

文章编号:1005-3832(2026)02-0072-12

# 棉粕在水产饲料中的应用研究进展

任胜杰<sup>1,2</sup>, 龚思铭<sup>1,2</sup>, 刘春杰<sup>3</sup>, 刘正元<sup>1,4</sup>, 陈剑明<sup>1,2</sup>, 马先俊<sup>1,2</sup>

(1.塔里木大学生命科学与技术学院,新疆阿拉尔 843300;

2.塔里木盆地生物资源保护利用省部共建国家重点实验室培育基地,新疆阿拉尔 843300;

3.上海海洋大学农业农村部淡水种质资源重点实验室,上海 201306;

4.江苏海洋大学海洋科学与水产学院,江苏连云港 222005)

**摘要:**棉粕作为一种营养丰富的植物蛋白源在水产饲料中得到了较为广泛的应用,但同时因其含有棉酚等抗营养因子及氨基酸组成不平衡等因素,限制了其在水产饲料中的应用。在当前“豆粕减量替代”政策背景下,棉粕在水产饲料中的应用前景广阔,但游离棉酚的高效脱毒与膳食纤维含量的降低是制约棉粕在水产饲料中高值化利用的技术瓶颈。本文详细综述了棉粕在水产饲料中的应用现状,重点分析热处理、酶解、微生物发酵等脱毒技术在降解棉酚方面的效果与适用性,并比较了不同方法的成本-效益特征;进一步探讨了膳食纤维降解和氨基酸营养优化的技术路线,提出菌-酶联用策略在提高饲料利用效率和改善动物健康水平方面具有显著优势;综合分析棉粕对鱼粉和豆粕的替代潜力,并归纳了不同水产动物的耐受机制差异;最后指出,通过基因编辑创制低棉酚棉花品种、优化蛋白资源协同利用路径以及完善棉粕产业链调控体系,将是实现棉粕高值化利用的关键方向。本文可为推动棉粕在水产饲料中的绿色高效利用提供理论支持和实践路径。

**关键词:**棉粕;棉酚;膳食纤维;高值化利用

中图分类号:S963

文献标识码:A

## The Application and Research Progress of Cottonseed Meal in Aquatic Feeds

REN Shengjie<sup>1,2</sup>, GONG Siming<sup>1,2</sup>, LIU Chunjie<sup>3</sup>, LIU Zhengyuan<sup>1,4</sup>, CHEN Jianming<sup>1,2</sup>, MA Xianjun<sup>1,2</sup>

(1. College of Life Sciences and Technology, Tarim University, Alar 843300, China;

2. State Key Laboratory Incubation Base for Conservation and Utilization of Bio-Resource in Tarim Basin, Alar 843300, China;

3. Shanghai Ocean University, Key Laboratory of Freshwater Aquatic Genetic Resources, Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China;

4. College of Marine Science and Fisheries, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** As a nutrient-rich plant protein source, cottonseed meal has been widely used in aquatic feed. However, due to its anti-nutritional factors such as gossypol and unbalanced amino acid composition, the application of cottonseed meal in aquatic feed is limited. Under the current policy background of 'soybean meal reduction and replacement', cottonseed meal has a broad application prospect in aquatic feed, but the efficient detoxification of free gossypol and the reduction of dietary fiber content are the technical bottlenecks restricting the high-value utilization of cottonseed meal in aquatic feed. This paper systematically reviewed the application status of cottonseed meal in aquatic feed, focusing on the effect and applicability of detoxification technologies such as heat treatment, enzymatic hydrolysis and microbial fermentation in the degradation of gossypol, and compared the cost-benefit characteristics of different methods. The methods of dietary fiber degradation and amino acid nutrition optimization were further discussed, and it was proposed that the combination of bacteria and enzymes had significant advantages in improving feed utilization efficiency and animal health. In terms of application, the substitution potential of cottonseed meal for fish meal and soybean meal was comprehensively analyzed, and the differences in tolerance mechanisms of different aquatic animals were summarized. Finally, it is proposed that creating low gossypol cotton varieties through gene editing, optimizing the collaborative utilization path of protein resources and

收稿日期:2025-04-04

基金项目:新疆维吾尔自治区“天池英才”青年项目(TCYC2025-525307011);塔里木大学胡杨英才项目(博士人才科研启动金、TDZKBS202540);江苏省自然科学基金(BK20210943);新疆生产建设兵团第一师阿拉尔市科技计划项目(2025NY08);江苏省水产动物营养重点实验室开放课题(KJS2228).

作者简介:任胜杰(1989-),博士,副教授,研究方向为水产动物营养与饲料.E-mail: Renshengjie1990@163.com

通信作者:马先俊(1991-),硕士,实验师,研究方向为水产动物营养与饲料.E-mail: Maxianjun1213@163.com

improving the regulation system of cottonseed meal industry chain will be the key directions to realize the high-value utilization of cottonseed meal. This paper provides theoretical support and practical path for promoting the green and efficient utilization of cottonseed meal in aquatic feed.

**Key words:** cottonseed meal; gossypol; dietary fiber; high-value utilization

棉花是世界最主要的经济作物之一<sup>[1]</sup>,我国是世界产棉大国。据 2025 年《中国统计年鉴》数据显示<sup>[2]</sup>,2024 年全国棉花种植总面积达  $2.838 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ,其中新疆种植面积高达  $2.448 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。棉花(皮棉)总产量为  $6.160 \times 10^6 \text{ t}$ (图 1),新疆产量为  $5.866 \times 10^6 \text{ t}$ 。棉籽是棉花的种子,在籽棉加工成皮棉的过程中产生的主要副产物,产量巨大。我国棉籽资源丰富,年产量约  $8 \times 10^6 \text{ t}$ ,其中新疆产量约为  $7 \times 10^6 \text{ t}$ <sup>[3]</sup>。棉粕又称棉籽粕,是棉籽经物理压榨处理获取棉籽油后得到的棉饼,生产中通常会再经过有机溶剂浸出工艺将残油分离,得到一种微红或黄色的颗粒状物质,是一种营养丰富的植物蛋白源。在当前国家关于“豆粕减量替代”政策背景下,棉粕资源优势明显,在水产饲料中的应用前景广阔。但由于其含有抗营养因子及氨基酸组成不平衡等因素,限制了棉粕在水产饲料中的大量使用<sup>[4,5]</sup>;替代鱼粉达到 50% 及以上则会对金鲟(*Trachinotus ovatus*)肠道微生态和营养吸收能力产生不良影响<sup>[6]</sup>。因此,亟须优化棉粕处理工艺,降低抗营养因子和氨基酸组成不平衡带来的限制,提升棉粕在水产饲料中高值化利用水平。

## 1 棉粕的基础营养价值

棉粕的价格适宜,其有效成分类似于豆粕,具体营养成分如表 1 所示。通常棉粕产品按游离棉酚(free gossypol, FG)的含量范围分为低酚棉粕( $\text{FG} \leq 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),中酚棉粕( $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} < \text{FG} \leq 750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),及高酚棉粕( $750 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \leq \text{FG} \leq 1\,200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。需特别说明:上述分档仅用于研究比较,不等同于国家/行业标准的产品分级与合格判定。我国现行的产品标准 GB/T 21264-2007 属于“饲料用棉籽粕”的质量与检验通用要求,引用 GB/T 13086 测定 FG;而卫生限量层面的数值要求归属 GB 13078-2017(按“棉籽加工产品/其他饲料原料”等类别给出 FG 最高限量)。超过相应最高限量的样品不符合卫生标准,原则上不进入饲料链,若为工艺研究样品,应单列为“超限(不合规,仅用于工艺验证)”<sup>[7]</sup>。棉粕产品质量可靠且供应稳定,是一种良好的饲用蛋白源,在畜禽及水产饲料中得到较为广泛的应用。然而由于棉粕中通常含有较高含量的棉酚、膳食纤维(DFs)、单宁、植酸、环丙烯脂肪酸等抗营养因子及不平衡的氨基酸组成等因素,大大降低

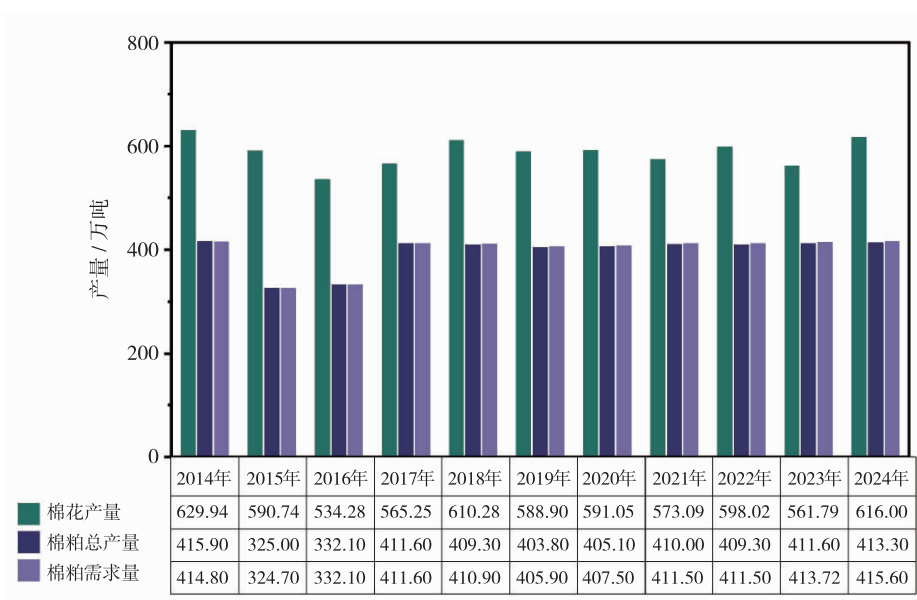


图 1 2014—2024 年中国棉花产量、棉粕产量及棉粕市场需求量<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Market demand of cotton yield, cottonseed meal yield and cottonseed meal in China from 2014 to 2024

了养殖动物对其利用率,限制了棉粕在饲料中的充分应用<sup>[8]</sup>。

## 2 棉粕高值化利用研究进展

### 2.1 降解棉粕中游离棉酚的方法

#### 2.1.1 通过蒸煮、膨化、辐射等技术降低游离棉酚

生产中最常用的降低 FG 的方法有热处理、挤压膨化、旋液分离、辐射技术等。热处理法是利用蒸煮或蒸汽破坏棉籽色素腺体,使 FG 释放出来,转变成结合棉酚。此法易导致高温下粗蛋白易与 FG 发生美拉德反应,降低蛋白纯度,且加热能耗较大,成本较高<sup>[9]</sup>。如挤压膨化法利用挤压膨化过程中的高温热降解、机械剪切破坏、湿热反应以及分子间结合等多重机制协同作用,有效降低棉粕中游离棉酚的含量。此法简便易操作,且不产生废水,但挤压温度难以确定,且易导致部分蛋白质变性、氨基酸降解、短链脂质挥发、维生素与热敏性成分损失,降低棉粕总体营养价值。旋液分离法脱毒效果较好,可使棉酚含量降低到 0.02% 以下,但所用设备复杂,成本较高,不易推广<sup>[10]</sup>。辐射技术对棉粕营养物质的破坏较小,辐射处理后不仅可以降低棉酚含量,还

可以减少棉粕中的微生物,但需要采取较高的安全防护措施<sup>[11]</sup>。

#### 2.1.2 通过外源添加特定酶降解游离棉酚

在棉粕饲料中添加对棉酚有降解效应的酶,也是一种有效的降低游离棉酚的方法,此法相比于其他方法更加安全可控。Wang 等<sup>[12]</sup>用 100 mg·kg<sup>-1</sup> 棉酚和漆酶催化后的产物饲喂小鼠,发现经过漆酶催化处理能降低棉酚对肝脏及生殖器官的毒性。魏婷柳等<sup>[13]</sup>研究表明,漆酶 BmLac 能有效降解棉酚,不加介体 55 °C 反应 2 h,该酶对棉酚的降解率可达 94.57%;在以 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸(ABTS)为底物时,55 °C 反应 2 h 对棉酚的降解率高达 98.73%。采用棉酚降解酶进行棉粕的酶解脱毒可有效地降低游离棉酚的含量,降解率可达 92.67%<sup>[14]</sup>。漆酶 CcLac9 能够有效降解棉酚,最适 pH 为 7.0,在 37 °C 条件下,1.0 U·mL<sup>-1</sup> CcLac9 能将 10 μg·mL<sup>-1</sup> 的棉酚在 2 h 内完全降解<sup>[15]</sup>。与物理及化学等脱毒方法相比,生物酶解脱毒方法无化学残留,相对更加绿色安全,并且无需复杂的设备和大量的能源消耗。但酶制剂成本与活性稳定性受温度、pH、底物浓度等影响<sup>[13-15]</sup>;放大应用需考虑固定

表 1 棉粕主要营养成分相关国家/行业规范说明(干基)

Tab. 1 Main nutritional components of cottonseed meal related national/industrial specifications (dry basis)

指标项目 item	一级 grade I	二级 grade II	三级 grade III	四级 grade IV	五级 grade V	规范口径 / 说明 specification/notes
粗蛋白 CP	≥50.0	≥47.0	≥44.0	≥41.0	≥38.0	
粗纤维 CF	≤9.0	≤12.0	≤14.0	≤14.0	≤16.0	
水分 MC	≤12.0	≤12.0	≤12.0	≤12.0	≤12.0	GB/T 21264-2007
粗灰分 ASH	≤8.0	≤8.0	≤9.0	≤9.0	≤9.0	
粗脂肪 EE	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	≤2.0	
干物质 DM			90.0			常规养分指标,随批次波动
无氮浸出物 NFE			26.3			参考值
中性洗涤纤维 NDF			22.5			参考值
酸性洗涤纤维 ADF			15.3			参考值
淀粉 starch			1.5			参考值
钙 Ca			0.30			参考值
总磷 P			1.24			参考值
有效磷 A-P			0.31			参考值

注:数据来源于 GB/T 21264-2007 和中国饲料成分及营养价值表(2024 年第 35 版)<sup>[7]</sup>。DM,干物质;CP,粗蛋白;EE,乙醚浸出物;CF,粗纤维;NFE,无氮浸出物;Ash,灰分;NDF,中性洗涤纤维;ADF,酸性洗涤纤维;Ca,钙;P,磷;A-P,有效磷。

Notes: The data is sourced from GB/T 21264-2007 and Chinese Feed Ingredients and Nutritional Value Table (2024, 35th Edition). DM, dry material; CP, crude protein; EE, ether extract; CF, crude fiber; NFE, nitrogen-free extract; Ash, ash content; NDF, neutral detergent fiber; ADF, acid detergent fiber; Ca, calcium; P, phosphorus; A-P, available phosphorus.

化、重复利用与在线失活控制。

### 2.1.3 通过微生物发酵降解游离棉酚

微生物发酵技术是一种有效降低棉粕中 FG 含量的方法,这种方法具有安全性高、生产成本低以及综合效益好的特点,已经成为近年来棉粕脱毒的研究热点。目前,运用较为广泛的是固态发酵法,将微生物接种到棉粕上,在其生长繁殖的过程中会产生酶以及一些其他物质,这些物质可以有效地降解棉酚,进而增加棉粕的营养价值<sup>[16]</sup>。Sun 等<sup>[17]</sup>使用枯草芽孢杆菌对棉籽饼进行发酵,其脱毒率达到了 61.91%。张莉等<sup>[18]</sup>以棉酚为唯一碳源,报道了一株具有较好降解棉酚能力的乳酸片球菌,对棉酚的脱毒率达 40%。张丛等<sup>[19]</sup>筛选到一株枯草芽孢杆菌 M-9,该菌株能高效降解棉籽饼粕中的棉酚,其棉酚降解率达到 94.74%。张琛等<sup>[20]</sup>以棉田腐殖质土壤为材料,以醋酸棉酚为筛选基质,筛选出了一株戊糖片球菌,该菌株可清除棉粕中 87.15%FG 和 22.83%BG。杨文婷<sup>[21]</sup>异源表达棉铃虫降解酶后纯化,棉粕的脱毒率达到 89.15%。棉铃虫(*Helicoverpa armigera*)是棉花生长过程中重要的钻蛀性害虫,主要蛀食棉花的花和嫩叶,其肠道内生细菌中可能存在对棉酚具有较高降解能力的菌株。侯敏等<sup>[22]</sup>从饲喂棉粕饲料的棉铃虫肠道中分离出 15 株菌株,其中部分菌株对棉酚的降解率最高可达 87.04%。此外,还有一些菌株也可以进行协同发酵。张庆华等<sup>[23]</sup>将热带假丝酵母、拟内孢霉、植物乳杆菌按照 3 : 2 : 1 配比,棉粕、玉米粉、麸皮按照 6 : 2 : 2 配比时,脱毒率最高,棉酚去除率为 85.30%。洪振<sup>[24]</sup>研究发现,当棉粕中添加混合菌(乳酸菌:枯草芽孢杆菌:酵母菌=1 : 2 : 2)进行发酵时,棉粕的脱毒率达 85.11%。微

生物发酵技术去除棉酚是一种高效环保且能提升原料营养价值的脱毒方法。但其存在一定局限性:棉酚降解效果受菌株、含水率、温度与通风等工艺变量影响;批次稳定性与工艺放大需要验证,需做好菌株安全性与残留控制。不同脱毒方法的优缺点见表 2。

## 2.2 降解棉粕中膳食纤维的方法

膳食纤维(DFs)的成分复杂,包含了非淀粉多糖(NSP)以及其他成分如抗性低聚糖和抗性淀粉、木质素等<sup>[26]</sup>。NSP 为植物中除淀粉外的多糖总称,是 DFs 的最主要组成成分。作为饲料中的常见抗营养成分,NSP 种类与含量在各类饲料原料中差异显著,给饲料配方的精准设计带来了显著挑战。植物粕中的 NSP 降解手段有多种,常见的有酶解法、微生物发酵法和物理法等。

### 2.2.1 纤维素酶的酶解处理

酶解法是当前植物粕 DFs 降解的主要手段。根据原料 NSP 谱系投加纤维素酶、木聚糖酶、 $\beta$ -葡聚糖酶、甘露聚糖酶、果胶酶等,水解  $\beta$ -1,4 或  $\beta$ -1,3 糖苷键,降低黏度并释放被细胞壁包裹的营养<sup>[27]</sup>。研究表明,木聚糖酶和甘露聚糖酶在适当的浓度下,对棉粕中的可溶性和不可溶性 NSP 都有显著的降解效果<sup>[28]</sup>。酶制剂的使用不仅可以提高饲料的利用率,还能减少动物肠道内有害微生物的生长,改善肠道健康。黄亚宽<sup>[29]</sup>在猪日粮中添加 NSP 酶,发现可以降低 NSP 的不利影响,并能改善营养物质的消化率。王纪亭等<sup>[30]</sup>研究表明,添加 NSP 酶可显著提高奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)的白细胞吞噬活性和血清的杀菌能力,从而改善奥尼罗非鱼的免疫功能。在奥尼罗非鱼饲料中

表 2 棉粕的不同脱毒方法成本效益对比表

Tab. 2 Cost-benefit comparison of different detoxification methods of cottonseed meal

方法 method	优点 advantage	缺点 disadvantage	参考文献 reference
物理法 physical method	操作简单,无废弃物	处理过程中易破坏营养成分,且低成本效果差	[10]
化学法 chemical process	操作简便,成本较低,脱毒效果稳定,且易于控制	化学试剂可能与其他营养物质反应,且可能产生残留和其他有毒物质,造成污染	[25]
酶解法 enzymolysis	降解效率高、专一性强、无污染,且反应条件温和	酶制剂的生产成本相对较高,且酶活性不稳定,易受到温度、pH 等因素的影响	[12,15]
微生物发酵法 microbiological fermentation	环保无污染、脱毒效果好且可通过生物代谢改善饲料的营养和适口性	技术不够成熟,处理效果不稳定,受多种环境因素影响	[22,24]

添加 0.02% 的液体 NSP 酶制剂,罗非鱼特定生长率提高 10.6%,饵料系数降低 16.1%<sup>[31]</sup>。陆娟娟等<sup>[32]</sup>在赤眼鳟(*Squaliobarbus curriculus*)饲料中添加 NSP 酶,鱼体增重率显著提高 16.86%,饲料系数显著降低 12.85%,同时粗蛋白、粗纤维的表现消化率显著提高。此外,饲料中添加 NSP 酶可提高黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)幼鱼前肠皱襞高度,在一定程度上改善前肠组织结构,其中以 50 mg·kg<sup>-1</sup> 添加水平效果最好<sup>[33]</sup>。酶解法的反应条件温和,在常温常压下即可进行,降低了能耗和成本;对环境的影响小,不会产生有害物质或废弃物,符合绿色生产的要求。同时,酶解法具有专一性和高效性,能够显著提高饲料的消化吸收率。但是酶解效果易受温度、pH、底物浓度和反应时间等多种因素的影响,因此需要严格控制酶解反应条件以获得最佳处理效果。

### 2.2.2 微生物发酵处理

以枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、乳酸菌、酵母等为产酶菌株,在适宜含水率与通风条件下固态发酵,分泌纤维素酶、木聚糖酶、甘露聚糖酶等降解 NSP,同时产生有机酸与小分子肽,改善适口性与肠道健康。研究表明:芽孢杆菌在发酵过程中会产生多种酶类,将饲料原料中不易被吸收的植源性物质分解成小分子肽和游离氨基酸,降低饲料中纤维素和半纤维素的含量<sup>[34]</sup>。韩伟等<sup>[35]</sup>用枯草芽孢杆菌、酿酒酵母固态发酵棉粕后检测其营养成分的变化,发现经 60 h 发酵和酶解后的棉粕粗纤维含量降低约 12.7%。微生物发酵法降低饲料中非淀粉多糖(NSP)含量,是一种高效、环保且可持续的方法,对于提高饲料品质、优化动物生产性能具有重要意义。

### 2.2.3 其他处理方法

物理处理是指通过加热、高压等物理方法,可以破坏棉粕中的细胞壁结构,使 NSP 更容易被酶解或发酵处理。但这种方法可能会破坏部分营养成分,因此需谨慎使用。化学处理是指采用酸处理或碱处理等方法,可以在一定程度上降低棉粕中的 NSP 含量。但化学处理可能会导致有害物质残留,影响饲料的安全性,因此在实际应用中需要严格控制处理条件。此外,近年来菌酶联用的方法也得到广泛关注,该技术使用微生物发酵释放植物胞内营养物质,然后添加 NSP 酶将释放出的 NSP 进行酶解,从而实现 NSP 的高效降解<sup>[36]</sup>。易兰兰等<sup>[37]</sup>采

用黄孢原毛平革菌、纤维素酶和木聚糖酶联合发酵玉米秸秆 21 d 后,其中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和酸性洗涤木质素分别降低了 23.4%、20.13% 和 7.68%,且发酵效果显著优于菌酶单独处理。该方法降解优势明显,但菌酶发酵效率受菌种、添加比例和温度等多种因素影响,因此对于菌酶协调发酵的条件仍需进一步探索<sup>[38]</sup>。

### 2.3 棉粕氨基酸的平衡技术

由于棉粕中一些必需氨基酸(如赖氨酸)的含量较低且利用率差,可通过在饲料中直接添加这些必需氨基酸的补充剂来平衡其氨基酸组成。如在含有 7.5% 棉粕的日粮中添加 0.75% 的赖氨酸,可有效提高凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)<sup>[39]</sup>肝胰腺的抗氧化能力,改善组织形态健康,降低了肝胰腺受损的风险;在凡纳滨对虾中,采用包被蛋氨酸-蛋氨酸(二肽)将日粮蛋氨酸调至 0.69%~0.82% 时,鱼粉含量 0~6% 的配方即可获得最佳生产与经济性<sup>[40]</sup>。在含有 25% 棉粕的日粮中添加 2% 赖氨酸和 0.025% 的混合酶制剂可以显著提高蛋鸡的生产性能<sup>[41]</sup>。在虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)<sup>[42]</sup>中,仅补充赖氨酸+蛋氨酸即可使虹鳟无鱼粉日粮的生长与全鱼体蛋白达到“补充必需氨基酸”水平。在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)<sup>[43]</sup>中,补充赖氨酸+蛋氨酸允许粗蛋白从 32% 降到 30% 且减少氮排。此外,在配制水产饲料时,通常将棉粕与其他氨基酸组成较为平衡的蛋白质原料(如鱼粉、豆粕、花生粕等)进行合理搭配,以弥补棉粕中部分氨基酸的不足,达到饲料氨基酸组成的适度平衡,在应用中常以少量替代鱼粉或豆粕实现<sup>[44]</sup>。

## 3 棉粕在水产饲料中的应用

### 3.1 棉粕对水产饲料中鱼粉的减量替代研究

棉粕是一种优质植物蛋白源,已有相关研究证明了棉粕适量替代鱼粉在水产饲料中的可行性,棉粕对水产动物的生长和生理影响详见表 3。王托<sup>[45]</sup>研究表明,用棉粕替代 8% 的鱼粉投喂凡纳滨对虾,发现对虾的增重率和特定生长率达到最高。Mbahinzireki 等<sup>[46]</sup>用棉粕替代罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)饲料中的鱼粉,发现当棉粕的替代量不超过基础鱼粉的 50% 时无不良影响。黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)<sup>[47]</sup>幼鱼饲料中用 20% 棉粕替代部分鱼粉,对黑鲷的消化酶活性和肠道组织结

表 3 棉粕替代鱼粉对水产动物的生长和生理影响研究

Tab. 3 Effects of replacing fish meal with cottonseed meal on growth and physiology of aquatic animals

物种 species	添加量 addition amount	生理影响 physiological effects	参考文献 reference
小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	12%、24%、36%、48%、60%替代鱼粉	高含量棉粕组存活率、WGR 以及 SGR 等生长指标降低;肠道细胞受损,出现胞内空泡	[57]
凡纳滨对虾 <i>Litopenaeus vannamei</i>	替代 40%鱼粉 替代 8%鱼粉 替代 40%鱼粉	随着棉粕替代水平的提高,对虾的增重率、特定生长率均下降 增重率和特定生长率均达到最高 增重率升高,但抗病力显著性降低	[69] [45] [70]
黑鲷 <i>Acanthopagrus schlegelii</i>	20%替代鱼粉	对消化酶活性和肠道组织结构无不良影响	[47]
金鲳 <i>Trachinotus ovatus</i>	20%~40%替代鱼粉	不影响肌肉中营养物质的生成	[48]
克氏原螯虾 <i>Procambarus clarkii</i>	棉粕替代 25%以上的鱼粉	降低生长性能和饲料利用率,诱导肝胰腺氧化应激,并影响血清和肌肉中的一些参数,低于 25%则无显著影响	[71]
尼罗罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i>	替代 66.7%鱼粉	增重降低 10.5%,FCR 升高 5.8%,血清转氨酶升高	[72]
乌苏里拟鲿 <i>Pseudobagrus ussuriensis</i>	按 0、10%、20%、30%、40%、50%、60%的比例逐步替代鱼粉	≥40%替代(游离棉酚≥317 mg·kg <sup>-1</sup> )会显著抑制生长、降低免疫与抗氧化能力,并增加细菌感染死亡率	[73]

构无不良影响。在卵形鲳鲹(*Trachinotus ovatus*)<sup>[48]</sup>饲料中用棉粕替代鱼粉观察对肌肉的影响,发现用 20%和 40%的棉粕替代鱼粉,不会影响金鲳的肌肉营养物质的组成,20%替代组与 40%替代组金鲳的粗蛋白与对照组无显著变化,但当替代比例达到 60%时,粗脂肪含量显著降低。Blom 等<sup>[49]</sup>研究发现,成年虹鳟饲料中棉粕可以完全替代鱼粉而对其生长没有影响,但雌性虹鳟的繁殖性能会有所下降。苗玉涛等<sup>[50]</sup>使用脱酚棉粕替代鱼粉探究对卵形鲳鲹肌肉品质的影响,结果显示,在卵形鲳鲹幼鱼饲料中,利用脱酚棉粕替代 20%鱼粉时,不会降低肌肉品质;但随着饲料中脱酚棉粕替代鱼粉的比例的增加,会加速蛋白质的降解,影响肌细胞的合成,从而导致肌肉硬度下降。杨霞等<sup>[51]</sup>的研究表明,不同水平棉粕和发酵棉粕替代鱼粉对中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*)全蟹水分、粗脂肪和粗灰分含量均无显著影响,但当普通棉粕替代鱼粉含量为 40%时,幼蟹的成活率低于 50%。以上研究表明,目前棉粕对饲料中的鱼粉只能进行适量部分替代,且其适宜替代比例和基础配方中的鱼粉及其他动物性蛋白源的比例直接相关。

### 3.2 棉粕对水产饲料中豆粕的减量替代研究

近年来,由于受多种因素影响豆粕价格持续高涨,国家因此推出《饲用豆粕减量替代三年行动方

案》。在此背景下饲料中豆粕替代研究被广泛开展,相关研究也已证明水产饲料中棉粕替代豆粕的可行性(表 4)。在斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)<sup>[52]</sup>饲料中添加 7%和 14%的棉粕用以代替基础饲料中 25.8%和 51.7%的豆粕,发现对斑点叉尾鲷的增重率等生长指标没有显著影响,对血清甘油三酯等脂类代谢生化指标亦没有显著影响;当棉粕替代 10%及以下的豆粕时,不会对斑点叉尾鲷的生长性能及形体指标产生显著的负面影响;但当棉粕添加比例高于 15%则会出现明显不良影响<sup>[53]</sup>。Yue 等<sup>[54]</sup>试验结果表明,在杂交罗非鱼幼鱼中用 33.76%棉粕替代对照饲料中 60%的豆粕时,鱼体质量增长率、饲料系数与对照组均无显著差异。在奥尼罗非鱼养殖实验中,当饲料中棉粕和菜粕的比例超过 52%时,会对罗非鱼的生产性能产生不良影响<sup>[55]</sup>。庞栋等<sup>[56]</sup>研究表明,用发酵棉粕替代 20%~80%的豆粕饲喂中华绒螯蟹幼蟹,发现对幼蟹的生长性能无显著影响,但替代比例为 20%时生长性能最好,以肝胰腺和肠道健康为评价指标,发酵棉粕替代豆粕比例不宜超过 40%。在小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)<sup>[57]</sup>幼鱼饲料中添加高含量的棉粕会导致存活率、增重率以及特定生长率等生长指标降低,肠道细胞受损,出现胞内空泡;但低剂量的棉粕对于小黄鱼幼鱼的影响仍然在可接受范围内。因此,建议小黄鱼幼鱼饲料

表 4 棉粕替代豆粕对水产动物的生长和生理影响的研究

Tab. 4 Effects of replacing soybean meal with cottonseed meal on growth and physiology of aquatic animals

物种 species	添加量 addition amount	生理影响 physiological effects	参考文献 reference
斑点叉尾鲟 <i>Ictalurus punctatus</i>	替代 7%、14% 豆粕	增重率等生长指标无显著影响,对血清 TG 等脂肪生化指标没有显著影响	[52]
	高于 15% 替代豆粕	对其生长性能产生负面影响	[53]
奥尼罗非鱼 <i>Oreochromis niloticus</i> × <i>O. aureus</i>	替代 60% 豆粕	鱼体质量增长率、饲料系数与对照组无显著差异	[54]
	超过 52% 豆粕	生产性能产生不利影响	[55]
中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>	替代 20% 豆粕	生产性能较好,无不良影响	[56]
草鱼 <i>Ctenopharyngodon idella</i>	使用棉粕完全替代 32% 大豆浓缩蛋白	WGR 下降 25%,FCR 上升 33%;肠道屏障损伤,消化酶活性降低以及菌群紊乱	[4]
	替代 5% 豆粕	对增重率、饲料系数、肥满度均没有影响;补充赖氨酸能显著提高草鱼的生长性能,并降低饲料系数	[44]

中棉粕的添加量不应超过 36%。在草鱼饲料中,用 16.64% 的棉粕替代饲料中 35% 的豆粕,对草鱼幼鱼生长、饲料利用率无负面影响<sup>[58]</sup>。李洁等<sup>[59]</sup>研究发现,脱酚棉籽蛋白替代饲料中 100% 的豆粕不会对凡纳滨对虾的生长和饲料利用产生显著影响,但会影响实验虾的消化、免疫应答以及肠道健康。综上所述,目前常规棉粕、发酵棉粕和脱酚棉粕能够替代水产饲料配方中的部分豆粕,其替代比例和基础配方中的豆粕比例、动物蛋白水平及水产动物的食性关系密切。

### 3.3 水产动物对棉粕抗营养因子耐受性差异的成因分析

现有研究表明,水产动物对棉粕中抗营养因子的耐受差异并非由“食性”或“种类”单一决定,而是由物种特异的 FG 解毒能力、DFs 发酵与胆汁酸代谢、肠道微生物及棉粕的加工条件等多因素共同作用。在相近配方与 FG 水平下,草 / 杂食性鱼类的平均耐受范围相对较宽,而典型肉食性鱼类与甲壳类更易在较高替代比例下出现生长抑制与肠道 / 肝胰腺损伤<sup>[60]</sup>。草食 / 杂食性鱼类在长期摄食植物性日粮的适应过程中,部分与解毒及营养吸收相关的通路呈现出差异化特征。研究表明,相较于典型肉食性鱼类,部分草食 / 杂食性鱼类在较高比例植物性原料条件下,细胞色素 P450(如 CYP3A/CYP1A)、短链脂肪酸(short-chain fatty acids,SCFAs)受体 GPR43/FFAR2 以及小肽转运蛋白 PepT1/SLC15A1 等通路上表现出较高的活性或表达水平<sup>[61]</sup>。然而,这些分

子层面的差异仅提示潜在的生理适应性,并不足以单独推断其对棉粕抗营养因子的“高耐受”,耐受性仍取决于 FG 暴露剂量与代谢清除、NSP-胆汁酸-肠屏障轴、肠道微生态以及配方与处理工艺等多因素的共同作用<sup>[60-65]</sup>。以棉酚代谢为例,鲤科鱼类如鲤(*Cyprinus carpio*)<sup>[62]</sup>可通过 CYP3A/CYP1A 途径参与氧化降解;而赤点石斑鱼(*Epinephelus akaara*)<sup>[60]</sup>报道的 CYP 活性较低,提示其解毒能力可能受限。因此,物种差异应结合配方中蛋白质品质 / 可消化性、DFs 和 FG 水平以及其他抗营养因子影响条件下的生长 / FCR、血清生化与组织学等综合指标审慎评估,不宜由单一基因 / 受体表达来判定其整体“耐受性”。

近年来,围绕“棉粕耐受性差异”的研究重心已从表观生长性能深入至分子-代谢-微生物等多维网络。棉粕中水溶性膳食纤维可在肠道内吸附胆汁酸,抑制法尼醇 X 受体(FXR)活性,扰乱胆汁酸合成-回收轴<sup>[60]</sup>。FXR 高敏感的草鱼通过激活该通路下调 CYP7A1,减少肝脏初级胆汁酸合成,维持肠-肝胆汁酸稳态<sup>[64]</sup>;而 FXR 低敏感的黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)<sup>[60,65]</sup>等偏肉食性鱼类则易出现胆汁淤积、溶血及脂溶性维生素流失。高 DFs 饲料还会升高游离型疏水胆汁酸比例,直接损伤肠上皮屏障。杂食性的印度鲢(*Cirrhinus mrigala*)<sup>[66]</sup>可上调肠道紧密连接蛋白(ZO-1,occludin)减轻肠漏,肉食性鱼类缺乏此代偿,肠道炎症发生率显著增加。膳食纤维在后肠发酵生成短链脂肪酸(SCFA)是另一

关键节点。鲤等杂食性鱼类肠道菌群丰富,丁酸产量高,通过 GPR43-FFAR2 受体抑制 NF- $\kappa$ B 通路,降低炎症反应<sup>[61]</sup>;石斑鱼等肉食性鱼类菌群纤维发酵能力弱,SCFA 不足,NF- $\kappa$ B 持续激活,肠炎风险升高<sup>[60]</sup>。能量代谢层面,草鱼可将脂肪分解产生的乙酰辅酶 A 导入 mTORC1 通路,促进内源氨基酸合成,实现“以脂省氮”<sup>[67]</sup>,肉食性鱼类依赖糖酵解生成乙酰辅酶 A 效率低,蛋白沉积受限。此外,草鱼对槟榔碱诱导的 GRP75/SERCA1 高表达敏感,钙稳态与线粒体呼吸链效率提升,能量利用率显著高于肉食性鱼类<sup>[68]</sup>。此外,相较于鱼类,甲壳类动物如中华绒螯蟹、凡纳滨对虾等对棉粕中的抗营养因子表现出更强的敏感性。这种差异源于其节肢动物门的生理特性,甲壳类消化系统(肠道、肝胰腺)的结构与功能较鱼类更为简单,缺乏高效的解毒酶系统和纤维降解能力,导致其对棉酚的氧化应激耐受性更低,且难以通过微生物发酵有效缓解膳食纤维的抗营养作用,最终加剧营养吸收障碍和代谢紊乱。因此,不同水产动物对棉粕抗营养因子的耐受性差异,并非由单一“食性”标签决定,其本质上可能是其自身分子代谢网络(如抗氧化、胆汁酸代谢、能量分配等)与微生物互作的综合体现。

## 4 棉粕在水产饲料中应用的若干思考

### 4.1 优势及前景

水产养殖业的规模化发展催生了高性价比饲料原料的研发需求。棉粕作为一种优质的植物蛋白原料,具有广阔的市场前景。通过现代生物技术和加工工艺的改进,可以进一步降低棉粕中的抗营养因子和毒性成分,显著改善其在水产饲料中的营养效价,推动棉粕在水产饲料中的广泛应用。当前国家对农业和渔业发展的政策大力支持也为棉粕在水产饲料中的应用提供了有力保障。未来水产饲料行业的发展进程中,政府可能会相继出台相关调控政策,鼓励水产饲料行业充分挖掘和使用国产饲料原料,逐步降低对进口依赖程度,提高农业和渔业的自给率。棉粕产业的发展将有力地促进相关产业链的发展,包括棉花种植、棉籽加工、饲料生产、健康养殖等环节。这将形成产业链上下游的协同发展,提高整体经济效益。

### 4.2 需要解决的问题

#### 4.2.1 抗营养因子消减方法的研究

棉粕在水产饲料中应用时,需重点解决抗营养因子等可能存在的问题,棉粕中主要的抗营养因子包括 FG、膳食纤维、植酸、单宁和抗营养蛋白等。这些抗营养因子会显著影响水产动物对棉粕的消化与利用,进而影响其生长性能和健康水平。目前,FG 与膳食纤维的钝化/去除仍是棉粕应用中未能很好解决的技术难题。针对这一问题,未来的技术可以聚焦于开发更绿色、环保可控的脱酚工艺,如生物酶解与发酵联用,以及微胶囊化技术,这些方法不仅能够降低棉酚的残留,还能在降低环境污染的同时保留更多营养成分。

能有效提高营养物质的可消化性。尽管这些方法能够显著降低 NSP 含量,但在高纤维含量的原料中,这些方法的效果仍然有限,且外源酶的应用成本较高,对于水产饲料生产者来说,费用问题仍是一个重要挑战。此外,现有方法通常对非纤维性抗营养因子的消减效果较差,尤其是植酸、单宁等对矿物质吸收和蛋白质利用有显著影响的抗营养因子。为了解决这一问题,未来的技术研究可以考虑菌-酶联用,通过联合使用发酵菌株和定制酶谱的组合方式,在降解 NSP 的同时,对植酸与单宁等抗营养因子进行协同去除。此外,多酶配方(如复合木聚糖酶与果胶酶等)也能进一步提升对这些抗营养因子的降解效果。植酸通常可通过酶解法来降解<sup>[74]</sup>,其中植酸酶被广泛应用。对于单宁来说,微生物发酵法能够在降解膳食纤维的同时,降低单宁的含量,减少其对矿物质吸收的抑制作用<sup>[75]</sup>。然而,单一的酶解方法对于“植物性抗营养因子”的处理效果有限,且在高浓度植酸存在的条件下,降解效率不高。发酵法虽然有一定效果,但其降解机制不够明晰,且需要进一步优化发酵菌株的筛选与工艺条件,以提高处理效率和稳定性。需要开发针对植酸与单宁的复合降解技术,例如,通过复合酶与微生物发酵联合使用,或者在发酵过程中引入能够分解植物单宁的特定微生物菌群,以更好地去除这些抗营养因子。

#### 4.2.2 棉花品种的优化

水产饲料中棉粕的应用需重点关注转基因抗虫棉品种衍生的生物安全性问题。我国转基因抗虫棉自 1997 年商业化以来,种植比例长期保持高位。统计显示,2018 年全国棉花种植面积中约 95% 为 Bt 棉,近年该比例基本稳定;2024 年中国转基因作

物面积约  $3.50 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 其中转基因棉约  $2.80 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 占当季棉花面积的 95%。同时, 新疆产量占比 >90% (2024 年约 92.3%), 意味着市场棉籽 / 棉粕来源中以 Bt 棉为主<sup>[76-78]</sup>。抗虫棉中的抗虫蛋白主要来源于转基因技术。这些蛋白 (Bt 抗虫蛋白) 在棉花体内表达并积累, 最终也必然会在棉粕中留存。Bt 蛋白 (如 Cry1Ac、Cry1F 等) 为热敏性大分子, 油脂压榨、预处理与脱酚 / 浓缩等工艺会显著降低其可检测水平。研究显示: 某 Bt 棉系的 Cry1Ac 由籽实的  $0.64 \text{ ng} \cdot \text{mg}^{-1}$  降至棉籽粕的  $0.11 \text{ ng} \cdot \text{mg}^{-1}$ , Cry1F 由  $6.2 \text{ ng} \cdot \text{mg}^{-1}$  降至  $0.21 \text{ ng} \cdot \text{mg}^{-1}$ , 而精炼棉籽油中未检出<sup>[79]</sup>。这些抗虫蛋白对目标害虫具有高效的毒性, 但关于它们对水产动物的毒性效应及具体毒性机理的问题极少被关注。但考虑到水产动物的生理特性和消化系统结构, 这些抗虫蛋白有可能对水产动物的生长及生理代谢产生不良影响, 如影响消化吸收、引发免疫反应或造成其他生理障碍, 且相较于鱼类, 水产甲壳类动物由于同棉铃虫同属节肢动物门, 其消化道结构及功能更为相似, 因此更应关注这一问题<sup>[80]</sup>。针对抗虫棉棉粕中抗虫蛋白含量升高的问题, 可从以下几个方面进行应对: (1) 加强对抗虫棉棉粕中抗虫蛋白的毒性效应研究, 明确其对水产动物的具体影响机制和影响程度, 这有助于为制定科学合理的饲料配方和加工工艺提供基础依据。(2) 优化饲料配方, 在饲料配方中合理控制抗虫棉棉粕的使用量, 避免过量使用导致抗虫蛋白积累; 同时, 可以通过添加其他营养成分来平衡饲料中的营养比例, 提高饲料的整体营养价值。(3) 可通过改进饲料加工工艺, 如采用高温高压处理、酶解处理等方法, 降低抗虫棉粕中抗虫蛋白的含量或改变其结构, 从而减少其对水产动物的潜在危害。(4) 利用 CRISPR/LbCpf1 等基因编辑手段创制无棉酚棉花品种, 从根本上解决棉酚残留的问题, 但现阶段无棉酚棉花品种的存活率和产量显然低于传统棉花品种和抗虫棉品种。

#### 4.2.3 棉粕资源的协同利用路径拓展

协同利用是推动棉粕资源从“低值副产物”向“功能化定制蛋白源”转型的关键举措。功能化定制蛋白源指在满足目标物种与生长阶段氨基酸等价的前提下, 通过原料分级、工艺改性与配方协同, 对蛋白原料的抗营养因子、安全性、消化率与特定生理功能 (如肠屏障、免疫抗氧化、胆汁酸稳态等) 进

行可量化、可验证的定向优化之蛋白材料体系。以棉粕为核心, 整合其他动植物蛋白源, 如菜籽粕、葵花籽粕、酒糟蛋白、黑水虻蛋白、蚕蛹蛋白、单细胞蛋白等多元化原料, 通过动态配比优化模型如响应面法、神经网络算法等开展多元植物蛋白配比优化研究, 解析原料间的氨基酸互补效应与抗营养因子拮抗机制, 突破单一蛋白源营养限制性因子的瓶颈, 以弥补单一原料营养短板。继而探索构建“协同消减-功能互补-精准营养”新型饲料配方体系, 实现原料间的协同利用与功能整合, 提升水产动物饲料整体营养效率与生态效益。

综上所述, 棉粕作为一种重要的水产饲料蛋白源, 在未来水产养殖发展中具有广阔的应用前景。但目前还需深入研究和解决棉粕在水产饲料中深度高值化应用过程中存在的瓶颈问题, 继而提升棉粕资源在水产饲料中的应用水平, 促进水产饲料的高质量发展。

#### 参考文献

- [1] 赵冬冬, 刘晓宇. 棉籽蛋白的研究进展[J]. 农产品加工(学刊), 2009, 12(5): 27-30.
- [2] 康义, 盛来运, 蔺涛, 等. 中国统计年鉴(第 37 版)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2025: 388.
- [3] 龙遗磊, 吾买尔江·库尔班, 马青山, 等. 新疆棉籽蛋白产业发展概述[J]. 中国棉花, 2023, 50(8): 25-29.
- [4] SHI Y, ZHONG L, LIU Y X, et al. Gossypol is the main limiting factor in the application of cottonseed meal in grass carp feed production: involvement of growth, intestinal physical and immune barrier, and intestinal microbiota[J]. Water Biology and Security, 2024, 3(4): 100287.
- [5] 严全根, 朱晓鸣, 杨云霞, 等. 饲料中棉粕替代鱼粉蛋白对草鱼的生长、血液生理指标和鱼体组成的影响[J]. 水生生物学报, 2014, 38(2): 362-369.
- [6] WANG Z Z, LIAO S L, WANG J, et al. Effects of fermented cottonseed meal substitution for fish meal on intestinal enzymatic activity, inflammatory and physical-barrier-related gene expression, and intestinal microflora of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. Fishes, 2023, 8(9): 466.
- [7] 中国饲料成分及营养价值表(2024 年第 35 版)制订说明[J]. 中国饲料, 2024, 46(21): 181.
- [8] 张家才, 王江水, 张剑峰, 等. 棉粕在家禽饲料中应用的研究进展[J]. 中国家禽, 2021, 43(7): 93-98.
- [9] 魏二虹, 张文举, 刘东军. 不同热处理对棉籽饼中棉酚含量的影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2010, 28

- (1):52-57.
- [10] 陈金洁,杨云华,戴玉娇.浅谈棉粕的脱毒方法[J].农业开发与装备,2016(9):141.
- [11] DABBOUR M, HAMODA A, MINTAH B K, et al. Ultra-sonic-aided extraction and degossypolization of cottonseed meal protein: optimization and characterization of functional traits and molecular structure[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 204: 117261.
- [12] WANG L, CHEN M, LUO X C, et al. Intramolecular annulation of gossypol by laccase to produce safe cottonseed protein[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8: 583176.
- [13] 魏婷柳,苗华彪,吴倩,等.漆酶 BmLac 的异源表达、酶学特性及棉酚降解的研究[J].生物技术通报,2023,39(12):320-328.
- [14] 杨文婷.棉酚降解酶与益生菌对棉粕生物脱毒效果的比较研究[D].石河子:石河子大学,2020.
- [15] 张亨.饲料杂粕抗营养因子降解酶挖掘及分子改良[D].北京:中国农业科学院,2022.
- [16] ZHANG Z T, YANG D L, LIU L, et al. Effective gossypol removal from cottonseed meal through optimized solid state fermentation by *Bacillus coagulans*[J]. *Microbial Cell Factories*, 2022, 21(1): 252.
- [17] SUN H, TANG J W, YAO X H, et al. Improvement of the nutritional quality of cottonseed meal by *Bacillus subtilis* and the addition of papain[J]. *International Journal of Agriculture Biology*, 2012, 14(4): 563-568.
- [18] 张莉,杨晓龙,王海亮,等.一株棉酚降解菌株的筛选鉴定及对棉粕的脱毒效果[J].新疆农业科学,2022,59(12):3057-3065.
- [19] 张丛,李佳,袁洪水,等.高效降解棉酚菌株的筛选鉴定及毒性试验[J].中国农学通报,2012,28(12):112-117.
- [20] 张琛,马季文,汪轶丽,等.一株具有清除棉酚作用的乳酸菌的分离、鉴定及其对棉籽粕发酵脱毒的研究[J].动物营养学报,2022,34(6):4050-4059.
- [21] 杨文婷,陈程,张文举.棉酚降解酶对棉籽粕酶解脱毒的条件参数优化[J].新疆农业科学,2019,56(6):1122-1126.
- [22] 侯敏,张晨曦,詹发强,等.不同饲喂下棉铃虫肠道内生菌的分离鉴定及脱毒效果研究[J].微生物学报,2022,62(1):305-320.
- [23] 张庆华,赵新海,钟丽娟,等.三菌株协同固态发酵对棉粕脱毒效果及其生物活性的影响[J].饲料工业,2007,28(18):37-38.
- [24] 洪振.微生物固态发酵法降低棉粕中游离棉酚含量的研究[D].武汉:武汉轻工大学,2016.
- [25] PELITIRE S M, DOWD M K, CHENG H N. Acidic solvent extraction of gossypol from cottonseed meal[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2014, 195: 120-128.
- [26] 游艳芝,苏萃扬,张亮,等.膳食纤维不同改性技术研究进展[J].食品科学,2025,46(13):406-416.
- [27] 王玉,腾敏,孟勇,等.酶制剂在稻谷及其加工副产物饲料中的应用[J].中国饲料,2024,46(9):143-149.
- [28] 王洁,李铁军,崔志杰,等.棉粕非淀粉多糖的体外酶解效果研究[J].湖南农业科学,2011(15):13-15.
- [29] 黄亚宽.非淀粉多糖酶和植酸酶对生长猪不同类型日粮的营养改善作用[D].武汉:华中农业大学,2023.
- [30] 王纪亭,吴淑勤,万文菊,等.非淀粉多糖酶对奥尼罗非鱼生长及抗菌力的影响[J].动物营养学报,2006,18(2):105-110.
- [31] 王纪亭,吴淑勤,石存斌,等.非淀粉多糖酶对奥尼罗非鱼生产性能和饲料消化率的影响[J].中国畜牧杂志,2006,42(12):37-40.
- [32] 陆娟娟,冯宗友,李太元,等.饲料中添加非淀粉多糖酶对赤眼鳟生产性能、消化率的影响[J].当代水产,2016(3):88-89.
- [33] 张若然.蛋白酶、脂肪酶、非淀粉多糖酶在黄颡鱼饲料中的应用研究[D].广州:华南农业大学,2018.
- [34] LI W, WANG T. Effect of solid-state fermentation with *Bacillus subtilis* lwo on the proteolysis and the antioxidative properties of chickpeas[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2021, 338: 108988.
- [35] 韩伟,李晓敏,刘倩,等.微生物固态发酵和酶解工艺处理棉粕的研究[J].中国油脂,2017,42(1):112-115.
- [36] 李仲玄,魏嘉,李治城,等.菌酶协同处理对棉籽粕蛋白品质的影响[J].饲料研究,2024,47(24):107-112.
- [37] 易兰兰,朱俊红,程文杰,等.植物纤维的降解机制及菌酶协同发酵应用[J].动物营养学报,2024,36(3):1361-1374.
- [38] 姚蕾,原雪峰,耿彦超,等.菌酶协同发酵饲料菌种选择及条件优化[J].猪业科学,2024,41(6):73-76.
- [39] 潘韵超.发酵棉粕部分替代鱼粉及添加晶体赖氨酸对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)生长及健康的影响[D].上海:上海海洋大学,2023.
- [40] WANG H M, HU X, CHEN J, et al. Impact of dietary protein levels on growth, immune response, digestibility, intestinal microbiota, and transcriptome in *Litopenaeus vannamei* fed cottonseed protein concentrate[J]. *Aquaculture Reports*, 2025, 42: 102762.
- [41] SAKI A A, POURNIA K, TABATABAIE M M, et al. Effects of cottonseed meal supplemented with lysine and enzyme (Hydroenzyme XP) on egg quality and performance of

- laying hens[J]. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 2012, 41(10): 2225–2231.
- [42] YAMAMOTO T, MATSUNARI H, SUGITA T, et al. Optimization of the supplemental essential amino acids to a fish meal-free diet based on fermented soybean meal for rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Fisheries Science*, 2012, 78(2): 359–366.
- [43] GAN L, LIU Y J, TIAN L X, et al. Effect of dietary protein reduction with lysine and methionine supplementation on growth performance, body composition and total ammonia nitrogen excretion of juvenile grass carp, *Ctenopharyngodon idella*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, 18(6): 589–598.
- [44] 张超元,肖调义.棉粕替代豆粕对草鱼生长性能的影响[J].*科学养鱼*,2015(8):67–68.
- [45] 王托.凡纳滨对虾对棉粕及菜粕的利用研究[D].湛江:广东海洋大学,2010.
- [46] MBAHINZIREKI G B, DABROWSKI K J L, SAIDY E L, et al. Growth, feed utilization and body composition of tilapia (*Oreochromis* sp.) feed with cottonseed meal-based diets in a recirculating system[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2001, 7(3): 189–200.
- [47] 杨彬彬,华颖,肖金星,等.棉粕替代部分鱼粉对黑鲷幼鱼消化酶活性及肠道组织结构的影响[J].*扬州大学学报(农业与生命科学版)*,2015,36(4):45–51.
- [48] QIN Y W, HE C Q, GENG H Y, et al. Muscle nutritive metabolism changes after dietary fishmeal replaced by cottonseed meal in golden pompano (*Trachinotus ovatus*) [J]. *Metabolites*, 2022, 12(7): 576.
- [49] BLOM J H, LEE K J, RINCHARD J, et al. Reproductive efficiency and maternal offspring transfer of gossypol in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets containing cottonseed meal [J]. *Journal of Animal Science*, 2001, 79(6): 1533–1539.
- [50] 苗玉涛,钟宛清,卢宝鑫,等.脱酚棉籽粕替代鱼粉对卵形鲳鲹肌肉品质的影响[J].*华南师范大学学报(自然科学版)*,2022,54(4):65–73.
- [51] 杨霞,叶金云,张易祥,等.普通棉籽粕和发酵棉籽粕替代鱼粉对中华绒螯蟹幼蟹生长性能、体成分及肝胰腺消化酶活性的影响[J].*动物营养学报*,2014,26(3): 683–693.
- [52] 郭勇,胡毅,易新文,等.棉粕替代豆粕对斑点叉尾鲷生长、血清生化、体色、肉色以及肠道菌群的影响[J].*上海海洋大学学报*,2023,32(2):339–347.
- [53] 黄琳,陆昌生.棉粕替代豆粕对斑点叉尾鲷生长性能的影响[J].*黑龙江水产*,2023,42(4):270–272.
- [54] YUE Y R, ZHOU Q C. Effect of replacing soybean meal with cottonseed meal on growth, feed utilization, and hematological indexes for juvenile hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus* [J]. *Aquaculture*, 2008, 284: 185–189.
- [55] 林仕梅,麦康森,谭北平.菜粕、棉粕替代豆粕对奥尼罗非鱼(*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*)生长、体组成和免疫力的影响[J].*海洋与湖沼*,2007,38(2):168–173.
- [56] 庞栋,戚常乐,叶金云.发酵棉籽粕替代豆粕对中华绒螯蟹幼蟹生长性能、免疫功能、抗氧化能力和肠道健康的影响[J].*动物营养学报*,2023,35(10):6638–6649.
- [57] 马彬恒.小黄鱼幼鱼饲料蛋白质营养及棉粕替代鱼粉适宜比例的研究[D].舟山:浙江海洋大学,2021.
- [58] ZHENG Q M, WEN X B, HAN C Y, et al. Effect of replacing soybean meal with cottonseed meal on growth, hematology, antioxidant enzymes activity and expression for juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Fish Physiology and Biochemistry*, 2012, 38(4): 1059–1069.
- [59] 李洁,王旋,周慧慧,等.脱酚棉籽蛋白替代豆粕对凡纳滨对虾生长、饲料利用和免疫应答的影响[J].*中国海洋大学学报(自然科学版)*,2024,54(6):45–54.
- [60] 蔡春芳,任胜杰,万金娟,等.膳食纤维过量摄入对鱼类的致病作用和机制[J].*水产学报*,2024,48(4):241–256.
- [61] PETIT J, BRUIJN I, GOLDMAN M, et al.  $\beta$ -glucan-induced immuno-modulation: a role for the intestinal microbiota and short-chain fatty acids in common carp [J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 12: 761820.
- [62] 张静,张孟丹,梁俊平,等.醋酸棉酚在鲤不同器官和组织中的残留量及对转氨酶和 *CYP3A*、*sod*、*cat* 和 *gpx* 基因表达的影响[J].*水产学杂志*,2020,33(4):7–14.
- [63] UNO T, ISHIZUKA M, ITAKURA T. Cytochrome P450 (CYP) in fish [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2012, 34(1): 1–13.
- [64] CHEN S Y, LIN Y, SHI H Q, et al. Dietary ferulic acid supplementation improved cottonseed meal-based diet utilization by enhancing intestinal physical barrier function and liver antioxidant capacity in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. *Frontiers in Physiology*, 2022, 13: 922037.
- [65] CAI C F, REN S J, CUI G T, et al. Short-term stress due to dietary pectin induces cholestasis, and chronic stress induces hepatic steatosis and fibrosis in yellow catfish, *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. *Aquaculture*, 2020, 516: 734607.
- [66] YADAV R, JAYANT M, JANA P, et al. Effects of substituting groundnut oil cake with *Prosopis cineraria* seed meal on growth, physio-metabolic, and haemato-

- biochemical responses of *Labeo rohita* [J]. Aquaculture Science and Management, 2025, 2(7): 1–16.
- [67] LI H D, JI S H, YUAN X T, et al. Eicosapentaenoic acid (EPA) improves grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) muscle development and nutritive value by activating the mTOR signaling pathway [J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2024, 50(2): 687–703.
- [68] WU L Q, YAO N, JIANG W D, et al. Arecoline regulates glycolipid and endoplasmic reticulum metabolisms in adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Animal Nutrition, 2025, 21: 447–461.
- [69] LIM C. Substitution of cottonseed meal for marine animal protein in diets for *Penaeus vannamei* [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2010, 27(4): 402–409.
- [70] 张海涛, 蒲雪松, 杨奇慧, 等. 高蛋白棉粕替代鱼粉对凡纳滨对虾生长性能、非特异性免疫指标及抗病力的影响 [J]. 广东海洋大学学报, 2018, 38(4): 20–26.
- [71] ZHANG H J, DAI J H, CAI M L, et al. Effects of dietary replacement of fishmeal by cottonseed meal on the growth performance, immune and antioxidant responses, and muscle quality of juvenile crayfish *Procambarus clarkii* [J]. Aquaculture Reports, 2023, 31: 101639.
- [72] HASSAAN M S, EL-SAYED A I M, SOLTAN M A, et al. Partial dietary fish meal replacement with cotton seed meal and supplementation with exogenous protease alters growth, feed performance, hematological indices and associated gene expression markers (GH, IGF-I) for Nile tilapia, *Oreochromis niloticus* [J]. Aquaculture, 2019, 503: 282–292.
- [73] BU X Y, CHEN A J, LIAN X Q, et al. An evaluation of replacing fish meal with cottonseed meal in the diet of juvenile Ussuri catfish *Pseudobagrus ussuriensis*: growth, antioxidant capacity, nonspecific immunity and resistance to *Aeromonas hydrophila* [J]. Aquaculture, 2017, 479: 829–837.
- [74] ZHANG Y, LIU Z, BAI Y, et al. Enhancing the digestibility of cottonseed meal by *Bacillus licheniformis* fermentation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(29): 8343–8352.
- [75] KUMAR V, SINHA A K, MAKKAR H P S, et al. Phytate and phytase in fish nutrition [J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2012, 96(3): 335–364.
- [76] DHARMAKAR P, AANAND S, KUMAR J, et al. Solid-state fermentation of cottonseed meal with *Saccharomyces cerevisiae* for gossypol reduction and nutrient enrichment [J]. Indian Journal of Animal Research, 2023, 57(7): 868–874.
- [77] ZHANG Y J, DONG H Z. Resolved concerns after 28 years of Bt cotton in China [J]. Journal of Cotton Research, 2024, 7(1): 29.
- [78] DRYZGA M D, YANO B L, ANDRUS A K, et al. Evaluation of the safety and nutritional equivalence of a genetically modified cottonseed meal in a 90-day dietary toxicity study in rats [J]. Food and Chemical Toxicology, 2007, 45(10): 1994–2004.
- [79] DUMONT A F, LANZONI A, WAIGMANN E, et al. Relevance of new scientific information (Santos-Vigil et al., 2018) in relation to the risk assessment of genetically modified crops with Cry1Ac [J]. EFSA Supporting Publications, 2018, 15(11): 1504E.
- [80] KOCH M S, WARD J M, LEVINE S L, et al. The food and environmental safety of Bt crops [J]. Frontiers in Plant Science, 2015, 6: 283.