

## 厌氧氨氧化在污水处理中的研究进展

廖小兵<sup>1,2,3,4</sup> 许玫英<sup>3,4</sup> 罗慧东<sup>3,4</sup> 孙国萍<sup>3,4\*</sup>

- (1. 中国科学院华南植物园 广东 广州 510650)
- (2. 中国科学院研究生院 北京 100049)
- (3. 广东省微生物研究所 广东 广州 510070)
- (4. 广东省菌种保藏与应用重点实验室 广东 广州 510070)

**摘要:** 厌氧氨氧化(ANAMMOX)是指厌氧氨氧化细菌在厌氧条件下以亚硝酸盐为电子受体将氨氮氧化为氮气的过程。由于在节能降耗和环境友好上的独特优点,基于厌氧氨氧化原理的脱氮技术被公认是目前最具应用前景的生物脱氮技术,因此自发现以来一直是国内外研究的热点。综述近年有关厌氧氨氧化细菌、厌氧氨氧化机理、反应的影响因素及其在污水处理应用方面的研究进展,并展望厌氧氨氧化在污水处理领域的发展方向。

**关键词:** 厌氧氨氧化, 机理, 细菌, 影响因素, 污水处理

## The Research Progress of Anaerobic Ammonium Oxidation in Wastewater Biotreatment

LIAO Xiao-Bing<sup>1,2,3,4</sup> XU Mei-Ying<sup>3,4</sup> LUO Hui-Dong<sup>3,4</sup> SUN Guo-Ping<sup>3,4\*</sup>

- (1. South China Botanical Garden, Chinese Academy of Science, Guangzhou, Guangdong 510650, China)
- (2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)
- (3. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou, Guangdong 510070, China)
- (4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangzhou, Guangdong 510070, China)

**Abstract:** Anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) is a process that the bacteria of anammox convert  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  into  $\text{N}_2$  with the  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  as the primary electron acceptor under anaerobic condition. It is considered as a very promising nitrogen removal technology in future, because of its cost effectiveness and environmental friendly characteristics. Here, we review its mechanism, influence factors, application situation and the bacteria of anammox. Some suggestions are given for the development of anammox application in wastewater treatment.

**Keywords:** Anammox, Mechanism, Bacteria, Influence factors, Wastewater treatment

氮素含量是水质控制的重要指标。氮素污染的加剧也是近年来引起我国湖泊、河流以及近海等水域水华和赤潮大规模爆发的重要因素之一,因此引起了人们的广泛关注。传统废水处理的氨氮脱除一

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(No. 2009ZX07211-009); 广东省教育部产学研合作引导项目(No. 2009B090300300299); 粤港关键领域重点突破招标项目(No. 2009205200030); 广东省科学院野外工作站基金项目(No. sytz2008)

\* 通讯作者: Tel: 86-20-87681673; ✉: guopingsun@163.com

收稿日期: 2010-05-19; 接受日期: 2010-08-24

般是通过硝化和反硝化过程实现,但这一过程需要大量曝气、额外投加有机碳源和碱度,投资和运行费用高昂,而且还会产生二次污染。厌氧氨氧化脱氮是上世纪 90 年代发展起来的一种新型高效生物脱氮技术。与传统生物脱氮技术相比厌氧氨氧化反应途径较短,不需要碱度补偿和投加有机碳源,从而节约了大量的能源和物料,节省运行成本。因此,吸引了国内外学者的广泛研究,本文综述了厌氧氨氧化在污水处理中的最新研究进展。

### 1 厌氧氨氧化反应机理

长期以来,人们都认为  $\text{NH}_4^+$  是化学惰性的,需在好氧条件下经多功能氧化酶的作用才能氧化。1977 年, Broda 通过热力学计算,预测自然界存在能以亚硝态氮为电子受体进行氨氧化反应的微生物。1995 年荷兰学者 Mulder 在反硝化流化床反应器中发现氨氮在随着硝态氮的消失同时有氮气生成的现象,并将其命名为“ANAMMOX”,随后 Van de Graaf 等人通过大量的实验证明 ANAMMOX 一个生物学过程,并用  $^{15}\text{N}$  标记的氮化合物证明  $\text{NO}_2^-$  才是 ANAMMOX 的关键电子受体,而不是之前认为的  $\text{NO}_3^-$ ,并提出了厌氧氨氧化可能的代谢途径如图 1 所示。因此 ANAMMOX 是厌氧氨氧化细菌在厌氧条件下以  $\text{NO}_2^-$  为电子受体,将氨氮氧化为氮气的生物学过程。羟氨( $\text{NH}_2\text{OH}$ )和联氨( $\text{N}_2\text{H}_4$ )是厌氧氨氧化过程的中间产物,其中羟氨为最可能的电子受体。羟氨由  $\text{NO}_2^-$  还原产生,这一还原过程又为联氨转化为氮气提供所需要的等量电子<sup>[1]</sup>。

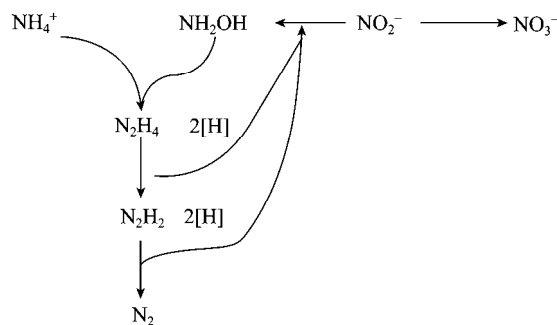
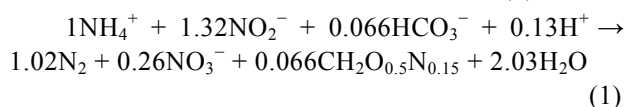


图 1 厌氧氨氧化可能的代谢途径<sup>[2]</sup>  
 Fig. 1 Possible metabolic pathway for anaerobic ammonium oxidation<sup>[2]</sup>

Strous<sup>[2]</sup>等在利用 SBR 反应器富集厌氧氨氧化细菌的过程中,根据化学计量和物料衡算提出了厌氧氨氧化反应可能的总反应方程式,见式(1)。



### 2 厌氧氨氧化细菌的分离鉴定

由于厌氧氨氧化细菌生长非常缓慢,代增时间长达 11-20 d,现有的微生物分离技术很难获得它的纯系菌株。目前多是通过反应器长时间富集培养,获得比例较高的菌株混合物。Strous<sup>[2]</sup>等利用 SBR 反应器历时 1 年的富集培养获得了厌氧氨氧化细菌占 70%的富集培养物。经鉴定该优势菌种是一种具有不规则的球状的革兰氏阴性细菌,在电子显微镜下表现出不规则的微生物学特性。通过 16S rDNA 鉴定,此种细菌属于浮霉状菌目(Planctomycetales)一个很深的分支,被命名为 *Candidatus Brocadia anammoxidans*。目前在不同的反应器和环境中发现的厌氧氨氧化细菌共有 5 个属,9 个种<sup>[3]</sup>(图 2),均属

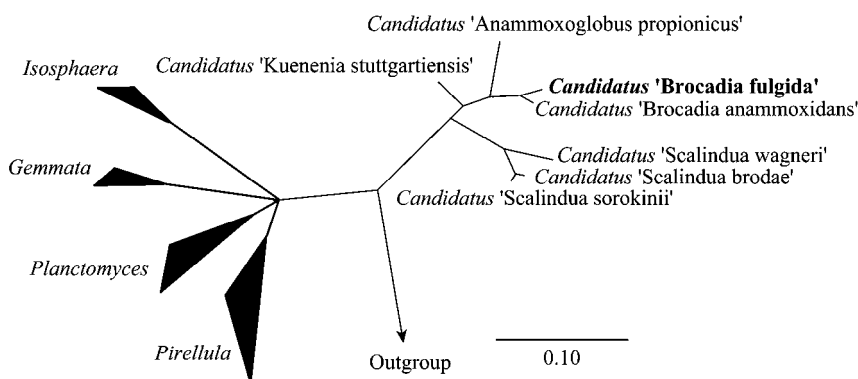


图 2 厌氧氨氧化细菌系统发育树<sup>[3]</sup>  
 Fig. 2 Phylogenetic tree of anammox bacteria<sup>[3]</sup>

于浮霉状菌目(Planctomycetales), 其中 *Candidatus Kueneia stuttgartiensis* 的全基因组测序工作也已完成<sup>[4]</sup>。但 Hu 等人<sup>[5]</sup>的研究发现一株门多萨假单胞菌属的细菌也具有的一定的厌氧氨氧化活性, 这意味着具有厌氧氨氧化功能的细菌并不一定是浮霉状菌目的细菌。

### 3 厌氧氨氧化的影响因素

#### 3.1 温度对厌氧氨氧化的影响

温度是影响细菌生长和代谢的重要环境因素之一。郑平等<sup>[6]</sup>的分批实验结果表明厌氧氨氧化反应的适宜温度为 0–30°C; 当温度 < 15°C 时, 反应速率较低; 当温度从 15°C 升至 30°C 时, 反应速率逐渐提高; 继续升至 35°C 时, 反应速率反而下降; 当温度 > 40°C 时, 厌氧氨氧化细菌的活性急剧下降。Dosta 等人<sup>[7]</sup>在 18°C 下利用 SBR 反应器启动了厌氧氨氧化, 说明厌氧氨氧化工艺在中低温下也有可能启动。

#### 3.2 溶解氧对厌氧氨氧化的影响

溶解氧是影响厌氧氨氧化反应的一个重要因素。厌氧氨氧化被证实是个典型的严格厌氧反应。Strous 等<sup>[8]</sup>通过在 2%、1%、0.5%和 0%(不断地充入氩气)的氧饱和和浓度下的连续实验发现, 在溶氧浓度为 2%、1%和 0.5%的实验组里, 没有发现  $\text{NH}_4^+$  被氧化, 只有 0%的氧气饱和浓度的实验组, 即严格厌氧的情况, 才出现  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_2^-$  的同时减少。说明厌氧氨氧化对溶氧非常敏感, 只能在严格厌氧的条件下进行, 当溶氧浓度大于 2  $\mu\text{mol/L}$  就会对它产生可逆抑制作用。

#### 3.3 pH 对厌氧氨氧化的影响

pH 也是厌氧氨氧化过程的一个重要影响因素。国内外很多学者就 pH 对厌氧氨氧化的影响进行了研究。有文献报道的厌氧氨氧化反应适宜的 pH 范围为 6.7–8.3, 最大反应速率出现在 8.0 左右。郑平等<sup>[6]</sup>在研究中发现, 当 pH 从 6.0 升至 7.5 时, 厌氧氨氧化速率逐渐提高; 但当 pH 继续升至 9.5 时, 厌氧氨氧化速率会不断下降。现在普遍认为厌氧氨氧化的最适 pH 在 7.8–8.0 之间。

#### 3.4 底物浓度对厌氧氨氧化的影响

厌氧氨氧化的主要底物是亚硝酸盐氮和氨氮, 高浓度的氨氮和亚硝酸盐氮对细胞有毒害作用。

Strous<sup>[9]</sup>认为氨氮和硝酸盐氮在 1 g/L 的情况下都不会对厌氧氨氧化产生抑制作用, 但是亚硝态氮超过 0.1 g/L, 厌氧氨氧化反应就会完全被抑制。亚硝酸盐氮的抑制作用可以通过向反应器中添加微量的中间产物胍和羟氨得以解除。张树德等<sup>[10]</sup>研究了亚硝酸盐浓度对厌氧氨氧化活性的影响。结果表明亚硝酸盐浓度的提高有利于加快 ANAMMOX 的反应速率, 当  $\text{NO}_2^--\text{N}=118.4 \text{ mg/L}$  时, 氨氮转化速率达最高; 进一步提高  $\text{NO}_2^--\text{N}$  浓度会对 ANAMMOX 产生明显的抑制作用, 并提出进水中适宜的  $\text{NO}_2^--\text{N} : \text{NH}_4^+-\text{N}$  为 1.3 : 1。唐崇俭等人<sup>[11]</sup>在上流式生物反应器中研究不同基质浓度对厌氧氨氧化的影响时, 得出亚硝态氮的临界浓度是 280 mg/L。笔者在用厌氧折流板作为反应器时, 亚硝态氮的临界抑制浓度在 320 mg/L 左右。因此底物浓度对厌氧氨氧化的影响并不是绝对的, 可以通过改变操作模式和改变反应器结构提高厌氧氨氧化过程对底物的耐受浓度。

#### 3.5 其他因素对厌氧氨氧化的影响

厌氧氨氧化反应的条件相较其他生化反应而言较为苛刻。国内外学者在研究温度、溶解氧和 pH 等因素对厌氧氨氧化影响的同时, 也研究了有机物、磷酸盐等对它的作用。Kang 等人<sup>[12]</sup>的研究发现, 当 COD 在 0–500 mg/L 的范围内时, 随着 COD 的升高氨氮和亚硝态氮的去除率不断上升。Jetten 等人<sup>[13]</sup>在厌氧氨氧化细菌的富集培养过程中发现磷酸盐对厌氧氨氧化反应产生明显的影响, 厌氧氨氧化细菌只能耐受 1 mmol/L 的磷酸盐, 当磷酸盐的浓度在 5–50 mmol/L 时, 厌氧氨氧化活性完全受到抑制。王勇等<sup>[14]</sup>研究了进水 Ca/p 比对厌氧氨氧化的影响, 低 Ca/p 对厌氧氨氧化活性有抑制作用。张蕾等人<sup>[15]</sup>认为添加少量的  $\text{Fe}^{3+}$  可以促进厌氧氨氧化细菌生长, 提高厌氧氨氧化活性; Zhang 等人<sup>[16]</sup>在研究 CANON 工艺时, 添加微量的  $\text{NO}_2^-$  有效提高了 AUSB 反应器的脱氮效率; 金仁村<sup>[17]</sup>考察了盐度对厌氧氨氧化的影响。此外也有文献报道, 厌氧氨氧化细菌属光敏感性微生物, 光能抑制其活性, 能降低 30%–50%的氨氮去除率<sup>[18]</sup>。

## 4 厌氧氨氧化的启动运行

### 4.1 厌氧氨氧化反应器

自 Mulder 等人在流化床中发现厌氧氨氧化以

来,国内外众多学者致力于探究厌氧氨氧化的启动条件及运行特征,为厌氧氨氧化的工程化运用奠定基础。由于厌氧氨氧化细菌生长缓慢,代时长,并且细胞浓度至少需达到  $10^{10}$ – $10^{11}$  个/mL 才能较好地显现厌氧氨氧化活性<sup>[2]</sup>,故多采用污泥停留时间较长的反应器。目前用到的反应器主要有流化床、SBR、UASB、EGSB、ASBR、固定床、气升式反应器和生物滴滤池等。接种的污泥有好氧活性污泥、厌氧颗粒污泥、厌氧消化污泥、反硝化污泥、河涌底泥、垃圾渗滤液处理活性污泥等。路青等<sup>[19]</sup>比较了好氧污泥、厌氧颗粒污泥和厌氧消化污泥 3 种不同接种污泥源的厌氧氨氧化启动效能,结果表明,厌氧颗粒污泥是这 3 种污泥当中最适于富集厌氧氨氧化菌的污泥源。除传统的污泥接种方式之外,污泥固定化技术也被应用于厌氧氨氧化的启动<sup>[20]</sup>。

由于 SBR 具有高生物截留量、底物分布均匀,可长期稳定运行等独到优势,因此目前它是厌氧氨氧化启动用得最多的反应器。除广泛采用 SBR 外,国内外学者也探索采用其他反应器启动厌氧氨氧化工艺,并获得了不同程度的处理效果。朱明石等<sup>[21]</sup>用 UASB 运行厌氧氨氧化,在稳定期的  $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 去除率在 99.9% 以上, TN 去除率也超过了 90%。张杰等人<sup>[22]</sup>用 IC 反应器获得了粒径为 1 mm–2 mm 的厌氧氨氧化颗粒污泥。Wang 等<sup>[23]</sup>用 EGSB 反应器在 3 个月内启动了厌氧氨氧化,在进水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  为 500 mg/L 的情况下,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  去除率可达 80%。Trigo 等人<sup>[24]</sup>用膜生物反应器启动了厌氧氨氧化,氨氮的去除率达 710 g/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ),亚硝态氮基本上百分百去除。

#### 4.2 厌氧氨氧化试验用水

厌氧氨氧化工艺启动大多采用人工配水,运行负荷不断被刷新。据最新文献报道厌氧氨氧化总氮去除率可高达 26 kg N/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )<sup>[25]</sup>,远超过传统的生物脱氮工艺。除使用人工配水外,近年来,许多国内外学者开始直接使用废水原水研究厌氧氨氧化工艺,并且已经有部分工程实践的例子<sup>[26–27]</sup>。目前用到的废水多为高氨氮废水,主要有污泥消化液、污泥压滤液、猪场废水以及垃圾渗滤液等。

Joss 等人<sup>[28]</sup>在工程规模下应用亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺处理的高氨氮的消化污泥上清液,氨氧化率达到 500 g N/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ ),其中有 90% 转化为氮气。

Qiao 等<sup>[29]</sup>利用厌氧氨氧化工艺处理牲畜废水,总氮去除率达到 3.12 kg N/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )。此外,也有学者将厌氧氨氧化工艺引入到高氨氮高生物毒性的垃圾渗滤液处理过程<sup>[30–31]</sup>。

## 5 厌氧氨氧化工艺

目前基于厌氧氨氧化原理开发的工艺有 OLAND (限氧自养硝化-反硝化, Oxygen limited autotrophic nitrification and denitrification) 工艺, CANON (基于亚硝酸盐的完全自养脱氮, Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite), SHARON (Single reactor for high activity ammonia removal over nitrite) ANAMMOX 工艺。

OLAND 工艺 1998 年由比利时 Gent 大学微生物生态实验室开发研制,是限氧亚硝化与厌氧氨氧化相耦联的生物脱氮反应系统。该工艺在限氧的条件下,使硝化过程仅进行到  $\text{NH}_4^+$  氧化为  $\text{NO}_2^-$  阶段,继而由  $\text{NO}_2^-$  氧化未反应的  $\text{NH}_4^+$  形成  $\text{N}_2$ 。Wyffels 等人<sup>[32]</sup>成功利用 OLAND 工艺处理污泥消化液; Windey 等人<sup>[33]</sup>的研究结果表明 OLAND 工艺处理高盐废水具有一定的可行性。

SHARON-ANAMMOX<sup>[34]</sup>工艺是荷兰 Delft 大学 2001 年开发的一种新型脱氮工艺。基本原理是在 2 个反应器内,在第 1 个反应器内,氨氧化细菌在有氧条件下将氨氧化生成  $\text{NO}_2^-$ ,使出水的  $\text{NH}_4^+:\text{NO}_2^- = 1:1$  左右;然后在第 2 个反应器内,厌氧氨氧化细菌在厌氧条件下以  $\text{NO}_2^-$  为电子受体将  $\text{NH}_4^+$  氧化生成  $\text{N}_2$ 。Sharon 是一种理想的  $\text{NO}_2^-$ -N 生成装置,与传统的硝化-反硝化过程相,Sharon-Anammox 过程可使运行费用减少 90%,  $\text{CO}_2$  排放量减少 88%,不产生  $\text{N}_2\text{O}$  有害气体,无需有机物,不产生剩余污泥,节省占地,具有显著的可持续性与经济效益。世界上第一个厌氧氨氧化工艺工程化规模装置已在荷兰鹿特丹的 Dokhaven 废水处理厂建成,采用的即是 SHARON-ANAMMOX 工艺。

CANON 工艺是荷兰 Delft 大学在 SHARON-ANAMMOX 基础上发展起来的一种全新的工艺。其原理是亚硝化菌在有氧条件下把氨氧化成亚硝酸盐,厌氧氨氧化菌则在无氧条件下把氨和亚硝酸盐转化成氮气,即利用亚硝化菌和厌氧氨氧化菌的协同作用,在同一个反应器中完成亚硝化和厌氧氨氧

化。Vazquez-Padin 等<sup>[35]</sup>以厌氧消化污泥作为进水在脉冲充氧的条件下, 启动了 CANON 工艺。付昆明等人<sup>[36]</sup>研究了在好氧条件下 CANON 工艺的启动, 经过 210 d 的运行, TN 去除负荷达到 1.22 kg/(m<sup>3</sup>·d), 去除率维持在 70%。CANON 工艺能比较好的处理低 C/N 高氨氮废水。

## 6 展望

厌氧氨氧化生物脱氮过程, 氨氮历经的化学途径最短, 有效节约了能源能耗, 同时又节省了基建投资, 具有广泛的应用前景。但是由于厌氧氨氧化启动时间较长, 一般需要 100–200 d, 以及运行条件的相对苛刻, 严重制约了厌氧氨氧化在工程实践中的应用。鉴于此, 今后需进一步加强对已发现的浮霉状目的厌氧氨氧化细菌的纯化力度; 研究部分生长因子和微量元素对厌氧氨氧化细菌生长的影响, 找出厌氧氨氧化细菌的最适宜的生长条件, 缩短厌氧氨氧化细菌的代时; 高效适宜的厌氧氨氧化工艺反应器的开发, 缩短厌氧氨氧化启动的时间和提高厌氧氨氧化运行的稳定性。此外, 有文献报道, 部分硝化细菌、亚硝化细菌以及假单胞菌也有一定的厌氧氨氧化活性, 意味着厌氧氨氧化细菌并不局限于浮霉菌目, 因此可以尝试在其他种属中筛选具有高厌氧氨氧化活性的细菌, 并进一步研究其反应机理。

## 参 考 文 献

- [1] Kuenen JG. Anammox bacteria: from discovery to application. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(4): 320–326.
- [2] Strous M, Heijnen JJ, Kuenen JG, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589–596.
- [3] Kartal B, van Niftrik L, Rattray J, *et al.* Candidatus 'Brocadia fulgida': an autofluorescent anaerobic ammonium oxidizing bacterium. *FEMS Microbiology Ecology*, 2008, **63**(1): 46–55.
- [4] Strous M, Pelletier E, Mangenot S, *et al.* Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome. *Nature*, 2006, **440**(7085): 790–794.
- [5] Hu BL, Zheng P, Li JY, *et al.* Identification of a denitrifying bacterium and verification of its anaerobic ammonium oxidation ability. *Science in China Series C-Life Sciences*, 2006, **49**(5): 460–466.
- [6] 郑平, 胡宝兰. 厌氧氨氧化菌混培物生长及代谢动力学研究. *生物工程学报*, 2001, **17**(2): 193–198.
- [7] Dosta J, Fernandez I, Vazquez-Padin JR, *et al.* Short- and long-term effects of temperature on the Anammox process. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1/3): 688–693.
- [8] Strous M, vanGerven E, Kuenen JG, *et al.* Effects of aerobic and microaerobic conditions on anaerobic ammonium-oxidizing (Anammox) sludge. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(6): 2446–2448.
- [9] Strous M, Kuenen JG, Jetten MSM. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248–3250.
- [10] 张树德, 李杨张. 亚硝酸盐对厌氧氨氧化的影响研究. *环境污染与防治*, 2005, **27**(5): 324–327.
- [11] 唐崇俭, 郑平, 陈建伟, 等. 基于基质浓度的厌氧氨氧化工艺运行策略. *化工学报*, 2009, **60**(3): 718–725.
- [12] Kang J, Wang JL. Influence of chemical oxygen demand concentrations on anaerobic ammonium oxidation by granular sludge from EGSB reactor. *Biomedical and Environmental Sciences*, 2006, **19**(3): 192–196.
- [13] Jetten M, Schmid M, van de Pas-Schoonen K, *et al.* Anammox organisms: enrichment, cultivation, and environmental analysis. *Environmental Microbiology*, 2005(397): 34–57.
- [14] 王勇, 黄勇, 袁怡, 等. 进水 Ca/P 比对厌氧氨氧化活性的影响. *水处理技术*, 2009, **35**(5): 53–56.
- [15] 张蕾, 郑平, 胡安辉. 铁离子对厌氧氨氧化反应器性能的影响. *环境科学学报*, 2009, **29**(8): 1629–1634.
- [16] Zhang DJ, Cai Q, Cong LY. Enhancing completely autotrophic nitrogen removal over nitrite by trace NO<sub>2</sub> addition to an AUSB reactor. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2010, **85**(2): 204–208.
- [17] 金仁村, 郑平, 胡安辉. 盐度对厌氧氨氧化反应器运行性能的影响. *环境科学学报*, 2009, **29**(1): 81–87.
- [18] Van De Graaf A, DeBruijn P, Robertson LA, *et al.* Autotrophic growth of anaerobic ammonium-oxidizing micro-organisms in a fluidized bed reactor. *Microbiology-Uk*, 1996(142): 2187–2196.
- [19] 路青, 李秀芬, 华兆哲, 等. 接种污泥源对厌氧氨氧化启动效能的影响. *生态与农村环境学报*, 2009, **25**(4): 60–65.
- [20] Zhu GL, Hu YY, Wang QR. Nitrogen removal performance of anaerobic ammonia oxidation co-culture immobilized in different gel carriers. *Water Science and Technology*, 2009, **59**(12): 2379–2386.
- [21] 朱明石, 周少奇, 曾武. Uasb 反应器厌氧氨氧化菌的脱氮特性研究. *环境工程学报*, 2008, **2**(1): 11–15.

- [22] 张杰, 李海华, 韦道领, 等. Ic 反应器厌氧氨氧化启动与运行特性研究. 污染防治技术, 2007, **20**(2): 21-24.
- [23] Wang JL, Jing K. The characteristics of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) by granular sludge from an EGSB reactor. *Process Biochemistry*, 2005, **40**(5): 1973-1978.
- [24] Trigo C, Campos JL, Garrido JM, *et al.* Start-up of the Anammox process in a membrane bioreactor. *Journal of Biotechnology*, 2006, **126**(4): 475-487.
- [25] Tsushima I, Ogasawara Y, Kandaichi T, *et al.* Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors. *Water Research*, 2007, **41**(8): 1623-1634.
- [26] Wang CC, Lee PH, Kumar M, *et al.* Simultaneous partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and denitrification (SNAD) in a full-scale landfill-leachate treatment plant. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **175**(1/3): 622-628.
- [27] Weissenbacher N, Takacs I, Murthy S, *et al.* Gaseous nitrogen and carbon emissions from a full-scale deammonification plant. *Water Environment Research*, 2010, **82**(2): 169-175.
- [28] Joss A, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitrification and anammox in one SBR. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(14): 5301-5306.
- [29] Qiao S, Yamamoto T, Misaka M, *et al.* High-rate nitrogen removal from livestock manure digester liquor by combined partial nitrification-anammox process. *Biodegradation*, 2010, **21**(1): 11-20.
- [30] Liang Z, Liu JX, Li J. Decomposition and mineralization of aquatic humic substances (AHS) in treating landfill leachate using the Anammox process. *Chemosphere*, 2009, **74**(10): 1315-1320.
- [31] Xu ZY, Zeng GM, Yang ZH, *et al.* Biological treatment of landfill leachate with the integration of partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and heterotrophic denitrification. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 79-86.
- [32] Wyffels S, Boeckx P, Pynaert K, *et al.* Nitrogen removal from sludge reject water by a two-stage oxygen-limited autotrophic nitrification denitrification process. *Water Science and Technology*, 2004, **49**(5/6): 57-64.
- [33] Windey K, De Bo I, Verstraete W. Oxygen-limited autotrophic nitrification-denitrification (OLAND) in a rotating biological contactor treating high-salinity wastewater. *Water Research*, 2005, **39**(18): 4512-4520.
- [34] Van Dongen U, Jetten MSM, van Loosdrecht MCM. The SHARON(R)-Anammox(R) process for treatment of ammonium rich wastewater. *Water Science and Technology*, 2001, **44**(1): 153-160.
- [35] Vazquez-Padin J, Fernandez I, Figueroa M, *et al.* Applications of anammox based processes to treat anaerobic digester supernatant at room temperature. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(12): 2988-2994.
- [36] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 好氧条件下 canon 工艺的启动研究. 环境科学, 2009, **30**(6): 1689-1694.

## 稿件书写规范

### 论文中有关正、斜体的约定

物种的学名: 菌株的属名、种名(包括亚种、变种)用拉丁文斜体。属的首字母大写, 其余小写, 属以上用拉丁文正体。病毒一律用正体, 首字母大写。

限制性内切酶: 前 3 个字母用斜体, 后面的字母和编码正体平排, 例如: *Bam*H I、*Msp* I、*Sau*3A I 等。

氨基酸和碱基的缩写: 氨基酸缩写用 3 个字母表示时, 仅第 1 个字母大写, 其余小写, 正体。碱基缩写为大写正体。

基因符号用小写斜体, 蛋白质符号首字母大写, 用正体。