



专论与综述

短程硝化活性污泥微生物群落结构及羟胺代谢对短程硝化的影响

马博言 刘缨 刘志培*

中国科学院微生物研究所 微生物资源前期开发国家重点实验室 北京 100101

摘要: 活性污泥法随着技术的成熟,已应用在高氨氮污水/废水处理中,通过不断发展衍生出的很多新型工艺也成为研究热点,短程硝化反应作为代表已逐渐体现出优越性。短程硝化能达到高效净化污水的目的,其反应中的代谢产物羟胺也和微生物类群及反应产物之间有着至关重要的影响。反应器中活性污泥的微生物群落结构和动态密切相关,探究微生物群落结构能帮助生物强化、优化参数,提高脱氮效率。本文主要总结了近年来有关短程硝化/半短程硝化活性污泥微生物群落组成与结构及其与反应器处理效率之间的关系,以及羟胺代谢对短程硝化的影响等方面的研究进展,这些研究加深了对微生物群落结构和污水处理工艺之间的认识,但充分发掘生物信息、提高工艺效能之路仍然充满挑战,还需利用氮平衡方法、Real-time PCR 法等多种生物技术手段对短程硝化进行全方位研究,为实践提供坚实的理论基础。

关键词: 短程硝化,活性污泥法,羟胺代谢,微生物群落

Bacterial community structure of the activated sludge for partial nitrification and the effect of hydroxylamine metabolism

MA Bo-Yan LIU Ying LIU Zhi-Pei*

State Key Laboratory of Microbial Resources, Institute of Microbiology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: Due to the maturity of technology, the activated sludge process has been applied in the treatment of high ammonia nitrogen wastewater. With continuous development, many new activated sludge-based processes have also become research hotspots. Partial nitrification (PN) has gradually emerged as a representative. Partial nitrification can achieve the purpose of purifying sewage efficiently; and the hydroxylamine, one of the metabolites in the reaction, also has a vital influence on the microbial community and the reaction products. The microbial community structure and dynamics of activated sludge in PN reactors are closely related with nitrifying process. Exploring the microbial community structure can help bio-enhancement, optimizing parameters and improve nitrogen removal efficiency. This review mainly

Foundation items: National Key Research and Development Program of China (2016YFD0501409); National Natural Science Foundation of China (31870103); Key Program of the Chinese Academy of Sciences (KFZD-SW-309)

*Corresponding author: Tel: 86-10-64806081; E-mail: liuzhp@im.ac.cn

Received: 27-03-2019; **Accepted:** 22-05-2019; **Published online:** 29-05-2019

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFD0501409); 国家自然科学基金(31870103); 中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-309)

*通信作者: Tel: 010-64806081; E-mail: liuzhp@im.ac.cn

收稿日期: 2019-03-27; 接受日期: 2019-05-22; 网络首发日期: 2019-05-29

summarized the recent advances on microbial community composition and structure of the activated sludge for partial nitrification/half partial nitrification and their relationships with reactor performances, as well as the effect of hydroxylamine metabolism on partial nitrification. These results have reinforced our understanding of microbial community structure and wastewater treatment processes, but the path to fully exploiting biological information and improving process efficiency remains challenging. It is also necessary to use a variety of biotechnology methods to conduct comprehensive research on partial nitrification and provide a solid theoretical basis for practice.

Keywords: Partial nitrification, Activated sludge process, Hydroxylamine metabolic, Microbial community

随着工业化生产的快速发展和城镇化以及人民生活水平的提高, 污水/废水排放逐年增加, 环境污染日益尖锐。据统计, 我国废水年排放总量约为 600 亿 m^3 , 其中城市生活污水 200 亿 m^3 , 工业废水 200 亿 m^3 , 乡镇污水 200 亿 m^3 ^[1]。在我国水环境污染中, 城市生活污水的主要污染物包括动植物蛋白质、脂肪、垃圾渗透液等有机物, 经过二级生化处理后, 出水中含氮量依然较高。纺织、石化、金属冶炼、食品加工等行业中的工业污水均含有大量含氮化合物, 是主要氮污染源, 直接排入水体会对水环境造成巨大的破坏, 因此越来越多的国家和地区制定了更为严格的污水氮排放标准。为了使出水水质指标达到相应的标准, 污水处理厂必须实现脱氮工序。目前, 生物处理法相较物理法和化学法高效且应用广, 其中活性污泥法是目前最为广泛采用的方法。

1913 年, Clark 和 Cage 在实验过程中发现对废水进行长时间的曝气会产生污泥, 并使水质得到明显的改善, 之后 Arden 和 Lockett 进一步对此深入研究发现, 由于实验容器清洗不干净, 留有残渣反而使水处理效果提高, 从而发现了活性微生物菌胶团, 定义为活性污泥。活性污泥法即利用污泥中的微生物对污水中的物质进行凝聚、分散、氧化、分解去除污水中的有机污染物, 达到净化污水的目的^[2]。通过不断改进, 传统活性污泥法逐渐成熟, 但还是存在操作管理要求严格、费用高等缺点。

污水/废水处理的指标之一就是氮素的去除, 也就是脱氮处理。传统生物脱氮工艺的基本原理是: 含氮化合物在微生物新陈代谢的作用下发生氨化、硝化和反硝化 3 个反应, 即在有氧条件下通过氨化

作用和硝化作用将有机氮相继转化为氨氮、亚硝态氮和硝态氮, 再利用反硝化作用在缺氧/厌氧条件下将硝态氮还原为气态氮, 从而达到脱氮的目的^[3]。在对传统生物脱氮理论认识的基础上, 人们逐渐开发出了不同类型的污水脱氮工艺。

此后又通过对生物脱氮的深入研究和技术的不断发展, 大多数脱氮工艺将好氧区和厌氧区分开, 以便硝化和反硝化过程都能独立完成, 具有代表性的工艺主要有 A/O (厌氧-好氧) 工艺^[4]、生物膜反应器^[5]、序批式反应器 (Sequencing batch reactor, SBR) 工艺及其改良序批式反应器^[6] (Modified sequencing batch reactor, MSBR) 工艺和循环活性污泥系统 (Cyclic activated sludge system, CASS) 工艺等。这些新型工艺在一定程度上改进了传统活性污泥的不足, 提高了氨氮去除率。

1 短程硝化反应器在处理高氨氮废水中的应用

硝化反应过程是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在氨氧化细菌 (Ammonia oxidizing bacteria, AOB) 的作用下经由羟胺 (NH_2OH) 变为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, 然后由亚硝酸盐氧化菌 (Nitrite oxidizing bacteria, NOB) 将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[7]。近年来, 短程硝化逐渐成为研究热点, 短程硝化反应的核心就是将氨氧化控制在亚硝化阶段, 亚硝酸盐大量积累后直接进入反硝化阶段^[8-9]。与传统硝化脱氮相比, 短程硝化更加适用于处理高浓度氨氮废水。

当前, 利用短程硝化处理污水主要采用的是 SBR 工艺。在该工艺中, 进水、曝气、沉淀、排水、静置这 5 个工序依次在一个体系内完成, 无需设置

二沉池和污泥回流系统,在反应器中使用较短的水力停留时间,也就是污水与活性污泥中微生物作用的平均反应时间,同时维持较长的泥龄和较高的污泥浓度,从而获得较好的硝化效果,实现脱氮效果。在 SBR 反应器中实现短程硝化反硝化的关键点在于抑制活性污泥中亚硝酸盐氧化菌的活性或者细胞增长速率,使得氨氧化细菌大量富集,在硝化系统中成为优势菌,氨氮的氧化速率大于亚硝态氮的氧化速率,从而导致亚硝酸盐的积累^[10-11]。由于 SBR 反应器大量的曝气条件,可能会产生足够的剪切力,增加细胞表面的疏水性,分解过度生长的细丝形成颗粒污泥^[12]。这样,反应器活性污泥中微生物的利用效率提高,泥水分离性能好,污泥不易膨胀,细菌的增长速度加快、反应进程缩短,从而减少反应容积和时间;而且同时减少了硝化的曝气量和反硝化有机物的投加量,减少了运行费用,具有重要的现实意义。

针对高氨氮污水的处理,还开发了短程硝化反应衍生出的半短程硝化(Single reactor system for high activity ammonium removal over nitrite, SHARON)+厌氧氨氧化(Anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)的组合工艺。在该工艺中,厌氧氨氧化菌以氨氮为电子供体,亚硝态氮为电子受体进行氨氧化反应形成氮气从而实现脱氮。由于污水中氮元素主要以氨氮的形式存在,所以需要半短程硝化工艺将污水中约 50%的氨氮高效稳定地转变成亚硝态氮,为厌氧氨氧化工艺创造条件^[13]。SHARON-ANAMMOX 组合工艺可以保证 2 种反应器中的菌群始终保持在高活性的状态^[14-15],还有无需添加有机物、节省曝气的能源消耗等优势,具有广阔的应用前景。本实验室针对高浓度高氨氮的猪场污水处理,设计并构建了“厌氧消化+SBR 半短程硝化+厌氧氨氧化”工艺,并在实验室进行小试。经过前期参数摸索、负荷逐步提升等调试阶段,最后该工艺稳定运行时,处理最高负荷可以达到 COD (Chemical oxygen demand, 化学需氧量)约 10 000 mg/L、氨氮约 600 mg/L 的猪场污水, COD

去除 90%以上,总氮去除率达到约 0.420 g N/(L·d),出水达标排放^[16],而且除启动阶段猪场原水需要稍作稀释调节外,全程不需另外添加其他药剂。

2 微生物群落结构与反应器特征的相互关系

从生物化学的角度看,短程硝化过程并不是简单地将氨氮氧化成亚硝态氮的过程,它涉及微生物群落结构与功能的演替^[17]。活性污泥中的微生物类群较丰富,类群之间存在着共生、拮抗、竞争及捕食等关系^[18-19]。微生物逐渐形成具有一定规律的群落结构,微生物之间相互影响;群落组成也随着进水负荷、温度、pH、溶氧等工艺运行条件的变化发生相应的改变,最终趋于稳定,影响反应器的运行效率^[20]。相同进水浓度、不同运行工艺有不同的微生物群落。在北京怀柔一家污水处理厂中同时运行膜生物反应器(Membrane bioreactor, MBR)工艺、氧化沟(Oxidation ditch, OD)工艺和 A/O 工艺,454 焦磷酸高通量测序分析发现,OD 工艺中主要是拟杆菌门,而 MBR 工艺和 A/O 工艺中主要为变形杆菌门,但在群落的组成上,这两种工艺的活性污泥存在明显差异^[21]。

在同一反应器内,运行条件改变后反应器内微生物的生态位也会随之变化,新的生态位形成,进而代替旧的^[22]。本实验室采用高通量测序方法,对上述 SBR 半短程硝化反应器活性污泥的细菌群落结构与动态变化进行了研究,也获得了相似的结果。该反应器的细菌群落结构随运行方式的改变(从连续流转变为 SBR 方式)以及猪场污水的纳入发生显著变化($P < 0.01$),且进水氨氮、出水氨氮、出水亚硝态氮、pH 和溶氧(Dissolved oxygen, DO)共同驱动着反应器内微生物群落结构的演替^[23]。这说明运行方式或参数改变后,微生物群落更新换代,原先丰度高的类群有可能丰度下降甚至消失,而有的类群则可能由低丰度或休眠状态转变成优势类群^[24]。运行条件、微生物群落结构、生物学功能之间互相影响,因此探究活性污泥中微生物群落结构有助于优化反应器参数,了解反应器功能,提高反应器的处理效能。

3 短程硝化反应器中的微生物群落结构演替

Wei 等^[25]采用高通量测序技术对一短程硝化反应器中的微生物群落进行研究,发现该反应器的微生物群落以细菌,尤其是好氧细菌为优势类群。其硝化颗粒污泥中鉴定出 9 个门,以变形杆菌门(*Proteobacteria*)和拟杆菌门(*Bacteroidetes*)为优势,分别占细菌总数的 46.86%和 51.64%,其他 7 个门只占很小的比例(<1.5%)。在目水平上,发现鞘脂杆菌目(*Sphingobacteriales*)和亚硝化单胞菌目(*Nitrosomonadales*)这两个优势类群分别占拟杆菌门和变形菌门的 39.6%和 24.1%^[25]。

已有文献[26]报道,通过 16S rRNA 基因序列相似性分析方法比对发现,在短程硝化活性污泥中,氨氧化微生物类群以好氧自养氨氧化菌为主,包括亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)、亚硝化弧菌属(*Nitrosovibrio*)、亚硝化球菌属(*Nitrosococcus*)、亚硝化叶菌属(*Nitrosoobus*)和亚硝化螺菌属(*Nitrosospira*)等;与自养氨氧化菌相比,亚硝酸盐氧化菌对游离氨、温度、溶氧等因素更敏感,在短程硝化过程中,亚硝酸盐氧化菌生长会受到抑制,包括硝化杆菌属(*Nitrobacter*)、硝化球菌属(*Nitrococcus*)、硝化刺菌属(*Nitrospina*)和硝化螺菌属(*Nitrospira*)等在短程硝化/半短程硝化反应器中生长缓慢,从而逐步被“冲刷”掉了。Wei 等^[25]的研究也得到类似的结果,与亚硝化单胞菌相关的 AOB 为优势菌群,所占比例为 24.1%,但没有发现与硝化螺菌属相关的 NOB。微生物群落的结构与组成会随运行工艺及参数变化而变化;也决定了反应器的功能与效率。我们的研究表明, SBR 半短程硝化反应器中,在目水平上,主要微生物类群有 *Proteobacteria*、*Bacteroidetes*、*Nitrospira*、*TM7*、*Chloroflexi*、*Chlorobi* 和 *Firmicutes*,占细菌总量的 73.93%–99.18%;连续流运行期间, *Nitrospira* 的相对丰度逐渐增加至 18.10%, *Nitrosomonas* 的相对丰度为 0.67%;运行方式改成序批式后, *Nitrospira* 随后迅速降至检测不到的水平, *Nitrosomonas* 逐渐升高到 8.00%;厌氧消化反应器出水作为进水后, *Nitrosomonas* 的相对丰度降

至 1.6%,但与 *Nitrosomonas* 相关的 OTU 类群发生变化,半短程硝化效率增强;高氨氮、高 DO 和高 pH 能促进 *Nitrosomonas* 的生长和氨氧化活性, *Nitrosomonas europaea* 相关类群是实现半短程硝化的主要功能微生物^[23]。

在 SBR 反应器曝气结束后,属于异养兼性厌氧的反硝化菌发挥着重要作用,其中占比约为 13.2%的陶厄氏菌(*Thauera*)可能是短程自养反硝化过程中的功能菌^[27]。研究者检测出陶厄氏菌的分布可能是由颗粒污泥的微观环境导致,根据溶氧梯度,颗粒污泥可分为 3 个区:好氧区、微好氧区和厌氧区;陶厄氏菌通过利用有机碳或氢作为电子供体,在自养或者异养条件下介导硝酸盐或亚硝酸盐的还原^[28]。根据以上文献报道,对短程硝化工艺以及微生物群落结构应进行更加全面和深入的研究,根据不同参数对反应器的前期、中期、后期全方位检测数据,解析不同的自养、异养硝化微生物参与的硝化过程和有关酶及其功能基因的作用机理等,为实际应用提供理论指导。

4 羟胺代谢在短程硝化中的作用

羟胺(NH_2OH)是细菌氨氧化过程中的重要中间产物^[29],细菌氨氧化的第一步是在氨单加氧酶的作用下将氨氧化为羟胺,羟胺也是氮代谢的关键节点。短程硝化工艺特有的高氨氮、高亚硝酸盐等特点,有利于羟胺的积累和转化,同时短程硝化反应中溶氧、进水负荷等运行参数都对羟胺积累有一定的影响,因此羟胺在短程硝化/半短程硝化反应器中的积累、转化以及对反应器微生物群落的影响等方面备受关注。Soler-Jofia 等报道,短程硝化 SHARON 反应器中羟胺浓度在 0.03–0.11 mg N/L 之间^[30]。Liu 等研究了 9 株 AOB 和氨氧化古菌(*Ammonia oxidizing archaea*, AOA)培养液中羟胺的积累过程,发现在欧洲亚硝化单胞菌(*Nitrosomonas europaea*)、亚硝化螺菌属(*Nitrosospira multiformis*)、亚硝化球菌属(*Nitrososphaera gargensis*)、*Ca. Nitrosotenuis uzonensis* 中有羟胺的积累^[31]。不同微生物对羟胺的

响应机制也存在较大的差异,羟胺同时也调控着系统中的 AOB 和 NOB 菌群^[32]。由于羟胺本身性质不稳定,在大气中存在的时间极短且有极强的反应活性,体系 pH、浓度、温度都会影响羟胺的稳定性及羟胺的多条代谢途径,加大了实验的难度,现阶段对羟胺代谢的了解还远远不够,需要今后从多角度、多层次加以阐述。

深层次探究短程硝化中的羟胺代谢有助于对短程硝化的深入了解和对微生物菌群的高效调控。研究表明短程硝化中羟胺代谢对氧化亚氮的排放具有重要影响^[33-34]。因此,综合评估羟胺代谢也可以为氧化亚氮的减量化控制提供理论基础,具有重要的现实意义。

5 小结与展望

综上,反应器工艺性能与微生物群落结构之间有密切联系,将微生物的代谢特征与反应过程控制相结合达到最优脱氮效果也是一种高效的污泥减量策略,因此准确获得微生物类群生物信息对于生物脱氮技术的发展具有重要意义。结合不同的生物分子学方法探索微生物代谢活性的最终目的就是提高污水处理效率,所以,要把更多的研究集中在根据不同工艺、不同参数调节微生物群落结构并保持工艺稳定运行这个方向是至关重要的。

本实验室长年致力于研究环境微生物及其在环境中的分布与发挥的作用、对污染物的降解效率和机理,也开展活性污泥法结合反应器构筑不同污水处理工艺并对工艺进行参数改进方面的研究。本实验室在 2014 年针对集约化猪场排放的高 COD、高氨氮污水,在传统的“半短程硝化+厌氧氨氧化”工艺的基础上,增加了 COD 去除功能,改进并提出了“UASB 厌氧消化+SBR 短程硝化+UASB 厌氧氨氧化”这一新型工艺。先后在实验室、广东中试基地进行小试和中试,在新型工艺处理猪场污水方面积累了大量的反应器运行经验。在反应器调试过程中,还同时对反应器污泥定期取样,进行高通量测序并分析其群落结构变化。这一工作有助于

更加深刻认识反应器运行过程中微生物,特别是发挥除氮功能的微生物群落结构的改变。本实验室在控制半短程硝化过程中氨氮转化、亚硝氮的积累方面做了很多工作,在之前的工作中获得的经验与心得可以为今后羟胺代谢对短程硝化影响方面的研究提供帮助。虽然前方困难重重,我们研究的也只是“冰山一角”,但相信通过大家的不懈努力,一定会为水污染控制工作献出一份力。

REFERENCES

- [1] Jiang T, Li Y, Sheng AZ, et al. Review of rural sewage treatment modes and technologies[J]. *Environment and Sustainable Development*, 2018, 43(4): 79-83 (in Chinese)
蒋涛, 李亚, 盛安志, 等. 农村生活污水治理模式与技术研究综述[J]. *环境与可持续发展*, 2018, 43(4): 79-83
- [2] Fan H, Shi C. Problems and measures of activated sludge process in sewage treatment[J]. *Modern Chemical Research*, 2018(10): 20-21 (in Chinese)
樊华, 史辰. 活性污泥法在污水处理中的问题及措施[J]. *当代化工研究*, 2018(10): 20-21
- [3] Miao L, Yang GQ, Tao T, et al. Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments—A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 235: 178-185
- [4] Canals O, Salvadó H, Auset M, et al. Microfauna communities as performance indicators for an A/O shortcut biological nitrogen removal moving-bed biofilm reactor[J]. *Water Research*, 2013, 47(9): 3141-3150
- [5] Chen CJ, Zhang R, Wang L, et al. Removal of nitrogen from wastewater with perennial ryegrass/artificial aquatic mats biofilm combined system[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(4): 670-676
- [6] Gkotsis P, Tsilogeorgis J, Zouboulis A. Hydraulic performance and fouling characteristics of a membrane sequencing batch reactor (MSBR) for landfill leachate treatment under various operating conditions[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(13): 12274-12283
- [7] He ZX, Yuan LJ, Wei YN, et al. N₂O emission and hydroxylamine oxidase (HAO) activity in a nitrogen removal process based on activated sludge with three COD/NH₄⁺ ratios[J]. *Water Environment Research*, 2017, 89(5): 387-395
- [8] Ni BJ, Joss A, Yuan ZG. Modeling nitrogen removal with partial nitrification and anammox in one flocc-based sequencing batch reactor[J]. *Water Research*, 2014, 67: 321-329
- [9] Ahn JH, Kwan T, Chandran K. Comparison of partial and full nitrification processes applied for treating high-strength nitrogen wastewaters: microbial ecology through nitrous oxide production[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(7): 2734-2740
- [10] Ye LH, Li D, Zhang J, et al. Start-up and performance of partial nitrification process using short-term starvation[J]. *Bioresour Technol*, 2019, 276: 190-198

- [11] Wang QL, Ye L, Jiang GM, et al. Side-stream sludge treatment using free nitrous acid selectively eliminates nitrite oxidizing bacteria and achieves the nitrite pathway[J]. *Water Research*, 2014, 55: 245-255
- [12] Gao DW, Liu L, Liang H, et al. Aerobic granular sludge: characterization, mechanism of granulation and application to wastewater treatment[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2011, 31(2): 137-152
- [13] Hwang IS, Min KS, Choi E, et al. Nitrogen removal from piggery waste using the combined SHARON and ANAMMOX process[J]. *Water Science & Technology*, 2005, 52(10/11): 487-494
- [14] Vlaeminck SE, de Clippeleir H, Verstraete W. Microbial resource management of one-stage partial nitrification/anammox[J]. *Microbial Biotechnology*, 2012, 5(3): 433-448
- [15] Qiu SK, Hu YS, Liu R, et al. Start up of partial nitrification-anammox process using intermittently aerated sequencing batch reactor: performance and microbial community dynamics[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647: 1188-1198
- [16] Du WL. Treatment of piggery wastewater and analyses of microbial communities in the bioreactors[D]. Beijing: Doctoral Dissertation of Chinese Academy of Sciences, 2018 (in Chinese) 杜伟丽. 猪场污水资源化处置及反应器内微生物群落结构分析[D]. 北京: 中国科学院博士学位论文, 2018
- [17] Bai YH, Sun QH, Wen DH, et al. Abundance of ammonia-oxidizing bacteria and archaea in industrial and domestic wastewater treatment systems[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2012, 80(2): 323-330
- [18] Speth DR, In't Zandt MH, Guerrero-Cruz S, et al. Genome-based microbial ecology of anammox granules in a full-scale wastewater treatment system[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11172
- [19] Date Y, Isaka K, Ikuta H, et al. Microbial diversity of anammox bacteria enriched from different types of seed sludge in an anaerobic continuous-feeding cultivation reactor[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2009, 107(3): 281-286
- [20] Ge SJ, Wang SY, Yang X, et al. Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: a review[J]. *Chemosphere*, 2015, 140: 85-98
- [21] Hu M, Wang XH, Wen XH, et al. Microbial community structures in different wastewater treatment plants as revealed by 454-pyrosequencing analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 117: 72-79
- [22] Rodriguez-Sanchez A, Gonzalez-Martinez A, Martinez-Toledo MV, et al. The effect of influent characteristics and operational conditions over the performance and microbial community structure of partial nitrification reactors[J]. *Water*, 2014, 6(7): 1905-1924
- [23] Du WL, Huang Q, Miao LL, et al. Association of running manner with bacterial community dynamics in a partial short-term nitrifying bioreactor for treatment of piggery wastewater with high ammonia content[J]. *AMB Express*, 2016, 6: 76
- [24] Hermansson A, Lindgren PE. Quantification of ammonia-oxidizing bacteria in arable soil by real-time PCR[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, 67(2): 972-976
- [25] Wei D, Ngo HH, Guo WS, et al. Partial nitrification granular sludge reactor as a pretreatment for anaerobic ammonium oxidation (Anammox): achievement, performance and microbial community[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 269: 25-31
- [26] Gao J, Duan Y, Liu Y, et al. Long- and short-chain AHLs affect AOA and AOB microbial community composition and ammonia oxidation rate in activated sludge[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 78: 53-62
- [27] Liu CS, Li WF, Li XC, et al. Nitrite accumulation in continuous-flow partial autotrophic denitrification reactor using sulfide as electron donor[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 243: 1237-1240
- [28] Liu BB, Mao YJ, Bergaust L, et al. Strains in the genus *Thauera* exhibit remarkably different denitrification regulatory phenotypes[J]. *Environmental Microbiology*, 2013, 15(10): 2816-2828
- [29] Joo HS, Hirai M, Shoda M. Characteristics of ammonium removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis* No. 4[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2005, 100(2): 184-191
- [30] Soler-Jofra A, Stevens B, Maaik H, et al. Importance of abiotic hydroxylamine conversion on nitrous oxide emissions during nitrification of reject water[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 287: 720-726
- [31] Liu SR, Han P, Hink L, et al. Abiotic conversion of extracellular NH_2OH contributes to N_2O emission during ammonia oxidation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(22): 13122-13132
- [32] Wan XY, Xiao PY, Zhang DJ, et al. The kinetics for ammonium and nitrite oxidation under the effect of hydroxylamine[J]. *Water Science & Technology*, 2015, 73(5): 1067-1073
- [33] Okabe S, Oshiki M, Takahashi Y, et al. N_2O emission from a partial nitrification-anammox process and identification of a key biological process of N_2O emission from anammox granules[J]. *Water Research*, 2011, 45(19): 6461-6470
- [34] Terada A, Sugawara S, Hojo K, et al. Hybrid nitrous oxide production from a partial nitrifying bioreactor: hydroxylamine interactions with nitrite[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(5): 2748-2756