

叶彦均, 谭斌, 乔聪聪, 等. 生物发酵对糙米品质影响研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(10): 466-474. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060160

YE Yanjun, TAN Bin, QIAO Congcong, et al. Research Progress on the Effect of Biological Fermentation on Brown Rice Quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(10): 466-474. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060160

· 专题综述 ·

生物发酵对糙米品质影响研究进展

叶彦均¹, 谭斌², 乔聪聪², 张笃芹^{2,*}, 刘春¹

(1. 中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南长沙 410004;

2. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 粮油加工研究所, 北京 100037)

摘要:糙米中除富含蛋白质、膳食纤维、淀粉、脂质等人体代谢所必需的基本营养成分外, 还含有诸多对人体具有健康功效的生物活性物质, 但由于皮层的作用, 使糙米存在不易煮熟、口感粗糙、食味品质不佳等问题, 极大限制了糙米产品的消费和推广。大量研究证实, 生物发酵能够通过微生物及其酶的生物化学修饰过程, 有效提升糙米的营养及食用价值, 是目前改善糙米产品品质的关键手段之一。本文首先从食用、加工和功能特性三个方面详细介绍了生物发酵对糙米品质的有利影响, 汇总归纳了生物发酵技术在糙米加工的国内外研究及应用现状, 提出了近年来生物发酵技术带来的糙米产品更新及品质改善, 最后对糙米生物发酵加工未来的研究和发展方向进行了展望, 旨在为生物发酵技术在糙米加工中的应用以及糙米品质的全面提升提供理论参考。生物发酵技术在糙米加工领域具有极大的应用潜力, 未来会继续朝着发酵菌种选育、工艺优化、设备改良及规模化生产、安全性提升、高功能价值产品研发等方向发展。

关键词:生物发酵, 糙米, 品质改善, 研究应用

中图分类号: TS210.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)10-0466-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060160



本文网刊:

Research Progress on the Effect of Biological Fermentation on Brown Rice Quality

YE Yanjun¹, TAN Bin², QIAO Congcong², ZHANG Duqin^{2,*}, LIU Chun¹

(1. College of Food Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. Institute of Cereal Processing Science and Technology, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, P.R.C., Beijing 100037, China)

Abstract: The brown rice is rich in protein, dietary fiber, starch, lipids and other essential nutrients for human metabolism, and also contains a variety of bioactive substances with healthcare effects. However, due to the existence of bran, brown rice is difficult to cook, rough in taste and poor in taste quality, which greatly limits the consumption and popularization of the brown rice product. A large number of studies have proved that biological fermentation can effectively improve the nutrition and edible value of brown rice through the biochemical modification process of microorganisms and their enzymes, and it is one of the essential ways to improve the quality of brown rice products at present. In this paper, the beneficial effects of bio-fermentation on the quality of brown rice are introduced in detail from the aspects of edible, processing and functional properties. Then, the research and application progress of bio-fermentation technology in brown rice processing domestic and abroad are summarized, and the product update and quality improvement brought by bio-fermentation technology in recent years are put forward. Finally, the future research and development direction of bio-fermentation processing of brown rice are prospected, aiming to provide a theoretical reference for the application of bio-fermentation technology in brown rice processing and the overall improvement of brown rice quality. The bio-fermentation

收稿日期: 2021-06-18

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFE0206300); 国家粮食和物资储备局科学研究院自主选题科研计划课题 (ZX2016)。

作者简介: 叶彦均 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: yeyanjun1997@163.com。

* 通信作者: 张笃芹 (1990-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 谷物生物加工与品质调控, E-mail: zdq@ags.ac.cn。

technology has great potential for application in the field of brown rice processing, and tends to develop in the breeding of fermentation strains, optimization of processing, progress of equipment and large-scale production, improvement of safety, development of products with high functional value.

Key words: bio-fermentation technology; brown rice; quality improvement; research and application

稻米中含有多种营养物质,包括碳水化合物、蛋白质、脂质、维生素和膳食纤维等。精米由稻米经过脱壳、碾磨、抛光等工艺加工而成,主要由稻米的胚乳部分构成^[1];糙米由稻米脱壳后直接加工而成,由果皮(1%~2%)、糊粉层和种皮(4%~6%)、胚芽(2%~3%)及淀粉质胚乳(89%~94%)构成,因此,糙米相较于精米含有更多的营养成分,营养价值更高。随着人们对糙米营养价值认知的逐渐加深,糙米全谷物食品的开发利用越发受到重视,然而,由于糙米皮层的存在,不仅阻碍了糙米内部组织的吸水膨胀,同时较高的粗纤维含量使得糙米不易煮熟、口感粗糙、食味品质不佳^[2],限制了糙米的食用和发展。为提高糙米的品质,目前,国内外研究通常采用物理法、生物法或物理和生物结合的方法处理糙米。

生物发酵技术在食品加工中占有重要地位,可被定义为微生物及其代谢产物(主要包括酶、有机酸等)对主要食物基质进行生物化学修饰的过程^[3]。糙米的生物发酵主要是利用微生物在发酵过程中产生的酶破坏糙米皮层结构的完整性及内部组织连接的致密性,从而提升吸水性能,降低硬度。大量研究表明,利用生物发酵对糙米进行处理不仅提高其营养成分含量,提升糙米食用品质,还能有效提高其功能活性^[4],是备受国内外学者关注的加工方式之一。本文首先详细分析了生物发酵技术对糙米食用品质、加工品质及功能品质的影响,初步探索了生物发酵技术改善糙米品质的可能机制,其次,归纳总结了生物发酵技术在糙米加工领域的应用与发展,最后对生物发酵技术在糙米加工业中未来的应用和发展方向进行了展望,旨在为糙米生物发酵技术的系统研究提供一定的理论参考。

1 生物发酵对糙米营养品质的影响

糙米中除富含蛋白质、膳食纤维、淀粉、脂质等人体代谢所必需的基本营养成分外,还含有诸多对人体具有健康功效的生物活性物质以及干扰营养物质消化吸收的抗营养因子等。为提高糙米的品质,目前国内外研究通常采用物理法(碾削、高温流化、超高压、辐照、浸泡、超微粉碎等),生物法(萌芽、添加外源酶、生物发酵法等)或物理和生物结合等方法处理糙米^[5-6],表 1 对比了常用糙米处理方法的优缺点。

生物发酵技术不仅能够优化糙米的基本营养物质配比,提高其生物活性物质含量,还可以降低抗营养因子水平,从而极大改善糙米的营养品质。

1.1 生物发酵对糙米基本营养成分的影响

经生物发酵后,糙米的基本营养成分相较于未发酵有明显变化,糙米米糠中的主要成分,包括蛋白

质、灰分、可溶性膳食纤维含量显著增加,胚乳中的淀粉含量下降。利用酵母菌发酵糙米粉后,可溶性膳食纤维含量显著增加,增幅达 104.46%,淀粉含量由 65.57% 降低至 (58.24%±0.98%)^[14]。以 Eagle 酵母发酵的糙米粉中蛋白质和灰分含量增加最为明显,分别为 8.44% 和 1.32%;利用酿酒酵母发酵 72 h 时糙米中灰分含量最高,可达 14.7%,脂肪含量也显著增大至 15.2%^[15]。Chinma 等^[16]研究表明,米糠浓缩蛋白在经酵母固态发酵处理后,蛋白质和灰分含量分别升高至 72.5% 和 4.72%,相较于未发酵米糠浓缩蛋白分别增大了 6.77% 和 1.68%。根据 Oliveria 等^[17]的研究,米糠经米根霉发酵 96 h 后,蛋白质含量增大至 43%,同时,细胞壁中的木质素被分解,从而释放出更多具有高抗氧化活性的酚类化合物。

研究表明,可溶性和不溶性纤维含量的变化可归因于酶活性的影响,发酵过程中细胞壁基质被微生物代谢产生的酶所降解,从而使可溶性膳食纤维含量增加^[18];蛋白质含量的增加则可能是由于酵母细胞的增殖和积累,以及在发酵过程中微生物的代谢活动合成了新的蛋白质;灰分含量的增加可能是由抗营养物质的降解或纤维成分的重排导致的^[17]。淀粉含量的降低可归因于在发酵过程中,糙米皮层的水解为外源酶的进入提供了有效的通道,糙米中的内源酶在适当温度和湿度条件下被激活,从而对胚乳中的淀粉产生水解作用。

1.2 生物发酵对糙米生物活性物质的影响

大多数生物活性物质是以结合态的形式存在于糙米中,如酚类化合物、 γ -氨基丁酸、叶酸等。糙米的部分组织经发酵过程中微生物的有效降解,这些以结合态形式存在的活性物质被释放了出来,使发酵产物具有一定的功能活性。

1.2.1 酚类化合物 谷物中的酚类化合物(Phenolic compounds, PC)主要包括酚酸、黄酮等,酚酸可以分为两大类,羟基苯甲酸(包括对羟基苯甲酸、原儿茶酸、香草酸和没食子酸)和羟基肉桂酸衍生物(对香豆酸、咖啡酸、阿魏酸和芥子酸)。酚类化合物通常都与细胞壁多糖结合,以结合酚形态存在,称为膳食纤维-酚类化合物(Dietary fiber-phenolic compounds, DF-PC)。人体菌群产生的 β -葡萄糖苷酶和酯酶不能降解高度交联的结合态膳食纤维-酚类化合物,因此,结合酚的生物利用度较低,可在食用前将结合酚转化成游离酚,以提高其生物利用度^[19]。

利用微生物对谷物进行生物发酵可以提高酚类物质含量,特别是游离酚的含量。文伟等^[20]研究发现,嗜酸乳杆菌发酵脱脂米糠 24 h 后,可溶性酚类物

表 1 糙米食用品质提升技术
Table 1 Food quality improvement techniques for brown rice

分类	技术名称	定义	优点	缺点	参考文献
物理法	浸泡	采用水或者其他溶液对糙米进行浸泡,使糙米吸收水分、组织结构软化,以缩短糙米的烹饪时间。	软化糙米结构,改善糙米品质。	浸泡过程易被微生物污染、耗时长、效率低、产品品质差,单独使用较少,在工业生产中常与蒸煮、干燥、发酵及发芽协同使用。	Kiomars等 ^[7] , 2019
	碾削	碾削指通过去除糙米糊粉层从而提升吸水性能的过程。	操作简单、成本低、易于推广。	营养物质会随着糙米碾削程度的加深而过度流失。常与低温等离子体、高静压、超声等新型非热加工技术或发酵、萌芽、酶处理等生物加工技术相结合使用。	Donatella等 ^[8] , 2020
	超微粉碎	超微粉碎技术是指利用机械或流体动力的方法克服糙米内部凝聚力使之破碎。	超微粉碎可以提升糙米粉的性质,使其具有良好的溶解性、分散性和吸附性。	然而糙米的营养物质大部分集中在米糠上,易造成营养成分流失。	彭国泰等 ^[9] , 2017
	超高压	超高压处理破坏皮层的结构,使水分更易渗透到米粒内部结构,从而提升糙米品质。	超高压技术能最大限度地保留食品营养价值、色泽、风味和香味。	成本高、效率较低、稳定性差、设备维护保养难度大、超高压处理后营养成分部分流失等。	Xia等 ^[10] , 2017
	高温流化	高温流化法主要是利用在流化干燥过程中糙米颗粒内外的水分梯度,导致使谷物内部产生抗压应力,造成裂缝,从而影响糙米的形状和质地特性。	通过技术参数的变更优化可精确控制糙米的形状、质地等品质特性。	操作复杂、成本高、难于控制,特别是需控制好高温流化的条件以免过高温破坏糙米内部结构。	Li等 ^[6] , 2017
生物法	辐照	辐照技术主要是利用放射性元素产生的射线和电子加速器产生的电子束对物体糙米进行加热。	辐照可显著改善糙米蒸煮品质,可延长糙米保质期,同时改善糙米品质。	辐照剂量控制要严格,辐照剂量过大糙米颜色会变深,更严重的会改变分子结构,从而会危害食用者的身体健康,诱发疾病。	Pradeep等 ^[11] , 2017
	萌芽	发芽法主要是通过活化糙米内源酶使其对自身作用,从而软化皮层,提高吸水性能。	发芽糙米不仅具有良好的消化性和吸收性;与未处理糙米相比,萌芽糙米质地更好,口味更佳。	发芽处理必须严格控制工艺,否则容易发霉、发臭,影响糙米品质,使其接受度降低。	Hathairat ^[12] , 2017
	外源酶法	糙米表层含有大量的纤维素、半纤维素及果胶物质,相应酶处理能将物质部分或全部降解。	酶解可以使糙米皮层结构变松散,提升糙米品质。	酶法处理成本较高,且各酶最适作用条件不同,增加了操作难度。	Zeng等 ^[13] , 2017
	生物发酵	生物发酵可被定义为微生物及其酶对糙米基质进行生物化学修饰的过程。	发酵有利于食品的保存,改良风味,提升口感,提高营养价值,增加多酚、多糖等生物活性组分,减少植酸、单宁等抗营养化合物,改善糙米的抗氧化性能。	但发酵过程不易调控,不易进行规模化生产,难以商业化,发酵产物具有不确定性,发酵过程中工艺参数难检测和控制等。	Zlatica等 ^[3] , 2007

质含量提高了 33.00%, 发酵 72 h 后, 不溶性酚类物质下降了 20.32%。Schmidt 等^[21] 研究发现, 米糠经米曲霉固态发酵后, 游离酚含量的提高大于 100%, 其中, 没食子酸和阿魏酸随发酵时间的增长而增加, 分别达到 170 和 765 mg/g。生物发酵使糙米酚类化合物含量增加, 主要归因于微生物生长代谢产生的 α -淀粉酶、 β -糖苷酶和木聚糖酶等, 通过水解作用切断了结合酚与细胞壁成分之间的联系, 导致细胞壁中大量的结合酚释放出来, 增加游离酚的含量, 从而提升谷物的抗氧化性能^[22]。

1.2.2 γ -氨基丁酸 γ -氨基丁酸(Gamma-amino butyric acid, GABA)具有降血压、降惊厥、促进记忆和抗疲劳等功能^[23]。糙米萌芽是提高 GABA 含量最为常用的方法, 而糙米萌芽辅助生物发酵技术则可以进一步提高 GABA 含量, 使发芽糙米营养价值取得更为显著的提升^[24]。李飞等^[25] 以不同蜂蜜添加量、酵母活化液添加量、发酵时间及发酵温度对糙米进行发酵处理, 分析了生物发酵对糙米酵素中 GABA 含量的影响, 结果表明, 当蜂蜜添加量 8%、酵母活化

液添加量 13%、发酵时间 3.9 h、发酵温度 30 ℃ 时, 发芽糙米酵素中 GABA 的含量最高, 可达 0.80 mg/mL。范媛媛等^[24] 研究发现, 利用乳酸菌和酵母菌混合发酵会使糙米匀浆中 GABA 含量增加到 33.25 mg/mL。这可能是由于生物发酵对发芽糙米的处理过程中微生物的代谢活性导致生物酶系统被激活, 进而降解淀粉和蛋白质等营养成分并产生以 GABA 为主的一些次级代谢物^[26]。

1.2.3 其他生物活性物质 糙米中还含有米糠多糖、叶酸及谷胱甘肽等多种生物活性物质, 与酚类化合物类似, 在经生物发酵处理后, 糙米部分组织会被酶水解等作用破坏, 使结合态的生物活性物质被释放出来, 显著提高了糙米发酵产物的生物活性。

发酵 7 d 后, 米糠多糖含量显著提高, 表现为对羟基自由基的清除活性提高, 可达 98.3%; 发酵 9 d 后, 米糠多糖对 DPPH 自由基清除活性达到 87.8%, 高于未发酵的米糠多糖(56.2%)^[27]。在发酵过程中, 糙米中叶酸含量也会显著提升, Bationo 等^[28] 用植物乳杆菌 6.2/发酵乳杆菌 MW2 和发酵乳杆菌 8.2/植

物乳杆菌 A6 制备的糙米粥中叶酸含量分别为 7.1 和 7.3 $\mu\text{g}/100\text{ g}$, 显著高于用传统方法制备的糙米粥(叶酸含量仅为 4.2 $\mu\text{g}/100\text{ g}$)。利用乳酸菌对膨化糙米汁进行发酵也可显著提升叶酸含量(可达 0.98 $\mu\text{g}/\text{mL}$)^[29]。与对照组未发酵米糠提取物相比, 布拉氏酵母菌发酵的米糠提取物可显著降低人类 B 淋巴瘤活性, 淋巴瘤的活力比对照组降低 85%^[30]。

Sakurai 等^[31]利用米曲霉发酵糙米, 产品可使小鼠巨噬细胞中谷胱甘肽含量得到显著提高。张旭普^[32]利用乳酸菌和酵母菌对糙米复合发酵 12 h, 还原型谷胱甘肽提高了约 26.659 mg/g。因此, 生物发酵不仅提高了游离态生物活性物质的含量, 还不同程度地改变了生物活性化合物的结构, 增强其功能活性。

1.3 生物发酵对糙米中抗营养因子的影响

抗营养因子是指干扰营养物质消化吸收, 且对营养物质的消化、利用和吸收产生不利影响的一系列物质。微生物发酵法被广泛用于谷物抗营养因子的降解, 糙米中含有多种抗营养因子, 如植酸、非淀粉多糖、酚类等。生物发酵对糙米中抗营养因子具有显著的降解作用, 且相关机制各不相同。

1.3.1 生物发酵技术对糙米中植酸的影响 植酸富含六个磷酸基团, 它与膳食阳离子形成不溶性复合物, 降低了矿物质的生物利用度。有研究指出, 生物发酵可显著降低植物性食品中植酸的含量, 同时提高矿物质溶解度^[33]。磷、铁和钙等矿物质以植酸盐形态存在于糙米糊粉层, 锌形成的植酸盐则广泛分布于胚乳中, 所有植酸盐总含量约占糙米籽粒干重的 1% 左右^[34]。Buddrick 等^[35]研究发现, 不同发酵方式对植酸水平影响不同, 但均可显著降低植酸含量, 且发酵过程中植酸的水解可显著提高矿物质(包括钙、铜、镁、锌和铁)的生物利用度。研究证实, 生物发酵显著降低了包括糙米在内的全谷物食品中植酸的含量^[36], 其机理可归纳为: a. 发酵过程中微生物产生的酶类水解抗营养因子; b. 发酵导致 pH 变化至植酸酶的最适 pH, 提升植酸酶的活性, 使其作用于植酸, 植酸酶将植酸高聚合形态 IP6, 肌醇 1, 2, 3, 4, 5, 6-六磷酸分解成低聚合形态, 包括 IP5、IP4、IP3、IP2、IP1 和肌醇, 低聚合形态的植酸金属螯合能力较低, 从而消除了抗营养作用^[37]。

与其抗营养作用相反, 植酸在低浓度时往往具有一些有益健康的特性, 如降低血浆胆固醇和甘油三酯、降低重金属毒性、抗氧化以及抗癌作用^[38]等。理论上, 通过对工艺参数的优化, 固态发酵技术可将糙米中的植酸含量降低至仅发挥有益人体健康的水平, 但目前尚未见到相关的研究报道。

1.3.2 生物发酵技术对糙米中单宁的影响 除植酸外, 糙米中还存在一些含量较少的抗营养因子, 如单宁。目前, 生物发酵技术对糙米中单宁含量影响的相关研究较为缺乏, 但对其他谷物中单宁含量影响的相关研究已有报道。小米发酵 12 和 24 h 会使一些食

物抑制剂减少, 特别是植酸和单宁。然而, 由于不同微生物代谢产生单宁降解酶的过程存在差异, 也有研究发现, 生物发酵对单宁物质的降解作用并不明显, 例如, 室温下发酵 36 h 并不会导致小米发酵样品的单宁含量发生变化。生物发酵引起单宁含量的降低可能与菌群产生多酚氧化酶或单宁酶, 对单宁产生水解作用有关^[39], 但相关机制仍需进一步研究。

2 生物发酵对糙米感官品质的影响

生物发酵后糙米的感官品质会明显提升, 具体表现为硬度下降、风味物质增加以及宜人香味的萌生。

2.1 生物发酵对糙米口感的影响

生物发酵对糙米质构的影响最为显著, 有研究表明, 糙米发酵后, 硬度降低了 29.63%, 黏性增加了 81.88%, 咀嚼性下降了 46.86%^[40], 主要是因为发酵使糙米皮层被降解, 在蒸煮时使水分快速迁移至糙米内部, 增强了淀粉与水的作用, 使淀粉快速糊化^[41]。利用乳酸菌发酵米糠后, 发现乳酸菌可以软化米糠纤维的结构, 提高米糠的加工效率^[42], 对糙米进行发酵后产生的酸性环境可以减缓淀粉的老化, 提升大米的食用品质。

2.2 生物发酵对糙米风味的影响

生物发酵可以提升糙米的风味, 发酵后糙米中的己醇、反-2-十一烯醇等醇类物质含量显著升高, 糙米饭的水果香味与花香味增加, 1-辛烯-3-醇、1-十二烷醇等醇类物质含量显著下降, 糙米饭的土味与油脂味减少^[40]。游离氨基酸也可影响糙米风味, 研究表明, 谷氨酸和天门冬氨酸具有鲜味, 混菌发酵后糙米中这两种氨基酸的总量提升了 20.51%; 起甜味作用的氨基酸有甘氨酸、脯氨酸、丝氨酸、丙氨酸、苏氨酸和赖氨酸, 混菌发酵后其总量提升了 43.36%^[43]; 此外, 发酵后可溶性糖的含量增加, 也会产生适度的甜味^[44]。

3 生物发酵对糙米加工品质的影响

糙米的皮层富含蜡质和纤维, 导致糙米不易蒸煮, 口感粗糙, 风味差。生物发酵可软化糙米皮层, 增强其吸水性, 缩短糙米的蒸煮时间, 改善糙米的蒸煮品质。有研究表明, 糙米经乳酸菌发酵后, 蒸煮时间缩短了 6.46 min, 吸水率增加了 25.18%, 蒸煮性能显著改善^[45]。这可能是因为, 发酵过程中微生物代谢产生的酶和酸破坏了糙米皮层纤维结构的完整性, 降低了内部组织连接的致密性。此外, 内部淀粉也会被部分水解, 特别是糙米中支链淀粉的长链被酶解, 相对结晶度降低, 糊化热和糊化温度显著降低, 这对提高糙米的蒸煮品质起到了重要的作用^[46]。

对于发酵糙米微观结构的研究显示, 未发酵糙米的皮层外观紧密且光滑, 而发酵后糙米的皮层在一定程度上软化、起皱(图 1A~D), 随着发酵时间的延长, 淀粉表面会出现沟壑和小孔^[47]。与程鑫^[45]的观察结果相似, 发酵前糙米皮层与胚乳结合紧密, 发酵

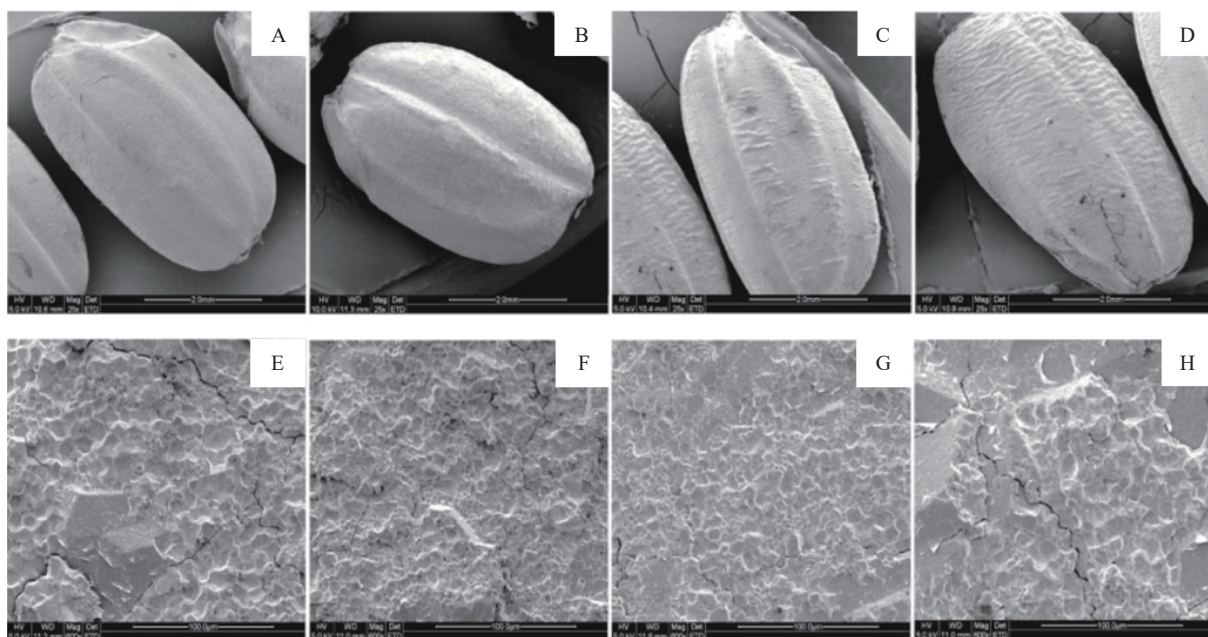


图1 未处理的糙米和发酵处理的糙米表面、横截面扫描电镜图像^[46]

Fig.1 Apparent and cross-sectional SEM images of untreated BR and SSF-treated BR^[46]

注: A: 未发酵糙米表面; B: 发酵 12 h 糙米表面; C: 发酵 24 h 糙米表面; D: 发酵 36 h 糙米表面; E: 未发酵糙米横截面; F: 发酵 12 h 糙米横截面; G: 发酵 24 h 糙米横截面; H: 发酵 36 h 糙米横截面。

后的糙米皮层与胚乳之间出现明显的裂隙, 这些变化有利于水分进入糙米内部。提高观测倍数后发现, 未发酵糙米的淀粉呈不规则多边形, 边界明显, 而发酵糙米的淀粉部分边界模糊(图 1E~H), 与 Ilowefah 等^[48]的研究结果类似。糙米皮层吸水通道的打开和淀粉颗粒结构的变化加速了糙米蒸煮过程中淀粉的糊化, 从而改善糙米的蒸煮性能。

4 生物发酵对糙米功能品质的影响

4.1 生物发酵对糙米抗氧化活性的影响

糙米中含有多酚类物质、维生素 E、类胡萝卜素等常见抗氧化成分, 谷物的体外抗氧化能力与这些成分的含量密切相关^[49]。大量研究证实, 生物发酵技术可显著增强糙米的体外抗氧化能力。Janarny 等^[50]研究发现, 随着发酵的进行, 米糠样品的酚酸类物质增加, 米糠样品 Bw367 和 Bg352 的总抗氧化能力分别提高了 38.78% 和 44.32%。通过给小鼠灌胃发酵糙米提取物可提高摄入抗氧化酶的含量, 增强了机体清除自由基的能力, 起到了抗氧化作用^[51]。Shin 等^[52]推测发酵米糠提取物中的酚酸类物质在提高自由基清除活性中起主要作用, 发酵后 DPPH 的清除率增加, 从发酵米糠中提取的酚类物质显示出缓慢的 DPPH 自由基抑制能力, 其值为 250 mg/mL, 对过氧化物酶具有潜在的竞争性抑制作用^[21]。利用灰树花菌属对糙米米糠进行发酵, DPPH 的清除率约为 87.85%, 而未发酵样品 DPPH 清除率仅为 56.2%^[27]。Abdrazak 等^[53]研究发现未发酵米糠水提取物, 以及分别用紫曲霉、少孢曲霉、紫曲霉-少孢曲霉的发酵米糠水提取物的抗氧化活性分别为 30.22 ± 9.57 、 61.21 ± 4.5 、 116.33 ± 4.74 、 144.03 ± 10.12 mg AAE/g(抗坏血酸当

量 AAE: Ascorbic acid equivalents)。Shin 等^[52]利用固态发酵对米糠进行发酵略微提高了自由基清除活性, 发酵进行 2~4 d 时自由基清除活性最高(米根霉和泡盛曲霉发酵的黑米糠自由基清除活性分别为 22.90 和 22.85 $\mu\text{mol TE/g}$ (水溶性维生素 E 当量 TE: Trolox equivalents))。综上所述, 利用生物发酵技术可以增强自由基清除能力, 提升糙米抗氧化活性。

4.2 生物发酵对糙米其他功能品质的影响

利用生物发酵技术对糙米进行处理可提升除抗氧化活性以外的多种其他功能品质。乳酸菌在糙米基质中生长代谢时可分泌多种有益成分, 如有机酸、过氧化氢抑菌素, 具有调节免疫、降低胆固醇、降血压等功效^[54]; 酵母细胞壁中的葡聚糖被证实具有较好的降血脂功效。同时, 酵母菌和乳酸菌还分泌多种有助于消化的蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶等酶解酵素, 可达到降解糙米营养物质、生成有益成分的效果^[51]。通过各种微生物作用制备的发酵米糠具有多种促进健康和化学保护特性, 例如抗癌、抗炎、抗糖尿病、抗动脉粥样硬化、抗过敏、抗应激、抗疲劳、抗血栓、保肝、抗菌、抗生物膜、酪氨酸酶抑制、预防特异性皮炎、阿霉素诱导毒性的化学保护作用、癌细胞的细胞毒性作用、保护肝脏免受急性肝炎的影响以及免疫增强剂^[55]等。

5 生物发酵在糙米产品中的应用

生物发酵技术对糙米产品品质改善效果明显, 国内研究学者对于生物发酵在糙米产品中的应用越来越重视, 目前已开发出的发酵糙米产品主要包括糙米酵素、糙米面包、发酵糙米糕、糙米焙烤类食品和糙米发酵饮料等。

5.1 发酵糙米糕及焙烤类制品

糙米常用于制作主食类产品,特别适合于制作糙米糕及焙烤类产品。仰思颖等^[56]以糙米粉为原料,米发糕为载体,利用酵母和乳酸菌为发酵剂,创制出一种发酵糙米糕,相较于普通米发糕,这种新型糙米糕营养物质更为丰富,品质更好,特别是添加 0.3% 黄原胶、9% 谷朊粉、3% 木薯淀粉等改良剂后,其感官品质进一步提高。国外也有许多类似的米糕制品,包括 Idli、Dosa、Dhokla 等^[57]。Phantipha 等^[58]通过将面粉和糙米粉进行复配发酵后制作的面包,口味更好、营养更优。赵丛丛等^[59]将糙米粉以 15% 的比例添加进面包,利用酵母进行发酵制成一种表面光滑无裂纹,口感松软,具有特殊的发酵风味的蔓越莓糙米面包。在馒头制备过程中添加发酵糙米粉可以显著改善其流变学特性和食用品质^[60]。研究证明发酵糙米米粉较未发酵糙米米粉品质有很大的改善,发酵糙米后的糙米米粉比未发酵的米粉更易熟且不易断条,口感更细腻,有一定的发酵风味且无明显酸味^[61]。

5.2 糙米饮料

利用双边发酵工艺,以糙米为原料,加入大米和水,可制成乙醇含量高、清香醇厚的清酒或有独特风味的蒸馏酒^[62],这种饮料在日本尤为受欢迎。此外,糙米还可制作葡萄酒,具体方法是以糙米或胚芽糙米为原料,经过一段时间蒸煮后进行酶解、糖化,然后加入乳酸菌和葡萄酒酵母菌,在常温下酿造制成糙米葡萄酒。制成的糙米葡萄酒酒精含量低,无葡萄酒的涩味,酒味醇厚且营养丰富,是一种口感类似于葡萄酒且具有保健功能的酒精饮料^[63]。利用生物发酵技术也能制出各式的糙米乳饮料,陈海旭^[64]研发出了一种风味酸度适宜、清香浓郁、口感醇厚的糙米益生菌饮料。晁鲁平^[65]研究了发酵糙米乳饮料的生产工艺,得到最佳发酵条件为牛奶与米浆配比 4:1、接种量 4%、发酵温度 50℃、发酵时间 7 h,发酵后测得产品中 GABA 含量为 66.85 mg/100 mL;饮料的最佳配方为混合发酵乳 50%、白砂糖 8%、乳酸添加量 0.1%,稳定剂最佳配方为硬脂酰乳酸钠 0.15%、海藻酸钠 0.15%、魔芋胶 0.15%,此条件下得到的饮料色泽为乳白色,稳定性好,风味最佳。

5.3 糙米酵素

糙米酵素是以糙米、米糠、发芽糙米等为主要原料,添加蜂蜜、麦芽粉、盐等辅料,加入微生物菌种进行发酵,最后经干燥和粉碎得到的一种含有丰富营养物质的混合生物酶体系,其营养价值超越了糙米本身^[65]。糙米酵素不仅可以制作糙米饮料,还可以作为食品添加剂,是近年来新兴的一种发酵类糙米产品。糙米酵素中富含多种生理活性成分,使糙米的功能特性,包括促进新陈代谢、提高机体免疫力等作用显著增强。目前我国对糙米酵素的研究还处于初级阶段,糙米酵素不仅能够直接食用,还可以作为食品添加剂及原料改良剂添加到食品中。研究显示,糙米酵素中

维生素 B₁、维生素 B₂ 和维生素 E 的含量分别是糙米的 9、9、2.5 倍^[66]。糙米酵素可以直接加入饮食中,还可应用于焙烤食品、肉制品、乳制品加工中,例如与大米混合,经红曲霉发酵制成糙米酵素红曲酒^[67],糙米红曲酒对机体具有一定的抗疲劳作用。

6 讨论与展望

综上所述,糙米未被消费者们所广泛接受,主要由于其存在难蒸煮、口感风味不佳等问题。利用生物发酵对糙米品质进行改良,不仅可以改善糙米的口感、使其具有独特的风味,还能在提高糙米营养价值的同时消除糙米中的抗营养因子。此外,糙米的发酵可以提高许多生物活性化合物的水平,有助于抑制有害微生物生长,提高食品安全性,因此,在食品工业有着巨大的潜力。

尽管如此,糙米的生物发酵在发展及推广上仍面临着诸多瓶颈:a.对发酵菌种研究较少,已知的专门用于改善糙米品质的菌种极少,糙米皮层的存在极易导致重金属残留,生物发酵技术对糙米中可能存在的重金属超标问题能否起到有益作用还需进一步探究;b.对发酵工艺研究不够深入,目前的生物发酵方式仍局限于作坊式生产,产品质量不稳定,安全性得不到保障;c.发酵设备适用性差,不能根据发酵过程 pH、温度、湿度等要求的变化而调整,导致发酵产品质量差、品质不过关等;d.发酵产品品质调控研究不够系统和深入,生物发酵工艺与产品品质之间的关联性不明确,发酵产品品质难以调控;e.糙米发酵相关产品种类较少,糙米发酵食品亟待开发。

对于上述问题,糙米的生物发酵未来需要投入更多的研究精力,包括:a.发酵过程中菌种选育、方式选择、工艺创新、加工装备的集成创新;b.生物发酵对糙米生物活性物质结构与功能的影响;c.生物发酵糙米产品的健康促进作用评价,包括生物发酵对糙米生物利用率和肠道微生态的影响研究等;d.加快糙米发酵新产品的研发,实现现代化和规模化的加工生产。

综上所述,生物发酵技术在糙米加工中的应用对于提升国民生活质量、改善国民膳食结构、节约稻米资源具有重要意义,糙米发酵制品具有广阔的市场发展前景。

参考文献

- [1] MARIANA R A, SUNGEUN C, MARÍA A B, et al. Impacts of degree of milling on the appearance and aroma characteristics of raw rice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2016, 96(9): 3017-3022.
- [2] 杨玉民,宋善武,张亮,等.我国糙米食品的研究现状与发展趋势[J]. *食品科技*, 2018(7): 174-180. [YANG Y M, SONG S W, ZHANG L, et al. Current status and development trend of brown rice food[J]. *Food Science and Technology*, 2018(7): 174-180.]
- [3] ZLATICA K, JOLANA K. Fermentation of cereals for specific purpose[J]. *Journal of Food and Nutrition Research*, 2007,

46(2): 51–57.

[4] SMITH G N, EMMANUEL A, ELIJAH H K, et al. Fermentation and germination improve nutritional value of cereals and legumes through activation of endogenous enzymes[J]. *Food Science & Nutrition*, 2018, 6(8): 2446–2458.

[5] YU Y, PAN F, RAMASWAMY H S, et al. Effect of soaking and single/two cycle high pressure treatment on water absorption, color, morphology and cooked texture of brown rice[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2017, 54(6): 1655.

[6] LI Y F, SU X, SHI F, et al. High-temperature air-fluidization-induced changes in the starch texture, rheological properties, and digestibility of germinated brown rice[J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(9-10): 1–10.

[7] KIOMARS S, MASOUD Y, RAMIN N N, et al. The reduction of toxic metals of various rice types by different preparation and cooking processes-human health risk assessment in Tehran households, Iran[J]. *Food Chemistry*, 2019, 280: 294–302.

[8] DONATELLA B M F, GRAZIA M B, OTO M, et al. Effects of grain debranning on bioactive compounds, antioxidant capacity and essential and toxic trace elements in purple durum wheats[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 118: 108734.

[9] 彭国泰, 吴娜娜, 谭斌, 等. 超微粉碎处理对糙米理化性质的影响[J]. *粮油食品科技*, 2017, 25(2): 17–21. [PENG G T, WU N N, TAN B, et al. Study on the effect of superfine grinding on physicochemical properties of brown rice flour[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2017, 25(2): 17–21.]

[10] XIA Q, WANG L P, XU C, et al. Effects of germination and high hydrostatic pressure processing on mineral elements, amino acids and antioxidants *in vitro* bioaccessibility, as well as starch digestibility in brown rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2017, 214(1): 533–542.

[11] PRADEEP K, KUMAR S P, KULSUM J, et al. Effects of gamma irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of brown rice starch[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 77: 194–200.

[12] HATHAIRAT P, YA J W, ONANONG N. Impact of pre-germination on amylopectin molecular structures, crystallinity, and thermal properties of pre-germinated brown rice starches[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 73: 151–157.

[13] ZENG Z, LI Y, YANG R, et al. The relationship between reducing sugars and phenolic retention of brown rice after enzymatic extrusion[J]. *Journal of Cereal Science*, 2017, 74: 244–249.

[14] MUNA I, JAMILAH B, HASANAH M G, et al. Enhancement of nutritional and antioxidant properties of brown rice flour through solid-state yeast fermentation[J]. *Cereal Chemistry Journal*, 2017, 94(3): 519–523.

[15] LARINE K, ELIANE C, MERITAINE R, et al. Solid-state fermentation for the enrichment and extraction of proteins and antioxidant compounds in rice bran by *Rhizopus oryzae*[J]. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2012, 55(6): 937–942.

[16] CHIEMELA E C, MUNA A I, BALAKRISHNAN S, et al. Chemical, antioxidant, functional and thermal properties of rice bran proteins after yeast and natural fermentations[J]. *International Jour-*

nal of Food Science & Technology, 2015, 49(10): 2204–2213.

[17] OLIVEIRA M, FEDDERN V, KUPSKI L, et al. Physicochemical characterization of fermented rice bran biomass caracterización físico-química de la biomasa del salvado de arroz fermentado[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2010, 8(3): 229–236.

[18] KATINA K. Sourdough: A tool for the improved flavour, texture and shelf-life of wheat bread[J]. *Vtt Publications*, 2005(569): 3–92.

[19] CĂLINOIU L F, VODNAR D C. Whole grains and phenolic acids: A review on bioactivity, functionality, health benefits and bioavailability[J]. *Nutrients*, 2018, 10(11): 1–31.

[20] 文伟, 张名位, 刘磊, 等. 乳酸菌发酵对脱脂米糠中糖和酚类物质含量的影响[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(198): 137–141.

[WEN W, ZHANG M W, LIU L, et al. Effects of lactic acid bacteria fermentation on the content of sugars and polyphenols of defatted rice bran[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2016, 32(198): 137–141.]

[21] SCHMIDT C G, GONÇALVES L M, PRIETTO L, et al. Antioxidant activity and enzyme inhibition of phenolic acids from fermented rice bran with fungus *Rizhopus oryzae*[J]. *Food Chemistry*, 2014, 146: 371–377.

[22] WANG T, HE F, CHEN G. Improving bioaccessibility and bioavailability of phenolic compounds in cereal grains through processing technologies: A concise review[J]. *Journal of Functional Foods*, 2014, 7: 101–111.

[23] SARASA S B, MAHENDRAN R, MUTHUSAMY G, et al. A brief review on the non-protein amino acid, gamma-amino butyric acid (GABA): Its production and role in microbes[J]. *Current Microbiology*, 2020, 77(3): 534–544.

[24] 范媛媛, 丁俊胃, 熊善柏, 等. 复合菌种发酵法提高发芽糙米中 γ -氨基丁酸[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34(3): 1–6. [FAN Y Y, DING J S, XIONG S B, et al. Improvement of γ -aminobutyric acid in germinated brown rice by fermentation with compound bacteria[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2019, 34(3): 1–6.]

[25] 李飞, 隋新, 苏红, 等. 不同发酵条件对糙米酵素中活性成分的影响[J]. *中国酿造*, 2016, 35(11): 162–166. [LI F, SUI X, SU H, et al. Effect of different fermentation conditions on the active ingredients in the brown rice leaven[J]. *China Brewing*, 2016, 35(11): 162–166.]

[26] LAMBERTS L, JOYE I J, BELIËN T, et al. Dynamics of γ -aminobutyric acid in wheat flour bread making[J]. *Food Chemistry*, 2012, 130(4): 896–901.

[27] LIU Q, CAO X, ZHUANG X, et al. Rice bran polysaccharides and oligosaccharides modified by grifola frondosa fermentation: Antioxidant activities and effects on the production of NO[J]. *Food Chemistry*, 2017, 223: 49–53.

[28] BATIONOA F, SONGRÉ-OUATTARA L T, YOUNA M H, et al. Improved processing for the production of cereal-based fermented porridge enriched in folate using selected lactic acid bacteria and a back slopping process[J]. *LWT*, 2019, 106: 172–178.

[29] 邹盈, 葛杭丽, 柳华贵, 等. 产叶酸菌株的鉴定及其膨化糙米汁发酵工艺条件的优化[J]. *浙江农业学报*, 2015, 27(4):

- 665–670. [ZOU Y, GE H L, LIU H G, et al. Identification of folic acid producing strains and optimization of fermentation conditions for expanded brown rice juice[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2015, 27(4): 665–670.]
- [30] RYAN E P, HEUBERGER A L, WEIR T L, et al. Rice bran fermented with *Saccharomyces boulardii* generates novel metabolite profiles with bioactivity[J]. *J Agric Food Chem*, 2011, 59(5): 1862–1870.
- [31] SAKURAI H, CHOO M K, CHINO A. Antimetastatic and immunostimulatory properties of fermented brown rice[J]. *Journal of Traditional Medicines*, 2006, 23(3): 112–116.
- [32] 张旭普. 糙米酵素发酵工艺的初步研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2018. [ZHANG X P. The preliminary study on the fermentation technology of brown rice jiaosu[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2018.]
- [33] ERTAŞ N. Effects of baker's yeast addition on some properties and phytic acid content of tarhana prepared with different cereal and legume products[J]. *Food and Health*, 2018, 4(1): 9–18.
- [34] LEE H H, LOH S P, BONG C F G, et al. Impact of phytic acid on nutrient bioaccessibility and antioxidant properties of dehusked rice[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2015, 52(12): 7806–7816.
- [35] BUDDRICK O, JONES O A H, CORNELL H J, et al. The influence of fermentation processes and cereal grains in wholegrain bread on reducing phytate content[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 59(1): 3–8.
- [36] REALE A, KONIETZNY U, COPPOLA R, et al. The importance of lactic acid bacteria for phytate degradation during cereal dough fermentation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(8): 2993–2997.
- [37] 花蕴, 黄昆仑, 梁志宏. 微生物发酵法降解谷物中抗营养因子的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(21): 272–276. [HUA Y, HUANG K L, LIANG Z H. Research progress on degradation of anti-nutritional factors in cereals and legumes by microbial fermentation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(21): 272–276.]
- [38] KUMAR V, SINHA A K, MAKAR H P S, et al. Dietary roles of phytate and phytase in human nutrition: A review[J]. *Food Chem*, 2010, 120(4): 945–959.
- [39] ELYAS S H, TINAY A H, YOUSIF N E, et al. Effect of natural fermentation on nutritive value and *in vitro* protein digestibility of pearl millet[J]. *Food Chemistry*, 2002, 78(1): 75–79.
- [40] 程鑫, 李永富, 史锋, 等. 乳酸菌发酵对糙米蒸煮性能和食用品质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2018, 33(5): 1–7. [CHENG X, LI Y F, SHI F, et al. Effect of *Lactobacillus* fermentation on cooking and eating quality of brown rice[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2018, 33(5): 1–7.]
- [41] LI Y F, TENG F, SHI F, et al. Effects of high temperature air fluidization (HTAF) on eating quality, digestibility and antioxidant activity of black rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Starch-Strke*, 2016, 69(7–8): 1–10.
- [42] SAMAN P, FUCIÑOS P, VÁZQUEZ J A, et al. Fermentability of brown rice and rice bran for growth of human *Lactobacillus plantarum* NCIMB 8826[J]. *Food Technology & Biotechnology*, 2011, 49(1): 128–132.
- [43] 高煜煜, 张旭普, 白俊岩, 等. 不同发酵工艺糙米酵素中游离氨基酸、 γ -氨基丁酸及挥发性香气成分分析[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(23): 36–41. [GAO M M, ZHANG X P, BAI J Y, et al. Component analysis of free amino acids, GABA and volatile aroma in brown rice enzymes with different fermentation processes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(23): 36–41.]
- [44] LIANG C H, SYU J L, LEE Y L, et al. Nonvolatile taste components of solid-state fermented adlay and rice by *Phellinus linteus*[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(10): 1738–1743.
- [45] 程鑫. 乳酸菌发酵对糙米蒸煮食用品质改良效果的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [CHENG X. Study on improving cooking and eating qualities of brown rice by lactic acid bacteria fermentation[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [46] LI Y F, TENG F, SHI F, et al. Effect of solid-state fermentation by *Lactobacillus plantarum* on the cooking quality, microstructure, and physicochemical properties of brown rice[J]. *Starch-Stärke*, 2019, 71(3–4): 1–34.
- [47] ZHOU Z, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Effect of storage temperature on cooking behaviour of rice[J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(2): 491–497.
- [48] ILOWEFAH M, BAKAR J, GHAZALI H M, et al. Physicochemical and functional properties of yeast fermented brown rice flour[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2015, 52: 5534–5545.
- [49] FARDET A, ROCK E, RÉMÉSY C. Is the *in vitro* antioxidant potential of whole-grain cereals and cereal products well reflected *in vivo*?[J]. *Journal of Cereal Science*, 2008, 48(2): 258–276.
- [50] JANARNY G, GUNATHILAKE K D P. Changes in rice bran bioactives, their bioactivity, bioaccessibility and bioavailability with solid-state fermentation by *Rhizopus oryzae*[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 23: 101510.
- [51] 戴凌燕, 李志江, 王欣, 等. 发酵糙米提取物对高血脂大鼠血脂、肝脏脂类含量及抗氧化能力的影响[J]. *中国生物制品学杂志*, 2012, 25(5): 574–578. [DAI L Y, LI Z J, WANG X, et al. Effect of extract of fermented brown rice on blood lipid, lipid content in liver and antioxidation of rats with hyperlipidemia[J]. *Chin J Biologics*, 2012, 25(5): 574–578.]
- [52] SHIN H Y, KIM S M, LEE J H, et al. Solid-state fermentation of black rice bran with *Aspergillus awamori* and *Aspergillus oryzae*: Effects on phenolic acid composition and antioxidant activity of bran extracts[J]. *Food Chemistry*, 2019, 272: 235–241.
- [53] ABDRAZAK D L, RASHID N Y, JAMALUDDIN A, et al. Enhancement of phenolic acid content and antioxidant activity of rice bran fermented with *Rhizopus oligosporus* and *Monascus purpureus*[J]. *Biocatal Agric Biotechnol*, 2015, 4(1): 33–38.
- [54] LIU S N, HAN Y, ZHOU Z J. Lactic acid bacteria in traditional fermented Chinese foods[J]. *Food Research International*, 2011, 44(3): 643–651.
- [55] SIVAMARUTHI B S, KESIKA P, CHAIYASUT C. Pharmacognosy reviews a comprehensive review of functional properties of

- fermented rice bran[J]. *Pharmacognosy Reviews*, 2018, 12(24): 218–224.
- [56] 仰思颖, 蔡群, 吴凤凤, 等. 发酵糙米糕的制作工艺研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2019, 38(4): 30–38. [YANG S Y, CAI Q, WU F F, et al. Study on processing technology of fermented brown rice steam sponge cake[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2019, 38(4): 30–38.]
- [57] BLANDINO A, AL ASEERI M E, PANDIELLA S, et al. Cereal-based fermented foods and beverages[J]. *Food Research International*, 2003, 36(6): 527–543.
- [58] PHANTIPHA C, KAMOLWAN J, ANUVAT J, et al. Physicochemical properties and consumer acceptance of wheat-germinated brown rice bread during storage time[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(6): S333–S339.
- [59] 赵丛丛, 陈燕鹏. 蔓越莓糙米面包的研制[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(290): 39–42. [ZHAO C C, CHEN Y P. Preparation of cranberry brown rice bread[J]. *Cereal & Oil*, 2020, 33(290): 39–42.]
- [60] MUNA A I, CHIEMELA E C, JAMILAH B, et al. Fermented brown rice flour as functional food ingredient[J]. *Foods*, 2014, 3(1): 149–159.
- [61] 张琚, 何义雁, 朱香燕, 等. 富含 γ -氨基丁酸的发酵糙米米粉工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(9): 239–242. [ZHANG J, HE Y Y, ZHU X Y, et al. Process of fermentation brown rice noodle rich in γ -aminobutyric[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(9): 239–242.]
- [62] 肖连冬, 臧晋, 吴德海. 双边发酵法生产发芽糙米酒的研究[J]. *食品工业科技*, 2007, 28(7): 153–155. [XIAO L D, ZANG J, WU D H. Study on the production of germinated brown rice wine by bilateral fermentation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2007, 28(7): 153–155.]
- [63] 杨斯茸, 魏淑珍, 李苏红, 等. 糙米酒发酵特征参数的研究[J]. *粮油食品科技*, 2013, 21(2): 62–64. [YANG S R, WEI S Z, LI S H, et al. The fermentation characteristics of brown rice wine[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2013, 21(2): 62–64.]
- [64] 陈海旭. 益生菌发酵糙米饮料的制作工艺及营养价值研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014. [CHEN H X. Study of manufacturing process and nutritional value of brown rice beverage by probiotic fermentation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.]
- [65] 晁鲁平. 糙米酵素发酵工艺研究及富含GABA发芽糙米食品的开发[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. [ZHAO L P. Study on the fermentation technology of brown rice enzyme and development of germinated brown rice food rich in GABA[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.]
- [66] 脱颖, 董平, 姜忠丽, 等. 糙米酵素乳饮料的功能成分及其抗氧化活性研究[J]. *粮食与油脂*, 2019, 32(3): 57–59. [TUO Y, DONG P, JIANG Z L, et al. Study on the functional components and antioxidant activities of brown rice enzyme milk beverage[J]. *Cereal & Oil*, 2019, 32(3): 57–59.]
- [67] SHIN H M, LIM J W, SHIN C G, et al. Comparative characteristics of rice wine fermentations using *Monascus koji* and rice nuruk[J]. *Food Science & Biotechnology*, 2017, 26: 1349–1355.