

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第9期

Vol.35 No.9

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长江三角洲地区霾判别方法的对比分析	刘晓慧,朱彬,高晋徽,张恩红,王红磊,陈焯鑫,王姝 (3239)
1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析	刘端阳,魏建苏,严文莲,吕军,孙燕 (3247)
瓦里关大气二氧化碳和甲烷时间变化特征	刘鹏,张国庆,王剑琼,吴昊,李宝鑫,王宁章 (3256)
上海城区PM _{2.5} 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析	张懿华,王东方,赵倩彪,崔虎雄,李娟,段玉森,伏晴艳 (3263)
亚青会期间南京市气溶胶中OC和EC的粒径分布	王红磊,朱彬,安俊琳,段卿,邹嘉南,沈利娟 (3271)
无锡市冬季典型天气PM _{2.5} 中碳组分的污染特征	云龙,陆钊,张天舒,伍德侠,盛世杰,陆亦怀,刘建国 (3280)
高炉炼铁工艺细颗粒物PM _{2.5} 排放特性分析	范真真,赵亚丽,赵浩宁,梁兴印,孙静雯,王保贵,王亚军 (3287)
重庆市北碚城区大气中VOCs组成特征研究	祁心,郝庆菊,吉东生,张军科,刘子锐,胡波,王跃思,江长胜 (3293)
双组分VOCs的催化氧化及动力学分析	卜龙利,杨力,孙剑宇,梁欣欣,虎雪姣,孟海龙 (3302)
汽车排放超细微粒子浓度及粒径谱特征的研究	陆叶强,陈秋方,孙在,蔡志良,杨文俊 (3309)
疏勒河上游地表水化学离子特征及其控制因素	周嘉欣,丁永建,曾国雄,吴锦奎,秦甲 (3315)
河流库区沉积物-水界面营养盐及气态氮的释放过程和通量	陈朱虹,陈能汪,吴殷琪,莫琼利,周兴鹏,鲁婷,田蕴 (3325)
大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价	张雷,秦延文,马迎群,赵艳民,时瑶 (3336)
雅鲁藏布江中段表层沉积物重金属形态分布及风险评价	柏建坤,李潮流,康世昌,陈鹏飞,王建力 (3346)
北京奥林匹克公园地表颗粒物粒度特征分析	李海燕,石安邦,瞿杨晨,岳靖冰 (3352)
黄河表层沉积物中类二噁英多氯联苯水平分布	李光耀,金军,何畅,王英,马召辉,李明园 (3358)
合肥城郊典型源头溪流不同渠道形态的氮磷滞留特征	李如忠,杨继伟,钱靖,董玉红,唐文坤 (3365)
基于水资源调度的平原河网区城市河道氮迁移转化研究	刘波,盛明,朱强,杨霜,檀炳超,范冉,南旭军,何茂阳,王国祥 (3373)
杭州湾潮滩湿地植物不同分解过程及其磷素动态	邵学新,梁新强,吴明,叶小齐,蒋科毅 (3381)
基于数据同化的太湖叶绿素多模型协同反演	李渊,李云梅,吕恒,朱利,吴传庆,杜成功,王帅 (3389)
天然日光辐照下两江交汇处溶解性有机质(DOM)光漂白过程:以涪江-嘉陵江为例	高洁,江韬,闫金龙,魏世强,王定勇,卢松,李璐璐 (3397)
利用紫外-可见吸收光谱估算三峡库区消落带水体、土壤和沉积物溶解性有机质(DOM)浓度	李璐璐,江韬,卢松,闫金龙,高洁,魏世强,王定勇,郭念,赵铮 (3408)
Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA可见光催化剂的制备及其降解2-氯苯酚的研究	王冉,周雪峰,胡学香,胡春 (3417)
不同粒径零价铁活化过硫酸钠氧化降解酸性橙7的影响及动力学研究	李欢旋,王金泉,马邕文,黄明智,王艳,陈杨梅 (3422)
还原脱氯-生物联合降解2,4-二氯苯氧乙酸	周红艺,曾思思,梁思,韩鉴 (3430)
多介质土壤滤层系统(MSL)与潜流式人工湿地技术处理海水养殖废水的效能比较	宋颖,黄玉婷,葛川,张浩,陈昕,张志剑,罗安程 (3436)
不同碳源在污水处理过程中的变化规律研究	金鹏康,常晋,王先宝,刘柯君,王晓昌 (3443)
气升装置对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响	李祥,张大林,黄勇,陈宗炬,袁怡 (3449)
微波及其组合工艺强化污泥厌氧消化研究	刘吉宝,倪晓棠,魏源送,佟娟,王亚伟 (3455)
“热水解-高温厌氧消化”工艺处理高含固率剩余污泥的中试研究	吴静,王广启,曹知平,李中华,胡玉瑛,王凯军,左剑恶 (3461)
温度对ABR-MBR复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析	吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (3466)
污水处理厂尾水细菌群落结构分析	徐爱玲,任杰,宋志文,吴等等,夏岩 (3473)
沼液养殖钝顶螺旋藻的中试研究	国青青,刘锐,罗金飞,王根荣,陈吕军,刘笑 (3480)
内源呼吸过程溶解性代谢产物的光谱特性分析	李志华,张芹,白旭丽,刘毅 (3487)
基于呼吸图谱的自养菌与异养菌内源呼吸过程分析	李志华,白旭丽,张芹,刘毅,贺春博 (3492)
S-异丙甲草胺与镉对斜生栅藻光合作用的影响	陈彩东,胡晓娜,章小强,刘惠君 (3498)
影响浑太河流域鱼类群落结构的不同尺度环境因子分析	李艳利,李艳粉,徐宗学 (3504)
河口区新建河道轮虫群落演替及与水环境的关系	马文华,张玮,顾琬雯,张瑞雷,王丽卿 (3513)
Fontibacter sp. SgZ-2厌氧腐殖质/Fe(III)还原特性及电子传递机制研究	马晨,杨贵芹,陆琴,周顺桂 (3522)
基于UNMIX模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析	艾建超,王宁,杨净 (3530)
石河子市土壤环境磁学特征及空间分布研究	杨涵,熊黑钢,陈学刚 (3537)
不同施磷量(KH ₂ PO ₄)作用对Cu、Zn在红壤中的迁移转化	郭亮,李忠武,黄斌,王艳,张艳 (3546)
硫素对水稻吸收砷的生物有效性及其在土壤中形态影响	杨世杰,唐冰培,王代长,饶伟,张亚楠,王丹,朱云集 (3553)
硫对土壤中硒形态变化及油菜硒吸收的影响	刘新伟,段碧辉,夏全杰,矫威,郭再华,胡承孝,赵竹青 (3564)
再生水灌溉对土壤化学性质及可培养微生物的影响	龚雪,王继华,关键飞,杨雪辰,陈黛慈 (3572)
西南喀斯特山区寿竹林地土壤微生物量与酶活性在不同坡位和剖面层次的分布特征	秦华军,何丙辉,赵旋池,李源,毛文韬,曾清平 (3580)
黔中喀斯特石漠化区不同土壤类型对常见植物叶片δ ¹³ C值的影响	杜雪莲,王世杰,罗绪强 (3587)
碳底物含量对厌氧条件下水稻土N ₂ 、N ₂ O、NO、CO ₂ 和CH ₄ 排放的影响	陈诺,廖婷婷,王睿,郑循华,胡荣桂,Klaus Butterbach-Bahl (3595)
北京市典型绿化灌木阻滞吸附PM _{2.5} 能力研究	梁丹,王彬,王云琦,张会兰,杨松楠,李昂 (3605)
污泥焚烧过程中氯化物对Cd迁移行为的影响	刘敬勇,卓钟旭,孙水裕,罗光前,李晓明,谢武明,王玉洁,杨佐毅,赵素莹 (3612)
京津冀区域生产和消费CO ₂ 排放的时空特点分析	汪浩,陈操操,潘涛,刘春兰,陈龙,孙莉 (3619)
水泥工业大气污染物排放控制水平确立研究	任春,江梅,邹兰,李晓倩,魏玉霞,赵国华,张国宁 (3632)
《环境科学》征稿简则 (3279) 《环境科学》征订启事 (3545) 信息 (3364,3486,3552,3563)	

温度对 ABR-MBR 复合工艺处理生活污水的影响及其微生物群落分析

吴鹏¹, 陆爽君¹, 徐乐中¹, 刘捷¹, 沈耀良^{1,2*}

(1. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215009; 2. 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: 将厌氧折流板反应器 (ABR) 与膜生物反应器 (MBR) 优化组合 (CAMBR) 用于处理实际生活污水, 研究温度对该反应器处理效能的影响, 并采用变性梯度凝胶电泳 (DGGE) 技术对其内部微生物群落结构进行分析。试验水力停留时间为 7.5 h、混合液回流比 R1 为 200%、R2 为 50%、pH 为 6.5~8.5、溶解氧 3 mg·L⁻¹ 左右。控制 3 个温度梯度: 中温 (25℃ ± 5℃)、低温 (10℃ ± 5℃)、高温 (35℃ ± 5℃)。结果表明系统稳定运行后, 温度对系统去除 COD 的影响很小, COD 的去除效果很好。中温和高温环境, 系统出水水质较好, TN 平均去除率为 70%, 出水平均浓度为 9 mg·L⁻¹, TP 平均去除率为 73%, 出水平均浓度低于 0.8 mg·L⁻¹。低温环境, TN 平均去除率仅为 57%, 出水平均浓度为 15 mg·L⁻¹; TP 平均去除率降至 67%, 出水平均浓度为 1 mg·L⁻¹。DGGE 图谱表明, 整个试验过程, 系统内微生物类群保持多样性分布, 同时优势菌群突出; 在同一时期内, 各反应池菌群相似性较高, 但各隔室微环境的改变使得 ABR 和 MBR 内微生物菌群结构仍存在明显差异, 强化了 ABR 和 MBR 的各自功能, 有效保证了系统脱氮除磷效果。

关键词: 厌氧折流板反应器; 膜生物反应器; 生活污水; 温度; 种群分析

中图分类号: X172; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)09-3466-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.09.031

Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community

WU Peng¹, LU Shuang-jun¹, XU Yue-zhong¹, LIU Jie¹, SHEN Yao-liang^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: Effects of temperature on the combined process of ABR and MBR (CAMBR) for domestic sewage treatment were investigated and the changes in the bacterial community structure were analyzed by PCR-DGGE technique. The HRT, recycle ratio 1, recycle ratio 2, pH and DO were 7.5 h, 200%, 50%, 6.5~8.5 and 3 mg·L⁻¹, respectively. The temperature were controlled at three gradients: middle (25℃ ± 5℃), low (10℃ ± 5℃) and high (35℃ ± 5℃). The results showed that the change of temperature had little influence on COD removal, and the CAMBR in stable state showed good performance in COD removal. In addition, the CAMBR achieved good effluent quality in middle or high temperature environment, and the average TN removal efficiency was 70% with an effluent TN of 9 mg·L⁻¹, and the average TP removal efficiency was 73% with the effluent TP below 0.8 mg·L⁻¹. For the process operated in low temperature environment, the average TN removal efficiency was only 57% with an effluent TN of 15 mg·L⁻¹, and the average TP removal efficiency was decreased to 67% with an effluent TP of 1 mg·L⁻¹. DGGE analysis indicated that throughout the process, the microbial population within the system maintained its diversity in distribution, while the dominant flora was prominent. During the same period, microbial populations in each compartment were similar. However, the structure of microbial community had significant differences between the ABR and the MBR due to the change of microenvironment in each compartment. Thus, the contributions of the ABR and the MBR were intensified, guaranteeing the efficiency of nitrogen and phosphorus removal in the system.

Key words: anaerobic baffled reactor; membrane bioreactor; domestic sewage; temperature; microbial analysis

当前,研究和开发经济高效的生物脱氮除磷技术,有效去除生活污水中的氮、磷等营养物质,是控制水体富营养化和保证水质安全的关键^[1]。为此,基于 ABR 具有微生物相有效分离且易于形成颗粒化污泥以及 MBR 具体高污泥截留和出水水质好的特点,本课题组将 ABR 和 MBR 进行优化组合构建新型反应器 (CAMBR),并首次将其应用于生活污水

的脱氮除磷研究,取得了较好的处理效果^[2]。

温度是影响活性污泥系统脱氮除磷效果的关

收稿日期: 2014-01-09; 修订日期: 2014-04-08

基金项目: 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)

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

键因素之一^[3,4]. 微生物在其最适生长温度下活性最强,生长速率快,而当温度高于或低于该温度时,其活性均会下降,影响反应器脱氮除磷效果及其稳定性. 在前期研究基础上^[2],结合四季温度变化情况,为 CAMBR 能在实际环境中运行应用,故对其在不同温度条件下处理实际污水脱氮除磷性能进行研究并结合 PCR-DGGE 技术对其内部微生物

群落结构进行分析,揭示 CAMBR 脱氮除磷机制.

1 材料与方法

1.1 试验水质

试验进水水质为苏州市某高校生活小区污水,一天中水质变化如表 1 所示.

表 1 某高校生活小区污水水质/mg·L⁻¹

Table 1 Water quality of domestic wastewater in a university/mg·L ⁻¹				
项目	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
范围	107.5~313.9	9.3~27.7	13.7~46.8	0.52~4.13
平均值	206.2	16.7	26.3	2.11

1.2 试验流程及装置

CAMBR 由三隔室 ABR、好氧池和膜池组成,有效容积分别为 8.6、2.7 和 3.1 L,如图 1 所示. ABR 内接种污泥取自苏州市某城市污水处理厂的重力浓缩池,总接种泥量约为各隔室有效体积的 3/5,各隔室悬浮污泥 (MLSS) 约为 28 g·L⁻¹;好氧池和膜池内的接种污泥取自苏州市某污水处理厂的氧化沟,投入量占各隔室有效体积的 1/2,MLSS 约为 7.5 g·L⁻¹,挥发性悬浮污泥 (MLVSS)/MLSS 约为 0.45,控制系统总 HRT 为 10 h,用生活污水填满各隔室,闲置 1 d 后开始连续进水. 好氧池中布设穿孔管,通过曝气为活性污泥供氧及对膜进行擦洗,延缓膜污染. 系统设置两个泥水混合液回流 (R1 为 200%,R2 为 50%),实现厌氧反硝化脱氮,厌氧释磷,反硝化除磷及好氧吸磷和硝化功能,最终通过

排泥实现除磷. MBR 由自吸泵间歇抽吸出水,抽吸周期为 12 min (包括 10 min 抽吸和 2 min 反冲洗). 整个系统采用可编程逻辑控制器 (PLC) 进行恒定水位、出水泵和反冲洗泵的启闭的自动控制. 通过在线监测仪实时监控 ABR 和好氧池的 DO、pH 值. 试验选用的膜组件为 PVDF 帘式中空纤维微滤膜,膜孔径为 0.1 μm,过滤面积为 0.15 m²,采用真空压力表监测跨膜压差 (TMP) 变化,观察膜的污染状况,当 TMP 增至 40 kPa 时对膜组件进行化学清洗.

1.3 试验方案

取接种污泥和启动结束后污泥 (90 d),另分别取 3 个温度段最后一天的污泥共 5 个污泥样品用于 DGGE 分析. 102 d 时 (见表 2),在 CAMBR 每个隔室采取污泥样品用于 DGGE 分析.

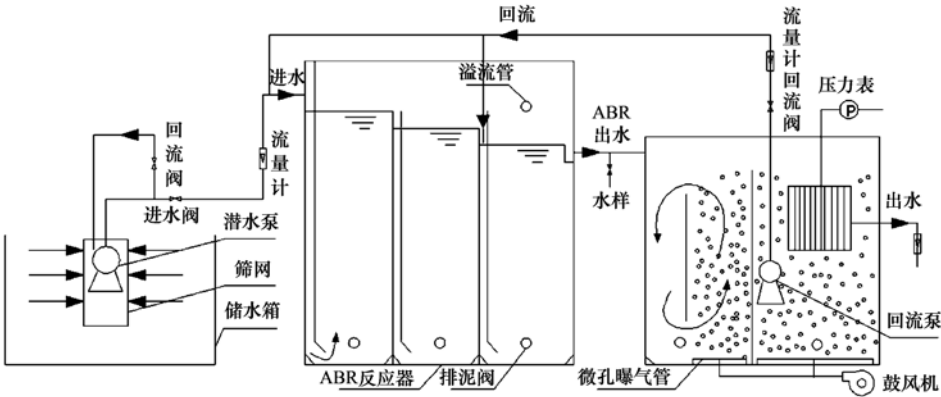


图 1 CAMBR 反应器示意

Fig. 1 Schematic diagram of CAMBR

1.4 监测方法

COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、TN 和 TP 等常规指标均采用国家标准方法^[5].

PCR-DGGE 分析方法:污泥样品的预处理、

DNA 提取和 PCR 扩增:将 10 mL 污泥样品离心 10 min (转速 3 500 r·min⁻¹) 后弃去上清液,然后保存于 -20℃ 的环境用于后续分析使用. 采用蛋白酶 K-CTAB 法破碎、裂解细胞对样品中 DNA 进行提取,

具体方法见文献[6]. 用于 PCR 扩增的细菌 16S rDNA通用引物为 GC341f(5'-CGCCCGCCGCG CCGCCGCGCCCGGCCCGCCGCCCCCGCCGCTACG GGAGGCAGCAG-3') 和 907r(5'-CCGTCAATTCTT TTGAGT TT-3'),PCR 扩增条件为:首先 95℃变性 5

min,然后 95℃变性 40 s,55℃退火 50 s,72℃延伸 50 s,循环 35 次,最后在 72℃保持 10 min,最终于 4℃保温^[7]. DGGE 分析:取 30 μL PCR 扩增产物在 DCode System (Bio-Rad, USA) 上进行电泳,详细步骤见文献[7].

表 2 试验运行条件

Table 2 Operation conditions of CAMBR

工况	时间/d	HRT/h			SRT/d	R1, R2/%	好氧池溶解氧 /mg·L ⁻¹	温度/℃
		ABR	MBR	合计				
1	1~90	6	4	10	20	200, 50	3	25
2	91~102	4.5	3	7.5	20	200, 50	3	25
3	103~121	4.5	3	7.5	20	200, 50	3	25±5(中温)
4	122~147	4.5	3	7.5	20	200, 50	3	10±5(低温)
5	148~173	4.5	3	7.5	20	200, 50	3	35±5(高温)

2 结果与讨论

2.1 对 COD 的去除效果

整个试验过程中进水 COD 为 260 ~ 330 mg·L⁻¹,COD 随时间变化的去除效果如图 2 所示. 中温阶段,ABR 对 COD 去除率达 60%,其出水 COD 浓度低于 112 mg·L⁻¹. CAMBR 对 COD 的去除率达到 90% 以上,系统出水 COD 浓度低于 26 mg·L⁻¹. 当温度降低至低温阶段,ABR 对 COD 的去除效果骤降,COD 去除率仅有 40%,出水浓度高达 166 mg·L⁻¹,系统对 COD 的去除能力也显著降低,COD 去除率仅有 66%,出水浓度高达 90 mg·L⁻¹,这与温度的骤降导致微生物活性降低,其生长代谢能力减弱有关^[8]. 随着反应器的运行,微生物逐渐适应了环境温度的变化,系统对 COD 的去除效果有所好转并趋于稳定,最终稳定在 89% 左右,出水浓度在 31 mg·L⁻¹ 左右. 当温度突然升高到 35℃,由于微生物没有适应环境温度的突变,ABR 对 COD 的去除效果显著降低,其出水 COD 浓度高达 160 mg·L⁻¹,系统对 COD 的去除率也仅有 75%,出水浓度达到了 75 mg·L⁻¹. 随着微生物对环境的适应,ABR 对 COD 的去除效果逐渐增强,系统对 COD 的去除能力也逐渐增强并趋于稳定,最终 COD 平均去除率稳定在 90%,出水平均浓度为 28 mg·L⁻¹. 由试验可知,CAMBR 对温度变化的适应能力较强,并能较快地恢复有机物去除能力.

2.2 对 NH₄⁺-N 的去除效果

整个试验过程中系统随时间变化对 NH₄⁺-N 的去除效果如图 3 所示. 系统进水 NH₄⁺-N 浓度为 17 ~ 30 mg·L⁻¹. 中温阶段,虽然进水 NH₄⁺-N 浓度波动较大,但是系统出水 NH₄⁺-N 浓度维持在 0.7 mg·L⁻¹ 以

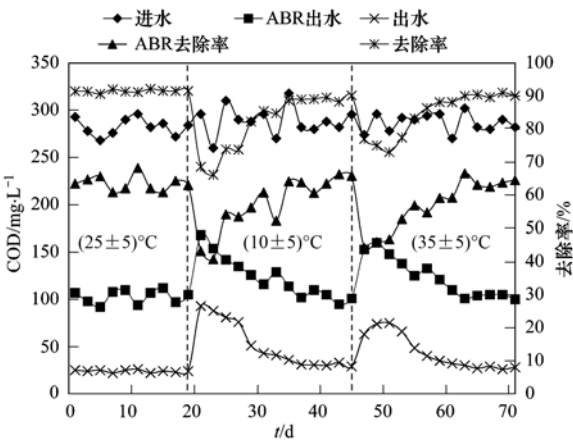


图 2 COD 浓度及其去除率随时间的变化

Fig. 2 Changes of concentration and removal rate of COD with time

下,去除效果良好,去除率达 96%. 这与中温阶段最适合硝化细菌的生长繁殖,活性强,硝化速率高^[9],可有效利用 NH₄⁺-N 有关,所以能取得很好的去除效果.

当温度骤降进入低温阶段,由于低温环境不利于硝化细菌的生长,其活性明显受到抑制^[10],系统出水 NH₄⁺-N 浓度显著上升,高达 10.9 mg·L⁻¹,其去除效果明显降低,去除率仅有 60%. 随着反应器的运行,硝化细菌逐渐适应低温环境,其活性有所增强. 另外,由于 SRT 较长及 MBR 膜组件对污泥的截留作用,系统内污泥维持在较高浓度,有利于硝化菌的生长富集^[11],使得 NH₄⁺-N 去除率有所上升,达到 71% 左右,出水 NH₄⁺-N 平均浓度为 7 mg·L⁻¹.

当温度突然上升至高温阶段,由于硝化细菌对于环境温度的突变极度不适应,其活性受到抑制,系统出水 NH₄⁺-N 浓度明显上升,达 11 mg·L⁻¹,其去除率显著降低,仅有 58%. 随着微生物对高温环境的适应,系统对 NH₄⁺-N 的去除能力显著增强并趋于稳

定,最终 NH_4^+-N 去除率达到 89% 左右,出水 NH_4^+-N 平均浓度为 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

虽然 ABR 内有机氮被转化为 NH_4^+-N ,由于混合液的回流稀释作用,ABR 出水 NH_4^+-N 浓度仍有所降低。3 个阶段中,中温阶段系统 NH_4^+-N 去除效果最好,高温阶段次之,低温阶段最差,表明为取得较好的 NH_4^+-N 去除效果,系统应维持在 10°C 以上,尽量减小低温对硝化菌的抑制作用。

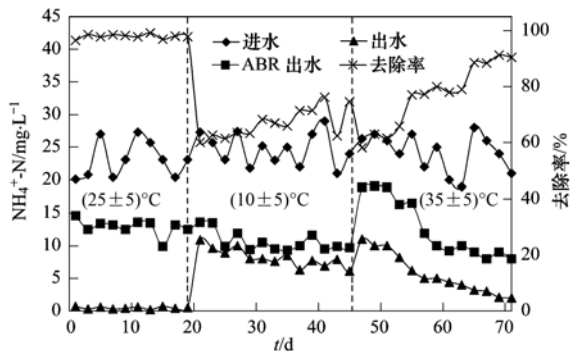


图 3 NH_4^+-N 浓度及其去除率随时间的变化

Fig. 3 Changes of concentration and removal rate of NH_4^+-N with time

2.3 对 TN 的去除效果

整个试验过程中随时间变化 CAMBR 对 TN 的去除效果如图 4 所示。可知系统进水 TN 为 $28 \sim 41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由于中温条件最适合硝化细菌的生长繁殖,其活性也较高,系统内 NH_4^+-N 在好氧池和膜池内几乎被完全转化为 NO_3^--N 和 NO_2^--N ,系统出水 TN 平均浓度为 $9.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,TN 平均去除率为 71%。膜池内泥水混合液经回流至 ABR1 号隔室, NO_3^--N 和 NO_2^--N 经 ABR 内反硝化细菌作用转化为 N_2 而得以去除。ABR 出水 TN 浓度为 $14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,TN 去除率平均为 58%。由此可知,ABR 去除了大部分 TN。另外,好氧池和膜池对 TN 的去除率约为 13%,这可能由于膜组件高效截留污泥的作用,膜池内维持了较高的污泥浓度,并且混合不均匀产生了同步硝化反硝化作用^[12],强化了 TN 的去除。另外,膜池内好氧微生物利用氮源生长代谢合成自身细胞吸收部分 TN,通过排泥也减少了部分 TN。

当温度降到低温阶段,由于低温条件对硝化菌活性产生抑制作用, NH_4^+-N 转化为 NO_3^--N 和 NO_2^--N 的效果很不理想,回流混合液中 NO_3^--N 和 NO_2^--N 浓度很低,并且低温条件下反硝化速率显著降低^[13],导致反硝化效果较差,进而导致系统 TN 去除效果也很差。另外,微生物在低温条件下生长繁殖缓慢,

氮素代谢合成利用减缓。随反应器的运行,微生物对低温环境也逐渐适应,随 NH_4^+-N 转化率的提高,TN 去除率也有所提高,最终稳定在 57% 左右,出水浓度为 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,其中,ABR 对 TN 的去除率达 53%。

由于温度的骤升,高温阶段初期随 NH_4^+-N 转化率的骤降,系统 TN 去除效果明显降低,TN 去除率仅有 40%,出水 TN 浓度高达 $19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。随着反应器的运行,微生物对温度的骤变逐渐适应, NH_4^+-N 转化率逐渐提高,系统出水 TN 去除率也逐步提高,最终升高至 70% 左右,出水浓度为 $9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,其中,ABR 对 TN 的去除率达 60%。

整个试验过程中,TN 和 NH_4^+-N 的去除率变化趋势基本类似。中温和高温阶段 TN 去除效果相差不大,而低温阶段较差。好氧池和膜池在不同阶段对 TN 的去除贡献为:中温 > 高温 > 低温,同样表明为取得较好的 TN 去除效果,CAMBR 应维持在 10°C 以上,减小低温对微生物的抑制作用。

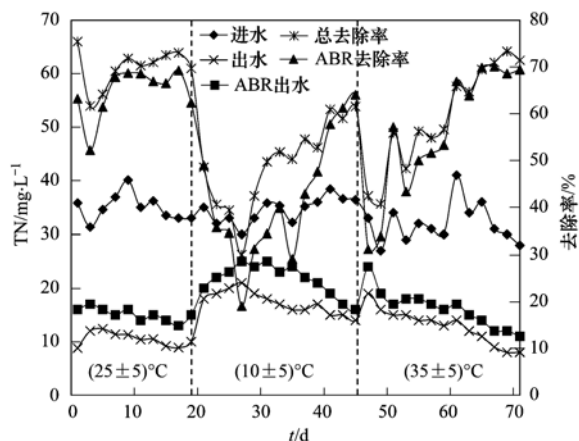


图 4 TN 浓度及其去除率随时间的变化

Fig. 4 Changes of concentration and removal rate of TN with time

2.4 对 TP 的去除效果

整个试验过程中 CAMBR 随时间变化对 TP 的去除效果如图 5 所示。系统进水 TP 浓度为 $2.4 \sim 3.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。整个运行过程中,系统 TP 去除率与厌氧释磷量呈良好的正相关性;ABR2 号隔室 TP 浓度显著高于进水浓度,表明 ABR2 号隔室内聚磷菌释磷充分;ABR 出水 TP 浓度显著降低表明 ABR3 号隔室内反硝化除磷菌吸收了部分 TP,有效保证了系统的除磷效果^[14,15],但仍显著高于进水浓度;在好氧池和膜池内聚磷菌进一步过量吸磷后,最终以剩余污泥的形式排出系统,实现磷的去除。

中温阶段,系统内微生物活性最高,有机物能充分降解为小分子有机酸,ABR 内聚磷菌释磷充分,

反硝化除磷菌也能充分吸磷,好氧池和膜池聚磷菌过量吸磷能力最强,TP 可被有效去除,系统出水 TP 平均浓度为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,去除率达到 87% 左右。

当温度降低到低温阶段,微生物活性受到抑制,ABR 内聚磷菌释磷能力减弱^[16],反硝化除磷菌吸磷能力降低,好氧池和膜池内聚磷菌过量吸磷能力也受到抑制,系统除磷效果明显下降,去除率骤降至 38%。随着反应器的运行,系统内微生物对低温环境逐渐适应,ABR 内聚磷菌释磷能力、反硝化除磷菌吸磷能力和好氧池、膜池内聚磷菌过量吸磷能力同步有所增强,TP 的去除率也稳步回升,最终系统 TP 去除率稳定在 67% 左右,出水 TP 平均浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。系统在低温环境下能够较好地除磷,与低温条件下 PAOs 相比聚糖菌(GAOs)能较多地利用 VFAs、抑制聚糖菌对除磷系统的不利影响密切相关^[17]。另外,缺氧反硝化除磷也提高了系统的除磷效能^[18]。此外,复合系统对于环境变化有较强的抗冲击能力,也使得 CAMBR 在低温环境能取得较好的除磷效果。

当温度从低温阶段急剧上升至高温阶段,由图 5 可知,ABR 内聚磷菌释磷能力、反硝化除磷菌吸磷能力、好氧池和膜池内聚磷菌过量吸磷能力均显著下降、系统 TP 去除率骤降至 38%,出水 TP 浓度高达 $1.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其原因是环境温度的骤变导致微生物活性下降;虽然温度上升,PAOs 释磷速率增加但吸磷速率降低^[19]。系统经过 24 d 的运行,其内部微生物逐渐适应了高温环境,ABR 内聚磷菌释磷能力、反硝化除磷菌吸磷能力、好氧池和膜池内聚磷菌过量吸磷能力均得到不同程度的回升,但仍低于中温条件下的除磷效果,这与高温条件下 GAOs 在吸收基质方面相比 PAOs 更具优势有关^[17],最终系统 TP 去除率达到 73%,出水 TP 平均浓度为 0.8

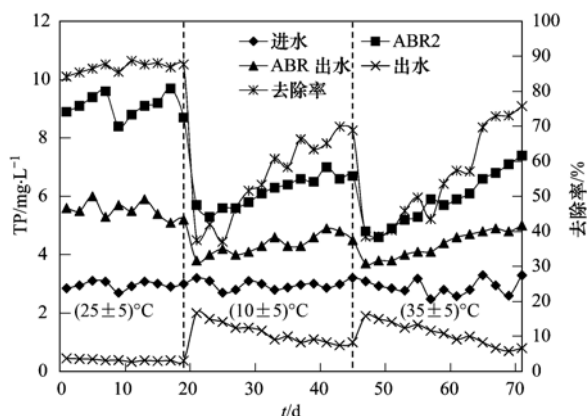


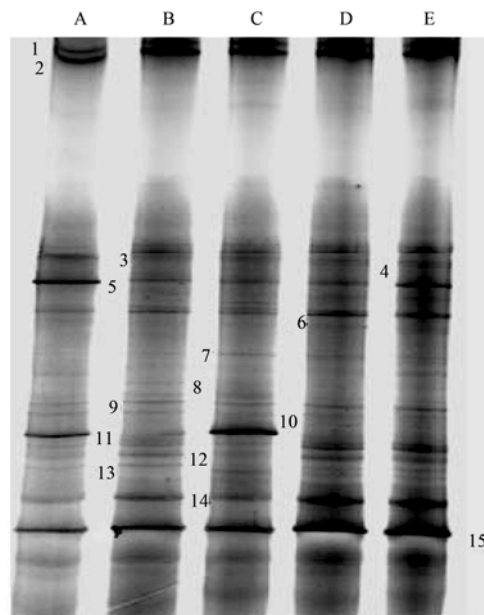
图 5 TP 浓度及其去除率随时间的变化

Fig. 5 Changes of concentration and removal rate of TP with time

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。相比其他高温条件下强化除磷系统除磷效率急剧下降,甚至崩溃的研究^[20],CAMBR 在高温环境仍具有稳定较好的出水。其原因是 ABR 特殊的结构具有相分离的功能^[21],使不同厌氧微生物在不同的隔室最适条件下生长,并呈现出了良好的种群分布,强化其原有功能,有利于 ABR 内聚磷菌释磷能力,反硝化除磷菌吸磷能力,好氧池和膜池内聚磷菌过量吸磷能力的充分发挥。

3 CAMBR 反应器 DGGE 图谱分析

脱氮除磷反应器中微生物菌群结构复杂,呈多样性分布^[22,23]。采用一些非培养的研究方法(如 DGGE、FISH、T-RFLP、醣谱和克隆文库技术等方法)对生物脱氮除磷反应器中菌群的研究表明:反应器内微生物菌群呈高度多样性分布,并且多种脱氮除磷功能菌群共同发挥脱氮除磷的功效。DGGE 图谱中每一个条带代表着一个细菌种属,而同一图谱中的对应条带的密度则可代表此菌种的丰度。由图 6 可知,CAMBR 在不同运行条件下,能够维持多种微生物的存在,使其共同发挥脱氮除磷的功能。另外,根据生态学中的“多样性导致稳定性原理”,物种多样化具有稳定生态系统的功能特征^[24],可知 CAMBR 中微生物菌群呈多样性分布有利于反应器获得稳定的脱氮除磷效果。生物脱氮除磷反应器中微生物菌群呈多样性分布的同时优势菌群突出^[25]。微生物菌群的多样性有利于系统的稳定,同时反应



A. 接种污泥; B. 启动; C. 中温; D. 低温; E. 高温

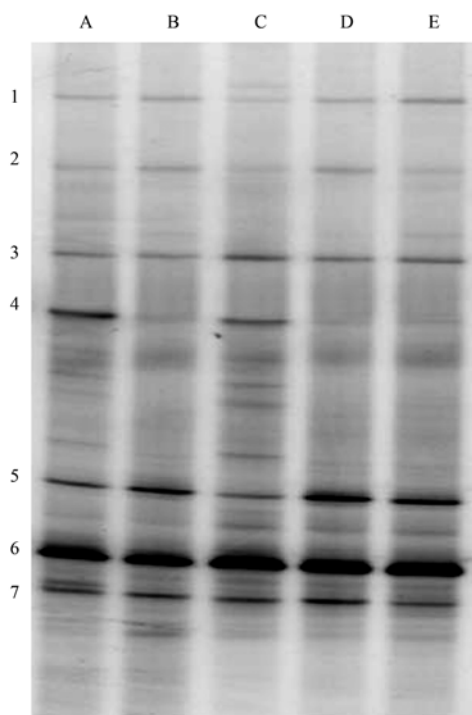
图 6 污泥样品的 DGGE 凝胶图谱

Fig. 6 DGGE profiles of 16S rDNA fragments of the sludge samples

器中优势菌群的种类、数量则可能直接关系到反应器功能的强弱。从图 6 可以看出 CAMBR 在不同运行条件下菌群结构有所变化,微生物菌群呈多样性分布的同时,优势菌群也格外明显。部分在接种污泥中存在的微生物,随着反应器运行条件的改变而逐渐被淘汰,A 泳道内优势细菌 5 号和 11 号在启动过程中逐渐减弱,最终失去优势地位,并且 11 号优势细菌在后面 4 个时期内几乎不存在。条带 6 和 14 在接种污泥内并非优势菌种,经过不同运行条件的适应,在后期逐渐演替为优势菌种,说明这些细菌能很好地适应系统环境。同时,15 号条带对应的细菌种属随着反应器的运行逐渐成为顶级优势菌种,对提高污水处理效果起到了至关重要的作用。伴随 CAMBR 内菌群结构的不断变化,不同条件下其脱氮除磷效果也不断得到增强,最终系统运行稳定,出水水质较好。由此可见,CAMBR 内菌群结构的变化直接关系到反应器脱氮除磷功能的发挥。当反应器从中温变为低温和高温后,4、6、14 和 15 号条带对应的细菌种属随着反应器的运行逐渐处于优势地位。由于反应器温度从恒温(25℃)变为中温(25℃±5℃),运行过程中温度出现明显波动,此时 10 号条带所代表的菌种在 C 泳道显示的信号特别强,说明 10 号菌种在中温(25℃±5℃)条件下得到了大量繁殖和富集。同时 1、2、3 和 15 号相对较稳定的功能菌群使得 CAMBR 功能得到了稳定地发挥。

4 CAMBR 不同区域菌群结构分析

CAMBR 不同区域菌群结构如图 7 所示。可知,各隔室之间相似性较高,均具有 1、2、3、5、6 和 7 号优势菌属。这与整个系统存在污泥回流现象、使得各个隔室内菌群在同一时期能够保持较高的相似性、微生物菌群结构在相对较短的时间内改变不明显有关。而 ABR 内特有的微环境促使各微生物种属的生理状态发生改变,使得不同微生物在不同隔室内发挥不同的功能:ABR1 号隔室内反硝化细菌反硝化脱氮、ABR2 号隔室内聚磷菌厌氧释磷、ABR3 号隔室内反硝化除磷菌利用硝酸盐反硝化除磷;而 MBR 发挥聚磷菌好氧吸磷及硝化细菌硝化作用。另外,ABR 内特有的 4 号优势菌种与 ABR 底部尺寸较大的颗粒污泥不参与整个系统的污泥回流有关,进一步稳定了 ABR 各隔室的原有功能。可知各优势菌群功能的耦合有效保证了系统的脱氮除磷效果。



A. ABR1; B. ABR2; C. ABR3; D. 好氧池; E. 膜池

图 7 第 102 d 不同隔室污泥样品的 DGGE 凝胶图谱

Fig. 7 DGGE profiles of 16S rDNA fragments of sludge samples in different compartments on day 102

5 结论

(1)CAMBR 在不同温度条件下能对实际生活污水进行有效处理,防止环境温度的突变(采取保温措施等)有利于系统获得稳定的除污性能。环境温度的变化对系统去除 COD 的影响很小,出水 COD 均优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准,出水 TN 优于一级 A 标准,出水 TP 满足一级 B 标准。试验过程中,系统内微生物类群保持多样性分布,同时优势菌群突出。

(2)在同一时期内,各个反应池菌群相似性较高,但各隔室微环境的改变使得 ABR 和 MBR 内微生物菌群结构仍存在明显差异,强化了 ABR 和 MBR 的各自功能,有效保证了系统脱氮除磷效果。

参考文献:

- [1] 郭云,杨殿海,卢文健. 城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2709-2714.
- [2] 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.
- [3] 郭昱廷,彭剑峰,宋永会,等. 温度对 ABR 反应器处理效果和微生物群落结构的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(7): 1542-1548.

- [4] 钱苏雯, 王如意, 孙培德. 水温变化对 EBPR 系统除磷效果响应机制的数值模拟研究[J]. 环境科学学报, 2012, **30**(12): 2420-2429.
- [5] 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.
- [6] Yang Z H, Xiao Y, Zeng G M, *et al.* Comparison of methods for total community DNA extraction and purification from compost [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **74**(4): 918-925.
- [7] Xiao Y, Zeng G M, Yang Z H, *et al.* Coexistence of nitrifiers, denitrifiers and anammox bacteria in a sequencing batch biofilm reactor as revealed by PCR-DGGE [J]. Journal of Applied Microbiology, 2009, **106**(2): 496-505.
- [8] 谷洁, 李生秀, 秦清军, 等. 农业废弃物静态高温堆腐过程中的生物化学变化[J]. 中国农业科学, 2005, **38**(8): 1699-1705.
- [9] Kim D, Kim K Y, Ryu H D, *et al.* Long term operation of pilot-scale biological nutrient removal process in treating municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(13): 3180-3884.
- [10] Marsili L S, Giunti L. Fuzzy predictive control for nitrogen removal in biological wastewater treatment [J]. Water Science and Technology, 2002, **45**(4-5): 37-44.
- [11] Pollice A, Laera G, Saturno D, *et al.* Effects of sludge retention time on the performance of a membrane bioreactor treating municipal sewage [J]. Journal of Membrane Science, 2008, **317**(1-2): 65-70.
- [12] Peng Y Z, Ge S J. Enhanced nutrient removal in three types of step feeding process from municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2011, **102**(11): 6405-6413.
- [13] Elefsiniotis P, Li D. The effect of temperature and carbon source on denitrification using volatile fatty acids [J]. Biochemical Engineering Journal, 2006, **28**(2): 148-155.
- [14] 陈晓阳, 薛智勇, 肖景霓, 等. 曝气强度对 AOA 膜生物反应器脱氮除磷性能的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(10): 2979-2985.
- [15] 葛士建, 彭永臻, 曹旭, 等. 改良 UCT 分段进水工艺处理生活污水性能优化研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 2006-2012.
- [16] Helmer C, Kunst S. Low temperature effects on phosphorus release and uptake by microorganisms in EBPR plants [J]. Water Science and Technology, 1998, **37**(4-5): 531-539.
- [17] Lopez-Vazquez C M, Song Y I, Hooijmans C M, *et al.* Short-term temperature effects on the anaerobic metabolism of glycogen accumulating organisms [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2007, **97**(3): 483-495.
- [18] 刘鹏霄, 张捍民, 王晓琳, 等. MUCT-MBR 工艺反硝化除磷脱氮研究[J]. 环境科学, 2009, **30**(7): 1995-2000.
- [19] Panswad T, Doungchai A, Anotai J. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system [J]. Water Research, 2003, **37**(2): 409-415.
- [20] 唐旭光, 王淑莹, 张婧倩. 温度变化对生物除磷系统的影响[J]. 化工学报, 2011, **62**(4): 1103-1109.
- [21] 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.
- [22] Seviour R J, Mino T, Onuki M. The microbiology of biological phosphorus removal in activated sludge systems [J]. FEMS Microbiology Review, 2003, **27**(1): 99-127.
- [23] Daims H, Nielsen P H, Nielsen J L, *et al.* Novel *Nitrospira*-like bacteria as dominant nitrite-oxidizers in biofilms from wastewater treatment plants: diversity and in situ physiology [J]. Water Science and Technology, 2000, **41**(4-5): 85-90.
- [24] 罗固源, 豆俊峰, 吉芳英, 等. 螺旋升流式反应器脱氮除磷效果及其特性的研究[J]. 环境科学学报, 2004, **24**(1): 15-19.
- [25] Liu Y, Zhang T, Fang H H P. Microbial community analysis and performance of a phosphate-removing activated sludge [J]. Bioresource Technology, 2005, **96**(11): 1205-1214.

CONTENTS

Comparative Analysis Methods of Haze Distinction over Yangtze River Delta Region	LIU Xiao-hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (3239)
Trends of Urban Haze in Jiangsu Province China over the Past 33 Years	LIU Duan-yang, WEI Jian-su, YAN Wen-lian, <i>et al.</i> (3247)
Temporal Variation of Background Atmospheric CO ₂ and CH ₄ at Mount Waliguan, China	LIU Peng, ZHANG Guo-qing, WANG Jian-qiong, <i>et al.</i> (3256)
Characteristics and Sources of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shanghai Urban Area	ZHANG Yi-hua, WANG Dong-fang, ZHAO Qian-biao, <i>et al.</i> (3263)
Size Distribution and Characterization of OC and EC in Atmospheric Aerosols During the Asian Youth Games of Nanjing, China	WANG Hong-lei, ZHU Bin, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (3271)
Pollution Characteristics of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} During Typical Winter Days in Wuxi City	YUN Long-long, LU Fan, ZHANG Tian-shu, <i>et al.</i> (3280)
Emission Characteristics of PM _{2.5} from Blast Furnace Iron Making	FAN Zhen-zhen, ZHAO Ya-li, ZHAO Hao-ning, <i>et al.</i> (3287)
Composition Characteristics of Atmospheric Volatile Organic Compounds in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	QI Xin, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3293)
Catalytic Oxidation of Two-component VOCs and Kinetic Analysis	BO Long-li, YANG Li, SUN Jian-yu, <i>et al.</i> (3302)
Ultrafine Particle Number Concentration and Size Distribution of Vehicle Exhaust Ultrafine Particles	LU Ye-qiang, CHEN Qiu-fang, SUN Zai, <i>et al.</i> (3309)
Major Ion Chemistry of Surface Water in the Upper Reach of Shule River Basin and the Possible Controls	ZHOU Jia-xin, DING Yong-jian, ZENG Guo-xiong, <i>et al.</i> (3315)
Sediment-water Flux and Processes of Nutrients and Gaseous Nitrogen Release in a China River Reservoir	CHEN Zhu-hong, CHEN Neng-wang, WU Yin-qi, <i>et al.</i> (3325)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Tidal Reach and Its Adjacent Sea Estuary of Daliaohe Area, China	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (3336)
Chemical Speciation and Risk Assessment of Heavy Metals in the Middle Part of Yarlung Zangbo Surface Sediments	BAI Jian-kun, LI Chao-liu, KANG Shi-chang, <i>et al.</i> (3346)
Analysis of Particle Size Characteristics of Road Sediments in Beijing Olympic Park	LI Hai-yan, SHI An-bang, QU Yang-sheng, <i>et al.</i> (3352)
Levels and Distribution of the Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in the Surface Sediment of the Yellow River	LI Guang-yao, JIN Jun, HE Chang, <i>et al.</i> (3358)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Retention in Two Different Channel Forms in a Typical Headwater Stream in the Suburb of Hefei City, China	LI Ru-zhong, YANG Ji-wei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (3365)
Migration and Transformation of Nitrogen in Urban Stream Located in Plain River-net Area Based on Water Resources Regulation	LIU Bo, SHENG Ming, ZHU Qiang, <i>et al.</i> (3373)
Decomposition and Phosphorus Dynamics of the Litters in Standing and Litterbag of the Hangzhou Bay Coastal Wetland	SHAO Xue-xin, LIANG Xin-qiang, WU Ming, <i>et al.</i> (3381)
Muti-model Collaborative Retrieval of Chlorophyll a in Taihu Lake Based on Data Assimilation	LI Yuan, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3389)
Photobleaching of Dissolved Organic Matter (DOM) from Confluence of Two Rivers Under Natural Solar Radiation; A Case Study of Fujiang River-Jialingjiang River	GAO Jie, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (3397)
Using Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Spectrum to Estimate the Dissolved Organic Matter (DOM) Concentration in Water, Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (3408)
Synthesis of Cu ₂ O-Ag-AgBr/MA Visible Photocatalyst and Its Performance in Degradation of 2-Chlorophenol	WANG Ran, ZHOU Xue-feng, HU Xue-xiang, <i>et al.</i> (3417)
Effects of Particle Size of Zero-Valent Iron on the Reactivity of Activating Persulfate and Kinetics for the Degradation of Acid Orange 7	LI Huan-xuan, WAN Jin-quan, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (3422)
Degradation of 2,4-D by Combined Catalytic Dechlorination and Biological Oxidation	ZHOU Hong-yi, ZENG Si-si, LIANG Si, <i>et al.</i> (3430)
Treatment of Marine-Aquaculture Effluent by the Multi-Soil-Layer (MSL) System and Subsurface Flow Constructed Wetland	SONG Ying, HUANG Yu-ting, GE Chuan, <i>et al.</i> (3436)
Variation of Different Carbon Sources in the Sewage Treatment Process	JIN Peng-kang, CHANG Jin, WANG Xian-bao, <i>et al.</i> (3443)
Effect of Gas-lift Device on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Reactor	LI Xiang, ZHANG Da-lin, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3449)
Enhancement for Anaerobic Digestion of Sewage Sludge Pretreated by Microwave and Its Combined Processes	LIU Ji-bao, NI Xiao-tang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3455)
Pilot Study of Thermal Treatment/Thermophilic Anaerobic Digestion Process Treating Waste Activated Sludge of High Solid Content	WU Jing, WANG Guang-qi, CAO Zhi-ping, <i>et al.</i> (3461)
Effects of Temperature on Combined Process of ABR and MBR for Domestic Sewage Treatment and Analysis of Microbial Community	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (3466)
Microbial Community of Municipal Discharges in A Sewage Treatment Plant	XU Ai-ling, REN Jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (3473)
Pilot-Scale Cultivation of <i>Spirulina plantensis</i> with Digested Piggery Wastewater	GUO Qing-qing, LIU Rui, LUO Jin-fei, <i>et al.</i> (3480)
Spectral Characteristics of Soluble Metabolites During Endogenous Respiration	LI Zhi-hua, ZHANG Qin, BAI Xu-li, <i>et al.</i> (3487)
Endogenous Respiration Process Analysis of Heterotrophic Biomass and Autotrophic Biomass Based on Respiration Map	LI Zhi-hua, BAI Xu-li, ZHANG Qin, <i>et al.</i> (3492)
Influence of S-Metolachlor and Cd ²⁺ on Photosynthesis of <i>Scenedesmus obliquus</i>	CHEN Cai-dong, HU Xiao-na, ZHANG Xiao-qiang, <i>et al.</i> (3498)
Effect of Environmental Factors on Fish Community Structure in the Huntai River Basin at Multiple Scales	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (3504)
Succession of Rotifer Community and Its Relationship with Environmental Factors in a New Estuarial Landscape River, Shanghai	MA Wen-hua, ZHANG Wei, GU Wan-wen, <i>et al.</i> (3513)
Anaerobic Reduction of Humus/Fe(Ⅲ) and Electron Transport Mechanism of <i>Fontibacter</i> sp. SgZ-2	MA Chen, YANG Gui-qin, LU Qin, <i>et al.</i> (3522)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in Jiapigou Goldmine Based on the UNMIX Model	AI Jian-chao, WANG Ning, YANG Jing (3530)
Environmental Magnetic Properties and Their Spatial Variability of Topsoil in Shihezi City	YANG Han, XIONG Hei-gang, CHEN Xue-gang (3537)
Effects of Different Amounts of Phosphate Fertilizers on Copper, Zinc Transfer in Red Soil Under the Application of KH ₂ PO ₄	GUO Liang, LI Zhong-wu, HUANG Bin, <i>et al.</i> (3546)
Influence of Sulfur on the Bioavailability of Arsenic Uptake by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) and Its Speciation in Soil	YANG Shi-jie, TANG Bing-pei, WANG Dai-chang, <i>et al.</i> (3553)
Effects of Sulfur on Transformation of Selenium in Soil and Uptake of Selenium in Rape	LIU Xin-wei, DUAN Bi-hui, XIA Quan-jie, <i>et al.</i> (3564)
Impact of Reclaimed Water Irrigation on Soil Chemical Properties and Culturable Microorganisms	GONG Xue, WANG Ji-hua, GUAN Jian-fei, <i>et al.</i> (3572)
Influence of Different Slope Position and Profile in <i>Disporopsis pernyi</i> Forest Land on Soil Microbial Biomass and Enzyme Activity in Southwest Karst Mountain of China	QIN Hua-Jun, HE Bing-Hui, ZHAO Xuan-chi, <i>et al.</i> (3580)
Effects of Different Soil Types on the Foliar δ ¹³ C Values of Common Local Plant Species in Karst Rocky Desertification Area in Central Guizhou Province	DU Xue-lian, WANG Shi-jie, LUO Xu-qiang (3587)
Effect of Carbon Substrate Concentration on N ₂ , N ₂ O, NO, CO ₂ and CH ₄ Emissions from a Paddy Soil in Anaerobic Condition	CHEN Nuo, LIAO Ting-ting, WANG Rui, <i>et al.</i> (3595)
Ability of Typical Greenery Shrubs of Beijing to Adsorb and Arrest PM _{2.5}	LIANG Dan, WANG Bin, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (3605)
Effects of Chlorides on Cd Transformation in a Simulated Grate Incinerator During Sludge Incineration Process	LIU Jing-yong, ZHUO Zhong-xu, SUN Shui-yu, <i>et al.</i> (3612)
Spatial Temporal Differentiation of Product-based and Consumption-based CO ₂ Emissions and Balance in the Beijing-Tianjin-Hebei Region: an Economic Input-Output Analysis	WANG Hao, CHEN Cao-cao, PAN Tao, <i>et al.</i> (3619)
Study on Feasible Emission Control Level of Air Pollutions for Cement Industry	REN Chun, JIANG Mei, ZOU Lan, <i>et al.</i> (3632)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年9月15日 第35卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 9 Sep. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人