

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.06.016

pH对高氨废水限氧半亚硝化过程中 N_2O 释放的影响

吕永涛, 张雪玲, 王磊, 鞠恺, 孙婷, 苗瑞

(西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 710055 西安)

摘要:为获得半亚硝化系统中强温室气体 N_2O 减量化释放的控制参数,采用SBR处理人工合成高氨废水(进水氨氮质量浓度约为 $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),考察不同进水pH(7.5, 8.0和8.5)对 N_2O 释放特性的影响.结果表明,不同进水pH下均释放 N_2O ,每个周期内 N_2O 的释放量随进水pH的升高而减小.pH为7.5, 8.0及8.5时, N_2O 释放量分别占进水氨氮的3.81%、2.35%和2.00%.当pH为7.5时,曝气初始50 min内, N_2O 释放速率先增大后减小,峰值速率为 $44.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$,之后维持在 $16.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$;当pH为8.0及8.5时,曝气初期 N_2O 释放峰值速率分别为 33.7 、 $22.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$,之后释放速率随pH降低和 NO_2^- 积累而逐渐增大.

关键词:序批式反应器;高氨废水;半亚硝化; N_2O ;pH

中图分类号: X703.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)06-0088-06

Effect of pH values on nitrous oxide emission during partial nitrification of high-ammonium wastewater under oxygen-limited condition

LÜ Yongtao, ZHANG Xueling, WANG Lei, JU Kai, SUN Ting, MIAO Rui

(School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, 710055 Xi'an, China)

Abstract: To reduce the emission of the strong greenhouse gas nitrous oxide (N_2O) in partial nitrification system, a lab-scale SBR treating synthetic high-ammonium wastewater (around $600\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ of influent ammonia) was investigated for the effect of pH values (7.5, 8.0 and 8.5) on N_2O emission. The results showed that, the N_2O emission was observed under different pH values, and the total amount of N_2O emission decreased with pH value increment. At pH 7.5, 8.0 and 8.5, the N_2O emission amount accounted for 3.81%, 2.35% and 2.00% of the influent ammonium nitrogen, respectively. At pH 7.5, in the initial 50 min the N_2O emission rate firstly increased (maximum value of $44.5\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) and then returned around $26.4\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$. At pH 8.0 and 8.5, 33.7 and $22.9\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$ of maximum N_2O emission rate were achieved in the initial 50 min, respectively, however, they increased slowly with the pH decrease and nitrite accumulation.

Keywords: SBR; high-ammonium wastewater; partial nitrification; nitrous oxide; pH value

N_2O 是一种强温室气体,其温室效应约为 CO_2 的300倍^[1].此外, N_2O 能消耗平流层臭氧,还会对人体及其他生物产生毒性^[2].研究证实,污水生物脱氮是 N_2O 的重要产生源之一,释放的 N_2O 占全球 N_2O 排放总量的2.5%~25%^[3].半亚

硝化是指在氨氧化菌(AOB)的作用下将进水中约50%的氨氮(NH_4^+-N)转化为亚硝酸盐氮(NO_2^--N),使出水中 NO_2^--N 与 NH_4^+-N 的比值接近1:1.基于半亚硝化的短程硝化-厌氧氨氧化组合工艺是一种可持续污水脱氮处理工艺,尤其适用于垃圾渗滤液、污泥消化液、畜禽养殖废水和焦化废水等高氨氮(氨氮质量浓度可达 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上)、低COD与氮比废水处理^[4-6].近年的研究^[7-8]表明,半亚硝化过程会释放 N_2O .受反应器形式、进水氨氮质量浓度及pH、DO质量浓度、温度等运行参数的共同影响,不同研究所得

收稿日期: 2014-04-09.

基金项目: 国家自然科学基金(51108367);高等学校博士学科点专项科研基金(20116120120009);陕西省自然科学基金(2014JQ7243).

作者简介: 吕永涛(1980—),男,副教授,硕士生导师;

王磊(1971—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 王磊, w01178@126.com.

的 N₂O 释放量各不相同^[2,8-10]. 研究影响半亚硝化过程 N₂O 释放的因素对优化反应器运行并减小 N₂O 释放量具有重要意义.

pH 是生化反应的重要控制参数,已有不少关于高氨氮废水半亚硝化过程中 N₂O 总释放量的研究^[11],但 N₂O 释放质量浓度和释放速率随 pH 变化的研究鲜见报道.本实验以人工合成高氨废水为处理对象,在 SBR 系统成功启动半亚硝化的基础上研究了不同进水 pH 对 N₂O 释放速率和释放量的影响,旨在为短程生物脱氮过程中 N₂O 的减量化控制提供理论依据.

1 实验

1.1 实验装置及运行方案

采用有机玻璃制成的圆柱形 SBR 反应器,反应器内径 9 cm,高 75 cm,有效容积 4 L.采用空压机曝气,用玻璃转子流量计将曝气量控制在 0.32 L·min⁻¹,以多孔气泡石作为微孔曝气器.用恒温加热棒将混合液温度控制在 (27±1) °C.每天运行 4 个周期,每周期为 6 h,包括进水 5 min、曝气 320 min、沉淀 30 min、排水 5 min,用微电脑时控开关进行控制,排水比为 1/2.

实验设 3 个不同的进水 pH,分别为 7.5、8.0 和 8.5,在每个 pH 下至少稳定运行 1 周后再对系统进行采样分析.

1.2 实验用水及污泥

实验采用人工合成无机高氨氮废水,其成份为: NH₄Cl 2.28 g·L⁻¹ (NH₄⁺-N, 600 mg·L⁻¹), NaHCO₃ 5.4 g·L⁻¹, 微量元素溶液 0.2 mL·L⁻¹. 其中微量元素溶液的成份为: Zn₂SO₄·7H₂O 0.110 g·L⁻¹, NaMO₄·2H₂O 0.111 g·L⁻¹, CoCl₂·6H₂O 0.120 g·L⁻¹, Mn₂SO₄·H₂O 0.117 g·L⁻¹, NiCl₂·6H₂O 0.104 g·L⁻¹, FeCl₃·6H₂O 0.124 g·L⁻¹, K₂HPO₄ 21.2 g·L⁻¹, KH₂PO₄ 53.6 g·L⁻¹. 所有药品均为分析纯.

实验用污泥为已驯化好的具有半亚硝化性能的好氧絮体污泥,实验期间,污泥质量浓度 (MLSS) 在 2 937 ~ 3 025 mg·L⁻¹, SVI 为 94 mL·g⁻¹,沉降性能良好.

1.3 水质分析及计算

NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 均按照国家环保总局颁布的标准方法^[12]进行测定,其中 NH₄⁺-N 采用纳氏试剂分光光度法, NO₂⁻-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法, NO₃⁻-N 采用紫外分光光度法; pH 用精密酸度计 (PHM210,

HACH, USA) 测定; DO 用哈希便携式溶解氧仪 (HQ25d, HACH, USA) 测定.

NO₂⁻-N 积累率 (R_{NA})、游离亚硝酸 (FNA) 质量浓度分别通过式 (1)、(2) 进行计算:

$$R_{NA} = [\rho_{NO_2^- - N} / (\rho_{NO_2^- - N} + \rho_{NO_3^- - N})] \times 100\%, \quad (1)$$

$$\rho_{FNA} = \frac{47}{14} \times \frac{\rho_{NO_2^- - N}}{\exp[-2300 / (273 + t)]} \times 10^{pH} \quad (2)$$

其中, $\rho_{NO_2^- - N}$ 和 $\rho_{NO_3^- - N}$ 分别为出水中 NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 的质量浓度, mg·L⁻¹; ρ_{FNA} 为 FNA 质量浓度, mg·L⁻¹; t 为温度, °C.

1.4 曝气阶段 N₂O 气体分析及计算

将反应残余气体脱除氧气和水蒸汽后,在曝气阶段的第 2、3、5、10、15、20、35、50、80、110、140、170、200、230、260、290、320 分钟,用气密性良好的气体采样针收集 5 mL 气样,然后用 PE 600 气相色谱仪对其中的 N₂O 进行分析,所用色谱柱为 Porapak Q 填充柱,检测器为电子捕获检测器 (ECD),以 20 mL·min⁻¹ 高纯 N₂ 作为载气,进样口、柱温箱和检测器的温度分别为 150、50 和 380 °C,所有气体样品均测定 3 次.

曝气阶段 N₂O 释放质量浓度、释放速率与释放量分别通过式 (3)、(4)、(5) 计算,即

$$\rho_{N_2O} = M_{N_2O} \cdot \varphi_{N_2O} \cdot p \cdot T / 22400, \quad (3)$$

$$w_{N_2O} = Q \cdot \varphi_{N_2O} \cdot M_{N_2O} \cdot p / (R \cdot T \cdot V_L \cdot \rho_{MLSS}), \quad (4)$$

$$m_{N_2O} = \sum_2^n \left[\frac{(w_{N_2O,n-1} + w_{N_2O,n})}{2} \cdot \Delta t \cdot V_L \cdot \rho_{MLSS} \right]. \quad (5)$$

式中: ρ_{N_2O} 为 N₂O 释放质量浓度, mg·L⁻¹; M_{N_2O} 为 N₂O 摩尔质量, 44.02 g·mol⁻¹; φ_{N_2O} 为所测得的 N₂O 体积分数, 10⁻⁶ m³·m⁻³; p 为大气压强, 101 kPa; T 为温度, K; w_{N_2O} 为 N₂O 释放速率, μg·min⁻¹·g⁻¹; Q 为曝气阶段的体积流量, L·min⁻¹; R 为气体常数, 8.314 L·kPa·K⁻¹·mol⁻¹; V_L 为反应器有效容积, L; ρ_{MLSS} 为混合液悬浮固体质量浓度, g·L⁻¹; m_{N_2O} 为 N₂O 释放量, mg; Δt 为 N₂O 气体采样时间间隔, min.

1.5 沉淀阶段溶解性 N₂O 分析

当进水 pH 分别为 8.5、8.0 和 7.5 时,曝气结束后,在沉淀阶段的第 0、15、30 分钟从反应器下部取适量泥水混合物,采用 N₂O 微电极 (Unisence, Aarhus, Denmark) 测定其中的溶解性 N₂O 质量浓度.

2 实验结果

2.1 反应器总体性能

反应器在限氧条件下运行,曝气 10 min 以后 DO 质量浓度基本保持在 0.2~0.5 mg·L⁻¹. 当进

水 pH 分别为 8.5, 8.0 和 7.5 时, 反应器进、出水氮素质量浓度变化如图 1 所示。

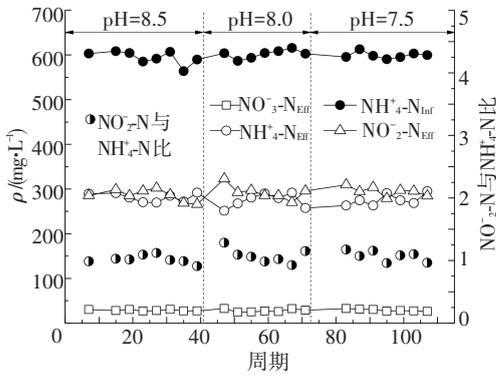
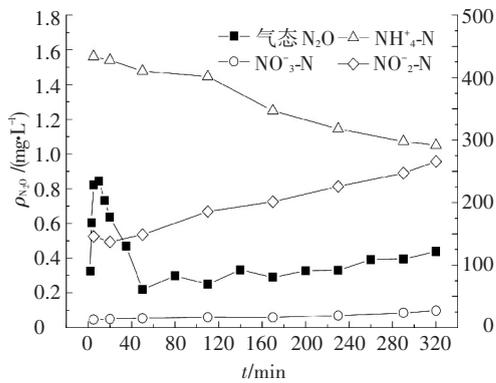


图 1 不同进水 pH 下反应器半亚硝化特性

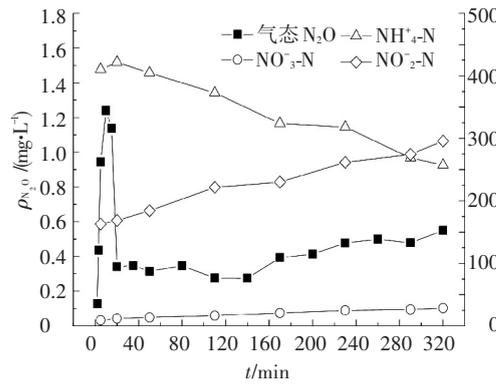
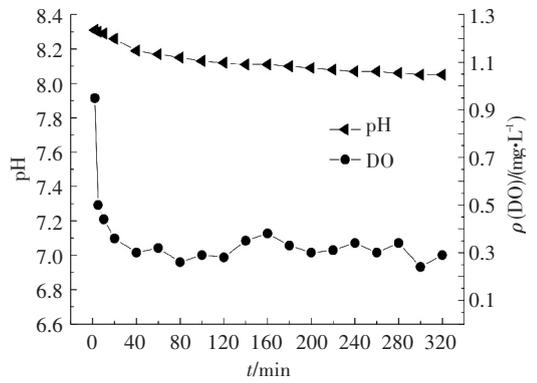
由图 1 可以看出, 不同 pH 下反应器总体运行稳定. 在进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度 (598 ± 12) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的条件下, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度为 (277 ± 12) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- 质量浓度为 (291 ± 14) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 质量浓度为 (28 ± 2) $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化率为 (53.8 ± 2.1)%, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累率为 (91.1 ± 0.7)%, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 质量浓度的比值为 (1.06 ± 0.09), 表明进水 pH 在 7.5~8.5 时均能获得稳定的半亚硝化效果。

2.2 不同初始 pH 条件下 SBR 单周期氮素转化特性

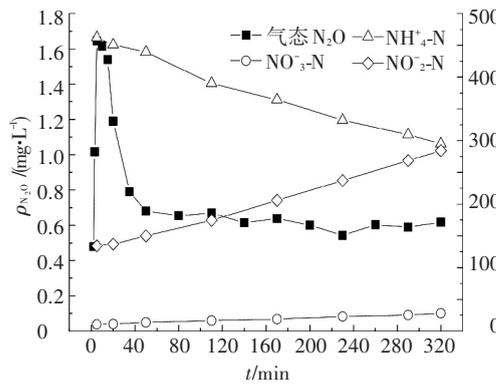
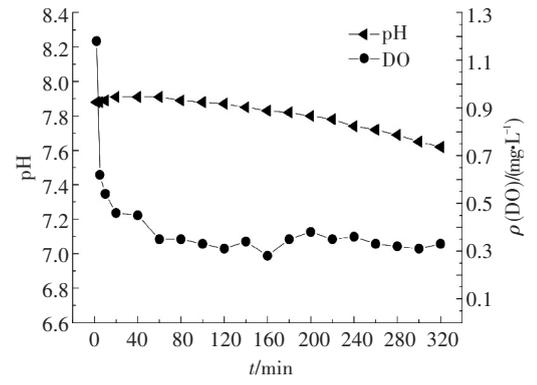
图 2 为进水 pH 分别为 8.5, 8.0 和 7.5 时, SBR 单周期氮素及 pH、DO 随曝气时间的变化。



(a) pH=8.5



(b) pH=8.0



(c) pH=7.5

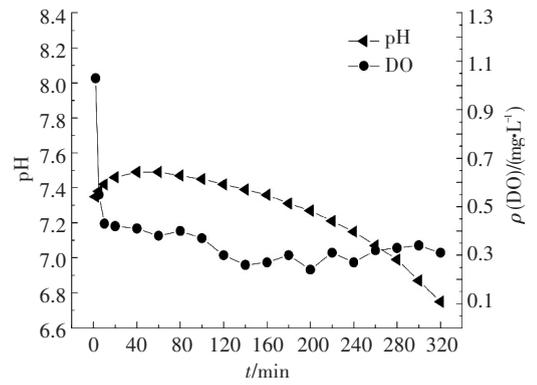


图 2 不同初始 pH 条件下 SBR 单周期氮素转化及运行条件变化

由图2左侧图可以看出,曝气期间 NH_4^+-N 以较快速率被转化, $NO_2^- -N$ 质量浓度迅速升高, $NO_3^- -N$ 增幅不大,出水 $NO_2^- -N$ 与 $NH_4^+ -N$ 比为 (1 ± 0.1) 。 N_2O 释放质量浓度在曝气初期(前50 min)呈先升高后降低的趋势,出现一个瞬时质量浓度峰值;50 min以后,随着曝气时间的延长,当初始pH为8.0及8.5时, N_2O 释放质量浓度呈波动增长趋势,分别由0.34,0.22 $mg \cdot L^{-1}$ 增加到0.55,0.44 $mg \cdot L^{-1}$ 。而当初始pH为7.5时, N_2O 释放质量浓度几乎不变,维持在0.6 $mg \cdot L^{-1}$ 左右。

由图2右侧图可以看出,曝气开始后DO质量浓度迅速降低,10 min后基本保持在0.2~0.5 $mg \cdot L^{-1}$ 。曝气20 min以后,随着亚硝化反应的进行,pH呈现总体降低的趋势。

2.3 不同初始pH条件下沉淀阶段溶解性 N_2O 质量浓度

图3为不同进水pH下SBR沉淀阶段溶解性 N_2O 质量浓度的变化。可以看出,随着沉淀时间的延长溶解性 N_2O 质量浓度呈增大趋势。当pH分别为7.5,8.0及8.5时,沉淀30 min以后,溶解性 N_2O 质量浓度依次从0.11,0.08,0.06 $mg \cdot L^{-1}$ 增加到0.38,0.32,0.30 $mg \cdot L^{-1}$ 。

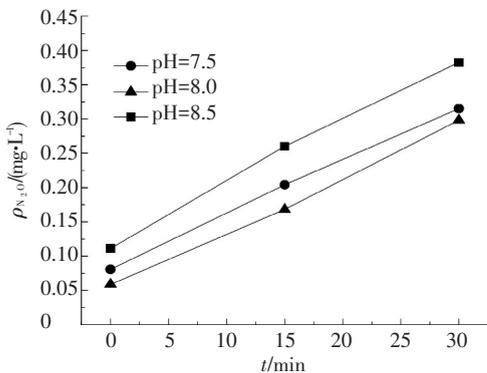


图3 不同进水pH下沉淀阶段溶解性 N_2O 质量浓度

3 讨论

3.1 半亚硝化过程 N_2O 释放特性

研究表明,在自养半亚硝化过程中, N_2O 的生成途径主要有以下两种(如图4所示):① NH_2OH 的氧化。当 NH_4^+ 氧化速率较高时, NH_2OH 发生积累,进而被 NO_2^- 或 O_2 氧化成 N_2O ^[13]。同时,在HAO酶的作用下 NH_2OH 还会被氧化成硝酰基(NO₂),NO₂在低DO下能发生双分子聚合反应生成 $N_2O_2H_2$, $N_2O_2H_2$ 进一步被水解为 N_2O ^[14];②AOB的反硝化作用。研究^[15-16]发现,某种氨氧化菌(AOB)为了避免 NO_2^- 在细胞内积累而诱发产生异构亚硝酸盐还原酶,能在限氧条件下以 NH_4^+ 为电

子供体, NO_2^- 为电子受体进行自养反硝化产生NO和 N_2O ,从而造成 N_2O 积累^[17]。

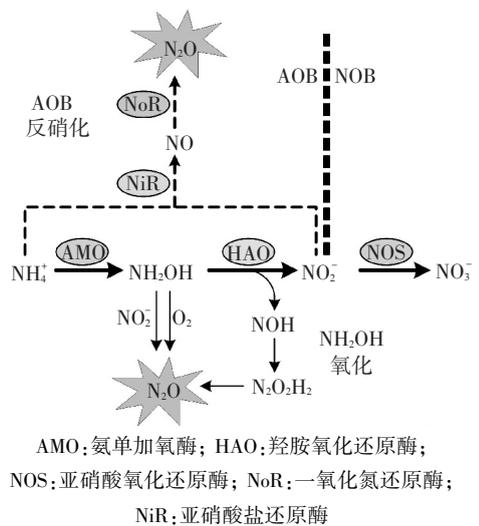


图4 半亚硝化过程中 N_2O 的产生与转化途径

由图2可知,不同pH条件下半亚硝化过程均释放 N_2O ,这是由于该系统中 NH_4^+ 质量浓度很高。曝气初期,当反应器条件从缺氧瞬间转变为好氧时,大量 NH_4^+ 被迅速氧化为 NH_2OH 。从化学反应的自由能变化看, NH_2OH 的氧化较 NH_4^+ 氧化不易进行^[18],导致 NH_2OH 发生短时积累,进而通过 NH_2OH 的氧化生成 N_2O ;此外,该半亚硝化过程在限氧条件下进行, NO_2^- 的积累也为AOB自养反硝化提供了反应条件。因此,羟胺(NH_2OH)及 NO_2^- 的积累是导致该系统产生 N_2O 的直接原因,低DO是 N_2O 产生的间接原因。

由图2还可以看出,在不同pH条件下,曝气初期 N_2O 释放速率均呈现先升高后降低的趋势。由图3可知,由于AOB的反硝化作用,沉淀阶段系统内仍会产生 N_2O 并积累于污泥内部。此外,研究表明,瞬时进水造成的环境突变会使AOB代谢平衡受到破坏,从而产生更多的 N_2O ^[1,9]。由这两方面因素产生的 N_2O 在曝气初期从混合液中被吹脱出来,导致 N_2O 释放量突然升高,这与Yu等^[19]的研究结果相吻合。

3.2 pH对半亚硝化过程 N_2O 释放的影响

根据式(5)可得,当pH分别为7.5,8.0及8.5时,单周期 N_2O 释放量依次为71.8,44.2,37.7 mg (如图5),分别占系统进水氨氮总量(1200 mg)的3.81%,2.35%,2.00%。由此可见,半亚硝化过程中, N_2O 释放量随着初始pH的升高而减小。对此,Wicht^[20]认为可能是由于低pH下形成的游离 HNO_2 (FNA)对Nos酶的抑制作用引起的(HNO_2 和 NO_2^- 在溶液中的平衡受pH影响)。经计算,当pH分别为7.5,8.0及8.5时,系

统中 FNA 的质量浓度变化范围分别为 0.04 ~ 0.38, 0.02 ~ 0.05, 0.006 ~ 0.018 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$. pH 为 8.0 及 8.5 时, FNA 质量浓度相差不大, 而与 pH 为 7.5 时差别较大, 这与图 5 结果 (pH 为 8.0 及 8.5 时 N_2O 释放量相差不大, 而与 pH 为 7.5 时差别较大) 一致. 由此可见, 低 pH 下 N_2O 释放量大很可能是由于低 pH 下 FNA 对 Nos 酶的抑制作用强, 但仍需进一步研究确定.

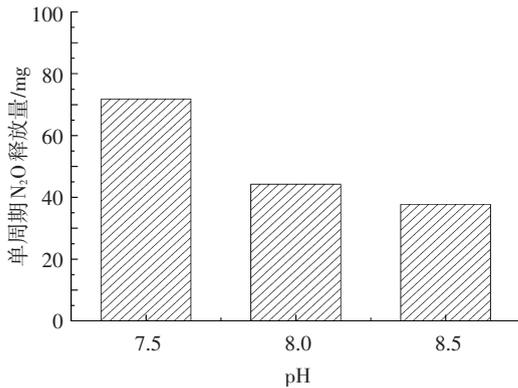


图 5 不同 pH 条件下 SBR 单周期 N_2O 释放量

图 6 为根据式 (4) 计算的不同进水 pH 条件下 SBR 系统单周期 N_2O 释放速率. 可以看出, N_2O 释放峰值过后, 随着曝气时间的延长, 不同 pH 下单周期 N_2O 释放规律不同. 当初始 pH 为 8.0 和 8.5 时, 随着反应的进行, pH 逐渐降低, N_2O 释放速率不断升高, 曝气结束时几乎增加了 1 倍, 这与低 pH 下半亚硝化过程中 N_2O 产量大的现象一致. 然而, 当初始 pH 为 7.5 时, 随着反应的进行与 pH 的降低, N_2O 释放速率几乎不变, 一直维持在较高水平 ($16.5 \mu\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右), 这是由于 N_2O 释放速率受 N_2O 产生速率和还原速率的共同影响, 随着 pH 的降低, 一方面, FNA 质量浓度增大, 使 N_2O 还原速率减小; 另一方面, AOB 活性降低, 使 N_2O 产生速率减小, 两者共同作用导致 N_2O 释放速率变化不大.

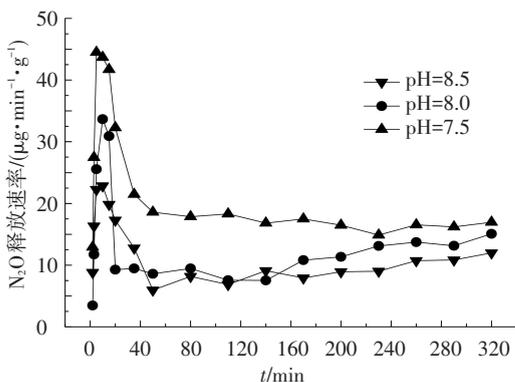


图 6 不同进水 pH 条件下单周期 N_2O 的释放速率

4 结 论

1) 在限氧半亚硝化过程中, 不同初始 pH 条件下均释放 N_2O , 且 N_2O 释放量随 pH 的升高而减小.

2) 曝气初期, N_2O 释放速率均呈先升高后降低的趋势, 速率峰值是上周期沉淀阶段生成累积的 N_2O 所致.

3) 随着曝气时间的延长, 当 pH 为 7.5 时, N_2O 释放速率几乎不变, 维持在 $16.5 \mu\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右; 当 pH 为 8.0 及 8.5 时, N_2O 释放速率逐渐增加, 分别由 $9.3, 5.9 \mu\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 增加到 $15.1, 12.0 \mu\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$.

参 考 文 献

- [1] KAMPSCHREUR M J, TEMMINK H, KLEEREBEZEM R, et al. Nitrous oxide emission during wastewater treatment [J]. *Water Research*, 2009, 43(17): 4093-4103.
- [2] DE GRAAFF M S, ZEEMAN G, TEMMINK H, et al. Long term partial nitrification of anaerobically treated black water and the emission of nitrous oxide [J]. *Water Research*, 2010, 44(7): 2171-2178.
- [3] KHALIL M A K, RASMUSSEN R A. The global sources of nitrous oxide [J]. *Journal of Geophysical Research-atmospheres*, 1992, 97(D13): 14651-14660.
- [4] VAN DONGEN U, JETTEN M S, VAN LOOSDRECHT M C. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater [J]. *Water Science and Technology*, 2001, 44(1): 153-160.
- [5] 吕鑑, 孟凡能, 张树军, 等. 半短程硝化-厌氧氨氧化处理污泥消化液的脱氮研究[J]. *北京工业大学学报*, 2011, 37(11): 1737-1742.
- [6] FUX C, BOEHLER M, HUBER P, 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.
- [7] OKABE S, OSHIKI M, TAKAHASHI Y, et al. N_2O emission from a partial nitrification-anammox process and identification of a key biological process of N_2O emission from anammox granules [J]. *Water Research*, 2011, 45(19): 6461-6470.
- [8] KAMPSCHREUR M J, VAN DER STAR W R L, WIELDERS H A, et al. Dynamics of nitric oxide and nitrous oxide emission during full-scale reject water treatment [J]. *Water Research*, 2008, 42(3): 812-826.
- [9] LAW Y, LANT P, YUAN Z. The effect of pH on N_2O

- production under aerobic conditions in a partial nitrification system [J]. *Water Research*, 2011, 45(18): 5934–5944.
- [10] KONG Qiang, ZHANG Jian, MIAO Mingsheng, et al. Partial nitrification and nitrous oxide emission in an intermittently aerated sequencing batch biofilm reactor [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 217: 435–441.
- [11] KONG Qiang, LIANG Shuang, ZHANG Jian, et al. N_2O emission in a partial nitrification system—dynamic emission characteristics and the ammonium-oxidizing bacteria community [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 127: 400–406.
- [12] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 258–284.
- [13] HE Y W, MIZUOCHI M, KONG H N, et al. NO emission from waste management systems [J]. *Japanese Journal of Water Treatment Biology*, 1996, 35(2): 67–78.
- [14] RUSSELL K H, ROGER K. Production of nitrous oxide by *Nitrosomonas europaea*: effect of acetylene, pH and oxygen [J]. *Canadian Journal of Microbiology*, 1984, 30(11): 1397–1404.
- [15] COLLIVER B B, STEPHENSEN T. Production of nitrogen oxide and dinitrogen oxide by autotrophic nitrifiers [J]. *Biotechnology Advances*, 2000, 18(3): 219–232.
- [16] 耿军军, 王亚宜, 张兆祥, 等. 污水生物脱氮革新工艺中强温室气体 N_2O 的产生及微观机理[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(9): 1729–1738.
- [17] OTTE S, GROBBEN N G, ROBERTSON L A, et al. Nitrous oxide production by *Alcaligenes faecalis* under transient and dynamic aerobic and anaerobic conditions [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, 62(7): 2421–2426.
- [18] 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: 35–39.
- [19] YU R, KAMPSCHREUR M J, VAN LOOSDRECHT M C M, et al. Mechanisms and specific directionality of autotrophic nitrous oxide and nitric oxide generation during transient anoxia [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(4): 1313–1319.
- [20] WICHT H. A model for predicting nitrous oxide production during denitrification in activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 1996, 34(5/6): 99–106.

(编辑 刘彤)