

# 水产养殖污染防控技术研究进展

覃晓茜<sup>1,2\*</sup>, 李天瑞<sup>1</sup>, 朱联东<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>随州维克昇检测有限公司, 湖北 随州

收稿日期: 2021年10月24日; 录用日期: 2021年11月26日; 发布日期: 2021年12月3日

## 摘要

我国水产养殖业发展极为迅速, 水产集约化养殖过程中, 大量饲料的使用和水产品代谢物的累积导致水体污染, 未经处理达标的养殖废水排放会对周边环境造成污染。本文讨论了目前我国水产养殖过程中的污染特征, 重点分析了水产养殖污染防控技术的研究现状, 包括物理技术、化学技术和生物修复技术, 最后对水产养殖废水处理的未来发展趋势做出了展望。

## 关键词

水产养殖, 污染, 防控技术, 生物修复

# Research Progress of Pollution Prevention and Control Technology in Aquaculture Industry

Xiaoxi Qin<sup>1,2\*</sup>, Tianrui Li<sup>1</sup>, Liandong Zhu<sup>1#</sup>

<sup>1</sup>School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Suizhou Weikesheng Testing Co., Ltd., Suizhou Hubei

Received: Oct. 24<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2021; published: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2021

## Abstract

The aquaculture industry in China is extremely rapidly developing. In the process of intensive aquaculture, the use of a large amount of feed and the accumulation of metabolites of aquatic prod-

\*第一作者。

#通讯作者。

ucts will cause source pollution in the water bodies, and the discharge of untreated aquaculture wastewater will also pollute the surrounding environment. This paper discusses the current pollution characteristics of aquaculture, focusing on the research status of aquaculture pollution prevention and control technologies, including physical technology, chemical technology and bioremediation technology. Finally, this paper presents prospects for the future development trend of aquaculture wastewater treatment.

## Keywords

Aquaculture, Pollution, Prevention and Control Technology, Bioremediation

Copyright © 2021 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

水产养殖的污染问题正在引起广泛关注, 污染不仅危害鱼类生存、影响渔民收入, 而人作为食物链最高, 食品安全问题是重中之重。水产养殖引起的污染问题受到国内外的广泛关注[1] [2] [3]。首先, 在人工养殖过程中, 饵料、肥料的过量投入会使养殖水体中氮、磷、氨等营养物质增加, 形成超标污染, 影响水质。而且, 营养物质过度增加, 会使藻类生长飞速, 导致水体富营养化, 从而降低鱼类生理和摄食功能, 导致鱼类死亡。其次, 由于病原体生命力强、传播速度快, 病原微生物会与治病药物一起造成水体污染, 影响水产品食品安全。水环境中的亚硝酸盐累积, 对鱼类形态和生长发育有毒害作用, 降低鱼类血红蛋白产生、运送氧气功能和生产代谢功能。虽然使用药物有治病作用, 但会破坏生态平衡, 导致水体污染。同时, 滥用药物不仅危害鱼类生长, 还会增加病原微生物的耐药性, 使其生长繁殖速度加快, 加快疫病传播, 有些药物未经法律允许使用还会影响水产品食品安全。养殖模式的不合理操作, 如集约型、网箱型养殖模式的推进发展, 导致养殖生物过多、养殖密度过大, 影响了水流运输物质的方式, 导致水体中氧气溶度降低, 影响鱼类生理代谢功能。因此, 国内外学者针对水产养殖污染的一系列难题, 一直致力于研究污染防控技术(物理技术、化学技术和生物修复技术) [3] [4] [5], 以期推动水产养殖的可持续发展。

## 2. 水产养殖污染特征

随着市场需求增加、水产养殖业规模和技术的发展, 养殖产业模式逐渐向高密度、集约化精养转变。为了获得更大的产量, 养殖过程中大量使用饵料、肥料等投入品, 而它们并不能全部被养殖产品摄食, 大部分都排放到环境中[1]。残留的饵料和养殖体的排泄物会释放出无机溶解态 N ( $\text{NH}_3^+$ )、P ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) 以及有机溶解态 N (DON)、P (DOP), 这两种形式的营养元素会直接进入水环境, 而有机颗粒态 N、P 则以残饵和排泄物的形式沉淀到水底形成沉积物, 沉积物中的 N、P 元素会再次通过矿化分解进入到水体中, 因此导致了养殖水体的富营养化[2]。相对于工业废水和生活污水, 水产养殖废水具有成分简单, 污染物浓度较低、易生化降解、水质稳定的特点, 其  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度一般在  $130 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右、TN 浓度一般在  $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  左右。主要污染物主要为易降解的有机物和营养盐、抗生素。工业废水和生活废水的处理需要达到相应的排放标准, 而水产养殖废水的处理目的主要是能够满足回用的要求, 意味着需要更加严格高效的处理方式。

此外,现代高密度集约化养殖中常会使用渔用药物和抗生素等药物,由于养殖人员的能力有限以及养殖场的管理不到位等原因,滥用药物的现象也广泛存在,使得水体中积累了大量的抗生素,破坏生态平衡[3]。我国是抗生素生产和使用大国,年均使用量约 2.5 t,水产养殖中用得最多、最广的抗生素包括大环内酯类、 $\beta$ -酰胺类、磺胺类、四环素类以及喹诺酮类 5 大类。研究表明,水产使用抗生素少部分进入食物链,大部分进入环境中,仅有少量抗生素被鱼体吸收。近年来,地表水中抗生素的检出率较高,水产养殖业就是其重要来源。有实验证明[4]在养殖鱼塘、生产河道、漏湖均能检出多种抗生素,其中恩诺沙星、磺胺甲噁唑以及氟甲砜霉素是水产养殖水中的主要残留抗生素。

### 3. 水产养殖污染防控技术

#### 3.1. 物理技术

常用的物理手段有机械过滤、泡沫分离技术、膜分离技术等,主要用于去除水产养殖废水中的悬浮颗粒物、COD 和 BOD,对可溶性氮、磷等物质的去除效果有限,在实际应用中具有一定的局限性,可以作为其他处理的预处理环节。

运行费用最低和较为方便的就是物理过滤技术,如机械过滤、压力过滤和砂滤器等。泡沫分离是向水中通入空气产生气泡,使气泡与颗粒黏附形成密度小于水的颗粒,从而将水中的悬浮物带到水体表面而去除,不仅可以有效去除水中的悬浮颗粒物,也能去除部分 COD 等污染物,常用于海水养殖系统。膜分离技术对 COD、TN 等污染物也有一定的去除效果,但是其设备投资和运行成本较高。超滤膜孔径在 0.001~0.02  $\mu\text{m}$  之间,操作压力 0.1~0.5 MPa,主要用于截留去除废水中的悬浮固体、胶体、微粒、细菌和病毒等大分子物,而纳滤膜平均孔径 2 nm 左右,操作压力一般低于 1.5 MPa,主要用来分离小分子有机物和多价离子等。如何将二者组合使用达到高渗透量和高截留率是目前仍需要进一步研究的问题。

#### 3.2. 化学技术

##### 3.2.1. 氧化消毒技术

氧化消毒技术是利用强氧化剂的氧化还原作用对养殖废水中的无机污染物、有机污染物和细菌进行处理,可去除氨氮、硝酸盐等有害物质,还有较强的杀菌作用。目前水产养殖废水中常用的消毒剂主要有臭氧、过氧化氢、氯气、二氧化氯、高锰酸钾和甲醛等。

使用臭氧不仅可以杀菌消毒,还可以大大提高鱼、虾、贝类育苗率和养殖的成活率,提高饲料的转化率[5]。我国在实际生产中的臭氧混合装置大部分是鼓泡塔式接触反应器,这种鼓泡塔大部分高 3 m 以上,不适于移动和日常的维护操作,而后被射流混合或叶片泵搅动混合方式的设备取代。刘鹏等[6]按气液混合理论设计了一种水产养殖用的新型臭氧混合方法,臭氧的溶解效率最高可以达到 78%左右。目前实际应用中不单单只使用了臭氧,常和其他技术联用,以紫外/臭氧组合工艺和臭氧/生物活性炭组合工艺最为广泛。但是在工厂化循环水养鱼系统中,应当严格控制臭氧的浓度,以减少臭氧对微生物灭菌、活性炭吸附工艺的破坏。

##### 3.2.2. 电化学降解技术

电化学降解法也是水产养殖废水常用的处理方法,主要通过电氧化、电还原和电絮凝等方法将氨氮、亚硝态氮、有机物等降解为水、氮气、二氧化碳或者简单的有机物,不会造成二次污染,并且占地面积小。但是由于电化学技术在实际运用中的电能消耗高、效果不稳定,所以暂时没有得到大规模的推广。吴照学等[5]用电解紫外协同处理的方法处理实际工厂化循环水养殖系统废水时发现,该系统对氨氮、亚硝氮、固体悬浮颗粒物的去除具有较好效果,去除率分别为 97.8%、96.9%和 92.1%。有研究表明,在碱

性条件下该技术适合去除氨，酸性条件下适用去除亚硝酸盐，在实际应用中应根据需求合理使用，确保电化学降解技术发挥优势。

### 3.2.3. 絮凝沉降技术

考虑到水产养殖废水的有机物浓度低，异养菌大多为贫营养菌，使得总体代谢选择性和有效微生物比例较低，也可以用絮凝的方法进行一级处理。絮凝沉降的基本原理是向养殖水体中加入絮凝剂，絮凝剂与水体中的悬浮物、有机物和氨氮等污染物相互接触，形成大粒径的絮凝团块，再通过沉淀从水中分离。絮凝处理能显著提高水体中悬浮物及胶体有机物的去除率，减轻后续处理的有机负荷，从而节省投资和运行成本。常用的絮凝剂主要有聚合硫酸铁、聚合铝絮凝剂、聚二甲基二烯丙基氯化铵等，实际运用中常需要联合使用几种絮凝剂来净化水体。陈强等[7]将混凝和膜过滤相结合，在持续空气曝气的条件下，连续投加混凝剂，水力停留时间仅为 15~30 min 后进入膜设备，对 COD、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、PO<sub>4</sub>-P 的去除率分别达到 75.6%、61.2%、82.9%、37.5% 和 59.1%。

在实际应用中需要严格控制絮凝剂的用量，因为过量的使用絮凝剂会对水产品产生毒性，高分子有机絮凝剂更会产生致癌、致畸和突变等副作用，危害水产品的质量。同时，利用絮凝技术进行抗生素的消除，仅仅是转化抗生素的状态而非对其彻底破坏，最后抗生素仍然会以其他形式回到环境中。

## 3.3. 生物修复技术

生物技术是水产养殖废水处理的主要手段，主要利用水生植物、动物、微生物对养殖水体内的污染物进行吸收、转化、利用。生物技术的主要方法为生物膜法、生物絮凝法及水生植物养殖法，在实际应用中常设计为生态浮床、人工湿地、膜生物反应器等。

### 3.3.1. 人工湿地

人工湿地具有运行费用省和运行耗能低的优点，常用的人工湿地包括水平潜流和垂直流人工湿地，水平潜流湿地的反硝化效果更好，除氨效果比较有限，而垂直流湿地与氧结合更好，对氨氮和有机物的去除效果好，反硝化效果有限。构造复合人工湿地来提供不同的氧化还原环境，促进硝化和反硝化的进行，能有效提高净化污水的效果。在硝化功能上，有研究发现复合垂直流人工湿地对总氮、氨氮的去除率均高于水平潜流人工湿地[8]。Hu [9]研究了复合人工湿地处理养殖废水，对富营养化养殖废水中亚硝酸盐、磷酸盐和硝酸盐的去除率分别达到 56%、71% 和 73%。

抗生素在人工湿地中的去除与光解、水解、植物吸附、填料吸附和微生物降解等因素有关[10][11]。陈国鑫[4]发现表面流人工湿地在水力停留时间为 4 h 时，对恩诺沙星的去除率可达到 66.7%，而在潜流人工湿地中水力停留时间 1 h 即可达到 80.4% 的去除率，对磺胺甲噁唑而言则是水平潜流人工湿地的去除效果优于垂直流人工湿地和复合垂直流人工湿地。可见实际操作中通过改进人工湿地工艺、优化工艺参数能够调整对不同抗生素的去除效果。

### 3.3.2. 生态浮床

生态浮床主要是利用水生植物和水生动物来处理水产养殖废水，水生植物主要通过吸收作用和附着微生物的分解作用去除有机物和氮，通过吸收、沉淀、吸附和微生物固定等方式直接或间接去除磷。由此可见，植物是生态浮床技术中净化污染水体的重点。黄翔峰等[12]的研究表明黄菖蒲和常绿鸢尾脱氮除磷的效果较好，常用于处理水产养殖废水，其中黄菖蒲对 COD 的去除率可达 39.8%；常绿鸢尾对 TP、TN 的去除分别达到 76.2%、63.5%。但是相比于单一植物，这两种植物的组合对 COD、TN、TP 的去除率均有所降低，这可能是植物体产生的化感物质对微生物的净化能力产生抑制作用，说明二者不合同时使用。

在生态浮床的系统构建时应针对废水中污染物的浓度选择净化能力强的水生植物，并在植物种植前应做好资料的调研或通过实验验证，在不了解相互影响时建议分片种植。同时还可将生态浮床与其他污水净化技术想结合。例如与不同组合基质搭配、增添微曝气技术等，可大幅度提升生态浮床的净化效能。

### 3.3.3. 生物膜法

生物膜法主要用于去除水产养殖废水中的  $\text{NH}_3\text{-N}$  和有机物，充满填料的生物滤器为氨氧化细菌和亚硝酸盐硝化细菌提供固体基质和适宜的生长环境，同时在生物膜表面形成的微生物，通过分解代谢活动将废水中的有机物最终分解为二氧化碳和水。生物膜法是去除 COD、氨氮等有机污染物最经济，成本最低，去除效果较好的方法，其应用形式主要有生物滤池、生物转盘和生物流化床等。

生物滤池的工艺原理是在滤池中装填一定量的滤料，通过气动、液动或机械带动等方式使滤料在滤池中不停运动，分别与空气、水接触，进而形成生物膜，依靠膜来代谢水体中的污染物。该法对养殖污水的净化效果较好，且滤器多带自净化功能，运行稳定，管理方便，但生物滤器也有受滤料层厚度限制，布水困难，占地较大等缺点。赵思[13]将曝气生物滤池应用处理水产养殖废水污染中，在最佳运行工况下  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的出水浓度达到了《地表水环境质量标准》中的 III 类标准。

生物转盘是用转动的盘片代替固定的滤料，转盘部分浸没在污水中，在运行时交替地与污水和空气接触，形成一个连续的吸附、氧化分解、吸氧的过程。使污水不断净化。生物转盘的适用范围广泛，能处理生活污水和各种工业废水，其操作简单且具备自动清洗能力，无需人工曝气和污泥回流，不会造成污泥膨胀和二次污染问题。李宁[14]研发了一种新型转鼓形生物反应器，将生物转盘和移动床生物膜反应器联合起来，借助转鼓的转动带动筒内填料转动，从而促进生物膜的更新，提高生物膜上的氧传质效率，使得污水中污染物净化效率提升。

生物流化床是指为提高水处理效率，在流化床反应器内加入特定比例的固载，使其作为生物膜生长依附的载体，污水自反应器底部进入反应器向上流过固载层，使得颗粒固载处于流化状态，从而单位时间内生物膜、废水、氧三者充分接触并传质，利用固载的流化状态增强污水生物净化过程的构筑物。该法兼具活性污泥法与生物膜法的特点，其滤床比表面积大、对溶解性有机物有较好的去除率、运行稳定方便。在水产养殖领域，国外生物流化床技术的代表是流化沙床生物滤器，在北美等地，流化床生物滤器广泛应用于养殖诸如小鲑鱼、彩虹鲑、濒危鱼类、热带鱼和观赏鱼等对水质要求比较高的系统中[15]。李源[15]构建了一种基于 CFD 的结构参数优化的内循环流化床反应器，净化 COD 150 mg/L，氨氮 3.5 mg/L 的养殖污水，COD 的去除率为 30%，氨氮的去除率为 72.3%。

### 3.3.4. 微生物菌剂技术

微生物菌剂无毒副作用、无污染，可改善水质，减少病害发生，提高水产养殖动物的免疫力和产量，在水产养殖中具有很好的应用前景。目前微生物菌剂主要有光合细菌、芽孢杆菌、乳杆菌、双歧杆菌、硝化细菌等。梁前才等[16]研究了沼泽红假单胞菌、枯草芽孢杆菌和地衣芽孢杆菌 3 种菌剂的单一投放和复合菌剂投放模式下对水体亚硝酸氮的降解效率，结果表明复合配方的降解能力最强，仅 72 h 降解率可达 99.74%。

## 4. 总结

我国水产养殖水体中氮磷污染主要来源于残饵、排泄物的矿化分解，抗生素的使用造成养殖水体中的抗生素污染，养殖尾水排放造成周围水体富营养化，同时低浓度抗生素的扩散也诱导了大量抗性基因的产生，对人体健康和周围水域的水态环境产生了威胁。故亟需研发水产养殖污染防控技术，包括物理技术、化学技术和生物修复技术。根据技术适用条件、各自特点及排放要求，合理选择某一类防控技术或集成两种及以上防控技术，是推动水产养殖业可持续发展的关键。

## 5. 展望

在养殖方式上,传统的养殖方式已经难以满足新时期发展的需求,有必要对淡水养殖方式进行技术创新。基于生态系统的养殖模式可以有效削减养殖水体中的氮磷负荷,推行清洁生产,实行生态养殖是水产养殖业可持续发展的出路。在技术手段上,解决养殖水体尾水氮磷污染的方法可分为物理、化学和生物三方面,需要结合实际情况加以选择,以达到经济有效的处理效果。从源头开展水产养殖水质净化和绿色养殖技术研究,综合各种处理技术的优点,取长补短,重点开展生物处理技术为主的水产养殖尾水净化方法研究。近年出现的微生物菌剂技术成为国内外较为热门的研究领域,而在深度净化及回用领域,国际上对人工湿地技术的关注度较高。此外,大数据技术也已经成为水产养殖全产业链向集约化、精准化和智能化发展的关键技术,推广如水产养殖智能监测系统的现代辅助设备,能够有效提高污染防治技术水平。建立一套适合我国水产养殖业可持续发展的高效健康养殖技术模式,改善养殖水环境成为我国水产养殖业可持续发展的关键。

## 基金项目

国家重点研发计划项目课题:田园综合体生态环境治理技术集成与示范(编号:2019YFD1101303)。

## 参考文献

- [1] Kurniawan, S.B., Abdullah, S., Imron, M.F., *et al.* (2021) Potential of Valuable Materials Recovery from Aquaculture Wastewater: An Introduction to Resource Reclamation. *Aquaculture Research*, **52**, 2954-2962. <https://doi.org/10.1111/are.15180>
- [2] 王成成, 焦聪, 沈珍瑶, 等. 中国水产养殖尾水排放的影响与防治建议[J]. 人民珠江, 2020, 41(1): 89-98.
- [3] 王丹薇. 水产养殖中的污染及防治措施[J]. 农村经济与科技, 2018, 29(10): 50-52.
- [4] 陈国鑫. 水产养殖水中抗生素的残留特性及其去除技术研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2015.
- [5] 吴照学, 李海军, 杨智良, 等. 电解与紫外协同去除工厂化养殖循环水中氨氮效果研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 277-284.
- [6] 刘鹏, 倪琦, 管崇武, 等. 水产养殖中多层次式臭氧混合装置效率研究[J]. 广东农业科学, 2014, 41(10): 115-119+131.
- [7] 陈强, 黎中宝, 陈明岭. 混凝-膜组合工艺处理水产养殖废水[J]. 环境工程学报, 2014, 8(5): 1869-1876.
- [8] 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 等. 人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响[J]. 环境科学, 2016, 37(9): 3430-3437.
- [9] Hu, J., Hu, R., Qi, D., *et al.* (2017) Study on Treatment of Aquaculture Wastewater Using a Hybrid Constructed Wetland. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **61**, Article ID: 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/61/1/012015>
- [10] Huang, X.F., Ye, G.Y., Yi, N.K., *et al.* (2019) Effect of Plant Physiological Characteristics on the Removal of Conventional and Emerging Pollutants from Aquaculture Wastewater by Constructed Wetlands. *Ecological Engineering*, **135**, 45-53. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.05.017>
- [11] Bôto, M., Almeida, C.M.R. and Mucha, A.P. (2016) Potential of Constructed Wetlands for Removal of Antibiotics from Saline Aquaculture Effluents. *Water*, **8**, Article No. 465. <https://doi.org/10.3390/w8100465>
- [12] 黄翔峰, 王坤, 陈国鑫, 陆丽君, 刘佳. 人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 12-20.
- [13] 赵思. 曝气生物滤池处理水产养殖废水的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2014.
- [14] 李宁. 新型生物转鼓反应器研制及脱氮效能研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 河北科技大学, 2015.
- [15] 李源. 内循环三相好氧生物流化床水产养殖污水净化装备的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2015.
- [16] 梁前才, 李长秀, 林清友, 许永军, 陈炳秋, 韦明肯. 复合菌剂对渔业养殖水体中亚硝酸氮的降解研究[J]. 广东石油化工学院学报, 2018, 28(4): 32-36.