

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120044

ZHANG Haojing, XU Zhengang, LI Yongxian, et al. Effect of Degree of Milling on the Cooking Properties and Edible Quality of the Sea Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 104–110. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120044

· 研究与探讨 ·

加工精度对海水稻米蒸煮特性及食用品质的影响

张浩竞^{1,2,3}, 徐振岗^{2,3}, 李泳娴², 陈天鸽², 贺天懿², 许敏^{2,3}, 庾晓军⁴, 刘磊^{2,3,4,*}, 赵喜红^{1,*}

(1. 武汉工程大学环境生态与生物工程学院, 湖北武汉 430205;

2. 五邑大学药学与食品工程学院, 广东江门 529020;

3. 江门市大健康国际创新研究院, 广东江门 529040;

4. 广东滨崎食品有限公司, 广东江门 529020)

摘要: 本研究旨在探究加工精度对海水稻米食用品质的影响, 对不同加工精度的海水稻米蒸煮品质、感官品质和质构特性进行测定。通过控制碾磨时间制备不同加工精度的海水稻米 (0%、7.20%、9.62%、10.85% 和 11.86%), 采用快速粘度仪、质构仪、感官评价等方法对海水稻米饭品质进行了综合分析。研究发现, 当加工精度从 0% 增加到 11.86% 时, 海水稻米中总膳食纤维含量减少了 86.07%, 蛋白质含量减少了 31.84%, 脂肪含量减少了 77.18%, 而淀粉含量提升了 7.12%; 海水稻米吸水性、膨胀率、碘蓝值和水溶性指数 (65~85 °C) 显著了 129.66%、178.45%、114.63% 和 46.79%~103.89% ($P<0.05$); 峰值粘度、最低粘度和最终粘度分别提升 35.22%、18.38% 和 8.07%, 糊化温度下降为 88.85 °C, 并且最适蒸煮时间减少了 43.01%。同时, 对海水稻米饭质构特性的分析显示, 随着加工精度的提高, 海水稻米饭的硬度、胶粘性和咀嚼性显著下降, 粘附性显著提升 ($P<0.05$), 弹性则无显著变化 ($P>0.05$), 米饭感官评价得分提升 19.30%。通过提高海水稻米的加工精度, 可改善其蒸煮、糊化、质构及整体感官特性, 从而提升其食用品质。本研究结果可为海水稻米的适度加工提供理论参考。

关键词: 海水稻米, 加工精度, 食用品质, 质构特性

中图分类号: TS213.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)23-0104-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120044



本文网刊:

Effect of Degree of Milling on the Cooking Properties and Edible Quality of the Sea Rice

ZHANG Haojing^{1,2,3}, XU Zhengang^{2,3}, LI Yongxian², CHEN Tiange², HE Tianyi², XU Min^{2,3}, TUO Xiaojun⁴,
LIU Lei^{2,3,4,*}, ZHAO Xihong^{1,*}

(1. School of Environmental Ecology and Biological Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. School of Pharmacy and Food Engineering, Wuyi University, Jiangmen 529020, China;

3. International Healthcare Innovation Institute (Jiangmen), Jiangmen 529040, China;

4. Guangdong Hamasaki Foods Co., Ltd., Jiangmen 529020, China)

Abstract: This research aimed to investigate the effect of degree of milling on the cooking properties and edible quality of the sea rice. The study examined the cooking quality, sensory attributes, and texture properties of the cooked sea rice with

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 江门市基础与应用基础研究重点项目 (2220002000277); 广东省普通高校重点领域专项 (2024ZDZX2007); 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); 广东大学生科技创新培育专项资金资助项目 (pdjh2024b379); 五邑大学 “创新创业基金” (2023111500000420, 202311329327)。

作者简介: 张浩竞 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 1256955990@qq.com。

*** 通信作者:** 刘磊 (1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工, E-mail: liuleifood@163.com。

赵喜红 (1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品安全, E-mail: zxh@wit.edu.cn。

different degree of milling. In this experiment, sea rice with different degree of milling (0%, 7.20%, 9.62%, 10.85% and 11.86%) were prepared by controlling the milling time. The quality attributes of cooked sea rice were analyzed by rapid viscosity analyzer (RVA), texture analyzer and sensory evaluation. As the milling degree increased from 0% to 11.86%, the total dietary fiber content in sea rice decreased by 86.07%, while protein content decreased by 31.84% and fat content decreased by 77.18%. Conversely, the starch content increased by 7.12%. The results of the study indicated significant increases in the water absorption, swelling rate, iodine blue value, and water solubility index (65~85 °C) of sea rice by 129.66%, 178.45%, 114.63%, and 46.79%~103.89%, respectively ($P<0.05$). The peak viscosity, low viscosity and final viscosity increased by 35.22%, 18.38% and 8.07%, respectively. Additionally, the gelatinization temperature of sea rice decreased to 88.85 °C, leading to a reduction of the optimum cooking time by 43.01%. The texture properties of sea rice were analyzed, revealing significant changes with the increase of milling degree. Specifically, the hardness, gumminess, and chewiness of sea rice decreased significantly, while the viscosity increased significantly ($P<0.05$). There was no significant change in springiness ($P>0.05$). Interestingly, the rice sensory evaluation score showed a substantial increase of 19.30%. The results of the study indicate that increasing the degree of milling of sea rice can improve its cooking properties, pasting characteristics, texture, overall sensory properties, and edible quality. Therefore, this study can provide a theoretical basis for choosing the suitable degree of milling of sea rice.

Key words: sea rice; degree of milling; edible quality; texture properties

海水稻, 又称耐盐碱水稻, 是一种不惧海水短期浸泡, 能在含盐量 0.3% 以上的海边滩涂地、内陆盐碱地和咸水湖等周边正常生长, 并可产业化推广的水稻品种。它是由我国农学家陈日胜研究员于 1986 年在湛江遂溪县发现的水稻新品种。海水稻具有抗涝、抗盐碱、抗倒伏、抗病虫害等能力, 是优良的水稻品种^[1]。同时, 海水稻富含淀粉、膳食纤维及氨基酸等营养成分, 还含有多酚类化合物、生物碱、六磷酸肌醇等天然活性物质, 具有较高的营养价值, 是天然的绿色有机食品^[2]。然而, 由于海水稻米的果皮层结构致密, 消费者使用其制作米饭时需要较长时间浸泡, 蒸煮费时, 米饭口感粗糙, 这阻碍了海水稻的消费及产业发展。

稻米的加工精度是反映稻米感官品质和营养质量的重要参数^[3]。国内外已有很多学者报道, 随着加工精度的提高, 大米的蒸煮品质、糊化特性及感官品质均得到改善^[4-5]。当加工精度从 0% 增加到 10%, 大米的吸水性和体积膨胀率均显著提升, 最适蒸煮时间显著降低^[6]。刘彦宵雪^[7]研究发现, 当加工精度从 0% 增加到 15.83%, 大米的峰值粘度、最低粘度、最终粘度分别增加了 61.1%、54.3%、38.5%; 对加工精度与糊化特性进行相关性分析发现, 加工精度与峰值粘度、最低粘度、衰减值、最终粘度呈极显著正相关, 与糊化温度呈极显著负相关^[8]。以上研究使用的原料都是利用淡水灌溉的普通水稻, 但采用盐碱地生长的海水稻进行蒸煮特性的研究尚未见报道。关于

加工精度对海水稻米蒸煮特性及食用品质的影响缺乏数据支持, 有待深入研究。

本研究以广东湛江地区的海水稻米作为研究对象, 研究加工精度对海水稻米食味、糊化特性以及质构特性的影响, 初步分析不同加工精度海水稻米饭的食用品质差异, 为海水稻米的适度加工提供理论参考。

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; 盐酸 分析纯, 广东广试试剂科技有限公司; 碘试剂 广州和为医药科技有限公司。

SXJMJ-168 精米机 台州市华昌粮油机械有限公司; 800Y 高速多功能粉碎机 永康市欧橡(oak)工贸有限公司; RVA-StarchMaster2 快速粘度仪 瑞典 Perten 公司; Biotek Synergy Neo2 多功能酶标仪 美国 Agilent 公司; TMS-PLILOT 美国 FTC 质构仪 北京盈盛恒泰科技有限责任公司。

1.2 实验方法

1.2.1 不同加工精度米样的制备 称取海水稻米 150 g (A_0), 用精米机碾磨, 碾磨时间分别为 0、10、20、30、40 s, 得到不同加工精度 (degree of milling, DOM) 的海水稻米, 如图 1 所示, 称量得碾磨后的海水稻米质量 A_1 。将不同加工精度的海水稻米样品粉碎, 密封分装并置于 4 °C 冰箱内以备用。在稻米的



图 1 不同加工精度的海水稻米样品

Fig.1 Sea rice with different degree of milling

注: 从左到右依次为碾磨时间 0、10、20、30 和 40 s 海水稻米。

实际碾磨中,难以准确控制稻米样品的加工精度为整数,后文的加工精度用碾磨时间表示^[8-10]。

$$A(\%) = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100$$

式中: A 表示加工精度,%; A_1 表示碾磨后大米质量, g; A_0 表示海水稻原料的质量, g。

1.2.2 基本成分的测定 膳食纤维的测定: 参考 GB 5009.88-2023《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》; 粗蛋白质的测定: 参考 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法; 粗脂肪的测定: 参考 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》索氏抽提法; 淀粉的测定: 参考 GB 5009.9-2023《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》酶水解法。

1.2.3 水溶性指数的测定 参考高晨^[11]和 Chen 等^[12]的方法并略作修改, 称取不同加工精度的米粉 2.5 g, 记为 W_0 , 置于烧杯中, 分别加 30 mL 的蒸馏水, 分别在加热到 65、75、85 °C 条件下搅拌 30 min, 经过 8000 r/min 离心 20 min 后收集上清液倒入重量为 W_1 培养皿中, 于 105 °C 烘箱中烘至恒重, 计为 W_2 。

$$W(\%) = \frac{W_2 - W_1}{W_0} \times 100$$

式中: W 表示水溶性指数, %; W_2 表示烘干后样品加培养皿质量, g; W_1 表示培养皿质量, g; W_0 表示原料米质量, g。

1.2.4 吸水性、膨胀率及碘蓝值的测定 参考魏振承等^[13]的方法并略作修改, 称取 7 g 米样(m_0), 转移至 100 mL 量筒内, 加入 25 mL 水, 读取体积 V_1 , 将其倒入已知质量(m_1)的烧杯中, 用蒸馏水清洗米样 5 遍, 向烧杯中加入 100 mL 蒸馏水, 待锅中水沸腾, 放入蒸煮 20 min, 将米汤倒出至无米汤滴出, 米饭冷却至室温称重, 记为 m_2 , 将已称重的米饭转移到 100 mL 量筒, 加入 50 mL 水, 读取体积 V_2 。

$$T(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100$$

式中: T 表示吸水性, %; m_2 表示蒸煮后米和容器质量, g; m_1 表示容器烧杯质量, g; m_0 表示原料米的质量, g。

$$V(\%) = \frac{V_2 - 50}{V_1 - 25} \times 100$$

式中: V 表示膨胀率, %; V_2 表示 50 毫升水和蒸煮后米的体积, mL; V_1 表示 25 毫升水和原料米的体积, mL。

米汤碘蓝值测定: 取 1 mL 米汤在 10 °C 下以 4000 r/min 离心 10 min 后取上清于装有 50 mL 蒸馏水的 100 mL 容量瓶中, 加入 0.5 mol/L HCl 溶液 5 mL 和 0.2 g/100 mL 碘试剂 1 mL, 用蒸馏水定容至 100 mL, 在 660 nm 处测定其吸光度。

1.2.5 最适蒸煮时间的测定 参考 GB/T 25226-2010《大米 蒸煮过程中米粒糊化时间的评价》和刘静

静等^[4]的方法并略作修改, 采用玻璃板白芯法, 将 250 mL 水加入 500 mL 的烧杯中, 置于电磁炉上的水浴锅中加热至沸腾, 称取 10 g 糙米倒入烧杯中开始计时, 从 15 min 后每隔 1 min 捞出至少 10 粒米, 使用玻璃板进行挤压, 观察米粒是否有白芯, 无白芯即为煮熟, 记录所有米粒均无白芯的时间为最适蒸煮时间。

1.2.6 糊化特性的测定 将制备的不同加工精度的海水稻米粉参考 GB/T 14490-2008《粮油检验 谷物及淀粉糊化特性测定 粘度仪法》和 Sandhu 等^[14]的方法, 用快速粘度分析仪测定样品糊化特性, 将米粉与纯水按质量比 1:9 的比例加入样品池, 测试程序温度设定: 50 °C 保持 1 min, 以 6 °C/min 的速率上升至 95 °C, 在 95 °C 保持 5 min, 再以 6 °C/min 速率下降到 50 °C, 在 50 °C 保持 1 min。测试开始高速混匀样品, 再以 150 r/min 的速率旋转至测试结束。得到样品的峰值粘度、最低粘度、崩解值、最终粘度、回生性、糊化温度。

1.2.7 米饭的质构品质分析 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置于带盖铝盒或不锈钢盒中, 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。

米饭质构特性的测定: 参考贺财俊^[15]的方法并略作修改, 质构仪参数设定: 测试模式为 TPA 全质构模式; 测试速度为 30 mm/min; 变形值为 70.0%; 触发力为 0.15 N; 两次压缩间隔为 0 s; 探头为直径 36 mm 金属圆柱型探头。

将制备好的米饭样品冷却至室温, 去掉上层米饭, 从中间层不同位置随机取粒米饭放置在置物台上, 并固定米饭放置位置。每次测定后用擦镜纸将探头擦拭干净后, 重复操作, 分别进行 10 次平行试验。

1.2.8 米饭的感官评价 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》, 选定 10 名评价员 (5 男 5 女), 年龄在 18~40 岁之间, 对不同加工精度海水稻米饭观察品尝并评价。感官评价评分表如表 1。

1.3 数据处理

三次平行实验后, 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 碾磨时间对海水稻米加工精度的影响

不同碾磨时间对海水稻米加工精度的影响如图 2 所示。随着碾磨时间的增加, 海水稻米的加工精度逐渐提高。碾磨时间为 10、20、30 和 40 s, 海水稻米的加工精度分别为 7.20%、9.62%、10.85% 和 11.86%。在稻米碾磨过程中, 加工精度曲线的斜率

表 1 海水稻米饭感官评价评分

Table 1 Sensory evaluation and scoring table for cooked sea rice

二级感官指标(分值)	评分标准	得分
纯正性、浓郁性 20分	具有米饭特有的香气, 香气浓郁	18~20
	具有米饭特有的香气, 米饭清香	15~17
	具有米饭特有的香气, 香气不明显	12~14
	米饭无香味, 但无异味	7~11
	米饭有异味	0~6
颜色 7分	米饭颜色洁白	6~7
	颜色正常	4~5
	米饭发黄或发灰	0~3
光泽 8分	有明显光泽	7~8
	稍有光泽	5~6
	无光泽	0~4
饭粒完整性 5分	米饭结构紧密, 饭粒完整性好	4~5
	米饭大部分结构紧密完整	3
	米饭粒出现爆花	0~2
粘性 10分	清爽, 有粘性, 不粘牙	8~10
	有粘性, 基本不粘牙	6~7
	有粘性粘牙; 或无粘性	0~5
弹性 10分	米饭有嚼劲	8~10
	米饭稍有嚼劲	6~7
	米饭疏松、发硬, 感觉有渣	0~5
软硬度 10分	软硬适中	8~10
	感觉略硬或略软	6~7
	感觉很硬或很软	0~5
纯正性, 持久性 25分	咀嚼时, 有较浓郁的清香和甜味	22~25
	咀嚼时, 有淡淡的清香滋味和甜味	18~21
	咀嚼时, 无清香滋味和甜味, 但无异味	16~17
	咀嚼时, 无清香滋味和甜味, 有异味	0~15
成团性、粘弹性、硬度 5分	较松散, 粘弹性较好, 硬度适中	4~5
	结团, 粘弹性稍差, 稍变硬	2~3
	板结, 粘弹性差, 偏硬	0~1

逐渐减小, 这可能与由于海水稻外部糠层相较于内部胚乳更柔软、易剥离有关, 因此碾磨初期海水稻的米糠层能够较为容易地去除^[16], 从而导致碾磨初期加工精度变化的幅度较大。

2.2 加工精度对海水稻米基本成分含量的影响

不同加工精度对海水稻米基本成分的影响如表 2 所示。随着加工精度的增加, 海水稻米的不溶性膳食纤维、可溶性膳食纤维、蛋白质和脂肪含量均显著下降($P<0.05$), 而淀粉含量显著增加($P<0.05$)。碾磨时间从 0 s 增加到 40 s 时, 总膳食纤维含量减少 86.07%, 其中, 膳食纤维以不溶性膳食纤维为主,

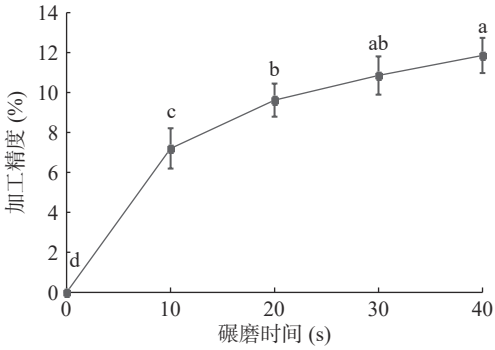


图 2 碾磨时间对海水稻米加工精度的影响

Fig.2 Effect of milling time on degree of milling of sea rice

注: 图中不同小写字母表示差异显著 $P<0.05$ 。

减少了 88.92%; 蛋白质含量减少了 31.84%, 脂肪含量减少了 77.18%, 而淀粉含量增加了 7.12%。原因在于膳食纤维、蛋白质及脂肪主要分布于糙米的皮层^[17], 而淀粉分布于糙米胚乳。随着碾磨时间的增加, 稻米的加工精度提高, 米糠层逐渐被去除, 导致膳食纤维等成分含量减少, 而淀粉含量增加^[18]。

2.3 加工精度对海水稻米水溶性指数的影响

不同加工精度对海水稻米水溶性指数的影响如表 3 所示。在相同的温度条件下, 海水稻米的水溶性指数随着加工精度的提高逐渐增加, 提升了 46.79%~103.89%。延长碾磨时间可降低淀粉结晶度, 从而降低糊化温度, 并提高了大米的水溶性指数和吸水性能^[19]。此外, 研究学者^[20]认为随着大米加工精度的提高, 不溶性膳食纤维逐渐减少, 进而导致水溶性指数增加。在 65 ℃ 至 85 ℃ 范围内, 海水稻米粉的水溶性指数呈现先上升后下降的趋势。这可能是因为当温度从 65 ℃ 升高到 75 ℃ 时, 大米中的水溶性物质释放增加, 同时, 阻碍释放的稻米外部糠层被破坏, 导致水溶性指数提高。然而在 85 ℃ 时淀粉开始糊化形成凝胶, 将水溶性物质包裹保护起来,

表 3 不同加工精度对海水稻米水溶性指数的影响(%)

Table 3 Effect of different degree of milling on the water solubility index of sea rice (%)

样品	65 ℃	75 ℃	85 ℃
SR	3.27±0.16 ^b	4.11±0.41 ^c	2.89±0.19 ^c
SR-1	4.16±0.03 ^a	4.47±0.25 ^{de}	2.91±0.51 ^c
SR-2	4.20±0.24 ^a	5.53±0.05 ^c	4.36±0.22 ^b
SR-3	4.56±0.17 ^a	6.71±0.52 ^b	5.47±0.69 ^a
SR-4	4.80±0.57 ^a	8.38±0.22 ^a	5.09±0.41 ^{ab}

表 2 不同加工精度海水稻米各基本成分含量

Table 2 Basic nutrient content of sea rice at different degree of milling

样品	不溶性膳食纤维(g/100 g)	可溶性膳食纤维(g/100 g)	总膳食纤维(g/100 g)	蛋白质(g/100 g)	脂肪(g/100 g)	淀粉(g/100 g)
SR	3.16±0.05 ^a	0.43±0.01 ^a	3.59±0.05 ^a	9.14±0.09 ^a	2.41±0.11 ^a	68.02±0.34 ^d
SR-1	1.52±0.05 ^b	0.23±0.01 ^b	1.75±0.06 ^b	8.42±0.09 ^b	1.77±0.09 ^b	70.13±0.20 ^c
SR-2	0.63±0.07 ^c	0.17±0.01 ^c	0.80±0.07 ^c	7.57±0.08 ^c	1.03±0.06 ^c	71.19±0.17 ^b
SR-3	0.41±0.04 ^d	0.15±0.01 ^c	0.56±0.04 ^d	7.20±0.13 ^d	0.66±0.08 ^d	71.75±0.26 ^b
SR-4	0.35±0.03 ^d	0.15±0.01 ^c	0.50±0.02 ^d	6.23±0.07 ^e	0.55±0.05 ^d	72.86±0.17 ^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); SR、SR-1、SR-2、SR-3、SR-4 分别表示加工精度为 0%、7.20%、9.62%、10.85% 和 11.86% 的海水稻米; 表 3~表 7 同。

从而导致水溶性指数下降^[11]。

2.4 加工精度对海水稻米蒸煮品质的影响

不同加工精度对海水稻米蒸煮品质的影响如表 4 所示。海水稻的吸水性、膨胀率和碘蓝值均随着加工精度的增加而增加,当碾磨时间从 0 s 增加到 40 s 时,吸水性、膨胀率和碘蓝值分别提升了 129.66%、178.45% 和 114.63%。海水稻的最适蒸煮时间随着加工精度的增加而缩短,当碾磨时间从 0 s 增加到 40 s 时,最适蒸煮时间从 35.67 min 缩短为 20.33 min,减少了 43.01%。这主要是由于海水稻的米糠层含有大量结构致密的不溶性膳食纤维^[21],阻碍了水分吸收,抑制了淀粉的糊化,导致海水稻糙米蒸煮时间长^[22]。而随着加工精度的提高,糙米外皮分布的膳食纤维^[23]、蛋白质^[24]、脂肪^[25] 等成分减少,而淀粉含量增加,更易吸水膨胀糊化。溶解在米汤中的淀粉含量也随之增加,导致碘蓝值升高。

表 4 不同加工精度对海水稻米蒸煮品质的影响
Table 4 Effect of different degree of milling on the cooking quality of sea rice

样品	吸水性 (%)	膨胀率 (%)	碘蓝值 (OD660)	最适蒸煮时间 (min)
SR	263.33±9.18 ^c	292.22±59.29 ^c	0.041±0.01 ^c	35.67±0.58 ^a
SR-1	450.00±11.34 ^d	593.33±23.09 ^d	0.062±0.01 ^d	26.33±0.58 ^b
SR-2	490.00±25.03 ^c	686.67±20.82 ^c	0.073±0.00 ^c	23.33±0.58 ^c
SR-3	560.48±16.49 ^b	753.33±30.55 ^b	0.078±0.02 ^b	20.67±0.58 ^d
SR-4	604.76±31.83 ^a	813.70±15.17 ^a	0.088±0.01 ^a	20.33±0.58 ^d

2.5 加工精度对海水稻米糊化特性的影响

不同加工精度对海水稻米糊化特性的影响如表 5 所示。随着碾磨时间从 0 s 增加到 40 s,海水稻的峰值粘度、最低粘度、崩解值、最终粘度及回生值分别增加 35.22%、18.38%、100.03%、8.07% 和 4.31%,而海水稻的糊化温度下降至 88.85 ℃。随着加工精度的提高,碾磨逐渐除去米糠层,膳食纤维、蛋白质、脂肪等物质含量均有不同程度降低^[17],使得

表 5 不同加工精度对海水稻米糊化特性的影响

Table 5 Effect of different degree of milling on the pasting properties of sea rice

样品	峰值粘度(cP)	最低粘度(cP)	崩解值(cP)	最终粘度(cP)	回生值(cP)	糊化温度(℃)
SR	1898.66±3.85 ^c	1523.00±3.74 ^d	375.66±4.18 ^c	3116.00±3.26 ^c	1563.33±14.00 ^c	89.91±0.37 ^a
SR-1	1961.66±12.47 ^d	1577.66±13.69 ^c	384.00±16.08 ^c	3189.00±12.67 ^d	1564.33±15.58 ^c	89.66±0.02 ^a
SR-2	2022.66±2.62 ^c	1630.33±33.47 ^b	392.33±30.9 ^c	3261.00±27.72 ^c	1593.00±0.81 ^b	89.65±0.04 ^a
SR-3	2359.00±16.06 ^b	1768.00±6.37 ^a	591.00±16.87 ^b	3331.33±20.15 ^b	1611.33±6.84 ^{ab}	89.65±0.04 ^a
SR-4	2567.33±10.27 ^a	1803.00±17.66 ^a	764.33±27.88 ^a	3367.33±9.74 ^a	1630.66±6.23 ^a	88.85±0.02 ^b

表 6 不同加工精度对海水稻米饭质构特性的影响

Table 6 Effect of different degree of milling on the texture properties of sea rice

样品	硬度(N)	粘附力(N)	粘附性(mJ)	内聚性	弹性(mm)	胶粘性(N)	咀嚼性(mJ)
SR	35.55±4.18 ^a	-0.46±0.18 ^a	0.23±0.13 ^c	0.30±0.06 ^a	0.87±0.05 ^a	10.91±3.27 ^a	9.64±3.19 ^a
SR-1	32.27±4.14 ^a	-0.60±0.16 ^a	0.35±0.14 ^c	0.25±0.06 ^a	0.83±0.12 ^a	8.35±2.81 ^b	7.14±3.34 ^b
SR-2	25.68±4.21 ^b	-0.85±0.13 ^b	0.56±0.11 ^b	0.27±0.06 ^a	0.86±0.10 ^a	6.76±1.12 ^{bc}	5.86±1.31 ^{bc}
SR-3	21.55±2.95 ^b	-0.97±0.09 ^{bc}	0.66±0.08 ^b	0.32±0.03 ^a	0.82±0.06 ^a	6.76±0.82 ^{bc}	5.57±0.83 ^{bc}
SR-4	16.50±6.26 ^c	-1.14±0.22 ^c	0.82±0.22 ^a	0.29±0.04 ^a	0.81±0.07 ^a	4.72±1.58 ^c	3.80±1.30 ^c

淀粉与水相互作用增强,更易糊化^[8],导致海水稻的粘度等糊化特性参数明显增加。Wu 等^[26] 研究结果显示大米蛋白含量减少,大米淀粉蛋白混合物的粘度、糊化焓及抗回生能力提升,糊化温度下降。此外,有研究报道^[27] 随着糙米加工精度从 0% 增加到 9.60%,糙米总酚含量减少了 55.6%,而多酚类物质可以抑制大米淀粉的回生^[28]。因此,加工精度的提高,加速了海水稻米糊化和回生。

2.6 加工精度对海水稻米饭质构特性的影响

不同加工精度对海水稻米饭质构特性的影响如表 6 所示。随着加工精度的提高,海水稻米饭的硬度、胶粘性及咀嚼性呈现下降趋势,粘附力绝对值和粘附性呈现上升趋势,内聚性和弹性无显著性变化($P>0.05$)。碾磨时间从 0 s 增加到 40 s,海水稻米饭的硬度从 35.55 N 减少为 16.5 N,粘附力绝对值大小从 0.46 N 增加为 1.14 N,粘附性从 0.23 mJ 增加为 0.82 mJ。其中碾磨 30 s 到 40 s,米饭硬度下降变化最大,下降 23.43%;碾磨 10 s 到 20 s 的粘附力和粘附性提升最大,分别为 42.71% 和 60.23%。主要原因可能是碾磨初期,海水稻外层^[21] 中的膳食纤维和蛋白质等物质被去除,进而使胚乳中的淀粉更好地与水作用,提升米饭粘性。米饭中可溶性膳食纤维与不可溶性膳食纤维比例与硬度、内聚性、胶粘性和咀嚼性呈负相关,与粘附性呈正相关^[29]。另一方面,直链淀粉分子小且含量高的大米质地通常较硬,粘度较低^[30],原因是直链淀粉分子与晶体薄片上的支链淀粉链纠缠,导致淀粉膨胀受限,从而质地较硬;膨胀受限还使得淀粉浸出少,从而影响米粒间的粘性,同时,如果支链淀粉分子小且含量低、短链比例少,在质构仪 TPA 探针接触米粒时,键合位点少,支链淀粉分子间相互作用就弱,导致米粒质地粘度低。

2.7 加工精度对海水稻米饭感官评价的影响

不同加工精度对海水稻米饭感官品质的影响如表 7 所示。海水稻米饭的感官评价总分整体随着加

表 7 不同加工精度对海水稻米饭感官品质的影响
Table 7 Effect of different degree of milling on the sensory quality of sea rice

样品	气味	外观结构	适口性	滋味	冷饭质地	总分
SR	15.10±0.70 ^{ab}	11.15±0.58 ^c	18.10±1.15 ^d	16.80±1.03 ^d	4.15±0.58 ^a	65.30±1.06 ^c
SR-1	16.25±1.09 ^a	10.70±1.03 ^c	21.15±0.88 ^b	17.90±0.57 ^{bc}	3.75±0.59 ^a	69.75±1.89 ^b
SR-2	15.00±0.82 ^b	12.37±0.94 ^b	18.90±0.58 ^{cd}	17.05±0.96 ^{cd}	3.60±0.52 ^a	66.62±1.86 ^c
SR-3	14.70±0.82 ^b	16.05±0.50 ^a	19.60±1.26 ^c	18.20±0.63 ^{ab}	3.65±0.41 ^a	72.50±2.51 ^b
SR-4	14.60±1.26 ^b	16.60±1.07 ^a	24.00±1.33 ^a	19.10±0.88 ^a	3.60±0.70 ^a	77.90±3.48 ^a

工精度的提高呈现上升趋势,米饭的外观、适口性及滋味均有显著改善。碾磨时间从 0 s 增加到 40 s,感官评价总分由 65.30 提升到 77.90。有研究表明^[5]随着加工精度的提高,大米中膳食纤维、蛋白质和脂肪等含量均降低,在蒸煮过程中淀粉能吸收更多水,因此糙米的感官品质得到改善,感官评价得分提升。经过 30 到 40 s 碾磨后,加工精度在 10.85%~11.86% 时海水稻米饭有良好的感官品质,评分达到 70 分以上。米饭香气是感官评价中重要指标之一,随着海水稻加工精度的提高,米饭气味的评价先升后降。10 s 碾磨过程中,米饭的香气得到提升,这可能是海水稻糠层部分被碾磨,释放了更多糠层中的香味物质^[18],随着加工精度的提高,大米糠层被完全磨去,香味物质减少^[31],导致香气变淡,因此,海水稻气味的评分最终呈现下降趋势。

3 结论

本文研究了加工精度对海水稻米的基本成分、糊化特性、蒸煮品质、质构特性及感官评价的影响。研究结果表明,海水稻米的加工精度提高到 11.86%,总膳食纤维减少 86.07%,蛋白质含量减少 31.84%,脂肪含量减少了 77.18%,而淀粉含量提升 7.12%。海水稻米饭的糊化特性、蒸煮品质、质构特性及感官评价均有不同程度的改善。海水稻糙米经过 40 s 的碾磨,海水稻米的峰值粘度、最低粘度和最终粘度分别提升 35.22%、18.38% 和 8.07%,糊化温度略有下降,为 88.85 ℃,海水稻米饭的最适蒸煮时间减少了 43.01%。吸水性和膨胀率分别升高 129.66% 和 178.45%,水溶性指数显著提升($P<0.05$),米饭硬度减小 19.05 N,粘附力绝对值提升 0.68 N,粘附性提升 0.59 mJ,感官评价总分提升 19.30%。由此可见,随着加工精度的提高,海水稻米致密的糠层被渐渐去除,膳食纤维、蛋白质和脂肪含量减少,海水稻米中的淀粉能更好地与水相互作用,使得其蒸煮和食用品质得到了明显改善。此外,本文作者将进一步研究加工精度对海水稻米酚类物质及米饭挥发性风味物质的影响,以期对海水稻米的适度加工提供理论参考,推动海水稻米的消费,促进海水稻加工产业的发展。

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] WANG K M, WU J G, LI G, et al. Distribution of phytic acid and mineral elements in three indica rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. Journal of Cereal Science, 2011, 54(1): 116–121.

[4] 刘静静,张名位,魏振承,等. 不同加工精度下丝苗米品质的比较分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(9): 186–192. [LIU Jingjing, ZHANG Mingwei, WEI Zhencheng, et al. Comparative analysis of simiao rice quality under different degree of milling[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(9): 186–192.]

[5] ZHAO S, SHI J, CAI S, et al. Effects of milling degree on nutritional, sensory, gelatinization and taste quality of different rice varieties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 186: 115244.

[6] 周晓晴. 不同加工精度大米食味品质分析及其综合评价研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013. [ZHOU Xiaoping. Study on eating qualities analysis and comprehensive evaluation of rice with different milling degree[D]. Nanchang: Nanchang University, 2013.]

[7] 刘彦宵雪. 碾减率对大米营养品质和食用品质的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022. [LIU Yanxiaoxue. Effects of degree of milling on nutritional quality and eating quality of rice[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.]

[8] 贺财俊,李怡,吴跃,等. 籼米糊化特性与碾磨程度的相关性分析[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 59–63. [HE Caijun, LI Yi, WU Yue, et al. Correlation between pasting properties and milling degree of indica rice[J]. Food Science, 2017, 38(11): 59–63.]

[9] 李柳燕,詹展,张威,等. 碾磨程度和蒸煮方式对优质籼稻米饭品质的影响[J]. 食品与机械, 2021, 37(8): 40–44,109. [LI Liuyan, ZHAN Zhan, ZHANG Wei, et al. Effects of milling degree and cooking method on the cooked rice quality of high-quality Indica rice[J]. Food & Machinery, 2021, 37(8): 40–44,109.]

[10] 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.

[11] 高晨. 不同稳定化处理的米糠在贮藏过程中风味物质的组成分析[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [GAO Chen. Composition analysis of the aroma volatile compounds in different stabilized rice bran during storage[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[12] CHEN L, TIAN Y, BAI Y, et al. Effect of frying on the pasting and rheological properties of normal maize starch[J]. Food Hy-

- drocolloids, 2018, 77: 85–95.
- [13] 魏振承, 张名位, 马永轩, 等. 粳稻配方米配制技术研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(4): 253–258, 262. [WEI Zhencheng, ZHANG Mingwei, MA Yongxuan, et al. Blending technology for indica rice blend combinations[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(4): 253–258, 262.]
- [14] SANDHU R S, SINGH N, KALER R S S, et al. Effect of degree of milling on physicochemical, structural, pasting and cooking properties of short and long grain indica rice cultivars[J]. Food Chemistry, 2018, 260: 231–238.
- [15] 贺财俊. 粳米碾磨程度与综合品质变化关联分析[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017. [HE Caijun. Correlation analysis of milling degree and comprehensive qualities of indica rice[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2017.]
- [16] 陈会会. 粳米适度碾制加工技术与品质研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020. [CHEN Huihui. Study on moderate milling processing technology and quality of japonica rice [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020.]
- [17] LIU K L, ZHENG J B, CHEN F S. Relationships between degree of milling and loss of vitamin B, minerals, and change in amino acid composition of brown rice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 82: 429–436.
- [18] ROSNIYANA A, HASHIFAH M A, NORIN S A S. The physico-chemical properties and nutritional composition of rice bran produced at different milling degrees of rice[J]. Journal of Tropical Agriculture and Food Science, 2007, 35(1): 99–105.
- [19] DEVI A F, FIBRIANTO K, TORLEY P J, et al. Physical properties of cryomilled rice starch[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 49(2): 278–284.
- [20] RASHID S, RAKHA A, ANJUM F M, et al. Effects of extrusion cooking on the dietary fibre content and water solubility index of wheat bran extrudates[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2015, 50(7): 1533–1537.
- [21] ZHANG Y, LI F, HUANG K, et al. Structural changes of starch under different milling degrees affect the cooking and textural properties of rice[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100627.
- [22] WU K, GUNARATNE A, GAN R, et al. Relationships between cooking properties and physicochemical properties in brown and white rice[J]. Starch-Stärke, 2018, 70(5-6): 1700167.
- [23] 周艳青, 杨英, 周娇娇, 等. 米糠膳食纤维对大米粉糊化特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(12): 64–67. [ZHOU Yanqing, YANG Ying, ZHOU Jiaojiao, et al. Effect of dietary fiber from rice bran on the pasting properties of rice flour[J]. Cereals & Oils, 2018, 31(12): 64–67.]
- [24] 王立峰, 张磊, 姚轶俊, 等. 碾磨程度对大米特征组分和米粉品质特性的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(5): 195–201. [WANG Lifeng, ZHANG Lei, YAO Yijun, et al. Effect of milling degree on content of characteristic components and quality properties of rice flour[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 195–201.]
- [25] KALPANADEVI C, SINGH V, SUBRAMANIAN R. Influence of milling on the nutritional composition of bran from different rice varieties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2018, 55(6): 2259–2269.
- [26] WU C, GONG X, ZHANG J, et al. Effect of rice protein on the gelatinization and retrogradation properties of rice starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 125061.
- [27] LIU L, GUO J, ZHANG R, 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.
- [28] WU Y, CHEN Z, LI X, et al. Effect of tea polyphenols on the retrogradation of rice starch[J]. Food Research International, 2009, 42(2): 221–225.
- [29] WATTANAVANITCHAKORN S, WANSUKSRI R, CHAI-CHOOMPU E, et al. Dietary fibre impacts the texture of cooked whole grain rice[J]. Foods, 2023, 12(4): 899.
- [30] LI H, GILBERT R G. Starch molecular structure: The basis for an improved understanding of cooked rice texture[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 195: 9–17.
- [31] WANG Z, ZHANG Y, YANG X, et al. Effect of milling degree on volatile profiles of cooked rice determined by electronic nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Cereal Chemistry, 2023, 100(6): 1301–1313.