

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

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

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM _{2.5} 的影响	陈国磊, 周颖, 程水源, 杨孝文, 王晓琦 (4069)
浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数	姚轶, 王浙明, 何志桥, 徐志荣, 顾震宇 (4080)
山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献	闫雨龙, 彭林 (4086)
某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析	高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 高爽, 田新愿, 方方, 衣学文 (4094)
加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用	黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 秦建平, 胡玮, 刘明宇 (4103)
北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究	崔彤, 李金香, 杨妍研, 程刚 (4110)
西安市人为源大气氨排放清单及特征	苏航, 闫东杰, 黄学敏, 宋文斌, 王惠琴, 宋雪娟 (4117)
佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究	周雪明, 项萍, 段菁春, 贺克斌, 马永亮, 邓思欣, 司徒淑婷, 谭吉华 (4124)
天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析	赵梦雪, 吴琳, 方小珍, 杨志文, 李凤华, 毛洪钧 (4133)
戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点	袁磊, 李文周, 陈文伟, 张金波, 蔡祖聪 (4142)
青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究	孟祥斌, 李孟哲, 李鸿涛, 高冬梅, 祁建华 (4147)
玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成	刘刚, 孙丽娜, 徐慧, 李久海, 李中平, 李立武 (4156)
极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析	张成, 吕新彪, 龙丽, 张军伟, 穆晓辉, 李迎晨, 王圣瑞, 张文丽, 肖尚斌 (4162)
典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析	陈雪霜, 江韬, 卢松, 白薇扬, 张成, 王定勇, 魏世强 (4168)
西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析	陈诗文, 袁旭音, 金晶, 李正阳, 许海燕 (4179)
周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析	张春华, 黄廷林, 方开凯, 周石磊, 夏超 (4187)
太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征	董丹萍, 章婷曦, 张丁予, 王巧云, 李德芳, 王国祥 (4194)
多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响	蔡顺智, 李大鹏, 王忍, 刘焱见, 徐垚, 于胜楠, 黄勇 (4203)
丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化	王伟, 于兴修, 汉强, 刘航, 徐苗苗, 任瑞, 张家鹏 (4212)
营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响	岳冬梅, 李洁, 肖琳 (4220)
氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制	文刚, 朱红, 黄廷林, 赵建超, 任崑, 徐向前 (4228)
净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析	马晓琳, 陆洋, 王钰, 侯誉, 白晓慧 (4235)
单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化	敖秀玮, 李豪杰, 刘文君, 余京儒 (4241)
三维有序介孔 Co ₃ O ₄ 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B	冯善方, 邓思萍, 杜嘉雯, 马晓雁, 卢遇安, 高乃云, 邓靖 (4247)
调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染	赵凯, 杨春风, 孙境求, 李静, 胡承志 (4255)
初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N ₂ O 释放的影响	付昆明, 王会芳, 苏雪莹, 周厚田 (4261)
3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性	张娅, 郝瑞霞, 徐鹏程, 徐忠强 (4268)
基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制	范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 朱晚霞, 万京京 (4275)
基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究	程朝阳, 赵诗惠, 吕亮, 吴鹏, 沈耀良 (4282)
中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响	袁硯, 朱亮 (4289)
生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响	崔延瑞, 邱鑫, 张庆荣, 王琦, 吴青, 孙剑辉 (4296)
ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究	周健, 完颜德卿, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 姚鹏程, 杨朋兵, 薛鹏程 (4302)
间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究	董宝刚, 宋小燕, 刘锐, 川岸朋树, 张永明, 陈吕军 (4309)
应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥	何晶晶, 王颖, 胡洁, 吕凡, 邵立明 (4317)
应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋	薛南冬, 陈宣宇, 杨兵, 秦普丰, 龙雨 (4326)
南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征	苗迎, 孔祥胜 (4333)
杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平	金漫彤, 滕丹丹, 郑艳霞, 胡张璇, 沈学优, 金赞芳 (4341)
应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数	王佳怡, 毕二平 (4349)
表流湿地细菌群落结构特征	魏佳明, 崔丽娟, 李伟, 雷茵茹, 于菁菁, 秦鹏, 穆泳林, 梁钊瑞 (4357)
城市污水中硝化菌群落结构与性能分析	于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 张茹, 李文江, 彭党聪 (4366)
DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响	王聪, 吴讷, 侯海军, 汤亚芳, 沈健林, 秦红灵 (4372)
培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响	刘畅, 黄雅丹, 张莹, 靳振江, 梁月明, 宋昂, 王腾, 郭佳怡, 李强 (4380)
1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定	陶兰兰, 向玉萍, 王定勇, 黄曼琳, 申鸿 (4389)
北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征	张兰河, 王佳佳, 哈雪姣, 邱孟超, 高敏, 仇天雷, 王旭明 (4395)
梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征	黄福义, 安新丽, 陈青林, 任红云, 苏建强 (4402)
几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比	霍婷婷, 董发勤, 邓建军, 张青碧, 贺小春, 孙东平 (4410)
添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响	李文斌, 孟昭福, 吴琼, 许绍娥, 刘泽 (4419)
生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响	张振国, 蒋煜峰, 慕仲锋, 孙航, 周琦, 展惠英 (4428)
集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应	王昌江, 施成晓, 冯帆, 陈婷, 张磊, 吕晓康, 王伟, 廖允成 (4437)
秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响	黄容, 高明, 万毅林, 田冬, 陶睿, 王芳丽 (4446)
《环境科学》征稿简则 (4161) 《环境科学》征订启事 (4365) 信息 (4123, 4132, 4409)	

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性

张娅,郝瑞霞*,徐鹏程,徐忠强

(北京工业大学北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室,北京 100124)

摘要:为探究三维电极生物膜耦合硫铁新工艺(3DBER-S-Fe)脱氮除磷并同步去除邻苯二甲酸酯(PAEs)的工艺特性,在水力停留时间(HRT)分别为 8、6、4 h 条件下,研究分析了系统内总氮(TN)、总磷(TP)、邻苯二甲酸二丁酯(DBP)、邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯(DEHP)、 NO_3^- -N、 SO_4^{2-} 及 pH 的变化情况. 结果表明,3DBER-S-Fe 系统具有较好的脱氮除磷及 PAEs 去除效果. 当水力停留时间为 8、6、4 h 时, TN 去除率分别为 80.99%、78.85%、64.76%; TP 去除率分别为 65.18%、67.17%、43.44%; DBP 去除率分别为 96.72%、97.32%、96.53%; DEHP 去除率分别为 91.89%、81.57%、74.30%. 在 3DBER-S-Fe 系统内,存在异养、氢自养、硫自养反硝化脱氮过程,当 HRT 由 8h 缩短到 4h 时,单质硫可以弥补进水 NO_3^- -N 负荷增加所导致的反硝化电子供体相对不足问题,维持系统高效的脱氮效率;系统中海绵铁填料腐蚀产生的铁离子能够高效持续沉淀除磷;3DBER-S-Fe 工艺结合了物理吸附、生物降解及电化学反应,使其在不同 HRT 条件下具有较高的 DBP 与 DEHP 去除率.

关键词:再生水; 三维电极生物膜; 水力停留时间; 邻苯二甲酸酯; 脱氮除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4268-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201604073

Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor

ZHANG Ya,HAO Rui-xia*, XU Peng-cheng, XU Zhong-qiang

(Key Laboratory of Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to explore the technological characteristics of the simultaneous removal of phthalate esters (PAEs) as well as nitrogen and phosphorus by the novel technology of three-dimensional biofilm-electrode coupled with iron/sulfur reactor (3DBER-S-Fe), the changes of the total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), DBP, DEHP, NO_3^- -N, SO_4^{2-} and pH value were analyzed under the hydraulic retention time (HRT) of 8 h, 6 h and 4 h respectively. The results showed that 3DBER-S-Fe could remove nitrogen, phosphorus and PAEs effectively. Under the HRT of 8 h, 6 h and 4 h, the removal rates of TN were 80.99%, 78.85% and 64.76%; TP were 65.18%, 67.17% and 43.44%; DBP were 96.72%, 97.32% and 96.53%; DEHP were 91.89%, 81.57% and 74.30%, respectively. There were heterotrophic denitrification, hydrogen autotrophic denitrification and sulfur autotrophic denitrification processes in the 3DBER-S-Fe, the elemental sulfur could compensate for the relative shortage of denitrification electron donor caused by the increase of NO_3^- -N load in the influent as a result of maintaining a high efficiency of the denitrification system when the HRT was shortened from 8h to 4h; the iron ions produced by the corrosion of the sponge iron filler in the system had a sustainable and efficient function of removing phosphorus by precipitation; the 3DBER-S-Fe process combined the interactions of physical adsorption, biological degradation and electrochemical processes which supported its high removal rates of DBP and DEHP under the different HRT conditions.

Key words: reclaimed water; three-dimensional biofilm-electrode; hydraulic retention time; phthalate esters (PAEs); nitrogen and phosphorus removal

随着水资源危机的日益加重,城市再生水被普遍作为城市杂用水、景观用水、工业冷却水等^[1~3]. 由于受污水处理技术限制,传统工艺常常不能保证很好地脱氮除磷效果^[4],污水厂尾水中总氮和总磷含量往往不能稳定达到《城市污水再生利用 景观环境用水水质》标准的要求^[5,6],其中,景观水质标准中 DBP 不超过 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,地下水回灌水质标准中 DBP 不超过 $3 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, DEHP 不超过 $8 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[7].

同时,我国绝大多数城市污水处理厂没有对内分泌干扰类物质作出明确要求^[8],这就使得尾水中含有较高的邻苯二甲酸酯类物质(phthalates,PAEs)^[9].

有研究发现,污水厂二级出水中碳氮比普遍低

收稿日期: 2016-04-09;修订日期: 2016-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378028)

作者简介: 张娅(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为污水处理及资源化,E-mail: amy Zhang_1990@163.com

* 通讯联系人,E-mail: haoruixia@bjut.edu.cn

于生物反硝化所需的理论值 2.86^[10],碳源不足问题导致脱氮效果较差;常规生化处理工艺对污水中的磷只能去除 10%~20%^[11];另外,常规工艺对 PAEs 去除率普遍较低,郝瑞霞等^[12]对北京市 4 座再生水厂去除 PAEs 效果进行分析,DBP 的去除率为 3%~30%,DEHP 去除率为 9%~60%。因此,有必要寻求一种新的工艺以达到同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯类微污染物的目的。

三维电极生物膜耦合硫铁同步脱氮除磷工艺(three-dimensional biofilm-electrode and iron/sulfur autotrophic system,3DBER-S-Fe)在传统三维电极生物膜工艺(3DBER)加入呈一定比例的海绵铁和硫磺颗粒,形成“异养+氢自养+硫自养+微电凝聚”耦合反硝化脱氮同步除磷体系,从而实现低碳氮比污水厂尾水深度脱氮同步除磷目标。同时,该系统内存在填料的物理吸附作用、电流所产生的电化学反应作用以及生物膜的生物降解作用,具有同步去除 PAEs 的潜力。本研究探讨不同水力停留时间(HRT)条件下 3DBER-S-Fe 系统脱氮除磷除 PAEs 的工艺特性,以期为工艺应用提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验装置

3DBER-S-Fe 装置采用连续升流式反应器,结构如图 1 所示。有机玻璃材质,内径 25 cm,承托层高度 10 cm,总有效容积 24 L。填料组成及体积比,海绵铁:硫:活性炭=1:1:8,其中海绵铁、单质硫和活性炭粒径均为 5~8 mm。石墨棒阳极设在反应器中央,以内夹聚丙烯腈活性炭纤维的双层

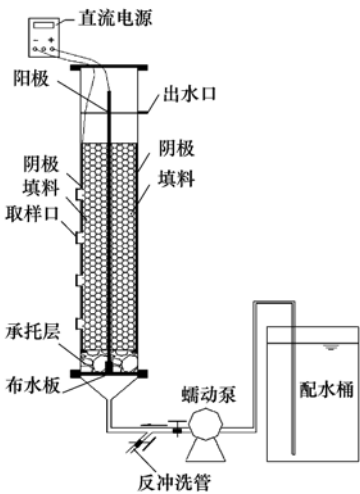


图 1 3DBER-S-Fe 试验装置示意
Fig. 1 Schematic diagram of 3DBER-S-Fe

泡沫镍为阴极紧贴反应器侧壁。为维持反应器内部温度恒定,在反应器外壁包裹一层厚度为 1.5 cm 的保温棉。

1.2 试验水质

试验用水采用在自来水中加入一定量的 DBP、DEHP、CH₃COONa、KNO₃ 和 KH₂PO₄ 模拟污水处理厂二级出水的人工配水。在温度为 15~18℃,进水 pH 为 7.0~7.5,ρ(DBP、DEHP)=500 μg·L⁻¹,ρ(NO₃⁻-N)=30 mg·L⁻¹,C/N(TOC/TN)=0.4,ρ(H₂PO₄⁻-P)=1.5 mg·L⁻¹,I=300 mA 条件下,试验反应器在 HRT 为 8、6、4 h 时,TN 和 TP 及 PAEs 的去除效果,每种运行条件均稳定运行 15 d 以上。

1.3 检测方法

(1)检测方法见表 1。

表 1 水质检测项目及方法

Table 1 Water quality testing items and methods

检测项目	检测方法	检测仪器
DBP、DEHP	分散固相萃取-气相色谱-质谱法	CNWBOND 聚丙烯空柱管、聚乙烯筛板、CNWBOND HC-C18 填料气相色谱_质谱仪(Agilent GC6890N-MSD5973)
NO ₃ ⁻ -N、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
TP	钼酸铵分光光度法	岛津 UVmini-1240 紫外可见分光光度计
总铁	邻菲罗啉分光光度法	岛津 UVmini-1240 紫外可见分光光度计

(2)预处理过程

采用分散固相萃取法(DSPE)对样品进行预处理,取 200 mL 水样于锥形瓶中,加入经甲醇浸泡后的 HC-C₁₈ 填料,将锥形瓶放置摇床中,在 50℃ 下以 200 r·min⁻¹ 进行振荡。20 min 后,转入配有聚乙烯

筛板的聚丙烯空柱管进行抽滤,将萃取剂填料滤入柱管中,用 6 mL 乙酸乙酯洗脱,氮吹后用甲醇定容至 1 mL。

(3)色谱与质谱条件

载气流量:1.0 mL·min⁻¹;进样口温度:

280℃; 不分流进样, 进样体积为 1 μL . 升温程序为: 柱温起始温度 50℃ 保持 0.75 min, 20 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 150℃, 然后以 15 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 260℃, 保持 3.00 min, 再以 5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 280℃.

质谱条件采用仪器默认值, 参数如下: 离子源温度 230℃; 接口温度 280℃; 电子倍增器电压 1 718 V; 电子轰击能量 70 eV; 质谱定性扫描采用 Scan 模式, 定量采用离子选择 (SIM) 模式; 特征离子的质荷比 (m/z): DBP (149、205、223)、DEHP (149、167、279); 溶剂延迟设定 4.80 min.

1.4 反应器启动

按照接种、挂膜和驯化的顺序启动 3DBER-S-Fe 反应器, 接种污泥取自北京某污水处理厂 A²/O 工艺回流污泥, 污泥浓度约为 5.25 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 具体参考李素梅等^[13]提供的三维电极生物膜反应器低温启动方法. 待出水各污染指标趋于稳定后, 启动过程完成.

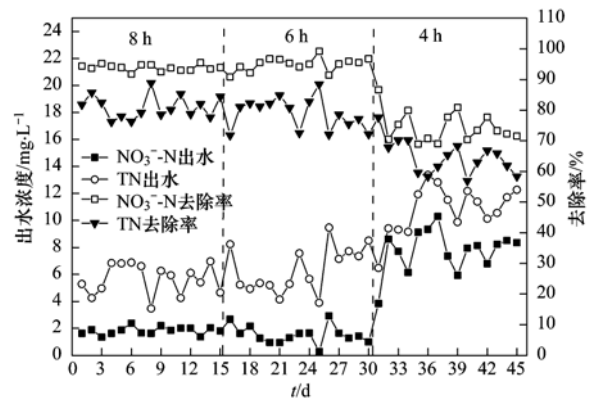
2 结果与讨论

2.1 反硝化脱氮性能

图 2 为 3DBER-S-Fe 工艺在不同 HRT 下的 TN 和 NO_3^- -N 去除情况. 从中可知, 当 HRT 为 8 h 和 6 h 时, 3DBER-S-Fe 的 NO_3^- -N 和 TN 去除变化不大, 出水浓度分别为 1.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 6 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 去除率分别维持在 95% 和 80% 左右; 当 HRT 缩短至 4 h 时, NO_3^- -N 和 TN 出水浓度分别为 7.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 11.8 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 其中, NO_3^- -N 去除率降至 74% 左右, TN 去除率降至 63% 左右. 通过以上分析可知, 在较短 HRT 内, 3DBER-S-Fe 系统仍可保证较高的脱氮效果.

图 3 为不同 HRT 条件下 3DBER-S-Fe 出水 TOC 消减量 (TOC 消减量由进水 TOC 浓度减去出水 TOC 浓度所得)、 SO_4^{2-} 积累量及出水 pH 变化情况. 从中可知, 随着 HRT 缩短, TOC 消减量由 7.90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到 8.65 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 当 HRT 由 8 h 缩短至 6 h、4 h 时, 出水 SO_4^{2-} 积累量显著增加, 由 38 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 逐渐增大到 55~63 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 出水 pH 维持在 7.8~8.2 之间. 由此可见, 随着 HRT 缩短, 3DBER-S-Fe 系统中硫自养反硝化作用和异养反硝化作用均有所增强; 出水 pH 值稳定.

在 3DBER-S-Fe 中, 反硝化脱氮作用可大致分为四类, 即异养反硝化作用, 硫自养反硝化作用, 氢自养反硝化作用和铁自养反硝化作用^[14,15]. 反应器进出水 $\rho(\text{TOC})$ 可以反映出系统中异养反硝化程



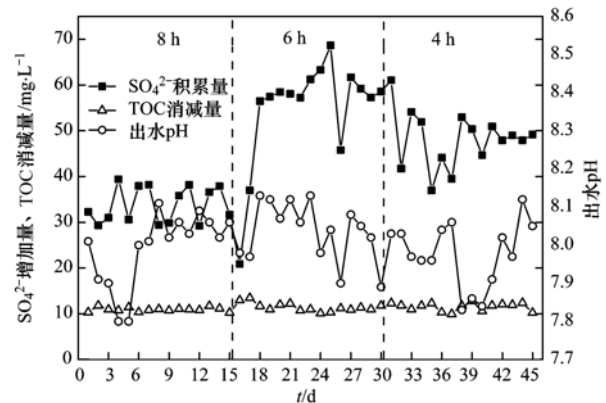
试验条件: DBP、DEHP 进水浓度 500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,

$\text{C/N}(\text{TOC}/\text{TN}) = 0.4$, NO_3^- -N = 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

$\text{P} = 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $I = 300 \text{ mA}$

图 2 不同 HRT 条件下 TN 和 NO_3^- -N 的去除

Fig. 2 Removal of TN and NO_3^- -N under different HRT conditions



试验条件: DBP、DEHP 进水浓度 500 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,

$\text{C/N}(\text{TOC}/\text{TN}) = 0.4$, NO_3^- -N = 30 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

$\text{P} = 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $I = 300 \text{ mA}$

图 3 不同 HRT 条件下出水 SO_4^{2-} 积累量和 pH

Fig. 3 Accumulation of SO_4^{2-} and pH under different HRT conditions

度, $\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 变化情况可以反映出硫自养反硝化程度. 常玉梅等^[16]的研究表明, 水样中 NO_3^- -N 去除量与硫酸盐增加量两者之间基本上呈线性关系, 每去除 1 mg NO_3^- -N 将产生 7.39 mg SO_4^{2-} , 理论值与试验值较接近. 由于系统中的海绵铁脱氮作用和氢自养反硝化作用相互关联, 可结合异养反硝化和硫自养反硝化作用推断出体系中氢和铁脱氮作用总和.

有研究表明, 异养反硝化脱氮过程中, 每去除 1 g NO_3^- -N 理论上消耗 2.86 g COD ^[17], 由于本试验检测项目为 TOC, 因此将 TOC 换算为 COD 进行计算, 取 $\text{COD}/\text{TOC} = 2.67$ ^[18], 在 3DBER-S-Fe 中异养

菌反硝化作用所占比例:

$$\omega_c = \frac{2.67\Delta\rho(\text{TOC})}{2.86 \times \Delta\rho'(\text{TN})} \times 100\% \tag{1}$$

式中, $\Delta\rho(\text{TOC})$ 和 $\Delta\rho'(\text{TN})$ 分别为每升进出水 TOC 消减量和折算后的每升进出水 TN 消减量.

文献[19~21]深入考察了自养反硝化作为去除市政废水脱氮工艺的可行性,并根据理论和试验数据建立了自养反硝化工艺的动力学模型和计量关系式.

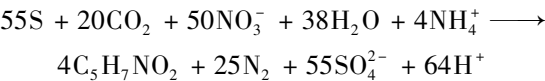


表 2 3DBER-S-Fe 脱氮过程定量分析
Table 2 Quantitative analysis of 3DBER-S-Fe

类别	项目	HRT/h		
		8	6	4
TOC 消减量	$\Delta\rho(\text{TOC})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	7.90	8.13	8.65
SO_4^{2-} 积累量	$\Delta\rho(\text{SO}_4^{2-})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	33.83	54.77	48.16
TN 去除量	$\Delta\rho'(\text{TN})/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	24.09	23.75	19.86
异养比例	$\omega_c/\%$	30.62	31.96	40.66
硫自养比例	$\omega_s/\%$	18.62	30.58	32.16
氢、铁自养比例	$\omega_{\text{H、Fe}}/\%$	50.76	37.46	27.18

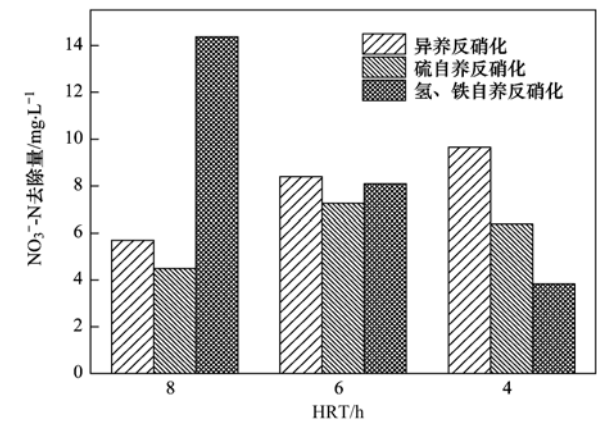


图 4 每升水中不同类型反硝化作用对 TN 的去除量

Fig. 4 TN removal per litre water by different types of denitrification

由表 2 及图 4 可以看出,在 $I = 300\text{ mA}$, $\text{C/N}(\text{TOC}/\text{NO}_3^- - \text{N}) = 0.4$ 的条件下,当 HRT 为 8、6、4 h 时, TN 去除量分别为 24.09、23.75、19.86 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这是因为 HRT 的缩短提高了进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 负荷,系统中电子供体相对不足,同时, HRT 的缩短,使得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 与生物膜有效接触时间减少;另外,水力负荷的增大加大了剪切强度,提高了生物膜更新速度,使得生物膜厚度减小^[22],各种反硝化菌的反硝化功能减弱,导致 $\Delta\rho'(\text{TN})$ 下降. 当 HRT 由 8 h 缩短到 4 h 时,氢、铁自养反硝化作用逐渐下降,分别为 50.76%、37.46%、27.18%,这是因为

由该方程式可知每去除 1 g $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 理论上生成 7.54 g SO_4^{2-} ,因此 3DBER-S-Fe 中硫自养反硝化作用所占比例为:

$$\omega_s = \frac{\Delta\rho(\text{SO}_4^{2-})}{7.54 \times \Delta\rho'(\text{TN})} \times 100\% \tag{2}$$

式中, $\Delta\rho(\text{SO}_4^{2-})$ 和 $\Delta\rho'(\text{TN})$ 分别为每升进出水 SO_4^{2-} 积累量和折算后的每升水 TN 消减量.

则氢、铁自养反硝化作用所占比例之和:

$$\omega_{\text{H、Fe}} = 1 - \omega_c - \omega_s \tag{3}$$

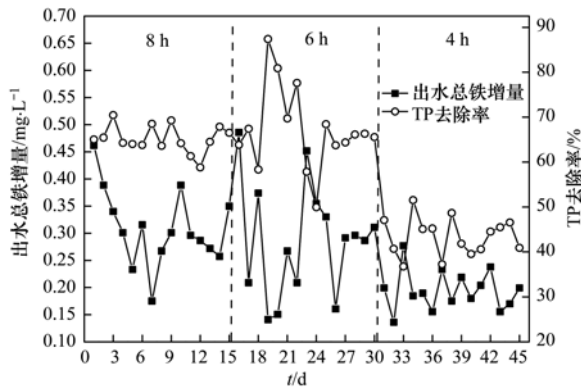
表 2 和图 4 表示不同水力停留时间下 3DBER-S-Fe 工艺的脱氮过程定量分析结果.

随着 HRT 的缩短,生物膜脱落量增加,不利于氢自养反硝化菌的增殖^[23],从而引起 $\omega_{\text{H、Fe}}$ 下降;当 HRT 由 8 h 缩短到 4 h 时,硫自养反硝化作用去除的 TN 量分别为 4.49、7.26、6.39 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,此时 ω_s 由 18.62% 逐渐升高到 32.16%,因此可认为在 HRT 减小时,硫自养反硝化作用增强,单质硫弥补了进水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 负荷增加所导致的反硝化电子供体相对不足问题,使 3DBER-S-Fe 在较短水力停留时间内维持较高的脱氮率.

2.2 除磷性能

图 5 反映了不同 HRT 条件下 3DBER-S-Fe 对磷的去除效果及出水总铁的增加情况. 从中可知,当 HRT 为 8 h 和 6 h 时,磷的去除率分别为 65.18%、67.17%,出水总铁增量为 0.15~0.45 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;当 HRT 缩短至 4 h 时,出水总铁增量维持在 0.20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右,磷的去除率为 45%. 本试验结果表明,3DBER-S-Fe 在较短水力停留时间内仍能保持较好的除磷效果. 这是因为 3DBER-S-Fe 体系中同时存在着物理化学作用和生物作用除磷,系统中海绵铁在电流刺激下腐蚀产生的铁离子(包括 Fe^{2+} 和 Fe^{3+})对磷进行絮凝沉淀作用,起到了强化电极生物膜工艺除磷的作用. 徐忠强等的研究表明^[24],3DBER-S-Fe 系统中存在着聚磷菌,电流作用不但能加快海绵铁腐蚀,同时还能刺激反硝化聚磷菌的

活性,对系统化学除磷和生物除磷均有不同程度的促进作用。



试验条件: DBP、DEHP 进水浓度 $500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,
 $\text{C/N}(\text{TOC/TN}) = 0.4$, $\text{NO}_3^- - \text{N} = 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,
 $\text{P} = 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $I = 300 \text{ mA}$

图 5 不同 HRT 条件下总磷去除率

Fig. 5 Removal of TP under different HRT conditions

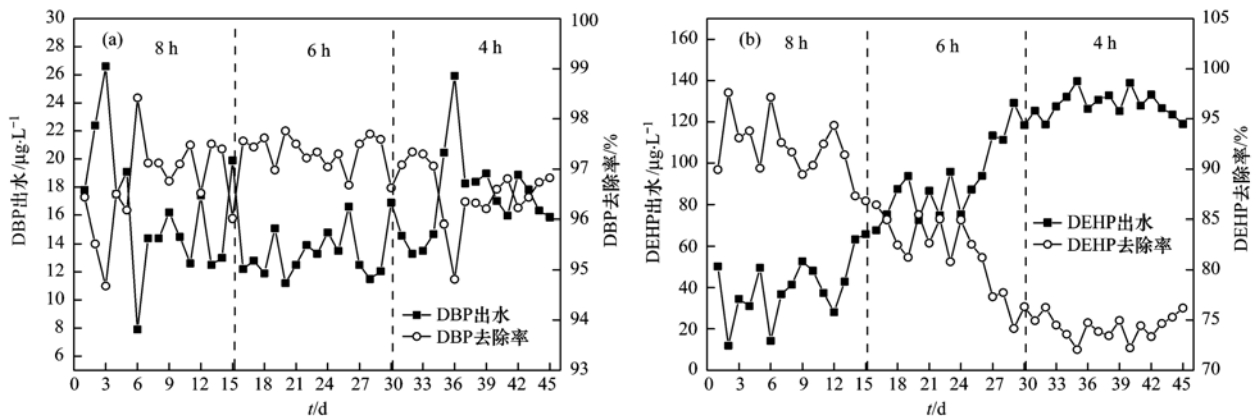
2.3 3DBER-S-Fe 对 PAEs 去除性能

由于 3DBER-S-Fe 内部填料结构的特殊性,使得工艺对 PAEs 的去除结合了物理吸附、生物降解及电化学作用,以上 3 种作用均在一定程度上受到水力停留时间长短的影响. HRT 的长短直接反映工艺的运行效率,一般希望在较短水力停留时间内达到理想处理效果. 3DBER-S-Fe 工艺在不同 HRT 下的 DBP 与 DEHP 去除情况如图 6 所示.

图 6 分别表示 3DBER-S-Fe 工艺在不同 HRT 下的 DBP 与 DEHP 去除率. 从中可知,在 HRT 由 8 h 缩短至 4 h 的过程中,DBP 出水浓度为 $13 \sim 19 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率平均为 97%,水力停留时间对 DBP 的去除效果影响不明显,该结果与徐焕成等^[25]研究铝碳微电解法和生物接触氧化法对 PAEs 的去除效

果一致,其研究中 HRT 在 4 h ~ 12 h 之间波动时, DBP 去除率变化不大. 由图 6 还可以看出 DEHP 的去除受水力停留时间影响较大,当 $\text{HRT} = 8 \text{ h}$ 时, DEHP 出水浓度为 $39 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,去除率为 94%,随着水力停留时间的缩短,DEHP 去除率逐渐下降,当 $\text{HRT} = 4 \text{ h}$ 时,DEHP 出水浓度达到 $130 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,此时去除率为 74%. DEHP 去除率随水力停留时间的缩短而降低,该结果与李生莲的研究一致^[26],这与邻苯二甲酸酯降解能力有关,DEHP 被认为是较难降解的化合物. DBP 去除率受水力停留时间长短影响不大,这是因为 DBP 分子量较 DEHP 小,结构比 DEHP 简单,容易降解^[27, 28],所以 DBP 即使在较短水力停留时间内也能保持较高的去除率.

由上述分析可得,3DBER-S-Fe 工艺对 DBP 与 DEHP 具有较强的去除能力,当 HRT 为 8、6、4 h 时,DBP 的去除负荷分别为 1360.77 、 1946.48 、 $2896.02 \text{ mg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,DEHP 的去除负荷为 1378.29 、 1631.36 、 $2229.06 \text{ mg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,而焦双吉^[29]的研究中常规慢滤池在 $\text{HRT} = 14 \text{ h}$ 时 DEHP 去除负荷为 $486.75 \text{ mg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$,浅层慢滤池在 $\text{HRT} = 6 \text{ h}$ 时 DEHP 去除负荷为 $787.2 \text{ mg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$. 由此可见,3DBER-S-Fe 工艺对 PAEs 的去除能力远大于常规工艺,这是因为该工艺结合了物理吸附、生物降解及电化学作用,PAEs 首先被吸附富集在活性炭颗粒填料表面,然后填料表面的生物膜对 PAEs 进行生物降解,同时系统中电场产生的羟基自由基对 PAEs 进行氧化^[30]. 因此,系统中 PAEs 的去除是多种作用结果,其中,启动运行初期以活性炭颗粒填料吸附为主,稳定运行后以微生物降解作用为主,电场的羟基氧化作用为辅.



试验条件: DBP、DEHP 进水浓度 $500 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{C/N}(\text{TOC/TN}) = 0.4$, $\text{NO}_3^- - \text{N} = 30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{P} = 1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $I = 300 \text{ mA}$

图 6 不同 HRT 条件下 DBP 和 DEHP 的去除

Fig. 6 Removal of DBP and DEHP under different HRT conditions

3 结论

(1) 3DBER-S-Fe 工艺能够实现同步脱氮除磷及去除 PAEs, 且在不同 HRT 条件下均有较好的去除效果. 当 HRT = 6 h 时, NO_3^- -N 和 TN 去除率分别为 95.23% 和 78.85%, 总磷去除率为 67.17%, DBP 去除率为 97.32%, DEHP 去除率为 81.57%.

(2) 当 HRT 由 8 h 缩短到 4 h 时, NO_3^- -N 去除率由 93.66% 下降到 74.53%, TN 去除率由 80.99% 下降到 64.76%. 随着水力停留时间缩短, 硫自养反硝化作用增强, 单质硫可以弥补进水 NO_3^- -N 负荷增加所导致的反硝化电子供体相对不足问题, 维持系统高效的脱氮效率.

(3) 当 HRT 由 8 h 缩短到 4 h 时, TP 去除率由 65.18% 下降到 43.44%. 3DBER-S-Fe 系统中海绵铁填料腐蚀产生的铁离子能够高效持续沉淀除磷.

(4) 当 HRT 由 8 h 缩短到 4 h 时, DBP 去除率由 96.72% 下降到 96.53%; DEHP 去除率由 91.89% 下降到 74.30%. 在不同 HRT 条件下, DBP 的去除负荷分别为 1360.77、1946.48、2896.02 $\text{mg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, DEHP 的去除负荷为 1378.29、1631.36、2229.06 $\text{mg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$. 该工艺结合了物理吸附、生物降解及电化学反应, 使其在较短水力停留时间内能够达到较高的 PAEs 去除率.

参考文献:

- [1] Kunz N C, Fischer M, Ingold K, *et al.* Drivers for and against municipal wastewater recycling: a review[J]. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2016, **73**(2): 251-259.
- [2] Schaum C, Lensch D, Cornel P. Water reuse and reclamation; a contribution to energy efficiency in the water cycle[J]. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 2015, **5**(2): 83-94.
- [3] 张杰, 曹开朗. 城市污水深度处理与水资源可持续利用[J]. *中国给水排水*, 2001, **17**(3): 20-21.
Zhang J, Cao K L. Advanced treatment of urban sewage and sustainable utilization of water resources[J]. *China Water & Wastewater*, 2001, **17**(3): 20-21.
- [4] 董良飞, 郗晓敏, 余海静, 等. MBR 组合工艺脱氮除磷研究进展[J]. *中国给水排水*, 2010, **26**(4): 24-28.
Dong L F, Xi X M, Yu H J, *et al.* Research progress in nitrogen and phosphorus removal with MBR combined process[J]. *China Water & Wastewater*, 2010, **26**(4): 24-28.
- [5] 池勇志, 崔维花, 苑宏英, 等. 不同源水和回用途径的再生水处理工艺的选择[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(18): 22-26.
Chi Y Z, Cui W H, Yuan H Y, *et al.* Selection of reclaimed water treatment processes under different source water qualities and reuse approaches[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(18): 22-26.
- [6] 张庆康, 郝瑞霞, 刘峰, 等. 不同再生水处理工艺出水水质回用途径适应性分析[J]. *环境工程学报*, 2013, **7**(1): 91-96.
Zhang Q K, Hao R X, Liu F, *et al.* Analysis about reuse approach adaptability for effluent quality from different reclaimed water treatment processes[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2013, **7**(1): 91-96.
- [7] 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.
Hao R X, Zhang Q K, Zhao J C, *et al.* Determination of phthalates in reclaimed water by SPE-GC-MS[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, **34**(5): 1-5, 23.
- [8] 徐鹏程, 郝瑞霞, 张娅, 等. 3BER-S 工艺用于再生水深度脱氮同步去除 PAEs 的可行性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 662-667.
Xu P C, Hao R X, Zhang Y, *et al.* Feasibility of 3BER-S process for the deep denitrification in synch with the removal of PAEs from reclaimed water[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 662-667.
- [9] 王军良, 徐超, 庄晓伟, 等. 水中邻苯二甲酸酯污染现状及高级氧化降解技术研究[J]. *工业水处理*, 2011, **31**(4): 5-10.
Wang J L, Xu C, Zhuang X W, *et al.* Research on the present pollution situation and advanced oxidation degradation of phthalate esters in water[J]. *Industrial Water Treatment*, 2011, **31**(4): 5-10.
- [10] 管策, 郁达伟, 郑祥, 等. 我国人工湿地在城市污水处理厂尾水脱氮除磷中的研究与应用进展[J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31**(12): 2309-2320.
Guan C, Yu D W, Zheng X, *et al.* Removing nitrogen and phosphorus of effluent from wastewater treatment plants by constructed wetlands in china; an overview[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31**(12): 2309-2320.
- [11] 肖文涛. 污水生物脱氮除磷工艺的现状与发展[J]. *环境保护与循环经济*, 2010, **30**(11): 59-62.
Xiao W T. Status and development of biological nitrogen and phosphorus removal process for wastewater[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2010, **30**(11): 59-62.
- [12] 郝瑞霞, 张庆康, 刘峰, 等. 再生水厂处理工艺对邻苯二甲酸酯去除效果分析[J]. *给水排水*, 2011, **37**(S1): 74-78.
Hao R X, Zhang Q K, Liu F, *et al.* Analysis of removal effects on phthalates in reclaimed water plants[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2011, **37**(S1): 74-78.
- [13] 李素梅, 郝瑞霞, 孟成成. 三维电极生物膜反应器低温启动试验研究[J]. *中国给水排水*, 2013, **29**(5): 101-105.
Li S M, Hao R X, Meng C C. Start-up of three-dimensional electrode biofilm reactor at low temperature[J]. *China Water & Wastewater*, 2013, **29**(5): 101-105.
- [14] 郝瑞霞, 王建超, 孟成成, 等. 电流对三维电极生物膜耦合硫自养脱氮工艺的影响[J]. *北京工业大学学报*, 2015, **41**(6): 919-925.
Han R X, Wang J C, Meng C C, *et al.* Influence of electric current on coupling 3-dimensional biofilm-electrode with sulfur autotrophic denitrification[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2015, **41**(6): 919-925.
- [15] 王建超, 郝瑞霞, 孟成成, 等. 3DBER-S 反硝化脱氮性能及

- 其菌群特征[J]. 环境科学研究, 2015, **28**(2): 310-317.
- am Wang J C, Hao R X, Meng C C, *et al.* Study on performance and bacterial community of coupling 3-dimensional biofilm-electrode with sulfur autotrophic denitrification [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, **28**(2): 310-317.
- [16] 常玉梅, 杨琦, 郝春博, 等. 城市污水厂活性污泥强化自养反硝化菌研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1210-1216.
- Chang Y M, Yang Q, Hao C B, *et al.* Experimental study of autotrophic denitrification bacteria through bioaugmentation of activated sludge from municipal wastewater plant [J]. Environmental Science, 2011, **32**(4): 1210-1216.
- [17] 胡传侠, 杨昌柱, 杨群, 等. 固定化三维电极-生物膜法去除污水中硝酸盐氮[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(2): 83-87.
- Hu C X, Yang C Z, Yang Q, *et al.* Study on removal of nitrate from by secondary effluent immobilized three-dimension electrode-biofilm reactor[J]. Environmental Science & Technology, 2008, **31**(2): 83-87.
- [18] 王海燕, 蔡海军. COD 与 TOC 相关性理论研究[J]. 河南城建学院学报, 2011, **20**(2): 36-40.
- Wang H Y, Cai H J. Relevant research of TOC and COD in organic wastewater [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2011, **20**(2): 36-40.
- [19] Batchelor B, Lawrence A W. Autotrophic denitrification using elemental sulfur [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1978, **50**(8): 1986-2001.
- [20] Bisogni Jr J J, Lawrence A W. Determination of submicrogram quantities of monomethyl mercury in aquatic samples [J]. Environmental Science & Technology, 1974, **8**(9): 850-852.
- [21] Bisogni Jr J J, Lawrence A W. Kinetics of mercury methylation in aerobic and anaerobic aquatic environments[J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1975, **47**(1): 135-152.
- [22] 邱立平, 马军, 张立昕. 水力停留时间对曝气生物滤池处理效能及运行特性的影响[J]. 环境污染与防治, 2004, **26**(6): 433-436.
- Qiu L P, Ma J, Zhang L X. Effect of hydraulic retention time on the treatment efficiency and operational characteristics of biological aerated filter[J]. Environmental Pollution & Control, 2004, **26**(6): 433-436.
- [23] 陈丹, 王弘宇, 宋敏, 等. 生物陶粒反应器的氢自养反硝化研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 3986-3991.
- Chen D, Wang H Y, Song M, *et al.* Study on hydrogen autotrophic denitrification of bio-ceramic reactor [J]. Environmental Science, 2013, **34**(10): 3986-3991.
- [24] 徐忠强, 郝瑞霞, 徐鹏程, 等. 硫铁填料和微电流强化再生水脱氮除磷的研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(2): 406-413.
- Xu Z Q, Hao R X, Xu P C, *et al.* Research on enhanced denitrification and phosphorus removal from reclaimed water by using sponge iron/sulfur composite fillers and low electrical current[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(2): 406-413.
- [25] 徐焕成, 王平, 赵雨, 等. 铝碳微电解法降解水中邻苯二甲酸酯[J]. 化工环保, 2014, **34**(6): 511-514.
- Xu H C, Wang P, Zhao Y, *et al.* Degradation of phthalate esters in water by Al-C microelectrolysis[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2014, **34**(6): 511-514.
- [26] 李升莲. 人工湿地去除废水中有机微污染物邻苯二甲酸酯的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- Li S L. Study on removal of organic micropollutants phthalic acid esters in constructed wetland treating sewage wastewater [D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [27] Huang J Y, Nkrumah P N, Li Y, *et al.* Chemical behavior of phthalates under abiotic conditions in landfills [M]. In: Whitacre D M (ed.). Reviews of Environmental Contamination and Toxicology. New York: Springer, 2013, **224**: 39-52.
- [28] Staples C A, Peterson D R, Parkerton T F, *et al.* The environmental fate of phthalate esters: a literature review[J]. Chemosphere, 1997, **35**(4): 667-749.
- [29] 焦双吉. 慢滤池去除污水中邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- Jiao S J. Study on the removal of DI (2-Ethylhexyl) phthalate from sewage by A slow sand filter [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012.
- [30] 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.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM _{2.5} in Chengde	CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4069)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province	YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> (4080)
Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province	YAN Yu-long, PENG Lin (4086)
Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China	GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> (4094)
Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station	HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> (4103)
NH ₃ Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing	CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> (4110)
Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an	SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (4117)
Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City	ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (4124)
Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin	ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> (4133)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve	YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> (4142)
Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao	MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> (4147)
Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion	LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> (4156)
Gas Transfer Velocity of CH ₄ at Extremely Low Wind Speeds	ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> (4162)
Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (4168)
Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed	CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir	ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> (4187)
Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu	DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> (4194)
Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> (4203)
Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China	WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> (4212)
Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i>	YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin (4220)
Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine	WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (4228)
Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water	MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> (4235)
Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder	AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> (4241)
Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co ₃ O ₄ for the Degradation of Rhodamine B	FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> (4247)
Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4255)
Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (4261)
Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor	ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> (4268)
Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> (4275)
Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> (4282)
Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process	YUAN Yan, ZHU Liang (4289)
Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios	CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> (4296)
Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4302)
A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater	DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> (4309)
Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria	HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> (4317)
Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model	XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> (4326)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng (4333)
PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou	JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> (4341)
Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship	WANG Jia-yi, BI Er-ping (4349)
Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands	WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> (4357)
Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants	YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> (4366)
Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils	WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> (4372)
Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions	LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (4380)
Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions	TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4389)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing	ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> (4395)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm	HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> (4402)
Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells	HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> (4410)
Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil	LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> (4419)
Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China	ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> (4428)
Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns	WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> (4437)
Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils	HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> (4446)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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