

# 鱼菜共生系统氮、磷利用效率研究现状和展望

蒋金辰<sup>1,2,3</sup>, 高霞婷<sup>1,3\*</sup>, 徐琰斐<sup>1,3</sup>, 单建军<sup>1,3</sup>, 张宇雷<sup>1,3</sup>

(1. 中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所, 上海 200092; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306;  
3. 农业农村部水产养殖设施工程重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 鱼菜共生利用水产养殖废水为植物提供营养, 由一种氮源(饲料)生产两种农产品(鱼和蔬菜), 具有节水节能、环境友好的优点, 是一种极具可持续发展潜力的现代化农业技术。该研究从鱼菜共生系统的运行工艺条件、系统设计和生物制剂 3 个方面对系统氮、磷利用效率的研究现状展开论述。总结了鱼菜共生系统运行工艺条件优化效果及原理, 包括 pH 值、溶解氧、水力负荷的调节, 喂食频率和投喂策略的改善, 植物挑选及精确种养比例等; 分析了鱼菜共生系统设计包括不同种植模式和耦合模式对提高系统氮、磷利用效率的优越性和局限性; 概述了鱼菜共生系统中生物制剂的应用前景, 包括水质改良调节剂和饲料添加剂等对系统氮、磷利用效率的影响; 提出了为优化鱼菜共生系统, 进一步提高系统对氮、磷营养物质的利用率, 应加强不同条件对鱼菜共生系统氮、磷元素转化规律影响研究的建议, 为微生物制剂在生产实践中科学、合理、高效地使用提供参考和理论依据。

**关键词:** 氮; 磷; 养殖; 鱼菜共生; 利用效率; 工艺条件; 系统设计; 生物制剂

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.034

中图分类号: X714

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-Supp.-0292-09

蒋金辰, 高霞婷, 徐琰斐, 等. 鱼菜共生系统氮、磷利用效率研究现状和展望[J]. 农业工程学报, 2022, 38(增刊): 292-300.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.034 <http://www.tcsae.org>

Jiang Jinchen, Gao Xiating, Xu Yanfei, et al. Research status and prospect of nitrogen and phosphorus use efficiency in the aquaponic system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 292-300. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.z.034 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

鱼菜共生系统是将循环水养殖和无土栽培技术相结合, 多种学科交叉融合的一种的综合性养殖新模式, 具有高效低碳、绿色健康、可持续性等特征的生态型农业技术<sup>[1]</sup>。鱼菜共生系统利用微生物将养殖水体中的有机污染物(残余饲料、鱼类的排泄物、分泌物等)转化为植物生长所需的营养源, 促进植物生长发育的同时达到净化水质的效果, 为鱼类生长提供良好的环境, 实现“一水两用”。其主要原理是饲料中的氮, 约 25%被鱼体吸收, 其余经鱼体代谢后随着排泄物以氨氮的形式排出体外, 水体中的氨氮(Tal Ammonia Nitrogen, TAN)经微生物依次转化为亚硝酸盐( $\text{NO}_2^-$ -N)和硝酸盐( $\text{NO}_3^-$ -N), 硝酸盐为植物根系可直接吸收利用的形式, 经植物净化后的养殖水体再次循环进入鱼池, 形成鱼菜共生系统的氮循环, 提高了氮的利用效率<sup>[2]</sup>。饲料中仅有约 15%的磷可被鱼体吸收利用<sup>[3]</sup>, 磷可分为有机磷和无机磷, 其中可溶性无机磷酸盐( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ 、 $\text{HPO}_4^{2-}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}$ )是植物唯一可以吸收利用的形式, 磷的溶解度取决于水体 pH 值, 较高的 pH 值将促进磷的沉淀, 植物无法吸收利用, 可在系统中

增加一个生物反应器, 对固体颗粒物分解矿化, 使其中的磷被重新释放并进入系统循环<sup>[4]</sup>。

早在上个世纪 70 年代初期, 美国就对鱼菜共生展开了研究, 并建立了第一个鱼菜共生系统<sup>[5]</sup>; 到了 80 年代初期, 美属维尔京群岛大学的 Rakocy 研发了第一个深水栽培鱼菜共生系统(the University of the Virgin Islands System, 简称 UVI 模式)<sup>[6]</sup>; 同时期, 北卡罗莱纳州立大学的 Mark Mcmurtry 博士研发了鱼菜共生系统(the North Carolina State University System, 简称 NCSU 模式)<sup>[7]</sup>。随着 UVI 系统研究取得的成果, 鱼菜共生系统进入了全球拓展阶段<sup>[8]</sup>, 世界各地的学者开始尝试设计和改进鱼菜共生系统。中国水产科学研究院渔业机械仪器研究所丁永良等<sup>[9]</sup>于 20 世纪 90 年代将鱼菜共生系统引进中国并开展试验研究, 设计了国内首套试验性鱼菜共生装置。张明华等<sup>[10]</sup>研究了氨氮、酸碱度、溶解氧、温度等因子对鱼菜不同生长阶段的影响, 总结出不同密度鱼类与不同种类、不同生长阶段蔬菜之间的优化配比关系。邹艺娜等<sup>[12]</sup>揭示了鱼菜共生系统内氮的迁移转化规律, 并对系统进行了优化。

尽管鱼菜共生系统被认为是可持续农业生产的新兴技术, 但系统中仅有 20%~50%的氮和 15%~65%的磷被吸收利用<sup>[11]</sup>, 大量氮和磷随着粪便和饲料残渣损失浪费, 其利用率还有很大的提升空间。随着鱼菜共生系统的不断发展和对生态环境的绿色要求, 需要重点研究系统中有机废物的消化降解, 将其中丰富的营养物质分解并用于植物营养, 最大限度地提高氮、磷等营养物质的利用

收稿日期: 2022-09-28 修订日期: 2022-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(32102822); 中国水产科学研究院科技创新团队项目(2020TD78)

作者简介: 蒋金辰, 研究方向为鱼菜共生技术。Email: pointend@163.com

\*通信作者: 高霞婷, 博士, 助理研究员, 研究方向为鱼类病原菌和鱼菜共生技术研究。Email: gaixiating@fmiri.ac.cn

效率<sup>[12]</sup>。目前,关于提高鱼菜共生系统氮、磷利用效率的研究范围非常广泛,主要包括系统设计和运行条件的优化以及生物制剂的应用<sup>[2,10,13-25]</sup>。因此,本文将对影响鱼菜共生系统氮、磷利用效率的关键因素和技术研究现状进行归纳分析,并针对存在的问题提出建议,对发展前景进行展望。

## 1 系统运行条件

### 1.1 pH 值

pH 值是鱼菜共生系统最重要的调节因素之一,影响着鱼类代谢、植物生长和微生物活性。通常,适合植物生长的 pH 值范围为 5.5~6.5 的偏酸性环境,酸性环境有利于铁(Fe)、锰(Mn)、铜(Cu)、锌(Zn)、硼(B)、磷(P)、钾(K)、钙(Ca)、镁(Mg)等元素的溶解,可以提高植物对这些必需元素的利用率<sup>[26-27]</sup>。适合硝化细菌生长的 pH 值范围为 7.5~9.0 的偏碱性环境,有研究表明<sup>[28]</sup>在 pH 值为 5.0 和 10.0 时,不利于硝化细菌的生长,弱碱性条件更有利于亚硝化细菌对氨氮的去除。鱼类生长发育的最适 pH 值范围在 6.5~9.0,不同品种的鱼的最适 pH 值不同, pH 值过低会影响鱼类的生长和繁育,甚至造成死亡<sup>[29]</sup>。因此,在鱼菜共生中,无法同时对鱼、植物和微生物提供最佳 pH 值并保持平衡,为了提高鱼菜共生系统的整体性能,特别是营养物质的循环利用率,许多学者对此开展了试验研究。Tyson 等<sup>[30]</sup>研究了 pH 值对鱼菜共生系统中黄瓜产量的影响,结果表明随着 pH 值从 6.0 增加到 8.0,早期可销售的黄瓜产量从 1.5 kg/株下降到 0.7 kg/株。有研究表明, pH 值对鱼菜共生系统的性能和氮素利用率有显著影响<sup>[17]</sup>,该研究比较了在 pH 值为 6.0、7.5 和 9.0 时鱼菜共生系统的运行情况,结果显示氮素利用效率随着 pH 的增加而降低,在 pH 值为 6.0 时达到最高,为 50.9%,其次是 pH 值 7.5 和 9.0。由此可见,酸性条件有利于植物对营养物质的吸收,但不利于鱼类的生长发育,且抑制硝化作用,并不利于系统氮素利用率的提高。因此,鱼菜共生系统需要进一步优化设计,以达到对植物和鱼类环境的精准调控,提高系统的氮、磷利用效率。

### 1.2 投喂策略

鱼菜共生系统中饲料是主要的氮素来源,鱼类和植物的生长受到饲料投喂的影响。Liang 等<sup>[21]</sup>研究了 3 个喂食频率(在 4、6 和 12 h 的间隔内分别均匀地喂食 6 次、4 次和 2 次)对鱼菜共生系统的影响,结果发现,增加喂食频率有利于稳定良好的水质,增加鱼和植物的产量,减少水中氮、磷营养物质的积累,提高营养物质的利用率。Yang 等<sup>[31]</sup>研究比较了 3 种不同的投喂策略,分别是标准投喂(Aquaponic Increasing Feeding, AIF)、均匀投喂(Aquaponic Uniform Feeding, AUF)和中等投喂(Aquaponic Intermediate Feeding, AMF)对系统水质、植物产量和氮素利用率等方面的影响,结果表明,均匀的投喂制度(AUF)提高了鱼菜共生中蔬菜的生物量,相比标准投喂制度,系统的氮素利用率增加了 30%。同时,该研究者通过检测水质发现,投喂制度影响鱼菜共

生系统的原理是通过改变 pH 值来影响植物产量和氮素利用率,AIF 的 pH 值相比 AUF 始终偏低,而硝化作用最佳的 pH 值在 7.5~8.0 之间,较低的 pH 值会抑制硝化作用从而降低植物产量和氮素利用率,AUF 的 pH 值则适合硝化细菌的生长。总的来说,投喂策略通过影响鱼的摄食量、残余的饲料量,从而影响鱼的代谢、水质以及系统营养物质利用率;减少每次喂食量,提高喂食频率,可以减少水体中的残饵等有害污染物以改善水质,提高鱼菜共生系统中植物的产量和系统的营养物质利用率。但是其中存在的问题也很明显:首先,喂食频率的不断提高是否与系统营养物质的利用效率成正比;其次,随着喂食频率的提高,会导致人工劳动量增加;最后,投喂策略对植物生长的影响机制尚不明确。因此,还需要进一步构建投喂策略与鱼类和植物之间的生长模型,得出最佳的投喂策略和喂食频率;同时加大对智能投喂装备技术的研发,利用信息化技术手段对鱼摄食状态进行实时监控分析,实现自动投喂,减少人工的劳动量和不稳定性,这对鱼菜共生系统的循环经济和可持续性非常重要。

### 1.3 溶解氧

一般来说,溶解氧(Dissolved Oxygen, DO)浓度高于 5 mg/L 时,是鱼类生长的理想条件<sup>[32]</sup>。溶解氧对植物的生长和营养物质的吸收也有重要影响。此外,溶解氧对硝化作用至关重要。如果溶解氧浓度低于 2 mg/L,硝化细菌的硝化作用效率降低<sup>[33]</sup>。因此,保持适当的溶解氧浓度对鱼菜共生系统的运行是极其重要的。曝气模式的改变会影响溶解氧,对脱氮、除磷、硝化、反硝化和其他过程产生复杂的影响<sup>[33-34]</sup>。Fang 等<sup>[35]</sup>研究比较了半曝气(Semi-Aeration, SA)和间歇性曝气(Intermittent Aeration, IA)2 种不同的曝气模式对鱼菜共生系统的影响,结果显示,采用半曝气的鱼菜共生系统的氮素利用率比间歇性曝气的鱼菜共生系统高 11.3%,主要是因为半曝气的方式使溶解氧更加稳定,不会在短时间内发生巨大变化,反硝化作用较弱,硝酸盐浓度保持较高水平,促进植物产量的增加。总体来说,溶解氧是鱼菜共生系统中最重要系统参数,它不仅对鱼的正常生长具有重要影响,且对植物的营养物质吸收和硝化细菌的硝化作用密切相关。因此,维持鱼菜共生系统各个部分的最佳溶解氧浓度是提高系统氮、磷等营养物质利用效率的关键。

### 1.4 水力负荷

在鱼菜共生系统中,适宜的水力负荷可以确保良好的水质<sup>[36]</sup>,使系统中的固体颗粒物得到充分过滤,防止有毒污染物对鱼类造成危害<sup>[24]</sup>。在以鲤鱼和薄荷为种养对象的鱼菜共生系统研究中发现,不同的水力负荷(3, 6 和 12 m/d)对鱼的质量增加、存活率、特定生长率具有显著影响,水力负荷在 6 m/d 时鱼的生长率相比其他组更高,同时水质参数、薄荷的生长、营养物质利用率也更好<sup>[37]</sup>。Endut 等<sup>[25]</sup>也在基质的鱼菜共生系统中发现,当水力负荷为 1.28 m/d 时,植物的氮素利用率最高,水力负荷过低会导致缺氧,从而产生反硝化作用,造成

水中氮的损失,降低系统的营养物质利用率;而水力负荷过高减少了循环水和植物根系之间的接触时间,甚至会冲走附着在植物根系和生物滤器上的微生物和沉积物,导致营养物质利用率降低<sup>[25,38]</sup>。由此可知,适宜的水力负荷可以为植物生长提供更多的营养,加快营养物质的循环速度和利用率,对植物的生长起到促进作用,但水力负荷在不同系统规模、不同水培模式、不同种养对象和比例间的最佳参数并不相同,还需要进一步开展相关研究,阐明不同条件下对水力负荷的影响机制和相互作用,使其对鱼类、植物的生长和营养物质的利用率可以得到进一步的提高。

### 1.5 种养对象和比例

叶类植物和果类植物都可以用于鱼菜共生培养,植物种类的选择需要根据养殖动物、栽种方式、市场需求和经济价值等多种因素确定<sup>[39]</sup>。不同植物的生长特性和氮、磷吸收能力都不同,因此鱼菜系统中的氮、磷利用率直接受到植物种类的影响。金树权等<sup>[40]</sup>选取了浮叶植物、浮水植物和挺水植物 3 种类型的 10 种不同的水生植物,比较了它们对氮、磷的吸收利用能力,结果发现大聚藻 (*Myriophyllum aquaticum*)、香菇草 (*Hydrocotyle vulgaris*)、水芹 (*Oenanthe javanica*) 和美人蕉 (*Canna indica*) 等挺水植物对水体中氮、磷的吸收利用率显著高于其他植物,且其净增生物量也更高。Endut 等<sup>[41]</sup>比较了空心菜和芥菜 2 种绿叶蔬菜在相同试验条件下的氮素利用率,结果表明空心菜的氮素利用率 (66.5%) 高于芥菜的氮素利用率 (59.9%)。Hu 等<sup>[13]</sup>在番茄和白菜的鱼菜共生系统中发现,番茄的氮素利用率 (41.3%) 高于白菜的氮素利用率 (34.4%),并且在 2 个试验水体中的微生物群落分析发现,番茄根部周围的硝化细菌含量是白菜的 4 倍多,这可能是因番茄的根系比白菜更发达,为硝化细菌的生长发育提供了更多的表面积。高霞婷等<sup>[42]</sup>研究了不同生长阶段的芹菜与生菜对鱼菜共生系统中氮、磷元素的吸收利用情况,结果表明生菜对磷的吸收能力较强。李天沛等<sup>[43]</sup>研究了不同种类蔬菜对养殖尾水氨氮转化的影响,结果表明当根质量占比在 34%~42% 时,植株各器官发育较好,对营养物质转化效率高,其中圣女果对氨氮的转化效果最佳。从以上研究中可以得知具有发达根系、较大根部表面积的植物可以为细菌提供更好的微生态环境,具有更高的氮素利用率,在鱼菜共生系统中更具应用优势。

植物和鱼的配比也是鱼菜共生系统的关键设计和系统参数。蔡淑芳等<sup>[44]</sup>研究了不同植物密度对鱼菜共生系统氮素转化的影响,结果表明植物密度为 45 株/ $m^2$  的系统具有较高的硝酸盐氮积累优势。Lam 等<sup>[45]</sup>在云斑尖塘鳢 (*Oxyeleotris marmorata*) 和空心菜 (*Ipomoea aquatica*) 的鱼菜共生系统中,研究了鱼菜比例对鱼类生长、蔬菜产量和营养物质利用的影响,发现在高容积比 ( $3 m^3/m^3$ ) 下对虾虎鱼和空心菜的营养利用和产量有明显优势,但在容积比超过  $3 m^3/m^3$  时,植物的产量显示出下降趋势。

因此,为了最有效地调整鱼菜之间的比例大小,必须在鱼类养殖的剩余养分和植物的养分吸收之间取得最

佳平衡,植物比例过小将导致养分在系统中积累,过量养分无法及时分解;植物比例过大可能会改善水质,但也会导致植物生长速度减慢,植物产量下降。在鱼菜共生系统中,适当提高种养比例,有利于氮、磷利用效率的提高。

## 2 系统设计

### 2.1 水培模式

根据种植床的类型,鱼菜共生系统可以分为 3 种类型,即基质栽培型 (Media Bed Culture) (图 1a)、深水栽培型 (Deep Water Culture, 简称 DWC) (图 1b) 或浮筏栽培型 (Floating Raft) 和营养液膜技术栽培型 (Nutrient Film Technique, 简称 NFT) <sup>[46]</sup> (图 1c)。在鱼菜共生系统中不同的水培模式,鱼类的生长、植物的生长、水中氮磷的净化都会有差异,需要依据鱼和植物的种类等方面来综合考虑选择<sup>[47-49]</sup>。Lennard 等<sup>[50-51]</sup>研究比较了鱼菜共生系统中不同的水培模式 (基质栽培、深水栽培和营养液膜栽培) 对鱼类的生长,生菜的生物量,水体中氮、磷的吸收率的影响,试验结果表明,基质栽培型对氮的利用率显著高于深水栽培型和营养液膜栽培型,而 3 种模式对磷的吸收利用率没有显著差异。该研究者认为植物对氮的吸收利用率与植物根系和水体的接触面积成正比,而植物对磷的吸收利用与植物对氮的吸收利用作用不同,并不是简单地取决于植物根系与水体的接触面积。Roosta 等<sup>[20]</sup>评估了不同基质 (100%珍珠岩、75%珍珠岩+25%椰糠、50%珍珠岩+50%椰糠、25%珍珠岩+75%椰糠和 100%椰糠) 对植物生长和发育的影响,研究表明珍珠岩的透气性比椰糠更好,毛细管作用更强,可储存其质量 3~4 倍的水分,从而有助于植物根系更好地吸收氧气和营养物质,因此植物产量随着基质中珍珠岩百分比的提高而增加,在 100%珍珠岩作为基质时,产量达到最高。

由上述可知,水培模式对系统中氮的吸收利用有很大影响。基质栽培模式能够为植物提供了更多的机会和面积吸收更多的营养物质。而深水栽培型的植物根部虽然与基质栽培一样完全淹没在水中,但基质栽培中的基质能为更多硝化细菌的生长需要提供充足的表面积,其硝化作用更强,对系统中氮的利用率更高。在基质模式中选择透气性好、毛细管作用强的基质,其鱼菜共生系统的生长性能表现更好。而目前关于系统水培模式对磷的吸收利用影响的文献较少,在上述研究中表明 3 种水培模式对磷的吸收利用率没有显著差异,后续应深入研究植物对磷的吸收利用机制,综合磷在系统中的动态转化影响和不同基质的影响,进一步针对性和系统性地开展相关研究工作,为水培模式选择提供理论依据。

### 2.2 耦合方式

鱼菜共生系统的耦合方式主要分为 2 种,其中传统的鱼菜共生系统是在 1 个循环流通的封闭系统中设置水产养殖单元和蔬菜水培单元,这种系统称为耦合型鱼菜共生系统 (图 2a),Rakocy 博士建立的 UVI 模式就是典型的耦合型系统,被认为是现代鱼菜共生的原型<sup>[8]</sup>。耦合型系统中的养殖和种植单元的水质指标调控在一定程

度上都会受到彼此的制约,无法达到鱼类和植物各自最佳的生长环境需求。近年来,随着欧洲现代农业技术的发展迅速,逐渐兴起了一种解耦型鱼菜共生系统(图 2b),

即养殖和种植单元为 2 个相互独立的水循环子系统,可根据鱼类和植物的营养需求进行精细调控,达到最优的养殖和种植条件<sup>[7]</sup>。



图 1 3 种水培模式类型

Fig.1 Three types of hydroponics models

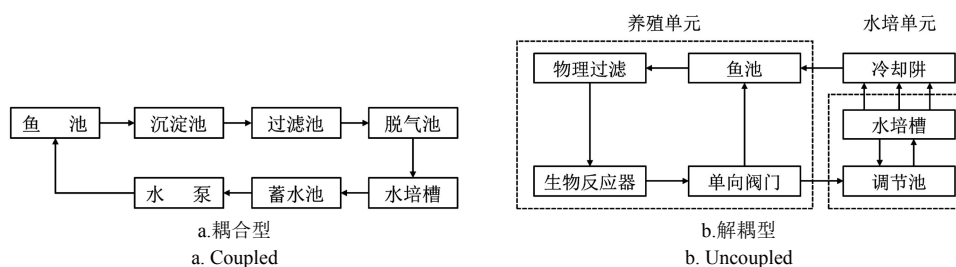


图 2 耦合型和解耦型鱼菜共生系统

Fig.2 Coupled and uncoupled aquaponics system

耦合型鱼菜共生系统没有充分利用养殖单元产生的固体废物,而是将其大部分收集排出,较低的氮素利用率严重阻碍了鱼菜共生的推广。有研究报告指出,耦合型鱼菜共生系统中生长的鱼和植物只利用了不到 40% 的氮,超过 60% 的氮没有被充分利用<sup>[52]</sup>。为了提高耦合型鱼菜共生系统对营养物质的利用率,一些研究者对系统中的生物反应器进行了研究,如:李月等<sup>[53]</sup>对目前循环水养殖中的移动床生物反应器进行了研究,通过优化系统水力停留时间和曝气量等条件参数,发现系统在水力停留时间为 6~8 min、曝气量为 180 L/h 时,能够高效地处理低浓度氨氮养殖废水。其中增加水力停留时间降低了水体流速,延长了生物膜上氨氧化细菌氧化氨氮的时间,有利于微生物吸收转化氨氮;曝气量为 180 L/h 时,同时满足了微生物的需氧量和滤料的正常流化;张海耿等<sup>[54]</sup>研制了新型流化床生物滤器,对流化床生物滤器的进水方式进行了优化,采用了双侧切向进水,并增加了一个自清洗装置,试验表明改进优化后的生物滤器避免了滤料的流失,使滤料生物膜厚度保持合理的水平,其硝化性能及稳定性优于常规生物反应器。

为了进一步减少耦合型鱼菜共生系统直接排出的固体废物对环境的污染,可采用厌氧发酵技术对粪便进行管理,粪便的厌氧发酵已被用于回收甲烷,作为能源使用,而发酵剩余的消化液通常被用作土壤改良剂<sup>[55]</sup>,但是厌氧发酵不能解决氮和磷的利用问题,大部分的氮和磷没有被消化降解,还会造成污染<sup>[56]</sup>。好氧发酵与传统的厌氧发酵相比,它是一种可持续的鱼粪处理方法,不会对环境产生负面影响<sup>[57]</sup>。Khiari 等<sup>[58]</sup>为了确定好氧微

生物发酵消化鱼粪的最佳条件,试验研究了不同 pH 值(5.5、6.0 和 6.5)、不同温度(30、35 和 40℃)和不同的持续时间(1~30 d)对营养物质回收能力的影响。通过分析数据和模型参数表明,在 35℃ 下使用 pH 值 6.0 或 6.5 对水产养殖固体废物进行 15 d 的好氧生物处理,硝化作用最强,反硝化作用导致氮素的损失最少,可以最大限度地回收粪便中的营养物质,为植物提供生长发育所需的常量元素和微量元素营养。

解耦型鱼菜共生系统则通过增加独立的厌氧生物反应器将鱼类产生的固体颗粒物分解再矿化,充分回收利用营养物质。Dijkgraaf 等<sup>[59]</sup>建立了一个多回路解耦型鱼菜共生系统,通过厌氧反应器消化分解养殖废弃物,提高氮素利用率至 77.74%。Goddek 等<sup>[26]</sup>研究了上流式厌氧污泥床(Upflow Anaerobic Sludge Bed, UASB)对鱼菜共生系统的营养物质回收能力,结果发现有机废物被分解成生物可利用的营养物质,随后可以输送给植物,促进植物的生长,有助于改善鱼菜共生系统的营养物质利用率。Yogev 等<sup>[60]</sup>在鱼菜共生系统中研究了 UASB 对磷的矿化和回收的作用,结果表明 UASB 可以回收系统中 69% 的磷,大大提高了系统的磷元素的利用率。总体认为,厌氧反应器特别是 UASB 等反应器的优点在于可以减少系统污染物的排放,回收更多的营养物质。但是,缺点在于减少污染物和有效回收更多的营养元素无法同时达到最佳效率,当反应器处于酸性条件时,常量元素和微量元素实现最佳回收效率,但此时甲烷停止生成。因此,还需进一步对此工艺进行优化,针对不同的反应条件,设计优化反应器,开展相关系统研究,以评估最



适合的系统设计。

### 3 生物制剂利用

生物制剂是近几年新兴的种养添加剂,主要包括微生物制剂、植酸酶、腐植酸和螺旋藻等。微生物制剂是在自然环境中通过筛选得到微生物有益菌活体,再经过培养、繁殖之后,制成包含大量微生物有益菌的活菌制剂<sup>[61]</sup>。植酸酶是一种能够将植酸以及植酸盐分解成磷酸盐以及肌醇的一类酶,饲料中添加生物制剂植酸酶能够提高鱼类对磷和其他营养元素的利用率<sup>[62]</sup>。腐植酸是动植物遗骸经过微生物的分解和转化,在自然界广泛存在的一类大分子有机物质,在好氧和厌氧废水处理以及生物修复方面具有很大的应用潜力<sup>[63]</sup>。螺旋藻含有丰富的蛋白质和氨基酸,并富含多种微量元素,被作为饲料添加剂广泛应用于动物饲料中<sup>[64]</sup>。生物制剂按用途主要可分为两大类,一类主要用作水质改良调节剂,而另一类则主要作为饲料添加剂使用<sup>[65]</sup>。

#### 3.1 水质改良调节剂

在水产养殖中微生物制剂大多是直接泼洒添加在养殖池中,可以快速生长、繁衍,分解鱼类的代谢粪便物、残饵等,有效降低水体亚硝酸盐、氨氮和 COD (Chemical Oxygen Demand) 的浓度,并提高水体透明度<sup>[66-68]</sup>。研究表明微生物制剂在改善水产养殖环境中产生了良好的效果<sup>[69]</sup>。水体中的有机物被微生物分解,可为鱼菜共生系统的中植物提供相应的营养物质,合理运用可以平衡整个鱼菜共生系统<sup>[70]</sup>。Zou 等<sup>[16]</sup>在鲤鱼和白菜组成的鱼菜共生系统中添加复合微生物制剂(硝化细菌、芽孢杆菌、乳酸杆菌等),结果显示在添加微生物制剂后,系统中编码氨单加氧酶的 *amoA* 基因拷贝数增加,硝化速率提高,促进了硝酸盐的累积和植物的生长,系统氮素利用率显著提高,达到了 53.3%。微生物制剂对系统中磷的利用同样有促进作用。在生菜和罗非鱼的鱼菜共生系统中接种含有芽孢杆菌的微生物制剂的研究中发现,芽孢杆菌微生物制剂具有类似植物生长促进剂 (Plant Growth Promoter, PGP) 的作用,添加了含有芽孢杆菌的微生物制剂后,系统中溶解的磷酸盐浓度高于对照组,可以促进植物生长,增加植物组织中的磷的积累<sup>[71]</sup>。Gullian 等<sup>[18]</sup>也发现芽孢杆菌的添加促进了氮、磷和钾等营养物质的矿化和利用率。芽孢杆菌等微生物通过矿化有机磷和溶解沉淀的磷酸盐来提高植物的磷供应并促进植物生长。除此之外,微生物与藻类联合使用也可以提高系统的氮利用效率。有研究表明,微生物和藻类联合使用的鱼菜共生系统中,藻类光合作用产生的氧气可被硝化细菌利用,在鱼池中硝化作用相关基因 *amoA* 拷贝数高于对照组,氮素利用率比普通系统高 13.79%<sup>[23]</sup>。这些研究都表明了微生物能改良系统水质,同时促进了氮、磷营养物质的循环利用。

#### 3.2 饲料添加剂

饲料添加剂的使用是将一些对鱼、植物和微生物有益的添加剂混合在饲料中进行投喂,饲料添加剂可以调节鱼体内微生态平衡<sup>[72]</sup>,促进生长发育,提高免疫力、

抗病力,起到防治疾病和增进健康的作用,还可以提高系统中营养物质的利用率。其中乳酸菌可以作为饲料添加剂进入宿主体内,在生物体内发挥代谢活性,可以为鱼类提供生存所需的氨基酸、维生素、消化酶等营养物质,还能激活鱼类体内的免疫机制,抑制病菌的侵袭。芽孢杆菌可以产生多种酶,这些酶可以提高鱼类对营养物质的吸收利用率,并有效提高鱼肠道内的有益菌群数,增加非特异性免疫力和抗病力等。当鱼类饲料配方中使用了大量的植物性成分时,还可在饲料中补充添加植酸酶,有研究评估了补充植酸酶的饲料对鱼菜共生系统中磷的动态变化和可利用率、鱼类和植物的生长以及植物的磷含量的影响,结果表明,添加了植酸酶的饲料与对照组相比,系统中释放的磷明显增加,提高了磷的总体利用率<sup>[73]</sup>。Gao 等<sup>[22]</sup>研究比较了不同浓度腐植酸 (0、15 及 30 mg/L) 对鱼菜共生系统氮素利用率的影响,结果显示腐植酸存在着浓度阈值效应,当其使用浓度为 15 mg/L 时,系统的氮素利用效率最佳。同时,作者揭示了 15 mg/L 系统中,硝化螺菌属比例和 *amoA* 及编码亚硝酸亚氧化还原酶的 *nrxB* 基因拷贝数到达最大值。还有研究发现螺旋藻含有丰富的营养物质并对鱼类消化系统中的有益菌具有刺激生长的作用,在饲料中添加螺旋藻能改善鱼菜共生系统中饲养的鱼的生长性能和饲料利用率<sup>[74]</sup>。

由此可见,生物制剂在系统水质改良和饲料利用方面具有良好的效果。其优点在于生物制剂种类复杂多样,不同制剂拥有不同的作用效果,可利用其不同特性组合搭配为复合微生物制剂,以发挥它们的综合效果;缺点在于不同微生物的生长繁殖条件不同,还需进一步对其使用条件和相互作用关系进行深入研究。

### 4 结论与展望

本综述通过对以上的试验研究总结发现,影响系统氮、磷利用效率的因素有很多,可分为系统运行条件、系统设计和生物制剂利用 3 个方面,主要是针对系统三大生物组成部分(鱼、植物、微生物)采取有效的优化措施。其中为了提高鱼对氮、磷的利用效率,可以优化投喂策略和种养比例;对于提高植物对氮、磷的利用效率,可以选择合适的种养对象和水培模式;对于微生物,尤其是硝化细菌的作用,可以优化运行条件(pH 值、溶解氧、水力负荷)和耦合方式。生物制剂则对鱼、植物和微生物均有提高氮、磷利用效率的作用。

目前,鱼菜共生系统运行条件的优化存在的弊端也很明显,主要是系统相关参数的还需要依靠人工调试,具有很大的主观性和不稳定性,系统运行管理技术门槛高,劳动力成本大。可以进一步研发渔业智能养殖装备技术,利用信息化手段、机器视觉、人工智能等技术研发相关的水质调控、自动投喂、溶氧控制等智能装备,减少人力和能源消耗,增加系统运行的稳定性,从而提高系统对氮磷等营养物质的利用率。

其次,针对于系统内的氮、磷利用效率的研究,多停留在评估提升系统中鱼菜产量的方面,对各种条件下系统氮、磷元素的转化过程及影响其转化降解的因素进

行的研究仍然是有限的。了解氮、磷在系统中的流动转化过程及影响因素,这将有助于更好地优化系统,提高对氮、磷营养物质的利用率。比如系统中通过硝化作用产生的硝酸盐,可通过植物吸收、反硝化作用和基质吸附等途径消耗,而现有研究仅针对植物的产量进行了评估和研究,其他途径产生和消耗的硝酸盐还不明确。因此,可以进一步研究采用分子标记等方法研究氮、磷在系统中从饲料到产品的转化降解过程,为该系统的进一步优化提供理论基础。

最后,通过上述研究发现生物制剂,特别是微生物制剂对鱼、植物和微生物均有良好的提高氮、磷利用效率的作用。而国内对微生物制剂在鱼菜共生系统中的应用方面缺少深入研究,可以有针对性地进行深入探究:1)研究微生物制剂对鱼菜共生系统中的微生物群落变化的影响,探究微生物促进植物生长的作用机制;2)筛选出优质的菌种并加以应用。为在生产实践中科学、合理、高效地使用微生物制剂提供参考和理论依据,从而促进微生物制剂在鱼菜共生系统中进一步研究和推广使用。

#### [参 考 文 献]

- [1] Yep B, Zheng Y. Aquaponic trends and challenges – A review[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 1586-1599.
- [2] 邹艺娜, 胡振, 张建, 等. 鱼菜共生系统氮素迁移转化的研究与优化[J]. *环境工程学报*, 2015, 9(9): 4211-4216.  
Zou Yina, Hu Zhen, Zhang Jian, et al. Investigation and optimization of nitrogen transformations in aquaponics[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(9): 4211-4216. (in Chinese with English abstract)
- [3] Raffee G, Saad C R. Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system[J]. *Aquaculture*, 2005, 244(1-4): 109-118.
- [4] Yavuzcan Y H, Robaina L, Pirhonen J, et al. Fish welfare in aquaponic systems: Its relation to water quality with an emphasis on feed and faeces—a review[J]. *Water*, 2017, 9(1): 13.
- [5] Lewis W M, Wehr L W. A fish-rearing system incorporating cages, water circulation, and sewage removal[J]. *Prog Fish Cult*, 1976, 38(2): 78-87.
- [6] Rakocy J, Shultz R C, Bailey D S, et al. Aquaponic production of tilapia and basil: Comparing a batch and staggered cropping system[J]. *Acta Horticulturae*, 2004, 648: 63-69.
- [7] McMurtry M R, Sanders D C, Cure J D, et al. Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system[J]. *Journal of World Aquaculture Society*, 1997, 28(4): 420-428.
- [8] 徐琰斐, 张宇雷, 顾川川, 等. 鱼菜共生发展历史、典型模式与发展趋势[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(5): 1-7.  
Xu Yanfei, Zhang Yulei, Gu Chuanchuan, et al. Historical process, typical systems and developing trends of aquaponics[J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(5): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [9] 丁永良, 张明华, 张建华, 等. 鱼菜共生系统的研究[J]. *中国水产科学*, 1997(4): 71-76.  
Ding Yongliang, Zhang Minghua, Zhang Jianhua, et al. Researches on fish and vegetable co-existing system[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1997(4): 71-76. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张明华, 丁永良, 杨菁, 等. 鱼菜共生技术及系统工程研究[J]. *现代渔业信息*, 2004(4): 7-12.  
Zhang Minghua, Ding Yongliang, Yang Jing, et al. A study on fish and vegetable co-existing technique and systems engineering[J]. *Modern Fisheries Information*, 2004(4): 7-12. (in Chinese with English abstract)
- [11] Schneider O, Sereti V, Eding E H, et al. Analysis of nutrient flows in integrated intensive aquaculture systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 2005, 32(3/4): 379-401.
- [12] Graber A, Junge R. Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production[J]. *Desalination*, 2009, 246(1/2/3): 147-156.
- [13] Hu Z, Lee J W, Chandran K, et al. Effect of plant species on nitrogen recovery in aquaponics[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 188: 92-98.
- [14] Trang N T D, Schierup H H, Brix H. Leaf vegetables for use in integrated hydroponics and aquaculture systems: Effects of root flooding on growth, mineral composition and nutrient uptake[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2010, 9(27): 4186-4196.
- [15] Endut A, Jusoh A, Ali N, et al. Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2009, 5(1/2/3): 19-28.
- [16] Zou Y, Hu Z, Zhang J, et al. Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifies addition and filler gradation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(7): 6671-6679.
- [17] Zou Y, Hu Z, Zhang J, et al. Effects of pH on nitrogen transformations in media-based aquaponics[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 210: 81-87.
- [18] Gullian K M, Gold B G, Delgadillo D M, et al. Effect of the use of *Bacillus* spp. on the characteristics of dissolved fluorescent organic matter and the phytochemical quality of *Stevia rebaudiana* grown in a recirculating aquaponic system[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(27): 36326-36343.
- [19] Wu D X, Zhao S M, Peng N, et al. Effects of a probiotic (*Bacillus subtilis* FY99-01) on the bacterial community structure and composition of shrimp (*Litopenaeus vannamei*, boone) culture water assessed by denaturing gradient gel electrophoresis and high-throughput sequencing[J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47(3): 857-869.
- [20] Roosta H R, Afsharipoor S. Effects of different cultivation media on vegetative growth, ecophysiological traits and nutrients concentration in strawberry under hydroponic and aquaponic cultivation systems[J]. *Advances in Environmental Biology*, 2012, 6: 543-555.
- [21] Liang J Y, Chien Y H. Effects of feeding frequency and photoperiod on water quality and crop production in a tilapia-water spinach raft aquaponics system[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2013, 85: 693-700.
- [22] Gao X, Zhang H, Xu Y, et al. Effects of humic acid on the nitrogen utilization efficiency and microbial communities in aquaponic systems[J]. *Aquaculture*, 2022, 547: 737475.
- [23] Fang Y. Improving nitrogen utilization efficiency of aquaponics by introducing algal-bacterial consortia[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 245: 358-364.
- [24] Ngo Thuy Diem T, Konnerup D, Brix H. Effects of

- recirculation rates on water quality and *Oreochromis niloticus* growth in aquaponic systems[J]. Aquacultural Engineering, 2017, 78: 95-104.
- [25] Endut A, Jusoh A, Ali N, et al. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(5): 1511-1517.
- [26] Goddek S, Delaide B P L, Joyce A, et al. Nutrient mineralization and organic matter reduction performance of RAS-based sludge in sequential UASB-EGSB reactors[J]. Aquacultural Engineering, 2018, 83: 10-19.
- [27] Rakocy J E. Aquaponics-Integrating Fish and Plant Culture[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2012: 344-386.
- [28] 刘苏, 杨宇晴, 张海发, 等. 不同 pH 和滤料对硝化细菌消氮效果的影响[J]. 渔业现代化, 2017, 44(5): 7-11, 18. Liu Su, Yang Yuqing, Zhang Haifa, et al. Effect of pH and filter material on ammonia nitrogen removal by nitrifying bacteria[J]. Fishery Modernization, 2017, 44(5): 7-11, 18. (in Chinese with English abstract)
- [29] 许友卿, 张仁珍, 丁兆坤. pH 对鱼类繁育及生长发育的影响[J]. 水产科学, 2014, 33(2): 133-136. Xu Youqing, Zhang Renzhen, Ding Zhaokun. Effects of pH of reproduction, growth and development in fish: A review[J]. Fisheries Science, 2014, 33(2): 133-136. (in Chinese with English abstract)
- [30] Tyson R V, Simonne E H, Treadwell D D, et al. Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters[J]. HortScience, 2008, 43(3): 719-724.
- [31] Yang T, Kim H J. Nutrient management regime affects water quality, crop growth, and nitrogen use efficiency of aquaponic systems[J]. Scientia Horticulturae, 2019, 256: 108619.
- [32] Hu Z, Lee J W, Chandran K, et al. Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission from aquaculture: A review[J]. Environmental Science & Technology, American Chemical Society, 2012, 46(12): 6470-6480.
- [33] Zhang W, Hou F, Peng Y, et al. Optimizing aeration rate in an external nitrification-denitrifying phosphorus removal (ENDPR) system for domestic wastewater treatment[J]. Chemical Engineering Journal, 2014, 245: 342-347.
- [34] Guo C Z, Fu W, Chen X M, et al. Nitrogen-removal performance and community structure of nitrifying bacteria under different aeration modes in an oxidation ditch[J]. Water Research, 2013, 47(11): 3845-3853.
- [35] Fang Y, Hu Z, Zou Y, et al. Increasing economic and environmental benefits of media-based aquaponics through optimizing aeration pattern[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 162: 1111-1117.
- [36] Yang T, Kim H J. Effects of hydraulic loading rate on spatial and temporal water quality characteristics and crop growth and yield in aquaponic systems[J]. Horticulturae, 2020, 6(1): 9.
- [37] Shete A P, Verma A K, Chadha N K, et al. Optimization of hydraulic loading rate in aquaponic system with common carp (*Cyprinus carpio*) and mint (*Mentha arvensis*)[J]. Aquacultural Engineering, 2016(72/73): 53-57.
- [38] Prehn J, Waul C K, Pedersen L F, et al. Impact of water boundary layer diffusion on the nitrification rate of submerged biofilter elements from a recirculating aquaculture system[J]. Water Research, 2012, 46(11): 3516-3524.
- [39] 刘爽, 安诗琦, 严子微, 等. 现代鱼菜共生技术研究进展与展望[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 160-166. Liu Shuang, An Shiqi, Yan Ziwei, et al. Progress and prospect of aquaponics technology[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(3): 160-166. (in Chinese with English abstract)
- [40] 金树权, 周金波, 朱晓丽, 等. 10 种水生植物的氮磷吸收和水质净化能力比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(8): 1571-1575. Jin Shuquan, Zhou Jinbo, Zhu Xiaoli, et al. Comparison of nitrogen and phosphorus uptake and water purification ability of ten aquatic macrophytes[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(8): 1571-1575. (in Chinese with English abstract)
- [41] Endut A, Lananan F, Abdul Hamid S H, et al. Balancing of nutrient uptake by water spinach (*Ipomoea aquatica*) and mustard green (*Brassica juncea*) with nutrient production by african catfish (*Clarias gariepinus*) in scaling aquaponic recirculation system[J]. Desalination and Water Treatment, 2016, 57(60): 29531-29540.
- [42] 高霞婷, 宋红桥, 张海耿, 等. 不同生长阶段的芹菜与生菜的净水能力比较[J]. 中国农学通报, 2021, 37(23): 125-132. Gao Xiating, Song Hongqiao, Zhang Haigeng, et al. Lettuce and celery at different growth stages: comparison of water purification capacity[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(23): 125-132. (in Chinese with English abstract)
- [43] 李天沛, 汪小岳, 丁为民, 等. 鱼菜共生系统中不同种类蔬菜对养殖尾水氮素转化的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 247-252. Li Tianpei, Wang Xiaochan, Ding Weimin, et al. Effects of different vegetables in aquaponics system on nitrogen conversion in aquaculture tail water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 247-252. (in Chinese with English abstract)
- [44] 蔡淑芳, 陈敏, 陈永快, 等. 种植密度对鱼菜共生系统氮素转化的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 132-137. Cai Shufang, Chen Min, Chen Yongkuai, et al. Effects of plant density on nitrogen transformation in aquaponics system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 132-137. (in Chinese with English abstract)
- [45] Lam S S, Ma N L, Jusoh A, et al. Biological nutrient removal by recirculating aquaponic system: Optimization of the dimension ratio between the hydroponic & rearing tank components[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2015, 102: 107-115.
- [46] Love D C, Fry J P, Li X, et al. Commercial aquaponics production and profitability: Findings from an international survey[J]. Aquaculture, 2015, 435: 67-74.
- [47] Timmons M B, Ebeling J M, Wheaton F W, et al. Recirculating Aquaculture Systems[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd, 2015.
- [48] Cherif M, Tirilly Y, Belanger R R. Effect of oxygen concentration on plant growth, lipidperoxidation, and receptivity of tomato roots to *Pythium* F under hydroponic conditions[J]. European Journal of Plant Pathology, 1997,

- 103(3): 255-264.
- [49] Engle C R. Economics of aquaponics[J]. *Aquaculture*, 2015, 5006: 1-4.
- [50] Lennard W A, Leonard B V. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in an aquaponic test system[J]. *Aquaculture International*, 2006, 14(6): 539-550.
- [51] Shete A P, Verma A K, Chadha N K, et al. Evaluation of different hydroponic media for mint (*Mentha arvensis*) with common carp (*Cyprinus carpio*) juveniles in an aquaponic system[J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(3): 1291-1301.
- [52] Wongkiew S, Hu Z, Chandran K, et al. Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review[J]. *Aquacultural Engineering*, 2017, 76: 9-19.
- [53] 李月, 刘晃, 张宇雷, 等. 移动床生物膜反应器在养殖废水处理中的性能研究[C]//中国水产学会. 2013 年中国水产学会学术年会论文集. 北京: 海洋出版社, 2013: 251.
- [54] 张海耿, 管崇武. 新型流化床生物滤器处理海水养殖废水性能研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(29): 29-35.  
Zhang Haigeng, Guan Chongwu. Effluent purifying performance of new style fluidized-sand biofilter in recirculating aquaculture system[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(29): 29-35. (in Chinese with English abstract)
- [55] Holm N J B, Al S T, Oleskowicz P P. The future of anaerobic digestion and biogas utilization[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(22): 5478-5484.
- [56] Kathijotes N, Petrova V, Zlatareva E, et al. Impacts of biogas digestate on crop production and the environment: A bulgarian case study[J]. *American Journal of Environmental Sciences*, 2015, 11(2): 81-89.
- [57] Layden N M, Mavinic D S, Kelly H G, et al. Autothermal thermophilic aerobic digestion (ATAD) — Part I: Review of origins, design, and process operation[J]. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 2007, 6(6): 665-678.
- [58] Khiari Z, Kaluthota S, Savidov N. Aerobic bioconversion of aquaculture solid waste into liquid fertilizer: Effects of bioprocess parameters on kinetics of nitrogen mineralization[J]. *Aquaculture*, 2019, 500: 492-499.
- [59] Dijkgraaf K H, Goddek S, Keesman K J. Modeling innovative aquaponics farming in kenya[J]. *Aquaculture International*, 2019, 27(5): 1395-1422.
- [60] Yogeve U, Vogler M, Nir O, et al. Phosphorous recovery from a novel recirculating aquaculture system followed by its sustainable reuse as a fertilizer[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 722: 137949.
- [61] Abdel-Latif H M R, Chaklader M R, Shukry M, et al. A multispecies probiotic modulates growth, digestive enzymes, immunity, hepatic antioxidant activity, and disease resistance of *Pangasianodon hypophthalmus* fingerlings[J]. *Aquaculture*, 2023, 563: 738948.
- [62] Adeshina I, Akpoiloh B U, Udom B F, et al. Interactive effects of dietary phosphorus and microbial phytase on growth performance, intestinal morphometry, and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed on low-fishmeal diets[J]. *Aquaculture*, 2023, 563: 738995.
- [63] Lipczynska-Kochany E. Humic substances, their microbial interactions and effects on biological transformations of organic pollutants in water and soil: A review[J]. *Chemosphere*, 2018, 202: 420-437.
- [64] Martins C F, Ribeiro D M, Matzapetakis M, et al. Effect of dietary spirulina (*Arthrospira platensis*) on the intestinal function of post-weaned piglet: An approach combining proteomics, metabolomics and histological studies[J]. *Journal of Proteomics*, 2022, 269: 104726.
- [65] Wang Y B, Li J R, Lin J. Probiotics in aquaculture: Challenges and outlook[J]. *Aquaculture*, 2008, 281: 1-4.
- [66] 李长玲, 黄翔鹤, 李瑞伟, 等. 硝化细菌对罗非鱼苗培育环境及抗病力的影响[J]. *广东海洋大学学报*, 2008, 28(6): 41-45.  
Li Changling, Huang Xianghu, Li Ruiwei, et al. Effects of nitrifying bacteria on culture environment and anti-disease ability of larval tilapia[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2008, 28(6): 41-45. (in Chinese with English abstract)
- [67] Boopathy R, Kern C, Corbin A. Use of *Bacillus* consortium in waste digestion and pathogen control in shrimp aquaculture[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2015, 102: 159-164.
- [68] Hlrdzi V, Kuebutornye F K A, Afriye G, et al. The use of *Bacillus* species in maintenance of water quality in aquaculture: A review[J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 18: 100503.
- [69] 孟睿, 何连生, 席北斗, 等. 芽孢杆菌与硝化细菌净化水产养殖废水的试验研究[J]. *环境科学与技术*, 2009, 32(11): 28-31.  
Meng Rui, He Liansheng, Xi Beidou, et al. Experimental study on purifying aquaculture wastewater between bacillus and nitrifying bacteria[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(11): 28-31. (in Chinese with English abstract)
- [70] 祁真, 杨京平. 几种微生物制剂和微藻在水产养殖中的应用[J]. *水生生物学报*, 2004(1): 85-89.  
Qi Zhen, Yang Jingping. Application of microbiological preparation and microalgae in aquaculture[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2004(1): 85-89. (in Chinese with English abstract)
- [72] Akhter N, Wu B, Memon A M, et al. Probiotics and prebiotics associated with aquaculture: A review[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2015, 45(2): 733-741.
- [73] Silva C B, Fitzsimmons K. Effect of dietary phytase on phosphorus use efficiency and dynamics in aquaponics[J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(3): 1227-1238.
- [74] Siringi J O, Turoop L, Njonge F. Growth and biochemical response of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) to spirulina (*Arthrospira platensis*) enhanced aquaponic system[J]. *Aquaculture*, 2021, 544: 737134.



## Research status and prospect of nitrogen and phosphorus use efficiency in the aquaponic system

Jiang Jinchun<sup>1,2,3</sup>, Gao Xiating<sup>1,3\*</sup>, Xu Yanfei<sup>1,3</sup>, Shan Jianjun<sup>1,3</sup>, Zhang Yulei<sup>1,3</sup>

(1. Fishery Machinery and Instrument Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200092, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

3. Key Laboratory of Aquaculture Facilities Engineering, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Aquaponics is a kind of technology, which consists of a Recirculating Aquaculture System (RAS) and hydroponics, and uses aquaculture effluent to provide nutrients for plants. Agricultural products (fish and plants) are produced from one nitrogen source (fish feed), with such characteristics as energy and water conservation, and environmental friendliness, which makes it a sustainable way of agricultural development. In this paper, the research status of nitrogen and phosphorus utilization efficiency of aquaponics was discussed from three aspects: Operating process conditions, system design, and biological agents. This paper summarized the optimization effect and principle of the operating process conditions of the aquaponics system: the adjustment of pH, dissolved oxygen, and hydraulic loading, the improvement of feeding frequency and feeding strategy, plant selection, and precise planting ratio, which could affect the nitrogen and phosphorus utilization efficiency of the system by directly affecting the normal growth and biological yield of fish, plants, and microorganisms. The advantages and limitations of different planting patterns and system construction patterns in the design of aquaponics systems to improve the system nitrogen and phosphorus utilization efficiency were analyzed. Media bed culture had higher nitrogen utilization efficiency than deep-water culture and nutrient film pipeline culture due to its higher microbial load. The decoupling type had more development potential than the coupling type because of its more precise control conditions and more equipment integration. This paper also summarized the application prospect of biological agents including microorganism preparation, plant extracts, and algae in aquaponics systems: Which could be used as water quality improvement regulators or feed additives to improve nitrogen and phosphorus utilization efficiency of the system by decomposing residual bait of fish manure, increasing nitrification, promoting plant growth, increasing dissolved oxygen, enhancing fish immunity, promoting nitrifying bacteria growth, improving feed utilization rate and other functions. Three suggestions for optimizing the aquaponics system and further improving the utilization rate of nitrogen and phosphorus nutrients in the system were put forward: Accelerating the research and development of fishery intelligent aquaculture equipment technology, strengthening the research on the mechanism of nitrogen and phosphorus transformation rule of aquaponics system under different conditions, and deepening the application of biological agents in the aquaponics system.

**Keywords:** nitrogen; phosphorus; aquaculture; aquaponics; utilization efficiency; process conditions; system design; biological agents