

微生物燃料电池在治污产能方面的研究进展

范方舟, 翟洪艳*, 季 民

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

摘要:系统地介绍了微生物燃料电池在处理污水、污泥、餐厨垃圾、受污染沉积物和土壤等方面的研究进展, 全面地总结了治污效果和产能能力, 指出未来的研究重点应放在新型反应器构型的设计、去污产电效果的提高和大规模实际运用等方面。

关键词:微生物燃料电池; 生物电化学系统; 治污; 产电

中图分类号: TM911.45

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2015)12-0019-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2015.12.006

Progress in microbial fuel cell for decontamination and power generation

FAN Fang-zhou, ZHAI Hong-yan*, JI Min

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The research progress in microbial fuel cell for treatment of wastewater, sludge, kitchen waste, contaminated sediment and soil are systematically introduced. The decontamination effect and power production of microbial fuel cell are comprehensively summarized. It is pointed out that the future research should be focused on the design of new type reactor configuration, improvement of decontamination and full-scale practical application.

Key words: microbial fuel cell; microbial electrochemical system; decontamination; power generation

能源问题是当今所有工业化国家面临的共同挑战, 由能源消耗产生的废气、废水、固废等严重污染了生活环境, 这些废物依靠传统处理消耗大量资源和能源, 因此开发绿色新能源十分迫切。变“废物”为能源具有治污和产能的双重效果, 实际生产、生活中很多废物富含有机质, 例如生活污水、活性污泥、餐厨垃圾等, 利用废物中的有机质回收能源对于保护环境和开发新能源具有重要意义。

微生物燃料电池 (microbial fuel cell, MFC) 是一种利用微生物降解有机物并将有机质中的化学能转变成电能的新型生物电化学系统^[1]。MFC 研究始于 1910 年, 随后不断深入, MFC 输出功率逐渐增大^[2]。2004 年 MFC 首次运用于实际废水处理并产电^[3], 为废物资源化利用开辟了新道路, 此后 MFC 的治污产电能力被广泛研究。本文中将从治理污水、污泥、受污染沉积物和餐厨垃圾等方面介绍 MFC 的治污效果和产能能力。

1 MFC 的基本构型

MFC 一般由阳极室、阴极室、质子交换膜和外接电路组成。根据有无阴极室将 MFC 分为双室

MFC [图 1(a)] 和单室 MFC [图 1(b)], 根据有无质子交换膜将 MFC 分为有膜 MFC 和无膜 MFC。在典型双室 MFC 系统中, 阳极上附着的微生物将可利用的有机质氧化为二氧化碳, 产生的电子传递到阳极并经外电路到达阴极, 产生的质子经过质子交换膜到达阴极室, 在阴极室中电子受体 (如氧气) 接受电子被还原。

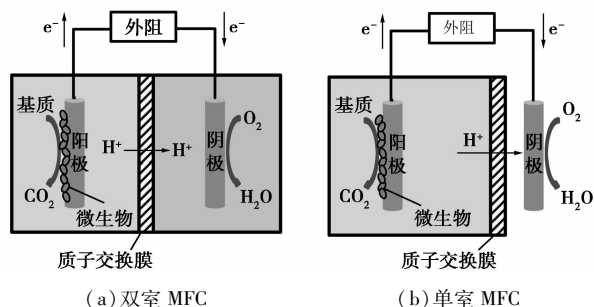


图 1 MFC 示意图

2 MFC 在污水、污泥、沉积物和餐厨垃圾等处理中的应用

2.1 MFC 在处理污水并产电方面的研究

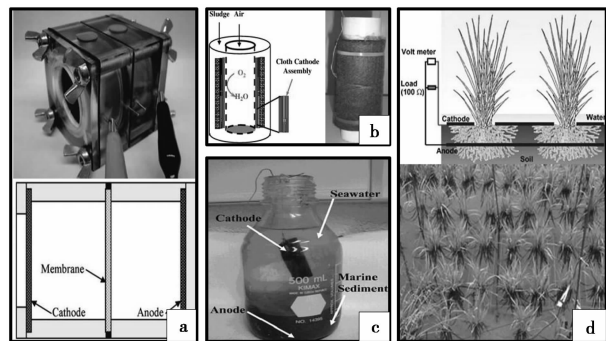
用于污水处理的 MFC 通常为双室结构, 污水在

收稿日期: 2015-05-28; 修回日期: 2015-10-07

基金项目: 天津市应用基础与前沿技术研究计划 (青年项目) (14JCQJNC08300); 天津大学自主创新基金 (2015XRG-0049); 教育部博士点基金 (20120032110042)

作者简介: 范方舟 (1993-), 女, 硕士生; 翟洪艳 (1979-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为水体修改、饮用水安全, 通讯联系人, 022-27406057, zhaihy@tju.edu.cn.

阳极室中进行降解,产生的质子通过质子交换膜到达阴极室,阴极一般暴露在空气中[图 2(a)]^[4]。目前 MFC 处理污水时的产电电压一般大于 200 mV,最大输出功率密度(P_{\max})从几十 mW/m^2 到几百 mW/m^2 变化,内阻从几十欧姆到几百欧姆变化,COD 去除率一般在 50% 以上。



(a)用于污水处理的 MFC;(b)用于污泥处理的 MFC;
(c)SMFC;(d)植物型 SMFC

图 2 基于 MFC 的去污产能装置

模拟污水中常以醋酸盐、葡萄糖、蔗糖等易降解有机物作为 MFC 燃料,一般能获得更好的产电效果。Tao 等^[5]利用双室 MFC 处理模拟废水(醋酸钠为燃料),模拟废水以间歇的方式进入阳极室,获得的 P_{\max} 为 $528 \text{ mW}/\text{m}^2$,COD 去除率为 79%,并且分析认为其中 74% 的去除率依靠阳极室微生物,5%

的去除率依靠阴极室微生物作用。在处理生活污水方面,Sudarsan 等^[6]研究了双室 MFC 处理旅店污水、制糖废水和乳液废水的产电情况,发现 3 种废水的产电电流分别是 0.64、0.54、0.34 mA,随后对盐桥中琼脂糖含量进行优化,发现最优琼脂糖质量分数为 10%,此时 P_{\max} 为 $230 \text{ mW}/\text{m}^2$,最大输出电流为 0.97 mA,最大输出电压为 0.95 V,BOD 去除率 92%,COD 去除率 75.5%。

单室 MFC 无阴极室,阴阳极距离减少,传质阻力小,内阻小。单室空气阴极 MFC 处理模拟污水 P_{\max} 可达到 $4\ 300 \text{ mW}/\text{m}^2$,COD 去除率达到 $93.5 \text{ kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ^[7]。多重阳极单室 MFC 处理生活污水的研究发现,能够得到的 P_{\max} 为 $328 \text{ mW}/\text{m}^2$,最大电压为 0.58 V,COD 去除率最大能达到 94%,库伦效率可达 31.4%^[8]。工业废水种类繁多,不同种类的废水水质情况不一样,去污和产电效果也有差别,处理啤酒废水时 P_{\max} 可达到 $4.1 \text{ mW}/\text{m}^3$,COD 去除率超过 85%^[9]。处理炼油废水时 P_{\max} 可达 $280 \text{ mW}/\text{m}^2$,COD 去除率能达到 86%,其中溶解性 COD 去除率为 78%^[10]。

目前 MFC 研究主要是小试规模,反应器容积一般小于 1 L。Sekoai 等^[11]研究了半中试规模 MFC 处理城市固废发酵液运行到 60 h 时,MFC 的电压提升到 0.48 V, P_{\max} 为 $210 \text{ mW}/\text{m}^2$,COD 去除率 50.1%。

(上接第 18 页)

[16] 徐惠,张俊龙,陈泳,等. Mn^{2+} 掺杂聚苯胺的电化学制备及电容特性[J]. 高分子材料科学与工程,2014,30(10):23-27.
[17] 徐惠,张俊龙,陈泳,等. Mn^{2+} 掺杂聚苯胺的制备及其电容特性研究[J]. 功能材料,2014,45(7):7047-7050.
[18] 方静,崔沐,张治安,等. 过渡金属盐掺杂聚苯胺材料及电容行为研究[J]. 功能材料,2011,42(1):171-174.
[19] 王新生. 锌-锌离子掺杂聚苯胺二次电池[D]. 南京:南京工业大学,2008.
[20] Li J, Cui M, Lai Y Q, et al. Investigation of polyaniline co-doped with Zn^{2+} and H^+ as the electrode material for electrochemical supercapacitors[J]. Synthetic Metals, 2010, 160(11/12):1228-1233.
[21] Xu H, Zhang J L, Lu H L, et al. Electrochemical polymerization of polyaniline doped with Zn^{2+} as the electrode material for electrochemical supercapacitors[J]. J Solid State Electrochemistry, 2014, 18(3):813-819.
[22] Ghosh D, Giri S, Mandal A, et al. H^+ , Fe^{3+} codoped polyaniline/MWCNTs nanocomposite: Superior electrode material for supercapacitor application[J]. Applied Surface Science, 2013, 276:120-128.

[23] Xu H, Wu J X, Li C L, et al. Investigation of polyaniline films doped with Fe^{3+} as the electrode material for electrochemical supercapacitors[J]. Electrochimica Acta, 2015, 165:14-21.
[24] Xu H, Wu J X, Li C L, et al. Investigation of polyaniline films doped with Co^{2+} as the electrode material for electrochemical supercapacitors[J]. Ionics, 2014, 21(4):1163-1170.
[25] 崔沐. 过渡金属离子掺杂聚苯胺材料制备及其电容特性研究[D]. 长沙:中南大学,2010.
[26] Shit A, Chatterjee S, Nandi A K. Dye-sensitized solar cell from polyaniline-ZnS nanotubes and its characterization through impedance spectroscopy[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2014, 16(37):20079-20088.
[27] Wang J, Wu Z C, Hu K H, et al. High conductivity graphene-like MoS_2 /polyaniline nanocomposites and its application in supercapacitor[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 619:38-43.
[28] 陈春燕. 含过渡金属离子导电聚苯胺的合成表征及其性质研究[D]. 长沙:湖南师范大学,2004.
[29] 温柳青. 四氯合金属季铵盐掺杂聚苯胺电极的电容性能及表征[D]. 石家庄:河北师范大学,2012.
[30] 张淑英,温柳青,武克忠. 季铵盐掺杂聚苯胺电极的电容性能[J]. 应用化学,2013,30(8):951-956. ■

2.2 MFC 在处理污泥并产电方面的研究

用于剩余污泥处理的 MFC 通常为单室空气阴极结构,剩余污泥在阳极室中进行降解,阴极与空气直接接触[图 2(b)]^[12]。一些研究者考察了影响 MFC 产电除污性能的影响因素。有研究表明,阳极室处于碱性环境有利于剩余污泥的处理, Yuan 等^[12]发现 pH = 10 时产电效果最好, P_{\max} 为 73 mW/m², COD 去除率为 53%。但又有研究表明,阳极室处于中性 pH 条件时产电效果最好, P_{\max} 为 275 mW/m²^[13]。孙晓杰等^[14]获得的最优运行条件(污泥浓度 21 000 mg/L、阳极面积 31.4 cm²、铜导线和 NaCl 浓度 200 mmol/L)下的输出电压为 597 mV 和 P_{\max} 301 mW/m²。

剩余污泥中有机质大部分为细胞物质,难被微生物直接利用。污泥预处理(超声、热/碱处理)能水解细胞壁并释放细胞内物质,对产电更有利^[15]。超声比热/碱处理效果更好,超声预处理后 MFC 能去除 90% 的 COD, P_{\max} 为 9.78 mW/m²^[15]。另外,在污泥中添加餐厨垃圾进行发酵预处理可以提高微生物活性,比超声预处理的产电效果更好^[16]。

双室污泥 MFC 的电子受体一般为铁氰化钾,考虑到铁氰化钾的毒性问题,价格低廉且低环境危害的次氯酸盐可作为替代品且能促进污泥的降解消化和提高产电效果, P_{\max} 和 COD 去除率比氧气作为电子受体时分别提高了 100% 和 29.5%^[17]。

2.3 MFC 处理沉积物和土壤修复方面的研究

沉积物微生物燃料电池(sediment microbial fuel cell, SMFC)是 MFC 的一种, SMFC 由埋于沉积物中的阳极通过外部电路与好氧上覆水体中的阴极相连而组成[图 2(c)], SMFC 利用沉积物中的有机质氧化过程和上覆水体中氧气的还原过程实现去污产电^[18]。目前很多沉积物富集了大量有机污染物并会将其释放到水体中,造成水体黑臭^[19]。SMFC 能在厌氧环境中降解沉积物中的有机物,是一种有效的沉积物原位生物修复方法。

SMFC 能对石油烃^[20]和多环芳烃^[21-22]等复杂有机物进行降解。Morris 等^[20]利用 SMFC 强化石油烃降解,石油烃去除率为 24.4%,高于 SMFC 开路时的去除率(2.1%),最大输出电压达到 190 mV, P_{\max} 为 2 162 mW/m³。Rodrigo 等^[21]发现 SMFC 使土壤中污染物二苯并噻吩的降解率提高了 3 倍,去除率达到 50%,电流密度为 20 mA/m²。在 SMFC 中添加氢氧化铁可以加强菲和芘的降解^[22],菲和芘的去除率分别为 99.47% 和 94.79%。另外有研究表

明,引入 Pt^[19]、四甲氧基苯吡啶^[23]等阴极催化剂可以提高阴极氧气还原速率,进而提高 SMFC 的输出功率。

实际应用中大规模 SMFC 的阴阳极间距较大,反应器内阻较大且输出功率较低, Yuan 等^[19]构建了一个新型管式空气阴极 SMFC,输出电压 703.2 mV, P_{\max} 为 107.1 mW/m²,沉积物中烧失量(loss on ignition)、氧化有机质(readily oxidizable organic matter)和 COD 去除率较开路情况提高了近 10 倍。Yang 等^[24]利用重污染沉积物(含高浓度重金属、多环芳烃、多溴联苯醚)成功运行一个 100 L 的 SMFC 超过 2 年,期间不补充电子供体,2 年多运行时间内平均输出电压为 0.8 V, P_{\max} 为 18.6 mW/m³, TOC 去除率 22.1%,表明 SMFC 可以扩大化和长期运行。

将水生植物引入 SMFC 中,通过植物根际分泌物补充阳极室中产电微生物所需的有机质,有利于微生物活动和产电功率的提高^[25]。植物型 SMFC 中通常将植物种植在阳极室沉积物中,阳极置于植物根部附近,阴极置于沉积物与水的交界面附近[图 2(d)]^[26]。一些研究者将 SMFC 与湿地等生态系统结合进行了中试规模的实验研究,湿地中的芦苇种植在阴极室,充分发挥了植物原位产氧作用,最大输出电压为 1.161 V, P_{\max} 为 43 mW/m², COD 去除率为 95%^[27]。

2.4 MFC 在处理餐厨垃圾并产电方面的研究

直接以餐厨垃圾为燃料构建的单室 MFC 中,基质浓度对输出功率密度有影响,在最佳基质浓度下的 P_{\max} 为 556 mW/m², COD 去除率 86.4%,过大的基质 COD 不利于有机物的有效利用^[28]。Kannaiah 等^[29]也发现中等基质浓度[1.74 kg/(m³·d)]更有利于产电,而且证明了预先发酵的餐厨垃圾更有利于 MFC 运行,预先发酵的餐厨垃圾开路电压为 391 mV, P_{\max} 为 98.8 mW/m²。

Mohan 等^[30]利用单室 MFC 处理食堂餐厨垃圾并持续产电 29 d,考察不同的电极和质子交换膜组合情况对 MFC 产电的影响,发现存在质子交换膜时,阳极离阴极有一定距离的 MFC 产电效果最好,开路电压为 463 mV,功率密度为 170.81 mW/m², COD 去除率 76%。没有质子交换膜但阳极离阴极有一定距离的 MFC 产电效果其次,开路电压为 398 mV,功率密度为 53.41 mW/m², COD 去除率 73%。阳极和阴极紧靠质子交换膜的 MFC 产电效果最差,开路电压为 258 mV,功率密度为 41.8 mW/m², COD 去除率 76%,这可能是阳极紧靠质子交换膜造成阳极与微生物接触面积减少使得产电效果变差。

综上,用于处理污水、污泥、沉积物和餐厨垃圾时的 MFC 有不同的规模、构型和阴阳极材料等,产

电去污效果也不一样,表 1 列出了很多具有参考价值意义的大量试验结果。

表 1 MFC 处理各种污染物及产电性能

处理类型	基质	反应器规模/L	构型	阳极	阴极	功率密度	去污率	电压/mV	内阻/ Ω	运行时间/d	电子受体
污水	乙酸钠 ^[5]	0.028	双室型	碳纸	碳布	528 mW/m ²	COD 79%	524	227	3	氧气
	旅店生活污水 ^[6]	2.6	双室型	石墨棒	石墨棒	230 mW/m ²	COD 75.5%	950	空白	31	氧气
	乙酸 ^[7]	0.03	单室型	碳布	碳布	4300 mW/m ²	COD 93.5 kg/(m ³ ·d)	>500	空白	63	氧气
	生活污水 ^[8]	0.13	单室型	碳刷	碳布	328 mW/m ²	COD 94%	580	64	空白	氧气
	啤酒废水 ^[9]	10.0	单室型	碳毡	CCA	4.1 W/m ³	COD 87.1%	23.01	800	180	氧气
	炼油污水 ^[10]	0.013	单室型	碳刷	碳布	280 mW/m ²	COD 86%	空白	空白	空白	氧气
	固废发酵流出液 ^[11]	1.4	双室型	石墨棒	石墨棒	210 mW/m ²	COD 50.1%	480	空白	空白	氧气
污泥	剩余污泥 ^[12]	1.727	单室型	石墨毡	CCA	73 mW/m ²	TCOD 53%	>650	空白	140	氧气
	初沉污泥 ^[13]	1.0	单室型	碳纸	碳纸	182 mW/m ²	空白	500	270	空白	氧气
	剩余污泥 ^[14]	0.75	单室型	石墨棒	圆形碳布	301.3 mW/m ²	空白	597.3	92.5	空白	氧气
	超声初沉污泥 ^[15]	0.24	双室型	石墨杆	石墨杆	13.42 mW/m ²	SCOD 87%	257	空白	6	氧气
	超声剩余污泥 ^[15]	0.24	双室型	石墨杆	石墨杆	9.78 mW/m ²	SCOD 90%	220	空白	3	氧气
	超声厌氧消化污泥 ^[15]	0.24	双室型	石墨杆	石墨杆	12.67 mW/m ²	SCOD 57%	249	空白	空白	氧气
	剩余污泥 ^[16]	0.13	双室型	碳刷	碳刷	31.5 W/m ³	TCOD 46.1%	660	90	4	铁氰化钾
	活性污泥+餐厨垃圾 ^[16]	0.1	单室型	碳刷	碳布	1205 mW/m ²	BOD 46%	556	86.2	空白	氧气
	活性污泥 ^[17]	3.17	双室型	碳毡	碳毡	8.7 W/m ³	TCOD 84.7%	965	90	65	次氯酸钠
	活性污泥 ^[17]	3.17	双室型	碳毡	碳毡	4.2 W/m ³	TCOD 65.4%	748	251	65	氧气
沉积物	淡水沉积物 ^[19]	0.6	单室型	碳毡	CCA	107.1 mW/m ²	COD 48.2%	703.2	20	180	氧气
	含砂沉积物 ^[20]	0.1	单室型	碳布	碳纸	2162 mW/m ³	TPH 24.4%	190	空白	66	氧气
	湖底沉积物 ^[22]	4.0	单室型	不锈钢筒	不锈钢筒	空白	非 99.47%	17.1	空白	240	氧气
	海底沉积物 ^[23]	3.2	单室型	碳布	Fe-CoTMP	62 mW/m ²	空白	720	空白	130	氧气
	河底沉积物 ^[24]	100.0	单室型	石墨板	石墨毡	18.6 mW/m ³	TOC 22.1%	800	空白	730	氧气
餐厨	餐厨垃圾 ^[28]	0.028	单室型	石墨刷	碳布	556 mW/m ²	COD 86.4%	322	空白	3	氧气
	餐厨垃圾 ^[30]	0.55	单室型	石墨片	石墨片	170.81 mW/m ²	COD 76%	463	空白	29	氧气

3 结语与展望

MFC 在治污产能方面具有巨大潜力,引起了各治污领域的广泛关注。随着 MFC 研究的不断深入, MFC 的产电除污性能大大提高,产电功率密度由几 mW/m² 增加到几千 mW/m²,产电电压已超过 1 000 mV, COD 去除效果与传统处理方法接近。MFC 的高效去污产电性能使其在污水和污泥的处理、受污染沉积物的处理及土壤的原位修复方面存在着巨大应用潜力,对新能源开发和废物资源化利用起着重要作用。目前 MFC 研究中存在产电功率仍然不高,与之匹配的电收集技术缺乏等问题,离

实际应用还有一定距离。相信随着新型装置构型的研制、运行条件的优化、微生物群落与 MFC 工作机理的深入研究, MFC 作为一种新型的替代能源和治污技术将在实际生产中发挥巨大作用。

参考文献

- [1] Bullen R A, Arnot T C, Lakemanc J B, et al. Biofuel cells and their development [J]. Biosens Bioelectron, 2006, 21 (11): 2015 - 2045.
- [2] Potter M C. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds [J]. Proc R Soc Lond B, 1911, 84: 260 - 2761.
- [3] Liu H, Ramnarayanan R, Logan B E. Biological extracting energy from wastewater: Biohydrogen production and microbial fuel cells

- [J]. *Environ Sci Technol*,2004,38(9):160A-167A.
- [4] Cheng S,Dempsey B A,Logan B E. Electricity generation from synthetic acid-mine drainage (AMD) water using fuel cell technologies[J]. *Environmental Science & Technology*,2007,41(23):8149-8153.
- [5] Tao Q,Zhou S,Luo J,*et al.* Nutrient removal and electricity production from wastewater using microbial fuel cell technique[J]. *Desalination*,2015,365:92-98.
- [6] Sudarsan J S,Prasana K,Nithiyantham S,*et al.* Comparative study of electricity production and treatment of different wastewater using microbial fuel cell (MFC) [J]. *Environmental Earth Sciences*,2015,73(5):2409-2413.
- [7] Fan Y,Han S K,Liu H,*et al.* Improved performance of CEA microbial fuel cells with increased reactor size[J]. *Energy and Environmental Science*,2012,5(8):8273-8280.
- [8] Ahn Y,Hatzell M C,Zhang F,*et al.* Different electrode configurations to optimize performance of multi-electrode microbial fuel cells for generating power or treating domestic wastewater[J]. *Journal of Power Sources*,2014,249:440-445.
- [9] Zhuang L,Yuan Y,Wang Y,*et al.* Long-term evaluation of a 10-liter serpentine-type microbial fuel cell stack treating brewery wastewater[J]. *Bioresource Technology*,2012,123:406-412.
- [10] Zhang F,Ahn Y,Logan B E. Treating refinery wastewaters in microbial fuel cells using separator electrode assembly or spaced electrode configurations[J]. *Bioresource Technology*,2014,152:46-52.
- [11] Sekoai P T,Gueguim Kana E B. Semi-pilot scale production of hydrogen from organic fraction of solid municipal waste and electricity generation from process effluents [J]. *Biomass and Bioenergy*,2014,60:156-163.
- [12] Yuan Y,Chen Q,Zhou S,*et al.* Improved electricity production from sewage sludge under alkaline conditions in an insert-type air-cathode microbial fuel cell[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*,2012,87(1):80-86.
- [13] Vologni V,Kakarlar A,Angelidaki I,*et al.* Increased power generation from primary sludge by a submersible microbial fuel cell and optimum operational conditions[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*,2013,36(5):635-642.
- [14] 孙晓杰,赵孝芹,罗洁瑜,等. 剩余污泥微生物燃料电池产电性能的优化试验研究[J]. *环境科学与技术*,2014,37(8):161-164.
- [15] Oh S,Yoon J Y,Gurung A,*et al.* Evaluation of electricity generation from ultrasonic and heat/alkaline pretreatment of different sludge types using microbial fuel cells[J]. *Bioresource Technology*,2014,165:21-26.
- [16] Chen Y,Luo J,Yan Y,*et al.* Enhanced production of short-chain fatty acid by co-fermentation of waste activated sludge and kitchen waste under alkaline conditions and its application to microbial fuel cells[J]. *Applied Energy*,2013,102:1197-1204.
- [17] Ghadge A N,Jadhav D A,Pradhan H,*et al.* Enhancing waste activated sludge digestion and power production using hypochlorite as catholyte in clayware microbial fuel cell[J]. *Bioresource Technology*,2015,182:225-231.
- [18] Rezaei F,Richard T L,Brennan R A,*et al.* Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems [J]. *Environmental Science & Technology*,2007,41(11):4053-4058.
- [19] Yuan Y,Zhou S,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.
- [20] Morris J M,Jin S. Enhanced biodegradation of hydrocarbon-contaminated sediments using microbial fuel cells[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2012,213/214:474-477.
- [21] Rodrigo J,Boltes K,Esteve-Nuñez A. Microbial-electrochemical bioremediation and detoxification of dibenzothiophene-polluted soil [J]. *Chemosphere*,2014,101:61-65.
- [22] 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.
- [23] Scott K,Cotlarciuc I,Head I,*et al.* Fuel cell power generation from marine sediments: Investigation of cathode materials[J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*,2008,83(9):1244-1254.
- [24] Yang Y,Lu Z,Lin X,*et al.* Enhancing the bioremediation by harvesting electricity from the heavily contaminated sediments [J]. *Bioresource Technology*,2015,179:615-618.
- [25] Deng H,Chen Z,Zhao F. Energy from plants and microorganisms: Progress in plant-microbial fuel cells[J]. *Chem Sus Chem*,2012,5(6):1006-1011.
- [26] Kaku N,Yonezawa N,Kodama Y,*et al.* Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*,2008,79(1):43-49.
- [27] Villaseñor J,Capilla P,Rodrigo M A,*et al.* Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland-microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates [J]. *Water Research*,2013,47(17):6731-6738.
- [28] Jia J,Tang Y,Liu B,*et al.* Electricity generation from food wastes and microbial community structure in microbial fuel cells [J]. *Bioresource Technology*,2013,144:94-99.
- [29] Kannaiah Goud R,Venkata Mohan S. Pre-fermentation of waste as a strategy to enhance the performance of single chambered microbial fuel cell (MFC) [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2011,36(21):13753-13762.
- [30] Mohan S V,Chandrasekhar K. Solid phase microbial fuel cell (SMFC) for harnessing bioelectricity from composite food waste fermentation: Influence of electrode assembly and buffering capacity [J]. *Bioresource Technology*,2011,102(14):7077-7085. ■