

厌氧氨氧化在废水处理中的研究及应用进展

沈明玉^{1,2}, 吴莉娜^{1,2}, 李志^{1,2}, 彭永臻³, 张树军⁴, 杨岸明⁴

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 环境与能源工程学院, 北京 100044; 3. 北京工业大学 城镇污水深度处理与资源化利用技术国家工程实验室, 北京 100124; 4. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100022)

摘要: 针对传统脱氮技术的高能耗、低效率, 厌氧氨氧化技术凭借其高效率、低能耗应运而生, 成为未来废水生物脱氮处理行业里的新星。较为全面地介绍了厌氧氨氧化菌菌种, 详细阐述了生物菌群的生态分布、多样性以及这两者与环境因素(温度、盐度、基质浓度等)的关系, 同时对厌氧氨氧化脱氮效率的影响因素及受业界认可的工程应用等进行了分析说明。最后, 对我国如何实现传统工艺向新兴高效工艺的实践应用转型提出一些建议思考。

关键词: 厌氧氨氧化; 生态分布多样性; 影响因素

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)06-0016-06

Research and Application Progress of Anaerobic Ammonium Oxidation in Wastewater Treatment

SHEN Ming-yu^{1,2}, WU Li-na^{1,2}, LI Zhi^{1,2}, PENG Yong-zhen³, ZHANG Shu-jun⁴, YANG An-ming⁴

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. National Engineering Laboratory for Advanced Municipal Wastewater Treatment and Reuse Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 4. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: Because of the high energy consumption, low efficiency of traditional denitrification technology and the lower energy consumption and higher efficiency of anaerobic ammonia oxidation technology, the former would be replaced by the latter in the future. The anaerobic ammonium oxidation has been a star in wastewater treatment nitrogen elimination process. As so far, the more comprehensive cultures of anaerobic ammonia oxidation bacteria were introduced in this paper. It was elaborated the following aspects: the diversity and ecological distribution of microbial community and the relationship between them and environmental factors (temperature, salinity, substrate concentration, etc.). At the same time, the influencing factors of anaerobic ammonia oxidation nitrogen removal efficiency and the engineering applications approved by the industry were analyzed and explained. Finally, some suggestions on the transition from traditional process application to new and high efficient process were put forward.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678057); 北京市自然科学基金资助项目(8192010); 北京建筑大学市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X18095、X18110)

通信作者: 吴莉娜 E-mail: wulina@bucea.edu.cn

Key words: anammox; variety of ecological distribution; influencing factors

随着水处理行业的进步与发展,以厌氧氨氧化技术为主要研究对象的可持续水处理技术将成为业界现在以及未来的热点。但是,作为化能自养的专性厌氧菌 AnAOB,最大比生长率仅为 0.0027 h^{-1} ,倍增速度迟滞,对生长环境要求严苛,对一些污染物的耐受性差,启动困难,这也成为 Anammox 工艺工程化应用的最大瓶颈^[1]。近来,Guo 等^[2-3]通过研究细菌通信对 AnAOB 菌群生命活动的影响与调节,发现分子信号(c-di-GMP)可以通过调控细菌多种代谢活动来控制细菌生物膜的形成和团聚,从而调控厌氧氨氧化菌群对环境的适应能力。这一发现表明,要突破 AnAOB 对环境敏感的瓶颈,分子生物学的研究将是未来的主要攻关方向。随着研究者对厌氧氨氧化领域的深入探索,对生物脱氮效能影响因素的研究不断取得新进展。这些研究进展都为厌氧氨氧化的工程化应用和推广提供了更加坚实的理论基础和先驱引领作用。

1 厌氧氨氧化菌的生态分布及多样性

1.1 生态分布

厌氧氨氧化菌最初在人工生境中发现,随后在海洋沉积物、油田、河口沉积物、厌氧海洋盆地、红树林地区、海洋冰块、淡水湖、稻田土壤、湖港区以及海底热泉等自然生境中相继发现。近年来,我国研究学者姜博等^[4]在低温高海拔地区亦发现了厌氧氨氧化菌。厌氧氨氧化菌在自然生境中对氮循环的贡献起着很重要的作用,部分自然生境的贡献率^[4-6]如表 1 所示。

表 1 不同自然生境对氮循环的贡献情况

Tab. 1 Contribution of different natural habitats to nitrogen cycle %

自然生境	脱氮贡献率
海洋沉积物	24 ~ 67
河口地区	1 ~ 24
厌氧海洋盆地	> 40
海洋冰块	19
淡水湖	13
稻田土壤	4 ~ 37
湖港区	1 ~ 8
低温高海拔地区	82.88

1.2 多样性

自然界广泛存在的厌氧氨氧化菌属于浮霉菌门

(Planctomycetes),根据文献报道,截至目前,已明确命名的厌氧氨氧化菌有 6 属^[7-17],已超过 23 种^[18]。此外,一些文献相继报道了 6 属之外的菌属。Hu 等^[19]在湿地中发现了一种未知厌氧氨氧化菌,所得 16S rRNA 功能基因克隆序列的 OTU 介于 *Brocadia* 菌和 *Jettenia* 菌之间。姜博等^[4]在低温高海拔地区亦发现了一种介于 *Brocadia* 菌和 *Jettenia* 菌之间的未知厌氧氨氧化菌。由于天山高纬地区的生物多样性单一,与淡水湿地的生境条件存在相似性,可以推测这是一种新菌群的存在。Sonthiphand 等^[20]在厌氧氨氧化菌的生物地理分布中提到淡水生境中的厌氧氨氧化菌 16S rRNA 的大多数基因序列是前所未有的,也就是说在淡水生境中可能存在新的菌群。

研究报道表明,厌氧氨氧化菌的生态多样性和自然环境分布相关的影响因素已初见端倪,如温度、海底沉积物的深度、有机碳、氨氮浓度、盐度等。重要的是,大量文献报道了盐度与厌氧氨氧化菌的多样性相关性^[20-21],在不同盐度下,厌氧氨氧化菌种间存在竞争,优势菌种发生转换,如在高盐度条件下,经过长期培养,生物反应器中的优势菌种 *Ca. Kuenenia* 转变为 *Ca. Scalindua*。Sonthiphand 等^[20]通过基于 2013 年以前的基因数据库,使用 UniFrac 离散矩阵的分析方法,针对 15 种环境下的厌氧氨氧化菌进行实验,结果表明样品分布与盐度呈现出强烈的相关性,但含盐和中等含盐条件下的样品分布在一起,无盐条件的样品单独分布。含盐条件下的生态环境,主要菌种分别是 *Ca. Scalindua*(几乎未在无盐生态环境下检测出)、*Ca. Kuenenia*,而其他种属多见于淡水环境中。不难看出,淡水环境下厌氧氨氧化菌菌种更具多样性。

2 厌氧氨氧化的影响因素

厌氧氨氧化菌对环境的要求近乎苛刻,从接种启动、运行到出水涉及影响厌氧氨氧化反应的因素有很多,例如反应装置(反应器类型、污泥性质、填料等),底物浓度(有机物、基质、无机盐、金属离子等),环境影响因素(DO、pH 值、温度等)等。在此着重阐述氮素基质、污泥龄、有机碳源等因素对脱氮效率的影响。

2.1 基质

厌氧氨氧化反应的氮素基质氨氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和

亚硝态氮($\text{NO}_2^- - \text{N}$)浓度及其比例的不同会对厌氧氨氧化反应起到促进或抑制作用。

根据厌氧氨氧化反应化学方程式, 基质氮源 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度理论比值为 1.32。但由于反应器运行工况、环境因素、菌群多样性和丰度差异等客观条件的存在, 使得最适厌氧氨氧化反应的基质氮源浓度比不同。

安芳娇等^[22]采用厌氧氨氧化反应器(ASBR)处理低基质浓度(30 mg/L 左右)人工模拟废水, 在温度为 30 °C, pH 值为 7.2 ± 0.2 , 氮源浓度比值为 1.4 时, 系统脱氮效果最好。闫刚等^[23]采用厌氧折流板反应器(ABR), 处理低基质浓度(100 mg/L 左右)人工模拟废水, 控制温度为 (33 ± 2) °C, pH 值为 7.5 ± 0.5 , 基质浓度比值为 1.34 时, 脱氮效果最好。

厌氧氨氧化受氨氮浓度影响较小, 其阈值可达到 1 000 mg/L, 而当亚硝态氮浓度过高时, 则会对其反应产生抑制作用。研究者们针对亚硝酸浓度阈值展开了广泛研究。丁爽等^[24]采用分批培养法研究单一基质抑制情况, 得出了亚硝酸浓度阈值高达 565.3 mg/L, 利用剂量-效应模型进行非线性回归拟合, 得到了亚硝酸浓度可信限为 239.0 ~ 916.3 mg/L。此外, 试验研究还发现不同的 AnAOB 对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 耐受程度不同, *Kuenenia stuttgartiensis* 的耐受程度强于 *Brocadia anammoxidans*。所以基质对反应的影响并不是绝对的, 尽管 AnAOB 受环境影响较大, 但菌种仍然可以根据需要驯化出优势菌种, 提高耐受性。

2.2 污泥龄

污泥龄是污水处理设计、运行、决定种群结构及出水水质的重要参数。但在厌氧氨氧化水处理研究进展中, 对污泥龄影响脱氮能力的专项研究并不多。张杰等^[25]利用 SBR 反应器分别研究梯度污泥量对 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除负荷(N_r)和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 污泥负荷(N_s)的影响情况, 从而研究相应情况下的脱氮性能。结果表明随着污泥龄的降低, 污泥龄由 21 d 降到 12 d, 系统整体的脱氮效能下降 16%, 但单位质量的厌氧氨氧化菌脱氮效能增加了 66.8%。Cao 等^[26]研究表明悬浮态的 *Candidatus Brocadia* sp. 40 世代时间短、繁殖速度快, 在较低污泥龄条件下脱氮效能明显, 自养脱氮贡献率可达到 37.5%。徐光景^[27]提到在 MBBR 中试装置中控制较低的污泥龄, 实现短程硝化亚硝态氮的积累, 得到有利于厌氧氨氧化反

应发生的氮素基质, 以发挥厌氧氨氧化高效脱氮的作用。

2.3 有机碳源

众所周知, 厌氧氨氧化技术几乎无需外加碳源, 但废水中是不可能不存在碳源的, 尽管有很多学者进行了这方面的研究, 但是不同的有机碳源及其浓度等对厌氧氨氧化菌是抑制作用还是促进作用没有明确的定论。后经过一系列研究, 发现 COD 整体会增强反硝化作用, 从而抑制 AnAOB 活跃度。随着研究的不断深入, 管勇杰等^[28]认为不同的有机碳源对厌氧氨氧化的促进作用不同。在常见碳源中, 蔗糖对反应器脱氮能效具有明显促进作用, 而同一种碳源, 在不同浓度下 AnAOB 活跃度不同, 反应器脱氮性能亦不相同。需要说明的是, 在有机碳源不抑制厌氧氨氧化反应时, 系统主要是通过厌氧氨氧化反应和反硝化反应的共同作用, 提高硝态氮的去除率, 从而提高了系统总氮的去除率, 增强反应器脱氮性能。

3 实际工程应用

随着厌氧氨氧化水处理工程的应用研究不断取得突破, 实际工程的建设在全世界范围内兴起。据报道, 截至 2017 年, 全世界厌氧氨氧化工程已超过 110 座^[29]。

上述已建或在建厌氧氨氧化工程应用于污水处理, 主要针对污泥消化液、高氨氮废水、低碳氮比的污泥液、厕所水、垃圾渗滤液、养殖废水、焦化废水等, 对于其他领域有待推广。因消化液具有温度高、水质波动小、低碳氮比的特点, 世界上第一座厌氧氨氧化工程就是用于处理污泥消化液, 世界上半数以上的工程也是用于处理污泥消化液。

3.1 新加坡樟宜污水厂

近几年厌氧氨氧化技术转向了市政水处理的应用研究。水处理技术正逐渐由厌氧氨氧化侧流技术向主流技术转变。

2017 年厌氧氨氧化技术在水处理行业取得新突破, 新加坡的樟宜污水处理厂成为迄今为止第一座稳定运行的主流厌氧氨氧化工程的污水处理厂。由曹业始博士主导的樟宜水处理系列项目, 实现了主流部分硝化和厌氧氨氧化, 同时强化了生物除磷。樟宜污水厂采用分段式活性污泥工艺(SFAS), 具体流程见图 1。该厂设计处理量为 $80 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 共 4 个相同的部分, 每部分设计处理量为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,

出水水质良好:TN < 5 mg/L, TP < 3 mg/L, 氨氮 < 3 mg/L, COD 控制在 30 mg/L 左右^[30-31]。优势菌种为 AOB 以及 *Candidatus Brocadia* sp. 40 为主的悬浮的游离 AnAOB, 其自养脱氮过程的贡献率为 37.5%^[26]。此外, 樟宜污水厂能耗降低达 60%, 产泥率降低达 80%。

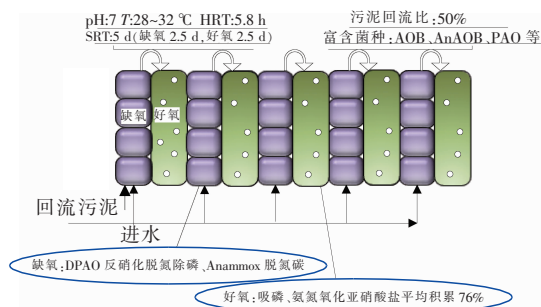


图1 新加坡樟宜污水厂工艺流程

Fig. 1 Technological process of Changi water reclamation plant in Singapore

樟宜污水厂主流厌氧氨氧化工程的成功运行与新加坡得天独厚的水温(28~32℃)是分不开的, 未来主流厌氧氨氧化在低温地区的应用还有很大的研究空间。

3.2 湖北十堰西部垃圾填埋场

我国对于渗滤液的处理从水质特性、处理技术再到处理工艺的研究, 已经形成了比较成熟的、全面的垃圾渗滤液研究系统^[32]。但将厌氧氨氧化技术与垃圾渗滤液处理相结合的研究仅是从近几年开始发展兴起的。短程硝化耦合厌氧氨氧化反应处理垃圾渗滤液的关键就是控制游离氨、游离亚硝酸, 实现氨氧化途径的亚硝酸积累^[33-34]。基于各位学者的不懈努力研究, 我国于2015年2月正式调试启动首个厌氧氨氧化技术处理垃圾渗滤液工程——湖北十堰垃圾渗滤液处理工程。

该工程设计日处理渗滤液为 150 m³, 采用自主驯养的厌氧氨氧化菌——芮诺卡, 采用两级 UASB 厌氧污泥床、ANAMMOX 脱氮、MBR/RO 膜过滤联合处理工艺(见图2), 出水水质完全达到《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)。

该工艺克服了低碳氮比的工程应用难题, COD 出水控制在 100 mg/L, TN 出水控制在 40 mg/L, 氨氮出水控制在 25 mg/L。湖北十堰垃圾渗滤液处理工程的成功运行, 为厌氧氨氧化技术实现高效处理、节能、降耗的工程应用带来了革命性的希望。

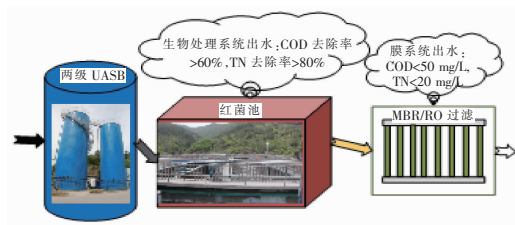


图2 十堰垃圾渗滤液联合工艺流程

Fig. 2 Combined treatment process of landfill leachate in Shiyan

4 结语

尽管厌氧氨氧化菌对生长环境要求挑剔, 但随着学者们的不断研究深入, 厌氧氨氧化菌种属分支不断壮大, 厌氧氨氧化反应的影响因素越来越明确, 对于最佳脱氮效能的一些核心因素越来越得到精准控制, 这些都为实现厌氧氨氧化工程的实际应用提供了基础和保障。除了上述外在影响因素的研究, 未来的发展方向可在分子生物方面进一步加强研究。根据厌氧氨氧化菌脱氮涉及的代谢过程, 可知酶的基因表达是其功能核心, 针对 AnAOB 对环境敏感的瓶颈, 认为在分子生物水平上深入研究调控促进 AnAOB 代谢的方向前景广阔, 潜力大。

参考文献:

- [1] 陈重军, 王建芳, 张海芹, 等. 厌氧氨氧化污水处理工艺及其实际应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 521-527.
Chen Chongjun, Wang Jianfang, Zhang Haiqin, et al. Research progress in anammox wastewater treatment system and its actual application [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(3): 521-527 (in Chinese).
- [2] Guo Y, Liu S, Tang X, et al. Role of c-di-GMP in anammox aggregation and systematic analysis of its turnover protein in *Candidatus Jettenia caeni*[J]. Water Res, 2017, 113: 181-190.
- [3] Guo Y, Liu S, Tang X, et al. Insight into c-di-GMP regulation in anammox aggregation in response to alternating feed loadings [J]. Environ Sci Technol, 2017, 51(16): 9155-9164.
- [4] 姜博, 祝贵兵, 周磊, 等. 低温高海拔湖泊岸边带厌氧氨氧化菌的存在、生物多样性及活性——以天山天池为例[J]. 环境科学学报, 2015, 35(7): 2045-2051.

- Jiang Bo, Zhu Guibing, Zhou Leiliu, *et al.* The activity and diversity analysis of anaerobic ammonium oxidation bacteria in the littoral sediments of the Heavenly Lake [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35 (7): 2045 – 2051 (in Chinese).
- [5] Li H, Chen S, Mu B, *et al.* Molecular detection of anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) bacteria in high-temperature petroleum reservoirs [J]. *Microb Ecol*, 2010, 60(4): 771 – 783.
- [6] Zhu G, Wang S, Wang Y, *et al.* Anaerobic ammonia oxidation in a fertilized paddy soil [J]. *ISME J*, 2011, 5 (12): 1905 – 1912.
- [7] Hou L, Zheng Y, Liu M, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation (anammox) bacterial diversity, abundance, and activity in marsh sediments of the Yangtze Estuary [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2014, 118(3): 1237 – 1246.
- [8] Wu L, Li Z, Zhao C, *et al.* A novel partial-denitrification strategy for post-anammox to effectively remove nitrogen from landfill leachate [J]. *Sci Total Environ*, 2017, 633: 745 – 751.
- [9] Araujo J C, Campos A C, Correa M M, *et al.* Anammox bacteria enrichment and characterization from municipal activated sludge [J]. *Water Sci Technol*, 2011, 64(7): 1428 – 1434.
- [10] Rothrock M J, Vanotti M B, Szögi A A, *et al.* Long-term preservation of anammox bacteria [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2011, 92(1): 147 – 157.
- [11] Narita Y, Zhang L, Kimura Z I, *et al.* Enrichment and physiological characterization of an anaerobic ammonium-oxidizing bacterium ‘*Candidatus Brocadia sapporoensis*’ [J]. *Syst Appl Microbiol*, 2017, 40(7): 448 – 457.
- [12] Ali M, Oshiki M, Awata T, *et al.* Physiological characterization of anaerobic ammonium oxidizing bacterium ‘*Candidatus Jettenia caeni*’ [J]. *Environ Microbiol*, 2015, 17(6): 2172 – 2189.
- [13] Nikolaev A, Kozlov M N, Kevbrina M V, *et al.* *Candidatus “Jettenia moscovienalis”* sp. nov., a new species of bacteria carrying out anaerobic ammonium oxidation [J]. *Microbiology*, 2015, 84(2): 256 – 262.
- [14] van de Vossenberg J, Woebken D, Maalcke W J, *et al.* The metagenome of the marine anammox bacterium ‘*Candidatus Scalindua profunda*’ illustrates the versatility of this globally important nitrogen cycle bacterium [J]. *Environ Microbiol*, 2013, 15(5): 1275 – 1289.
- [15] Fuchsman C A, Staley J T, Oakley B B, *et al.* Free-living and aggregate-associated *Planctomycetes* in the Black Sea [J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2012, 80(2): 402 – 416.
- [16] Hong Y G, Meng L, Cao H, *et al.* Residence of habitat-specific anammox bacteria in the deep-sea subsurface sediments of the south China sea; Analyses of marker gene abundance with physical chemical parameters [J]. *Microb Ecol*, 2011, 62(1): 36 – 47.
- [17] Khramenkov S V, Kozlov M N, Kevbrina M V, *et al.* A novel bacterium carrying out anaerobic ammonium oxidation in a reactor for biological treatment of the filtrate of wastewater fermented residue [J]. *Microbiology*, 2013, 82(5): 628 – 636.
- [18] Gao D, Wang X, Liang H, *et al.* Anaerobic ammonia oxidizing bacteria: Ecological distribution, metabolism, and microbial interactions [J]. *Front Environ Sci Eng*, 2018, 12(3): 10 – 27.
- [19] Hu B, Rush D, van der Biezen E, *et al.* New anaerobic, ammonium-oxidizing community enriched from peat soil [J]. *Appl Environ Microbiol*, 2011, 77(3): 966 – 971.
- [20] Sonthiphand P, Hall M W, Neufeld J D. Biogeography of anaerobic ammonia-oxidizing (anammox) bacteria [J]. *Front Microbiol*, 2014. DOI: 10.3389/fmicb.2014.00399.
- [21] Hu B, Shen L, Du P, *et al.* The influence of intense chemical pollution on the community composition, diversity and abundance of anammox bacteria in the Jiaojiang Estuary (China) [J]. *PloS One*, 2012. DOI: 10.1371/journal.pone.0033826.
- [22] 安芳娇, 彭永臻, 张永辉, 等. 基质比对厌氧氨氧化脱氮性能的影响 [J]. *环境科学学报*, 2018, 38(3): 1010 – 1015.
- An Fangjiao, Peng Yongzhen, Zhang Yonghui, *et al.* Effect of substrate ratio on the performance of nitrogen removal through anaerobic ammonia oxidation [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(3): 1010 – 1015 (in Chinese).
- [23] 阎刚, 徐乐中, 沈耀良, 等. 基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 [J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 2006 – 2011.
- Lü Gang, Xu Lezhong, Shen Yaoliang, *et al.* Effect of substrate ratio on nitrogen removal performance of ANAMMOX in ABR [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(5): 2006 – 2011 (in Chinese).
- [24] 丁爽, 郑平, 毕竑, 等. 基质性毒物对厌氧氨氧化富集培养物的单独和联合抑制效应 [J]. *环境科学学报*,

- 2017,37(8):2936–2943.
- Ding Shuang, Zheng Ping, Bi Hong, *et al.* Independent and joint inhibition effects of substrate-toxicants on anaerobic ammonia oxidation (anammox) enrichment culture [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8):2936–2943 (in Chinese).
- [25] 张杰,张泽文,李冬,等. 不同污泥龄厌氧氨氧化菌的脱氮效能及其动力学特性[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,50(8):1–7.
- Zhang Jie, Zhang Zewen, Li Dong, *et al.* Nitrogen removal efficiency and kinetic characteristics of anammox bacteria at different sludge ages [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 50(8):1–7 (in Chinese).
- [26] Cao Yesi, Kwok Bee Hong, Yan Zhou, 等. 新加坡最大回用水处理厂污水短程硝化厌氧氨氧化脱氮工艺[J]. 北京工业大学学报,2015,41(10):1441–1454.
- Cao Yesi, Kwok Bee Hong, Yan Zhou, *et al.* Mainstream partial nitrification/anammox nitrogen removal in the largest water reclamation plant in Singapore [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, 41(10):1441–1454 (in Chinese).
- [27] 徐光景. 基于化学法控制的亚硝化与厌氧氨氧化的耦合工艺研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- Xu Guangjing. Performance of Nitrification Adjusted by Chemical Method and the Following ANAMMOX [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese).
- [28] 管勇杰,于德爽,李津,等. 有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能[J]. 环境科学,2017,38(2):654–664.
- Guan Yongjie, Yu Deshuang, Li Jin, *et al.* Nitrogen removal performance of ANAMMOX with different organic carbon sources [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(2):654–664 (in Chinese).
- [29] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences—An application survey [J]. *Water Res*, 2014, 55(10):292–303.
- [30] Cao Y, Kwok B H, van Loosdrecht M C M, *et al.* The occurrence of enhanced biological phosphorus removal in a 200,000 m³/day partial nitrification and Anammox activated sludge process at the Changi water reclamation plant, Singapore [J]. *Water Sci Technol*, 2017, 75(3/4):741–751.
- [31] Cao Y, Kwok B H, van Loosdrecht M C M, *et al.* Mainstream partial nitrification and anammox in a 200,000 m³/day activated sludge process in Singapore: Scale-down by using laboratory fed-batch reactor [J]. *Water Sci Technol*, 2016, 74(1):48–56.
- [32] 吴莉娜,涂楠楠,程继坤,等. 垃圾渗滤液水质特性和处理技术研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(31):136–143.
- Wu Lina, Tu Nannan, Cheng Jikun, *et al.* Research of the characteristics and treatment technology of landfill leachate [J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(31):136–143 (in Chinese).
- [33] 黄奕亮,张立秋,李淑更,等. 短程硝化厌氧氨氧化联合处理实际垃圾渗滤液[J]. 工业水处理,2018,38(3):37–41.
- Huang Yiliang, Zhang Liqiu, Li Shugeng, *et al.* Combined treatment of landfill leachate by short-cut nitrification and anaerobic ammonium oxidation [J]. *Industrial Water Treatment*, 2018, 38(3):37–41 (in Chinese).
- [34] Wu L, Liang D, Xu Y, *et al.* A robust and cost-effective integrated process for nitrogen and bio-refractory organics removal from landfill leachate via short-cut nitrification, anaerobic ammonium oxidation in tandem with electrochemical oxidation [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 212:296–301.



作者简介:沈明玉(1990–),女,河北河间人,硕士研究生,研究方向为水污染控制、垃圾渗滤液处理和厌氧氨氧化等。

E-mail: pipi126521@163.com

收稿日期:2018–09–15