

DOI: 10.3969/j.issn.2095-9869.20240730002

http://www.yykxjz.cn/

崔鸿武, 卢伟斌, 冯宇娜, 崔正国, 汪鲁, 李皓, 曲克明, 滕峪, 李晓. 海水养殖尾水异养反硝化脱氮技术研究进展. 渔业科学进展, 2025, 46(6): 33–48

CUI H W, LU W B, FENG Y N, CUI Z G, WANG L, LI H, QU K M, TENG Y, LI X. Progress in research on the application of denitrification technology in mariculture tailwater treatment. Progress in Fishery Sciences, 2025, 46(6): 33–48

海水养殖尾水异养反硝化脱氮技术研究进展*

崔鸿武^{1①} 卢伟斌^{1,2} 冯宇娜^{1,5} 崔正国¹
汪 鲁³ 李 皓¹ 曲克明¹ 滕 峪¹ 李 晓⁴

- (1. 海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 山东 青岛 266071;
2. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院 浙江 舟山 316022; 3. 崂山实验室 山东 青岛 266237;
4. 山东省日照生态环境监测中心 山东 日照 276826; 5. 通辽市水产技术推广站 内蒙古 通辽 028000)

摘要 随着我国海水养殖业的迅猛发展, 养殖尾水排放量激增, 残饵、粪便等残余物使得尾水中氮污染严重。海水养殖地域面积广阔、尾水离子浓度高等特点使其净化和处理难度增大, 严重威胁海洋环境质量和海洋渔业资源的可持续发展。微生物异养反硝化技术具有脱氮效果好且不易产生二次污染等优点, 逐渐应用于海水养殖尾水净化研究中。本文概述了异养反硝化脱氮技术的机理与优势, 分类总结分析了异养反硝化脱氮技术在当前海水养殖尾水处理中的研究进展, 对影响反硝化脱氮效率的因素进行了分析与讨论, 包括碳源类型、水力停留时间、温度、溶解氧和 pH 等。在此基础上, 本文提出了反硝化技术应用于海水养殖尾水脱氮的难点, 并针对现有问题的解决方法和今后的研究方向进行了讨论和展望, 以为反硝化技术在海水养殖尾水高效脱氮中的应用提供理论依据和技术支持。

关键词 海水养殖; 尾水处理; 反硝化; 脱氮技术

中图分类号 S959 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2025)06-0033-16

我国是世界上最大的海水养殖国家, 海水养殖业已成为国民经济的支柱产业之一, 海水养殖产品已成为人类水产品需求增加的主要供给渠道。2023 年, 我国海水养殖产值为 4 885.48 亿元, 海水产品产量为 2 395.60 万 t, 同比增长 5.27% (农业农村部渔业渔政管理局等, 2024)。目前, 海水养殖正逐渐向规模化和工业化转变, 随之而来的是不可忽视的尾水排放和处理问题, 未经处理的尾水长期随意排放会加重养殖水体和邻近海域的污染负荷, 造成养殖用水资源匮乏、渔业产量和品质下降, 导致巨大的经济损失(王秀娟

等, 2013)。多种养殖模式的自净能力较低, 导致养殖尾水中存在大量残饵、粪便等有机物, 这些有机物可被微生物分解转化为氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2^-\text{-N}$)和硝酸盐($\text{NO}_3^-\text{-N}$)等, 是海水养殖氮污染的主要来源。

近年来, 多个省市针对海水养殖尾水污染问题, 陆续发布了地方强制性标准加以管控(表 1)。各地标准略有不同, 但各污染物的排放限值都维持在较低水平, 其中, 福建省和天津市根据地方特色单独制定了提水式海水池塘养殖和循环水式工厂化海水养殖尾水排放标准, 以精确控制污染物的排放。以总氮(total

* 山东省自然科学基金青年项目(ZR2022QC111)、国家自然科学基金青年基金(32202998)和中国水产科学研究院基本科研业务费(2023TD53)共同资助。

① 通信作者: 崔鸿武, 副研究员, Email: cuihw@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2024-07-30, 收修改稿日期: 2024-12-25

表 1 各省市海水养殖尾水排放标准 of provinces and cities
Tab.1 Marine aquaculture tailwater discharge standards of provinces and cities

省市 Province and City	总氮(以 N 计) Total nitrogen/(mg/L)		总磷(以 P 计) Total phosphorus/(mg/L)		pH		悬浮物 Suspension/(mg/L)		化学需氧量 COD _{Mn} /(mg/L)	
	一级标准 Level 1 standard	二级标准 Level 2 standard	一级标准 Level 1 standard	二级标准 Level 2 standard	一级标准 Level 1 standard	二级标准 Level 2 standard	一级标准 Level 1 standard	二级标准 Level 2 standard	一级标准 Level 1 standard	二级标准 Level 2 standard
辽宁省 Liaoning Province	≤5.0	≤8.0	≤0.5	≤1.0	7.0~8.5	6.5~9.0	≤40	≤100	≤10	≤20
河北省 Hebei Province	≤5	≤8	≤0.5	≤1.0	6.5~9.0		≤40	≤100	≤10	≤20
浙江省 Zhejiang Province	I 阶段 5.0 II 阶段 4.0	I 阶段 7.0 II 阶段 6.0	≤0.5	≤1.0	7.0~9.0	6.5~9.0	≤100	≤120	≤10	≤20
提水式海水池塘 养殖 福建省 Fujian Province	≤5.0	≤7.0	≤0.5	≤1.0	7.0~8.5	6.5~9.0	≤50	≤90	≤10	≤20
其他 Others	≤3.0	≤5.0								
广西壮族自治区 Guangxi Province	≤5.0	≤8.0	≤0.7	≤1.5	6.5~9.0		≤40	≤100	≤10	≤20
广东省 Guangdong Province	≤3.5	≤7.0	≤0.5	≤1.5	6.5~9.0		≤40	≤90	≤10	≤20
山东省 Shandong Province	≤4.0	≤6.0	≤0.7	≤1.0	7.0~8.5	6.5~9.0	≤40	≤100	≤10	≤20
江苏省 Jiangsu Province	≤3.0	≤5.0	≤0.5	≤1.0	7.0~8.5	6.5~9.0	≤40	≤100	≤10	≤20
海南省 Hainan Province	≤3.5	≤7.0	≤0.5	≤1.0	7.0~8.5	6.5~9.0	≤50	≤90	≤10	≤20
循环水式工厂化 海水养殖 天津市 Tianjin	≤8	≤10	≤0.8	≤1.0	6.5~9.0		≤60	≤80	≤15	≤20
其他 Others	≤5	≤8	≤0.5	≤0.8	6.5~9.0		≤40	≤80	≤10	≤20

nitrogen, TN)的排放限值为例,除天津市要求循环水式工厂化海水养殖 TN 含量不高于 8 mg/L 外,其他地区的一级排放标准均不高于 5 mg/L。同时发现,可能由于冬季气温限制,北方高纬度地区的一级排放标准限值普遍高于南方地区,其中江苏省和福建省的其他养殖模式对于 TN 排放限值最为严格。总磷的一级排放标准也呈现北方地区低于南方地区的现象,二级标准大多不高于 1.0 mg/L,而尾水中 pH、悬浮物和 COD 的标准在不同省份大致相同。随着养殖尾水排放标准的发布和实施,养殖尾水污染将得到有效控制,可进一步助力海水养殖业绿色高质量发展。

尾水处理是海水养殖可持续发展的关键环节。相比其他污水,海水养殖尾水具有盐度高、碳氮比(C/N)低、污染物中低浓度、排放量大且不集中等特点,导致其处理难度较大(李秋芬等, 2024)。传统养殖模式依靠换水将毒性较强的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 控制在合理水平,同时带出大量的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,而工厂化循环水养殖模式通过硝化作用将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 转化为生物毒性较低的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ (王震林等, 2019),以保持较高的水循环利用率,用以克服升温带来的巨大成本。但也有研究表明, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 积累会对养殖生物产生慢性的不良影响(Davids *et al*, 2017; van Duc *et al*, 2018),并且未经处理的高 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 尾水排放会严重影响受纳水域,引起水体富营养化等危害。因此,海水养殖尾水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的高效去除不仅符合我国“深入打好污染防治攻坚战”的重大战略需求,也是海水养殖业绿色发展的迫切需要。尽管国内外学者已经对水体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的物理和化学去除技术进行了广泛的研究,但运行成本高、受环境条件影响大以及可能带来二次污染等缺点限制了它们在尾水处理领域的推广应用(吕晓书等, 2023)。目前,生物处理技术是国内外海水养殖尾水净化的主要方式,其利用微生物的新陈代谢将尾水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 转化为生物体的一部分(同化反硝化)或转化为气态 N_2 (即异化反硝化)。虽然利用同化反硝化可以实现尾水中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除,但在水处理实践中应用最多的是微生物异化反硝化,这是因为同化反硝化的脱氮效率较低,而且副产品(如剩余污泥)产率较高(Li *et al*, 2022)。根据电子供体的不同又可将异化反硝化分为自养反硝化和异养反硝化 2 个类型。自养反硝化是指在自养反硝化菌的作用下,以 CO_2 、碳酸氢盐(HCO_3^-)、碳酸盐(CO_3^{2-})等作为碳源,以还原态无机物质如硫化物、 H_2 等作为电子供体,将水体中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 还原为 N_2 的过程(Wang *et al*, 2023)。异养反硝化是指在异养反硝化菌的作用下,利用外界的有机物

作为碳源,将水体中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 还原为 N_2 的过程(Epsztein *et al*, 2016)。经过长期的发展完善,异养反硝化目前已经被广泛用于城市污水、生活污水、工业废水以及垃圾渗透液等水体的脱氮处理中(袁绍春等, 2024)。

异养反硝化脱氮的工艺原理已得到较为深入的研究,本文从反硝化的影响因素出发,对异养反硝化技术在海水养殖尾水中的研究进展进行总结分析,结合不同反硝化技术方法列举其应用于海水养殖尾水处理的难点并分别进行讨论,还对各种碳源及其对不同水体的脱氮效果进行比较,以期海水养殖尾水的反硝化研究发展提供技术支撑和理论依据。

1 异养反硝化脱氮工艺概况

异养反硝化反应包含 4 个过程,即 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 在微生物作用下经由 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 NO 、 N_2O 最终转化为 N_2 ,因此,若反应不完全会产生毒性较高的中间产物—— $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。在异养反硝化过程中,有机物既是电子供体也是碳源。异养反硝化微生物一般是厌氧微生物,需要充足的有机碳源来保证反硝化进程的充分进行(何巧冲, 2019)。然而,在实际处理应用中,大部分水体中碳含量较低,不足以为完全反硝化作用提供足够的电子供体。海水养殖尾水同样具有低 C/N 特性,可导致异养反硝化进程积累 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,因此,为保证异养反硝化的高效和充分运行,需要额外添加有机物作为反硝化碳源(Zhao *et al*, 2012)。自 20 世纪 80 年代,脱氮副球菌(*Paracoccus denitrificans*)首次发现以来,好氧反硝化也一直是水处理领域研究的热点(Ji *et al*, 2015),其反硝化过程可在有氧条件下进行。相较于传统反硝化,好氧反硝化菌有着生长周期短,更易于大规模培养的优点(Holmes *et al*, 2019)。但随着研究的进行,好氧反硝化的缺点也逐渐暴露,诸如需碳量更高、易产生 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累、菌株易流失等特点使其缺少成功的实际应用案例(顾玉蓉等, 2024)。此外,众多学者也尝试通过同步硝化反硝化工艺来处理尾水,与传统生物脱氮工艺相比,可有效减少碳源消耗量,降低经济成本,具有广阔的发展前景(唐素琴等, 2023),但该过程运行条件苛刻,且易产生大量 N_2O 等温室气体(王书杰等, 2022),目前亟待更多实验改进。因此,针对海水养殖尾水的实际脱氮处理,目前仍以异养反硝化为主。异养反硝化中,碳源添加可分为水溶性有机碳源和固态碳源,二者各有优劣。在实际应用中,对水溶性有机碳源的研究较早,主要包括醇类、脂肪酸类和糖类,此类碳源通常具有易降解、

脱氮效果好的特点,被广泛应用于污水厂净水处理,但在实际应用中存在一系列问题:如甲醇在使用时投加量不易控制,易造成二次污染;糖类物质因结构复杂而反硝化速率较慢;其他碳源在使用时也常常出现 $\text{NO}_2\text{-N}$ 积累的情况(张仲玲, 2010; 殷同昕等, 2020)。异养反硝化常用固态碳源可以分为天然植物类物质和人工合成的可生物降解聚合物(BDPs)。在反硝化过程中,固态碳源在微生物分泌的如脂肪酶等胞外酶的水解作用下被分解为小分子有机物并进一步反应,既可为异养反硝化提供碳源,也可为反应过程中的微生物提供附着载体(朱启荣等, 2021; 荆肇乾等, 2015)。固态碳源大多具有较高的脱氮效率,且投入量易控制,但在实际运用中也存在一定缺陷,如天然植物类碳源释碳过快导致脱氮持续时间有限,而BDPs价格高昂致使脱氮成本过高,而将这两类固体碳源相结合的复合碳源可能是未来研究的方向之一。

在异养反硝化过程中,还有一些因素严重影响其脱氮效率。如水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)通过改变水体与反硝化微生物的反应时间而影响脱氮率,温度会影响微生物的生长代谢活性以及生物膜成熟时间,从而造成反硝化速率的变化。其他诸如pH、盐度和进水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度(influent nitrate concentration, INC)等因素都会对反硝化造成影响。因此,获得更好的脱氮效果还需综合考虑各方面因素。

2 海水养殖尾水异养反硝化脱氮效果

生物脱氮技术在近几十年来广泛应用于水处理中,虽然其具有运行费用高、系统负荷力低、控制条件复杂等缺点,但随着对养殖尾水处理的深层次研究,反硝化在尾水处理过程中的优势也愈加明显。反硝化技术可使水体中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 等含氮污染物含量保持在标准范围内,对绿色水产品养殖、系统节能降耗和减少环境污染具有重要作用,有助于提升水产养殖产量并改善水质(黄秀玉等, 2019)。李华等(2016)以稻壳为碳源,研究其在人工养殖海水中的脱氮性能, $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率可达59%。焦点(2018)在海水循环水养殖系统的水质净化单元中分离出耐盐型反硝化细菌,结果显示,其对循环养殖尾水的平均 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率达到55%,TN去除率达到50%。目前,反硝化技术在海水养殖尾水处理中的研究已较为广泛,发展出了多种应用方向,并均能取得较好的脱氮效果。表2汇总了近年来异养反硝化脱氮在不同海水养殖尾水中的应用研究,根据不同的尾水来源进行了分类。结果显示,目前应用于海水养殖异养反硝化脱

氮作用的碳源种类繁多,不同碳源的尾水脱氮效果各异,相同碳源因水质环境(如温度、pH、进水 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度等)差异,脱氮效果也不尽相同。但目前,异养反硝化技术用于海水养殖尾水脱氮的研究多来自实验室,中试或生产规模养殖水体的应用报道较少。

3 海水养殖尾水异养反硝化难点

海水养殖尾水相较于其他污水具有盐度高、有机污染负荷低、氮磷浓度较低、点源式排放等特点,使海水养殖尾水处理难度更大。在海水养殖尾水处理过程中反硝化技术的应用主要受到两方面制约,一是高盐度,二是低C/N。

3.1 高盐度

海水养殖尾水水体具有盐度效应。海水中盐度一般约为30,受盐度影响,水体中相关微生物数量较少,且盐度较高会使微生物细胞渗透压改变速度加快,抑制细菌生长甚至导致菌体细胞破裂,最终生物处理系统受到破坏而无法生存或正常进行代谢活动,使反硝化反应效率较低甚至难以进行(刘鲁建等, 2019)。研究表明,将生活在低盐环境中的微生物移植到高盐环境后,仅有部分微生物存活(雷云等, 2007)。在赵娟娟等(2024)的研究中,当盐度高达12时,反硝化出水TN浓度在9~12 mg/L之间波动,难以达到尾水排放标准($\text{TN}<10\text{ mg/L}$)。实际工程中多采用具有较强污染物截留能力的生物膜反应器来进行此类尾水的处理,然而较高的海水盐度仍是制约生物处理效率的关键因素,因此,海水养殖尾水的高盐度特点成为海水养殖反硝化技术处理的一大难点(巩有奎等, 2019; Zhang *et al.*, 2020)。

针对海水养殖尾水盐度较高这一难点,国内外相关学者将多种处理工艺应用于海水养殖尾水的反硝化过程,探究了盐度对有机物去除率、脱氮效率、系统稳定性和活性污泥微生物的影响,以及嗜盐菌培养盐度对系统耗氧率和基质利用率的影响等,得出了一系列含盐尾水生化处理系统的设计参数。同时,一些学者利用微生物技术对养殖尾水进行处理,通过驯化等方法培养更适用于海水养殖尾水水体盐度的微生物(Kim *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2023; Fu *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2005),期望利用耐盐性的硝化细菌、反硝化细菌及其他脱氮细菌来解决此问题。此外,为了使耐盐反硝化细菌更好地发挥作用,众多对其生长及发挥脱氮作用的影响条件的研究也正在进行中。翁南海等(2023)对筛选得到的耐盐菌株NA2-1的生长条件

表 2 海水养殖尾水异养反硝化脱氮应用
Tab.2 Application of heterotrophic denitrification in mariculture tailwater

尾水来源 Tailwater sources	碳源 Carbon source	进水状况 Influent water	硝酸盐去除率/去除速率 Nitrate removal/rate of removal	出水水质 Effluent quality	文献 Reference
人工模拟海水养殖尾水 Simulation of farm effluent	乙酸钠 Sodium acetate	水温 Temp: 26 ℃; pH: 7.0~7.5 NO ₃ ⁻ -N: 100 mg/L	78.8%	无亚硝酸盐氮累积 No nitrite nitrogen accumulation	刘伶俐等, 2013
	葡萄糖 Glucose (C/N=3)		76.1%		
	葡萄糖 Glucose (C/N=6)		75.3%		
	柠檬酸钠 Sodium citrate		77.2%	亚硝酸盐在 4 h 达到峰值 (16.9 mg/L), 9 h 降解完全 Nitrite peaked at 4 h (16.9 mg/L) and degraded completely at 9 h	
	甲醇 Wood spirit		53.7%	亚硝酸盐在 8 h 达到峰值 (15.3 mg/L), 随后下降 Nitrite peaked at 8 h (15.3 mg/L), then declined	
	葡萄糖 Glucose	水温 Temp: 21~27 ℃; pH: 6.7~7.3 DO: (6.54±0.17) mg/L NO ₃ ⁻ -N: (25.7±5.6) mg/L COD: (489.3±89.3) mg/L TOC: 200 mg/L; 盐度 Salinity: 31	90.6%	COD 去除率: 89.0% COD removal: 89.0% TOC 去除率: 97.8% TOC removal: 97.8%	
木屑 Wood chip		水温 Temp: 盐度 Salinity: 15 (14.0±0.9) ℃; DO: (8.95±0.33) mg/L pH: 7.82±0.07	(15.3±4.9) g/(m ³ ·d)	水温 Temp: (14.8±0.8) ℃ pH: 6.74~7.17 DO: (0.77±0.40) mg/L	Von <i>et al.</i> , 2019
		盐度 Salinity: 25 DO: (9.30±0.21) mg/L 盐度 Salinity: 35 DO: (8.95±0.33) mg/L	(12.5±5.4) g/(m ³ ·d) (11.8±4.0) g/(m ³ ·d)		

续表 2

尾水来源 Tailwater sources	碳源 Carbon source	进水状况 Influent water	硝酸盐去除率/去除速率 Nitrate removal/rate of removal	出水水质 Effluent quality	文献 Reference
半滑舌鳎成鱼循环水 Semi-smooth tongue spoiled adult fish circulating water	葡萄糖 Glucose 红糖 Brown sugar 可溶性淀粉 Soluble starch 乙醇 Ethanol	水温 Temp: 26~27.5 °C; pH: 7~8.5; DO: 5.5~6.5 mg/L; NO ₃ -N: (2.432±0.191) mg/L NO ₂ -N: (0.479±0.115) mg/L 水温 Temp: 26~27.5 °C; pH: 7~8.5; DO: 5.5~6.5 mg/L; NO ₃ -N: (2.471±0.269) mg/L NO ₂ -N: (0.415±0.032) mg/L 水温 Temp: 26~27.5 °C; pH: 7~8.5; DO: 5.5~6.5 mg/L; NO ₃ -N: (2.517±0.126) mg/L; NO ₂ -N: (0.271±0.042) mg/L 水温 Temp: 26~27.5 °C; pH: 7~8.5; DO: 5.5~6.5 mg/L; NO ₃ -N: (2.446±0.272) mg/L NO ₂ -N: (0.504±0.039) mg/L	41.39% 55.6 % 54.68 % 46.78 %	文中未提及 Not mentioned in the text	程海华等, 2016
南美白对虾养殖尾水 South American white shrimp aquaculture tailwater	纸板 Cardboard	水温 Temp: (27.11±0.67) °C; pH: 8.24±0.29 盐度 Salinity: 34.28±0.30; DO: (5.52±0.31) mg/L; NO ₃ -N: ≈ 14 mg/L; NO ₂ -N: ≈ 3 mg/L	56%	无亚硝酸盐氮累积 No nitrite nitrogen accumulation	Chen <i>et al</i> , 2021
RAS 尾水 RAS tailwater	PBS	盐度 Salinity: 25; NO ₃ -N: 50 mg/L	90%	NO ₂ -N<1 mg/L	Zhu <i>et al</i> , 2015
牙鲆 RAS 尾水 Turbot RAS tailwater	残饵粪便, 体积 1 : 1 的解种污泥与养殖 固体废物 Residual bait manure, 1 : 1 volume of detrital sludge and farm solid waste PCL	盐度 Salinity: 25; NO ₃ -N: 150 mg/L 盐度 Salinity: 30~32 ; 水温 Temp: (20±2) °C; pH: 5~6; NO ₃ -N: 60.37 mg/L TCOD: 1 240.28 mg/L	(0.66±0.12) g/(m ³ ·d) 43.5%	NO ₂ -N<2 mg/L TCOD 去除率: 24.0% TCOD removal: 24.0% TS 去除率: 13.6% TS removal: 13.6%	李秀辰等, 2010
模拟养殖污水 Simulation of farm effluent		水温 Temp: (22±1) °C; pH: 7.3~8.2; NO ₂ -N: ≈ 0.3 mg/L; NO ₃ -N: 40~50 mg/L NH ₄ ⁺ -N: ≈ 20 mg/L	86%	NH ₄ ⁺ -N = 5 mg/L NO ₂ -N < 0.14 mg/L	刘倩等, 2015

进行优化,发现其生长的最佳温度为 35 ℃,最佳 pH 为 5.5,能在盐度为 30~150 的培养基内良好生长,48 h 最高 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率达 91.3%。孙文妮等(2020)对获得的反硝化弧菌 YL5-2 菌株进行耐盐及反硝化能力的探究,发现其耐盐范围为 30~300,最适生长温度和 pH 分别为 30~35 ℃和 7.5~8.0,最高脱氮率可达 95% 以上。这些筛选出的菌株具有较高的脱氮效率并且可以适应高盐度环境,该技术是反硝化在海水处理应用中的重要方向。此外,由于菌株对环境因素的适应程度不同,应结合实际尾水水质和碳源种类来挑选合适的菌株进行反硝化应用。

3.2 低碳氮比(C/N)

C/N 是指基质中碳的总含量与氮的总含量的比值,海水养殖尾水 C/N 较低,碳源不足是限制脱氮的关键因素。周丹等(2012)研究认为,反硝化处理海水养殖尾水需要 $\text{C/N}>5$ 才可实现完全脱氮。郑冰冰等(2020)研究发现,海水养殖尾水的 C/N 由 12 降至 1 的过程中,反硝化酶在 $\text{C/N}<5$ 时受到抑制,导致脱氮不完全。这表明反硝化处理过程中需要足够的碳源作电子供体,碳源的选择也需要综合考虑各种因素。胡小宇等(2020)利用乙酸钠、乙醇、葡萄糖及其两两混合物作为碳源进行反硝化研究,均发现 $\text{NO}_2\text{-N}$ 累积。添加液体碳源时不仅投加量不好控制,而且存在二次污染的风险。因此,海水养殖尾水低 C/N 的特点成为了应用反硝化技术处理尾水时的另一制约因素。

针对海水养殖尾水 C/N 低的问题,众多学者通过添加固体碳源取得了优异的脱氮效果。李秀辰等(2010)针对海水循环水养殖系统,利用养殖固体废弃物作为碳源进行反硝化研究,经过 10 h 后, $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 COD 的去除率分别为 36.5%和 75.9%,提供了低成本的反硝化参考。采用高分子材料作为外加碳源已成为提高脱氮效果的一个有效解决方案,罗国芝等(2018)以聚己内酯(PCL)为碳源处理循环水养殖尾水,在温度为 25 ℃、HRT 为 6 h、INC 为 200 mg/L 时, $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均去除速率达 (0.55 ± 0.32) g/(L·d)。汪鲁等(2022)构建基于 PHBV 固体碳源的同步硝化反硝化反应器用于海水养殖尾水脱氮,HRT 2 h 条件下,TN 去除率为 $(87.5\pm 2.22)\%$,反硝化速率达到 0.20 g/(L·d)。采用固体碳源来处理海水养殖尾水具有效率高、易操作的优势,被广泛用于海水反硝化的研究当中。在反硝化处理中加入合适的外加碳源有助于解决海水养殖水体低 C/N 的问题,但为了提高经济效益还需根据实际情况选用适宜的碳源。

4 海水养殖尾水异养反硝化的影响因素

反硝化反应受众多因素的影响,包括碳源类型、HRT、温度和溶解氧(DO)等。这些因素均会通过影响微生物活性或性能来影响反硝化速率与反应程度,因此,明确反硝化影响因素对脱氮效果的影响具有重要意义。

4.1 碳源

研究表明,考虑微生物生长等条件,实际反硝化技术应用中需 C/N 达到 4 kg COD/kg N (Bi *et al*, 2022)。含碳量较低的海水养殖尾水不足以支持反硝化过程的完整进行,限制了 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效果,投加碳源是促进深度脱氮的一种有效途径。

经过长时间的研究,碳源的种类不断扩充,不同碳源对反硝化有巨大影响。根据碳源的物质形态,可以将异养反硝化划分为水溶性碳源反硝化和固体碳源反硝化(表3)。水溶性有机碳源的异养反硝化技术应用于尾水处理的研究较早,可为反硝化反应提供充足的电子供体,已在各种类型的污水脱氮处理中得到了应用。张仲玲等(2010)研究了甲醇、乙酸、丙酸、丁酸和葡萄糖作为间歇式反硝化实验外加碳源时的适宜 C/N 及反硝化速率,结果表明,在适宜 C/N 条件下,以上碳源皆具有较高的脱氮效率,其中添加甲醇和乙酸的实验组反硝化速率大于丙酸和丁酸实验组,而葡萄糖因需先转化为丙酮酸再降解而反硝化速率最慢,其中,乙酸和丁酸在反应过程中出现了较高的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 氮累积。张浩浩等(2017)以甲醇和乙酸钠作为碳源探究其对反硝化效果的影响,当 C/N 为 4、水力负荷为 $1.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时,两种碳源的滤柱对 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的平均去除率分别为 88.6%和 93.0%,甲醇实验组出水比乙酸钠组更加稳定,乙酸钠组出水波动性较大,对 COD 的去除不稳定。不同水溶性有机碳源的脱氮效率相差较大,且部分碳源的投入产生了诸如 $\text{NO}_2\text{-N}$ 积累、出水 COD 过高的问题,虽可以满足脱氮的需求,并且在污水处理中的应用已较为成熟,但投加量不易控制会产生二次污染等潜在风险仍需关注,该问题在海水养殖中更加需要注意。

固体碳源主要包括天然植物类物质和人工可降解聚合物。天然植物类物质包括木屑、小麦秸秆、玉米芯、甘草、海藻(叶斯斯等, 2014)、报纸、锯末、树皮(李瑶, 2017)、树叶堆肥和大麦秸秆等。这些碳源大多属于农业废弃物,容易在生产生活中获取,价格相较其他碳源低廉,但仅依靠此类碳源释碳效果不可持续(葛海华等, 2019)。可生物降解聚合物包括聚

表 3 异养反硝化碳源种类及优缺点
Tab.3 Advantages and disadvantages of different types carbon source used in heterotrophic denitrification

碳源种类		代表碳源		优点	缺点	文献
Type of carbon source		Representative carbon source		Advantage	Disadvantage	Reference
水溶性有机碳源 Water-soluble carbon sources	醇类 Alcohol	甲醇、乙醇等 Methanol, ethanol, etc.		取材方便、便于管理、脱氮效率高	投加量难控制、过量易造成二次污染	殷同昕等, 2020; 毕春雪等, 2019;
	脂肪酸类 Fatty acids	乙酸钠、丙酸等 Sodium acetate, propionic acid, etc.		Convenient access to materials, easy to manage, high efficiency of nitrogen removal	Difficult to control the dosage, overdose may cause secondary pollution	冯凯等, 2019; 张胜男等, 2021; 付昆明等, 2021
	糖类 Sugar	葡萄糖等 Glucose C ₆ H ₁₂ O ₆ , etc.				
固态碳源 Solid carbon sources	天然植物 Natural plant	芦苇秸秆、玉米芯等 Reed straw, corn cobs, etc.		容易获得、价格低廉	单纯添加释碳不持久、效果不稳定	赵佳敏, 2018; 钟华等, 2019
	可生物降解聚合物 Biodegradable Polymers	PBS、PHA、PHA、PCL 等 PBS, PHA, PHA, PCL, etc.		脱氮效率高、有良好的抗冲击负荷能力	价格高昂、启动时间长	封羽涛等, 2011; 范振兴等, 2009
	改性后固体碳源 Modified solid carbon sources	天然植物+高分子材料 Natural plants + polymer materials		High nitrogen removal efficiency and good shock load resistance 价格低于高分子材料、去除效果优于天然植物 Lower price than polymers, better removal effect than natural plants	易引起水体有机碳迅速升高、出水 COD 较高 Easy to cause rapid increase of organic carbon in the water body, higher COD in the effluent water	沈志强等, 2014; Cui <i>et al</i> , 2023

羟基链烷酸酯(PHA)、聚 3-羟基丁酸酯(PHB)、PHBV、PCL、聚丁二酸丁二醇酯(PBS)和聚乳酸(PLA)等。这类高分子聚合物具有良好的抗冲击负荷能力,但相较于天然植物成本较高(Feng *et al.*, 2023)。在两种固态碳源结合的基础上加工改性后的碳源因兼具二者的优势成为研究的新趋势,但有研究表明,改性后的固态碳源会引起水体有机碳和出水 COD 含量升高(王春喜等, 2018)。唐婧等(2020)利用玉米芯处理低 C/N 污水,当玉米芯投加量为 5.0 g/200 mL 时 NO_3^- -N 的去除率可达 92%~96%,同时发现,玉米芯投加量过高会造成二次污染。Zhu 等(2015)在循环水养殖尾水中添加 PBS 作为外加碳源探究脱氮效果,当 INC 为 50 mg/L 时,去除率为 90%;但 INC 增加至 150 mg/L 时,去除率降至(66±12)%,且 NO_2^- -N 浓度随之升高。由此可见,固体碳源的投入能有效提高脱氮效率,但受到各种外部条件以及投加量的制约。对此,许多学者开展了各碳源最佳影响条件的研究,以期解决这一问题。

碳源的添加对于异养反硝化的完全进行十分关键,需根据海水养殖尾水的实际情况具体考虑碳源的种类和添加量以及外部条件,避免反硝化脱氮效率降低或二次污染问题的发生。本文列举了海水养殖尾水处理中常见的碳源(表 3)并整理了各自特点,以期为其应用提供理论参考。

4.2 水力停留时间(HRT)

HRT 是指未处理尾水在反应器内与反硝化细菌作用的时间。HRT 直接影响尾水水体与微生物的接触时间。一般情况下, NO_3^- -N 的去除率随着 HRT 的延长而升高(Benyoussef *et al.*, 2013)。若停留时间太短,则生物反应器内部 DO 含量过高,无法形成异养反硝化所需的厌氧环境,微生物无法充分降解污染物,导致脱氮效果较差。增加 HRT 使微生物有充分的时间降解有机基质,有利于提高 NO_3^- -N 的去除率,但 HRT 过长会导致实际处理效率降低,且固体碳源溶出增多,降低净水能力(Guo *et al.*, 2017)。

Chen 等(2021)选取纸板作为碳源,研究 HRT 对对虾循环水养殖尾水反硝化效率的影响。实验过程中, NO_3^- -N 浓度保持在较低水平(2.55~7.57 mg/L),在 HRT 为 0.5~2.0 时,随着 HRT 增大 NO_3^- -N 的去除率由 81.21%增加至 85.05%,且此过程中反硝化优势菌和功能菌的种群发生显著变化。高书伟等(2023)以香蕉杆为碳源,处理人工海水养殖尾水,设置温度为 22 °C,INC 为 50 mg/L,结果表明,在一定范围内,随着 HRT 的增加, NO_3^- -N 的去除率呈增长趋势,在 HRT=20 h 时, NO_3^- -N 去除率高达(96.71±1.36)%,当

HRT≥20 h 时便不再显著增加。谭洪新等(2010)以 PBS 为碳源,探究 HRT 对 INC 为 100 mg/L 人工模拟养殖尾水的影响,结果显示,HRT 越大, NO_3^- -N 的去除率越高,但过长的 HRT 导致其后几个小时反硝化速率很低。由此可见,HRT 是异养反硝化脱氮效率的重要影响因素,在适宜条件下提升 HRT 能提高脱氮效果,但并不是 HRT 越大去除效果越好,即存在最佳 HRT 和最大去除速度(Cui *et al.*, 2024)。最佳 HRT 与 INC 有关,不同的 INC 对应的最佳 HRT 不同,且随着 INC 的增加,最佳 HRT 相应延长。因此,运用反硝化技术处理海水养殖尾水,需要综合考虑养殖水体、碳源种类及其他影响因素来确定合适的 HRT。

4.3 温度

温度是影响反硝化效率的重要因素之一,其会通过影响反硝化细菌的生长代谢以及繁殖,从而影响反硝化效率。温度升高有助于提高反硝化菌的脱氮效果,但温度过高会导致微生物反硝化酶失活等,致使反硝化速率降低(雷婷婷等, 2022; He *et al.*, 2018)。反硝化细菌最适宜的温度一般在 20~36 °C 之间(周鹏等, 2023),在此温度范围内反硝化速率随着温度下降而降低。

相关研究表明,温度低于 15 °C 会减缓水体中反硝化菌的增殖和代谢速率,导致反硝化速率降低(Roberts *et al.*, 2009)。谭洪新等(2010)利用 PBS 作为碳源来探究温度对反硝化效率的影响,研究结果显示,14 °C 时的反硝化速率只有 30 °C 时的 50%。沈耀良等(1999)发现,当温度低于 10 °C 时,反硝化速率显著下降;且当温度在 3 °C 以下,反硝化作用停止。由此可见,低温会显著降低反硝化菌的活性,从而降低脱氮效果。温度不仅会影响反硝化速率,同样会影响反硝化反应过程的微生物群落结构,该过程与温度对反硝化菌生长繁殖活性的影响有关。在魏小涵等(2019)对不同温度下反硝化菌群变化的研究中,温度为 18~20 °C 时,优势菌属由黄杆菌属(*Flavobacterium*)、索氏菌属(*Thauera*)和黄单胞菌属(*Xanthomonadaceae*)组成;实验温度升至 20~22 °C 时,黄杆菌属和黄单胞菌属的比例均有不同程度的下降,而硫杆菌属(*Thiobacillus*)的比例却明显提高。此外,在尾水处理中应用反硝化技术时,应注意最适温度对反硝化脱氮效果的影响。焦点(2018)研究表明,盐度为 100 时,中度嗜盐反硝化菌(DN20)的最佳代谢温度为 30 °C,此时最大比基质利用速率($q_{\max}$)为 3.90 mgN/(g prot·h)。当盐度为 150 时,中度嗜盐低温反硝化菌(DN10)的最佳代谢温度为 41 °C, $q_{\max}$ 为 3.42 mgN/(g prot·h),其最

适温度还受其他水质条件的影响。因此,在实际海水养殖尾水净化过程中,应格外注意温度变化对反硝化脱氮效率的影响,根据水质和菌种调节合适的温度有助于更好地调控反硝化效能。同时,可根据具体水质调节温度以调控优势菌种,达到最佳脱氮效果。

4.4 溶解氧(DO)

溶解在水中的分子态氧称为 DO,其可以通过与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 竞争电子供体,抑制 $\text{NO}_3\text{-N}$ 还原酶的合成与活性来抑制反硝化过程(Wen *et al.*, 2017)。反硝化菌是兼性细菌,可分为有氧呼吸和无氧呼吸两种方式,水体中 DO 浓度的高低会直接影响反硝化效率(Zhao *et al.*, 2012)。当 DO 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 同时存在时,因有氧呼吸产生的能量更多,会优先进行有氧呼吸。因此,为保证反硝化的顺利进行,需要保持微氧环境($\text{DO} < 2 \text{ mg/L}$),但若水体中 DO 含量过低,会影响微生物的代谢活性致使 $\text{NO}_2\text{-N}$ 少量增加(赵海燕, 2009)。

养殖尾水中的 DO 含量居高不下也是困扰厌氧反硝化进行的一个难点,针对该难点许多学者开始采用好氧反硝化来进行尾水的脱氮处理,并取得了良好的研究成果。邱梦瑶等(2024)在虾池中分离出好氧反硝化菌株 ZY-F8,在温度为 30°C 、pH 为 7 时的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 去除率可达 99%以上,基本无 $\text{NO}_2\text{-N}$ 积累。李艳丽等(2024)从硝化滤池中分离得到一株好氧反硝化菌 ZH8,在 C/N 为 15、温度为 30°C 的条件下对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 及 TN 的去除率均可达到 90%以上。好氧反硝化具有高效脱氮、易培养等特点,但目前其代谢途径和机理尚未研究清楚,还未实现在实际工程中的应用。

在一定范围内调节 DO 浓度对反硝化速率影响较小,当 DO 浓度降低至某一值时,反硝化效率会随之急剧升高,此 DO 浓度变化范围称为阈值。DO 的阈值根据不同水体条件有所不同,一般为 $0.08\sim 7.70 \text{ mg/L}$ (Wilson *et al.*, 1997)。相关学者研究发现,反应过程中反硝化速率达到最高时,升高或降低 DO 浓度均会降低反硝化速率和 TN 去除率(熊子康等, 2021),即存在最适 DO 浓度。Meng 等(2008)研究表明,当 DO 浓度低于 0.2 mg/L 时,反硝化速率不受水体中 pH 变化的影响,可以完全反应。表明 DO 对反硝化菌的影响远大于酸碱度,控制厌氧条件对反硝化的进行尤为重要。由此可见,在实际应用中,需根据不同水体条件调节最适 DO 浓度范围,使反硝化菌更好地生长繁殖,以达到更好的脱氮效果。Yan 等(2019)研究发现,在低 DO 条件下反硝化菌的含量更高,随着 DO 降低,参与硝化和反硝化作用的酶增加。Patureau 等(2000)在研究过程中发现,若调控 DO 浓

度为 $0.35\sim 6.30 \text{ mg/L}$,实验菌群(好氧反硝化菌)的反硝化速率可以保持在 $34.10\sim 42.30 \mu\text{mol N}/(\text{L}\cdot\text{h})$ 之间。由此看来,不同反硝化菌对溶氧条件的适应存在差异,从而在不同程度上影响反硝化活性。应根据不同水体的基本条件及其主要反硝化菌群的特性调节适宜的 DO 浓度。

4.5 其他因素

除以上因素,INC、盐度、pH 等条件也会影响反硝化脱氮效率。当 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度上升时,水体中的 C/N 降低,导致反硝化电子供体不足,反硝化进行不全会造成 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的积累,导致脱氮效率降低(卢伟斌等, 2024)。高盐度废水中 Cl^- 浓度过高,会改变细菌的细胞渗透压从而破坏胞体,抑制微生物生长,直接影响水处理效果(唐婧等, 2015)。研究表明,在较高盐度尾水中加入嗜盐菌可以提高脱氮效率(赵佳敏, 2018),但高盐度及盐度变化会影响微生物的生长代谢和降解能力,高盐尾水会显著降低有机物去除率和脱氮效率(Pan *et al.*, 2023)。pH 值可直接影响酶的活性,环境中的 H^+ 浓度如果超过了微生物酶可适应的阈值,微生物活性会受到影响。张淑楠等(2015)研究发现,在中性及碱性的水体环境中,反硝化菌的生长速率高于酸性条件,对 TN 的去除率最高达 97.1%。此外,不同影响因素之间也会相互影响,如 INC 会影响反硝化过程的最适 HRT,盐度会对最适温度产生影响等。因此,要达到较高的反硝化脱氮速率和较好的净水效果,需要综合考虑多种因素的互作影响,在实际进行尾水处理前,需要先进行预实验来筛选适宜反硝化菌发挥作用的最佳条件,以取得最好的经济效益。

5 结论与展望

目前,异养反硝化脱氮工艺原理较为明晰,海水养殖尾水反硝化脱氮研究多集中于实验室规模,多来源于人工模拟尾水、养鱼尾水和循环水养殖尾水。异养反硝化脱氮效果受诸多因素影响,如碳源类型、HRT、温度、DO 和 pH 等。需综合考虑多重因素,才能更好地利用异养反硝化技术实现海水养殖尾水的高效脱氮。

海水养殖尾水高盐度、低 C/N 的特点在一定程度上限制了异养反硝化脱氮的应用。虽然上述问题可通过外加碳源并筛选特定菌株予以缓解,但这同时也会引入新的问题,如碳源添加量无法精准把控、筛选菌株难以成为优势种、如何在低成本状态下开展高效反硝化等,且这一过程受到碳源类型、HRT、温度和

DO等诸多因素的影响,致使目前研究多处于实验室阶段,针对当前海水养殖尾水异养反硝化脱氮应用面临的主要问题及未来发展方向,可围绕以下方面开展深入研究:

(1)因养殖品种生物学习性差异导致的环境需求不同、养殖对象营养需求不同导致的饲料成分差异,致使养殖尾水污染物因养殖物种而异。因此,可根据不同养殖生物,制定针对特定养殖品种尾水高效反硝化的处理工艺,包括外加碳源种类、配比、HRT等处理工艺参数的摸索和优化升级等。

(2)对于影响反硝化脱氮的诸多因素,现有研究多集中于单因素影响实验,忽略了多种因素之间的相互作用机制与耦合作用,后期应加强多因素协同作用的探究,为海水养殖尾水异养反硝化工艺的优化调控提供技术支撑。

(3)目前,针对海水养殖尾水反硝化处理技术的研究大多处于实验室水平,未来应进一步放大至中试和生产规模,探索和解决实际养殖情况下反硝化单元出现的问题,并进一步估算运行成本,从而为低成本养殖尾水脱氮示范工艺的建立提供理论依据。

参 考 文 献

- BENYOUCEF N, CHEIKH A, DROUICHE N, *et al.* Denitrification of groundwater using Brewer's spent grain as biofilter media. *Ecological Engineering*, 2013, 52: 70–74
- BI C X, YU D S, DU S M, *et al.* Nitrite accumulation characteristics of partial denitrification in different sludge sources using sodium acetate as carbon source. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 783–790 [毕春雪, 于德爽, 杜世明, 等. 乙酸钠作为碳源不同污泥源短程反硝化过程亚硝酸盐积累特性. *环境科学*, 2019, 40(2): 783–790]
- BI Z H, ZHANG Q, XU X J, *et al.* Perspective on inorganic electron donor-mediated biological denitrification process for low C/N wastewaters. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127890
- Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. *China fishery statistical yearbook 2024*. Beijing: China Agriculture Press, 2024 [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2024 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2024]
- CHEN Z, CHANG Z Q, QIAO L, *et al.* Effect of hydraulic retention time on solid-phase denitrification reactor in recirculating aquaculture system. *Aquaculture*, 2021, 543: 736928
- CHENG H H, ZHU J X, QU K M, *et al.* Effect of different organic carbon sources and C/N on the bio-filter purification. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(1): 127–134 [程海华, 朱建新, 曲克明, 等. 不同有机碳源及 C/N 对生物滤池净化效果的影响. *渔业科学进展*, 2016, 37(1): 127–134]
- CUI H W, FENG Y N, LU W B, *et al.* Effect of hydraulic retention time on denitrification performance and microbial communities of solid-phase denitrifying reactors using polycaprolactone/corn cob composite. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 205: 116559
- CUI H W, FENG Y N, YIN Z D, *et al.* Organic carbon release, denitrification performance and microbial community of solid-phase denitrification reactors using the blends of agricultural wastes and artificial polymers for the treatment of mariculture wastewater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 255: 114791
- DAVIDSON J, GOOD C, WILLIAMS C, *et al.* Evaluating the chronic effects of nitrate on the health and performance of post-smolt Atlantic salmon *Salmo salar* in freshwater recirculation aquaculture systems. *Aquacultural Engineering*, 2017, 79: 1–8
- EPSZTEIN R, BELIAVSKI M, TARRE S, *et al.* High-rate hydrogenotrophic denitrification in a pressurized reactor. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 286: 578–584
- FAN Z X, WANG J L. Denitrification using polylactic acid as solid carbon source. *Environmental Science*, 2009, 30(8): 2315–2319 [范振兴, 王建龙. 利用聚乳酸作为反硝化固体碳源的研究. *环境科学*, 2009, 30(8): 2315–2319]
- FENG K, LIU H L. Denitrification characteristics of modified PHBV. *Technology of Water Treatment*, 2019, 45(2): 39–42, 47 [冯凯, 刘海龙. 改性聚β-羟基丁酸戊酸酯反硝化特性研究. *水处理技术*, 2019, 45(2): 39–42, 47]
- FENG Y N, WANG L, YIN Z D, *et al.* Comparative investigation on heterotrophic denitrification driven by different biodegradable polymers for nitrate removal in mariculture wastewater: Organic carbon release, denitrification performance, and microbial community. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1141362
- FENG Y T, WU W Z. The comparison of nitrogen removal effect between biodegradable polymers of PCL and PBS in the low organic pollution water. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(S1): 1127–1132 [封羽涛, 吴为中. 可降解聚合物 PCL、PBS 在低有机污染水中固相反硝化脱氮效果比较. *生态环境学报*, 2011, 20(S1): 1127–1132]
- FU G P, ZHAO L, HUANGSHEN L K, *et al.* Isolation and identification of a salt-tolerant aerobic denitrifying bacterial strain and its application to saline wastewater treatment in constructed wetlands. *Bioresource Technology*, 2019, 290: 121725
- FU K M, ZHANG X H, LIU F Q, *et al.* Effect of C/N on denitrification and N₂O release with glucose as the carbon

- source. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(4): 1279–1288 [付昆明, 张晓航, 刘凡奇, 等. 葡萄糖碳源条件下 C/N 对反硝化和 N_2O 释放性能的影响. 环境工程学报, 2021, 15(4): 1279–1288]
- GAO S W, ZHANG K, LI Z F, *et al.* Investigation of the performance of solid phase denitrification under different hydraulic retention times and influent nitrate concentration using banana stalk as a carbon source. Progress in Fishery Sciences, 2023, 44(3): 23–36 [高书伟, 张凯, 李志斐, 等. 不同水力停留时间和进水硝酸盐浓度下香蕉秆为碳源的固相反硝化性能研究. 渔业科学进展, 2023, 44(3): 23–36]
- GE H H, ZHU S C, LIU C X, *et al.* Current situation and research progress of denitrifying filter with natural cellulose substances. Environmental Science and Technology, 2019, 32(6): 71–75 [葛海华, 朱守超, 刘春晓, 等. 基于天然纤维素质滤料的反硝化滤池脱氮现状 & 研究进展. 环境科技, 2019, 32(6): 71–75]
- GONG Y K, REN L F, LI Y B. N_2O accumulation and reduction characteristics during denitrification process of different salinities. Environmental Engineering, 2019, 37(2): 62–66 [巩有奎, 任丽芳, 李永波. 不同盐度反硝化过程 N_2O 积累及还原特性. 环境工程, 2019, 37(2): 62–66]
- GU Y R, ZHANG X. Research progress of aerobic denitrification bacteria in denitrification system of sewage water. Modern Chemical Research, 2024(15): 46–49 [顾玉蓉, 张鑫. 污水脱氮系统中好氧反硝化菌的研究进展. 当代化工研究, 2024(15): 46–49]
- GUO Y D, GUO L, SUN M, *et al.* Effects of hydraulic retention time (HRT) on denitrification using waste activated sludge thermal hydrolysis liquid and acidogenic liquid as carbon sources. Bioresource Technology, 2017, 224: 147–156
- HE Q C. Multiple electron donors-based denitrification processes for nitrate-contaminated water treatment. Doctoral Dissertation of China University of Geosciences (Beijing), 2019 [何巧冲. 基于不同电子供体反硝化技术处理硝酸盐污染水研究. 中国地质大学(北京)博士研究生学位论文, 2019]
- HE T X, YE Q, SUN Q, *et al.* Removal of nitrate in simulated water at low temperature by a novel psychrotrophic and aerobic bacterium, *Pseudomonas taiwanensis* strain J. BioMed Research International, 2018, 2018: 4984087
- HOLMES D E, DANG Y, SMITH J A. Nitrogen cycling during wastewater treatment. Advances in Applied Microbiology, 2019, 106: 113–192
- HU X Y, ZHU J P. Biological denitrification efficiency of three single and mixed carbon sources. Technology of Water Treatment, 2020, 46(1): 57–61 [胡小宇, 朱静平. 3 种单一及其混合碳源的生物反硝化脱氮效能. 水处理技术, 2020, 46(1): 57–61]
- HUANG X Y, RONG H X, GAO Y S, *et al.* Research progress of denitrification technology in recirculating aquaculture system. Technology of Water Treatment, 2019, 45(2): 7–12 [黄秀玉, 荣浩翔, 高月淑, 等. 循环水养殖系统中反硝化技术研究进展. 水处理技术, 2019, 45(2): 7–12]
- JI B, YANG K, ZHU L, *et al.* Aerobic denitrification: A review of important advances of the last 30 years. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2015, 20(4): 643–651
- JIAO D. Study on denitrifying bacteria in circulating aquaculture seawater. Master's Thesis of Dalian Ocean University, 2018 [焦点. 循环养殖海水中反硝化细菌的研究. 大连海洋大学硕士研究生学位论文, 2018]
- JING Z Q, PENG Y Y, HE R, *et al.* New types of carbon source for reducing the cost of denitrification. Hubei Agricultural Sciences, 2015, 54(3): 517–520 [荆肇乾, 彭英艳, 何瑞, 等. 降低脱氮成本的新型碳源与工艺研究概况. 湖北农业科学, 2015, 54(3): 517–520]
- KIM J K, PARK K J, CHO K S, *et al.* Aerobic nitrification–denitrification by heterotrophic *Bacillus* strains. Bioresource Technology, 2005, 96(17): 1897–1906
- KIM M, JEONG S Y, YOON S J, *et al.* Aerobic denitrification of *Pseudomonas putida* AD-21 at different C/N ratios. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2008, 106(5): 498–502
- LEI T T, CHEN L Z, CHEN S X, *et al.* Progress in research on the adaptability of microorganisms to extremely cold environments. Acta Microbiologica Sinica, 2022, 62(6): 2150–2164 [雷婷婷, 陈良仲, 陈绍兴, 等. 微生物对低温极端环境适应性的研究进展. 微生物学报, 2022, 62(6): 2150–2164]
- LEI Y, XIE Q L, LI Y H. The study on the treatment of high salinity wastewater. Environmental Science and Management, 2007, 32(6): 94–98 [雷云, 解庆林, 李艳红. 高盐度废水处理研究进展. 环境科学与管理, 2007, 32(6): 94–98]
- LI H, ZHOU Z M, LIU Q S, *et al.* Research on the denitrification capacity of rice husk as denitrification carbon source in seawater. Industrial Water Treatment, 2016, 36(3): 58–61 [李华, 周子明, 刘青松, 等. 稻壳作为反硝化碳源在海水中的脱氮性能研究. 工业水处理, 2016, 36(3): 58–61]
- LI Q F, TIAN W J, SUN B, *et al.* Research progress and prospects of constructed wetland treatment systems for maricultural wastewater and its nitrogen removal process. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 82–95 [李秋芬, 田文杰, 孙波, 等. 海水养殖尾水人工湿地处理系统及其脱氮过程研究进展和展望. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 82–95]
- LI X C, LI L L, ZHANG G C, *et al.* Denitrification of wastewater with external carbon source of solid wastes in recirculating marine culture system. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(4):

- 275–279 [李秀辰, 李俐俐, 张国琛, 等. 养殖固体废弃物作碳源的海水养殖废水反硝化净化效果. 农业工程学报, 2010, 26(4): 275–279]
- LI Y L, YANG L, ZHANG Z H, *et al.* Nitrogen removal characteristics and bioenhancement effects of aerobic denitrifying bacteria *Burkholderia* sp. ZH8. China Environmental Science, 2024, 44(8): 4282–4291 [李艳丽, 杨垒, 张志昊, 等. 好氧反硝化细菌 *Burkholderia* sp. ZH8 的脱氮特性与生物强化作用. 中国环境科学, 2024, 44(8): 4282–4291]
- LI Y. Study on the effects of temperature on denitrification and carbon releasing in constructed wetland filled with bark. Master's Thesis of Wuhan University of Technology, 2017 [李瑶. 温度对树皮填料人工湿地反硝化和释碳的影响研究. 武汉理工大学硕士研究生学位论文, 2017]
- LI Z, LI L, SUN H Y, *et al.* Ammonia assimilation: A double-edged sword influencing denitrification of *Rhodobacter azotoformans* and for nitrogen removal of aquaculture wastewater. Bioresource Technology, 2022, 345: 126495
- LIU C F, FANG T, XU Y, *et al.* Seawater start-up of EGSB reactor//Proceedings of 2011 academic annual meeting of Chinese society of Environmental Sciences (Volume I), 2011, 853–858 [刘长发, 方涛, 徐岩, 等. EGSB 反应器的海水启动//2011 中国环境科学学会学术年会论文集 (第一卷), 2011, 853–858]
- LIU L J, DONG J, ZHANG L X, *et al.* Denitrification effect of high salinity wastewater. Chemistry & Bioengineering, 2019, 36(7): 50–53 [刘鲁建, 董俊, 张岚欣, 等. 高盐度废水中反硝化脱氮效果的研究. 化学与生物工程, 2019, 36(7): 50–53]
- LIU L L, SONG Z W, QIAN S C, *et al.* Dynamics analysis on effects of different carbon sources on denitrifying bacteria activity. Hebei Fisheries, 2013(1): 6–9 [刘伶俐, 宋志文, 钱生财, 等. 碳源对海水反硝化细菌活性的影响及动力学分析. 河北渔业, 2013(1): 6–9]
- LIU Q, XU G M, LUO G Z. Study on the effect of hydraulic retention time on aquaculture wastewater treatment in solid-phase denitrification system. Fishery Modernization, 2015, 42(6): 6–10 [刘倩, 徐桂梅, 罗国芝. 水力停留时间对养殖污水固相反硝化处理效果的影响研究. 渔业现代化, 2015, 42(6): 6–10]
- LU W B, HU H Y, FENG Y N, *et al.* Investigation of denitrification performance of composite solid carbon source of polycaprolactone and corn cob under different influent nitrate concentrations and temperatures. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 123–135 [卢伟斌, 胡海燕, 冯宇娜, 等. 不同进水硝酸盐浓度和温度下聚己内酯/玉米芯复合固体碳源的反硝化性能探究. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 123–135]
- LUO G Z, HOU Z W, GAO J F, *et al.* Nitrate removal efficiency and microbial community analysis of polycaprolactone-packed bioreactors with PCL as carbon source treating aquaculture water under different hydraulic retention time. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(2): 572–580 [罗国芝, 侯志伟, 高锦芳, 等. 不同水力停留时间条件下 PCL 为碳源去除水产养殖水体硝酸盐的效率及微生物群落分析. 环境工程学报, 2018, 12(2): 572–580]
- LYU X S, WANG X L, JIANG G M, *et al.* Review of nanoscale zero valent iron-based materials and their application in the removal of aqueous nitrate pollution. Materials Reports, 2023, 37(4): 62–71 [吕晓书, 王霞玲, 蒋光明, 等. 纳米零价铁基材料去除水中硝酸盐污染的研究进展. 材料导报, 2023, 37(4): 62–71]
- MENG Q J, YANG F L, LIU L F, *et al.* Effects of COD/N ratio and DO concentration on simultaneous nitrification and denitrification in an airlift internal circulation membrane bioreactor. Journal of Environmental Sciences, 2008, 20(8): 933–939
- PAN Y C, SHE D L, SHI Z Q, *et al.* Salinity and high pH reduce denitrification rates by inhibiting denitrifying gene abundance in a saline-alkali soil. Scientific Reports, 2023, 13(1): 2155
- PATUREAU D, BERNET N, DELGENÈS J P, *et al.* Effect of dissolved oxygen and carbon-nitrogen loads on denitrification by an aerobic consortium. Applied Microbiology and Biotechnology, 2000, 54(4): 535–542
- QIU M Y, SU Y B, ZHOU Y. Isolation and identification of an aerobic denitrifying bacteria and its denitrification performance. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(3): 809–818 [邱梦瑶, 苏应兵, 周燚. 一株好氧反硝化细菌的分离鉴定及其脱氮性能研究. 江西农业大学学报, 2024, 46(3): 809–818]
- ROBERTSON W D, PTACEK C J, BROWN S J. Rates of nitrate and perchlorate removal in a 5-year-old wood particle reactor treating agricultural drainage. Groundwater Monitoring & Remediation, 2009, 29(2): 87–94
- SHEN Y L, WANG B Z. New technologies for biological wastewater treatment. Beijing: China Environmental Science Press, 1999 [沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术: 理论与应用. 北京: 中国环境科学出版社, 1999]
- SHEN Z Q, ZHOU Y X, WANG J L. Denitrification using starch/PCL blends as solid carbon source and biofilm carrier. Journal of Environmental Engineering Technology, 2014, 4(2): 129–134 [沈志强, 周岳溪, 王建龙. 利用淀粉/PCL 共混物作为反硝化固体碳源和生物膜载体的研究. 环境工程技术学报, 2014, 4(2): 129–134]
- SUN W N, TIAN F R, WANG K C, *et al.* Salt tolerance and degradation ability of a halophilic denitrifying *Vibrio* strain. Industrial Water & Wastewater, 2020, 51(3): 24–29 [孙文妮, 田凤蓉, 王开春, 等. 一株嗜盐反硝化弧菌的耐盐能力和降解能力研究. 工业用水与废水, 2020, 51(3): 24–29]

- TAN H X, LAI C S, LUO G Z, *et al.* Using biodegradable polymers as carbon source for nitrate removal in marine re-circulated aquaculture systems. *Marine Sciences*, 2010, 34(6): 22–27 [谭洪新, 赖才胜, 罗国芝, 等. 以可生物降解聚合物为碳源去除海水闭合循环养殖系统中的硝酸盐. *海洋科学*, 2010, 34(6): 22–27]
- TANG J, QU S S, FU J X, *et al.* Efficiency of saline wastewater denitrification by bioaugmentation with composite microbial inoculum. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, 9(6): 2699–2705 [唐婧, 屈姗姗, 傅金祥, 等. 复合菌剂强化处理高盐废水脱氮效果. *环境工程学报*, 2015, 9(6): 2699–2705]
- TANG J, YANG Y F. Enhancement on nitrogen removal from low C/N wastewater by adding solid carbon. *Journal of Hunan City University (Natural Science)*, 2020, 29(3): 72–74 [唐婧, 杨羽菲. 固体碳源投加量强化低 C/N 污水脱氮的研究. *湖南城市学院学报(自然科学版)*, 2020, 29(3): 72–74]
- TANG S Q, GUO T T, LI Y X, *et al.* Study on denitrification of high ammonia nitrogen wastewater treated with synchronous nitrification and denitrification bacteria. *Industrial Microbiology*, 2023, 53(5): 97–103 [唐素琴, 郭婷婷, 李一鑫, 等. 同步硝化反硝化菌处理高氨氮污水脱氮研究. *工业微生物*, 2023, 53(5): 97–103]
- VAN DUC L, SONG B, ITO H, *et al.* High growth potential and nitrogen removal performance of marine anammox bacteria in shrimp-aquaculture sediment. *Chemosphere*, 2018, 196: 69–77
- VON AHNEN M, AALTO S L, SUURNÄKKI S, *et al.* Salinity affects nitrate removal and microbial composition of denitrifying woodchip bioreactors treating recirculating aquaculture system effluents. *Aquaculture*, 2019, 504: 182–189
- WANG C X, YU G L, ZHANG D X, *et al.* Study on influence factors of solid carbon source combined with immobilized denitrifying bacteria for nitrogen removal. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(10): 62–65, 70 [王春喜, 余关龙, 张登祥, 等. 固体碳源联合反硝化菌脱氮的影响因素研究. *水处理技术*, 2018, 44(10): 62–65, 70]
- WANG L, LIU J, LI Y F, *et al.* Elemental sulfur-driven autotrophic denitrification process for effective removal of nitrate in mariculture wastewater: Performance, kinetics and microbial community. *Chemosphere*, 2023, 337: 139354
- WANG L, LIU J, LI Y F, *et al.* Performance of simultaneous nitrification and denitrification reactor based on solid-phase carbon source on nitrogen removal from mariculture wastewater. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(6): 2001–2009 [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. *环境工程学报*, 2022, 16(6): 2001–2009]
- WANG S J, WU Y H. Effect of exogenous organic carbon on N_2O release during simultaneous nitrification and denitrification. *New Technology & New Products of China*, 2022(20): 59–62 [王书杰, 吴彦宏. 外源有机碳对同步硝化反硝化过程 N_2O 释放的影响. *中国新技术新产品*, 2022(20): 59–62]
- WANG X J, HU Q G. Analysis on coordination degree between marine aquaculture and marine ecological environment in China. *Chinese Rural Economy*, 2013(11): 86–96 [王秀娟, 胡求光. 中国海水养殖与海洋生态环境协调度分析. *中国农村经济*, 2013(11): 86–96]
- WANG Z L, ZHU J X, QU K M, *et al.* The impact of hydraulic retention time on an anaerobic reactor's nitrogen removal effect. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(3): 42–49 [王震林, 朱建新, 曲克明, 等. 水力停留时间对厌氧反应器脱氮效果的影响. *渔业科学进展*, 2019, 40(3): 42–49]
- WEI X H, BI X J, YIN Z X, *et al.* Effects of temperature and dissolved oxygen on nitrification and denitrification in MBBR system. *China Environmental Science*, 2019, 39(2): 612–618 [魏小涵, 毕学军, 尹志轩, 等. 温度和 DO 对 MBBR 系统硝化和反硝化的影响. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 612–618]
- WEN X, GONG B Z, ZHOU J, *et al.* Efficient simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification (SNAD) system equipped with a real-time dissolved oxygen (DO) intelligent control system and microbial community shifts of different substrate concentrations. *Water Research*, 2017, 119: 201–211
- WENG N H, ZHANG L, LU J, *et al.* Screening and identification of a salt-tolerant denitrifying bacterium and its application in the treatment of high-salinity nitrogen-containing wastewater. *Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition)*, 2023, 32(3): 31–37 [翁南海, 张磊, 卢静, 等. 一株耐盐反硝化细菌的筛选鉴定及其在高盐废水脱氮中的应用. *江苏海洋大学学报(自然科学版)*, 2023, 32(3): 31–37]
- WILSON L P, BOUWER E J. Biodegradation of aromatic compounds under mixed oxygen/denitrifying conditions: A review. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, 1997, 18(2): 116–130
- XIONG Z K, ZHENG H L, SHANG J F, *et al.* State-of-the art review of adding extra carbon sources to denitrification of wastewater treatment. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(2): 168–181 [熊子康, 郑怀礼, 尚娟芳, 等. 污水反硝化脱氮工艺中外加碳源研究进展. *土木与环境工程学报*, 2021, 43(2): 168–181]
- YAN L L, LIU S, LIU Q P, *et al.* Improved performance of simultaneous nitrification and denitrification via nitrite in an oxygen-limited SBR by alternating the DO. *Bioresource Technology*, 2019, 275: 153–162
- YE S S, JIANG Z L, LIAN S J, *et al.* Research on biological removal of NO_3^- -N with aerobic denitrifying

- Pseudomonas stutzeri* immobilized in calcium alginate and activated carbon. *Journal of Wenzhou University (Natural Sciences)*, 2014, 35(4): 55–61 [叶斯斯, 蒋张亮, 炼石金, 等. 海藻酸钙-活性炭固定化好氧反硝化施氏假单胞菌生物脱 NO_3^- -N 的研究. *温州大学学报(自然科学版)*, 2014, 35(4): 55–61]
- YIN T X, CAO J S, ZHANG T, *et al.* Research progress on nitrite accumulation during denitrification with different carbon sources. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(11): 2919–2925 [殷同昕, 操家顺, 张腾, 等. 不同碳源下反硝化亚硝酸盐积累情况研究进展. *应用化工*, 2020, 49(11): 2919–2925]
- YUAN S C, WANG Q, LV B, *et al.* Study on the nitrogen removal efficacy of denitrification biofilter in the treatment of tailwater from township sewage plant. *Technology of Water Treatment*, 2024, 50(11): 107–112 [袁绍春, 王钦, 吕波, 等. 反硝化生物滤池处理乡镇污水厂尾水的脱氮效能研究. *水处理技术*, 2024, 50(11): 107–112]
- ZHANG H H, WU X H, WANG L, *et al.* Effect of carbon source on the operation of denitrification biological filters with different filter materials. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(S1): 224–229 [张浩浩, 吴兴海, 王林, 等. 碳源类型对不同滤料反硝化滤池运行的影响. *环境科学与技术*, 2017, 40(S1): 224–229]
- ZHANG S N, GUO H Y, YANG X R, *et al.* Cultivation and characteristics of DGAOs with nitrite as electron acceptor. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2021, 42(3): 55–59 [张胜男, 郭海燕, 杨雪瑞, 等. 以亚硝酸盐为电子受体的反硝化聚糖菌培养及特性分析. *大连交通大学学报*, 2021, 42(3): 55–59]
- ZHANG S N, WANG X Y, XIA D P. Effects of initial pH on denitrification of microorganism. *Environmental Engineering*, 2015, 33(S1): 67–71 [张淑楠, 王心义, 夏太平. 初始 pH 值对微生物反硝化的影响. *环境工程*, 2015, 33(S1): 67–71]
- ZHANG Z L. Selection of external carbon sources for denitrification. Master's Thesis of Harbin Institute of Technology, 2010 [张仲玲. 反硝化脱氮外加碳源的选择. 哈尔滨工业大学硕士研究生学位论文, 2010]
- ZHANG Z Z, ZHANG Y, CHEN Y G. Recent advances in partial denitrification in biological nitrogen removal: From enrichment to application. *Bioresource Technology*, 2020, 298: 122444
- ZHAO H Y. Study on domestic wastewater treatment by simultaneous nitrification-denitrification in SBR reactors. Master's Thesis of Changan University, 2009 [赵海燕. 序批式反应器同步硝化反硝化处理生活污水试验研究. 长安大学硕士研究生学位论文, 2009]
- ZHAO J J, GU W W, WANG Y, *et al.* A comparative study on the effect of increasing salt concentration on denitrification efficiency and carbon emissions of different denitrification systems. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2024, 44(8): 181–189 [赵娟娟, 谷文文, 王韵, 等. 盐度增加对不同反硝化系统脱氮效能的影响及碳排放对比研究. *环境科学学报*, 2024, 44(8): 181–189]
- ZHAO J M. Woodchip-based solid-phase denitrification bioreactor for nitrate-contaminated water treatment. Master's Thesis of China University of Geosciences (Beijing), 2018 [赵佳敏. 以木屑为碳源的固相反硝化反应器处理水中硝酸盐的研究. 中国地质大学(北京)硕士研究生学位论文, 2018]
- ZHAO Y X, ZHANG B G, FENG C P, *et al.* Behavior of autotrophic denitrification and heterotrophic denitrification in an intensified biofilm-electrode reactor for nitrate-contaminated drinking water treatment. *Bioresource Technology*, 2012, 107: 159–165
- ZHENG B B, WU Y W, LI Y H, *et al.* Effect of different C/N ratio on nitrogen removal of mariculture wastewater. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(8): 1848–1856 [郑冰冰, 吴怡伟, 李云辉, 等. 不同碳氮比对海水养殖废水脱氮效果的影响. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1848–1856]
- ZHONG H, CHENG Y, ZHANG H W, *et al.* Performance of corn cob-based solid phase denitrification system: A column study. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(12): 133–140 [钟华, 程莹, 张洪维, 等. 基于玉米芯的固相反硝化柱实验研究. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(12): 133–140]
- ZHOU D, ZHOU B. Calculation and application of minimum carbon and nitrogen ratio for denitrification. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(2): 46–48 [周丹, 周雹. 反硝化最小碳氮比值的推求和应用. *中国给水排水*, 2012, 28(2): 46–48]
- ZHOU P, LIU Y, MU X T, *et al.* Research progress on heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria in the denitrification of mariculture wastewater. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(6): 148–157 [周鹏, 刘鹰, 慕欣廷, 等. 异养硝化-好氧反硝化细菌在海水养殖废水脱氮中的研究进展. *水生态学杂志*, 2023, 44(6): 148–157]
- ZHU Q R, CAO J S, ZHANG T, *et al.* Research progress of traditional and alternative carbon sources for denitrification in wastewater treatment plants. *Applied Chemical Industry*, 2021, 50(6): 1600–1606 [朱启荣, 操家顺, 张腾, 等. 污水厂反硝化传统及可供替代碳源研究进展. *应用化工*, 2021, 50(6): 1600–1606]
- ZHU S M, DENG Y L, RUAN Y J, *et al.* Biological denitrification using poly(butylene succinate) as carbon source and biofilm carrier for recirculating aquaculture system effluent treatment. *Bioresource Technology*, 2015, 192: 603–610

Progress in Research on the Application of Denitrification Technology in Mariculture Tailwater Treatment

CUI Hongwu^①, LU Weibin^{1,2}, FENG Yu'na^{1,5}, CUI Zhengguo¹,
WANG Lu³, LI Hao¹, QU Keming¹, TENG Yu¹, LI Xiao⁴

(1. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods,
Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

3. Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China;

4. Shandong Rizhao Ecological Environment Monitoring Center, Rizhao, 276826, China;

5. Tongliao City Aquaculture Technology Extension Station, Tongliao 028000, China)

Abstract With the ongoing rapid development of China's mariculture industry, there has been a corresponding surge in the discharge of marine aquaculture tailwater, and the residual bait, feces, and other residues contained in this water have contributed to serious increases in the levels of nitrogen pollution. The wide geographical distribution of maricultural operations and the high concentrations of ions in tailwaters contribute to difficulties in the effective treatment and purification of this waste water, thereby seriously threatening the quality of the marine environment and the sustainable development of marine fishery resources. In this regard, microbial heterotrophic denitrification technology, which has the advantages of excellent nitrogen removal efficacy and less likelihood of contributing to secondary pollution, has increasingly become a focus of scholars engaged in research on mariculture tailwater purification. In this paper, we outline the mechanisms and advantages of heterotrophic denitrification and denitrification technology, summarize and assess the progress of research and the application of heterotrophic denitrification and denitrification technology in current mariculture tailwater treatment, and describe and evaluate the factors influencing the efficiency of denitrification, including the type of carbon source, hydraulic retention time, temperature, dissolved oxygen, and pH. On this basis of this information, we summarize the difficulties in applying denitrification technology to the commissioning of mariculture tailwater, assess potential solutions to the existing problems, and consider future research directions, with a view toward providing a theoretical basis and technical support for the application of denitrification technology in the efficient treatment of mariculture tailwater.

Key words Marine aquaculture; Tailwater treatment; Denitrification; Nitrogen removal technology

① Corresponding author: CUI Hongwu, Email: cuihw@ysfri.ac.cn