

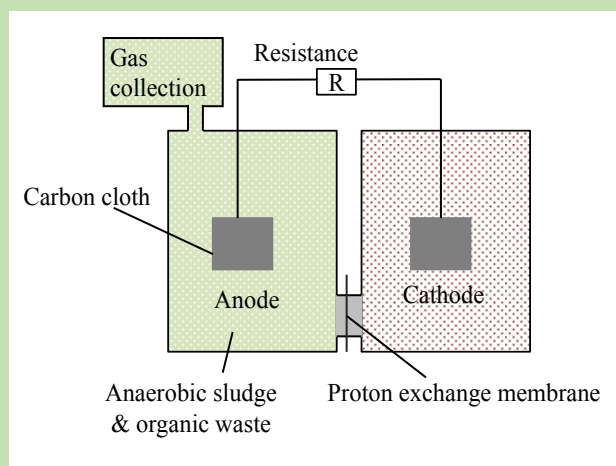
## Electricity production and microbial community change of anaerobic sludge

Jianjun DING<sup>1,2</sup>, Xiaowei PENG<sup>1\*</sup>, Yejun HAN<sup>1\*</sup>

1. State Key Laboratory of Biochemical Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2. College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The production of methane by anaerobic fermentation is the main treatment mode of organic waste such as wastewater, but subsequent processes of carbon dioxide separation, methane storage and transportation have restricted its application. Microbial fuel cells can directly convert the chemical energy of organic waste into electrical energy, and converting the traditional anaerobic fermentation methanogenesis process of organic waste into electricity production process, which is a greener and more environmentally friendly process and has broad application prospects. In present study, a microbial fuel cell (MFC) with good performance was constructed by using an anaerobic



activated sludge as inoculum. High-throughput sequencing was used to analyze the changes of bacteria and archaea before and after MFC operation. The results showed that when the external 1 000  $\Omega$  resistor was used, the output voltage reached 0.62 V, the output power reached 1 247 mW/m<sup>2</sup>, and the internal resistance was 143  $\Omega$ , the Coulomb efficiency was 9.9%, the COD removal rate of the sludge in anode chamber reached 64% after MFC operation. When the sludge was treated by MFC, only the electron was produced instead of traditional CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>, thereby avoiding problems such as CO<sub>2</sub> separation, CH<sub>4</sub> storage and transportation in the methanogenesis process. The composition of archaea was relatively stable, while the bacterial flora changed significantly. Compared with the original anaerobic sludge, the MFC microbial diversity index decreased, while the dominant bacteria group became more obvious. The dominant bacteria *Firmicutes* and *Proteobacteria* were accepted as the common electric producing bacteria. *Klebsiella*, which is directly related to MFC's ability to produce electricity, is enriched and became a dominant genus with a relative abundance of 16.73%. In addition, *Hydrogenophaga* is also abundantly enriched, which may be a novel electrogenic microorganism. This study provided theoretical and technical support for the conversion of organic waste into electrical energy through anaerobic treatment.

**Key words:** anaerobic sludge; methane; microbial fuel cells; electron transport; high-throughput sequencing

收稿: 2018-03-21, 修回: 2018-04-23, 网络发表: 2018-05-10, Received: 2018-03-21, Revised: 2018-04-23, Published online: 2018-05-10  
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 21676279); 国家高技术研究发展计划(863)资助项目(编号: 2014AA021905); 海南省重点研发计划资助项目(编号: ZDYF2016205)  
作者简介: 丁建军(1993-), 女, 山东省聊城市人, 硕士研究生, 生物工程专业, E-mail: sdaudingjianjun@163.com; 通讯联系人, 彭小伟, E-mail: xwpeng@ipe.ac.cn; 韩业君, E-mail: yjhan@ipe.ac.cn.

**引用格式:** 丁建军, 彭小伟, 韩业君. 厌氧活性污泥产电特性及产电过程微生物群落变化. 过程工程学报, 2019, 19(1): 209-215.  
Ding J J, Peng X W, Han Y J. Electricity production and microbial community change of anaerobic sludge (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2019, 19(1): 209-215, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.218152.

# 厌氧活性污泥产电特性及产电过程微生物群落变化

丁建军<sup>1,2</sup>, 彭小伟<sup>1\*</sup>, 韩业君<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院过程工程研究所生化工程国家重点实验室, 北京 100190

2. 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049

**摘要:** 以厌氧活性污泥为接种液构建微生物燃料电池(MFC), 检测了运行第 1 周期前后电池的理化性质及菌群变化情况。结果表明, MFC 启动后产电性能良好, 外接 1000  $\Omega$  电阻时输出电压可达 0.62 V, 功率密度达 1247 mW/m<sup>2</sup>, 内阻为 143  $\Omega$ , 化学需氧量(COD)去除率达 63.6%; 高通量测序结果显示, MFC 菌群与原始接种厌氧活性污泥菌群相比变化较明显, 菌群多样性指数降低, 优势菌门硬壁菌门(*Firmicutes*)和变形菌门(*Proteobacteria*)为产电菌群常见门, 与 MFC 产电能力直接相关的克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)富集并成为优势菌属, 相对丰度达 16.73%。

**关键词:** 厌氧污泥; 微生物燃料电池; 产电; 高通量测序

中图分类号: Q939.99

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2019)01-0209-07

## 1 前言

微生物燃料电池(Microbial Fuel Cell, MFC)可将复杂的生物质化学能直接转化为电能, 且能与有机废水处理相结合, 在消除有机废弃物的同时产生电能, 因此具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。产电微生物能利用多种有机物产生电能, 是影响微生物燃料电池产电效率和稳定性的关键因素, 寻找稳定高效的产电微生物菌群, 对微生物燃料电池产业化应用非常重要<sup>[2]</sup>。活性污泥中含大量电活性的微生物, 在阳极室微生物催化有机物分解, 加入电极会激发电活性微生物代谢过程中产生的电子通过电极导出, 被阴极铁氰化钾接受, 形成电流<sup>[3]</sup>, 已应用于微生物燃料电池<sup>[4]</sup>。相对于纯菌, 混合菌群抗环境冲击能力强, 可利用基质范围广, 同时可以发挥菌群间的协同作用, 增强微生物燃料电池运行的稳定性, 提高系统的产电效率, 对微生物燃料电池的工程应用有较大的优势<sup>[5]</sup>。采用适当的混合菌群接种可获得与用纯菌体接种相当的效果<sup>[6]</sup>。甲烷是微生物燃料电池潜在的底物, 也是能量非常密集的温室气体<sup>[7-9]</sup>, Michael 等<sup>[10]</sup>研究证明甲烷的能量可被产电微生物利用转化为电能。但利用厌氧活性污泥构建的微生物燃料电池产电效率普遍较低, 且缺乏对产电过程中微生物菌群的分析。目前利用厌氧污泥消化有机废弃物生产甲烷是主要的工业应用模式, 但产甲烷过程中伴随产生 CO<sub>2</sub>, 甲烷需与 CO<sub>2</sub> 分离才能高效利用, 增加了成本, 且易污染环境<sup>[11]</sup>。将有机物厌氧发酵产甲烷工艺转化为有机物发酵直接产电工艺, 可节省运输、分离、储藏成本<sup>[12]</sup>, 该过程较温和, 也有利于降低污染, 是更加绿色环保的工艺过程。厌氧活性污泥接种 MFC 以电能为唯一能量输出形式, 避免了沼气发酵过程中沼气需要分离、储存、运输及能量难以利用

的问题。高通量测序技术<sup>[13]</sup>可直接检测 16S rRNA 的基因序列, 是解析复杂环境中微生物群落物种组成和相对丰度的重要工具。本研究以厌氧活性污泥为接种物构建微生物燃料电池, 研究其产电性能, 通过高通量测序检测产电过程中微生物菌群的变化, 探讨厌氧活性污泥从产甲烷到产电变化的微生物学基础, 为厌氧活性污泥在微生物燃料电池中的应用提供技术方法和理论支撑。

## 2 实验

### 2.1 实验材料

厌氧活性污泥取自北京市污水处理厂。

人工配制阳极营养液, 基本组成: 乳酸钠 40 mmol/L, 葡萄糖 2 g/L, NH<sub>4</sub>Cl 1 g/L, NaCl 1 g/L, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 12.8 g/L, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 3 g/L, MgSO<sub>4</sub> 0.24 g/L, CaCl<sub>2</sub> 0.01 g/L, 微量元素溶液 (25% HCl 10 mL, FeCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 1.5 g, ZnCl<sub>2</sub> 70 mg, MnCl<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 100 mg, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 6 mg, CoCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 190 mg, CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O 2 mg, NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O 24 mg, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O 36 mg, 重蒸水 1 L) 10 mL, 维生素溶液(生物素 2 mg, 维生素 B9 2 mg, 维生素 B6 2 mg, 二水盐酸硫胺 10 mg, 核黄素 5 mg, 烟酸 5 mg, D-泛酸钙 5 mg, 维生素 B12 0.1 mg, 对氨基苯甲酸 5 mg, 硫辛酸 5 mg, 重蒸水 1 L) 10 mL, 加入重蒸水至 1 L。

阴极室溶液组成: 50 mmol/L 铁氰化钾<sup>[14]</sup>, 0.1 mol/L NaCl, 50 mmol/L 磷酸缓冲液, 调整 pH 为 7.0。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 MFC 构建

反应装置主体为双室 MFC 反应器, 见图 1。150 mL 阳极室与 150 mL 阴极室由直径 3.5 cm、长 10 cm 的通道连接, 用 Nafion117 膜分隔, 阴阳电极均为

WOS1002 亲水性碳布(台湾碳能科技股份有限公司), 阳极面积  $8\text{ cm}^2$ , 阴极面积  $16\text{ cm}^2$ , 两电极间外部电路连接一个  $1\text{ k}\Omega$  的电阻。阳极室内为厌氧污泥及营养液, 阴极室内为阴极室溶液。另设对照组, 无导线联通阴阳极, 电子不能导出, 用于检测相同培养条件下  $\text{CH}_4$  等气体产生情况。

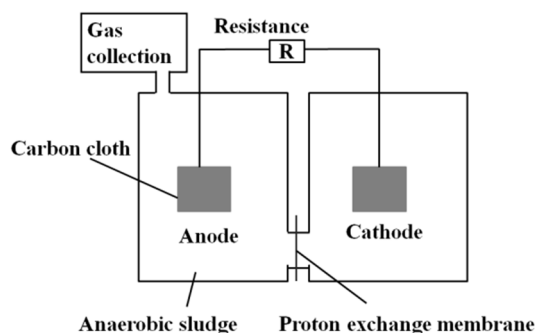


图 1 MFC 反应器示意图

Fig.1 Schematic diagram of MFC

### 2.2.2 接种与运行

用人工配制的营养液启动混菌产电, 碳源主要为乳酸钠和葡萄糖, 接种的厌氧活性污泥用无菌纱布过滤去除大颗粒杂质, 接种量为阳极室总体积的 30%。使用厌氧培养箱厌氧操作,  $30^\circ\text{C}$  下运行, 每隔 6 h 或 12 h 检测 MFC 运行情况, 当电压下降到 0.27 V 以下时可视为 1 个周期结束。在 MFC 和对照组运行的第 2 周期中, 投加的乳酸钠减少为 20 mmol/L、葡萄糖减少为 1 g/L, 以检测反应体系的连续运行能力。

### 2.2.3 菌群高通量测序

产电微生物菌群分析采用高通量测序技术, 分别检测接种的厌氧活性污泥和 MFC 运行第 1 周期第 10 d 的稳定产电菌群 16S rRNA 的 V3~V4 区。取样时先将菌液充分摇匀, 用无菌注射器抽取菌液 10 mL。

### 2.3 分析仪器和方法

化学需氧量(COD)通过重铬酸钾法检测, 有机物用 Agilent LC-20AT 230V 高效液相色谱仪(HPLC, 日本岛津公司)检测, 色谱柱为氢柱, 流动相为  $0.05\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ , 柱温  $65^\circ\text{C}$ , 流速  $0.6\text{ mL/min}$ , 进样量  $10\text{ }\mu\text{L}$ 。气体体积采用气相色谱法检测, 色谱柱为填充柱, 载气为氦气, 流速  $25\text{ mL/min}$ 。进样口、柱箱和检测器温度分别为 100, 110 和  $120^\circ\text{C}$ 。

输出电压用 UT58B 万用表(广州优利德科技有限公司)测量, 用 CS350H 电化学工作站(武汉科斯特仪器有限公司)校正。

在 MFC 运行至最大电压且较稳定时外接  $20\sim 2000\text{ }\Omega$  电阻, 调节电阻大小, 记录电压, 获得极化曲线, 计算功率密度:  $P_A=UI/S$ , 其中  $U$  为电压(V),  $I$  为电流(A),  $S$  为阳极碳布电极面积( $\text{m}^2$ )。本实验的输出电压为外接  $1\text{ k}\Omega$  电阻两侧的电压, 远大于 MFC 的内阻。

库伦效率(Coulombic Efficiency, CE)指 MFC 中有机底物实际转化电量与理想状态下理论电量的比<sup>[3]</sup>:

$$CE=(\sum_{i=1}^n U_i I_i)M/(RFbV\Delta\text{COD})$$

其中,  $t$  为记录电压时的时间(s),  $U$  为记录的电压(V),  $M$  为氧气的摩尔质量( $32\text{ g/mol}$ ),  $R$  为外电阻( $\Omega$ ),  $F$  为法拉第常数( $96485\text{ C/mol}$ ),  $b$  为常数( $4\text{ mol/mol}$ ),  $V$  为反应器腔室总体积(L),  $\Delta\text{COD}$  为反应前后化学需氧量减少值( $\text{mg/L}$ )。

## 3 结果与分析

### 3.1 厌氧污泥产电性能分析

MFC 启动 2 个周期内(加  $1000\text{ }\Omega$  外电阻)的电压变化见图 2(a), MFC 启动的前 96 h 产电性能稳步升至约 0.20 V, 之后产电性能快速提升, 在约 24 h 内电压由 0.20 V 升至 0.60 V, 最终输出电压稳定在约 0.62 V, 可视为 MFC 装置启动成功, 且稳定运行约 200 h。320 h

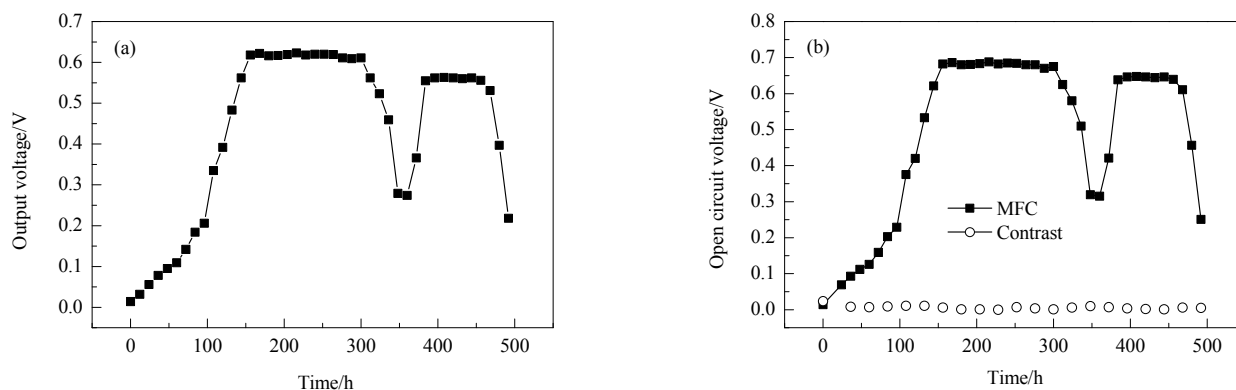


图 2 厌氧污泥 MFC 的输出电压与开路电压

Fig.2 Output voltage and open circuit voltage of anaerobic sludge MFC

后输出电压急速降至 0.27 V 以下，第 1 个周期运行结束。图 2(b)为开路电压图，与 MFC 相比，对照组开路电压无明显变化。350 h 时重新投加碳源后 MFC 又快速启动。

图 3 为运行第 1 个周期即 MFC 启动阶段输出电压

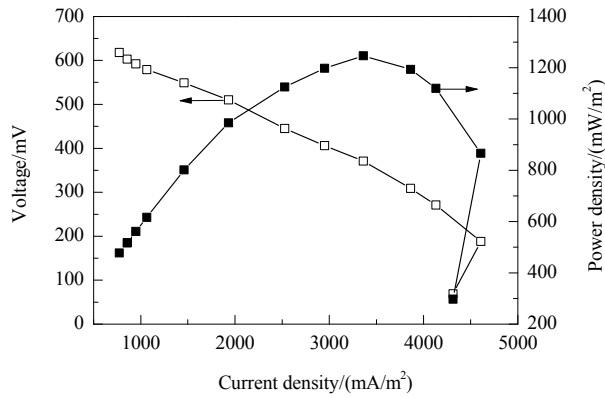


图 3 厌氧污泥 MFC 极化曲线和功率密度  
Fig.3 The power density and polarization curves of anaerobic sludge MFC

稳定后 240 h 的极化曲线与功率密度，可见启动阶段功率密度最高可达 1247 mW/m<sup>2</sup>，内阻约为 143 Ω，与文献(表 1)相比，本研究厌氧活性污泥微生物燃料电池性能较好，内阻较低，输出功率及输出电压较高，而一般污泥 MFC 的输出电压为 0.20~0.50 V。

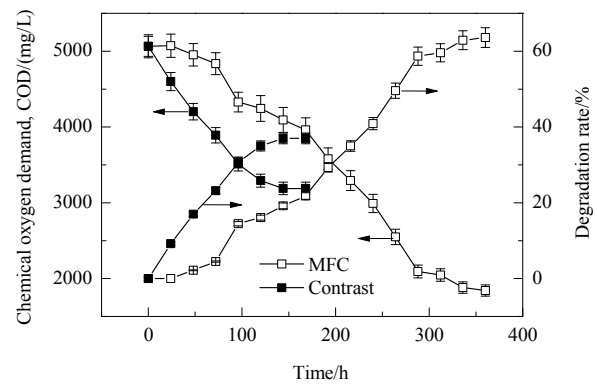


图 4 厌氧污泥 MFC 和对照组的 COD 变化  
Fig.4 COD change of anaerobic sludge MFC and contrast

表 1 各种 MFC 产电性能比较

| Table 1 Overview of various types of wastewater MFC |                     |                   |                              |              |                       |                              |                                     |           |
|---|---------------------|-------------------|------------------------------|--------------|-----------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| Structure   | Electron donor      | Electron acceptor | Inoculum                     | Electrode    | Internal resistance/Ω | Voltage/V (Resistance 1 k Ω) | Power density /(mW/m <sup>2</sup> ) | Ref.      |
| Single chamber                                      | Lactate             | Oxygen            | Anaerobic and aerobic sludge | Carbon brush | 1656                  | 0.23                         | 11.15 W/m <sup>3</sup>              | [15]      |
| Double chamber                                      | Acetate             | Oxygen            | Anaerobic sludge             | Carbon cloth | —                     | 0.38                         | 179.1                               | [4]       |
| Double chamber                                      | Acetate             | Ferricyanide      | Anaerobic sludge             | Carbon paper | 800                   | 0.33                         | 548                                 | [16]      |
| Double chamber                                      | Acetate             | Ferricyanide      | Anaerobic sewage             | Carbon cloth | 155                   | 0.58                         | 1 292                               | [17]      |
| Single chamber                                      | Glucose             | Oxygen            | Surplus sludge               | Graphite     | 368                   | 0.22                         | 221                                 | [18]      |
| Double chamber                                      | Pickle wastewater   | Ferricyanide      | Pickle wastewater            | Carbon cloth | 88                    | 0.72                         | 7.44 W/m <sup>3</sup>               | [19]      |
| Three chamber                                       | Glucose             | Oxygen            | Anaerobic and aerobic sludge | Carbon felt  | 100                   | 0.34 (100 Ω)                 |                                     | [20]      |
| Double chamber                                      | Glucose and lactate | Ferricyanide      | Anaerobic slurry             | Carbon cloth | 143                   | 0.62                         | 1247                                | This work |

3.2 理化参数变化分析

3.2.1 COD 变化

COD 变化是判断有机物消耗的重要指标，也是判断 MFC 阳极液总能量消耗和库伦效率的依据<sup>[3]</sup>。MFC 运行第 1 周期结束后，COD 含量大幅下降(图 4)，由 5067 mg/L 降至 1842 mg/L，降解率达 63.6%，计算的库伦效率为 9.9%。液相检测可知葡萄糖和乳酸钠消耗完全，阴极室内溶液也由较浑浊的黑灰色变为较澄清的土黄色。对照组在相同碳源和培养条件下，在约 150 h 开始不再产生 CH<sub>4</sub>，此时 COD 为 3189 mg/L，降解率为 37%。经产电菌富集，MFC 可稳定产电 300 h 以上，除消耗添加的有机物外，还消耗了原始接种污泥中的有机物，故 COD 去除率较高，有利于发酵废液后处理。

3.2.2 反应过程气体变化

由图 5 可知，接种厌氧污泥的 MFC 运行 1 周期后阳极产生大量 CO<sub>2</sub>，1 L 阳极反应液产生的 CO<sub>2</sub> 达 375 mL，气相色谱未检测到 CH<sub>4</sub> 和 H<sub>2</sub>。而对照组 1 L 反应

液产 CH<sub>4</sub>、H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 分别为 196、15 和 172 mL，占比分别为 51vol%、4vol% 和 45vol%。对照组厌氧活性污泥中含大量产甲烷菌古菌，如甲烷鬃菌(*Methanosaeta*)、甲烷绳菌(*Methanolinea*)和甲烷八叠球菌(*Methanosarcina*)，均可通过乙酸途径产 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub><sup>[21]</sup>，其中 *Methanolinea*

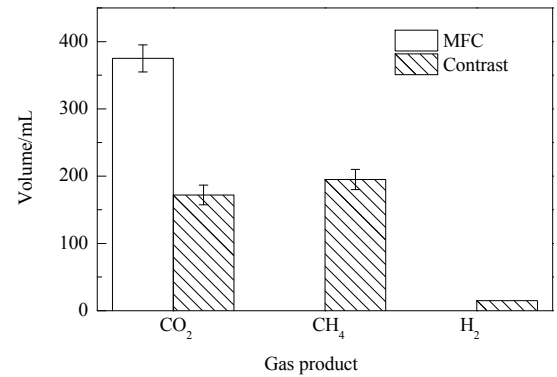


图 5 厌氧污泥 MFC 和对照组产气量  
Fig.5 Gas production of anaerobic sludge MFC and contrast

还可转化为  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2$ ，再利用  $\text{H}_2$  和  $\text{CO}_2$  产  $\text{CH}_4$  [22]。在 MFC 中大量电活性微生物富集，当有机物中的能量以电子形式导出时，不利于阳极室中  $\text{H}^+$  得电子生成  $\text{H}_2$  及 C 以最低价态存在于  $\text{CH}_4$  中，而  $\text{H}_2$  和  $\text{CH}_4$  可作为潜在的电子供体为微生物供体提供能量[10]。

3.3 MFC 运行前后菌群变化

高通量测序结果表明，MFC 运行前后古菌为主要产甲烷菌群，无明显变化，但细菌菌群变化非常大。目前报道的产电微生物绝大多数为细菌，如变形菌门 (*Proteobacteria*)、厚壁菌门 (*Firmicutes*)、酸杆菌门 (*Acidobacteria*)和放线菌门(*Actinobacteria*)<sup>[23,24]</sup>，故对细菌菌群进行详细分析。

用 Chao I 指数表征物种的丰富度，其值越高表明群落的物种丰富度越高，用 Shannon 指数表征细菌群落的多样性程度<sup>[25]</sup>。MFC 的 Chao I 指数较厌氧活性污泥小，即细菌群落的物种丰富度降低，Shannon 指数也呈逐渐减小的趋势(表 2)，表明 MFC 中物种丰富度比厌氧活性污泥低。

| 表 2 样品多样性统计结果                                   |                            |              |               |
|---|----------------------------|--------------|---------------|
| Table 2 Statistical results of sample diversity |                            |              |               |
| Sample  | Operational taxonomic unit | Chao I index | Shannon index |
| MFC   | 329                        | 381          | 5.20          |
| Anaerobic sludge                                | 370                        | 392          | 6.65          |

在门和属 2 个水平上，根据各样品中含量较高的物种的占比作物种相对丰度图，其余相对含量较低的物种归于其它(Others)中，基于 97%相似度对分类操作单元 (Operational Taxonomic Units, OUT)进行分析，绘制物种丰度图。从图 6 可知，在细菌门水平上，原始厌氧活性污泥的相对丰度拟杆菌门(*Bacteroidetes*)>硬壁菌门 (*Firmicutes*)>变形菌门(*Proteobacteria*)>绿弯菌门 (*Chloroflexi*)>热袍菌门(*Thermotogae*)>互养菌门

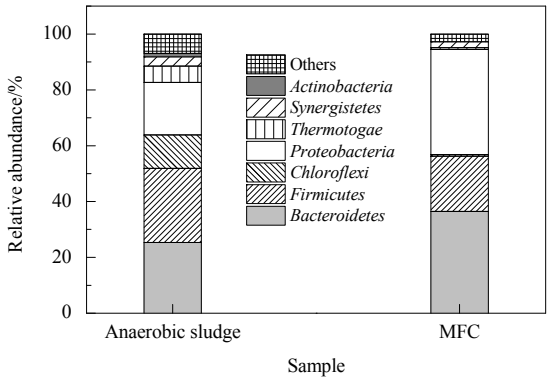


图 6 厌氧污泥 MFC 和原始厌氧污泥门水平物种相对丰度  
Fig.6 Species abundance to OTU of MFC and anaerobic sludge on phylum level

(*Synergistetes*)。随 MFC 运行，优势门更明显，以 *Bacteroidetes*, *Proteobacteria* 和 *Firmicutes* 为主，三者的相对丰度总和达 94.10%。

从图 7 可见，在菌属水平上，MFC 中优势菌属比原始活性污泥更明显，且菌群变化较大。由表 3 可知，通过 MFC 的富集，克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)大量生长，相对丰度短时间内由 0.11%升高到 16.73%，氢噬胞菌属 (*Hydrogenophaga*) 的相对丰度由 0.35% 升高到 13.78%。相对丰度较高的属还有 *Proteiniphilum* (11.47%), *Petrimonas* (10.72%), *Lentimicrobium* (7.38%)，而 BD1-7\_clade, *Clostridium\_sensu\_stricto\_1* 和 *Longilinea* 的相对丰度大幅下降。

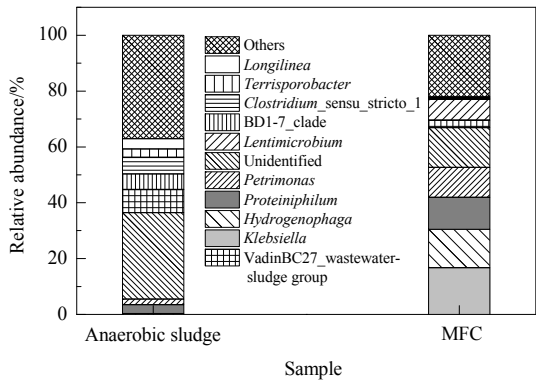


图 7 厌氧污泥 MFC 和原始厌氧污泥属水平物种相对丰度  
Fig.7 Species abundance to OTU of MFC and anaerobic sludge on genus level

表 3 厌氧污泥 MFC 和原始厌氧污泥属水平丰度变化  
Table 3 Changes of abundance of the bacterial genera before and after MFC starting up on genu level

| No. | Affiliation           | Genu                                     | Abundance/%      |       |
|-----|-----------------------|--|------------------|-------|
|     |                       |  | Anaerobic sludge | MFC   |
| 1   | <i>Proteobacteria</i> | <i>Klebsiella</i>                        | 0.11             | 16.73 |
| 2   | <i>Proteobacteria</i> | <i>Hydrogenophaga</i>                    | 0.35             | 13.78 |
| 3   | <i>Bacteroidetes</i>  | <i>Petrimonas</i>                        | 2.03             | 10.72 |
| 4   | <i>Bacteroidetes</i>  | <i>Proteiniphilum</i>                    | 3.11             | 11.47 |
| 5   | <i>Bacteroidetes</i>  | <i>VadinBC27_wastewater-sludge group</i> | 8.33             | 2.70  |
| 6   | <i>Bacteroidetes</i>  | <i>Lentimicrobium</i>                    | 0.01             | 7.38  |
| 7   | <i>Proteobacteria</i> | <i>BD1-7_clade</i>                       | 5.54             | 0.17  |
| 8   | <i>Firmicutes</i>     | <i>Clostridium_sensu_stricto_1</i>       | 5.56             | 0.18  |
| 9   | <i>Firmicutes</i>     | <i>Terrisporobacter</i>                  | 3.05             | 0.32  |
| 10  | <i>Chloroflexi</i>    | <i>Longilinea</i>                        | 3.61             | 0.28  |
| 11  |                       | Others                                   | 37.38            | 21.98 |
| 12  |                       | Undentified                              | 30.93            | 14.28 |

微生物的电子传递主要有 4 种方式：直接接触传递、氧化还原介体作为电子穿梭体传递、纳米导线电子传递和次生代谢产物作用传递。*Klebsiella* 菌属具有良好的产电效果<sup>[26]</sup>，属变形菌门，可通过分泌醌类物质作为电子传递中间体传递电子<sup>[27]</sup>。*Proteiniphilum* 可降解葡萄糖产

乙酸和  $\text{CO}_2$ <sup>[28]</sup>, 氢噬胞菌属的 *Hydrogenophaga* sp. WLSH-44 很少利用碳水化合物并具有厌氧硝酸盐呼吸功能<sup>[29]</sup>, *Hydrogenophaga* 可能与电子传递相关。Sun 等<sup>[30]</sup> 从厌氧甲烷活性污泥中分离出了严格厌氧菌株 *Lentimicrobium* strain TBC1, 其具有利用葡萄糖产乙酸和  $\text{H}_2$  的能力, 但不能以硝酸盐作为电子受体。*Hydrogenophaga* 利用 *Lentimicrobium* 所产  $\text{H}_2$  大量生长。葡萄糖、乳酸是大多数产电微生物的碳源<sup>[31]</sup>, MFC 所提供的厌氧环境及电极对电子的导出也有利于这些产电相关菌的电子传递, 从而使产电菌繁殖积累。

## 4 结 论

考察了厌氧活性污泥的产电性能, 检测了厌氧活性污泥微生物燃料电池(MFC)的化学需氧量(COD)及产气情况, 并用高通量测序法分析了反应前后产电菌群的变化, 得到以下结论:

(1) 利用厌氧活性污泥成功构建了性能良好的 MFC, 输出功率达  $1247 \text{ mW/m}^2$ , 内阻为  $143 \Omega$ , 库伦效率为 9.9%, COD 去除率达 64%。

(2) 厌氧消化过程有大量  $\text{CH}_4$  及极少量  $\text{H}_2$  产生, 无电子输出; MFC 中无  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2$  产生, 有大量  $\text{CO}_2$  生成, 有电子输出。

(3) MFC 运行后优势菌群更明显, 与厌氧活性污泥相比细菌多样性指数降低, 优势菌门硬壁菌门(*Firmicutes*)和变形菌门(*Proteobacteria*)为常见的产电菌门, 与 MFC 产电能力直接相关的克雷伯氏菌属(*Klebsiella*)富集并成为优势菌属, 相对丰度由 0.11% 升至 16.73%, 氢噬胞菌属(*Hydrogenophaga*)可能是电子传递相关菌属。

## 参考文献

- [1] Trapero J R, Horcajada L, Linares J J, et al. Is microbial fuel cell technology ready—an economic answer towards industrial commercialization [J]. *Applied Energy*, 2017, 185(1): 698–707.
- [2] Xu L, Zhao Y Q, Doherty L, et al. The integrated processes for wastewater treatment based on the principle of microbial fuel cells: a review [J]. *Critical Reviews in Environment Science and Technology*, 2016, 46(1): 60–91.
- [3] Logan B E. *Microbial fuel cell* [M]. New Jersey: John Wiley and Sons, 2008: 49, 93.
- [4] Quan X C, Quan Y P, Tao K, et al. Comparative investigation on microbial community and electricity generation in aerobic and anaerobic enriched MFCs [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 128(1): 259–265.
- [5] 黄霞, 梁鹏, 曹效鑫, 等. 无介体微生物燃料电池的研究进展 [J]. *中国给水排水*, 2007, 23(4): 1–6.  
Huang X, Liang P, Cao X X, et al. Progress in research of mediator-less microbial fuel cells [J]. *China Water and Wastewater*, 2007, 23(4): 1–6.
- [6] 孙建, 胡勇有. 废水处理新理念—微生物燃料电池技术研究进展 [J]. *工业用水与废水*, 2008, 29(1): 1–6.  
Sun J, Hu Y Y. Research progress of a novel notion for wastewater treatment—microbial fuel cell technology [J]. *Industrial Water and Wastewater*, 2008, 29(1): 1–6.
- [7] Hosseini S E, Wahid M A. Biogas utilization: experimental investigation on biogas flameless combustion in lab-scale furnace [J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 74(8): 426–432.
- [8] Kim J R, Min B, Logan B E. Evaluation of procedures to acclimate a microbial fuel cell for electricity production [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2005, 68(1): 23–30.
- [9] Howarth R W, Santoro R, Ingraffea A. Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations [J]. *Climatic Change*, 2011, 106(4): 679–691.
- [10] Michael J M, Venkata G P, Kyoung Y K, et al. Electricity from methane by reversing methanogenesis [J]. *Nature Communications*, 2017, 8: 15419.
- [11] Shindell D T, Faluvegi G, Koch D M, et al. Improved attribution of climate forcing to emissions [J]. *Science*, 2009, 326(5953): 716–718.
- [12] Lee S Y, Kim H U. Systems strategies for developing industrial microbial strains [J]. *Nature Biotechnology*, 2015, 33(10): 1061–1072.
- [13] Langille M G I, Zaneveld J, Caporaso J G, et al. Predictive functional profiling of microbial communities using 16S rRNA marker gene sequences [J]. *Nature Biotechnology*, 2013, 31(9): 814–821.
- [14] Parkdh Z. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, 81(3): 348–355.
- [15] 尹亚琳, 高崇洋, 赵阳国, 等. 好氧-厌氧混合污泥启动微生物燃料电池产电性能及微生物群落动态特征 [J]. *微生物学报*, 2014, 54(12): 1471–1480.  
Yin Y L, Gao C Y, Zhao Y G, et al. Electricity generation and dynamics characteristics of microbial community of microbial fuel cells started up with mixture of aerobic/anaerobic sludge [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2014, 54(12): 1471–1480.
- [16] Oh S E, Min B, Logan B E. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(18): 4900–4904.
- [17] 李凤祥, 周启星, 李白. 产电菌群及电子受体对微生物燃料电池性能的影响 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 3070–3074.  
Li F X, Zhou Q X, Li B. Effects of exoelectrogens and electron acceptors on the performance of microbial fuel cells [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(12): 3070–3074.
- [18] Liu Z H, Li X M, Jia B, et al. Production of electricity from surplus sludge using a single chamber floating-cathode microbial fuel cell [J]. *Water Science and Technology*, 2009, 60(9): 2339–2404.
- [19] 付国楷, 张林防, 郭飞, 等. 榨菜废水 MFC 多周期运行产电性能及 COD 降解 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1401–1407.  
Fu G K, Zhang L F, Guo F, et al. Electricity generation and COD removal of MFC using mustard tuber wastewater as substrate in multi-cycle running [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(4): 1401–1407.
- [20] 张建民, 魏佳齐, 崔心水, 等. 双阴极 MFC 启动过程中的电化学特性 [J]. *环境工程学报*, 2017, 12(11): 6252–6258.  
Zhang J M, Wei J Q, Cui X S, et al. Electrochemical characterization of dual cathode MFC during start-up phase [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 12(11): 6252–6258.

- [21] Liu Y, Whitman W B. Metabolic, phylogenetic, and ecological diversity of the methanogenic archaea [J]. Annals of the New York Academy of Sciences, 2008, 1125(1): 171–189.
- [22] Wood G E, Haydock A K, Leigh J A. Function and regulation of the formate dehydrogenase genes of the methanogenic archaeon *methanococcus maripaludis* [J]. Journal of Bacteriology, 2003, 185(8): 2548–2554.
- [23] 李颖, 孙永明, 孔晓英. 微生物燃料电池中产电微生物的研究进展 [J]. 微生物学通报, 2009, 32(9): 1404–1409.  
Li Y, Sun Y M, Kong X Y. Progress in research of electrigenes in microbial fuel cell [J]. Microbiology, 2009, 36(9): 1404–1409.
- [24] Liu M, Yuan Y, Zhang L X, et al. Bioelectricity generation by a gram-positive *Corynebacterium* sp. strain MFC03 under alkaline condition in microbial fuel cells [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(6): 1807–1811.
- [25] 曹荣, 刘淇, 赵玲, 等. 基于高通量测序的牡蛎冷藏过程中微生物群落分析 [J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 275–280.  
Cao R, Liu Q, Zhao L, et al. Microbial flora analysis of oyster during refrigerated storage by high throughput sequencing technology [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(20): 275–280.
- [26] Zhang L X, Zhou S G, Zhuang L, et al. Microbial fuel cell based on *Klebsiella pneumoniae* biofilm [J]. Electrochemistry Communications, 2008, 10(10): 1641–1643.
- [27] Xia X, Cao X X, Liang P, et al. Electricity generation from glucose by a *Klebsiella* sp. in microbial fuel cell [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 87(1): 383–390.
- [28] Chen S, Dong X. *Proteiniphilum acetatigenes* gen. nov., sp. nov., from a UASB reactor treating brewery wastewater [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2005, 55(6): 2257–2261.
- [29] Rachel N V H, Joanne M S. Arsenite oxidation by the heterotrophy *Hydrogenophaga* sp. nov. NT-14: the arsenite oxidase and its physiological electron acceptor [J]. Biochimica et Biophysica Acta, Bioenergetics, 2004, 1656(2/3): 148–155.
- [30] Sun L W, Toyonaga M, Ohashi A, et al. *Lentimicrobium saccharophilum* gen. nov., sp. nov., a strictly anaerobic bacterium representing a new family in the phylum bacteroidetes, and proposal of *Lentimicrobiaceae* fam. nov. [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2016, 66(7): 2635–2642.
- [31] Sharma V, Kundu P P. Biocatalysts in microbial fuel cells [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2010, 47(5): 179–188.