

## 技术进展

# 沉积物微生物燃料电池修复水体沉积物 研究进展

宋天顺, 晏再生, 胡 颖, 江和龙

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 沉积物微生物燃料电池在修复水体沉积物的研究近年来受到广泛关注。相比较传统的原位生物修复技术, 其不需要投加电子受体或供氧剂, 而是以电极作为电子受体, 并可在氧化有机物的同时产生一定的电能。本文详细介绍了其工作原理和特点, 并阐述了阴极、阳极、电极间距、溶解氧浓度、外电阻、底物传质、微生物、水体种类对其的影响, 对今后的应用和研发重点进行了展望。

**关键词:** 微生物燃料电池; 沉积物; 修复

中图分类号: X131.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)11-0015-05

## Progress in aquatic sediment remediation by sediment microbial fuel cell

SONG Tian-shun, YAN Zai-sheng, HU Ying, JIANG He-long

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In recent years, sediment microbial fuel cell (SMFC) attracts much more attention in aquatic sediment remediation. Compared with the conventional *in situ* bioremediation methods, SMFC does not require dosing of chemical agents as electron acceptor and/or oxygen supply, but an electrode is used as an electron acceptor. In SMFC systems, a certain amount of power energy can be generated from oxidation of organic matters in sediments. In this paper, the principle and characteristics of SMFC are summarized systematically. In addition, the main factors about SMFC operation are analyzed in detail, with the emphasis on electrode type, electrode spacing, dissolved oxygen concentration, external resistance, substrate mass transfer, microorganism, and water body types. Furthermore, the development prospect and future research focuses for SMFC are presented.

**Key words:** microbial fuel cell; sediment; remediation

随着经济的快速发展和人民生活水平的日益提高, 河湖两岸工厂、农业、生活废水不加以处理直接排入河流湖泊而导致的流域水体污染问题日趋严重。现行的主要方法是减少并控制生活污水和工业污水直接向河流湖泊的排放量, 即对污染源进行处理和减排。但是还会有相当数量的污水排入城市河流, 日积月累后这些营养盐会在沉积物(底泥)中蓄积, 当外源被切断后, 沉积物中营养盐不可避免向水体释放, 在合适的条件下, 这种释放会更加剧烈<sup>[1-4]</sup>, 从而会继续导致河流湖泊水体的污染。因此, 加强对污染沉积物的治理已刻不容缓, 势在必行。

底泥搬运到其他场所再进行集中的生物修复, 成本高昂。原位生物修复不需疏浚而直接对底泥进行处理, 这样既可节省大量的疏浚费用, 又能减少疏

浚带来的环境干扰, 因而是理想的污染底泥治理方法。对富含有机污染物的沉积物, 让微生物在原地直接分解是比较理想的办法。虽然经过纯培养, 发现有些微生物能较大程度分解 PAHs、PCBs 等有机物, 但要制成在原位能活跃分解有机物的产品, 目前的效果还不理想<sup>[5-6]</sup>。原位处理需要投加具有高效降解作用的微生物和营养物, 有时还需投加电子受体或供氧剂, 但外加的微生物或其他物质易受水力条件及土著微生物等因素的强烈影响, 难以达到预期的效果。因此一种新的原位修复技术——沉积物微生物燃料电池技术便应运而生。

微生物燃料电池 (Microbial Fuel Cell) 是利用电化学技术将微生物代谢能转化为电能的一种装置, 最早是由英国植物学家 Potter 于 1911 年提出<sup>[7]</sup>, 此

收稿日期: 2009-08-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2008CB418005)

作者简介: 宋天顺(1981-), 男, 博士后, 主要从事环境电化学方面的研究; 江和龙(1970-), 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为湖泊生态系统动力学, 通讯联系人, 025-86882117, hljiang@niglas.ac.cn。

后在空间科学研究领域取得较大研究进展<sup>[8]</sup>。到 20 世纪 90 年代,利用微生物发电的技术出现了较大突破,可用于污水/废水处理。MFC 不仅可从易生化降解的有机物<sup>[9-13]</sup>中获取电能,也可从一些难降解有机物<sup>[14-15]</sup>中获取电能。

沉积物微生物燃料电池(Sediment Microbial Fuel Cell, SMFC)的工作原理与微生物燃料电池类似,但是反应器结构要简单很多。在沉积物微生物燃料电池中,作为阳极的电极被埋在水底沉积物中,而作为阴极的电极则悬于阳极上方的水中。相比较传统的原位生物修复,其不需要投加电子受体或供氧剂,而是以电极作为电子受体,并可以在氧化有机物的同时产生一定的电能。因此具有可移动、原位修复效率高、能产生电能的特点,应用前景广泛。

近年来,在国外已开始进行该技术应用于水体修复中的研究,但在国内相关领域则鲜有报道。本文综述了沉积物微生物燃料电池在修复水体沉积物中的研究进展,并对该项技术的发展前景及今后的研究方向提出了建议。

## 1 工作原理

沉积物微生物燃料电池的工作原理见图 1。SMFC 阴极位于上层好氧的水相中,SMFC 阳极插于沉积物中,阴极和阳极之间通过导线相连接,并接有电阻。沉积物中有机物在阳极区附近厌氧微生物的催化作用下被氧化,产生的电子通过细胞膜传递到阳极,再经过外电路到达阴极,氢离子通过水-沉积物界面传递到阴极,悬浮在含溶解氧相对高的水中阴极接受电子,完成氧气的还原作用。在此过程中电极作为微生物的电子受体来传递氧化有机物过程中产生的电子,从而加速了底物中有机物的去除并产生电流,而其中电流的大小代表 SMFC 氧化沉积物中有机物的速率快慢。

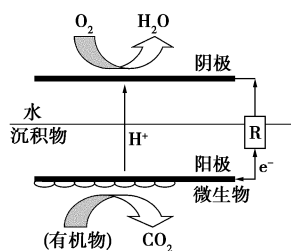


图 1 沉积物微生物燃料电池工作原理图

SMFC 在氧化沉积物中有机物的同时,还可改变沉积物的氧化还原电位。Seok 等<sup>[16]</sup>以石墨作为电极,通过 5 个月的运行后发现,沉积物中总有机质

含量下降了 21.9%,易氧化有机物的含量下降了 32.7%,而没有插入电极的沉积物其总有机质含量以及易氧化有机物的含量都没有发生变化。并且发现沉积物的氧化还原电位发生了变化,从原来的  $-152\text{ mV}$ (参比电极为 SHE,下同)变成  $+128\text{ mV}$ ,而一般在氧化还原电位低于  $-100\text{ mV}$  时容易生成产甲烷菌,说明 SMFC 不仅可氧化沉积物中的有机物,还可通过提升氧化还原电位来抑制沉积物中产甲烷过程的发生。

## 2 影响因素

### 2.1 阴极

氧气对于沉积物微生物燃料电池来说是一种合适的电子受体,但是由于水体中有限的溶解氧以及氧气的扩散速度慢,造成了其高的过电位。最常用的方法是加入催化剂来减少氧气还原的活化能,提高反应速率。Reimers 等<sup>[17]</sup>最早用铂网作为阴极,其输出功率为  $1.4\text{ mW/m}^2$ ,虽然铂作为氧还原催化剂效果很好,但支撑体导电性能不好,影响了其输出功率。Scott 等<sup>[18]</sup>以炭布作为阳极,研究了不同阴极材料对微生物燃料电池的影响。主要分成 2 类,一类为不含催化剂的材料:炭布、碳纸、泡沫碳、石墨、网状玻璃态碳;另一种为含催化剂的材料:负载 CoTMMP 的碳纸、负载 FeCoTMMP 的碳纸、负载铂的碳纸、负载铂的钛网。结果表明,不含催化剂的石墨电极输出功率最小,为  $7\text{ mW/m}^2$ 。而负载铂催化剂的碳纸,其输出功率也仅为  $8\text{ mW/m}^2$ ,这是因为负载铂催化剂的电极中加入了常规 MFC 制备空气电极时用的 PTFE 粘结剂,其不适合这种依靠溶解氧活性的水淹电极。电极上负载催化剂 FeCoTMMP,输出功率最大为  $60\text{ mW/m}^2$ ,并且发现不含催化剂的泡沫碳输出功率可达  $38\text{ mW/m}^2$ 。这说明增大材料的比表面积,可增大电流密度,从而减少过电位。正是基于此点,Hong 等<sup>[19]</sup>通过在石墨电极上打孔来增加其比表面积,以提高电流密度。实验结果表明,10 mm 厚的多孔石墨电极最大电流密度为  $45.4\text{ mA/m}^2$ ,6 mm 厚的多孔石墨电极最大电流密度为  $37.6\text{ mA/m}^2$ ,都要高于无孔石墨的  $13.9\text{ mA/m}^2$ 。Hong 等<sup>[20]</sup>还研究了阴极和阳极的面积比对于微生物燃料电池性能的影响,其设计的阳极和阴极面积比分别是 1:1、1:1/2、1:1/5、1:1/10,结果发现阳极和阴极的面积比至少要满足 1:1/5,此时 SMFC 才能稳定产电,因为 SMFC 不像常规的 MFC 有可持续提供的易生物降解的底物。此外,还有研究者用比表

面积大的碳刷作为阴极<sup>[21]</sup>,在125天内其输出功率为34 mW/m<sup>2</sup>。

其次是通过增加氧的传递速度来加速氧还原速率。He等<sup>[22]</sup>制备了旋转阴极,通过阴极的旋转使得水体中溶解氧质量浓度从0.4 mg/L增加到1.6 mg/L,使得其输出功率从29 mW/m<sup>2</sup>增大到49 mW/m<sup>2</sup>。说明SMFC可利用水流或者海潮来推动阴极旋转,通过旋转将空气中的氧气带入水中,提高阴极附近的溶解氧浓度,以提高氧还原速率。可是过多氧的渗入会提高阳极的电子传递阻抗,最终限制其输出功率,因此合适的阴极转速还需做进一步研究。

最近研究显示,也可利用微生物来协助阴极的氧还原反应。以不锈钢网作为沉积物燃料电池的阴极,研究发现,浸没在水体中的不锈钢网,经过长期的运行会在其上形成一层生物膜。Dumas等<sup>[23]</sup>以不锈钢网作为阴极,研究发现当生物膜形成后,其电流密度从5 mA/m<sup>2</sup>增加到25 mA/m<sup>2</sup>。Shantaram等<sup>[24]</sup>通过牺牲阳极,在不锈钢网阴极上沉淀一层二氧化锰,并通过阴极上形成的锰还原菌来协助阴极的氧还原。上述研究说明了附着在阴极上的微生物可加速氧气的还原,但具体的协同作用以及相应的生物阴极结构还需进一步的深入研究。

## 2.2 阳极

沉积物微生物燃料电池阳极主要是以碳材料构成的,最常见的为石墨阳极<sup>[25]</sup>,其输出功率为20 mW/m<sup>2</sup>,或者是以石墨纤维<sup>[17]</sup>作为阳极,其输出功率为10 mW/m<sup>2</sup>。Scott等<sup>[26]</sup>研究了几种不同碳材料对沉积物微生物燃料电池的影响,分别以炭布、碳纸、泡沫碳、石墨、网状玻璃态碳作为阳极,结果表明泡沫碳的最大输出功率为55 mW/m<sup>2</sup>,是炭布和石墨的2倍。

在碳材料阳极的基础上,研究者希望通过对碳材料的改性来提高其动力学活性。Lowy等<sup>[27]</sup>通过采用不同的制备方法来改进阳极,以增强其电催化活性。首先利用浸渍法,制备出含有1,6-二磺酸蒽醌(AQDS)、1,4-萘醌(NQ)的石墨电极。此外把质量分数为3%的MnSO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O、质量分数为1.0%的NiCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O和石墨粉以质量比2:1混合后,加入无机粘结剂,通过压模成型并煅烧,制备出掺入Mn<sup>2+</sup>和Ni<sup>2+</sup>的石墨电极,并以同样的方法制备出含有Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的石墨电极。然后采用常规的三电极体系,通过电化学分析从TAFEL曲线上拟合得到交换电流*i*<sub>0</sub>,结果发现这些改性后的阳极,其电化学反应活性相对于不含催化剂的石墨电极提高了1.5~2.2倍,

其输出功率最高可达100 mW/m<sup>2</sup>。

Lowy等<sup>[28]</sup>在前期阳极掺入催化剂的基础上,又研究了阳极官能团对SMFC的影响。首先把石墨用砂纸打磨,用去离子水清洗,在120℃下烘干。然后将其放入电解池中,电解液是质量分数为20%的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,通过电化学氧化使电极表面富含一定的醌基官能团,即得到氧化石墨电极。然后再通过浸渍法,在此氧化石墨电极上用AQDS进行改性,得到AQDS改性的石墨电极。结果发现,未改性的石墨电极电化学活性为1.0,而氧化石墨电极的电化学活性为57.8,AQDS氧化石墨电极的电化学活性为217.8。这主要是由于氧化后的石墨电极比表面积增大,更容易吸附电子介体,从而提高电化学活性。目前,仍需开展进一步的放大实验以研究这种电极的稳定性。

上述大部分的阳极都为石墨电极或者是负载催化剂的石墨电极,但是由于石墨电极比较脆,因此只适合实验室研究,而对于进一步的工程放大研究是不行的。正是基于此点,Dumas等<sup>[23,29]</sup>选择了不锈钢作为阳极材料,并比较了石墨电极和不锈钢电极作为阳极的差异<sup>[23]</sup>。结果表明,采用石墨作为阳极,45天后输出功率为100 mW/m<sup>2</sup>,而采用不锈钢作为阳极,输出功率为20 mW/m<sup>2</sup>,不锈钢动力学属性是造成其输出功率下降的原因,但实验结果说明不锈钢作为SMFC的阳极是可行的,还需要进一步对其结构改进或者是在其表面涂层来提高其性能。

## 2.3 电极间距

Hong等<sup>[20]</sup>研究了不同间距对SMFC性能的影响。当间距为12 cm时,其电流密度为11.5 mA/m<sup>2</sup>;当电极距离增大到20 cm时,电流密度为7.64 mA/m<sup>2</sup>;随着距离的增加其电流密度继续减小,当间距为100 cm时,其电流密度只有2.11 mA/m<sup>2</sup>,这主要是由于电极距离的减小会减小SMFC的欧姆内阻。因此,两电极距离应该在保持阴极氧充分的情况下尽可能地接近。

## 2.4 溶解氧浓度

水体中溶解氧的变化会对SMFC的性能产生影响。Seok等<sup>[16]</sup>研究发现,SMFC电流密度波动的趋势和水中溶解氧浓度的变化趋势相同。这主要是由于溶解氧浓度在不同时间段会有影响,一般在下午时阴极所在的溶解氧质量浓度范围在8~10 mg/L,而在早晨时会降为4 mg/L,这可能是由于白天藻类的生长加速引起的。并建议阴极附近的溶解氧质量浓度要大于5 mg/L,此时SMFC的电流密度

变化较小。

## 2.5 外电阻

在以模拟废水作为底物的 MFC<sup>[30]</sup>中,电流的大小和化学需氧量(COD)的去除随外电阻的增大而减小,但在 SMFC 中结果却不一样。Hong 等<sup>[20]</sup>研究了 10、100、1 000  $\Omega$  下外电阻对电流大小的影响。在初始阶段,低的外电阻对应高的输出电流。但是在 20 d 后,3 种不同外电阻对应的电流密度相近(11.3 ~ 13.0 mA/m<sup>2</sup>),而对于输出功率来说有差别,在 1 000  $\Omega$  下的输出功率最大。

## 2.6 底物传质

Hong 等<sup>[19]</sup>以多孔石墨作为电极,运行 160 d 后,对其在开路状态和闭路状态下有机物去除进行了比较。结果发现,在接近阳极处(间距小于 1 cm 处),沉积物中总有机质的含量下降了 30%。而在开路状态下以及远离阳极的附近(间距 3 cm),其总有机质含量变化不大。这说明对于 SMFC,传质的限制是影响其性能的重要因素之一。

因此,Schampelaire 等<sup>[31]</sup>通过把植物和 SMFC 进行耦合,以提高其传质作用。结果显示与植物联合作用的 SMFC 输出功率为不种植物的 SMFC 输出功率的 7 倍,这主要是由于植物以根系沉淀的形式可以持续地提供新的底物到阳极。

## 2.7 微生物

SMFC 中的微生物可以在氧化有机物的同时把代谢过程中的电子传递到阳极上,因此加强对 SMFC 中微生物的了解,以找到合适的办法来提高其性能。Holmes 等<sup>[32]</sup>分别利用海底沉积物、沼泽沉积物、淡水沉积物来构建沉积物微生物燃料电池,研究结果发现,在阳极上产电的微生物种类要明显低于不产电的微生物种类,这主要是由于在 SMFC 的阳极上富集了变形菌门(*Proteobacteria*),而其中泥土杆菌(*Geobacteraceae*)占据了主要部分(45% ~ 89%),在海底沉积物和沼泽沉积物中多为硫酸盐还原细菌(*Desulfuromonas*),而在淡水沉积物中多为异化还原菌(*Geobacter species*),并且暗示这些传递电子的微生物种类会随不同沉积物的环境而出现差异。不仅水体种类对阳极微生物菌落形态有影响,在同种水体下也会有影响。Reimers 等<sup>[21]</sup>研究发现,阳极微生物菌落形态会随阳极深度有所变化,在棒状阳极的顶部微生物种类要明显少于底部。笔者所在课题组以太湖 6 个不同区域的沉积物作为接种物来驯化微生物燃料电池,通过 3 个月驯化周期后发现,不同区域的产电性能存在差异,这也证实了同种水体下阳

极微生物也会存在差异,并且这些微生物在极端条件下也可以降解有机物传递电子。Mathis 等<sup>[33]</sup>研究发现,通过 SMFC 富集到的嗜热阳极呼吸菌,在 60℃ 下产生的电流密度是 22℃ 下的 10 倍。

## 2.8 水体种类

虽然对于沉积物的研究大部分集中在海水环境,但是淡水环境也可以维持电流的产生。Holmes 等<sup>[32]</sup>比较了 2 种不同水体的 SMFC 性能,结果海水沉积物微生物燃料电池最大电流密度为 20 mA/m<sup>2</sup>,而淡水沉积物微生物燃料电池最大电流密度只有 10 mA/m<sup>2</sup>。淡水沉积物微生物燃料电池的电流密度相对于海水环境的要低,其主要原因是其低的导电性。在 20℃ 下<sup>[22]</sup>海水的导电性高,为 50 000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ,而淡水的导电性能只有 500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。而在微生物燃料电池中电解质的导电性是影响内阻的重要因素之一<sup>[34]</sup>,低的导电性意味着高的内阻,从而会降低其电流大小。其次是缺乏海水对于沉积物燃料电池阴极的腐蚀作用,阴极的腐蚀作用一方面可提高其比表面积,其次可形成生物膜有利于阴极氧化还原性能的提高<sup>[35]</sup>。其他可能的原因为沉积物中有机物含量,以及有机物被微生物氧化的速率不同引起的。

## 3 结语及展望

沉积物微生物燃料电池自身潜在的优点展示了其良好的发展前景,但是相关的研究还处于基础阶段。因此还需要在以下几个方面进行深入研究,推动其工程化的应用:

(1)导电性能优良的立体化微生物燃料电池阳极研究。开发新型的立体化电极,并采用化学修饰来增强阳极生物亲和性和导电性,提高固定有效产电微生物的量和微生物向电极传导电子的能力。

(2)高效廉价的微生物燃料电池生物阴极研究。通过选择导电性能优良的材料,通过一定的方式使其表面产生生物膜来提高氧还原速率。

(3)加强淡水沉积物微生物燃料电池的研究。近年来淡水资源的污染已严重影响到人们的生活,而 SMFC 所展现的优点可以应用于其污染治理。并可通过深入研究生态工程和沉积物微生物燃料电池的协同作用来提高其修复速率。

(4)应用物理和生物方式,加快沉积物中有机物向阳极的传递,以提升 SMFC 工艺运行效果。

## 参考文献

[1] Jin X C, Wand S R, Pand Y, et al. The adsorption of phosphate on dif-

- ferent trophic lake sediments[J]. *Colloids Surf*, 2005, 254(1): 241 – 248.
- [2] D Angelo E M, Reddy R K. Diagenesis of organic matter in wetland receiving hypereutrophic lake water: I. Distribution of dissolved nutrients in the soil and water column[J]. *J Environ Qual*, 1994, 23(5): 928 – 936.
- [3] Tuominen L. Increased bioavailability of sediment phosphorus due to silicate enrichment[J]. *Water Res*, 1998, 32(7): 2001 – 2008.
- [4] Kim L H, Euiso C, Gil K I, *et al.* Phosphorus release rate from sediments and pollutant characteristics in Han River, Seoul, Korea[J]. *Sci Total Environ*, 2004, 321(1/2/3): 115 – 125.
- [5] Aronstein B N, Alexander M. Effect of a non-ionic surfactant added to the soil surface on the biodegradation of aromatic hydrocarbons within the soil[J]. *Appl Microb Biotechnol*, 1993, 39(3): 386 – 390.
- [6] Slater G F, Cowie B R, Harper N. Variation in PAH inputs and microbial community in surface sediments of Hamilton Harbour: Implications to remediation and monitoring[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153(1): 60 – 70.
- [7] Potter M C. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds[J]. *Royal Society*, 1911, 8(84): 260 – 276.
- [8] Wilkinson S. “Gastrobots”-benefits and challenges of microbial fuel cells in food powered robot applications[J]. *Autonomous Robots*, 2000, 9(2): 99 – 111.
- [9] Liu H, Cheng S, Logan B E. Production of electricity from acetate or butyrate using a single-chamber microbial fuel cell[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(2): 658 – 662.
- [10] Rodrigo M A, Canizares P, Lobato J, *et al.* Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell[J]. *J Power Sources*, 2007, 169(1): 198 – 204.
- [11] He Z, Wagner N, Minteer S D. An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: Assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(17): 5212 – 5217.
- [12] Oh S, Logan B E. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies[J]. *Water Res*, 2005, 39(19): 4673 – 4682.
- [13] Prasad D, Sivaram T K, Berchmans S, *et al.* Microbial fuel cell constructed with a micro-organism isolated from sugar industry effluent[J]. *J Power Sources*, 2006, 160(2): 991 – 996.
- [14] Venkata Mohan S, Mohanakrishna G, Reddy B P, *et al.* Bioelectricity generation from chemical wastewater treatment in mediatorless (anode) microbial fuel cell (MFC) using selectively enriched hydrogen producing mixed culture under acidophilic microenvironment[J]. *Biochem Eng J*, 2008, 39(1): 121 – 130.
- [15] Song T S, Xu Y, Ye Y, *et al.* Electricity generation from terephthalic acid using a microbial fuel cell[J]. *J Chem Technol Biot*, 2009, 84(3): 356 – 360.
- [16] Seok W H, Hyung J K, Yong S C, *et al.* Field experiments on bioelectricity production from lake sediment using microbial fuel cell technology[J]. *B kor Chem Soc*, 2008, 29(11): 2189 – 2194.
- [17] Reimers C E, Tender L M, Fertig S, *et al.* Harvesting energy from the marine sediment: Water interface[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35(1): 192 – 195.
- [18] Scott K, Cotlarciuc I, Head I, *et al.* Fuel cell power generation from marine sediments: Investigation of cathode materials[J]. *J Chem Technol Biot*, 2008, 83(9): 1244 – 1254.
- [19] Hong S W, Chang I S, Choi Y S, *et al.* Responses from freshwater sediment during electricity generation using microbial fuel cells[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2009, 32(3): 389 – 395.
- [20] Hong S W, Chang I S, Choi Y S, *et al.* Experimental evaluation of influential factors for electricity harvesting from sediment using microbial fuel cell[J]. *Bioresour Technol*, 2009, 100(12): 3029 – 3035.
- [21] Reimers C E, Girguis P, Stecher H A, *et al.* Microbial fuel cell energy from an ocean cold seep[J]. *Geobiology*, 2006, 4(2): 123 – 126.
- [22] He Z, Shao H, Angenent L T. Increased power production from a sediment microbial fuel cell with a rotating cathode[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, 22(12): 3252 – 3255.
- [23] Dumas C, Mollica A, Feron D, *et al.* Checking graphite and stainless anodes with an experimental model of marine microbial fuel cell[J]. *Bioresour Technol*, 2008, 99(18): 8887 – 8894.
- [24] Shantaram A, Beyenal H, Veluchamy R R A, *et al.* Wireless sensors powered by microbial fuel cells[J]. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(13): 5037 – 5042.
- [25] Tender L M, Reimers C E, Stecher H A, *et al.* Harnessing microbially generated power on the seafloor[J]. *Nature Biotechnol*, 2002, 20(8): 821 – 825.
- [26] Scott K, Cotlarciuc I, Hall D, *et al.* Power from marine sediment fuel cells: The influence of anode material[J]. *J Appl Electrochem*, 2008, 38(9): 1313 – 1319.
- [27] Lowy D A, Tender L M, Zeikus J G, *et al.* Harvesting energy from the marine sediment-water interface: II. Kinetic activity of anode materials[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2006, 21(11): 2058 – 2063.
- [28] Lowy D A, Tender L M. Harvesting energy from the marine sediment-water interface: III. Kinetic activity of quinone- and antimony-based anode materials[J]. *J Power Sources*, 2008, 185(1): 70 – 75.
- [29] Dumas C, Mollica A, Feron D, *et al.* Marine microbial fuel cell: Use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials[J]. *Electrochim Acta*, 2007, 53(2): 468 – 473.
- [30] Jang J K, Pham T H, Chang I S, *et al.* Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell[J]. *Process Biochem*, 2004, 39(8): 1007 – 1012.
- [31] De Schampelaire L, Van Den Bossche L, Hai S D, *et al.* Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants[J]. *Environ Sci Technol*, 2008, 42(8): 3053 – 3058.
- [32] Holmes D E, Bond D R, Oneil R A. Associated with electrodes harvesting electricity from a variety of aquatic sediments[J]. *Microbial Ecol*, 2004, 48(2): 178 – 190.
- [33] Mathis B J, Marshall C W, Milliken C E, *et al.* Electricity generation by thermophilic microorganisms from marine sediment[J]. *Appl Microb Biot*, 2008, 78(1): 147 – 155.
- [34] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, *et al.* Microbial fuel cells: Methodology and technology[J]. *Environ Sci Technol*, 2006, 40(17): 5181 – 5192.
- [35] Bergel A, Feron D, Mollica A. Catalysis of oxygen reduction in PEM fuel cell by seawater biofilm[J]. *Electrochem Commun*, 2005, 7(9): 900 – 904. ■