

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚A在5种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及p53的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX中试实验对二级出水中有机物去除的3DEEM解析 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻LX1在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京3类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中PM_{2.5}的特征分析 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO_x-CeO₂/ZrO₂低温催化还原NO性能研究 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的CO₂吸收和再生特性 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统CH₄和N₂O排放的影响 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同N源条件下典型除草剂对土壤呼吸和N₂O排放的影响 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库15种植物对重金属Pb、Zn的积累和养分吸收 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施CO₂对C3和C4植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR处理生活污水效率与菌群多样性的关系 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫄,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell生物传感器在Cu²⁺、Cd²⁺冲击活性污泥系统分析中的应用 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的Fe/C空气阴极MFC性能研究 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究

唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华

(沈阳建筑大学市政与环境工程学院, 沈阳 110168)

摘要: 用浸渍法制得硝酸铁/活性炭粉催化剂, 通过吸附法将催化剂吸附到碳毡上制作 Fe/C 催化剂碳毡空气阴极电极. 通过改变初始活性炭粉投加量和硝酸铁浓度, 考察了两者对以垃圾渗滤液为燃料的 MFC 产电性能影响; 通过循环伏安测试, 对不同硝酸铁浓度下自制阴极电极性能进行了评价; 在最佳催化条件下考察了装置运行稳定性; 并对不同进水 COD 浓度下同步产电和污水净化性能进行了研究. 结果表明, 随着活性炭粉投加量或硝酸铁浓度的增加, MFC 产电性能均呈现先升高后降低的趋势; 当活性炭粉投加量为 1 g 且硝酸铁浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 电池性能最佳, 功率密度为 $4199.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$, 表观内阻为 465Ω ; 在硝酸铁和活性炭粉最佳比范围内, MFC 的内阻和功率密度分别随着催化剂量的增加而减小和增加; 循环伏安测试进一步表明, 硝酸铁浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时放电容量最大, 且性能稳定; 在最佳催化条件下, 随着进水 COD 浓度的增加, MFC 产电性能增加, 功率密度达 $5478.92 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$, 同时 COD 去除量也增加, 最大为 $1505.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 垃圾渗滤液的 COD 去除率最大达 89.1%.

关键词: 微生物燃料电池; 垃圾渗滤液; Fe/C 催化剂; 空气阴极; 产电

中图分类号: X382 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2125-06

Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate

TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, HE Ya-ting, FU Jin-xiang, ZHAO Yu-hua

(Municipal and Environment Engineering College, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Ferric nitrate/activated carbon powder catalyst was obtained through impregnation and Fe/C catalyst was adsorbed on carbon felt as air cathode electrodes. Effects of activated carbon powder dosage and ferric nitrate concentration on electricity generation of MFC with landfill leachate as fuel were measured. Performances of cathodes obtained at different ferric nitrate concentrations were evaluated by cyclic voltammetry tests. The results showed that with the increase of activated carbon powder dosage or the iron nitrate concentration, MFC produce electrical properties showed a decreasing trend after the first rise. When the activated carbon powder dosage was 1 g and the iron nitrate concentration was $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, it was proved to be an optimum cell performance for $4199.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ output power and 465Ω apparent resistance. Under the optimal ratio rang between ferric nitrate and activated carbon powder, MFC apparent resistance decreased and the power density increased respectively with the increase of catalyst total dosage. The best produce electrical properties of MFC with Fe/C catalyst for $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ iron nitrate and 1 g activated carbon powder dosage was observed by cyclic voltammetry tests. The output power of MFC and the removal quantity increased with the concentration of inlet and the maximum values were respectively $5478.92 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ and $1505.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. the maximum removal rates of COD achieved at 89.1%.

Key words: microbial fuel cells (MFC); landfill leachate; Fe/C catalyst; air-cathode; power generation

微生物燃料电池 (microbial fuel cells, MFC) 是在氧化有机物的同时获得电能的一种装置^[1-4], 而污水中含有的大量有机物可作为 MFC 原料, 使污水中有机质能在产电的同时实现废水的净化处理, 在废水处理领域有很好的应用前景^[5-8]. 垃圾渗滤液是垃圾填埋场影响环境的主要污染物之一^[9], 具有高 COD、高氨氮等^[10] 特点, 水质情况复杂^[11], 是 MFC 较好的原料.

目前 MFC 存在产电效率低、稀有金属阴极催化剂成本高等缺点而限制其规模化使用^[12-15], 因此, 国内外研究者针对能够提高产电效率的阴极催化剂进行了大量研究, 并在产电性能方面取得了一定成

果. 孙瑾华等^[16]将二氧化锰粉末、高纯石墨粉、聚偏二氟乙烯按一定质量比混合制作催化剂涂抹在石墨纸上制备阴极, 以配制的葡萄糖液作为阳极液, KCl/KOH 溶液作为阴极液, 电池在 30°C 温度下运行, 获得 MFC 的最大功率密度 $696.3 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$. 温青等^[17]将 Ag 等作为自制气体阴极的催化剂, 以葡萄糖模拟废水为基质, 并最终获得 $4146 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ 的电池最大输出功率. Aelterman 等^[18]将 Fe、EDTA 和

收稿日期: 2011-08-28; 修订日期: 2011-10-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50876070); 住建部科技计划项目 (05k2-11)

作者简介: 唐玉兰 (1971~), 女, 博士后, 教授, 主要研究方向为污水深度处理理论与技术, E-mail: ty198037@163.com

PTFE 混合后负载于活性炭布上,以配制的醋酸盐溶液作为阳极液,获得 $40.3 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ 的最大输出功率密度和 12.9 mA 的稳定电流. 祝学远等^[19]以硫酸铁为阴极催化剂,以配制的葡萄糖液作为阳极液,功率密度达 $14.58 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$, 电池内阻为 500Ω .

从以上研究可看出,制备的阴极催化剂电极皆应用于配制的溶液中,而实际污水与配制溶液作为 MFC 阳极液,制备的阴极催化剂电极性能、MFC 运行稳定性将会有很大差异. 因此,本研究以垃圾渗滤液作为 MFC 阳极液,碳棒为阳极采用浸渍法以硝酸铁和活性炭粉为原料制作 Fe/C 催化剂,自制负载该催化剂的碳毡空气阴极,构建连续上升流微生物燃料电池. 本文研究了活性炭粉投加量和硝酸铁浓度对 MFC 产电性能的影响;通过对阴极电极循环伏安测试,研究了自制阴极的稳定性;同时研究了装置运行稳定性以及 MFC 对垃圾渗滤液 COD 的去除效果.

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

材料:碳毡(厚度 3 mm ,比表面积 $900 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,辽宁)、直径 1 cm 碳棒、 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ (国药集团,分析纯)、活性炭粉(国药集团,分析纯)、铜导线.

主要设备:万用表(UT71A型,上海),可调电阻箱(ZX21型,上海),电化学工作站(EC705型,武汉),饱和甘汞电极(SCE, 212型,上海),磁力搅拌

器(GSP7703型,江苏).

1.2 Fe/C 催化剂碳毡空气阴极制备

催化剂制备:采用浸渍法以硝酸铁和活性炭粉为原料制作催化剂. 称取 $50.5 \text{ g Fe}(\text{NO}_3)_3\cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 于烧杯中(本试验硝酸铁均保持此质量),加 500 mL 蒸馏水搅拌,待硝酸铁完全溶解后再投加 1 g 活性炭粉,于磁力搅拌器上搅拌 30 min ,使活性炭粉混匀,即制得硝酸铁浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 活性炭粉为 1 g 的 Fe/C 催化剂.

电极制备:将碳毡立即垂直放入制备好的 Fe/C 催化剂溶液中,利用碳毡的吸附性制作碳毡空气阴极,待烧杯中活性炭粉完全沉淀,取出碳毡放进烘箱 105°C 烘干 2 h ,即得到负载 Fe/C 催化剂的碳毡空气阴极.

1.3 污泥接种与垃圾渗滤液

垃圾渗滤液取自沈阳市老虎冲垃圾填埋场,水质情况如表 1 所示. 一般稀释至 COD 浓度为 $(1000 \pm 100) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间备用. 接种污泥为 UASB 反应器里的厌氧颗粒污泥. 文献[15,20]指出附着于电极上的微生物比悬浮在溶液中的微生物具有更高的电化活性,并且电能的输出主要依赖于附着在电极上的微生物. 因此,本试验在试验前将碳棒插入厌氧污泥中(大概一个月),以便微生物附着,缩短启动时间,比 Zhang 等^[21]构建的 UAMMFC 提前 5 d 获得稳定电压,比温青等^[22]构建的 UACMFC 提前 3 d 达到稳定. 另外,经多次尝试,发现将铜导线中铜丝簇束状均匀固定在碳棒一端,连接内阻最小.

表 1 沈阳市老虎冲垃圾填埋场垃圾渗滤液水质指标

Table 1 Shenyang Laohuchong landfill leachate water quality indicators

指标	COD/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	碱度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
范围	14 000 ~ 18 000	1 800 ~ 2 400	7.6 ~ 8.5	6 000 ~ 10 000

1.4 试验装置及运行

试验装置是由有机玻璃制成的圆柱形反应器,总体积为 3.92 L ,中间阳极室有效容积为 36 mL (高 11.5 cm ,内径 2.0 cm). 阳极室底部为了避免出现死角设计成半球状. 装置上的密封盖有阳极孔、阴极孔、检测孔. 进水口设在装置的底部正中间. 在阳极室外侧包裹阴极电极,并由密封柱套牢,防止空气进入,装置示意图如图 1 所示. 试验运行模式为连续流,连接外阻为 1000Ω ,运行温度为 $17^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

1.5 分析指标及测定方法

通过调节变阻箱($10 \sim 90000 \Omega$)改变外电路电阻大小,用万用表(UT71A型,上海)测得电压. 功率

密度 $P(\text{mW}\cdot\text{m}^{-3})$ 按照公式 $P = \frac{U^2}{RV}$ 计算,式中 U

(V)为电压, $R(\Omega)$ 为电阻, $V(\text{m}^3)$ 为阳极室体积.

表观内阻采用稳态放电法测定^[23].

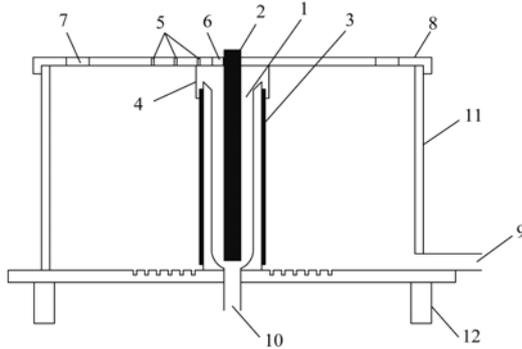
循环伏安测试采用三电极体系,以饱和甘汞电极为参比电极. 电化学工作站采用武汉 EC705 型.

COD 采用快速密闭催化消解法测定^[24].

2 结果与讨论

2.1 活性炭粉投加量对 MFC 产电性能的影响

为了研究活性炭粉投加量对 MFC 产电性能的影响,配制浓度为 $0.156 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸铁溶液,改变



1. 阳极室; 2. 阳极碳棒; 3. 阴极碳毡; 4. 密封柱;
5. 电极出口; 6. 电化学测试入口; 7. 空气通风口; 8. 密封盖;
9. 出水口; 10. 进水口; 11. 装置外壳; 12. 支撑柱

图 1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic of test device

活性炭粉投加量, 分别制备负载同一硝酸铁浓度不同活性炭粉含量的 Fe/C 催化剂碳毡空气阴极. 在流速 $120 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ 和进水垃圾渗滤液浓度 $(1000 \pm 100) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下启动和运行 MFC, 直至 MFC 运行稳定. 最后测试 MFC 电压、电流等性能参数, 通过对表观内阻和功率密度的分析, 考察活性炭粉投加量对 MFC 产电性能的影响. 结果如图 2 和表 2 所示.

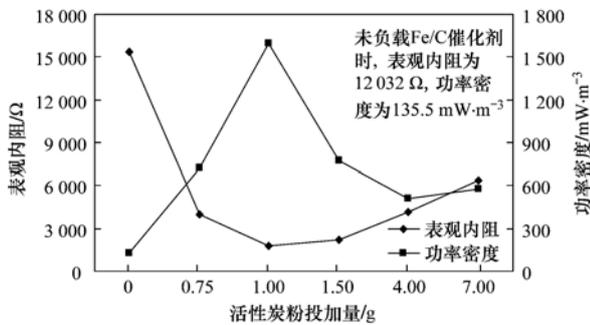


图 2 活性炭粉投加量对 MFC 产电性能的影响

Fig. 2 Effects of activated carbon powder dosage on MFC performance

表 2 不同活性炭粉投加量在同一硝酸铁浓度下碳毡吸附的催化剂量

Table 2 Fe/C Catalyst weight of carbon felt adsorption with different activated carbon powder dosages and the same ferric nitrate concentration

活性炭粉投加量/g	硝酸铁浓度/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	初始碳毡/g	吸附后碳毡/g	单位质量碳毡吸附 Fe/C 催化剂量
0	0.156	5.608 5	6.037 9	0.076 6
0.75	0.156	5.4735	5.928 4	0.083 1
1	0.156	5.603 6	6.1001	0.088 6
1.5	0.156	5.368	5.931	0.104 9
4	0.156	5.73	6.73	0.174 5
7	0.156	5.563	6.536	0.174 9

从图 2 可以看出, 功率密度随着活性炭粉投加

量的增加而增加, 表观内阻随着活性炭粉投加量的增加而减小; 当活性炭粉投加量达到 1 g 时, 功率密度达到最大 $(1597.6 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3})$, 表观内阻最低 (1790Ω) ; 之后功率密度随着活性炭粉投加量的增加而减小. 这是因为随着活性炭粉投加量的增加, 被碳毡吸附的 Fe/C 催化剂含量也增加 (如表 2), 提高阴极反应速率, 从而加速电子传递, 降低了内阻, 导致功率密度增加. 但当活性炭粉投加量 $> 1 \text{ g}$ 时, 随着活性炭粉投加量的继续增大, 碳毡吸附的 Fe/C 催化剂含量也继续增加, 但是此时碳毡吸附的 Fe/C 催化剂含量的增加主要来源于活性炭粉量的增加 (如表 2 所示, 活性炭粉投加量大量增加, 碳毡吸附的 Fe/C 催化剂含量大幅增加), 而过多的活性炭粉或硝酸铁并不能起到催化作用, 反而会增加 MFC 的内阻, 致使功率密度减小. 这一点从未投加活性炭粉时电池的性能和图 3、表 3 看出. 当活性炭粉投加量为 0 时, 碳毡上只吸附了硝酸铁, 此时 MFC 体系表观内阻为 15331Ω , 比未负载催化剂时增加 3300Ω , 功率密度也有所减小. 说明了单独三价铁不但不能作为催化剂, 而且增加了 MFC 体系内阻.

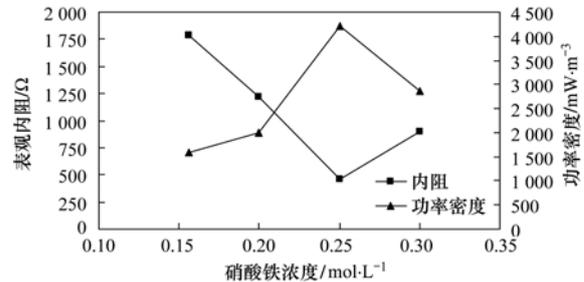


图 3 初始硝酸铁浓度对燃料电池产电性能的影响

Fig. 3 Effects of initial ferric nitrate concentration on MFC performance

表 3 不同硝酸铁浓度在最适活性炭粉投加量下碳毡吸附的催化剂量

Table 3 Fe/C Catalyst weight of carbon felt adsorption with different ferric nitrate concentrations and the same activated carbon powder dosage

硝酸铁浓度/ $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	活性炭粉投加量/g	初始碳毡/g	吸附后碳毡/g	单位重量碳毡吸附 Fe/C 催化剂量
0.156	1	5.603 6	6.100 1	0.088 6
0.20	1	5.497 5	6.380 2	0.160 5
0.25	1	5.582 3	6.577 9	0.178 3
0.30	1	5.584 5	7.252 5	0.298 7

2.2 初始硝酸铁浓度对燃料电池产电性能的影响

为了研究初始硝酸铁浓度对 MFC 产电性能的影响, 通过固定活性炭粉投加量为 1 g , 取相同质量硝酸铁配制不同浓度的硝酸铁溶液, 制备负载同一

活性炭粉含量不同硝酸铁浓度的碳毡阴极. 固定 $45 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$ 的流速和进水垃圾渗滤液 COD 浓度 (1000 ± 100) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 在分析表观内阻和功率密度的基础上, 考察硝酸铁浓度对 MFC 发电性能的影响. 结果如图 3 和表 3 所示.

从图 3 可看出, 随着硝酸铁浓度增大, 表观内阻先减小后增大, 功率密度呈现先增大后减小的趋势. 这是因为随着硝酸铁浓度增大, 阴极电极碳毡所吸附的 Fe/C 催化剂量增加 (如表 3), 增加了阴极反应效率, 从而降低了内阻. 当硝酸铁浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 表观内阻达到最小 465Ω , 功率密度达到最大 $4199.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ ($68.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$). 此后, 随着硝酸铁浓度增加, 内阻增加, 功率密度减小. 这是因为在活性炭粉投加量不变的情况下, 随着硝酸铁浓度继续增加, 碳毡吸附的 Fe/C 催化剂含量也继续增加, 显然此时碳毡吸附的 Fe/C 催化剂含量增加主要来源于铁的增加 (如表 3), 而过多的铁不但不能促进阴极反应, 反而会增加 MFC 阻力, 导致 MFC 功率密度降低.

本研究获得的 $4199.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ ($68.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$) 功率密度, 稍优于温青等^[17]采用 Ag 催化剂获得 $4146 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ 功率密度, 低于 MnO_2 催化剂获得的 $696.3 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 功率密度^[16], 这是由于本试验是在 $(17 \pm 1)^\circ\text{C}$ 自然条件下以实际废水作为燃料进行的, 而 MnO_2 催化剂阴极是在 30°C 温度的恒温箱中运行, 且是以配制的葡萄糖液作为阳极液. 不如 Pt 催化剂阴极, 但是由于价格低廉, 制作方法简单, 易于扩大化生产, 因此, 本研究的催化剂阴极应用前景广泛.

表 3 为不同硝酸铁浓度在同一活性炭粉投加量下碳毡吸附催化剂的量. 由表 2 和表 3 可看出, 随着活性炭粉投加量和硝酸铁浓度的增加, 单位重量碳毡吸附的 Fe/C 催化剂含量都增加. 但 MFC 发电性能并不是随着 Fe/C 催化剂含量的增加而单调提高, 说明 Fe/C 催化剂中 Fe 和 C 两者比例有一最佳范围, 在这范围内催化剂的增加才能增加反应效率, 在这范围之外, 催化剂的增加反而会增加 MFC 内阻, 降低其性能.

2.3 MFC 的循环伏安测试

循环伏安法^[25] (cyclic voltammetry, CV) 是一种能够测试电池的放电容量, 从而表征其性能稳定性的电化学重要方法之一. 因此, 本试验以阴极为工作电极, 阳极为对电极, 通过循环伏安测试, 研究 MFC 放电性能及其性能稳定性, 结果如图 4 和图 5 所示.

图 4 为活性炭粉投加量为 1 g , 初始硝酸铁浓度分别为 0.2 、 0.25 、 $0.3 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 扫描速度为 $50 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$ 的循环伏安曲线, 扫描范围为 $-0.8 \sim 0.8 \text{ V}$. 由扫描速度 ($50 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$) 和范围 ($-0.8 \sim 0.8 \text{ V}$) 可知, 负向扫描和正向扫描的时间 ($1600 \text{ mV}/50 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$) 为 320 s , 因此, 横坐标也可以表示扫描的时间, 纵坐标表示的是扫描时的电流强度^[17]. 由 $Q = I \cdot t$ 可以得出扫描曲线下的积分面积, 用积分面积表示其放电容量. 由此可以从图 4 中看出, 随着硝酸铁浓度的增加, 放电容量先增加后减小, 分别为 1.12 、 2.43 、 1.25 , 说明硝酸铁浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时电池性能最佳.

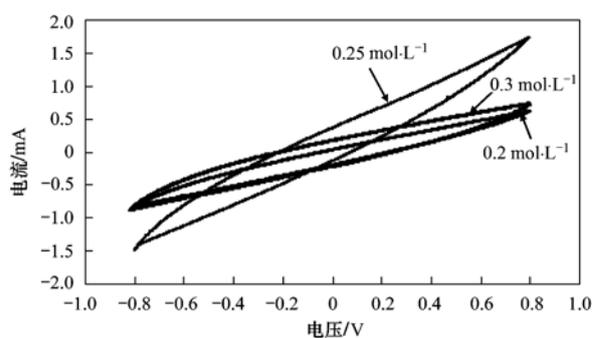


图 4 不同初始硝酸铁浓度 MFC 的 CV 图

Fig. 4 Cyclic voltammograms of MFC with catalyst of different initial ferric nitrate concentrations

为了分析电池放电稳定性, 本研究在同样条件下对硝酸铁初始浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的阴极电极进行循环扫描 20 次. 从图 5 中可以看出, 随着循环次数的增加, 曲线形状几乎没有改变. 通过对 1、5、10、15、20th 曲线进行积分面积计算 (其积分面积分别为 2.49 、 2.34 、 2.29 、 2.26 、 2.22), 发现每次循环的面积变化率约为 0.35% , 这说明电池性能比较稳定.

2.4 MFC 运行稳定性研究

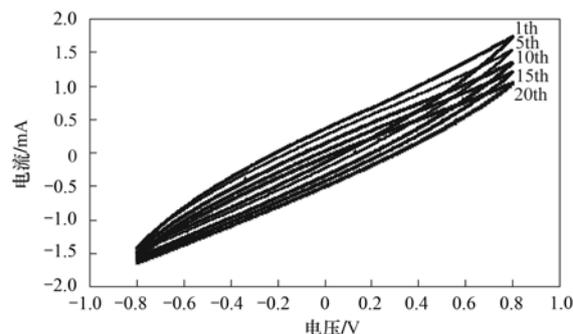


图 5 初始硝酸铁浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ MFC 的 CV 图

Fig. 5 Cyclic voltammograms of MFC with catalyst of $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ initial ferric nitrate concentration

为了验证装置运行稳定性,采用负载硝酸铁初始浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,活性炭粉投加量为 1 g 的 Fe/C 碳毡作为空气阴极,外接电阻为 $1\ 000 \ \Omega$,保持流速 $45 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$,从装置运行第 1 d 开始,每天 15:00 记录电池电压.装置连续运行 10 d 电池电压变化如图 6 所示.

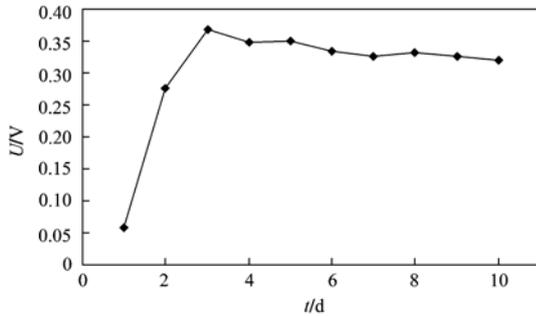


图 6 电压随时间变化

Fig. 6 Voltage output during operating period of MFC

从图 6 可以看出,电池电压在前 3 d 处于上升趋势,在第 3 d 便获得最大电压 0.36 V ,随着装置连续运行,电池电压有所降低但是基本保持在 0.33 V .说明电池运行比较稳定.

2.5 同步产电和污水净化性能的研究

为考察 Fe/C 催化剂碳毡空气阴极 MFC 同步产电和污水净化的性能,本试验采用硝酸铁初始浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$,活性炭粉投加量为 1 g 的 Fe/C 空气阴极,外阻 $1\ 000 \ \Omega$ 和流速为 $55 \text{ mL}\cdot\text{h}^{-1}$,在 23°C 运行温度下,通过改变进水 COD 浓度,考察 MFC 产电性能和对 COD 的去除效果.结果如图 7 和图 8 所示.

从图 7 可以看出,COD 去除率随进水浓度的增加呈现先增加后减小的趋势.当进水 COD 浓度为 $1\ 689.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,COD 去除率达到最大 89.1% .这是因为随着进水有机负荷的增加,可被微生物利用的有机质含量增加,微生物活性增强,COD 去除率升高.但进水 COD 浓度 $> 1\ 689.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,COD 去除率从 89.1% 很快下降到 35.7% .这是因为在进水浓度为 $1\ 689.3$ 、 $2\ 861.9$ 、 $3\ 847.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,COD 去除量分别为 $1\ 505.2$ 、 $1\ 254.3$ 、 $1\ 373.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,COD 去除量几乎达到饱和,因此,COD 去除率不再增大而是随着有机负荷的增加而减小.

从图 8 可以看出,在同一阴极电极条件下,改变进水 COD 浓度,随着进水 COD 浓度从 $88.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 到 $3\ 847.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,MFC 功率密度从 $124.5 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到 $5\ 478.92 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$,电池表观内阻

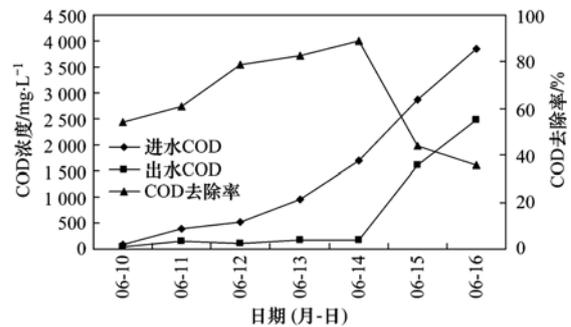


图 7 进、出水 COD 浓度及其去除率

Fig. 7 Removal of COD by MFC with $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ initial ferric nitrate concentration and 1 g activated carbon powder dosage

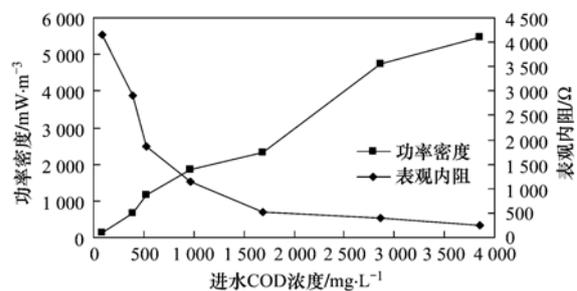


图 8 不同进水 COD 浓度下产电效果

Fig. 8 Effects of power generation with different influent COD concentrations

降低到 $253.23 \ \Omega$.说明 Fe/C 催化剂碳毡空气阴极 MFC 抗负荷能力强,碳毡阴极作为 MFC 空气阴极运行稳定.

3 结论

(1)单独硝酸铁不能起到催化剂作用,反而会增加电池内阻,降低 MFC 电池性能. Fe/C 催化剂中硝酸铁和活性炭存在一定的最佳比范围,在此范围内,催化剂的量愈大,MFC 性能愈好,超过此范围,MFC 性能随着催化剂量的增加而降低.

(2)随着活性炭粉投加量或硝酸铁浓度的增加,MFC 产电性能均呈现先升高后降低的趋势;当活性炭粉投加量为 1 g 且硝酸铁浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,电池性能最佳,表观内阻为 $465 \ \Omega$,功率密度达 $4\ 199.8 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$.循环伏安测试表明,在此条件下,MFC 性能最好,而且性能稳定.

(3)在活性炭粉投加量为 1 g ,硝酸铁初始浓度为 $0.25 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下的 Fe/C 空气阴极 MFC 具有很好的同步产电和污水处理性能. COD 去除量随着进水 COD 浓度的增加而增加,最大去除量为 $1\ 505.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,最大去除率可达 89.1% .功率密度随着进水 COD 浓度的增加而增加.当进水 COD 浓

度为 $3\ 847.2\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 功率密度达 $5\ 478.92\ \text{mW}\cdot\text{m}^{-3}$, 内阻降低到 $253.23\ \Omega$. 证明 Fe/C 催化剂碳毡空气阴极 MFC 同步产电和污水处理性能较好.

参考文献:

- [1] Logan B E. 微生物燃料电池 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009. 4-9.
- [2] Lu N, Zhou S G, Zhuang L, *et al.* Electricity generation from starch processing wastewater using microbial fuel cell technology [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2009, **43** (3): 246-251.
- [3] 郭坤, 李顶杰, 李浩然, 等. 短臂型空气阴极微生物燃料电池产电特性研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (10): 3082-3088.
- [4] Sun J, Hu Y Y, Bi Z, *et al.* Improved performance of air-cathode single-chamber microbial fuel cell for wastewater treatment using microfiltration membranes and multiple sludge inoculation [J]. *Journal of Power Sources*, 2009, **187** (2): 471-479.
- [5] 尤世界, 赵庆良, 姜璐秋. 废水同步生物处理与生物燃料电池发电研究 [J]. *环境科学*, 2006, **27** (9): 1786-1790.
- [6] Huang L P, Cheng S A, Rezaei F, *et al.* Reducing organic loads in wastewater effluents from paper recycling plants using microbial fuel cells [J]. *Environmental Technology*, 2009, **30** (5): 499-504.
- [7] 卢娜, 周顺桂, 张锦涛, 等. 利用玉米浸泡液产电的微生物燃料电池研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (2): 563-567.
- [8] Kim J R, Dec J, Bruns M A, *et al.* Removal of odors from Swine wastewater by using microbial fuel cells [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74** (8): 2540-2543.
- [9] 孙洪伟, 王淑莹, 张树军, 等. 高氮渗滤液短程深度脱氮及反硝化动力学 [J]. *环境科学*, 2010, **31** (1): 129-133.
- [10] 孙艳波, 周少奇, 李伙生, 等. SBR 工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮特性研究 [J]. *环境科学*, 2010, **31** (2): 357-362.
- [11] 董军, 赵勇胜, 韩融, 等. 垃圾填埋污染场地的微生物变化特征与污染物行为研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (7): 2160-2164.
- [12] Fornero J J, Rosenbaum M, Cotta M A, *et al.* Microbial fuel cell performance with a pressurized cathode chamber [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42** (22): 8578-8584.
- [13] Li X, Hu B X, Suib S, *et al.* Manganese dioxide as a new cathode catalyst in microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2010, **195** (9): 2586-2591.
- [14] Li F X, Sharma Y, Lei Y, *et al.* Microbial fuel cells: the effects of configurations, electrolyte solutions, and electrode materials on power generation [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2010, **160** (1): 168-181.
- [15] 徐源, 宋天顺, 叶晔捷, 等. 直接微生物燃料电池阴极的制备及优化 [J]. *过程工程学报*, 2008, **8** (5): 998-1002.
- [16] 孙瑾华, 刘建好, 黄呈珠, 等. 二氧化锰为阴极催化剂的微生物燃料电池 [J]. *电源技术*, 2008, **132** (12): 838-844.
- [17] 温青, 刘智敏, 陈野, 等. 空气阴极生物燃料电池电化性能 [J]. *物理化学学报*, 2010, **24** (6): 1063-1067.
- [18] Aelterman P, Versichele M, Genetello E, *et al.* Microbial fuel cells operated with iron-chelated air cathodes [J]. *Electrochimica Acta*, 2009, **54** (24): 5754-5760.
- [19] 祝学远, 冯雅丽, 李少华, 等. 单室直接微生物燃料电池的阴极制作及构建 [J]. *过程工程学报*, 2007, **7** (3): 594-597.
- [20] Du Z W, Li Q H, Tong M, *et al.* Electricity generation using membrane-less microbial fuel cell during wastewater treatment [J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, **16** (5): 772-777.
- [21] Zhang J N, Zhao Q L, You S J, *et al.* Continuous electricity production from leachate in a novel upflow air-cathode membrane-free microbial fuel cell [J]. *Water Science & Technology*, 2008, **57** (7): 1017-1021.
- [22] 温青, 朱宁正, 赵立新, 等. 同步废水处理和产能的上流式空气阴极生物燃料电池 [J]. *水处理技术*, 2009, **35** (9): 26-29.
- [23] 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 [J]. *环境科学*, 2007, **28** (8): 1894-1898.
- [24] 国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989. 216-219.
- [25] Heinze J. Cyclic voltammetry — “electrochemical spectroscopy” [J]. *Angewandte Chemie*, 1984, **23** (11): 831-847.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行