

光合细菌在微生物燃料电池中的应用研究进展

吴义诚^{1,2} 王泽杰^{2,3} 傅海燕¹ 赵峰^{2*}

(1. 厦门理工学院环境科学与工程学院 福建 厦门 361024)

(2. 中国科学院城市环境研究所 福建 厦门 361021)

(3. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所 山东 青岛 266101)

摘要: 微生物燃料电池(Microbial fuel cells, MFCs)降解污染物的同时产生电能,受到广泛关注。光合细菌在MFCs领域的应用实现了污水处理、CO₂捕捉、光电转换等多重功能,并显示出了良好的产电特性。本文根据光合细菌在MFCs中所起作用的不同对其产电机理进行评述,并在此基础上分析了光照对光合细菌型MFCs产电性能的影响;针对当前研究的不足与面临的问题,提出了今后光合细菌在MFCs领域的应用前景与发展方向。

关键词: 微生物燃料电池,光合细菌,光照,生物能源

Progress on application of photosynthetic bacteria in microbial fuel cells

WU Yi-Cheng^{1,2} WANG Ze-Jie^{2,3} FU Hai-Yan¹ ZHAO Feng^{2*}

(1. School of Environment Science and Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen, Fujian 361024, China)

(2. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen, Fujian 361021, China)

(3. Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, Shandong 266101, China)

Abstract: Microbial fuel cells (MFCs) are receiving wide attentions as a promising method of producing electricity through degradation of pollutants by microorganism. MFCs with photosynthetic bacteria as biocatalyst showed high capability of electricity generation, and achieved multiple functions of sewage treatment, capture of carbon dioxide, conversion of light energy into electricity, as well as recycling of valuable photosynthetic bacteria biomass. Based on the role of photosynthetic bacteria in the system, the ability of electricity production and electron transfer mechanism were reviewed. Moreover, the effects of light on the performance of MFCs inoculated with photosynthetic bacteria were also discussed. Finally the perspective of application of photosynthetic bacteria in MFCs was proposed.

Keywords: Microbial fuel cells, Photosynthetic bacteria, Light, Bioenergy

Foundation item: Young Teacher project of Fujian Province (No. JA15372); National Natural Science Foundation of China (No. 41471260)

*Corresponding author: Tel/Fax: 86-592-6190766; E-mail: fzhao@iue.ac.cn

Received: December 25, 2015; **Accepted:** July 11, 2016; **Published online** (www.cnki.net): July 19, 2016
基金项目: 福建省中青年教育科研项目(No. JA15372); 国家自然科学基金项目(No. 41471260)

*通讯作者: Tel/Fax: 86-592-6190766; E-mail: fzhao@iue.ac.cn

收稿日期: 2015-12-25; 接受日期: 2016-07-11; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-07-19

社会经济快速发展,环境日趋恶化,化石能源逐渐走向枯竭,污染物资源化技术逐渐成为人们研究的热点领域。微生物燃料电池(Microbial fuel cells, MFCs)通过电化学活性微生物的代谢降解污染物并回收能源,具有环境友好及利于可持续发展的特点,受到越来越广泛的关注^[1-2]。

早在1911年,英国植物学家Potter就发现微生物通过代谢有机物产电的现象,开启了MFCs研究序幕^[3]。近年来,基于电化学活性微生物代谢的多样性,以MFCs为基础,开发了包括淡化海水的微生物脱盐电池^[4]、产氢的微生物电解池^[5]、捕捉CO₂的光合微生物碳捕捉电池^[6]等微生物和电化学结合的衍生技术。应用光合微生物构建光微生物燃料电池(Photo microbial fuel cells, Photo-MFCs)实现了光能到电能的转化。光合细菌是一类能进行不放氧光合作用的原核生物,利用光合细菌构建的Photo-MFCs同步实现污水处理、CO₂捕捉、产电等多重功能,扩大了废水资源化程度^[7-9]。

光合微生物主要包括光合细菌和微藻,微藻应用于MFCs阴极提供电子受体目前已有较多的报道,而光合细菌既能应用于MFCs阳极分解有机污染物提供电子,还能应用于MFCs阴极作为电子受体,其代谢途径的多样为MFCs功能的扩展提供了条件^[10-11]。本文综述了近年来光合细菌在MFCs领域的研究,并就光合细菌在MFCs领域的应用趋势

进行探讨。

1 光合微生物燃料电池

MFCs是一种利用电化学活性微生物的代谢将废水中污染物蕴含的化学能转化为电能的废水处理技术,由阳极、阴极和膜组成。污染物在阳极被电化学活性微生物氧化,释放电子和质子,电子通过阳极和外电路传递至阴极电子受体,而质子通过半透膜到达阴极,形成一个闭合回路实现污染物降解和产电,传统MFCs工作原理如图1A所示^[12]。

光合微生物应用于MFCs领域可构建Photo-MFCs,实现污染物降解的同时将光能转化为电能,受到科研工作者的重视^[13-14]。产电光合微生物是Photo-MFCs能量转换的基础,也是其功能实现的关键^[15]。接种于Photo-MFCs阳极的光合细菌通过光合作用和呼吸作用均能为Photo-MFCs提供电子来源,而阴极生长的微藻在光照条件下能够为Photo-MFCs提供充足的氧气作为电子受体,Photo-MFCs工作原理如图1B所示^[16]。

2 光合细菌在MFCs领域的基础研究

光合细菌种类繁多,代谢途径多样,在MFCs阴极和阳极均有应用,但其在阳极应用相对更为广泛。

2.1 光合细菌在MFCs阳极应用

阳极电化学活性微生物是一类能将代谢底物

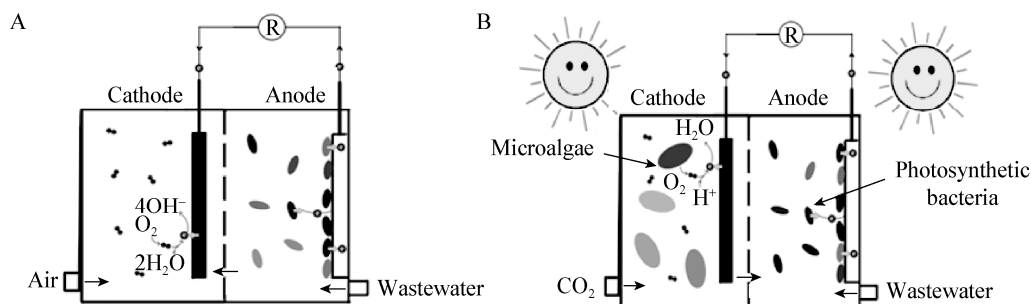


图1 微生物燃料电池示意图^[16]
Figure 1 Schematic diagrams of MFCs^[16]

注:A:传统MFCs;B:Photo-MFCs.

Note: A: Traditional MFCs; B: Photo-MFCs.

产生的电子传递到阳极的微生物,是MFCs功能实现的关键,决定着MFCs的产电性能。光合细菌代谢途径多样,能进行不产氧的光合作用,菌体广泛应用于饵料、饲料、菌肥等生产^[9]。光合细菌应用于MFCs领域,实现废水处理的同时产生电能并收获光合细菌,提高了废水资源化程度。

光合细菌在阳极产电方式主要有两种:(1)通过自身光合作用或呼吸作用产生电子直接产电;(2)通过光合作用产生的氢气作为阳极底物间接产电。微生物是影响MFCs产电性能的关键因素之一,按照MFCs中接种的微生物的种属是否单一,MFCs分为单菌MFCs和混菌MFCs。

2.1.1 光合细菌纯培养物在MFCs阳极的应用:光合细菌光反应中心色素蛋白复合体在光照条件下激发至激发态,激发态的色素蛋白复合体具有更强的还原性,电子更容易从光合细菌传递到电极,从而提高MFCs的产电性能。早在1964年,Berk等^[17]将红螺菌*Rhodospirillum rubrum*接种于MFCs阳极,构建的Photo-MFCs光照条件下获得了0.96 V的开路电压及750 mA/m²的短路电流。在2003年,Chaudhuri等^[18]从佛吉尼亚的牡蛎海湾沉淀物中分离的光合细菌*Rhodospirillum rubrum*是最先被报道可以使用复杂有机物的电化学生物活性光合细菌,可以氧化葡萄糖、蔗糖、乳糖和木糖等有机物实现长期稳定地产电,且库仑效率在80%以上,在富含碳氢化合物废弃生物质的开发利用方面具有较大潜力。祝学远等^[19]利用*R. ferrireducens*构建单室空气阴极MFCs,发现该MFCs电能的输出主要依赖附着在电极表面的菌膜,而与悬浮在溶液中的细菌及溶液中的其他物质基本无关。Xing等^[20]分离到的沼泽红假单胞菌*R. palustris* DX-1有很好的产电性能,能利用广泛的底物产电;接种该菌的单室空气阴极MFCs(电极面积约15 cm²)功率密度高达2 720 mW/m²,高于相同装置接种混合菌群的MFCs。基于*R. palustris* DX-1多样的代谢途径、广泛的底物来源、相对较高的产电性能等诸多优势,该菌具有应用于Photo-MFCs实际工程的潜力。吴义诚等^[21]采用光

照富集及厌氧划线法从污水厂二沉池采集的活性污泥分离到一株光合细菌YC-1,以YC-1为双室MFCs的阳极接种物氧化乙酸钠,铁氰化钾作为阴极电子受体,外载为1 000 Ω时,电池稳定运行时输出电压为0.58 V,且输出电压不受光源光谱影响。曹效鑫^[22]计算以碳布为电极构建的MFCs,阳极接种活性污泥,忽略电极、电解液、质子交换膜等的内阻条件下,其输出最大功率密度理论值为19 369 mW/m²。Cho等^[23]以类球红细菌*Rhodobacter sphaeroides*为阳极构建的单室空气阴极MFCs具有较好的产电性能,光照条件下输出的最大功率密度最高也只有7 900 mW/m²,说明目前光合细菌构建的MFCs产电性能的提高还有较大的空间。

2.1.2 光合细菌混合培养物在MFCs阳极的应用:单菌MFCs有助于研究微生物与电极间的电子传递机制,但混菌MFCs操作简单易行,便于实际应用,其性能往往优于相同底物和运行条件下的单菌MFCs。尽管很多MFCs采用光合细菌纯培养物,但自然环境中的微生物群落更适合于降解有机废物产电^[24-26]。Cao等^[27]发现光照使接种光合细菌混合培养物的Photo-MFCs功率密度提高了7倍。吴义诚等^[28]以恒电位及光照富集的光合细菌混合培养物为阳极接种物构建的双室Photo-MFCs以含乙酸钠的人工废水为底物,输出电压为207 mV(外阻R=1 000 Ω),以养猪废水为底物,电池稳定输出电压为161 mV,COD、氨氮及总磷去除率分别为91.8%、90.2%和81.7%。Xing等^[29]研究单室空气阴极MFCs阳极生物膜微生物群落结构发现*R. palustris* ATCC 17001及*R. sphaeroides* PSB07-19在阳极生物膜中含量丰富。Chandra等^[30]在单室空气阴极MFCs阳极接种河水,光照富集光合细菌和微藻构建的菌藻混合阳极具有较好的产电性能,COD的去除率达96.12%,且对挥发性有机酸也有很好的去除效果。

2.1.3 光合细菌产氢产电方式:光合细菌依靠仅有的光合系统I在限氮等产氢条件下,光氧化有机质产生电子,并依靠固氮酶将H⁺还原为H₂。光合细

菌产氢具有较高的理论效率,并能利用较宽的光波段,且不存在放氧过程,是富有应用潜力的产氢系统^[31-32]。

在光合细菌通过产氢间接产电过程,氢气利用方式分为原位利用和异位利用。阳极培养的光合细菌光合产氢,氢气阳极室氧化实现原位产电。Cho等^[23]在单室空气阴极MFCs中接种光合细菌*R. sphaeroides*,其光合作用产生的氢气原位利用,电池输出的功率密度达790 mW/m²。Rosenbaum等^[33]采用混合放氢系统,在MFCs阳极同时接种大肠杆菌*Escherichia coli* K12和光合细菌*R. sphaeroides*,大肠杆菌*E. coli* K12发酵葡萄糖产生有机酸和乙醇,产生的这些易于降解的小分子有机物代谢产物被光合细菌*R. sphaeroides*于光照条件下氧化,产生的氢气提供给阳极作为氧化底物,电池产生的最大功率密度为7.3 mW/L,混合放氧系统提高了光合细菌产氢效率,进而提高了MFCs的功率密度。

异位利用方式则是将光合细菌产氢光生物反应器与MFCs耦合,底物首先在光合产氢反应器降解并产生氢气,氢气由光生物反应器通入MFCs阳极室氧化。MFCs阳极与光合产氢都需要厌氧的环境,因此光合产氢反应器与MFCs阳极具有较好的系统兼容性,使得光合产氢反应器与MFCs进行耦合成为了可能^[34]。李俊等^[35]构建了由生物膜光合产氢反应器和单室无膜空气阴极MFCs组成的耦合系统,该系统以葡萄糖为底物研究了底物流速对耦合系统产氢和电池性能的影响,结果表明在底物流速为40 mL/h时,不仅有助于阳极电化学活性微生物的生长,还有利于电池阴极性能的改善,MFCs最大功率密度达到50.0 W/m³。

2.2 光合细菌在MFCs阴极的应用

生物阴极型MFCs利用阴极微生物作为催化剂,降低MFCs成本的同时提高其运行稳定性。阴极微生物是生物阴极的核心,也是其功能实现的关键,因此阴极微生物的研究受到广泛关注^[36]。阴极微生物可实现CO₂的还原和高附加值有机物的合成。MFCs阴极还原CO₂是一个吸热过程,不能自

发发生^[7,37]。因而要实现阴极微生物的催化CO₂还原,必须有外源的能量输入。Liu等^[5]通过在阴阳极之间加电压的方法降低阴极电势,从而使得阴极产氢得以发生。

光合细菌具有捕光色素蛋白复合体,能够捕获光能作为体系能量输入,进而克服同化CO₂的热力学能垒,实现CO₂的固定。Cao等^[25]在MFCs阴极接种光合细菌,光照条件下,光合电子传递链中的电子跃迁至高能态,其电势降低后沿呼吸电子传递链传递给作为最终电子受体的CO₂,实现电化学活性光合细菌自身获能和CO₂的还原(图2)。另外,该装置阴极使用CO₂作为电子受体,与使用NO₃⁻和O₂作为电子受体相比优势更加明显:首先,采用的碳酸/碳酸氢盐的缓冲体系成本更低;其次,阳极的出水可以直接进入阴极,这种运行方式可以有效减少阴阳两室溶液间的pH差异,进一步提高输出功率;另外,整个装置呈厌氧状态,有助于提高MFCs的库仑效率^[25]。

3 光照对Photo-MFCs产电性能的影响

光照是影响光合微生物光合作用效率和生长繁殖的重要因素,提高光能利用率对于改善Photo-MFCs性能、降低运行成本、拓展应用领域具有重要意义^[2,38]。光合细菌对光照的响应具有一定

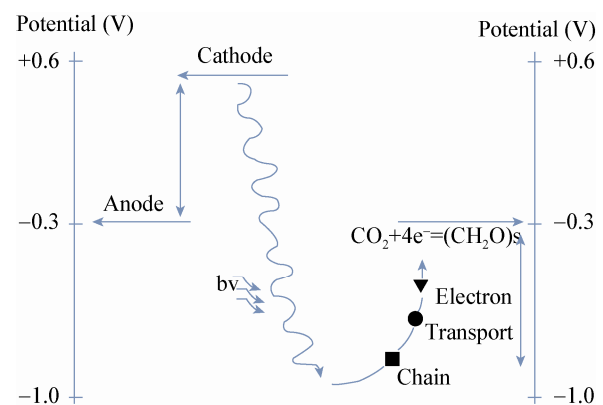


图2 光照条件下阴极同步固碳的电子流向示意图^[25]

Figure 2 Cathode electron flow of carbon sequestration under light condition^[25]

的种属特异性,且存在最适生长的光照环境。光照是一个复杂的生态因子,包括光强和光质等。光合细菌应用于MFCs领域,优化光照条件,促进光合作用,是提高光合细菌型MFCs性能的重要途径。

3.1 光强对 Photo-MFCs 产电性能的影响

电化学活性光合细菌产电的电子来源主要由呼吸作用和光合作用提供,优化呼吸作用和光合作用影响因素,有助于提高接种光合细菌的Photo-MFCs性能。曹效鑫^[22]通过光照和产电双重选择压力,Photo-MFCs阳极富集产电光合细菌,光照条件下光合细菌色素蛋白复合体捕获光子,光反应中心蛋白复合体激发至高能态,电势降低,还原性增强,电势差增大,提高了Photo-MFCs产电性能,但该Photo-MFCs在黑暗条件下运行功率密度仍可达600 mW/m²,说明所富集的包括光合细菌在内的微生物在黑暗条件下能够通过代谢有机物为Photo-MFCs提供电子。吴义诚等^[28]也发现光照能提高光合细菌的产电性能,光照条件下接种光合细菌混合培养物的生物电化学系统开路电势迅速降低,且对光照响应灵敏。但接种沼泽红假单胞菌*R. palustris* DX-1单室空气阴极MFCs最大功率密度基本不受光照的影响,这可能与该菌产电主要依靠呼吸作用提供电子有关^[20]。CO₂还原性能的生物阴极启动过程中,恒定电位和光照两个条件两者缺一不可,当从光条件切换至暗条件时,体系输出电流迅速减小,重新恢复至光照条件,输出电流又逐渐增大^[22]。

3.2 光源对 Photo-MFCs 产电性能的影响

光合细菌细胞内不同种类的色素蛋白复合体捕获特定波长的光进行不产氧的光合作用,不同光谱的光源对光合细菌的生长和代谢具有重要影响。曹效鑫^[22]研究发现光源对光合细菌混合培养物产电性能影响显著,荧光灯波长范围偏窄,与光合细菌可利用光的光谱范围不匹配,接种活性污泥的单室空气阴极MFCs使用荧光灯做光源,阳极室培养物颜色变化不明显,电池长时间运行仍不能启动,光源改用白炽灯后,随反应器的运行,阳极室颜色

呈鲜艳的玫瑰红色,输出电压高于相同运行条件下接种*G. sulfurreducens*的单室空气阴极MFCs。但吴义诚等^[21]发现不同光谱光源对阳极接种光合细菌YC-1的MFCs产电性能没有显著影响,循环伏安结果进一步表明该光合细菌氧化还原活性不受光源影响。不同光谱的光源对电化学活性光合细菌电化性能影响的差异可能是由于不同光合细菌所含的捕光色素蛋白复合体种类和含量的差异所致,由于捕光色素蛋白复合体的差异,不同光合细菌对不同波长的光捕获能力不一,造成不同光源照射下光能利用率的差异。因此研究光合细菌对不同波长光的捕获能力差异,有助于消除光合细菌光饱和效应,提高接种光合细菌的Photo-MFCs光能利用率。

4 总结与展望

近年来,环境污染日趋严重,能源危机日趋加剧,MFCs利用生物电极促进污染物降解和转化,实现污染物资源化,是一项符合可持续发展战略的环境治理新技术。电化学光合细菌或是通过不产氧的光合作用直接产电,或是通过代谢产生电子中介体提高MFCs的产电性能。开展光合细菌在MFCs领域的研究不仅可以促进所涉及的相关学科基础研究发展,还可以提高污染物资源化程度,具有重要的经济和社会意义。

由于光合细菌在MFCs领域的应用研究起步较晚,其产电机理尤其是与电极间电子传递机制了解还不够深入,电化学活性光合细菌光电转化和污染物降解效率都还较低。光合细菌在MFCs领域下一步研究的重点主要包括以下几个方面:

(1) 电化学活性光合细菌的分离,优化微生物群落产电的富集方法,筛选更多高性能产电光合细菌。

(2) 分析光合细菌电子传递途径及光合细菌与电极间电子传递机理,借助于分子生物学技术改造产电光合细菌的代谢途径,提高其电子传递效率,拓展光合细菌在MFCs领域应用。

(3) 构建光合细菌型MFCs与其它生化反应器之间耦合系统,利用不同微生物反应器间优势互补

的特点,优化耦合系统的运行工艺,达到提高废水处理 and 能量回收效率的目的。

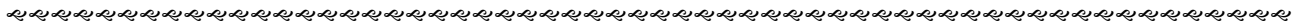
(4) 接种光合细菌的 MFCs 反应器优化,在综合现有 MFCs 反应器结构优势的基础上,结合高效光生物反应器特点做进一步优化,提高光合细菌的光能利用率。

MFCs 产电影响因素较多,且各因素之间相互关联,随着生物电化学及分子生物学等交叉学科理论和技术的发展,为光合细菌产电性能的逐步提高提供了有力支撑,光合细菌在 MFCs 领域应用也将愈加广泛。

参 考 文 献

- [1] Park DH, Zeikus JG. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003, 81(3): 348-355
- [2] Zhao F, Rahunen N, Varcoe JR, et al. Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(13): 4971-4976
- [3] Potter MC. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds[J]. *Proceedings of Royal Society B: Biological Sciences*, 1911, 84(571):260-276
- [4] Cao XX, Huang X, Liang P, et al. A new method for water desalination using microbial desalination cells[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(18): 7148-7152
- [5] Liu H, Grot S, Logan BE. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(11): 4317-4320
- [6] Wang X, Feng YJ, Liu J, et al. Sequestration of CO₂ discharged from anode by algal cathode in microbial carbon capture cells (MCCs)[J]. *Biosensors & Bioelectronics*, 2010, 25(12): 2639-2643
- [7] Wu YQ, Song HY. Advance in the study on molecular biology of nitrogen fixation in photosynthetic bacteria[J]. *Plant Physiology Communications*, 1991, 27(3): 161-166 (in Chinese)
吴永强, 宋鸿遇. 光合细菌固氮分子生物学研究进展[J]. *植物生理学通讯*, 1991, 27(3): 161-166
- [8] Li QS, Tan DQ, Wang YQ. Growth promotion effect of DL-1 microbial additive on cultured fish[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 1990, 14(4): 368-371 (in Chinese)
李勤生, 谭德清, 王业勤. DL-1 微生物饲料添加剂对养殖鱼类的促长作用[J]. *水生生物学报*, 1990, 14(4): 368-371
- [9] Nissen H, Dundas ID. *Rhodospirillum salinarum* sp. nov., a halophilic photosynthetic bacterium isolated from a Portuguese saltern[J]. *Archives of Microbiology*, 1984, 138(3): 251-256
- [10] Xiao L, He Z. Applications and perspectives of phototrophic microorganisms for electricity generation from organic compounds in microbial fuel cells[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 37: 550-559
- [11] Wu YC, Guan K, Wang ZJ, et al. Isolation, identification and characterization of an electrogenic microalgae strain[J]. *PLoS One*, 2013, 8(9): e73442
- [12] Liu H, Ramnarayanan R, Logan BE. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell[J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, 38(7): 2281-2285
- [13] Bombelli P, McCormick AJ, Scott AM, et al. Quantitative analysis of the factors limiting solar power transduction by *Synechocystis* sp. PCC 6803 in biological photovoltaic devices[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(11): 4690-4698
- [14] McCormick AJ, Bombelli P, Scott AM, et al. Photosynthetic biofilms in pure culture harness solar energy in a mediatorless bio-photovoltaic cell (BPV) system[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(11): 4699-4709
- [15] Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, et al. Microbial fuel cells: methodology and technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(17): 5181-5192
- [16] Rosenbaum M, He Z, Angenent LT. Light energy to bioelectricity: photosynthetic microbial fuel cells[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2010, 21(3): 259-264
- [17] Berk RS, Canfield JH. Bioelectrochemical energy conversion[J]. *Applied Microbiology*, 1964, 12(1): 10-12
- [18] Chaudhuri SK, Lovley DR. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells[J]. *Nature Biotechnology*, 2003, 21(10): 1229-1232
- [19] Zhu XY, Feng YL, Li SH, et al. Construction of a single-chamber direct microbial fuel cell and preparation of cathode electrode[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2007, 7(3): 594-597 (in Chinese)
祝学远, 冯雅丽, 李少华, 等. 单室直接微生物燃料电池的阴极制作及构建[J]. *过程工程学报*, 2007, 7(3): 594-597
- [20] Xing DF, Zuo Y, Cheng SA, et al. Electricity generation by *Rhodospseudomonas palustris* DX-1[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(11): 4146-4151
- [21] Wu YC, Xiao Y, Zhao F. Isolation and identification of a photosynthetic bacteria and its electricity-generating characteristics[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(10): 4503-4507 (in Chinese)
吴义诚, 肖勇, 赵峰. 一株光合细菌的分离鉴定及其产电特性[J]. *环境工程学报*, 2014, 8(10): 4503-4507
- [22] Cao XX. Mechanism and application of exoelectrogen-electrode interaction in microbial fuel cell[D]. Beijing: Doctoral Dissertation of Tsinghua University, 2009 (in Chinese)
曹效鑫. 微生物燃料电池中产电菌与电极的作用机制及其应用[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2009
- [23] Cho YK, Donohue TJ, Donohue TJ, et al. Development of a solar-powered microbial fuel cell[J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, 104(3): 640-650
- [24] Bond DR, Holmes DE, Tender LM, et al. Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments[J]. *Science*, 2002, 295(5554): 483-485
- [25] Cao XX, Huang X, Liang P, et al. A completely anoxic microbial fuel cell using a photo-biocathode for cathodic carbon dioxide reduction[J]. *Energy & Environmental Science*, 2009, 2(5): 498-502
- [26] Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation[J]. *Trends in Biotechnology*, 2005, 23(6): 291-298
- [27] Cao XX, Huang X, Boon N, et al. Electricity generation by an enriched phototrophic consortium in a microbial fuel cell[J]. *Electrochemistry Communications*, 2008, 10(9): 1392-1395
- [28] Wu YC, Wang ZJ, Liu LD, et al. Resource recovery of swine wastewater using photo microbial fuel cells[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(2): 456-460 (in Chinese)
吴义诚, 王泽杰, 刘利丹, 等. 利用光微生物燃料电池实现养猪废水资源化利用研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2): 456-460
- [29] Xing DF, Chen SA, Logan BE, et al. Isolation of the exoelectrogenic denitrifying bacterium; *Comamonas denitrificans* based on dilution to extinction[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(5): 1575-1587
- [30] Chandra R, Subhash GV, Mohan SV, et al. Mixotrophic operation of photo-bioelectrocatalytic fuel cell under anoxygenic microenvironment enhances the light dependent bioelectrogenic

- activity [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 109: 46-55
- [31] Miyake J, Kawamura S. Efficiency of light energy conversion to hydrogen by photosynthetic bacteria *Rhodobacter sphaeroides*[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1987, 12(3): 147-149
- [32] Fascetti E, D'Addrio E, Todini O, et al. Photosynthetic hydrogen evolution with volatile organic acids derived from the fermentation of source selected municipal solid wastes[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1998, 23(9): 753-760
- [33] Rosenbaum M, Schröder U, Scholz F. In situ electrooxidation of photobiological hydrogen in a photobioelectrochemical fuel cell based on *Rhodobacter sphaeroides*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(16): 6328-6333
- [34] Elmekawy A, Hegab H M, Vanbroekhoven K, et al. Techno-productive potential of photosynthetic microbial fuel cells through different configurations[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39(6): 617-627
- [35] Li J, Xu Z, Zhu X, et al. Behavior of photosynthetic hydrogen production-microbial fuel cell coupled system for energy recovery and wastewater treatment[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2012, 33(6): 1043-1046 (in Chinese)
李俊, 徐众, 朱恂, 等. 光合产氢-微生物燃料电池耦合系统的能量回收与废水处理特性[J]. *工程热物理学报*, 2012, 33(6): 1043-1046
- [36] He Z, Angenent LT. Application of bacterial biocathodes in microbial fuel cells[J]. *Electroanalysis*, 2006, 18(19/20): 2009-2015
- [37] Schink B. Microbially driven redox reactions in anoxic environments: Pathways, energetics, and biochemical consequences[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2006, 6(3): 228-233
- [38] Wu YC, Wang ZJ, 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



征订启事

欢迎订阅 《微生物学通报》

《微生物学通报》创刊于 1974 年, 月刊, 是中国科学院微生物研究所和中国微生物学会主办, 国内外公开发行, 以微生物学应用基础研究及技术创新与应用为主的综合性学术期刊。刊登内容包括: 基础微生物学研究, 农业微生物学研究, 工业微生物学研究, 医学微生物学研究, 食品微生物学研究, 环境微生物学研究, 微生物功能基因组研究, 微生物蛋白组学研究, 微生物模式菌株研究, 微生物工程与药物研究, 微生物技术成果产业化及微生物教学研究改革等。

本刊为中文核心期刊。曾获国家优秀科技期刊三等奖, 中国科学院优秀科技期刊三等奖, 北京优秀科技期刊奖, 被选入新闻出版总署设立的“中国期刊方阵”并被列为“双效”期刊。

据中国科学技术信息研究所信息统计, 本刊 2012—2015 年以国内“微生物、病毒学类期刊”综合评价总分第一名而连续 4 年获得“百种中国杰出学术期刊奖”, 并入选 300 种“中国精品科技期刊”, 成为“中国精品科技期刊顶尖学术论文(F5000)”项目来源期刊。2014 年获得中国科学院科技期刊三等出版基金资助; 2015 年获得中国科协精品科技期刊工程项目资助。

欢迎广大读者到邮局订阅或直接与本刊编辑部联系购买, 2017 年每册定价 80 元, 全年 960 元, 我们将免邮费寄刊。

邮购地址: (100101) 北京朝阳区北辰西路 1 号院 3 号中国科学院微生物研究所《微生物学通报》编辑部

Tel: 010-64807511; E-mail: bjb@im.ac.cn, tongbao@im.ac.cn

网址: <http://journals.im.ac.cn/wswxtbcn>

国内邮发代号: 2-817; 国外发行代号: M413