

微生物燃料电池对污染物的强化降解及其机理综述

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

(1. 江西农业大学 生物科学与工程学院 江西 南昌 330045)

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

(3. 省部共建华南应用微生物国家重点实验室 广东 广州 510070)

摘要: 产电和污染物降解是微生物燃料电池(Microbial Fuel Cells, MFCs)的两个基本功能,也是 MFCs 作为一种新型的环境治理和能源技术最具吸引力的优势。大量的研究已表明:相对于一般厌氧生物降解技术, MFCs 具有更高效的废弃物、废水或污染物降解的能力。解析 MFCs 强化污染物降解的机理对于进一步优化 MFCs 的性能具有重要的指导意义,也可以为 MFCs 在实际环境中的原位应用提供理论支持。本文在综述 MFCs 强化污染物降解研究报道的基础上,从 MFCs 中微生物群落的代谢模式、生物膜的活性以及 MFCs 对局部氧化还原环境的影响等方面为 MFCs 强化污染物降解的功能提供可能的理论依据,并对 MFCs 在污染物降解方面的几个可能的发展方向进行展望,为不同学科背景的相关研究者提供参考。

关键词: 微生物燃料电池, 污染物降解, 生物修复技术, 生物电化学

Enhanced contaminant degradations in microbial fuel cells and the potential mechanisms: a review

XIANG Yin-Bo^{1,2} YANG Yong-Gang^{2,3} SUN Guo-Ping^{2,3} XU Mei-Ying^{2,3*}

(1. College of Bioscience and Biotechnology, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China)

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

(3. State Key Laboratory of Applied Microbiology, Southern China, Guangzhou, Guangdong 510070, China)

Abstract: Current generation and contaminant degradation are two basic functions, as well as two most attractive advantages for microbial fuel cells (MFCs). It has been extensively documented that MFCs have more efficient contaminant-degrading capacities relative to traditional anaerobic biodigestion reactors. The mechanisms underlying the higher degrading capacity of MFCs are important for optimizing the performances of MFCs, as well as for the *in-situ* applications of MFCs. This paper reviewed the recent studies that comparatively assessed the degrading-capacities in MFCs and other anaerobic digestion reactors. Potential mechanisms of the higher degrading capacity in

基金项目: 国家 973 计划项目(No. 2012CB22307); 国家自然科学基金项目(No. 31200096); 国家博士后科学基金项目(No. 2012M521578); 广东省自然科学基金研究团队项目(No. 9351007002000001); 广东省科技攻关项目(No. 2011B060100007); 广东省科学院青年基金项目(No. qnjjsq201109)

*通讯作者: Tel: 86-20-87683656; 信箱: xumy@gdim.cn

收稿日期: 2013-03-04; 接受日期: 2013-04-24; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2013-10-11

MFCs, including the microbial metabolic pathways, biofilm viability and redox-impacts of anode on the ambient environment, were analyzed and suggested for improving the performances of MFCs for contaminant degradation.

Keywords: Microbial fuel cells, Contaminant degradation, Bioremediation, Bioelectrochemistry

燃料电池的技术始于 1839 年 Grove 利用气态燃料产电的报道。1911 年, Potter 发现微生物的催化作用可以在燃料电池系统中产生电压^[1], 微生物燃料电池(Microbial fuel cells, MFCs)技术的发展就此开始。20 世纪中后期, 由于美国航空航天局(NASA)的推动, 微生物燃料电池曾一度成为研究热点^[2]。但由于后来世界政治格局的变化及 MFCs 对外源电子介体的依赖等技术缺陷, MFCs 的研究报道逐渐趋于减少。近几十年来, 环境污染和能源危机造成的社会问题日益突出, 环境治理和新能源技术的研发也引起了世界范围的关注和重视。由于可以将贮存于有机废弃物的化学能直接转化为电能, MFCs 再次逐渐引起了科研工作者的关注。1999 年, Kim 等发现 *Shewanella putrefaciens* 可以在无外源电子介体的条件下催化 MFCs 产电, 该研究促使 MFCs 技术摆脱了依赖外源电子介体的瓶颈^[3]。Kim 等的研究被认为是 MFCs 十几年来迅速发展的开端^[4]。

MFCs 可以被简单地定义为通过微生物的厌氧呼吸过程氧化底物、还原电极并输出电能的生物电化学系统。近年来, 尽管一些新功能或基于 MFCs 的新技术被开发, MFCs 中同步进行的废水或污染物降解以及电能输出仍被认为是其较之传统的电化学或厌氧生物降解技术最具特色的优势。电能输出方面, 由于结构、材料、接种物等方面的不断优化, 过去十几年里 MFCs 的功率密度增长了超过 10^5 倍^[4-5]。底物降解方面, MFCs 被用于越来越多的各种类型的废水、有机物或污染物的处理和降解^[6]。值得注意的是, MFCs 处理废水或降解污染物的研究几乎无一例外地表明: 各种废水、有机底物或污染物都可以在 MFCs 阳极室中得到高于一般厌氧生物处理技术的降解效率。

揭示 MFCs 阳极室中较高的污染物降解效率的潜在机理, 对于进一步提高 MFCs 的实用性或提高其它生物技术的污染物降解效率具有重要的指导意义。本文在综述近期报道的 MFCs 强化有机污染物降解研究的基础上, 结合其它相关的微生物电化学研究结果, 从微生物学和电化学等角度为 MFCs 中有机底物的高效降解过程提供可能的解释, 为生物电化学系统的进一步优化及其在废水处理、生物修复中的实际应用提供理论支持。

1 微生物燃料电池强化污染物降解

在以废水处理或污染物降解为目的的 MFCs 研究中往往需要设置其他生物处理技术作为对照以更全面的评价 MFCs 在废水处理或生物修复中的可用性^[7]。开路 MFCs 是指将 MFCs 外部电路断开, 阻断电子从阳极到阴极的转移。开路 MFCs 阳极室中微生物不能进行电极呼吸, 可以被认为是一个常规厌氧生物处理装置^[7]。研究者们常将 MFCs 分别在闭路和开路两种模式下运行, 以比较 MFCs 及常规厌氧处理技术对污染物的降解效果(表 1), 以下内容将对这些研究进行综述。

1.1 MFCs 强化底泥或土壤中有机污染物的降解

Hong 等在河流中构建了原位底泥微生物燃料电池(Sediment microbial fuel cells, SMFCs), 观察其对底泥中有机物的降解情况^[8-9]。运行 6 个月后, 发现阳极周围底泥的烧失量(Loss on ignition, LOI)和易氧化有机物(Readily oxidative organic matters, ROOM)分别降低了 21.9%和 32.7%, 而且底泥中的有机物更容易腐殖化或形成大分子复合物, 而不产电的电极板周围的有机物却没有发生明显变化^[8-9]。2010 年, Yuan 等报道了一种筒状空气阴极 MFCs, 在接种底泥后可输出 107 mW/m^2 的功率密度, 同时底泥内的 LOI、ROOM 和酸挥发性硫化物相对

于开路对照分别降低了 33%、36%和 95%^[10]。Huang 等将该装置改进后用于降解浸水土壤中的苯酚,运行 10 d 后,闭路装置中苯酚的降解率达到 90%,远高于开路对照的 27.6%^[11]。在 Jiang 等使用 MFCs 处理污泥有机物的研究中,闭路 MFCs 对污泥中总 COD 的去除率比开路对照高出 8%,污泥中的各种有机物在 MFCs 中均得到了更高效的降解。他们的研究还表明,使用超声波对污泥进行预处理可以进一步提高 MFCs 中 COD 的去除率^[12]。

铁在自然环境中多以不溶态存在,与 MFCs 电极类似,可以作为微生物厌氧呼吸的胞外电子受体。Yan 等的研究表明,在底泥环境中插入 MFCs 电极可以对底泥中菲、芘等多环芳烃类以及其他有机物的降解率显著高于自然降解对照组和添加无定形铁的处理组,在 SMFCs 中同时添加无定形铁可以进一步强化污染物的降解^[13]。

1.2 MFCs 强化石油有机污染物的降解

石油化工原料中含有大量的烷烃、多环芳烃等有机污染物,在加工及运输过程中容易对周围环境造成污染。针对石油污染物在土壤中难降解的问题,Wang 等设计了一种便于原位应用的 U 型 MFCs。相对于开路对照,闭路条件下该装置产电功率密度为 0.8 mW/m²,同时还将土壤中烷烃、多环芳烃等污染物的降解率提高了 120%^[14]。Morris 等构建的双室 MFCs 中在降解石油烃类化合物的同时输出 31 mW/m²的产电功率密度。运行 21 d 后,阳极室 8-C 到 15-C 的烃类化合物降解率达到 82%,而一般厌氧生物消化装置中仅有 31%的降解率^[15]。为了进一步评价 MFCs 应用于原位石油污染修复的可行性,Morris 等还构建了 SMFCs,结果同样表明,闭路运行的 SMFCs 中石油烃类降解率(24%)远高于开路对照(2%)。作者还提出,SMFCs 中电子从底泥传递至电极表面的过程是主要的电子传递限制步骤^[16]。

1.3 MFCs 强化电子受体类有机污染物降解

阳极是 MFCs 中产电微生物电子传递的胞外电子受体。理论上,在 MFCs 阳极室添加其它的电

子受体可能会因为不同呼吸过程相互竞争电子而使产电或其它电子受体的还原降解受抑制,但实际的研究结果似乎并非如此。Huang 等研究了不同底物对双室 MFCs 中五氯酚降解的影响,发现乙酸作为电子供体效果显著好于葡萄糖,同时也发现产电条件下五氯酚的降解率比开路条件下高出 2 倍以上。但由于阳极室的厌氧环境,降解产物四氯酚难以继续降解^[17]。她们的后续研究改用单室空气阴极 MFCs,由于该装置允许较多的氧渗入,造成局部有氧环境,从而在提高了五氯酚的降解效率的同时还实现了五氯酚及其还原中间产物的完全矿化。类似地,单室 MFCs 中五氯酚的降解速率比开路对照高出 31%–54%^[18],表明微生物产电促进了五氯酚的还原降解。类似的现象在偶氮染料还原的 MFCs 中也有发现^[19]。Chen 等对 MFCs 促进偶氮染料还原脱色的原因解释为两种电子受体存在时可以促进微生物的更快生长^[20]。Pham 等研究了 MFCs 中二氯乙烷的降解过程,发现 MFCs 中二氯乙烷每小时的降解速率可以达到 102 mg/L,比一般厌氧生物降解高出 30%。一般厌氧环境中生物脱氯是还原过程,而 Pham 等推测其 MFCs 中二氯乙烷降解是一个作为电子供体被氧化的过程,这种厌氧氧化脱氯的过程曾在硝酸盐还原体系中报道,但具体机制尚不清楚^[21]。

1.4 MFCs 强化其它有机污染物的降解

Greenman 等的研究比较了好氧生物滤器、厌氧消化和 MFCs 对垃圾渗滤液中 BOD₅ 的降解效果。其中 MFCs 在输出电能的同时,BOD 的去除率可以达到开路厌氧处理的 1.5 倍^[22]。饮用水源中的藻类代谢物对人类健康存在重要威胁。Wang 等测试了 MFCs 对藻类代谢物的利用和降解能力。结果表明,微生物可以利用这些代谢物输出较高电能,与开路 MFCs 或厌氧降解装置相比,产电 MFCs 对阳极藻类代谢物溶液中的 COD、蛋白质、脂类、碳水化合物以及三氯甲烷前体物的降解率高出 2–4 倍^[23]。张翠萍等使用 MFCs 对喹啉进行降解,闭路 MFCs 对喹啉的降解率较开路高出 10%^[24]。

表 1 污染物降解 MFCs Table 1 MFCs for contaminant degradation					
MFCs 结构 Configuration	接种物 Inoculation	功率密度 Power density	降解底物或指标 Substrate/Index	降解率(%，MFCs/对照) Degradation rate (%， MFCs/control)	文献 Reference
Dual-chamber	地下水	30.00 mW/m ²	柴油烃	82.0/31.0	[14]
SMFCs	沉积物	2.20 W/m ³	石油烃	24.0/2.0	[15]
U-MFCs	土壤	0.80 mW/m ²	石油污染物	15.2/6.9	[13]
Single-chamber	垃圾渗滤液	1.40 mW/m ²	BOD ₅	30.0/20.0	[21]
Dual-chamber	富营养化湖水	4.10 W/m ³	三氯甲烷前体物	85.0/21.0	[22]
Dual-chamber	污泥	10.60 W/m ³	总 COD	19.2/11.3	[11]
Dual-chamber	污泥上清液	173.00 mW/m ²	喹啉	94.5/83.7	[23]
Dual-chamber	厌氧污泥	30.00 mW/m ²	苯酚	86.0/61.0	[25]
Dual-chamber	活性污泥	48.50 W/m ³	吡啶	100.0/22.0	[24]
Dual-chamber	生活污水	2.00 W/m ³	五氯酚	80.0/30.0	[16]
Soil MFCs	浸水土壤	30.00 mW/m ²	苯酚	90.0/27.6	[10]
Tubular MFCs	底泥	107.00 mW/m ²	LOI, ROOM, 酸挥发硫化物	33.0/2.4, 36.0/2.0 95.0/0.7	[9]
SMFCs	底泥	0.07 mW/m ³	菲, 芘	96.0/80.0, 92.0/74.0	[12]
Single-chamber	生活污水	7.70 W/m ³	五氯酚	100.0/46.0–69.0	[17]
Dual-chamber	污泥	15.90 W/m ³	糠醛	93.0/79.0	[26]
Single-chamber	MFCs 驯化液	113.00 W/m ³	头孢曲松钠	91.0/51.0	[27]
Single-chamber	污泥	274.00 mW/m ²	活性亮红	100.0/80.1	[18]
Dual-chamber	污染样品	15.20 mW/m ³	二氯乙烷	98.0/73.0	[20]

张翠萍等还报道 500 mg/L 的吡啶在 MFCs 中 12 h 可被完全降解，而一般的厌氧或好氧的生物降解技术在 72 h 内只能达到 22%或 8.2%的降解率^[25]。汪家权等的研究表明苯酚在 MFCs 中的去除效率比传统厌氧技术高出 25%，COD 的去除率也有 30%的提高^[26]。Luo 等构建的双室 MFCs 可以在阳极和阴极分别对糠醛和偶氮染料实现同步去除，其中糠醛可以作为唯一电子供体输出功率密度为 15.9 W/m³ 的电 能，7 h 内阳极糠醛(300 mg/L) 的降解率可达 93%，而开路对照降解率为 79%^[27]。Wen 等使用单室 MFCs 对制药废水中头孢类抗生素进行降解研究，发现头孢曲松钠在 MFCs 中的 24 h 降解率比一般厌氧反应器高出 40%，而且头孢曲松在有效降解的同时可以作为燃料物质供

MFCs 输出电能^[28]。

1.5 MFCs 强化无机污染物的降解

氨氮过量是造成环境污染的重要原因之一。尽管 He 等认为微生物氨氧化过程可以直接或间接的为 MFCs 电极还原提供电子, Kim 等的研究结果却与此相反,但他们的研究都表明 MFCs 产电具有促进氨氮去除的功能^[29-30]。Kim 等的研究比较了双室和单室 MFCs 对氨氮的去除效果，结果表明：相对于开路对照，单室 MFCs 中阴极 pH 持续升高，有利于氨氮挥发去除；双室 MFCs 产电可以驱动阳极氨离子持续向阴极转移^[29]。Sun 等研究了 MFCs 中硫的氧化机制,发现 MFCs 中有微生物参与的硫化物氧化比单一电化学硫化物氧化产生了更高的电流密度和库伦效率。他们后来的研究发现 MFCs

阳极室中电极生物膜与浮游细胞的群落结构有明显区别。生物膜中, 硫氧化细菌更丰富, 而硫酸盐还原菌多存在于浮游细胞中。由此可见, MFCs 阳极生物膜和悬浮细胞在不同的空间位置自发地形成了相互协同的代谢网络^[31-32]。

2 MFCs 强化污染物降解的机理

Mohan 等的研究发现 MFCs 有较一般厌氧生物处理更强的有机物耐受能力和污染物降解能力。对于此, 他们的推测是 MFCs 除了生物降解的功效, 还具有一些电极直接或间接氧化的电化学催化功效, 即电极表面形成活性氧、次氯酸等强氧化性分子对底物进行氧化降解^[33]。但这种电化学反应的发生一般对电池的电压(>2.0 V), pH (碱性)以及电极材料(金属电极)等都有较高要求, 而一般 MFCs 的电压低于 1.0 V, pH 为中性, 电极为碳基质, 因而 MFCs 中电极氧化对有机物降解的贡献有限。Mohan 等也认为, 微生物的代谢活动在 MFCs 的有机物降解中发挥了主要作用^[33]。

2.1 更有效的微生物代谢模式

微生物通过氧化磷酸化(电子传递链)途径形成质子动势产生 ATP 是最有效的能量获取方式^[34]。而在缺少电子受体的厌氧环境中, 异氧微生物主要通过发酵或底物磷酸化的方式代谢有机底物。基于此, 刺激微生物呼吸(电子传递)过程、调控微生物的代谢方式及速率是较为常用的促进生物修复效果的手段。比如, 有选择性地向污染环境中添加微生物容易利用的电子供体(乙酸盐、乙醇等)或者电子受体(O_2 、硝酸盐、三价铁等)可以分别促进电子受体类或电子供体类污染物的降解脱毒^[35-36]。MFCs 阳极可以作为一种稳定的经济有效的电子受体维持局部环境中微生物的厌氧呼吸。Morris 等的研究认为电极对微生物呼吸的热力学效果与硝酸盐接近, 尽管电极的氧化还原电位(-0.2 V)一般远低于后者(+0.46 V)^[16]。Yan 等的研究以及本课题组的 SMFCs 实验均表明: 电极对底泥微生物降解有机物的强化作用优于三价铁(+0.37 V), 与

Morris 等的观点相符^[13,37]。

在缺少电子受体的条件下, 微生物的发酵过程往往会产生大量的有机酸、氢气等小分子产物, 而这些产物的积累往往会对底物的持续降解形成反馈抑制。而产电微生物电极呼吸偏好利用小分子有机物(乙酸、乳酸等), 这种“接力式”的代谢模式可以解除装置中的反馈抑制现象、使更彻底地将有机物中的化学能转化。另外, 电极呼吸过程中底物的代谢途径与微生物发酵不同, 一些发酵中不能利用的底物在产电过程中被代谢降解。

2.2 电极呼吸生物膜具有更高的代谢活性

自然界中大部分微生物以生物膜的形式生存, 相互协作, 以提高对不利条件的应对能力。在 MFCs 中, 电极生物膜在产电和污染物降解过程中都发挥着至关重要的作用。按每个微生物细胞在电极表面占据 $1 \mu m^2$ 的面积估算, 单层生物膜在 $1 cm^2$ 的电极表面将聚集 10^6 - 10^8 个微生物细胞。Lovley 认为电极及其表面大量的微生物细胞可以对污染物进行吸附并集中降解^[38]。由于传质受阻, 非产电条件下生物膜内部细胞的代谢活性往往会逐渐降低^[39]。而在产电 MFCs 中, 生物膜内部细胞靠近电极(电子受体), 可以维持更有效的呼吸。基于细胞膜通透性的荧光染色和转录谱分析表明, 产电生物膜内层和外层细胞可以维持相当高的代谢活性, 而且闭路状态下的电极生物膜活性比开路维持得更久。开路或闭路对浮游微生物的活性没有显著影响^[40-41]。

对于电极生物膜的高活性还有另外一种可能的解释: 附着于基质生长的微生物活性往往比浮游状态的微生物具有更高的活性, 尤其是表面呈电负性的基质^[42]。MFCs 阳极一般呈电负性, 可以调节细胞膜的 pH, 促进质子跨膜运输, 产生更多的 ATP^[42], 有助于维持生物膜的代谢活性^[43]。

最近的研究还表明产电条件下有利于提高电极生物膜内物质的扩散效率^[44]。扩散效率的提高有利于生物膜内营养物质及代谢产物的运输, 这可

能也是电极呼吸生物膜维持较高代谢活性的原因之一。此外,较高的扩散效率还意味着污染物在生物膜内进行更有效的流通,与微生物细胞接触的机会也会增大,这也有利于污染物在 MFCs 阳极室内的降解。

2.3 电极对周围氧化还原环境的影响

Hong 等在河流中构建的原位 SMFCs 阳极周围底泥的氧化还原电位(+120 mV)相对于无 MFCs 底泥(-150 mV)有大幅提高^[8-9]。电位的提高对底泥厌氧环境中的很多生物-化学过程都有影响,例如:产甲烷和硫酸盐还原过程偏好的氧化还原电位为-100 mV, MFCs 电极对周围环境氧化还原电位的提高可以抑制这些过程,从而有利于降低局部环境中甲烷、硫化氢等温室气体或有害气体的浓度。微生物电化学通气管(Microbial electrochemical snorkel, MES)是基于 MFCs 的一种简化了的生物修复装置,它由一块导体材料制成,一端置于厌氧废水或底泥环境另一端曝露于空气,这样厌氧环境下微生物呼吸产生的电子可以通过 MES 直接传递给氧气。相对于 MFCs, MES 不能发电但可以更有效地降解废水 COD,一个重要原因就是 MES 具有较高的氧化还原电位^[45-46],可以为微生物呼吸代谢提供更多的能量,促进功能微生物的代谢生长。此外, MES 的高电位可以造成底泥颜色的直观变化,并且有利于重金属污染修复、抑制甲烷释放等过程^[47]。本课题组的研究还表明,电极或 MES 的高电位还可以调控微生物细胞色素 C 的表达^[46]。

3 展望

过去的十几年里, MFCs 引起了众多微生物学、环境科学、电化学、材料科学等学科研究者的关注,也正是由于不同学科研究者的协作和贡献, MFCs 经历了迅速的发展并从实验室逐步走向实际应用。MFCs 不仅为环境治理和新能源开发提供了一种新的选择,也促进了新的交叉性的学科——生物电化学(电化学微生物学)的形成,并为相关学科的基础研究提供了新的平台。目前生物电化学系

统相关的研究出现了越来越多的发展方向。随着生物电化学系统功能的不断拓展,其潜在的应用领域也越来越多样化,包括被用于电源供给、生物降解、盐水电解、生物合成以及二氧化碳减量等,其中电源供给和生物降解仍然是两个主要的研究方向^[5]。一些在实际环境中构建的 MFCs 已经可以为一些低能耗的检测设备提供电能,但发电功率密度低仍然是限制 MFCs 在更大范围内推广应用的主要因素^[5,38]。就 MFCs 生物修复、污染物降解的研究方向而言,近期可能主要包括以下几个方面:(1) MFCs 被用于更多的难降解或新型污染物、废弃物的处理;(2) 通过高通量或稳定性同位素标记等新手段对 MFC 中的微生物代谢网络的进一步解析;(3) 生物阴极中有机物的降解或转化生成一些有价值的化合物;(4) 具有更高产电或代谢能力的微生物的筛选或基因工程菌的构建。

参考文献

- [1] Potter MC. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series B-Containing Papers of a Biological Character, 1911, 84(571): 260-276.
- [2] Lewis K. Symposium on bioelectrochemistry of microorganisms biochemical fuel cells[J]. Bacteriological Reviews, 1966, 30(1): 101-113.
- [3] Kim BH, Ikeda T, Park HS, et al. Electrochemical activity of an Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens* IR-1, in the presence of alternative electron acceptors[J]. Biotechnology Techniques, 1999, 13(7): 475-478.
- [4] Logan BE. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells[J]. Nature Reviews Microbiology, 2009, 7(5): 375-381.
- [5] Yang YG, Sun GP, Xu MY. Microbial fuel cells come of age[J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2011, 86(5): 625-632.
- [6] 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.
- [7] Logan BE. Essential data and techniques for conducting microbial fuel cell and other types of bioelectrochemical system experiments[J]. ChemSusChem, 2012, 5(6): 988-994.
- [8] Hong SW, Kim HS, Chung TH. Alteration of sediment organic matter in sediment microbial fuel cells[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(1): 185-191.
- [9] Hong SW, Kim HJ, Choi YS, et al. Field experiments on bioelectricity production from lake sediment using

- microbial fuel cell technology[J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2008, 29(11): 2189-2194.
- [10] Yuan Y, Zhou SG, Zhuang L. A new approach to *in situ* sediment remediation based on air-cathode microbial fuel cells[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(7): 1427-1433.
- [11] Huang DY, Zhou SG, Chen Q, et al. Enhanced anaerobic degradation of organic pollutants in a soil microbial fuel cell[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 172(2/3): 647-653.
- [12] Jiang JQ, Zhao QL, Wei LL, et al. Degradation and characteristic changes of organic matter in sewage sludge using microbial fuel cell with ultrasound pretreatment[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1): 272-277.
- [13] Yan Z, Song N, Cai H, et al. Enhanced degradation of phenanthrene and pyrene in freshwater sediments by combined employment of sediment microbial fuel cell and amorphous ferric hydroxide[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012(199/200): 217-225.
- [14] Wang X, Cai Z, Zhou QX, et al. Bioelectrochemical stimulation of petroleum hydrocarbon degradation in saline soil using U-tube microbial fuel cells[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, 109(2): 426-433.
- [15] Morris JM, Jin S, Crimi B, et al. Microbial fuel cell in enhancing anaerobic biodegradation of diesel[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 146(2): 161-167.
- [16] Morris JM, Jin S. Enhanced biodegradation of hydrocarbon-contaminated sediments using microbial fuel cells[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012(213/214): 474-477.
- [17] Huang LP, Gan LL, Zhao QL, et al. Degradation of pentachlorophenol with the presence of fermentable and non-fermentable co-substrates in a microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(19): 8762-8768.
- [18] Huang LP, Gan LL, Wang N, et al. Mineralization of pentachlorophenol with enhanced degradation and power generation from air cathode microbial fuel cells[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, 109(9): 2211-2221.
- [19] Sun J, Hu YY, Bi Z, et al. Simultaneous decolorization of azo dye and bioelectricity generation using a microfiltration membrane air-cathode single-chamber microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(13): 3185-3192.
- [20] Chen BY, Zhang MM, Chang CT, et al. Assessment upon azo dye decolorization and bioelectricity generation by *Proteus hauseri*[J]. Bioresource Technology, 2010, 101(12): 4737-4741.
- [21] Pham H, Boon N, Marzorati M, et al. Enhanced removal of 1,2-dichloroethane by anodophilic microbial consortia[J]. Water Research, 2009, 43(11): 2936-2946.
- [22] Greenman J, Galvez A, Giusti L, et al. Electricity from landfill leachate using microbial fuel cells: Comparison with a biological aerated filter[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2009, 44(2): 112-119.
- [23] Wang H, Liu DM, Lu L, et al. Degradation of algal organic matter using microbial fuel cells and its association with trihalomethane precursor removal[J]. Bioresource Technology, 2012, 116: 80-85.
- [24] 张翠萍, 王志强, 刘广立, 等. 降解喹啉的微生物燃料电池的产电特性研究[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 740-746.
- [25] Zhang CP, Li MC, Liu GL, et al. Pyridine degradation in the microbial fuel cells[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 172(1): 465-471.
- [26] 汪家权, 夏雪兰, 丁巍巍. 微生物燃料电池处理苯酚废水运行条件研究[J]. 环境科学学报, 2010, 30(4): 735-741.
- [27] Luo Y, Zhang RD, Liu GL, et al. Simultaneous degradation of refractory contaminants in both the anode and cathode chambers of the microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(4): 3827-3832.
- [28] Wen Q, Kong FY, Zheng HT, et al. Simultaneous processes of electricity generation and ceftriaxone sodium degradation in an air-cathode single chamber microbial fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(5): 2567-2572.
- [29] Kim JR, Zuo Y, Regan JM, et al. Analysis of ammonia loss mechanisms in microbial fuel cells treating animal wastewater[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 99(5): 1120-1127.
- [30] He Z, Kan JJ, Wang YB, et al. Electricity production coupled to ammonium in a microbial fuel cell[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9): 3391-3397.
- [31] Sun M, Mu ZX, Chen YP, et al. Microbe-assisted sulfide oxidation in the anode of a microbial fuel cell[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(9): 3372-3377.
- [32] Sun M, Tong ZH, Sheng GP, et al. Microbial communities involved in electricity generation from sulfide oxidation in a microbial fuel cell[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2010, 26(2): 470-476.
- [33] Mohan SV, Raghavulu SV, Peri D, et al. Integrated function of microbial fuel cell (MFC) as bio-electrochemical treatment system associated with bioelectricity generation under higher substrate load[J]. Biosensors & Bioelectronics, 2009, 24(7): 2021-2027.
- [34] Hernandez ME, Newman DK. Extracellular electron transfer[J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2001, 58(11): 1562-1571.
- [35] Xu MY, Wu WM, Wu LY, et al. Responses of microbial community functional structures to pilot-scale uranium *in situ* bioremediation[J]. ISME Journal, 2010, 4(8): 1060-1070.
- [36] Gregory KB, Lovley DR. Remediation and recovery of uranium from contaminated subsurface environments with electrodes[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(22): 8943-8947.
- [37] Yan ZS, Song N, Cai HY, et al. Enhanced degradation of phenanthrene and pyrene in freshwater sediments by combined employment of sediment microbial fuel cell and amorphous ferric hydroxide[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 199: 217-225.
- [38] Lovley DR, Nevin KP. A shift in the current: New applications and concepts for microbe-electrode electron

- exchange[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2011, 22(3): 441-448.
- [39] Stewart PS. Diffusion in biofilms[J]. *Journal of Bacteriology*, 2003, 185(5): 1485-1491.
- [40] Yang YG, Sun GP, Guo J, et al. Differential biofilms characteristics of *Shewanella decolorationis* microbial fuel cells under open and closed circuit conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(14): 7093-7098.
- [41] Franks AE, Nevin KP, Glaven RH, et al. Microtoming coupled to microarray analysis to evaluate the spatial metabolic status of *Geobacter sulfurreducens* biofilms[J]. *ISME Journal*, 2010, 4(4): 509-519.
- [42] Hong YS, Brown DG. Variation in bacterial ATP level and proton motive force due to adhesion to a solid surface[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75(8): 2346-2353.
- [43] Busalmen JP, Esteve-Nunez A, Feliu JM. Whole cell electrochemistry of electricity-producing microorganisms evidence an adaptation for optimal exocellular electron transport[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(7): 2445-2450.
- [44] Renslow R, Babauta J, Majors P, et al. Diffusion in biofilms respiring on electrodes[J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(2): 595-607.
- [45] Erable B, Etcheverry L, Bergel A. From microbial fuel cell (MFC) to microbial electrochemical snorkel (MES): maximizing chemical oxygen demand (COD) removal from wastewater[J]. *Biofouling*, 2011, 27(3): 319-326.
- [46] Yang YG, Guo J, Sun GP, et al. Characterizing the snorkeling respiration and growth of *Shewanella decolorationis* S12[J]. *Bioresour Technology*, 2012, 128C: 472-478.
- [47] Lovley DR. Live wires: direct extracellular electron exchange for bioenergy and the bioremediation of energy-related contamination[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(12): 4896-4906.



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,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,微生物蛋白质组学研究,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。

本刊为中国自然科学核心期刊。曾获国家级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。

自2008年本刊已经全新改版,由双月刊改为月刊,发表周期缩短,内容更加丰富详实。欢迎广大读者到邮局订阅或直接与本刊编辑部联系购买,2014年每册定价58元,全年696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/wwxtbcn>

国内邮发代号: 2-817; 国外发行代号: BM413