

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氮氨异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析

王敏¹, 赵阳国^{1,2*}, 卢珊珊¹

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 为探讨培养过程对微生物的选择性作用及电极活性菌在生物膜中的功能地位, 采用亨氏厌氧滚管稀释培养技术, 以氧化铁为指征, 自微生物燃料电池 (microbial fuel cell, MFC) 阳极生物膜中分离电极活性微生物, 并对纯菌分离过程中微生物群落结构动态特征进行跟踪监测。结果表明, 以乳酸、乙酸和甾体药物生产废水为底物的 MFC 最高电压分别可达 0.57、0.60 和 0.40 V。种泥以及乳酸、乙酸为底物的阳极膜分离出的优势菌种均为变形杆菌, 而甾体废水为底物的阳极膜分离出的优势菌包含变形杆菌、厚壁菌和拟杆菌, 种类丰富。经过富集培养最终分离获得 2 株电极活性菌, 16S rDNA 测序鉴定为路德维希杆菌 (*Enterobacter ludwigii*) 和弗氏柠檬酸杆菌 (*Citrobacter freundii*)。以乳酸为底物, 两株纯菌可分别获得 0.10 V 和 0.17 V 的最大电压。该研究表明, 应用氧化铁为指征的厌氧梯度稀释培养技术可分离到电极活性微生物, 但由于分离过程的选择作用, 微生物群落结构动态变化特征显著。

关键词: 电极活性细菌; 微生物燃料电池; 群落结构; 生物膜

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3940-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.10.042

Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria

WANG Min¹, ZHAO Yang-guo^{1,2}, LU Shan-shan¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: To investigate the effect of selective culturing on microorganisms and functional role of electrical active bacteria in biofilm, some exoelectrogens were isolated from microbial fuel cell (MFC) anodic biofilm using Hungate roll-tube technique with iron oxide as indicator. At the same time, the dynamics of the microbial community structure was monitored during the pure culture isolation. The results show that maximum voltages of MFCs feeding with lactic acid, acetic acid and steroid wastewater are 0.57, 0.60 and 0.40 V respectively. The dominant bacteria isolated from seed sludge and anodic films feeding with acetate and lactate belong to phylum Proteobacteria; while steroid wastewater contains relative high diversity of bacteria, i. e. Proteobacteria, Firmicutes and Bacteroidetes. After enriching and culturing, two bacteria were consequently obtained, which shared the highest similarity with *Enterobacter ludwigii* and *Citrobacter freundii* respectively. When inoculated in MFC with lactic acid as the substrate, they produced maximum voltage of 0.10 and 0.17 V individually. This study shows that electrical active bacteria can be isolated from the MFC anodic biofilm using anaerobic gradient dilution culture techniques with iron oxide as indicator. Microbial community structure presents markedly shifting during the bacteria isolation owing to its selectivity.

Key words: electrical active bacteria; microbial fuel cell; community structure; biofilm

微生物燃料电池 (MFC) 是利用微生物作为生物催化剂, 通过生物电化学途径氧化有机物并产生电能的系统。在 MFC 系统中, 富集在阳极表面的电极活性微生物, 在厌氧条件下通过降解有机物产生质子和电子, 电子直接或间接传递到阳极, 再经由外电路到达阴极, 在阴极与来自阳极的质子反应生成水, 而在外电路形成电流^[1]。将 MFC 应用于污水处理系统中, 既可以利用微生物降解废水中的有机物, 同时还能产生电能, 实现环境保护和产电节能的双赢^[2]。然而, MFC 在实际应用中还存在功率密度低、放大性较差等瓶颈问题, 尤其是 MFC 中高性能电极活性细菌的研究还没有得到充分重视^[3]。

在 MFC 中, 接种不同的底物时, MFC 中阳极膜

的微生物群落组成差别很大^[4], 因此, 了解混合菌作用下 MFC 阳极膜的微生物群落结构, 有利于后续筛选高效产电的菌株^[5]。根据 Kim 等^[6]的研究, 阳极膜上的优势菌群并不一定是优势产电菌, 某些数量上非优势的菌属也可能是产电高效的微生物, MFC 的产电过程实际是占优势的非产电菌和数量不占优势的产电菌共同作用的结果^[7]。阳极生物膜电极活性菌的分离是 MFC 产电机理研究的基础, 获

收稿日期: 2014-03-01; 修订日期: 2014-04-24

基金项目: 山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目 (BS2011NJ018)

作者简介: 王敏 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为废水处理资源化, E-mail: wangmin08hg@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ygzha@ouc.edu.cn

得电极活性菌不仅能够提高 MFC 的库仑效率,还能够促进电子产生机制和传递途径等方面的研究进展^[3].

本研究以不同底物运行的 MFC 阳极膜微生物群落为对象,富集分离得到高活性的电极活性菌,通过跟踪监测分离过程中的微生物群落结构变化,探索培养条件对微生物的选择作用以及电极活性菌在 MFC 中的地位.

1 材料与方法

1.1 MFC 的运行

反应器采用双室空气阴极反应器,两极室体积均为 170 mL,以有机玻璃为材料,阳极膜材料为 8 cm × 6 cm 碳布,阴极为碳纸,两极室间以质子交换膜(Nafion 117, Dupont)隔开,膜的有效面积为 40 cm².

分别以乳酸、乙酸和甾体药物生产废水为阳极碳源底物,并接种等量的种泥,启动 MFC 反应器. 接种污泥取自本实验室稳定运行的厌氧折流板反应器(ABR)污泥,该污泥中微生物种类丰富,厌氧生物多样性高,在碳硫比为 2:1 时,硫酸盐去除率可达 98%^[8]. 反应器的阴极溶液为磷酸盐缓冲液,组成为(g·L⁻¹): NaH₂PO₄·12H₂O 4.58, Na₂HPO₄·2H₂O 2.75. 阳极溶液组成为(g·L⁻¹): KCl 3.1, NH₄Cl 1.3, Na₂HPO₄·2H₂O 2.75, NaH₂PO₄·12H₂O 4.58, 2 mL 维生素溶液^[9], 2 mL 氨基酸溶液^[10]和 2 mL 微量元素溶液^[11,12],分别以乳酸、乙酸为有机底物,配成化学需氧量(COD)浓度为 500 mg·L⁻¹的进水溶液. 甾体药物生产废水取自山东某制药厂氢化可的松的生产车间, pH = 7.2, 电导率 8.63 mS·cm⁻¹, COD 6 717 mg·L⁻¹, SO₄²⁻ 为 2 419 mg·L⁻¹.

在 MFC 启动阶段,每 24 h 换水一次,换水时反应器底部保留约 10 mL 污泥混合液,直至反应器输出电压稳定,取阳极生物膜做扫描电镜观察,并记录周期内反应器的产电情况. 待分离出纯菌后,将反应器拆洗并灭菌,加入灭菌的乳酸底物阳极溶液和阴极溶液,并接种纯菌,记录纯菌产电情况.

1.2 电化学分析

为了监测混合菌和纯菌 MFC 的运行状况,对反应器进行电化学监测分析. 电压通过数据采集卡(PIOS 813, 台湾泓格)进行在线记录.

1.3 电极活性菌的分离与鉴定

在无菌环境下,从运行状况良好的反应器阳极剪下约 1 cm² 碳布,放入已灭菌的 LB 液体培养基富

集培养,获得选择性富集培养菌液;以富集培养菌液为对象,采用基于无定形铁还原的连续稀释法^[13]分离电极活性微生物菌株,在培养基中加入无定形铁,培养一段时间后若培养基变黑,说明微生物能还原无定形铁,并有效地将电子传递到胞外电子受体^[14,15],由此判定微生物具有产电功能. 具体步骤为,将富集后的菌液用无菌水稀释至不同梯度,采用亨氏厌氧滚管稀释培养技术接种于固体培养基中,充氮气去除氧气后制成滚管,进行恒温厌氧培养,观察并挑取黑色的单菌落转接入新鲜的液体培养基中. 重复操作若干次,直至管内菌落在显微镜下的细胞形态一致^[16].

对电极活性菌的鉴定,包括观察产电情况、电子显微镜形态观察以及 16S rDNA 测序鉴定. 分别提取菌株 Lss104 和 Lss121 基因组 DNA,以细菌 16S rDNA 的通用引物 BSF8/20: 5'-AGAGTTTGATCC TGGCTCAG-3'和 BSR1541/20: 5'-AAGGAGGTGATC CAGCCGCA-3'进行 PCR 扩增(CFX96, 美国伯乐)^[1], PCR 产物长度约 1 500 bp,所有引物均购自 Invitrogen(上海). 克隆后进行测序,序列通过 RDP(<http://rdp.cme.msu.edu/>)中的 Seq Match 程序进行分类,并下载相似序列. 应用 Mega 4.0 以 NJ 法构建系统发育树. 电极活性菌 Lss104 和 Lss121 的 16S rDNA 序列已经提交至 GenBank 中,登录号 KJ730211-KJ730212.

1.4 纯菌分离过程中微生物群落监测分析

采用变性梯度凝胶电泳技术(DGGE)监测纯菌分离过程中微生物群落结构动态. 获取种泥、反应器运行稳定时阳极膜、富集培养菌液以及纯培养微生物,采用土壤 DNA 提取试剂盒(Mobio, 美国)提取微生物总 DNA,以此为模板,进行 PCR 扩增,采用细菌 16S rDNA 通用引物 BA341F: 5'-CCTACG GGAGGCAGCAG-3'和 BA534R: 5'-ATTACCGCGG CTGCTGG-3',对应于 *E. coli* 16S rRNA 基因的 341 ~ 534 bp; 其中引物 BA341F 的 5'端带有 GC 夹. PCR 程序、PCR 产物的 DGGE 分析根据文献^[16]进行. DGGE 图谱中条带按文献^[16]方法回收并克隆测序. 序列通过 RDP(<http://rdp.cme.msu.edu/>)中的 Seq Match 程序进行分类.

2 结果与讨论

2.1 不同底物 MFC 产电效率

分别以乳酸、乙酸和甾体药物生产废水为碳源启动 MFC 反应器,反应器正常启动并运行后电压情

况如图 1. 更换阳极液后,各反应器的电压上升速率为乳酸>乙酸>甾体废水,最高电压乙酸>乳酸>甾体废水,最高电压的维持时间甾体药物生产废水>乙酸>乳酸. 大分子底物在被微生物利用的过程中存在梯级降解过程,大量微生物参与复杂有机物的降解环节,而部分产电微生物则仅能利用最终降解成的小分子产电,所以在同等条件下,底物越简单,产电库仑效率往往越高. 以混合菌群为接种污泥时,乳酸在被微生物利用的过程中会产生乙酸,丙酸等挥发酸^[18],利用过程较为复杂,且中间产物乙酸、丙酸等也能成为部分微生物的碳源,该过程中存在着有机物的分解和利用,因此乳酸比乙酸 MFC 的最高电压低. 甾体药物生产废水成分相对复杂,有机底物含量高,因而其最高电压的维持时间最长;而甾体药物生产废水的电压上升速率和最高电压均低于乳酸、乙酸,可能是由于甾体药物生产废水中微生物种类丰富,非产电微生物多,可以消耗掉大量的电子,导致库仑效率下降,电压降低. 王超等^[19]用 MFC 处理黄姜废水的研究中指出,COD 负荷过高将导致产电过程受抑制,高 COD 负荷对产电微生物产生影响,导致 MFC 产电性能有所下降. 而蔡小波等^[20]也曾提出,高浓度有机废水容易出现的酸化现象是 MFC 电压输出的限制因素.

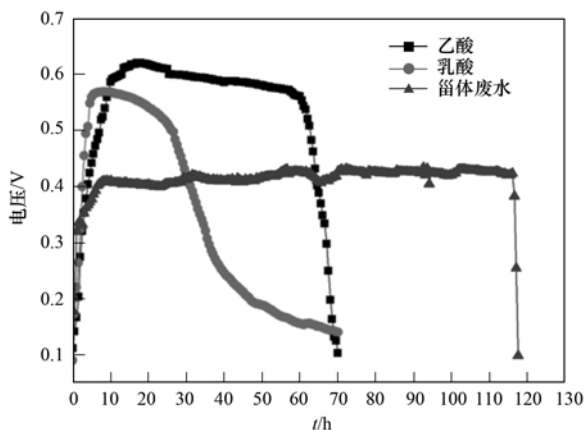


图 1 以不同有机物为底物时 MFC 电压变化

Fig. 1 Voltage variation of MFCs fed with lactic acid, acetic acid and pharmaceutical wastewater

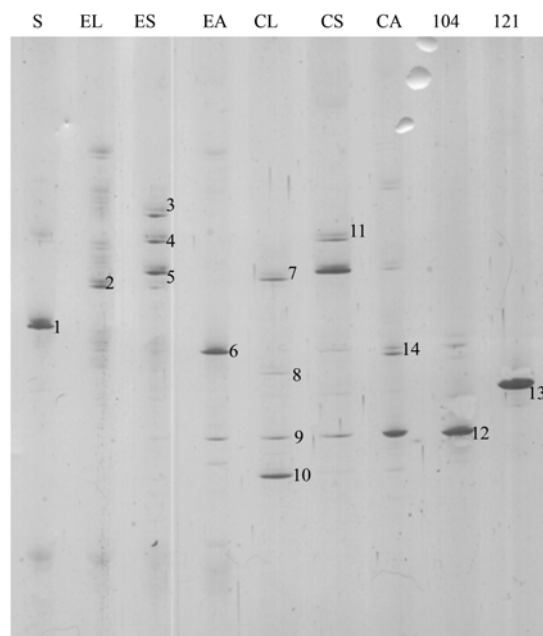
2.2 培养过程对微生物的选择作用

将乳酸、乙酸和甾体药物生产废水为碳源的 MFC 阳极膜经过预处理后,进行电镜观察,发现 3 种电极表面都附着了大量微生物,且微生物的形态类似,主要为长杆细菌,多层分布,附着情况良好. 产生这种现象的原因可能是在电极表面富集微生物的过程中,细菌个体以某种特定的方式连接到一起

成为整体“协同分布”,这样更有利于电子的传导,使微生物获得更多的能量,微生物在阳极表面的成层分布可能存在不同的导电机理^[4].

图 2 展示了利用亨氏厌氧滚管法分离纯培养的过程中每个阶段优势种群变化的 DGGE 图谱,比较分别以乳酸、乙酸和甾体药物为碳源的 MFC 阳极膜 DGGE 图谱发现,乙酸阳极膜上的优势种群数量最少(多样性指数 1.73),甾体药物生产废水稍高(多样性指数 2.66),而乳酸最多(多样性指数 2.95). 通常来说,底物越复杂,需要越多的微生物参与降解,但同时可能造成库仑效率的下降^[16]. 刘茹等^[17]发现乳酸在被微生物降解产电的过程中,会被分解成乙酸、丙酸等更小分子的挥发酸后再被利用,因此,群落中除了以乳酸为碳源的电极活性菌外还可能有乳酸降解菌和以乙酸、丙酸为碳源的电极活性菌. 而甾体废水为碳源 MFC 阳极电极膜中也可能是大分子物质降解菌、发酵菌和电极活性菌等多种功能的微生物同时存在,共同降解复杂化合物并产电. 正是由于多种菌群的共同作用,甾体废水这种复杂有机废水中的大分子有机物能被降解,同时有机物被利用产生电能.

另外,在种泥样品(S)中仅有一个优势条带,这说明种泥中,优势种群非常显著,其它种类微生物所



S 为接种污泥,EL、ES、EA 分别为乳酸、甾体药物生产废水和乙酸为碳源阳极生物膜,CL、CS、CA 分别为乳酸、甾体药物生产废水和乙酸电极生物膜富集培养菌液,104 和 121 为分离得到的纯菌

图 2 电极活性菌分离过程 DGGE 图谱分析

Fig. 2 DGGE profile of electrode active bacteria separation process

占比例较少,这个结果还与 DGGE 方法本身的特点有关. Vallaey 等^[21]发现 DGGE 仅能够检测到种群数量超过群落总量 1% 的微生物,而含量小于 1% 的无法在 DGGE 图谱中显示. 接种污泥是 ABR 反应器中高度驯化的污泥,优势种群非常明显,其数量比例可能非常高.

当应用 LB 培养基对阳极生物膜进行富集培养后,DGGE 图谱发生了显著变化,主要体现在优势种类的改变以及数量的增加. 如富集后的乳酸生物膜出现了 4 条优势条带,且与原生物膜种类不同;富集后的甬体药物生产废水生物膜出现了 3 条优势条带,其中 2 条与原生物膜一致,1 条为新出现的优势种群;而富集后的乙酸生物膜优势条带与原生物膜较一致.

将 DGGE 图谱上的优势条带切下进行测序比较,结果如表 1. 从测序结果可以看出,种泥中的优

势条带对应的菌株为变形菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans*,该菌株是典型的化能自养菌,为革兰氏阴性,好氧嗜酸,主要生长在 pH 为 1 ~ 3 的环境中^[22],能在有氧条件下依靠 Fe^{2+} 、各种还原性硫化物以及 H_2 氧化来提供能量生长^[23]. 甬体废水为碳源的电极膜优势条带对应的微生物为 *Desulfocapsa sulfexigens*、*Sedimentibacter hydroxybenzoicus* 以及 *Porphyromonadaceae bacterium*. *D. sulfexigens* 是一种利用单质硫同时作为电子供体和电子受体而完成硫歧化的一种海洋细菌. 系统发育树中与该菌的亲缘关系最近的微生物是硫酸盐还原菌,而 *D. sulfexigens* 却不能通过还原硫酸盐获得生长;并且在利用 CO_2 作为唯一碳源代谢单质硫、亚硫酸盐、硫代硫酸盐的过程中,其生长速率与代谢过程是不成比例的^[24]. *S. hydroxybenzoicus* 最初是从池塘沉积物中分离出来的能利用氨基酸的不动厌氧杆菌.

表 1 微生物群落 PCR-DGGE 图谱中优势条带克隆测序结果

Table 1 Cloning sequencing results of PCR-DGGE

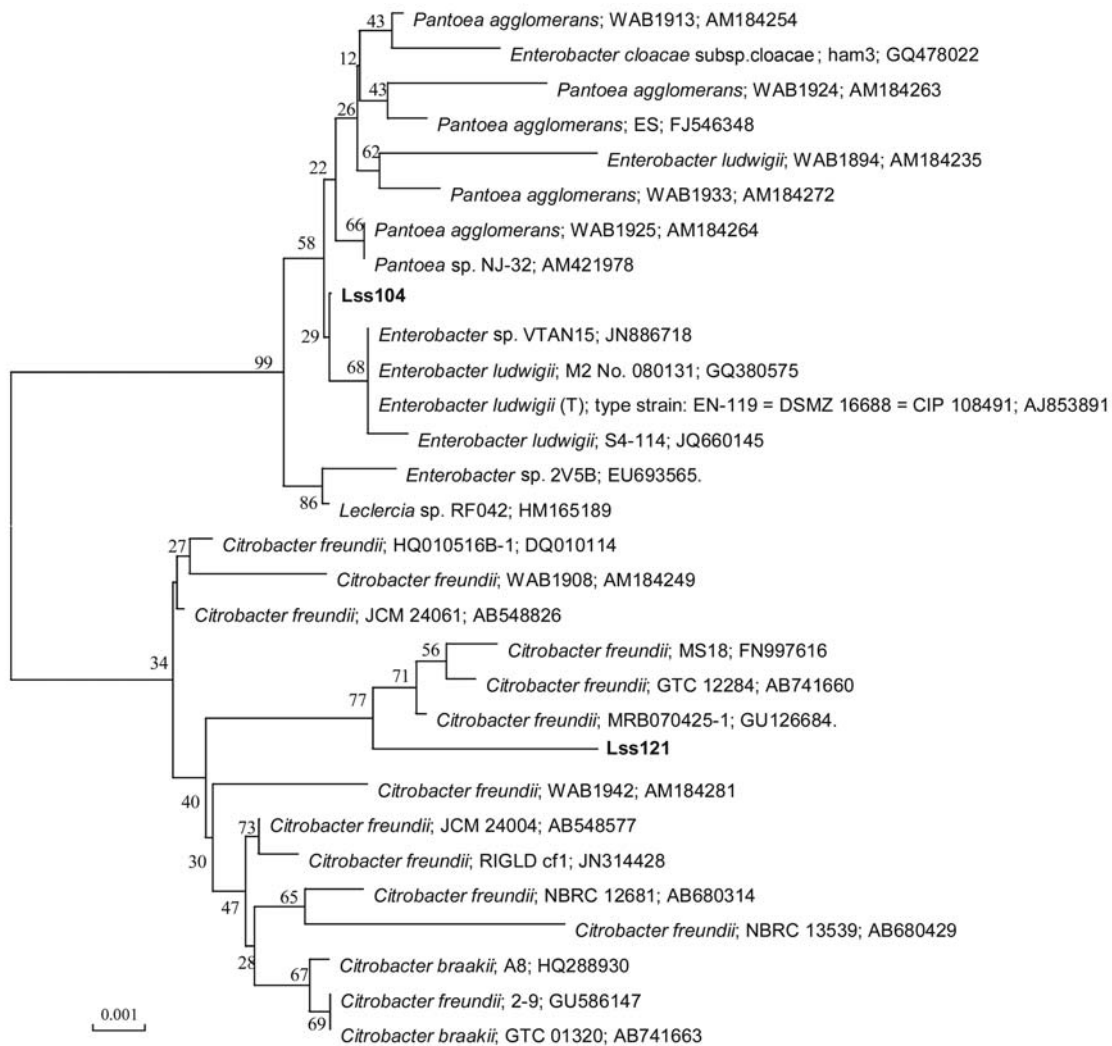
序号	长度/bp	相似菌种	序列号	相似度/%	系统发育关系
1	187	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	DQ168465	100	Proteobacteria
2	187	<i>Zoogloea</i> sp. A5	DQ342276	100	Proteobacteria
3	194	<i>Desulfocapsa sulfexigens</i> DSM 10523	NR102510	100	Proteobacterial
4	178	<i>Porphyromonadaceae bacterium</i> JN18_A107_G	DQ168658	100	Bacteroidetes
5	163	<i>Sedimentibacter hydroxybenzoicus</i> (T)	L11305	96	Firmicutes
6	184	<i>Acinetobacter</i> sp. LMG V90	AJ633641	100	Proteobacteria
7	168	<i>Fodinicurvata sediminis</i>	NR044595	99	Proteobacteria
8	161	<i>Clostridium bifermentans</i>	DSM 10716	100	Firmicutes
9	163	<i>Clostridium bifermentans</i>	DSM 13560	100	Firmicutes
10	162	<i>Clostridium bifermentans</i>	AY604562	100	Firmicutes
11	162	<i>Clostridium bifermentans</i>	X73437	100	Firmicutes
12	187	<i>Cronobacter sakazakii</i>	FJ947061	100	Proteobacteria
13	185	<i>Citrobacter freundii</i>	DQ294288	100	Proteobacteria
14	186	<i>Citrobacter freundii</i>	DQ010114	100	Proteobacteria

乙酸碳源的电极膜优势微生物 *Acinetobacter* sp. LMG V90 为革兰阴性球杆菌,菌体大小为 1.5 ~ 2.5 μm ,双排列,革兰染色不易褪色,多数菌株有荚膜,无芽孢,无鞭毛. 乳酸电极膜微生物富集培养中的优势条带对应的菌为 *Fodinicurvata sediminis*. 将 3 种碳源驯化的电极膜在 LB 培养基中富集培养,稀释后用 Fe_2O_3 的培养基进行亨氏厌氧滚管分离,从 3 种滚管中各挑取 4 株黑色菌落分别在 LB 培养基中厌氧扩大培养并测序. 在分离出的 12 株菌中,有 10 株是弗氏柠檬酸杆菌 *Citrobacter freundii*,来自 3 种碳源 MFC,另外两株则是 *Cronobacter sakazakii*,仅分离自甬体废水反应器. 3 种反应器的接种污泥相同,经过不同碳源驯化之后群落结构发生了改变,优势菌种向不同方向发展. 但是将电极膜用亨氏厌氧

滚管技术富集分离培养后,不同群落中的优势菌发生了变化,且向单一方向转变,最终从不同反应器中分离得到同一菌株. 另外,根据 DGGE 图谱,菌株 104 在富集培养液中是存在的,但在原始的阳极膜中并未显示,表明其在阳极生物膜中所占的数量比例很低.

2.3 电极活性细菌的鉴定及产电情况

以还原氧化铁的能力为指征,利用亨氏厌氧滚管稀释培养技术分离到两株电极活性细菌,分别为 Lss104 和 Lss121. 对两株菌 16S rDNA 测序,并构建系统发育树,结果如图 3. 从中看出,与 Lss104 最相似的微生物是路德维希希肠杆菌(*Enterobacter ludwigii* En- 119^T, GenBank 登录号: AJ853891),相似性 99%. *E. ludwigii* 是以在细菌系统分类学上有突出



相似序列下载于 RDP (rdp.cmc.msu.edu), 采用 Mega 4.0 NJ 法构建系统发育树 (bootstrap = 1 000), 分支处数字为支持率 (%), 左下比例尺显示分离距离

图 3 本研究分离到的细菌菌株 Lss104 和 Lss121 与相似序列构建的系统发育树

Fig. 3 Phylogenetic tree of the isolates Lss104 and Lss121 and the similar sequences

贡献的微生物学家 Wolfgang Ludwig 命名, 第一次是从临床样品中分离得到的菌种. 研究表明, 该菌革兰氏阴性, 过氧化氢酶阳性, 氧化酶和脱氧核糖核酸酶阴性, 能发酵葡萄糖, 是无色素的运动型棒状细菌. 它的生长温度和在 LB、HB 等通用培养基生长情况与其他肠杆菌属特征相似, 能通过肌醇和 3-O-methyl-D-glucopyranose 上的生长状况与其他肠杆菌区别开来^[25], 目前尚未见该菌产电的报道.

与 Lss121 最相似的菌株是弗式柠檬酸杆菌 (*Citrobacter freundii* MRB070425-1, GenBank 登陆号: GU126684), 相似性 99%. 该菌革兰氏阴性菌, 1 ~ 5 μm , 长杆状周身有鞭毛可以运动, 是致病菌^[26]. 李颖等^[27]从 MFC 中分离出 1 株产电菌株 *Citrobacter freundii* LY-3, 发现其菌悬液在循环伏安

扫描时出现氧化还原峰, 且氧化还原不可逆; LY-3 菌株在 MFC 中能利用牛肉膏产电, 最大功率密度为 $98.2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 另外, 有研究发现 *Citrobacter freundii* Z7 以柠檬酸钠为电子供体时^[28], 在单室空气阴极 MFC 中可获得最大输出电压 0.26 V, 最大功率密度 $204.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 显示出了较强的电化学活性. 可见, 弗式柠檬酸杆菌是重要的电极活性细菌.

为了检验两株电极活性细菌 Lss104 和 Lss121 是否能够直接产电, 将纯菌菌液直接加入灭菌的乳酸碳源 MFC 反应器中, 在线监测电压变化, 结果如图 4. Lss104 和 Lss121 的最高电压分别是 0.104 V 和 0.136 V, Lss104 的产电周期短于 Lss121. 一般来说, 电极活性菌纯菌株的产电能力低于混合菌群, 主要是由于混合菌群在底物和利用过程中能够协同作

用,不同种类的微生物分别负责电子受体的产生、大分子物质的水解和有机物的产电等过程^[29]。

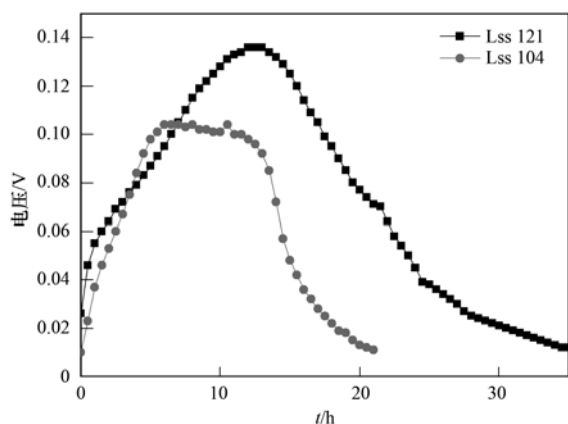


图4 两株电极活性细菌菌株 Lss104 和 Lss121 的产电情况

Fig. 4 Voltage changes of two electrical active bacteria, Lss 104 and Lss 121

电极活性微生物有助于 MFC 的产电过程,而混合菌群中其他微生物对产电过程的作用则需要进一步探究. MFC 利用微生物处理复杂有机废水并产电是一个复杂的过程,需要多种微生物共同合作. 对微生物之间的相互作用进行深入研究,正确利用微生物之间的协同和拮抗作用,可以形成处理特定有机废水的高性能微生物组合,帮助人们更准确地认识微生物产电和废水处理过程,提高 MFC 的产电效率.

3 结论

(1)利用亨氏厌氧滚管稀释培养技术,以还原氧化铁的能力为指征,富集和分离电极活性微生物. 结果表明,微生物富集分离过程中群落结构动态变化显著,对微生物群落表现出强烈的选择作用. 甾体药物生产废水等复杂底物 MFC 阳极膜中优势种类较简单底物,如乳酸和乙酸,要丰富得多.

(2)采用以氧化铁为指征的厌氧滚管稀释培养技术可分离到阳极膜上丰度较低的电极活性微生物,本研究分离到两株产电菌,即路德维希肠杆菌 (*Enterobacter ludwigii*) 和 弗式柠檬酸杆菌 (*Citrobacter freundii*),其最大电压分别为 0.10 V 和 0.14 V.

参考文献:

- [1] 洪义国, 郭俊, 孙国萍. 产电微生物及微生物燃料电池最新研究进展[J]. 微生物学报, 2007, 47(1): 173-177.
- [2] Logan B E, Regan J M. Microbial fuel cells-challenges and applications[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(17): 5172-5180.
- [3] 刘尧兰. 产电菌的分离及不同温度下 MFC 产电特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [4] 张翼峰. 不同底物的微生物燃料电池阳极菌群及其产电特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [5] 谢海秀. *Shewanella haliotis* Z4 和 *Enterococcus faecalis* Z5 及其产电特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [6] Kim G T, Webster G, Wimpenny J W T, et al. Bacterial community structure, compartmentalization and activity in a microbial fuel cell [J]. Journal of Applied Microbiology, 2006, 101(3): 698-710.
- [7] Bond D R, Holmes D E, Tender L M, et al. Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments [J]. Science, 2002, 295(5554): 483-485.
- [8] Wang J C, Zhao Y G, Li X W, et al. Enrichment and community characteristics of acetate-utilizing sulfate reducing microflora[A]. In: 1st Conference on Environmental Pollution and Public Health [C]. Irvine USA: Scientific Research Publishing, 2010. 883-887.
- [9] Balch W E, Fox G E, Magrum L J, et al. Methanogens: reevaluation of a unique biological group [J]. Microbiological Reviews, 1979, 43(2): 260-296.
- [10] Wu D, Xing D F, Lu L, et al. Ferric iron enhances electricity generation by *Shewanella oneidensis* MR-1 in MFCs [J]. Bioresource Technology, 2013, 135: 630-634.
- [11] Lee J, Phung N T, Chang I S, et al. Use of acetate for enrichment of electrochemically active microorganisms and their 16S rDNA analyses[J]. FEMS Microbiology Letters, 2003, 223(2): 185-191.
- [12] Bretschger O, Obratsova A, Sturm C A, et al. Current production and metal oxide reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1 wild type and mutants [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2007, 73(21): 7003-7012.
- [13] 孙丹. 生物电解产氢系统功能微生物筛选及其电化学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [14] 刘志丹, 周良, 杜竹玮, 等. 异化金属还原菌的研究进展[J]. 微生物学通报, 2005, 32(5): 156-159.
- [15] Lovley D R. Dissimilatory metal reduction: from early life to bioremediation[J]. ASM News, 2002, 68(5): 231-237.
- [16] 李永峰, 任南琪, 陈瑛, 等. 发酵产氢细菌分离培养的厌氧实验操作技术[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(12): 1589-1594.
- [17] 刘茹, 赵阳国, 卢珊珊, 等. 微生物燃料电池利用乳酸产电性能与微生物群落分布特征[J]. 微生物学报, 2012, 52(6): 744-752.
- [18] Liu R, Gao C Y, Zhao Y G, et al. Biological treatment of steroidal drug industrial effluent and electricity generation in the microbial fuel cells [J]. Bioresource Technology, 2012, 123: 86-91.
- [19] 王超, 薛安, 赵华章, 等. 单室型微生物燃料电池处理黄姜废水的性能研究[J]. 环境科学, 2009, 30(10): 3093-3098.
- [20] 蔡小波, 杨毅, 孙彦平, 等. 微生物燃料电池利用甘薯燃料

- 乙醇废水产电的研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2512-2517.
- [21] Vallaeys T, Topp E, Muyzer G, *et al.* Evaluation of denaturing gradient gel electrophoresis in the detection of 16S rDNA sequence variation in rhizobia and methanotrophs [J]. FEMS Microbiology Ecology, 1997, **24**(3): 279-285.
- [22] 刘欣伟, 冯雅丽, 李浩然, 等. 好氧和厌氧条件下 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 菌对 Fe^{3+} 氧化 FeS_2 的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, **23**(1): 274-281.
- [23] 符翔, 王红梅, 刘乔, 等. Fe^{2+} 浓度对 *Acidithiobacillus ferrooxidans* 耐铜性的影响[J]. 矿物学报, 2011, **31**(4): 662-667.
- [24] Finster K W, Kjeldsen K U, Kube M, *et al.* Complete genome sequence of *Desulfocapsa sulfexigens*, a marine deltaproteobacterium specialized in disproportionating inorganic sulfur compounds[J]. Standards in Genomic Sciences, 2013, **8**(1): 58-68.
- [25] Hoffmann H, Stindl S, Stumpf A, *et al.* Description of *Enterobacter ludwigii* sp. nov., a novel Enterobacter species of clinical relevance [J]. Systematic and Applied Microbiology, 2005, **28**(3): 206-212.
- [26] Wang J T, Chang S C, Chen Y C, *et al.* Comparison of antimicrobial susceptibility of *Citrobacter freundii* isolates in two different time periods [J]. Journal of Microbiology, 2000, **33**(4): 258-262.
- [27] 李颖, 孙永明, 孔晓英, 等. 微生物燃料电池中一株产电菌 *Citrobacter freundii* 的分离及特性研究[J]. 太阳能学报, 2012, **33**(11): 1968-1972.
- [28] 彭月. *Klebsiella oxytoca* Z6 和 *Citrobacter freundii* Z7 的分离及其产电特性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [29] 陈姗姗, 张翠萍, 刘广立, 等. 纯菌株与混合菌株在 MFC 中降解喹啉及产电性能的研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(9): 2148-2154.
- [30] Jabari L, Gannoun H, Cayol J L, *et al.* *Macellibacteroides fermentans* gen. nov., sp. nov., a member of the family Porphyromonadaceae isolated from an upflow anaerobic filter treating abattoir wastewaters [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2012, **62**(10): 2522-2527.
- [31] Zhang X M, Mandelco L, Wiegel J. *Clostridium hydroxybenzoicum* sp. nov., an amino acid-utilizing, hydroxybenzoate-decarboxylating bacterium isolated from methanogenic freshwater pond sediment[J]. International Journal of Systematic Bacteriology, 1994, **44**(2): 214-222.
- [32] Breitenstein A, Wiegel J, Haertig C, *et al.* Reclassification of *Clostridium hydroxybenzoicum* as *Sedimentibacter hydroxybenzoicus* gen. nov., comb. nov., and description of *Sedimentibacter saalensis* sp. nov. [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2002, **52**(3): 801-807.
- [33] 曹效鑫. 微生物燃料电池中产电菌与电极的作用机制及其应用[D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [34] Liandris E, Gazouli M, Taka S, *et al.* Evaluation of the microbial safety of child food of animal origin in Greece [J]. Journal of Food Science, 2014, **79**(3): M362-M368.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LU Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行