

## 基于主流厌氧氨氧化的 AB 工艺应用前景

姜 珊, 付昆明, 苏雪莹, 仇付国, 廖敏辉

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

**摘 要:** 基于未来可能的主流厌氧氨氧化应用, 总结与分析了 AB 工艺的 A 段中微生物的研究现状、净化机理以及 A 段中存在的胞外聚合物 (EPS) 的作用与影响。A 段对污水中碳源的回收, 存在着吸附、絮凝、沉降以及生物作用等多种过程, 其中, 增加进水 SS、升高 EPS 含量、提高 pH 值、加入二价或三价阳离子、降低多糖含量等方法均可提高污泥的絮凝、沉降、吸附性能。在强化 A 段捕捉有机物的研究中发现, 投加化学絮凝剂是较为可行的强化方法, 可以将  $BOD_5$  去除率提高到 60% ~ 70%。想要进一步降低  $BOD_5/N$  比值还需要在 B 段进一步降低有机物的值, 可在新提出的两种工艺的短程硝化阶段或是有机物氧化阶段通过调节 DO 值, 氧化分解有机物使得 ANAMMOX 菌具有良好活性, 以实现主流 ANAMMOX 工艺。

**关键词:** AB 工艺; 污泥吸附; 污泥絮凝; 胞外聚合物

**中图分类号:** TU992.3 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2018)22-0025-06

## Application Prospects of Adsorption – Biodegradation (AB) Process Based on Mainstream ANAMMOX

JIANG Shan, FU Kun-ming, SU Xue-ying, QIU Fu-guo, LIAO Min-hui

(Sino – Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Based on the possible application of anaerobic ammonia oxidation in the main treatment process in future, this paper summarized and analyzed the research status of microorganisms and purification mechanism in A-stage of AB process, as well as the effect of the extracellular polymer substances (EPS) in the A-stage. There were many processes such as adsorption, flocculation, sedimentation and biodegradation in the A-stage. Among them, it could be found that increasing influent SS, the EPS content and pH, adding two or trivalent cationic flocculants, and reducing the content of polysaccharide could improve the adsorption, flocculation sedimentation performance of sludge. In the study on strengthening the performance to capture organic matter in A-stage, it was found that the addition of chemical flocculants was a feasible method to increase the removal rate of  $BOD_5$  to 60% – 70%. To further reduce the  $BOD_5/N$  ratio, it was necessary to further reduce the value of organic matter in B-stage, which could

基金项目: 北京市教育委员会科技发展计划项目 (SQKM201710016006); 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 (X18214)

通信作者: 付昆明 E-mail: fukunming@163.com

be realized by adjusting the DO value in the short-term nitrification stage of the two new processes or in the oxidative stage of organic matter. The oxidative decomposition organic compounds makes ANAMMOX bacteria had good activity to achieve the mainstream ANAMMOX process.

**Key words:** AB process; sludge adsorption; sludge flocculation; extracellular polymeric substances

与传统的活性污泥法相比,AB工艺具有体积小、污水处理工艺设备简易、拥有独特的适应各段要求的微生物、对毒物忍受能力强等优势,自1977年出现以来发展迅速。但由于AB工艺主要以处理污水中有机物为主,随着脱氮除磷的问题被日益关注,AB工艺由于不能够适应脱氮除磷的要求,而逐渐被淘汰,原有的AB工艺大多被改造成具有同步脱氮除磷功能的污水处理工艺。20世纪90年代,革命性的厌氧氨氧化(ANAMMOX)工艺诞生,因其解决了常规脱氮工艺对于碳源竞争的问题,不需要有机碳源,也就无需为后续脱氮保留碳源。目前,主流ANAMMOX应用的难点主要有:其一是污水中有机物存在对于后续ANAMMOX造成干扰,其二是低 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 条件下的亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>B</sub>)的抑制问题。本文主要关注第一点,在脱氮前,对于有机物进行预处理成为了必然选择。此时,AB工艺重新走入研究人员的视野之中,利用AB工艺中的A段先对污水中容易利用的碳源进行吸附,其后污水进行部分亚硝化(partial nitritation),然后进行ANAMMOX反应<sup>[1]</sup>,或者直接进行CANON反应<sup>[2]</sup>。而A段富含有机物的污泥进入厌氧发酵,产生能量,而且由于A段以絮凝吸附作用为主,因此收集的此类碳源更容易利用,然后在B段利用ANAMMOX技术实现脱氮。由此可见,AB工艺结合ANAMMOX技术,便可在污水处理的同时实现能源回收。

目前,大部分研究人员关注的主要问题是,如何在B段实现ANAMMOX,但很少有人关注A段的有机物去除问题,而有机物能否被去除,对于后续的ANAMMOX过程至关重要。但是,在应用主流ANAMMOX时,有机物往往难以去除完全,有研究表明当 $\text{BOD}_5/\text{N} > 0.5$ 时,异养菌如反硝化菌便会与ANAMMOX菌竞争生长空间和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ <sup>[3]</sup>。由于反硝化菌的生长速度高于ANAMMOX菌,若此时有可溶性 $\text{BOD}_5$ 的存在,更会增加反硝化菌在竞争中的优势<sup>[4,5]</sup>。也有学者将 $\text{BOD}_5/\text{N}$ 的值控制在 $0.1 \sim 0.5$ <sup>[6]</sup>和 $0 \sim 2$ <sup>[7]</sup>,也发现相同规律。由此可见,若有

机物去除不完全,会限制ANAMMOX菌的生长繁殖,使ANAMMOX菌无法占据主导地位,在脱氮中起到的作用可能微乎其微,其节能优势也就无法显现,主流ANAMMOX也就失去了意义。因此,AB工艺的处理效果,尤其是A段对有机物的去除效果,对于后续的ANAMMOX有重要影响。为此从增强A段对于有机物的捕捉,利用AB工艺降低污水中的有机物等方面展开讨论和研究,以利于后续的ANAMMOX处理。

### 1 A段捕捉有机物的机理

A段微生物的活性和密度都很高,同时具有很强的代谢能力,可以大量储存营养物质,对非溶解性有机物的去除效率可高达70%左右。描述活性污泥絮凝、沉淀、吸附机理的学说主要包括:荚膜学说、电动势-含能学说、菌体外纤维素纤维学说、原生动物学说、电性中和学说、丝状网架结构模型、二价阳离子架桥学说、胞外聚合物(EPS)学说等。目前,比较被认同的絮凝机理是胞外聚合物及二价阳离子架桥学说。

EPS是指所有存在于细胞外、未和细胞外膜以及细胞壁质相连的高分子物质,主要由多糖、蛋白质、核酸等高分子物质组成。EPS与活性污泥的絮凝能力、絮体结构密切相关,更对絮体性质起着决定性的作用。EPS主要分为三种类型:粘液型、松散结合型和紧密结合型。粘液型的EPS即是离心分离时分散于细胞外的粘性聚合物,它的增多可以提升污泥的吸附能力;松散结合型EPS即是以胶体状态或溶解状态存在于液相中的粘性聚合物<sup>[8]</sup>,但其仅可以传递污染物<sup>[9]</sup>;紧密结合型是离心分离时仍然附着在细胞壁上难以分离的胞囊聚合物,它的增多会减慢污泥吸附速率,有研究显示<sup>[10]</sup>,紧密结合型EPS比松散结合型EPS的絮凝能力更强,对活性污泥沉降性能更好。但是,EPS的浓度并不是越高越好,由于EPS的主要成分为细菌多糖,因此产生的多糖含量也会增加,这种多糖物质具有黏附性,可以促进细菌相互絮凝;但是EPS带负电,因此EPS浓

度升高会导致生物絮体表面负电荷增加,当絮体表面积累的负电荷过多时,就会增加生物絮体之间的排斥力,使得活性污泥絮凝、沉降性能恶化<sup>[11]</sup>。

EPS 及二价阳离子架桥学说认为,带负电荷的 EPS 与带正电的二价离子发生架桥作用,从而形成紧密的三维絮体结构<sup>[8,12]</sup>。在 A 段中,微生物在形成絮凝体的同时,由于微生物世代短,不断繁殖,使得絮凝体结构密实;与此同时 EPS 以及多糖物质的存在可以产生包埋作用,进一步加强了絮凝体的沉降性。除此之外,EPS 和多糖还可以促进 SS 相互间的凝聚,去除污水中悬浮状态以及胶体状态的有机物。但进一步的研究发现,EPS 中蛋白质在絮凝过程中起着更为重要的作用,因为 EPS 中含有蛋白质、脂质等与污泥疏水性有关,可以造成 EPS 局部具有疏水性。

由于 A 段微生物通过酶解作用改变了一些大分子物质的表面结构性质,从而对有机物有很强的吸附能力。A 段的吸附池水力停留时间为 15 ~ 20 min 即可<sup>[13]</sup>。有研究表明<sup>[14]</sup>,AB 工艺的 A 段反应时间仅需 15 min。更有研究<sup>[15]</sup>显示,在高浓度有机物进水(有机物浓度为 7 500 mg/L)条件下,间歇搅拌 5 min 便可达到最佳吸附效果,连续搅拌在 2 min 时可达到最大吸附率。可见 A 段吸附作用所需的时间很短。通常,A 段结合絮凝、沉降、吸附等作用对于非溶解性 BOD<sub>5</sub> 有很强的去除效果,去除效率可以达到 80% ~ 90%,可以去除污水中总 BOD<sub>5</sub> 的 40% ~ 50%,但是 BOD<sub>5</sub>/N 比值仍无法下降至 0.5 以下。

## 2 强化 A 段捕捉有机物的研究

通过对 AB 工艺 A 段反应机理的充分认识,可寻找到促进 A 段絮凝、沉降、吸附的方法,有助于实现有机物的回收与利用。通过对 A 段的研究可以发现,提高活性污泥絮凝、沉降、吸附效果的方式有:①采取投加化学絮凝剂(通常是铝盐或铁盐)的方法进一步降低 BOD<sub>5</sub>/N 的比值。原理即是二、三价阳离子通过与 EPS 架桥形成紧密的三维絮体结构、与微粒之间形成架桥等方式提高絮凝活性;加入二、三价的阳离子还可以通过吸附架桥作用,使得体积较小的松散絮体变得大而密实,从而提高活性污泥的沉降效果。②增加进水 SS 浓度,主要是通过附着在污泥絮体的丝状菌表面,增加絮体密度,阻碍丝状菌架桥的方式促进污泥沉降。③可以通过降低污泥

龄,阻止丝状菌成为优势菌种从而达到提高沉降性能的目的。④适当降低污泥负荷,低负荷时多糖含量以及 EPS 含量高,从而促进活性污泥絮凝能力。⑤适当提高 pH 值,污水中正电荷增多,可以中和胶体颗粒表面所带的负电荷,从而减弱胶体颗粒间的斥力,进而使得颗粒间的距离缩短,絮凝效果增强<sup>[16]</sup>;通过强化 A 段处理,BOD<sub>5</sub> 去除率可以达到 60% ~ 70%<sup>[17,18]</sup>。

有学者<sup>[19]</sup>则认为,A 段发生的反应不只是絮凝、沉淀、吸附作用,也有部分生物降解作用。A 段对于 BOD<sub>5</sub> 的去除有 2/3 是絮凝吸附所致,另外 1/3 则为生物降解。如果 A 段不能将影响后续 ANAMMOX 的有机物彻底去除,可以考虑在 B 段通过生物降解去除。

## 3 强化 B 段降低有机物的研究

对于目前已经应用的 ANAMMOX 案例,88% 是一体化的反应器,即 CANON 工艺的形式。付昆明等<sup>[20]</sup>从短程硝化的角度,也认为实现主流 ANAMMOX 的结果,应该采用 CANON 工艺的形式。但是,鉴于 A 段可能无法将有机物去除彻底,而有机物又会对后续的 ANAMMOX 造成干扰,因此,可以考虑在 B 段进一步将残留有机物氧化。

对于强化 B 段降低有机物,现有技术如:PN + ANAMMOX 或是 A/O(缺氧/好氧) + ANAMMOX 结合的工艺<sup>[21~23]</sup>,在 ANAMMOX 前端设置曝气池将 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> - N 部分转化为 NO<sub>2</sub><sup>-</sup> - N,而部分亚硝化的成功关键在于增强好氧氨氧化菌(AOB)的活性以及抑制 NOB 的活性。AOB 的氧饱和系数为 0.2 ~ 0.4 mg/L,NOB 的氧饱和系数为 1.2 ~ 1.5 mg/L,因此在富集 AOB 同时抑制 NOB 生长的实验中,有学者利用 A/O + ANAMMOX 组合工艺处理城市污水时,在好氧段将溶解氧(DO)控制在略高于 AOB 氧饱和系数的水平,可完成部分亚硝化,同时保证 ANAMMOX 菌具有良好活性<sup>[24]</sup>。适当控制 DO,可以在有效去除有机物而不影响后续 ANAMMOX 反应的同时完成部分亚硝化,为 ANAMMOX 反应提供反应基质。还有学者利用 SBR + PN + ANAMMOX 组合工艺进行脱氮除磷,也是将短程硝化的 DO 控制略高于 AOB 氧饱和系数的水平 0.2 ~ 0.5 mg/L,TN 去除率可达到 79%,ANAMMOX 活性良好且生成的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> - N 仅有 2.25 mg/L<sup>[25]</sup>。可见短程硝化过程中进一步去除了有机物,使得有机物含量不足以影响



ANAMMOX 活性,以获得良好的脱氮效率。其他学者处理城市污水的研究中,在 PN + ANAMMOX 结合工艺中,对于 DO 的控制值类似,都获得了良好的脱氮效率和 ANAMMOX 活性<sup>[26,27]</sup>。

对于现有技术的思考,提出两种可能的主流 ANAMMOX 工艺,其工艺流程如图 1 所示。

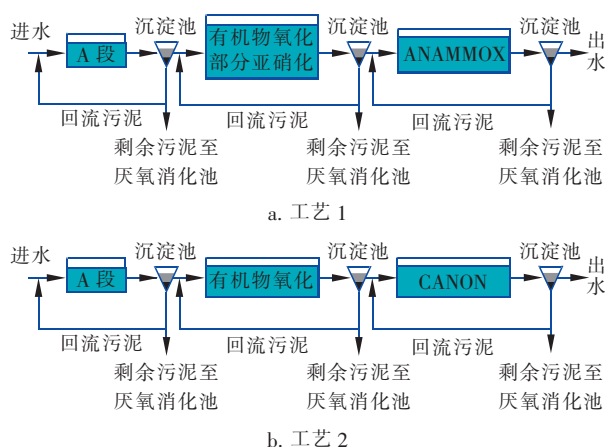


图1 两种可能的主流 ANAMMOX 工艺

Fig. 1 Two possible mainstream ANAMMOX processes

工艺 1 中,污水进入 A 段经沉淀后进入曝气池,在此处将有机物氧化与短程硝化结合,控制短程硝化过程,使有机物得到去除后进入到 ANAMMOX 阶段进行脱氮,出水随后经过沉淀池后排出。沉淀池的剩余污泥运送到厌氧消化池用于厌氧消化产沼气。由于有氧曝气时,有机物先被氧化进而才会氧化  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,因此提出工艺 2。该工艺中污水进入 A 段经过沉淀池后进入有机物氧化池,在此处调节曝气量,使得反应器仅将有机物氧化而不氧化  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,出水随后进入一体化的自养脱氮 CANON 反应器完成脱氮。

以上两种组合工艺的区别在于,前者以  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  氧化完毕为反应终点,而后者以有机物氧化完毕为终点;其共同点在于,均利用 A 段首先去除易降解有机物,防止有机物进入 ANAMMOX 阶段,以有利于主流 ANAMMOX 的实现。

在能源紧缺的今天,设法从污水中回收资源、利用资源将是污水处理未来主要的研究方向。有研究<sup>[28]</sup>显示,污水中所蕴含的能量是处理过程耗电量的 9.3 倍。借鉴国外污水厂实现能源自给自足的运行经验,如:Sheboygan 污水处理厂 2013 年已实现产电量与耗电量之比达到 90% ~ 115%,而产热量与其耗热量比值达到了 85% ~ 90%<sup>[29]</sup>。可见如今污

水处理不应仅局限于污水处理,还要注重可持续发展,AB 工艺对于碳源回收拥有巨大的潜力,对于未来污水处理有着重大意义。

#### 4 结语

① 调查显示,经过 A 段生物吸附,最多可以去除污水中总  $\text{BOD}_5$  的 40% ~ 50%,且 A 段的吸附池水力停留时间仅为 15 min 甚至更少。

② A 段通过适当调节 pH 值,加入二、三价阳离子等容易实现的途径提高污泥絮凝、沉降以及吸附性能,可将  $\text{BOD}_5$  去除率提高到 60% ~ 70%。

③ 剩余未降解有机物,可考虑在 B 段通过生物降解去除,以进一步去除 A 段残留的有机物,使得进入 ANAMMOX 的有机物比例进一步降低,从而实现主流 ANAMMOX 工艺。

#### 参考文献:

- [1] 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,等. ABR 工艺 ANAMMOX 耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水[J]. 环境科学, 2016,37(8):3108-3113.  
Wu Peng, Zhang Shiyong, Song Yinling, et al. Nitrogen removal of municipal wastewater by ANAMMOX coupled shortcut nitrification in anaerobic baffled reactor[J]. Environmental Science, 2016, 37(8): 3108-3113 (in Chinese).
- [2] 苏彩丽,余泳昌,季宝杰. 短程硝化—厌氧氨氧化生物脱氮研究进展[J]. 环境科学与技术, 2009,32(4): 92-96.  
Su Caili, Yu Yongchang, Ji Baojie. Research advances in biological  $\text{N}_2$  removal by partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(4): 92-96 (in Chinese).
- [3] Daigger G T. Oxygen and carbon requirements for biological nitrogen removal processes accomplishing nitrification, nitritation, and anammox[J]. Water Environ Res, 2014, 86(3): 204-209.
- [4] Xu G, Zhou Y, Yang Q, et al. The challenges of mainstream deammonification process for municipal used water treatment[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2015, 99(6): 2485-2490.
- [5] Kumar M, Lin J. Co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen and carbon removal—Strategies and issues[J]. J Hazard Mater, 2010, 178(1/3): 1-9.
- [6] Winkler M K H, Kleerebezem R, van Loosdrecht M C M.

- Integration of anammox into the aerobic granular sludge process for main stream wastewater treatment at ambient temperatures[J]. *Water Res*, 2012, 46(1): 136 – 144.
- [ 7 ] De Clippeleir H, Siegfried E V, De Wilde F V, *et al.* One-stage partial nitrification/anammox at 15 °C on pre-treated sewage: Feasibility demonstration at lab-scale [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2013, 97(23): 10199 – 10210.
- [ 8 ] Sheng G, Yu H, Li X. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review[J]. *Biotechnol Adv*, 2010, 28(6): 882 – 894.
- [ 9 ] 胡小兵, 叶星, 周元凯, 等. 胞外聚合物对活性污泥吸附生活污水碳源的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(11): 4062 – 4069.
- Hu Xiaobing, Ye Xing, Zhou Yuankai, *et al.* The effect of extracellular polymeric substances on absorption of the carbon source in sewage by activated sludge[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(11): 4062 – 4069 (in Chinese).
- [ 10 ] Bala S S, Yan S, Tyagi R D, *et al.* Extracellular polymeric substances (EPS) producing bacterial strains of municipal wastewater sludge: Isolation, molecular identification, EPS characterization and performance for sludge settling and dewatering[J]. *Water Res*, 2010, 44(7): 2253 – 2266.
- [ 11 ] 刘振超. 胞外聚合物对活性污泥沉降性能影响机制研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2015.
- Liu Zhenchao. Mechanism Study on the Effect of Extracellular Polymeric Substances to the Settability of Activated Sludge[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2015 (in Chinese).
- [ 12 ] Wei D, Wang B, Ngo H H, *et al.* Role of extracellular polymeric substances in biosorption of dye wastewater using aerobic granular sludge [J]. *Bioresour Technol*, 2015, 185: 14 – 20.
- [ 13 ] 魏东洋, 贾晓珊, 胡春玲, 等. 城市污水处理新工艺研究——高负荷生物吸附再生法[J]. *环境保护科学*, 2006, 32(6): 23 – 26.
- Wei Dongyang, Jia Xiaoshan, Hu Chunling, *et al.* A new process study on treatment of municipal wastewater—High-loading adsorption biodegradation regeneration process[J]. *Environmental Protection Science*, 2006, 32(6): 23 – 26 (in Chinese).
- [ 14 ] de Graaff M S, van den Brand T P H, Roest K, *et al.* Full-scale highly-loaded wastewater treatment processes (A-stage) to increase energy production from wastewater: Performance and design guidelines[J]. *Environ Eng Sci*, 2016, 33(8): 571 – 577.
- [ 15 ] 端允, 岳秀萍, 李亚新, 等. AB – ASBR 工艺机理及动力学分析[J]. *广州化工*, 2010, 38(5): 94 – 97.
- Duan Yun, Yue Xiuping, Li Yaxin, *et al.* Mechanism and kinetics of adsorption-biodegradation anaerobic sequencing batch reactor[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2010, 38(5): 94 – 97 (in Chinese).
- [ 16 ] Zhang P, Chen Y, Guo J, *et al.* Adsorption behavior of tightly bound extracellular polymeric substances on model organic surfaces under different pH and cations with surface plasmon resonance[J]. *Water Res*, 2014, 57: 31 – 39.
- [ 17 ] 黄海波, 呼世斌, 张凤梅, 等. 化学絮凝法对高质量浓度养猪废水预处理效果[J]. *西北农业学报*, 2013, 22(6): 190 – 196.
- Huang Haibo, Hu Shibin, Zhang Fengmei, *et al.* Effect of chemical flocculation on high mass concentration of pig wastewater pretreatment[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2013, 22(6): 190 – 196 (in Chinese).
- [ 18 ] 胡勇有, 罗肖肖, 程建华, 等. 吸附 – 生物降解工艺化学强化除磷的试验研究[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2008, 36(12): 61 – 65.
- Hu Yongyou, Luo Xiaoxiao, Cheng Jianhua, *et al.* Experimental investigation of chemically-enhanced phosphorus removal with adsorption – biodegradation process[J]. *Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition*, 2008, 36(12): 61 – 65 (in Chinese).
- [ 19 ] 魏铮, 庞维亮, 冯丽霞. AB 法污水处理工艺处理制药废水的应用实例[J]. *资源节约与环保*, 2014, (3): 117 – 117.
- Wei Zheng, Pang Weiliang, Feng Lixia. Application of AB process to treat pharmaceutical wastewater[J]. *Resources Economization & Environment Protection*, 2014, (3): 117 – 117 (in Chinese).
- [ 20 ] 付昆明, 仇付国, 左早荣. 厌氧氨氧化技术应用于市政污水处理的前景分析[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(4): 8 – 13.
- Fu Kunming, Qiu Fuguo, Zuo Zaorong. Prospective analysis of application of anaerobic ammonia oxidation technology to municipal wastewater treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(4): 8 – 13 (in Chinese).
- [ 21 ] 吕鑑, 孟凡能, 张树军, 等. 半短程硝化 – 厌氧氨氧化处理污泥消化液的脱氮研究[J]. *北京工业大学学*

- 报,2011,37(11):1737-1742.
- Lü Jian, Meng Fanneng, Zhang Shujun, *et al.* Study on half-nitrosification - ANAMMOX process for treatment of reject water [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2011, 37(11): 1737-1742 (in Chinese).
- [22] 马斌. 城市污水连续流短程硝化厌氧氨氧化脱氮工艺与技术[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- Ma Bin. Nitritation and ANAMMOX Achieved in Continuous Reactors Treating Sewage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012 (in Chinese).
- [23] 吴莉娜,徐莹莹,史泉,等. 短程硝化-厌氧氨氧化组合工艺深度处理垃圾渗滤液[J]. 环境科学研究, 2016, 29(4): 587-593.
- Wu Lina, Xu Yingying, Shi Xiao, *et al.* Advanced treatment of landfill leachate by combined process of partial nitrification and anaerobic ammonium oxidation [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(4): 587-593 (in Chinese).
- [24] 马斌,张树军,王俊敏,等. A/O + Anammox 工艺处理低 C/N 城市污水的脱氮性能[J]. 中南大学学报:自然科学版,2011,42(8):2526-2530.
- Ma Bin, Zhang Shujun, Wang Junmin, *et al.* Performance of nitrogen removal from municipal wastewater in A/O + Anammox system [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(8): 2526-2530 (in Chinese).
- [25] 邵和东,王淑莹,张亮,等. 常温下厌氧氨氧化组合工艺处理低 C 与 N 质量浓度比的城市污水的脱氮除磷性能[J]. 中南大学学报:自然科学版,2016,47(1): 344-349.
- Shao Hedong, Wang Shuying, Zhang Liang, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from low mass concentration ratio between C and N municipal wastewater based on Anammox process at ambient temperatures [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2016, 47(1): 344-349 (in Chinese).
- [26] Li X, Xiao Y, Liao D, *et al.* Granulation of simultaneous partial nitrification and anammox biomass in one single SBR system [J]. Appl Biochem Biotechnol, 2011, 163(8): 1053-1065.
- [27] Malovanyy A, Plaza E, Trela J, *et al.* Combination of ion exchange and partial nitritation/Anammox process for ammonium removal from mainstream municipal wastewater [J]. Water Sci Technol, 2014, 70(1): 144-151.
- [28] Bagley D M, Shizas I. Experimental determination of energy content of unknown organics in municipal wastewater streams [J]. J Energy Eng, 2014, 130(2): 45-53.
- [29] 郝晓地,魏静,曹亚莉. 美国碳中和运行成功案例——Sheboygan 污水处理厂 [J]. 中国给水排水, 2014, 30(24): 1-6.
- Hao Xiaodi, Wei Jing, Cao Yali. A successful case of carbon-neutral operation in America: Sheboygan WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(24): 1-6 (in Chinese).



作者简介:姜姗(1993-),女,北京人,硕士研究生,研究方向为水处理技术。

E-mail: klarolines@163.com

收稿日期:2018-04-28