

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

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

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000 ~ 2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升钼压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

氨氮对 AOB 抑制的形态及规律

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

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 苏州科技学院环境生物技术研究所, 苏州 215009)

摘要: 采用亚硝化生物膜反应器通过大量的批式实验, 研究了氨氮对 AOB 抑制的形态及规律, 控制反应条件为温度 30℃, HRT 4.76 h, ORP 100 mV. 结果表明, 在进水氨氮浓度 2 000 mg·L⁻¹ 时, 当 AOB 活性达到半抑制水平后, 通过降低 pH 使 FA 浓度从 235 mg·L⁻¹ 降到 13 mg·L⁻¹, AOB 的抑制得以解除. 说明是 FA 对 AOB 产生抑制. 将在各浓度梯度下得到的半抑制 FA 浓度 IC_{50FA} 和达到半抑制水平所需反应时间 *t* 进行拟合, 发现两者呈指数关系. 通过分析具体方程发现在本实验条件下 FA 抑制 AOB 的最小值为 98.84 mg·L⁻¹. FA 对 AOB 的抑制受 FA 浓度和反应时间两者的影响, 且存在可以对 AOB 产生抑制的最小 FA 浓度值. 当 FA 浓度大于该最小值且经过相应的反应时间后将会对 AOB 产生抑制作用. 高浓度 FA 经过较短的反应时间即可对 AOB 形成抑制, 较低浓度的 FA 经过足够长的反应时间可以对 AOB 形成与之相同的抑制水平.

关键词: 亚硝化; 氨氧化菌; 抑制; 游离氨; 反应时间

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4168-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.11.030

Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule

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

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The inhibiting form and rule of ammonium to ammonia oxidation bacteria (AOB) were investigated through a series of batch experiments using biofilm reactor, in which the reaction conditions were controlled to 30℃, HRT 4.76 h, ORP 100 mV. The results showed that when the AOB activity was half-inhibited at an ammonia nitrogen concentration of 2 000 mg·L⁻¹, the concentration of FA was decreased from 235 mg·L⁻¹ to 13 mg·L⁻¹ by reducing pH, leading to the removal of the AOB inhibition. This indicated that FA was the real inhibitor for AOB. The half inhibitory concentration of FA and reaction time required to reach this concentration obtained from the concentration gradient test were fitted. The results confirmed that there was an exponential relationship between them. The inhibitory threshold value of FA to AOB was 98.84 mg·L⁻¹ under the experimental condition. Both the concentration of FA and the reaction time had a great influence on the inhibition of FA to AOB, and there was a minimal FA concentration that could cause inhibition to AOB. When the concentration of FA was greater than this threshold value, the activity of AOB would be inhibited after a suitable reaction time. High concentration of FA could inhibit AOB within a short time, so could low concentration of FA after an enough long reaction time.

Key words: nitrification; ammonia oxidation bacteria; inhibit; free ammonia; reaction time

为了解决水体中氨氮污染问题, 各国学者共同研究开发出一批新型生物脱氮工艺诸如短程硝化-反硝化工艺^[1]、SHARON-ANAMMOX^[2]、OLAND^[3]、CANON^[4]等. 这些新工艺的首要步骤都是将硝化过程控制在亚硝化阶段, 实现亚硝酸盐的积累, 关键在于有效富集氨氧化菌(AOB)并抑制亚硝酸盐氧化菌(NO₂-oxidizing bacteria, NOB).

氨氮作为 AOB 的底物在超过一定浓度时反而会对 AOB 产生抑制^[5], 但是目前人们对氨氮抑制 AOB 的观点不一. Shrama 等^[6]和 Hou 等^[7]认为 AOB 真正利用的底物是氨氮中的游离态氨(FA)而不是 NH₄⁺ 离子. Jubany 等^[8]研究发现 FA 对 AOB 和 NOB 都有抑制作用, 但是 NOB 对 FA 更为敏感, 因此 FA 是实现亚硝化的重要控制因素. 在以往关于 FA 抑制 AOB 的研究中难以做到反应条件恒定,

特别是 pH 会随着反应的进行逐渐降低, 无法排除其他因素对结果的干扰. 在非单一变量条件下不同研究者得到的 FA 对 AOB 的抑制阈值差异明显, 范围跨度大(9 ~ 613 mg·L⁻¹)^[9~12]. 这样的结果不能真实反映 FA 抑制 AOB 的普遍规律, 对实际工艺缺乏指导意义.

在本实验中严格控制反应过程中的各项条件恒定, 做到单因子分析. 本实验旨在分析氨氮对 AOB 的抑制形态, 并且通过进水氨氮的浓度梯度实验探索抑制物作用于 AOB 的一般规律, 以期在新型生

收稿日期: 2015-05-22; 修订日期: 2015-06-23

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(CXLX14-1289); 苏州科技学院研究生创新基金项目(skex14/028)

作者简介: 崔剑虹(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为废水脱氮理论及工艺, E-mail: cuijianhonghuan@126.com

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

物脱氮工艺中实现亚硝酸盐积累提出一些可行的建议。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验所用的装置如图 1 所示,为圆柱形玻璃反应器,有效容积 2.5 L. 反应器内置搅拌器、水浴夹套、ORP 实时监控装置和温度、pH 自动调节装置. 反应器采用生物膜系统,以海绵块为载体,连续流方式进水,水力停留时间为 4.76 h,反应温度控制为 30℃.

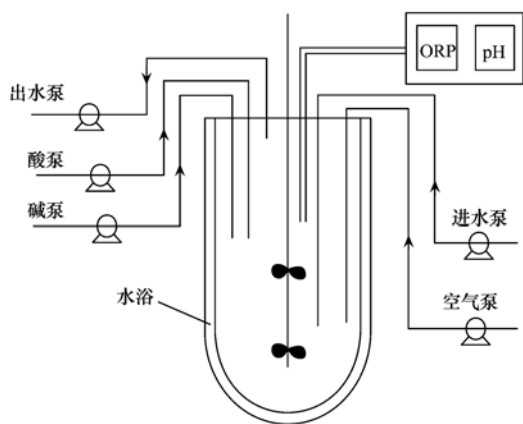


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the reactor

1.2 生物膜与进水水质

实验使用的生物膜以海绵块为载体,载体的堆积体积占反应器有效容积的 0.1. 该生物膜取自本研究所的亚硝化反应器,其亚硝化速率稳定在 $0.9 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

实验进水为人工配水,其中氨氮和碳源分别由 NH_4Cl 和 NaHCO_3 提供. 微量元素组成^[13]为: $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $0.3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 KH_2PO_4 $0.027 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 CaCl_2 $0.136 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、微量元素 I $1.0 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 、微量元素 II $1.25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$. 微量元素 I 组成($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)为: FeSO_4 5、EDTA 5; 微量元素 II 组成($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)为: EDTA 5、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0.25 、 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.043 、 $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.99 、 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0.24 、 H_3BO_4 0.014 、 $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.22 、 $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 0.2 .

1.3 分析项目与方法

各种指标检测方法参考文献[14]. NH_4^+-N : 钠氏试剂分光光度法; NO_2^--N : *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法; pH、ORP 均采用 METTLER-TOLEDO 电极实时监测; FA 浓度(以 N 计)按公式(1)^[15]计算:

$$c_{\text{FA}} = \frac{c_{\text{NH}_4^+-\text{N}} \times 10^{\text{pH}}}{e^{6.334/(273+T)} + 10^{\text{pH}}} \quad (1)$$

式中, c_{FA} 为 FA 的浓度,单位 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $c_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$ 为氨氮浓度(以 N 计),单位 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; T 为温度,单位℃.

1.4 实验方法

以出水中 NO_2^--N 浓度和亚硝化速率来表征抑制物对 AOB 的抑制程度,通过 ORP 控制反应器中的 DO. 定义当出水 NO_2^--N 浓度降为最大值的一半时称为半抑制水平(I_{50}),此时的抑制物浓度称为半抑制浓度(IC_{50}).

氨氮抑制形态分析: 待反应器运行稳定后,将进水氨氮浓度升至 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 控制温度为 30°C , pH 为 8.3, ORP 为 100 mV, 定时检测出水中的 NH_4^+-N 和 NO_2^--N . 当反应达到半抑制水平后将 pH 降至 7.0, 以此改变反应器中 FA 和 NH_4^+ 离子的浓度,结合出水 NO_2^--N 浓度变化情况分析 AOB 的真正抑制物.

抑制物对 AOB 的作用规律: 待反应器运行稳定后,控制温度为 30°C 、pH 为 8.3、ORP 为 100 mV. 进水氨氮浓度分别为 1000、1500、3000、4000、5000 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 定时检测出水中的 NH_4^+-N 和 NO_2^--N . 在提高进水氨氮浓度时同步增大曝气量以保证反应器中 DO 不变.

2 结果与讨论

2.1 氨氮对 AOB 的抑制形态

设定进水氨氮浓度 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 温度为 30°C , HRT 为 4.76 h, 初始 pH 为 8.3. 反应器运行 19 h 后将 pH 降到 7.0 继续运行 8 h, 出水中 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 浓度变化如图 2 所示. 在反应开始后的 4 h 内, 反应器中 NH_4^+-N 浓度由 0 升到 $1075.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

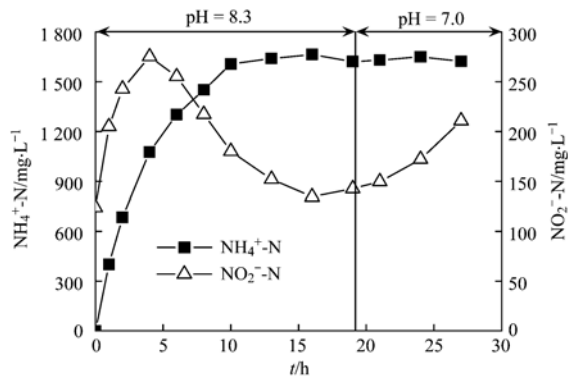


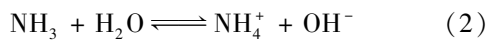
图 2 进水氨氮 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下出水氨氮、亚硝态氮浓度变化

Fig. 2 Variation of effluent NH_4^+-N and NO_2^--N at an influent NH_4^+-N of $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

出水中 NO_2^- -N浓度升到最大值 $275.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在此过程中亚硝化速率上升到最大值 $1.39 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 在 $4\sim 19 \text{ h}$ 的过程中反应器内 NH_4^+ -N浓度持续上升然后趋于稳定. 在此阶段出水中 NO_2^- -N浓度最终下降至 $134.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 亚硝化速率降低至 $0.68 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 此时反应达到半抑制水平.

反应进行到 19 h 时将 pH 降低至 7.0 来改变 FA 浓度, 此后出水中 NO_2^- -N浓度开始回升. 27 h 后出水中 NO_2^- -N浓度上升到 $210.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 亚硝化速率回升到 $1.06 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 对 AOB 的抑制得以解除.

氨氮在水中存在两种形态即 NH_4^+ 离子和 FA, 两者存在如下平衡关系:



由式(1)、(2)可知 FA 浓度与氨氮浓度、温度、pH 有关, 在氨氮浓度和温度均不变的情况下, 可通过降低 pH 以降低 FA 的浓度. 如图 3 所示为在进水氨氮 $2000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时出水中 NO_2^- -N和 FA 浓度变化趋势. 反应初始阶段出水中 NO_2^- -N、FA 浓度均上升, 当 FA 增大到 $137 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后 AOB 活性开始受到抑制, 这与最初报道的 FA 对 AOB 的抑制浓度 $10\sim 150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [16] 相符. 此后 FA 继续升高到 $235 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, AOB 达到半抑制水平. 在 FA 升高的过程中 NH_4^+ 离子同时升高, 因此实验进行到此尚无法判断氨氮对 AOB 的抑制形态. 在反应进行到 19 h 时将 pH 降低到 7.0 , 根据 FA 与 NH_4^+ 离子间的平衡关系可知 FA 浓度降低, 而 NH_4^+ 离子浓度继续升高. 在 $19\sim 27 \text{ h}$ 反应器中 FA 维持在 $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, NO_2^- -N浓度回升到 $210 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, AOB 活性恢复. Park 等 [17] 研究表明 pH 为 7.0 时, pH 主要通过影响氨氮在水中的平衡来影响亚硝化反应. 这很好地说明了 FA 是 AOB 的抑制物, 与 Torà 等 [18] 的研究结果一致.

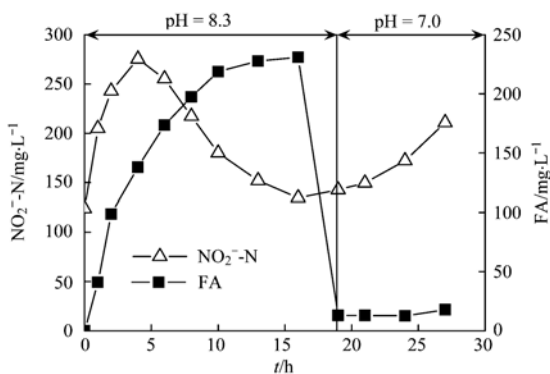


图 3 FA 对亚硝化的影响

Fig. 3 Influence of FA on nitritation

2.2 不同进水氨氮浓度下的抑制

如图 4 所示, 在稳定运行的反应器中, 控制温度

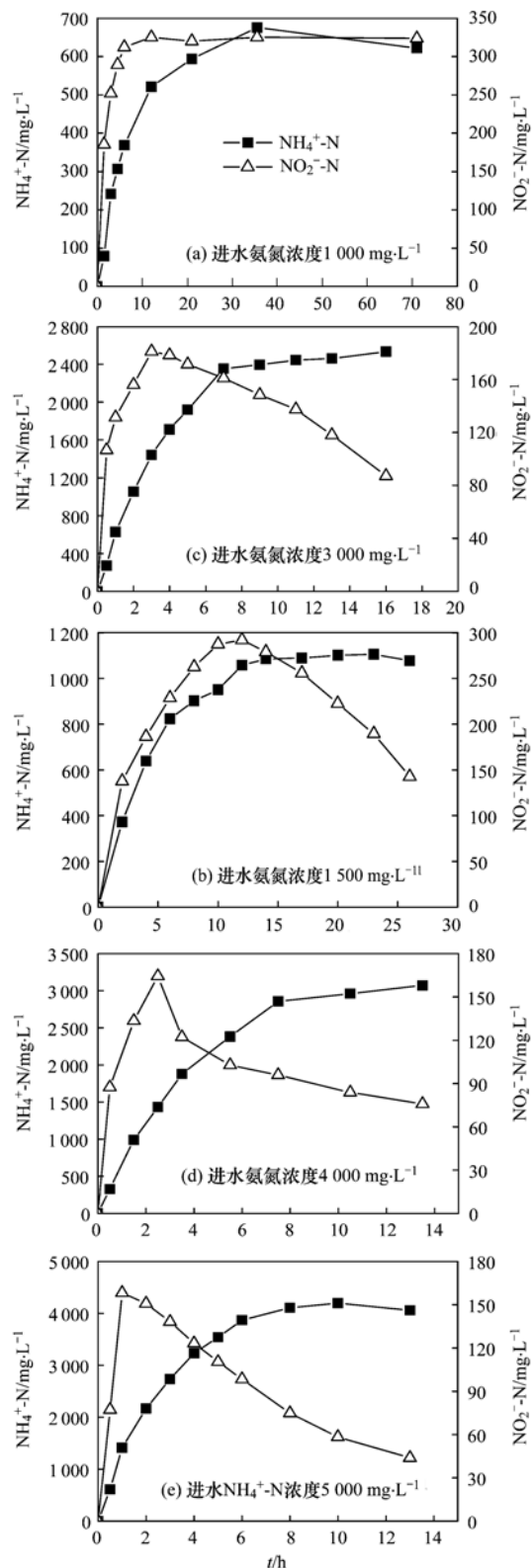


图 4 不同浓度下出水氨氮、亚硝态氮浓度变化

Fig. 4 Variation of effluent NH_4^+ -N and NO_2^- -N at various concentration

恒定为 30℃, pH 为 8.3, 进行氨氮浓度梯度实验. 如图 4(a) 所示在进水氨氮浓度为 1 000 mg·L⁻¹ 时, 反应进行到 71 h 后出水亚硝酸盐浓度仍未出现下降趋势. 这说明在当前条件下该浓度未能对 AOB 产生抑制. 如图 4(b) 所示, 进水氨氮浓度为 1 500 mg·L⁻¹ 时, 反应 25.5 h 后达到半抑制水平, 此时反应器中氨氮浓度为 1 080 mg·L⁻¹. 随着进水氨氮浓度的提升, 反应达到半抑制所需的时间缩短, 并且产生半抑制的氨氮浓度相应提高. 如图 4(e) 所示, 当进水氨氮浓度高达 5 000 mg·L⁻¹ 时, 达到半抑制水平仅需 7.9 h, 半抑制氨氮浓度 4 100 mg·L⁻¹.

综上所述, 在达到相同抑制水平的前提下, 抑制

浓度与响应时间有密切关系. 进水氨氮浓度越大, 达到半抑制所需的时间越短, 而且当氨氮浓度低于某一值时将不能对 AOB 构成抑制.

表 1 中列出了不同进水氨氮浓度下达到半抑制水平所需的时间 t 和半抑制 FA 浓度 IC_{50FA} . 数据表明不同进水氨氮浓度下达到半抑制水平所需的时间 t 有显著差异, 并且 IC_{50FA} 与其反应时间 t 呈现明显相关性. 以往的研究中并没有考虑到半抑制水平 I_{50} 、半抑制 FA 浓度 IC_{50FA} 与反应时间 t 的关系, 只将 FA 浓度作为产生抑制的依据, 但是在一些实验中低浓度 FA^[19] 经过足够长的时间后仍能对 AOB 产生抑制.

表 1 不同进水氨氮达到半抑制所需反应时间 t 与 IC_{50FA} 浓度
Table 1 Reaction time and IC_{50FA} at various influent NH_4^+-N

进水氨氮浓度/mg·L ⁻¹	1 500	2 000	3 000	4 000	5 000
反应时间 t /h	25.5	17	15	12	7.9
半抑制 FA 浓度 IC_{50FA} /mg·L ⁻¹	160	235	345	390	600

将表 1 中的反应时间 t 与半抑制 FA 浓度 IC_{50FA} 进行拟合发现两者具有指数函数关系, 相关系数为 0.96, 拟合曲线及方程如图 5 所示. FA 对 AOB 的抑制受 FA 浓度和反应时间 t 的影响, 则 I_{50} 、 IC_{50FA} 、 t 三者关系可表示为 $I_{50} = F(IC_{50FA}, t)$, IC_{50FA} 值越小达到 I_{50} 所需的反应时间 t 越长. 图 5 中的曲线为半抑制临界曲线, 曲线上任意一点均表示该状态下达到 I_{50} 的最小 IC_{50FA} 和 t , 在该点处中可以通过增大 FA 浓度或延长反应时间来达到半抑制水平.

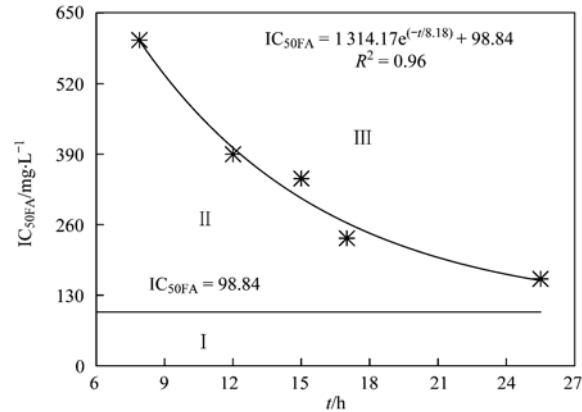


图 5 半抑制水平下 t 与 IC_{50FA} 关系

Fig. 5 Correlation between t and IC_{50FA} under the condition of half inhibition

由拟合方程分析可知当 t 趋向正无穷时半抑制临界曲线将无限趋近直线 $IC_{50FA} = 98.84$. 这在实际反应中表现为当 FA 浓度小于 98.84 mg·L⁻¹ 时无论反应进行多长时间都不会对 AOB 造成抑制, 即

98.84 是本实验条件下 FA 对 AOB 产生抑制的最小值. 在图 5 中半抑制临界曲线和直线 $IC_{50FA} = 98.84$ 将象限分为 3 个区域(I、II、III). 反应进行到任意时刻所对应的点若落到区域 I 这说明此时没有达到半抑制水平, 但是可以通过提高 FA 浓度至相应的 IC_{50FA} 来达到半抑制水平; 若点落到区域 II 则说明虽然此时尚未达到半抑制水平, 只要反应进行足够长的时间或提高 FA 浓度至相应的 IC_{50FA} 就能达到半抑制水平; 若点落到区域 III 则说明已经达到半抑制水平. 在浓度梯度 1 000 mg·L⁻¹ 的实验中, 反应器中 FA 浓度最终稳定为 90 mg·L⁻¹, 反应进行足够长的时间后仍未对 AOB 产生抑制, 这与拟合方程的预测结果一致. 陈建伟^[12] 在研究高活性短程硝化菌动力学特性时得到半抑制 FA 浓度为 613.9 mg·L⁻¹, 反应时间为 10 h. 该点落到图 5 中区域 III, 这与上述判断结果相符.

目前已有报道中存在 FA 浓度小于 98.84 mg·L⁻¹ 仍能对 AOB 产生抑制的情况, 这表明 FA 对 AOB 的抑制除了受 FA 浓度和反应时间的影响外可能还与一些其他因素有关. Torà 等^[20] 研究发现限制碳源会放大 FA 对 AOB 的抑制作用; Tokutomi 等^[21] 发现用 NaHCO₃ 代替 NaOH 提供碱度有利于亚硝酸盐的积累并提出了以高浓度 IC (inorganic carbon) 来促进 AOB 活性的策略; Wu 等^[22] 经过研究发现较高的反应温度可以削弱 FA 对 AOB 的抑制作用; Villaverde 等^[23] 和姚晓园等^[24] 均在实验中观察到亚硝酸盐的积累与系统生物量有关, 当 FA/

MLVSS 高于某个值后才会对 AOB 产生抑制,这意味着提高反应器中的生物量可以减弱抑制作用. 更多 FA 抑制 AOB 的影响因素仍有待研究. 在本实验中以 NaHCO_3 提供碱度及 AOB 所需碳源, C/N 控制为 1, 此时 IC 不会限制亚硝化^[25], 温度为 30℃. 综合各种因素本实验得到的半抑制 FA 浓度大于其他研究报道值($70 \sim 300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)^[26].

3 结论

(1) 在进水氨氮浓度为 $2000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 反应进行 17 h 后 AOB 达到半抑制水平, 然后通过改变 pH 使 FA 浓度降低, AOB 活性恢复从而验证了 FA 是 AOB 的抑制物.

(2) 经拟合发现半抑制 FA 浓度 $\text{IC}_{50\text{FA}}$ 和达到半抑制水平所需反应时间 t 呈指数关系, 在本实验条件下两者的关系方程为 $\text{IC}_{50\text{FA}} = 1314.17 e^{(-t/8.18)} + 98.84$. 通过对方程的分析得出本实验条件下 FA 对 AOB 产生抑制的最小值为 $98.84 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

(3) FA 对 AOB 的抑制受 FA 浓度和反应时间的影响, 当 FA 浓度大于可对 AOB 产生抑制的最小值且经过相应的反应时间后将 AOB 产生抑制. 通过对半抑制临界曲线的分析可知: 随着 FA 浓度逐渐降低至可对 AOB 产生抑制的最小值, 达到半抑制水平所需反应时间随之延长到无穷大.

参考文献:

- [1] 宫曼丽, 刘洋, 赵欣, 等. 新型短程硝化反硝化工艺处理高浓度氨氮废水[J]. 中国给水排水, 2013, 29(11): 1-5.
- [2] Shalini S S, Joseph K. Start-up of the SHARON and ANAMMOX process in landfill bioreactors using aerobic and anaerobic ammonium oxidising biomass [J]. Bioresource Technology, 2013, 149: 474-485.
- [3] Schaubroeck T, Bagchi S, de Clippeleir H, et al. Successful hydraulic strategies to start up OLAND sequencing batch reactors at lab scale[J]. Microbial Biotechnology, 2012, 5(3): 403-414.
- [4] 张杰, 付昆明, 曹相生, 等. 序批式生物膜 CANON 工艺的运行与温度的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(8): 850-855.
- [5] Stein L Y, Arp D J. Loss of ammonia monooxygenase activity in *Nitrosomonas europaea* upon exposure to nitrite[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, 64(10): 4098-4102.
- [6] Sharma B, Ahlert R C. Nitrification and nitrogen removal[J]. Water Research, 1977, 11(10): 897-925.
- [7] Hou B L, Han H J, Jia S Y, et al. Effect of alkalinity on nitrite accumulation in treatment of coal chemical industry wastewater using moving bed biofilm reactor[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(5): 1014-1022.
- [8] Jubany I, Lafuente J, Baeza J A, et al. Total and stable washout of nitrite oxidizing bacteria from a nitrifying continuous activated sludge system using automatic control based on Oxygen Uptake Rate measurements[J]. Water Research, 2009, 43(11): 2761-2772.
- [9] 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.
- [10] 李正魁, 赖鼎东, 杨竹攸, 等. 固定化氨氧化细菌短程硝化稳定性研究[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2835-2840.
- [11] Bae W, Baek S, Chung J, et al. Optimal operational factors for nitrite accumulation in batch reactors[J]. Biodegradation, 2001, 12(5): 359-366.
- [12] 陈建伟. 高效短程硝化和厌氧氨氧化工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [13] van de Graaf A A, de Bruijn P, Robertson L A, et al. Autotrophic growth of Anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms in a fluidized bed reactor[J]. Microbiology, 1996, 142(8): 2187-2196.
- [14] 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.
- [15] Anthonisen A C, Loehr R C, Prakasam T B S, et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid[J]. Water Pollution Control Federation, 1976, 48(5): 835-852.
- [16] Turk O, Mavinic D S. Maintaining nitrite build-up in a system acclimated to free ammonia[J]. Water Research, 1989, 23(11): 1383-1388.
- [17] Park S, Bae W, Rittmann B E. Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH, and free ammonia and free nitrous acid inhibition[J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(1): 335-342.
- [18] Torù J A, Lafuente J, Baeza J A, et al. Combined effect of inorganic carbon limitation and inhibition by free ammonia and free nitrous acid on ammonia oxidizing bacteria[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15): 6051-6058.
- [19] 于德爽, 殷金兰, 王晓霞, 等. 控制 DO 及 FA 条件下短程硝化过程系统稳定性研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(12): 2677-2680.
- [20] Li S, Chen Y P, Li C, et al. Influence of Free Ammonia on Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite (CANON) Process[J]. Applied Biochemistry Biotechnology, 2012, 167(4): 694-704.
- [21] Tokutomi T, Shibayama C, Soda S, et al. A novel control method for nitrification: the domination of ammonia-oxidizing bacteria by high concentrations of inorganic carbon in an airlift-fluidized bed reactor[J]. Water Research, 2010, 44(14): 4195-4203.
- [22] Wu L, Peng Y Z, Ma Y, et al. The short-term effects of temperature and free ammonia on ammonium oxidation in granular and floccular nitrifying system[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2012, 20(5): 1016-1023.

- [23] Villaverde S, Fdz-polanco F, García P A. Nitrifying biofilm acclimation to free ammonia in submerged biofilters. start-up influence[J]. Water Research, 2000, **34**(2): 602-610.
- [24] 姚晓园, 饶正凯, 陆天友, 等. 游离氨对高浓度含氮废水生物亚硝化的影响[J]. 工业用水与废水, 2009, **40**(4): 44-48.
- [25] Ganigué R, Volcke E I P, Puig S, *et al.* Impact of influent characteristics on a partial nitrification SBR treating high nitrogen loaded wastewater[J]. Bioresource Technology, 2012, **111**: 62-69.
- [26] Van Hulle S W H, Volcke E I P, Teruel J L, *et al.* Influence of temperature and pH on the kinetics of the SHARON nitrification process[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2007, **82**(5): 471-480.

关于反对个别作者一稿两投行为的联合声明

为保证所发表论文的首创性和学术严谨性,《环境科学》、《中国环境科学》、《环境科学学报》编辑部和《Journal of Environmental Sciences》编辑部特发表如下联合声明。

我们明确反对个别作者的一稿两投或变相一稿两投行为。自即日起,我们各刊在接受作者投稿时,要求论文全体作者就所投稿件作出以下承诺(附在投稿上):

1) 来稿所报道的研究成果均系全体作者的原创性研究成果,文中报道的研究成果(含图、表中数据的全部或部分)未曾发表亦未曾投其它科技期刊。

2) 在接到所投期刊编辑部关于稿件处理结果之前,所投稿件的全部或部分内容不再投其它科技期刊。

我们将认真对待作者所作的上述承诺,并建立信息共享机制,对违背上述承诺的作者(包括在文中署名的全体作者)采取联合行动。

净化学术环境、促进学术繁荣是学术期刊作者和编者的共同责任。我们诚恳地希望广大作者能够了解我们的上述立场和做法,并积极宣传和配合。

《环境科学》编辑部

《中国环境科学》编辑部

《环境科学学报》编辑部

《Journal of Environmental Sciences》编辑部

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i> (3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i> (3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC ...	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i> (3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer(SPAMS)	 ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i> (3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia (3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song (3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i> (4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i> (4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China	 LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i> (4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County	 KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i> (4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Shi-hui, <i>et al.</i> (4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i> (4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i> (4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen (4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing	 REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i> (4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i> (4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i> (4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i> (4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin (4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitritation-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitritation Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i> (4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i> (4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i> (4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i> (4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming	LAN Mu-ling, GAO Ming (4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i> (4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i> (4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i> (4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i> (4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i> (4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin (4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen (4319)

《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11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 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