

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫滩系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响

杨朋兵^{1,2}, 李祥^{1,2}, 黄勇^{1,2*}, 朱亮^{1,2}, 崔剑虹^{1,2}, 徐杉杉^{1,2}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011; 2. 苏州科技学院环境生物技术研究所, 苏州 215011)

摘要: 通过接种厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 污泥, 研究了苯酚浓度对 ANAMMOX 污泥脱氮效能长短期影响。短期结果表明, 随着苯酚浓度的增大, 氮去除率快速下降。当苯酚浓度大于 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率降低到 6% 以下, TN 的去除率只有 10% 左右。长期实验结果表明, 当苯酚浓度小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率都能达到 99% 以上, 说明低浓度苯酚对 ANAMMOX 菌有一个驯化的过程。当苯酚浓度高于 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率只有 23.59%, TN 去除率只有 50.3%, ANAMMOX 污泥抑制明显, 与短期结果相同。此时反硝化菌活性明显高于 ANAMMOX 菌, 说明苯酚可作为有机碳源诱发体系中发生反硝化反应, 最终导致反硝化菌在体系中占据主导地位。但高浓度 ($1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 苯酚对反硝化菌也具有抑制作用。通过拟合得到苯酚对 ANAMMOX 半抑制有效浓度 (IC_{50}) 为 $71.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。经过 18 d 的恢复后, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率基本恢复, 但氮素之间的转化计量式发生了改变, $\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})_{\text{去除}} / \rho(\text{NO}_2^- - \text{N})_{\text{去除}} / \rho(\text{NO}_3^- - \text{N})_{\text{生成}}$ 为 1:0.86:0.2。研究结果表明, 将苯酚控制在合理范围内可以使反应器达到同步脱氮除酚的效果。

关键词: 厌氧氨氧化; 苯酚; 反硝化; 脱氮效能; 影响

中图分类号: X703.5; TQ028.8 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3771-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.10.028

Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge

YANG Peng-bing^{1,2}, LI Xiang^{1,2}, HUANG Yong^{1,2*}, ZHU Liang^{1,2}, CUI Jian-hong^{1,2}, XU Shan-shan^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China;

2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: The effects of phenol concentration on nitrogen removal efficiency in ANAMMOX sludge were studied in short or long term. The nitrogen removal rate decreased rapidly with the increase of concentration of phenol in short-term. When the phenol concentration was above $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the removal rate of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was lower than 6% and the removal rate of TN was only about 10%. The long-term experimental results showed when the phenol concentration was below $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the removal rate of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ can reach 99%, which indicated that ANAMMOX bacteria have a process of adaptation to the low concentration of phenol. However, when the phenol concentration was above $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the removal rate of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN was only 23.59% and 50.3%, the activity in sludge was significantly inhibited which was similarly to the short-term and the activity of denitrifying bacteria was significantly higher than ANAMMOX bacteria. As an organic carbon source, phenol can activated denitrification reaction and finally plays a dominant role in the system. However, the high concentration of phenol ($1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) also has an inhibitory effect on denitrification bacteria. Half inhibitory concentration (IC_{50}) of phenol to ANAMMOX activity was $71.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ by fitting. After 18 days' recovery, the stoichiometric ratios of nitrogen were changed, although the $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was basically removed. The ratio of removed $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, removed $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and produced $\text{NO}_3^- - \text{N}$ was 1:0.86:0.2. Our results showed that the concentration of phenol should be controlled within a reasonable range, so that the reactor can achieve simultaneous removal of phenol and nitrogen.

Key words: ANAMMOX; phenol; denitrification; nitrogen removal efficiency; effect

ANAMMOX 是近年来兴起的具有较好经济效能和较高脱氮效能的生物脱氮工艺, 与传统的脱氮工艺相比具有需氧量低、运行费用低和不需外加碳源等优点, 从产生至今受到了国内外研究者的广泛关注^[1~3], 其在垃圾渗滤液^[4,5]、蚀刻液废水^[6]、猪场废水^[7,8]、城镇污水^[9]、污泥消化液上清液^[10]等高氨氮废水中得到了广泛研究。

炼油、炼焦、石油化工等行业生产废水是一类低 C/N 比、高氨氮的工业废水, 用传统工艺处理成本较高且很难达标, 而用 ANAMMOX 工艺就能够很

好地解决这类问题。但苯酚作为一种常见的有机物是该类废水中不可避免的成分, 会对微生物产生抑制作用^[11~13], 若要用厌氧氨氧化工艺处理该类废水, 需要研究苯酚对 ANAMMOX 菌的影响。目前虽

收稿日期: 2015-04-13; 修订日期: 2015-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51408387, 51478284); 江苏省研究生创新基金项目 (CX14_1289); 江苏省环境科学与工程重点专业 (类) 项目; 江苏省特色优势学科二期立项项目; 苏州科技学院基金项目 (SKCX14_028)

作者简介: 杨朋兵 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: 769854378@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: yhuang@mail.usts.edu.cn

然有研究者在小试的条件下将 ANAMMOX 工艺应用于焦化废水等含苯酚废水处理^[14,15],但关于苯酚对 ANAMMOX 菌的影响的相关报道较少。

本文研究了不同浓度的苯酚对 ANAMMOX 污泥脱氮效能及污泥形态的影响并对其影响过程进行初步探究,以期 ANAMMOX 工艺应用于高氨氮含酚废水提供一些借鉴。

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

实验运行装置采用 100 mL 和 250 mL 规格的血清瓶,螺旋盖密封。装置运行条件:血清瓶放在恒温气浴振荡箱中,温度为 33℃ 恒定;转速为 125 r·min⁻¹;进水 pH 值为 7.8 ~ 8.2,通过 0.25 mol·L⁻¹的 HCl 调节控制;进出水方式为全进全出。反应前用高纯氮气对装置曝气 30 min,将水中的溶解氧除去。

1.2 接种污泥来源与实验废水

接种的污泥是实验室稳定运行 4 a 的具有较高活性的 ANAMMOX 颗粒污泥,颜色为红色,MLVSS/MLSS 为 0.42。

实验废水采用模拟废水,主要成分为 NH₄Cl (NH₄⁺-N 100 mg·L⁻¹)、NaNO₂ (NO₂⁻-N 130 mg·L⁻¹)、NaHCO₃ 2 000 mg·L⁻¹、KH₂PO₄ 27 mg·L⁻¹、CaCl₂·2H₂O 136 mg·L⁻¹、MgSO₄·7H₂O 200 mg·L⁻¹。微量元素浓缩液 I 成分为:EDTA 5 000 mg·L⁻¹,FeSO₄ 5 000 mg·L⁻¹;微量元素浓缩液 II 成分为:EDTA 5 000 mg·L⁻¹,ZnSO₄·7H₂O 430 mg·L⁻¹,CoCl₂·6H₂O 240 mg·L⁻¹,MnCl₂·4H₂O 990 mg·L⁻¹,NaMoO₄·2H₂O 220 mg·L⁻¹,NiCl₂·6H₂O 190 mg·L⁻¹,NaSeO₄·10H₂O 210 mg·L⁻¹,H₃BO₄ 14 mg·L⁻¹。其中微量元素 I 投加量为 1 mL·L⁻¹,微量元素 II 投加量为 1.25 mL·L⁻¹。苯酚储备液浓度为 50 g·L⁻¹。

1.3 实验方法

1.3.1 短期内苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响

为使接种污泥的脱氮性能相近,提高实验准确度,将含水的 ANAMMOX 污泥进行泥水分离,然后将分离后的颗粒污泥等分为 18 份,每份约 2 g,分别置于 18 个 100 mL 的血清瓶中。32℃ 恒温气浴振荡器连续培养 15 h 之后,根据脱氮效能将 18 个瓶子由高到低排列,采用取平均数法,将脱氮效能最好的

4 个和最差的 4 个去掉,选用中间去除效果接近的 10 个(去除率差值不大于 5%),以进一步保证污泥得到等分。

对剩余的 10 个血清瓶进行序号标记并加入不同浓度的苯酚溶液,使其浓度分别为 0、100、200、300、400、500、600、700、800 和 1 000 mg·L⁻¹。经过 15 h 培养反应后,测定进、出水 pH、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 和苯酚值,评估苯酚浓度对 ANAMMOX 污泥脱氮性能的影响。以上实验重复 2 次。

1.3.2 长期内苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响

采用相同的方法选取性状相似的污泥约 2 g 装于 250 mL 的血清瓶中进行长期影响实验。初始运行周期设定为 1 d,等脱氮效能稳定后逐步提高进水苯酚浓度,直至出现脱氮效能明显下降,当 ANAMMOX 污泥脱氮效能处于稳定抑制状态后,停止投加苯酚,研究其恢复情况来判断抑制的可逆性。

1.4 分析方法

方法均参照文献[16]。NH₄⁺-N:纳氏试剂分光光度法;NO₂⁻-N:N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法;NO₃⁻-N:紫外分光光度法;pH:哈纳 pH211 型酸度计;苯酚:4-氨基安替比林直接光度法;MLSS 和 MLVSS:重量法;TN:实验环境为无机环境,因此以 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 三者之和表示 TN。

2 结果与讨论

2.1 短期内苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响

保持进水 NH₄⁺-N 浓度 100 mg·L⁻¹、NO₂⁻-N 浓度 130 mg·L⁻¹ 左右,经过 15 h 反应后,结果如图 1 所示,随着水中苯酚浓度的增加,出水 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 浓度出现明显的变化。不加苯酚的作为对照,其出水 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 浓度分别为 22.67 mg·L⁻¹、62.60 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N 的去除率为 78.1%,TN 去除率为 56.7%。当进水苯酚浓度为 100 mg·L⁻¹ 时出水 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 浓度分别为 65.7 mg·L⁻¹、93.11 mg·L⁻¹,NH₄⁺-N 的去除率为 34.3%,TN 的去除率为 24.8%,ANAMMOX 污泥活性受到抑制。随着苯酚浓度增加其抑制更加明显,当苯酚浓度大于 600 mg·L⁻¹ 时,ANAMMOX 污泥活性受到严重抑制,出水 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 浓度分别在 90 mg·L⁻¹、118 mg·L⁻¹ 左右,NH₄⁺-N、TN 的去除率分别只有 6%、10% 左右。但此时 TN 去除率高于 NH₄⁺-N 去除率,说

明体系中 TN 的损失不仅仅由 ANAMMOX 反应引起的,还存在其他途径,而从图 1 中可知体系中苯酚有降解,因此推测 TN 的损失与苯酚的降解有关,体系中可能存在着某种降解苯酚的微生物。

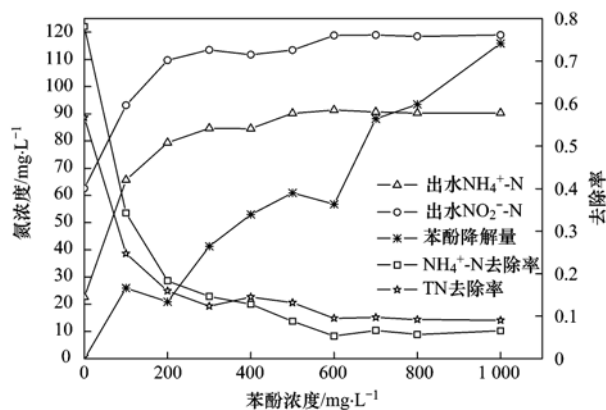


图1 短期内厌氧氨氧化污泥脱氮效能随苯酚浓度的变化

Fig. 1 Variation of nitrogen removal efficiency on ANAMMOX with phenol concentration in short-time

李祥等^[17]在做 Cu 离子对 ANAMMOX 的影响时把过程分为 3 个阶段: 活性刺激阶段、稳定阶段和抑制阶段。而本实验在做苯酚对 ANAMMOX 污泥活性影响时,随着苯酚的加入, NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 的去除率一直呈现下降趋势,并没有出现活性刺激阶段和稳定阶段,只有 1 个阶段,即抑制阶段。分析原因可能是因为部分微量重金属是微生物维持生命活动所需的营养物质,也是酶的活化剂,少量加入时可以促进微生物生长^[18]。彭厦等^[19]在研究铁离子对 ANAMMOX 反应器脱氮效能影响时表明,当进水铁离子浓度由 $0.04 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高到 $0.06 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N 的去除率明显升高,并达到相对稳定状态;当进水铁离子浓度提升为 $0.08 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N 的去除率进一步提高。而铁离子也正是 ANAMMOX 反应所需的微量元素之一。但本实验中所加的苯酚在工业上常用作抑菌剂,主要通过使微生物细胞内的原生质蛋白发生凝固或变性而起到杀菌作用,通常 0.2% 苯酚即有抑菌作用,苯酚浓度大于 1% 时能杀死一般细菌。本实验所加苯酚浓度为 $100 \sim 1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (含量在 0.01% ~ 0.1% 之间),加入后不会立即杀死微生物,所以可以长期观察苯酚对微生物的影响。郁丹等^[20]研究表明,在厌氧反应中加入 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 苯酚时就对反应产生了影响,当反应器中的苯酚浓度大于 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,苯酚已经对厌氧颗粒污泥表现出一定的毒性。本实验中当进水苯酚含量为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,

NH_4^+ -N 和 TN 的去除率均低于未加苯酚的 50%,表明苯酚在短期内对 ANAMMOX 菌的活性产生了严重的抑制;而当苯酚浓度大于 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, ANAMMOX 菌处于完全抑制状态。Yang 等^[21]在研究苯酚和 Cu 离子联合对 ANAMMOX 污泥活性影响时表明,两者联合的毒性主要依赖于苯酚浓度,当苯酚浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,污泥活性保留百分比只有 48.7%,此时抑制率已经超过一半。综上,苯酚对厌氧污泥存在毒性,本实验在研究苯酚对 ANAMMOX 污泥活性短期影响时只存在抑制阶段。

2.2 长期内苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响

长期实验苯酚浓度采用从低浓度开始逐渐增加的方式进行,保持进水 NH_4^+ -N 浓度 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 NO_2^- -N 浓度 $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右不变,结果如图 2 所示。反应运行初期(0 ~ 28 d),当进水苯酚浓度由 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 逐步升高到 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, ANAMMOX 污泥对 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 的去除率起初有所下降,但运行稳定后又逐渐提高,基本保持在 99% 以上, NO_3^- -N 生成量呈现稳定趋势。这与短期结果不同,说明低浓度苯酚对 ANAMMOX 菌有一个驯化的过程,当反应周期延长, ANAMMOX 污泥逐渐适应了苯酚的环境,其抑制被减弱。以后苯酚浓度以 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为一个梯度,每提升一个梯度, NH_4^+ -N、TN 的去除率都会出现先下降后上升的趋势。但随着梯度的增加,抑制更加明显,稳定后的 NH_4^+ -N 最终去除率都会比上一个阶段低。当苯酚浓度提升至 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, NH_4^+ -N 的最终去除率降低到 10% 以下, TN 的去除率也只有 27% 左右,此时 ANAMMOX 污泥受到了严重的抑制。然而, NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 的变化趋势与 NH_4^+ -N 不太一样,虽然也是先下降后升高,但当苯酚浓度大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,反应稳定后出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 均为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 的其去除率达到了 100%,生成的 NO_3^- -N 也被完全降解。当苯酚浓度为 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 后期时, NO_2^- -N 的去除率始终保持在 100%,产物中没有检测到 NO_3^- -N。Zhu 等^[22]研究了厌氧反应器中苯酚和硝酸盐的同步去除情况,将苯酚作为唯一电子供体,硝酸盐作为唯一电子受体。研究结果表明,经过 110 d 的驯化后,当进水苯酚和硝酸盐分别为 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $430 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 20.75 h,出水苯酚和硝酸盐的去除率分别为 95.5% 和 96.75%。其结果表明,苯酚可以与硝酸盐发生反硝化反应,导致硝态氮的减少。本实验中出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 减少正是由于苯酚的

加入导致了反应体系内发生了反硝化反应导致的. 当苯酚浓度提高至 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, NO_2^- -N 的去除率再次受到影响, 其去除率降为 46.5%, 出水也可以检测到有 NO_3^- -N 的生成, 说明高浓度苯酚对反硝化反应也会产生影响. 在反应器运行至 95 d 时, 将进出苯酚浓度降为 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 观察 ANAMMOX 污泥

恢复情况. 经过 18 d 的恢复培养, NH_4^+ -N 的去除率逐步回升至 99% 以上, 而 NO_2^- -N 的去除率基本稳定在 64% ~ 65% 之间, 此时 NH_4^+ -N 与 NO_2^- -N 之间的转化关系发生了变化. 长期结果说明高浓度苯酚对 ANAMMOX 菌产生了严重的抑制, 且短期内很难恢复到原来的状态.

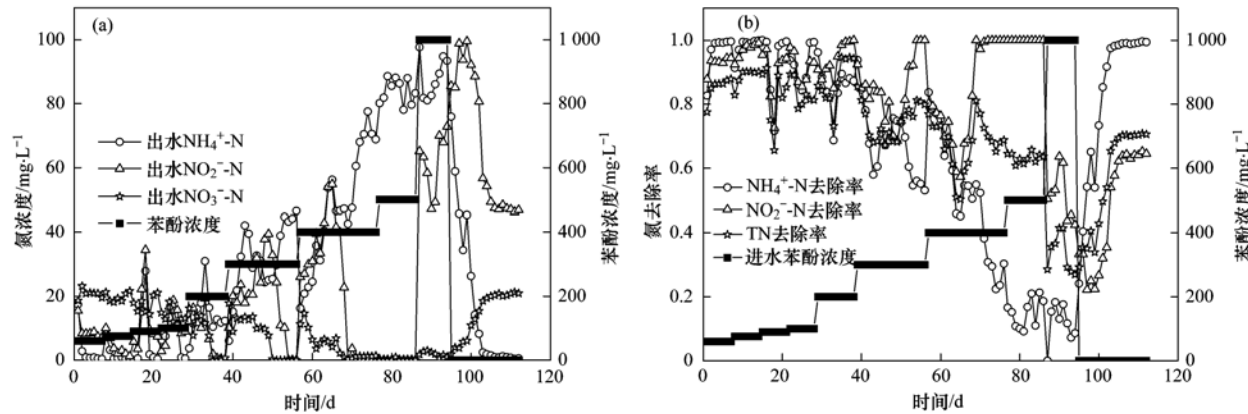


图 2 长期实验苯酚浓度对厌氧氨氧化脱氮效能的影响

Fig. 2 Effect of nitrogen removal efficiency on ANAMMOX with phenol concentration in long-time

2.3 苯酚对厌氧氨氧化污泥形态影响及恢复实验

刚开始接种的 ANAMMOX 污泥, 如图 3 (a) 所示, 颜色呈红色. Strous 等^[23] 研究表明, 氨氧化细菌细胞内含有大量血红素, 当污泥颜色较红时表明 ANAMMOX 污泥活性很好. 随着苯酚的加入, 反应到 46 d 后, 反应器内出现絮状物, 污泥体积和颜色开始发生变化, 红色的污泥表层开始变为黑色絮状, 如图 3 (b) 所示, 此时苯酚对污泥产生了抑制^[14]. 随着苯酚浓度的增加, 黑色絮状向内扩增, 表层的絮状开始脱落, 到第 94 d, 污泥只有核心的一点还呈现颗粒状, 但颜色仍为红色, 说明此时 ANAMMOX 污泥仍然具有活性, 如图 3 (c) 所示. 第 95 d 停止投加苯酚, 改为加常规的营养液, 经过 18 d 的修复后, 污泥表层的黑色絮体逐渐变为红色, 污泥颜色部分恢

复, 如图 3 (d) 所示. 此时 NH_4^+ -N 的去除率得到恢复, 但污泥量减少, 部分微生物死亡, 由于 ANAMMOX 菌时代周期较长 (11 d), 所以短期恢复无法使微生物量快速增加. 整个过程中, 随着 NH_4^+ -N 去除率的变化污泥颜色会发生变化, 因此可以将污泥的颜色作为视觉上评判 ANAMMOX 污泥活性受抑制程度的一个依据. 然而恢复后 $\rho(\text{NO}_2^- \text{-N})_{\text{去除}}/\rho(\text{NH}_4^+ \text{-N})_{\text{去除}}/\rho(\text{NO}_3^- \text{-N})_{\text{生成}}$ 平均值为 1:0.86:0.2, 与氨氧化理论化学计量比为 1:1.32:0.26 有很大差别. 猜测原因可能是当苯酚存在时反硝化细菌和 ANAMMOX 细菌竞争 NO_2^- -N, 从而使 ANAMMOX 细菌在利用较少 NO_2^- -N 时就可以发生反应, 或者有新的微生物如自养细菌生成, 可以直接降解 NH_4^+ -N. 但具体原因需要进一步去研究.

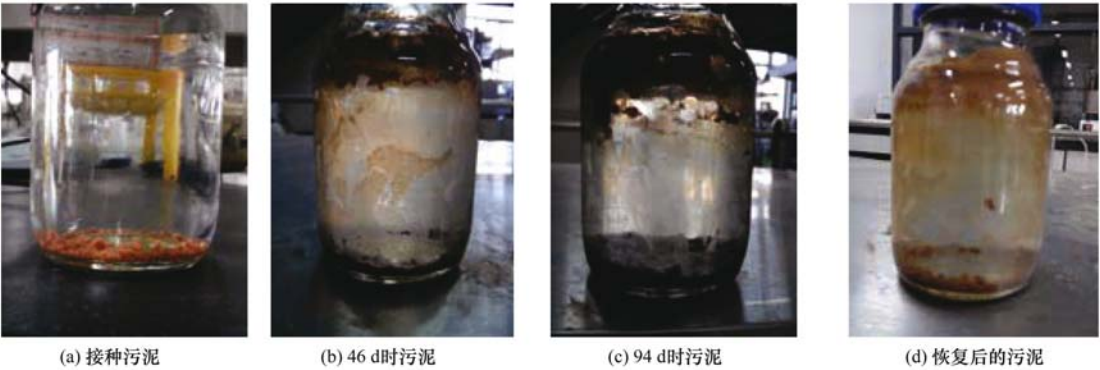


图 3 苯酚浓度对厌氧氨氧化活性污泥形态的影响

Fig. 3 Morphology of ANAMMOX of activated sludge inhibition by phenol

2.4 苯酚作为有机碳源诱发体系内反硝化反应

长期实验结果表明,当苯酚浓度大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,体系中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率在下降,ANAMMOX 菌的能力在减弱,而 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除率不但没有下降反而升高,甚至达 100%,说明反应体系存在着可以降解 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的反应. Toh 等^[24] 在用 ANAMMOX 工艺处理焦化废水的研究中证实了 ANAMMOX 体系中存在反硝化菌,而赖杨岚等^[25] 研究结果进一步表明,ANAMMOX 菌能与反硝化菌共存,反应器可实现 ANAMMOX 与反硝化的协同作用. 因此在 ANAMMOX 体系中加入苯酚有可能发生以苯酚为有机碳源的反硝化反应,猜测 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的过量去除与苯酚有关. 本实验中反应体系中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的减少量与苯酚的降解量如图 4(a) 所示,随着苯酚浓度的增加,体系中苯酚的降解量在增大,而此时 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的去除量也相应增大,说明 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的过量去除确实是由于苯酚导致的,且苯酚作为有机碳源参与了反应,也就是反硝化反应. 当苯酚浓度高于 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,由于体系中基质 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$) 有限,所以苯酚的降解量处于平稳状态,此时反硝化菌的能力也达到稳定.

刘常敬等^[26] 的研究证实了此观点,他们在研究苯酚对 ANAMMOX 工艺耦合反硝化时发现,在 ANAMMOX 体系中加入苯酚可以耦合反硝化反应,当苯酚浓度为 $0.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($18.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时,耦合反硝化效果最好,此时消耗的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与生成的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 之比为 $1:1.52:0.11$,系统中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 都相应减少. 本实验中苯酚对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 三者转化比影响见图 4(b),当进水苯酚浓度低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,反应器内 $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})_{\text{去除}}/\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})_{\text{去除}}$ 平均值为 1.265,低于理论值; $\rho(\text{NO}_3^- - \text{N})_{\text{生成}}/\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})_{\text{去除}}$ 平均值为 0.18,低于理论值,表明此时系统中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化处于被抑制阶段,这与 Yang 等^[21] 研究结果相近. 而当加入苯酚浓度大于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\rho(\text{NO}_2^- - \text{N})_{\text{去除}}/\rho(\text{NH}_4^+ - \text{N})_{\text{去除}}$ 逐步提高至 1.32 并持续升高,最高时达到 14.66,表明系统中出现明显的反硝化反应,其所占比例在逐渐提高.

既然体系中存在反硝化反应,那么系统中 TN 的损失是由 ANAMMOX 反应造成的还是由反硝化反应造成的,或者说由二者共同造成的呢. 如果是二者共同的结果,那二者之间所占比例又如何. 以 ANAMMOX 理论计量比 ($1:1.32:0.26$) 计算

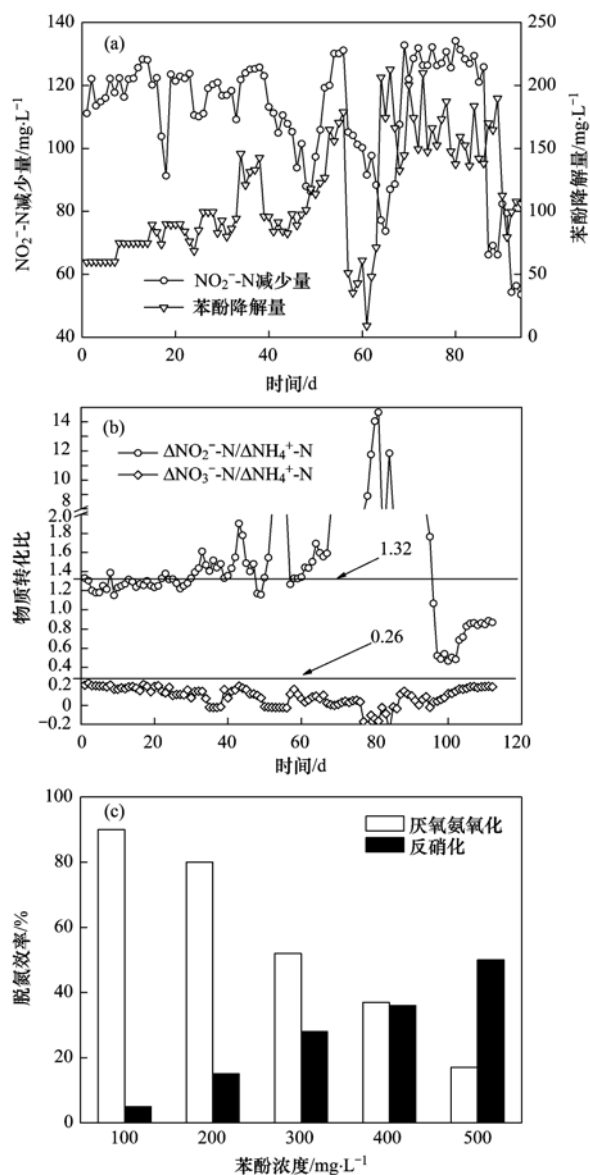


图4 苯酚诱发体系内反硝化反应

Fig. 4 Phenol induced denitrification reaction in the system

ANAMMOX 反应和反硝化反应对体系 TN 去除的贡献如图 4(c) 所示. 计算说明如下.

体系进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 $130 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 反应容积 V 为 250 mL , 进水 TN 为:

$$\text{TN} = (100 + 130) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot 0.25 \text{ L}$$

体系中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除是由 ANAMMOX 反应引起的, 因此以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除量作为 ANAMMOX 菌的去除能力. 而 ANAMMOX 反应每当消耗 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 时, 相应会消耗 1.32 mg $\text{NO}_2^- - \text{N}$, 同时生成 0.26 mg $\text{NO}_3^- - \text{N}$. 用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率计算体系中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除量:

$$\text{NH}_4^+ - \text{N 去除量} = \text{NH}_4^+ - \text{N 去除率} \cdot (100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot$$

0.25 L)

因此,ANAMMOX 反应消耗体系中的 TN 为:

$$\text{TN} = \text{NH}_4^+ - \text{N} \text{ 去除率} \cdot 100 \cdot (1 + 1.32 - 0.26)$$

$$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot 0.25 \text{ L}$$

ANAMMOX 反应对 TN 的贡献(A)则为:

$$A = [\text{NH}_4^+ - \text{N} \text{ 去除率} \cdot 100 \cdot (1 + 1.32 - 0.26)]$$

$$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot 0.25 \text{ L}] \cdot [(100 + 130) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot 0.25 \text{ L}]^{-1}$$

反硝化对 TN 的贡献(B)则为:

$$B = \text{TN 的去除率} - \text{ANAMMOX 的贡献}$$

当苯酚浓度 $\leq 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,ANAMMOX 反应对 TN 去除占 80% 以上,反硝化反应对 TN 去除占比低于 15%,体系内仍以 ANAMMOX 反应为主导,但 ANAMMOX 贡献率在不断降低,反硝化贡献率不断增加;当苯酚浓度达到 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,二者比例达到对等,分别为 37% 和 36%,此时反硝化细菌开始与氨氧化细菌形成竞争局面. 随后反硝化反应在体系中所占比例超过了 ANAMMOX,当苯酚浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 继续升高,但 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 仍为 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且苯酚的降解量处于平稳状态,说明反硝化菌能够利用的基质不足,导致苯酚的降解量维持在稳定阶段,此时反硝化菌能力达到稳定,ANAMMOX 反应和反硝化反应对氮去除分别占 18% 和 45%,此时 ANAMMOX 菌受到了严重的抑制,体系中反硝化细菌适应了苯酚环境,并且已成为优势菌种,TN 的去除基本由反硝化实现,反硝化反应在体系中占据主导地位.

2.5 苯酚对厌氧氨氧化活性污泥的有效半抑制浓度

短期内苯酚对 ANAMMOX 污泥活性影响研究表明,随着苯酚浓度的增加,ANAMMOX 污泥活性受到的抑制程度在逐渐增大并达到稳定,稳定时 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率低于 10%. 由线性拟合计算得出苯酚对 ANAMMOX 活性污泥的有效半抑制浓度 (IC_{50}) 为 $83.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 此值低于了苯酚初始投加量 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,因此实验一开始设置的苯酚浓度范围过于大,计算得出的 IC_{50} 准确性需进行验证. 故缩短苯酚浓度范围,重新做了低范围内苯酚的短期实验. 污泥选取及方法与上一次相同,恒温气浴培养 15 h. 其拟合曲线如图 5 所示,通过线性拟合计算得出 IC_{50} 为 $71.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 因此取 $71.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 作为短期实验的 IC_{50} .

由图 2(b) 可知,当苯酚浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率由 99% 降低至 55%,与 Pereira 等^[27] 长期实验研究结果相近. Yang 等^[28] 利用活性 (以 N/VSS 计) 为 $(12.4 \pm 3.1) \text{ mg} \cdot (\text{g} \cdot \text{h})^{-1}$ 的

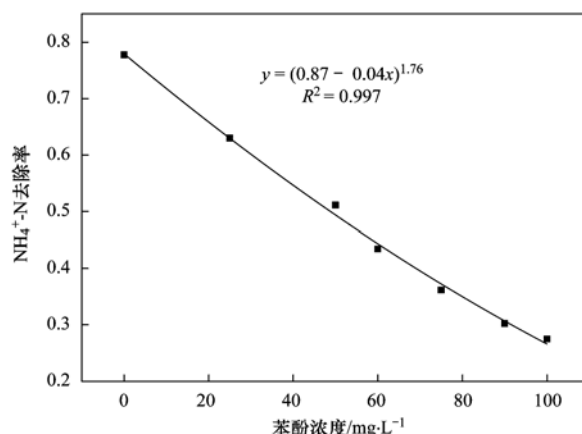


图 5 短期内厌氧氨氧化污泥脱氮效能随低浓度苯酚变化的拟合曲线

Fig. 5 Fitting curve of the changing in nitrogen removal efficiency on ANAMMOX with low phenol concentration in short-time

ANAMMOX 颗粒污泥研究苯酚对污泥活性影响,短期实验得到苯酚的 IC_{50} 为 $678.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 这与本实验的结论有很大出入,分析原因可能有以下 2 点: ①Yang 等的拟合方程采用非竞争性抑制曲线进行拟合,表明该抑制下苯酚不会参与反应,但本实验中苯酚在体系中参与了反应; ②污泥活性不同, Yang 等 ANAMMOX 污泥活性比本课题组高,因此其承受抑制能力较强一些.

常规焦化废水中苯酚含量在 $50 \sim 2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,经过脱酚处理后可低于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[29]. 因此,采用工艺前应先测定一下废水中苯酚含量,若含量低于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时则可直接运用 ANAMMOX 工艺;或者将 ANAMMOX 工艺用在脱酚后的处理工艺. 但对于高浓度含苯酚废水,可将苯酚作为反硝化反应的有机碳源,并与驯化后的厌氧污泥进行厌氧处理工艺联用.

3 结论

(1) 短期结果表明,苯酚对 ANAMMOX 污泥具有抑制作用,随着苯酚浓度的增加,ANAMMOX 脱氮效能逐渐降低. 当苯酚浓度大于 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, TN 去除率下降并稳定在 10% 左右,说明抑制达到稳定状态. 短期实验拟合得到苯酚对 ANAMMOX 半抑制有效浓度 (IC_{50}) 为 $71.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(2) 长期实验表明,低浓度苯酚对 ANAMMOX 体系中微生物对有一个驯化的过程,当加入苯酚浓度小于 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率先下降,反应后都能稳定在 99% 以上. 当苯酚浓度大于 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率明显下降,ANAMMOX

污泥脱氮效能受到了严重抑制。

(3) 苯酚的加入诱发了 ANAMMOX 体系中发生反硝化, 随着苯酚浓度的增加, 反硝化所占相对比例也在增大。但高浓度苯酚 ($1\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 对反硝化细菌同样具有抑制作用。

(4) 苯酚对 ANAMMOX 污泥抑制明显, 导致部分污泥死亡, 经过 18 d 恢复后氮素之间的转化计量式发生改变, $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})_{\text{去除}}/\rho(\text{NO}_2^--\text{N})_{\text{去除}}/\rho(\text{NO}_3^--\text{N})_{\text{生成}}$ 为 1:0.86:0.2。

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 Ecologist*, 1995, **16**(3): 177-183.
- [2] 丁爽, 唐崇俭, 郑平, 等. 厌氧氨氧化工艺脱氮机理和抑制因素的研究进展[J]. *化工进展*, 2010, **29**(9): 1754-1759.
- [3] 赵志宏, 廖德祥, 李小明, 等. 厌氧氨氧化微生物颗粒化及其脱氮性能的研究[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 800-804.
- [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] Nhat P T, Biec H N, Mai N T T, *et al.* Application of a partial nitrification and anammox system for the old landfill leachate treatment [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, **95**: 144-150.
- [6] 李祥, 黄勇, 朱莉, 等. 蚀刻液废水厌氧氨氧化脱氮性能研究[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(12): 2199-2204.
- [7] Park W, Nam Y K, Lee M J, *et al.* Anaerobic ammonia-oxidation coupled with Fe^{3+} reduction by an anaerobic culture from a piggery wastewater acclimated to $\text{NH}_4^+/\text{Fe}^{3+}$ medium[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, **14**(5): 680-685.
- [8] 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.
- [9] Malovany A, Yang J J, Trela J, *et al.* Combination of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor and partial nitrification/anammox moving bed biofilm reactor (MBBR) for municipal wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **180**: 144-153.
- [10] 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.
- [11] 李晓波, 康妮, 王哲. 苯酚对亚硝化反应的影响[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(1): 85-87, 91.
- [12] 路聪聪, 王淑莹, 葛士建, 等. 苯酚对污水生物脱氮系统亚硝积累及污泥性能的影响[J]. *化工学报*, 2013, **64**(7): 2641-2649.
- [13] 刘娜, 胡元森, 王丹, 等. 苯酚对土壤中微生物数量及酶活性的影响[J]. *河南农业大学学报*, 2009, **43**(1): 88-91.
- [14] 林琳, 李玉平, 曹宏斌, 等. 焦化废水厌氧氨氧化生物脱氮的研究[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(9): 1201-1206.
- [15] 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, **26**(5): 56-59.
- [16] 李祥, 张大林, 黄勇, 等. 气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3449-3454.
- [17] 李祥, 黄勇, 刘福鑫, 等. 铜、锌离子对厌氧氨氧化污泥脱氮效能的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 924-929.
- [18] Jefferson B, Burgess J E, Pichon A, *et al.* Nutrient addition to enhance biological treatment of greywater [J]. *Water Research*, 2001, **35**(11): 2702-2710.
- [19] 彭厦, 高大文, 黄晓丽. 金属离子对厌氧氨氧化反应器效能的影响[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(21): 30-33.
- [20] 郁丹, 严群, 赵明星, 等. 苯酚对厌氧颗粒污泥活性的抑制效应和恢复[J]. *化工学报*, 2007, **58**(6): 1559-1563.
- [21] Yang G F, Jin R C. The joint inhibitory effects of phenol, copper (II), oxytetracycline (OTC) and sulfide on Anammox activity [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **126**: 187-192.
- [22] Zhu J H, Lin J P, Zhang B, *et al.* Simultaneous removal of phenol and nitrate in an anaerobic bioreactor [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2006, **132**(9): 1073-1077.
- [23] Strous M, Pelletier E, Mangenot S, *et al.* Deciphering the evolution and metabolism of an anammox bacterium from a community genome[J]. *Nature*, 2006, **440**(7085): 790-794.
- [24] Toh S K, Ashbolt N J. Adaptation of anaerobic ammonium-oxidising consortium to synthetic coke-ovens wastewater [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2002, **59**(2-3): 344-352.
- [25] 赖杨岚, 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化的协同作用特性研究[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(13): 6-9.
- [26] 刘常敬, 李泽兵, 郑照明, 等. 苯酚对厌氧氨氧化工艺耦合反硝化的启动及脱氮性能的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(5): 1145-1151.
- [27] Pereira A D, Leal C D, Dias M F, *et al.* Effect of phenol on the nitrogen removal performance and microbial community structure and composition of an anammox reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **166**: 103-111.
- [28] Yang G F, Guo X L, Chen S X, *et al.* The evolution of Anammox performance and granular sludge characteristics under the stress of phenol [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **137**: 332-339.
- [29] 张能一, 唐秀华, 邹平, 等. 我国焦化废水的水质特点及其处理方法[J]. *净水技术*, 2005, **24**(2): 42-47.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
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	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	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
出 版	科学出版社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印刷装订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科学出版社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行