

冉竞龙, 胡勇有, 阎佳. 2009 不同物质对亚硝酸盐积累的影响 [J]. 环境科学学报, 29(7): 1405–1410
Ran J L, Hu Y Y, Yan J. 2009. The effects of organic carbon and salts on nitrite accumulation in an ANNAMOX reactor[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(7): 1405–1410

不同物质对亚硝酸盐积累的影响

冉竞龙, 胡勇有*, 阎佳

华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006
收稿日期: 2008-10-27 录用日期: 2009-05-07

摘要: 亚硝化-厌氧氨氧化脱氮工艺的关键是实现亚硝酸盐的累积. 实验采用 SBR 反应器, 在实现亚硝酸盐稳定积累的基础上, 考察了不同的碳源种类及离子对亚硝酸盐积累的影响. 结果表明, 当进水 COD 不高于 200mg L^{-1} ($0 < \text{C/N} \leq 0.34$) 时, 外加碳源对亚硝酸盐的积累有促进作用, 亚硝酸盐积累率可达到 78%; 碳源种类对亚硝酸盐积累的影响不明显, 而对出水 COD 的影响较为明显, 其中以葡萄糖为碳源时 COD 去除率最高, 可达到 98.4%. 亚硝酸盐的积累率随氯离子、硫酸盐以及磷酸盐浓度的增大而迅速下降, 当其浓度分别达到 0.5mol L^{-1} 、 0.4mol L^{-1} 以及 0.4mol L^{-1} 时, 好氧氨氧化菌活性被完全抑制, 氨氮转化率为零; 抑制亚硝酸盐累积的离子排序为: 硫酸盐 > 磷酸盐 > 氯离子 > C/N.
关键词: 亚硝酸盐; 有机碳源; 氯离子; 硫酸根离子; 磷酸根离子

文章编号: 0253-2468(2009)07-1405-06 中图分类号: X703 文献标识码: A

The effects of organic carbon and salts on nitrite accumulation in an ANNAMOX reactor

RAN Jinglong HU Yongyou*, YAN Jia
College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006

Received 27 October 2008 accepted 7 May 2009

Abstract Nitrite accumulation is regarded as the key to the Nitrification/Anammox process. The effect of different organic carbon and salts in the feeding of SBR reactors was studied after steady nitrification was achieved in the reactors. The results showed that when the influent COD was not more than 200mg L^{-1} ($0 < \text{C/N} \leq 0.34$), the nitrite accumulation rate was promoted up to 78%. However, different kinds of organic carbon had much more obvious impacts on the COD removal rate than nitrification. When glucose was used as organic carbon, the COD removal rate was 98.4% which was better than any other tested carbon source. The nitrite accumulation decreased rapidly when the concentration of chloride, sulfate or phosphate increased, and the activity of ammonia oxidizing bacteria was restrained. Nitrite accumulation was completely inhibited when the concentration of chloride, sulfate or phosphate reached 0.5mol L^{-1} , 0.4mol L^{-1} and 0.4mol L^{-1} , respectively. The order of influence of the C/N ratio and salts on nitrite accumulation was sulfate > phosphate > chloride > C/N.

Keywords nitrite; organic carbon; chloride; sulfate; phosphate

1 引言 (Introduction)

亚硝化-厌氧氨氧化工艺被誉为可实现的最短的脱氮工艺, 该工艺的技术关键之一就是控制厌氧氨氧化进水中氨氮与亚硝氮比例约 1:1.3. 人们对温度、pH 值、游离氨 (FA)、溶解氧 (DO)、水力停留时间 (HRT) 等对亚硝酸积累的影响进行了研究. 当

pH 为 7.5~8.5 (Hellinckx *et al.*, 1998; 陈际达等, 2000; 徐冬梅等, 1999)、温度 30~35℃ (Müller, 1997)、SRT 为 1d、DO 为 $0.5\sim 1\text{mg L}^{-1}$ (Hanaki *et al.*, 1990; Laanbroek, 1993; 王志盈等, 2000; Allman, 1984; Bernat, 2001; Wiesmann, 1994) 时有利于富集好氧氨氧化菌、淘汰亚硝酸盐氧化菌, 实现稳定的亚硝酸盐的积累.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 50678071); 广东省自然科学基金 (No. 06105409)
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50678071) and the Natural Science Foundation of Guangdong province (No. 06105409)
作者简介: 冉竞龙 (1984—), 男, E-mail: rjlong0626@yahoo.com.cn * 通讯作者 (责任作者), E-mail: ppyhtu@scut.edu.cn
Biography: RAN Jinglong (1984—), male, E-mail: rjlong0626@yahoo.com.cn * **Corresponding author:** E-mail: ppyhtu@scut.edu.cn

好氧氨氧化菌属于自养菌,生长缓慢易流失,会受到溶液中有有机物、氯、磷及重金属等多种物质的影响。A. Mosquera-Corral 等 (Mosquera-Corral *et al.*, 2005)采用 CSTR反应器研究了 TOC/N 以及盐离子对亚硝酸盐积累的影响,当 TOC/N 为 0.2 时,碳源对亚硝酸盐的积累有促进作用,而当 TOC/N 高于 0.3 时,好氧氨氧化菌活性受到抑制,氮氮的转化率降低至 10%;水中的 NaCl 、 KCl 、 Na_2SO_4 等都会抑制好氧氨氧化菌的活性,当 Cl^- 浓度达到 0.5 mol L^{-1} 时,好氧氨氧化菌被完全抑制。Nowak 等 (Nowak *et al.*, 1996)研究发现亚硝酸盐氧化菌的磷酸盐半饱和系数高于好氧氨氧化菌一个数量级 ($0.2\sim 0.03\text{ mg L}^{-1}$)。Arequia 等 (Arequia *et al.*, 1993)的研究发现,低浓度的铜、铁、铅、铬和镉对亚硝酸盐的积累没有明显的影响,也不显生物毒性。

已有的研究主要是针对碳源总量对亚硝酸盐累积的影响,以及在无机碳源条件下,不同离子对亚硝化过程的影响。而对于碳源的种类以及有机碳源条件下不同离子对亚硝化过程的影响的研究尚无报道。本课题组此前实现了 SBR 反应器亚硝酸盐的稳定积累以及好氧氨氧化菌与好氧异养菌的共存, SBR 反应器比 CSTR 反应器的亚硝酸盐积累效果稳定,且当 $\text{C/N}\leq 0.34$ 时, SBR 反应器 COD 去除率仍可达到 90% 以上,氮的转化率最高可达到 $0.17\text{ kg m}^{-3}\text{ d}^{-1}$ (阎佳等, 2008)。在此基础上,本文进一步研究在进水 $\text{C/N}=0.34$ 时,不同碳源 (糖类、有机酸类)及离子 (氯离子、磷酸根离子及硫酸根离子)对亚硝酸盐积累的影响,以期有部分亚硝化的实际应用提供理论依据。

表 1 人工模拟废水的组成

Table 1 Composition of the feeding solution

$\text{CaCl}_2 /$ (g L^{-1})	$\text{KH}_2\text{PO}_4 /$ (g L^{-1})	$\text{MgSO}_4 /$ (g L^{-1})	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} /$ (g L^{-1})	$\text{NaHCO}_3 /$ (g L^{-1})	EDTA / (g L^{-1})	微量元素 ¹⁾ / (mg L^{-1})	pH
0.30	0.07	0.02	0.009	2.16	0.006	1.25	7.55±0.50

1) 参考文献 (Strous *et al.*, 1998) 的配比。

2.3 分析项目与测定方法

氨氮: 纳氏试剂分光光度法; 亚硝酸盐氮: N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; 硝酸盐氮: 紫外分光光度法; COD: 重铬酸钾快速消解法; pH: Ecoscan pH5/6 DO: YSI 550A; MLVSS、MLSS 重量法 (水和废水监测分析方法 (第 4 版), 2002 水生微生物学实验法 (上), 1985)。

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 实验装置及运行参数

采用 0.5L 的有机玻璃 SBR 反应器, 在恒温室中保持温度 (30 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ 。污泥取自稳定运行半年的亚硝化 SBR 反应器, 接种后反应器中 MLSS 约 2500 mg L^{-1} , 溶解氧 $1\sim 2\text{ mg L}^{-1}$, 换水率 80%, HRT 为 1d 实验装置如图 1 所示。

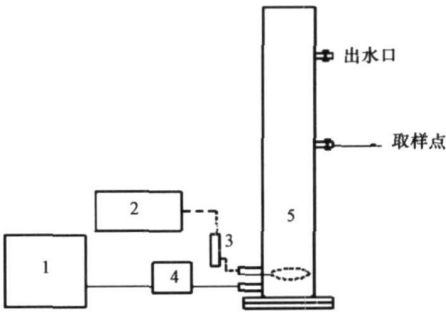


图 1 实验装置示意图 (1 储水池, 2 曝气机, 3 气体流量计, 4 计量泵, 5 SBR 反应器)

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental equipment

2.2 进水水质

采用人工模拟废水, 进水氨氮 (氯化铵) 600 mg L^{-1} , COD 200 mg L^{-1} , 有机碳源为葡萄糖、乳糖、可溶性淀粉、乳酸、正戊酸、柠檬酸及苹果酸等; 无机离子为氯化钠、硫酸钠、磷酸二氢钾。废水其它组成列于表 1 中。

3 结果 (Results)

3.1 不同碳源对亚硝酸盐积累的影响

图 2 所示为不同碳源对亚硝化过程的影响, 1 号反应器无外加碳源, 2~ 8 号反应器进水有机碳源依次为葡萄糖、乳糖、可溶性淀粉、乳酸、正戊酸、柠檬酸及苹果酸。1 号反应器亚硝酸盐积累率为 53.7%; 2~ 8 号反应器亚硝酸盐积累率没有明显的差异, 葡萄糖最高, 为 79.3%, 淀粉最低, 为 76.4%;

以葡萄糖为碳源的 2 号反应器 COD 去除率最高, 达到 98.4%, 其它反应器的 COD 去除率则在 66.0% ~ 84.6% 之间.

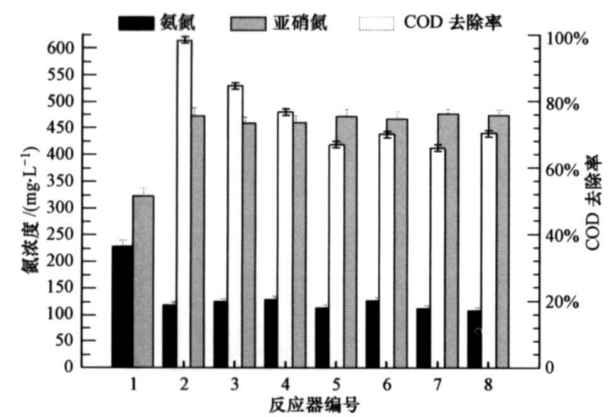


图 2 不同碳源对亚硝化积累的影响 (1 无外加碳源; 2 葡萄糖; 3 乳糖; 4 可溶性淀粉; 5 乳酸; 6 正戊酸; 7 柠檬酸; 8 苹果酸)

Fig 2 The effect of different organic carbon sources on nitrite accumulation

2.2 不同离子对亚硝酸盐积累的影响

2.2.1 氯离子对亚硝酸盐积累的影响 根据 2.1 节的实验结果, 选用葡萄糖为碳源, 氯化铵为氮源 (后续实验相同). 出水亚硝氮及总氮随进水氯离子浓度的上升而降低 (如图 3 所示), 相应的出水氨氮浓度则逐渐上升. 当只有氯化铵时, 即 Cl^- 浓度为 $0.043 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐积累率最高, 为 79.0%, 此时出水亚硝氮浓度为 $473.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 氨氮浓度为 $136.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 当 Cl^- 浓度超过 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 亚硝化反应完全停止, 出水氨氮接近出水总氮.

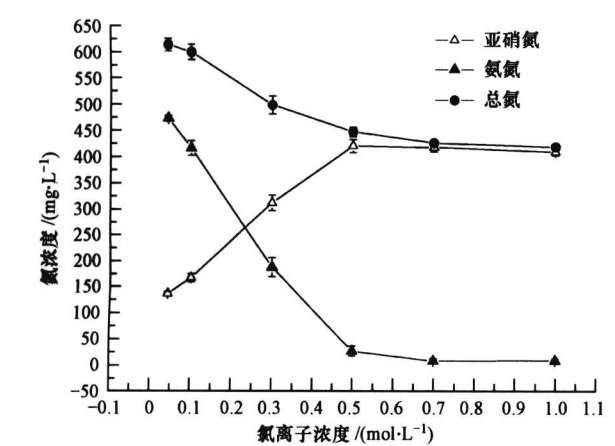


图 3 Cl^- 对亚硝化积累的影响

Fig 3 The effect of chloride on nitrite accumulation

如图 4 所示, COD 去除率随 Cl^- 浓度的升高而逐渐降低. 当只有氯化铵时, COD 去除率达到 99.5%. 当进水 Cl^- 浓度为 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, COD 去除率降低为 22.6%. 当 Cl^- 浓度大于 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 COD 迅速增加, 去除率出现负值.

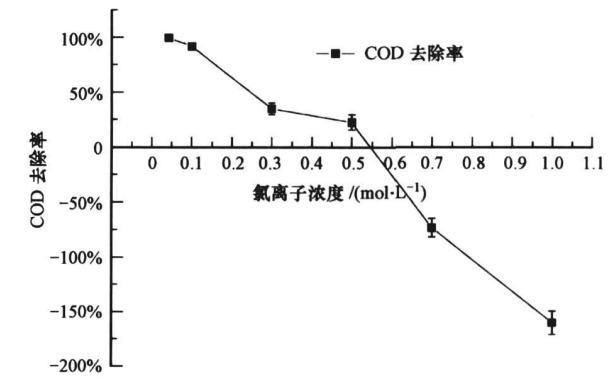


图 4 Cl^- 对 COD 去除率的影响

Fig 4 The effect of chloride on the COD removal rate

2.2.2 SO_4^{2-} 对亚硝酸盐积累的影响 如图 5 所示, 出水亚硝氮浓度、总氮及 COD 去除率均随进水中 SO_4^{2-} 浓度的上升而迅速降低, 相应的出水氨氮浓度逐渐升高. 当进水中无硫酸盐时, 亚硝酸盐积累率及 COD 去除率均达到最大值, 分别为 79.0% 及 99.6%. 当 SO_4^{2-} 浓度为 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 亚硝酸盐积累率明显下降, 为 42.3%, 此时出水亚硝氮浓度已低于氨氮浓度, COD 去除率亦降低至 78.1%. 当 SO_4^{2-} 浓度为 $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 亚硝化反应完全停止, 出水氨氮接近出水总氮, 同时 COD 去除率亦降低至 54.4%.

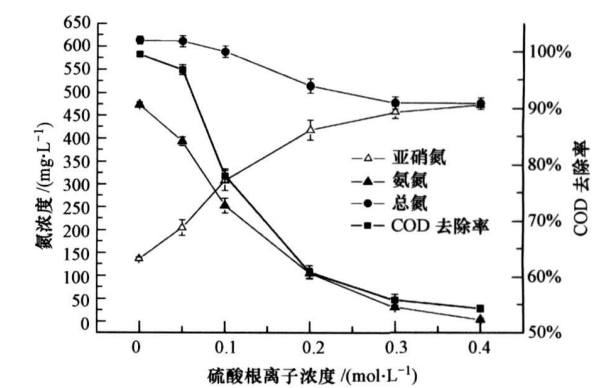


图 5 SO_4^{2-} 浓度对亚硝化积累及 COD 去除率的影响

Fig 5 The effect of sulfate on nitrite accumulation and COD removal rate

2.2.3 PO_4^{3-} 对亚硝酸盐积累的影响 如图 6 所示,出水亚硝氮、总氮及 COD 去除率随进水 PO_4^{3-} 浓度的上升而迅速大幅度降低,相应的出水氨氮浓度逐渐升高.当 PO_4^{3-} 浓度不大于 0.02mol L^{-1} 时,对亚硝酸盐积累及 COD 去除率的影响均不明显,最大值分别为 76.8% 和 98.2%. PO_4^{3-} 浓度大于 0.02mol L^{-1} ,出水亚硝氮浓度及 COD 去除率开始迅速

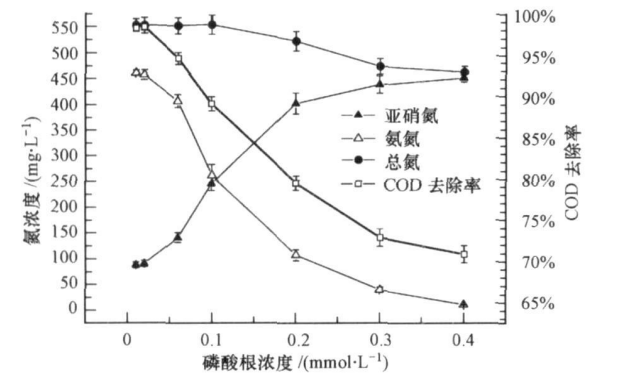


图 6 PO_4^{3-} 对亚硝化积累及 COD 去除率的影响
Fig 6 The effect of phosphate on nitrite accumulation and COD removal rate

下降.当 PO_4^{3-} 浓度达到 0.4mol L^{-1} 时,亚硝化反应完全停止,出水氨氮接近出水总氮, COD 去除率则降低至 70.9%.

2.3 正交实验

根据 2.2 节的实验结果,设计由 Cl^- 浓度、 SO_4^{2-} 浓度、 PO_4^{3-} 浓度以及 C/N 组成的 4 因素 3 水平的正交实验 (如表 2 所示),测定出水中的亚硝氮浓度,所得结果列于表 3.

表 2 正交实验因素水平

Table 2 Factors and levels in the orthogonal experiment				
水平	Cl^- 浓度 / (mol L^{-1})	SO_4^{2-} 浓度 / (mol L^{-1})	PO_4^{3-} 浓度 / (mol L^{-1})	C/N
水平 1	0.042	0	0	0
水平 2	0.150	0.15	0.15	0.34
水平 3	0.300	0.30	0.30	0.67

从表 3 的正交实验结果可以看出,所选定的因素中 SO_4^{2-} 对亚硝酸盐累积效果的影响最大,其次是 Cl^- 及 PO_4^{3-} ,进水 C/N 对亚硝化的影响则最小.

表 3 正交实验结果

Table 3 Results of orthogonal experiments					
实验号	Cl^- 浓度 / (mol L^{-1})	SO_4^{2-} 浓度 / (mol L^{-1})	PO_4^{3-} 浓度 / (mol L^{-1})	C/N	NO_2^- -N 浓度 / (mg L^{-1})
1	0.042	0	0	0	332.5
2	0.042	0.15	0.15	0.34	41.6
3	0.042	0.3	0.3	0.67	9.3
4	0.15	0	0.15	0.67	73.8
5	0.15	0.15	0.3	0	6.6
6	0.15	0.3	0	0.34	0
7	0.3	0	0.3	0.34	7.1
8	0.3	0.15	0	0.67	14.4
9	0.3	0.3	0.15	0	0
I	127.8	137.8	115.6	113.0	
II	26.8	20.9	38.5	16.2	
III	7.2	3.1	7.9	32.5	

注: I、II、III 表示每个因素在水平 1、2、3 情况下,对应的 3 个实验结果的平均值.

4 讨论 (Discussion)

4.1 不同碳源对亚硝化的影响

理论上,有机碳源的加入对好氧氨氧化菌的活性有两种截然相反的影响,一方面是有机碳源对亚硝酸盐氧化菌的抑制作用明显强于对好氧氨氧化菌的抑制作用,因此,在一定浓度范围内,有机碳源的存在将有利于亚硝酸盐的积累;另一方面是当有

机碳源存在时,必然有好氧异养菌存在,且随着有机碳源浓度增加异养菌的数量也相应增加,而好氧氨氧化菌是自养菌,异养菌与自养菌争夺氧,当异养菌数量较多时,自养菌对氧的亲合力就会大大下降 (Phillips *et al.*, 2002). 实验结果表明,在有外加碳源存在的条件下 (2~8 号反应器) 亚硝酸盐的平均积累率为 78.0%,比无外加碳源 (1 号反应器为 53.66%) 高 24.34%,说明外加碳源对亚硝化有一

定的促进作用,这与Steimmüller和Bock、阎佳等的研究结果接近(Steimmüller and Bock, 1976; 阎佳等, 2008)。Mosquera-Corral等(Mosquera-Corral *et al.*, 2005)亦采用CSTR反应器做了类似的研究,其结果表明,在污泥浓度为 $150\text{mg VSS} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,C/N由0提升至0.2,亚硝酸盐积累率由43%提高到60%;当C/N达到0.3时,亚硝酸盐积累率明显下降。而本实验在C/N为0.34时,1~8号反应器的亚硝酸盐平均积累率为75.0%,与同类研究相比,造成该差异的原因主要有两个方面:一是SBR反应器的抗有机碳源冲击负荷能力高于CSTR反应器;二是本实验中SBR反应器中的污泥浓度较高(约为 $2500\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, MLVSS/MLSS约为70%)。

另外,根据2~8号反应器的实验结果,在进水COD均为 $200\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的情况下,碳源的种类对亚硝酸盐积累的影响不明显,仅COD去除率有所不同。以糖类作为碳源(2~4号反应器)的COD去除率比以有机酸(5~8号反应器)作为碳源高(两类碳源的COD去除率的均值分别为86.6%、68.4%),其中以葡萄糖作为碳源的COD去除效果最好。这说明在C/N不高于0.34的有机碳源下,好氧氨氧化菌和好氧异养菌共存,分别独立完成亚硝化反应和有机物氧化反应,并不相互影响,即亚硝酸盐的积累与碳源的种类无关。

4.2 不同离子对亚硝化的影响

随着盐离子浓度的升高,盐析作用使得生物脱氢酶活性降低,即好氧氨氧化菌细胞活性逐渐被抑制,因而出水总氮和亚硝氮浓度随盐离子浓度的上升而逐渐下降,相应的出水氨氮和COD逐渐上升。当进水盐离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-})浓度分别达到 $0.5\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.4\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.4\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水亚硝氮浓度为零,这与Mosquera-Corral等关于氯离子对亚硝酸盐积累的影响的研究结果相似(Mosquera-Corral *et al.*, 2005)。相应地COD去除率分别降低至22.6%、54.4%和70.9%,即好氧氨氧化菌活性完全被抑制,大部分异养菌活性亦被抑制。当氯离子浓度大于 $0.5\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水COD大于进水COD,说明高盐浓度产生了高渗透压,不但使生物脱氢酶活性降低,微生物活性受到抑制,而且使微生物细胞脱水,引起细胞原生质分离,出现了细胞解体现象,从而导致COD去除率出现负值。在 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 浓度达到 $0.4\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,仍有部分COD被去除,而亚硝化反应则完全停止。该结果说明,盐离子

浓度对好氧氨氧化菌活性的影响大于对异养菌活性的影响。另外,在实验过程中还发现,当盐离子浓度大于 $0.3\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污泥沉降性能变差,出水浑浊,造成该现象的原因可能是由于高盐度使得污泥活性降低,使得水的密度增加而导致污泥上浮(刘正, 2004)。

如图5所示,直到磷酸盐浓度达到 $0.02\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (即 $0.61\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)时,好氧氨氧化菌的活性及亚硝酸盐积累率才有明显的下降,而Nowak等(Nowak *et al.*, 1996)的实验结果表明,好氧氨氧化菌的磷酸盐半饱和系数是 $0.03\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,造成该差异的原因可能是在本实验中所采用的是好氧氨氧化菌和好氧异养菌的混合培养污泥,当磷酸盐的浓度较低时,磷酸盐作为微生物生长所需要的营养物质而被消耗,从而导致磷酸盐对好氧氨氧化菌的抑制作用不明显;而当磷酸盐浓度较高时,对好氧异养菌的抑制作用逐渐增大,磷酸盐的消耗量减少,磷酸盐对好氧氨氧化菌的活性的抑制作用显现出来,从而降低了氨氮的转化率。

此外,出水总氮随盐离子浓度的增加呈下降趋势,当亚硝化完全被抑制时,出水总氮浓度基本维持在 $(450 \pm 30)\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,造成这种现象可能有以下两方面的原因:一是由于反应是在一个温度较高($30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$)且敞开的体系下进行的,此种情况下氨氮的自身挥发是造成该现象的重要原因之一;二是曝气的吹脱作用为氨氮的挥发提供了有利的条件。

5 结论(Conclusions)

1)在有外加有机碳源的情况下,亚硝化反应和有机物氧化反应分别由好氧氨氧化菌和好氧异养菌完成。在较低的碳氮比范围内,外加有机碳源对亚硝酸盐的累积有促进作用,当进水COD不高于 $200\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (C/N=0.34)时,亚硝酸盐的积累与碳源的种类无关。

2)亚硝酸盐的累积效果随氯离子、硫酸根以及磷酸根浓度的增大而明显降低,其浓度分别达到 $0.5\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.4\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.4\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,亚硝酸盐积累率降低至零。

3)抑制亚硝酸盐累积效果的离子排序为:硫酸盐>磷酸盐>氯离子>C/N。

责任作者简介:胡勇有(1961—),男,教授(博导),主要从事水处理技术、絮凝技术与水处理材料、污水处理生物增强技

术以及(废)污水处理理论与工艺技术.

参考文献 (References):

- Allen J E. 1984. Elevated nitrite occurrence in biological wastewater treatment systems [J]. *Water Sci Technol* 17(1): 409—419
- Arquiaga M C, Canter L W, Sabatini D A. 1993. Microbiology of high-sodium-nitrite-waste-water treatment [J]. *Environ Pollut* 81: 1—6
- Bemat N, Dangion N, Delgenes J P, *et al*. 2001. Nitrification at low oxygen concentration in biofilm reactor [J]. *Environ Eng* 127 (3): 266—271
- 陈际达, 陈志胜, 张光辉, 等. 2000. 含氮废水亚硝化型硝化的研究 [J]. *重庆大学学报 (自然科学版)*, 23(3): 74—76
- Chen J D, Chen Z S, Zhang G H, *et al*. 2000. Study on Nitrosification of Ammoniated Wastewater [J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 23(3): 74—76 (in Chinese)
- 陈绍铭, 郑福寿. 1985. 水生微生物学实验法 (上) [M]. 北京: 海洋出版社
- Chen S M, Zheng F S. 1985. The Experimental Method of Aquatic Microbiology [M]. Beijing: Ocean Press (in Chinese)
- 国家环境保护总局编. 2002. 水和废水监测分析方法 (第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社
- National Environmental Protection Agency. 2002. Water and Exhausted Water Monitoring Analysis Method [M]. Beijing: China Environmental Science Press (in Chinese)
- Hanaki K, Wantaw C, Ohgaki S. 1990. Nitrification at low levels of dissolved oxygen without organic loading in a suspended-growth reactor [J]. *Wat Res* 24: 297—302
- Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al*. 1998. The Sharon process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. *Water Sci Technol* 37(9): 135—142
- Laanbroek H J, Gerards S. 1993. Competition for limiting amounts of oxygen between *Nitrosomonas europaea* and *Nitrobacter winogradskyi* grown in mixed continuous cultures [J]. *Arch Microbiol* 159: 453—459
- 刘正. 2004. 高浓度含盐废水生物处理技术 [J]. *化工环保*, 24(增刊): 209—211
- Liu Z. 2004. The treatment of high-concentration salinity wastewater by biological technology [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 24(S): 209—211 (in Chinese)
- Mosquera-Corral A, González F, Campos J L, *et al*. 2005. Partial nitrification in a SHARON reactor in the presence of salts and organic carbon compounds [J]. *Process Biochemistry*, 40 (2005): 3109—3188
- Muller J W, van Kempen R. 1997. N-removal by SHARON [J]. *Water Quality International* 2: 30—31
- Nowak O, Svardal K, Kroiss H. 1996. The impact of phosphorus deficiency on nitrification—Case study of a biological pretreatment plant for rendering plant effluent [J]. *Water Science and Technology* 34: 229—236
- Philips S, Laanbroek H J, Verstraete W. 2002. Origin, Causes and effects of increased nitrite concentrations in aquatic environments [J]. *Environmental Science & Biotechnology*, 1: 115—141
- Steinmüller W, Bock E. 1976. Growth of *Nitrobacter* in the presence of organic matter: I. Mixotrophic growth [J]. *Arch Microbiol* 108: 299—304
- Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al*. 1998. The Sequencing Batch Reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonia-oxidizing microorganisms [J]. *Appl Microbiol Biotechnol* 50: 598—596
- 王志盈, 刘超翔, 袁林江, 等. 2000. 低溶氧下生物流化床内亚硝化过程的选择特性研究 [J]. *西安建筑科技大学学报*, 32(1): 4—7
- Wang Z Y, Liu C X, Yuan L J, *et al*. 2000. Study on the selection process of nitrification under low dissolved oxygen in biofilm in biological fluidized bed [J]. *JX J Univ of Arch & Tech*, 32(1): 4—7 (in Chinese)
- 王志盈, 袁林江, 彭党聪, 等. 2000. 内循环生物流化床硝化过程的选择特性研究 [J]. *中国给水排水*, 16(4): 1—4
- Wang Z Y, Yuan L J, Peng D C, *et al*. 2000. Experimental Study on the Selection Characteristic of Nitrification in Down-Flow Biological Fluidized Bed (DBFB) [J]. *China Water & Wastewater* 16(4): 1—4 (in Chinese)
- Wiesmann U. 1994. Biological nitrogen removal from waste water [A]. In: Foehrer A. *Advances in Biochemistry and Engineering/Biotechnology* [C]. New York: Springer, 113—154
- 徐冬梅, 聂梅生, 金承基. 1999. 亚硝酸型硝化试验研究 [J]. *给水排水*, 25(7): 37—39
- Xu D M, Nie M S, Jin C J. 1999. Experiment and research on the nitrous nitrification [J]. *Water & Wastewater Engineering* 25(7): 37—39 (in Chinese)
- 阎佳, 胡勇有, 胡贵平. 2008. 有机碳源环境下亚硝酸盐的积累 [J]. *环境科学*, 29(10): 131—136
- Yan J, Hu Y Y, Hu G P. 2008. Nitrite accumulation in ammonia-rich organic wastewater [J]. *Environmental Science*, 29(10): 131—136 (in Chinese)