

## 超声波辅助处理对发芽糙米营养及食用品质的影响

朱 创, 杨 丽, 肖登荣, 肖 斌, 聂 攀, 钟苓, 宋立华

### Effects of Ultrasonic-assisted Treatment on Nutrition and Edible Quality of Germinated Brown Rice

ZHU Chuang, YANG Li, XIAO Dengrong, XIAO Bin, NIE Pan, ZHONG Lingyue, and SONG Lihua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021040085>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 富氫水发芽糙米加工工艺及其品质研究

Research on the Processing Technology and Quality of Brown Rice Germinated with Hydrogen-rich Water

食品工业科技. 2021, 42(9): 145-153

#### 超高压处理对发芽糙米酒中 $\gamma$ -氨基丁酸及挥发性成分的影响

Effect of Ultra High Pressure Treatment on  $\gamma$ -Aminobutyric Acid and Volatile Components in Germinated Brown Rice Wine

食品工业科技. 2019, 40(20): 29-35

#### 发芽糙米和羟丙基甲基纤维素对面包品质的影响

Effect of germinated brown rice and hydroxypropyl methyl cellulose on the quality of bread

食品工业科技. 2017(14): 55-60

#### 焙烤处理对发芽糙米生理活性物质及抗氧化活性的影响

Effect of Baking Treatment on Physiological Active Substances and Antioxidant Activity of Germinated Brown Rice

食品工业科技. 2019, 40(7): 64-69

#### 超声波辅助喷雾加湿法富集发芽黑糙米生物活性物质工艺的响应面优化

Optimization of Ultrasonic-assisted Spray Humidification for Enriching Bioactive Substances from Germinated Black Brown Rice by Response Surface Method

食品工业科技. 2020, 41(4): 105-113

#### 发芽糙米食品研究现状及展望

Research status and prospect of germinated brown rice

食品工业科技. 2017(13): 324-329



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

朱创, 杨丽, 肖登荣, 等. 超声波辅助处理对发芽糙米营养及食用品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(24): 48-54. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040085

ZHU Chuang, YANG Li, XIAO Dengrong, et al. Effects of Ultrasonic-assisted Treatment on Nutrition and Edible Quality of Germinated Brown Rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(24): 48-54. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040085

# 超声波辅助处理对发芽糙米营养及食用品质的影响

朱创<sup>1</sup>, 杨丽<sup>1</sup>, 肖登荣<sup>2</sup>, 肖斌<sup>2</sup>, 聂攀<sup>1</sup>, 钟苓玥<sup>1</sup>, 宋立华<sup>1\*</sup>

(1.上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240;

2.上海瀛丰五斗生态农业发展有限公司, 上海 202179)

**摘要:**本研究采用超声波技术辅助加工发芽糙米, 探究超声波辅助处理对发芽糙米总黄酮、基本营养成分、米糠皮层微观结构及质构等的影响。结果表明, 超声波辅助处理工艺顺序对发芽糙米总黄酮的含量有一定影响, 其中糙米先浸泡 13 h, 再用 160 W 超声处理 25 min 后发芽, 发芽糙米的总黄酮含量达到最大值 218.17 mg/100 g。在此工艺条件下, 与未超声处理组相比, 发芽糙米的发芽势和发芽率分别升高了 19.60% ( $P<0.01$ ) 和 4.66% ( $P<0.05$ ); 蛋白质、维生素 B<sub>2</sub> 及矿物质元素 (钾、磷、锰、锌) 的含量均显著增加 ( $P<0.05$ ); 糙米皮层变得更加疏松多孔; 硬度、黏着性、弹性和粘度均下降。热物性方面, 发芽糙米淀粉糊化相关热物性参数无显著性变化 ( $P>0.05$ ), 可见超声波辅助加工能在一定程度上改善发芽糙米的功能营养特性及食用品质。

**关键词:**超声波辅助处理, 发芽糙米, 营养成分, 超微结构, 质构

中图分类号: TS210.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)24-0048-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021040085



本文网刊:

## Effects of Ultrasonic-assisted Treatment on Nutrition and Edible Quality of Germinated Brown Rice

ZHU Chuang<sup>1</sup>, YANG Li<sup>1</sup>, XIAO Dengrong<sup>2</sup>, XIAO Bin<sup>2</sup>, NIE Pan<sup>1</sup>, ZHONG Lingyue<sup>1</sup>, SONG Lihua<sup>1\*</sup>

(1.School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2.Shanghai Yingfeng Wudou Ecological Agriculture Development Co., Ltd., Shanghai 202179, China)

**Abstract:** In present study, ultrasonic technology was applied to the processing of germinated brown rice(GBR), and the changes of total flavonoids contents, partial primary nutrients, ultrastructure of bran and textural properties of GBR were analyzed. The results showed that the sequence of ultrasonic-assisted treatment exhibited a certain effect on the content of total flavonoids in germinated brown rice. It was as high as 218.17 mg/100 g under the following processing condition: The brown rice was firstly soaked for 13 h and then treated with 160 W ultrasonic treatment for 25 min before germination processing. Under this condition, the germination potential and germination rate of ultrasonic-assisted germinated brown rice(GBR-U) significantly increased by 19.60% ( $P<0.01$ ) and 4.66% ( $P<0.05$ ) respectively compared with the GBR without ultrasonic-assisted treatment; moreover, the contents of protein, vitamin B<sub>2</sub> and some mineral elements (potassium, phosphorus, manganese and zinc) notably increased ( $P<0.05$ ). The cortex of GBR-U was more porous, the hardness, adhesiveness, springiness and viscosity of GBR-U showed decreasing trend, while no significant difference were observed in thermal properties of starch gelatinization ( $P>0.05$ ). The present study suggested that the ultrasonic-assisted processing could improve the nutrition characteristics and edible quality of GBR in a certain degree.

**Key words:** ultrasonic-assisted treatment; germinated brown rice; nutritional components; ultrastructure; textural properties

收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目 (2019-02-08-00-08-F01154)。

作者简介: 朱创 (1991-), 女, 博士研究生, 研究方向: 食品加工与营养, E-mail: zc0324@sjtu.edu.cn。

\* 通信作者: 宋立华 (1970-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品加工与营养, E-mail: lihuas@sjtu.edu.cn。

发芽处理作为可有效改善谷物和豆类等食品营养特性及食用品质的加工工艺,其成本低且简便易行<sup>[1]</sup>。种子萌芽过程在酶的作用下会使谷物或豆类食品中的维生素、膳食纤维、蛋白质、氨基酸等基本营养成分的含量有所增加<sup>[2]</sup>,但处理工艺不同基本营养成分的变化不同;糙米发芽处理还可有效富集  $\gamma$ -氨基丁酸(GABA)等功能活性成分,使发芽糙米的营养价值高于普通糙米和白米<sup>[3]</sup>,但与普通白米相比,发芽糙米的食用口感仍有待于改进。此外,除 GABA 外,如何改进发芽工艺以进一步提高发芽糙米中其他活性成分的含量也值得深入研究。

黄酮类化合物是植物性食品中重要的功能活性成分之一。超声波作为一种重要的物理辅助加工技术在黄酮等活性成分的提取方面应用广泛,如利用超声波辅助提取黑米、红麦麸皮及发芽糙米中的黄酮成分,可有效提高提取率<sup>[4-6]</sup>。在发芽谷物加工方面,卞紫秀等<sup>[7]</sup>利用超声波辅助处理(320 W, 30 min, 29 °C)加工发芽苦荞,发现其不但可有效促进苦荞麦种子的萌发,还可显著增加苦荞芽苗中黄酮类物质的含量;程威威等<sup>[8]</sup>利用超声波处理(59 kHz, 8 h)发芽糙米,发现其可显著增加糙米发芽率。目前,利用超声波辅助技术加工发芽糙米,对功能成分的富集作用研究大多围绕 GABA 展开<sup>[9-11]</sup>,但针对黄酮的富集作用研究尚不多见;已有研究结果表明对于不同的谷物,当超声工艺条件不同时,对黄酮成分的富集效果也有所不同;此外,超声波辅助加工对发芽糙米加工及品质改善的相关研究较少。因此,本研究利用超声波辅助技术加工发芽糙米,首先以总黄酮含量为主要考核指标对超声工艺参数进行优化,在此基础上进一步分析超声波辅助处理对发芽糙米基本营养成分、米糠微观结构、糊化性质及质构特性的影响,为改善发芽糙米的功能营养特性及加工食用品质提供可参考的方法。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

糙米 南梗 9108,初始湿基含水量为 12.63%±0.81%,由上海光明集团瀛丰五斗生态农业有限公司提供;次氯酸钠、乙醇、三氯化铝、乙酸钾 均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;芦丁 萨恩化学技术(上海)有限公司;体外抗氧化试剂盒 南京建成生物科技有限公司。

DHG-9071A 电热恒温干燥箱 上海精宏实验设备有限公司;LRH-150 培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;200T 高速多功能磨粉机 永康市利阳电器有限公司;THC 型数控超声波提取机 济宁天华超声电子仪器有限公司;Multiskan FC 型酶标仪 Thermo Fisher(上海)仪器有限公司;VFD-2000 冷冻干燥机 上海比昂仪器制造有限公司;50T ES plus 高真空镀膜仪 英国 Quorum 公司;拉曼图像-扫描电子显微镜联用仪 捷克 TESCAN-MAIA3 公司;

差式扫描量热仪 德国 Netzsch 公司;TA-XT Plus 型质构仪 英国 Stable Micro Systems 公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 发芽糙米的制备 称取经挑选、除杂、饱满的糙米约 400 g,漂洗干净后,用 0.1% 的次氯酸钠溶液浸泡 15 s 对其表面消毒,冲洗干净后加纯水浸泡,置于恒温培养箱中。浸泡期间每隔 2 h 更换一次水,浸泡结束后将糙米放入恒温培养箱中萌发。浸泡条件:29 °C, 13 h,结束时种子露白;萌发条件:29 °C, 24 h,结束后种子芽长约 1 mm。收集发芽糙米,参考杨丽等<sup>[12]</sup>的方法,对发芽糙米经 50 °C 干燥 1 h 后磨粉,80 目过筛得到实验用糙米粉。

1.2.2 超声波处理方法 实验参考 Yaldagard 等<sup>[13]</sup>的超声参数。实验分别采用糙米浸泡前超声处理和浸泡后超声处理,浸泡前超声处理操作如下:将清洗干净的糙米装进塑封袋中,超声处理,超声结束后按照 1.2.1 中的条件浸泡、发芽。浸泡后超声处理操作如下:将浸泡 13 h 后的糙米装进塑封袋中,进行超声处理,超声结束后按照 1.2.1 中的条件发芽。

超声处理条件为:a. 160 W 功率下分别处理 5、15 和 25 min;b. 280 W 功率下分别处理 5、15 和 25 min;c. 400 W 功率下分别处理 5、15 和 25 min。

1.2.3 总黄酮含量的测定 采用 Guan 等<sup>[14]</sup>的方法并作改动,具体如下:称取 2 g 糙米粉末,加入 10 mL 50% 乙醇水溶液超声提取 40 min,4000 r/min 离心 10 min 后取 5 mL 上清液,加入 2 mL 三氯化铝溶液(0.1 mol/L),反应 8 min 后再加 3 mL 乙酸钾溶液(1 mol/L),用 50% 乙醇水溶液定容至 10 mL,摇匀,室温下反应 30 min 后于 420 nm 波长处测定吸光度值。总黄酮含量以芦丁当量表示(mg/100 g)。

1.2.4 发芽势和发芽率的测定 参照 Guan 等<sup>[14]</sup>的方法,按如下公式计算发芽势和发芽率:

$$\text{发芽势}(\%) = (\text{糙米萌发时露白的种子数} / \text{种子总数}) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$\text{发芽率}(\%) = (\text{糙米萌发至芽长约1mm时的种子数} / \text{种子总数}) \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.5 基本营养成分的测定 含水量采用国标法-直接干燥法<sup>[15]</sup>;蛋白质、脂肪、淀粉、维生素、膳食纤维<sup>[16-21]</sup>采用国标法测定。

矿物质元素参照国标法<sup>[22]</sup>测定,并稍作改动:称取糙米粉 1.00 g 于坩埚中,小火加热,炭化至无烟,转移至马弗炉中,于 550 °C 灰化 3 h,至试样呈白灰状,冷却,取出,用适量硝酸溶液溶解并用水定容至 10 mL。利用 ICP-AES 法分析测定,外标法定量。

1.2.6 超微结构的测定 冷冻干燥处理样品 24 h 后,用导电胶将干燥后的样品固定在金属载物台上,利用高真空镀膜仪喷金 30 s 后用电子扫描显微镜扫描样品表面并拍照。

1.2.7 热物性的测定 取 2 mg 样品,按 1:2(质量比)加入纯水,密封后于 4 ℃ 放置 24 h,用差式扫描量热仪进行测定。扫描温度由 20 ℃ 上升至 100 ℃,扫描速率为 10 ℃/min,载气为氮气,氮气流速为 20 mL/min。以空坩埚作为对照,记录并计算吸热曲线上的起始温度( $T_0$ )、峰值温度( $T_p$ )、终止温度( $T_c$ )热焓( $\Delta H$ )。

1.2.8 质构的测定 参照宋伟等<sup>[23]</sup>的方法,测定煮后发芽糙米的质构,具体如下:加 12 mL 水于 10 g 糙米中,蒸锅中加适量水,置于电磁炉上蒸煮 40 min 后关火焖 10 min,待冷却至室温后,随机取 6 粒米进行硬度、黏着性、弹性和黏度的测定。参数:探头 P/50、触发点 10 g、压缩比例 75%、下降速度 10 mm/s、测试速度 0.5 mm/s、测试后速度 5 mm/s。

### 1.3 数据处理

每组实验均平行 3 次,结果以“平均值±标准差”表示,方差分析采用 LSD 法, $P < 0.05$  视为有显著性差异;数据处理软件使用 Excel 2016 和 IBM SPSS Statistics 25,绘图使用 GraphPad Prism 8.2.1。

## 2 结果与分析

### 2.1 超声波辅助发芽糙米工艺的建立

本实验结果表明超声波辅助处理顺序对发芽糙米总黄酮的含量有一定影响,结果如图 1 所示。采用先超声后浸泡处理工艺时,当超声功率为 160 和 280 W 时,随着超声处理时间的增加,发芽糙米的总黄酮含量先下降再升高;当超声功率为 400 W 时,随着超声处理时间的增加,发芽糙米的总黄酮含量先升高后下降,其中 400 W 超声 15 min 条件下,发芽糙米的总黄酮含量达到最大值 203.61 mg/100 g。

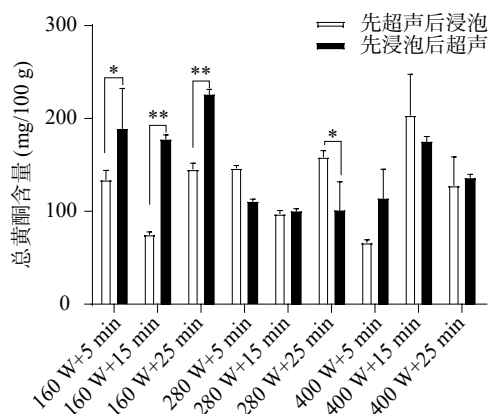


图 1 超声波顺序对发芽糙米总黄酮含量的影响

Fig.1 Effects of ultrasonic sequence on the total flavonoid contents of GBR

注: \*表示  $P < 0.05$ ; \*\*表示  $P < 0.01$ 。

采用先浸泡后超声处理工艺时,当超声功率为 160 W 时,发芽糙米的总黄酮含量均显著高于先超声后浸泡组( $P < 0.05$ );且与 280 和 400 W 的超声波处理组相比,160 W 超声波处理的发芽糙米总黄酮含量最高,超声处理 25 min 时达到最大值 218.17 mg/100 g。

这可能是因为先浸泡再进行超声波适当处理,能在促使种皮软化的基础上,利用超声波的机械效应改变细胞壁结构和细胞膜通透性,从而促使黄酮类物质的释放<sup>[24]</sup>。此外,还有研究表明超声波处理能提高苦荞种子中与黄酮类物质合成相关的苯丙氨酸解氨酶(PAL)的活性<sup>[25]</sup>,这可能也是超声波辅助处理使黄酮含量有所增加的原因。

鉴于上述黄酮的变化情况,本研究后续实验均选择将糙米先浸泡 13 h 后再用 160 W 超声处理 25 min 作为优化超声辅助处理参数,并进一步研究超声波辅助对发芽糙米基本营养成分及其食用和加工品质的影响。

### 2.2 超声波辅助处理对发芽糙米发芽势、发芽率及总黄酮含量的影响

糙米发芽势和发芽率结果如图 2A 所示,超声波辅助糙米发芽组发芽势为 65.82% ( $P < 0.01$ ),发芽率为 75.02% ( $P < 0.05$ ),较未超声处理组分别增加了 19.60% 和 4.66%。这可能与超声波可以促进谷物代谢,加快细胞吸水膨胀从而使种子发芽速率增加有关<sup>[26-27]</sup>。

总黄酮含量如图 2B 显示,超声波辅助处理组发芽糙米组总黄酮含量较未发芽糙米组和未超声处理组分别显著增加了 415.49% 和 48.11% ( $P < 0.01$ )。已有研究表明,超声波可使类黄酮生物合成相关基因

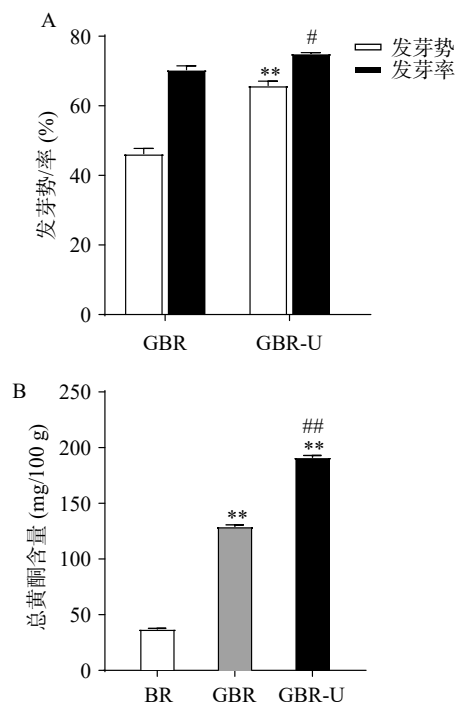


图 2 超声波辅助后发芽糙米发芽势、发芽率(A)及总黄酮含量(B)的变化

Fig.2 Changes of germination potential, germination rate(A) and total flavonoid contents(B) of GBR-U

注: BR: 糙米; GBR: 发芽糙米; GBR-U: 超声波辅助发芽糙米; A: 发芽势及发芽率比较, \*\*表示  $P < 0.01$  vs GBR 组; #表示  $P < 0.05$  vs GBR 组; B: 总黄酮含量比较, \*\*表示  $P < 0.01$  vs BR 组; ##表示  $P < 0.01$  vs GBR 组。



查耳酮合成酶(CHS)等的表达增强<sup>[28]</sup>;另外,超声波处理还可提高苯丙氨酸解氨酶(PAL)的活性,PAL是类黄酮合成代谢过程中的关键限速酶,其活性增加有利于黄酮类物质的合成<sup>[25]</sup>。

### 2.3 超声波辅助处理对发芽糙米基本营养成分及矿物质含量的影响

各组发芽糙米基本营养组分结果如表 1 所示。与 BR 相比,GBR 中蛋白质、淀粉和不溶性膳食纤维含量有所降低( $P<0.05$ );烟酸显著升高 4 倍( $P<0.05$ );脂肪、维生素 B<sub>1</sub>、B<sub>2</sub> 及可溶性膳食纤维含量无显著变化( $P>0.05$ )。而与 GBR 相比,GBR-U 组发芽糙米中蛋白质和维生素 B<sub>2</sub> 含量分别显著升高 20.54% 和 110.94%( $P<0.05$ ),而维生素 B<sub>1</sub> 和不可溶性膳食纤维分别显著降低 32.40% 和 16.13%( $P<0.05$ )。有研究表明,超声波处理可以提高发芽糙米中可溶性蛋白质含量,这可能是由于超声波处理能促进植物体细胞和原生质蛋白质的积累<sup>[29-30]</sup>。超声波还可使种子内部温度升高,酶活力上升,物质的分解和转换速率加快,有利于内部细胞的生长,贮藏在其中的脂肪可作为营养物质转换成糖类,因此表现为脂肪含量下降而淀粉含量升高<sup>[31]</sup>。此外,超声波可以破坏细胞壁,加速膳食纤维的分解<sup>[32]</sup>,而细胞壁的软化可促进种子发芽,因此也可以促进发芽率和发芽势的增加,这进一步验证了上述关于 GBR-U 组糙米发芽势和发芽率的结果。

此外,发芽糙米中矿物质元素含量分析如表 2

所示。结果表明,与 BR 相比,GBR 组发芽糙米中钙的含量显著升高 12.22%( $P<0.05$ ),而钾的含量显著降低 7.18%( $P<0.05$ )。与 GBR 组发芽糙米相比,超声波辅助处理可使发芽糙米中钾、磷、锰和锌分别显著升高 43.90%、35.91%、46.57% 和 35.28%( $P<0.05$ ),而钠和钙分别显著降低 39.45% 和 15.33%( $P<0.05$ )。关于矿物元素的上述变化,一方面可能是由于种子发芽时,胚芽的生长需要矿物质,矿物质可作为辅助因子协助催化蛋白质和碳水化合物的分解和利用,造成部分矿物质被消耗<sup>[33]</sup>;另一方面是由于种子中的无机物大部分是与有机物结合的形式存在,随着种子的萌发而转变成游离态<sup>[34]</sup>。此外,利用超声波处理,其空化作用及热效应也可能促进无机物的释放。

### 2.4 超声波辅助处理对发芽糙米表皮超微结构的影响

图 3 为发芽糙米表皮扫描电镜分析结果。从图 3 中可以看到,未发芽糙米表皮光滑致密无空隙;发芽后,糙米皮层变得松散;而超声波辅助处理后发芽糙米的表皮结构变得更加疏松,空隙也变得更大,这说明超声波可以破坏糙米皮层的致密程度。同样,用超声波处理金荞麦粉末后,其细胞结构被破坏,变得疏松多孔<sup>[35]</sup>。Yang 等<sup>[36]</sup> 研究也发现超声波产生的空化和机械作用使得糙米表皮发生了不同程度的变形并产生了裂痕,从而使糙米皮层变得更疏松多孔。

### 2.5 超声波辅助处理对发芽糙米热物性的影响

表 3 为利用差式扫描量热仪分析发芽糙米糊化特性结果。与 BR 相比,发芽可使糙米加热糊化的起

表 1 超声波辅助处理对发芽糙米基本营养成分的影响

Table 1 Effects of ultrasonic-assisted treatment on the basic nutritional components of GBR

成分	BR	GBR	GBR-U
蛋白质(g/100 g)	10.44±0.31	9.30±0.24*	11.21±0.30**
脂肪(g/100 g)	5.54±2.29	6.47±2.25	4.81±0.18
淀粉(g/100 g)	78.99±0.01	74.47±1.19*	76.32±0.67
维生素B <sub>1</sub> (mg/kg)	4.16±0.09	3.92±0.13	2.65±0.29**
维生素B <sub>2</sub> (mg/kg)	0.36±0.03	0.64±0.30	1.35±0.09**
烟酸(mg/kg)	14.69±0.01	74.78±9.95*	74.07±3.78*
可溶性膳食纤维(g/100 g)	1.07±0.08	1.23±0.42	1.09±0.24
不可溶性膳食纤维(g/100 g)	8.01±0.09	7.44±0.24*	6.24±0.30**

注: BR: 糙米; GBR: 发芽糙米; GBR-U: 超声波辅助发芽糙米; \*表示 $P<0.05$  vs BR组; \*\*表示 $P<0.05$  vs GBR组; 表2~表4同。

表 2 超声波辅助发芽糙米矿物质元素的变化

Table 2 Changes of mineral elements in GBR-U

成分(mg/kg)	BR	GBR	GBR-U
钠	92.95±11.50	97.37±3.65	58.96±3.41**
钾	3028.39±1.63	2810.85±67.39*	4044.78±414.75**
钙	379.70±8.90	426.11±10.26*	360.79±30.36#
磷	4747.59±265.43	4476.11±122.76	6083.29±683.92**
锰	38.59±0.02	35.52±1.35	52.06±4.69**
铁	18.13±0.38	17.97±3.95	20.81±2.15
铜	3.56±0.15	4.00±0.48	4.51±0.22*
锌	25.20±0.82	22.82±0.30	30.87±3.37**

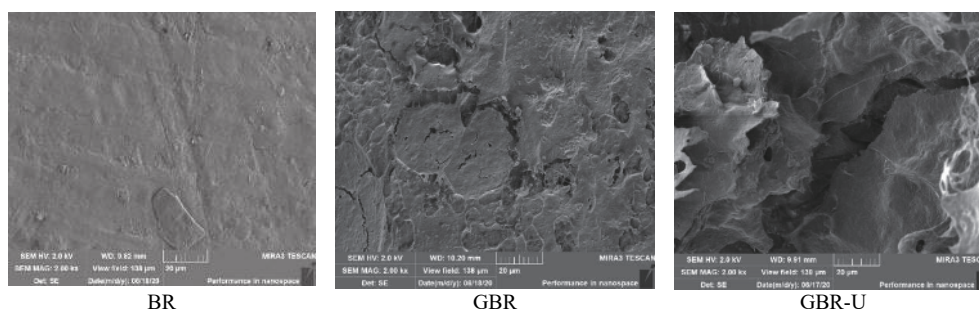


图3 超声波辅助发芽糙米扫描电镜图(2000×)

Fig.3 SEM images of GBR-U (2000×)

注: BR, 糙米; GBR, 发芽糙米; GBR-U, 超声波辅助发芽糙米。

表3 超声波辅助处理对发芽糙米热物性的影响

Table 3 Effects of ultrasonic-assisted treatment on the thermal properties of GBR

组别	起始温度(℃)	峰值温度(℃)	终止温度(℃)	热焓(J/g)
BR	60.93±0.27	70.61±0.36	77.87±0.57	6.02±0.43
GBR	55.00±0.74*	68.13±0.23*	77.22±1.12	5.61±0.40
GBR-U	57.94±3.34	68.98±0.60*	77.34±0.84	5.66±0.32

表4 超声波辅助处理对发芽糙米质构的影响

Table 4 Effects of ultrasonic-assisted treatment on the texture properties of GBR

组别	硬度(g)	黏着性(g·s)	弹性(mm)	黏度(g)
BR	3456.41±460.13	121.87±29.85	0.64±0.03	0.41±0.02
GBR	2787.46±418.52*	71.96±21.78*	0.59±0.03	0.39±0.05
GBR-U	2469.05±604.43*	60.88±20.25*	0.57±0.06	0.39±0.02

始温度、峰值温度( $P<0.05$ )、终止温度和热焓值均有所降低,这可能是因为淀粉与脂质的交互作用可以使糊化温度升高,而糙米经发芽后淀粉含量降低,导致其与脂质的交互作用减弱,进而使糊化温度下降<sup>[37]</sup>。

与 GBR 相比,超声波辅助处理后发芽糙米糊化的起始温度、峰值温度、终止温度和热焓值分别略有升高,但两组发芽糙米的热物性参数无显著差异。值得关注的是,也有研究发现超声波处理(55℃, 16 kHz)后发芽糙米糊化所需的能量增多,这可能是因为超声处理会诱导糙米内的聚合物重新排列,从而使其需要更多的能量来完全糊化<sup>[38]</sup>。这也提示本实验所采用的超声辅助处理条件较适宜,不影响发芽糙米的热物性,可更有利于保持发芽后糙米的糊化特性。

## 2.6 超声波辅助处理对发芽糙米质构的影响

质构分析结果显示(表4), GBR-U 组的硬度、黏着性显著低于 GBR 组( $P<0.05$ ),弹性和黏度无显著差异( $P>0.05$ );与 GBR 组相比,超声波辅助后糙米硬度和黏着性分别降低了 11.42% 和 15.40%;弹性和黏度也略有下降。已有研究表明,适当的超声波处理可以降低稻米的硬度<sup>[39]</sup>、胶黏性和咀嚼性<sup>[40]</sup>。有研究发现超声波会使谷物表面产生裂纹,在糙米蒸煮过程中水会更容易通过增加的裂纹渗透进糙米中从而降低其硬度<sup>[41]</sup>,这一结论与本实验中扫描电镜结果相一致。

## 3 结论

本实验探究了超声波辅助处理技术对发芽糙米

部分理化品质的影响。结果表明超声波处理工艺条件对发芽糙米总黄酮含量有显著影响,先将糙米浸泡 13 h 后再用 160 W 超声处理 25 min,总黄酮含量可达到最大值 218.17 mg/100 g。此外,在此处理工艺条件下,与未超声处理发芽糙米相比,糙米发芽势、发芽率分别提高 19.60% 和 4.66%;蛋白质和维生素 B<sub>2</sub> 含量均有所提高,而维生素 B<sub>1</sub> 和不可溶性膳食纤维均有所降低;米糠皮层致密程度降低,变得疏松多孔;发芽糙米的硬度、黏着性、弹性和黏度等质构特性均得到改善,但糙米加热糊化过程的热物性参数无显著变化。上述结果提示利用超声波辅助处理加工发芽糙米可在一定程度上通过富集黄酮成分改善发芽糙米的功能营养特性,通过影响质构参数改善发芽糙米的食用品质。

## 参考文献

- [1] PAJAK P, SOCHA R, GALKOWSK A D, et al. Phenolic profile and antioxidant activity in selected seeds and sprouts[J]. Food Chemistry, 2014, 143: 300–306.
- [2] CORNEJO F, CACERES P J, MARTINEZ-VILLALUENGA C, et al. Effects of germination on the nutritive value and bioactive compounds of brown rice breads[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 298–304.
- [3] KAMJIJAM B, BEDNARZ H, SUPWANNAPORN P, et al. Localization of amino acids in germinated rice grain: Gamma-aminobutyric acid and essential amino acids production approach[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 93: 102958.
- [4] 王磊, 韦雅玲, 刘长蛟. 超声辅助醇提黑米中黄酮的工艺优

- 化[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(4): 24-28. [WANG L, WEI Y L, LIU C J. Optimization on ultrasonic-assisted ethanol extraction of flavonoids from black rice[J]. Cereal & Oil, 2018, 31(4): 24-28.]
- [5] 吴敏, 秦丹, 张齐, 等. 红麦麸皮中黄酮类物质不同提取工艺研究[J]. 食品科学, 2019(7): 208-212. [WU M, QIN D, ZHANG Q, et al. Study on different extraction process of flavonoids from red wheat bran[J]. Food Science, 2019(7): 208-212.]
- [6] 刘振春, 张利宽, 于畅, 等. 响应面优化超声波辅助提取发芽糙米黄酮工艺[J]. 食品科学, 2012, 33(8): 80-84. [LIU Z C, ZHANG L K, YU C, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of flavonoids from germinated brown rice using response surface methodology[J]. Food Science, 2012, 33(8): 80-84.]
- [7] 卞紫秀, 汪建飞, 王顺民. 超声波处理下苦荞麦萌发及富集黄酮工艺优化研究[J]. 安徽工程大学学报, 2018, 33(5): 7-13. [BIAN Z X, WANG J F, WANG S M. Optimization of flavonoid enrichment technology and germination of buckwheat seed by ultrasonic method[J]. Journal of Anhui Polytechnic University, 2018, 33(5): 7-13.]
- [8] 程威威, 吴跃, 周婷, 等. 不同前处理对糙米发芽的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(12): 99-103. [CHENG W W, WU Y, ZHOU T, et al. Effect of different pretreatment on the germination of brown rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(12): 99-103.]
- [9] 聂煌. 稻芽中  $\gamma$ -氨基丁酸含量变化研究[J]. 粮食储藏, 2019, 48(5): 42-45, 51. [NIE H. Study on the conversion of  $\gamma$ -aminobutyric acid content in rice sprout[J]. Grain Storage, 2019, 48(5): 42-45, 51.]
- [10] 雷月, 宫彦龙, 邓茹月, 等. 超声波辅助喷雾加湿法富集发芽黑糙米生物活性物质工艺的响应面优化[J]. 食品工业科技, 2020, 41(4): 105-113. [LEI Y, GONG Y L, DENG R Y, et al. Optimization of ultrasonic-assisted spray humidification for enriching bioactive substances from germinated black brown rice by response surface method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(4): 105-113.]
- [11] 康文瀚. 新疆糙米中  $\gamma$ -氨基丁酸富集与分离纯化及糙米咀嚼片的制备[D]. 石河子: 石河子大学, 2016. [KANG W H. Study on the enrichment and purification of gamma amino acid in brown rice in Xinjiang and the preparation of brown rice chewable tablets[D]. Shihezi: Shihezi University, 2016.]
- [12] 杨丽, 肖斌, 肖登荣, 等. 富氢水发芽糙米加工工艺及其品质研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 145-153. [YANG L, XIAO B, XIAO D R, et al. Research on the processing technology and quality of brown rice germinated with hydrogen-rich water[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(9): 145-153.]
- [13] YALDAGARD M, MORTAZAVI S A, TABATABAIE F. Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barley seed: Optimization of method by the Taguchi approach[J]. Journal of the Institute of Brewing, 2008, 114: 14-21.
- [14] GUAN Q, DING X W, JIANG R, et al. Effects of hydrogen-rich water on the nutrient composition and antioxidative characteristics of sprouted black barley[J]. Food Chemistry, 2019, 299: 125095.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.3-2016 食品安全国家标准 食品中水分的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.3-2016 National standard for food safety determination of food moisture[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.5-2016 National standard for food safety determination of protein in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [17] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.6-2016 National standard for food safety. Determination of fat in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.9-2016 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.9-2016 National standard for food safety. Determination of starch in food: GB 5009.9-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.84-2016 食品安全国家标准 食品中维生素 B<sub>1</sub> 的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.84-2016 Determination of vitamin B<sub>1</sub> in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.85-2016 食品安全国家标准 食品中维生素 B<sub>2</sub> 的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.85-2016 National standard for food safety determination of vitamin B<sub>2</sub> in food: GB 5009.85-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.88-2014 食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.88-2014 Determination of dietary fiber in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.]
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.268-2016 食品安全国家标准 食品中多元素的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.268-2016 National standard for food safety determination of minerals in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [23] 宋伟, 陈瑞, 刘璐. 不同储藏条件下糙米质构和蒸煮品质的规律变化及相关性研究[J]. 中国食物与营养, 2011, 17(3): 36-40. [SONG W, CHEN R, LIU L. Correlation of changes between cooking quality and texture of brown rice under different

- conditions[J]. Food and Nutrition in China, 2011, 17(3): 36-40. ]
- [ 24 ] 杨慧,周霖,边媛媛,等. 非热加工技术对种子萌发生物效应的研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 211-215. [ YANG H, ZHOU L, BIAN Y Y, et al. Effects of nonthermal processing technologies on seed germination: A review on recent research advances[J]. The Food Industry, 2020, 41(7): 211-215. ]
- [ 25 ] WANG J, BIAN Z X, WANG S M, et al. Effects of ultrasonic waves, microwaves, and thermal stress treatment on the germination of Tartary buckwheat seeds[J]. Journal of Food Process Engineering, 2020: e13494.
- [ 26 ] GUIMARAES B, POLACHINI T C, AUGUSTO P E D, et al. Ultrasound-assisted hydration of wheat grains at different temperatures and power applied: Effect on acoustic field, water absorption and germination[J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2020, 155: 108045.
- [ 27 ] MIANO A C, AUGUSTO P E D. The ultrasound assisted hydration as an opportunity to incorporate nutrients into grains[J]. Food Research International, 2018, 106: 928-935.
- [ 28 ] KIM J Y, LEE S I, KIM J A, et al. Specific audible sound waves improve flavonoid contents and antioxidative properties of sprouts[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 276: 109746.
- [ 29 ] 郑艺梅,黄河,华平,等. 超声波处理对发芽糙米主要成分变化的影响[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 337-339. [ ZHENG Y M, HUANG H, HUA P, et al. Effects of ultrasonic treatment on main components of germinated brown rice[J]. Food Science, 2008, 29(11): 337-339. ]
- [ 30 ] JOERSBO M, BRUNSTED T J. Protein synthesis stimulated in sonicated sugar beet cells and protoplasts[J]. Ultrasound in Medicine & Biology, 1990, 16: 719-724.
- [ 31 ] 张瑞. 芝麻籽粒萌发过程中主要营养与功能性物质变化研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019. [ ZHANG R. Research on the changes of main nutrients and functional substances during germination of sesame seeds[D]. Zhengzhou: School of Food Science and Technology, 2019. ]
- [ 32 ] 李笑笑. 高场强超声波处理对大豆分离蛋白结构及乳化性的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [ LI X X. Effect of high intensity ultrasonic treatment on structure and emulsification of soy protein isolate[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020. ]
- [ 33 ] SEERAT B, SUPRIYA K, BALWINDER S, et al. Impact of germination on phenolic composition, antioxidant properties, antinutritional factors, mineral content and Maillard reaction products of malted quinoa flour[J]. Food Chemistry, 2021, 346: 128915.
- [ 34 ] 王莘,王艳梅,董浩. 豆类萌发期矿物质元素和糖类含量变化的研究[J]. 扬州大学学报, 2003(2): 72-74. [ WANG X, WANG Y M, DONG H. Studies on the changement of mineral elements and total sugar in legumens during sprouting period[J]. Journal of Yangzhou University, 2003(2): 72-74. ]
- [ 35 ] 王佰灵,陈雅焱,谢家星,等. 超声波辅助纤维素酶提取金荞麦总黄酮工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(4): 123-128. [ WANG B L, CHEN Y X, XIE J X, et al. Ultrasound-assisted cellulase optimization of extraction process of total flavonoids from *Fagopyrum dibotrys* (D. Don) Hara and its antioxidant activity research[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(4): 123-128. ]
- [ 36 ] YANG X, LI Y, LI S, et al. Effects of ultrasound pretreatment with different frequencies and working modes on the enzymolysis and the structure characterization of rice protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 38: 19-28.
- [ 37 ] 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 F F. Effect of germination on nutritional components, physiological functions and processing characteristics of brown rice[J]. Wuxi: Jiangnan University, 2013. ]
- [ 38 ] CUI L, PAN Z L, YUE T L, et al. Effect of ultrasonic treatment of brown rice at different temperatures on cooking properties and quality[J]. Cereal Chemistry, 2010, 87(5): 403-408.
- [ 39 ] 陶虹,夏强,李云飞. 超声波与超高压处理对全谷物糙米蒸煮品质和抗氧化活性的影响比较[J]. 食品工业科技, 2017, 38(10): 91-95. [ TAO H, XIA Q, LI Y F. Comparative effects of ultrasound and high hydrostatic pressure treatments on cooking properties and antioxidant activity of brown rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(10): 91-95. ]
- [ 40 ] BONTO A P, TIOZON R N, ROJVIRIYA C, et al. Sonication increases the porosity of uncooked rice kernels affording softer textural properties, loss of intrinsic nutrients and increased uptake capacity during fortification[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 68: 105234.
- [ 41 ] LI S, LUO Z, GUAN X, et al. Effect of ultrasonic treatment on the hydration and physicochemical properties of brewing rice[J]. Journal of Cereal Science, 2019, 87: 78-84.