

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

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

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究	唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)
南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析	薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)
2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征	李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)
结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟	郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)
2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析	沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翥 (1662)
移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO ₂ 的时空分布	李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)
秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成	刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)
连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制	窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)
我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平	于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)
巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响	马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)
京杭大运河(杭州段)典型断面水生植物多样性调查及其与水环境相关性研究	陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)
合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价	李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)
重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算	潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)
千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价	唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)
九龙江流域潜在病原菌污染分析	侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)
江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响	刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)
鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征	简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)
典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征	姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)
基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析	席庆, 李兆富, 罗川 (1773)
混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究	孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)
不同波长和强度光照对水体汞还原的影响	李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)
地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响	杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)
溴氧化铋可见光催化降解高效氯氟酯的研究	彭一荣, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)
石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究	常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)
电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究	卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)
典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋	甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)
颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制	何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)
石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究	周贵忠, 王兆丰, 王珣, 李文倩, 李少香 (1832)
酞基甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用	张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)
FePMo ₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究	王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)
实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究	杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)
SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究	龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)
不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响	尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)
黄原酸化废弃污泥吸附 Cu ²⁺ 研究	岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)
轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究	薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)
不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对苯的吸附性能	黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)
北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究	李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)
泰州市区重金属污染的薛袋法与路生法评价研究	陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)
放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响	王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)
苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响	王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)
重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究	王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)
上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征	奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)
不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³ C 连续标记法	谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)
污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究	郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)
石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究	李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)
大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究	虞俊超, 王宝盛, 王亚韩, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)
应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性	周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)
氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究	王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)
吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制	黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立椿, 王惜若 (1974)
牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究	焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)
针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响	杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)
城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究	王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)
铈插层黏土负载铁催化剂在 H ₂ S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究	孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)
脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征	祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)
固定污染源排气中 PM _{2.5} 采样方法综述	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)
产甲烷微生物研究概况	李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)
《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)	

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究

焦燕^{1,2}, 张国栋^{3*}, 赵庆良⁴

(1. 山西财经大学资源型经济转型发展研究院, 太原 030006; 2. 山西财经大学环境经济学院, 太原 030006; 3. 山西大学资源与环境工程研究所, 太原 030006; 4. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 哈尔滨 150090)

摘要: 长期运行稳定性是微生物燃料电池 (microbial fuel cells, MFCs) 技术的一项重要特征, 是其能否走向实际应用的关键。生物阴极 MFC 利用牛粪产电的长期运行特征的研究表明, 该 MFC 可长期、高效、稳定地产电。在 100 Ω 外电阻下, 171 d 的运行期内, 电池功率密度平均为 $6.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \pm 2.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。第 70 d 的电池开路电压、内阻、最大功率密度分别为 0.874 V、22.1 Ω 和 14.1 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。随着运行时间延长, 每 30 d 的总化学需氧量 (total chemical oxygen demand, TCOD) 去除量不断递减, 而库仑效率 (Coulomb efficiency, CE) 不断递增, 在 121 ~ 150 d, CE 可达 $17.5\% \pm 3.3\%$ 。阳极微生物群落结构分析表明, Proteobacteria (45%)、Bacteroidetes (22%)、Firmicutes (17%)、Actinobacteria (11%) 在阳极生物膜中占有优势地位。Clostridium、Cellulomonas 等已被证明具有产电能力或纤维素降解能力的细菌是阳极生物膜中的关键功能种群。

关键词: 牛粪; 微生物燃料电池; 长期运行稳定性; 微生物群落结构

中图分类号: X382 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1981-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.05.050

Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate

JIAO Yan^{1,2}, ZHANG Guo-dong³, ZHAO Qing-liang⁴

(1. Research Institute of Transition of Research-based Economies, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China; 2. Institute of Environmental Economics, Shanxi University of Finance and Economics, Taiyuan 030006, China; 3. Institute of Resources and Environment Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030006, China; 4. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: Long-term performance is of primary concern when considering the commercialized use of an microbial fuel cell (MFC). The long-term stability of MFC was studied using dairy manure as substrate over a testing time of 171 d. The results showed that the MFC could efficiently recover electricity from dairy manure during the long-time run, and the average power density was $6.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \pm 2.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$. On day 70, the polarization curve was measured, the open circuit voltage, internal resistance and maximum power density of MFC were 0.874 V, 22.1 Ω and 14.1 $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The 30-day TCOD removal decreased with increasing test time, and the CE during the 121-150 d period reached $17.5\% \pm 3.3\%$. Phylogenetic analyses revealed that the dominant microbial communities in anodic biofilm were Proteobacteria (45%), Bacteroidetes (22%), Firmicutes (17%) and Actinobacteria (11%). At genera level, the bacteria with electricity production and (or) cellulose degradation ability, such as *Clostridium* and *Cellulomonas* were the abundant taxa.

Key words: dairy manure; microbial fuel cell (MFC); long-term stability; microbial communities

牛粪富含氮、磷、有机质等易引起富营养化的物质, 若不经处理而直接排放, 容易增加环境负荷并造成周围环境恶化。目前, 牛粪典型的处理方式是厌氧消化产沼气, 然而厌氧消化系统中两类主要功能菌群 (产酸发酵菌群和产甲烷菌群) 在营养需求、环境适应性、生理代谢过程等方面存在较大差异^[1], 易导致该系统较难平衡和控制, 运行稳定性欠佳^[2], 阻碍了该技术的推广和商业化^[3], 因此, 亟待发展替代性技术来实现牛粪的高效处理和资源化。

最近有研究人员发现, MFC 技术不仅可以利用如乙酸钠^[4]、葡萄糖^[5]等简单纯有机物基质产电, 而且还能利用生活污水^[6]、啤酒酿造废水^[7]、剩余污泥^[8, 9]、牛粪^[10~12]等混合复杂有机物基质产电,

其反应条件温和, 容易控制。在这些复杂有机物基质中, 由于牛粪富含纤维素、木质素等不易被微生物分解利用的有机物质, 研究者不断尝试使用不同的 MFC 反应器及强化措施来提高功率密度, 如 Lee 等^[13]利用过筛牛粪转化电能, 在单阴极和双阴极微生物燃料电池中分别可获得 $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 的最高功率密度; Kiely 等^[14]使用空气阴极 MFC 以牛粪渗滤液为基质可获得的最高功率密度为 $4.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, Zhang 等^[15]利用生物阴极 MFC 来提高牛粪燃料电池的输出功率, 在 6% 总固体浓度

收稿日期: 2013-09-06; 修订日期: 2013-12-02

作者简介: 焦燕 (1981 ~), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为污染控制与资源化、水体生态修复。

* 通讯联系人, E-mail: happygdz@gmail.com

下,功率密度最高可达 $15.1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$. 然而,就目前 MFC 研究而言,研究者多注重短期的污染物去除和产电效果,往往忽略了长期运行稳定性方面的探索. 而长期运行稳定性是 MFC 技术的一项重要特征,是 MFC 技术能否走向实际应用关键所在,对其进行研究具有重要的现实意义.

因此,本研究通过构建生物阴极 MFC,将其长期运行处理牛粪并回收电能,考察牛粪 MFC 产电特征、能量回收效能、有机物降解效率等随运行时间的变化情况,判断其长期运行稳定性;同时通过分析 MFC 在稳定运行阶段阳极微生物群落结构组成,以探索牛粪 MFC 的运行稳定性状况下发挥产电作用的关键微生物种群.

1 材料与方法

1.1 实验装置与启动

1.1.1 实验装置

反应器(图 1)由三室组成,包括一个阳极室(圆柱形, $\phi 100 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$)和两个相同的阴极室(长方体, $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$),在阳极室侧壁,开有两个对称的 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 长方形窗口,用以衔接两阴极室,阴极室和阳极室用质子交换膜(Nafion 117, Dupont 公司)隔开. 两个阴极室用 $\phi 10 \text{ mm}$ 直径的乳胶管连接,让阴极电解液在两个阴极室之间自由流通. 反应器阳极室总容积为 706 mL ,有效溶液体积为 617 mL ; 阴极总容积为 640 mL ,有效溶液体积为 321 mL . 阴极室底部铺有塑性曝气条,运行后曝气量为 $150 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. 阴阳电极材料均由石墨刷(石墨纤维型号为 STS4024K; 由 TohoTenax 公司生产)组成,减小 MFC 阳极的传质内阻并促进有机

物的迅速降解,对阳极液进行定时搅拌(搅拌器每隔 1 h 搅拌 3 min). 此外,将 Ag/AgCl 参比电极(0.195 V vs. 标准氢电极, SHE)插入阳极室检测阳极相对电势.

1.1.2 实验装置启动

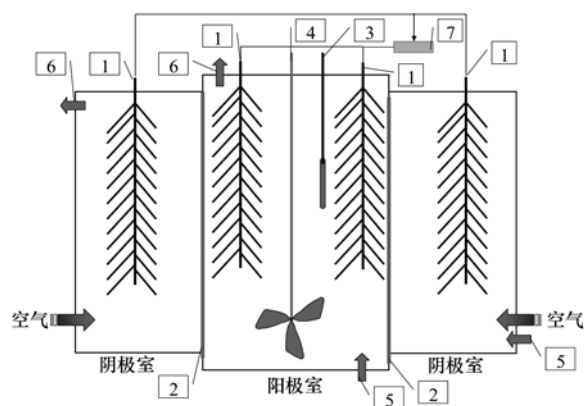
实验用牛粪取自哈尔滨市香坊奶牛场,均为当天排泄物,其性质为: pH 值 = 6.97 ± 0.21 、总固体浓度(total solids, TS) = $17.8\% \pm 1.6\%$ 、挥发性固体浓度(volatile solids, VS) = $86.2\% \pm 3.1\%$ 、纤维素含量 = $34.7\% \pm 2.6\%$ 、半纤维素含量 = $22.5\% \pm 1.2\%$ 、木质素含量 = $23.6\% \pm 4.7\%$ 、总碳(total carbon, TC) = $41.3\% \pm 2.5\%$ 、总氮(total nitrogen, TN) = $3.3\% \pm 0.2\%$ 、氨氮(NH_4^+-N) = $5874 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \pm 322 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、总磷(total phosphorus, TP) = $1.57\% \pm 0.22\%$. 其中 pH 和 TS 基于牛粪湿体积计算,其余各项基于干体积测量和计算. MFC 阳极基质采用 TS = 6% 的牛粪与蒸馏水混合液(TCOD = $50297 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 1436 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, TN = $1453 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1} \pm 269 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 阳极启动时,将阳极腔体装满 6% TS 浓度的牛粪混合液后,封闭即可,不必外加接种物. 生物阴极培养液每 L 包括: $1.0 \text{ g NH}_4\text{Cl}$; $1.2 \text{ g K}_2\text{HPO}_4$; 0.5 g MgSO_4 ; 0.5 g KCl ; $0.14 \text{ g KH}_2\text{PO}_4$; $0.01 \text{ g Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 0.02 g 酵母提取物; 培养液添加 10 mL 微量元素溶液,其成分和生物阴极接种方法见文献[16].

1.2 实验方法

1.2.1 电化学测试和计算

MFC 电压通过多功能双通道电压信号采集器(12 位 A/D 芯片, U. S.)完成,采样精度和频率分别为 10^{-3} V 和 60 s/频次 ,阴、阳极电势使用 Ag/AgCl 电极作为参比电极测定. 在本研究中,当 MFC 经过平稳的产电期,阳极电势持续保持在 -0.20 V 、 3 d 以上时,被认为是一个周期的结束. 电池极化曲线使用手动法测定:在电池开路 12 h 时,连接可变电阻箱,电阻值由大到小调节,利用万用表(Agilent HP 34970, U. S.)测定不同外电阻(R_{ext})下的电压值 E ,经欧姆定律 $I = E/R_{\text{ext}}$ 获得对应的电流密度值,绘制成极化曲线, MFC 内阻由梁鹏等^[17]提供的方法测得,而功率密度曲线由公式 $P = E \cdot I$ 计算出功率密度后结合电流密度值绘制而成. 库仑效率(CE)计算依下式进行:

$$\text{CE}(\%) = \frac{M_{\text{O}_2} \sum_{i=0}^t I_i \Delta \tau_i}{b F V_{\text{ano}} (\text{COD}_{t_0+t} - \text{COD}_{t_0})} \quad (1)$$



1. 石墨刷; 2. 质子交换膜; 3. Ag/AgCl 参比电极;
4. 搅拌桨; 5. 进水口; 6. 出水口; 7. 电阻

图 1 反应器结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the reactor

式中, COD_{t_0} 和 COD_{t_0+t} 分别为起始 t_0 和时间 t_0+t 点的阳极混合液化学需氧量; V_{ano} 阳极液体积; M_{O_2} 为氧气摩尔质量, 取 $32 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; I_i 和 τ_i 分别为瞬时电流和间隔时间; b 为以氧为受体氧化 1 mol 有机物的转移电子数, 为 $4 \text{ mol}_e \cdot \text{mol}^{-1}$; F 为 Faraday 常数, 取 $96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$.

取样时先利用设置在 MFC 阳极室的搅拌器充分搅拌 15 min 以上, 将底部牛粪充分悬浮和溶液混合后, 迅速利用自制的小型桶装污水采样器 ($\phi = 20 \text{ mm}$, 高为 70 mm) 伸入反应器不同部位进行取样, 每次取 3 个样品进行测试. 常规指标 TCOD、TC、TN、 NH_4^+-N 、TS、VS 的定量分析按照标准方法进行^[18]. 阳极电解液 pH 值用 pH 计 (pHS-3C 型, 上海雷磁) 进行测试, 纤维素、半纤维素、木质素含量测定方法参见文献^[19].

1.2.2 阳极微生物群落分析

在 MFC 运行稳定后收集阳极电极表面生物膜, 采用细菌基因组提取试剂盒 (上海华舜生物技术有限公司) 对总 DNA 进行提取. 采用带有 40 bp “GC 夹子” 的细菌通用 BSF8 引物和 BSR534 引物对 16S rRNA V1 ~ V3 高变区进行扩增, 再利用 Dcode™ 基因突变检测系统 (Bio-Rad 公司) 对反应产物进行分离, 变性胶梯度为 30% ~ 70%. DGGE 胶经扫描记录后可见条带全部回收并 PCR 扩增, 扩增产物链接 pMD18-T 载体 (TaKaRa pMD18-T Vector 试剂盒) 并转化 *E. coli* JM109, 挑选阳性转化子进行 DNA 测序 (ABI Prism® 3100 遗传分析仪), 基因序列在 NCBI (National Center for Biotechnology Information) 和 RDP (Ribosomal Database Project) 基因数据库进行比对分析, 并将序列提交于 NCBI 数据库, 登录号为 KF052629 ~ 052646. 在基因信息比对的基础上, 下载各序列的近缘序列, 采用 MEGA 5.05 构建序列进化树^[20].

2 结果与讨论

2.1 长期运行电化学特性分析

图 2 为牛粪 MFC 运行一个周期的阴极电势、阳极电势和功率密度变化情况. 结果显示, 启动后, 电池电势经历短暂的下降阶段后迅速回升, 在第 12 d, 100Ω 外电阻下, 电池电势可达到 477 mV , 表明牛粪生物阴极 MFC 此时已启动成功. 随后, 电池电势继续上升, 在第 50 d 达到 719 mV , 并在剩余的运行时间保持平稳. 与电池生物阴极启动过程相比, 阳极启动过程偏短. 阳极电势在第 8 d 即可达

到 -200 mV (vs. Ag/AgCl 参比电极), 并在第 21 d 降低到 -400 mV . 在 21 ~ 156 d 时间段内, 阳极电势十分平稳, 一直保持在 $-475 \sim -400 \text{ mV}$ 之间, 表明 MFC 可利用牛粪长期稳定产电. 但在持续运行 156 d 之后, 可能是由于阳极液中可利用有机物不断减少, 难于满足产电微生物的代谢需求, 阳极瞬时积累电子减少, 电势开始上升.

如图 2 显示, 功率密度变化直接受阳极电势影响, 在启动初期, 功率密度存在短暂的停滞期, 然后逐步上升, 在第 7 d 即可达到 $1.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ ($R_{\text{ext}} = 100 \Omega$). 随后, 随着阳极电势持续降低, 电池功率密度持续升高, 在第 44 d 上升到 $8.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, 但功率密度最高值出现在启动后第 119 d ($8.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$), 这表明牛粪 MFC 理想产电状态持续时间较长, 正如统计数据显示, 在启动后的第 25 ~ 140 d (约占 67.3% 整个运行期时长), 电池功率密度可持续保持在 $8.0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右. 在 171 d 的运行期内, 电池功率密度平均为 $6.77 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3} \pm 2.11 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$. 而电池功率密度 $\geq 6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 的时间超过 137 d, 占到总运行天数的 81.7%. 充分表明, 生物阴极微生物燃料电池能够利用牛粪长期稳定、高效地产电, MFC 在处理牛粪

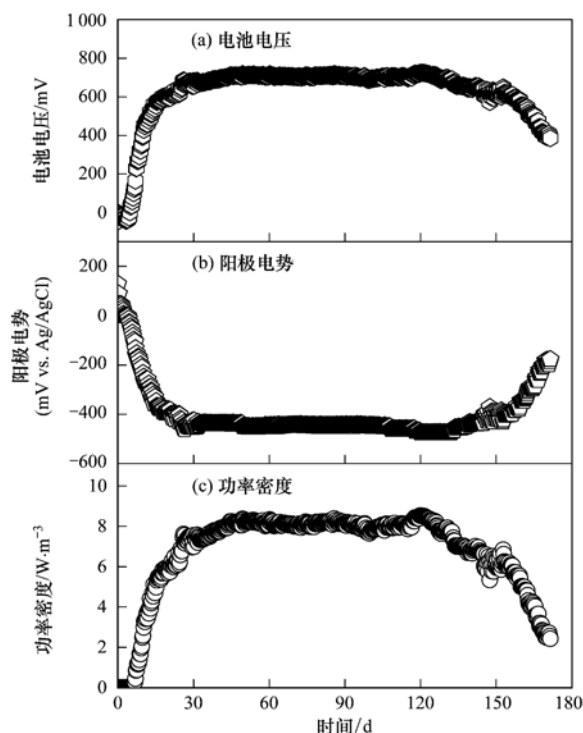


图 2 牛粪 MFC 长期运行功率密度、阴阳极电势变化图 ($R_{\text{ext}} = 100 \Omega$)

Fig. 2 Temporal variation of anode potential, cathode potential and power density of biocathode MFC with dairy manure as anode substrate (based on external resistance of 100Ω)

并回收能量方面优势明显。

反应器启动后第 70 d, 利用调节电阻法测定了 MFC 极化曲线(图 3)。极化曲线显示, MFC 开路电压为 0.874 V, 内阻为 22.1 Ω , 内阻与电池总体积比约为 16.4 $\Omega \cdot L^{-1}$ 。电池的功率密度曲线显示, 牛粪 MFC 此时的最高功率密度可达 14.1 $W \cdot m^{-3}$, 对应电流密度高达 32.0 $A \cdot m^{-3}$, 这是牛粪 MFC 开路电压较高、内阻较小的必然结果。以往利用牛粪产电的同类研究显示, MFC 开路电压均小于 0.57 V, 电池内阻均大于 47 Ω , 内阻与电池总体积比 $\geq 27.2 \Omega \cdot L^{-1}$, 因此功率输出只有 0.2 ~ 4.7 $W \cdot m^{-3}$ [12~16, 21], 远小于本研究获得的功率输出。

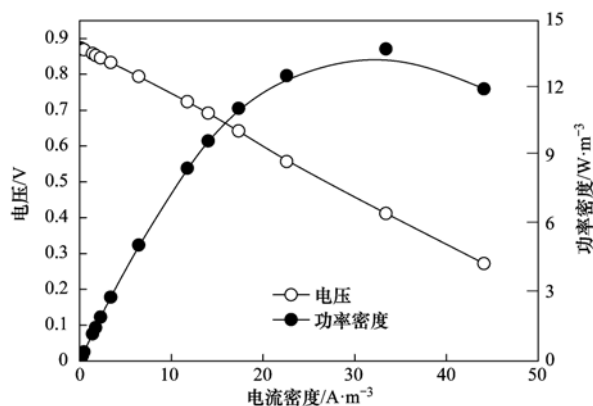


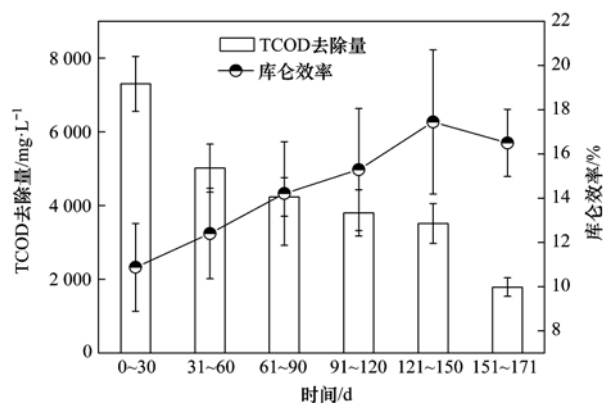
图 3 牛粪 MFC 运行第 70 d 极化曲线和功率密度曲线

Fig. 3 Polarization curves and power output vs. current plots of MFC using dairy manure as anode substrate on the seventieth operational day

2.2 有机物降解规律和库伦效率变化分析

图 4 是牛粪 MFC 运行期内不同运行阶段每 30 d 的 TCOD 去除量和库伦效率变化。其中显示, 随运行时间的延长, 牛粪每 30 d 的 TCOD 去除量呈明显的下降趋势, 而库伦效率则呈上升趋势。如, 在 0 ~ 30 d, 反应器 TCOD 去除量为 7342 $mg \cdot L^{-1} \pm 742 mg \cdot L^{-1}$, 库伦效率为 10.9% $\pm 2.0\%$; 而在 121 ~ 150 d, TCOD 去除量为只有 3514 $mg \cdot L^{-1} \pm 517 mg \cdot L^{-1}$, 库伦效率提高到 17.5% $\pm 3.3\%$ 。在 0 ~ 30 d 的 TCOD 去除量是 121 ~ 150 d 的 2.1 倍, 其库伦效率只有 121 ~ 150 d 的 62%。TCOD 去除量递减结果表明: 在运行初期, 牛粪含有机物种类和数量都较多, 其中易降解物质在这一时期最为丰富, 即可被细菌迅速直接利用的简单有机物质较多, 滋生了大量与产电无关的细菌参与代谢而消耗 TCOD, 从而导致 MFC 库伦效率较低。此阶段 TCOD 去除速率较快, 但库伦效率偏低; 然而, 到了运行阶段的中后

期, 牛粪中易降解物质减少, 微生物不得不转而水解利用牛粪中的主体物质——纤维素、半纤维或木质素等物质, 此类物质分解困难, TCOD 去除速率开始受到限制, 与运行前期相比, 相同时间内 TCOD 去除量减少, 分解的能量优先被产电相关菌群利用, 库伦效率反而升高。MFC 运行一个周期(171 d 后), TCOD 总去除率为 51.0%, 出水中 TCOD 和 TN 含量分别为 24 642 $mg \cdot L^{-1} \pm 1 127 mg \cdot L^{-1}$ 和 251 $mg \cdot L^{-1} \pm 42 mg \cdot L^{-1}$ 。



$R_{ext} = 100 \Omega$, 误差值为 3 次测量标准差

图 4 阳极液 TCOD 月去除量和库伦效率

Fig. 4 TCOD removal and average CE per month in MFC using dairy manure as anode substrate in long-term operation

2.3 DGGE 分析稳态阳极微生物群落结构

反应器运行平稳后, 使用 DGGE 对阳极生物膜微生物群落结构分析显示(图 5), 图谱中共有 18 个明显的主条带, 表明在阳极表面至少有 18 个优势细菌群落存在, 多样性十分丰富, 群落结构较为稳定, 在利用牛粪产电的过程中发挥着重要作用。

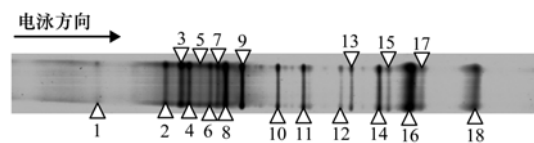


图 5 DGGE 图谱

Fig. 5 DGGE profile

将 DGGE 条带切割后进行克隆后测序, 共获得 18 条完整的 DNA 序列, 以 99% 的相似度对序列进行同源性分析, 共获得 18 个分类操作单元 (operational taxonomic units, OTUs), 利用 NCBI 和 RDP (ribosomal database project) 数据库对 OTUs 进行比对分析。结果显示, 18 个 OTUs 分别与 Proteobacteria (45%, 8 OTUs)、Bacteroidetes (22%, 4 OTUs)、Firmicutes (17%, 3 OTUs)、Actinobacteria (11%, 2 OTUs)、Chloroflexi (6%, 1 OTU) 等细菌门

的微生物序列有较好的同源关系 ($\geq 92\%$) (如图 6), 其中在 Proteobacteria 中 α -Proteobacteria 纲包含 6 个 OTUs, 占有绝对优势, 而 β -Proteobacteria 和 γ -Proteobacteria 纲各包含一个 OTU, 优势不明显. OTUs 比对结果表明, 在牛粪 MFC 阳极生物膜中, Proteobacteria、Bacteroidetes、Firmicutes 门细菌具有较大的优势地位, 这与前面研究者的研究结果十分相似, 如 Clauwaert 等^[22] 比较研究了 8 个不同类型的反应器, 发现, Proteobacteria 的 4 个纲 (α -Proteobacteria、 β -Proteobacteria、 γ -Proteobacteria、 δ -Proteobacteria) 及厚壁菌门 (Firmicutes) 和拟杆菌门 (Bacteroidetes) 细菌是 MFC 阳极微生物中的主要类群. 而 Xing 等^[23] 发现 α -Proteobacteria、Bacteroidetes、Firmicutes 和 δ -Proteobacteria 是阳极微生物的主要类群, 而 γ -Proteobacteria 和 Chloroflexi 优势地位次之. Kiely 等^[24] 研究表明, 长期运行的空气阴极 MFC, 在利用简单有机物如甲酸、乙酸、乙醇等作基质时, Firmicutes 细菌一般所占比例较小或不存在, 但是, 当利用需要参与 TCA 循环逐步降解的复杂有机物如: 乳酸、蔗糖、淀粉、纤维素等基质时, Firmicutes 细菌所占比例较大, 常是优势种群, 可能与 Firmicutes 门细菌能利用复杂有机物产电有关. Wang 等^[25] 利用富含纤维素和木质素的玉米秸秆直接产电研究表明, Firmicutes 门细菌是 MFC 阳极生物膜中的绝对优势种群, 这与本研究微生物群落分析结果较为吻合, 由于阳极底物牛粪也同样富含纤维素和木质素等物质, 需要厚壁菌门 (Firmicutes) 细菌将其有效降解, 并释放电子. 同样, 放线菌门 (Actinobacteria) (图 6) 在阳极的富集也与牛粪富含纤维素等难降解物质有关, 因为 Actinobacteria 门的许多细菌被认为是降解纤维素的有效种群^[26].

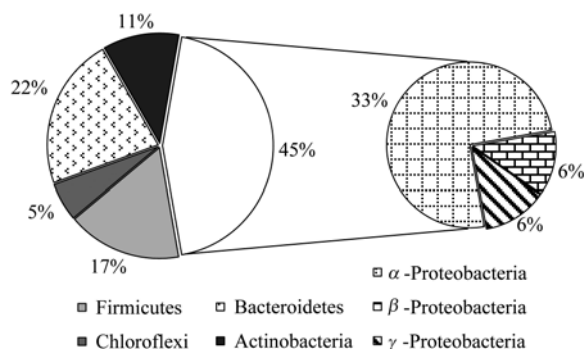


图 6 牛粪 MFC 阳极生物膜细菌 V3 区序列多样性统计分析

Fig. 6 Taxonomic breakdown of bacterial V3 tags from the anode

图 7 为 DGGE 分离条带 OTUs 分子进化树. 其中显示, 在隶属于 α -Proteobacteria 纲的 Band 9、10、11、12、16、17 条带中, Band 9、10、11、12 的亲缘关系较为相近, 同属于根瘤菌目 (Rhizobiales), 在属的水平上分别与 *Bradyrhizobium*、*Devosia*、*Pseudaminobacter*、*Methylocystis* 等属的细菌有较好的同源性, 而条带 Band 16 和 17 分别与 *Rhodobacter* 和 *Sphingomonas* 属 16S rRNA 序列具有 $\geq 95\%$ 的相似性. 据目前研究报道, 在已分离具有产电能力的微生物纯培养体中, 有多株细菌隶属于根瘤菌目 (Rhizobiales), 如 *Ochrobactrum anthropi* YZ-1^[27] 和 *Rhodopseudomonas palustris* DX-1^[28] 等, 因此推测, 在本研究中阳极生物膜富集根瘤菌目细菌, 可能与利用牛粪有机物产电存在直接关系. 条带 Band 13 和 14 分别与 *Zoogloea* 和 *Acinetobacter* 属细菌存在较近的亲缘关系, *Zoogloea* 属细菌以容易产生菌胶团而著称, 其在牛粪 MFC 阳极表面的富集说明牛粪在反应器中分解活动旺盛, 能够产生大量的糖类物质以供 *Zoogloea* 细菌生成菌胶团, 改造光滑的石墨纤维电极表面, 利于其它菌类附着生成生物膜, 高效降解有机物并向电极释放电子.

Band 1、3、5 的序列均与 *Clostridium* 属细菌 16S rRNA 存在较好的同源性关系, 有研究证实 *Clostridium* 属的细菌常常是在 MFC 中利用纤维素等复杂有机物产电的关键种群^[15,25], 此外被分离的 *Clostridium beijerinckii*、*Clostridium butyricum* 细菌种的纯培养体在 2004 年已被证实可以利用淀粉高效产电^[29], 被研究者认为是典型的产电菌种. 如前所述, Actinobacteria 门细菌常出现在富含难降解有机物环境中, 隶属于 Actinobacteria 门的 Band 15 和 18 分别与 *Cellulomonas* (纤维素单胞菌属) 和 *Brooklawnia* 属细菌存在高度同源性, 其中 *Cellulomonas* 属细菌是细菌界具有代表性的一类纤维素降解的菌群^[26]. 条带 Band 4、6、7 和 8 的序列均属于拟杆菌门, 其中条带 Band 7 (拟杆菌属, *Bacteroides*) 在 GenBank 中存在相似度 $\geq 95\%$ 的序列; Band 4 和 6 分别与紫单胞菌科 (Porphyromonadaceae) 和腐螺旋菌科 (Saprospiraceae) 细菌 16S rRNA 序列存在较高的相似度; 而 Band 8 与现有拟杆菌门未分类细菌序列存在 $>98\%$ 相似度; 这表明条带 Band 4、6、8 所代表的细菌种为目前还未被人类所分离鉴定的新细菌种, 其属性和价值有待进一步挖掘和研究.

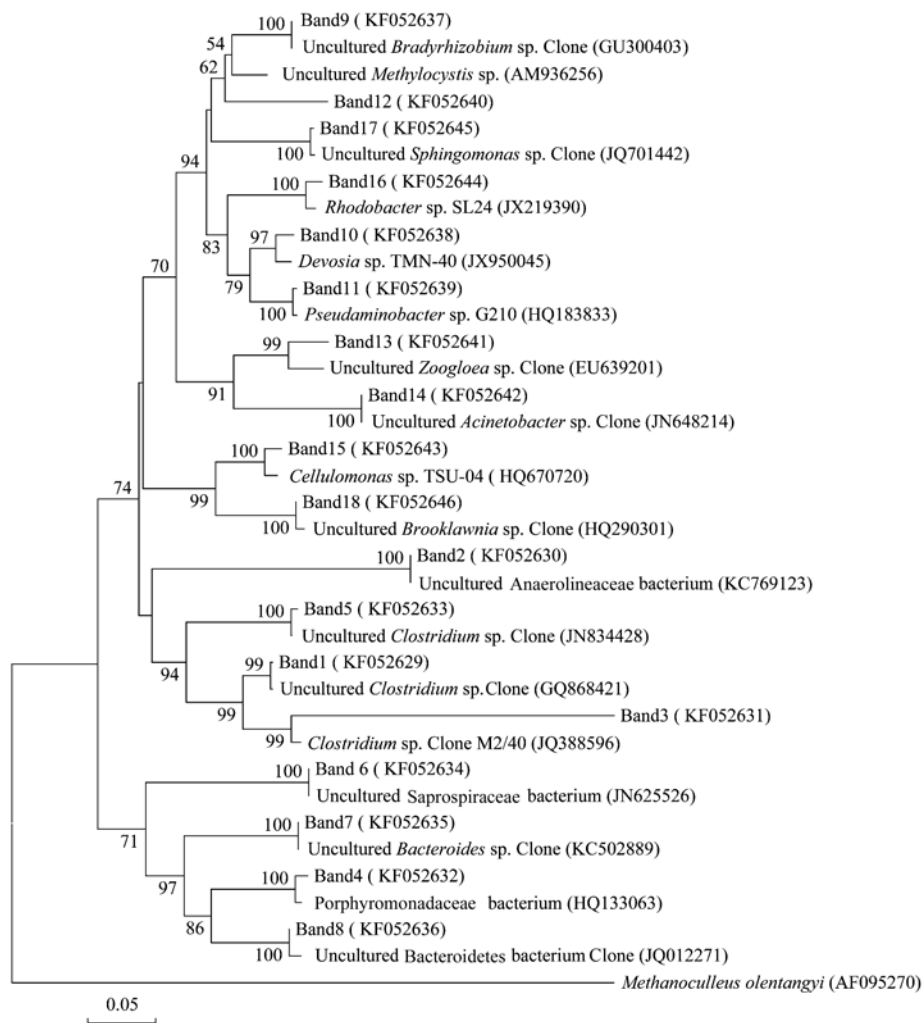


图7 基于16S rDNA 阳极微生物优势种群进化树

Fig. 7 Phylogenetic tree based on 16S rDNA sequences of dominant populations from anode

3 结论

实验研究结果显示,生物阴极 MFC 可利用牛粪长期稳定产电,内电阻小,功率密度高,并且能量回收效率随运行时间的延长而增加,TCOD 去除效率随时间增加而降低. 阳极微生物群落结构分析显示,变形菌门、拟杆菌门、厚壁菌门是阳极生物膜中的主要菌群,其中一些已证明有产电能力和纤维素高效降解能力的细菌种在阳极表面富集.

参考文献:

- [1] Pohland F G, Ghosh S. Development in anaerobic stabilization of organic wastes the two-phase concept [J]. Environmental Letters, 1971, 1(4): 255-266.
- [2] Demirel B, Yenigün O. Two-phase anaerobic digestion processes: a review [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2002, 77(7): 743-755.
- [3] Dupla M, Conte T, Bouvier J C, et al. Dynamic evaluation of a fixed bed anaerobic digestion process in response to organic overloads and toxicant shock loads [J]. Water Science & Technology, 2004, 49(1): 61-68.
- [4] 尤世界, 赵庆良, 姜珺秋. 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.
- [5] Pant D, Bogaert G Van, Diels L, et al. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 1533-1543.
- [6] Rodrigo M A, Cañizares P, Lobato J, et al. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell [J]. Journal of Power Sources, 2007, 169(1): 198-204.
- [7] 王鑫, 冯玉杰, 曲有鹏, 等. 温度对啤酒废水微生物燃料电池产电性能的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(11): 3128-3132.
- [8] 贾斌, 刘志华, 李小明, 等. 剩余污泥为燃料的微生物燃料电池产电特性研究[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1227-1231.
- [9] Zhang G D, Zhao Q L, Jiao Y, et al. Efficient electricity

- generation from sewage sludge using biocathode microbial fuel cell [J]. *Water Research*, 2012, **46**(1): 43-52.
- [10] Power C A, Richardson R E, Scott N R. Microbial fuel cell operation and use with anaerobic digestion for power production from daily manure [J]. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007: 074144.
- [11] Scott K, Murano C, Rumbu G J. A tubular microbial fuel cell [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2007, **37**(9): 1063-1068.
- [12] Scott K, Murano C. A study of a microbial fuel cell battery using manure sludge waste [J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2007, **82**(9): 809-817.
- [13] Lee Y, Nirmalakhandan N. Electricity production in membraneless microbial fuel cell fed with livestock organic solid waste [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(10): 5831-5835.
- [14] Kiely P D, Cusick R D, Call F, *et al.* Anode microbial communities produced by changing from microbial fuel cell to microbial electrolysis cell operation using two different wastewaters [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(1): 388-394.
- [15] Zhang G D, Zhao Q L, Jiao Y, *et al.* Biocathode microbial fuel cell for efficient electricity recovery from dairy manure [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, **31**(1): 537-543.
- [16] Zhang G D, Zhao Q L, Jiao Y, *et al.* Improved performance of microbial fuel cell using combination biocathode of graphite fiber brush and graphite granules [J]. *Journal of Power Sources*, 2011, **196**(15): 6036-6041.
- [17] 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.
- [18] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 200-497.
- [19] 李雪. 秸秆固态发酵酒精的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002. 9-15.
- [20] Tamura K, Peterson D, Peterson N, *et al.* MEGA5: Molecular evolutionary genetics analysis using maximum likelihood, evolutionary distance, and maximum parsimony methods [J]. *Molecular Biology and Evolution*, 2011, **28**(10): 2731-2739.
- [21] Yokoyama H, Ohmori H, Shida M, *et al.* Treatment of cow-waste slurry by a microbial fuel cell and the properties of the treated slurry as a liquid manure [J]. *Animal Science Journal*, 2006, **77**(6): 634-638.
- [22] Clauwaert P, Aelterman P, Pham T H, *et al.* Minimizing losses in bio-electrochemical systems: the road to applications [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **79**(6): 901-913.
- [23] Xing D, Cheng S, Regan J M, *et al.* Change in microbial communities in acetate-and glucose-fed microbial fuel cells in the presence of light [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, **25**(1): 105-111.
- [24] Kiely P D, Rader G K, Regan J M, *et al.* Long-term cathode performance and the microbial communities that develop in microbial fuel cells fed different fermentation endproducts [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(1): 361-366.
- [25] Wang X, Feng Y, Wang H, *et al.* Bioaugmentation for electricity generation from corn stover biomass using microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(15): 6088-6093.
- [26] 熊冬梅, 周红丽. 纤维素降解菌群的研究进展[J]. *酿酒科技*, 2011, **203**(5): 94-97.
- [27] Zuo Y, Xing D F, Logan B E, *et al.* Isolation of the exoelectrogenic bacterium *Ochrobactrum anthropi* YZ-1 by using a U-Tube microbial fuel cell [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, **74**(10): 3130-3137.
- [28] Xing D F, Zuo Y, Cheng S A, *et al.* Electricity generation by *Rhodopseudomonas palustris* DX-1 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(11): 4146-4151.
- [29] Niessen J, Schroder U, Scholz F. Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation-a bacterial fuel cell operating on starch [J]. *Electrochemistry Communications*, 2004, **6**(9): 955-958.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjing Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, MA Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FeMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LU Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seaford from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 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