豆渣的微生物发酵及应用研究进展

屠大伟¹, 田仕艳², 牟韦², 邓美林³, 尤琳烽¹

1. 重庆工商大学 环境与资源学院, 重庆 400067
2. 重庆紫水豆制品有限公司, 重庆 405499
3. 重庆万标检测技术有限公司, 重庆 400714

摘要:目的 对豆渣在微生物发酵方面的研究现状进行阐述和总结,旨在为豆渣废弃物的再利用提供参考。方法 通过查阅和分析豆渣微生物发酵相关文献,对豆渣的微生物发酵及应用研究现状进行了系统的归纳总结,主要包括豆渣的营养特性、发酵菌种、发酵方式以及微生物发酵豆渣的应用等方面,并对豆渣微生物发酵方面研究的不足和发展方向进行了分析和展望。结果 研究发现:豆渣富含的膳食纤维、蛋白质、脂肪、矿物质等营养成分为微生物发酵提供了良好的物质基础,酵母菌、霉菌、乳酸菌、枯草芽孢杆菌以及食用真菌等多种微生物均可用于豆渣发酵。在实际研究中,常根据目标产物以及发酵条件等来选择适宜的菌种,且混菌发酵是发酵豆渣的最常用发酵方式。通过对发酵豆渣品质进行评价,发现经微生物发酵后,豆渣的营养价值和感官特性均得到提升,豆腥味得到很好的抑制。但目前的研究也存在一定不足,如高附加值新型豆渣发酵产品的研究以及产业化应用等方面。结论 总的来说,豆渣营养丰富,微生物发酵是豆渣品质改善及其再利用价值提升的重要方法之一,具有重要的实际生产意义,但还需进一步研究来充分开发其有益价值。

关键词:豆渣;营养特性;微生物发酵;再利用

中图分类号:TS209 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2025.0002.001

Research Progress on Microbial Fermentation and Application of Soybean Residue

TU Dawei¹, TIAN Shiyan², MU Wei², DENG Meilin³, YOU Linfeng¹

1. School of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China
2. Chongqing Zishui Bean Products Co., Ltd., Chongqing 405499, China
3. Chongqing Wanbiao Testing Technology Co., Ltd., Chongqing 400714, China

Abstract: Objective The current research status of soybean residue in microbial fermentation was elaborated and summarized, aiming to provide a reference for the reuse of soybean dregs waste. **Methods** By reviewing and analyzing relevant literature on microbial fermentation of soybean residue, a systematic summary of the current research on microbial fermentation and application of soybean residue was conducted, mainly including the nutritional characteristics, fermentation strains, fermentation methods, and application of microbial fermentation of soybean residue. The shortcomings and development directions of research on microbial fermentation of soybean residue were analyzed and prospected. **Results** The study found that the rich nutritional components such as dietary fiber, protein, fats, and minerals in soybean residue provide a good material basis for microbial fermentation. Various microorganisms including yeast, molds, lactic acid bacteria, *Bacillus subtilis*, and edible fungi can be used for fermenting soybean residue. In practical research, suitable strains are selected based on target products and fermentation conditions, and mixed

收稿日期:2023-03-05 修回日期:2023-05-18 文章编号:1672-058X(2025)02-0001-08

基金项目:重庆市开州区科技计项目(KZKJ-2022-J-10).

作者简介:屠大伟(1977—),男,博士,正高级工程师,主要从事食品安全与食品检测研究.

通讯作者:尤琳烽(1987—),男,博士,副教授,主要从事食品风味与食品检测研究. Email:youlf@ctbu.edu.cn.

引用格式:屠大伟,田仕艳,牟韦,等豆渣的微生物发酵及应用研究进展[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2025,42(2):1-8.

TU Dawei, TIAN Shiyan, MU Wei, et al. Research progress on microbial fermentation and application of soybean residue[J].

Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2025, 42(2): 1-8.

fermentation is the most commonly used method for fermenting soybean residue. By evaluating the quality of fermented soybean residue, it was found that after microbial fermentation, the nutritional value and sensory characteristics of soybean residue were improved, and the bean odor was well suppressed. However, there are still certain shortcomings in current research, including the research and industrial application of high-value-added new soybean residue fermentation products. **Conclusion** In conclusion, soybean residue is nutritionally rich, and microbial fermentation is an important method to improve the quality of soybean residue and enhance its reuse value, which has significant practical production significance. However, further research is needed to fully develop its beneficial value.

Keywords: soybean residue; nutritional characteristics; microbial fermentation; reuse

1 引言

大豆中含有丰富的植物蛋白,含量约为谷物的四到五倍,氨基酸组成与牛奶蛋白相似,被认为是人类食用和动物饲料中蛋白质的重要来源^[1]。除了直接食用外,大豆被加工为豆腐、豆浆、大豆油等大豆制品,在大多数亚洲国家,豆腐和豆浆的食用历史已有几千年。豆渣是大豆在加工成大豆制品(豆浆、豆腐或腐竹等)时过滤掉水溶性部分后剩余的残渣,是大豆制品加工业中最大的副产物^[2]。据报道,每 1 kg 大豆制作豆腐、豆浆等豆制品时约会产生 1.1~1.2 kg 鲜豆渣,我国鲜豆渣的年产量达 4 000 万吨以上^[3-4]。未经加工处理的鲜豆渣具有水分、蛋白质、脂肪等含量较高的特点,使得微生物极易生长繁殖而发生变质,且豆渣中的脂肪也易在酶作用下被分解生成具有不良风味的小分子物质^[5]。因此,在实际加工生产中,豆渣常常作为工业加工副产物被丢弃,仅少量被用于动物饲料或食品原料进一步使用,这既造成了严重的资源浪费,也对环境造成了负担^[6-7]。豆渣富含蛋白质、膳食纤维等营养成分,且兼具低糖、低热量等特点,具备开发营养健康食品的潜力。近年来,已有学者对豆渣的进一步利用进行研究,如多肽、多糖、异黄酮等活性物质的分离、提取,豆渣感官和营养特性的改性^[8],这为豆渣的再利用和附加值提升提供了思路与方向。

目前,已有研究者采用干制、酶法、酸/碱处理、微生物发酵等方法对豆渣进行再加工处理^[9]。其中,微生物发酵作为一种能改变原料营养、质地等特性的重要手段,已有研究者将其应用于豆渣产品的加工,

如豆渣发酵酱油和生物饲料的制备^[10-11]。在发酵过程中,微生物不仅可将其大分子营养物质分解为易被人体消化吸收的小分子成分,产生的各种酶还对豆渣中的抗营养因子具有降解作用,改善其风味^[12]。本文就豆渣的营养特性、微生物发酵豆渣的菌种、方式及其应用等相关研究进行综述,以期对豆渣的进一步再利用和高附加值转化提供参考。

2 豆渣的营养与发酵潜力

豆渣的化学成分与大豆品种、豆浆加工方法以及从磨碎大豆中提取的水溶性成分的量有关^[13]。豆渣主要营养成分含量如表 1 所示。在鲜豆渣中,水分是最主要的成分,占比超过 70%,其次为膳食纤维(DF)和蛋白质,这也是鲜豆渣易发生霉变、不耐储运的重要原因,因此干制是鲜豆渣的常用保存方法。干豆渣中的 DF 含量明显较高,但主要为不可溶性膳食纤维(IDF),导致口感粗糙和功能性较差,限制了其再加工利用。发酵法是膳食纤维的常用改性方法,不仅可以提高豆渣中可溶性膳食纤维(SDF)的含量,还能有效改善膳食纤维的理化性质,如持水力和膨胀力等^[14]。豆渣蛋白中包含所有必需氨基酸,是优质蛋白,但豆渣蛋白的不易溶解性使其难以被机体消化吸收利用。有研究表明,微生物发酵可以增加豆渣中的水溶性蛋白含量,改善豆渣蛋白的溶解性^[15]。另外,豆渣中还有少量脂肪,但其含有的脂氧合酶、过氧化氢裂解酶易与脂肪酸反应生成小分子醛类、醇类物质,产生令人不愉快的豆腥味^[5],而微生物发酵可使这些脂肪酸及其衍生物被分解,从而减弱豆腥味,甚至可能生成具有良好香气的化合物^[16]。

表 1 豆渣主要营养成分(以干基计,%)

Table 1 Main nutritional components of soybean residue (dry basis, %)

序号	样品名称	水分	蛋白质	脂肪	灰分	可溶性膳食纤维	不可溶性膳食纤维	数据来源
1	鲜豆渣	83.3	18.17	4.14	3.72	6.25	54.01	姜慧燕等 ^[17]
2	鲜豆渣	76.22	6.53	1.57	0.59	0.31	12.19	Fayaz 等 ^[18]
3	鲜豆渣	80.25	7.91	6.22	0.86	3.25	10.58	Guimarães 等 ^[19]
4	干豆渣	6.08	20.50	15.62	3.53	6.12	57.08	李伟伟等 ^[14]
5	干豆渣	4.91	18.10	3.60	3.40	1.34	75.04	Bo Li 等 ^[20]
6	干豆渣	6.71	15.31	5.90	3.85	1.91	55.63	Lu 等 ^[21]

异黄酮是豆渣中的重要生物活性成分,在豆浆加工过程中,约有 12~30% 的大豆异黄酮会保留在豆渣中^[22]。豆渣中的异黄酮主要是糖苷和苷元, β -葡萄糖苷酶可将异黄酮糖苷酶解为苷元,从而使其更容易被人体消化吸收。有研究者发现,一些发酵微生物可以通过分泌 β -葡萄糖苷酶或增强其活性来促进异黄酮的生物转化^[23]。豆渣中还含有一些抗营养因子(如植酸、胰酶抑制因子、单宁等),这些成分限制了豆渣营养物质的吸收和利用。一些研究表明,微生物发酵是处理抗营养因子的有效策略,其代谢所得的物质具有更好地消化、吸收能力^[24]。

综上,豆渣营养丰富,但未经处理的豆渣感官品质不佳,且含有抗营养因子,限制了其应用范围。微生物发酵处理是改变豆渣不良品质的有效手段,对提升其再加工利用性具有重要作用。

3 发酵豆渣的常用菌种

发酵作为处理豆渣的一种重要方法,国内外学者对其多有研究,在菌种选择上一般有酵母菌、霉菌、食用真菌及以乳酸菌、芽孢杆菌为代表的细菌。在实际研究中,通常根据目标产物以及发酵条件等来选择适宜的菌种,如:豆渣营养丰富,是很好的发酵底物,通过接种特定菌种以获得特定的蛋白、多肽、酶等物质;豆渣中的大分子营养成分(不溶性蛋白、纤维等)不易被吸收利用,可接种能分泌分解或转化这些物质的酶的微生物,从而改善其营养价值;由于不同微生物间特性,采用多菌种发酵可以获得品质更优的产品。

3.1 乳酸菌

乳酸菌广泛应用于各类发酵食品中,例如泡菜、酸奶、腊肉等,其风味优良,并具有调节产品 pH、抗菌的一系列优良性能。但是乳酸菌产生的酶对膳食纤维分解能力较弱,而豆渣中含有较大量的 DF,故在发酵豆渣中联合使用其他菌种或物理化学方法联合发酵,以改善产品品质和增加功能成分^[25],常用的乳酸菌种有嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌、副干酪乳杆菌、植物乳杆菌等。张瑜等^[26]采用毛霉、发酵乳杆菌和副干酪乳杆菌进行联合分步发酵豆渣,研究表明,毛霉单菌种发酵后豆渣可溶性膳食纤维(SDF)含量为 10.34%,是鲜豆渣含量的 2 倍;毛霉、发酵乳杆菌、副干酪乳杆菌联合发酵后,SDF 含量约为鲜豆渣的 4 倍;先用毛霉发酵,后接种发酵乳杆菌、副干酪乳杆菌进行二次发酵,SDF 含量可达 34.27%,且蛋白质、可溶性蛋白、可溶性糖等的含量均有所增加。以上可以看出,乳酸菌可极大促进毛霉对 DF 的分解,增加 SDF 的含量。

3.2 酵母菌

酵母菌是直接食用最多的一种微生物,其本身除

了含有丰富的营养物质外,同时还含有多种消化酶(α -淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶等)^[27],对豆渣的 DF、多糖及蛋白质具有较强的分解能力。酵母菌可降解豆渣中的胰蛋白酶抑制因子、植酸、单宁等物质^[28],提高豆渣的消化利用率,并在发酵豆渣的营养成分、自由基清除及抗氧化活性等方面上有所提升^[29]。另外,酵母菌发酵还可以显著改善豆渣的香气和滋味,提升豆渣的琥珀酸等鲜味物质含量,改善豆渣的口感,并能去除豆渣的腥味成分,增加发酵气味,改善豆渣的香气^[30]。Hu 等^[31]研究发现,鲜豆渣经马克斯克鲁维酵母发酵后,其粗脂肪、可溶性膳食纤维和多糖含量增加,而植酸和胰蛋白酶抑制剂活性降低,发酵豆渣具有较高的吸水率和较好的乳化性能;并且,发酵后豆渣的风味得到了较大改善,豆渣的青草味得到了较大减弱。这一点在 Vong 等^[13]研究中也得到证实:经酵母发酵后的豆渣,其青草腥味大大减弱,而果味、脂肪香气增强,挥发性风味化合物中脂类达到 165~277 $\mu\text{g/g}$,提高了约 70 倍。

3.3 芽孢杆菌

芽孢杆菌广泛应用于食品发酵、生物制药、饲料加工等领域,在中国的豆豉、传统发酵霉豆渣中均发现芽孢杆菌是发酵的重要菌种^[32]。庞春霞等^[33]发现从传统霉豆渣中分离的 8 株主要发酵菌种中,枯草芽孢杆菌的产蛋白酶和纤维素酶的能力最强。纳豆芽孢杆菌是纳豆的主要发酵菌种,其发酵产物中的多聚- γ -谷氨酸具有重要的生理保健作用。Jiang 等^[34]将 NX-2S 解淀粉芽孢杆菌发酵的豆渣添加于饲料中,发现单宁、胰蛋白酶抑制剂、植酸等抗营养因子含量均显著降低,饲料中添加发酵豆渣可使大鼠平均增重增加,料肉比降低。芽孢杆菌对膳食纤维具有较强的改性能力,经纳豆芽孢杆菌联合超声处理的豆渣膳食纤维持水能力显著增强^[35]。另外,豆渣可作为抗菌活性物质生产的优良培养基,Leães 等^[36]将 *Bacillus sp.* P11 分别接种于豆渣、鱼粉、葡萄渣、乳清蛋白等六种物质,发现豆渣产细菌素的能力最强,表明豆渣可作为芽孢杆菌生产抗菌活性物质的一种经济有效的底物。在另一项研究中,Wang 等^[37]发现纳豆芽孢杆菌发酵豆渣中甲基萘醌-7(MK-7)和纳豆激活酶浓度分别达到了 91.25 mg/L 和 2675.73 U/mL, MK-7 可能是治疗阿尔茨海默病和帕金森病的潜在药物。

3.4 霉菌

在中国,霉菌是豆腐乳的主要发酵菌种,霉菌发酵可赋予豆制品优良的风味,并增加豆制品的营养成分,这在发酵豆渣中亦得到广泛应用,霉菌发酵可改善豆渣风味和质地,并产生益生元^[38]。Zhou 等^[39]从 *Neurospora crassa* 发酵的豆渣中提取多糖,经鉴定为纤维素糖,并通过体外实验发现豆渣低聚糖可使肠道等中的氨氮浓度

显著降低、短链脂肪酸水平升高,因此该发酵豆渣可能是一种潜在的益生元食品。这一结果与 Yu 等^[40]的研究结果相一致, Yu 等通过体外实验发现从 *Neurospora crassa* 发酵豆渣中提取的 SDF 可显著提高发酵液产气量和短链脂肪酸水平,降低 pH 和氨氮浓度;并且用该发酵豆渣饲喂的小鼠的肠道菌群结构也得到改善。另外,霉菌种类繁多,不同霉菌对豆渣的发酵能力不同。Kanti 和 Sudiana^[41]以豆渣等作为发酵底物,分别研究比较了黑曲霉、米根霉和好食脉孢霉三个菌种产植酸酶、淀粉酶和纤维素酶的能力,其中黑曲霉的产淀粉酶和纤维素酶的能力最强,好食脉孢霉产植酸酶的能力最强,这为发酵豆渣中霉菌菌种的选择应用提供了一定的依据。

3.5 食用菌

近几年,许多研究关注于食用菌发酵豆渣,食用菌作为食品的安全可靠性已被广泛证实。香菇、金针菇、蛹虫草、灵芝等均可作为豆渣的发酵菌种,对提升豆渣的蛋白质、功能性多糖含量有积极意义。Shi 等^[42]使用金针菇发酵豆渣,提取其中多糖成分,研究发现,发酵豆渣中多糖含量为 59.15 mg/g,并具有较强的抗氧化活性、刺激巨噬细胞增殖、产生一氧化氮和对阿霉素损伤的保护作用。这一结论和 Li 等^[43]使用蛹虫草发酵豆渣的研究结果相似。Yang 等^[44]分别使用香菇和灵芝发酵豆渣以研究其对骨质疏松的预防治疗作用,发现香菇发酵豆渣在预防骨质疏松方面优于以灵芝发酵的豆渣。不同食用菌发酵豆渣的功能成分不同,其功能性物质具有差异性,在实际运用中,可根据不同需要筛选不同食用菌以应用于发酵豆渣。

4 豆渣发酵方式

豆渣中丰富的碳水化合物、蛋白质和脂肪为微生物发酵提供了良好的物质环境,微生物代谢产生的多种酶对豆渣中的大分子物质和抗营养因子有分解作用。根据发酵菌种的来源不同,豆渣发酵方式可分为自然发酵和接种发酵。

4.1 自然发酵

自然发酵是指利用底物自身附着的和环境中的微生物进行发酵。传统发酵豆渣制品一般在湖北、四川、湖南、江西等地较为常见,由于发酵需要在较低温度下进行,一般在秋冬季节制作,其主要工艺为:将加水混匀的鲜豆渣在室温下敞口自然酸化,然后压榨去水,上锅蒸出豆香味且酸味变小后取出摊凉,最后将豆渣整形成块状,室温发酵^[45]。自然发酵中的微生物主要来自发酵环境和原料自身携带芽孢等,通常不是单一菌种,因此自然发酵本质上来说也属于混合菌种发酵。相比于人工接种发酵,自然发酵完全依靠自然界中存

在的微生物发酵,不需要额外的菌种投入,发酵成本低,同时在一定程度上也能够保留原有的营养成分和风味;但其也存在发酵周期较长,并且由于发酵时的微生物种类和数量难以控制,导致发酵品质不稳定和难以实现标准化生产等问题^[11]。

4.2 接种发酵

可用于豆渣发酵的微生物种类很多,接种发酵按照接种微生物的数量可分为单菌发酵和混菌发酵。单菌发酵排除了其他微生物对发酵过程的干扰,具有目标产物明确、易操作与发酵条件控制简单的优点。周亚楠等^[46]利用芽孢杆菌进行湿豆渣发酵,通过 121 °C 高温高压灭菌 20 min 的方式杀灭豆渣中自带微生物,然后接种 5 % 和 10 % 活化菌液,37 °C 恒温发酵,4 °C 低温后熟,发酵豆渣营养价值随接种量的增加而提高。刘爱瑜等^[47]比较了枯草芽孢杆菌、植物乳杆菌和酿酒酵母菌 3 种微生物单菌及等比例复合发酵对新鲜豆渣感官和营养品质的影响,结果表明复合菌较单一菌发酵效果好,这与前述的张瑜等的研究结果相似。范阳等^[48]利用混合发酵(植物乳杆菌、枯草芽孢杆菌和酿酒酵母)制备豆渣饲料,该饲料的 pH 值明显降低,营养也有所改善。在发酵过程中,不同菌种分泌的酶系有差异,其对发酵底物的作用也会有所不同,所以采用多个菌种联合发酵的方式可以在一定程度上获得更为全面的酶系物质。同时,对于在底物表面上难以附着的菌种,可以利用菌丝发达菌种来解决,如将不易附着的酵母菌与菌丝发达的曲霉和食用菌组合^[49]。但混合菌种发酵也存在一些不足,例如不同菌种的最适发酵条件可能有差异,发酵过程中的相互作用不明确,所以在选择发酵条件时需要考虑菌种间的协同、拮抗作用等^[15]。

5 微生物发酵豆渣的应用

5.1 食品工业

5.1.1 发酵豆渣食品

在如今食品研究人员或食品工业更关注于开发新天然成分和具有更好理化或生物功能特性产品的背景下,豆渣富含膳食纤维、蛋白质等营养物质的特性为其在食品中的应用提供了良好物质基础。张梦茹等^[10]利用两种曲霉混合发酵制备豆渣酱油,成品质量达到了二级酱油标准。林雪娇等^[50]利用新鲜发酵豆渣制成了一款具有一定保健功能的膳食纤维乳饮料。赵爽^[51]利用豆渣进行黄豆酱发酵,发现 8 % 的豆渣添加量不会对黄豆酱的制曲、发酵和感官产生显著影响,且在大规模生产中具有较强的可操作性,有效降低了黄豆酱生产成本,提高了生产原料再利用率和经济效益。王霏霏等^[52]采用黑曲霉结合小曲发酵豆渣,相比于未发酵的豆渣,发酵豆渣中的氨基酸态氮含量增加了 3.23 倍,

纤维素酶和半纤维素酶的活性分别提升了 2.02 倍和 10.64 倍,豆渣粒径显著减小,毛霉长势良好,可用于制作腐乳。

5.1.2 食品添加剂

豆渣可经真菌、细菌和酵母菌等微生物发酵后,水溶性纤维、蛋白质、多肽等活性物质含量增加,并且特定微生物可定向产生色素等物质,可用于制备食品添加剂或催化剂^[53]。孔维宝等^[54]用紫色红曲霉发酵豆渣得到的产物既可作为提取红曲色素的原料,还可以用作功能性生物饲料或红曲制剂。Liu 等^[55]利用黄色微球菌以两段固态发酵法生产赤藓糖醇,该法具有周期短、节约能耗及可操作性强等特点。王宁等^[56]利用红酵母发酵豆渣产类胡萝卜素,并确定了最优发酵工艺参数,在该条件下类胡萝卜素产量比工艺优化前产量提高了 67.7%。

5.2 饲料加工

制备牲畜、水产饲料是豆渣最常见的用途之一,但若豆渣不经加工直接饲喂或处理不当会导致其营养难以吸收,甚至引起消化不良、腹泻、生长缓慢等多种问题。微生物发酵可以有效降解豆渣中的大分子营养物质和抗营养因子,提升豆渣的吸收、消化和利用率,目前已有大量关于微生物发酵豆渣饲料的研究。陈劲舒等^[57]使用枯草芽孢杆菌、植物乳杆菌和粪肠球菌发酵鸡蛋壳、豆渣混合物,发现产物中游离氨基酸、乳酸钙的浓度明显提高,可用以生产高钙饲料。张永根等^[58]以豆渣为原料,利用混合菌种固态发酵制得一种耐贮藏、适口性强的反刍动物饲料,并确定了固态发酵最佳工艺条件。侍宝路等^[59]以豆渣、麸皮混菌固态发酵生产酸化饲料,发酵产物的总酸含量增加,pH 值降为 3.75,而中性洗涤纤维含量降低。

5.3 其他

由于微生物发酵豆渣产物中含有多种生物活性成分,且不同菌种发酵的产物也有所不同,因此其除了在食品、饲料方面具有再利用的潜力外,也被一些研究者用于其他领域的研究。Ano 等^[60]利用枯草芽孢杆菌固态发酵生产脂肽类抗生素 Iturin A。Hayashi 等^[61]利用 *Penicillium expansum* Link MK-57 发酵豆渣,并从产物中分离提取出 3 种杀虫剂(Communesins C, D and E)。Fujita 等^[62]从 *Penicillium brasilianum* Batista JV-379 发酵的豆渣中分离到 3 种可使桑蚕发生痉挛的同系物,分别为 Brasiliamides C, D and E。豆渣抗氧化肽是一种经济安全的植物抗氧化剂,在生命活动、医疗保健方面有着显著的作用。除酶解法外,微生物发酵也可生成具有抗氧化能力的肽类物质^[63]。魏长浩等^[64]利用粗壮脉纹孢菌在最适产蛋白酶条件下发酵豆渣,结果发现产物中的多肽、总酚和总黄酮等物质随发酵时间

的延长而增加,抗氧化能力提升。维酶素,是以豆渣为原料,经阿氏假囊酵母菌进行固体发酵产生的,其主要成分是核黄素及其衍生物等^[65]。

6 结论与展望

大量工业加工副产物的丢弃不仅导致经济损失和资源浪费,也形成了对环境的巨大挑战。近年来,各种技术的出现与进步促进了工业加工副产物的再利用与高值转化。已有大量研究表明,微生物发酵是豆渣品质改善及再利用价值提升的重要方法之一,对提升其再利用性具有重要的实际生产意义。

目前的研究也存在一定不足,如作为饲料使用仍是发酵豆渣的主要用途,这在一定程度上限制了豆渣附加值的进一步提升;目前关于高附加值新型豆渣发酵产品的研究上还不够成熟,极少应用于工业化生产,需要进一步深入研究;新鲜豆渣具有易腐败性,其储运、加工豆渣节约的成本和再利用的投资与效益也是生产者需要考虑的方面。总而言之,微生物发酵豆渣还需进一步研究来充分开发其有益价值,包括优良发酵菌种的筛选与组合,生物活性成分的分离提取及产业化应用等。

参考文献(References):

- [1] XU X, CUI H, XU J, et al. Effects of different probiotic fermentations on the quality, soy isoflavone and equol content of soy protein yogurt made from soy whey and soy embryo powder[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 157 (1): 113096.
- [2] 陶积德,何玉凤,杨彩霞,等.豆渣活性成分的提取、改性及应用研究进展[J].天然产物研究与开发,2012,24(5): 702-707, 621.
TAO Ji-de, HE Yu-feng, YANG Cai-xia, et al. Advanced in extraction, modification, and utilization of the active constituents from beandregs[J]. Natural Product Research and Development, 2012, 24(5): 702-707, 621.
- [3] SANTOS D C, OLIVEIRA FILHOP J G, SILVA J S, et al. Okara flour: Its physicochemical, microscopical and functional properties [J]. Nutrition & Food Science, 2019, 49(6): 1252-1264.
- [4] XIE L, ZHOU W, ZHAO L, et al. Impact of okara on quality and in vitro starch digestibility of noodles: The view based on physicochemical and structural properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 237(1): 124105.
- [5] MATEOS-APARICIO I, REDONDO-CUENCA A, VILLANUEVA-SUÁREZ, et al. Peapod, broad bean pod and okara, potential sources of functional compounds [J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(9): 1467-1470.
- [6] 吴永祥,吴丽萍,朴银美,等.药(食)真菌发酵豆渣的主要功能物质及生物活性变化[J].食品与发酵工业,2020,46

- (15): 100–106.
WU Yong-xiang, WU Li-ping, PARK Eunmi, et al. Changes in main functional substances and biological activities of okara fermented with medicinal and edible fungi[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(15): 100–106.
- [7] 喻远东, 张喻. 豆渣的价值及加工利用分析探讨[J]. *粮食科技与经济*, 2018, 43(6): 114–115.
YU Yuan-dong, ZHANG Yu. Analysis and discussion on the value and processing utilization of bean dregs[J]. *Grain Science and Technology and Economy*, 2018, 43(6): 114–115.
- [8] 杨静. 基于豆渣活性成分的提取、改性及应用研究进展[J]. *中国食品*, 2021(6): 131–131.
YANG Jing. Research progress in extraction, modification, and application of active ingredients from soybean residue[J]. *China Food*, 2018, 43(6): 114–115.
- [9] 尹立晨, 童群义. 改性豆渣膳食纤维的理化性质、结构及其益生活性研究[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(3): 141–148.
YIN Li-chen, TONG Qun-yi. Physicochemical properties, structure and prebiotic activity of modified okara dietary fiber[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(3): 141–148.
- [10] 张梦茹, 刘美蓉, 朱娜丽, 等. 豆渣发酵酱油关键技术[J]. *食品与发酵工业*, 2013, 39(12): 104–109.
ZHANG Meng-ru, LIU Mei-rong, ZHU Na-li, et al. Bao-shan Study of fermenting soy sauce using bean dregs[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2013, 39(12): 104–109.
- [11] 殷雨洋, 范阳, 齐伟彪, 等. 自然发酵和益生菌发酵豆渣饲料的发酵品质、营养成分及微生物菌群组成分析[J]. *中国畜牧杂志*, 2023, 59(5): 241–246.
YIN Yu-yang, FAN Yang, QI Wei-biao, et al. Analysis of fermentation quality, nutrient composition and microbial flora composition of natural fermentation and probiotics fermented soybean dregs feed[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2023, 59(5): 241–246.
- [12] HOTZ C, GIBSON R S. Traditional food-processing and preparation practices to enhance the bioavailability of micronutrients in plant-based diets[J]. *Journal of Nutrition*, 2007, 137(4): 1097–1100.
- [13] VONG W C, LIU S-Q. Biovalorisation of okara (soybean residue) for food and nutrition[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, 52(1): 139–147.
- [14] 李伟伟, 曲俊雅, 周才琼, 等. 真菌及乳酸菌联合发酵对豆渣膳食纤维及理化特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(11): 159–166.
LI Wei-wei, QU Jun-ya, ZHOU Cai-qiong. Effects of combined fermentation of fungi and lactic acid bacteria on dietary fiber and physicochemical properties of soybean dregs[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(11): 159–166.
- [15] 肖婧泓, 辛嘉英, 刘青云, 等. 微生物发酵提高豆渣可溶性蛋白的研究进展[J]. *饲料研究*, 2021, 44(11): 131–134.
XIAO Jing-hong, XIN Jia-ying, LIU Qing-yun, et al. Research progress on improving soluble protein of soybean dregs by microbial fermentation[J]. *Feed Research*, 2021, 44(11): 131–134.
- [16] YUAN S, CHANG S K-C. Selected odor compounds in soymilk as affected by chemical composition and lipoxygenases in five soybean materials[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55(2): 426–431.
- [17] 姜慧燕, 邹礼根, 翁丽萍, 等. 豆渣营养成分分析及蛋白质营养价值评价[J]. *食品工业*, 2020, 41(6): 325–328.
JIANG Hui-yan, ZHOU Li-gen, WENG Li-ping, et al. Nutritional components analyzation and protein nutrition evaluation of soybean residue[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(6): 325–328.
- [18] FAYAZ G, PLAZZOTTA S, CALLIGARIS S, et al. Impact of high pressure homogenization on physical properties, extraction yield and biopolymer structure of soybean okara[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 113(1): 108324.
- [19] GUIMARAES R M, SILVA T E, LEMES A C, et al. Okara: A soybean by-product as an alternative to enrich vegetable paste[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 92(1): 593–599.
- [20] LI B, YANG W, NIE Y, et al. Effect of steam explosion on dietary fiber, polysaccharide, protein and physicochemical properties of okara[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94(5): 48–56.
- [21] LU F, LIU Y, LI B. Okara dietary fiber and hypoglycemic effect of okara foods[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2013, 2(2): 126–132.
- [22] JACKSON C J C, DINLI J P, LAVANDIER C, et al. Effects of processing on the content and composition of iso-flavones during manufacturing of soy beverage and tofu[J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(10): 1117–1123.
- [23] FENG J Y, THAKUR K, NI Z J, et al. Effects of okara and vitamin B₂ bioenrichment on the functional properties and in vitro digestion of fermented soy milk[J]. *Food Research International*, 2021, 145(1): 110419.
- [24] WANG T, QIN G X, SUN Z W, et al. Advances of research on glycinin and β -conglycinin: a review of two major soybean allergenic proteins[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2014, 54(7): 850–862.
- [25] 赵超, 马广明, 吕静怡, 等. 添加乳酸菌和纤维素酶对豆渣与桑叶混贮品质及体外瘤胃发酵特性的影响[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(4): 2168–2177.
ZHAO Chao, MA Guang-ming, LV Jing-yi, et al. Effects of adding lactic acid bacteria and cellulase on quality of mixed silage of soybean residue and mulberry leaves and Rumen fermentation characteristics in vitro[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(4): 2168–2177.
- [26] 张瑜. 毛霉联合乳酸菌发酵对豆渣可溶性膳食纤维及其应用特性的影响[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2020.
ZHANG Yu. Effect of mucor Combined with Lactic acid

- bacteria fermentation on soluble dietary fiber in soybean dregs and its application characteristics[D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2020.
- [27] 刘艳新,刘占英,倪慧娟,等. 微生物发酵饲料的研究进展与前景展望[J]. 饲料博览, 2017, 27(2): 15-22.
LIU Yan-xin, LIU Zhan-ying, NI Hui-juan, et al. The Research Progress and Prospect of Microbial Fermentation Feed[J]. Feed Review, 2017, 27(2): 15-22.
- [28] 信珊珊,丁浩,杨阳,等. 酵母菌发酵植物粕类饲料研究进展[J]. 中国饲料, 2023(3): 5-10.
XIN Shan-shan, DING Hao, YANG Yang, et al. Research progress on yeast-fermented plant meal feed[J]. China Feed, 2023(3): 5-10.
- [29] RASHAD M, MAHMOUD A, ABDOU H, et al. Improvement of nutritional quality and antioxidant activities of yeast fermented soybean curd residue[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(28): 5504-5513.
- [30] VONG W C, AU YANG K L C, LIU S-Q. Okara (soybean residue) biotransformation by yeast *Yarrowia lipolytica*[J]. International Journal of Food Microbiology, 2016, 235(1): 1-9.
- [31] HU Y, PIAO C, CHEN Y, et al. Soybean residue (okara) fermentation with the yeast *Kluyveromyces marxianus*[J]. Food Bioscience, 2019, 31(1): 100439.
- [32] 董超,孙劲冲,李若楠,等. 豆豉与淡豆豉的成分测试及微生物菌群分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 154-163.
DONG Chao, SUN Jing-chong, LI Ruo-nan, et al. Ingredient test and microbial flora analysis of the Fermented Soya Bean and Sojae Semen Praeparatum[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2023, 14(11): 154-163.
- [33] 庞春霞,徐伟程,甘甜,等. 传统发酵霉豆渣菌种分离鉴定及其产酶能力分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 107-113.
PANG Chun-xia, XU Wei-cheng, GAN Tian, et al. Isolation, Identification and Enzyme Producing Capacity Analysis of Dominant Strain in Traditional Fermented Meitauza [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 107-113.
- [34] JIANG K, TANG ., WANG Q, et al. The bio-processing of soybean dregs by solid state fermentation using a poly- γ -glutamic acid producing strain and its effect as feed additive[J]. Bioresource Technology, 2019, 291(2): 121841.
- [35] 李爽. 超声处理及纳豆芽孢杆菌发酵对豆渣不溶性膳食纤维改性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
LI Shuang. Modification of okara insoluble dietary fiber by ultrasonic treatment and *Bacillus natto* fermentation[D]. Harbin, Northeast Agricultural University, 2022.
- [36] LEÃES F L, VANIN N G, SANT' ANNA V, et al. Use of byproducts of food industry for production of antimicrobial activity by *Bacillus* sp. P11. [J]. Food and bioprocess technology, 2011, 4(5): 822-828.
- [37] WANG H, SUN X, WANG L, et al. Coproduction of menaquinone-7 and nattokinase by *Bacillus subtilis* using soybean curd residue as a renewable substrate combined with a dissolved oxygen control strategy[J]. Annals of Microbiology, 2018, 68(10): 655-665.
- [38] YAO Y, PAN S, WANG K, et al. Fermentation process improvement of a Chinese traditional food: soybean residue cake[J]. Journal of Food Science, 2010, 75(7): 417-421.
- [39] ZHOU R, REN Z, YE J, et al. Fermented soybean dregs by *Neurospora crassa*: a traditional prebiotic food [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2019, 189(3): 608-625.
- [40] YU J, FU Y, DENG Z, et al. Effects of soluble dietary fiber from soybean residue fermented by *Neurospora crassa* on the intestinal flora in rats[J]. Food & Function, 2020, 11(9): 7433-7445.
- [41] KANTI A, SUDIANA I M. Production of phytase, amylase and cellulase by *Aspergillus*, *Rhizopus* and *Neurospora* on mixed rice straw powder and soybean curd residue[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 166(1): 012010.
- [42] SHI M, YANG Y, GUAN D, et al. Bioactivity of the crude polysaccharides from fermented soybean curd residue by *Flammulina velutipes*[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(4): 1268-1276.
- [43] LI Y, BAN L, MENG S, et al. Bioactivities of crude polysaccharide extracted from fermented soybean curd residue by *Cordyceps militaris*[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2021, 35(1): 342-353.
- [44] YANG L C, FU T J, YANG F C. Biovalorization of soybean residue (okara) via fermentation with *Ganoderma lucidum* and *Lentinus edodes* to attain products with high anti-osteoporotic effects[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2019, 129(4): 514-518.
- [45] 石威. 自然发酵豆渣中微生物分离, 鉴定及混合发酵豆渣产品的研制[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
SHI Wei. Micorobes isolation, identification of natural fermented okara and the products development of mixed fermented okara[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [46] 周亚楠,柴贺,初琦,等. 纳豆芽孢杆菌发酵豆渣营养成分变化研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(23): 170-174.
ZHOU Ya-nan, CHAI He, CHU Qi, et al. The variable pattern of nutrition components in *Bacillus natto* fermentation of bean residue[J]. Food Research and Development, 2016, 37(23): 170-174.
- [47] 刘爱瑜,宋艳磊,赵寿培,等. 单一和复合菌剂发酵豆腐渣的营养价值评定[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(1): 120-128.
LIU Ai-yu, SONG Yan-lei, ZHAO Shou-pei, et al. Nutritional value evaluation of fermented tofu residue with single and compound inoculants[J]. Journal of Shanxi

- Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42 (1): 120–128.
- [48] 范阳, 齐伟彪, 朱崇森, 等. 发酵豆渣工艺的优化及对营养成分的影响[J]. 切畜牧与兽医, 2021, 53(12): 17–22.
FAN Yang, QI Wei-biao, ZHU Chong-miao, et al. Fermentation process optimization of soybean residue leed and its consequent nutrient changes[J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2021, 53(12): 17–22.
- [49] 郑玉琳. 微生物发酵豆渣在肉鸡饲料中应用的初步研究[J]. 湖南饲料, 2022(2): 37–38.
ZHENG Yu-lin. Preliminary study on the application of microbial fermented soybean dregs in broiler feed[J]. Hunan Feed, 2022(2): 37–38.
- [50] 林雪娇, 高宇航, 彭杉, 等. 高膳食纤维发酵豆渣乳饮料工艺优化[J]. 乳业科学与技术, 2017, 40(6): 13–19.
LIN Xue-jiao, GAO Yu-hang, PENG Shan, et al. Optimization of processing parameters for the preparation of high dietary fiber milk beverage supplemented with fermented okara[J]. Journal of Dairy Science and Technology, 2017, 40(6): 13–19.
- [51] 赵爽. 大豆豆渣替代部分黄豆发酵豆酱的研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(3): 116–118.
ZHANG Shuang. The research of soybean paste fermentation with soybean residue instead of part of soybean[J]. Food Research and Development, 2019, 40(3): 116–118.
- [52] 王霏霏, 王莎, 李丹林. 豆渣发酵工艺优化研究及其腐乳产品开发[J]. 农产品加工, 2020(21): 28–31.
WANG Fei-fei, WANG Sha, LI Dan-lin. Study on optimal fermentation process of bean dregs and development of sufu products[J]. Farm Products Processing, 2020(21): 28–31.
- [53] SU M, HU Y, CUI Y, et al. Production of β -glucosidase from okara fermentation using *Kluyveromyces marxianus*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 58(1): 366–376.
- [54] 孔维宝, 陈冬, 杨洋, 等. 紫色红曲霉固态发酵豆渣产红曲色素的工艺研究[J]. 中国油脂, 2019, 44(5): 138–143.
KONG Wei-bao, CHEN Dong, YANG Yang, et al. Production of *Monascus* pigments by solid-state fermentation of soybean dregs with *Monascus purpureus*[J]. 2019, 44(5): 138–143.
- [55] LIU X, YU X, ZHANG T, et al. Novel two-stage solid-state fermentation for erythritol production on okara-buckwheat husk medium[J]. Bioresource Technology, 2018, 266(20): 439–446.
- [56] 王宁, 杨继业, 陈书明, 等. 红酵母发酵豆腐渣产类胡萝卜素工艺优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 323–330.
WANG Ning, YANG Ji-ye, CHEN Shu-ming, et al. Optimization of the process for carotenoid production from bean curd residue fermented by *Rhodotorula*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 323–330.
- [57] 陈劲舒, 董丽婷, 夏凤腾, 等. 响应面法优化蛋壳豆渣发酵工艺生产高钙饲料[J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 200–206.
CHEN Shao-shu, DONG Li-ting, XIA Feng-teng, et al. Optimized the fermentation process of eggshell and soybean dregs to produce high calcium feed by response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(9): 200–206.
- [58] 张永根, 薛世崇, 李洋, 等. 固态发酵豆渣生产反刍动物饲料工艺条件研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(5): 76–82.
ZHANG Yong-gen, XUN Shi-chong, LI Yang, et al. Study on fermentation process of ruminant feed in soybean dregs by solid-state fermentation[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(5): 76–82.
- [59] 侍宝路, 王计伟, 刘春雪, 等. 混菌固态发酵豆渣生产酸化饲料工艺条件研究[J]. 饲料工业, 2018, 39(2): 51–55.
SHI Bao-lu, WANG Ji-wei, LIU Chun-xue, et al. Research on fermentation process of sour feed by mixed bacteria solid-state soybean dregs[J]. Feed Industry, 2018, 39(2): 51–55.
- [60] ANO T, JIN G Y, MIZUMOTO S, et al. Solid state fermentation of lipopeptide antibiotic iturin A by using a novel solid state fermentation reactor system[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(1): 162–165.
- [61] HAYASHI, MATSUMOTO H, AKIYAMA K. New Insecticidal Compounds, Communesins C, D and E, from *Penicillium expansum* Link MK-57[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2004, 68(3): 753–756.
- [62] FUJITA T, MAKISHIMA D, AKIYAMA K, et al. New Brasilamide Congeners, Brasilamides C, D and E, from *Penicillium brasilianum* Batista JV-379[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2004, 68(4): 820–826.
- [63] 高红梅, 丁志刚, 郭会丽. 豆渣抗氧化肽的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2016, (9X): 107–108.
GAO Hhong-mei, DING Zhi-gang, GUO Hui-li. Research progress on antioxidant peptides from bean dregs [J]. China Food Safety Magazine, 2016, (9X): 107–108.
- [64] 魏长浩, 邓泽元, 范亚苇, 等. 粗壮脉纹孢菌固态发酵豆渣产抗氧化多肽研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(5): 20–24.
WEI Chang-hao, DENG Ze-yuan, FAN Ya-wei, et al. Study on antioxidant peptides from bean dregs fermented by solid *Neurospora crassa*[J]. Food and Machinery, 2020, 36(5): 20–24.
- [65] 杨晨敏, 田洁萍, 谷军. 利用豆渣生产维酶素及作为鲤鱼饲料添加剂的研究[J]. 黑龙江水产, 2000(2): 31–31.
YANG Chen-min, TIAN Jie-ping, GU Jun. Study on the production of vitacoenzyme by bean dregs and its use as feed additive for carp [J]. Northern Chinese Fisheries, 2000(2): 31–31.

责任编辑:陈芳