

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京市大气气溶胶中糖类化合物的组成及来源	梁林林, Guenter Engling, 段凤魁, 马永亮, 程远, 杜祯宇, 贺克斌 (3935)
北京大气 PM _{2.5} 与惰性 SiO ₂ 的生物毒性比较	刘梦娇, 黄艺, 文航, 邱国玉 (3943)
APEC 期间北京及周边城市 AQI 区域特征及天气背景分析	高庆先, 刘俊蓉, 王宁, 李文涛, 高文康, 苏布达 (3952)
2000~2014 年北京市 SO ₂ 时空分布及一次污染过程分析	程念亮, 张大伟, 李云婷, 陈添, 李金香, 董欣, 孙瑞雯, 孟凡 (3961)
利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因	周静博, 任毅斌, 洪纲, 路娜, 李治国, 李雷, 李会来, 靳伟 (3972)
长江三角洲夏季一次典型臭氧污染过程的模拟	张亮, 朱彬, 高晋徽, 康汉青, 杨鹏, 王红磊, 李月娥, 邵平 (3981)
珠江三角洲区域污染分布及其垂直风场特征	刘建, 吴兑, 范绍佳 (3989)
春季黄渤海海水中尿素分布特征及溶解态氮的组成	李志林, 石晓勇, 张传松 (3999)
洱海流域农业用地与入湖河流水质的关系研究	庞燕, 项颂, 储昭升, 薛力强, 叶碧碧 (4005)
大辽河主要污染源营养盐输入特征	马迎群, 张雷, 赵艳民, 秦延文, 潘晓雪, 曹伟, 刘志超, 杨晨晨 (4013)
三峡库区大宁河沉积物营养盐时空分布及其与叶绿素的相关性分析	张永生, 李海英, 任家盈, 卢佳 (4021)
不同地质背景水库区夏季水-气界面温室气体交换通量研究	李建鸿, 蒲俊兵, 孙平安, 袁道先, 刘文, 张陶, 莫雪 (4032)
周丛生物存在下不同水层氧化还原带的分布及其与微生物的关联	王逢武, 刘玮, 万娟娟, 杨嘉利, 刘雪梅, 向速林, 吴永红 (4043)
华北低平原区地下水中氟分布特征及形成原因: 以南皮县为例	孔晓乐, 王仕琴, 赵焕, 袁瑞强 (4051)
某市典型地段地表水及地下水中氟喹诺酮类抗生素分布特征	崔亚丰, 何江涛, 苏思慧, 杨蕾, 乔肖刚 (4060)
乳山湾邻近海域沉积物中好氧氨氧化微生物分布特征	贺惠, 甄毓, 米铁柱, 张玉, 付璐璐, 于志刚 (4068)
青木关地下河中溶解态甾醇来源及迁移、转化特征	梁作兵, 沈立成, 孙玉川, 王尊波, 江泽利, 张媚, 廖昱, 谢正兰, 张远瞩 (4074)
多环芳烃在岩溶地下表层沉积物-水相的分配	蓝家程, 孙玉川, 肖时珍 (4081)
降雨期间岩溶地下河溶解态多环芳烃变化特征及来源解析	江泽利, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 任坤, 谢正兰, 张媚, 廖昱 (4088)
重庆南山老龙洞地下河系统重金属分布、迁移及自净能力	任坤, 梁作兵, 于正良, 张宇, 王蓉, 袁道先 (4095)
三峡水库消落带植物汞的分布特征	梁丽, 王永敏, 李先源, 唐振亚, 张翔, 张成, 王定勇 (4103)
物理和生物组合扰动对底泥微界面过程的影响	王忍, 李大鹏, 黄勇, 刘焱见, 陈俊 (4112)
超声、过硫酸钾协同去除水中诺氟沙星的效果	魏红, 史京转, 李佳霖, 李克斌, 赵琳, 韩凯 (4121)
载银活性炭活化过硫酸钠降解酸性橙 7	王忠明, 黄天寅, 陈家斌, 李文卫, 张黎明 (4127)
TiO ₂ 降解迪美唑的动力学及活性物质分析	陈冬梅, 喻泽斌, 孙蕾, 黄俊, 高丽红, 李明洁 (4135)
单宁酸铁吸附去除水中无机氮的性能与机制研究	张瑞娜, 李琳, 刘俊新 (4141)
间歇曝气式膜生物反应器对养猪沼液中兽用抗生素的去除特性	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 宋小燕, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (4148)
单级和两级串联臭氧-生物活性炭深度处理垃圾渗滤液比较研究	杜安静, 范举红, 刘锐, 邱松凯, 文晓刚, 陈吕军 (4154)
水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响	王会芳, 付昆明, 左早荣, 仇付国 (4161)
氨氮对 AOB 抑制的形态及规律	崔剑虹, 李祥, 黄勇, 朱亮, 杨朋兵 (4168)
厌氧氨氧化与反硝化协同脱氮处理城市污水	张诗颖, 吴鹏, 宋吟玲, 沈耀良, 张婷 (4174)
同步硝化反硝化耦合除磷工艺的快速启动及其运行特征	冷璐, 信欣, 鲁航, 唐雅男, 万利华, 郭俊元, 程庆锋 (4180)
HCO ₃ ⁻ 对部分亚硝化-厌氧氨氧化联合工艺脱氮效能的影响	李祥, 陈宗姮, 黄勇, 袁怡, 刘忻, 张大林 (4189)
ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥亚硝化性能调控及稳态研究	巫恺澄, 吴鹏, 沈耀良, 李月寒, 王建芳, 徐乐中 (4195)
活化过硫酸盐对市政污泥调理效果的影响	徐鑫, 濮文虹, 时亚飞, 虞文波, 张诗楠, 宋健, 张昊, 何姝, 杨昌柱, 杨家宽 (4202)
温度分化对 APBR 反应器性能及产甲烷菌群落的影响	谢海迎, 汪鑫, 李牧原, 阎叙西, 五十岚泰夫, 罗锋 (4208)
污染场地修复技术筛选方法及应用	白利平, 罗云, 刘俐, 周友亚, 颜增光, 李发生 (4218)
基于 Monte Carlo 模拟的土壤重金属综合风险评价与案例分析	杨阳, 代丹, 蔡怡敏, 陈卫平, 侯瑜, 杨锋 (4225)
大港工业区土壤重金属污染及生态风险评价	张倩, 陈宗娟, 彭昌盛, 李发生, 谷庆宝 (4232)
缙云山不同土地利用方式对土壤团聚体微生物量碳氮的影响	李增全, 江长胜, 郝庆菊 (4241)
不同秸秆翻埋还田对旱地和水田土壤微生物群落结构的影响	兰木岭, 高明 (4252)
生草果园土壤微生物群落的碳源利用特征	杜毅飞, 方凯凯, 王志康, 李会科, 毛鹏娟, 张向旭, 王婧 (4260)
不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响	姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 马嘉伟, 柳丹, 叶正钱 (4268)
组配改良剂对土壤-蔬菜系统铅镉转运调控的场地研究	朱维, 刘丽, 吴燕明, 周航, 邓贵友, 杨文骏, 彭佩钦, 曾敏, 廖柏寒 (4277)
水稻品种及典型土壤改良措施对稻米吸收镉的影响	王美娥, 彭驰, 陈卫平 (4283)
大庆湖泊群水体和淡水鱼中多环芳烃污染特征及生态风险评估	王晓迪, 臧淑英, 张玉红, 王凡, 杨兴, 左一龙 (4291)
覆盖层甲烷氧化动力学和甲烷氧化菌群落结构	邢志林, 赵天涛, 高艳辉, 何芝, 杨旭, 彭绪亚 (4302)
阳极内添加阳离子交换树脂提升铝压“三合一”膜电极 MFC 性能	梅卓, 张哲, 王鑫 (4311)
应用基于单克隆抗体的免疫传感器检测环境中的茚和苯并茚	李鑫, 乔琰, 钟国祯 (4319)
《环境科学》征订启事 (4224) 《环境科学》征稿简则 (4318) 信息 (4080, 4173, 4290, 4301)	

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^{1,2}, 吴鹏^{1,2}, 沈耀良^{1,2,3*}, 李月寒^{1,2}, 王建芳^{1,2,3}, 徐乐中^{1,2,3}

(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: 本研究将厌氧折流板反应器(ABR)末端两隔室分别改为曝气池与沉淀池,使其成为厌氧耦合好氧一体化工艺,探索连续流条件下好氧颗粒污泥亚硝化实现条件。分别在厌氧区和好氧区接种厌氧颗粒污泥和好氧颗粒污泥,控制好氧区沉淀时间为1 h,好氧区C/N比由1逐渐降低至0.4,并逐步提高进水氨氮容积负荷[由 $0.89 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提高至 $2.23 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$]。经45 d的运行,在好氧区成功培养出成熟的亚硝化颗粒污泥,其外观呈黄色,结构密实、边缘清晰,出水亚硝酸盐积累率稳定在80%左右。游离氨(FA)和游离亚硝酸(FNA)共同抑制作用是实现稳定亚硝酸盐积累的关键因素。运行初期部分好氧颗粒污泥出现解体现象,好氧区产生大量絮体;但后期絮体逐步转化为小粒径颗粒污泥,表明一定数量的有机碳源有利于絮体颗粒化,而大量富集慢速生长的硝化细菌对颗粒的稳定维持起重要作用。

关键词: 连续流; 亚硝化颗粒污泥; 游离氨; 游离亚硝酸; 稳定性; 颗粒化

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4195-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.034

Research on Cultivation and Stability of Nitrification Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor

WU Kai-cheng^{1,2}, WU Peng^{1,2}, SHEN Yao-liang^{1,2,3*}, LI Yue-han^{1,2}, WANG Jian-fang^{1,2,3}, XU Yue-zhong^{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 University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: The last two compartments of the Anaerobic Baffled Reactor (ABR) were altered into aeration tank and sedimentation tank respectively to get an integrated anaerobic-aerobic reactor, using anaerobic granular sludge in anaerobic zone and aerobic granular sludge in aerobic zone as seed sludge. The research explored the condition to cultivate nitrification granular sludge, under the condition of continuous flow. The C/N rate was decreased from 1 to 0.4 and the ammonia nitrogen volumetric loading rate was increased from $0.89 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ to $2.23 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ while the setting time of 1 h was controlled in the aerobic zone. After the system was operated for 45 days, the mature nitrification granular sludge in aerobic zone showed a compact structure and yellow color while the nitrite accumulation rate was about 80% in the effluent. The associated inhibition of free ammonia (FA) and free nitrous acid (FNA) dominated the nitrification. Part of granules lost stability during the initial period of operation and flocs appeared in the aerobic zone. However, the flocs were transformed into newly generated small particles in the following reactor operation, demonstrating that organic carbon was benefit to granulation and the enrichment of slow-growing nitrifying played an important role in the stability of granules.

Key words: continuous flow; nitrification granular sludge; free ammonia (FA); free nitrous acid (FNA); stability; granulation

亚硝化作为许多新型生物脱氮工艺如SHARON工艺、亚硝化-厌氧氨氧化工艺等的基础环节,其处理效果及稳定性是废水脱氮的关键^[1~3]。但实际研究中亚硝化存在污泥难以持留及增长、抗冲击负荷能力差、长期运行容易失稳而转向全程硝化等问题,使得该亚硝化技术无法向工程应用领域大规模推广。颗粒污泥比絮状污泥具有更好的持留富集性能和传质条件^[4],因而将颗粒化技术应用于废水处理的亚硝化环节,有望获得高效稳定的处理效果。

尽管亚硝化颗粒污泥的培养已有成功报道,但

多数研究是在具有较大高径比、运行模式特殊的柱形SBR中进行的^[5],而该类工艺无法应用于现存实际工程的改造或升级^[6]。因此,通常采用常规的运行模式更利于实际工程的应用^[7,8];此外,多数研究均采用自配无机或低C/N比废水^[9],而对于同时含有较高浓度有机物及氨氮的废水,倘若置于单一反

收稿日期: 2015-05-18; 修订日期: 2015-07-02

基金项目: 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); 江苏省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: 巫恺澄(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: 15062399836@163.com

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

应器内,必然存在好氧异养菌与自养硝化菌争夺氧的局面,当异养菌数量较多时,自养菌对氧的亲合力就会大大下降^[10],因而会对自养菌造成一定的抑制作用.

本研究将厌氧折流板反应器(anaerobic baffled reactor, ABR)与好氧组合为一体化工艺并加以改进,实现耦合运行. 利用 ABR 良好的节能去碳能力,在 ABR 段完成有机物的降解,同时通过其有效的酸化过程改善碳源质量、改变 C/N 比,以利于后续具有亚硝化功能的好氧颗粒污泥的培养,提高连续搅拌反应器系统(continuous stirred tank reactor, CSTR)的运行稳定性.

1 材料与方法

1.1 实验装置与进水水质

本研究自行设计 ABR 耦合 CSTR 一体化工艺(图 1),其由竖向导流板分为 6 个隔室,前 4 个格式均相同,为厌氧区,其下向流和上向流隔室水平宽度

之比为 1:6,总有效容积为 6.4 L; 第五、六隔室分别为好氧(曝气)区和沉淀区,有效容积分别为 1.45 L 和 0.9 L. 研究过程中,控制曝气量为 60 L·h⁻¹ (表面气体上升流速为 2.6 mm·s⁻¹). 反应器置于水浴缸中,控制温度在 30℃ ± 1℃. 进水为混合污水(生活污水:人工配水为 1:1),以乙酸钠作为碳源,氯化铵为氮源,磷酸二氢钾为磷源,碳酸氢钠调节 pH,各组分及微量元素含量见表 1.

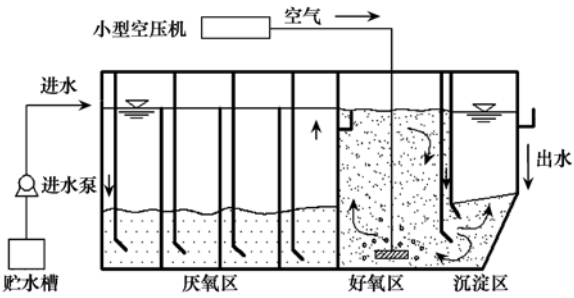


图 1 实验装置及工艺流程示意
Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme

表 1 混合污水的组成

Table 1 Components of mixed sewage

组分	含量/mg·L ⁻¹	组分	含量/mg·L ⁻¹	组分	含量/mg·L ⁻¹
COD	750 ~ 850	CaCl ₂	44.8	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.12
NH ₄ ⁺ -N	60 ~ 150	MgSO ₄	49	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.12
TP	3 ~ 6	FeCl ₃ ·6H ₂ O	1.5	NaMoO ₄ ·2H ₂ O	0.06
		H ₃ BO ₃	0.15	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.03
		MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.12	KI	0.03

厌氧区接种污泥取自前期运行稳定的厌氧颗粒污泥,接种后污泥浓度 (MLSS) 为 5.5 g·L⁻¹. 采用混合污水经过 15 d 的启动运行,出水水质稳定. 好氧区接种前期培养成熟的好氧颗粒污泥,接种后 MLSS 为 6.2 g·L⁻¹,污泥容积指数 (SVI) 为 40 mL·g⁻¹.

研究中,各常规分析指标均按国家标准方法测定^[11]. 其中,pH 值采用雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计测定;溶解氧(DO)采用便携式 DO 测定仪测定;颗粒形态及微生物相采用 OLYMPUS CX41 型显微镜检

测;颗粒污泥沉降速率采用清水静沉测速法测定;颗粒污泥粒径分布采用筛分法测定.

1.2 研究过程

控制好氧区沉淀时间为 1 h,CSTR 内 C/N 比由 1 逐渐降低至 0.4,通过提高进水氨氮容积负荷[由 0.89 kg·(m³·d)⁻¹ 提高至 2.23 kg·(m³·d)⁻¹],使得以氨氧化细菌(ammonia oxidizing bacteria, AOB)为主的自养硝化菌在竞争中逐渐占据主导地位,为颗粒污泥实现亚硝化创造条件. 表 2 所列为运行控制参数.

表 2 ABR-CSTR 一体化工艺运行参数

Table 2 Operational parameters in ABR-CSTR coupled reactor

阶段	运行时间/d	好氧区			
		C/N	进水 COD 浓度 /mg·L ⁻¹	进水氨氮浓度 /mg·L ⁻¹	氨氮容积负荷 /kg·(m ³ ·d) ⁻¹
I	1 ~ 7	1	60	60	0.89
II	8 ~ 19	0.67	60	90	1.34
III	20 ~ 31	0.5	60	120	1.79
IV	32 ~ 45	0.4	60	150	2.23

2 结果与讨论

2.1 运行结果

一体化反应器厌氧区接种污泥性能良好,出水水质稳定. 整个研究过程中,厌氧区对进水 COD 去除率均维持在 90% 以上,好氧区进水 COD 浓度得以控制在 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右. 系统运行期间,厌氧区对氨氮几乎没有去除作用,且氨氮浓度略有升高,而在好氧区 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被大量去除.

有研究表明,颗粒污泥中硝化细菌的数量和活性会随着进水中 C/N 比的减少而上升^[12-15]. 本研究中好氧区进水 C/N 比由 1 降低至 0.4,接种颗粒中的异养菌因缺乏基质而活性受到抑制;与此同时,自养硝化细菌因底物充足,其活性得以提升. 氨氮去除率逐渐上升(图 2),最终稳定在 90% 左右,系统中的污泥具有良好的硝化性能.

阶段 I,亚硝酸盐积累率在低于 40% 的范围内剧烈波动,硝化类型以全程硝化为主. 进入阶段 II,好氧区进水氨氮容积负荷提高至 $1.34 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,全程硝化逐渐向短程硝化转变(图 3). 当进水氨氮浓度和负荷分别至 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时(阶段 III),出水亚硝酸盐积累率进一步提高至 70% 以上. 阶段 IV,提高氨氮容积负荷至 $2.23 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,出水亚硝酸盐积累率逐渐趋于稳定并接近 80%,且氨氮去除率接近 90%,即好氧区实现良好的亚硝化效果.

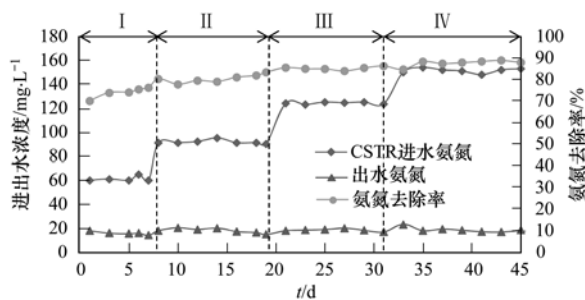


图 2 好氧区进出水氨氮浓度及去除率

Fig. 2 Profile of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in the influent/effluent and removal rate during the experiment

2.2 亚硝化成因分析

AOB 活性和数量上的优势是实现亚硝酸盐积累的根本原因. 本研究后期出水中伴有 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的存在 ($20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下),说明系统中存在一定数量的亚硝酸盐氧化菌(nitrite oxidizing bacteria, NOB),但与 AOB 相比呈明显劣势. 分析其中原因如下.

(1) 温度 现有的短程硝化工艺一般将其温度

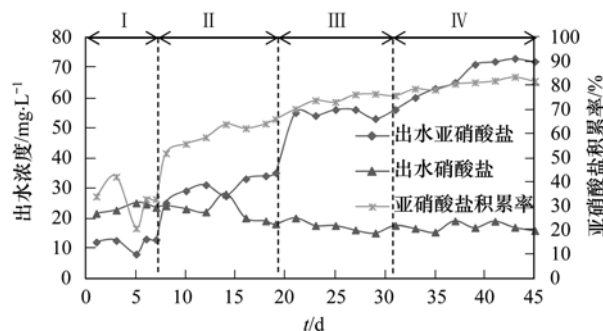


图 3 出水硝酸盐、亚硝酸盐及亚硝酸盐积累率

Fig. 3 Profile of $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NO}_2^- - \text{N}$ in the effluent and nitrite accumulation rate during the experiment

控制在 $30 \sim 35^\circ\text{C}$ ^[16]. 罗远玲等^[17]研究发现 30°C 时 AOB 的活性要高于 NOB,亚硝化颗粒污泥性能稳定且具有良好的絮凝和沉降性. 本研究中反应器置于恒温水浴缸,温度始终控制在 $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$,即便如此,初始阶段并未实现亚硝酸盐的稳定积累,故温度对亚硝酸盐积累贡献较小.

(2) 泥龄(SRT) 本研究未对 SRT 进行定量控制. 前三阶段出水 MLSS 均有不同幅度的波动,直至 IV 阶段才最终稳定在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下,且好氧区污泥浓度也有不同程度的变化,而 III 阶段开始系统便出现了较高的亚硝酸盐积累. 因此,与 SHARON 工艺不同,SRT 不是本研究实现亚硝酸盐大量积累的关键因素.

(3) DO 有研究发现 AOB 对溶解氧的亲合力大于 NOB,因此在对 O_2 的竞争中,NOB 处于劣势^[18],故低浓度溶解氧可能更适合 AOB 的生长同时抑制 NOB,从而实现亚硝酸盐的积累^[19]. 本研究中,实现稳定亚硝化阶段(IV 阶段)时,平均 DO 浓度 ($2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 反而大于初始阶段 ($1.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 值得注意的是,氨氮去除率却随着 DO 的增加而升高,故本研究中溶解氧是反应速率的限制因素,而非硝化类型的决定因素.

(4) 游离氨(free ammonia, FA) 和游离亚硝酸(free nitrous acid, FNA) 的共同抑制作用 有研究表明,当 FA 浓度达到 $6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时就可完全抑制 NOB 的生长;而 FNA 完全抑制 NOB 和 AOB 生长的浓度分别为 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[20-22]. 支霞辉等^[23]研究发现,当 FA 大于 $0.724 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时会抑制 NOB 的生长而对 AOB 不产生抑制作用. 王振等^[24]认为,FA 和 FNA 对 NOB 具有联合抑制作用,能够实现 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积的最佳抑制浓度分别为 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq \text{FA} \leq 8.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \leq$

$\text{FNA} \leq 0.249 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 尽管上述报道中 FA, FNA 的抑制浓度差异较大,但都反映了一个共同的趋势,即 FA 和 FNA 对 NOB 的抑制效应大于 AOB.

本研究中好氧区进水氨氮容积负荷由 $0.89 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提高至 $2.23 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, FA 平均浓度由 I 阶段的 $1.45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提升至 IV 阶段的 $2.64 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,亚硝酸盐积累率逐步提高并稳定维持在 80% 左右(图 4),由此可见 FA 对于短程硝化的实现起到直接作用. FNA 浓度与亚硝酸盐积累率同样呈现出良好的相关性(图 5).

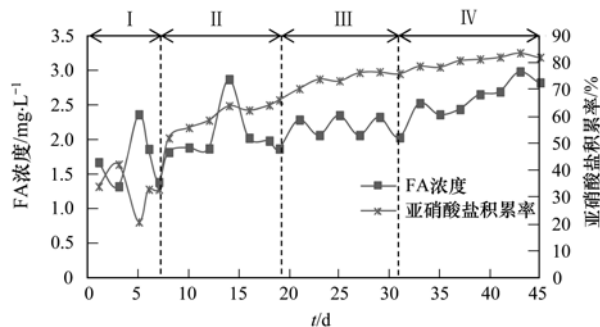


图 4 FA 及亚硝酸盐积累率变化情况

Fig. 4 Profile of FA and nitrite accumulation rate during the experiment

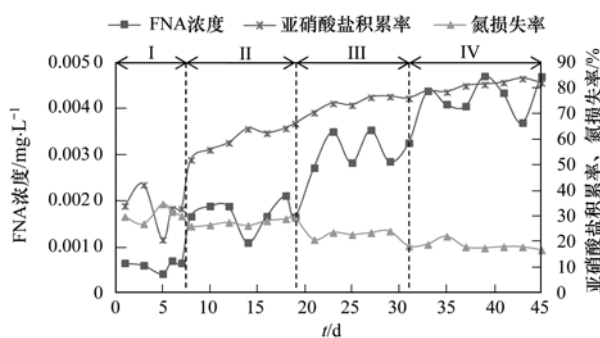


图 5 FNA、氮损失率及亚硝酸盐积累率变化情况

Fig. 5 Profile of FA, nitrogen loss rate and nitrite accumulation rate during the experiment

然而,相比上述报道,本研究中 FNA 浓度似乎并未达到抑制 NOB 的程度. 分析认为,由于颗粒污泥内部因氧传质受限而形成的缺(厌)氧微环境,且好氧区存在一定数量异养反硝化所需的有机碳源以及好氧氨氧化产生的高价态氮,因而提供了实现反硝化的有利条件,导致了本研究中好氧区始终存在一定程度的氮损. 一方面,各阶段平均氮损逐渐减少[由 I 阶段的 31% 减少到 IV 阶段的 18% (见图 5)],即颗粒内部产生碱度的反硝化过程相对而言越来越少;另一方面随着氨氮去除率的提升,越来越多的氧化产物 H^+ 得以传送进颗粒内部. 总体使

颗粒内部的 pH 趋于下降,故颗粒内部 FNA 浓度会高于外部混合液,而 NOB 较 AOB 分布于颗粒污泥更内层^[25],因而在本研究后期,NOB 所处环境的平均 FNA 浓度会远大于 IV 阶段的 $0.004 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,从而实现 FNA 对 NOB 的抑制. 值得注意的是,在 I 阶段,尽管好氧区中也曾出现过高 FA 浓度现象,但并未发现稳定的亚硝酸盐积累,这有可能是因为在短程硝化启动后,FNA 对于好氧区短程硝化的稳定维持具有不可替代的作用,这与韩晓宇等的研究结果相同,即在较高 FA 和 FNA 共同抑制 NOB 的作用下实现了稳定的亚硝酸盐积累^[26].

虽然,SHARON 工艺被认为是在连续流反应器中实现亚硝化过程中最为成功的技术^[27,28],然而在低 HRT 条件下,由于该工艺中污泥以絮体形式存在 ($\text{SRT} = \text{HRT}$),故较难实现高浓度 AOB 的积累,其亚硝酸盐积累速率一般仅为 $0.32 \sim 0.52 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ^[29]. 本研究中好氧区接种高浓度的好氧颗粒污泥,在 HRT 为 1.6 h 的条件下,亚硝酸盐积累速率可达 $1.78 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 可见,连续流亚硝化颗粒污泥系统在高效生物脱氮技术方面具有巨大发展潜力.

2.3 稳态研究

2.3.1 好氧颗粒污泥形态变化

好氧区接种的污泥为实验室 ABR-CSTR 一体化工艺中培养成熟的好氧颗粒污泥,外观为淡黄色,呈现较为规则的圆形或椭圆形[图 6(a)]. 系统运行初期,好氧区不断产生絮状污泥,部分颗粒污泥发生解体现象,第 I 阶段出水 SS 在波动中不断上升,一度高达 $180 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 7);此时好氧区颗粒污泥完整性发生明显恶化,边缘毛糙、表面存在较多丝状体[图 6(b)];此外, I 阶段颗粒污泥沉降性能也变差(图 8),平均沉降速度由接种时的 $40.6 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 下降至 $21.9 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$. II 阶段,出水 SS 略有减少,但仍然在 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,污泥解体现象稍有好转但依然存在. 进入 III 阶段以后,出水 SS 与平均沉降速率均得到大幅改善. 实验尾期,出水 SS 低于 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,且平均沉降速率达到 $50 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,颗粒污泥呈现黄色,结构密实、边缘清晰[图 6(d)],粒径 $> 1.6 \text{ mm}$ 及粒径 $< 0.8 \text{ mm}$ 的颗粒较接种前分别减少和增加(图 9). 而粒径大小与氮损之间有重要联系,粒径减小,其内部缺(厌)氧区域比例相对减小,则反硝化程度减弱. 本研究中粒径变化规律与图 5 所示氮损变化规律一致.

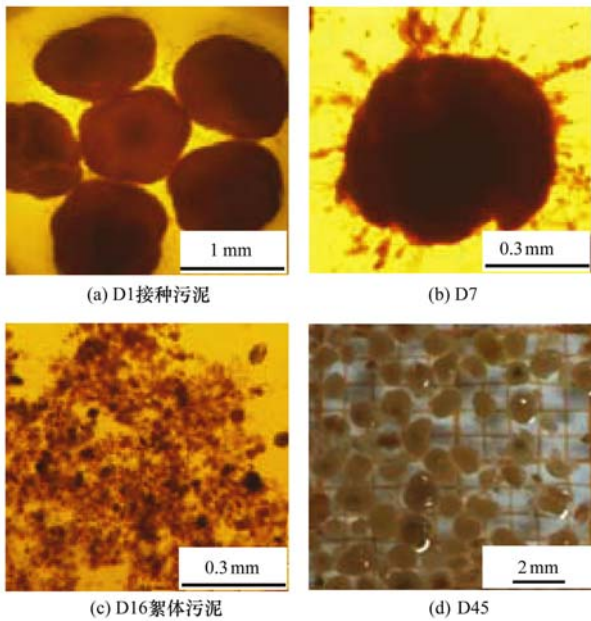


图6 好氧区颗粒污泥形态变化

Fig. 6 Variation in morphology of granules during cultivation

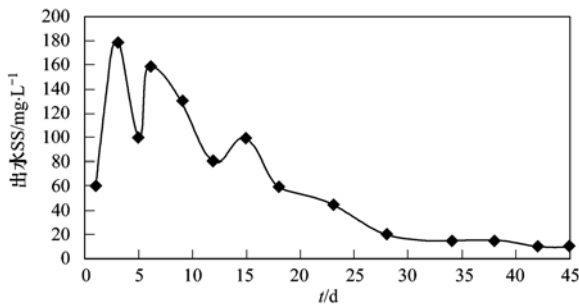


图7 好氧区出水SS变化情况

Fig. 7 Variations of MLSS in effluent zone in the aerobic zone during the experiment

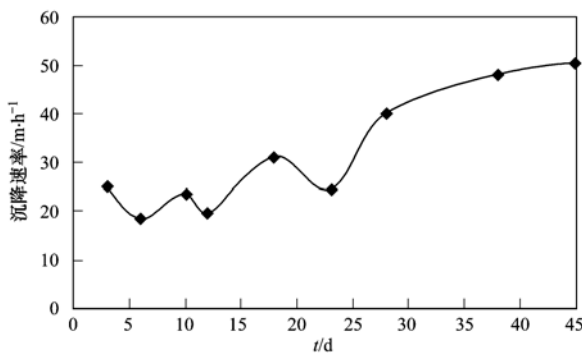


图8 好氧区颗粒污泥沉降速率变化情况

Fig. 8 Variations of average settling velocity of granules in the aerobic zone during the experiment

2.3.2 稳态分析

本研究中,为了实现好氧区颗粒污泥的亚硝化,通过调低曝气量(由接种时的 $100 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 下降至 45

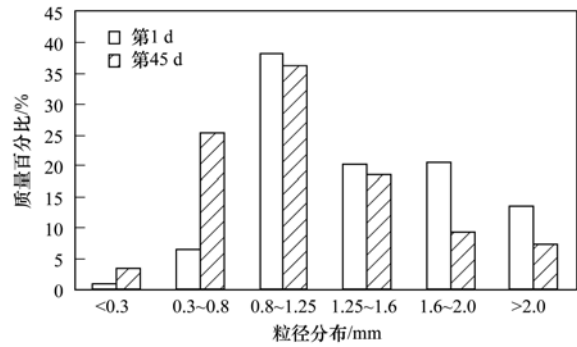


图9 接种前后好氧区颗粒污泥粒径分布比较

Fig. 9 Comparison of size distribution of sludge in the aerobic zone on day 1 and day 45

$\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)以控制好氧区内溶解氧浓度在较低范围内.此外,为了更好地富集慢速生长的 AOB,好氧区沉淀时间由接种时的 0.75 h 增加到 1 h ,从而导致沉淀池表面负荷由原先的 $1.88 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 下降至 $1.41 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$. 上述两方面的改变,造成好氧区水力剪切力变小,而该力对颗粒污泥的形成和稳定起着至关重要的作用,Kishida 等^[30]认为反应器内水力流态和剪切力的改变,很大程度上影响了颗粒污泥表面微生物的剥离,较高的水力剪切力所培养出的颗粒污泥,其粒径也较大,而剪切力较小时颗粒粒径也会减小,最终,粒径与剪切力达到平衡状态.

虽然运行初期,好氧区颗粒出现解体现象,但从宏观上看,好氧区污泥始终保持颗粒状态,且随着反应器的继续运行,解体现象得以改善. 尽管如此,好氧区出现絮体现象始终无法回避. 图 10 表明了各个运行阶段好氧区混合液中絮体污泥质量浓度以及絮体污泥与颗粒污泥质量比 k 的变化情况.

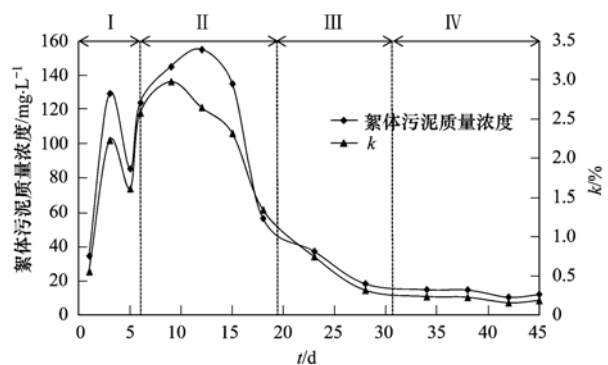


图10 好氧区混合液中絮体污泥质量浓度以及絮体污泥与颗粒污泥质量比的变化情况

Fig. 10 Variations of the concentration of the flocs and the Quality ratio of floc sludge and granular sludge of the mixed liquor in the aerobic zone during the experiment

前两阶段该比值不断增加,一度逼近 3%,Ⅱ阶段末期 k 值出现明显回落,Ⅳ阶段时稳定在 0.2% 左右. 分析认为,好氧区产生的絮体污泥可能来自两个方面:一方面,从好氧区 MLSS 的变化(从接种时的 $6\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到Ⅱ阶段的 $4\,200\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)可以证实颗粒污泥的解体对絮体现象有一定贡献,这与阴方芳等^[31]研究一致;另一方面,由于本系统是厌氧耦合好氧工艺,尽管前端 ABR 对有机物的去除率已达到很高水平(平均去除率维持在 92% 以上),但仍有一部分有机物无法通过厌氧的方式进行降解,故始终存在一定浓度的有机物(COD 厌氧出水浓度约为 $60\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右)交由好氧区内异养微生物来降解,而其增殖速率很大,这就可能造成絮体污泥的大量产生. 值得注意的是,絮体现象并没有一直恶化下去. 随着系统的运行,絮体污泥逐渐转化为粒径较小的颗粒污泥,Ⅳ阶段时絮体污泥与颗粒污泥的质量浓度分别为 $12\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $6\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 高景峰等^[32]认为,胞外聚合物(EPS)的产量及空间分布对好氧颗粒污泥长期稳定维持起着至关重要的作用,并指出低底物浓度梯度不利于颗粒污泥的稳定维持. 本研究采用连续流一体化工艺,旨在好氧区培养以自养型 AOB 为优势种群的亚硝化颗粒污泥. 虽然硝化菌 EPS 产率较低,但好氧区始终存在一定浓度的有机物保证了一定数量异养微生物的生长,其产生的 EPS 分散于絮体污泥中,从而加速了絮体颗粒化的过程,恰如 Tsuneda 等^[33]通过投加异养微生物产生的 EPS 来强化硝化生物膜快速形成. 此外,本研究中颗粒污泥大量富集生长缓慢的硝化细菌,该特征使其对连续进水所造成的低底物浓度梯度较普通好氧颗粒污泥表现出更好的稳定性^[34,35].

3 结论

(1)采用 ABR-CSTR 一体化工艺,好氧区接种成熟的好氧颗粒污泥,控制沉淀时间为 1 h, C/N 比由 1 逐渐降低至 0.5,逐步提高好氧区进水氨氮容积负荷[由 $0.89\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 提高至 $2.23\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$]. 系统运行 45 d 后,成功将好氧颗粒污泥调控至具有亚硝化功能,出水亚硝酸盐积累率稳定在 80% 左右. 亚硝酸盐积累速率达 $1.78\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$.

(2)FA 和 FNA 共同抑制作用是实现稳定和维持亚硝酸盐积累的关键因素,温度、泥龄以及溶解氧在本研究中不起决定性作用.

(3)一定数量的有机碳源促进了絮体颗粒化,而大量富集慢速生长的硝化细菌对颗粒的稳定维持起重要作用.

参考文献:

- [1] Wan C L, Sun S P, Lee D J, *et al.* Partial nitrification using aerobic granules in continuous-flow reactor: rapid startup [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **142**: 517-522.
- [2] 王斌,李冬,梁瑜海,等. 亚硝化颗粒污泥的培养、强化方法及其特性[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(11): 1-4, 8.
- [3] 杨洋,左剑恶,卜德华,等. 好氧颗粒污泥亚硝化工艺的启动与运行特性研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2462-2466.
- [4] 刘小英,罗玉龙,田中凯,等. 颗粒污泥 A/O 系统同步脱氮除磷的研究[J]. 中国给水排水, 2013, **29**(13): 28-31, 37.
- [5] 刘文如,阴方芳,丁玲玲,等. 选择性排泥改善颗粒污泥亚硝化性能的研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 396-402.
- [6] 宋泽洋. 连续流好氧颗粒污泥反应器的启动及运行研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.
- [7] Show K Y, Lee D J, Tay J H. Aerobic granulation: advances and challenges [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2012, **167**(6): 1622-1640.
- [8] Juang Y C, Adav S S, Lee D J, *et al.* Stable aerobic granules for continuous-flow reactors: Precipitating calcium and iron salts in granular interiors[J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(21): 8051-8057.
- [9] 阎佳,胡勇有,胡贵平. 有机碳源环境下亚硝酸盐的积累[J]. 环境科学, 2008, **29**(10): 2824-2829.
- [10] Philips S, Laanbroek H J, Verstraete W. Origin, causes and effects of increased nitrite concentrations in aquatic environments [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2002, **1**(2): 115-141.
- [11] 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.
- [12] Liu Y, Yang S F, Tay J H. Improved stability of aerobic granules by selecting slow-growing nitrifying bacteria [J]. *Journal of Biotechnology*, 2004, **108**(2): 161-169.
- [13] Yang S F, Tay J H, Liu Y. Effect of substrate nitrogen/chemical oxygen demand ratio on the formation of aerobic granules [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2005, **131**(1): 86-92.
- [14] Ni B J, Yu H Q, Sun Y J. Modeling simultaneous autotrophic and heterotrophic growth in aerobic granules [J]. *Water Research*, 2008, **42**(6-7): 1583-1594.
- [15] Wu L, Peng C Y, Peng Y Z, *et al.* Effect of wastewater COD/N ratio on aerobic nitrifying sludge granulation and microbial population shift [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(2): 234-241.
- [16] Xu Z Y, Zeng G M, Yang Z H, *et al.* Biological treatment of landfill leachate with the integration of partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and heterotrophic denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 79-86.

- [17] 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.
- [18] Picioreanu C, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Modelling the effect of oxygen concentration on nitrite accumulation in a biofilm airlift suspension reactor [J]. Water Science and Technology, 1997, **36**(1): 147-156.
- [19] Peng Y Z, Chen Y, Peng C Y, *et al.* Nitrite accumulation by aeration controlled in sequencing batch reactors treating domestic wastewater[J]. Water Science and Technology, 2004, **50**(10): 35-43.
- [20] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. Water Research, 2007, **41**(4): 826-834.
- [21] Vadivelu V M, Yuan Z G, Fux C, *et al.* The inhibitory effects of free nitrous acid on the energy generation and growth processes of an enriched *Nitrobacter* culture[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(14): 4442-4448.
- [22] Vadivelu V M, Keller J, Yuan Z G. Effect of free ammonia and free nitrous acid concentration on the anabolic and catabolic processes of an enriched *Nitrosomonas* culture[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2006, **95**(5): 830-839.
- [23] 支霞辉, 王红武, 丁峰, 等. 常温条件下短程硝化反硝化生物脱氮研究[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(1): 26-29.
- [24] 王振, 肖文胜, 杨嘉谟, 等. 常温条件下两级曝气生物滤池启动及短程硝化研究[J]. 环境科学与技术, 2014, **37**(7): 66-71.
- [25] Vázquez-Padín J R, Figueroa M, Campos J L, *et al.* Nitrifying granular systems: a suitable technology to obtain stable partial nitrification at room temperature[J]. Separation and Purification Technology, 2010, **74**(2): 178-186.
- [26] 韩晓宇, 张树军, 甘一萍, 等. 以 FA 与 FNA 为控制因子的短程硝化启动与维持[J]. 环境科学, 2009, **30**(3): 809-814.
- [27] Van Kempen R, Mulder J W, Uijterlinde C A, *et al.* Overview: full scale experience of the SHARON® process for treatment of reject water of digested sludge dewatering[J]. Water Science and Technology, 2001, **44**(1): 145-152.
- [28] 王金保, 王建永. 基于短程硝化反硝化的 SHARON 工艺原理及技术要点[J]. 工业水处理, 2008, **28**(4): 13-15, 61.
- [29] 李亚新. 活性污泥法理论与技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [30] Kishida N, Tsuneda S, Sakakibara Y, *et al.* Real-time control strategy for simultaneous nitrogen and phosphorus removal using aerobic granular sludge [J]. Water Science and Technology, 2008, **58**(2): 445-450.
- [31] 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.
- [32] 高景峰, 苏凯, 陈冉妮, 等. 连续进水对好氧颗粒污泥稳定维持的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(7): 1377-1383.
- [33] Tsuneda S, Park S, Hayashi H, *et al.* Enhancement of nitrifying biofilm formation using selected EPS produced by heterotrophic bacteria [J]. Water Science and Technology, 2001, **43**(6): 197-204.
- [34] Toró J A, Moliné E, Carrera J, *et al.* Efficient and automated start-up of a pilot reactor for nitrification of reject water: from batch granulation to high rate continuous operation [J]. Chemical Engineering Journal, 2013, **226**: 319-325.
- [35] 刘文如, 沈耀良, 丁玲玲, 等. 接种好氧颗粒污泥快速启动硝化工艺的过程研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2302-2308.

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