

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第8期

Vol.38 No.8

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

用于滤膜称重的饱和氯化镁溶液恒湿系统搭建与评估	李晓晓, 张强, 邓建国, 蒋靖坤, 郝吉明 (3095)
钢铁工业排放颗粒物中碳组分的特征	张进生, 吴建会, 马威, 冯银厂 (3102)
常州市大气 PM _{2.5} 中 PAHs 污染特征及来源解析	顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 毕承路, 苏亚兰, 叶招莲, 盖鑫磊 (3110)
兰州河谷盆地大气多环芳烃干沉降通量及来源	尉媛丽, 刘攀亮, 于周锁, 高宏, 毛潇萱, 马建民, 黄韬 (3120)
株洲市大气降尘中元素特征及来源分析	王世豪, 张凯, 柴发合, 钟学才, 周广柱, 杨晴, 柯馨妹 (3130)
传统北京烤鸭烤制过程中大气污染物的排放特征	徐敏, 何万清, 聂磊, 韩力慧, 潘涛, 石爱军 (3139)
基于车载测试的重型柴油车尾气典型烷烃排放特征	史纯珍, 郝雪薇, 申现宝, 曹鑫悦, 张伟, 吴辉, 姚志良 (3146)
基于 wavelet-SVM 的 PM ₁₀ 浓度时序数据预测	王平, 张红, 秦作栋, 姚清晨, 耿红 (3153)
广州港船舶停泊工况排放因子实测及排放量初步估算	黄学良, 张洲, 杨威强, 李晟, 朱明, 方华, 何俊杰, 陈俊文, 万承浩, 张艳利, 刘国光, 黄祖照, 王宇骏, 王新明 (3162)
沙尘天气对生物气溶胶中总微生物浓度及粒径分布的影响	李鸿涛, 祁建华, 董立杰, 高冬梅 (3169)
典型生活垃圾处理设施恶臭排放特征及污染评价	芦会杰 (3178)
杭州地区城区降雪中全氟化合物的污染特征	张明, 唐访良, 俞雅雲, 徐建芬, 陈金汉, 余波, 周嫻, 张伟 (3185)
黄浦江流域典型污水中不同粒径胶体的三维荧光光谱特征	聂明华, 晏彩霞, 杨毅, 周俊良, 刘敏 (3192)
漓江地表水体有机碳来源	赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军 (3200)
夏季热分层效应对典型岩溶水库水化学及溶解无机碳的影响	吴飞红, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶, 李丽, 黄思宇 (3209)
城市不同功能区地表水重金属污染特性比较: 以宁波为例	徐美娟, 童桂华, 孙丹, 李建新, 虞效益 (3218)
地下水主要组分水化学异常识别方法对比: 以柳江盆地为例	张小文, 何江涛, 彭聪, 张昌延, 倪泽华 (3225)
人为扰动背景下城郊溪流底质磷的生物-非生物吸收潜力分析	李如忠, 叶舟, 高苏蒂, 郑悦 (3235)
长江口低氧区沉积物中磷的形态及其环境意义	刘军, 臧家业, 冉祥滨, 赵晨英, 刘季花, 王小静 (3243)
三峡库区小流域不同土地利用类型“土壤-水体”氮磷含量特征及其相互关系	陈成龙, 高明, 木志坚, 倪九派, 祁乐 (3254)
黄土高原降雨驱动下流域碳输移特征及其碳流失评估: 以羊圈沟坝系流域为例	鄂馨卉, 汪亚峰, 高扬, 陈利顶, 陈世博, 陈维梁 (3264)
新型溴代苯酚类消毒副产物的氯化降解机制	李欢, 李正魁, 李爱民, 周庆, 王莹, 潘咏 (3273)
藻形态及混凝剂组成对混凝-超滤过程的影响	张大为, 徐慧, 王希, 门彬, 王东升, 段晋明 (3281)
汝溪河浮游硅藻功能群特征及其与环境因子相关性分析	向蓉, 李巧玉, 喻焱, 张洪波, 董聪聪, 施军琼, 吴忠兴 (3290)
石岩水库叶绿素 a 时空分布及其影响因子分析	宋云龙, 张金松, 郭小雅, 朱佳, 王丽, 陶益, 张丽 (3302)
不同湿地模型中根系微生物的多样性	王林, 李冰, 余家辉, 朱加宾, 朱健 (3312)
北海湖微生物群落结构随季节变化特征	张雅洁, 李珂, 朱浩然, 张洪勋 (3319)
基于高通量测序的流化床生物滤器细菌群落结构分析	张海耿, 宋红桥, 顾川川, 单建军, 张宇雷, 倪琦 (3330)
高效反硝化菌和包埋填料性能及微生物群落分析	孟婷, 杨宏 (3339)
基于城市污水资源化的微藻筛选与污水预处理	韩松芳, 金文标, 涂仁杰, 陈洪一 (3347)
生物膜贴壁培养小球藻净化猪粪沼液废水的效果	王愿珠, 程鹏飞, 刘德富, 刘天中 (3354)
微气泡臭氧催化氧化-生化耦合工艺深度处理煤化工废水	刘春, 周洪政, 张静, 陈晓轩, 张磊, 郭延凯 (3362)
pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响	于德爽, 周同, 李津, 王晓霞, 吴国栋, 王尧静 (3369)
酒精废水部分亚硝化-厌氧氨氧化脱氮的可行性	周正, 林兴, 王凡, 顾澄伟, 沈婧, 袁砚, 金润 (3377)
模拟废水中钼的微生物回收及其对亚甲基蓝的催化特性	康乃馨, 朱能武, 郭雯颖, 何志心 (3385)
采用颜色空间表征 ANAMMOX 启动与冲击过程	王利君, 李志华, 韩冬, 张天宇, 杨成建 (3393)
CSTR 和 MBR 反应器的短程硝化快速启动	张婷, 吴鹏, 沈耀良, 闫刚, 徐乐中, Samwine Thomas (3399)
硫酸盐还原氨氧化体系中基质转化途径	完颜德卿, 黄勇, 毕贞, 刘忻, 姚鹏程, 张文静 (3406)
不同 TOC/NH ₄ ⁺ -N 对厌氧氨氧化脱氮效能的影响	王凡, 刘凯, 林兴, 周正, 李祥, 黄勇 (3415)
盐度对 EGSB 反应器的运行及厌氧颗粒污泥的影响	谭潇, 黄靛, 杨平, 涂奔州 (3422)
CANON 颗粒污泥工艺的启动与负荷提高策略	孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (3429)
胞外聚合物对活性污泥吸附去除全氟辛酸磺酸 (PFOS) 的影响	刘鑫彤, 尹华, 彭辉, 李浩榕, 杨萍萍, 曹雅娟 (3435)
不同施肥方式下紫色土 N ₂ O 与 NO _x 的排放特征	胡磊, 刘韵, 朱波 (3442)
地膜覆盖对蔬菜地甲烷排放的影响	张凯莉, 郝庆菊, 冯迪, 石将来, 石孝均, 江长胜 (3451)
模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响	张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 王军涛, 杨中领, 韩红艳, 张丽梅, 万师强, 贺正 (3463)
长期施肥酸性旱地土壤硝化活性及自养硝化微生物特征	徐白璐, 钟文辉, 黄欠如, 秦红益, 邓欢, 韩成 (3473)
施加碳酸钙对酸性土壤微生物氮循环的影响	郭安宁, 段桂兰, 赵中秋, 唐仲, 王杨扬, 王伯勋 (3483)
水稻不同生育期根际与非根际土壤胞外酶对施氮的响应	魏亮, 汤珍珠, 祝贞科, 蔡观, 葛体达, 王久荣, 吴金水 (3489)
凋落物呼吸温度敏感性的变化特征及其影响因素	张彦军 (3497)
西北干旱区农田土壤磁性特征及其环境意义	王新, 夏敦胜, 王博, 陈红, 刘浩 (3507)
小麦秸秆驱动菱铁矿热解制备磁性生物质碳及其吸附 Cd ²⁺ 活性	张如玉, 刘海波, 邹雪华, 庆承松, 李梦雪, 陈冬, 陈天虎 (3519)
交通污染暴露对 DNA 甲基化的影响	汪婷, 丁锐, 黄丹妮, 祝子逸, 章军, 叶怀庄, 徐迎春, 金永堂 (3529)
外接菌种对污泥堆肥效能及堆体细菌群落的影响	杨萍萍, 尹华, 彭辉, 唐少宇, 卢妙, 刘皓 (3536)
中国电动自行车动力铅酸蓄电池生命周期评价	刘巍, 田金平, 陈吕军 (3544)
《环境科学》征稿简则 (3280) 《环境科学》征订启事 (3301) 信息 (3353, 3472, 3535)	

pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响

于德爽, 周同, 李津*, 王晓霞, 吴国栋, 王骁静

(青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071)

摘要: 采用 ASBR 反应器, 研究了 pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮效能的影响, 并利用 Andrew 模型和 Ratkowsky 模型模拟 pH 冲击下海洋厌氧氨氧化菌的脱氮过程. 结果表明, 当 pH 在 7~8 时, 反应器的脱氮效果最佳, 氨氮去除负荷 (NRR) 稳定在 $(0.30 \pm 0.04) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 总氮去除率 (TNRE) 在 $(76.73 \pm 5.74)\%$; 当 pH 为 8.5 时, 游离氨 (FA) 的平均浓度为 $14.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 该 FA 浓度对 NRR 的影响较小, NRR 仍维持在 $(0.30 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右, 但是 NO_2^- -N 在 pH 的直接影响下出现了积累, 不能够完全去除, 此条件不利于反应器的稳定运行; 当 pH 为 6.5 和 9 时, FA 浓度分别为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $37.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NRR 分别低至 $(0.10 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(0.15 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 且 TNRE 仅为 $(23.04 \pm 9.88)\%$ 和 $(42.12 \pm 5.52)\%$. 海洋厌氧氨氧化菌在碱性条件下的耐受性强于酸性条件. 采用修正的 Andrew 模型进行拟合, 得到了 NRR 与 FA 之间的相互关系, 同时还可以得到 $\text{NRR}_{\max}$ 、 k_s 和 k_1 等参数, 对于表征海洋厌氧氨氧化菌的脱氮过程具有实际意义.

关键词: 海洋厌氧氨氧化菌; pH 冲击; 含海水废水; 生物脱氮; 动力学

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)08-3369-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201702023

Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater

YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin*, WANG Xiao-xia, WU Guo-dong, WANG Xiao-jing

(School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: The effect of pH shock on nitrogen removal performance of marine anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (MAAOB) treating saline wastewater was studied by employing an ASBR reactor. Dynamic characteristics of the MAAOB were simulated by the Andrew model and Ratkowsky model. The results indicated that the reactor had the best nitrogen removal efficiency when the pH value was 7-8. The nitrogen removal rate (NRR) was $(0.30 \pm 0.04) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, and the total nitrogen removal efficiency (TNRE) was $(76.73 \pm 5.74)\%$. When the pH value was 8.5, FA had a mean concentration of $14.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and little effect on nitrogen removal. The NRR was $(0.30 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. However, NO_2^- -N accumulated and it was not completely removed. When the pH values were 6.5 and 9, the concentrations of FA were $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $37.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, the NRRs were (0.10 ± 0.02) and $(0.15 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, and the TNREs were $(23.04 \pm 9.88)\%$ and $(42.12 \pm 5.52)\%$. The tolerance of the MAAOB in alkaline condition was stronger than that in acidic condition. The Andrew model was modified to determine the relationship between NRR and FA. Other parameters such as $\text{NRR}_{\max}$, k_s , and k_1 were also achieved simultaneously. These are key to describing the nitrogen removal process of MAAOB.

Key words: marine anaerobic ammonium-oxidizing bacteria (MAAOB); pH shock; saline wastewater; biological nitrogen removal; kinetics

厌氧氨氧化工艺是迄今为止最有前景的脱氮过程之一^[1]. 近年来, 海洋环境中的厌氧氨氧化菌备受瞩目. 它们的发现对研究海洋生态学和海洋氮元素生物地球化学循环有着重要的意义. 国内外研究者陆续在海洋沉积物中发现厌氧氨氧化反应, 并在自然界的氮循环发挥着重要的作用^[2~4]. 此外, 较高的盐度对常规脱氮微生物的生理活性非常不利, 从而限制了其脱氮效能的发挥. 海洋厌氧氨氧化菌来自于海洋环境中, 能够耐受较高的盐度. 因此, 在高盐度废水的脱氮处理方面有着良好的应用前

景^[5~8].

然而, 制约海洋厌氧氨氧化菌稳定运行的因素有很多, 有机物、重金属、温度、pH 冲击、氟化物、硫化物、磷酸盐等都会影响其脱氮效能. pH 能够直接影响微生物的生长以及酶的活性. pH 冲击可

收稿日期: 2017-02-07; 修订日期: 2017-03-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278258, 51478229); 山东省自然科学基金项目 (BS2015HZ007); 山东省高等学校科技计划项目 (J15LC61)

作者简介: 于德爽 (1964~), 男, 教授, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: qdydsh@163.com

* 通信作者, E-mail: ljjin0532@126.com

能会影响有毒物质游离氨 (FA) 和游离亚硝酸 (FNA) 的浓度, 从而影响海洋厌氧氨氧化活性. 有研究者报道, 在厌氧氨氧化脱氮稳定运行的状态下, pH 可以高达 8.5~9.3^[9] 或者 9.3~9.5^[10], 甚至在 pH 为 6.5 时也可以保持稳定^[11]. 然而 Fux 等^[12] 的研究结果认为, 利用流化床反应器, 当 pH 为 9.3 时, 厌氧氨氧化菌的活性被完全抑制. 这些研究结果的不同都与反应器内污泥结构、微生物种群、进水特点以及实验的运行条件有关. 一直以来, FA 和 FNA 被认为是引起抑制作用的主要因素^[13~15], 然而近几年来有报道称, 当 FA 的浓度低于 17 mg·L⁻¹ 时, 其并不是主要的抑制因素^[14,16]. 除了影响因素外, 动力学模型作为调控脱氮工艺过程的重要工具, 利用其探讨海洋厌氧氨氧化脱氮特性可以给予重要的帮助.

鉴于当前 pH 冲击对海洋厌氧氨氧化的影响作用尚不清楚, 并且适用于海洋厌氧氨氧化反应器的动力学模型更是鲜有报道, 本实验主要分析讨论了 pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的脱氮过程, 并利用动力学模型分析了 pH 冲击条件下, 海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水脱氮特性. 本研究对于了解海洋厌氧氨氧化菌的脱氮过程具有重要的帮助, 并为海洋厌氧氨氧化脱氮工艺提供可靠的理论依据.

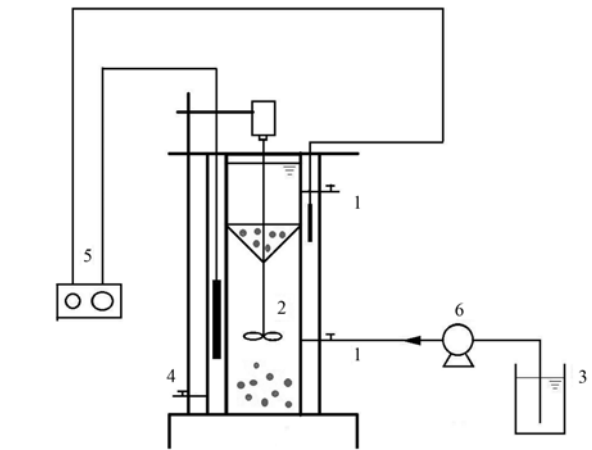
1 材料与方法

1.1 实验装置

本研究采用 ASBR 反应器 (如图 1), 其有效容积为 7 L, 系有机玻璃制成. 反应器内的温度通过温控箱控制在 25℃, 整个反应器用锡纸包裹, 防止光对海洋厌氧氨氧化菌活性的影响. 反应区内悬挂无纺滤布作为海洋厌氧氨氧化菌的生物膜载体, 且置有电动搅拌器, 反应器内污泥主要以红色颗粒为主. 实验采用人工配制的模拟废水, 经高纯氮气吹脱 15 min, 消除溶解氧的影响, 再从反应器下部进水口通过流动泵进水. 运行一个周期包括进水 4 min, 反应 6 h, 静置 25 min, 出水 4 min.

1.2 实验用水

实验所海水取自胶州湾 (黄海北部), 平均盐度为 32‰, 经人工配制成模拟废水, 其主要成分为: 29 mg·L⁻¹ KH₂PO₄, 136 mg·L⁻¹ CaCl₂, 1 200 mg·L⁻¹ KHCO₃, 300 mg·L⁻¹ MgSO₄·7H₂O. 同时投加微生物所需的微量元素, 微量元素 I: EDTA 5 000 mg·L⁻¹, FeSO₄·7H₂O 5 000 mg·L⁻¹, 微量元素 II:



1. 取样口及进/出水口; 2. 搅拌; 3. 储水箱;

4. 水浴进/出水口; 5. 水浴恒温控制器; 6. 进水蠕动泵

图 1 海洋厌氧氨氧化反应器

Fig. 1 Schematic diagram of the marine ANAMMOX reactor

EDTA 15 000 mg·L⁻¹, H₃BO₃ 11 mg·L⁻¹, MnCl₂·4H₂O 990 mg·L⁻¹, CuSO₄·5H₂O 250 mg·L⁻¹, ZnSO₄·7H₂O 430 mg·L⁻¹, NiCl₂·6H₂O 190 mg·L⁻¹, Na₂MoO₄·2H₂O 220 mg·L⁻¹, CoCl₂·6H₂O 240 mg·L⁻¹, NaSeO₄·10H₂O 210 mg·L⁻¹. NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 分别用 NH₄Cl 和 NaNO₂ 提供, 进水 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 的浓度设定为 80 mg·L⁻¹ 和 105.6 mg·L⁻¹.

1.3 分析方法

NH₄⁺-N: 纳氏试剂比色法^[17]; NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺光度法^[17]; NO₃⁻-N: 麝香草酚分光光度法^[17]; pH 值: WTW pH/Oxi 340i; 温度: 水银温度计; 紫外/可见光分光光度计: UV-5200. 总氮容积负荷 (NLR) 根据进水氨氮浓度与 HRT 关系得到, 氨氮去除负荷 (NRR) 根据进、出水氨氮浓度与 HRT 关系得到, 氨氮去除率 (NRE) 根据进、出水氨氮浓度的关系得到, 游离氨 (FA) 根据文献^[13], 即 pH 值与进、出水氨氮浓度的关系得到. 即:

$$NRR = \frac{(c_{\text{inf}} - c_{\text{eff}}) \times 24}{1000 \cdot \text{HRT}} \quad (1)$$

$$NLR = \frac{c_{\text{inf}} \times 24}{1000 \cdot \text{HRT}} \quad (2)$$

$$NRE = \frac{c_{\text{inf}} - c_{\text{eff}}}{c_{\text{inf}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$FA = \frac{17}{14} \times \frac{TNA \times 10^{\text{pH}}}{\exp[6334/(273 + T)] + 10^{\text{pH}}} \quad (4)$$

$$FNA = \frac{47}{14} \times \frac{TNN}{[\exp[-2300/(273 + T)] + 10^{\text{pH}}] + 1} \quad (5)$$

式中, c_{inf} 为进水氨氮浓度 (mg·L⁻¹), c_{eff} 为出水氨氮

浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), HRT 为水力停留时间 ($\text{HRT} = 6 \text{ h}$, 采样间隔 $t = 0.5 \text{ h}$), FA 为游离氨浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), TAN 为总氨浓度 ($\text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NH}_3 - \text{N}$), FNA 为游离亚硝酸 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), TNN 为总亚硝态氮 ($\text{NO}_2^- - \text{N} + \text{HNO}_2^- - \text{N}$).

实验过程中各阶段安排如表 1 所示.

表 1 反应器 ASBR 的运行策略

Table 1 Operational strategy of the ASBR reactor

反应阶段	天数/d	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$ / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	pH
P1	1 ~ 14	80	105.6	6.5
P2	15 ~ 28	80	105.6	7
P3	29 ~ 42	80	105.6	7.5
P4	43 ~ 56	80	105.6	8
P5	57 ~ 70	80	105.6	8.5
P6	71 ~ 84	80	105.6	9

1.4 动力学模型

有研究者利用 Andrew 模型模拟 H^+ 对 H_2 产生速率的影响^[18,19], 另外也可以模拟 H^+ 对基质降解速率、产氢细菌的生长以及生成一些可溶性代谢产物的影响^[20]. 而为了使数据更直观, 通常在模型中用 pH 表示更为方便, Ratkowsky 模型能够很好地描述 pH 与 NRR 的关系.

Andrew 模型^[20]:

$$\text{NRR} = \frac{\text{NRR}_{\max} [\text{H}^+]}{k_a + [\text{H}^+] + [\text{H}^+]^2/k_b} \quad (6)$$

Ratkowsky 模型^[20]:

$$\text{NRR} = [A(\text{pH} - \text{pH}_{\min})]^2 \times \{1 - \exp[B(\text{pH} - \text{pH}_{\max})]\}^2 \quad (7)$$

式中, NRR 为氨氮去除负荷 [$\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$], $\text{NRR}_{\max}$ 为最大氨氮去除负荷 [$\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$], $[\text{H}^+]$ 为氢离子浓度, k_a 和 k_b 为 Andrew 常数, A 和 B 为 Ratkowsky 常数, $\text{pH}_{\min}$ 和 $\text{pH}_{\max}$ 分别为反应器下限和上限的 pH 值.

2 结果与讨论

2.1 pH 冲击对海洋厌氧氨氧化脱氮效能的影响

实验结果如图 2 所示. 由图 2(a) 可以看出, 反应器在 pH 为 7 ~ 8.5 的范围内, 可以维持较高的脱氮效率, 然而 pH 为 6.5 和 9 时, NRE 分别为 30.37%、45.46%. 在 P1 阶段, 当 pH 值为 6.5 时, 进水 FA、FNA 的平均浓度分别为 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $0.208 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的平均浓度分别为 $56.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $77.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NRR 的平均值仅为 $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的生成量相对较

小, 此时处于较低 FA 的浓度下, 海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的脱氮效能受到的抑制作用可能是低 pH 环境下, FNA 的浓度较高引起的. 当 pH 低于 7.1 时, FNA 在厌氧氨氧化反应器内起到主要的抑制作用^[21], 较低的 NRR 可能就是较高浓度的 FNA 影响所致. 随着 pH 值提高至 7 和 7.5 时, 即在 P2 和 P3 阶段, 进水 FA 由 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高至 $1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FNA 下降至 $0.078 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.025 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度明显下降, 两者均能都完全被去除, NRR 分别为 $(0.27 \pm 0.03) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $(0.33 \pm 0.02) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 且 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的生成量同步增加, 尤其在 pH 为 7.5 时, NRE 始终保持在 98.82% 以上. 在 P4 阶段, 进水 pH 值提高到 8 时, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度出现轻微变化, 平均出水浓度分别为 $6.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而 NRR 几乎没有变化, 其平均值为 $0.33 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 说明在此 pH 冲击条件下, 反应器仍然具有较高的脱氮能力, 且 pH 在 7 ~ 8 范围内反应器脱氮过程最为稳定. Strous 等^[22]的研究表明, pH 在 6.5 ~ 7.5 的范围下, $\Delta \text{NH}_4^+ - \text{N} : \Delta \text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta \text{NO}_3^- - \text{N} = 1 : 1.32 : 0.26$. 在本实验中 pH 为 6.5 时 [图 2(d)], $\Delta \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\Delta \text{NO}_2^- - \text{N}$ 的平均比值为 1.11, $\Delta \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\Delta \text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均比值为 0.22, 而 pH 在 7 ~ 7.5 之间时, $\Delta \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\Delta \text{NO}_2^- - \text{N}$ 的平均比值分别为 1.31 和 1.27, $\Delta \text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 $\Delta \text{NO}_3^- - \text{N}$ 的平均比值分别为 0.19 和 0.21, 比较接近理论值, 反应器内厌氧氨氧化反应为主导反应. 这些偏差可能是由于反应器内的污泥结构、微生物种群和实验运行条件的不同导致.

当反应器进入 P5 阶段时, 进水 FA 平均浓度为 $14.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时, NRR 的平均值仍为 $0.30 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, NRE 的平均值为 99.27%. 虽然 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 可基本全部去除, 但是 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的出水浓度进一步增加, 出现了积累的现象, 这可能是由于在弱碱性条件下, 厌氧氨氧化反应过程中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在还原酶的作用下需要消耗 H^+ , 反应器受到的抑制作用主要是 pH 本身对海洋厌氧氨氧化菌的影响, 而不是 FA 的影响, 从而使 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不能够完全去除. He 等^[23]的研究结果也出现类似情况, 其结果显示当 FA 浓度在 $13 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右便开始出现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不能够完全去除的现象. 随着 pH 进一步提高为 9 时, 进水 FA 的平均浓度提高至 $37.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度增加到 (43.76 ± 9.53)

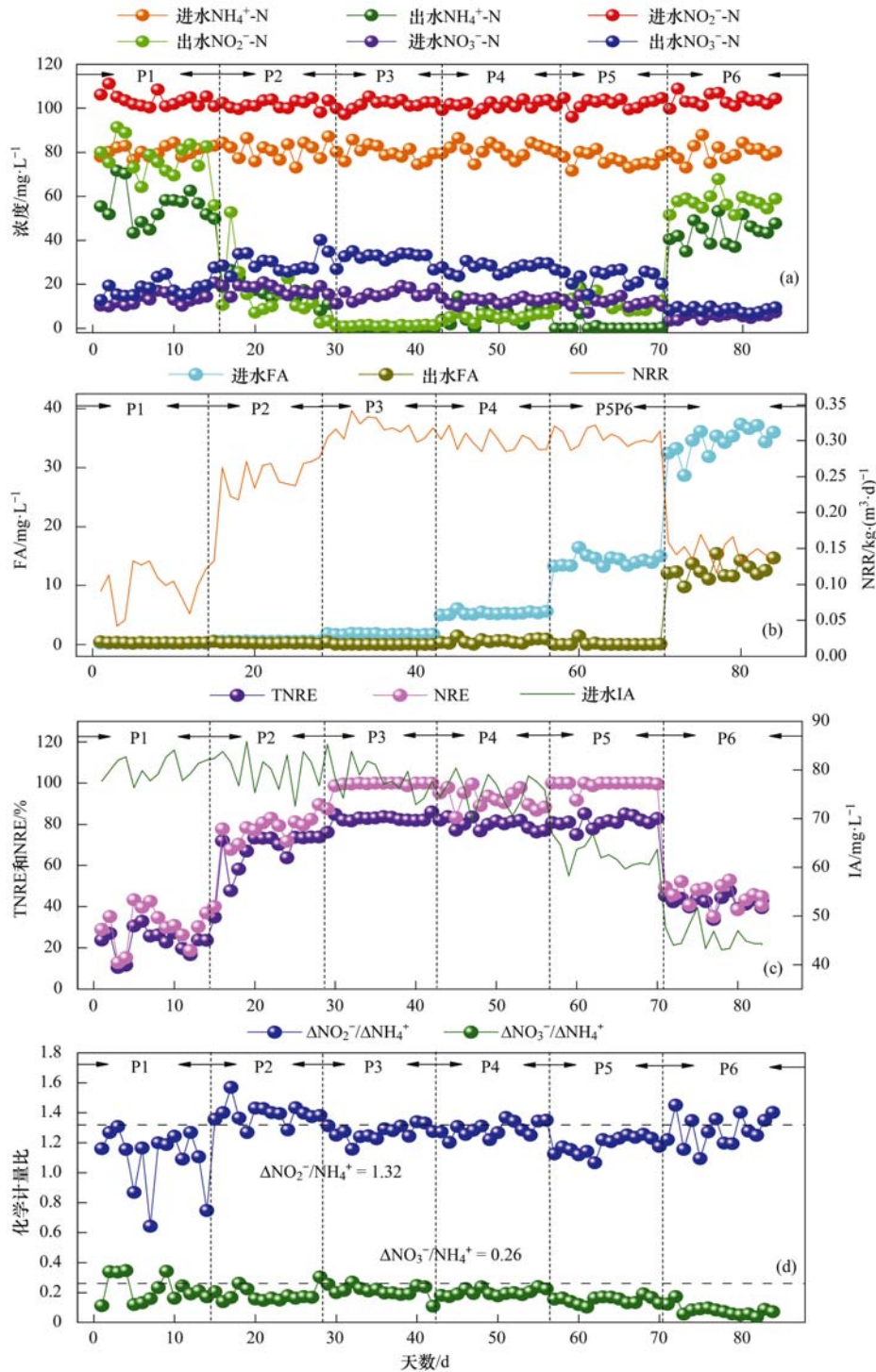


图2 pH冲击条件下反应器内脱氮指标的变化

Fig. 2 Changes in nitrogen removal index of the reactor at different pH values

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $(57.40 \pm 2.52) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_3^- -N 的生成量同步减小, NRR 的平均值下降至 $0.15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 此时反应器开始恶化. 由此可知, 海洋厌氧氨氧化菌的耐碱性强于耐酸性. pH 在 8 ~ 8.5 范围内, ΔNH_4^+ -N 与 ΔNO_2^- -N 的比值为 1.24 ± 0.10 , ΔNH_4^+ -N 与 ΔNO_3^- -N 的比值为 0.18 ± 0.05 , 这与理论值比较接近, 但是 pH 为 9 时, ΔNH_4^+ -N 与

ΔNO_2^- -N 的比值为 1.28 ± 0.19 , ΔNH_4^+ -N 与 ΔNO_3^- -N 的比值仅为 0.08 ± 0.04 . 高浓度的 FA 对反应器内海洋厌氧氨氧化菌的脱氮效能造成了较大的影响.

综上所述, 为了使反应器稳定运行, pH 值应该控制在 7 ~ 8 之间. 这与杨洋等^[24]的研究结果略有不同, 其认为反应器最适 pH 为 7.5 ~ 8.3. 一直以来在对比 NH_4^+ -N 与 FA 的抑制作用时, 大多认为 FA

在厌氧氨氧化过程中是主要的抑制因素. 而在本实验中, FA 浓度较低的情况下, FNA 的浓度达到 $0.208 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应器的脱氮效能较差, 较高的 FNA 浓度是抑制反应器脱氮效能的主要原因. 在反应器能够承受 FA 浓度的范围内, 随着 FA 浓度的增加, 反应器的脱氮效能也有所提高, 这是由于 pH 值逐渐被控制在海洋厌氧氨氧化菌适宜的条件下, 反应器的脱氮效能也随之增加, 当 FA 浓度进一步提高, 反应器的脱氮效能出现微小的降低, pH 为 8.5 时, NO_2^- -N 出现的不完全去除现象可能是 FA 产生了一部分的影响, 但此时 NRR 仍然较高, pH 仍然是主要的影响因素, 当 pH 为 9 时, 反应器恶化的直接原因可能是 pH 和 FA 的双重抑制作用导致.

2.2 pH 冲击条件下周期内海洋厌氧氨氧化反应器的脱氮过程

在 pH 冲击条件下分析反应器内海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的脱氮过程, 被显著抑制的 pH 范围是小于 6.5 和大于 9 时, 说明弱酸或强碱条件下均不适合海洋厌氧氨氧化菌的生长及其新陈代谢, 且海洋厌氧氨氧化菌耐碱性强于耐酸性. 当 pH 在 8.5 时, 反应器内 NO_2^- -N 出现剩余, NO_2^- -N 的积累现象也不利于反应器的稳定运行, 而 pH 在 7~8 的范围内时, 反应器可以较为稳定地运行, 并具有较好

的脱氮能力. 如图 3 所示, 反应器在单个周期内 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 以及 pH 的变化. 从图 3 (a) ~ 3 (c) 可以看出, pH 在 7~8 时, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 基本可以全部去除, 而且伴有 NO_3^- -N 同步增加, 图 3(d) 所显示的 pH 变化量在 0.3~0.5 之间, 此范围内 pH 冲击对海洋厌氧氨氧化菌的脱氮效能影响较小. 然而在 pH 为 6.5 时, NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 的去除速率明显减小, NH_4^+ -N 的去除速率为 $(0.03 \pm 0.03) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, NO_2^- -N 的去除速率仅为 $(0.02 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$. 在 pH 为 8.5 时, NH_4^+ -N 能够在 6 h 内完全去除, 而 NO_2^- -N 的剩余作为抑制剂并不利于反应器的脱氮过程, 因此, 长期处于此条件下, NO_2^- -N 积累所产生的毒性作用可能会抑制海洋厌氧氨氧化菌的脱氮效能. 除此之外, 在 pH 为 9 的时候, 海洋厌氧氨氧化菌也同样表现出较低的脱氮能力, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的去除速率分别为 $(0.05 \pm 0.05) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $(0.05 \pm 0.04) \text{ mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{h})^{-1}$, 而且从图 3(d) 可以看出, 周期内 pH 值逐渐减小, 这可能是由于在强碱条件下, 反应器内厌氧氨氧化反应减弱, 而 NH_4^+ 更倾向于 FA 的动态平衡, 使 FA 的浓度升高, 影响反应器内脱氮过程中 pH 逐渐增加的正常规律. 另外, 于德爽等^[25]研究发现, 在 pH 冲击条件下, 脱氮过程中 NRR 与 pH 变化量 (ΔpH)

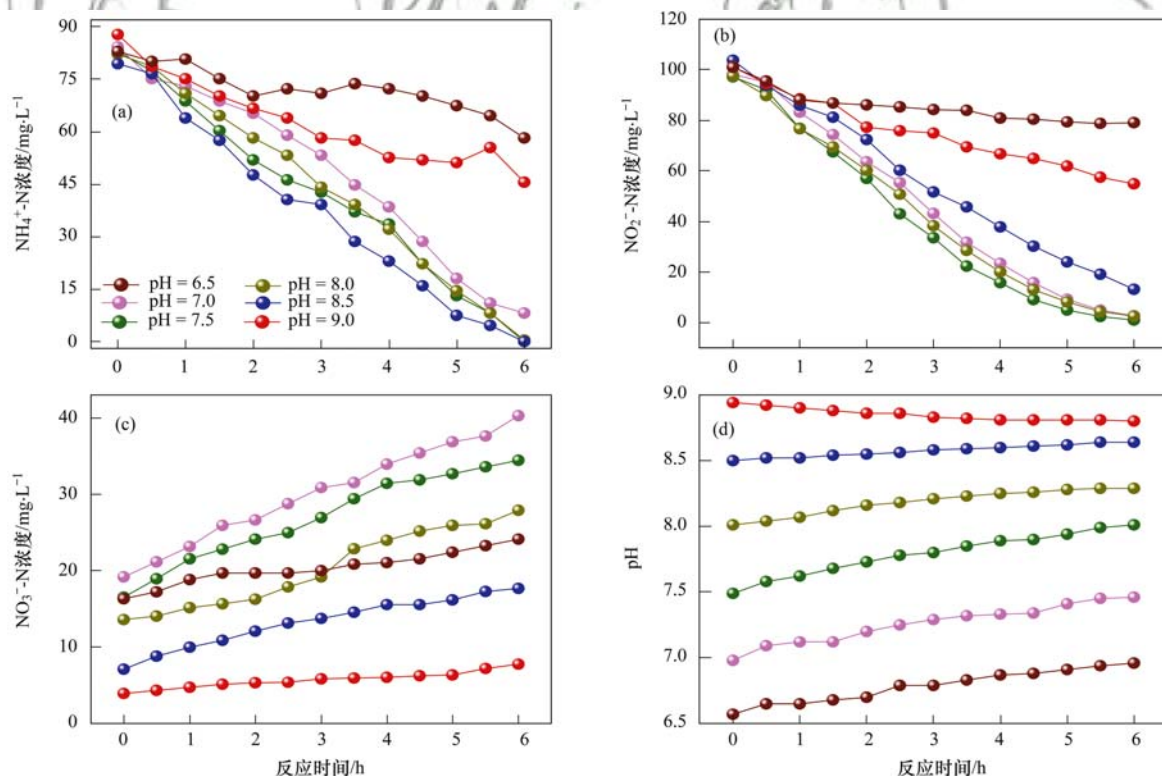


图 3 pH 冲击条件下反应器周期内脱氮指标的变化

Fig. 3 Changes in the nitrogen removal index of the reactor during the period at different pH values

和流量(Q)的乘积存在较好的线性关系,而在本研究的实验结果中三者也存在较好的线性关系,为 $y = 0.301x - 0.638$,如图4所示. 为了描述反应器最佳脱氮效能时的脱氮特性,当 pH 为 8 时,可能是由于在弱碱性条件下,反应器内一部分 NH_4^+ 利用 OH^- 使 FA 浓度进一步增加,导致 ΔpH 较小,因此选取 pH 为 7~7.5 脱氮过程的 NRR 与 ΔpH ,由此看出,为了使反应器稳定运行,应合理控制出水 pH 在最适范围内.

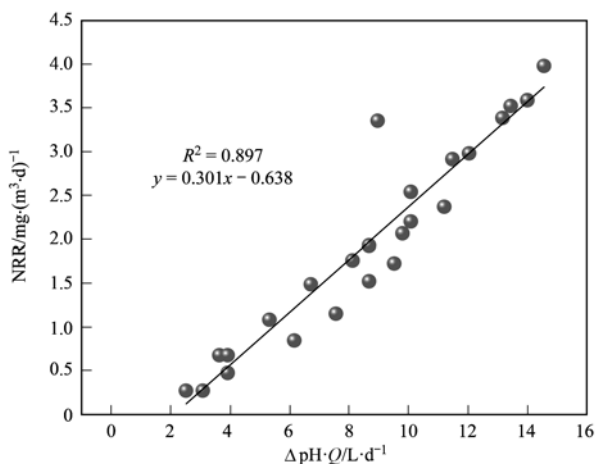


图4 NRR 与 $\Delta\text{pH} \cdot Q$ 的线性关系

Fig. 4 Linear relationship between NRR and $\Delta\text{pH} \cdot Q$

Puyol 等^[26]的研究表明,在弱碱条件下,抑制厌氧氨氧化过程的主要因素是 pH 值的变化,并不是 FA 的浓度. 有报道称,在厌氧氨氧化体与核糖细胞质中存在参予合成细胞 ATP 的质子^[27]. 在反应器中, pH 为 6.5 或者 pH 为 9 时都可能会影响质子的转化以及海洋厌氧氨氧化菌的新陈代谢过程. 另外,长期处于强酸或强碱的环境下也可能破坏联氨水解酶、 NO_2^- 还原酶等其他参与反应的酶变性,甚至失活. NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 是通过载体蛋白进入到细胞质中,当反应器处于酸性或者碱性的条件下时,由于载体蛋白的作用被抑制使 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 进入细胞质的过程受到影响,而 FA 和 FNA 进入细胞质内改变了细胞环境内的 pH 值^[28]. 当 pH 在 8.5 时, NO_2^- -N 的积累也不利于反应器的长期运行. 李亚峰等^[29]的研究表明, pH 在 7.5~8.5 的条件下,淡水厌氧氨氧化菌反应器的脱氮效果最佳. 本实验与其研究结果相当, pH 在 7~8 时能够维持反应器稳定的脱氮效能,只是 pH 在 8.5 时,虽然 NH_4^+ -N 基本可以去除,但是 NO_2^- -N 出现不完全去除的现象,这可以把其看成是反应器开始出现不稳定的临界 pH 值,因此在对海洋厌氧氨氧化反应器的运行条件进行优

化时,可以将进水 pH 控制在 7~8,以免对海洋厌氧氨氧化菌造成一定的抑制作用,不利于反应器的稳定性运行,同时 FA 和 FNA 的浓度分别低于 $5.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.078 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

2.3 pH 冲击条件下海洋厌氧氨氧化反应器脱氮的动力学特性

本实验采用 Andrew 模型和 Ratkowsky 模型分析 pH 冲击条件下,海洋厌氧氨氧化反应器处理含海水污水的脱氮动力学特性,如图5所示. 图5(a)利用 Andrew 模型描述 H^+ 浓度对 NRR 的影响,为了表示得更方便,图5(b)利用 Ratkowsky 模型来描述 pH 与 NRR 之间的关系,这两个模型都具有较高的相关系数 R^2 ,分别为 0.906 和 0.901. 由图5(b)可知,反应器下限和上限的 pH 值分别为 5.80 和 9.83,即 pH 小于 5.80 和大于 9.83 时反应器内的海洋厌氧氨氧化菌均会失去活性. 同时,利用 Andrew 模型拟合得到的参数 $\text{NRR}_{\max}$ 为 $0.452 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,如图5(a)所示,这与实验结果得到的 $\text{NRR}_{\max}$ 为 0.348 相比存在较小的误差. 根据 Andrew 模型所得到 NRR 的预测公式与实际测量的值相比,在 pH 冲击条件下其相对误差分别为 (0.123 ± 0.035) 、 (0.260 ± 0.017) 、 (0.317 ± 0.037) 、 (0.366 ± 0.067) 、 (0.305 ± 0.014) 和 $(0.159 \pm 0.014) \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,由于 Andrew 模型得到的参数并不具有实际意义,因此在本研究进行了适当的修改,将原来的 H^+ 浓度替换成 FA 浓度 (S_{FA}),以此来分析 FA 浓度与 NRR 之间的关系. 即:

$$\text{NRR} = \frac{\text{NRR}_{\max} S_{\text{FA}}}{k_s + S_{\text{FA}} + S_{\text{FA}}^2 / k_i} \quad (8)$$

式中, k_s 、 k_i 分别表示半饱和常数和抑制常数.

修改后, Andrew 模型能够很好地拟合 FA 对海洋厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响过程,如图5(c)所示,得到的参数 $\text{NRR}_{\max}$ 为 0.507 以及半饱和常数 k_s 为 0.575,这与实验结果所得到的 $1/2 \text{ NRR}_{\max}$ 所对应的 FA 浓度 0.562 相差较小,并且通过实验结果得到的 $\text{NRR}_{\max}$ 与拟合得到的参数 $\text{NRR}_{\max}$ 相比,海洋厌氧氨氧化反应器的脱氮效能可能仍具有一定的提升空间,同时得到抑制常数 k_i 为 18.004,而实验中当 FA 浓度为 $15.108 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时出现 NO_2^- -N 不能够完全去除的现象,说明 FA 在此浓度下对海洋厌氧氨氧化反应器开始产生一定的影响,这与实验结果也比较相符,由此可以看出,利用 Andrew 模型以 FA 浓度替换比较适合拟合海洋厌氧

氨氧化反应器的脱氮效能,得到的参数也更具有实际意义. 因此,适当调整 Andrew 模型,用其拟合海洋厌氧氨氧化反应器的脱氮特性,得到的公式及参数能够很好地表示 FA 与 NRR 之间的关系.

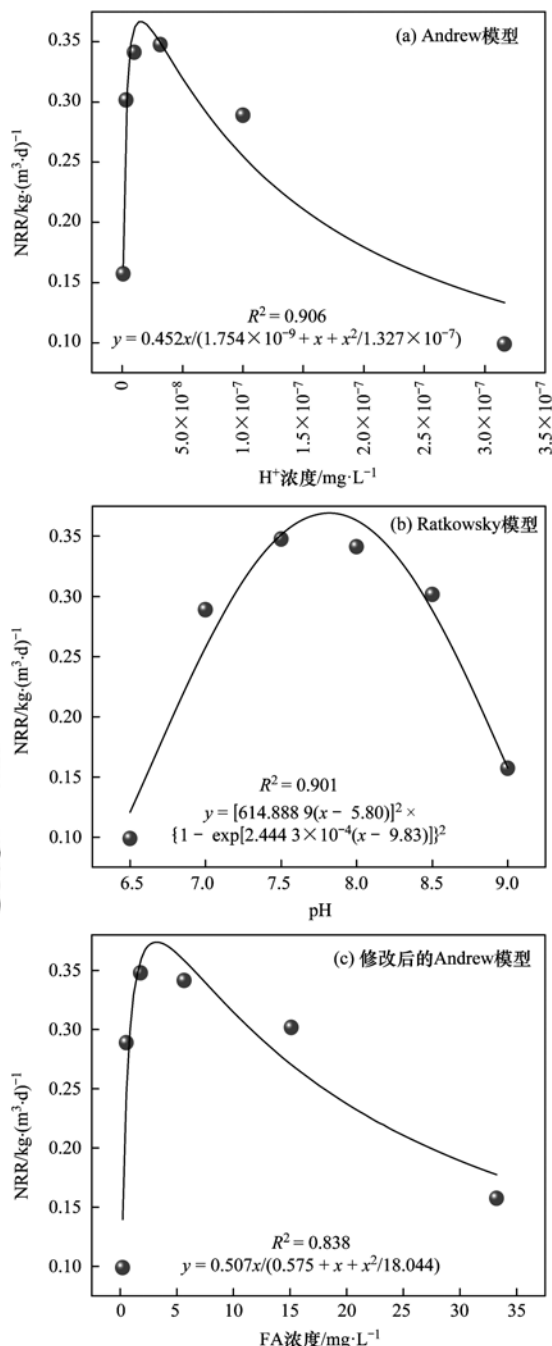


图5 Andrew模型和Ratkowsky模型的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of the Andrew pH model and Ratkowsky model

3 结论

(1) 当 pH 为 6.5 时, NRR 的平均值仅为 $0.10 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 较高的 FNA 的浓度是影响海洋厌氧氨氧化脱氮能力的主要原因; 当 pH 在 7~8 时, 海洋厌氧氨氧化反应器的脱氮效能最佳, NRR 稳定在

$0.32 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右; 当 pH 为 8.5 时, 由于 pH 的直接影响, 导致 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 不能够完全去除, 此条件下不利于反应器的稳定运行; 当 pH 继续提高至 9 时, 较高的 FA 浓度和 pH 的双重抑制作用是影响海洋厌氧氨氧化菌脱氮能力的主要原因, 并且海洋厌氧氨氧化的耐碱性强于耐酸性.

(2) 周期内 NRR 与 ΔpH 和 Q 的乘积存在良好的线性关系, $y = 0.301x - 0.638$, 应合理控制出水 pH 的最适范围, 同时反应器应控制在 7~8 之间, 且 FA 和 FNA 的浓度分别低于 $5.34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.078 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) 利用 Andrew 模型和 Ratkowsky 模型拟合海洋厌氧氨氧化反应器的脱氮过程, 推荐使用 Andrew 模型将本身的 H^+ 浓度替换成 FA 浓度再进行拟合, 得到能够表征 NRR 与 FA 浓度之间关系的预测公式, 同时得到的参数值更具有实际意义.

参考文献:

- [1] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(4): 320-326.
- [2] Shehzad A, Liu J W, Yu M, *et al.* Diversity, community composition and abundance of Anammox bacteria in sediments of the north marginal seas of China [J]. *Microbes and Environments*, 2016, **31**(2): 111-120.
- [3] Li M, Hong Y G, Cao H L, *et al.* Community structures and distribution of anaerobic ammonium oxidizing and *nirS*-encoding nitrite-reducing bacteria in surface sediments of the South China Sea [J]. *Microbial Ecology*, 2013, **66**(2): 281-296.
- [4] Marchant H K, Mohr W, Kuypers M M M. Recent advances in marine N-cycle studies using ^{15}N labeling methods [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2016, **41**: 53-59.
- [5] Kartal B, Koleva M, Arsov R, *et al.* Adaptation of a freshwater anammox population to high salinity wastewater [J]. *Journal of Biotechnology*, 2007, **126**(4): 546-553.
- [6] Yang J C, Zhang L, Hira D, *et al.* Anammox treatment of high-salinity wastewater at ambient temperature [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **102**(3): 2367-2372.
- [7] Chen Y P, Ma T F, Hu X, *et al.* Start-up of a combined anaerobic/partial nitrification/anammox process for high-salt mustard wastewater treatment [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2015, **175**(1): 119-134.
- [8] Wei Q Y, Kawagoshi Y, Huang X W, *et al.* Nitrogen removal properties in a continuous marine anammox bacteria reactor under rapid and extensive salinity changes [J]. *Chemosphere*, 2016, **148**: 444-451.
- [9] Tang C J, Zheng P, Hu B L, *et al.* Influence of substrates on nitrogen removal performance and microbiology of anaerobic ammonium oxidation by operating two UASB reactors fed with different substrate levels [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181**(1-3): 19-26.
- [10] Ahn Y H, Hwang I S, Min K S. ANAMMOX and partial denitrification in anaerobic nitrogen removal from piggery waste [J]. *Water Science Technology*, 2004, **49**(5-6): 145-153.

- [11] Jaroszynski L W, Cicek N, Sparling R, *et al.* Importance of the operating pH in maintaining the stability of anoxic ammonium oxidation (anammox) activity in moving bed biofilm reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(14): 7051-7056.
- [12] Fux C, Marchesi V, Brunner I, *et al.* Anaerobic ammonium oxidation of ammonium-rich waste streams in fixed-bed reactors[J]. *Water Science & Technology*, 2004, **49**(11-12): 77-82.
- [13] He S L, Niu Q G, Ma H Y, *et al.* The treatment performance and the bacteria preservation of Anammox: a review[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, **226**: 163.
- [14] Fernández I, Dosta J, Fajardo C, *et al.* Short-and long-term effects of ammonium and nitrite on the Anammox process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **95**(S): S170-S174.
- [15] Jaroszynski L W, Cicek N, Sparling R, *et al.* Impact of free ammonia on Anammox rates (anoxic ammonium oxidation) in a moving bed biofilm reactor[J]. *Chemosphere*, 2012, **88**(2): 188-195.
- [16] Wang G, Xu X C, Gong Z, *et al.* Study of simultaneous partial nitrification, ANAMMOX and denitrification (SNAD) process in an intermittent aeration membrane bioreactor [J]. *Process Biochemistry*, 2016, **51**(5): 632-641.
- [17] 国家环境保护总局. 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.
- [18] Wang J L, Wan W. Application of desirability function based on neural network for optimizing biohydrogen production process [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, **34**(3): 1253-1259.
- [19] Chen C C, Lin C Y, Lin M C. Acid-base enrichment enhances anaerobic hydrogen production process[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, **58**(2): 224-228.
- [20] Wang J L, Wan W. Kinetic models for fermentative hydrogen production: a review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, **34**(8): 3313-3323.
- [21] Puyol D, Carvajal-Arroyo J M, Sierra-Alvarez R, *et al.* Nitrite (not free nitrous acid) is the main inhibitor of the anammox process at common pH conditions[J]. *Biotechnology Letters*, 2014, **36**(3): 547-551.
- [22] 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]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [23] He S L, Zhang Y L, Niu Q G, *et al.* Operation stability and recovery performance in an Anammox EGSB reactor after pH shock[J]. *Ecological Engineering*, 2016, **90**: 50-56.
- [24] 杨洋, 左剑恶, 沈平, 等. 温度、pH值和有机物对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(4): 691-695.
- Yang Y, Zuo J E, Shen P, *et al.* Influence of temperature, pH value and organic substance on activity of ANAMMOX sludge [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(4): 691-695.
- [25] 于德爽, 李伟刚, 李津. ASBR反应器厌氧氨氧化脱氮 I: 工艺特性与控制策略[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2176-2183.
- Yu D S, Li W G, Li J. Nitrogen removal in the Anammox sequencing batch reactor I: performance and control strategies [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(12): 2176-2183.
- [26] Puyol D, Carvajal-Arroyo J M, Li G B, *et al.* High pH (and not free ammonia) is responsible for Anammox inhibition in mildly alkaline solutions with excess of ammonium[J]. *Biotechnology Letters*, 2014, **36**(10): 1981-1986.
- [27] van der Star W R, Dijkema C, de Waard P, *et al.* An intracellular pH gradient in the Anammox bacterium *Kuenenia stuttgartiensis* as evaluated by ^{31}P NMR [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, **86**(1): 311-317.
- [28] Sprott G D, Patel G B. Ammonia toxicity in pure cultures of methanogenic bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 1986, **7**(2-3): 358-363.
- [29] 李亚峰, 马晨曦, 张弛. UASBB厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(8): 3044-3051.
- Li Y F, Ma C X, Zhang C. Influencing factors of sludge liquor treatment in UASBB[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(8): 3044-3051.

CONTENTS

Evaluation and Development of a Weighing Chamber by Using Saturated MgCl_2 Solution	LI Xiao-xiao, ZHANG Qiang, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (3095)
Characteristics Research on Carbonaceous Component of Particulate Matter Emitted from Iron and Steel Industry	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, MA Xian, <i>et al.</i> (3102)
Pollution Characteristics and Source Identification of PAHs in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Changzhou City	GU Ai-jun, LIU Jia-shu, LUO Shi-peng, <i>et al.</i> (3110)
Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lanzhou Valley, Northwest China	JU Yuan-li, LIU Pan-liang, YU Zhou-suo, <i>et al.</i> (3120)
Characteristics and Sources of Elements in Atmospheric Dust Fall in Zhuzhou City, Central China	WANG Shi-hao, ZHANG Kai, CHAI Fa-he, <i>et al.</i> (3130)
Atmospheric Pollutant Emission Characteristics from the Cooking Process of Traditional Beijing Roast Duck	XU Min, HE Wan-qing, NIE Lei, <i>et al.</i> (3139)
Exhaust Emission Characteristics of Typical Alkanes from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on a Portable Emission Measurement System	SHI Chun-zhen, HAO Xue-wei, SHEN Xian-bao, <i>et al.</i> (3146)
PM_{10} Concentration Forecasting Model Based on Wavelet-SVM	WANG Ping, ZHANG Hong, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (3153)
Emission Factors and Preliminary Emission Estimates of Air Pollutants from Ships at Berth in the Guangzhou Port	HUANG Xue-liang, ZHANG Zhou, YANG Wei-qiang, <i>et al.</i> (3162)
Influence of Dust Events on the Concentration and Size Distribution of Microorganisms in Bioaerosols	LI Hong-tao, Qi Jian-hua, DONG Li-jie, <i>et al.</i> (3169)
Odor Emission Characteristics and Pollution Evaluation from Typical Household Rubbish Disposal Facilities	LU Hui-jie (3178)
Perfluorinated Compounds in Snow from Downtown Hangzhou, China	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (3185)
Fluorescence Characterization of Fractionated Colloids in Wastewaters Received by Huangpu River	NIE Ming-hua, YAN Cai-xia, YANG Yi, <i>et al.</i> (3192)
Sources of Organic Carbon in the Surface Water of Lijiang River	ZHAO Hai-juan, XIAO Qiong, WU Xia, <i>et al.</i> (3200)
Impacts of Thermal Stratification on the Hydrochemistry and Dissolved Inorganic Carbon in a Typical Karst Reservoir in Summer	WU Fei-hong, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (3209)
Comparison of Heavy Metal Contamination Characteristics in Surface Water in Different Functional Areas; A Case Study of Ningbo	XU Mei-juan, TONG Gui-hua, SUN Dan, <i>et al.</i> (3218)
Comparison of Identification Methods of Main Component Hydrochemical Anomalies in Groundwater; A Case Study of Liujiang Basin	ZHANG Xiao-wen, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (3225)
Biotic and Abiotic Uptake of Phosphorus in Benthic Sediments of Suburban Streams Under Intense Human Disturbance Scenario	LI Ru-zhong, YE Zhou, GAO Su-di, <i>et al.</i> (3235)
Sedimentary Phosphorus Speciation in the Coastal Hypoxic Area of Changjiang Estuary and Its Environmental Significance	LIU Jun, ZANG Jia-ye, RAN Xiang-bin, <i>et al.</i> (3243)
Characteristics and the Relationship of Nitrogen and Phosphorus in Soil and Water of Different Land Use Types of a Small Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3254)
Characteristics of Carbon Transportation Under Rainfall Events and Associated Carbon Loss Evaluation in Loess Plateau, China; A Case Study of Yangjuangou Dam Watershed	E Xin-hui, WANG Ya-feng, GAO Yang, <i>et al.</i> (3264)
New Bromated Phenolic Disinfection Byproducts: Mechanism of Their Decomposition During Chlorination	LI Huan, LI Zheng-kui, LI Ai-min, <i>et al.</i> (3273)
Effects of Algal Morphology and Al Species Distribution on the Coagulation-Ultrafiltration Process	ZHANG Da-wei, XU Hui, WANG Xi, <i>et al.</i> (3281)
Functional Group Characteristics of Planktonic Diatoms and Their Relationship with Environmental Factors in the Ruxi River	XIANG Rong, LI Qiao-yu, YU Yi, <i>et al.</i> (3290)
Spatiotemporal Variations of Chlorophyll <i>a</i> and Its Relationship to Environmental Factors in Shiyan Reservoir	SONG Yun-long, ZHANG Jin-song, Guo Xiao-ya, <i>et al.</i> (3302)
Rhizosphere Microbial Diversity in Different Wetland Microcosms	WANG Lin, LI Bing, YU Jia-hui, <i>et al.</i> (3312)
Community Structure of Microorganisms and Its Seasonal Variation in Beihai Lake	ZHANG Ya-jie, LI Ke, ZHU Hao-ran, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Diversity in a Fluidized-Sand Biofilter Based on High-Throughput Sequencing Technology	ZHANG Hai-geng, SONG Hong-qiao, GU Chuan-chuan, <i>et al.</i> (3330)
Analysis of High-efficiency Denitrifying Bacteria and Embedding Filler Performance and Microflora	MENG Ting, YANG Hong (3339)
Selection of Microalgae for Biofuel Using Municipal Wastewater as a Resource	HAN Song-fang, JIN Wen-biao, TU Ren-jie, <i>et al.</i> (3347)
Purification Effect of Piggery Wastewater with <i>Chlorella pyrenoidosa</i> by Immobilized Biofilm-Attached Culture	WANG Yuan-zhu, CHENG Peng-fei, LIU De-fu, <i>et al.</i> (3354)
Combination of Microbubble Catalytic Ozonation and Biological Process for Advanced Treatment of Biotreated Coal Chemical Wastewater	LIU Chun, ZHOU Hong-zheng, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3362)
Effect of pH Shock on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium-Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	YU De-shuang, ZHOU Tong, LI Jin, <i>et al.</i> (3369)
Removal of Nitrogen from Alcohol Wastewater by PN-ANAMMOX	ZHOU Zheng, LIN Xing, WANG Fan, <i>et al.</i> (3377)
Biorecovery of Palladium from Simulated Wastewaters and Its Catalytic Property for Methylene Blue	KANG Nai-xin, ZHU Neng-wu, GUO Wen-ying, <i>et al.</i> (3385)
Investigation of Initiation and Shock Process of ANAMMOX Based on Color Space	WANG Li-jun, LI Zhi-hua, HAN Dong, <i>et al.</i> (3393)
Fast Start-up of Shortcut Nitrification in a CSTR and an MBR	ZHANG Ting, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3399)
Conversion Pathways of Substrates in Sulfate-Reducing Ammonia Oxidation System	WANYAN De-qing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3406)
Effect of Different TOC to NH_4^+ -N Ratios on Nitrogen Removal Efficiency in the ANAMMOX Process	WANG Fan, LIU Kai, LIN Xing, <i>et al.</i> (3415)
Effects of Salinity on the Operation of EGSB Reactors and the Anaerobic Granular Sludge	TAN Xiao, HUANG Liang, YANG Ping, <i>et al.</i> (3422)
Start-up of Granule CANON Process and the Strategy for Enhancing Total Nitrogen Removal Rate	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> (3429)
Effect of Extracellular Polymeric Substance (EPS) on the Adsorption of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) onto Activated Sludge	LIU Xin-tong, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3435)
Characteristics of N_2O and NO_x Emissions from Purple Soil Under Different Fertilization Regimes	HU Lei, LIU Yun, ZHU Bo (3442)
Effect of Plastic Film Mulching on Methane Emission from a Vegetable Field	ZHANG Kai-li, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (3451)
Responses of Soil Ammonia Oxidizers to Simulated Warming and Increased Precipitation in a Temperate Steppe of Inner Mongolia	ZHANG Cui-jing, SHEN Ju-pei, SUN Yi-fei, <i>et al.</i> (3463)
Nitrification Activity and Autotrophic Nitrifiers in Long-term Fertilized Acidic Upland Soils	XU Bai-lu, ZHONG Wen-hui, HUANG Qian-ru, <i>et al.</i> (3473)
Effects of CaCO_3 Application on Soil Microbial Nitrogen Cycle in an Acid Soil	GUO An-ning, DUAN Gui-lan, ZHAO Zhong-qiu, <i>et al.</i> (3483)
Responses of Extracellular Enzymes to Nitrogen Application in Rice of Various Ages with Rhizosphere and Bulk Soil	WEI Liang, TANG Zhen-zhu, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3489)
Variation in the Temperature Sensitivity of Surface Litter Respiration and Its Influencing Factors	ZHANG Yan-jun (3497)
Magnetic Properties of Farmland Soils in Arid Regions in Northwest China and Their Environmental Implications	WANG Xin, XIA Dun-sheng, WANG Bo, <i>et al.</i> (3507)
Preparation of Magnetic Biomass Carbon by Thermal Decomposition of Siderite Driven by Wheat Straw and Its Adsorption on Cadmium	ZHANG Ru-yu, LIU Hai-bo, ZOU Xue-hua, <i>et al.</i> (3519)
Effects of Traffic-related Air Pollution Exposure on DNA Methylation	WANG Ting, DING Rui, HUANG Dan-ni, <i>et al.</i> (3529)
Effects of Exogenous Microorganism Inoculation on Efficiency and Bacterial Community Structure of Sludge Composting	YANG Ping-ping, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> (3536)
Life Cycle Assessment of Traction Lead-acid Batteries for Electric Bikes in China	LIU Wei, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun (3544)