

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

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

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 细菌群落特征	王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)
北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析	熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)
北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征	程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)
基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征	樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)
夏季珠江三角洲地区 PM _{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响	杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)
隧道工人的 PM ₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价	向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)
基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征	张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)
柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源	朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)
长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义	李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)
“引江济太”过程中长江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究	潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)
重庆市典型城镇区地表径流污染特征	王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)
调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响	张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)
青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究	严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)
岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素	李建鸿,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)
室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响	赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)
新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价	冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)
青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究	梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)
三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征	白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)
燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响	梁鹏,王远娜,尤琼智,高雪飞,何杉杉 (2870)
运用硫同位素、氮氧同位素示踪厘清湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源	李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)
藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响	刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)
DOM 对被动采样技术的影响与应用	于尚云,周岩梅 (2895)
蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析	王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)
水环境中碳纳米管对沙丁胺醇降解的影响	汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)
β -In ₂ S ₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素	艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)
排水管道沉淀物氮释放特性的研究	陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)
生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析	付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)
ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)
两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究	高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)
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	巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)
珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价	窦磊,杨国义 (2954)
广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价	吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏伟,杜国栋 (2964)
开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险	段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)
我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物 ¹⁵ N 自然丰度对长期氮施加的响应	刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)
黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征	李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)
开顶式气室原位研究水稻根系对大气汞浓度升高的响应	陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)
接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响	郑文君,王明元 (3004)
水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响	赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)
固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中芘解吸的影响	全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)
零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究	陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)
Fe ³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究	杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)
原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用安全性	焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)
镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力	张杏丽,邹威,周启星 (3045)
不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响	刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)
磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化	汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)
洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性	邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)
3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价	杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)
石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应	孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)
Cu-Mn-Ce/ 分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究	虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)
热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响	胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)
磷石膏对麦田 CO ₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析	李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪,Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)
全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析	郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)
《环境科学》征订启事 (2757)	
《环境科学》征稿简则 (2767)	
信息 (2734,2783,3073,3079)	

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

巫恺澄^{1,2}, 吴鹏^{1,2}, 徐乐中^{1,2,3}, 李月寒^{1,2}, 沈耀良^{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. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215009)

摘要: 本研究通过对厌氧折流板反应器(ABR)改进,使其成为厌氧与好氧组合一体化工艺,实现耦合运行. 对连续流条件下其好氧颗粒污泥形成机制进行了研究. 将ABR末端隔室分别改为曝气池与沉淀池,并分别在厌氧区和好氧区接种厌氧颗粒污泥和普通活性污泥,保持好氧区C/N为2, COD容积负荷逐渐由 $1.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提高至 $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$,沉淀池HRT逐步由2.0 h缩短至0.75 h. 研究表明,经110 d的运行,在好氧区中成功培养结构致密、沉降性能良好(平均沉降速率为 $20.8 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$)的淡黄色颗粒污泥. 在好氧区沉淀时间为0.75 h、COD容积负荷为 $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下,系统稳定运行时具有较好的脱氮除磷效果,COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP和TN的去除率分别为90%、80%、65%和45%. 研究表明,因沉淀时间缩短而不断提高的选择压、维持较高的有机负荷是好氧颗粒污泥形成的主要驱动力.

关键词: ABR; CSTR; 好氧颗粒污泥; 形成机制; 除污效能

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2947-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.030

Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor

WU Kai-cheng^{1,2}, WU Peng^{1,2}, XU Yue-zhong^{1,2,3}, LI Yue-han^{1,2}, SHEN Yao-liang^{1,2,3*}

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

Abstract: Anaerobic Baffled Reactor (ABR) was altered to make an integrated anaerobic-aerobic reactor. The research investigated the mechanism of aerobic sludge granulation, under the condition of continuous-flow. The last two compartments of the ABR were altered into aeration tank and sedimentation tank respectively with seeded sludge of anaerobic granular sludge in anaerobic zone and conventional activated sludge in aerobic zone. The HRT was gradually decreased in sedimentation tank from 2.0 h to 0.75 h and organic loading rate was increased from $1.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ to $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ while the C/N of 2 was controlled in aerobic zone. When the system operated for 110 days, the mature granular sludge in aerobic zone were characterized by compact structure, excellent sedimentation performance (average sedimentation rate was $20.8 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$) and slight yellow color. The system performed well in nitrogen and phosphorus removal under the conditions of setting time of 0.75 h and organic loading rate of $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ in aerobic zone, the removal efficiencies of COD, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TP and TN were 90%, 80%, 65% and 45%, respectively. The results showed that the increasing selection pressure and the high organic loading rate were the main propulsions of the aerobic sludge granulation.

Key words: ABR; CSTR; aerobic granular sludge; formation mechanism; removal efficiencies

厌氧折流板反应器(ABR)以其良好的污泥截留性能、独特的水力流态和明显的生物相分离等优点引起人们的广泛关注^[1]. 目前,尽管对好氧颗粒污泥的研究日趋成熟,但相关的研究和应用多是在具有较大高径比、运行模式特殊的柱形SBR中展开^[2],而对于连续性污染源,利用SBR处理需要加设缓冲池或者调节池,且时间上的推流运行不利于形成稳态的反应过程^[3,4]. Juang等^[5]指出稳定的连续流式反应器具有比间歇式运行更适合污泥颗粒化条件. 然而,现有连续流反应器内培养颗粒污泥的研究报道中,不仅反应器的结构较为复杂,而且运行

操作要求较高,如Tsuneda等^[6]所采用的AUFBS系统其高径比达64:1,且需设置泥水分离装置及外接沉淀池等.

当前,在连续流的条件下以厌氧出水为进水基质,成功培养好氧颗粒污泥的研究鲜见报道^[7]. 为此,本研究将ABR工艺进行改进,使其成为厌氧与

收稿日期: 2014-12-29; 修订日期: 2015-03-16

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

好氧组合一体化工艺,实现耦合运行,对连续流条件下其好氧颗粒污泥形成机制进行了研究.

1 材料与方法

1.1 试验装置与进水水质

本研究采用自行设计的 ABR 耦合 CSTR 一体化工艺(如图 1),由竖向导流板分为 6 个格式,前 4 个格式均相同,为厌氧区,下、上流室水平宽度之比为 1:6,折流板底角为 45°,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, DO > 1.0 mg·L⁻¹). 反应器置于水浴缸中,运行温

度控制在 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,各组分及微量元素含量见表 1.

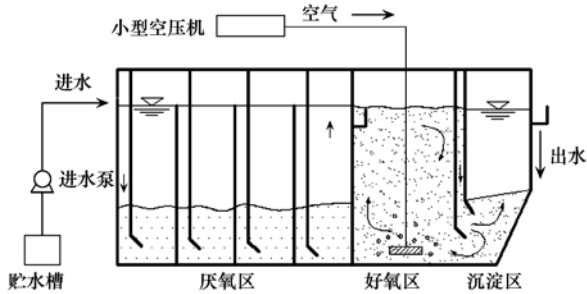


图 1 试验装置及工艺流程示意

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart

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	800 ~ 1 250	CaCl ₂	44.8	CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.12
NH ₄ ⁺ -N	50 ~ 100	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

试验中厌氧区接种污泥取自苏州新区某污水处理厂厌氧污泥,接种后污泥浓度(MLSS)为 6 g·L⁻¹. 采用混合污水经过 30 d 的启动运行,出水水质稳定.

好氧区接种污泥取自苏州新区某污水处理厂氧化沟内活性污泥,接种污泥浓度为 4 500 mg·L⁻¹.

研究中,各常规分析指标均按国家标准方法测定^[8]. 其中,pH 值采用雷磁 PHSJ-4A 型 pH 计测定;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

研究过程中,采用选择法以逐步缩短 HRT 和提高有机负荷的方式进行筛选性研究^[9],为污泥颗粒化创造条件,并考察颗粒形成过程中各个阶段内系统对污染物的去除效能,分析好氧颗粒污泥形成机制. 表 2 所列为试验运行控制参数.

表 2 ABR-CSTR 一体化工艺运行参数

Table 2 Detailed operational parameters in ABR-CSTR coupled reactor

阶段	运行时间/d	沉淀时间/h	厌氧区出水 COD 浓度/mg·L ⁻¹	好氧区 COD 容积负荷/kg·(m ³ ·d) ⁻¹
I	1 ~ 17	2.0	200	1.5
II	18 ~ 42	1.5	150	1.5
III	43 ~ 66	1.0	135	2.0
IV	67 ~ 110	0.75	100	2.0

2 结果与讨论

2.1 运行结果

通过缩短沉淀时间(即缩短沉淀区 HRT),致使沉降性能较差的分散污泥不断被洗出. 以好氧区内污泥形态变化为依据,将整个培养过程分为阶段 I

(整体启动)、阶段 II(颗粒初显)、阶段 III(颗粒生长)以及阶段 IV(颗粒成熟). 对污泥进行镜检分析表明,系统运行 17 d 后,污泥的形态发生明显变化,由原来的絮状污泥逐步向结构较为松散、肉眼可见表面较多丝状体的微小聚集体转变,此后至第 110 d 逐步相互黏合成长为结构较为密实,边缘更加清晰

的淡黄色好氧颗粒污泥,成功实现了污泥颗粒化。

2.2 运行效能及分析

2.2.1 COD 的去除情况及分析

本工艺好氧区进水即为厌氧区出水。厌氧区、好氧区进出水水质及去除率如图 2 所示。

第 I (整体启动) 阶段沉淀池 HRT 为 2.0 h, 厌氧区 COD 容积负荷在 $2.1 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 左右, 厌氧污泥经过 17 d 的驯化, 出水 COD 稳定在 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 去除率维持在 80% 以上, 充分说明 ABR 中接种的厌氧颗粒污泥具有良好 COD 去除能力。由于处于启动初期, 好氧区的 COD 去除率较低, 仅为 55% 左右, 出水 COD 浓度为 $85 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; 第 II 阶段沉淀池 HRT 为 1.5 h, 由图 2 可知, 厌氧区对 COD 的去除率逐渐升高, 出水 COD 在 $150 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。厌氧区各个隔室内上向流速由 $0.087 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$ 提高至 $0.115 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$, 增进了厌氧污泥与进水基质的充分接触, 因而强化了对底物的去除能力。系统中的好氧活性污泥经过启动期的适应, 已有少量颗粒污泥出现, 但此时系统中仍以絮状污泥为主,

絮状污泥的传质阻力较低因而有利于对营养物质的吸收降解, COD 去除率略有升高, 稳定在 60% 左右, 沉淀池出水 COD 逐渐降低至 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; 第 III 阶段进一步缩短沉淀池 HRT 至 1.0 h, 对应厌氧区 HRT 缩短至 7.11 h, 逐渐调整进水 COD 浓度至 $1050 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 厌氧区 COD 去除率经历短暂波动后又恢复至先前较高水平, 出水 COD 浓度在 $135 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。当沉淀时间缩短至 1.0 h 时[此时沉淀池的表面负荷达到 $1.4 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 大量的絮状污泥被淘洗出系统, 好氧区内生物量在短期内大量减少, 但同时, 反应器内的颗粒污泥不断生长, 生物量增加, 对底物的去除率提高并维持在 60% 以上; 第 IV 阶段沉降时间为 0.75 h、好氧区 COD 容积负荷为 $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 经过一个月的运行, 好氧段的 COD 去除率稳定在 70% 以上, 出水浓度稳定在 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 而整个系统的 COD 总去除率达 90% 以上。可见, 实现污泥颗粒化之后, 系统 COD 的去除率越来越稳定, 表明污泥颗粒化反应器具有较好的处理效能。

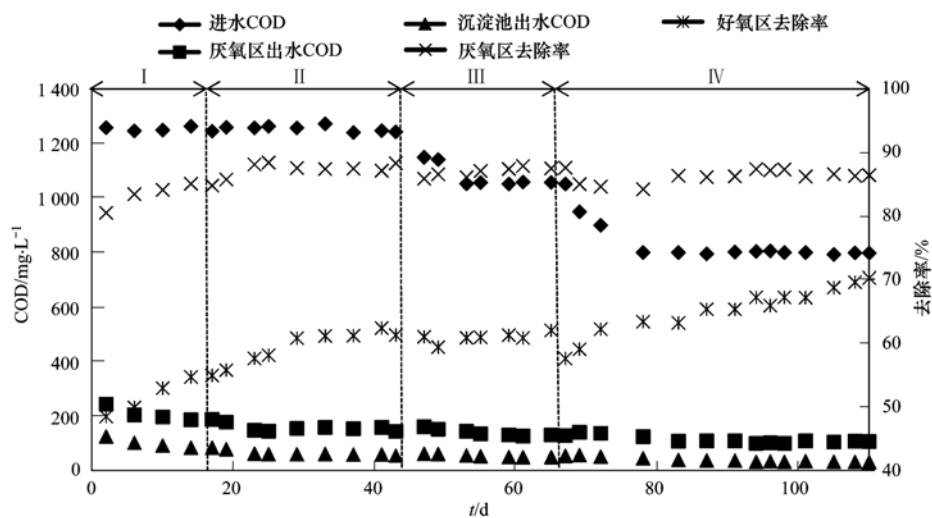


图2 COD 的去除情况

Fig. 2 COD removal profile

2.2.2 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除情况及分析

本研究中, 将好氧区进水 C/N 控制为 2 左右, 考察低 C/N 比条件下好氧颗粒污泥形成过程及处理效能。进出水氨氮浓度及去除效率如图 3 所示。

整个运行期间, 厌氧区对氨氮几乎没有去除作用, 且氨氮浓度有所升高, 而在好氧区 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被大量去除 (图 3)。第 I 阶段, 氨氮去除率就达到 60% 以上并最终稳定在 65% 左右。第 II、III 阶段由于絮状污泥被洗脱, 氨氮去除率有所波动, 但总体呈上升趋势。进入第 IV 阶段, 因颗粒污泥的形成并通过增

强曝气, 系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的整体去除率稳定在 80% 以上, 表明颗粒污泥的形成强化了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果。

2.2.3 TP 的去除情况及分析

单一的 ABR 即使是在稳定运行阶段对磷的去除效果也普遍不佳^[10]。本研究中除磷的任务是交由后续好氧区完成。进出水 TP 浓度及去除效率见图 4。

I、II 阶段系统对 TP 的去除率不高, 大约在 40% 左右, 主要是依靠吸附了磷酸盐的絮状污泥被洗脱出反应器而达到去除 TP 的效果。III 阶段, 随着

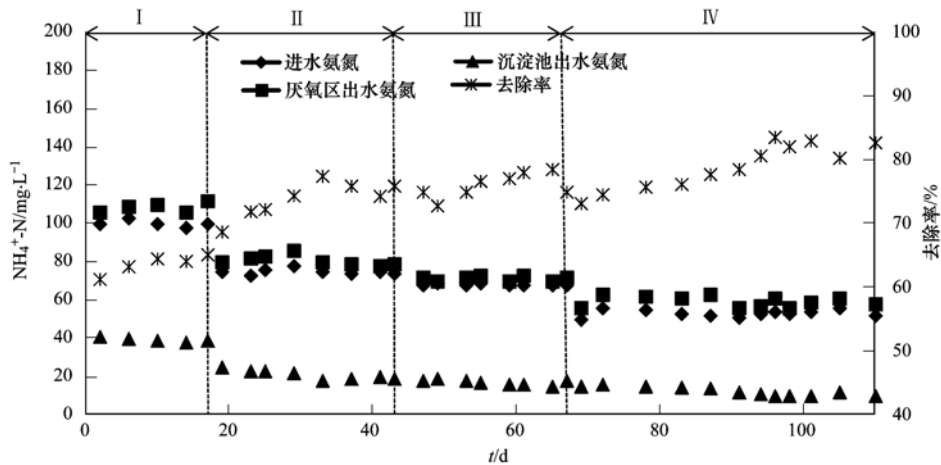
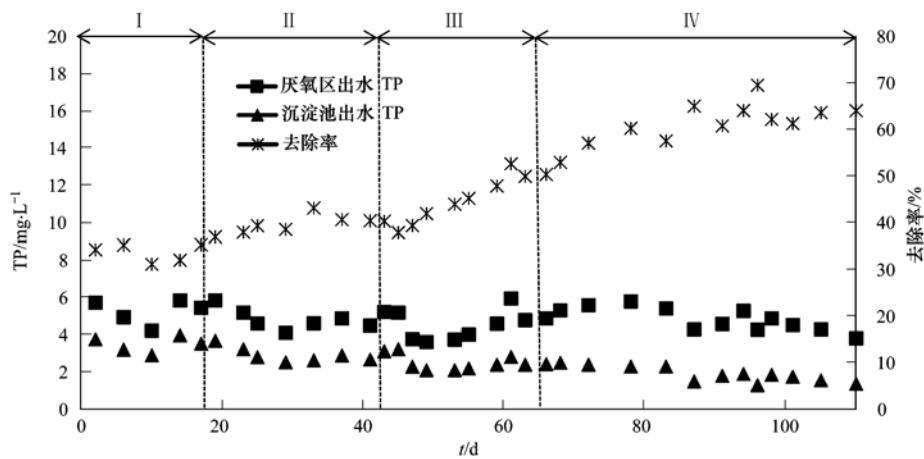
图3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除情况Fig. 3 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal profile

图4 TP 的去除情况

Fig. 4 TP removal profile

颗粒初显并不断生长,去除率不断提高,这可能是由于颗粒污泥本身存在着独特的厌氧-缺氧-好氧结构,使得好氧区的聚磷菌能够在适宜的条件下释磷吸磷^[11],该阶段去除率稳定在 50% 左右,较前两阶段有所提高。IV 阶段初始,由于进水浓度的降低以及好氧区曝气量的不足及不均,结合趋于成熟的颗粒污泥的结构特征而强化了除磷功能,TP 的去除率稳步提升,一度高达 70%。随后增加曝气量,导致厌氧环境的减少,释磷量减少,影响了除磷效果;此外,逐渐增加的氮损能够证实好氧区存在着一定程度的反硝化作用,导致反硝化菌与释磷菌竞争碳源的局面^[12,13],因而可能进一步导致 TP 去除率的波动。

2.2.4 氮损情况及分析

通过对进出水氮的物料衡算发现,系统中一直存在 N 损失,但并不具有明显规律,系统运行 4 个

阶段氮损失率的平均值分别为 31%、36%、42% 和 45%。值得注意的是,随着沉淀时间的缩短,污泥颗粒化程度越高,与此同时氮损失率也逐渐增加,说明本工艺能够实现一定的脱氮作用。这可能是由于:①系统中 DO 不足导致反硝化的发生。部分污泥滞留在沉淀区,无法自主回流至好氧区故而产生缺氧环境以进行反硝化。系统运行后期,由于好氧颗粒污泥的形成并增大,在其内部形成了厌氧-缺氧-好氧结构,为反硝化提供了有利环境;②出水中伴随少量游离氨的吹脱。

2.3 好氧颗粒污泥的形成过程

2.3.1 形态变化

本研究中沉淀池 HRT 逐步从 2.0 h 降为 0.75 h,反应器中污泥形态发生了明显变化,即由 I 阶段的灰褐色絮状污泥[图 5(a)]逐渐转变为 II 阶段时肉眼可见的微小聚集体,此时的聚集体边缘较为毛

糙、表面存在较多丝状体[图 5(b)];Ⅲ阶段好氧区内大量絮状污泥被洗脱出反应器,淡黄色污泥聚集体数量大幅上升,具有了规则、光滑的颗粒边缘,粒径主要分布在 0.58~1.25 mm 的范围内[图 5(c)];进入Ⅳ阶段,颗粒尺寸进一步增大,结构更加密实,边缘更加清晰,呈现较为规则的圆形或椭圆形[图 5(d)].图 6 为第 108 d 时好氧区内颗粒污泥的粒径分布,粒径在小于 0.58 mm、0.58~0.8 mm、0.8~1.25 mm、1.25~1.6 mm、1.6~2.5 mm 及大于 2.5 mm 范围的颗粒污泥所占总污泥质量的百分比分别为 4.2%、21.67%、38.28%、20.37%、13.12% 及 2.36%,即反应器中粒径大于 0.58 mm 的污泥成绝对优势(占 95% 以上),表明好氧区内已成功实现污泥的颗粒化.

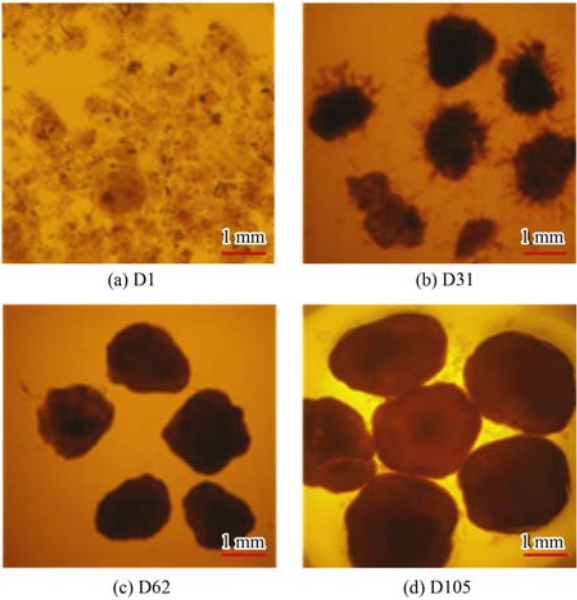


图 5 好氧区内污泥形态变化
Fig. 5 Evolution of morphological observation of granular sludge in aerobic zone

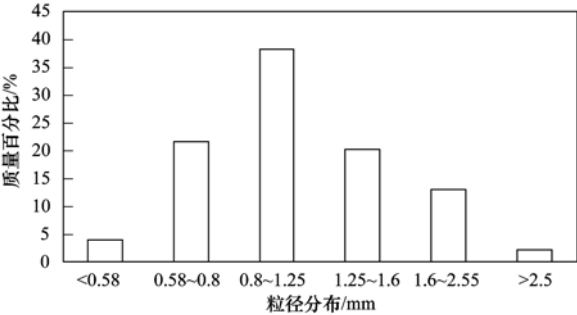


图 6 第 108 d 时好氧区内颗粒污泥的粒径分布
Fig. 6 Particle size distribution of aerobic granular sludge on day 108

2.3.2 好氧区 SVI 及 MLSS 变化

研究过程中,好氧区中污泥的 SVI 和 MLSS 的变化情况如图 7 所示.Ⅰ阶段,接种的絮状活性污泥沉降性能良好(SVI 为 $45\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$),随后 SVI 不断上升,Ⅰ阶段末达到 $250\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$,而此时在镜检中也发现了大量的丝状菌,说明在连续流式运行下,即使采用不易产生丝状菌的乙酸钠为碳源,但其基质浓度梯度几乎为零的特征也很容易产生丝状菌膨胀的情况^[14].随着选择压的不断增强,SVI 逐渐降低,最终稳定在 $45\text{ mL}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下.另一方面,MLSS 则经历了先下降再上升的过程,随着沉淀时间的不断缩短,沉降性能差的、细小的絮体污泥被不断地淘洗出反应器,沉降性能较好的污泥则被截留在反应器内,MLSS 由Ⅰ阶段时的 $4\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至Ⅱ阶段末的 $1\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时颗粒污泥已初步形成.本研究中进水的 COD 容积负荷由 $1.5\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 逐渐提高至 $2.0\text{ kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,随着污泥的不断洗脱,好氧区中的污泥负荷由 $0.33\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$ 提高至 $1.33\text{ kg}\cdot\text{d}^{-1}$,促进了颗粒污泥的形成.与絮状活性污泥相比,颗粒污泥具有较高的传质阻力,而较高的 COD 容积负荷则有助于颗粒污泥克服其传质阻力,但也容易引发丝状菌污泥膨胀,因而此时控制好氧区在较高的水力剪切力下运行,使丝状菌易于被冲刷出系统.颗粒污泥形成之后,污泥浓度不断升高,构成的晶核不断吸附菌群,使颗粒越来越大,并在水力剪切力的作用下,颗粒变得越来越密实,其污泥浓度由 $1\,500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 $6\,000\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.此时(第 110 d)颗粒污泥呈现出非常好的沉降性能,其平均沉降速率为 $20.8\text{ m}\cdot\text{h}^{-1}$.

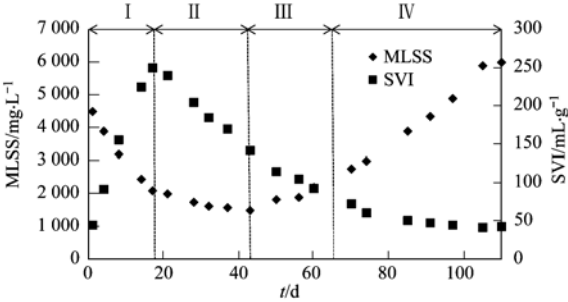


图 7 好氧区 SVI 及 MLSS 变化情况
Fig. 7 Time courses of SVI and MLSS

2.3.3 好氧颗粒污泥形成机理分析

在本研究中,因沉淀时间缩短而不断提高的选择压以及维持较高的有机负荷是颗粒污泥形成的主要驱动力.①选择压:沉淀时间由初期的 2.0 h 降低到 0.75 h,沉淀池的表面负荷也相应地由 0.7

$\text{m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 提高至 $1.88 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 大量沉降性能差絮状污泥被洗脱出系统; 另外, 研究表明 HRT 的缩短, 可以促进微生物胞外聚合物 (EPS) 的产生, EPS 对于颗粒污泥的形成和稳定维持也有重要作用^[15], 其中蛋白质的分泌对促进颗粒的初期形成影响比较大, 而多糖可为微生物的聚集提供黏附剂, 维持颗粒结构的稳定^[16]. ②有机负荷: 好氧区的有机负荷也从 $1.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提高至 $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, Liu 等^[17]认为, 有机负荷对颗粒污泥的形成具有重要作用, 当 COD 容积负荷低于 $1.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 时, 鲜见好氧颗粒污泥的形成^[18,19].

此外, 水力剪切力是好氧颗粒形成的一个重要影响因素^[20], 由曝气速度即表面气流上升速度决定, 并与其呈正相关关系, 能改变颗粒的形状和结构. 本研究中, 在好氧颗粒污泥培养前期, 由于反应器高度的限制, 表面气流上升速度为 $2.6 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 低于 Liu 等^[17]认为的好氧颗粒污泥可以形成的最低表面气体流速; 在后期, 调整曝气量, 此时表面气流增加到 $4.3 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 提高了水力剪切力. 而较高的水力剪切力更有利于形成颗粒污泥^[21], 因而促进了颗粒污泥的进一步成熟.

本试验连续稳定运行 4 个月, 形成的颗粒污泥不但没有解体, 反而形状更加规则, 结构更加密实, 分析原因可能是由于本研究中不断提高的 N 负荷, 使得颗粒污泥中硝化细菌比例不断提高, 促进了颗粒污泥结构的稳定维持^[22,23]. 这与 de Kreuk 等^[24]和 Liu 等^[25]认为通过在好氧颗粒内富集硝化菌等生长缓慢型微生物可以提高好氧颗粒污泥的稳定性相一致, 亦为本研究的目的和意义所在.

3 结论

(1) ABR-CSTR 一体化工艺沉淀池 HRT 逐渐由 2.0 h 缩短至 0.75 h, 保持好氧区 C/N 为 2, COD 容积负荷逐步由 $1.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 提高至 $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 系统运行 110 d 后, 在好氧区成功获得成熟的淡黄色颗粒污泥, 颗粒结构致密、沉降性能良好 (平均沉降速率为 $20.8 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$), 粒径大于 0.58 mm 的污泥约占总数的 95%.

(2) 在好氧区沉淀时间为 0.75 h、COD 容积负荷为 $2.0 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 的条件下, ABR-CSTR 一体化工艺具有较为明显的脱氮除磷效果, COD、 NH_4^+ -N、TP 和 TN 的去除率分别为 90%、80%、65% 和 45%.

(3) 因沉淀时间缩短而不断提高的选择压以及

维持较高的有机负荷是好氧颗粒污泥形成的主要驱动力. 此外, 水力剪切力是其形成的一个重要影响因素, 不断提高的 N 负荷是其维持稳定运行的原因.

参考文献:

- [1] 沈耀良, 王宝贞. 废水生物处理新技术——理论与应用 [M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006. 64-69.
- [2] 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.
- [3] Li X F, Li Y J, Liu H, *et al.* Characteristics of aerobic biogranules from membrane bioreactor system [J]. Journal of Membrane Science, 2007, **287**(2): 294-299.
- [4] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Intergeneric coaggregation of strains isolated from phenol-degrading aerobic granules [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, **79**(4): 657-661.
- [5] 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.
- [6] Tsuneda S, Nagano T, Hoshino T, *et al.* Characterization of nitrifying granules produced in an aerobic upflow fluidized bed reactor [J]. Water Research, 2003, **37**(20): 4965-4973.
- [7] 王硕, 于水利, 时文歆, 等. 好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究 [J]. 环境科学, 2012, **33**(4): 1293-1298.
- [8] 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.
- [9] Wang Q, Du G C, Chen J. Aerobic granular sludge cultivated under the selective pressure as a driving force [J]. Process Biochemistry, 2004, **39**(5): 557-563.
- [10] 朱凯, 刘小朋, 程继辉, 等. 厌氧折流板反应器-复合人工湿地处理农村生活污水中试研究 [J]. 水处理技术, 2014, **40**(12): 95-99.
- [11] 刘小英, 林慧, 马兆瑞, 等. 同步脱氮除磷颗粒污泥硝化反硝化特性试验研究 [J]. 环境科学, 2014, **35**(1): 214-220.
- [12] 李思敏, 郝同, 王若冰, 等. 改良型 A^2/O 工艺在低温不同污泥负荷下的运行研究 [J]. 中国给水排水, 2014, **30**(13): 64-68.
- [13] 张杰, 臧景红, 杨宏, 等. A^2/O 工艺的固有缺欠和对策研究 [J]. 给水排水, 2003, **29**(3): 22-26.
- [14] 杨雄, 霍明昕, 王淑莹, 等. 碳源类型对污泥沉降性能及丝状菌生长的影响 [J]. 化工学报, 2011, **62**(12): 3471-3477.
- [15] 崔成武, 纪树兰, 任海燕, 等. 好氧颗粒污泥形成的影响因素及应用 [J]. 中国给水排水, 2005, **21**(10): 31-34.
- [16] 吴昌永, 周岳溪. 厌氧/好氧运行方式对颗粒污泥形成的影响 [J]. 中国环境科学, 2013, **33**(7): 1237-1243.
- [17] Liu Y, Yang S F, Liu Q S, *et al.* The role of cell hydrophobicity in the formation of aerobic granules [J]. Current Microbiology,

- 2003, **46**(4): 270-274.
- [18] 王强, 陈坚, 堵国成. 选择压法培育好氧颗粒污泥的试验[J]. 环境科学, 2003, **24**(4): 99-104.
- [19] Tijhuis L, van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Formation and growth of heterotrophic aerobic biofilms on small suspended particles in airlift reactors [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1994, **44**(5): 595-608.
- [20] 陈婷婷, 杨长军, 余波, 等. 好氧颗粒污泥的培养及影响因素研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(12M): 173-178.
- [21] Li A J, Yang S F, Li X Y, *et al.* Microbial population dynamics during aerobic sludge granulation at different organic loading rates [J]. Water Research, 2008, **42**(13): 3552-3560.
- [22] Adav S S, Lee D J, Lai J Y. Biological nitrification-denitrification with alternating oxic and anoxic operations using aerobic granules [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 2009, **84**(6): 1181-1189.
- [23] 李志华, 郭强, 吴杰, 等. 自养菌污泥致密过程及其污水处理特性研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 738-742.
- [24] de Kreuk M K, van Loosdrecht M C M. Selection of slow growing organisms as a means for improving aerobic granular sludge stability[J]. Water Science and Technology, 2004, **49**(11-12): 9-17.
- [25] Liu Y Q, Wu W W, Tay J H, *et al.* Formation and long-term stability of nitrifying granules in a sequencing batch reactor[J]. Bioresource Technology, 2008, **99**(9): 3919-3922.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wangyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	Li Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster: The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-rui, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 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