

微生物学报 *Acta Microbiologica Sinica*
50(7):847-852; 4 July 2010
ISSN 0001-6209; CN 11-1995/Q
<http://journals.im.ac.cn/actamicrocn>

微生物燃料电池在环境污染治理研究中的应用进展

杨永刚^{1,2,3,4}, 孙国萍^{1,2,3}, 许玫英^{1,2,3*}

⁽¹⁾ 广东省微生物研究所, 广州 510070)

⁽²⁾ 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广州 510070)

⁽³⁾ 广东省微生物应用新技术公共实验室, 广州 510070)

⁽⁴⁾ 华南理工大学生物工程与科学学院, 广州 510006)

摘要:近年来,微生物燃料电池(Microbial fuel cells, MFCs)研究得到了迅速发展。由于可以将可生物降解有机物的化学能直接转化为电能,MFCs在环境污染治理及生物产电方面具有良好的应用前景。本文将全面介绍和总结MFCs在环境污染治理中的研究及应用,其中包括脱氮、脱硫、有机污染物降解、重金属污染治理以及垃圾渗滤液处理等方面。此外,本文还提出MFCs在研究及应用过程中存在的主要问题,并对其研究前景进行展望。

关键词: 微生物燃料电池; 环境污染治理; 生物产能

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0001-6209 (2010) 07-0847-06

能源危机和环境污染以及由此造成的社会、气候等问题已经成为全世界关注的焦点。作为一种生物电化学能源技术,微生物燃料电池(Microbial Fuel Cells, MFCs)可以通过微生物作用,将污染环境中的有机物甚至有毒物质降解,并从该过程中获得电能。

微生物产电的现象早在1911年就被报道^[1]。MFCs的研究始于20世纪60年代^[2],但早期的MFCs存在产电效率低、成本高和二次污染等缺点。1999年Kim等使用*Shewanella putrefaciens*构建第一个无电子介体MFCs^[3],并掀起了MFCs的全面迅速发展,MFCs的产电密度从不足 $1\text{W}/\text{m}^3$ (W/m^3 :基于装置阳极溶液体积的功率密度单位。)达到超过 $2000\text{W}/\text{m}^3$ ^[4]。目前,已有研究者在底泥、废水等实际环境中构建MFCs,并成功地收集MFCs所产生的电能,为一些小型监测装置、机器人、移动电话等低电耗装置供电。同时,旨在将MFCs应用于航天、医

疗器械等领域的研究也在进行之中^[5-8]。

在用于环境治理和污染物降解时,MFCs与一般的微生物或电化学单独作用过程不同。在MFCs中,微生物和电化学这两种降解作用可以同时进行并相互促进,实现更好的降解效果。由于在环境污染降解及资源化过程中的优越性,MFCs已经被广泛用于污染环境和污染物治理的研究。然而,作为新兴的多学科综合性技术,MFCs在研究和实际应用方面仍有待进一步完善。本文将对MFCs在各种不同的环境污染治理中的研究和应用进展进行的概述,并对其存在问题及发展前景进行总结和展望。

1 MFCs在各种环境污染治理中的应用

1.1 MFCs用于脱氮

硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐及其它形态的N元素广泛存在于各种水环境中,是地球氮循环的主要组

基金项目:广东省自然科学基金研究团队项目(9351007002000001);广东省科学院优秀青年人才基金(200902);广东省教育部产学研合作引导项目(2009B090300300299);广东省科学院野外实验站基金(sytz2008)

* 通信作者。Tel/Fax: +86-20-87683656; E-mail: xumy@gdim.cn

作者简介:杨永刚(1982-),男,河南漯河人,博士研究生,主要从事环境微生物生理生态学及生物产能研究。E-mail: yyg115@sohu.com

收稿日期:2010-02-07; **修回日期:**2010-04-13

成部分,然而氮元素超标也是各种污染环境的重要特征之一。

MFCs 可以有效地进行脱氮。氨氮的氧化还原电位较低,在有氧或厌氧氨氧化过程中都可以作为电子供体为微生物生长提供能量。Kim 等的研究认为氨氮的氧化不能在 MFCs 中提供能量,MFCs 运行中出现的氨氮的减少,可能是由于挥发或者氨氮透过质子膜转移到了阴极室造成的^[9]。He 等提出了与 Kim 等不同的观点,他们的 MFCs 在经过两个月的启动之后,可以以 NH_4Cl 为电子供体输出电能,添加一定量的硝酸盐或亚硝酸盐可以促进氨氧化,提高产电量。而且,在他们的 MFCs 中分离到了和 Kim 等装置中相同的氨氧化菌 *Nitrosomonas europaea*。对于 Kim 等的结论,He 等认为可能是由于启动时间不够造成的^[10]。

Cluwaert 等首次将 MFCs 与电化学生物反应器 (Bioelectrical Reactor, BER) 结合,克服了 BER 耗能的弊端。该装置以阳极产生并传递的电子作为阴极微生物生长代谢的唯一电子供体,实现了 $8 \text{ W} / \text{m}^3$ 的产电和每天 $0.146 \text{ kg} / \text{m}^3$ 硝酸盐的去除率^[11]。他们的研究表明自然界中电极氧化微生物的存在,并可能在某些环境或应用中发挥特殊作用。相对于电极还原微生物,目前关于这类微生物的研究甚少,已知的电极氧化微生物只有 *Geobacter metallireducens*、*G. sulfurreducens* 和 *G. lovleyi*^[12],作者所在课题组的研究发现 *Shewanella decolorationis* S12 可以以电极为唯一电子供体进行生长并进行偶氮还原(数据未发表)。

由于 MFCs 中质子膜透过效率较低,大部分参与阴极反应的质子来自阴极溶液的电解,而随之产生的 OH^- 造成阴极室 pH 升高,不利于产电。常用的磷酸盐缓冲液可以很好的维持 pH 平衡,但用于实际环境是不现实的。 $\text{NH}_3\text{-N}$ 在有氧环境下通过氨氧化菌 (Ammonia Oxidizing Bacteria, AOB) 和硝化细菌 (Nitrite Oxidizing Bacteria, NOB) 的作用可以转化为 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3\text{-N}$, 释放出质子,并起到一定的缓冲作用。You 等在阴极室添加好氧活性污泥,并补给氨氮为电子供体,以取代常用的磷酸盐缓冲液,不仅实现了 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除,而且降低了 MFCs 的内阻^[13]。

由于硝酸盐的氧化还原电位 (+0.74V) 高于一般 MFCs 阴极的氧化还原电位,因而 MFCs 阳极溶液中若存在过量的硝酸盐可能会与电极竞争接受微生物释放的电子而抑制 MFCs 的产电量及产电效率。

1.2 MFCs 用于脱硫

硫酸盐、硫化物等含硫化合物是水体和大气污染的另一个重要原因。在氧化还原势高于 -0.274 V 时,硫化物可依次被氧化为 0 价硫、亚硫酸盐和硫酸盐。

作为生物电化学装置,MFCs 在脱硫过程中具有特殊优势。Habermann 和 Pommer 构建的 MFCs 运行长达 5 年,该装置阳极室硫酸盐还原菌的混合接种物可以将硫酸盐转化为硫化物,并以为之能源物质进行产电,所生成的硫化物又可被电极氧化为硫酸盐^[14]。与 Habermann 和 Pommer 的研究不同,Zhao 等通过预培养硫酸盐还原菌 *Desulfovibrio desulfuricans* 将硫酸盐转化为硫化物作为 MFCs 的能源物质,在 MFCs 中电极和微生物共同作用下,硫化物被氧化为元素硫沉淀于电极表面,可以较为方便的除去,硫酸盐的去除率可达 99%,最大输出功率密度为 $5.1 \text{ W} / \text{m}^2$ (W / m^2 : 基于装置阳极电极面积的功率密度单位)。他们的研究还表明使用活性炭作为电极时产电效果最佳。而且由于活性炭对硫化氢等气体具有一定的吸附作用,可实现对硫化物的高效去除,因而,使用活性炭电极是 MFCs 去除该类化合物的最佳选择^[15]。在甲烷发酵装置中,硫酸盐及硫化物是造成产甲烷效率低的重要原因。Rabaey 等构建了不同结构的 MFCs 并与厌氧甲烷消化装置结合,可以实现对硫化物、硫酸盐和乙酸盐的去除,提高甲烷生成效率,减少了该过程的能量损失^[16]。

值得注意的是,由于 MFCs 处理过程中产生的硫化物的多样性,可能存在部分产物用于生物合成代谢,或者挥发以及扩散至阴极室,导致电子回收率较低。其中, HSO_4^- 、 HS^- 对常用的载铂电极的催化作用有一定的抑制。

1.3 MFCs 用于偶氮类染料降解

偶氮类染料及其降解产物具有“三致”作用,其在环境中造成的污染也受到广泛关注。

MFCs 用于偶氮染料降解可以结合传统的电化学生物降解和生物降解两种技术的优势。Sun 等构建单室 MFCs 接种污泥对偶氮染料进行脱色降解。在偶氮染料浓度从 0 到 $1500 \text{ mg} / \text{L}$ 的范围内均可达到 100% 的降解效果,在使用葡萄糖为能源物质时,产电密度为 $0.1 \text{ W} / \text{m}^3$ ^[17]。Liu 等构建的 MFCs 中, *Klebsiella pneumoniae* L17 被用于阳极底物的氧化,产生的电子用于阴极偶氮染料的还原降解。在较低 pH 条件下,偶氮染料的还原速度为 $0.298 \mu\text{mol} / \text{min}$,产

电输出 $0.035 \text{ W/m}^{2[18]}$ 。值得深入研究的是, 根据能斯特公式, 电子供体和受体之间的氧化还原电位差越大, 为微生物或 MFCs 提供的能量越多, 而偶氮染料的氧化还原电位一般介于 -180 和 -430 mV 之间^[19], 即 MFCs 中以氧为电子受体可以获得远高于偶氮染料的能量, 但在 Lin 等的结果中, 偶氮染料作为电子受体可以得到与氧 ($+0.82\text{V}$) 相近的产电输出。另外, 作者所在课题组的研究也发现, 在 *S. decolorationis* S12 以偶氮为末端电子受体的呼吸机制中, 氧化还原电位较高的丙酮酸、铁和黄素类可以作为电子供体或电子介体用于偶氮还原^[20]。对于后者, 一个可能原因是在这些物质作为底物与相关酶蛋白结合时, 其电化学性质发生了改变。

1.4 MFCs 用于垃圾渗滤液处理

垃圾渗滤液含有较高浓度的氨氮、BOD、COD, 以及重金属元素等, 对周围土壤、水体和大气危害严重。生物法是目前主要的垃圾渗滤液处理方法, 分为好氧和厌氧处理两种, 但通常效率较低, 难以实现其资源化。

近年来, MFCs 在垃圾渗滤液处理并资源化过程中表现出较好的应用前景。You 等首次将垃圾渗滤液作为 MFCs 能源物质。他们对单室和双室 MFCs 对垃圾渗滤液的处理效果进行了比较, 其中单室 MFCs 具有较小的内阻 (510 欧), 产电量为 6.8 W/m^3 , COD 去除率可达 98% , 电极生物膜在降解中发挥了主要作用^[21]。在 Greenman 等的研究中, MFC 的产电密度在渗滤液的流加速度为 $24 - 192 \text{ mL/h}$ 的范围内与之呈较好的线性关系 ($R^2 = 0.971$), 当渗滤液流加速度为 48 mL/h 时, BOD 去除效率达到最大。但是, 试验中 MFCs 的 BOD 去除能力低于有氧生物处理的对照组^[22]。一般地, 多个 MFCs 串联可以得到高于单个 MFCs 的产电能力。Gálvez 等将 3 个 MFCs 串联用于循环处理垃圾渗滤液, 提高了 MFCs 的 BOD 和 COD 去除效率。处理 4 天后, BOD 和 COD 的去除率分别为 82% 和 79% ^[23]。由于垃圾渗滤液本身的物化特性, MFCs 用于处理垃圾渗滤液时尽管可以达到较好的降低 BOD 和 COD 的效果, 但产电库伦效率较低。解决这个问题可能需要适当的预处理方法或驯化更优的微生物群落。

1.5 MFCs 用于金属还原与氧化

环境中微生物在金属的氧化还原过程中发挥了重要作用, 异化金属还原菌和金属氧化菌可以将金属离子在其氧化态和还原态之间转换。在 MFCs

中, 除微生物作用外, 金属离子还可以在电极的作用下被氧化或还原。

1.5.1 铁: 由于较高的氧化还原电位和良好的溶解性, 铁氰化钾常用于 MFCs 的阴极溶液。Heijne 等构建的 MFCs 阴极可以进行三价铁还原。他们使用可以同时选择性透过阴离子和阳离子的两性膜以维持利于阴极室三价铁溶解和产电的 pH, 产电密度为 0.86 W/m^2 。通过在阴极接种铁氧化菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans*, 被还原生成的二价铁又可以氧化为三价铁, 形成 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 氧化还原介体^[24,25], 可维持 MFCs 的长期运行。

1.5.2 锰: 考虑到铁氰化钾在实际应用中并不安全, You 等使用高锰酸钾溶液作为 MFCs 阴极电子受体, 产电功率为 0.116 W/m^2 , 分别比以铁氰化钾和氧作为电子受体时高 4.5 和 11.3 倍^[26], 在此过程中, 六价锰离子被还原为四价。Phoads 等构建的 MFCs 对锰有较好的去除效果, 阴极室中, 在电极和金属氧化菌 *Leptothrix discophora* SP-6 的共同作用下形成 $\text{Mn}^{2+}/\text{MnO}_2$ 氧化还原介体, 其中生成的 MnO_2 沉淀于电极表面容易被除去或回收^[27]。

1.5.3 铬: Li 等构建的 MFCs 与光化学电解池 (Photoelectrochemical Cell, PEC) 结合, 阴极含有具催化作用的金红石 (TiO_2), 以重铬酸钾作为阴极溶液, 在电极还原及氙灯光源的共同作用, 26 小时后, 97% 的六价铬被还原为三价, 最大电流输出 235 mA/m^3 ^[28]。Wang 等构建的阴极铬还原 MFCs 在 150 h 内 100 g/L 的重铬酸钾被全部还原, 产电功率密度为 0.15 W/m^2 , 与以氧气或铁氰化钾为电子受体相比, 有更好的产电能力^[29]。

1.5.4 铀: 根据 Gregory 和 Lovely 的研究, Logan 提出了 MFCs 用于 U(VI) 还原为 U(IV) 的方法, 即 MFCs 中生物电极表面微生物接受来自电极的电子, 用于 U(VI) 还原, 不同于直接电化学还原, 生物还原得到 U(IV) 稳定的沉积于电极表面, 可以方便的除去^[4]。

1.6 MFCs 用于纤维类固体生物质资源化

目前, 绝大部分的谷物秸秆等纤维素类生物质未能得到有效利用, 即使在美国利用率也小于 10% , 这类物质在微生物作用下可以转化为乙醇、氢气等能源物质, 但效率较低。

MFCs 可以实现对纤维素类生物质更高效、更直接的能量转化。Zuo 和 Wang 等分别构建了双室和单室 MFCs 以汽爆处理谷物秸秆得到的水解液作为阳极溶液。在 Zuo 等的 MFCs 中, BOD 去除率达

90%以上,产电量为 $0.971\text{W}/\text{m}^{2[30-31]}$ 。Catal等证明了木质纤维素类生物质降解得到的多种单糖均可作为MFCs的能源物质,并研究了预处理过程生成的呋喃、苯酚类副产物对MFCs的影响^[32]。Ren等采用共培养的方法接种可以降解纤维素类的*Clostridium cellulolyticum*和具有较强产电能力的*Geobacter sulfurreducens*共培养,结果发现,*C. cellulolyticum*首先将纤维素降解为乙酸,乙醇等,并为*G. sulfurreducens*提供电子供体产生电能^[33]。这种共培养的方法同样值得在MFCs用于其他难降解物质资源化中进行尝试。

1.7 MFCs用于其它环境污染物的降解

对硝基苯酚是工业生产中广泛应用的环境污染物。温青等构建的MFCs以葡萄糖和对硝基苯酚为底物,运行6天,对硝基苯酚的去除率为82.1%,最大产电输出为 $0.057\text{W}/\text{m}^{3[34]}$,但研究并未表明对硝基苯酚在降解过程中是否可以作为能源物质。骆海萍等构建的MFCs以苯酚为单一能源物质,在降解的同时输出最高为 $9.6\text{W}/\text{m}^3$ 电能,运行60h,苯酚去除率可达到90%左右。但以苯酚为唯一能源物质时,MFCs的产电能力及库伦效率较低^[35-36]。吡啶在较高浓度下对微生物有明显的毒害作用,因而被认为是一种难降解有毒物质。在Zhang等构建的MFCs中,经过较长时间的驯化(90天),阳极微生物以吡啶为唯一能源物质产电 $1.7\text{W}/\text{m}^3$,降解速度是普通好氧或厌氧降解的60倍以上^[37]。二氯乙烯是工业生产中应用最广的氯代烃,并广泛分布在地表水中危害人类健康。在Pham等的研究中,经过乙酸盐驯化的菌群对二氯乙烯有较强的降解和利用能力,运行4个月,98%的二氯乙烯被降解生成乙酸盐,二氧化碳等,最高电流输出 $3.78\text{A}/\text{m}^3$ 。但使用二氯乙烯驯化的微生物产电能力较弱^[38],这可能是由于驯化时间不够或者形成的微生物群落不适于产电和降解造成的。作者所在课题组利用所构建的MFCs实现了对多溴联苯醚的高效脱溴降解(数据未发表)。

2 总结和展望

由于可以同时实现污染物降解并直接输出电能,MFCs被认为在解决环境污染和能源危机中具有很好的应用前景。近几年来,MFCs在环境污染治理研究方面得到迅速发展和应用:(1)实用性大大提高:在MFCs产电能力不断提高的同时,其构建成本也大大降低,并表现出了实际应用的可行性;

(2)研究范围不断拓展:在污染治理及资源化的研究中得到越来越广泛的应用;(3)机理研究加强:功能微生物,包括生物降解功能微生物和产电微生物的作用机理取得了一系列新进展。

尽管MFCs发展迅速,但目前还存在一些困难和问题需要解决。第一,尚不能得到广泛的应用。由于产电能力较低,能量收集方法及装置尚需完善等原因限制了MFCs的实际应用;第二,MFCs中微生物的作用尚不清楚,其中包括底物降解机制、电子传递机制和功能微生物的种类及其代谢网络等。一方面是由于污染环境中微生物种类及结构复杂、微生物代谢及呼吸多样性等原因,另一方面,由于MFCs研究者关注的重点及专业背景不同,一些有意义微生物资源未能得到有效的研究;第三,评价MFCs性能的标准仍需完善。目前使用的基于电极面积或溶液体积的功率密度等是普遍使用的评价参数,但不能全面的反应MFCs的性能,而且由于外阻的使用,产生的电能以热能的形式散失。Donoan等认为MFCs的性能还需兼顾通过电能的收集及利用效率^[39]。为更好的反映微生物在MFCs中的作用,Biffinge等将产电过程中的生物量和产电量联系起来^[40]。

由于MFCs涉及生物学、电化学、环境科学等学科,为更好的解决目前MFCs研究中存在的问题,需要各个专业的研究者的广泛交流和共同努力。随着更加全面和深入的研究,MFCs将在更广泛的领域得到推广应用。

参考文献

- [1] Potter, MC. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. *Proceedings of the Royal Society of London Series B*, 1911, B(84):260-276.
- [2] John BD, Dallas T. Microbial oxygenated fuel cell. USA:US3331848. July 18, 1967.
- [3] Kim BH, Ikeda T, Park HS, Kim HJ, Hyun MS, Kano K, Takagi K, Tatsumi H. Electrochemical activity of an Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens* IR-1, in the presence of alternative electron acceptors. *Biotechnology Techniques*, 1999, 13(7):475-478.
- [4] Logan BE. Microbial fuel cell. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [5] Tender LM, Gray SA, Groveman E, Lowy DA, Kauffman P, Melhado J, Tyce RC, Flynn D, Petrecca R, Dobarro J. The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable power supply Powering a meteorological buoy. *Journal of Power Sources*, 2008, 179(2):571-575.

- [6] Wilkinson, S. "Gastrobots"-benefits and challenges of microbial fuel cells in food-powered robot applications. *Autonomous Robots*, 2000(9) : 99-111.
- [7] Gerardo, JJ, Joseph, JW, Ethan, JC. Microbial fuel cell cathode assembly. WO 2009/050513 A2. April 23, 2009.
- [8] Esteve-Nunez I A, Reija A, Moreno-Garzón F, Barroeta B, Aguilera A, Busalman JP, Martin J, Ortiz-bernad I. Harvesting bioelectricity from natural environments: microbial fuel cell fuelled by rice plants. *New Biotechnology*, 2009, 25(S) :250.
- [9] Kim JR, Zuo Y, Regan JM, Logan BE. Analysis of Ammonia Loss Mechanisms in Microbial Fuel Cells Treating Animal Wastewater. *Biotechnology and Bioengineering*, 2008, 99(5) :1120-1127.
- [10] He Z, Kan J, Wang Y, Huang Y, Mansfeld F, Nealsen KH. Electricity production coupled to ammonium in a microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*. 2009, 43 : 3391-3397.
- [11] Clauwaert P, Rabaey K, Aelterman P, et al. Biological Denitrification in Microbial Fuel Cells. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41 : 3354-3360.
- [12] Strycharz SM, Woodard TL, Johnson JP, Nevin KP, Sanford RA, Löffler FE, Lovley DR. Graphite electrode as a sole electron donor for reductive dechlorination of tetrachlorethene by *Geobacter lovleyi*. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, 74(19) :5943-5947.
- [13] You SJ, Ren NQ, Zhao QL, Kiely PD, Wang JY, Yang FL, Fu L, Peng L. Improving phosphate buffer-free cathode performance of microbial fuel cell based on biological nitrification. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009, 24(12) :3698-3701.
- [14] Habermann W, Pommer EH. Biological fuel cells with sulphide storage capacity. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1991, 35 :128-133.
- [15] Zhao F, Rahunen N, Varcoe JR, Chandra A, Avignon-Rossa C, Thumser AE, Slade RCT. Activated carbon cloth as anode for sulfate removal in a microbial fuel cell. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42, 4971-4976.
- [16] Rabaey, K., Sompel KD, Maignien L, Boon N, Aelterman P, Clauwaert P, Schampelaire LD, Pham HT, Vermeulen J, Verhaege M, Lens P, Verstraete W. Microbial fuel cells for sulfide removal. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40 : 5218-5224.
- [17] Sun J, Hu YY, Bi Z, Cao YQ. Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology*, 2009, 100 : 3185-3192.
- [18] Liu L, Li FB, Feng CH, Li XZ. Microbial fuel cell with an azo-dye-feeding cathode. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 85(1) :175-183.
- [19] Rau J, Knackmuss HJ, Stolz A. Effects of different quinoide redox mediators on the anaerobic reduction of azo dyes by bacteria. *Environmental Science and Technology*, 2002, 36 :1497-1504.
- [20] Hong Y, Chen X, Guo J, Xu ZL, Xu MY, Sun GP. Effects of electron donors and acceptors on anaerobic azo dyes reduction by *Shewanella decolorationis* S12. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2007, 74 :230-238.
- [21] You SJ, Zhao QL, Jiang JQ, Zhang JN, Zhao SQ. Sustainable Approach for Leachate Treatment: Electricity Generation in Microbial Fuel Cell. *Journal of Environmental Science and Health (Part A)*, 2006, 41 : 2721-2734.
- [22] Greenman J, Gálvez A, Giusti L, Ieropoulos I. Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells; Comparison with a biological aerated filter. *Enzyme and Microbial Technology*, 2009, 44 :112-119.
- [23] Gálvez A, Greenman J, Ieropoulos I. Landfill leachate treatment with microbial fuel cells; scale-up through plurality. *Bioresource Technology*, 2009, 100 : 5085-5091.
- [24] Heijne AT, Hamlers HV, Wilde VD, Rozendal RA, Buisman CJN. A bipolar membrane combined with ferric iron reduction as an efficient cathode system in microbial fuel cells. 2006, 40(17) :5200-5205.
- [25] Heijne AT, Hamlers VM, Buisman CJN. Microbial Fuel Cell Operation with Continuous Biological Ferrous Iron Oxidation of the Catholyte. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41 :4130-4134.
- [26] You SJ, Zhao QL, Zhang JN, Jiang J, Zhao S. A microbial fuel cell using permanganate as the cathodic electron acceptor. *Journal of Power Sources*, 2006, 162 : 1409-1415.
- [27] Phoads A, Beyenal H, Lewandowski Z. Microbial Fuel Cell using Anaerobic Respiration as an Anodic Reaction and Biomineralized Manganese as a Cathodic Reactant. *Environmental Science and Technology*. 2005, 39 :4666-4671.
- [28] Li Y, Lu A, Ding HR, Jin S, Yan Y, Wang C, Zeng C, Wang X. Cr(VI) reduction at rutile-catalyzed cathode in microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications*, 2009, 11 :1496-1499.
- [29] Wang G, Huang LP, Zhang YF. Cathodic reduction of hexavalent chromium [Cr(VI)] coupled with electricity generation in microbial fuel cells. *Biotechnology Letters*, 2008, 30 :1959-1966.

- [30] Zuo Y, Maness PC, Logan BE. Electricity production from steam-exploded corn stover biomass. *Energy & Fuels*, 2006, 20:1716-1721.
- [31] Wang X, Feng YJ, Wang HM, Qu Y, Yu Y, Ren N, Li N, Wang E, Lee H, Logan BE. Bioaugmentation for electricity generation from corn stover biomass using MFCs. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(15):6088-6093.
- [32] Catala T, Fan Y, Li KC, Bermek H, Liu H. Effects of furan derivatives and phenolic compounds on electricity generation in microbial fuel cells. *Journal of Power Sources* 2008, 180:162-166.
- [33] Ren Z, Ward TE, Regan JM. Electricity Production from Cellulose in a Microbial Fuel Cell Using a Defined Binary Culture. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(13):4781-4786.
- [34] 温青, 孙茜, 赵立新, 吴英. 微生物燃料电池对废水中对硝基苯酚的去除. *现代化工 (Modern Chemical Industry)*, 2009, 29(4):40-42.
- [35] Luo HP, Liu GL, Zhang RD, Jin S. Phenol degradation in microbial fuel cell. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 147: 259-264.
- [36] 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, Jin S. 以苯酚为燃料的微生物燃料电池产电特性 [J]. *环境科学学报 (Acta Scientiae Circumstantia)*, 2008, 28(7): 1279-1283.
- [37] Zhang CP, Li MC, Liu GL, Luo H, Zhang R. Pyridine degradation in the microbial fuel cells. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 172:465-471.
- [38] Pham H, Boon N, Marzorati M, Verstraete W. Enhanced removal of 1,2-dichloroethene by anodophilic microbial consortia. *Water research*, 2009, 43, 2936-2946.
- [39] Donovan C, Dewan A, Heo D, Beyenal H. Batteryless, Wireless Sensor Powered by a Sediment Microbial Fuel Cell. *Environmental Science and Technology*. 2008, 42: 8591-8596.
- [40] Biffinger JC, Ray R, Little BJ, Fitzgerald LA, Ribbens M, Finkel SE, Ringeisen BR. Simultaneous Analysis of Physiological and Electrical Output Changes in an Operating Microbial Fuel Cell With *Shewanella oneidensis*. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, 103(3):524-531.

Progress of research on the microbial fuel cells in the application of environment pollution treatment——A review

Yonggang Yang^{1,2,3,4}, Guoping Sun^{1,2,3}, Meiying Xu^{1,2,3*}

⁽¹⁾ Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China)

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

⁽³⁾ Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, Guangzhou 510070, China)

⁽⁴⁾ School of Bioscience and Bioengineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Microbial fuel cells (MFCs) are bio-electrochemical reactors that have the capacity to convert chemical energy of biodegradable organic chemicals to electrical energy, and developed rapidly in the past few years. With an increasing concern for energy crisis and environment pollution, MFCs has become a promising technology in the researches of environment pollution treatments and biology electricity. In this paper, we offered a comprehensive review of the recent research progress of MFCs in environment pollution treatment, includes denitrification, desulfurization, organic pollutants degradation, heavy metal reduction and landfill leachate treatment. Also, we pointed out the challenges and problems which were bottle necks for a wide application of MFCs and the potential future development.

Keywords: microbial fuel cell; environment pollution treatment; bioenergy generation

(本文责编: 张晓丽)

Supported by the Teamwork Project of the Natural Science Foundation of Guangdong Province (9351007002000001), the Outstanding Scholarship Foundation of Guangdong Academy of Sciences (200902), the Guangdong Provincial Programs for Promoting the Integration of Production, the Teaching and Research (2009B090300300299) and the Field Experiment Station Foundation of Guangdong Academy of Sciences (sytz2008)

* Corresponding author. Tel/Fax: +86-20-87683656; E-mail: xumy@gdim.cn

Received: 7 February 2010/ Revised: 13 April 2010