

产电微生物及微生物燃料电池最新研究进展

洪义国^{1,2} 郭俊² 孙国萍^{2*}

(¹ 中国科学院华南植物园 广州 510650)

(² 广东省微生物研究所 广东省菌种保藏与应用重点实验室 广州 510070)

摘 要 新型产电微生物 (*Electricigens*) 的发现,使得微生物燃料电池概念的内涵发生了根本性的变化,展现了广阔的应用前景。这种微生物能够以电极作为唯一电子受体,把氧化有机物获得的电子通过电子传递链传递到电极产生电流,同时微生物从中获得能量而生长。这种代谢被认为是一种新型微生物呼吸方式。以这种新型微生物呼吸方式为基础的微生物燃料电池可以同时进行废水处理和生物发电,有望可以把废水处理发展成一个有利可图的产业,是 MFC 最有发展前景的方向。

关键词 :产电微生物 微生物燃料电池 新型微生物呼吸方式

中图分类号 :X172 文献标识码 :A 文章编号 :0001-6209(2007)01-0173-05

随着人类的进步与发展,对能源的需求愈加强烈。为了解决能源短缺问题,人类在积极寻求新型能源方式。在能源的寻求过程中,科学家把眼光投向了微生物,利用微生物产生电能,即微生物燃料电池 (Microbial Fuel Cell, MFC)。MFC 并不是一个新概念,早在 1911 年英国植物学家 Potter 发现微生物可以产生电流^[1],生物燃料电池研究由此开始,但在以后的发展中,有关 MFC 的研究一直进展缓慢。早期的 MFC 是用发酵型的酵母和细菌进行制电,但其机制并不清楚,初步认为是在微生物发酵过程产生的还原产物与电极直接作用而产生电流。20 世纪 80 年代后,由于电子传递中间体的广泛应用,微生物燃料电池的输出功率有了较大提高,但这种装置仍然存在诸多缺点,因此也制约了其发展。近几年来,随着直接将电子传递给固体电子受体的纯培养菌种的发现,科学家发明了无需使用电子传递中间体的微生物电池,其中所使用的菌种可以将电子直接传递给电极而产生持续高效稳定的电流。特别是美国科学家 Logan 的同时废水处理 and 微生物发电的研究,给 MFC 的研究注入新的活力,引起了世界各国科学家的高度关注^[2]。

在 MFC 这个系统中,产电微生物 (*Electricigens*) 是核心要素。因此产电微生物的生理生化特性、生态特性及电子传递特征的研究,对于深入理解现代 MFC 的产电机理及优化产电模型有重要的理论和实践意义。本文主要从生物学的角度对产电微生物及 MFC 的最新进展做一评述。

1 新型微生物燃料电池的工作原理

MFC 的基本装置如图 1 所示。这一装置有两个槽组成,分别为阳极槽和阴极槽。阳极槽保持厌氧,阴极槽保持有氧。阳极放在阳极槽中,接受电子;阴极放在阴极槽中,传递

电子到末端电子受体氧气。阳极和阴极之间有外接电线连接,中间还串联一个电阻器或其他电子设备。在阳极槽和阴极槽之间还装有一个阳离子半透膜, H^+ 可以自由通过,而氧气不能自由通过。最近,Logan 设计的电池装置是一个圆柱形的有机玻璃密闭槽,是单一反应槽,里面装有一条阳极石墨棒,它们围绕着八根阴极棒。密闭槽中间以质子交换膜间隔,密闭槽外部以铜线和可调电阻组成闭合电路用作检测电子流^[2]。

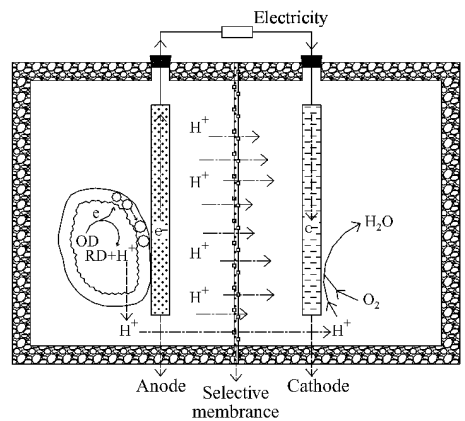


图 1 微生物燃料电池的工作原理

Fig. 1 Electricity producing mechanism of MFC. OD-oxidizing electron donor; RD-reducing electron donor

现代的 MFC 是基于微生物的厌氧呼吸为基础,即以阴极为唯一电子受体的电子传递过程。在 MFC 工作过程中,首先是通过微生物氧化有机底物产生电子,电子被阳性电极接受后通过电线传递到阴性电极,微生物在氧化底物过程中产生的质子通过阳离子半透膜从厌氧槽渗透到好氧槽。最

基金项目 国家自然科学基金项目(30670020);广东省自然科学基金项目(05100365 015017)

* 通讯作者。Tel 86-020-87684471; E-mail: guopingsun@163.com

作者简介 洪义国(1974-)男,内蒙赤峰人,博士,研究方向为环境微生物。E-mail: hongyiguo0708@yahoo.com.cn

收稿日期 2006-09-06 接受日期 2006-11-20 修回日期 2006-10-25

后,在阴极电极上氧气与质子和电子发生作用生成水。这样,通过源源不断的电子流动产生电流。

现代的MFC与传统的氢气或甲烷驱动的非生物的燃料电池相比较有显著的不同。非生物的燃料电池不但需要昂贵的催化剂在高温条件下促进电子供体的氧化,而且因为氢气或甲烷气体具有高度的爆炸性和毒性,需要做高度的纯化。MFC是利用自然存在的微生物在常温常压条件下催化燃料的氧化,可以利用多种被认为是没有价值的“垃圾”燃料,例如有机废水和沉积物中的有机物,而且不需要像非生物的燃料电池那样的高度复杂的调节分配系统。所以,MFC在偏远地区和发展中国家是很有吸引力的电力能源。

MFC与酶燃料电池也有很大的不同。酶燃料电池依靠酶的作用氧化有机物,但这种氧化是不彻底的,只能收获少量的电能。而MFC是利用完整的菌体细胞氧化有机物,能够高效的转化有机物产生持续稳定的电流。

2 产电微生物

正如产甲烷微生物被称为Methanogens一样,产电微生物被称为Electricigens^[3]。Electricigens是由于近几年在微生物燃料电池研究领域的突破性进展而发展起来的新概念,就是那些能够厌氧条件下完全氧化有机物成CO₂,然后把氧化过程中产生的电子通过电子传递链传递到电极上产生电流的微生物,同时微生物在电子传递过程中获得能量支持生长。

2.1 泥细菌

泥细菌(*Geobacter*, *G.*)是非常重要的产电微生物。研究发现,将石墨电极或铂电极插入厌氧海水沉积物中,与之相连的电极插入溶解有氧气的水中,就有持续的电流产生^[4,5]。对紧密吸附在电极上的微生物群落进行分析后得出结论:*Geobacteraceae*科的细菌在电极上高度富集。由此得出结论:上述电池反应中电极作为*Geobacteraceae*科细菌的最终电子受体。Lowley等人的研究发现:*G. sulfurreducens*可以只用电极做电子受体而完全氧化电子供体,在无氧化还原介体的情况下,它可以定量转移电子给电极,这种电子传递归功于吸附在电极上的大量细胞,电子传递速率为0.21~1.2 μmol电子·mg⁻¹蛋白质·min⁻¹,与柠檬酸铁做电子受体时($E^0 = +0.37V$)的速率相似^[6]。目前发现,能够以电极作为唯一电子受体的泥细菌包括:*G. sulfurreducens*, *G. metallireducens*, *G. psychrophilus*, *Desulfuromonas acetoxidans*与*Geopsychrobacter electrophilus*。由于*G. sulfurreducens*的全基因组序列的测序已经完成,有很好的遗传背景,所以基本上都是以*G. sulfurreducens*为模式菌进行MFC的研究^[7-9]。

2.2 希瓦氏菌

希瓦氏菌由于其呼吸类型的多样性而得到广泛研究。韩国科学家Kim的研究首次发现了腐败希瓦菌(*Shewanella putrefaciens*)在无需氧化还原介质条件下,能够氧化乳酸盐产生电,从而可以设计出无介质的高性能微生物燃料电池^[10]。最近,Kin(2002)等人采用循环伏安法来研究*S. putrefaciens* MR-1, *S. putrefaciens* IR-1和SR-21的电化学活性,并分别以

这几种细菌为催化剂,乳酸盐为燃料组装微生物燃料电池。发现不用氧化还原介体,直接加入燃料后,几个电池的电动势都有明显提高^[11]。其中*S. putrefaciens* IR-1的电动势最大,可达0.5V。当负载1kΩ的电阻时,它有最大电流,约为0.04mA。

2.3 红螺菌

马萨诸塞州大学的研究人员发现铁还原红螺菌(*Rhodospirillum rubrum*)能够代谢糖类转化为电能,且转化效率高,第一次实现了利用纯培养单一微生物转化糖类为电能。*R. rubrum*是一种氧化铁还原微生物,它无需催化剂就可将电子直接转移到电极上^[12]。相比其他微生物燃料电池,*R. rubrum*电池最重要的优势就是它将糖类物质转化为电能,它可以完全氧化葡萄糖,这样就大大推动了微生物燃料电池的实际应用进程。进一步研究表明,这种电池作为蓄电池具有很多优点:(1)放电后补充底物可恢复至原来水平;(2)充放电循环中几乎无能量损失;(3)充电迅速;(4)电池性能长时间稳定。

2.4 其它产电微生物

通过分析MFC电极表面沉积的微生物发现,*Desulfobulbaceae*菌科也是一类重要的产电微生物,其中研究最多的是*Desulfobulbus propionicus*。*Desulfobulbaceae*菌科细菌能够利用电极作为唯一电子受体氧化S⁰成为SO₄²⁻获得能量^[13]。另外发现嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophila*)能够利用酵母抽提物作为燃料产生电流,但不能氧化乙酸盐产电。因为乙酸盐是很多有机物的发酵终产物,所以推测*A. hydrophila*不能有效的氧化有机物,限制了其在MFC中的应用^[14]。其它的如大肠杆菌(*Escherichia coli*)假单胞菌(*Pseudomonas*)枯草杆菌(*Bacillus*)及变形细菌(*Proteus*)等必须依赖氧化还原中间体才能把从有机物氧化过程中产生的电子传递到电极,效率很慢,与本文论述的主题内容差别较大,不再赘述。

2.5 产电微生物的改造

利用电极作为唯一电子受体的发现,给MFC的研究与开发带来光明的前景。因为微生物产电不是与其生存直接相关的自然选择压力,只是厌氧呼吸过程的延伸。所以微生物的产电效率在自然条件下是很低的。因此对现有的产电微生物进行驯化改良是进一步提高产电微生物的产电效率重要一步。其主要途径之一是对微生物进行基因工程改造,例如增加某个基因过量表达与电极直接接触的膜蛋白,提高电子传递率。另外还可以通过增加选择压力,迫使微生物本身向着高产电效率的方向进化。对于产电微生物的驯化目前还没有大的进展^[15]。

3 MFC与微生物呼吸

MFC与微生物的呼吸密切相关。在MFC中,微生物氧化有机物,然后把氧化过程中产生的电子通过电子传递链传递到燃料电池电极上产生电流,同时微生物在电子传递过程中获得能量支持生长,这一过程被认为是一种新的微生物呼吸方式,即以电极作为唯一电子受体的呼吸产电过程。电子从

电子供体到 Cytochrome c 传递过程中产生的能量用于细胞的生长和代谢,而电子从 Cytochrome c 到 O_2 传递产生的能量可以转化为 MFC 的电。所以说微生物呼吸是 MFC 的重要理论基础^[16]。近年来,本实验室在微生物呼吸产能方面做了积极的探究,分离到两株希瓦氏菌新种脱色希瓦氏菌 *S12* (*S. decolourationis* S12)^[17] 和中国希瓦氏菌 D14^[18]。利用这两株菌为模式菌,发现了一种新的细菌呼吸方式-偶氮呼吸,并且在偶氮呼吸与 $Fe(III)$ 呼吸的关系的研究中也取得了积极进展^[19-21]。这些研究成果,为开发新型 MFC 奠定了理论基础。利用 S12 菌和 D14 菌进行 MFC 的研究,有望在微生物产电和废水处理中有所突破。

4 电子传递机制

现在还没有证据表明微生物传递电子到石墨是一个自然现象,推测产电微生物传递电子到 MFC 电极上的能力与他们把电子传递到天然受体的机制密切相关,例如铁或锰氧化物及腐殖质等。所以深入理解微生物传递电子到这些天然受体机制,对于提高产电微生物传递电子到 MFC 固体电极的认识具有重要意义。希瓦氏菌 *S. oneidensis* MR-1 和泥细菌 *G. sulfurreducens* 都是典型的异化铁或锰还原菌,能以铁或锰氧化物为唯一电子受体获得能量。对于 *S. oneidensis* 和 *G. sulfurreducens* 铁还原的电子传递已经积累了很多的资料,而且全基因组序列已经获得,有了很好的遗传背景供参考^[22-24]。利用 *S. oneidensis* 和 *G. sulfurreducens* 进行 MFC 电子传递机制的研究具有诸多优势。

目前大部分微生物电池的底物为简单的有机酸,需依靠发酵性微生物先将糖类或复杂有机物转化为其所需小分子有机酸方可利用。微生物可以依靠其膜上的脱氢酶直接氧化小分子的有机酸,例如甲酸盐、乙酸盐、乳酸盐等,从有机物中释放的电子传递给膜上的电子载体。另外产电微生物还可以氧化糖类等有机物生成还原力($NADH$, $FADH_2$),这些还原力与脱氢酶作用释放电子到电子传递链。

通过电子传递链的传递,电子由膜内传递到膜外。电子传递链由多个电子传递载体组成。证据表明,一系列的 C 型细胞色素蛋白在电子传递中发挥作用。全基因组序列分析表明, *G. sulfurreducens* 大约有 100 个 C 型细胞色素蛋白编码基因^[22], *S. oneidensis* MR-1 有 37 个 C 型细胞色素蛋白编码基因^[23],这些 C 型细胞色素可能分布在菌体的内膜、外膜和周质空间。

电子从菌体的外膜传递到电极是电子传递的关键一步。在 $Fe(III)$ 的还原的研究中发现,细菌的一种特殊的菌毛在电子传递中起重要作用。这种菌毛叫做纳米电线(Nanowire),它能与固体铁氧化物直接接触,把电子从菌体传递给 $Fe(III)$ 。目前在泥细菌、希瓦氏菌等多种菌株中发现了这种具有电子传输功能的纳米电线,推测纳米电线在微生物中是广泛存在的现象。生物学家 Lovely 所带领的研究小组发现,这种微生物纳米线路宽仅有 3 到 5 纳米,但长度是宽度的 1000 倍,拥有非常好的导电性。这么长的细小导体结构在生物界

是空前的,它改变了我们对微生物控制电子的传统理解,同时告诉我们微生物纳米线路在极小电子设备的开发中将会非常有用,另外在能源污染处理、微环境传感器和生物开发等领域也将有所突破。微生物纳米电线可以在电子产业的纳米技术领域得到新的应用,电子设备的进一步微化就需要这种纳米线路,尽管利用金属、硅或碳等传统材料制造纳米线路是非常困难和昂贵的,但是利用微生物纳米电线实现这一过程也许变得很容易。在 MFC 的电子传递中,产电微生物的纳米电线可能在 MFC 的电子传递中把电子从菌体直接传递给电极^[25,26]。

另外马萨诸塞州大学 Holmes 的研究表明, *G. sulfurreducens* 的 $Fe(III)$ 的还原必需的外膜蛋白 OmcS 和 OmcE 也参与了将电子传到 MFC 电极的传递^[27,28]。

有关产电微生物电子传递机制目前还不够清楚,有待进一步的深入研究。电子传递机制的阐明,对于改善 MFC 的构造、优化电极材料以及提高电子传递效率是重要的理论基础。

5 MFC 的应用及展望

通过我们的研究工作,提出以下几点体会。

(1) 在偏远地方为电子监控设备提供电能。这一应用有望可以在短期实现。华盛顿大学和俄勒冈州立大学的研究人员合作开发了一套利用海洋污泥的 MFC 系统,这个系统能够有效的为海上分析检测设备提供电源^[29]。MFC 还可以在诸如深海底部和国土安全的军事“特殊区域”具有潜在用途。

(2) 废水处理。在废水中,一般含有丰富的有机物质。利用 MFC 不仅可以净化水质,还可以发电。因此 MFC 有望可以把废水处理变成一个有利可图的产业,是 MFC 最有发展前景的方向。最近由美国宾夕法尼亚州立大学的科学家 Logan 率领的一个研发小组宣布他们研制出一种新型的微生物燃料电池,可以把未经处理的污水转变成干净用水和电源^[2]。只要是富含有机物的地方都可以使用这种电池。不过,微生物燃料电池最好的用途还是处理污水,假如污水处理厂使用此类设备,那么它们可以一边处理废水一边发电,从而大大降低污水处理成本。维持污水处理厂的正常运作是一件花费相当高的事情,无论对发展中国家还是对工业化国家来说,处理废水同时又能发电的新燃料电池技术都相当诱人。随着人类进入工业化以来,各种废水的产量也急剧增加。根据美国国家发展委员会统计,美国每年需要处理 1.25 亿 m^3 的生活污水,处理费用大约为 250 亿美元,而大部分的成本都花在维持处理厂运转所需的能源上。因此,若微生物燃料电池能降低成本和提高发电效率,将会为废水处理节省庞大的开支。另外 MFC 还可以用来处理畜牧厂的废水,养猪废水,工业废水^[30-32]。

(3) 生物修复。通常情况下,为了促进有毒污染物的生物降解,加入电子供体或电子受体支持微生物的呼吸^[33]。电极可以作为电子受体支持微生物呼吸,达到降解污染物的目的。

的。例如, *G. metallireducens* 能够以电极为唯一电子受体有效的降解甲苯^[34]。另外利用电极作为电子供体支持微生物有毒污染物的还原。例如在 U 的污染中, U^{6+} 可以从电极上获得微生物产生的电子而还原成为 U^{4+} , 附着在阴极表面而去除^[35]。

随着 MFC 在未来的不断进步和发展, 将会有越来越多的应用领域。有人预测在宇航员的太空旅行中, 可以用到太空废物支持 MFC 产能。

6 结语

高产电微生物的不断被发现, 使得 MFC 的内涵发生了根本性的变革, 同时也展现了 MFC 的广阔应用前景, 是目前全球关注热点生物技术之一。但是这一研究正处于起步阶段。目前世界上几个发达国家的实验室正在加紧新型微生物燃料电池的研究, 其中包括美国的马萨诸塞州大学和华盛顿大学、比利时根特大学、法国里昂生态中心、宾夕法尼亚大学、德国 Greifswald 大学、北爱尔兰的 Wageningen 大学等。但在我们国家, 只有极少数的单位在微生物燃料电池方面进行了初步研究。预计在不远的将来, MFC 的研究将会获得重大突破。如何充分将 MFC 为人类所用, 如何提高生物质的转化效率, 还需要生物学家、电化学家和工程学家的协手努力。

参 考 文 献

- [1] Potter MC. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proc R Soc Lond B*, 1911, **84** :260 - 276.
- [2] Logan BE. Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation. *Water Science*, 2005, **52** :31 - 37.
- [3] Lovley DR. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology*, 2006, **17** :327 - 332.
- [4] Reimers CE, Tender LM, Fertig S, *et al.* Harvesting energy from the marine sediment-water interface. *Environ Sci Technol*, 2001, **35** :192 - 195.
- [5] Bond DR, Holmes DE, Tender LM. *et al.* Electrode-reducing microorganisms harvesting energy from marine sediments. *Science*, 2002, **295** :483 - 485.
- [6] Bond DR, Lovley DR. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl Environ Microbiol*, 2003, **69** :1548 - 1555.
- [7] Tender LM, Reimers CE, Stecher HA, *et al.* Harnessing microbially generated power on the seafloor. *Nature Biotechnol*, 2002, **20** :821 - 825.
- [8] Bond DR, Lovley DR. Evidence for involvement of an electron shuttle in electricity generation by *Geothrix fermentans*. *Appl Environ Microbiol*, 2005, **71** :2186 - 2189.
- [9] Bond DR, Lovley DR. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl Environ Microbiol*, 2003, **69** :1548 - 1555.
- [10] Kim BH, Kim HJ, Hyun MS. *et al.* Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *J Microbiol Biotechnol*, 1999, **9** :127 - 131.
- [11] Kim HJ, Park HS, Hyun MS, *et al.* A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme Microbiol Technol*, 2002, **30** :145 - 152.
- [12] Chaudhuri SK, Lovley DR. Electricity from direct oxidation of glucose in mediator-less microbial fuel cells. *Nature Biotechnol*, 2003, **21** :1229 - 1232.
- [13] Holmes DE, Bond DR, Lovley DR. Electrontransfer to Fe(III) and graphite electrodes by *Desulfobulbus propionicus*. *Appl Environ Microbiol*, 2004, **70** :1234 - 1237.
- [14] Pham CA. A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Aeromonas hydrophila* isolated from a microbial fuel cell. *FEMS Microbiol Lett*, 2003, **223** :129 - 134.
- [15] Lovley DR. Taming electricigens. *The Scientist*, 2006, **7** :46
- [16] Logan BE, Regan JM. Microbial Fuel Cells-Challenges and Applications. *Environ Sci Technol*, 2006, **40** :5172 - 5180.
- [17] Xu M, Guo J, Cen Y, *et al.* *Shewanella decolorationis* sp. nov., a dye-decolorating bacterium isolated from an activated sludge of waste-water treatment plant. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2005, **55** :363 - 368.
- [18] 许玫英, 郭俊, 钟小燕, 等. 一个降解染料的希瓦氏菌新种——中国希瓦氏菌. *微生物学报*, 2004, **44** (5) :561 - 566.
- [19] Hong Y, Chen X, Guo J, *et al.* Effects of electron donors and acceptors on anaerobic azo dyes reduction by *Shewanella decolorationis* S12. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2006, DOI 10.1007/s00253-006-0657-2.
- [20] Hong Y, Guo J, Xu Z, *et al.* Respiration and growth of *Shewanella decolorationis* S12 with azo compound as sole electron acceptor. *Appl Environ Microbiol*, 2006, published online.
- [21] 许玫英, 林培真, 孔祥义, 等. 中国希瓦氏菌 D14T 的 Fe(III) 还原特性及其影响因素. *微生物学报*, 2005, **45** (3) :463 - 466.
- [22] Methé BA. The genome of *Geobacter sulfurreducens*: insights into metal reduction in subsurface environments. *Science*, 2003, **302** :1967 - 1969.
- [23] Heidelberg JF, Paulsen IT, Nelson KE, *et al.* Genome sequence of the dissimilatory metal ion-reducing bacterium *Shewanella oneidensis*. *Nat biotech*, 2002, **20** :1118 - 1123.
- [24] 洪义国, 许玫英, 郭俊, 等. 细菌的 Fe(III) 还原. *微生物学报*, 2005, **45** (4) :653 - 656.
- [25] Reguera G, McCarthy KD, Mehta T, *et al.* Extracellular electron transfer via microbial nanowires. *Nature*, 2005, **435** :1098 - 1101.
- [26] Gorby YA, Yanina S, McLean JS, *et al.* Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *PNAS*, 2006, **103** :11358 - 11363.
- [27] Holmes DE, Chaudhuri SK, Nevin KP, *et al.* Microarray and genetic analysis of electron transfer to electrodes in *Geobacter sulfurreducens*. *Environ Microbiol*, 2006, **8** :1805 - 1815.
- [28] Mehta T, Coppi MV, Childers SE, *et al.* Outer membrane c-type cytochromes required for Fe(III) and Mn(IV) oxide reduction in *Geobacter sulfurreducens*. *Appl Environ Microbiol*, 2005, **71** :8634 - 8641.
- [29] Tender LM, Reimers CE, Stecher HA, *et al.* Harnessing microbially generated power on the seafloor. *Nature Biotechnol*, 2002, **20** :821 - 825.
- [30] Angenent LT, Karim KA, Dahhan MH, *et al.* Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural

- [31] Mina B , Kima J , Oha S , *et al.* Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells. *Water Research* , 2005 , **39** : 4961 – 4968.
- [32] Min B , Logan BE. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell. *Environ Sci Technol* , 2004 , **38** : 5809 – 5814.
- [33] Gregory KB , Bond DR , Lovley DR. Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *Environ Microbiol* , 2004 , **6** : 596 – 604.
- [34] Anderson RT , Lovley DR. Ecology and biogeochemistry of *in situ* groundwater bioremediation. *Adv Microbial Ecol* , 1997 , **15** : 289 – 350.
- [35] Gregory KB , Lovley DR. Remediation and recovery of uranium from contaminated subsurface environments with electrodes. *Environ Sci Technol* , 2005 , **39** : 8943 – 8947.

Recent progress in electricigens and microbial fuel cell

HONG Yi-guo^{1,2} , GUO Jun² , SUN Guo-ping^{2*}

(¹ South China Institute of Botany , Chinese Academy of Science , Guangzhou 510650 , China)

(² Guangdong Institute of Microbiology , Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application , Guangzhou 510070 , China)

Abstract :The discovery of Electricigens substantially changed the meaning of Microbial Fuel Cell (MFC) and exhibited a broad prospect for application . This kind microorganism can completely oxidize organic compounds with electrode as sole electron acceptor and then transfer the electrons derived from that oxidation onto the anode of a MFC through electron transport chain . When the electrons transfer from anode to cathode , the current was generated continuously . At same time , they gain energy to support their growth from the electron transport . The biochemical metabolism process was considered as a new type microbiological respiration . Based on the new concept , MFC offered the possibility of efficient treatment waste-water and generation electricity simultaneously , which would fuel the waste-water into a profitable industry in the future . So the application of MFC in the waste-water treatment would be most promising .

Keywords : Electricigens ; Microbial fuel cell ; New type respiration

Foundation item : National Natural Science Foundation(30670020) ; Guangdong Provincial Programs for Natural Science Foundation Group(015017) ; Guangdong Provincial Natural Science Foundation(032319)

* Corresponding author. Tel/Fax 86-20-87684471 ; E-mail : guopingsun@163.com

Received : 6 September 2006 / Accepted : 20 November 2006 / Revised : 25 October 2006 ©中国科学院微生物研究所期刊联合编辑部 <http://journals.im.ac.cn>