

有机碳源环境下亚硝酸盐的积累

阎佳, 胡勇有*, 胡贵平

(华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006)

摘要:采用 CSTR 反应器实现 SHARON 过程, 考察了有机碳源存在下亚硝酸盐的积累过程, 着重研究了当温度 35℃、DO 1.5~2 mg/L、HRT=1 d、进水 pH 值为 8 时, C/N 对亚硝酸盐积累及出水 NO_2^- -N: NH_4^+ -N 的影响。结果表明, 当进水中 NH_4^+ -N 浓度为 360 mg/L, C/N 不超过 0.42 时, 有机碳源的存在有利于亚硝酸盐的积累; 在 C/N 0.17~0.34 范围内, SHARON 反应器出水适合后续 ANAMMOX 进水的要求; 加入有机碳源后 pH 值降低 0.2~0.4, 当 C/N 不超过 0.5 时, SHARON 反应器出水 pH 值均处于 ANAMMOX 的适宜范围内; 在 C/N 为 0~0.5 范围内, 随 C/N 的增加 COD 去除率从约 90% 大幅降低至约 44% 后又大幅提高至约 82%。加入有机碳源后, 由于异养菌的生长污泥浓度以及污泥中有机物含量升高, 形成了紧密的絮状结构的污泥。

关键词: SHARON; C/N; 亚硝酸盐积累; 高氨氮有机废水

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2824-06

Nitrite Accumulation in Ammonia-rich Organic Wastewater

YAN Jia, HU Yong-you, HU Gui-ping

(School of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Nitrite accumulation in CSTR reactor for the artificial ammonia-rich organic wastewater was studied in this paper. It was focused that the effect of C/N to nitrite accumulation and NO_2^- -N: NH_4^+ -N in the effluent under the condition of 35℃, dissolved oxygen(DO) 1.5-2 mg/L, hydraulic retention time(HRT) 1 day and pH 8. The results showed that organic carbon was benefit to nitrite accumulation when C/N was lower than 0.42 with NH_4^+ -N concentration being 360 mg/L; The suitable C/N for SHARON-ANAMMOX process was in the range of 0.17-0.34; The pH value decreased 0.2-0.4 while organic carbon was added to the artificial ammonia-rich wastewater, the pH value of the effluent of SHARON reactor was suitable for ANAMMOX when C/N was lower than 0.5. With C/N increased, the COD removal rate decreased from 90% to 44% and then stabilized at 82%, which was correlated to an increase of both biomass and organic content increased while organic carbon was added to the artificial ammonia-rich wastewater which can be attributed to the heterotrophic bacteria, at the same time small flocks was formed.

Key words: SHARON; C/N ratio; nitrite accumulation; ammonia-rich organic wastewater

SHARON(single reactor for high activity ammonia removal over nitrite)过程通过控制温度和水力停留时间积累亚硝酸盐, 与 ANAMMOX(anaerobic ammonium oxidation)组成高效的 SHARON-ANAMMOX 联合脱氮工艺, 比传统的硝化-反硝化工艺节约 25% 氧气及 40% 碳源^[1]。此前, SHARON-ANAMMOX 工艺的研究和应用主要是针对污泥消化液等高氨氮低碳废水^[1~3], 而对于垃圾渗滤液、焦化废水等高氨氮有机废水则鲜见报道。

Ahn 等^[4]在 ANAMMOX 处理养猪废水的研究中提出, 厌氧氨氧化与部分反硝化协同能同时脱氮除碳, 而且部分反硝化还可以促进厌氧氨氧化过程。Fux 等^[2]则在 SHARON 反应器中检测到 COD 的去除, 且有机碳源对亚硝酸盐氧化菌的抑制作用强于对好氧氨氧化菌的抑制作用^[5]。因此, 可以通过调控使 SHARON 过程同时满足 2 个条件来实现 SHARON-ANAMMOX 联合工艺对高氨氮有机废水的处理, 一是使 SHARON 过程实现亚硝酸盐积累的同时除碳; 二是使 SHARON 反应器出水的 NO_2^- -N:

NH_4^+ -N 满足 ANAMMOX 脱氮除碳的要求。

近年来, 在无机碳源下温度、DO 等条件对亚硝酸盐积累影响的研究方面, 蒋佳超等^[6]认为亚硝酸盐积累的最佳温度为 30~36℃。鉴于好氧氨氧化菌和亚硝酸盐氧化菌的氧饱和系数不同, DO 在 0.5~1.7 mg/L 范围有利于亚硝酸盐积累^[7]。Ganigué 等^[8]在研究 SBR 反应器对垃圾渗滤液的亚硝化过程中得出 pH 值 7.0~8.0 有利于亚硝酸盐的积累。这些研究结果对研究高氨氮有机碳源下 SHARON 过程亚硝酸积累有借鉴作用。

为此, 本试验设置温度 35℃、DO 1.5~2 mg/L、HRT 1 d、进水 pH 值 8 为操作条件, 以葡萄糖为碳源模拟高氨氮有机废水, 以 CSTR(continuous stirred tank reactor)反应器为 SHARON 反应器, 着重研究了 C/N

收稿日期: 2007-10-09; 修订日期: 2007-12-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678071); 广东省自然科学基金项目(06105409)

作者简介: 阎佳(1983~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: jenniferjia@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ppyyhu@scut.edu.cn

对亚硝酸盐氮积累及出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}:\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的影响,通过对 SHARON 过程中 COD、氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮、pH 等指标的变化分析,主要微生物种计数和污泥性状观察,探索 SHARON 反应器处理高氨氮有机废水的规律,以期为实现 SHARON-ANAMMOX 联合工艺处理高氨氮有机废水提供基础依据.

1 材料与方法

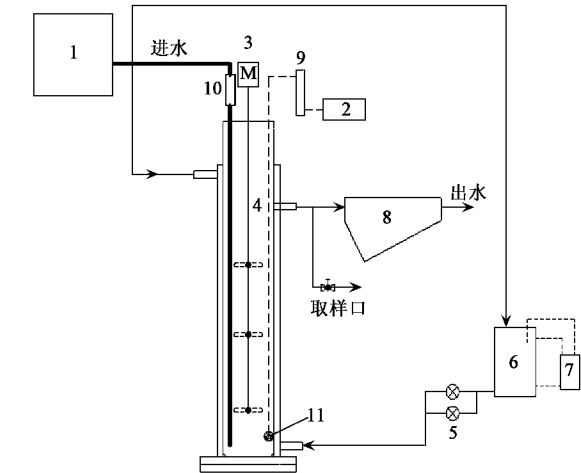
1.1 试验装置

CSTR 是处理高氨氮废水实现亚硝酸盐积累的理想反应器^[1].故此,本试验采用 CSTR 反应器来实现 SHARON 过程,圆柱形反应器及水浴夹层由有机玻璃制成,内径 80 mm,高 400 mm,有效容积 2L,反应器夹层中通有循环热水恒温,循环热水温度由温度控制系统维持在 $(35 \pm 1)^\circ\text{C}$.SHARON 反应器装置与试验流程如图 1 所示.进水贮存于高位水箱,通过流量计进入反应器.采用微孔曝气方式,用气体流量计调节曝气量.

1.2 接种污泥及废水水质

接种污泥取自某污水处理厂氧化沟好氧段,接种量 0.5 L,污泥浓度(以 VSS 计)为 14.17 g/L,VSS/SS为 52.8%.

采用人工模拟高氨氮有机废水,其组成如文献[9],其中 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NaHCO_3 浓度分别为 1.68 ~ 2.33 和 3.25 g/L;以葡萄糖为有机碳源,其投加量根



1. 高位进水箱; 2. 曝气机; 3. 搅拌器; 4.CSTR 反应器;
5. 管道泵; 6. 加热水箱; 7. 温度控制系统; 8. 沉淀池;
9. 气体流量计; 10. 液体流量计; 11. 微孔曝气头

图 1 试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental equipment

据反应进程的要求而变.用 $0.1 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的盐酸和氢氧化钠溶液调节模拟废水的 pH 值在 8.0 ± 0.1 的范围内.

1.3 SHARON 反应器运行条件

根据试验需要在反应器运行的不同阶段控制不同的运行条件,见表 1. 第 I 阶段第 II 阶段分别为无有机碳源下反应器启动期和 SHARON 稳定运行期.

表 1 SHARON 反应器运行条件

Table 1 Operational conditions of SHARON reactor

指标	I	I	II	III	IV	V	VI
时间/d	1 ~ 12	13 ~ 25	26 ~ 73	74 ~ 99	100 ~ 105	106 ~ 115	116 ~ 121
HRT/d	1.5	1.5	1	1	1	1	1
DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1.5 ± 0.1	1.5 ± 0.1	2 ± 0.1	2 ± 0.1	2 ± 0.1	2 ± 0.1	2 ± 0.1
$\text{NH}_4^+ \text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	500	360	360	360	360	360	360
COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0	0	50	100	125	175
C/N ¹⁾	0	0	0	0.17	0.34	0.42	0.50

1) C/N 以实测平均值计

1.4 分析方法

氨氮采用纳氏试剂分光光度法用 UV-2000 型紫外可见分光光度计测定.亚硝酸盐态氮采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定.硝酸盐态氮采用紫外分光光度法测定.COD 采用重铬酸钾快速消解法测定.pH 值采用 pH/ORP 测定仪测定.DO 采用 YSI 溶氧仪测定.VSS、SS 采用重量法测定.好氧氨氧化菌、亚硝酸盐氧化菌计数采用 MPN 法.好氧异养菌计数采用平板计数法.

2 结果与分析

2.1 SHARON 反应器的启动

如图 2 所示,在无机碳源下,反应器运行到第 10 d 时 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度达到最大值 105 mg/L,之后迅速降低,18 d 后一直低于 10 mg/L.从第 13 d 开始有 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的积累,之后其浓度逐步升高,而 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度则从第 13 d 开始迅速降低,第 II 阶段 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 及 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度都趋于稳定.第 I 阶段完成时,出水

$\text{NO}_2^- \text{-N}:\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 为 1,第Ⅱ阶段 $\text{NO}_2^- \text{-N}:\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 有所提高,平均值为 1.20.至此,实现了无机碳源下的稳定 SHARON 过程.

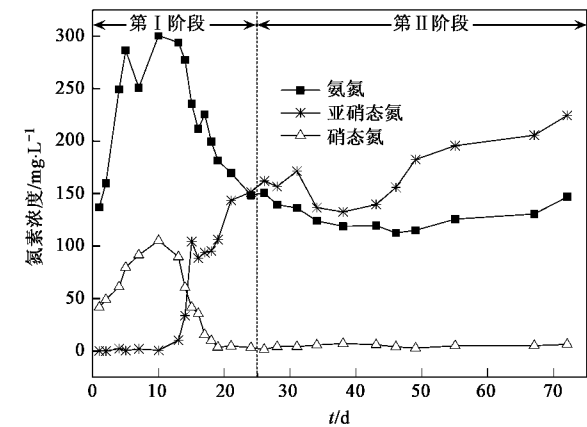


图 2 I、Ⅱ阶段出水三氮浓度

Fig.2 Soluble nitrogen compounds in the effluent corresponding to I and II operational steps

2.2 SHARON 反应器在不同 C/N 条件下的运行情况

从第Ⅲ阶段开始在进水中加入有机碳源,并逐步提高 COD 浓度.图 3、图 4 分别反映了当 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度在 360 mg/L, C/N(以进水 $\text{COD}/\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 计)分别为 0、0.17、0.34、0.42、0.50 时,反应器出水亚硝酸盐积累率($\text{NO}_2^- \text{-N}$ 占 TN 的比率)、 $\text{NO}_2^- \text{-N}:\text{NH}_4^+ \text{-N}$ (以亚硝氮占总氮比例:氨氮占总氮比例表示),以及 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的生成速率. C/N 为 0.17 时 $\text{NO}_2^- \text{-N}:\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 达最大值 1.52,亚硝酸盐积累率达 59%, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的生成速率达最高 0.168 9 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$,之后随着 C/N 的升高 $\text{NO}_2^- \text{-N}:\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 逐渐降低. $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 生成速率虽有所降低,但直到 C/N 达 0.42 时都比无有机碳源时有明显增加.而在 C/N 升至 0.5 时 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 生成速率已明显低于无有机碳源时的情况,此时 $\text{NO}_2^- \text{-N}:\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 降低至 0.36.

2.3 SHARON 过程的 pH 值变化情况

反应器运行不同阶段的出水 pH 值如图 5 所示.在反应器启动的第Ⅰ阶段, pH 值较低,平均值仅有 6.70.进入第Ⅱ阶段后 pH 值明显升高且趋于稳定,平均值为 7.76.加入有机碳源后,当 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 360 mg/L, C/N 在 0.17~0.42 时, pH 值均有所降低,与第Ⅱ阶段相比降低了 0.2~0.4,但随着 C/N 的升高,出水 pH 值又略有回升,至 C/N 达 0.5 时,出水 pH 值已明显升高,平均值达到 7.81,高于未加入有

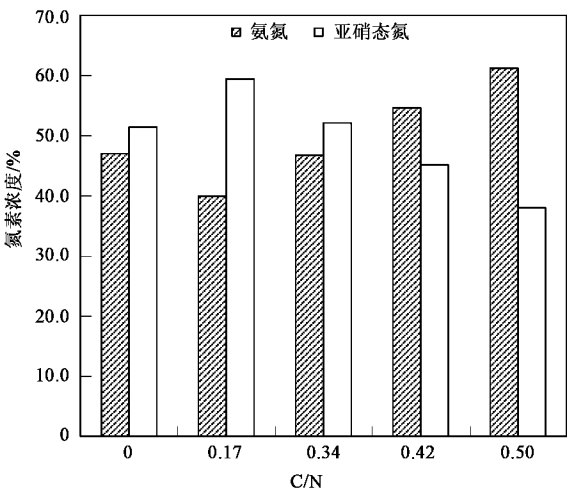


图 3 不同 C/N 下 SHARON 反应器出水亚硝态氮与氨态氮占总氮比例

Fig.3 Proportion of nitrite and ammonia in the effluent of SHARON reactor at different C/N

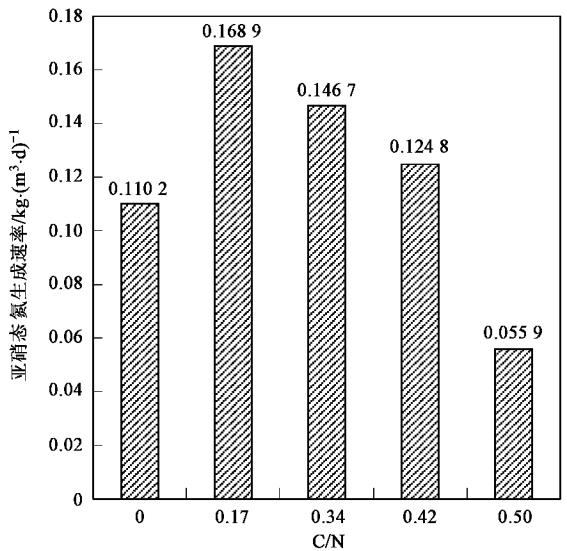


图 4 不同 C/N 下 SHARON 反应器中亚硝态氮生成速率

Fig.4 Nitrite production rate of SHARON reactor at different C/N

机碳源的出水平均 pH 值.

2.4 SHARON 反应器 COD 的去除情况

图 6 反映了进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 360 mg/L, C/N 从 0.17 逐步增加到 0.50 反应器中 COD 的去除率及进、出水 COD 浓度的变化情况. C/N 为 0.17 时 COD 去除率最高达到 90%,当 C/N 从 0.17 增加到 0.34 时 COD 去除率显著降低,而当 C/N 在 0.34~0.42 范围内, COD 去除率保持稳定在平均 44%,但当 C/N 增加到 0.50 时, COD 去除率又迅速提高至平均 82%.

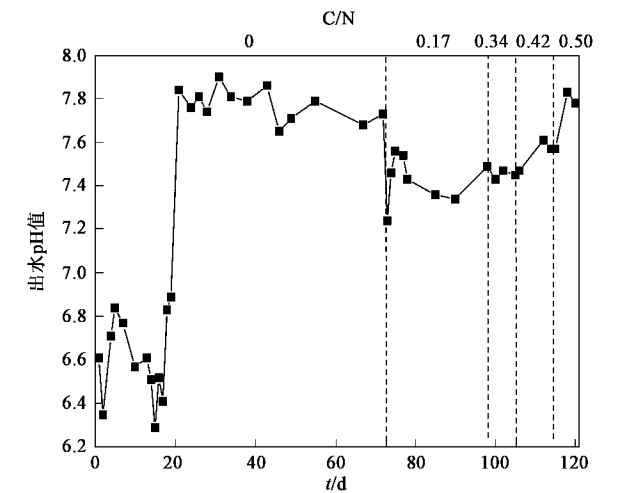


图 5 SHARON 反应器出水 pH 值随时间的变化

Fig.5 Change of pH value in the effluent of SHARON reactor

2.5 SHARON 反应器运行过程中的污泥性状

污泥接种后, 分别测定第 II 阶段稳定期(第 30 d)以及加入有机碳源后 30 d 稳定运行的污泥浓

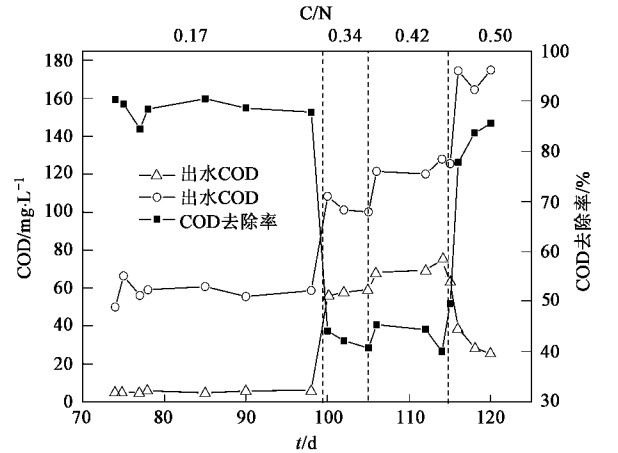


图 6 SHARON 反应器进出水 COD 浓度及 COD 去除率

Fig.6 Concentration and removal rate of COD in the influent and effluent of SHARON reactor

表 2 SHARON 反应器中污泥性状及主要菌体数量							
Table 2 Properties of sludge and quantities of main bacteria in SHARON reactor							
时间/d	VSS/g·L ⁻¹	VSS/SS/%	颜色	状态	AOB/个	NOB/个	好氧异养菌/个
0	14.17	52.8	黑色	絮状	$> 1.0 \times 10^{14}$	$> 1.0 \times 10^{14}$	— ¹⁾
30	6.31	41.5	灰色	细沙状	2.5×10^{14}	6.5×10^7	—
100	10.00	49.8	黄灰色	絮状	4.5×10^{14}	2.5×10^5	2.15×10^7

1) 未检测

在无机碳源下的 SHARON 过程, 启动后污泥浓度迅速降低, 同时絮状污泥解体呈现松散的细沙状, 反应器运行 30 d 后, 污泥中好氧氨氧化菌的数量已明显高于亚硝酸盐氧化菌的数量. 加入有机碳源后污泥浓度开始增加, 同时污泥开始呈较小的絮状. 有机碳源下, 加入有机碳源 30 d 后, 污泥中好氧氨氧化菌的数量略有增加, 但亚硝酸盐氧化菌数量则明显降低. 此时, 还测得污泥中存在一定数量的好氧异养菌.

3 讨论

3.1 C/N 对亚硝酸盐积累的影响

理论上, 有机碳源的加入对好氧氨氧化菌的活性将带来 2 种截然相反的影响, 一方面是有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

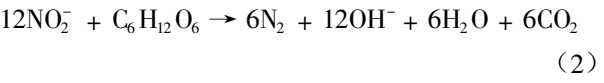
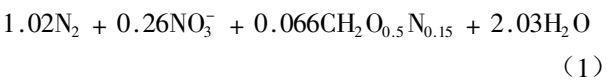
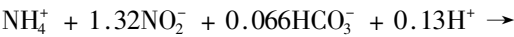
度及污泥中好氧氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO₂⁻)以及好氧异养菌(加入有机碳源以后)的数量, 结果如表 2 所示.

氧化菌是自养菌, 这样就存在异养菌与自养菌争夺氧的问题, 当异养菌数量较多时, 自养菌对氧的亲合力就会大大下降^[10]. Mosquera-Corral 等^[9]在 35℃、HRT 为 1.1 d 的条件下得出当 C/N(TOC/NH₄⁺-N)从 0 增加到 0.2 时, NO₂⁻-N 的积累率从 43% 提高到 60%, 而当 C/N 达到 0.3 时, NO₂⁻-N 的积累率却已降至不到 20%.

本试验当 C/N 从 0 增加到 0.17 时, NO₂⁻-N 的积累率从 51% 提高 59%, COD 去除率高达 90%, 亚硝氮的生成速率也显著提高, 这充分体现了有机碳源对亚硝酸盐积累的促进作用. 细菌计数结果也表明, 有机碳源的存在导致亚硝酸盐氧化菌数量降低, 同时有一定数量的好氧异养菌存在. 随着 C/N 分别提高到 0.34、0.42 时, 虽然亚硝氮的生成速率仍高于无有机碳源的情况, 但都已明显的降低, 有机碳源对亚硝酸盐积累的抑制作用逐渐增强, 至 C/N 达 0.5 时, 有机碳源对 NO₂⁻-N 积累的抑制已非常明显, 与之相对应的是 COD 去除率的明显提高, 这也说明此时异养菌在与自养菌争夺氧过程中已明显处于优

势.可见,在本试验的条件下,当 C/N 不超过 0.42 时,有机碳源的存在有利于亚硝酸盐的积累.

如前所述,满足 SHARON 过程亚硝酸盐积累的同时必须考虑能否满足 ANAMMOX 进水的 NO_2^- -N: NH_4^+ -N 要求. ANAMMOX 的主反应见式(1)^[11],亚硝酸盐型反硝化反应见式(2)^[16],理论计算得出 ANAMMOX 反应去除 100 mg NH_4^+ -N 需要消耗 132 mg NO_2^- -N,反硝化反应去除 100 mg COD 需要消耗 142 mg NO_2^- -N. 理论计算的 ANAMMOX 反应所需 NO_2^- -N 浓度,包括 ANAMMOX 去除 SHARON 反应器出水中的 NH_4^+ -N 所需的 NO_2^- -N,以及部分反硝化去除 SHARON 出水的 COD 所需的 NO_2^- -N,以及实测值列于表 3.



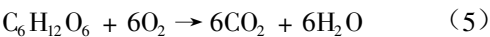
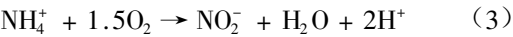
当 C/N 为 0.17 时, NO_2^- -N: NH_4^+ -N 实测值比理论值高,即 ANAMMOX 反应后出水中将有过剩的 NO_2^- -N,此时可以通过在 ANAMMOX 反应器中补充高氨氮废水的方法去除过剩的 NO_2^- -N.当 C/N 高于 0.34 时, NO_2^- -N: NH_4^+ -N 实测值已低于理论值,即 SHARON 反应器出水所提供的 NO_2^- -N 不能满足 ANAMMOX 过程去除水中的 NH_4^+ -N 和 COD,且随着 C/N 的升高 NO_2^- -N: NH_4^+ -N 实测值与理论值的差值越大.可见, C/N 在 0.17 ~ 0.34 之间,满足后续 ANAMMOX 过程的要求.

表 3 ANAMMOX 所需理论 NO_2^- -N: NH_4^+ -N 值和实测值

Table 3 Academic and practical ratio of nitrite and ammonium for ANAMMOX reactor

C/N	出水 COD 浓度 /mg·L ⁻¹	去除 COD 所需 NO_2^- -N 浓度/mg·L ⁻¹	出水 NH_4^+ -N 浓度 /mg·L ⁻¹	去除 NH_4^+ -N 所需 NO_2^- -N 浓度/mg·L ⁻¹	理论需要 NO_2^- -N: NH_4^+ -N	实际所得 NO_2^- -N: NH_4^+ -N
0.17	5.35	7.60	155.16	204.81	1.37	1.52
0.34	57.64	81.85	164.45	217.07	1.82	1.41
0.42	68.93	97.88	172.55	227.77	1.89	1.08
0.50	30.91	43.89	277.13	365.77	1.48	0.36

3.2 有机碳源环境下 SHARON 过程 pH 值的变化
短程硝化过程的主要反应见式(3)^[12],理论上,每消耗 100 mg NH_4^+ -N 将产生0.014 3 mol/L的 H^+ .产生的 NO_2^- 有一小部分被氧化为 NO_3^- [见式(4)]^[13],该反应没有 H^+ 生成.当加入有机碳源后,SHARON 反应器中还将发生好氧异养菌的呼吸反应,当采用葡萄糖为有机碳源时[见式(5)]^[17],该反应也没有 H^+ 生成.因此当以葡萄糖作为有机碳源时,短程硝化是 pH 值降低的直接原因.



试验中,加入有机碳源后 pH 值明显降低,随着 C/N 的提高 pH 值又略有回升,表明有机碳源促进了短程硝化反应,但随着 C/N 的提高有机碳源对短程硝化反应的促进作用逐渐减弱.至 C/N 达到 0.5 时,有机碳源已转化为对短程硝化反应的抑制因素,此时 pH 值高于无有机碳源时的值.

在无机碳源环境下,ANAMMOX 反应的适宜 pH 范围是 6.7 ~ 8.3,最佳 pH 值为 8^[11],当有机碳源存

在时,ANAMMOX 反应的适宜 pH 范围是 6.02 ~ 9,最佳 pH 值为 8^[14].本试验中,在无机碳源下的第Ⅱ阶段,出水平均 pH 值为 7.76,当 C/N 为 0.17 ~ 0.5 时,出水 pH 值为 7.37 ~ 7.81. SHARON 反应器出水 pH 值均在 ANAMMOX 的适宜范围内.

3.3 SHARON 过程的污泥特性

接种后,由于好氧氨氧化菌生长缓慢,污泥流失量大于污泥产生量,反应器中污泥浓度和有机物含量都迅速降低,且污泥原有的絮状结构解体为细沙状.加入有机碳源后,由于异养菌的生长导致污泥浓度以及污泥中有机物含量升高,并重新形成紧密的絮状结构. Villaseñor 等^[15]曾报道当在无机废水中加入醋酸盐后原本蓬松的污泥由于异养菌的生长形成了绒毛状的絮状结构, Mosquera-Corral 等^[9]也报道了无机废水中加入醋酸盐后形成了较大的黄灰色不规则絮状结构,同时反应器内污泥浓度快速增加.这些报道的现象与本试验现象相一致.

Sinha 等^[16]采用 FISH 技术,在运行 95 d 后运行良好的 SHARON 反应器中检测到污泥中好氧氨氧化菌约占 48% ~ 53%,亚硝酸盐氧化菌只占 6% ~ 8%.本试验采用传统微生物学方法进行检测,接种

时污泥中好氧氨氧化菌与亚硝酸盐氧化菌数量相当,在运行 30 d 后,好氧氨氧化菌的数量已远远超过亚硝酸盐氧化菌的数量,好氧氨氧化菌的数量增加了约 1.8 倍,而亚硝酸盐氧化菌的数量减少了近 260 倍,微生物种群的演变与加入有机碳源有利于亚硝酸盐积累的结果是相一致的。

4 结论

(1)在 35℃、DO 2 mg/L、HRT = 1 d 的操作条件下,当 NH_4^+ -N 浓度为 360 mg/L, C/N 不超过 0.42 时,有机碳源的存在有利于亚硝酸盐的积累,出水 NO_2^- -N: NH_4^+ -N 达到 1.52;实现 SHARON-ANAMMOX 联合工艺的最佳 C/N 介于 0.17~0.34 之间。

(2)在上述的操作条件和进水 NH_4^+ -N 浓度下,加入有机碳源后 pH 值明显降低,降幅约 0.2~0.4,随 C/N 的提高 pH 值又略有升高,至 C/N 达到 0.5 时,pH 值已高于无有机碳源时.当 C/N 不超过 0.5 时,SHARON 反应器出水 pH 值均处于 ANAMMOX 的适宜范围内。

(3)在上述的操作条件和进水 NH_4^+ -N 浓度下,在 C/N 为 0~0.5 范围内,随 C/N 的增加 COD 去除率从 90%大幅降低至约 44%后又大幅提高至约 82%。

(4)加入有机碳源后,污泥中好氧氨氧化菌数量增加,亚硝酸盐氧化菌的数量则大幅度降低,且由于异养菌的生长污泥浓度以及污泥中有机物含量升高,形成紧密的絮状结构。

参考文献:

- [1] Van Dongen U, Jetten M S M, Van Loosdrecht M C M. The SHARON-ANAMMOX process for treatment of ammonium rich wastewater[J]. Water Sci Technol, 2001, **44**(1): 153-160.
- [2] Fux C, Bohler M, Huber H, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) in a pilot plant[J].

- Journal of Biotechnology, 2002, **99**(3): 295-306.
- [3] 郝晓地, van Loosdrecht M. 荷兰鹿特丹 DOKHAVEN 污水处理厂介绍[J]. 给水排水, 2003, **29**(10): 19-25.
- [4] Ahn Y H, Hwang I S, Min K S. ANAMMOX and partial denitrification in anaerobic nitrogen removal from piggery waste[J]. Wat Sci Tech, 2004, **49**(5-6): 145-153.
- [5] Okable S, Oozawa Y, Hirata K, *et al.* Relationship between population dynamics of nitrifiers in biofilms and reactor performance at various C:N ratios[J]. Water Res, 1996, **30**(7): 1563-1577.
- [6] 蒋家超, 万田英, 张雁秋. 亚硝化过程影响因素分析和讨论[J]. 工业安全与环保, 2006, **32**(3): 26-28.
- [7] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration[J]. Water Res, 2003, **37**: 1371-1377.
- [8] Ganigué R, López H, Balaguer M D, *et al.* Partial ammonium oxidation to nitrite of high ammonium content urban landfill leachates [J]. Water Res, 2007, **41**: 3317-3326.
- [9] Mosquera-Corral A, González F, Campos J L, *et al.* Partial nitrification in a SHARON reactor in the presence of salts and organic carbon compounds [J]. Process Biochemistry, 2005, **40**: 3109-3188.
- [10] Philips S, Laanbroek H J, Verstraete W. Origin, causes and effects of increased nitrite concentrations in aquatic environments [J]. Environmental Science & Bio/Technology, 2002, **1**: 115-141.
- [11] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. Appl Environ Microbiol, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [12] 吴永明, 李小明, 曾光明, 等. 亚硝化-厌氧氨氧化作用机理的研究[J]. 工业用水与废水, 2005, **30**(1): 5-8.
- [13] 高廷耀, 顾国维. 水污染控制工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003. 58-59.
- [14] 朱静平. 有机碳源环境下厌氧氨氧化生物脱氮工艺的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2006. 47-54.
- [15] Villaseñor J, van Loosdrecht M C M, Picioreanu C, *et al.* Influence of different substrates on the formation of biofilm in a biofilm airlift suspension reactor[J]. Water Sci Technol, 2000, **41**(4-5): 323-330.
- [16] Sinha B, Annachhatre A P. Assessment of partial nitrification reactor performance through microbial population shift using quinone profile FISH and SEM[J]. Bioresource Technology, 2007, **98**: 3602-3610.