ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第34卷 第4期
2013年4月15日

目 次

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析

袁怡[1,2],黄勇[2*],邓慧萍[1],盛学敏[2],潘杨[2],李祥[2]
(1. 同济大学环境科学与工程学院,上海 200092; 2. 苏州科技学院环境科学与工程学院,苏州 215011)

摘要:在 SBR 反应器中利用乙酸钠为底物,研究 C/N(COD/NO_3^--N)比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响. 在 SBR 连续运行过程中(HRT 为 6 h),C/N 比为 3 时,亚硝酸盐积累率可达 45%. 批式处理研究表明,C/N 比为 2.5 和 3.0 时 亚硝酸盐的积累率较高,分别为 47.50% ± 1.005% 和 45.28% ± 5.469%. C/N 比为 2.5 时获得的亚硝酸盐比积累速率为(30.17 ± 1.70) $mg\cdot(g\cdot h)^{-1}$,C/N 比为 3 时获得的亚硝酸盐比积累速率为(29.92 ± 1.90) $mg\cdot(g\cdot h)^{-1}$. C/N 比在 2.5 ~ 4 范围内时,C/N 比对硝酸盐的还原速率基本无影响,但对亚硝酸盐的积累速率影响显著,C/N 比为 2.5 和 3.0 时有利于亚硝酸盐的积累,C/N 比≥3.5 时,亚硝酸盐积累率下降显著.

关键词:半反硝化; 亚硝酸盐积累; SBR 反应器
中图分类号: X703.1 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2013)04-1416-05

Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process

YUAN Yi[1,2], HUANG Yong[2], DENG Hui-ping[1], SHENG Xue-min[2], PAN Yang[2], LI Xiang[2]
(1. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Effect of C/N (COD/NO_3^--N) ratio on nitrite accumulation during denitrification process was investigated in a sequencing batch reactor (SBR) with acetic sodium as the electron donor. The nitrite accumulation ratio was 45% at a C/N ratio of 3 during operation in SBR with HRT at 6 h. According to the results of batch experiments, Nitrite accumulation ratios were higher at C/N ratios of 2.5 and 3.0, and the values were 47.50% ± 1.005% and 45.28% ± 5.469%, respectively. The nitrite specific accumulation rate was (30.17 ± 1.70) $mg\cdot(g\cdot h)^{-1}$ at a C/N ratio of 2.5, and was (29.92 ± 1.90) $mg\cdot(g\cdot h)^{-1}$ at a C/N ratio of 3.0. C/N ratios of 2.5-4.0 did not affect the nitrate reduction rate but obviously affected the nitrite accumulation rate. C/N ratios of 2.5 and 3.0 were favorable for nitrite accumulation, and a C/N ratio≥3.5 would lead to decrease in nitrite accumulation (SBR).

Key words: partial denitrification; nitrite accumulation; sequencing batch reactor (SBR)

近几年兴起的厌氧氨氧化技术能在无需碳源的前提下,实现废水的生物脱氮. 其原理是在厌氧条件下,以亚硝态氮为电子受体,氨氮为电子供体,生成氮气. 第一座生产规模的 ANAMMOX 反应器也在荷兰鹿特丹的 Dokhaven 市政污水处理厂运行成功[1]. 目前该技术的最高氮负荷已达 76 $kg\cdot(m^3\cdot d)^{-1}$ [2],显示出很好的应用前景. 由于该技术以亚硝态氮为电子受体[3],工程师们多采用半亚硝化-ANAMMOX 联合工艺处理低 C/N 比的含氨废水,如城市垃圾填埋场的垃圾渗滤液[4,5]、污泥上清液[6,7]、味精废水[8]、焦化废水[9]、养猪场废水[10]. 但对于同时含有氨氮和硝态氮的低碳废水,如电镀废水,关键是需先将废水中的硝态氮转化为亚硝态氮,然后利用氨氮作电子供体,通过厌氧氨氧化途径脱氮.

通常不易发现反硝化过程中的亚硝态氮累积现象. 而反硝化过程是分步进行的: $NO_3^- \longrightarrow NO_2^- \longrightarrow NO \longrightarrow N_2O \longrightarrow N_2$,在某些条件下,可以观察到亚硝态氮得以累积的现象. 在已有的研究中表明,影响反硝化过程中NO_2^--N积累的因子有微生物种类[11]、pH 值[12,13]、碳源种类[14~18] 和 C/N 比[18,19]等. 因此可以把反硝化控制在半反硝化(亚硝酸盐积累)阶段,与厌氧氨氧化工艺联合处理同时含氨和硝酸盐的废水,能实现高效脱氮,且不需曝气,能源消耗少,是低碳的途径.

Sun 等[14]认为碳源对半反硝化有重要影响,乙酸钠为碳源时,反硝化过程中获得的亚硝酸盐积累浓度最大,乙醇和甲醇次之; 另外 C/N 比小于 3.75 时,生物脱氮的反硝化过程中有明显的亚硝态氮积累. 曹相生等[18]则以甲醇为碳源,在 C/N 为 0 ~ 4 的条件下研究亚硝酸盐的积累,发现 C/N≥4 时难以获得亚硝酸盐的积累; 当进水 C/N 为 2.4 ~ 3.2 之间时,能获得的亚硝态氮累积率大约为 25%; C/N < 2.4 时,亚

收稿日期: 2012-07-05; **修订日期**: 2012-10-16
基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51008202); 江苏省环境保护厅重大项目(201104)
作者简介: 袁怡(1977 ~),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为废水处理理论与技术,E-mail: yiyuansuzhou@163.com
* 通讯联系人, E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

硝酸盐的积累率降低. 因此 C/N 比是影响反硝化进程的另一个重要影响因素. 本研究以乙酸钠为碳源时,实现高效稳定的 NO_2^- 累积率的最佳 C/N 比,获得半反硝化工艺控制条件,以期为同时含氨氮和硝酸盐废水的工程治理提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 试验仪器及设备

半反硝化污泥的培养采用 3.2 L 的圆柱形厌氧 SBR 反应器(图 1). 反应器的运行模式为:充水比 1/2; 每天运行 8 个周期; 每个运行周期 $t=3$ h(也即 HRT = 6 h),其中进水 15 min,反应 45 min,沉淀 90 min,出水 15 min,排泥 15 min. 反应器置于 30℃ 的恒温水浴中,搅拌速度维持在 52 $r \cdot min^{-1}$.

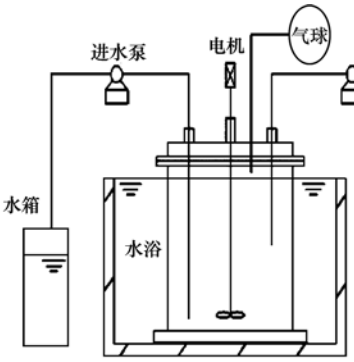


图 1 半反硝化试验装置

Fig. 1 Experimental setup for partial denitrification

1.2 批式试验

硝态氮起始浓度为 60 $mg \cdot L^{-1}$,pH 值为 5.5 左右,分别控制 C/N 比为 2.5∶1、3.0∶1、3.5∶1和 4.0∶1,研究不同 C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累速率的影响. 将淘洗浓缩后的污泥分装到 18 支 50 mL 比色管中,使污泥浓度(MLSS)为3 400 $mg \cdot L^{-1}$. 将原水用氮气吹脱 5 min,然后分别加入 18 支比色管中,并定容至 50 mL,迅速将其密封,横着放入 30℃的恒温水浴振荡器中进行培养并定时取样.

1.3 接种污泥及人工配水

SBR 反应器的接种污泥取自苏州新区第一污水厂,SBR 反应器的污泥浓度 MLSS 为3 200 $mg \cdot L^{-1}$. 人工配水的成分为($mg \cdot L^{-1}$):硝酸钾和乙酸钠按需投加; 氯化钙 220,硫酸镁 82,磷酸二氢钾 5,碳酸氢钠 300. 微量元素[3] 1.25 $mL \cdot L^{-1}$.

Abeling 等发现[20],当亚硝酸(HNO_2)的浓度达到 0.13 $mg \cdot L^{-1}$时,便会抑制反硝化. 因而低的 pH 值能使反硝化过程产生的亚硝酸盐以亚硝酸的形式存在而抑制反硝化过程,出现亚硝酸盐的积累. Thomsen 等[12]也发现 pH 在 5.5 时,反硝化过程中有较高的亚硝酸盐积累; 随着 pH 的升高,亚硝酸盐的积累浓度逐步降低; 当 pH = 8.5 时,硝态氮可直接转化为氮气,无亚硝酸盐的积累. 因而本试验的原水用1 $mol \cdot L^{-1}$的 HCl 调节 pH 为 5.5 ~6 之间,以期获得亚硝酸盐的积累.

在试验控制的 pH 值范围内,溶液中的氨氮将以NH_4^+-N的形式存在,不会对微生物产生抑制,并且其在有机缺氧环境下不会发生氧化反应. 因此在本试验中,未在原水中添加氨氮,未考察氨氮对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响.

1.4 试验采用的测量方法

各项指标测定方法均参照文献[21],其中 NH_4^+-N采用纳氏试剂分光光度法; NO_2^--N采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO_3^--N采用紫外分光光度法; COD 采用快速消解分光光度法; pH 采用玻璃电极法.

1.5 计算公式

尽管反硝化副产物有 NO、N_2O 等,但是 pH 会使硝酸盐和亚硝酸盐的还原过程中的产物发生变化,因此本文用简化的反硝化模式进行分析:

$$NO_3^- \longrightarrow NO_2^- \longrightarrow N_2$$

反硝化的两步反应的比转化速率可描述如下.

硝酸盐的比转化速率:

$$\frac{\gamma_{NO_3^-}}{X} = -\frac{\Delta\ NO_3^-\text{-N}}{X\Delta t} \tag{1}$$

亚硝酸盐的比转化速率(有硝酸盐时):

$$\frac{\gamma_{NO_2^-}}{X} = \frac{\Delta\ NO_2^-\text{-N}}{X\Delta t} \tag{2}$$

亚硝酸盐的比转化速率(无硝酸盐时):

$$\frac{\gamma_{NO_2^-}}{X} = -\frac{\Delta\ NO_2^-\text{-N}}{X\Delta t} \tag{3}$$

式中,$\gamma_{NO_3^-}$ 为硝酸盐(以 N 计)的转化速率[$mg \cdot (L \cdot h^{-1})$]; $\gamma_{NO_2^-}$ 为亚硝酸盐(以 N 计)的转化速率[$mg \cdot (L \cdot h^{-1})$]; X 为污泥浓度, 即 MLSS ($g \cdot L^{-1}$).

2 结果与讨论

2.1 反应器运行试验结果与讨论

反应器运行分为两个阶段. 0 ~7 d 是反应器启动阶段,提高污泥的反硝化活性. 第 8 ~70 d 为半反硝化的条件控制研究阶段,考察 C/N 比对半反硝化的

影响. 试验结果见图2. 在反应器的整个运行期间,氨氮的生成量都低于1 mg·L^{-1}(试验结果未列出).

0~7 d为反应器启动阶段,反应器进水含COD和NO_3^--N分别为105 mg·L^{-1}和30 mg·L^{-1},C/N比为3.5,进水pH值为7左右. 除前3 d出现不适应低碳源的现象外,反应器显示出较强的反硝化能力,没有出现NO_2^--N的积累,NO_3^--N全转化为N_2.

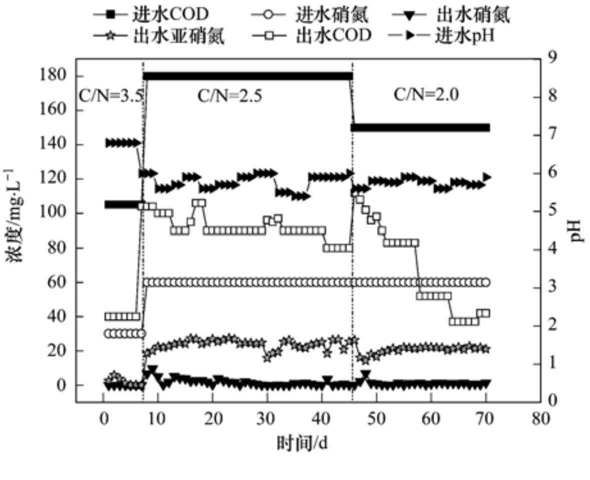


图2 反应器进出水水质变化

Fig. 2 Variation of substrates in SBR reactor

第8~45 d,把进水pH值降为5.5左右,同时进水NO_3^--N浓度提高至60 mg·L^{-1},COD浓度提高至180 mg·L^{-1},C/N比为3. 试验期间,硝酸盐在反硝化过程中几乎全被转化,而亚硝酸盐开始有明显的积累,最高达27.2 mg·L^{-1}(图2),积累率达45%(图3),优于曹相生等[18]的25%积累水平. 反应器的出水COD由最初的92 mg·L^{-1}左右,逐渐稳定为83 mg·L^{-1}左右.

第46~70 d,原水NO_3^--N浓度仍为60 mg·L^{-1},pH值为5.8左右,把COD浓度降至150 mg·L^{-1},C/N比为2.5,其它运行条件不变. 试验表明,COD浓度对反硝化过程中亚硝酸盐的积累有明显影响. 反硝化过程中硝酸盐几乎全被转化,而亚硝酸盐的积累率先有所下降,最低仅为24%. 随着反应器中污泥对碳源浓度的适应,亚硝酸盐的积累率有所上升,最高达37%,相应的NO_2^--N出水浓度为22.4 mg·L^{-1},出水COD为42 mg·L^{-1}. SBR反应器中相应的污泥浓度(MLSS)为3 400 mg·L^{-1}.

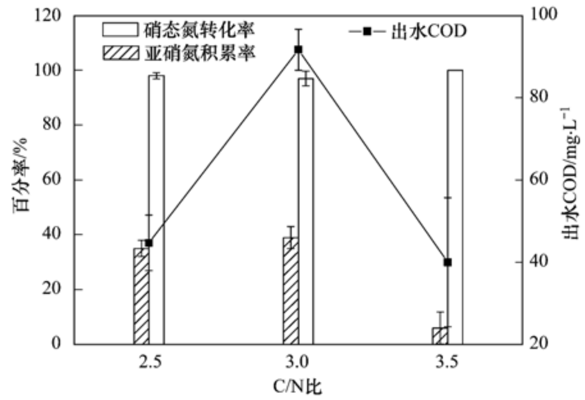


图3 SBR反应器中C/N比对反硝化过程的亚硝酸盐积累率的影响

Fig. 3 Effect of C/N ratios on nitrite accumulation during denitrifying process in SBR reactor

在整个反应期间,未对SBR反应器进行排泥,而反应器的运行也未出现出水带泥的情况,静置期的泥面未明显升高. 而Mateju等[22]的研究曾表明,若把微生物的分子式记为$C_5H_7NO_2$,用乙酸进行反硝化时的污泥产率系数为0.07,而用典型有机物进行反硝化时的污泥产率系数为0.11,用葡萄糖进行反硝化时的污泥产率系数为0.18; McAdan等[23]的研究则表明,利用乙醇进行反硝化时的污泥产率系数为0.14(见表1). 可见,用乙酸或乙酸钠进行反硝化时的污泥产量较低,可以降低剩余污泥的处置费用. 而ANAMMOX细菌的世代期长,若该反应与ANAMMOX工艺联用时,因反硝化细菌生长过快而将ANAMMOX菌淘汰的可能性降低.

表1 反硝化的计量反应方程式

Table 1 Stoichiometries of denitrification reactions

碳源种类	计量反应方程式	文献
乙酸	$0.82CH_3COOH + NO_3^- \longrightarrow 0.07C_5H_7NO_2 + HCO_3^- + 0.30CO_2 + 0.90H_2O + 0.47N_2$	[22]
典型有机物	$0.3C_5H_3NO + NO_3^- + H^+ \longrightarrow 0.11C_5H_7NO_2 + 0.95CO_2 + 1.17H_2O + 0.5N_2 + 0.19NH_4^+$	[22]
乙醇	$0.69C_2H_5OH + NO_3^- + H^+ \longrightarrow 0.14C_5H_7NO_2 + 0.67CO_2 + 2.07H_2O + 0.43N_2$	[23]
葡萄糖	$0.36C_6H_{12}O_6 + NO_3^- + 0.18NH_4^+ + 0.82H^+ \longrightarrow 0.18C_5H_7NO_2 + 1.25CO_2 + 2.28H_2O + 0.5N_2$	[22]

2.2 不同C/N比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响

在批式处理研究中发现,C/N比为2.5∶1、3.0∶1、3.5∶1和4.0∶1时,硝酸盐的转化基本都在45 min内完成; 而亚硝酸盐都在45 min时达到最高值,随后逐渐下降; pH值逐步升高; COD值逐渐下降(见图4).

反硝化过程的半反应方程式如式(4)和式(5)

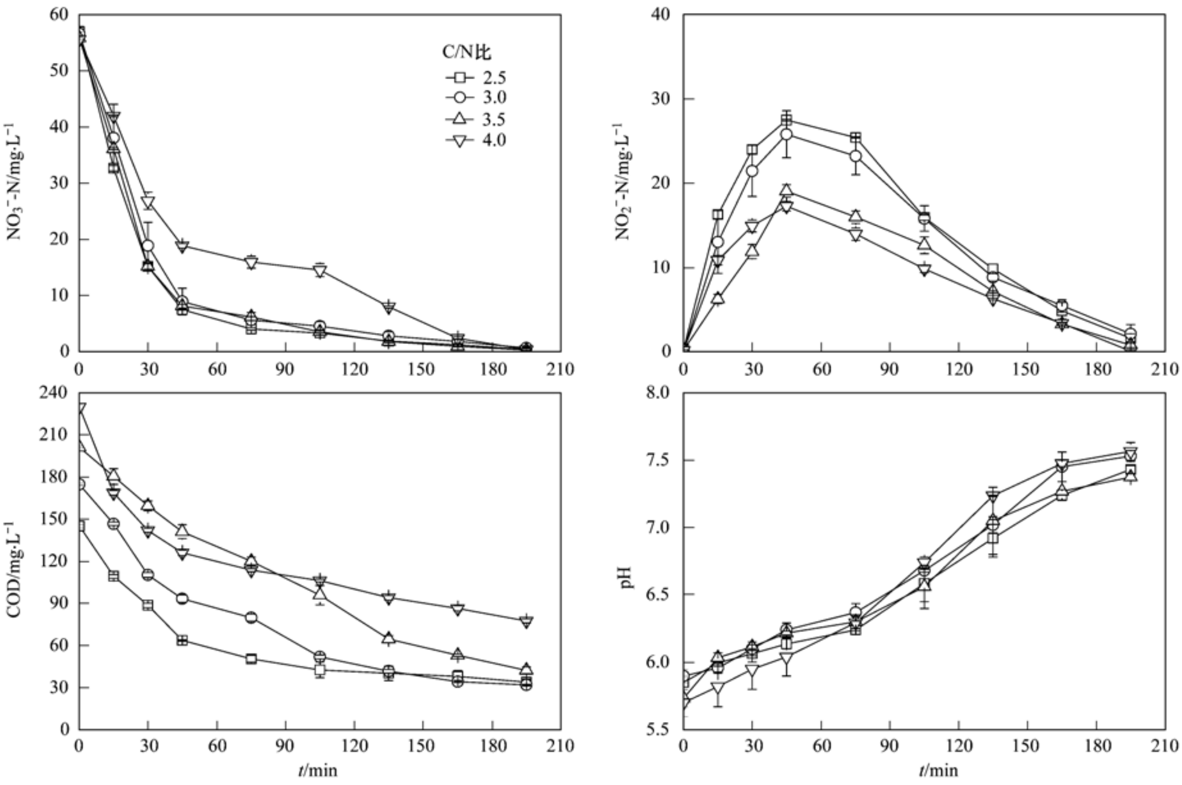


图 4　不同 C/N 时各底物的变化

Fig. 4　Variation of substrates during denitrification at different initial C/N ratios in batch experiment

所示[24]：

$$\frac{1}{2}NO_3^- + \frac{1}{2}H^+ + e^- \longrightarrow \frac{1}{2}NO_2^- + \frac{1}{2}OH^-,$$

$$\Delta G^{0'} = -41.45\ kJ \cdot mol^{-1} \tag{4}$$

$$\frac{1}{3}NO_2^- + \frac{2}{3}H^+ + e^- \longrightarrow \frac{1}{6}N_2 + \frac{2}{3}OH^-,$$

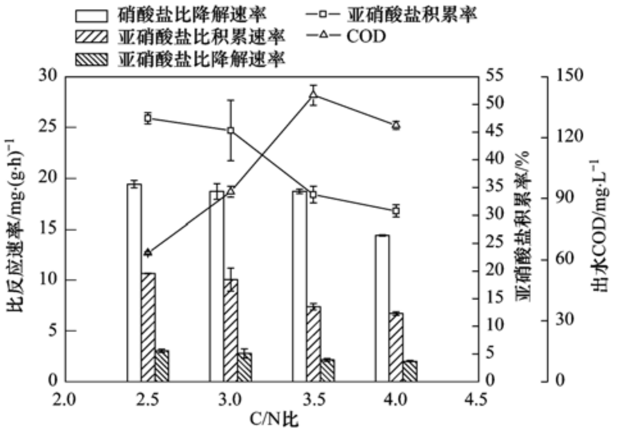
$$\Delta G^{0'} = -30.75\ kJ \cdot mol^{-1} \tag{5}$$

式中，$\Delta G^{0'}$ 为标准状态和 pH = 7 时，反应释放的自由能.

由式(4)和式(5)可以看出，获得单位摩尔的电子当量，硝酸盐还原比亚硝酸盐还原释放更多的自由能. 因此在相同条件下，硝酸盐的还原过程比亚硝酸盐的还原更易发生，适当的反应时间可导致亚硝酸盐的积累.

有类似研究表明，当 *Paracocus denitrificans* 和 *Pseudomonas fluorescens* 纯培养菌在进行硝酸盐和亚硝酸盐的还原时，若基质所提供的电子有限时，则存在对底物电子的竞争，硝酸盐比亚硝酸更容易作为电子受体[12,25].

C/N 为 2.5、3.0 和 3.5 时获得的硝酸盐比转化速率相近，C/N 比为 4.0 时的略低(见图 5)，说明 C/N 为 2.5 ~ 4.0 时，对硝酸盐的转化基本无影响. 而研究报道，只有当硝酸盐的浓度低于 0.3 mg·L^{-1} 时，反硝化速率才会受到抑制[26]. 本研究中，C/N 为 2.5 以上，碳源充足，因此微生物的生长仅与电子受体硝酸盐的浓度有关.



COD 为亚硝酸盐积累浓度最大时的剩余浓度

图 5　不同 C/N 比对反硝化速率的影响

Fig. 5　Effect of C/N ratios on denitrification rates in batch experiment

C/N 比为 2.5 和 3.0 时的亚硝酸盐比积累速率相近，分别为(30.17 ± 1.70) mg·(g·h)$^{-1}$ 和(29.92 ± 1.90) mg·(g·h)$^{-1}$，相应亚硝酸盐的积累率分别为 47.50% ± 1.005% 和 45.28% ± 5.469%. 而 C/N

比为 3.5 和 4.0 时的亚硝酸盐比转化速率和亚硝酸盐的比积累速率下降明显,亚硝酸盐的积累率也随之分别下降至 33.70% ± 1.496% 和 30.75% ± 1.107%. 说明 C/N 比对亚硝酸盐的积累有较大影响,C/N 比为 2.5 ~3.0 有利于亚硝酸盐的积累.

虽然 C/N 比 2.5 和 3.0 时的亚硝酸盐积累率相近,但是 C/N 比为 2.5 条件下,当亚硝酸盐积累浓度达到最高时的剩余 COD 浓度低于 60 $mg\cdot L^{-1}$,一方面可减少反硝化过程的外加碳源量而减少药剂费用的支出,另外也可减少对 COD 的后续处理费用,降低有机物对 ANAMMOX 过程的不利影响.

3 结论

(1)在 SBR 运行过程中,C/N 为 3 时,获得的亚硝酸盐积累率可达 45%.

(2)SBR 连续试验和批式试验都表明,MLSS 为 3.4 $g\cdot L^{-1}$时,反应 45 min 时可获得最大的亚硝酸盐积累率.

(3)C/N 为 2.5 ~4.0 时,对硝酸盐的转化速率基本无影响,但对亚硝酸盐的积累速率影响显著,C/N 为 2.5 和 3.0 时有利于亚硝酸盐的积累,C/N ≥3.5 时,亚硝酸盐积累率下降显著. C/N 为 2.5 和 3 时,亚硝酸盐积累率分别为 47.50% ±1.005% 和 45.28% ± 5.469%,亚硝酸盐比积累速率分别为 (30.17 ± 1.70) $mg\cdot(g\cdot h)^{-1}$ 和 (29.92 ± 1.90) $mg\cdot(g\cdot h)^{-1}$.

参考文献:

[1] Van der Star W R L, Abma W R, Blommers D, *et al*. Startup of reactors for anoxic ammonium oxidation: experiences from the first full-scale anammox reactor in Rotterdam [J]. Water Research, 2007, **41**(18): 4149-4163.

[2] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al*. Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. Water Research, 2011, **45**(1): 135-144.

[3] Van de Graaf A A, De Bruijn P, Robertson L A, *et al*. Metabolic pathway of anaerobic ammonium oxidation on the basis of ^{15}N studies in a fluidized bed reactor [J]. Microbiology, 1997, **143**(7): 2415-2421.

[4] Liang Z, Liu J X. Landfill leachate treatment with a novel process: anaerobic ammonium oxidation (Anammox) combined with soil infiltration system[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **151**(1): 202-212.

[5] 李伙生, 周少奇, 孙艳波. 2 种 UASB 的 ANAMMOX 与反硝化协同作用对比研究[J]. 环境工程学报, 2010, **4**(2): 247-252.

[6] Ahn Y H, Choi H C. Autotrophic nitrogen removal from sludge digester liquids in upflow sludge bed reactor with external aeration [J]. Process Biochemistry, 2006, **41**(9): 1945-1950.

[7] 马富国, 张树军, 曹相生, 等. 部分亚硝化-厌氧氨氧化耦合工艺处理污泥脱水液[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(2): 219-224.

[8] 陈旭良, 郑平, 金仁村, 等. 味精废水厌氧氨氧化生物脱氮的研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(5): 747-751.

[9] 吕艳丽, 单明军, 王旭, 等. 短程硝化-厌氧氨氧化处理焦化废水的研究[J]. 冶金能源, 2007, **16**(5): 55-58.

[10] 何鉴尧, 黄瑞敏, 郭嘉, 等. 亚硝化/厌氧氨氧化一体化反应器的启动特性分析[J]. 中国给水排水, 2009, **25**(17): 10-19.

[11] Lazarova V, Capdeville B, Nikolov L. Influence of seeding conditions on nitrite accumulation in a denitrifying fluidized bed reactor[J]. Water Research, 1994, **28**(5): 1189-1197.

[12] Thomsen J K, Geest T, Raymond P C. Mass spectrometric studies of the effect of pH on the accumulation of intermediates in denitrification by *Paracoccus denitrificans* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, **60**(2): 536-541.

[13] 王燕, 王淑莹, 孙洪伟, 等. pH 和 MLSS 对短程反硝化过程 NO_2^- 还原速率的影响[J]. 中国给水排水, 2010, **26**(13): 25-27.

[14] Sun H W, Yang Q, Peng Y Z, *et al*. Nitrite accumulation during the denitrification process in SBR for the treatment of pre-treated landfill leachate[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2009, **17**(6): 1027-1031.

[15] 孙洪伟, 王淑莹, 王希明, 等. 低温 SBR 反硝化过程亚硝态氮积累试验研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(12): 3620-3623.

[16] 孙洪伟, 彭永臻, 魏东洋, 等. 低温 SBR 反硝化过程亚硝态氮积累的动力学研究[J]. 中国给水排水, 2011, **27**(5): 99-104.

[17] 田建强, 李咏梅. 以喹啉或吲哚为单一碳源时反硝化过程中亚硝酸盐的积累[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(1): 68-74.

[18] 曹相生, 付昆明, 钱栋, 等. 甲醇为碳源时 C/N 对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响[J]. 化工学报, 2010, **61**(11): 2938-2943.

[19] 葛士建, 王淑莹, 杨岸明, 等. 反硝化过程中亚硝酸盐积累特性分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, **33**(1): 140-146.

[20] Abeling U, Seyfried C F. Anaerobic-aerobic treatment of high-strength ammonium wastewater-nitrogen removal via nitrite[J]. Water Science and Technology, 1992, **26**(5-6): 1007-1015.

[21] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 258-282.

[22] Matxěju V, Čižinská S, Krejěí J, *et al*. Biological water denitrification-a review [J]. Enzyme Microbial Technology, 1992, **14**(3): 170-183.

[23] McAdan E J, Judd S J. A review of membrane bioreactor potential for nitrate removal from drinking water [J]. Desalination, 2006, **196**(1-3): 135-148.

[24] Rittmann B E, McCarty P L. Environmental biotechnology: principles and applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 59-135.

[25] Almeida J S, Reis M A N, Carrondo M J T. Competition between nitrate and nitrite reduction in denitrification by *Pseudomonas flourescens* [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1995, **46**(5): 476-484.

[26] Moore S F, Schroeder E D. The effect of nitrate feed rate on denitrification[J]. Water Research, 1971, **5**(7): 445-452.

HUANJING KEXUE Vol. 34 No. 4
Environmental Science (monthly) Apr. 15, 2013

CONTENTS

《环境科学》第 6 届编辑委员会

环境科学

（HUANJING KEXUE）

（月刊　1976 年 8 月创刊）

2013 年 4 月 15 日　34 卷　第 4 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 34　No. 4　Apr. 15, 2013

主　管　中国科学院

主　办　中国科学院生态环境研究中心

协　办　（以参加先后为序）
北京市环境保护科学研究院
清华大学环境学院

主　编　欧阳自远

编　辑　《环境科学》编辑委员会
北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085）
电话：010-62941102，010-62849343
传真：010-62849343
E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn
http：//www. hjkx. ac. cn

出　版　科学出版社
北京东黄城根北街 16 号
邮政编码：100717

印刷装订　北京北林印刷厂

发　行　科学出版社
电话：010-64017032
E-mail：journal@ mail. sciencep. com

订购处　全国各地邮电局

国外总发行　中国国际图书贸易总公司
（北京 399 信箱）

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences

Co-Sponsored by Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection
School of Environment, Tsinghua University

Editor-in -Chief OUYANG Zi-yuan

Edited by The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE)
P. O. Box 2871, Beijing 100085, China
Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343
E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn
http://www. hjkx. ac. cn

Published by Science Press
16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing　100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House

Distributed by Science Press
Tel: 010-64017032
E-mail: journal@ mail. sciencep. com

Domestic All Local Post Offices in China

Foreign China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号： ISSN　0250-3301 / CN　11-1895/X

国内邮发代号： 2-821

国　内　定　价： 90. 00 元

国外发行代号： M 205

国内外公开发行