

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第4期

Vol.37 No.4

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年12月上海市重度污染期间细颗粒物化学特征与输送轨迹影响 周敏, 乔利平, 朱书慧, 李莉, 楼晟荣, 王红丽, 陶士康, 黄成, 陈长虹 (1179)

利用 SPAMS 研究华北乡村站点(曲周)夏季大气单颗粒物老化与混合状态 黄子龙, 曾立民, 董华斌, 李梅, 朱彤 (1188)

南京大气气溶胶混合态与云凝结核活化特征研究 朱麟, 马嫣, 郑军, 李时政, 王利朋 (1199)

北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 苏捷, 赵普生, 陈一娜 (1208)

重庆市主城区 PM_{2.5}时空分布特征 刘永林, 孙启民, 钟明洋, 钟部卿, 雒昆利 (1219)

大气细颗粒物中有机碳和元素碳监测方法对比 庞博, 吉东生, 刘子锐, 朱彬, 王跃思 (1230)

深圳市大气中全氟化合物的残留特征 何鹏飞, 张鸿, 李静, 何龙, 罗骥, 刘国卿, 沈金灿, 杨波, 崔晓宇 (1240)

北京上甸子站大气 CO₂ 及 δ¹³C(CO₂) 本底变化 夏玲君, 周凌晔, 刘立新, 张根 (1248)

梅雨期大学宿舍室内生物气溶胶浓度及粒径分布 刘婷, 李露, 张家泉, 占长林, 刘红霞, 郑敬茹, 姚瑞珍, 曹军骥 (1256)

城市黑臭水体空气微生物污染及健康风险 刘建福, 陈敬雄, 辜时有 (1264)

北京市典型室内外灰尘中重金属的粒径和季节变异特征及人体暴露评估 曹治国, 余刚, 吕香英, 王梦蕾, 李琦路, 冯精兰, 闫广轩, 余浩, 孙剑辉 (1272)

西安市地表灰尘中多环芳烃分布特征与来源解析 王丽, 王利军, 史兴民, 卢新卫 (1279)

PDMS 基涂层活性炭对甲苯、苯和丙酮吸附研究 刘寒冰, 姜鑫, 王新, 杨兵, 薛南冬, 张石磊 (1287)

海南东北部滨海湿地沉积物微量元素分布特征、来源及污染评价 张卫坤, 甘华阳, 闭向阳, 王家生 (1295)

曹妃甸围填海土壤重金属积累的磁化率指示研究 薛勇, 周倩, 李远, 章海波, 胡雪峰, 骆永明 (1306)

滇南蒙自地区降水稳定同位素特征及其水汽来源 李广, 章新平, 许有鹏, 宋松, 王跃峰, 季晓敏, 项捷, 杨洁 (1313)

江苏省浅水湖泊表层沉积物重金属 GIS 空间分布及生态风险评价 李莹杰, 张列宇, 吴易雯, 李曹乐, 杨天学, 唐军 (1321)

城市景观水体甲基汞的形成机制及微宇宙模拟研究 刘小红, 司友斌, 郭子薇, 杜成竹, 朱聪聪 (1330)

我国北方温带水库——周村水库季节性热分层现象及其水质响应特性 曾明正, 黄廷林, 邱晓鹏, 王亚平, 史建超, 周石磊, 刘飞 (1337)

额尔齐斯河源区融雪期积雪与河流的水化学特征 韦虹, 吴锦奎, 沈永平, 张伟, 刘世伟, 周嘉欣 (1345)

太原汾河景区浮游植物群落结构及其与环境因子关系分析 冯佳, 郭宇宁, 王飞, 吕俊平, 刘琪, 谢树莲, 程革, 张建民 (1353)

铜陵市河流沉积物中硝化和反硝化微生物分布特征 程建华, 窦智勇, 孙庆业 (1362)

基流对亚热带农业流域氮素输出的贡献研究 马秋梅, 李玮, 王毅, 刘新亮, 李勇, 吴金水 (1371)

重庆南山表层岩溶泉与地下河三氮运移及氮通量估算 张远瞩, 贺秋芳, 蒋勇军, 李勇 (1379)

山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 张文慧, 许秋瑾, 黄天寅 (1389)

伊乐藻-固定化脱氮微生物技术对入贡湖河道脱氮机制的影响 韩华杨, 李正魁, 王浩, 朱倩 (1397)

环太湖不同性质河流水体磷的时空分布特征 高永霞, 宋玉芝, 于江华, 朱广伟 (1404)

藻类与扰动共存下水体中不同形态磷的数量分布规律 陈俊, 李勇, 李大鹏, 黄勇, 朱培颖 (1413)

扰动对悬浮颗粒物粒径及上覆水中磷形态分布的影响 郭俊锐, 李大鹏, 刘焱见 (1422)

锆改性高岭土覆盖对底泥与上覆水之间磷迁移转化的影响 章喆, 林建伟, 詹艳慧, 王虹 (1427)

电化学还原-氧化工艺降解 4-氯酚的毒性研究 王岩, 施钦, 王辉, 卞兆勇 (1437)

水合氧化铝负载的磁性核/壳结构 Fe₃O₄@SiO₂ 纳米颗粒对水中磷的去除及再利用 赖立, 谢强, 方文侃, 邢明超, 吴德意 (1444)

多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 刘会娟, 曲久辉 (1451)

污水处理厂污泥水溶性有机物的光谱特性分析 牛天浩, 周振, 胡大龙, 魏海娟, 李晶, 窦微笑, 葛红花 (1460)

高含氟的光伏废水反硝化可行性及经济性分析 李祥, 朱亮, 黄勇, 杨朋兵, 崔剑虹, 马航 (1467)

连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制 吴鹏, 张诗颖, 宋吟吟, 徐乐中, 沈耀良 (1472)

反硝化颗粒污泥在纳米零价铁胁迫下的性能恢复 王翻翻, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳, 张月茹, 刘郭洵 (1478)

低浓度环丙沙星对曝气生物滤池生物膜硝化过程及硝化微生物的作用影响 何势, 顾超超, 魏欣, 黄圣琳, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1485)

低碳源条件下改良双污泥系统脱氮除磷优化研究 杨伟强, 王冬波, 李小明, 杨麒, 徐秋翔, 张志贝, 李志军, 向海弘, 王亚利, 孙剑 (1492)

短期保护性耕作措施对大豆-冬小麦轮作系统温室气体排放的影响 谢燕, 陈曦, 胡正华, 陈书涛, 张寒, 凌慧, 申双和 (1499)

不同封育年限荒漠草原土壤呼吸日、季动态变化及其影响因子 崔海, 张亚红 (1507)

塔里木盆地南缘典型绿洲土壤有机碳、无机碳与环境因子的相关性 贡璐, 朱美玲, 刘曾媛, 张雪妮, 解丽娜 (1516)

小分子有机酸对紫色土及其溶液中 Pb 的赋存影响 刘江, 江韬, 黄容, 张进忠, 陈宏 (1523)

鸢尾对石油烃污染土壤的修复以及根系代谢分析 王亚男, 程立娟, 周启星 (1531)

水锰矿氧化水溶性硫化物过程及其影响因素 罗瑶, 李珊, 谭文峰, 刘凡, 蔡崇法, 邱国红 (1539)

高温纤维素降解菌群筛选及产酶特性 冯红梅, 秦永胜, 李筱帆, 周金星, 彭霞薇 (1546)

基于固相萃取及高效液相色谱-荧光检测分析的污泥中氟喹诺酮类抗生素研究方法的开发 戴晓虎, 薛勇刚, 刘华杰, 戴翎翎, 严寒, 李宁 (1553)

养殖场周边土壤-蔬菜系统磺胺类药物残留及风险评价 金彩霞, 司晓薇, 王子英, 张琴文 (1562)

4 种典型 PPCPs 对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响 王兰君, 王金凤, 朱鲁生, 王军, 赵祥 (1568)

新型污染物卤代吡啉的环境行为及生态毒理效应 林坤德, 陈艳秋, 袁东星 (1576)

水源地土壤环境保护优先区划分方法与实例研究 李蕾, 王铁宇, 王晓军, 肖荣波, 李奇峰, 彭驰, 韩存亮 (1584)

《环境科学》征订启事(1218) 《环境科学》征稿简则(1370) 信息(1352, 1412, 1498)

连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制

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

(1. 苏州科技大学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. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 如何快速稳定地启动短程硝化工艺对低 C/N 比废水的处理具有十分重要的实际应用价值. 针对城市污水厂以连续流工艺为主的现状, 故对连续流反应器短程硝化的快速启动与维持进行研究. 结果表明, 利用间歇曝气, 依次控制 3 个阶段的停/曝时间 (15 min/45 min、45 min/45 min 和 30 min/30 min), 连续流反应器经过 60 d 左右的运行, 可以成功实现短程硝化的快速启动. 控制停/曝时间为 30 min/30 min, 进水氨氮浓度为 50 或 100 mg·L⁻¹ 时, 亚硝化率分别可达 90% 或 95%. 另外, 间歇曝气有利于抑制硝化菌 (NOB) 的活性, 而缩短水力停留时间 (HRT) 可淘洗出 NOB, 两者结合可以更好地维持短程硝化.

关键词: 连续流反应器; 短程硝化; 低 C/N 比污水; 间歇曝气

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)04-1472-06 DOI: 10.13227/j.hjkk.2016.04.036

Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor

WU Peng^{1,2}, ZHANG Shi-ying¹, SONG Yin-ling^{1,2}, XU Yue-zhong^{1,2}, SHEN Yao-liang^{1,2,3*}

(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 215009, China)

Abstract: How to achieve fast and stable startup of shortcut nitrification has a very important practical value for treatment of low C/N ratio wastewater. Thus, the quick start-up and sustaining of shortcut nitrification were investigated in continuous flow reactor targeting at the current situation of urban wastewater treatment plant using a continuous flow process. The results showed that quick start-up of shortcut nitrification could be successfully achieved in a continuous flow reactor after 60 days' operation with intermittent aeration and controlling of three stages of stop/aeration time (15 min/45 min, 45 min/45 min and 30 min/30 min). The nitrification rates could reach 90% or 95% respectively, while influent ammonia concentrations were 50 or 100 mg·L⁻¹ with stop/aeration time of 30 min/30 min. In addition, intermittent aeration could inhibit the activity of nitrite oxidizing bacteria (NOB), while short hydraulic retention time (HRT) may wash out NOB. And a combined use of both measures was beneficial to sustain shortcut nitrification.

Key words: continuous flow reactor; shortcut nitrification; low C/N ratio wastewater; intermittent aeration

采用传统生物脱氮工艺处理低 C/N 比废水 (如城市污水、生活污水等) 时, 会出现碳源不足, 工艺流程长, 脱氮效果达不到预期效果等问题, 短程硝化/厌氧氨氧化工艺不需要外加碳源^[1], 为此类废水的有效处理提供了可能, 因此如何实现稳定的短程硝化对低 C/N 值废水的处理具有十分重要的意义和应用价值. 目前, 绝大部分短程硝化工艺都是在 SBR 反应器内实现^[2~5], 虽然序批式反应器有利于灵活地控制运行条件, 对实现短程硝化十分有利^[6], 但是 SBR 反应器需要较大的高径比, 运行调控方式较为复杂, 且一体化反应器内异养菌与自养菌共生, 会导致反应器运行不稳定. 而且污水处理厂多选用连续流反应器, 便于管理, 运行成功后反应器运行更加稳定. 虽然利用 A/O 反应器在低氧环境 (溶解氧为 0.4~0.7 mg·L⁻¹) 可实现短程硝化处理生活污水, 但是连续充氧方式长期运行, NOB 会

逐渐适应低氧环境, 从而破坏短程硝化^[7]. 为此, 笔者在前期研究基础上^[8], 采用 CSTR 反应器, 采用间歇曝气的方式进行了低 C/N 值 (0.5~1) 废水的短程硝化启动过程研究, 并考察了短程硝化过程中氮的转化规律, 以为拓展连续流短程硝化反应器处理实际低 C/N 值废水的应用奠定基础.

1 材料与方法

1.1 工艺流程和装置

本试验采用 CSTR 反应器 (如图 1), 其材质为

收稿日期: 2015-11-09; 修订日期: 2015-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51578353); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (12KJA610002); 苏州市环境保护科技项目 (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; 苏州科技学院科研基金青年项目 (XKQ201504)

作者简介: 吴鹏 (1985~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为废水生物处理, E-mail: wupengniu@126.com

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

有机玻璃,包括曝气池和沉淀池两部分. 曝气池和沉淀池有效容积分别为 1.3L 和 0.8L,曝气池底部采用曝气砂头供气. 曝气池采用间歇曝气方式运行,曝停时间见表 1. 反应器置于水浴缸中,保持反应器运行温度在 30℃ 左右.

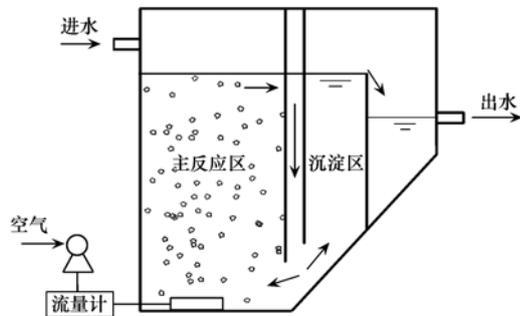


图 1 试验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process flow chart

表 1 CSTR 具体运行情况

Table 1 Concrete operation of CSTR

编号	运行时间 /d	进水 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	好氧时间 /min	缺氧时间 /min	HRT /h
1	1 ~ 20	100	45	15	6
2	21 ~ 40	100	45	45	6
3	41 ~ 60	100	30	30	6
4	61 ~ 70	100	30	30	4
5	71 ~ 90	100	30	30	3
6	91 ~ 110	50	30	30	3

为了考察间歇曝气过程中氮变化规律,进行了批次试验. 在反应器运行稳定时,从 CSTR 反应器中取出 200 mL 颗粒污泥,加入 300 mL 进水混合均匀,将泥水混合液转移至 500 mL 锥形瓶中,然后在锥形瓶底部设置曝气头进行间歇曝气. 曝气时保持水中 DO 为 1 ~ 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,曝停时间、进水氨氮、COD 浓度等与反应器在该阶段运行条件一致. 将锥形瓶置于恒温水浴振荡器上反应,每 15 min 取样测定水中氨氮、硝态氮和亚硝态氮浓度.

1.2 接种污泥

接种污泥为实验室培养成熟的厌氧颗粒污泥,接种量共 500 mL. 接种初期反应器混合液 MLSS 为 5.5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,污泥容积指数(SVI)为 39 $\text{mL}\cdot\text{g}^{-1}$,污泥沉降性能良好.

1.3 试验进水

试验进水为自配水,以乙酸钠作为有机碳源,氯化铵提供氨氮,碳酸氢钠提供碱度,调节进水 COD、氨氮的浓度及 pH 值,并添加磷酸二氢钾、硫酸镁、氯化钙等生物所需营养元素及其他微量元素. 试验

中进水 COD 为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 50 ~ 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH 控制在 7.5 ~ 8.0 之间.

1.4 试验方法

本试验在连续流的状态下采用间歇曝气的方式培养亚硝化颗粒污泥,通过 60 d 的运行亚硝化率可达 90% 以上. 为研究间歇曝气过程中氮转化规律,采用锥形瓶进行批次试验,考察周期内出水氨氮、硝酸盐氮与亚硝酸盐氮的浓度,分析亚硝化菌群和活性与亚硝化效果之间的关系.

1.5 分析方法

根据文献[9]所列主要水质指标的测试方法: COD,快速消解分光光度法; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,纳氏试剂分光光度法; $\text{NO}_2^- \text{-N}$,*N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^- \text{-N}$,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.

2 结果与讨论

2.1 短程硝化工艺启动

为抑制硝化菌(NO_B)的活性,在 CSTR 反应器内接种厌氧颗粒污泥后,可以采用间歇曝气的方式富集 AOB^[10]. 反应器启动期间采用低 C/N 比进水, COD 浓度为 50 ~ 70 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,氨氮浓度为 50 ~ 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,pH 控制在 7.5 ~ 8, DO 浓度为 1 ~ 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,运行 60 d 左右,成功启动短程硝化反应器.

2.1.1 短程硝化工艺启动过程

系统进出水水质如图 2 所示,反应器经过 60 d 的运行可以达到稳定的短程硝化效果,整个培养过程分为 3 个阶段. 从中可知,随试验运行,在第一阶段(1 ~ 20 d),系统进水氨氮浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 浓度为 50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在反应初期为了快速激活 AOB 和 NOB,设置了较长的好氧时间,间歇曝气的缺氧/好氧时间比为 15 min/45 min. 第一阶段,反应器出水氨氮浓度逐渐降低,表明污泥中氨氧化菌活性逐渐增强,能消耗掉反应器大部分氨氮,反应器运行至第 19 d 时,氨氮去除率达 97%.

反应器在曝气阶段,DO 在 1 ~ 2 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在停曝结束后 10 min 左右,反应器内 DO 才降为零. 第一阶段亚硝酸盐累积率逐渐增大,第 19 d 时,反应器内亚硝酸盐浓度达 44 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,亚硝化率为 57%,说明缺氧/好氧交替的运行条件有利于实现短程硝化^[11]. 这与反应器由缺氧环境转变为好氧环境时, AOB 可以立即以最大生长速率增长,而 NOB 需要一定的恢复时间才可以达到其最大的生长速率,反

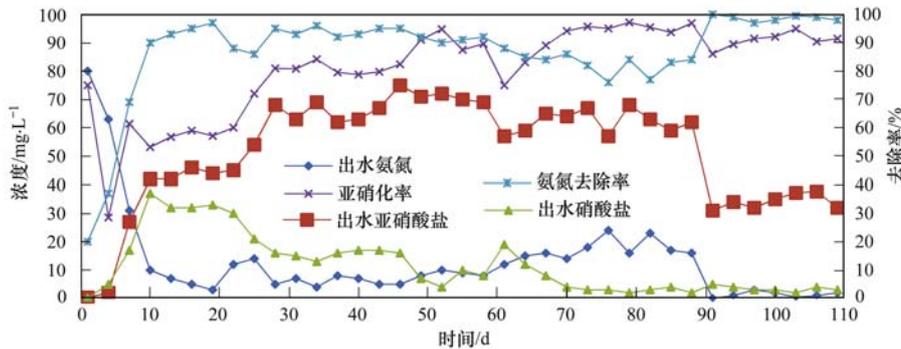


图2 短程硝化启动阶段进出水参数变化

Fig. 2 Changes of influent and effluent parameters in the start-up stage of shortcut nitrification

反应器长时间处于缺氧/好氧交替的环境时, NOB 无法正常增殖, 数量会逐渐减少有关^[12]. 因此, 利用缺氧/好氧交替运行的方式抑制 NOB 的活性, 使 AOB 占主导地位, 可以实现短程硝化.

试验运行中发现, 反应过程中存在一部分氮损, 因为进水中含有一定量的有机物, 在间歇曝气的缺氧段, 反硝化菌会利用有机物将一部分亚硝态氮和硝态氮转化为氮气. 在前 10 d, 由于厌氧颗粒污泥中残留一部分反硝化菌, 并且反应器初期会出现污泥解体死亡的现象, 导致反应器内有机物浓度较高, 该阶段有 25% 左右的氨氮通过硝化反硝化作用被去除. 由于进水中 COD 浓度较低, 且缺氧时间较短, 反硝化菌活性受到抑制, 第一阶段反硝化作用并不显著, TN 损失量平均为 12%.

在第二阶段(21 ~ 40 d), 将曝气频率调整为曝气 45 min/停曝 45 min, 考察曝停时间比对亚硝酸盐积累率的影响. 改变运行条件后, 由于停曝时间比缩短, 反应器氨氮去除率有所降低, 出水氨氮由 5 mg·L⁻¹ 左右上升至 12 mg·L⁻¹ 左右, 经过一周的适应时间, 出水氨氮浓度降低, 氨氮平均去除率达 94%. 从图 2 中可以看出, 在此阶段, 出水亚硝酸盐浓度升高, 出水硝酸盐浓度呈下降的趋势, 导致亚硝态氮积累率大幅度升高, 30 d 时平均亚硝化率达 81%, 相比少于巫恺澄等人 45 d 时亚硝化率达 80% 的启动时间^[13], 这与停止曝气时间长达 45 min, 期间反应器由好氧逐渐向缺氧转变, 不过 AOB 的亚硝化速率不会受到显著的抑制, 而 NOB 氧化亚硝态氮的速率会受到显著抑制有关^[14,15]. 同时, 在停/曝气时间比为 1:1 时, 也有利于亚硝酸盐的积累^[16]. 李亚峰等^[17] 利用 SBR 反应器在缺氧/好氧时间比为 45 min/45 min 时成功启动短程硝化工艺, 亚硝化率可达 96%, 与本试验结论一致. 张辉等^[18] 发现一定范围内停/曝频率越高, 越有利于亚硝态氮的积累.

因此, 在第三阶段减小了停曝时间, 以提高停/曝频率.

在第三阶段(41 ~ 60 d) 将曝气频率调整为 30 min/30 min, 氨氮去除率无明显变化, 平均氨氮转化率为 92%, 亚硝化率进一步提高, 此阶段亚硝化率平均可达 89%, 出水亚硝酸盐浓度稳定在 70 mg·L⁻¹ 左右, 硝酸盐浓度低于 10 mg·L⁻¹, 氨氮浓度低于 10 mg·L⁻¹.

从图 3 可以看出, 在第二、三阶段, TN 去除率一直维持在 12% 左右, 不随曝/停时间的变化而变化.

2.1.2 HRT 对短程硝化的影响

为研究短程硝化反应器可承受的氨氮负荷情况, 在第四阶段(61 ~ 90 d) 逐步缩短反应器 HRT, 从图 2 中可以看出随着水力停留时间的缩短, 氨氮去除率逐渐下降, 在 HRT 为 3h, 进水氨氮浓度为 100 mg·L⁻¹ 时, 氨氮去除率降至 80% 左右. 这与 HRT 较短, 部分氨氮来不及被 AOB 利用即被排出有关, 此时平均氨氮有效容积负荷为 0.64 kg·(m³·d)⁻¹.

本试验反应器接种污泥为厌氧颗粒污泥, 接种初期, 颗粒污泥由于环境变化而发生部分解体. 在 HRT 为 6 h 的条件下, 反应器内颗粒污泥和絮状污泥并存, 颗粒污泥边缘毛糙, 有污泥膨胀现象, 颗粒污泥平均沉降速度为 25.6 m·h⁻¹, 污泥沉降性能一般. 通过逐渐缩短 HRT 的方式, 降低沉淀池污泥沉降时间, 将沉降性能较差的絮状污泥逐渐从反应器内淘洗出去, 同时污泥龄 (SRT) 缩短, 起到淘洗 NOB 的作用^[19]. 当 HRT 降为 3 h 运行稳定后, 反应器内絮状污泥基本被淘洗出去, 出水 SS 低于 25 mg·L⁻¹. 颗粒污泥在低 C/N 比的条件下培养, 自养硝化菌 AOB 占主导地位, 由于 AOB 生长速率较异养菌缓慢, 所以颗粒污泥结构比较密实, 平均沉降速

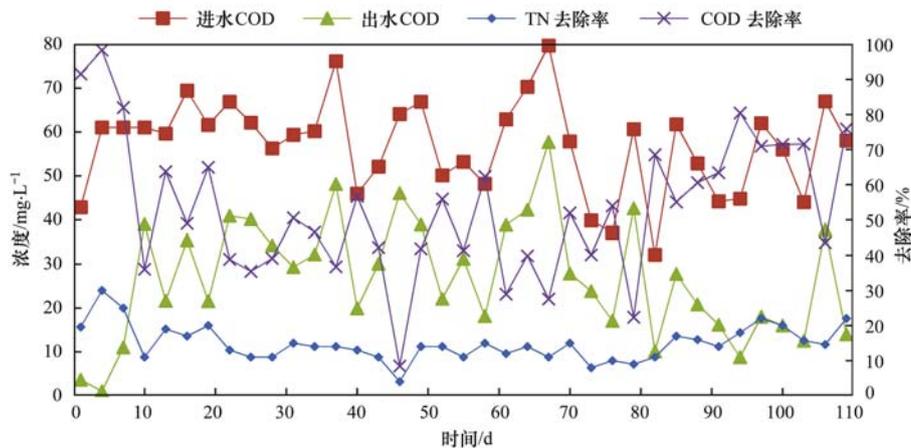


图3 短程硝化反应器 TN 及 COD 进出水变化

Fig. 3 Change of TN and COD in influent and effluent in the shortcut nitrification reactor

率可达 $43.8 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$.

随 HRT 的缩短,反应器氨氮去除率降低,但是亚硝化率逐渐上升,当 HRT 为 4 h 时,平均亚硝化率达 88%;而当 HRT 为 3 h 时,平均亚硝化率可达 95%. 因为随着 HRT 的缩短,SRT 相应缩短,大量絮状污泥随出水排出,在间歇曝气的条件下,NOB 的生长速率远低于 AOB,SRT 的缩短会导致 NOB 在反应器内的数量大幅减少,使得颗粒污泥表面好氧区部分 AOB 成为优势菌种,实现稳定的短程硝化.与此同时,较短的 HRT 缩短了 NOB 与亚硝酸盐的反应时间,更有利于亚硝态氮的累积.

本研究的最终目的是为了考察低 C/N 比污水(如城市污水、生活污水等)短程硝化的可行性,故在第 90~110 d,进水采用 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的自配水,考察低氨氮浓度下的短程硝化效果.从图 2 中可以看出,该反应器能在较低的氨氮浓度下稳定运行,由于氨氮浓度降低,所以绝大部分氨氮都能被去除,出水氨氮浓度保持在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,亚硝化率在 90% 以上.

2.2 间歇曝气过程中氮变化规律分析

近年来很多研究都是采用 SBR 工艺来启动短程硝化,在连续流状态下少有低氨氮废水成功启动短程硝化的案例.因为在连续流低氨氮浓度的条件下,游离氨(FA)或游离亚硝酸(FNA)都未达到抑制 NOB 的浓度,只通过调节反应器 pH、温度、碱度和 DO 等运行参数,很难富集 AOB.而间歇曝气的方式可以实现连续流条件下的短程硝化,但是在间歇曝气中曝停时间比、C/N 比、HRT 等均是影响亚硝酸盐氮积累的重要因素,本试验考察了反应器启动不同阶段氮的变化规律.在反应器运行至第 19、70 及

110 d 时,取反应器内颗粒污泥进行批次试验,考察反应器不同阶段污泥的处理性能,试验结果如下.

图 4(a)为反应器运行第 19 d 时,反应器内氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮在曝停时间为 45 min/15 min 条件下,运行 6 个停/曝周期的变化规律.从中可知,在曝气阶段,氨氮浓度逐渐降低,停曝阶段氨氮转化速率放缓,因为停止曝气后反应器内还残留一部分 DO,使氨氮氧化过程没有完全停止.在低氧环境下,AOB 仍具有氧化氨氮的能力,但是 NOB 的活性会受到抑制^[20-22],导致部分亚硝态氮没有被氧化.在 240 min 前,氨氮差不多以均匀速率下降,90% 的氨氮在此时间内被氧化,此时亚硝化率在 55% 左右;在 240 min 后,反应器内只含有少量氨氮,但是曝气还未停止,导致亚硝酸盐被进一步氧化成硝酸盐,亚硝化率逐渐降低至 30% 左右.在此阶段,亚硝化率最高达 57%,说明在此条件下,反应器内同时存在 AOB 与 NOB,一部分亚硝酸盐被氧化为硝酸盐,使亚硝化率难以提高.因此,曝气时间过长会导致亚硝态氮易被氧化,不利于亚硝酸盐的积累.

图 4(b)为反应器运行第 70 d 时,反应器内氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮在曝停时间为 30 min/30 min 条件下,运行 4 个停/曝周期的变化规律.经过一段时间的运行,反应器亚硝化率逐渐升高,在第 30 min 时,亚硝化率可达 85%.通过批次试验可以看出,在运行过程中,氨氮浓度逐步降低,在 240 min 时,氨氮去除率达 86%,相比曝停时间 45 min/15 min 的要低,这与 HRT 缩短会导致氨氮去除率降低有关.在整个反应过程,硝酸盐氮浓度在 $12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右波动,而亚硝酸盐氮浓度则显著升高,在 240 min 时,出水亚硝酸盐氮浓度为 $61 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝化

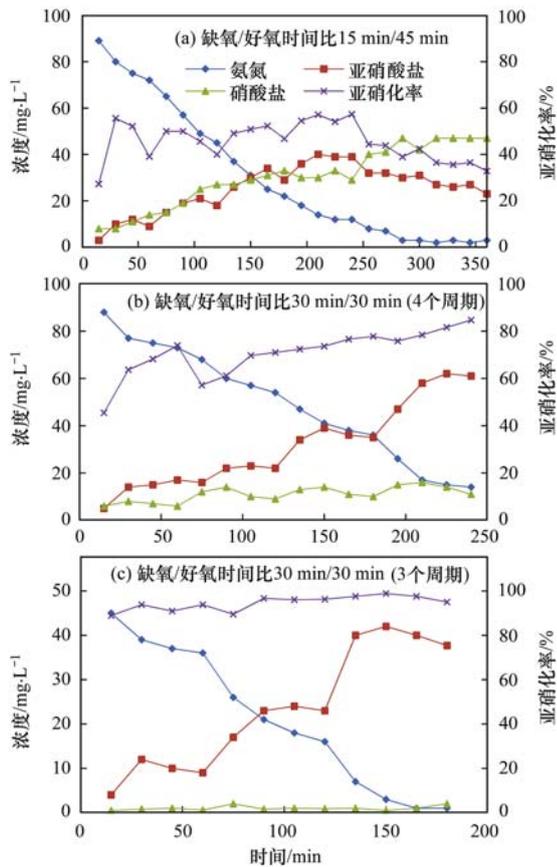


图4 CSTR不同阶段氮变化批次试验

Fig. 4 Batch test of nitrogen in different stages of CSTR

率为85%,说明反应器内NOB受到抑制,AOB占优势地位,实现了短程硝化.与曝停时间45 min/15 min相比,曝停时间为30 min/30 min更有利于亚硝酸盐的积累.由于初始DO为 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,在曝气停止后反应器内DO浓度逐渐减少,曝停时间比大即曝停时间较短时,使得反应器内缺氧环境较少,间歇曝气的优势不能被充分体现,导致亚硝化率较低.

图4(c)为反应器运行至第110 d时,反应器内氨氮、亚硝酸盐氮和硝酸盐氮在曝停时间为30 min/30 min条件下,运行3个停/曝周期的变化规律.该阶段反应器进水氨氮浓度降至 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,进水COD仍为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,考察该反应器在低氨氮条件下的运行情况.经过3 h的运行,反应器出水氨氮去除率达98%,亚硝化率达95%,由图4(c)可知,在HRT为3 h时,可以实现短程硝化.反应过程中硝酸盐氮浓度低于 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在曝气时间段,亚硝酸盐氮浓度急剧升高,缺氧段亚硝酸盐氮浓度略有降低.这与进水中含有一部分COD,在缺氧段会发生反硝化作用有关,从而导致亚硝酸盐氮浓度降

低;另外,逐步降低反应器HRT有利于淘洗出NOB,实现污泥颗粒化以利于AOB的富集亦有一定关系.

3 结论

(1)利用间歇曝气的运行方式,依次控制3个阶段的停/曝时间:15 min/45 min、45 min/45 min和30 min/30 min,连续流反应器经过60 d左右的运行,可以成功实现短程硝化的快速启动,亚硝化率可达90%左右.

(2)依次控制间歇曝气(15 min/45 min、45 min/45 min和30 min/30 min)有利于抑制NOB的活性,而逐渐缩短HRT可淘洗出NOB,两者结合可以更好的维持短程硝化.

(3)曝停比为1:1最适合短程硝化,过高会使亚硝酸盐易被氧化,不利于亚硝酸盐的积累.控制间歇曝气30 min/30 min,进水氨氮浓度为 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,亚硝化率分别可达90%或95%.

参考文献:

- [1] 付昆明,左早荣,仇付国.陶粒CANON反应器的接种启动与运行[J].环境科学,2014,35(3):995-1001.
- [2] 罗远玲,杨朝晖,徐峥勇,等.亚硝化颗粒污泥对温度变化的响应特性研究[J].环境科学,2012,33(2):511-517.
- [3] 荣宏伟,邓杰,杨文杰,等.低温对稳定短程硝化体系的影响[J].中国给水排水,2015,31(7):65-68.
- [4] 张立成,党维,徐浩,等.SBR快速实现短程硝化及影响因素[J].环境工程学报,2015,9(5):2272-2276.
- [5] 张功良,李冬,张肖静,等.低温低氨氮SBR短程硝化稳定性试验研究[J].中国环境科学,2014,34(3):610-616.
- [6] 高春娣,王惟肖,李浩,等.SBR法交替缺氧好氧模式下短程硝化效率的优化[J].中国环境科学,2015,35(2):403-409.
- [7] 马勇,王淑莹,曾薇,等.A/O生物脱氮工艺处理生活污水中试(一)短程硝化反硝化的研究[J].环境科学学报,2006,26(5):703-709.
- [8] 阴方芳,刘文如,王建芳,等.CSTR中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究[J].环境科学,2014,35(11):4230-4236.
- [9] 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.
- [10] 苏东霞,李冬,张肖静,等.不同曝气方式SBR短程硝化试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(6):2120-2129.
- [11] 高春娣,李浩,焦二龙,等.交替好氧缺氧短程硝化及其特性[J].北京工业大学学报,2015,41(1):116-122.
- [12] Komaros M, Dokianakis S N, Lyberatos G. Partial nitrification/denitrification can be attributed to the slow response of nitrite oxidizing bacteria to periodic anoxic disturbances [J]. Environmental Science & Technology, 2010, 44(19): 7245-7253.

- [13] 巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 等. 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[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4195-4201.
- [14] Zeng W, Li L, Yang Y Y, *et al.* Nitritation and denitritation of domestic wastewater using a continuous anaerobic-anoxic-aerobic (A^2O) process at ambient temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8074-8082.
- [15] Ma Y, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Achieving nitrogen removal via nitrite in a pilot-scale continuous pre-denitrification plant[J]. *Water Research*, 2009, **43**(3): 563-572.
- [16] 苏东霞, 李冬, 张肖静, 等. 曝停时间比对间歇曝气 SBR 短程硝化的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(5): 1152-1158.
- [17] 李亚峰, 秦亚敏, 谢新立, 等. 间歇曝气条件下短程硝化的实现及影响因素研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(7): 1518-1521.
- [18] 张辉, 白向玉, 李敬, 等. 间歇曝气短程硝化控制新途径的初步试验研究[J]. 新疆环境保护, 2005, **27**(4): 28-32.
- [19] 赵志瑞, 侯彦林. 半短程亚硝化与厌氧氨氧化联合脱氮工艺微生物特征研究进展[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2834-2842.
- [20] Wu P, Xu L Z, Wang J F, *et al.* Partial nitrification and denitrifying phosphorus removal in a pilot-scale ABR/MBR combined process[J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2015, **177**(5): 1003-1012.
- [21] Zeng W, Zhang Y, Li L, *et al.* Control and optimization of nitrifying communities for nitritation from domestic wastewater at room temperatures [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2009, **45**(3): 226-232.
- [22] 蒋铁锋, 陈浚, 王宝贞, 等. 间歇曝气对硝化菌生长动力学影响及 NO_2^- 积累机制[J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 85-90.

CONTENTS

Chemical Characteristics of Particulate Matters and Trajectory Influence on Air Quality in Shanghai During the Heavy Haze Episode in December, 2013	ZHOU Min, QIAO Li-ping, ZHU Shu-hui, <i>et al.</i> (1179)
Analysis of Single Particle Aging and Mixing State at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer	HUANG Zi-long, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (1188)
Investigation of Aerosol Mixed State and CCN Activity in Nanjing	ZHU Lin, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (1199)
Characteristics of Number Concentration Size Distributions of Aerosols Under Different Weather Processes in Beijing	SU Jie, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (1208)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} in Chongqing Urban Areas	LIU Yong-lin, SUN Qi-min, ZHONG Ming-yang, <i>et al.</i> (1219)
Comparison of Monitoring Methods of Organic Carbon and Element Carbon in Atmospheric Fine Particles	PANG Bo, JI Dong-sheng, LIU Zi-rui, <i>et al.</i> (1230)
Residue Characteristics of Perfluorinated Compounds in the Atmosphere of Shenzhen	HE Peng-fei, ZHANG Hong, LI Jing, <i>et al.</i> (1240)
Monitoring Atmospheric CO ₂ and δ ¹³ C(CO ₂) Background Levels at Shangdianzi Station in Beijing, China	XIA Ling-jun, ZHOU Ling-xi, LIU Li-xin, <i>et al.</i> (1248)
Concentration and Size Distribution of Bioaerosols in Indoor Environment of University Dormitory During the Plum Rain Period	LIU Ting, LI Lu, ZHANG Jia-quan, <i>et al.</i> (1256)
Air Microbial Pollution and Health Risk of Urban Black Odorous Water	LIU Jian-fu, CHEN Jing-xiong, GU Shi-you (1264)
Particle Size Distribution, Seasonal Variation Characteristics and Human Exposure Assessment of Heavy Metals in Typical Settled Dust from Beijing	CAO Zhi-guo, YU Gang, LÜ Xiang-ying, <i>et al.</i> (1272)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dust of Xi'an City, China	WANG Li, WANG Li-jun, SHI Xing-min, <i>et al.</i> (1279)
Toluene, Benzene and Acetone Adsorption by Activated Carbon Coated with PDMS	LIU Han-bing, JIANG Xin, WANG Xin, <i>et al.</i> (1287)
Distribution Characteristics, Sources and Pollution Assessment of Trace Elements in Surficial Sediments of the Coastal Wetlands, Northeastern Hainan Island	ZHANG Wei-kun, GAN Hua-yang, BI Xiang-yang, <i>et al.</i> (1295)
Heavy Metals Accumulation in the Caofeidian Reclamation Soils: Indicated by Soil Magnetic Susceptibility	XUE Yong, ZHOU Qian, LI Yuan, <i>et al.</i> (1306)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation and Their Moisture Sources in Mengzi Region, Southern Yunnan	LI Guang, ZHANG Xin-ping, XU You-peng, <i>et al.</i> (1313)
GIS Spatial Distribution and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Shallow Lakes in Jiangsu Province	LI Ying-jie, ZHANG Lie-yu, WU Yi-wen, <i>et al.</i> (1321)
Microcosm Simulation Study and Methylmercury Forming Mechanism at Landscape Water of City	LIU Xiao-hong, SI You-bin, GUO Zi-wei, <i>et al.</i> (1330)
Seasonal Stratification and the Response of Water Quality of a Temperate Reservoir—Zhoucun Reservoir in North of China	ZENG Ming-zheng, HUANG Ting-lin, QIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (1337)
Hydrochemical Characteristics of Snow Meltwater and River Water During Snow-melting Period in the Headwaters of the Ertis River, Xinjiang	WEI Hong, WU Jin-kui, SHEN Yong-ping, <i>et al.</i> (1345)
Relationship Between the Phytoplankton Distribution and Environmental Factors in Fenhe Scenic Spot of Taiyuan	FENG Jia, GUO Yu-ning, WANG Fei, <i>et al.</i> (1353)
Distribution Characteristics of Nitrifiers and Denitrifiers in the River Sediments of Tongling City	CHENG Jian-hua, DOU Zhi-yong, SUN Qing-ye (1362)
Contribution of Base Flow to Total Nitrogen Loading in Subtropical Agricultural Catchments	MA Qiu-mei, LI Wei, WANG Yi, <i>et al.</i> (1371)
Characteristics and Transport Patterns of Ammonia, Nitrites, Nitrates and Inorganic Nitrogen Flux at Epikarst Springs and a Subterranean Stream in Nanshan, Chongqing	ZHANG Yuan-zhu, HE Qiu-fang, JIANG Yong-jun, <i>et al.</i> (1379)
Pollution Characteristics and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China	QIU Zu-kai, HU Xiao-zhen, YAO Cheng, <i>et al.</i> (1389)
Effect of <i>Elodea natallii</i> -immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on Nitrogen Removal Mechanism in an Inflow River, Gonghu Bay	HAN Hua-yang, LI Zheng-kui, WANG Hao, <i>et al.</i> (1397)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Different Forms of Phosphorus in Three Sorts of Rivers around Lake Taihu	GAO Yong-xia, SONG Yu-zhi, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (1404)
Distribution of Phosphorus Forms in the Overlying Water Under Disturbance with the Addition of Algae	CHEN Jun, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (1413)
Impacts of Sediment Disturbance on the Distribution of Suspended Particle Size and Phosphorus	GUO Jun-rui, LI Da-peng, LIU Yan-jian (1422)
Effect of Zirconium Modified Kaolin-Based Cap on Migration and Transformation of Phosphorus Between Sediment and Overlying Water	ZHANG Zhe, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1427)
Toxicity of 4-Chlorophenol Solution Under Electrochemical Reduction-oxidation Process	WANG Yan, SHI Qin, WANG Hui, <i>et al.</i> (1437)
Removal and Recycle of Phosphor from Water Using Magnetic Core/Shell Structured Fe ₃ O ₄ @SiO ₂ Nanoparticles Functionalized with Hydrous Aluminum Oxide	LAI Li, XIE Qiang, FANG Wen-kan, <i>et al.</i> (1444)
Occurrence and Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Typical Wastewater Treatment Plants in Beijing	QIAO Meng, QI Wei-xiao, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (1451)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matters in Reject Water from Wastewater Treatment Plants	NIU Tian-hao, ZHOU Zhen, HU Da-long, <i>et al.</i> (1460)
Feasibility and Economic Analysis of Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	LI Xiang, ZHU Liang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (1467)
Quick Start-up and Sustaining of Shortcut Nitrification in Continuous Flow Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (1472)
Performance Recoverability of Denitrifying Granular Sludge Under the Stressing Effect of Nanoscale Zero-valent Iron	WANG Fan-fan, QIAN Fei-yue, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (1478)
Effect of Low-concentration Ciprofloxacin on the Nitrification and Nitrifying Microorganisms of Biofilms in Biological Aerated Filter	HE Shi, GU Chao-chao, WEI Xin, <i>et al.</i> (1485)
Optimization Study on the Nitrogen and Phosphorus Removal of Modified Two-sludge System Under the Condition of Low Carbon Source	YANG Wei-qiang, WANG Dong-bo, LI Xiao-ming, <i>et al.</i> (1492)
Effects of Short-time Conservation Tillage Managements on Greenhouse Gases Emissions from Soybean-Winter Wheat Rotation System	XIE Yan, CHEN Xi, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1499)
Diurnal and Seasonal Dynamic Variation of Soil Respiration and Its Influencing Factors of Different Fenced Enclosure Years in Desert Steppe	CUI Hai, ZHANG Ya-hong (1507)
Correlation Among Soil Organic Carbon, Soil Inorganic Carbon and the Environmental Factors in a Typical Oasis in the Southern Edge of the Tarim Basin	GONG Lu, ZHU Mei-ling, LIU Zeng-yuan, <i>et al.</i> (1516)
Effects of Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Speciation of Pb in Purple Soil and Soil Solution	LIU Jiang, JIANG Tao, HUANG Rong, <i>et al.</i> (1523)
Phytoremediation of Petroleum Contaminated Soils with <i>Iris pseudacorus</i> L. and the Metabolic Analysis in Roots	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1531)
Oxidation Process of Dissolvable Sulfide by Manganite and Its Influencing Factors	LUO Yao, LI Shan, TAN Wen-feng, <i>et al.</i> (1539)
Screening and Enzyme Production Characteristics of Thermophilic Cellulase-producing Strains	FENG Hong-mei, QIN Yong-sheng, LI Xiao-fan, <i>et al.</i> (1546)
Development of Determination Method of Fluoroquinolone Antibiotics in Sludge Based on Solid Phase Extraction and HPLC-Fluorescence Detection Analysis	DAI Xiao-hu, XUE Yong-gang, LIU Hua-jie, <i>et al.</i> (1553)
Distribution and Risk Assessment of Sulfonamides Antibiotics in Soil and Vegetables from Feedlot Livestock	JIN Cai-xia, SI Xiao-wei, WANG Zi-ying, <i>et al.</i> (1562)
Influence of Four Kinds of PPCPs on Micronucleus Rate of the Root-Tip Cells of <i>Vicia-faba</i> and Garlic	WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, <i>et al.</i> (1568)
Environmental Behaviors and Ecotoxicology of the Emerging Contaminants Polyhalogenated Carbazoles	LIN Kun-de, CHEN Yan-qiu, YUAN Dong-xing (1576)
Classification of Priority Area for Soil Environmental Protection Around Water Sources; Method Proposed and Case Demonstration	LI Lei, WANG Tie-yu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (1584)

《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)

2016年4月15日 第37卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 4 Apr. 15, 2016

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