

不同食品大分子对黑米饮料花色苷加工和储藏稳定性的影响

王宁雅^{1,2}, 马勤², 张瑞芬², 张名位^{2*}

(1. 华中农业大学食品科学技术学院, 湖北武汉 430070)(2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

摘要: 该研究通过分别将黑米饮料中的大分子蛋白质、纤维素、淀粉酶解制备不同的黑米饮料, 探究加工及储藏过程中不同食品大分子对黑米饮料花色苷稳定性的影响。结果表明酶解过程中大分子的降解会造成花色苷保留率下降, 全谷物组不加酶经过相同加热条件保留率最高, 为 62.88%; 灭菌后全谷物组花色苷保留率为 17.62%, 高于各酶解组。将灭菌后的各组样品分别在不同光照(常温光照/避光)和不同温度(4 °C/37 °C 避光)条件储藏 10 d, 除 4 °C 避光条件下外, 其他条件下各组的花色苷的降解均符合一级动力学方程, 相较于花色苷水提液, 全谷物组和各酶解组花色苷的半衰期均延长, 全谷物组的半衰期最长, 分别在常温光照、常温避光、37 °C 避光条件下将花色苷半衰期由 4.31、4.72、0.76 d 延长至 8.99、9.65、4.09 d。储藏过程中虽然花色苷存在不同程度的降解, 但黑米饮料的抗氧化活性仅在 37 °C 避光条件下显著降低。这些结果表明, 复杂食品体系中蛋白质、膳食纤维、淀粉可以在热加工及储藏过程中提高花色苷的稳定性。

关键词: 黑米饮料; 花色苷保留率; 抗氧化活性; 酶解处理; 灭菌处理

文章编号: 1673-9078(2023)04-136-145

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.4.0474

Effects of Different Food Macromolecules on the Processing and Storage Stability of Anthocyanins in Black Rice Beverage

WANG Ningya^{1,2}, MA Qin², ZHANG Ruifen², ZHANG Mingwei^{2*}

(1. Department of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

(2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory Processing, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In this study, different black rice beverages were prepared through enzymatically hydrolyzing the macromolecular protein, cellulose, and starch in black rice beverages, and the effects of different food macromolecules on the stability of anthocyanin in black rice beverages during processing and storage were investigated. The results showed that the degradation of macromolecules during enzymatic hydrolysis caused a decrease in the retention rate of anthocyanins, and the highest retention rate (62.88%) was observed with the whole grain group without added enzymes subjected to the same heating conditions. After sterilization, the retention rate of anthocyanins in the whole grain group was 17.62%, which was higher than that of any of the enzymolysis groups. The sterilized samples of each group were stored under different lighting (ambient light/light-proof) and temperature (4 °C/37 °C light-proof) conditions for 10 d. Except for 4 °C light-proof conditions, the degradation of anthocyanins conformed to the first-order kinetic equation. Compared with the anthocyanin aqueous extract, the half-life of the

引文格式:

王宁雅, 马勤, 张瑞芬, 等. 不同食品大分子对黑米饮料花色苷加工和储藏稳定性的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(4): 136-145.

WANG Ningya, MA Qin, ZHANG Ruifen, et al. Effects of different food macromolecules on the processing and storage stability of anthocyanins in black rice beverage [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 136-145.

收稿日期: 2022-04-18

基金项目: 广东特支计划本土创新团队项目(2019BT02N112); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2019A1515110633); 广东省农业科学院人才引进项目(R2019YJ-YB1003; R2020PY-JG011)

作者简介: 王宁雅(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1072510321@qq.com

通讯作者: 张名位(1966-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 功能食品, E-mail: mwzhh@vip.tom.com

anthocyanins in the whole grain group and each enzymatic hydrolysis group was prolonged, with the half-life of the anthocyanins in the whole grain group being the longest, which was prolonged from 4.31, 4.72 and 0.76 d to 8.99, 9.65 and 4.09 d under the conditions of room temperature and light, room temperature and light-proof, and 37 °C and light-proof respectively. Although different degrees of anthocyanin degradation took place during storage, the antioxidant activity of black rice beverages was significantly reduced only under conditions of light-proof and 37 °C. These results suggest that protein, dietary fiber, and starch in complex food systems can improve the stability of anthocyanins during thermal processing and storage.

Key words: black rice beverage; anthocyanin retention; antioxidant activity; enzymatic hydrolysis treatment; sterilization treatment

黑米是一种珍贵的稻米品种, 营养丰富, 素有“黑珍珠”、“贡米”的美誉。作为一种典型的全谷物, 黑米含有丰富的碳水化合物、蛋白质、膳食纤维、类黄酮等多种营养物质。现代药理学研究表明黑米因活性成分而具有抗氧化、降血脂、抗炎、抗动脉粥样硬化、改善糖尿病及相关代谢疾病的健康功效, 花色苷是黑米中特征性活性成分^[1,2]。

团队前期研究发现黑米米糠含有丰富的酚类物质, 其花色苷含量平均为 2 417 mg/100 g (以干质量计), 矢车菊素-3-O-葡萄糖苷为其主要的花色苷成分 (约 80%)^[3]。然而由于花色苷苯环上含有多个羟基, 其化学性质不稳定, 加工过程中易受 pH 值、光照、温度、氧气等多种因素的影响, 导致降解、褪色和生物活性降低^[4]。因此许多研究试图通过结构改性、微胶囊包埋等方式提高花色苷的稳定性, 以期将花色苷更广泛地应用于食品中。此外也有研究表明乳清分离蛋白的加入可以增强花色苷溶液体系的稳定性; 黄原胶、果胶、阿拉伯胶能够增强花色苷在饮料中的颜色稳定性^[5,6]。然而目前关于食物大分子对花色苷稳定性的研究大多集中在成分单一的模拟饮料体系中, 且大多采用纯化的单体化合物, 这与实际的生产过程相较甚远。

黑米因其富含碳水化合物、蛋白质等营养物质, 常用来开发全谷物饮料产品。但由于淀粉的易老化反生、膳食纤维的颗粒粗糙感, 常通过酶解的方法提高黑米饮料产品的稳定性, 然而其大分子的降解对其花色苷稳定性及活性的影响尚不清楚。因此, 本文以黑米为研究对象, 通过酶解分别降解黑米中的蛋白、纤维素、淀粉等大分子制备不同的黑米饮料, 进而探究酶解、高压灭菌等加工过程及不同储藏条件下不同组黑米饮料花色苷的稳定性及其抗氧化活性的变化, 明确复杂食品体系下大分子对花色苷稳定性及抗氧化活性的影响, 以期为黑米饮料的开发提供一定的理论基础。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

黑米: 山东鹤来香, 出仓时间 2020 年 10 月, 于

零度冷库储藏。中性蛋白酶、中温 α -淀粉酶、纤维素酶 (夏盛酶生物技术有限公司); Trolox、2,2'-偶氮二异丁基脒二盐酸盐 [2,2'-Azobis(2-methylpropionamide) dihydrochloride, AAPH]、荧光素二钠盐 (分析纯), 美国 Sigma-Aldrich 公司; 其他试剂 (分析纯), 天津大茂化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

DFT-50A 粉碎机, 浙江温岭林达机械制造有限公司; pHS-3C 型 pH 计, 上海理达仪器厂; GL224I-1SCN 分析天平, 德国赛多利斯集团; GL-20M 高速冷冻离心机, 湖南长沙易达仪器有限公司; UV-1800 紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; LS-75HD 立式压力蒸汽灭菌锅, 江阴滨江医疗设备有限公司; Infinite M200pro 多功能酶标仪, 瑞士 Tecan 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 黑米饮料的制备

原料黑米经粉碎后放于烧杯中, 以料液比 1:10 (g:mL) 加入蒸馏水, 全谷物组采用与蛋白酶解相同的加热条件 40 °C 加热 2 h 制备得到, 蛋白酶解组将黑米饮料 pH 值调至 6.5, 加入 $m=0.1\%$ 蛋白酶, 在 40 °C 反应 2 h; 纤维素酶组将黑米饮料 pH 值调至 6.0, 按 $m=0.1\%$ 的加酶量加入纤维素酶, 在 65 °C 反应 2 h; 淀粉酶组将黑米饮料预糊化煮沸 4 min, 过程中时时搅拌。将黑米饮料 pH 值调至 6.0, 加入 $m=0.5\%$ 中温 α -淀粉酶, 在 60 °C 反应 1 h。加入 $m=0.1\%$ 糖化酶, 在 60 °C 条件下反应 1 h。酶解完成后将各组黑米饮料快速冰浴冷却, pH 值调至 6.5 后进行灌装, 随后进行 121 °C 15 min 的高压灭菌。

1.3.2 黑米饮料的储藏条件

以黑米花色苷水提液为对照组, 将各组黑米饮料分别放置于常温 (18~25 °C) 避光、常温光照 (日光灯 24 h 照射) 条件下以探究食物大分子对花色苷光照稳定性的影响, 放置于 4 °C 避光、37 °C 避光条件下以探究食物大分子对花色苷热稳定性的影响, 储藏 10 d, 每两天取一次样, 提取黑米饮料中花色苷, 测定提取

液的花色苷含量、总酚含量、氧自由基吸收能力 (Oxygen Radical Absorbance Capacity, ORAC)。

1.3.3 常规成分测定

蛋白水解度采用 OPA 法^[7]。

膳食纤维含量的测定采用酶重量法, 参照 GB 5009.88-2014。

总淀粉含量的测定采用酸水解法, 参照 GB 5009.9-2016。

还原糖采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定。

1.3.4 黑米饮料花色苷的提取与测定方法

参考 Tian 等^[8]的方法并稍作调整。取 5 mL 黑米饮料置于 50 mL 离心管中, 10 mL $\varphi=80\%$ 酸化乙醇 (乙醇:1 mol/L HCl=85:15, V/V), 冰浴下均质 5 min (10 000 r/min), 10 000 r/min 离心 5 min 后收集上清液, 沉淀再加 10 mL 预冷的 $\varphi=80\%$ 酸化乙醇溶液按照上述条件重复提取 1 次, 合并两次上清液, 置于 -20 °C 备用。

pH 示差法用于测定黑米饮料的总花色苷含量^[9]。取 1 mL 待测溶液分别加 9 mL pH 值 1.0 氯化钾缓冲液和 pH 值 4.5 醋酸钠缓冲液。平衡 40 min, 以蒸馏水作为空白对照, 使用酶标仪分别在 511 nm 和 700 nm 处与蒸馏水测定吸光度。总花色苷含量按矢车菊素-3-O-葡萄糖苷计。

$$c = \frac{[(A_1 - A_2) - (A_3 - A_4)] \times M_w \times DF \times 1000}{\epsilon \times l} \quad (1)$$

式中:

c —花色苷含量(按矢车菊素-3-O-葡萄糖苷计), mg/mL;

A_1 —加 pH 值 1.0 氯化钾缓冲液在 511 nm 处的吸光度;

A_2 —加 pH 值 1.0 氯化钾缓冲液在 700 nm 处的吸光度;

A_3 —加 pH 值 4.5 醋酸钠缓冲液在 511 nm 处的吸光度;

A_4 —加 pH 值 4.5 醋酸钠缓冲液在 700 nm 处的吸光度;

M_w —矢车菊素-3-O-葡萄糖苷的分子量 (449.2 g/mol);

DF —稀释倍数;

ϵ —摩尔消光系数 (25, 740 cm²/mol);

l —光程, 微孔板的通径长度为 0.645 cm。

1.3.5 聚合物颜色测定

采用偏亚硫酸氢盐漂白方法测定聚合物颜色指数^[10]。用 pH 值 2.2 磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液 (取 0.2 mol/L 磷酸氢二钠 4.0 mL、0.1 mol/L 柠檬酸 106.0 mL 混合至 110.0 mL) 稀释样品提取物, 使其在 511 nm 处吸光度介于 0.5 至 1.0 之间。为了进行分析, 将 0.2 mL 0.90 mol/L 焦亚硫酸氢钠添加到 2.8 mL 稀释样品 (亚硫酸氢盐漂白样品) 中, 并将 0.2 mL 磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液添加到 2.8 mL 稀释样品 (未漂白、对照样品) 中。平衡 15 min 后, 在 700、511 和 420 nm 处评估样品。

使用亚硫酸氢盐漂白的样品用公式 (2)、(3) 确定聚合物颜色和褐变指数。

$$PC = [(A_5 - A_6) + (A_7 - A_6)] \times n \quad (2)$$

$$BI = \frac{A_5}{A_7} \quad (3)$$

式中:

PC —聚合物颜色指数;

A_5 —测试溶液在 420 nm 处的吸光度;

A_6 —测试溶液在 700 nm 处的吸光度;

A_7 —测试溶液在 511 nm 处的吸光度;

n —稀释倍数;

BI —褐变指数。

1.3.6 总酚含量测定

总酚含量的测定采用福林酚比色法^[11]。取 125 μ L 酚类物质提取液, 加入 500 μ L 蒸馏水和 125 μ L 福林酚试剂, 静置 6 min。然后加入 1.25 mL 7% (m/V) Na_2CO_3 溶液, 避光静置 90 min 后, 于 760 nm 处测定吸光值。以没食子酸标准品做标准曲线。总酚含量以每毫升黑米饮料所含 μ g 没食子酸当量 (Gallic Acid Equivalent, GAE) 表示, 即 μ g GAE/mL。

1.3.7 ORAC 抗氧化能力测定

参照 Su 等^[12]的方法, 样品和标准品的溶解和稀释均使用 75 mmol/L 磷酸钾缓冲液 (pH 值 7.4) 为溶剂。采用 96 孔板, 每孔先后加入 20 μ L 适度稀释的提取液或 Trolox 标准液 (浓度为 6.25~50 μ mol/L) 和 200 μ L 荧光素工作液 (浓度为 0.96 μ mol/L), 37 °C 培育 20 min 后, 加入 20 μ L AAPH 溶液 (浓度为 119 mmol/L)。用多功能酶标仪 (激发波长为 485 nm, 发射波长为 538 nm) 每隔 4.5 min 测定一次荧光强度, 重复 35 个循环。ORAC 测定结果以每 mL 黑米饮料所含 μ mol Trolox 当量表示 (μ mol TE/mL)。

1.4 数据处理与分析

每个处理 3 个平行, 结果由平均数 \pm 标准偏差表示。用 Origin 9.0 软件绘图, 采用 SPSS 软件通过单因素方差分析进行组间差异的比较, 统计结果 $P < 0.05$ 认为差异显著。

2 结果分析

2.1 不同酶解处理对黑米饮料营养成分和抗氧化活性的影响

2.1.1 不同酶解处理组黑米饮料的基本成分

表 1 不同酶解处理组黑米饮料的基本成分

组别	湿重 ^A		干重 ^B	
	还原糖含量/(mg/mL)	蛋白质水解度/%	膳食纤维含量/%	淀粉含量/%
全谷物	0.52±0.05 ^b	7.52±0.08	3.38±0.13	69.47±2.17
蛋白酶解	0.57±0.05 ^b	22.53±0.11	3.38±0.13	69.47±2.17
纤维酶解	0.63±0.04 ^b	7.52±0.08	1.03±0.05	69.47±2.17
淀粉酶解	48.02±0.99 ^a	7.52±0.08	3.38±0.13	0.33±0.03

注: A 表示含量以黑米饮料湿重计; B 表示以黑米粉干重计。不同小写字母代表同列数据存在显著性差异 ($P<0.05$), 表 2、3 同。

表 2 酶解处理对黑米饮料营养活性成分的影响

组别	花色苷质量浓度/($\mu\text{g/mL}$)	聚合物颜色	褐变指数	总酚含量/($\mu\text{g GAE/mL}$)
原料 ^A	139.24±4.73 ^a	0.28±0.01 ^d	0.76±0.01 ^c	547.02±25.17 ^a
全谷物	87.40±2.64 ^b (62.88% ^B)	0.34±0.02 ^c	0.79±0.01 ^c	424.11±4.00 ^b
蛋白酶解	80.30±1.38 ^c (57.77%)	0.38±0.01 ^b	0.80±0.01 ^c	415.27±4.26 ^b
纤维酶解	52.93±3.56 ^d (38.08%)	0.39±0.00 ^b	0.98±0.01 ^b	398.80±1.59 ^b
淀粉酶解	55.88±1.67 ^d (40.21%)	0.46±0.00 ^a	1.05±0.02 ^a	400.37±2.47 ^b

注: A 表示米粉以 1:10 (g/mL) 加入蒸馏水; B 表示花色苷较未处理的保留率。

不同酶解处理后, 黑米饮料的基本成分如表 1 所示。酶解后蛋白质的水解度由 7.52% 升高至 22.53%, 表明蛋白质被蛋白酶水解为小分子肽^[13]。纤维酶解后, 膳食纤维含量由 3.38% 降至 1.03%。淀粉酶解后淀粉含量由 69.47% 降低至 0.33%。

综上所述, 酶解处理成功将黑米饮料中的食物大分子水解, 样品可以用来进行后续的食物大分子对花色苷稳定性的影响试验。

2.1.2 酶解处理对黑米饮料营养活性成分的影响

由表 2 可知, 各组黑米饮料中的花色苷经过酶解后均有不同程度的降解。全谷物组经过与蛋白酶解相同的 pH 和温度条件处理后, 花色苷保留率为 62.88%, 而蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组花色苷保留率分别为 57.77%、38.08%、40.21%, 低于全谷物组, 表明食物大分子的水解会使得黑米饮料中的花色苷失去保护而造成不同程度的损失。邹芳芳等也发现随着淀粉酶的添加, 紫薯浆中淀粉水解, 会导致花色苷失去保护, 含量降低^[14]。本实验酶解过程中对花色苷含量造成较大影响的是膳食纤维, 其次是淀粉, 蛋白次之, 但这种差异可能是不同的 pH 和温度条件导致的。各组黑米饮料经过酶解处理后总酚含量显著下降, 由 547.02 $\mu\text{g GAE/mL}$ 下降至 398.80~424.11 $\mu\text{g GAE/mL}$, 但各处理组间无显著性差异 ($P>0.05$)。

在热处理过程中, 花色苷涉及一些反应, 例如降解、与其他化合物的缩合和非酶促褐变反应, 这些反应会产生棕色和聚合色物质^[15]。溶液中含有的还原糖、氨基酸和维生素 C 导致非酶促褐变, 可以通过褐

变指数来反应^[16]。由表 2 可知, 酶解过程由于花色苷的降解使得各组黑米饮料的聚合物颜色和褐变指数都显著升高, 全谷物组、蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组的聚合物颜色由 0.28 分别提高至 0.34、0.38、0.39、0.46, 褐变指数由 0.76 分别提高至 0.79、0.80、0.98、1.05, 结合花色苷保留率结果可知, 花色苷降解的同时伴随着聚合物颜色的增加。江甜等在探究紫薯花色苷的降解动力学时也发现, 紫薯花色苷提取液在贮藏过程中聚合物颜色和褐变指数均会随花色苷含量的降低而增加^[17]。值得注意的是, 淀粉酶解组花色苷的降解小于纤维酶解组, 聚合物颜色和褐变指数却更高, 这可能是体系中大量的还原糖发生了非酶促褐变反应造成的。

2.1.3 酶解处理对黑米饮料抗氧化活性的影响

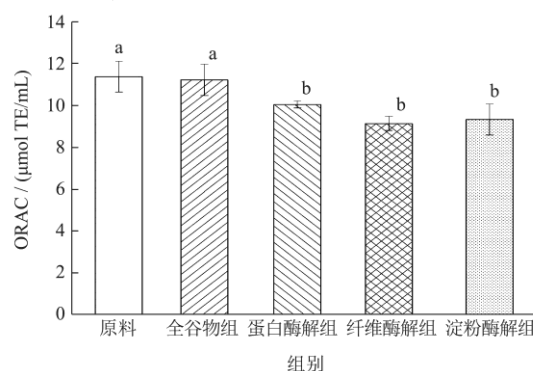


图 1 酶解对黑米饮料抗氧化活性的影响

Fig.1 Effect of enzymatic hydrolysis on antioxidant activity of black rice beverage

注: 不同字母代表存在显著性差异 ($P<0.05$), 下同。

由图 1 可知, 酶解后全谷物组、蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组的 ORAC 抗氧化活性分别由未处理的 11.39 $\mu\text{mol TE/mL}$ 降低至 11.24、10.06、9.15、9.34 $\mu\text{mol TE/mL}$ 。虽然各组黑米饮料在酶解工艺中花色苷虽损失了 37.12%~61.98%, 但抗氧化活性仍能保留 80% 以上, 这说明花色苷的一些降解产物同样具有抗氧化能力。Zheng 等^[18]也发现虽然紫米酒在储藏期间的花色苷含量已大大降低, 但抗氧化能力并没有明显变化, 并推断抗氧化能力的损失可以通过花色苷的降解产物酚类物质来补偿。

2.2 灭菌处理对黑米饮料营养成分和抗氧化活性的影响

2.2.1 灭菌处理对黑米饮料营养成分的影响

由表 3 可知, 与灭菌前比较, 蛋白酶解组、纤维

酶解组、淀粉酶解组花色苷保留率分别为 14.42%、16.08%、9.68%, 均低于全谷物组的 17.62%。结果表明在高压灭菌的过程中, 黑米中的蛋白、膳食纤维、淀粉均可以一定程度上保护花色苷, 其中淀粉的保护作用最强, 蛋白次之, 膳食纤维较弱。蛋白酶解组的总酚含量为 274.92 $\mu\text{g GAE/mL}$, 显著低于全谷物组、纤维酶解组、淀粉酶解组的 340.96、351.59、340.96 $\mu\text{g GAE/mL}$ 。

灭菌处理后, 随着花色苷的降解, 全谷物组、蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组黑米饮料聚合物颜色显著升高至 0.49、0.58、0.54、0.57, 褐变指数显著升高至 1.25、1.35、1.37、1.42。程冯云^[19]也发现石榴浊汁经热杀菌后聚合物颜色和褐变指数显著增加。其中可能的原因是花色苷的降解产生查尔酮, 在热处理过程中查尔酮进一步脱脂为棕色产物; 还有一种原因是花色苷本身或与其他酚类化合物之间的反应^[20]。

表 3 灭菌处理对黑米饮料营养活性成分的影响

Table 3 Effect of sterilization on active nutrients of black rice beverage

组别	花色苷质量浓度/ $(\mu\text{g/mL})$	聚合物颜色	褐变指数	总酚含量/ $(\mu\text{g GAE/mL})$
全谷物	15.40 \pm 1.83 ^a (17.62% ^A)	0.49 \pm 0.01 ^c	1.25 \pm 0.01 ^c	340.96 \pm 30.20 ^a
蛋白酶解	11.58 \pm 1.47 ^b (14.42%)	0.58 \pm 0.01 ^b	1.35 \pm 0.01 ^b	274.81 \pm 4.38 ^b
纤维酶解	8.51 \pm 0.93 ^b (16.08%)	0.54 \pm 0.01 ^a	1.37 \pm 0.01 ^b	351.59 \pm 22.40 ^a
淀粉酶解	5.41 \pm 0.99 ^c (9.68%)	0.57 \pm 0.01 ^a	1.42 \pm 0.02 ^a	336.74 \pm 3.03 ^a

注: A 表示花色苷含量较灭菌前的保留率。

2.2.2 灭菌处理对黑米饮料抗氧化活性的影响

由图 2 可知, 经灭菌后, 全谷物组、蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组黑米饮料的抗氧化活性进一步下降至 7.16、6.90、7.35、7.13 $\mu\text{mol TE/mL}$, 而各组间的含量无显著性差异, 这可能是源于总酚含量的下降, 表明酚类物质是黑米饮料中主要抗氧化成分^[21]。许多研究表明, 有色谷物食品的总酚含量与抗氧化活性呈正相关, 食品加工中使用的较高温度可能会改变酚类化合物的分子结构, 从而影响抗氧化活性^[22]。

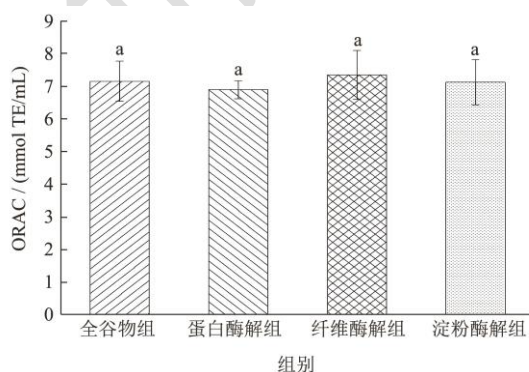


图 2 灭菌对黑米饮料抗氧化活性的影响

Fig.2 Effect of sterilization on antioxidant activity of black rice beverage

2.3 黑米饮料储藏稳定性的研究

2.3.1 不同光照条件下各组黑米饮料花色苷的稳定性

图 3a 显示了不同组别黑米饮料在常温光照储藏条件下的花色苷保留率随时间的变化趋势。在储藏期间, 各组黑米饮料的花色苷保留率均呈现下降趋势。储藏结束时, 花色苷水提液的花色苷保留率最小, 为 20.42%; 淀粉酶解组的花色苷保留率在显著高于水提液组, 为 28.27%。全谷物组、蛋白酶解组、纤维酶解组的花色苷保留率最高, 分别为 44.42%、40.18%、41.28%, 三组间无显著性差异。说明在常温光照条件下, 淀粉对黑米饮料中的花色苷起主要的保护作用。

图 3b 是常温避光条件下各组黑米饮料花色苷保留率在贮藏过程中花色苷保留率的变化趋势。在储藏期间, 各组黑米饮料的花色苷保留率均呈现下降趋势, 储藏结束时不同组别黑米饮料中花色苷保留率的大小顺序与常温光照条件相同, 依然为全谷物组 \approx 蛋白酶解组 \approx 纤维酶解组 $>$ 淀粉酶解组 $>$ 水提液, 但各组的花色苷保留率较光照条件均有提升, 从 20.42%~44.42% 提升至 22.18%~47.56%, 这说明避光条件有利于花色

昔的储藏。Zheng 等^[18]分别采用室温自然光、室温避光两种方法贮藏紫米酒也发现在储藏过程中,光照的增加对花色苷的稳定性有负面影响,在30 d的储藏中,室温自然光条件下花色苷的降解率 83.35% 高于室温避光的 69.28%。

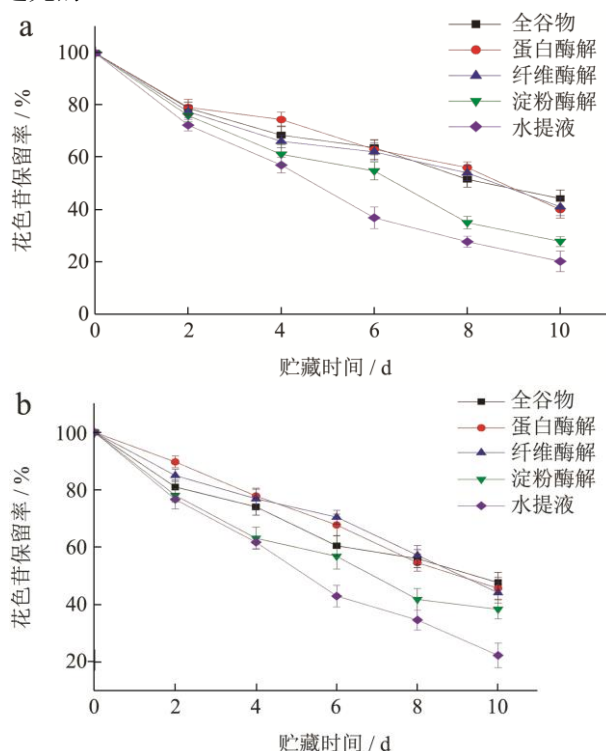


图3 不同光照条件下黑米饮料花色苷保留率

Fig.3 Anthocyanin retention of black rice beverage under different light conditions

注: a 为常温光照条件下各组黑米饮料的花色苷保留率,

b 为常温避光条件下各组黑米饮料的花色苷保留率。

2.3.2 不同温度条件下各组黑米饮料花色苷的稳定性

由图4a可知,在4℃避光贮藏期间,各组黑米饮料花色苷都较为稳定。10 d时,全谷物组、蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组、水提液组的花色苷保留率分别为92.11%、91.40%、91.69%、88.03%、85.58%。

由图4b可知,37℃避光条件下花色苷降解显著。说明高温会加快花色苷生化反应的进行,促使红色的黄烺盐阳离子向无色的假碱或查尔酮方向转化,并且高温破坏了反应的可逆性,导致花色苷进一步降解、褪色^[23]。水提液组花色苷在6 d全部降解。贮藏结束时,全谷物组、蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组的花色苷保留率分别为16.43%、11.03%、10.51%、10.42%,均显著低于4℃避光储藏条件($P < 0.05$),说明低温更有利于花色苷的储藏。Goessinger 等^[24]探究草莓花蜜中花色苷的稳定性也观察到在37℃时花色苷的损失非常快,而4℃条件下花色苷的降解要

低得多。对比37℃避光条件下储藏结束时各组的花色苷保留率,发现淀粉对花色苷的影响最大,纤维次之,蛋白较弱。对比不同储藏条件下储藏结束时各组的花色苷保留率,总体来说均为全谷物组的花色苷保留率最高,蛋白酶解、纤维酶解、淀粉酶解组降解速率均有不同程度地加快,水提液的花色苷保留率最低,这说明蛋白、纤维素、淀粉均可保护黑米中的花色苷。

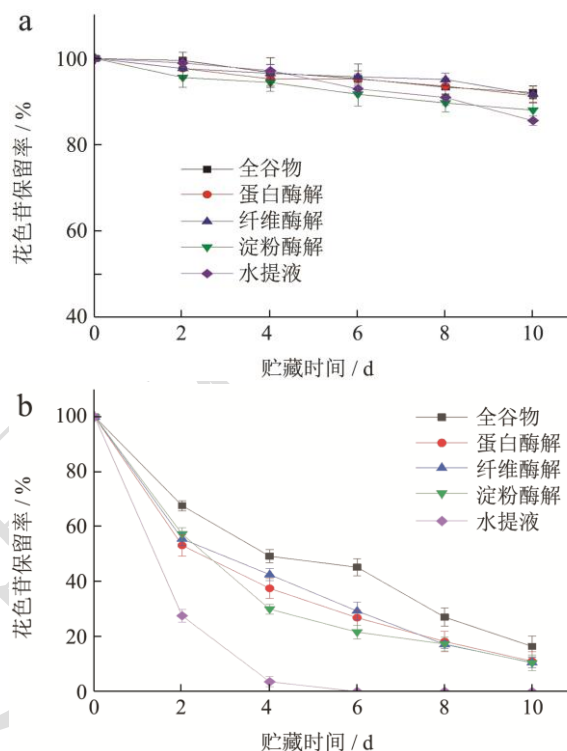


图4 不同温度条件下黑米饮料花色苷保留率

Fig.4 Anthocyanin retention of black rice beverage under different temperature conditions

注: a 为4℃避光条件下各组黑米饮料的花色苷保留率,

b 为37℃避光条件下各组黑米饮料的花色苷保留率。

2.3.3 黑米饮料花色苷的降解动力学研究

通过计算发现,在常温光照、常温避光、37℃贮藏条件下各组花色苷降解率的对数 $-\ln(C_t/C_0)$ 与时间(t)之间呈线性关系,相关线性回归系数均大于0.9,表明在这些储藏条件下黑米花色苷的降解符合一级动力学方程^[25]。

由回归方差求出反应速率常数(k),再利用公式计算出黑米花色苷热降解半衰期 $t_{1/2}$,计算结果显示于表4中。

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (4)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (5)$$

式中:

$-\ln \frac{C_t}{C_0}$ ——花色苷降解率的对数, C_0 、 C_t 分别是在初始

和 t 时刻的花色苷质量浓度 (mg/mL);

k ——反应速率常数;

$t_{1/2}$ ——黑米花色苷热降解半衰期。

表4 不同储藏条件下各组黑米饮料花色苷的降解参数

Table 4 Degradation parameters of black rice anthocyanins under light under different storage conditions

储藏条件	组别	R^2	$k (10^{-2} d^{-1})$	$t_{1/2}$
常温光照	全谷物	0.98	7.71	8.99
	蛋白酶解	0.96	8.22	8.43
	纤维酶解	0.97	7.95	8.72
	淀粉酶解	0.96	10.38	6.40
常温避光	水提液	0.99	16.06	4.31
	全谷物	0.99	7.18	9.65
	蛋白酶解	0.99	7.95	8.72
	纤维酶解	0.96	7.68	9.02
37℃避光	淀粉酶解	0.98	9.70	7.14
	水提液	0.99	14.69	4.72
	全谷物	0.97	16.95	4.09
	蛋白酶解	0.96	17.98	3.85
37℃避光	纤维酶解	0.98	20.14	3.44
	淀粉酶解	0.96	20.26	3.42
	水提液	0.99	90.90	0.76

由表4可以看出,黑米饮料的热降解速率常数 k 和半衰期 $t_{1/2}$ 会受到黑米饮料基质的影响,全谷物组与各酶解组相比,在相同条件下花色苷的降解均较慢,半衰期延长。在常温光照条件下各组黑米饮料花色苷半衰期由大到小为:全谷物组>纤维酶解组>蛋白酶解组>淀粉酶解组>水提液,常温避光条件下各组黑米饮料花色苷半衰期由大到小为:全谷物组>纤维酶解组>蛋白酶解组>淀粉酶解组>水提液,37℃避光条件下各组黑米饮料花色苷半衰期由大到小为:全谷物组>蛋白酶解组>纤维酶解组>淀粉酶解组>水提液,说明黑米中的大分子有利于花色苷的保存,总体来说淀粉对花色苷稳定性的影响最大。而各储藏条件大分子对花色苷稳定性影响的差异可能是由于环境因素对食物大分子与花色苷之间相互作用的影响导致的。Chung等^[26]探究了乳清蛋白、柑橘果胶等四种食物大分子抑制花色苷降解的潜力,也发现模型饮料体系中食物大分子的存在可以提高加速存储条件下花色苷的稳定性。在常温避光条件下各组

黑米饮料花色苷的降解速率要低于光照条件下的花色苷降解速率,这表明光照不利于黑米花色苷的稳定,与Lin等^[27]的结论一致。比较不同温度可以看出各组黑米饮料中花色苷的降解速率均会随着温度的提高而增加,表明高温会破坏花色苷的稳定性,这和刘长姣等^[28]的结论一致。

2.4 不同贮藏条件下酶解处理对黑米饮料总

酚和抗氧化活性的影响

2.4.1 不同储藏条件下酶解处理对黑米饮料总酚的影响

由表5可得,贮藏10d后,在37℃避光条件下,各组黑米饮料总酚下降最快,蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组分别由274.81、351.59、336.74 μg GAE/mL显著下降至235.48、267.31、245.59 μg GAE/mL ($P < 0.05$),全谷物组下降速率稍缓,由340.96 μg GAE/mL显著下降到265.12 μg GAE/mL ($P < 0.05$)。酚类物质在4℃和常温条件下储藏损失均较小,散射光对其稳定性影响也不大,而37℃不利于酚类物质的稳定。对比花色苷,酚类物质的热稳定性和光稳定性更强,这可能是由于多酚比具有糖苷形式的花色苷对环境因素的耐受性更高^[29]。

2.4.2 不同贮藏条件下酶解处理对黑米饮料抗氧化活性的影响

本研究选用了ORAC自由基清除能力来评价各贮藏条件期间黑米饮料抗氧化活性变化。由表6可知,贮藏10d后,在常温光照、常温避光、4℃避光条件下各组的抗氧化活性未发生显著变化 ($P > 0.05$)。而37℃避光条件下,全谷物组、蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组分别由7.16、6.90、7.35、7.13 μmol TE/mL显著下降至5.71、4.88、5.72、5.57 μmol TE/mL ($P < 0.05$),这与总酚含量的趋势一致。说明37℃条件下抗氧化活性的降低可能是由于总酚含量的降低,这点与加工环节对黑米饮料活性成分的影响一致。Estupinan^[30]也发现,在安第斯浆果模型饮料的储存期间,抗氧化能力降低与总酚含量的降低同时发生。Sui等^[31]研究花色苷溶液在不同温度下的储藏时发现,4℃和25℃的储存温度对水溶液的抗氧化能力影响不大,仅在储存于45℃和65℃时的抗氧化能力显著下降,这说明花色苷的抗氧化能力可通过氧化、聚合等反应而新形成的酚类化合物进行补偿。

表 5 不同储藏条件下各组黑米饮料花色苷的总酚含量

Table 5 Total phenol content of black rice anthocyanins under light under different storage conditions

储藏条件	组别	总酚含量/($\mu\text{g GAE/mL}$)					
		0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d
常温光照	全谷物	340.96 \pm 30.20 ^a	340.81 \pm 16.48 ^a	341.77 \pm 14.62 ^a	327.60 \pm 13.90 ^a	324.61 \pm 26.17 ^a	325.55 \pm 24.67 ^a
	蛋白酶解	274.81 \pm 4.38 ^a	273.01 \pm 1.57 ^a	265.87 \pm 29.33 ^a	271.79 \pm 11.06 ^a	267.49 \pm 11.28 ^a	265.91 \pm 6.36 ^a
	纤维酶解	351.59 \pm 22.40 ^a	352.02 \pm 7.28 ^a	355.44 \pm 0.06 ^a	324.67 \pm 8.60 ^b	321.78 \pm 4.85 ^b	320.86 \pm 1.64 ^b
	淀粉酶解	336.74 \pm 3.03 ^a	335.59 \pm 6.09 ^a	328.52 \pm 3.90 ^{ab}	328.34 \pm 5.56 ^{ab}	328.31 \pm 5.08 ^{ab}	321.29 \pm 1.85 ^b
常温避光	全谷物	340.96 \pm 30.20 ^a	342.57 \pm 22.61 ^a	341.32 \pm 10.08 ^a	339.95 \pm 17.93 ^a	339.75 \pm 9.71 ^a	337.73 \pm 3.56 ^a
	蛋白酶解	274.81 \pm 4.38 ^a	276.50 \pm 2.94 ^a	277.62 \pm 17.69 ^a	269.38 \pm 17.79 ^a	273.93 \pm 15.18 ^a	278.09 \pm 9.81 ^a
	纤维酶解	351.59 \pm 22.40 ^a	338.52 \pm 10.31 ^a	334.25 \pm 2.91 ^a	337.26 \pm 3.52 ^a	344.15 \pm 13.29 ^a	337.26 \pm 3.52 ^a
	淀粉酶解	336.74 \pm 3.03 ^a	339.05 \pm 3.66 ^a	335.39 \pm 4.00 ^a	336.17 \pm 2.22 ^a	337.61 \pm 2.42 ^a	334.97 \pm 4.92 ^a
4 °C 避光	全谷物	340.96 \pm 30.20 ^a	339.72 \pm 23.40 ^a	336.19 \pm 10.43 ^a	340.19 \pm 20.72 ^a	344.74 \pm 20.05 ^a	335.69 \pm 8.87 ^a
	蛋白酶解	274.81 \pm 4.38 ^a	276.82 \pm 29.00 ^a	271.47 \pm 9.89 ^a	275.10 \pm 15.01 ^a	269.43 \pm 15.87 ^a	267.66 \pm 7.77 ^a
	纤维酶解	351.59 \pm 22.40 ^a	356.34 \pm 21.17 ^a	359.88 \pm 0.58 ^a	340.89 \pm 6.22 ^a	345.07 \pm 5.00 ^a	343.01 \pm 6.07 ^a
	淀粉酶解	336.74 \pm 3.03 ^a	333.33 \pm 10.32 ^a	330.31 \pm 3.68 ^a	326.79 \pm 23.23 ^a	330.24 \pm 11.01 ^a	327.35 \pm 4.93 ^a
37 °C 避光	全谷物	340.96 \pm 30.20 ^a	331.48 \pm 9.26 ^a	322.41 \pm 19.42 ^a	293.67 \pm 14.93 ^{ab}	270.07 \pm 13.56 ^b	265.12 \pm 24.69 ^b
	蛋白酶解	274.81 \pm 4.38 ^a	273.98 \pm 15.81 ^a	260.01 \pm 1.05 ^{ab}	254.20 \pm 3.61 ^b	234.61 \pm 5.04 ^c	235.48 \pm 11.02 ^c
	纤维酶解	351.59 \pm 22.40 ^a	320.16 \pm 5.79 ^b	277.10 \pm 10.00 ^c	270.86 \pm 6.34 ^c	264.30 \pm 10.01 ^c	267.31 \pm 6.65 ^c
	淀粉酶解	336.74 \pm 3.03 ^a	287.39 \pm 3.53 ^b	244.79 \pm 12.81 ^c	245.83 \pm 19.41 ^c	241.12 \pm 10.19 ^c	245.59 \pm 19.00 ^c

注: 含量以黑米饮料计, 即 $\mu\text{g GAE/mL}$ 黑米饮料, 同一行不同字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。

表 6 不同储藏条件下各组黑米饮料花色苷的 ORAC 活性

Table 6 ORAC activity of black rice beverage under different storage conditions

储藏条件	组别	ORAC 活性/($\mu\text{mol TE/mL}$)					
		0 d	2 d	4 d	6 d	8 d	10 d
常温光照	全谷物	7.16 \pm 0.61 ^a	7.33 \pm 0.48 ^a	7.54 \pm 0.72 ^a	7.81 \pm 0.72 ^a	7.24 \pm 0.80 ^a	7.50 \pm 0.32 ^a
	蛋白酶解	6.90 \pm 0.28 ^a	6.68 \pm 0.32 ^a	6.64 \pm 0.54 ^a	6.72 \pm 0.45 ^a	6.63 \pm 0.12 ^a	6.60 \pm 0.67 ^a
	纤维酶解	7.35 \pm 0.75 ^a	7.21 \pm 0.44 ^a	6.94 \pm 0.77 ^a	7.03 \pm 0.29 ^a	7.13 \pm 0.27 ^a	7.01 \pm 1.20 ^a
	淀粉酶解	7.13 \pm 0.69 ^a	7.09 \pm 1.07 ^a	7.09 \pm 0.26 ^a	7.75 \pm 1.06 ^a	7.32 \pm 0.34 ^a	7.27 \pm 0.08 ^a
常温避光	全谷物	7.16 \pm 0.61 ^a	7.36 \pm 0.51 ^a	7.81 \pm 0.60 ^a	7.16 \pm 1.00 ^a	7.29 \pm 0.65 ^a	7.49 \pm 0.42 ^a
	蛋白酶解	6.90 \pm 0.28 ^a	6.99 \pm 0.43 ^a	6.89 \pm 0.52 ^a	6.78 \pm 0.67 ^a	6.78 \pm 0.10 ^a	6.69 \pm 0.60 ^a
	纤维酶解	7.35 \pm 0.75 ^a	7.31 \pm 0.46 ^a	7.09 \pm 0.74 ^a	7.22 \pm 0.49 ^a	7.07 \pm 0.49 ^a	7.45 \pm 0.48 ^a
	淀粉酶解	7.13 \pm 0.69 ^a	6.79 \pm 1.53 ^a	6.93 \pm 0.33 ^a	7.23 \pm 0.87 ^a	7.46 \pm 0.60 ^a	7.23 \pm 0.16 ^a
4 °C 避光	全谷物	7.16 \pm 0.61 ^a	7.58 \pm 0.52 ^a	7.77 \pm 0.38 ^a	7.69 \pm 0.18 ^a	7.32 \pm 0.79 ^a	7.51 \pm 0.28 ^a
	蛋白酶解	6.90 \pm 0.28 ^a	6.97 \pm 0.53 ^a	6.81 \pm 0.50 ^a	6.74 \pm 0.66 ^a	6.78 \pm 0.06 ^a	6.76 \pm 0.48 ^a
	纤维酶解	7.35 \pm 0.75 ^a	7.09 \pm 1.04 ^a	7.34 \pm 0.46 ^a	7.37 \pm 1.17 ^a	7.43 \pm 0.61 ^a	7.50 \pm 1.12 ^a
	淀粉酶解	7.13 \pm 0.69 ^a	6.72 \pm 0.85 ^a	7.16 \pm 0.95 ^a	7.85 \pm 0.95 ^a	7.26 \pm 0.30 ^a	7.38 \pm 0.31 ^a
37 °C 避光	全谷物	7.16 \pm 0.61 ^a	6.84 \pm 0.35 ^{ab}	6.30 \pm 0.50 ^{bc}	6.09 \pm 0.33 ^c	5.79 \pm 0.25 ^c	5.71 \pm 0.31 ^c
	蛋白酶解	6.90 \pm 0.28 ^a	6.35 \pm 0.33 ^{ab}	6.22 \pm 0.32 ^{bc}	5.95 \pm 0.33 ^{bc}	5.63 \pm 0.30 ^c	4.88 \pm 0.37 ^d
	纤维酶解	7.35 \pm 0.75 ^a	7.16 \pm 0.61 ^{ab}	6.60 \pm 0.46 ^{abc}	6.42 \pm 0.27 ^{bc}	5.96 \pm 0.31 ^c	5.72 \pm 0.23 ^c
	淀粉酶解	7.13 \pm 0.69 ^a	6.29 \pm 0.38 ^a	6.14 \pm 1.23 ^{ab}	6.00 \pm 0.30 ^{ab}	5.91 \pm 0.45 ^{ab}	5.57 \pm 0.33 ^b

注: 含量以黑米饮料计, 即 $\mu\text{g TE/mL}$ 黑米饮料, 同一行不同字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。

3 结论

本研究将黑米中的食物大分子蛋白质、纤维素、

淀粉分别酶解制备成不同的黑米饮料, 探究加工过程及储藏过程中各组黑米饮料花色苷稳定性和抗氧化活性的变化。结果表明, 在酶解过程中由于大分子的降

解各酶解组黑米饮料的花色苷保留率均低于相同加热处理不加酶的全谷物组。灭菌后蛋白酶解组、纤维酶解组、淀粉酶解组的花色苷保留率均低于全谷物组,淀粉酶解组最低,说明灭菌过程中黑米中的淀粉对花色苷的保护作用最强,蛋白次之,膳食纤维较弱。经过酶解、灭菌后花色苷损失了80%以上,但60%的抗氧化活性得以保留,说明花色苷的降解产物同样具有抗氧化活性。将灭菌后的各组样品于不同温度(4℃避光、37℃避光)和光照(常温避光、常温日光灯直射)储藏10d后,4℃条件下各组黑米饮料的花色苷含量差异不显著,其他条件下各组的花色苷的降解均符合一级动力学模型特征。相较于花色苷水提液,全谷物组和各酶解组花色苷的保留率均显著提高,全谷物组的花色苷保留率最高。不同储藏条件大分子对花色苷降解速率影响的差异可能是由于环境因素对食物大分子与花色苷之间相互作用的影响导致的,总体来说淀粉对花色苷稳定性的影响最大,这可能是由于黑米中淀粉的含量最高。储藏过程中虽然花色苷存在不同程度的降解,但储藏结束时黑米饮料的抗氧化活性仅在37℃避光条件下显著降低,这与总酚含量的趋势相一致。基于上述结果,全谷物利用的黑米饮料能更好保留功能活性,黑米饮料中蛋白质、膳食纤维、淀粉的存在均能提高花色苷的稳定性。

参考文献

- [1] Zhang S, Ma Q, Dong L, et al. Phenolic profiles and bioactivities of different milling fractions of rice bran from black rice [J]. Food Chem (4.052), 2022, 378: 132035.
- [2] Bhat F M, Sommano S R, Riar C S, et al. Status of bioactive compounds from bran of pigmented traditional rice varieties and their scope in production of medicinal food with nutraceutical importance [J]. Agronomy-Basel, 2020, 10(11): 1817.
- [3] 王立,王领军,姚惠源,等.黑米及黑米色素的加工与利用[J].粮食与饲料工业,2004(6):11-13,20.
- [4] Quan W, He W, Qie X, et al. Effects of β -cyclodextrin, whey protein, and soy protein on the thermal and storage stability of anthocyanins obtained from purple-fleshed sweet potatoes [J]. Food Chemistry, 2020, 320: 126655.
- [5] Chung C, Rojanasasithara T, Mutilangi W, et al. Enhancement of colour stability of anthocyanins in model beverages by gum arabic addition [J]. Food Chem (4.052), 2016, 201: 14-22.
- [6] Zhao L, Pan F, Mehmood A, et al. Protective effect and mechanism of action of xanthan gum on the color stability of black rice anthocyanins in model beverage systems [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 3800-3807.
- [7] Nascimento E S D, Anaya K, Oliveira J M C D, et al. Identification of bioactive peptides released from in vitro gastrointestinal digestion of yam proteins (*Dioscorea cayennensis*) [J]. Food Research International, 2021, 143: 110286-110286.
- [8] Long Y, Xiang X, Yan L, et al. Optimization of ethanol extracting process of anthocyanin from black rice [J]. Science & Technology of Food Industry, 2018, 39(21): 172-177.
- [9] Lin Z, Fischer J, Wicker L. Intermolecular binding of blueberry pectin-rich fractions and anthocyanin [J]. Food Chemistry, 2016, 194: 986-993.
- [10] Lavefve L, Brownmiller C, Howard L, et al. Changes in polyphenolics during storage of products prepared with freeze-dried wild blueberry powder [J]. Foods, 2020, 9(4): 466.
- [11] Ghafoor K, Al Juhaimi F, Ozcan M M, et al. Total phenolics, total carotenoids, individual phenolics and antioxidant activity of ginger (*Zingiber officinale*) rhizome as affected by drying methods [J]. Lwt - Food Science and Technology, 2020, 126: 109354.
- [12] Dongxiao S, Huihui T, Ruifen Z, et al. Structural elucidation and cellular antioxidant activity evaluation of major antioxidant phenolics in lychee pulp [J]. Food Chemistry, 2014, 158: 385-391.
- [13] 崔沙沙,钟俊植,方冲,等.不同低水解度的大米蛋白溶解性与结构变化的关系[J].食品工业科技,2016,37(7):86-91.
- [14] 邹芳芳,夏书芹,张晓鸣,等.酶解条件对紫薯浆原料利用和花色苷保留效果的影响[J].中国科技论文,2016,25(1):34-45.
- [15] Zhang Y, Sun Y, Zhang H, et al. The degradation rules of anthocyanins from eggplant peel and antioxidant capacity in fortified model food system during the thermal treatments [J]. Food Bioscience, 2020, 38(1).
- [16] Dorris M R, Voss D M, Bollom M A, et al. Browning index of anthocyanin-rich fruit juice depends on pH and anthocyanin loss more than the gain of soluble polymeric pigments [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(4): 911-921.
- [17] 江甜,李佳,杨宁,等.紫薯花色苷在贮藏过程中的降解特性[J].食品科学,2019,40(7):88-94.
- [18] Zheng R-L, Ren T, Niu C-T, et al. Anthocyanins composition and antioxidant activity of purple rice and color degradation under sunlight exposure of purple rice wine [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2022, 154: 91-97.

- [19] 程冯云.不同加工方式对石榴浊汁微生物和品质的影响研究[D].昆明:昆明理工大学,2021.
- [20] Tian J, Ying M, Lushan S, et al. Degradation of anthocyanins and polymeric color formation during heat treatment of purple sweet potato extract at different pH [J]. Food Chemistry, 2019, 274: 460-470.
- [21] Yue X, Xu Z. Changes of anthocyanins, anthocyanidins, and antioxidant activity in bilberry extract during dry heating [J]. Journal of Food Science, 2008, 73(6): C494-C499.
- [22] Wongwisitchai S, Kijpatanasilp I, Assatarakul K. Changes in content of bioactive constituents and antioxidant activity of riceberry after food processing and degradation kinetics during storage [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(3): 1096-1107.
- [23] 刘军波,邹礼根,赵芸.蓝莓花青素加工环境稳定性研究[J].食品与生物技术学报,2018,37(10):1073-1079.
- [24] Goessinger M, Ullram T, Hermes M, et al. Effects of pre-freezing, puree content and pasteurisation regime on colour stability of strawberry nectar made from puree [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2009, 89(1): 144-149.
- [25] Fan L, Wang Y, Xie P, et al. Copigmentation effects of phenolics on color enhancement and stability of blackberry wine residue anthocyanins: Chromaticity, kinetics and structural simulation [J]. Food Chem, 2019, 275: 299-308.
- [26] Chung C, Rojanasasithara T, Mutilangi W, et al. Enhanced stability of anthocyanin-based color in model beverage systems through whey protein isolate complexation [J]. Food Research International, 2015, 76: 761-768.
- [27] Lin Z, Chengyun H, Zhigang Z, et al. Stability of anthocyanin extracted from black rice by different methods [J]. Food Industry, 2018, 8: 6-10.
- [28] 刘长姣,申丹妮,王磊,等.黑米花色苷热降解动力学研究[J].中国食品添加剂,2018,7:109-113.
- [29] Mejia-Meza E I, Yanez J A, Remsberg C M, et al. Effect of dehydration on raspberries: polyphenol and anthocyanin retention, antioxidant capacity, and antiadipogenic activity [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(1): H5-H12.
- [30] Estupinan D C, Schwartz S J, Garzon G A. Antioxidant activity, total phenolics content, anthocyanin, and color stability of isotonic model beverages colored with Andes berry (*Rubus glaucus* Benth) anthocyanin powder [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(1): S26-S34.
- [31] Sui X, Bary S, Zhou W. Changes in the color, chemical stability and antioxidant capacity of thermally treated anthocyanin aqueous solution over storage [J]. Food Chemistry, 2016, 192: 516-524.