

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第8期

Vol.37 No.8

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

中国地区二次有机气溶胶的时空分布特征和来源分析	陈卓, 刘峻峰, 陶玮, 陶澍 (2815)
中国民用煤燃烧排放细颗粒物中重金属的清单	刘海彪, 孔少飞, 王伟, 严沁 (2823)
基于长时间序列的北京 PM _{2.5} 浓度日变化及气象条件影响分析	苗蕾, 廖晓农, 王迎春 (2836)
2004~2015年北京市清洁点臭氧浓度变化特征	
程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 魏强, 孙彤卉, 王步英, 富佳明, 何乐为, 程兵芬, 皮帅, 马立光, 崔继宪, 孟凡 (2847)	
抗战胜利70周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析	
周静博, 李治国, 路娜, 徐曼, 杨鹏, 高康宁, 王建国, 靳伟 (2855)	
成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征	蒋燕, 贺光艳, 罗彬, 陈建文, 王斌, 杜云松, 杜明 (2863)
嘉兴市春季一次持续雾霾过程中气象条件与污染物变化特征分析	
沈利娟, 王红磊, 李莉, 吕升, 袁婧, 张孝寒, 章国骏, 王翥 (2871)	
泉州市大气降尘中金属元素污染特征及来源解析	张棕巍, 胡恭任, 于瑞莲, 刘贤荣, 胡起超, 王晓明 (2881)
城市室内灰尘重金属水平、影响因素及健康风险: 以贵阳市为例	李晓燕, 汪浪, 张舒婷 (2889)
桂林市酸雨变化特征及来源分析	郭雅思, 于爽, 黎泳珊, 孙平安, 何若雪 (2897)
农田土壤施用系列新型氮肥后气态氮 (NH ₃ 和 N ₂ O) 减排效果比较: 以夏玉米季为例	范会, 姜姗姗, 魏茨, 蒋静艳 (2906)
青海南部高原积雪期与生长季高寒草甸土壤 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 通量的观测	吴建国, 周巧富 (2914)
三峡库区香溪河秋末至中冬 CO ₂ 和 CH ₄ 分压特征分析	张军伟, 雷丹, 肖尚斌, 张成, 穆晓辉, 刘佳, 李迎晨 (2924)
气候变化对于桥水库总磷与溶解氧的潜在影响分析	张晨, 刘汉安, 高学平, 张文娜 (2932)
三峡库区小流域土地利用结构变化及其氮素输出控制效应: 以兰陵溪小流域为例	
吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄, 韩黎阳 (2940)	
入湖河流水质对土地利用时空格局的响应研究: 以洱海北部流域为例	项颂, 庞燕, 储昭升, 胡小贞, 孙莉, 薛力强 (2947)
库湾营养盐循环对三峡库区营养盐运输的影响: 以草堂河为例	王晓彤, 罗光富, 操满, 王雨春, 汪福顺, 邓兵 (2957)
农田溪流人工深潭地貌格局暂态存储特征分析	李如忠, 黄青飞, 钱靖, 殷晓曦, 韦林 (2964)
农田排水沟渠水体-底泥中溶质氮分布特征试验研究	李强坤, 胡亚伟, 宋常吉, 彭聪 (2973)
三峡库区典型消落带土壤微生物生物量碳、氮的变化特征及其影响因素探讨	
柴雪思, 雷利国, 江长胜, 黄哲, 范志伟, 郝庆菊 (2979)	
重金属在河口区潮汐界面与盐度界面响应规律研究	刘静, 郑丙辉, 刘录三, 马迎群, 林岗璇, 汪星, 夏阳 (2989)
深圳地区全氟辛酸磺酸的环境多介质迁移和归趋行为研究	崔晓宇, 张鸿, 罗骥, 张若冰 (3001)
柘林湾表层沉积物中有机氯农药的分布特征及生态风险评价	卫亚宁, 潘佳钊, 宋玉梅, 郭鹏然, 王毅 (3007)
北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析	陈永娟, 胡玮璇, 庞树江, 王晓燕 (3017)
昌邑滨海湿地沉积物的放射性核素水平与环境指示意义	王启栋, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁, 曹磊 (3026)
甯醇对南山老龙洞地下水粪便污染的指示	廖昱, 孙玉川, 王尊波, 梁作兵, 张远瞩 (3034)
漳沱河冲洪积扇地下水中酚类化合物的污染现状与分布特征	昌盛, 赵兴茹, 刘琰, 耿梦娇, 肖晋翠 (3041)
雨季不同土地利用下表层岩溶泉中脂肪酸来源分析	张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 赵瑞一, 梁作兵 (3049)
Zn 系 LDHs 覆膜改性人工湿地沸石基质除磷机制	张翔凌, 黄华玲, 郭露, 陈巧珍, 阮聪颖, 冷玉洁 (3058)
Ce ³⁺ 与 Cu ²⁺ 协同强化芬顿体系氧化苯酚的效能与机制研究	张剑桥, 迟惠中, 宋阳, 罗从伟, 江进, 马军 (3067)
Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究	丁文川, 向星光, 曾晓岚, 厉晓宇, 梁国强, M. M. Mian (3073)
石墨烯-TiO ₂ 光催化剂复合板制备及其对五氯酚的催化降解	徐琪, 周泽宇, 王洪涛 (3079)
单偶氮染料 AY17 的光催化降解动力学及机制	阳海, 魏宏庆, 胡乐天, 胡倩, 阳立平, 刘华杰, 易翔, 易兵 (3086)
硫自养反硝化处理高含氟光伏废水可行性	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (3094)
膜曝气-生物膜反应器生物强化处理阿特拉津废水运行性能	刘春, 于长富, 张静, 陈晓轩, 张磊, 杨景亮 (3101)
ABR 工艺 ANAMMOX 耦合短程硝化协同脱氮处理城市污水	吴鹏, 张诗颖, 宋吟玲, 徐乐中, 沈耀良, 张婷 (3108)
活性污泥厌氧 Fe(III) 还原氨氧化现象初探	李祥, 林兴, 杨朋兵, 黄勇, 刘恒蔚 (3114)
低浓度氨氮废水单级自养脱氮 EGSB 反应器的快速启动	顾书军, 方芳, 李凯, 刘勇, 郭劲松, 陈猷鹏, 蒋甫阳 (3120)
超低溶解氧条件下的 EBPR 系统除磷性能	马娟, 宋璐, 俞小军, 李璐, 孙雷军, 孙洪伟, 李光银 (3128)
活性污泥表面性质对絮凝沉降性能与出水悬浮物的影响	何志江, 赵媛, 张源凯, 王洪臣, 齐鲁, 尹训飞, 张晓军 (3135)
山东省典型金矿区土壤重金属空间特征分析与环境风险评估	
王菲, 吴泉源, 吕建树, 董玉龙, 曹文涛, 康日斐, 曹见飞 (3144)	
电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征	赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 戴巍 (3151)
我国18种不同理化性质的土壤对硒酸盐的吸附解吸作用研究	冯璞阳, 李哲, 者渝芸, 黄杰, 梁东丽 (3160)
流动搅动法研究针铁矿对亚砷酸盐的吸附特征	李鑫, 杨军, 饶伟, 王代长, 杜光辉, 化党领, 刘世亮, 刘红恩 (3169)
聚羧基铝柱撑硅藻土的制备及其对水溶液中 Cu ²⁺ 、Zn ²⁺ 的吸附特性	朱健, 雷明婧, 王平, 张伟丽, 陈仰 (3177)
新型污泥基吸附材料制备及其氨氮去除性能评价	王文东, 刘荟, 张银婷, 杨生炯 (3186)
纳米复合水凝胶的制备及其对重金属离子的吸附	朱倩, 李正魁, 张一品, 韩华杨, 王浩 (3192)
鼠李糖脂与β-环糊精复合提取预测污染土壤中 PAHs 的生物有效性	
张亚楠, 杨兴伦, 卞永荣, 谷成刚, 王芳, 王代长, 蒋新 (3201)	
不同磷水平下丛枝菌根真菌对纳米氧化锌生物效应的影响	景新新, 苏志忠, 邢红恩, 王发园, 石兆勇, 刘雪琴 (3208)
中美水生生物基准受试物种敏感性差异研究	王晓南, 闫振广, 余若祯, 王婉华, 陈丽红, 刘征涛 (3216)
贫营养和痕量抗生素对质粒抗生素抗性适应度代价的影响	林文芳, 陈胜, 万堃, 王春明, 林惠荣, 于鑫 (3224)
不同氮水平下间作对玉米土壤硝化势和氨氧化微生物数量的影响	吕玉, 周龙, 龙光强, 汤利 (3229)
《环境科学》征订启事 (3025) 《环境科学》征稿简则 (3057) 信息 (3072, 3085, 3143)	

Pt/生物炭电极反应器处理水中腐殖酸的研究

丁文川^{1,2}, 向星光¹, 曾晓岚^{1,2}, 厉晓宇¹, 梁国强¹, M. M. Mian¹

(1. 重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆大学低碳绿色建筑国际联合研究中心, 重庆 400045)

摘要: 构建 Pt/生物炭电极反应器, 研究其对水中腐殖酸的去除效率和去除特性. 结果表明, 在电流密度为 $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下反应 300 min, Pt/生物炭电极反应器对水中腐殖酸的去除率为 74.58%, 较 Pt/石墨电极反应器 47.10% 去除率提高 58.3%. Pt/生物炭电极反应器对水中腐殖酸的去除主要通过电化学氧化和气浮作用. 生物炭阴极比石墨阴极能产生更多的 H_2O_2 , 是提高 Pt/生物炭电极反应器对腐殖酸去除率的重要原因. 三维荧光光谱和凝胶色谱法分析表明, Pt/生物炭电极反应器具有较强的氧化能力, 可将较小分子量的腐殖酸直接矿化. 研究结果显示生物炭可以作为一种新型电化学反应器的阴极材料用于对水中有机污染物处理.

关键词: 生物炭; 电极反应器; 腐殖酸; 高级氧化; 气浮

中图分类号: X131.2; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)08-3073-06 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.08.031

Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor

DING Wen-chuan^{1,2}, XIANG Xing-guang¹, ZENG Xiao-lan^{1,2}, LI Xiao-yu¹, LIANG Guo-qiang¹, M. M. Mian¹

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. National Centre for International Research of Low-carbon and Green Buildings, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: A Pt/biochar electrode reactor was developed to remove humic acid in water. The removal efficiency and characteristics of the reactor were investigated. Experimental results showed that Pt/biochar electrode reactor obtained 74.58% removal rate after 300 min reaction under current density of $20 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$. The removal rate was increased by 58.3% comparing with 47.10% removal rate achieved by Pt/graphite electrode reactor. Electrochemical oxidation and air floating played the main roles in removal of humic acid from water. The improved removal efficiency of humic acid in Pt/biochar electrode reactor was attributed to the fact that the biochar cathode could produce more H_2O_2 than graphite cathode. Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy and Gel permeation chromatography measurement revealed that Pt/biochar electrode reactor had strong oxidation capability to mineralize the low molecular weight humic acid directly. It suggests that biochar could be use as an innovative cathode material of electrode reactor for organic pollutants treatment in water.

Key words: biochar; electrode reactor; humic acids; advanced oxidization; air flotation

天然有机物(NOM)在水体和土壤中广泛存在, 其组成复杂, 包括脂肪族、有色和芳香族化合物, 同时这些化合物的化学结构和分子量也不同. 近几十年来, 很多报道已证实 NOM 对饮用水的污染已是一个普遍现象^[1~3]. 环境中存在的 NOM 大部分为腐殖质类有机物, 其过量的存在会给城镇供水系统带来不良影响, 主要包括: ①影响出水的色度、气味; ②提高水处理工艺中混凝剂和消毒剂的用量, 进而增加污泥产量和消毒副产物(DBP)产生; ③促进配水系统中微生物增长; ④提高对水中重金属的络合作用和有机污染物的吸附能力^[4]. 有研究表明, 水中腐殖质主要组成部分是腐殖酸, 因此, 如何有效地去除水中腐殖酸至关重要.

与传统的膜分离法、混凝沉淀法、吸附法和生物降解法等水中腐殖酸处理技术相比, 高级氧化技术(AOPs)更具有高效性和易操作性. 其中, 电化学

高级氧化(EAOPs)可以直接产生羟基自由基 $[\cdot\text{OH}]$ 而不需要使用化学试剂, 降低了在运输、储存、操作过程中的潜在风险, 被认为是一种极具应用前景的高级氧化技术. 电化学高级氧化机制可分为直接电化学氧化和间接电化学氧化. 直接电化学氧化(又称阳极氧化)是有机物被阳极表面产生的羟基自由基直接氧化的过程^[5], 广泛使用的阳极电极如 Pt、 IrO_2 、 RuO_2 等对有机物都有较好的去除效果; 间接电化学氧化是利用阴极产生具有强氧化作用的氧化剂如 Cl_2 、 H_2O_2 使有机物氧化. 与阳极低效的 $[\cdot\text{OH}]$ 产生量相比, 阴极产生 H_2O_2 间接生成

收稿日期: 2016-02-02; 修订日期: 2016-03-30

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07102-001-004); 重庆市基础与前沿研究计划项目(CSTC2014JCYJA20019); 重庆大学大型仪器设备开放基金项目(201406150061)

作者简介: 丁文川(1969~), 男, 教授, 主要研究方向为污水和固体废物污染控制与资源化, E-mail: dingwenchuan@cqu.edu.cn

[·OH]更为高效.近几年来关于以碳材料作为阴极材料产生 H_2O_2 的研究成为国内外热点,主要的碳材料包括石墨^[6]、玻碳^[7]、碳纤维^[8,9]和气体扩散电极^[10]等碳材料,而生物炭作为一种新型碳材料,其原料来源广泛、制备过程简单,并且具有较大的比表面积和良好的导电能力^[11,12],可以作为一种低成本的电极材料.目前,以生物炭作阴极材料进行有机物间接氧化的研究还未见报道.为此,本研究构建以生物炭为阴极、Pt 为阳极的电极反应器处理水中腐殖酸,将直接电化学氧化与间接电化学氧化相结合,探究该反应器对水中腐殖酸的去除特性.

1 材料与方法

1.1 生物炭阴极制作

生物炭由废弃椰子壳在 700°C 、氮气氛围下热解 60 min 制得;将所得生物炭研磨,取 80 ~ 100 目的颗粒,以少量聚偏二氟乙烯(PVDF)为粘结剂, N,N -二甲基乙酰胺(DMAc)为有机溶剂,搅拌均匀制得混合炭浆,将混合浆料均匀涂在石墨纸两面上($5\text{ cm} \times 4\text{ cm}$),在 105°C 下干燥 12 h(去除材料孔隙中有机溶剂)制得生物炭阴极.

1.2 Pt/生物炭电极反应器

反应器采用有机玻璃制作的矩形反应槽($10\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 10\text{ cm}$),阳极采用钛网表面涂镀 Ti/Pt 电极($5\text{ cm} \times 4\text{ cm}$),阴极为椰子壳生物炭电极,电极间距为 2.0 cm,用稳压直流电源输出恒定的电流进行反应.实验中将反应器放置于磁力搅拌器上,并在反应器阴极设置增氧泵曝气.

1.3 腐殖酸溶液配制

准确称取 2.000 g 腐殖酸(化学纯,天津光复公司)于 100 mL 浓度 $0.1\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 NaOH 溶液里充分搅拌后,用 $0.45\text{ }\mu\text{m}$ 的滤膜过滤去除不溶性杂质,将滤液移入 1 000 mL 的容量瓶中定容作为储备液.过滤后的滤膜在 105°C 下烘干至恒重,得出滤膜上残留物的重量,最后计算出 1 000 mL 容量瓶中腐殖酸的浓度.将配制好的储备液避光保存于 5°C 下,实验中腐殖酸溶液通过稀释储备液配制而成.

1.4 实验方法

作为对比,选用石墨片与生物炭分别做反应器阴极,测定各自反应器中腐殖酸的去除率和阴极产 H_2O_2 浓度.

腐殖酸去除:取 300 mL 腐殖酸溶液(调整初始 $\text{pH} = 7.0$ 、浓度 $50\text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)于反应槽中,同时在阴

极处用增氧泵以 $1.5\text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 气体流量持续曝气,用 $0.05\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{SO}_4$ 做溶液电解质,在电流密度为 $20\text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下通电持续反应,实验过程中按设定的时间间隔取样测定溶液中剩余腐殖酸浓度.腐殖酸去除率计算见式(1).

$$D = \frac{c_0 - c_t}{c_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, D 是去除率(%), c_0 和 c_t 分别为初始和反应 t 时后溶液中腐殖酸浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

阴极生成 H_2O_2 浓度:取 300 mL 去离子水(初始 $\text{pH} = 7$)于反应槽中,其他条件同前,实验过程中按设定的时间间隔取样测定溶液中 H_2O_2 浓度.

溶液表层浮渣中腐殖酸含量:反应结束后,收集反应溶液表层的浮渣,溶于 $0.05\text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}\text{ Na}_2\text{SO}_4$ 溶液中($\text{pH} = 7.0$),测定该溶液中腐殖酸的浓度,计算出浮渣中腐殖酸含量.

1.5 测试方法

采用紫外分光光度法(T6 UV-VIS 光度计,北京普析公司)在 254 nm 处获得系列已知浓度腐殖酸溶液的吸光度值 UV_{254} ,绘制标准曲线,采用线性拟合出换算公式(2).

$$c = 32.113 \times \text{UV}_{254} - 0.1074, R^2 = 0.9995 \quad (2)$$

式中, c 是对应吸光度下腐殖酸的浓度, UV_{254} 是 254 nm 波长紫外光下的吸光度, R^2 是相关系数.然后测定实验过程中溶液的 UV_{254} ,代入上述公式算出溶液中腐殖酸浓度. H_2O_2 浓度测定采用钛试剂分光光度法,波长为 400 nm^[13].用三维荧光光谱法对反应前后腐殖酸荧光特性进行分析^[14].用凝胶色谱法测定反应前后溶液中分子量分布变化,仪器型号:Agilent(安捷伦)110 型,色谱柱型号:2 根串联 G3000PW(XL),G6000PW(XL),流速为 $0.5\text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,进样量 20 μL ,柱温恒定为 40°C ,标准物使用聚乙二醇(PEG),检测器采用示差检测器.

2 结果与讨论

2.1 电极反应器对腐殖酸的去除

生物炭电极与石墨电极反应器对水中腐殖酸去除率随通电时间的变化如图 1. 从中看出,石墨阴极与生物炭阴极体系对腐殖酸的去除率随反应时间均呈上升趋势,但后者去除率始终大于前者.反应 300 min 后,石墨阴极与生物炭阴极体系对腐殖酸的去除率分别为 47.10% 和 74.8%.由于两个反应体系中阴阳极的析氢析氧反应产生 H_2 和 O_2 ,且两个反

反应器持续曝气,因此两个反应体系中均可见气泡产生. 反应后,生物炭阴极体系溶液表面漂浮大量浮渣,而石墨阴极体系中几乎没有浮渣产生. 分别测定浮渣中腐殖酸含量以及溶液中残存的腐殖酸含量,可以计算出两个电极反应器中,通过电化学氧化和气浮作用分别去除的腐殖酸量(如图2).

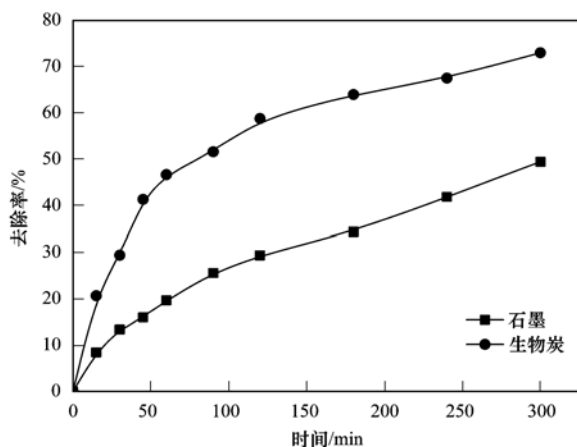


图1 腐殖酸去除率随时间的变化

Fig. 1 Removal rate of humic acids versus reaction time

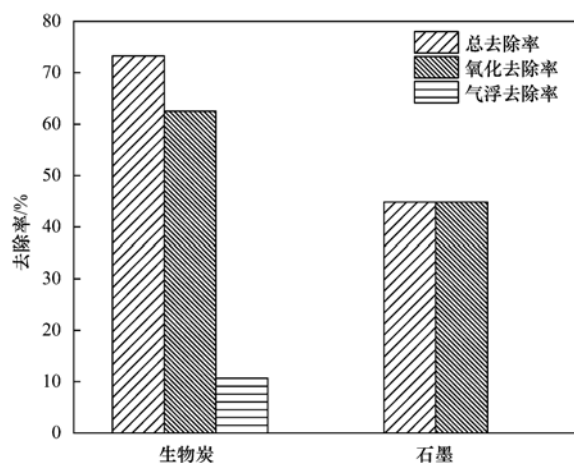


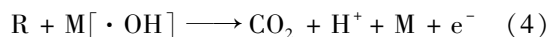
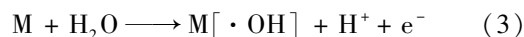
图2 腐殖酸的氧化和气浮去除比例

Fig. 2 Ratio of humic acids removed by electrochemical oxidation and air flotation processes

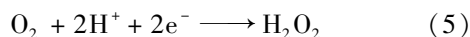
由图2可知,在生物炭阴极体系总去除率中,有10.72%的腐殖酸以气浮途径被去除,其余63.86%以电化学氧化途径去除;而在石墨阴极体系中,所有的腐殖酸通过电化学氧化去除. 另外,两个反应体系中溶液初始pH均为7.0,但反应结束后,石墨电极体系pH为6.9变化不大,而生物炭阴极体系pH大幅降低至2.7. 由于生物炭阴极体系溶液由中性变为酸性,而酸性条件下的腐殖酸在溶液中疏水性强,加上体系中有大量气泡产生,导致部分腐殖酸以气浮的形式被去除. 石墨体系中虽也有气泡产生,但其溶液pH基本没有发生变化,腐殖酸仍以溶

解态的形式存在于溶液中,因此很难通过气浮去除.

从实验结果可知,Pt/石墨与Pt/生物炭反应器对腐殖酸的去除主要是通过电化学氧化作用. 一方面阳极在其表面产生羟基自由基直接氧化腐殖酸,反应机制如式(3)和式(4).



另一方面利用石墨阴极和生物炭阴极产 H_2O_2 间接氧化腐殖酸. 相关研究已发现利用碳材料阴极产 H_2O_2 去除有机污染物尤为有效^[15,16], H_2O_2 产生机制如式(5).



2.2 阴极体系 H_2O_2 产量

生物炭阴极对腐殖酸的去除率始终大于石墨阴极. 且前者体系中溶液pH大幅度下降,而后者pH变化不大,推测生物炭阴极产 H_2O_2 作用大于石墨体系为主要原因. 为此测定了两个体系中 H_2O_2 的产量,如图3所示.

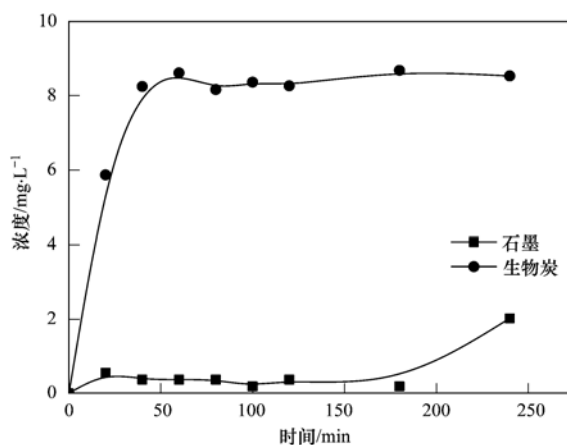
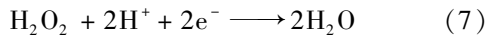
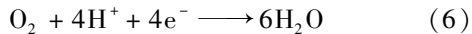


图3 H_2O_2 生成量随时间的变化

Fig. 3 Variation of accumulated H_2O_2 concentration with reaction time

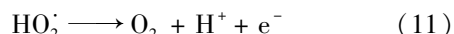
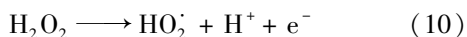
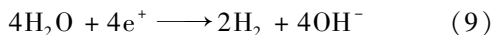
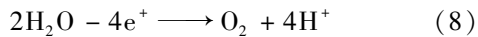
从图3可以看出,生物炭阴极在较短的反应时间内(60 min)体系中 H_2O_2 浓度迅速上升并达到 $8.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其后基本保持在该浓度上下,这与王辉等^[17]的研究结果类似. 而石墨阴极体系中 H_2O_2 浓度在初期基本维持在 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,只有当反应240 min后 H_2O_2 浓度才增加到 $2.21 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 由此可见,生物炭阴极体系更容易产生 H_2O_2 . 这可能是由于生物炭的多孔结构使其比石墨有更大的表面积,而阴极的表面积是影响 H_2O_2 产生重要因素,能够给 O_2 提供更多的活性位点. 另外,有研究发现^[18],普通的商用石墨电极在产生 H_2O_2 同时会伴

随有许多副反应如式(6)和式(7).



从反应方程式可以发现,石墨阴极在产生 H_2O_2 的同时伴随着 H_2O 产生,并且产生的 H_2O_2 在石墨阴极上易被还原成 H_2O ,这些因素很大程度上限制了石墨阴极 H_2O_2 的产生. 因此,以石墨与生物炭分别做体系阴极处理腐殖酸溶液 300 min 后,由于生物炭阴极产生了更多的 H_2O_2 ,间接会产生更多羟基自由基氧化水中的腐殖酸,所以生物炭阴极能提高对水中腐殖酸的去除率.

Wang 等^[19]在单室隔膜电极反应体系中研究发现,阳极室主要发生的反应包括析氧反应[如式(8)]和有机物氧化反应[如式(3)、(4)],随着反应的进行阳极室 H^+ 逐渐积累;而阴极室主要发生的反应包括析氢反应[如式(9)]和产 H_2O_2 反应[如式(5)],随着反应的进行阴极室 OH^- 逐渐积累;但最终阴极室累积 OH^- 与阳极室累积 H^+ 的当量相同. 而本研究采用的生物炭阴极和石墨阴极反应体系均为单室无隔膜电极反应器,由于没有了隔膜的阻挡,阴阳两极积累的 OH^- 和 H^+ 恰好中和,但阴极室产生的 H_2O_2 能扩散到阳极,在阳极被氧化成 $[\text{HO}_2^\cdot]$,最终转化为 O_2 ^[20],存在如式(10)和式(11)的反应.



由上述方程式可知, H_2O_2 被阳极氧化的过程中产生 H^+ ,而在生物炭阴极体系中由于产生了大量 H_2O_2 ,部分 H_2O_2 定会被阳极氧化,从而导致体系中 H^+ 逐渐积累,使生物炭阴极体系中溶液最终显现酸性. 而在石墨阴极体系中由于 H_2O_2 产生量少,所以体系中的 H^+ 很难积累,故表现出反应后溶液中 pH 值变化不大.

2.3 腐殖酸降解途径分析

为了揭示生物炭阴极体系去除腐殖酸的反应过程,本研究分析了反应前后腐殖酸的三维荧光特性,并通过凝胶色谱法测定了反应前后溶液中分子量分布变化.

2.3.1 腐殖酸的三维荧光光谱分析

腐殖酸的三维荧光光谱能间接反映其化学结构和官能团特征,通常情况下,天然环境中各种溶解性有机质的 E_x/E_m 荧光峰位置如下:第一类 E_x 约为

350 ~ 440 nm, E_m 约为 430 ~ 510 nm; 第二类 E_x 约为 310 ~ 360 nm, E_m 约为 370 ~ 450 nm; 第三类 E_x 约为 260 ~ 290 nm, E_m 约为 300 ~ 350 nm; 第四类 E_x 约为 240 ~ 270 nm, E_m 约为 370 ~ 440 nm. 第一类被归为类腐殖酸荧光,第二类与第四类为类富里

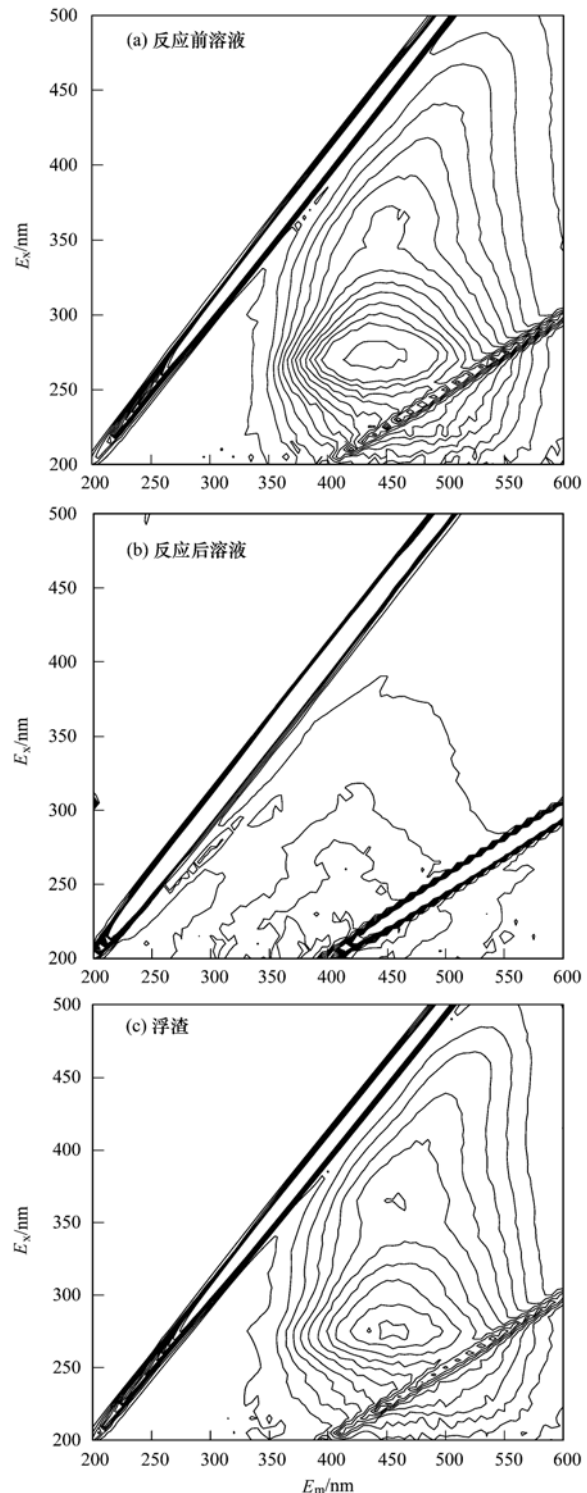


图4 腐殖酸的三维荧光光谱图

Fig. 4 Three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy of humic acids

酸荧光,第三类为类蛋白荧光^[21~23]。

生物炭阴极体系反应前溶液荧光光谱如图 4(a),位于 $E_x/E_m = 270\text{ nm}/435\text{ nm}$ 处覆盖范围广的特征荧光峰为类富里酸荧光峰,其肩峰位于 $E_x/E_m = 365\text{ nm}/455\text{ nm}$ 处的为类腐殖酸荧光峰,覆盖范围较小。经过电极反应器处理 5 h 后,溶液的三维荧光光谱如图 4(b) 所示,可以发现, $E_x/E_m = 365\text{ nm}/455\text{ nm}$ 处的类腐殖酸峰消失, $E_x/E_m = 270\text{ nm}/435\text{ nm}$ 处的类富里酸峰蓝移到 $E_x/E_m = 245\text{ nm}/400\text{ nm}$ 处,且荧光强度明显低于原腐殖酸溶液,说明经过电极反应器处理,溶液中腐殖酸的化学结构发生了变化且数量减少。类富里酸峰蓝移与芳香族化合物的分解、大分子有机物分解成小分子物质、芳香环和链状结构上共轭基团数量的减少、线形结构向非线形结构的转化以及羰基、羟基和胺基等特殊官能团的消失等均有密切联系^[24],分析结果表明,电化学氧化可能使腐殖酸中芳香族单位分解,化合物中羰基和羟基等官能团被降解转化。

对反应后溶液表面浮渣的三维荧光光谱图 4(c) 分析发现,浮渣组分中包含与图 4(a) 中相同的 2 个荧光峰,显示浮渣中腐殖酸未发生化学结构上的变化,因此认为溶液中有一部分腐殖酸通过气浮的物理过程得到去除。

2.3.2 腐殖酸的凝胶色谱分析

凝胶色谱法分析可以测定反应前后溶液中腐殖酸分子量的分布变化,以探究腐殖酸这类大分子有机物的降解转化途径。由图 5 可知,凝胶色谱曲线图中波峰位置没有太大的偏移变化,也没有出现新的波峰,表明溶液中的腐殖酸在去除过程中没有转化为小分子有机物。经统计,原腐殖酸溶液 90% 的相对分子质量分布在 754 ~ 2 346,数均分子量(M_n)和重均分子量(M_w)分别为 1.32×10^3 、 1.77×10^3 。当反应 5 h 后,其溶液中腐殖酸 90% 的相对分子质量分布在 730 ~ 2 250,数均分子量(M_n)和重均分子量(M_w)分别为 1.27×10^3 、 1.68×10^3 。即反应前后溶液中腐殖酸平均分子量和分子量分布变化不大,但经过处理后水中腐殖酸浓度大大降低。从腐殖酸结构特性分析可知:腐殖酸是由多种脂肪族和芳香族单位组成,同时含有如羧基、羟基等特殊官能团。结合前述的三维荧光光谱分析结果,本研究认为生物炭电极反应器在处理过程中将大部分腐殖酸直接氧化矿化。有研究发现^[25,26],光催化过程可将腐殖酸中大分子物质转化为小分子物质,而本研究则表明与光催化反应体系相比,Pt/生物炭电极反应器在反应过程具有持续不断的强氧化能力,从而能将腐殖酸较彻底地氧化分解。

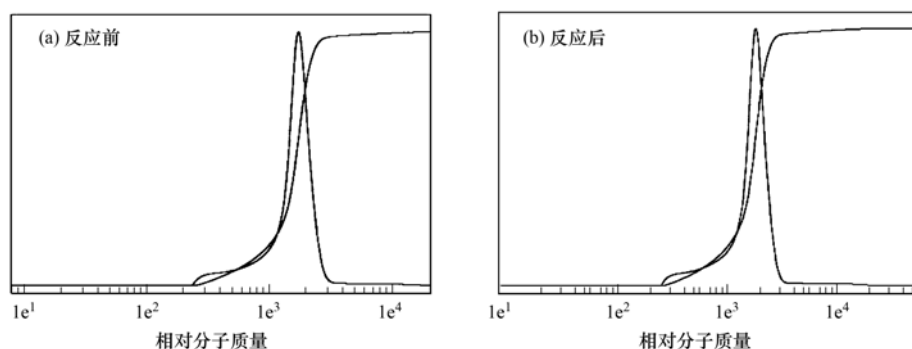


图 5 腐殖酸溶液的凝胶色谱图

Fig. 5 Gel permeation chromatography of humic acids solution

3 结论

(1) Pt/生物炭电极反应器 300 min 内对水中腐殖酸的去除率可达 74.58%,较 Pt/石墨电极反应器 47.10% 的去除率提高 58.30%。

(2) Pt/生物炭电极反应器对水中腐殖酸的去除包括电化学氧化(63.86% 去除率)和气浮作用(10.72% 去除率)两种途径,而 Pt/石墨电极反应器对水中腐殖酸的去除主要是电化学氧化。

(3) 与石墨阴极相比,生物炭阴极能产生大量

H_2O_2 ,而这些 H_2O_2 是提高 Pt/生物炭电极反应器对腐殖酸去除率的重要原因。

(4) Pt/生物炭电极反应器能产生较强的氧化能力,可实现对较小分子量腐殖酸的完全氧化分解。

参考文献:

- [1] Hong H C, Huang F Q, Wang F Y, *et al.* Properties of sediment NOM collected from a drinking water reservoir in South China, and its association with THMs and HAAs formation[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, **476**: 274-279.
- [2] Fabris R, Chow C W K, Drikas M, *et al.* Comparison of NOM character in selected Australian and Norwegian drinking waters

- [J]. *Water Research*, 2008, **42**(15): 4188-4196.
- [3] 周霞, 余刚, 张祖麟, 等. 北京通惠河水表层沉积物中氯苯类有机物污染现状[J]. *环境科学*, 2005, **26**(2): 117-120.
- [4] Matilainen A, Gjessing E T, Lahtinen T, *et al.* An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment [J]. *Chemosphere*, 2011, **83**(11): 1431-1442.
- [5] Martínez-Huitle C A, Brillas E. Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods; a general review[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2009, **87**(3-4): 105-145.
- [6] 岑世宏, 宋晓焱, 褚衍洋. 双极电化学氧化降解水中苯胺[J]. *环境科学*, 2011, **32**(8): 2305-2310.
- [7] Coria G, Pérez T, Sirés I, *et al.* Mass transport studies during dissolved oxygen reduction to hydrogen peroxide in a filter-press electrolyzer using graphite felt, reticulated vitreous carbon and boron-doped diamond as cathodes [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015, **757**: 225-229.
- [8] Ramírez B, Rondán V, Ortiz-Hernández L, *et al.* Semi-empirical chemical model for indirect advanced oxidation of Acid Orange 7 using an unmodified carbon fabric cathode for H_2O_2 production in an electrochemical reactor [J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, **171**: 29-34.
- [9] 曾海燕, 李华亮, 雷恒毅, 等. 活性炭纤维电极电还原产 H_2O_2 的实验研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(3): 711-716.
- [10] 徐文英, 李平, 董滨. 气体扩散电极体系电化学消毒[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 104-110.
- [11] Jiang J H, Zhang L, Wang X Y, *et al.* Highly ordered macroporous woody biochar with ultra-high carbon content as supercapacitor electrodes[J]. *Electrochimica Acta*, 2013, **113**: 481-489.
- [12] Huggins T, Wang H M, Kearns J, *et al.* Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **157**: 114-119.
- [13] Sellers R M. Spectrophotometric determination of hydrogen peroxide using potassium titanium (IV) oxalate [J]. *The Analyst*, 1980, **105**(1255): 950-954.
- [14] 傅平青, 刘丛强, 尹祚莹, 等. 腐殖酸三维荧光光谱特性研究[J]. *地球化学*, 2004, **33**(3): 301-308.
- [15] Bocos E, Alfaya E, Iglesias O, *et al.* Application of a new sandwich of granular activated and fiber carbon as cathode in the electrochemical advanced oxidation treatment of pharmaceutical effluents [J]. *Separation and Purification Technology*, 2015, **151**: 243-250.
- [16] Borràs N, Arias C, Oliver R, *et al.* Mineralization of desmetryne by electrochemical advanced oxidation processes using a boron-doped diamond anode and an oxygen-diffusion cathode [J]. *Chemosphere*, 2011, **85**(7): 1167-1175.
- [17] 王辉, 卞兆勇. Pd/C 气体扩散电极用于电生成 H_2O_2 降解苯酚的研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1506-1512.
- [18] Da Pozzo A, Di Palma L, Merli C, *et al.* An experimental comparison of a graphite electrode and a gas diffusion electrode for the cathodic production of hydrogen peroxide [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2005, **35**(4): 413-419.
- [19] Wang H, Wang J L. The cooperative electrochemical oxidation of chlorophenols in anode-cathode compartments [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, **154**(1-3): 44-50.
- [20] Brillas E, Bastida R M, Llosa E, *et al.* Electrochemical destruction of aniline and 4-chloroaniline for wastewater treatment using a carbon-PTFE O_2 -fed cathode [J]. *Journal of the Electrochemical Society*, 1995, **142**(6): 1733-1741.
- [21] Baker A. Fluorescence properties of some farm wastes: implications for water quality monitoring [J]. *Water Research*, 2002, **36**(1): 189-195.
- [22] Wu F C, Tanoue E. Isolation and Partial characterization of dissolved copper-complexing ligands in streamwaters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(18): 3646-3652.
- [23] Leenheer J A, Croué J P. Characterizing aquatic dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(1): 18A-26A.
- [24] Wang Z W, Wu Z C, Tang S J. Characterization of dissolved organic matter in a submerged membrane bioreactor by using three-dimensional excitation and emission matrix fluorescence spectroscopy [J]. *Water Research*, 2009, **43**(6): 1533-1540.
- [25] 安延涛. 光催化法降解饮用水源水中腐殖酸和苯酚的试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008. 53-57.
- [26] 吴伟. 二氧化钛光催化降解腐殖酸的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010. 55-58.

CONTENTS

Spatiotemporal Distribution and Source Attribution of SOA in China	CHEN Zhuo, LIU Jun-feng, TAO Wei, <i>et al.</i> (2815)
Emission Inventory of Heavy Metals in Fine Particles Emitted from Residential Coal Burning in China	LIU Hai-biao, KONG Shao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (2823)
Diurnal Variation of PM _{2.5} Mass Concentration in Beijing and Influence of Meteorological Factors Based on Long Term Date	MIAO Lei, LIAO Xiao-nong, WANG Ying-chun (2836)
Characteristics of Ozone Background Concentration in Beijing from 2004 to 2015	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2847)
Online Sources about Atmospheric Fine Particles During the 70th Anniversary of Victory Parade in Shijiazhuang	ZHOU Jing-bo, LI Zhi-guo, LU Na, <i>et al.</i> (2855)
Pollution Characteristics of Inorganic Water-soluble Ions in Atmospheric Particulate Matter in Chengdu Plain	JIANG Yan, HE Guang-yan, LUO Bin, <i>et al.</i> (2863)
Observation Analysis on the Characteristics of Meteorological Elements and Pollutants During a Continuous Fog and Haze Episode in Spring in Jiaying City	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LI Li, <i>et al.</i> (2871)
Characteristics and Source Apportionment of Metals in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2881)
Level and the Courses of Heavy Metals and Its Risk Assessment in Indoor Dust of City: Take Guiyang as a Case	LI Xiao-yan, WANG Lang, ZHANG Shu-ting (2889)
Chemical Characteristics and Source of Acid Precipitation in Guilin	GUO Ya-si, YU Shi, LI Yong-shan, <i>et al.</i> (2897)
Assessment of Gaseous Nitrogen (NH ₃ and N ₂ O) Mitigation After the Application of a Range of New Nitrogen Fertilizers in Summer Maize Cultivation	FAN Hui, JIANG Shan-shan, WEI Ying, <i>et al.</i> (2906)
Soil CO ₂ , CH ₄ and N ₂ O Fluxes from Alpine Meadows on the Plateau of Southern Qinghai Province During Snow Cover Period and Growing Seasons	WU Jian-guo, ZHOU Qiao-fu (2914)
Partial Pressure of Carbon Dioxide and Methane from Autumn to Winter in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Jun-wei, LEI Dan, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2924)
Potential Impacts of Climate Change on Phosphorus and DO in Yuqiao Reservoir	ZHANG Chen, LIU Han-an, GAO Xue-ping, <i>et al.</i> (2932)
Land Use Structure Change and Its Control Effect of Nitrogen Output in a Small Watershed of Three Gorges Reservoir Area: A Case Study of Lanlingxi Watershed	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (2940)
Response of Inflow Water Quality to Land Use Pattern in Northern Watershed of Lake Erhai	XIANG Song, PANG Yan, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i> (2947)
Effect of Nutrient Cycles in Tributaries on the Transport of Nutrient in the Three Gorge Reservoirs: A Case Study of Caotang River	WANG Xiao-tong, LUO Guang-fu, CAO Man, <i>et al.</i> (2957)
Transient Storage Characteristics of Artificial Pool Geomorphic Structure in an Agricultural Headwater Stream	LI Ru-zhong, HUANG Qing-fei, QIAN Jing, <i>et al.</i> (2964)
Distribution Characteristics of Solute Nitrogen in the Water-Sediment of Farmland Drainage Ditch	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, SONG Chang-ji, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics and Influencing Factors of Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Drawdown Area in the Three Gorges Reservoir	CHAI Xue-si, LEI Li-guo, JIANG Chang-sheng, <i>et al.</i> (2979)
Response Behaviors of Heavy Metals at Tidal Currents Interface and Salinity Interface in the Estuary Area	LIU Jing, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (2989)
Simulation of Multimedia Transfer and Fate of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) in Shenzhen Region	CUI Xiao-yu, ZHANG Hong, LUO Ji, <i>et al.</i> (3001)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Sediments of Zhelin Bay in Guangdong Province, China	WEI Ya-ning, PAN Jia-chuan, SONG Yu-mei, <i>et al.</i> (3007)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Dissolved Organic Matter in Beiyun River	CHEN Yong-juan, HU Wei-xuan, PANG Shu-jiang, <i>et al.</i> (3017)
Distribution and Environmental Significances of Radionuclides in the Sediment of the Changyi Coastal Wetland	WANG Qi-dong, SONG Jin-ning, LI Xue-gang, <i>et al.</i> (3026)
Fecal Contamination in Laolongdong Underground River as Measured by the Sterol Biomarkers	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3034)
Distribution Characteristics and Pollution Status of Phthalate Esters in the Groundwater of Hutuo River Pluvial Fan	CHANG Sheng, ZHAO Xing-nu, LIU Yan, <i>et al.</i> (3041)
Impacts of Land Use on the Source of Dissolved Fatty Acids in Epikarst Spring During Rainy Season	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3049)
Mechanisms of Phosphorus Removal by Modified Zeolites Substrates Coated with Zn-LDHs in Laboratory-scale Vertical-flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, HUANG Hua-ling, GUO Lu, <i>et al.</i> (3058)
Synergistic Enhancement on Oxidation of Phenol by Fenton Processes by Adding Ce ³⁺ and Cu ²⁺ Ions	ZHANG Jian-qiao, CHI Hui-zhong, SONG Yang, <i>et al.</i> (3067)
Removal of Humic Acid from Water Using Pt/biochar Electrode Reactor	DING Wen-chuan, XIANG Xing-guang, ZENG Xiao-lan, <i>et al.</i> (3073)
Generation of Graphene-titanium Dioxide Nanotubes Catalytic Board and Its Photocatalysis Capability to Degrade Pentachlorophenol	XU Qi, ZHOU Ze-yu, WANG Hong-tao (3079)
Photocatalytic Degradation Kinetics and Mechanism of Monoazo Dye Acid Yellow 17 by UV/TiO ₂ in Aqueous Solution	YANG Hai, WEI Hong-qin, HU Le-tian, <i>et al.</i> (3086)
Feasibility of Sulfur-based Autotrophic Denitrification of Photovoltaic Wastewater Containing High Fluorine	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (3094)
Operation Performance of a Bioaugmented Membrane-aerated Biofilm Reactor Treating Atrazine Wastewater	LIU Chun, YU Chang-fu, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3101)
Nitrogen Removal of Municipal Wastewater by ANAMMOX Coupled Shortcut Nitrification in Anaerobic Baffled Reactor	WU Peng, ZHANG Shi-ying, SONG Yin-ling, <i>et al.</i> (3108)
Simultaneous Ferric Reduction with Ammonia Oxidation Phenomena in Activated Sludge in Anaerobic Environment	LI Xiang, LIN Xing, YANG Peng-bing, <i>et al.</i> (3114)
Rapid Start-up of One-stage Autotrophic Nitrogen Removal Process in EGSB Reactor for Wastewater with Low Concentration of Ammonia	GU Shu-jun, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (3120)
Phosphorus Removal Performance in EBPR System under Extra-low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, SONG Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3128)
Influence of Activated Sludge Surface Properties on Flocculating Settling and Effluent Suspend Solid	HE Zhi-jiang, ZHAO Yuan, ZHANG Yuan-kai, <i>et al.</i> (3135)
Spatial Characteristics and Environmental Risk of Heavy Metals in Typical Gold Mining Area of Shandong Province	WANG Fei, WU Quan-yuan, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (3144)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in an E-waste Dismantling Area and Their Distribution Characteristics	ZHAO Ke-li, FU Wei-jun, YE Zheng-qian, <i>et al.</i> (3151)
Selenate Adsorption and Desorption in 18 Kinds of Chinese Soil with Their Physicochemical Properties	FENG Pu-yang, LI Zhe, ZHE Yu-yun, <i>et al.</i> (3160)
Adsorption Characteristics of Arsenite on Goethite by Flow Stirring Method	LI Xin, YANG Jun, RAO Wei, <i>et al.</i> (3169)
Preparation of Poly-hydroxy-aluminum Pillared Diatomite and Characteristics of Cu ²⁺ , Zn ²⁺ Adsorption on the Pillar in Aqueous Solutions	ZHU Jian, LEI Ming-jing, WANG Ping, <i>et al.</i> (3177)
Preparation and NH ₄ ⁺ -N Removal Performance of a Novel Filter Substrate Made from Sludges	WANG Wen-dong, LIU Hui, ZHANG Yin-ting, <i>et al.</i> (3186)
Preparation of Nanocomposite Hydrogel and Its Adsorption of Heavy Metal Ions	ZHU Qian, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (3192)
Prediction of PAHs Bioavailability in Spiked Soil by Composite Extraction with Hydroxypropyl-β-cyclodextrin and Rhamnolipid	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (3201)
Biological Effects of ZnO Nanoparticles as Influenced by Arbuscular Mycorrhizal Inoculation and Phosphorus Fertilization	JING Xin-xin, SU Zhi-zhong, XING Hong-en, <i>et al.</i> (3208)
Difference of Species Sensitivities for Aquatic Life Criteria in China and the USA	WANG Xiao-nan, YAN Zhen-guang, YU Ruo-zhen, <i>et al.</i> (3216)
Effects of Low-level Nutrition and Trace Antibiotics on the Fitness Cost of Plasmids Bearing Antibiotic Resistance	LIN Wen-fang, CHEN Sheng, WAN Kun, <i>et al.</i> (3224)
Effect of Different Nitrogen Rates on the Nitrification Potential and Abundance of Ammonia-oxidizer in Intercropping Maize Soils	LÜ Yu, ZHOU Long, LONG Guang-qiang, <i>et al.</i> (3229)

《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8月15日 第37卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 8 Aug. 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