

全谷物生物加工研究进展与发展方向

高 琨, 汪丽萍, 翟小童, 谭 斌*
(国家粮食和物资储备局科学研究院 北京 100037)

摘要 全谷物因营养健康效应而得到世界的广泛关注,然而其不易加工和食用品质差等问题限制了全谷物产业的发展。目前,物理改良技术可以在一定程度上实现全谷物加工和食用品质改良,然而其在全谷物风味品质提升和营养组分留存等方面仍存在技术瓶颈。在此背景下,大量研究证实生物加工技术利用添加外源酶或改变内源酶活性来实现全谷物中功能性组分的分子结构和物化性质等调控,可以显著提高全谷物的营养品质和生物利用度,并有助于改善全谷物食品风味等食用品质。生物技术涉及发酵、萌芽、酶解等多种技术,被视为未来全谷物食品加工的主要品质改良技术。本文围绕生物技术在全谷物加工中的应用研究进行综述,重点介绍发酵、萌芽和酶解 3 种主要生物技术在全谷物加工领域的应用情况,阐述 3 种生物技术在全谷物及其制品的营养品质提升,食用品质改良和抗营养因子消减等方面的应用优势,并在此基础上提出未来全谷物生物加工的发展方向,以期为我国全谷物产业发展提供参考。

关键词 全谷物; 生物加工; 发酵; 萌芽; 酶解

文章编号 1009-7848(2024)07-0387-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.07.038

随着人们生活水平的提升,消费者追求合理膳食模式和健康饮食行为的需求日益增长。谷物作为膳食中的主食原料,含有大量碳水化合物,是膳食能量的主要来源(占总能量的 50%~65%),也是 B 族维生素、膳食纤维、矿物质和蛋白质的重要来源^[1]。与精制谷物相比,全谷物可以提供更高质量的碳水化合物,更高含量的 B 族维生素、矿物质、酚类化合物等生物活性物质^[2]。研究证实适量食用全谷物食品,对肥胖、心脑血管疾病、2 型糖尿病等膳食相关疾病的预防和控制具有积极的干预作用^[3-4]。全谷物食品与人体健康的科学共识已得到世界广泛关注和认可,美国、英国、荷兰、丹麦、意大利和中国等多个国家都在大力倡导全谷物产业发展,积极推进全谷物及其食品的开发和利用^[5-7]。此外,全谷物开发与利用可以减少粮食加工环节损失与浪费,提高粮食出品率。因此,大力发展全谷物产业是实施“健康中国 2030”规划纲要的重要举措,也是落实中办、国办印发《粮食节约行动方案》提高粮食安全保障水平的重要途径。然而,全谷物中不可溶性膳食纤维等物质的存在,使得全谷物原/配料不易加工,全谷物食品食用品

质差,消费者可接受度低,货架期短等。此外,全谷物中抗营养因子(植酸和单宁等)的存在,限制了人体对全谷物中一些重要生物活性物质的吸收^[8]。因此,解决全谷物加工品质差,优化全谷物食品的食用品质,提高全谷物营养品质是当前全谷物产业面临的首要任务。

目前,物理改良技术(如挤压膨化、颗粒细度调控、预糊化、低温等离子、高静压处理技术等)可以在一定程度上实现全谷物品质改良^[9-13]。挤压膨化技术利用高温、高压、高剪切作用将全谷物原料进行改性,促使膳食纤维结构改变、淀粉糊化、蛋白质变性和抗营养因子破坏等,从而起到改善全谷物原/配料加工适宜性,优化全谷物食品适口性,降低植酸等抗营养因子带来的不利影响^[9-10]。颗粒细度调控技术利用物理粉碎技术有效改变麸皮粒径、结构和比表面积,改变麸皮的吸水性和溶解性,降低麸皮对面团筋网络结构破坏,改善面团流变性能,提升全谷物食品的食用口感^[11-12]。预熟化技术主要是利用高压蒸煮、微波预熟和常压蒸熟处理,使水分渗入谷物胚乳并与淀粉发生糊化,从而实现提高全谷物米制品的蒸煮品质、风味口感和组成结构^[9,13]。此外,低温等离子和高静压处理等新兴物理改良技术通过改变谷物皮层和组分结构,起到缩短全谷物烹煮时间和改良质地品质的目的^[9]。虽然物理改良技术可在一定程度上实

收稿日期: 2023-07-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1100503-1)

第一作者: 高琨,女,博士,副研究员

通信作者: 谭斌 E-mail: tb@ags.ac.cn

现改善全谷物加工和食用品质的目的,但是仍存在限制其发展的瓶颈问题:一方面,物理改良技术针对全谷物存在苦涩等不良风味问题,其改善效果并不理想;另一方面,物理加工过程中往往伴随着热处理,这导致热敏性营养素的损失,降低了全谷物食品的营养品质。因此,如何在尽可能保留全谷物营养品质的前提下,提高全谷物加工品质和食用品质,是当下全谷物亟待解决的技术问题。

在此背景下,生物加工技术利用外源酶和来源酶活性来调控全谷物功能性组分分子结构、组成及物化性质等,从而实现适度改善全谷物加工品质和食用品质的目的,被视为未来全谷物加工的主流研究方向。研究表明,糙米^[14-15]、燕麦^[16]、荞麦^[17-18]、麦麸^[19-22]、米糠^[23]等全谷物原/配料经过生物萌芽、生物发酵技术或酶解等生物加工技术处理后,不仅其营养品质和健康效益得到显著提升,而且加工和食用品质得到大幅度改善。因此,发展全谷物生物加工技术有助于解决限制全谷物产业共性问题,有助于推动构建可持续粮食系统,减少粮食损失和浪费,为消费者提供丰富、合理的膳食来源。本文主要围绕全谷物生物加工研究进行综述,首先介绍全谷物主要生物技术,其次阐述生物技术在全谷物加工领域应用的优势。在此基础上提出未来全谷物加工发展方向,以期为我国全谷物产业发展提供理论参考。

1 全谷物主要生物加工技术

1.1 生物发酵技术

发酵技术主要是利用微生物将底物转化成酶、生物量、初级及次级代谢产物,并利用这些产物实现对全谷物原/配料功能性物质进行生物化学修饰,达到改善产品品质的目的^[24]。从全谷物发酵方式,可以分为固态发酵和液态(深层)发酵两类^[24-25],如图1所示。

传统谷物液态发酵技术主要包括表面静态发酵、固定化发酵和深层发酵技术等,具有生产稳定、生产效率高优势,主要应用于食醋^[26]、白酒^[27]、饲料^[28]等产品。近年来,深层发酵技术被尝试应用于全谷物加工,主要是促使发酵过程中微生物悬浮于发酵液,与谷物基质进行充分接触,产生复杂酶体系,实现谷物品质调控^[24-26]。以糙米为例,

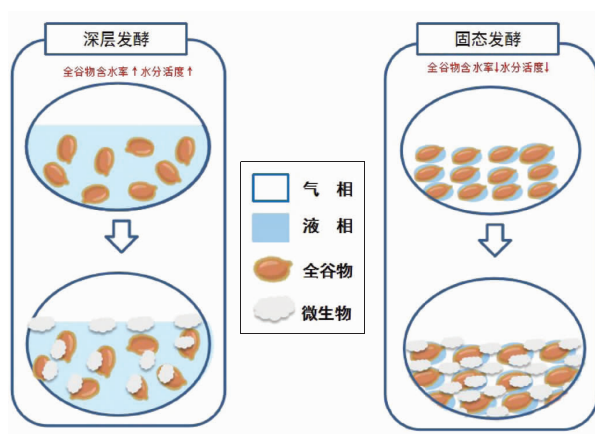


图1 全谷物深层发酵和固态发酵对比示意图

Fig.1 Comparison between submerged and solid-state fermentation

利用乳酸菌、酵母菌等深层液态发酵处理后产生的复杂酶体系(木聚糖酶、纤维素酶和蛋白酶等)可以水解共价键,有助于结合态酚酸化合物从米糠中释放出来转化为游离态酚酸,提高糙米多酚种类、含量及其生物有效利用率,提升糙米等谷物产品附加值^[25]。荞麦、大麦和黑麦经液态深层发酵处理后,会产生相似的研究结果^[29]。然而,液态发酵技术存在设备成本高,废水处理、生产周期长等问题,限制了其在全谷物产业中的应用^[30-31]。截止目前,液态发酵技术在全谷物加工领域研究相对较少,其应用价值有待进一步探究和开发。

固态发酵是以气相(连续相)、液膜及其覆盖的固定相组成的三相系统,其特点在于其培养基为固态,在水分活度满足微生物生长条件下,基质内部和表面几乎没有或者含有极少量自由流动水^[24,30]。与液态发酵相比,固态发酵技术在全谷物加工领域优势较多,具有原料成本低,产酶种类丰富,生产周期短,环境友好和经济成本低等优点^[30-31]。随着固态发酵技术发展,其作为全谷物主要生物加工技术,被广泛应用于糙米^[15]、燕麦^[16]、麦麸^[20-22]、糙小米^[32]、藜麦^[33-35]、全麦^[35-36]、高粱^[36]、玉米^[36]等。全谷物固态发酵过程中营养品质和食用品质特性的相关研究报道,为提高全谷物及其制品品质改良提供参考。目前,全谷物以单一菌种固态发酵居多,多菌组合发酵研究相对较少,这与多菌组合发酵代谢复杂、不易控制有关。随着固态发酵技术不断发展,多菌种组合发酵获得优势复合酶是未来

全谷物发酵的发展趋势。

全谷物生物发酵技术影响因素较多, 需要注意菌种筛选和培养基条件(接种密度、含氧量、培养基 pH 值、温度和发酵时间等)等因素都会影响全谷物发酵效果^[24,30-31]。首先, 菌种种类会影响全谷物发酵过程中复合酶的形成, 是决定全谷物原/配料发酵效果的首要因素。常见的全谷物发酵微生物主要包括细菌(植物乳杆菌^[15-16,24]、发酵乳杆菌^[24]、鼠李糖乳杆菌^[29]、好食脉孢霉菌^[15]、干酪乳杆菌^[34]、双歧杆菌^[35]等)和真菌(酿酒酵母^[24,29]、米根霉^[15]、米曲霉^[15-16,20,33]、黑曲霉^[22]、泡盛曲霉^[22]、少孢根霉^[33]和间型脉孢菌等^[33])两大类(见表 1)。研究结果证实真菌更适合应用于全谷物固态发酵, 而细菌和酵母菌则更适合应用于全谷物液态深层发酵。其次, 培养基条件也会影响全谷物原/配料的发酵效果。全谷物液态发酵过程中, 通气供氧方式

和数量、发酵温度、发酵终点判别指标等因素都会影响全谷物最终发酵效果^[26]。同样, 全谷物固态发酵过程中, 水分含量和水分活度、接种密度、发酵温度、氧气、培养基 pH 值、发酵终点判别指标等因素也同样会影响全谷物最终发酵效果^[37]。其中, 水分含量在固态培养基中起到重要作用, 通常情况下, 固态基质水分含量在 30%~85%最佳; 当发酵微生物为细菌时, 固态基质的水分含量通常应大于 70%, 而当发酵微生物为真菌时, 固态发酵基质水分含量通常在 30%~70%范围内较为合适^[30,37]。发酵培养基条件很大程度上取决于菌种和发酵底物。因此, 为了达到提升全谷物营养品质和食用品质的目的, 针对不同谷物底物性质和目标产品需求, 开展个性化的菌种筛选和培养基条件优化是非常有必要的, 相关工作有待进一步深入研究。

表 1 常用的全谷物发酵微生物种类

Table 1 Common microorganisms in whole grain fermentation

发酵方式	微生物类型	微生物名称	发酵基质	参考文献	
液态发酵	细菌	植物乳杆菌	糙米	[24]	
		发酵乳杆菌	糙米	[24]	
		鼠李糖乳杆菌	荞麦、大麦和黑麦	[29]	
固态发酵	真菌	酿酒酵母	糙米、荞麦、大麦和黑麦	[24],[29]	
		细菌	植物乳杆菌	糙米、燕麦	[15],[16]
			好食脉孢霉菌	糙米	[15]
	双歧杆菌		全麦、藜麦	[35]	
	真菌	酿酒酵母	糙米、糙小米粉	[15],[32]	
		米根霉	糙米	[15]	
		米曲霉	糙米、燕麦、麦麸、藜麦、玉米、高粱、小麦	[15],[16],[20],[33],[36]	
		黑曲霉	麦麸	[22]	
		泡盛曲霉	麦麸	[22]	
		少孢根霉	藜麦	[33]	
干酪乳杆菌		藜麦	[34]		
间型脉孢菌	藜麦	[33]			

1.2 生物萌芽技术

生物萌芽技术指通过吸胀作用诱导全谷物籽粒内源酶(淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶和植酸酶等)活性增强, 促使全谷物籽粒内部发生一系列有序生理反应, 从而改变全谷物形态及物化性质, 实现全谷物品质改良的目的^[38]。由于萌芽技术仅利用谷物内源酶即可实现全谷物营养品质和风味口感

的提升, 更加符合人们对食品清洁标签追求, 因此萌芽谷物及其制品是全谷物食品重要原/配料来源。近年来, 生物萌芽技术已经广泛应用于糙小米^[32,39]、糙米^[40-44]、荞麦^[18]、燕麦^[45-47]、全麦^[48-51]和藜麦^[52-54]等全谷物原/配料加工领域。

全谷物生物萌芽技术主要影响因素包括: 全谷物品种和种类、萌芽方式(浸泡法和加热加湿

法)、萌芽工艺(浸泡温度、浸泡时间、萌发方式、萌芽温度、萌芽湿度、萌芽时间)及干燥温度等^[38]。全谷物品种和种类是决定全谷物原/配料品质的首要条件。由于不同谷物自身结构、组成及物化性质差异显著,全谷物品种和种类会导致后续萌芽工艺和干燥条件明显不同,因此全谷物品种和种类选择是萌芽谷物原/配料及产品开需要考虑的首要因素。其次,萌芽方式是萌芽谷物制备的重要影响因素。研究表明,浸泡萌芽法适合全麦粉等全谷物粉类产品加工,恒温恒湿法更适合糙米等全谷物米类产品^[38];与浸泡萌芽相比,恒温恒湿萌芽方式更有助于全谷物中营养含量的提升,如恒温恒湿制备萌芽糙米中GABA含量是浸泡萌芽制备糙米的1.1~2.5倍左右^[41]。萌芽工艺条件对萌芽全谷物营养、加工和食用品质产生重要影响,其中萌芽时间对全谷物营养品质影响最显著。一方面,大量研究结果表明在萌芽72h范围内,糙小米^[39]、糙米^[41]、燕麦^[45]、全麦^[49]等大多数全谷物随萌芽时间延长,GABA、总酚等生物活性物质含量显著增加。萌芽72h后,谷物依据自身特性不同,呈现下

降或先增加后下降等不同趋势。另一方面,萌芽处理时间延长可以显著降低藜麦^[53]等全谷物中皂角苷等物质含量,明显改善藜麦等全谷物食用风味品质。此外,干燥温度也是影响萌芽谷物后续产品品质的关键因素之一。经萌芽处理后全谷物含水量通常为35%~60%^[55],含水量高会导致萌芽谷物不易贮存,货架期短,限制萌芽谷物产品的应用。干燥使萌芽全谷物水分含量降低到安全水平($\leq 14\%$),起到抑制微生物生长的目的^[56]。干态萌芽谷物作为一种相对稳定的全谷物原/配料,可用于生产高附加值的健康全谷物产品。值得注意的是,过高的干燥温度($>60\text{ }^{\circ}\text{C}$)会对最终产品的加工和营养质量产生负面影响,因此常用的干燥温度为40~60 $^{\circ}\text{C}$ ^[57-59]。针对不同全谷物,优化萌芽方式、工艺参数和干燥条件有助于提高萌芽全谷物食品的加工质量。目前研究主要集中在萌芽工艺对全谷物品质的影响,关于萌芽方式和干燥条件与营养质量之间的关系尚不清楚,因此需要更多相关研究来促进全谷物品质改善和新产品研发。

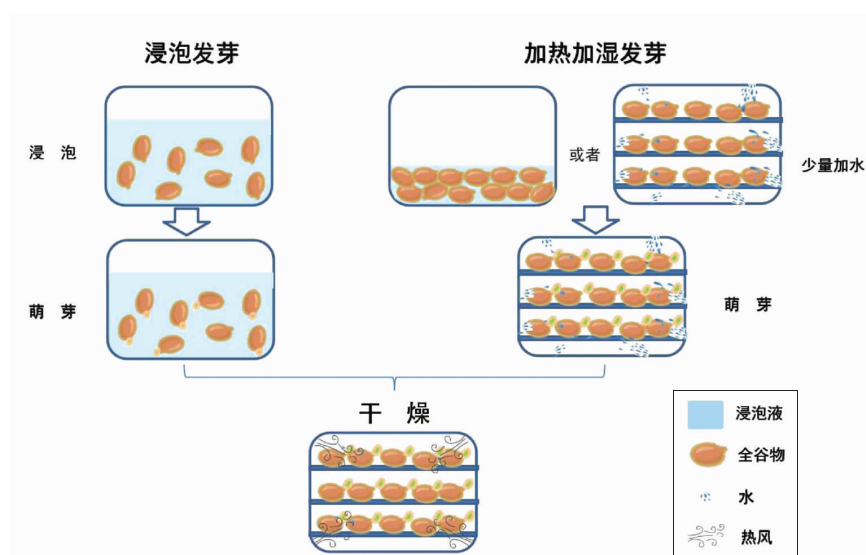


图2 浸泡发芽和加热加湿全谷物发芽方式对比示意图

Fig.2 Comparison of soaking sprouting and heating and humidifying sprouting

为进一步提升萌芽谷物营养附加值,超声波^[45,49,60-61]、低氧胁迫^[60-61]、脉冲强光照射^[62]、低压等离子^[63]等非生物胁迫技术被应用于萌芽全谷物中特征性功能营养素(如GABA、酚类化合物等)含量富集。研究表明,经超声辅助萌芽处理后,全

麦和燕麦籽粒GABA含量比未经超声处理萌芽籽粒GABA含量分别增加30.69%和13.67%^[45,49]。与超声处理相似,在低氧、脉冲强光处理和低压等离子条件下进行萌芽处理,糙米中酚类化合物和GABA含量均高于对照组,且随萌芽处理时间延

长而显著增加^[62-63]。然而,全谷物在非生物胁迫辅助萌芽处理过程中会伴有内源酶活性增强,导致部分加工品质下降。因此,在保障全谷物加工品质的前提下,进一步探究适宜的非生物胁迫辅助萌芽技术条件十分必要。

1.3 生物酶解技术

生物酶解技术是指在全谷物中添加外源酶,利用酶切位点将全谷物中不溶性膳食纤维、淀粉和蛋白质等物质进行定向水解,转化成水溶性膳食纤维、可溶性多糖及具有甜味的单糖等,具有环境友好、反应单一、废弃物少等优点^[19,23,64-65]。目前,生物酶解技术已经应用于全谷物品质改良,生物酶种类和酶解条件(温度、时间和添加量等)都会影响最终酶解效果。选择适宜的生物酶种类满足全谷物原料特性和目标产品个性化需求,是全谷物生物酶解技术的核心要素。根据生物酶功能不同,常见全谷物产品所需的生物酶主要分为细胞壁水解酶、葡聚糖酶、淀粉酶和蛋白酶等。以全谷物皮层为作用对象的细胞壁水解酶,利用木聚糖酶^[23,66-68]和纤维素酶^[23]等对全谷物皮层进行酶解改性,促使小麦麸皮和米糠等全谷物皮层中可溶性膳食纤维和酚类化合物等生物活性物质增加,达到提高全谷物营养和加工性能的目的。不同微生物制备的生物酶对水解底物的特异性不同,Escarnot等^[66]研究表明不同微生物产生的木聚糖酶可以提升麦麸中可溶性木聚糖含量(18.1%~69.7%)。研究表明,木聚糖酶可以改善全麦面团机械加工性能和流变特性,赋予全麦面包和全麦面条等产品更好的食用品质^[67]。葡聚糖酶可以改善燕麦粉面团的流变学特性,降低燕麦面团中 β -葡聚糖成胶性,提高燕麦面团的流变学特性和可变形性等加工适宜性^[68]。另外,葡聚糖酶可以适度破坏燕麦乳中 β -葡聚糖形成凝胶体系,降低燕麦乳的黏稠度,提高燕麦乳口感和稳定性^[67]。值得注意的是,酶解条件会影响酶解效率并影响产品品质,通常情况下影响因素由大到小依次为酶解温度、酶解时间和生物酶添加量^[67]。因此,选择适宜的酶制剂和酶解条件可以有效改善全谷物食品的加工和食用品质。

同时,为了提高酶解效率和产品食用品质,通常采用复合酶制剂或者将酶制剂与物理

方法结合使用。研究表明,纤维素酶和木聚糖酶协同作用可以促使米糠中阿魏酸、对香豆酸和 γ -谷维素含量分别提高253%、66%和41%~743%^[23]。葡萄糖氧化酶、戊聚糖酶和纤维素酶协同作用,可以改善面团的韧性、延展性和持气能力,实现全麦馒头品质改良^[69]。燕麦汁经葡糖淀粉酶、 α -淀粉酶和支链淀粉酶协同处理后,可以显著降低燕麦汁离心沉淀率,提高燕麦汁稳定性^[70]。Aktas-Akyildiz等^[71]采用酶解辅助挤压处理联合改性处理,有助于增加麦麸中可溶性膳食纤维含量。刘明等^[72]采用酶解辅助预糊化处理,改变了糙米凝胶温度范围,并降低了脂肪含量,使得糙米更易糊化,利于保存。由此可见,复合酶制剂或酶制剂与物理方法结合使用更易满足全谷物食品复杂体系需求,是未来全谷物食品品质改良的研究发展方向之一。

2 全谷物生物加工技术优势

2.1 生物加工技术有助于全谷物营养品质提升

生物加工技术利用外源酶或内源酶作用促使全谷物籽粒内部发生系列生化反应,有助于全谷物中酚类化合物、维生素、氨基酸和膳食纤维等生物活性物质合成和释放,促进营养物质在人体内的吸收和利用。以酚类化合物为例,谷物中多酚大部分主要与细胞壁中非淀粉多糖以结合态形式存在,少数以游离态存在。与游离态相比,结合态多酚抗氧化能力弱,且不易被人体吸收^[73]。大量研究表明,生物加工技术对全谷物多酚的吸收利用具有促进作用,具体体现在以下两个方面。一方面,生物加工可以利用内源酶(萌芽)和外源酶(固态发酵和酶解)破坏谷物皮层中多酚与非淀粉多糖的相互作用,从而促进结合酚的释放,提高游离酚含量和抗氧化能力。燕麦和藜麦等全谷物经萌芽处理后,游离态的没食子酸、原儿茶素、香草素、阿魏酸、咖啡酸等多种酚类化合物含量均显著增加,其抗氧化能力显著增加^[47,52]。燕麦经固态发酵处理后,游离态酚类化合物含量显著增加^[76]。另一方面,生物加工诱导谷物中苯丙氨酸解氨酶等生物酶激活,促进谷物中酚类物质合成^[32,74-75]。糙小麦经萌芽、固态发酵、萌芽-固态发酵协同处理后,总酚含量显著增加,其中,萌芽-固态发酵协同处理含量最高^[32]。燕麦经固态发酵处理后,没食子酸、

儿茶素和阿魏酸等结合态酚酸含量显著增加,并生成绿原酸和槲皮素等酚类物质^[74]。全谷物食品是维生素重要的膳食来源,生物加工技术可以显著增加谷物中B族维生素和生育酚的含量。根据文献报道,萌芽和发酵等生物加工技术均可以显著增加全麦、大麦、燕麦和黑麦等全谷物中叶酸^[76-77]、烟酸^[47,78]和核黄素^[47,78]的含量,是理想谷物B族维生素的强化手段。同样,生物加工技术有助于提高谷物中生育酚含量,如全麦籽粒经萌芽处理后其 α -生育酚、 β + γ -生育酚和 δ -生育酚含量分别比未处理全麦籽粒增加3.59、2.33倍和2.61倍^[78]。生物技术不仅可以提高谷物中原有维生素的含量,还可以合成新的维生素。例如,天然谷物中不含有维生素C,研究发现生物萌芽技术有助于小麦^[79]、高粱^[80]、小米^[80]和大麦^[80]等谷物内维生素C的合成。因此,生物加工技术不仅可以提高谷物中维生素含量,还可以丰富全谷物维生素种类。全谷物食品中赖氨酸含量较低且加工中易损失,故赖氨酸被视为谷物蛋白的第一限制性氨基酸。大量研究证实,萌芽和发酵加工技术不仅可以显著提高玉米^[81]、高粱^[81]、糙米^[82]等全谷物中赖氨酸含量,还可以提高谷物中赖氨酸的生物有效利用率^[83]。此外,生物加工技术还可以显著提高全谷物GABA含量^[42,45,49],促进不可溶性膳食纤维向可溶性膳食纤维转化^[42,84]等。由此可见,生物加工技术不仅有助于提高全谷物中原有生物活性物质含量,还可以合成新的生物活性物质,并且促进生物活性物质在人体内的吸收。

2.2 生物加工技术有助于全谷物食用品质改善

目前市场上全谷物食品品类和市场覆盖率不断增加,而居民全谷物食品实际摄入量和推荐摄入量之间仍有很大差距,造成这种原因主要是由于全谷物食品的食用品质不佳。全谷物麸皮含有多种非挥发性风味活性物质且富含不溶性膳食纤维等,这些物质导致了全谷物食品的口感苦涩、质地粗糙^[85]。因此,全谷物食品适口性差一直是限制全谷物产业发展的瓶颈。大量研究证实,生物加工技术可以有效改善全谷物食品风味和质地等食用品质。全谷物皮层中富含皂角苷、酚类化合物是全谷物苦涩味形成的主要原因^[53]。例如,藜麦的苦涩味主要是由于皂角苷引起,研究发现固态发酵和

萌芽处理均可以降低藜麦中皂苷的含量,有效改善藜麦的苦涩味^[53,86]。麦麸经米根霉固态发酵后,风味得到了明显改善^[20]。此外,生物加工不仅可以降低全谷物中苦涩等不良风味,还可以赋予全谷物令人愉悦的风味。全麦等谷物经萌芽处理后,籽粒淀粉和蛋白等大分子物质水解成糖类、氨基酸等小分子物质,赋予了全谷物食品令人愉悦的风味^[56]。糙米皮层中纤维素等水不溶性膳食纤维等物质抑制了淀粉吸水和糊化,导致糙米烹饪时间长,质地偏硬且不易咀嚼。研究发现利用植物乳杆菌对糙米进行生物固态发酵处理,可以部分降解皮层中纤维素和半纤维素,减少纤维素等对淀粉糊化的抑制作用,缩短烹饪时间,降低糙米饭的硬度,达到改善糙米食用品质的目的^[87]。与固态发酵处理结果相似,对糙米进行生物萌芽和酶解处理,也可以起到缩短糙米饭烹饪时间和改善糙米食用口感的目的^[14,72]。全麦麸皮中不溶性膳食纤维会与面筋蛋白竞争吸水并干预面筋网络形成,从而影响全麦面制品食用品质。生物发酵和酶水解技术会利用微生物酶水解作用,将麸皮中水不溶性膳食纤维向水溶性膳食纤维转化,减少其对面筋网络形成干扰,改善全麦产品粗糙、干涩的口感^[88]。综上所述,生物加工技术不仅可以消减全谷物的不良风味,还有助于改善全谷物的食用口感。

2.3 生物加工技术有助于降低全谷物抗营养因子

全谷物皮层中植酸和单宁等物质具有抗营养作用,能够抑制人体对蛋白质和矿物质等营养物质的吸收利用,其含量因谷物品种不同而存在差异。大量研究表明,生物加工技术(发酵、萌芽等)可以显著降低全谷物中植酸的含量,从而有效提高矿物元素的生物利用度^[32,89-91]。据文献报道,全麦^[91]、小米^[32]、大麦^[90]、燕麦^[89-90]、糙米^[91]等全谷物在固态发酵处理过程中,微生物将全谷物中部分碳水化合物转化为乳酸、柠檬酸和乙酸等各种有机酸,从而降低了谷物籽粒内部pH值,使得谷物中内源性植酸酶激活,从而降低全谷物中植酸含量。同样,全麦^[48]、糙米^[91]、荞麦^[92]和藜麦^[92]等全谷物通过萌芽处理诱导谷物籽粒内源酶活性增强,从而降低全谷物中植酸含量。对同种全谷物而言,固态发酵对全谷物中植酸降解效果要优于萌芽处理^[92]。生物加工技术不仅可以降低全谷物中植酸

含量,还有助于全谷物中单宁含量下降。研究表明,通过对小米、高粱、荞麦、藜麦等全谷物进行萌芽、发酵、萌芽-发酵联合处理后,生物加工技术可以显著降低全谷物中单宁的含量,影响效果由大到小依次为萌芽-发酵联合、萌芽和发酵^[92-94]。由此可见,生物加工技术均对全谷物中抗营养因子影响显著,固态发酵技术对全谷物植酸降解作用效果更加显著,而萌芽技术对全谷物中单宁降解作用效果更加显著。

3 全谷物生物加工未来发展方向

3.1 构建全谷物生物加工基础数据库

全谷物原料功能组分是影响全谷物食品品质与功能特性的关键因素,重要的功能组分决定了生物加工技术对全谷物食品营养、加工和食用等多维品质的改善效果。全谷物品类繁多,而原料基础数据不足,专用品种缺乏,因此建立全谷物生物加工基础数据库,有助于生物加工原料筛选,满足不同全谷物食品的加工需求。

3.2 开展全谷物高活性优质发酵菌株筛选

微生物菌种对固态发酵全谷物加工及营养品质形成具有重要影响,决定了全谷物加工品质的改性程度,以及全谷物食品营养品质和食用品质的改良效果。为达到提升全谷物营养品质和食用品质的目的,针对不同谷物底物性质和目标产品需求,开展适宜的高活性优质菌种筛选工作是非常有必要的。

3.3 建立全谷物萌芽精准化控制体系

全谷物在不同萌芽阶段营养物质和加工品质变化不尽相同,明确全谷物萌芽过程中营养与加工品质间的动态平衡区间,阐明不同萌芽阶段全谷物原料的优质性,明确不同谷物萌芽程度的加工适宜性,确立萌芽全谷物营养特性、风味特性以及加工适应性的关键控制点及评价指标,实现目标全谷物萌芽精准化控制加工,对全谷物萌芽产品开发、绿色加工和高值化利用具有重要意义。

3.4 研发适应全谷物加工新型酶制剂

以改善全谷物食品加工品质和营养强化为目标,针对影响全谷物食品品质形成的功能组分(纤维素、蛋白和淀粉等),筛选及合成出能够绿色、高效降解全谷物中纤维素等不溶性膳食纤维的纤维

素酶等生物酶制剂,提高不同产品加工适宜性的蛋白酶和淀粉酶类等。同时,运用基因工程和蛋白质工程等对生物酶制剂进行修饰改性,进一步提高生物酶解效率。

3.5 构建全谷物生物加工调控关键技术

针对全谷物存在口感改良及营养素留存技术滞后等问题,构建全谷物原/配料固态发酵定向品质提升技术、精准可控生物萌芽改性技术、酶法重构协同增效等生物绿色加工系列关键技术,实现全谷物食品品质改良。同时,全谷物食品制造过程中需要生物(固态发酵、萌芽和酶解)和物理改造(如过热蒸汽、精准柔性碾皮、微波磁场、挤压改性、颗粒细度等)多种加工技术联合使用,进行全谷物生物、物理与工程技术创新,是提升我国全谷物食品加工水平和品质改良的核心竞争力,是保障全谷物食品加工产业高水平发展的关键。

3.6 深入开展全谷物生物改性产品营养健康功能评价

随着我国居民营养健康需求持续增长,全谷物食品的营养健康作用是消费者选择产品的重要评价要素。目前,全谷物生物加工食品的体内健康功能评价不足,需要进一步开展生物加工与全谷物食品体内健康功能关系研究。未来,通过体外试验模型及动物和人群实验,运用代谢组学、蛋白组学、营养组学、大数据分析等多种分析技术联合协作,开展生物加工与全谷物食品健康功能评价,相关研究有助于构建和完善全谷物与人体健康关系数据库,为全谷物食品推荐摄入提供科学数据支撑。

3.7 关键核心智能化装备研发

智能化装备研发是实现生物技术在全谷物食品产业化应用的关键。生物加工设备研发,在保障绿色、高效、智能和安全的前提下,针对全谷物食品加工特点,开发全谷物生物加工专用化设备,如规模化高效全谷物萌芽成套装备、全谷物及麸皮固态发酵专用设备、高效全谷物灭酶与稳定化装备等。

3.8 建立相关生产技术规范和产品标准

由于生物加工工艺多样性和复杂性的问题,全谷物生物加工生产技术规范必须符合实际生产的需要。以糙米加工为例,糙米可以经过生物萌

芽、固态发酵和酶法辅助加工获得不同糙米产品。糙米经不同生产工艺,生产的产品各项指标变化差异较大,应根据加工工艺不同,制定不同生产工艺技术规范和产品标准。目前,我国全谷物生物加工技术规范较少,亟待开展制修订全谷物生物加工技术规范和产品标准相关工作。

3.9 研发适合我国居民膳食习惯和营养需求的系列化全谷物食品

针对全谷物食品食用品质不佳,消费者接受度低等问题,根据消费场景、消费人群、营养和风味口感等不同需求,利用生物发酵、萌芽和酶解等多种技术辅助处理全谷物原/配料,研发符合我国居民膳食习惯和营养需求的系列化全谷物主食、个性化全谷物功能食品及代餐食品。

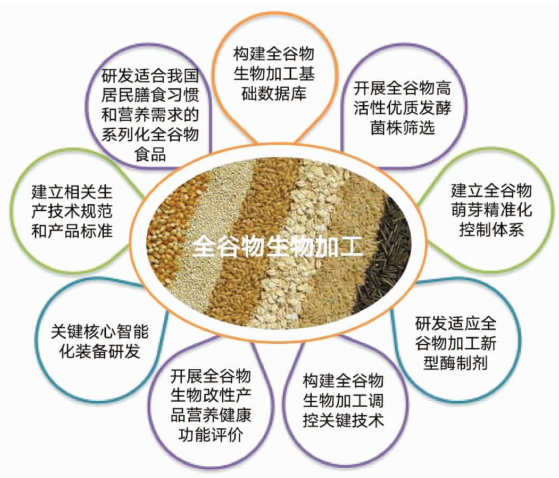


图3 全谷物生物加工未来发展方向

Fig.3 Future perspectives in whole grain bioprocessing

4 小结与展望

生物加工技术被视为环境友好和可持续发展的未来全谷物品质改性加工技术,大量研究结果表明其不仅可以提高全谷物营养因子含量和生物利用度,而且有助于全谷物食品加工和食用品质改善。针对我国全谷物产业发展重大需求,围绕全谷物食品不易加工、食用品质差和营养素留存滞后等瓶颈问题,大力发展全谷物生物加工技术在全谷物品质改性及全谷物食品品质提升等领域的应用,加快推进生物加工技术在全谷物食品加工制造、营养健康、风味提升、口感改善、智能装备和标准制修订等方面产业布局,着力突破全谷物生

物加工关键性技术和智能装备,推动全谷物食品由小众食品向大众食品转变,促进全谷物食品消费成为一种健康饮食方式,有利于助推我国全谷物产业绿色健康可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 中国营养学会. 中国居民膳食指南[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2022: 4-5.
Chinese Nutrition Society. The Chinese dietary guidelines[M]. Beijing: People's Medical Publishing House Co., LTD, 2022: 4-5.
- [2] LANDBERG R, SCHEERS N. Whole grains and health[M]. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2021: 21-29.
- [3] RICCARDI G, COSTABILE G. Carbohydrate quality is key for a healthy and sustainable diet[J]. Nature Reviews Endocrinology, 2019, 15(5): 257-258.
- [4] REYNOLDS A, MANN J, CUMMINGS J, et al. Carbohydrate quality and human health: A series of systematic reviews and meta-analyses [J]. Lancet, 2019, 393(10170): 434-445.
- [5] CLAR C, AL-KHUDAIRY L, LOVEMAN E, et al. Low glycaemic index diets for the prevention of cardiovascular disease[J]. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2017, 7(7): CD004467.
- [6] KELLY S A M, HARTLEY L, LOVEMAN E, et al. Whole grain cereals for the primary or secondary prevention of cardiovascular disease[J]. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2017, 8(8): CD005051.
- [7] PEPA D G, VETRANI C, VITALE M, et al. Whole grain intake and risk of type 2 diabetes: Evidence from epidemiological and intervention studies[J]. Nutrients, 2018, 10(9): 1288.
- [8] KUMAR A, LAL M K, SAHOO S K, et al. The diversity of phytic acid content and grain processing play decisive role on minerals bioavailability in rice [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 115: 105032.
- [9] 颜翼璇, 李言, 钱海峰, 等. 全谷物食品适口性改良方法研究进展[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(2): 179-186.
YAN Y X, LI Y, QIAN H F, et al. Research on palatability of whole grain foods and improvement

- methods [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(2): 179–186.
- [10] YI C P, QIAN N N, ZHU H, et al. Extrusion processing: A strategy for improving the functional components, physicochemical properties, and health benefits of whole grains[J]. Food Research International, 2020, 160: 111681.
- [11] XIONG L C, ZHANG B J, NIU M, et al. Protein polymerization and water mobility in whole wheat dough influenced by bran particle size distribution[J]. LWT–Food Science and Technology, 2017, 82: 396–403.
- [12] LIN S Y, JIN X X, GAO J, et al. Impact of wheat bran micronization on dough properties and bread quality: Part II–Quality, antioxidant and nutritional properties of bread [J]. Food Chemistry, 2022, 396: 133631.
- [13] 关桦楠, 吴永存, 孙冰玉, 等. 高压蒸煮及微波预熟工艺改良糙米品质的研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 204–211.
- GUAN H N, WU Y C, SUN B Y, et al. Effect of high pressure and microwave precooking processes on improving the quality of brown rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(8): 204–211.
- [14] OLIVEIRA M E A S, COIMBRA P P S, GALDEANO M C, et al. How does germinated rice impact starch structure, products and nutritional evidences? –A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 122: 13–23.
- [15] ZHANG D Q, YE Y J, TAN B. Comparative study of solid–state fermentation with different microbial strains on the bioactive compounds and microstructure of brown rice[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133735.
- [16] WU H, LIU H N, MA A M, et al. Synergetic effects of *Lactobacillus plantarum* and *Rhizopus oryzae* on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of whole–grain oats (*Avena sativa* L.) during solid–state fermentation[J]. LWT–Food Science and Technology, 2022, 154: 112687.
- [17] 孙丹. 固态发酵苦荞中酚类物质、抗氧化性及抗炎活性的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2016.
- SUN D. Study on phenolic substances, antioxidant activity and anti–inflammatory activity in solid fermentation Tartary buckwheat[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016.
- [18] HAO J X, WU T J, LI H Y, et al. Dual effects of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) treatment on the accumulation of γ -aminobutyric acid (GABA) and rutin in germinated buckwheat[J]. Food Chemistry, 2016, 201: 87–93.
- [19] LIU X, SUO K K, WANG P, et al. Modification of wheat bran insoluble and soluble dietary fibers with snail enzyme [J]. Food Science and Human Wellness, 2021, 10(3): 356–361.
- [20] WU J F, REN L X, ZHAO N, et al. Solid–state fermentation by *Rhizopus oryzae* improves flavour of wheat bran for application in food[J]. Journal of Cereal Science, 2022, 107: 103536.
- [21] ZHANG H J, ZHANG X S, CAO X R, et al. Semi–solid state fermentation and enzymatic hydrolysis impeded the destroy of wheat bran on gluten polymerization [J]. LWT–Food Science and Technology, 2021, 98: 306–313.
- [22] YIN Z N, WU W J, SUN C Z, et al. Comparison of releasing bound phenolic acids from wheat bran by fermentation of three *Aspergillus* species[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2018, 53(5): 1120–1130.
- [23] SAPNA I, JAYADEEP A. Cellulolytic and xylanolytic enzyme combinations in the hydrolysis of red rice bran: A disparity in the release of nutraceuticals and its correlation with bioactivities [J]. LWT–Food Science and Technology, 2022, 154: 112856.
- [24] GARRIDO–GALAND S, ASENSIO–GRAU A, CALVO–LERMA J, et al. The potential of fermentation on nutritional and technological improvement of cereal and legume flours: A review[J]. Food Research International, 2021, 145(12): 110398.
- [25] KHAN S A, ZHANG M W, LIU L, et al. Co–culture submerged fermentation by *Lactobacillus* and yeast more effectively improved the profiles and bioaccessibility of phenolics in extruded brown rice than single–culture fermentation[J]. Food Chemistry, 2020, 326: 126985.
- [26] 陈程鹏, 邱晓曼, 洪厚胜. 食醋液态发酵工艺的研究现状[J]. 中国调味品, 2020, 45(1): 189–192.
- CHEN C P, QIU X M, HONG H S. Research status of liquid fermentation technologies of vinegar[J]. China Condiment, 2020, 45(1): 189–192.

- [27] 唐洁, 王海燕, 徐岩. 酿酒酵母和异常毕赤酵母混菌发酵对白酒液态发酵效率和风味物质的影响[J]. 微生物通报, 2012, 39(7): 921-930.
TANG J, WANG H Y, XU Y. Effect of mixed culture of *Saccharomyces cerevisiae* and *Pichia anomala* on fermentation efficiency and flavor compounds in Chinese Liquor[J]. Microbiology China, 2012, 39(7): 921-930.
- [28] 周鹏, 曹清杰, 董寿周. 液态发酵对饲料品质的影响[J]. 养殖与饲料, 2020, 19(10): 52-53.
ZHOU P, CAO Q J, DONG S Z. Effect of liquid fermentation on feed quality [J]. Animals Breeding and Feed, 2020, 19(10): 52-53.
- [29] ĐORĐEVIĆ T M, ŠILER-MARINKOVIĆ S S, DIMITRIJEVIĆ-BRANKOVIĆ S I. Effect of fermentation on antioxidant properties of some cereals and pseudo cereals[J]. Food Chemistry, 2010, 119(3): 957-963.
- [30] 隋文杰, 刘锐, 吴涛, 等. 固态发酵在食品加工中的应用研究进展[J]. 生物产业技术, 2018, 3(5): 13-23.
SUI W J, LIU R, WU T, et al. Application and research progress of solid-state fermentation in food processing fields [J]. Biotechnology & Business, 2018, 3(5): 13-23.
- [31] 张铁鹰. 固态生物发酵研究进展与未来发展趋势[J]. 饲料与畜牧, 2017(17): 24-30.
ZHANG T Y. Research progress and future development trend of solid state biological fermentation[J]. Feed and Animal Husbandry, 2017(17): 24-30.
- [32] AZEEZ S O, CHINMA C E, BASSEY S O, et al. Impact of germination alone or in combination with solid-state fermentation on the physicochemical, antioxidant, *in vitro* digestibility, functional and thermal properties of brown finger millet flours[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 154: 112734.
- [33] STARZYŃSKA-JANISZEWSKA A, STODOLAK B, GÓMEZ-CARAVACA A M, et al. Mould starter selection for extended solid-state fermentation of quinoa[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 99: 231-237.
- [34] LI S L, CHEN C, JI Y X, et al. Improvement of nutritional value, bioactivity and volatile constituents of quinoa seeds by fermentation with *Lactobacillus casei*[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 84: 83-89.
- [35] AYYASH M, JOHNSON S K, LIU S Q, et al. Cytotoxicity, antihypertensive, antidiabetic and antioxidant activities of solid-state fermented lupin, quinoa and wheat by *Bifidobacterium* species: *In vitro* investigations[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 95: 295-302.
- [36] SAHARAN P, SADH P, DUHAN J S. Comparative assessment of effect of fermentation on phenolics, flavanoids and free radical scavenging activity of commonly used cereals[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2017, 12: 236-240.
- [37] KRISHNA C. Solid-state fermentation systems—an overview[J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2005, 25(1/2): 1-30.
- [38] 高琨, 谭斌, 汪丽萍, 等. 萌芽全谷物的研究现状、问题与机遇[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(2): 71-80.
GAO K, TAN B, WANG L P, et al. The research status, problems and opportunities of sprouted whole grain [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(2): 71-80.
- [39] LI X F, HAO J X, LIU X G, et al. Effect of the treatment by slightly acidic electrolyzed water on the accumulation of γ -aminobutyric acid in germinated brown millet[J]. Food Chemistry, 2015, 186: 249-255.
- [40] 郑向华, 陈荣, 叶宁, 等. 温度和时间对发芽糙米中 γ -氨基丁酸含量的影响[J]. 中国粮油学报, 2009, 24(9): 1-4.
ZHENG X R, CHEN R, YE N, et al. Effect of temperature and time on γ -GABA content of germinated brown rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 24(9): 1-4.
- [41] 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.
- [42] CHO D H, LIM S T. Germinated brown rice and its bio-functional compounds [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 259-271.
- [43] WU N N, LI R, LI Z J, et al. Effect of germination in the form of paddy rice and brown rice on their phytic acid, GABA, γ -oryzanol, phenolics, flavonoids and antioxidant capacity[J]. Food Research International, 2022, 159: 111603.

- [44] LIU X L, ZHANG J, YANG X J, et al. Combined molecular and supramolecular structural insights into pasting behaviors of starches isolated from native and germinated waxy brown rice [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 283: 119148.
- [45] DING J Z, JOHNSON J, CHU Y F, et al. Enhancement of γ -aminobutyric acid, avenanthramides, and other health-promoting metabolites in germinating oats (*Avena sativa* L.) treated with and without power ultrasound [J]. *Food Chemistry*, 2019, 283: 239–247.
- [46] APARICIO-GARCÍA N, MARTÍNEZ-VILLALUENGA C, FRIAS J, et al. Changes in protein profile, bioactive potential and enzymatic activities of gluten-free flours obtained from hulled and dehulled oat varieties as affected by germination conditions[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2020, 134: 109955.
- [47] APARICIO-GARCÍA N, MARTÍNEZ-VILLALUENGA C, FRIAS J, et al. Sprouted oat as a potential gluten-free ingredient with enhanced nutritional and bioactive properties[J]. *Food Chemistry*, 2021, 338: 127972.
- [48] LEMMENS E, BRIER N D, SPIERS K M, et al. The impact of steeping, germination and hydrothermal processing of wheat (*Triticum aestivum* L.) grains on phytate hydrolysis and the distribution, speciation and bio-accessibility of iron and zinc elements[J]. *Food Chemistry*, 2018, 254: 367–376.
- [49] DING J Z, HOU G G, NEMZER B V, et al. Effects of controlled germination on selected physico-chemical and functional properties of whole-wheat flour and enhanced γ -aminobutyric acid accumulation by ultrasonication [J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 214–221.
- [50] BOUKID F, PRANDI B, VITTADINI E, et al. Tracking celiac disease-triggering peptides and whole wheat flour quality as function of germination kinetics[J]. *Food Research International*, 2018, 112: 345–352.
- [51] GAO K, LIU Y X, TAN B, et al. An insight into the rheology and texture assessment: The influence of sprouting treatment on the whole wheat flour[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 125: 107248.
- [52] BHINDER S, KUMARI S, SING B, 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.
- [53] SUÁREZ-ESTRELLA D, BORGONOVO G, BURATTI S, et al. Sprouting of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.): Effect on saponin content and relation to the taste and astringency assessed by electronic tongue[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2021, 144: 111234.
- [54] HE Y N, SONG S H, LI C, et al. Effect of germination on the main chemical compounds and 5-methyltetrahydrofolate metabolism of different quinoa varieties[J]. *Food Research International*, 2022, 159: 111601.
- [55] DZIKI D. The crushing of wheat kernels and its consequence on the grinding process [J]. *Powder Technology*, 2018, 185(2): 181–186.
- [56] FENG H, NEMZER B, DEVRIES J W. Sprouted Grains[M]. United Kingdom: Elsevier Inc, 2019: 69–90, 113–140.
- [57] AGHA M K K, BUCKLIN R A, LEE W S, et al. Effect of drying conditions on triticale seed germination and rice weevil infestation [J]. *Transactions of the ASABE*, 2017, 60(2): 571–575.
- [58] POUDEL R, FINNIE S, ROSE D J. Effects of wheat kernel germination time and drying temperature on compositional and end-use properties of the resulting whole wheat flour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2019, 86: 33–40.
- [59] SHEN L Y, GAO M, ZHU Y, et al. Microwave drying of germinated brown rice: Correlation of drying characteristics with the final quality[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 70: 102673.
- [60] 徐汇, 梅新, 李书艺, 等. 非生物胁迫对发芽谷物多酚的影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(20): 330–335.
- XU H, MEI X, LI S Y, et al. Research progress on effect of abiotic stress on polyphenols of sprouted cereal[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(20): 330–335.
- [61] 丁俊青. 低氧胁迫与超声场激发对发芽糙米中 γ -氨基丁酸积累的影响及其代谢机制[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- DING J Z. Effect of hypoxic stress and ultrasonic stimulation on the γ -aminobutyric acid (GABA) ac-

- cumulation in germinating dehulled rice and metabolomic mechanism[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016.
- [62] 张良晨, 李东红, 于森, 等. 发芽糙米 γ -氨基丁酸富集工艺的研究进展[J]. 农业科技与装备, 2019, 292(4): 51-53.
- ZHANG L C, LI H D, YU M, et al. Research progress on enrichment process of γ -aminobutyric acid in germinated brown rice[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2019, 292(4): 51-53.
- [63] CHEN H H, CHANG H C, CHEN Y K, et al. An improved process for high nutrition of germinated brown rice production: Low-pressure plasma[J]. Food Chemistry, 2016, 191: 120-127.
- [64] 金根升. PET冷灌装酶解燕麦乳饮料的开发[D]. 厦门: 集美大学, 2017.
- JIN G S. The development of oat milk beverage about PET cold filling and enzymatic hydrolysis[D]. Xiamen: Jimei University, 2017.
- [65] PATRA T, AXEL C, RINNAN Å, et al. The physicochemical stability of oat-based drinks [J]. Journal of Cereal Science, 2022, 104: 103422.
- [66] ESCARNOT E, AGUEDO M, PAQUOT M. Enzymatic hydrolysis of arabinoxylans from spelt bran and hull[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55: 243-253.
- [67] 刘姣, 汪丽萍, 吴卫国, 等. 麦麸木聚糖酶处理条件对全麦挂面品质的影响[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3): 79-85.
- LIU J, WANG L P, WU W G, et al. Effect of bran xylanase enzyme treatment conditions on the quality of whole wheat flour dried noodles[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(3): 79-85.
- [68] 钱海峰, 潘琪锋, 李言, 等. β -葡聚糖酶对高燕麦含量面团性质与蛋白结构的影响[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 41-49.
- QIAN H F, PAN Q F, LI Y, et al. Effect of β -glucanase on properties and protein structure of dough with a high oat flour content[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 41-49.
- [69] 蔺艳君. 复合酶处理对全麦馒头品质的改良作用[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- LIN Y J. Quality improvement of whole wheat Chinese steamed bread with compound enzyme[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2016.
- [70] 张晓旻, 刘靛, 刘敏尧, 等. 复配酶酶解对燕麦浊汁的稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 72-76.
- ZHANG X M, LIU L, LIU M R, et al. Effects of hydrolysis using an enzyme mixture on stability of turbid oat juice[J]. Food Research and Development, 2021, 42(11): 72-76.
- [71] AKTAS -AKYILDIZ E, MASATCIOGLU M T, KÖKSEL H. Effect of extrusion treatment on enzymatic hydrolysis of wheat bran[J]. Journal of Cereal Science, 2020, 93: 102941.
- [72] 刘明, 咎学梅, 谭斌. 酶解辅助预糊化处理对糙米食用品质及其理化特性的影响[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(4): 130-143.
- LIU M, ZAN X M, TAN B, et al. Effect of enzyme-assisted pregelatinization on edible quality and physicochemical properties of brown rice[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(4): 130-143.
- [73] 易翠平, 刘爽, 林本平, 等. 谷物中多酚与多糖之间相互作用的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4): 187-193.
- YI C P, LIU S, LIN B P, et al. Research progress on interaction between polyphenols and polysaccharides in cereal[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oil Association, 2022, 37(4): 187-193.
- [74] BEI Q, LIU Y, WANG L, et al. Improving free, conjugated, and bound phenolic fractions in fermented oats (*Avena sativa* L.) with *Monascus anka* and their antioxidant activity[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 32: 185-194.
- [75] 翟玮玮. 萌发谷物中多酚类物质与苯丙氨酸解氨酶的研究进展[J]. 食品工业科技, 2010, 31(8): 370-372, 376.
- ZHAI W W. Research progress of phenolic compounds and phenylalanine ammonia-lyase in pre-germinated grains [J]. Science and Technology of Food Industry, 2010, 31(8): 370-372, 376.
- [76] HEFNI M, WITHÖFT C. Increasing the folate content in Egyptian baladi bread using germinated wheat flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2011, 44(3): 706-712.
- [77] BOZ H. Effect of processing on cereal folates [J].

- Journal of Cereal Science, 2021, 99: 103202.
- [78] ŽILIĆ S, BASIĆ Z, ŠUKALOVIĆ H T, et al. Can the sprouting process applied to wheat improve the contents of vitamins and phenolic compounds and antioxidant capacity of the flour? [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2014, 49 (4): 1040–1047.
- [79] YANG F, BASU T K, OORAIKUL B. Studies on germination conditions and antioxidant contents of wheat grain[J]. International Journal of Food Sciences & Nutrition, 2001, 52(4): 319–330.
- [80] LEMMENS E, MORONI A V, PAGAND J, et al. Impact of cereal seed sprouting on its nutritional and technological properties: A critical review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(1): 305–328.
- [81] ASIEDU M, LIED E, NILSEN R, et al. Effect of processing (sprouting and/or fermentation) on sorghum and maize: II. Vitamins and amino acid composition. Biological utilization of maize protein[J]. Food Chemistry, 1993, 48(2): 201–204.
- [82] SEONG H Y, KIM M. Enhanced protein quality and antioxidant activity of fermented Brown rice with *Gryllus bimaculatus*[J]. LWT– Food Science and Technology, 2021, 150: 111948.
- [83] WU H, LIU H N, MA A M, et al. Synergetic effects of *Lactobacillus plantarum* and *Rhizopus oryzae* on physicochemical, nutritional and antioxidant properties of whole-grain oats (*Avena sativa* L.) during solid-state fermentation[J]. LWT–Food Science and Technology, 2022, 154: 112687.
- [84] LI Y X, NIU L, GUO Q Q, et al. Effects of fermentation with lactic bacteria on the structural characteristics and physicochemical and functional properties of soluble dietary fiber from prosomillet bran [J]. LWT – Food Science and Technology, 2022, 154: 112609.
- [85] HEINIÖ R L, NOORT N W J, KATINA K, et al. Sensory characteristics of wholegrain and bran-rich cereal foods—A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 47: 25–38.
- [86] BOLÍVAR-MONSALVE J, CEBALLOS-GONZALEZ C, RAMÍREZ-TORO C, et al. Reduction in saponin content and production of gluten-free cream soup base using quinoa fermented with *Lactobacillus plantarum*[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2018, 42(2): e13495.
- [87] LI Y F, CHENG X, 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): 1800160.
- [88] ZHANG H J, ZHANG X S, CAO X R, et al. Semi-solid state fermentation and enzymatic hydrolysis impeded the destroy of wheat bran on gluten polymerization[J]. LWT – Food Science and Technology, 2018, 98: 306–313.
- [89] MAGALA M, KOHAJDOVÁ Z, KAROVIČOVÁ J. Degradation of phytic acid during fermentation of cereal substrates [J]. Journal of Cereal Science, 2015, 61: 94–96.
- [90] EKLUND –JONSSON C, SANDBERG A S, ALMINGER M L. Reduction of phytate content while preserving minerals during whole grain cereal tempe fermentation [J]. Journal of Cereal Science, 2006, 44(2): 154–166.
- [91] LIANG J F, HAN B Z, NOUT M J R, et al. Effects of soaking, germination and fermentation on phytic acid, total and *in vitro* soluble zinc in brown rice[J]. Food Chemistry, 2008, 110(4): 821–828.
- [92] THAKUR P, KUMAR K, AHMED N, et al. Effect of soaking and germination treatments on nutritional, anti-nutritional, and bioactive properties of amaranth (*Amaranthus hypochondriacus* L.), quinoa (*Chenopodium quinoa* L.), and buckwheat (*Fagopyrum esculentum* L.) [J]. Current Research in Food Science, 2021, 4: 917–925.
- [93] SHARMA R, SHARMA S. Anti-nutrient & bioactive profile, *in vitro* nutrient digestibility, techno-functionality, molecular and structural interactions of foxtail millet (*Setaria italica* L.) as influenced by biological processing techniques[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130815.
- [94] KRUGER J, TAYLOR J R N, OELOFSE A. Effects of reducing phytate content in sorghum through genetic modification and fermentation on *in vitro* iron availability in whole grain porridges[J]. Food Chemistry, 2012, 131(1): 220–224.

Research Progress and Development Directions of Whole Grain Bioprocessing

Gao Kun, Wang Liping, Zhai Xiaotong, Tan Bin*

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037)

Abstract Whole grain foods are known to be beneficial to health, however, the factors including poor processing characteristics and sensory attributes, limit industry development of whole grain. At present, several physical treatments have been shown to improve the processing and edible characteristics of whole grain. However, there are still technical limitations in the improvement of flavor quality and retention of nutritional components of whole grains. In this background, extensive research has shown that bioprocessing technologies can modified the molecular structure, physical and chemical properties of whole grains by exogenous and endogenous enzyme. These changes can markedly elevate nutrient content and bioavailability of whole grains, and improve sensory attributes of whole grains foods. Bioprocessing involves fermentation, sprouting, enzymatic hydrolysis and other technologies, which is regarded as a major modification mean of whole grain processing in the future. This article aimed to comprehensively review the applications of bioprocessing technologies in whole grains. The application of fermentation, sprouting and enzymatic hydrolysis, which were mainly used in whole grain processing, were introduced in this paper. The advantages of three bioprocessing technologies in improving the nutritional efficacy, sensory attributes and reducing anti-nutritional factors of whole grains were discussed. Furthermore, future perspectives in whole grain bioprocessing technologies and product development are discussed. The study can provide references for the future development of whole grain industry in China.

Keywords whole grain; bioprocessing; fermentation; sprouting; enzyme hydrolysis