

Anammox 工艺影响因素

胥毅豪 王玉建*

绵阳师范学院, 中国·四川 绵阳 621006

摘要: 厌氧氨氧化 (Anammox) 是一种新型的污水脱氮工艺, 它具有无需外加有机碳源, 能耗低, 污泥产量少等优点; 但由于厌氧氨氧化菌 (AnAOB) 活性易受环境影响, 且稳定运行状态的厌氧氨氧化反应器也容易受到外界环境影响而失稳导致厌氧氨氧化菌活性降低, 进而影响到出水水质。研究厌氧氨氧化菌活性快速恢复及提高其活性对厌氧氨氧化工艺的广泛运用具有重要意义。本文综述了部分影响厌氧氨氧化菌活性的因素以及厌氧氨氧化反应器快速启动的方法。

关键词: 厌氧氨氧化; 微生物脱氮; 活性恢复; 快速启动

Factors Affecting the Anammox Process

Xu Yihao, Wang Yujian*

Mianyang Normal University, China Sichuan Mianyang 621006

Abstract: Anaerobic ammonia oxidation (Anammox) is a novel wastewater nitrogen removal process, which boasts advantages such as no need for external organic carbon sources, low energy consumption, and minimal sludge production. However, due to the susceptibility of anaerobic ammonia oxidizing bacteria (AnAOB) activity to environmental factors, and the potential destabilization of a stable operating state of the Anammox reactor caused by external environmental impacts, leading to reduced AnAOB activity and subsequently affecting effluent quality, research on the rapid recovery and enhancement of AnAOB activity holds significant importance for the widespread application of the Anammox process. This paper reviews some factors affecting AnAOB activity and methods for the rapid start-up of Anammox reactors.

Keywords: Anaerobic ammonia oxidation; Microbial nitrogen removal; Activity recovery; Rapid start-up

0 引言

微生物脱氮技术被广泛应用于废水脱氮领域, 其中厌氧氨氧化技术作为一种新兴的技术以其独特的优势逐渐成为生物脱氮领域的热门话题。厌氧氨氧化是有奥地利理论化学家 BRODA Engelber^[1] 基于热力学理论于 1977 年提出一种利用氨氮和亚硝酸氮生成氮气的生物脱氮反应。ASTRID A.VAN DE GRAAF^[2] 等利用同位素标记法, 对基质使用 N^{15} 标记 NH_4^+-N 和 N^{14} 标记 NO_2-N 产生 $14-15N_2$, 证明了厌氧氨氧化 (Anammox) 的存在。目前对于厌氧氨氧化的反应路径主要有两种观点, 第一种观点认为 NO^{2-} 在亚硝酸还原酶 (Nir) 的作用下被还原为 NH_2OH , NH_4^+ 和 NH_2OH 在联氨合成酶 (HNS) 或联氨水解酶 (HH) 的作用下转化为 N_2H_4 , 接着, N_2H_4 在联氨脱氢酶 (HDH) 或联氨氧化酶 (HZO) 的作用下生成 N_2 ; 第二种观点是 Strous 等^[3] 基于基因组学和相关酶作用推导出

的中间产物为 NO 的途径, 这种观点认为 NO^{2-} 在亚硝酸还原酶 (Nir) 的作用下生成 NO , NO 和 NH_4^+ 在联氨水解酶 (HH) 的作用下产生 N_2H_4 , 然后经过羟胺氧化还原酶 (HAO) 的催化生成 N_2 。

相比于传统脱氮工艺, 厌氧氨氧化工艺具有无需外加有机物以及减少曝气的能量消耗的优势, 但是由于厌氧氨氧化菌对环境较为敏感, 不适宜的环境因素很容易抑制厌氧氨氧化菌的活性, 且外界环境的变化也容易导致稳定运行的厌氧氨氧化反应器失稳; 同时厌氧氨氧化菌倍增时间长, Isaka 等^[4] 通过荧光原位标记法, 对厌氧生物滤池 (ABF) 中的厌氧氨氧化菌进行计数, 得出厌氧氨氧化菌的倍增时间为 11 天; 外界环境的变化也容易导致稳定运行的厌氧氨氧化反应器失稳, 这些因素制约了厌氧氨氧化工艺的大面积使用。本文综述了影响厌氧氨氧化菌活性的因素, 同时总结了快速启动厌氧氨氧化反应器及失稳反应器恢复

的方法。

1 环境影响因素

1.1 温度

温度是影响微生物生长和代谢的重要因素，多数氨氧化菌属于中温菌，最适生长温度为 30~35℃^[5]，温度过低会降低细胞内酶促反应速度，宋成康等^[6]利用 SBR 反应器发现当温度有 33℃降低至 15℃时，厌氧氨氧化菌会产生更多的胞外聚合物（EPS），当温度继续降低至 10℃时，厌氧氨氧化菌分泌的 EPS 会减少，从而导致颗粒解体，出水变得更加浑浊，低温对厌氧氨氧化菌的活性降低是可逆的，姚俊芹等^[7]将运行稳定的 UASB 厌氧氨氧化反应器温度从 31℃降低到 17℃，反应器内的厌氧氨氧化菌活性受到明显抑制，平均总氮去除率从 86% 下降为 35.5%，而后将反应器温度从 17℃直接升高到 31℃，17d 后反应器中厌氧氨氧化菌的活性恢复到最初状态，平均总氮去除率达到 86%；超过 45℃的高温则会直接使厌氧氨氧化菌细胞裂解死亡^[8]，这对厌氧氨氧化菌的活性造成了不可逆的损失。

1.2 PH

PH 是微生物生长的重要参数，对微生物酶活性有重要影响，它可以改变酶分子和底物分子的带电状态，影响酶和底物的结合^[13]。据报道，厌氧氨氧化菌的最适 PH 为 6.7~8.5，鲍林林等^[14]通过对稳定运行的低基质浓度厌氧氨氧化反应器逐渐降低 PH 至 6.41，再逐渐提升 PH 至 8.86，最后缓慢恢复到 7.7 左右，发现该反应器在 PH 为 6.7~8.5 的范围内，总氮的去除率可达 80% 以上；PH 降低水中的 FA 浓度减少，但是 FNA 浓度会增加，PH 升高水中的 FNA 浓度会减少，但是 FA 浓度会增加，二者浓度过高都会对厌氧氨氧化菌活性造成抑制^[15]；有研究者提出铵可以通过细胞质膜上的离子泵输送到细胞质内，然后氨通过细胞膜输送到细胞外，导致细胞质酸化和细胞外碱化，改变了细胞内外的酸碱平衡，严重时可导致细胞死亡^[16]。

陈宗姮等^[17]利用恒定 PH 反应器发现随着反应 PH 的上升，NRR 总体呈先上升再下降的趋势，PH 为 8 时的脱氮效果最好，在反应 4h 时，氨氮和亚硝氮去除率分别达到了 98.39% 和 99.48%，且与不控制 PH 时相比可在较短反应时间内达到较好的脱氮效果；Li^[18]等人在对厌氧氨氧化反应器做 PH 冲击实验时，发现极端的 PH 值会降低颗粒污泥的大小，酸性 PH 对污泥粒径影响不大，当 PH 为 9.0 时，Anammox 颗粒污泥发生崩解；在实际运用过程中

常常将厌氧氨氧化工艺与传统脱氮工艺相结合，由于厌氧氨氧化和硝化两种反应呈现的酸碱性不同，所以对 PH 的控制提出了新的要求，陈建伟等^[18]在对短程硝化 - 厌氧氨氧化反应器进行低 PH 进水冲击实验中发现，反应器的脱氮效能随 PH 冲击强度的增大而下降，但同时当 PH 为 6.55 时，反应器总氮负荷越高，受 PH 冲击的影响越小，这可能是由于厌氧氨氧化过程产生的碱度中和了水中的酸。Cao 等^[19]人将厌氧氨氧化和亚硫酸盐驱动的自养反硝化（ASDAD）耦合，研究了 PH（8.5~6.5）对亚硫酸盐低氮废水脱氮和 N₂O 排放的影响，随着 PH 的降低自养反硝化对脱氮的贡献降低，且当 PH=6.5 时，由于厌氧氨氧化菌的失活和亚硝酸盐不完全的自养反硝化，N₂O 排放达到峰值。厌氧氨氧化反应自身是产碱反应，随着厌氧氨氧化反应的进行，会消耗水中的 H⁺，导致 PH 升高，厌氧氨氧化菌活性越好，PH 升高的越快，需要及时采取措施保持厌氧氨氧化菌的适宜生长环境。

厌氧氨氧化菌种类	最适PH	参考文献
Candidatus Brocadia sinica	6.5~8.8	[11]
Candidatus Brocadia fulgida	7.0~7.3	[20]
Candidatus Brocadia sapporoensis	6.9~7.5	[21]
Candidatus Kuenenia stuttgartiensis	7.7~8.4	[20]
Candidatus Anammoxoglobus sulfate	8.0~8.2	[22]
Candidatus Anammoximicrobium moscowii	7.8~8.3	[23]
Candidatus Scalindua sinooilfield	7.3~8.1	[24]

1.3 DO（溶解氧）

厌氧氨氧化菌是一种严格厌氧菌，对氧气非常敏感，废水中溶解氧浓度过高时，会影响厌氧氨氧化菌的活性，一般在实验室阶段使用的废水会先使用氮气或者惰性气体将溶解氧浓度降低到 0.5mg/L 以下^[25]，厌氧氨氧化菌只能在氧分压低于 5% 氧饱和（以空气中的氧浓度为 100%）的条件下生存，氧分压超过 18% 就会抑制厌氧氨氧化菌的活性^[26]。溶解氧对厌氧氨氧化活性的抑制是可逆的^[27]，李亚峰等^[28]将未进行脱氧处理的实验废水直接加进厌氧氨氧化反应器中发现 NH₄⁺-N 去除率先上升再趋于平稳，NO₂⁻-N 去除率先下降后小幅上升随后逐渐平稳，后又对进水进行脱氧处理，经两周的适应期后反应器中厌氧氨氧化菌活性逐渐恢复，并恢复到脱氧前水平，分析原因可能是未脱氧时废水中高浓度的溶解氧促进了污泥中 AOB 的活性，硝化作用增强。

在实际引用过程中，一般会使用混合反应器，例如

PN/A 工艺, 短程硝化可以消耗废水中的溶解氧, 从而给厌氧氨氧化菌提供适应的生长环境。在部分硝化/厌氧氨氧化工艺中低溶解氧浓度 ($0.30\sim 0.43\text{mg/L}$) 生物难降解有机物会严重抑制羟胺氧化 (HZO) 基因, 从而导致 AOB 活性降低, 亚硝酸盐的积累速率下降, 将溶解氧 (DO) 提高到 $1.10\pm 0.2\text{mg/L}$ 的水平, 可恢复氨转化和亚硝酸盐积累, 反应器可以长期稳定运行^[29]; 将粉碎的 AnGS 作为固定化填料的 CANON 反应器中控制 DO 浓度为 3mg/L , 反应器 TRR (总氮去除率) 达到 80% 以上, 出水 $\text{NO}_3\text{--N}$ 浓度只有 $5.9\sim 7.9\text{mg/L}$ ^[30]; 将厌氧氨氧化与异养反硝化结合, 同时微量曝气将废水中溶解氧浓度控制在 $0.25\sim 0.35\text{mg/L}$, 可以将高氨氮的猪场养殖废水的总氮去除率达到 95.03%, 其中氨氮由进水的 404.8mg/L 降至 0.02mg/L 一下, 且污明显亚硝氮积累^[31]。这些研究成果表明, 将厌氧氨氧化工艺与传统脱氮工艺相耦合可以降低甚至避免废水中高溶解氧对厌氧氨氧化菌的影响, 并且提高脱氮效果。

2 其他影响因素

2.1 有机物 (COD)

一般认为厌氧氨氧化菌是一种化能自养菌, 其生长繁殖仅需少量无机碳源, 厌氧氨氧化污泥中一般会有反硝化菌存在, 高浓度的有机物会促进反硝化菌的生长繁殖, 由于厌氧氨氧化菌的生长繁殖更慢, 在竞争中处于不利地位^[32], 有研究发现当系统中有有机物浓度达到 284.1mg/L 时会完全抑制厌氧氨氧化菌的活性^[33], 当系统中有机物、氨氮、亚硝酸盐共存时, 由于反硝化菌的高生长速率, 厌氧氨氧化细菌无法与反硝化菌竞争电子受体^[34]; 少量的有机物存在对厌氧氨氧化菌影响不大^[35], 当 COD 从 100mg/L 提高到 200mg/L 时, 对氨去除率产生了明显的下降^[36], 余建等^[37] 向稳定运行的厌氧氨氧化反应器中加入 100mg/LCOD 时, 厌氧氨氧化贡献率从 90% 降低到 80%, 继续提高 COD 浓度到 200mg/L 时厌氧氨氧化贡献率降低到了 22%, 反硝化的脱氮比例则上升到 78% 左右; 对厌氧氨氧化耦合反硝化系统中, 将葡萄糖浓度提高到 200mg/L , 厌氧氨氧化活性明显降低, 加入适量亚硝酸盐可以缓解葡萄糖对系统的抑制作用^[34]; 然而也有研究表明部分厌氧氨氧化菌可以在环境温度下利用有限的醋酸盐去除硝酸盐^[38], 同时也有研究表明一定量的有机物浓度对厌氧氨氧化菌活性有一定的促进作用。Jia 等^[39] 发现低进水 COD/TN (约

0.1) 时, 进水 COD 提高了厌氧氨氧化反应器脱氮效果; 周铨凯等^[40] 给 MBBR 反应器长期投加 50mg/LCOD , 反应器出水的氨氮, 亚硝氮较未加 COD 的反应器都更低, 但是未加 COD 的反应器厌氧氨氧化菌的丰度更高, 推测是异养反硝化菌的增殖抑制了厌氧氨氧化菌的增殖。将厌氧氨氧化系统与反硝化系统结合可以在一定程度上将两种菌分相培养, 并同时去除废水中的 COD 和 TN, 但是体系非常的脆弱, 需要注意 COD 浓度, 加强二者的耦合强度。

2.2 亚硝氮浓度

厌氧氨氧化反应是以 NH_4^+ 、 NO_2^- 作为主要底物, 底物浓度对厌氧氨氧化反应有重大影响, 同时二者的去除率也是评估厌氧氨氧化反应器性能的主要指标, 然后过高的基质浓度也会对厌氧氨氧化菌的活性造成抑制^[42], 相对于氨来说, 亚硝酸盐的抑制阈值较低, 厌氧氨氧化菌更容易受亚硝酸盐抑制, 而即使高达 1000mg/L 的氨浓度依然为未对厌氧氨氧化菌活性造成影响^[43]。有研究指出 FNA (游离亚硝酸) 是厌氧氨氧化菌抑制的真正因素^[44], 另有研究指出 FNA 对厌氧氨氧化菌的抑制浓度为 $19\mu\text{g/L}$ ^[45]。有关亚硝酸盐对厌氧氨氧化菌的抑制机理可能有以下方式^[46]: (1) 作为解偶联剂影响微生物产能; (2) 直接影响微生物代谢的关键酶; (3) 通过刺激某种中间产物积累而导致中毒。国外有研究发现, 当亚硝氮浓度大于 185mg/L 时, 厌氧氨氧化菌的活性就会被完全抑制^[47], 但是 Cho 等^[48] 实验发现当亚硝氮浓度达到 400mg/L 时, 厌氧氨氧化菌活性会降低 50%, 但是有研究发现亚硝酸盐对厌氧氨氧化菌活性的抑制是可恢复的^[44]。目前关于亚硝酸盐对厌氧氨氧化菌活性抑制的浓度众说纷纭, 不同反应器的抑制浓度还与环境、反应器类型以及厌氧氨氧化菌的生长状态有关, 提高厌氧氨氧化菌的活性可以提高亚硝酸盐的影响阈值。

3 结论与展望

Anammox 作为一种新型脱氮工艺, 具有广阔的前景, 但是厌氧氨氧化菌生长条件苛刻, 影响因素众多, 限制了其大规模工程应用。目前, 将 Anammox 过程与传统硝化、反硝化过程相结合是一种大趋势, 不仅可以提升脱氮效率, 处理更复杂的污水, 还可以解除一部分环境因素对厌氧氨氧化菌的抑制。同时, 由于厌氧氨氧化菌自身的特性, 仍需大量有关 Anammox 过程快速启动的研究, 以及厌氧氨氧化菌易受环境因素影响, 还需驯化耐高盐, 耐低温, 耐

高 COD 等高耐受性厌氧氨氧化菌, 以为 Anammox 的大规模应用提供基础。

参考文献:

- [1] BRODA,E. 2 KINDS OF LITHOTROPHS MISSING IN NATURE[J]. Zeitschrift Fur Allgemeine Mikrobiologie, 1977, 17(6): 491-493.
- [2] VANDEGRAAF,AA,MULDER, et al. Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, 61(4): 1246-1251.
- [3] Strous,M,Pelletier, et al. Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome[J]. Nature, 2006, 440(7085): 790-794.
- [4] Isaka,K,Date, et al. Growth characteristic of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in an anaerobic biological filtrated reactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 70(1): 47-52.
- [5] 郑平, 胡宝兰. 厌氧氨氧化菌混培物生长及代谢动力学研究[J]. 生物工程学报, 2001, (02): 193-198.
- [6] 宋成康, 王亚宜, 韩海成等. 温度降低对厌氧氨氧化脱氮效能及污泥胞外聚合物的影响[J]. 中国环境科学, 2016, 36(07): 2006-2013.
- [7] 姚俊芹, 刘志辉, 周少奇. 温度变化对厌氧氨氧化反应的影响[J]. 环境工程学报, 2013, 7(10): 3993-3996.
- [8] Dosta,J,Fern á ndez, et al. Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 154(1-3): 688-693.
- [9] Nakajima,J,Sakka, et al. Enrichment of anammox bacteria from marine environment for the construction of a bioremediation reactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 77(5): 1159-1166.
- [10] van de Vossenberg,J,Rattray, et al. Enrichment and characterization of marine anammox bacteria associated with global nitrogen gas production[J]. Environmental Microbiology, 2008, 10(11): 3120-3129.
- [11] Awata,T,Oshiki, et al. Physiological Characterization of an Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacterium Belonging to the "Candidatus Scalindua" Group[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(13): 4145-4148.
- [12] 孙艳波, 周少奇, 李伙生等. 氮素负荷及高温冲击对 UASB-ANAMMOX 反应器的运行影响[J]. 化工进展, 2009, 28(09): 1672-1676.
- [13] 陈重军, 冯宇, 汪瑶琪等. 厌氧氨氧化反应影响因素研究进展[J]. 生态环境学报, 2016, 25(02): 346-352.
- [14] 鲍林林, 赵建国, 李晓凯等. 常温低基质下 pH 值和有机物对厌氧氨氧化的影响[J]. 中国给水排水, 2012, 28(13): 38-42.
- [15] Wendong Tao,Yuling He,Ziyuan Wang, et al. Effects of pH and temperature on coupling nitrification and anammox in biofilters treating dairy wastewater[J]. Ecological Engineering, 2012, 47.
- [16] Martinelle,K,Westlund, et al. Ammonium ion transport? a cause of cell death[J]. Cytotechnology, 1996, 22(1-3): 251-254.
- [17] 陈宗姮, 徐杉杉, 李祥等. pH 对厌氧氨氧化反应脱氮效能的影响[J]. 化工环保, 2015, 35(02): 121-126.
- [18] 陈建伟, 郑平, 唐崇俭等. 低 pH 对高负荷厌氧氨氧化反应器性能的影响[J]. 高校化学工程学报, 2010, 24(02): 320-324.
- [19] Cao Xiwei,Zhou Xin,Xue Mi, et al. Evaluation of nitrogen removal and N₂O emission in a novel anammox coupled with sulfite-driven autotrophic denitrification system: Influence of pH[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321.
- [20] Brin,LD,Giblin, et al. Similar temperature responses suggest future climate warming will not alter partitioning between denitrification and anammox in temperate marine sediments[J]. Global Change Biology, 2017, 23(1): 331-340.
- [21] Kartal,B,van Niftrik, et al. Candidatus Brocadia fulgida: an autofluorescent anaerobic ammonium oxidizing bacterium[J]. Fems Microbiology Ecology, 2008, 63(1): 46-55.
- [22] Miao,L,Wang, et al. Advanced nitrogen removal from landfill leachate via Anammox system based on Sequencing Biofilm Batch Reactor (SBBR): Effective protection of biofilm[J]. Bioresource Technology, 2016, 220: 8-16.
- [23] Li,H,Chen, et al. Molecular Detection of Anaerobic Ammonium-Oxidizing (Anammox) Bacteria in High-Temperature Petroleum Reservoirs[J]. Microbial Ecology, 2010, 60(4): 771-783.

- [24] Liu,ST,Yang, et al. Application of anaerobic ammonium-oxidizing consortium to achieve completely autotrophic ammonium and sulfate removal[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(15): 6817-6825.
- [25] Ikuo Tsushima,Yuji Ogasawara,Tomonori Kindaichi, et al. Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors.[J]. Water Research, 2007, 41(8).
- [26] 郑平, 张蕾. 厌氧氨氧化菌的特性与分类[J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2009, 35(05): 473-481.
- [27] Strous,M,vanGerven, et al. Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) sludge[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1997, 63(6): 2446-2448.
- [28] 李亚峰, 于耀溢, 杨嗣靖等. HRT、DO 和有机物对厌氧氨氧化脱氮性能的影响研究[J]. 工业水处理, 2020, 40(08): 27-31.
- [29] Lei Zhen,Wang Lianxu,Wang Jun, et al. Partial-nitrification of low-strength anaerobic effluent: A moderate-high dissolved oxygen concentration facilitates ammonia-oxidizing bacteria disinhibition and nitrite-oxidizing bacteria suppression[J]. Science of the Total Environment, 2021, 770.
- [30] Hongyu Wang,Qun Song,Jing Wang, et al. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in an aerobic granular sludge sequencing batch reactor with high dissolved oxygen: Effects of carbon to nitrogen ratios[J]. Science of the Total Environment, 2018, 642.
- [31] Mengyao Cui,Guoqiang Zhan,Lixia Zhang, et al. Micro-oxygen supply combined with applied voltage enhance ammonium oxidation and denitrification in a single-chamber microbial electrolysis cell: Performance and mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 487.
- [32] P.C. Sabumon.. Anaerobic ammonia removal in presence of organic matter: A novel route[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 149(1).
- [33] Chongjun Chen,Faqian Sun,Haiqing Zhang, et al. Evaluation of COD effect on anammox process and microbial communities in the anaerobic baffled reactor (ABR)[J]. Bioresource Technology, 2016, 216.
- [34] Yang Jingyue,Li Jun,Zheng Zhaoming, et al. Effect of organic matters on anammox coupled denitrification system: when nitrite was sufficient[J]. Royal Society Open Science, 2019, 6(11).
- [35] 杨洋, 左剑恶, 沈平等. 温度、pH 值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. 环境科学, 2006, (04): 691-695.
- [36] Shou-Qing Ni,Jian-Yuan Ni,De-Liang Hu, et al. Effect of organic matter on the performance of granular anammox process[J]. Bioresource Technology, 2012, 110.
- [37] 余健, 李刚, 杨琴等. Anammox 反应器的高效运行及有机物抑制效应[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(04): 127-133.
- [38] M.-K.H. Winkler,R. Kleerebezem,M.C.M. van Loosdrecht.. Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures[J]. Water Research, 2011, 46(1).
- [39] Lee,A,Elam, et al. Membrane materials for water purification: design, development, and application[J]. Environmental Science-water Research & Technology, 2016, 2(1): 17-42.
- [40] 周铨凯, 暴瑞玲, 阮爱东等. COD 对连续流厌氧氨氧化混菌体系氮素转化和菌群结构的影响[J]. 当代化工, 2023, 52(12): 2895-2900.
- [41] 操沈彬, 王淑莹, 吴程程等. 有机物对厌氧氨氧化系统的冲击影响[J]. 中国环境科学, 2013, 33(12): 2164-2169.
- [42] 刘小宁, 张文杰. 进水 NO₂--N 浓度对厌氧氨氧化反应器的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(06): 31-36.
- [43] Strous,M,Kuenen, et al. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(7): 3248-3250.
- [44] T. Lotti,W.R.L. van der Star,R. Kleerebezem, et al. The effect of nitrite inhibition on the anammox process[J]. Water Research, 2012, 46(8).
- 基金项目: 四川省区域创新合作-川渝科技创新合作计划(2024YFHZ0102)资助项目。
- 作者简介: 胥毅豪(1998.05-), 男, 汉族, 四川省遂宁市, 硕士研究生, 研究方向: 污水处理。
- * 通讯作者: 王玉建, 电子邮箱 46669083@qq.com。