

鱼类饵料转换的生理适应机制与养殖应用研究进展

朱呈良^{1,2}, 高小强², 郭富禄², 李 澳², 张家文², 夏苏东^{1*}, 刘宝良^{2*}

¹天津农学院水产学院, 天津市水产生态及养殖重点实验室, 天津

²中国水产科学研究院黄海水产研究所, 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2026年2月2日; 录用日期: 2026年2月24日; 发布日期: 2026年3月4日

摘 要

鱼类饵料转换是水产养殖业苗种培育的核心技术节点, 直接决定苗种存活率、生长性能及后续养殖效益, 却常受转饵应激、消化紊乱等问题制约。本文系统梳理鱼体自身特性、饵料属性及养殖环境三大关键影响因素, 从生理生化适应(消化功能调整、免疫应激响应)和肠道微生态重塑(菌群结构变化、菌群-宿主互作)层面, 解析鱼类饵料转换的协同适配机制。综合论述最佳转饵时机确定、驯化技术优化、功能性添加剂应用等核心优化技术, 结合海水鱼、淡水鱼及珍稀鱼类的典型案例, 总结不同食性鱼类的转饵技术方案。指出当前研究存在物种特异性覆盖不足、分子调控网络解析不深入、实验室技术与规模化应用脱节等问题, 展望未来需通过多组学技术深化机制研究、研发特异性功能产品、开发智能化转饵技术。相关研究为推动转饵技术精准化与规模化应用、提升苗种培育质量、支撑水产养殖业绿色高效发展提供理论参考与技术支持。

关键词

苗种培育, 饵料转换, 肠道微生态, 水产养殖, 适配机制

Research Progress on Physiological Adaptation Mechanisms and Aquaculture Applications of Fish Weaning

Chengliang Zhu^{1,2}, Xiaoqiang Gao², Fulu Guo², Ao Li², Jiawen Zhang², Sudong Xia^{1*}, Baoliang Liu^{2*}

¹Tianjin Key Laboratory of Aquatic Ecology and Aquaculture, College of Aquatic Products, Tianjin Agricultural University, Tianjin

²State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao Shandong

*通讯作者。

文章引用: 朱呈良, 高小强, 郭富禄, 李澳, 张家文, 夏苏东, 刘宝良. 鱼类饵料转换的生理适应机制与养殖应用研究进展[J]. 水产研究, 2026, 13(1): 56-66. DOI: 10.12677/ojfr.2026.131008

Abstract

Weaning in fish is a core technical node in seedling rearing for aquaculture, directly determining seedling survival rate, growth performance, and subsequent aquaculture benefits. However, it is often constrained by issues such as feed transition stress and digestive disorders. This study systematically summarizes three key influencing factors: fish intrinsic characteristics, feed properties, and aquaculture environmental conditions. It elaborates on the synergistic adaptation mechanisms of fish feed transition from the perspectives of physiological and biochemical adaptations (including digestive function regulation and immune stress response) and intestinal microbiota remodeling (encompassing changes in microbial community structure and microbiota-host interactions). Core optimized technologies are reviewed, such as the determination of optimal feed transition timing, optimization of acclimation techniques, and application of functional feed additives. Combined with typical cases of marine fish, freshwater fish, and rare fish species, targeted feed transition technical schemes for fish with different feeding habits are summarized. Current research limitations are identified, including insufficient coverage of species-specific mechanisms, inadequate in-depth analysis of molecular regulatory networks, and a disconnect between laboratory-developed technologies and large-scale aquaculture applications. Future research directions are proposed, which involve deepening mechanism exploration via multi-omics technologies, developing species-specific functional products, and advancing intelligent feed transition techniques. This review provides theoretical references and technical support for promoting the precise and large-scale application of feed transition technologies, improving seedling rearing quality, and facilitating the green and efficient development of the aquaculture industry.

Keywords

Seedling Rearing, Fish Weaning, Intestinal Microbiota, Aquaculture, Adaptation Mechanism

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

鱼类苗种培育是水产养殖业规模化发展的核心支撑，饵料转换作为苗种培育的关键技术节点，衔接天然饵料向人工配合饲料的营养供给转型，其成败直接决定苗种存活率、生长性能及抗逆能力，深刻影响后续养殖的生产效率与综合效益。自然环境中鱼类可通过自身发育适配饵料天然更替，而人工养殖需人为引导其从活饵(如丰年虫、轮虫等)转食为人工配合饲料，这一过程常伴随转饵应激、消化功能紊乱、肠道微生态失衡等问题，导致苗种死亡率升高，成为制约养殖鱼类(尤其是肉食性鱼类)苗种培育成功率的主要瓶颈[1]。

解析饵料转换适配机制、攻克转饵应激难题，是水产养殖领域的重要科学课题。近年来，借助分子生物学、微生物组学等技术，科研人员围绕鱼类转饵期消化功能调整、免疫应激响应及肠道微生态重塑开展大量研究，阐明了鱼体特性、饵料属性及养殖环境对转饵效果的调控作用，为技术优化提供了理论支撑[2]-[4]。但当前研究仍有短板：不同食性、发育阶段鱼类的转饵适应机制存在显著物种特异性，基础研究衍生的优化技术在规模化养殖中应用转化率偏低[5] [6]。

本文聚焦鱼类饵料转换的关键科学问题与技术需求,概述核心影响因素,从生理生化适应、肠道微生物生态响应及分子调控机制解析转饵适配规律,总结转饵优化技术研发与应用进展,结合典型养殖鱼类案例分析,指出研究不足与未来方向,为深入理解转饵分子适应机制、推动技术升级、提升苗种培育质量、支撑水产养殖业绿色高效发展提供参考。

2. 鱼类饵料转换的关键影响因素

鱼类饵料转换的成功与否是鱼体自身特性、饵料属性特征及养殖环境调控三者协同作用的结果。不同因素通过直接或间接调控鱼体摄食意愿、消化功能及适应能力,共同影响转饵效率与苗种培育成效。

2.1. 鱼体自身特性

鱼体自身的生物学特征是决定饵料转换适应性的内在核心因素,直接主导转饵过程中的生理响应模式与适应效率。

发育阶段与体型规格是影响转饵效果的关键变量。鱼类幼鱼期消化器官(胃、肠道、消化腺)与免疫系统尚未发育完善,消化酶分泌能力弱、肠道黏膜屏障功能不成熟,对饵料类型变化的耐受性极低,而随着体长体重的增长,消化酶系统逐步健全、免疫功能持续强化,转饵适应性显著提升。黄颡鱼需体长达到 3 cm 以上时开展转食驯化,才能保证较高的成活率[7]。这种差异本质上是发育成熟度对转饵应激的调控作用,即大规格个体具备更完善的生理调控能力,能够快速适配人工饲料的营养结构与消化需求。对于以日龄为发育判定标准的鱼类,胭脂鱼[3]在 20 dph 时启动转食的存活率(91.21%)显著高于 15 dph 组(82.95%),而圆口铜鱼[8]则以 30 日龄为最佳转食时机。物种特异性与摄食习性决定了转饵的基础适配难度。无胃鱼类如胭脂鱼因缺乏胃腺,其转食难度显著高于有胃鱼类,转食期成活率普遍低于有胃鱼类[9]。鱼类的摄食行为差异也影响转饵效果,如巡游性鱼类对颗粒饲料的摄食意愿高于底栖性鱼类,凶猛性鱼类的残食行为会加剧小规格个体的转饵应激,进一步降低转饵成功率。遗传背景差异为转饵适应性提供了分子基础。不同品系或种群的鱼类在消化酶基因表达、营养吸收载体活性等方面存在先天差异,导致其对人工饲料的适配能力不同[10]。研究表明,通过选育具有高饲料转化率性状的养殖品种,可显著提升转饵适应性,如大口黑鲈“优鲈 3 号”[4]经多代选育后,转食成功率(96.67%)显著高于非选育群体(74.0%),其生长性能与成活率也表现出明显优势,提示遗传改良可作为提升转饵效率的潜在途径。

2.2. 饵料属性特征

饵料作为鱼体营养供给载体,其属性特征直接影响鱼类摄食意愿与消化吸收效率,是转饵成功的关键外部因素。

营养成分适配性为核心指标。鱼类对蛋白质、脂肪、碳水化合物的需求存在物种特异性,人工饲料营养组成需与鱼体生理需求高度匹配[11]。肉食性鱼类对饲料蛋白质要求较高(40%~55%),大口黑鲈专用配合饲料的鱼粉含量需达到 55%才能满足转食需求[2];草食性鱼类可耐受 20%~30%的碳水化合物,适量膳食纤维还能促进肠道蠕动[12]。脂肪源类型(鱼油、植物油)及维生素、矿物质含量也影响转饵适应性,如不饱和脂肪酸缺乏会降低鱼类抗应激能力,增加疾病发生率[13]。联合投喂可优化营养供给,胭脂鱼经丰年虫 + 螺旋藻 + 饲料联合投喂后,转食成活率显著高于单一饲料组[14]。饵料硬度与水中稳定性也不容忽视,过硬饲料会增加咀嚼难度,易致胃肠道损伤;稳定性不足则会造成营养成分流失,还可能污染水质,间接影响转饵效果[15]。

2.3. 养殖环境调控

养殖环境通过调控鱼体生理与代谢状态,间接影响饵料转换适应效率,适宜条件可降低转饵应激、

提升成功率。

水温、盐度与溶氧是核心影响因子。水温直接调节代谢速率与消化酶活性，石斑鱼[16] (26℃~30℃)、鲤鱼[17] (20℃~25℃)等在适宜温度内消化酶活性峰值，摄食与消化效率最优；水温异常则导致酶活性下降、消化不良。盐度影响海水鱼渗透压平衡，突变会消耗能量、加剧转饵应激[18]-[20]；溶氧不足抑制呼吸代谢，降低摄食率与消化酶分泌，与转饵应激叠加升高死亡率，圆口铜鱼转食期需维持溶氧 7.8~8.3 mg/L [21][22]。养殖密度与操作应激显著影响转饵效果。高密度养殖导致空间受限、水质恶化，引发竞争应激与皮质醇升高，抑制消化及免疫功能[23]；石斑鱼转饵期密度从 50 尾/L 降至 20 尾/L，存活率提升 28% [24]。转饵前后需保持环境稳定，减少换水、捞鱼等人为干扰[25]。转饵方式与驯化周期是技术关键。直接转饵应激强烈、死亡率高，梯度转饵可让鱼体逐步适配新饲料，大黄鱼[26]采用多阶段梯度方案，存活率较直接转饵提升 40%；胭脂鱼[9]以 20 dph 为起始点、10 天过渡，平衡存活率与成本。

3. 鱼类饵料转换的生理生化适应与肠道微生物响应机制

鱼类从天然饵料向人工饲料转换的过程，是鱼体生理生化系统与肠道微生物协同重构以适配新饵料营养特征的动态过程，涉及消化功能和免疫应激的适应性调整，以及肠道菌群结构与功能的定向重塑，二者相互作用、密切协同，共同决定转饵适配效率。

3.1. 生理生化适应机制

3.1.1. 消化功能的适应性调整

鱼类会根据饵料营养成分精准调整消化酶活性，蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶作为核心酶类，其动态变化直接反映适配状态[27][28]。饵料转换诱导胃肠道形态重塑，斑马鱼[29]肠道绒毛高度与隐窝深度比值提升 27%，与饲料转化率正相关；胃容积扩大、肠道绒毛增长及黏膜上皮细胞增殖，可提升营养接触与吸收效率[30]。肝脏通过调控糖原储备与脂肪代谢酶活性适配饵料能量组成，胰腺则调整消化酶合成分泌，维持酶系统平衡[31]。营养吸收层面，转饵后肠道营养吸收载体基因定向表达，如[32]转至高碳水化合物饲料后，GLUT2 基因表达升高促进葡萄糖吸收，氨基酸转运载体 mRNA 表达随对应营养物质含量调整[33]；代谢途径也适应性切换，通过脂肪酸 β -氧化供能或提升蛋白质合成速率促进生长[34]。

3.1.2. 免疫与应激响应机制

饵料转换作为应激源，引发免疫与应激系统协同响应，核心是通过激素调控与免疫调整维持稳态。转饵初期，下丘脑-垂体-肾上腺(HPA)轴激活，皮质醇、肾上腺素分泌升高提供应急能量，但持续高皮质醇会抑制免疫与生长激素分泌[35][36]。应激激素调控能力是转饵适应性的重要标志。转饵应激导致非特异性免疫指标暂时性波动，石斑鱼转饵 3 天溶菌酶活性下降 31%，14 天恢复，这与皮质醇对免疫细胞的抑制相关[37][38]。肠道作为最大免疫器官，转饵后黏液分泌量调整，黏蛋白包裹上皮细胞、抑制有害菌定植[39]；黏膜固有层免疫细胞活性增强，通过吞噬作用与细胞因子分泌提升局部免疫应答[36]，添加益生菌可提升大黄鱼[40]肠道黏蛋白 2 表达与巨噬细胞活性，缓解免疫抑制。

3.2. 肠道微生物响应机制

3.2.1. 肠道菌群结构与多样性变化

饵料转换驱动肠道菌群结构显著改变，核心表现为优势菌门/属更替、多样性波动及功能菌群富集。变形菌门(Proteobacteria)为多数鱼类肠道核心优势菌门，转饵后其丰度微调，其他菌门呈差异化响应：大口黑鲈[25]转食配合饲料后，气单胞菌属(Aeromonas)等条件致病菌丰度随投喂频率波动，鲸杆菌属(Cetobacterium)等有益菌在适宜投喂频率下显著升高；鲤鱼[41]等杂食性鱼类转饵后拟杆菌门(Bacteroidetes)

丰度上升, 适配植物性饲料中碳水化合物降解。

功能菌群特异性富集是微生态适配的关键: 转饵后产消化酶菌、发酵菌等功能菌群显著富集, 辅助降解人工饲料中复杂营养成分。鲸杆菌属可合成维生素 B12 并产生短链脂肪酸, 在大口黑鲈适宜投喂频率组丰度显著升高, 提升饲料消化效率[1]; 乳球菌属在胭脂鱼[3]转饵后丰度上升, 与消化功能提升密切相关。益生菌添加效果显著, 珍珠龙胆石斑鱼转饵饲料中添加枯草芽孢杆菌, 可使肠道有益菌丰度提升 25%, 改善转饵适应性[42]。

3.2.2. 菌群 - 宿主的互作适配机制

肠道菌群与宿主通过复杂互作网络实现转饵协同适应, 核心机制包括代谢产物调控、营养代谢协同及免疫稳态维持。转饵后菌群发酵产生的短链脂肪酸(SCFAs)、氨基酸、维生素等代谢产物含量改变, 通过调节肠道 pH 值、激活上皮细胞信号通路, 影响宿主消化吸收与免疫功能[43]。短链脂肪酸可促进肠道绒毛生长与紧密连接蛋白表达, 增强黏膜屏障功能, 同时作为能量底物被宿主吸收[44]。营养代谢层面, 菌群与宿主存在显著协同效应: 肠道菌群分泌纤维素酶、淀粉酶等胞外消化酶, 与宿主自身消化酶协同作用, 提升营养降解效率[45]。免疫调控方面, 菌群通过与肠道黏膜免疫细胞相互作用, 维持免疫稳态, 有益菌可产生抗菌肽、竞争营养物质, 抑制气单胞菌属、弧菌属等致病菌生长; 同时刺激固有层免疫细胞分泌 IL-10、TNF- α 等细胞因子, 增强黏膜免疫应答[46]。

3.2.3. 微生态失衡与转饵应激的关联

饵料转换引发的微生态失衡, 是转饵应激加剧、消化功能紊乱的重要诱因, 核心表现为致病菌增殖、菌群代谢紊乱及肠道黏膜屏障损伤。转饵初期, 宿主肠道黏膜屏障功能减弱, 菌群多样性下降, 为致病菌定植增殖提供条件[47]: 大口黑鲈转食后投喂频率不适宜(如 1 餐/d), 气单胞菌属等致病菌丰度显著升高, 其毒素损伤肠道上皮细胞, 导致存活率下降[2]; 胭脂鱼转饵期微生态失衡会加剧转食应激, 降低成活率[3], 且转饵期鱼类死亡率与致病菌丰度呈正相关, 益生菌、益生元添加可有效抑制致病菌增殖[48]。微生态失衡时, 菌群代谢途径异常, 有益代谢产物(短链脂肪酸、维生素)分泌减少, 氨、硫化氢等有害产物积累[49]。肠道黏膜屏障损伤是失衡与应激的交叉结果, 有害菌及其代谢产物攻击上皮细胞, 导致紧密连接蛋白表达下降、肠道通透性增加, 未消化食物大分子、致病菌易位引发全身性炎症, 进一步破坏微生态平衡[50]。

4. 饵料转换优化技术与养殖应用

基于鱼类饵料转换的生理机制研究, 一系列转饵优化技术已在养殖生产中得到应用, 主要包括最佳转饵时机与规格的确定、转饵驯化技术优化及功能性饲料添加剂的研发与应用, 这些技术的应用显著提升了转饵成功率与苗种培育质量。

4.1. 最佳转饵时机与规格的确定

转饵时机与规格的精准判定是提升转饵成功率的基础, 其核心依据是鱼体的发育成熟度与生理适配能力。不同鱼类的适宜转饵规格存在显著差异见表 1: 肉食性海水鱼类如赤点石斑鱼、斜带石斑鱼的最佳转饵规格为体长 3~4 cm, 此时幼鱼消化酶系统健全、残食行为发生率低, 转饵存活率可达 90%以上[51]; 淡水肉食性鱼类如鳊鱼的最佳转饵规格为体长 2.5~3 cm, 需在其主动摄食活饵的高峰期逐步引入人工饲料[52]; 草食性与杂食性鱼类如大口黑鲈、鲤鱼的转饵规格可适当提前, 体长 1.5~2 cm 即可启动转饵, 其消化酶系统的广谱性使其能快速适配植物性饲料[5][53]。对于以日龄为判定标准的鱼类, 胭脂鱼[9]的最佳转食起始点为 20 日龄, 圆口铜鱼[8]为 30 日龄, 杂交鲟[54]为 20 日龄。

Table 1. Weaning specifications and conversion age for some common brackish water fish species**表 1.** 一些常见的淡水水鱼类饵料转换规格和转换日龄

鱼种 Fish species	消化生理特征 Digestive physiological characteristics	转饵规格 Weaning specifications	转饵日龄 Weaning days	参考文献 References
赤点石斑鱼	有胃肉食性	3~4 cm	/	[55]
鳊鱼	有胃肉食性	2.5~3 cm	/	[52]
大口黑鲈	有胃杂食性	1.5~2 cm	/	[1]
松潘裸鲤	有胃杂食性	1.5~2 cm	/	[5]
胭脂鱼	无胃杂食性	/	20 d	[3]
圆口铜鱼	有胃杂食性	/	30 d	[8]
杂交鲟	有胃肉食性	/	20 d	[54]

4.2. 转饵驯化技术优化

转饵驯化技术的核心是通过梯度适配、适口性改良等方式,降低鱼体对饵料转换的应激反应,提升摄食意愿与适应效率。梯度转饵方案是目前应用最广泛的驯化技术,其核心逻辑是逐步增加人工饲料比例、降低天然饵料占比,给鱼体消化系统与摄食习性留出适应周期[56]。黄颡鱼[7]转食时,采用“鱼糜诱导→鱼糜+膨化饲料→膨化饲料”的梯度方案,可使驯化成功率提升至90%以上。环境调控辅助转饵技术通过优化养殖条件降低应激水平。在转饵期将水温控制在鱼类适宜生长范围的中上限(如石斑鱼28℃~30℃、鲤鱼22℃~25℃),可提升消化酶活性与代谢效率[24][41];保持溶氧浓度在6 mg/L以上,避免缺氧应激与转饵应激叠加[57];适当降低养殖密度(较常规密度降低20%~30%),减少摄食竞争与残食行为[58]。

4.3. 功能性饲料添加剂的研发与应用

功能性添加剂通过调控鱼体消化功能、免疫功能及肠道微生态,缓解转饵应激,已成为转饵优化技术的新方向。益生菌与益生元通过调节肠道微生态平衡提升转饵适应性。益生菌如芽孢杆菌、乳酸菌、酵母菌等,可通过分泌胞外消化酶、抑制有害菌定植、产生短链脂肪酸等方式,协同肠道消化酶功能,增强肠道黏膜屏障。在赤点石斑鱼转饵饲料中添加枯草芽孢杆菌,可使肠道有益菌丰度提升25%,消化酶活性提高18%,转饵存活率提升22% [59]。益生元如低聚果糖、 β -葡聚糖等,可作为益生菌的营养底物,促进有益菌增殖,同时直接刺激肠道免疫细胞活性,增强抗应激能力[60]。

5. 典型养殖鱼类饵料转换研究进展

不同食性、生活习性的鱼类在饵料转换机制与技术需求上存在显著差异,针对典型养殖鱼类的研究已形成各具特色的理论体系与技术方案,为行业提供了重要参考。

5.1. 海水鱼类

海水鱼类中,肉食性鱼类的转饵研究最为集中,其核心难点在于天然活饵向人工饲料的适配性提升。大黄鱼作为我国重要的海水养殖鱼类,转饵研究聚焦于适口性改良,通过在人工饲料中添加鱼浆蛋白与甘氨酸引诱剂,结合14天梯度驯化,可使幼鱼摄食率提升40%,饲料转化率优化1.1~1.3 [61]。鲷科鱼类的转饵研究更注重规模化应用技术优化。真鲷、黑鲷等鲷科鱼类为杂食性,转饵难度相对较低,目前已

形成“2 cm 规格启动转饵、7~10 天梯度驯化”的标准化方案[62]。赤点石斑鱼作为快速生长的肉食性鱼类，转饵研究聚焦于能量代谢调控，发现转饵后添加鱼油为脂肪源的饲料可显著提升生长性能，其机制与脂肪酸 β -氧化基因表达上调相关；同时，通过优化养殖密度(5~8 尾/L)与水温(26℃~28℃)，可进一步降低转饵应激[63]。

5.2. 淡水鱼类

淡水鱼类转饵研究覆盖草食性、杂食性与肉食性类群，技术成熟度较高。鲶形目鱼类转饵聚焦底栖摄食习性适配：杂食性斑点叉尾鮰通过改良饲料沉降性(添加羧甲基纤维素钠)，配合 2~3 cm 规格梯度驯化，转饵存活率达 92% [64]，转饵后拟杆菌门丰度升高，助力植物性饲料碳水化合物降解[65]；肉食性黄颡鱼通过添加蚯蚓提取物与亮氨酸引诱剂激发摄食意愿，搭配芽孢杆菌制剂，转饵存活率从 60% 提升至 85% [66]。

肉食性鳊鱼、乌鳢转饵聚焦习性适配突破：鳊鱼[67]对活饵依赖性强，传统存活率不足 50%，近年通过“活饵驯化→死饵过渡→人工饲料适配”三步法，配合含胰蛋白酶与牛磺酸的功能性饲料，存活率提升至 70%~80%；乌鳢[68]采用“10~15 cm 规格转饵、21 天梯度驯化”方案，通过降低密度(3~5 尾/m²)、增加投喂频率(4 次/天)减少残食，提升转饵效率。

胭脂鱼、圆口铜鱼等珍稀鱼类转饵服务于资源保护：无胃型胭脂鱼以 20 dph 为转食起始点、10 天过渡，采用丰年虫 + 螺旋藻 + 饲料联合投喂，存活率超 70% [31][49]；极危圆口铜鱼经丰年虫开口 30 天后转食水蚯蚓，存活率达 82% [20]；松潘裸鲤[69]最优方案为“30 日龄前喂丰年虫、30~70 日龄混合投喂水蚯蚓与微粒子饲料、70 日龄后纯喂微粒子饲料”，综合生长与存活效果最佳。

6. 研究现状与未来展望

6.1. 当前研究热点与突破

当前鱼类饵料转换研究已进入多学科交叉融合的阶段，核心热点集中在机制解析、技术优化与应用转化三个层面。多组学技术的深度应用推动了机制研究的突破，通过整合转录组、代谢组、微生物组数据，已初步揭示“饵料信号→基因表达调控→消化酶活性调整→肠道菌群重塑”的协同适配网络[70]技术优化方面，精准化与集成化是主要趋势。功能性添加剂的研发实现了从单一成分向“复合酶制剂 + 益生菌 + 抗应激因子”的协同配方升级，应用效果大幅提升[71]。应用转化层面，规模化养殖技术的标准化取得进展，针对石斑鱼、大黄鱼、草鱼等典型鱼类的转饵技术已形成行业推荐方案，部分技术已纳入水产养殖标准化规程。

6.2. 现存研究不足

尽管研究取得显著进展，但仍存在诸多亟待解决的问题。物种特异性研究欠缺，当前研究主要集中在少数名贵鱼类(如石斑鱼、大口黑鲈)和珍稀鱼类(如胭脂鱼、圆口铜鱼)，对中低端养殖鱼类(如罗非鱼、鲫鱼)的转饵机制研究不足，且不同发育阶段(如仔鱼、幼鱼、亚成体)的适配机制差异尚未明确。分子调控网络的系统性解析不够深入，目前对饵料转换信号的感知途径、基因表达调控的上游通路(如激素信号、表观遗传修饰)仍知之甚少，尚未形成完整的调控网络图谱[72]。

技术应用层面存在“实验室研究与规模化养殖脱节”的问题，实验室条件下优化的转饵技术在高密度、复杂环境的规模化养殖中效果往往下降，如益生菌在大规模养殖中易受水质、温度等因素影响，稳定性不足[73]。功能性添加剂的精准应用技术欠缺，目前多为通用性配方，针对不同鱼类、不同转饵阶段的特异性添加剂研发不足，且添加剂的作用剂量与适用条件尚未明确，转饵技术与其他养殖环节(如水质

调控、疾病防控)的协同优化研究较少,难以形成全链条的技术体系[74]。

6.3. 未来研究方向

未来鱼类饵料转换研究应聚焦于机制深化、技术精准化与应用规模化,重点开展以下工作:一是深化转饵适配分子机制解析,通过整合饵料转换过程中基因组的遗传背景数据、转录组的基因表达谱、代谢组筛选转饵成功的生物标志物(Biomarkers),建立苗种转饵准备状态的无损检测体系变化轨迹、微生物组的肠道菌群动态及表观组的调控修饰特征,系统构建肉食性、杂食性等不同食性鱼类的转饵分子调控网络,精准定位物种特异性分子标记与转饵关键调控基因;二是特异性功能产品的研发,针对不同鱼类的食性特征与转饵难点,开发“物种专属+阶段适配”的复合添加剂配方,提升应用针对性;三是智能化转饵技术的开发,结合传感器监测(如鱼体摄食行为、生理指标)与大数据分析,实现转饵时机、饲料配比、环境条件的动态精准调控。同时,针对“实验室研究与规模化养殖脱节”的核心问题,基于规模化养殖场景的水质动态变化与鱼体生理反馈数据,优化智能投喂算法,开发适配池塘、工厂化养殖等不同模式的智能化投喂设备,降低技术落地门槛;另一方面,聚焦鱼类转饵关键发育窗口期,开展“功能性过渡饲料”配方设计,通过优化饲料原料配比、调整营养梯度、添加靶向功能成分,解决苗种转饵期存活率低、生长缓慢的产业痛点;开展转饵技术与绿色养殖的协同研究,通过优化转饵方案减少饲料浪费与残饵污染,建立转饵效率与养殖环境承载力的平衡模型,为水产养殖业的可持续发展提供技术支撑。

7. 结论

鱼类饵料转换是苗种培育的核心技术环节,其适应机制涉及消化功能、免疫应激及肠道微生态等多个层面的协同响应。鱼体自身特性(发育阶段、物种特异性、遗传背景)、饵料属性(营养成分、物理化学性质)及养殖环境(水温、密度、转饵方式)是影响转饵效果的关键因素。转饵过程中,鱼体通过消化酶系统定向调整、消化器官形态重塑及营养吸收效率优化实现消化功能适配;通过应激激素调控与免疫功能调整维持机体稳态;肠道菌群则通过结构更替与功能协同辅助宿主适应新饵料。然而,当前研究仍存在物种特异性研究欠缺、分子调控网络解析不深入、实验室技术与规模化应用脱节等问题,未来需通过多组学技术深化机制研究、研发特异性功能产品、开发智能化转饵技术,推动转饵技术的精准化与规模化应用。

鱼类饵料转换的适应机制是多层面、多因素协同作用的结果,相关研究不仅深化了对鱼类消化生理与环境适应的认知,更为水产养殖业苗种培育技术升级提供了关键支撑。随着研究的不断深入与技术的持续优化,鱼类饵料转换技术将在提升养殖效益、保障产业可持续发展及珍稀鱼类资源保护中发挥更加重要的作用。

基金项目

国家重点研发计划项目(2022YFD2001704),泰山产业领军人才工程资助(NO. tscx202312145),山东省重点研发项目 2022ZLGX01,盐城渔业高质量发展课题编号:ycyy2024001,现代农业产业技术体系专项(CARS-47-G24),水科院基本科研业务费(No. 2023TD53)

参考文献

- [1] 李武辉,孙成飞,董浚键,等.大口黑鲈开口摄食与转食人工配合饲料期消化系统发育特征[J].渔业科学进展,2023,44(1):80-89.
- [2] 董亚伦,谢雨辰,陶易凡,等.大口黑鲈仔鱼开口饵料及转食策略研究[J].动物营养学报,2025,37(10):6970-6982.

- [3] 郭忠娣, 刘亚秋, 黄静, 等. 不同转食策略对胭脂鱼仔鱼和稚鱼生长及存活率的影响[J]. 水产学报, 2016, 40(1): 64-72.
- [4] 赵莹, 李胜杰, 白俊杰, 等. 大口黑鲈选育群体幼鱼转食配合饲料的驯食研究[J]. 水产科学, 2019, 38(6): 846-850.
- [5] 胡仁云, 舒旗林, 丁勇, 等. 不同转食策略对松潘裸鲤仔稚鱼生长及存活的影响分析[J]. 南方农业, 2018, 12(35): 117-119.
- [6] 施永海, 谢永德, 刘永士, 等. 菊黄东方鲀幼鱼转食过程中生长和脂肪酸组成变化[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(1): 48-56.
- [7] 黄江峰, 张爱芳, 章海鑫, 等. 黄颡鱼仔鱼转食期食性转化分析[J]. 科学养鱼, 2016(10): 67-68.
- [8] 舒旗林, 黄晋, 胥贤, 等. 不同转食饵料对圆口铜鱼幼苗存活及生长的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(4): 129-131, 140.
- [9] 易建华. 不同开口饵料对胭脂鱼仔稚鱼成活率的影响[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [10] 刘浩, 李胜杰, 白俊杰. 鱼类食性的基因调控与遗传改良研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(11): 78-82.
- [11] 谢瑞涛. 饲料脂肪与蛋白质对杂交石斑鱼(褐点石斑鱼♀ × 清水石斑鱼♂)生长及代谢的影响[D]: [博士学位论文]. 湛江: 广东海洋大学, 2021.
- [12] 帅美琪, 徐亚恒, 李江涛, 等. 硒代蛋氨酸对大口黑鲈幼鱼血清、肝脏糖代谢的影响[J]. 河北渔业, 2024(12): 1-6.
- [13] 池英嘉, 朱健, 胡楠望, 等. 饲料中大豆卵磷脂对圆口铜鱼肝脏营养代谢的影响[J]. 淡水渔业, 2026, 56(1): 13-24.
- [14] 易建华, 郭忠娣, 刘本祥, 等. 转食和联合投喂对胭脂鱼仔稚鱼生长和消化能力的影响[J]. 水产学报, 2016, 40(2): 225-235.
- [15] 李晴, 张志华, 刘晓丽, 等. 蚕豆饲喂脆化养殖对草鱼鱼肉品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(7): 174-183.
- [16] 庄炆, 蔡乐天, 廖燕珍, 等. 气象条件对漳浦县石斑鱼养殖的影响[J]. 农业技术与装备, 2024(6): 117-118, 123.
- [17] 文岐莉, 秦秀东, 唐凌杰, 等. 鲤鱼高质量养殖管理技术应用要点浅析[J]. 吉林畜牧兽医, 2025, 46(6): 154-156.
- [18] 蔡小雨, 徐静雯, 张世勇, 等. 盐度对斑点叉尾(鱼回)肠道菌群的影响[J]. 南方水产科学, 2025, 21(3): 158-168.
- [19] 马金林, 段鹏飞, 李子奇, 等. 银川地区石斑鱼低盐度养殖研究[J]. 科学养鱼, 2024(10): 71-73.
- [20] 刘康, 卢玉典, 莫飞龙, 等. 不同盐度对苏氏圆腹(鱼芒)生长性能的影响[J]. 水产养殖, 2023, 44(12): 50-51, 78.
- [21] 舒旗林, 黄晋, 胥贤, 等. 不同的转食饵料对圆口铜鱼幼苗生长及存活的影响分析[J]. 水产养殖, 2020, 41(4): 32-36.
- [22] 孙志禹, 朱挺兵, 杨德国, 等. 圆口铜鱼人工驯养繁育进展与展望[J]. 淡水渔业, 2020, 50(1): 107-112.
- [23] 张现红, 李文洋, 刘宝良, 等. 密度胁迫对珍珠龙胆石斑鱼生长和生理的影响[J]. 渔业科学进展, 2025, 46(1): 71-81.
- [24] 姜建湖, 郭建林, 陈建明, 等. 基于工厂化循环水养殖模式的淡水石斑鱼大规格苗种培育技术[J]. 科学养鱼, 2021(4): 9.
- [25] 马兴宇, 唐忠林, 陈树桥, 等. 转食饲料对大口黑鲈幼鱼的存活率、抗氧化酶和消化酶活性及肠道菌群的影响[J]. 中国水产科学, 2024, 31(4): 403-415.
- [26] 张文兵, 于晓俊, 马睿, 等. 养殖大黄鱼品质的饲料营养调控研究进展[J]. 饲料工业, 2024, 45(22): 1-13.
- [27] 李瑜琬, 梁浩辉, 覃瑶, 等. 大口黑鲈仔稚鱼早期发育及对不同饲料原料的选择性试验[J]. 广东农业科学, 2025, 52(3): 100-112.
- [28] 苏超凡, 张世勇, 段永强, 等. 不同开口饵料对斑点叉尾鲷鱼苗生长性能、营养组成和消化酶活性的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(23): 73-77.
- [29] 符广才, 李道君, 杨宏伟, 等. 饲料中添加壳寡糖对斑马鱼肝肠健康和抗病能力的影响[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(5): 222-230.
- [30] 钟天. 中国结鱼胚胎发育及饲料蛋白质水平对幼鱼生长、肝肠、肌肉的影响[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉轻工大学, 2025.
- [31] 吕巍巍, 蒋琦辰, 黄伟伟, 等. 丁酸梭菌对不同湖区黄颡生长性能、肠道消化酶活性及肝脏抗氧化能力的影响[J]. 上海农业学报, 2025, 41(5): 70-75.
- [32] 张家炜. 应用虾青素和橙粕改善鲤鱼品质及其分子机制研究[D]: [博士学位论文]. 青岛: 中国科学院大学(中国

- 科学院海洋研究所), 2023.
- [33] 迟淑艳, 钟家丽, 何远法, 等. 斜带石斑鱼氨基酸转运载体 B0AT1 基因的克隆和组织表达[J]. 广东海洋大学学报, 2017, 37(6): 1-6.
- [34] 杨兰, 吴莉芳, 瞿子惠, 等. 饲料蛋白质水平对洛氏鲮生长、非特异性免疫及蛋白质合成的影响[J]. 水生生物学报, 2018, 42(4): 709-718.
- [35] 王成强, 相智巍, 李宝山, 等. 不同养殖密度对花鲈生长性能、消化酶活性、非特异性免疫及抗应激能力的影响[J]. 渔业科学进展, 2026, 47(1): 116-125.
- [36] El-Dweny, N.M.S., El-Bab, A.F.F. and Naiel, M.A.E. (2025) The Synergistic Role of β -Glucan and *Bacillus coagulans* on the Growth, Blood Hematological and Biochemical Indices, Intestinal Structure, Redox Status, Immune Response, and Regulation of Specific Genes in *Sparus aurata* L. *Aquaculture*, **602**, Article ID: 742316.
- [37] Ferreira, A.B., Piedade, L.R., Piedade, M.T.F. and Lopes, A. (2021) Biomass Production of the Aquatic Macrophyte *Ceratopteris pteridoides* (Hook.) Hieron (Pteridaceae) in Nutrient Addition Treatments. *Acta Botanica Brasiliica*, **35**, 126-131. <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0226>
- [38] De, M., Ghaffar, M.A., Bakar, Y. and Das, S.K. (2016) Effect of Temperature and Diet on Growth and Gastric Emptying Time of the Hybrid, *Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *E. lanceolatus* ♂. *Aquaculture Reports*, **4**, 118-124. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2016.08.002>
- [39] Anjum, A., Parvin, T., Sultana, S., Naziat, A., Ferdous, Z., Zahangir, M.M., et al. (2026) Water Added Probiotics Attenuates Sumithion-Induced Toxicity on Growth, Intestinal Deformities, Erythrocytic Abnormalities, and Immunity in Nile Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture Nutrition*, **2026**, Article ID: 2689798. <https://doi.org/10.1155/anu/2689798>
- [40] 张志豪, 姚传伟, 刘勇涛, 等. 复合诱食剂对大黄鱼稚鱼生长性能、摄食、肠道发育、抗氧化能力及免疫功能的影响[J]. 水产学报, 2025, 49(9): 20-31.
- [41] 万柏祺, 王园秀, 叶昀, 等. 基于多组学分析的荷包红鲤肠道菌群与性腺重关联机制研究[J]. 中国科学: 生命科学, 2025, 55(11): 2297-2309.
- [42] 杨政高. 复方中草药对珍珠龙胆石斑鱼生长、肠道菌群、免疫功能和血清代谢组学的影响[D]: [硕士学位论文]. 湛江: 广东海洋大学, 2022.
- [43] 车兵, 吴山功, 连总强, 等. 色氨酸对草鱼生长、免疫、抗氧化能力及肠道微生物的影响[J]. 淡水渔业, 2026, 56(1): 75-85.
- [44] 李鸿伟, 周萌, 孙淼, 等. 饲料中添加海藻多糖对大口黑鲈幼鱼生长及肠道健康的影响[J]. 中国水产科学, 2025, 32(8): 1123-1137.
- [45] Yao, Y., Zhou, W., Hu, J., Yang, Y., Li, M., Xia, R., et al. (2025) Strain-specific Effects of Fish Originated *Bacillus velezensis* on Growth, Gut Health, and Disease Resistance of Zebrafish. *Fish & Shellfish Immunology*, **163**, Article ID: 110400. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2025.110400>
- [46] Camacho-Méndez, K., Vásquez-Ponce, F., Ramírez, F., Valenzuela, C., Alcalde-Rico, M., López-Carvalho, A., et al. (2025) Gut Dysbiosis after Successive Administration of Florfenicol-Medicated Feed Alters Intestinal Inflammatory Response and Growth Patterns in Healthy Atlantic Salmon (*Salmo salar*). *Animal Microbiome*, **7**, Article No. 122. <https://doi.org/10.1186/s42523-025-00490-0>
- [47] Hissen, K.L., He, W., Wu, G. and Criscitiello, M.F. (2025) Dietary L-Glutamate Modulates Intestinal Mucosal Immunity of Juvenile Hybrid Striped Bass (*Morone saxatilis* ♀ × *Morone chrysops* ♂). *Frontiers in Immunology*, **16**, Article 1575644. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2025.1575644>
- [48] Zaghoul, E.H., Mustafa, F.H.A., Hassan, S.A.H., Abbas, E.M., Sharawy, Z.Z. and Ashour, M. (2025) A Probiotic Fermented *Ulva fasciata* Biological Extract Feed Supplement Improves *Litopenaeus vannamei*'s Growth Performance, Gut Bacteria, and Immunity-Related Gene Expression. *Probiotics and Antimicrobial Proteins*. <https://doi.org/10.1007/s12602-025-10693-1>
- [49] Chen, X., Zhang, J., Zhang, J., Zou, W. and Yan, Q. (2025) Isolation, Characterization, and Assessment of Probiotic *Lactococcus lactis* from the Intestinal Tract of Largemouth Bass (*Micropterus salmoides*). *Fishes*, **10**, Article 291. <https://doi.org/10.3390/fishes10060291>
- [50] 黄雨薇, 叶元士, 蔡春芳, 等. MDA 对草鱼肠道黏膜结构屏障损伤和肝胰脏、肠道胆固醇、胆汁酸合成影响[J]. 水生生物学报, 2016, 40(4): 869-878.
- [51] 吴永丽, 吴桂仪, 马细兰, 等. 石斑鱼循环水养殖系统与自然海水水质和细菌数量比较分析[J]. 水产养殖, 2022, 43(11): 10-14.
- [52] 崔冉, 张婷钰, 张欣. 鳊鱼饲料驯化与健康养殖技术[J]. 科学养鱼, 2025(7): 42-43.

- [53] 郝想军. 牧草与配合饲料不同搭配比及搭配时长对草鱼生长和肌肉品质的影响[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- [54] 刘恩彤. 饲料蛋白水平对杂交鲟生长、体组成和消化生理的影响[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2022.
- [55] 程学文, 史存卓, 刘鹰, 等. 投喂频率对珍珠龙胆石斑鱼生长影响的代谢组学分析[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(4): 593-602.
- [56] 龙凡, 肖俊, 丁立云, 等. 工厂化循环水模式下鳊鱼的饲料驯化和养殖技术研究[J]. 中国水产, 2025(5): 33-34.
- [57] 刘涛, 丁德明. 加州鲈配合饲料驯化技术[J]. 湖南农业, 2022(2): 23.
- [58] 李豪华, 廖涛, 白婵, 等. 运前密度和温度驯化对斑点叉尾鲴幼鱼模拟运输的影响[J]. 南方水产科学, 2024, 20(2): 160-171.
- [59] 马建忠, 任鹏, 陈舜, 等. 饲料中添加枯草芽孢杆菌对赤点石斑鱼生长、免疫和肠道菌群的影响[J]. 水产科技情报, 2025, 52(1): 42-48.
- [60] Mukul Ray, S., Ghule, S., Muthukumar, S., Banik, A. and Maji, C. (2020) Effects of Dietary Supplementation of a Single- and a Multi-Strain Probiotic on Growth Performance and Intestinal Histomorphology of Commercial Broiler Chickens. *International Journal of Poultry Science*, **19**, 363-371. <https://doi.org/10.3923/ijps.2020.363.371>
- [61] 徐丹, 王震, 刘勇涛, 等. 大黄鱼专题系列讲座大黄鱼精准投喂策略[J]. 科学养鱼, 2023(1): 11-12.
- [62] 仇玉燕, 张志勇, 陈淑吟, 等. 杂交鲟与黑鲟投喂频率的比较研究[J]. 南方水产科学, 2022, 18(1): 59-67.
- [63] 翁祖兴. 赤点石斑鱼工厂化循环水养殖试验[J]. 科学养鱼, 2023(9): 70-72.
- [64] 张盛. 饲料糖水平对斑点叉尾鲴生长和生理机能的影响[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [65] 侯金亮. 变态期棘胸蛙肠道组织与菌群结构研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2023.
- [66] 章晓红, 周华兴, 段国庆, 等. 黄颡鱼养殖试验[J]. 科学养鱼, 2026(1): 49-50.
- [67] 洪斌, 谢莎莎. 全雌鳊饲料养殖技术与效益分析[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(17): 36-38.
- [68] 郭贵良, 高颖, 闫先春. 配合饲料养殖乌鳢的转食驯化方法[J]. 科学种养, 2010(8): 39.
- [69] 张嘉祺, 喻亚丽, 路珂, 等. 野生、驯养和养殖硬刺松潘裸鲤肌肉营养成分分析[J]. 大连海洋大学学报, 2025, 40(2): 281-289.
- [70] Chen, Y., Zhang, L., Lin, X., Sheng, H., Chen, W., Cui, M., *et al.* (2025) Growth Performance, Digestive Capacity, and Transcriptomic Analysis of the Hybrid Offspring of *Mastacembelus armatus* × *Mastacembelus favus*. *Animals*, **16**, Article 11. <https://doi.org/10.3390/ani16010011>
- [71] Shehata, A.I., El Basuini, M.F., Elmaghraby, A.M., Amer, A.A., Yousef, M.I., Hussein, A., *et al.* (2026) Dietary *Monascus purpureus* Red Dye Enhances Immune Response, Antioxidant Defense, and Growth in Tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquaculture*, **613**, Article ID: 743348. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2025.743348>
- [72] Huo, J., Li, X., Hu, X. and Lv, A. (2024) Multi-Omics Analysis of miRNA-Mediated Intestinal Microflora Changes in Crucian Carp *Carassius auratus* Infected with *Rahnella aquatilis*. *Frontiers in Immunology*, **15**, Article 1335602. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2024.1335602>
- [73] Sudirman, A., Ilham, N.B., Yeyen, M., *et al.* (2026) Probiotic Feed Technology Innovation for Food Security in the Fisheries Sector (Case of Tilapia Cultivation with Homemade Feed). *BIO Web of Conferences*, **208**, Article ID: 03001.
- [74] Ahmed, I., Siddique, M.A.B., Haque, M.M., Hasan, M.M., Hasan, S.J., Chowdhury, T.I., *et al.* (2026) Selenium Nanoparticle-Enriched Diet Enhances Growth Performance, Morphometric Stability, and Meristic Integrity of Asian Seabass (*Lates calcarifer*) Broodfish Reared in Ras. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, **42**, Article No. 5. <https://doi.org/10.1007/s41208-025-01015-x>