

不同环境下Anammox工艺脱氮性能及菌群的迁移转化

Study on Nitrogen Removal and Shift of Microbial Community by Anammox Process under Different Cultivating Conditions

杨嘉春¹, 任仲宇², 古川憲治³

(1.神华集团有限责任公司, 北京 100011; 2.北京工业大学建筑工程学院水资源与水工程研究所, 北京 100124; 3.日本熊本大学工学部环境工学学科, 日本熊本 860-8555)

摘要: 为提高Anammox菌对各种操作条件的应变能力, 扩大该技术在实际工程上的应用范围, 对Anammox反应器在不同操作条件下的脱氮性能及其菌群的迁移转化规律进行试验性研究。292 d的实验数据表明, Anammox反应器在充足无机碳源环境、室温环境以及高盐环境下均可高效稳定的运行, 且在室温为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、污泥量为22 g-MLSS/L下最高氮负荷达 $20.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$, 根据DNA结果, 此阶段KU2约占反应器内所有菌群的75%, 说明此类菌群对低温高负荷条件具有很强的生存性。此外, 当进水盐度为30 g/L时, Anammox反应器仍可进行高效脱氮处理, 而DNA结果显示, 此阶段反应器内KU2所占比例降至36.5%, 说明进水中的高盐度对KU2的富集具有消极意义。有关Anammox菌对高盐环境长期适应性及菌群变化的研究尚少, 仍需进一步探讨。

关键词: 厌氧氨氧化; 脱氮; 室温; 高盐

中图分类号: X52

文献标识码: A

Abstract: In order to improve the adaption capacity of the Anammox bacteria on a variety of operating conditions, and also to expand the scope of application in practice, the nitrogen removal performance as well as the shift and transformation of Anammox bacteria population under different environmental conditions were studied. The experimental data of 292 days showed that the Anammox reactor could operate efficiently under the conditions of adequate inorganic carbon source, ambient temperature and high-salt concentration. Under the ambient temperature of $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ and sludge concentration of 22 g-MLSS/L, the maximum nitrogen loading rate (NLR) was as high as $20.5 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$. According to the DNA results, KU2 accounted for 75% of the microbial population in the Anammox reactor at this running stage, indicating the strong survival capacity of this kind of bacteria under the conditions of low temperature and high NLR. Besides, when the influent NaCl concentration was 30 g/L, Anammox reactor could still be efficient for nitrogen removal, but DNA results exhibited that at this stage the proportion of KU2 in the reactor dropped to 36.5%, indicating that the high salinity water had negative effect on KU2 enrichment. Long-term cultivation of these kinds of Anammox bacteria under high salt concentrations was still poorly understood and should be investigated in the future.

Key words: Anammox; Nitrogen Removal; Ambient Temperature; High Salinity

CLC number: X52

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, 简称Anammox)工艺是近20年来新型生物脱氮技术的研发热点之一^[1-3], 因具有无需供给有机碳源及氧等优势而受到广泛关注^[4]。目前该工艺已在荷兰、日本等国成功地应用于消化污泥脱水

液、养猪废水以及垃圾渗滤液等废水的处理中, 脱氮效率远高于传统的硝化-反硝化工艺, 且处理所需费用远低于传统工艺, 因而显示出了诱人的应用前景。然而, Anammox菌生长缓慢, 倍增时间长, 细胞产率低, 且对环境条件敏感^[5,6], 导

收稿日期: 2012-05-28

作者简介: 杨嘉春(1982-), 男, 博士、工程师。研究方向: 废水污染控制。

致厌氧氨氧化工艺推广应用缓慢。为寻求有效方法缩短Anammox工艺启动时间,提高Anammox菌对各种操作条件的应变能力,扩大该技术在工程上的应用范围,本研究将对Anammox反应器在不同操作条件下的脱氮性能及其菌群的迁移转化规律进行试验性研究,以期Anammox工艺在工程实际应用中提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

实验采用一上流式圆柱腔体作为Anammox反

应器,有效容积为5.8 L,腔体内部装有一螺旋形结构作为三相分离器。通过水浴加热,反应器内部温度控制在 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ 至 $(33 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。进水pH为 (7.2 ± 2) 。模拟废水通过蠕动泵送入反应器,整个反应系统为连续运行。光照对于氨氮的去除效果具有副作用(约30%~50%的削减),因此利用黑色聚乙烯薄塑料围布覆盖以创造避光环境。在整个实验过程中,通过改变进水总氮浓度以及水力停留时间(HRT)来调节系统的氮负荷。实验共进行292 d,操作及运行条件,见表1。

表1 操作条件

阶段	t/d	HRT/h	无机碳浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	T/ $^\circ\text{C}$	NaCl 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
启动(阶段一)	0~24	10~3.3	22 ± 2	33 ± 1	0
充足无机碳(阶段二)	25~110	3.8~1.5	$(22 \pm 2) \sim 220$	33 ± 1	0
室温(阶段三)	111~202	1.5~1.03	150 ± 5	$(33 \pm 1) \sim (23 \pm 2)$	0
高盐(阶段四)	203~292	1.74	150 ± 5	$(23 \pm 2) \sim (28 \pm 2)$	4~30

1.2 种泥及实验用水

本研究中起始种泥的80%是取自古川研究室一个22 L的以聚乙烯无纺布作为填料的上流式固定床Anammox反应器^[7],另外20%的种泥取自一个2.5 L的以聚乙烯海绵作为填料的上流式固定床Anammox反应器,起始种泥的浓度为 $4\text{g} \cdot \text{MLSS} \cdot \text{L}^{-1}$ 。实验采用人工合成废水,废水成份如下: $\text{NH}_4\text{-N}$ 300~663 mg/L, $\text{NO}_2\text{-N}$ 309~620 mg/L, KHCO_3 0.125~2 g/L, KH_2PO_4 54 mg/L, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 9 mg/L,EDTA 5 mg/L,无机盐溶液2 ml/L(NaCl 500 mg/L, KCl 700 mg/L, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 700 mg/L, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 500 mg/L),微量元素1 ml/L($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.25 mg/L, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.43 mg/L, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.24 mg/L, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.99 mg/L, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.22 mg/L, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.19 mg/L, NaSeO_4 0.11 mg/L, H_3BO_3 0.014 mg/L)

1.3 操作条件及分析方法

$\text{NH}_4\text{-N}$ 采用改进的邻苯基苯酚比色法测定, $\text{NO}_2\text{-N}$ 采用分光光度法测定, $\text{NO}_3\text{-N}$ 采用紫外分光(ultraviolet spectrophotometric screening)法测定。实验所用的蠕动泵、pH仪、DO测定仪型号分别为ROLLER PUMP RP-2000、METTLED

TOLEDO 320 pH Meter、pH/DO meter D-55。

1.3.1 DNA提取及PCR扩增 在分析之前,将用于DNA提取的样本储存于 -20°C 的环境中。污泥样本首先在液氮环境下进行研磨,再采用ISOIL套件(Wako, Osaka, Japan)对元基因组DNA为模板进行提取,利用真细菌引物6F(正向引物:5'-GGAGAGTTAGATCTTGGCTCAG-3')和1492r(反向引物:5'-GGTTACCTTGTTACGACT-3')通过Phusion DNA聚合酶(FINNZYMES, Finland)对16SrRNA基因进行扩增。之后根据以下参数进行PCR扩增实验:首先在 98°C 下进行预变性30s,其次分别在 98°C 下扩增10s, 51°C 下扩增20s, 72°C 下扩增35s,重复进行25次,再在 72°C 下最后进行延伸5 min,重复进行25次。最后使用向导SV凝胶和PCR清理系统(Promega, USA)对扩增产物进行纯化。

1.3.2 16S rRNA基因的克隆及测序 纯化后的基因片段连接到pBluescript II KS+的EcoRV基因文库(Stratagene, USA),大肠杆菌DH10B通过构建好的质粒被转化。随机挑选白色菌落,利用碱性方法提取质粒。采用3130xl基因分析仪及BigDye V3.1循环测序试剂(Applied Biosystems,

USA) 测定核苷酸序列。测定出的序列通过NCBI网站与BLAST方案中使用NR-database序列进行比较、匹配。

2 结果与讨论

2.1 不同环境条件下反应器的脱氮效果

2.1.1 阶段一-启动阶段 由于在本研究开始之前, 种泥保存在冰箱中数月, 因此种泥的活性较低。为迅速提高Anammox菌的活性, 本研究采用温度冲击的特殊操作方法来完成启动过程。启动的第一天, 温度逐步从34 °C提升至40 °C, 之后

在40 °C时持续10 h, 同时进水总氮浓度保持在100 mg/L, Anammox菌的活性迅速被激发, 当温度降至33 °C时, 出水中检测不到NO₂-N, 且NO₃-N也有稳定的积累。在之后的24 d里, 逐步提高总氮负荷NLR至2.5 kg N/m³·d见图1, 总氮的去除率可稳定维持在80%左右。与其他学者的研究成果相比, 本研究中Anammox反应器显示出对迅速提高的氮负荷极强的适应能力。究其原因, 可归结为以下两点: 较高的种泥浓度为反应器的快速启动提供了前提条件; 实验初期采取的温度冲击操作策略在本实验条件下具有可行性。

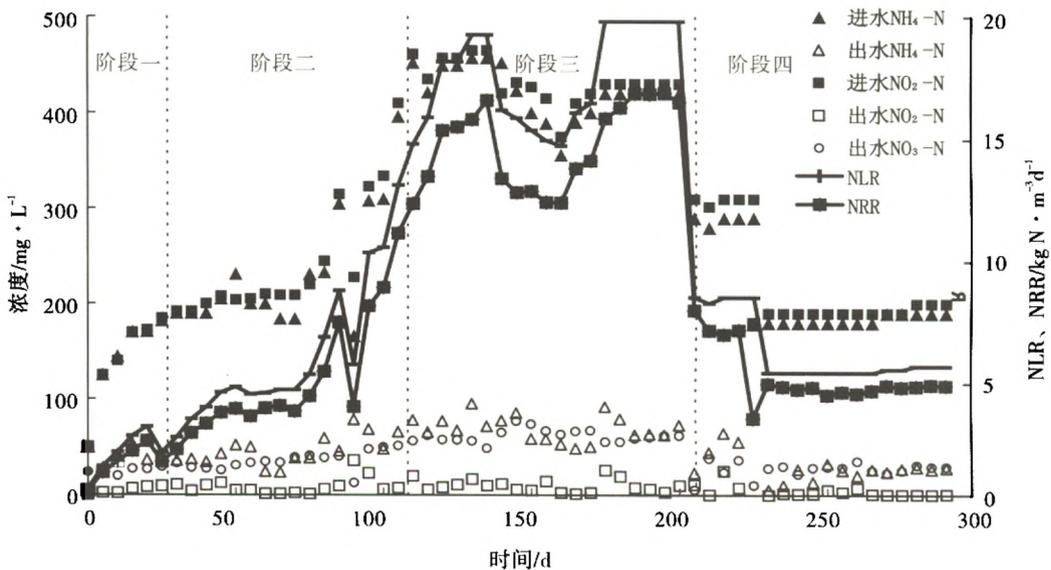


图1 Anammox反应器脱氮性能示意图

2.1.2 阶段二充足无机碳环境 Furukawa et al^[8]研究表明, 无机碳源 (IC) 在连续型硝化反应器中是重要的限制因素。Wett et al^[9]认为, CO₂不足很可能是硝化菌活性严重降低的主要原因。Liao et al^[10]和李金堂^[11]报道Anammox菌活性随着进水无机碳源浓度的增加而增加。因此推断无机碳也许对Anammox菌的富集起重要作用。实验进入第二阶段, 在前两周 (第26~50 d) 中, 进水总氮负荷逐渐提高至4.6 kg N/m³·d, 最高的脱氮负荷为3.7 kg N/m³·d, 实现了反应器的高效稳定运行。从第51 d起, 实验开始考察无机碳源对Anammox过程脱氮性能的影响, 无机碳源以KHCO₃的形式添加到进水中。在接下来的3周

内, 保持进水总氮负荷不变, 逐步增加进水中无机碳源的浓度。当IC浓度从30 mg/L增至45 mg/L时, 出水NO₂-N浓度立即由8 mg/L降至0.8 mg/L, 由此说明充足IC可加强Anammox反应器的脱氮性能。继续稳步提高IC浓度至200 mg/L, 总氮去除率始终保持在80%以上, 出水NO₂-N低于1 mg/L。

根据以上实验结果, 考虑经济因素, 最终确定IC浓度150 mg/L为本研究中最佳投加量。在第79~110 d之间, 总氮浓度迅速从535 mg/L提升至920 mg/L, 在此短短32 d内, 脱氮负荷 (NRR) 迅速由5.2 kg N/m³·d提高至11.8 kg N/m³·d, 这也表明, 充足的无机碳源可有效提高反应器的脱氮效率。

2.1.3 阶段三室温阶段 微生物研究已证实, Anammox菌的适宜温度为30~40 °C^[12,13]。虽然一些学者已研究出Anammox菌的微观组成, 但是有关在室温条件下进行Anammox过程的菌群还鲜有报道^[14-16]。因此在接下来的92 d逐渐降低反应器温度, 以实现反应器在室温条件下的高效稳定运行。在开始的24 d中, 保持温度在(33±1) °C, 逐步提高进水总氮负荷至19.2 kg N/m³·d, 最高脱氮负荷达16±0.3 kg N/m³·d。之后逐步降低反应器温度以防止温度骤变引起的微生物菌群紊乱。为使Anammox菌更快地适应低温环境, 降低进水总氮浓度至870 mg/L并延长HRT至1.3 h, 同时将温度从(33±1) °C降至(23±2) °C。结果表明, 温度的变化并没有影响Anammox反应器的脱氮性能, 这也说明Anammox菌可以逐渐地适应低温环境。从第154 d开始通过降低HRT方法逐步提高进水总氮负荷至20.5 kg N/m³·d, 处理效果仍然很好, 出水NO₂-N浓度在10 mg/L以下。反应器在此负荷下共运行3周, 说明反应器在室温条件下具有很强的稳定性能。反应器之所以可以在低温环境下达到如此好的处理效果, 究其原因, 可归结为以下几点: 充足无机碳源的添加(IC浓度为150 mg/L), 可以为Anammox菌在抵抗较大pH波动中提供了一定的保护和补偿作用, 使得Anammox菌在高浓度亚硝氮下仍可以正常代谢而不被抑制; 大量Anammox菌(22 g-MLSS/L)为反应器高效运行提供保障; 菌群种类(KU2), DNA分析结果表明, 此过程中的主导菌群为KU2(具体分析见下文)。

2.1.4 阶段四高盐阶段 高盐度废水已成为人们不得不面对的一类特殊废水, 近些年一些学者^[17-19]致力于在高盐条件下培养驯化淡水Anammox菌, 使其可在高盐条件下实现高效脱氮, 然而有关在高盐度、高负荷条件下实现反应器长期稳定运行的报道尚少有报道, 因此在接下来的90 d, 逐步

向进水中添加NaCl来模拟高盐废水环境。承接上一部分实验, 反应器温度仍为(23±2) °C。在本部分实验开始之前, 反应器内一半污泥被取出, 因此本阶段污泥浓度约为11 g-MLSS/L。在起始的两周内, 保持进水负荷在(82±0.1) kg N/m³·d, 同时逐步提高进水NaCl浓度4 g/L至18 g/L, 总氮去除率始终维持在(85±2)%, 处理效果较好。继续提高NaCl浓度至20 g/L, 处理效果突然恶化, 出水亚硝氮浓度达到280 mg/L, 于是通过稀释进水的方法降低进水负荷及盐度, 脱氮效果仍然很差。为使反应器恢复其脱氮性能, 从第230 d开始将进水总氮浓度降至100 mg/L, 同时不添加任何盐度, 亚硝氮去除率达到100%。在接下来的4 d, 稳步增加进水总氮浓度100 mg/L至600 mg/L, 反应器表现出稳定的脱氮性能, 由此说明Anammox菌的活性已得到恢复。继续增加进水盐度至30 g/L, 进水总氮负荷维持在5.1 kg·N/m³·d, 出水亚硝氮保持在10 mg/L以下, 反应器在此条件下稳定运行一个月, 处理效果稳定, 脱氮负荷为(4.5±0.1) kg N/m³·d。

对比其他学者的研究成果, 本研究所取得的结果具有明显的优势。Kartal B, et al^[17]在NaCl浓度为30 g/L的条件下所达到的最高脱氮负荷为1.0 kg N/m³·d; Dapena-Mora A, et al^[20-22]在NaCl浓度为30 g/L的条件下所达到的最高脱氮负荷为0.3 kg N/m³·d; 本研究在NaCl浓度为30 g/L的条件下所达到的最高脱氮负荷为4.6 kg N/m³·d, 这也是目前为止报道的最高盐度下的最大除氮负荷, 且此状态稳定维持1个月, 充分说明系统的高效、稳定、可靠性。

2.2 微生物菌群的迁移转化

对不同培养环境下微生物菌群迁移转化的研究有助于深入理解反应器脱氮性能的机理。通过DNA分析方法探讨不同环境条件下Anammox反应器内的主导菌群, 实验结果见表2。

表2 不同阶段反应器内微生物菌群的变化

OTU	类别	登录号	相似性 / %	阶段一	阶段二	阶段三	阶段四
1	<i>Planctomycete KSU-1</i>	AB057453	100-99	12 (12/34)	1 (1/47)	0 (0/32)	0 (0/52)
2	<i>Uncultured anoxic sludge bacterium KU2</i>	AB054007	100-99	3 (3/34)	14 (14/47)	24 (24/32)	19 (19/52)
	<i>Candidatus Kuenenia stuttgartiensis</i>	CT573071	100-99				
3	<i>Uncultured bacterium clone MABRDTU18</i>	FJ529971	100-99	13 (13/34)	0 (0/47)	0 (0/32)	0 (0/52)
	<i>Uncultured bacterium clone NBDTU17</i>	FJ529937	99				
	<i>Uncultured bacterium clone PIH12</i>	FJ416451	96				
4	<i>Uncultured bacterium clone KIST-JJY038</i>	EF654707	99	1 (1/34)	7 (7/47)	0 (0/32)	0 (0/52)
	<i>Uncultured bacterium clone: A2</i>	AB462403	99				
	<i>Uncultured bacterium clone: A</i>	AB194898	99				
5	<i>Uncultured bacterium clone: AnSal-04</i>	AB434256	100-99	0(0/34)	0 (0/47)	0 (0/32)	5 (5/52)
	<i>Uncultured bacterium clone: AnDHS-2</i>	AB430333	99				
	<i>Uncultured bacterium clone Ge64</i>	FJ710714	99				
6	<i>Uncultured bacterium clone H2SRC239x</i>	FM213063	100-99	0(0/34)	0 (0/47)	0 (0/32)	5 (5/52)
	<i>Uncultured bacterium clone B38</i>	EU234164	100-99				
	<i>Uncultured bacterium clone KD3-123</i>	AY188302	97				

Anammox菌 *KSU-1* (AB057453²¹) 以及与 16S rRNA 基因序列的 *uncultured bacterium clone MABROTU18* (FJ529971), *NBDTU17* (FJ529937), *PIH12* (FJ416451) 有较高相似度的 OTU3 是种泥中的优势菌群, 且分别占 35% (12/34) 和 38% (13/34)。当足量无机碳源的添加且随着 Anammox 系统除氮负荷的提高 (从 5.2 kg N/m³ · d 升高至 11.8 kg N/m³ · d), 反应器中的优势菌群出现了迁移转化, 即 *KU2* (AB054007²²)、*Candidatus Kuenenia stuttgartiensis* (CT573071) 和 OTU4 成为了优势菌群, OTU3 则消失掉。此实验结果可以说明

KU2 在充足无机碳源条件下的生存能力要强于 *KSU-1*; 同时较高的氮负荷也是菌群迁移转化的重要原因所在。

当环境转化成为室温, 且在高负荷下驯化培养 92 d 后, 反应器内唯一的优势菌群为 *KU2*, *KU2* 为 *anammoxosome* 属, 根据实验结果推断此类菌群可在较高的氮负荷下生存。此外, 室温条件破坏了反应器内原有的微生物共生关系, 使得 *KU2* 比例急剧升高 (由 30% 上升至 75%), 说明在与其他菌群竞争过程中低温条件给了 *KU2* 生存优势^[15], *KU2* 对低温条件的适应将有助于进一步

研究Anammox工艺在处理高氨氮废水中的实际应用。在最后的90 d中,操作条件转化成为高盐环境。*KU2*仍为优势菌群且占36.5%的比例,而在DNA分析结果中,*AnSal-04* (AB434256),*AnDHS-2* (AB430333) 以及*Ge64* (FJ710714) 约占10%,成为第二大优势菌群,这与Crocetti et al^[23]研究结果具有很大相似性。Kartal et al^[24]的研究中指出,淡水菌群*Candidatus Kuenenia stuttgartiensis*在维持稳定的Anammox活性的同时可以适应盐度高达30 g/L,然而在本研究中,高盐条件下培养驯化后,*KU2*的比例大幅降低至36.5%,说明进水中的高盐度对*KU2*的富集具有消极意义。有关Anammox菌对高盐环境长期适应性及菌群变化的研究尚少,仍需进一步探讨。

3 结论

本研究探讨了不同环境条件下Anammox工艺的脱氮性能及其菌群的迁移转化规律。反应器分别经历了启动阶段、充足无机碳源阶段、室温阶段和高盐阶段,反应器均表现出较高的脱氮性能,且室温下最高氮负荷达 $20.5 \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$ 。通过对高盐环境的适应,在盐度为30 g/L下,脱氮负荷可稳定维持在 $(4.5 \pm 0.1) \text{ kg N/m}^3 \cdot \text{d}$,体现了系统的稳定性和高效性。此外,DNA结果表明,*KU2*在各个阶段内均是反应器内的优势菌群,说明此类菌群可很好的适应各种操作条件,培养和富集此类Anammox菌对今后实际工程应用具有重要意义。

参考文献

- [1]郑平,徐向阳,胡宝兰.新型生物脱氮理论与技术[M].北京:科学出版社,2004.
- [2]Tsushima I, Ogasawara Y, Kindaichi T, et al. Development of high-rate anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) biofilm reactors[J]. Water Res, 2007, 41 (8): 1623-1634.
- [3]van der Star W R L, Abma W R, Bolmers D, et al. Startup of reactors

- for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam[J]. Water Res, 2007, 41(18): 4149-4163.
- [4]Ahn Y. Sustainable nitrogen elimination biotechnologies: A review[J]. Process Biochem, 2006, 41 (8): 1709-1721.
- [5]Jetten M S M, Cirpus I, Kartal B, et al. 1994-2004: 10 years of research on the anaerobic oxidation of ammonium[J]. Biotech Soc Trans, 2005, 33(1): 119-123.
- [6]唐崇俭, 郑平. 厌氧氨氧化技术应用的挑战与对策[J]. 中国给水排水, 2010, 126(4): 19-23.
- [7]Furukawa K., Rouse J D, Yoshida N, et al. Mass cultivation of anaerobic ammonium-oxidizing sludge using a novel nonwoven biomass carrier[J]. J Chem Eng Jpn, 2003, 36(4): 1163-1169.
- [8]Furukawa K, Ike A, Ryu S L, et al. Nitrification of $\text{NH}_4\text{-N}$ polluted sea water by immobilized acclimated marine nitrifying sludge[J]. J Fermentation Bioeng, 1993, 76(6): 512-520.
- [9]Wett B, Rauch W. The role of inorganic carbon limitation in biological nitrogen removal of extremely ammonia concentrated wastewater[J]. Wat Res, 2003, 37(5): 1100-1110.
- [10]Liao D, Li X, Yang Q, et al. Effect of inorganic carbon on anaerobic ammonium oxidation enriched in sequencing batch reactor[J]. J Environ Sci, 2008, 20(8): 940-944.
- [11]李金堂. 无机碳源对ASBR反应器中厌氧氨氧化反应的影响研究[J]. 环境科技, 2011, 24(4): 25-28.
- [12]Egli K, Fanger U, Alvarez P. Enrichment and characterization of an Anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate[J]. Arch Microbiol, 2001, 175(3): 198-207.
- [13]Isaka K, Sumino T, Tsuneda S. High nitrogen removal performance at moderately low temperature utilizing anaerobic ammonium oxidation reactions[J]. J Biosci Bioeng, 2007, 103(5): 486-490.
- [14]Chamchoi N, Nitisorvut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation and denitrification[J]. Bioresour Technol, 2008, 99(9): 3331-3336.
- [15]Jiachun Y, Li Z, Daisuke H, et al. High-rate nitrogen removal by the Anammox process at ambient temperature[J]. Bioresour. Technol, 2011, 102(2): 672-676.
- [16]Ni S Q, Lee P H, Sung S. The kinetics of nitrogen removal and biogas production in an anammox non-woven membrane reactor[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(15): 5767-5773.
- [17]Kartal B, Koleva M, Arsov R, et al. Adaption of a freshwater anammox population to high salinity wastewater[J]. J Biotechnol, 2006, 126(4): 546-553.
- [18]Liu C, Yamamoto T, Nishiyama T, et al. Effect of salt concentration in anammox treatment using non woven biomass carrier[J]. J Biosci Bioeng, 2009, 107(5): 519-523.
- [19]Jiachun Y, Li Z, Daisuke H, et al. Nitrogen removal from high salinity wastewater by Anammox process at ambient temperature[J]. Bioresour. Technol., 2011, 102(3): 2367-2372.
- [20]Dapena-Mora A, Vázquez-Padrón J R, Campos J L, et al. Monitoring the stability of an Anammox reactor under high salinity conditions[J]. Biochem Eng, 2010, 51(3): 167-171.
- [21]Fujii T, Sugino H, Rouse D, et al. Characterization of the microbial community in an anaerobic ammonium oxidizing biofilm cultured on a nonwoven biomass carrier[J]. J Biosci Bioeng, 2002, 94(5): 412-418.
- [22]Furukawa K, Rouse J D, Imajo U, et al. Anaerobic oxidation of ammonium confirmed in continuous flow treatment using a non-woven biomass carrier[J]. JPN J Wat Treat Biotechnol, 2001, 38(2): 87-94.
- [23]Crocetti G R, Banfield J F, Keller J, et al. Glycogen accumulating organisms in laboratory-scale and full-scale wastewater treatment processes[J]. Microbiol, 2002, 148(11): 3353-3364.
- [24]Kartal B, Kuenen J G., Van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox[J]. Sci, 2010, 328(5979): 702-703.