

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏伟,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农用水安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应

孟瑶¹, 付玉彬^{1*}, 梁生康², 陈伟¹, 柳昭慧¹

(1. 中国海洋大学材料科学与工程研究院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 海底石油污染物在缺氧环境下导致其生物降解过程缓慢, 对海洋环境造成长期危害. 本文利用海底微生物燃料电池 (BMFCs) 原理, 尝试通过电催化作用提高海底石油污染物的降解速率. 对比测试了含油电池装置 (BMFCs-A) 与无油电池装置 (BMFCs-B) 的电化学性能, 研究了石油污染物对电池性能的影响; 比较了含油通路 (BMFCs-A) 和断路状态下 (BMFCs-C) 的石油降解率和细菌聚集量, 分析了 BMFCs 对石油污染物降解的加速作用. 结果表明, BMFCs-A 和 BMFCs-B 阳极的交换电流密度分别为 $1.37 \times 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.50 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 最大输出功率密度分别是 $105.79 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $83.60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, BMFCs-A 装置的抗极化能力增强, 交换电流密度提高近 9 倍, 最大输出功率密度提高 1.27 倍. BMFCs-A 和 BMFCs-C 阳极表面的异养菌数量分别是 $(66 \pm 3.61) \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $(7.3 \pm 2.08) \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$, 细菌数量增加了 8 倍, 高的异养菌数量导致石油降解加速进行, BMFCs 的石油降解率是自然条件下的 18.7 倍. BMFCs 在电化学性能提高的同时, 加速石油污染物的降解. 本文同时提出了一种海底微生物燃料电池对石油污染物加速降解的新模式.

关键词: 海底微生物燃料电池; 石油污染物; 降解率; 电化学性能; 异养菌数量

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-3080-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.048

Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation

MENG Yao¹, FU Yu-bin^{1*}, LIANG Sheng-kang², CHEN Wei¹, LIU Zhao-hui¹

(1. Institute of Materials Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Degradation of oil pollutants under the sea is slow for its oxygen-free environment which has caused long-term harm to ocean environment. This paper attempts to accelerate the degradation of the sea oil pollutants through electro catalysis by using the principle of marine benthonic microbial fuel cells (BMFCs). The influence of oil pollutants on the battery performance is innovatively explored by comparing the marine benthonic microbial fuel cells (BMFCs-A) containing oil and oil-free microbial fuel cells (BMFCs-B). The acceleration effect of BMFCs is investigated by the comparison between the oil-degrading rate and the number of heterotrophic bacteria of the BMFCs-A and BMFCs-B on their anodes. The results show that the exchange current densities in the anode of the BMFCs-A and BMFCs-B are $1.37 \times 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ and $1.50 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ respectively and the maximum output power densities are $105.79 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ and $83.60 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ respectively. The exchange current densities have increased 9 times and the maximum output power density increased 1.27 times. The anti-polarization ability of BMFCs-A is improved. The heterotrophic bacteria numbers of BMFCs-A and BMFCs-C on their anodes are $(66 \pm 3.61) \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ and $(7.3 \pm 2.08) \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ respectively and the former total number has increased 8 times, which accelerates the oil-degrading rate. The degrading rate of the oil in the BMFCs-A is 18.7 times higher than that in its natural conditions. The BMFCs can improve its electrochemical performance, meanwhile, the degradation of oil pollutants can also be accelerated. A new model of the marine benthonic microbial fuel cells on its acceleration of oil degradation is proposed in this article.

Key words: marine benthonic microbial fuel cells; oil pollutants; degrading rate; electrochemical performance; the heterotrophic bacteria number

海洋石油的开发带来的经济效益越来越高, 但海上轮船的溢油以及石油平台在开采、加工和运输过程中的泄油给海洋环境造成严重的污染^[1]. 近几年来, 国内外均发生了严重的海洋石油污染事件, 2010 年 4 月美国石油公司墨西哥湾“深水地平线”钻井平台爆炸, 造成美国史上最大的海洋环境污染.

2011 年 6 月中海油康菲油田出现漏油事故, 经济损失达数十亿人民币^[2]. 这些石油污染事故对环境、

收稿日期: 2014-12-29; 修订日期: 2015-03-10

基金项目: 国家海洋局可再生能源专项 (GHME2011GD04); 山东省自然科学基金重点项目 (ZR2011BZ008)

作者简介: 孟瑶 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微生物燃料电池, E-mail: 13646395091@163.com

* 通讯联系人, E-mail: fyybb@ouc.edu.cn

生物、水产业均造成了极其严重的生态灾难。

发生溢油后,大量的石油污染物最终沉积在海底中,不仅对底栖生态环境造成严重危害,而且会不断释放到水体中造成水体二次污染^[3],海洋石油污染的治理是一个急需解决的问题。目前,国际上通用的治理方法有物理处理法、化学处理法和生物处理法(生物修复法)这3种^[4]。其中,生物处理法具有操作简易、成本低和可以用于处理大面积污染场地而备受关注。但由于海底为缺氧或厌氧环境^[5],导致生物降解速率缓慢,生物修复周期较长^[6]。如何提高海底环境下石油污染物的降解速率,是目前环境修复领域广泛关注的问题。

美国 Derek Lovley 团队曾对铀污染的地下水进行过生物修复的研究,研究表明微生物能够促进铀的还原^[7],多种细菌能通过自身的代谢作用发挥这种还原能力^[8]。该团队也曾对被石油、菲和萘污染的海洋港口沉积物进行过测试,证明微生物群落在厌氧环境中能够对多环芳烃进行原位氧化,有利于菲和萘的降解,并且多环芳烃的存在提高了微生物的活性^[9]。Wang^[10]等开展过利用 MFC 降解石油的探究,与自然修复相比,石油烃降解率从 $(6.9 \pm 2.5)\%$ 提高到 $(15.2 \pm 0.6)\%$ 。Morris 等^[11]测得 MFC 开路状态和断路状态的石油烃降解率分别为 24% 和 2%。本研究利用海底微生物燃料电池(BMFCs)原理,从电子受体的差异和降解率的提高等方面探究石油污染物对 BMFCs 性能的影响,以及 BMFCs 对石油的降解效果。BMFCs 的工作原理是:海底沉积层中的细菌不断分解有机污染物(如石油污染物),产生电子,海泥中置入负极,海水中放置正极,电子通过附着细菌转移到负极上,再经导线转移到正极,正极处于海水中,溶解氧消耗电子生成 H_2O ,由此形成连续不断的电流^[12]。BMFCs 作为一种新型燃料电池,它将海底沉积层中的有机污染物和无机物的化学能转化为电能,实现原位生物修复的同时促进微生物的代谢,从而加速海底沉积层中石油污染物的降解。

本项目组曾经开展 BMFCs 对海泥中有机碳的电催化降解作用^[13],本研究将电化学方法和微生物学方法相结合探究石油污染物对 BMFCs 性能的影响,以及 BMFCs 对石油的降解效果。实验了天然底物(海泥)有原油和无原油两种装置 BMFCs 的电化学性能,并将有原油装置的通路状态和断路状态进行石油降解率的对比。石油作为一种海泥底物组分可显著提高 BMFCs 的电化学性能、抗极化能力、电

子转移动力学和输出功率,另一方面,在 BMFCs 的电催化作用下,石油污染物的降解速率显著提高。本研究结果可为海底石油污染治理提供一种全新的思路。

1 材料与方法

1.1 实验试剂

无水乙醇(分析纯,天津博迪化工股份有限公司),氨水(分析纯,国药集团化学试剂有限公司),SZ36-1 原油^[14](重质油,中国海洋石油总公司),碳毡(高纯,青岛高泰新材料有限公司),碳纤维(粘胶基,青岛远辉复合材料有限公司),海泥、海水均取自青岛李村河入海口。

1.2 实验过程

1.2.1 改性阳极制备

据文献报道,N/C 含量的增加可以加速电子传递,提高电极性能^[15]。制作 9 个 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 尺寸的碳毡电极,用无水乙醇超声 15 min,再浸泡 3 h,之后用去离子水清洗干净,将浸泡过的碳毡放入马弗炉(SX2,龙口市电炉制造厂),在空气中 40 min 升温至 400°C ,保温 30 min,之后将灼烧后的碳毡用氨水浸泡 10 h,晾干,作为阳极。

1.2.2 普通阴极制备

碳刷具有较大的表面积和孔隙率,阴极材料碳刷以黏胶基碳纤维作原料,由专门的制刷机制造组装而成,碳刷中心为不易腐蚀的钛丝,总重约 58 g。

1.2.3 盐桥的制备

准确称取琼脂 10 g 加入 1 000 mL KCl 饱和溶液中,浸泡 5 min,不断搅拌,用电炉加热至糊状,趁热倒入 U 型管内(无气泡),冷却即成。

1.2.4 组装 BMFCs

由于海泥里的原油容易溢出影响阴极效果,且共用阴极可以排除阴极电位对电池电压的影响,为使实验结果更准确,实验装置设计为共用阴极双室反应器,如图 1 所示。将 2 000 mL 天然海泥倒入 A、B、C 这 3 个 3 000 mL 烧杯中,其中 A 和 C 烧杯分别加入 5 g 原油,使用数显搅拌机(DSX-120,杭州仪表电机有限公司)搅拌,使原油与海泥混合均匀,倒入 800 mL 海水,使阳极处于厌氧环境,构成阳极室,每个阳极室插入 3 个平行阳极(距离烧杯底部 5 cm)。将 2 500 mL 海水倒入 3 000 mL 烧杯中,构成阴极室,将制备的阴极固定在阴极室内。用 3 个盐桥将 3 个阳极室与 1 个阴极室连接起来,分别构成 BMFCs-A 有油通路系统、BMFCs-B 无油通路系统和 BMFCs-C

有油断路系统(模拟海底自然条件下的石油降解).

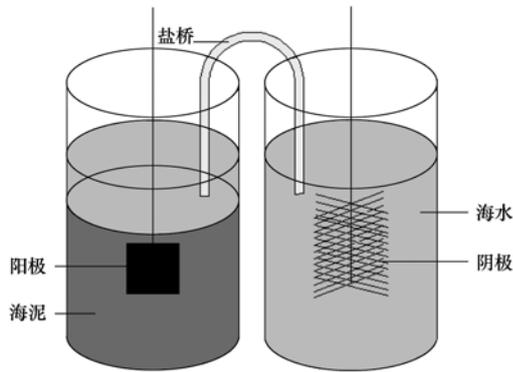


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

1.3 测试方法

在 BMFCs 断路条件下,将饱和甘汞电极(SCE)插入海水中作为参比电极,利用万用表测量阳极电位.待系统阳极电位稳定之后,用电化学工作站(LK2005B,天津市兰力科化学电子技术有限公司)测量塔菲尔曲线.调节变阻箱,通过改变电阻值,进而改变电流、电压值,记录每组数据,绘制阳极极化曲线.计算功率密度,绘制功率密度曲线,功率密度的公式为: $P = I \times (\varphi_{\text{阴极}} - \varphi_{\text{阳极}}) / S$,式中, P 为功率密度, I 为电流, S 为电极碳毡表面积.

实验前,采用总有机碳分析仪来测定 B 装置的沉积物中有机碳含量,采用离子选择电极法测定沉积物中硫离子的含量.在长期放电过程中,每隔 16 d 用玻璃管分别从 A 和 C 装置距离阳极表面 1 cm 处取样,每个装置取 3 个平行样,将沉积物于表面皿中自然风干,研磨,准确称取 10 g.通过超声-索氏萃取-重量法^[16]来测定泥样中的含油量,萃取剂为正己烷和二氯甲烷(正己烷:二氯甲烷为1:1),超声萃取 10 min.根据实验结果求平均值,计算不同装置的含油量.

在长期放电的第 64 d,分别从 A、B 和 C 装置阳极表面 1 cm 处取 1 g 海泥,每个装置取 3 个平行样,再分别加入 9 mL 无菌水,25℃温度下在摇床中以 160 r·min⁻¹摇匀,将菌悬液逐级稀释后,采用 2216E 琼脂固体平板法测定异养菌数量^[17].根据实验结果求平均值,计算不同装置阳极表面的细菌附着量.

2 结果与讨论

2.1 石油对 BMFCs 系统电化学性能的影响

2.1.1 阳极电位及极化性能曲线

由图 2 和图 3 可见,A、B 装置的开路电压分别

在第 13 d 和 14 d 达到稳定电位 -491 mV 和 -468 mV,稳定的开路电压表明产电菌已稳定附着在电极上^[18].由图 2 还可以看出,含油系统的阳极电位更低一些,稳定的阳极电位相差 23 mV.实验测得海泥中有机碳和硫离子的背景值分别为 70 g·kg⁻¹和 0.032 μg·g⁻¹,而含油系统增加了有机物底物,所以阳极材料表面更易富集产电菌,分解利用石油时产生的电子多,导致电位低.通过稳态放电法得到如图 3 显示的阳极极化曲线,对于 BMFCs-B 装置,当电流密度由 0 mA·m⁻²升高到 199 mA·m⁻²时,阳极电位由 -468 mV 升高到 7.5 mV,而对于 BMFCs-A 装置,当电流密度由 0 mA·m⁻²升高到 258 mA·m⁻²时,阳极电位由 -496 mV 升高到 -15.5 mV.说明海泥中原油的存在降低了阳极极化曲线斜率,阳极抗极化能力增强^[19].

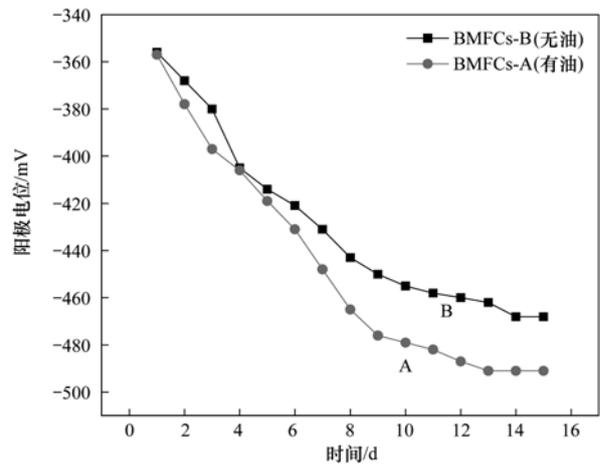


图 2 不同阳极的电位稳定曲线

Fig. 2 Stable potential of different anodes

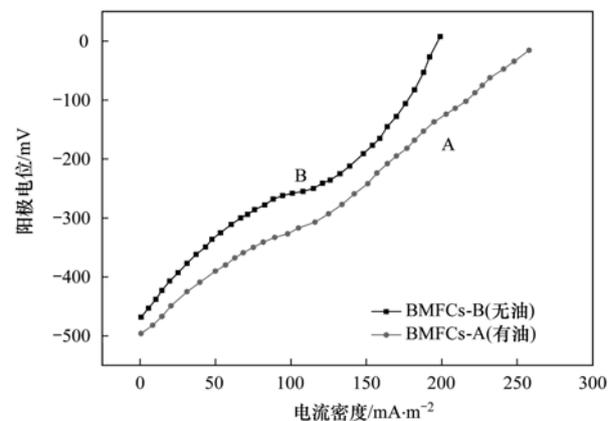


图 3 不同阳极的极化曲线

Fig. 3 Polarization curves of different anodes

2.1.2 塔菲尔曲线及阳极电子转移动力学

塔菲尔曲线的公式为: $\eta = a + b \lg |i|$,式中, i 为

交换电流密度值, η 为阳极过电位, a 为单位电流密度时的超电势值, 通过比较最大交换电流密度的大小, 有助于判断电极反应的可逆性或是否容易被极化^[20]. 塔菲尔曲线如图 4 所示, 经线性拟合得出, BMFCs-A 和 BMFCs-B 阳极的最大交换电流密度分别为 $1.37 \times 10^{-2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.50 \times 10^{-3} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, 含油装置的阳极表面最大交换电流密度约是无油装置的 9 倍, 说明石油污染物的存在使 BMFCs 电荷转移电阻降低、电子转移动力学活性提高, 更易于进行电极反应, 电极体系更不容易被极化.

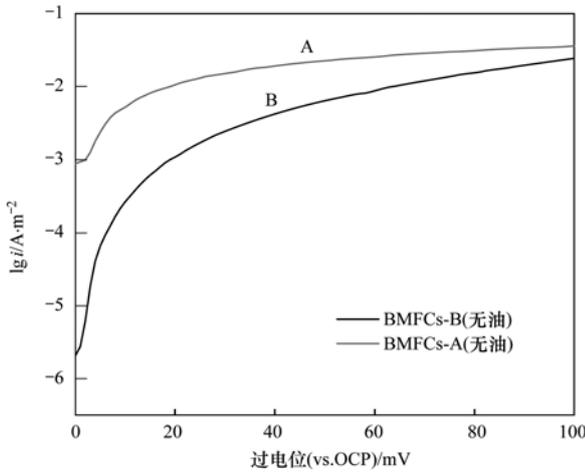


图 4 不同阳极的塔菲尔曲线
Fig. 4 Tafel of different anodes

2.1.3 电池功率密度曲线

图 5 显示了不同装置的电池功率密度曲线, 由图可得, 在电流密度小于 $50 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, BMFCs-A 和 BMFCs-B 系统的功率密度变化趋势逐渐上升且相差不大, 在电流密度大于 $50 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 两装置逐渐出现明显差异. BMFCs-A 在电流密度为 $249.92 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 时达到最大功率密度 $105.79 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 此时电池内阻和外阻大小相等^[21], 为 908Ω . BMFCs-B 在电流密度为 $165.12 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 时达到最大功率密度 $83.6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 此时电池内阻为 1830Ω . 结果表明, 相同的改性阳极在有石油存在

的海泥环境中最大输出功率密度是无油环境中的 1.27 倍, 电池内阻降低了一倍. 由图 3 可以看出, BMFCs-A 装置的扩散内阻和电荷转移内阻降低, 导致电池内阻降低, 输出功率密度提高, 因此, 石油污染物的存在提高了海底微生物燃料电池的电池性能.

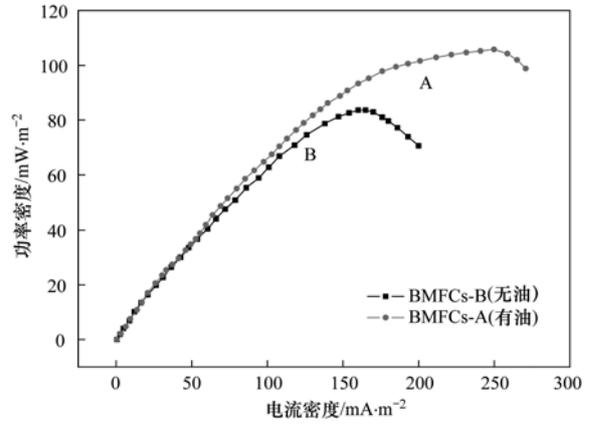


图 5 不同电池的功率密度曲线
Fig. 5 Power density curves of different electrodes

2.2 阳极表面细菌附着量

从表 1 可以计算出, BMFCs-A、BMFCs-B 和 BMFCs-C 装置阳极表面单位质量海泥的异养菌数量分别是 $(66 \pm 3.61) \times 10^7$ 、 $(46 \pm 2.65) \times 10^7$ 和 $(7.3 \pm 2.08) \times 10^7 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$, 阳极异养菌数量关系: $\text{BMFCs-A} > \text{BMFCs-B} > \text{BMFCs-C}$. BMFCs-A 比 BMFCs-B 的阳极细菌数量多, 说明石油污染物存在时, 异养菌更易于富集在阳极表面. Wang 等^[10] 研究发现利用 MPN 法测定 MFC 系统阳极附近的石油降解菌数量 $[(373 \pm 56) \times 10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}]$ 比断路系统 $[(8 \pm 2) \times 10^3 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}]$ 提高了接近两个数量级, 本研究测得 BMFCs-A 的阳极细菌数量是 BMFCs-C 的 9 倍, 说明通路状态比自然条件下阳极附近有利于聚集细菌. 本研究中, 石油污染物的存在为细菌提供了丰富的底物, 有利于产电菌的富集和异养菌密度增大, 细菌数目增多, 产生的电子增多, 阳极和电池性能得到提高.

表 1 不同装置阳极表面异养菌数量(单位质量异养菌数量比较) $\times 10^7/\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 1 Comparison of heterotrophic bacteria number of different devices (heterotrophic bacteria number) $\times 10^7/\text{CFU} \cdot \text{g}^{-1}$

BMFCs-A ₁	BMFCs-A ₂	BMFCs-A ₃	BMFCs-B ₁	BMFCs-B ₂	BMFCs-B ₃	BMFCs-C ₁	BMFCs-C ₂	BMFCs-C ₃
67	62	69	48	43	47	8	5	9

2.3 BMFCs 装置对石油降解率的影响

图 6 为长期放电时不同装置的含油量曲线, 结果表明: BMFCs-A (通路装置) 和自然条件下 BMFCs-C (断路装置) 的海泥中石油污染物的最初

含量分别是 $(15.40 \pm 0.08) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(15.0 \pm 0.09) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 在长期放电的第 64 d, BMFCs-A 和 BMFCs-C 的含油量分别在最初的基础上下降了 $(28.62 \pm 1.25)\%$ 和 $(1.53 \pm 0.52)\%$, 使海泥中的含油量达

到 $(11.0 \pm 0.25) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(14.77 \pm 0.01) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, BMFCs 的石油降解率是自然条件下的 18.7 倍. 分析海底微生物燃料电池提高石油降解率的原因在于 BMFCs 对石油污染物中部分细菌有电催化作用, 这种电催化作用能够加速细菌“搬运”电子的能力, 而且阳极表面的细菌主要靠消耗石油污染物中的有机碳来产生电子, 从而加速海底石油污染物的降解, 提高降解率^[13]. 另外, 异养菌数量和石油降解率之间的相关性非常明显, 相关性为 0.989, 异养菌数量越多越有利于石油污染物的降解^[22]. 细菌降解石油产生的电子、质子分别被 BMFCs 消耗掉, 从而加速了细菌的生命代谢, 促进了石油污染物的降解, 使得 BMFCs 系统的石油降解量比自然条件下的降解量高.

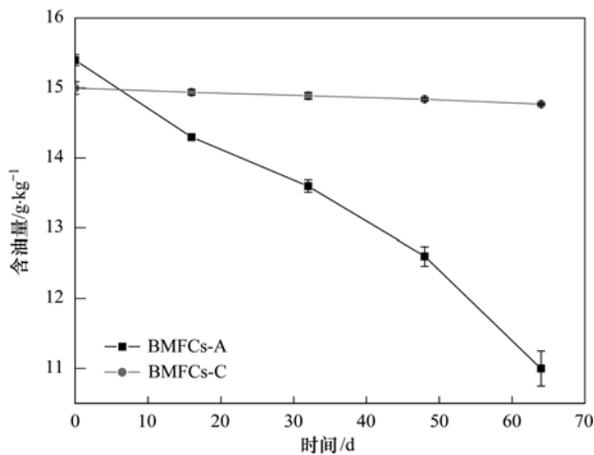


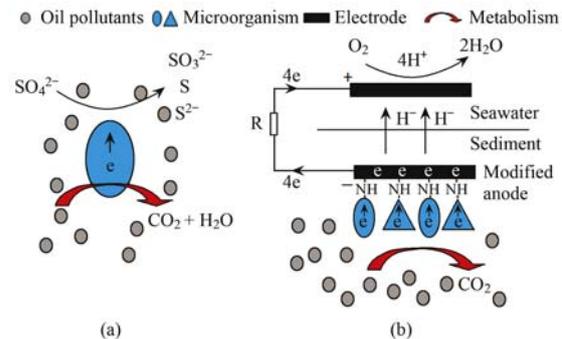
图 6 不同装置含油量曲线

Fig. 6 Oil content of different devices

2.4 BMFCs 加速石油污染物降解模式分析

石油含有饱和烃、芳香烃、胶质和沥青等成分, 自然状态下, 微生物利用各种开环酶、加氧酶、降解酶等通过酶促反应^[23] 将石油污染物中部分难降解的大分子转变为易分解的脂肪酸、醛酮、芳香族化合物、氨基酸^[24] 等, 再经过微生物的新陈代谢作用将其氧化为 CO_2 和 H_2O . 而在 BMFCs 存在的环境中, 多种细菌协同作用, 石油降解菌将石油降解为小分子有机物, 而后由产电菌代谢产电. 阳极表面的微生物通过对小分子有机物的氧化作用产生 CO_2 、质子和电子, 电子经外电路传递到阴极, 质子通过海底沉积层/海水界面扩散到阴极, 在阴极表面与质子、 O_2 结合, 生成 H_2O . Ding 等^[25] 认为石油污染物氧化过程所需电子受体的种类会影响石油降解的速度, 在自然状态海底厌氧环境中, 最终电子受体主要是硫酸盐、硝酸盐和有机物分解的中间产物

等. 在本研究的 BMFCs 系统中, 基于产电呼吸的 MFC 工作原理^[26], 电子受体是电极, 在整个通路装置的运行中, 阴极源源不断消耗电子, 促进了阳极附近微生物的新陈代谢作用; 另外, 阳极材料经氨水处理过, 降低了反应过程的活化能. 同时, 阳极表面细菌数量增多, 加速了电子传递速度, 进一步加速石油污染物的降解. 综上, 本研究提出一种 BMFCs 加速海底石油污染物降解的模式图, 如图 7.



(a) 石油降解模式; (b) BMFCs 降解石油模式

图 7 自然状态下石油降解模式和 BMFCs 降解石油模式

Fig. 7 Oil degradation model under natural state and the oil degradation model with BMFCs

3 结论

本研究利用海底微生物燃料电池的原理, 石油污染物作为 BMFCs 的燃料, 既能提高电池的产电能力, 又能加速石油污染物的降解. 含油通路装置的阳极最大交换电流密度和电池最大输出功率密度分别是无油通路装置的 10 倍和 1.27 倍, 其石油降解率和阳极表面异养菌数量分别是自然条件下的 18.7 倍和 9 倍. 石油污染物作为 BMFCs 的一种底物为微生物的新陈代谢提供了丰富的“养料”, 细菌数目增多, 产生的电子增多, 同时以改性阳极和电池阴极作为石油污染物氧化过程所需电子受体, 提高了 BMFCs 的电化学性能, 进而加速石油的降解. 本研究结果可为通过海底微生物燃料电池在海底石油污染物强化修复中的应用提供基础.

参考文献:

- [1] 李习武, 刘志培. 石油烃类的微生物降解[J]. 微生物学报, 2002, 42(6): 764-767.
- [2] 刘慧杰, 张虎山. 海洋石油污染及治理措施[J]. 广州环境科学, 2012, 27(4): 35-38.
- [3] 刘魏魏, 尹睿, 林先贵, 等. 生物表面活性剂-微生物强化紫花苜蓿修复多环芳烃污染土壤[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 1079-1084.
- [4] 张景来, 李会爽, 周磊, 等. 海洋石油污染物微生物降解的研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(29): 18069-18071.

- [5] 曹新垲, 杨琦, 郝春博. 厌氧污泥降解动力学与生物多样性研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(10): 3535-3541.
- [6] 刘五星, 骆永明, 滕应, 等. 石油污染土壤的生物修复研究进展[J]. 土壤, 2006, **38**(5): 634-639.
- [7] Williams K H, Bargar J R, Lloyd J R, *et al.* Bioremediation of uranium-contaminated groundwater: a systems approach to subsurface biogeochemistry [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2013, **24**(3): 489-497.
- [8] Lovley D R, Phillips E J. Reduction of uranium by *Desulfovibrio desulfuricans* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1992, **58**(3): 850-856.
- [9] Hays L A, Nevin K P, Lovley D R. Role of prior exposure on anaerobic degradation of naphthalene and phenanthrene in marine harbor sediments [J]. Organic Geochemistry, 1999, **30**(8): 937-945.
- [10] Wang X, Cai Z, Zhou Q X, *et al.* Bioelectrochemical stimulation of petroleum hydrocarbon degradation in saline soil using U-tube microbial fuel cells [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, **109**(2): 426-433.
- [11] Morris J M, Jin S. Enhanced biodegradation of hydrocarbon-contaminated sediments using microbial fuel cells[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **213-214**: 474-477.
- [12] 刘昌云. 微生物燃料电池的反应动力学研究[J]. 可再生能源, 2010, **28**(5): 56-59.
- [13] 张业龙, 付玉彬, 卢志凯, 等. 海底微生物燃料电池电催化降解有机碳[J]. 化学工程, 2013, **41**(5): 10-13.
- [14] 张瑞虎, 曲涛, 戴承远. 充分利用SZ36-1原油资源生产优质沥青[J]. 石油沥青, 2002, **16**(3): 46-49.
- [15] Wang X, Cheng S A, Feng Y J, *et al.* Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(17): 6870-6874.
- [16] 王如刚, 王敏, 牛晓伟, 等. 超声-索氏萃取-重量法测定土壤中总石油烃含量 [J]. 分析化学, 2010, **38**(3): 417-420.
- [17] 谢昭聪, 郑文丽, 徐立俊, 等. 培养条件对海水中菌落总数测定的影响 [J]. 中国国境卫生检疫杂志, 2011, **34**(4): 260-262.
- [18] 卢志凯. 低电位阳极海底微生物燃料电池构建及温度对电池性能影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. 24-36.
- [19] Fu Y B, Yu J, Zhang Y L, *et al.* Graphite coated with manganese oxide/multiwall carbon nanotubes composites as anodes in marine benthic microbial fuel cells [J]. Applied Surface Science, 2014, **317**: 84-89.
- [20] Lowy D A, Tender L M, Zeikus J G, *et al.* Harvesting energy from the marine sediment-water interface II: Kinetic activity of anode materials [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2006, **21**(11): 2058-2063.
- [21] Zhao F, Slade R C T, Varcoe J R. Techniques for the study and development of microbial fuel cells: An electrochemical perspective [J]. Chemical Society Reviews, 2009, **38**: 1926-1939.
- [22] 张秀霞, 武海杰, 白雪晶, 等. 土壤修复过程中微生物数量、酶活性与石油降解率的关系 [J]. 石油学报, 2014, **30**(1): 96-99.
- [23] 王悦明, 王继富, 李鑫, 等. 石油污染土壤微生物修复技术研究进展 [J]. 环境工程, 2014, **37**(8): 157-161, 130.
- [24] Lovley D R. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms [J]. Nature Reviews Microbiology, 2006, **4**(7): 497-508.
- [25] Ding K Q, Luo Y M, Sun T H, *et al.* Bioremediation of soil contaminated with petroleum using forced-aeration composting [J]. Pedosphere, 2002, **12**(2): 145-150.
- [26] 刘敏, 邵军, 周奔, 等. 微生物产电呼吸最新研究进展 [J]. 应用与环境生物学报, 2010, **16**(3): 445-452.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carriers on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFASs	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行