

饮料体系中玫瑰茄花青素的稳定性

张敏¹, 尹力¹, 陈岩松¹, 章海风^{1,2}, 李春梅^{1,2}, 王芸^{1,2*}

(1. 扬州大学旅游烹饪学院, 江苏扬州 225127) (2. 中餐非遗技艺传承文化和旅游部重点实验室, 江苏扬州 225127)

摘要: 玫瑰茄花青素 (Roselle Anthocyanins, RA) 是一种天然功能性着色剂。为了研究 RA 在酸性饮料体系中的稳定性, 该文通过 pH 示差法评估了 pH、温度、金属离子、氨基酸、多酚和糖等常见物化因素对 RA 含量的影响。结果表明: RA 仅在 pH 值 ≤ 3 时呈现鲜艳的红色; RA 的热降解规律符合一级动力学, 半衰期在 40、60、80、100 $^{\circ}\text{C}$ 下分别为 5.89、2.28、1.52、0.97 h; 金属离子 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 Ca^{2+} 对 RA 稳定性无显著影响, Al^{3+} 可使 RA 稳定性提高 10.59%, 而 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 则破坏 RA 的稳定性; 4 种多酚改善 RA 稳定性的能力为槲皮素 (14.11%) > 芸香叶苷 (10.48%) > 没食子酸 (4.84%) $\approx$ 阿魏酸 (1.21%); 7 种氨基酸中苏氨酸、甘氨酸和酪氨酸对 RA 的稳定效果最好, 分别提高了 15.99%、11.92% 和 11.89%; 蔗糖、葡萄糖、果糖和木糖醇对 RA 稳定性无显著影响, 而维生素 C 会引起 RA 的降解, 质量浓度为 2.0 mg/mL 时可使 RA 稳定性降低 23.74%。该研究可为 RA 作为功能性着色剂在酸性饮料的应用提供理论基础。

关键词: 玫瑰茄; 花青素; 稳定性; 酸性饮料体系

文章编号: 1673-9078(2025)12-131-137

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1460

Stability of Roselle Anthocyanins in Beverages

ZHANG Min¹, YIN Li¹, CHEN Yansong¹, ZHANG Haifeng^{1,2}, LI Chunmei^{1,2}, WANG Yun^{1,2*}

(1. College of Tourism and Culinary Science, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China)

(2. Key Laboratory of Chinese Cuisine Intangible Cultural Heritage Technology Inheritance, Ministry of Culture and Tourism, Yangzhou 225127, China)

Abstract: Roselle anthocyanins (RAs) are natural functional colorants. To study the stability of RAs in acidic beverages, the common physiochemical factors (pH, temperature, metal ions, amino acids, sugars, and polyphenols) influencing RA levels were evaluated using the pH differential method. The results showed that RA appeared bright red only at pH ≤ 3 . The thermal degradation pattern of RA followed first-order kinetics, with half-lives of 5.89, 2.28, 1.52, and 0.97 h at 40, 60, 80, and 100 $^{\circ}\text{C}$, respectively. Metal ions Mg^{2+} , Na^{+} , K^{+} , and Ca^{2+} did not significantly influence the stability of RA, while Al^{3+} enhanced RA stability by 10.59%, and Cu^{2+} , Fe^{3+} , and Fe^{2+} reduced the stability of RA. The abilities of the four polyphenols to stabilize RA followed the order: quercetin (14.11%) > rutin (10.48%) > gallic acid (4.84%) $\approx$ ferulic acid (1.21%). Among the seven amino acids, threonine, glycine, and tyrosine had the most significant stabilizing effect on RA, increasing by 15.99%, 11.92%, and 11.89%, respectively. Sucrose, glucose, fructose, and xylitol had no significant effect on RA stability, whereas vitamin C induced the degradation of RA, reducing RA stability by 23.74% at a mass concentration of 2.0 mg/mL. This study provides a theoretical basis for the application of RA as a functional colorant in acidic beverages.

Key words: roselle; anthocyanins; stability; acidic beverages

引文格式:

张敏, 尹力, 陈岩松, 等. 饮料体系中玫瑰茄花青素的稳定性[J]. 现代食品科技, 2025, 41(12): 131-137.

ZHANG Min, YIN Li, CHEN Yansong, et al. Stability of roselle anthocyanins in beverages [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 131-137.

收稿日期: 2024-09-29; 修回日期: 2024-11-17; 接受日期: 2024-11-22

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (32401974); 扬州市绿扬金凤人才项目 (137013475)

作者简介: 张敏 (2004-), 女, 本科, 研究方向: 食品资源与综合利用, E-mail: 222402522@stu.yzu.edu.cn

通讯作者: 王芸 (1993-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品资源与综合利用, E-mail: wysx931221@163.com

玫瑰茄 (*Hibiscus sabdariffa* L.)，又称为洛神花、山茄，是锦葵科中的一年生草本植物^[1]。玫瑰茄富含花青素，我国《食品安全国家标准食品添加剂使用标准》(GB 2760-2014) 已将玫瑰茄花青素 (Roselle Anthocyanins, RA) 列为天然食用色素^[2]。花青素属黄酮类化合物，不仅能赋予食物丰富的颜色，还具有抗氧化、抗炎、降血糖和改善肠道菌群等生理活性^[3]。然而，花青素稳定性较差，大多数的结构和颜色仅在 pH 值 ≤ 3 时较稳定^[4]，因此研究花青素稳定性对其在酸性食品中的应用具有重要意义。目前，基于有机酸和花青素构建的酸性饮料体系，因成分简单且干扰因素少，而被广泛用于花青素稳定性的研究^[5]。此外，热处理是食品加工中的关键环节，且加热过程中花青素的降解不仅受温度的影响，还受产品内在特性（如共存物质等）的影响^[6]。因此，有必要在热处理下考察其它因素对花青素稳定性的影响。

维生素 C (Vc) 和糖是酸性饮料中常见的添加成分，但两者对花青素稳定性的影响仍存在争议。部分研究表明 Vc 和糖会对花青素的稳定性产生不利结果^[7]，而另一部分研究则认为 Vc 和糖对花青素稳定无影响或具有积极影响^[8,9]。此外，花青素与体系中存在的多酚、氨基酸和金属离子等发生共色素沉着作用是影响其稳定性的重要因素。通常情况下，共色素沉着作用是提高花青素稳定性的有效策略。例如，多酚中的黄酮醇、羟基苯甲酸和羟基肉桂酸具有 π 共轭结构，可通过非共价的 π - π 堆积与花青素结合形成非共价复合物，以增强花青素的颜色强度^[10]；氨基酸（如苯丙氨酸、酪氨酸和精氨酸等）可与花青素通过氢键、范德华力和疏水相互作用等非共价作用力形成复合物提高花青素稳定性^[10,11]；而金属离子（如 Ca^{2+} 、 Al^{3+} 和 Cu^{2+} 等）通过配位键与花青素发生络合作用来影响花青素稳定性^[12]。

但目前关于上述物质对 RA 稳定性的研究主要集中于金属离子，且因研究体系和评价方法的不同导致结果存在很大差异^[9,13]。因此，本研究通过构建酸性饮料体系，采用 pH 示差法评估热处理下金属离子、氨基酸、多酚、Vc 和糖等物质对 RA 稳定性的影响，以期开发富含 RA 的酸性饮料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

RA 提取物，陕西百川生物科技有限公司；没食子酸、槲皮素、芸香叶苷，上海麦克林生化科技有限公

司；氢氧化钠、无水柠檬酸、氯化钠、氯化镁、氯化铝、氯化钾、硫酸铜、硫酸亚铁、氯化铁、氯化钙、维生素 C (Vitamin C, Vc)、苯丙氨酸、亮氨酸、苏氨酸、精氨酸、甘氨酸、组氨酸、酪氨酸、阿魏酸、果糖、葡萄糖等（均为分析纯），国药集团化学试剂有限公司；木糖醇，浙江华康药业股份有限公司；蔗糖，上海谷欣食品有限公司。

1.2 设备与仪器

FA2204N 电子分析天平，上海启前电子科技有限公司；DK-8D 三孔电热恒温水槽，上海精宏实验设备有限公司；EnSight 多功能酶标仪，美国 PerkinElmer 公司；PHS-3C 型 pH 计，上海仪电科学仪器股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 花青素含量测定

采用 pH 示差法测定花青素的含量，并参照李建伟^[14]的方法配制 pH 值 1 和 pH 值 4.5 缓冲液。向 RA 溶液 (1 mg/mL) 中分别加入 pH 值 1 和 pH 值 4.5 缓冲液混合，使其与缓冲液体积比为 1:9。混合液在室温静置反应 50 min 后，在 523 nm 和 700 nm 进行样品吸光度的测定。

根据 Fuleki 等^[15]公式 (1) 计算花青素含量：

$$C = \frac{A \times MW \times DF \times 10^3}{\varepsilon \times l} \quad (1)$$

式中：

C——花青素含量，mg/L；

A——吸光度之差，即 $A = (A_{523\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH}1.0} - (A_{523\text{nm}} - A_{700\text{nm}})_{\text{pH}4.5}$ ；

MW——矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔质量，449.2 g/mol；

DF——稀释倍数，10；

ε ——矢车菊素-3-葡萄糖苷的摩尔吸光系数，26 900 L/(mol·cm)。

1.3.2 pH值对RA稳定性的影响

配制 pH 值 1~14 的柠檬酸 (0.2 mol/L)- Na_2HCO_3 溶液 (0.1 mol/L) 缓冲液，其中 pH 值 1 和 pH 值 9~14 的缓冲液可通过加入少量稀 HCl 和 NaOH 溶液进行调节。将不同 pH 值的 RA 溶液（质量浓度为 1 mg/mL）在室温放置 1 h 后进行拍照，之后通过酶标仪在 400~700 nm 波长范围内扫描紫外吸收光谱^[16]。

1.3.3 温度对酸性饮料体系中RA稳定性的影响

酸性饮料体系用 pH 值 3 的柠檬酸- Na_2HCO_3 溶液缓冲液构建。配制质量浓度为 2 mg/mL 的 RA 溶液，装入 20 mL 的透明玻璃瓶中，分别置于 40、60、80 和 100 °C 的水浴锅中避光加热 30、60、90 和 120 min。

加热完成后,取出立即置于冰水中冷却。以未处理的 RA 溶液作为对照,加热前后 RA 溶液中花青素的含量测定方法同 1.3.1。此外,花青素的热降解通常遵循一级动力学,参照 Huang 等^[17]方法利用公式(2)和(3)计算 RA 的热降解动力学:

$$\ln \frac{\rho_t}{\rho_0} = -kT \quad (2)$$

式中:

ρ_t ——加热处理后的 RA 含量;

ρ_0 ——加热处理前的 RA 含量;

k ——热降解速率常数, h^{-1} ;

T ——加热时间, h。

$$T_{1/2} = -\ln 0.5 \times k^{-1} \quad (3)$$

式中:

$T_{1/2}$ ——降解半衰期, h。

1.3.4 金属离子对酸性饮料体系中 RA 稳定性的影响

用 pH 值 3 缓冲液分别配制浓度为 0.2 mol/L 的 NaCl、 MgCl_2 、 CaCl_2 、KCl、 AlCl_3 、 CuSO_4 、 FeCl_3 和 FeSO_4 溶液,并与质量浓度为 2 mg/mL 的 RA 溶液等体积混合,通过酶标仪在 400~700 nm 范围内扫描混合液的紫外吸收光谱。将混合液置于 80 °C 的水浴锅中避光加热 1 h 后,取出立即置于冰水中冷却。以未处理的 RA 溶液作为对照,加热前后 RA 溶液中花青素的含量测定方法同 1.3.1。

1.3.5 Vc 对酸性饮料体系中 RA 稳定性的影响

用 pH 值 3 缓冲液依次配制质量浓度为 0.8、1.6、2.4、3.2 和 4.0 mg/mL 的 Vc 溶液,并分别与质量浓度为 2 mg/mL 的 RA 溶液等体积混合。后续操作同 1.3.4。

1.3.6 氨基酸对酸性饮料体系中 RA 稳定性的影响

用 pH 值 3 缓冲液依次配制质量浓度为 2 mg/mL 的苯丙氨酸、苏氨酸、甘氨酸、精氨酸、组氨酸、酪氨酸和亮氨酸溶液,并分别与质量浓度为 2 mg/mL 的 RA 溶液等体积混合。后续操作同 1.3.4。

1.3.7 多酚对酸性饮料体系中 RA 稳定性的影响

用 pH 值 3 缓冲液依次配制质量浓度为 0.2 mg/mL 的槲皮素、没食子酸、芸香叶苷和阿魏酸溶液,并分别与质量浓度为 2 mg/mL 的 RA 溶液等体积混合。后续操作同 1.3.4。

1.3.8 糖类对酸性饮料体系中 RA 稳定性的影响

用 pH 值 3 缓冲液依次配制质量浓度为 50 mg/mL 的蔗糖、葡萄糖、果糖和木糖醇溶液,并分别与质量浓度为 2 mg/mL 的 RA 溶液等体积混合。后续操作同 1.3.4。

1.4 数据处理

所有实验均重复三次,结果采用平均值 $\pm$ 标准差表示。使用 SPSS Statistics 26 和 Origin 2021 进行单因素方差分析、Duncan 多重比较,并绘制实验数据图表。当 P 值小于 0.05 时,认为组间差异显著。

2 结果与分析

2.1 pH 值对 RA 稳定性的影响

如图 1a、1b 所示,RA 具有 pH 敏感性,其颜色和特征吸收峰均表现出随 pH 值的变化而发生改变。在 pH 值为 1~3 时 RA 溶液呈现亮红色,最大吸收波长(λ_{max})为 523 nm,但 λ_{max} 处的吸光度值随 pH 值升高而降低(1.79→1.53→1.03)。这是由于在高酸条件下花青素分子主要以黄烺盐阳离子形式存在,升高体系 pH 值会降低其含量,进而影响 λ_{max} 处的吸光度值^[18]。在 pH 值为 4~6 时 RA 溶液颜色由玫红色逐渐变为紫色, λ_{max} 逐渐右移(529 nm→536 nm→547 nm),且 λ_{max} 处的吸光度值发生骤降,说明花青素分子结构逐渐向假碱形式转变^[19]。当 pH 值为 7~10 时,颜色从浅蓝色变为深蓝色, λ_{max} 由 570 nm 右移至 600 nm,且 λ_{max} 处的吸光度值先升高后降低。这是因为在此 pH 值范围内花青素分子主要以蓝色的醌碱基结构存在。在 pH 值为 11~14 时,随着 pH 值的不断上升,其颜色从黄褐色变为黄色,且 λ_{max} 消失。这是由于花青素分子失去原本 C 环 O 上的阳离子而转变为查尔酮结构^[18]。因此,RA 适合应用于 pH 值 ≤ 3 的酸性食品体系。

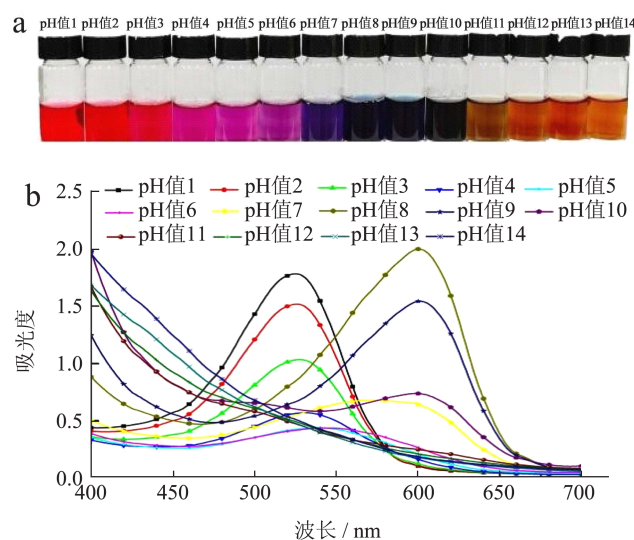


图 1 RA 在不同 pH 值下的颜色 (a) 和 UV-vis 光谱 (b)

Fig.1 Color (a) and UV-vis spectrum (b) of RA at different pH values

2.2 温度对酸性饮料体系中RA稳定性的影响

食品在加工过程中的热处理环节是造成花青素大量损失的主要原因之一。如图 2a 所示，与对照组相比，在相同加热时间下，随着加热温度的升高 RA 含量也随之显著降低 ($P<0.05$)。当加热时间为 60 min 时，RA 含量在不同加热温度下开始骤降 ($P<0.05$)，分别降低了 8.51% (40 °C)、27.80% (60 °C)、39.65% (80 °C) 和 51.72% (100 °C)。此外，与对照组相比，在相同热处理温度下，RA 含量仅在加热温度超过 60 °C 时表现出随加热时间的增加而显著减少 ($P<0.05$)，其中在 80 °C 下分别减少了 22.84% (30 min)、39.65% (60 min)、42.89% (90 min) 和 57.33% (120 min)。高温引起 RA 发生降解可能通过以下两种途径^[6]，即花青素先开环得到查耳酮进而转化为香豆素糖苷衍生物，或是水解反应去糖基化引起的花青素降解。由于花青素的降解过程是吸热的，且受温度影响很大，因此有必要研究 RA 在不同温度下的热降解动力学。

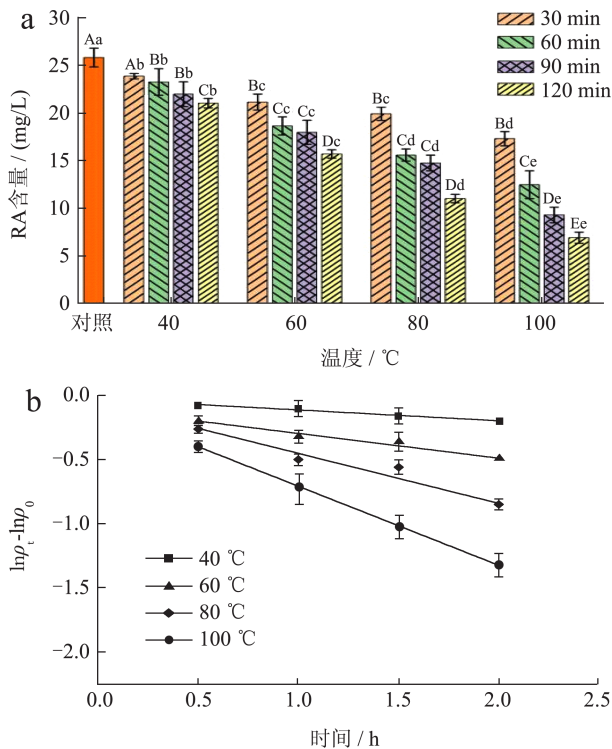


图2 酸性饮料体系中 RA 在不同温度下的稳定性
和热降解速率

Fig.2 Stability and thermal degradation rate of RA in
acidic beverage systems at different temperatures

注：a 为稳定性；b 为热降解速率。不同小写字母代表相同加热时间的不同温度下的样品存在显著性差异 ($P<0.05$)；不同大写字母代表不同加热时间的相同温度下的样品存在显著性差异 ($P<0.05$)。

如图 2b 和表 1 所示，随着温度的升高，RA 的降解速率常数 k 值增加，在 40、60、80、100 °C 下分别为 0.118、0.304、0.456 和 0.717。同时 RA 降解过程中的半衰期值 $t_{1/2}$ 急剧下降，分别为 5.89 h (40 °C)、2.28 h (60 °C)、1.52 h (80 °C)、0.97 h (100 °C)。此外，所有温度下的 $R^2>0.97$ 。以上结果说明酸性饮料体系中 RA 的热降解动力学符合一级动力学模型。Wu 等^[20] 和 Huang 等^[21] 之前的研究也证实酸性环境中 RA 热降解过程的符合一级动力学。由于热处理是食品加工的重要环节，且产品的固有性质是影响花青素热降解的重要因素^[22]。因此，后续研究其它因素对 RA 稳定性的影响时进行了加热处理。

表 1 酸性饮料体系中RA在不同温度下的热降解参数

Table 1 Thermal degradation parameters of RA in acidic
beverage systems at different temperatures

pH 值	温度/°C	R^2	k/h^{-1}	$t_{1/2}/h$
3.0	40	1.00	0.12	5.89
	60	0.99	0.30	2.28
	80	0.97	0.46	1.52
	100	1.00	0.72	0.97

2.3 金属离子对酸性饮料体系中RA稳定性的影响

图 3a、3b 为不同金属离子存在下 RA 溶液的外观颜色变化和 UV-vis 光谱变化。由图可知，添加 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 保持了 RA 原有的和亮红色，而 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Al^{3+} 使 RA 的颜色加深。此外，以上金属离子并未改变 RA 固有的 UV-vis 光谱特征， λ_{max} 值保持在 523 nm 左右，但 λ_{max} 处的吸光度值均表现出不同程度的升高，进一步说明以上金属离子增加了 RA 的颜色强度。而 Fe^{3+} 的添加使 RA 颜色变为深褐色并产生沉淀，并完全改变了 RA 的 UV-vis 光谱形状，这说明 RA 与 Fe^{3+} 形成了新的络合物^[21]。因此，后续的热处理过程没有涉及 Fe^{3+} 对 RA 稳定性的影响。

如图 3c 所示，与对照组相比，添加 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 对 RA 的稳定性无显著影响 ($P>0.05$)， Al^{3+} 显著提高了 RA 的稳定性 (约 10%)，而 Cu^{2+} 和 Fe^{2+} 对 RA 的稳定性具有明显的破坏作用 ($P<0.05$)。有关研究证实金属离子带电荷越多，越容易与花青素 B 环上的游离羟基结合，从而增强颜色强度^[23]。此外，不同氧化态的铁离子与花青素的络合的结果差异很大， Fe^{3+} 可以与紫胡萝卜花青素形成蓝色的铁配合物^[23]，而紫色马铃薯花青素与 Fe^{2+} 的络合不会引起最大吸收波长的偏移^[24]。

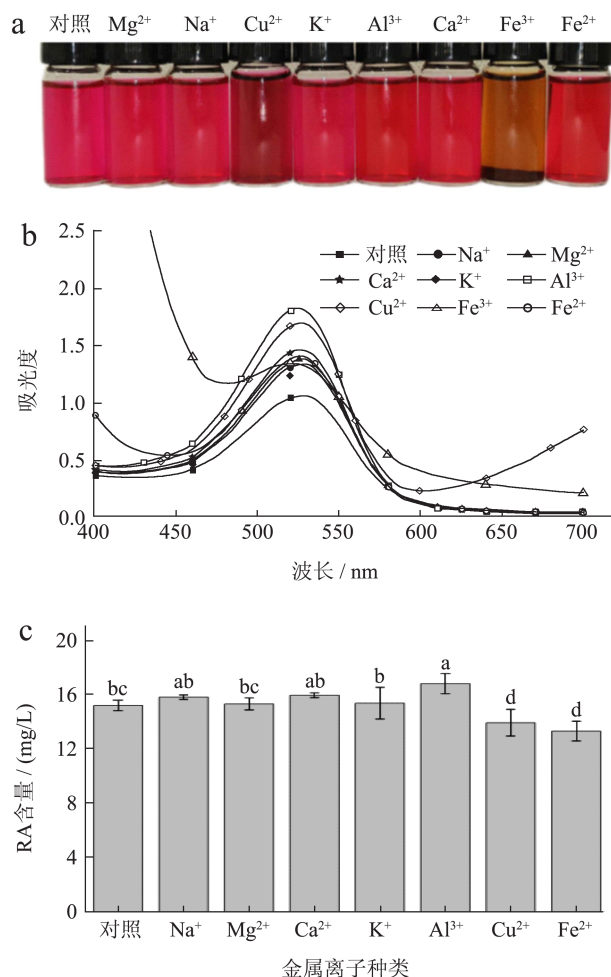


图3 酸性饮料体系中 RA 在不同金属离子下的稳定性

Fig.3 Stability of RA in acidic beverage system at different metal ions

注: a 为颜色; b 为 UV-vis 光谱; c 为稳定性。不同小写字母表示不同样品具有显著差异 ($P < 0.05$)。下同。

2.4 Vc对酸性饮料体系中RA稳定性的影响

Vc作为一种高效抗氧化剂,常用于食品中以防止氧化和提高营养价值。由图4可知,随着Vc质量浓度的升高,其对酸性饮料体系中RA稳定性的破坏能力也越来越强 ($P < 0.05$)。当Vc质量浓度为0.4 mg/mL和2.0 mg/mL时,酸性饮料体系中的RA含量比对照组分别降低了11.93%和23.74%。这可能是由于Vc直接缩合降低了RA的含量或Vc被氧化生成 H_2O_2 加快了RA的热降解导致的^[25]。Hernández-herrero等^[26]研究发现添加Vc(质量浓度为0.5 mg/mL)显著破坏了李子汁中花青素的颜色稳定性。因此,在RA产品加工过程中不建议使用Vc直接作为抗氧化剂。目前,Gérard等^[27]研究发现了一种Vc的替代品(2-O- α -d-吡喃葡萄糖基-1-抗坏血酸),其不会对花青素产生降解作用。

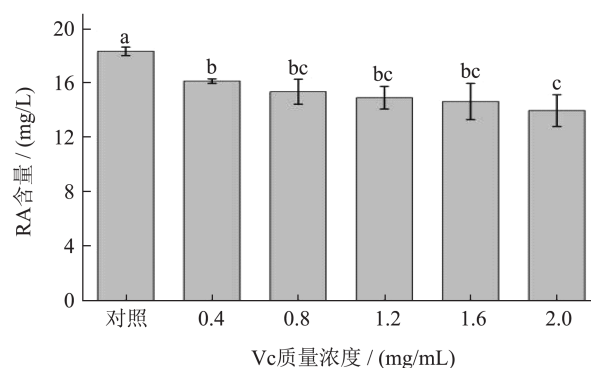


图4 酸性饮料体系中 RA 在不同 Vc 浓度下的稳定性

Fig.4 Stability of RA at different Vc concentrations in acidic beverage systems

2.5 氨基酸对酸性饮料体系中RA稳定性的影响

如图5所示,7种氨基酸对酸性饮料体系中RA的稳定性均有不同程度的提高 ($P < 0.05$)。原因可能是花青素与氨基酸间的共色素沉着阻止了水分子对花青素的亲核攻击,从而阻止查尔酮结构的形成和降解^[28]。与对照组相比,苏氨酸、甘氨酸和酪氨酸对RA稳定的效果最好,分别提高了15.99%、11.92%和11.89%;而苯丙氨酸、精氨酸、组氨酸和亮氨酸与前者相比影响较小,仅提高了6.59%、3.12%、5.67%和7.41%。这可能是因为不同氨基酸与RA的相互作用机制不同,进而导致对RA的稳定性影响不同^[28]。Nie等^[29]和Bingöl等^[30]的研究分别证实了在酸性饮料体系中蛋氨酸对杨梅花青素,以及天冬氨酸、脯氨酸和缬氨酸对草莓花青素的稳定性均具有积极影响。

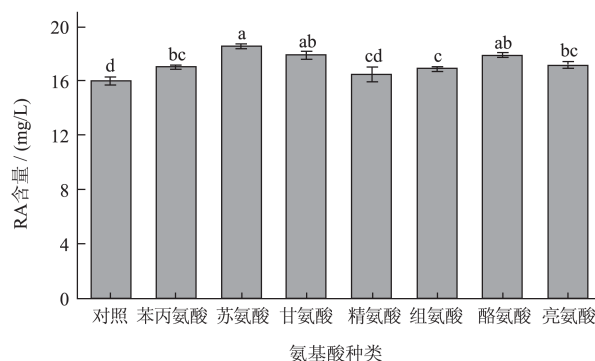


图5 酸性饮料体系中 RA 在不同氨基酸下的稳定性

Fig.5 Stability of RA in acidic beverage system at different amino acids

2.6 多酚对酸性饮料体系中RA稳定性的影响

如图6所示,与对照组相比,4种多酚对RA稳定性的保护能力为槲皮素>芸香叶苷>没食子酸~阿魏酸,分别比对照组提高了14.11%、10.48%、4.84%

和 1.21%。这是因为黄酮醇（槲皮素、芸香叶苷等）、羟基苯甲酸（没食子酸等）和羟基肉桂酸（阿魏酸等）结构不同所导致的，其中黄酮醇因在整个三环核心结构（环 A、B 和 C）上都有 π 共轭体系，可最大限度增强花青素的颜色^[12]。Geng 等^[31] 之前研究也表明槲皮素和芸香叶苷稳定蓝色金银花汁中花青素的能力明显高于没食子酸。

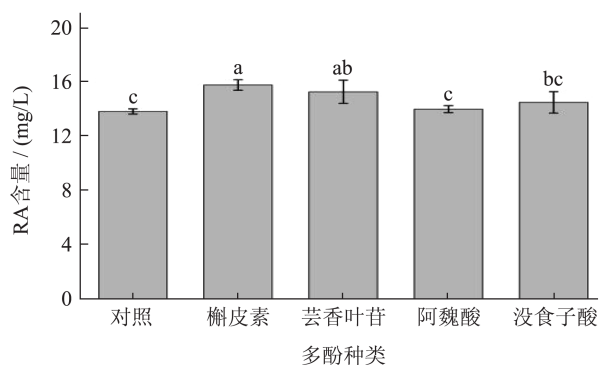


图 6 酸性饮料体系中 RA 在不同多酚下的稳定性

Fig.6 Stability of RA in acidic beverage system at different polyphenols

2.7 糖对酸性饮料体系中 RA 稳定性的影响

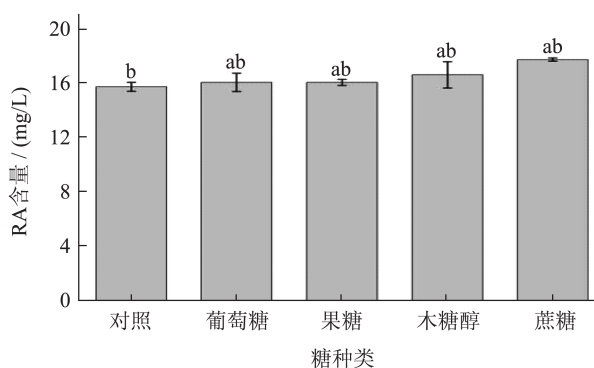


图 7 酸性饮料体系中 RA 在不同糖下的稳定性

Fig.7 Stability of RA in acidic beverage system at different sugars

由图 7 可知，与对照组相比，葡萄糖、果糖、木糖醇和蔗糖对酸性饮料体系中 RA 稳定性的影响不显著 ($P > 0.05$)，在 80 °C 加热 1 h 后的 RA 含量分别提高了 1.91%、1.91%、5.67% 和 12.73%。目前，关于糖对花青素的稳定性影响结果仍存在争议，可能与不同的研究体系、糖的浓度以及花青素的种类有关。Sadilova 等^[8] 研究表明蔗糖、葡萄糖和果糖对黑胡萝卜汁、草莓汁和接骨木莓汁的颜色没有显著影响；Wang 等^[32] 的研究也证实质量浓度为 40~200 mg/mL 的蔗糖、葡萄糖和果糖对酸性饮料体系中的玫瑰花青素稳定性无影响。

3 结论

本文系统研究了 pH、温度、金属离子、多酚、氨、糖和 Vc 等对酸性饮料体系中 RA 稳定性的影响。结果表明 RA 仅在 pH 值 ≤ 3 时呈现鲜艳的红色，其热降解遵循一级动力学。对于共色素物质，金属离子中的 Al^{3+} 可增强 RA 颜色强度， Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 则破坏 RA 的稳定性；4 种多酚提高 RA 稳定性的效果为槲皮素 > 芸香叶苷 > 没食子酸 $\approx$ 阿魏酸；7 种氨基酸均能提高 RA 的稳定性，其中苏氨酸、甘氨酸和酪氨酸的提高效果超过 10%。此外，蔗糖、葡萄糖、果糖和木糖醇对 RA 稳定性无影响，而抗坏血酸会引起 RA 的降解。因此，开发富含 RA 的甜味酸性饮料时，可考虑多酚和氨基酸作为稳定剂和强化剂，且避免跟 Vc 铁器和铜器等的接触。本研究将为研制富含 RA 的酸性饮料提供理论依据。

参考文献

- [1] 李静,李云清,林荔辉,等.玫瑰茄花青素研究进展[J].亚热带农业研究,2022,18(3):155-162.
- [2] GB 2760-2014,食品安全国家标准食品添加剂使用标准[S].
- [3] ANUYAHONG T, CHUSAK C, ADISAKWATTANA S. Incorporation of anthocyanin-rich riceberry rice in yogurts: Effect on physicochemical properties, antioxidant activity and *in vitro* gastrointestinal digestion [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 129: 109571.
- [4] HERRERA-B D D, CHAI Z, BETA T, et al. Blueberry anthocyanins: An updated review on approaches to enhancing their bioavailability [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 118: 808-821.
- [5] NIE M, WANG L, LU S M, et al. Protective effect of amino acids on the stability of bayberry anthocyanins and the interaction mechanism between l-methionine and cyanidin-3-O-glycoside [J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133689.
- [6] SENDRI N, SINGH S, SHARMA B, et al. Effect of co-pigments on anthocyanins of rhododendron arboreum and insights into interaction mechanism [J]. Food Chemistry, 2023, 426: 136571.
- [7] HUBBERMANN E M, HEINS A, STCKMANN H, et al. Influence of acids, salt, sugars and hydrocolloids on the colour stability of anthocyanin rich black currant and elderberry concentrates [J]. European Food Research & Technology, 2006, 223(1): 83-90.
- [8] SADILOVA E, STINTZING F C, KAMMERER D R, et al. Matrix dependent impact of sugar and ascorbic acid addition on color and anthocyanin stability of black carrot, elderberry and strawberry single strength and from concentrate juices upon thermal treatment [J]. Food Research International, 2009, 42(8): 1023-1033.
- [9] 王丽霞,戴婷玉,邹雨,等.食品配料及添加剂对玫瑰茄花色苷稳定性的影响[J].食品研究与开发,2020,41(18):15-20.

- [10] WANG X H, CHENG J J, ZHU Y, et al. Intermolecular copigmentation of anthocyanins with phenolic compounds improves color stability in the model and real blueberry fermented beverage [J]. Food Research International, 2024, 190: 114632.
- [11] 崔海鹏,郭健龙,王大全,等.花青素加工稳定性及其研究进展[J].食品与发酵工业, 2024,50(13):388-397.
- [12] WANG J D, ZHAO Y Q, SUN B, et al. The structure of anthocyanins and the copigmentation by common micromolecular copigments: A review [J]. Food Research International, 2024, 176: 113837.
- [13] 赵敏,钟继超,李泽璠,等.玫瑰茄色素的稳定性及其抗氧化活性研究[J].包装与食品机械,2022,40(6):15-19.
- [14] 李建伟.pH示差法测定山楂中花青素的含量[J].长治医学院学报,2015,29(3):177-179.
- [15] FULEKI T, FRANCIS F J. Quantitative methods for anthocyanins. Determination of total and degradation index for cranberry juice [J]. Journal of Food Science, 1968, 33(1): 78-83.
- [16] KANG S, WANG H, XIA L, et al. Colorimetric film based on polyvinyl alcohol/okra mucilage polysaccharide incorporated with rose anthocyanins for shrimp freshness monitoring [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115402.
- [17] HUANG J Y, HU Z H, CHIN Y X, et al. Improved thermal stability of roselle anthocyanin by co-pigmented with oxalic acid: Preparation, characterization and enhancement mechanism [J]. Food Chemistry, 2023, 410: 135407.
- [18] NEUENFELDT N H, DE MORAES D P, DE DEUS C, et al. Blueberry phenolic composition and improved stability by microencapsulation [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(4): 750-767.
- [19] CALDERARO A, BARRECA D, BELLOCCO E, et al. Colored Phytonutrients: Role and Applications in the Functional Foods of Anthocyanins [M]// Phytonutrients in food. Woodhead Publishing, 2020: 177-195.
- [20] WU H Y, YANG K M, CHIANG P Y. Roselle anthocyanins: Antioxidant properties and stability to heat and pH [J]. Molecules, 2018, 23: 1357
- [21] HUANG Y X, ZHOU S Y, ZHAO G H, et al. Destabilisation and stabilisation of anthocyanins in purple fleshed sweet potatoes: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 116: 1141-1154.
- [22] PATRAS A, BRUNTON N P, O'DONNELL C, et al. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation [J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21 (1): 3-11.
- [23] BUCHWEITZ M, BRAUCH J, CARLE R, et al. Colour and stability assessment of blue ferric anthocyanin chelates in liquid pectin-stabilised model systems [J]. Food Chemistry, 2013, 138(2-3): 2026-2035.
- [24] ZHAO T, MAO-QUN Y U. Spectrum characteristics and stability of anthocyanin pigment from hullless barley (*Hordeum vulgare* ssp. *vulgare*) [J]. Advanced Materials Research, 2010, 113-116: 2323-2328.
- [25] LI X D, LI J, WANG M, et al. Copigmentation effects and thermal degradation kinetics of purple sweet potato anthocyanins with metal ions and sugars [J]. Applied Biological Chemistry, 2016, 59(1): 15-24.
- [26] HERNÁNDEZ-HERRERO J A, FRUTOS M J. Influence of rutin and ascorbic acid in colour, plum anthocyanins and antioxidant capacity stability in model juices [J]. Food Chemistry, 2015, 173: 495-500.
- [27] GÉRARD V, AY E, GRAFF B, et al. Ascorbic acid derivatives as potential substitutes for ascorbic acid to reduce color degradation of drinks containing ascorbic acid and anthocyanins from natural extracts [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(43): 12061-12071.
- [28] SUN X Y, SHOKRI S, GAO B H, et al. Improving effects of three selected co-pigments on fermentation, color stability, and anthocyanins content of blueberry wine [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 156: 113070.
- [29] NIE M, WANG L, LU S M, et al. Protective effect of amino acids on the stability of bayberry anthocyanins and the interaction mechanism between l-methionine and cyanidin-3-O-glycoside [J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133689.
- [30] BINGÖL A, TURKYILMIZ M, ÖZKAN M. Increase in thermal stability of strawberry anthocyanins with amino acid copigmentation [J]. Food Chemistry, 2022, 384: 132518.
- [31] GENG Y F, CUI K J, DING N, et al. Polyphenol co-pigments enhanced the antioxidant capacity and color stability of blue honeysuckle juice during storage [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101848.
- [32] WANG Y, XIAO Y, ZHANG L F, et al. Study on stability of rose anthocyanin extracts and physicochemical properties of complex with whey protein isolate after spray drying [J]. Journal of Food Science, 2024, 89(11): 7464-7476.