

武伟超, 桑若杰, 刘磊, 等. 发芽、发酵对谷物营养和功能活性成分的影响及其应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 411–418. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030307

WU Weichao, SANG Ruojie, LIU Lei, et al. Research Progress on the Effects of Germination and Fermentation on the Nutritional and Functional Active Ingredients of Cereals and Their Applications[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 411–418. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030307

· 专题综述 ·

发芽、发酵对谷物营养和功能活性成分的影响及其应用研究进展

武伟超¹, 桑若杰^{2, +}, 刘磊³, 李雅丽^{2, 4}, 刘士伟^{2, 4}, 刘金洋^{2, 4}, 于有强^{2, 4}, 马芙俊^{2, 4}, 曹续东²,
王利红^{1, *}, 段盛林^{2, 4, *}

(1. 河北工程大学生命科学与食品工程学院, 河北邯郸 056004;

2. 中国食品发酵工业研究院有限公司, 北京 100015;

3. 神威药业集团有限公司, 河北廊坊 065201;

4. 功能主食创制与慢病营养干预北京市重点实验室, 北京 100015)

摘要: 谷物是我国传统膳食的主食, 是人体能量的最经济、最重要的来源。然而近年来, 我国居民谷物消费量逐年下降。此外, 谷物食品存在消化吸收效率不高, 部分谷物含有抗营养因子等缺陷, 同时产品缺乏创新, 限制了谷物类产品的消费和推广。已有研究证实, 发芽和发酵作用可影响谷物营养及功能活性成分的变化, 而且可以增强谷物在人体内的消化吸收率, 降低部分人群的过敏反应, 并且可以改善谷物的风味, 有效提升谷物的营养及使用价值。本文主要分析了发芽和发酵作用对谷物营养及功能活性成分的影响, 并对谷物类加工的国内外研究进展进行了归纳, 对谷物类食品加工未来的研究和发展方向进行了展望。旨在为发芽和发酵在谷物加工中的应用提供理论参考。

关键词: 谷物, 发芽, 发酵, 营养成分, 功能活性

中图分类号: TS213

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)07-0411-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030307



本文网刊:

Research Progress on the Effects of Germination and Fermentation on the Nutritional and Functional Active Ingredients of Cereals and Their Applications

WU Weichao¹, SANG Ruojie^{2, +}, LIU Lei³, LI Yali^{2, 4}, LIU Shiwei^{2, 4}, LIU Jinyang^{2, 4}, YU Youqiang^{2, 4},
MA Fujuan^{2, 4}, CAO Xudong², WANG Lihong^{1, *}, DUAN Shenglin^{2, 4, *}

(1. Life Sciences and Food Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056004, China;

2. China National Research Institute of Food & Fermentation Industries Co., Ltd., Beijing 100015, China;

3. China Shineway Pharmaceutical Group Limited, Langfang 065201, China;

4. Beijing Key Laboratory of the Innovative Development of Functional Staple and the Nutritional Intervention for Chronic Disease, Beijing 100015, China)

Abstract: In the Chinese traditional diet, grain is the most cost-effective and crucial source of human energy. However, in recent years, China's grain consumption has decreased year after year. Furthermore, a grain-based diet is inefficient in terms of digestion and absorption, and some grains contain anti-nutrients. At the same time, a lack of product innovation limits the

收稿日期: 2022-03-25 +并列第一作者

作者简介: 武伟超 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1343847640@qq.com。

桑若杰 (1990-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 食品新产品新技术研究, E-mail: srj711@126.com。

* 通信作者: 王利红 (1986-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 益生菌在食品加工中的应用, E-mail: 18710354317@163.com。

段盛林 (1968-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向: 谷物生物加工与品质调控, E-mail: dslbeijing@163.com。

use and promotion of grain products. Germination and fermentation have been shown to affect changes in cereal nutritional and functional active components, improve cereal digestion and absorption in humans, reduce allergic reactions in some populations, and improve cereal flavor, all of which can improve cereal nutrition and use value. This paper primarily examines the effects of germination and fermentation on the nutritional and functional active ingredients of cereals, summarizes the development of domestic and international research on cereal processing, and offers a prognosis for the future directions of research and development in cereal food processing. Its purpose is to provide theoretical references for germination or fermentation on grain processing applications.

Key words: grain; germination; fermentation; nutritional components; functional activity

谷物作为中国人的传统饮食, 在我国的膳食中占有重要的地位。五谷通常指稻、黍、麦、菽(豆类)和粟(谷子)。谷物富含碳水化合物、脂肪、蛋白质、维生素等营养成分, 同时含有多种功能活性成分如 γ -氨基丁酸、生物肽等, 具有降低血脂、改善氧化应激、改善肝肾功能的作用^[1]。谷物中含有抗营养因子, 在谷物生长代谢过程中, 可以保护谷物免受病虫害侵害, 但当人摄入过多后会影响到消化吸收的功能, 谷物中主要的抗营养因子包括胰蛋白酶抑制剂、植酸、非淀粉多糖和植物凝集素等^[2]。通过发芽和发酵的加工方式对谷物原料处理可以降低谷物中的抗营养因子。

发芽是指种子在适宜的条件下, 开始萌发逐渐生长成一株完整的幼苗^[3]。发酵指人们借助微生物在有氧或无氧条件下的生命活动来制备微生物菌体本身、或直接代谢产物或次级代谢产物的过程^[4]。经过发芽和发酵处理, 可以改善谷物的营养含量、功能活性和风味^[5], 并提高消化率, 降低过敏人群的发病率^[6]。随着加工技术和生活水平的提高, 人们对饮食健康和食品安全的关注度也越来越高。通过发芽、发酵制备营养均衡、富含功能活性成分的谷物制品符合未来消费市场需求, 有较大的开发空间。

本文通过分析发芽、发酵对谷物营养及功能活性成分的影响, 初步探索了发芽、发酵改善谷物营养及功能活性成分的可能机制, 其次对发芽、发酵在谷物加工领域的应用进行了归纳, 最后对发芽、发酵在谷物加工业中未来的发展方向进行了展望。旨在为发芽、发酵加工谷物的系统研究提供进一步的理论参考。

1 发芽对谷物营养及功能活性成分的影响

1.1 发芽对谷物营养成分的影响

1.1.1 发芽对淀粉的影响 谷物在发芽过程中, 可以通过延长发芽时间, 提高淀粉酶活性, 淀粉酶可以使淀粉降解成还原糖, 从而降低谷物中淀粉的含量^[7], 同时淀粉酶降解促使淀粉破碎, 使其更易崩解, 因此谷物黏度降低^[8]。薏米在发芽 60 h 后淀粉含量降低了 20.75%^[9]。高粱在发芽至 72 h 时, 直链淀粉和支链淀粉都出现了不同程度地下降, 在发芽前 36 h, 随着发芽时间的延长, 峰值黏度、谷值黏度、终值黏度下降, 36 h 之后趋于平缓^[10]。糙糯米在发芽 72 h 后, 总淀粉含量下降了 4.71%, 糙糯米粉的峰值黏度在发

芽 12 h 后也急剧下降, 由发芽前的 814 cP 降至 230 cP, 并且随着发芽时间的延长逐渐降低至 30 cP^[11]。不同谷物经过发芽后淀粉含量都会降低, 且研究发现在发芽过程中, 峰值黏度、谷值黏度、终值黏度也会出现下降。综上所述, 谷物在发芽过程中会利用种子内的储藏物质对淀粉产生降解, 从而生成还原糖、氨基酸等新的物质以供生长。

1.1.2 发芽对脂肪的影响 谷物发芽后会出现脂肪含量下降的现象。花生发芽后脂肪含量相比未发芽时会下降 65%~23% 不等, 脂肪的下降程度会因花生的品种而存在差异^[12-13]。苟美玲等^[14]研究发现青稞发芽后, 脂肪含量也会出现下降。KAUR 等^[15]研究发现小麦、大米、燕麦、玉米经过发芽, 脂肪含量相比未发芽时, 分别下降了 0.9%、0.62%、2.01%、0.87%。谷物在萌发时, 脂肪酶被激活, 种子中贮藏的脂肪开始降解, 生成的脂肪酸等物质参与种子萌发时活跃的乙醛酸循环, 为芽苗的生长发育提供能量^[16]。

1.1.3 发芽对蛋白质的影响 蛋白质在黄豆发芽过程中会出现增长的现象, 这可能是由于特定氨基酸如赖氨酸、色氨酸的增加, 也有可能是由于干重的损失, 因为部分碳水化合物和脂肪在呼吸过程中被利用^[17]。藜麦发芽过程中, 萌发前期蛋白质含量呈下降趋势, 萌发后期蛋白质含量呈增加趋势^[18]。郑立军^[19]研究了七种豆子在发芽期间的蛋白质含量的变化, 发现其也出现了先下降后增长的现象, 72 h 时, 赤小豆、红豆、绿豆、黑豆、花生可溶性蛋白呈短期下降后缓慢上升趋势, 其中黑豆和绿豆可溶性蛋白增长幅度最大, 分别为 27.64 和 25.78 mg/g DW。蛋白质在糙米发芽过程中也会出现减少的现象, 可能是因为在发芽时可溶性蛋白分解用于促进物质代谢, 也有可能是因为在样品制备时, 由于部分加工工艺而导致的蛋白质含量减少^[20]。SINGH 等^[21]研究发现, 糙米随着萌发时间的延长和萌发温度的升高, 蛋白质含量会出现明显的降低, 在 35 ℃, 48 h 时蛋白质含量降低了 6.35%。蛋白质在发芽初期, 可溶性蛋白分解以促进豆类物质代谢, 加快呼吸作用。另外豆芽在喷淋与浸泡的作用下, 部分可溶性蛋白溶解到水中造成损失, 导致可溶性蛋白含量下降。

1.1.4 发芽对其它营养成分的影响 谷物的发芽过程不仅会对淀粉、脂肪和蛋白质的含量产生影响, 对矿物质和维生素等其他营养成分的含量也会产生影

响。糙米经过高压发芽后,相比未处理过的糙米,维生素 E 含量增长到了 $4.34 \text{ mg}/100 \text{ g}$ ^[22]。萌发过程中维生素 E 含量的增加归因于生育酚和生育三烯醇的合成,作为水稻幼苗生长的生理代谢材料,随后它们被用作植物的生长促进剂和增效剂。黑豆和黄豆经过发芽后,维生素 B₂ 含量高出发芽黄豆和黑豆 2 倍^[23]。FAKIR 等^[24]通过控制褐豆芽和绿豆芽发芽过程中的温度和光照,发现绿豆芽和褐豆芽中出现了维生素 C,在两种植物的干种子中均未检测到维生素 C。研究证明,维生素 C 可以由植物从葡萄糖、甘露糖和半乳糖合成。因此,在发芽过程中,维生素 C 的增加是由淀粉酶对淀粉的酶解驱动的,淀粉酶提高了葡萄糖对维生素 C 生物合成的可利用性,正是这种葡萄糖含量的提高,促成了维生素 C 含量的提高^[25]。

RAMIREZ-OLVERA 等^[26]通过研究不同浓度 Ce 溶液下水稻种子萌发的变化,发现 $50 \mu\text{mol/L}$ Ce 浓度下,与对照组相比, P 增加了 26.1%, Mg 增加了 31.25%。这可能是因为发芽时,高浓度 Ce 与 P、Mg 存在协同效应造成的。陈淑芳等^[27-28]通过研究使用 Na_2SeO_3 溶液发芽苦荞,发现当 Na_2SeO_3 溶液的浓度为 $20 \mu\text{g/L}$ 时,硒含量最大,相比对照组提高了 48.46%。这可能是由于低浓度的硒能够促进苦荞种子对硒的吸收,而高浓度的硒对苦荞种子有抑制作用,也可能是由于富硒萌发的进行,荞麦代谢活动增强,细胞内外物质交换活跃,促进硒的富集^[29-30]。

1.2 发芽对谷物功能活性成分的影响

1.2.1 发芽对 GABA 含量的影响 γ -氨基丁酸(γ -aminobutyric acid, GABA),一种重要的中枢神经系统抑制性神经递质,是广泛存在于动植物体内的一种四碳非蛋白质天然氨基酸。通过发芽方式处理谷物,可以使谷物中的 GABA 含量增加。BARANZELLI 等^[31]研究发现通过控制小麦发芽时的温度(15°C 下发芽 24 h),GABA 含量较发芽前提高了约 2.3 倍。采用避光发芽水稻,发现萌发时间越长,谷氨酸和 GABA 产量越高,萌发 48 h 时, GABA 含量为 $34.28 \text{ mg}/100 \text{ g}$ ^[32]。AL-ANSI 等^[33]将大麦颗粒浸泡在 0.1% 的 NaClO 溶液中 30 min,浸泡结束后在 30°C 、80%~85% 湿度下发芽,研究表明发芽前浸泡对大麦 GABA 含量有明显的促进作用,相比未浸泡发芽 GABA 含量提高了 2.17 倍。这可能是由于大麦发芽前浸泡导致 GABA 被激活,浸水会造成谷物缺氧促使植物组织中 GABA 含量快速增加^[34]。VANN 等^[35]研究了黄豆、黑豆、绿豆和红豆经过发芽后的 GABA 含量变化。在 12 h 时,黄豆中 GABA 含量达到最大值,为 0.89 mg/g ,黑豆在 24 h 时达到最大值 4.78 mg/g ,青豆和红豆在 36 h 时 GABA 含量分别达到最大值 3.93 和 3.09 mg/g 。这可能是因为在发芽过程中,蛋白水解酶被激活,蛋白质被分解为游离氨基酸特别是谷氨酸,然后转化成了 GABA 化合物^[36]。

1.2.2 发芽对其他生物活性的影响 谷物中还含有

其他多种生物活性成分,例如多酚、多肽、黄酮等。通过发芽也可使其含量发生变化。这些生物成分对人体保持健康有着大的帮助。LAUS 等^[37]通过检测在 20°C 和 70% 湿度下萌发的藜麦,发现发芽藜麦相比于未处理藜麦多酚含量高出 2.6 倍。这是因为藜麦发芽后苯丙氨酸转氨酶(PLA)被激活,又合成了新的多酚类化合物,促使发芽后多酚含量提高^[38]。ZHANG 等^[39]研究发现大豆经过盐处理后,再次进行发芽多肽含量显著提高,6 h 时相比未处理的大豆种子显著提高 2.4 倍。研究证明,盐胁迫下多肽含量的增加或减少可能与 mRNA 加工、转录调控、转运、稳定性的改变有关,也可能与蛋白质降解速率的改变有关^[40]。LEE 等^[41]通过研究 3 种大麦发芽时总黄酮含量的变化,发现大麦经过完全避光发芽后总黄酮含量由最开始的 0.35 mg/g 增加到 0.37 mg/g 。发芽过程中随着苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性的增强,出现黄酮类化合物的积累增加。PAL 是黄酮类化合物和酚类化合物的关键合成酶,可以催化莽草酸途径产生的 L-苯丙氨酸去除氨残留物并生成反式肉桂酸。反式肉桂酸可以通过苯丙烷代谢途径转化为中间产物。中间产物包括香豆素酸、阿魏酸、芥子酸等,可进一步转化为香豆素、绿原酸、辅酶 A 酯,最终转化为次生代谢物,包括木质素、黄酮和其他化合物^[42-43]。MUNARKO 等^[44]通过完全浸泡的方式发芽糙米后,相比未发芽糙米谷维素含量略有增加,这可能与水稻品种、稻壳的物理特性和萌发过程中稻壳渗入浸泡液的能力有关^[45]。

谷物经过发芽方式的处理后,会造成谷物中多酚、多肽、黄酮类活性物质含量的增长,此类物质含量的显著增多,提高了谷物的抗氧化活性和谷物类食品的应用前景。

2 发酵对谷物营养及功能活性成分的影响

2.1 发酵对谷物营养成分的影响

2.1.1 发酵对蛋白质的影响 通过发酵可以使谷物中蛋白质含量出现增加,增幅程度会因为实验设计和食物的初始蛋白质含量而出现差异。研究发现,利用枯草芽孢杆菌和植物乳杆菌固态发酵干谷物,发现发酵干谷物相比未发酵干谷物,粗蛋白含量增加了 11.29%^[46]。AKINOLA 等^[47]通过对珍珠粟粉进行发酵处理,显著提高了珍珠粟粉蛋白质含量,从 $10.48\% \pm 0.01\%$ 增加到 $15.39\% \pm 0.00\%$ 。通过面包酵母和淀粉葡萄糖苷酶对高粱进行发酵,使粗蛋白含量从 9% 增加到 27%^[48]。谷物经过发酵方式处理后,蛋白质发生变化,首先可能是因为微生物水解和碳水化合物和脂肪作为发酵时所需的能量来源而使干物质损失而引起的相对变化^[49],另一个原因是因为微生物降解复合蛋白,从而释放多肽和氨基酸导致的。

2.1.2 发酵对维生素的影响 维生素是人体中必需的微量元素,在调节机体代谢方面有着重要的作用,一般需要依靠外界的摄取才能满足人体需要。相比之

下,采用发酵方式使谷物中的维生素含量升高,比采用维生素类药物进行维生素补充更好。使用昆奇乳杆菌 B₇ 发酵马齿苋发现马齿苋汁中维生素 C、A、E 的含量得到了保持,维生素 B₂ 得到了提高,达到了 0.19±0.005 mg/100 mL^[50]。XIE 等^[51-52]通过采用丙酸杆菌和短乳杆菌共同发酵麦麸,同时控制发酵液 pH,在 3 d 后维生素 B₁₂ 含量增至 332±44 ng/g 干物质。THOMPSON 等^[53]通过利用不同菌株的植物乳杆菌发酵白豆,维生素 B₁₂ 含量显著增加了 66%。维生素 B₁₂ 增长原因可能是由于维生素 B₁₂ 对发酵时 pH 的强依赖性,产生维生素 B₁₂ 的最佳 pH 在 6.5 左右,pH 影响产生维生素的含量^[54]。

2.1.3 发酵对矿物质的影响 谷物和豆类是发展中国家矿物质的主要来源,通过发酵处理可以提高谷物中的矿物质含量。CHI 等^[55]通过使用斯皮奇乳杆菌 DSM 15429 对米糠进行发酵,研究其对米糠矿物质的影响,发现矿物质的含量至少增加了两倍。在发酵 24 h 时,钙、镁、钾、铜、锌、锰分别增加了 2.3 倍,1.94 倍,1.98 倍,2.55 倍,1.92 倍,1.68 倍。ILOWEFAH 等^[56]通过研究固态酵母发酵对糙米粉营养成分含量的影响,发现通过酵母发酵后磷提高了 39.94%,锌提高了 51.76%,钙提高了 8.65%。矿物质含量的增加可能与植酸含量的减少或纤维组成的变化有关。因为植酸具有很强的螯合能力,可与钙、铁、镁、锌等金属离子产生不溶性化合物。在发酵过程中 pH 下降到 5 以及谷物面粉中内源植酸酶的作用可能会导致植酸含量的显著降低和矿物质含量的增加^[57-58]。

2.2 发酵对谷物功能活性成分的影响

2.2.1 发酵对 GABA 含量的影响 GABA 具有抗高血压、免疫调节、降胆固醇、抗癌等功能。谷物通过发酵处理后可以进一步提高 GABA 含量,使谷物营养价值取得更为显著的提升。通过使用乳酸菌对谷物进行固态发酵可以提高 GABA 含量,乳酸菌被认为是细菌中主要的氨基丁酸生产者。产生 GABA 的乳酸菌可以从奶酪、酸奶、酸面包等食品中分离出来^[59]。CÁCERES 等^[60]通过使用发酵剂对发芽糙米进行发酵,GABA 含量相比未发酵提高了约 2.5 倍,达到了 1.9 mg/100 g。利用短乳杆菌 A7 和药用乳酸杆菌 A11 进行发酵酸面团,证实了这两种菌株具有提高面包中 GABA 含量的能力,GABA 含量最高可达到 39 mg/kg^[61]。使用鼠李糖乳杆菌和藜麦分离菌发酵藜麦酸奶可以使饮料中的 GABA 含量从 20 mg/L 提高到 100 mg/L^[62]。这可能是因为 GABA 的关键合成酶 GAD 在 pH 为 4.4 时具有较高的合成 GABA 的能力,鼠李糖乳杆菌发酵时 pH 较低^[63]。还有可能和发酵底物相关,所选谷物自身谷氨酸含量如果较高,通过发酵提升 GABA 含量会更多,因为适宜的谷氨酸浓度能有效地增加 GAD 活性,促进 GABA 的合成。

2.2.2 发酵对总酚含量的影响 酚类化合物是谷物主要的抗氧化成分,是植物次生代谢的产物,是一种具有一个或多个羟基的化合物,通常分为酚酸、黄酮、单宁、香豆素和二苯乙烯等。这些化合物主要以与各种糖基相连的糖苷或与有机酸、胺类、脂类、碳水化合物和其他酚类物质相连的复合物的形式存在。通过发酵可以显著提高谷物中的酚类化合物含量。可溶性酚类化合物的增加可能与可溶性酚类化合物的转化有关,在发酵过程中,可溶性酚类化合物被微生物转化,因为可溶性酚类化合物通常与糖和/或有机酸形成共轭酚类化合物^[64]。XU 等^[65-66]通过研究证实将双孢蘑菇菌、多洼马鞍菌、嗜蓝孢孔菌分别接种到小麦、水稻、燕麦、玉米、小米、藜麦、荞麦、大豆、豌豆和高粱当中,发现发酵谷物的总酚含量随发酵时间和发酵剂种类的不同而变化,分别提高了 1.6~1.38 倍。ZIELINSKI 等^[67]通过采用 ABTS 法、FRAP 法和光化学发光法测定了乳酸菌和少孢根霉液体发酵(LSF)对生荞麦粉和烤荞麦粉总酚含量的影响,发现乳酸菌发酵生荞麦粉总酚含量较高,少孢根霉液体发酵烤荞麦粉总酚含量更高。通过发酵方式进行处理可以有效地增加谷物中的酚类物质,尤其是游离酚的含量。发酵可有效释放谷物中与淀粉、蛋白等物质结合的酚类物质,从而有效提高总酚含量^[68]。

2.2.3 发酵对其他生物活性的影响 通过发酵技术还可以提高其他生物活性物质的变化,如黄酮、 γ -谷物素、多肽等。发酵可以改变生物活性化合物的结构,增强其功能活性。这些物质具有抗癌、免疫调节、保护心血管、抗自由基、降血脂等作用。NASRULLAEVA 等^[69]通过利用以植酸酶为基础的复合酶制剂,在 pH4.5 和 50 °C 的温度下进行小麦籽粒发酵 12 h,发现发酵过程有利于小麦籽粒黄酮醇含量的提高,发酵前与发酵后相比提高 3.7 倍,发酵过程中产生了糖苷酶,释放不溶性膳食黄酮为水溶性黄酮苷,使黄酮醇含量增加^[70]。MAO 等^[71]为提高麦麸的营养性能,利用从其他食品中分离出的粪肠球菌 M2 进行固态发酵,发现总黄酮含量可提高至 0.27 mg/g,这是因为在发酵过程中,微生物可以通过产生的酶降解植物细胞壁从而刺激细胞内化合物的释放,从而造成黄酮含量的增加^[72]。

JUNG 等^[73]通过测定 21 种发酵米糠中 γ -谷维素含量,发现发酵米糠 γ -谷维素增长水平各不相同,其中发酵米王米糠 γ -谷维素含量最高可达到 294.77±6.74 mg/100 g,相比未发酵米王米糠增加了 2.4 倍。这可能是因为米糠中的成分因品种的影响而有所不同,例如籽粒成熟度^[74]。通过发酵处理不仅使谷物中生物活性物质的含量出现了变化,还相对提高了谷物类产品的附加值。

3 发芽、发酵在谷物产品中的应用

3.1 发芽、发酵谷物饮品

利用发芽、发酵制作谷物饮品,相较于普通饮品

营养物质更为丰富,品质更好,消化率更高。目前已开发出的谷物类食品多为植物基饮料、乳类、固体饮料等。贾红玲^[75]通过全稻芽的曲法糖化联合乳酸菌和酵母菌制备饮料,研发出了一款低醇含气、酸甜可口、滋味丰富的清凉活菌饮料,RS等^[76]、罗建光等^[77]也进行了相同的研究。CHAVAN等^[78]以大麦、小米和蚕豆为原料,以杏仁乳和椰奶为辅料,通过在饮料中接种嗜酸乳杆菌研制了非乳益生菌饮料,并对其感官评价,椰奶益生菌饮料总体感官接受度较好。孙雨茜^[79]以富含锌的发芽糙米粉和富含 GABA 的发芽大豆粉、发芽玉米粉为主要原料,研制高锌和 GABA 发芽营养粉,冲调出的饮料色泽为浅黄色,口感细腻微甜,香味浓郁,粘稠度适中,秦萍^[80]也进行了相同的研究。谷物类原料食品经过发芽或发酵处理后会改善原有的风味和不易接受的口感,其营养性和口感更能得到大众的青睐。

3.2 其他发芽、发酵谷物制品

谷物除了加工成饮品以外,还可加工成饼干、面包、面条、速食粥等食品。李次力等^[81]将糙米进行发芽处理后用于面包制作,通过单因素、正交试验确定发芽糙米面包的最佳配方工艺条件,研发出一款色泽金黄、带有清淡的发芽糙米香味、口感柔软的发芽糙米面包。陈娇娇^[82]采用发酵全麦粉制作饼干,并与非全麦饼干进行对比,发现全麦饼干除脂肪外,蛋白质、矿物质和膳食纤维含量均高于非全麦饼干,并且呈现比较纯正的麦麸色,口感酥脆,具有发酵全麦饼干特有的麦香味。李嘉欣^[83]采用发芽小米粉制作面条,发现发芽小米面条的蒸煮损失显著低于未发芽小米面条,发芽小米面条的氨基酸组成更适宜人体。修茹燕^[84]以富含花色苷的发芽黑米为原料,得到了一款香味浓郁,顺滑爽口,品质良好,开水冲泡五分钟即可食用粥,并且具有一定的抗氧化作用且富含花色苷及 GABA,解决了黑米难以蒸煮,难以消化和吸收的问题。经过发芽、发酵研制出的产品符合当代大众高营养,低脂肪的消费观念,在口感上也有了提升。

4 发芽、发酵谷物制品功能性评价

利用发芽、发酵技术对谷物进行处理,可以显著提高谷物中营养成分的生物利用率。这是因为发芽、发酵技术可以降低其中抗营养因子含量。种子发芽过程中,植酸酶活性的显著增加有助于减少植酸,而植酸会迅速结合矿物质,增加矿物质的可用性^[85]。发芽促使抗营养因子含量和淀粉酶活性的降低,提高淀粉消化率^[86]。刘贞^[87]将发芽后的糙米制成发芽糙米浆后,发现植酸含量是 7.42 mg/g,比未发芽前降低 60.48%。ALBARRACIN 等^[88]通过研究发芽对全米粉成分营养特性的影响,发现了发芽全米粉的蛋白质消化率高达 100%。谷物在发芽的过程中,胰蛋白酶抑制剂的活性逐渐降低,胰蛋白酶活性随之升高,使得蛋白质消化率提高^[89]。

5 结论与展望

大量研究表明,谷物经过发芽或发酵处理,可以通过改变谷物的营养价值和提高消化率来改善产品特性,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增殖、提高食品安全性、改善质地等,因此对食品工业具有巨大的发展潜力,可以通过开发新配料、再造工艺和产品来进行深入探索。尽管如此,对于使用发芽、发酵的加工方式对谷物进行处理,仍然存在许多问题:a. 对发芽发酵机制机理研究不够深入及系统,未能形成一致性科学共识;b. 当前产品开发大部分局限于实验室研究,产业化程度不高,缺乏大型规模化生产设备及条件;c. 相应的发芽或发酵产品种类较少,亟待开发。

对于这些问题,谷物加工研究未来需要投入更多的研究精力,包括:a. 发芽、发酵对谷物生物活性物质结构与功能的影响及机制机理研究;b. 发芽、发酵上的工艺创新,工厂设备的集成创新;c. 加快谷物发芽、发酵新产品的研发,采用发芽、发酵协同处理,提高产品功能附加值,同时依据谷物营养结构科学配伍,研发全营养复合谷物类制品,提高研发产品的营养均衡化及精准化。

参考文献

- [1] 李娟娟,刘艺欢,陈东方,等. 谷物制品的生物加工研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(13): 358-363. [LI Juanjuan, LIU Yihuan, CHEN Dongfang, et al. Research progress of bio-processing of cereal products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(13): 358-363.]
- [2] 严卫星,丁晓雯,马良,等. 食品毒理学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2009. [YAN Weixing, DING Xiaowen, MA Liang, et al. Food of toxicology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2009.]
- [3] ABBAS Y, AHMAD A. Impact of processing on nutritional and antinutritional factors of legumes: A review[J]. Food Science and Technology, 2018, 19(2): 199-215.
- [4] SAMTIYA M, ALUKO R E, PUNIYA A K, et al. Enhancing micronutrients bioavailability through fermentation of plant-based foods: A concise review[J]. Fermentation, 2021, 7(2): 63.
- [5] LEMMENS E, MORONI A V, PAGAND J, et al. Impact of cereal seed sprouting on its nutritional and technological properties: A critical review[J]. Compr Rev Food Sci Food Saf, 2019, 18(1): 305-328.
- [6] NKHATA S G, AYUA E, KAMAU E H, et al. Fermentation and germination improve nutritional value of cereals and legumes through activation of endogenous enzymes[J]. Food Sci Nutr, 2018, 6(8): 2446-2458.
- [7] MOHAN B H, MALLESHI N G, KOSEKI T. Physico-chemical characteristics and non-starch polysaccharide contents of Indica and Japonica brown rice and their malts[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(5): 784-791.
- [8] 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 Chem, 2015, 173: 298-

304.

- [9] 徐磊. 发芽对薏米营养成分、理化特性及生物活性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [XU Lei. Effect of germination on the nutritional components, physicochemical properties and biological activities of adlay[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
- [10] 张俊, 胡玲, 张三杉, 等. 不同发芽阶段高粱粉理化及功能特性的变化[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(6): 68–74. [ZHANG Jun, HU Ling, ZHANG Sanshan, et al. Changes of physicochemical and functional properties of sorghum flour at different germination stages[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(6): 68–74.]
- [11] 何李晔紫. 发芽对糙糯米粉及其淀粉物化性质的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020. [HE Liyezi. Effects of germination on physicochemical properties of brown glutinous rice flour and its starch[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020.]
- [12] 杨天, 徐学明, 江宇, 等. 发芽对不同品种花生营养成分和生物活性成分的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 1–10. [YANG Tian, XU Xueming, JIANG Yu, et al. Effect of germination on nutritional and bioactive components in different cultivars of peanut (*Arachis hypogaea* L.) seeds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(14): 1–10.]
- [13] 詹玉婷, 赵文瑞, 陈志刚. 花生发芽过程中基础成分变化及白藜芦醇的诱导富集[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(12): 87–92. [ZHAN Yuting, ZHAO Wenrui, CHEN Zhigang. Changes of basic components and induced enrichment of resveratrol during peanut germination[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(12): 87–92.]
- [14] 苟美玲, 张静. 发芽对青稞的营养成分和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(3): 86–89, 97. [GOU Meiling, ZHANG Jing. Effects of germination on the nutrient and antioxidant activity of barley[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(3): 86–89, 97.]
- [15] KAUR H, GILL B S. Comparative evaluation of physicochemical, nutritional and molecular interactions of flours from different cereals as affected by germination duration[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(3): 1147–1157.
- [16] ATUDOREI D, STROE S G, CODINĂ G G. Impact of germination on the microstructural and physicochemical properties of different legume types[J]. Plants, 2021, 10(3): 592.
- [17] 郭婕, 李季平. 黄豆萌发过程中营养物质的动态变化研究[J]. 周口师范学院学报, 2018, 35(2): 89–91. [GUO Jie, LI Jiping. Dynamic changes of nutrient in yellow soybean germination[J]. Journal of Zhoukou Normal University, 2018, 35(2): 89–91.]
- [18] 吕晨晨, 白羽嘉, 冯作山. 不同品种藜麦萌发蛋白质营养价值比较[J]. 食品科技, 2020, 45(4): 43–49. [LYU Chenchen, BAI Yujia, FENG Zuoshan. Comparison of protein nutritional value of different varieties of quinoa after germination[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(4): 43–49.]
- [19] 郑立军. 七种豆催芽过程营养素与活性成分变化规律研究及豆芽脆片的制作[D]. 长春: 吉林大学, 2020. [ZHENG Lijun. Study on the changes of nutrients and active ingredients in seven bean sprouts and preparation of bean sprout crisps[D]. Changchun: Jilin University, 2020.]
- [20] KIM H Y, HWANG I G, KIM T M, et al. Chemical and functional components in different parts of rough rice (*Oryza sativa* L.) before and after germination[J]. Food Chemistry, 2012, 134(1): 288–293.
- [21] SINGH A, SHARMA S, SINGH B. Germination behaviour, physico-nutritional properties, and diastase activity of brown rice influenced by germination time and temperature[J]. Acta Alimentaria, 2018, 47(1): 70–79.
- [22] KIM M Y, LEE S H, JANG G Y, et al. Changes of phenolic acids and vitamin E profiles on germinated rough rice (*Oryza sativa* L.) treated by high hydrostatic pressure[J]. Food Chem, 2017, 217: 106–111.
- [23] HUANG G, CAI W, XU B. Improvement in beta-carotene, vitamin B₂, GABA, free amino acids and isoflavones in yellow and black soybeans upon germination[J]. LWT, 2017, 75: 488–496.
- [24] FAKIR M S A, RAHMAN A B, SARKER S R, et al. Light and temperature effects on sprout yield and its proximate composition and vitamin C content in Lignosus and Mung beans[J]. Journal of the Bangladesh Agricultural University, 2017, 15(2): 248.
- [25] DESAI A D, KULKARNI S S, SAHOO A K, et al. Effect of supplementation of malted ragi flour on the nutritional and sensorial quality characteristics of cake[J]. Advance Journal of Food Ence & Technology, 2010, 2(1): 67–71.
- [26] RAMIREZ-OLVERA S M, TREJO-TELLEZ L I, GARCIA-MORALES S, et al. Cerium enhances germination and shoot growth, and alters mineral nutrient concentration in rice[J]. PLoS One, 2018, 13(3): e0194691.
- [27] 陈淑芳. 富硒发芽苦荞生理变化及其蛋白抗氧化活性研究[D]. 太原: 山西师范大学, 2019. [CHEN Shufang. Study on physiological changes and antioxidant activity of protein in Se-enriched and sprouted tartary buckwheat[D]. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2019.]
- [28] 陈淑芳, 苏晓丹, 李瑞, 等. 荞麦富硒萌发过程中生理变化比较研究[J]. 食品工业, 2019, 40(1): 47–51. [CHEN Shufang, SU Xiaodan, LI Rui, et al. Comparative study of the physiological changes of buckwheat during the selenium-enriched and germination process[J]. Food Industry, 2019, 40(1): 47–51.]
- [29] 宋娇娇, 张红, 杨润强, 等. 富硒大豆芽不同部位与大分子中硒的分布[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2011(3): 75–79. [SONG Jiaojiao, ZHANG Hong, YANG Runqiang, et al. Selenium distribution in different parts and macromolecule of selenium-enriched soybean sprouts[J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2011(3): 75–79.]
- [30] 赵萍, 刘笑笑, 王雅, 等. 小麦发芽富硒工艺及其抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(18): 301–305. [ZHAO Ping, LIU Xiaoxiao, WANG Ya, et al. Study on enrichment of selenium in wheat seeds and the antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(18): 301–305.]
- [31] BARANZELLI J, KRINGEL D H, COLUSSI R, et al. Changes in enzymatic activity, technological quality and gamma-aminobutyric acid (GABA) content of wheat flour as affected by germination[J]. LWT, 2018, 90: 483–490.
- [32] KAMJIJAM B, BEDNARZ H, SUWANNAPORN 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.

- [33] AL-ANSI W, MAHDI A A, AL-MAQTARI Q A, et al. The potential improvements of naked barley pretreatments on GABA, β -glucan, and antioxidant properties[J]. *LWT*, 2020; 130.
- [34] CHUNG H J, JANG S H, CHO H Y, et al. Effects of steeping and anaerobic treatment on GABA (γ -aminobutyric acid) content in germinated waxy hull-less barley[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2009, 42(10): 1712–1716.
- [35] VANN K, TECHAPARIN A, APIRAKSAKORN J. Beans germination as a potential tool for GABA-enriched tofu production[J]. *J Food Sci Technol*, 2020, 57(11): 3947–3954.
- [36] KOMATSUZAKI N, TSUKAHARA K, TOYOSHIMA H, et al. Effect of soaking and gaseous treatment on GABA content in germinated brown rice[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(2): 556–560.
- [37] LAUS M N, CATALDI M P, ROBBE C, et al. Antioxidant capacity, phenolic and vitamin C contents of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) as affected by sprouting and storage conditions[J]. *Italian Journal of Agronomy*, 2017, 12(1): 63–68.
- [38] WANG H, WANG J, GUO X, et al. Effect of germination on lignan biosynthesis, and antioxidant and antiproliferative activities in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2016, 205(15): 170–177.
- [39] ZHANG W, HAO Y, TENG C, et al. Effects of salt stimulation on lunasin accumulation and activity during soybean germination[J]. *Foods*, 2020, 9(2): 118.
- [40] HURKMAN W J, TANAKA T C K. Germin-like polypeptides increase in barley roots during salt stress[J]. *Plant Physiology*, 1991, 97(1): 366–374.
- [41] LEE Y J, JANG G Y, LI M, et al. Changes in the functional components of barley produced from different cultivars and germination periods[J]. *Cereal Chemistry Journal*, 2017, 94(6): 978–983.
- [42] CHENG S, CHEN K, LIU W, et al. Regulation and expression of the pal in plant and its outlook[J]. *Journal of Fruit Science*, 2003, 20(5): 351–357.
- [43] KIM S L, KIM S K, PARK C H. Introduction and nutritional evaluation of buckwheat sprouts as a new vegetable[J]. *Food Research International*, 2004, 37(4): 319–327.
- [44] MUNARKO H, SITANGGANG A B, KUSNANDAR F, et al. Effect of different soaking and germination methods on bioactive compounds of germinated brown rice[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2021, 56(9): 4540–4548.
- [45] YODPITAK S, MAHATHEERANONT S, BOONYAWAN D, et al. Cold plasma treatment to improve germination and enhance the bioactive phytochemical content of germinated brown rice[J]. *Food Chem*, 2019, 289: 328–339.
- [46] WANG C, SU W, ZHANG Y, et al. Solid-state fermentation of distilled dried grain with solubles with probiotics for degrading lignocellulose and upgrading nutrient utilization[J]. *AMB Express*, 2018, 8(1): 188.
- [47] AKINOLA S A, BADEJO A A, OSUNDAHUNSI O F, et al. Effect of preprocessing techniques on pearl millet flour and changes in technological properties[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(4): 992–999.
- [48] DAY C N, MORAWICKI R O. Effects of fermentation by yeast and amylolytic lactic acid bacteria on grain sorghum protein content and digestibility[J]. *Journal of Food Quality*, 2018, 2018: 1–8.
- [49] MARKO A, RAKICKÁ M, MIKUOVÁ L, et al. Lactic acid fermentation of cereal substrates in nutritional perspective[J]. 2014, 4(4): 80–92.
- [50] DI CAGNO R, FILANNINO P, VINCENTINI O, et al. Fermented *Portulaca oleracea* L. juice: A novel functional beverage with potential ameliorating effects on the intestinal inflammation and epithelial injury[J]. *Nutrients*, 2019, 11(2): 248.
- [51] XIE C, CODA R, CHAMLAGAIN B, et al. Co-fermentation of *Propionibacterium freudenreichii* and *Lactobacillus brevis* in wheat bran for in situ production of vitamin B₁₂[J]. *Front Microbiol*, 2019, 10: 1541.
- [52] XIE C, CODA R, CHAMLAGAIN B, et al. Fermentation of cereal, pseudo-cereal and legume materials with *Propionibacterium freudenreichii* and *Levilactobacillus brevis* for vitamin B₁₂ fortification[J]. *LWT*, 2021: 137.
- [53] THOMPSON H O, ONNING G, HOLMGREN K, et al. Fermentation of cauliflower and white beans with *Lactobacillus plantarum*-impact on levels of riboflavin, folate, vitamin B₁₂, and amino acid composition[J]. *Plant Foods Hum Nutr*, 2020, 75(2): 236–242.
- [54] MARTENS J H, BARG H, WARREN M J, et al. Microbial production of vitamin B₁₂[J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2002, 58(3): 275–285.
- [55] CHI M S, PUCEAN A, MAN S M, et al. Effect of rice flour fermentation with *Lactobacillus spicheri* DSM 15429 on the nutritional features of gluten-free muffins[J]. *Foods*, 2020, 9(6): 822.
- [56] ILOWEFAH M, BAKAR J, GHAZALI H M, 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.
- [57] KUMARI S, BHINDER S, SINGH B, et al. Effect of buckwheat incorporation on batter fermentation, rheology, phenolic, amino acid composition and textural properties of idli[J]. *LWT*, 2020, 122(C): 109042–109042.
- [58] GOBBETTI M, DE ANGELIS M, DI CAGNO R, et al. Novel insights on the functional/nutritional features of the sourdough fermentation[J]. *Int J Food Microbiol*, 2019, 302: 103–113.
- [59] YUNES R A, POLUEKTOVA E U, DYACHKOVA M S, et al. GABA production and structure of *gadB/gadC* genes in *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* strains from human microbiota[J]. *Anaerobe*, 2016, 42: 197–204.
- [60] CÁCERES P J, PEÑAS E, MARTÍNEZ-VILLALUENGA C, et al. Development of a multifunctional yogurt-like product from germinated brown rice[J]. *LWT*, 2019, 99: 306–312.
- [61] VENTURI M, GALLI V, PINI N, et al. Use of selected *Lactobacilli* to increase gamma-aminobutyric acid (GABA) content in sourdough bread enriched with amaranth flour[J]. *Foods*, 2019, 8(6): 218.
- [62] LORUSSO A, CODA R, MONTEMURRO M, et al. Use of selected lactic acid bacteria and quinoa flour for manufacturing novel yogurt-like beverages[J]. *Foods*, 2018, 7(4): 51.
- [63] QIAN L. Submerged fermentation of *Lactobacillus rhamno-*

- sus YS9 for γ -aminobutyric acid (GABA) production[J]. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2013, 44(1): 183–187.
- [64] ROBBINS R J. Phenolic acids in foods: An overview of analytical methodology[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(10): 2866–2887.
- [65] XU L N, GUO S, ZHANG S W. Effects of solid-state fermentation with three higher fungi on the total phenol contents and antioxidant properties of diverse cereal grains[J]. *FEMS Microbiol Lett*, 2018, 365(16): 163.
- [66] XU L N, GUO S, ZHANG S W. Effects of solid-state fermentation on the nutritional components and antioxidant properties from quinoa[J]. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 2019, 31(1): 39–45.
- [67] ZIELINSKI H, SZAWARA-NOWAK D, BACZEK N, et al. Effect of liquid-state fermentation on the antioxidant and functional properties of raw and roasted buckwheat flours[J]. *Food Chem*, 2019, 271: 291–297.
- [68] GAN R Y, SHAH N P, WANG M F, et al. Fermentation alters antioxidant capacity and polyphenol distribution in selected edible legumes[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2016, 51(4): 875–884.
- [69] NASRULLAEVA G, KUZNETSOVA E A, VOITSEKHIVSKIY V I, et al. Changes in the microstructure, polypeptide composition and antioxidant activity of wheat grains after fermentation[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 613(1): 012086.
- [70] VINUSHA K S, DEEPIKA K, JOHNSON T S, et al. Proteomic studies on lactic acid bacteria: A review[J]. *Biochemistry & Biophysics Reports*, 2018, 14: 140–148.
- [71] MAO M, WANG P, SHI K, et al. Effect of solid state fermentation by *Enterococcus faecalis* M2 on antioxidant and nutritional properties of wheat bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2020: 94.
- [72] YILMAZ S, ERGÜN S. Trans-cinnamic acid application for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): I. effects on haematological, serum biochemical, non-specific immune and head kidney gene expression responses[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2018, 78: 140–157.
- [73] JUNG T D, SHIN G H, KIM J M, et al. Comparative analysis of gamma-oryzanol, beta-glucan, total phenolic content and antioxidant activity in fermented rice bran of different varieties[J]. *Nutrients*, 2017, 9(6): 571.
- [74] MASSAROLO K C, DENARDI DE SOUZA T, COLLAZZO C C, et al. The impact of rhizopus oryzae cultivation on rice bran: Gamma-oryzanol recovery and its antioxidant properties[J]. *Food Chem*, 2017, 228: 43–49.
- [75] 贾红玲. 全稻芽发酵饮料的研制[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018. [JIA Hongling. Development of fermented beverage from whole rice grain sprouts[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2018.]
- [76] RS M R D, PRIYANKA. Selection of suitable form of processing of cereal (pearl millet & moth bean) for preparation of whey-cereal based fermented beverage (Lassi) prepared by using ncdc-167 culture and 1% fat content[J]. *The Pharma Innovation Journal*, 2018, 7(7): 790–795.
- [77] 罗建光, 徐文井. 灵芝发芽糙米乳饮料的工艺研究[J]. *食品科技*, 2017, 42(11): 116–120. [LUO Jianguang, XU Wenjing. Processing of vinegar beverage made from germinated brown rice fermented by *Ganoderma lucidum*[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(11): 116–120.]
- [78] CHAVAN M, GAT Y, HARMALKAR M, et al. Development of non-dairy fermented probiotic drink based on germinated and ungerminated cereals and legume[J]. *LWT*, 2018, 91: 339–344.
- [79] 孙雨茜. 糙米发芽富锌技术及其营养粉研发[D]. 南京: 南京农业大学, 2015. [SUN Yuqian. Zinc accumulation in germinated brown rice and nutritional powder development[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.]
- [80] 秦萍. 发芽杂粮代餐粉的研制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019. [QIN Ping. Development of meal replacement powder of germinated grains[D]. Shenyang: Shenyang Agriculture University, 2019.]
- [81] 李次力, 王茜. 发芽糙米面包的研制[J]. *食品科学*, 2009, 30(18): 436–439. [LI Cili, WANG Qian. Formulation of germinated brown rice bread[J]. *Food and Science*, 2009, 30(18): 436–439.]
- [82] 陈娇娇. 发酵全麦饼干加工工艺及营养成分分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016. [CHEN Jiaojiao. Processing technology and nutritional analysis of fermented whole wheat pastries[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.]
- [83] 李嘉欣. 发芽小米面条的营养及品质改良研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2021. [LI Jiaxing. Research on nutrition and quality improvement of germination foxtail millet noodles[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science & Technology, 2021.]
- [84] 修茹燕. 富含花色苷的发芽黑米速食粥及体外抗氧化研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016. [Xiu Ruyan. Study on the anthocyanin-enriched germinated instant black porridge and anti-oxidation *in vitro*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.]
- [85] ROUSSEAU S, KYOMUGASHO C, CELUS M, et al. Barriers impairing mineral bioaccessibility and bioavailability in plant-based foods and the perspectives for food processing[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2020, 60(5): 826–843.
- [86] OGHBAEI M, PRAKASH J, YILDIZ F. Effect of primary processing of cereals and legumes on its nutritional quality: A comprehensive review[J]. *Cogent Food & Agriculture*, 2016, 2(1): 1–29.
- [87] 刘贞. 糙米发芽制备高 γ -氨基丁酸营养粉的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010. [LIU Zhen. Study on the preparation of high γ -aminobutyric acid nutritional powder by germination of brown rice[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.]
- [88] ALBARRACIN M, DYNER L, GIACOMINO M S, et al. Modification of nutritional properties of whole rice flours (*Oryza sativa* L.) by soaking, germination, and extrusion[J]. *J Food Biochem*, 2019, 43(7): e12854.
- [89] GE Z, XU Z, GAO Y, et al. Effects of germination on the nutritional properties, phenolic profiles, and antioxidant activities of buckwheat[J]. *Journal of Food Science*, 2015, 80(4–5–6): 111–119.