

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农,张小玲,王迎春,刘伟东,杜佳,赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍,温天雪,王跃思,刘子锐,王丽,兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满,雷前涛,谈明光,李晓林,张桂林,刘卫,李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟,李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱,张洪海,杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗,李纯厚,徐娇娇,肖雅元,林琳,黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇,张鸿,何龙,沈金灿,柴之芳,杨波,王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川,沈立成,袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁,陶贞,高全洲,毛海若,姜光辉,焦树林,郑雄波,张乾柱,马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚,李彩梅,秦作栋,邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩,琚宜文,翟航,许亮,沈媛媛,纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红,叶淑君,吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁,高扬,林勇明,朱波,徐亚娟,于贵瑞,吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超,毕孟飞,李泽利,沙健,王玉秋,钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红,李义敏,周艺,卫安平,周广顺,肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌,李阳,孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞,李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚,李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟,李瑞娇,张念,赵峰,谢从新,张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧,毕春娟,韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波,孙荣国,王定勇,王小文,张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙,张忠民,赵霞,焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海,叶招莲,文颖频,毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇,刘伟京,张耀辉,徐军,唐敏,陈勇,白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳,陈复彬,赵慧,常自强,章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春,年永嘉,张静,张明,张磊,龚鹏飞,肖太民,李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦,王娟,郑天龙,刘建国,汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽,薛罡,高品,吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振,胡大龙,乔卫敏,陈冠翰,蒋玲燕,李震,麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰,向洪锐,陈春丽,周文斌,王佳佳,刘春英,曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒,孙家仁,吴兑,范绍佳,任明忠,吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰,王铁宇,李奇峰,张海燕,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎,高丽荣,田益玲,朱帅,张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍,汪钊,蔡强,欧文斌,孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春,梁文艳,赵远,李飞贞,曹敬灿,胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏,梅帅,曹有福,丁进锋,徐嘉杰,李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹,王丽华,郝春博,李璐,李思远,冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪,赵大勇,曾巾,余多慰,吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪,王佳,范晓蕾,罗生军,郭荣波,邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚,邓欢,肖勇,赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江,彭霞薇,李霞,孙雅君,冯红梅,江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳,陈国耀,姜珂,许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲,杨芸,徐卫红,王崇力,陈蓉,熊仕娟,谢文文,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲,仇少君,陈印平,赵西梅,刘京涛,陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利,赵彤,闫浩,黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊,杨晓洪,葛峰,王娜,焦少俊,叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举,崔孝强,阮震,赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒,特拉津·那斯尔,程永毅,詹江渝,杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉,杜永芬,王丹丹,高抒,高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威,蔡冠清,黄浩波,耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛,王龙昌,黄召存,贾会娟,冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君,杨智杰,翁发进,刘小飞,陈朝琪,林伟盛,王小红,陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦,张洪,李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究

涂勇, 刘伟京, 张耀辉*, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚

(江苏省环境科学研究院, 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210036)

摘要: 采用厌氧滤池 (AF) + 曝气生物滤池 (BAF) 工艺处理树脂化工废水, 曝气生物滤池以陶粒为生物载体, 进水 COD 为 200 ~ 300 mg·L⁻¹, 实验规模均为 2 ~ 4 L·d⁻¹. 实验表明, 采用 AF + BAF 工艺对化工园区尾水有较好的处理效果, 在 AF 停留 24 h, BAF 停留 12 h 的条件下, COD 的去除率最高可达 73.4%, NH₄⁺-N 的去除率达到 93.8%. 通过气相色谱-有机质谱联用仪 (GC-MS) 和三维荧光光谱分析发现, 系统对小分子有机物和微生物代谢产物的去除显著, 但对饱和烷烃和含氮杂环类物质去除效果不佳. 变性梯度凝胶电泳 (DGGE) 谱图显示, AF 中的微生物种类比原废水厂上流式厌氧池 (UASB) 中更为丰富, 表明化工园区废水采用二次厌氧效果明显.

关键词: 化工废水; 厌氧滤池; 曝气生物滤池; 三维荧光

中图分类号: X78 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2216-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.024

AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park

TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, XU Jun, TANG Min, CHEN Yong, BAI Yong-gang

(Jiangsu Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China)

Abstract: The anaerobic filter (AF) and biological aerated filter (BAF) were employed to treat the effluent in a sewage plant of the resin and chemical industry park. The ceramsite was used in BAF. In this study, the influent COD was 200-300 mg·L⁻¹ and the pilot model scale was 2-4 L·d⁻¹. According to the results, the AF-BAF treatment had a good effect on organic wastewater. When the AF HRT was 24 h and BAF was 12 h, the removal of COD reached 73.4%, and that of NH₄⁺-N reached 93.8%. From gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and three-dimensional fluorescence analysis, it was found that small organic molecules and microbial metabolites could be removed effectively. However, there was no obviously effect on the removal of saturated alkane and nitrogenous heterocyclic compounds. From the denature gradient gel electrophoresis (DGGE) spectra analysis, it was shown that there were more kinds of microorganism in the sludge of the AF than in the up-flow anaerobic sludge bed (UASB), which indicates that the AF-BAF system is more effective on treating effluent in a sewage plant of the resin and chemical industry park.

Key words: chemical wastewater; anaerobic filter (AF); biological aerated filter (BAF); three-dimensional fluorescence

随着经济的快速发展, 目前化工企业正朝着园区化的特点发展, 江苏全省共有 56 家化工集中区. 化工园区废水经过企业一级预处理后, 主要呈现有机物种类复杂、可生化性差、水质及水量波动大、具有一定生物毒性等特点, 为二级废水厂的设计及运行带来极大的难度^[1~3]. 研究显示, 生物膜法具有对低浓度废水适应性较好、耐冲击负荷等优点^[4,5], 近年来在新建废水厂被广泛运用^[6,7], 曝气生物滤池也是近年来水处理领域研究的重点^[8~12]. 本实验采用 AF + BAF 组合工艺处理树脂化工集中区废水厂尾水, 重点考察进水浓度、水力停留时间、温度等因素对系统的影响, 研究二级厌氧池的污泥中微生物的变化情况.

1 材料与方法

1.1 实验水样

实验所用废水为江苏宜兴某废水处理厂二沉池出水. 该废水处理厂主要收集处理集团公司内部 31 家企业所生产的废水, 集团公司主要以生产合成树脂系列、光固化树脂及单体、环氧树脂、饱和及不饱和树脂、溶剂系列等产品为主.

该废水处理厂主体采用生化处理工艺, 具体处理工艺如图 1 所示. 对二沉池出水进行常规水质分析, 检测结果如表 1 所示. 废水各项指标虽均达到《污水综合排放标准》(GB 8978-1996) 中的三级接管标准, 但由于其可生化性差, 增加了二级废水处理厂的处理难度.

收稿日期: 2013-10-27; 修订日期: 2014-01-08

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07101-003); 江苏省环保科研项目 (2013036)

作者简介: 涂勇 (1978 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为污水治理工艺设计研发、环境影响评价以及水污染环境规划, E-mail: 67057591@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: fashionzyh@163.com

1.2 实验装置和方法

实验工艺流程如图 2 所示. 实验在室温 (25 ± 2)℃ 下进行. AF 柱高度 2 200 mm, BAF 柱高度

2 500 mm, 直径 200 mm, 有机玻璃材质. 塔内填料为多孔性、高比表面积 of 陶粒, 粒径为 3 ~ 4 mm, 滤料高 1 500 mm.

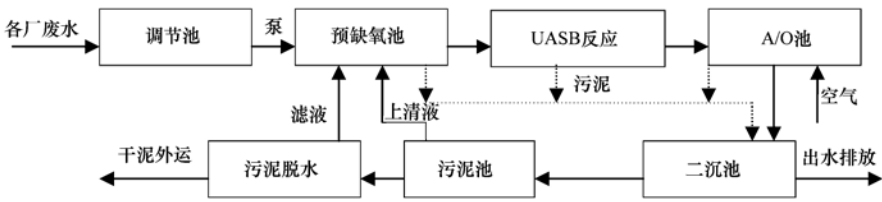


图 1 宜兴某树脂化工集中区废水厂废水处理工艺流程

Fig. 1 Resin and chemical wastewater treatment process in a wastewater treatment plant in Yixing

表 1 二沉池出水常规水质指标

Table 1 Characterization of the wastewater

pH	$\rho(\text{COD})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{BOD}_5)$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ /mg·L ⁻¹	$\rho(\text{TP})$ /mg·L ⁻¹	浊度/NTU
6.8 ~ 7.5	200 ~ 350	—	10 ~ 25	3 ~ 5	2 ~ 4

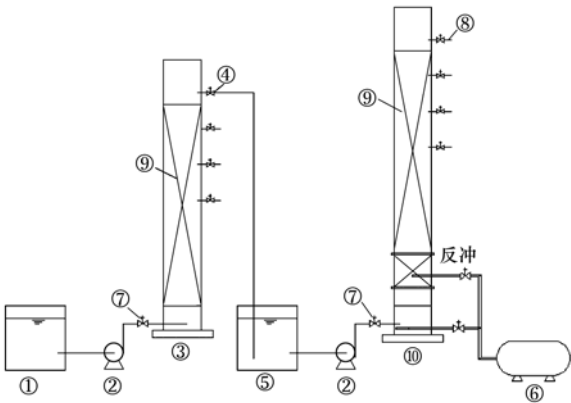


图 2 厌氧滤池 + 曝气生物滤池工艺流程示意

Fig. 2 Process flow chart of anaerobic filter and biological aerated filter

采用该废水处理厂厌氧池和二沉池的污泥进行接种, 引入二沉池废水, 启动初期用清水稀释 2 倍, 并投加营养物质葡萄糖, 厌氧滤池停留时间分别控制在 24 h 和 12 h, 曝气生物滤池停留时间控制在 12 h. 每天监测出水水质, 并逐步降低稀释倍数, 减少葡萄糖投加量. 待出水水质趋于稳定, 对滤料表面生物膜进行镜检, 发现有大量菌胶团附着, 且生物膜上出现原生动物, 此时认定生物膜培养完成.

考察不同停留时间下, AF + BAF 对有机物的去除; 提高进水 COD 浓度, 观察 AF + BAF 工艺的抗冲击负荷能力; 观察 AF + BAF 系统处理效率随温度的变化趋势; 对废水处理厂 USAB 池以及小试装置的厌氧滤池和曝气生物滤池污泥进行菌落分析.

1.3 分析方法

COD、BOD₅、NH₄⁺-N 和色度等指标的测定均采用标准方法^[13]; pH 采用酸度计 (pHB-2, 上海雷磁仪器厂) 测定; 浊度采用便携式浊度仪 (2100P, HACH) 测定.

三维荧光激发-发射光谱 (3DEEMs) 的测定在 Hitachi F-4500 型荧光分光光度计上完成. 使用 150W 氙弧灯作激发光源, 带通 (band pass): E_x = 5 nm, E_m = 5 nm. 扫描速度 2 400 nm·min⁻¹.

采用气质联用仪 (GC-MS) 分析废水中的有机物, 首先对废水中有机物进行萃取, 参照美国环境保护署 (EPA) 对工业废水的取样和分析步骤^[14~17]. 分析仪器为 Agilent-5975 气相-质谱联用仪, GC 柱选用 DB-5 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 气化温度: 280℃, 检测器选用氢火焰检测器 (FID), 进样量 1 μL, 分流比 100:1.

采用分子生物学技术聚合链式反应-变性梯度凝胶电泳 (polymerase chain reaction-denaturing gradient gel electrophoresis, PCR-DGGE) 的方法分析 UASB 厌氧池、厌氧滤池和曝气生物滤池 3 个样品的菌落变化^[18,19]. 分析仪器为 Fastprep 24 核酸提取仪 (MP)、DCode 变性梯度凝胶电泳 (Bio-Rad)、Gel Doc XR + 凝胶成像系统 (Bio-Rad)、PCRS1000 96 孔 (Bio-Rad).

2 结果与分析

2.1 处理效果分析

2.1.1 AF + BAF 启动和运行

启动时,将二沉池出水稀释一半后再进入反应器,连续运行,驯化过程中额外添加葡萄糖. 运行过程中逐渐降低稀释水量,减少葡萄糖投加量. 经过约 20 d 的运行,厌氧滤池和曝气生物滤池初步挂膜成功,25 d 后进水全为二沉池出水,停止投加葡萄糖. 经过 35 d 的运行,系统出水趋于稳定,反应器启动成功,结果如图 3 所示.

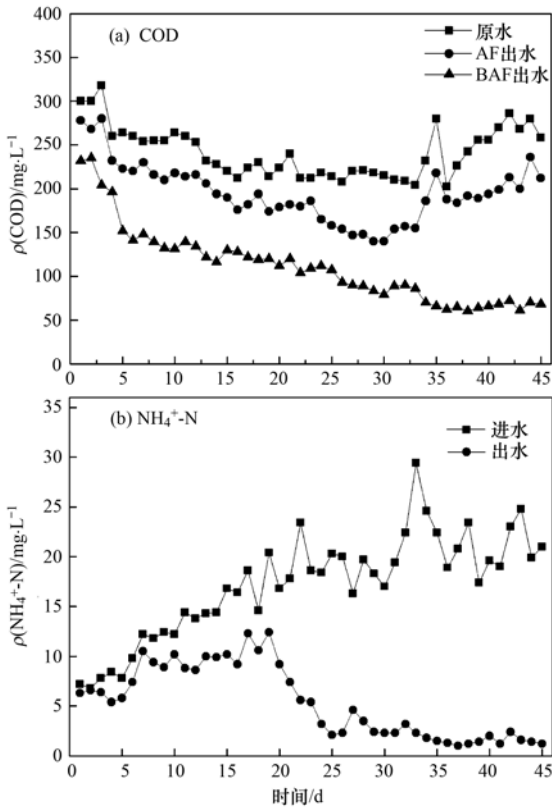


图 3 AF + BAF 启动期间对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

Fig. 3 Variation of COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the start-up period of the AF and BAF

由图 3(a)可以看出,滤池启动阶段,COD 去除率增加也较为明显,此时降解的 COD 大多数为葡萄

糖. 运行约 35 d 后出水 COD 趋于稳定,当进水 COD 在 $240\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右时,出水可控制在 $60\sim65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在进水 COD 在 $200\sim300\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间波动时,厌氧滤池的出水相应发生一定程度的波动,但最终曝气生物滤池的出水稳定在 $60\sim70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,表明系统具有较强的耐冲击负荷能力,有机物在厌氧阶段得到转化,废水可生化性大幅提升. 由图 3(b)可以看出, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率随运行时间的延长逐渐增加,运行至 25 d 时, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率升至 84% 以上. 在实验期间,系统对氨氮的去除效率稳定保持在 84% 以上,最高可达 92.8%,出水氨氮维持在 $1.0\sim2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间.

2.1.2 停留时间对去除效果的影响

厌氧滤池和曝气生物滤池水力停留时间对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率见表 2 所示. 在系统稳定运行过程中,改变厌氧滤池的停留时间对系统最终出水 COD 影响较大. 保持 BAF 水力停留时间为 12 h 的前提下,AF 停留时间从 24 h 下降至 12 h 时,系统对 COD 的去除效率从 73.4% 下降至 56.5%. 由此可见,延长厌氧停留时间可以有效提高废水的可生化性,提高系统的处理效率.

保持 AF 水力停留时间为 24 h 不变,BAF 停留时间从 12 h 逐渐下降至 3.2 h 时,系统对 COD 的去除效率呈下降趋势,但去除效率下降缓慢,在水力停留时间下降至 3.2 h,去除效率也能保持在 54.9%. 表明 BAF 反应器通过载体能将大量好氧微生物固定,使活性污泥在反应器内有足够的停留时间,反应器内持有较高浓度的活性污泥,微生物和废水能充分接触,从而有效提高了反应器处理废水和抵抗负荷冲击的能力. 改变系统的停留时间对氨氮的去除效率影响不大,当 BAF 停留时间下降至 3.2 h,氨氮去除效率仍能达到 84.9%.

表 2 不同 HRT 下 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

Table 2 COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency at different hydraulic retention times

停留时间/h		COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$			$\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
AF	BAF	进水	出水	去除率/%	进水	出水	去除率/%
12	12	248	108	56.5	17.4	1.6	90.8
24	12	236	63	73.4	19.4	1.2	93.8
24	6	238	86	63.9	18.4	1.6	91.3
24	4.8	238	98	58.8	18.4	2.2	88.0
24	3.2	226	102	54.9	18.6	2.8	84.9

2.1.3 温度对去除效果的影响

对于废水的生物处理过程,温度是一个非常重要的影响因素,它直接影响微生物的活性. 如图 4 所示,当温度维持在 25°C 以上时,系统对 COD 的去

除效率可保持在 74% 以上. 随着温度的降低,COD 的去除效率虽有所下降,但下降幅度不大,当温度下降至 5°C 时,COD 的去除效率为 65.4%. 由此可见,AF + BAF 工艺对温度的变化具有较强的适应能力,

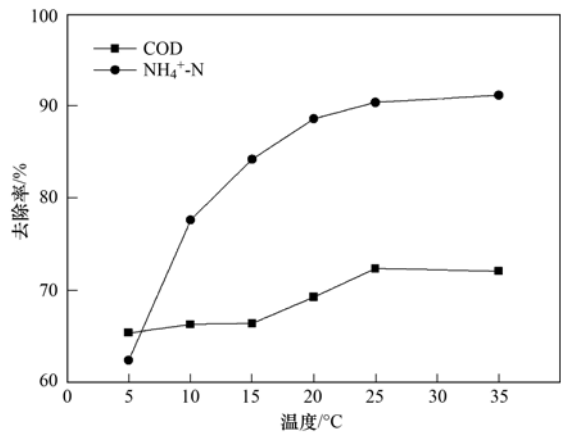


图 4 温度对 COD 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响

Fig. 4 Effect of temperature on the COD and $\text{NH}_4^+\text{-N}$

即使在冬季条件下运行,系统对 COD 的去除仍可保持较高的效率. 温度变化对氨氮的影响较为明显,当温度从 35℃ 下降至 5℃ 时,氨氮的去除效率从 91.2% 下降至 62.4%,这与硝化细菌在低温下活性下降有关.

2.2 进出水有机污染物 GC-MS 分析

AF + BAF 进出水所含有有机物在 GC-MS 测试中的总离子流谱图如图 5 所示,系统进出水检测出有机物的数据库分析结果见表 3.

由表 3 可知: GC-MS 检测出双酚 A、苯酚等,其

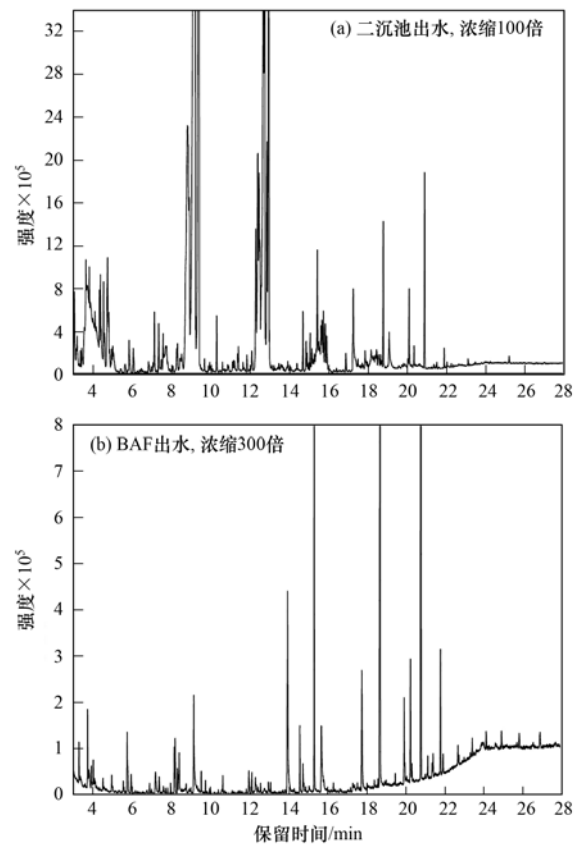


图 5 各处理工段出水中有机物的总离子流图

Fig. 5 GC-MS total ion chromatograms of wastewater from each treatment section

表 3 系统进出水中的有机物¹⁾

Table 3 Organic substances of wastewater from each treatment sections		
种类	二沉池出水	BAF 出水
苯及酚类	②⑦⑧⑩⑪⑬	②⑧⑩
酸、酯、醇、醚类	③④⑤⑪⑫⑬⑭⑮⑯⑰⑱⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟	⑪⑫⑬⑭⑮
酮类	⑥	
胺类	⑩⑪⑫⑬	⑫
杂环类	①⑥⑨⑲⑳㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗㉘㉙㉚㉛㉜㉝㉞㉟	㉑㉒㉓㉔㉕㉖㉗
烷烃类	⑮~㉑㉒㉓等大量长链支链烷烃	⑮~㉑㉒㉓等大量长链支链烷烃
其他类	⑨⑲⑳㉑	㉑㉒
抗氧化剂		㉑

1) ①甘油缩甲醛; ②双酚 A; ③1-(2-甲氧基-1-甲基乙氧基)异丙醇; ④4-甲氧基-丁酸甲酯; ⑤1,1'-氧代双[2-丙醇]; ⑥4-甲基-5,6-二氢-2H-吡喃-2-酮; ⑦甲苯; ⑧二甲苯; ⑨DL-盐酸麻黄碱; ⑩N,N,N,N-四乙基乙二胺; ⑪N,N-二甲基十八胺; ⑫N-2-羟乙基硬脂酸酰胺; ⑬对苯二胺; ⑭1,1'-[(1-甲基-1,2-乙亚基)二(氧)]二-(2-丙醇); ⑮~㉑十九烷~二十五烷烃; ㉒三十烷; ㉓三十二烷; ㉔五亚乙基乙二醇二甲醚; ㉕二环己胺; ㉖1,1'-[(1-甲基-1,2-乙亚基)二(氧)]二-(2-丙醇); ㉗6-甲基-2,4-二乙基-1,3,5-三噁烷; ㉘磷酸三(B-氯丙基)酯; ㉙邻苯二甲酸二异丁酯; ㉚2,4-二氨基-6-苯基-1,3,5-三嗪; ㉛2,4,6-三[双(甲氧基甲基)氨基]-1,3,5-三嗪; ㉜三聚甲醛; ㉝乙酸,2-丙烯基酯; ㉞四氧杂螺; ㉟四氯乙烷; ㊱2-乙基-1,4-二甲苯; ㊲2-氨基-5-巯基-1,3,4-噻二唑; ㊳月桂酸; ㊴甲癸醚; ㊵2,6-二叔丁基对甲酚; ㊶邻苯二甲酸二甲酯磷酸三丙酯; ㊷新戊基乙二醇; ㊸邻甲基苯甲酸; ㊹2-四氢呋喃-环丁烷甲酸酯; ㊺单丁酯; ㊻磷酸三丙酯; ㊼丙烯酸羟乙酯; ㊽季戊四醇; ㊾二丁基羟基甲苯

均为环氧树脂生产过程中所用的原辅料; 检测出的甲苯、二甲苯、四氯乙烷,均为有机溶剂,而且相对含量较大; 检测出大量饱和烷烃,主要来源于氯化石蜡和二聚酸生产过程中; 检测出月桂酸、甲癸醚

等物质,为微生物代谢产物.

由图 5 可以看出,废水经过厌氧滤池和曝气生物滤池后,可检测出的典型有机物相比原水中少了一些,与水质的常规分析也相呼应,说明 AF

+BAF 工艺对有机物的去除具有一定的效果. 出水中检测不出甲苯、烯烃等物质; 小分子醇类、酯类物质降解效果较为明显; 溶剂除四氯乙烷外, 二甲苯等均可有效降解; 胺类物质的降解表明厌氧滤池效率较高, 有机氮在厌氧段转化为氨氮; 酚类物质去除效果不如醇类. 同时检测出新的物质三聚甲醛等. 曝气生物滤池出水中未知峰数目增多, 质谱图显示相对分子质量在 150~300 之间, 可能在微生物的作用下, 有机物转变成小分子物质.

但是, 系统对大分子含氮杂环类物质的降解效果不佳, 出水中能够检测出, 其浓度无明显下降, 饱和烷烃也无法得到有效降解.

2.3 进出水有机污染物三维荧光分析

废水在处理过程中, 微生物会代谢合成多种有机物, 如色氨酸、辅酶、腐殖酸等^[20], 这些物质的种

类和数量与废水厂的运行状态有着密切联系. 这些物质在激发光的作用下, 会产生出特征的发射光, 在荧光光谱图上出现特征峰^[21,22].

取二沉池尾水和 AF+BAF 的生化出水, 稀释 5 倍后进行三维荧光扫描, 荧光峰类型与其他文献的对比结果见表 4. 从图 6 可见, 有机物降解效果明显. 原水中可溶性微生物代谢产物 (SMP) 主要有 3 类: 可见腐殖质类 A ($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$ 为 340 nm/420 nm)、类富里酸 B ($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$ 为 250 nm/380 nm)、UV 腐殖质类 C ($\lambda_{Ex}/\lambda_{Em}$ 为 220 nm/405 nm). 处理后其特征荧光基团荧光强度均有大幅下降, 其中物质 B 和物质 C 的特征荧光峰完全消失, 物质 A 的特征荧光峰虽然存在, 但其荧光强度由原来的 595.15 降低至 464.08. 可见 AF+BAF 工艺对原水中的类富里酸和 UV 腐殖质类可以完全去除, 并能降解部分可见腐殖质类物质.

表 4 水样荧光组分特征
Table 4 Fluorescence characteristics of the fluorophores in water

组分	类型	激发波长/发射波长	
		本研究	文献值
A	可见类腐殖质	340 nm/420 nm	320~366 nm/420~460 nm ^[23] ; 320~366 nm/420~480 nm ^[24]
B	类富里酸	250 nm/380 nm	260/380~460 nm ^[25]
C	UV 腐殖质	220 nm/405 nm	240/405 nm ^[26]

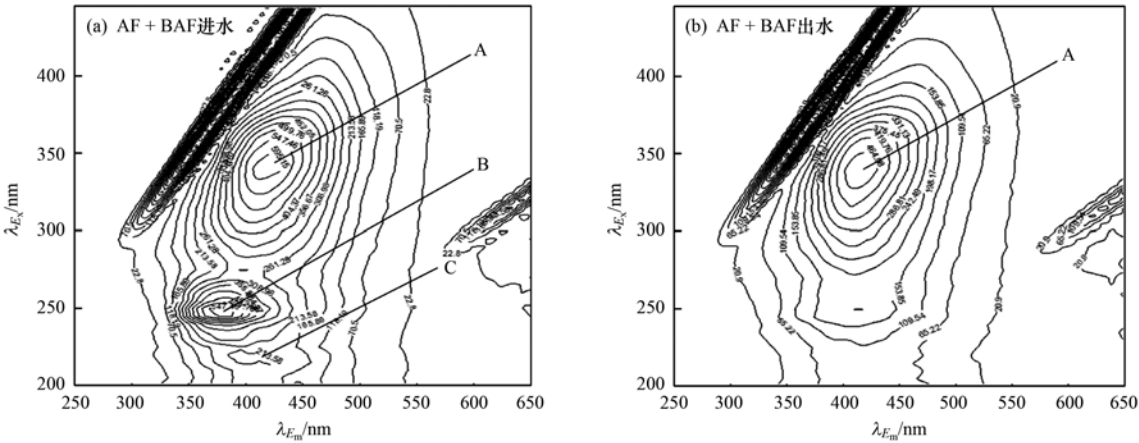


图 6 生化处理前后水样的三维荧光光谱
Fig. 6 Three-dimensional fluorescence spectra of water sample before and after the biological treatment

2.4 各处理单元污泥的菌落变化分析

由图 7 可以看出, 厌氧滤池污泥样品比原废水厂 UASB 池污泥样品条带多, 其微生物多样性复杂. 进水水质的差异能影响厌氧污泥中微生物的种群结构. 通过 DGGE 图谱可以半定量分析图谱中不同细菌种群的相对含量^[27]. 厌氧滤池中菌群的相对种类有明显增加 (条带 2、7、8、9), 有一些菌群 (条带 1、3、4、5、6) 的量无明显变化. 曝气生物滤池中主

要为好氧微生物, 与厌氧滤池的菌种存在本质差别.

二级厌氧可以有效稳定进水水质的变化, 特别是水质变化引起的 COD 波动现象, 通过二级厌氧的调节进一步调控微生物菌种的组成, 使一些菌种成为优势菌, 通过细菌及其代谢产物的协同作用能有效控制 COD, 保障水质的稳定性. 当进水 COD 在 200~300 mg·L⁻¹ 之间波动时, 曝气生物滤池的最终出水 COD 稳定在 60 mg·L⁻¹ 左右. 因此, 作为二级

废水处理厂,特别是化工园区废水厂,好氧段前端设置厌氧处理工艺,既可以去除废水中的有机污染物,又可以控制住进水水质,提高废水可生化性,增加系统抗冲击负荷能力。

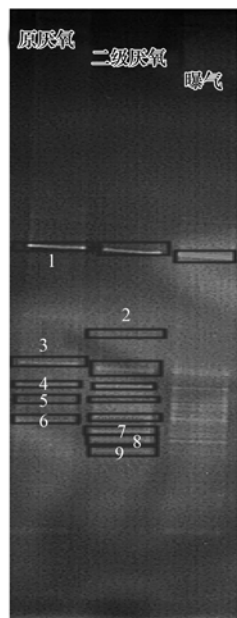


图7 UASB池、厌氧滤池和曝气生物滤池污泥DGGE图谱

Fig. 7 DGGE profiles of sludge samples at UASB, AF and BAF

3 结论

(1)采用厌氧滤池+曝气生物滤池组合工艺对工业园区废水厂二沉池出水有较好的处理效果,厌氧滤池的水力停留时间是影响处理效果的关键因素,温度的变化对COD的去除效率影响不大,在最优条件下COD去除率可达73.4%。 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率受水力停留时间影响较小,但温度对其影响较大,随着温度的变化, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率从91.2%下降至62.4%。

(2)化工园区废水处理出水的GC-MS测试中检测出大量有机物,经AF+BAF处理后出水可检测出的典型有机物种类大幅减少。废水中的大分子饱和烷烃和含氮杂环类物质去除效率不佳。

(3)采用三维荧光技术对AF+BAF系统进出水进行分析,二沉池出水中含有腐殖质类、类富里酸和UV腐殖质类微生物代谢产物,经AF+BAF系统处理后,微生物代谢产物可被吸收降解,其中类富里酸和UV腐殖质类降解效果明显。

(4)通过对废水厂UASB池和小试研究中的厌氧滤池污泥菌落变化分析得出,厌氧滤池中的微生物多样性更为复杂,进水水质直接影响厌氧污泥中微生物的种群结构。针对化工园区一级生化出水,再次采

用厌氧工艺仍具有明显的效果,二级厌氧可以有效稳定进水水质的变化,特别是水质变化引起的COD波动现象,使生化系统的处理效率得到保障。

参考文献:

- [1] 张有仓,王申,胡吉仁. 镇江市新区第二污水处理厂入网企业废水毒性试验[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(5): 100-104.
- [2] Peng J F, Song Y H, Yuan P, *et al.* An novel identification method of the environmental risk sources for surface water pollution accidents in chemical industrial parks [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(7): 1441-1449.
- [3] Reungoat J, Escher B I, Macova M, *et al.* Biofiltration of wastewater treatment plant effluent; Effective removal of pharmaceuticals and personal care products and reduction of toxicity [J]. Water Research, 2011, 45(9): 2751-2762.
- [4] 侯立安. 小型污水处理与回用技术及装置[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 18-30.
- [5] 王琳,王宝贞. 分散式污水处理与回用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003. 22-32.
- [6] Park T J, Lee K H, Kim D S, *et al.* Petrochemical wastewater treatment with aerated submerged fixed-film reactor (ASFFR) under high organic loading rate [J]. Water Science and Technology, 1996, 34(10): 9-16.
- [7] Adachi S, Fuchū Y. Reclamation and reuse of wastewater by biological aerated filter process [J]. Water Science and Technology, 1991, 24(9): 195-204.
- [8] 潘孝宇,宋乾武,李秀金. 化学混凝与曝气生物滤池组合工艺用于再生水处理中试研究[J]. 环境科学研究, 2005, 18(6): 64-67.
- [9] Feng Y, Yu Y Z, Wan X, *et al.* Performance of water quenched slag particles (WQSP) for municipal wastewater treatment in a biological aerated filter [J]. Biomass and Bioenergy, 2012, 45(2): 280-287.
- [10] Cui J Q, Wang X J, Chen Z W, *et al.* Combined processes of two-stage Fenton-biological anaerobic filter-biological aerated filter for advanced treatment of landfill leachate [J]. Waste Management, 2012, 32(12): 2401-2405.
- [11] Li Q, Sun S F, Guo T F, *et al.* Short-cut nitrification in biological aerated filters with modified zeolite and nitrifying sludge [J]. Bioresource Technology, 2013, 136(4): 148-154.
- [12] Shi K, Zhou W Z, Zhao H X, *et al.* Performance of halophilic marine bacteria inocula on nutrient removal from hypersaline wastewater in an intermittently aerated biological filter [J]. Bioresource Technology, 2012, 113(5): 280-287.
- [13] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 49-70.
- [14] 刘军,鲍林发,汪苹. 运用GC-MS联用技术对垃圾渗滤液中有有机污染物成分的分析[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(8): 31-33.
- [15] Linda D. GC/MS分析20种纺织品和消费品中禁止使用胺类致癌物和印染处理废水的环境检测中出现的胺类致癌物

- [J]. 环境化学, 2004, **24**(5): 622-625.
- [16] Schroder H F. Polar organic pollutants from textile industries in the wastewater treatment process-biochemical and physicochemical elimination and degradation monitoring by LC-MS, FIA-MS and MS-MS [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 1996, **15**(8): 349-362.
- [17] Castillo M, Barceló D. Characterisation of organic pollutants in textile wastewaters and landfill leachate by using toxicity-based fractionation methods followed by liquid and gas chromatography coupled to mass spectrometric detection [J]. Analytica Chimica Acta, 2001, **12**(2): 253-264.
- [18] Pozos N, Scow K, Wuertz S, *et al.* UV disinfection in a model distribution system; biofilm growth and microbial community[J]. Water Research, 2004, **38**(13): 3083-3091.
- [19] Wang Y, Zhang X J, Feng S, *et al.* Study on inactivation of iron bacteria isolated from real drinking water distribution systems by free chlorine and chloramine [J]. Annals of Microbiology, 2009, **59**(2): 353-358.
- [20] 李卫华, 盛国平, 王志刚, 等. 废水生物处理反应器出水的三维荧光光谱解析[J]. 中国科学技术大学学报, 2008, **38**(6): 601-608.
- [21] Pons M N, Bont S L, Potier O. Spectral analysis and fingerprinting for biomedica characterization [J]. Journal of Biotechnology, 2004, **113**(1-3): 211-230.
- [22] 王丽君, 刘玉忠, 张列宇, 等. 地下土壤渗滤系统中溶解性有机物组成及变化规律研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, **33**(8): 2123-2127.
- [23] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 2003, **82**(3-4): 239-254.
- [24] 黄昌春, 李云梅, 王桥, 等. 基于三维荧光和平行因子分析法的太湖水体 CDOM 组分光学特征[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(3): 375-382.
- [25] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 1996, **51**(4): 325-346.
- [26] 王烨, 蒋进元, 周岳溪, 等. Fenton 法深度处理腈纶废水的特性[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(8): 911-915.
- [27] Husband P S, Boxall J B. Asset deterioration and discolouration in water distribution systems [J]. Water Research, 2011, **45**(1): 113-124.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiye Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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