

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响

丁为俊, 于立亮, 陈杰, 成少安*

(浙江大学能源工程学系, 杭州 310027)

摘要: 阳极材料是影响微生物燃料电池实用化的关键因素之一。本文以碳刷、碳布或石墨毡阳极和泡沫镍空气阴极制成紧凑型 6 L 单室双空气阴极微生物燃料电池(MFC), 研究不同阳极材料对电池启动过程和运行以乙酸钠为基质的人工废水和实际屠宰废水的产电性能和废水处理效果的影响, 比较了单位阳极成本的产电效益。结果表明: 阳极材料对紧凑型 MFC 的启动过程没有明显影响; 在产电性能方面, 碳刷阳极 MFC 在人工废水和屠宰废水中的输出功率密度最高, 分别为 $(56.3 \pm 1.8) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(19.5 \pm 0.8) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, 其次为碳布阳极 MFC, 分别为 $(46.0 \pm 1.7) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(16.9 \pm 0.6) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, 最差的是石墨毡阳极 MFC, 分别为 $(40.8 \pm 1.5) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(11.9 \pm 0.5) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$; 在废水处理效果方面, 不同阳极 MFC 在运行人工废水或屠宰废水时 COD 去除率没有明显差别, 均在 90% 左右。碳刷阳极 MFC 所产生的经济效益最高, 在运行乙酸钠和屠宰废水时分别为 $(3.44 \pm 0.08) \text{ mW} \cdot \text{元}^{-1}$ 和 $(0.97 \pm 0.05) \text{ mW} \cdot \text{元}^{-1}$, 分别比碳布 MFC 和石墨毡 MFC 高 18.6%、12.8% 和 38.7%、80%。本研究结果说明碳刷是微生物燃料电池实用化过程中最合适的阳极材料。

关键词: 微生物燃料电池; 阳极材料; 启动; 产电功率; 水处理; 产电效益

中图分类号: X382; X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1911-07 DOI: 10.13227/j. hjkx. 201611106

Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells

DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, CHENG Shao-an*

(Department of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Anode material is one of the most important factors on the application of microbial fuel cells for wastewater treatment due to its key role in forming exoelectrogenic biofilm and transferring electrons along with the high investment cost. In this study, carbon brush (CB), carbon cloth (CC) and graphite felt (GF) were investigated as alternative anode materials for 6 L single-chamber dual air-cathode microbial fuel cells (MFCs) in terms of starting-up rate and electricity production with artificial wastewater and slaughter wastewater. The cost effectiveness of anode materials was also evaluated. The results showed that anode materials had no obvious effect on the start-up of MFC. All MFCs finished their started-up on day 24. Using artificial wastewater [acetate $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ in $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ phosphate buffer (PBS)] as substrate, the maximum power densities for the CB, CC and GF-MFCs were $(56.3 \pm 1.8) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, $(46.0 \pm 1.7) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, and $(40.8 \pm 1.5) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, while with slaughter wastewater MFCs could produce $(19.5 \pm 0.8) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, $(16.9 \pm 0.6) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, and $(11.9 \pm 0.5) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. COD removals of all the MFCs were approximately 90% with both artificial wastewater and slaughter wastewater. The CB-MFCs had a cost of $(3.44 \pm 0.08) \text{ mW} \cdot \text{yuan}^{-1}$ with the artificial wastewater and $(0.97 \pm 0.05) \text{ mW} \cdot \text{yuan}^{-1}$ with slaughter wastewater, which were 18.6%, 12.8% higher than that of CC-MFCs and 38.7%, 80% higher than that of GF-MFCs, respectively. These results demonstrate that carbon brush is the most suitable material used in large-scale MFC.

Key words: microbial fuel cells (MFCs); anode materials; start up; power generation; water treatment; economic analysis

微生物燃料电池 (microbial fuel cells, MFCs) 是一种以微生物为催化剂将储存在废水中的化学能直接转化为电能的新型废水处理技术^[1,2], 具有燃料来源多样化、操作条件温和、无需能量输入、清洁高效等优点^[3], 对于缓解当前能源危机及水环境污染有重要意义, 因此受到了广泛关注。近年来多种构型的反应器被开发出来, 如双室^[4]、单室^[5]、上流式^[6]、平板式^[7]、管式^[8~10]等, 其中单室空气阴极型 MFC 由于不需要使用质子交换膜和曝气装置, 具有结构简单、成本低、电池内阻低和产电功率高

等优点, 被认为是最适合用于放大和处理实际废水的反应器构型^[11]。但单室空气阴极型 MFC 放大后, 还存在产电功率低和电池成本高的关键问题。

阳极作为 MFC 的重要组成部分, 不仅是产电菌群的附着载体, 而且是电子传递的关键位点, 对

收稿日期: 2016-11-14; 修订日期: 2016-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51278448, 51478414); 国家重点研发计划项目 (2016YFB0600505)

作者简介: 丁为俊 (1988 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为微生物燃料电池扩大化及水处理, E-mail: superding@zju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: shaoancheng@zju.edu.cn

MFC 的产电性能有至关重要的影响. 高性能的 MFC 阳极材料需要具有导电性好、比表面积大、耐腐蚀、生物相容性好和价格低廉等特点^[2]. 金属阳极材料,如不锈钢,成本低廉,但需要对金属表面进行处理或修饰以提高金属表面的生物相容性和比表面积^[12~16]. 修饰的工艺、成本和金属阳极长期使用过程中存在的腐蚀问题限制了金属阳极在大尺寸 MFC 及实际废水处理中的应用^[14]. 以碳为基体的电极材料,包括碳纸^[17]、碳布^[18]、碳毡^[19]、石墨颗粒^[20, 21]、碳刷^[22]等是 MFC 广泛使用的阳极材料,其中碳刷、碳布和石墨毡材料常被用作大尺寸 MFC (>1 L)的阳极材料. Zhang 等^[10]使用碳布作为 2 L 管式 MFC 的阳极,在处理城市废水时 COD 去除率为 53%,最大输出功率密度为 $0.68 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$. 以石墨毡为阳极构建的 1.5 L 和 10 L 管式 MFC 运行啤酒厂废水时 COD 去除率为 83.8%,最大输出功率密度为 $11 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[23, 24]. Feng 等^[25]以碳刷为阳极材料构建了容积为 250 L 的 MFC,在处理城市废水时 COD 去除率为 86%,最大输出功率密度为 $0.47 \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$. 这些大尺寸 MFC 都可以在脱除 COD 的同时从废水中以电能形式回收部分电能^[26],但反应器结构、运行条件的不同导致难以比较不同阳极材料对 MFC 产电性能的影响,并且这些研究也没有比较

不同电极材料的产电效益.

因此,为了获得产电性能最佳和产电效益最高的阳极材料,本文以自制大尺寸空气阴极型 MFC 研究了碳刷、碳布、石墨毡阳极材料对 MFC 性能的影响,评价了不同阳极材料 MFC 的启动特性和运行以乙酸钠为基质的人工废水和实际屠宰场废水的产电功率和废水处理效果,并且比较了单位阳极成本的产电效益,以期为微生物燃料电池实用化过程中阳极材料的选择提供依据.

1 材料与方法

1.1 组装微生物燃料电池阳极

本实验设置 3 组不同阳极,包含碳刷阳极(carbon brush, CB)、石墨毡阳极(graphite felt, GF)和碳布阳极(carbon cloth, CB),具体参数见表 1. 使用之前,碳刷和碳布电极经过乙醇浸泡 24 h 后再在空气环境中 450°C 热处理 1 h^[27];石墨毡电极先经过酸洗处理 24 h,再碱洗处理 24 h,最后清水洗净烘干备用. 碳刷之间用直径为 1.5 mm 的铜丝连接;石墨毡和碳布阳极均以 8 组长为 35 cm 宽为 0.5 cm 的不锈钢片作为电极导线,并且使用不锈钢螺丝夹紧以强化电极材料与导线之间的连接,最后在框架外使用铜条将所有导线连接起来.

表 1 阳极材料

Table 1 Anode materials of MFCs

阳极材料	厂家	规格	数量	总价/元
碳刷	自制,纤维为日本东丽公司	直径:2 cm;长度:30 cm	20 根	100
碳毡	北京三业碳素公司	长度:80 cm;宽度:30 cm;厚度:0.3 cm	1 片	110
碳布	日本东丽公司	长度:80 cm;宽度:30 cm;厚度:0.15 cm	2 片	96

1.2 微生物燃料电池的构建

本实验所采用的反应器为单室双空气阴极型 MFC,腔体为长度 80 cm,宽度 1.4 cm,高度 30 cm 的长方体,反应器的有效体积是 6 L,其结构见图 1. 阴极(80 cm × 30 cm × 0.1 cm)以泡沫镍为集电体、活性炭作为催化剂按照文献[28]报道的方法制备,以镍带作为电极导线,组装时对称置于反应器腔体两侧. 阳极为上述准备的 3 种不同材料的电极,组装时置于反应器正中位置. 阴极与阳极之间放置一片与阴极相同尺寸的玻璃纤维(厚度为 0.14 cm),以避免短路.

1.3 电池的启动和运行

以实验室长期稳定运行乙酸钠的 MFC 倒出液和 $50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸盐缓冲液(PBS, $\text{Na}_2\text{HPO}_4\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ $11.466 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $2.75 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,

NH_4Cl $0.31 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, KCl $0.13 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 1:1 的混合溶液

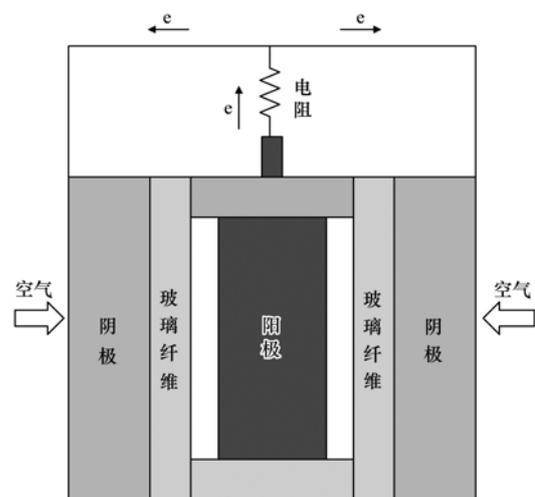


图 1 反应器结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of MFC

作为实验反应器的接种液. 启动反应器时, 接种液中添加 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸钠、 $12.5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 矿物质和 $5 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 的微量元素^[5], 启动电阻为 200Ω . MFC 获得稳定输出电压后逐渐将运行电阻降低为 1Ω , 在 1Ω 下连续运行 10 个周期(10 d)后进行功率曲线和极化曲线的测试. 为了比较阳极材料对 MFC 运行实际废水时产电性能的影响, 将运行溶液更换为屠宰废水. 屠宰废水取自于杭州某食品公司废水处理厂的初沉池出水, 其化学需氧量(COD)为 $(1\ 807 \pm 21) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 为 7.0 ± 0.1 , 电导率为 $(1.7 \pm 0.1) \text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$. 废水使用之前用 300 目筛网过滤掉废水中大颗粒杂质, 并储存在 4°C 冰箱中. 使用时从冰箱中取出至室温后直接作为运行基质, 不进行任何参数调节. 运行 15 个周期(30 d)后, 对电池的产电性能和废水处理效果进行测试. 每一种阳极材料均设置一组平行反应器, 所有 MFC 均按序批次模式运行, 实验数据为两组反应器的平均值, 所有实验均在 $(30 \pm 1)^\circ\text{C}$ 环境内进行.

1.4 分析方法

(1) 电池电压 $U(\text{V})$

电池电压由数据采集仪(Agilent 34970, 美国, 安捷伦公司)每隔 20 min 自动记录得到.

(2) 功率曲线和极化曲线

在电化学工作站(Iviumstat, 荷兰, IVIUM 公司)上通过线性扫描伏安法(LSV)测定电池的功率曲线. LSV 扫描采用两电极体系, 以阳极为工作电极, 阴极为对电极和参比电极. 扫描电压范围为开路电压(OCP) $\sim -0.15 \text{ V}$, 扫描速度为 $0.1 \text{ mV}\cdot\text{s}^{-1}$. 体积功率密度($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$)根据公式(1)计算.

$$P = (UI)/V \quad (1)$$

式中, U 是电池电压(V), I 是电流(A), V 是溶液体积(m^3). 电极极化曲线采用三电极体系, 通过测试阴极和阳极与 Ag/AgCl 参比电极之间的电位得到, 其中参比电极置于对电极和工作电极之间, 并靠近工作电极.

(3) 电池内阻/电极极化内阻

对电池和电极极化曲线线性区间拟合获得^[29].

(4) COD 的测定

采用 Cr 氧化法, 使用分光光度计按照标准测试方法(HACH DR/2400, 美国, HACH 公司)获得^[30].

(5) 库仑效率(CE)

CE 根据公式(2)计算.

$$P = \left(M \times \int Idt \right) / V(F \times \Delta\text{COD} \times bV) \quad (2)$$

式中, M 为基质摩尔质量($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$), F 是法拉第常数($96\ 485 \text{ C}\cdot\text{mol}^{-1}$); b 是 1 mol 基质充分氧化后转移的电子个数; V 是反应器溶液体积(m^3), ΔCOD 为电池进出水 COD 的差值($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

2 结果与分析

2.1 微生物燃料电池的启动性能

在外接电阻为 200Ω 时, MFC 的启动曲线如图 2 所示. 从中可以看出, 阳极材料对 MFC 启动时间没有明显影响. 在 12 d 之前, 3 种 MFC 的输出电压均低于 200 mV . 从第 12 d 开始, 电池电压开始进入快速增长阶段. 启动 24 d 后, 3 种阳极 MFC 均达到稳定电压, 平均值分别为 0.637 V (CB-MFC)、 0.624 V (CC-MFC) 和 0.623 V (GF-MFC), 其相应的阳极电位分别为 -0.512 、 -0.500 和 -0.493 V (相对于 Ag/AgCl 参比电极). CB 阳极产电性能优于 CC 和 GF.

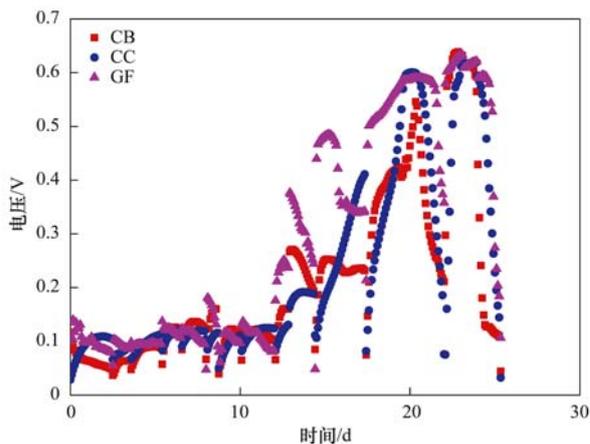


图 2 不同阳极材料 MFC 在 200Ω 外电阻下的启动曲线
Fig. 2 Start-up curves of CB-, CC-, and GF-MFCs under 200Ω external loading

2.2 以人工废水为运行基质时 MFC 的性能

图 3 比较了在以 $50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PBS 和 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 乙酸钠为运行基质时不同阳极材料对 MFC 产电功率的影响. 由图 3(a) 看出, CB-MFC 的最大输出功率密度为 $(56.3 \pm 1.8) \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$, 与 CC-MFC 和 GF-MFC 相比, 分别高出 22.4% 和 38.0%, 其功率密度分别为 $(46.0 \pm 1.7) \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $(40.8 \pm 1.5) \text{ W}\cdot\text{m}^{-3}$. 从电极极化曲线看, 所有 MFC 的阴极性能相近[图 3(b)], 而阳极性能差异较大[图 3(c)]. 比如, 当电流密度为 $170 \text{ A}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, 阳极电位分别为 $(-372 \pm 3) \text{ mV}$ (CB)、 $(-323 \pm 5) \text{ mV}$ (CC) 和 $(-291 \pm 8) \text{ mV}$ (GF), 因此电池输出功率的差异是由阳极性能的差异引起的.

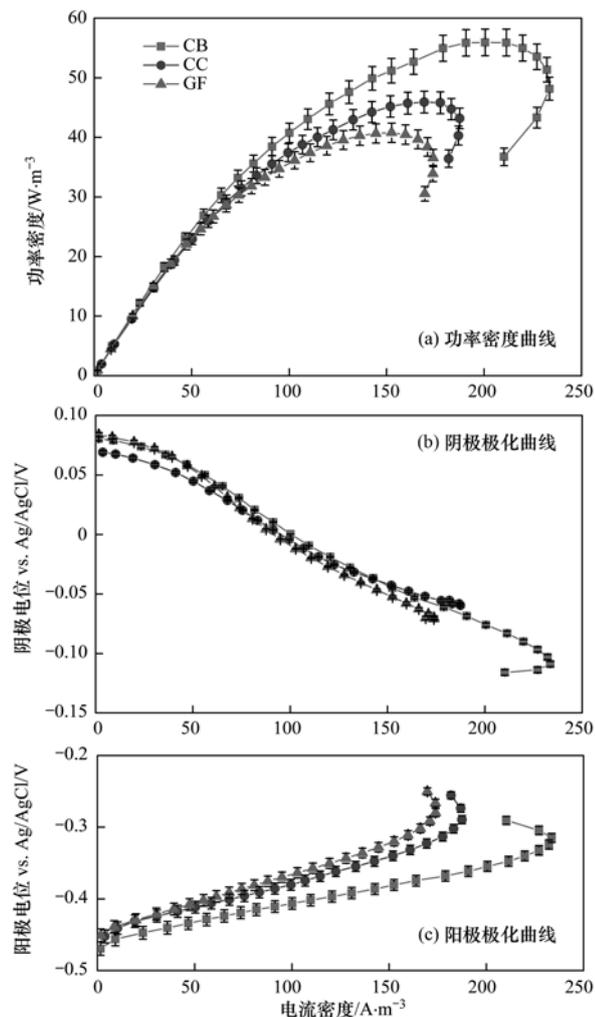


图3 以 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ PBS 和 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸钠为运行基质时不同阳极材料 MFC 的功率曲线与电极极化曲线

Fig. 3 Power density and cathode and anode polarization curves of CB-, CC-, and GF-MFCs when artificial wastewater ($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ acetate in $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ PBS) was fed as substrate

表2 以 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ PBS 和 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙酸钠为运行基质时 3 组不同阳极 MFC 的最大产电功率、电池极化内阻、阳极极化内阻、COD 去除率和 CE (1Ω)

Table 2 Maximum power densities, internal resistances of the whole cells and anodes, COD removal efficiencies, and CEs for CB-, CC-, and GF-MFCs achieved with acetate ($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) in $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ PBS at 1Ω

电池类型	功率密度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$	电池内阻/ $\text{m}\Omega \cdot \text{m}^3$	阳极内阻/ $\text{m}\Omega \cdot \text{m}^3$	COD 去除率/%	CE/%
CB-MFC	56.3 ± 1.8	1.4 ± 0.1	0.7 ± 0.1	95.0 ± 1.2	50.0 ± 0.2
CC-MFC	46.0 ± 1.7	1.6 ± 0.1	0.8 ± 0.1	91.2 ± 0.8	46.6 ± 0.1
GF-MFC	40.8 ± 1.5	1.7 ± 0.2	1.0 ± 0.1	91.0 ± 1.1	44.6 ± 0.1

别为 $(124 \pm 16) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (CB-MFC)、 $(175 \pm 23) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (CC-MFC) 和 $(207 \pm 25) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (GF-MFC)。COD 去除率分别为 $(93.0 \pm 0.9)\%$ 、 $(90.0 \pm 1.3)\%$ 和 $(88.2 \pm 1.4)\%$ ，CE 分别为 $(12.3 \pm 0.1)\%$ 、 $(11.2 \pm 0.1)\%$ 和 $(10.0 \pm 0.1)\%$ (表3)。与运行实际废水相比，COD 去除率没有明显降低，但 CE 降低了约 75.0%。

MFC 的产电性能与电池内阻密切相关。3 种阳极 MFC 的电池内阻分别为 (1.4 ± 0.1) 、 (1.6 ± 0.1) 和 $(1.7 \pm 0.2) \text{ m}\Omega \cdot \text{m}^3$ ，阳极极化内阻为 (0.7 ± 0.1) 、 (0.8 ± 0.1) 和 $(1.0 \pm 0.1) \text{ m}\Omega \cdot \text{m}^3$ (表2)，因此阳极极化内阻越大，电池内阻越高，电池的输出功率越低。

3 种 MFC 的 COD 去除率和 CE 如表2所示。在 1Ω 外接电阻下，3 组 MFC 的 COD 去除率都达到 90.0% 以上，CE 达到 40.0% 以上。其中 CB-MFC 的 COD 去除率和 CE 最高，分别为 $(95.0 \pm 1.2)\%$ 和 $(50.0 \pm 0.2)\%$ ，其次为 CC-MFC，分别为 $(91.2 \pm 0.8)\%$ 和 $(46.6 \pm 0.1)\%$ ，最后为 GF-MFC，分别为 $(91.0 \pm 1.1)\%$ 和 $(44.6 \pm 0.1)\%$ 。

本实验结果表明在以人工废水为运行基质时，碳刷阳极 MFC 获得了最高的功率输出。

2.3 以实际屠宰废水为运行基质时 MFC 的性能

3 种不同阳极 MFC 运行屠宰废水时的产电功率如图4所示。从图4(a)可以看出，CB-MFC、CC-MFC 和 GF-MFC 可以获得的最大输出功率密度分别为 (19.5 ± 0.8) 、 (16.9 ± 0.6) 和 $(11.9 \pm 0.5) \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。由图4(b)和图4(c)发现，MFC 最大输出功率的差异是由于阳极性能的差异引起的，这一实验结果与运行人工废水时的实验结果相一致。但是产电功率与运行人工废水相比下降了 60% ~ 70%，这与电池内阻的增加有关。3 种电池运行实际屠宰废水时的内阻分别为 (4.2 ± 0.4) 、 (4.9 ± 0.6) 和 $(5.8 \pm 0.9) \text{ m}\Omega \cdot \text{m}^3$ ，比运行人工废水时增加了 210% ~ 240%。

3 种 MFC 运行屠宰废水 30 d 后，出水 COD 分

本实验结果表明在以实际屠宰废水为运行基质时，碳刷阳极 MFC 获得了最高的功率输出。

3 讨论

本研究结果表明：不同阳极材料对 MFC 的启动没有明显影响，启动后碳刷阳极 MFC 在以乙酸钠和屠宰废水为运行基质时都获得了最高的产电功率。

表 3 运行实际屠宰废水时 3 种不同阳极 MFC 的最大输出功率、电池极化内阻、阳极极化内阻、COD 去除率和 CE(1 Ω)Table 3 Maximum power densities, internal resistances of the whole cells and anodes, COD removal efficiencies and CEs for CB-, CC-, and GF-MFCs achieved with slaughter wastewater at 1 Ω

电池类型	功率密度/ $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$	电池内阻/ $\text{m}\Omega\cdot\text{m}^3$	阳极内阻/ $\text{m}\Omega\cdot\text{m}^3$	COD 去除率/%	CE/%
CB-MFC	19.5 ± 0.8	4.2 ± 0.4	1.8 ± 0.2	93.0 ± 0.9	12.3 ± 0.1
CC-MFC	16.9 ± 0.6	4.9 ± 0.6	2.0 ± 0.2	90.0 ± 1.3	11.2 ± 0.1
GF-MFC	11.9 ± 0.5	5.8 ± 0.9	3.5 ± 0.3	88.2 ± 1.4	10.0 ± 0.1

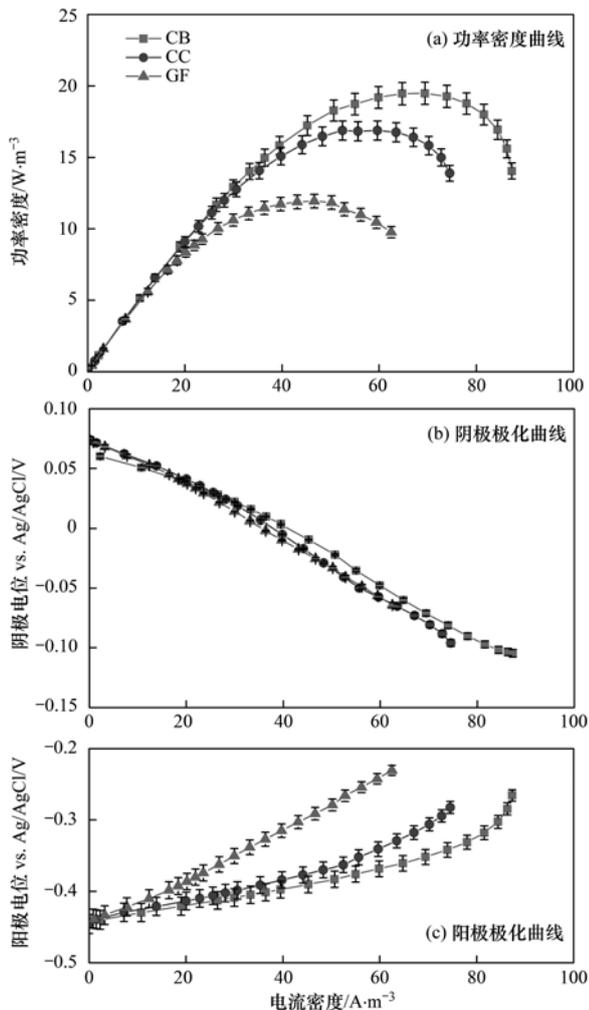


图 4 以实际屠宰废水为基质时不同阳极材料 MFC 的功率曲线与电极极化曲线

Fig. 4 Power density and cathode and anode polarization curves of CB-, CC-, and GF-MFCs when slaughter wastewater was fed as substrate

在本研究中,3 种阳极材料 MFC 均以相同接种液启动,因此阳极材料和溶解氧为影响微生物燃料电池启动速度的关键因素^[31, 32]. Zhang 等^[32]以碳刷作为单室空气阴极 MFC(2 cm 腔体)阳极,溶解氧浓度测试结果表明阳极区域溶解氧浓度过高是导致 MFC 启动速度慢的主要原因. Fan 等^[33]以碳布为阳极设计了“三明治”结构(CEA)MFC,阳极与阴极之间仅相隔一层隔膜材料,由于阳极区域溶解氧浓

度过高,他们的反应器在启动初期电压上升较慢,经过一段时间的驯化后,启动速度加快. 在本研究中,阴极与阳极的中心距离仅为 0.7 cm,且采用了双空气阴极的结构设计,3 种阳极 MFC 的启动过程与 Fan 等^[33]的反应器启动过程类似,在前 12 d 由于阳极区域溶解氧浓度过高,兼性或厌氧的产电微生物增殖缓慢,经过 12 d 的驯化,产电微生物对溶解氧的耐受能力提高,增殖速度加快,产电电压也开始快速上升,最终 3 种不同阳极 MFC 均在 24 d 完成启动过程,因此笔者认为对于紧凑型 MFC 来说溶解氧对启动的影响要大于电极材料.

稳定运行后,与碳布阳极、石墨毡阳极 MFC 相比,碳刷阳极 MFC 的产电功率均为最高. MFC 产电性能与阳极材料的比表面积呈正相关关系,而与不同电极材料的导电性或者与启动后表面种群结构关系不大^[34]. Stoll 等以石墨硬毡、泡沫碳和石墨刷为 MFC 的阳极材料,结果发现 3 种阳极表面的种群结构相似,但碳刷阳极的比表面积最大,其 MFC 产生的功率密度最高. 本文虽然没有分析其阳极表面的种群结构,但三类反应器的接种液是相同的,因此,笔者推测本研究中碳刷、碳布和石墨毡的种群结构是接近的,其产电的差异性主要来自于阳极的比表面积不同. 根据电极材料分类,碳刷属于三维碳基材料,碳布和石墨毡属于二维碳基材料^[35]. 与二维碳基材料相比,三维碳基材料拥有更大的表面积,有利于附着更多的产电微生物和获得更好的产电性能. MFC 在运行实际屠宰废水时的产电功率明显低于运行人工废水时,这与实际屠宰废水的特性有关. 一方面,实际屠宰废水的电导率仅为人工废水的 1/4,其低电导率导致电池内阻增加,质子传递阻力增大,阴极氧还原反应速度降低,最终导致产电功率降低^[11]. 另一方面,屠宰废水中含有高浓度的脂质、糖类、有机酸、蛋白质等. 已有研究表明, MFC 不能直接利用这些物质产电,而只能利用它们水解的产物进行产电,并且产电功率低于乙酸钠^[36]. 3 种阳极 MFC 在运行人工废水或实际屠宰废水时均获得了 90% 左右的 COD 去除率,说明阳

极材料对 MFC 脱除 COD 没有明显影响. 比较库仑效率发现, MFC 运行实际屠宰废水时获得的 CE 比运行人工废水时降低了 75%, 说明大量的 COD 被非产电过程所消耗. 与运行人工废水相比, MFC 运行实际屠宰废水时每个周期的运行时间从 1 d 增加至 2 d, 更长的运行时间会导致更多的溶解氧进入到反应器腔体内, 使得更多的基质被好氧过程所消耗. 此外, 屠宰废水中含有高浓度的氨氮, 硝化反硝化脱氮过程也会消耗大量的基质.

MFC 可以同时脱除 COD 和产生电能, 但是从 MFC 实用化角度考虑, 阳极材料的经济性不容忽视. 虽然 MFC 在处理实际废水时产电功率并不大, 其产生的电能不能上网外输, 但可以通过升压装置 (BQ25504) 和以电容器充电收集而得到利用, 如驱动电机等, 从而实现 MFC 产电的经济效益^[26]. 从表 1 可以看出, 本研究所用的阳极成本分别为 100 元(碳刷)、96 元(碳布)和 110 元(石墨毡). 当运行乙酸钠时, 每单元阳极成本所能产生的功率为 (3.44 ± 0.08) mW (CB-MFC)、 (2.90 ± 0.10) mW (CC-MFC) 和 (2.48 ± 0.09) mW (GF-MFC); 当运行屠宰废水时, 每单位阳极成本所能产生的功率为 (0.97 ± 0.05) 、 (0.86 ± 0.07) 和 (0.54 ± 0.05) mW. 每单位碳刷阳极获得的产电效益比碳布和石墨毡阳极高出 18.6%、38.7% (乙酸钠) 和 12.8%、80% (屠宰废水). 这里阳极的成本未考虑阳极的预处理成本, 因为 MFC 扩大化后, 阳极的预处理成本相对阳极生产成本可以忽略, 此外, 考虑 MFC 的实际应用以处理实际废水为主, 阳极的预处理也可以省去. 因此, 碳刷是微生物燃料电池实用化过程中最具合适的阳极材料.

4 结论

(1) 以碳刷、碳布和石墨毡 3 种不同碳基阳极材料构建单室空气阴极微生物燃料电池, 其启动过程类似, 启动时间约为 24 d 左右.

(2) 3 种阳极材料 MFC 运行人工废水或实际废水时 COD 去除率均在 90% 左右.

(3) 在 3 种碳刷阳极 MFC 中, 碳刷阳极 MFC 在运行人工废水和实际屠宰废水时均获得了高的最大功率密度和产电效益, 最大功率密度分别达到 (56.3 ± 1.3) W·m⁻³ 和 (19.5 ± 1) W·m⁻³; 单位碳刷阳极成本所能产生的功率分别达到 (3.44 ± 0.08) mW 和 (0.97 ± 0.05) mW. 表明碳刷是微生物燃料电池扩大化合适的阳极材料.

参考文献:

- [1] Chaudhuri S K, Lovley D R. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells [J]. *Nature Biotechnology*, 2003, **21**(10): 1229-1232.
- [2] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, *et al.* Microbial fuel cells: methodology and technology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40**(17): 5181-5192.
- [3] 张怡然, 吴立波. 微生物燃料电池在废水处理中的应用进展 [J]. *水资源与水工程学报*, 2010, **21**(6): 100-104.
Zhang Y R, Wu L B. Application progress of microbial fuel cells for wastewater treatment [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, **21**(6): 100-104.
- [4] Oh S E, Logan B E. Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, **70**(2): 162-169.
- [5] Liu H, Cheng S A, Logan B E. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(2): 658-662.
- [6] Li X H, Zhu N W, Wang Y, *et al.* Animal carcass wastewater treatment and bioelectricity generation in up-flow tubular microbial fuel cells: effects of HRT and non-precious metallic catalyst [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **128**: 454-460.
- [7] Min B, Logan B E. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38**(21): 5809-5814.
- [8] You S J, Zhao Q L, Zhang J N, *et al.* A graphite-granule membrane-less tubular air-cathode microbial fuel cell for power generation under continuously operational conditions [J]. *Journal of Power Sources*, 2007, **173**(1): 172-177.
- [9] Scott K, Murano C, Rimbau G. A tubular microbial fuel cell [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2007, **37**(9): 1063-1068.
- [10] Zhang F, Ge Z, Grimaud J, *et al.* *In situ* investigation of tubular microbial fuel cells deployed in an aeration tank at a municipal wastewater treatment plant [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **136**: 316-321.
- [11] Cheng S A, Logan B E. Increasing power generation for scaling up single-chamber air cathode microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(6): 4468-4473.
- [12] Tanisho S, Kamiya N, Wakao N. Microbial fuel cell using *Enterobacter aerogenes* [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*, 1989, **275**(1): 25-32.
- [13] Erbay C, Yang G, de Figueiredo P, *et al.* Three-dimensional porous carbon nanotube sponges for high-performance anodes of microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, **298**: 177-183.
- [14] Ledezma P, Donose B C, Freguia S, *et al.* Oxidised stainless steel: a very effective electrode material for microbial fuel cell bioanodes but at high risk of corrosion [J]. *Electrochimica Acta*, 2015, **158**: 356-360.
- [15] Zheng S Q, Yang F F, Chen S L, *et al.* Binder-free carbon black/stainless steel mesh composite electrode for high-performance anode in microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, **284**: 252-257.
- [16] Guo K, Soeriyadi A H, Feng H J, *et al.* Heat-treated stainless steel felt as scalable anode material for bioelectrochemical systems

- [J]. *Bioresource Technology*, 2015, **195**: 46-50.
- [17] Kim J R, Jung S H, Regan J M, *et al.* Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2007, **98** (13): 2568-2577.
- [18] Ishii S, Watanabe K, Yabuki S, *et al.* Comparison of electrode reduction activities of *Geobacter sulfurreducens* and an enriched consortium in an air-cathode microbial fuel cell[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74**(23): 7348-7355.
- [19] Kim H J, Park H S, Hyun M S, *et al.* A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2002, **30** (2): 145-152.
- [20] Rabaey K, Clauwaert P, Aelterman P, *et al.* Tubular microbial fuel cells for efficient electricity generation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(20): 8077-8082.
- [21] Di L Z, Liu B, Song J J, *et al.* Effect of chemical etching on the Cu/Ni metallization of poly (ether ether ketone)/carbon fiber composites[J]. *Applied Surface Science*, 2011, **257**(9): 4272-4277.
- [22] Hutchinson A J, Tokash J C, Logan B E. Analysis of carbon fiber brush loading in anodes on startup and performance of microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2011, **196** (22): 9213-9219.
- [23] Zhuang L, Zheng Y, Zhou S G, *et al.* Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **106**: 82-88.
- [24] Zhuang L, Yuan Y, Wang Y Q, *et al.* Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater[J]. *Bioresource Technology*, 2012, **123**: 406-412.
- [25] Feng Y J, He W H, Liu J, *et al.* A horizontal plug flow and stackable pilot microbial fuel cell for municipal wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2014, **156**: 132-138.
- [26] Ge Z, Wu L, Zhang F, *et al.* Energy extraction from a large-scale microbial fuel cell system treating municipal wastewater [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, **297**: 260-264.
- [27] Feng Y J, Yang Q, Wang X, *et al.* Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2010, **195** (7): 1841-1844.
- [28] Cheng S A, Wu J C. Air-cathode preparation with activated carbon as catalyst, PTFE as binder and nickel foam as current collector for microbial fuel cells[J]. *Bioelectrochemistry*, 2013, **92**: 22-26.
- [29] Fan Y, Sharbrough E, Liu H. Quantification of the internal resistance distribution of microbial fuel cells[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(21): 8101-8107.
- [30] Ren L, Ahn Y, Logan B E. A two - stage microbial fuel cell and anaerobic fluidized bed membrane bioreactor (MFC-AFMBR) system for effective domestic wastewater treatment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48** (7): 4199-4206.
- [31] 刘春梅, 李俊, 朱恂, 等. 阳极材料及结构对微生物燃料电池性能的影响[J]. *工程热物理学报*, 2013, **34** (6): 1127-1129.
- Liu C M, Li J, Zhu X, *et al.* The effects of anode materials and configurations on the performance of microbial fuel cells [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, **34** (6): 1127-1129.
- [32] Zhang X Y, Liang P, Shi J, *et al.* Using a glass fiber separator in a single-chamber air-cathode microbial fuel cell shortens start-up time and improves anode performance at ambient and mesophilic temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **130**: 529-535.
- [33] Fan Y Z, Han S K, Liu H. Improved performance of CEA microbial fuel cells with increased reactor size [J]. *Energy & Environmental Science*, 2012, **5**(8): 8273-8280.
- [34] Stoll Z A, Ma Z K, Trivedi C B, *et al.* Sacrificing power for more cost-effective treatment: a techno-economic approach for engineering microbial fuel cells[J]. *Chemosphere*, 2016, **161**: 10-18.
- [35] 王鑫, 李楠, 高宁圣洁, 等. 微生物燃料电池碳基阳极材料的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2012, **28**(22): 5-8.
- Wang X, Li N, Gao N S J, *et al.* Research progress in carbon anode materials for microbial fuel cells [J]. *China Water & Wastewater*, 2012, **28**(22): 5-8.
- [36] Asensio Y, Fernandez-Marchante C M, Lobato J, *et al.* Influence of the fuel and dosage on the performance of double-compartment microbial fuel cells[J]. *Water Research*, 2016, **99**: 16-23.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhu, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper (II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)