

文章编号: 1674-5566(2025)04-0715-14

DOI: 10.12024/jso.20250404837

水产养殖鱼类粪便的特性、影响因素及基于营养调控的优化处理

张彦娇^{1,2}, 廖兆凡^{1,2}, 徐后国³, 麦康森^{1,2}

(1. 中国海洋大学 农业农村部水产动物营养与饲料重点实验室, 山东 青岛 266003; 2. 中国海洋大学 海水养殖教育部重点实验室, 山东 青岛 266003; 3. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071)

摘要: 随着集约化水产养殖尤其是工厂化循环水养殖系统(Recirculating aquaculture systems, RAS)的迅猛发展, 养殖水体中固体废物的高效管理已成为关键挑战。在RAS中, 悬浮固体的去除效率不仅直接决定系统的运行效能, 更关乎其长期稳定运行。作为养殖水体中固体废物的主要来源, 鱼类粪便的物理成形性与水中稳定性是实现养殖用水高效循环利用的关键前提。而且, 粪便的过度累积不仅会直接损害鱼类鳃部及体表健康, 还会通过加剧微生物竞争、促进氨氮与活性磷等营养盐异常积累, 引发水体富营养化与生态系统功能失衡。本研究系统梳理了养殖鱼类粪便物理化学特性、关键影响因素及营养调控策略的最新研究成果。研究发现, 鱼类粪便的水中稳定性、沉降速率和颗粒形态等物理特性存在显著种间差异, 并受养殖环境与饲料组成的双重调控; 尽管粪便化学组成与饲料存在同源性, 但其营养成分存在显著差异, 其中氮、磷等元素的高度富集是造成水体污染的主要诱因。在营养调控策略方面, 饲料优化作为源头治理的核心路径, 可通过调整营养成分、添加蛋白酶、植酸酶等外源酶制剂提升营养消化率; 借助黏合剂与浮力调节剂优化粪便物理性状; 以及利用益生菌、功能性寡糖等添加剂调节肠道微生态, 间接改善粪便组成。尽管当前研究已取得阶段性进展, 但针对不同养殖模式与品种的特异性研究仍有待加强。本研究旨在为创新饲料技术研发、推动水产养殖业绿色发展提供系统性理论依据。

关键词: 粪便特性; 粪便清除效率; 营养调控; 养殖鱼类; 工厂化水产养殖

中图分类号: S 963.2 文献标志码: A

水产养殖业作为全球渔业经济的核心组成部分, 在保障食物安全和促进经济发展方面发挥着日益重要的作用。联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)的数据表明, 2022年全球水生动物产量已达到9 440万t, 其中水产养殖产量首次超过捕捞渔业产量, 标志着水产养殖已成为水产品供应的主导生产方式^[1]。这一结构性转变不仅凸显了水产养殖在全球食品供应链中的关键地位, 也对行业的可持续发展提出了更高要求。随着全球对生态环境保护的重视, 绿色、低碳、循环已成为水产养殖业的核心发展方向。在传统生态养殖模式下, 水体自净能力可在环境容量范围内维持系统稳定。然而, 近年来集约化养殖和工厂化循环水养殖系统(Recirculating aquaculture

system, RAS)的快速发展, 在显著提升生产效率的同时, 也带来了水体富营养化、固体废物累积等一系列环境问题^[2]。特别是在RAS模式下, 养殖水体的固体废物管理直接影响系统的运行效率和稳定性, 成为制约产业可持续发展的关键因素之一。养殖水体中的固体废物主要来源于残饵、鱼类粪便、微生物絮团及无机悬浮颗粒, 其中粪便的贡献率最高^[3]。尽管通过精准投喂技术可减少残饵污染, 但鱼类代谢产生的粪便难以避免。这些粪便若未能有效去除, 将导致水体悬浮物浓度升高, 进而直接危害鱼类健康: 损害鳃部呼吸功能, 增加体表病原感染风险; 恶化水质: 促进异养微生物增殖, 加速氨氮(NH₃-N)和活性磷(PO₄³⁻)积累, 诱发富营养化; 增加尾水处理难度, 影响排放达标, 甚至可能对周边水体生态系统造

收稿日期: 2025-04-15 修回日期: 2025-05-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32273143); 中国水产科学院基本科研业务费项目(2023TD52); 国家海水鱼产业技术体系(CARS 47)

作者简介: 张彦娇(1981—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为水产动物营养与饲料。E-mail:yanjiaozhang@ouc.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydxxb.com>

成长期负面影响。所以,对粪便进行有效处理极为关键,不但影响到养殖水系统的处理效率,还直接关系到尾水排放的质量。基于上述挑战,本研究系统综述鱼类粪便的物理化学特性、粪便对养殖水体及鱼类健康的影响以及粪便管理的核心策略,重点探讨饲料营养调控(如酶制剂、黏合剂、益生菌等)的优化路径,以期为水产养殖业的绿色转型提供理论支撑。

1 鱼类粪便的特性及其影响因素

在水产养殖系统内,鱼类粪便包含液相与固相两个部分。其中,液相部分由水以及鱼体分泌物构成,固相部分由未消化吸收的物质、微生物以及从肠道磨损脱落下来的微量细胞物质组成^[4]。研究表明,鱼类粪便的理化特性(包括密度、水中稳定性、营养成分等)与饲料配方呈现显著相关性;具体而言,饲料的蛋白质来源(如鱼粉、豆粕等)和水平,碳水化合物类型(如淀粉、纤维素等)及含量,脂肪组成(饱和与不饱和脂肪酸比例),添加剂(如酶制剂、黏合剂等)均会通过影响消化吸收效率而显著改变粪便的组成和特性^[5]。

1.1 鱼类粪便的物理特性

鱼类粪便的物理性质,如密度、水中稳定性等,受鱼的种类、大小、饲料成分等多种因素影响,差异较大。目前,针对鱼类粪便物理性质的研究主要聚焦在水中稳定性和密度这两个方面。鱼类粪便的水中稳定性与粪便的含水量、黏度紧密相关。鱼类粪便的水中稳定性决定了其在水处理系统中的处理效率,一般来说,水中稳定性越高,粪便的清除效率也就越高。不同种类的鱼类在粪便含水量上会存在一定差异,例如,在鲤科鱼类中,粪便的含水量为75%~91%^[6],尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)粪便的含水量在88%左右^[7]。同时,粪便的含水量还会受饲料成分的影响。研究表明,饲料中的植物性成分(如淀粉)能够影响鱼体消化过程,这些植物性成分通常具有较强的吸水能力,导致食糜的含水量升高,进而导致粪便的含水量增加^[8]。饲料中添加黏合剂,能够提高饲料的水稳定性,同时也能增加粪便的含水量和黏度^[9]。

鱼类粪便的密度决定了其在水体中的沉降性能。在实际生产中,大多数去除水产养殖系统中悬浮固体的方法为沉淀法和过滤法^[10]。然而,

由于细微颗粒质量小、沉降速度慢(对于沉淀法)以及粒径小易穿过滤材孔隙(对于过滤法)等原因,无论是沉淀法还是过滤法,在处理细微颗粒方面的效果都比较有限^[11]。这些固体废物在水体中存在的时间越长,暴露于水流剪切力的时间也就越长,就越容易被分解成细小颗粒,进而导致水体恶化。UNGER等^[12]提出了一种新方法,即通过在饲料中添加一定剂量的浮力调节剂,使鱼类排出的粪便能够漂浮在水面上。理想状态下,粪便会全部集中在养殖水体的上层,此时只需采用机械过滤手段处理上层养殖水体,这将大大降低废物管理的成本,提高清洁效率。由于降低粪便密度更适用于过滤法处理装置,而沉淀法对高密度粪便的处理效率更高,所以在养殖过程中,针对不同种类的处理装置,可以通过在饲料中灵活添加沉性或浮性材料来调节鱼类粪便密度,以更好地应对处理需求^[13]。

粪便的形态特征同样是影响其在养殖系统中清洁效率的重要因素。一般来说,粪便的形态特征在其排出鱼体时就已基本确定。通常,成形的粪便体积较大,在水中能长时间保持原有形状,不易分解成更小的颗粒;而弥散的粪便体积较小,在水中会更易分解成小粒径颗粒,小粒径颗粒不仅容易穿透过滤介质,难以通过常规过滤手段有效截留,而且其较大的比表面积会加速吸附水中的有害物质,进一步增加水质净化的难度,从而显著降低清洁系统的处理效率。因此,这种小粒径的固体颗粒往往是影响整个清洁系统效率的关键因素。一般来说,颗粒的去除一方面取决于其大小,另一方面取决于其形状。颗粒的圆度是一个重要指标,通常颗粒的圆度越小,其形状越不规则,与过滤介质的接触面积和摩擦力可能越大,从而被过滤去除的机会就越大^[14]。同时,颗粒的形状对其沉降特性也有很大影响。例如,絮凝颗粒比球体沉降速度慢很多,这是因为絮凝颗粒垂直于运动方向的横截面积更大,受到的摩擦阻碍也更大^[15]。在以往对养殖水体粒径分布的研究中,很少有研究考虑过颗粒的形状。大多数用于评估颗粒大小的仪器和计算都基于球形的假设,但在实际情况中,颗粒的形状往往是不规则的,如棒状、薄片状和纤维状等,且这些形状的颗粒在水体中的分布占比也各不相同^[16]。这一研究缺口导致在设计养殖水体清洁

系统时,难以精准匹配实际颗粒特性,常出现过滤设备选型不当、处理效率低下等问题,不仅造成资源浪费,还可能影响养殖动物的生存环境和养殖效益。因此,深入研究颗粒的形状及其分布占比,对于精准计算和优化固体去除处理所需的粒度分布具有重要的意义。

1.2 鱼类粪便的化学特性

粪便的主要组成成分与饲料高度相似,然而,两者在营养成分上却存在一定差异,这种差异主要与饲料成分的消化率相关^[17]。粪便的干物质成分主要有蛋白质、脂肪、碳水化合物、纤维素和矿物质^[18]。粪便中主要的营养物质是氮、磷和溶解的有机碳化合物,这3种物质在水体中会促进藻类等浮游生物的大量繁殖,消耗水中的溶解氧,进而破坏水体生态平衡,是造成水体污染的主要因素^[19-20]。根据CRAB等^[21]的研究,生产1 kg的活鱼需要1~3 kg的干饲料,由于鱼无法完全消化所摄食的饲料,其中36%会以有机废弃物(大部分是粪便)的形式排出体外,大约75%的饲料中的氮和磷未得到利用,仍作为废物留在水中^[22]。研究^[23]表明,粪便中营养物质的浸出速度会随着暴露于水中的时间而增加。因此,及时地收集处理粪便格外重要。

研究^[24]表明,当鱼类摄入氨基酸组成不均衡的饲料后,其体内的氨基酸会发生转氨和脱氨反应,进而导致排出的粪便中氮含量增多。粪便中磷的含量受其来源影响显著,尤其是当磷来源于植物性蛋白时,在植物性蛋白来源中,约60%~80%的磷以植酸磷的形式存在^[25]。由于大部分肉食性鱼类的消化道缺乏合成植酸酶的能力,因此大部分肉食性鱼类对植酸磷的消化能力很低^[26],这就意味着,如果在饲料中添加过多植物性成分,会使粪便中的磷含量增加。当这些粪便排泄到水中时,会对环境造成污染^[27]。在RAS系统中,来自粪便的有机碳可用于反硝化作用,从而降低RAS系统中的水更换量和营养物质排放量^[28]。然而,当反硝化作用强度较高时,仅靠粪便自身所含的有机碳不足以满足反硝化作用的需求,为了确保反硝化作用持续、高效进行,还需要适时、适量地补充碳源^[29]。在其他养殖模式以及自然条件下,鱼类粪便中的部分有机碳会随粪便沉淀,而部分会溶解在水中,过量的溶解有机碳会使水体的化学需氧量和生化需氧量升高,

导致水质下降^[30]。然而,另一方面,溶解有机碳是水体中异养微生物的重要碳源,能够促进微生物的生长和繁殖,进而参与水体中的物质循环和能量流动,对整个养殖系统的生态平衡产生重要影响^[31]。

1.3 鱼类粪便的生物学特性

通常情况下,鱼类粪便中的微生物可能来源于鱼类肠道、水体环境以及食物等。鱼类肠道内存在着大量的微生物,这些微生物与鱼类共生,并参与鱼类的各种生理功能,如生殖、发育、营养、免疫和应激反应等。因此,肠道微生物群落常被称作“额外器官”^[32]。正因为肠道微生物群落在鱼类生理中具有如此重要的地位且参与了消化过程,当食物在肠道中被消化吸收后,未被完全消化的物质以及肠道内的部分微生物会随粪便排出体外,所以鱼类肠道微生物是粪便中微生物的主要来源之一。鱼类生活在水中,水体中存在着多种多样的微生物,包括细菌、真菌、藻类等,这些微生物能够通过鱼类的鳃、皮肤和口腔等部位进入鱼体。其中一部分会在肠道中定植,而未能在肠道内成功定植的那部分微生物则可能随着粪便排出体外。有研究^[33]表明,在野外的大多数鱼体中,近80%的肠道微生物(OTU水平)和水体环境中的微生物相同。此外,当水温、溶解氧、pH等水环境因子发生变化时,鱼类的肠道微生态环境也会随之波动,进而对机体免疫力及基础代谢能力产生影响^[34]。鱼类所摄取的食物(如:浮游生物、水生植物、小型水生动物以及饲料的表面和内部)都附着有各种微生物^[35]。当鱼类摄入这些食物后,食物中的微生物一部分会受到鱼类自身消化酶和免疫系统的作用,有的会随着粪便排出体外,只有极少一部分能够定植在肠道中。

2 鱼类粪便对水产养殖的影响

鱼类粪便不仅直接影响着养殖动物自身的健康与生存状况,还对水处理设施的运行以及养殖效益产生显著影响。此外,鱼类粪便在尾水排放环节的作用,直接关系到整个养殖生态环境的稳定与平衡。鉴于鱼类粪便在水产养殖各环节的重要性,将从3个关键方面深入探讨鱼类粪便特性对水产养殖的影响。

2.1 对养殖动物的直接影响

养殖鱼类粪便的累积往往是导致大多数水质问题的根源之一。最直接的表现就是水体中总悬浮固体浓度的增加,而总悬浮固体中很大一部分就是悬浮颗粒物。在集约化养殖过程中进行饲料投喂,其中未被鱼类摄入的残饵会与鱼类排出的粪便一起,进一步使水体中悬浮颗粒物的浓度升高。颗粒物质对鱼类健康有多方面的影响。有研究表明,颗粒物质能够对鱼体的鳃等结构造成物理损伤^[36],当水体中颗粒物浓度过高时,还会使水体的浊度升高,进而导致水体的可见度降低。这会使鱼体产生不良的生理反应,例如应激激素水平、红细胞数、白细胞数等血液学参数发生变化以及免疫水平下降等,进而降低鱼类的存活率^[37]。此外,也有研究表明,水体中颗粒物浓度的增加能够损害幼鱼的发育^[38];不仅如此,当水体因颗粒物浓度增加导致能见度降低时,同时会直接影响鱼类的摄食行为、反应距离以及猎物选择等,从而限制鱼群的觅食成功率^[39]。

2.2 对水处理设施压力及养殖效益的影响

固体颗粒除了能直接对鱼类造成损害外,还能通过浸出重金属离子、有害化学物质等有害物质给鱼类带来间接危害。此外,颗粒的浸出程度会随着颗粒尺寸的减小而增加。因此,粒径小的颗粒固体被认为对水产养殖系统的水质会构成更大威胁^[40]。在开放式和半开放式养殖系统中,由于集约化养殖使得粪便产量大幅增加,而系统水体又与自然水体之间存在大量的水资源交换。在这种情况下,如果粪便不能及时清除,其中大部分营养物质会溶解在水中,随着水体交换进入自然水体,对环境产生影响^[41]。在自然界中,化学自养细菌(亚硝化单胞菌和硝化杆菌)在将NH₄⁺氧化到NO₂⁻,最后再转化为NO₃⁻的过程中,这些离子被水生植物、藻类和细菌吸收,并作为氮源同化为生物质组分,而过量存在的含氮化合物会导致水体富营养化,从而破坏水生生态系统的平衡,并可能导致水生动物大量死亡^[42]。在RAS中,及时清除粪便尤为重要,因为粪便几乎对RAS中所有组件的运行都有着重要影响^[2]。处理回路在RAS的净化水质方面起着关键作用;若回路中悬浮的粪便颗粒不能有效清除,会迅速淤积在滤池孔隙内,堵塞水流通道,使生物

滤池的比表面积大幅减小,这会极大地压缩硝化细菌的生存空间,限制硝化细菌的生长;同时,受限的空间还会阻碍硝化细菌接触营养物质与反应底物,使其反应活性降低^[43]。此外,随着养殖系统内固体颗粒浓度的增加,水体的酸碱度、溶解氧含量、氨氮浓度等水质参数也会发生变化,而这些变化会对养殖鱼类的正常生长以及亚硝酸盐氧化细菌的硝化作用产生不利影响^[44]。

2.3 对尾水排放和养殖生态环境的影响

在水产养殖过程中,如果固体废物没有被充分去除,水体环境就会失衡,异养细菌和自养细菌会为争夺溶解氧、碳源、氮源等有限的资源而展开激烈竞争。这种竞争会干扰正常的氮循环过程,导致水中氨的生成速率远高于转化速率,氨含量也会逐渐升高。氨的毒性很强,其能够穿透生物细胞膜,干扰细胞内的酸碱平衡,破坏酶的活性,进而影响生物的正常生理功能。在水产养殖环境中,鱼类代谢产生的氨不断积累,会显著改变水体化学性质,促使水体pH升高、溶解氧降低,形成恶劣水质条件。因此,氨不仅会对养殖区域内的鱼虾贝类等养殖生物造成严重危害,若未经妥善处理就直接排放还会对周边更大范围的水生生态系统产生不良影响^[45]。许多研究表明,水体中高浓度的氨会通过多种不良生理作用影响鱼类健康。氨可穿透鱼鳃上皮细胞,与血液中血红蛋白的携氧位点结合,降低其携氧能力,导致鱼类窒息;进入体内的氨还会干扰肝脏中尿素循环的正常代谢,造成氮代谢紊乱,损害肝脏功能;在肾脏中,氨会破坏肾小管细胞的离子转运功能,影响肾脏排泄功能;同时,氨能抑制免疫细胞中相关酶的活性,阻碍免疫因子的合成与分泌,削弱鱼类免疫系统,进而降低鱼类的摄食活性、繁殖能力和存活率^[46-47]。

磷也是鱼类粪便中的重要元素之一,水产养殖饲料中相当一部分磷会以固体形式存在于粪便中^[45]。磷负载量,通常是指水体中磷元素的总量及其对生态系统的压力;磷负载量在很大程度上受养殖系统以及饲料成分组成的影响,因为这些因素决定了养殖物种对磷的消化和吸收效率^[48]。为了防止水体富营养化,水体的磷酸盐的含量必须控制在50 μg/L以下,一旦超标,就极易导致水体污染^[49]。水体富营养化会导致溶解氧水平显著降低,进而恶化水质,为产生毒素的蓝

藻提供适宜的快速繁殖条件。随着可溶性磷酸盐在水中持续积累,当达到一定阈值时,便会暴发藻华现象;藻华不仅会消耗大量溶解氧,造成水生生物缺氧死亡,其产生的毒素还会在水生食物链中传递、富集,严重破坏整个水生生态系统的平衡与稳定,并快速在生态系统中扩散^[50]。

3 优化鱼类粪便性状的营养调控措施

在水产养殖中,粪便处理对于维持良好的水体环境和养殖生态起着关键作用。当前,国内常见的粪便处理方法有物理处理(沉淀、过滤)、化学处理(絮凝、消毒)和生物处理等方式。然而,国内现有研究多围绕外部处理技术展开,很少有研究聚焦于对粪便本身性状的优化^[51]。而粪便的物理化学性状,如含水量、黏度、颗粒大小等,直接影响其在养殖水体中的分散、沉降特性以及后续处理难度,忽视对其优化可能限制粪便处理效率的提升与处理成本的降低。利用营养饲料途径提升粪便清除能力,能够从源头上减少粪便产量,提高粪便去除效率。相较于传统物理、化学处理手段,该途径无须大量使用药剂,可有效避免化学残留对水体及养殖生物的潜在危害,降低环境风险。其绿色环保的特性高度契合水产养殖业可持续发展要求,为维护养殖水域生态平衡、推动产业高质量发展提供了新的技术路径。

3.1 提升饲料消化率

在养殖系统的生产过程中,鱼类摄食饲料后产生的废物会对环境造成多方面影响。从本质上讲,这些废物作为鱼类代谢的最终产物,以固体(粪便)和溶解态的形式存在于水体中,不仅会改变水体的理化性质,还可能引发一系列生态问题^[52]。有效管理养殖系统中的鱼类粪便,对于维持水质、保障鱼类健康以及减少环境污染至关重要。尽管可以通过合理调整投饲技术、优化养殖条件、加强水质监测与管理以及改进水处理系统等方式,来有效减少生产过程中产生的废物。但在实际养殖过程中,常常受到养殖成本、技术水平、场地设施等条件限制,使得这些方式的作用难以充分发挥,效果有限。水产饲料中原料的组成、质量以及营养素的平衡,不仅对鱼类健康和营养状况有着重大意义^[53],而且对粪便的特性也有显著影响。通过优化饲料来调整粪便的性质,能够从源头提高粪便处理的效率,对养殖生产具

有重要价值。鱼类产生的粪便废物量与饲料成分的可消化性密切相关,影响饲料干物质消化率的成分,会直接影响固体废物的产生量及其回收处理效果。在水产养殖中,消化率是估算粪便产量及其去除效率的关键指标。一般而言,饲料消化率与粪便产量呈显著负相关,即饲料的消化率越高,鱼类对营养物质的吸收越充分,未被消化吸收而排出体外形成粪便的物质就越少^[54]。这一特性使得提高鱼类对饲料的消化率成为粪便处理的重要突破口。究其原因,较低的消化率不仅会导致粪便产量增加,加重后续粪便处理系统的负担,还会使粪便中残留更多未消化的营养物质,增加养殖水体污染的风险。因此,通过科学配方设计,精准调配饲料中蛋白质、脂肪、碳水化合物等营养成分比例,以及添加酶制剂等手段,能够有效提高鱼类对饲料的消化率,这对于从源头减少粪便产生、提升粪便处理效率、降低养殖环境污染风险具有至关重要的意义。

首先,饲料组成对消化率有着显著影响。有研究指出,饲料中的植物性成分常含有抗营养因子,如植酸、单宁等,这些抗营养因子会干扰鱼类对饲料中营养物质的消化吸收过程,降低消化酶活性,进而导致鱼类对饲料的消化率下降^[55],甚至还会使粪便的稳定性降低,增加后续处理难度^[56]。相比之下,鱼粉作为一种优质蛋白源,其氨基酸组成与鱼类需求高度匹配,在适口性和可消化性方面都明显优于植物蛋白原料。不过,随着水产养殖规模的不断扩大,鱼粉需求量持续攀升,然而鱼粉资源有限且价格高昂^[57]。因此,以植物蛋白为代表的替代蛋白源,或其他成本较低的蛋白原料,在水产饲料中的广泛应用已成为必然趋势^[58]。

其次,饲料的营养均衡性也是影响鱼类消化率的关键因素。蛋白质作为鱼类生长发育和维持生命活动的核心营养素,不仅是构成鱼体组织、器官的物质基础,参与酶、激素等生物活性物质的合成,还对鱼类的免疫功能和新陈代谢起着关键作用。饲料中蛋白质的含量与质量,直接关系到鱼类消化酶的活性和分泌水平,进而显著影响鱼类对饲料的消化率。当饲料中的蛋白质含量适宜且氨基酸组成与鱼类自身需求相匹配时,鱼类能够更有效地消化吸收蛋白质^[59]。如果饲料中某种必需氨基酸缺乏或过量,都会干扰鱼类

对蛋白质的正常消化和利用。例如,蛋氨酸和赖氨酸是大多数鱼类的限制性氨基酸,缺乏这些氨基酸会降低蛋白质的消化率,进而影响鱼类的生长性能;相反,过量的氨基酸不仅会造成饲料成本增加,还可能导致代谢负担加重,影响消化功能^[60-61]。

脂肪作为鱼类所必需的营养物质,其在鱼类生命代谢过程中具有多种生理作用,例如对脂溶性维生素的吸收和体内激素的合成等。饲料中脂肪的含量和脂肪酸组成与鱼类的消化率密切相关。不同的脂肪含量和脂肪酸构成,会通过影响鱼类的消化酶活性、肠道健康等方面,进而对鱼类消化率产生重要影响。例如, ω -3系列不饱和脂肪酸(EPA 和 DHA)对许多鱼类的生长、繁殖和免疫力具有重要意义,富含这些脂肪酸的饲料能够改善鱼类的生理功能,促进消化酶的分泌和活性,从而提高饲料的消化率^[62]。然而,如果饲料中脂肪含量过高,超出鱼类机体的代谢和储存能力,多余的脂肪会在肝细胞内异常堆积。这会破坏肝细胞的正常结构和功能,引发肝细胞炎症、变性和坏死,最终导致脂肪肝等疾病。患病鱼类肝脏分泌胆汁的能力下降,脂肪乳化作用减弱,同时消化酶的合成和分泌也受到抑制,从而严重影响消化功能^[63]。此外,饲料中的脂肪酸在储存过程中,易受氧气、光照、温度等因素影响发生氧化酸败。氧化酸败过程中,脂肪酸会分解产生醛、酮、过氧化物等有害物质,这些物质不仅破坏了脂肪酸本身的营养结构,降低饲料营养价值,还会产生不良气味和味道,降低饲料适口性,导致鱼类摄食量下降;同时,摄入这些氧化酸败产物会损伤鱼类肠道黏膜结构和功能,抑制消化酶活性,进而对鱼类消化率产生显著的负面影响^[64]。

碳水化合物是水产动物所需能量的重要来源之一,但鱼类对碳水化合物的消化利用能力因种类而异。一般来说,草食性和杂食性鱼类对碳水化合物的耐受能力相对较高,而肉食性鱼类则较低^[65]。饲料中碳水化合物的种类和含量对鱼类的消化率至关重要。简单碳水化合物,如单糖和双糖,因其分子结构简单,较容易被鱼类消化吸收,但是,当饲料中简单碳水化合物过量时,会导致鱼类血糖迅速升高,进而影响胰岛素的正常分泌和体内代谢平衡;另一方面,复杂碳水化合物,如淀粉和纤维素,其消化过程需要特定的酶

类参与,例如,淀粉酶可分解淀粉,而纤维素的消化则依赖于鱼类肠道内共生微生物所分泌的纤维素酶等^[66]。如果饲料中碳水化合物含量过高且鱼类无法有效消化利用,未被消化的碳水化合物会在肠道内积累,刺激肠道微生物异常增殖,导致消化不良,出现腹胀、腹泻等症状;同时,这种异常还会破坏肠道内正常的微生态平衡,引起肠道功能紊乱,影响肠道对营养物质的吸收,最终降低饲料的消化率^[67]。

维生素和矿物质尽管在饲料中的含量相对较少,然而它们却是鱼类维持正常生理功能和保障消化过程顺利进行的关键要素,在鱼类的生长、发育、免疫等多个方面发挥着不可替代的作用。例如,维生素 C 和维生素 E 具有抗氧化作用,能够保护肠道细胞免受氧化损伤,维持肠道正常的消化吸收功能^[68]。矿物质则是许多酶的组成成分或激活剂,对鱼类的骨骼发育、渗透压调节和神经传导等生理过程至关重要^[69]。饲料中维生素和矿物质的缺乏或过量都会对鱼类消化率产生不良影响。维生素 B 族在鱼类体内以辅酶的形式参与糖、蛋白质和脂肪的代谢过程,缺乏维生素 B 族会导致这些代谢过程受阻,影响能量的正常产生和利用,同时还会影响神经系统的正常功能,使鱼类出现食欲不振和消化紊乱等症状^[70]。钙、磷是鱼类骨骼的重要组成成分,当饲料中钙、磷比例不合适时,会导致鱼类对饲料中钙、磷的吸收和利用效率降低,进而影响饲料利用率,还可能引发其他生理功能异常^[71]。

水产饲料中的原料的品质会受到动态原料市场的制约,这对鱼类消化率的影响是难以预估的^[56]。鉴于原料市场波动对饲料配方调整带来的不确定性,以及由此对鱼类消化率产生的不可控影响,相比于单纯调整饲料配方组成,在饲料中添加酶制剂等功能性物质,被认为是一种更可靠稳定的提高饲料效率和消化率的途径。有研究表明,植酸盐在饲料中会与钙、镁、锌等金属离子以及蛋白质结合,形成难以消化的复合物,进而影响鲤(*Cyprinus carpio*)、尼罗罗非鱼、虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)等常见养殖鱼类对营养物质的吸收,对其生长和饲料转化率产生负面影响^[72]。而在饲料中添加植酸酶能够有效缓解这一负面效应。其作用原理在于,植酸酶可将植酸盐分解为肌醇和磷酸,释放出被结合的磷和氮等

营养物质;研究显示,在饲料中使用微生物植酸酶,可以显著提高鱼类对植酸结合的磷和氮的生物利用度,不仅有助于鱼类营养吸收,还能降低磷排放到水生环境中的量,对减少水体富营养化风险、保护养殖生态环境具有重要意义^[73]。除了植酸酶,蛋白酶、淀粉酶、纤维素酶等多种酶制剂在众多鱼类养殖实践中也已证明能够有效提高饲料效率。此外,不同的酶制剂之间还存在协同作用。例如,在尖齿胡鲶(*Clarias gariepinus*)中,复合酶制剂(木聚糖酶、淀粉酶和蛋白酶)单独使用或组合使用时,能够改善非洲鲶鱼的生长状况、饲料效率以及机体健康^[74]。类似地,在尼罗罗非鱼的研究中也得到了相同的结果,饲料中补充木聚糖酶和植酸酶,能够增加蛋白质、脂肪和碳水化合物的表观消化率,提升尼罗罗非鱼的生长性能^[75]。

3.2 饲料添加剂会改变粪便的物理性质

除了通过提高饲料消化率来减少粪便产量外,还可以通过改变粪便的性质来提升其去除效率。例如,可以通过使用黏合剂来提高饲料的水中稳定性,从而间接地提高粪便的水中稳定性。BRINKER等^[40]发现在饲料中添加黏合剂(海藻酸钠和瓜尔胶)对虹鳟粪便的稳定性有积极作用,同时还提高了固体颗粒的去除效率^[76]。除了添加黏合剂可以增加饲料的黏度外,饲料成分中的植物性原料也能起到增加饲料黏度的作用^[77]。研究表明,饲料中添加糊化淀粉能够增加粪便的稳定性以及清除效率^[7]。但需要注意的是,粪便的稳定性并非总是与黏度呈正相关。在尼罗罗非鱼的研究中发现,饲料中添加8%的瓜尔胶增加了食糜的黏度,但却降低了粪便的回收率^[78]。类似地,在条纹鮰(*Pangasianodon hypophthalmus*)的研究中也发现,饲料中添加了非淀粉多糖增强了粪便的黏度和含水量,但却加速了粪便在水中的崩解,降低了粪便的水中稳定性^[79]。由于黏合剂通常是结构复杂的多糖,而大多数鱼类自身无法产生分解这些多糖的相关酶,所以黏合剂难以被鱼类消化吸收^[80]。然而,有些鱼类肠道菌群的某些成分可以产生酶,这些酶能够使一些非淀粉多糖被鱼类消化利用。不过,这一消化过程的效率会受到多种因素的影响,比如肠道特定的解剖学和生理学特征,以及肠道内容物中可利用的非淀粉多糖底物的浓度等^[81]。在

一项虹鳟的研究中发现,饲料中等黏度瓜尔胶的添加量为0.4%时的粪便稳定性低于0.3%剂量的粪便稳定性,这可能就是因为瓜尔胶浓度增加加强了微生物酶的活性作用,降低了瓜尔胶的黏合作用,最终使得粪便的稳定性降低^[76]。因此,对于黏合剂的种类和剂量选择格外重要。

粪便的密度对其去除效率有着关键影响。由于粪便密度直接关系到其在水体中的沉降特性,因此在不同规模的养殖系统中,采用的清除方式也有所差异。在规模较小的养殖系统中,粪便可以通过虹吸、粪便收集器和网具轻松清除;但在大规模养殖投喂系统中,通常会设计一个锥形底部的澄清器来去除废弃物^[82]。这些方法主要通过沉淀的方式清理下沉的粪便。然而在实际养殖过程中,鱼的游动会产生水流扰动,打破水体的稳定状态,干扰粪便的正常沉降;水的流速过快会使粪便难以在澄清器等沉淀设备中充分沉降,流速过慢则可能导致水体中悬浮物质增多影响沉淀效果,而水流方向的改变也会使粪便偏离预定的沉淀路径^[40]。因此,沉淀的效率往往会影响到这些因素的显著影响。所以,在实际生产中,为确保粪便的有效清除,往往还会结合过滤法等手段来协同处理水体中的粪便。研究发现,在虹鳟饲料中添加低密度软木颗粒,能够使虹鳟产生漂浮的粪便。为处理这些漂浮的粪便颗粒,实验中专门设计了一种特殊的表面分离器,该分离器可将粪便颗粒直接输送到滚筒过滤器中。当投喂富含软木成分的饲料时,滚筒过滤器的清除效率得到大幅提高^[83],并且这一方法在商用的养殖系统中也取得了良好的效果^[84]。然而,在通过添加低密度物质降低粪便密度时需谨慎选择。由于多数浮力物质性质稳定且难以被消化,因此在选择浮力材料时,必须充分考量其对鱼体生长、摄食效率和肠道健康可能产生的负面影响。YANG等^[82]在尼罗罗非鱼上的研究发现,在饲料中添加3%~5%剂量的软木能够降低饲料和粪便的密度,但对鱼的生长性能和肠道组织形态产生了负面影响。进一步研究表明,在软木饲料中补充瓜尔胶和蛋白酶,瓜尔胶可以改善饲料的黏性和结构,蛋白酶有助于提高营养物质的消化吸收,二者协同作用,不仅可以进一步增强粪便的漂浮性,还能有效减轻软木饲料对生长性能和肠道健康的负面影响^[85]。因此,在实际应用中,可

以综合考虑不同的添加剂来控制粪便的性质,以更大程度地发挥各种添加剂的作用。

粪便颗粒的形状不仅是影响鱼类健康的一个重要因素,同时对其在水体中的沉积和过滤效率等方面也有很大影响。粪便颗粒的形状在很大程度上受制于饲料成分的构成,尤其是植物性成分。这是因为植物性成分中往往含有较多的膳食纤维、多糖等物质,这些物质在鱼类的消化过程中,可能由于难以被完全消化分解,从而影响粪便的物理结构和形状。相较于其他成分,植物性成分对粪便颗粒形状的塑造作用可能更为显著。BECKE 等^[86]在虹鳟的研究中发现养殖系统中的颗粒形状与 2003 年在商业大西洋鲑 (*Salmo salar*) 生产设施的水中发现的颗粒形状有些不同^[87],这种差异可能是由于饲料配方的变化所致,随着时间推移,饲料配方中小麦的含量逐渐降低,小麦中富含纤维素,在饲料中占比较高时,会使鱼类粪便中产生较多纤维素颗粒,当小麦含量减少后,粪便中纤维素颗粒的占比相应改变,进而导致了两种养殖系统中粪便颗粒形状的不同。

3.3 肠道健康的营养调节

除了前文所述的通过优化饲料成分、调整粪便物理性质等方法来促进粪便清除外,鱼类肠道健康状况的改善也极有可能在粪便清除过程中发挥重要作用。肠道作为营养物质消化吸收以及粪便形成的关键场所,其健康状态的改变可能会影响粪便的物理和化学特性,进而对粪便的清除效率产生影响。在以往植物性原料替代鱼粉的研究中,当鱼粉的替代比例增加时,往往会影响鱼类肠道微生物群落的稳定,损伤鱼类的肠道健康。例如在大菱鲆 (*Scophthalmus maximus*) 的研究中,饲料中豆粕含量超过 30% 时,会导致大菱鲆的肠道组织形态受损,进而诱发肠炎,且肠道中潜在致病菌的相对丰度也有所增加^[88]。类似地,在大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 上的研究也表明,用豆粕替代鱼粉的比例超过 50% 时会诱发肠道炎症,同时肠道微生物中潜在益生菌的丰度显著下降^[89]。肠道微生物群落失调将直接降低鱼类对饲料的利用效率^[90],这会加重养殖水体污染负担。在水产养殖中,益生菌能够通过提高消化酶活性(如脂肪酶、蛋白酶和淀粉酶活性),来帮助幼鱼阶段的鱼类降解难以消化的化

合物,如复杂的多糖、蛋白质和脂肪等,进而提高鱼类的生长性能^[91]。例如,在梭鲈 (*Sander lucioperca*) 幼鱼的饲料中添加乳酸杆菌时,可观察到幼鱼的骨骼发育得到改善,并且胰蛋白酶与胰凝乳蛋白酶的活性比也有所提高^[92]。在鲤的研究中也有类似的发现,饲料中补充甘露寡糖能够显著提高肠道中乳酸菌的相对丰度,同时还提高了饲料转化率^[93]。

尽管目前在鱼类研究领域,尚未有直接探讨肠道健康与粪便性质关系的相关研究,但从鱼类生理机制角度来看,肠道作为营养物质消化吸收的核心器官,一旦其健康状态受损,必然会干扰正常的消化与吸收过程,进而不可避免地对粪便的物理化学性质产生影响。这一研究空白,实际上为水产养殖领域探索优化粪便管理、提升养殖效益提供了极具潜力的研究方向。在哺乳动物的众多研究中已明确证实,肠道健康与粪便状态之间存在着紧密的内在联系。肠道健康状况的改变,会通过影响肠道蠕动速率、水分重吸收效率、微生物代谢产物分泌等多种生理过程,直接作用于粪便的形成与排出,从而改变粪便的状态^[94]。因此,通过调节肠道健康,能够有效干预这些生理过程,实现对粪便状态的调控。例如,在针对小鼠的研究中发现,患有肠易激综合征的小鼠与健康小鼠相比,其肠道黏膜屏障的完整性遭到破坏,肠道微生物群落结构失衡、多样性显著降低。这种肠道健康状态的异常,导致肠易激综合征小鼠肠道对营养物质的消化吸收能力下降,水分代谢紊乱,最终使得粪便在体积、含水量等形态特征上与健康小鼠产生极大差异;而当通过特定手段改善肠易激综合征小鼠的肠道健康后,随着肠道黏膜屏障修复和微生物群落的逐渐恢复,小鼠粪便的各项特征也随之改善,最终恢复到与健康小鼠相似的状态^[95-96]。

4 结论与展望

本研究通过系统梳理鱼类粪便理化特性、关键影响因素及营养调控策略,为工厂化循环水养殖体系的生物污染控制与系统优化提供了重要理论依据。粪便管理作为维持 RAS 稳定运行的核心环节,其理化特性的精准调控是提升水体自净效能和降低尾水污染负荷的重要措施。面向水产养殖绿色发展的重大需求,后续研究的主要

方向:(1)深入解析粪便特性调控机制,优化粪便处理手段;(2)开发实时监控技术,构建污染物释放预测模型;(3)创新营养调控技术,从饲料配方、肠道健康等多维度提升粪便成型稳定性。在此基础上,通过多学科交叉与系统化管理,突破“饲料-粪便-水体”系统互作机制认知,推动水产养殖业可持续发展。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2024—blue transformation in action [R]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2024.
- [2] BADIOLA M, MENDIOLA D, BOSTOCK J. Recirculating aquaculture systems (RAS) analysis: main issues on management and future challenges [J]. Aquacultural Engineering, 2012, 51: 26-35.
- [3] HEIDERSCHEIDT E, TESFAMARIAM A, PULKKINEN J, et al. Solids management in freshwater recirculating aquaculture systems: effectivity of inorganic and organic coagulants and the impact of operating parameters [J]. Science of the Total Environment, 2020, 742: 140398.
- [4] GUILLAUME J, KAUSHIK S, BERGOT P. Nutrition and feeding of fish and crustaceans [M]. London: Springer, 2001.
- [5] ZHANG Y Q, MAAS R M, HILGERS P, et al. Effect of non-starch polysaccharides and bile acid supplementation on nutrient digestibility, bile acid balance, faecal waste production and characteristics of yellowtail kingfish (*Seriola lalandi*) [J]. Aquaculture Reports, 2025, 41: 102708.
- [6] WANG X X, ANDRESEN K, HANDÅ A, et al. Chemical composition and release rate of waste discharge from an Atlantic salmon farm with an evaluation of IMTA feasibility [J]. Aquaculture Environment Interactions, 2013, 4(2): 147-162.
- [7] AMIRKOLAEI A K, VERRETH J A J, SCHRAMA J W. Effect of gelatinization degree and inclusion level of dietary starch on the characteristics of digesta and faeces in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* (L.)) [J]. Aquaculture, 2006, 260(1/4): 194-205.
- [8] TRAN-TU L C, BOSMA R H, VERSTEGEN M W A, et al. Effect of dietary viscosity on digesta characteristics and progression of digestion in different segments of the gastrointestinal tract of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*) [J]. Aquaculture, 2019, 504: 114-120.
- [9] STOREBAKKEN T. Binders in fish feeds: I. Effect of alginate and guar gum on growth, digestibility, feed intake and passage through the gastrointestinal tract of rainbow trout [J]. Aquaculture, 1985, 47(1): 11-26.
- [10] CRIPPS S J, BERGHEIM A. Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems [J]. Aquacultural Engineering, 2000, 22(1/2): 33-56.
- [11] VAN RIJN J. Waste treatment in recirculating aquaculture systems [J]. Aquacultural Engineering, 2013, 53: 49-56.
- [12] UNGER J, BRINKER A. Floating feces: a new approach for efficient removal of solids in aquacultural management [J]. Aquaculture, 2013, 404-405: 85-94.
- [13] UNGER J, BRINKER A. Feed and treat: what to expect from commercial diets [J]. Aquacultural Engineering, 2013, 53: 19-29.
- [14] MAMANE H, KOHN C, ADIN A. Characterizing shape of effluent particles by image analysis [J]. Separation Science and Technology, 2008, 43(7): 1737-1753.
- [15] CHRISTIANSEN E B, BARKER D H. The effect of shape and density on the free settling of particles at high Reynolds numbers [J]. Aiche Journal, 1965, 11(1): 145-151.
- [16] FERNANDES P M, PEDERSEN L F, PEDERSEN P B. Daily micro particle distribution of an experimental recirculating aquaculture system - a case study [J]. Aquacultural Engineering, 2014, 60: 28-34.
- [17] CHO C Y, BUREAU D P. Reduction of waste output from salmonid aquaculture through feeds and feeding [J]. The Progressive Fish-Culturist, 1997, 59(2): 155-160.
- [18] SCHUMANN M, BRINKER A. Understanding and managing suspended solids in intensive salmonid aquaculture: a review [J]. Reviews in Aquaculture, 2020, 12(4): 2109-2139.
- [19] MADARIAGA S T, MARÍN S L. Sanitary and environmental conditions of aquaculture sludge [J]. Aquaculture Research, 2017, 48(4): 1744-1750.
- [20] 罗国芝. 水产养殖用水可重复利用性评估指标及相关标准分析[J]. 上海海洋大学学报, 2018, 27(5): 748-755.
- [21] LUO G Z. The evaluation parameters and criteria of the reuse possibilities of aquaculture water [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(5): 748-755.
- [22] CRAB R, AVNIMELECH Y, DEFOIRD T, et al. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production [J]. Aquaculture, 2007, 270 (1/4): 1-14.
- [23] GUTIERREZ-WING M T, MALONE R F. Biological filters in aquaculture: trends and research directions for freshwater and marine applications [J]. Aquacultural Engineering, 2006, 34(3): 163-171.
- WINDELL J T, FOLTZ J W, SAROKON J A. Methods

- of fecal collection and nutrient leaching in digestibility studies [J]. *The Progressive Fish-Culturist*, 1978, 40(2): 51-55.
- [24] BERMUDES M, GLENROSS B, AUSTEN K, et al. The effects of temperature and size on the growth, energy budget and waste outputs of barramundi (*Lates calcarifer*) [J]. *Aquaculture*, 2010, 306(1/4): 160-166.
- [25] SARKER P K, FUKADA H, HOSOKAWA H, et al. Effects of phytase with inorganic phosphorus supplement diet on nutrient availability of Japanese flounder (*Paralichthys olivaceus*) [J]. *Aquaculture Science*, 2006, 54(3): 391-398.
- [26] MORALES G A, MOYANO F J. Application of an *in vitro* gastrointestinal model to evaluate nitrogen and phosphorus bioaccessibility and bioavailability in fish feed ingredients [J]. *Aquaculture*, 2010, 306(1/4): 244-251.
- [27] LIEBERT F, PORTZ L. Nutrient utilization of Nile tilapia *Oreochromis niloticus* fed plant based low phosphorus diets supplemented with graded levels of different sources of microbial phytase [J]. *Aquaculture*, 2005, 248(1/4): 111-119.
- [28] MARTINS C I M, OCHOLA D, ENDE S S W, et al. Is growth retardation present in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* cultured in low water exchange recirculating aquaculture systems? [J]. *Aquaculture*, 2009, 298(1/2): 43-50.
- [29] AHMAD A L, CHIN J Y, HARUN M H Z M, et al. Environmental impacts and imperative technologies towards sustainable treatment of aquaculture wastewater: a review [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2022, 46: 102553.
- [30] ZHU Z Y, FANG F T, HOSSEN S, et al. Impact of wild fish faeces to deep sea dissolved organic carbon as revealed by laboratory incubations [J]. *Deep Sea Research Part I : Oceanographic Research Papers*, 2023, 200: 104148.
- [31] GO Y S, KIM C S, LEE W C, et al. A stable isotopic approach for quantifying aquaculture-derived organic matter deposition dynamics in the sediment of a coastal fish farm [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 192: 115132.
- [32] BUTT R L, VOLKOFF H. Gut microbiota and energy homeostasis in fish [J]. *Frontiers in Endocrinology*, 2019, 10: 9.
- [33] YANG H L, WU J M, DU H, et al. Quantifying the colonization of environmental microbes in the fish gut: a case study of wild fish populations in the Yangtze River [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 12: 828409.
- [34] 孟晓林, 李文均, 聂国兴. 鱼类肠道菌群影响因子研究进展 [J]. *水产学报*, 2019, 43(1): 143-155.
- MENG X L, LI W J, NIE G X. Effect of different factors on the fish intestinal microbiota [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2019, 43(1): 143-155.
- [35] TAWFIK M M, LORGEN-RITCHIE M, KRÓL E, et al. Modulation of gut microbiota composition and predicted metabolic capacity after nutritional programming with a plant-rich diet in Atlantic salmon (*Salmo salar*): insights across developmental stages [J]. *Animal Microbiome*, 2024, 6(1): 38.
- [36] WONG C K, PAK I A P, LIU J X. Gill damage to juvenile orange-spotted grouper *Epinephelus coioides* (Hamilton, 1822) following exposure to suspended sediments [J]. *Aquaculture Research*, 2013, 44 (11): 1685-1695.
- [37] LU C, KANIA P W, BUCHMANN K. Particle effects on fish gills: an immunogenetic approach for rainbow trout and zebrafish [J]. *Aquaculture*, 2018, 484: 98-104.
- [38] MARTINS C I M, PISTRIN M G, ENDE S S W, et al. The accumulation of substances in recirculating aquaculture systems (RAS) affects embryonic and larval development in common carp *Cyprinus carpio* [J]. *Aquaculture*, 2009, 291(1/2): 65-73.
- [39] BECKE C, STEINHAGEN D, SCHUMANN M, et al. Physiological consequences for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) of short-term exposure to increased suspended solid load [J]. *Aquacultural Engineering*, 2017, 78: 63-74.
- [40] BRINKER A, KOPPE W, RÖSCH R. Optimised effluent treatment by stabilised trout faeces [J]. *Aquaculture*, 2005, 249(1/4): 125-144.
- [41] NORA'AINI A, MOHAMMAD A W, JUSOH A, et al. Treatment of aquaculture wastewater using ultra-low pressure asymmetric polyethersulfone (PES) membrane [J]. *Desalination*, 2005, 185(1/3): 317-326.
- [42] ZHANG P L, HUANG Q L, PENG R B, et al. Environmental factors of rearing water and growth performance of shrimp (*Penaeus vannamei*) in a microalgal monoculture system [J]. *Aquaculture*, 2022, 561: 738620.
- [43] JOKUMSEN A, SVENDSEN L M. Farming of freshwater rainbow trout in denmark [M]. Copenhagen: DTU Aqua, 2010.
- [44] EMPARANZA E J M. Problems affecting nitrification in commercial RAS with fixed-bed biofilters for salmonids in Chile [J]. *Aquacultural Engineering*, 2009, 41(2): 91-96.
- [45] WU H P, HAO B B, CAI Y P, et al. Effects of submerged vegetation on sediment nitrogen-cycling bacterial communities in Honghu Lake (China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755: 142541.
- [46] SHINDE A, SHARMA R, KUMAR P, et al. Combined effect of mercury and ammonia toxicity and its mitigation

- through selenium nanoparticles in fish [J]. *Aquatic Toxicology*, 2025, 280: 107270.
- [47] BEN-ASHER R, NATIV P, DAGAN-JALDETY C, et al. Mitigation of ammonia concentrations for improving wet, live fish and crab transport conditions [J]. *Aquaculture Reports*, 2024, 36: 102088.
- [48] CHEN L, ZHONG C Y, TAN B Y, et al. Effects of dietary fish meal replacement with American cockroach residue on the growth, metabolism, antioxidant capacity, intestinal health, and aquaculture water quality of juvenile rainbow trout[J]. *Aquaculture*, 2025, 604: 742463.
- [49] BACELO H, PINTOR A M A, SANTOS S C R, et al. Performance and prospects of different adsorbents for phosphorus uptake and recovery from water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 381: 122566.
- [50] LUO G Z. Review of waste phosphorus from aquaculture: source, removal and recovery[J]. *Reviews in Aquaculture*, 2023, 15(3): 1058-1082.
- [51] 徐嘉波, 刘永土, 施永海, 等. 淡水集中连片池塘与养殖尾水处理系统的综合水质评价[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(1): 170-180.
- XU J B, LIU Y S, SHI Y H, et al. Comprehensive water quality evaluation of freshwater concentrated continuous ponds and aquaculture tail water treatment system [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31 (1) : 170-180.
- [52] SUMMERFELT S T. CIGR handbook of agricultural engineering [M]. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1999.
- [53] GLENCCROSS B D, BOOTH M, ALLAN G L. A feed is only as good as its ingredients - a review of ingredient evaluation strategies for aquaculture feeds [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2007, 13(1): 17-34.
- [54] PRAKASH S, MAAS R M, FRANSEN P M M M, et al. Effect of feed ingredients on nutrient digestibility, waste production and physical characteristics of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) faeces [J]. *Aquaculture*, 2023, 574: 739621.
- [55] GAYLORD T G, BARROWS F T, RAWLES S D. Apparent digestibility of gross nutrients from feedstuffs in extruded feeds for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* [J]. *Journal of the World Aquaculture Society*, 2008, 39 (6): 827-834.
- [56] BRINKER A, FRIEDRICH C. Fish meal replacement by plant protein substitution and guar gum addition in trout feed. Part II : effects on faeces stability and rheology[J]. *Biorheology*, 2012, 49(1): 27-48.
- [57] COTTRELL R S, BLANCHARD J L, HALPERN B S, et al. Global adoption of novel aquaculture feeds could substantially reduce forage fish demand by 2030 [J]. *Nature Food*, 2020, 1(5): 301-308.
- [58] HOERTERER C, PETEREIT J, LANNIG G, et al. Sustainable fish feeds: potential of emerging protein sources in diets for juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*) in RAS[J]. *Aquaculture International*, 2022, 30(3): 1481-1504.
- [59] NGOH S Y, SHEN X Y, CHAN T L L, et al. Effects of digestible protein and energy on growth, amino acid requirements and protein utilisation in juvenile Malabar snapper (*Lutjanus malabaricus*) : a four-protein by three-energy factorial design study [J]. *Aquaculture*, 2025, 600: 742200.
- [60] SUI Z M, WANG X, SUN Y K, et al. Methionine deficiency affects myogenesis and muscle macronutrient metabolism in juvenile turbot *Scophthalmus maximus* [J]. *Aquaculture*, 2024, 578: 740013.
- [61] 宋长友, 任鸣春, 谢骏, 等. 不同生长阶段团头鲂的赖氨酸需要量研究[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25 (3): 396-405.
- SONG C Y, REN M C, XIE J, et al. Study of lysine requirement in different growth stages of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*) [J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2016, 25(3): 396-405.
- [62] CHEN C Y, SUN B L, LI X X, et al. N-3 essential fatty acids in Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*: quantification of optimum requirement of dietary linolenic acid in juvenile fish [J]. *Aquaculture*, 2013, 416-417: 99-104.
- [63] TOLA S, ADEPOJU M S K, YUANGSOI B, et al. Effects of partial and complete replacement of fish oil with perilla oil on growth performance, feed efficiency, health status, and fatty acid accumulation in flesh of Asian seabass (*Lates calcarifer*) reared in freshwater [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2025, 323: 116277.
- [64] CAMACHO-RODRÍGUEZ J, VIZCAÍNO-TORRES A, MACÍAS-SÁNCHEZ M D, et al. Economically viable bioprocess for inclusion of microalga *Nannochloropsis gaditana* in aquaculture feeds: evaluation of antioxidant addition in preventing lipid oxidation during storage [J]. *Bioresource Technology*, 2024, 406: 131024.
- [65] ZHU W L, ZHANG H L, PAN H T, et al. Sodium alginate ameliorates health in freshwater fish through gut-liver axis modulation under high carbohydrate diets [J]. *Aquaculture Reports*, 2025, 40: 102538.
- [66] SOUSA L C, MOROMIZATO B S, DE ALMEIDA V D N S, et al. There is more than one way of feeding carnivorous fish : Surubim (*Pseudoplatystoma reticulatum* × *P. corruscans*) are able to cope with carbohydrates rich diets, but there is a trade-off between growth and immunity [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 262: 114382.

- [67] CHEN W L, GE Y P, SUN M, et al. Insights into the correlations between prebiotics and carbohydrate metabolism in fish: administration of xylooligosaccharides in *Megalobrama amblycephala* offered a carbohydrate-enriched diet [J]. Aquaculture, 2022, 561: 738684.
- [68] ANZABI M P, MOGHANLOU K S, IMANI A, et al. Effects of dietary vitamin E and C co-supplementation on growth performance, hemato-immunological indices, digestive enzymes activity, and intestinal histology of rainbow trout fed diet contained spoiled fish meal and oil [J]. Aquaculture Reports, 2023, 33: 101842.
- [69] PRABHU P A J, SILVA M S, KRÖECKEL S, et al. Effect of levels and sources of dietary manganese on growth and mineral composition of post-smolt Atlantic salmon fed low fish meal, plant-based ingredient diets [J]. Aquaculture, 2019, 512: 734287.
- [70] ADAM A C, SAITO T, ESPE M, et al. Metabolic and molecular signatures of improved growth in Atlantic salmon (*Salmo salar*) fed surplus levels of methionine, folic acid, vitamin B₆ and B₁₂ throughout smoltification [J]. British Journal of Nutrition, 2022, 127(9): 1289-1302.
- [71] SHARIFINIA M. From nutrient bioavailability to disease resistance: the comprehensive benefits of chelated minerals in aquaculture [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2025, 160: 110218.
- [72] FRANCIS G, MAKKAR H P S, BECKER K. Antinutritional factors present in plant-derived alternate fish feed ingredients and their effects in fish [J]. Aquaculture, 2001, 199(3/4): 197-227.
- [73] DIAS J, SANTIGOSA E. Maximising performance and phosphorus utilisation of warm water fish through phytase supplementation [J]. Aquaculture, 2023, 569: 739360.
- [74] SADEK M F, DEEB K A E. Effect of exogenous enzymes supplementation with different levels of fiber in diets on growth performance, feed utilization and health of African catfish *Clarias gariepinus* [J]. Egyptian Journal of Nutrition and Feeds, 2003, 24(3): 439-450.
- [75] MAAS R M, VERDEGEM M C J, DERSJANT-LI Y, et al. The effect of phytase, xylanase and their combination on growth performance and nutrient utilization in Nile tilapia [J]. Aquaculture, 2018, 487: 7-14.
- [76] BRINKER A. Guar gum in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) feed: the influence of quality and dose on stabilisation of faecal solids [J]. Aquaculture, 2007, 267 (1/4): 315-327.
- [77] SINHA A K, KUMAR V, MAKKAR H P S, et al. Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition - a review [J]. Food Chemistry, 2011, 127(4): 1409-1426.
- [78] AMIRKOLAIE A K, LEENHOUWERS J I, VERRETH J A J, et al. Type of dietary fibre (soluble versus insoluble) influences digestion, faeces characteristics and faecal waste production in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) [J]. Aquaculture Research, 2005, 36 (12): 1157-1166.
- [79] TRAN-TU L C, HIEN T T T, BOSMA R H, et al. Effect of ingredient particle sizes and dietary viscosity on digestion and faecal waste of striped catfish (*Pangasianodon hypophthalmus*) [J]. Aquaculture Nutrition, 2018, 24(3): 961-969.
- [80] BUDDINGTON R K, KROGDAHL A, BAKKE-MCKELLEP A M. The intestines of carnivorous fish: structure and functions and the relations with diet [J]. Acta Physiologica Scandinavica, 1997, 638: 67-80.
- [81] RAY A K, GHOSH K, RINGØ E. Enzyme-producing bacteria isolated from fish gut: a review [J]. Aquaculture Nutrition, 2012, 18(5): 465-492.
- [82] YANG H, LI X Q, HUAN D Y, et al. Effects of three positively buoyant dietary supplements on the buoyancy of feces, growth and intestinal health of Tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus* [J]. Aquaculture and Fisheries, 2018, 3(2): 72-78.
- [83] SCHUMANN M, UNGER J, BRINKER A. Floating faeces: effects on solid removal and particle size distribution in RAS [J]. Aquacultural Engineering, 2017, 78: 75-84.
- [84] UNGER J, SCHUMANN M, BRINKER A. Floating faeces for a cleaner fish production [J]. Aquaculture Environment Interactions, 2015, 7(3): 223-238.
- [85] YANG H, LI X Q, LIANG G Y, et al. Cork and guar gum supplementation enhanced the buoyancy of faeces, and protease supplementation alleviated the negative effects of dietary cork on growth and intestinal health of tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus* [J]. Aquaculture Nutrition, 2019, 26(1): 26-36.
- [86] BECKE C, SCHUMANN M, GEIST J, et al. Shape characteristics of suspended solids and implications in different salmonid aquaculture production systems [J]. Aquaculture, 2020, 516: 734631.
- [87] PATTERSON R N, WATTS K C. Micro-particles in recirculating aquaculture systems: microscopic examination of particles [J]. Aquacultural Engineering, 2003, 28(3/4): 115-130.
- [88] CHEN Z C, ZHAO S F, LIU Y, et al. Dietary citric acid supplementation alleviates soybean meal-induced intestinal oxidative damage and micro-ecological imbalance in juvenile turbot, *Scophthalmus maximus* L [J]. Aquaculture Research, 2018, 49(12): 3804-3816.
- [89] CHEN W J, GAO S Y, CHANG K, et al. Partial fishmeal replacement by soybean meal induces fish growth retardation and gut inflammation via gut mucosal

- barrier dysfunction and dysbiosis in largemouth bass [J]. Animal Feed Science and Technology, 2024, 316: 116067.
- [90] DIÓGENES A F, CASTRO C, CARVALHO M, et al. Exogenous enzymes supplementation enhances diet digestibility and digestive function and affects intestinal microbiota of turbot (*Scophthalmus maximus*) juveniles fed distillers' dried grains with solubles (DDGS) based diets [J]. Aquaculture, 2018, 486: 42-50.
- [91] MOHAMMADI G, HAFEZIEH M, KARIMI A A, et al. The synergistic effects of plant polysaccharide and *Pediococcus acidilactici* as a symbiotic additive on growth, antioxidant status, immune response, and resistance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) against *Aeromonas hydrophila* [J]. Fish & Shellfish Immunology, 2022, 120: 304-313.
- [92] LJUBOBRATOVIC U, KOSANOVIC D, VUKOTIC G, et al. Supplementation of lactobacilli improves growth, regulates microbiota composition and suppresses skeletal anomalies in juvenile pike-perch (*Sander lucioperca*) reared in recirculating aquaculture system (RAS): a pilot study [J]. Research in Veterinary Science, 2017, 115: 451-462.
- [93] MOMENI-MOGHADDAM P, KEYVANSOKOOGH S, ZIAEI-NEJAD S, et al. Effects of mannan oligosaccharide supplementation on growth, some immune responses and gut lactic acid bacteria of common carp (*Cyprinus carpio*) fingerlings [J]. Veterinary Research Forum, 2015, 6(3): 239-244.
- [94] FORD A C, SPERBER A D, CORSETTI M, et al. Irritable bowel syndrome [J]. The Lancet, 2020, 396 (10263): 1675-1688.
- [95] LUO M, XIE P W, DENG X H, et al. Rifaximin ameliorates loperamide-induced constipation in rats through the regulation of gut microbiota and serum metabolites [J]. Nutrients, 2023, 15(21): 4502.
- [96] WU Y H, LI S J, LV L X, et al. Protective effect of *Pediococcus pentosaceus* Li05 on diarrhea-predominant irritable bowel syndrome in rats [J]. Food & Function, 2024, 15(7): 3692-3708.

Aquaculture fish faeces: characteristics, influencing factors and nutritional optimization strategies

ZHANG Yanjiao^{1,2}, LIAO Zhaofan^{1,2}, XU Houguo³, MAI Kangsen^{1,2}

(1. Key Laboratory of Aquaculture Nutrition and Feed, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China; 2. Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, Shandong, China; 3. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, Shandong, China)

Abstract: With the rapid development of intensive aquaculture, especially in recirculating aquaculture systems (RAS), the efficient management of solid waste in aquaculture water has become a critical challenge. In RAS, the removal efficiency of suspended solids not only directly determines system performance but also affects its long-term operational stability. As the primary source of solid waste in aquaculture water, the characteristics of fish faeces are key prerequisites for achieving efficient water recycling. Moreover, excessive accumulation of faeces can directly damage fish gill and epidermal health, while also exacerbating microbial competition, promoting abnormal accumulation of nutrients such as ammonia and reactive phosphorus, and triggering water eutrophication and ecosystem dysfunction. This review systematically showed the latest researches on the characteristics of farmed fish faeces, influencing factors, and nutritional regulation strategies. Studies reveal significant interspecific differences in the physical characteristics of fish faeces, such as water stability, settling velocity, and particle morphology, which are jointly regulated by rearing conditions and feed composition. Although the chemical composition of feces is homologous to feed, there are notable differences in nutrient content, with the high enrichment of nitrogen and phosphorus being the primary contributors to water pollution. Regarding nutritional regulation strategies, feed optimization serves as the core approach for source control. This includes: (1) Improving nutrient digestibility by adjusting feed formulations and supplementing exogenous enzymes such as proteases and phytases; (2) Optimizing fecal physical properties using binders and buoyancy regulators; (3) Modulating gut health with probiotics and functional oligosaccharides to indirectly improve fecal composition. Despite current progress, further research is needed to address the specific requirements of different aquaculture systems and species. This review aims to provide a systematic theoretical foundation for innovative feed technology development and promote the green, sustainable advancement of the aquaculture industry.

Key words: faeces characteristics; fecal removal efficiency; nutritional regulation; farmed fishes; industrial aquaculture