

Effects of two-compartment gas interflow on the performance of photosynthetic microbe fuel cell

Xintong ZHU¹, Huan HE¹, Runyun ZHU², Zhiang XU¹, Fengxia HAN^{1*}, Hongping PU¹

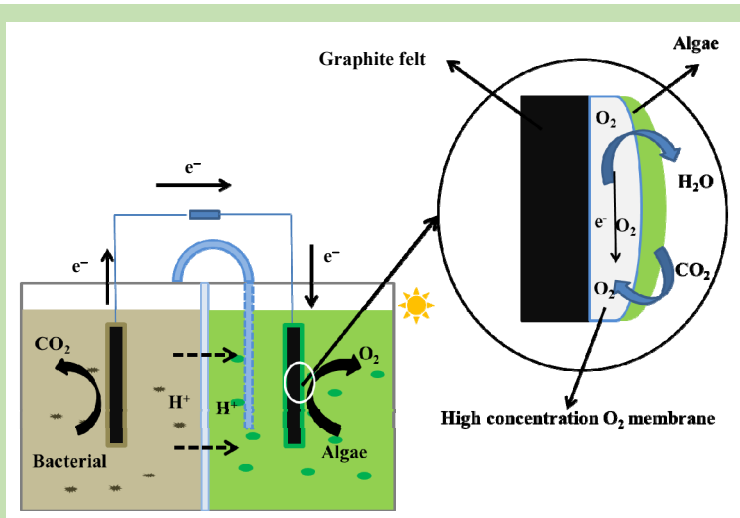
1. Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China

2. Yunnan Agricultural Technology Extension Station, Kunming, Yunnan 650000, China

Abstract: Microbial carbon capture cell (MCC) was assembled with a photo biocathode where growing *Scenedesmus obliquus* to produce oxygen as an electron acceptor after the operation of photo-microbe fuel cell (PMFC) and an added CO₂ photo-MFC (AC-PMFC). The voltage generation, dissolved oxygen and pH were measured over each day in the different systems. It was demonstrated that cell voltage produced by MFC was in line with the oxygen concentration in all systems with algae cathode. The pH of the electrolyte can also affect voltage generation. The highest voltage and power density of MCC were

obtained in the three types of MFC with 492 mV and 102.3 mW/m², respectively. Its maximum power density was higher than that of PMFC and AC-PMFC. The three systems received different concentrations of carbon dioxide for photosynthesis. The AC-PMFC achieved the lowest voltage and power density due to the excessive concentration of CO₂, which could inhibit the biological activity and photosynthesis of microalgae. The scanning electron microscope (SEM) was measured to observe the morphology characteristics of algae on the cathode surface of MCC after long-term operation. A layer of *in situ* oxygen film with high concentration could be generated on the surface of algae biofilm and electrode plate. The electrochemical analysed demonstrated that the biofilm could not directly receive the electrons from the plate and had no biocatalytic activity. This biofilm could increase the rate of oxygen reduction, which can effectively reduce the resistance of the battery surface. Polymerase chain reaction (PCR) and 16S rRNA gene detection technology indicated that the Chao1 index in MFC was 170, while the PMFC was 152 and the MCC was 145. The oversaturated oxygen in the cathode could be transported to the anode by pipeline and affect the microbial community in the anode. This study could provide a basis for further understanding of algae-based microbial carbon-trapping cells to improve MCC performance.

Key words: fuel cell; microbial carbon capture cell; algae; bioenergy; microbial diversity



收稿: 2020-03-15, 修回: 2020-05-22, 网络发表: 2020-06-04, Received: 2020-03-15, Revised: 2020-05-22, Published online: 2020-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 41761092; 51878321)

作者简介: 朱馨彤(1996-), 女, 浙江省义乌市人, 硕士研究生, 环境工程专业, E-mail: 602416041@qq.com; 韩丰霞, 通讯联系人, E-mail: hanfengxia@kmust.edu.cn.

引用格式: 朱馨彤, 何欢, 朱润云, 等. 两室气体互通对光合微生物燃料电池性能的影响. 过程工程学报, 2021, 21(3): 314-322.

Zhu X T, He H, Zhu R Y, et al. Effects of two-compartment gas interflow on the performance of photosynthetic microbe fuel cell (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2021, 21(3): 314-322, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220088.

两室气体互通对光合微生物燃料电池性能的影响

朱馨彤¹, 何欢¹, 朱润云², 徐志昂¹, 韩丰霞^{1*}, 普红平¹

1. 昆明理工大学环境科学与工程学院, 云南 昆明 650500

2. 云南省农业技术推广总站, 云南 昆明 650000

摘 要:以斜生栅藻生长产生氧为电子受体的光合微生物燃料电池(PMFC)和外加 CO₂ 光合微生物燃料电池(AC-PMFC)联合构建成微生物碳捕获电池(MCC)。研究 MCC 在不同运行条件下的产电性能及影响因素。测量 MCC, PMFC 和 AC-PMFC 三种系统中的电压、溶解氧和 pH。结果表明, 产电压趋势与所有系统中的藻类阴极的氧浓度相关, 电解液 pH 也能影响 MFC 电压的产生。三种类型的 MFC 中, MCC 产电性能最佳, 其电压和功率密度分别可达 492 mV 和 102.3 mW/m², 最大功率密度分别比 PMFC 和 AC-PMFC 高 42.33%, 54.08%。AC-PMFC 由于添加了相对高浓度的 CO₂, 抑制了微藻的生物活性和光合作用, 产生的电压和功率密度最低。用 SEM 观察长期运行后的 MCC 的阴极表面藻类的形貌特征, 藻生物膜与电极板表面能够生成一层高浓度的原位氧膜。电化学分析表明斜生栅藻-生物膜本身不能直接接收来自极板上的电子, 无生物催化活性。但这层膜可促进 O₂ 的还原速率且可有效降低电池内阻。PCR 和 16S rRNA 基因检测技术分析结果表明, MFC 中的 Chao1 指数为 170, 而 PMFC 为 152, MCC 为 145, 阴极中的过饱和氧可通过管道输送到阳极并影响阳极的微生物群落。本研究结果为进一步改善藻类微生物碳捕获电池性能提供基础。

关键词: 燃料电池; 微生物碳捕获电池; 藻类; 生物能源; 微生物多样性

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2021)03-0314-09

1 前言

微生物燃料电池(MFC)是一种可持续发展的技术, 其可利用微生物作为生物催化剂将有机废水中有机物的化学能转化为电能^[1-3]。传统的双室微生物燃料电池由阳极室和阴极室组成, 阳极室和阴极室由质子交换膜隔开。在阳极室中, 电活性菌将有机物降解为 CO₂ 并产生电子和质子, 电子通过外部电路转移到阴极室, 并与电子受体结合形成电流。在非生物阴极系统中, O₂ 与铁氧化物、高锰酸盐、次氯酸盐等相比具有较高的氧化还原电位和环境友好性, 是目前传统双室微生物燃料电池最合适的电子受体^[4]。但在此系统中, 需连续供应 O₂ 用于阴极中的还原反应, 一定程度上增加了经济成本^[5]。

最近的研究工作已经提出将 MFC 与微藻结合构成光合微生物燃料电池(PMFCs), 以克服持续供氧的缺点。在此系统中, 通过藻类的光合作用可在阴极室中产生大量氧气^[6]。斜生栅藻光合效率高、繁殖速度快, 适合阴极制氧^[7], 在去除水体中氮、磷及降解其他有机物和废水等应用中效果显著^[8,9]。此外, 光强度^[10]和照明周期^[11]对 PMFCs 性能的影响也有研究, 更强的光强度和更长的光照时间可使溶解氧增加, 促进产电^[12]。CO₂ 对微藻代谢途径和光合作用效率影响显著^[13], 研究表明每天向阴极室补充 0.5 h 的 CO₂ 足以使藻类在 MFC 中实现最

佳生长^[14], 且供应浓度为 10% CO₂ 比供应空气(0.037% CO₂)的开路电压高 1.5 倍^[15]。

本研究构建了藻阴极光合微生物燃料电池, 解决了阴极室中因机械曝气所产生的能耗问题。以斜生栅藻为光合作用藻类在三种 MFC 系统的阴极室通过光合作用产生氧气, 研究了藻阴极微生物燃料电池在不同运行条件下的产电性能, 探究了二氧化碳浓度对微生物燃料电池产电性能的影响, 考察并监测了在明暗循环中阴极溶解氧和 pH 的变化, 采用电化学分析手段测量阴极板表面藻类生物膜的氧化还原电位变化。此外, 还对比分析了不同时期的阳极微生物群落, 以评估阴极藻类产生的氧气对阳极细菌多样性的影响。此研究结果对光合微生物燃料电池的进一步发展具有重要意义。

2 实验

2.1 材料与试剂

本研究从昆明市第七水质净化厂厌氧活性污泥中培养提取阳极初始微生物。取得的活性污泥在 300 mL 的烧瓶中厌氧密封恒温闷曝 3 d, 使其转化为严格的厌氧细菌。将上述厌氧活性污泥静置 1 h 后, 取上清液作为接种液, 将 10 mL 的上清液与 46 mL 的相应培养基接种入灭菌后的反应器中。

斜生栅藻购于水生生物研究所淡水藻类培养物保

藏中心。在加入 MFC 阴极前,将藻类放入含有 BG11 培养基的 2 L 锥形瓶中培养,每天摇动三次以补充无机碳源。光源为 LED 灯(Philips)光照周期为明暗 12 h/12 h。 CH_3COONa , NaCl , NH_4Cl , CaCl_2 , MgCl_2 , NaOH , HCl 等试剂均为 AR 级,购于上海 Sigma-Aldrich 公司。

2.2 实验设备

在本研究中,传统的双室 MFC 材质由有机玻璃组成并由质子交换膜(Nafion117)隔开,如图 1 所示。阳极室和阴极室的有效体积为 140 mL。每个隔室中使用普通石墨毡(北海碳素有限公司)作为电极,有效面积约为 28.3 cm^2 (直径 6 cm)。放入双室前,电极用 1 mol/L 盐酸和 1 mol/L 氢氧化钠溶液分别浸泡 24 h,用超纯水冲洗使其成为中性。MFC 的阳极和阴极之间的距离为 2 cm^[15]。外部电路采用铜线链接并固定电阻 1000 Ω 。在微生物碳捕获电池(MCC)的研究中使用软管连接顶部的两个腔室,阳极产生的 CO_2 通过软管进入阴极电解液,银/氯化银电极作为参比电极插入阴极室。

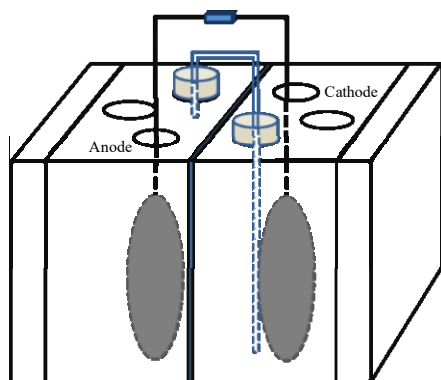


图 1 MCC 实验装置的结构图

Fig.1 Schematic and experimental set up of the MCC used for carbon capture tests

MFC 在 $25 \pm 5^\circ\text{C}$ 的室温下运行。初始设置时,向 MFC 的阳极室中分批次加入含厌氧细菌的 30 mL 合成废水。培养一个月后,生物膜在阳极电极表面生长。合成废水配方为 1.00 g/L 乙酸钠, 1.292 g/L NaCl , 0.80 g/L NH_4Cl , 0.05 g/L CaCl_2 , 0.20 g/L MgCl_2 , 50 mmol/L 磷酸盐缓冲溶液(PBS)。每次补充前,阳极电解液用 99%纯氮气曝气约 15 min,阳极顶部空间充气 2 min 制造厌氧环境。MFC 初始运行期间,阴极采用机械曝气通氧,阴极电解液为 50 mmol/L PBS。获得稳定的 MFC 电压后,将阴极电解液换为 BG11 介质用于机械曝气,然后进行藻类曝气通氧。在机械通气过程中,正常大气以 0.3 L/min 的流速在阴极室中连续曝气,构成石墨阴极的空气曝气微生物燃料电池(AA-MFC)。在藻类曝气期间,阴极电解液

在 200 r/min 下持续磁力搅拌,阴极室由 LED 灯每天照明 12 h,光强为 3000 Lux。藻类曝气期间需补充 CO_2 ,以 0.3 L/min 的流速每天在阴极室中连续曝气。将藻类悬浮液离心(9000g),并在 UP 水中洗 3 次后放入阴极室,以除去之前的培养基和其他营养物质。为防止高浓度藻类引起的光合作用效应,阴极换液时使用 BG11 对其稀释,藻类浓度控制在 5×10^6 个/mL^[16]。

2.3 分析方法

MFC 各阶段的溶解氧浓度采用 MP516 溶解氧测定仪(上海三信)测定;pH 采用 Denver UB-7 酸度计(美国 Denver)测量。三个系统中的化学需氧量(COD)采用 DRB200 消解仪(美国 HACH)测定;藻类细胞密度通过 UV-2600 紫外分光光度计(日本 Shimadzu)绘制标准曲线(细胞数量与 680 nm 吸光度的关系)估算^[17];光强由数字光度计(美国 HACH)测定,生物样品(结束运行时阳极的微生物群落)送至马略生物制药技术有限公司(中国上海),使用聚合酶链反应(PCR)、16S rRNA 基因检测技术和高通量测序分析间歇模式^[18]检测。实验结束后,采用 Nova Nano SEM 450 扫描电镜(美国 FEI)观察普通石墨毡阴极上藻类生物膜。

用数据采集系统 IPAM-6505 在外部负载值(1000 Ω)下每 2 min 记录一次 MFC 输出的电压。极化曲线测试在 99999.9~30 Ω 范围内的可变电阻箱中进行,每个电阻在稳定电压下连接 10 min。电流(I)和功率(P)用式(1)和(2)计算:

$$I = \frac{V}{RA} \quad (1)$$

$$P = \frac{V^2}{RA} \quad (2)$$

式中, A 是阳极室和阴极室之间接触表面的有效面积, V 是电压, R 是外接电阻。阴极电位采用 Ag/AgCl 参比电极测定。循环伏安法和电化学阻抗谱用 CHI660E 电化学工作站(上海辰华仪器有限公司)进行测量^[19]。循环伏安曲线以观察不同曝气类型(机械曝气和藻类曝气)下普通石墨毡阴极电极上的氧还原电势。等速测量时,将参比电极放入阴极电解液中,工作电极是相应要测电池的阴极电极,对电极是相应要测电池的阳极电极。在扫描速率为 0.5 V/s, $-0.7 \sim 0.7\text{ V}$ 范围内进行电位扫描。交流阻抗测量在开路电压(OCV)下以 20 kHz~200 MHz 的频率进行,振幅为 10 mV。

3 结果与讨论

3.1 MFC 全天的性能

如图2所示,在连续两个周期中观察到稳定的电池电压(215 ± 2 mV),表明产电微生物(EPM)已经适应并附着在阳极板上。将带有生物膜的阳极和新的石墨毡阴极重新组装成另一组MFC,阴极电解液用BG11介质代替。等待电池电压再次稳定一段时间,将含有斜生栅藻作为接种物的BG11培养基重新注入。

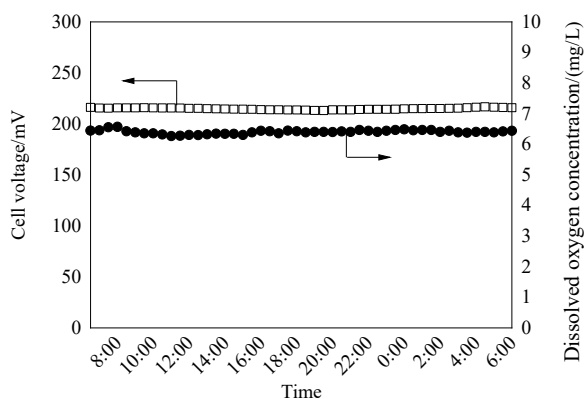


图2 机械曝气阶段一天内的电池电压和溶解氧浓度变化

Fig.2 Variations of cell voltage and dissolved oxygen concentration in one day during the mechanical aeration phase

阴极藻类曝气期间,其周期为明暗12 h/12 h,每天9:30 打开光照,21:30 关闭。在外加 CO_2 光合微生物燃

料电池(AC-PMFC)阶段,每天9:30 在阴极室中补充30 min 流速为0.3 L/min 的 CO_2 ($\geq 99.9\%$),使阴极电解液中达到饱和,获得约38 mmol/L 的较高浓度 CO_2 ^[14,20]。当灯打开时,藻类吸收光并捕获 CO_2 进行光合作用,释放 O_2 。PMFC 藻类光合作用所用的 CO_2 来自夜间阴极藻类的呼吸作用,无其他外源补充,浓度相对较低;MCC 藻类光合作用所用的 CO_2 来自夜间阴极藻类呼吸作用及经两室气体互通的软管运输到阴极室的阳极室微生物氧化代谢有机物产生的 CO_2 。在类似的研究中,MCC 阳极室产生 CO_2 的浓度为1~1.8 mmol/L,此浓度范围的 CO_2 通过两室气体互通管道对阴极室进行补充,且全部溶于阴极电解液中,浓度相对适中^[21,22];图3(a)为不同运行模式下,周期约4天的稳定电压变化曲线。图3(b)和3(c)为不同运行模式下,单个循环过程中电压曲线及阴极电解液中溶解氧的变化曲线。电池电压的变化趋势与相应阴极电解液中藻类曝气时溶解氧的变化趋势相同,阴极电解液中藻类曝气的稳定电压和溶解氧浓度高于空气曝气。光照开始(9:30)时,溶解氧浓度和电池电压都有所增加。PMFC 的电池电压在12:00 时首次达稳定值276 mV。在AC-PMFC 的运行过程中,光照和高浓度 CO_2 的补充同时进行,由于光合作用产生 O_2 ,电压升高,而随高浓度 CO_2 的加入电压降低,整个照明期间

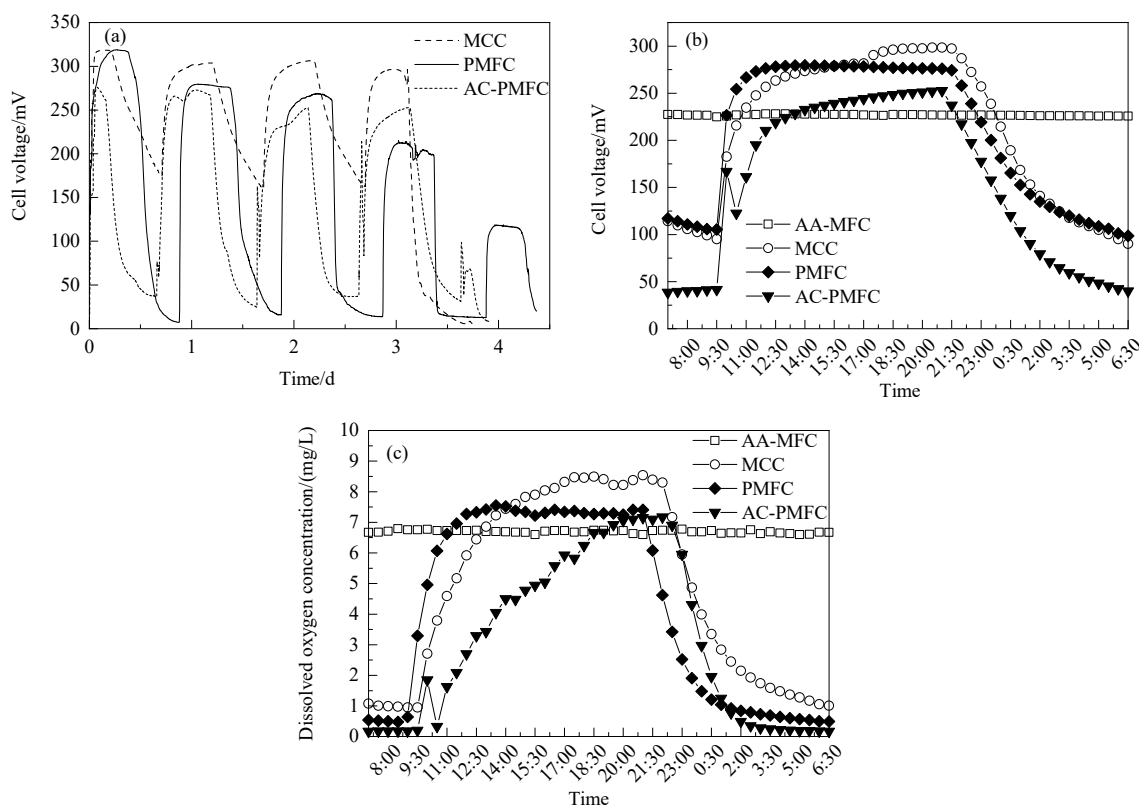


图3 不同运行方式下MFCs(a)周期内电池电压、一天内(b)电池电压及(c)阴极溶解氧浓度的变化

Fig.3 Variations of (a) cell voltage within the cycle, (b) cell voltage and (c) dissolved oxygen concentration at the cathode in one day of MFCs in different operation modes

最大电压约为 253 mV。在 AC-PMFC 运行期间, 来自阳极的低浓度 CO_2 连续补充到阴极室中, 导致 MCC 的电压在 17:00 时达稳定 282 mV。当 PMFC, AC-PMFC, MCC 电压分别达到最大值(279, 253, 299 mV)时, 其阴极溶解氧浓度分别稳定在 7.5, 7.2 和 8.5 mg/L。在 AC-PMFC 实验中, 随 CO_2 浓度增加, 溶解氧浓度缓慢增加, 导致其电压低于 PMFC 和 MCC。由此证明适度的 CO_2 在光合作用中起着重要的作用。在光合作用过程中, 随 CO_2 含量适当增加, 藻类的生物量和光合速率显著增加, 但 CO_2 浓度过高抑制了藻类的生物活性, 进而抑制了藻类的光合作用。直到 21:30, 光照结束进入黑暗阶段, 藻类消耗氧气进行呼吸作用, 导致溶解氧浓度降低, PMFC, AC-PMFC, MCC 的电压下降。结果表明, 三种系统的电压与斜生栅藻在阴极室中产生的溶解氧密切相关, 两者均与光照周期呈现明升暗降的变化趋势, 在先前的研究也有类似现象^[21-25]。

阴阳极电解液的 pH 也能影响 MFC 电压的产生^[26]。一天中阴极 pH 的变化如图 4 所示。AA-MFC 的阴极 pH

约保持在 6.9。PMFC 和 MCC 的阴极 pH 在白天分别从 7.8 增至 8.3, 从 7.7 增至 8.5, 在关灯后 pH 降低。这表明藻类在光照阶段进行光合作用, 捕获 CO_2 使电解液 pH 升高; 而在暗反应阶段通过呼吸作用释放 CO_2 , 使电解液 pH 降低。当 CO_2 鼓泡时, 由于 CO_2 溶解在水中能产生碳酸并形成质子, AC-PMFC 阴极的 pH 从 7.7 急剧降到 6.3。此后由于碳酸/碳酸氢盐/碳酸盐的缓冲作用及在氧还原反应中 H^+ 的消耗, pH 逐渐升高^[27]。

MFC 对 COD 的去除能力也是一项重要的检测其性能的指标。如图 5 所示, PMFC, AC-PMFC 和 MCC 在稳定运行一个周期后, 对以 1.00 g/L 乙酸钠为底物的合成废水中 COD 的去除率分别为 82.3%, 76.6% 和 80.1%。AA-MFC 由于运行周期比其他电池的运行周期时间长约 1 天, 其 COD 的去除率为 80.3%。PMFC 的电压输出低于 MCC, 其底物的有效产电利用率低于 MCC。AC-PMFC 阴极氧气的还原反应较慢, 底物的有效产电利用率也随之降低, 主要用于微生物的自身生长繁殖。

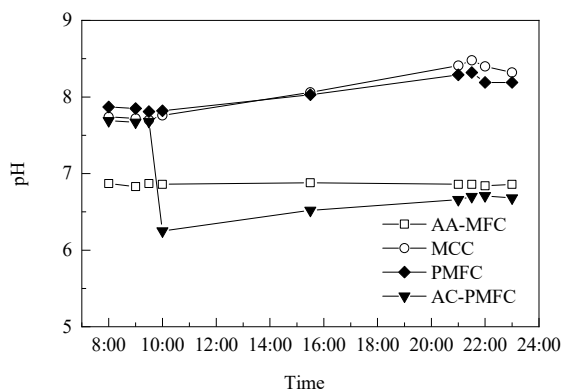


图4 阴极液一天内 pH 的变化
Fig.4 Variation of pH at the cathode in one day

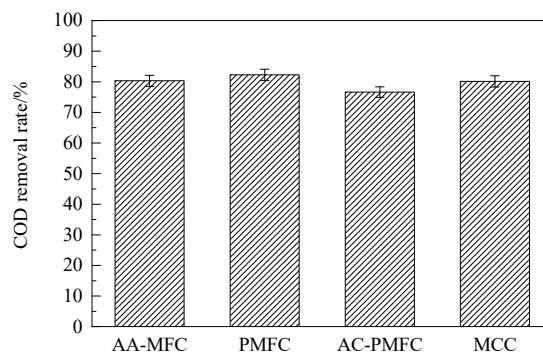


图5 不同运行模式的 MFCs 阳极的 COD 去除率
Fig.5 COD removal rate of MFCs anode in different operation modes

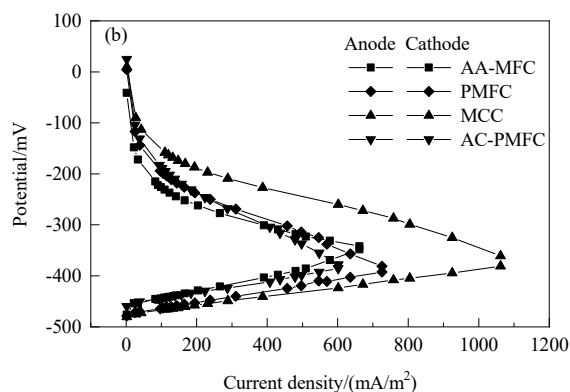
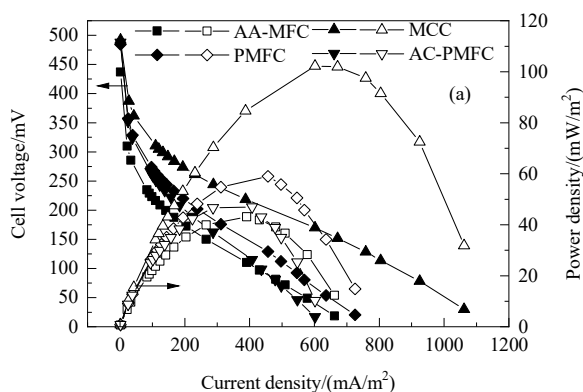


图6 不同运行模式下的 MFCs 的(a)功率输出及(b)电势变化
Fig.6 Variations of (a) power output and (b) electrode potential of MFCs in different operation modes

在不同模式下的 MFCs 达到稳定电压后, 使用 30~5000 Ω 的可变电阻箱进行极化测试。图 6(a)和 6(b) 为 MFCs 的极化曲线和功率密度曲线, 采用空气曝气阴极室 AA-MFC 的开路电压为 437 mV, 低于在阴极室中采用藻类曝气的 PMFC, MCC 和 AC-PMFC, 分别为 484, 492, 488 mV。在 601.6 mA/m² 的电流密度和 100 Ω 的外部电阻下, MCC 的最大功率密度为 102.3 mW/m², 比 AA-MFC, PMFC 和 AC-PMFC 分别高 57.83%, 42.33% 和 54.08%。其原因可能是阴极板上藻类生物膜的形成及添加中等浓度的 CO₂ 以促进藻类更好的光合作用产生氧气, 从而加速了氧气的还原^[27], 同时, 随溶解氧浓度增加, 电压显著提高。

3.2 生物阴极的电化学表征和扫描电镜

循环伏安法用于分析空气阴极和藻类阴极的催化行为, 结果如图 7 所示。无论是 AA-MFC 中的空气曝气, 还是 MCC 中的藻类曝气, 循环伏安曲线均未观察到明显的氧化还原峰, 表明阴极表面的藻类生物膜对氧的还原没有催化作用。因此, 基于电压和溶解氧间的密

切关系, MCC 系统中获得的较高功率密度是由于斜生栅藻在光照下释放较高浓度的溶解氧, 进而促进阴极板表面的氧还原, 此结果与 Walter 等^[28]的研究类似。

藻类-细菌共生系统可通过生物催化方法实现氧还原反应, 无须使用昂贵的催化剂^[29]。欧姆电阻(R_s)和电荷转移电阻(R_{ct})由图 8 所示的 Nyquist 图估算。图由弧曲线和直线组成, 分别对应阴极界面处的电极和电解质界面处的氧扩散电阻。结果表明, 藻类阴极(MCC)比石墨阴极(AA-MFC)的弧曲线半径更小, 弧线的起点表示 R_s 值, 而终点表示 R_{ct} , 空气曝气阶段石墨阴极的 R_s 和 R_{ct} 分别为 1.1 和 3.6 Ω 。MCC 中藻类阴极的 R_s 和 R_{ct} 分别为 0.8 和 2.4 Ω , 表明 MCC 没有能力催化阴极表面藻类生物膜的氧还原过程。 R_s 从 1.1 Ω 降到 0.8 Ω , 可能是由于阴极生长的藻类排放有机物质, 如氨基酸和脂类, 减少了电极的欧姆损失^[30,31]; R_{ct} 从 3.6 Ω 降到 2.4 Ω , 可能是由于藻类生物膜和阴极间的溶解氧浓度较高, 氧还原速率提高。高的溶解氧浓度有助于降低阴极电解液中氧的扩散阻力, 因此藻类阴极的直线区域也小于空气曝气阶段石墨阴极^[32]。

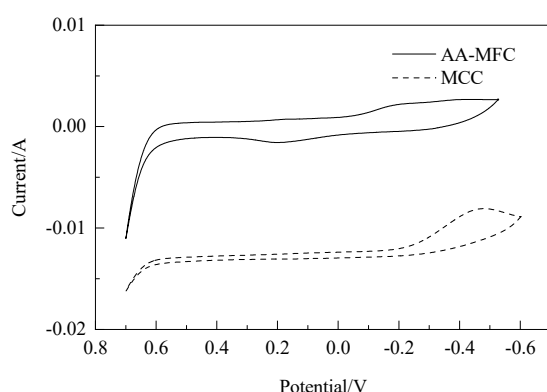


图7 AA-MFC 和 MCC 阴极电极的循环伏安曲线
Fig.7 Cyclic voltammetry curves of the cathode electrodes in AA-MFC and MCC

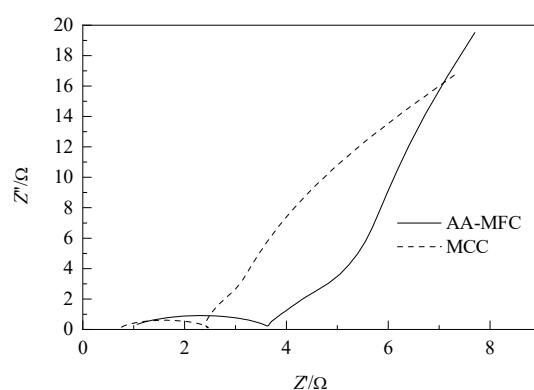
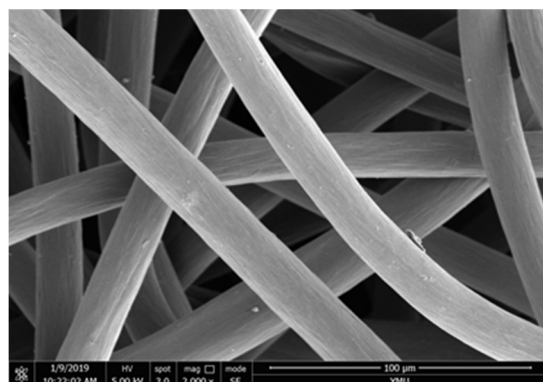


图8 AA-MFC 和 MCC 阴极电极的能斯特曲线
Fig.8 Nyquist plots of the cathode electrode in AA-MFC and MCC



(a) Pristine graphite felt



(b) Algae attached on the plain graphite felt

图9 初始极板与附着藻极板的电镜图像

Fig.9 SEM images of the pristine graphite felt and algae attached on the plain graphite felt

长期运行后,采用扫描电镜观察阴极表面藻类的形貌特征,结果如图 9 所示。图 9(b)附着藻极板中可以清晰的观察到细胞形态大多为尖条状的斜生栅藻生物膜。由于藻类生物膜不具备如前所述催化氧还原的能力,MCC 中较高的电压和功率密度是由于藻类生物膜和阴极表面之间产生的高浓度溶解氧促进了直接原位氧还原且降低了氧在阴极电解液中的扩散阻力。

3.3 阳极微生物群落分析

实验结束后,采用 PCR 和 16S rRNA 基因检测技术

分析阳极板表面不同生物膜的微生物群落。如表 1 所示,在 97%的相似度水平上,PMFC 的微生物群落数最多,有 224 个操作分类单位,AA-MFC 最少,只有 149 个操作分类单位。AA-MFC 中的 Chao1 指数为 170,而 PMFC 为 152,MCC 为 145,表明阴极室中光和高浓度氧的存在可能抑制某些细菌的生长繁殖,从而降低微生物群落的丰度。然而,AA-MFC,PMFC 和 MCC 的 Shannon 指数分别为 3.08,3.33 和 2.96,表明阴极的光富集了优势细菌,增加了物种的多样性^[32],但阴极藻类光合作用中可能存在的氧气会抑制阳极厌氧菌的生长。

表 1 测序和微生物多样性分析的统计数据
Table 1 Statistical for sequencing and microbial diversity analysis

Sample name	Tag number ^a	OTUs	Chao1 ^b	ACE ^b	Shannon ^c	Coverage ^d
AA-MFC	34570	149	170	171	3.08	0.999653
PMFC	31735	224	152	152	3.33	0.999842
MCC	28933	194	145	145	2.96	0.999689

Note: a. Tag number represents the high-quality sequences obtained. b. The higher values of the Chao1 and ACE, the higher richness of the microbial communities. c. The higher values of the Shannon index, the higher the species diversity. d. Coverage estimated probability that the next read will belong to an OUT that has already been found.

在分类学水平上,细菌群落组成的信息如图 10 所示。三个系统生物样品(AA-MFC:机械曝气初始启动期间阳极微生物样本;PMFC:传统的光合微生物燃料电池运行期间的阳极微生物样本;MCC:微生物碳捕获燃料电池运行期间的阳极微生物样本)中主要由 *Proteobacteria*(83.9%, 78.9%, 79.7%)组成,还有少许 *Bacteroidetes*(8.6%, 12.5%, 5.1%)和 *Firmicutes*(4.4%, 6.3%, 4.0%)。他们都是电化学活性细菌(EAB),优势菌种大致相同,在细胞外电子传递过程(EET)中起较大作用^[32]。*Bacteroidetes* 和 *Firmicutes* 在复杂的有机降解过

程中发挥重要作用^[33]。*Actinobacteria* 在启动阶段逐渐消失,表明 *Actinobacteria* 在厌氧条件下生长繁殖受到抑制。MCC 中 *Bacteroidetes* 和 *Firmicutes* 的比例低于 PMFC,表明阴极中的过饱和氧可通过软管输送到阳极并影响阳极的微生物群落。

4 结 论

本研究通过联合外加 CO₂ 光合微生物燃料电池(AC-PMFC)和光合微生物燃料电池(PMFC)构建了微生物碳捕获电池(MCC)。研究了 MCC 在不同运行条件下的产电性能及影响因素,并测量了 MCC,PMFC 和 AC-PMFC 三种系统中的电压和溶解氧,得到如下结论:

- (1) 阴极以斜生栅藻产生的氧为主要电子受体,但其表面的藻类生物膜不具备生物催化氧还原的性能。
- (2) MCC 系统中,产生的电压和功率密度均高于 PMFC 和 AC-PMFC 系统,表明适度的 CO₂ 补充有利于藻类通过光合作用产生氧气,而同时 CO₂ 浓度过高会抑制藻类的生长活性。
- (3) MCC 产电量主要取决于氧气浓度,电池电压的变化趋势与相应阴极电解液中溶解氧的变化趋势相同,且两者均与光照周期呈明升暗降的变化趋势。
- (4) 微生物多样性分析表明,阴极藻类产生的氧气也在进入阳极,从而影响了微生物群落结构。

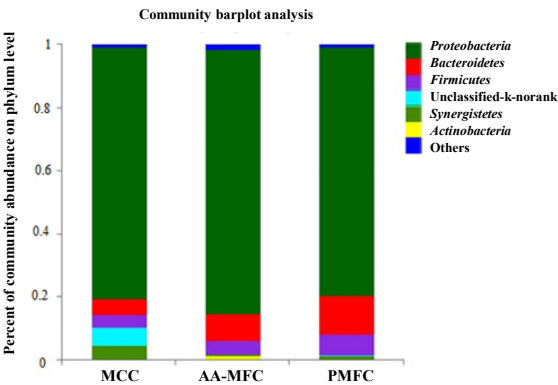


图 10 不同运行模式下阳极电极在门水平上的细菌群落分析
Fig.10 Analysis of bacterial community of the anode electrodes at Phylum level in different operating modes

参考文献

- [1] Luo S, Berges J A, He Z, et al. Algal-microbial community collaboration for energy recovery and nutrient remediation from wastewater in integrated photobioelectrochemical systems [J]. *Algal Research*, 2017, 24: 527–539.
- [2] Li W W, Yu H Q, He Z. Towards sustainable wastewater treatment by using microbial fuel cells-centered technologies [J]. *Energy & Environmental Science*, 2014, 7(3): 911–924.
- [3] 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.
- [4] Commault A S, Laczka O, Siboni N, et al. Electricity and biomass production in a bacteria-*Chlorella* based microbial fuel cell treating wastewater [J]. *Journal of Power Sources*, 2017, 356: 299–309.
- [5] Khandelwal A, Vijay A, Dixit A, et al. Microbial fuel cell powered by lipid extracted algae: a promising system for algal lipids and power generation [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 247: 520–527.
- [6] Zhang Y, Noorl J S, Angelidaki I. Simultaneous organic carbon, nutrients removal and energy production in a photomicrobial fuel cell (PFC) [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(10): 4340–4346.
- [7] Alice F, Belina R, Ana F F, et al. *Scenedesmus obliquus* microalga-based biorefinery – from brewery effluent to bioactive compounds, biofuels and biofertilizers – aiming at a circular bioeconomy [J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2019, 13(5): 1169–1186.
- [8] Ana O, Ana B, Ana P B, et al. *Scenedesmus obliquus* in poultry wastewater bioremediation [J]. *Environmental Technology*, 2019, 40(28): 3735–3744.
- [9] Aikaterini P, Maria K, Kiriakos K, et al. Comparative biodegradation of all chlorinated phenols by the microalga *Scenedesmus obliquus* — the biodegradation strategy of microalgae [J]. *Journal of Biotechnology*, 2019, 296: 61–68.
- [10] Juang D F, Lee C H, Hsueh S C. Comparison of electrogenic capabilities of microbial fuel cell with different light power on algae grown cathode [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 123: 23–29.
- [11] Hu X, Zhou J T, Liu B J. Effect of algal species and light intensity on the performance of an air-lift-type microbial carbon capture cell with an algae-assisted cathode [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(30): 25094–25100.
- [12] Wu X Y, Song T S, Zhu X J, et al. Construction and operation of microbial fuel cell with *Chlorella vulgaris* biocathode for electricity generation [J]. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 2013, 171(8): 2082–2092.
- [13] Wu Y C, Wang Z J, Zheng Y, et al. Light intensity affects the performance of photo microbial fuel cells with *Desmodesmus* sp. A8 as cathodic microorganism [J]. *Applied Energy*, 2014, 116: 86–90.
- [14] Eloka-Eboka A C, Inambao F L. Effects of CO₂ sequestration on lipid and biomass productivity in microalgal biomass production [J]. *Applied Energy*, 2017, 195: 1100–1111.
- [15] Powell E E, Eviets R W, Hill G A, et al. A microbial fuel cell with a photosynthetic microalgae cathodic half cell coupled to a yeast anodic half cell [J]. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2011, 33(5): 440–448.
- [16] Freguia S, Rabaey K, Yuan Z, et al. Electron and carbon balances in microbial fuel cells reveal temporary bacterial storage behavior during electricity generation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(8): 2915–2921.
- [17] Logan B E, Regan J M. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells [J]. *TRENDS in Microbiology*, 2006, 14(12): 512–518.
- [18] Ma J X, Wang Z W, Zhang J Y, et al. Cost-effective *Chlorella* biomass production from dilute wastewater using a novel photosynthetic microbial fuel cell (PMFC) [J]. *Water Research*, 2017, 108: 356–364.
- [19] Pandit S, Nayak B K, Das D. Microbial carbon capture cell using cyanobacteria for simultaneous power generation, carbon dioxide sequestration and wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 107: 97–102.
- [20] Wang X, Feng Y J, Liu J, et al. Sequestration of CO₂ discharged from anode by algal cathode in microbial carbon capture cells (MCCs) [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 25(12): 2639–2643.
- [21] Del C A G, Cañizares P, Rodrigo M A, et al. Microbial fuel cell with an algae-assisted cathode: a preliminary assessment [J]. *Journal of Power Sources*, 2013, 242: 638–645.
- [22] Uggetti E, Sialve B, Hamelin J, et al. CO₂ addition to increase biomass production and control microalgae species in high rate algal ponds treating wastewater [J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2018, 28: 292–298.
- [23] Almomani F, Al Ketife A M D, Judd S, et al. Impact of CO₂ concentration and ambient conditions on microalgal growth and nutrient removal from wastewater by a photobioreactor [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 157–175.
- [24] Lobato J, Del Campo A G, Fernández F J, et al. Lagooning microbial fuel cells: a first approach by coupling electricity-producing microorganisms and algae [J]. *Applied Energy*, 2013, 110: 220–226.
- [25] Singh S P, Singh P. Effect of temperature and light on the growth of algae species: a review [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 431–444.
- [26] Velvizhi G, Venkata Mohan S. *In situ* system buffering capacity dynamics on bioelectrogenic activity during the remediation of wastewater in microbial fuel cell [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2014, 33(2): 454–462.
- [27] Chung K, Fujiki I, Okabe S. Effect of formation of biofilms and chemical scale on the cathode electrode on the performance of a continuous two-chamber microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(1): 355–360.
- [28] Walter X A, Greenman J, Ieropoulos I A. Oxygenic phototrophic biofilms for improved cathode performance in microbial fuel cells [J]. *Algal Research*, 2013, 2(3): 183–187.
- [29] Kakarla R, Min B. Photoautotrophic microalgae *Scenedesmus obliquus* attached on a cathode as oxygen producers for microbial fuel cell (MFC) operation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(19): 10275–10283.
- [30] Liu X W, Sun X F, Huang Y X, et al. Photoautotrophic cathodic oxygen reduction catalyzed by a green alga, *Chlamydomonas reinhardtii* [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2013, 110(1): 173–179.
- [31] Xing D, Cheng S, Regan J M, et al. Change in microbial communities in acetate- and glucose-fed microbial fuel cells in the presence of light [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, 25(1): 105–111.
- [32] Ishii S, Suzuki S, Tenney A, et al. Comparative metatranscriptomics reveals extracellular electron transfer pathways conferring microbial adaptivity to surface redox potential changes [J]. *The ISME Journal*, 2018, 12(12): 2844.
- [33] Liu W Z, Wang A J, Sun D, et al. Characterization of microbial

communities during anode biofilm reformation in a two-chambered
microbial electrolysis cell (MEC) [J]. *Journal of Biotechnology*,
2012, 157(4): 628–632.