

## 研究报告

# 微生物燃料电池降解苯酚过程中微电场对阴极微生物多样性的影响

张蓉, 侯彬\*, 刘晓宇, 何盼, 张超, 孙洪鑫, 卢静

中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051

张蓉, 侯彬, 刘晓宇, 何盼, 张超, 孙洪鑫, 卢静. 微生物燃料电池降解苯酚过程中微电场对阴极微生物多样性的影响[J]. 微生物学通报, 2022, 49(2): 463-472

Zhang Rong, Hou Bin, Liu Xiaoyu, He Pan, Zhang Chao, Sun Hongxin, Lu Jing. Effect of micro electric field on cathode microbial diversity in the process of phenol degradation in microbial fuel cell[J]. Microbiology China, 2022, 49(2): 463-472

**摘要:**【背景】苯酚废水作为一种毒性强、难降解的废水而备受关注。目前, 微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)已经广泛用于苯酚废水的降解, MFC的产电效果和苯酚的降解效率与反应器内的微生物群落有着密切关系。【目的】为了提高MFC的产电效果及对有害物质的降解能力, 需要对MFC中苯酚的降解和微生物群落结构进行探索。【方法】分别在开路和闭路情况下, 利用高效液相色谱(HPLC)测试MFC对苯酚的去除率; 利用16S rRNA基因高通量测序技术分析阴极室中微生物群落的变化。【结果】与开路控制相比, 闭路情况下苯酚的去除效率有了显著提升。并且阴极微生物的物种多样性增多, 尽管整体的物种丰度减少了, 但一些产电菌和降解菌的丰度明显增加, 例如门水平上的变形菌门(*Proteobacteria*)、放线菌门(*Actinobacteria*)和纲水平上的 $\gamma$ -变形菌纲(*Gammaproteobacteria*)。【结论】微电场的存在促进了一些功能微生物的生长, 对苯酚的降解和MFC的产电产生了积极影响。

**关键词:** 微生物燃料电池; 苯酚; 微电场; 高效液相色谱; 16S rRNA基因高通量测序技术; 微生物多样性

基金项目: 国家自然科学基金(21806147, 41977141); 山西省自然科学基金(201801D121268)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (21806147, 41977141); Natural Science Foundation of Shanxi Province (201801D121268)

\*Corresponding author: E-mail: houbin566@163.com

Received: 2021-07-06; Accepted: 2021-08-11; Published online: 2021-09-22

## Effect of micro electric field on cathode microbial diversity in the process of phenol degradation in microbial fuel cell

ZHANG Rong, HOU Bin<sup>\*</sup>, LIU Xiaoyu, HE Pan, ZHANG Chao, SUN Hongxin, LU Jing

School of Environmental and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China

**Abstract:** [Background] Phenol wastewater has attracted much attention as a kind of wastewater with strong toxicity and refractory degradation. At present, microbial fuel cell (MFC) have been widely used for the degradation of phenol wastewater. The power generation efficiency of MFC and the degradation efficiency of phenol are closely related to the microbial community in the reactor. [Objective] In order to improve the electricity generation effect of MFC and the degradability of harmful substances, it is necessary to explore the degradation of phenol in MFC and the structure of microbial community. [Methods] In open and closed circuit condition, high-performance liquid chromatography (HPLC) was used to test the removal rate of phenol by MFC; 16S rRNA gene high-throughput sequencing technology was used to analyze changes in the microbial community in the cathode compartment. [Results] The results showed that compared with open circuit control, the removal effect of phenol in closed circuit condition has been significantly improved. In addition, the species diversity of cathodic microorganisms has increased. Although the overall species abundance has decreased, the abundance of some electricity-producing and degrading bacteria has increased significantly, such as, *Proteobacteria* and *Actinobacteria* at the phylum level and *Gammaproteobacteria* at the class level. [Conclusion] The existence of the micro electric field promotes the growth of some functional microorganisms, which has a positive impact on the degradation of phenol and the power generation of MFC.

**Keywords:** microbial fuel cell; phenol; micro electric field; HPLC; 16S rRNA gene high-throughput sequencing technology; microbial diversity

截至目前, 科学家们对有毒有机废水进行了广泛的研究, 尤其是对毒性强、难降解的含酚废水<sup>[1]</sup>。酚类物质主要来源于炼油厂、制药厂和化工厂<sup>[2]</sup>。苯酚作为酚类物质的代表, 在工业废水排放的过程中进入水生生态系统, 这对当地的生物群落产生了不利影响, 包括藻类、原生动物、无脊椎动物和脊椎动物等。除此之外, 苯酚还可以通过皮肤和黏膜进入人体内部, 引起一系列皮肤病、神经系统疾病和内脏疾病等<sup>[3]</sup>。在水质标准方面, 苯酚已经被列入有毒化学品清单, 世界卫生组织(World Health Organization, WHO)表明饮用水中允许的最大苯酚含量为 1 mg/L<sup>[4]</sup>。

有关苯酚废水的处理方法包括物理法、化学法和生物法, 但在众多的方法中, 生物降解是最有利于生态系统的一种方法, 可以将一些有害的物质分解生成无害的产物排放<sup>[4]</sup>。生物法通常包括微生物法和酶法, 其中微生物法是去除有机化合物、降解有毒废水的有效策略, 苯酚可以被酵母、真菌和细菌等多种微生物降解<sup>[5]</sup>。好氧和厌氧微生物都可以将苯酚作为碳源供其自身生长代谢, 利用微生物降解苯酚具有成本低、适应性强、环境友好等优点<sup>[6]</sup>。

微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)是近年来发展起来的一种废水处理技术, 可用于酚类废水的生物修复, 其利用微生物作为生

物催化剂, 将化学能转化为其他形式, 如电、氢和甲烷<sup>[7]</sup>。以往的研究表明, 从人工模拟废水到实际废水, 多种有机基质都可以在 MFC 中降解<sup>[8-9]</sup>。在通常的反硝化、铁和硫酸盐还原条件下, 电子受体的耗尽可能会阻止苯酚的完全降解, 而在 MFC 中, 阳极微生物消耗底物释放的电子通过外电路转移到阴极, 电子最终被终端电子受体消耗, 终端电子受体(如空气中的氧气)不会耗尽; 与开路对照相比, MFC 对苯酚的降解率提高了约 15%<sup>[10]</sup>。Hassan 等<sup>[11]</sup>表明在 MFC 中苯酚的降解与反应器内的微生物群落密不可分, 因此对微生物群落结构的研究相当重要。

先前有许多有关苯酚在 MFC 降解过程中阳极微生物群落的研究, 但对好氧条件下阴极微生物群落的报道较少, 因此, 本研究在开路(无电场)和闭路(有电场)条件下对苯酚的降解以及阴极微生物群落的变化进行研究分析, 探究微电场对苯酚的降解以及对阴极微生物群落结构的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 MFC 反应器构型

实验采用的是一种环形电场的双室 MFC, 其反应器由一个圆柱形有机玻璃组成, 该反应器分为阴极和阳极, 阴极位于中间, 有效容积为 830 mL, 阳极为环形结构围绕在阴极外侧, 有效容积为 760 mL。2 个反应室由 1 K 超滤膜分离开来, 其中阳极为厌氧环境, 阴极为好氧环境。阳极电极由 42 cm×6 cm 的碳毡组成, 阴极电极由 10 cm×10 cm 的碳毡卷成碳棒, 两电极之间由钛丝连接形成环形电场, 固定外部电阻为 1 000 Ω。本实验使用了 3 套(6 个)相同的装置在不同的条件下运行, 其中 3 个为开路(无电场)、3 个为闭路(有电场), 并且采用连续流的模式运行, 苯酚废水先在阳极室进行厌氧反

应, 然后再进入阴极室进行好氧反应。

### 1.2 MFC 的接种与启动

实验使用的活性污泥采集自山西省太原市北郊污水处理厂的厌氧池。接种体为好氧污泥和厌氧污泥的混合物, 其体积比为 1:1。将悬浮固体浓度为 2 000 mg/L 的预处理活性污泥转移到 MFC 的阳极室和阴极室中进行培养。加入一些营养液为微生物的生长提供舒适的环境, 这些营养液主要包括磷酸盐缓冲溶液(phosphate buffered saline, PBS)、矿物质溶液和维生素溶液<sup>[12]</sup>。实验采用的驯化方式为梯度驯化, 微生物的驯化分为 2 个阶段: 第一阶段, 以化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)浓度为 450 mg/L 的葡萄糖为碳源, 促进初始微生物生长; 第二阶段, 采用苯酚逐步取代葡萄糖, 使苯酚和葡萄糖作为微生物生长的共同碳源, 使 2 种物质叠加的 COD 浓度保持在 450 mg/L, 并且最终达到固定的浓度(苯酚 300 mg/L COD, 葡萄糖 150 mg/L COD), 有研究表明共底物更有助于难降解物质的去除<sup>[13-15]</sup>。在驯化期间以电压低于 50 mV 为标志, 同时更换阴阳极的营养物质, 直到电压升高并达到稳定值, 驯化结束。

### 1.3 主要试剂和仪器

将 125.9 mg 苯酚溶解在 1 000 mL 蒸馏水中制备模拟苯酚废水(300 mg/L COD), 加入适量葡萄糖(150 mg/L COD)作为微生物生长的共同碳源。苯酚和葡萄糖, 阿拉丁试剂(上海)有限公司。

NucleoSpin 土壤 DNA 提取试剂盒, Macherey-Nagel 公司; PCR 聚合酶, 东洋纺(上海)生物科技有限公司。PCR 仪, Applied Biosystems 公司; 高效液相色谱仪(HPLC), Thermo Fisher Scientific 公司。

### 1.4 高效液相色谱法

采用高效液相色谱(HPLC)检测 MFC 中苯酚的浓度, 色谱柱的型号为 Waters Symmetry

C18 (3.91 mm×50 mm), 紫外检测器工作波长为 270 nm, 流动相甲醇:水的体积比为 80:20, 流速为 1 mL/min, 此条件下苯酚的保留时间为 3.4 min。进样量为 20  $\mu$ L, 进样前用 0.22  $\mu$ m 滤膜过滤。

## 1.5 微生物的提取与分析

### 1.5.1 样品的采集

分别对每个反应器阴极反应室内的污泥混合液进行取样, 每个反应器中取 3 个平行样。具体操作步骤为: 用玻璃棒将阴极反应室内的泥水混合, 取 10 mL 泥水混合物放入离心管中, 14 800×g 离心 10 min, 弃掉上清液后在 -80  $^{\circ}$ C 的条件下保存。

### 1.5.2 DNA 提取与分析

采用 NucleoSpin 土壤 DNA 提取试剂盒提取样品的 DNA。PCR 反应采用细菌 16S rRNA 基因 V3-V4 区域引物 338F (5'-ACTCCTACGG GAGGCAGCA-3')和 806R (5'-GGACTACHVG GGTWCTAAT-3')。将获得的序列(相似性为 97%)聚类为操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU), 并选取每个 OTU 的代表序列进行分类。 $\alpha$  指数采用 Mothur V1.30 软件分析<sup>[16]</sup>。生物信息分析流程参考文献<sup>[17]</sup>。为了更简约直观地看出有无电场这 2 种情况下样品间的差异, 将每种情况下 3 个样品的结果进行合并分析讨论。

## 2 结果与讨论

### 2.1 MFC 的产电

如图 1 所示, MFC 的启动分为 2 个阶段。前 4 个循环为第一阶段, 以葡萄糖为唯一碳源, 电压逐渐升高, 达到 0.48 V 左右, 表明接种了营养物和活性污泥混合物的 MFC 正式启动<sup>[18]</sup>。后 2 个循环为第二阶段, 苯酚和葡萄糖作为微

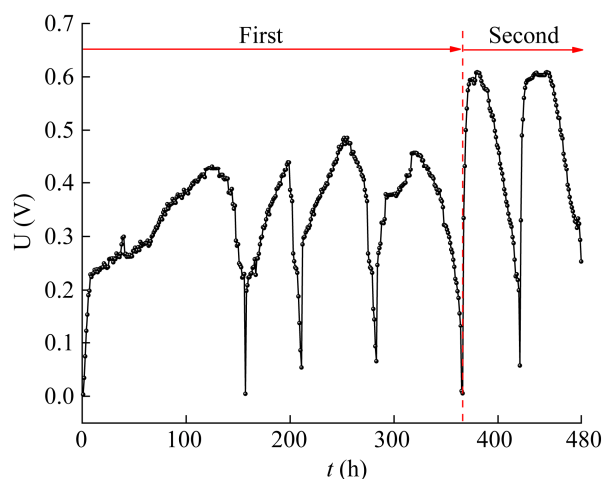


图 1 MFC 在梯度驯化期间产生电压的变化曲线图

Figure 1 The change curve of the voltage generated by the MFC during the gradient acclimation.

生物生长的共同碳源, 在此阶段, 最大电压值从 0.48 V 上升到 0.60 V, 电压上升速度明显提高。这表明功能微生物已经在一定程度上适应了苯酚作为营养物质供其生长繁殖, 苯酚作为 MFC 的底物可以提供电子, 并且共底物能比单有葡萄糖产生更多电子<sup>[13]</sup>。这种现象可能是由于梯度驯化增加了混合废水的微生物多样性, 功能微生物更好地利用苯酚废水作为碳源产生电子, 从而增加了电压的产生<sup>[19-20]</sup>。

### 2.2 微电场对苯酚去除率的影响

苯酚在 MFC 反应器的阳极和阴极室内分别经过 36 h 反应后几乎完全降解, 因此在水力停留时间为 36 h 的情况下分别对 2 个反应器内的废水取样测试苯酚的浓度。测试结果如图 2 所示, 经过 36 h 的反应后, 在阳极室内, 开路条件下苯酚的去除率可以达到 35.8%, 而闭路条件较开路条件相比高 8%。在整体的出水中, 微电场存在时, 在 30 h 取到的样品中苯酚的去除率就接近 100%, 而此时开路条件下

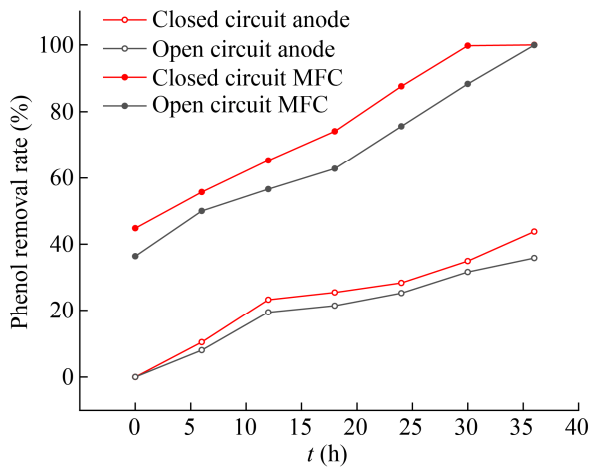


图 2 开路闭路条件下 MFC 中阳极室和整体对苯酚去除率的对比

Figure 2 Comparison of phenol removal rate between anode chamber and overall MFC in the open and closed circuit condition.

苯酚的去除率仅有 88.3%。结果表明,与开路控制相比,微电场的存在可以提高苯酚的去除效果。然而在 MFC 中苯酚的代谢途径与功能微生物群落有很大的关系,微电场可以对微生物产生一种刺激,为微生物呼吸过程提供能量并

促进污染物降解,从而增强苯酚的代谢<sup>[21-22]</sup>。

### 2.3 开路闭路条件下阴极微生物群落的稀释曲线和 OTU 聚类分析

为了揭示微电场对 MFC 阴极微生物群落的影响,分别在开路和闭路条件下对阴极溶液中的泥水混合物进行取样分析。从图 3A 可以看出,开路和闭路条件下阴极样品的稀释性曲线开始都呈一个上升趋势并逐渐趋于平稳,表明达到了测试目的。

OTU 是通过相似度为 97.0%的 reads 进行聚类得到的。如图 3B 所示,开路和闭路条件下样品的 OTU 数分别为 400 和 406,其中 382 种是重合的,这表明 2 个样品中的微生物种类较相似。此外,还检测到开路样品中独有的 OTU 数为 18,闭路样品中独有的 OTU 数为 24,微电场的存在增加或者改变了部分微生物的种类。这表明微电场刺激了阴极微生物的生长繁殖,可能使阴极室中微生物的物种增多或者产生一些嗜电菌和苯酚降解菌,为加速苯酚的降解提供了更有利的条件。

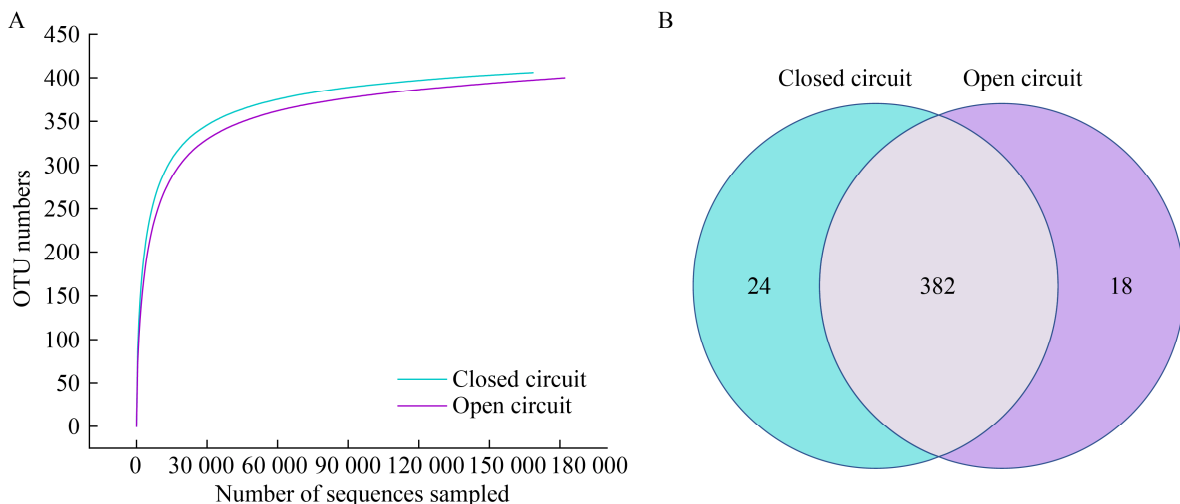


图 3 开路和闭路条件下阴极样品的稀释曲线图(A)和 OTU 分布的韦恩图(B)

Figure 3 Rarefaction curve (A) and Venn diagram of OTU distribution (B) of cathode samples in the open and closed circuit condition.

## 2.4 开路和闭路条件下阴极微生物的 $\alpha$ 多样性分析

由表 1 可见, 开路和闭路条件下阴极样品的覆盖指数均为 99.98%, 表明测序数据足以捕捉 2 个样品中微生物群落的实际多样性。 $\alpha$  多样性分析反映的是微生物的物种丰度及物种多样性, 衡量指标包括 Chao1、ACE、Simpson 和 Shannon 指数。其中前 2 个指标可以反映物种的丰度, 后 2 个指标可以反映物种的多样性<sup>[23]</sup>。与开路阴极样品中的 ACE 指数和 Chao1 指数相比, 闭路条件下这 2 个指数略有下降, 表明无电场情况下阴极的微生物物种丰度高于有电场的阴极。Simpson 和 Shannon 指数表明, 有电场阴极室中的微生物多样性比无电场阴极室中的微生物多样性更丰富。结果表明, 微电场的存在减少了 MFC 阴极微生物的物种丰度, 微电场对一些菌有一定的选择作用, 因此一些菌在微电场的作用下无法大量存活, 整体丰度减少, 这与之前的研究结果一致<sup>[24]</sup>。然而在微电场存在的条件下微生物的物种多样性却略微增高, 这可能是由于微电场的存在会刺激一些嗜电菌生长, 因此种类增多。

## 2.5 开路和闭路条件下阴极微生物的群落组成和相对丰度

### 2.5.1 门水平上分析对比开路和闭路条件下阴极微生物群落

首先从门水平分析, 如图 4 所示, 在 MFC 的阴极室内检测到的优势菌为变形菌门 (*Proteobacteria*)、异常球菌-栖热菌门

(*Deinococcus-Thermus*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)和放线菌门(*Actinobacteria*), 在开路和闭路 2 种条件下这 4 种菌门的总占比高达 80%以上。在开路条件下, 物种相对丰度由高到低依次为 *Proteobacteria*、*Deinococcus-Thermus*、*Bacteroidetes* 和 *Actinobacteria*, 其占比分别为 45%、25%、10%和 9%。与开路控制相比, 闭路情况下 *Proteobacteria* 和 *Actinobacteria* 的丰度分别增加了 9%和 2%; *Bacteroidetes* 的丰度保持不变; *Deinococcus-Thermus* 的丰度显著减少, 在闭路条件下仅占 12%。

*Proteobacteria* 是一种电化学活性细菌 (electrochemically active bacteria, EAB), 在细胞外电子转移过程中起着非常重要的作用, 对 MFC 的产电性能具有促进作用<sup>[25-26]</sup>。结果表明, 微电场的存在导致 *Proteobacteria* 的丰度增加, 使其更好地参与苯酚的降解和 MFC 的产电。*Actinobacteria* 是一种脱氮菌, 外形上属于丝状细菌, 以降解代谢物和有毒化合物而闻名<sup>[27-28]</sup>。有研究报道微电场对丝状细菌的生长有积极影响, 与本研究结果一致, 因此闭路条件下阴极室中检测到的放线菌丰度高于开路条件<sup>[29]</sup>。*Bacteroidetes* 多为革兰氏阴性菌, 在众多水处理工艺中发挥着重要作用, 尤其在 MFC 中较常见, 其可以对大分子物质进行高效分解, 结果表明其生长繁殖不受微电场的影响<sup>[11,30]</sup>。有关 *Deinococcus-Thermus* 产电活性和降解方面的相关报道较少, 在本研究结果中闭路条件下此菌

表 1 开路和闭路条件下阴极微生物的  $\alpha$  多样性指数对比

Table 1 Comparison of alpha diversity index statistics of cathodic microorganisms in the open and closed circuit condition

Sample	ACE index	Chao1 index	Simpson index	Shannon index	Coverage (%)
Open circuit	420.854 3	474.375 0	0.869 8	4.401 2	99.98
Closed circuit	418.921 8	433.000 0	0.921 4	5.185 3	99.98

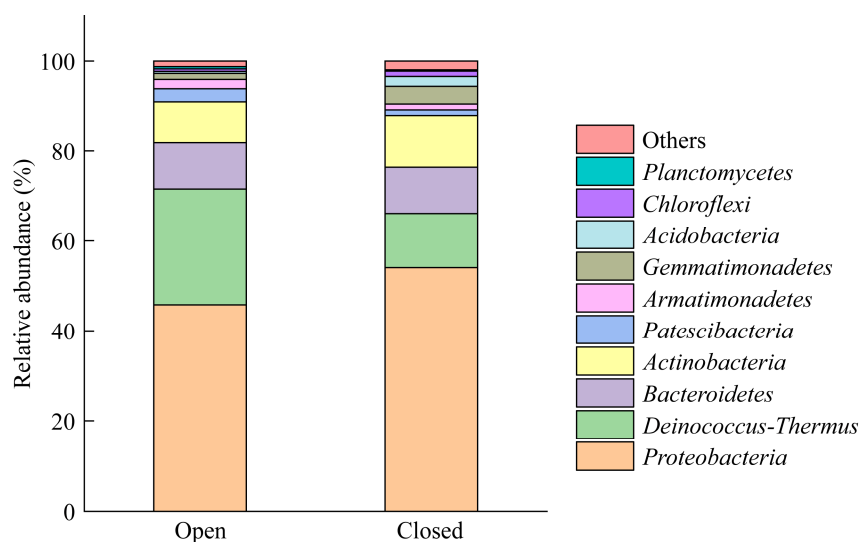


图 4 开路 and 闭路条件下门水平的物种相对丰度对比图

Figure 4 Comparison of relative abundance of species at phylum level in the open and closed circuit condition.

门的丰度较开路条件显著减少, 我们推测微电场在一定程度上抑制了 *Deinococcus-Thermus* 的生长繁殖。

### 2.5.2 纲水平上分析对比开路 and 闭路条件下阴极微生物群落

如图 5 所示, 在纲水平上, 开路条件下阴极优势菌相对丰度的比例由高到低依次为  $\gamma$ -变形菌纲(*Gammaproteobacteria*) 39%、异常球菌纲 (*Deinococci*) 25%、拟杆菌纲 (*Bacteroidia*) 10%、放线菌纲(*Actinobacteria*) 9%和  $\alpha$ -变形菌纲(*Alphaproteobacteria*) 5%。与开路条件相比, 在闭路条件下的阴极样品中发现 *Gammaproteobacteria*、*Actinobacteria* 和 *Alphaproteobacteria* 的丰度均有所增加, 分别为 49%、11%和 6%; *Bacteroidia* 的丰度保持不变; *Deinococci* 的丰度从 25%下降至 12%, 这与在门水平上检测到的趋势一致。

*Gammaproteobacteria* 与 *Alphaproteobacteria* 都属于变形菌门, 微电场的存在刺激了这两类菌的生长, 尤其是 *Gammaproteobacteria*, 此前也有研究表明这种菌在 MFC 的生物阴极微生

物群落中占有较高的丰度, 在 MFC 降解苯酚的过程中扮演着重要角色, 在微电场存在的条件下, 其相对丰度的提高加速了苯酚的降解效率<sup>[31]</sup>。同样 *Alphaproteobacteria* 也能产生将电子传递到电极表面的电子介质, 提高 MFC 的产电效能<sup>[32]</sup>。与门水平相同, *Actinobacteria* 的增加也与微电场的刺激有密不可分的关系, 对苯酚的降解产生积极影响。

### 2.5.3 属水平上分析对比开路 and 闭路条件下阴极微生物群落

如图 6 所示, 从属水平来看, 开路条件下阴极中检测到的优势菌为 *uncultured\_bacterium\_f\_Burkholderiaceae*、特吕珀菌属 (*Truepera*)、*uncultured\_bacterium\_f\_Microbacteriaceae* 和孤岛杆菌属(*Dokdonella*), 其相对丰度分别为 25%、25%、7.9%和 6.4%。在微电场存在的情况下, *uncultured\_bacterium\_f\_Burkholderiaceae* 的丰度有所增加但不明显; *uncultured\_bacterium\_f\_Microbacteriaceae* 和 *Dokdonella* 略微下降; 而 *Truepera* 显著下降。

*uncultured\_bacterium\_f\_Burkholderiaceae* 是

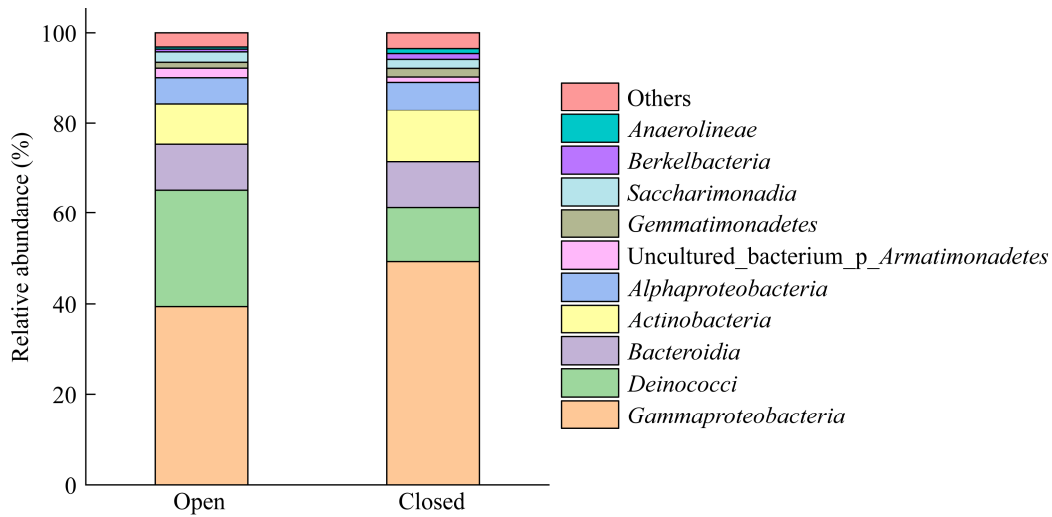


图 5 开路 and 闭路条件下纲水平的物种相对丰度对比图

Figure 5 Comparison of relative abundance of species at class level in the open and closed circuit condition.

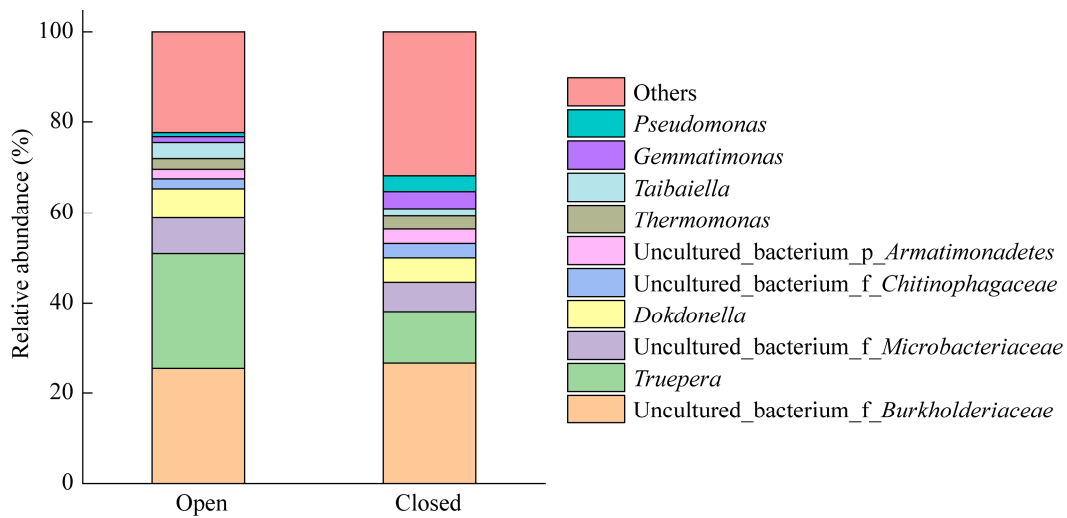


图 6 开路 and 闭路条件下属水平的物种相对丰度对比图

Figure 6 Comparison of relative abundance of species at genus level in the open and closed circuit condition.

一种革兰氏阴性菌，属于变形菌门；uncultured\_bacterium\_f\_Microbacteriaceae 是一种革兰氏阳性菌；Dokdonella 是一种好氧型的革兰氏阴性菌。研究表明，这 3 种优势菌属在微电场作用下的变化并不明显，这说明它们可能对外部环境的适应能力都比较强。有报道

称 Truepera 可以利用多种有机质进行生长繁殖，但其适应环境的能力较弱，在微电场作用下只能存活一部分<sup>[33]</sup>。然而有关这些细菌降解有机物能力和产电能力的研究较少，我们推测这些功能微生物之间复杂的协同作用显著加强了 MFC 中苯酚的降解和产电。目前，在属水平



上检测到的相关细菌的报道很少, 仅仅通过 16S rRNA 基因序列分析不足以说明已鉴定的细菌在 MFC 中的具体作用, 还需要进一步探究<sup>[34]</sup>。

### 3 结论

对环形电场的双室 MFC 同时发电和降解苯酚化合物进行研究, 结果表明 MFC 在驯化期间的最高电压可达到 0.6 V, 微电场的存在加强了苯酚废水的降解; 并且微电场提高了阴极的物种多样性, 对一些优势菌的生长产生刺激; 虽然整体丰度减少, 但一些产电菌和降解菌的丰度增加, 例如, 门水平上的 *Proteobacteria* 和 *Actinobacteria*, 以及纲水平上的 *Alphaproteobacteria*、*Gammaproteobacteria* 和 *Actinobacteria*。微电场的存在使这些优势菌种更好地生长繁殖, 从而促进了 MFC 的产电和苯酚的降解。

### REFERENCES

- [1] Zhou P, Wan JF, Wang XR, Chen J, Gong YG, Xu K. Three-dimensional hierarchical porous carbon cathode derived from waste tea leaves for the electrocatalytic degradation of phenol[J]. *Langmuir*, 2019, 35(40): 12914-12926
- [2] Liang JY, Geng C, Li D, Cui L, Wang X. Preparation and degradation phenol characterization of Ti/SnO<sub>2</sub>-Sb-Mo electrode doped with different contents of molybdenum[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, 31(5): 473-478
- [3] Wang YJ, Song J, Zhao W, He XL, Chen J, Xiao M. *In situ* degradation of phenol and promotion of plant growth in contaminated environments by a single *Pseudomonas aeruginosa* strain[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(1): 354-360
- [4] Pradeep NV, Anupama S, Navya K, Shalini HN, Idris M, Hampannavar US. Biological removal of phenol from wastewaters: a mini review[J]. *Applied Water Science*, 2015, 5(2): 105-112
- [5] Gallego A, Fortunato MS, Foglia J, Rossi S, Gemini V, Gomez L, Gomez CE, Higa LE, Korol SE. Biodegradation and detoxification of phenolic compounds by pure and mixed indigenous cultures in aerobic reactors[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2003, 52(4): 261-267
- [6] Basha K, Rajendran A, Thangavelu V. Recent advances in the biodegradation of phenol: a review[J]. *Asian Journal of Experimental Biology Science*, 2010, 1(2): 219-234
- [7] Guo K, PrévotEAU A, Patil SA, Rabaey K. Engineering electrodes for microbial electrocatalysis[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2015, 33: 149-156
- [8] Sun M, Zhai LF, Li WW, Yu HQ. Harvest and utilization of chemical energy in wastes by microbial fuel cells[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, 45(10): 2847-2870
- [9] Dai Q, Zhang S, Liu H, Huang J, Li L. Sulfide-mediated azo dye degradation and microbial community analysis in a single-chamber air cathode microbial fuel cell[J]. *Bioelectrochemistry*, 2020, 131: 107349
- [10] Luo HP, Liu GL, Zhang RD, Jin S. Phenol degradation in microbial fuel cells[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 147(2/3): 259-264
- [11] Hassan H, Jin B, Donner E, Vasileiadis S, Saint C, Dai S. Microbial community and bioelectrochemical activities in MFC for degrading phenol and producing electricity: microbial consortia could make differences[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 332: 647-657
- [12] Hou B, Sun J, Hu YY. Simultaneous Congo red decolorization and electricity generation in air-cathode single-chamber microbial fuel cell with different microfiltration, ultrafiltration and proton exchange membranes[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(6): 4433-4438
- [13] Luo HZ, Zhang JS, Wang H, Chen R, Shi ZP, Li X, Ding J. Effectively enhancing acetone concentration and acetone/butanol ratio in ABE fermentation by a glucose/acetate co-substrate system incorporating with glucose limitation and *C. acetobutylicum*/*S. cerevisiae* co-culturing[J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2017, 118: 132-142
- [14] Wang SS, Huang LP, Gan LL, Quan X, Li N, Chen GH, Lu L, Xing DF, Yang FL. Combined effects of enrichment procedure and non-fermentable or fermentable co-substrate on performance and bacterial community for pentachlorophenol degradation in microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 120: 120-126
- [15] Beecroft NJ, Zhao F, Varcoe JR, Slade RCT, Thumser AE, Avignone-Rossa C. Dynamic changes in the microbial community composition in microbial fuel cells fed with sucrose[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2012, 93(1): 423-437

- [16] Schloss PD, Westcott SL, Ryabin T, Hall JR, Hartmann M, Hollister EB, Lesniewski RA, Oakley BB, Parks DH, Robinson CJ, et al. Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(23): 7537-7541
- [17] 刘瑶, 侯彬, 陈佳俊, 张蓉, 刘晓宇, 叶蓉. 驯化对生物阴极微生物燃料电池中阴极微生物群落多样性的影响[J]. *微生物学通报*, 2021, 48(2): 373-382  
Liu Y, Hou B, Chen JJ, Zhang R, Liu XY, Ye R. The influence of domestication on the diversity of cathodic microbial community in biocathode microbial fuel cell[J]. *Microbiology China*, 2021, 48(2): 373-382 (in Chinese)
- [18] Zhang L, Li J, Zhu X, Ye DD, Liao Q. Anodic current distribution in a liter-scale microbial fuel cell with electrode arrays[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 223: 623-631
- [19] Li B, Liu XN, Tang C, Zhou J, Wu XY, Xie XX, Wei P, Jia HH, Yong XY. Degradation of phenolic compounds with simultaneous bioelectricity generation in microbial fuel cells: influence of the dynamic shift in anode microbial community[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 291: 121862
- [20] Velasquez-Orta SB, Head IM, Curtis TP, Scott K. Factors affecting current production in microbial fuel cells using different industrial wastewaters[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(8): 5105-5112
- [21] Zeng XF, Collins MA, Borole AP, Pavlostathis SG. The extent of fermentative transformation of phenolic compounds in the bioanode controls exoelectrogenic activity in a microbial electrolysis cell[J]. *Water Research*, 2017, 109: 299-309
- [22] Hoseinzadeh E, Rezaee A, Farzadkia M. Nitrate removal from pharmaceutical wastewater using microbial electrochemical system supplied through low frequency-low voltage alternating electric current[J]. *Bioelectrochemistry*, 2018, 120: 49-56
- [23] Grice EA, Kong HH, Conlan S, Deming CB, Davis J, Young AC, Program NCS, Bouffard GG, Blakesley RW, Murray PR, et al. Topographical and temporal diversity of the human skin microbiome[J]. *Science*, 2009, 324(5931): 1190-1192
- [24] Hou B, Zhang R, Liu XY, Li Y, Liu PX, Lu J. Study of membrane fouling mechanism during the phenol degradation in microbial fuel cell and membrane bioreactor coupling system[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 338: 125504
- [25] Chen JF, Hu YY, Zhang LH, Huang WT, Sun J. Bacterial community shift and improved performance induced by *in situ* preparing dual graphene modified bioelectrode in microbial fuel cell[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 238: 273-280
- [26] Zhang QH, Zhang YY, Li DP. Cometabolic degradation of chloramphenicol via a meta-cleavage pathway in a microbial fuel cell and its microbial community[J]. *Bioresource Technology*, 2017, 229: 104-110
- [27] Zhang GD, Zhao QL, Jiao Y, Wang K, Lee DJ, Ren NQ. Efficient electricity generation from sewage sludge using biocathode microbial fuel cell[J]. *Water Research*, 2012, 46(1): 43-52
- [28] Li N, Zeng W, Miao ZJ, Wang BG, Li ZX, Peng YZ. Enhanced nitrogen removal and *in situ* microbial community in a two-step feed oxidic/anoxic/oxic-membrane bioreactor (O/A/O-MBR) process[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2019, 94(4): 1315-1322
- [29] Liu LF, Liu JD, Gao B, Yang FL. Minute electric field reduced membrane fouling and improved performance of membrane bioreactor[J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 86: 106-112
- [30] Bäckhed F, Ley RE, Sonnenburg JL, Peterson DA, Gordon JI. Host-bacterial mutualism in the human intestine[J]. *Science*, 2005, 307(5717): 1915-1920
- [31] 曹新. 新型滴滤式生物阴极微生物燃料电池的同步污水处理及产能研究[D]. 武汉: 武汉科技大学硕士学位论文, 2012  
Cao X. Performance on a novel biocathode microbial fuel cell with trickling aeration[D]. Wuhan: Master's Thesis of Wuhan University of Science and Technology, 2012 (in Chinese)
- [32] Yu J, Cho S, Kim S, Cho H, Lee T. Comparison of exoelectrogenic bacteria detected using two different methods: U-tube microbial fuel cell and plating method[J]. *Microbes and Environments*, 2012, 27(1): 49-53
- [33] Albuquerque L, Simões C, Nobre MF, Pino NM, Battista JR, Silva MT, Rainey FA, Costa MS. *Truepera radiovictrix* nov. sp. nov., a new radiation resistant species and the proposal of *Trueperaceae* fam. nov.[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2005, 247(2): 161-169
- [34] Hou B, Sun J, Hu YY. Effect of enrichment procedures on performance and microbial diversity of microbial fuel cell for Congo red decolorization and electricity generation[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 90(4): 1563-1572