味紫薯色素溶液吸光度的影响：用 pH3.0 柠檬酸–磷酸氢二钠缓冲液稀释浓缩液至 100 倍体积，分别加入草酸、L–苹果酸、丙二酸、柠檬酸、阿魏酸和抗坏血酸，使有机酸最终浓度为 0.05 mol/L，65 ℃恒温水浴 4 h 后取出，测定 528 nm 处吸光度，以不添加有机酸的色素溶液为对照组。

2)有机酸对脱味紫薯色素热稳定性的影响：用 pH 3.0 的柠檬酸–磷酸氢二钠缓冲液稀释浓缩液至 100 倍体积，分别加入草酸、L–苹果酸和丙二酸，使有机酸最终浓度为 0.05 mol/L，分别置于 75、85、95 ℃恒温水浴中加热，每隔 1 h 测定吸光度 $A_{528\ nm}$，以不添加有机酸的色素溶液为对照组。

1.4 试验指标及测定方法

1.4.1 颜色强度 $CI=A_{\lambda max}-A_{720}$ (1)

矫正浊度对色素溶液吸光度的影响，详见文献[2]。

1.4.2 颜色密度 $CD=A_{420}+A_{520}+A_{620}$ (2)

1.4.3 降解指数 $DI=A_{420}/A_{\lambda max}$ (3)

表征褐变化合物含量变化情况，详见文献[2]。

1.4.4 颜色色调 $CT=A_{420}/A_{530}$ (4)

1.4.5 CIELAB 值测定 用色差计测定色素溶液的 L^*、a^*、b^* 值，计算 $H°$和 C^* 值。

$$H°=\arctan b^*/a^* \quad (5)$$

$$C^*=\sqrt[2]{a^2+b^2} \quad (6)$$

1.4.6 花色苷保存率的测定

$$r=(A_h/A_c)\times 100\% \quad (7)$$

式(7)中，r 为花色苷保存率，A_h 为样液处理后吸光度值，A_c 为样液初始吸光度值。

2 结果与分析

2.1 不同 pH 值对脱味紫薯色素稳定性的影响

见表 1 和图 1，随 pH 升高，色素溶液可见 λ_{max} 出现红移；pH 10.5 时，λ_{max} 为 400 nm，可能是由于形成的共振稳定醌型阴离子导致在紫外光范围有吸收；色素溶液由红向紫蓝甚至绿变化；CI 值先降再升，pH 10.5 时又下降，CD 值先降后升，DI 值先增大再下降随后又增大，CT 值逐渐增大，表明 pH 对色素溶液吸收光谱有较大影响。L^* 值随 pH 升高呈先降再升，后出现不规则变化趋势。a^*、b^* 值的变化与溶液颜色变化趋势一致。色角 $H°$由正值变为负值，酸性时花色苷较稳定，有明亮红色，$H°$变化较小；碱性时花色苷不稳定，$H°$变化较大。C^* 值也随 pH 升高有相应变化，这与色素溶液的颜色种类及其深浅相符。这些变化是由于花色苷在不同 pH 环境中结构发生转变，酸性环境下紫薯花色苷主要以红色吡喃型阳离子结构存在，溶液 CI 和 CD 较高；中性环境主要存在形式是无色查尔酮，溶液 CI 减弱；碱性条件下主要以蓝绿色醌式结构存在，色素溶液 CD 会增加。

表 1 不同 pH 值对 PSPAs 吸收光谱和颜色特征的影响

Table 1 Effect of pH values on UV–Vis spectra and colour characterization of PSPAs solution

pH	L^*	a^*	b^*	C^*	$H°$	λ_{max}	Color	CI	CD	DI	CT
1.0	44.41±1.00	49.63±0.51	19.54±0.63	53.34±0.29	0.38±0.01	523	亮红	1.49	1.74	0.17	0.15
2.0	40.65±1.23	47.89±0.89	11.85±0.34	49.33±0.79	0.24±0.05	526	深红	1.36	1.45	0.24	0.17
3.0	37.72±1.14	45.60±0.96	7.87±0.23	46.28±0.91	0.17±0.01	529	桃红	1.02	1.28	0.27	0.22
4.1	33.76±0.37	42.07±0.28	−3.35±0.25	42.20±0.28	−0.08±0.01	532	浅红	0.64	0.91	0.30	0.30
4.5	48.46±1.67	29.98±2.13	−11.08±0.55	31.97±2.18	−0.35±0.01	540	紫红	0.55	0.63	0.42	0.43
5.1	45.38±1.49	34.72±0.36	−13.95±0.11	37.42±0.33	−0.38±0.004	541	浅紫红	0.37	0.61	0.45	0.46
6.0	51.73±0.56	27.30±0.48	−14.84±0.30	31.08±0.57	−0.49±0.01	546	紫色	0.27	0.48	0.47	0.50
6.9	28.57±2.09	40.47±0.04	−34.80±0.65	53.38±0.43	−0.71±0.10	566	浅紫	0.48	0.93	0.42	0.52
8.0	18.73±0.82	37.24±0.98	−32.78±1.29	49.61±1.56	−0.72±0.10	589	紫蓝	0.79	1.35	0.34	0.53
8.9	20.16±1.13	32.55±0.40	−37.10±1.62	49.36±1.41	−0.85±0.02	602	蓝色	1.60	2.27	0.29	0.80
9.9	20.52±0.52	23.84±0.13	−31.25±0.66	39.31±0.59	−0.92±0.01	604	蓝绿	1.27	2.29	0.56	1.58
10.5	28.08±1.07	−3.40±0.54	−6.98±0.06	7.77±0.25	−1.12±0.06	400	绿色	0.33	1.62	2.74	4.71

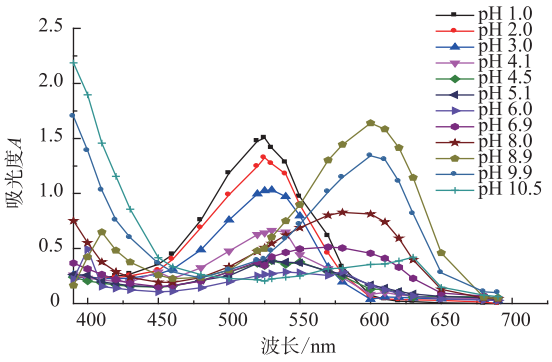


图 1　紫薯花色苷色素溶液在不同 pH 值下的吸收光谱

Fig. 1　UV –Vis spectra of anthocyanins solution from purple sweet potato at different pH

由图 2 可知，室温避光条件下，紫薯花色苷在 pH3.0 缓冲液中降解速率最小，10 d 后保存率为 92.2%，在 pH 6.0 的缓冲液中降解速度最快，10 d 后花色苷的保存率为 84.3%。pH 值 2.2、4.1、5.1 的缓冲液中，10 d 后的保存率分别为 90.2%、91%、87.8%。可见 pH 值影响紫薯花色苷的稳定性，在 pH 3.0 附近时脱味紫薯花色苷色素溶液最稳定。因此，在加工及使用过程中应尽量避免与此 pH 范围外的溶剂接触，以防对紫薯花色苷产生破坏作用。

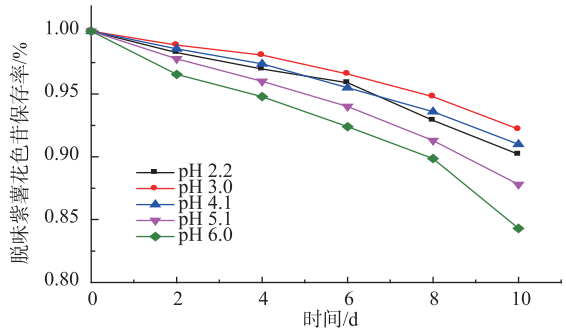


图 2　不同 pH 值对脱味紫薯花色苷保存率的影响

Fig. 2　Effect of pH values on the retention rate of anthocyanins solution from purple sweet potato

2.2　金属离子对脱味紫薯花色苷稳定性的影响

2.2.1　金属离子种类对色素溶液特征参数的影响

由表 2 可知，pH 3.0 的色素溶液缓冲体系中，添加 Fe^{2+}后 CI 值有所下降；添加 Cu^{2+}后 CI 值增加，但不显著；而添加 Ca^{2+}、Fe^{3+}和 Mn^{2+}后 CI 值增加，其中 Fe^{3+}的增色作用最显著；添加 Fe^{3+}、Ca^{2+}、Mn^{2+}、Cu^{2+}和 Fe^{2+}后色素溶液的 CD 和 DI 值均有增加，Mn^{2+}对溶液降解指数影响不显著。与对照组相比，添加金属离子后色素溶液的 λ_{max} 出现红移，$\Delta\lambda$=1~2 nm，λ_{max} 值一般在 529 左右。

表 2　金属离子对色素浓缩液特征参数的影响情况（体系 pH 值 3.0，金属离子浓度 1.2 mmol/L）

Table 2　Effect of ions on the color characteristic parameters (system including 1.2 mmol/L ions in pH 3.0)

离子种类	特征参数指标			
	CI	CD	DI	λ_{max}
CK	0.437 5±0.002 1	0.486 1±0.000 1	0.141 3±0.002 1	528±1
Ca^{2+}	0.540 1±0.004 2	0.604 4±0.001 2	0.154 0±0.003 2	529±1
Fe^{2+}	0.426 3±0.003 4	0.543 2±0.003 1	0.295 1±0.001 5	529±1
Fe^{3+}	0.556 4±0.006 2	0.779 7±0.004 5	0.386 4±0.012 4	530±1
Cu^{2+}	0.455 3±0.003 1	0.563 8±0.004 3	0.156 0±0.001 8	529±1
Mn^{2+}	0.535 6±0.004 2	0.593 3±0.007 2	0.146 6±0.010 1	529±1

2.2.2　金属离子浓度对脱味紫薯色素特征参数的影响

由图 3 可知，在色素溶液中添加 Cu^{2+}后 CI 值呈升高趋势，并随着离子浓度增大 CI 值增高；添加 Fe^{3+}、Mn^{2+}和 Ca^{2+}后色素溶液 CI 值呈先升高后降低的趋势，当金属离子浓度为 1.2 mmol/L 时 CI 值最高，溶液颜色较深，其中 Fe^{3+}的增色效果最好，可能原因是 Fe^{3+}、Mn^{2+}和 Ca^{2+}与花色苷发生螯合作用，起到辅色效果；但随着 Fe^{3+}、Mn^{2+}和 Ca^{2+}浓度增加，色素溶液的 CI 值减小，说明高浓度金属离子对花色苷产生破坏作用；添加 Fe^{2+}后色素溶液 CI 值降低，且随着浓度升高 CI 值减小。

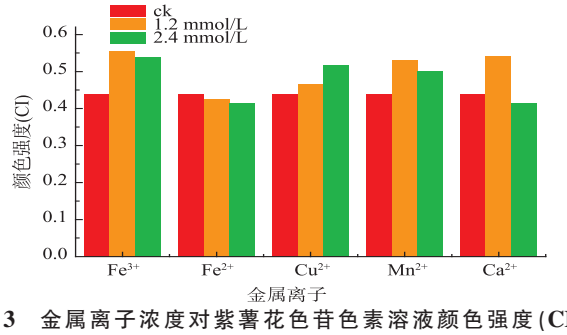


图 3　金属离子浓度对紫薯花色苷色素溶液颜色强度（CI）的影响

Fig. 3　Effect of ionic concentration on the color intense of anthocyanins solution from purple sweet potato

由图 4 可知,添加 Fe^{2+}和 Fe^{3+}后色素溶液 DI 值显著高于对照组,且随着金属离子浓度升高 DI 值呈增大趋势,尤其是 Fe^{3+},它会加速紫薯花色苷降解;添加 Mn^{2+}、Ca^{2+}和 Cu^{2+}对色素溶液 DI 值影响不显著。

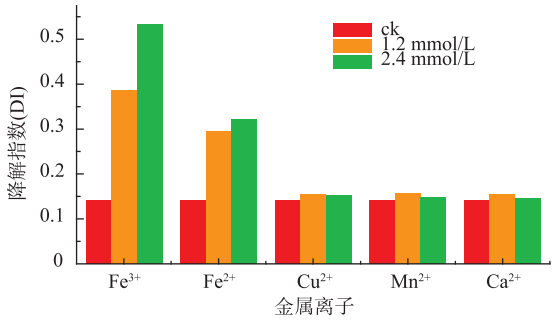


图 4　金属离子浓度对脱味紫薯色素溶液降解指数 (DI)的影响

Fig. 4　Effect of ionic concentration on the degradation index of anthocyanins solution from purple sweet potato

由图 5 可知, 随着 Ca^{2+}浓度的增大色素溶液的 CD 值呈先升后降的趋势,当 Ca^{2+}浓度为 1.2 mmol/L 时,CD 值最高;添加 Mn^{2+}、Cu^{2+}、Fe^{2+}和 Fe^{3+}后色素溶液的 CD 值均增加, 且随着离子浓度升高呈增大趋势,可能是由于花色苷或其他酚类化合物发生氧化而褐变。由此可见,金属离子浓度对紫薯花色苷色素溶液的 CD 值有较大影响。

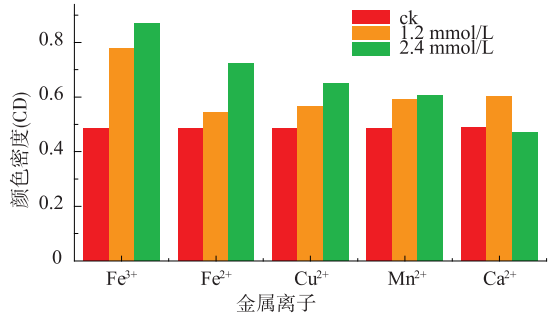


图 5　金属离子浓度对紫薯花色苷色素溶液颜色密度(CD)的影响

Fig. 5　Effect of ionic concentration on the color density of anthocyanins solution from purple sweet potato

2.3　有机酸对脱味紫薯花色苷色素稳定性的影响

2.3.1　*有机酸种类对辅色效果的影响*　由图 6 可知,丙二酸、L-苹果酸、柠檬酸、阿魏酸和草酸使紫薯花色苷的吸光度增加, 草酸的增色效果最显著,丙二酸和 L-苹果酸次之,柠檬酸和阿魏酸的增色效果不显著; 抗坏血酸降低了色素溶液的吸光度,具有减色作用。因此选择草酸、丙二酸和 L-苹果酸作为后续实验研究的辅色剂。

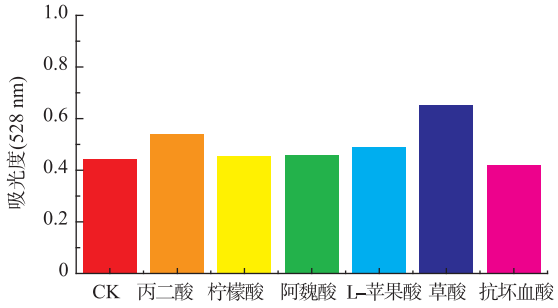
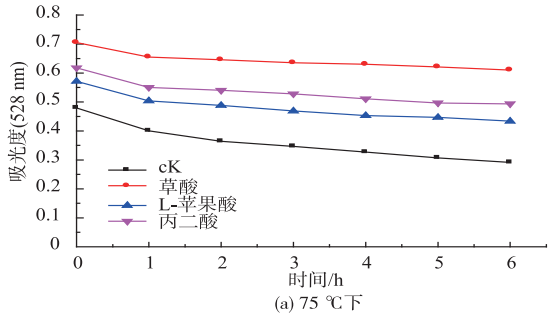


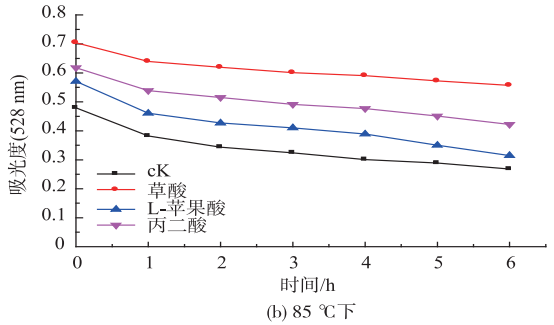
图 6　有机酸种类对紫薯花色苷色素吸光度的影响

Fig. 6　Effect of kinds of organic acids on absorbance A_{528} values of anthocyanins from purple sweet potato

2.3.2　*有机酸对脱味紫薯色素热稳定性的影响*　由图 7 可知,辅色前后色素溶液的吸光度值随加热时间的延长呈下降趋势。对照组在 75、85 ℃和 95 ℃加热 6 h 后, 吸光度分别为 0.320 1、0.267 9 和 0.225 6, 与加热前相比, 吸光度分别下降 33.20%、44.10%和 52.92%。用草酸、L-苹果酸和丙二酸辅色后在 75 ℃和 85 ℃加热 6 h 后, 色素溶液的吸光度分别为 0.610 1、0.433 7、0.493 7 和 0.556 9、0.314 6、0.422 2。95 ℃加热 6 h 后, 吸光度分别下降为 0.513 7、0.290 2 和 0.362 5,与加热前相比,色素溶液的吸光度分别下降 27.07%、49.15%和 27.58%,说明草酸的辅色效果最佳。将添加有机酸的色素溶液与对照组相比可知,有机酸对紫薯花色苷色素具有辅色作用,辅色有助于提高色素溶液的热稳定性。



(a) 75 ℃下



(b) 85 ℃下

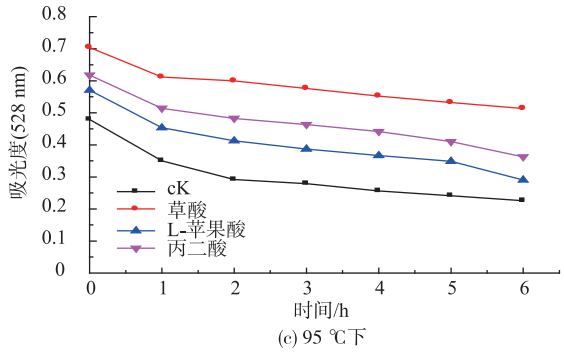


图 7　有机酸对紫薯花色苷热稳定性的影响

Fig. 7　Effect of organic acids on the thermal stability of anthocyanins from purple sweet potato

3 结　语

本研究结果显示，脱味紫薯花色苷色素在不同pH环境中呈现不同色泽，颜色密度、颜色强度及降解指数等特征参数均有所不同，λ_{max} 向红移方向移动，脱味紫薯花色苷色素在环境 pH 3.0 附近时稳定性最好。添加适量的适宜金属离子和有机酸可以对紫薯色素起到辅色作用，提高紫薯花色苷色素的稳定性。其中 Fe^{3+}具有最强的辅色效果；草酸、丙二酸和 L-苹果酸对紫薯花色苷具有辅色作用，其中草酸增色效果最显著，其次是丙二酸和 L-苹果酸；阿魏酸和柠檬酸的辅色作用不显著，抗坏血酸具有减色作用。以上研究结果旨在为实际应用提供参考。

目前，关于影响天然花色苷稳定性因素的研究报道虽较多，但都不系统。而且有关提高花色苷稳定性技术的研究还很不足，以后有待系统研究如氨基酸、植酸等其他辅色剂及微胶囊技术对天然花色苷稳定性的提高，使天然花色苷色素得到更好的应用，进而增加农副产品的附加值。

参考文献：

[1] 李杰. 紫甘薯花色素苷的提取、组分分析及热稳定性研究[D]. 武汉：华中农业大学，2012.

[2] 韩永斌. 紫甘薯花色苷提取工艺与组分分析及稳定性和抗氧化性研究[D]. 南京：南京农业大学，2007.

[3] 隋华嵩，朱骞. 紫红豇豆色素理化性质及稳定性研究[J]. 食品与生物技术学报，2013，32(5)：38-43.
SUI Huasong，ZHU Qian. Studies on physicochemical properties and stability of pigments from purple-red Vigna unguiculatav (Linn.)Walp.[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**，2013，32(5)：38-43.(in Chinese)

[4] 李金林. 紫甘薯花色苷提取、膜分离及加工稳定性研究[D]. 南昌：南昌大学，2007.

[5] 姚钰荣. 紫甘薯花青素的提取纯化、稳定性及抗氧化活性研究[D]. 保定：河北农业大学，2009.

[6] Giusti M，RonaldE M. Acylated anthoeyanins from edible sources and their application food systems[J]. **Biochem Eng**，2003，14：217-255.

[7] Malien-Aubert C，Dangles O，Amiot M J. Color stability of commercial anthocyanin-based extracts in relation to the phenolic composition. Protective effects by intra and intermolecular copigmentation [J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**，2001，49：170-176.

[8] 郭松年. 石榴汁花色苷稳定性、抗氧化性及其组分鉴定[D]. 杨陵：西北农林科技大学，2008.

[9] 尹晴红，刘邮洲，谢一芝，等. 紫甘薯花色甙的稳定性分析[J]. 江苏农业学报，2004，20(2)：111-115.
YIN Qinghong，LIU Youzhou，XIE Yizhi，et al. The stability of anthocyanin from purple sweet potato [J]. **Jiangsu Journal of Agricultural Sciences**，2004，20(2)：111-115.(in Chinese)

[10] 方忠祥，倪元颖，李洪民. 紫肉甘薯中花青素在不同环境条件下稳定性的研究[J]. 食品与发酵工业，2002，28(10)：31-34.
FANG Zhongxiang，NI Yuanying，LI Hongmin. Study on stability of anthocyanins from purple sweet potato under different environmental conditions[J]. **Food and Fermentation Industries**，2002，28(10)：31-34.(in Chinese)

[11] Kjell Torskangerpoll，ΦyindM Andersen. Colour stability of anthocyanins in aqueous solutions at various pH values [J]. **Food Chem**，2005，89：427-440.

[12] Bolivar A Cevallos-Casals，Luis Cisneros-Zevallos. Stability of anthocyanin-based aqueous extracts of Andean Purple corn and red-freshed sweet potato compared to synthetic and natural colorants[J]. **Food Chem**，2004，86：69-77.

[13] LI Jie，LI xiaoding. Identification and thermal stability of purple-fleshed sweet potato anthocyanins in aqueous solutions with various pH values and fruit juices[J]. **Food Chem**，2013，136：1429-1434.