

酶解耦合挤压膨化对海水稻米 抗氧化多酚的释放作用

徐振岗¹, 胡家睿¹, 汪曾玉¹, 吴婧媛¹, 许心妍¹, 张雨真¹, 赵广河², 刘磊^{1*}

(1. 五邑大学药学与食品工程学院, 广东江门 529020) (2. 广西师范大学生命科学学院, 广西桂林 541006)

摘要: 为研究不同酶(耐高温 α -淀粉酶、纤维素酶及复合酶)耦合挤压膨化对海水稻米多酚及抗氧化活性的影响。将酶浓度为 100、1 000 U·g⁻¹ 的耐高温 α -淀粉酶、纤维素酶及二者等量混合组成的复合酶均匀喷洒在海水稻米粉体上, 再采用双螺杆挤压膨化机进行加工, 然后分析海水稻米中游离态和结合态多酚、黄酮、花色苷及抗氧化活性的变化。结果表明: 与未添加酶直接进行挤压膨化的海水稻米对照组相比, 添加了 100、1 000 U·g⁻¹ 的耐高温 α -淀粉酶和复合酶解耦合挤压膨化海水稻米的游离酚分别由 95.60 mg GAE/100 g DW 增加至 110.38、176.33、108.51 和 195.65 mg GAE/100 g DW, 游离黄酮分别由 50.42 mg CE/100 g DW 增加至 53.00、100.38、58.76 和 107.59 mg CE/100 g DW, 花色苷含量分别由 5.18 μ g CGE/g DW 增加至 5.84、7.18、5.51 和 9.85 μ g CGE/g DW, FRAP 抗氧化能力分别由 728.21 μ mol Fe²⁺/100 g DW 增加至 754.33、882.4、764.77 和 929.72 μ mol Fe²⁺/100 g DW, ORAC 抗氧化能力分别由 1 501.56 μ mol TE/g DW 增加至 1 872.74、1 925.24、1 826.8 和 2 201.48 μ mol TE/g DW。而仅添加纤维素酶对多酚和黄酮的释放没有显著作用。其中添加 1 000 U·g⁻¹ 的复合酶解耦合挤压膨化对游离酚、游离态黄酮含量和花色苷含量增加最多, 其抗氧化能力也显著高于其他组别。该研究旨在拓宽海水稻米的精深加工利用途径, 为研发海水稻米营养代餐食品提供理论参考。

关键词: 海水稻米; 酶解挤压膨化; 酚类物质; 抗氧化活性

文章编号: 1673-9078(2026)7-195-203

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0339

Effects of Enzymatic Hydrolysis Coupled with Extrusion on the Release of Antioxidant Polyphenols from Sea Rice

XU Zhengang¹, HU Jiarui¹, WANG Zengyu¹, WU Jingyuan¹, XU Xinyan¹, ZHANG Yuzhen¹,
ZHAO Guanghe², LIU Lei^{1*}

(1. School of Pharmacy and Food Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China)

(2. College of Life Sciences, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China)

Abstract: The effects of thermostable α -amylase, cellulase, and complex enzyme coupled with extrusion on the polyphenols and antioxidant activity of sea rice were investigated. Sea rice powder was sprayed evenly with the test enzymes or complex enzyme (mixture of both enzymes in equal amounts) at a concentration of 100 or 1 000 U·g⁻¹ and processed using a twin-screw extruder.

引文格式:

徐振岗, 胡家睿, 汪曾玉, 等. 酶解耦合挤压膨化对海水稻米抗氧化多酚的释放作用[J]. 现代食品科技, 2026, 42(7): 195-203.

XU Zhengang, HU Jiarui, WANG Zengyu, et al. Effects of enzymatic hydrolysis coupled with extrusion on the release of antioxidant polyphenols from sea rice [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 195-203.

收稿日期: 2025-03-10; 修回日期: 2025-07-22; 接受日期: 2025-07-28

基金项目: 广东省普通高校重点领域专项(2024ZDZX2007); 五邑大学教育教学研究与改革项目(JX2025002); 广东大学生科技创新培育专项资金资助项目(pdjh2024b379); 广东省百校联百县助力百千万工程行动项目(BQW2024001); 广东省科技创新战略专项资金(“大专项+任务清单”)项目(江科[2023]72号); 广西自然科学基金项目(2022GXNSFAA035523)

作者简介: 徐振岗(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与品质调控, E-mail: 963314202@qq.com

通讯作者: 刘磊(1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工与品质调控, E-mail: liulei@wyu.edu.cn

Changes in free and bound phenolic, flavonoid, and anthocyanin contents and antioxidant activity of sea rice were analyzed. Compared with the control group (direct extrusion of sea rice without enzyme addition), extruded sea rice hydrolyzed with 100 or 1 000 U·g⁻¹ thermostable α -amylase or the complex enzyme exhibited elevated free phenolic content (from 95.60 mg gallic acid equivalents (GAE)/100 g dry weight (DW) to 110.38, 176.33, 108.51, and 195.65 mg GAE/100 g DW), elevated free flavonoid content (from 50.42 mg catechin equivalents (CE)/100 g DW to 53.00, 100.38, 58.76 and 107.59 mg CE/100 g DW), elevated anthocyanin content (from 5.18 μ g chlorogenic acid equivalents (CGE)/g DW to 5.84, 7.18, 5.51 and 9.85 μ g CGE/g DW), elevated ferric reducing antioxidant power (FRAP) (from 728.21 μ mol Fe²⁺/100 g DW to 754.33, 882.4, 764.77 and 929.72 μ mol Fe²⁺/100 g DW), and elevated oxygen radical absorbance capacity (ORAC) (from 1 501.56 μ mol Trolox equivalents (TE)/g DW to 1 872.74; 1 925.24; 1 826.8; and 2 201.48 μ mol TE/g DW). In contrast, cellulase addition did not significantly affect phenolic and flavonoid release. However, free phenolic, free flavonoid, and anthocyanin contents increased the most with the addition of 1 000 U·g⁻¹ complex enzyme coupled with extrusion; its antioxidant capacity was also significantly higher than that of the other groups. This study aimed to broaden the scope of deep processing and utilization of sea rice and to provide a theoretical basis for the development of sea rice-based nutritional replacement meals.

Key words: sea rice; enzymatic extrusion; phenolic compounds; antioxidant activity

海水稻, 又称为耐盐碱水稻, 是一种能在盐(碱)质量分数 0.3% 以上的盐碱滩涂地生长^[1], 通过特殊的离子转运蛋白和渗透势调节等基因适应盐胁迫环境的水稻作物^[2]。海水稻具有抗涝、抗盐碱、抗倒伏、抗病虫等优势, 是区别于其他水稻的最大特点^[3,4]。与普通的五常大米相比, 海水稻米含有更多的多酚、黄酮及花色苷类植物活性成分^[5], 其含量分别为 512.33 mg GAE/100 g DW、215.39 mg CE/100 g DW 和 9.69 mg CGE/100 g DW^[6]。已有研究报道长期食用全谷物能够有效降低心血管疾病、糖尿病、癌症等慢性疾病的发病率^[7,8], 这部分归因于全谷物中含有抗氧化活性较强的酚类物质。

挤压膨化技术是集搅拌、杀菌、成型为一体, 具有生产效率高、适用性强、节能环保、成本低等优点的一种熟化工艺^[9-11]。挤压膨化技术已广泛应用于谷物营养食品的加工中。海水稻米中多酚以游离态和不溶性共价结合态形式存在, 主要与细胞壁多糖、蛋白质、木质素等大分子以酯键、醚键等连接, 并在分子间和分子内形成交联网络^[7,12]。Zhang 等^[13]研究发现挤压膨化会降低精米和糙米多酚含量和抗氧化活性。挤压膨化过程中会破坏谷物细胞壁, 促使共价结合态酚类物质向游离态多酚转变, 但是酚类物质在高温、高压、高剪切的苛刻环境下会显著减少。赵志浩^[11]研究发现与直接挤压膨化相比, 预酶解挤压膨化会提高普通糙米、红米和黑米总酚含量和抗氧化活性。曾子聪^[14]进一步研究发现在预酶解挤压膨化工艺中随着加入的耐高温 α -淀粉酶浓度增加, 糙米的总酚含量和抗氧化活性增加。这些研究表明预酶解挤压膨化相较于直接挤压膨化能够保留更多的酚类物质, 但是该方法前处理

工艺耗时, 不利于食品工业化连续生产。

目前, 国内外关于海水稻的研究主要集中在育种提高产量和耐盐碱基因的分析上^[15], 而关于海水稻米的精深加工技术研究较少。生物酶协同挤压膨化技术已被证实能改善大米粉的冲调分散性^[16,17], 然而关于酶解耦合挤压膨化对海水稻米酚类物质及抗氧化活性的影响的研究尚未见报道。因此, 本研究采用酶解耦合挤压膨化技术, 分别向海水稻米粉体中加入不同浓度的耐高温 α -淀粉酶、纤维素酶和复合酶(等量耐高温 α -淀粉酶与纤维素酶复合)混合后进行挤压膨化制备海水稻米膨化粉, 以不加酶直接挤压膨化制备的海水稻米膨化粉为对照组, 分别对海水稻米膨化粉测定游离酚、结合酚、游离黄酮、结合黄酮、花色苷、单体酚、铁离子还原能力(Ferric Reducing Antioxidant Power, FRAP)、氧自由基吸收能力(Oxygen Radical Absorbance Capacity, ORAC)等指标进行分析, 比较明确不同酶耦合挤压膨化对海水稻米酚类物质及抗氧化活性的影响。本研究旨在为海水稻米的精深加工和营养代餐食品开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

海红 11 号, 购自广东海稻红农业科技有限公司。

耐高温 α -淀粉酶(150 000 U·mL⁻¹), 购自宁夏夏盛实业集团有限公司; 纤维素酶(35 000 U·g⁻¹), 购自广州齐云生物有限公司; Trolox, 购自上海麦克林生化科技股份有限公司; 所有分离用有机溶剂均为国产分析纯。

FMHE36-24 双螺杆挤压膨化机, 湖南富马科食品工程技术有限公司; 800Y 高速多功能粉碎机, 永康市欧橡(oak)工贸有限公司; Biotek Synergy Neo2 多功能酶标仪, 美国 Agilent 公司; Acquity Are 高效液相色谱, 美国沃特世公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品制备

海水稻米原料粉碎至 60 目, 将耐高温 α -淀粉酶、纤维素酶、复合酶(耐高温 α -淀粉酶与纤维素酶等量混合)分散于一定蒸馏水中, 以边搅拌边喷淋的方式与海水稻米粉均匀混合, 各酶低浓度用量为 $100 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 、高浓度用量为 $1000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。将混合后的海水稻米粉送进挤压膨化机进行加工, 仪器参数参考肖家喜等^[16]的方法并稍加修改, 样品制备流程见图 1。设置挤压机温区温度: 二区温度 60°C 、三区温度 90°C 、四区温度 110°C 、五区温度 120°C 、六区温度为 130°C , 水分含量 28 wt.%, 喂料量 $7 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, 螺杆转速 $150 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。挤出物均在 45°C 恒温干燥烘箱中干燥 2 h, 粉碎并过 60 目筛, 4°C 低温密封保存。相同条件下, 未添加酶直接进行挤压膨化制备的海水稻米膨化粉作为对照组。实验组分为 6 组: 低浓度 α -淀粉酶 ($100 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻米 (Extrusion of Sea Rice with Low Concentration α -amylase, L-A)、高浓度 α -淀粉酶 ($1000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻米 (Extrusion of Sea Rice with High Concentration α -amylase, H-A)、低浓度纤维素酶 ($100 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻米 (Extrusion of Sea Rice with Low Concentration Cellulase, L-C)、高浓度纤维素酶 ($1000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻米 (Extrusion of Sea Rice with High Concentration Cellulase, H-C)、低浓度复合酶 ($100 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻米 (Extrusion of Sea Rice with Low Concentration Complex Enzyme, L-A+C)、高浓度复合酶 ($1000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻米 (Extrusion of Sea Rice with High Concentration Complex Enzyme, H-A+C)。

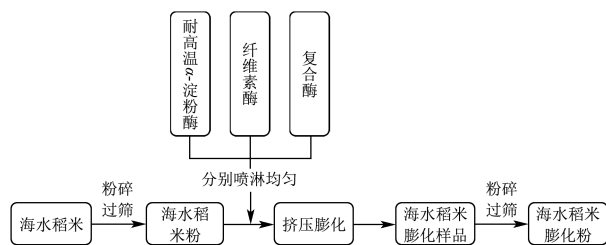


图 1 海水稻米膨化样品制备流程

Fig.1 Extrusion of sea rice sample

1.2.2 游离态多酚的提取

参考 Zhang 等^[18]的方法并稍加修改。准确称取 0.5 g 样品置于 50 mL 离心管中, 加入预冷至 4°C 的 $\varphi=80\%$ 丙酮 30 mL, 离心管在冰浴条件下用组织匀浆机 $10000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 均质 5 min 后, $6000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 10 min, 取上清液。向离心管中沉淀物中再加入预冷至 4°C 的 $\varphi=80\%$ 丙酮 30 mL, 重复上述步骤提取 1 次, 合并两次得到的上清液, 用旋转蒸发仪在 45°C 条件下旋转蒸发至干, 残余物用甲醇定容至 10 mL, 得游离态多酚的提取液, 在 -20°C 冰箱下储存备用。

1.2.3 结合态多酚的提取

向经过 1.2.2 提取游离态多酚剩余的沉淀物中加入 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氢氧化钠溶液 30 mL, 并于水浴恒温振荡器下室温振荡 2 h。所得碱化液用 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸溶液将 pH 值调节至 1 后, 先用 100 mL 正己烷萃取脱脂, 再分别用 100 mL 乙酸乙酯萃取 5 次, 合并乙酸乙酯萃取相, 用旋转蒸发仪在 45°C 条件下旋转蒸发至干, 残余物用甲醇定容至 10 mL, 得结合态多酚的提取液, 在 -20°C 冰箱下储存备用。

1.2.4 总酚含量的测定

参考 Dewanto 等^[19]的方法并稍加改动。取 125 μL 多酚提取液, 加入 500 μL 去离子水和 125 μL 福林酚试剂, 混匀静置 6 min, 加入 1.25 mL 的 7 wt.% 碳酸氢钠和 1.0 mL 去离子水, 混匀避光静置 90 min, 在 760 nm 波长下测定其吸光值, 以 125 μL 甲醇代替提取液作为空白对照。以甲醇配制没食子酸标准品溶液, 稀释成不同质量浓度, 制作标准曲线。总酚含量以每 100 g 干基样品中所含没食子酸当量 (Gallic Acid Equivalent, GAE) 表示 ($\text{mg GAE}/100 \text{ g DW}$)。

1.2.5 总黄酮含量的测定

参考 Ti 等^[20]的方法。取 300 μL 提取液, 加入 1.5 mL 去离子水和 90 μL 5 wt.% 的亚硝酸钠, 混匀静置 6 min, 加入 180 μL 10 wt.% 的三氯化铝溶液, 混匀静置 5 min, 加入 600 μL $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 氢氧化钠, 加入去离子水 330 μL , 于 510 nm 波长下测定提取液吸光值, 以 300 μL 甲醇代替提取液作空白对照。以甲醇配制儿茶素标准品溶液, 稀释成不同质量浓度, 制作标准曲线。总黄酮含量以每 100 g 干基样品中所含儿茶素当量 (Catechin Equivalent, CE) 表示 ($\text{mg CE}/100 \text{ g DW}$)。

1.2.6 花色苷含量的测定

参考 Chen 等^[21]的方法并稍作修改。准确称取 1.0 g 样品置于离心管中, 加入的 $1.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸与 $\varphi=95\%$

乙醇的混合溶液（85/15）10 mL，混匀后 45 ℃水浴抽提 5 h，再定容至 10 mL。抽提液分别用 pH 值为 4.5 的缓冲溶液（0.4 mol·L⁻¹ 醋酸钠，用盐酸调至 pH 值为 4.5）和 pH 值为 1.0 缓冲溶液（0.25 mol·L⁻¹ 氯化钾，用盐酸调至 pH 值为 1.0）稀释相同的倍数，用酶标仪分别在 520 nm 和 700 nm 波长测定吸光度值，根据公式算出花色苷含量：

$$C = \frac{[(A_{520} - A_{700})pH_{1.0} - (A_{520} - A_{700})pH_{4.5}] \times M \times D \times V \times 1000}{\epsilon} \quad (1)$$

式中：

- C——花色苷含量以每 g 干基中所含矢车菊素葡萄糖苷当量（Cyanidin Glucoside Equivalent, CGE）表示，μg CGE/g DW；
- M——矢车菊素-3-葡萄糖苷（Cy-3-glu）的分子量，449.2；
- D——稀释倍数；
- V——提取液体积，mL；
- ε——矢车菊素-3-葡萄糖苷（Cy-3-glu）的消光系数，26 900。

1.2.7 单体酚含量测定

单体酚含量测定采用配有光电二极管阵列检测器的 Waters 高效液相色谱仪，色谱柱为 Acclaim 120 C18 反相色谱柱（4.6 mm×250 mm, 5 μm），柱温为 30 ℃；流量为 1.0 mL·min⁻¹；自动进样，进样体积为 20 μL；流动相 A 为 φ=0.4% 的乙酸，流动相 B 为乙腈，洗脱梯度为 0~10 min B φ=5%~8%，10~15 min B φ=8%~10%，15~45 min B φ=10%~20%，45~48 min B φ=20%~100%，48~51 min B φ=100%，51~55 min B φ=100%~5%，55~60 min B φ=5%；全波长扫描，以 280 nm 为主要观察波长，后运行平衡时间为 5 min。

峰面积外标法定量已知单体酚含量，将不同质量浓度的标准品按上述条件分析检测，以峰面积和质量浓度关系做线性回归，回归方程和相关系数如表 1 所示；并用标准品做回收性实验，回收率均在 95% 以上，能满足定量分析要求，重复测定 3 次。将样品色谱峰保留时间与标准品保留时间比较，鉴定单体酚种类，根据峰面积计算单体酚含量，结果以 100 g 干基样品所含有的单体酚微克数表示（μg/100 g DW）。

1.2.8 FRAP抗氧化活性的测定

参考 Zhang 等^[22]的方法并略作修改。取 30 μL 提取液，加入 900 μL FRAP 工作液，混匀室温避光反应 30 min，测定 593 nm 波长处其吸光度。FRAP 工作液的制备：300 mmol·L⁻¹ 乙酸钠缓冲液；10 mmol·L⁻¹ TPTZ 盐酸溶液；20 mmol·L⁻¹ 三氯化铁溶液以 10:1:1 的体积比混合，此为测样品所使用的 FRAP 工作液。以硫酸亚铁制作标准曲线，计算样品中二价铁离子当量（μmol Fe²⁺/100 g DW）。

表 1 单体酚标准曲线
Table 1 The standard curve of phenolic acid

单体酚酸	线性回归方程	相关系数	保留时间/min
没食子酸	y=43 162x+54 469	R ² =0.999 1	6.473
原儿茶酸	y=24 037x+17 260	R ² =0.999 8	12.233
对羟基苯甲酸	y=23 597x+15 435	R ² =0.999 7	19.192
绿原酸	y=32 107x-13 178	R ² =0.999 6	20.319
儿茶素	y=8 495.6x+4 826.3	R ² =0.999 4	20.830
香草酸	y=30 106x+18 397	R ² =0.999 8	23.422
丁香酸	y=55 307x+27 160	R ² =0.999 8	25.567
对香豆酸	y=97 332x+42 654	R ² =0.999 8	34.099
阿魏酸	y=59 419x+44 637	R ² =0.999 8	38.809
异阿魏酸	y=66 628x+39 352	R ² =0.999 8	41.972

1.2.9 ORAC抗氧化活性的测定

参考 Huang 等^[23]的方法并略有改动。向黑色 96 孔板各孔中分别加入 20 μL 提取液、20 μL 17.5 μmol·L⁻¹ 的没食子酸标准品溶液以、20 μL 不同质量浓度的 Trolox 标准品溶液（6.25、12.50、25 和 50 μmol·L⁻¹）及 20 μL 缓冲液，于酶标仪中 37 ℃孵育 10 min；向各孔中加入 200 μL 0.96 μmol·L⁻¹ 的荧光素工作液，37 ℃孵育 20 min；再向各孔中加入 20 μL 的 119 mmol·L⁻¹ AAPH 溶液，现配现用。在 37 ℃温度下以激发波长 485 nm，发射波长 538 nm 连续测定各孔的荧光强度，每 4.5 min 测定一次，连续测定 35 个循环；将不同质量浓度 Trolox 标准品荧光强度衰退曲线的延缓部分面积（Net AUC）与对应 Trolox 质量浓度制作标准曲线，代入稀释后提取液的 Net AUC，计算得到各提取液的 ORAC 值，结果以每克干基样品中所含 Trolox 当量表示（μmol TE/g DW）。

1.3 数据处理

实验数据表现形式为平均值 ± 标准差，采用 excel 软件对实验数据进行制表，使用 SPSS 软件 Duncan 检验法对数值进行差异性分析（P<0.05）。

2 结果与讨论

2.1 酶解耦合挤压膨化对海水稻米游离酚、结合酚及总酚的含量影响

酶解耦合挤压膨化对海水稻米游离酚、结合酚及总酚的含量影响如图 2 所示。对照组海水稻米游离酚、结合酚及总酚含量分别为 95.6 mg GAE/100 g DW、130.81 mg GAE/100 g DW 和 226.41 mg GAE/100 g DW。与对照组相比，L-A 组、H-A 组、L-C 组、L-A+C 组、

H-A+C 组游离酚含量显著增加了 15.46%、84.45%、4.20%、13.50% 和 104.65%，其中 H-A+C 组游离态多酚含量最高，为 195.65 mg GAE/100 g DW。H-A 组、H-C 组、H-A+C 组结合态多酚含量显著减少，分别减少了 17.41%、12.70%、16.73%，L-A 组、L-A+C 组结合态多酚含量显著增加，分别增加了 21.94%、20.46%，L-C 组结合态多酚无显著变化。L-A 组、H-A 组、L-A+C 组、H-A+C 组总多酚含量显著增加，分别增加了 19.21%、25.60%、17.52% 和 34.52%，其中 H-A+C 组总多酚含量最高为 304.57 mg GAE/100 g DW。该研究结果表明，在海水稻米挤压膨化过程中样品添加了耐高温 α -淀粉酶会显著提高游离酚含量，降低结合酚含量，这主要是由于 α -淀粉酶能水解淀粉，释放了与之相连的结合酚。此外，淀粉水解程度增大，机腔内熔融态粉体的黏度降低，导致粉体在膨化过程中的粉体温度、模具压力降低，减少了多酚在高温加工条件下的损失。Xu 等^[24]研究发现糙米在挤压膨化过程中游离酚、总酚含量随着耐高温 α -淀粉酶浓度的增加而增加。另一方面，研究结果也显示添加纤维素酶对海水稻米中游离酚含量增加的作用较小，这主要是因为纤维素酶不耐高温，在挤压膨化工艺中快速失活，难以发挥出对纤维素的降解作用。

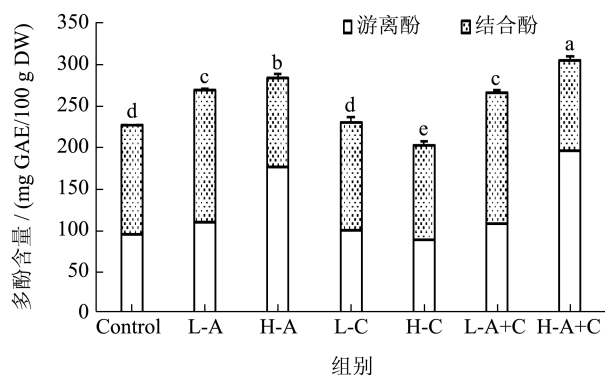


图2 酶解耦合挤压膨化对海水稻米游离酚、结合酚及总酚的含量影响

Fig.2 Effects of extrusion with enzyme on free phenolics, bound phenolics and total phenolics of sea rice

注：图中同列不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。Control：对照组（未添加酶直接挤压膨化）、L-A：低浓度 α -淀粉酶 ($100 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻、H-A：高浓度 α -淀粉酶 ($1000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻、L-C：低浓度纤维素酶 ($100 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻、H-C：高浓度纤维素酶 ($1000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻、L-A+C：低浓度复合酶 ($100 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻、H-A+C：高浓度复合酶 ($1000 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) 耦合挤压膨化海水稻，下同。

2.2 酶解耦合挤压膨化对海水稻米游离黄酮、结合黄酮及总黄酮的含量影响

酶解耦合挤压膨化对海水稻米游离黄酮、结合黄酮及总黄酮的含量影响如图3所示。海水稻米中黄酮类化合物的变化趋势与酚类化合物的变化趋势类似。对照组中海水稻米游离态黄酮含量、结合态黄酮含量及总黄酮含量分别为 50.42、133.89 和 184.32 mg CE/100 g DW。与对照组相比，L-A 组、H-A 组、L-C 组、L-A+C 组、H-A+C 组游离态黄酮含量分别增加了 5.11%、99.08%、6.57%、16.54% 和 113.36%，其中 H-A+C 组游离态黄酮含量最高为 107.59 mg CE/100 g DW。H-A 组、L-C 组、H-C 组、H-A+C 组结合态黄酮含量分别减少了 46.93%、18.56%、28.49% 和 53.23%。L-A 组、L-A+C 组结合态黄酮含量显著增加，分别增加了 3.19%、2.26%。其中 L-A+C 组总黄酮含量最高为 195.68 mg CE/100 g DW。与对照组相比，分别添加低浓度耐高温 α -淀粉酶和复合酶进行挤压膨化的海水稻米结合态黄酮增加，可能是因为改变了海水稻米淀粉结构提高了结合态黄酮提取率。已有研究发现添加耐高温 α -淀粉酶进行挤压膨化可以增加稻米中游离黄酮的含量，然而该研究并未对结合态黄酮进行分析^[25]。赵志浩等^[11]采用耐高温 α -淀粉酶对糙米、红米、黑米先进行预酶解 30 min 后再挤压膨化加工可以增加游离态黄酮含量，降低结合态黄酮含量。

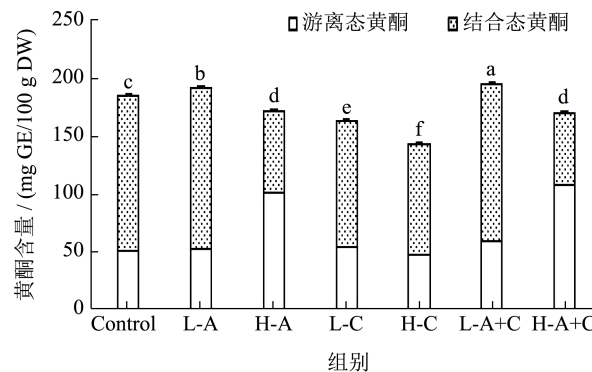


图3 酶解耦合挤压膨化对海水稻米游离黄酮、结合黄酮及总黄酮的含量影响

Fig.3 Effects of extrusion with enzyme on free flavonoids, bound flavonoids and total flavonoids of sea rice

2.3 酶解耦合挤压膨化对海水稻米花色苷的含量影响

酶解耦合挤压膨化对海水稻米花色苷的含量影响如图4所示。对照组中海水稻米花色苷含量为

5.18 $\mu\text{g CGE/g DW}$ 。与对照组相比, L-A 组、H-A 组与 H-A+C 组海水稻米花色苷含量显著增加, 分别增加了 12.90%、38.71% 和 90.32%; H-C 组海水稻米花色苷含量显著减少, 减少了 29.03%; L-C 组与 L-A+C 组处理对海水稻米花色苷含量没有显著影响。由于花色苷是一种不耐热的生物活性化合物, 在挤压膨化的过程中会发生热降解^[26]。但在挤压膨化过程中添加了耐高温 α -淀粉酶和复合酶能够降低挤压过程中粉体温度及模具压力, 减少了花色苷在挤压过程中的损失。Ti 等^[27]在研究挤压膨化黑糙米中发现花色苷在经过挤压膨化后大幅度减少, 结合态花色苷几乎完全损失, 总花色苷含量几乎全为游离态花色苷。Sompong 等^[28]研究发现挤压膨化对红米、黑米花色苷的降解作用大于酚酸, 但提高挤压膨化时水分含量会减少花色苷的降解。

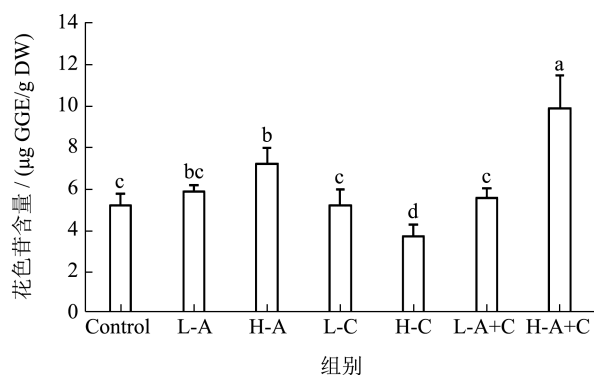


图4 酶解耦合挤压膨化对海水稻米花色苷的含量影响

Fig.4 Effects of extrusion with enzyme on anthocyanin of sea rice

2.4 酶解耦合挤压膨化对海水稻米单体酚含量的影响

酶解耦合挤压膨化对海水稻米单体酚含量的影响见图5。由图可知, 酶解耦合挤压膨化海水稻米结合态单体酚检测到原儿茶酸、绿原酸、对香豆酸、阿魏酸和异阿魏酸, 而对应的游离态单体酚酸没有被检测到。这主要是由于在挤压膨化加工中产生高温进而导致游离态单体酚酸降解^[29]。此外, 已有研究报道多酚易与淀粉大分子在挤压加工过程中形成更稳定的复合物^[30,31], 这可能是游离态酚酸未被检测到的另一个原因。与对照组相比, 各加酶组结合态原儿茶酸含量显著减少, 减少幅度为 20.05%~88.91%; 各加酶组异阿魏酸显著减少, 减少幅度为 11.4%~89.96%; H-A+C 组、L-C 组、H-C 组、H-A+C 组中绿原酸显著减少, 分别减少了 20.85%、40.87%、37.51%、42.35%; L-C 组、H-C 组、H-A+C 组中对香豆酸显著减少, 分别减少了 0.69%、24.32%、35.01%; H-A+C 组、L-C 组、H-C 组、H-A+C 组中阿魏酸显著减少, 分别减少了 6.40%、2.06%、24.85%、32.02%; 然而 L-A 组与 L-A+C 组中的绿原酸、

对香豆酸、阿魏酸显著增加, 绿原酸分别增加了 9.72%、19.04%, 对香豆酸分别增加了 29.56%、35.01%, 阿魏酸分别增加了 8.48%、29.97%, 研究结果发现, 海水稻米挤压膨化中添加了高浓度 α -淀粉酶和复合酶会减少结合酚酸含量, 然而添加了低浓度 α -淀粉酶和复合酶会增加结合酚酸含量, 是因为海水稻米在挤压膨化过程中低浓度 α -淀粉酶和复合酶加大了对细胞壁的破坏^[24], 增加了绿原酸、对香豆酸、阿魏酸三种酚酸的可提取性, 进一步提高酶浓度会使淀粉大量降解和糊精化, 导致与之结合的酚酸释放减少, 这与前面所测结合态总酚的含量变化相一致, 但总量有所减少, 可能是因为总酚中还存在花色苷、黄酮类等酚类物质^[32]。此外, 挤压膨化后海水稻米中主要结合酚酸为原儿茶酸、对香豆酸、阿魏酸和异阿魏酸。前人关于挤压膨化红米^[33]、中温 α -淀粉酶解挤压膨化糙米^[34]的单体酚酸研究中同样发现结合酚酸主要为阿魏酸、对香豆酸。

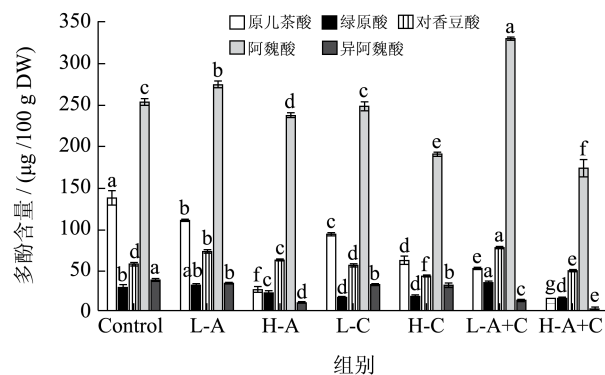


图5 酶解耦合挤压膨化对海水稻米结合态单体酚含量的影响

Fig.5 Effects of extrusion with enzyme on the content of bound phenolic acid of sea rice

2.5 酶解耦合挤压膨化对海水稻米FRAP抗氧化活性的影响

酶解耦合挤压膨化对海水稻米 FRAP 抗氧化活性的影响如图6所示。对照组海水稻米游离态 FRAP 值、结合态 FRAP 值及总 FRAP 值分别为 338.52 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$ 、389.69 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$ 和 728.21 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$ 。与对照组相比, L-A 组、H-A 组、L-C 组、H-A+C 组游离态 FRAP 值显著增加, 分别增加了 7.49%、81.63%、7.91%、97.74%, 其中 H-A+C 组游离态 FRAP 值最高为 669.38 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100 \text{ g DW}$; L-A+C 组游离态 FRAP 值与对照组相比无显著变化。H-A 组、H-C 组、H-A+C 组结合态 FRAP 值显著减少, 分别减少了 31.34%、31.12%、33.19%; L-C 组、L-A+C 组结合态 FRAP 值显著增加, 分别增加了 2.84%、8.68%; L-A 组结合态 FRAP 值与对照组相比无显著变化。与对照组相比, L-A 组、H-A 组、L-C 组、L-A+C

组、H-A+C 组总 FRAP 值显著增加,分别增加了 3.59%、21.17%、5.20%、5.02%、27.67%, 其中 H-A+C 组总 FRAP 值最高为 929.72 $\mu\text{mol Fe}^{2+}/100\text{ g DW}$ 。已经有大量研究表明, 稻米的抗氧化活性与酚类化合物(如酚酸、黄酮类化合物)的含量密切相关^[18,35], Xu 等^[36]研究表明挤压膨化精米的抗氧化活性随加入的 α -淀粉酶浓度的增加而增加, 在高酶浓度下具有较高的游离态 FRAP、ABTS 抗氧化活性。Zeng 等^[37]研究发现, 在挤压膨化糙米中, 游离态 DPPH、FRAP、ABTS 抗氧化活性会随着 α -淀粉酶浓度增加而增加, 并与酚类物质呈现高相关性。也有研究表明挤压膨化过程中美拉德反应过程中会产生多种低分子量杂环化合物, 对自由基有清除作用, 具有抗氧化性^[38,39]。

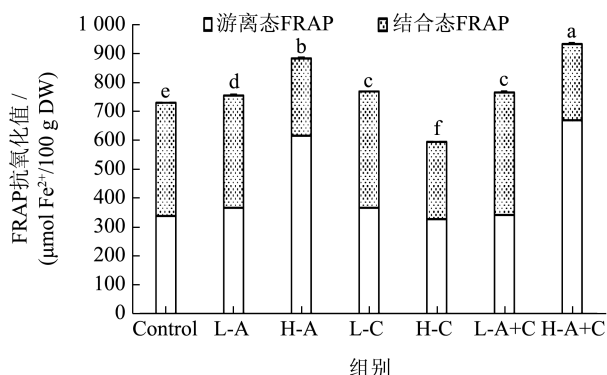


图 6 酶解耦合挤压膨化对海水稻米 FRAP 抗氧化活性的影响
Fig.6 Effects of extrusion with enzyme on FRAP antioxidant capacity of sea rice

2.6 酶解耦合挤压膨化对海水稻米中 ORAC 抗氧化活性的影响

单一的抗氧化剂活性测量方法不能充分反映复杂氧化还原体系中的所有抗氧化剂活性^[40]。ORAC 测定是通过测量化合物中过氧自由基清除活性来量化食品的抗氧化能力^[41]。酶解耦合挤压膨化对海水稻米 ORAC 抗氧化能力的影响如图 7 所示。对照组海水稻米游离态 ORAC 值、结合态 ORAC 值及总 ORAC 值分别为 767.33 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 、734.23 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 和 1 501.56 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 。与对照组相比, 加酶各组游离态 ORAC 值显著增加, 增加幅度为 17.24%~99.88%, 其中 H-A+C 组游离态 ORAC 值最高为 1 533.7 $\mu\text{mol TE/g DW}$; H-A 组、H-C 组、H-A+C 组结合态 ORAC 值显著减少, 分别减少了 12.41%、6.43%、9.05%; L-A 组、L-C 组、L-A+C 组结合态 ORAC 值显著增加, 分别增加了 22.65%、30.57%、26.28%。与对照组相比, 加酶各组总 ORAC 值显著增加, 增加幅度为 16.21%~46.61%, 其中 H-A+C 组总 ORAC 值最高为 2 201.48 $\mu\text{mol TE/g DW}$ 。Chiu 等^[42]报

道了挤压膨化玉米的游离态 ORAC 值显著高于生玉米, 表明挤压膨化提高了玉米的游离 ORAC 抗氧化活性。Liu 等^[43]报道了挤压膨化显著提高了苹果渣在体外消化中的 ORAC 抗氧化活性。挤压膨化能够提高谷物、水果的 ORAC 抗氧化活性, 主要是由于挤压膨化加工能够释放出结合态酚类物质^[40,44]。已有研究表明谷物中酚类物质是 ORAC 抗氧化活性的主要贡献者^[45]。

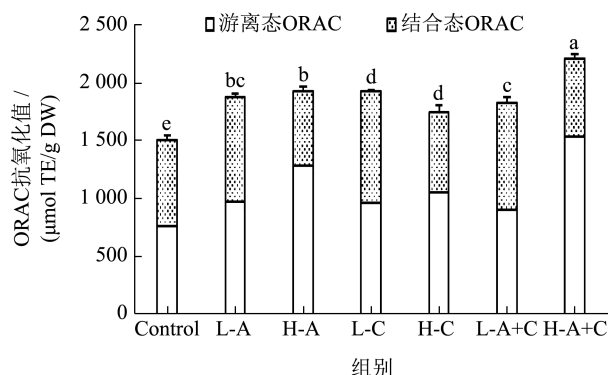


图 7 酶解耦合挤压膨化对海水稻米中 ORAC 抗氧化活性的影响
Fig.7 Effects of extrusion with enzyme on ORAC antioxidant capacity of sea rice

3 结论

海水稻米富含膳食纤维, 口感粗糙, 作为主食不易被消费者接受, 进行精深加工是推广海水稻米的重要渠道。该文研究了耐高温 α -淀粉酶、纤维素酶、复合酶(耐高温 α -淀粉酶与纤维素酶等量混合)三种酶解耦合挤压膨化对海水稻米酚类物质及抗氧化活性的影响。结果表明, 与对照组相比, 添加纤维素酶解耦合挤压膨化会降低酚类物质含量及抗氧化活性, 添加了耐高温 α -淀粉酶、复合酶解耦合挤压膨化均能够显著提高游离态多酚、游离态黄酮含量、花色苷含量及总抗氧化能力。其中添加 1 000 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ 的复合酶解耦合挤压膨化对游离酚、游离态黄酮含量和花色苷含量增加最多, 分别提高了 104.65%、113.36% 和 90.32%, 其抗氧化能力也显著高于其他组别。以酶解耦合挤压膨化加工的海水稻米粉为主要基料, 再根据需求复配蛋白质、脂肪、维生素、矿物质等营养成分即可开发海水稻米营养代餐粉新产品。该文的研究结果可以为海水稻米的精深加工利用提供技术指导。

参考文献

- [1] 王才林, 张亚东, 赵凌, 等. 耐盐碱水稻研究现状、问题与建议[J]. 中国稻米, 2019, 25(1): 1-6.
- [2] LIANG W J, MA X L, WAN P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: A review [J]. Biochemical and Biophysical Research

- Communications, 2018, 495(1): 286-291.
- [3] 王旭明,赵夏夏,陈景阳,等.湛江盐碱地精准开发与海水稻抗盐碱高效栽培展望[J].热带农业科学,2018,38(12):25-29.
- [4] 谭海清,王际娣.水稻专家陈日胜:中国粮安根基稳固[J].小康,2022,35:66-69.
- [5] 赖双定,龙宇,陈逸君,等.海水稻营养成分与加工利用研究进展[J].粮食与油脂,2022,35(6):13-15,35.
- [6] 李泳娴,陈韬文,刘迪林,等.加工精度对海水稻米饭酚类物质、抗氧化活性及风味成分的影响[J].食品工业科技,2026,47(3)32-41.
- [7] CALINOIU L F, VODNAR D C. Whole grains and phenolic acids: a review on bioactivity, functionality, health benefits and bioavailability [J]. Nutrients, 2018, 10(11): 1615.
- [8] OKARTER N, LIU R H. Health benefits of whole grain phytochemicals [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2010, 50(3): 193-208.
- [9] 王婷,王琰鑫,王晓涵,等.挤压膨化技术在食品工业的研究进展[J].食品工程,2022,4:16-20.
- [10] 刘畅,孟倩楠,刘晓飞,等.挤压膨化技术及其应用研究进展[J].饲料研究,2021,44(4):137-140.
- [11] 赵志浩.预酶解—挤压膨化对全谷物速食糙米粉理化性质及生物活性的影响[D].福州:福建农林大学,2017.
- [12] 陈彩薇,吴晖,赖富饶,等.米糠中不同存在形态酚类物质的抗氧化活性研究[J].现代食品科技, 2015,31(2):42-46,13.
- [13] ZHANG R F, KHAN S A, CHI J W, et al. Different effects of extrusion on the phenolic profiles and antioxidant activity in milled fractions of brown rice [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 88: 64-70.
- [14] 曾子聪.挤压加工对糙米多酚及其抗氧化性影响的研究[D].南昌:南昌大学,2019.
- [15] CHEN R S, CHENG Y F, HAN S Y, et al. Whole genome sequencing and comparative transcriptome analysis of a novel seawater adapted, salt-resistant rice cultivar-sea rice 86 [J]. BMC Genomics, 2017, 18: 655.
- [16] 肖家喜,段映羽,邹晓琴,等.冲调米粉酶解耦合挤压膨化工艺优化及其产品性质分析[J].中国粮油学报,2023,38(8):49-57.
- [17] 马永轩,张名位,张瑞芬,等.高温 α -淀粉酶-挤压膨化耦合处理对全谷物糙米粉品质的影响[J].食品科学技术学报,2022,38(1): 111-116.
- [18] ZHANG M W, ZHANG R F, ZHANG F X, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of black rice bran of different commercially available varieties [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(13): 7580-7587.
- [19] DEWANTO V, WU X Z, ADOM K K, et al. Thermal processing enhances the nutritional value of tomatoes by increasing total antioxidant activity [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(10): 3010-3014.
- [20] TI H H, LI Q, ZHANG R F, et al. Free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of milled fractions of different indica rice varieties cultivated in southern China [J]. Food Chemistry, 2014, 159: 166-174.
- [21] CHEN F Y, ZHANG M, DEVAHASTIN S, et al. Comparative evaluation of the properties of deep-frozen blueberries dried by vacuum infrared freeze drying with the use of CO₂ laser perforation, ultrasound, and freezing-thawing as pretreatments [J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(10): 1805-1816.
- [22] ZHANG R F, ZENG Q S, DENG Y Y, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of litchi pulp of different cultivars cultivated in southern China [J]. Food Chemistry, 2013, 136(3-4): 1169-1176.
- [23] HUANG D J, OU B X, HAMPSCH-WOODILL M, et al. High-throughput assay of oxygen radical absorbance capacity (ORAC) using a multichannel liquid handling system coupled with a microplate fluorescence reader in 96-well format [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(16): 4437-4444.
- [24] XU E B, WU Z Z, LONG J, et al. Effect of thermostable α -amylase addition on the physicochemical properties, free/bound phenolics and antioxidant capacities of extruded hulled and whole rice [J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(9): 1958-1973.
- [25] XU E B, WU Z Z, PAN X W, et al. Effect of enzymatic (thermostable α -amylase) treatment on the physicochemical and antioxidant properties of extruded rice incorporated with soybean flour [J]. Food Chemistry, 2016, 197(PA): 114-123.
- [26] 丘婷婷,熊华,朱雪梅,等.滚筒干燥和挤压膨化对黑色谷物理化性质及储藏稳定性的影响[J].食品科学,2020,41(2):73-83.
- [27] TI H H, ZHANG R F, ZHANG M W, et al. Effect of extrusion on phytochemical profiles in milled fractions of black rice [J]. Food Chemistry, 2015, 178: 186-194.
- [28] SOMPONG R, SIEBENHANDL-EHN S, BERGHOFER E, et al. Extrusion cooking properties of white and coloured rice varieties with different amylose content [J]. Starch-Stärke, 2011, 63(2): 55-63.
- [29] SARKA E, SLUKOVA M, HENKE S. Changes in phenolics during cooking extrusion: a review [J]. Foods, 2021, 10(9): 2100.
- [30] WANG R B, LI M, BRENNAN M A, et al. Complexation of starch and phenolic compounds during food processing and impacts on the release of phenolic compounds [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(4): 3185-3211.
- [31] RODRIGUEZ P O, PEREZ B A L. Effect of the gelatinization level of normal maize starch under extrusion on ferulic acid-starch complex formation [J]. Journal of Cereal Science, 2024, 117: 103905.
- [32] CHEN Y, CHEN L, XIAO Z G, et al. Effects of enzymolysis and fermentation on the antioxidant activity and functional components of a coarse cereal compound powder based on principal component analysis and microstructure study [J]. Journal of Food Science, 2022, 87(8): 3573-3587.
- [33] BLANDINO M, BRESCIANI A, LOSCALZO M, et al. Extruded snacks from pigmented rice: Phenolic profile and physical properties [J]. Journal of Cereal Science, 2022, 103: 103347.
- [34] QIN Y, MA S H, ZHOU J W, et al. Conversion of endogenous phenolic acid in brown rice by bioextrusion of mesophilic α -amylase [J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102699.
- [35] GONG E S, LUO S J, TONG L, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activity of processed brown rice products [J]. Food Chemistry, 2017, 232: 67-78.
- [36] XU E B, PAN X W, WU Z Z, et al. Response surface methodology for evaluation and optimization of process parameter and antioxidant capacity of rice flour modified by enzymatic extrusion [J]. Food Chemistry, 2016, 212: 146-154.
- [37] ZENG Z C, LI Y T, YANG R, et al. The relationship between reducing

- sugars and phenolic retention of brown rice after enzymatic extrusion [J]. Journal of Cereal Science, 2017, 74: 244-249.
- [38] KANZLER C, HAASE P T, SCHESTKOWA H, et al. Antioxidant properties of heterocyclic intermediates of the maillard reaction and structural related compounds [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(41): 7829-7837.
- [39] SHARMA P, GUJRAL H S, SINGH B. Antioxidant activity of barley as affected by extrusion cooking [J]. Food Chemistry, 2012, 131(4): 1406-1413.
- [40] ZHANG S, MA Q, DONG L H, et al. Phenolic profiles and bioactivities of different milling fractions of rice bran from black rice [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132035.
- [41] AWIKA J M, ROONEY L W, WU X L, et al. Screening methods to measure antioxidant activity of sorghum (*Sorghum bicolor*) and sorghum products [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2003, 51(23): 6657-6662.
- [42] CHIU H W, PENG J C, TSAI S J, et al. Effect of extrusion processing on antioxidant activities of corn extrudates fortified with various Chinese yams (*Dioscorea* sp.) [J]. Food Bioprocess Technol, 2012, 5: 2462-2473.
- [43] LIU G, YING D Y, GUO B Y, et al. Extrusion of apple pomace increases antioxidant activity upon *in vitro* digestion [J]. Food & Function, 2019, 10(2): 951-963.
- [44] FENG Z Y, DONG L H, ZHANG R F, et al. Structural elucidation, distribution and antioxidant activity of bound phenolics from whole grain brown rice [J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129872.
- [45] NAYAK B, LIU R H, BERRIOS J D J, et al. Bioactivity of antioxidants in extruded products prepared from purple potato and dry pea flours [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(15): 8233-8243.