

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80689

米珍营养米食味品质、风味物质 及主要活性成分分析

邓仲利^{1,2} 范光君^{1,2} 袁瑞博^{1,2} 曾广胜³ 徐友志^{1,2} 林亲录^{1,2}

(1. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410000; 2. 稻谷及副产物深加工国家工程研究中心, 湖南 长沙 410000; 3. 湖南工学院材料科学与工程学院, 湖南 衡阳 421002)

摘要: [目的] 通过对比米珍营养米、糙米和精白米的基本营养成分、风味物质和主要活性成分等, 全面评估米珍营养米的食味品质和营养价值。[方法] 运用食味计、质构仪等一系列仪器, 评价 3 种大米的食味品质; 采用 HS-SPME-GC-MS 方法分析挥发性风味物质, 通过主成分分析 (PCA) 确定关键挥发性成分, 并使用高效液相色谱法和紫外分光光度法测定其主要活性成分含量。[结果] 米珍营养米保留糊粉层, 其蛋白质、脂肪、膳食纤维和灰分含量显著高于精白米 ($P < 0.05$), 且黄粒米率显著低于糙米 ($P < 0.05$)。米珍营养米的食味值接近精白米, 优于糙米, 并具有适度的硬度和弹性, 较高的黏性、胶黏性和咀嚼性。米珍营养米中共检出 57 种挥发性风味物质, 显著多于精白米的, 并富含己醛、辛醛、反-2-辛烯醛等关键风味物质。米珍营养米中的主要活性成分 γ -谷维素、生育酚、多酚和 γ -氨基丁酸含量均显著高于精白米 ($P < 0.05$)。[结论] 米珍营养米具有更高的综合品质和营养价值。

关键词: 米珍营养米; 食味品质; 风味物质; 活性成分

Mizhen nutritional rice taste quality, flavor substances, and main active ingredients

DENG Zhongli^{1,2} FAN Guangjun^{1,2} YUAN Ruibo^{1,2} ZENG Guangsheng³ XU Youzhi^{1,2} LIN Qinlu^{1,2}

(1. School of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410000, China; 2. National Engineering Research Center of Rice and Byproduct Deep Processing, Changsha, Hunan 410000, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Hunan Institute of Technology, Hengyang, Hunan 421002, China)

Abstract: [Objective] To comprehensively evaluate the taste quality and nutritional value of Mizhen nutritional rice by comparing its basic nutritional components, flavor compounds, and key active ingredients with those of brown rice and refined white rice. [Methods] A series of instruments, including taste meters and texture analyzers, were utilized to evaluate the taste quality of the three types of rice. The HS-SPME-GC-MS method was employed to analyze volatile flavor compounds, and principal component analysis (PCA) was utilized to identify key volatile components. The content of the main active ingredients was determined using high-performance liquid chromatography and ultraviolet spectrophotometry. [Results] Mizhen nutritional rice retains the aleurone layer, with significantly higher protein, fat, dietary fiber, and ash content compared to refined white rice ($P < 0.05$). Its yellow rice content is significantly lower than that of brown rice ($P < 0.05$). The taste quality of Mizhen nutritional rice is similar to that of refined white rice, superior to brown rice, and exhibits moderate hardness and elasticity, along with higher viscosity, stickiness, and chewiness. A total of 57 volatile flavor compounds were detected in Mizhen nutritional rice, significantly more than those found in refined white rice, with key flavor substances such as hexanal, octanal, and trans-2-octenal being prominent. The main active components in Mizhen nutritional rice, including γ -oryzanol, tocopherol, polyphenols, and γ -aminobutyric acid, were significantly higher than those in refined white rice ($P < 0.05$). [Conclusion] Mizhen nutritional rice demonstrates higher overall quality and nutritional value.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (编号: 32472410); 湖南省自然科学基金重点项目 (编号: 2024JJ3053)

通信作者: 徐友志 (1972—), 男, 中南林业科技大学副教授, 博士。E-mail: t20121499@csuft.edu.cn

收稿日期: 2024-07-18 改回日期: 2025-02-04

Keywords: Mizhen nutritional rice; taste quality; flavor compounds; active components

传统的精白米口感较好,但在加工过程中会损失大量营养成分^[1-2]。糙米虽然保留了大部分营养,但其口感较差,难以被消费者接受。为了解决传统米类食品在营养价值与口感之间的矛盾,米珍营养米的概念被提出并逐渐发展。米珍为稻米去除麸皮后,在碾磨成精白米的过程中产生的洁净碾下物^[3]。米珍层保留了糊粉层、亚糊粉层及部分胚芽,富含人体 90% 以上的必需元素^[4-6]。陈弘^[7]研究提出,米珍的营养价值极高,富含维生素 E、 γ -氨基丁酸、 γ -谷维素和膳食纤维等多种生物活性成分。随着稻米精准加工技术的创新突破,特别是人工智能靶向碾磨技术的应用,使得米珍层的精准保留成为可能。该技术基于稻米外皮层和营养物质层的分布特征,结合精细工艺的检测条件,能够准确判断稻米被碾磨的层次,从而在去除外皮层的同时保留目标营养米层^[8]。因此,通过“靶向碾磨”技术,对稻米加工过程实现精准控制,在去除糙米外皮层的同时,保留米珍层的营养成分,得到一种新型功能营养大米——米珍营养米。尽管米珍营养米在技术上取得了突破,但目前关于其营养价值和食味品质的研究仍显不足,缺乏深入的具体分析。

研究拟对比米珍营养米、糙米和精白米的基本成分、风味物质和主要活性成分等,评估米珍营养米的食味品质和营养价值,并量化其 γ -谷维素、生育酚、 γ -氨基丁酸和多酚含量^[9-12],以期米珍营养米这一新兴资源的利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与主要试剂

新鲜米珍营养米、糙米、精白米:南县稻虾米 2 号同一系列籼稻,湖南助农米业有限公司;

石油醚、硫酸钾、硼酸、甲醇、甲基红等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

异丙醇、乙腈、甲醇、乙酸等:色谱纯,美国 Sigma-aldrich 公司;

γ -谷维素标准品:色谱纯,加拿大 Toronto Research Chemicals Inc 公司;

4 种生育酚标准品(α -生育酚、 β -生育酚、 γ -生育酚、 δ -生育酚):色谱纯,上海安谱实验科技股份有限公司;

没食子酸标准品:色谱纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;

γ -氨基丁酸标准品:色谱纯,上海源叶生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

气相色谱—质谱联用仪:GC-MS-QP2010 型,日本岛

津株式会社;

高效液相色谱仪:Shimadzu LC-20A 型,日本岛津株式会社;

紫外—可见分光光度计:722s 型,上海精密科学仪器有限公司;

偏光显微镜:Eclipse Ci-POL 型,日本 Nikon 公司;

米饭食味计:ATA1B 型,日本佐竹公司;

差示扫描量热仪:DSC2000 型,美国沃斯特集团。

1.2 试验方法

1.2.1 米珍营养米的食味品质测定

(1) 水分:按 GB 5009.3—2016 执行。

(2) 淀粉:按 GB 5009.9—2023 执行。

(3) 还原糖:按 GB 5009.7—2023 执行。

(4) 蛋白质:按 GB 5009.5—2016 执行。

(5) 脂肪:按 GB 5009.6—2016 执行。

(6) 膳食纤维:按 GB 5009.88—2023 执行。

(7) 灰分:按 GB 5009.4—2016 执行。

(8) 外观品质:各挑选 3 种大米 300 粒整齐排列于整列板上,放入扫描仪,选择籼米模式测定整米率等指标。

(9) 糊粉层染色观察:挑选 100 粒大米,切片厚度不超过 1 mm。将切片于染色液中浸泡 1 min,清水洗 2 次。加 95% 乙醇洗 2 min。于偏光显微镜下观察,倍数为 50~200 倍。

(10) 食味值:预热米饭食味计 30 min 并校正。取 7.0 g 米饭放入样品盒,选择籼米检量线进行 3 次测定。

(11) 质构特性:将 3 粒煮熟的米饭用镊子夹放至测试平台上,使用 P/36R 探头,选择全质构模式测试。

(12) 糊化特性:称取 3 g 大米粉,加 25 mL 纯水,搅拌均匀成乳液。参照 GB/T 24852—2010 测定。

(13) 热特性:准确称取 3.0 mg 大米粉于铝坩埚中,加 9 μ L 超纯水。压片机密封,常温下平衡 1 d。DSC 程序为初始温度 30 $^{\circ}$ C,以 10 $^{\circ}$ C/min 升温至 100 $^{\circ}$ C,测量 3 次。

(14) 感官评定:由 20 名志愿者参照 GB/T 15682—2008 对 3 种米饭的各项感官特性进行综合评分。

1.2.2 米珍营养米的风味物质分析

(1) 样品准备:称取 2 g 大米样品于 15 mL 顶空瓶中,加入 3.2 mL 蒸馏水预浸泡后,于 100 $^{\circ}$ C 加热搅拌器上蒸煮 40 min。插入固相微萃取手柄,使用 SPME 纤维头吸附 50 min,将纤维头注入气相色谱样口,250 $^{\circ}$ C 解析 5 min。

(2) HS-SPME-GC-MS 条件优化:对萃取温度、萃取时间和解析时间 3 个条件进行优化,以总峰面积为考察指标,确定最佳萃取条件。GC-MS 条件为进样口温度 250 $^{\circ}$ C,使用高纯度氦气,流速 1.0 mL/min,不分流模式;初始温度 40 $^{\circ}$ C,保持 2 min,以 5 $^{\circ}$ C/min 升至 230 $^{\circ}$ C。电子

轰击离子源温度 230 °C,电子能量 70 eV,全扫描范围 30~500 m/z 。

(3) 主成分分析(PCA):根据 GC-MS 结果,对 3 种大米挥发性风味成分进行主成分分析。

1.2.3 米珍营养米的主要活性成分分析

(1) γ -谷维素含量:根据文献[13]并修改。称 2 g 大米样品,溶于 20 mL 异丙醇,80 °C 水浴 30 min,4 000 r/min 离心 10 min,重复提取 3 次合并上清液,过膜后待进样。采用映山红 C_{18} 色谱柱(4.6 mm \times 250 mm, 5 μ m),以 300 mL 异丙醇、700 mL 乙腈和 5 mL 甲酸混合液作为流动相。流速 1.0 mL/min,等度洗脱,柱温 30 °C,紫外检测器波长 325 nm,进样量 20 μ L。

(2) 生育酚含量:根据 GB 5009.82—2016 中第一法。色谱条件为使用 Athena C_{30} 色谱柱(4.6 mm \times 250 mm, 3 μ m);流动相为甲醇—水($V_{\text{甲醇}}:V_{\text{水}}=96:4$),流速 0.8 mL/min,等度洗脱;柱温 20 °C;荧光检测激发波长 295 nm,发射波长 330 nm,进样量 20 μ L。

(3) γ -氨基丁酸含量:参照文献[14]并修改。称取 1.000 g 大米粉,加 10 mL 60% 乙醇,50 °C 水浴振荡 30 min,4 000 r/min 离心 10 min,重复提取 1 次合并上清液。邻苯二甲醛(OPA)衍生化反应:取 100 μ L 样品(或标准品)于 5 mL 离心管中,加入 300 μ L 含 β -巯基乙醇的 OPA 衍生化试剂和 600 μ L 硼酸缓冲液,涡旋 10 s,静置 2 min。吸取 100 μ L 反应液,用超纯水稀释至 5 mL,过膜后进样分析。使用映山红 C_{18} 色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μ m);流动相 A 为甲醇,流动相 B 为 25 mmol/L 乙酸钠缓冲液(pH 5.8)。荧光检测激发波长 340 nm,发射波长 450 nm;柱温 30 °C,流速 0.8 mL/min,进样量 20 μ L。

(4) 多酚含量:参照文献[15]并修改。精确称取 25.0 mg 没食子酸标准品于 50 mL 棕色容量瓶中,甲醇定容,制成储备溶液(0.5 mg/mL)。吸取不同体积的储备溶液(0~10 mL),用 90% 甲醇定容,制得质量浓度为 2.5~100.0 μ g/mL 的系列标准溶液。精确称取 1 g 试样,加入 10 mL 70% 乙醇提取液,超声提取 30 min,4 000 r/min 离心 10 min,重复提取 3 次,合并上清液和沉淀备用。在上清液中加入 25 mL 石油醚—乙酸乙酯混合液,萃取 4 次,合并有机相,氮吹干,复溶于 10 mL 90% 甲醇,得游离态

酚待测液,4 °C 保存。沉淀中加入 10 mL 0.5 mol/L NaOH,40 °C 避光碱解 6 h,调节 pH 至 2.0 后离心。上清液加 25 mL 萃取液,萃取 4 次,合并有机相,氮吹干,复溶于 10 mL 90% 甲醇,得结合态酚待测液 1。沉淀用 70% 乙醇超声提取 2 次,合并上清液,加入 17 mL 萃取液,得结合态酚待测液 2,4 °C 保存。

将不同浓度的没食子酸标准溶液(1 mL)加入试管,分别加入 6 mL 水和 1 mL 福林酚试剂(1 mol/L),静置 6 min,加入 4 mL 1 mol/L 碳酸钠溶液,静置 60 min,稀释至刻度,测定吸光度(760 nm),绘制标准曲线。将游离态酚、结合态酚 1 和 2 待测液稀释 10 倍,各取 1 mL,分别加入 6 mL 水、1 mL 福林酚试剂(1 mol/L),静置 6 min,加入 4 mL 碳酸钠溶液,静置 60 min,稀释至刻度,测定吸光度(760 nm),根据标准曲线计算浓度,平行测定 3 次。

1.3 数据处理

所有试验均平行测定 3 次,以 Excel 2019 软件、Origin 2021 软件和 SPSS 26.0 软件进行数据分析和作图,结果以平均值 \pm 标准差表示,显著性差异采用 $P<0.05$ 表示。

2 结果与分析

2.1 米珍营养米的食味品质

2.1.1 基本成分和外观 由表 1 可知,米珍营养米和糙米的蛋白质、脂肪、膳食纤维和灰分含量高于精白米。其中,米珍营养米中的膳食纤维含量约为精白米的 2 倍。主要是因为蛋白质、脂肪、膳食纤维集中在稻谷的胚芽和糊粉层,矿物质集中在稻谷的果皮和种皮中。米珍营养米和糙米均保留了糊粉层,因此具有较高的营养价值。

3 种大米的完整粒和粒型无明显差异,碎米率略有差异,黄粒米率存在显著差异($P<0.05$),其中糙米的黄粒米最高,米珍营养米的较少,而精白米中不含黄粒米。黄粒米是指胚乳呈黄色的米粒,对大米外观品质有直接影响,其含量不得超过 1.0%^[16]。综上,米珍营养米具有良好的外观品质。

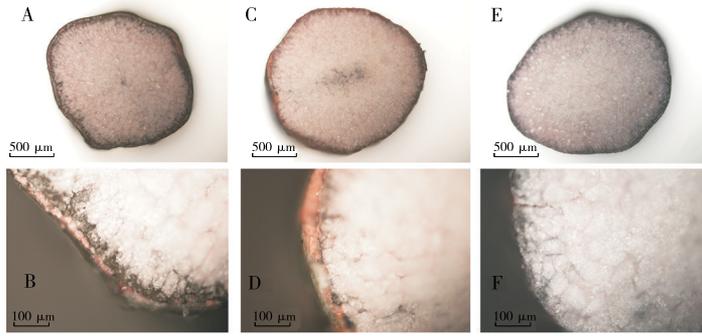
2.1.2 糊粉层染色观察和米饭食味值 大米的糊粉层具有高营养价值,其含有丰富的蛋白质、B 族维生素和矿物质等,这些是评估大米营养价值的关键物质。由图 1 可知,精白米未保留糊粉层,米珍营养米和糙米均保留有糊

表 1 米珍营养米、糙米及精白米的基本成分含量及质量指标[†]

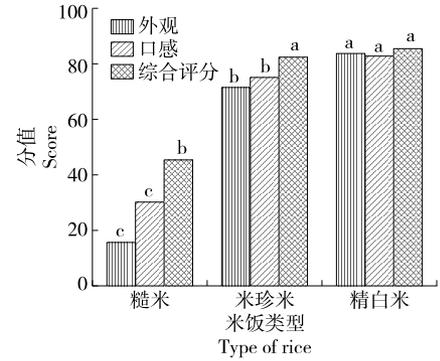
Table 1 Basic ingredient content and quality indicators of Mizhen nutritional rice, brown rice, and refined white rice

品种	基本成分/(10 ⁻² g \cdot g ⁻¹)					质量指标/%					
	淀粉	水分	粗脂肪	蛋白质	还原糖	膳食纤维	灰分	整米	碎米率	黄粒米	粒型(长宽比)
糙米	75.14 \pm 0.02 ^a	12.37 \pm 0.04 ^a	5.82 \pm 0.04 ^a	8.47 \pm 0.05 ^a	1.29 \pm 0.01 ^a	3.51 \pm 0.04 ^a	2.58 \pm 0.00 ^a	96.27 \pm 0.53 ^a	3.73 \pm 0.53 ^b	0.40 \pm 0.08 ^a	4.20 \pm 0.57
米珍营养米	77.64 \pm 0.01 ^b	12.83 \pm 0.02 ^a	2.44 \pm 0.01 ^b	6.56 \pm 0.05 ^b	0.89 \pm 0.01 ^b	1.10 \pm 0.04 ^b	1.27 \pm 0.03 ^b	95.70 \pm 0.70 ^{ab}	4.30 \pm 0.70 ^{ab}	0.17 \pm 0.05 ^b	4.00 \pm 0.41
精白米	79.75 \pm 0.02 ^a	12.57 \pm 0.02 ^b	0.42 \pm 0.02 ^c	6.18 \pm 0.05 ^c	0.19 \pm 0.01 ^c	0.60 \pm 0.05 ^c	0.38 \pm 0.01 ^c	94.47 \pm 0.57 ^b	5.53 \pm 0.57 ^c	0.00 \pm 0.00 ^c	3.90 \pm 0.49

[†] 同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。



(a) 大米糊粉层染色图



(b) 米飯食味计测定结果

A、C、E 分别为糙米、米珍营养米、精白米在 50 倍下的整体图；B、D、F 分别为糙米、米珍营养米、精白米在 200 倍的局部图；小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 大米糊粉层染色图和米飯食味计测定结果

Figure 1 Aleurone layer staining diagram of rice and results determined by rice taste meter

粉层。米珍营养米的食味值高于糙米,但接近精白米的,糙米由于保留了麸皮层,颜色偏黄,口感较粗糙;精白米经过抛光处理,外观透亮,口感清香。综上,米珍营养米的外观和口感较糙米更受消费者喜爱。

2.1.3 蒸煮特性 蒸煮品质是指通过蒸煮过程中的理化特性来反映稻米在烹饪中的口感和质地,包括质构特性、糊化特性和热特性等。大米的质构特性受淀粉膨胀、细

胞壁强度、蛋白质含量和皮层条件等因素影响。由表 2 可知,3 种大米在黏性方面存在显著差异 ($P < 0.05$),在回复性方面则无显著差异。米珍营养米与糙米在弹性和咀嚼性方面存在显著差异 ($P < 0.05$),米珍米与精白米在硬度和胶黏性方面存在显著差异 ($P < 0.05$),表明米珍营养米较糙米和精白米具有适度的硬度和弹性,较高的黏性、胶黏性和咀嚼性,其口感良好。

表 2 米珍营养米、糙米及精白米的蒸煮品质[†]

Table 2 Cooking quality of Mizhen nutritional rice, brown rice, and refined white rice

类别	硬度/N	黏性/N	回复性/%	弹性/%	胶黏性/N	咀嚼性/N	峰值黏度/(mPa·s)	谷值黏度/(mPa·s)
糙米	27.600±0.021 ^a	-0.923±0.080 ^a	12.01±2.26	44.820±3.02 ^b	7.910±0.015 ^{ab}	3.550±0.041 ^b	1 764.00±19.69 ^c	1 057.00±29.34 ^c
米珍营养米	24.230±0.121 ^a	-3.410±0.085 ^c	12.84±9.68	68.090±9.89 ^a	9.140±0.131 ^a	6.270±0.208 ^a	2 993.00±22.84 ^b	1 845.00±10.66 ^b
精白米	17.090±0.140 ^b	-2.090±0.247 ^b	12.92±5.55	74.250±8.61 ^a	6.670±0.153 ^b	4.990±0.227 ^{ab}	4 145.00±6.94 ^a	2 348.00±21.79 ^a
类别	崩解值/(mPa·s)	最终黏度/(mPa·s)	回生值/(mPa·s)	糊化温/度/°C	起始温/度/°C	峰值温/度/°C	最终温/度/°C	糊化焓/(J·g ⁻¹)
糙米	707.00±11.67 ^c	2 516.00±19.75 ^c	1 459.00±12.92 ^a	75.60±0.64 ^{ab}	65.84±0.26 ^b	69.53±2.18 ^b	75.54±3.72	5.04±0.07
米珍营养米	1 155.00±24.73 ^b	3 115.00±9.27 ^b	1 270.00±12.97 ^c	76.80±0.57 ^b	66.34±1.57 ^b	69.33±0.64 ^b	75.65±2.94	5.98±0.83
精白米	1 816.00±12.66 ^a	3 686.00±21.06 ^a	1 371.00±11.95 ^b	74.56±0.40 ^b	69.87±1.63 ^a	73.66±1.43 ^a	79.71±1.82	6.21±0.56

[†] 同列小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

蒸煮过程中,淀粉的糊化和溶胀会影响米饭的口感和质地,糊化温度反映淀粉颗粒开始糊化的难易程度,这些温度参数对食品加工中淀粉的糊化特性和最终产品的口感等有重要影响。3 种大米糊化特性的特征值均存在显著差异 ($P < 0.05$)。与糙米相比,米珍营养米有较高的峰值黏度、谷值黏度和最终黏度,说明米珍营养米的淀粉颗粒比糙米更容易在受热时破裂,冷糊稳定性高,有助于延缓老化,具有较高的食用品质。糊化焓反映了淀粉分子在糊化过程中的结构变化和能量释放情况,在热特性

测定中,3 种大米的糊化焓差异不显著,可能是由于淀粉成分相似。

2.1.4 米飯感官评定 食味品质好的大米通常具有浓郁的米香、清爽的口感和适口的质地。由表 3 可知,米珍营养米和精白米的米香味比糙米的更浓郁,颜色和光泽更白而透亮。就适口性而言,米珍营养米和精白米的黏性、弹性、软硬程度、咀嚼和持久滋味均优于糙米。在米飯冷却放置一段时间后,米珍营养米在成团性、黏弹性和硬度方面介于精白米和糙米之间。综上,米珍营养米在米香、

表3 3种米饭的感官评定[†]

Table 3 Sensory evaluation of three kinds of rice

类别	气味(纯正性、浓郁性)	外观结构			适口性			滋味(纯正性、冷饭质地(成团持久性)、性,黏弹性,硬度)		总分
		颜色	光泽	饭粒完整性	黏性	弹性	软硬度	持久性)	性,黏弹性,硬度)	
糙米	14.45±2.33 ^c	2.70±0.56 ^c	3.70±1.10 ^c	3.15±0.48 ^c	5.00±1.22 ^c	5.70±1.76 ^c	5.85±1.19 ^c	16.70±2.65 ^c	1.95±1.02 ^c	59.20±5.33 ^c
米珍营养米	16.60±1.62 ^b	5.15±0.96 ^b	6.20±0.93 ^b	3.90±0.54 ^b	7.25±0.77 ^b	7.40±0.80 ^b	7.40±0.73 ^b	21.10±2.19 ^b	3.65±0.57 ^b	78.65±6.26 ^b
精白米	17.90±0.94 ^a	6.15±0.65 ^a	7.50±0.50 ^a	4.40±0.66 ^a	8.10±0.70 ^a	7.80±0.98 ^a	7.90±0.89 ^a	22.35±1.15 ^a	4.35±0.57 ^a	86.45±3.63 ^a

[†] 同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

色泽、黏弹性、软硬程度、咀嚼滋味和持久滋味方面优于糙米,略逊于精白米。

2.2 米珍营养米的风味物质

2.2.1 HS-SPME-GC-MS 条件优化 由图2可知,当萃取温度从80℃升高到120℃时,总峰面积先显著增加后逐渐减少,当萃取温度为100℃时,总峰面积最大,表明此萃取效果较好。随着萃取时间的延长,总峰面积先增后减。在50 min时,总峰面积最大,表明萃取效果最佳。总峰面积随解吸时间的延长先增后减,在5 min时,总峰面积达

到最大,表明解吸效果最佳,此时吸附物质基本解吸完全。

在HS-SPME测定方法中,萃取温度的提高有助于加速分子的热运动,缩短气液两相平衡时间,但过高的温度会降低萃取头的吸附能力,影响测定。萃取时间过长会导致一些小分子从萃取纤维头上脱附。解吸时间过长会导致萃取头使用次数减少和色谱峰变宽。因此HS-SPME方法优化结果为萃取温度100℃,萃取时间50 min,解吸时间5 min。

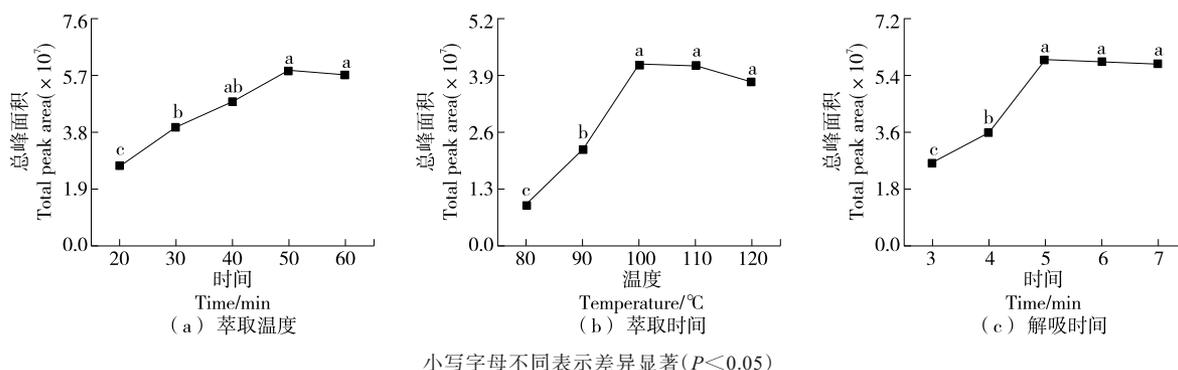


图2 HS-SPME-GC-MS条件对大米挥发性风味物质的影响

Figure 2 Effect of HS-SPME-GC-MS conditions on volatile flavor compounds in rice

2.2.2 挥发性风味物质主成分分析 由图3可知,米珍营养米与糙米中共检出57种挥发性风味物质,精白米中共检出52种挥发性风味物质。醛类物质占比最高,为52.80%~63.93%。米珍营养米与糙米分布在同一象限,具有相似的挥发性特征,综合分析下,己醛、庚醛、苯甲醛、反-2-庚烯醛、辛醛、反-2-辛烯醛、壬醛、癸醛、2,4-癸二烯醛、水杨酸-2-乙基己基酯、胡莫柳酯、棕榈酸甲酯、抗坏血酸二棕榈酸酯、油酸、2-戊基呋喃为米珍营养米中主要的挥发性风味物质,对米珍营养米的香气贡献较大。与糙米和精白米相比,米珍营养米中保留了糙米的部分风味特征,同时减少了糙米的粗糙感,风味更接近于精白米,但比精白米中挥发性风味物质种类和含量更为丰富和复杂。这些挥发性风味物质的存在,使得米珍营养米在感官上具有独特的香气和风味特征,在风味方面具有一定的优势。

2.3 米珍营养米的主要活性成分

糙米、米珍营养米和精白米中主要活性成分色谱图如图4所示。

由表4可知,3种大米中的主要活性成分含量从高到低均为糙米>米珍营养米>精白米,与Jayadeep等^[17]的研究结果一致。这是由于稻谷脱壳后的精白米在加工过程中经过精磨完全去掉了糠层、胚芽等大米外层部分,而糙米相对于精白米而言,脱壳后充分保留了米的营养价值,但蒸煮食用口感粗糙。米珍营养米是去净糙米外皮层(皮糠)且保留米珍(包含糊粉层、亚糊粉层、部分胚芽)的大米,相较于精白米营养成分更丰富。

3 结论

通过系统比较米珍营养米、糙米和精白米的基本营养成分、外观品质、蒸煮特性、食味值和感官评定等指标,

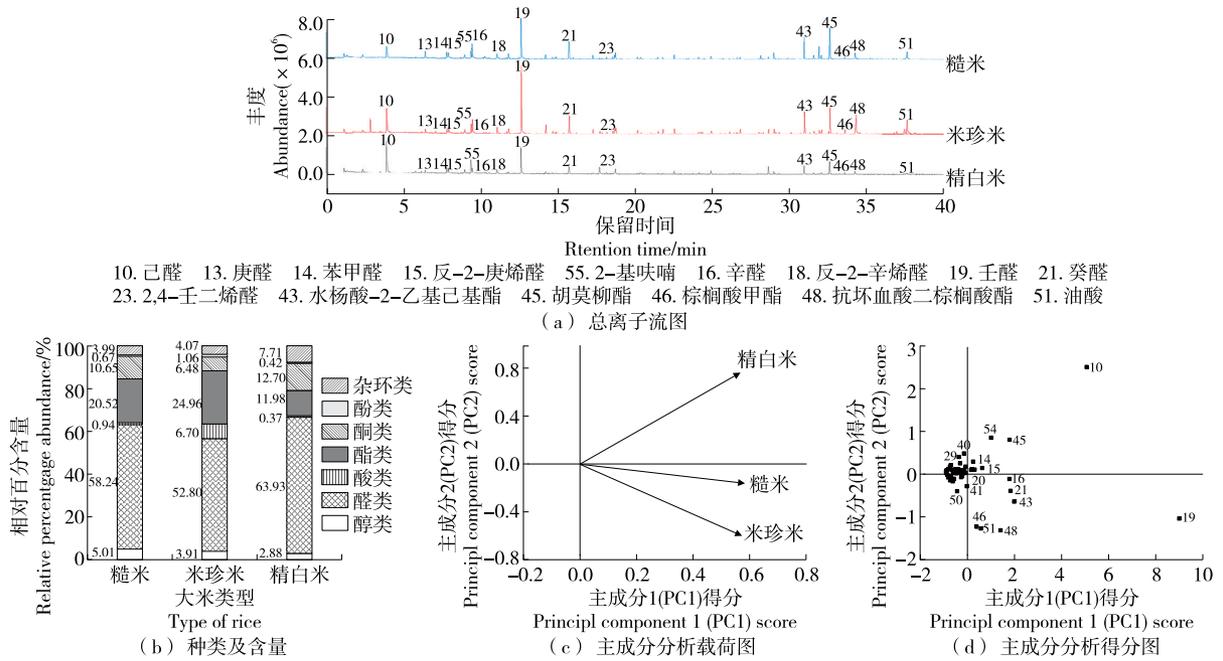


图3 米珍营养米、糙米及精白米的挥发性风味物质总离子流图、种类及含量、主成分分析载荷图和主成分分析得分图
Figure 3 Total ion current diagram, types and content, principal component analysis load diagram, and principal component analysis score plot of volatile flavor compounds in Mizhen nutritional rice, brown rice, and refined white rice

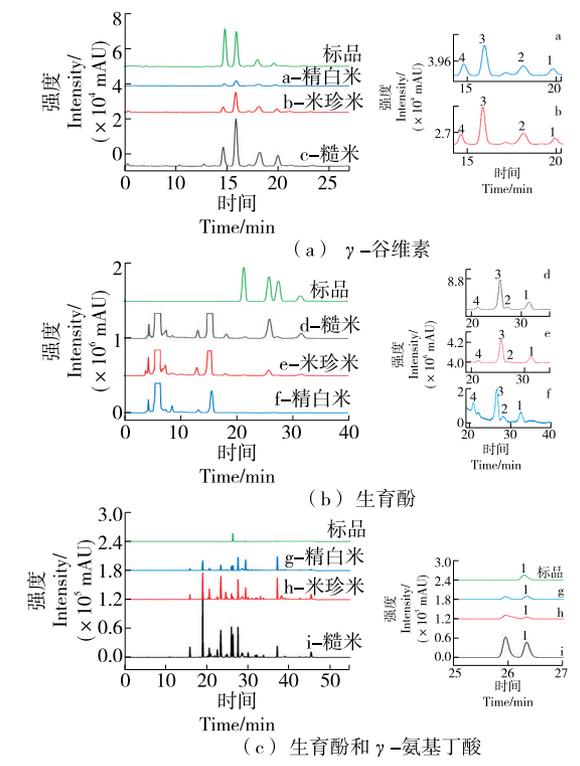


图4 标准溶液、糙米、米珍营养米和精白米中主要活性成分色谱图
Figure 4 Chromatograms of active compounds in standard solution, brown rice, Mizhen nutritional rice, and refined white rice

表4 米珍营养米、糙米、精白米中 γ -谷维素、生育酚、 γ -氨基丁酸和多酚含量[†]
Table 4 Content of γ -oryzanol, tocopherol, γ -aminobutyric acid, polyphenols in Mizhen nutritional rice, brown rice, and refined white rice mg/100 g

活性物质	糙米	米珍营养米	精白米
γ -谷维素	44.27 ± 1.37 ^a	15.31 ± 1.63 ^b	1.29 ± 0.01 ^c
α -生育酚	0.28 ± 0.02 ^a	0.09 ± 0.01 ^b	0.008 3 ± 0.001 0 ^c
β -生育酚	0.03 ± 0.00 ^a	0.01 ± 0.00 ^b	0.002 2 ± 0.000 1 ^c
γ -生育酚	0.30 ± 0.01 ^a	0.08 ± 0.01 ^b	0.006 6 ± 0.001 5 ^c
δ -生育酚	0.02 ± 0.00 ^a	0.01 ± 0.00 ^b	0.000 4 ± 0.000 0 ^c
总生育酚	0.63 ± 0.04 ^a	0.18 ± 0.02 ^b	0.02 ± 0.00 ^c
γ -氨基丁酸	488.79 ± 0.38 ^a	109.36 ± 0.14 ^b	38.28 ± 0.28 ^c
游离酚	109.06 ± 0.74 ^a	81.83 ± 0.77 ^b	63.46 ± 1.32 ^c
结合酚	168.54 ± 0.34 ^a	119.63 ± 1.72 ^b	106.66 ± 2.10 ^c
总酚	277.60 ± 1.08 ^a	201.76 ± 2.48 ^b	170.11 ± 0.78 ^c

[†] 同行字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。

发现米珍营养米展现出显著的综合品质优势。从营养成分分析,米珍营养米因保留了糊粉层,其蛋白质、脂肪、膳食纤维和灰分等营养成分含量显著高于精白米,同时黄粒米率低于糙米,表现出优异的外观品质。在食用品质方面,米珍营养米的食味值优于糙米且接近精白米,其口感特征兼具米香、色泽、黏弹性、软硬程度、咀嚼滋味和持久滋味等优良特性。

进一步研究发现,米珍营养米中共鉴定出57种挥发性风味物质,其种类和含量与糙米相当且显著高于精白米。通过主成分分析确定己醛、辛醛、反-2-辛烯醛等特征挥发性风味物质是构成米珍营养米独特香气和风味特征的关键成分。此外,米珍营养米在功能性成分方面表现突出,其 γ -谷维素、生育酚、多酚和 γ -氨基丁酸含量显著高于精白米,这些成分对人体健康具有重要益处。

综上,米珍营养米是一种兼具美味与健康特性的新型大米产品,具有广阔的市场应用前景。但该研究仍存在一些不足,如未评估长期食用效果、不同人群适应性、环境影响及经济性,加工技术和贮藏稳定性也有待优化,同时缺乏与其他谷物的全面对比及消费者偏好研究。后续需进一步开展长期人群试验、专项适应性研究、生命周期评估、市场调研及加工技术优化,以全面评估其潜力并推动其市场化应用。

参考文献

- [1] VERMA D K, SRIVASTAV P P. Bioactive compounds of rice (*Oryza sativa* L.): review on paradigm and its potential benefit in human health[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 97: 355-365.
- [2] 任静,姜雯倩,赵宁,等.大米—黄米混米品质特性[J].食品与机械,2022,38(4):200-206.
- REN J, JIANG W Q, ZHAO N, et al. Quality properties of mixture of the proso millet and rice[J]. Food & Machinery, 2022, 38(4): 200-206.
- [3] 徐蕴山,陈弘,赵良.关于米糠中分离提取米珍技术的探讨[J].黑龙江粮食,2014(7):46-48.
- XU Y S, CHEN H, ZHAO L. Discussion on the technology of separating and extracting rice germ from rice bran[J]. Heilongjiang Grain, 2014(7): 46-48.
- [4] KAUR B, RANAWANA V, HENRY J. The glycemic index of rice and rice products: a review, and table of GI values[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2016, 56(2): 215-236.
- [5] SHARIF M K, BUTT M S, ANJUM F M, et al. Rice bran: a novel functional ingredient[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2014, 54(6): 807-816.
- [6] 蒋志荣.碾米生产工艺控制方法及米珍生产线:CN202111359213.X[P].2022-03-11.
- JIANG Z R. Rice milling production process control method and rice germ production line: CN202111359213.X[P]. 2022-03-11.
- [7] 陈弘.稻米加工产业新思维[J].黑龙江粮食,2015(12):50-52.
- CHEN H. New thinking in the rice processing industry[J]. Heilongjiang Grain, 2015(12): 50-52.
- [8] 蒋志荣.稻米加工靶向碾磨工艺检测方法及系统:CN202310739279.4[P].2023-09-19.
- JIANG Z R. Detection method and system for targeted milling process in rice processing: CN202310739279.4[P]. 2023-09-19.
- [9] PEANPARKDEE M, IWAMOTO S. Bioactive compounds from by-products of rice cultivation and rice processing: extraction and application in the food and pharmaceutical industries[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 109-117.
- [10] GONG E S, LUO S J, LI T, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activity of brown rice varieties[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 432-443.
- [11] PANG Y H, AHMED S, XU Y J, et al. Bound phenolic compounds and antioxidant properties of whole grain and bran of white, red and black rice[J]. Food Chemistry, 2018, 240: 212-221.
- [12] GOUFO P, TRINDADE H. Rice antioxidants: phenolic acids, flavonoids, anthocyanins, proanthocyanidins, tocopherols, tocotrienols, γ -oryzanol, and phytic acid[J]. Food Science & Nutrition, 2014, 2(2): 75-104.
- [13] SAWADA K, NAKAGAMI T, RAHMANIA H, et al. Isolation and structural elucidation of unique γ -oryzanol species in rice bran oil[J]. Food Chemistry, 2021, 337: 127956.
- [14] ZANDY S L, DOHERTY J M, WIBISONO N D, et al. High sensitivity HPLC method for analysis of in vivo extracellular GABA using optimized fluorescence parameters for o-phthalaldehyde (OPA)/sulfite derivatives[J]. Journal of Chromatography B, 2017, 1055: 1-7.
- [15] ALVES G H, FERREIRA C D, VIVIAN P G, et al. The revisited levels of free and bound phenolics in rice: effects of the extraction procedure[J]. Food Chemistry, 2016, 208: 116-123.
- [16] 国家标准化管理委员会,国家市场监督管理总局.大米:GB/T 1354—2018[S].北京:中国标准出版社,2018:5.
- Standardization Administration of China, State Administration for Market Regulation. Rice: GB/T 1354—2018[S]. Beijing: China Standards Press, 2018: 5.
- [17] JAYADEEP A, MALLESHI N G. Nutrients, composition of tocotrienols, tocopherols, and γ -oryzanol, and antioxidant activity in brown rice before and after biotransformation Nutrientes, composición de tocotrienoles, tocoferoles y γ -oryzanol, y actividad antioxidante del arroz integral antes y después de la biotransformación[J]. CyTA-Journal of Food, 2011, 9(1): 82-87.