

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,任巍,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	袁砚,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)	

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,朱晓霞,万京京

(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)

摘要:为提高硫铁复合填料反硝化脱氮同步除磷效果,对比研究了不同填料和耦合微生物后的除磷效果,分析了微生物耦合硫铁复合填料反硝化脱氮同步实现除磷的机制。结果表明与单纯海绵铁填料比较,硫磺与海绵铁复合填料除磷效率提高 30%,达到 95% 以上,出水磷含量可降至 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。X 射线衍射(XRD)和总铁浓度分析表明,硫铁复合填料除磷系统反应产物主要为 FeOOH 、 FeS 和 $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ 固体物质和溶解性铁离子,产生于海绵铁的腐蚀和除磷过程;腐蚀产生的 Fe^{2+} 及 Fe^{3+} 的水解产物 FeOOH 和 FeS 通过吸附沉淀作用将 PO_4^{3-} 转化为 $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ 去除。微生物耦合硫铁炭复合填料反应器运行稳定后,TN、TP 去除率分别在 90% 左右和 83% 以上;硫自养反硝化产生的 H^+ 和生物铁作用也可以促进海绵铁腐蚀和除磷过程,体系将“异养协同自养”复合反硝化与化学除磷有机结合,实现了城市污水处理厂尾水高效反硝化脱氮同步除磷的目的。

关键词:硫铁复合填料; TP 去除率; 硫化铁; FeOOH ; $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4275-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201604195

Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification

FAN Jun-hui, HAO Rui-xia*, LI Meng, ZHU Xiao-xia, WAN Jing-jing

(Key laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to improve the phosphorus removal effect in the denitrification and phosphorus synchronous removal process by sulfur/sponge iron composite fillers, the phosphorus removal effect by different fillers with the coupling microorganisms was studied to analyze the denitrifying phosphorus removal mechanism of the microbial coupling sulfur/sponge iron composite fillers. The research result showed that the phosphorus removal ratio of sponge iron/sulfur composite fillers was over 95%, which was increased by 30% as compared to only sponge iron filler. In addition, the effluent TP concentration was reduced to less than $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The analysis of X-ray diffraction(XRD) and total iron concentration indicated that the main phosphorus removal system products which were produced in the corrosion and phosphorus removal process of sponge iron were FeOOH , FeS and $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ deposits and dissolved iron ions; FeS and FeOOH which were the hydrolysis products of Fe^{2+} and Fe^{3+} converted PO_4^{3-} to $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ by adsorption and deposition so that phosphorus removal could be achieved. After the reactor of microbial coupling sulfur/sponge iron carbon composite fillers became stable, the removal efficiency of TN and TP could reach 90% and more than 83%, respectively; Corrosion of sponge iron and phosphorus removal process could also be promoted by biological iron and H^+ that was produced in the sulfur autotrophic denitrification process, the system could realize the combination of “heterotrophic synergy autotrophic” composite denitrification and chemical phosphorus removal, and efficient denitrifying denitrification synchronous phosphorus removal process could be achieved in the urban sewage treatment plant.

Key words: sponge iron/sulfur composite fillers; the removal rate of TP; FeS ; FeOOH ; $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$

目前污水处理厂的尾水一部分作为天然水系如湖泊、河流、水库的补充水源,其余部分经深度处理后作为城市的第二水源。有研究表明^[1],磷是水体富营养化的控制性因素。大多数城市污水处理厂采用生物和化学相结合的除磷工艺,以确保其尾水中磷含量满足《城镇污水厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 或 B 标准^[2]。有学者指出^[3],即使达到标准也不能保证生态系统的安全,当缓流水体内总磷大于 $0.02 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,就有可能引发水体富营养化现象。目前关于污水处理厂尾水深度脱

氮的报道较多,而基于反硝化深度脱氮同步除磷的研究鲜见报道。

由于污水处理厂尾水 C/N 比和氮磷浓度相对较低,深度脱氮存在碳源不足问题,若进一步实现脱氮同步除磷具有相当的技术难度。自养反硝化脱氮因无需消耗碳源,被广泛运用在低 C/N

收稿日期: 2016-04-25; 修订日期: 2016-05-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378028)

作者简介: 范军辉(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为再生水深度脱氮除磷技术, E-mail: fjhahyq@163.com

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

比的地下水、污水厂尾水深度反硝化脱氮过程中^[4,5]. Batchelor 等^[6]通过脱氮硫杆菌还原硫化物证实了硫自养反硝化的可行性, Lawrence 等^[7]研究发现, 单质硫作为电子供体时处理效果最佳. 将硫磺作为处理低 C/N 比尾水的填料, 可以减少体系对碳源的消耗, 提高反硝化脱氮效率. 但单纯硫自养反硝化过程并不能高效地将水中的磷去除.

海绵铁是常见的水处理填料, 结构多孔疏松、具有较大的比表面积和较高的表面能^[8], 通过内部微原电池作用、氧化作用等被腐蚀, 腐蚀产生的 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 以及它们的水解产物 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等具有较强的卷扫、絮凝、沉淀等作用, 能与带相反电荷的离子、胶体等物质发生沉聚作用, 可以使磷的含量大大降低^[9]. 徐忠强等^[10]以硫铁复合填料作为三维电极生物膜填料取得良好的脱氮同步除磷效果, 但未提及硫铁复合填料反硝化脱氮同时实现除磷的机制.

本研究针对污水处理厂尾水深度反硝化脱氮同步除磷问题, 通过对不同类型填料及微生物耦合硫铁复合填料的静态除磷实验, 并结合对除磷过程中硫铁复合填料生成物成分分析, 深入探究了硫铁复

合填料除磷过程及机制, 以期为污水处理厂尾水深度脱氮同步除磷技术提供参考.

1 材料与方法

1.1 实验材料

采用 500 mL 锥形瓶作为反应器, 瓶口用封口膜密封, 排出氮气的同时保持反应器内缺氧的环境; 粒径 5 ~ 8 mm 海绵铁颗粒在 $\text{pH} = 3.74$ 的稀盐酸溶液中浸泡 1 h, 清水冲洗数遍后干燥待用; 粒径 2 ~ 3 mm 的球形硫磺颗粒, 粒径 3 ~ 5 mm 活性炭颗粒; 接种污泥来自北京某污水处理厂回流污泥, 接种前用含一定浓度 KNO_3 的人工配水富集培养反硝化细菌 1 ~ 2 周, 每 24 h 换水一次, 待硝酸盐氮去除率达到 90% 以上富集培养完成.

反应器进水为模拟城市污水处理厂尾水的人工配水, 在自来水中加入一定量的 CH_3COONa 、 KNO_3 和 KH_2PO_4 , 并用 HCl 和 NaOH 调节 pH 值为 7.0 左右. 控制进水中 NO_3^- -N 和 COD 浓度分别为 (30 ~ 35) 和 (45 ~ 60) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, C/N 维持在 1.5 左右, TP 浓度为 1.3 ~ 1.5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

1.2 分析方法与仪器

如表 1 所示.

表 1 分析方法与仪器

Table 1 Analysis apparatus and methods

项目	仪器/方法	文献
称重	分析天平	
pH	雷磁 ZDJ-4A 自动电位滴定仪	[32]
总铁 (TFe)	邻菲罗啉分光光度法	[32]
总磷 (TP)	钼酸铵分光光度法	[32]
NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N	瑞士万通 861 离子色谱仪	[32]
TOC/TN	德国耶拿 multi N/C 3100 型快速测定仪	[32]
恒温振荡器	国华 SHZ-82	
填料成分及其生成物分析	德国 BRUKER D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪	

1.3 实验方法

分别对填料类型和微生物作用下的静态除磷性能进行了对比研究. 考察了 3 种类型填料的静态除磷效果: 单纯海绵铁、硫铁复合填料和硫铁炭复合填料; 并对硫铁炭复合填料耦合微生物脱氮除磷性能进行了分析. 如表 2 所示.

表 2 实验设计

Table 2 Experimental design

编号	材料
1	150 g 海绵铁
2	150 g 海绵铁、100 g 硫磺
3	150 g 海绵铁、100 g 硫磺、100 g 活性炭
4	150 g 海绵铁、100 g 硫磺、100 g 活性炭、100 mL 富集培养污泥
5	100 mL 富集培养污泥

分别向 500 mL 的锥形瓶中加入实验材料, 在 28℃、64 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下恒温振荡, 每 24 h 换水 400 mL, 采用虹吸方式排水. 分别测定溶液中 TP、TFe、TN、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N 浓度.

2 结果与讨论

2.1 不同填料的除磷效果

不同填料的除磷效果如图 1 所示. 从中可知, 硫铁复合填料反应器 TP 去除率在 95% 以上, 分别比硫铁炭复合填料、单纯海绵铁填料高出 8% 和 35%; 出水 TP 的含量在 0.1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 均低于硫铁炭复合填料、单纯海绵铁填料. 由此可见, 硫磺可以高效地促进海绵铁除磷过程, 活性炭会影响硫

铁复合填料的除磷效果.

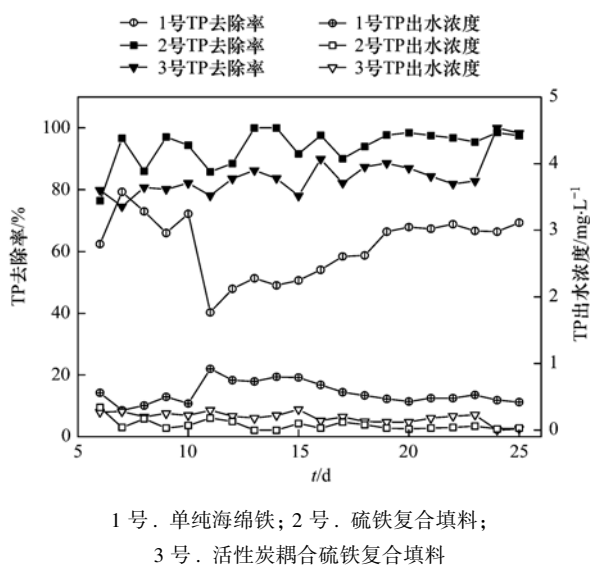
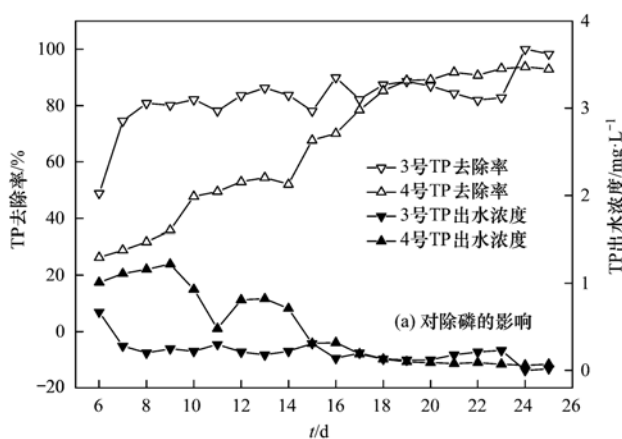


图 1 不同填料的除磷效果
Fig. 1 Effect of different fillers on TP removal

2.2 微生物耦合硫铁炭复合填料脱氮除磷性能

微生物耦合硫铁炭复合填料对脱氮除磷效果的影响如图 2 所示. 从中可知, 硫铁炭复合填料反应器 TP 去除率保持在 87% 左右, 出水 TP 浓度在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 耦合系统的 TP 去除率初期只有 40% 左右, 随后逐渐升高, 运行一段时间后保持在 83% 以上, 出水 TP 浓度在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 可见, 微生物附着初期对除磷效果有一定的影响, 随后逐渐接近硫铁炭复合填料的除磷效率. 微生物耦合硫铁炭填料的反应器 TN 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率分别达到 90% 和 95% 左右, 比单纯微生物系统分别高 60% 和 35%. 因此, 微生物耦合硫铁炭复合填料可以强化反硝化脱氮过程, 能够实现同步高效脱氮除磷.



3 号. 硫铁炭复合填料; 4 号. 微生物耦合硫铁炭复合填料; 5 号. 单纯微生物

图 2 微生物耦合硫铁炭复合填料对脱氮除磷效果的影响

Fig. 2 Effect of microbial coupled sulfur iron carbon composite fillers on the removal of nitrogen and phosphorus

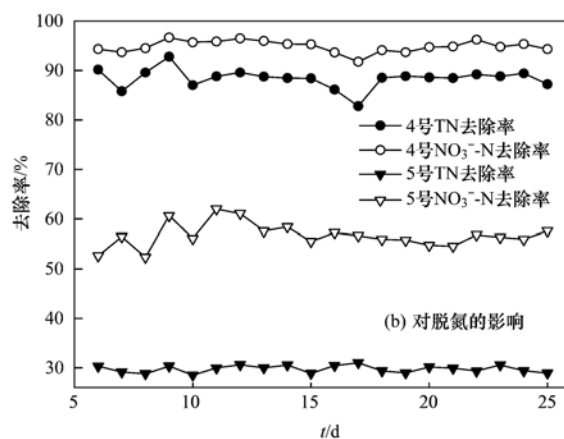
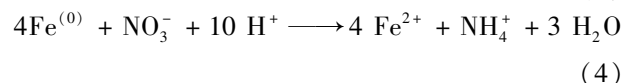
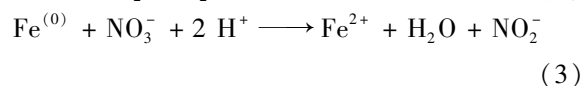
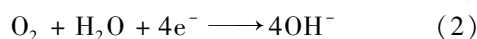
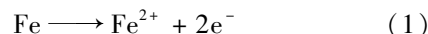
2.3 机制分析

2.3.1 硫铁复合填料除磷作用过程分析

为探究硫铁复合填料高效除磷机制, 分别采用化学分析和 X 射线衍射 (XRD) 方法, 分析了反应体系溶解性总铁浓度和不溶性生成物成分, 见图 3、图 4.

由图 3 可知, 硫铁复合填料反应器出水 TFe 浓度保持在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 均高于单纯海绵铁和硫铁炭复合填料. 由图 4 可知, 反应前海绵铁和硫磺表面主要成分分别为 Fe、S; 硫铁复合填料反应 6 h 后沉积物主要为 FeS、FeOOH 和 $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, 反应 72 h 后沉积物主要为 FeS、FeOOH 和 $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$, 其中, FeOOH 是海绵铁腐蚀水解产物、FeS 是硫铁填料反应产物, 水中的 PO_4^{3-} 分别生成 $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ 沉淀去除.

因此, 在硫铁复合填料体系中, 海绵铁腐蚀生成 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、FeOOH 和 FeS 是实现高效除磷的主要原因. 系统中海绵铁的腐蚀途径包括: ①单质铁被水中的溶解氧氧化为 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 等物质; ②海绵铁内部的碳与铁构成微原电池持续促进海绵铁腐蚀产生 Fe^{2+} , 如反应方程式 (1)、(2) 所示; ③零价铁与硝酸盐发生氧化还原反应生成 Fe^{2+} [11~13], 如反应方程式 (3)、(4) 所示, 出水 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度见图 5; ④硫铁填料之间的硫化反应又进一步促进海绵铁的腐蚀.



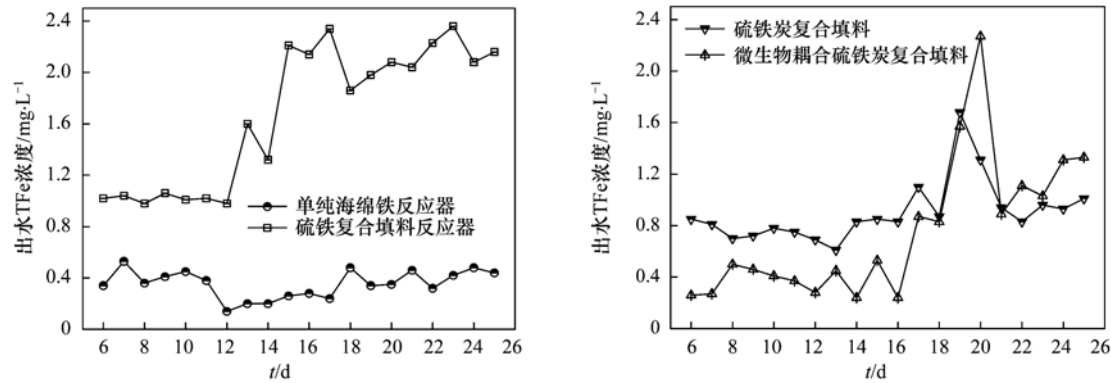


图3 出水 TFe 浓度

Fig. 3 TFe concentration in the effluent

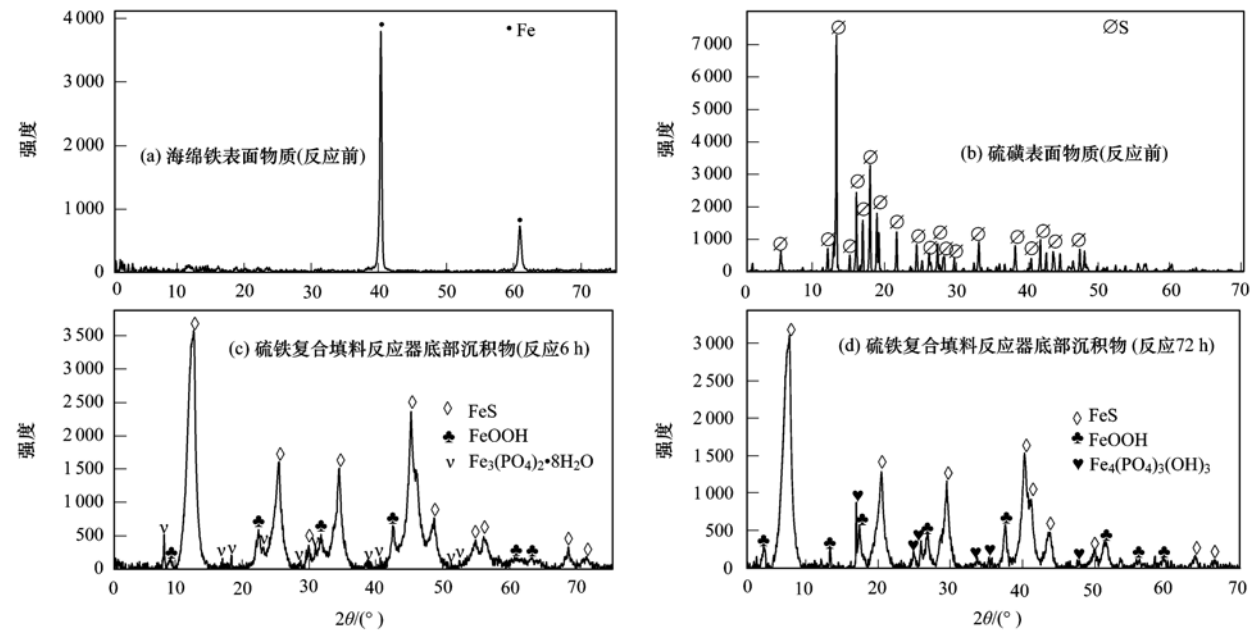


图4 反应前填料表面及反应后沉积物的 XRD

Fig. 4 XRD of Surface of the filler before reaction and the sediment after reaction

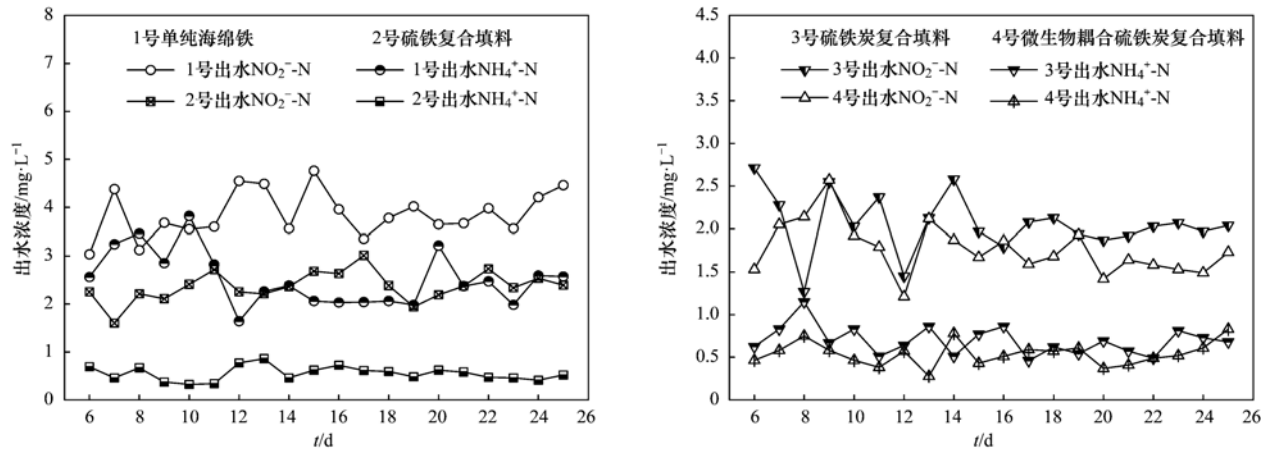


图5 出水 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N浓度

Fig. 5 NO_2^- -N and NH_4^+ -N concentrations in the effluent

系统除磷过程包括: ①疏松多孔的海绵铁先通过物理化学吸附作用将 PO_4^{3-} 吸附其表面^[14~16], 在海绵铁表面的还原性环境下, 再与 Fe^{2+} 作用形成 $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, 最终转化为稳定态的 $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ 沉淀; ②不同类型填料出水 pH 值如图 6 所示, 在偏碱性条件下, 水中海绵铁腐蚀生成的 Fe^{2+} 很快转化为 Fe^{3+} ^[17], Fe^{2+} 的水解产物 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ($K_{\text{sp}} = 4.8 \times 10^{-17}$) 转化为更难溶的 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ($K_{\text{sp}} = 2.79 \times 10^{-39}$), 水中富含 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 时, Fe^{3+} 水解产物 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体可以转化成为 FeOOH ^[18], 有研究发现^[19~21], FeOOH 对 PO_4^{3-} 有很强的吸附作用, PO_4^{3-} 与 FeOOH 作用生成多核羟基磷酸铁沉淀; ③由于硫磺的氧化还原电位高于铁的 [$\varphi^\theta(\text{S}/\text{S}^{2-}) = 0.48 \text{ V}$, $\varphi^\theta(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) = -0.44 \text{ V}$], 而且形成 FeS 或 FePO_4 沉淀致使 $\varphi^\theta(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe})$ 、 $\varphi^\theta(\text{Fe}^{3+}/\text{Fe})$ 氧化还原电位降低、 $\varphi^\theta(\text{S}/\text{S}^{2-})$ 氧化还原电位升高, 进一步促进硫磺与海绵铁反应生成 FeS ^[22], 新生成的 FeS 具有较强活性、较大的比表面积和吸附容量^[23], FeS 先将 PO_4^{3-} 吸附在其表面, 由于 FeS 的溶度积 ($K_{\text{sp}} = 6.3 \times 10^{-18}$) 大于 FePO_4 的溶度积 ($K_{\text{sp}} = 1.3 \times 10^{-22}$), FeS 转化为更难溶的 FePO_4 沉淀。可见, 硫铁复合填料体系以吸附沉淀方式将水中的磷去除。

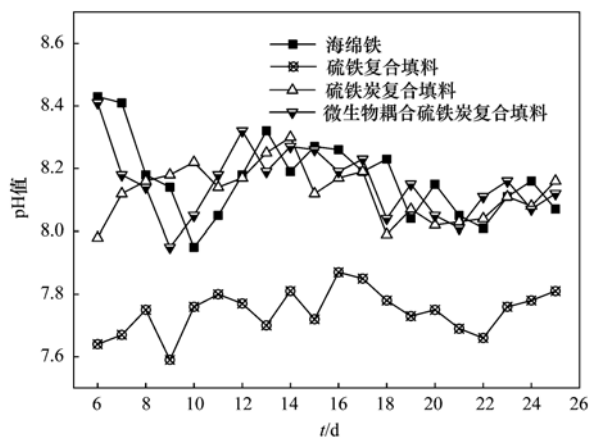


图 6 出水 pH 值

Fig. 6 The pH of effluent

2.3.2 微生物耦合硫铁复合填料脱氮除磷机制

微生物耦合硫铁复合填料体系中存在异养反硝化和硫自养反硝化过程, 体系中的单质 S 可作为硫自养反硝化的电子供体, 当体系碳源不足时能够弥补脱氮效率下降的问题^[24,25]。有研究表明^[26~28], 与单纯的自养或者异养相比, 异养反硝化和硫自养反硝化混养条件下, 可有效缓解系统对碳源的消耗、

稳定体系 pH、提高硝态氮去除率和降低出水硫酸根浓度等问题。此外, 硫自养反硝化过程中产生的 H^+ 能够促进海绵铁的腐蚀除磷过程^[6,10]。

微生物耦合硫铁炭复合填料体系主要是通过吸附和化学沉淀除磷, 与硫铁复合填料反应器除磷作用相似。在生物膜附着初期, 海绵铁填料表面腐蚀产物及溶液主体中 PO_4^{3-} 的传质阻力增加^[29], 一定程度上影响了吸附和沉淀除磷过程。由于铁能够刺激微生物的生长代谢, 随着运行时间延长, 微生物与海绵铁之间产生生物铁作用, 加之硫自养反硝化产生 H^+ , 共同促进了海绵铁的腐蚀除磷。Wang 等^[30] 研究发现, 微生物也可以促进硫磺与单质铁作用生成 FeS 。图 7 所示为微生物耦合硫铁炭复合填料腐蚀除磷过程。此外, 有研究表明, 反硝化聚磷菌等微生物在脱氮的同时也可以吸收一部分磷, 从而将水中磷的含量降低^[10,31]。

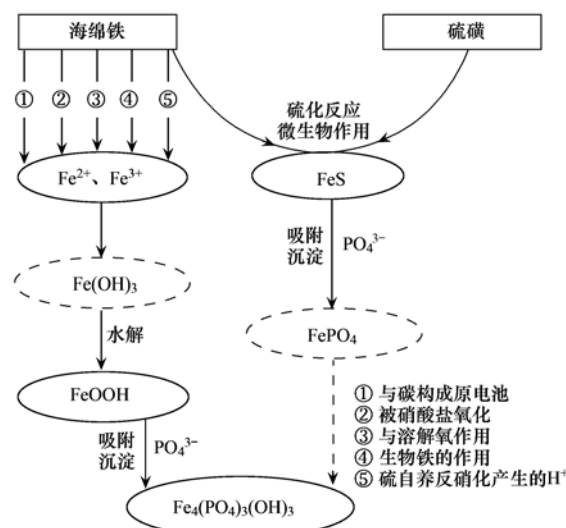


图 7 微生物耦合硫铁炭复合填料腐蚀除磷机制

Fig. 7 Phosphorus removal mechanism of microbial coupling sulfur/sponge iron carbon composite fillers

3 结论

(1) 硫铁复合填料反应器 TP 去除率在 95% 以上, 比单纯海绵铁高出 30%。海绵铁除化学沉淀作用除磷外, 硫铁复合填料通过化学反应产生 FeS , FeS 先将 PO_4^{3-} 吸附其表面, 利用溶度积大小关系转化为 FePO_4 沉淀。此外, Fe^{3+} 的水解产物 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 转化为 FeOOH , FeOOH 可以快速将 PO_4^{3-} 吸附生成 $\text{Fe}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$ 沉淀。

(2) 微生物耦合硫铁炭复合填料体系具有高效脱氮同步除磷功能。运行稳定后, TP 去除率在 83% 以上; TN 去除率约为 90%, 比单纯微生物高出

60%左右。体系将化学除磷与“异养协同自养”复合反硝化系统有机结合,有效弥补微生物耦合硫铁炭复合填料体系反硝化碳源不足、脱氮同步除磷困难等缺点,对于低 C/N 比的再生水深度脱氮除磷具有重要意义。

参考文献:

- [1] 刘毅. 中国磷代谢与水体富营养化控制政策研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
Yi L. Study on phosphorus societal metabolism and eutrophication control policy in China[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [2] 李瞳, 郝瑞霞, 刘峰, 等. A/A/O 工艺脱氮除磷运行效果分析[J]. 环境工程学报, 2011, **5**(8): 1729-1734.
Li T, Hao R X, Liu F, *et al.* Analysis on running effect for biological nitrogen and phosphorus removal of A/A/O technology [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, **5**(8): 1729-1734.
- [3] 孙亮, 彭永臻. 一级 A 标准升级改造应因地制宜[N]. 中国建设报, 2011-09-16(007).
- [4] Kurt M, Dunn I J, Bourne J R. Biological denitrification of drinking water using autotrophic organisms with H_2 in a fluidized-bed biofilm reactor [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1987, **29**(4): 493-501.
- [5] 王海燕, 曲久辉, 雷鹏举. 电化学氢自养与硫自养集成去除饮用水中的硝酸盐[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(6): 711-715.
Wang H Y, Qu J H, Lei P J. Electrochemical hydrogen and sulfur autotrophic denitrification combined process in drinking water treatment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, **22**(6): 711-715.
- [6] Batchelor B, Lawrence A W. Autotrophic denitrification using elemental sulfur [J]. Journal (Water Pollution Control Federation), 1978, **50**(8): 1986-2001.
- [7] Lawrence A W, Bisogni Jr J J, Batchelor B. Autotrophic denitrification using sulfur electron donors[R]. EPA-600/2-78-113. Washington: EPA, 1978.
- [8] Till B A, Weathers L J, Alvarez P J J. Fe(0)-supported autotrophic denitrification [J]. Environmental Science & Technology, 1998, **32**(5): 634-639.
- [9] 闵乐. 催化铁内电解法生产性试验和使用镀铜电极的研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
Min L. The pilot-scale experiment and the study on applying copper-plate in catalyzed iron internal electrolysis process[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [10] 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.
- [11] Yang G C C, Lee H L. Chemical reduction of nitrate by nanosized iron: kinetics and pathways [J]. Water Research, 2005, **39**(5): 884-94.
- [12] Liu H Y, Guo M, Zhang Y. Nitrate removal by Fe^0 /Pd/Cu nano-composite in groundwater[J]. Environmental Technology, 2014, **35**(7): 917-924.
- [13] 顾莹莹, 高孟春, 贾永刚, 等. 海绵铁还原水中硝酸盐的初步研究[J]. 中国给水排水, 2006, **22**(7): 82-84, 88.
Gu Y Y, Gao M C, Jia Y G, *et al.* Preliminary study on reduction of nitrate in water with sponge iron[J]. China Water & Wastewater, 2006, **22**(7): 82-84, 88.
- [14] 王萍. 海绵铁除磷技术研究[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(6): 798-800.
Wang P. Study on removal of phosphate with sponge iron [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2000, **20**(6): 798-800.
- [15] 李海宁, 陈静, 李秋梅, 等. 铁锰复合氧化物包覆海砂的吸附除磷研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(3): 880-886.
Li H N, Chen J, Li Q M, *et al.* Adsorptive removal of phosphate from water using Fe-Mn binary oxide coated sea sand [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(3): 880-886.
- [16] Jiang C, Jia L Y, He Y L, *et al.* Adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution using sponge iron and zeolite [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, **402**: 246-252.
- [17] 毛岩鹏. 水体中铁盐与磷酸盐的相互作用机理及其数学模型研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.
Mao Y P. The mechanism and mathematical model study on the interaction between iron and phosphate in water [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [18] 熊慧欣, 周立祥. 不同晶型羟基氧化铁($FeOOH$)的形成及其在吸附去除 Cr(VI) 上的作用[J]. 岩石矿物学杂志, 2008, **27**(6): 559-566.
Xiong H X, Zhou L X. Synthesis of iron Oxyhydroxides of different crystal forms and their roles in adsorption and removal of Cr(VI) from aqueous solutions [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2008, **27**(6): 559-566.
- [19] Ding X B, Song X W, Boily J F. Identification of fluoride and phosphate binding sites at $FeOOH$ surfaces[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2012, **116**(41): 21939-21947.
- [20] Chitrakar R, Makita Y, Hirotsu T, *et al.* Selective uptake by akaganeite (β - $FeOOH$) of phosphite from hypophosphite and phosphite solutions [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, **51**(2): 972-977.
- [21] 齐晓璐, 孙丽华, 张雅君, 等. 原位水解生成的羟基氧化铁凝聚吸附除磷效能与机制[J]. 环境工程学报, 2014, **8**(2): 505-512.
Qi X L, Sun L H, Zhang Y J, *et al.* Effectiveness and mechanism of the in situ formed iron hydroxide ($FeOxHy$) towards the removal of phosphate by coagulation and adsorption [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(2): 505-512.
- [22] Hu Y, Zheng Z, Jia H M, *et al.* Selective synthesis of FeS and FeS_2 nanosheet films on iron substrates as novel photocathodes for tandem dye-sensitized solar cells [J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2008, **112**(33): 13037-13042.
- [23] 宋世琨, 苏益明, 代朝猛, 等. 纳米硫化铁在环境保护中的应用研究进展[J]. 化工进展, 2016, **35**(1): 248-254.
Song S K, Su Y M, Dai C M, *et al.* Recent advances in the application of iron sulfide nanoparticles in environment [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, **35**(1):

- 248-254.
- [24] Oh S E, Yoo Y B, Young J C, *et al.* Effect of organics on sulfur-utilizing autotrophic denitrification under mixotrophic conditions [J]. *Journal of Biotechnology*, 2002, **92**(1): 1-8.
- [25] 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.
- [26] Zhao Y X, Zhang B G, Feng C P, *et al.* Behavior of autotrophic denitrification and heterotrophic denitrification in an intensified biofilm-electrode reactor for nitrate-contaminated drinking water treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2012, **107**: 159-165.
- [27] Hao R X, Li S M, Li J B, *et al.* Denitrification of simulated municipal wastewater treatment plant effluent using a three-dimensional biofilm-electrode reactor: operating performance and bacterial community[J]. *Bioresource Technology*, 2013, **143**: 178-186.
- [28] 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.
- Meng C C, Hao R X, Wang J C, *et al.* Study on the performance for a coupleddenitrifying system of 3BER-S [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(11): 2817-2823.
- [29] 苗峻赫. 膜生物反应器净化低浓度有机废气中生物膜生长与传输特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- Miao J H. Biofilm formation and mass transport characteristics in a plannar membrane bioreactor for volatile organic compounds treatment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [30] Wang S H, Liang P, Wu Z Q, *et al.* Mixed sulfur-iron particles packed reactor for simultaneous advanced removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(1): 415-424.
- [31] 袁林江, 周国标, 南亚萍. 微生物聚磷及其酶学调控[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(7): 1955-1962.
- Yuan L J, Zhou G B, Nan Y P. Review on microbial polyphosphate accumulation and its enzymological regulation[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(7): 1955-1962.
- [32] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版增补版). 北京: 中国环境科学出版社, 2007.

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