

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第7期

Vol.37 No.7

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

2015年北京市两次红色预警期间PM_{2.5}浓度特征 程念亮, 张大伟, 陈添, 石爱军, 孙峰, 刘保献, 邹本东, 王琴, 李倩, 王小菊, 姜磊, 孟凡 (2409)

北京市冬季雾霾天人体呼吸高度PM_{2.5}变化特征对气象因素的响应 张南, 熊黑钢, 葛秀秀, 段鹏程, 毛先如, 王亚龙 (2419)

兰州大气细颗粒物中多环芳烃污染特征及来源分析 李英红, 饶志国, 谭吉华, 段晋春, 马永亮, 贺克斌 (2428)

南京北郊冬季PM_{2.5}中芳香酸的测定及来源解析 张亚飞, 马嫣, 亓鲁, 王振, 王利朋, 朱麟 (2436)

海洋-大气过程对南海气溶胶数浓度谱分布的影响 孔亚文, 盛立芳, 刘寿, 李秀镇 (2443)

新疆准东煤田降尘重金属污染及健康风险评价 杨春, 塔西甫拉提·特依拜, 侯艳军, 高宇潇, 刘芳, 夏楠 (2453)

重庆地区大气场降水中氢氧同位素变化特征及与大气环流的关系 温艳茹, 王建力 (2462)

湖水氢氧同位素组分的时间变化特征及影响因素分析 徐敬争, 肖薇, 肖启涛, 王伟, 温学发, 胡诚, 刘诚, 刘寿东, 李旭辉 (2470)

河水-地下水侧向交互带地球化学特征: 以重庆市马鞍溪为例 张宇, 杨平恒, 王建力, 谢世友, 陈峰, 詹兆君, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 孟元可 (2478)

亚热带典型岩溶溪流水气界面CO₂交换通量变化过程及其环境影响 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 于爽, 肖琼, 张陶 (2487)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 紫外-可见吸收光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2496)

淹水条件下三峡库区典型消落带土壤释放DOM的光谱特征: 荧光光谱 梁俭, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 陈雪霜, 王齐磊 (2506)

华东地区某水源水中13种磺胺类抗生素的分布特征及人体健康风险评价 金磊, 姜蕾, 韩琪, 薛佳怡, 叶辉, 曹国民, 林匡飞, 崔长征 (2515)

北京水环境中氯胺酮和去甲氯胺酮的浓度水平 张华方, 杨军, 杜鹏, 王琮淙, 李喜青 (2522)

输水期间于桥水库流域水体中溶解态多环芳烃的分布特征与风险 昌盛, 赵兴茹, 付青, 郭睿, 王山军 (2530)

卤系阻燃剂在东江工业水体中的质量浓度及其分配特征 何明靖, 李琦, 赵佳渊, 王登祥 (2539)

岩溶地下水多环芳烃、脂肪酸分布特征及来源分析 谢正兰, 孙玉川, 张媚, 廖昱, 江泽利, 王尊波, 梁作兵 (2547)

哈尔滨主城区不同下垫面融雪径流污染特性 孙夕涵, 刘硕, 万鲁河, 王宏 (2556)

降水对泃河水质和水体微生物的影响 卢思丹, 孙寓姣, 赵轩, 王蕾, 郑丹阳 (2563)

不同磷源下铜绿微囊藻的生长差异及对磷酸盐的响应 王振翔, 张汉鹏, 罗专溪 (2570)

布洛芬和双氯芬酸在不同构型人工湿地中的去除行为研究 景瑞瑛, 杨扬, 戴玉女, 万翔, 邹义萍, 樊静静 (2577)

化学预氧化对苏氨酸生成三氯乙醛的影响 蔡广强, 傅学敏, 刘丽君, 卢小艳, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (2586)

活性炭负载Co₃O₄活化过一硫酸盐降解金橙G 王忠明, 陈家斌, 张黎明, 李文卫, 黄天寅 (2591)

碳纳米管活化过一硫酸盐降解金橙G过程及动力学 张黎明, 陈家斌, 李文卫, 王忠明, 黄天寅 (2601)

碳纳米管修饰电极电催化还原去除废水中的氯霉素 邓飞, 唐柏彬, 张进忠, 汤民, 刘江 (2610)

铁刨花-Fenton-絮凝工艺对染料生产废水中AOX、色度和TOC的去除效果研究 舒小铭, 徐灿灿, 文晓刚, 朱静娜, 赵远, 刘锐, 陈吕军 (2618)

Fenton氧化去除制药企业活性污泥中AOX的效果研究 陈思, 徐灿灿, 刘锐, 李国华, 陈吕军, 郑炜 (2625)

中试规模微气泡曝气生物膜反应器运行性能评估 刘春, 张晶, 张静, 陈晓轩, 张磊, 曹丽亚 (2632)

基于CANON工艺的新型HABR反应器生物脱氮性能研究 鲍林林, 陈婉秋 (2639)

异养与硫自养反硝化协同处理高硝氮废水特性研究 李祥, 马航, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵, 朱强 (2646)

基于高通量测序的ABR厌氧氨氧化反应器各隔室细菌群落特征分析 陈重军, 张海芹, 汪瑶琪, 喻徐良, 王建芳, 沈耀良 (2652)

NUA-DAS生态滤池脱氮效果与反硝化菌特征研究 汪龙眠, 仇皓雨, 车昱晓, 张松贺, 郭照冰, 张毅敏 (2659)

葡萄藻生物膜贴壁培养处理含钴工业废水与烃类生产的耦合 程鹏飞, 王艳, 杨期勇, 汤明, 刘天中 (2666)

拉乌尔菌sari01的分离及其异养硝化好氧反硝化特性 颜薇芝, 郝健, 孙俊松, 史吉平 (2673)

海水异养硝化-好氧反硝化芽孢杆菌SLWX₂的筛选及脱氮特性 成钰, 李秋芬, 费聿涛, 张艳 (2681)

焦化废水活性污泥中降解硫氰化物细菌种群多样性分析 徐伟超, 蒙小俊, 尹莉, 张玉秀, 李海波, 曹宏斌 (2689)

浮游微型真核生物群落对电厂温排水增温的响应 戴文芳, 阳石页, 阙治家, 熊金波 (2696)

磷脂脂肪酸(PLFA)法检测蒙古沙冬青根围土壤微生物群落结构 左易灵, 贺学礼, 王少杰, 赵丽莉 (2705)

半干旱区土壤微生物呼吸对极端降水的响应 赵慢, 王蕊, 李如剑, 杜兰兰, 吴得峰, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (2714)

三峡库区消落带N₂O排放及其影响因素 李睿, 雷利国, 江长胜, 柴雪思, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2721)

不同量碳源输入梯度下果园排水沟底泥氮素反硝化与N₂O排放研究 高雪梅, 余冬立, 颜晓元, 夏永秋 (2731)

冬季污泥堆肥过程温室气体排放特征 易建婷, 杨雨洽, 张成, 陈宏, 赵秀娟, 木志坚 (2738)

藏东南春季拉山土壤中有机氯农药和多环芳烃的浓度分布及来源解析 罗东霞, 张淑娟, 杨瑞强 (2745)

基于地质统计及随机模拟技术的天津武清区土壤重金属源解析 宋志廷, 赵玉杰, 周其文, 刘潇威, 张铁亮 (2756)

水热变化对三峡水库消落带紫色土有机碳矿化的影响 丁长欢, 王莲阁, 唐江, 慈恩, 谢德体 (2763)

减磷施肥有机肥对紫色土早坡地磷素流失的消减效应 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳, 陈晨 (2770)

水稻根际与非根际土壤硫素赋存形态转化及其迁移规律 杜光辉, 饶伟, 李鑫, 张亚楠, 王代长, 杨军, 化党领, 刘世亮, 李培培, 刘红恩 (2779)

组配改良剂对污染稻田中Pb、Cd、Cu和Zn钝化效果持续性比较 吴玉俊, 周航, 杨文骏, 邹紫今, 朱维, 辜娇峰, 彭佩钦, 张平, 曾敏, 廖柏寒 (2791)

生物法回收贵金属铂纳米颗粒及其机制 商儒, 朱能武, 康乃馨, 石超宏 (2799)

热处理天然褐铁矿制备γ-Fe₂O₃及其NH₃-SCR活性探究 徐彬, 陈天虎, 刘海波, 朱承驻, 陈冬, 邹雪华, 蒋阳 (2807)

《环境科学》征订启事(2569) 《环境科学》征稿简则(2576) 信息(2744, 2769, 2790)

基于 CANON 工艺的新型 HABR 反应器生物脱氮性能研究

鲍林林, 陈婉秋

(河南师范大学环境学院, 黄淮水环境与污染防治教育部重点实验室, 河南省环境污染控制重点实验室, 新乡 453007)

摘要: 采用新型复合式折流板反应器 (HABR) 启动及运行全程自养脱氮 (CANON) 工艺. 通过缩短水力停留时间 (HRT) 的方式提高进水总氮负荷启动反应器, 反应器运行成功后, 考察反应器沿程氮素、电导率、pH 值及 MLSS 的变化规律, 并对反应器内微生物种群形态结构及空间分布进行分析. 结果表明, 当进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 经过 89 d 的连续运行, 新型 HABR 反应器实现了快速启动, 并能稳定运行至 187 d, 稳定运行期出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别稳定在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 去除率分别达到 96% 和 83% 以上, NRR 达到 $0.15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 稳定运行阶段, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TN 浓度在反应器沿程逐渐降低, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的生成量一直维持在较低浓度. 第 1 个单元格脱氮效率最高, 通过 SEM 和 FISH 分析表明, 在第 1 个单元格中存在丰富的功能菌种亚硝化菌 (AOB) 和厌氧氨氧化菌 (AnAOB).

关键词: 新型复合式折流板反应器; 全程自养脱氮; 亚硝化菌; 厌氧氨氧化菌

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)07-2639-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.07.029

Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process

BAO Lin-lin, CHEN Wan-qi

(Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, Henan Key Laboratory for Environmental Pollution Control, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: The startup of novel hybrid anaerobic baffled reactor (HABR) and the feasibility of completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process were studied. The reactor was operated by gradually decreasing HRT to improve total nitrogen load. After startup, the change of nitrogen concentrations, conductivity, pH and MLSS was measured along the reactor, and then the microbial morphology and spatial structure of bacteria were defined. The test results indicated several points: under the experimental condition of an average $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ of $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in influent, the quick start-up process was successfully achieved by continuous operation within 89 days, and stabilized over 187 days. The average $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN concentrations of effluent were below $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ respectively, the average removal efficiencies of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN reached above 96% and 83% respectively, and a NRR of $0.15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ was obtained. During the stable phase, the concentrations of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN gradually declined along the reactor, while the concentrations of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ remained constant at relatively lower values. The highest nitrogen removal efficiency of ammonia occurred in compartment 1, and the reason was confirmed by SEM and FISH microbiological analysis that enriched functional bacteria of AOB and AnAOB coexisted in compartment 1.

Key words: hybrid anaerobic baffled reactor (HABR); completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON); AOB; AnAOB

全程自养脱氮 (completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON) 工艺是一种新型的高效、经济的脱氮工艺^[1,2], 通过亚硝化菌 (AOB) 和厌氧氨氧化菌 (AnAOB) 的协同竞争作用, 实现污水中氮素的去除. 目前相关的研究主要集中于高氨氮 ($>400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 废水^[3], 如污泥消化液^[4] 和渗滤液^[5], 对低氨氮废水的研究较少. 目前, 较长的启动时间^[6], 较低的脱氮速率^[7], 缓慢的 AnAOB 生长速率^[8] 和运行性能不易稳定^[9] 等缺点是限制 CANON 工艺应用于低氨氮浓度生活污水 ($20 \sim 85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理的关键问题. 因此, 出现了许多 CANON 工艺结合于不同反应器类型的研究.

厌氧折流板反应器 (ABR) 是一种适合处理低

浓度生活污水的新型厌氧生物反应器^[10], 具有污泥产率低、无需机械搅拌、运行费用低等优点. 通过在反应器中加设挡板, 将反应器分成几个串联的相对独立的单元格, 使反应器介于推流式 (PF) 和完全混合式 (CSTR) 之间. 相较于 CSTR, ABR 的死角区域更少、容积负荷更高^[11]. 污水在反应器内部通过不断地上下折流, 不仅使基质与污泥充分接触混合, 而且可以使不同种群的微生物在不同的单元格内生

收稿日期: 2015-12-01; 修订日期: 2016-02-26

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2015ZX07204-002)

作者简介: 鲍林林 (1980 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为污水深度处理与水环境修复技术, E-mail: baolinlin226@163.com

长,从而呈现出良好的种群分布特征^[12]. 复合式折流板反应器 (HABR) 则是将 ABR 与生物膜反应器相结合,更进一步提高了反应器的运行效能.

本研究采用一种新型的 HABR 启动 CANON 工艺,即利用 ABR 独特的物理结构,添加醛化纤维丝作为生物膜载体,对位于前段的几个单元格进行曝气处理,将一个反应器分成好氧和厌氧两个区域,以达到促进 AOB 与 AnAOB 协同生长的目的,加速实现反应器的启动. 反应器稳定运行后,通过扫描电镜 (SEM) 及荧光原位杂交 (FISH) 的手段对生物膜进行研究,分析反应器内微生物种群形态结构及空间分布.

1 材料与方 法

1.1 实验装置和接种活性污泥

HABR 实验装置如图 1 所示,材质为有机玻璃,长 40 cm,宽 20 cm,高 70 cm,有效容积 32 L. 反应器被挡板分割成 6 个相互串联的相同单元格,每单元格的底部有倾角为 45°的导流板将其分为体积比约为 1:3 的下向流格室和上向流格室. 中空塑料圆环周围绑扎醛化纤维丝的填料悬挂填充于整个上向流格室,以助于生物量的保持,增大进水与污泥的接触面积,且每个上向流格室顶端均分布有一取样口.

反应器接种污泥取自实验室内运行良好的改良氧化沟污泥^[13],MLSS 为 2 706 ~ 5 281 mg·L⁻¹,取 1.5 L 污泥分别从各单元格上向流格室上部向反应器内加入.

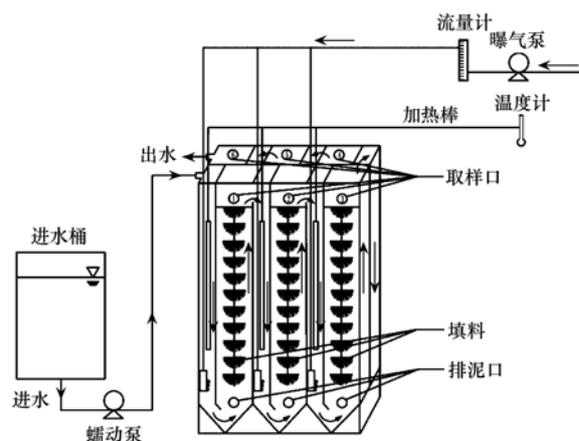


图 1 新型 HABR 反应器装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of novel HABR

1.2 实验配水和启动方法

实验用水采用人工配水,即向自来水中加入适量 NH₄Cl、NaHCO₃ 和 KH₂PO₄ 配置而成,平均进水 NH₄⁺-N 浓度为 40 mg·L⁻¹,水温和 pH 分别控制为 (30 ± 2) °C 和 7.7 ± 0.2,碱度和 pH 通过投加 NaHCO₃ 和稀盐酸、NaOH 调节.

通过低负荷连续进水的方式启动反应器,共分为 3 个阶段,各阶段进水 NH₄⁺-N 浓度、水力停留时间 (HRT) 等运行参数如表 1 所示. 反应器启动成功后,对反应器沿程各单元出水水质进行监测,并记录氮素去除规律及沿程的电导率、pH 值和 MLSS 浓度的变化,最后对反应器中微生物种群形态结构及空间分布进行分析.

表 1 各阶段反应器运行参数

Table 1 Influent and operational conditions in different phases

阶段	时间/d	HRT/h	曝气量 /L·min ⁻¹	平均进水 NH ₄ ⁺ -N 浓度 /mg·L ⁻¹	平均 NRR /kg·(m ³ ·d) ⁻¹
I	1 ~ 41	24	0.2, 0.2, 0.1	40	0.03
II	42 ~ 71	12	0.2, 0.2, 0.1	40	0.07
III _I	72 ~ 89	6	0.2, 0.2, 0.1	40	0.15
III _{II}	90 ~ 187	6	0.2, 0.2, 0.1	40	0.15

1.3 化学分析方法

NH₄⁺-N: 纳氏试剂分光光度法; NO₂⁻-N: N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; NO₃⁻-N: 麝香草酚分光光度法; MLSS: 重量法; DO 及水温: WTW Multi340i 多功能溶氧仪; pH 值: WTW inoLab pH 计; 电导率: WTW inoLab cond 730.

1.4 扫描电镜 (SEM) 分析

当新型 HABR 反应器处于稳定运行阶段时,取纤维填料,用无菌刷将生物膜取下,经 PBS 清洗 3

遍、戊二醛固定、乙醇梯度脱水、乙酸异戊酯置换、冷冻干燥后喷金处理,采用日本 JSM-6390LV 型扫描电镜仪对样品进行观察.

1.5 荧光原位杂交 (FISH) 分析

荧光探针采用由生工生物工程 (上海) 股份有限公司合成并标记的 Amx820 (5'-AAAAC CCCTCTACTTAGTGCCC-3'-Cy3) 和 NSO190 (5'-CGATCCCCTGCTTTTCTCC-3'-Cy5), 按照 Amann 等^[14]的操作方法进行双重染色后,在共聚焦显微镜

(Leica TCS SP8) 的同一视野下观察生物群落的空间结构分布。

2 结果与讨论

2.1 反应器启动和运行效能

新型 HABR 反应器的启动及稳定运行共历时 187 d, 运行参数见表 1, 整个过程可划分为 3 个阶段: I (1 ~ 41 d)、II (42 ~ 71 d)、III₁ (72 ~ 89 d)

和 III_{II} (90 ~ 187 d)。DO 作为实现 CANON 工艺的关键因素, 不仅要满足 AOB 将部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_2^-\text{-N}$, 为后续的 ANAMMOX 反应提供基质的需求, 而且要能够限制抑制 NOB 的生长^[15]。因此, 在前 3 个向下流格室内控制曝气量分别为 0.2 、 0.2 、 $0.1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 并通过逐步缩短 HRT 启动反应器。反应器 3 个阶段的进、出水氮素浓度的变化如图 2 所示。

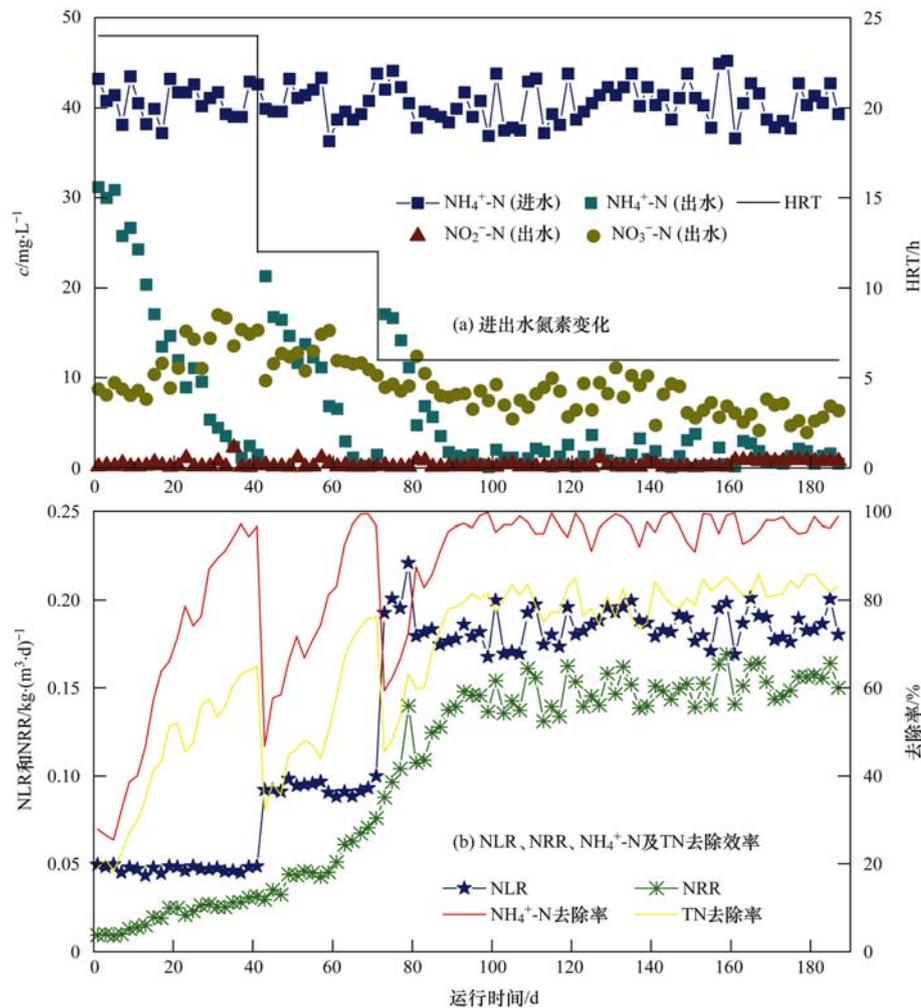


图 2 新型 HABR 反应器运行效能

Fig. 2 Performance of novel HABR during operation

阶段 I (1 ~ 41 d), 实验进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, HRT 为 24 h, 即平均进水氨氮负荷为 $0.05 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。实验初期, 较长的 HRT 有利于活性污泥在填料上附着生长, 以形成生物膜。然而, 由于接种污泥未针对厌氧氨氧化菌群做特别的筛选, 且厌氧氨氧化菌的世代周期长, 增长缓慢, 因此反应器在启动初期氮素去除情况不理想。在经历了 41 d 的连续驯化培养后, 出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐从 31

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 去除率分别达到 95% 和 63%。

阶段 II (42 ~ 71 d), 通过缩短 HRT 至 12 h 的方式提高进水氨氮负荷至 $0.1 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。运行初期, 由于 HRT 的突然缩短, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的去除率迅速降至 46% 和 32%, 但出水中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化不大。待微生物逐渐适应提高的氨氮负荷后, 反应器脱氮性能随之恢复, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN

去除率分别逐渐升高至 98% 和 75%。

继续缩短 HRT 至 6 h, 在阶段 III₁ (72 ~ 89 d) 初期, NH_4^+ -N 和 TN 的去除率再次出现降低, 不过经过短暂的驯化培养后, 两者的去除率很快回升至 96% 和 83%, 此时, 出水 NH_4^+ -N 和 TN 浓度维持在 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, NRR 达到 $0.15 \text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$, 认为反应器启动成功, 其启动时间短于先前的研究报道^[16]。为了测试新型 HABR 反应器的运行稳定性, 维持阶段 III₁ 的运行条件, 进入阶段 III_{II} (90 ~ 187 d)。由图 2 可以看出, 在阶段 III_{II}, 反应器出水 NH_4^+ -N 和 TN 浓度持续保持在 $2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, NH_4^+ -N 和 TN 去除率分别达到 96% 和 83%, 这说明新型 HABR 反应器不仅启动速度快, 而且能够连续稳定运行, 即新型 HABR 反应器具有良好的脱氮性能和稳定性。

2.2 反应器沿程氮素变化

在阶段 III_{II} 期间, 分别从反应器的 6 个取样口同时多次取样, 以分析反应器沿程氮素的变化规律, 其结果如图 3 所示。从中可知, 前 3 个单元格去除了接近 90% 的 NH_4^+ -N, 特别是第 1 个单元格中 NH_4^+ -N 的去除率达到 40%, 第 2 个单元格也达到 30%, 这与之前的文献报道相类似^[12,17]。 NO_2^- -N 浓度在曝气量较大的前两格中略有升高, 但远小于亚硝化反应中 NH_4^+ -N 去除量与 NO_2^- -N 生成量之比为 1:1 的理论值, 说明亚硝化反应所产生的 NO_2^- -N 迅速被 ANAMMOX 反应作为基质所利用, 因此并未出现大量 NO_2^- -N 积累的现象。 NO_3^- -N 浓度在前 3 个单元格虽有上升, 但幅度较小, 由进水中的 $5.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 最高升至 $9.94 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (第 3 个单元格), 在后 3 个单元格中 NO_3^- -N 浓度略有下降, 整个反应器沿程并无大量 NO_3^- -N 产生, 说明反应器中 NOB 无明显的富集, 且其活性受到了有效地抑制。

电导率是评价生物系统处理性能的重要指示参数, 与废水中微生物群落的主要组成存在显著的线性关系^[18], 与厌氧氨氧化活性关系密切^[19]。反应器沿程电导率监测结果如图 4(a) 所示, 由进水的 $2.77 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 沿着水流方向逐步降至 $2.48 \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$, 尤以第 1 个单元格下降最为明显, 与沿程 NH_4^+ -N 下降趋势相一致, 这说明电导率与 NH_4^+ -N 浓度之间有着一定的线性关系^[20]。相同的情况也出现在先前的研究中, 即氮的去除量与电导率的差值成比例下降^[21~23]。因此, 可根据进、出水电导率的差值来衡量反应器运行效果的好坏。

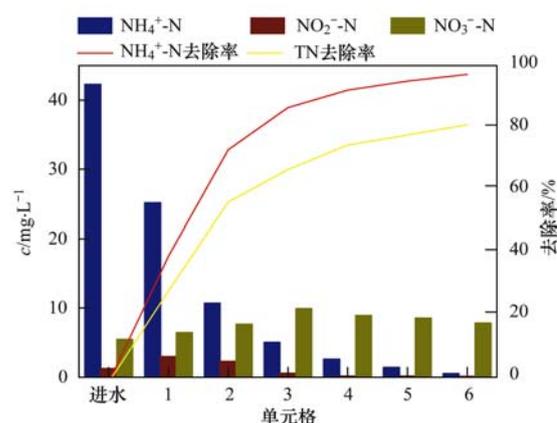


图 3 反应器各单元格氮素变化及去除率

Fig. 3 Profile of nitrogen and nitrogen removal in each compartment of the reactor

pH 值作为自养脱氮系统的一个重要影响因素^[24], 不仅可以影响细胞内电解质的平衡来直接影响微生物的活性甚至决定其能否存活, 甚至还能通过影响基质或抑制物的浓度来间接影响微生物的活性。对于 ANAMMOX 反应而言, 进出水 pH 差值 (ΔpH) 在一定程度上受 ANAMMOX 菌数量和活性的影响^[25], 其运行效能与 ΔpH 值和流量的乘积 ($\Delta\text{pH} \times Q$) 具有较为显著的线性关系^[22], 故可以通过 ΔpH 的变化来推断反应器内是否进行 ANAMMOX 反应^[26]。因此, 根据亚硝化和 ANAMMOX 反应的最佳 pH 值范围, 本实验将进水 pH 值控制在 7.7 ± 0.2 之间。反应器沿程各单元格中 pH 值的变化如图 4(b) 所示。由于 ANAMMOX 反应属于嗜酸释碱过程, 因此沿程中 pH 值的不断上升可以证实反应器各单元格中均存在厌氧氨氧化反应。在沿程中出现了两次明显的 pH 值上升: 一次是第 1 个单元格的出水 pH 显著高于进水 pH, 说明此时 ANAMMOX 过程为主反应, ANAMMOX 反应产生的碱大于亚硝化过程产生的酸; 另一次是第 4 个单元格的出水 pH 高于第 3 个单元格的出水 pH, 此时好氧段结束, 缺氧段开始, 不利于 AOB 的生长, 亚硝化过程受到抑制, 而 ANAMMOX 反应继续进行。

为分析反应器沿程各单元格内生物量的变化, 在反应器稳定运行期间测定各单元格内的 MLSS 浓度。由图 4(c) 可以看出, 反应器中不同单元格的 MLSS 浓度在 $5200 \sim 3200 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间, 沿程中 MLSS 的浓度伴随着 NH_4^+ -N 浓度的下降呈现出逐渐降低的变化趋势, 这是由于水中基质浓度与微生物的生长变化密切相关。 NH_4^+ -N 作为 AOB 和 AnAOB 共同的基质, 在其含量相对较高且进行曝气的第 1、

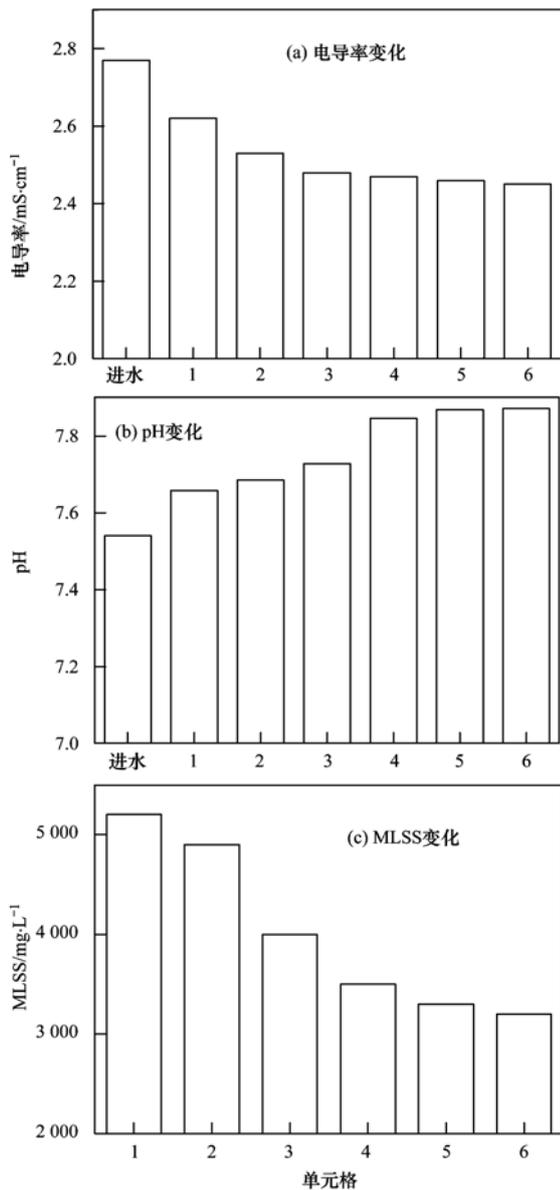


图4 反应器各单元格内参数变化

Fig. 4 Variations of parameters in each compartment of the reactor

2个单元格中 MLSS 浓度为 $5\ 000\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,明显高于其他单元格,即充足的营养物质和适宜的 DO 浓度使得微生物快速生长富集. 而在其他单元格中,随着营养物质的降低,MLSS 稍有下降,但仍维持在相对稳定的水平,在 $3\ 500\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右的范围内波动,这说明经过长期驯化成功的微生物已适应反应器内环境,整体上其生长与衰亡达到动态平衡.

2.3 生物膜形态及空间结构分析

由于第1个单元格具有突出的脱氮性能,因此选其作为分析微生物种群形态结构及空间分布的研究对象具有代表性,故对第1个单元格中的生物膜进行扫描电镜及 FISH 分析.

AOB 和 AnAOB 种类形态多样,污水处理系统中经常出现的 AOB 主要是 *Nitrosococcus* (亚硝化球菌属) 和 *Nitrosomonas* (亚硝化单胞菌属),其形态分别呈球状和短杆状,AnAOB 属于圆形和椭圆形的革兰氏阴性菌^[27],成簇聚生,直径约 $0.8\sim 1.1\ \mu\text{m}$. 由图5可知,反应器内存有结构紧致的菌胶团,与先前的 CANON 反应器研究结果相似^[28],成簇生长的球形和椭球形菌为生物膜上的优势菌种,直径在 $0.2\sim 0.8\ \mu\text{m}$,由此推断其中的球形菌可能为 *Nitrosococcus* 和 AnAOB,数量较少的短杆菌则可能为 *Nitrosomonas*.

为研究生物膜内微生物的空间分布,通过 AOB 和 AnAOB 的特异性探针对生物膜进行 FISH 分析,结果如图6所示,其群落分布情况与已知的研究结果一致^[29~31],AOB 和 AnAOB 两种微生物同时存在于污泥样品中,AnAOB 趋向于分布在内侧,AOB 则更趋于分布于外侧. 这一结果验证了前面的推断,AOB 和 AnAOB 的协同作用保证了 CANON 反应器良好的脱氮效果. 由于氧饱和常数不同以及传质限制等因素,使得 AOB 和 AnAOB 具有特定的空间分

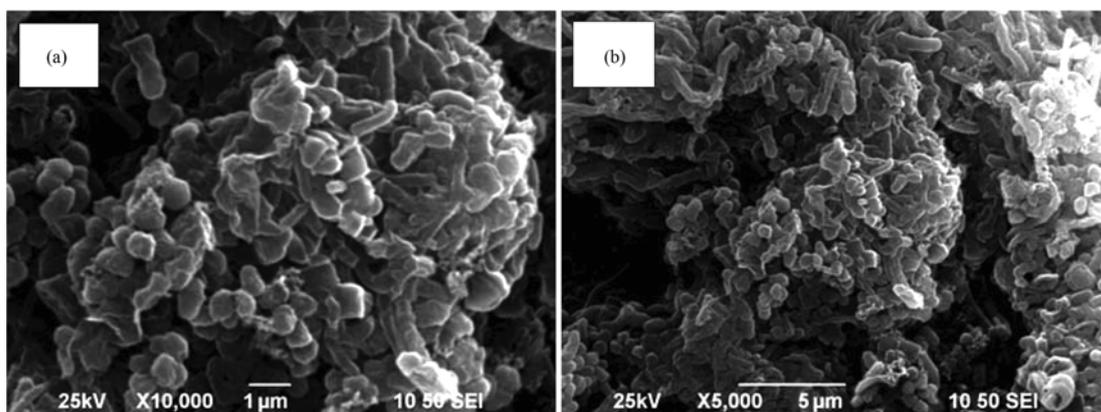
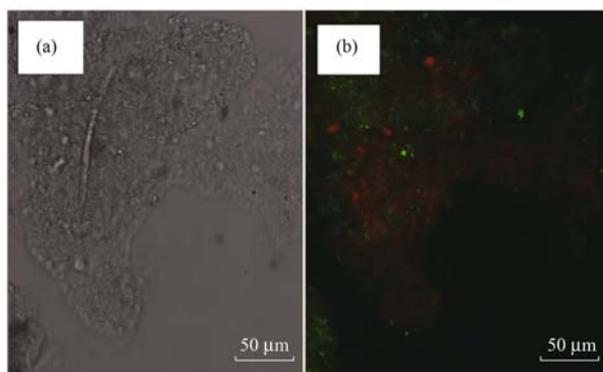


图5 污泥样品扫描电镜照片

Fig. 5 SEM images of the sludge sample

布特征。AOB 属好氧菌,易聚积生长于生物膜的表面,适宜的 DO 促进 AOB 的生长代谢,淘汰 NOB,将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,为 AnAOB 提供基质,DO 在向生物膜内层扩散过程中不断被消耗掉,故在生物膜内层出现了利于 AnAOB 生长的缺氧或厌氧区域。



(a) 污泥可见光照片; (b) 污泥 FISH 照片; 放大倍数 400 倍, 绿色为 AOB, 红色为 AnAOB

图 6 反应器内生物膜 FISH 结果

Fig. 6 FISH results of biofilm in the reactor

3 结论

(1) 经过 89 d 的连续运行,新型 HABR 反应器实现了 CANON 工艺的快速启动,并能持续稳定运行至 187 d。稳定运行阶段,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 浓度分别在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,去除率分别达到 96% 和 83% 以上, NRR 达到 $0.15 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,证实了新型 HABR 是一种高效、稳定的脱氮反应器。

(2) 稳定运行阶段, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TN 浓度沿程逐渐降低,沿程中 pH 值的波动变化与 DO 密切相关,电导率、MLSS 的变化与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度的变化具有正相关性。

(3) SEM 和 FISH 分析结果表明, AOB 与 AnAOB 为反应器内的优势菌种, AOB 位于生物膜外层, AnAOB 分布于缺氧或厌氧的生物膜内层,二者的协同作用保证了反应器良好的脱氮效果。

参考文献:

- [1] Third K A, Slikers A O, Kuenen J G, *et al.* The CANON system (completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite) under ammonium limitation: interaction and competition between three groups of bacteria [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, **24**(4): 588-596.
- [2] Slikers A O, Derwort N, Gomez J L C, *et al.* Completely autotrophic nitrogen removal over nitrite in one single reactor [J]. *Water Research*, 2002, **36**(10): 2475-2482.
- [3] 王会芳,付昆明,左早荣,等.水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(11): 4161-4167.
- [4] Ahn Y H, Choi H C. Autotrophic nitrogen removal from sludge digester liquids in upflow sludge bed reactor with external aeration [J]. *Process Biochemistry*, 2006, **41**(9): 1945-1950.
- [5] Nhat P T, Biec H N, Mai N T T, *et al.* Application of a partial nitrification and anammox system for the old landfill leachate treatment [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2014, **95**: 144-150.
- [6] Jeanningros Y, Vlaeminck S E, Kaldate A, *et al.* Fast start-up of a pilot-scale deammonification sequencing batch reactor from an activated sludge inoculum [J]. *Water Science & Technology*, 2010, **61**(6): 1393-1400.
- [7] Liu T, Li D, Zeng H P, *et al.* Biodiversity and quantification of functional bacteria in completely autotrophic nitrogen-removal over nitrite (CANON) process [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **118**: 399-406.
- [8] 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.
- [9] 张红陶,郑平. Canon 工艺研究进展 [J]. *工业水处理*, 2013, **33**(8): 1-5.
- [10] Feng H J, Hu L F, Mahmood Q, *et al.* Anaerobic domestic wastewater treatment with bamboo carrier anaerobic baffled reactor [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2008, **62**(3): 232-238.
- [11] Barber W P, Stuckey D C. The use of the anaerobic baffled reactor (ABR) for wastewater treatment: a review [J]. *Water Research*, 1999, **33**(7): 1559-1578.
- [12] Uyanik S, Sallis P J, Anderson G K. The effect of polymer addition on granulation in an anaerobic baffled reactor (ABR). Part I: process performance [J]. *Water Research*, 2002, **36**(4): 933-943.
- [13] 鲍林林,程庆锋,李冬,等.改良氧化沟工艺节能降耗及脱氮除磷优化研究 [J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(13): 8-11.
- [14] Amann R I, Krumholz L, Stahl D A. Fluorescent-oligonucleotide probing of whole cells for determinative, phylogenetic, and environmental studies in microbiology [J]. *Journal of Bacteriology*, 1990, **172**(2): 762-770.
- [15] Wang Z Z, Liang H, Qu F S, *et al.* Start up of a gravity flow CANON-like MBR treating surface water under low temperature [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, **217**: 466-474.
- [16] Cho S, Fujii N, Lee T, *et al.* Development of a simultaneous partial nitrification and anaerobic ammonia oxidation process in a single reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 652-659.
- [17] Chelliapan S, Wilby T, Sallis P J. Performance of an up-flow anaerobic stage reactor (UASR) in the treatment of pharmaceutical wastewater containing macrolide antibiotics [J]. *Water Research*, 2006, **40**(3): 507-516.

- [18] De Vrieze J, Saunders A M, He Y, *et al.* Ammonia and temperature determine potential clustering in the anaerobic digestion microbiome [J]. *Water Research*, 2015, **75**: 312-323.
- [19] Bai R, Xi D, He J Z, *et al.* Activity, abundance and community structure of anammox bacteria along depth profiles in three different paddy soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **91**: 212-221.
- [20] Yang J J, Trela J, Plaza E, *et al.* Oxidation-reduction potential (ORP) as a control parameter in a single-stage partial nitrification/anammox process treating reject water[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2015, doi: 10.1002/jctb.4849.
- [21] 谢作甫, 郑平, 厉巍, 等. ANAMMOX 过程性能与电导率变化[J]. *化工学报*, 2013, **64**(7): 2633-2640.
- [22] Li H S, Zhou S Q, Ma W H, *et al.* Fast start-up of ANAMMOX reactor; operational strategy and some characteristics as indicators of reactor performance[J]. *Desalination*, 2012, **286**: 436-441.
- [23] 黄鹏飞, 张锦耀, 秦玉洁, 等. 高流速启动 ANAMMOX-UASB 反应器及其脱氮特性[J]. *中国给水排水*, 2014, **30**(17): 9-13.
- [24] Fajardo C, Mora M, Fernández I, *et al.* Cross effect of temperature, pH and free ammonia on autotrophic denitrification process with sulphide as electron donor [J]. *Chemosphere*, 2014, **97**: 10-15.
- [25] 李冬, 邱文新, 吴迪, 等. 不同水力负荷下的 ANAMMOX 试验研究[J]. *中国给水排水*, 2013, **29**(11): 101-105.
- [26] 曾国驱, 贾晓珊. 制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4618-4626.
- [27] Sliekers A O, Haaijer S, Schmid M, *et al.* Nitrification and anammox with urea as the energy source [J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2004, **27**(3): 271-278.
- [28] Liu T, Li D, Zhang J, *et al.* Effect of temperature on functional bacterial abundance and community structure in CANON process [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2016, **105**: 306-313.
- [29] Kindaichi T, Tsushima I, Ogasawara Y, *et al.* In situ activity and spatial organization of anaerobic ammonium-oxidizing (anammox) bacteria in biofilms[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, **73**(15): 4931-4939.
- [30] Chu Z R, Wang K, Li X K, *et al.* Microbial characterization of aggregates within a one-stage nitrification-anammox system using high-throughput amplicon sequencing[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **262**: 41-48.
- [31] Xiao P Y, Lu P L, Zhang D J, *et al.* Effect of trace hydrazine addition on the functional bacterial community of a sequencing batch reactor performing completely autotrophic nitrogen removal over nitrite[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **175**: 216-223.

CONTENTS

Concentration Characteristics of PM _{2.5} in Beijing During Two Red Alert Periods	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, CHEN Tian, <i>et al.</i> (2409)
Response of Human Respiratory Height PM _{2.5} Variation Characteristics to Meteorological Factors During Winter Haze Days in Beijing	ZHANG Nan, XIONG Hei-gang, GE Xiu-xiu, <i>et al.</i> (2419)
Pollution Characteristics and Sources Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmospheric Fine Particulate Matter in Lanzhou City	LI Ying-hong, RAO Zhi-guo, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (2428)
Determination and Source Apportionment of Aromatic Acids in PM _{2.5} from the Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Ya-fei, MA Yan, QI Lu, <i>et al.</i> (2436)
Impact of Marine-atmospheric Process on Aerosol Number Size Distribution in the South China Sea	KONG Ya-wen, SHENG Li-fang, LIU Qian, <i>et al.</i> (2443)
Assessment of Heavy Metals Pollution and Its Health Risk of Atmospheric Dust Fall from East Part of Junggar Basin in Xinjiang	YANG Chun, Tashpolat Tiyp, HOU Yan-jun, <i>et al.</i> (2453)
Variations of Stable Isotope in Precipitation and Its Atmospheric Circulation Effect in Chongqing	WEN Yan-ru, WANG Jian-li (2462)
Temporal Dynamics of Stable Isotopic Composition in Lake Taihu and Controlling Factors	XU Jing-zheng, XIAO Wei, XIAO Qi-tao, <i>et al.</i> (2470)
Geochemical Characteristics of Lateral Hyporheic Zone Between the River Water and Groundwater, a Case Study of Maanxi in Chongqing	ZHANG Yu, YANG Ping-heng, WANG Jian-li, <i>et al.</i> (2478)
Variations of CO ₂ Exchange Fluxes Across Water-air Interface and Environmental Meaning in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (2487)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; UV-Vis Spectrum	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2496)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) Releases from Soils of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas; Fluorescence Spectra	LIANG Jian, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (2506)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Thirteen Sulfonamides Antibiotics in a Drinking Water Source in East China	JIN Lei, JIANG Lei, HAN Qi, <i>et al.</i> (2515)
Concentrations of Ketamine and Norketamine in the Water Environment in Beijing	ZHANG Hua-fang, YANG Jun, DU Peng, <i>et al.</i> (2522)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Water of Yuqiao Reservoir Watershed During the Water Delivery Period	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, FU Qing, <i>et al.</i> (2530)
Concentrations and Partitioning of Halogenated Flame Retardants in Industrial Water of Dongjiang River	HE Ming-jing, LI Qi, ZHAO Jia-yuan, <i>et al.</i> (2539)
Distribution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Fatty Acids in Water of Karst Underground River	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (2547)
Pollution Characteristics of Snowmelt Runoff on Different Underlying Surface in Main Urban Area of Harbin	SUN Xi-han, LIU Shuo, WAN Lu-he, <i>et al.</i> (2556)
Impact of Precipitation on Fenghe River Water and Aquatic Microorganisms	LU Si-dan, SUN Yu-jiao, ZHAO Xuan, <i>et al.</i> (2563)
Response of <i>Microcystis aeruginosa</i> Growth to Arsenate Under Different Phosphorus Regimes	WANG Zhen-hong, ZHANG Han-peng, LUO Zhuan-xi (2570)
Removal Behavior of Ibuprofen and Diclofenac in Different Constructed Wetlands	JING Rui-ying, YANG Yang, DAI Yu-ni, <i>et al.</i> (2577)
Influence of Chemical Pre-oxidation on Chloral Hydrate Formation of Threonine	CAI Guang-qiang, FU Xue-min, LIU Li-jun, <i>et al.</i> (2586)
Activated Carbon Supported Co ₃ O ₄ Catalysts to Activate Peroxymonosulfate for Orange G Degradation	WANG Zhong-ming, CHEN Jia-bin, ZHANG Li-ming, <i>et al.</i> (2591)
Kinetics for Degradation of Orange G with Peroxymonosulfate Activated by Carbon Nanotubes	ZHANG Li-ming, CHEN Jia-bin, LI Wen-wei, <i>et al.</i> (2601)
Removal of Chloramphenicol in Wastewater by Electrocatalytic Reduction with Carbon Nanotubes-Modified Electrode	DENG Fei, TANG Bo-bin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2610)
Removal of AOX, Chroma and TOC in Chemical Dye-stuff Wastewater with Iron Scraps-Fenton-Coagulation Combined Process	SHU Xiao-ming, XU Can-can, WEN Xiao-gang, <i>et al.</i> (2618)
Removal of AOX in Activated Sludge of a Chemical Pharmaceutical Industry with Fenton Oxidation	CHEN Si, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (2625)
Performance Evaluation of a Pilot-scale Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, ZHANG Jing, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2632)
Nitrogen Removal Performance of Novel HABR Reactor over CANON Process	BAO Lin-lin, CHEN Wan-qiu (2639)
Characteristics of a Combined Heterotrophic and Sulfur Autotrophic Denitrification Technology for Removal of High Nitrate in Water	LI Xiang, MA Hang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (2646)
Characteristics of Microbial Community in Each Compartment of ABR ANAMMOX Reactor Based on High-throughput Sequencing	CHEN Chong-jun, ZHANG Hai-qin, WANG Yao-qi, <i>et al.</i> (2652)
Nitrogen Removal and the Characteristics of Denitrification Bacteria Using NUA-DAS Ecofilter	WANG Long-mian, QIU Hao-yu, CHE Yu-xiao, <i>et al.</i> (2659)
Coupling of Hydrocarbon Accumulation and Cobalt Removal During Treatment of Cobalt Enriched Industrial Wastewater with <i>Botryococcus braunii</i> Biofilm Attached Cultivation	CHENG Peng-fei, WANG Yan, YANG Qi-yong, <i>et al.</i> (2666)
Isolation of <i>Raoultella</i> sp. sari01 and Its Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Characteristics	YAN Wei-zhi, HAO Jian, SUN Jun-song, <i>et al.</i> (2673)
Screening and Nitrogen Removing Characteristics of Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacteria SLWX ₂ from Sea Water	CHENG Yu, LI Qiu-fen, FEI Yu-tao, <i>et al.</i> (2681)
Biodiversity of Thiocyanate-degrading Bacteria in Activated Sludge from Coking Wastewater	XU Wei-chao, MENG Xiao-jun, YIN Li, <i>et al.</i> (2689)
Responses of Plankton Microeukaryotic Community to Increasing Temperatures Created by Power Plant Thermal Discharges	DAI Wen-fang, YANG Shi-ye, QUE Zhi-jia, <i>et al.</i> (2696)
Characteristics of Soil Microbial Community Structure in the Rhizospheric Soil of <i>Ammopiptanthus mongolicus</i> by Phospholipid Fatty Acid (PLFA)	ZUO Yi-ling, HE Xue-li, WANG Shao-jie, <i>et al.</i> (2705)
Response of Soil Respiration to Extreme Precipitation in Semi-arid Regions	ZHAO Man, WANG Rui, LI Ru-jian, <i>et al.</i> (2714)
Features and Influencing Factors of N ₂ O Emissions from Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	LI Rui, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2721)
Denitrification Loss and N ₂ O Emission from Different Carbon Inputs in Orchard Drains Sediments	GAO Xue-mei, SHE Dong-li, YAN Xiao-yuan, <i>et al.</i> (2731)
Emissions Characteristics of Greenhouse Gas from Sewage Sludge Composting Process in Winter	YI Jian-ting, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (2738)
Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soils from Shergyla Mountain, Southeast Tibetan Plateau	LUO Dong-xia, ZHANG Shu-juan, YANG Rui-qiang (2745)
Applications of Geostatistical Analyses and Stochastic Models to Identify Sources of Soil Heavy Metals in Wuqing District, Tianjin, China	SONG Zhi-ting, ZHAO Yu-jie, ZHOU Qi-wen, <i>et al.</i> (2756)
Effects of Soil Moisture and Temperature Variations on Organic Carbon Mineralization of Purple Soil in the Hydro-fluctuation Belt of the Three Gorges Reservoir	DING Chang-huan, WANG Lian-ge, TANG Jiang, <i>et al.</i> (2763)
Reduction Effect of Reduced Phosphorus Fertilizer and Combining Organic Fertilizers on Phosphorus Loss of Purple Soil Sloping Field	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2770)
Transformation and Migration of Sulfur Speciation in the Rhizosphere and Bulk Soil of Paddy Soil	DU Guang-hui, RAO Wei, LI Xin, <i>et al.</i> (2779)
Comparison of the Persistence of a Combined Amendment Stabilizing Pb, Cd, Cu and Zn in Polluted Paddy Soil	WU Yu-jun, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (2791)
Bio-inspired Recovery of Platinum Nanoparticle and Its Mechanism	SHANG Ru, ZHU Neng-wu, KANG Nai-xin, <i>et al.</i> (2799)
Preparation of γ -Fe ₂ O ₃ Catalyst by Heat Treatment of Natural Limonite for Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	XU Bin, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (2807)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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7月15日 第37卷 第7期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 7 Jul. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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