

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.04.027

张笃芹, 谭斌, 汪丽萍, 等. 小麦麸皮固态发酵的研究应用现状[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(4): 201-210.

ZHANG D Q, TAN B, WANG L P, et al. The current research and application of solid-state fermentation of wheat bran[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(4): 201-210.

小麦麸皮固态发酵的研究应用现状

张笃芹¹, 谭斌¹✉, 汪丽萍¹, 叶彦均²

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037;

2. 中南林业科技大学, 湖南 长沙 410004)

摘要: 小麦麸皮是小麦粉研磨过程产生的最主要副产物, 含有丰富的生物活性物质, 可作为固态发酵过程中微生物生长的基质, 用于各种工业生产领域。综述小麦麸皮固态发酵在代谢产物生产、微生物菌剂制备、全谷物食品加工及饲料替代等领域的国内外研究应用现状, 并对其未来的研究发展方向进行展望, 以期小麦麸皮固态发酵系统研究提供参考。

关键词: 小麦麸皮; 固态发酵; 代谢产物; 微生物菌剂; 全谷物食品; 研究应用

中图分类号: TS209 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)04-0201-10

The Current Research and Application of Solid-state Fermentation of Wheat Bran

ZHANG Du-qin¹, TAN Bin¹✉, WANG Li-ping¹, YE Yan-jun²

(1. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China;

2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: Wheat bran is the main by-product during the milling process of wheat flour, which is rich in bioactive substances. It could be used as the substrate for microbial growth in the process of solid-state fermentation and in various industrial production fields. The current research and application of solid-state fermented wheat bran in metabolites production, microbial inoculums preparation, whole-grain food processing, and feed substitution were reviewed in this study, and their prospects were also put forward, in order to provide a theoretical reference for the further and systematic research of wheat bran solid-state fermentation.

Key words: wheat bran; solid-state fermentation; secondary metabolites; microbial inoculums; whole-grain food; research and application

小麦 (*Triticum aestivum*) 作为在世界各地广泛种植的谷类作物, 主要用于人类主食和牲畜饲料^[1-2]。小麦籽粒由麸皮、胚芽和胚乳三个部分组成,

麸皮位于小麦籽粒的最外层, 约占小麦籽粒总重的 13%~19%^[3]。作为小麦粉研磨过程中最主要的加工副产物, 小麦麸皮中较高的蛋白质、脂肪和粗纤维含量使其吸水性强、易霉变、易被呕吐毒素污染, 大大缩短了储存时间, 易对环境造成污染且处理成本高^[4]。因此, 小麦麸皮的综合利用受到国内外的广泛关注。目前对于小麦麸皮的应用主要是作为生物炼制的加工原料、动物饲料和人类食品^[2,5]。据统计, 约 90% 的小麦麸皮用

收稿日期: 2021-01-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFE0206300)

Supported by: National Key Research and Development Project of China (No.2018YFE0206300)

作者简介: 张笃芹, 女, 1990 年出生, 博士, 助理研究员, 研究方向为粮食加工。E-mail: zdq@ags.ac.cn.

通讯作者: 谭斌, 男, 1972 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为粮食加工。E-mail: tb@ags.ac.cn.

作动物饲料和生物炼制,约 10%的小麦麸皮则与小麦仁一起碾磨制成全麦面粉作为膳食纤维补充来源,用于焙烤、油炸和早餐谷物^[6-7]。

固态发酵是在没有或接近没有自由水的情况下,于惰性载体或水不溶性底物上进行的发酵过程^[8-9]。由于固态发酵在游离水极少的条件下进行,更加接近微生物适应的自然环境,因此,相比于其他生物加工技术,固态发酵具有更高的发酵生产力、更低的分解代谢阻遏、更低的水分活性以及更低的无菌操作要求等^[9]。此外,固态发酵还可利用低成本的农工废弃物作为惰性载体(固体基质/底物),如小麦麸皮的应用就极大的解决了农工废弃物的环境污染及其处置的高成本问题^[10]。已有报道的小麦麸皮固态发酵广泛用于工业生产,特别在生物活性代谢产物、微生物菌剂、全谷物食品及饲料等生产领域得到了极为广泛的应用^[11-12]。

本文综述小麦麸皮固态发酵在代谢产物(酶制剂、有机酸和抗生素)、微生物菌剂(昆虫病原菌、拮抗真菌和益生菌)、全谷物食品加工和饲料等领域的应用及研究进展,并对小麦麸皮的固态发酵在工业生产中的应用前景进行了展望,以期为实现小麦麸皮固态发酵的规模化生产提供理论支撑。

1 小麦麸皮

小麦麸皮中粗蛋白质含量为 11.77%~17.02%,粗脂肪为 2.33%~3.35%,粗纤维约 8.45%,除此之外,小麦麸皮中还含有丰富的生物活性物质,如阿拉伯木聚糖 10.9%~26.0%^[13-14]、 β -葡聚糖 2.1%~2.5%^[15]、酚酸 0.1%~1.1%^[16]、阿魏酸 0.02%~1.5%^[17]、植酸 4.2%~5.4%^[16]等。小麦麸皮可细分为三层:种皮,糊粉层和果皮,其中,果皮包括外皮层和内皮层,富含不可溶性膳食纤维和结合态的酚酸^[2]。种皮层含有烷基间苯二酚^[18],可作为小麦麸皮的生物标记物。糊粉层是麸皮的最内层,部分与胚乳共享,含有丰富的木脂素和氨基酸组成十分均衡的蛋白质,以及众多其他生物活性化合物、植酸、抗氧化剂、维生素和矿物质^[19],进一步的麸皮分离提取工艺包括脱壳、去皮和麸皮分级,这些方法可以提高麸皮的营养质量^[20]。

小麦麸皮中丰富的营养物质,不仅可以作为微生物生长代谢的碳源和氮源,其作为廉价而丰富的膳食纤维来源,富含多种对人类健康有益的生物活性物质,可为动物和人体提供多种营养元素,维持肠道健康^[21]。据统计,供人类食用的小麦麸皮每年的产量约为 9 000 万 t,在全球范围内,含有小麦麸皮的食物数量从 2001 年的 52 种增加到 2011 年的约 800 种^[22]。

尽管用途多样,小麦麸皮实际在工业生产中仍未获得广泛的应用。主要基于以下几点原因:

(1)通常小麦麸皮中有害物质残余较多,作为微生物发酵的固体基质时,易污染目标产物,此外,小麦麸皮生产过程中对卫生管控也不够严格,达不到食品要求,不能作为食品级原料应用;(2)小麦麸皮中粗蛋白质、粗纤维含量较高,吸水性较强,易霉变,不易储存,影响了其在工业生产中的应用^[4];(3)小麦麸皮中不溶性膳食纤维等难消化分解的碳水化合物以及植酸等抗营养因子的含量较高,导致微生物、动物和人体的生物利用率较低,对工业生产效率以及动物和人体健康产生不利影响^[23-24]。因此,近年来,大量研究者致力于小麦麸皮的改性研究,期望拓展小麦麸皮在工业生产中的应用范围。

2 固态发酵

固态发酵是指在没有或几乎没有游离水的情况下进行的含有固体基质的发酵过程;但是底物中应该含有足够的水分可以支持微生物的生长和代谢^[11]。固态发酵技术已有数千年的历史,最早在亚洲地区用于生产各种传统发酵食品的制作,如酒曲、奶酪、蛋黄酱和面包等^[10]。自 20 世纪 70 年代开始,固态发酵技术才重新得到重视,并获得迅速发展,广泛用于生产多种不同产品,如代谢产物(包括酶、有机酸、抗生素、芳香化合物和多糖)^[25-26]和发酵产品(包括发酵食品、饲料添加剂和生物复合材料)等^[27-28]。绝大多数固态发酵过程都会利用丝状真菌^[29],使用的固态基质大体基本划分两种:一种既提供固体结构,又提供营养的固态基质,另一种仅提供固体结构的固态基质^[9]。近年来,源于农业、林业和食品加工的副产物由于自身的固体结构,且富含微生物生

长代谢必需的多种有机物质而成为固态发酵首选的低成本基质^[30]。

相比于其他生物加工技术,如液体深层发酵、悬浮固体发酵和浆液发酵等,固态发酵在水分含量极低的固态基质上进行,底物浓度高,水分活度低,微生物极易形成优势菌种,从而具备较高的发酵能力,使得终产物/目标产物产量升高,生产稳定性增强,分解代谢阻遏降低,同时对无菌的要求较低,是极具优势的生物加工技术^[31]。此外,固态发酵技术多使用农工废弃物作为固态基质,成本低、操作容易,已广泛应用于各种工业生产,如酶、有机酸、真菌毒素、抗生素、饲料的生产与制备等^[11,31]。

3 小麦麸皮固态发酵在工业生产中的应用

固态发酵过程中,微生物菌丝体需要一个固体基质作为锚定,以获得最佳的生长和生产力,而小麦麸皮是固态发酵最常用的固体基质^[32]。目前,已有报道的小麦麸皮固态发酵研究主要涉及代谢产物生产、微生物菌剂制备、全谷物食品加工及饲料替代等。

3.1 代谢产物

代谢产物的生产是近年来固态发酵技术应用

的重点之一。固态发酵技术可同时使用多种微生物(真菌和细菌)混合发酵,充分利用各种微生物之间的代谢协同作用,最终获得多种代谢产物,且产量更高。目前的国内外研究中,小麦麸皮固态发酵在酶制剂、有机酸、真菌毒素及抗生素中的应用最为突出。

3.1.1 酶制剂

据统计,约 90%的工业化酶是由经过基因改造的微生物通过液体发酵技术生产的。近年来,大量研究显示,固态发酵技术可以直接利用野生型微生物生产酶制剂,从而大大节省了对微生物进行基因改造的成本^[33]。小麦麸皮作为固态基质发酵生产酶制剂在国内外已有较多的研究报道,在食品加工、饲料品质改良、生物检测、农业废弃物的生物转化及增殖等方面均有重要用途,其酶制剂种类、菌株、发酵方式、最优工艺参数及产量、酶的应用总结如表 1。尽管麦麸固态发酵在酶制剂的工业生产中潜力巨大,目前固态发酵技术也只在小范围内应用,主要是因为一些工程技术瓶颈,特别是现有的生物反应器无法满足麦麸基质中热量和质量的动态传递,不能保证微生物生长代谢需要的发酵温度、pH 值、水分、底物浓度等条件,使得生产效率大幅下降。

表 1 麦麸固态发酵在酶制剂工业生产中的应用研究

Table 1 Industrial application of solid state fermentation of wheat bran in enzyme production

酶制剂种类	菌株	介质	发酵方式	最优工艺参数及产量	酶的应用	参考文献
多聚半乳糖醛酸酶	曲霉突变株	小麦麸皮	托盘式固态发酵法	在不添加任何营养物质或诱导剂的条件下,选择小麦麸皮厚度为 11 mm,相对湿度为 70% 的条件,曲霉突变株托盘式固态发酵得到的多聚半乳糖醛酸酶活性最高可达 298 U/g。	果汁澄清、植物油提取、咖啡和可可腌制、植物纤维精制、无果胶淀粉制造	[34]
植酸酶	总状毛霉	小麦麸皮: 芝麻油渣饼 =1:1	锥形烧瓶固态发酵	小麦麸皮作为总状毛霉的底物进行固态发酵时,植酸酶的产量明显低于其他油渣饼粕,但当小麦麸皮与芝麻油渣饼粕以 1:1 混合作为底物时,植酸酶活性(44.5 U/g gds)最高。	作为单胃动物饲料中的添加剂。	[35]
漆酶	四种白腐菌 <i>Pleurotus ostreatus</i> (<i>P. ostreatus</i>), <i>Trametes pubescens</i> , <i>Cerrena unicolor</i> 和 <i>Trametes versicolor</i> (<i>T. versicolor</i>)	麦麸片	锥形烧瓶半固态发酵	四种白腐菌的生长微形态各不相同,产酶能力也有较大差异,其中,白腐菌 <i>T. versicolor</i> 显示最高的漆酶活性, <i>P. ostreatus</i> 其次,分别为 63.5 和 58.2 U/g。	作为生物检测器而应用于底物、辅酶、抑制剂等成分的分析。	[36]
脂肪酶	少孢根霉	杏仁粉、椰子粉、芥末粉、大豆粉、稻壳和小麦麸皮	锥形烧瓶固态发酵	以杏仁粉为基质时,少孢根霉产脂肪酶的活性最高,为 48.0 U/g 基质;小麦麸皮作为基质时产生的脂肪酶活性略低于杏仁粉,但显示高于其他四种基质的产脂肪酶活性。	应用于食品和调味品工业进行酯化、醇解、酸解和氨解等生物转化反应。	[37]

续表 1

酶制剂种类	菌株	介质	发酵方式	最优工艺参数及产量	酶的应用	参考文献
β-葡萄糖苷酶	里氏木霉和米曲霉	豆皮：小麦麸皮=4：1	静态盘式固态发酵	里氏木霉和米曲霉混合培养产 β-葡萄糖苷酶的最佳固态发酵条件为：温度 30 °C，pH 5，水分含量 70%。在静态盘式发酵罐中培养 96 h 后，β-葡萄糖苷酶的最大活力为 10.7 U/gds，可以有效地糖化麦秸等木质纤维素生物质。	协同降解纤维素底物，用于生产燃料乙醇以及生物产品的生物物质加工。	[38]
肽酶	土曲霉	小麦麸皮	高压聚丙烯袋固态发酵	以 5.0 g 小麦麸皮为底物，培养温度 30 °C，接种量为 2.0×10 ⁵ 个孢子/g，75%生理盐水体积分，土曲霉发酵 72 h 后肽酶产量达到 677 U/mL (5 400 U/g 培养基)。肽酶抽提物的最适 pH 和温度分别为 6.5 和 55 °C，可耐受不同的 pH 值；肽酶还显示出良好的角蛋白溶解和胶原溶解活性，分别为 0.252 和 0.165 OD/mL。	应用于制药、化妆品、食品、皮革、洗涤剂、生物修复和废物处理等。	[39]
α-半乳糖苷酶	米曲霉	红豆植物废弃物：小麦麸皮混合物=1：1 (w/w)	锥形烧瓶固态发酵	小麦麸皮与红豆植物废弃物按 1：1 (w/w) 混合时，米曲霉固态发酵得到的 α-半乳糖苷酶产量最高，底物浓度的增加并没有降低培养皿中酶的产率。	应用于甜菜糖加工、豆科食品和饲料中棉子糖和水苏糖的水解、制浆造纸工业中生物漂白、多糖的改性与增值加工等。	[40]
β-外葡聚糖酶	黑曲霉	小麦麸皮	锥形瓶固态发酵	含水量为 40%，pH 值为 7.0，底物深度为 1.0 cm，接种量为 2×10 ⁶ 个孢子/g 麦麸，温度为 30 °C 为黑曲霉的最适固态发酵条件。以 28.60 FPU/g 麦麸为原料，在最佳条件下培养 3 d，可获得最高产量的外源葡聚糖酶。	应用于农业废弃物的生物转化和增值。	[41]

3.1.2 有机酸

固态发酵技术用于生产有机酸是仅次于产酶的又一重要用途。目前，国内外已有报道的小麦麸皮固态发酵主要用于酚酸，特别是阿魏酸的制备。

采用黑曲霉在锥形瓶内对小麦麸皮进行固态发酵，浓度为 1×10⁶ 孢子/mL 的菌液接种于 2 g 小麦麸皮基质，28 °C、70%湿度条件下培养 7 d 后，酚酸产量可达 358.72 μg/g，研究者在此基础上测定了黑曲霉固态发酵对小麦麸皮抗氧化能力和消炎活性的影响，发现经黑曲霉固态发酵处理后，小麦麸皮中释放出丰富的阿魏酸 (FA-WB)，显著降低了细胞的氧化损伤，且比阿魏酸标准品具有更好的抗氧化活性；此外，TNF-α、IL-6 和 NO 水平表明 FA-WB 能抑制脂多糖诱导的炎症反应^[42]。凌阿静等将 3 种真菌黑曲霉、米曲霉、里氏木霉以 1×10⁷ 孢子/mL 的浓度接种于 10 g 小麦麸皮 (接种体积 1 mL)，于锥形瓶中进行固态发酵，使用分光光度法和高效液相对比了三种真菌发酵小麦麸皮中总游离酚酸的含量及抗氧化活性，发现米曲霉发酵对小麦麸皮酚酸含量和抗氧化活性的改

善效果最为显著^[43]。

固态发酵可使小麦麸皮有机酸含量增加，这多与真菌代谢产生的酶活力升高相关。在一定程度上可以说，固态发酵提高小麦麸皮酶和有机酸含量的根本区别在于目标产物的不同，本质上都基于酶活力的显著提高。例如，尹志娜等在湿度 70%，温度 28 °C 条件下用黑曲霉、米曲霉和泡盛曲霉对小麦麸皮在锥形瓶中进行固态发酵，对比测定了发酵 7 d 后小麦麸皮中酚酸含量、酶活和微观结构的变化，最终筛选出一株优势固态发酵菌种黑曲霉 Y-9，可使阿魏酸、没食子酸释放量分别达 416.60 和 105.77 μg/g 麦麸，她们认为，这些菌种对小麦麸皮的降解能力与酚酸酯酶活性正相关，木聚糖酶的活性则直接影响小麦麸皮酵解程度，从而间接影响酚酸组分的释放^[44-45]。杜小燕等研究发现，泡盛曲霉发酵小麦麸皮后，木聚糖酶活力随小麦麸皮总酚释放量的增加而升高，阿魏酸酯酶活力在发酵中后期达到顶峰，她们认为，小麦麸皮发酵过程中酚酸含量的显著增加可能与木聚糖酶和阿魏酸酯酶的活力显著相关^[46]。实际工业生产中，通过固态发酵工艺获得有机酸

后,将其从麦麸中萃取分离的下游工艺十分关键,这是因为微生物代谢产生的有机酸扩散并吸附至麦麸基质中,增大了有机酸萃取回收的难度,这是目前限制麦麸固态发酵工艺在有机酸生产中广泛应用的一个重要因素^[12]。

3.1.3 抗生素

Ohno 等以小麦麸皮为原料,将其初始水分含量由 12.8%调整至 30%~75%,研究了枯草芽孢杆菌 NB22 在固态发酵条件下生产脂肽抗生素伊枯草菌素的工艺。结果表明,固态发酵技术可促使枯草芽孢杆菌 NB22 产生强效抗生素活性的伊枯草菌素同源物,且单位重量湿基产生的伊枯草菌素是液体深层发酵的 5~6 倍^[47]。

3.2 微生物菌剂

微生物菌剂是利用活的有益微生物制备的制剂,在农牧业中发挥重要作用。目前,小麦麸皮主要用于昆虫病原真菌、拮抗真菌、益生菌等微生物菌剂的固态发酵生产^[48-49]。

3.2.1 昆虫病原真菌

昆虫病原真菌对害虫数量具有抑制作用,在害虫的微生物防治中占有独特地位。麦麸固态发酵常用于虫草、白僵菌和苏云金芽孢杆菌等昆虫病原真菌的制备。以中国被毛孢细胞膜成分麦角甾醇含量为指标,对中国被毛孢的最佳固态发酵条件进行优化,当培养基组成为 2 g 麸皮、5 g 大米、2 g 玉米粉、1 g 蚕蛹粉,培养温度 20 °C、料水比 1:1.5、料层厚度 2 cm、无光照条件下,菌丝体中麦角甾醇含量最高,可达 0.591 1 mg/g,比优化前提高了 38.6%^[50]。Nuñez-Gaona 等研究了含水量和接种量对球孢白僵菌生长及产孢量的影响,发现球孢白僵菌在小麦麸皮培养基上的生长速率最高,当水分活度 $A_w=1.0$ 时,生长速率最高;而 $A_w<0.97$ 时,则没有生长;在小麦麸皮水分含量 66%, $A_w=1.0$ 时,固态发酵可得到 1.18×10^{10} 孢子/gds 的最高产量^[51]。

在工业生产中,苏云金芽孢杆菌的生产已由小麦麸皮固态发酵技术标准化,可获得最大产量的毒素,且成本效益较高。Devi 等以锥形瓶装小麦麸皮为培养基,对苏云金芽孢杆菌进行了固态发酵,培养 16 h 后,每隔 8 h 进行曝气可显著增加其孢子数和毒素含量。进一步的验证实验发现,

该技术生产的浓度为 0.1%的苏云金芽孢杆菌对蓖麻幼虫有很强的杀灭作用,在实验室生物测定中可使其 3 天完全死亡,将实验室水平的固态发酵扩大至工业生产水平时,1 kg 苏云金芽孢杆菌的材料成本仅约 0.70 美元^[52]。

3.2.2 拮抗真菌

拮抗真菌通过与动植物病原菌的拮抗而发挥生物防治作用。木霉作为灰霉病菌、菌核病菌和白腐菌等植物病原菌的拮抗真菌,可通过麦麸的固态发酵而获得。以大米、玉米麸皮、小麦麸皮为固体基质,接种了哈桑木霉、绿色木霉、康宁木霉和多孢木霉,在不添加外源营养源,对固体基质进行脱臭水湿润、灭菌、接种、30 °C 培养 7 d 后发现,小麦麸皮是木霉菌所有孢子的最佳生长基质。其中,哈桑木霉和绿色木霉孢子产量最高,分别为 28.30×10^8 /gds 和 24.10×10^8 /gds^[53],相比于液体发酵方式,固态发酵生产的木霉孢子更耐干燥^[54-55]。陈欣等发现以麸皮为唯一底物时,初始湿度 140%,115 °C 处理 20 min,调节 pH 为 6.0,固态发酵培养 7 d 后能够获得最高的盾壳霉孢子产量 (9.5×10^9 个孢子/g 麸皮),是盾壳霉作为生物防治农药工业化生产的最佳方式^[56]。Zhao 等以稻秸粉 (300 g/kg) 和小麦麸皮 (700 g/kg) 为原料,添加葡萄糖 (40 g/kg)、蛋白胨 (20 g/kg)、酵母抽提物 (20 g/kg)、 KH_2PO_4 (10 g/kg) 和 CaO (5 g/kg),在 37 °C、水分含量 65%的固态发酵条件下培养 48 h,可获得地衣芽孢杆菌产量为 1.7×10^{11} 个孢子/gds^[57]。孙斐等以小麦麸皮和玉米芯为原料,筛选了孢子产量最大的拟康氏木霉固态发酵培养基。在最优培养基中,小麦麸皮和玉米芯配比 8:2,含水量 55%~60%, KNO_3 1%, CaSO_4 1%,蔗糖 1%时,在 28 °C、接种量 10%的条件下,利用浅盘氏发酵,拟康氏木霉可产生 1.34×10^9 孢子/g^[58]。

3.2.3 益生菌

抗生素的大量使用会使致病菌株产生耐药性,引起人畜交叉感染,此外,抗生素药物残留严重危害人和动物的健康并造成环境污染。益生菌作为一种天然有益的生物活性制剂,具有无残留、无抗药性、无副作用等优势,完全克服了抗生素的不利因素又具有防病治病的作用,此外,

它们通过维持动物肠道微生物区系的自然平衡, 显著提高畜牧业的动物产量, 因此, 益生菌是最有潜力、最有希望替代抗生素的产品之一^[59]。黄占旺等以活菌数、芽孢数、蛋白酶及 α -淀粉酶活力为指标, 对益生纳豆芽孢杆菌 B2 固态发酵条件进行了初步研究, 最终得到纳豆芽孢杆菌 B2 的最佳生长条件为: 玉米粉和小麦麸皮配比为 3 : 7, 含水量 60%, 种龄 15 h, 接种量 5%, 温度 37 °C, 时间 5 d^[59]。目前, 小麦麸皮固态发酵技术在生产制备益生菌领域虽报道较少, 但优势十分明显, 具有较大潜力。

3.3 全谷物食品加工

由于小麦麸皮中富含矿物质、膳食纤维、维生素 B 和其他有益健康的生物活性物质^[60], 在食品加工领域的应用受到越来越多的关注。然而, 小麦麸皮中难消化碳水化合物含量较高, 大大降低了其生物价值并引起产品感官品质的劣变^[61]。

为解决麸皮在工业生产中的应用受限问题, 国内外学者致力于麸皮的改性研究, 固态发酵技术是最常用的改性方法。固态发酵技术可以在有效降低麸皮中的抗营养因子含量的同时显著提高生物活性物质含量及有效性, 不仅如此, 小麦麸皮的固态发酵还可以显著改善食品的加工和感官品质。

固态发酵过程中分泌的酶会引起一些令人满意的变化, 从而改善最终产品的营养、质地、风味和香气, 其有效提高谷物食品中生物活性物质含量及生物有效性的效果主要体现于三个方面^[62]:

(1) 复杂的大分子, 包括脂肪、蛋白质、碳水化合物等被水解成更小的营养物质, 更易被人体利用; (2) 抗营养化合物如胰蛋白酶抑制剂、凝集素、单宁等, 在固态发酵处理后显著减少, 特别是固态发酵过程中释放出的植酸酶, 分解抗营养因子植酸, 增加铁、锌、钙和无机磷的含量和生物有效性; (3) 游离形式的抗氧化剂也会在固态发酵期间释放出来, 增加最终产品的营养价值。

工业的固态发酵工艺通常采用纯培养, 以控制底物的利用和最终产品的形成。如果发酵的产品是以消费为目的, 在固态发酵过程中使用的微生物必须是 GRAS (公认的安全) 状态。目前, 根霉属和乳酸菌属分别是最主要的真菌属和细菌

属, 这些微需氧微生物由于可以在相对较高的温度 (30~40 °C) 下培养, 长久以来被食品工业用于发酵。例如, 将根霉孢子接种于小麦麸皮上, 在 30 °C 下培养, 分别于 0、24、48 和 72 h 提取样品, 并测定发酵前后麸皮中蛋白质含量、蛋白质溶解度、体外消化率、凝胶度和保水性。结果发现, 根霉能显著提高蛋白质含量 (56.0%)、蛋白质溶解度 (36.2%) 和持水能力 (11.4%)^[63]。甄莉娜等研究了不同接种温度和温度梯度条件下, 混合益生菌对固态发酵小麦麸皮营养物质的影响, 发现当芽孢杆菌 (地衣芽孢杆菌、凝结芽孢杆菌和枯草芽孢杆菌)、乳酸菌 (乳酸杆菌和双歧杆菌)、酵母菌 (假丝裂殖酵母) 和霉菌 (黑曲霉和米曲霉) 按 5 : 1 : 1 : 1 重量比混合、3% 的总接种量、30 °C 时发酵效果最好, 发酵完成后, 小麦麸皮中可溶性糖和淀粉含量分别降低 52% 和 82%, 还原性糖和蛋白质含量分别升高 53.9% 和 30.1%, 他们认为该产品可作为益生菌发酵小麦麸皮的初级产品^[64]。陈秋燕等以植物杆菌、枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、酿酒酵母为发酵菌种, 采取单菌发酵和混合发酵筛选最优菌种组合, 考察接种量、发酵温度、发酵时间、料水比对小麦麸皮阿魏酸糖酯 (FGs) 产量的影响。结果表明, 枯草芽孢杆菌、地衣芽孢杆菌、酿酒酵母按 1 : 1 : 1 质量比、发酵温度 42.5 °C、发酵时间 58.5 h、接种量 10.7%、料水比 1 : 1.16 (g/mL) 时, 发酵小麦麸皮得到的 FGs 产量最高, 为 1 273.18 nmol/g, 且此时小麦麸皮的 DPPH 自由基清除率、羟基自由基清除率和还原力最高, 对嗜热链球菌和植物乳杆菌增殖的促进作用最明显^[65]。

固态发酵不仅改善小麦麸皮的营养品质, 还可以改善麸皮的加工性能和感官品质。朱科学等利用酵母和乳酸菌复合菌种对麸皮进行固态发酵处理, 测定了固态发酵麸皮的感官、营养、微观、水合及风味品质, 经发酵处理后, 麸皮的持水和保水能力显著增强; 他们进一步将固态发酵麸皮回添至小麦粉形成重组全麦粉, 并对其粉质特性、糊化特性、热特性和面团粘弹特性的等加工品质进行分析, 结果发现, 固态发酵麸皮回添形成重组小麦粉的加工品质显著优于回添未发酵麸皮的

全麦粉,且比较接近空白小麦粉,他们认为,麸皮经过固态发酵后再回添入小麦粉中能够有效改善麸皮回添带来的负面影响^[66]。许锡凯等通过响应面法对好食脉孢霉固态发酵小麦麸皮释放可溶性膳食纤维(SDF)发酵条件进行了优化,当含水量为 74%(v/w)、接种量为 11%(v/w)、发酵温度为 29℃、发酵时间为 83.5 h 时小麦麸皮 SDF 利率最高,其溶解性、胆固醇吸附能力、葡萄糖吸附能力、DPPH 清除能力均显著提高^[67]。

值得指出的是,固态发酵选用的真菌及细菌,例如乳酸菌、酵母菌等,具有一定吸附和分解麦麸中常见毒素(例如玉米赤霉烯酮、黄曲霉毒素、脱氧雪腐镰刀菌烯醇、伏马菌素和赭曲霉毒素 A 等)的作用,既可保持麦麸的发酵特性,还显著提升了麦麸作为食品及饲料的安全性。

3.4 饲料

小麦麸皮结构疏松,在动物生产中常用作添加剂预混料、吸附剂与发酵饲料的载体。然而,除了不能长时间储存以外,小麦麸皮中维生素 A、D 和钙含量偏少,口感粗糙,有苦涩味,不利于动物饲喂。固态发酵技术通过微生物的分解代谢,提高麦麸中活性成分含量、分解有害物质、降解抗营养因子,促使一些利用率低甚至无法利用的成分转化成易消化的小分子物质^[4]。

利用黑曲霉和热带假丝酵母混合菌株对小麦麸皮进行固态发酵工艺优化,当小麦麸皮含水量 70%,黑曲霉与热带假丝酵母菌种配比为 2:1,发酵温度 32℃,发酵 72 h 后小麦麸皮中蛋白质含量最高,粗纤维含量最低,作为饲料品质最佳^[68]。陈洪伟等在培养温度 30℃、接种量 10%、酵母菌:黑曲霉接种比 2:1、水料比 1:1、葡萄糖添加量 2%条件下利用小麦麸皮进行固态发酵制备蛋白饲料,最终得到的小麦麸皮比发酵前粗蛋白含量提高了 33.93%^[69]。史俊祥等以麸皮 80.46%、豆粕粉 9.32%和玉米粉 10.22%作为混合培养基,以酿酒酵母菌与枯草芽孢杆菌的最适比例 6.7:3.3 接种,发酵产物中多糖产量可达 55.92 mg/g^[70]。目前,固态发酵麸皮在实验室水平已广泛应用于鸡、鸭、羊、猪等动物饲料的复配与营养改善试验中。虽然已有的研究均表明发酵麸皮应用于动物饲料具有较好的效果,但在实

际饲料工业生产中,发酵麸皮的应用研究报道较为缺乏。这与固态发酵菌种的选择及安全性等关系密切,亟待开展发酵麸皮的营养评价,以及发酵麸皮对动物消化代谢能力、生物利用率影响等方面系统而深入的研究,以推动发酵麸皮在饲料工业中的应用。

3.5 其他

除了以上应用以外,小麦麸皮的固态发酵在堆肥、其他生物活性物质的生产中也发挥着重要作用。例如,付冰妍等载体配比为 35%小麦麸皮、45%米糠、6%乳糖、6%黄豆粉、8%硅藻土和 5%海藻糖,接种量和装瓶量为 15%、料水比 1:0.85、接种量为 15%时,芽孢杆菌 B01 的固态发酵可使园林废弃物堆肥过程中纤维素降解率提高 11.04%、木质素降解率提高 15.74%、腐殖质含量提高 19.90%,是加速堆肥的有效手段^[71]。Lim 等利用枯草芽孢杆菌 HA 对烤麦麸粉进行固态发酵处理,以制备包括粘液和肽在内的多种生物活性物质。研究发现,经 1 d 的发酵,添加 5%谷氨酸钠的烤麦麸粉 pH 为 6.5,粘液含量最高,为 11.5%,一致性指数为 5.59 Pa·sⁿ,活细胞计数为 6.25×10⁸ CFU/g,酪氨酸当量为 4.0 mg/g,蛋白酶含量为 20 U/g^[72]。

4 展望

综上所述,小麦麸皮固态发酵在代谢产物(酶制剂、有机酸和抗生素)、微生物菌剂(昆虫病原菌、拮抗真菌和益生菌)、全谷物食品加工、饲料替代和其他天然活性产物的工业生产领域具有较大的应用潜力,在目标产物生产力、产品质量和加工成本方面具有显著的优越性。进一步深入研究并拓展小麦麸皮固态发酵的应用范围不仅可以减少小麦麸皮废弃引起的环境污染及整治成本,还能提高其综合利用率及附加值,具有显著的经济和社会效益。

当前,随着国内外对小麦麸皮固态发酵研究的日趋成熟,研究的不断扩大与深入,其应用也愈加广泛,然而,以下方面仍有提升空间:(1)小麦麸皮的分级与分离程度不足,其质量难以满足不同固态发酵产品的需求;(2)绝大多数的小麦麸皮固态发酵仍局限于实验室或中试水平,生

产力低, 不能满足产业需求; (3) 受发酵温度、pH、水分、氧气浓度、接种菌种等工艺在发酵过程中动态变化的影响, 以及生物反应器不适用等固态发酵条件的限制, 小麦麸皮固态发酵生产规模难以扩大, 即对小麦麸皮固态发酵关键技术和设备的研究不够深入。因此, 研究不同分离精度小麦麸皮固态发酵的差异, 研发关键技术及设备, 扩大固态发酵规模将成为今后的研究热点。

参考文献:

- [1] CURTI E, BONACINI G, TRIBUZIO G, et al. Effect of the addition of bran fractions on bread properties[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 57(3): 325-332.
- [2] APPRICH S, TIRPANALAN Ö, HELL J, et al. Wheat bran-based biorefinery 2: valorization of products[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 56(2): 222-231.
- [3] HOSSAIN K, ULVEN C, GLOVER K, et al. Interdependence of cultivar and environment on fiber composition in wheat bran[J]. *Australian Journal of Crop Science*, 2013, 7(4): 525-531.
- [4] 崔艺燕, 田志梅, 鲁慧杰, 等. 糠麸营养价值及其发酵饲料在动物生产中的应用[J]. *中国畜牧兽医*, 2019, 46(10): 2902-2915.
CUI Y Y, TIAN Z M, LU H J, et al. Bran nutrition value and its fermented feed application in animal production[J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2019, 46(10): 2902-2915.
- [5] CHERUBINI F. The biorefinery concept: using biomass instead of oil for producing energy and chemicals[J]. *Energy Conversion & Management*, 2010, 51(7): 1412-1421.
- [6] PRÜCKLER M, SIEBENHANDL-EHN S, APPRICH S, et al. Wheat bran-based biorefinery 1: Composition of wheat bran and strategies of functionalization[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 56(2): 211-221.
- [7] ONIPE O O, JIDEANI A I O, BESWA D. Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2015, 50(12): 2509-2518.
- [8] PANDEY A, SOCCOL C R, RODRIGUEZLEON J A, et al. Solid state fermentation in biotechnology: fundamentals and applications reference book[J]. *Physics in Medicine & Biology*, 2004, 49(2): 327-43.
- [9] HÖLKER U, HÖFER M, LENZ J. Biotechnological advantages of laboratory-scale solid-state fermentation with fungi[J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2004, 64(2): 175-186.
- [10] PANDEY A. Solid-state fermentation[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2003, 13(3): 81-84.
- [11] SINGHANIA R R, PATEL A K, SOCCOL C R, et al. Recent advances in solid-state fermentation[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, 44(1): 13-18.
- [12] MARTINS S, MUSSATTO S I, MARTÍNEZ-AVILA G, et al. Bioactive phenolic compounds: Production and extraction by solid-state fermentation. A review[J]. *Biotechnology Advances*, 2011, 29(3): 365-373.
- [13] DORNEZ E, JOYE I J, GEBRUERS K, et al. Wheat-kernel-associated endoxylanases consist of a majority of microbial and a minority of wheat endogenous endoxylanases[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2006, 54(11): 4028-4034.
- [14] GEBRUERS K, DORNEZ E, BOROS D, et al. Variation in the content of dietary fiber and components thereof in wheats in the healthgrain diversity screen[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(21): 9740-9749.
- [15] LI W, CUI S, KAKUDA Y. Extraction, fractionation, structural and physical characterization of wheat β -D-glucans[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2006, 63(3): 408-416.
- [16] FARDET A. New hypotheses for the health-protective mechanisms of wholegrain cereals: what is beyond fibre[J]. *Nutrition Research Reviews*, 2010, 23(1): 65-134.
- [17] ANSON N M, HEMERY Y M, BAST A, et al. Optimizing the bioactive potential of wheat bran by processing[J]. *Food & Function*, 2012, 3(4): 362-375.
- [18] REBOLLEDA S, BELTRÁN S, SANZ M T, et al. Extraction of alkylresorcinols from wheat bran with supercritical CO₂[J]. *Journal of Food Engineering*, 2013, 119(4): 814-821.
- [19] JAVED M M, ZAHOOR S, SHAFIAT S, et al. Wheat bran as a brown gold: nutritious value and its biotechnological applications [J]. *African Journal of Microbiology Research*, 2012, 6: 724-733.
- [20] DE BRIER N, HEMDANE S, DORNEZ E, et al. Structure, chemical composition and enzymatic activities of pearlings and bran obtained from pearled wheat (*Triticum aestivum* L.) by roller milling[J]. *Journal of Cereal Science*, 2015, 62: 66-72.
- [21] ZHOU K, SU L, YU L. Phytochemicals and antioxidant properties in wheat bran[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(20): 6108-6114.
- [22] ONIPE O O, JIDEANI A I O, BESWA D. Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2015, 50(12): 2509-2518.
- [23] AIVAZ M, MOSHARRAF L. Influence of different treatments and particle size of wheat bran on its mineral and physicochemical characteristics[J]. *International Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 3: 608-619.
- [24] CODA R, KÄRKI I, NORDLUND E, et al. Influence of particle size on bioprocess induced changes on technological functionality of wheat bran[J]. *Food Microbiology*, 2014, 37: 69-77.
- [25] BALAKRISHNAN K, PANDEY A. Production of biologically active secondary metabolites in solid state fermentation[J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 1996, 55: 365-372.
- [26] ROBINSON T, SINGH D, NIGAM P. Solid-state fermentation: a promising microbial technology for secondary metabolite production[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2001,

- 55: 284-289.
- [27] NIGAM P, SINGH D. Processing of agricultural wastes in solid state fermentation for microbial protein production[J]. Journal of Scientific & Industrial Research, 1996, 55: 373-380.
- [28] HAN B Z, ROMBOUITS F M, NOUT M J R. A Chinese fermented soybean food[J]. International Journal of Food Microbiology, 2001, 65:1-10.
- [29] VINIEGRA-GONZÁLEZ G, FAVELA-TORRES E, AGUILAR C N, et al. Advantages of fungal enzyme production in solid state over liquid fermentation systems[J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 13(2-3): 157-167.
- [30] HÖLKER U, LENZ J. Solid-state fermentation-are there any biotechnological advantages?[J]. Current Opinion in Microbiology, 2005, 8(3): 301-306.
- [31] PANDEY A, SOCCOL C R, MITCHELL D. New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products[J]. Process Biochemistry, 2000, 35(10): 1153-1169.
- [32] GUPTA A, MADAMWAR D. Solid state fermentation of lignocellulosic waste for cellulase and β -glucosidase production by cocultivation of *Aspergillus ellipticus* and *Aspergillus fumigatus* [J]. Biotechnology Progress, 1997, 13: 166-169.
- [33] FILER K. The newest old way to make enzymes[J]. Feed Mix, 2001, 9: 27-29.
- [34] DEMIR H, TARI C. Bioconversion of wheat bran for polygalacturonase production by *Aspergillus sojae* in tray type solid-state fermentation[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2016, 106: 60-66.
- [35] ROOPESH K, RAMACHANDRAN S, NAMPOOTHIRI K M, et al. Comparison of phytase production on wheat bran and oilcakes in solid-state fermentation by *Mucor racemosus*[J]. Bioresource Technology, 2006, 97(3): 506-511.
- [36] OSMA J F, ULLA M, TOCA-HERRERA JOSÉ L, et al. Morphology and laccase production of white-rot fungi grown on wheat bran flakes under semi-solid-state fermentation conditions [J]. Fems Microbiology Letters, 2011, 318(1): 27-34.
- [37] UL-HAQ I, IDREES S, RAJOKA M I. Production of lipases by *Rhizopus oligosporus* by solid-state fermentation[J]. Process Biochemistry, 2002, 37(6): 637-641.
- [38] BRIJWANI K, OBEROI H S, VADLANI P V. Production of a cellulolytic enzyme system in mixed-culture solid-state fermentation of soybean hulls supplemented with wheat bran[J]. Process Biochemistry, 2010, 45(1): 120-128.
- [39] SIQUEIRA A C R D, ROSA N G D, MOTTA C M S, et al. Peptidase with keratinolytic activity secreted by *Aspergillus terreus* during solid-state fermentation[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2014, 57(4): 514-522.
- [40] SHANKAR S K, MULIMANI V H. Alpha-galactosidase production by *Aspergillus oryzae* in solid-state fermentation[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(4): 958.
- [41] SUBHOSH CHANDRA M G, RAJASEKHAR REDDY B. Exoglucanase production by *Aspergillus niger* grown on wheat bran[J]. Annals of Microbiology, 2012, 63(3): 871-877.
- [42] YIN Z N, WU W J, SUN C Z, et al. Antioxidant and anti-inflammatory capacity of ferulic acid released from wheat bran by solid-state fermentation of *Aspergillus niger*[J]. Biomedical and Environmental Sciences, 2019, 32(1): 11-21.
- [43] 凌阿静, 李小平, 刘柳, 等. 真菌发酵对麦麸酚酸及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与生物技术学报. 2019, 38(4): 136-142.
- LING A J LI X P, LIU L, et al. Effect of fungal fermentation on wheat bran phenolic acids contents and antioxidant activity[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(4): 136-142.
- [44] 尹志娜. 小麦麸皮固态发酵过程中活性成分释放的机理研究[D]. 华南理工大学, 2018.
- YING Z N. Study on mechanism of active component released by solid-state fermentation of wheat bran[D]. South China University of Technology, 2018.
- [45] 尹志娜, 吴晖, 赖富饶, 等. 两种丝状真菌发酵小麦麸皮中酚酸的释放及与阿魏酸酯酶和木聚糖酶的关系. 现代食品科技, 2017, 3(33): 81-87.
- YIN Z N, WU H, LAI F R, et al. Release of phenolic acid by two filamentous fungi during the fermentation of wheat bran with ferulic acid esterase and xylanase[J]. Modern Food Science and Technology, 2017, 3(33): 81-87.
- [46] 杜小燕, 吴晖, 赵超敏, 等. 泡盛曲霉发酵麦麸过程中酚类物质含量的变化与三种酶活性的相关性[J]. 现代食品科技, 2015, 4(31): 76-83.
- DU X Y, WU H, ZHAO C M, et al. Correlations between phenolic compounds contents in wheat bran fermented by *Aspergillus Awamori* and three types of enzyme activities[J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 4(31): 76-83.
- [47] OHNO A, ANO T, SHODA M. Production of antifungal antibiotic, iturin in a solid state fermentation by *Bacillus subtilis* nb22 using wheat bran as a substrate[J]. Biotechnology Letters, 1992, 14(9): 817-822.
- [48] JAGADEESH K S, GEETA G S. Effect of *Trichoderma harzianum* grown on different food bases on the biological control of *Sclerotium rolfsii* Sacc. in groundnut[J]. Environmental and Ecological Statistics. 1994, 12: 471-473.
- [49] SANGEETHA PANICKER JEYARAJAN R, PANICKER S. Mass multiplication of biocontrol agent *Trichoderma* spp. Indian J. Mycol[J]. Plant Pathology. 1993, 23: 328-330.
- [50] 葛飞, 桂林, 李春如, 等. 冬虫夏草无性型—中国被毛孢固态发酵条件的初步研究. 生物学杂志, 2009, 3(26): 22-25.
- GE F, GUI L, LI C R, et al. Studies on solid-state fermentation condition of *Hirsutella sinensis* anamorph of *Cordyceps sinensis* [J]. Journal of biology, 2009, 3(26): 22-25.
- [51] NUÑEZ-GAONA O, SAUCEDO-CASTAÑEDA G, ALATORRE-ROSAS R, et al. Effect of moisture content and inoculum on the growth and conidia production by *Beauveria bassiana* on wheat bran[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2010, 53(4): 771-777.

- [52] DEVI P S V, RAVINDER T, JAIDEV C. Cost-effective production of bacillus thuringiensis by solid-state fermentation[J]. Journal of Invertebrate Pathology, 2005, 88(2): 163-168.
- [53] CAVALCANTE R S, LIMA H L S, PINTO G A S, et al. Effect of moisture on trichoderma conidia production on corn and wheat bran by solid state fermentation[J]. Food & Bioprocess Technology, 2008, 1(1): 100-104.
- [54] DESHPANDE M V. Mycopesticide production by fermentation: potential and challenges[J]. Critical Reviews in Microbiology, 1999, 25(3): 229-243.
- [55] TENGEDY R P, SZAKACS G. Bioconversion of lignocellulose in solid substrate fermentation[J]. Biochemical Engineering Journal, 2003, 13(2): 169-179.
- [56] XIN C, YIN L I, GUOCHENG D U, et al. Production of coniothyrium minitans spore on a simple medium with wheat bran as sole substrate[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(5): 635-638.
- [57] ZHAO S, HU N, HUANG J, et al. High-yield spore production from bacillus licheniformis by solid state fermentation[J]. Biotechnology Letters, 2008, 30(2): 295-297.
- [58] 孙斐, 陈靠山, 张鹏英. 固态发酵麸皮和玉米芯生产拟康氏木霉孢子的研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(6): 236-239.
- SUN F, CHEN K S, ZHANG P Y. The study of solid state fermentation of Trichoderma pseudokoningii spores with wheat bran and corncob[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 236-239.
- [59] 黄占旺, 帅明, 牛丽亚. 纳豆芽孢杆菌的筛选与固态发酵研究[J]. 中国粮油学报, 2009, 1(24): 35-39.
- HUANG Z W, SHUAI M, NIU L Y, et al. Bacillus natto: strain screening and solid fermentation[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2009, 1(24): 35-39.
- [60] REISINGER M, TIRPANALAN Ö, PRÜCKLER M, et al. Wheat bran biorefinery-A detailed investigation on hydrothermal and enzymatic treatment[J]. Bioresource Technology, 2013, 144: 179-185.
- [61] VINKX C J A, DELCOUR J A. Rye (*Secale cereale* L.) Arabinoxylans: A Critical Review[J]. Journal of Cereal Science, 1996, 24(1): 1-14.
- [62] SILVEIRA C M S, BADIALE-FURLONG E. Spent effects of solid-state fermentation in the functional properties of defatted rice bran and wheat bran[J]. Brazilian Archives of Biology and Technology, 2009, 52(6): 1555-1562.
- [63] GUPTA S, LEE J J L, CHEN W N. Analysis of improved nutritional composition of potential functional food (okara) after probiotic solid-state fermentation[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(21): 5373-5381.
- [64] 甄莉娜, 柴旭旭, 李侠, 等. 益生菌固态发酵对麦麸营养品质的影响[J]. 中国饲料, 2020, 5: 79-82+86.
- ZHEN L N, CHAI X X, LI X, et al. Effect of probiotics on nutritional quality of solid-state wheat bran fermentation[J]. China Feed, 2020, 5: 79-82+86.
- [65] 陈秋燕, 郝希然, 王园, 等. 麦麸阿魏酸糖酯微生物发酵工艺优化及体外抗氧化和益生活性评价[J]. 食品工业科技, 2020, DOI: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200713.1714.010.html>.
- CHEN Q Y, HAO X R, WANG Y, et al. Bran and evaluation of its antioxidant and probiotic activities in vitro[J]. 2020, DOI: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200713.1714.010.html>.
- [66] ZHAO H M, GUO X N, ZHU K X. Impact of solid state fermentation on nutritional, physical and flavor properties of wheat bran[J]. Food Chemistry, 2017, 217: 28-36.
- [67] 许锡凯, 辛嘉英, 任佳欣, 等. 好食脉胞霉发酵麦麸制备可溶性膳食纤维及其理化性质[J]. 食品工业科技, 2020, DOI: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200709.1528.014.html>.
- XU X K, XIN J Y, REN J X, et al. The preparation and physicochemical properties of soluble dietary fiber (SDF) from wheat bran fermented by Neurospora sitophila[J]. 2020, DOI: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1759.TS.20200709.1528.014.html>.
- [68] 张福娟. 黑曲霉和热带假丝酵母混菌固态发酵麸皮工艺优化[J]. 辽宁师专学报, 2020, 22(1): 97-101.
- ZHANG F J. Optimization of technology for solid-state fermentation of bran by Aspergillus niger and Candida tropicalis[J]. Journal of Liaoning Normal Colleges (Natural Science Edition), 2020, 22(1): 97-101.
- [69] 陈洪伟, 叶淑红, 王际辉, 等. 混菌固态发酵麸皮制备蛋白饲料的研究[J]. 中国酿造, 2011, 30(6): 74-77.
- CHEN H W, YE S H, WANG J H, et al. Production of protein feed from wheat bran with solid-state fermentation by multi-strains[J]. China Brewing, 2011, 30(6): 74-77.
- [70] 史俊祥. 麸皮多糖微生物发酵制备及其粗制品抗氧化活性的研究[D]. 内蒙古农业大学, 2017.
- SHI J X. Research on the microbial fermentation of wheat bran polysaccharide and the antioxidant activity of crude polysaccharide [D]. Inner Mongolia Agricultural University, 2017.
- [71] 付冰妍, 孙向阳, 余克非, 等. 降解园林废弃物专用固体复合菌的构建及其堆肥效应研究[J]. 环境科学研究, 2020, DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2020.08.16](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.08.16).
- FU B Y, SUN X Y, YU K F, et al. Construction of solid composite inoculums for green waste degradation and its effect on composting[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, DOI: [10.13198/j.issn.1001-6929.2020.08.16](https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2020.08.16).
- [72] LIM J Y, JANG G M, GARCIA C V, et al. Fortification of bioactive compounds in roasted wheat bran by solid-state fermentation using bacillus subtilis HA[J]. Food Science & Technology Research, 2017, 23(3): 395-402. 完