

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区VOCs特征及O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的A ² O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N ₂ O产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)	

3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性

徐鹏程^{1,2}, 郝瑞霞^{1*}, 张娅¹, 王冬月¹, 钟丽燕¹, 徐浩丹¹

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100124; 2. 北京市首都规划设计工程咨询开发公司, 北京 100045)

摘要: 为了考察三维电极生物膜硫自养耦合工艺(3BER-S)对再生水进行深度脱氮同步去除邻苯二甲酸酯(PAEs)的可行性, 基于 3BER-S 反应器内已挂膜活性炭填料静态吸附 PAEs 能力测定和动态反硝化脱氮同步除 PAEs 运行结果, 分析了 3BER-S 反应器同步脱氮去除 PAEs 的工艺特性和作用机制。结果表明, 挂膜活性炭填料对邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯(DEHP)的平均吸附去除率分别为 85.84%、97.12%, 平衡吸附容量为 $0.1426 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $0.162 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, 达到吸附饱和的时间分别为 120 min、60 min; PAEs 对 3BER-S 反硝化系统脱氮效果影响不明显, 加入 PAEs 前后反应器出水 TN 的浓度在 $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, TN 的平均去除率达到了 94% 以上; 3BER-S 反硝化系统对 PAEs 有较强的去除能力, 出水中 DBP 和 DEHP 的浓度在 $0 \sim 6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内、去除率均在 96% 以上; 3BER-S 对 PAEs 的去除是吸附、生物降解和电化学协同作用结果。模拟污水厂二级出水经过 3BER-S 工艺处理后, DBP 和 DEHP 的浓度满足《城市污水再生利用地下水回灌水质标准》(GB/T 19772-2005)所规定的限值。

关键词: 再生水; 深度反硝化脱氮; PAEs; 吸附作用; 生物降解作用

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0662-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.02.035

Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water

XU Peng-cheng^{1,2}, HAO Rui-xia^{1*}, ZHANG Ya¹, WANG Dong-yue¹, ZHONG Li-yan¹, XU Hao-dan¹

(1. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Capital Planning and Design Engineering Consulting Corporation, Beijing 100045, China)

Abstract: In order to investigate the feasibility of deep denitrification and simultaneous removing phthalate esters (PAEs) in the process of reclaimed water treatment uses three-dimensional biofilm-electrode reactor coupled with sulfur autotrophic deep denitrification technology (3BER-S), the technological characteristics and mechanisms were analyzed based on determining the static adsorption capacity of biofilm cultured active carbon fillers in 3BER-S reactor together with the operation results of dynamic denitrification and simultaneous PAEs removing. The results showed that the average adsorption rates of DBP, DEHP were 85.84% and 97.12% in the biofilm cultured active carbon fillers, the equilibrium adsorption capacities were $0.1426 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and $0.162 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ and the time spans of reaching adsorption saturation were 120 min and 60 min, respectively; The existence of PAEs had no obvious effect on denitrification, the reactor effluent concentration of TN was in range of $1 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ before and after the addition of PAEs, and the average removal rate of TN reached above 94%; 3BER-S denitrification system showed significant ability in removing PAEs, leading to effluent concentrations of DBP and DEHP of no more than $6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ with removal rates of above 96%; this was due to the synergistic effect of absorption, biodegradation and electrochemistry. After treatment with 3BER-S technology, DBP and DEHP in simulative municipal secondary effluent met the regulated limitation of The Reuse of Urban Recycling Water Quality Standard for Groundwater Recharge (GB/T 19772-2005).

Key words: reclaimed water; deep denitrification; PAEs; absorption; biodegradation

水体中的邻苯二甲酸酯类(PAEs)作为环境激素类物质具有极大的危害性^[1,2]。目前污水处理厂尾水中 DBP 和 DEHP 的浓度在 $0 \sim 59.17 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围^[3-8], 虽然满足城镇污水厂的排放限值^[9] ($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 但与《城市污水再生利用地下水回灌水质标准》^[10] (DBP $3 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、DEHP $8 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 还有一定差距; 现行城镇污水厂排放标准中规定 TN 的 A

标准为 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 受脱氮技术的限制, 大部分污水处理厂尾水 TN 超标, 排入水体后可引起水体富营养化^[11,12]。

收稿日期: 2015-07-27; 修订日期: 2015-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378028)

作者简介: 徐鹏程(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理及资源化, E-mail: xupengcheng@emails.bjut.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: haoruixia@bjut.edu.cn

目前对城镇污水厂尾水的深度处理主要集中在对氮、磷的去除,对作为选择性控制项目 PAEs 的去除研究关注较少,用反硝化工艺处理再生水实现同步脱氮去除邻苯二甲酸酯的研究还未见报道. 孟成等^[13]研究了 3BER-S 工艺在再生水深度脱氮方面的技术优势,但并未涉及到对 PAEs 的去除^[14]; Liang 等^[15]探究了在静态条件下反硝化系统对邻苯二甲酸二甲酯(DMP)的去除,其侧重点仅仅是 DMP 在静态反硝化系统中的降解过程及其对反硝化系统微生物种群多样性的影响.

3BER-S 工艺是将三维电极生物膜工艺与硫自养反硝化技术相耦合,从结构上分析,其具有脱氮和去除 PAEs 的能力. 系统内异养反硝化、硫自养反硝化和电化学氮自养反硝化在空间和时间上发挥协同促进作用;该工艺结合了多种处理 PAEs 的方法,首先填料中活性炭的比例较大,其对 PAEs 具有很强的吸附能力;其次生物法表现在反应器内的反硝化微生物种群的降解作用^[16,17],由附着在填料和阴、阳极表面的生物膜来完成;再次由电流产生羟基自由基可将难生物降解的邻苯二甲酸酯氧化成容易生物降解的物质^[18],然后通过微生物的作用最终分解成 H_2O 和 CO_2 .

本文应用 3BER-S 工艺对再生水进行深度脱氮同步去除 PAEs 研究,对比在动态连续运行条件下 3BER-S 反应器的各项出水水质指标,考察 3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性,以期对再生水深度处理提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验方法

1.1.1 灭活挂膜活性炭填料静态吸附实验

3BER-S 反应器运行稳定后,从取样口取出一定量的已挂膜的活性炭填料,在高压灭菌锅($121^\circ C$ 、 0.15 MPa)中进行灭活处理(灭活时间 30 min),以排除生物降解作用对物理吸附作用的干扰,分两组进行实验(每组有 3 个平行实验,实验结果取平均值),分别研究挂膜活性炭填料对 DBP 和 DEHP 的物理吸附作用. 称取同等质量灭活活性炭填料,置于体积为 1.5 L 的容器中,加入 1 L 浓度为 $2.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 DBP、DEHP 水样后,置于 $30^\circ C$ 、 $145\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 恒温摇床中进行等温吸附实验,定时取水样进行分析直至吸附饱和.

1.1.2 反应器动态运行实验

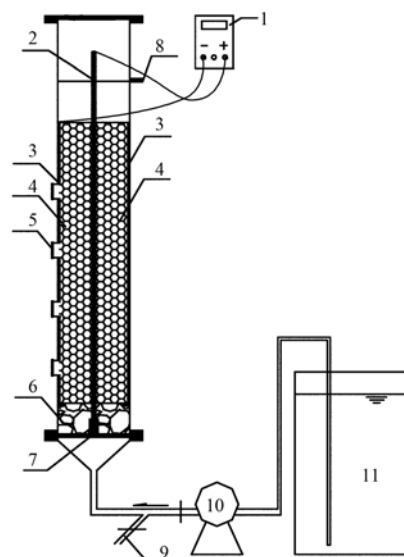
为了研究 3BER-S 反应器在动态条件下深度脱

氮同步去除邻苯二甲酸酯的可行性,分别研究了加入 PAEs 前后(即阶段一 T_1 、阶段二 T_2)对脱氮效果的影响;并考察了 3BER-S 对不同浓度 PAEs 的去除能力. 连续监测出水中 TN、PAEs、硫酸盐、pH 值和总有机碳(TOC)等指标.

1.2 实验材料

1.2.1 实验装置

连续升流式反硝化生物滤柱反应器结构如图 1. 反应器内径 25 cm ,高度 1.4 m ,有效容积 22 L . 以石墨棒作为阳极,置于反应器的正中央;以内夹聚丙烯腈活性炭纤维的双层泡沫镍作为阴极,沿反应器内壁布置. 在反应器外壁包裹一层厚度为 1.5 cm 的保温棉,以维持反应器内部温度恒定. 阴极和阳极之间装填体积比为 $8:1$ 的颗粒活性炭和硫磺颗粒的混合填料,其中活性炭颗粒的粒径为 $5\sim 8\text{ mm}$,硫磺颗粒的粒径为 $3\sim 5\text{ mm}$. 反应器承托层高度为 0.1 m ,填料高度为 0.96 m .



1. 直流电源; 2. 阳极(石墨棒); 3. 阴极(泡沫镍);
4. 填料(颗粒活性炭+硫磺颗粒); 5. 取样口;
6. 承托层(石英砂); 7. 布水板; 8. 出水口;
9. 反冲洗水管; 10. 蠕动泵; 11. 储水箱

图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic layout of 3BER-S

1.2.2 实验用水

动态实验中反应器的运行条件为 $I = 300\text{ mA}$, $HRT = 12\text{ h}$, $T\ 20\sim 25^\circ C$, $pH\ 7.0\sim 7.5$,采用 DBP、DEHP、 CH_3COONa 、 KNO_3 和 KH_2PO_4 进行人工配水,模拟城市污水厂二级出水水质,实验过程中进水 $NO_3^- - N$ 、TOC、TP 浓度保持不变,具体情况见表 1.

1.2.3 检测方法

检测方法如表 2 所示.

表 1 实验阶段及其进水条件

Table 1 Experimental stage and influent conditions						
阶段		$\text{NO}_3^- \text{-N}$	TOC	TOC: TN: TP	DBP	DEHP
阶段一	T_1	$35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$45 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$	12.9:10:1	$c_0(\text{DBP}) = 0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$c_0(\text{DEHP}) = 0 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
阶段二	T_{21}				$c_1(\text{DBP}) = 100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$c_1(\text{DEHP}) = 50 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
	T_{22}				$c_2(\text{DBP}) = 300 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$c_2(\text{DEHP}) = 100 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
	T_{23}				$c_3(\text{DBP}) = 600 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	$c_3(\text{DEHP}) = 200 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$

表 2 水质检测项目及方法

Table 2 Water quality testing items and methods		
检测项目	检测方法	检测仪器
DBP、DEHP	固相萃取-气相色谱-质谱法	固相萃取柱 (CNWBOND LC-C18 SPE 500 mg 3 mL) 气相色谱-质谱仪 (Agilent GC6890N-MSD5973)
$\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 SO_4^{2-}	离子色谱法	Metrohm 861 离子色谱仪
TOC、TN	燃烧氧化法-非分散红外吸收法	TOC/TN 分析仪 (Jena multi N/C 3100)
pH	玻璃电极法	上海三信 PHS-3C pH 计

气相色谱仪的检测条件为:载气流量 $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;进样口温度 280°C ;不分流进样,进样体积 $1 \text{ } \mu\text{L}$;升温程序为:起始温度 50°C 保持 0.75 min , $20^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 150°C ,然后以 $15^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 260°C 保持 3 min ,最后以 $5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 280°C . 质谱的条件为:离子源温度 230°C ;接口温度 280°C ;电子轰击能量为 70 eV ;溶剂延迟时间为 5 min . DBP 的特征离子为 149 、 205 、 225 ,DEHP 的特征离子是 149 、 167 、 279 ^[19].

采用固相萃取法对水样进行预处理:先依次用 6 mL 去离子水、 6 mL 甲醇对固相萃取柱 (CNWBOND LC-C18 SPE 500 mg 3 mL) 进行活化,然后用真空泵抽吸水样使其匀速通过小柱 (速度控制在 $4 \sim 5$

$\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$),抽干后先后用 3 mL 甲醇、 3 mL 二氯甲烷进行洗脱,最后对洗脱液进行氮吹处理,吹干后用甲醇定容至 1 mL . 通过以上步骤仪器检测的 DBP 和 DEHP 的平均加标回收率为 97.3% 和 90.5% .

2 结果与分析

2.1 灭活挂膜活性炭填料对 DBP 和 DEHP 的物理吸附作用

3BER-S 反应器填料中活性炭约占 90% . 有研究表明^[20~22],颗粒活性炭对邻苯二甲酸酯有极强的吸附作用,但活性炭颗粒表面附着生物膜后对邻苯二甲酸酯的吸附去除影响研究还未见相关报道. 本实验结果如图 2.

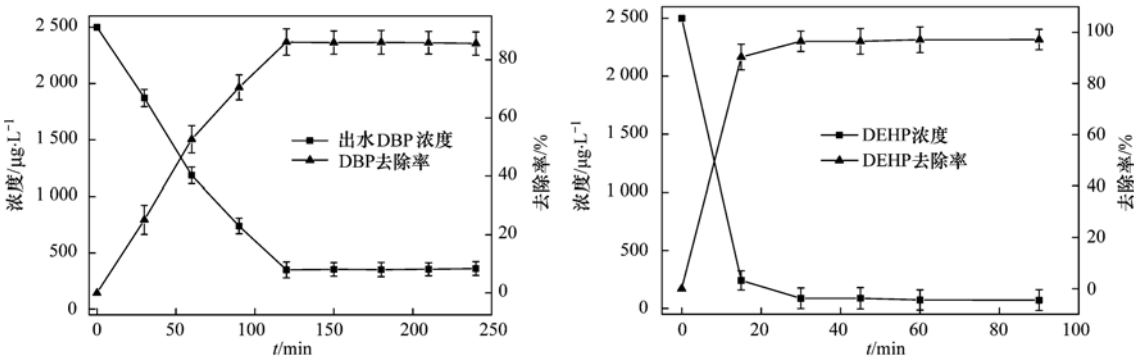


图 2 灭活挂膜活性炭对 DBP、DEHP 的物理吸附

Fig. 2 Physical adsorption of DEHP and DBP by inactivated biofilm activated carbon

由图 2 可知,两种 PAEs 在吸附开始阶段去除率上升较快,随着时间的推移,去除率增长变缓,最终达到吸附平衡状态. DBP 和 DEHP 吸附饱和时间分别为 120 min 和 60 min ,吸附去除率分别为 85.84% 和 97.12% ,灭活性炭填料对 DBP、DEHP

的吸附容量分别为 $0.143 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $0.162 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,小于曾文慧等^[23]研究的颗粒活性炭吸附容量 ($17.16 \sim 43.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$),这可能是由于生物膜的附着使得活性炭填料的比表面积和孔隙结构发生变化导致的.

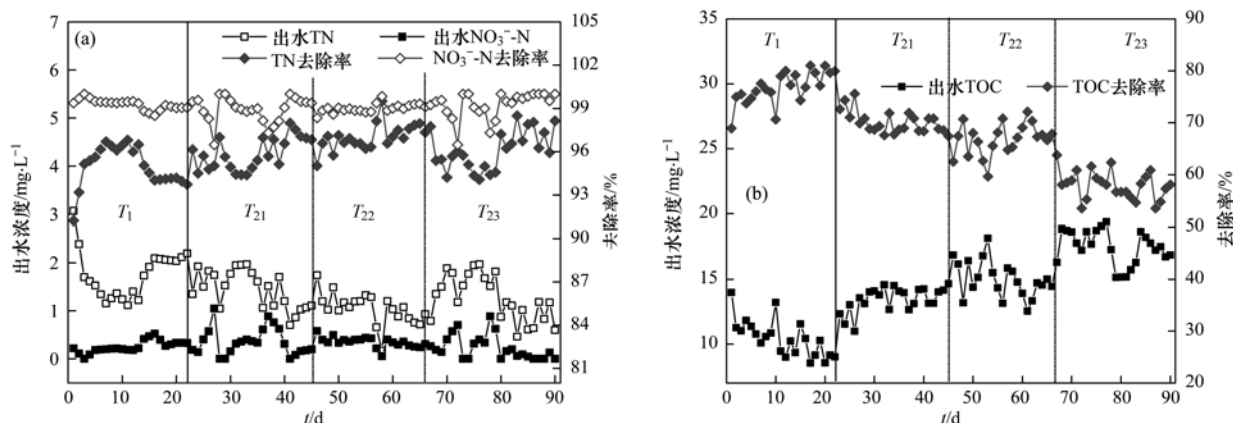
静态吸附实验结果表明:挂膜后的颗粒活性炭对 DBP 和 DEHP 有一定的吸附容量,达到吸附饱和所需的时间较短,由于工艺内活性炭体积占很大比重,在实际动态运行的前期吸附作用对 PAEs 的去除起到决定性作用,直至吸附达到饱

和状态为止。

2.2 3BER-S 深度脱氮同步去除 PAEs 的研究

2.2.1 PAEs 对 TN 和 NO_3^- -N 的去除影响

3BER-S 进水中加入 PAEs 前后 TN、 NO_3^- -N、TOC 去除率及出水浓度对比情况如图 3。



运行条件: NO_3^- -N = 35 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, C: N: P = 12.9: 10: 1, $I = 300 \text{ mA}$, HRT = 12 h, pH 7.0 ~ 7.5, $T 20 \sim 25^\circ\text{C}$

图 3 出水 TN、 NO_3^- -N、TOC 浓度及去除率

Fig. 3 Effluent concentrations and removal rates of TN, NO_3^- -N, and TOC

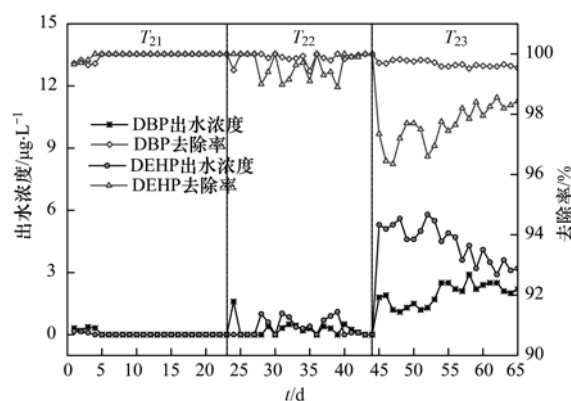
由图 3(a)可知,阶段一中 3BER-S 反应器出水 TN 在 2.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, TN 的去除率在 94% 以上, NO_3^- -N 去除率在 99.0% 以上; 阶段二中出水 TN 稳定在 1.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 附近, TN 去除率在 94.0% ~ 98.0% 之间, NO_3^- -N 去除率在 98.8% ~ 99.8% 之间. 两个阶段中 TN 的去除负荷分别为 66.2 $\text{g} \cdot (\text{m} \cdot \text{d})^{-1}$ 和 67.6 $\text{g} \cdot (\text{m} \cdot \text{d})^{-1}$, 加入 PAEs 对系统脱氮效果影响不明显。

TOC 的去除率在一定程度上可以反映反硝化系统内异养反硝化脱氮作用的大小. 从图 3(b) 看出, 加入 PAEs 后, TOC 平均去除率由 75.4% 下降至 70% 左右; 随着进水中 PAEs 浓度增加, TOC 平均去除率继续下降至 57.8%. 有研究表明^[24], PAEs 对异养反硝化细菌有一定的抑制作用, 导致其活性下降. 由于 3BER-S 系统集合了异养反硝化、硫自养反硝化和氢自养反硝化过程, 在微生物生态、电子供体补偿和酸碱平衡等方面存在协同促进作用. 系统内的硫自养反硝化作用和氢自养反硝化作用能够弥补 PAEs 对异养反硝化作用的抑制, 使系统始终保持较高的脱氮效率。

2.2.2 3BER-S 去除 DBP、DEHP 的能力

3BER-S 对 DBP 和 DEHP 去除能力如图 4。

由图 4 可知, 3BER-S 对 DBP、DEHP 均有较高的去除率; 增加进水 PAEs 浓度, 反应器出水 DBP 和 DEHP 浓度产生一定的波动, 但去除率仍然保持



运行条件: $c(\text{NO}_3^- \text{-N}) = 35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, C: N: P = 12.9: 10: 1, $I = 300 \text{ mA}$, HRT = 12 h, pH 7.0 ~ 7.5, $T 20 \sim 25^\circ\text{C}$

图 4 出水 DBP、DEHP 及其去除率

Fig. 4 Effluent concentrations and removal rates of DEHP and DBP

在 95% 以上. 运行期间, 出水 DBP 浓度在 0 ~ 4 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, DBP 的去除率在 99.5% ~ 100% 之间; 出水 DEHP 的浓度在 0 ~ 6 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, DEHP 的去除率 96% 左右。

上述数据表明, 3BER-S 工艺对 PAEs 具有较高的去除能力. 含有较高 DBP 和 DEHP 浓度的进水经过 3BER-S 反应器处理后, 出水 DBP 和 DEHP 的浓度完全符合相关再生水利用水质标准^[10, 25] (DBP 3 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 DEHP 8 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) 的要求。

如果仅考虑吸附作用, 根据活性炭填料的吸附容量 (DBP 0.143 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、DEHP 0.162 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)、

反应器内活性炭填料干重(8.44 kg)、以及反应器进水 PAEs 浓度,可以计算出反应器连续运行至 53 d 时活性炭填料已经达到吸附饱和状态. 由图 4 的数据可知,反应器连续运行 65d, DBP 和 DEHP 维持在较高去除率(99% 和 96%)以上,这说明 3BER-S 系统去除 PAEs 是多种方法协同作用的结果:有活性炭填料的吸附作用、微生物降解作用和电场氧化作用;其中,吸附作用进行得很快,PAEs 首先被吸附富集在活性炭填料表面,然后被填料表面的生物膜利用,或被电场中产生的羟基自由基氧化^[16~18];填料吸附饱和后,生物降解作用占主导作用,由于 DEHP 较 DBP 结构复杂,DEHP 的生物降解能力较

DBP 更弱,因此出水 DEHP 在 T_{23} 时出现明显波动.

综上所述,3BER-S 系统内结合了多种反硝化脱氮、去除 PAEs 的方法,由于这些方法在时间和空间上的协同作用,使得 3BER-S 反应器在深度脱氮的同时对 DBP 和 DEHP 能够保持较高的去除能力.

2.2.3 3BER-S 系统平衡 pH 值能力

pH 值是影响反硝化的速率和最终产物的一个重要环境因子. 适宜的 pH 值更有利于脱氮系统中的反硝化细菌的生长,有利于提高 TN 和 PAEs 的去除效率^[15,26]. 3BER-S 反应器进出水 pH 及 SO_4^{2-} 对比情况如图 5 所示.

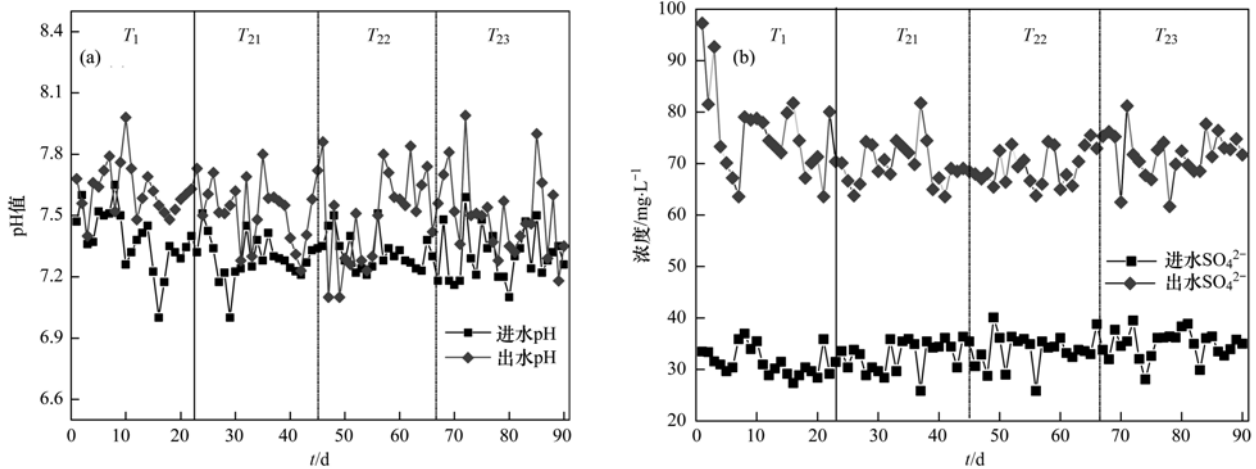


图 5 进出水 pH、 SO_4^{2-} 对比

Fig. 5 Comparison of pH and SO_4^{2-} between influent and effluent

由图 5(a)可知,在进水 pH 在 7.0~7.5 时,无论是否加入 PAEs,3BER-S 系统出水 pH 值稳定在 7.3~7.9 之间. 这是由于系统内硫自养反硝化过程产生的 H^+ 可以中和部分氢自养反硝化过程和异养反硝化过程产生的 OH^- .

单质硫被硫自养反硝化细菌利用时有 SO_4^{2-} 生成,因此,出水 SO_4^{2-} 的积累量在一定程度上可以反映 3BER-S 反应器的硫自养反硝化过程. 图 5(b)中两阶段进出水 SO_4^{2-} 比较稳定,每升出水中 SO_4^{2-} 平均积累量为 38.47 mg,说明进水中添加 PAEs 后对系统内硫自养反硝化作用影响较小,能够使系统 pH 维持在有利于微生物生长的范围内,这对系统高效同步脱氮去除 PAEs 起到关键作用.

3 结论

(1)3BER-S 系统对 DBP 和 DEHP 的去除率均在 95% 以上,出水 DBP 和 DEHP 浓度符合我国城市

污水再生利用地下水回灌水质标准所规定的限值(DBP $3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、DEHP $8 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).

(2)3BER-S 系统能够保持较高的脱氮效率,TN 平均去除率能达到了 94% 以上,出水 TN 的浓度在 $1\sim 2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间.

(3)3BER-S 系统内结合了多种反硝化脱氮、去除 PAEs 的方法,进水中加入不同浓度的 PAEs 后,对系统脱氮效果影响不明显,出水 TN 和 PAEs 均符合再生水回用的要求,3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 具有可行性.

参考文献:

- [1] van Wezel A P, van Vlaardingen P, Posthumus R, *et al.* Environmental risk limits for two phthalates, with special emphasis on endocrine disruptive properties[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2000, **46**(3): 305-321.
- [2] Fatoki O S, Noma A. Solid phase extraction method for selective determination of phthalate esters in the aquatic environment[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, **140**(1-4): 85-98.
- [3] 林兴桃. 北京地区水中邻苯二甲酸酯类环境激素的研究

- [D]. 北京: 北京工业大学, 2003.
- [4] 周益奇, 刘云霞. 北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋[J]. 环境科学, 2013, **34** (4): 1357-1362.
- [5] 林兴桃, 陈明, 王小逸, 等. 污水处理厂中邻苯二甲酸酯类环境激素分析[J]. 环境科学与技术, 2004, **27** (6): 79-81.
- [6] 李梅, 王翠彦, 于小迪, 等. 污水处理厂中邻苯二甲酸酯类物质分布及去除特性研究[J]. 安全与环境学报, 2014, **14** (5): 186-190.
- [7] 王翠彦. 污水处理过程中邻苯二甲酸酯类物质的分布及去除规律研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2013.
- [8] 李炳华, 李爱明, 郑凡东, 等. 污水再生利用过程中邻苯二甲酸酯的分布特征[J]. 北京水务, 2013, (4): 1-4.
- [9] DB 11/890-2012, 城镇污水处理厂水污染物排放标准[S].
- [10] GB/T 19772-2005, 城市污水再生利用 地下水回灌水质[S].
- [11] 郜超超. 城市污水处理厂脱氮除磷及其影响因素影响研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.
- [12] 冯萃敏, 李莹, 张雅君, 等. 以再生水为水源的封闭景观水体营养状态分析[J]. 天津大学学报, 2010, **43** (8): 727-732.
- [13] 孟成成, 郝瑞霞, 王建超, 等. 3BER-S 耦合脱氮系统运行特性研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34** (11): 2817-2823.
- [14] 郝瑞霞, 孟成成, 王建超, 等. 三维电极生物膜-硫自养耦合脱氮系统中反硝化细菌多样性研究[J]. 北京工业大学学报, 2014, **40** (11): 1722-1729, 1740.
- [15] Liang D W, Zhang T, Fang H H P. Denitrifying degradation of dimethyl phthalate[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, **74** (1): 221-229.
- [16] Wu D L, Zheng P, Mahmood Q, et al. Isolation and characteristics of *Arthrobacter* sp. strain CW-1 for biodegradation of PAEs[J]. Journal of Zhejiang University Science A, 2007, **8** (9): 1469-1474.
- [17] Wang J L, Liu P, Qian Y. Microbial metabolism of di-butyl phthalate (DBP) by a denitrifying bacterium [J]. Process Biochemistry, 1999, **34** (6-7): 745-749.
- [18] 韩卫清. 电化学氧化法处理生物难降解有机化工废水的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- [19] 郝瑞霞, 张庆康, 赵继成, 等. 固相萃取-气相色谱-质谱测定再生水中邻苯二甲酸酯类物质[J]. 环境污染与防治, 2012, **34** (5): 1-5, 23.
- [20] 丁堃. 活性炭吸附水中邻苯二甲酸二丁酯及介质阻挡放电再生活性炭的实验研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
- [21] Wang Z. Efficient adsorption of dibutyl phthalate from aqueous solution by activated carbon developed from phoenix leaves[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2015, **12** (6): 1923-1932.
- [22] Adhoum N, Monser L. Removal of phthalate on modified activated carbon: application to the treatment of industrial wastewater[J]. Separation and Purification Technology, 2004, **38** (3): 233-239.
- [23] 曾文慧, 高乃云, 陈明吉, 等. 颗粒活性炭性能指标和动态吸附容量的相关性研究[A]. 见: 中国土木工程学会水工业分会给水深度处理研究会 2005 年年会论文集[C]. 广州: 中国土木工程学会, 2005. 215-220.
- [24] 曹相生, 刘海建, 林福东. 邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯对反硝化的影响[J]. 中国给水排水, 2014, **30** (11): 39-42, 47.
- [25] GB/T 18921-2002, 城市污水再生利用景观环境用水水质标准[S].
- [26] Qambrani N A, Jung S H, Ok Y S, et al. Nitrate-contaminated groundwater remediation by combined autotrophic and heterotrophic denitrification for sulfate and pH control: batch tests [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20** (12): 9084-9091.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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