

好氧反硝化细菌脱氮性能及其在污水处理中应用研究进展

姚 伟

华北电力大学环境科学与工程学院, 北京

收稿日期: 2024年2月6日; 录用日期: 2024年3月21日; 发布日期: 2024年3月31日

摘 要

好氧反硝化菌自从第一次被提出以来, 就因为其挑战了厌氧反硝化理论, 能够在好氧条件下发挥反硝化作用, 实现了在一个反应器里硝化反硝化同时进行而受到了很多关注。本文较为系统的总结了近几年来从不同环境中筛选分离出的好氧反硝化菌, 并从“协同呼吸理论”和“好氧反硝化酶作用”这两个方面深入探讨了好氧反硝化菌的反硝化作用机理。在此基础上, 考察了各种环境因子对好氧反硝化菌脱氮效果的影响。包括碳源的种类, 温度, 溶氧, pH, 盐度。最后对好氧反硝化菌在污水处理领域的应用前景进行分析, 并利用好氧反硝化菌易于附着于生物膜表面, 从而达到高效稳定运行的目的, 为污水处理领域的实际应用研究提供理论依据。

关键词

好氧反硝化菌, 筛选分离, 作用机理, 影响因素, 应用前景

Research Progress on Denitrification Performance of Aerobic Denitrifying Bacteria and Its Application in Wastewater Treatment

Wei Yao

College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Feb. 6th, 2024; accepted: Mar. 21st, 2024; published: Mar. 31st, 2024

Abstract

Since it was first proposed, aerobic denitrification bacteria have attracted much attention because

they challenge the theory of anaerobic denitrification, can play the role of denitrification under aerobic conditions, and achieve simultaneous nitrification and denitrification in one reactor. This paper systematically summarizes the aerobic denitrifying bacteria isolated from different environments in recent years, and further discusses the denitrifying mechanism of aerobic denitrifying bacteria from two aspects: “cooperative respiration theory” and “aerobic denitrifying enzyme action”. On this basis, the effects of various environmental factors on the denitrification efficiency of aerobic denitrifying bacteria are investigated. Including the type of carbon source, temperature, dissolved oxygen, pH, salinity. Finally, the application prospect of aerobic denitrifying bacteria in the field of sewage treatment is analyzed, and the use of aerobic denitrifying bacteria is easy to attach to the surface of biofilm, so as to achieve the purpose of efficient and stable operation, and provide a theoretical basis for the practical application research in the field of sewage treatment.

Keywords

Aerobic Denitrifier, Screening and Separation, Mechanism of Action, Influence Factor, Application Prospect

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水体中含氮化合物的过量富集, 会引发各种环保与生态问题。比如过多的氮含量会引起水体富营养化, 从而促使藻类和水草的过度生长, 进而产生大量藻华。水中氮化合物含量过多是影响藻类生长的主要因素, 张梦寒等对苏州市 5 批 158 件桶装水及 1 批 6 件源水进行藻类检测, 结果藻类在桶装水检出率为 5.7%, 在源水中检出率为 100% [1]。另外, 氮化合物的过量富集将造成水体中的氧被消耗殆尽, 进而导致水域严重缺氧, 从而影响水生生物的正常存活, 最终对水生态系统形成不良影响。这严重违背了绿色发展的要求, 日益威胁着生态安全和人类的生存[2]。所以, 控制水体中含氮物质的过量富集已成为生态保护的必然要求。为了限制水体中含氮物质的过度富集, 一个很重要的途径就是减少污水中氮的排放总量[3]。

传统的生物脱氮理论将生物脱氮过程分解为硝化与反硝化两个阶段。氨氮在好氧条件下被硝化细菌氧化为硝酸盐氮, 这个过程一般是在自养条件下。最后在有机物提供碳源条件下, 经反硝化菌在厌氧或兼氧状态下将硝酸盐氮还原成 N_2O 和 N_2 等气态产物[4]。这两个部分对有机物和氧气(O_2)的要求完全相反。

反硝化作用是氮素生物地球化学循环过程的关键步骤。长期以来, 人们一直以为, 反硝化细菌只能在厌氧或者兼氧条件下发挥作用[5]。直到 1980, 研究者 Meiberg 首次发现了好氧反硝化细菌[6], 随后其他学者在此基础上首次分离出了一种好氧反硝化细菌——*Thiosphaera pantotropha* [7]。大家对反硝化菌才有了更全新的认识: 在好氧条件下, 反硝化细菌也能发生硝氮还原现象。好氧反硝化技术挑战了传统的厌氧条件下只能进行反硝化的理论, 并具有在一个曝气反应器内同时进行硝化和反硝化的独特优点, 引起了人们的广泛关注[8]。同时, 好氧反硝化菌的发现, 进一步完善了反硝化理论学, 并为开发新型生物脱氮技术奠定基础。本文对近年来国内外好氧反硝化微生物的分离、鉴定、脱氮机制、影响因素和应用前景等方面进行了较为系统的综述。

2. 好氧反硝化菌的发现及其分离

第一株具有好氧反硝化性能的细菌，是一九八零年 Meiberg 等人对 *Hyphomicrobium X* 氧化甲胺/三甲胺进行研究的基础上发现的[6]。紧接其后，首株好氧反硝化菌 *Thiosphaera pantotropha* 被分离出来，该菌是 Robertson 等学者从废水脱硫和反硝化系统中筛选纯化后得到的[7]。为了对好氧反硝化菌的脱氮性能有一个更深入的了解，大量的研究人员开始致力于在不同环境中进行筛选和研究好氧反硝化菌株，如土壤、水库、湖泊、河流、海洋和污水处理厂等等。这些菌株大多数为革兰氏阴性细菌，常见种属为不动杆菌属、假单胞菌属、副球菌属、无色杆菌属、弧菌属、产碱杆菌属(*Alcaligenes sp.*)等等。

近 40 多年来，好氧反硝化已经得到了广泛的研究，目前已有大量的好氧反硝化细菌被报道。例如，郭焱等从景观湖底泥中筛选到一株好氧反硝化细菌，鉴定后确定该菌为假单胞菌 J-5。该菌株具有较好的底物适应性，在多种不同碳源和不同氮源条件下都有很多的脱氮性能。通过研究发现其最佳的培养条件为：碳源为丁二酸钠，硝酸钾作为氮源， $\text{pH} = 10$ [9]。李茜等从稻虾养殖塘污水污泥中分离得到一株盖氏假单胞菌 YZWF2207，其在水产养殖污水处理中表现出了强大的反硝化力和竞争性，是一种极具应用潜力的高效脱氮菌[10]。夏平等通过富集、纯化从微污染废水处理生物膜中分离得到一株草螺菌属菌 XDT-1，该菌株具有好氧反硝化、耐低温、低 pH 等优点，对提升城市污水脱氮效能具有重要的现实意义[11]。张志昊等在实验室内运行稳定的生物滤池中筛出一株伯克氏菌(*Burkholderia sp.*) ZH8，其具有好氧反硝化作用，脱氮除磷能力都可达到 95%以上[12]。

3. 好氧反硝化菌脱氮机理研究

好氧反硝化是指在好氧条件下进行的一种反硝化过程，不同于以往认为只有在厌氧或缺氧状态下才能实现脱氮的传统观点。到目前为止，关于好氧反硝化脱氮的反应机制仍有分歧，对其机理的讨论也不够完善，至今仍处于探索性阶段。但被大部分研究者所接受的两个好氧反硝化机理分别是协同呼吸理论和好氧反硝化酶作用。

3.1. 协同呼吸理论

协同呼吸理论认为，反硝化微生物既能向氧转移电子，又能向硝酸根转移电子。也就是说，碳源比如乙酸钠等作为电子供体，而电子受体既是氧气又是硝酸盐。由于 O_2 比 NO_3^- -N 具有更高的电子亲和力，所以在好氧反硝化菌对外界能量需求比较低的情况下，更倾向于把 O_2 当作电子受体；而在好氧反硝化菌对外界能量需求比较高的情况下，作为电子受体的 NO_3^- -N 竞争能力增强，电子转移到 NO_3^- -N 的比例增加。虽然 NO_3^- -N 对电子的竞争弱于 O_2 ，但 NO_3^- -N 仍能与 O_2 参与微生物代谢，即发生好氧反硝化作用。

在常规传统脱氮过程中，细胞色素 c (Cyt c) 与细胞色素 aa3 (Cyt aa3) 间的电子传递受到限制，所以导致电子难以向 O_2 传输。在此基础上，我们提出了协同呼吸理论，这就很好的解释了之前电子传输的“瓶颈现象”。即电子能同时向 NO_3^- -N 和 O_2 转移，也就是说，在好氧条件下可以发生反硝化反应[7]。

3.2. 好氧反硝化酶作用

随着科技水平的提高，好氧反硝化有关酶学的研究逐渐成为近几年来的一个热门话题。

据酶理论，一共有四种酶(NAR、NIR、NOR 和 NOS)在好氧反硝化中起关键作用。好氧反硝化中的硝酸盐还原酶 NAR 首先催化硝酸盐为亚硝酸盐，再通过亚硝酸盐还原酶 NIR 将亚硝酸盐转换为 NO，随后 NO 在一氧化氮还原酶 NOR 的作用下转换为 N_2O ，最终通过氧化二氮还原酶 NOS 将氧化二氮还原成氮气[13]。

Jetten 等学者发现存在两种不同的 NAR，即膜内硝酸盐还原酶(M-NAR)和质周硝酸盐还原酶(P-NAR)

[14]。与细胞膜结合的酶是 M-NAR，但 P-NAR 位于细胞壁和细胞膜之间。M-NAR 酶仅在缺氧和厌氧条件下表达，而在有氧条件下并不起作用。相比之下，P-NAR 酶可以在有氧和厌氧环境下产生，并且在高 DO 浓度下都是可行的，这表明 P-NAR 在有氧条件下更好地表达[15]。好氧反硝化细菌由于具有独特的 M-NAR 和 P-NAR，可同步实现 O_2 与 NO_3^- -N 的还原，因此好氧环境不再是约束条件。

4. 好氧反硝化菌反硝化作用的影响因素

好氧反硝化菌的生长和脱氮性能受到多种因素的影响，如碳源类型、碳氮比、温度、溶解氧、pH、盐度、初始氮浓度、抗生素、磁场、微生物群落等。本文综述了碳源、温度、溶解氧、pH 值和盐度等对菌株好氧反硝化特性的影响。

4.1. 碳源

不同于硝化作用以无机碳作为碳的主要来源，好氧反硝化菌主要以有机碳为碳源。自养生长的硝化菌一般发育缓慢、硝化效率低，而好氧反硝化菌一般为异养菌，生长速度比较快。碳源是影响好氧反硝化菌生长性能和脱氮性能的重要因素[16]。

目前研究表明，好氧反硝化细菌可以利用的有机碳源有：柠檬酸钠，葡萄糖，乙酸钠，蔗糖，琥珀酸，琥珀酸钠，甲醇，乙醇等。少数好氧反硝化菌还可以利用难以分解的有机物质作为碳源。另外，不同的菌种对不同的有机基质表现出广泛的偏好。

例如，赵洋等在研究不同碳源对菌株 *Pseudomonas stutzeri* DZ11 的好氧反硝化性能的影响时，发现当培养基中唯一碳源为柠檬酸钠时，菌株有着最高生长量且综合脱氮性能最好[17]。Chen 等发现 *Diaphorobacter* sp. PD-7 在 85 h 内完全降解了苯酚($1400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，并在 65 h 内去除了大约 91% 的 NO_3^- -N ($164.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) [18]。Wu 等发现了一种新分离的好氧反硝化细菌 *calcoaceticus* TY1，脱氮效果最佳的碳源为柠檬酸钠[19]。

4.2. 温度

好氧反硝化菌一般在 $25^\circ\text{C}\sim 37^\circ\text{C}$ 条件下生长，这也是细菌生长的最适温度。如果温度低于 10°C ，好氧反硝化细菌的反硝化性能会降低。这是因为温度会对酶活性产生影响[20]。如果温度太高或太低，反硝化作用都可能被抑制[16]。好氧反硝化细菌的温度敏感性已经被许多研究者在实验中得到了很好的验证[21]。

一般来说，几乎所有已知的好氧反硝化反应都发生在中温条件下($20^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$)。例如，Su 等、研究表明 *Raoultella* sp. R11 在 30°C 时具有良好的反硝化能力，并能完全降解[22]。然而，对于对温度比较敏感的好氧反硝化菌来说，也有一些特殊情况。有一些好氧反硝化菌能够在极寒或者极热条件下生存。例如，Zhao 等人从猪场废水中分离出一株菌株，鉴定为 *Acinetobacter* sp. TAC-1。在低温条件下(5°C)，该菌株脱氮性能依旧良好，硝氮($400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的去除率达到 93.3% [23]。Yao 等人新分离得到了一株异养型硝化-好氧反硝化细菌，经表型和系统发育分析鉴定为不动杆菌属。该菌株具有良好的低温耐受性，其最适温度为 20°C ，存活温度为 4°C 。在低温、纯好氧条件下，铵盐、亚硝酸盐和硝酸盐的去除效果较好，且中间产物积累较少[24]。Wei 等分离出一株新型耐寒菌株根瘤菌 sp. WS7，其在 15°C 条件下脱氮效率显著， NO_3^- -N 去除率为 99.98%，在污水冷处理中具有很大的应用可行性[25]。Lin 等建立了一个高温(50°C)异养硝化-好氧反硝化(HNAD)生物膜系统。结果表明，HNAD 工艺具有良好的耐高温性能，高温系统在 50°C 时表现出良好的脱氮和 COD 能力。在这个系统里氨氧化主要由异养硝化作用进行，而缺氧和好氧途径协同作用于反硝化作用。并通过基因组学研究揭示了好氧反硝化菌在高温下的微生物机制，高通量测序结果显示，在 50°C 条件下，反硝化菌占据 52.88% [26]。

这些发现对北方地区低温含氮废水和高温工业废水的实际工程处理具有重要意义, 为好氧反硝化菌应用于低温或高温等极端环境下奠定了理论基础。

4.3. 溶解氧

如果从电子转移的角度来看, 在好氧反硝化过程中, NO_3^- -N 和 O_2 都可以成为电子受体, NO_3^- -N 和 O_2 的共存必然会竞争电子。如果从热力学的角度来看, 当 O_2 被好氧反硝化菌用作电子受体时, 好氧反硝化菌获得的能量远比 NO_3^- -N 作为电子受体的多, 因此好氧反硝化菌更容易利用 O_2 。好氧反硝化受 DO 的影响, 其作用大小随微生物类型而异。

目前, 国内外学者通过对振动筛旋转速度进行调控, 从而实现溶解氧的有效调控[27]。在一项研究 DO 对施氏假单胞菌 T13 好氧反硝化作用的研究中, 通过改变摇动速度来控制 DO 浓度。振动速度为 120、150 和 160 rpm 分别相当于 4.7、6.5 和 7.2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 DO。当振动速度保持在 160 rpm 以下时, 观察到显著的 NO_3^- -N 去除效率[28]。当振动转速低于 120 rpm ($4.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, NO_3^- -N 几乎 100% 被排出[29]。

一般来说, 好氧反硝化菌较高的脱氮能力仅发生在一定的 DO 浓度区间内, 如果不在这个区间内, 则会影响反硝化效率, 并且该 DO 浓度范围因生物种类的不同而不同[18]。但是有些好氧反硝化菌随着 DO 浓度的增加其反硝化性能会下降。如果 DO 浓度超过一定限度, 则 DO 浓度的增加不会影响 ADB 的脱氮性能, 该浓度称为 DO 阈值。有些好氧反硝化菌比较少见, 能够在高浓度 DO 发挥反硝化作用。

4.4. pH

对于好氧反硝化过程来说, pH 是影响其速率的重要因素之一[30]。一般来说, 酸性条件($\text{pH} < 5$)和碱性条件($\text{pH} > 10$)都会影响好氧反硝化菌的生长。张宇红等筛选得到一株新型高效好氧反硝化细菌 - 葡萄球菌属(*Staphylococcus*) SY-D-22, 发现其最佳反硝化条件为 pH 8.18 [31]。Huang 从海水养殖水中分离出的一株细菌(*Bacillus litoralis* N31)在 pH 值为 7.5 至 8.5 之间表现出有效的反硝化作用[32]。Su 等发现 *Raoultella* sp. R11 具有明显的好氧反硝化, 通过 *napA* 基因扩增确定了菌株 R11 的脱氮机理。响应面法 (RSM) 分析结果表明, 菌株的硝酸盐去除率最高可达 96.06%, 最佳 pH 为 6.65 [33]。

有趣的是, 一些研究表明某些好氧反硝化菌能够在好氧反硝化期间自我调节 pH。比如 *Serratia marcescens* W5 就能够自主地将 pH 从 10.0 降至 7.2, 以满足理想最佳生长条件[34]。

4.5. 盐度

好氧反硝化菌脱氮效果也受盐度的影响。高盐引起的高渗透压会使微生物细胞脱水, 并阻碍其与外界环境间的物质转运, 从而影响其正常代谢, 甚至引起细胞崩解及酶活下降[31]。

但是, 对于一些嗜盐细菌来说, 一定的盐度水平反而促进了反硝化作用。例如, Duan 等学者从海洋沉积物中分离到一种嗜盐异养硝化 - 好氧反硝化细菌 *diabolicus* 弧菌 SF16。研究发现在 1%~5% 的盐度下, 菌株 SF16 对 NH_4^+ -N 的去除效果不错。但在不添加 NaCl 时几乎不去除 NH_4^+ -N。说明 NaCl 对菌株 SF16 的酶活性至关重要[35]。

Cui 等研究分离到了一株嗜盐好氧反硝化细菌 *Exiguobacterium mexicanum* SND-01, 该菌株具有轻微的嗜盐性, 可在 0%~9% (w/v) 盐度下存活[36]。

目前对嗜盐微生物耐盐机制的分析主要包括: 钾吸收和钠排泄机制; 相容溶质在细胞内的积累; 以及生产嗜盐酶[37] [38]。具体机理有待进一步研究。

5. 好氧反硝化菌在污水处理中的应用潜能

早期的研究主要集中在分离鉴定纯的好氧反硝化细菌和分析对其脱氮性能有影响的环境因素。为了

更好地发挥其在废水处理领域的重要作用,近几年来研究者们开始将好氧反硝化细菌引进到污水处理设备中。

但是好氧反硝化细菌由于不能在长期的竞争中占据主导地位成为优势物种而最终被淘汰,因此无法将其直接投入到污水处理反应器中。另外,长时间运行后,好氧反硝化细菌数量及相对丰度会下降。这些限制使得好氧反硝化的脱氮性能非常不稳定,这是制约该技术规模化应用的一个重要因素。生物膜反应器通过保留附着在自由移动或固定载体材料上的生物膜的微生物细胞来提供高浓度的活性生物量[39]。好氧反硝化菌可以很容易地挂在生物膜上以实现细菌固定化。

Tian 等将好氧反硝化细菌 PCN-1 固定在聚氨酯生物载体上,在中试氧化沟中进行了生物强化处理,效果良好。微生物群落分析表明,生物强化促进了活性污泥与生物载体之间细菌种群的共生关系。反硝化菌在生物载体上占主导地位,具有众所周知的 N_2O 还原能力[40]。Hong 等为了提高 SBBR 处理富氮废水的效率,对门多萨假单胞菌 IHB602, 格里根甲基杆菌属 DC-1 和施氏假单胞菌 IHB618 这 3 种具有强自聚集和高脱氮双重能力的好氧反硝化菌进行了研究。结果表明,3 株菌种共存时的共聚集优于单独生长的 1 株或 2 株。采用最佳共聚集菌对试验反应器(SBBRT)进行生物强化,其生物膜形成时间比未接种的对照反应器(SBBR_C)短。不同进水氨氮负荷(150、200 和 300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)下,氨氮和硝氮的平均去除率均高于 SBBR_C,亚硝酸盐氮积累量低于 SBBR_C。微生物群落结构分析表明,共聚集菌可以在生物反应器中成功定植,并且对高浓度氮具有很强的耐受性,有助于高效去除无机氮和形成生物膜[41]。Chen 等在 MBBR 中接种好氧反硝化菌处理家禽养殖废水,结果表明,不同载体类型对不同 C/N 比下的反硝化效果有显著影响,聚乙烯醇(PVA)凝胶载体比卡尔德斯载体更适合好氧反硝化菌的生长。此外,微生物学分析表明,以 PVA 凝胶为载体的 MBBR 有利于少营养菌和异养硝化-好氧反硝化菌的生长,在 C/N 比为 6 时,相对丰度最高,为 16.37% [42]。

依靠好氧反硝化菌的生物膜反应器在目前的实验室中试以及部分中试中均达到了预期的氮处理效果。但是需要注意的是,由于生物膜堵塞、填料成本高、抗冲击负荷能力弱等原因,好氧反硝化菌在实际中的应用依然是目前国内外研究的热点和难点。

6. 结论与前景展望

1) 目前的研究表明,好氧反硝化菌在环境中广泛存在。越来越多的学者在不同环境中筛选分离出各种好氧反硝化菌。比如土壤、水库、湖泊、河流、海洋和污水处理厂等等。

2) 目前对好氧反硝化菌的作用机制被广泛认可的有两种解释,即协同呼吸理论和好氧反硝化酶作用。然而,迄今为止,好氧反硝化菌的作用机制还停留在理论解释阶段,具体的作用机制尚不清楚,学术界还缺乏一个被广泛接受的答案。

3) 好氧反硝化菌的生长受碳源、温度、溶解氧、pH、盐度等多种因素的影响。一般来说,碳源类型不同,菌的反硝化能力也不同。温度通过影响好氧反硝化菌的酶系来影响其脱氮效率。大多数好氧反硝化菌是在中温(20°C~40°C)中发现的,但最近也发现了耐高温或耐低温好氧反硝化菌。DO 对好氧反硝化菌的影响可分为三种情况,大多数好氧反硝化菌仅在一定的 DO 浓度范围内表现出良好的脱氮性能。pH 对好氧反硝化菌有极其重要的影响,大部分好氧反硝化菌只能在最适 pH (pH 在 7.5~8.5 之间)下旺盛生长,也能耐受极端 pH,甚至能自行调节 pH 达到最佳生长条件。

4) 近几年来,研究者开始利用生物强化技术将好氧反硝化菌固定在生物膜上再投放到污水处理反应器中。好氧反硝化菌既能好氧条件下去除污水中的氮,又能实现同步硝化反硝化,是具有很大发展潜力的新技术。然而,相关研究尚处于实验室模拟污水的小型试验阶段,距离真正的污水处理及小尺度工程应用还有很长一段距离。

参考文献

- [1] 张梦寒, 李建, 姜韬, 等. 苏州市桶装饮用水中藻类的检测[J]. 职业与健康, 2014, 30(24): 3598-3600
- [2] Ahn, Y.H. (2006) Sustainable Nitrogen Elimination Biotechnologies: A Review. *Process Biochemistry*, **41**, 1709-1721. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2006.03.033>
- [3] Zheng, H.Y., Liu, Y., Gao, X.Y., et al. (2012) Characterization of A Marine Origin Aerobic Nitrifying-Denitrifying Bacterium. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **114**, 33-37. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2012.02.025>
- [4] Jung, J., Yeom, J., Han, J., et al. (2012) Seasonal Changes in Nitrogen-Cycle Gene Abundances and in Bacterial Communities in Acidic Forest Soils. *Journal of Microbiology*, **50**, 365-373. <https://doi.org/10.1007/s12275-012-1465-2>
- [5] Frette, L., Gejlsbjerg, B. and Westermann, P. (1997) Aerobic Denitrifiers Isolated from an Alternating Active Sludge System. *FEMS Microbiology Ecology*, **24**, 363-370. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.1997.tb00453.x>
- [6] Meiberg, J.B.M. (1980) Effect of Dissolved Oxygen Tension on the Metabolism of Methylated Amines in *Hyphomicrobium* in the Absence and Presence of Nitrate Evidence for Aerobic Denitrification. *The Journal of General Microbiology*, **120**, 453-463. <https://doi.org/10.1099/00221287-120-2-453>
- [7] Robertson, L.A., Van Niel, E.W., Torremans, R.A., et al. (1988) Simultaneous Nitrification and Denitrification in Aerobic Chemostat Cultures of *Thiosphaera pantotropha*. *Applied and Environmental Microbiology*, **54**, 2812-2818. <https://doi.org/10.1128/aem.54.11.2812-2818.1988>
- [8] 康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 等. 湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构[J]. 环境科学, 2018, 39(5): 2431-2437.
- [9] 郭焱, 何雯, 吴丹, 张雅清, 代加南. 好氧反硝化菌 *Pseudomonas* sp. J-5 的分离及脱氮性能研究[J]. 绿色科技, 2023, 25(14): 224-229.
- [10] 李茜, 孙正祥, 周焱. 高效好氧反硝化盖氏假单胞菌 YZ-7 的鉴定及其脱氮性能研究[J]. 南方农业学报, 2023, 54(5): 1549-1558.
- [11] 夏平, 马民, 宫玲, 杜敬, 曹经纶, 罗凡, 欧阳卓明, 赵御豪. 好氧反硝化菌株 *Herbaspirillum* sp. XDT-1 分离鉴定及特性研究[J]. 给水排水, 2022, 58(S2): 177-185.
- [12] 张志昊. 好氧反硝化细菌 *Burkholderia* sp. ZH8 的脱氮机理及生物强化应用研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2022.
- [13] Ji, B., Yang, K., Zhu, L., et al. (2015) Aerobic Denitrification: A Review of Important Advances of the Last 30 Years. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, **20**, 643-651. <https://doi.org/10.1007/s12257-015-0009-0>
- [14] Jetten, M.S., Logemann, S., Muyzer, G., Robertson, L.A., de Vries, S., et al. (1997) Novel Principles in the Microbial Conversion of Nitrogen Compounds. *Antonie Van Leeuwenhoek*, **71**, 75-93. <https://doi.org/10.1023/A:1000150219937>
- [15] Kumar, M. and Linj, G. (2010) Co-Existence of Anammox and Denitrification for Simultaneous Nitrogen and Carbon Removal-Strategies and Issues. *Journal of Hazardous Materials*, **178**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.01.077>
- [16] Xi, H.P., Zhou, X.T., Arslan, M., Luo, Z.J., Wei, J., Wu, Z.R., et al. (2022) Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Process: Promising but a Long Way to Go in the Wastewater Treatment. *Science of the Total Environment*, **805**, Article ID: 150212. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150212>
- [17] 赵洋, 孙慧明, 林浩澎, 罗娉婷, 朱雅婷, 陈琼华, 舒琥. 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.
- [18] Chen, Q. and Ni, J.R. (2012) Ammonium Removal by *Agrobacterium* sp. LAD9 Capable of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **113**, 619-623. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2011.12.012>
- [19] Wu, L., Ding, X., Lin, Y., et al. (2022) Nitrogen Removal by a Novel Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium *Acinetobacter calcoaceticus* TY1 Under Low Temperatures. *Bioresource Technology*, **353**, Article ID: 127148. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127148>
- [20] Ji, B., Wang, H.Y. and Yang, K. (2014) Tolerance of an Aerobic Denitrifier *Pseudomonas Stutzeri* to High O₂ Concentrations. *Biotechnology Letters*, **36**, 719-722. <https://doi.org/10.1007/s10529-013-1417-x>
- [21] 董怡华, 王凌潇, 任涵雪, 等. 一株耐低温异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性[J]. 生物技术通报, 2023, 39(12): 237-249.
- [22] Su, J.F., Shao, S.C., Huang, T.L., Ma, F., Zhang, K., Wen, G. and Zheng, S.C. (2016) Isolation, Identification, and Algicidal Activity of Aerobic Denitrifying Bacterium R11 and Its Effect on *Microcystis aeruginosa*. *Water Science & Technology*, **73**, 2600-2607. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.085>

- [23] Zhao, Y.Y., Min, H.C., Luo, K.Y., Zhang, R.J., Chen, Q. and Chen, Z.B. (2022) Transcriptomics and Proteomics Revealed the Psychrotolerant and Antibiotic-Resistant Mechanisms of Strain *Pseudomonas psychrophila* RNC-1 Capable of Assimilatory Nitrate Reduction and Aerobic Denitrification. *Science of the Total Environment*, **820**, Article ID: 153169. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153169>
- [24] Yao, S., Ni, J., Ma, T. and Li, C. (2013) Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification at Low Temperature by a Newly Isolated Bacterium, *Acinetobacter* Sp. HA2. *Bioresource Technology*, **139**, 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.189>
- [25] Wei, B., Luo, X., Ma, W., et al. (2022) Biological Nitrogen Removal and Metabolic Characteristics of a Novel Cold-Resistant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification *Rhizobium* sp. WS7. *Bioresource Technology*, **362**, Article ID: 127756. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127756>
- [26] Lin, Z., Zhou, J., He, L., et al. (2022) High-Temperature Biofilm System Based on Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Treating High-Strength Ammonia Wastewater: Nitrogen Removal Performances and Temperature-Regulated Metabolicpathways. *Bioresource Technology*, **344**, Article ID: 126184. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126184>
- [27] Lei, X., Jia, Y.T., Chen, Y.C. and Hu, Y.Y. (2019) Simultaneous Nitrification and Denitrification without Nitrite Accumulation by a Novel Isolated Ochrobactrum Anthropic LJ81. *Bioresource Technology*, **272**, 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.10.060>
- [28] Sun, Y.L., Li, A., Zhang, X.N. and Ma, F. (2015) Regulation of Dissolved Oxygen from Accumulated Nitrite during the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of *Pseudomonas stutzeri* T13. *Applied Microbiology and Biotechnology*, **99**, 3243-3248. <https://doi.org/10.1007/s00253-014-6221-6>
- [29] Sun, Z.Y., Lv, Y.K., Liu, Y.X. and Ren, R.P. (2016) Removal of Nitrogen by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification of a Novel Metal Resistant Bacterium *Cupriavidus* sp. S1. *Bioresource Technology*, **220**, 142-150. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.110>
- [30] 张宇红, 刘香宇, 董先博, 等. 好氧反硝化细菌 SY-D-22 的分离、优化及脱氮机理[J]. 微生物学通报, 2023, 50(5): 1815-1825.
- [31] Huang, F., Pan, L.Q., Lv, N. and Tang, X.M. (2017) Characterization of Novel *Bacillus* Strain N31 from Mariculture Water Capable of Halophilic Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, **124**, 564-571. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2017.06.008>
- [32] 滕峪, 汪鲁, 王占英, 等. 一株嗜碱兼性好氧反硝化菌 *Marinobacter* sp. B3 的分离鉴定及脱氮性能研究[J]. 海洋与湖沼, 2024(26): 1-13.
- [33] Su, J., Ting Lian, T., Lin Huang, T., et al. (2017) Microcystis Aeruginosa Flour as Carbon and Nitrogen Source for Aerobic Denitrification and Algicidal Effect of *Raoultella* sp. R11. *Ecological Engineering*, **105**, 162-169. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.04.014>
- [34] Wang, T., Dang, Q.F., Liu, C.S., Yan, J.Q., Fan, B., Cha, D.S., Yin, Y.Y. and Zhang, Y.B. (2016) Heterotrophic Nitrogen Removal by a Newly-Isolated Alkalitolerant Microorganism, *Serratia marcescens* W5. *Bioresource Technology*, **211**, 618-627. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.03.142>
- [35] Duan, J.M., Fang, H.D., Su, B., Chen, J.F. and Lin, J.M. (2015) Characterization of a Halophilic Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterium and Its Application on Treatment of Saline Wastewater. *Bioresource Technology*, **179**, 421-428. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.12.057>
- [36] Cui, Y., Cui, W. and Huang, J.L. (2021) A Novel Halophilic Exiguobacterium Mexicanum Strain Removes Nitrogen from Saline Wastewater via Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification. *Bioresource Technology*, **333**, Article ID: 125189. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125189>
- [37] Kixmuller, D. and Greie, J.C. (2012) Construction and Characterization of a Gradually Inducible Expression Vector for *Halobacterium salinarum*, Based on the *Kdp* Promoter. *Applied and Environmental Microbiology*, **78**, 2100-2105. <https://doi.org/10.1128/AEM.07155-11>
- [38] He, X.L., Sun, Q., Xu, T.Y., Dai, M. and Wei, D.S. (2019) Removal of Nitrogen by Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification of a Novel Halotolerant Bacterium *Pseudomonas mendocina* TJPU04. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, **42**, 853-866. <https://doi.org/10.1007/s00449-019-02088-8>
- [39] Abdelfattah, A., Hossain, M.I. and Chng, L. (2020) High-Strength Wastewater Treatment Using Microbial Biofilm Reactor: A Critical Review. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, **36**, Article No. 75. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02853-y>
- [40] Tian, Z., Zhou, N., You, W., et al. (2021) Mitigating NO and N₂O Emissions from a Pilot-Scale Oxidation Ditch Using Bioaugmentation of Immobilized Aerobic Denitrifying Bacteria. *Bioresource Technology*, **340**, Article ID: 125704. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125704>

-
- [41] Hong, P., Yang, K., Shu, Y., *et al.* (2021) Efficacy of Auto-Aggregating Aerobic Denitrifiers with Coaggregation Traits for Bioaugmentation Performance in Biofilm-Formation and Nitrogen-Removal. *Bioresource Technology*, **337**, Article ID: 125391. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125391>
- [42] Chen, X., Zhang, Q., Zhu, Y. and Zhao, T.T. (2021) Response of Wastewater Treatment Performance, Microbial Composition and Functional Genes to Different C/N Ratios and Carrier Types in MBBR Inoculated with Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria. *Bioresource Technology*, **336**, Article ID: 125339. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125339>