

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铝压“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)	

HCO₃⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响

李祥^{1,2}, 陈宗烺^{1,2}, 黄勇^{1,2}, 袁怡^{1,2}, 刘忻^{1,2}, 张大林^{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: 利用已经启动并达到稳定运行的部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺, 研究了 HCO₃⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响。结果表明, 当 C/N 比由 2 降低到 0.17 时, 因 HCO₃⁻ 投加量的限制, 亚硝化区和厌氧氨氧化区 pH 值大幅下降, 从而导致各区域氮素转化效能受限。联合工艺的氮去除速率由 1.3 kg·(m³·d)⁻¹ 下降到 0.40 kg·(m³·d)⁻¹, 下降幅度达到 69.3%。在联合脱氮工艺运行过程中, 降低 HCO₃⁻ 对亚硝化菌、厌氧氨氧化菌和硝化细菌活性的影响依次下降。当 C/N 比恢复到 1 时, 联合工艺的脱氮效能很快恢复到 1 kg·(m³·d)⁻¹, 说明短期内 HCO₃⁻ 限制对联合工艺氮素转化效能的影响能够快速恢复。通过拟合后发现, 进水 C/N 比值与联合工艺脱氮效能存在明显的相关性。

关键词: 厌氧氨氧化; 部分亚硝化; HCO₃⁻; 脱氮效能; 缓冲能力

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4189-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.033

Effect of HCO₃⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitrification-ANAMMOX Process

LI Xiang^{1,2}, CHENG Zong-heng^{1,2}, HUANG Yong^{1,2}, YUAN Yi^{1,2}, LIU Xin^{1,2}, ZHANG Da-lin^{1,2}

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

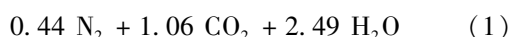
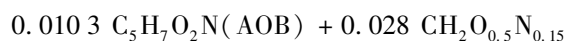
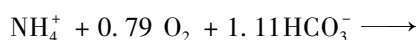
2. Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The effect of HCO₃⁻ on nitrogen removal efficiency in partial nitrification-ANAMMOX process was studied by using the combined process of partial nitrification and ANAMMOX has been started and achieved the stable operation of nitrogen removal. The results showed that, when the ratio of C/N decreased from 2 to 0.17 in influent, the nitrogen removal rate decreased from 1.3 kg·(m³·d)⁻¹ to 0.40 kg·(m³·d)⁻¹, the decrease range arrived at 69.3%. The nitrogen conversion efficiency was limited, because of the added amount of HCO₃⁻ was decreased, which leading to the pH value declined sharply in nitrification and ANAMMOX zone. In the partial nitrification-ANAMMOX process, the effect of HCO₃⁻ limitation on activity of ammonium oxidizing bacteria, ANAMMOX bacteria and nitrifying bacteria was decreased in turn. When the C/N ratio increased to 1, the nitrogen removal rate of combined process was quickly restored to 1 kg·(m³·d)⁻¹. It indicated that short HCO₃⁻ limitation on nitrogen conversion efficiency of the combined process can be fast recovery. The result also showed that the relationship between influent C/N ratio and nitrogen removal efficiency has obvious relativity in partial nitrification-ANAMMOX process.

Key words: ANAMMOX; partial nitrification; HCO₃⁻; nitrogen removal efficiency; buffer ability

厌氧氨氧化作为一种新型生物脱氮工艺, 因具有脱氮效能高, 污泥产量低, 无需有机物参与的优点而受到研究者的广泛关注^[1,2]。然而厌氧氨氧化过程需要亚硝酸盐作为电子受体, 因此必须与亚硝化反应联合才能实现废水中氨氮的去除^[3], 如计量方程式(1)所示。为了更好地实现联合工艺高效脱氮, 研究者围绕亚硝化菌、厌氧氨氧化菌对 DO 环境需求以及反应过程 pH 变化差异等问题进行了大量研究^[4-6]。

在亚硝化系统中, HCO₃⁻ 既是维持生化反应所需 pH 值的主要承担者, 同时也是亚硝化菌所需碳源的供应者。亚硝化菌对 HCO₃⁻ 的需求量较大, 过低的 HCO₃⁻ 将严重影响亚硝化过程的亚硝酸盐生成速率^[7,8]。同时, 厌氧氨氧化过程也是一个 pH 增大的过程, 大量研究表明 HCO₃⁻ 浓度的变化对厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响十分明显^[9,10]。Hu 等^[11] 在部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的提



收稿日期: 2015-03-10; 修订日期: 2015-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008202); 江苏省环境保护厅重大项目(201104); 江苏省环境科学与工程重点专项; 江苏省特色优势学科二期项目

作者简介: 李祥(1984~), 男, 硕士, 实验师, 主要研究方向为废水脱氮处理理论及工艺, E-mail: lixiang@mail.usts.edu.cn

升过程中发现,无机碳(IC)浓度的增加对联合工艺氮去除速率提高具有显著影响,但是未对其进行定量说明.因此,利用该类型联合工艺处理低C/N废水,尤其是几乎不含碳源废水(例如,碱性蚀刻液^[12]、半导体废水^[13])时, HCO_3^- 对联合工艺的脱氮效能的影响以及是否存在调控规律尚需深入分析.在控制过程中, HCO_3^- 对哪个阶段的影响是主要关注对象?这些问题都是联合工艺应用于低碳氮比废水处理过程中需要解决的问题.

为此,本文利用成熟的亚硝化生物膜和厌氧氨氧化化污泥,在无机环境下,研究 HCO_3^- 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺氮素转化效能的影响,以期为其工程化应用提供数据参考.

1 材料与方法

1.1 实验装置及运行条件

实验装置由有机玻璃制成(如图1),总有效体积3.5 L,主要包括部分亚硝化区2.8 L,厌氧氨氧化区0.23 L和沉淀区0.47 L.在联合工艺的运行过程中,利用部分亚硝化区的曝气尾将沉淀区出水回流至部分亚硝化区.进水运行方式为连续流,流量由蠕动泵控制.联合工艺的水力停留时间设定为0.04 d.气体流量由气体流量计控制.联合工艺的温度控制在25℃,由气浴加热器控制.亚硝化区的ORP控制在 (140 ± 20) mV(溶解氧约 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),厌氧氨氧化区的ORP检测值一般在 (-300 ± 50) mV,由WTW在线监测仪监控,整个实验期间不排泥.

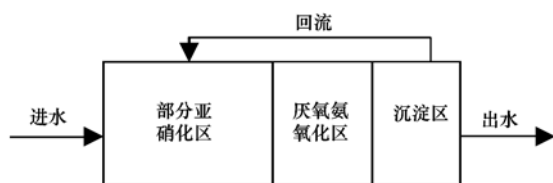


图1 部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺流程示意

Fig. 1 Schematic of the partial nitrification-ANAMMOX process

1.2 接种污泥

亚硝化区接种的亚硝化生物膜来源于经过150 d驯化的亚硝化反应器,接种量1 L.厌氧区接种的厌氧氨氧化污泥取自实验室长期运行的厌氧氨氧化种泥反应器,接种量0.3 L.

1.3 废水组成

采用人工配制废水,主要由 NH_4Cl (按需配制), NaHCO_3 (按需配制), KH_2PO_4 $27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $136 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,

微量元素 I $1 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 和微量元素 II $1.25 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$.微量元素浓缩液组分为 I: EDTA $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, FeSO_4 $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;微量元素浓缩液 II 组分为: EDTA $5000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ $430 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ $990 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ $250 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $220 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $190 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaSeO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ $210 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, H_3BO_4 $14 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.4 测定方法

水质指标测定方法均按照文献[14]. NH_4^+-N 采用纳氏分光光度法(哈希2800,美国); $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 采用离子色谱法(戴安IS-9001,美国);pH、ORP和温度采样WTW在线监测仪(德国).IC采用总有机碳气体分析仪(Multi N/C3100,德国)

1.5 实验方法

首先,接种入成熟的亚硝化生物膜和厌氧氨氧化污泥,利用人工模拟废水启动装置.在研究 HCO_3^- 对联合工艺氮素转化影响之前,装置已经过150d左右的运行,氮去除速率由最初 $0.69 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 上升到 $1.3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,并达到稳定(数据略).待反应器稳定运行后(此处标记为本实验的第1 d),调节进水 HCO_3^- 浓度或者氨氮浓度的方式改变C/N的比值(调节氨氮浓度主要防止反应器内氨氮积累,避免FA对功能菌产生影响),通过氨氮,亚硝氮,硝氮及IC浓度(因 HCO_3^- 在水中随着pH值变化会以不同形态存在,在pH值6.5~9之间主要以 HCO_3^- 形式存在,因此在研究过程中以IC浓度表征)的变化,探讨 HCO_3^- 浓度变化对反应器内不同功能菌的影响及联合工艺脱氮效能的影响.

因联合工艺具有回流特征,所涉及到的亚硝化菌、厌氧氨氧化菌和硝化菌的氮素转化效能计算公式如下:

$$\Delta N = \text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{inf}} - (\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{eff}} + \text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{eff}} + \text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{eff}}) \quad (2)$$

$$\text{NPR-NO}_2^- = (\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{inf}} - \text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{eff}} - \Delta N / 2.3 - \text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{eff}} + 0.26 \Delta N / 2.3) / \text{HRT} \quad (3)$$

$$\text{NRR} = \Delta N / \text{HRT} \quad (4)$$

$$\text{NPR-NO}_3^- = (\text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{eff}} - 0.26 \Delta N / 2.3) / \text{HRT} \quad (5)$$

式中, ΔN 表示进出水总氮的差值, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{inf}}$ 表示最初进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$; $\text{NH}_4^+ - \text{N}_{\text{eff}}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}_{\text{eff}}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}_{\text{eff}}$ 表示最终出水

NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 NO_3^--N 浓度, $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; HRT 表示联合工艺的水力停留时间, d; NPR-NO_2^- 表示 NO_2^--N 生成速率, $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; NPR-NO_3^- 表示 NO_3^--N 生成速率, $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; NRR 表示联合工艺的脱氮速率, $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

2 结果与讨论

2.1 HCO_3^- 变化对联合工艺脱氮效能的影响

根据联合工艺前期稳定运行的参数,设定进水氨氮浓度 $125\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,同时设定进水 IC 浓度为 $250\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (C/N 比值为 2),出水氮素变化如图 2 所示. 最终出水氨氮浓度稳定在 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝酸盐及硝酸盐浓度稳定在 $12.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,联合工艺的氮去除速率稳定在 $1.3\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 说明此时 HCO_3^- 充足,联合工艺各区域氮素转化效能未受影响. 随后通过降低进水 HCO_3^- 的方式逐步降低进水 C/N 比值,经过 96 d 的运行,进水 C/N 比值下降至 0.17,对应的进水氨氮浓度 $120\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水 IC 浓度降低到 $26.55\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时联合工艺的出水氨氮浓度上升至 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝酸盐及硝酸盐浓度稳定在 $11\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,联合工艺的氮去除速率下降至 $0.4\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右,下降幅度达到 69.3%. 说明 HCO_3^- 浓度的下降限制着联合工艺的氮素转化效能. 但是在 HCO_3^- 浓度不断下降的过程中,出水硝酸盐的浓度未因厌氧氨氧化脱氮效能下降而降低,反而出现积累现象. Guisasola 等^[15]在研究 IC 浓度对亚硝化过程影响时发现,当 IC 浓度低于 $36\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,亚硝化细菌的活性将受到抑制而硝化细菌的活性并未受到限制. 本研究进一步证实的在自养生物脱氮系统中,硝化细菌活性受 HCO_3^- 浓度下降的抑制敏感性明显低于亚硝化菌和厌氧氨氧化细菌.

在联合工艺运行的 96 d 后,逐步提高进水 C/N 比值,考察其可恢复性. 经过 24 d 的运行,进水 C/N 比值恢复到 0.98,对应进水氨氮和 IC 浓度分别为 $105\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $102\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,联合工艺的脱氮效能稳步上升,最终出水氨氮、亚硝氮和硝氮浓度分别为 41 、 9.9 和 $15\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,联合工艺的氮去除速率恢复到 $0.95\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 说明短期内 IC 对联合工艺的氮素转化效能的抑制是可逆的. 在恢复过程中也进一步发现硝酸盐出水浓度逐步提高,未因联合工艺的脱氮效能恢复而降低. 说明部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺中硝化细菌出现快速生长后,短期内很难得到抑制.

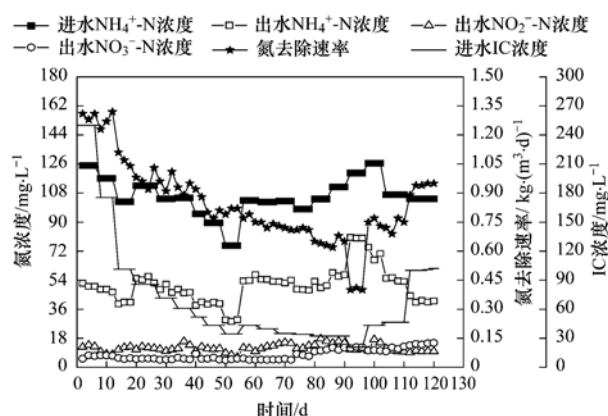


图 2 IC 浓度对联合工艺氮素转化的影响

Fig. 2 Effects of IC concentration on nitrogen translation in partial nitrification-anammox process

2.2 HCO_3^- 对各区域 pH 值及氮素转化效能的影响

部分亚硝化菌与厌氧氨氧化菌都是自养菌,需要无机碳源作为合成细胞所需的碳源,但是其需求量并不大. 李祥等^[16]在研究 HCO_3^- 浓度变化对亚硝化过程影响时发现,只要通过强碱将反应器内的 pH 值控制在亚硝化菌适宜的范围之内,空气与水中所携带的 CO_2 就能够满足自养菌生长所需要的碳源. HCO_3^- 在亚硝化系统中主要功能是维持反应所需 pH 值环境,因此在研究 HCO_3^- 浓度对联合工艺氮素转化效能影响时,有必要考虑到 pH 值的变化.

HCO_3^- 浓度变化对联合工艺各区域 pH 值环境及氮素转化效能的影响如图 3 所示. 随着进水 HCO_3^- 浓度的降低,联合工艺的亚硝化区和厌氧氨氧化区的 IC 浓度都逐步降低,IC 浓度的损失基本上发生在亚硝化区. 由图 3 可知,当亚硝化出水进入到厌氧氨氧化区时,IC 浓度基本上不发生变化. 当进水 C/N 比值大于 1.5 时,因 HCO_3^- 充足,亚硝化区及出水的 pH 值均大于进水 (pH 值稳定在 8 左右),亚硝酸盐生成速率基本稳定在 $1\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右,厌氧氨氧化氮去除速率基本稳定在 $1.28\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 左右;而当进水 C/N 比值小于 1.5 时,亚硝化区和最终出水的 pH 值均小于进水,并且差距随进水 HCO_3^- 浓度下降而逐步扩大. 当进水 C/N 比值下降到 0.17 时,亚硝化区的 pH 值下降到 6.54,厌氧区的 pH 值下降到 6.6 左右. 亚硝酸盐生成速率下降到 $0.49\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,厌氧氨氧化的氮去除速率下降到 $0.40\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 同时,亚硝化区的 IC 浓度下降到 $9.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右. Villaverde 等^[17,18]在研究 pH 对硝化生物膜影响时发现,当 pH 值大于 7.5 时才出现亚硝酸盐的积累;当 pH 低于 7.5 时,亚硝化菌的活性将会受到

限制. 杨洋等^[19]研究表明 pH 值为 7.0 和 9.0 时的厌氧氨氧化速率分别为 pH 值 8.3 时的 77% 和 66%, 最适 pH 值为 7.5~8.3. 说明 HCO_3^- 浓度的降低严重影响了各个区域的 pH 值从而导致联合工艺脱氮效能的降低.

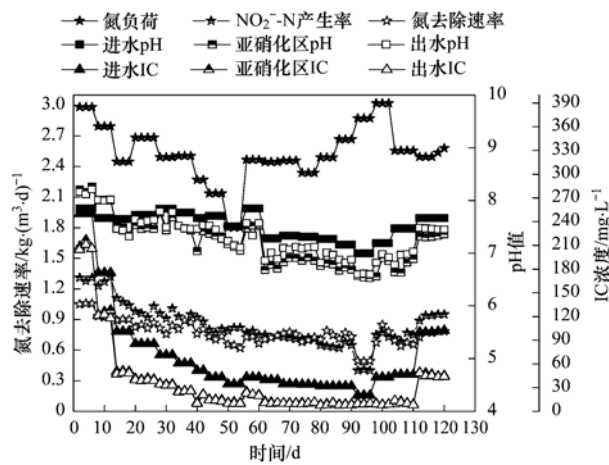
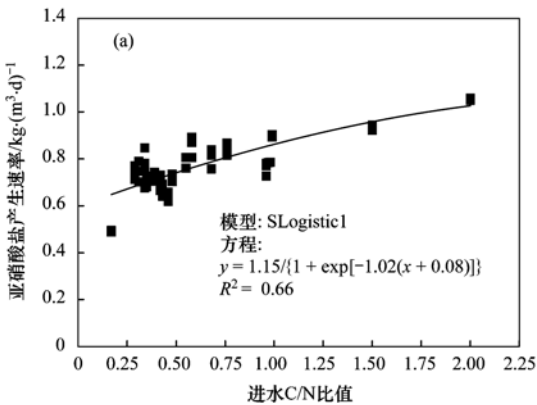


图3 IC 浓度变化对好氧区和厌氧区氮素转化效能及 pH 的影响
Fig. 3 Effects of IC concentration on nitrogen conversion and pH in aerobic area and anaerobic area

在 HCO_3^- 浓度下降过程中, 厌氧氨氧化菌氮去除速率一直随着亚硝酸盐生成速率的变化而变化 (图 3), 未出现亚硝酸盐的积累, 说明在联合工艺运行过程中, HCO_3^- 不足维持亚硝化反应所产生的酸度, 导致 pH 值逐步下降, 从而导致亚硝化菌的亚硝化效能降低, 最终导致厌氧氨氧化菌脱氮效能下降. 也进一步说明在 HCO_3^- 浓度下降过程中, 亚硝化过程最先因 pH 环境不适宜而受到限制, 亚硝化菌对 HCO_3^- 限制的敏感性要强于厌氧氨氧化菌. 因此, 在联合工艺运行过程中, 首先要满足亚硝化菌对 HCO_3^- 的需求, 然后再考虑厌氧氨氧化菌对 HCO_3^- 的需求.



2.3 HCO_3^- 浓度变化与部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的关系

HCO_3^- 在部分亚硝化-厌氧氨氧化联合自养生物脱氮工艺中的消耗主要发生在亚硝化区. 李祥等^[16]研究发现, 在单一的亚硝化系统中 HCO_3^- 与亚硝化菌产生的 H^+ 进行中和, 最终以 CO_2 的形式随尾气溢出水面, IC 的消耗量与亚硝酸盐生成速率具有明显的线性关系 ($y = 347.1x - 116.8, R^2 = 0.87$). Fux 等^[20]研究也表明亚硝化反应器出水亚硝酸盐/氨氮的比值基本依赖于进水氨氮/碱度的比值. 说明亚硝化过程需要大量的 HCO_3^- 来进行酸碱反应. 虽然厌氧氨氧化是一个产生碱度的过程, 在厌氧氨氧化系统不存在 IC 消耗. 但是有研究表明 IC 浓度的改变对厌氧氨氧化菌活性影响很大. Jin 等^[21]研究表明进水 C/N 比值不能低于 1.2, 否则会影响厌氧氨氧化菌活性. Kimura 等^[10]研究表明虽然进水 IC 对厌氧氨氧化活性产生影响, 但是进水 C/N 比值变化对厌氧氨氧化菌的氮去除速率影响无特定的线性规律. 因此推测在部分亚硝化-厌氧氨氧化联合脱氮工艺中, 进水 C/N 应该与亚硝化效能及联合工艺整体脱氮效能具有一定的相关性, 而且这两个相关性之间应具有一致性.

因此, 本研究采用 Logistic 生长模型将部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺的亚硝酸盐生成速率、联合工艺的氮去除速率与进水 C/N 比值进行拟合, 如图 4 所示. 进水 C/N 比值与亚硝化菌的亚硝化效能具有一定的关系: $y = 1.15 / \{1 + \exp[-1.02 \times (x + 0.08)]\}$, 但是其相关性不是很明显 ($R^2 = 0.66$) [图 4(a)]. 进水 C/N 比值与联合工艺氮去除速率之间也具有一定的关系: $y = 1.29 / \{1 + \exp[-2.3 \times (x - 0.29)]\}$, 相关性比较明显 ($R^2 = 0.90$) [图 4(b)]. 采用相同的生长模型进行拟合后, 相关性未

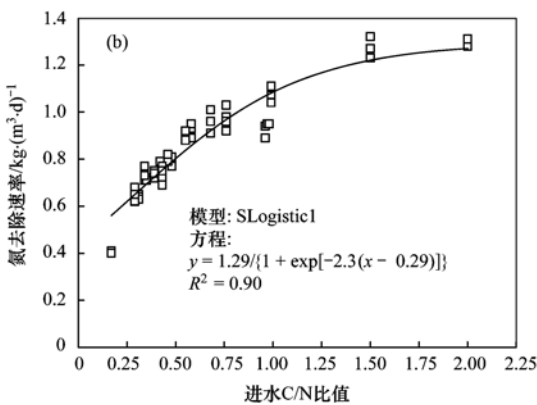


图4 进水 IC/N 与联合工艺氮去除速率的关系

Fig. 4 Relationship between IC/N and nitrogen removal rate in partial nitrification-ANAMMOX process

出现很明显的一致性. 出现此现象可能是因为在部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺的运行过程中, 因为回流的存在, 厌氧氨氧化区产生的碱度回流到亚硝化区, 并与亚硝化菌产生的酸度中和, 才导致进水 C/N 比值与亚硝化效能的相关性不明显.

2.4 部分亚硝化厌氧氨氧化联合工艺的 HCO_3^- 需求探讨

目前, 部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺的联合方式有两种, 一种是一步式, 即将部分亚硝化与厌氧氨氧化放置在一个反应器内进行培养; 另一种是两步式, 即将部分亚硝化和厌氧氨氧化放置在两个反应器内, 通过串联实现其联合. 在两步式工艺中, 各反应区需要的 HCO_3^- 浓度都很大, 而且部分亚硝化段 HCO_3^- 完全处于消耗状态, 这必将提高无机高氨废水的处理成本. 为了实现亚硝化过程和厌氧氨氧化过程的酸碱中和, 同时节省占地面积, 很多研究者采用一步式^[22~24].

但是在单一反应器内很难避免亚硝化过程的溶解氧对厌氧氨氧化菌活性的影响. 本实验采用两步式, 即将部分亚硝化和厌氧氨氧化菌放置在两个区域内进行培养. 通过回流同样实现两个反应过程的酸碱互补, 与无回流的部分亚硝化厌氧氨氧化串联工艺相比, 减少了各个区域维持 pH 值所需的投加量, 同时也减少部分亚硝化区的剩余溶解氧对厌氧氨氧化区的干扰. 由拟合方程可知, 利用部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺处理低 C/N 废水时, 进水 C/N 比值不能低于 1.5, 否则就不能够保证联合工艺各区域 pH 值处于各功能菌适宜的范围之内, 从而影响联合工艺脱氮效能的提高.

3 结论

(1) 在部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺中, 当进水 C/N 比由 2 降低到 0.17 时, 因 IC 投加量的限制, 导致各功能区 pH 值大幅下降, 从而导致氮素转化受限, 联合工艺的氮去除速率由 $1.3 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 下降到 $0.40 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 下降幅度达到 69.3%. 当 C/N 比恢复到 1 时, 联合工艺的氮去除速率很快恢复到 $1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

(2) 在部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺中, 微生物对 HCO_3^- 限制的敏感性为: 亚硝化菌 > 厌氧氨氧化菌 > 硝化细菌. 因此, 首先关注 HCO_3^- 浓度变化对亚硝化过程的影响.

(3) 通过拟合后发现, 在有回流的部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺中, 进水 C/N 比值与联合工艺

脱氮效能具有明显的相关性.

参考文献:

- [1] Kuenen J G. Anammox bacteria: from discovery to application [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2008, **6**(4): 320-326.
- [2] Terada A, Zhou S, Hosomi M, *et al.* Presence and detection of anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) bacteria and appraisal of anammox process for high-strength nitrogenous wastewater treatment: a review [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2011, **13**(6): 759-781.
- [3] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-An application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**(5): 292-303.
- [4] Xing B S, Guo Q, Yang G F, *et al.* The influences of temperature, salt and calcium concentration on the performance of anaerobic ammonium oxidation (anammox) process [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **265**: 58-66.
- [5] Xu G J, Xu X C, Yang F L, *et al.* Partial nitrification adjusted by hydroxylamine in aerobic granules under high DO and ambient temperature and subsequent Anammox for low C/N wastewater treatment [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, **213**: 338-345.
- [6] Abbas G, Zheng P, Wang L, *et al.* Oxygen Transfer characteristics in a pilot-scale airlift internal-loop bioreactor for simultaneous partial nitrification and anaerobic ammonia oxidation [J]. *Environmental Engineering Science*, 2014, **31**(8): 453-460.
- [7] Wett B, Rauch W. The role of inorganic carbon limitation in biological nitrogen removal of extremely ammonia concentrated wastewater [J]. *Water Research*, 2003, **37**(5): 1100-1110.
- [8] Ma Y W, Sundar S, Park H, *et al.* The effect of inorganic carbon on microbial interactions in a biofilm nitrification-anammox process [J]. *Water Research*, 2015, **70**: 246-254.
- [9] Yang J C, Zhang L, Fukuzaki Y, *et al.* High-rate nitrogen removal by the Anammox process with a sufficient inorganic carbon source [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(24): 9471-9478.
- [10] Kimura Y, Isaka K, Kazama F. Effects of inorganic carbon limitation on anaerobic ammonium oxidation (anammox) activity [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(6): 4390-4394.
- [11] Hu Y S, Zhao X H, Zhao Y Q. Achieving high-rate autotrophic nitrogen removal via Canon process in a modified single bed tidal flow constructed wetland [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, **237**: 329-335.
- [12] 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.
- [13] Tokutomi T, Yamauchi H, Nishimura S, *et al.* Application of the nitrification and anammox process into inorganic nitrogenous wastewater from semiconductor factory [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2011, **137**(2): 146-154.
- [14] 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.
- [15] Guisasola A, Petzet S, Baeza J A, *et al.* Inorganic carbon

- limitations on nitrification: experimental assessment and modelling [J]. *Water Research*, 2007, **41**(2): 277-286.
- [16] 李祥, 王悦, 黄勇, 等. HCO_3^- 在部分亚硝化中功能及对亚硝化效能影响[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(3): 757-763.
- [17] Villaverde S, García-Encina P A, Fdz-Polanco F. Influence of pH over nitrifying biofilm activity in submerged biofilters [J]. *Water Research*, 1997, **31**(5): 1180-1186.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Fux C, Siegrist H. Nitrogen removal from sludge digester liquids by nitrification/denitrification or partial nitrification/anammox: environmental and economical considerations [J]. *Water Science and Technology*, 2004, **50**(10): 19-26.
- [21] Jin R C, Yu J J, Ma C, *et al.* Transient and long-term effects of bicarbonate on the ANAMMOX process [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, **98**(3): 1377-1388.
- [22] Zhang J B, Zhou J, Yi H, *et al.* Start-up and bacterial communities of single-stage nitrogen removal using anammox and partial nitrification (SNAP) for treatment of high strength ammonia wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **169**: 652-657.
- [23] Kanders L, Areskoug T, Schneider Y, *et al.* Impact of seeding on the start-up of one-stage deammonification MBBRs [J]. *Environmental Technology*, 2014, **35**(22): 2767-2773.
- [24] Joss A, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Full-Scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitrification and anammox in one SBR [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(14): 5301-5306.

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