

不同品种籼型糙米营养成分、质构及体外消化特性

杨子毅，刘小玲*

(广西大学轻工与食品工程学院，广西高校特色农产品精深加工与安全控制重点实验室，广西南宁 530000)

摘要：为了促进全谷物食品的发展和低血糖指数 (Glycemic Index, GI) 主食的开发，本研究分析了 8 个品种糙米的营养成分、质构及体外消化特性，并与精白米进行对比，探讨糙米与精白米之间的差异性，以及分析各指标之间的相关性。不同品种籼型糙米的脂肪、蛋白质和膳食纤维等含量存在显著性差异 ($P<0.05$)。所有糙米品种的 γ -氨基丁酸、总游离酚类和总游离黄酮含量均显著高于 ($P<0.05$) 精白米，其抗氧化能力也显著高于精白米，其中 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除活性最高的糙米品种分别约为精白米的 4 倍和 3 倍。不同品种籼型糙米的米饭硬度显著高于 ($P<0.05$) 精白米米饭，硬度最低的糙米米饭仍约为精白米的 1.5 倍。糙米米饭的预估血糖指数 (Estimated Glycemic Index, eGI) 范围为中等至高 GI，其中 eGI 最低的品种为中早 39 (eGI=61.48)，约为精白米 eGI 的 0.8 倍。糙米米饭的 eGI 值与脂肪、蛋白质和膳食纤维呈极显著负相关 ($P<0.01$)。糙米在提升膳食营养价值和开发功能性低GI食品方面具有较大潜力，研究结果可为糙米食品的加工、配方优化及健康功能评价提供理论依据。

关键词：糙米；营养品质；抗氧化能力；质构特性；体外消化特性

文章编号：1673-9078(2026)04-65-75 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0168

Nutritional Composition, Textural, and *in Vitro* Digestive Characteristics of Different Indica Brown Rice Varieties

YANG Ziyi, LIU Xiaoling*

(College of Light Industry and Food Engineering, Key Laboratory of Deep Processing and Safety Control for Specialty Agricultural Products in Guangxi Universities, Guangxi University, Nanning 530000, China)

Abstract: To promote the development of whole-grain foods and low glycemic index (GI) staples, the nutritional composition, textural properties, and *in vitro* digestion characteristics of eight indica brown rice varieties were systematically compared with those of milled rice. The differences between these varieties and milled rice were discussed, and correlations between indicators were examined. Significant differences ($P<0.05$) were observed in fat, protein, and dietary fiber contents among different brown rice varieties. All brown rice varieties exhibited significantly higher ($P<0.05$) γ -aminobutyric acid, total free phenolics, and total free flavonoids than milled rice, accompanied by superior antioxidant capacities. The maximum DPPH and ABTS⁺ radical scavenging activities observed in the brown rice varieties were approximately four times and three times higher than those in milled rice, respectively. Cooked brown rice demonstrated significantly greater hardness ($P<0.05$), with the softest brown rice variety still showing a hardness level approximately 1.5 times higher than that of milled rice. The estimated glycemic index (eGI) of brown rice ranged from medium to high levels, with Zhongzao 39 exhibiting the lowest eGI value (61.48), equivalent to 0.8 times that of

引文格式：

杨子毅,刘小玲.不同品种籼型糙米营养成分、质构及体外消化特性[J].现代食品科技,2026,42(4):65-75.

YANG Ziyi, LIU Xiaoling. Nutritional composition, textural, and *in vitro* digestive characteristics of different indica brown rice varieties [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 65-75.

收稿日期：2025-02-12；修回日期：2025-04-23；接受日期：2025-05-01

基金项目：广西重点研发计划项目（桂科 AB24010187）

作者简介：杨子毅（1998-），男，硕士研究生，研究方向：水产品的开发与利用，E-mail：1790861875@qq.com

通讯作者：刘小玲（1972-），女，博士，教授，研究方向：水产品的开发与利用，E-mail：13877173857@163.com

milled rice. Significant negative correlations ($P<0.01$) were identified between eGI values and fat, protein, and dietary fiber contents. These findings suggest that brown rice has substantial potential for enhancing nutritional value and developing low-GI functional foods, thus providing theoretical support for processing optimization, formula design, and health function evaluation of brown rice products.

Key words: brown rice; nutritional quality; antioxidant capacity; textural properties; *in vitro* digestive characteristics

健康的生活方式始终是公众关注的重点议题，其中膳食结构更是备受重视的核心内容。近年来，平衡膳食的重要性逐渐被人们所重视，全谷物食品因此成为广大研究人员的开发热点。糙米是由稻谷脱去颖壳获得，其保留了果皮、种皮、糊粉层、胚芽及胚乳等部分，属于全谷物食品^[1]。精制谷物（如精白米和精白面等）是中国及多数亚洲国家的主食之一，主要用于提供人体每日所需的能量。多项研究发现精白米的摄入量与人体 II 型糖尿病的患病风险呈正相关，涵盖了中国、美国、日本和印度等地区的人群^[2]。对于经常食用糙米的人群，他们患上 II 型糖尿病、心血管疾病和结直肠癌等慢性疾病的风险降低，也不易产生炎症和肥胖^[3]。

尽管糙米的营养价值相比于精白米的营养价值高，但是其在推广的过程中并不顺利^[4]，主要由于糙米在食用感官上与精白米存在差异。通过比较糙米与精白米的质构特性，筛选适口性优良的糙米品种，并将其开发成食用方便的产品，是解决糙米推广难题的重要途径。《中国居民膳食指南-2022》建议成年人每人每日摄入谷类 200~300 g，其中全谷物和杂豆类占 50~150 g。粳型水稻是我国南方地区广泛种植的水稻类型，产量占比较大。粳型常规水稻因其能够实现自留种，且种植要求相比杂交水稻低，适合广大农户长期种植。因此，本研究主要选用粳型常规水稻的糙米作为研究对象，旨在希望发掘这些水稻资源在健康膳食体系的应用潜力，进而提高他们的经济效益，实现农户经济效益与居民营养健康的协同增效发展。

目前，国内外关于不同品种糙米在食用品质^[5]、抗氧化特性^[6]、糊化特性^[7]和发芽特性^[8]等方面已有研究，但关于不同品种糙米在营养成分、质构特性及其米饭消化特性方面与经典主食的对比研究较少。食品的 GI 值已被证实能够影响一些疾病的患病风险，如 II 型糖尿病、心血管疾病、癌症、胃肠道疾病、肥胖、癫痫、抑郁症和偏头痛等疾病的患病风险^[9]。因此，本研究通过研究不同品种粳型糙米的营养成分含量、活性成分含量、抗氧化能力、米饭的质构特性和米饭的体外消化特性来探讨糙米品种之间的品质差异性，以及与经典主食（以精白米为代表）在上述方面的品质差异性，从而直观的了解全谷物食品与精制谷物的

特性。综合以上研究，为筛选食用品质较高和较低 GI 值的粳型糙米品种提供参考依据，有利于进一步对这些糙米开展研究及开发产品等。

1 材料与方法

1.1 实验材料与主要试剂

不同品种粳型稻谷的类型及来源地情况如表 1 所示。浓香 42、中早 39 和黄华占来自湖南金色农丰种业有限公司，桂野香占来自广西南宁新农田农业科技有限公司，桂丰 9 号来自广西皓凯生物科技有限公司，菁华粉稻来自广西万千种业有限公司，广粮香 2 号和广 8 优龙丝苗来自南宁市当地农贸市场，共计 8 个水稻品种，均为 2023 年期间生产。精白米以广粮香 2 号的精白米为代表，即其稻谷经砻谷和碾米制备；糙米均为相应稻谷品种经过砻谷制备，部分需要样品破碎的实验项目，将其破碎后过 80 目筛，密封存放于常温避光的干燥容器中。体外消化模拟所使用的参考食物白面包（高筋面粉 59%~62%、水 35%~38%、干酵母 0.6%~0.9%、食用盐 0.6%~1.2%）来自当地糕点铺。

表 1 稻谷的品种名称、类型及来源地
Table 1 The name of the rice variety and the place of origin

稻谷品种名	类型	来源地
广粮香 2 号	粳型常规水稻	广西
桂野香占	粳型常规水稻	广西
桂丰 9 号	粳型常规水稻	广西
菁华粉稻	粳型常规水稻	广西
广 8 优龙丝苗	粳型三系杂交水稻	广西
浓香 42	粳型常规水稻	湖南
中早 39	粳型常规水稻	湖南
黄华占	粳型常规水稻	湖南

α -淀粉酶（CAS : 9000-90-2, BR）、2,2'-联苯基 -1-苦基肼基（DPPH, $\geq 96\%$ ）、2,2'-联氨 - 双（3- 乙基苯并噻唑啉-6- 磺酸）二胺盐（ABTS, $\geq 98\%$ ），采购于上海麦克林生化科技股份有限公司； γ -氨基丁酸（ $\geq 98\%$ ）、没食子酸（ $\geq 98\%$ ）、芦丁（ $\geq 98\%$ ）、水溶性维生素 E（ $\geq 98\%$ ）、福林酚，采购于北京索莱宝科技有限公司；糖化酶（CAS : 9032-08-0, 10 万 u·g⁻¹），采购于上海源叶生物科技有限公司；葡萄糖试剂盒

(葡萄糖氧化酶法), 采购于南京建成生物工程研究所; 盐酸、硫酸、氢氧化钠、无水乙醇、30~60 ℃沸程石油醚和甲醇等试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器

JLGJ-45 检验砬谷机, 台州市路桥京奥粮用器材厂; prepASH®340Series 热重分析仪, 瑞士 Precisa 公司; SZF-06A 自动脂肪测定仪, 上海新嘉电子有限公司; K-375 全自动凯氏定氮仪, 瑞士 BUCHI 公司; Infinite E Plex 多功能酶标仪, 奥地利 Tecan 公司; TMS-Pro 高级质构分析仪, 美国 Food Technology 公司 (FTC); SHA-B 恒温振荡器, 上海力辰仪器科技有限公司; H5-21KR 高速冷冻离心机, 湖南可成仪器设备有限公司; SQP 电子天平, 赛多利斯科学仪器 (北京) 有限公司。

1.3 方法

1.3.1 基本理化指标的测定

水分含量参照 GB 5009.3-2016 直接干燥法测定; 灰分含量参照 GB 5009.4-2016 食品中总灰分测定; 脂肪含量参照 GB 5009.6-2016 索氏抽提法测定; 蛋白质含量参照 GB 5009.5-2016 凯氏定氮法测定; 淀粉含量参照 GB 5009.9-2023 酸水解法并稍作修改, 试样水解液的葡萄糖含量采用葡萄糖试剂盒 (葡萄糖氧化酶法) 测定; 膳食纤维含量参照 GB 5009.88-2023 测定; 直链淀粉含量参照 GB/T 15683-2008 测定。

1.3.2 活性成分含量的测定

1.3.2.1 γ -氨基丁酸 (γ -aminobutyric Acid, GABA) 的提取及测定

GABA 的提取及测定参考陈恩成等^[10]的方法并稍作修改。将 1.0 g 糙米粉末转移至 50 mL 离心管, 加入 8 mL 乙醇 (60%, V/V) 摇匀, 使用恒温水浴振荡器在 70 ℃; 250 r·min⁻¹ 条件下水平振荡提取 2 h, 然后在 4 ℃下以 10 000 r·min⁻¹ 离心 15 min, 收集上清液。

GABA 的测定基于 Berthelot 显色反应。取 0.5 mL 标准溶液或方法 1.3.2.1 的提取液到 15 mL 离心管中, 加入 0.2 mL 四硼酸钠 (0.2 mol·L⁻¹), 1 mL 苯酚 (6%, m/V), 0.4 mL 次氯酸钠 (10%, V/V), 用漩涡振荡器震荡均匀, 于沸水浴中反应 10 min, 迅速置于冰水浴中冷却 20 min, 然后加入 2 mL 乙醇 (60%, V/V), 在波长 645 nm 处测定吸光度。以 GABA 标准溶液的浓度为横坐标, 其吸光度为纵坐标, 绘制成标准曲线, 通过线性回归方程计算出样品的 GABA 含量 (mg GABA/100 g DW)。

1.3.2.2 游离类抗氧化成分的提取及总游离酚类含量的测定

游离类抗氧化成分的提取参考 Shen 等^[11]的方法并

稍作修改。将 1.0 g 糙米粉末与 20 mL 甲醇 (80%, V/V) 加入到 50 mL 离心管中, 使用恒温水浴振荡器在 25 ℃; 250 r·min⁻¹ 条件下水平振荡提取 30 min, 然后在 4 ℃下以 10 000 r·min⁻¹ 离心 15 min, 收集上清液后再次加入 20 mL 甲醇 (80%, V/V) 重复提取 1 次, 然后将 2 次提取得到的上清液合并, 并用甲醇 (80%, V/V) 定容至 50 mL。

总游离酚类含量的测定根据 Folin-Ciocalteu 显色反应, 参考 Pang 等^[12]的方法并稍作修改。取 0.2 mL 标准溶液或方法 1.3.2.2 的提取液到 10 mL 离心管中, 加入 4.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 的福林酚溶液, 静置 5 min 后加入 1.5 mL 饱和碳酸钠 (75 g·L⁻¹), 在室温条件下避光反应 2 h, 在波长 760 nm 处测定吸光度。以没食子酸标准溶液的浓度为横坐标, 其吸光度为纵坐标, 绘制成标准曲线, 通过线性回归方程计算出样品的总游离酚类含量。总游离酚类含量以没食子酸当量 (Gallic Acid Equivalent, mg GAE/100 g DW) 表示。

1.3.2.3 总游离黄酮含量的测定

参考 Ti 等^[13]的方法并稍作修改。取 0.3 mL 标准溶液或方法 1.3.2.2 的提取液到 10 mL 离心管中, 加入 1.5 mL 蒸馏水和 0.09 mL 亚硝酸钠 (5%, m/V), 静置 5 min 后加入 0.18 mL 结晶氯化铝 (10%, m/V), 静置 11 min 后加入 0.6 mL 氢氧化钠 (1.0 mol·L⁻¹) 和 0.33 mL 蒸馏水, 立即在波长 510 nm 处测定吸光度。以芦丁标准溶液的浓度为横坐标, 其吸光度为纵坐标, 绘制成标准曲线, 通过线性回归方程计算出样品的总游离黄酮含量。总游离黄酮含量以芦丁当量 (Rutin Equivalent, mg RE/100 g DW) 表示。

1.3.3 抗氧化能力的测定

1.3.3.1 2,2-联苯基-1-苦基肼基 (DPPH) 自由基清除能力的测定

参考 Sompong 等^[14]的方法并稍作修改。取 0.3 mL 标准溶液或方法 1.3.2.2 的提取液到 5 mL 离心管中, 加入 1.5 mL DPPH 工作溶液 (0.12 mmol·L⁻¹, 溶剂为无水乙醇), 使用漩涡振荡器震荡均匀后在室温下避光反应 40 min, 然后在波长 519 nm 处测定吸光度。以水溶性维生素 E 标准溶液的浓度为横坐标, 其 DPPH 清除能力为纵坐标, 绘制成标准曲线, 通过线性回归方程计算出样品的 DPPH 自由基清除能力。DPPH 自由基清除能力以水溶性维生素 E 当量 (Trolox Equivalent, μ mol TE/100 g DW) 表示。使用公式 1 计算样品的 DPPH 自由基清除能力 (DPPH SA)。

$$D = (1 - \frac{A_{519 \text{ nm sample}}}{A_{519 \text{ nm blank}}}) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

D —样品的 DPPH 自由基清除能力 (DPPH SA), %;

$A_{519\text{ nm sample}}$ —样品组在波长 519 nm 处的吸光度;

$A_{519\text{ nm blank}}$ —空白组在波长 519 nm 处的吸光度。

1.3.3.2 2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐 (ABTS) 自由基清除活性的测定

参考 Ti 等^[15]的方法并稍作修改。将 ABTS ($7.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 与过硫酸钾 ($2.45\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 按 1:1 (V/V) 混合, 在室温条件下避光静置 15 h 得到 ABTS 储备溶液, 然后用甲醇稀释使其在波长 743 nm 处的吸光度为 0.70 ± 0.02 , 从而得到 ABTS^+ 自由基工作溶液。取 0.3 mL 标准溶液或方法 1.3.2.2 的提取液到 5 mL 离心管中, 加入 1 mL ABTS^+ 自由基工作溶液, 静置 6 min 后在波长 743 nm 处测定吸光度。以水溶性维生素 E 标准溶液的浓度为横坐标, 其 ABTS^+ 自由基清除活性为纵坐标, 绘制成标准曲线, 通过线性回归方程计算出样品的 ABTS^+ 自由基清除活性。 ABTS^+ 自由基清除活性以水溶性维生素 E 当量 ($\mu\text{mol TE}/100\text{ g DW}$) 表示。使用公式 2 计算样品的 ABTS^+ 自由基清除活性 (ABTS SA)。

$$A = (1 - \frac{A_{743\text{ nm sample}}}{A_{743\text{ nm blank}}}) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

A —样品的 ABTS^+ 自由基清除能力 (ABTS SA), %;

$A_{743\text{ nm sample}}$ —样品组在波长 743 nm 处的吸光度;

$A_{743\text{ nm blank}}$ —空白组在波长 743 nm 处的吸光度。

1.3.4 糙米米饭的制备

参考 GB/T 15682-2008 中小量样品米饭的制备方法并稍作修改。称取 10.0 g 试样于蒸饭皿 (304 不锈钢材质, 直径 70 mm) 中, 将其倒入沥水筛后, 迅速加入 300 mL 水至筛中, 先顺时针搅拌 10 圈再逆时针搅拌 10 圈, 沥干水分后快速重复洗涤 1 次, 然后用 200 mL 蒸馏水淋洗 1 次, 沥干水分后将其倒回蒸饭皿中。洗米的时间应控制在 3~5 min。米水比例采用 1:1.7 (m/m), 即加入 17.0 g 蒸馏水至蒸饭皿中, 将其置于恒温水浴锅, 以 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下浸泡 60 min。在蒸锅内加入适量的水, 用电炉或电磁炉加热其至沸腾, 将盛放样品的蒸饭皿加盖后置于蒸屉上, 盖上蒸锅锅盖, 继续加热并开始计时, 蒸煮 40 min 后停止加热, 再焖煮 20 min 后得到糊化糙米或精白米样品。将这些样品保存于保温箱内, 直到测定时再取出。

1.3.5 糙米米饭的质构特性的测定

将质构仪的探头调零, 待探头上升至适宜高度后将含有米饭样品 (按照 1.3.4 的方法制备) 的蒸饭皿放置在质构仪载物台上, 调整蒸饭皿至适宜的位置, 进行第 1 次质构特性测定, 待其测定完毕后, 旋转蒸饭

皿重复测定 2 次, 应确保每次测定时探头挤压的位置不存在交集。糙米米饭的质构特性测定条件如下: 采用 P25 (直径 25.7 mm) 柱形探头, 测定时速度为 $60\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$, 压缩比例为 80%, 两次下压间隔为 3 s, 数据采集速率为 1 000 pps, 触发力为 0.05 N。

1.3.6 糙米米饭的体外消化特性的测定

1.3.6.1 糙米米饭淀粉组分含量的测定

米饭淀粉组分的测定参考 Englyst 等^[16]的方法并稍作修改。称取 1.0 g 米饭样品 (按照 1.3.4 的方法制备) 于 50 mL 离心管, 尽可能使米粒集中在离心管的底部, 使用适宜直径的玻璃棒对离心管底部的米饭施加 3 000~4 000 N 的纵向挤压力, 重复挤压操作 5~8 次以模拟口腔咀嚼动作, 然后加入 10.0 mL 醋酸钠缓冲液 ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值 5.2)、5.0 mL α -淀粉酶 [1.0% , m/m , 使用醋酸钠缓冲液 ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值 5.2) 配制]、5.0 mL 糖化酶 [1.0% , m/m , 使用醋酸钠缓冲液 ($0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值 5.2) 配制] 和 5 粒玻璃珠, 所有溶液在加入前应预热至 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, 使用恒温水浴振荡器在 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$; $150\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下回旋振荡进行酶解反应, 并开始计时。当酶解反应至 0、20 和 120 min 时, 吸取 0.2 mL 酶解液至 5 mL 离心管, 加入 3.8 mL 无水乙醇以终止酶解反应, 用葡萄糖试剂盒 (葡萄糖氧化酶法) 测定酶解液的葡萄糖含量。另称取 1.0 g 米饭按照 GB 5009.9-2023 酸水解法测定其总淀粉含量。

公式 (3)、公式 (4) 和公式 (5) 分别用于米饭淀粉中快速消化淀粉 (Rapidly Digestible Starch, RDS)、慢速消化淀粉 (Slow Digestible Starch, SDS)、抗性淀粉 (Resistant Starch, RS) 含量的计算。

$$B_1 = \frac{(G_{20} - G_0) \times 0.9}{E} \times 100\% \quad (3)$$

$$B_2 = \frac{(G_{120} - G_{20}) \times 0.9}{E} \times 100\% \quad (4)$$

$$B_3 = 100\% - B_1 - B_2 \quad (5)$$

式中:

B_1 —快速消化淀粉 (RDS) 的含量, %;

B_2 —慢速消化淀粉 (SDS) 的含量, %;

B_3 —抗性淀粉 (RS) 的含量, %;

G_0 —酶解反应 0 min 时酶解液中的葡萄糖含量, mg;

G_{20} —酶解反应 20 min 时酶解液中的葡萄糖含量, mg;

G_{120} —酶解反应 120 min 时酶解液中的葡萄糖含量, mg;

E —米饭的总淀粉含量 (TS), mg;

0.9—葡萄糖与淀粉之间的分子量换算因子。

1.3.6.2 糙米米饭体外消化曲线的测定

体外消化曲线的测定参考缪铭^[17]的方法并稍作

修改。称取 1.0 g 米饭样品（按照 1.3.4 的方法制备）或白面包（参考食物），按方法 1.3.6.1 进行体外消化模拟实验，从计时开始，当酶解反应至 10、20、40、60、90、120、180 min 时，吸取 0.2 mL 酶解液至 5 mL 离心管，加入 3.8 mL 无水乙醇以终止酶解反应，用葡萄糖试剂盒（葡萄糖氧化酶法）测定酶解液的葡萄糖含量，然后计算米饭或参考食物的淀粉水解率，并绘制淀粉水解率-时间曲线。公式 6 用于米饭或参考食物淀粉水解率的计算。

$$S = \frac{G_t \times 0.9}{E} \times 100\% \quad (6)$$

式中：

S ——淀粉水解率，%；

G_t ——酶解反应 t min 时酶解液中的葡萄糖含量，mg。

1.3.6.3 糙米米饭 eGI 值的测定

eGI 值的测定参考 Goni 等^[18]建立的体外消化动力学模型。通过方法 1.3.6.2 得到米饭或白面包的淀粉水解率-时间曲线，其淀粉水解率遵循一级反应方程式（公式 7），使用 OriginLab OriginPro 对该曲线拟合，并计算曲线下面积，定义白面包的水解指数（Hydrolysis Index, HI）为 100。公式（8）和公式（9）分别用于 HI 和 eGI 的计算。

$$S = C_{\infty} \times (1 - \exp^{-Kt}) \quad (7)$$

$$HI = \frac{AUC_{sample}}{AUC_{white bread}} \times 100 \quad (8)$$

$$eGI = 0.549HI + 39.71 \quad (9)$$

式中：

C_{∞} ——平衡水解率，%；

K ——一级动力学反应速率， min^{-1} ；

t ——酶解时间，min；

AUC_{sample} ——米饭淀粉水解率拟合曲线的曲线下面积， $\% \cdot \text{min}$ ；

$AUC_{white bread}$ ——白面包淀粉水解率拟合曲线的曲线下面积， $\% \cdot \text{min}$ ；

100——白面包的水解指数。

1.3.7 数据统计与处理

所有实验的数据使用 Microsoft Office Excel 进行统计；使用 IBM SPSS 26 软件进行数据处理，结果以平均值 ± 标准偏差来表示，对数据进行单因素 ANOVA 分析，方法为沃勒-邓肯（I 类/II 类误差比率为 100），检验比较组间的差异性（ $P < 0.05$ 为显著）；对部分评价指标进行皮尔逊相关性分析，检验比较这些评价指标的相关性（ $P < 0.05$ 为显著相关， $P < 0.01$ 为极显著相关）；使用 OriginLab OriginPro 软件进行数据处理或图像绘制。

2 结果与讨论

2.1 不同品种粳型糙米的营养成分含量

不同品种粳型糙米的营养成分含量如表 2 所示。稻谷因品种特性、生长环境和采收后存放的条件等因素有所差异，其糙米的水分含量存在显著性差异（ $P < 0.05$ ）。不同品种粳型糙米的水分含量均小于 14.00%，该条件下不利于微生物的生长和繁殖，有利于糙米的长期贮存。不同品种粳型糙米的灰分含量在 1.25~1.73（g/100 g DW）范围，总体上广西地区的糙米灰分含量略高于湖南地区的糙米灰分。精白米的灰分含量为糙米的灰分含量二分之一左右，说明糙米皮层和胚芽的无机成分含量较高。

不同品种粳型糙米的脂肪含量在 2.65~3.58 g/100 g DW 范围，均显著高于（ $P < 0.05$ ）精白米的脂肪含量（1.04 g/100 g DW），这是由于糙米保留了完整的胚芽，通常脂肪在该结构中含量较高。糙米脂肪的脂肪酸主要成分为油酸、亚油酸和棕榈酸^[19]。此外，糙米的粗脂肪提取物中还含有谷维素、甾醇和维生素 E 等脂溶性功能化合物，这些成分与脂肪酸对于防止人体动脉硬化和降低人体血液中低密度脂蛋白等有着重要作用^[20]。对于糙米的保藏特性而言，脂肪含量较高容易导致糙米在贮存期间发生品质劣变或吸引害虫害鼠啃食，不利于糙米的长期贮存。因此，糙米的保质期相比精白米短。

不同品种粳型糙米的蛋白质含量在 6.85~8.81 g/100 g DW 范围，显著高于（ $P < 0.05$ ）精白米的蛋白质含量（6.46 g/100 g DW），表明糙米的蛋白质主要存在于胚乳部分。糙米的蛋白质主要成分为谷蛋白（约占 80%），其水解后可获得人体 8 种必需氨基酸（其中亮氨酸含量最高）^[21]。

不同品种粳型糙米的膳食纤维含量在 2.16~2.74（g/100 g DW）范围，包含可溶性膳食纤维（Soluble Dietary Fiber, SDF）和不溶性膳食纤维（Insoluble Dietary Fiber, IDF），均为精白米的膳食纤维含量（0.95 g/100g DW）2 倍以上，表明膳食纤维主要来源于果皮和种皮。膳食纤维是一种非淀粉多糖，不能被人体所消化，能够提供较强的饱腹感，有利于促进肠道的蠕动，具有改善便秘、改善肠道菌群、降血糖、降血脂和预防胃肠道疾病等生理功能^[22]。但对某些肠胃较敏感的人群，摄入过量膳食纤维可能会引起腹胀或腹泻等症状。

不同品种粳型糙米的淀粉含量在 74.31~76.09 g/100 g DW 范围，显著低于（ $P < 0.05$ ）精白米的淀粉含量（78.32 g/100 g DW），这是由于在精白米加工过程中糙

2.2.2 不同品种籼型糙米的总游离酚类与总游离黄酮含量

中早 39 品种与菁华粉稻品种的糙米总游离酚类含量较高 (图 3a), 分别达到 114.96 mg GAE/100 g DW 与 115.53 mg GAE/100 g DW。精白米的总游离酚类含量为 38.15 mg GAE/100 g DW, 显著低于 ($P<0.05$) 糙米的总游离酚类含量。多酚作为一类天然抗氧化剂, 是糙米发挥降血糖、降血脂、降低患心血管疾病风险等生理功效的主要活性成分^[27]。总游离黄酮含量较高的糙米品种为浓香 42、中早 39、黄华占和广粮香 2 号, 最高可达 166.29 mg RE/100 g DW。精白米的总游离黄酮含量为 37.17 mg RE/100 g DW, 约为糙米的总游离黄酮含量三分之一。黄酮化合物因其具有较为强大的抗氧化能力, 使其具有多种对人体健康有益的功效, 如具有抗炎活性、降低患癌风险和减少心血管疾病发病率^[28]。糙米的总游离酚类和总游离黄酮, 与其膳食纤维均呈极显著正相关 ($P<0.01$) 的关系 (图 2)。因此, 如需大量提取糙米的游离酚类或游离黄酮, 可选择膳食纤维含量较高的糙米品种。

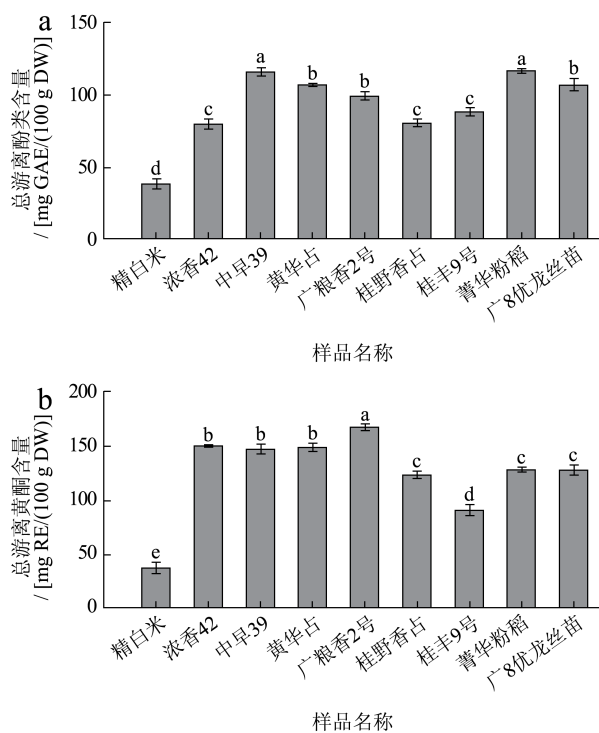


图3 不同品种籼型糙米的总游离酚类与总游离黄酮含量 (干基)

Fig.3 Contents of total free phenols and total free flavonoids in different varieties of indica brown rice (Dry weight)

2.3 不同品种籼型糙米的抗氧化能力

不同品种籼型糙米的 DPPH 自由基清除能力和

ABTS⁺ 自由基清除活性存在显著性差异 ($P<0.05$), 其中菁华粉稻的 DPPH 自由基清除能力与 ABTS⁺ 自由基清除活性最强, 分别达 249.63 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g DW}$ 与 713.57 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g DW}$ (图 4)。精白米的 DPPH 自由基清除能力与 ABTS⁺ 自由基清除活性分别为 59.41 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g DW}$ 与 237.15 $\mu\text{mol TE}/100\text{ g DW}$, 显著低于 ($P<0.05$) 糙米的抗氧化能力, 说明糙米实现其较强的抗氧化能力的活性成分主要存在于糙米的皮层和胚芽中。此外, 糙米的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺ 自由基清除活性, 与其总游离酚类呈极显著正相关 ($P<0.01$) 的关系 (图 2), 说明发挥二者抗氧化能力的主要抗氧化成分可能为酚类。

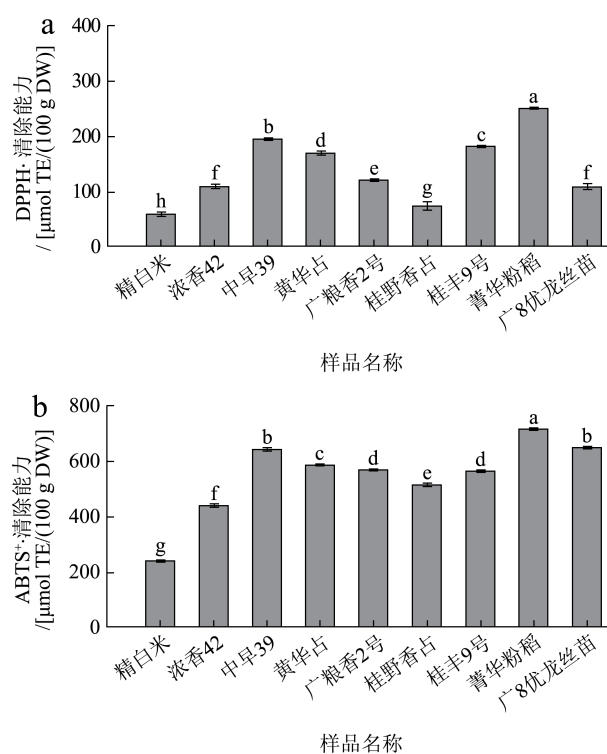


图4 不同品种籼型糙米的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺ 自由基清除活性 (干基)

Fig.4 DPPH free radical scavenging ability and ABTS⁺ free radical scavenging activity of different varieties of indica brown rice (Dry weight)

研究表明, 在细胞代谢或脂类过氧化反应的过程中, 产生的自由基是癌症和心血管疾病形成的因素之一^[29]。抗氧化成分能够阻断自由基反应, 从而降低这些疾病的患病风险。DPPH 法测定时介质为有机溶剂, 用于疏水性系统的抗氧化能力评价; ABTS 法则用于亲水性和亲脂性系统的抗氧化能力评价, 因此二者结合可对糙米中各种抗氧化成分的抗氧化能力进行综合性评价^[30]。

2.4 不同品种籼型糙米米饭的质构特性

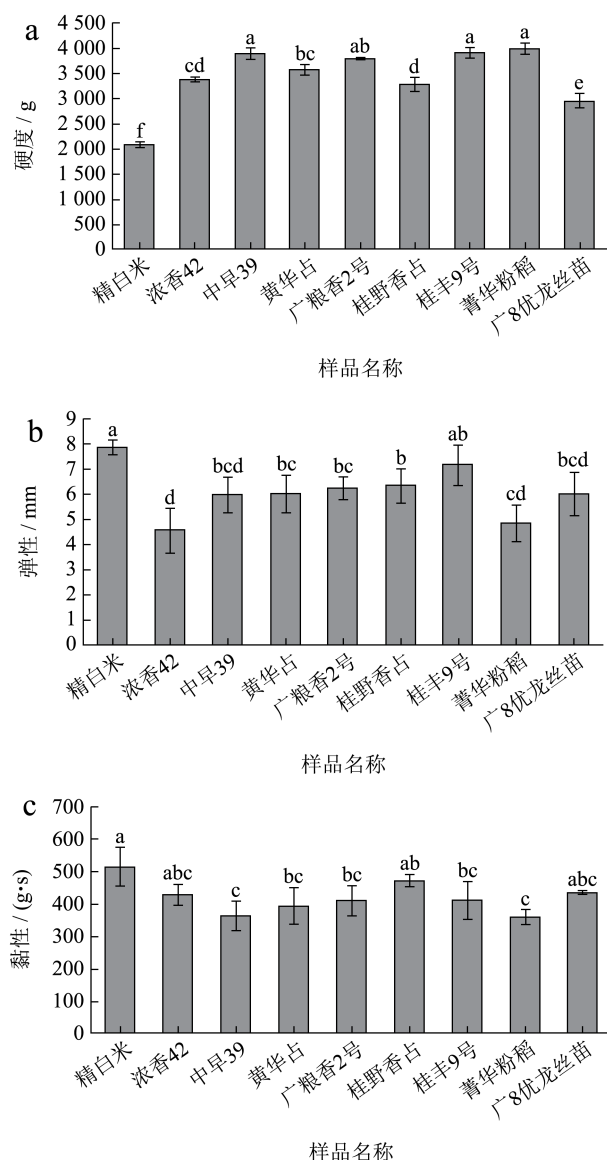


图5 不同品种籼型糙米米饭的硬度(a)、弹性(b)和黏性(c)

Fig.5 Hardness (a), elasticity (b) and viscosity (c) of different varieties of indica brown rice

注:黏性为取绝对值后的数值。

米饭的质构特性有硬度、弹性和黏性等^[31],是影响人们感官上对米饭接受程度的重要评价指标。不同品种籼型糙米米饭的硬度在2 937.6~3 978.8 g范围,均显著高于($P<0.05$)精白米米饭的硬度(2 082.7 g),说明糙米中的皮层和胚芽对其米饭的硬度有显著性影响(图5a)。不同品种籼型糙米米饭之间的硬度也存在差异($P<0.05$),其与脂肪、蛋白质、膳食纤维、总游离酚类和总游离黄酮呈极显著负相关($P<0.01$),与总淀粉呈极显著正相关($P<0.01$)的关系(图2)。此外,还能够观察到糙米米饭硬度与糙米粒型的关系,其中中早39和菁华粉稻(圆粒形糙米)米饭的硬度较其他长粒形

糙米品种的米饭硬度高。不同品种籼型糙米米饭的弹性在4.58 mm~7.15 mm范围(图5b),显著低于($P<0.05$)精白米的弹性(7.84 mm),与膳食纤维存在显著性负相关($P<0.05$)的关系(图2)。多数品种糙米米饭的黏性显著低于精白米的黏性(510.97 g·s),表明糙米米饭的粘附力较低。糙米米饭的硬度、弹性和黏性均与膳食纤维存在显著相关性(图2),说明糙米的膳食纤维是影响其米饭质构特性的关键因素之一。因此,可通过膳食纤维方面入手,对糙米的食用口感进行优化研究。

2.5 不同品种籼型糙米米饭的质构特性

2.5.1 不同品种籼型糙米米饭的淀粉组分的含量

不同品种籼型糙米米饭的RDS含量在16.77%~30.30%范围(图6),相比于精白米米饭的RDS含量(37.25%)低。不同品种籼型糙米米饭的SDS含量在23.85%~32.38%范围,其SDS含量与精白米米饭的SDS含量相差小于5%,表明糙米的皮层对米饭的SDS含量影响较小。不同品种籼型糙米米饭的RS含量在43.49%~57.68%,均高于精白米米饭的RS含量(34.77%)。对比已报道的湖北地区7种糙米淀粉组分的含量结果^[32],发现该文献中大多数糙米品种RDS含量约为SDS含量的5倍,原因可能是米饭样品的制备方法和体外消化模拟的方法存在差异。糙米皮层含有多种能够影响米饭RDS含量、SDS含量和RS含量的成分,主要有膳食纤维、脂质、蛋白质和多酚等。这些成分主要与淀粉酶作用而影响米饭淀粉组分,如膳食纤维能够阻碍淀粉酶与淀粉结合^[33];脂质能够在加热条件下与直链淀粉产生复合,抑制淀粉颗粒膨胀和减少淀粉与淀粉酶的结合位点^[34];多酚能够抑制淀粉酶的活性^[35]等。RS类似于膳食纤维,其在小肠中不能被消化吸收,只能被大肠中的微生物水解利用,对肠道健康有利^[16]。

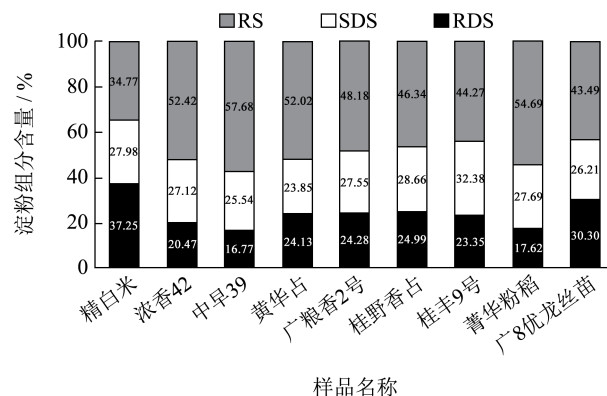


图6 不同品种籼型糙米米饭的淀粉组分

Fig.6 Starch components of different varieties of indica brown rice

2.5.2 不同品种籼型糙米米饭的体外消化曲线

整体上看,不同品种籼型糙米米饭的淀粉水解率随着时间的增加而增大,在同一时间糙米米饭的淀粉水解率要小于精白米米饭的淀粉水解率(图7)。在0~60 min时,精白米米饭淀粉水解率的增涨速率较糙米米饭淀粉水解率的增涨速率快,这是由于精白米的淀粉中RDS含量占比较高。所有糙米品种米饭和精白米米饭的淀粉水解率在时间达到120 min后增长趋于平缓。在180 min时,中早39品种米饭的淀粉水解率最小,广8优龙丝苗品种米饭的淀粉水解率最大,前者 and 后者分别与精白米米饭的淀粉水解率相差26%和10%。影响米饭淀粉水解率的因素与影响淀粉组分的因素基本相同,可分为内在因素(如蛋白质、脂质、膳食纤维和多酚等)和外在因素(如米饭蒸煮条件等)。糙米米饭淀粉水解率受其蒸煮条件影响较大,通常较短的蒸煮时间和较低的蒸煮压力会使米饭无法完全糊化,从而使得米饭淀粉水解率下降。研究发现,糙米米饭的淀粉水解率与米饭的米粒/水比例(m/m)、蒸煮(沸腾)时间和蒸煮压力成正相关^[36]。

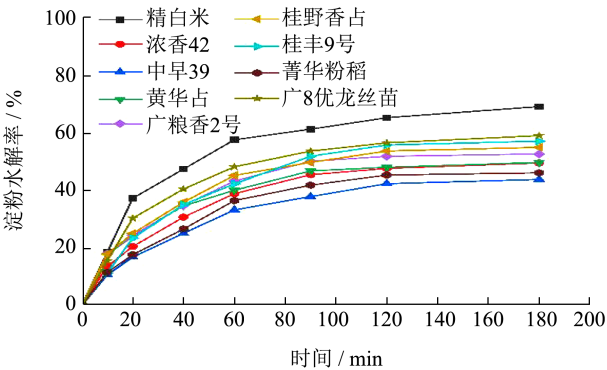


图7 不同品种籼型糙米米饭的体外消化曲线

Fig.7 In vitro digestion curve of different varieties of indica brown rice

2.5.3 不同品种籼型糙米米饭的eGI值

不同品种籼型糙米米饭之间的eGI存在显著性差异($P<0.05$),绝大多数品种糙米米饭的eGI在55~70之间,属于中等eGI食品,其中eGI最低的糙米品种为中早39($eGI=61.48$),与低eGI食品($eGI<55$)仍存在一定差距(表3)。精白米和广8优龙丝苗品种米饭的eGI分别为75.75和70.47,属于高eGI食品($eGI>70$)。所有糙米品种米饭的HI和eGI显著低于($P<0.05$)精白米米饭的HI和eGI,表明皮层的存在能够使得米饭淀粉的HI和eGI下降,其中精白米米饭的eGI与中早39品种米饭的eGI相差14.27。

不同品种籼型糙米米饭的eGI与其脂肪、蛋白质、膳食纤维、总游离酚类和总游离黄酮呈极显著负相关($P<0.01$),与直链淀粉呈显著负相关($P<0.05$)的关系(图7),因此可通过这些评价指标来初步筛选具有相关消化特性的糙米品种。此外,米饭的GI还受其加工方式等外在因素影响^[37],如米饭的糊化方式(蒸汽、微波等)和米饭蒸煮时的加水量等。

2.6 籼型糙米各评价指标的相关性分析

相关性分析揭示了籼型糙米营养成分、质构特性与体外消化特性间的多维关联关系(图7)。例如,膳食纤维与绝大多数评价指标均存在显著相关性,这表明糙米皮层和胚芽不仅作为营养物质的富集部位影响其营养品质,还在一定程度上影响糙米米饭的质构特性及体外消化过程。此外,糙米米饭的eGI同样与多个关键指标呈现显著相关性。相关性分析从统计学角度上为筛选适宜全谷物产品开发的籼型糙米品种提供了参考依据,同时也为后续优化这些糙米的食用品质或消化特性等指明研究方向。

表3 不同品种籼型糙米一级动力学参数和eGI值

Table 3 Primary kinetic parameters and eGI of different varieties of indica brown rice

糙米品种名	$C_{\infty}/\%$	K/min^{-1}	R^2	$AUC/(\%\cdot\text{min})$	HI	eGI
精白米	66.51	0.034 4	0.990 6	10 041.45 $\pm$ 33.73	65.64 $\pm$ 0.22 ^a	75.75 $\pm$ 0.12 ^a
浓香 42	49.83	0.025 9	0.996 1	7 056.33 $\pm$ 43.15	46.12 $\pm$ 0.28 ^d	65.03 $\pm$ 0.15 ^d
中早 39	44.54	0.022 4	0.993 3	6 066.68 $\pm$ 278.64	39.66 $\pm$ 1.82 ^f	61.48 $\pm$ 1.00 ^f
黄华占	48.69	0.034 2	0.988 6	7 314.83 $\pm$ 234.55	47.81 $\pm$ 1.53 ^d	65.96 $\pm$ 0.84 ^d
广粮香 2 号	52.71	0.030 5	0.987 4	7 763.07 $\pm$ 124.25	50.74 $\pm$ 0.81 ^c	67.57 $\pm$ 0.45 ^c
桂野香占	54.34	0.030 1	0.992 1	7 985.80 $\pm$ 136.80	52.20 $\pm$ 0.89 ^c	68.37 $\pm$ 0.49 ^c
桂丰 9 号	58.60	0.023 1	0.995 6	8 036.07 $\pm$ 72.78	52.53 $\pm$ 0.48 ^c	68.55 $\pm$ 0.26 ^c
菁华粉稻	47.49	0.023 1	0.995 2	6 523.38 $\pm$ 142.26	42.64 $\pm$ 0.93 ^e	63.12 $\pm$ 0.51 ^e
广 8 优龙丝苗	57.70	0.032 2	0.994 9	8 572.28 $\pm$ 190.69	56.03 $\pm$ 1.25 ^b	70.47 $\pm$ 0.68 ^b

注: 不同字母表示有显著性差异 ($P<0.05$)。

3 结论

本研究系统评估了不同粳型糙米品种在营养成分、活性物质、抗氧化能力、质构及体外消化特性及其与精白米的差异性。结果显示糙米在蛋白质、脂肪、膳食纤维以及 GABA、总游离多酚和总游离黄酮等功能性成分方面均显著优于精白米，其抗氧化作用也更为突出。同时，糙米米饭的 eGI 普遍低于精白米，其中中早 39 品种的 eGI(61.48) 接近低 GI 食品 (eGI<55) 阈值，表明粳型糙米在开发低 GI 主食中相比精白米等传统主食具有较大潜力。各项指标间的显著相关性进一步揭示，糙米皮层和胚芽中的丰富营养成分不仅提升了其健康功能，还在一定程度上影响了米饭的口感和消化特性。

基于本研究结果，建议在粳型糙米相关产品的开发和加工应用中，结合品种优选（兼顾营养、质构与消化特性）、工艺优化（提高糙米食用感官品质）、功能化开发（开发即食糙米制品、复合谷物食品或功能性代餐产品，满足特定人群需求）和贮藏技术升级（考虑糙米脂肪含量较高且易氧化），进一步提升其营养功能、感官品质与市场竞争力，从而有助于改善糙米推广难题。

参考文献

- [1] 付宸睿,高婷婷,孙斯远,等.全谷物糙米的营养特性及其应用研究进展[J].粮食问题研究,2023,4:53-56.
- [2] HU EA, PAN A, MALIK V, et al. White rice consumption and risk of type 2 diabetes: meta-analysis and systematic review [J]. BMJ, 2012, 344: e1454.
- [3] REYNOLDS A, MANN J, CUMMINGS J, et al. Carbohydrate quality and human health: a series of systematic reviews and meta-analyses [J]. The Lancet (British edition), 2019, 393(10170): 434-445.
- [4] 吕呈蔚,岳玉兰,王政,等.糙米营养价值及加工技术研究进展[J].粮油食品科技,2020,28(6):140-144.
- [5] 张芳,李玲玲,于非凡,等.不同产地和品种发芽糙米的理化特性与食用品质研究[J].食品安全质量检测学报,2023,14(10):182-190.
- [6] GUNARATNE A, WU K, LI D, et al. Antioxidant activity and nutritional quality of traditional red-grained rice varieties containing proanthocyanidins [J]. Food Chem, 2013, 138(2-3): 1153-1161.
- [7] 叶玲旭,周闲容,马晓军,等.不同品种糙米营养品质与糊化特性分析[J].中国食品学报,2018,18(2):280-287.
- [8] 吴晓娟,从竞远,吴伟,等.糙米发芽前后营养成分的变化及其对发芽糙米糊化特性的影响[J].食品科学,2017,38(18):67-72.
- [9] 靳玉龙.GI值的测定方法和影响因素及低GI食品生理学功能的研究进展[J].现代食品科技,2024,40(3):350-360.
- [10] 陈恩成,张名位,彭超英,等.比色法快速测定糙米中 γ -氨基丁酸含量研究[J].中国粮油学报,2006,21(1):125-128.
- [11] SHEN S, WANG Y, LI M, et al. The effect of anaerobic treatment on polyphenols, antioxidant properties, tocols and free amino acids in white, red, and black germinated rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 19: 641-648.
- [12] PANG Y, AHMED S, XU Y, et al. Bound phenolic compounds and antioxidant properties of whole grain and bran of white, red and black rice [J]. Food Chem, 2018, 240: 212-221.
- [13] TI H, ZHANG R, ZHANG M, et al. Dynamic changes in the free and bound phenolic compounds and antioxidant activity of brown rice at different germination stages [J]. Food Chemistry, 2014, 161: 337-344.
- [14] SOMPONG R, SIEBENHANDL-EHN S, LINSBERGER-MARTIN G, et al. Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka [J]. Food Chemistry, 2011, 124(1): 132-140.
- [15] TI H, LI Q, ZHANG R, et al. Free and bound phenolic profiles and antioxidant activity of milled fractions of different indica rice varieties cultivated in southern China [J]. Food Chem, 2014, 159: 166-174.
- [16] ENGLYST HN, KINGMAN SM, CUMMINGS JH. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions [J]. Eur J Clin Nutr, 1992, 46(Suppl 2): S33-S50.
- [17] 缪铭.慢消化淀粉的特性及形成机理研究[D].无锡:江南大学,2009.
- [18] GONI I, GARCIAALONSO A, SAURACALIXTO F. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index [J]. Nutrition Research, 1997, 17(3): 427-437.
- [19] KHATOON S, GOPALAKRISHNA AG. Fat-soluble nutraceuticals and fatty acid composition of selected Indian rice varieties [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2004, 81(10): 939-943.
- [20] 邵雅芳.稻米的营养功能特点[J].中国稻米,2020,26(6):1-11.
- [21] 毛海锋,卢黄华,曾端辉,等.碾白精度对稻米营养成分及氨基酸组成的影响[J].粮食与饲料工业,2014,9:1-3.
- [22] MUDGIL D, BARAK S. Composition, properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 61: 1-6.
- [23] 吴永康.碾减率对籼米理化性质及蒸煮食味品质的影响[D].长沙:中南林业科技大学,2022.
- [24] MILLER JB, PANG E, BRAMALL L. Rice: a high or low glycemic index food? [J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 1992, 56(6): 1034-1036.
- [25] 刘彦霄雪.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.
- [26] HELI Z, HONGYU C, DAPENG B, et al. Recent advances of γ -aminobutyric acid: Physiological and immunity function, enrichment, and metabolic pathway [J]. Frontiers in Nutrition (Lausanne), 2022, 9: 1076223.
- [27] VAUZOUR D, RODRIGUEZ-MATEOS A, CORONA G, et al. Polyphenols and human health: prevention of disease and mechanisms of action [J]. Nutrients, 2010, 2(11): 1106-1131.

- [28] MIDDLETON E, KANDASWAMI C, THEOHARIDES TC. The effects of plant flavonoids on mammalian cells: implications for inflammation, heart disease, and cancer [J]. *Pharmacological Reviews*, 2000, 52(4): 673-751.
- [29] ZHAO J, LAHIRI-CHATTERJEE M, SHARMA Y, et al. Inhibitory effect of a flavonoid antioxidant silymarin on benzoyl peroxide-induced tumor promotion, oxidative stress and inflammatory responses in SENCAR mouse skin [J]. *Carcinogenesis*, 2000, 21(4): 811-816.
- [30] 邹磊,甄少波,宋杨.食品抗氧化能力检测方法的研究进展[J].*食品工业科技*,2011,32(6):463-466.
- [31] 张玉荣,周显青,杨兰兰.大米食味品质评价方法的研究现状与展望[J].*中国粮油学报*,2009,24(8):155-160.
- [32] 隋勇,施建斌,蔡沙,等.不同品种糙米营养品质和理化特性比较[J].*现代食品科技*,2023,39(6):37-43.
- [33] GRUNDY MML, EDWARDS CH, MACKIE AR, et al. Re-evaluation of the mechanisms of dietary fibre and implications for macronutrient bioaccessibility, digestion and postprandial metabolism [J]. *British Journal of Nutrition*, 2016, 116(5): 816-833.
- [34] WANG S, CHAO C, CAI J, et al. Starch-lipid and starch-lipid-protein complexes: A comprehensive review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(3): 1056-1079.
- [35] SUN L, MIAO M. Dietary polyphenols modulate starch digestion and glycaemic level: a review [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(4): 541-555.
- [36] 吴艺婕.不同蒸煮条件对黑米饭品质及低GI特性的影响[D].武汉:华中农业大学,2022.
- [37] 王浩瑞,李小平.血糖生成指数测定方法及加工方式对谷物血糖生成指数的影响研究进展[J].*食品科学*,2023,44(11):338-347.