

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估与案例分析	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估	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)	

厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水

张诗颖^{1,2}, 吴鹏^{1,2}, 宋吟玲^{1,2,3*}, 沈耀良^{1,2,3}, 张婷¹

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 苏州 215009; 3. 苏州科技学院江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 利用 ABR 反应器在温度为 27℃, pH 为 8, HRT 为 10 h, 进水 $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 1.32 条件下, 在 45 d 内成功启动厌氧氨氧化反应, 稳定阶段反应器出水 TN 平均去除率为 83%, 此阶段的三氮比 $\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N} : \Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 1:1.31:0.27。在利用厌氧氨氧化反应器处理实际污水过程中, 进水中不可避免地含有一定量的有机碳。在 C/N 比为 0.5 时, 有机碳对厌氧氨氧化反应无明显影响; 厌氧氨氧化菌与反硝化菌的最佳协同作用条件为 C/N = 1, 此时 TN 平均去除率为 93%; 在 C/N 比为 2 时有机碳会对厌氧氨氧化菌产生抑制作用, 导致 TN 去除率降低; 降低进水 COD 浓度后, 厌氧氨氧化菌能在短时间内恢复活性。考察了厌氧氨氧化与反硝化协同作用对城市污水的处理性能, 证明 ABR 协同脱氮反应器适用于处理低氨氮浓度城市污水, 出水 TN 浓度为 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 平均去除率达 86%。

关键词: 厌氧氨氧化; 反硝化; 协同作用; 城市污水; 有机负荷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4174-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.031

Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage

ZHANG Shi-ying^{1,2}, WU Peng^{1,2}, SONG Yin-ling^{1,2,3*}, SHEN Yao-liang^{1,2,3}, ZHANG Ting¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: In this study, an Anaerobic Baffled Reactor (ABR) was constructed. The ANAMMOX process was successfully started up using this reactor within 45 days under the following condition: 27℃, pH of 8, HRT of 10 h, and the influent $\text{NO}_2^- - \text{N}/\text{NH}_4^+ - \text{N}$ was 1.32. At the stable phase, the average TN removal percentages reached 83% and the $\Delta\text{NH}_4^+ - \text{N} : \Delta\text{NO}_2^- - \text{N} : \Delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ was 1:1.31:0.27. In the process of treating municipal sewage, there was inevitably a certain amount of organic carbon in the influent. Organic carbon had no obvious effect on the ANAMMOX process at C/N of 0.5; Nitrogen removal was improved, and the average total nitrogen (TN, including ammonia, nitrite and nitrate nitrogen) removal efficiency of 93% was obtained at C/N of 1. However, at C/N of 2, the TN removal performance reduced due to the suppression of ANAMMOX by organic carbon; the ANAMMOX bacteria could recover their activity in a short period of time by reducing the influent COD concentration. In this work, the performance of the ANAMMOX-denitrification process in the treatment of municipal sewage was investigated, which proved the suitability of ABR-denitrification reactor in treating municipal sewage with low ammonia nitrogen concentration, with an effluent TN concentration of $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the average TN removal percentages reaching 86%.

Key words: ANAMMOX; denitrification; synergistic effect; municipal sewage; organic loading

传统城市生活污水处理主要采用硝化-反硝化工艺,通过高曝气量和外加源来达到脱氮的效果,产生很多不必要的处理费用^[1]。厌氧氨氧化自养脱氮工艺相对于传统脱氮工艺可节省 60% 的曝气量,无需有机碳作为碳源,从而可以充分利用城市污水中的有机物产生能源物质——甲烷^[2],且不会产生 CO_2 和 N_2O ,是一种可持续污水处理技术^[3,4]。

但是厌氧氨氧化菌对有机物、DO、温度和光等环境因素非常敏感,而预处理过后的生活污水仍会含有一定量的 COD、DO 等物质,使得厌氧氨氧化系统受到影响^[5~7]。Kalyuzhnyi 等^[8]发现,厌氧氨氧化菌和反硝化菌可以共生,通过两种细菌的协同作用,

可以有效地克服有机物对于厌氧氨氧化反应的抑制;Toh 等^[9]在利用厌氧氨氧化菌处理焦化废水的研究中发现了反硝化菌的存在;Sabumon 等^[10]证实了有机碳存在的环境下,厌氧氨氧化反应能够进行,且在 ORP 为 $(-248 \pm 25) \text{ mV}$ 时一部分 NH_4^+ 会被氧化为 NO_3^- 通过反硝化作用被去除。本研究以

收稿日期: 2015-05-11; 修订日期: 2015-06-25

基金项目: 江苏省高校自然科学研究重大项目(12KJA610002); 苏州市环保科技项目(B20130502); 江苏高校优势学科建设工程项目; 环境工程江苏省重点专业类项目

作者简介: 张诗颖(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为废水处理理论与技术,E-mail: zhangshiyong0914@sina.com

* 通讯联系人,E-mail: yinling-song@hotmail.com

NH_4^+-N 、 NO_3^--N 为基质成功启动了 ANAMMOX 反应器,并逐步向反应器内添加有机物,分析不同 C/N 比对厌氧氨氧化反应的影响,以期为厌氧氨氧化工艺处理城市生活污水的实际应用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 工艺流程和装置

实验所用装置分为 ABR 去碳反应器和 ABR

厌氧氨氧化反应器两个部分(见图 1),均由有机玻璃制成。厌氧氨氧化反应器长 20 cm,宽 14 cm,高 28 cm,有效容积为 2.7 L。反应器分为两个格室,每格室升降流向隔间宽度比为 6:1,折流板导向角为 45° ,将反应器遮光放置于水浴缸之中,温度维持在 27°C 左右。反应器采用连续进水和溢流出水的方式,采用蠕动泵控制进水量从而控制水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)。

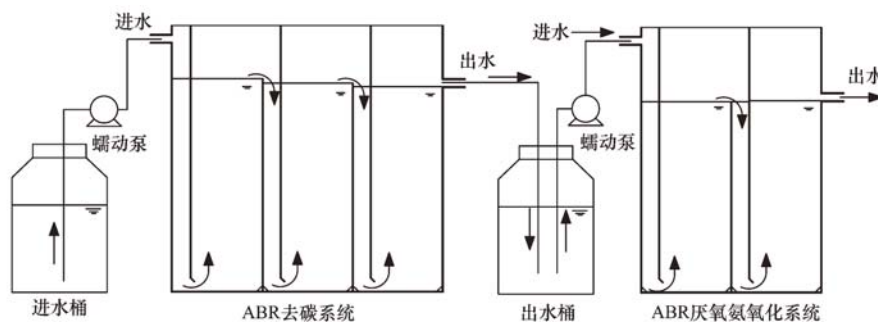


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic drawing of the ABR-ANAMMOX reactor

1.1.2 接种污泥

本实验 ABR 厌氧氨氧化系统所用污泥由实验室培养成熟的厌氧氨氧化颗粒污泥和厌氧颗粒污泥按 1:1 接种,接种量共 1 L。接种初期反应器混合液 MLSS 为 $8.5 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥容积指数(SVI)为 39 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$,污泥沉降性能良好。

1.1.3 实验进水

ABR 厌氧氨氧化系统根据进水不同分为 3 个阶段。第一阶段,进水采用人工配水,根据厌氧氨氧化反应化学计量比 1:1.32^[11],由 NH_4Cl 提供 NH_4^+-N ,浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$; NaNO_2 提供 NO_2^--N ,浓度为 $65 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;第二阶段,向反应器内逐渐增加乙酸钠作为有机物,浓度为 $0 \sim 200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,采用 NaHCO_3 调节进水 pH 在 8 左右,并添加 KH_2PO_4 、 MgSO_4 、 CaCl_2 和微量元素;第三阶段采用实验室稳定运行的 ABR 出水,另外再投加 NaNO_2 作为基质,作为本阶段厌氧氨氧化反应器用水。实验室采用 ABR 反应器处理城市生活污水,已稳定运行 120 d,出水 COD 浓度在 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右, NH_4^+-N 在 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,另外投加 NaNO_2 调节进水 NO_2^--N 浓度为 $39 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,采用 NaHCO_3 调节进水 pH 为 8。

1.2 分析项目及方法

1.2.1 分析方法

根据文献[12]所列主要水质指标的测试方法:

COD,快速消解分光光度法; NH_4^+-N ,纳氏试剂分光光度法; NO_2^--N ,N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO_3^--N ,紫外分光光度法; TN,过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; pH 采用 pHs-9V 数显酸度计测定;溶解氧,YSI550A 溶氧仪; MLSS,滤纸称重法。

1.2.2 实验方法

本实验分为 3 个阶段,第 I 阶段,利用 ABR 反应器,维持 HRT 为 10 h,在无有机碳源、低氨氮负荷的条件下培养厌氧氨氧化菌,启动厌氧氨氧化反应。第 II 阶段,为考察反应器对含有有机物、氨氮和亚硝酸盐的低 C/N 比污水的处理性能,逐步向反应器内添加乙酸钠作为有机碳源,研究厌氧氨氧化与反硝化的协同作用,并调节 C/N 比为 0.5、1 和 2,考察不同 C/N 比条件下厌氧氨氧化协同反硝化反应的脱氮性能。第 III 阶段,进水基质变为预处理后的生活污水,进一步考察厌氧氨氧化协同反硝化反应器处理城市生活污水的性能。

2 结果与分析

2.1 厌氧氨氧化反应器的启动

本实验反应器在无有机碳源、低氨氮负荷的条件下进行启动(1~45 d),进水 NO_2^--N 和 NH_4^+-N 浓度按照 1:1.3 配水,分别为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 65

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 为 10 h, pH 为 8, TN 负荷为 $0.7 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 以厌氧氨氧化颗粒污泥和反硝化颗粒污泥混合接种启动反应器。

反应器启动前 10 d, 反应器处于适应期, NH_4^+ -N 去除率较低, NO_2^- -N 去除率逐渐升高(图 2)。这是因为接种污泥在新环境中, 有一部分菌群裂解、死亡, 被异养菌分解产生大量 NH_4^+ -N, 导致出水 NH_4^+ -N 含量较高^[13]。而接种的反硝化颗粒污泥可以利用细菌分解产生的有机物进行反硝化作用, 将 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 转化为 N_2 , 导致出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 含量较低。

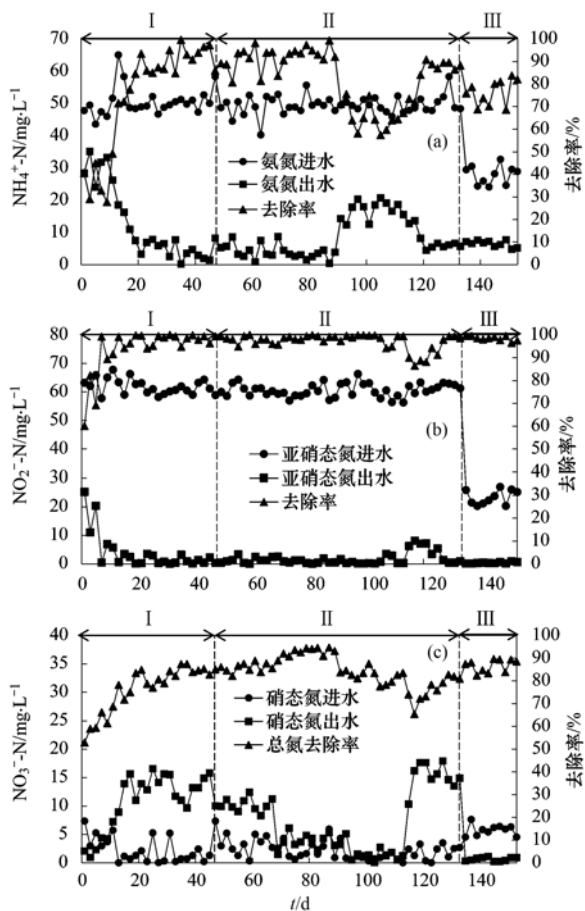
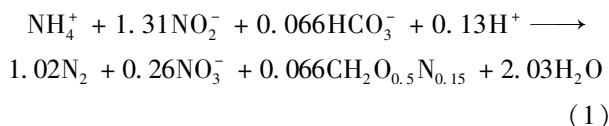


图 2 ABR 反应器运行期间脱氮性能

Fig. 2 Nitrogen removal performance during operation of ABR

经过半个月左右的运行, 反应器 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 去除率不断升高, 但出水 NO_3^- -N 浓度呈上升趋势。根据报道 1 mol NH_4^+ 与 1.31 mol NO_2^- 反应除生成 N_2 之外^[10], 还会产生 0.26 mol 的 NO_3^- [见式(1)], 会导致出水中含有一定量的 NO_3^- -N。而反应器内有机物在第一阶段被消耗完后, 由于缺少碳源, 反硝化反应无法进行, 导致出水 NO_3^- -N 含量开始增加。



经过一段时间的培养, 反应器出水水质稳定在较高水平。反应器出水 NO_2^- 、 NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度平均值分别为 1.1、4.1 和 $13.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 平均去除率为 83%。图 3 为厌氧氨氧化反应器反应化学计量学关系, 显示了反应器 NO_2^- -N 的去除量与 NH_4^+ -N 去除比值 (ΔNO_2^- -N/ ΔNH_4^+ -N) 和 NO_3^- -N 的产生量与 NH_4^+ -N 去除量的比值 (ΔNO_3^- -N/ ΔNH_4^+ -N) 随时间的变化关系。厌氧氨氧化反应的三氮比 ΔNH_4^+ -N: ΔNO_2^- -N: ΔNO_3^- -N 理论值为 1:1.32:0.26^[10], 除了厌氧氨氧化反应, 反应器内可能存在的反硝化反应和硝化反应对这两个计量学参数都有影响^[2], 因此反应器内的化学计量学关系和出水的水质可以用于作为厌氧氨氧化反应器启动成功的标准。该阶段平均三氮比 ΔNH_4^+ -N: ΔNO_2^- -N: ΔNO_3^- -N 为 1:1.31:0.27, 接近理论值, 表现出明显的厌氧氨氧化特性, 说明厌氧氨氧化反应器启动成功。

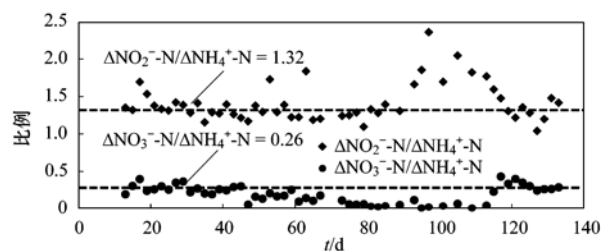


图 3 运行期间厌氧氨氧化反应的化学计量学关系

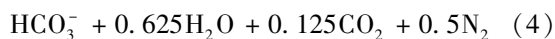
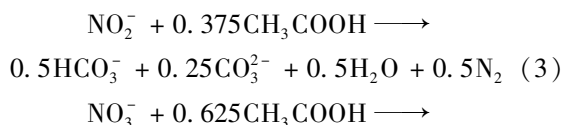
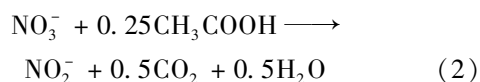
Fig. 3 Stoichiometry of ANAMMOX during operation

2.2 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮

从图 2(a)~2(c) 可以看出, NO_3^- -N 占了出水 TN 的 70% 以上, 是导致 TN 去除率较低的主要因素。在利用厌氧氨氧化反应器处理实际污水过程中, 进水中不可避免地含有一定量的有机碳。有研究表明, 厌氧氨氧化菌与反硝化菌能在一个反应器内共存, 反硝化菌利用有机物将反应器内的 NO_3^- 转化为 N_2 , 可解除有机物对厌氧氨氧化的抑制作用; 同时反硝化产生的 CO_2 还可为厌氧氨氧化提供无机碳源, 两者可实现协同作用^[14]。但是过高的 COD 会导致反硝化菌的过度繁殖, 与厌氧氨氧化菌竞争并优先利用 NO_2^- , 从而抑制厌氧氨氧化菌活性^[9]。因此在第 II 阶段 (46~132 d), 本实验设计了不同的进水 COD/TN (C/N) 比, 考察 ABR 反应器中 COD 对脱氮的影响以及厌氧氨氧化菌和反硝化菌的相互作用。

2.2.1 C/N 比为 0.5

向进水中添加少量的有机物,维持进水 C/N 比在 0.5 左右(46 ~ 67 d)。从图 2 可以看出,反应器 NO_2^- 和 NH_4^+ 去除率无明显变化,但是出水平均 NO_3^- -N 浓度从未添加有机物时(阶段 1)的 $13.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $10.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,下降了 25%,TN 去除率从 83% 上升到 85%。本阶段平均三氮比为 1:1.35:0.15, ΔNO_2^- -N/ ΔNH_4^+ -N 比理论值偏大, ΔNO_3^- -N/ ΔNH_4^+ -N 比理论值偏小,说明反应器内有一部分 NO_2^- 和 NO_3^- 通过反硝化作用被去除。因为本实验反应器中接种了一部分厌氧颗粒污泥,导致反应器内含有一定量的反硝化菌,进水中加入了有机碳后反应器中的异养反硝化细菌被迅速激活,将 NO_2^- 和厌氧氨氧化反应产生的一部分 NO_3^- 还原为 N_2 。这与文献[15 ~ 18]的研究结果一致, COD/ NH_4^+ -N 比值在 0 ~ 1.57 之间对厌氧氨氧化过程去除 NH_4^+ 和 NO_2^- 无明显影响,反而可以通过异养反硝化过程提高 TN 去除率。



从文献[14,15]可知,在有机物存在的厌氧氨氧化反应器内主要存在着厌氧氨氧化反应(ANAMMOX)[式(1)]、短程异养反硝化反应 1[式(2)]、短程异养反硝化反应 2[式(3)]和全程异养反硝化过程(denitrification)[式(4)]。在这些反应中,厌氧氨氧化反应无需有机碳源,厌氧氨氧化菌可利用 NH_4^+ 作为电子供体,与 NO_2^- 反应生成 N_2 达到脱氮的目的。短程异养反硝化反应 1、短程异养反硝化反应 2 和全程异养反硝化反应需要以有机碳源作为电子供体,实现 NO_3^- 和 NO_2^- 的还原。因此氮的去除途径可以通过计算短程硝化作用的反应 1、2 和全程反硝化作用消耗的 COD 和去除的 TN 来推出,见公式(5)~(6)。图 4 为基于实验结果和上述提到的式(1)~(4)而计算出的结果。推测在第二阶段, C/N 比为 0.5 时,通过厌氧氨氧化途径去除的氮平均占 80%,异养反硝化的贡献占 18%,其他方式如氨挥发、微生物合成作用等占 2%,证明在 C/N 比为 0.5 时,厌氧氨氧化占脱氮过程的主导地位。

$$\text{TN}_{\text{removal}} = [\text{NH}_4^+] + [\text{NO}_2^-]_{\text{A}} +$$

$$[\text{NO}_2^-]_2 + [\text{NO}_3^-]_{\text{d}} \quad (5)$$

$$\text{COD}_{\text{removal}} = 2.68[\text{NO}_3^-]_{\text{d}} + 1.71[\text{NO}_2^-]_2 + 1.08[\text{NO}_3^-]_1 \quad (6)$$

2.2.2 C/N 比为 1

当 C/N 比由 0.5 上升为 1(68 ~ 89 d),如图 2 所示,随着 COD 浓度的升高,反应器 NO_2^- 和 NH_4^+ 去除率仍无明显变化,但是出水 NO_3^- 浓度大幅度下降到 $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,对 TN 平均去除率也维持在 90% 以上,反应器达到良好的脱氮效果。从图 4 中可以看出,反硝化所占比例增加,通过反硝化去除的氮已经占 34%。显然,充足的有机物可以增强反硝化作用达到更高的总氮去除率。

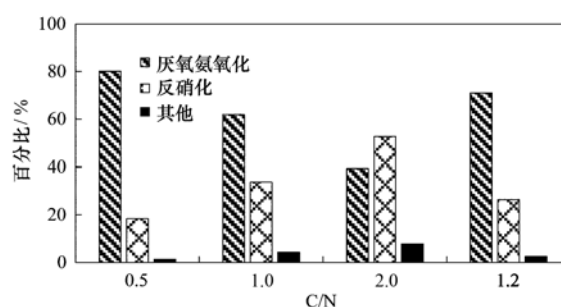


图 4 ABR 反应器氮去除分析

Fig. 4 Nitrogen removal analysis of ABR

在 79 ~ 89 d 期间,出水水质保持稳定, TN 平均去除率为 94%,说明厌氧氨氧化菌和异养反硝化菌能共存并协同脱氮。有研究发现^[17,21,22],当 COD/ NO_2^- 比为 2 时,整个反应周期过程中都有亚硝酸盐的存在,可以避免在有机条件下异养反硝化过程对厌氧氨氧化反应的抑制。当反应体系中亚硝酸盐充足时,反硝化过程对厌氧氨氧化活性无明显影响。厌氧氨氧化菌与反硝化菌在对亚硝酸盐的竞争中达到平衡,是其维持协同作用的关键。赖杨岚等^[23]在采用 UASB 反应器培养厌氧氨氧化菌时发现最佳 COD/TN 比为 1.46,在 COD/TN 比大于 2 时会抑制厌氧氨氧化菌的活性。高范^[19]的研究表明在 COD: NO_2^- : NH_4^+ 为 0.6:1.26:1 时达到最佳的总氮去除率。从上文可以得出,在较低 C/N 比条件下时,有机物不会破坏厌氧氨氧化反应的进行,厌氧氨氧化菌能与异养反硝化菌共生,并可以进一步提高反应器脱氮效率。

2.2.3 C/N 比为 2

综上实验结果中可以看出当 C/N 比为 0.5 和 1 时,有机物的存在对厌氧氨氧化反应没有显著的影响,厌氧氨氧化菌和反硝化菌能在较低的有机物浓度($\text{COD} < 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)下共存并实现协同脱氮。但

是在实际废水处理过程中,进水 COD 经常会出现较大的波动,因此本实验探究了在较高的 C/N 比条件下反应器的脱氮效果。

在第 90 ~ 109 d,进水的 C/N 比提高到 2 时,从图 2 可以看出,出水 NH_4^+ 浓度大幅上升, NO_2^- 和 NO_3^- 浓度依然稳定在较低水平,此阶段三氮比平均值为 1:1.89:0.01。在高 C/N 比条件下,异养反硝化菌活性增强,反应器内绝大部分 NO_3^- 通过反硝化作用被去除;而 $\Delta\text{NO}_2^- \text{-N}/\Delta\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 大幅度上升,说明大量的 NO_2^- 被用于反硝化反应,反应器内厌氧氨氧化菌由于缺少电子受体活性受到抑制。TN 的平均去除率下降至 78%,通过厌氧氨氧化途径去除的氮仅占 39%,异养反硝化脱氮占总氮去除的 52%。在有机物、氨和亚硝酸盐共存时,反硝化反应的吉布斯自由能 ($-427 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) 低于厌氧氨氧化反应 ($-335 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$),反硝化过程更容易发生,更容易得到其共同的电子受体 NO_2^- [24];另外,反硝化菌增长速率远大于厌氧氨氧化菌 [25],导致厌氧氨氧化菌被抑制。在本阶段,反应器内的反硝化菌已经超过厌氧氨氧化菌成为主导,厌氧氨氧化菌和反硝化菌的协同作用被破坏 [26]。

2.2.4 厌氧氨氧化反应器的恢复

反应器内 C/N 比为 2,即 COD 为 $200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右时,由于厌氧氨氧化菌活性大大降低,导致 TN 去除率急剧下降,为了考察厌氧氨氧化反应器在有机负荷冲击下的恢复能力,在第 110 ~ 133 d,采用不含有机碳的进水培养厌氧氨氧化菌。

由图 2 中可以看出,经过一段时间的驯化,出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度逐渐下降,但是 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度呈上升趋势,说明在缺少有机碳的条件下,反硝化反应受到抑制。在第 127 d $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的去除率达到 89%, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 出水浓度下降至 $1.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN 去除率恢复至 81%。此时反应器三氮比为 1:1.32:0.26,说明厌氧氨氧化菌的活性受到较高浓度有机物的抑制后,经过无机进水的驯化,可在较短时间内得到恢复。厌氧氨氧化菌中的浮霉菌门微生物能耐受高浓度有机碳源,在高有机负荷下仍能保持高效的脱氮作用 [27]。本实验采用颗粒污泥富集厌氧氨氧化菌,污泥流失量较少,在有机负荷的冲击下,厌氧氨氧化菌活性受到抑制,但是数量并未大量减少,此特性可以使反应器在有机负荷降低之后迅速恢复,使反应器具有一定的抗冲击负荷能力。

2.3 厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水

目前,厌氧氨氧化工艺已被用于处理实际高氨

氮废水,例如垃圾渗滤液 [28]、污泥消化液 [29]、畜禽粪便废水 [30] 等,采用此工艺处理低氨氮浓度的实际生活污水的研究较为少见。本实验中,采用厌氧氨氧化协同反硝化工艺处理低负荷含氮废水,在 NH_4^+ 浓度为 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,C/N 比为 1 时,可得到良好的处理效果,TN 去除率可稳定在 90% 以上,并具有一定的抗有机负荷冲击能力。为考察厌氧氨氧化协同反硝化反应器处理城市生活污水的性能,采用实验室稳定运行的 ABR 出水,另外再投加 NaNO_2 提供 $\text{NO}_2^- \text{-N}$,作为本阶段厌氧氨氧化反应器用水。

在第 III 阶段 (133 ~ 153 d),厌氧氨氧化反应器进水 C/N 比在 1.1 左右,经过 20 d 的运行,反应器出水水质稳定,出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 均低于 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,出水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 平均浓度为 $6.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN 平均浓度为 $7.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN 平均去除率达到 86%。经分析此阶段经厌氧氨氧化反应去除的氮占去除 TN 的 71%,经异养反硝化反应去除的氮占 26%,其他途径占 3%,厌氧氨氧化菌与反硝化菌在此条件下能实现协同脱氮。

卢健聪等 [31] 采用“甲烷化 + 半亚硝化 + 厌氧氨氧化脱氮”联合工艺处理模拟城市污水,出水 TN < $4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解性 COD < $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,达到了良好的处理效果。这种 3 段式处理工艺,可以充分利用各个反应器的特点,联合起来达到产甲烷除 COD 和厌氧氨氧化脱氮的目的。除三相式反应器之外,有研究者利用单相反应器实现厌氧氨氧化脱氮。Lotti 等 [32] 利用 SBAR 反应器实现了短程硝化-厌氧氨氧化脱氮,该反应器在 10°C 、进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,仍能运行良好。本实验采用 ABR 反应器,在不同格室内培养优势微生物,实现一体化除碳脱氮,有利于厌氧氨氧化工艺的实际应用。

3 结论

(1) 利用 ABR 反应器 1:1 混合接种厌氧氨氧化颗粒污泥和厌氧颗粒污泥,可在 45 d 内快速启动厌氧氨氧化反应,并实现稳定运行。反应器出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度平均值分别为 1.1、4.1 和 $13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,总氮平均去除率为 83%,该阶段三氮比为 1:1.31:0.27。

(2) 向反应器内加入少量的有机物 (COD < $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),可以通过厌氧氨氧化菌和反硝化菌的协同作用提高 TN 去除率。C/N 比为 1 时,反应器可达到最佳处理效果,对 TN 去除率维持在 90% 以上;

C/N 升高到 2 时,在高 COD 的影响下,厌氧氨氧化反应受到抑制,TN 去除率下降;通过降低进水 COD 浓度可以使受有机碳抑制的反应器快速恢复,说明协同脱氮反应器可以抵抗一定的有机负荷冲击。

(3)采用厌氧氨氧化协同反硝化反应器处理城市污水,出水 NO_2^- -N 和 NO_3^- -N 均低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, NH_4^+ -N 和 TN 平均浓度分别为 $6.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,TN 平均去除率达到 86% 以上,说明协同脱氮反应器可以高效稳定地处理城市生活污水。

参考文献:

- [1] Fu Z M, Yang F L, An Y Y, *et al.* Characteristics of nitrite and nitrate in situ denitrification in landfill bioreactors [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(12): 3015-3021.
- [2] 马斌. 城市污水连续流短程硝化厌氧氨氧化脱氮工艺与技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [3] Kartal B, Kuenen J G, Van Loosdrecht M C M. Sewage treatment with anammox[J]. *Science*, 2010, **328**(5979): 702-703.
- [4] Staley J T, Bryant M P, Pfennig N, *et al.* *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology* (Vol. 3) [M]. Williams & Wilkins, 2001. 1807-1835.
- [5] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [6] Gut L, Plaza E, Trela J, *et al.* Combined partial nitrification/ANAMMOX system for treatment of digester supernatant [J]. *Water Science & Technology*, 2006, **53**(12): 149-159.
- [7] 王欢, 裴伟征, 李旭东, 等. 低碳氮比猪场废水短程硝化反硝化-厌氧氨氧化脱氮[J]. *环境科学*, 2009, **30**(3): 815-821.
- [8] Kalyuzhnyi S, Gladchenko M, Mulder A, *et al.* New anaerobic process of nitrogen removal [J]. *Water Science & Technology*, 2006, **54**(8): 163-170.
- [9] 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.
- [10] Sabumon P C. Anaerobic ammonia removal in presence of organic matter: a novel route[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **149**(1): 49-59.
- [11] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [12] 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.
- [13] 王晓霞, 于德爽, 李津, 等. ASBR 厌氧氨氧化反应器的快速启动及脱氮原理分析[J]. *环境工程学报*, 2012, **6**(6): 1834-1840.
- [14] 周少奇. 厌氧氨氧化与反硝化协同作用化学计量学分析[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, **34**(5): 1-4.
- [15] Kumar M, Lin J G. Co-existence of anammox and denitrification for simultaneous nitrogen and carbon removal—strategies and issues[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **178**(1-3): 1-9.
- [16] 胡勇有, 梁辉强, 朱静平, 等. 有机碳源环境下的厌氧氨氧化批次实验[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2007, **35**(6): 116-119, 142.
- [17] 操沈彬, 王淑莹, 吴程程, 等. 有机物对厌氧氨氧化系统的冲击影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(12): 2164-2169.
- [18] Ni S Q, Ni J Y, Hu D L, *et al.* Effect of organic matter on the performance of granular anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **110**: 701-705.
- [19] 高范. 基于厌氧水解-硝化-反硝化/厌氧氨氧化技术的城市污水脱氮工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [20] 朱静平, 胡勇有, 闫佳. 有机碳源条件下厌氧氨氧化 ASBR 反应器中的主要反应[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1353-1357.
- [21] Du R, Peng Y Z, Cao S B, *et al.* Advanced nitrogen removal with simultaneous Anammox and denitrification in sequencing batch reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **162**: 316-322.
- [22] 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.
- [23] 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): 6-10.
- [24] Güven D, Dapena A, Kartal B, *et al.* Propionate oxidation by and methanol inhibition of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(2): 1066-1071.
- [25] 唐崇俭, 郑平, 陈建伟. 流加菌种对厌氧氨氧化工艺的影响[J]. *生物工程学报*, 2011, **27**(1): 1-8.
- [26] Tang C J, Zheng P, Zhang L, *et al.* Enrichment features of anammox consortia from methanogenic granules loaded with high organic and methanol contents [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(6): 613-619.
- [27] 陈重军, 朱为静, 黄孝肖, 等. 有机碳源下废水厌氧氨氧化同步脱氮除碳[J]. *生物工程学报*, 2014, **30**(12): 1835-1844.
- [28] Rusalleda M, López H, Ganigué R, *et al.* Heterotrophic denitrification on granular anammox SBR treating urban landfill leachate [J]. *Water Science & Technology*, 2008, **58**(9): 1749-1755.
- [29] Furukawa K, Inatomi Y, Qiao S, *et al.* Innovative treatment system for digester liquor using anammox process [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(22): 5437-5443.
- [30] Molinuevo B, García M C, Karakashev D, *et al.* Anammox for ammonia removal from pig manure effluents: effect of organic matter content on process performance [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100**(7): 2171-2175.
- [31] 卢健聪, 高大文, 孙学影. 基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1435-1441.
- [32] Lotti T, Kleerebezem R, Hu Z, *et al.* Simultaneous partial nitrification and anammox at low temperature with granular sludge [J]. *Water Research*, 2014, **66**: 111-121.

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