

黑果枸杞花色苷 pH 和氨气敏感性 及其抗氧化活性

张美清^{1,2}, 曾繁森^{1,2}, 叶妍琦^{1,2}, 郑诗钰^{1,2}, 李洁^{1,2}, 费鹏^{1,2,*}

(1. 闽南师范大学生物科学技术学院, 福建漳州 363000;

2. 闽南师范大学闽台特色园林植物福建省高校重点实验室, 福建漳州 363000)

摘要:本文以干制黑果枸杞为原料,将乙醇作为浸提液提取其中的花色苷,对其 pH 敏感性、对挥发性氨和对肉类腐败气体的响应、抗氧化活性等方面进行了研究。结果表明:浸提法提取黑果枸杞花色苷浓缩液中花色苷含量为 291.93 mg/L;黑果枸杞花色苷具有良好 pH 敏感性,在 pH1~pH13 区间,花色苷溶液颜色变化显著,发生紫粉色向浅绿色、黄绿色、棕黄色、鲜黄色的转变,最大吸收峰对应波长从 522 nm 向 619 nm 方向移动。黑果枸杞花色苷对挥发性氨和对肉类腐败气体响应效果较好,当氨气浓度不断增大时,花色苷溶液最大吸收峰明显减小,其所对应的波长发生明显红移现象,且氨气浓度越高,反应速率越快,肉类食品新鲜程度下降及挥发性盐基氮气体挥发越快,其全波段扫描图与在氨水中相似。黑果枸杞花色苷溶液和维生素 C(V_C)溶液均有较强的羟基自由基清除率,且黑果枸杞花色苷溶液清除能力强于 V_C ,两者的 IC_{50} 分别为 5.54 和 10.19 mg/L。研究结果能够为黑果枸杞花色苷的开发利用提供参考。

关键词:黑果枸杞,花色苷,pH 敏感性,氨气响应,抗氧化活性

The pH and Ammonia Sensitivity and Antioxidant Activity of Anthocyanins from *Lycium ruthenicum*

ZHANG Mei-qing^{1,2}, ZENG Fan-sen^{1,2}, YE Yan-qi^{1,2}, ZHENG Shi-yu^{1,2}, LI Jie^{1,2}, FEI Peng^{1,2,*}

(1. School of Biological Science and Biotechnology, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China;

2. Fujian University Key Laboratory of Characteristics Garden Plants Resource in Fujian and Taiwan, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

Abstract: In this paper, the anthocyanin extracted from dried Chinese wolfberry was extracted with ethanol as the extraction liquid, and its pH sensitivity, response to volatile ammonia and meat putrid gas, and antioxidant activity were studied. The results showed that the anthocyanin content in the anthocyanin concentrate was 291.93 mg/L. The anthocyanins of *Lycium ruthenicum* had good pH sensitivity, and the color of anthocyanin solution changed significantly between pH1 and pH13. As the pH value increased, the solution changed from purple pink to light green, yellow-green, brown-yellow and bright yellow, and the corresponding wavelength of the maximum absorption peak shifted from 522 nm to 619 nm. Black fruit of Chinese wolfberry anthocyanins on volatile ammonia and corruption for meat gas response effect was good, when the ammonia concentration increased, anthocyanins solution maximum absorption peak decreased, and its corresponding wavelength was obviously red shifted, and the higher the concentration of ammonia, the faster the reaction rate, the lower the freshness of meat food and the faster the volatilization of volatile base nitrogen gas. The full band scanning pattern of the meat products was similar to that in ammonia water. Anthocyanin solution and vitamin C (V_C) solution were both with strong hydroxyl radical scavenging rate and anthocyanin solution had stronger scavenging capacity than V_C , and the IC_{50} of the two was 5.54 and 10.19 mg/L, respectively. The results can provide a reference for the development and utilization of *Lycium barbarum* anthocyanins.

Key words: *Lycium ruthenicum* Murray; anthocyanin; pH sensitivity; ammonia response; antioxidant activity

中图分类号: TS206.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)01-0022-06

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2020030182

引文格式: 张美清, 曾繁森, 叶妍琦, 等. 黑果枸杞花色苷 pH 和氨气敏感性及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 22-27.

收稿日期: 2020-03-21

作者简介: 张美清(1998-), 女, 本科, 研究方向: 食品包装材料, E-mail: 575668307@qq.com.

* 通信作者: 费鹏(1990-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 食品包装材料及农产品加工副产物综合利用, E-mail: feipenggood@126.com.

基金项目: 福建省自然科学基金青年项目(2019J05109); 漳州市自然科学基金项目(ZZ2018J18); 福建省教育厅中青年教育科研项目(JAT170354); 国家大学生创新创业资助项目(1040224)。

ZHANG Mei-qing, ZENG Fan-sen, YE Yan-qi, et al. The pH and Ammonia Sensitivity and Antioxidant Activity of Anthocyanins from *Lycium ruthenicum* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42 (1): 22-27. (in Chinese with English abstract) <http://www.spjgkj.com>

黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum*) 在中国西北干旱地区分布较为广泛, 作为茄科 (Solanaceae) 枸杞属 (*Lycium*) 的植物^[1], 其果实一般呈黑色, 在成熟的浆果中含有丰富的花色苷, 其种类有矮牵牛素-3-O-(6-O-对香豆酰) 芸香糖苷-5-O-葡萄糖苷、矮牵牛素-5-O-葡萄糖苷和飞燕草素-3-O-葡萄糖苷等八种^[2]。花色苷类色素在不同 pH 条件下苯并吡喃氧鎓离子结构会转变成其它结构形式, 酸性环境中以红色的氧鎓阳离子呈现, 碱性环境中以蓝色的醌型结构呈现^[3], 花色苷具有较高的营养价值和良好的功效作用, 当今国内外大部分专家学者已经接受并认可其抗氧化性以及防治心脑血管和预防癌症等疾病的功效^[4-5]。

肉类食品中挥发性盐基氮的含量能够客观地反映其腐败程度, 目前理化检验中挥发性盐基氮检测法检测准确度较高, 但需要在实验室中操作, 过程繁琐且耗时较长, 不能高效、简便地进行检测^[6], 难以广泛应用于生产生活中。花色苷对于挥发性盐基氮具有良好的响应, 且其颜色变化和肉类的腐败程度呈现出一定的相关性^[7], 因此, 通过花色苷溶液颜色的变化可以直观反映肉制品的新鲜程度。

目前, 对于黑枸杞中花色苷的 pH 敏感性、对不同浓度氨气和肉类腐败气味的响应、及其抗氧化活性等方面研究鲜见, 这使黑枸杞的功效及价值得不到充分利用, 资源开发不够全面。因此, 本研究采用溶剂浸提及旋转蒸发浓缩的方法, 提取黑枸杞中的花色苷。通过观测花色苷颜色在不同 pH 下的变化, 分析其 pH 敏感性; 不同浓度氨气及对肉类腐败气味的响应测试, 探究其对腐败气体的敏感度; 将 V_c 溶液作为花色苷溶液的对照品, 通过测定其羟基自由基清除率来探讨黑枸杞花色苷的抗氧化性。全文研究结果能够为黑枸杞资源开发利用提供一定的科学理论依据, 也为其是否能应用于气敏性及抗氧化性食品包装材料的制备作为参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黑果枸杞干 特级, 宁夏; 猪肉、牛肉 购于漳州市芫城区新华都超市; 本文所用无水乙醇、乙酸、浓盐酸 (37%)、浓氨水 (28%)、柠檬酸、磷酸二氢钠、水杨酸、 V_c (抗坏血酸) 等试剂 均为 AR 级, 西陇科学股份有限公司。

MultiSkan Go 全波长酶标仪 美国赛默飞世尔有限公司; FW 100 高速万能粉碎机 天津市泰斯特仪器有限公司; 旋转蒸发仪 上海亚荣生化仪器厂; NICOLET IS 10 傅里叶紫外分光光度计 美国赛默飞世尔有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 黑果枸杞花色苷的提取 将适量干燥黑果枸杞放于粉碎机中粉碎, 随后过 40 目筛以得到颗粒适

当的枸杞粉末, 将其置于阴暗干燥的低温环境中保存。将同等体积的无水乙醇和 2% 乙酸溶液均匀混合作为提取剂, 将其与黑果枸杞粉末按 20:1 mL/g 加入提取瓶混合均匀, 随后将其用超声振荡 0.5 h, 接着将浸提液放于 50 °C 水浴锅中浸提 3 h 后取出进行抽滤, 得到色素粗提液^[8-9]。将色素粗提液放在 50 °C 旋转蒸发仪中蒸发浓缩, 最终得到花色苷浓缩液, 将其保存在密封试剂瓶且放于黑暗低温环境中, 备用。

1.2.2 花色苷含量测定 总花色苷含量采用 pH 示差法测定^[10]。分别测定黑果枸杞花色苷在 pH1.0 盐酸-柠檬酸标准缓冲液和 pH4.5 柠檬酸-磷酸氢二钠标准缓冲液中于紫外分光光度计 400~800 nm 范围内扫描情况, 可知相应的最大吸收波长和最大吸收波长处的吸光度值 $A_{\max}$ 。总花色苷含量 (以矢车菊素-3-葡萄糖苷计) 用以下公式计算:

$$AC(\text{mg/L}) = \frac{A \times M_w \times DF \times 10^3}{\varepsilon \times L}$$

式中, 吸光度值: $A: (A_{523 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH}1.0} - (A_{540 \text{ nm}} - A_{700 \text{ nm}})_{\text{pH}4.5}$; M_w : 矢车菊-3-葡萄糖的分子质量 (449.2 g/mol); DF : 稀释因子 ($V/W_t = 10$); ε : 摩尔消光系数 ($26900 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$); L : 光路长度 (0.51995 cm)。

1.2.3 黑果枸杞花色苷对 pH 的响应测试 分别配制 pH1.0~pH13.0 的标准 pH 缓冲液备用; 每次取 1 mL 花色苷溶液分别加入 13 支 10 mL 的容量瓶中, 取上述 pH1.0~pH13.0 的缓冲液定容至 10 mL, 混合均匀后将其放于全波长酶标仪中作全波长扫描。测定黑果枸杞花色苷提取物的吸光度及 pH 敏感性。

1.2.4 黑果枸杞花色苷的智能指示

1.2.4.1 黑果枸杞花色苷对挥发氨的响应试验 配制浓度分别为 0.297、0.371、0.495、0.742、1.484 mol/L 浓度的氨水溶液; 取 25 mL 花色苷溶于 100 mL 容量瓶, 用水定容, 混合均匀备用; 依次取上述花色苷溶液 5 mL 分别加入五个康威式扩散皿内室中, 再分别取已配制的各浓度氨水 5 mL 加入扩散皿外室, 将其放于通风橱中反应 1 h, 在此期间每隔 10 min 将其进行全波长扫描。分析黑果枸杞花色苷溶液随着时间延长对挥发氨的响应。

1.2.4.2 黑果枸杞花色苷对肉类新鲜程度的响应试验 称取 25 g 猪肉和 25 g 牛肉, 将其剁碎成肉末状后分别放于康威式扩散皿外室中, 取 25 mL 花色苷浓缩液, 用水定容至 100 mL, 向上述扩散皿内室中分别加入 5 mL 花色苷稀释液, 做三组平行, 存放于常温下干燥通风环境, 每天相同时间放于紫外分光光度计中测定其吸光度, 连续测 5 d 判定黑果枸杞花色苷对不同新鲜程度的肉类食品的响应。

1.2.5 羟基自由基清除率测定 参照高亮等^[11]的方法作了适当变动, 采用水杨酸法测定花色苷浓缩液羟基自由基清除能力, 分别配制 2 mmol/L 的 FeSO_4 溶液和 H_2O_2 溶液、100 mg/L 的 V_c 溶液; 用无水乙醇作溶剂配制 2 mmol/L 水杨酸溶液; 取 10 mL 花色苷

浓缩液,定容至 100 mL;分别取 3 mL FeSO_4 溶液和水杨酸乙醇溶液依次加入到 20 支 10 mL 离心管中,混合均匀;分别取 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 和 2.0 mL 的 V_c 溶液和 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.8 和 2.0 mL 的花色苷浓缩液加入到上述离心管中,将离心管置于 37 ℃ 水浴中加热 0.5 h,进行全波长扫描,测定各个吸光度。羟基自由基清除率计算公式为:

$$Y(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

式中,Y:羟基自由基清除能力,%; A_1 :加入样品后的吸光度; A_0 :样品本身的吸光度值。

1.3 数据处理

本研究中涉及的实验内容均重复 3 次并采用 SPSS Statistics 22.0 计算标准差;所有分析图运用 Origin 2017 和 Adobe Photoshop CC2019 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 黑果枸杞花色苷浓缩液中花色苷的含量

图 1 反映了在波长 400~800 nm 范围内,黑果枸杞花色苷溶液 pH=1 和 pH=4.5 时的光谱情况。实验采用 pH 示差法测定黑果枸杞浓缩液中总花色苷的含量,由图 1 可知,黑果枸杞花色苷在 pH=1 时,在 523 和 700 nm 处分别有最大吸光度 1.020 和最小吸光度 0.012,当 pH=4.5 时在 540 和 700 nm 处有最大吸光度 0.120 和最小吸光度 0.021,将数据代入 1.2.2 公式中可得,此次实验中黑果枸杞花色苷浓缩液中花色苷含量为 291.93 mg/L。

2.2 黑果枸杞花色苷颜色对 pH 的响应

图 2 反映了不同 pH 下黑果枸杞花色苷颜色的变化(左)和可见光区全波段光谱图的情况(右),以此探究其 pH 敏感性。由图 2(左)可知,在 pH1.0~pH13.0 变化范围内,随着 pH 的增大,黑果枸杞花色

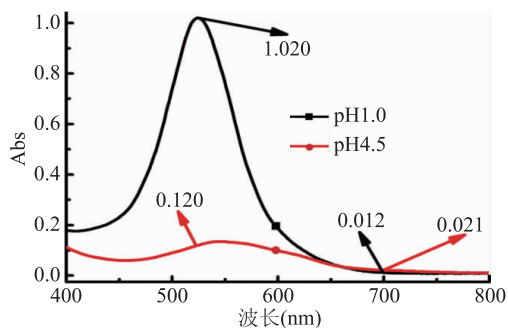


图 1 黑果枸杞花色苷在 pH1.0 和 pH4.5 时可见光区全波段光谱图

Fig.1 Full-band spectra of anthocyanins from *Lycium barbarum* at pH1.0 and pH4.5

苷颜色从紫粉色最终变为黄色。在 pH1.0~pH4.0 范围内,其颜色由粉紫色逐渐变淡为无色;在 pH5.0~pH8.0 范围内,颜色由无色逐渐转变为绿色;在 pH9.0~pH13.0 范围内,暗黄色逐渐变亮。由图 2(右)可知,在 pH1.0~pH4.0 范围内,pH1.0 时花色苷的最大吸收波长为 522 nm,当 pH 逐渐增大到 4.0 时,其最大吸收波长向 533 nm 方向移动,同时,其最大吸收峰不断减小;在 pH5.0~pH8.0 范围内,其最大吸收峰所处波长发生红移,由 533 nm 到 619 nm,pH8.0 时出现最大吸收峰,此时对应波长在 619 nm 附近。花色苷颜色之所以在不同的 pH 中呈现出颜色明显差别,是因为在不同的 pH 环境中,具有不同的化学结构^[12]。在 pH1.0~pH4.0 间,强酸性环境使花色苷主要以黄烺盐离子的形式存在,随着酸性减弱,其结构转化为假碱、查耳酮^[13],其最大吸收峰不断减小,粉色随之消失直到成无色状态^[14];pH5.0~pH8.0 间,花色苷结构逐渐变成醌式碱^[15],引起黄烺盐离子浓度和溶液光泽一同降低,各个 pH 对应的最大吸收峰明

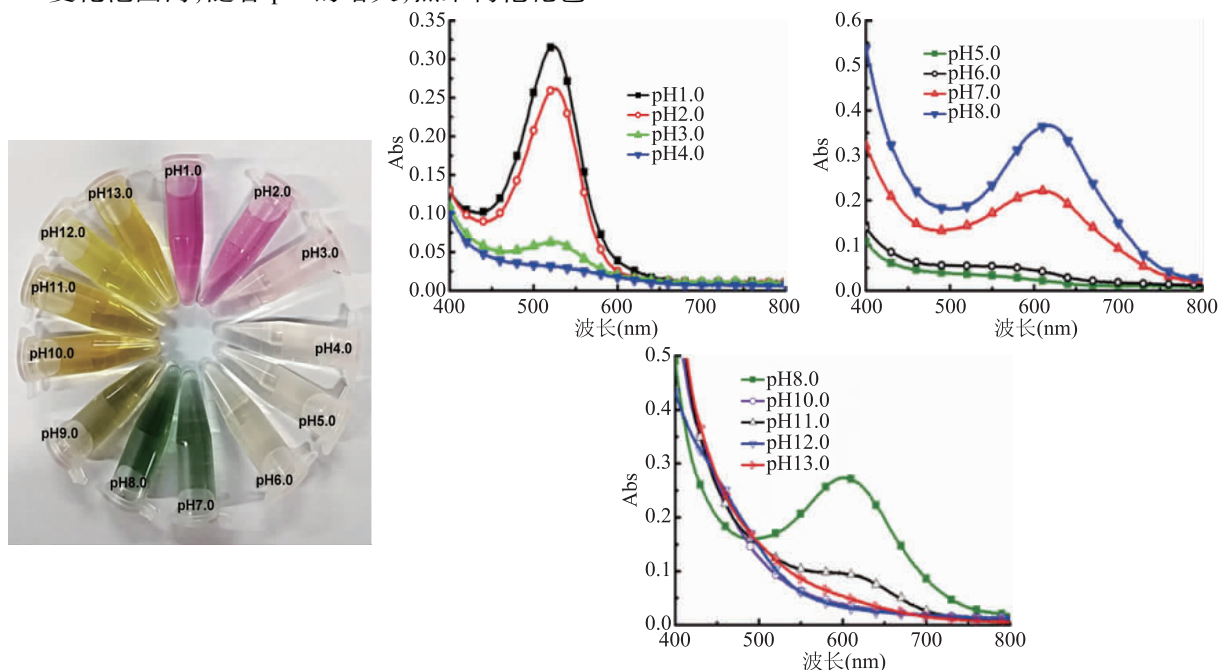


图 2 不同 pH 下黑果枸杞花色苷的颜色和可见光区全波段光谱图

Fig.2 The color of anthocyanin and its full band spectrum in visible region of *Lycium barbarum* under different pH values

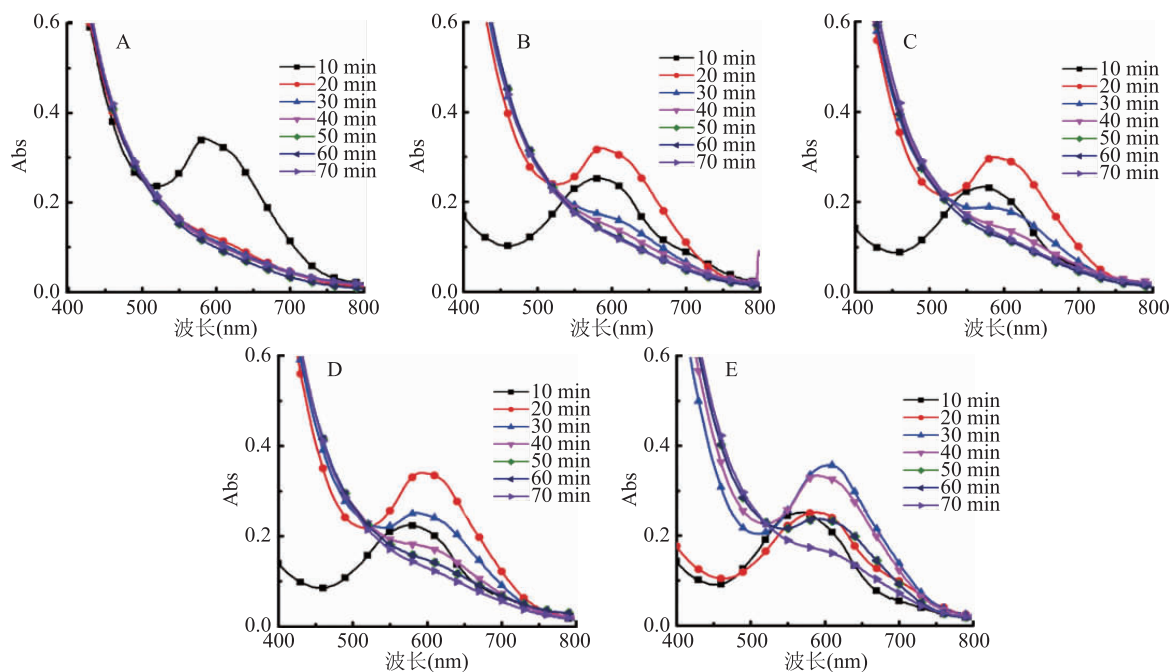


图3 不同浓度氨水挥发下黑果枸杞花色苷 70 min 内可见光区全波段光谱图

Fig.3 The full band spectrum of anthocyanin in visible light region in 70 minutes under different ammonia concentration volatilization

注:A:1.484 mol/L;B:0.742 mol/L;C:0.495 mol/L;D:0.371 mol/L;E:0.297 mol/L。

显增大,溶液颜色呈现绿色^[16];在 pH9.0~pH13.0 间,随着碱性增强,花色苷结构继续发生某些化学转变^[17],溶液颜色实现从浅绿色、黄绿色、棕黄色、鲜黄色的转变。以上结果皆表明,花色苷溶液能够在不同 pH 中发生显著的颜色反应,有较强的 pH 敏感性。

2.3 黑果枸杞花色苷的智能指示

挥发性盐基氮是指由于细菌及有关酶的影响,动物食品在变腐败过程中,因为蛋白质分解产生的氨以及胺类等碱性含氮物质^[18]。因而,能够通过挥发性盐基氮的含量判断动物性食品的新鲜程度。本实验在常温常压条件下进行,用猪肉、牛肉两种生活中常见肉类为样品,氨气为腐败特征气体^[19],用以模拟肉类食品在新鲜程度发生改变时含氮化合物的挥发,实验反映了黑果枸杞花色苷对氨气、肉类样品不同新鲜程度的颜色响应及其灵敏度情况。以此判定是否能够用黑果枸杞花色苷来即时检测食品的新鲜程度。

2.3.1 黑果枸杞花色苷对挥发氨的响应测试 图3反映了在 70 min 内每间隔 10 min 在不同浓度氨水下,黑果枸杞花色苷的可见光区全波段图谱扫描。由图3可知,随着时间延长,花色苷溶液吸收峰不断减小,且氨水浓度越大变化越快,在 30 min 时,氨水浓度为 0.297、0.371、0.495、0.742 mol/L 所对应花色苷溶液最大吸光值分别为 0.36、0.26、0.19、0.17;当氨水浓度为 1.484 mol/L 时,在 20 min 处,其最大吸收峰已完全消失;随着时间推移,花色苷溶液出现最大吸收波长红移情况,从 585 nm 向 603 nm 迁移。初始状态下,溶液呈紫色,对应吸收峰最强。随着反应进行,溶液中氨气浓度升高,颜色发生明显变化,实现从粉色到黄绿色最终为黄色的转变,吸收峰变弱且最大吸收波长发生红移的现象。这些现象发生的原因是,样品酸性强度高时,花色苷分子结构主要以黄

烔盐离子的形式存在^[20],随着 NH_3 浓度增大,溶液碱性增强,花色苷结构转化为蓝色醌式碱,此时黄烔盐离子的浓度及色泽强度降低^[21],导致最大吸收峰减小,最大吸收波长红移,颜色呈黄绿色^[22];反应达一定程度时,花色苷结构极其不稳定最终被分解,吸收峰随之消失,颜色变黄^[23]。以上结果说明,花色苷溶液能够和氨水反应,当反应时间相同时,氨水浓度越大,花色苷对 NH_3 的响应速度越快,能够根据花色苷溶液的颜色变化判断食品腐败气体的产生且灵敏性较好。

2.3.2 黑果枸杞花色苷对肉类腐败气味的响应测试 图4反映了黑果枸杞花色苷溶液连续 5 d 放于存有猪肉和牛肉的密闭环境中,其吸光值的变化。由图4可知,花色苷于猪肉和牛肉环境中变化情况几乎一致,随着时间推移,花色苷溶液最大吸收峰逐渐变小,同时,也伴随着花色苷颜色的改变。第 3 d 时,其最大吸收波长发生红移,从第 1、2 d 时 525 nm 迁移到 538 nm,其吸收峰继续变小,此时,花色苷颜色已转化成黄绿色,到第 4 d 吸收峰开始消失,颜色向黄色转变。原因是随着时间的延长,猪肉和牛肉新鲜度不断下降,肉质逐渐腐败,蛋白质发生变性^[24],此时,伴随着氨以及胺类等碱性含氮物质的产生,这直接导致花色苷的红色烔阳离子结构减少且向着无色的假碱、查耳酮转变^[25]。在第 3 d 及以后,因猪肉和牛肉腐败程度加深,含氮物质挥发量达一定限度,花色苷结构被破坏^[26],溶液颜色变黄。以上表明,肉类食品新鲜程度可以通过观察黑果枸杞花色苷颜色的变化,这对食品质量优劣起到一定的指示作用。

2.4 黑果枸杞花色苷的羟基自由基清除能力

图5反映不同 V_c 和花色苷添加量对羟基自由基的清除能力。Hochstein 等^[27]研究结果显示,羟基

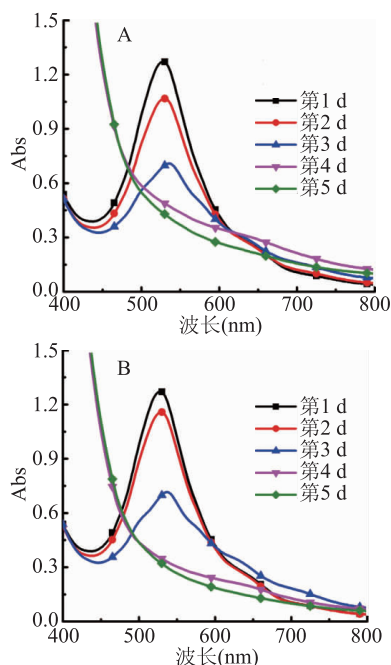


图4 不同新鲜度猪肉(A)与牛肉(B)对黑果枸杞花色苷的影响

Fig.4 Effects of pork (A) and beef (B) with different freshness on anthocyanins of *Lycium barbarum*

自由基作为生物体系生成的一种极具反映性的自由基,其在自由基病理学方面拥有强烈损伤性,它可能使细胞坏死或发生突变^[28]。因此,能够通过羟基自由基的清除率来探究某些物质的抗氧化能力强弱^[29]。

实验以相同体积的 V_c 溶液为对照品。由图5可知,在实验浓度范围内,花色苷和 V_c 溶液对羟基自由基均具有一定的清除能力,当花色苷含量为 0.95 mg/L 时,羟基自由基清除率为 2.4%;当花色苷含量到 7.30 mg/L 时,其清除率达 64.3%。对于 V_c ,当其浓度为 16.68 mg/L 时,其清除率达 100%。由图5可知, V_c 和黑果枸杞花色苷对应羟基自由基清除率的 IC_{50} 分别为 10.19 和 5.54 mg/L,由此可得,黑果枸杞花色苷的羟基自由基清除能力强于 V_c 。原因是黑果枸杞花色苷中释放出的 H 能够较好地与 $\cdot OH$ 结合,生成相对稳定的自由基,从而消灭介质中存在的大量有害自由基^[30]。以上结果说明,黑果枸杞花色苷具有较强的羟基自由基清除能力,且清除能力随含量呈正相关稳步升高,说明具有良好抗氧化性能。

3 结论

本实验将乙醇作为浸提液提取黑果枸杞花色苷浓缩液,测定了浓缩液中花色苷含量、不同 pH 响应、氨气及肉类腐败气体响应、羟基自由基清除率。结果表明,黑果枸杞提取液中花色苷含量较高,为 291.93 mg/L;花色苷 pH 敏感性较强,在 pH1.0~pH13.0 环境中,其颜色发生显著变化,从紫粉色到无色再到绿色最终变为黄色,其最大吸收波长发生红移,从 522 nm 到 533 nm 再到 619 nm;花色苷对肉类食品新鲜程度有良好的指示性,对氨气响应较为灵敏,且其反映速率随浓度增大而加快,花色苷溶液颜

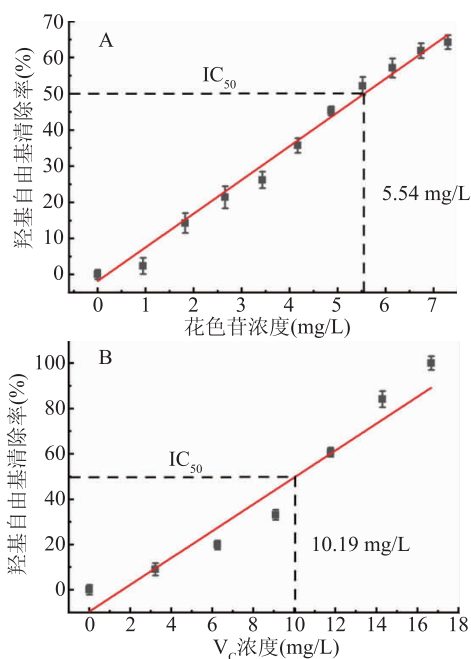


图5 不同浓度黑果枸杞花色苷(A)和 V_c (B)溶液的羟基自由基清除率

Fig.5 Hydroxyl radical scavenging rates of *Lycium barbarum* anthocyanin(A) and V_c (B) solutions with different concentrations

色从紫红色转变青黄色最终变为黄色,肉类食品腐败程度加深时,最大吸收峰逐渐减弱,波长在 525~538 nm 范围内变化;花色苷具备良好的抗氧化性能,花色苷 IC_{50} 比 V_c 小 4.65 mg/L,清除羟基自由基效果明显,随着花色苷浓度的增大,其羟基自由基清除率呈稳定上升趋势。

参考文献

- [1] 闫亚美,戴国礼,冉林武,等.不同产地野生黑果枸杞资源果实多酚组成成分分析[J].中国农业科学,2014,47(22):4540-4550.
- [2] 谭亮,董琦,曹静亚,等.黑果枸杞中花色苷的提取与结构鉴定[J].天然产物研究与开发,2014,26(11):1797-1802,1760.
- [3] 邝敏杰,齐敏玉,何静仁,等.紫菜茎花色苷组分鉴定及其稳定性和抗氧化性[J].中国农业科学,2014,47(20):4067-4077.
- [4] 钟越,李海超,冯馨锐,等.食源性原花青素对 SH-SY₅Y 细胞生长的抑制作用及其机制[J].吉林大学学报(医学版),2020,46(1):61-65.
- [5] 李彩霞,宋海,焦杨,等.果胶酶提取黑果枸杞花青素的工艺优化[J].食品工业科技,2016,37(7):204-209.
- [6] 胡云峰,王雅迪,唐裕轩.猪肉糜在贮藏过程中的变化规律及新鲜度快速测定方法的研究[J].食品研究与开发,2018,39(15):178-182.
- [7] 薛瑾.基于花青素的三文鱼新鲜度指示型包装材料研究[D].镇江:江苏大学,2019.
- [8] 任小娜,陈志梅,曾俊,等.黑果枸杞中原花青素提取条件的优化与含量测定[J].食品与发酵工业,2015,41(1):147-150.

- [9] 史光辉, 胡志和, 马科铭, 等. 紫薯花青素提取条件优化及淀粉等产物的制备[J]. 食品科学, 2014, 35(22): 39-45.
- [10] 闫亚美, 冉林武, 曹有龙, 等. 黑果枸杞花色苷含量测定方法研究[J]. 食品工业, 2012, 33(6): 145-147.
- [11] 高亮, 蔡为荣, 张孟雪, 等. HSCCC 分离荷叶原花青素及其抗氧化活性研究[J]. 安徽工程大学学报, 2019, 34(4): 1-7.
- [12] 王兆然. 蓝莓果渣中花色苷的提取及稳定性研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
- [13] 邹小波, 张俊俊, 石吉勇, 等. 基于玫瑰茄花青素的猪肉新鲜度智能指示膜研究[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 243-248.
- [14] 邹小波, 薛瑾, 黄晓玮, 等. 一种双层智能膜的制备及在指示三文鱼新鲜度中的应用[J]. 食品科学, 2019, 40(23): 206-212.
- [15] 陈文田. 红萝卜色素产品异味成分鉴定及控制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- [16] 贾代涛, 卢立新, 潘嘹, 等. 改性花青素涂覆聚丙烯新鲜度指示膜的制备与研究[J]. 功能材料, 2019, 50(6): 6211-6215.
- [17] 由璐, 隋茜茜, 赵艳雪, 等. 花色苷分子结构修饰及其生理活性研究进展[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 351-359.
- [18] 李兴艳. 兔肉成熟过程中理化及蛋白质功能性质的变化[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [19] 晋圣坤, 曹洁, 刘兆雷, 等. 基于 MEMS 气味传感技术冰箱食材识别的遗传 RBF 神经网络算法研究[J]. 家电科技, 2017(4): 62-64.
- [20] 何琼. 紫心大白菜花青素合成和积累的分子机理研究[D]. 食品与机械, 2016, 32(7): 14-17.
- [21] 苏菁, 李晓燕. 玉米须总皂苷提取方法比较研究[J]. 河南城建学院学报, 2014, 23(4): 56-60.
- [22] 赵二劳, 杨洁, 高子怡, 等. 玉米多糖提取纯化工艺研究进展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(5): 18-20.
- [23] 刘媛, 薛慧中, 杨文革, 等. 玉米须多糖的提取及含量测定[J]. 南京中医药大学学报, 1999(2): 28-29, 68.
- [24] 张娟娟, 熊越怀, 贺文彬, 等. 响应曲面法优选远志糖蛋白的提取工艺[J]. 中华中医药杂志, 2016, 31(10): 4226-4229.
- [25] 吴光杰, 李玉萍, 陈美琴, 等. 马齿苋多糖蛋白含量测定及脱蛋白方法研究[J]. 时珍国医国药, 2015, 26(7): 1577-1579.
- [26] Yuan T, Wan C, Liu K, et al. New maplexins F-I and phenolic glycosides from red maple (*Acer rubrum*) bark [J]. Tetrahedron, 2012, 68(4): 959-964.
- [27] Ali H, Houghton P J, Soumyanath A. a-Amylase inhibitory activity of some Malaysian plants used to treat diabetes; with particular reference to *Phyllanthus amarus* [J]. J Ethnopharmacol, 2006, 107(3): 449-455.
- [28] 常波, 毛明婷, 谭云, 等. 超声波辅助法提取植物黄酮的工艺研究[J]. 价值工程, 2018, 37(33): 242-245.
- [29] 李培. 山药多糖对 α -葡萄糖苷酶抑制作用动力学研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [21] 李甘. 紫洋葱及黑豆种皮中花青素的定性定量分析和生物活性的研究[D]. 太原: 山西大学, 2019.
- [22] 李慧波. 影响单子叶植物蓝色花蓝色形成主要因子的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [23] 蒋光阳, 肖力源, 王章英, 等. 不同基材复配紫薯花青素制备智能指示膜及其应用[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 267-273.
- [24] 孙天利. 冰温保鲜技术对牛肉品质的影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013.
- [25] 郝瑞林, 梁爱琦, 董倩倩, 等. 响应面法优化红芸豆种皮花色苷的超声波辅助提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(20): 190-196, 203.
- [26] 金周雨, 孟展冰, 郭凌霄, 等. 蓝靛果花青素稳定性研究[J]. 北方农业学报, 2019, 47(6): 108-112.
- [27] Hochstein P, Atallah A S. The nature of oxidants and antioxidant systems in the inhibition of mutation and cancer [J]. Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 1988, 202(2): 363-375.
- [28] Jin X C, Ning Y. Antioxidant and antitumor activities of the polysaccharide from seed cake of *Camellia oleifera* Abel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2012, 51(4): 364-368.
- [29] 高石花, 叶高杰, 覃江克, 等. 油茶多糖和多酚的体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2013, 34(11): 163-166.
- [30] 陈云霞, 田密霞, 胡文忠, 等. 蓝莓花色苷提取工艺及其抗氧化性研究[J]. 保鲜与加工, 2015, 15(2): 34-39.
- [30] 冯学珍, 覃慧逢, 冯书珍. 网地藻多糖对 α -葡萄糖苷酶体外抑制作用的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(3): 35-40.
- [31] 周笑琴, 雷娅, 雷霖卿, 等. 番茄发酵液对 α -淀粉酶活性的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 65-68, 73.
- [32] 陈睿, 曾阳, 黄元, 等. 灰枸杞提取物对 α -淀粉酶抑制作用的初步研究[J]. 食品科技, 2009, 34(11): 243-245.
- [33] 魏振奇, 蔡文卓, 郑晓娟, 等. 齐墩果酸对 α -淀粉酶及脂肪酶的抑制作用[J]. 吉林医药学院学报, 2017, 38(2): 26-29.
- [34] 廖彭莹, 李承曼, 黄志祥, 等. 杨桃不同部位提取物抑制 α -葡萄糖苷酶的作用[J]. 大众科技, 2018, 20(10): 36-37, 58.
- [35] 周晓婷, 张根义. 苦荞提取物成分分析及不同极性提取物对 α -淀粉酶的抑制作用[J]. 食品科学, 2017, 38(18): 42-47.
- [36] 阿依仙木·加帕尔, 闫冬, 何雯, 等. 维药石榴花多酚提取物对 α -葡萄糖苷酶和 α -淀粉酶抑制作用的研究[J]. 新疆医科大学学报, 2013, 36(5): 581-583, 587.
- [37] 刘娟, 韩晓强, 姜博. 玉米须多糖治疗糖尿病作用研究[J]. 时珍国医国药, 2006(8): 1441-1442.
- [38] 马天成, 孙宇, 刘雷. 玉米须黄酮类成分提取工艺及抗氧化活性物质基础研究[J]. 中国现代应用药学, 2019, 36(22): 2794-2799.

(上接第 21 页)

and MYBs in the whole development stage of *Fagopyrum tataricum* [J]. Scientia Agr Sci (中国农业科学), 2017, 50: 3473-3481.

[21] 苏菁, 李晓燕. 玉米须总皂苷提取方法比较研究[J]. 河南城建学院学报, 2014, 23(4): 56-60.

[22] 赵二劳, 杨洁, 高子怡, 等. 玉米多糖提取纯化工艺研究进展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(5): 18-20.

[23] 刘媛, 薛慧中, 杨文革, 等. 玉米须多糖的提取及含量测定[J]. 南京中医药大学学报, 1999(2): 28-29, 68.

[24] 张娟娟, 熊越怀, 贺文彬, 等. 响应曲面法优选远志糖蛋白的提取工艺[J]. 中华中医药杂志, 2016, 31(10): 4226-4229.

[25] 吴光杰, 李玉萍, 陈美琴, 等. 马齿苋多糖蛋白含量测定及脱蛋白方法研究[J]. 时珍国医国药, 2015, 26(7): 1577-1579.

[26] Yuan T, Wan C, Liu K, et al. New maplexins F-I and phenolic glycosides from red maple (*Acer rubrum*) bark [J]. Tetrahedron, 2012, 68(4): 959-964.

[27] Ali H, Houghton P J, Soumyanath A. a-Amylase inhibitory activity of some Malaysian plants used to treat diabetes; with particular reference to *Phyllanthus amarus* [J]. J Ethnopharmacol, 2006, 107(3): 449-455.

[28] 常波, 毛明婷, 谭云, 等. 超声波辅助法提取植物黄酮的工艺研究[J]. 价值工程, 2018, 37(33): 242-245.

[29] 李培. 山药多糖对 α -葡萄糖苷酶抑制作用动力学研究