

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第8期

Vol.39 No.8

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国城市 PM _{2.5} 污染的健康风险及经济损失评价	李惠娟, 周德群, 魏永杰 (3467)
冬季电力行业对长江中游城市群空气质量影响	孙晓伟, 郭秀锐, 程水源 (3476)
基于区域传输矩阵和 PM _{2.5} 达标约束的大气容量计算方法	李敏辉, 廖程浩, 杨柳林, 曾武涛, 唐喜斌 (3485)
利用 SPAMS 研究天津市夏季环境空气中细颗粒物化学组成特征	温杰, 史旭荣, 田瑛泽, 徐娇, 史国良, 冯银厂 (3492)
重庆市北碚城区气溶胶中有机碳和元素碳的污染特征	彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 陈建博, 江长胜 (3502)
杭甬地区大气中含碳气溶胶特征及来源分析	徐宏辉, 徐婧莎, 何俊, 浦静姣, 齐冰, 杜荣光 (3511)
城市生活垃圾露天焚烧 PM _{2.5} 及其组分排放特征	王艳, 郝伟伟, 程珂, 支国瑞, 易鹏, 樊静, 张洋 (3518)
民用燃煤排放分级颗粒物中碳组分排放因子	杨国威, 孔少飞, 郑淑睿, 吴剑, 郑明明, 郑煌, 严沁, 刘海彪, 王伟, 吴方琪, 程溢 (3524)
大连地区夏季非甲烷烃 (NMHC) 特征及其来源解析	纪德钰 (3535)
“十三五”挥发性有机物总量控制情景分析	张嘉妮, 陈小方, 梁小明, 柯云婷, 范丽雅, 叶代启 (3544)
浙江省包装印刷行业挥发性有机物排放特征及排放系数	王家德, 吕建璋, 李文娟, 顾震宇, 缪孝平 (3552)
有机溶剂使用企业挥发性恶臭有机物排放特征及特征物质识别	翟增秀, 孟洁, 王巨, 翟友存, 曹阳, 邹克华 (3557)
基于 MODIS_C006 的乌鲁木齐 10 年气溶胶光学厚度变化特征	胡俊, 亢燕铭, 陈勇航, 刘鑫, 李霞, 刘琼 (3563)
基于路网车流量的北京城市副中心机动车污染控制情景	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (3571)
北京典型跑步区域空气污染特征及跑步者呼吸暴露	陶双成, 高硕吟, 熊新竹, 姚嘉林, 邓顺熙 (3580)
丹江口水库调水前后表层沉积物营养盐和重金属时空变化	李冰, 王亚, 郑钊, 许信, 辛英督, 黄进, 郭诗君, 毕升阁, 胡兰群, 陈兆进, 李玉英 (3591)
太湖北部湖区春、冬季节天然有机质的荧光特征及环境意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华 (3601)
太湖重点区域水环境中邻苯二甲酸酯的污染水平及生态风险评价	朱冰清, 高占啟, 胡冠九, 王骏飞, 于南洋, 韦斯 (3614)
台风强降雨输入水源水库悬浮泥沙的氮磷吸附特性	姚玲爱, 赵学敏, 马千里, 梁荣昌, 夏北成, 卓琼芳 (3622)
珠江三角洲高碑地下水赋存环境特征及成因分析	张昌延, 何江涛, 张小文, 倪泽华 (3631)
有机污染物对杭州湾海域浮游细菌群落的影响	宣丽霞, 戴文芳, 郁维娜, 周素明, 欧昌荣, 熊金波 (3640)
澜沧江流域浮游细菌群落结构特征及驱动因子分析	程豹, 望雪, 徐雅倩, 杨正健, 刘德富, 马骏 (3649)
碧流河水库细菌群落结构特征及其关键驱动因子	王欢, 赵文, 谢在刚, 魏杰, 姜洋 (3660)
浑河底泥反硝化厌氧甲烷氧化菌群落多样性的时空分布特征及其与环境因子关系分析	张亚迪, 宋永会, 彭剑桥, 张剑桥, 张盼月, 刘瑞霞, 石国强 (3670)
人类活动对河流沉积物中反硝化厌氧甲烷氧化菌群落特征的影响	刘洋, 陈永娟, 王晓燕, 许康利 (3677)
外源氮输入对不同土地利用排水沟底泥反硝化和 N ₂ O 排放影响	余冬立, 陈心逸, 高雪梅, 张文娟, 夏永秋 (3689)
雨水管道沉积物沉淀特性及主要污染物含量分布	尚宇, 周毅, 廖安意, 方正 (3696)
水体中 Cr(VI) 对不同混凝剂混凝过程的影响	高倩, 张大为, 徐慧, 徐建坤, 张崇森, 王东升 (3704)
Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ 复合阳极活化过一硫酸盐强化光电催化降解双酚 A	李蒋, 王雁, 张秀芳, 赵旭 (3713)
海藻酸钙/生物炭复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能和机制	于长江, 董心雨, 王苗, 林强 (3719)
磁性生物炭对水中 CIP 和 OFL 的吸附行为和机制	赵华轩, 郎印海 (3729)
污水中新精神活性物质的分析方法优化及验证	陈培培, 杜鹏, 周子雷, 徐泽琼, 高婷婷, 李喜青 (3736)
臭氧-CNT 膜改性联用工艺对 PVDF 中空纤维膜污染进程的缓解	关羽琪, 王凯伦, 祝学东, 董丹, 薛小雷, 马艳林, 栾桂荣, 郭瑾 (3744)
阴离子交换树脂生物再生去除硝酸盐氮	叶婷, 张光, 王珂, 双陈冬, 李爱民 (3753)
普鲁士蓝@酵母菌催化剂的合成及其 Fenton 性能	陈思, 白波, 王洪化, 索有瑞 (3759)
PN/A 双菌层系统的构建及其脱氮性能	许静怡, 杜俊, 杨一峰, 吕峰, 夏四清 (3767)
苯酚对 EBPR 系统除磷性能的抑制作用	马娟, 王瑾, 俞小军, 周猛, 李光银, 孙洪伟 (3775)
反硝化-短程硝化-厌氧氨氧化工艺处理晚期垃圾渗滤液的脱氮除碳性能	王凡, 陆明羽, 殷记强, 李祥, 黄勇 (3782)
好/厌氧条件下反硝化细菌脱氮特性与功能基因	康鹏亮, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 商潘路, 刘珍芳, 王跃, 谭欣林 (3789)
苯并[a]芘厌氧降解的苯酚共基质协同作用与污泥微生物特性	吴海珍, 胡肖怡, 王鸣, 韦景悦, 范一文, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (3797)
污泥超高温堆肥过程中 DOM 结构的光谱分析	刘晓明, 余震, 周普雄, 罗海林, 王跃强, 廖汉鹏, 周顺桂 (3807)
生物炭对华北农田土壤 N ₂ O 通量及相关功能基因丰度的影响	刘杏认, 赵光昕, 张晴雯, 田秀平 (3816)
设施菜田土壤 N ₂ O 产生对 O ₂ 的响应	陈吉吉, 宋贺, 曹文超, 王乙然, 王敬国 (3826)
利用 μ -XRF 和 XANES 研究铅锌矿区土壤铅形态及其生物有效性	孙晓艳, 柳检, 罗立强 (3835)
南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征	李俊凯, 张丹, 周培, 刘群录 (3845)
Fe-Al 改性硅藻土的制备及其对土壤 Cd 污染固定化效果	杨雨中, 朱健, 肖媛媛, 谭蓉, 王平, 陈润华, 徐海音, 杨雄 (3854)
基于稳定碳同位素技术的干旱区绿洲土壤有机碳向无机碳的转移	李杨梅, 贡璐, 安申群, 孙力, 陈新 (3867)
生境过滤驱动庞泉沟华北落叶松林土壤真菌群落的构建过程	赵鹏宇, 李鑫, 柴宝峰 (3876)
转 cry1Ab 和 epsps 基因玉米 C0030.3.5 对土壤固氮细菌丰度和群落结构的影响	王蕊, 朱珂, 李刚, 刘惠芬, 王晶, 修伟明, 赵建宁, 杨殿林 (3885)
脱硫石膏对稻田 CH ₄ 释放及其功能微生物种群的影响	胡翔宇, 向秋洁, 木志坚 (3894)
长期施肥对不同深度稻田土壤碳氮水解酶活性的影响特征	杜林森, 唐美铃, 祝贞科, 魏亮, 魏晓梦, 周萍, 葛体达, 王久荣, 邹冬生, 吴金水 (3901)
黄河口滨岸潮滩湿地泥沙沉积及外源 Cd 输入对碱蓬物质量分配及抗氧化酶活性的影响	宋红丽, 王立志, 郁万妮, 吴希媛 (3910)
黄河下游开封段引黄灌区小麦中重金属污染特征及健康风险评价	康国华, 张鹏岩, 李颜颜, 杨丹, 庞博, 何坚坚, 闫宇航 (3917)
氧化石墨烯对邻苯二甲酸二丁酯藻毒性的影响	涂海峰, 刘成, 王宇擎, 储祺, 侯晓冬, 李锋民 (3927)
有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响	祖波, 马兰, 刘波, 卢培利, 许君 (3937)
中国氢燃料电池车燃料生命周期的化石能源消耗和 CO ₂ 排放	林婷, 吴焯, 何晓婧, 张少君, 郝吉明 (3946)
气溶胶水相反应生成二次有机气溶胶研究进展	叶招莲, 瞿珍秀, 马帅帅, 盖鑫磊 (3954)
《环境科学》征订启事 (3543)	
《环境科学》征稿简则 (3570)	
信息 (3600, 3728, 3844)	

有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响

祖波¹, 马兰¹, 刘波², 卢培利^{3*}, 许君⁴

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆怡置北郡房地产开发有限公司, 重庆 401147; 3. 重庆大学环境科学系, 重庆 400044; 4. 重庆市环境工程评估中心, 重庆 401121)

摘要: 通过接种厌氧氨氧化污泥到微生物燃料电池阳极, 成功启动厌氧氨氧化微生物燃料电池 (ANAMMOX-MFC), 研究了葡萄糖和苯酚对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能的影响。结果表明, 当葡萄糖浓度较低时 ($100 \sim 200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 对 ANAMMOX 菌有促进作用, ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能增强, 此时反应器进出水 COD 浓度变化不大; 当葡萄糖浓度高于 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 产电性能逐渐下降, NH_4^+ -N 去除率和去除速率逐渐下降, 而 NO_2^- -N 去除率和去除速率基本保持不变, 此时出水 COD 浓度也出现降低, 说明厌氧氨氧化菌活性受到抑制, 反硝化菌活性开始增强。极化曲线拟合程度较低, COD 浓度变化对电池内阻影响较小。当苯酚浓度较低时 ($50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能影响较低; 当苯酚浓度超过 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能逐渐被抑制。整个过程进出水 COD 浓度变化不大, 极化曲线拟合程度较低, 表观内阻有缓慢升高。

关键词: 厌氧氨氧化微生物燃料电池 (ANAMMOX-MFC); 葡萄糖; 苯酚; 脱氮; 产电

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)08-3937-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711104

Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance

ZU Bo¹, MA Lan¹, LIU Bo², LU Pei-li^{3*}, XU Jun⁴

(1. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Chongqing Yizheng North County Real Estate Development Company Limited, Chongqing 401147, China; 3. Department of Environmental Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. Appraisal Center for Environment & Engineering of Chongqing, Chongqing 401121, China)

Abstract: An anaerobic ammonium oxidation microbial fuel cell (ANAMMOX-MFC) was successfully started by inoculating anaerobic ammonium oxide sludge into the anode of a microbial fuel cell and then used to study the effect of glucose and phenol on ANAMMOX-MFC denitrification electrogenesis performance. The results showed that the ANAMMOX bacteria promoted ANAMMOX-MFC denitrification when the concentration of glucose was low ($100\text{--}200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). At that time, the chemical oxygen demand (COD) concentration of the reactor was not significant. The electrogenesis production performance and NH_4^+ -N removal rate gradually decreased when the glucose concentration was higher than $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, but the NO_2^- -N removal rate generally remained unchanged. The COD concentration was also reduced, indicating that the activity of the ANAMMOX bacteria was inhibited and the activity of denitrification bacteria began to increase. The polarization curve fitting degree was low, and the change in COD concentration had little effect on the battery internal resistance. When the concentration of phenol was low ($50\text{--}100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), there was little effect on ANAMMOX-MFC denitrification electrogenesis performance. When the concentration of phenol exceeded $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, ANAMMOX-MFC denitrification performance was gradually inhibited. Overall, in the process, the COD concentrations of the water influent and effluent changed little, the polarization curve fitting degree was low, and the apparent internal resistance increased slowly.

Key words: anaerobic ammonium oxidation microbial fuel cell (ANAMMOX-MFC); glucose; phenol; denitrification; electrogenesis

微生物燃料电池 (microbial fuel cell, MFC) 是以细菌为催化剂, 氧化有机物和无机物产生电流的装置。这些代谢反应产生的电子, 通过外电路从阳极到阴极, 从而产生了电流^[1]。MFC 具有很多吸引人的地方, 如直接产电, 能量转化效率高, 能在室温下进行反应。特别地, MFC 在实现废水处理的同时能够减少污泥的产生^[2]。MFC 的研究主要集中在有机废水处理上^[2~4]。人们采用 MFC 对食品工

业废水、酒工业废水、甜食工业废水、牛奶工业废水、农业加工废水、纸回收工业废水、城市生活污水等进行了研究^[5~7]。近来, 兼具脱氮功能的 MFC

收稿日期: 2017-11-12; 修订日期: 2018-01-24

基金项目: 重庆市研究生创新基金项目 (CYS16182, CYS17214); 重庆市研究生教育教学改革研究重点项目 (yjg20162025)

作者简介: 祖波 (1980~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为废水处理理论与技术, E-mail: zubo@cqjtu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: lupl@cqu.edu.cn

成为了研究的新焦点^[8,9]. Zhen 等^[10]构建了以氨为唯一能源的 MFC, 推测硝化细菌能直接以氨为燃料进行产电或通过化能自养代谢过程合成有机物为其他异养产电菌提供能源. 谢作甫^[11]构建了氨氧化微生物燃料电池(ammonia-oxidation microbial fuel cell, AO-MFC), 探明了溶解氧(DO)对硝化和产电性能的影响及其机制. 张吉强^[12]首次创建了阳极反硝化微生物燃料电池(anodic denitrification MFC, AD-MFC), 系统而深入地研究了 AD-MFC 的脱氮产电性能. Viridis 等^[13]利用 A/O 工艺与 MFC 结合, 首先将氨和有机物通入阳极, 当有机物在阳极去除完毕后, 将阳极液通入外置硝化反应器, 进行硝化反应, 再将出水通入阴极进行反硝化反应, 最终转化为氮气, 完成脱氮过程. Viridis 等^[14]对反硝化 MFC 进行了改进, 省略了外置硝化反应器, 直接对阴极进行曝气, 实现了阴极同步自养硝化反硝化. Sotres 等^[15]在研究双室微生物燃料电池中, 通过对阴极室间歇曝气实现了同时硝化反硝化菌群的建立, 并进行了微生物群落分析.

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)菌是新发现的一类脱氮细菌, 其能够在厌氧条件下以氨为电子供体、亚硝酸盐为电子受体产生氮气($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- \rightleftharpoons \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$)^[16]. 以该反应开发的 ANAMMOX 工艺是一种新兴的废水生物脱氮工艺, 可同时去除氨和亚硝酸盐两种氮素污染物^[17]. 厌氧氨氧化微生物燃料电池可实现氨氮和亚硝氮的同时去除, 目前研究较少. 谢作甫^[11]构建了厌氧氨氧化微生物燃料电池(anaerobic ammonium oxidation MFC, ANAMMOX-MFC), 探明了其脱氮和产电性能, 结果表明: ANAMMOX-MFC 容积负荷和容积去除速率(以 N 计)分别为 $1.72 \sim 2.57 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ 和 $1.64 \sim 2.38 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$, 氨氮和亚硝氮去除率分别为 $88.9\% \sim 98.3\%$ 和 $88.7\% \sim 97.2\%$. 张吉强^[12]创建了厌氧氨氧化微生物燃料电池(ANAMMOX-MFC), 探明了其脱氮产电性能, 考察了温度、pH 和中介体对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能的影响, 但仍需进一步探明不同影响因素对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响. 由于实际废水中难免会存在有机物, 研究有机物对厌氧氨氧化微生物燃料电池脱氮产电性能的影响变得十分有意义.

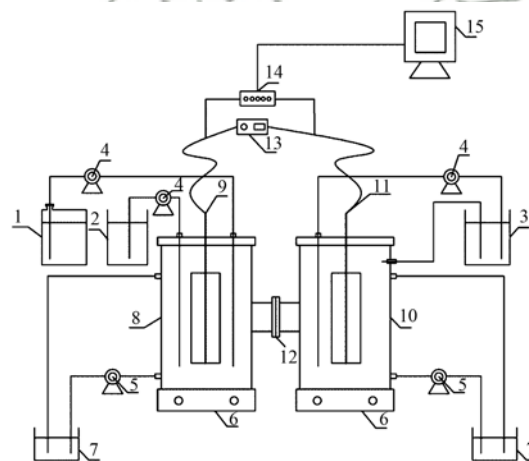
本研究通过接种厌氧氨氧化污泥到微生物燃料电池阳极, 成功启动 ANAMMOX-MFC 达到稳定性

能的基础上, 并进一步研究有机物对 ANAMMOX-MFC 的影响, 旨在为此新工艺提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 ANAMMOX-MFC 系统

本实验在张吉强^[12]研究基础上构建了双室 ANAMMOX-MFC, 实验装置如图 1 所示. MFC 由有机玻璃制成, 阴极室和阳极室由两个圆柱体构成, 圆柱体含中间保温层, 双室有效容积均为 550 mL (实际溶液体积 450 mL), 中间由圆形的质子交换膜(Nafion 117)分隔开, 有效面积为 19.6 cm^2 . ANAMMOX-MFC 放置于可调节转速的磁力搅拌器上, 阳极和阴极均用石墨毡作电极($10 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 0.5 \text{ cm}$), 从而增大了接触面积. 石墨毡由钢丝固定于容器中部悬空, 距底面 4 cm, 平行于质子交换膜. 中空保温层由潜水泵将水浴锅中温水泵入保温层, 保证反应器温度. MFC 阳极接进水桶和出水桶, 采用序批式进出水, 由中控系统和蠕动泵控制进出水. 阴极接进水桶和出水桶, 采用连续进出水. 阴极室和阳极室外接可变电阻箱($0 \sim 9\,990 \, \Omega$)调节电阻大小, 外联数据采集卡(USB-1408FS-PLUS), 并用电脑记录.



1. 阳极室进水桶; 2. 阳极室出水桶; 3. 阴极室储液桶; 4. 蠕动泵; 5. 热水循环泵; 6. 磁力搅拌器; 7. 恒温水浴锅; 8. 阳极室; 9. 阳极; 10. 阴极室; 11. 阴极; 12. 阳离子交换膜; 13. 可变电阻箱; 14. 数据采集卡; 15. 电脑

图 1 ANAMMOX-MFC 装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the ANAMMOX-MFC system

1.2 厌氧氨化污泥的接种

接种污泥为厌氧氨氧化污泥, 取自实验室(重庆大学煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室)内前期培养 3 个月并实现稳定运行的厌氧氨氧化反应器. 其中 SS 为 $1\,596.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, VSS $1\,221.3$

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, VSS/SS 为 0.765, 接种量为 450 mL. (NH₄)₂SO₄、NaNO₂, 浓度按需要添加. 参考相关报道^[18], 进水主要元素浓度如表 1 所示. 阳极进水 pH 控制在 7.5 左右.

1.3 模拟废水

阳极室进水为模拟废水, 进水基质为

表 1 厌氧氨氧化模拟废水成分¹⁾

Table 1 Simulation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX)										
成分	NaHCO ₃	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄ ·7H ₂ O	CaCl ₂	FeSO ₄ ·7H ₂ O	EDTA	(NH ₄) ₂ SO ₄	NaNO ₂	微量元素 I	微量元素 II
单位/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	1 000	27.2	200	300	6.25	6.25	ND	ND	1	1

1) 微量元素 I: EDTA 5 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, FeSO₄·7H₂O 5 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 微量元素 II: EDTA 15 000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ZnSO₄·7H₂O 430 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CoCl₂ 240 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, MnCl₂·4H₂O 990 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, CuSO₄·5H₂O 250 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NaMoO₄·2H₂O 220 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NiCl₂·6H₂O 190 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Na₂SeO₄·10H₂O 210 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, H₃BO₄ 14 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

1.4 实验方案

阳极室外接储液桶 20 L, 在配置进水之前采取通入氮气排氧, 并在储液桶一端接入氮气压缩袋, 尽量保持厌氧条件. 阳极室进水控制基质浓度 1:1, 控制 NH₄⁺-N 和 NO₂⁻-N 均为 90 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 阴极室采用蠕动泵连续进水, 高锰酸钾 8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 作为阴极电子受体. 采用小型潜水泵将恒温水浴锅中的水泵入反应器保温隔层, 将温度控制在 35℃ ± 1℃, 通过盐酸和碳酸氢钠调节 pH 维持在 7.5 左右, 外接电阻为 1 000 Ω. 系统采用锡箔纸覆盖微生物燃料电池反应器, 使之达到避光的条件. 通过中控系统设定水力停留时间 (HRT) 为 8 h (进水 5 min、厌氧反应 450 min、沉淀 20 min、排水 5 min).

1.4.1 葡萄糖对 ANAMMOX-MFC 性能的影响实验

本实验选用葡萄糖为研究对象, 考察不同浓度葡萄糖对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能的短期影响. 设定不同的葡萄糖浓度梯度, 分别为 100、200、300、400 和 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 每一浓度梯度连续进行 2 个周期实验, 待稳定后通过改变电阻箱阻值 9 000 ~ 20 Ω 测定极化曲线, 连续实验结束后恢复之前进水状态 (不添加葡萄糖), 待性能恢复后重复上述实验, 待两次实验数据相差小于 5% 时提升进水葡萄糖浓度, 进行下一浓度实验.

1.4.2 苯酚对 ANAMMOX-MFC 性能的影响实验

本实验选用苯酚为研究对象, 考察不同浓度苯酚对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能的短期影响. 设定不同的苯酚浓度梯度, 分别为 50、100、200、300、400 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 每一浓度梯度连续进行 2 个周期实验, 待稳定后通过改变电阻箱阻值 9 000 ~ 20 Ω 测定极化曲线, 连续实验结束后恢复之前进水状态 (不添加苯酚), 待性能恢复后重复上述实验, 待两次实验数据相差小于 5% 时提升进水苯酚浓度, 进

行下一浓度实验.

1.5 实验检测指标与方法

(1) 化学指标

采用重铬酸钾法测化学需氧量 (COD); 纳氏试剂光度法测氨氮 (NH₄⁺-N); N-(1-萘基)-乙二胺光度法测亚硝态氮 (NO₂⁻-N); 酚二磺酸光度法测硝态氮 (NO₃⁻-N); 玻璃电极法测 pH 值; 水银温度计测温度.

(2) 电化学指标

ANAMMOX-MFC 的输出电压 $U(\text{mV})$ 通过数据采集卡每隔 30 s 自动记录一次, 并以 Excel 形式存入电脑中; 电流 $I(\text{mA})$ 通过欧姆定律 $I = U/R$ 计算得到; 功率密度 $P(\text{W}\cdot\text{m}^{-3})$ 采用下式计算:

$$P = \frac{U_{\text{cell}} I}{V} = \frac{U_{\text{cell}}^2}{R_{\text{ex}} V}$$

(1)

式中, P 为体积功率密度, $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$; U_{cell} 为电池电压, V; V 为阳极室体积, m^3 ; R_{ex} 为外电阻, Ω.

极化曲线采用稳态法测定, 先将 ANAMMOX-MFC 保持开路状态保持稳定后, 逐步改变外电路电阻值 9 000 ~ 20 Ω, 外电阻减小幅度先大后小, 9 000 ~ 1 000 Ω 之间时, 每次减少 1 000 Ω, 1 000 ~ 100 Ω 之间时, 每次减少 100 Ω, 100 ~ 20 Ω 之间时, 每次减少 20 Ω. 记录 ANAMMOX-MFC 在每一外电阻下的稳定电压, 通过数据采集卡记录并保存稳定状态下的电压值, 并通过欧姆定律求得电流值, 绘制相应的电压与电流的关系即可得到极化曲线; 内阻选用稳态法测定, 通过可变电阻箱改变外电阻 20 ~ 9 000 Ω, 得到稳定状态下的电压值和电流值, 通过将极化曲线在欧姆极化区的数据拟合得到等效的表现内阻 (又称电池内阻), 同时在这个区域也可以得到最大的输出功率.

2 结果与分析

2.1 葡萄糖对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能的影响

2.1.1 葡萄糖对 ANAMMOX-MFC 脱氮性能的影响

设定葡萄糖浓度梯度为 100、200、300、400、500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 实验测得实际进水 COD 值分别为 125、240、373、507、613 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 不同进水葡萄糖浓度对 ANAMMOX-MFC 的脱氮性能的影响如图 2 所示. 在 COD 浓度较低时 (125 ~ 240 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), TN 去除率、 NH_4^+ -N 去除率和去除速率、 NO_2^- -N 去除率和去除速率持续增加, ANAMMOX-MFC 阳极主要发生 ANAMMOX 反应, 对 ANAMMOX-MFC 脱氮性能具有一定促进作用; 当 COD 浓度上升至 373 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, TN 去除率、 NH_4^+ -N 去除率和去除速率开始出现下降, 而 NO_2^- -N 去除率和去除速率基本保持不变, 说明 ANAMMOX-MFC 阳极中厌氧氨氧化菌活性开始降低, 反硝化菌活性开始增强. 当 COD 浓度继续升高至 613 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, TN 去除率、 NH_4^+ -N 去除率和去除速率继续下降, 而 NO_2^- -N 去除率和去除速率基本保持不变, 说明 ANAMMOX-MFC 阳极中厌氧氨氧化菌活性继续下降, 反硝化作用不断增强.

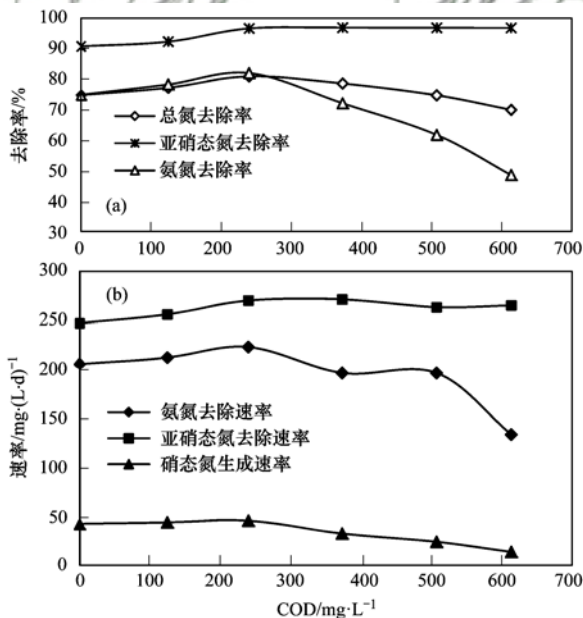
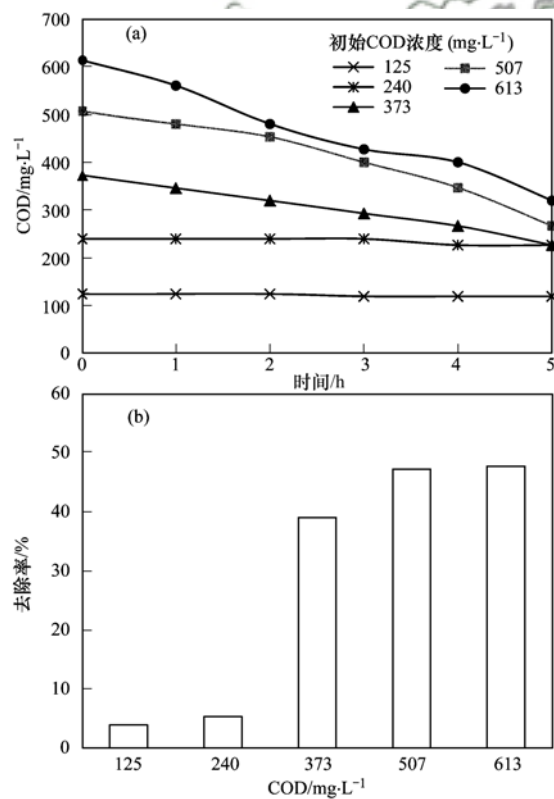


图 2 不同进水葡萄糖浓度对 ANAMMOX-MFC 的脱氮性能的影响

Fig. 2 Effect of glucose concentration on the denitrification performance of ANAMMOX-MFC

设定葡萄糖浓度梯度为 100、200、300、400、500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 实验测得实际进水 COD 值分别为 125、240、373、507、613 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 不同葡萄糖浓度

下 COD 变化如图 3 所示. 当进水 COD 浓度为 125 ~ 240 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 进出水 COD 浓度变化不大, 原因在于 ANAMMOX-MFC 阳极异养细菌仍处于抑制状态, 反应仍为厌氧氨氧化反应; 当进水 COD 浓度升高至 373 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 出水 COD 浓度开始出现下降, 经过一个周期运行 COD 浓度从 373 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至 227 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 去除率为 39.1%; 当进水 COD 浓度继续升高至 507 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 经过一个周期运行 COD 浓度从 507 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至 267 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 去除率为 47.3%; 当进水 COD 浓度继续升高至 613 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 经过一个周期运行 COD 浓度从 613 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低至 320 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, COD 去除率为 47.8%. 随着 COD 浓度的继续升高, 异养菌活性逐渐增强, COD 去除率和去除速率均升高, 表明接种污泥中仍存在异养细菌, 当进水葡萄糖浓度够高时异养细菌会重新恢复活性.



(a) 不同葡萄糖浓度下周期内 COD 浓度变化;
(b) 不同葡萄糖浓度下周期内 COD 去除率变化

图 3 不同葡萄糖浓度下 COD 变化

Fig. 3 Change in COD under different concentrations of glucose

2.1.2 葡萄糖对 ANAMMOX-MFC 产电性能的影响

外电阻恒定为 1000 Ω , 设定葡萄糖浓度梯度为 100、200、300、400、500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 实验测得实际进水 COD 值分别为 125、240、373、507、613 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 不同浓度 COD 对 ANAMMOX-MFC 产电性

能的影响如图 4 所示. 当 COD 浓度较低时 ($125 \sim 240 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 对产电性能有一定促进作用, ANAMMOX-MFC 的最大输出电压和最大输出功率密度从未投加葡萄糖时的 ($201.6 \pm 2.9 \text{ mV}$ 和 $(90.3 \pm 1.3) \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$) 上升至 ($240.1 \pm 3.7 \text{ mV}$ 和 $(128.1 \pm 2.0) \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$); 当 COD 浓度升高至 $373 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 产电性能开始出现下降; 当 COD 浓度继续升高至 $613 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, ANAMMOX-MFC 的最大输出电压和最大输出功率密度降低至 ($131.0 \pm 1.6 \text{ mV}$ 和 $(38.1 \pm 0.5) \text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$).

在每个 COD 条件下达到稳定后, 通过改变电阻箱阻值 $9\ 000 \sim 20\ \Omega$, 稳定状态下不同 COD 浓度条件下极化曲线的拟合如图 5 所示. 表明 COD 浓

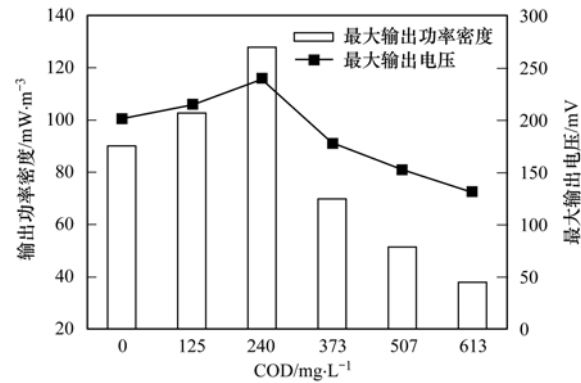


图 4 不同进水葡萄糖浓度对 ANAMMOX-MFC 的产电性能的影响

Fig. 4 Effect of glucose concentration on the electrogenesis performance of ANAMMOX-MFC

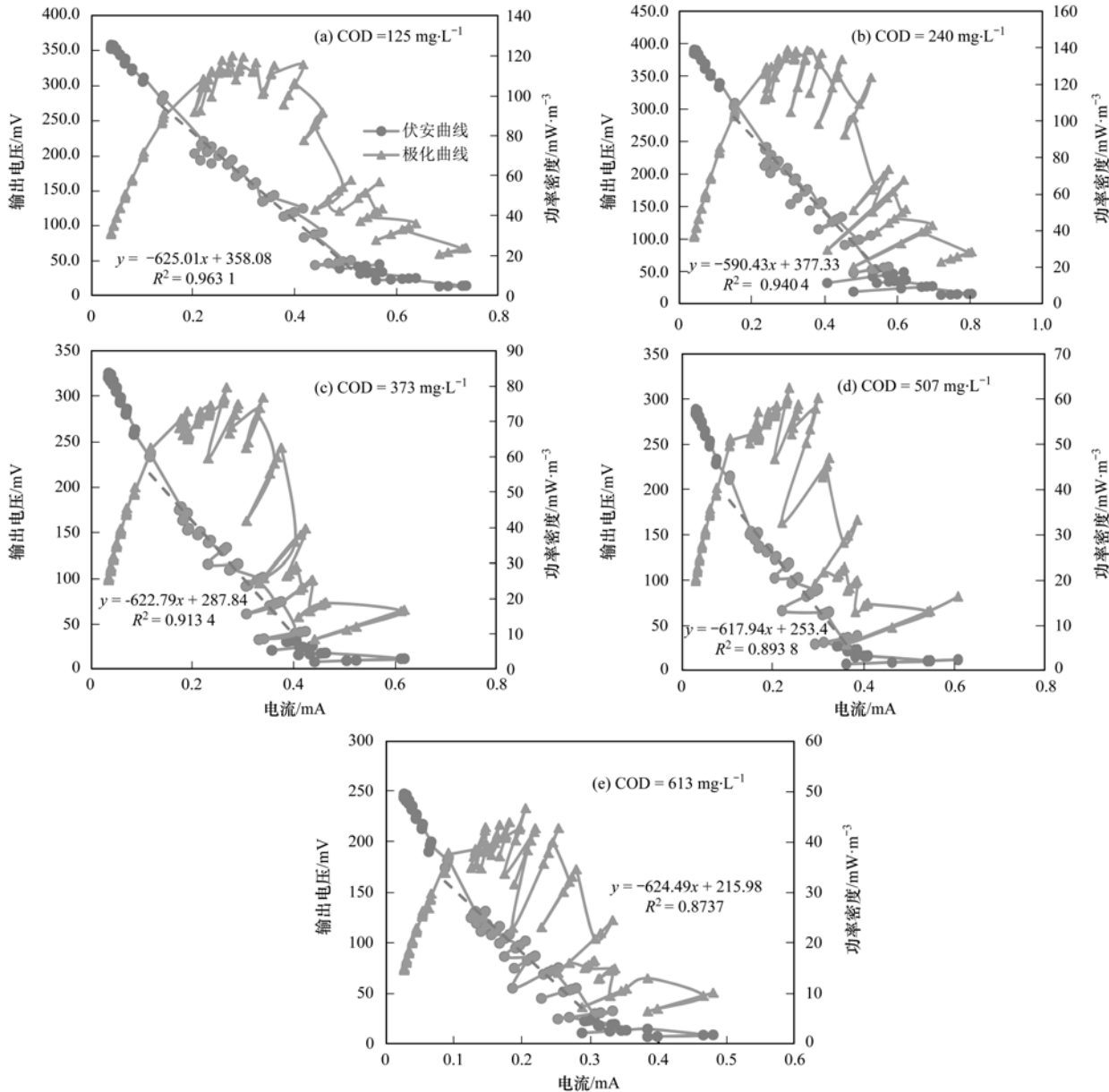


图 5 不同葡萄糖条件下极化曲线分析

Fig. 5 Polarization curve analysis under different glucose conditions

度变化对电池内阻影响较小,对产电性能影响则较大.当 COD 浓度较低时($125 \sim 240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),最大输出电压和最大输出功率密度从(358.6 ± 2.5) mV 和(120.1 ± 3.2) $\text{mW} \cdot \text{m}^{-3}$ 上升至(391.2 ± 2.6) mV 和(139.1 ± 1.2) $\text{mW} \cdot \text{m}^{-3}$,对 ANAMMOX-MFC 产电性能有一定促进作用;当 COD 浓度升高至 $373 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,产电性能开始出现下降,最大输出电压和最大输出功率密度降低到(325.8 ± 3.5) mV 和(79.7 ± 1.6) $\text{mW} \cdot \text{m}^{-3}$,并且输出电压比较难稳定,导致极化曲线拟合程度降低;当 COD 浓度继续升高至 $613 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,最大输出电压和最大输出功率密度降至(248.3 ± 3.1) mV 和(46.8 ± 0.9) $\text{mW} \cdot \text{m}^{-3}$,极化曲线拟合程度继续降低.说明当 COD 浓度过高时,会对 ANAMMOX-MFC 阳极生物反应产生影响,导致产电性能受到抑制且不稳定.

2.2 苯酚对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能的影响

2.2.1 苯酚对 ANAMMOX-MFC 脱氮性能的影响

设定苯酚浓度梯度为 50、100、200、300、400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,实验测得实际 COD 值分别为 120、240、440、680、920 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.苯酚对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能的影响如图 6 所示.当 COD 浓度较低时($120 \sim 240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),对 ANAMMOX-MFC 脱氮性能影响较低,TN 去除率为 71%, NH_4^+ -N 去除率为

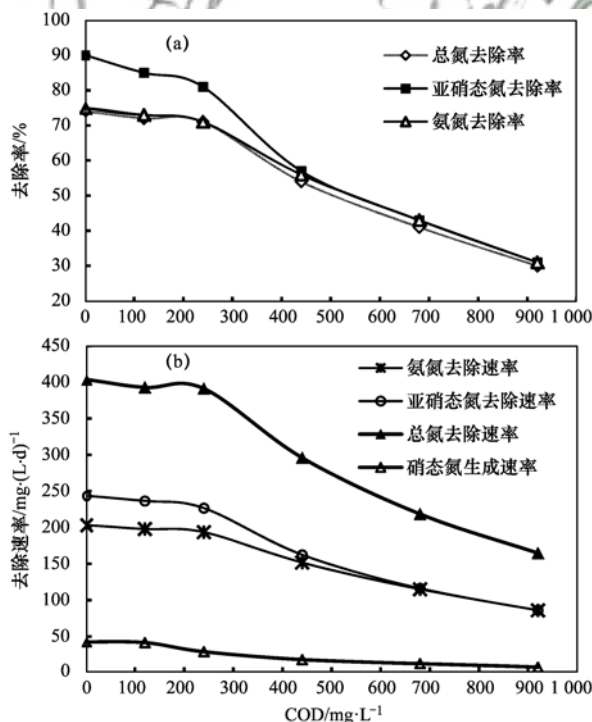
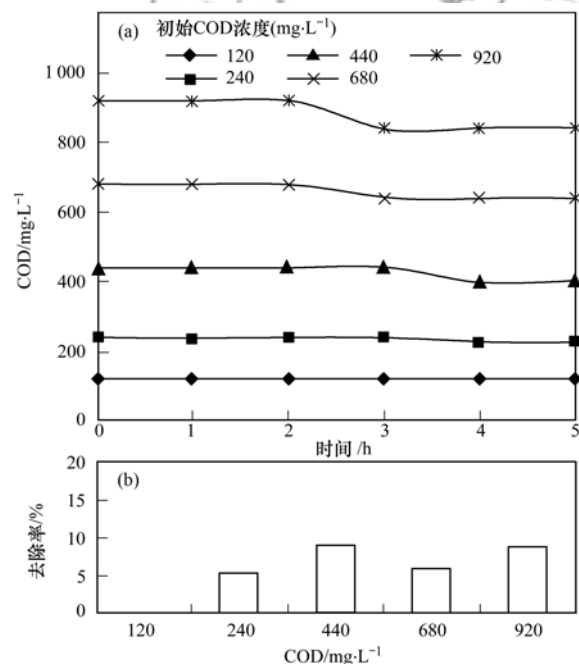


图 6 不同进水苯酚浓度对 ANAMMOX-MFC 的脱氮性能的影响

Fig. 6 Effect of phenol concentration on the denitrification performance of ANAMMOX-MFC

71%, NO_2^- -N 去除率为 81%; NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 TN 的去除速率为(193.6 ± 3.11)、(226.7 ± 2.8) 和(391.1 ± 4.8) $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$;当 COD 浓度上升至 $440 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时脱氮效果开始出现抑制,TN 去除率为 54%, NH_4^+ -N 去除率为 56%, NO_2^- -N 去除率为 57%; NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 TN 的去除速率为(151.8 ± 2.3)、(162.5 ± 2.5) 和(296.0 ± 4.5) $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$;当 COD 浓度继续升高至 $920 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,抑制作用逐渐增强, NH_4^+ -N 去除率仅为 31%, NO_2^- -N 去除率仅为 31%; NH_4^+ -N、 NO_2^- -N 和 TN 的去除速率仅为(86.2 ± 1.6)、(86.3 ± 1.6) 和(164.7 ± 3.1) $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{d})^{-1}$.

设定苯酚浓度梯度为 50、100、200、300、400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,实验测得实际 COD 值分别为 120、240、440、680、920 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.不同苯酚浓度下 COD 浓度变化如图 7 所示.整个过程中 COD 浓度变化不大,说明苯酚不是 ANAMMOX-MFC 的反应基质.



(a) 不同苯酚浓度下周期内 COD 浓度变化;
(b) 不同苯酚浓度下周期内 COD 去除率变化

图 7 不同苯酚浓度下 COD 变化

Fig. 7 Change in COD under different concentrations of phenol

2.2.2 苯酚对 ANAMMOX-MFC 产电性能的影响

外电阻恒定为 1000Ω 时,设定苯酚浓度梯度为 50、100、200、300、400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,实验测得实际 COD 值分别为 120、240、440、680、920 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.不同浓度 COD 对 ANAMMOX-MFC 产电性能的影响如图 8 所示.当 COD 浓度较低时($120 \sim 240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),ANAMMOX-MFC 的最大输出电压和最大

输出功率密度变化不大；当进水 COD 浓度为 $440\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，ANAMMOX-MFC 的最大输出电压和最大输出功率密度开始出现下降；最终当进水 COD 浓度升高至 $920\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，ANAMMOX-MFC 的最大输出电压和最大输出功率密度降低至 $(100.7 \pm 2.0)\text{ mV}$ 和 $(22.5 \pm 0.5)\text{ mW}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

在每个 COD 条件下达到稳定后，通过改变电阻箱阻值 ($9\ 000 \sim 20\ \Omega$)，稳定状态下对不同 COD 条件下极化曲线的拟合如图 9 所示。表观内阻缓慢升高的原因有待进一步研究， R 值较低，原因在于 ANAMMOX-MFC 阳极反应受到抑制，破坏了原有的稳定状态。当 COD 浓度较低时 ($120 \sim 240\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)，对 ANAMMOX-MFC 产电性能影响较小；当 COD 浓度升高至 $440\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时，产电性能开始出现下降，当 COD 浓

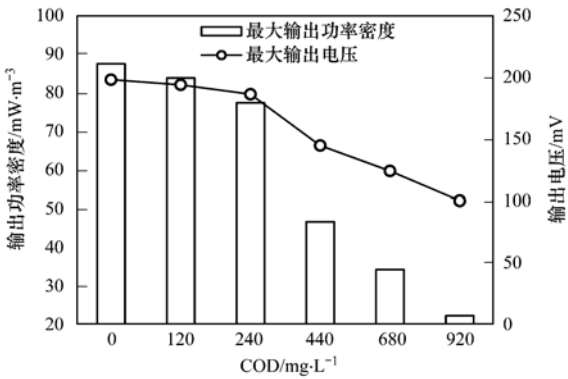


图 8 不同进水苯酚浓度对 ANAMMOX-MFC 的产电性能的影响

Fig. 8 Effect of phenol concentration on the electrogenesis performance of ANAMMOX-MFC

度继续升高至 $920\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，产电性能受到抑制，最大输出电压为 $(200.0 \pm 2.2)\text{ mV}$ ，最大输出功

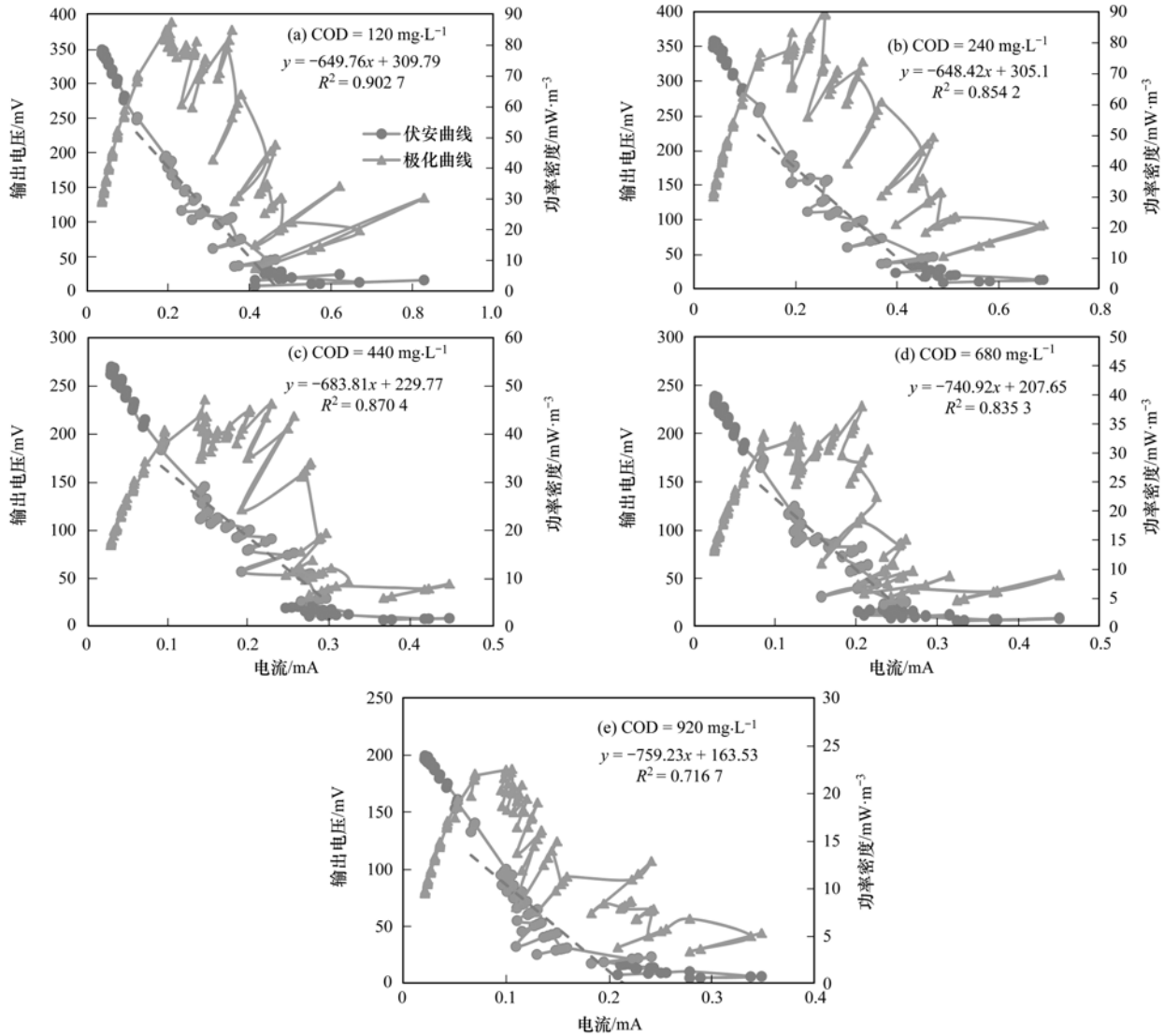


图 9 不同苯酚条件下极化曲线分析

Fig. 9 Polarization curve analysis under different phenol conditions

率密度为 $(22.6 \pm 0.6) \text{ mW} \cdot \text{m}^{-3}$ ，且输出电压很难长时间处于稳定状态。

3 讨论

本研究结果表明：当采用葡萄糖来调控废水中 COD 浓度时，当 COD 浓度达到 $373 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时会抑制厌氧氨氧化反应，本研究结果与前人^[19, 20]研究

的抑制浓度有所差异，COD 抑制浓度有所不同可能是接种污泥和反应器有所差异引起的，本实验采用 ANAMMOX-MFC 反应器，该反应器能同时脱氮产电。当苯酚浓度超过 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时会抑制厌氧氨氧化反应，苯酚抑制浓度与前人研究有所不同^[21, 22]可能是反应器有所差异引起的。表 2 给出了影响厌氧氨氧化反应的相关研究。

表 2 影响厌氧氨氧化反应的相关研究结果

Table 2 Related research results affecting ANAMMOX reaction

反应器	接种污泥	调控 COD 浓度的物质	抑制厌氧氨氧化反应的 COD 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	抑制厌氧氨氧化反应的苯酚浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	文献
UASB	厌氧污泥和厌氧氨氧化污泥	全脂牛奶	300	/	[19]
ASBR	好氧硝化污泥	葡萄糖	200	/	[20]
SBR	厌氧氨氧化污泥	/	/	300	[21]
血清瓶	厌氧氨氧化污泥	/	/	600	[22]
ANAMMOX-MFC	厌氧氨氧化污泥	葡萄糖	373	/	本研究
		苯酚	440	200	

An 等^[23]在将实际废水进入 MFC 之后，发现随着最大功率密度的降低，而相应地内阻增加。Li 等^[24]将厌氧氨氧化和脱氮微生物燃料电池耦合，在稳定运行时产生连续的电流密度为 $165 \text{ mA} \cdot \text{m}^{-2}$ 。Lee 等^[8]使用 MFC/Anammox 反应器处理垃圾渗滤液，产生的最大功率密度达 $12 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

4 结论

(1) 当葡萄糖浓度较低时 ($125 \sim 240 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)，对 ANAMMOX 菌有促进作用，ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能增强，此时反应器进出水 COD 变化不大；当葡萄糖浓度高于 $300 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，产电性能逐渐下降， $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率和去除速率逐渐下降，而 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 去除率和去除速率基本保持不变，此时出水 COD 浓度也出现降低，说明厌氧氨氧化菌活性受到抑制，反硝化菌活性开始增强。

(2) 当用葡萄糖来调控废水中 COD 浓度时，随着 COD 浓度的增加极化曲线拟合程度降低；COD 浓度变化对电池内阻影响较小，对产电性能影响较大。

(3) 当苯酚浓度较低时 ($50 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)，对 ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能影响较低；当苯酚浓度超过 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，ANAMMOX-MFC 脱氮产电性能逐渐被抑制。

(4) 当用苯酚来调控废水中 COD 浓度时，整个过程进出水 COD 浓度变化不大，极化曲线拟合程度较低，表现内阻有缓慢升高。

参考文献：

[1] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, *et al.* Microbial fuel cells: methodology and technology[J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(17): 5181-5192.

[2] Pant D, Van Bogaert G, 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.

[3] Rabaey K, Lissens G, Verstraete W. Microbial fuel cells: performances and perspectives[A]. In: Lens P N, Westermann P, Haberbauer M, *et al.* (Eds.). Biofuels for fuel cells: Biomass Fermentation Towards Usage in Fuel Cells. London: IWA Publishing, 2011. 377-399.

[4] Wang B, Han J I. A single chamber stackable microbial fuel cell with air cathode[J]. Biotechnology Letters, 2009, **31**(3): 387-393.

[5] Pandey P, Shinde V N, Deopurkar R L, *et al.* Recent advances in the use of different substrates in microbial fuel cells toward wastewater treatment and simultaneous energy recovery [J]. Applied Energy, 2016, **168**: 706-723.

[6] Gude V G. Wastewater treatment in microbial fuel cells-an overview[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, **122**: 287-307.

[7] Zhang Q G, Hu J J, Lee D J. Microbial fuel cells as pollutant treatment units: research updates[J]. Bioresource Technology, 2016, **217**: 121-128.

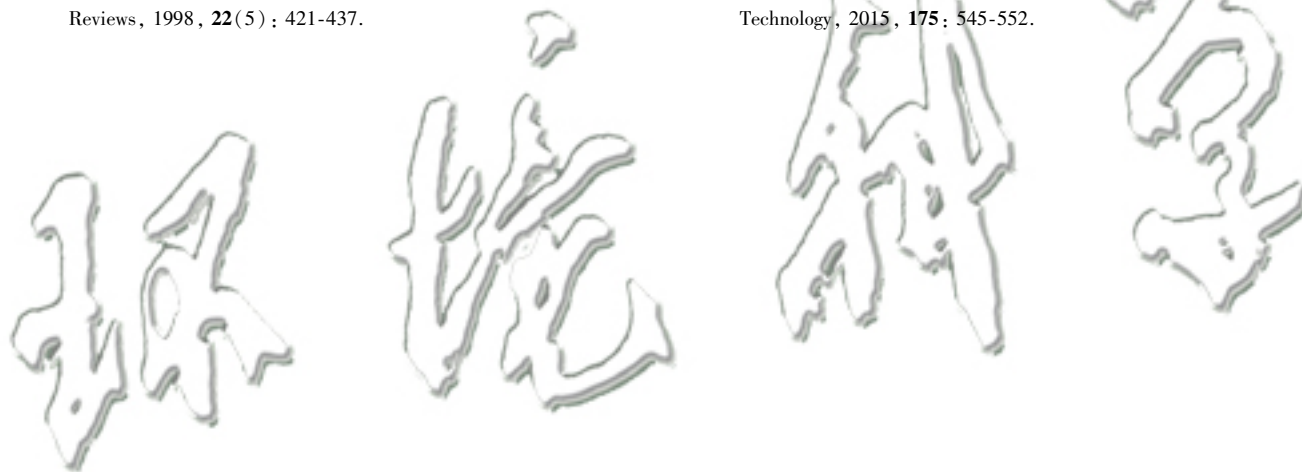
[8] Lee Y, Martin L, Grasel P, *et al.* Power generation and nitrogen removal of landfill leachate using microbial fuel cell technology [J]. Environmental Technology, 2013, **34**(19): 2727-2736.

[9] Yan H J, Regan J M. Enhanced nitrogen removal in single-chamber microbial fuel cells with increased gas diffusion areas [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2013, **110**(3): 785-791.

[10] He Z, Kan J J, Wang Y B, *et al.* Electricity production coupled to ammonium in a microbial fuel cell[J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(9): 3391-3397.

[11] 谢作甫. MFC 脱氮产电性能及电导率研究[D]. 杭州: 浙江

- 大学, 2014.
- [12] 张吉强. 微生物燃料电池同步脱氮产电性能及机理研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [13] Virdis B, Rabaey K, Yuan Z G, *et al.* Microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal[J]. *Water Research*, 2008, **42**(12): 3013-3024.
- [14] Virdis B, Rabaey K, Rozendal R A, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and carbon removal in microbial fuel cells[J]. *Water Research*, 2010, **44**(9): 2970-2980.
- [15] Sotres A, Cerrillo M, Viñas M, *et al.* Nitrogen removal in a two-chambered microbial fuel cell: establishment of a nitrifying-denitrifying microbial community on an intermittent aerated cathode[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, **284**: 905-916.
- [16] Strous M, Fuerst J A, Kramer E H M, *et al.* Missing lithotroph identified as new planctomycete [J]. *Nature*, 1999, **400** (6743): 446-449.
- [17] Tang C J, Zheng P, Wang C H, *et al.* Performance of high-loaded ANAMMOX UASB reactors containing granular sludge [J]. *Water Research*, 2011, **45**(1): 135-144.
- [18] Jetten M S M, Strous M, van de Pas-Schoonen K T, *et al.* The anaerobic oxidation of ammonium [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1998, **22**(5): 421-437.
- [19] Chamchoi N, Nitisoravut S, Schmidt J E. Inactivation of ANAMMOX communities under concurrent operation of anaerobic ammonium oxidation (ANAMMOX) and denitrification [J]. *Bioresource Technology*, 2008, **99**(9): 3331-3336.
- [20] 郭丕健. 厌氧氨氧化启动及 COD 对其影响[D]. 青岛: 青岛大学, 2014.
- [21] Pereira A D, Leal C D, Dias M F, *et al.* Effect of phenol on the nitrogen removal performance and microbial community structure and composition of an anammox reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **166**: 103-111.
- [22] 杨朋兵, 李祥, 黄勇, 等. 苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3771-3777.
- Yang P B, Li X, Huang Y, *et al.* Short or long term influence of phenol on nitrogen removal efficiency of ANAMMOX sludge[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3771-3777.
- [23] An B M, Heo Y, Maitlo H A, *et al.* Scaled-up dual anode/cathode microbial fuel cell stack for actual ethanolamine wastewater treatment[J]. *Bioresource Technology*, 2016, **210**: 68-73.
- [24] Li C, Ren H Q, Xu M, *et al.* Study on anaerobic ammonium oxidation process coupled with denitrification microbial fuel cells (MFCs) and its microbial community analysis[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **175**: 545-552.



CONTENTS

An Assessment of PM _{2.5} -Related Health Risks and Associated Economic Losses in Chinese Cities	LI Hui-juan, ZHOU De-qun, WEI Yong-jie (3467)
Impact of the Electric Power Industry on Air Quality in Winter of Urban Agglomerations Along the Middle Reaches of the Yangtze River	SUN Xiao-wei, GUO Xiu-rui, CHENG Shui-yuan (3476)
Capacity Simulation Method Based on Regional Transfer Matrix and PM _{2.5} Concentration Target Constraint	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, YANG Liu-lin, <i>et al.</i> (3485)
Analysis of Chemical Composition of the Fine Particulate Matter in Summer in Tianjin City via a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)	WEN Jie, SHI Xu-rong, TIAN Ying-ze, <i>et al.</i> (3492)
Pollution Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	PENG Xiao-le, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3502)
Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Carbonaceous Aerosols in the Cities of Hangzhou and Ningbo	XU Hong-hui, XU Jing-sha, HE Jun, <i>et al.</i> (3511)
Emission Characteristics and Chemical Components of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste	WANG Yan, HAO Wei-wei, CHENG Ke, <i>et al.</i> (3518)
Size-resolved Emission Factors of Carbonaceous Particles from Domestic Coal Combustion in China	YANG Guo-wei, KONG Shao-fei, ZHENG Shu-ni, <i>et al.</i> (3524)
Characteristics and Source Analysis of Non-methane Hydrocarbons (NMHC) in Dalian	Ji De-yu (3535)
Scenario Analyses of the Volatile Organic Compound Emission Allowance and Allocation in the 13th Five-Year Period	ZHANG Jia-ni, CHEN Xiao-fang, LIANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (3544)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Packaging and Printing Industry in Zhejiang Province	WANG Jia-de, LÜ Jian-zhang, LI Wen-juan, <i>et al.</i> (3552)
Emission Characteristics and Characteristic Substance Identification of Volatile Odorous Organic Compounds in Industries Using Organic Solvents	ZHAI Zeng-xiu, MENG Jie, WANG Gen, <i>et al.</i> (3557)
Analysis of Aerosol Optical Depth Variation Characteristics for 10 years in Urumqi Based on MODIS_C006	HU Jun, KANG Yan-ming, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (3563)
Motor Vehicle Pollution Control Scenarios of Beijing Subsidiary Administrative Center Based on Road Traffic Flow	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (3571)
Air Pollution Characteristics and Jogger Inhalation Exposure in Typical Running Area of Beijing	TAO Shuang-cheng, GAO Shuo-han, XIONG Xin-zhu, <i>et al.</i> (3580)
Temporal and Spatial Changes in Sediment Nutrients and Heavy Metals of the Danjiangkou Reservoir Before and After Water Division of the Mid-route Project	LI Bing, WANG Ya, ZHENG Zhao, <i>et al.</i> (3591)
Fluorescence Characteristics and Environmental Significance of Organic Matter in the Northern Part of Lake Taihu in Spring and Winter	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua (3601)
Contamination Levels and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Aquatic Environment of Key Areas of Taihu Lake	ZHU Bing-qing, GAO Zhan-qi, HU Guan-jiu, <i>et al.</i> (3614)
Nitrogen and Phosphorous Adsorption Characteristics of Suspended Solids Input into a Drinking Water Reservoir via Typhoon Heavy Rainfall	YAO Ling-ai, ZHAO Xue-min, MA Qian-li, <i>et al.</i> (3622)
Geochemical Characteristics and Genesis Analyses of High-arsenic Groundwater in the Pearl River Delta	ZHANG Chang-yan, HE Jiang-tao, ZHANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3631)
Effects of Organic Pollutants on the Bacterioplankton Community in Hangzhou Bay	XUAN Li-xia, DAI Wen-fang, YU Wei-na, <i>et al.</i> (3640)
Bacterioplankton Community Structure in the Lancang River Basin and the Analysis of Its Driving Environmental Factors	CHENG Bao, WANG Xue, XU Ya-qian, <i>et al.</i> (3649)
Bacterial Community Structure Characteristics in the Biliuhe Reservoir and Its Key Driving Factors	WANG Huan, ZHAO Wen, XIE Zai-gang, <i>et al.</i> (3660)
Analysis of the Temporal and Spatial Distribution of the Diversity of the Denitrifying Anaerobic Methane-Oxidizing Bacterial Community in the Sediments of the Hunhe River and Its Relationship with Environmental Factors	ZHANG Ya-di, SONG Yong-hui, PENG Jian-feng, <i>et al.</i> (3670)
Influences of Anthropogenic Activities on the Community Structure of N-DAMO Bacteria in the North Canal	LIU Yang, CHEN Yong-juan, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3677)
Impact of Exogenous Nitrogen Import on Sediment Denitrification and N ₂ O Emissions in Ditches Under Different Land Uses	SHE Dong-li, CHEN Xin-yi, GAO Xue-mei, <i>et al.</i> (3689)
Sedimentation Characteristics and Pollutant Content Distribution of Storm Drainage Sediments	SHANG Yu, ZHOU Yi, LIAO An-yi, <i>et al.</i> (3696)
Effect of Cr(VI) on Coagulation Process of Different Coagulants	GAO Qian, ZHANG Da-wei, XU Hui, <i>et al.</i> (3704)
Enhancement of Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A with Peroxymonosulfate Activated by a Co ₃ O ₄ /BiVO ₄ Composite Photoanode	LI Jiang, WANG Yan, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (3713)
Preparation and Characterization of a Calcium Alginate/Biochar Microsphere and Its Adsorption Characteristics and Mechanisms for Pb(II)	YU Chang-jiang, DONG Xin-yu, WANG Miao, <i>et al.</i> (3719)
Behaviors and Mechanisms of CIP and OFL Adsorption by Magnetic Biochar	ZHAO Hua-xuan, LANG Yin-hai (3729)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect New Psychoactive Substances in Wastewater	CHEN Pei-pei, DU Peng, ZHOU Zi-lei, <i>et al.</i> (3736)
Effect of Hybrid Process of Pre-ozonation and CNT Modification on Hollow Fiber Membrane Fouling Control	GUAN Yu-qi, WANG Kai-lun, ZHU Xue-dong, <i>et al.</i> (3744)
Bioregeneration of Anion Exchange Resin Used in Nitrate Removal	YE Ting, ZHANG Guang, WANG Ke, <i>et al.</i> (3753)
Preparation of Prussian Blue@Yeast Catalyst and Its Heterogeneous Fenton Performance	CHEN Si, BAI Bo, WANG Hong-lun, <i>et al.</i> (3759)
Nitrogen Removal of Double-bacteria-layer System via PN/A Process	XU Jing-yi, DU Jun, YANG Yi-feng, <i>et al.</i> (3767)
Inhibitory Effect of Phenol on Phosphorus Removal Performance of an EBPR System	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3775)
Treatment of Old Landfill Leachate via a Denitrification-Partial Nitritation-ANAMMOX Process	WANG Fan, LU Ming-yu, YIN Ji-qiang, <i>et al.</i> (3782)
Denitrification Characteristics and Functional Genes of Denitrifying Bacteria Under Aerobic or Anaerobic Conditions	KANG Peng-liang, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3789)
Characteristic of Benzo[a]pyrene Anaerobic Degradation by Phenol Co-substrate and Microbial Communities from Two Types of Sludge	WU Hai-zhen, HU Xiao-yi, WANG Ming, <i>et al.</i> (3797)
Spectroscopic Characterization of DOM During Hyperthermophilic Composting of Sewage Sludge	LIU Xiao-ming, YU Zhen, ZHOU Pu-xiong, <i>et al.</i> (3807)
Effects of Biochar on Nitrous Oxide Fluxes and the Abundance of Related Functional Genes from Agriculture Soil in the North China Plain	LIU Xing-ren, ZHAO Guang-xin, ZHANG Qing-wen, <i>et al.</i> (3816)
Nitrous Oxide Production in Response to Oxygen in a Solar Greenhouse Vegetable Soil	CHEN Ji-ji, SONG He, CAO Wen-chao, <i>et al.</i> (3826)
Comprehensive Study of Lead Speciation and Its Bioavailability in Soils From a Lead/Zinc Mining Area by Micro X-Ray Fluorescence and X-Ray Absorption Near-Edge Structure	SUN Xiao-yan, LIU Jian, LUO Li-qiang (3835)
Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil and Its Bioaccumulation by Dominant Plants in a Lead-Zinc Mining Area, Nanjing	LI Jun-kai, ZHANG Dan, ZHOU Pei, <i>et al.</i> (3845)
Preparation of Iron-Aluminum Modified Diatomite and Its Immobilization in Cadmium-Polluted Soil	YANG Yu-zhong, ZHU Jian, XIAO Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3854)
Transfer of Soil Organic Carbon to Inorganic Carbon in Arid Oasis Based on Stable Carbon Isotope Technique	LI Yang-mei, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i> (3867)
Environmental Filters Drive the Assembly of the Soil Fungal Community in the <i>Larix principis-rupprechtii</i> Forests of the Guandi Mountains	ZHAO Peng-yu, LI Cui, CHAI Bao-feng (3876)
Effects of Transgenic Maize with <i>cry1Ab</i> and <i>Epsps</i> Genes C0030.3.5 on the Abundance and Community Structure of Soil Nitrogen-fixing Bacteria	WANG Rui, ZHU Ke, LI Gang, <i>et al.</i> (3885)
Effects of Gypsum on CH ₄ Emission and Functional Microbial Communities in Paddy Soil	HU Xiang-yu, XIANG Qiu-jie, MU Zhi-jian (3894)
Effects of Long-term Fertilization on Enzyme Activities in Profile of Paddy Soil Profiles	DU Lin-sen, TANG Mei-ling, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3901)
Effects of Sediment Burial and Exogenous Cd Input on Biomass Allocation and Antioxidative Enzyme Activities of <i>Suaeda salsa</i> in the Coastal Wetland of the Yellow River Delta	SONG Hong-li, WANG Li-zhi, YU Wan-ni, <i>et al.</i> (3910)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wheat Grains Cultivated in Kaifeng Irrigation Area of the Yellow River	KANG Guo-hua, ZHANG Peng-yan, LI Yan-yan, <i>et al.</i> (3917)
Effect of Graphene Oxide on Algal Toxicity of Dibutyl Phthalate	TU Hai-feng, LIU Cheng, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (3927)
Effects of Organic Substrates on ANAMMOX-MFC Denitrification Electrogenesis Performance	ZU Bo, MA Lan, LIU Bo, <i>et al.</i> (3937)
Well-to-Wheels Fossil Energy Consumption and CO ₂ Emissions of Hydrogen Fuel Cell Vehicles in China	LIN Ting, WU Ye, HE Xiao-yi, <i>et al.</i> (3946)
Secondary Organic Aerosols from Aqueous Reaction of Aerosol Water	YE Zhao-lian, QU Zhen-xiu, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (3954)