



全国中文核心期刊
中国科技核心期刊

环境工程学报

Chinese Journal of Environmental Engineering



第7卷 第12期

Vol.7 No.12

中国科学院
生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版

12
2013

目次

水污染防治

低温条件下 BAF + SPD 组合工艺对滇池入湖河水的脱氮效果	吴伟龙	杨璐华	杨飞飞	赵 兰	吴为中 (4597)
水环境中腐殖酸与镉离子结合作用影响因素	杨 毅	王晓昌	金鹏康	兰亚琼	(4603)
产酸克雷伯氏菌 <i>Klebsiella oxytoca</i> 对硝基苯及 4-氯硝基苯的降解	杨 娟	黄华伟	任 源		(4607)
阴极负载不同催化剂对天然水体中沉积物微生物燃料电池运行特性的影响	付 飞	任月萍	李秀芬	华兆哲	潘丹云 赵亚楠 (4614)
容积负荷对 ANAMMOX 生物滤池脱氮效能的影响及其基质动力学	刘雪娇	田智勇	王思宇	宋永会	杨 宏 徐 浩 (4619)
膜生物反应器污泥内源消化及 SMP 变化	胡以松	王晓昌	陈 华	金鹏康	张永梅 (4625)
温度对活性污泥-生物膜复合工艺中红斑囊体虫爆发性繁殖影响	董 滨	王 瑜	沈丹妮	詹 咏	元 燕 杨 瑒 何群彪 (4631)
黄菖蒲和狭叶香蒲根系对氮磷的吸收动力学	陈国元	李国新	唐 凯		(4638)
复合赤泥在高浓度含磷废水处理中的应用	丁超峰	陈建平	盛彦清	曲瑛璇	孙启耀 (4643)
吸附-预沉淀 MBR 工艺处理生活污水及膜污染控制效果	周 岩	李 继	吕小梅	孙飞云	牛和新 (4648)
臭氧微气泡深度处理染料废水生化出水	冯 玥	王 璐	陈泉源		(4653)
骨炭对水中不同形态 Sb 吸附和解吸的影响	徐 峰	黄益宗	蔡立群	孙晓铧	刘崇敏 王 斐 李 季 (4659)
棉秆基活性炭的制备及其对 2,4-二硝基苯酚的吸附	贾佳祺	李坤权	张雨轩	张秀莲	(4666)
挥发性污染物苯在水气界面耦合扩散的浓度分布	徐 杰	吴慧芳	陈丽萍		(4673)
臭氧辅助 UV/Fenton 法处理电镀添加剂生产废水	何华良	刘国光	姚 坤	吕文英	李 鹏 (4678)
复配混凝剂理化特性及性能	蒋绍阶	盛贵尚	黄新丽	向 平	冯欣蕊 (4683)
不同生育期美人蕉-微生物修复富营养化水体	毛 昕	王丽红	张光生		(4689)
ASBBR 处理超高盐榨菜腌制废水	李晓品	魏姗姗	韩 懿	周 健	陈 涔 杨 志 (4697)
水位波动带氮素迁移转化规律	李 翔	席北斗	姜永海	袁志业	张进保 安 达 杨 昱 马志飞 (4703)
Fenton 氧化破解污水处理厂污泥	李小平	张 健	洗 萍	车锐媚	刘丽芳 (4709)
基于层次分析法的电解锰废水处理技术评价	汪启年	王 璠	于宏兵		(4714)
紫外催化湿式双氧水氧化处理化学镀铜废液	刘 鹏	李朝林	孔祥瀚	陆 钢	崔海波 张文方 (4719)
几种印染助剂对壳聚糖稳定纳米铁去除酸性品红的影响	金晓英	余 兵	杨 静	陈祖亮	(4724)
金霉素在活性污泥上的吸附行为	李 慧	王玉军	贵伟伟	强志民	(4729)
黄麻纤维活性炭对亚甲基蓝和甲基橙吸附动力学	何丽芬	刘其霞	季 涛	高 强	(4735)
改性蜂窝煤渣吸附 Cr(VI) 的动力学和热力学性能	余美琼	杨金杯	陈文韬	龚 轩	(4741)
响应面分析法优化稀土废水 MAP 沉淀法脱氮	王 浩	成官文	宋晓薇	徐子涵	蒙金结 董传强 (4748)
改进隔板絮凝池的数值模拟和实验	岳 兵	鄢碧鹏	叶 飞	蔡小虎	(4755)
CS-Fe 和 CS-Fe/Ni 的制备及其用于去除钴离子	翁秀兰	黄兰兰	钟燕华	林 深	陈祖亮 (4761)
基于三波长透率的水体色度检测标准	赵晓伟	沈为民	黄 杰	余 庆	楼 俊 (4766)
污泥负荷对 UASB 处理低浓度污水运行效果和污泥性质的影响	刘 尹	刘海宁	张凯松		(4773)
四环素高效降解酵母菌 <i>Trichosporon mycotoxinivorans</i> XPY-10 降解特性	冯福鑫	许旭萍	程群星	韩永和	(4779)
改性油页岩灰渣对水中 DNP 吸附去除效果	金兰淑	王建国	李 平	申 龙	(4786)
植物收割频率对水生植物滤床深度处理养猪废水的影响	廖德润	林国徐	王 振	刘玉洪	刘超翔 方 静 (4793)
臭氧-曝气生物滤池深度处理印染制革园区废水	余 彬	刘 锐	程家迪	范举红	李昌湖 冉 坤 曹国华 陈吕军 (4799)
电吸附对水中盐类、氨氮、COD 的去除效果分析	崔馨心	谢海燕	肖 乐	李雅梅	许 鹏 孙媛媛 (4805)
超声波对氢氧化镁混凝性能及絮体特性影响	焦秀梅	郭晓玉	赵建海	刘诗雨	封 娜 (4811)
复合人工湿地对水源地库区水质净化效果分析	赵 晶	赵和平	许良峰	曾 峥	丁哲利 赖春宇 赵凤亮 杨肖娥 (4816)
电化学氧化法深度处理垃圾焚烧发电厂沥滤液生化出水	谭怀琴	全学军	陈 波	程治良	(4823)

粉煤灰沸石负载 Ce^{3+}/TiO_2 光催化降解水中的菲和蒽	朱 满	湛建宇	李小明	骆其金	杨 麒(4829)
漆酶对活性黑 KN-B 和直接大红染料的脱色性能		杨 波	杜 丹	孙 也	汪旭明(4835)
磷酸根和硫离子在纳米铁表面的竞争吸附		茹春云	孟凡生	王业耀	杨 琦(4841)
铁炭微电解法降解 TAIC 废水	荣少鹏	孙亚兵	赵泽华	张 艳	陆素洁
SBR 处理高浓度养猪废水工艺条件	赵君楠	孟昭福	孟祥至	朱 军	闫晓艺
臭氧-BAF 组合工艺对石化行业废水深度处理的中试研究					任 爽(4854)
	杜白雨	付存库	徐继峥	李秀红	庄春锋
重金属杂质对磷酸铵镁结晶法处理制药废水的影响		王国文	王 栋	王明明	徐晓晨
3 种药剂对普通小球藻的抑制作用	高 磊	张鸿涛	范 婧	周北海	王玉双
丙烯酸改性壳聚糖磁性颗粒处理模拟废水中氨氮					田欣欣
负载 $V_2O_5-WO_3/TiO_2$ 掺炭纤维脱除烟气中 Hg^0		王龙杰	刁永发	范红兵	王琳琳(4881)

大 气 污 染 防 治

铜-胺改性 ZSM-5 吸附剂的制备及其对 NO_x 的净化机理	张 惠	王喜芹	栾志强	宋怀河	叶平伟	李 凯(4887)
气液两相旋流喷嘴雾化特性			袁文博	向晓东	石 零	吴高明(4891)
河北廊坊地区大气污染物变化特征与来源追踪	田 谧	吉东生	王跃思	胡 波	凌 红	徐仲均(4895)
锰铜复合催化剂常温催化氧化 NO			张豪杰	王发根	刘 爽	何丹农(4904)
亚铁离子生物氧化-还原法连续脱除硫化氢			吴莉莉	刘宗瑜	秦松岩	程龙军(4909)
Mn 的氧化价态对 $Mn/\gamma-Al_2O_3$ 催化剂催化臭氧氧化气相低浓度甲苯的影响			曾小岚	高 倩	曹彦荣	朱天乐(4915)
以焦炭为填料的生物滴滤塔处理含挥发性脂肪酸臭气	邓志华	宁 平	李嘉艳	陈 渝	张 健	周 成(4921)
间歇运行式生物滴滤池处理油漆废气中试研究	陈子平	李建军	安太成	孙端方	许玫英	孙国萍(4929)
臭氧氧化苯乙烯有机气体性能及机制			何觉聪	黄倩茹	叶杞宏	罗雨薇
碱式硫酸铝溶液吸收二氧化硫					王巧玉	邓先和(4940)
密相半干法低温同时脱硫脱硝影响因素			赵荣志	梁宝瑞	宋存义	冷廷双(4945)

固 体 废 物 处 置

矿区炼金废渣的固化/稳定化处理	赵述华	张太平	陈志良	潘伟斌(4951)
城市生活垃圾在机械炉排炉内焚烧过程研究及数值模拟		朱新才	胡桂川	林顺洪(4958)
好氧堆肥反应器对人类便堆肥中温降解的中试研究	胡 涛	王晓昌	李 倩	时红蕾
高炉渣调质作为矿渣纤维原料	李 杰	张玉柱	刘卫星	邢宏伟
水葫芦与厨余垃圾混合好氧堆肥中氮素变化及对腐熟度的影响		张 锐	李 兵	樊 星
pH 对污水污泥中污染物浸出的影响		李娟英	陈洁芸	曹宏宇
底泥煤渣帽封与药剂投加联用原位稳定化技术对上覆水体及底泥 pH-Eh-COD 的影响		章 萍	钱光人	王天琪
		陆 源	谢育红	郑育毅
不同热处理温度对污泥厌氧发酵产氢的影响				刘常青(4995)
水泥窑协同处置过程中 Pb、Cd 的挥发特性	崔敬轩	闫大海	李 丽	王祖光
长柄扁桃核壳活性炭的制备及表征			杨 丹	刘永军
				张 弛
				张应龙(5007)

土 壤 污 染 防 治

钙对李氏禾富集和耐受铬的调控作用	王文萍	张 慧	刘 杰	黄晓武	顾 晨(5012)
粉质粘土和粉质砂土对铬渣渗滤液中 $Cr(VI)$ 吸附特性		李喜林	王来贵	郝 喆	刘 玲(5019)
上海市桃浦垃圾填埋场封场植被的重金属吸收和积累特征					
	陈志涛	覃仁娟	李子峰	茹广欣	姜灵敏
				张 琪	张冬梅(5025)

环 境 生 物 技 术

纳污水体中好氧脱氮菌的筛选与氨氮去除特性	于鲁冀	杨 强	李廷梅	吴小宁	郭东凡(5032)
基于 FPGA 的 SBR 呼吸速率的测量与应用		衷卫声	钟 铮	张 平	王文海(5037)
一株降解纤维素梭形芽胞杆菌的筛选与鉴定	吴 翔	甘炳成	彭卫红	贾定洪	谢丽源
附着生活型轮虫的悬浮固体去除特性					沈成媛
					万小娟(5047)

CONTENTS

Effect of nitrogen removal of river water treatment using BAF + SPD combined process at low temperature	Wu Weilong Yang Luhua Yang Feifei Zhao Lan Wu Weizhong(4597)
Influencing factors of binding of humic acid and cadmium ion in the water environment	Yang Yi Wang Xiaochang Jin Pengkang Lan Yaqiong(4603)
Degradation of nitrobenzene and 4-chloronitrobenzene by <i>Klebsiella oxytoca</i>	Yang Juan Huang Huawei Ren Yuan(4607)
Effect of various cathode modifications on operation performance of sediment microbial fuel cells in freshwater	Fu Fei Ren Yueping Li Xiufen Hua Zhaozhe Pan Danyun Zhao Yanan(4614)
Influence of volumetric loading on nitrogen removal of ANAMMOX filtration and its matrix dynamics	Liu Xuejiao Tian Zhiyong Wang Siyu Song Yonghui Yang Hong Xu Hao(4619)
SMP variation during endogenous digestion of activated sludge from a MBR process	Hu Yisong Wang Xiaochang Chen Hua Jin Pengkang Zhang Yongmei(4625)
Effect of temperature on explosive breeding of <i>Aeolosoma hemprichi</i> in activated sludge-biofilm hybrid system	Dong Bin Wang Yu Shen Danni Zhan Yong Qi Yan Yang Yang He Qunbiao(4631)
Kinetics of nitrogen and phosphorus uptake by root system of <i>Iris pseudacorus</i> L. and <i>Typha angustifolia</i> L.	Chen Guoyuan Li Guoxin Tang Kai(4638)
Application of composite red mud in treatment of high phosphate-containing wastewater	Ding Chaofeng Chen Jianping Sheng Yanqing Qu Yingxuan Sun Qiyao(4643)
Domestic wastewater treatment and membrane fouling control by an innovative MBR system combined with adsorption and rough-sedimentation	Zhou Yan Li Ji Lü Xiaomei Sun Feiyun Niu Hexin(4648)
Ozone microbubbles in tertiary purification of biological treatment effluent of dye-making wastewater	Feng Yue Wang Lu Chen Quanyuan(4653)
Effect of bone char on adsorption and desorption of Sb(Ⅲ) and Sb(Ⅴ) in solution	Xu Feng Huang Yizong Cai Liqun Sun Xiaohua Liu Chongmin Wang Fei Li Ji(4659)
Preparation of activated carbons from cotton stalk and their adsorption of 2,4-dinitrophenol	Jia Jiaqi Li Kunquan Zhang Yuxuan Zhang Xiulian(4666)
Distribution of concentration of volatile pollutant benzene in water-air interface coupled diffusion	Xu Jie Wu Huifang Chen Liping(4673)
Treatment of electroplating additive producing wastewater by O ₃ -assisted UV-Fenton	He Hualiang Liu Guoguang Yao Kun Lü Wenying Li Peng(4678)
Physico-chemical properties and performance of composite coagulants	Jiang Shaojie Sheng Guishang Huang Xinli Xiang Ping Feng Xinrui(4683)
Remediation of eutrophicated water by canna-microbial in different growing phases	Mao Xin Wang Lihong Zhang Guangsheng(4689)
Treatment of hypersaline mustard tuber wastewater by anaerobic sequencing batch biofilm reactor	Li Xiaopin Wei Shanshan Han Yi Zhou Jian Chen Li Yang Zhi(4697)
Nitrogen migration and transformation in fluctuation belt of water table	Li Xiang Xi Beidou Jiang Yonghai Yuan Zhiye Zhang Jinbao An Da Yang Yu Ma Zhifei(4703)
Sludge disintegration by Fenton reagent oxidation	Li Xiaoping Zhang Jian Xian Ping Che Ruimei Liu Lifang(4709)
Evaluation on electrolytic manganese wastewater treatment technologies based on analytic hierarchy process	Wang Qinian Wang Fan Yu Hongbing(4714)
Treatment of electroless copper plating waste liquid by UV-catalytic wet peroxide oxidation	Liu Peng Li Chaolin Kong Xianghan Lu Gang Cui Haiibo Zhang Wenfang(4719)
Influence of additives on degradation of acid fuchsine by chitosan-stabilized nanoscale zero-valent iron in water	Jin Xiaoying Yu Bing Yang Jing Chen Zuliang(4724)
Adsorption behavior of chlortetracycline on activated sludge	Li Hui Wang Yujun Ben Weiwei Qiang Zhimin(4729)
Adsorption kinetics of jute fiber-based activated carbon on methylene blue and methyl orange	He Lifen Liu Qixia Ji Tao Gao Qiang(4735)
Adsorption kinetics and thermodynamics of Cr(VI) on modified honeycomb-cinder	Yu Meiqiong Yang Jinbei Chen Wentao Gong Xuan(4741)
Optimization of ammonia nitrogen removal from rare-earth wastewater using MAP precipitation by response surface methodology	Wang Hao Cheng Guanwen Song Xiaowei Xu Zihan Meng Jinjie Dong Chuanqiang(4748)
Numerical simulation and experiments on improved baffled flocculation tank	Yue Bing Yan Bipeng Ye Fei Cai Xiaohu(4755)
Preparation of chitosan-stabilized Fe and Fe/Ni nanoparticles for removal of Co ²⁺ in water	Weng Xiulan Huang Lanlan Zhong Yanhua Lin Shen Chen Zuliang(4761)
Standard for water color determination based on three-wavelength luminous transmittance	Zhao Xiaowei Shen Weimin Huang Jie Yu Qing Lou Jun(4766)
Effect of sludge loading on process performance and sludge properties of UASB treating low-strength municipal wastewater	Liu Yin Liu Haining Zhang Kaisong(4773)
Degradation characteristics of tetracycline hydrochloride by <i>Trichosporon mycotoxinivorans</i> XPY-10	Feng Fuxin Xu Xuping Cheng Qunxing Han Yonghe(4779)
DNBP adsorption of modified oil shale ash	Jin Lanshu Wang Jianguo Li Ping Shen Long(4786)
Effect of cutting frequency on tertiary treatment of swine wastewater using aquatic plant filter bed system	Liao Derun Lin Guoxu Wang Zhen Liu Yuhong Liu Chaoxiang Fang Jing(4793)
Advanced treatment of dyeing and tannery park wastewater by O ₃ -BAF	Yu Bin Liu Rui Cheng Jiadi Fan Juhong Li Changhu Ran Kun Cao Guohua Chen Lüjun(4799)
Analysis of removal efficiencies of salt, ammonia-N and COD by electro-sorption technology	Cui Xinxin Xie Haiyan Xiao Le Li Yamei Xu Peng Sun Yuanyuan(4805)

Effects of ultrasonic on magnesium hydroxide coagulation performance and floc properties	Jiao Xiumei Guo Xiaoyu Zhao Jianhai Liu Shiyu Feng Na(4811)
Analysis of water purification efficiency of integrated constructed wetland in drinking water supply reservoir	Zhao Jing Zhao Heping Xu Liangfeng Zeng Zheng Ding Zheli Lai Chunyu Zhao Fengliang Yang Xiaoe(4816)
Electrochemical treatment of biologically treated leachate from municipal solid waste incinerator	Tan Huaqin Quan Xuejun Chen Bo Cheng Zhiliang(4823)
Photocatalytic degradation of phenanthrene and fluoranthene solution by Ce ³⁺ modified TiO ₂ loaded on zeolite from coal ash	Zhu Man Chen Jianyu Li Xiaoming Luo Qijin Yang Qi(4829)
Decolorization performance of Reactive Black KN-B and Direct Red dyes with laccase	Yang Bo Du Dan Sun Ye Wang Xuming(4835)
Competitive adsorption of phosphate and sulfide on nanoscale iron surface	Ru Chunyun Meng Fansheng Wang Yeyao Yang Qi(4841)
Degradation of TAIC by iron-carbon micro-electrolysis	Rong Shaopeng Sun Yabing Zhao Zehua Zhang Yan Lu Sujie Bian Lin(4847)
Technological conditions for treatment of high concentration swine manure by SBR	Zhao Junnan Meng Zhaofu Meng Xiangzhi Zhu Jun Yan Xiaoyi Ren Shuang(4854)
Pilot study on advanced treatment of petrochemical wastewater by combined process of ozone-BAF	Du Baiyu Fu Cunku Xu Jizheng Li Xiuhong Zhuang Chunfeng Dong Zhaoqi Zhang Lin Tang Anzhong Liu Bin(4861)
Effect of heavy metal impurities on struvite precipitation for treatment of pharmaceutical wastewater	Wang Guowen Wang Dong Wang Mingming Xu Xiaochen Yang Fenglin(4866)
Inhibitional effect of 3 chemical substances on chlorella	Gao Lei Zhang Hongtao Fan Jing Zhou Beihai Wang Yushuang Wu Chunxu(4869)
Ammonia nitrogen removal from simulate wastewater by acrylic acid-modified magnetic chitosan particles	Tian Xinxin Huang Huili(4874)
Hg ⁰ removal effect of carbon-containing fiber loaded with V ₂ O ₅ -WO ₃ /TiO ₂ for coal-fired flue gases	Wang Longjie Diao Yongfa Fan Hongbing Wang Linlin(4881)
Adsorption mechanism of NO _x by ZSM-5 zeolite modified with copper and amine	Zhang Hui Wang Xiqin Luan Zhiqiang Song Huaihe Ye Pingwei Li Kai(4887)
Atomization characteristics of gas-liquid two phase rotation flow spray nozzle	Yuan Wenbo Xiang Xiaodong Shi Ling Wu Gaoming(4891)
Characteristics of atmospheric pollutants and their sources in Langfang of Hebei	Tian Mi Ji Dongsheng Wang Yuesi Hu Bo Ling Hong Xu Zhongjun(4895)
Catalytic oxidation of NO by Mn-Cu composite catalyst at room temperature	Zhang Haojie Wang Fagen Liu Shuang He Dannong(4904)
Hydrogen sulfide removal in reduction of ferric and bio-oxidation of ferrous iron system	Wu Lili Liu Zongyu Qin Songyan Cheng Longjun(4909)
Effects of Mn valence on catalytic oxidation of gas-phase low-concentration toluene by ozone over Mn/ γ -Al ₂ O ₃ catalyst	Zeng Xiaolan Gao Qian Cao Yanrong Zhu Tianle(4915)
Biological treatment of malodor-causing volatile fatty acids in waste gases using coke as a carrier of biotrickling filter	Deng Zhihua Ning Ping Li Jiayan Chen Yu Zhang Jian Zhou Cheng(4921)
Pilot-scale study of performance of a intermittent running-biotrickling filter on treatment of waste gas from paint manufacturing process	Chen Ziping Li Jianjun An Taicheng Sun Duanfang Xu Meiyong Sun Guoping(4929)
Mechanism and performance of ozone oxidation of styrene in high concentration	He Juecong Huang Qianru Ye Qihong Luo Yuwei Wei Zaishan(4935)
Absorption of sulfur dioxide by alkali aluminum sulfate solution	Wang Qiaoyu Deng Xianhe(4940)
Influencing factors during simultaneous removal of NO _x and SO ₂ in semi-dry dense bed at low temperature	Zhao Rongzhi Liang Baorui Song Cunyi Leng Tingshuang(4945)
Solidification/stabilization treatment of gold mining waste residue	Zhao Shuhua Zhang Taiping Chen Zhiliang Pan Weibin(4951)
Combustion process study and numerical simulation of municipal solid waste in grate incinerator	Zhu Xincai Hu Guichuan Lin Shunhong(4958)
A pilot scale study on a human feces composting in aerobic medium temperature composting reactor	Hu Tao Wang Xiaochang Li Qian Shi Honglei Bai Fan(4965)
Quenched and tempered blast furnace slag as slag fiber raw materials	Li Jie Zhang Yuzhu Liu Weixing Xing Hongwei Long Yue(4971)
Effects of maturity and N variation during hybrid aerobic composting of kitchen waste and water hyacinth	Zhang Rui Li Bing Fan Xing Chen Xueli(4978)
Influence of pH on leaching of pollutants from sewage sludge	Li Juanying Chen Jieyun Cao Hongyu He Peimin(4983)
Effects of chemical agents capped with cinder on overlying water and sediment during in-situ sediment treatment for organic pollutants	Zhang Ping Qian Guangren Wang Tianqi Zhou Wenbin(4990)
Effect of different heat treatment temperatures on anaerobic fermentation hydrogen production from municipal sludge	Lu Yuan Xie Yuhong Zheng Yuyi Liu Changqing(4995)
Volatilizing characteristic of lead and cadmium during co-processing in cement kiln	Cui Jingxuan Yan Dahai Li Li Wang Zuguang Yu Hongjin He Jie Wang Qi(5001)
Preparation and characterization of activated carbon from amygdalus shell	Yang Dan Liu Yongjun Zhang Chi Zhang Yinglong(5007)
Regulation of calcium on accumulation and tolerance of <i>Leersia hexandra</i> Swart under Cr ³⁺ stress	Wang Wenping Zhang Hui Liu Jie Huang Xiaowu Gu Chen(5012)
Absorption characteristics of Cr(VI) from leachate of chromium slag by silty clay and silty sand	Li Xilin Wang Laigui Hao Zhe Liu Ling(5019)
Absorption and accumulation characteristic of heavy metals by vegetation on the Taopu Landfill in Shanghai	Chen Zhitao Qin Renjuan Li Zifeng Ru Guangxin Jiang Lingmin Zhang Qi Zhang Dongmei(5025)
Screening of aerobic denitrobacteria from polluted water body and its characteristics of ammonium removal	Yu Luji Yang Qiang Li Tingmei Wu Xiaoning Guo Dongfan(5032)
Measurement and application of OUR in SBR based on FPGA	Zhong Weisheng Zhong Zheng Zhang Ping Wang Wenhai(5037)
Screening and identification of a cellulose-decomposing strain <i>Lysinibacillus fusiformis</i>	Wu Xiang Gan Bingcheng Peng Weihong Jia Dinghong Xie Liyuan Huang Zhongqian Gao Jian(5041)
Suspended particle removal characteristics of attached rotifers	Shen Chengyuan Wan Xiaojuan(5047)

阴极负载不同催化剂对天然水体中沉积物微生物燃料电池运行特性的影响

付 飞 任月萍* 李秀芬 华兆哲 潘丹云 赵亚楠

(江南大学环境与土木工程学院,无锡 214122)

摘 要 考察了阴极负载 Co_3O_4 和 MnOOH 对天然水体中沉积物微生物燃料电池(SMFC)产电性能和 SMFC 对沉积物中有机质去除率的影响。实验结果表明,SMFC 阴极负载 Co_3O_4 和 MnOOH 后,体系的输出电压由 483 mV 增大到 549 mV 和 534 mV;相应体系的内阻由 206 Ω 显著降低到 99 Ω 和 128 Ω ,最大功率密度($P_{\max}$)由 3.3 mW/m^2 增大到 9.1 mW/m^2 和 6.6 mW/m^2 。此外,SMFC 体系的电流密度与沉积物中烧失量(LOI)、易氧化有机质(ROOM)去除率呈线性关系,并且阴极负载 Co_3O_4 和 MnOOH 可以促进阳极沉积物中有机质的去除。

关键词 沉积物微生物燃料电池 阴极修饰 烧失量 易氧化有机质

中图分类号 X524 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2013)12-4614-05

Effect of various cathode modifications on operation performance of sediment microbial fuel cells in freshwater

Fu Fei Ren Yueping Li Xiufen Hua Zhaozhe Pan Danyun Zhao Yanan

(School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract The effect of Co_3O_4 and MnOOH modified cathodes on the electricity generation performance of sediment microbial fuel cell (SMFC) and the corresponding organic matter removal efficiency in sediment by SMFCs was investigated. Experimental results suggested that compared with the SMFC with blank cathode, the output voltages of the SMFCs used Co_3O_4 and MnOOH modified cathodes increased from 483 mV to 549 mV and 534 mV. The corresponding internal resistances decreased from 206 Ω to 99 Ω and 128 Ω , and the maximum output power densities were elevated from 3.3 mW/m^2 to 9.1 mW/m^2 and 6.6 mW/m^2 , respectively. Besides, there existed linear relationships between the current densities of the SMFCs and the removal efficiencies of loss on ignition (LOI) and readily oxidizable organic matter (ROOM) in sediments. Furthermore, Co_3O_4 and MnOOH modified cathodes obviously promoted the removal efficiency of organic matter in sediments.

Key words sediment microbial fuel cell; cathode modification; loss on ignition; readily oxidizable organic matter

沉积物微生物燃料电池(sediment microbial fuel cell, SMFC)是一种利用微生物作催化剂,将沉积物中有机物化学能转化为电能电化学装置,由埋在厌氧底泥中的阳极和悬于好氧水体中的阴极组成^[1]。这种结构使其适用于河流、湖泊或海洋底泥修复和固体废弃物处理^[2]。与现有的河湖底泥原位处理技术和生态疏浚技术相比,SMFC 技术可以利用天然存在的微生物将有机物彻底氧化成 CO_2 和水,过程环保,无二次污染。然而,输出功率较低是目前限制 SMFC 实际应用的重要问题。根据 Hai 等^[3]的报道,阴极氧气还原反应(ORR)速率是 MFC 体系产电过程的限制因素。以 Pt 作为 MFC 阴极

ORR 催化剂可以显著提高体系的输出功率^[4],但 Pt 催化剂高昂的价格无疑会增大 MFC 的成本。过渡金属氧化物,如 MnO_x 、 CoO_x 等来源广泛,廉价易得,有望成为 Pt 催化剂的替代品^[5]。例如, Roche 等^[6]发现双室 MFC 中利用 MnO_x/C 为催化剂,体系的最

基金项目:国家自然科学基金资助项目(21076097,21206058);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07101-013-04);中央高校基本科研业务费专项资金资助(JUSRP111A09)

收稿日期:2012-10-11; **修订日期:**2012-12-11

作者简介:付飞(1987~),男,硕士研究生,主要从事废物资源化工程。E-mail: fufei922@126.com

* 通讯联系人, E-mail: ypren@jiangnan.edu.cn

大功率密度($P_{\max}$)达到了 160 mW/m^2 ,与使用 Pt/C 为催化剂的体系 $P_{\max}$ (193 mW/m^2) 相当。除此之外,Xu 等^[7]通过塔菲尔(Tafel)测试发现纳米级棒状 $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{C}$ 催化剂在 $-0.12\sim-0.20\text{ V}$ 范围内的 ORR 催化活性高于 Pd/C 催化剂。Sun 等^[8]实验发现 MnOOH/C 催化剂对 ORR 也具有较高的催化活性,且随着 MnOOH 含量增大,催化活性升高。然而,目前以 Co_3O_4 和 MnOOH 作为 MFC 阴极催化剂的研究报道还不多见。因此,本文考察了负载 Co_3O_4 和 MnOOH 的阴极对天然水体中 SMFC 产电特性和 SMFC 对水底沉积物中有机质的去除效果的影响。

1 材料与方法

1.1 SMFC 实验装置

SMFC 装置:电极材料为 0.5 cm 厚的圆形石墨毡(北京市三业碳素有限公司),其中阳极直径为 40 cm ,阴极直径为 20 cm 。将阴阳极以电极间距为 20 cm 分别固定于 PVC 支架上并以铜导线连接,外接电阻,记录电压变化情况。将搭建好的 SMFC 装置埋于校园湖泊中,阳极埋于泥水分界面大约 5 cm 深处,阴极悬浮于阳极上方的水中。

修饰阴极的制备:ORR 催化剂 Co_3O_4 和 MnOOH 的制备按照文献[9,10]中的方法进行。将一定量的上述 2 种催化剂、导电炭黑、PTFE 溶液(60%)和超纯水混合,超声分散均匀后用毛刷均匀涂抹在石墨毡上, 40°C 下烘干备用。

1.2 实验方法

SMFC 的运行:分别以空白石墨毡和负载 Co_3O_4 、 MnOOH 的石墨毡为阴极,空白石墨毡为阳极搭建 3 组 SMFC 装置。在开路、 $800\ \Omega$ 和 $500\ \Omega$ 闭路条件下,分别运行 7、7 和 30 d ,使产电微生物富集生长在阳极表面,每天 14:00 测定装置电压值,水温、pH 值、电导率、溶解氧(DO)等湖水水质指标;实验开始和结束时分别测定 LOI、ROOM 等湖底沉积物指标。实验期间水温为 $26.8\sim34.5^\circ\text{C}$,pH 为 $7.47\sim8.96$,DO 浓度为 $7.39\sim11.11\text{ mg/L}$,电导率为 $348\sim368\ \mu\text{S/cm}$,装置运行前沉积物中 LOI 和 ROOM 含量分别为 4.2% 和 1.7%。

1.3 分析测试

SMFC 电压用数字电压表(UT70B,优利德集团有限公司)测定。极化曲线和功率密度曲线测定采用稳态放电法^[11]。电化学阻抗谱(EIS)和塔菲尔(Tafel)曲线在电化学工作站(CHI600D 型,上海辰

华有限公司)上,采用三电极体系进行测定。EIS 测试,起始电压为开路电压,扫描频率为 $0.05\sim100\ 000\text{ Hz}$,振幅为 0.01 V ;塔菲尔扫描范围为 $-0.3\sim0.7\text{ V}$,扫描速度为 10 mV/s 。水底沉积物烧失量(loss on ignition,LOI)通过称量 550°C 加热 4 h 前后的样品重量得到;易氧化有机质(readily oxidizable organic matter,ROOM)采用湿式氧化法测定^[12]。

2 结果与讨论

2.1 电化学表征

图 1(a)为电极负载不同催化剂的电化学阻抗谱 Nyquist 图。由图可见,负载 Co_3O_4 和 MnOOH 的电极与空白电极的电荷转移内阻分别由 $60.04\ \Omega$ 降低到 $5.34\ \Omega$ 和 $35.56\ \Omega$ 。这是因为 Co_3O_4 和 MnOOH 具有 ORR 催化活性,加快了电极表面 ORR 的进行。同时,负载 Co_3O_4 和 MnOOH 后电极的欧姆内阻与空白电极相比也有所降低。图 1(b)为负载 Co_3O_4 和 MnOOH 的电极与空白电极的塔菲尔(Tafel)曲线。反向延长 Tafel 曲线线性部分至过电位等于零处所对应的电流密度即为测试电极的交换电流密度(i_0)。 i_0 越高说明反应活化能越低,电极反应速率越快^[13]。负载 Co_3O_4 和 MnOOH 的电极与空白电极的 i_0 分别为 0.358 、 0.207 和 0.075 A/m^2 ,说明负载 Co_3O_4 和 MnOOH 后,电极 ORR 反应速率有所提高。

2.2 SMFC 产电特性

2.2.1 SMFC 的运行

在校园湖中静置 7 d 富集微生物后,空白阴极体系、阴极负载 MnOOH 体系和阴极负载 Co_3O_4 体系的开路电压初始值分别为 524 、 574 和 592 mV (见表 1)。

表 1 SMFC 体系的输出电压			
	Table 1 Voltage generation of SMFCs (mV)		
SMFC 体系	空 白	阴极负载 MnOOH	阴极负载 Co ₃ O ₄
开路电压 初始值	524	574	592
输出电压 平均值	483	534	549

图 2 为 SMFC 在 $500\ \Omega$ 外阻下闭路运行 30 d 的电压变化情况。由图可见,运行 5 d 后各体系的输出电压值均达到相对稳定状态。空白阴极体系、阴极负载 MnOOH 体系和阴极负载 Co_3O_4 体系运行 30

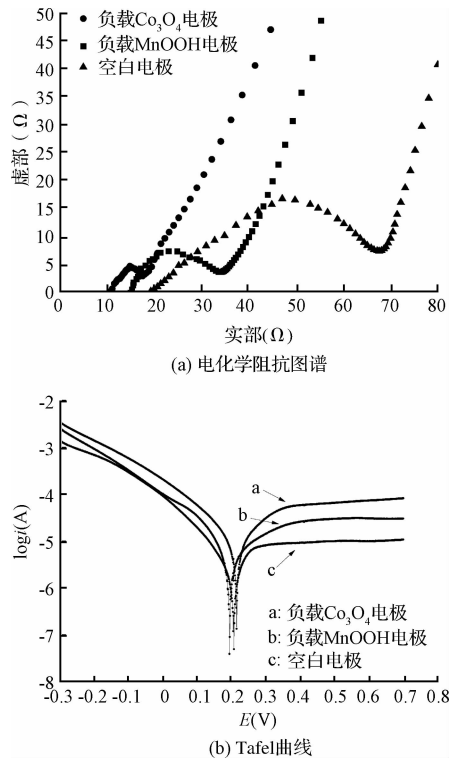


图 1 空白电极、负载 MnOOH 和 Co_3O_4 电极在 PBS 缓冲液 ($\text{pH} = 7.0$) 中的电化学阻抗图谱 (Nyquist 曲线) 和 Tafel 曲线

Fig. 1 Nyquist curves of the electrochemical impedance spectroscopy test and Tafel plots of blank electrode, MnOOH modified electrode and Co_3O_4 modified electrode in PBS solution ($\text{pH} = 7.0$)

d 的平均输出电压依次增大, 分别为 483、534 和 549 mV。根据文献报道, O_2 吸附于催化剂活性中心表面, 催化剂和 O_2 之间较强的相互作用能够削弱 $\text{O}-\text{O}$ 键, 有利于降低氧气还原反应的过电位, 提高阴极电势^[14], 因此, 阴极负载 MnOOH 和 Co_3O_4 后体系的开路电压和输出电压明显高于空白阴极体系。

2.2.2 极化曲线和功率密度曲线

SMFC 体系的极化曲线和功率密度曲线如图 3 所示。由图 3(a) 可见, 阴极负载 Co_3O_4 和阴极负载 MnOOH 的 SMFC 体系在 $500\ \Omega$ 外阻下运行 30 d 后开路电压 (OCV) 分别为 736 mV 和 719 mV, 明显高于空白阴极体系 (584 mV)。对极化曲线进行线性拟合得到 3 个体系的内阻分别为 99、128 和 $206\ \Omega$ 。说明阴极负载 Co_3O_4 和 MnOOH 后可以显著降低阴极电阻, 从而使得整个体系的内阻明显降低^[15]。由图 3(b) 中各体系的功率密度曲线可得, 阴极负载

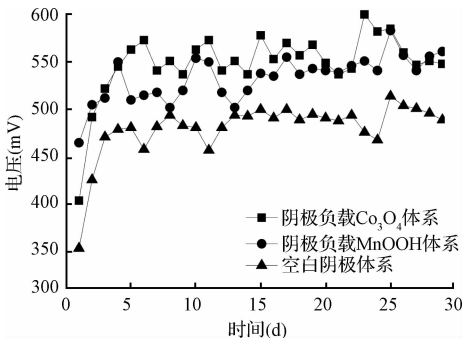
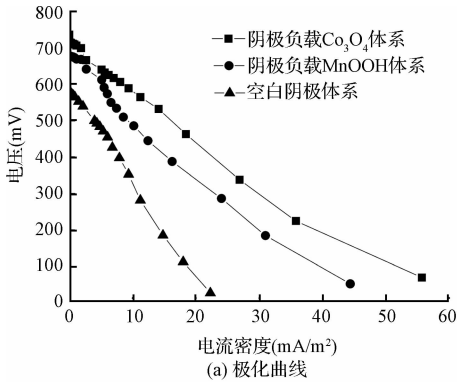


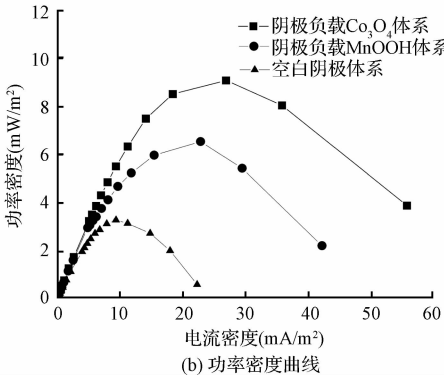
图 2 不同 SMFC 体系的输出电压变化情况

Fig. 2 Voltage variations of SMFCs with different cathodes

Co_3O_4 、阴极负载 MnOOH 和空白阴极 SMFC 体系的 P_{max} 分别为 9.1 、 6.6 和 $3.3\ \text{mW}/\text{m}^2$ 。阴极经过负载 Co_3O_4 和 MnOOH 可以降低阴极的欧姆内阻和电荷转移内阻, 加快阴极反应速率, 改善阴极的性能, 从而降低体系的总内阻, 增大 SMFC 体系的 P_{max} 。



(a) 极化曲线



(b) 功率密度曲线

图 3 不同 SMFC 体系的极化曲线和功率密度曲线

Fig. 3 Polarization curves and power density of SMFCs with different cathodes

2.3 SMFC 对水底沉积物中有机质的影响

2.3.1 SMFC 对沉积物中有机质的去除

图 4 揭示了 SMFC 体系运行 30 d 后水底沉积

物的 LOI 和 ROOM 的去除情况。由图 4(a)可见,阴极负载 Co_3O_4 、阴极负载 MnOOH 和空白阴极体系的 LOI 去除率依次减小,分别为 17.6%、15.1% 和 8.6%。ROOM 去除率也出现了相同的规律,阴极负载 Co_3O_4 体系的 ROOM 去除率最大,为 24.3%,而空白阴极体系的 ROOM 去除率最小,仅为 4.6% (见图 4(b))。

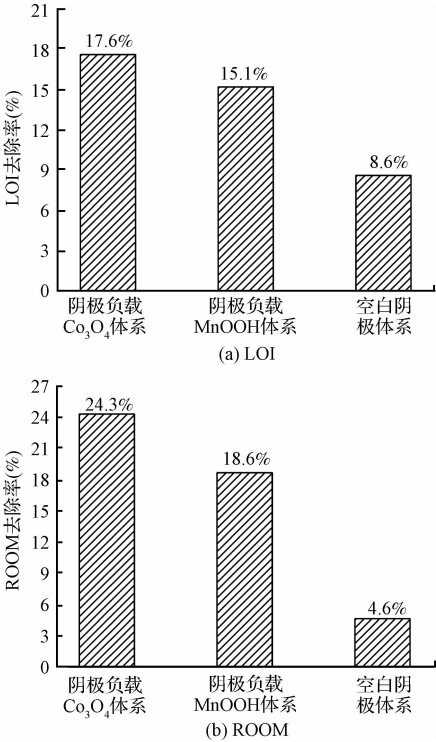


图 4 SMFC 对沉积物中 LOI 和 ROOM 的去除率
Fig. 4 Removal efficiencies of LOI and ROOM in sediments by SMFCs with different cathodes

2.3.2 SMFC 体系电流密度与水底沉积物中有机质去除率的关系

在 SMFC 阳极区,沉积物中的有机质被产电微生物氧化产生电子,电子从微生物的细胞传递到阳极表面,由外电路传递到阴极参与阴极氧气还原反应。电子不断产生、传递、流动形成电流,完成产电过程^[16]。根据 Jadhav 等^[17]的报道,双室 MFC 体系的电流密度与体系中底物的去除浓度呈线性关系。本文考察了 3 个 SMFC 体系平均输出电流密度与沉积物中有机质去除率的关系 (见图 5),发现了相似的规律。由图可见,SMFC 体系的电流密度与沉积物中 LOI 和 ROOM 去除率呈线性关系,线性相关系数分别为 $R^2 = 0.986$ 和 $R^2 = 0.980$ 。说明 SMFC 利用的有机质主要是 ROOM,可能是阳极表面的微生物

物优先利用沉积物中的小分子有机物。同时,这一发现使得利用 SMFC 体系的输出电流对污染河湖沉积物中有机质浓度进行检测具有了一定的可能性。

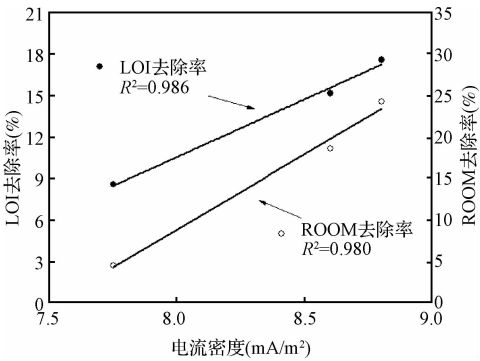


图 5 SMFC 体系电流密度与沉积物中有机质去除率关系
Fig. 5 Correlation between current density of SMFCs and removal efficiency of organic matter in sediment

3 结 论

本文考察了阴极负载 Co_3O_4 和 MnOOH 对天然水体中 SMFC 产电性能和沉积物中有机质去除率的影响。实验结果表明,负载 Co_3O_4 和 MnOOH 可以降低阴极的电荷传递内阻,提高阴极反应速率,从而降低 SMFC 体系的总内阻,提高 SMFC 体系的产电性能。阴极负载 Co_3O_4 和 MnOOH 后,体系的总内阻由 $206\ \Omega$ 分别降低到 $99\ \Omega$ 和 $128\ \Omega$;提高了体系的平均输出电压,由 $483\ \text{mV}$ 增大到 $549\ \text{mV}$ 和 $534\ \text{mV}$;增大了体系的 P_{max} ,由 $3.3\ \text{mW/m}^2$ 增大到 $9.1\ \text{mW/m}^2$ 和 $6.6\ \text{mW/m}^2$ 。本文的研究结果可以为廉价过渡金属 ORR 催化剂在 SMFC 体系中的使用提供更多思路,并且为 SMFC 在污染河湖底泥原位修复的实际应用提供理论基础。

参 考 文 献

[1] Logan B. E., Hameler S. B., Rozendal R. A., et al. Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science & Technology, 2006, 40(17): 5181-5192

[2] Song T. S., Yan Z. S., Zhao Z. W., et al. Construction and operation of freshwater sediment microbial fuel cell for electricity generation. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2011, 34(5): 621-627

[3] Hai P. T., Jang J. K., Chang I. S., et al. Improvement of cathode reaction of a mediatorless microbial fuel cell. Journal of Microbiology and Biotechnology, 2004, 14(2): 324-329

[4] Yang S. Q., Jia B. Y., Liu H. Effects of the Pt loading

- side and cathode-biofilm on the performance of a membrane-less and single-chamber microbial fuel cell. *Biore-source Technology*, **2009**, 100(3):1197-1202
- [5] Zhang L., Liu C., Zhuang L., et al. Manganese dioxide as an alternative cathodic catalyst to platinum in microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, **2009**, 24(9):2825-2829
- [6] Roche I., Katari K., Scott K. A microbial fuel cell using manganese oxide oxygen reduction catalysts. *Journal of Applied Electrochemistry*, **2010**, 40(1):13-21
- [7] Xu J. B., Gao P., Zhao T. S., et al. Non-precious Co_3O_4 nano-rod electrocatalyst for oxygen reduction reaction in anion-exchange membrane fuel cells. *Energy Environmental Science*, **2012**, 5(1):5333-5339
- [8] Sun W., Hsu A., Chen R. R. Carbon-supported tetragonal MnOOH catalysts for oxygen reduction reaction in alkaline media. *Journal of Power Sources*, **2011**, 196(2):627-635
- [9] Yang J., Liu H. W., Martens W. N., et al. Synthesis and characterization of cobalt hydroxide, cobalt oxyhydroxide, and cobalt oxide nanodiscs. *The Journal of Physical Chemistry C*, **2010**, 114(1):111-119
- [10] Xi G. C., Peng Y. Y., Zhu Y. C., et al. Preparation of $\beta\text{-MnO}_2$ nanorods through a $\gamma\text{-MnOOH}$ precursor route. *Materials Research Bulletin*, **2004**, 39(11):1641-1648
- [11] 梁鹏, 范明志, 曹效鑫, 等. 微生物燃料电池表观内阻的构成和测量. *环境科学*, **2007**, 28(8):1894-1898
- Liang P., Fan M. Z., Cao X. X., et al. Composition and measurement of the apparent internal resistance in microbial fuel cell. *Environmental Science*, **2007**, 28(8):1894-1898 (in Chinese)
- [12] Loring D. H., Rantala R. T. T. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth Science Reviews*, **1992**, 32(4):235-283
- [13] Raghavulu S. V., Babu P. S., Goud R. K., et al. Bio-augmentation of an electrochemically active strain to enhance the electron discharge of mixed culture: Process evaluation through electro-kinetic analysis. *RSC Advances*, **2012**, 2(2):677-688
- [14] Renslow R., Donovan C., Shim M., et al. Oxygen reduction kinetics on graphite cathodes in sediment microbial fuel cells. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **2011**, 13(48):21573-21584
- [15] Fan Y. Z., Sharbrough E., Liu H. Quantification of the internal resistance distribution of microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, **2008**, 42(21):8101-8107
- [16] 卢娜, 周顺桂, 倪晋仁. 微生物燃料电池的产电机制. *化学进展*, **2008**, 20(7-8):1233-1240
- Lu N., Zhou S. G., Ni J. R. Mechanism of energy generation of microbial fuel cells. *Progress in Chemistry*, **2008**, 20(7-8):1233-1240 (in Chinese)
- [17] Jadhav G. S., Ghangrekar M. M. Performance of microbial fuel cell subjected to variation in pH, temperature, external load and substrate concentration. *Biore-source Technology*, **2009**, 100(2):717-723