

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓, 刘峻峰, 陶玮, 陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪, 孔少飞, 王伟, 严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾, 廖晓农, 王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 魏强, 孙彤卉, 王步英, 富佳明, 何乐为, 程兵芬, 皮帅, 马立光, 崔继宪, 孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博, 李治国, 路娜, 徐曼, 杨鹏, 高康宁, 王建国, 靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕, 贺光艳, 罗彬, 陈建文, 王斌, 杜云松, 杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟, 王红磊, 李莉, 吕升, 袁婧, 张孝寒, 章国骏, 王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 刘贤荣, 胡起超, 王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险: 以贵阳市为例	李晓燕, 汪浪, 张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思, 于爽, 黎泳珊, 孙平安, 何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮(NH ₃ 和N ₂ O)减排效果比较: 以夏玉米季为例	范会, 姜姗姗, 魏茨, 蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤CO ₂ 、CH ₄ 和N ₂ O通量的观测	吴建国, 周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬CO ₂ 和CH ₄ 分压特征分析	张军伟, 雷丹, 肖尚斌, 张成, 穆晓辉, 刘佳, 李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨, 刘汉安, 高学平, 张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例	
吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄, 韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究: 以洱海北部流域为例	项颂, 庞燕, 储昭升, 胡小贞, 孙莉, 薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响: 以草堂河为例	王晓彤, 罗光富, 操满, 王雨春, 汪福顺, 邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠, 黄青飞, 钱靖, 殷晓曦, 韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤, 胡亚伟, 宋常吉, 彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思, 雷利国, 江长胜, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静, 郑丙辉, 刘录三, 马迎群, 林岗璇, 汪星, 夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇, 张鸿, 罗骥, 张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁, 潘佳钊, 宋玉梅, 郭鹏然, 王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟, 胡玮璇, 庞树江, 王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚酸酯的污染现状与分布特征	昌盛, 赵兴茹, 刘琰, 耿梦娇, 肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 赵瑞一, 梁作兵 (3049)
Zn系LDHs覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌, 黄华玲, 郭露, 陈巧珍, 阮聪颖, 冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥, 迟惠中, 宋阳, 罗从伟, 江进, 马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川, 向星光, 曾晓岚, 厉晓宇, 梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪, 周泽宇, 王洪涛 (3079)
单偶氮染料AY17的光催化降解动力学及机制	阳海, 魏宏庆, 胡乐天, 胡倩, 阳立平, 刘华杰, 易翔, 易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春, 于长富, 张静, 陈晓轩, 张磊, 杨景亮 (3101)
ABR工艺ANAMMOX耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良, 张婷 (3108)
活性污泥厌氧Fe(III)还原氨氧化现象初探	李祥, 林兴, 杨朋兵, 黄勇, 刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮EGSB反应器的快速启动	顾书军, 方芳, 李凯, 刘勇, 郭劲松, 陈猷鹏, 蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的EBPR系统除磷性能	马娟, 宋璐, 俞小军, 李璐, 孙雷军, 孙洪伟, 李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江, 赵媛, 张源凯, 王洪臣, 齐鲁, 尹训飞, 张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲, 吴泉源, 吕建树, 董玉龙, 曹文涛, 康日斐, 曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳, 李哲, 者渝芸, 黄杰, 梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫, 杨军, 饶伟, 王代长, 杜光辉, 化党领, 刘世亮, 刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健, 雷明婧, 王平, 张伟丽, 陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东, 刘荟, 张银婷, 杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩, 李正魁, 张一品, 韩华杨, 王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中PAHs的生物有效性	
张亚楠, 杨兴伦, 卞永荣, 谷成刚, 王芳, 王代长, 蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新, 苏志忠, 邢红恩, 王发园, 石兆勇, 刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南, 闫振广, 余若祯, 王婉华, 陈丽红, 刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳, 陈胜, 万堃, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (3224)
不同氨水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉, 周龙, 龙光强, 汤利 (3229)
《环境科学》征订启事 (3025) 《环境科学》征稿简则 (3057) 信息 (3072, 3085, 3143)	

ABR 工艺 ANAMMOX 耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水

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

(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: 厌氧氨氧化技术如能替代市政污水厂的主流工艺, 将大幅降低市政污水处理能耗。故采用 ABR 反应器, 构建除碳系统、短程硝化系统和厌氧氨氧化系统, 将三者耦合成一体化短程硝化-厌氧氨氧化反应器进行城市污水脱氮。结果表明, ABR 除碳系统的 HRT 为 4.5 h 时, 其出水 COD 平均浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 不会对后续短程硝化系统产生不利影响, 出水 TN 平均浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧氨氧化系统 TN 容积负荷为 $0.36 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。当控制 DO 为 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 亚硝化率能长时间维持在 90% 左右, 有利于保证后续厌氧氨氧化系统的稳定运行。当控制温度为 30°C 左右, 好氧区 DO 为 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 短程硝化-ANAMMOX 一体化 ABR 工艺可以对城市污水稳定高效地脱氮。

关键词: 短程硝化; 城市污水; 厌氧氨氧化; 连续流反应器

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3108-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.036

Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor

WU Peng^{1,2}, ZHANG Shi-ying¹, SONG Yin-ling^{1,2}, XU Yue-zhong^{1,2}, 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 215009, China)

Abstract: If the technology of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) can substitute the mainstream technology of municipal wastewater treatment plant, the energy of municipal wastewater treatment will be decreased significantly. Thus, anaerobic baffled reactor (ABR) was used to build carbon system, shortcut nitrification system and anaerobic ammonia oxidation system. And the three systems were coupled to shortcut nitrification-anaerobic ammonia oxidation reactor to treat municipal wastewater. The results showed that the average effluent COD concentration of carbon removal system was $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ when the hydraulic retention time of carbon removal system was 4.5 h. And the subsequent shortcut nitrification system would not be adversely affected by the effluent COD. Finally, the average effluent total nitrogen concentration was $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with total nitrogen volume load of ANAMMOX system of $0.36 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. When the dissolved oxygen was controlled between 1 to $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the nitrite accumulation rate could be maintained around 90%, ensuring the stable operation of the subsequent anaerobic ammonia oxidation system. The nitrogen of municipal wastewater could be stable and efficiently removed by the shortcut nitrification-ANAMMOX integration ABR with temperature of 30°C and dissolved oxygen of $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Key words: shortcut nitrification; municipal wastewater; anaerobic ammonium oxidation; continuous flow reactor

厌氧氨氧化 (anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX) 因无需供氧和有机碳源等优点而受到广泛关注^[1~3], 如能将厌氧氨氧化技术成功应用于市政污水厂的主流线路, 将使得市政污水处理产生革命性的变化^[4]。但有机物和溶解氧对厌氧氨氧化过程影响很大^[5,6], 对进水要求比较高。另外, 与传统的全程硝化相比, 短程硝化可以节省 25% 的曝气量和 30% 的反应时间^[7,8]。因此, 短程硝化-厌氧氨氧化工艺凭借节省曝气量、无需外加碳源等优点, 成为处理低 C/N 比污水 (如城市污水) 的有效途径^[9,10]。为此, 在前期研究的基础上^[11], 强化短程

硝化功能^[12], 故本试验基于 ABR 反应器具有微生物相有效分离的特性, 构建除碳系统、短程硝化系统和厌氧氨氧化系统, 将三者耦合成一体化短程硝化-厌氧氨氧化 ABR 工艺处理城市污水, 以期在城市污水处理提供新途径。

收稿日期: 2016-01-20; 修订日期: 2016-03-24

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; 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

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置为 7 隔室 ABR 反应器,由前除碳系统、中间短程硝化系统和后 ANAMMOX 系统三部分组成(如图 1)。ABR 反应器每隔室升流区和降流区隔间宽度比为 4:1,折流板导向角 45°,总有效容积为 10L,置于 28 ~ 30℃ 的水浴中。除碳系统由 ABR 前 3 个厌氧隔室组成。ABR 反应器第 4 和第 5 号隔室为短程硝化系统,分为好氧区和沉淀区两部

分,好氧区曝气装置采用砂块曝气头,由时间继电器控制曝气时间,由转子流量计控制气量,好氧区 DO 浓度平均为 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。ANAMMOX 系统位于 ABR 反应器最后两个隔室,并采用遮阳塑料膜避光。控制 ANAMMOX 系统进水为 ABR 出水与短程硝化系统出水 1:2 混合水,保证 ANAMMOX 反应器进水 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$): ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 在 1:1 左右。如图 2 所示,除碳系统出水(即 ABR 第三隔室出水)由泵打入 ANAMMOX 反应器与短程硝化沉淀池出水混合,进行厌氧氨氧化反应。

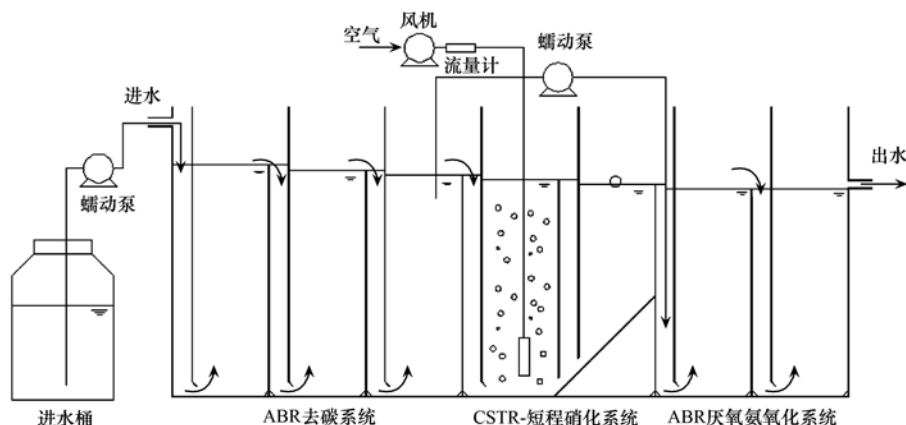


图 1 一体化短程硝化-厌氧氨氧化装置示意

Fig. 1 Schematic of integrated partial nitrification-ANAMMOX plant

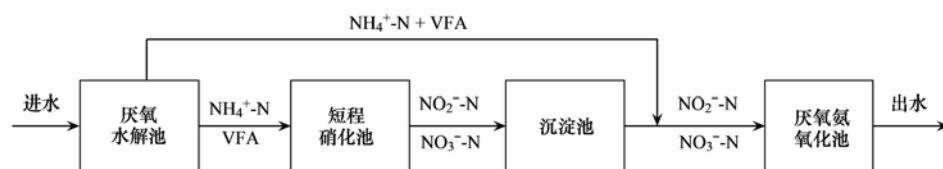


图 2 一体化短程硝化-厌氧氨氧化机制

Fig. 2 Mechanism of integrated partial nitrification-ANAMMOX

1.2 试验进水与污泥

试验进水为城市污水,再添加一定量氯化铵和乙酸钠作为碳源和氮源,调节进水 COD 浓度为 200 ~ 600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。

除碳系统和短程硝化系统的接种污泥为实验室培养成熟的厌氧颗粒污泥。除碳系统接种量为隔室的一半左右。短程硝化系统接种量共 500 mL,接种初期 MLSS 为 5.5 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。ANAMMOX 系统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 MLSS 为 8.5 $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 分析方法

根据文献[13]所列主要水质指标的测试方法:COD 为快速消解分光光度法; $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为纳氏试剂分

光光度法; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 *N*-(1-萘基)-乙二胺分光光度法; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为紫外分光光度法; TN 为过硫酸钾氧化-紫外分光光度法; pH 采用 pHHS-9V 数显酸度计测定;溶解氧:YSI550A 溶氧仪; MLSS 为滤纸称重法。

1.4 试验方法

城市污水进入 ABR 反应器前 3 个隔室完成除碳过程后,作为短程硝化段进水。在短程硝化段 90% 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被转化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,为保证厌氧氨氧化段 ($\text{NO}_2^- - \text{N}$): ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 为 1:1 左右,以 ABR 反应器第三隔室出水与短程硝化段沉淀池出水 1:2 混合,作为厌氧氨氧化段进水,完成厌氧氨氧化脱氮过程。通过调控反应器 HRT、pH 和 DO 等运行参数,对短程硝化-厌氧氨氧化系统除碳脱氮效能进行研究。为探索一体化短程硝化-厌氧氨氧化反应器最优运

行参数,设置了数组运行条件对该系统进行调控,各 段运行条件如表 1 所示.

表 1 试验运行条件

Table 1 Experimental operation condition

工况	时间/d	HRT/h				进水 COD /mg·L ⁻¹	好氧池 DO /mg·L ⁻¹
		ABR	短程硝化	ANAMMOX	合计		
1	1~20	9	6	6	21	200	2~3
2	21~30	9	6	6	21	400	1~2
3	31~40	6	4	4	14	400	1~2
4	41~60	4.5	3	3	10.5	400	1~2
5	61~80	4.5	3	3	10.5	600	1~2
6	81~100	3	2	2	7	600	<1

2 结果与讨论

2.1 进水有机物浓度对一体化系统的影响

ABR 反应器接种厌氧颗粒污泥, MLSS 均值 6 800 mg·L⁻¹, HRT 为 6 h, 城市污水 pH 在 7.0 ~ 7.8 之间, COD 波动范围较大, 本试验设计了 3 组不同 COD 浓度的进水, 考察 ABR 对城市污水有机负荷的承受能力.

ABR 反应器特殊的折流板结构, 使反应器内水流多次上下折流运动, 促使反应器内污泥与基质的混合接触^[14], 并可将污泥有效地截留, 适用于处理有机物浓度较低的城市污水. ABR 进出水 COD 变化与 COD 去除率如图 3 所示, 进水有机物浓度不断提升的过程中, ABR 能保持较稳定的除碳效果. 在进水 COD 为 600 mg·L⁻¹, ABR 段 HRT 为 3 h, 反应器有机负荷可达 0.7 kg·(kg·d)⁻¹, 出水 COD 可稳定在 80 mg·L⁻¹ 左右, 与宋小康等的研究结果类似^[15]. 出水 COD 浓度受进水 COD 浓度波动的影响较小, 这与进水有机负荷较低有关. 由于 ABR 除碳系统去除了大部分有机物, 短程硝化段进水 COD 在 80 ~ 100 mg·L⁻¹ 左右. 有研究表明, C/N 比大于 5.6 时会导致氨氧化菌数量和多样性的减少, 致使

NO₂⁻-N 累积率下降^[16]. 然而, 由图 4 可知, 本试验进水 COD 的小幅波动对短程硝化影响不大, 出水 NO₂⁻-N 浓度及亚硝化率均无明显变化, 这与短程硝化系统进水 COD 浓度(平均浓度小于 120 mg·L⁻¹) 较低有关, 与巫恺澄等^[17]的研究结果一致. 另外, 短程硝化系统在间歇曝气过程中 DO 浓度较低(1 ~ 2 mg·L⁻¹), 存在反硝化作用, 亦会消耗少量的有机物, 短程硝化系统出水 COD 平均为 58 mg·L⁻¹, COD 浓度进一步降低, 从而减小了对短程硝化效果的影响.

2.2 HRT 对一体化系统的影响

ABR 反应器适用于处理低浓度有机废水, 传统的高效厌氧反应器如 UASB、EGSB 等需要较高的有机物浓度和传质效率才能成功启动, 但是 ABR 可以通过缩短 HRT 的方式, 利用低浓度有机废水培养厌氧颗粒污泥, 并可以达到高效稳定的除碳效果^[18]. 由图 3 可知, 当 ABR 进水 COD 浓度为 400 mg·L⁻¹, HRT 为 9 h 时, COD 平均去除率为 70% 左右, 出水 COD 浓度为 80 mg·L⁻¹ 左右. 这与基质浓度较低, 有机物与污泥的传质效率不高, HRT 较长时水流较缓, 基质与污泥混合不均, 甚至出现短流的现象有关, COD 去除率较低^[19]. 逐步缩短 HRT 至

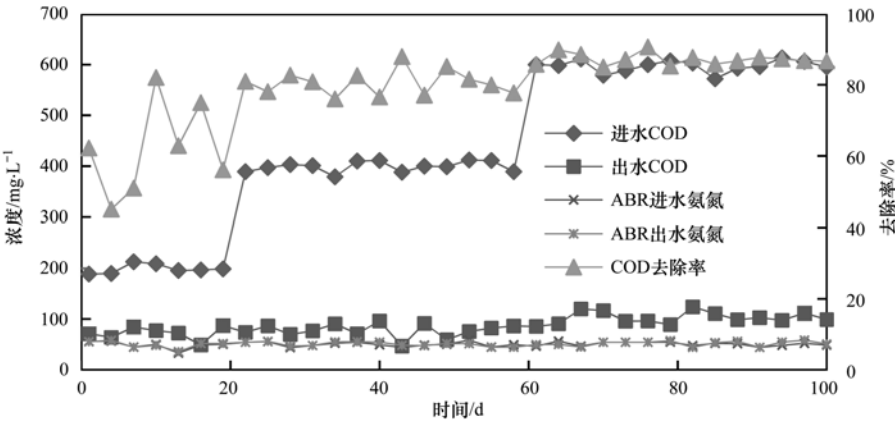


图 3 ABR 反应器进出水浓度与去除率随时间变化

Fig. 3 Influent and effluent concentrations and removal rates of ABR with time

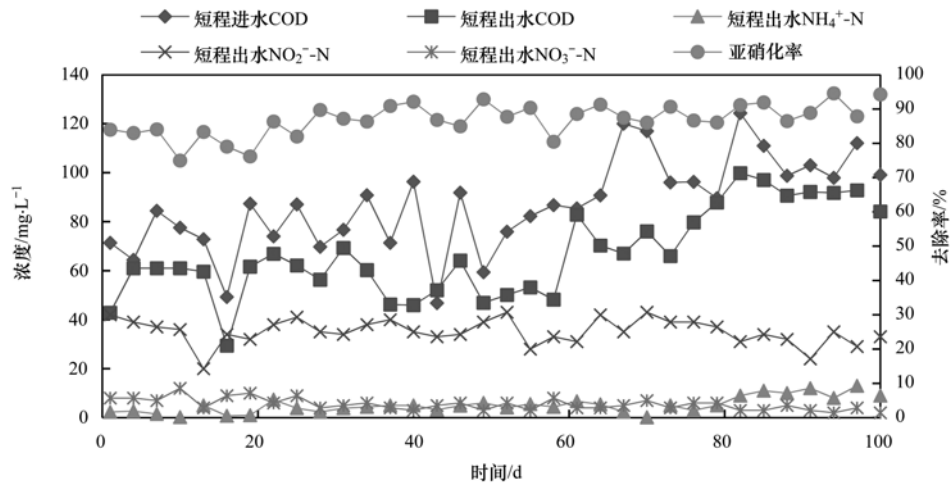


图4 短程硝化系统进出水浓度与去除率随时间变化

Fig. 4 Influent and effluent concentrations and removal rates of short-cut nitrification system with time

4.5 h 时, ABR 中污水上升流速由 $0.086 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 上升为 $0.172 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, 水力扰动加剧, 可使污泥与基质充分接触, 有机物去除率达到 85% 左右^[20]. 进一步提高 COD 浓度为 $600 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 出水 COD 浓度并未明显变化. HRT 为 3 h 时, 水流上升速度增大, 污泥略有流失, COD 去除率略有下降, 不利于系统的稳定运行^[21]. 另外, 平均亚硝化率达 89%, NH_4^+ -N 去

除率在 90% 以上, 表明短程硝化系统能高效稳定的运行. 除碳系统高效除碳和短程硝化系统高效的亚硝化作用保证了后续厌氧氨氧化的进行.

厌氧氨氧化系统进水 COD 在 $70 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右 (图 5), NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 分别保持在 $23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 逐步将厌氧氨氧化部分 HRT 由 6 h 缩短至 3 h, TN 容积负荷 (以 N 计) 由 0.18

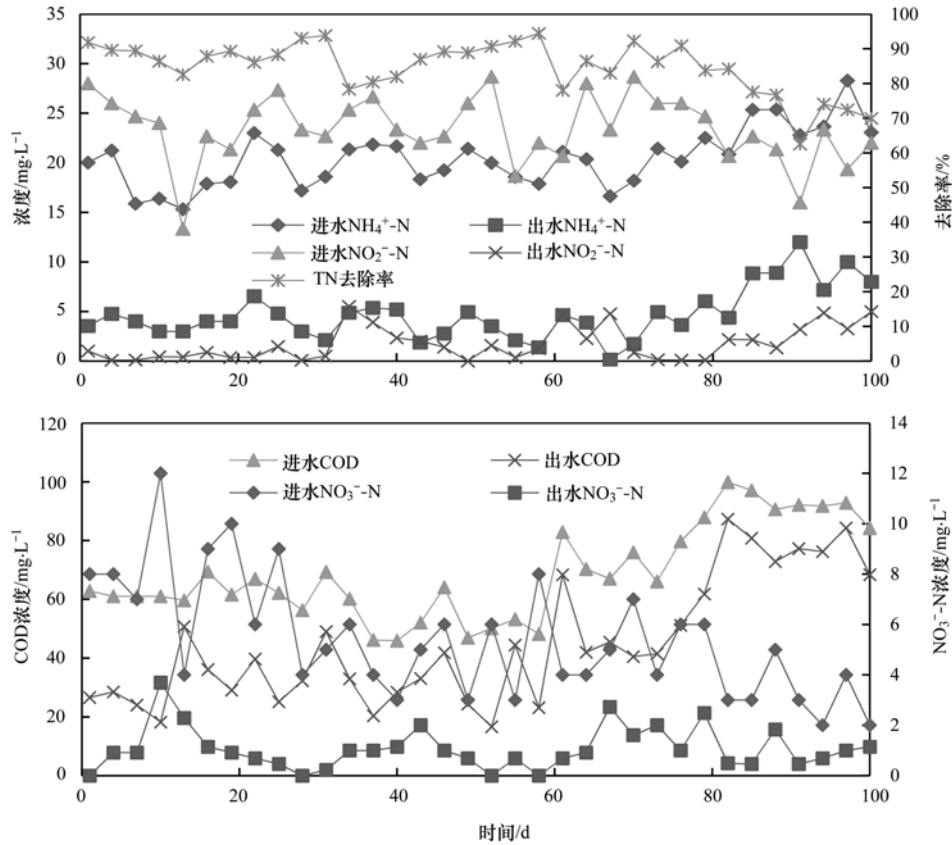


图5 厌氧氨氧化反应器去除性能

Fig. 5 Removal performance of ANAMMOX reactor

$\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提升为 $0.36 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 系统出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度低于 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN 去除率达 90%。在 81 ~ 100 d, 继续缩短厌氧氨氧化段 HRT 至 2 h, 由于 HRT 过短, 厌氧氨氧化反应不完全, 导致出水 TN 去除率降至 70% 以下, 所以保持本工艺厌氧氨氧化段 HRT 为 3 h 最为合适。

2.3 DO 对一体化系统的影响

本试验采用间歇曝气的方式启动短程硝化系统。曝气阶段, DO 控制在 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 可以成功启动短程硝化, 由图 4 可知, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积率可达 90%, 这与间歇曝气的方式可抑制 NOB 活性有关, 所以在较高的 DO 浓度下, 仍能实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累^[22]。但是运行一段时间后, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积率有下降的趋势, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度有所升高, 说明 DO 为 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时短程硝化作用并不稳定。从第 21 d 开始, 将曝气量调小, 控制 DO 为 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在间歇曝气和低 DO 的双重抑制下, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积率逐渐升高^[23], 一周左右恢复至 90%, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率保持在 90% 以上。进一步降低 DO 在 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下时, 反应器内曝气不均匀, 污泥沉积出现死区, 出水 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度降低, 氨氧化速率减慢, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率降至 70%, 不利于后续的厌氧氨氧化过程。

DO 对厌氧氨氧化菌有抑制作用, 厌氧氨氧化反应器顶部密封隔绝空气, 但是短程硝化出水中含有一部分 DO, 会导致厌氧氨氧化段 DO 升高, 但是对本试验厌氧氨氧化系统影响不大。因为厌氧氨氧化系统内存在一部分好氧氨氧化菌, 会消耗掉进水中的 DO, 并且厌氧氨氧化颗粒污泥结构较为密实, 内层微生物受到外界 DO 变化影响较小, 可保证反应器稳定运行。石利军等^[24] 通过批次试验也证明了溶解氧存在时能够发生厌氧氨氧化反应, 试验中同时发生 NH_4^+ 、 NO_2^- 和 DO 浓度降低的现象, 说明系统中存在着好氧氨氧化菌和厌氧氨氧化菌的协同作用, 前者能够消耗 DO, 从而为后者创造厌氧条件。

2.4 一体化短程硝化-ANAMMOX 系统处理效能

由于 ABR 的特殊构造, 可以使产酸产甲烷菌、氨氧化菌和 ANAMMOX 菌在不同隔室中适宜条件下生存^[25], 避免相互干扰, 优化了污泥种群, 提高了各系统单元的处理效率, 确保城市污水在一体化反应器中, 在连续流的状态下实现除碳脱氮。在和第五阶段运行条件一致的情况下, 把 ABR 反应器进水

改为实际城市污水, 反应器运行稳定后, 沿程取样分析, 反应器内温度为 30°C , pH 值为 $7.5 \sim 8$, 好氧区 DO 控制在 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, COD 为 $258 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

如图 6 所示, 原水在前 3 个隔室经过厌氧菌的作用, 大部分 COD 被去除, 减小了高浓度 COD 对短程硝化菌活性和厌氧氨氧化菌活性的抑制作用^[26], $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度略有升高, 第三隔室出水 COD 为 $78 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 进出水 pH 变化不大; 第四隔室在 AOB 的作用下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度由 $55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降为 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 浓度升至 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度为 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 亚硝化率达 93%, 间歇曝气过程中出现一部分氮损, COD 小幅度下降, 可能产生了反硝化作用。整个过程 pH 在 $7 \sim 8$, 在 ANAMMOX 适宜 pH 范围内。除碳系统和短程硝化系统两者出水按 2:1 混合作为 ANAMMOX 反应器进水, 在最后两个隔室内 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 在厌氧氨氧化作用下被去除, 部分 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 利用有机物发生反硝化作用从水中去除, TN 平均浓度由 $47.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降为 $7.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 出水 COD 降为 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。表明短程硝化-ANAMMOX 一体化 ABR 工艺能够高效稳定地用于处理城市污水除碳脱氮。

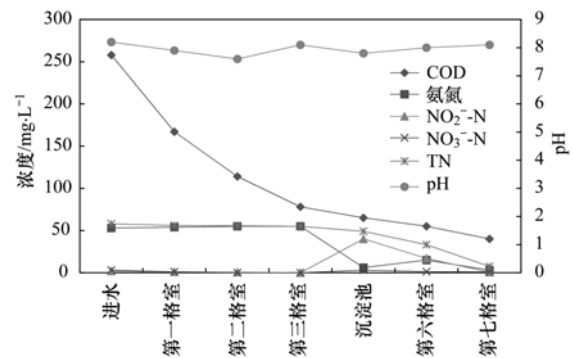


图 6 稳态运行时污染物浓度沿程变化情况

Fig. 6 Variations of the concentration of pollutants in flow path during stable operation period

3 结论

(1) ABR 除碳系统的 HRT 为 4.5 h 时, 其出水 COD 平均浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 不会对后续短程硝化系统产生不利影响。此时, ABR 反应器整体的脱氮效能最高, 出水 TN 平均浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧氨氧化系统 TN 容积负荷为 $0.36 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 。

(2) 控制 DO 为 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 短程硝化系统不稳定。控制 DO 为 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 亚硝化率能长时间维持在 90% 左右, 有利于保证后续厌氧氨氧化

系统的稳定运行。

(3)控制温度为 30℃ 左右,好氧区 DO 为 1~2 mg·L⁻¹时,短程硝化-ANAMMOX 一体化 ABR 工艺可以对城市污水稳定高效地脱氮,TN 平均去除率达 84%。

参考文献:

- [1] 于英翠,高大文,陶彧,等. 利用序批式生物膜反应器启动厌氧氨氧化研究[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(5): 843-849.
- [2] 李祥,郑宇慧,黄勇,等. 保存温度及时间对厌氧氨氧化污泥活性的影响[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(1): 56-61.
- [3] 李智行,张蕾,陈晓波,等. 高效耐海水型厌氧氨氧化污泥的驯化[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(3): 748-756.
- [4] 付昆明,仇付国,左早荣. 厌氧氨氧化技术应用于市政污水处理的前景分析[J]. 中国给水排水, 2015, **31**(4): 8-13.
- [5] 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.
- [6] 任玉辉,王科,李相昆,等. 常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4218-4223.
- [7] Hellinga C, Schellen A A J C, Mulder J W, *et al.* The SHARON process: an innovative method for nitrogen removal from ammonium-rich waste water [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(9): 135-142.
- [8] Ruiz G, Jeison D, Chamy R. Nitrification with high nitrite accumulation for the treatment of wastewater with high ammonia concentration [J]. Water Research, 2003, **37**(6): 1371-1377.
- [9] 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.
- [10] van Dongen U, Jetten M S, van Loosdrecht M C. The SHARON-Anammox process for treatment of ammonium rich wastewater [J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(1): 153-160.
- [11] 张诗颖,吴鹏,宋吟玲,等. 厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 4174-4179.
- [12] 吴鹏,张诗颖,宋吟玲,等. 连续流反应器短程硝化的快速启动与维持机制[J]. 环境科学, 2016, **37**(4): 1472-1477.
- [13] 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.
- [14] 孙立柱,沈耀良,李媛,等. ABR 反应器水力混合性能研究[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2010, **23**(3): 6-9, 22.
- [15] 宋小康,金龙,王建芳,等. ABR + 复合人工湿地处理分散性生活污水的中试研究[J]. 环境工程学报, 2012, **6**(9): 3096-3100.
- [16] 时永辉. 低 C/N 短程硝化反硝化影响因素与系统稳定性研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2010.
- [17] 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.
- [18] 任南琪,王爱杰. 厌氧生物技术原理与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [19] 杨忠林,钟中,韩萍芳,等. HRT 及 EPS 对 ABR 中污泥性能的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2012, **34**(4): 22-26.
- [20] 杜接弟,王毅力,李炯,等. HRT 对 ABR 处理低浓度废水的效果和颗粒污泥特征的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 2022-2029.
- [21] Wu P, Ji X M, Song X K, *et al.* Nutrient removal performance and microbial community analysis of a combined ABR-MBR (CAMBR) process[J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **232**: 273-279.
- [22] 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.
- [23] 于德爽,殷金兰,王晓霞,等. 控制 DO 及 FA 条件下短程硝化过程系统稳定性研究[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(12): 2677-2680.
- [24] 石利军,杨凤林,张兴文. 有氧条件下 ANAMMOX 反应及其在 HABR 反应器中实现[J]. 大连理工大学学报, 2007, **47**(3): 338-343.
- [25] 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,等. ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究[J]. 环境科学, 2015, **36**(8): 2947-2953.
- [26] Sabumon P C. Anaerobic ammonia removal in presence of organic matter: a novel route[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **149**(1): 49-59.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-ru, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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