

常温限氧条件下 SBR 反应器中的部分亚硝化研究

田智勇, 李冬, 曹相生, 张树德, 杨宏, 张杰

(北京工业大学水质科学与水环境恢复工程(北京市)重点实验室, 北京 100022)

摘要: 常温下(14.1~24.2℃)以二级出水($\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 30~100 mg/L)为原水, 在限氧条件下(DO 为 0.3~0.4 mg/L)的 SBR 反应器中研究了适合 ANAMMOX 工艺进水的部分亚硝化工艺. ANAMMOX 反应器进水要求 $\text{NH}_4^+ / \text{NO}_2^- = 1/1.31$, 即仅有一部分氨氮形成亚硝酸盐. 研究中通过控制进水碱度, 以在线 DO 趋势线为指示, 实现部分亚硝化, 最终获得 $\text{NH}_4^+ -\text{N}/\text{NO}_2^- -\text{N}$ 合适比例的出水. 当约 57% 的氨氮转化为亚硝酸盐时, 同等比例的 $\text{HCO}_3^- / \text{NH}_4^+$ 消耗会导致 pH 值的自然下降. 当 pH 值下降到一定程度时, 氨氧化细菌代谢速率的减小导致了耗氧速率(OUR)的急剧下降, DO 趋势线就会出现突跃的特征点(本研究以 DO 突跃至 1.0 mg/L 为判别), 指示出部分亚硝化反应的终点. 试验对 30~100 mg/L 范围内 4 种氨氮浓度条件下部分亚硝化的最佳碱度进行了研究. 结果表明, 本试验中进水碱度与氨氮浓度的比率是影响部分亚硝化工艺出水亚硝化比率($\text{NO}_2^- / \text{NH}_4^+$)的重要因素, 通过对进水碱度的控制完全可以实现向 ANAMMOX 反应器提供进水的部分亚硝化工艺.

关键词: 污水深度处理; 限氧条件; 部分亚硝化; 厌氧氨氧化; 碱度

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)04-0931-06

Partial Nitrification in SBR Under Normal Temperature and Limited Oxygen Condition

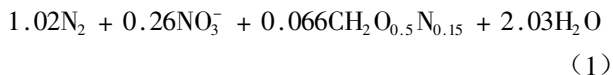
TIAN Zhi-yong, LI Dong, CAO Xiang-sheng, ZHANG Shu-de, YANG Hong, ZHANG Jie

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Partial nitrification was researched in a SBR reactor under the limited oxygen condition (DO 0.3-0.4 mg/L) and the normal temperature of 14.1-24.2℃ to produce the correct influent for ANAMMOX process from secondary wastewater ($\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 30-100 mg/L). The influent for the ANAMMOX process must be composed of NH_4^+ and NO_2^- in a ratio of 1/1.31 and therefore only a partial nitrification of ammonium into nitrite was required. The control of alkalinity and the indication of monitoring profile of DO allowed to achieve this partial nitrification with a final effluent only composed of $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ and $\text{NO}_2^- -\text{N}$ at the right stoichiometric ratio. The equal consumption of $\text{HCO}_3^- / \text{NH}_4^+$ in secondary wastewater resulted in a natural pH decrease when approximately 57% of $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ was oxidized. When the pH dropped to a certain level, the lowering of the metabolic rate of the ammonium oxidizer would lead to rapid decline of the oxygen uptake rate (OUR) in reactor, and the jump characteristic point (it was distinguished by the jump over 1.0 mg/L of DO value) in the DO profile would emerge, which signalled the end-point of the partial nitrifying. The optimum alkalinity of partial nitrification was studied under 4 concentrations in the range of $\text{NH}_4^+ -\text{N}$ 30-100 mg/L of secondary wastewater. The result indicated that the bicarbonate/ammonium ratio was the key factor influencing the nitrification ratio ($\text{NO}_2^- / \text{NH}_4^+$), and it was absolutely possible to successfully achieve partial nitrification that provided right substrate for ANAMMOX reactor through the control of the alkalinity.

Key words: advanced treatment; limited oxygen condition; partial nitrification; ANAMMOX; alkalinity

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)过程是十几年前才发现的新型节能高效的微生物学反应^[1]. 它是由浮霉目较深分支中的一类完全自养型的细菌, 在缺氧条件下, 以亚硝酸盐为电子受体、 CO_2 为主要碳源、羟胺和联氨为中间产物, 将氨直接氧化为氮气和少量硝酸盐的微生物学过程^[2]. 因此, 该过程不仅需要亚硝酸盐来源, 而且根据目前较为公认的 ANAMMOX 过程分解代谢与合成代谢的综合化学计量方程式^[3][如式(1)所示], $\text{NH}_4^+ -\text{N}/\text{NO}_2^- -\text{N}$ 应为 1/1.31.



如上所述, ANAMMOX 工艺与传统的硝化/反硝化工艺相比, 具有流程简洁、无需有机碳源、节能高效等多方面的优点.

但是, 要想很好地发展这一工艺, 必须要有合适 $\text{NH}_4^+ -\text{N}/\text{NO}_2^- -\text{N}$ 进水. 这就意味着进水中只能含有氨氮和亚硝酸盐, 而不含硝酸盐. 显然, 部分亚硝化工

收稿日期: 2007-04-04; 修订日期: 2007-06-21

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2003AA601010)

作者简介: 田智勇(1978~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水处理与 water 环境恢复, E-mail: tzy@emails.bjut.edu.cn

艺成为 ANAMMOX 工艺最理想的前处理工艺. 它不但将硝化过程稳定地控制在亚硝化阶段, 而且控制出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}/\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的比例满足 ANAMMOX 反应的要求.

据文献报道, 在 pH 7.9~8.2、温度 30~35℃、低 DO 浓度下 ($< 1 \text{ mg/L}$) 氨氧化细菌的生长速率明显高于亚硝酸盐氧化细菌^[4-6], 且氨氧化细菌的氧饱和系数 ($K_s = 0.3 \text{ mg/L}$) 较亚硝酸盐氧化细菌的氧饱和系数 ($K_s = 1.1 \text{ mg/L}$) 要低^[7], 即氨氧化细菌对氧基质的亲和力比亚硝酸盐氧化细菌高. 因此, 在有利的 DO 浓度、pH 和温度下, 氨氧化细菌可以将亚硝酸盐氧化细菌竞争淘汰掉, 这就为部分亚硝化的实现提供了有利的条件.

目前, 在恒化培养反应器中, 利用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度 800~1 000 mg/L 的厌氧污泥消化上清液, 温度 37℃ 左右、SRT $< 2 \text{ d}$ 的条件下, 已经成功实现了部分亚硝化工艺 (SHARON 工艺), 并应用于实践^[5,8-10]. 但是, 常温下利用城市污水二级处理出水成功实现部分亚硝化工艺还鲜见报道. 所以, 本试验在常温下 (14.1~24.2℃), 利用 A/O (厌氧/好氧) 除磷工艺的二级处理出水, 限氧条件下 (DO 为 0.3~0.4 mg/L) 在 SBR 反应器中对低氨氮浓度 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 30~100 mg/L) 的部分亚硝化工艺进行研究, 从而为 ANAMMOX 工艺提供合适的进水.

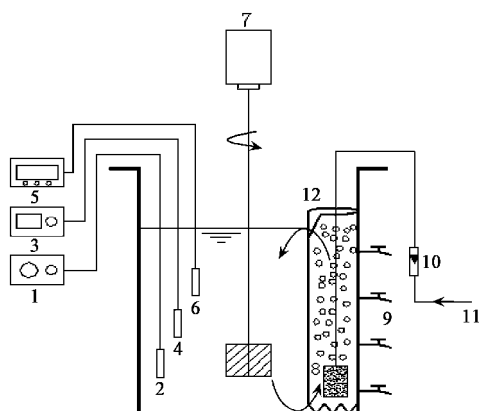
1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用有机玻璃 SBR 反应器模型, 总体积约为 6.6 L, 有效容积 5 L, 详见图 1 所示. 反应器内设有一内径为 42 mm 的曝气筒, 容积约为总有效容积的 5%, 曝气筒底部与 SBR 反应器连通, 上部设三角堰, 堰上水深约 10 mm. 曝气筒内用粘砂块曝气头进行曝气, 使曝气筒内液流与反应器内液流形成内循环, 通过传质交换为反应器内处理水提供溶解氧, 由转子流量计控制气量. 反应器内设立搅拌器 (搅拌叶片面积 $A = 1\,264 \text{ mm}^2$, 转速 200 r/min), 提供混合作用, 以加强传质. 定时检测 SBR 反应器内处理液的 SV_{30} 、SVI、MLSS、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 等参数, 在线监测 DO、ORP、pH 和水温等参数.

1.2 试验原水

试验原水采用北京工业大学水质科学与水环境恢复工程实验室处理生活污水的 A/O (厌氧/好氧) 除磷工艺的二级处理出水 (COD 50~60 mg/L,



1. pH 测定仪; 2. pH 电极; 3. ORP 测定仪; 4. ORP 传感器;
5. DO 测定仪; 6. DO 传感器; 7. 搅拌器; 8. 粘砂曝气头;
9. 取样口; 10. 转子流量计; 11. 压缩空气 12. 曝气筒

图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 80~110 mg/L, $\text{NO}_2^- - \text{N} < 1 \text{ mg/L}$, $\text{NO}_3^- - \text{N} < 1 \text{ mg/L}$, TP 0.18~0.74 mg/L, 水温 14.1~24.2℃, pH 7.65~7.79). 利用自来水将其稀释成不同氨氮浓度, 通过投加稀盐酸和碳酸氢钾的方法调节不同的碱度水平.

1.3 反应器的启动与运行

试验采用接种培养的方法启动反应器, 接种污泥为具有普通硝化功能的沉淀池回流污泥, MLSS 为 4.85 g/L, 接种量为 1 L. 接种后, 控制曝气量在 0.10~0.15 L/min, DO 保持在 0.10~0.20 mg/L. 在线监测反应器中的 pH、ORP 和 DO 等参数, 当 DO 趋势线出现突跃后, 停止曝气和搅拌, 沉淀 1.5 h 后排水. 培养驯化 1 个月后, 反应器内 MLSS 稳定在 1 000 mg/L 左右, MLVSS 约为 820 mg/L, SV_{30} 和 SVI 值分别稳定在 5% 和 50 mL/g 左右, 氨氮去除率 $> 98\%$, 亚硝酸盐氮积累率稳定在 90% 以上, 平均可达到 95%, 亚硝化反应器启动成功.

在全程硝化过程中, 氨氮一般在氨氧化细菌和亚硝酸盐氧化细菌的联合作用下被转化为硝酸盐. 然而, 在该过程中很多时候都会自发产生亚硝酸盐的积累现象. 但是, 大部分情况会随着反应器的运行, 短则几星期, 长则 2~3 个月, 逐渐转变为全程硝化. 因此, 考虑到亚硝酸盐积累能否长期稳定, 反应器启动成功以后, 放宽系统对溶解氧浓度的要求, 使 DO 在 0.03~0.60 mg/L 范围内变动, 稳定运行约 6 个月. 稳定运行期间, 仍然在线监测反应器中 pH、ORP 和 DO 趋势线, 3 种趋势线均出现突跃性变化后停止曝气和搅拌, 沉淀 1.5 h 后排水, 每天平均运行 3 个

周期。

为了最终获得 ANAMMOX 工艺的合适进水, 本试验在常温(14.1 ~ 24.2℃)和限氧(DO 为 0.3 ~ 0.4 mg/L)的条件下对 4 种氨氮浓度的二级处理出水进行了部分亚硝化的试验研究, 每个氨氮浓度下设置了不同的碱度, 详见表 1。

表 1 部分亚硝化试验进水氨氮浓度和碱度状况/mg·L⁻¹

Table 1 Influent concentration of ammonium and alkalinity in the partial nitrification test/mg·L⁻¹

试验阶段	氨氮浓度	碱度 ¹⁾	试验阶段	氨氮浓度	碱度
第 1 阶段	91.8 ~ 102.6 (97.2) ²⁾	218	第 3 阶段	56.3 ~ 58.8 (57.6)	228
		324			278
		445			332
		548			383
		631			434
第 2 阶段	73.7 ~ 81.5 (77.3)	149	第 4 阶段	35.6 ~ 36.7 (36.6)	238
		251			264
		379			289
		460			315

1) 以 CaCO₃ 计, 滴定终点 pH 为 3.7; 2) 括号内为平均值

1.4 分析项目及方法

水样分析项目中 NH₄⁺-N 采用纳氏试剂光度法; NO₂⁻-N 采用 N-(1-奈基)-乙二胺光度法; NO₃⁻-N 采用麝香草酚分光光度法; DO 和温度采用 WTW inoLab StirOx G 多功能溶解氧在线测定仪; pH 采用 OAKLON Waterproof pHTestr 10BNC 型 pH 测定仪; ORP 采用 OAKLON Waterproof ORPTestr 10 型 ORP 测

定仪; 碱度、MLSS、MLVSS、SV30 和 SVI 均按中国国家标准和 美国环境总署发布的标准方法测定^[11, 12]。

定期从反应器取水样约 25 mL, 静沉 30 min 后, 取上清液约 15 mL 用中速滤纸过滤后待测。静沉残液与污泥倒回反应器, 并通过重物淹没排水法保持反应器内液位和曝气筒堰上水深不变。

2 结果与讨论

2.1 稳定期的亚硝化效果

反应器亚硝化稳定期内, 氨氮主要被转化为亚硝酸盐, 亚硝酸盐氮积累率平均可达到 95% 左右, 仅有少量硝酸盐形成, 最大比污泥氨氧化速率为 0.86 kg/(kg·d), 容积比氨氮去除速率为 0.70 kg/(m³·d), 与同类报道^[13 ~ 15]相比活性较高。但较左剑恶等^[16]在高温(35 ± 1)℃、高氨氮浓度(860 ~ 3 500 mg/L)下所实现的氨氧化速率 1.39 ~ 3.01 kg/(kg·d) 要低, 这是由于本试验采用了较低的温度、DO 和氨氮基质浓度的缘故。

图 2 描述了亚硝化 1 个周期内运行参数(DO、pH 和 ORP)以及反应器内各氮素化合物的变化规律。在碱度不受限的条件下, 氨氮被不断氧化为亚硝酸盐和微量的硝酸盐, 并伴随着 pH 的缓慢降低和 ORP 的缓慢上升, 其间由于该氧化反应没有受到任何限制, 因此充氧速率和耗氧速率均较稳定, 并能够迅速达到稳定的平衡, 从而使得反应器内的 DO

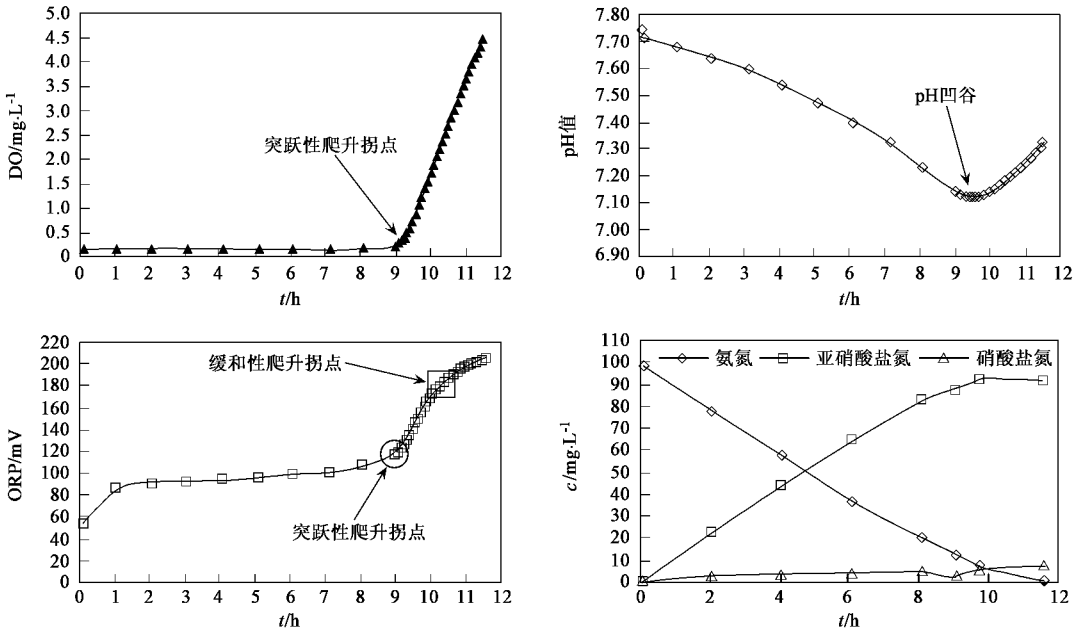


图 2 1 个 SBR 周期内运行参数与氮素化合物浓度的变化趋势线

Fig.2 Profiles of operating variables and nitrogen compounds of nitrification in a SBR circle

能够长期稳定在某一数值. 当氨氮浓度降低至限制性浓度值以下时, 亚硝化反应的速率由于基质缺乏而迅速降低, 反应器内充氧速率大于耗氧速率, DO 趋势线首先出现突跃性上升, 直至溶解氧达到饱和; 其次, ORP 趋势线由于受到 DO 的影响也出现了硝化过程所特有的第 1 个突跃性爬升拐点(如图 2 中“○”所示); 随后, 由于反应器内碳酸解离平衡的破坏和空气对 CO₂ 的吹脱作用, 致使 pH 趋势线出现了硝化反应所特有的回升凹谷, 通常称之为“pH 凹谷”^[17]; 最后, 由于 pH 值的升高对 ORP 的降低有贡献, 因此在 pH 和 DO 的共同影响下, ORP 趋势线上出现了第 2 个硝化过程所特有的拐点, 即缓和性爬升拐点(如图 2 中“□”所示).

在亚硝化稳定期, 反应器运行 6 个月以上未出现恶化, 水质情况和运行参数与以上周期相似, 从而可以确定在该反应器中实现了稳定的亚硝酸盐积累.

2.2 部分亚硝化试验的效果

SBR 部分亚硝化试验分 4 个阶段进行, 如表 1 所示. 整个试验过程中保持相对恒定的曝气量(0.028~0.032 m³/h). 由于供养和耗氧平衡, 反应器内的溶解氧在亚硝化过程不受限的情况下会稳定

在 0.3~0.4 mg/L 范围内. 随着氧化反应的进行, 水中氨氮不断被转化为亚硝酸盐氮, 水中同等比例的 HCO₃⁻/NH₄⁺ 消耗就会导致 pH 的自然下降. 根据《伯杰细菌鉴定手册》(第 8 版), 氨氧化细菌中较普遍的亚硝化单胞菌属的生长 pH 范围为 5.8~8.5, 超出该范围细菌的生理活性快速降低. 另有资料显示^[18,19], 当 pH<6.5 时, pH 就打破了 NH₃ 和 NH₄⁺ 的平衡, 游离氨浓度太低不足以满足氨氧化细菌的生长, 氨的氧化就不再发生了. 因此, 当 pH 值下降到一定程度时, 游离氨便成为该反应过程的限制性因素, 从而导致了氨氧化细菌代谢速率和反应器中耗氧速率(OUR)的急剧下降, DO 趋势线就会出现突跃的特征点(本试验以 DO 突跃至 1.0 mg/L 为判别), 指示出部分亚硝化反应的终点. 以第 1 阶段为例, 各碱度水平下反应器内 DO、ORP、pH 等参数和 3 种氮素化合物浓度的变化情况详见图 3 和图 4 所示.

本试验中部分亚硝化过程的 DO 变化趋势线与稳定期完全亚硝化过程的趋势线相似, 均存在 1 个突跃点, 但是二者的成因有本质不同. 部分亚硝化过程是由于水中碱度消耗殆尽、pH 过低造成的; 而完全的亚硝化过程是由于氨氮基质浓度降低至限制性基质浓度以下造成的. 因此, pH 趋势线不存在

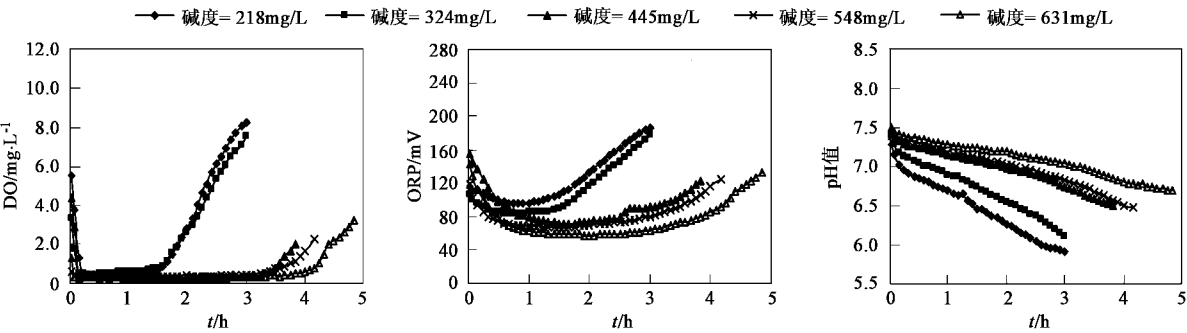


图 3 部分亚硝化过程中运行参数的变化趋势线
Fig.3 Profiles of operating variables of partial nitrification

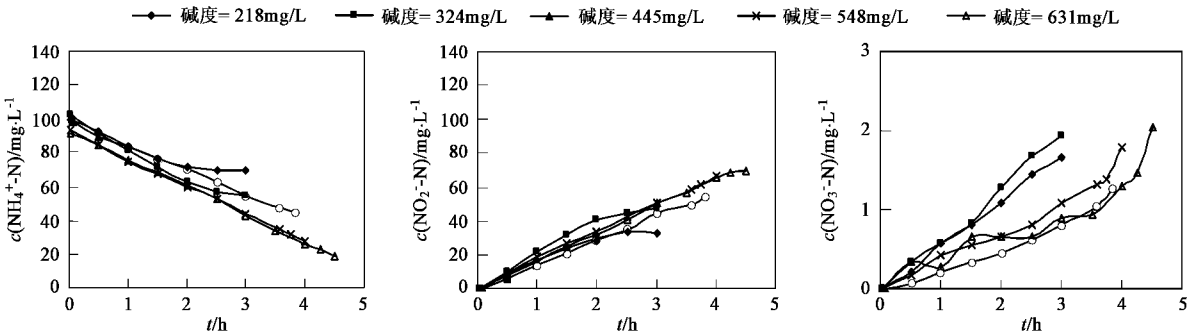


图 4 部分亚硝化过程中氮素化合物浓度的变化趋势线
Fig.4 Profiles of nitrogen compounds concentration of partial nitrification

“pH 凹谷”,而是近似呈直线降低;ORP 趋势线仅存在突跃性爬升拐点,而不存在缓和性爬升拐点(如图 3 所示). 部分亚硝化终点(DO 为 1.0 mg/L 时)的亚硝化积累率 $[\text{NO}_2^-/(\text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-)]$ 大于 97%,硝化产物中仅有 3% 以下为硝酸盐,基本上可以忽略不计. 3 种氮素化合物的浓度在部分亚硝化过程中如果没有受到 pH 的限制随反应时间基本呈线性转化关系(如图 4 所示).

2.3 碱度对部分亚硝化比率的影响

由于氨氧化过程需要消耗水中的碱度,从而引起反应器中 pH 值的持续降低,直至碱度消耗殆尽. 当 pH 值下降到一定程度时,氨氧化细菌代谢速率的减小导致了反应器中耗氧速率(OUR)的急剧下降,DO 趋势线就会出现突跃的特征点(本研究以 DO = 1.0 mg/L 为特征点),指示出部分亚硝化反应的终点. 因此碱度是本试验中控制氨氧化过程亚硝化比率($\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+$)的重要因素.

4 个氨氮浓度下达到反应终点时反应器出水亚硝化比率($\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+$)与碱度的关系如图 5 所示. 由图 5 可知,除第 4 阶段外其它试验阶段的亚硝化比率与碱度明显呈二次相关关系(相关系数 R^2 分别为 0.999 2、0.999 9 和 0.998 8),亚硝化比率随碱度的增加沿二次曲线快速提高. 在试验第 4 阶段,亚硝化率仅在碱度较低时随碱度增加而提高,到达一定程度后便趋于某一数值(根据图 5 所示,这一数值约为 1.97). 这是由于第 4 阶段的初始氨氮浓度较低,随着氨氧化反应的进行氨氮很快就降低至限制性基质浓度,制约了氨氧化反应的进一步进行,即使继续增加碱度也很难进一步提高亚硝化率.

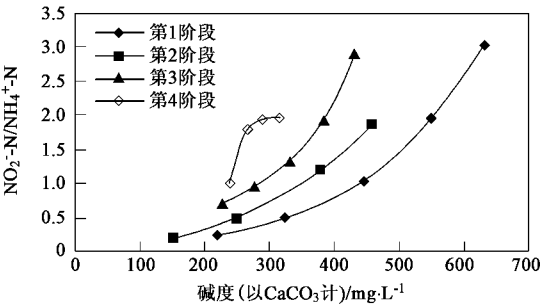


图 5 亚硝化比率与碱度的关系

Fig.5 Relationship between nitrification ratio and alkalinity

根据图 5 中亚硝化比率与碱度之间的关系,可以得出 4 种不同试验氨氮浓度下实现部分亚硝化(亚硝化比率 $\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+ = 1.31$)时所需的碱度值. 再以 4 个阶段氨氮浓度 $c(\text{NH}_4^+ - \text{N})$ 为横坐标,所需

碱度值为纵坐标,可以绘制出实现部分亚硝化所需碱度与进水氨氮浓度之间的关系曲线(如图 6 所示). 由图 6 可知,二者呈明显线性相关关系,相关系数 $R^2 = 0.999 2$. 直线斜率 $k = 3.824 2$,说明进水(碱度 - 107.84)与氨氮浓度比率等于 3.824 2 时,常温限氧条件下,以 DO 达到 1.0 mg/L 为部分亚硝化反应终点的控制点,可以实现稳定的部分亚硝化,为 ANAMMOX 工艺提供合适比例($\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+ = 1.31$)的进水.

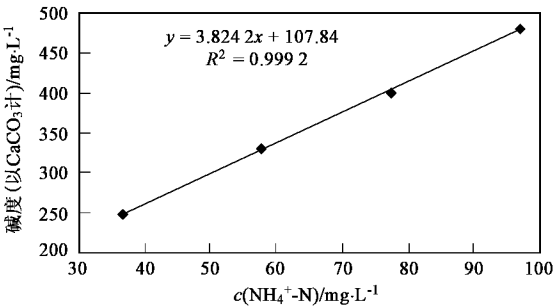


图 6 部分亚硝化工艺所需碱度与进水氨氮浓度之间的关系

Fig.6 Relationship between the alkalinity demanded in partial nitrification and the influent ammonium concentration

2.4 试验出水的适用性验证

将部分亚硝化反应器的出水(1 000 mL)转移至 1 L 的广口瓶中,并向其中加入 40 g(湿重)已经培养好的厌氧氨氧化污泥和 1 个磁力搅拌转子,然后将瓶口用带有通气管的橡胶塞封住,置于磁力加热搅拌器(681 型-中国上海南汇电讯器材厂制)上反应数 h,温度控制在 25 ~ 35℃,通气管深入 10% NaOH 碱液水槽中,以观察气泡的产生. 试验发现,置于碱液水槽中的通气管在反应过程中不断有气泡产生(主要成份为 N_2),且该过程始末反应液中大量的氨氮和亚硝酸盐氮约以 1/1 的质量比被迅速消耗,硝酸盐浓度略有升高但变化不大,并伴随有 pH 升高的现象,与 ANAMMOX 工艺的试验现象完全一致. 这充分说明,本试验中部分亚硝化 SBR 反应器所生产的出水是完全可以作为 ANAMMOX 反应器的进水的. 另外,试验还发现硝酸盐的产量低于 ANAMMOX 反应的理论值,而产气量却高于理论值,推断这是由于该过程中存在一定程度的反硝化过程,将一部分 ANAMMOX 反应所产生的硝酸盐转化为了氮气.

3 结论

(1)常温(14.1 ~ 24.2℃)条件下,以 A/O 除磷工艺的二级处理出水为原水,通过低溶解氧浓度下氨

氧化细菌和亚硝酸氧化细菌的氧基质缺乏竞争机制,可以在 SBR 的活性污泥系统中成功实现亚硝酸盐的高效长期稳定积累.

(2)实时监测反应器中的溶解氧浓度趋势线可以很好地指示出氨氧化过程进行的程度和受限情况,是控制亚硝化过程终点的最佳指示参数.

(3)亚硝化工艺中,亚硝化比率随碱度的增加呈二次相关关系升高.

(4)本试验中,碱度与氨氮浓度的比率是影响部分亚硝化工艺出水 $\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+$ 比率的重要因素,以 DO 达到 1.0 mg/L 为控制终点,控制进水(碱度 - 107.84)与氨氮浓度比率等于 3.824 2, SBR 部分亚硝化工艺可以为 ANAMMOX 反应器提供 $\text{NO}_2^-/\text{NH}_4^+ = 1.31$ 合适比率的进水.

参考文献:

- [1] Mulder A, van de Graaf A A, Robertson L A, *et al.* Anaerobic Ammonium Oxidation Discovered in a Denitrifying Fluidized Bed Reactor [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 1997, **163**(3): 177-183.
- [2] 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**: 2415-2421.
- [3] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1998, **50**: 589-596.
- [4] Alleman J E. Elevated nitrite occurrence in biological wastewater treatment systems [J]. *Water Sci Technol*, 1984, **17**(1): 409-419.
- [5] Hellenga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The Sharon process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. *Water Sci Technol*, 1998, **37**(9): 135-142.
- [6] Bernat N, Dangiong N, Delgenes J P, *et al.* Nitrification at low oxygen concentration in biofilm reactor [J]. *Environ Eng*, 2001, **127**(3): 266-271.
- [7] Wiesmann U. Biological nitrogen removal from waste water [A]. In: Foehcher A. *Advances in Biochemistry and Engineering/Biotechnology* [C]. New York: Springer, 1994. 113-154.
- [8] 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**: 153-160.
- [9] Fux C, Bohler M, Huber P, *et al.* Biological treatment of ammonium-rich wastewater by partial nitrification and subsequent anaerobic ammonium oxidation (anammox) in pilot plant [J]. *Biotechnology*, 2002, **99**: 295-306.
- [10] Van Hulle S W H, van den Broeck S, Maertens J, *et al.* Construction, start-up and operation of a continuously aerated laboratory-scale SHARON reactor in view of coupling with an Anammox reactor [J]. *Water SA*, 2005, **31**: 327-334.
- [11] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 233-239.
- [12] APHA, AWWA, WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* [M]. (19th edition). Washington, DC, USA: 1995. 129-130.
- [13] 魏琛, 罗固源. FA 和 pH 值对低 C/N 污水生物亚硝化的影响 [J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2006, **29**(3): 124-127.
- [14] 陈旭良, 郑平, 金仁村, 等. pH 和碱度对生物硝化影响的探讨 [J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2005, **31**(6): 755-759.
- [15] Galí A, Dosta J, Loosdrecht M C M, *et al.* Two ways to achieve an anammox influent from real reject water treatment at lab-scale: Partial SBR nitrification and SHARON process [J]. *Process Biochemistry*, 2007, **42**(4): 715-720.
- [16] 左剑恶, 杨洋, 蒙爱红. 高氨氮浓度下的亚硝化过程及其影响因素研究 [J]. *环境污染与防治*, 2003, **25**(6): 332-335.
- [17] 高大文, 彭永臻, 郑庆柱. SBR 工艺中短程硝化反硝化的过程控制 [J]. *中国给水排水*, 2002, **18**(11): 13-18.
- [18] 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**: 4149-4163.
- [19] Khin T, Annachhatre A P. Novel microbial nitrogen removal processes [J]. *Biotechnology Advances*, 2004, **22**: 519-532.