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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100360

LI Yongxian, CHEN Taowen, LIU Dilin, et al. Effects of Degree of Milling on Phenolic Profiles, Antioxidant Activities and Flavor Components of Cooked Sea Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 32−41. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100360

· 研究与探讨 ·

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

李泳娴[1], 陈韬文[1], 刘迪林[2,3,4], 叶盛权[5], 刘祎帆[6], 张浩竞[1], 刘 磊[1,*], 李 备[7,8,*], 徐巨才[1]

(1.五邑大学药学与食品工程学院, 广东江门 529020;
2.广东省农业科学院水稻研究所, 广东广州 510640;
3.农业农村部华南优质稻遗传育种实验室(部省共建), 广东广州 510640;
4.广东省水稻育种新技术重点实验室, 广东广州 510640;
5.广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524005;
6.仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225;
7.海南省检验检测研究院, 海南海口 570311;
8.国家市场监督管理总局重点实验室(热带果蔬质量与安全), 海南海口 570311)

摘 要: 本文研究了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。运用酶标仪测定海水稻米饭多酚、黄酮、花色苷含量及抗氧化能力值, 采用顶空固相微萃取(HS-SPME)与气相色谱质谱(GC-MS)联用的方法测定海水稻米饭的风味成分。研究发现, 随着碾磨时间从 0 s 增加到 10、20、30、40 s, 海水稻米饭总酚含量减少了 65.91%、74.55%、84.39% 和 90.19%; 总黄酮含量减少了 60.82%、78.14%、86.93% 和 92.11%; 总 FRAP 抗氧化能力值减少了 67.42%、73.52%、85.07%、91.20%; 总 ORAC 抗氧化能力值减少了 51.61%、74.16%、83.48%、89.16%; 挥发性风味成分总含量减少了 50.85%、75.61%、78.42% 和 88.37%。对海水稻米饭风味贡献最大的成分为 2-乙酰基-1-吡咯, 经过 40 s 碾磨后 OAV 下降 76.01%。此外, 在相同加工精度下, 蒸煮加工降低了稻米中的多酚、黄酮、花色苷含量以及 FRAP、ORAC 抗氧化能力。因此, 建议海水稻米加工精度宜控制在 8%~10%, 以达到改善食用品质和保留酚类物质、抗氧化活性及挥发性风味成分的平衡。

关键词: 加工精度, 海水稻米饭, 酚类物质, 抗氧化能力, 风味成分

中图分类号: TS213.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002−0306(2026)03−0032−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100360 本文网刊:

Effects of Degree of Milling on Phenolic Profiles, Antioxidant Activities and Flavor Components of Cooked Sea Rice

LI Yongxian[1], CHEN Taowen[1], LIU Dilin[2,3,4], YE Shengquan[5], LIU Huifan[6], ZHANG Haojing[1], LIU Lei[1,*], LI Bei[7,8,*], XU Jucai[1]

(1.School of Pharmacy and Food Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;
2.Rice Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China;
3.Key Laboratory of Genetics and Breeding of High Quality Rice in Southern China (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510640, China;

收稿日期: 2024−10−31

基金项目: 五邑大学教育教学研究与改革项目(JX2025002);广东省普通高校重点领域专项(2024ZDZX2007);广东省百校联百县助力百千万工程行动项目(BQW2024001);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);五邑大学"创新创业基金"(2023111500000420)。

作者简介: 李泳娴(2003−),女,大学本科,研究方向:农产品加工,E-mail:2454465443@qq.com。

*** 通信作者:** 刘磊(1982−),男,博士,研究员,研究方向:粮油加工,E-mail:liuleifood@163.com。
李备(1976−),男,博士,主任药师,研究方向:食品质量与安全检测,E-mail:cq_libei@163.com。

4.Guangdong Key Laboratory of New Technology in Rice Breeding, Guangzhou 510640, China；
5.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524005, China；
6.College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China；
7.Hainan Academy of Inspection and Testing, Haikou 570311, China；
8.Key Laboratory of Tropical Fruits and Vegetables Quality and Safety, State Administration for Market Regulation, Haikou 570311, China）

Abstract: This research aimed to investigate the effects of degree of milling on phenolic profiles, antioxidant activities and flavor components of cooked sea rice. The contents of polyphenols, flavonoids, anthocyanins, and the antioxidant capacity of cooked sea rice were analyzed by microplate reader, the flavor components of cooked sea rice were analyzed by HS-SPME combined with GC-MS. The results showed that with the increase of milling time from 0 s to 10, 20, 30, 40 s, the average total phenol content of cooked sea rice decreased by 65.91%, 74.55%, 84.39% and 90.19%. The average total flavonoid content decreased by 60.82%, 78.14%, 86.93% and 92.11%. The total FRAP antioxidant activity decreased by 67.42%, 73.52%, 85.07% and 91.20%. The total ORAC antioxidant activity decreased by 51.61%, 74.16%, 83.48% and 89.16%. The volatile compounds content of cooked sea rice decreased by 50.85%, 75.61%, 78.42% and 88.37%. The 2-acetyl-1-pyrroline contributed the most to the flavor of cooked sea rice, and the OAV decreased by 76.01% after 40 s milling. Furthermore, sea rice with the same degrees of milling decreased after cooking for total phenols, total flavonoids, total anthocyanins and total FRAP antioxidant activity, total ORAC antioxidant activity. Therefore, the degree of milling should be carefully controlled at 8%~10% to improve the balance of sensory quality and retain phenolic profiles, antioxidant activities and volatile compounds during cooked sea rice milling.

Key words: degree of milling; cooked sea rice; phenolic; antioxidant activity; flavor components

海水稻又称耐盐碱水稻，属于禾本科植物，能在海边滩涂地和内陆盐碱地生长，具有耐盐碱、抗涝、抗旱、抗病虫害的特点，是具有广阔应用前景的优良水稻品种[1]。海水稻米粒呈赤红色，含有天然可溶性红色素，并且富含淀粉、膳食纤维、氨基酸等营养物质[2]。现代流行病学调查表明，主食消费中增加全谷物的摄入量，可以降低高脂血症、心血管疾病及 2 型糖尿病的发病率[3]。全谷物的这种健康作用与其所含的酚类物质密切相关[4]。海水稻米中的多酚类物质在加工过程中的变化规律仍不清楚，有待深入研究。

国内外已有大量研究表明，酚类物质是谷物抗氧化活性的最重要贡献者[5]。随着加工精度的提高，谷物的酚类物质及风味成分会发生显著变化。目前，加工精度对稻米酚类物质及风味成分的影响已有很多研究报道，JIANG 等[6] 研究发现，糙米总酚和总黄酮的含量随碾磨时间的增加均有不同程度的降低。SHAO 等[7] 研究发现，稻谷籽粒抛光后仅保留总花色苷的 3%。安周红等[8] 研究发现，当加工精度由 0% 升高到 10%，米饭风味成分总含量显著降低。另外也有学者研究了米饭中的酚类物质，TI 等[9] 研究发现蒸煮降低了糙米游离态和结合态的多酚和黄酮含量，以及 ORAC 抗氧化能力。但海水稻米果皮层膳食纤维含量高且结构致密，制成米饭时浸泡时间长，蒸煮费时，口感粗糙，严重限制了海水稻米的消费和推广。课题组前期研究发现提高海水稻米的加工精度能显著增强其吸水性，降低最适蒸煮时间、硬度和胶粘性，显著改善了其食用品质[10]。然而，不同加工精度对海水稻米饭酚类物质及风味成分的影响仍未见报道，有待深入研究。

因此，本研究以海水稻米为原料，经过蒸煮制备米饭，比较不同加工精度对海水稻米饭中游离态和结合态多酚、黄酮含量的影响，采用 FRAP 和 ORAC 方法评价米饭的抗氧化活性，分析加工精度对海水稻米饭风味成分种类及含量的影响，以期为海水稻米的消费及加工利用提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

海红 11 号　广东海红香农业科技有限公司；丙酮、浓盐酸　分析纯，广东广试试剂科技有限公司；甲醇、氢氧化钠、正己烷、乙酸乙酯、碳酸钠、亚硝酸钠、三氯化铝（结晶）、过硫酸钾、磷酸二氢钾、磷酸氢二钾、石油醚、无水乙酸钠、硫酸亚铁　分析纯，天津市大茂化学试剂厂；福林酚试剂　分析纯，上海源叶生物科技有限公司；没食子酸、儿茶素、2,4,6-三吡啶基三嗪（TPTZ）、2,2'-联氨-双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）二胺盐（ABTS）、Trolox（分析纯）、环己酮（色谱纯）　上海麦克林生化科技股份有限公司；偶氮二异丁脒盐酸盐（AAPH）、荧光素钠盐　分析纯，美国 Sigma 公司。

SXJMJ-168 精米机　台州市华昌粮油机械有限公司；B25 高速剪切均质机　上海贝尔特流体设备有限公司；Hei-VAP Precision 旋转蒸发仪　德国 Heidolph 公司；ML204T/02 电子分析天平　梅特勒-托利多（上海）有限公司；Biotek Synergy Neo2 多功能酶标仪　美国 Agilent 公司；PB-10 pH 计　赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；SHA-B 水浴恒温振荡器　常州国华仪器有限公司；GM-0.33A 真空泵　天津市沸腾实验设备有限公司；HXLG-10-50B 真空冷冻干燥机　上海沪析实业有限公司；Trace1300-ISQ QD 气相色谱质谱联用仪　赛默飞世尔科技公司。

1.2 实验方法

1.2.1 海水稻米饭的制备 准确称取 150 g 海水稻米，利用精米机将其进行碾磨，收集不同碾磨时间（10、20、30、40 s）的海水稻米，得到不同加工精度（0%、7.20%、9.62%、10.85% 和 11.86%）海水稻米样品。加工精度的计算方法为：加工精度(%)=(1−碾磨后大米的质量/海水稻原料的质量)×100。样品密封分装贮存于−4 ℃ 冰箱备用。在海水稻米的实际碾磨中，由于难以准确控制海水稻米的加工精度为整数，因此本文的加工精度用碾磨时间表示[11]。

米饭的制备参考 GB/T 15682-2008《粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》的方法，称取 10 g 不同加工精度海水稻米置于不锈钢盒中，用自来水淘洗三次，加入 15 mL（1∶1.5，m/v）蒸馏水，待水沸腾，蒸煮 30 min，停止加热焖制 5 min。冷却至室温，冷冻干燥处理 48 h，将冻干的米饭样品粉碎，过 60 目筛，密封分装并置于 4 ℃ 冰箱内备用。

1.2.2 游离酚和结合酚的提取 参考卢琦等[12] 的方法并略作修改，准确称取 0.5 g 海水稻米粉置于 50 mL 离心管中，加入 5 ℃ 预冷 20 min 的 80% 丙酮(v/v)15 mL，在冰浴条件下用组织匀浆机 10000 r/min 均质 3 min 后，离心机 9000 r/min 离心 10 min，收集离心管中上清液。向离心管沉淀物中再加入 80% 丙酮 15 mL，根据上述步骤重复提取 1 次，合并两次得到的上清液，用旋转蒸发仪在 45 ℃ 条件下旋转蒸发至干，残余物用甲醇定容至 10 mL，得游离酚提取液。

提取游离酚后的沉淀物中加入 2 mol/L NaOH 溶液 40 mL，并用水浴振荡锅在室温下振荡 2 h。所得碱化液用 6 mol/L HCl 溶液将 pH 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 ℃ 条件下旋转蒸发至干，残余物用甲醇定容至 10 mL，得结合酚提取液。

1.2.3 多酚含量测定 参照 DEWANTO 等[13] 的方法作适当修改，取 0.125 mL 游离酚/结合酚提取液，加入 0.125 mL 100% 福林酚试剂和 0.5 mL 纯水，混匀，室温静置反应 6 min，加入 1.25 mL 7%(m/v) 碳酸钠溶液和 1 mL 纯水，混匀，室温避光静置反应 90 min，在 760 nm 波长处测定其吸光度。以没食子酸标准品制作标准曲线，得标准曲线：y=0.0024x+0.0115，R^2=0.9991。海水稻米/米饭的酚类物质含量以干基每 100 g 样品所含没食子酸当量表示（mg GAE/100 g DW）。实验重复三次。总酚含量=游离酚含量+结合酚含量。

1.2.4 黄酮含量测定 参照 DEWANTO 等[13] 的方法作适当修改，取 0.3 mL 游离酚/结合酚提取液，加入 0.09 mL 5%(m/v)亚硝酸钠溶液和 1.5 mL 纯水，混匀，室温静置反应 6 min，加入 0.18 mL 10%(m/v)氯化铝溶液，室温静置反应 5 min，加入 0.6 mL 1 mol/L 氢氧化钠溶液，加纯水 0.33 mL 补至 3 mL，在 510 nm 波长处测定其吸光度。以儿茶素标准品制作标准曲线，得标准曲线：y=0.0019x+0.004，R^2=0.9994。海水稻米/米饭的黄酮含量以干基每 100 g 样品所含儿茶素当量表示（mg CE/100 g DW）。实验重复三次。总黄酮含量=游离黄酮含量+结合黄酮含量。

1.2.5 花色苷含量测定 根据 CHEN 等[14] 的方法作适当修改，准确称量 1.00 g 海水稻/海水稻米饭粉末置于 50 mL 离心管中，加入经预冷处理的 20 mL 含有 15% 盐酸的甲醇溶液，浸提 10 min，8000 r/min 离心收集上清液，根据上述步骤重复提取 2 次，合并两次得到的上清液，定容至 60 mL，得花色苷提取液。

取上述花色苷提取液 1 mL，分别加入 0.025 mol/L 氯化钾缓冲液和 0.4 mol/L 乙酸钠溶液稀释至适当浓度，使得吸光度在 0.2~0.8 区间内，混匀后避光静置反应 20 min，分别在 515 nm 和 700 nm 波长处测定吸光度值。实验重复三次。花色苷含量以矢车菊素-3-O-葡萄糖苷当量表示（mg CGE/100 g DW），计算公式如下：

$$c=\frac{A}{\varepsilon L}\times M\times D\times\frac{V}{m}\times 100$$

式中：c 表示花色苷含量，单位为 mg CGE/100 g DW；A 表示样品吸光度值，$A=(A_{515\ nm}-A_{700\ nm})_{pH1.0}-(A_{515\ nm}-A_{700\ nm})_{pH4.5}$；$\varepsilon$ 表示矢车菊花青素-3-O-葡萄糖苷的摩尔消光系数，26900 L/(mol·cm)；L 表示酶标仪光径，cm；M 表示矢车菊花青素-3-O-葡萄糖苷的分子量，449.2 g/mol；D 表示溶液稀释倍数；V 表示提取液总体积，mL；m 表示样品质量，g。

1.2.6 抗氧化能力测定

1.2.6.1 铁离子还原能力（ferric reducing antioxidant power，FRAP）测定 根据 IQBAL 等[15] 的方法作适当修改，制备 FRAP 工作液，300 mmol/L 乙酸钠缓冲液、10 mmol/L TPTZ 盐酸溶液、20 mmol/L 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。取 0.03 mL 游离酚/结合酚提取液，加入 0.9 mL FRAP 工作液，混匀，室温避光反应 30 min，在 593 nm 波长处测定其吸光度。以硫酸亚铁制作标准曲线，得标准曲线 y=1.0425x+0.037，R^2=0.9999，计算样品中二价铁离子当量（μmol Fe^{2+}/100 g DW）。实验重复三次。总 FRAP 抗氧化能力值=游离态 FRAP 抗氧化能力值+结合态 FRAP 抗氧化能力值。

1.2.6.2 氧化自由基吸收能力（oxygen radical absorbance capacity，ORAC）测定 根据卢琦等[12] 的方法作适当修改，取 0.02 mL 游离酚/结合酚提取液，磷酸盐缓冲液和不同浓度 Trolox 标准品溶液加入 96 孔板于 37 ℃ 酶标仪孵育 10 min，分别加入 0.2 mL 荧光素工作液（0.96 μmol/L），37 ℃ 酶标仪孵育

20 min，加入 0.02 mL AAPH（119 mmol/L），酶标仪在 37 ℃ 条件下以激发波长 485 nm，发射波长 538 nm，连续测定各孔的荧光强度监测荧光衰退情况，每 4.5 min 重复测定一次，测定 35 个循环。将酚提取液抑制自由基产生荧光衰退的延缓部分面积（Net AUC）代入标准抗氧化物质 Trolox 的 Net AUC 与 Trolox 浓度所作的标准曲线，得到提取液的抗氧化能力的指数值，以干基每 100 g 样品中所含的 Trolox 当量（μmol TE/100 g DW）表示。实验重复三次。总 ORAC 抗氧化能力值=游离态 ORAC 抗氧化能力值+结合态 ORAC 抗氧化能力值。

1.2.7　米饭挥发性风味成分的测定　根据苏慧敏等[16] 的方法作适当修改，称取 4 g 新鲜米饭于 20 mL 顶空瓶中，加入 5 μL 浓度为 100 mg/L 环己酮作为标准物，并迅速加塞密封，用（DVB/CAR/PDMS，50/30 μm）SPME 纤维提取挥发性化合物，提取温度 80 ℃，纤维置于顶空瓶顶空处 40 min。GC-MS 进样口 250 ℃ 解吸 5 min，不分流模式。使用赛默飞 TG-5MS 毛细管柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），设置初始温度 40 ℃，恒温 3 min，以 5 ℃/min 上升到 90 ℃，再以 10 ℃/min 上升到 230 ℃，保持 5 min，载气氦气流速 1 mL/min。赛默飞 ISQ QD 电子电离源（EI）传输线温度 280 ℃，离子源温度 250 ℃，扫描质量范围 33~500。实验重复三次。

GC-MS 仪器数据处理由 Chromeleon7 软件完成，通过与 NIST 数据库匹配，采用匹配度大于 800（最大值 1000）的挥发性成分；定量分析采用内标相对定量法，计算公式如下：

$$C_i = C_{is} \times \frac{A_i}{A_{is}}$$

式中：C_i 表示某种挥发性组分含量，μg/kg；C_{is} 表示内标物（环己酮）含量，μg/kg；A_i 表示某种挥发性组分的色谱峰面积；A_{is} 表示内标物（环己酮）的色谱峰面积。

参考彭凯雄等[17] 的方法，采用气味活度值（odor activity value，OAV）评价各化合物对不同加工精度海水稻米饭风味的贡献。关于风味成分阈值问题，因为米饭含水较为丰富，本研究的阈值来源参考风味成分在水中的阈值，OAV 值的计算公式如下：

$$OAV = \frac{C}{T}$$

式中：C 为挥发性化合物的质量浓度，μg/kg；T 为挥发性化合物的气味阈值，μg/kg。

当 OAV>1 时，定义为关键风味成分，对总体风味有直接影响，且 OAV 越大说明该物质对总体风味贡献越大[18]。

1.3　数据处理

所有实验进行三次重复，使用 SPSS 27 和 Excel 2016 软件进行数据处理及制图，实验结果以平均值±标准差表示，显著性水平 $P<0.05$。

2　结果与分析

2.1　加工精度对海水稻米饭多酚含量的影响

加工精度对海水稻米饭多酚含量的影响如图 1 所示。由图可知，随着加工精度的提高，海水稻米及其米饭总酚含量显著下降（$P<0.05$）。随着碾磨时间从 0 s 增加到 40 s，海水稻米煮制的米饭游离酚含量减少了 93.12%，结合酚含量减少了 86.82%，总酚含量减少了 90.19%。经过 40 s 碾磨后的海水稻米总酚含量较未碾磨的海水稻米总酚含量减少 88.47%。这与加工精度对普通糙米多酚含量的影响研究结果相一致[19]。随着加工精度的增加，海水稻米及其米饭多酚含量减少，这与海水稻米中的酚类物质分布有关[20]。谷物的酚类物质主要位于其糠麸部位[21]。随着加工精度的提高，糠麸层逐渐被碾磨去除，导致海水稻米及其米饭的游离酚和结合酚含量均呈现下降趋势。

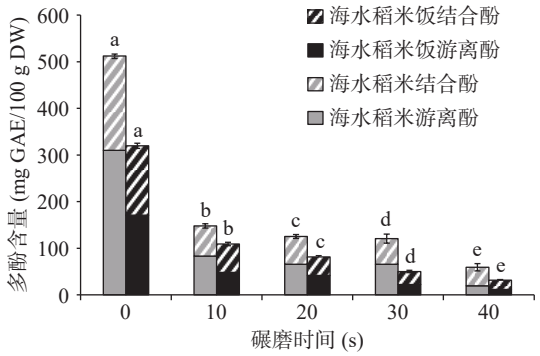


图 1　加工精度对海水稻米饭游离态与结合态多酚含量的影响

Fig.1　Effects of degree of milling on the content of free and bound phenols in cooked sea rice

注：图中同一样品不同字母表示有显著性差异（$P<0.05$），图 2~图 5 同。

在相同加工精度条件下，海水稻米饭比稻米中的多酚含量低。经过 0、10、20、30 和 40 s 不同时间制备的海水稻米饭相较于其稻米原料而言，游离酚含量分别减少 44.83%、42.36%、36.44%、66.03% 和 40.11%；结合酚含量分别减少 26.39%、5.15%、33.34%、49.71% 和 50.29%；总酚含量分别减少 37.56%、26.15%、34.97%、58.62% 和 46.90%，这表明蒸煮加工会导致多酚含量的损失。THUENG-TUNG 等[22] 也有类似的报道，发现稻米经过蒸煮后，总酚含量显著降低。这是由于多酚含有酚羟基，在高温条件下不稳定，易被降解，导致多酚含量下降[23−24]。

2.2　加工精度对海水稻米饭黄酮含量的影响

不同加工精度对海水稻米饭黄酮含量的影响如图 2 所示。由图可知，随着加工精度的提高，海水稻米及其米饭中黄酮含量显著下降（$P<0.05$），随着碾磨时间从 0 s 增加到 40 s，海水稻米煮制的米饭游离黄酮含量减少了 90.18%，结合黄酮含量减少了 94.62%，总黄酮含量减少了 92.11%。经过 40 s 碾磨

后的海水稻米总黄酮含量较未碾磨的海水稻米总黄酮含量减少 73.87%。糙米中黄酮类化合物主要位于米糠层[21], 随着加工精度的升高, 黄酮的损失越来越多。马占倩[25] 的研究中也有类似的报道, 随着加工精度的提高, 糙米的总黄酮含量降低。

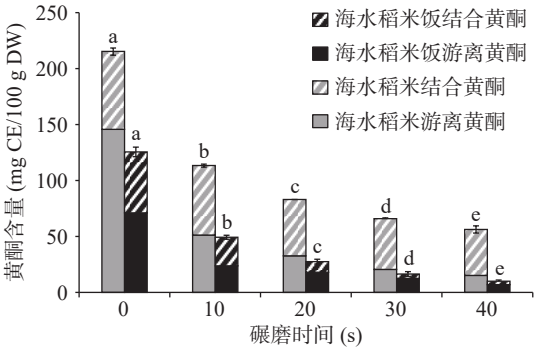


图 2 加工精度对海水稻米饭游离态与结合态黄酮含量的影响

Fig.2 Effects of degree of milling on the content of free and bound flavonoids in cooked sea rice

在相同加工精度条件下, 海水稻米饭比稻米中的黄酮含量低。碾磨时间为 0、10、20、30 和 40 s 的海水稻米饭相较于其海水稻米原料, 游离黄酮含量分别减少 51.26%、53.70%、45.07%、39.56% 和 54.25%; 结合黄酮含量分别减少 21.75%、58.98%、81.10%、91.17% 和 92.85%; 总黄酮含量分别减少 41.71%、56.60%、66.93%、75.09% 和 82.39%, 这表明蒸煮加工会导致黄酮含量的损失。郭旭等[26] 也有类似的报道, 与藜麦生粉对比, 蒸煮后的藜麦粉黄酮含量降低。黄酮含量降低可能是由于黄酮是酚类物质中的一类, 稳定性差, 在蒸煮热加工处理时容易发生降解或溶解在蒸煮的水中造成损失[27]。

2.3 加工精度对海水稻米饭花色苷含量的影响

加工精度对海水稻米饭花色苷的含量影响如图 3 所示。随着加工精度的提高, 海水稻米及其米饭花色苷含量显著下降(P<0.05), 未碾磨的海水稻米蒸煮所得米饭其花色苷含量为 4.67 mg CGE/100 g DW, 与稻米相比含量减少了 51.73%。经过 10~40 s 碾磨后的海水稻米饭中未检测出花色苷。经过 40 s 碾磨后的海水稻米花色苷含量较未碾磨的海水稻米花色苷含量减少 93.10%。这表明海水稻米的花色苷主要位于种皮部位, 而且热敏性高, 在高温加工过程中容易降解[28]。JIAMYANGYUEN 等[29] 也有类似的报道, 黑米粉经过蒸煮处理后, 总花色苷含量显著降低了 88.97%。

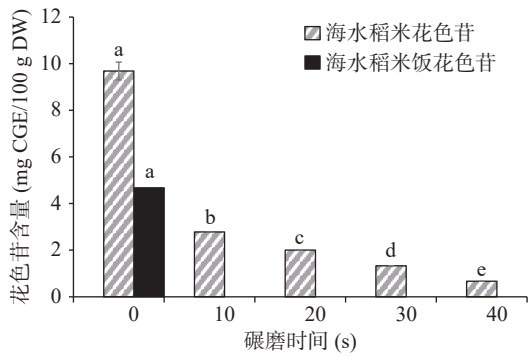


图 3 加工精度对海水稻米饭花色苷含量的影响

Fig.3 Effects of degree of milling on the content of anthocyanins in cooked sea rice

2.4 加工精度对海水稻米饭抗氧化活性的影响

2.4.1 FRAP 抗氧化能力分析 不同加工精度海水稻米饭的 FRAP 抗氧化能力的变化如图 4 所示。由图可知, 随着加工精度的提高, 海水稻米 FRAP 抗氧化能力显著下降(P<0.05)。随着碾磨时间从 0 s 增加到 40 s, 海水稻米煮制的米饭游离态 FRAP 抗氧化能力减少了 89.92%, 结合态 FRAP 抗氧化能力减少了 91.59%, 总 FRAP 抗氧化能力减少了 91.20%。经过 40 s 碾磨后的海水稻米总 FRAP 抗氧化能力较未碾磨的海水稻米总 FRAP 抗氧化能力减少了 92.44%。

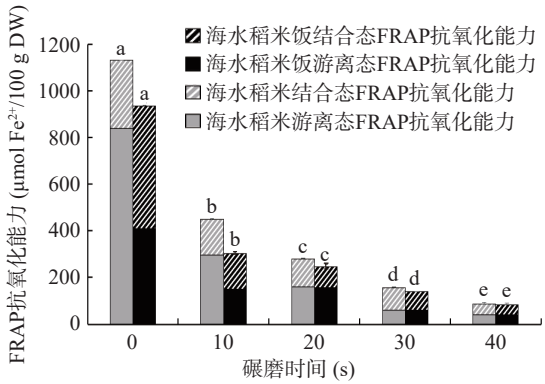


图 4 加工精度对海水稻米饭游离态与结合态 FRAP 抗氧化能力的影响

Fig.4 Effects of degree of milling on the free and bound FRAP antioxidant capacities in cooked sea rice

在相同加工精度条件下, 碾磨时间为 0、10、20、30 和 40 s 的海水稻米饭较其海水稻米原料游离态 FRAP 抗氧化能力分别减少 51.04%、49.37%、2.84%、4.35% 和 6.09%; 经过 20、30 和 40 s 碾磨的结合态 FRAP 抗氧化能力分别减少 23.78%、16.55% 和 1.55%。而未经碾磨和碾磨 10 s 海水稻米煮制的米饭结合态 FRAP 抗氧化能力较原料有提升, 分别增加 78.15% 和 1.63%, 这可能是由于蒸煮处理破坏了海水稻米紧密的细胞壁结构, 使得部分结合酚更容易提取[30]; 另一方面可能是高温处理过程中发生美拉德反应而生成部分具有抗氧化活性的美拉德产物[4]。经过 0、10、20、30 和 40 s 碾磨的海水稻米制备的米饭总 FRAP 抗氧化能力较其海水稻米分别减少 17.40%、32.04%、11.72%、11.78% 和 3.75%。

2.4.2 ORAC 抗氧化能力分析 不同加工精度海水稻米饭的 ORAC 抗氧化能力的变化如图 5 所示。随着加工精度的提高, 海水稻米及其米饭 ORAC 抗氧化能力显著下降(P<0.05)。随着碾磨时间从 0 s 增

加到 40 s，海水稻米煮制的米饭游离态 ORAC 抗氧化能力减少了 85.67%，结合态 ORAC 抗氧化能力减少了 91.27%，总 ORAC 抗氧化能力减少了 89.16%。经过 40 s 碾磨后的海水稻米总 ORAC 抗氧化能力较未碾磨的海水稻米总 ORAC 抗氧化能力减少 89.94%。

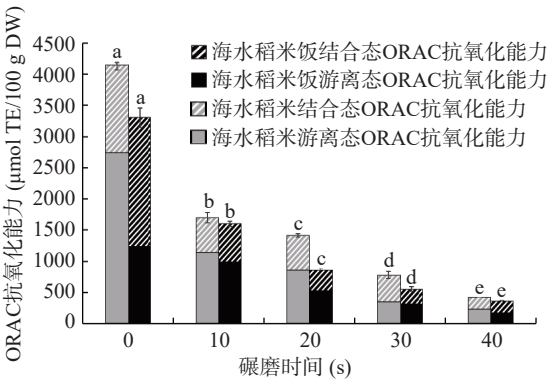


图 5　加工精度对海水稻米饭游离态与结合态 ORAC 抗氧化能力的影响

Fig.5　Effects of degree of milling on the free and bound ORAC antioxidant capacities in cooked sea rice

碾磨时间为 0、10、20、30 和 40 s 的海水稻米饭较其海水稻米原料游离态 ORAC 抗氧化能力值分别减少 58.38%、13.44%、38.39%、8.09% 和 23.73%；经过 20、30 和 40 s 碾磨的结合态 ORAC 抗氧化能力值分别减少 40.91%、46.71% 和 1.65%；而未经碾磨和碾磨 10 s 煮制的海水稻米饭结合态 ORAC 抗氧化能力值较原料有提升，分别增加 46.41% 和 8.88%；经过 0、10、20、30 和 40 s 碾磨的海水稻米制备的米饭总 ORAC 抗氧化能力值较其海水稻米分别减少 20.16%、6.03%、39.37%、29.45% 和 14.02%。

FRAP 和 ORAC 两种抗氧化能力值均随着加工精度的增加而降低。已有报道发现碾磨处理使得红米的抗氧化活性急剧下降，碾磨度越高，抗氧化能力越低[31]。有研究指出，全谷物的抗氧化作用主要由酚类物质贡献[32]。主要分布于皮层、糊粉层以及胚芽部位的酚类物质[4]，经过碾磨加工被逐步除去后，海水稻米及其米饭酚类物质含量降低，海水稻米及其米饭的抗氧化活性也随之降低。

经过蒸煮加工后，未经碾磨和碾磨 10 s 的海水稻米饭结合态抗氧化活性有提升，可能是由于海水稻米饭在水蒸气作用下的软化，结构变得疏松，提高了结合态抗氧化活性物质的可提取性和释放能力[32]。而随着碾磨时间的增加，经过 20、30 和 40 s 碾磨海水稻米逐渐缺乏麸皮保护，抗氧化活性物质更容易在蒸煮过程中流失到水中，导致结合抗氧化活性物质减少。经过蒸煮加工后，海水稻米饭抗氧化活性降低，可能是因为在热加工过程中，由于经过碾磨的海水稻米所含的酚类物质较少，且这些酚类物质在热加工过程中更容易受到温度、水分等因素的影响，更能促进结合态抗氧化物质的释放、游离酚酸脱羧或酚类物质的聚合，从而导致酚类物质含量损失及其抗氧化活性降低[33]。

2.5　加工精度对海水稻米饭挥发性风味成分的影响

2.5.1　加工精度对海水稻米饭挥发性风味成分含量的影响　加工精度对海水稻米饭挥发性风味成分种类的影响如图 6 所示。海水稻米饭中含有 40 种挥发性风味成分，其中醛类 8 种，醇类 6 种，酮类 5 种，酯类 4 种，烷烃类 12 种，其他 5 种。碾磨时间 0、10、20、30 和 40 s 的海水稻米饭挥发性风味成分分别为 26、28、17、19 和 13 种。

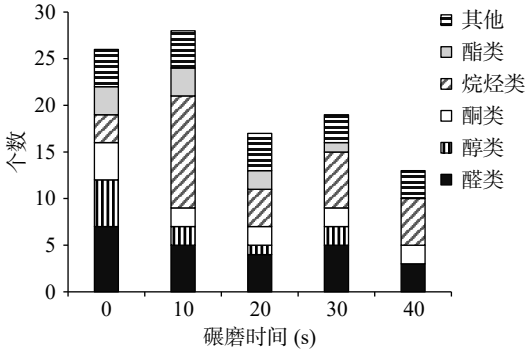


图 6　加工精度对海水稻米饭挥发性风味成分种类的影响

Fig.6　Effects of degree of milling on the types of volatile compounds in cooked sea rice

随着碾磨时间的增加，海水稻米饭风味成分的种类变化不稳定，可能是由于海水稻米皮层和胚逐渐被碾除，导致脂肪和蛋白质含量减少，海水稻米饭挥发性风味成分种类减少。在碾磨 10、30 s 时，海水稻米饭挥发性风味成分种类较前一碾磨时间出现增加的现象，可能是由于海水稻米经碾磨后表面脂质暴露，米糠脂肪酶将脂质转化为游离脂肪酸，而此类游离脂肪酸不稳定，迅速被氧化产生不饱和脂肪酸，一系列反应导致挥发性风味成分种类的增加[8]。

加工精度对海水稻米饭挥发性风味成分组成及含量的影响如表 1 所示。由表可知，各挥发性风味成分含量有不同程度的减少。随着加工精度的增加，海水稻米饭醛类、酮类、烷烃类以及其他类化合物含量显著降低（P<0.05），而酯类化合物在碾磨 10 s 后含量增加，可能是由于碾磨导致碎米增多，大米表面积增大，在相同的提取条件下，蛋白质、氨基酸、脂肪酸等更易分解为小分子风味成分[34]。碾磨时间从 0 s 增加到 40 s，海水稻米饭醛类化合物含量降低了 88.01%，酮类化合物含量降低了 87.42%，烷烃类化合物含量降低了 84.20%，其他类化合物含量降低了 88.44%，碾磨 40 s 后未检测出醇类化合物与酯类化合物。经过 10、20、30 和 40 s 的碾磨，挥发性风味成分总含量分别减少 50.85%、75.61%、78.42% 和 88.37%。张敏等[35] 研究也有类似的报道，相对于糙米，碾磨 3、6、9 min 大米制成米饭风味成分含量分别减少了 50.7%、73%、79%。这些挥发性风味成分通常来源于脂肪、蛋白质、游离氨基酸、碳水化合物

表 1 加工精度对海水稻米饭挥发性风味成分组成及含量的影响

Table 1 Effects of degree of milling on the composition and content of volatile components in cooked sea rice

种类	物质名称	含量(μg/kg)				
		0 s	10 s	20 s	30 s	40 s
醛类	正戊醛	23.52±5.80	–	–	–	–
	正己醛	324.53±19.09^{a}	90.98±26.94^{b}	71.04±16.07b^{c}	57.83±21.15^{cd}	38.39±8.42^{d}
	正壬醛	243.49±6.19^{a}	205.78±20.36^{b}	103.36±16.25^{c}	68.03±15.47^{d}	50.50±12.85^{d}
	癸醛	75.97±3.62^{a}	25.62±6.93^{b}	14.01±5.76^{c}	13.32±5.31^{c}	9.23±3.04^{c}
	正庚醛	63.22±7.80	–	–	–	–
	E-2-辛烯醛	–	–	–	8.48±2.23	–
	2-丁基-2-辛烯醛	13.75±4.71^{a}	10.14±1.72^{ab}	8.02±1.35^{ab}	6.89±3.14^{b}	–
	苯甲醛	73.85±1.83^{a}	25.01±1.48^{b}	–	–	–
	总量	818.33±23.15^{a}	357.53±34.54^{b}	196.43±23.61^{c}	154.55±27.01^{d}	98.12±15.66^{e}
醇类	1-辛烯-3-醇	20.73±1.22^{a}	12.82±3.70^{b}	–	4.72±2.15^{c}	–
	正己醇	27.44±4.72	–	–	–	–
	正庚醇	10.23±0.60	–	–	–	–
	2-乙基己醇	34.43±4.03	–	–	–	–
	2-己基-1-辛醇	4.23±0.70	–	–	–	–
	(-)-异雪松醇	–	5.73±0.16^{a}	4.30±1.57^{a}	4.03±1.28^{a}	–
	总量	97.06±6.39^{a}	18.55±3.70^{b}	4.30±1.57^{d}	8.75±2.50^{c}	–
酮类	香叶基丙酮	27.89±1.29^{a}	18.54±8.45^{ab}	17.39±6.74^{ab}	16.48±5.98^{b}	11.28±3.77^{b}
	植酮	76.44±6.64^{a}	12.32±3.93^{b}	7.10±4.32^{b}	–	–
	2-十二酮	–	–	–	6.27±0.81^{a}	4.44±0.98^{b}
	2,3-辛二酮	9.67±0.79	–	–	–	–
	5-甲基-2-庚酮	10.96±0.44	–	–	–	–
	总量	124.96±6.82^{a}	30.86±9.32^{b}	24.49±8.01^{bc}	22.75±6.03^{bc}	15.72±3.89^{c}
烷烃类	正十一烷	–	9.01±1.16^{ab}	12.54±3.99^{a}	9.11±0.27^{ab}	6.60±1.65^{b}
	正十二烷	–	28.17±4.99^{a}	–	14.17±4.39^{b}	–
	正十三烷	–	35.82±2.89^{a}	–	35.68±4.76^{a}	18.36±5.84^{b}
	正十四烷	–	53.13±16.33^{a}	29.84±9.66^{b}	16.82±6.53^{bc}	10.18±2.02^{c}
	正十六烷	–	16.73±4.96^{a}	14.90±5.00^{ab}	13.61±2.56^{ab}	8.43±0.70^{b}
	正十九烷	–	15.44±3.67^{a}	6.30±4.03^{b}	7.65±3.08^{b}	3.83±0.41^{b}
	2,6-二甲基十一烷	–	5.59±0.42	–	–	–
	3-甲基十七烷	–	9.83±4.79	–	–	–
	3-甲基-十三烷	–	12.80±2.49	–	–	–
	(+)-柠檬烯	211.88±44.37^{a}	36.19±13.02^{b}	–	–	–
	邻伞花烃	58.91±10.32^{a}	7.49±2.53^{b}	–	–	–
	3,7-二甲基-1-辛烯	29.16±1.37^{a}	10.58±4.07^{b}	–	–	–
	总量	299.95±45.58^{a}	240.78±23.7^{b}	63.58±12.27^{d}	97.04±10.03^{c}	47.40±6.45^{e}
酯类	N-甲基邻氨基苯甲酸甲酯	10.75±1.50	–	–	–	–
	棕榈酸甲酯	21.37±8.31^{b}	48.06±11.26^{a}	20.04±5.74^{b}	8.98±4.64^{c}	–
	棕榈酸乙酯	10.29±4.19^{a}	15.35±4.80^{a}	13.02±6.57^{a}	–	–
	肉豆蔻酸甲酯	–	23.33±8.65	–	–	–
	总量	42.41±9.43^{b}	86.74±14.99^{a}	33.06±8.72^{c}	8.98±4.64^{d}	–
其他	2-乙酰基-1-吡咯啉	57.61±8.10^{a}	47.20±7.45^{a}	20.00±2.13^{b}	18.64±4.13^{b}	13.82±2.22^{b}
	2-戊基呋喃	333.41±0.73^{a}	78.63±14.91^{b}	51.52±17.27^{c}	45.79±17.34^{c}	15.15±6.24^{d}
	2,4-二叔丁基酚	24.27±7.92^{a}	25.29±9.35^{a}	39.88±18.49^{a}	35.44±18.51^{a}	21.12±5.98^{a}
	亚麻酸	18.01±5.81	–	–	–	–
	石竹素	–	7.07±1.83^{a}	9.61±1.21^{a}	–	–
	总量	433.30±12.75^{a}	158.19±19.20^{b}	121.01±25.42^{c}	99.87±25.70^{d}	50.09±8.92^{e}
总计		1816.01±54.34^{a}	892.65±49.49^{b}	442.87±38.69^{c}	391.94±39.43^{d}	211.33±19.53^{e}

注: 同行不同小写字母表示不同碾磨时间海水稻米饭挥发性物质含量有显著性差异(P<0.05); –表示未检测到。

以及甘油三酯或其衍生物, 且多集中在大米外层, 并随着碾磨度的增加而逐渐降低[36]。

2.5.2 加工精度对海水稻米饭挥发性风味成分 OAV 的影响 加工精度对海水稻米饭风味成分 OAV 的影响如表 2 所示, 海水稻米蒸煮过程中 OAV>1 的挥发性风味成分有 10 种, 分别为正戊醛、正己醛、正

表 2　加工精度对海水稻米饭挥发性风味成分 OAV 的影响

Table 2　Effects of degree of milling on the OAV of volatile components in cooked sea rice

种类	物质名称	风味阈值[36,40]（μg/kg）	风味描述[17,36,40]	OAV				
				0 s	10 s	20 s	30 s	40 s
醛类	正戊醛	12.00	醇香味	1.96	–	–	–	–
	正己醛	4.10	果香，青草香	79.15	22.19	17.33	14.10	9.36
	正壬醛	1.00	柑橘香，青草香	243.49	205.78	103.36	68.03	50.50
	癸醛	2.00	脂肪，柑橘，花香	37.98	12.81	7.00	6.66	4.62
	正庚醛	3.00	草香，花香，柑橘味	21.07	–	–	–	–
	E-2-辛烯醛	2.70	坚果，青草，油脂香	–	–	–	3.14	–
醇类	1-辛烯-3-醇	14.00	生蘑菇，稻草香	1.48	0.92	–	0.34	–
其他	2-乙酰基-1-吡咯啉	0.10	爆米花香	576.10	472.00	200.00	186.40	138.20
	2-戊基呋喃	6.00	花香，果香，坚果香	55.57	13.11	5.89	7.63	2.53
	亚麻酸	5.00	油脂味	3.60	–	–	–	–

注：–表示未检测到。

壬醛、癸醛、正庚醛、E-2-辛烯醛、1-辛烯-3-醇、2-乙酰基-1-吡咯啉、2-戊基呋喃、亚麻酸，表明醛类、醇类以及杂环类对海水稻米饭风味的贡献较大。这些关键风味化合物除 E-2-辛烯醛外，均随着海水稻米加工精度的增加而减少，海水稻米饭挥发性风味成分 OAV 降低，表明海水稻米外层的挥发性风味成分对海水稻米饭的总体风味贡献度较大。

醛类化合物主要来源于脂肪氧化和蛋白质降解，大部分醛类化合物气味阈值较低，对海水稻米饭风味影响显著，这些物质主要由脂肪氧化得到，并具有一定的油脂香、青草香、甜香味、花香味等令人愉悦的风味[37]。其中未经碾磨海水稻米饭中的风味成分正壬醛 OAV>100，对海水稻米饭风味影响较大，为海水稻米提供柑橘香，青草香味，经过 40 s 碾磨后，正壬醛 OAV 降低了 79.26%。

醇类物质给大米带来花香果香等令人愉悦的气味，其中 1-辛烯-3-醇具有蘑菇香，在碾磨 40 s 的海水稻米饭中未检测到 1-辛烯-3-醇等醇类挥发性风味成分。

杂环类化合物主要通过美拉德反应产生，为海水稻米饭提供坚果焙烤的焦香风味[38]。海水稻米饭杂环类化合物中 2-乙酰基-1-吡咯啉、2-戊基呋喃 OAV 相对较高，是大米的典型风味成分[39]。这两种风味成分含量都随着加工精度的增加呈下降的趋势。对于米饭中的特征风味成分 2-乙酰基-1-吡咯啉，由于其易挥发、阈值低，OAV 最高为 576.10，对海水稻米饭风味的贡献最大，使米饭具有爆米花香，对海水稻米饭风味起着决定性作用，经过 40 s 的碾磨，其 OAV 降低了 76.01%。

3　结论

本论文研究了加工精度对海水稻米饭的酚类物质含量及风味成分的影响。结果表明，随着加工精度的增加，海水稻米及其米饭的多酚、黄酮及花色苷含量均显著减少。在相同加工精度下，海水稻米饭比稻米中的多酚、黄酮及花色苷含量低。海水稻米饭 FRAP 和 ORAC 抗氧化能力均随加工精度增加而降低，在相同加工精度下，海水稻米总 FRAP 和 ORAC 抗氧化能力在蒸煮后均降低。此外，高的加工精度也导致海水稻米饭挥发性风味化合物的含量显著降低。结合课题组的前期研究，提高海水稻米的加工精度能显著增强其吸水性，降低最适蒸煮时间、硬度和胶粘性，改善了其感官品质。因此，提高加工精度对改善海水稻米饭食用品质既有有利影响，也有不利影响。综上所述，海水稻米在碾磨加工过程中加工精度建议控制在 8%~10%，以达到改善食用品质和保留酚类物质、抗氧化活性及挥发性风味成分的平衡。本研究可为海水稻米的加工及消费提供理论参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 陈启彪，梁慧琳，陈俏媛，等. 新型海水稻的介绍[J]. 农技服务，2016，33(6)：17，41. [CHEN Qibiao，LIANG Huilin，CHEN Qiaoyuan，et al. Introduction of new sea rice[J]. Agricultural Technology Service，2016，33(6)：17，41.]

[2] 赖双定，龙宇，陈逸君，等. 海水稻营养功能成分与加工利用研究进展[J]. 粮食与油脂，2022，35(6)：13−15，35. [LAI Shuangding，LONG Yu，CHEN Yijun，et al. Research progress on nutritional functional components and processing utilization of seawater rice[J]. Cereals & Oils，2022，35(6)：13−15，35.]

[3] ZHANG Shuai，MA Qin，DONG Lihong，et al. Phenolic profiles and bioactivities of different milling fractions of rice bran from black rice[J]. Food Chemistry，2022，378：132035.

[4] LIU Ruihai. Whole grain phytochemicals and health[J]. Journal of Cereal Science，2007，46(3)：207−219.

[5] SINGH A，SHARMA S. Bioactive components and functional properties of biologically activated cereal grains：A bibliographic review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2017，57(14)：3051−3071.

[6] JIANG Ping，LI Ren，TIAN Xiaohong，et al. Effect of milling on proximate composition，γ-oryzanol，vitamin B_1，polyphenolic，and bioaccessibility of phenolic of brown rice[J]. Journal of Food

Processing and Preservation, 2022, 46(12): e17215.
[7] SHAO Yafang, XU Feifei, SUN Xiao, et al. Identification and quantification of phenolic acids and anthocyanins as antioxidants in bran, embryo and endosperm of white, red and black rice kernels (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Cereal Science, 2014, 59(2): 211−218.
[8] 安红周, 陈会会, 尹文婷, 等. 加工精度对大米食用品质及风味的影响[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(1): 1−7. [AN Hongzhou, CHEN Huihui, YIN Wenting, et al. Effect of milling degree on the edible quality and flavor of rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(1): 1−7.]
[9] TI Huihui, ZHANG Ruifen, LI Qing, et al. Effects of cooking and *in vitro* digestion of rice on phenolic profiles and antioxidant activity[J]. Food Research International, 2015, 76: 813−820.
[10] 张浩竞, 徐振岗, 李泳娴, 等. 加工精度对海水稻米蒸煮特性及食用品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 104−110. [ZHANG Haojing, XU Zhengang, LI Yongxian, et al. Effect of processing accuracy on cooking characteristics and eating quality of seawater rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 104−110.]
[11] LAOKULDILOK T, SURAWANG S, KLINHOM J. Effect of milling on the color, nutritional properties, and antioxidant contents of glutinous black rice[J]. Cereal Chemistry, 2013, 90(6): 552−557.
[12] 卢琦, 贾栩超, 邓梅, 等. 不同干制方式对沙田柚果渣粉活性物质的影响[J]. 中国农业科学, 2022, 55(14): 2825−2836. [LU Qi, JIA Xuchao, DENG Mei, et al. Effects of different drying methods on bioactive components of shatianyou (*Citrus grandis* L. Osbeck) pomace powder[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2022, 55(14): 2825−2836.]
[13] DEWANTO V, WU Xianzhong, 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.
[14] 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 CO_2 laser perforation, ultrasound, and freezing–thawing as pretreatments[J]. Food and Bioprocess Technology, 2021, 14(10): 1805−1816.
[15] IQBAL Y, PONNAMPALAM E N, SULERIA H A R, et al. LC-ESI/QTOF-MS profiling of chicory and lucerne polyphenols and their antioxidant activities[J]. Antioxidants, 2021, 10(6): 932.
[16] 苏慧敏, 张敏, 苗菁, 等. 不同加工程度大米食味变化分析[J]. 食品科学, 2016, 37(18): 58−63. [SU Huimin, ZHANG Min, MIAO Jing, et al. Changes in rice taste with milling degree[J]. Food Science, 2016, 37(18): 58−63.]
[17] 彭凯雄, 唐群勇, 陈晓明. 酿酒用生、熟大米挥发性风味物质差异分析[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 303−319. [PENG Kaixiong, TANG Qunyong, CHEN Xiaoming. Difference analysis of volatile flavor substances in raw and cooked rice for winemaking[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 303−319.]
[18] 吴林, 张强, 臧慧明, 等. 气味活度值法评价蓝莓果皮、果肉、果汁挥发性香气成分[J]. 食品工业科技, 2020, 41(1): 195−200. [WU Lin, ZHANG Qiang, ZANG Huiming, et al. Evaluation of volatile aroma components in blueberry peel, pulp and juice by odor activity value[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(1): 195−200.]
[19] LIU Lei, GUO Jinjie, ZHANG Ruifen, et al. Effect of degree of milling on phenolic profiles and cellular antioxidant activity of whole brown rice[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 318−325.
[20] ZHOU Z K, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. The distribution of phenolic acids in rice[J]. Food Chemistry, 2004, 87(3): 401−406.
[21] TI Huihui, LI Qing, ZHANG Ruifen, 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.
[22] THUENGTUNG S, OGAWA Y. Comparative study of conventional steam cooking and microwave cooking on cooked pigmented rice texture and their phenolic antioxidant[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(2): 965−972.
[23] ALI N, POPOVIĆ V, KOUTCHMA T, et al. Effect of thermal, high hydrostatic pressure, and ultraviolet-C processing on the microbial inactivation, vitamins, chlorophyll, antioxidants, enzyme activity, and color of wheatgrass juice[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020, 43(1): e13036.
[24] 王红, 叶英, 韦唯, 等. 不同萌发条件及加工方法对藜麦品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(9): 72−79. [WANG Hong, YE Ying, WEI Wei, et al. Effects of different germination conditions and processing methods on the quality of quinoa[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(9): 72−79.]
[25] 马占倩. 蒸制和煮制对不同加工精度稻米酚类物质的影响研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019. [MA Zhanqian. Effects of cooking and steaming on phenolic substances in rice with different processing accuracy[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2019.]
[26] 郭旭, 赵红梅, 李雪洁. 萌发时间及熟化方式对萌芽藜麦粉品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(6): 60−65. [GUO Xu, ZHAO Hongmei, LI Xuejie. Effects of germination time and ripening methods on the quality of germinated quinoa flour[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(6): 60−65.]
[27] KADIRI O. A review on the status of the phenolic compounds and antioxidant capacity of the flour: Effects of cereal processing[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup1): S798−S809.
[28] 钟凯翠, 刘思炜, 巫雨桐, 等. 海红米花色苷的提取工艺优化及其体外降糖作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(14): 97−103. [ZHONG Kaicui, LIU Siwei, WU Yutong, et al. Study on extraction process optimization of anthocyanins from sea red rice and its hypoglycemic effect *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(14): 97−103.]
[29] JIAMYANGYUEN S, NUENGCHAMNONG N, NGAMDEE P. Changes of anthocyanins in black rice flours prepared by cooking and pregelatinization[J]. Chiang Mai University Journal of Natural Sciences, 2019, 18(4): 534−552.
[30] 袁佐云, 朱运平, 俞伟祖, 等. 蒸煮与发酵对全谷物粉甲醇提取物抗氧化活性的影响[J]. 中国食品学报, 2016, 16(2): 25−32. [YUAN Zuoyun, ZHU Yunping, YU Weizu, et al. Effect of steam and fermentation on the antioxidant activity of the methanol extract of whole grain[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2016, 16(2): 25−32.]
[31] MIN B, GU L W, McCLUNG A M, et al. Free and bound total phenolic concentrations, antioxidant capacities, and profiles of

proanthocyanidins and anthocyanins in whole grain rice (*Oryza sativa* L.) of different bran colours[J]. Food Chemistry, 2012, 133(3): 715−722.

[32] MA Zhanqian, YI Cuiping, WU Nana, et al. Steaming retains more phenolics, dietary fiber, and antioxidant activities than cooking for rice with different milling processes[J]. Cereal Chemistry, 2022, 99(3): 664−679.

[33] SHARMA P, GOUDAR G, LONGVAH T, et al. Fate of polyphenols and antioxidant activity of barley during processing[J]. Food Reviews International, 2022, 38(2): 163−198.

[34] MONSOOR M A, PROCTOR A. Volatile component analysis of commercially milled head and broken rice[J]. Journal of Food Science, 2004, 69(8): C632−C636.

[35] 张敏, 苏慧敏, 王子元. 稻米加工对米饭风味的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 8−14. [ZHANG Min, SU Huimin, WANG Ziyuan. The effect of rice processing on the flavor of cooked rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 8−14.]

[36] 贾梦. 大米不同粒层理化性质和风味的分布特征及其多酚体外发酵特性的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022. [JIA Meng. Study on physicochemical and volatile characteristics present in different layer of rice, and *in vitro* fermentation characteristics for polyphenolic[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2022.]

[37] YUAN Biao, ZHAO Chanjuan, YAN Ming, et al. Influence of gene regulation on rice quality: Impact of storage temperature and humidity on flavor profile[J]. Food Chemistry, 2019, 283: 141−147.

[38] 彭凯雄, 唐群勇, 郑钰涵, 等. 大米中挥发性风味物质的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 4794−4801. [PENG Kaixiong, TANG Qunyong, ZHENG Yuhan, et al. Research progress of volatile flavor substances in rice[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(15): 4794−4801.]

[39] WANG Ziyuan, SU Huimin, BI Xue, et al. Effect of fragmentation degree on sensory and texture attributes of cooked rice[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(4): e13920.

[40] 管兴宇. 大米蒸煮溶出组分的特性及其对米饭品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. [GUAN Xingyu. Characteristics of soluble components released during rice cooking and their impact on rice quality[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.]