

李爱科、綦文涛研究员主持“粮食品质提升与营养改善”专栏文章之五

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.05.018

王永伟, 施晶晶, 段涛, 等. 生物技术在粮油饲料资源增值转化中的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(5): 152-159.

WANG Y W, SHI J J, DUAN T, et al. Research progress on the application of biotechnology in value-added conversion of grain, oil and feed resources[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(5): 152-159.

生物技术在粮油饲料资源增值转化中的应用研究进展

王永伟, 施晶晶, 段涛, 何贝贝, 刘宽博, 王丽, 李爱科✉

(国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食品质营养研究所, 北京 100037)

摘要: 优质蛋白饲料资源短缺成为影响我国粮食安全的重要变量。我国粮油加工副产物资源丰富, 但是饲用价值偏低, 通过生物发酵、酶解、合成生物学等现代生物技术对这些资源进行加工处理, 能实现资源提质增效, 达到替代大豆粕的目的。本文重点综述了发酵饲料、酶解饲料和菌体蛋白饲料的生产工艺、饲用价值以及在豆粕减量替代研究中的应用效果, 同时介绍了微生物吸附、降解以及生物酶在脱除真菌毒素上的研究进展, 最后对生物发酵饲料的开发、产业化应用、标准制定、行业监管等方面提出了研究展望。本文可为生物技术在粮油饲料资源增值上的应用提供有力指导。

关键词: 粮油饲料资源; 生物技术; 增值利用; 发酵饲料; 豆粕替代

中图分类号: TS209; Q-1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)05-0152-08

网络首发时间: 2023-09-11 14:12:31

网络首发地址: <http://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20230908.1541.013>

Research Progress on the Application of Biotechnology in Value-added Conversion of Grain, Oil and Feed Resources

WANG Yong-wei, SHI Jing-jing, DUAN Tao, HE Bei-bei, LIU Kuan-bo, WANG Li, LI Ai-ke✉

(Institute of Grain Quality and Nutrition Research, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: The shortage of high-quality protein feed resources has become an important variable affecting food security in China. Grain and oil processing by-products are abundant in China, but the feeding value is low. If these resources are processed through modern biotechnology, such as biofermentation, enzymolysis technology or synthetic biology, their quality and efficiency will be improved and can be used to replace the soybean meal. This paper summarized the production process, feed value and its application in soybean meal

收稿日期: 2023-05-05

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (ZX2233)

Supported by: Fundamental Research Funds of the Central Research Institutes (No. ZX2233)

作者简介: 王永伟, 男, 1983 出生, 博士, 副研究员, 研究方向为生物饲料资源开发应用。E-mail: wyw@ags.ac.cn

通讯作者: 李爱科, 男, 1963 出生, 博士, 首席研究员, 研究方向为动物营养与饲料资源开发利用。E-mail: lak@ags.ac.cn。作者详细介绍见 PC26。

replacement of fermented feed, enzymolysis feed and microbial protein feed, and also introduced the research progress of microbial adsorption, degradation, or enzymes on removing mycotoxins, finally put forward the research prospect of development, industrialization application, standard establishment, and industry supervision for biological fermentation feed. This paper can provide guidance for the application of biotechnology in grain and oil feed resources.

Key words: grain and oil feed resources; biotechnology; value-added utilization; fermented feed; soybean meal replacement

生物技术是指基于生物学、化学以及工程学的基本原理,依托于生物体、细胞器和酶等生产有用物质的技术,主要包括基因工程、细胞工程、酶工程和发酵工程等技术。近年来,运用微生物发酵工程开发发酵酶解饲料、菌体蛋白等资源,可以有效缓解蛋白质饲料不足的突出问题。我国粮食消费中饲用消费占比较大,2022年我国谷物、豆粕和粮食加工副产品饲用消费总量达3.919亿t,占粮食消费总量的48%,明显高于33%的口粮消费和17%的工业消费。饲料蛋白消耗总量达7900万t,由进口原料提供的占比达46.3%,保障蛋

白饲料资源供给是保障我国粮食和重要农产品稳定安全供给的关键。因此,通过阐述生物技术在饲料工业中的具体应用,可以为粮油资源饲用品质提升和大豆粕减量替代提供实践指导。

1 生物饲料资源开发与应用

生物发酵技术可以通过对发酵参数优化发掘微生物资源的潜力,该技术在饲料加工生产中的应用主要体现在3个方面:生产发酵饲料、酶解饲料以及菌体蛋白饲料,三种生物饲料的生产工艺流程见图1。

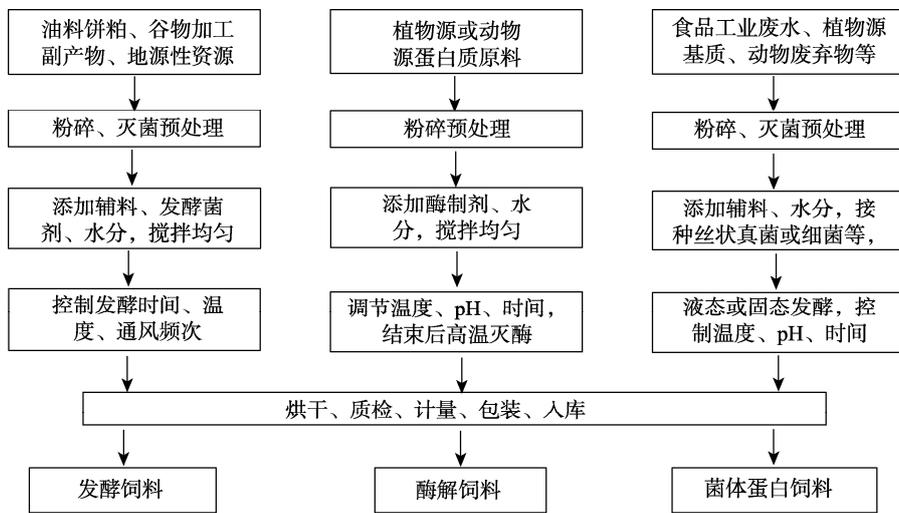


图1 三种生物饲料的生产工艺流程

Fig.1 Production process of three kinds of biological feed

1.1 发酵饲料

发酵饲料是指利用微生物发酵技术将饲料原料中难以消化的大分子物质和抗营养因子进行转化和分解,提高营养物质生物利用度和消化率,产生营养丰富、适口性好、活菌含量高的饲料原料。发酵工艺按照含水量高低可分为液体发酵和固体发酵,国内通常采用在饲料原料中添加益生菌生产固态发酵饲料。目前用于发酵饲料的菌株

主要有乳酸菌、酵母菌、枯草芽孢杆菌、霉菌等。发酵菌种多以复合菌发酵为主,即发酵前期通过酵母菌或芽孢杆菌消耗体系中的氧气,随后由乳酸菌等厌氧菌进行厌氧发酵。发酵工艺按照原料不同又可分为单一原料和复合原料发酵,底物原料选择时除兼顾动物营养与微生物营养的需要,还需考虑所用原料对发酵产品松散性、风味、颗粒度等性能的影响。发酵工艺参数及影响因素主

要包括菌种活化、接种量、水分、原料粉碎细度、pH、温度等,实际生产中应根据不同发酵原料的特性以及发酵目的对相关发酵工艺条件进行控制和优化,以便提高发酵的效率和产品品质。

我国拥有丰富的棉籽饼粕、菜籽饼粕、花生饼粕等资源,这些原料粗蛋白质含量都在40%以上,但由于氨基酸组成不平衡且含有抗营养因子,限制了其在动物饲料中的高效应用。我国糟渣类资源如酒糟、果渣、薯渣等种类多、数量大,营养丰富,但由于水分和有毒有害物质含量高,难以储存和利用。通过生物发酵技术处理可以降低饼粕和糟渣中的抗营养因子含量、有效提升饲用价值^[1-2]。此外,我国玉米秸秆资源量也较大,但粗纤维含量高、粗蛋白质含量低,通过微生物发酵处理后,可大大提升玉米秸秆粗蛋白质含量、降低粗纤维含量,提高其在动物体内的消化利用率,降低养殖成本^[3]。其他地源性资源(如桑叶粉、构树、尾菜等)经生物发酵后可部分替代玉米、豆粕等常规饲料^[4]。

饲料原料经微生物发酵后,除了可提高其营养价值、降低抗营养因子含量,还可产生一些生物活性物质,发挥替代饲用抗生素的作用。乳酸菌固态发酵可使发酵棉粕产物中有机酸总量提高,发挥类似益生菌的作用,降低动物肠道pH,减少有害菌定植、增加有益菌菌群水平^[5]。发酵饲料还可通过增强动物机体抗氧化能力和改善机体代谢功能等提高畜禽肉蛋品质^[6]。添加一定量的发酵饲料也可在提高营养物质消化吸收的同时,促进无机氮转化为有机氮,从而降低畜禽有害气体排放,有益于畜禽健康和环境保护^[7]。

1.2 酶解饲料

生物酶解技术是利用生物酶制剂将特定物质分解转化,变成易于动物消化利用物质的过程。饲料经过酶解之后,可以降低饲料中抗营养因子和真菌毒素含量,有效提高饲料原料的利用率。在微生物发酵的基础上,添加酶制剂对原料进行预消化,产生的小分子营养物质会提高益生菌的增殖速度,发挥菌酶协同增效作用。

蛋白质酶解饲料通常选择植物源蛋白质或动物源蛋白质,但主要以植物源蛋白质为主。酶解

植物源蛋白质饲料除可降低抗营养因子外,主要特点是可产生各种功能性小肽。如棉籽粕的氨基酸比例不平衡,经过酶解后,棉籽粕氨基酸(74~180 Da)含量可从3.2%提高为5.1%,小肽(180~1 983 Da)含量从1.9%提高到13.4%,可溶性蛋白含量从10.4%提高到23.4%^[8]。菜籽粕中含有硫苷、植酸等抗营养因子,利用黑曲霉发酵和酶解两步法处理菜粕,可使菜粕硫苷含量从31.38% $\mu\text{mol/g}$ 降低至11.31 $\mu\text{mol/g}$,植酸含量从34.45 mg/g降低至1 mg/g以下,且小肽含量比菜籽粕提高了673.36%^[9]。利用酶解技术对谷朊粉进行酶解处理可以获得粗蛋白质含量75%以上、1 800 Da(以水溶性蛋白为基础)以下小肽含量43%以上的小麦酶解蛋白产品,富含谷氨酰胺,作为功能饲料添加剂有较好的应用效果^[10]。豆粕是优质的蛋白饲料原料,但豆粕含有抗胰蛋白酶因子、大豆球蛋白、植酸等抗营养因子,经过酶解后大豆球蛋白、 β -伴大豆球蛋白降解率分别可达82.3%和53.6%^[11],阿拉伯糖、甘露糖和葡萄糖含量可分别提升382%、113%和51%^[12],显著提升了豆粕的营养价值。玉米秸秆生物酶解饲料目前多以理化预处理和生物酶解联合,或酶解发酵同步处理生产生物饲料;酶制剂多以纤维素酶为主,关注指标主要包括纤维降解率、糖含量、粗蛋白质和真蛋白质含量等^[13]。另外,关于其他原料如啤酒糟、马铃薯渣、玉米浆、牡丹籽粕,针对不同生产目的,如制备多肽、提高蛋白质含量、降解纤维、制备低聚糖等的生物酶解也有相关研究。

1.3 菌体蛋白饲料

伴随着蛋白需求的不断增加,新型蛋白资源的开发或对传统低值蛋白资源进行再加工获得新型蛋白源,已经成为研究的热点。菌体蛋白(microbial protein, MP)是指从纯微生物细胞培养物中提取的干微生物细胞或总蛋白。菌体蛋白可由多种特定微生物产生,包括细菌、酵母、丝状真菌和藻类,因此也称为单细胞蛋白(single cell protein, SCP)。MP具有丰富的蛋白质含量和合理的氨基酸组成,还包含多不饱和脂肪酸、多糖等^[14]。相比于植物蛋白质,单细胞蛋白的生产更加高效,在生物反应器中微生物蛋白质的每立方米产量可

以达到每小时几千克，这比传统农业高出几个数量级，且对环境的影响及依赖性极小^[15]。

从降低成本出发，产业上多利用食品工业废水(淀粉加工废水、啤酒加工废水和味精废水等)、植物来源基质(秸秆、糟渣和大米次粉等)和动物废弃物(粪便、羽毛和内脏等)等低质原料发酵生产MP。以纤维素降解菌、热带假丝酵母和解脂假丝酵母为协同发酵菌种进行好氧-厌氧固态发酵，发酵后物料与未发酵相比，粗蛋白质和有机氮含量分别增加了64.9%和202.9%^[16]。

合成生物技术作为农业科技领域中最具引领性和颠覆性的战略高技术，特别是CO₂固定技术和绿色合成氨氮技术等前沿技术的创新应用，有望突破粮食产量刚性需求和资源环境刚性约束，促进我国现代农业跨越发展^[17-18]。与传统菌体蛋白培养物不同，气体菌体蛋白(One-carbon gas protein, C1GP)是以C1气体，如天然气(主要是甲烷)、甲醇、合成气(主要是CO和CO₂)为底物经过某些特殊的细菌发酵生产的。目前生产C1GP所用的细菌主要有甲烷氧化菌、甲醇氧化菌、乙醇梭菌和氢氧化菌。2021年，首钢朗泽公司生产的新饲料蛋白——乙醇梭状芽孢杆菌蛋白，获批中国首个饲料原料新产品证书。该蛋白是通过乙醇梭状芽孢菌将无机氮(NH₃)和碳(CO、CO₂)转化为有机氮和碳而生产的，一步工业化合成蛋白质仅需22秒，产率达85%。这项技术打破了天然光合碳、太阳能固氮系统和低反应速度的限制，打破了天然植物蛋白质合成的空间和时间限制，目前已经形成了一万吨级的工业生产潜力。据估计，1000万t乙醇梭状芽孢杆菌蛋白(粗蛋白质含量83%)的工业生产相当于2800万t大豆(粗蛋白质含量30%)，这也可以减少2.5亿t二氧化碳排放。这一成果开辟了利用低成本的非传统动植物资源生产优质饲料蛋白的新途径。

1.4 新型饲料资源在豆粕减量替代中的应用

粮食安全最突出的矛盾在饲料粮，豆粕减量替代既是应对外部供应不确定性的被动选择，更是贯彻新发展理念推动高质量发展的主动作为。利用微生物发酵技术对粮油加工副产物进行深度加工后形成一系列新型饲料资源，不仅可促进其

饲料化利用、降低饲料成本，有助于实现豆粕减量替代，还可以在动物养殖过程中发挥减抗替代的功能，为打造中国特色配方体系奠定基础，对我国畜牧业转型升级以及高质量发展具有重大意义。

发酵饲料：固态发酵技术已被用于增强植物蛋白生物利用度，在畜禽饲粮中作为蛋白源替代豆粕的过程中发挥重要作用，主要体现在改善动物的生长性能和肠道微生态平衡。发酵棉粕在断奶仔猪料中替代6%豆粕可以提高其生长性能、免疫力以及抗氧化能力，并且改善肠道微生物及其代谢功能^[19]。在白羽肉鸡日粮中添加发酵棉粕不仅对生长发育和胴体品质有积极影响，而且可以通过有机酸代谢、脂肪酸代谢、氨基酸代谢等多种途径调节脂质代谢^[20]。有研究指出发酵菜籽粕在肉鸡生长初期添加量不宜超过10%，在29~35日龄添加量提高到30%对生产性能没有负面影响^[21]。在低蛋白饲粮配方中使用发酵菜籽粕替代50%豆粕，对育肥猪的生长性能和胴体性状无显著影响，但会显著改善猪肉脂肪酸组成，提高肌苷酸含量和感官评分^[22]。在火鸡饲料中应用发酵菜籽粕可以改善肉质及脂肪酸结构和抗氧化能力^[23]。不同益生菌发酵饲料对蛋鸡生产性能和肠道健康略有差异，但都显著改善了饲料性状，提高了饲料转化效率^[24]。发酵饲料可通过刺激动物法氏囊、胸腺、脾脏等免疫器官发育，增加免疫T细胞和B细胞的数量和活性，调控细胞因子、抗体和溶菌酶的表达或活性，调控肠道微生物组成等途径增强肠道免疫屏障功能，发挥替代抗生素的作用^[25]。

酶解饲料：赵娜等(2016)^[26]用酶解豆粕替代10%豆粕饲喂仔猪，结果显示酶解豆粕能够有效提高仔猪肠道中乳酸杆菌数量，减少大肠杆菌数量，减少仔猪的腹泻率，同时，还提高了仔猪血清抗氧化能力。王凯周(2017)^[27]利用棉粕酶解蛋白替代10%鱼粉蛋白可以显著提高中华鳖肠道消化吸收酶的活性，促进肠道绒毛发育以及免疫基因的表达。通过理化预处理与生物酶解联合处理玉米秸秆，可以使其表观代谢能达到玉米的67%，与豆粕相当，显著提高了秸秆的营养价值。

菌体蛋白：动物饲粮中添加一定比例的菌体蛋白可以提高生产性能。曲浩杰等(2019)^[28]研

究表明, 饲粮中添加 1.5 g/kg 混合型啤酒酵母显著提高了蛋鸡的体重和全净膛率。张大城等(2022)^[29]研究表明, 与对照组相比, 饲粮中添加 4% 白酒糟酿酒酵母后可以显著增加断奶仔猪的平均日增重。乙醇梭菌蛋白是良好的水生动物可替代蛋白源, 替代鱼粉比例可达到 30%~50% 左右^[30]。在饲料加工方面, 乙醇梭菌蛋白可以显著降低饲料的容重、水溶性、溶失率和漏油率, 并且可以显著提高饲料的膨化率、硬度、吸水性和吸油性^[31]。

2 生物脱毒技术的开发及应用

生物脱毒技术是目前真菌毒素脱毒研究的热点, 具有脱毒效率高、反应条件温和, 对原料和饲料的营养价值和风味影响小等优势。该技术主要基于微生物自身特征形成细胞吸附、生物转化和代谢产物酶为主的脱毒机制, 包含了微生物吸附法、微生物及酶降解法^[32]。

微生物吸附法主要是借助乳酸菌和酵母菌细胞表面特殊的结构吸附真菌毒素, 不同微生物细胞的脱毒能力大小取决于其细胞壁结构中肽聚糖、硫醇、碱性氨基酸和酯类基团^[33]。Kosztik 等(2020)^[34]研究利用乳酸杆菌吸附黄曲霉毒素 B₁ (AFB₁) 和杂色曲霉素, *L. pentosus* TV3 对杂色曲霉素吸附率高达 20%, 而对 AFB₁ 的吸附率 11.5%, 其中乳酸菌中肽聚糖结构导致了对不同毒素吸附的差异。酵母菌细胞中葡聚糖、几丁质和甘露聚糖决定了真菌毒素的吸附效果。邵春山等(2023)^[35]从普洱茶叶分离出毕赤酵母菌 MC-1, 该菌具有耐酸、耐盐、耐胆盐的特性; 对 1 mg/L 呕吐毒素液的脱毒率为 54.76%, 该菌株与含 1 mg/kg 呕吐毒素的豆粕共同发酵 48 h 后, 脱毒率达到 46.79%。吸附机制主要是由真菌毒素与细胞壁中活性成分形成氢键、疏水作用和离子作用, 为真菌毒素提供了多种吸附中心。虽然细胞壁的结构和化学组成均在吸附过程中起着重要的作用, 但由于结构和成分的复杂性, 具体吸附机制仍需深入研究。

微生物降解法是借助微生物发酵过程直接将真菌毒素转化为低毒或无毒的代谢产物。微生物

降解菌具有反应温和、不吸附营养物质和特异性强的特点。Chen 等(2022)^[36]从天然发酵泡菜中筛选出解淀粉芽孢杆菌 WF2020, 该菌在 pH 为 8.0 条件下, 能够有效降解 8 mg/L 的 AFB₁; 此外, 淀粉芽孢杆菌 WF2020 抑制了 10 个黄曲霉毒素通路基因和 2 个转录因子 (alfR 和 alfS) 的表达, 表明解淀粉芽孢杆菌 WF2020 可能抑制了 AFB₁ 的合成。Fang 等(2020)^[37]发现黑曲霉 RAF106, 在初始 pH 值为 4~10 和培养温度为 25~45 °C 的条件下, 该菌仍能降解 AFB₁, 优良耐热性的细胞内酶或蛋白质能够将 AFB₁ 降解为低致突变性或无致突变性的代谢物; 基因组分析表明, 黑曲霉 RAF106 是一种安全且潜在有用的真菌, 缺乏毒力基因, 不合成真菌毒素。

生物降解酶主要借助微生物产生的酶降解真菌毒素。相对于微生物降解, 生物降解酶不会损坏饲料的感官品质, 且具有特异性、有效性和环境友好的特点, 但酶活性受温度和 pH 影响较大, 因此开发耐酸和耐温的降解酶是饲料行业迫切的需要。Zhou 等(2020)^[38]从白腐真菌 *Cerrena unicolor* 6884 中纯化并鉴定了一种新的能催化 AFB₁ 降解的漆酶, 在 pH 7.0、45 °C、漆酶孵育 24 h 条件下, AFB₁ 的降解率为 94%; Lac 2 的稳定性和 AFB₁ 在较高 pH 值下的显著降解表明饲料酶在动物肠道中的潜在适用性。需要关注的是生物降解酶产量偏低, 需要通过基因工程技术进行体外表达和定向进化, 以此提升酶的产量和性能。

在评估生物脱毒法在饲料中的应用效果方面: 石楠等(2022)^[39]评估了三种蜡样芽孢杆菌对真菌毒素超标的玉米籽粒的脱毒能力, 当 TD-1 蜡样芽孢杆菌添加量为 5% 时, 玉米籽粒耗氧发酵 48 h 后, AFB₁ 和 DON 脱毒率分别达到了 67.59% 和 73.03%; 当 TD-1 蜡样芽孢杆菌添加量为 10% 时, 发酵 48 h 后 ZEN 脱毒率达到 65.71%; 发酵脱毒过程中除玉米籽粒中可溶性碳水化合物含量降低外, 对其他营养成分无明显影响。此外, 高捷等(2023)^[40]研究表明, 与对照组相比, 在母猪饲料中联合添加生物降解酶和酵母细胞壁, 母猪产健仔数提高 4.52%, 仔猪日增重显著提高, 表明生物酶和吸附剂联合使用可缓解真菌毒素对

动物的危害。

3 研究展望

生物技术是推动现代农业产业发展的核心动力，我国生物饲料产业正在迅猛发展，笔者所在研究团队近些年在多菌种协同发酵饲料资源开发方面做了系列研究工作，建立高品质发酵棉籽蛋白^[41]、发酵菜籽粕^[42]、酶解小麦蛋白^[10]、发酵麦麸^[43]等产品的生产工艺，其中饼粕中主要内源毒素生物脱除率达 90% 以上。生物发酵可以推动饲料工业进步，应用前景广阔，但在生产应用中存在以下问题：（1）我国尚未建立严格的发酵饲料监测体系，不同发酵产品生产和评价缺乏行业指导标准。（2）发酵饲料的储存和添加方式仍有待研究，应在减少烘干成本的同时实现添加效果。（3）生物脱毒技术仍需筛选安全稳定高效的降解菌株和毒素降解酶，实现“菌、酶、吸附剂”联合脱毒的产业化应用。（4）加快气体菌体蛋白等颠覆性技术的低成本大规模生产技术攻关，推进其他生物发酵技术的示范推广应用。

参考文献：

[1] 宣秋希, 乔琳, 侯晓林, 等. 发酵棉粕的工艺研究及其在动物生产中的应用[J]. 饲料工业, 2021, 42(18): 29-35.
XUAN Q X, QIAO L, HOU X L, et al. Fermentation technology of fermented cottonseed meal and its application in animal production[J]. Feed Industry, 2021, 42(18): 29-35.

[2] 范洪岩, 杨瑞飞, 刘晓峰, 等. 酒精发酵副产物生产微生物发酵饲料工艺初探[J]. 酿酒, 2023, 50(1): 130-133.
FAN H Y, YANG R F, LIU X F, et al. Preliminary study on the production of microbial fermented feed from alcohol fermentation by-products[J]. Liquor Making, 2023, 50(1): 130-133.

[3] 李国祥, 万发春, 沈维军, 等. 秸秆发酵饲料添加剂研究进展[J]. 养殖与饲料, 2022, 21(9): 62-66.
LI G X, WAN F C, SHEN W J, et al. Research progress of straw fermentation feed additive[J]. Animals Breeding and Feed, 2022, 21(9): 62-66.

[4] 林萌萌, 刘玉, 郑爱华, 等. 全株杂交构树发酵饲料对育肥猪肌肉氨基酸含量及组成的影响[J]. 饲料研究, 2023, 46(1): 29-32.
LING M M, LIU Y, ZHENG A H, et al. Effects of whole plant hybrid broussonetia papyrifera fermented feed on amino acid content and composition in muscle of fattening pigs[J]. Feed Research, 2023, 46(1): 29-32.

[5] 高鹏翔, 潘予琮, 蒋林树, 等. 饲用豆粕减量替代技术的应用

及新型蛋白质饲料的开发前景[J]. 动物营养学报, 2023, 35(3): 1433-1443.
GAO P X, PAN Y C, JIANG L S, et al. Application of alternative technology for soybean meal reduction for feed and development prospect of new protein feed[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(3): 1433-1443.

[6] 阮栋, 刘建高, 陈伟, 等. 发酵饲料对蛋鸭产蛋性能、蛋品质、肠道消化酶活性及免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(12): 5740-5749.
RUAN D, LIU J G, CHEN W, et al. Effects of fermented feed on laying performance, egg quality, intestinal digestive enzyme activities and immune function of laying ducks[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(12): 5740-5749.

[7] 刘闰, 赵国先, 刘观忠, 等. 菌酶协同发酵饲料对蛋鸡生产性能、养分表观消化率和粪中氨气排放的影响[J]. 饲料研究, 2022, 45(18): 29-33.
LIU R, ZHAO G X, LIU G Z, et al. Effect of fermented feed by microbial cooperating with enzyme on production performance, nutrient apparent digestibility and ammonia excretion in fecal of laying hens[J]. Feed Research, 2022, 45(18): 29-33.

[8] GUI D, LIU W, SHAO X, et al. Effects of different dietary levels of cottonseed meal protein hydrolysate on growth, digestibility, body composition and serum biochemical indices in crucian carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. Animal Feed Science and Technology, 2010, 156, 112-120.

[9] 帖余, 李丽, 刘军, 等. 菌酶协同处理对发酵菜粕的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45, 117-122.
TIE Y, LI L, LIU J, et al. Effects of cooperation of bacteria and enzyme on fermented rapeseed meal[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45, 117-122.

[10] FANG J, YORDAN M, DENG C J, et al. Effects of dietary enzymolysis products of wheat gluten on the growth performance, serum biochemical, immune, and antioxidant status of broilers[J]. Food and Agricultural Immunology, 2017, 28(6): 1155-1167.

[11] 龚阿琼, 高震, 陈敬帮, 等. 不同酶制剂对豆粕中抗原蛋白的影响[J]. 中国饲料, 2019, 23.
GONG A Q, GAO Z, CHEN J B, et al. The influence of different enzyme preparation of antigen protein in soybean meal[J]. China Feed, 2019, 23.

[12] ISLAM S M, LOMAN A A, JU L K. High monomeric sugar yields from enzymatic hydrolysis of soybean meal and effects of mild heat pretreatments with chelators[J]. Bioresource technology, 2018, 256, 438-445.

[13] 杨森, 段旭磊, 梁婷婷, 等. 同步酶解发酵瞬时弹射式蒸汽爆破玉米秸秆生产生物饲料研究[J]. 饲料研究, 2019, 42(5): 67-72.
YANG S, DUAN X L, LIANG T T, et al. Producing biological feedstuff by synchronous saccharification and fermentation process with instant catapult explosion pretreated corn straw[J]. Feed Research, 2019, 42(5): 67-72.

- [14] BRATOSIN B C, DARJAN S, VODNAR D C. Single cell protein: A potential substitute in human and animal nutrition[J]. Sustainability, 2021, 13(16): 9284.
- [15] SILIMAN J, NYGREN L, KAHILUOTO L, et al. Bacterial protein for food and feed generated via renewable energy and direct air capture of CO₂: Can it reduce land and water use[J]. Global Food Security, 2019, 22: 25-32.
- [16] 孙东立, 怀宝东, 李佩然. 玉米秸秆微生物固态发酵菌体蛋白饲料的工艺研究[J]. 现代化农业, 2021(7): 29-32.
SUN D L, HUAI B D, LI P R. Study on the technology of corn straw microbial solid state fermentation for bacterial protein feed[J]. Modernizing Agriculture, 2021(7): 29-32.
- [17] CAI T, SUN H, QIAO J, et al. Cell-free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide[J]. Science, 2021, 373(6562): 1523-1527.
- [18] NACKLER N, HEIJSTRA B D, RASOR B J, et al. Stepping on the gas to a circular economy: accelerating development of carbon-negative chemical production from gas fermentation[J]. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering, 2021, 12: 439-470.
- [19] GU X, LI Z, WANG J, et al. Fermented cottonseed meal as a partial replacement for soybean meal could improve the growth performance, immunity and antioxidant properties, and nutrient digestibility by altering the gut microbiota profile of weaned piglets[J]. Frontiers Microbiology, 2021, 12: 734389.
- [20] NIU J L, WEI L Q, LUO Y Q, et al. Fermented cottonseed meal improves production performance and reduces fat deposition in broiler chickens[J]. Animal Bioscience, 2021, 34(4): 680-691.
- [21] ALJUOBORI A, ISRUS Z, SOLEIMANI A F, et al. Response of broiler chickens to dietary inclusion of fermented canola meal under heat stress condition[J]. Italian Journal of Animal Science, 2017, 16: 546e51.
- [22] 顾方, 刘世龙, 李红胜, 等. 低蛋白质饲料中添加发酵菜籽粕对育肥猪生长性能和肉品质的影响[J/OL]. 动物营养学报: 1-12.
GU F, LIU S L, LI H S, et al. Effects of low protein diet supplemented with -fermented canola meal on growth performance and meat quality of finishing pigs[J/OL]. Chinese Journal of Animal Nutrition: 1-12.
- [23] DRAŽBO A, KOZŁOWSKI K, OGNIK K, et al. The effect of raw and fermented rapeseed cake on growth performance, carcass traits, and breast meat quality in turkey[J]. Poultry Science, 2019, 98(11): 6161-6169.
- [24] LV J, GUO L, CHEN B, et al. Effects of different probiotic fermented feeds on production performance and intestinal health of laying hens[J]. Poultry Science, 2022, 101(2): 101570.
- [25] 李俊玲, 孙延军, 杨智国, 等. 减抗替抗主力军“发酵饲料”的生产与应用[J]. 养殖与饲料, 2022, 21(2): 44-46.
LI L L, SUN Y J, YANG Z G, et al. Production and application of Fermented feed, as the main force of reducing and replacing antibiotic[J]. Breeding and Feed, 2022, 21(2): 44-46.
- [26] 赵娜, 杨雪海, 陈芳, 等. 豆粕酶发酵物对仔猪生长性能, 血清指标及肠道菌群结构的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28, 3962-3969.
ZHAO N, YANG X H, CHEN F, et al. Effects of soybean enzymatic fermentation product on growth performance, serum indices and intestinal microflora structure of piglets[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28, 3962-3969.
- [27] 王凯周. 棉粕酶解蛋白替代鱼粉对中华鳖稚鳖生长, 免疫及肠道功能的影响[D]. 南京农业大学, 2017.
WANG K Z. Effects of fish meal replacement with cottonseed meal protein hydrolysate on growth, immune capability and intestine function of juvenile Chinese soft-shelled turtle, *pelodiscus sinensis*[D]. NanJing Agriculture University, 2017.
- [28] 曲浩杰, 杨在宾, 李新新, 等. 混合型啤酒酵母粉对产蛋后期蛋鸡屠宰性能、胫骨强度和经济效益的影响[J]. 家禽科学, 2019(12): 3-6.
QU H J, YANG Z B, LI X X, et al. Effects of mixed brewer's yeast powder on slaughtering performance, tibia strength and economic benefits of laying hens in late laying period[J]. Poultry Science, 2019(12): 3-6.
- [29] 张大城, 洪玲玲, 刘碧凡, 等. 日粮添加白酒糟酿酒酵母培养物对断奶仔猪生长和肠道结构及功能的影响[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2022, 48(4): 474-482.
ZHANG D C, HONG L L, LIU B F, et al. Effects of adding *Saccharomyces cerevisiae* culture from distiller's grains in diet on growth, intestinal structure and function of weaned piglets[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 8(4):474-82.
- [30] ZHU S, GAO W, WEN Z, et al. Partial substitution of fish meal by *Clostridium autoethanogenum* protein in the diets of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*)[J]. Aquaculture Reports, 2022, 22.
- [31] MA S, WANG H, YANG J, et al. Effects of *Clostridium autoethanogenum* protein inclusion levels and processing parameters on the physical properties of low-starch extruded floating feed[J]. Aquaculture Reports, 2022, 23: 101030.
- [32] XU H, WANG L, SUN J, et al. Microbial detoxification of mycotoxins in food and feed[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(18): 4951-4969.
- [33] LUO Y, LIU X, YUAN L, et al. Complicated interactions between bio-adsorbents and mycotoxins during mycotoxin adsorption: Current research and future prospects[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 96: 127-134.
- [34] KOSZTIK J, MÖRTL M, SZÉKÁCS A, et al. Aflatoxin B1 and sterigmatocystin binding potential of lactobacilli[J]. Toxins, 2020, 12(12): 756.
- [35] 邵春山, 余祖华, 廖成水, 等. 一株毕赤酵母菌 MC-1 降解呕吐毒素、生物学特性及初步应用[J]. 中国饲料, 2023, 719(3):

- 37-43.
- SHAO C S, YU Z H, LIAO C S, et al. Degradation of deoxynivalenol by a strain of pichia pastoris MC-1, biological characteristics and preliminary application[J]. China Feed, 2023, 719(3): 37-43.
- [36] CHEN G, LIAO Z, XU C, et al. Detoxification of aflatoxin B1 by a potential probiotic bacillus amyloliquefaciens WF2020[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13.
- [37] FANG Q, DU M, CHEN J, et al. Degradation and detoxification of aflatoxin B1 by tea-derived aspergillus niger RAF106[J]. Toxins, 2020, 12(12):777.
- [38] ZHOU Z, LI R, NG T B, et al. A new laccase of Lac 2 from the white rot fungus Cerrena unicolor 6884 and Lac 2-mediated degradation of aflatoxin B1[J]. Toxins, 2020, 12(8): 476.
- [39] 石楠, 张桂杰. 不同蜡样芽孢杆菌对玉米籽粒中黄曲霉毒素B1、玉米赤霉烯酮和呕吐毒素脱毒效果及营养成分评价[J]. 饲料工业, 2022, 43(23): 38-43.
- SHI N, ZHANG G J. Effect evaluation of different bacillus cereus strains on aflatoxin b1, zearalenone and deoxynivalenol degradation and nutrient contents in com grains[J]. Feed Industry, 2022, 43(23): 38-43.
- [40] 高婕, 赵晓静, 张义奇, 等. 霉菌毒素脱毒降解酶对母猪生产性能的影响[J/OL]. 饲料研究, 2023(9):34-37.
- GAO J, ZHAO X J, ZHANG Y Q, et al. Effect of mycotoxin detoxification degrading enzyme on production performance of sows[J]. Feed Research, 2023(9): 34-37.
- [41] 宣秋希, 乔琳, 侯晓林, 等. 固态生料发酵棉籽粕菌种筛选及发酵工艺的研究[J]. 动物营养学报, 2022, 34(5): 3376-3391.
- XUAN Q X, QIAO L, HOU X L, et al. Screening of strain for solid-state fermentation of raw cottonseed meal and study on fermentation technology[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(5): 3376-3391.
- [42] 汪钰, 刘宽博, 李爱科, 等. 多指标综合加权法优化固态发酵菜粕品质研究[J]. 饲料工业, 2022, 43(12): 42-47.
- WANG Y, LIU K B, LI A K, et al. Study on optimizing the quality of solid-state fermented rapeseed meal by multi-index comprehensive weighting method[J]. Feed Industry, 2022, 43(12): 42-47.
- [43] AN J, SHI J, LIU K, et al. Effects of solid-state fermented wheat bran on growth performance, immune function, intestinal morphology and microflora in lipopolysaccharide-challenged broiler chickens[J]. Animals, 2022, 12, 1100. 