

不同产地和品种发芽糙米的理化特性与食用品质研究

张芳¹, 李玲玲¹, 于丰凡¹, 刘冠卉^{1*}, 戴波², 贾继荣², 何文霞³, 屠洁³

(1. 江苏科技大学粮食学院, 镇江 212100; 2. 江苏省粮油质量监测中心, 南京 210031;

3. 江苏科技大学生物技术学院, 镇江 212100)

摘要: **目的** 研究发芽对12种不同产地与品种的糙米的理化特性和食用品质的影响。**方法** 采用不同浸泡液、低温等方式处理糙米, 使之发芽, 根据 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)含量筛选出8种糙米。进一步比较其淀粉与直链淀粉、总酚含量, 以及感官品质、质构特性和糊化特性。**结果** 以5 mg/mL谷氨酸钠溶液浸泡发芽对发芽糙米中GABA的富集效果最好。其中, 蚌埠淮粳糯20的GABA含量可达(261.6 $\pm$ 4.3) mg/100 g; 泰兴9108的GABA含量达(263.1 $\pm$ 6.8) mg/100 g, 二者发芽率均可达96%。发芽使各品种糙米的色泽向黄红色偏移, 总酚含量显著增加($P<0.05$), 淀粉与直链淀粉含量均显著降低($P<0.05$)。发芽后, 糙米的糊化崩解值、回生值均显著下降($P<0.05$)。不同品种的糙米米饭食用品质均好转, 表现为体积膨胀率显著提高($P<0.05$)、硬度显著降低($P<0.05$), 咀嚼性、胶着性降低, 黏性增强, 感官评分显著提高($P<0.05$)。**结论** 地区和品种是影响发芽糙米GABA含量的重要因素, 发芽能有效改善糙米的营养与食用品质。

关键词: 糙米; 发芽; γ -氨基丁酸; 产地; 品种

Study on physicochemical characteristics and edible quality of germinated brown rice from different origins and varieties

ZHANG Fang¹, LI Ling-Ling¹, YU Feng-Fan¹, LIU Guan-Hui^{1*}, DAI Bo²,
JIA Ji-Rong², HE Wen-Xia³, TU Jie³

(1. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China;

2. Jiangsu Grain and Oil Quality Monitoring Center, Nanjing 210031, China; 3. College of Biotechnology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of germination on the physicochemical properties and edible quality of brown rice. **Methods** Brown rice was pretreated by soaking in different solutions or low temperature to make it germinate. The γ -aminobutyric acid (GABA) content was determined to select 8 varieties of brown rice for further study. The content of starch, amylose, total phenol, sensory quality, texture and gelatinization were further compared. **Results** The GABA content was mostly improved by soaking with 5 mg/mL sodium glutamate solution, the GABA content of the brown rice 'Huainuo 20' and 'Nanjing 9108' reached (261.6 $\pm$ 4.3) and (263.1 $\pm$ 6.8) mg/100 g, respectively. Meanwhile,

基金项目: 镇江市重点研发计划项目(NY2021030)、苏州市农业科技创新项目(SNG2022029)、江苏科技大学大学生创新项目

Fund: Supported by the Key Science and Technology Project of Zhenjiang (NY2021030), the Agricultural Science and Technology Innovation Project of Suzhou (SNG2022029), and the Undergraduate Innovation Program of Jiangsu University of Science and Technology

***通信作者:** 刘冠卉, 硕士, 副教授, 主要研究方向为粮食生物技术与功能性食品。E-mail: liuguanh@163.com

***Corresponding author:** LIU Guan-Hui, Master, Associate Professor, Jiangsu University of Science and Technology, No.666, Changhui Road, Dantu District, Zhenjiang 212100, China. E-mail: liuguanh@163.com

the germination rates of these 2 varieties of brown rice both reached up to 96%. The color of all varieties of brown rice was changed to reddish and yellowish by the germination processing, and the content of total phenolics increased significantly ($P<0.05$), while the content of starch and amylose decreased significantly ($P<0.05$). After germination, the gelatinization disintegration values and retrogradation value of the brown rice both decreased significantly ($P<0.05$). The edible quality of different varieties of brown rice was improved after germination, which displayed by significantly increasing of the volume expansion rate and the stickiness ($P<0.05$) and significantly decreasing of the hardness, chewiness and adhesiveness. The sensory score was finally significantly improved ($P<0.05$). **Conclusion** Locality of growth and variety are important factors affecting GABA content of germinated brown rice, and germination can effectively improve the nutrition and edible quality of brown rice.

KEY WORDS: brown rice; germination; γ -aminobutyric acid; origins; varieties

0 引 言

在“健康中国”“节粮减损”的战略背景下,全谷物食品的开发正成为谷物加工、消费与科学研究的热点。糙米是稻谷脱去稻壳,含有皮层、胚与胚乳的全谷物,其膳食纤维、维生素和酚类物质含量丰富,与大米相比,营养价值更高^[1]。目前已生产和开发了诸如糙米粉、糙米酵素、糙米饮料等产品。但由于留有稻谷皮层,糙米存在口感较粗糙、蒸煮困难、食味与加工品质不佳的问题^[1-2]。发芽是一种有效改善谷物食用与营养品质的方法。在发芽过程中,糙米的蛋白酶、淀粉酶、植酸酶等内源性酶被激活,蛋白质与淀粉等大分子物质发生降解,纤维质的皮层发生软化,米粒结构变得疏松,从而改善发芽糙米的蒸煮食用品质,同时能改善发芽糙米制品的营养品质与加工特性^[3]。发芽也是富集 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA)的有效途径^[4-5]。GABA 是一种四碳非蛋白质氨基酸,是高等动物神经系统中重要的抑制性神经递质^[6],已被证实具有诱导睡眠、抗抑郁、降血压、调节血糖和血脂等多种生理功能^[7-8],是一种安全性高、功效良好的保健食品原料。

目前,关于糙米发芽的研究主要集中在微酸性电解水浸泡^[4]、超声辅助^[9]、循环加湿^[10]等发芽工艺方面,但对不同产地和品种间的 GABA 富集差异与食用品质差异研究较少。我国稻谷品种众多,不同地区的栽培条件也会导致稻谷的加工特性和食用品质存在差异。因此,研究不同地区和品种糙米发芽富集 GABA 能力、理化特性与食用品质的影响,对糙米生产和进一步开发酵素、黄酒、米醋、汤圆等米制品具有重要指导意义。本研究以 10 个地区 12 种品种的糙米为研究对象,探究不同品种与产地的发芽糙米中 GABA、淀粉、直链淀粉与总酚含量、糊化特性等理化性质和食用品质,以期后续筛选和培育适用于加工食品的专用稻谷品种以及糙米产品的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究收集 10 个地区 12 种品种的稻谷,实验室砻谷成糙米,样品信息如下:句容南粳 46 (C1)、太仓常农粳 12 (C2)、太仓南粳 46 (C3)、淮安金粳 818 (C4)、如皋 5055 (C5)、蚌埠淮糯 20 (C6)、太仓 3908 (C7)、大丰 9108 (C8)、泰兴 5055 (C9)、常香粳 1813 (C10)、泰兴 9108 (C11)、金坛镇糯 20 (C12)。

纳米硒(Se 含量 $\geq 1\%$, 格美微量元素有限公司); 纳米硅(Si 含量 $\geq 100\text{g/L}$, 英国戈普敦农业化学品公司); 淀粉含量测试盒(A148-1-1)、直链淀粉含量测试盒(A152-1-1)(南京建成生物工程研究所); 福林酚、甲醇、没食子酸、无水碳酸钠、次氯酸钠(分析纯)、GABA(纯度 $\geq 98\%$)(国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

JLG-IIA 砻谷机、JSFM-II 粮食水分测试粉碎磨(中储粮成都储藏研究院有限公司); TA.XTC-18 质构仪(上海保圣实业发展有限公司); RVA-TEC 快速黏度分析仪(瑞典 Perten 公司); NR10QC 色差仪(深圳三恩驰科技有限公司); PR223ZH/E 万分之一分析天平[奥豪斯仪器(常州)有限公司]; Vortex Point-2 迷你漩涡仪(上海力辰邦西仪器科技有限公司); GHP-9160 隔水式培养箱(上海一恒科学仪器有限公司); GenLee16R 高速冷冻离心机(湖南湘立科学有限公司)。

1.3 方 法

1.3.1 发芽糙米样品制备

参照 NY/T 3522—2019《发芽糙米加工技术规范》并略作修改,选用籽粒饱满的糙米(含低温处理后的糙米),用 1%的 NaClO 溶液浸泡 10 min,再用蒸馏水冲洗 2~3 遍沥干,分别以下列方式处理: 1)蒸馏水浸泡; 2)以 2 和 5 mg/mL 谷氨酸钠溶液、稀释 500 倍和稀释 1000 倍的纳米硅溶液、5 和 10 mg/L 纳米硒溶液为浸泡液浸泡; 3) -18 和 4℃低温处

理 24 h 后再以蒸馏水浸泡。以上各组均于 30℃ 条件下浸泡 10 h, 沥去浸泡液, 盖上 2 层纱布, 在培养箱中 35℃ 恒温发芽, 每间隔 4 h 喷洒一次浸泡液或蒸馏水, 保持 35℃、80% 的相对湿度; 发芽结束后, 立即将发芽糙米转入 100℃ 烘箱干燥 5 min, 终止发芽, 然后低温 50℃ 烘干 2~3 h, 待水分降至 14% 以下, 用粉碎磨将发芽糙米粉碎过 60 目筛, 密封袋封装后于 4℃ 的冰箱中保存备用。

1.3.2 GABA 含量测定

取样品粉末 1.000 g, 加入 8 mL 蒸馏水, 漩涡仪振荡 30 s 后, 振荡提取 90 min, 然后 8000 r/min 离心 20 min; 再用 0.22 μm 水系针孔过滤头过滤上清液 1 mL 于离心管中待测。采用比色法测量 GABA 含量^[11], 以 GABA 浓度为横坐标, 吸光值为纵坐标, 标准曲线方程为 $Y=1.1841X-0.0068$, $r^2=0.9961$, 结果以 mg/100 g DW 表示。

1.3.3 总酚含量测定

称取样品粉末 1.000 g, 加 80% 甲醇 10 mL 恒温振荡 2 h, 保留上清液; 二次提取振荡后合并滤液, 8000 r/min 离心 10 min。采用 Folin-Ciocalteu 法分析总酚含量^[12], 以没食子酸浓度为横坐标, 吸光值为纵坐标, 标准曲线方程为 $Y=3.6939X+0.087$, $r^2=0.9979$, 结果以每克样品中没食子酸的毫克当量(mg GAE/g DW)表示。

1.3.4 淀粉、蛋白质、水分含量测定

淀粉与直链淀粉含量采用试剂盒测定; 蛋白质含量采用 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的燃烧法测量; 水分含量采用 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法测量。

1.3.5 芽长与发芽率统计

在发芽 24 h 的糙米中随机取出 30 粒为一组, 测量发芽糙米芽长; 随机取出 50 粒为一组, 统计发芽(芽长约 1~3 mm)与未发芽颗粒数, 按照公式(1)计算发芽率。

$$\text{发芽率}/\% = \text{发芽糙米颗粒数}/50 \times 100\% \quad (1)$$

1.3.6 色差、糊化与质构特性测定

参照 XU 等^[13]的方法, 使用色差仪进行测量 5 次, 读取 L^* (亮度值)、 a^* (红色值)、 b^* (黄色值)。按照 GB/T 24852—2010《大米及米粉糊化特性测定 快速粘度仪法》规定, 称取 3 g 糙米粉, 加 25 mL 水(按样品水分校正), 使用标准 RVA 程序进行扫描和分析^[14]。参照 GB/T 15682—2008《粮油检验稻谷、大米蒸煮食用品质感官评价方法》蒸煮糙米和发芽糙米, 称 5 g 糙米或发芽糙米放入小罐中, 快速漂洗 3 次, 按照 1.3 倍水量浸泡 30 min, 蒸 35 min、冷却 60 min 后待测。质构特性参照文献^[15]并略做修改。用 TA/20R 柱形探头对糙米和发芽糙米饭进行全质构测试。测试类型: 下压; 目标模式: 形变; 目标数值: 50.000%; 时间: 5.00 s; 测试前速度 2 mm/s; 测试速度 1.00 mm/s; 测试后速度 1.00 mm/s; 触发点数值: 5.000 gf。

1.3.7 蒸煮与食用品质测定

分别测定糙米的原体积(V_1)及对应的米饭体积(V_2), 按公式(2)计算体积膨胀率^[16]。

$$\text{体积膨胀率}/\% = V_2/V_1 \times 100\% \quad (2)$$

由 6 位经培训的从业人员按国标 GB/T 15682—2008 附录 B 方法, 从气味、外观、适口性、滋味、冷饭质地等方面对糙米饭进行评分。

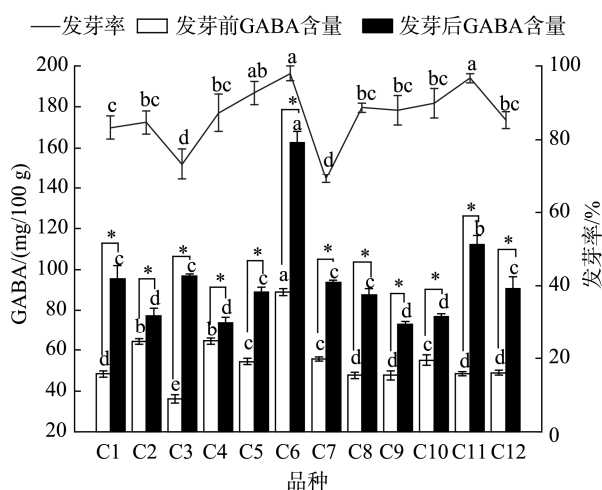
1.4 数据处理

所有测试均重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示, 数据采用 SPSS 22.0 软件分析, 显著性差异用 t 检验和单因素方差分析(SNK 法), 采用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 糙米发芽率及发芽糙米中 GABA 含量

发芽率与 GABA 含量是评价发芽糙米潜在营养质量和消化率的重要指标^[2,5]。如图 1 所示, 蒸馏水浸泡发芽后不同糙米中 GABA 含量均显著提高, 其中 C1、C3、C5、C6、C7、C8、C11、C12 等 8 个品种的发芽糙米中 GABA 含量较高, 将用作后续实验研究。其中, 粳糯稻 C6 的初始 GABA 含量、发芽后 GABA 含量均最高, 分别为 (88.8±1.7) mg/100 g 和 (162.8±5.5) mg/100 g, 其发芽率为 98%, 是极具 GABA 富集潜力的稻谷; 在粳稻中, 泰兴产的南粳 9108 (C11) 发芽后 GABA 含量达到 (112.2±4.5) mg/100 g, 为未发芽前的 2.3 倍, 发芽率达 96.7%, 也是良好的 GABA 富集来源稻谷。



注: 不同小写字母表示不同品种之间有显著性差异($P<0.05$), *表示发芽前后有显著性差异($P<0.05$)。

图1 不同地区与品种对糙米GABA含量与发芽率的影响
Fig.1 Effects of different regions and varieties on GABA content and germination rate of brown rice

由图 1 可知, 不同地区种植的同一种稻谷, 如 C1 和 C3、C5 和 C9、C8 和 C11, 其原 GABA 含量及富集增长量均有差异。这是由于不同地区的土壤养分、种植环境的差异所致, 类似的, 有研究显示产地和气温的不同会影响可可豆中 GABA 的含量^[17], 光照的不同会使植物的 GABA 代谢发生变化^[18]。值得注意的是, C8 和 C11 在发芽前 GABA 含量没有显著差异, 但发芽后 GABA 含量出现显著差异, 这可能与谷氨酸脱羧酶(glutamate decarboxylase, GAD)具有时空差异性有关, 即在不同地区、不同生长期的同一种植物内 GAD 的活力不同^[19]。

植物在受胁迫与发芽时, GABA 主要通过 L-谷氨酸在 GAD 催化下脱羧生成 GABA 的 GABA 支路途径和多胺在多胺氧化酶(polyamine oxidases, PAO)等作用下的多胺代谢途径产生积累。因此, 采用谷氨酸钠浸泡及营造冷藏、冷冻等逆境是常见的 GABA 富集方式^[20]。纳米硅、纳米硒是近年来农业上使用的新型多功能作物肥料, 对作物生长具有多种调节作用。有研究表明, 合适浓度的纳米硅/硒可以促进种子发芽^[21-22]。故本研究进一步采用谷氨酸钠、纳米硅肥和纳米硒肥浸泡及冷藏、冷冻方式处理 C1、C3、C5、C6、C7、C8、C11、C12 糙米, GABA 含量和发芽率结果分别见表 1 和表 2。

不同浓度的谷氨酸钠浸泡均能使 GABA 含量显著增加($P<0.05$), 这可能是由于谷氨酸钠增加了 GAD 的可用底物, 从而增加了 GABA 的生成量^[20]。冷冻与冷藏的低温环境会破坏细胞内部结构、降低细胞质 pH, 有利于谷氨酸脱羧和发芽糙米中 GABA 形成^[23]。经冷冻与冷藏

后, 与仅蒸馏水浸泡发芽处理相比, C3、C6、C11 中 GABA 含量下降, 而其余品种 GABA 含量有所升高。冷藏或冻藏等低温处理种子均可使发芽率提升, 在本研究中却没有发现此现象, 可能是与文献报道相比, 本研究中的低温贮藏的时间较短所致^[24-25]。

与蒸馏水浸泡发芽相比, 纳米硅浸泡发芽的糙米中 GABA 含量呈下降趋势(除 C12 外)。500 倍稀释浓度的 C12 中 GABA 含量显著高于 1000 倍稀释浓度, 这可能是纳米硅可以增强植物对环境的抗性, 从而减少 GABA 的生成, DAS 等^[26]发现硅可以抑制盐胁迫下水稻中的 GAD 与 PAO 活性, 从而减少 GABA 的生成。但浓度对其余品种的糙米 GABA 含量影响并无显著差异, 其原因这还需要进一步研究。采用纳米硒浸泡后, 除 C6 及 5 mg/mL 纳米硒浸泡的 C11 外, 其他品种糙米的 GABA 含量均高于蒸馏水浸泡糙米。鲁红侠^[27]的研究发现, 低浓度的亚硒酸钠浸泡辽梗 294 糙米对其 GAD 酶有一定的激活作用, 导致 GABA 含量上升; 但后期由于 GABA 转氨酶(GABA-T)活性增强使得 GABA 含量又出现下降。

以 GABA 含量为主要指标、综合考虑成本, 从谷氨酸钠、纳米硒、纳米硅、低温 4 种发芽处理方式中各选择一种进行发芽率实验。由表 1~2 可知, 5 mg/mL 谷氨酸钠处理组的 GABA 含量明显高于其他处理组, 且发芽率也较高。而本研究中纳米材料对糙米的发芽率影响不一, 这与不同品种糙米所需要的纳米材料浓度有关。一般来说, 低浓度的纳米材料能穿透植物种皮, 利于种子吸收水分, 但高浓度的纳米材料对植物有致毒作用^[21,28]。

表 1 发芽方式对 GABA 含量的影响(mg/100 g)
Table 1 Effects of germination methods on GABA content (mg/100 g)

发芽方式	C1	C3	C5	C6	C7	C8	C11	C12
蒸馏水浸泡	95.3±8.5 ^c	96.8±1.2 ^c	88.8±2.4 ^c	162.8±5.5 ^a	93.6±1.1 ^c	87.5±3.1 ^c	112.2±4.5 ^b	90.5±6.0 ^c
谷氨酸钠 2 mg/mL	112.1±2.8 ^c	135.3±9.6 ^b	117.0±9.2 ^c	174.4±6.8 ^a	139.0±8.5 ^b	116.0±3.8 ^c	147.5±5.6 ^b	138.2±7.9 ^b
谷氨酸钠 5 mg/mL	234.0±7.7 ^b	218.6±3.1 ^c	207.9±9.6 ^c	261.6±4.3 ^a	238.4±9.4 ^b	213.7±5.3 ^c	263.1±6.8 ^a	219.4±7.3 ^c
纳米硅稀释 500 倍	92.8±0.7 ^{bc}	86.4±3.3 ^{cd}	76.4±3.0 ^c	100.9±5.5 ^a	85.2±4.2 ^{cd}	81.3±3.1 ^{de}	88.4±3.9 ^{cd}	96.5±4.8 ^{ab}
纳米硅稀释 1000 倍	91.3±1.9 ^b	84.0±4.5 ^{cd}	79.6±2.2 ^d	97.9±2.6 ^a	84.2±1.1 ^{cd}	79.4±1.5 ^d	92.5±3.0 ^b	88.9±3.0 ^{bc}
纳米硒 5 mg/L	104.0±2.6 ^c	109.4±5.9 ^{bc}	103.1±1.5 ^c	130.9±3.9 ^a	116.0±4.0 ^b	94.0±2.4 ^d	108.9±4.6 ^{bc}	110.9±2.6 ^{bc}
纳米硒 10 mg/L	116.5±4.9 ^c	102.8±2.2 ^f	134.1±2.2 ^d	152.4±5.2 ^a	144.4±1.9 ^{bc}	114.3±1.8 ^c	139.2±4.9 ^{cd}	147.0±1.9 ^{ab}
-18℃, 24 h	100.4±1.5 ^c	94.5±3.5 ^d	93.8±2.2 ^d	133.6±2.6 ^a	102.8±4.4 ^c	91.1±2.4 ^d	108.7±1.8 ^b	111.1±3.4 ^b
4℃, 24 h	99.4±1.9 ^d	92.5±1.1 ^d	105.5±2.6 ^c	147.3±5.5 ^a	107.0±2.4 ^c	97.4±4.8 ^d	110.9±4.5 ^c	135.6±2.8 ^b

注: 同行中不同字母表示有显著性差异($P<0.05$)。

2.2 不同品种发芽糙米的理化性质

采用 5 mg/mL 谷氨酸钠溶液浸泡发芽 8 种糙米。理化性质结果如表 3 和表 4 所示。芽长均达到了 1 mm 以上, 其中 C6 芽长最长, 芽长达到(3.27±0.70) mm, 发芽最为明显。发芽后, 大部分糙米 L^* 略有下降但差异不显著, a^* 略有上升但差异也不显著; C1、C6、C8、C12 的 b^* 向黄色方向增大且差异显著, 其余品种无显著差异。这是由于, 随着干燥时间的增加, 发芽糙米中还原糖与氨基酸产生美拉德反应, 当颗粒温度处于 90℃以上时, 发芽糙米表面发生褐变, L^* 降低、

a^* 与 b^* 升高^[29]。
发芽处理使各品种的糙米总酚含量均显著增加, 其中 C11 增加最多, 由 0.484 mg GAE/g 增加到 0.653 mg GAE/g, 增加了 35%; C6 也增加了 23%。发芽过程中, 糙米内源酶被激活, 能合成更多的酚类物质或使得部分结合性酚类物质被释放出来^[30]。在萌发期间, 淀粉的分解代谢活跃, 淀粉含量与直链淀粉含量均显著下降。发芽后, C6 中直链淀粉占淀粉百分比仍为 1.5%; 而 C11 中直链淀粉占淀粉百分比从 17%降至 15%, 但发芽前后无显著差异。

表 2 发芽方式对发芽率的影响(%)
Table 2 Effects of germination methods on germination rate (%)

发芽方式	C1	C3	C5	C6	C7	C8	C11	C12
蒸馏水浸泡	83.3±3.1 ^e	73.3±4.2 ^f	92.7±3.1 ^{bc}	98.0±2.0 ^a	65.3±1.2 ^g	88.7±1.2 ^{cd}	96.7±1.2 ^{ab}	85.3±2.3 ^{de}
谷氨酸钠 5 mg/mL	85.3±4.2 ^b	69.3±3.1 ^c	93.3±4.2 ^a	96.0±2.0 ^a	70.0±6.0 ^c	80.7±4.2 ^b	96.0±3.5 ^a	84.0±4.0 ^b
纳米硅稀释 1000 倍	88.7±3.1 ^{bc}	74.7±5.0 ^e	82.0±2.0 ^{cd}	96.7±1.2 ^a	64.7±5.0 ^f	88.0±2.0 ^{bc}	94.0±2.0 ^{ab}	77.3±3.1 ^{de}
纳米硒 10mg/L	81.3±3.5 ^b	78.7±5.1 ^b	92.1±3.0 ^a	96.7±1.3 ^a	73.7±4.1 ^b	88.7±3.0 ^a	95.3±3.5 ^a	78.0±5.1 ^b
4℃, 24 h	87.3±1.2 ^b	68.0±2.0 ^d	89.3±3.1 ^b	98.0±2.0 ^a	74.0±5.3 ^c	87.3±5.0 ^b	93.3±1.2 ^{ab}	79.3±4.2 ^c

注: 同一行中不同字母表示有显著性差异($P<0.05$)。

表 3 发芽对糙米芽长、总酚、淀粉和直链淀粉含量的影响
Table 3 Effects of germination on bud length, total phenol, starch and amylose content of brown rice

品种	芽长/mm		总酚/(mg GAE/g)		淀粉/(g/100 g)		直链淀粉/(g/100 g)	
	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后
C1	-	1.29±0.59	0.484±0.008	0.634±0.049*	67.461±1.051*	59.580±1.229	15.010±0.850*	11.588±0.895
C3	-	2.19±0.99	0.475±0.009	0.561±0.064*	70.589±1.165*	60.723±1.568	16.305±0.476*	12.104±0.197
C5	-	2.35±0.96	0.602±0.058	0.657±0.068*	69.927±1.260*	58.305±0.720	14.141±0.533*	10.787±0.303
C6	-	3.27±0.70	0.642±0.064	0.787±0.079*	67.665±1.885*	55.297±1.820	1.015±0.198*	0.849±0.062
C7	-	2.03±0.97	0.552±0.028	0.646±0.014*	70.915±0.872*	64.304±1.437	13.386±0.784*	11.056±0.406
C8	-	1.33±0.63	0.462±0.037	0.548±0.058*	66.955±1.512*	56.777±1.395	15.518±1.012*	12.785±1.106
C11	-	1.47±0.60	0.484±0.072	0.653±0.069*	73.753±1.059*	67.268±1.536	12.522±0.586*	10.001±0.527
C12	-	1.98±0.90	0.640±0.040	0.732±0.050*	71.696±1.335*	62.059±1.006	0.896±0.097*	0.501±0.048

注: -表示无此项; *表示发芽前后的显著性差异($P<0.05$), 下同。

表 4 发芽对糙米色度值的影响
Table 4 Effects of germination on chroma value of brown rice

品种	L^*		a^*		b^*	
	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后
C1	61.73±1.79	60.31±0.62	3.84±0.63	4.88±0.45*	13.07±0.86	17.22±1.31*
C3	64.33±1.33	63.38±0.38	3.51±0.16	4.01±0.56	14.13±0.17	16.95±1.63
C5	60.52±1.13	58.32±1.15	3.76±0.36	4.00±0.26	12.79±1.32	14.09±0.06
C6	70.92±0.96	68.76±1.17	4.00±0.27	4.84±0.22	15.84±0.85	17.96±0.55*
C7	61.56±0.36	63.18±0.97	3.92±0.27	4.31±0.05	13.49±0.68	16.73±0.70
C8	62.07±1.11	60.56±0.92	4.12±0.88	4.87±0.91	14.13±0.99	18.15±3.28*
C11	65.03±1.06	63.54±0.90	3.77±0.10	4.39±0.32	14.87±1.74	17.66±1.46
C12	67.78±0.51*	63.20±1.52	4.08±0.31	5.19±0.60	15.61±0.39	18.42±1.63*

2.3 不同品种发芽糙米的糊化特性

8 种糙米发芽前后的糊化特性结果见表 5。崩解值表征加热和剪切下的稳定性, 其值越小代表糙米粉的热稳定性越好。回生是糙米糊化的淀粉重新有序排列的过程, 回生值越小, 代表糙米粉的冷糊稳定性越好。发芽糙米的峰值黏度、低谷黏度、崩解值、终值黏度、回生值均显著降低。糙米在发芽过程中, 内源酶被激活, 使得淀粉降解、淀粉的刚性结构及分子量都下降的原因, 也与发芽后糙米中的直链淀粉比例、蛋白质与膳食纤维含量有关, 其现象与文献报道的结果一致^[31-32]。表明发芽糙米粉更适合加工米制品, 制成的产品不易回生耐贮藏。同时, 从表 5 中可知, 糯糙米 C6、C12 的崩解值与回生值远低于粳糙米, 其原因是糯糙米淀粉主要为支链淀粉, 热稳定性更高; 而直链淀粉含量高的粳糙米, 更易发生短期回生^[33]。

2.4 不同品种发芽糙米的食用品质

如表 6 所示, 发芽后的糙米蒸煮时更易吸水膨胀, 发芽糙米饭的膨胀体积率显著提高, 其原因是糙米表面完整的皮层限制了糙米蒸煮过程的吸水能力、体积膨胀程度及固形物的溶出, 发芽处理使糙米表面糠层变软并可能形成

微小裂缝, 因此发芽后的糙米在蒸煮过程中水分更容易进入米粒内部。米粒表面微结构的变化使水分更容易进入米粒内部, 导致发芽糙米蒸煮时吸水率增加^[34]。粳糙米发芽后, 米饭的色泽稍显偏暗, C3、C8 的亮度发生显著变化, 可能是由于发生了美拉德反应所致^[35]; 糯糙米发芽后, 米饭的亮度没有显著差异。

如表 7 所示。发芽后, 由于皮层被破坏, 发芽糙米更易吸水、淀粉易糊化, 故各品种发芽糙米饭的硬度均显著低于未发芽糙米饭, 这也和表 5 中黏度、崩解值、回生值显著降低的结果相一致。发芽糙米饭的黏性增大、咀嚼型降低、胶着性下降, 其中部分品种呈显著差异。这与感官评价得分相对应, 表现为发芽糙米饭结构较松散、柔软, 向下咀嚼不费力, 牙齿松开时能体会到米饭的黏性。

有研究表明, 蛋白质含量较低、直链淀粉含量适宜的米饭食味较好^[36]。在本研究中发现, 发芽后的糙米饭感官评分显著高于发芽前, 但在发芽前后的各个品种之间却无显著性差异。这可能是, 糙米与精米不同, 其品尝评分值除与蛋白质、淀粉、直链淀粉含量有关外, 还与脂肪、膳食纤维含量相关^[37]。目前尚缺少糙米化学成分与食味之间关系的分析研究。

表 5 发芽对糙米糊化特性的影响
Table 5 Effects of germination on pasting properties of brown rice

品 种	峰值黏度/cp		低谷黏度/cp		崩解值/cp		终值黏度/cp		回生值/cp		峰值时间/min	
	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后
C1	1982±12*	182±5	1274±82*	170±9	708±70*	12±4	2253±65*	385±20	979±17*	215±11	6.0±0.1	5.5±0.1
C3	2390±48*	443±17	1410±68*	356±27	980±20*	87±10	2241±57*	698±42	831±11*	342±15	5.8±0.1	5.8±0.2
C5	1842±52*	260±7	1137±78*	232±17	705±26*	28±10	2095±54*	497±32	958±24*	265±15	5.9±0.2	5.9±0.1
C6	666±13*	90±6	624±18*	86±7	42±5*	4±1	824±29*	143±5	200±11*	57±2	6.4±0.1	7.0±0.1
C7	1456±8*	373±23	1004±35*	304±32	452±27*	69±9	1730±49*	607±26	726±14*	303±6	5.9±0.1	5.7±0.1
C8	2012±30*	340±7	1152±62*	221±12	860±32*	119±5	2209±48*	482±10	1057±14*	261±2	5.7±0.2	5.2±0.1
C11	2044±30*	253±9	1215±75*	194±12	829±45*	59±3	2175±87*	427±15	960±12*	233±3	5.9±0.2	5.4±0.2
C12	536±14*	94±8	510±17*	89±9	26±3*	5±1	735±25*	150±8	225±8*	61±1	6.9±0.1	7.0±0.2

表 6 发芽对糙米饭体积膨胀率和色差的影响
Table 6 Effects of germination on volume expansion and chromatic aberration of brown rice

品种	膨胀体积率/%		<i>L</i> *		<i>a</i> *		<i>b</i> *	
	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后
C1	384.21±0.03	405.83±0.06*	60.52±1.0	56.09±1.35	0.53±0.22	1.11±0.23*	7.21±0.96	6.87±1.13
C3	371.93±0.04	393.98±0.14*	59.14±0.9*	54.51±0.15	0.59±0.13	0.87±0.16*	7.28±0.64	6.0±1.01
C5	382.86±0.03	402.44±0.12*	59.13±0.23	57.79±1.09	1.59±0.31	1.59±0.46	9.52±0.77	10.46±1.45
C6	324.07±0.08	329.37±0.07*	53.07±1.61	53.69±0.78	2.33±0.25*	1.42±0.10	8.74±1.36	7.16±0.45
C7	378.70±0.42	402.44±0.12*	57.55±1.5	56.86±1.26	1.31±0.56	0.68±0.38	7.29±1.25	6.83±1.6
C8	367.57±0.03	390.34±0.07*	61.18±1.71*	51.65±1.28	1.06±0.16	1.32±0.11	9.02±0.75*	6.3±0.9
C11	387.96±0.04	412.50±0.13*	57.43±1.70	54.39±1.28	1.58±0.31	1.71±0.15	8.52±1.52	8.36±0.77
C12	328.70±0.80	341.46±0.12*	56.54±0.66	56.49±0.97	1.7±0.51	1.5±0.32	9.28±1.59	9.0±0.33

表 7 发芽对糙米饭质地特性和感官评价的影响
Table 7 Effects of germination on texture characteristics and sensory evaluation of brown rice

品种	硬度/gf		黏性/(gf·s)		咀嚼性/gf		胶着性/gf		感官评价	
	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后	发芽前	发芽后
C1	347.48±31.88*	223.43±6.2	39.65±16.43	121.58±4.8*	61.56±10.06*	28.40±2.91	124.23±15.74*	76.87±3.02	60.67±1.53	70.33±1.53*
C3	314.44±30.78*	274.29±16.29	20.80±4.51	25.81±15.77	46.91±30.78	39.65±7.41	99.92±7.59	89.09±2.89	63.00±1.73	72.00±2.00*
C5	357.08±35.16*	245.99±9.74	15.64±7.58	48.3±18.53*	46.71±10.50	38.25±10.99	115.874±11.05	81.28±4.21	59.67±3.06	68.33±2.52*
C6	376.56±18.81*	293.44±6.72	23.11±3.56	35.66±12.88	48.25±4.05	36.64±8.65	105.72±7.87*	83.10±5.85	64.00±1.00	70.67±2.31*
C7	369.29±30.54*	263.32±12.29	36.41±19.55	54.87±15.84	70.37±17.06*	33.42±0.54	125.97±9.89*	80.14±6.10	59.00±3.46	72.00±1.00*
C8	355.64±24.26*	244.92±4.08	17.39±3.41	79.40±11.82*	52.46±10.14	45.73±6.64	121.29±14.28*	89.85±3.79	60.33±4.04	67.67±4.04*
C11	360.68±28.15*	229.0±18.93	24.58±1.09	47.95±7.54*	66.29±2.0*	37.77±12.85	120.50±10.27	77.14±8.86	62.67±3.06	68.33±2.08*
C12	280.42±29.52*	212.22±11.62	38.43±11.06	91.12±10.12*	33.58±2.21	22.63±8.09	86.77±6.57	59.07±9.38	61.33±4.16	69.33±2.52*

3 结 论

不同地区、品种的糙米经发芽后, GABA 含量均显著增加, 但增加量不同, 其中太仓南粳 46、蚌埠淮粳糯 20、金坛镇糯 20 的 GABA 增加较多。不同发芽方式中以 5 mg/mL 谷氨酸钠溶液浸泡发芽对 GABA 的富集效果最好。发芽后, 各品种发芽糙米的淀粉与直链淀粉含量均显著下降; 总酚含量均显著提高, 蚌埠淮粳糯 20 的总酚含量显著高于其他品种。发芽糙米的糊化崩解值、回生值下降。不同地区和品种的发芽糙米饭食味性能均好转, 表现为硬度显著降低, 咀嚼性、胶着性降低, 黏性增强, 感官评分显著提高。本研究可为后续生产不同的发芽糙米食品提供理论依据。有关不同地区与品种的糙米的发芽规律与机制, 还需结合栽培条件并通过蛋白质组学和代谢组学做深入研究。

参考文献

- [1] 郑子懿, 李成武, 李琳, 等. 比较发芽和固态发酵对糙米营养及感官品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(11): 4467–4473.
- ZHENG ZY, LI CW, LI L, *et al.* Comparison of effects of germination and solid state fermentation on nutrition and sensory quality of brown rice [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(11): 4467–4473.
- [2] LI HY, XU MH, YAO X, *et al.* The promoted hydrolysis effect of cellulase with ultrasound treatment is reflected on the sonicated rather than native brown rice [J]. Ultrason Sonochem, 2022, 83: 105920.
- [3] WEI Q, GUO YB, LIU XY, *et al.* Improving the eating quality of brown rice by defatting combined with hydrothermal treatment [J]. Food Res Int, 2022, 162(A): 112020.
- [4] TYAQI A, CHEN X, SHABBIR U, *et al.* Effect of slightly acidic electrolyzed water on amino acid and phenolic profiling of germinated brown rice sprouts and their antioxidant potential [J]. LWT-Food Sci Technol, 2022, 157: 113–119.
- [5] SUN Y, MEHMOOD A, BATTINO M, *et al.* Enrichment of gamma-aminobutyric acid in foods: From conventional methods to innovative technologies[J]. Food Res Int, 2022, 162(A): 111801.
- [6] HASEGAWA M, YAMANE D, FUNATO K, *et al.* Gamma-aminobutyric acid fermentation with date residue by a lactic acid bacterium, *Lactobacillus brevis* [J]. J Biosci Bioeng, 2018, 125(3): 316–319.
- [7] TIAN K, WANG YX, LI LX, *et al.* Neuronal death/apoptosis induced by intracellular zinc deficiency associated with changes in amino-acid neurotransmitters and glutamate receptor subtypes [J]. J Inorg Biochem, 2018, 179: 54–59.
- [8] ZHANG HJ, WANG YJ, GAO FY, *et al.* GABA increases susceptibility to DSS-induced colitis in mice [J]. J Funct Foods, 2022, 99(12): 105339.
- [9] DING J, HOUB GG, NEMZER BV, *et al.* Effects of controlled germination on selected physicochemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced γ -aminobutyric acid accumulation by ultrasonication [J]. Food Chem, 2018, 243: 214–221.
- [10] 温翠娟, 周敏, 张露丹, 等. 高 γ -氨基丁酸发芽糙米的循环加湿生产工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(9): 132–136.
- WEN CJ, ZHOU M, ZHANG LD, *et al.* Cyclic humidification of germinated brown rice enriched with gamma-aminobutyric acid [J]. Food Res Dev, 2022, 43(9): 132–136.
- [11] 汤彩云, 王涛, 屠洁, 等. 比色法与 HPLC 法对比测定桑叶茶中 γ -氨基丁酸的含量[J]. 食品科学, 2018, 39(24): 256–260.
- TANG CY, WANG T, TU J, *et al.* Comparison of colorimetry and HPLC for determination of γ -aminobutyric acid in mulberry leaf tea [J]. Food Sci, 2018, 39(24): 256–260.
- [12] TU J, ZHAO J, LIU G H, *et al.* Solid state fermentation by *Fomitopsis pinicola* improves physicochemical and functional properties of wheat bran and the bran-containing products [J]. Food Chem, 2020, 127046(328): 1–9.
- [13] XU Y, JIN YM, SU JJ, *et al.* Changes in the nutritional value, flavor, and antioxidant activity of brown glutinous rice during fermentation [J]. Food Biosci, 2021, 101273(43): 1–8.
- [14] WAEWKUM P, SINGTHONG J. Functional properties and bioactive compounds of pigmented brown rice flour [J]. Bioact Carbohydr Diet Fibre, 2021, 26: 100289.
- [15] LI C, LUO JX, ZHANG CQ, *et al.* Causal relations among starch chain-length distributions, short-term retrogradation and cooked rice texture [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 106064(108): 1–9.
- [16] 周显青, 张少昌, 梁彦伟. 不同储藏条件下蒸谷米蒸煮特性的变化研究 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 77–84.
- ZHOU XQ, ZHANG SC, LIANG YW. Study on cooking properties changes of parboiled rice and milled rice under different storage conditions [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2021, 42(3): 77–84.
- [17] HANIFAH A, FIRMANTO H, PUTRI SP, *et al.* Unique metabolite profiles of Indonesian cocoa beans from different origins and their correlation with temperature [J/OL]. J Biosci Bioeng, 2022, 134(2): 125–132.
- [18] ESMAELPOUR S, IRANBAKSH A, DILMAGHANI K, *et al.* The potential contribution of the WRKY53 transcription factor, gamma-aminobutyric acid (GABA) transaminase, and histone deacetylase in regulating growth, organogenesis, photosynthesis, and transcriptional responses of tomato to different light-emitting diodes (LEDs) [J]. J Photoch Photobio B, 2022, 112413(229): 1–9.
- [19] 彭彤, 郭艳芳, 何韵云, 等. 茺青中谷氨酸脱羧酶(Gad)酶性质的时空差异[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2017, 54(6): 1323–1328.
- PENG D, GUO YF, HE YY, *et al.* The spatial and temporal variation of glutamate decarboxylase (GAD) property in *Brassica rapa* L. ssp. *rapa* [J]. J Sichuan Univ (Nat Sci Ed), 2017, 54(6): 1323–1328.
- [20] TU J, LIU GH, JIN YC, *et al.* Enrichment of γ -aminobutyric acid in mulberry leaves and the inhibitory effects of the water extract on ACE and α -glucosidase activity [J]. Ind Crop Prod, 2022, 114485(177): 1–8.
- [21] 孙德权, 陆新华, 胡玉林, 等. 纳米硅材料对植物生长发育影响的研究进展[J]. 热带作物学报, 2019, 40(11): 2300–2311.
- SUN DQ, LU XH, HU YL, *et al.* Research progress of silica nanoparticle

- effects on the growth and development of plants [J]. Chin J Trop Crop, 2019, 40(11): 2300–2311.
- [22] 张瑞阁, 雷鸣, 陈俊, 等. 硒污染对水稻种子萌发的生物效应[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(5): 5–7.
- ZHANG RG, LEI M, CHEN J, *et al.* Biological effects of selenium pollution on rice seed germination [J]. Shaanxi J Agric Sci, 2017, 63(5): 5–7.
- [23] JIANG XJ, XU QP, ZHANG AW, *et al.* Optimization of γ -aminobutyric acid (GABA) accumulation in germinating *Adzuki beans* (*Vigna angularis*) by vacuum treatment and monosodium glutamate, and the molecular mechanisms [J]. Front Nutr, 2021, 8: 693862.
- [24] 丛和均. 不同处理方法对文冠果种子萌发的影响研究[J]. 安徽农学通报, 2018, 24(11): 85–86.
- CONG HJ. Effects of different treatments on *shiny-leaved yellowhorn* seed germination [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2018, 24(11): 85–86.
- [25] 徐慧敏, 郭磊, 马瑞娟, 等. 低温冷藏对桃砧木 Nemaguard 种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(1): 200–206.
- XU HM, GUO L, MA RJ, *et al.* Effects of cold storage on seed germination and seedling growth of peach root stock cultivar Nemaguard [J]. Jiangsu J Agric Sci, 2022, 38(1): 200–206.
- [26] DAS P, MANNA I, SIL P, *et al.* Silicon augments salt tolerance through modulation of polyamine and GABA metabolism in two indica rice (*Oryza sativa* L.) cultivars [J]. Plant Physiol Biochem, 2021, 166: 41–52.
- [27] 鲁红侠. 糙米萌发过程中富硒对两种内源酶活性的影响效应[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- LU HX. Effect of selenium-enrich upon endogenous enzyme activities in process of brown rice germination [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013.
- [28] 苏国峰, 胡福田. 纳米硒茶粕基有机肥对玉米种子萌发的影响[J]. 农技服务, 2021, 38(9): 8–10.
- SU GF, HU FT. Effect of nano selenium tea meal based organic fertilizer on corn seed germination [J]. Agric Technol Ser, 2021, 38(9): 8–10.
- [29] SHARMA S, SAXENA DC, RIAR CS. Changes in the GABA and polyphenols contents of foxtail millet on germination and their relationship with *in vitro* antioxidant activity [J]. Food Chem, 2018, 45: 863–870.
- [30] 张友朋. 微波干燥发芽糙米生产线设计与验证[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
- ZHANG YP. Design and verification of microwave drying germinated brown rice production line [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020.
- [31] 王宏伟, 肖乃勇, 赵双丽, 等. 糙糯米发芽过程中淀粉理化特性的变化[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(5): 1–5.
- WANG HW, XIAO NY, ZHAO SL, *et al.* Changes of physicochemical properties of starch in brown sweet rice in germination [J]. J Chin Cereal Oil Assoc, 2019, 34(5): 1–5.
- [32] 冯志强, 肖乃勇, 孙建伟, 等. 湿度对糙糯米发芽过程中淀粉结构及糊化性能的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(20): 6808–6812.
- FENG ZQ, XIAO NY, SUN JW, *et al.* Effect of germination humidity on starch structure and gelatinization performance during germination of glutinous brown rice [J]. J Food Saf Qual, 2019, 10(20): 6808–6812.
- [33] 冯志强, 余颜圃, 王艳, 等. 沙蒿胶对糯米淀粉糊化特性和流变特性的影响[J]. 轻工学报, 2023, 38(1): 18–26.
- FENG ZQ, YU YP, WANG Y, *et al.* Effects of *Artemisia argyi* gum on gelatinization and rheological properties of glutinous rice starch [J]. J Light Ind, 2023, 38(1): 18–26.
- [34] 吴凤凤. 发芽对糙米主要营养成分、生理功效和加工特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2013.
- WU FF. Effects of germination on main nutrients, physiological efficacy and processing characteristics of brown rice [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013.
- [35] HU ZQ, SHAO YF, LU L, *et al.* Effect of germination and parboiling treatment on distribution of water molecular, physicochemical profiles and microstructure of rice [J]. J Food Meas Charact, 2019, 13(3): 1898–1906.
- [36] ZHAO HM, WANG YB, CHENG HT, *et al.* Biochemical composition distribution in different grain layers is associated with the edible quality of rice cultivars [J]. Food Chem, 2020, 311(5): 125896.
- [37] WANG H, WANG Q, ZHU J, *et al.* Comparison of high-pressure, freeze-thaw cycles and germination-parboiling treatments on lipids digestibility and rancidity of brown rice [J]. Sci Rep-UK, 2022, 12(1): 15667.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

作者简介



张芳, 主要研究方向为粮油食品检测。
E-mail: 1021529935@qq.com



刘冠卉, 硕士, 副教授, 主要研究方向为粮食生物技术与功能性食品。
E-mail: liuguanh@163.com