

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

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

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娟,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	王菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨珺,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈慕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

O 池溶解氧水平对石化废水 A/O 工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响

丁鹏元¹, 初里冰¹, 张楠², 王星³, 王建龙^{1*}

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 2. 中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 北京 100083; 3. 湖南大学环境科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 以实际石化废水为处理对象, 研究溶解氧浓度对 A/O 反应器生物降解特性的影响。A、B 两组反应器平行运行以进行对比, O 段的溶解氧浓度分别控制在 $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。反应器稳定运行近半年的结果表明: 在 HRT 为 20 h 时, A 组反应器出水的 COD ($72.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 14.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 略高于 B 组 ($68.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 14.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), COD 平均去除率分别为 67.0% 和 68.8%; 出水氨氮的平均浓度和去除率为 $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 95% 左右。出水的 BOD₅ 均低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。表明 A/O 反应器对有机物的生物降解比较彻底, 溶解氧浓度对其没有显著影响。对 O 段污泥进行 454 高通量测序结果表明: 变形菌门、浮霉菌门和拟杆菌门细菌所占比例较高, 在 A、B 组反应器中的比例分别为 58.7% 和 59.2%、14.7% 和 12.7% 以及 10.8% 和 12.4%。高溶解氧运行的反应器 B 具有较高的菌群丰度和多样性, 氨氧化菌 *Nitrosomonas*、亚硝酸氧化菌 *Nitrospira* 和专性好氧菌如 *Planctomyces* 的比例较高。厌氧反硝化菌如 *Azospira* 和 *Acidovorax* 在反应器 A 中的含量较高。在属的水平, 鉴定出的 *Novosphingobium*、*Comamonas*、*Sphingobium* 和 *Altererythrobacter* 属细菌具有降解多环芳烃、氯代硝基苯、农药和石油化合物的功能, 有利于石化废水的降解。

关键词: 溶解氧; 石化废水; A/O 反应器; 454 高通量测序; 微生物群落

中图分类号: X172; X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0604-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.031

Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidic Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater

DING Peng-yuan¹, CHU Li-bing¹, ZHANG Nan², WANG Xing³, WANG Jian-long^{1*}

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Effects of dissolved oxygen (DO) on the biodegradation of organic pollutants were investigated using A/O reactors for the treatment of actual petrochemical wastewater. Two A/O reactors, DO were controlled at $2 \sim 3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ in the oxidic parts of reactor A and $5 \sim 6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of reactor B, were operated in parallel for comparison. The nearly a half of year operation results showed that the effluent COD in reactor A ($72.5 \pm 14.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) was slightly higher than that in reactor B ($68.7 \pm 14.6 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) at a HRT of 20 h. The average COD removal efficiencies were 67.0% and 68.8%, respectively. The effluent ammonium concentration was maintained at $0.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ and approximately 95% of ammonium removal was achieved. The effluent BOD₅ concentration was lower than $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. This indicated that the organic pollutants could be degraded thoroughly by the A/O processes, which were affected slightly by DO. Results of 454 pyrosequencing analysis of the sludge in oxidic parts showed that at the phylum levels, sequences belonged to Proteobacteria, Planctomycetes and Bacteroidetes were abundant with 58.7% and 59.2%, 14.7% and 12.7%, 10.8% and 12.4% of total bacterial sequences in reactor A and B, respectively. Ammonium oxidation bacteria *Nitrosomonas*, nitrite oxidizing bacteria *Nitrospira* and obligate aerobic bacteria were highly enriched in reactor B with high DO levels, while the anaerobic denitrifiers *Azospira* and *Acidovorax* were highly enriched in reactor A with low DO levels. The identified bacteria belonged to genera *Novosphingobium*, *Comamonas*, *Sphingobium* and *Altererythrobacter* were reported to degrade PAHs, chloronitrobenzene, pesticides and petroleum, which contributed to the degradation of petrochemical wastewater.

Key words: dissolved oxygen; petrochemical wastewater; A/O reactor; 454 high-throughput pyrosequencing; microbial community

收稿日期: 2014-06-30; 修订日期: 2014-09-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07201-005-06-01)

作者简介: 丁鹏元(1985~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水污染控制, E-mail: ricky1115@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wangjl@tsinghua.edu.cn

石化废水是石化工业在生产各种石油产品和有机化工材料过程中产生的废水。石化废水污染物种类多、成分复杂、水质水量波动大。废水中含有石油类、苯和苯的衍生物等多种毒性有机物,属于难降解的工业废水^[1]。单一的处理工艺很难达到要求,常采用物化法预处理,厌氧/好氧生化法二级处理,有些石化企业为达到更高的排放标准或实现回用还设有深度处理工艺^[2,3]。其主体工艺为以活性污泥法、缺氧/好氧(A/O)、生物流化床等为代表的二级生化处理工艺^[4]。

A/O 工艺具有较高的有机物降解和脱氮能力,并且基建和运行费用低,近年来在国内外发展迅速。溶解氧是 O 段需要控制的重要指标。曝气费用一般占污水运行费用的 60%~80%,溶解氧过高会造成能量的浪费,而且影响总氮的去除^[5]。较低的溶解氧会抑制好氧菌的活性,影响有机物的降解和硝化作用^[6]。吴昌永等^[7]研究采用 A²/O 工艺处理生活污水,当 O 段溶解氧(DO)浓度从 4.0 mg·L⁻¹降到 1.0 mg·L⁻¹时,COD 的去除率一直保持在较高的水平,但系统硝化效果降低。Guo 等^[8]研究表明较低的 DO 水平(1.5~2.4 mg·L⁻¹)有利于 A/O 生物膜反应器的快速启动,而且抗冲击负荷能力强。

目前关于 DO 影响的研究大多针对生活污水,对处理实际石化废水的研究十分有限;并且缺乏 DO 对反应器微生物群落结构和代谢机制的影响研究。传统的分子生物学方法操作繁琐复杂,得到的信息量有限。Rocher 454 测序^[9]是一种基于焦磷酸测序原理的高通量基因组测序技术,具有测序速度快、读长长、通量高、准确度高和一致性好等优点。它不仅可以获得样品中的微生物群落组成,并将其含量进行数字化,而且可进行种群多样性和丰度分析^[10]。

本文以实际石化废水为处理对象,研究 DO 浓度对 A/O 反应器降解有机物和脱氮除磷效果的影响;

并解析不同 DO 浓度下微生物的群落特征,以期 A/O 工艺运行调控提供技术基础。

1 材料与方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。废水经蠕动泵进入 A/O 反应器,出水经沉淀池沉降后从顶部溢流堰排出,沉淀池底部的污泥经蠕动泵回流至缺氧 A 段。反应器由有机玻璃制成,分为平行运行的 A、B 两组。每组由一个 A 段和两个好氧段 O1、O2 组成,总体积为 45 L, A 段、O1 段和 O2 段的比例为 1:2:2,沉淀池体积为 28 L。反应器在 A 段设有机械搅拌, O 段采用底部砂棒曝气。A 组反应器 O 段的 DO 控制在 2~3 mg·L⁻¹, B 组反应器控制在 5~6 mg·L⁻¹,反应器温度为 23~26℃。

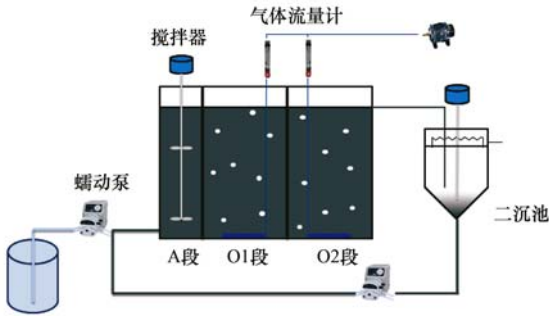


图 1 实验装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

1.2 实验用水和启动、运行方案

实验装置建在我国北方某石化综合污水处理厂内。该污水厂的进水由工业废水和生活污水两部分构成,比例约为 3:1。工业废水来源于该公司下属的炼油厂、化肥厂、电石厂、树脂厂等所有化工厂处理后的出水。实验用水取自该污水厂的水解酸化池出水,水质指标如表 1 所示。进水 COD 波动较大,总氮(TN)主要以氨氮为主,总磷(TP)含量比较低。

表 1 实验废水水质¹⁾

Table 1 Characteristics of the influent

COD	TOC	BOD ₅	氨氮	硝氮	总氮	总磷	UV ₂₅₄
237.3±67.6	54.8±5.6	76.6±23.5	20.0±3.9	0.68±0.6	28.6±5.0	1.7±0.6	1.5±0.2

1)除 UV₂₅₄ 外单位为 mg·L⁻¹

接种污泥取自该污水厂的曝气池。反应器自 2013 年 4 月 24 日启动,闷曝 48 h 后开始连续进水。水力停留时间(HRT)为 30 h,回流比为 100%。经过两周左右的驯化,出水水质稳定,COD 去除率达

到 70% 以上,反应器启动成功。反应器稳定运行分两个阶段:自 2013 年 5 月 20 日至 2013 年 9 月 4 日,HRT 为 30 h;自 2013 年 9 月 5 日至 2013 年 11 月 6 日,HRT 为 20 h。污泥龄(SRT)为 50 d。

定期(每隔 2~3 d)取样测定反应器进水、出水的 COD 和氨氮浓度. 不定期检测进、出水 BOD₅、TN、TP 浓度和反应器各段 COD 和氮化合物的浓度分布. 所有水样均采用 0.45 μm 滤膜过滤后再进行分析. 反应器运行稳定后,取两组 O 段污泥样品进行微生物种群结构解析. 对反应器进、出水进行溶解性微生物产物(SMP)、蛋白质、多糖和腐殖酸含量以及 3D-EEM 荧光光谱检测分析其水质特性的变化规律.

1.3 分析方法

BOD₅、COD、氨氮、硝氮、亚硝氮和总磷测定均参照国标方法测定^[11]. 总有机碳(TOC)和 TN 使用总有机碳分析仪(TOC-V_{CPH/CPN},岛津)测定. 多糖测定采用苯酚硫酸法,蛋白采用考马斯亮蓝法. 污泥浓度(MLSS)采用重量法测定. DO 和水温采用便携式溶解氧测定仪(YSI-550A). 采用 3D-EEM 荧光光度计(Hitachi F-7000)分析出水溶解性有机物质的组成^[12],激发波长(E_x)为 200~400 nm,发射波长(E_m)为 240~500 nm,狭缝宽度 5 nm,扫描速度 1 200 nm·min⁻¹,光电倍增管 PMT 电压 700 V.

微生物种群分析采用 454 高通量测序法,具体实验方法如下.

1.3.1 DNA 提取与纯化

生物膜样品的 DNA 采用 E. Z. N. A. 土壤 DNA 提取试剂盒(OMEGA 公司)进行提取,实验按照生产厂商提供的方法进行.

1.3.2 PCR 扩增

DNA 样品采用 16S rRNA 通用引物(27F 和 533R)对细菌的 V1~V3 区域进行扩增. 前向引物(5'-GCC TTG CCA GCC CGC TCA GAG AGT TTG ATC CTG GCT CAG-3')包含 454B 衔接子序列和细菌通用引物 27F 序列. 反向引物(5'-GCC TCC CTC GCG CCA TCA GNN NNN NNN NNT TAC CGC GGC TGC TGG CAC-3')包含 454A 衔接子序列,随机组合的 10 个碱基标记每一种 PCR 产物和细菌通用引物 533R 序列. PCR 反应于 20 μL 体系中进行,包含 0.4 μmol·L⁻¹正向和反向引物,1 μL 模板 DNA,200

nmol·L⁻¹ dNTP 和 1×FastPfu Buffer. 以不含 DNA 的 PCR 水来稀释. PCR 反应程序设定为:94℃预变性 2 min,95℃变性 30 s,55℃退火 30 s,72℃延伸 30 s,共 25 个循环,最终 72℃延伸 5 min. 扩增产物用 2% 琼脂糖凝胶电泳检测. 扩增产物以 AxyPrepTM 凝胶回收试剂盒回收(AXYGEN 公司).

1.3.3 扩增产物检测、焦磷酸测序

扩增产物 DNA 浓度用 Quant-iT PicoGreen dsDNA 试剂盒测定(Invitrogen 公司),DNA 样品以 30 μL TE 缓冲液稀释,在微细胞比色皿加入等量 2X PicoGreen 工作溶液,总反应体积 60 μL. 以 465~485 nm 为激发波长,515~575 nm 为发射波长,采用 Turner Biosystems TBS-380 荧光光度计测定其荧光强度. 浓度定量测定后,纯化后的 DNA,等摩尔比例加入到试管中. 焦磷酸测序采用 454 GS FLX Titanium 测序方法(罗氏),由上海美吉生物医药科技有限公司进行. 在 0.03 水平进行 OTU 聚类 and 物种分类分析. 以 MOTHUR 软件以及序列聚类软件 Usearch4.0.38 进行序列比较及分析. 所比对的数据库为 Silva106 版.

2 结果与讨论

2.1 DO 对 A/O 反应器去除有机物和氮磷的影响

A/O 反应器启动成功后稳定运行近半年的时间. A、B 两组反应器内的 A 段和 O 的污泥浓度(MLSS)分别保持在 3~4 g·L⁻¹和 5~6 g·L⁻¹,MLVSS/MLSS 的比值在 71%~75%,污泥活性均较高. 图 2 和图 3 分别为进、出水 COD 和氨氮浓度及其去除率随时间的变化. 两个 HRT 下,A、B 两组反应器出水的水质指标列于表 2. 可以看出,尽管进水的 COD 浓度波动较大,但 COD 的去除率保持稳定,A/O 反应器具有良好的抗冲击性. 出水的 BOD₅ 均低于 5 mg·L⁻¹,说明 A/O 反应器对有机物的生物降解比较彻底. HRT 为 20 h 时出水 COD 的去除效果优于 30 h. 在 HRT 为 20 h 时,A 组反应器出水的 COD(72.5 mg·L⁻¹±14.8 mg·L⁻¹)略高于 B 组反应器出水(68.7 mg·L⁻¹±14.6 mg·L⁻¹),COD 平均

表 2 A、B 反应器出水指标分析

Table 2 Analysis of the effluent from reactor A and B

反应器	HRT/h	COD /mg·L ⁻¹	BOD ₅ /mg·L ⁻¹	氨氮 /mg·L ⁻¹	硝氮 /mg·L ⁻¹	总氮 /mg·L ⁻¹	总磷 /mg·L ⁻¹	UV ₂₅₄
A	30	77.2±14.5	2.7±1.1	1.2±1.4	9.2±2.1	11.7±2.1	0.8±0.3	0.61±0.02
	20	72.5±14.8	4.9±0.3	0.8±0.3	14.4±3.0	22.0±1.0	1.2±0.2	0.67±0.07
B	30	78.9±17.0	3.4±2.4	1.0±0.6	10.1±2.3	12.5±2.9	1.0±0.3	0.63±0.02
	20	68.7±14.6	2.8±0.6	0.8±0.5	15.5±3.4	23.4±1.6	1.1±0.2	0.70±0.07

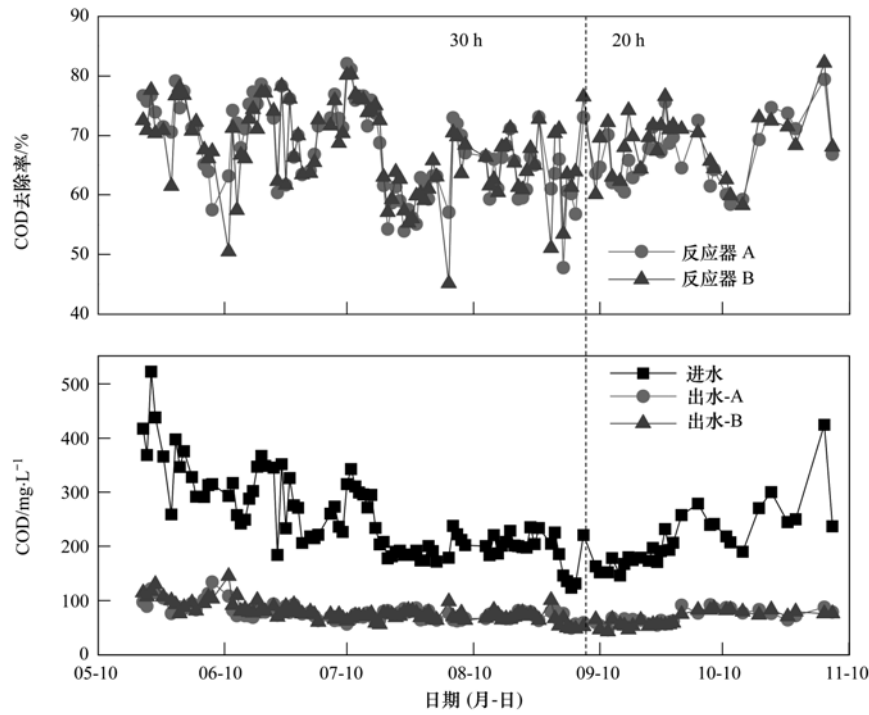


图 2 进、出水 COD 浓度及其去除率随时间变化

Fig. 2 Time course of COD concentrations in the influent and effluent and COD removal efficiency

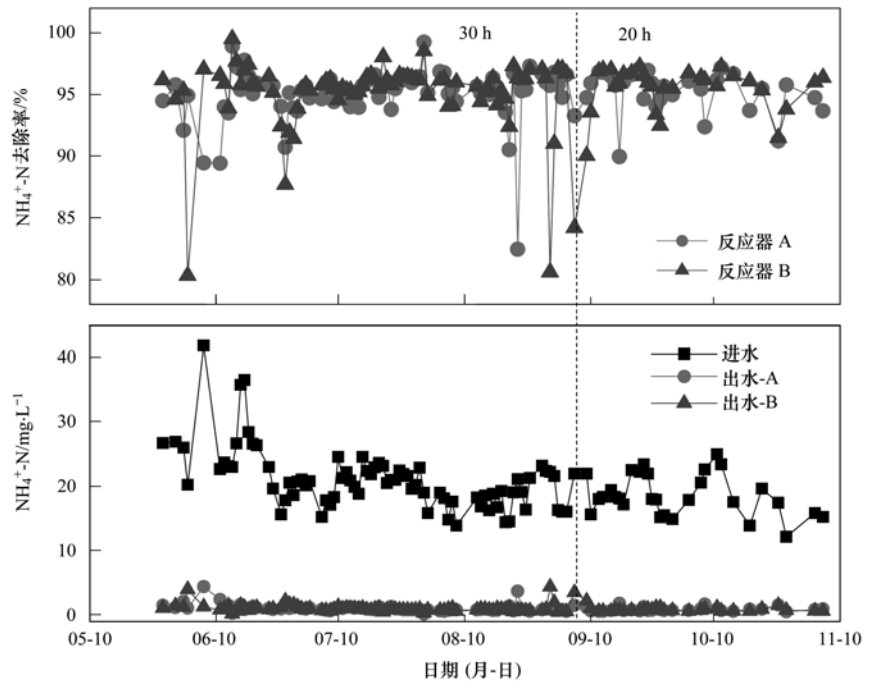


图 3 进、出水氨氮浓度及其去除率随时间变化

Fig. 3 Time course of NH₄⁺-N concentrations in the influent and effluent and NH₄-N removal efficiency

去除率分别为 67.0% 和 68.8%, TOC 的去除率分别为 64.4% 和 69.1%. 说明低 DO 浓度下运行对有机物的去除没有显著影响.

反应器运行初期, 低 DO 运行的 A 组反应器出水的氨氮浓度较高, 说明硝化菌的活性降低. 但经过 3 个月的运行后, 两组反应器出水的氨氮浓度已

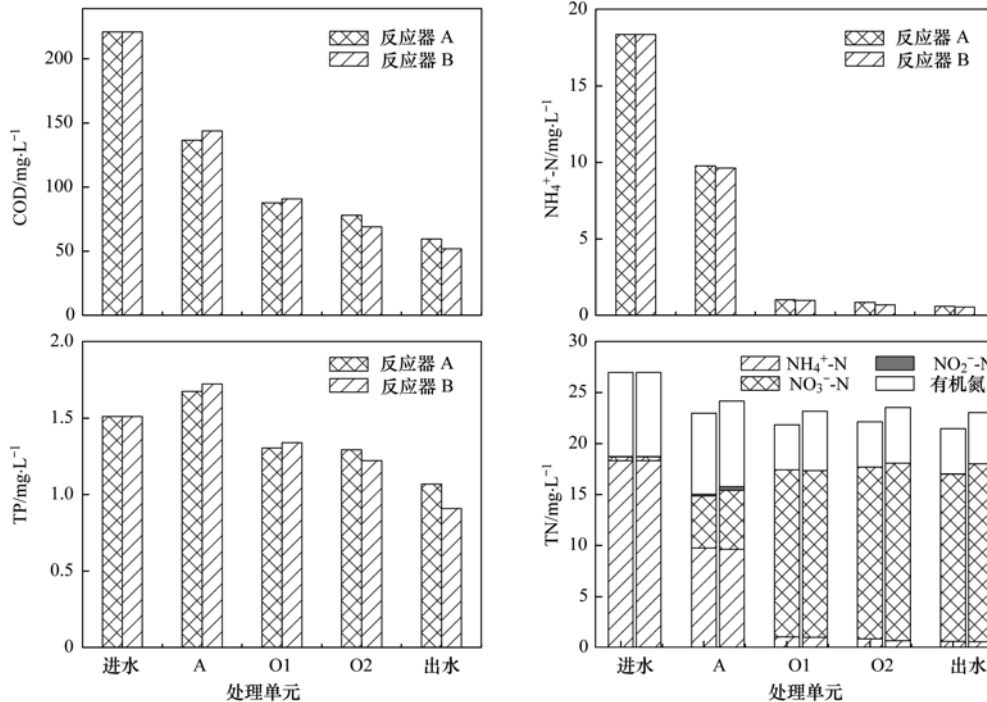
经没有显著差别,氨氮的去除率均在 90% 以上。

2.2 反应器各段有机物和氮磷去除效率分析

A、B 反应器各段 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 的浓度变化如图 4 所示。A、B 反应器的降解趋势基本一致。考虑到 100% 硝化液回流到 A 段,COD 和

氨氮在 A 段大约被稀释了一倍。COD 和氨氮的降解主要发生在 O 段。有机物在 O 段基本完成降解,二沉池污泥絮凝沉降过程中,也会吸附一部分有机物,使 COD 浓度进一步降低。

氨氮在 O 段发生硝化作用转化为硝态氮,硝态



对于 TN,左侧柱状图为反应器 A,右侧为反应器 B

图4 A、B 反应器沿程 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 浓度变化

Fig. 4 Changes in COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP concentrations at different parts of reactors

氮在 A 段发生反硝化作用转变为氮气,因此 TN 的去除主要发生在 A 段。O 段也有一定的去除作用,说明在 O 段也有一定数量的反硝化菌。A 组反应器 TN 的去除率(31%)略高于 B 组(26%),B 组反应器 O 段的高溶解氧回流会影响 A 段的反硝化效果,从而影响 TN 的去除。反应器出水的 TN 以硝态氮为主,亚硝态氮一直保持在非常低的水平(小于 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),表明硝化反应进行得较为完全。出水硝态氮的增加主要来自氨氮和有机氮的转化。

A/O 反应器对于总磷的去除通过厌氧释磷、好氧吸磷最终排泥而去除。B 组反应器 TP 的去除率略高于 A 组,分别为 39% 和 34%,说明聚磷菌的活性均较强。出水总磷浓度低于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级标准。

2.3 A/O 反应器进、出水溶解性有机物质组成分析

SMP 是由于基质代谢(通常与生长相关)和污泥衰减释放的一类有机化合物,对于生化处理污水的出水水质和处理效率有重要影响,其主要成分为

腐殖酸,多糖和蛋白质^[13]。进水中 SMP 所占 COD 的质量分数为 30% 左右,出水 SMP 对 COD 的贡献增至 70% ~ 75%。进水及 A、B 反应器出水 SMP 各组分的浓度变化如图 5 所示。多糖和蛋白质的降解主要依靠微生物自身的代谢,而腐殖酸几乎不能被

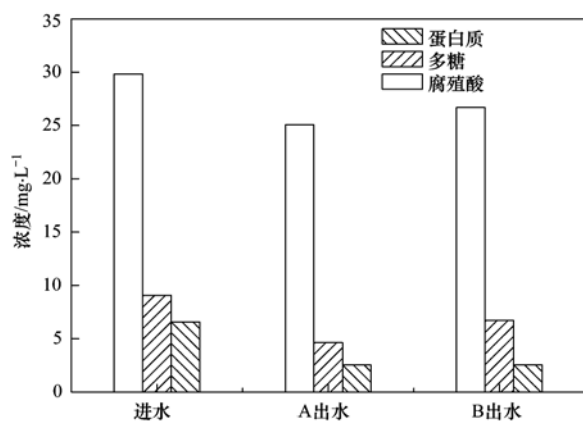


图5 进、出水 SMP 各组分的变化

Fig. 5 Changes in SMP composition in the influent and effluent

微生物利用,只能依靠排泥去除. 蛋白质最容易被微生物利用,其次是多糖,去除率分别为 61.3% 和 48.9%,腐殖酸的去除率只有 16.5%. A、B 反应器对蛋白质和腐殖酸的去除效率基本相同,低 DO 运行的 A 反应器对多糖的降解效率比 B 反应器高 20% 左右.

对反应器进出水进行 3D-EEM 扫描,结果表明进水中主要有 3 个峰,分别对应为酪氨酸类物质、色氨酸类物质和 SMP 类物质^[14]. 经过 A/O 反应器处理后,色氨酸类物质的峰基本消失,水中主要为酪氨酸和 SMP 物质,峰的强度较进水均显著减小,表明这些物质已被生物降解. A 反应器出水峰的强度

略高于 B 反应器出水.

2.4 不同 DO 条件下反应器 O 段污泥微生物种群结构解析

表 3 为 A、B 反应器 O 段污泥样品的 454 测序结果. 其中丰富度指数 Ace 和 Chao1 是估计群落中含有 OUT 数目的指数,生态学中常用来估计物种总数. 多样性指数 Shannon 和 Simpson 用来估计群落中 OUT 多样性高低的群落多样性指数. Shannon 值越大,Simpson 越小,说明群落多样性越高. 从表 3 数据可以看出,高 DO 运行的反应器 B 具有较高的菌群丰度和多样性,表明较高的 DO 浓度有利于好氧菌的生长和繁殖.

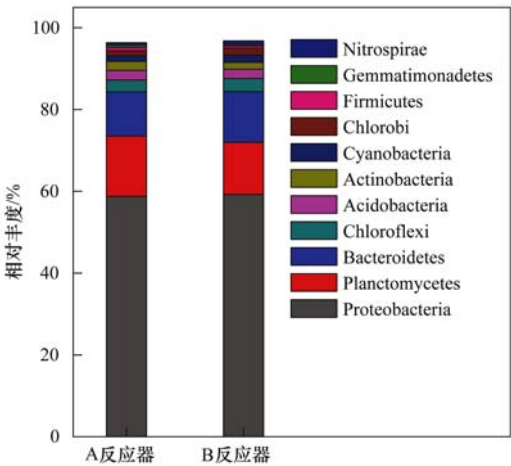
表 3 细菌种群多样性指数特征¹⁾

Table 3 Characteristics of bacterial community diversity based on diversity indices						
反应器	Reads	OTUs	Ace	Chao1	Shannon	Simpson
A	17 423	2 331	4 964	4 192	6. 31	0. 007
B	15 200	2 408	5 637	4 392	6. 50	0. 005

1)97% OTUs 相似水平

在门的水平,两个反应器 O 段污泥细菌种群分布如图 6 所示. 主要优势菌群依次为变形菌门 (Proteobacteria)、浮霉菌门 (Planctomycetes)、拟杆菌门 (Bacteroidetes)、绿弯菌门 (Chloroflexi)、酸杆菌门 (Acidobacteria)、放线菌门 (Actinobacterium)、蓝藻门 (Cyanobacteria)、绿菌门 (Chlorobi)、厚壁菌门 (Firmicutes)、芽单胞菌门 (Gemmatimonadetes) 和硝化螺旋菌门 (Nitrospirae). 变形菌门、浮霉菌门和拟杆菌门菌群所占比重较大,在 A、B 反应器中的比例分别为 58.7% 和 59.2%、14.7% 和 12.7% 以及 10.8% 和 12.4%,总和加起来接近 85%. A、B 两个反应器比较,低 DO 运行的 A 反应器浮霉菌门、厚壁菌门和芽单胞菌门细菌比例高于 B 反应器;高 DO 运行的 B 反应器中拟杆菌门、放线菌门、绿菌门和硝化螺旋菌门细菌所占的比例高于 A 反应器. 污泥中的优势菌群变形菌门是细菌中最大的一门,包括很多好氧、厌氧或兼性细菌,具有多种代谢种类,也有一些无机化能种类(如可以氧化氨氮的亚硝化单胞菌属 *Nitrosomonas*),能够在降解有机物的同时完成脱氮除磷功能. 浮霉菌门是一小门水生细菌,在海水和淡水中都可被发现. 拟杆菌门菌群常在除磷系统中被报道,可降解蛋白质、糖类等物质^[15, 16].

在属的水平鉴定出的主要优势菌及其丰度如表 4 所示. 可以看出,较高的 DO 有利于硝化作用,反



仅列出大于 0.5% 的数据

图 6 在门的水平上,A、B 反应器污泥细菌菌群的相对丰度

Fig. 6 Bacterial community and relative abundance of reactors A and B at phylum levels

应器中 B 中氨氧化菌 *Nitrosomonas* 和亚硝酸氧化菌 *Nitrospira* 的比例较高. 一些专性好氧菌如 *Planctomyces* 的丰度高. 一些厌氧反硝化菌如 *Azospira* 和 *Acidovorax*^[17] 以及聚糖菌 *Defluviicoccus* 在 A 反应器中的含量较高. 值得一提的是,有报道指出,鉴定出的 *Novosphingobium* 属、*Comamonas* 属、*Sphingobium* 属和 *Altererythrobacter* 属细菌具有降解多种多环芳烃、氯代硝基苯、农药和石油化合物的功能^[18~20],有利于石化废水的降解.

表 4 在属的水平鉴定出的主要优势菌及其丰度

Table 4 Relative abundance of the dominant bacteria at genus levels

细菌	丰度/%	
	反应器 A	反应器 B
<i>Flexibacter</i> (不动杆菌属,拟杆菌门)	4.9	5.1
<i>Azospira</i> (固氮弓菌属,变形菌门)	3.3	1.0
<i>Gemmata</i> (出芽菌属,浮霉菌门)	3.2	4.0
<i>Altererythrobacter</i> (变形菌门)	2.5	2.3
<i>Sulfuritalea</i> (浮霉菌门)	2.3	1.8
<i>Deftuicoccus</i> (固氮螺菌属,变形菌门)	1.7	0.9
<i>Comamonas</i> (丛毛单胞菌属,变形菌门)	1.6	1.9
<i>Sphingobium</i> (鞘氨醇杆菌属,变形菌门)	1.5	1.1
<i>Acidovorax</i> (食酸菌属,厚壁菌门)	1.2	0.9
<i>Novosphingobium</i> (新鞘氨醇杆菌属,变形菌门)	1.1	1.7
<i>Planctomyces</i> (浮霉菌属,浮霉菌门)	0.8	1.0
<i>Nitrosomonas</i> (亚硝化单胞菌属,变形菌门)	0.30	0.61
<i>Nitrospira</i> (硝化螺旋菌属,硝化螺旋门)	0.52	0.83

3 结论

(1)尽管石化废水的进水 COD 浓度波动较大,但 A/O 反应器出水 COD 的去除率保持稳定. 在 HRT 为 20 h 时, A 组反应器出水的 COD ($72.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 14.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 略高于 B 组出水 ($68.7 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1} \pm 14.6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), COD 平均去除率分别为 67.0% 和 68.8%; 出水氨氮的平均浓度和去除率均为 $0.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 95%. 这表明 DO 在 $2 \sim 6 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内, DO 浓度对有机物和氨氮的降解没有显著影响. 系统保持在低 DO ($2 \sim 3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 运行可以大大减少曝气费用.

(2) A、B 反应器 TN 和 TP 的去除率分别为 30% 和 26%, 34% 和 39%. 进水主要为酪氨酸类、色氨酸类和 SMP 类物质, A/O 反应器出水主要为酪氨酸和 SMP 类物质, 峰的强度较进水均显著减小.

(3) 对 O 段污泥进行 454 高通量测序结果表明: 优势菌群为变形菌门、浮霉菌门和拟杆菌门菌群. 高 DO 运行的反应器 B 具有较高的菌群丰度和多样性, 氨氧化菌 *Nitrosomonas* 和亚硝酸氧化菌 *Nitrospira* 的比例较高. 一些厌氧反硝化菌如 *Azospira* 和 *Acidovorax* 在 A 反应器中的丰度较高. 两个反应器均检测出具有降解多种多环芳烃、氯代硝基苯、农药和石油化合物功能的 *Novosphingobium* 属、*Comamonas* 属、*Sphingobium* 属和 *Altererythrobacter* 属细菌.

参考文献:

[1] Liu S, Ma Q, Wang B, *et al.* Advanced treatment of refractory organic pollutants in petrochemical industrial wastewater by bioactive enhanced ponds and wetland system [J].

Ecotoxicology, 2014, **23**(4): 689-698.

[2] Diya'uddeen B H, Daud W M A W, Aziz A R A. Treatment technologies for petroleum refinery effluents: A review [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, **89**(2): 95-105.

[3] 蒋侃, 马放, 孙铁珩, 等. 电气石强化生物接触氧化法处理石化废水[J]. 环境科学, 2009, **30**(6): 1669-1673.

[4] Estrada-Arriaga E B, Ramirez-Camperos E, Moeller-Chavez G E, *et al.* Anaerobic/aerobic treatment of a petrochemical wastewater from two aromatic transformation processes by fluidized bed reactors [J]. Water Science and Technology, 2012, **66**(12): 2754-2763.

[5] Tan T W, Ng H Y. Influence of mixed liquor recycle ratio and dissolved oxygen on performance of Pre-denitrification submerged membrane bioreactors[J]. Water Research, 2008, **42**(4-5): 1122-1132.

[6] 郭建华, 王淑莹, 彭永臻, 等. 低溶解氧污泥微膨胀节能方法在 A/O 中的试验验证[J]. 环境科学, 2008, **29**(12): 3348-3352.

[7] 吴昌永, 彭永臻, 王然登, 等. 溶解氧浓度对 A²/O 工艺运行的影响[J]. 中国给水排水, 2012, **28**(3): 5-9.

[8] Guo J B, Ma F, Chang C-C, *et al.* Start-up of a two-stage bioaugmented anoxic-oxic (A/O) biofilm process treating petrochemical wastewater under different DO concentrations[J]. Bioresource Technology, 2009, **100**(14): 3483-3488.

[9] Kwon S, Kim T-S, Yu G H, *et al.* Bacterial community composition and diversity of a Full-Scale integrated Fixed-Film activated sludge system as investigated by pyrosequencing[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2010, **20**(12): 1717-1723.

[10] Guss A M, Roeselers G, Newton I L G, *et al.* Phylogenetic and metabolic diversity of bacteria associated with cystic fibrosis[J]. ISME Journal, 2011, **5**(1): 20-29.

[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] Chu L B, Wang J L. Comparison of polyurethane foam and

- biodegradable polymer as carriers in moving bed biofilm reactor for treating wastewater with a low C/N ratio[J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(1): 63-68.
- [13] Jarusutthirak C, Amy G. Understanding soluble microbial products (SMP) as a component of effluent organic matter (EfOM) [J]. *Water Research*, 2007, **41**(12): 2787-2793.
- [14] Jamieson T, Sager E, Guéguen C. Characterization of biochar-derived dissolved organic matter using UV-visible absorption and excitation-emission fluorescence spectroscopies [J]. *Chemosphere*, 2014, **103**: 197-204.
- [15] Snaird J, Amann R, Huber I, *et al.* Phylogenetic analysis and in situ identification of bacteria in activated sludge[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(7): 2884-2896.
- [16] Sly L I, Taghavi M, Fegan M. Phylogenetic heterogeneity within the genus *Herpetosiphon*: Transfer of the marine species *Herpetosiphon cohaerens*, *Herpetosiphon nigricans* and *Herpetosiphon persicus* to the genus *Lewinella* gen., nov. in the *Flexibacter-Bacteroides-Cytophaga* phylum [J]. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 1998, **48**(3): 731-737.
- [17] Mergaert J, Boley A, Cnockaert M C, *et al.* Identity and potential functions of heterotrophic bacterial isolates from a continuous-upflow fixed-bed reactor for denitrification of drinking water with bacterial polyester as source of carbon and electron donor[J]. *Systematic and Applied Microbiology*, 2001, **24**(2): 303-310.
- [18] 崔志松, 邵宗泽. 一株海洋新鞘氨醇杆菌 *phe-8* (*Novosphingobium* sp.) 的 PAHs 降解基因和降解特性[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2006, **45**(S1): 257-261.
- [19] 孙纪全, 梁斌, 黄星, 等. *Sphingobium* 属细菌土壤中降解异丙隆的特性[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(2): 383-388.
- [20] 刘磊, 刘志培, 吴建峰, 等. 氯代硝基苯降解菌 *Comamonas* sp. strain CNB-1 对污染土壤生物修复作用的研究[J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(4): 615-621.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidative Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ni (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 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