



移动扫码阅读

由昆,覃发挥,李倩,等.水产养殖废水深度脱氮研究进展[J].能源环境保护,2023,37(6):64-78.
YOU Kun, QIN Fahui, LI Qian, et al. Research progress on total nitrogen removal for aquaculture wastewater[J].
Energy Environmental Protection, 2023, 37(6): 64-78.

水产养殖废水深度脱氮研究进展

由 昆¹,覃发挥¹,李 倩²,郭建林²,刘 鹰³,

肖 艳⁴,刘德钊^{3,*}

(1. 沈阳建筑大学 市政与环境工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 浙江省淡水水产研究所, 浙江 湖州 313001; 3. 浙江大学农业生物环境工程研究所, 农业农村部设施农业装备与信息化重点实验室, 浙江省农业智能装备与机器人重点实验室, 浙江 杭州 310058; 4. 中煤科工集团杭州研究院有限公司, 浙江 杭州 311201)

摘要:水产养殖业在促进我国经济发展和保障食品供应安全等方面发挥着重要作用。然而,近年来我国水产养殖业的迅猛发展导致每年大量废水和污染物的排放,给周边环境和近海带来严重污染。针对水产养殖废水,生物脱氮技术因其绿色环保、经济可靠等优点而得到广泛研究和应用。目前,大多工厂化养殖采用传统的好氧生物处理方法,注重氨氮的去除,往往忽略硝化反应带来的硝酸盐积累问题,进而导致水生生物如鱼类生长缓慢、免疫力下降等问题。依靠周期性换水以降低三氮危害的主流方式显然不利于节水减排。因此,必须追求经济高效的深度脱氮工艺,为水产养殖业的可持续发展提供可靠支持。针对养殖废水的深度脱氮,在分析传统脱氮方式的基础上,主要介绍了好氧反硝化及同步硝化反硝化的最新进展及应用情况,探讨了其关键影响因素和功能微生物群的作用,并介绍了潜在的深度脱氮前沿技术,以期为我国水产养殖废水深度脱氮工程实践提供有效的指导和依据。

关键词:水产养殖废水;深度脱氮;同步硝化反硝化;好氧反硝化

中图分类号:X703

文献标识码:A

文章编号:1006-8759(2023)06-0064-15

Research progress on total nitrogen removal for aquaculture wastewater

YOU Kun¹, QIN Fahui¹, LI Qian², GUO Jianlin², LIU Ying³,

XIAO Yan⁴, LIU Dezha^{3,*}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, China; 3. Key Laboratory of Equipment and Informatization in Environment Controlled Agriculture from Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Intelligent Equipment and Robotics for Agriculture of Zhejiang Province, Institute of Agricultural Bio-Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 4. CCTEG Hangzhou Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 311201, China)

Abstract: Aquaculture plays a significant role in promoting China's economic development and ensuring the safety of the food supply. However, in recent years, the rapid development of China's aquaculture industry has led to the discharge of a large amount of nitrogen-rich wastewater and pollutants every year. This has caused serious pollution in the surrounding environment and offshore areas. Re-

收稿日期:2023-10-29

DOI:10.20078/j.eep.20231105

基金项目:浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C02045);浙江省重点研发计划资助项目(2021C02024);

萧山区重大科技计划资助项目(2021224)

作者简介:由 昆(1978—),女,辽宁沈阳人,教授研究员级高级实验师,研究方向为污水处理理论和技术。E-mail: 466755432@qq.com

通讯作者:刘德钊(1977—),男,山东菏泽人,研究员,主要从事废水处理及养殖污染优化控制和资源化。E-mail: dezhaoliu@zju.edu.cn

garding aquaculture wastewater, biological denitrification technology has been widely studied and applied due to its advantages in terms of green environmental protection, economic viability, and reliability. Currently, most industrial aquaculture operations rely on traditional aerobic biological treatment methods that primarily focus on removing ammonia nitrogen while often overlooking the issue of nitrate accumulation caused by nitrification. As a result, problems such as slow fish growth and decreased immunity among aquatic organisms arise. The mainstream approach of relying on periodic water exchange to reduce the presence of the three forms of nitrogen is clearly not conducive to water conservation and emission reduction. Therefore, it is necessary to pursue an economic and efficient denitrification process that can provide reliable support for the sustainable development of aquaculture in China. This paper primarily focuses on analyzing traditional denitrification methods for aquaculture wastewater and introduces the latest advancements and applications of aerobic denitrification and simultaneous nitrification and denitrification. The key influencing factors and the role of functional microbial populations are analyzed, and potential cutting-edge technologies for cost-effective nitrogen removal are discussed. This study aims to provide effective guidance for the engineering practice of biological nitrogen removal from aquaculture wastewater in China.

Keywords: Aquaculture wastewater; Total nitrogen removal; Simultaneous nitrification and denitrification; Aerobic denitrification

0 引言

进入新世纪,我国水产养殖业迎来了政策利好,现已成为我国渔业生产的主体。据官方最新统计,2022 年全国收获 6 800 万余吨水产品,其中八成以上为养殖产出,远超同期捕捞产品产量。不仅如此,我国水产养殖占地较去年进一步扩大,已达 7 107.50 千公顷。

水产养殖业每年排放的废水数以亿吨计,因而导致了不容忽视的环境和病害问题。根据《第二次全国污染源普查公报》,我国水产养殖业化学需氧量排放量是工业源的 0.73 倍,达 66.60 万吨,总磷排放超过 1.6 万吨,同时总氮排放接近 10 万吨^[1]。养殖废水带来的氮污染往往最容易被人们忽视,约 75%~80% 的剩余饵料、鱼虾类的排泄物等以氨氮和有机氮的形式残留在养殖水体中^[2]。养殖尾水裹挟的污染物尤其是氮元素的过量排放,对水生生态环境具有极大的隐患。此外,养殖水体中以氨氮和亚硝态氮为主要危害源的三态氮对养殖水产品均具有毒性,任其在养殖环境中停留积累,也势必会降低水产品的品质及产量。因此,为了保障水产养殖业良性、可持续发展和减少对自然环境的危害,必须对养殖水采取合理、经济可行的处理措施。近年来,循环水养殖(Recirculating Aquaculture System, RAS)受到诸多政策利好和扶持,作为未来养殖行业发展的主力军,其养殖水

处理工艺,既反映了该系统的先进性,也是行业健康发展的核心环节。图 1 展示了目前常规的循环养殖水处理工艺流程,及三态氮的转化、排放过程。

常见的机械过滤、泡沫分离、紫外消毒、臭氧净化、电化学法等物理化学技术,或活性污泥法、生物膜法衍生出的各种工艺都被广泛应用于水产养殖水净化领域^[3],也可利用湿地生态系统、鱼塘水生生态系统以达到净化效果。在实际生产运行中,往往采用多种不同原理的工艺技术相互组合,对污染物质的去除会更加有效。这其中,生物脱氮由于其成本低、绿色环保、无二次污染等优点被公认为是经济有效和具有发展前途的方法之一^[4]。硝化作用是目前大多数生物滤器的首要设计功能,可将毒性较强的氨氮和亚硝酸盐氮氧化,然而其产物硝酸盐在养殖水体中不断累积,会导致鱼类等养殖对象生长减缓等问题^[5]。采取养殖水缺氧或厌氧下的脱氧工艺以实现生物反硝化不失为一种有效的策略,然而实施此工艺增加了昂贵的设备采购投入、运行及维护成本。因此,如何经济高效地实现水产养殖水深度脱氮,既是痛点又是行业可持续发展的关键所在。

本文介绍了以下 4 种常用的生物脱氮技术原理及其在水产养殖水深度脱氮的应用,重点分析了同步硝化反硝化及好氧反硝化理论与实践,并对前沿技术进行了展望,以期对水产养殖行业废

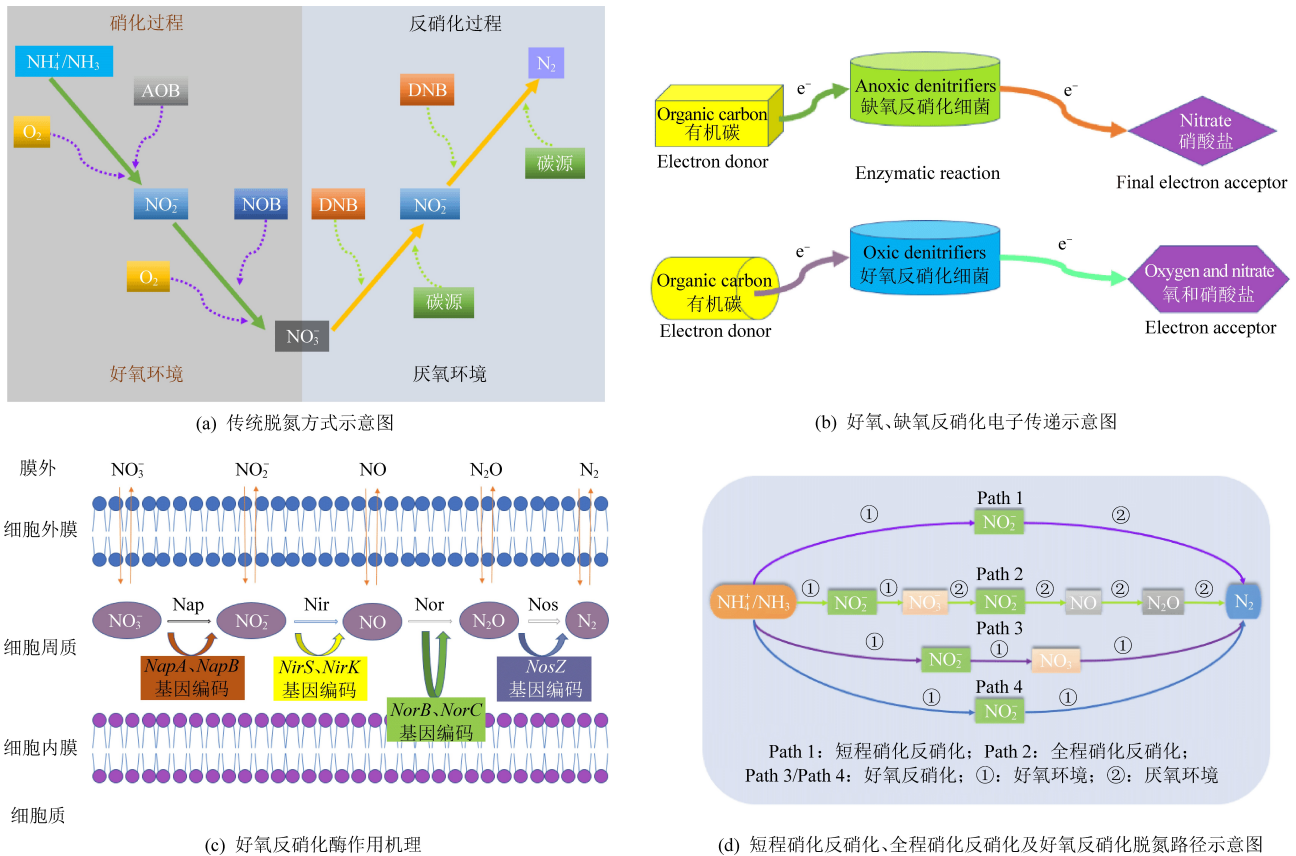


图 2 水产养殖水深度脱氮技术原理图

Fig. 2 Schematic diagram of deep denitrification technology for aquaculture wastewater

1.3 同步硝化反硝化(SND)

硝化与反硝化两个看似“泾渭分明”的反应过程能够同一时间同一环境发生,即同步硝化反硝化(Simultaneous Nitrification and Denitrification, SDN)过程的观点近些年已得到共识,这一过程可有效降低废水中的碳、氮含量^[11],维持 pH 相对稳定,因此能极大地简化工艺、提高生物脱氮的效率^[12]。SND 的机理仍在不断完善,缺氧微环境的存在及系统中以好氧反硝化菌为代表的功能菌群的存在,有力地解释了 SND 发生的合理性。周少奇等^[6]认为全程(NO_3^- 途径)脱氮和短程(NO_2^- 途径)脱氮是可以同时存在的,SND 由这两种途径共同完成脱氮。全程硝化反硝化脱氮是经历 $\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{N}_2$ ^[12] 完整脱氮过程。更快捷地,以 NO_2^- 为硝化目标产物及反硝化起始底物的过程为短程硝化反硝化脱氮。研究还发现,经过“ NO_2^- 途径”进行同时硝化反硝化生物脱氮,可以省去传统理论中 $\text{N}-\text{NO}_2^-$ 氧化成 $\text{N}-\text{NO}_3^-$ 以及 $\text{N}-\text{NO}_3^-$ 还原成 $\text{N}-\text{NO}_2^-$ 这两个中间步骤,节省约 25% 的 O_2 和 40% 以上的有机碳^[6]。综上所述,SND 可在一定程度上解决水产养殖废水中有机碳源不足

的问题,减少投碳量,还能节省曝气运行成本和碳源成本。图 2(d) 揭示了几种不同路径的反硝化脱氮过程。虽然在 SND 反应器开发、特殊菌种鉴定培养等方面都取得了颇丰的成果,但如何将其广泛落实到水产养殖行业并实现中试及以上规模的应用,未来仍是一个研究热点。

1.4 短程硝化反硝化

NO_2^- 途径脱氮工艺起步较晚,应用于水产养殖业及其他碳氮比较低的废水脱氮时尤为合适。脱氮工艺需要保证 NO_2^- 的足够积累^[13],比 NO_3^- 途径脱氮节省更多的能源与碳源^[14]。

乌兰等^[15]设计了一种硝化反硝化缸用于模拟海水养殖废水净化,为了亚硝酸盐有效积累,须维持反应器低溶解氧状态,最终在 C/N 低于 1.2 的低碳环境下成功实现短程脱氮。上述试验实际是通过“ NO_2^- 途径”实现的 SND 工艺,印证了周少奇等^[6]的观点,其实质仍是同步硝化反硝化;虽然系统 DO 仅有 0.5 mg/L,有机物去除率会由于异养细菌活性不高而打折扣,但鉴于海水养殖环境有机碳浓度本就不高的情况,牺牲部分溶解氧也不会造成出水 COD 过高,还可以节省曝气成本。

宋宏宾等^[16]也利用短程硝化反硝化理论建立起一套可编程逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PCL)控制的连续流-三级生物膜工艺,以应对水产养殖废水 C/N 较低的局面。实验发现,进水 pH 7.5~8.5, 温度 28~32 ℃, 溶解氧 0.5~1 mg/L, 游离氨 5~10 mg/L 的条件下, 不投加任何碳源即可实现低 C/N 养鱼废水的生物脱氮。此外, 该工艺对 COD 的平均去除率也接近 95%, 出水各项指标可以达到回用标准。该试验是水产养殖废水短程硝化反硝化脱氮的经典案例, 为后续研究乃至中试、实际工程应用提供了宝贵的参考价值。

然而 NO_2^- 作为短程脱氮工艺的重要媒介, 对养殖水产品的毒性非常大, 尤其在 RAS 中, 高浓度 NO_2^- 可能带来致命的风险, 因此, 须严格控制流入养殖池中的亚硝含量。

1.5 传统生物脱氮的优势及其局限性

传统生物脱氮技术经过几十年的研究应用与发展, 目前已经比较成熟, 脱氮稳定性好, 但也有其局限性。

一般认为反硝化菌为异养型微生物, 需要充足的碳源维持其活性。水产养殖废水通常 C/N 不高, 碳源成为了限制反硝化效率的最重要因素。此外, 脱氮过程分成了硝化和反硝化两个系统, 需要的设备庞大, 占地面积大, 建造成本高, 前期投资需求大, 工艺流程较长, 条件控制也更复杂。目前也有对水产养殖废水从事传统生物脱氮的研究, 但从成本角度考虑, 好氧反硝化及 SND 更具实际应用价值和研究潜力。

2 SND 关键影响因素

前文分析指出, 由于多种特殊微生物的存在, 全程、短程及好氧反硝脱氮皆可能在 SND 过程中出现, 即 SND 深度脱氮集结了多种脱氮原理及途径, 是实现养殖水脱氮最具研究价值的方式之一。因此, 有必要对 SND 的关键影响因素和参与其中的菌属加以探究、归纳和总结, 以更好地为实际应用提供理论依据和指导。温度、pH、DO 和 C/N 是最直观的控制因素, 它们的最佳控制范围和参数组合往往需要在实验和工程实践中探索确定。

2.1 温度、pH 及游离氨浓度

温度影响细菌酶的活性, 因此能控制 SND 脱氮速率和效率^[17]。通常认为硝化细菌可适应 10~35 ℃ 的温度范围^[18]。而硝化、反硝化反应的适宜

温度为 20~30 ℃, 此外, pH 的波动会影响细菌对营养物质的吸收程度、改变酶的活性^[19]。氨氧化细菌(Ammonia-Oxidizing Bacteria, AOB)和亚硝酸盐氧化细菌(Nitrite-Oxidizing Bacteria, NOB)一起推动生物硝化过程, 如图 2(a), 二者统称为硝化细菌^[20]。AOB 与 NOB 的适宜 pH 分别是 7.0~8.5 与 6.0~7.5, 反硝化细菌(Denitrifying Bacteria, DNB)的最适宜 pH 在 7.0~8.5^[17]。刘俞辰等^[21]在 SBBR 反应器中研究 SND, 发现 pH 为 8 时脱氮效果最佳。选取不同反应装置、水质参数的相互组合以及不同的评判指标(脱碳率、脱氮率、SND 效率)等, 最佳 pH 往往并不固定。pH 还会影响水中游离氨(Free Ammonia, FA)的水平, FA 即气态 NH_3 , 会抑制硝化细菌的活性, 其中 NOB 更敏感, 当其余条件一定时, 提高 pH 会引起 FA 浓度升高, 进而抑制 NOB 的活性, 阻碍硝酸盐的生成, 利于实现短程硝化^[20]。

2.2 DO 浓度

硝化及有机物的分解过程需要好氧微生物的参与, 要求系统中 DO 浓度不能太低, 否则会导致硝化细菌活性不高、硝化过程缓慢, 氨氮无法有效转化为亚硝酸盐和硝酸盐。反之, 任由 DO 浓度升高又会使氧的穿透能力增强, 不利于在反应器死角、活性污泥或生物膜内部形成缺氧微环境, DO 浓度梯度不明显; 其次, 异养型细菌因为溶解氧充足, 增殖的过程会加速有机物的消耗, 以致反硝化细菌可能会缺乏碳源, 活动受限^[22]。与此同时, 硝化细菌同异养型细菌竞争 O_2 时总处于劣势, 不利于硝化反应。薛武丹等^[23]计算了不同 DO 浓度下变速氧化沟 SND 比率的理论值, 结果表明, 当 DO 浓度分别为 1.2、1.0、0.8 mg/L 时, 理论值均在 45%~51% 之间, 与实测值偏差在 10% 以内。事实上, 采取不同的工艺类型、处理不同成分的水质都会影响到最佳 DO 浓度范围的选取, 需要在实验和工程实践中反复验证。

2.3 C/N

进水 C/N 是成功启动装置 SND 最关键的因素。当有机碳充足、C/N 很高时, 异养细菌会大量繁殖, 自养型硝化细菌本就生长缓慢, 在与其他异养细菌争夺有限资源(最关键的 O_2) 时往往不占优势, 以致硝化作用缓慢; 如不考虑自养反硝化的情况, 若 C/N 过低, 电子供体不足, 会导致亚硝酸盐和硝酸盐的积累, 破坏硝化、反硝化作用的动态平衡^[22]。郑丽纯^[24]、陈翠忠^[25]、孙浩翔^[26]、

WANG^[27]、CHAI^[28]、ZHU^[29]、JIA^[30]、曹勇锋^[31]等在自己的装置中,研究了 C/N 对同步脱氮的实验效果,并分析了主要菌群,具体数据详见表 2。JIA^[30]的实验证实了 NO₃⁻ 途径和 NO₂⁻ 途径脱氮是可以同时存在的。不仅如此,DO 在生物膜内的扩散效果也受 C/N 的影响^[31],因此研究 C/N 至关重要。

总结以上案例,C/N 比值往往越高,SND 效率也随之提高;缺氧反硝化和好氧反硝化可以同时发生,也就是说,SND 可能伴随发生好氧反硝化反应,这也与前文的推测相符;即使在一些 C/N 不高的反应系统中,仍可以通过合理的参数控制,实现很高的 SND 率,且 TN、氨氮等去除效果不差。尤其在水产养殖废水缺碳的不利局面下,如何实现低投碳量的 SND 脱氮,值得研究者们积极探索。

不同反应器、进水浓度、控制条件,以及不同评价指标(脱氮率或除碳率),最佳 C/N 也必然不同,需要在实践中归纳总结,综合考虑投加成本和预期目标而定。除了考虑 C/N,还要注意废水中

快速降解有机物(RCOD)的含量,即碳源的种类,相同 C/N 情况下,提高 RCOD 的含量可以获得更好的脱氮效果^[17]。

2.4 氧化还原电位(ORP)及微生物絮体结构

理论上,ORP 的确是同步硝化反硝化的关键因子,通常也只是在调控 pH、DO 等他指标时,观测到 ORP 值的变化。因此在设计实验方案时,一般优先考虑其他因素。

邱静^[22]、周少奇等^[6]认为微生物絮体结构也会影响 SND 进程,对于特定的反应器应有最佳的絮体粒径、密实度和浓度范围,便于创造微生物絮体内部合适的好氧区与缺氧区,保证 DO 和有机碳在絮体内分布得当,有助于 SND 的发生。此外,基质传递到絮体内部的传质性能也会因絮体粒径不同有所差异,然而,在工程应用中不便于通过测定、控制絮体粒径等来控制 SND 的脱氮效果^[17]。因此,在工程实践中,往往致力于寻求其他调控方法。

表 2 不同 C/N 下同步硝化反硝化总氮去除率

Table 2 Total nitrogen removal rate based on simultaneous nitrification and denitrification with different C/N

反应器	填料/膜 组件	C/N	运行/停留 时间(h)	温度/ ℃	初始 DO/ (mg · L ⁻¹)	pH	主要功能菌	进水 TN/ (mg · L ⁻¹)	TN 去 除率/%	文献
生物膜 反应器	纺锤体型 半悬浮生 物填料	20.0	8.0	27.0~28.0	3.0	—	变形菌门、拟杆菌门、 暂定种 <i>Sacchari-bacteria</i> 和浮霉菌门	—	100.00	[24]
SBR	—	0、5.0、 10.0、15.0	—	25.0±2.0	1.0~2.5	7.50±0.20	动胶菌属(<i>Zoogloea</i>) (优势菌属)、 <i>Dechloro-monas</i> 、 硝化螺旋菌属(<i>Nitrospi-ra</i>)等	—	—	[25]
MABR	疏水性聚 偏氟乙烯 中空纤维膜	5.0	48.0	28.0±1.0	—	7.00~8.00	<i>Cyanobacteria_norank</i> 、 <i>Acidobacteria_norank</i> 、 <i>Lactobacillus</i> 、 <i>Bacteroides</i>	23.00±1.00	55.21	[26]
MBSBR	聚氨酯 泡沫	12.0	—	30.0±2.0	2.5	8.00	假单胞菌、 <i>Thauera</i> 、 <i>Acinetobacter</i> 、 <i>Zoogloea</i>	27.40~30.90	97.50	[27]
SBR	—	5.0	10.5	25.0~28.0	0.5~1.0 3.0~4.0	7.55±0.20	—	50.00	66.70	[29]
MBBR	—	7.5	7.0	—	3.0±0.2	7.20±0.10	<i>Stenotrophomonas maltophilia</i> <i>DQ01</i> 、 <i>Flavobacteria</i> 、 <i>Thauera</i>	266.70	94.43	[30]
SBBR	立方体 聚氨酯 PU	6.0、8.0、 10.0、12.0、 14.0	12.0	—	3.0	7.80	—	22.50~29.15 (C/N=12.0)	98.00	[31]

2.5 填料及反应器形式

目前关于 SND 脱氮工艺的研究,多以活性污泥法、生物膜法的各种衍生工艺开展,如 SBR 反应器^[25,29]、SBBR 反应器^[28,32]、生物滤池^[33]等。MBBR,即移动床生物膜反应器可在无需增加额外占地、不改变原有工艺路线的情况下,实现深度脱

氮^[34],尤其适用于污水厂提标、提量改造^[35],因此成为不少学者们研究的热点。许多研究都证实了 MBBR-SND 工艺能够很好地去废水中的氮素,如 JIA 等^[30]、栾志翔等^[36]的研究应用。邹俊良等^[37]也曾采用 MBBR 净化模拟黄颡鱼养殖塘废水,效果良好,且反应器运行稳定后,在运行初期

就发生了 SND。同步硝化反硝化工艺的研究多集中于生活、市政及工业废水领域,如何在水产养殖水处理流程中实现 SND 是一个值得研究的热点,尤其是 MBBR-SND 反应器的开发与应用。

除此之外,填料种类也关系着 SND 的表现效果。王翥田等^[38]建立了一套改良 $A^2/O+HYBAS$ 中试装置以改善出水水质,结果显示,该工艺运行稳定,实现了 SND 并提高了系统脱氮能力。郑丽纯^[39]研制了一种呈纺锤体型、ABS 材质的半悬浮生物填料,并结合该填料特点设计了一种反应器,用于处理人工模拟生活废水,并成功实现 SND。邵留等^[40]在生物反应器中投放玉米芯填料,较好地实现了高 DO 环境下罗非鱼循环养殖废水 SND 作用, TN 去除率达 85% 以上。

3 SND 及好氧反硝化菌群研究进展

从功能菌的角度分析, SND 细菌通常兼具异养硝化和好氧反硝化功能^[18]。好氧反硝化菌的发现,是生物脱氮原理和技术得以进步的标志性事件^[41]。为了厘清好氧、厌氧反硝化菌的区别,必须明确好氧反硝化菌的代谢机制。异养硝化-好氧反硝化菌(HN-AD)作为好氧反硝化细菌的一个重要分支,它们可吸收、转化氨氮为细胞内氮(Intracellular N)、 $NO_2^- - N$ 、 $NO_3^- - N$ 以及气态氮(NO 、 N_2O 、 N_2),这涉及到复杂的酶反应系统^[42]。关于好氧反硝化菌的酶代谢机制,朱婉瑜等^[43]在整理了杨婷^[44]、JI^[45]、BELL^[46]、ROBERTSON^[47]、ORELLANA^[48]等研究者的成果后进行了分析。研究认为,好氧反硝化菌的代谢主要涉及到 4 种酶类,分别为 Nap、Nir、Nos 及 Nor,详见表 1,这 4 种酶的作用底物分别为 $NO_3^- - N$ 、 $NO_2^- - N$ 、 N_2O 、 NO 。厌氧反硝化过程的硝酸盐还原酶一般为膜质硝酸盐还原酶(Membrane-bound nitrate reductase, Nar),停留在细胞膜上,并非周质,属于一种膜结合酶,这与好氧反硝化菌的 Nap 不同。有氧环境中, Nar 催化的反硝化反应会被抑制, Nap 却不受 O_2 影响; Nir 的表达也不受环境中氧气的影响,可将 $NO_2^- - N$ 还原为 NO 和 N_2O ; Nor 在细胞膜外催化 NO , 还原成 N_2O ; N_2O 是反硝化不完全的产物,会被 Nos 还原为 N_2 ^[43]。以上就是这 4 种酶类的作用原理,可见,好氧反硝化菌在促进反硝化时不受 O_2 影响,因此具有很高的研究价值。

目前报道的好氧反硝化菌有很多,如常见的不动杆菌属、气单胞菌属以及副球菌属等^[49]。不

仅如此,有许多特殊功能菌也相继被筛选分离,如耐盐型^[50]、耐低 C/N 型^[51]等。马青山等^[52]在前人的研究基础上归纳、总结了好氧反硝化细菌的筛选、评价方法。

现今,也有许多研究者把关注点聚焦在水产养殖废水-好氧反硝化脱氮实际应用方面,相关实践成果^[53-61]见表 3,这些从不同养殖水环境中分离得到的好氧反硝化细菌不仅丰富了菌种库及好氧反硝化理论,未来在水产养殖领域更将有广阔的应用前景。研究还发现,混合培养的好氧反硝化细菌相比单一和纯细菌菌株在分离时间上更具优势,且由于混合细菌的共存和相互作用等对去除污染往往更有效^[62]。遗憾的是,目前研究者对这一类混合细菌去除污染物的性能尚未完全了解,未来,探讨其在水产养殖废水深度脱氮中的表现或可作为一种新的研究思路。

4 水产养殖废水深度脱氮实例分析

好氧反硝化菌作为 SND 脱氮工艺的重要功能菌,促进氨化、硝化和反硝化过程同时在有氧环境中进行。然而 SND 是一个受多种因素影响的复杂过程,需考虑低 C/N、低氨氮浓度的特点,开发出适合于水产养殖模式、能稳定高效运行的装置^[5],并合理控制影响参数,才能达到深度脱氮的目的。唐成婷等^[63]利用 PBS 颗粒构建的 PBS-SND 系统(图 3(a))处理人工模拟养殖废水,该系统能在低 C/N 下高效脱氮,总氮去除率高达 99% 以上。胡玉等^[64]采用 PCL 颗粒构建了 PCL-SND 系统(图 3(b)),该系统同样可以处理低 C/N 养殖废水,总氮去除率可达 $(56.85 \pm 2.21)\%$ 。向天勇等^[65]研究并自制出一种多孔陶粒(再生性能好),结合该陶粒组建了一套 SND 反应器(图 3(c))用于模拟淡水养殖废水的脱氮研究,最终反应器成功启动。成小婷等^[66]将养殖固体废弃物的发酵产物投放到连续低曝气的 SBR 装置中(图 3(d))处理人工模拟养殖废水,对 TN 的去除率约为 87%,使用该 SBR 反应器不仅能稳定地实现 SND 脱氮,且能资源化利用养殖固体废弃物,有效避免了污染的发生,并为 RAS 系统零排放提供支持。

相较于淡水,适合海水养殖环境并参与脱氮的本土 HN-AD 菌的种类和特性大多未知, HUANG 等^[67]也认为在复杂的富营养化环境中,不同脱氮途径的复合 HN-AD 菌可能比单一菌株的脱氮效果更好,然而对海水养殖中 HN-AD 菌

群的研究较少,为此,团队从海水养殖虾池中分离得到 25 株性能优良的嗜盐 HN-AD 菌株,研究它们之间的共存和相互作用,发现有三种新型菌群

((*Marinomonas communis* & *Halomonas titanicae*, MCH)、(*Marinomonas aquimarina* & *Halomonas titanicae*, MAH)、(*Marinomonas aquimarina* & *Cobetia*

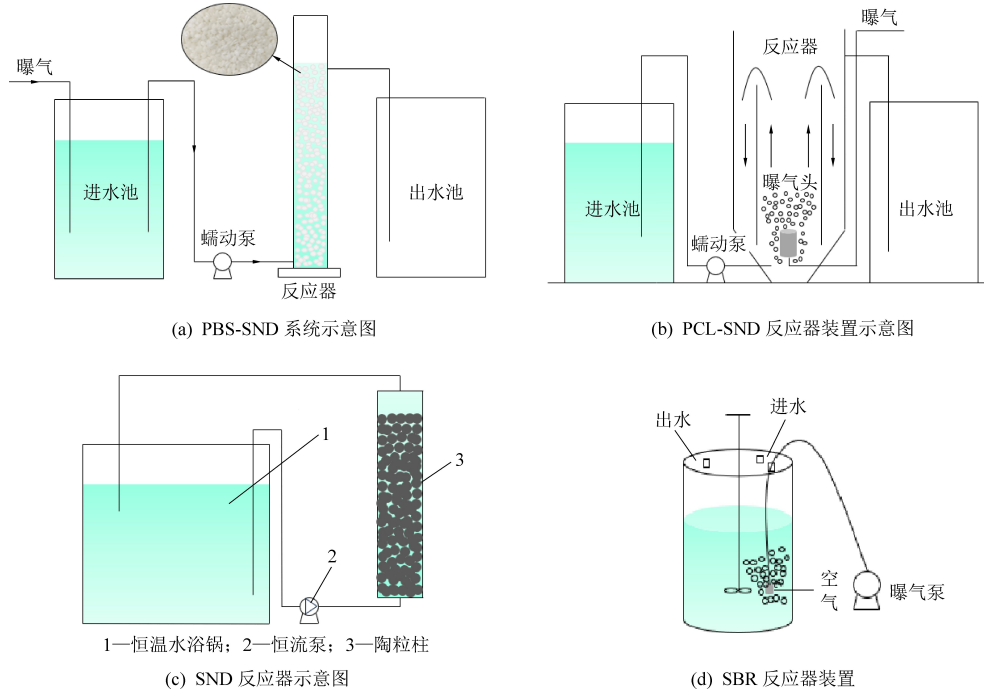


图 3 SND 反应器示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SND reactor

表 3 好氧反硝化细菌性能表

Table 3 The performance table of aerobic denitrifying bacteria

种属	菌名	来源	最佳 温度/℃	最佳 pH	碳源	氮源	脱氮 率/%	应用 前景	文献
<i>Vibrio azureus</i>	—	实验室	25.0±1.0	7.8~8.3	乙酸钠	NO ₃ ⁻ -N TN	>80.00 80.50	海水好氧反硝 化反应器	[53]
假单胞菌属施 氏假单胞菌	<i>Pseudomonas stutzeri</i> DZ11	中山市民众镇 水产养殖场 底泥及污水	35.0	7.0	柠檬酸钠	氨氮 NO ₃ ⁻ -N NO ₂ ⁻ -N	84.39 99.00 97.65	养殖废水的 脱氮工艺中	[54]
假单胞菌属	<i>Pseudomonas</i> sp. BB1	广州市西朗	25.0~30.0 (BB1)	7.0	柠檬酸钠	氨氮(BB1)	>93.00	水产养殖水 质调控以及水 产养殖中	[55]
	<i>Pseudomonas</i> sp. BB1-a	珠江水产研究 所养殖池塘	20.0 (BB1-a)			氨氮(BB1-a)	86.73		
假单胞菌	<i>Pseudomonas mendocina</i> S16	珠三角地区 淡水养殖池	20.0~35.0	—	柠檬酸钠	无机氮(S16)	66.59~ 97.97	水产养殖尾 水处理	[56]
阴沟肠杆菌	<i>Enterobacter cloacae</i> DS-5					无机氮(DS-5)	72.27~ 96.44		
盐单胞菌	<i>Halomonas</i> sp. GJWA3	广东江门对 虾海水养 殖水体	25.0~35.0	7.0~8.5	葡萄糖	NH ₄ ⁺ -N NO ₂ ⁻ -N NO ₃ ⁻ -N	96.44 99.42 78.27	养殖水处理领 域进行实际应用	[57]

续表

种属	菌名	来源	最佳 温度/℃	最佳 pH	碳源	氮源	脱氮 率/%	应用 前景	文献
假单胞菌	L3	罗非鱼养殖系 统生物絮团	25.0~35.0	6.0~8.0	丁二酸钠	NH ₄ ⁺ -N	>93.90	运用到未来 实际生产工作	[58]
						TN	>88.30		
						NO ₂ ⁻ -N	95.40		
						NO ₃ ⁻ -N	97.70		
<i>Bacillus coagulans</i> (凝结芽孢杆菌)	YX-6	高密度养虾池	30.00	7.0	琥珀酸钠	NO ₂ ⁻ -N	100	海洋和淡水养 殖中的亚硝酸 盐氮降解、 集约化养殖	[59]
<i>Pseudomonas</i> sp. (假单胞菌)	DM02	武汉某循环水 产养殖系统 的生物絮团	—	7.0	葡萄糖	TAN	≈100	连续处理实 际养殖废水	[60]
						NO ₂ ⁻ -N	≈100		
						NO ₃ ⁻ -N	≈100		
<i>Vibrio parahaemolyticus</i>	HA2	天津某集约化 海水养殖公司 循环水养殖系 统聚乙烯纤维	26.03±1.16	—	柠檬酸钠	NH ₄ ⁺ -N	99.06	水产养殖中	[61]
						NO ₃ ⁻ -N	97.35		
						NO ₂ ⁻ -N	34.91		

marina, MAC))。由于种间共存,对氨氮的去除效率和稳定性明显优于单一菌群,且 *Marinomonas communis* & *Halomonas titanicae* 菌群对亚硝酸盐的去除率最高,更为重要的是,这些微生物菌群可以通过同化和异化作用将更多的无机氮转化为细菌生物量,而不是单纯通过反硝化作用去除氮。接着, HUANG^[68] 的团队继续对上述 MCH 和 MAH 这两个菌群及它们的单株菌 (MC、MA 和 H) 进行研究,在实际海水养殖废水中, MCH 和 MAH 的 NH₄⁺-N 去除率 (65%~68%) 均高于单一菌株,细胞数量也较单一菌株稳定,且菌群和单菌对抗生素具有很强的抗性 (耐药性)。上述研究目前只在实验室利用培养基实现,未来,这些 HN-AD 菌群在降低海水养殖或其他含盐环境废水中氮污染方面具有极大的应用潜力。

5 脱氮前沿技术

5.1 微生物固定化

作为一种细菌富集手段,微生物固定化技术有效克服了实际应用过程中细菌存活率低、高毒性环境中耐受性低等问题,它可以显著提高菌株密度,毒性耐受性和简化细菌液的去除,利用自固定或外泌体固定制备出具有特定活动范围的微生物菌株^[69]。

南海水产研究所创新团队根据 DO 分配不均理论设计了一种特殊的反硝化胶囊,可置于好氧

反应器中实现养殖尾水 SND 脱氮,总无机氮去除率达到 97%,SND 率接近 99%;这种反硝化胶囊是基于包埋技术的新型固定化方法来制备,经驯化后可直接置入养殖池塘、RAS 系统生物滤池或生物絮团中,与好氧硝化细菌协同作用实现 SND,完成生物脱氮全过程^[70]。陈爽等^[71]以粉煤灰、活性底泥、铁粉和碳酸钙粉末为原料制作了一种改性粉煤灰陶粒,将有效微生物群落 (Effective Microorganisms, EM) 固定在此陶粒中形成生物陶粒,其对于模拟水产养殖废水总氮去除最高可至 93.80%,比未固定化 EM 的纯粉煤灰陶粒脱氮效果更佳,且微生物对废水中氮的去除起了主要贡献作用。有研究认为,包埋固定复合菌种比单一菌种能更有效处理废水中多种类污染物,且土著微生物比外来高效微生物更具有适应性,去除能力也更佳^[72]。

5.2 微藻处理

微藻植物修复具有去除养分效率高、成本低的特点,具有很大的潜力,最重要的是,微藻生物量可以直接利用或转化为水产养殖饲料,实现营养物质的闭环循环^[73]。通过微藻代谢水产养殖废水中的有机碳,而亚硝酸盐和硝酸盐可被微藻细胞脆化成铵盐,最后被微藻同化,在实际应用中,可供选择的藻类较多,诸如小球藻、斜生栅藻等单细胞藻类,利用藻菌共生系统或藻类塘等多种净化方式改善水质^[74]。

刘庆辉等^[75]发现绿色巴夫藻对模拟养殖废水的去氮效果非常好,生长率也很高。吕俊平等^[76]发现低起始的生物质接种浓度有利于绿球藻的生长,对养殖废水中污染物的降解效果也更佳,初始接种浓度为 100 mg/L 时最为显著。

5.3 厌氧氨氧化

厌氧氨氧化技术 (Anammox) 起源于上世纪 90 年代,表现为厌氧氨氧化菌在厌氧/缺氧条件下将 NH_4^+-N 氧化为 N_2 ,并产生少量 NO_3^--N 的一种生物反应过程,这其中涉及到复杂的反应步骤和酶系统^[77]。自问世以来,研究者们开展了许多关于厌氧氨氧化脱氮机理、影响因素和工艺/组合工艺等系列研究。其研究方向大都集中在高氨氮废水处理领域^[78]。作为一种绿色、低能耗、高效的工艺,在高氨氮、低 C/N 污水处理方面有着广阔的发展和应用前景,美中不足的是,目前反应器多以模拟废水作为进水,与实际废水水质仍不能等同,因此,其处理效能还有待进一步验证^[79]。另外,Anammox 工艺难以处理中低氨氮浓度废水,因此难以独立的大规模应用^[80]。Anammox 工艺是降低水产养殖废水中氨氮浓度的一种很好的替代方法,NABILAH II 等^[81]从氨和硝酸盐调节的操作条件和机制的角度解释了厌氧氨氧化处理水产养殖废水的工艺。Anammox 工艺的优势在于无需额外投加有机碳源,若想在水产养殖废水处理领域广泛应用,需解决中低氨氮浓度稳定亚硝化、及厌氧/缺氧环境难以控制的瓶颈,为此,相关研究还有待继续深入。

6 结论与展望

针对水产养殖废水深度脱氮研究,从几种新型生物脱氮技术原理及应用情况、影响因素、相关菌种研究进展以及前沿技术等多方面展开论述。

近年来,环保政策持续收紧,各省市相继出台、规范化水产养殖行业污染物的排放标准,未来,水产养殖废水脱氮治理将会愈发重要。传统的硝化反硝化技术虽然应用较为成熟,但因其诸多局限性,在未来应寻求更经济高效的脱氮方式。全程/短程硝化反硝化及好氧反硝化可以两两或同时在废水处理系统中发生,在许多案例中都得到验证,同步硝化反硝化理论很好地揭示了这些现象的内在原理。然而,SND 在生活、工业污废水处理领域的研究应用较多,却很少在水产养殖废水处理方面报道,中试及以上规模的更少,且进水

多为模拟水产养殖废水,这与实际废水在水质、水温等方面仍有较大差别。因此,为了进一步实现水产养殖废水深度脱氮的工程化应用,还需要从以下几方面开展研究:

(1)未来,可以从实际养殖废水的引入、规模放大等方面加大研究力度。

(2)在 SND 理论的研究基础上,从工艺开发方面展开探索。例如,当前针对城市、工业污水脱氮的研究与应用,有许多是通过 MBBR 工艺来实现的,但水产养殖业的 MBBR-SND 脱氮案例却十分有限,未来可以朝这一方向做更多研究。

(3)继续从水产养殖水体中分离、筛选、鉴定更多类型的 HN-AD 菌,目前已报道了从多种类型污水分离提取出的好氧反硝化菌,但这些细菌是否适用于水产养殖废水还有待深入研究。了解不同细菌的脱氮性能有助于在将来的实际应用中选取并接种合适的菌种。

(4)现阶段养殖废水 SND 案例大多为控制间歇进水,或通过间歇曝气等方式维持低溶解氧、甚至缺氧状态,这与实际养殖模式较为不符,而固相反硝化脱氮存在出水有机碳高等弊端,因此,需以连续进水、连续曝气的工况为出发点,做进一步研究。

(5)碳源短缺一直是制约反硝化进程的难点,可以开展低碳投加策略下的 SND 相关研究,既保证一定的反硝化效率,同时维持氨氮、亚硝出水的达标排放或循环利用,还能节省碳源投加成本。

参考文献 (References):

- [1] 第二次全国污染源普查公报[J]. 环境保护, 2020, 48(18): 8-10.
The second national pollution source Census Bulletin[J]. Environmental Protection, 2020, 48(18): 8-10.
- [2] 朱金浩, 张戈, 杨可, 等. 养殖废水中氮元素处理技术的研究进展[J]. 应用化工, 2022, 51(5): 1480-1484.
ZHU Jinhao, ZHANG Ge, YANG Ke, et al. Treatment technologies for elemental nitrogen in farm wastewater a review[J]. Applied Chemical Industry, 2022, 51(5): 1480-1484.
- [3] 肖茂华, 李亚杰, 汪小昆, 等. 水产养殖尾水处理技术与装备的研究进展[J]. 南京农业大学学报, 2023, 46(1): 1-13.
XIAO Maohua, LI Yajie, WANG Xiaochan, et al. Research progress of aquaculture tailwater treatment technology and equipment [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(1): 1-13.
- [4] 许育新. 水产养殖废水生物处理技术研究进展[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(8): 1306-1310.
XU Yuxin. Research progress on biological treatment technology

- of aquaculture wastewater[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2019, 60(8): 1306-1310.
- [5] 黄志涛, 江玉立, 宋协法. 好氧反硝化技术处理水产养殖废水研究进展[J]. 渔业现代化, 2018, 45(5): 7-13.
HUANG Zhitao, JIANG Yuli, SONG Xiefa. Research progress of aquaculture wastewater treatment with aerobic denitrification technology[J]. Fishery Modernization, 2018, 45(5): 7-13.
- [6] 周少奇, 周吉林, 范家明. 同时硝化反硝化生物脱氮技术研究进展[J]. 环境技术, 2002(2): 38-44.
ZHOU Shaoqi, ZHOU Jilin, FAN Jiaming. The study and progress of biological nitrogen removal by Simultaneous Nitrification and Denitrification (SND) technology[J]. Environmental Technology, 2002(2): 38-44.
- [7] 朱历, 纪荣平, 赵思. 硝化-反硝化曝气生物滤池改进工艺处理水产养殖废水[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2017, 20(1): 74-78.
ZHU Li, JI Rongping, ZHAO Si. Improvement technology of nitrification and denitrification biological aerated filter treatment of aquaculture wastewater[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2017, 20(1): 74-78.
- [8] ROBERTSON L A, KUENE J G. Aerobic denitrification: A controversy review[J]. Archives of Microbiology, 1984, 139(4): 351-354.
- [9] 牛晓倩, 周胜虎, 邓禹. 脱氮微生物及脱氮工艺研究进展[J]. 生物工程学报, 2021, 37(10): 3505-3519.
NIU Xiaolian, ZHOU Shenghu, DENG Yu. Advances in denitrification microorganisms and processes[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2021, 37(10): 3505-3519.
- [10] RAJTA A, BHATIA R, SETIA H, et al. Role of heterotrophic aerobic denitrifying bacteria in nitrate removal from wastewater[J]. Journal of Applied Microbiology, 2020, 128(5): 1261-1278.
- [11] 曹文娟, 徐祖信, 王晟. 生物膜中同步硝化反硝化的研究进展[J]. 水处理技术, 2012, 38(1): 1-5.
CAO Wenjuan, XU Zuxin, WANG Sheng. Research progress of simultaneous nitrification and denitrification in biofilm[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(1): 1-5.
- [12] 汪鲁, 刘军, 李永富, 等. 基于固态碳源的同步硝化反硝化反应器对海水养殖废水中氮的去除性能[J]. 环境工程学报, 2022, 16(6): 2001-2009.
WANG Lu, LIU Jun, LI Yongfu, et al. Performance of simultaneous nitrification and denitrification reactor based on solid-phase carbon source on nitrogen removal from mariculture wastewater[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(6): 2001-2009.
- [13] 张馨文, 王荣震, 冯成业, 等. 生活污水短程硝化脱氮工艺的快速启动及稳定性研究[J]. 环境工程, 2022, 40(10): 9-14.
ZHANG Xinwen, WANG Rongzhen, FENG Chengye, et al. Rapid start-up and stability of partial nitrification for domestic sewage[J]. Environmental Engineering, 2022, 40(10): 9-14.
- [14] Wang S, Sun X. Progress of biological nitrogen removal via Shortcut Nitrification-Denitrification[C]//Global Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering, 2014.
- [15] 乌兰, 王俊, 吴晓彤, 等. 海水养殖废水短程硝化反硝化基础研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 1-6.
WU Lan, WANG Jun, WU Xiaotong, et al. Basic research on short-cut nitrification-denitrification of marine aquaculture wastewater[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2017, 38(5): 1-6.
- [16] 宋宏宾, 蒋进元, 周岳溪, 等. 低 C/N 比水产养殖废水生物脱氮实验研究[J]. 环境工程学报, 2010, 4(5): 998-1002.
SONG Hongbin, JIANG Jinyuan, ZHOU Yuexi, et al. Experimental study on biological nitrogen removal process of low C/N aquaculture[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2010, 4(5): 998-1002.
- [17] 王海, 阮辰旻. 同步硝化反硝化脱氮的关键因素探讨[J]. 净水技术, 2015, 34(S1): 77-80+113.
WANG Hai, RUAN Chenmin. Key factors on nitrogen removal via simultaneous nitrification and denitrification[J]. Water Purification Technology, 2015, 34(S1): 77-80+113.
- [18] 向钰. 不同溶解氧同步硝化反硝化脱氮效能及途径[D]. 重庆: 重庆大学, 2020: 000356.
XIANG Yu. Nitrogen removal capacity and pathways of the simultaneous nitrification and denitrification process under different oxygen conditions[D]. Chongqing: Chongqing University, 2020: 000356.
- [19] 马放, 李平, 张晓琦, 等. SBR 反应器同步硝化反硝化影响因素及其特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(8): 55-60.
MA Fang, LI Ping, ZHANG Xiaoqi, et al. The influencing factors and the characteristics of simultaneous nitrification-denitrification in SBR[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(8): 55-60.
- [20] 杨宏, 姚仁达. pH 和硝化细菌浓度对氨氮氧化速率的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 2660-2665.
YANG Hong, YAO Renda. Effects of pH level and nitrifying bacteria concentration on ammonia oxidation rate[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(5): 2660-2665.
- [21] 刘俞辰, 王建辉, 闫娇, 等. 同步硝化反硝化脱氮的影响因素分析[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2020, 21(4): 52-54+64.
LIU Yuchen, WANG Jianhui, YAN Jiao, et al. The analysis of influencing factors of simultaneous nitrification and denitrification[J]. Journal of Changchun Institute of Technology(Natural Sciences Edition), 2020, 21(4): 52-54+64.
- [22] 邱静. SBBR 同步硝化反硝化脱氮影响因素研究[D]. 陕西: 长安大学, 2010: 1730065.
QIU Jing. Simultaneous nitrification-denitrification influence factor in SBBR[D]. Shanxi: Chang'an University, 2010: 1730065.
- [23] 薛武丹, 彭党聪, 王攀, 等. 溶解氧对氧化沟同步硝化反

- 硝化脱氮比率的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3305-3310.
- XUE Wudan, PENG Dangcong, WANG Pan, et al. Effect of dissolved oxygen on nitrogen removal efficiency of simultaneous nitrification and denitrification in oxidation ditch[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(7): 3305-3310.
- [24] 郑丽纯, 汤兵, 郑义, 等. 不同 C/N 对半悬浮生物填料的同步硝化反硝化过程的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(11): 4273-4282.
- ZHENG Lichun, TANG Bing, ZHENG Yi, et al. Effect of different C/N ratios on the process of simultaneous nitrification and denitrification in a biofilm reactor packed with semi-suspended bio-carriers[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(11): 4273-4282.
- [25] 陈翠忠, 李俊峰, 刘生宝, 等. 间歇式活性污泥法(SBR)系统碳氮比对同步硝化反硝化微生物群落分布及脱氮效能的影响[J]. 环境化学, 2021, 40(11): 3598-3607.
- CHEN Cuizhong, LI Junfeng, LIU Shengbao, et al. Effect of C/N ratio on the microbial community of simultaneous nitrification and denitrification (SND) and the biological nitrogen removal in sequencing batch reactor (SBR)[J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(11): 3598-3607.
- [26] 孙浩翔, 刘德钊, 蓝丽华, 等. 探究 C : N 对 MABR 处理水产养殖废水水质影响[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(2): 163-169.
- SUN Haoxiang, LIU Dezhao, LAN Lihua, et al. Investigation of the effect of C : N on the water quality of aquaculture wastewater treated by MABR [J]. Environmental Science & Technology, 2019, 42(2): 163-169.
- [27] WANG Jingyin, RONG Hongwei, CAO Yongfeng, et al. Factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND) in a moving bed sequencing batch reactor (MBSBR) system as revealed by microbial community structures[J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2020, 43(10): 1833-1846.
- [28] CHAI Hongxiang, XIANG Yu, CHEN Rong, et al. Enhanced simultaneous nitrification and denitrification in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater: Treatment performance and nitrogen removal pathway[J]. Bioresource Technology, 2019, 280: 51-58.
- [29] ZHU Guangcan, LU Yongze, XU Liran. Effects of the carbon/nitrogen (C/N) ratio on a system coupling simultaneous nitrification and denitrification (SND) and denitrifying phosphorus removal (DPR) [J]. Environmental Technology, 2020, 42(19): 3048-3054.
- [30] JIA Yating, ZHOU Miaomiao, CHEN Yuancai, et al. Insight into short-cut of simultaneous nitrification and denitrification process in moving bed biofilm reactor: Effects of carbon to nitrogen ratio [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 400: 125905.
- [31] 曹勇锋, 张朝升, 荣宏伟, 等. C/N 对生物膜同步硝化反硝化效果及膜内 DO 有效扩散系数的影响[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(11): 1229-1233.
- CAO Yongfeng, ZHANG Chaosheng, RONG Hongwei, et al. The effect of C/N on simultaneous nitrification and denitrification and effective diffusion coefficient of DO in biofilm[J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40(11): 1229-1233.
- [32] 张世羊, 张学辉, 何鑫, 等. 不同曝气策略对 SBBR 处理模拟水产养殖废水净化效率的影响[J]. 淡水渔业, 2021, 51(1): 103-112.
- ZHANG Shiyang, ZHANG Xuehui, HE Xin, et al. Effect of different aeration strategies on purification efficiency of simulated aquaculture wastewater by SBBR [J]. Freshwater Fisheries, 2021, 51(1): 103-112.
- [33] 黄佳琦, 赵晓祥, 许敬新, 等. 锰负载固相碳源在处理生活污水中脱氮性能研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(9): 101-108.
- HUANG Jiaqi, ZHAO Xiaoxiang, XU Jingxin, et al. Denitrification performance of manganese supported solid carbon source in domestic sewage treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(9): 101-108.
- [34] 韩文杰, 吴迪, 周家中, 等. 长三角地区 MBBR 泥膜复合污水厂低温季节微生物多样性分析[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5037-5049.
- HAN Wenjie, WU Di, ZHOU Jiazhong, et al. Microbial diversity analysis of WWTPs based on Hybrid-MBBR process in a low temperature season in the Yangtze River Delta[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 5037-5049.
- [35] 吴迪. MBBR 在国内的工程应用与发展前景[J]. 中国给水排水, 2018, 34(16): 22-31.
- WU Di. Application and development prospect of MBBR in China[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(16): 22-31.
- [36] 栾志翔, 吴迪, 韩文杰, 等. 北方某污水厂 MBBR 工艺升级改造后的高效脱氮除磷效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(2): 333-341.
- LUAN Zhixiang, WU Di, HAN Wenjie, et al. Effect of high efficiency nitrogen and phosphorus removal in a wastewater treatment plant in north China[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(2): 333-341.
- [37] 邹俊良, 杨京平, 吕亚敏. 移动床生物膜反应器净化模拟水产养殖废水的研究[J]. 环境科学学报, 2013, 33(12): 3219-3226.
- ZOU Junliang, YANG Jingping, LYU Yamin. Aquaculture wastewater treatment using a moving bed biofilm reactor (MBBR) [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(12): 3219-3226.
- [38] 王翥田, 车明凤, 韩萍. HYBAS 工艺的脱氮效能及同步硝化反硝化分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(15): 59-63.
- WANG Zhutian, CHE Mingfeng, HAN Ping. Nitrogen removal efficiency and simultaneous nitrification and denitrification of HYBAS Process[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(15): 59-63.
- [39] 郑丽纯. 半悬浮生物填料生物膜反应器的构建及同步硝化反硝化过程研究[D]. 广东: 广东工业大学,

- 2017; 867006.
- ZHENG Lichun. Study on the process of simultaneous nitrification and denitrification in a semi-suspended bio-carrier biofilm reactor [D]. Guangdong: Guangdong University of Technology, 2017; 867006.
- [40] 邵留, 兰燕月, 姬芬, 等. 玉米芯强化生物反应器对罗非鱼循环养殖废水脱氮效果研究[J]. 海洋渔业, 2018, 40(2): 217-226.
- SHAO Liu, LAN Yanyue, JI Fen, et al. On nitrogen removal from tilapia recirculating aquaculture wastewater using corn cob as carbon source and biofilm carrier [J]. Marine Fisheries, 2018, 40(2): 217-226.
- [41] 杨婷. *Bacillus subtilis* JD-014 好氧反硝化脱氮与调控机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021; 000079.
- YANG Ting. Study on the nitrogen removal characteristic and aerobic denitrification mechanism of *Bacillus subtilis* JD-014 [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021; 000079.
- [42] 赵天涛, 陈沛沛, 张晟, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌氮代谢机理的研究进展[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2022, 36(1): 194-203.
- ZHAO Tiantao, CHEN Peipei, ZHANG Sheng, et al. Research progress on nitrogen metabolism mechanism of heterotrophic nitrification aerobic denitrification bacteria[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2022, 36(1): 194-203.
- [43] 朱婉瑜, 侍浏洋, 赵维, 等. 好氧反硝化菌代谢机制及其与重金属相互作用的代谢特征[J]. 微生物学报, 2021, 61(7): 1786-1798.
- ZHU Wanyu, SHI Liuyang, ZHAO Wei, et al. Metabolic characteristics of aerobic denitrifiers and their interactions with heavy metals[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2021, 61(7): 1786-1798.
- [44] 杨婷, 杨娅, 刘玉香. 异养硝化-好氧反硝化的研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(9): 2213-2222.
- YANG Ting, YANG Ya, LIU Yuxiang. Research progress and challenges of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification [J]. Microbiology China, 2017, 44(9): 2213-2222.
- [45] JI Bin, YANG Kai, ZHU Lei, et al. Aerobic denitrification: A review of important advances of the last 30 years[J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2015, 20(4): 643-651.
- [46] BELL LC, RICHARDSON DJ, FERGUSON SJ. Periplasmic and membrane-bound respiratory nitrate reductases in *Thiosphaera pantotropha*. The periplasmic enzyme catalyzes the first step in aerobic denitrification. [J]. FEBS Letters, 1990, 265(1-2): 85-87.
- [47] ROBERTSON LA, KUENEN JG. Combined heterotrophic nitrification and aerobic denitrification in *Thiosphaera pantotropha* and other bacteria. [J]. Antonie van Leeuwenhoek, 1990, 57(3): 139-152.
- [48] Orellana LH, Rodriguez R LM, Higgins S, et al. Detecting nitrous oxide reductase (*NosZ*) genes in soil metagenomes: Method development and implications for the nitrogen cycle. [J]. Mbio, 2014, 5(3): e01193-14.
- [49] 冯亮, 袁春燕, 杨超, 等. 好氧反硝化生物脱氮技术的研究进展[J]. 微生物学通报, 2020, 47(10): 3342-3354.
- FENG Liang, YUAN Chunyan, YANG Chao, et al. Research progress in nitrogen removal by aerobic denitrification[J]. Microbiology China, 2020, 47(10): 3342-3354.
- [50] HE Xiaoling, SUN Qi, XU Tengyao, et al. Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a novel halotolerant bacterium *Pseudomonas mendocina* TJPU04. [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2019, 42(5): 853-866.
- [51] ZHOU Shilei, HUANG Tinglin, ZHANG Haihan, et al. Nitrogen removal characteristics of enhanced in situ indigenous aerobic denitrification bacteria for micro-polluted reservoir source water[J]. Bioresource Technology, 2016, 201: 195-207.
- [52] 马青山, 李艳. 水产养殖中好氧反硝化细菌的筛选及评价研究进展[J]. 动物营养学报, 2021, 33(1): 20-32.
- MA Qingshan, LI Yan. Advances in screening and evaluation of aerobic denitrifying bacteria in aquaculture [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(1): 20-32.
- [53] 江玉立, 黄志涛, 宋协法, 等. 基于好氧反硝化反应器的海水脱氮性能及动力学特征[J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 365-371.
- JIANG Yuli, HUANG Zhitao, SONG Xiefa, et al. Performance and kinetic property of nitrate removal from seawater by an aerobic denitrification bioreactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 365-371.
- [54] 赵洋, 孙慧明, 林浩澎, 等. 一株安全高效的好氧反硝化菌 *Pseudomonas stutzeri* DZ11 的生物安全性及脱氮性能研究[J]. 生物技术通报, 2022, 38(10): 226-234.
- ZHAO Yang, SUN Huiming, LIN Haopeng, et al. Biosafety and nitrogen removal performance of a safe and efficient aerobic denitrifying *Pseudomonas stutzeri* DZ11[J]. Biotechnology Bulletin, 2022, 38(10): 226-234.
- [55] 郭静文. 好氧反硝化细菌的筛选及菌藻联合对养殖废水的处理[D]. 广州: 广州大学, 2020; 000138.
- GUO Jingwen. Isolation of aerobic denitrification bacterium and treatment of aquaculture wastewater by combination of bacteria and algae [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2020; 000138.
- [56] HU Shu, SUN Huiming, HUANG Wen, et al. Nitrogen removal characteristics and potential application of the heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacteria *Pseudomonas mendocina* S16 and *Enterobacter cloacae* DS'5 isolated from aquaculture wastewater ponds [J]. Bioresource Technology, 2021, 345: 126541.
- [57] 苏兆鹏, 李赞, 潘鲁青, 等. 一株新型异养硝化-好氧反硝化菌 GJWA3 的脱氮性能及定量检测[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(10): 41-50.
- SU Zhaopeng, LI Yun, PAN Luqing, et al. Denitrification removal performance and quantitative of a novel heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium *halomonas* sp. GJWA3[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(10): 41-50.

- [58] 李哲, 吕剑, 张宇轩, 等. 具有异养硝化-好氧反硝化功能的水产养殖生物絮团菌的分离鉴定及其性能研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(2): 127-133.
LI Zhe, LYU Jian, ZHANG Yuxuan, et al. Separation, identification and performance of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacteria from bioflocs in aquacultural system [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(2): 127-133.
- [59] SONG Z F, AN J, FU G H, et al. Isolation and characterization of an aerobic denitrifying *Bacillus* sp. YX-6 from shrimp culture ponds[J]. Aquaculture, 2011, 319(1-2): 188-193.
- [60] DENG Min, ZHAO Xiaoli, SENBATI YEERKEN, et al. Nitrogen removal by heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium *Pseudomonas* sp. DM02: Removal performance, mechanism and immobilized application for real aquaculture wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2021, 322: 124555.
- [61] LIU Xing, WANG Qingkui, LI Lianxing, et al. Characterization of aerobic denitrification genome sequencing of *Vibrio parahaemolyticus* strain HA2 from recirculating mariculture system in China[J]. Aquaculture, 2020, 526: 735295.
- [62] ZHANG Haihan, ZHAO Zhenfang, LI Sulin, et al. Nitrogen removal by mix-cultured aerobic denitrifying bacteria isolated by ultrasound: Performance, co-occurrence pattern and wastewater treatment [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 372: 26-36.
- [63] 唐成婷, 罗国芝, 谭洪新, 等. 以 PBS 为载体和碳源的 SND 系统的脱氮效果研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(5): 151-155.
TANG Chengting, LUO Guozhi, TAN Hongxin, et al. Effectiveness of nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification reactor packed with poly(butylene succinate) media[J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(5): 151-155.
- [64] 胡玉, 罗国芝, 李丽, 等. PCL-SND 系统的脱氮效果[J]. 环境工程学报, 2016, 10(5): 2420-2426.
HU Yu, LUO Guozhi, LI Li, et al. Effect of nitrogen removal by PCL-SND system [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(5): 2420-2426.
- [65] 向天勇, 陆惠明, 张正红, 等. 开孔陶粒的制备与同步硝化/反硝化生物反应器的构建[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(4): 426-431+436.
XIANG Tianyong, LU Huiming, ZHANG Zhenghong, et al. Preparation of porous ceramsite and construction of simultaneous nitrification/denitrification bioreactor [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(4): 426-431+436.
- [66] 成小婷, 罗国芝, 李丽, 等. 以养殖固体废物发酵产物为碳源的 SND 系统的脱氮除磷效果[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 163-168.
CHENG Xiaoting, LUO Guozhi, LI Li, et al. Nitrogen and phosphorus removal by simultaneous nitrification and denitrification using fermented aquaculture solid waste products as carbon source[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(1): 163-168.
- [67] HUANG Fei, PAN Luqing, HE Ziyang, et al. Culturable heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterial consortia with cooperative interactions for removing ammonia and nitrite nitrogen in mariculture effluents [J]. Aquaculture, 2020, 523: 735211.
- [68] HUANG Fei, PAN Luqing, HE Ziyang, et al. Heterotrophic nitrification-aerobic denitrification characteristics and antibiotic resistance of two bacterial consortia from *Marinomonas* and *Halomonas* with effective nitrogen removal in mariculture wastewater[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 279: 111786.
- [69] ZHANG Z, FAN Z, ZHANG G, et al. Application progress of microbial immobilization technology based on biomass materials [J]. BioResources, 2021, 16(4): 8509-8524.
- [70] LI Hua, LIU Qingsong, YANG Ping, et al. Encapsulation of microorganisms for simultaneous nitrification and denitrification in aerobic reactors[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4): 105616.
- [71] 陈爽, 王良恺, 文涛, 等. 新型粉煤灰陶粒固定化有效微生物群落对模拟水产养殖废水净化效果[J]. 浙江农林大学学报, 2020, 37(4): 761-768.
CHEN Shuang, WANG Liangkai, WEN Tao, et al. Purification effect of immobilized effective microorganism community of fly ash ceramsite on aquaculture wastewater [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2020, 37(4): 761-768.
- [72] 石广辉, 刘青松, 张旭丰, 等. 包埋固定化微生物技术在水产养殖废水处理领域的研究进展[J]. 水处理技术, 2015, 41(9): 28-32.
SHI Guanghui, LIU Qingsong, ZHANG Xufeng, et al. Research progress of embedding immobilized microorganism technology in aquaculture water treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(9): 28-32.
- [73] NIE X, MUBASHAR M, ZHANG S, et al. Current progress, challenges and perspectives in microalgae-based nutrient removal for aquaculture waste: A comprehensive review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 124209.
- [74] 刘真, 王海凤. 水产养殖废水污染危害及处理技术研究[J]. 农业与技术, 2022, 42(5): 119-121.
LIU Zhen, WANG Haifeng. Study on pollution hazards and treatment technology of aquaculture wastewater [J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(5): 119-121.
- [75] 刘庆辉, 余祥勇, 叶孝飞, 等. 4 种饵料微藻对水产养殖废水的净化效果研究[J]. 水产科技情报, 2021, 48(5): 267-273.
LIU Qinghui, YU Xiangyong, YE Xiaofei, et al. Research on purification effect of four bait microalgae on aquaculture tailwater [J]. Fisheries Science & Technology Information, 2021, 48(5): 267-273.
- [76] 吕俊平, 折雨亭, 刘洋, 等. 不同接种浓度绿球藻对水产养殖废水净化的影响[J]. 水生生物学报, 2021, 45(3): 617-624.

- LYU Junping, ZHE Yuting, LIU Yang, et al. Effect of chlorococcum sphacosum gd with different inoculation concentrations on the purification of aquaculture wastewater[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2021, 45(3): 617-624.
- [77] 车林轩, 刘方剑. 厌氧氨氧化生物脱氮研究进展[J]. 广东化工, 2022, 49(8): 89-90+114.
- CHE Linxuan, LIU Fangjian. Research progress of anammox biological nitrogen removal[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(8): 89-90+114.
- [78] 吴莉娜, 闫志斌, 李进, 等. 厌氧氨氧化在城市生活污水处理中的应用[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46(4): 421-430.
- WU Lina, YAN Zhibin, LI Jin, et al. Application of anaerobic ammonia oxidation in municipal domestic sewage treatment plants[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2020, 46(4): 421-430.
- [79] 汪涛, 邢芳华, 王志强, 等. 厌氧氨氧化反应器研究进展[J]. 水处理技术, 2022, 48(2): 34-38+48.
- WANG Tao, XING Fanghua, WANG Zhiqing, et al. Research progress of anammox reactors[J]. Technology of Water Treatment, 2022, 48(2): 34-38+48.
- [80] 汪晓军, 陈永兴, 陈振国. 厌氧氨氧化及其处理低碳氮比氨氮废水的研究进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(11): 25-31.
- WANG Xiaojun, CHEN Yongxing, CHEN Zhenguo. Anaerobic ammonia oxidation and its research progress for the treatment of low C/N ratio ammonia nitrogen wastewater[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(11): 25-31.
- [81] NABILAH I I, MUHAMMAD T, UMOR A N, et al. Anammox process for aquaculture wastewater treatment: Operational condition, mechanism, and future prospective[J]. Water Science and Technology, 2022, 86(12): 3093-3112.