

## 异养硝化-好氧反硝化的研究进展

杨婷 杨娅 刘玉香\*

(太原理工大学环境科学与工程学院 山西 太原 030024)

**摘要:** 近年来, 异养硝化-好氧反硝化菌的发现打破了传统硝化反硝化理论, 其在去除氮素和有机污染物的同时, 能够实现同时硝化反硝化(SND), 因此受到广泛关注。文章介绍了异养硝化-好氧反硝化菌的影响因素和一些已筛选菌的最佳脱氮效果, 及其与传统硝化反硝化菌作用酶系的不同, 列出了一些已筛选菌的氮代谢途径, 并对中间产物  $\text{NO}_2^-$ -N 积累和复合菌方面的研究进展进行了综述, 最后提出了异养硝化-好氧反硝化在生物强化应用中的研究现状和面临的挑战。

**关键词:** 异养硝化-好氧反硝化, 代谢途径,  $\text{NO}_2^-$ -N, 复合菌, 生物强化

### Research progress and challenges of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification

YANG Ting YANG Ya LIU Yu-Xiang\*

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

**Abstract:** In recent years, the discovery of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria has broken the traditional theory. It is not only able to simultaneously remove nitrogen and organics, but also some bacteria can achieve simultaneous nitrification and denitrification (SND), so it has gained widespread attention. Our review focuses on the influence factors of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria, the optimal nitrogen removal effect of some bacteria, the difference between traditional nitrification-denitrification bacteria and heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria and the nitrogen metabolic pathways of some bacteria. In addition, it shows the research progress in the aspects of  $\text{NO}_2^-$ -N control and compound bacteria. Finally, the present situation of its application in bioaugmentation and challenges facing it are brought forward.

**Keywords:** Heterotrophic nitrification-aerobic denitrification, Metabolic pathway,  $\text{NO}_2^-$ -N, Compound bacteria, Bioaugmentation

**Foundation item:** Research Project Supported by Shanxi Scholarship Council of China (No. 2016-033); National Key R&D Program of China (No. 2016YFB0600502); Key Research Plan (Project) in Social Development of Shanxi Province (No. 201603D321010); Key Research Plan (International Cooperation) Projects of Shanxi Province (No. 201603D421040)

\*Corresponding author: Tel: 86-351-6534123; E-mail: yuxiangliu2002@126.com

Received: November 24, 2016; Accepted: January 20, 2017; Published online (www.cnki.net): January 20, 2017

基金项目: 山西省回国留学人员科研资助项目(No. 2016-033); 国家重点研发计划项目(No. 2016YFB0600502); 山西省重点研发计划(一般项目)社发领域(No. 201603D321010); 山西省重点研发计划(国际合作)项目(No. 201603D421040)

\*通讯作者: Tel: 86-351-6534123; E-mail: yuxiangliu2002@126.com

收稿日期: 2016-11-24; 接受日期: 2017-01-20; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2017-01-20

近年来,氮素的超标排放造成了水体的富营养化。因此,生物脱氮已日益受到国内外的重视<sup>[1]</sup>。传统的生物脱氮包括硝化与反硝化。其中硝化反应是指在好氧条件下由自养菌将  $\text{NH}_4^+$  经  $\text{NO}_2^-$  氧化为  $\text{NO}_3^-$ 。而反硝化是把  $\text{NO}_3^-$  或  $\text{NO}_2^-$  转化为  $\text{N}_2\text{O}$  或  $\text{N}_2$  的还原过程,主要由兼性异养的反硝化菌在缺氧环境条件下来完成。

异养硝化-好氧反硝化的发现突破了传统的脱氮理论,硝化和反硝化可以在异养和好氧条件下同时发生。与传统脱氮工艺相比,异养硝化-好氧反硝化具有如下优点:(1) 实现了在同一反应器中完成硝化和反硝化作用,很大程度上节省了占地面积和投资成本<sup>[2]</sup>;(2) 异养硝化-好氧反硝化菌的多样性使其对环境的耐受能力较强,从而扩大了其应用范围;(3) 异养硝化过程对有机碳的需求克服了传统硝化池不耐有机负荷的缺陷<sup>[3]</sup>。

随着脱氮工艺的不断完善,许多学者已经开始对异养硝化-好氧反硝化细菌进行更深层次的研究,通过两株或几株菌的复合来强化其降解能力,并且通过小试或中试研究异养硝化-好氧反硝化菌的实际应用。本文从异养硝化-好氧反硝化菌的脱氮特性、代谢途径及中间产物  $\text{NO}_2^-$ -N 控制、复合菌研究方面进行综述,并阐述了目前生物强化应用方面的研究现状与面临的挑战。

## 1 异养硝化-好氧反硝化菌的影响因素及脱氮效果

自 20 世纪 80 年代 Robertson 等<sup>[4]</sup>首次发现了好氧反硝化泛养琉球菌 *Paracoccus pantotrophus* 后,越来越多的异养硝化-好氧反硝化菌被分离出来,其中以细菌居多,例如 *Bacillus subtilis*、*Pseudomonas stutzeri*、*Klebsiella pneumoniae*、*Alcaligenes faecalis*、*Acinetobacter*、*Paracoccus versutus* 等。此外,异养硝化真菌也被陆续报道。Liu 等<sup>[5]</sup>筛选到了一株可以形成菌丝球的异养硝化-好氧反硝化的青霉菌。吕永康等<sup>[6]</sup>从焦化废水曝气池的活性污泥中分离纯化出一株高效转化氨氮的异养硝化真菌 *Penicillium* sp.

L1。李伟斯<sup>[7]</sup>从河流底泥中筛选出 5 株均能在好氧条件下生长并具有好氧反硝化能力的真菌。

影响异养硝化-好氧反硝化脱氮特性的因素很多,其中研究较多的有碳源、C/N 比、初始氨氮浓度和盐度等。

### 1.1 碳源

碳元素是微生物生长的重要营养物质,细胞内各种有机物质以碳为骨架。碳源对菌株异养硝化-好氧反硝化脱氮特性影响很大。目前筛选出的细菌利用的碳源主要有葡萄糖、蔗糖、柠檬酸钠、琥珀酸钠、醋酸钠和乙酸钠等。Li 等<sup>[8]</sup>分离的 *Pseudomonas stutzeri* YG-24 以柠檬酸钠为脱氮最有效的碳源,在 24 h 时对  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 的去除率分别为 90.73%、66.73%和 94.17%;梁贤等<sup>[9]</sup>分离的 *Pseudomonas aeruginosa* YL 以乙酸钠、琥珀酸钠和柠檬酸钠为碳源时,24 h 后氨氮去除率均达到 90.0%以上,TOC 去除率均达到 80%以上,其中利用琥珀酸钠时氨氮去除率为 98.9%,TOC 去除率为 90.8%,而碳源为葡萄糖和蔗糖时,氨氮去除率仅为 26.3%和 16.8%。Liu 等<sup>[10]</sup>分离的 *Acinetobacter* sp. Y1 在以丙酮酸钠为碳源时氨氮去除率接近 100%,而以碳酸钠为碳源时则不生长;武文丽等<sup>[11]</sup>从炼油废水活性污泥中筛选出的鲍曼不动杆菌 WY6 以丁二酸钠为碳源时降解性能最好。

此外,有些菌株可以利用难降解的物质为碳源。王国英等<sup>[12]</sup>发现了异养硝化-好氧反硝化菌 *Diaphorobacter* sp. PDB3 在最佳条件下苯酚的降解率达 94.9%,TOC 去除率达 90.8%,同时 40 mg/L 氨氮被完全去除;Bai 等<sup>[13]</sup>从焦化废水处理厂活性污泥中分离的 *Shinella zoogloeoides* BC026 可以以吡啶为唯一碳源和氮源,同时达到降解吡啶的目的。

因为硝化反硝化过程是氧化还原反应,碳源为微生物生长提供所需的能量和电子,不同类型的碳源下细菌生长速率不同,影响硝酸盐的还原和中间产物的积累程度,因此对反硝化速率影响很大<sup>[14]</sup>。

### 1.2 C/N 比

C/N 比对菌株的生长和降解特性有显著影响。

由于菌株的多样性及代谢机理的不同, 异养硝化-好氧反硝化菌对 C/N 比的适应范围较广, 大多数异养硝化-好氧反硝化菌最佳 C/N 在 6–20 范围内。*Bacillus subtilis* A1<sup>[15]</sup>在 C/N 为 6 和 12 时  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 COD 的去除率均无明显差别; Kundu 等<sup>[16]</sup>分离的 *Chryseobacterium* sp. R31 在 C/N 为 10 时脱氮率最高; Yang 等<sup>[17]</sup>分离的 *Acinetobacter junii* YB 在 C/N 为 15 时降解效果最佳。大多数菌的脱氮最佳 C/N 比都较高, 而 C/N 过高会使最终 COD 浓度过高。这也是异养硝化需要面对的一个问题。

### 1.3 初始氨氮浓度

由于各种废水中所含氨氮浓度有所不同, 因此有必要研究异养硝化-好氧反硝化菌对不同初始氨氮浓度条件下的降解性能, 从而为其能够应用于实际废水处理提供理论依据。Jin 等<sup>[18]</sup>发现 *Pseudomonas* sp. ADN-42 在初始氨氮浓度 96.2、187.8、284.8、389.9 和 489.9 mg/L 时去除效率分别为 99.5%、99.8%、96.2%、85.5%和 75.8%; 黄菲菲<sup>[19]</sup>研究得到 HY2 在进水氨氮浓度为 50 mg/L 时, 降解效果最佳, 降解率达 74%, 随着进水氨氮浓度的提高, 降解率逐渐下降; Liu 等<sup>[20]</sup>筛选得到的 *Alcaligenes faecalis* C16 在初始氨氮浓度为 100 mg/L 时去除率为 94.1%, 而在 800 mg/L 时去除率只有 52.8%。有些研究者还筛选分离出了能够转化高氨氮的菌株。信欣等<sup>[21]</sup>得到耐高氨氮的 *Acinetobacter* sp. TN-14, 能够在氨氮高达 1 200 mg/L 的环境下生长; Shoda 等<sup>[22]</sup>将 *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 用来去除消化污泥中高浓度氨氮(约 1 000 mg/L  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), 在 24 h 内氨氮去除率达到 90%–100%, 且平均氨氮去除率为 2.9 kg-N/( $\text{m}^3\cdot\text{d}$ ), 高于传统的硝化反硝化过程 200 倍。Yun 等<sup>[23]</sup>认为, 不同种属细菌对氨氮浓度的耐受性大不相同, 传统高氨氮废水处理中, 在高自由氨浓度下将抑制亚硝酸盐氧化菌的活性而使亚硝酸盐积累。

### 1.4 盐度

盐度是影响硝化作用的重要参数, 即使是从海洋环境中分离出的菌株也受到高盐的抑制, 而一些

嗜盐菌的发现有助于扩大异养硝化-好氧反硝化菌的应用范围。

Chen 等<sup>[24]</sup>研究得出 *Aeromonas* sp. HN-02 在盐度低于 20 g/L 时能够高效去除氨氮, 因此可以定义为耐盐菌; Duan 等<sup>[25]</sup>发现菌株 *Vibrio diabolus* SF16 在 1%–5% 的盐度下  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率稳定在一个比较高的水平, 然而在无 NaCl 存在下 SF16 很难去除  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ; Zhang 等<sup>[26]</sup>筛选出的 *Bacillus methylotrophicus* L7 在不含 NaCl 培养基中有最佳氨氮去除率 83.40%, 在 30 g/L 和 40 g/L NaCl 条件下氨氮去除率分别为 58.70%和 39.50%。

一些异养硝化-好氧反硝化菌的脱氮特性见表 1。

## 2 氮的代谢途径及 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的控制

由于异养硝化-好氧反硝化菌的种类较多, 且影响菌株代谢途径的因素复杂多变, 因此对其机理和氮代谢路径的研究较少, 代谢途径尚不明确。不同的菌株表达的酶系不同, 代谢途径也有所不同。

### 2.1 异养硝化-好氧反硝化作用酶系及氮的代谢途径

硝化作用包括两个步骤, 即氨氧化为亚硝酸和亚硝酸氧化为硝酸, 分别由氨氧化菌和亚硝酸氧化菌完成, 其中氨氧化菌生化反应过程中涉及到的酶有氨单加氧酶(AMO)和羟胺氧化酶(HAO), 亚硝酸氧化菌生化过程中涉及到的酶有亚硝酸氧化酶(NOR)<sup>[44]</sup>。反硝化过程中涉及到四种酶: 硝酸盐还原酶(NAR)、亚硝酸盐还原酶(NIR)、NO 还原酶(NOR)和  $\text{N}_2\text{O}$  还原酶(NOS)<sup>[45]</sup>。而在异养硝化-好氧反硝化作用中可能涉及到的酶有氨单加氧酶(AMO)、羟胺氧化酶(HAO)、硝酸盐还原酶(NAR)、亚硝酸盐还原酶(NIR)、NO 还原酶(NOR)和  $\text{N}_2\text{O}$  还原酶(NOS)。

AMO 催化氨氮氧化为羟胺, HAO 将羟胺转化为  $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 。目前已经有学者在 AMO、HAO 的分离纯化以及相关基因序列分析与外源表达方面进行了比较深入的探讨。从已有的结果来看, 因菌株的不同, 异养硝化细菌的 AMO 和 HAO 存在很大

的差别。Zhang 等<sup>[46]</sup>对 *Pseudomonas fluorescens* wsw-1001 进行了酶活试验,发现 AMO 和 HAO 的活性分别为 0.28 U 和 0.24 U。Yang 等<sup>[17]</sup>对 *Acinetobacter junii* YB 进行了硝化和反硝化酶基因

的 PCR 扩增实验,结果显示 HAO 的基因扩增 992 bp,表明了 HAO 的存在。Zhao 等<sup>[30]</sup>测定了 *Alcaligenes faecalis* NR 的酶活,未发现 NAR 和 NIR,而 HAO 的活性为 0.063 U。

表 1 一些异养硝化-好氧反硝化菌的脱氮特性(最佳参数)

Table 1 Nitrogen removal characteristics of some heterotrophic nitrification-aerobic denitrifiers (optimal parameters)

种属 Genus	菌株 Strains	来源 Source	碳源 Carbon source	碳氮比 C/N	氨氮去除率 Ammonia nitrogen removal efficiency (%)	参考文献 Reference
假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i>	YZN-001	猪粪废水	琥珀酸钠	10	95.00	[27]
	YG-24	富营养化太湖沉积物	柠檬酸钠	8	88.13	[8]
	ZF31	饮用水水库	琥珀酸钠	8.23	/	[28]
	XS76	垃圾渗滤液活性污泥	丁二酸钠	15	99.20	[29]
	ADN-42	繁茂膜海绵	/	12	75.80	[18]
粪产碱杆菌 <i>Alcaligenes faecalis</i>	NR	膜生物反应器	葡萄糖	/	100	[30]
弧菌属 <i>Vibrio</i>	SF16	海洋沉积物	醋酸钠	10	91.82	[25]
沙雷氏菌属 <i>Serratia</i>	N-2	养殖池塘	蔗糖	/	90.79	[31]
芽孢杆菌 <i>Bacillus</i>	A1	/	葡萄糖、醋酸盐、柠檬酸	6	58.40	[15]
	L7	污水样品	琥珀酸钠	20	74.00	[26]
	CL1、CL9	活性污泥	柠檬酸钠	20	99.00	[32]
	WYLLW-X06	SBR 反应器	琥珀酸钠	/	97.18	[33]
	I6	污水处理厂	葡萄糖	/	85.00	[34]
不动杆菌 <i>Acinetobacter</i>	Y16	贫营养生态位	醋酸钠	2	66.00	[35]
	YB	活性污泥	琥珀酸钠	15	99.31	[17]
	YF14	养殖池塘底泥	琥珀酸钠	8	92.00	[36]
	A14	微污染水源水库沉积物	乙酸钠	12	95.25	[37]
肺炎克雷伯菌 <i>Klebsiella pneumoniae</i>	CF-S9	生活污水	葡萄糖	/	85.00	[38]
副球菌属 <i>Paracoccus versutus</i>	LYM	海底污泥	乳酸钠	/	100	[39]
根癌农杆菌 <i>Agrobacterium</i>	LAD9	垃圾渗液处理系统	琥珀酸盐、乙酸盐	8.28	100	[40]
	WS-2	垃圾填埋场土壤	丁二酸钠	/	94.70	[41]
红球菌属 <i>Rhodococcus</i>	CPZ24	养猪场	丁二酸钠	/	100	[42]
气单胞菌属 <i>Aeromonas</i>	HN-02	活性污泥	琥珀酸	/	80.77	[24]
金黄杆菌 <i>Chryseobacterium</i>	R31	屠宰废水	葡萄糖、琥珀酸	10	95.87	[16]
贪铜菌属 <i>Cupriavidus</i>	S1	焦化废水	丙酮酸钠	14	99.68	[43]

NAR 一般包括两种类型,即膜质硝酸盐还原酶(Membrane-bound nitrate reductase, NAR)和周质硝酸盐还原酶(Periplasmic nitrate reductase, NAP)。菌体的好氧和厌氧条件直接影响这两种酶的活性。在缺氧条件下,NAR 表达占主导地位;在好氧条件下,NAP 表达占主导地位;在厌氧条件下,NAP 也会有所表达。NIR 是反硝化途径中的关键酶,一种是含 c 和 d1 型血红素的二聚体,称为 Cyt cd1 型亚硝酸盐还原酶;另一种是可溶性含铜酶,称为 Cu 型亚硝酸盐还原酶。PCR 扩增 *Klebsiella pneumoniae* CF-S9 的 NAP 和 NIR,证明了该酶的存在且作用于好氧反硝化过程中<sup>[38]</sup>。Zhao 等<sup>[47]</sup>对 *Acinetobacter calcoaceticus* HNR 的酶活进行了试验,发现其中并不存在 NAR 和 NIR,而 HAO 的活性为 0.051 U。

NOR 可以将 NO 转化为 N<sub>2</sub>O,对 NO 具有很高的亲和力,将有限的电子集中于 NO 还原,使 NO 浓度维持在极低的水平,避免了 NO 对生物体的毒性影响。N<sub>2</sub>O 至 N<sub>2</sub> 的还原反应是由 NOS 催化完成的,其位于细胞膜外周质,不含血红素基因。Miyahara 等<sup>[48]</sup>在 *Pseudomonas stutzeri* 中检测到亚硝酸盐还原酶(NIR)和 N<sub>2</sub>O 还原酶(NOS),从而说明该菌可以进行反硝化。

目前,系统研究异养硝化-好氧反硝化过程中氮代谢路径的研究较少,通常都是通过酶活性试验和代谢产物的测定来推测代谢路径。Huang 等<sup>[35]</sup>通过酶活试验,提出了 *Acinetobacter* sp. Y16 的氮代谢路径(图 1),这与 Zhang 等<sup>[26]</sup>对 *Bacillus methylotrophicus* L7 的推测一致。Taylor 等<sup>[49]</sup>对

*Providencia rettgeri* YL 的脱氮途径推测如图 2 所示。Li 等<sup>[8]</sup>通过酶活试验和气体产物的分析,得出 *Pseudomonas stutzeri* YG-24 可能的脱氮途径为 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (→NH<sub>2</sub>OH)→NO<sub>2</sub><sup>-</sup>→NO (N<sub>2</sub>O→N<sub>2</sub>)。由于异养硝化-好氧反硝化的机理较复杂,不同条件下的酶学特征有很大差异,因此增加了研究的难度,对于异养硝化-好氧反硝化的酶学特征和脱氮路径有待进一步研究和考证。

## 2.2 中间产物 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的控制

亚硝酸盐是一类无机化合物的总称。主要指亚硝酸钠,亚硝酸钠为白色至淡黄色粉末或颗粒状,味微咸,易溶于水。硝酸盐和亚硝酸盐广泛存在于人类环境中,是自然界中最普遍的含氮化合物。然而,亚硝酸盐的积累不仅对水生生物产生毒性,而且抑制反硝化细菌的活性。因此,研究中间产物 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的控制和亚硝酸盐作为反硝化作用的底物不仅在理论研究方面很重要,而且还能更好地理解异养硝化-好氧反硝化的机理并控制亚硝酸盐污染。研究表明,亚硝酸盐的积累与菌株的脱氮途径密切相关,而好氧反硝化过程中的关键酶硝酸盐还原酶(NAR)和亚硝酸盐还原酶(NIR)的活性是决定其代谢途径的主要因素。

一些异养硝化-好氧反硝化菌脱氮过程中不积累 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N。Zhang 等<sup>[27]</sup>通过检测 *Pseudomonas stutzeri* YZN-001 异养硝化-好氧反硝化能力得到,在好氧条件下菌株能够将 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 转化为 N<sub>2</sub>,被去除的 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 主要分布于反硝化产物和同化产物,没有硝酸盐和亚硝酸盐的积累;王景峰等<sup>[50]</sup>分离得

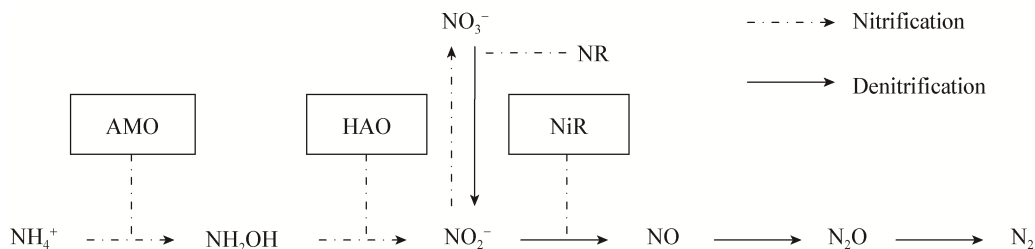


图 1 *Acinetobacter* sp. Y16 的氮代谢路径

Figure 1 Proposed nitrogen metabolic pathway of *Acinetobacter* sp. Y16

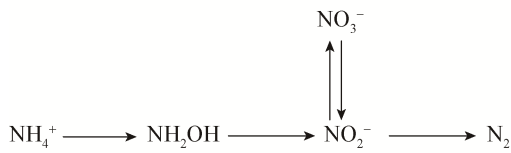


图2 *Providencia rettgeri* YL 的脱氮途径  
Figure 2 Proposed pathway for nitrogen removal by *Providencia rettgeri* YL

到的 YY-5 菌好氧条件下脱氮过程中总氮的去除与氮气生成量之间基本保持平衡,并且在脱氮过程中没有检测到  $\text{N}_2\text{O}$  气体生成,液相中也没有出现硝酸盐和亚硝酸盐的积累。

有些菌株在异养硝化-好氧反硝化过程中有  $\text{NO}_2^-$ -N 的积累。王瑶等<sup>[51]</sup>研究发现 *Alcaligenes faecalis* C16 在脱氮过程中有较高浓度的亚硝酸盐积累,但是培养基中添加铜离子后亚硝酸盐基本全部代谢。Zhang 等<sup>[39]</sup>发现 *Paracoccus versutus* LYM 在同步硝化反硝化培养基中添加  $\text{Fe}^{2+}$  时,有利于细菌增长并能促进  $\text{NO}_2^-$ -N 的进一步转化。此外,当  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 存在时,可以通过添加碳源(提高碳氮比)使剩余的  $\text{NO}_2^-$ -N 完全还原,而  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_3^-$ -N 转换率也达到了 97.09%和 96.34%。当  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 同时存在时,碳源充足情况下菌株 LYM 也可以彻底去除氮的化合物;Ma 等<sup>[52]</sup>研究得到通过对 *Pseudomonas stutzeri* T13 固定化可以促进积累的亚硝酸盐还原;刘杰凤等<sup>[31]</sup>以硫酸铵、亚硝酸钠为唯一氮源,从养殖池塘中筛选出一株高效去除亚硝态氮的异养硝化细菌 N-2,并且以亚硝酸钠为氮源时,对亚硝态氮的去除率可达 98.52%;王成林等<sup>[53]</sup>从复合垂直流人工湿地表层基质中分离出一株硝化活性较强的异养硝化细菌 H-1,通过 4 因素 3 水平的正交试验,得出当温度为 30 °C, pH 为 7.5,接种量为  $10^7$  CFU,溶氧 2.25 mg/L 时,该菌株亚硝化反应效果最佳,影响亚硝化反应效果的因素顺序为:溶氧>温度>pH>接种量;Yang 等<sup>[17]</sup>通过  $L_{16}(4)^4$  正交试验来优化亚硝酸盐去除的条件,实验结果表明,影响亚硝酸盐去除的四个因素顺序是转速>温度>C/N>初始 pH 值,这与王成林等<sup>[53]</sup>

的研究结果一致。

综上所述,对于中间产物  $\text{NO}_2^-$ -N 的减少和以亚硝酸盐作为反硝化作用的底物的研究只是针对个别菌株,温度和溶解氧是否是影响  $\text{NO}_2^-$ -N 减少和脱氮特性的主要因素,得出的规律是否具有普遍性,是否对同一属的菌株都能适用还有待进一步研究和归纳,进而可以针对不同菌属情况调节筛选菌种达到废水处理过程中脱氮和  $\text{NO}_2^-$ -N 控制最优化。

### 3 复合菌的研究现状

单一微生物对有机化合物的生物降解往往会产生有毒的终端产物,抑制微生物生长。多种微生物构成生物链,组成稳定的微生物群落,来消除有毒代谢产物对降解菌的影响。一种微生物的有毒代谢产物往往是另一种微生物的生长基质。工业应用也主要是利用复合的优势菌群,无论是从处理时间还是稳定性上来说复合菌的处理效果都优于单一菌。

目前有许多学者对复合菌进行了研究,但大多都是通过相似功能的两株或几株菌复合来强化其脱氮能力。唐婧等<sup>[54]</sup>从反应器的成熟耐盐活性污泥中筛选分离得到耐盐反硝化菌(*Halomonas* sp.)、耐盐硝化菌和普通耐盐菌(*Halomonas* sp.) 35 株,优选其中耐盐反硝化菌株 F3 和 F5、耐盐硝化菌 X23 和普通耐盐菌 N39 进行复配,获得复配比例为 1:1:10:60 的高效耐盐脱氮复合菌;刘玉香等<sup>[55]</sup>从焦化废水活性污泥中筛选得到 4 株高效去除  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 的异养硝化细菌,通过组合实验研究得出接种比例为 1:1:1:1 时  $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 降解率最高,均比单一菌株和其他组合菌的效果好;张勇等<sup>[56]</sup>针对微污染水体原位生物脱氮处理中存在的低温、有机碳源含量低及好氧环境问题,采用自适应及菌源生态重组策略构建了生物脱氮功能菌群,并考察了该功能菌群对水库原水的脱氮效果,得出 Z8+P3+D3、Z8+P3+D4 效果最佳;石玉新等<sup>[57]</sup>从海水养殖公司排污池中的底泥中筛选出两株芽孢杆菌 W01 与 Y01,将两株脱氮能力不同的菌株进行复合配比实验,得到复合比为 W01:Y01 (每毫升所含细胞个数比)=1:3 的复合菌株,该复合菌株对无机氮的去除

率可达 70%左右;尹明锐等<sup>[58]</sup>于运行稳定的莲花味精股份有限公司味精厂一厂和二厂废水处理系统的活性污泥中筛选得到 5 株性能良好的异养硝化-好氧反硝化菌,采用两两组合方式,构建出了优于单一菌株脱氮活性的复合菌群 F1,在盐度 2.0%、3.5%的条件下均能生长,在盐度 0、2.0%、3.5%的条件下, $\text{NH}_4^+$ -N 和 TN 去除率在 48、84、96 h 时均达到 80%以上。

随着生物学技术的不断进展,也有学者从活性污泥或其它环境中直接富集得到异养硝化-好氧反硝化混合菌群进行研究。Yao 等<sup>[59]</sup>在实验室反应器中富集得到耐低温的异养硝化-好氧反硝化混合菌群,实现了在 10 °C 下氮的去除,并分析了富集过程中菌群的变化;白士远<sup>[60]</sup>从山东某水库沉积物、人工强化无沉积物原水、人工强化有沉积物原水及水库水体中筛选出 27 种脱氮效果良好的好氧反硝化混合菌群,并以 10<sup>#</sup>混合菌群为菌源对其进行脱氮特性研究,体现混合菌群在原水中发挥了作用,在微污染水源水微生物脱氮方面具有应用价值。

然而,由于菌株的生长受各种环境条件的影响,不同菌株的最佳生长条件也不同,使得复合菌的性能不能长期保持高效的状态,所以复合菌的保藏和稳定性还有待进一步研究。

#### 4 异养硝化-好氧反硝化在生物强化中的应用研究

由于异养硝化-好氧反硝化菌的不断发现,并且在水处理方面表现出的潜在应用能力,许多学者开始研究其在实际废水处理方面的生物强化应用,但由于实际废水成分复杂,处理系统庞大,研究大多停留在实验室小试或中试阶段。

杨云龙等<sup>[61]</sup>通过初步实验证实螯台球菌 (*Chelatococcus daeguensis*) TAD1 在高温下具有异养硝化-好氧反硝化的能力,为验证其可应用性,采用曝气生物滤池工艺,研究了 TAD1 在温度为 50 °C 时的异养硝化-好氧反硝化性能;乔楠等<sup>[62]</sup>将硅藻土经改性后作为异养硝化-好氧反硝化菌 H1 的载

体,对负载条件以及固定化菌对环境的耐受性能进行了优化及研究,使用该固定化菌对生活污水进行连续式处理,8 d 后目标污染物的去除率趋于稳定,TN、 $\text{NH}_4^+$ -N 及 COD 去除率分别达到 52.40%、55.64%与 61.23%;刘雪洁<sup>[63]</sup>通过对实验室筛选的异养硝化-好氧反硝化菌株进行富集培养,对菌群的脱氮特性做了初步研究,利用膜生物反应器 (MBR) 研究了主要影响因素对菌群长期作用的影响,同时利用聚合酶链式反应变性梯度凝胶电泳 (PCR-DGGE) 技术分析了不同影响因素条件下反应器中微生物的菌群结构变化;Chen 等<sup>[64]</sup>将筛选出的异养硝化-好氧反硝化菌 PCN 成功应用于中试规模生物强化处理城市污水的 SBR 反应器中,在 C/N 比为 8 时,生物强化系统具有稳定良好的碳和营养物质的去除,出水平均 COD、 $\text{NH}_4^+$ -N、TN 和 TP 浓度分别为 20.6、0.69、14.1 和 0.40 mg/L,能够满足中国国家污水排放标准第一类的要求(COD<50 mg/L, TN<15 mg/L, TP<0.5mg/L);Huang 等<sup>[65]</sup>分离并鉴定了好氧反硝化细菌动胶菌 N299、不动杆菌属 G107 和不动杆菌属 81Y,并用这些菌来修复水源水样品;Deng 等<sup>[66]</sup>为了降低养殖水体中的氨氮和亚硝酸盐,筛选得到一株反硝化假单胞菌 SC221-M,随后将 SC221-M 和蜡样芽孢杆菌 BSC24 进行复合形成微生物制剂,混合制剂的脱氮率比 SC221-M 或 BSC24 菌株更有效,研究表明,添加的微生物制剂可以提高实验水产养殖系统中水的质量和微生物群落结构。

#### 5 结论

目前关于异养硝化-好氧反硝化菌的研究已经很多,研究范围和研究层次也在不断扩大和深入,但仍面临着一些问题和挑战:

(1) 能否将异养硝化-好氧反硝化菌在实际废水处理工艺中应用是目前面临的巨大挑战,加强异养硝化-好氧反硝化菌对工艺系统中菌群变化影响的研究,从而使其能够在系统中发挥优势作用;

(2) 将异养硝化-好氧反硝化菌与其他功能菌

复合, 构成复合菌剂达到脱氮同时降解其它难降解物质的目的;

(3) 大多数异养硝化-好氧反硝化菌在高 C/N 比条件下脱氮效率较高, 对于一些低碳比污水的处理和应用还有待进一步探讨。

## 参考文献

- [1] Ren NQ. Microbiology of Environmental Engineering[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 354-364 (in Chinese)  
任南琪. 污染控制微生物学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 354-364
- [2] Joo HS, Hirai M, Shoda M. Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No. 4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification[J]. Water Research, 2006, 40(16): 3029-3036
- [3] Su WY, Gao JF, Zhao HM. Research progress in heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacteria[J]. Industrial Water Treatment, 2013, 33(12): 1-5 (in Chinese)  
苏婉昀, 高俊发, 赵红梅. 异养硝化-好氧反硝化菌的研究进展[J]. 工业水处理, 2013, 33(12): 1-5
- [4] Robertson LA, Kuenen JG. *Thiosphaera pantotropha* gen. nov. sp. nov., a facultatively anaerobic, facultatively autotrophic sulphur bacterium[J]. Microbiology, 1983, 129(9): 2847-2855
- [5] Liu YX, Hu TT, Zhao J, et al. Simultaneous removal of carbon and nitrogen by mycelial pellets of a heterotrophic nitrifying fungus-*Penicillium* sp. L1[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2016. DOI: 10.1016/j.jbiosc.2016.08.009
- [6] Lyu YK, Niu FL, Liu YX, et al. Isolation and characteristic of a new heterotrophic nitrification fungus[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(2): 129-133 (in Chinese)  
吕永康, 牛飞龙, 刘玉香, 等. 一株异养硝化真菌的筛选及其特性[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(2): 129-133
- [7] Li WS. Study on isolation and nitrogen removal characteristic of aerobic fungal denitrifiers[D]. Dongying: Doctoral Dissertation of China University of Petroleum (East China), 2013 (in Chinese)  
李伟斯. 好氧反硝化真菌的筛选及其除氮特性研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东)博士学位论文, 2013
- [8] Li CE, Yang JS, Wang X, et al. Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a phosphate accumulating bacterium *Pseudomonas stutzeri* YG-24[J]. Bioresource Technology, 2015, 182: 18-25
- [9] Liang X, Ren YX, Yang L, et al. Characteristics of nitrogen removal by a heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium YL[J]. Environmental Science, 2015, 36(5): 1749-1756 (in Chinese)  
梁贤, 任勇翔, 杨垒, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌 YL 的脱氮特性[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1749-1756
- [10] Liu YX, Hu TT, Song YJ, et al. Heterotrophic nitrogen removal by *Acinetobacter* sp. Y1 isolated from coke plant wastewater[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2015, 120(5): 549-554
- [11] Wu WL, Yan JB, Ji NN, et al. Screening of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strain from refinery wastewater[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2015, 35(4): 354-358 (in Chinese)  
武文丽, 颜家保, 纪南南, 等. 炼油废水中异养硝化-好氧反硝化菌的筛选[J]. 化工环保, 2015, 35(4): 354-358
- [12] Wang GY, Cui J, Yue XP, et al. Simultaneous removal of phenol and ammonium by a heterotrophic nitrifying-aerobic denitrifying bacterium[J]. China Environmental Science, 2015, 35(9): 2644-2649 (in Chinese)  
王国英, 崔杰, 岳秀萍, 等. 异养硝化-好氧反硝化菌脱氮同时降解苯酚特性[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2644-2649
- [13] Bai YH, Sun QH, Zhao C, et al. Aerobic degradation of pyridine by a new bacterial strain, *Shinella zoogloeoides* BC026[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 2009, 36(11): 1391-1400
- [14] Obaja D, Macé S, Mata-Alvarez J. Biological nutrient removal by a sequencing batch reactor (SBR) using an internal organic carbon source in digested piggery wastewater[J]. Bioresource Technology, 2005, 96(1): 7-14
- [15] Yang XP, Wang SM, Zhang DW, et al. Isolation and nitrogen removal characteristics of an aerobic heterotrophic nitrifying-denitrifying bacterium, *Bacillus subtilis* A1[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 854-862
- [16] Kundu P, Pramanik A, Dasgupta A, et al. Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by *Chryseobacterium* sp. R31 isolated from abattoir wastewater[J]. Biomed Research International, 2014, 2014: 436056
- [17] Yang L, Ren YX, Liang X, et al. Nitrogen removal characteristics of a heterotrophic nitrifier *Acinetobacter junii* YB and its potential application for the treatment of high-strength nitrogenous wastewater[J]. Bioresource Technology, 2015, 193: 227-233
- [18] Jin RF, Liu TQ, Liu GF, et al. Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by the marine origin bacterium *Pseudomonas* sp. ADN-42[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2015, 175(4): 2000-2011
- [19] Huang FF. Identification and nitrogen removal characteristic of two heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strains[D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing University of Science & Technology, 2013 (in Chinese)  
黄菲菲. 异养硝化—好氧反硝化菌的筛选与脱氮性能研究[D]. 南京: 南京理工大学硕士学位论文, 2013
- [20] Liu YX, Wang Y, Li Y, et al. Nitrogen removal characteristics of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis* C16[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015, 23(5): 827-834
- [21] Xin X, Yao L, Lu L, et al. Identification of a high ammonia nitrogen tolerant and heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterial strain TN-14 and its nitrogen removal capabilities[J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3926-3932 (in Chinese)  
信欣, 姚力, 鲁磊, 等. 耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3926-3932
- [22] Shoda M, Ishikawa Y. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification of high-strength ammonium in anaerobically digested sludge by *Alcaligenes faecalis* strain No. 4[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2014, 117(6): 737-741
- [23] Yun HJ, Kim DJ. Nitrite accumulation characteristics of high strength ammonia wastewater in an autotrophic nitrifying



- biofilm reactor[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2003, 78(4): 377-383
- [24] Chen MX, Wang WC, Feng Y, et al. Impact resistance of different factors on ammonia removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium *Aeromonas* sp. HN-02[J]. Bioresource Technology, 2014, 167: 456-461
- [25] Duan JM, Fang HD, Su B, et al. Characterization of a halophilic heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium and its application on treatment of saline wastewater[J]. Bioresource Technology, 2015, 179: 421-428
- [26] Zhang QL, Liu Y, Ai GM, et al. The characteristics of a novel heterotrophic nitrification-aerobic denitrification bacterium, *Bacillus methylotrophicus* strain L7[J]. Bioresource Technology, 2012, 108: 35-44
- [27] Zhang JB, Wu PX, Hao B, et al. Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by the bacterium *Pseudomonas stutzeri* YZN-001[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(21): 9866-9869
- [28] Huang TL, Guo L, Zhang HH, et al. Nitrogen-removal efficiency of a novel aerobic denitrifying bacterium, *Pseudomonas stutzeri* strain ZF31, isolated from a drinking-water reservoir[J]. Bioresource Technology, 2015, 196: 209-216
- [29] Wu JJ, Wang ZY, Xu PY. Isolation and identification of an efficiently heterotrophic nitrifier, and its removal characterization of ammonia nitrogen[J]. China Environmental Science, 2013, 33(7): 1309-1315 (in Chinese)  
吴建江, 王兆阳, 许培雅. 一株高效异养硝化菌的分离、鉴定及其氨氮去除特性[J]. 中国环境科学, 2013, 33(7): 1309-1315
- [30] Zhao B, An Q, He YL, et al.  $N_2O$  and  $N_2$  production during heterotrophic nitrification by *Alcaligenes faecalis* strain NR[J]. Bioresource Technology, 2012, 116: 379-385
- [31] Liu JF, Zhou T, Liu ZH, et al. Screening and identification of a new heterotrophic nitrifying bacteria and characterization of nitrification[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(8): 99-103 (in Chinese)  
刘杰凤, 周天, 刘正辉, 等. 一株新型异养硝化细菌的分离鉴定及硝化特性[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(8): 99-103
- [32] Cao L, Yi XW, Dong B, et al. Separation and performance of denitrification for heterotrophic nitrification and aerobic denitrification bacterium in activated sludge[J]. Water Purification Technology, 2014, 33(3): 91-95 (in Chinese)  
曹林, 衣学文, 董滨, 等. 活性污泥中异养硝化-好氧反硝化菌的分离及其脱氮性能[J]. 净水技术, 2014, 33(3): 91-95
- [33] Liu JN, Wang P, Yin MR, et al. Isolation and identification of a heterotrophic nitrification aerobic denitrifier with high efficiency in removal of nitrogen[J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2010, 28(2): 18-23 (in Chinese)  
刘健楠, 汪苹, 尹明锐, 等. 高效异养硝化-好氧反硝化菌株的分离鉴定与脱氮性能[J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2010, 28(2): 18-23
- [34] Hasan HA, Abdullah SRS, Kofli NT, et al. Removal of ion in drinking water treatment using locally isolated heterotrophic nitrifier[J]. Desalination and Water Treatment, 2012, 50(1/3): 294-301
- [35] Huang XF, Li WG, Zhang DY, et al. Ammonium removal by a novel oligotrophic *Acinetobacter* sp. Y16 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification at low temperature[J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 44-50
- [36] Xin YF, Qu XH, Yuan MD, et al. Isolation and identification of a heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying *Acinetobacter* sp. YF14 and its denitrification activity[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2011, 51(12): 1646-1654 (in Chinese)  
辛玉峰, 曲晓华, 袁梦冬, 等. 一株异养硝化-反硝化不动杆菌的分离鉴定及脱氮活性[J]. 微生物学报, 2011, 51(12): 1646-1654
- [37] Huang TL, Zhang LN, Zhang HH, et al. Screening and nitrogen removal characteristics of a heterotrophic nitrification-aerobic denitrification strain[J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(1): 113-120 (in Chinese)  
黄廷林, 张丽娜, 张海涵, 等. 一株贫营养异养硝化-好氧反硝化菌的筛选及脱氮特性[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 113-120
- [38] Padhi SK, Tripathy S, Sen R, et al. Characterisation of heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying *Klebsiella pneumoniae* CF-S9 strain for bioremediation of wastewater[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 78: 67-73
- [39] Zhang Y, Shi Z, Chen MX, et al. Evaluation of simultaneous nitrification and denitrification under controlled conditions by an aerobic denitrifier culture[J]. Bioresource Technology, 2014, 175: 602-605
- [40] Chen Q, Ni JR. Ammonium removal by *Agrobacterium* sp. LAD9 capable of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, 113(5): 619-623
- [41] Li XZ, Wu SF, Hua GF, et al. Denitrifying characteristic of a heterotrophic nitrifying strain of bacteria and its preliminary application[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2014, 30(3): 352-357 (in Chinese)  
李焯楨, 吴胜发, 华桂芬, 等. 一株异养硝化细菌的脱氮特性及其初步应用[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(3): 352-357
- [42] Chen PZ, Li J, Li QX, et al. Simultaneous heterotrophic nitrification and aerobic denitrification by bacterium *Rhodococcus* sp. CPZ24[J]. Bioresource Technology, 2012, 116: 266-270
- [43] Sun ZY, Lv YK, Liu YX, et al. Removal of nitrogen by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification of a novel metal resistant bacterium *Cupriavidus* sp. S1[J]. Bioresource Technology, 2016, 220: 142-150
- [44] Zheng P, Feng XS. The biochemical theory of nitrification[J]. Microbiology China, 1999, 26(3): 215-217 (in Chinese)  
郑平, 冯孝善. 硝化作用的生化原理[J]. 微生物学通报, 1999, 26(3): 215-217
- [45] Wang SY, Sun HW, Yang Q, et al. Biochemical reaction mechanism and kinetics of denitrification[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, 14(5): 732-736 (in Chinese)  
王淑莹, 孙洪伟, 杨庆, 等. 传统生物脱氮反硝化过程的生化机理及动力学[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(5): 732-736
- [46] Zhang SM, Sha CQ, Jiang W, et al. Ammonium removal at low temperature by a newly isolated heterotrophic nitrifying and aerobic denitrifying bacterium *Pseudomonas fluorescens* wsw-1001[J]. Environmental Technology, 2015, 36(19): 2488-2494

- [47] Zhao B, He YL, Hughes J, et al. Heterotrophic nitrogen removal by a newly isolated *Acinetobacter calcoaceticus* HNR[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(14): 5194-5200
- [48] Miyahara M, Kim SW, Fushinobu S, et al. Potential of aerobic denitrification by *Pseudomonas stutzeri* TR2 to reduce nitrous oxide emissions from wastewater treatment plants[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(14): 4619-4625
- [49] Taylor S. Further Study on the heterotrophic nitrification-aerobic denitrification ability of two MBR isolated bacteria-*Providencia rettgeri* YL and *Alcaligenes faecalis* NR[D]. Shanghai: Master's Thesis of Shanghai Jiao Tong University, 2009 (in Chinese)  
Shauna Taylor. 两株异养细菌 *Providencia rettgeri* YL 和 *Alcaligenes faecalis* NR 脱除能力的研究[D]. 上海: 上海交通大学硕士学位论文, 2009
- [50] Wang JF, Jin M, Shen ZQ, et al. Screening of the aerobic simultaneous denitrobacteria and its denitrification characteristics[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8): 2409-2413 (in Chinese)  
王景峰, 金敏, 谔志强, 等. 1 株好氧脱氮菌的筛选与脱氮特性研究[J]. *环境科学*, 2011, 32(8): 2409-2413
- [51] Wang Y, Liu YX, An H, et al. Influence of metal ions on nitrogen removal and NO<sub>2</sub>-N accumulation by *Alcaligenes faecalis* C16[J]. *Microbiology China*, 2014, 41(11): 2254-2263 (in Chinese)  
王瑶, 刘玉香, 安华, 等. 金属离子对粪产碱杆菌 C16 的脱氮和亚硝酸盐积累的影响[J]. *微生物学通报*, 2014, 41(11): 2254-2263
- [52] Ma F, Sun YL, Li A, et al. Activation of accumulated nitrite reduction by immobilized *Pseudomonas stutzeri* T13 during aerobic denitrification[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 187: 30-36
- [53] Wang CL, Zhou QH, Wang YF, et al. Studies on the identification and nitrosification of a heterotrophic nitrifier bacterial strain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 1146-1150 (in Chinese)  
王成林, 周巧红, 王亚芬, 等. 一株异养硝化细菌的分离鉴定及其亚硝化作用研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(3): 1146-1150
- [54] Tang J, Chen JN, Xiao YN, et al. Denitrification characteristics of halophilic denitrification complex microbial inoculants under different conditions[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2013, 29(6): 1133-1139 (in Chinese)  
唐婧, 陈金楠, 肖亚男, 等. 不同条件下耐盐脱氮复合菌剂的脱氮特性[J]. *沈阳建筑大学学报: 自然科学版*, 2013, 29(6): 1133-1139
- [55] Liu YX, Wang Y, Li Y, et al. Studies on the construction and nitrogen removal properties of highly effective compound heterotrophic nitrifiers[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2012, 43(4): 421-424 (in Chinese)  
刘玉香, 王瑶, 李屹, 等. 复合异养脱氮菌群脱氮性能研究[J]. *太原理工大学学报*, 2012, 43(4): 421-424
- [56] Zhang Y, Wei W, Zhang WS. Establishment of denitrifying functional bacteria groups based on features of micro-polluted waters[J]. *Water Technology*, 2013, 7(3): 21-24 (in Chinese)  
张勇, 魏巍, 章武首. 基于微污染水体特征的脱氮功能菌群的构建[J]. *供水技术*, 2013, 7(3): 21-24
- [57] Shi YX, Qi ST, Lyu YS, et al. Digesting inorganic nitrogen in mariculture water with composite *Bacillus*[J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2011, 40(6): 34-39 (in Chinese)  
石玉新, 齐树亭, 吕玉珊, 等. 复合芽孢杆菌在海水养殖水体中脱氮的研究[J]. *河北工业大学学报*, 2011, 40(6): 34-39
- [58] Yin MR, Wang P, Liu JN, et al. Study on construction and characteristics of multiple heterotrophic nitrification-aerobic denitrification microorganisms[J]. *Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition)*, 2010, 28(3): 55-59 (in Chinese)  
尹明锐, 汪苹, 刘健楠, 等. 复合脱氮菌群的构建及其脱氮特性研究[J]. *北京工商大学学报: 自然科学版*, 2010, 28(3): 55-59
- [59] Yao S, Ni JR, Chen Q, et al. Enrichment and characterization of a bacteria consortium capable of heterotrophic nitrification and aerobic denitrification at low temperature[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 127: 151-157
- [60] Bai SY. Isolation, identification and denitrification characteristics of oligotrophic mixed aerobic denitrifiers[D]. Xi'an: Master's Thesis of Xian University of Architecture and Technology, 2015 (in Chinese)  
白士远. 贫营养好氧反硝化混合菌群的筛选鉴定和脱氮特性研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学硕士学位论文, 2015
- [61] Yang YL, Huang SB, Xu FQ, et al. Heterotrophic nitrification-denitrification of *Chelatococcus daeguensis* TAD1 in an aerating biofilter at high temperature[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(5): 610-614 (in Chinese)  
杨云龙, 黄少斌, 许辅乾, 等. 整球菌 TAD1 在高温曝气生物滤池中的异养硝化-反硝化性能[J]. *环境化学*, 2012, 31(5): 610-614
- [62] Qiao N, Chen RJ, Yu DY. Study on the denitrification characteristics of heterotrophic nitrification-aerobic denitrifier loaded on diatomite[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2015, 34(5): 1459-1465 (in Chinese)  
乔楠, 陈瑞佳, 于大禹. 硅藻土负载异养硝化-好氧反硝化菌的脱氮性能[J]. *化工进展*, 2015, 34(5): 1459-1465
- [63] Liu XJ. Study on nitrogen removal characteristics of heterotrophic nitrification-aerobic denitrification in a membrane biological reactor[D]. Dalian: Master's Thesis of Dalian University of Technology, 2014 (in Chinese)  
刘雪洁. MBR 中异养硝化-好氧反硝化脱氮性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学硕士学位论文, 2014
- [64] Chen Q, Ni JR, Ma T, et al. Bioaugmentation treatment of municipal wastewater with heterotrophic-aerobic nitrogen removal bacteria in a pilot-scale SBR[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 183: 25-32
- [65] Huang TL, Zhou SL, Zhang HH, et al. Nitrogen removal from micro-polluted reservoir water by indigenous aerobic denitrifiers[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2015, 16(4): 8008-8026
- [66] Deng B, Fu LQ, Zhang XP, et al. The denitrification characteristics of *Pseudomonas stutzeri* SC221-M and its application to water quality control in grass carp aquaculture[J]. *PLoS One*, 2014, 9(12): e114886