

微生物燃料电池中产电微生物的研究进展

李颖^{1,2,3} 孙永明² 孔晓英^{2,3} 李连华² 袁振宏² 杨秀山^{1*}

(1. 首都师范大学 北京 100037)

(2. 中国科学院广州能源研究所 广东 广州 510640)

(3. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要: 产电微生物是微生物燃料电池系统的核心组成, 本文从生物学角度介绍了几种产电微生物的分类学地位、形态特征、生理生化特征及在微生物燃料电池中的产电机理和产电能力, 分析了利用产电微生物进行废水处理同时生物发电的应用前景, 提出产电微生物在 MFC 系统中的进一步研究方向为微生物的富集、驯化、改造和多种菌种优化组合等。

关键词: 微生物燃料电池, 产电微生物, 铁还原菌, 电子传递

Progress in Research of Electrigens in Microbial Fuel Cell

LI Ying^{1,2,3} SUN Yong-Ming² KONG Xiao-Ying^{2,3} LI Lian-Hua²
YUAN Zhen-Hong² YANG Xiu-Shan^{1*}

(1. Capital Normal University, Beijing 100037, China)

(2. Guangzhou Institute of Energy Conversion Chinese Academy of sciences, Guangzhou, Guangdong 510640, China)

(3. Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Electricigens play an important role in microbial fuel cell (MFC). This review provides an introduction of different electricigens on their taxonomical group, biochemical, physiological and morphological characteristics. The ability of electricity production of electricigens and electron transfer mechanisms in microbial fuel cells are also concluded. The prospect of waste water treatment and bio-electricity production is underlined, it is point out in this review that the future research of microorganism for MFC should be focused on enrichment, adaptation, modification and optimization by multi-strains application to improve the performances of MFC.

Keywords: Microbial fuel cell, Electricigens, Fe(III)-reducing bacteria, Electron transfer

微生物燃料电池(Microbial fuel cell, MFC)是一种以微生物为催化剂, 将有机物中的化学能转化成电能的装置(图 1)。

利用有机物维持生长的微生物, 把氧化有机物获得的电子通过电子传递链传递到细胞外, 直接或间接地通过介质(Mediator)将电子传递到电极上产

生电流, 这种微生物就是产电微生物(Electricigen)^[1]。微生物产电的能力差异很大, 能应用在 MFC 系统中的微生物决定着 MFC 的功能与应用, 是 MFC 系统的核心。对已在 MFC 中应用的产电微生物的系统总结和分析, 对于 MFC 的研究与应用具有重要的意义。

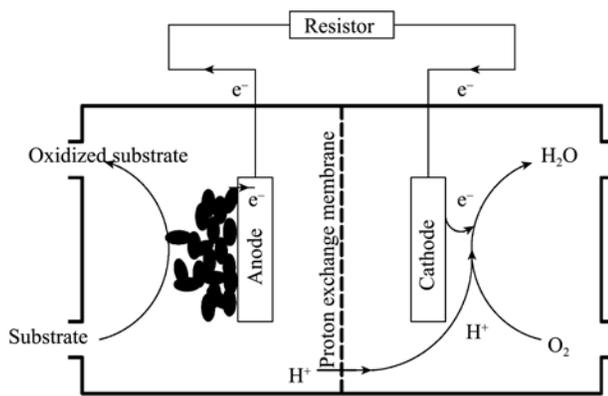


图1 微生物燃料电池示意图

Fig. 1 A schematic of a microbial fuel cell

1 产电菌的生物学特征及电化学活性

目前,在自然条件中分离的产电微生物主要是变形菌门(Proteobacteria)和厚壁菌门(Firmicutes)的细菌,多为兼性厌氧菌,具有无氧呼吸和发酵等代谢方式,可氧化糖类、有机酸等获得能量维持生长。这些产电微生物多数为铁还原菌[Fe(III)-reducing bacteria, FRB],即以Fe(III)为呼吸链的最终电子受体。

已报道的产电微生物有 α -变形菌纲(Alphaproteobacteria)的沼泽红假单胞菌(*Rhodopseudomonas palustris*)和人苍白杆菌(*Ochrobactrum anthropi*); β -变形菌纲(Betaproteobacteria)的铁还原红育菌(*Rhodoferrax ferrireducens*); γ -变形菌纲(Gammaproteobacteria)的嗜水气单胞菌(*Aeromonas hydrophilia*)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)和希万氏菌(*Shewanella putrefactions*)、*S. oneidensis*; δ -变形菌纲(Deltaproteobacteria)的硫还原地杆菌(*Geobacter sulfurreducens*)、金属还原地杆菌(*G. metallireducens*)、*Geopsychrobacter electrodiphilus*、丙酸硫叶菌(*Desulfohalobus propionicus*),此外,还有厚壁菌门的丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)和拜氏梭菌(*Clostridium beijerinckii*),酸杆菌门(Acidobacteria)的*Geothrix fermentans*。了解这些产电菌的生物学特征和在MFC中的产电能力有利于更好地研究MFC。

1.1 希万氏菌

希万氏菌属是研究较多的产电微生物,主要有*S. putrefactions* IR-1、*S. oneidensis* DSP10和*S. oneidensis* MR-1,它们都属于细菌(Bacteria),变形菌门, γ -变形菌纲,交替单胞菌目(Alteromonadales),希万氏菌科(Shewanellaceae),革兰氏阴性菌,细胞

杆状,铁还原菌,兼性厌氧。有氧条件下,可彻底氧化丙酮酸、乳酸为 CO_2 ,厌氧条件下,以乳酸、甲酸、丙酮酸、氨基酸、氢气为电子供体。

S. oneidensis DSP10是最早发现的可在有氧条件下产电的菌种,Ringeisen等和Biffinger等先后用微型燃料电池(Mini-MFC)对其好氧产电进行了研究,发现在好氧条件下能将乳酸氧化成 CO_2 产电,产电功率密度为 500 W/m^2 [2],*S. oneidensis* DSP10还能以葡萄糖、果糖、抗坏血酸(维生素C)为电子供体产电,且以果糖为电子供体时产电最高,功率密度达 350 W/m^2 [3]。该菌好氧可产电大大拓宽了底物的利用范围,在微生物燃料电池中有较好的应用前景。

Kim等人从稻田土中分离出的*S. putrefactions* IR-1[4]是首次报道的能直接将电子传递到电极表面的产电菌[5],开创了无介体燃料电池的研究先河;*S. oneidensis* MR-1的全基因组序列已获得,多用于细胞与电极间电子传递机制的研究。研究发现*S. oneidensis* MR-1约有37个编码Cyt c的基因[6],Cyt c被认为是电子跨膜传递的通道[7]。

1.2 铁还原红育菌(*Rhodoferrax ferrireducens*)

*R. ferrireducens*属于细菌,变形菌门, β -变形菌纲,伯克氏菌目(Burkholderiales),丛毛单胞菌科(Comamonadaceae),红育菌属(*Rhodoferrax*),革兰氏阴性,兼性厌氧,铁还原菌[8],可以彻底氧化葡萄糖、果糖、木糖、蔗糖等生成 CO_2 。

该菌是最早报道能直接彻底氧化葡萄糖产电的微生物,其他的多数铁还原菌电子供体局限于简单有机酸。以葡萄糖为电子供体时,*R. ferrireducens*的电子回收率达81%[9]。由该菌构建的微生物燃料电池利用底物产电迅速,放电后补充底物可恢复原来产电水平,可反复充放电,电池性能稳定。

1.3 硫还原地杆菌(*Geobacter sulfurreducens*)

*G. sulfurreducens*属于细菌,变形菌门, δ -变形菌纲,除硫单胞菌目(Desulfuromonadales),地杆菌科(Geobacteraceae),地杆菌属(*Geobacter*),革兰氏阴性菌,杆菌,专性厌氧,铁还原菌,电子供体较少,仅能以乙酸和氢气作为电子供体,Fe(III)、S、Co-EDTA、延胡索酸和苹果酸为电子受体。

*G. sulfurreducens*是最早报道的厌氧条件下以电极为最终电子受体完全氧化电子供体的微生物[10]。由于*G. sulfurreducens*的细胞可吸附于电极上,细胞间又可通过菌毛形成多层细胞组成的高度结构化的

生物膜^[11], 法国研究人员 Dumas 分别以不锈钢为唯一电子受体(乙酸为电子供体)和唯一的电子供体(延胡索酸为电子受体)制成了 *G. sulfurreducens* 细胞覆盖的生物膜阳极和生物膜阴极, 并用循环伏安法测得最大电流输出密度分别 2.4 A/m^2 ^[12]和 24.2 A/m^2 ^[13], 证实了生物膜的电化学活性。*G. sulfurreducens* 的全基因组的序列信息已阐明^[14,15], 可作为模式菌研究细胞与电极间电子传递机制和 MFC 结构优化。

1.4 沼泽红假单胞菌(*Rhodopseudomonas palustris*)

R. palustris 属于细菌, 变形菌门, α -变形菌纲, 根瘤菌目 (Rhizobiales), 慢生根瘤菌科 (Bradyrhizobiaceae), 红假单胞菌属 (*Rhodopseudomonas*), 光合细菌, 革兰氏阴性, 极生鞭毛, 能运动, 最佳生长方式是利用光和有机碳源行光能异养, 缺氧时可发酵底物, 亦能以氢、硫代硫酸钠、硫化氢等为电子供体行化能自养^[16]。

R. palustris DX-1 是最近报道的光合产电菌, Logan 研究组的 Xing 等人在研究中发现该菌有很高的产电能力和广泛的产电底物, 由其催化的 MFC 最大电功率输出密度高达 2720 mW/m^2 , 高于相同装置菌群催化的 MFC。此外, 该菌还能利用醋酸、乳酸、乙醇、戊酸、酵母提取物、延胡索酸、甘油、甲酸、丁酸、丙酸等产电, 其中利用醋酸产电的功率密度最高, 为 450 mW/m^2 ^[17]。该菌也是最早报道的 α -变形菌, 为产电菌的发现开辟了新的领域。基于 *R. palustris* 多样的代谢途径、广泛的底物来源、相对较高的产电能力等诸多优势可能会广泛应用于微生物燃料电池的研究。

1.5 人苍白杆菌(*Ochrobactrum anthropi*)

O. anthropi 属于细菌, 变形菌门, α -变形菌纲, 根瘤菌目 (Rhizobiales) 布鲁氏菌科 (Brucellaceae) 苍白杆菌属 (*Ochrobactrum*), 革兰氏阴性、杆菌、极生鞭毛、能运动, 可利用醋酸、乳酸、丙酸、丁酸、葡萄糖、蔗糖、纤维二糖、甘油、乙醇等。

O. anthropi YZ-1 是 Logan 研究组的 Zuo 首次利用稀释 U 型 MFC 阳极管的新的产电菌分离方法成功分离出的, 可利用多种复杂有机物和简单有机酸产电^[18]。同为 α -变形菌, *O. anthropi* 和 *R. palustris* 都能利用广泛的底物、具有多种代谢途径, 但 *O. anthropi* 是条件致病菌, 如何控制该菌使其处于正常菌的稳定状态, 并应用于 MFC 有待于研究。

1.6 铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)

P. aeruginosa 属于细菌, 变形菌门, γ -变形菌纲, 假单胞菌目 (Pseudomonadales), 假单胞菌科 (Pseudomonadaceae), 革兰氏阴性, 兼性好氧菌。*P. aeruginosa* 是最早报道的能够产生电子穿梭介体的微生物。Rabaey 等人发现在 MFC 中分离出的 *P. aeruginosa* 能代谢产生绿脓菌素 (Pyocyanin) 并作为自身和其他菌种的电子传递介体, 将电子传递到电极上^[19,20], 从而丰富了对 MFC 中电子传递机制的认识, 但绿脓菌素与其他人为添加的电子传递介体一样具有毒性。虽然单菌和混合菌都有比较好的产电效果, 但并非 MFC 理想的催化剂。

1.7 丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)

C. butyricum 属于细菌, 厚壁菌门, 梭菌纲 (Clostridia), 梭菌目 (Clostridiales), 梭菌科 (Clostridiaceae), 梭菌属 (*Clostridium*), 严格厌氧, 铁还原菌, 最适生长温度 37°C , 最适 pH 为 7.0, 能水解淀粉、纤维二糖、蔗糖等复杂糖类。单独或与 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 的还原相偶联氧化葡萄糖产生乳酸、丁酸、甲酸、醋酸、 CO_2 和 H_2 等。

C. butyricum EG3 是首次报道的能利用淀粉等复杂多糖产电的革兰氏阳性菌^[21]。同属的 *C. beijerinckii* 也能利用淀粉、糖蜜、葡萄糖和乳酸等产电^[22], 体现了产电微生物在淀粉废水及其他有机废水处理领域的应用潜力。革兰氏阳性菌细胞与电极间的电子传递机制是否同革兰氏阴性菌类似有待于研究。

1.8 其他产电菌种

耐寒细菌 *Geopsychrobacter electrodiphilus* 在 MFC 中能彻底氧化乙酸、苹果酸、延胡索酸和柠檬酸等产电^[23], 由于其具有低温海底环境中生长的优势, *G. electrodiphilus* 更适合催化海水沉积 MFC; *Desulfobulbus propionicus* 能够以乳酸、丙酸、丙酮酸或氢为电子供体产电, 但 MFC 电子回收效率较低, 且不能利用乙酸作为电子供体^[24]; 专性厌氧菌 *Geothrix fermentans* 以电极为唯一电子受体时, 能够彻底氧化乙酸、琥珀酸、苹果酸、乳酸、丙酸等简单有机酸, 虽然以乙酸为电子供体时的电子回收率超过 90%, 但电流输出较低^[25]; Kim 等分离出的嗜水气单胞菌 (*Aeromonas hydrophilia*) 也可产电^[26], 但其具有毒性, 能使人类和鱼类致病^[27], 故不适宜应用于 MFC。

2 MFC 中产电微生物的电子传递机制

微生物在阳极代谢产生的电子和电子的胞外传递影响着 MFC 的产电能力。深入了解微生物的电子传递机制有助于提高 MFC 的电能输出。

通常发生在微生物细胞内的生物氧化分为底物脱氢(或电子)、递氢(或电子)和受氢(或电子)3 个阶段, 底物在脱氢酶的作用下产生的还原力[H](或电子)要通过多个电子载体按一定顺序(电子传递链)传给最终的电子受体, 同时获得能量维持生长。而产电微生物在传递电子的过程中可将电子传到细胞外的电子受体上, 这种特殊的电子传递方式使微生物具有了电化学活性。

Kim^[28]等人利用电子传递链阻断抑制剂的研究方法, 推断出了利用乙酸产电的电子传递过程(图 2), 这一传递途径与有氧呼吸有共同的路径。除了直接接触电极通过外膜上的电化学蛋白将电子传到电极上, 微生物还可以借助菌毛(纳米导线), 人为添加的中间体(中性红、硫堇、AQDS 等)或微生物自身产生的物质(绿脓菌素)将电子传到电极上。

目前, 多用铁还原菌研究产电菌的胞外电子传

递。铁还原菌 *S. oneidensis* MR-1 和 *G. sulfurreducens* 的全基因组序列已阐明, 分别有 37 和 100 个编码 Cyt c 的基因^[6,29], 研究发现 *G. sulfurreducens* 两种外膜 Cyt c 蛋白, 即 OmcS 和 OmcE 参与了电子到电极的传递^[30,31]。*G. sulfurreducens* 以电极为电子受体时, *omcS* 转录水平增加到 19 倍, 且 *omcS* 转录水平随电流增大而增加, 敲除 *omcS* 抑制电流产生; *S. oneidensis* MR-1 的细胞色素蛋白 MtrC 和 OmcA 参与了纳米导线途径的传递, 基因缺陷株的纳米导线不能导电^[32]。

对电子传递机制的研究还局限于铁还原菌, 而非铁还原菌的产电菌的电子传递机制还没有阐明。随着细菌全基因组的获得人们对微生物电子传递机制将有更多的发现。

3 产电菌在 MFC 中的产电能力

不同产电菌在 MFC 中产电能力差别较大, 文献报道了利用两室(Two-chamber)、U-型(U-tube)和微型(Mini-MFC)微生物燃料电池研究单菌的产电能力, 此外, MFC 中阳极材料、微生物利用的底物都会影响电能的输出, 如表 1。

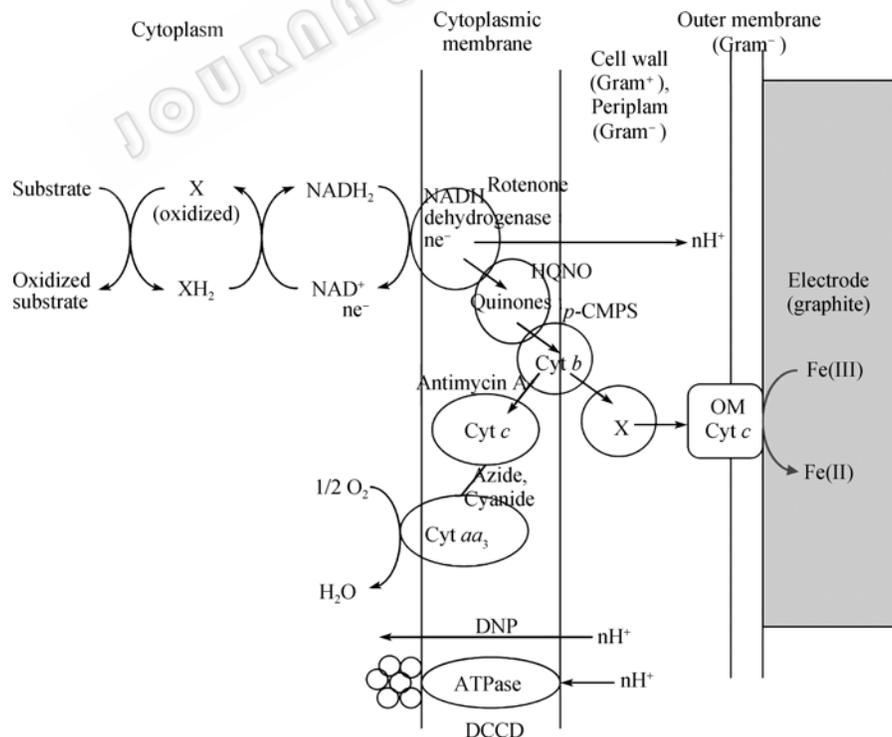


图 2 以乙酸为底物的 MFC 电子传递机制^[28]

Fig. 2 Proposed electron transport system in an MFC enriched with acetate^[28]

表 1 产电菌在 MFC 中的产电情况
Table 1 Electricity production of electricigens in MFC

产电菌 Electricigens donor	电子供体 Electron	阳极材料 Anode material	最大电流密度 (mA/m ² 阳极面积) Maximum current density (mA/m ² anode area)	最大功率密度 (mW/m ² 阳极面积) Maximum power density (mW/m ² anode area)	MFC 类型 MFC type	文献 Reference
<i>S. oneidensis</i>	乳酸	网状玻璃碳	100	24	微型	[2]
<i>G. sulfurreducens</i>	乙酸	石墨电极	1143	—	两室	[7]
<i>R. ferrireducens</i>	葡萄糖	石墨棒	31	—	两室	[9]
<i>R. palustris</i>	—	石墨电刷	9900	2720	两室	[17]
<i>O. anthropi</i>	乙酸	碳布	708	89	U-型	[18]
<i>P. aeruginosa</i>	葡萄糖	石墨板	—	28.4	两室	[19]
<i>G. metallireducens</i>	乙酸	碳纸	—	40	两室	[33]

目前,已分离出的产电单菌多为铁还原菌,对铁还原菌的产电机理已有初步了解,所以基于铁还原菌的微生物燃料电池仍然是现阶段的研究重点,另外,其他类型的产电单菌也逐渐被发现,如光合细菌 *R. palustris*,其单独产电能力比其存在的群落混合菌高^[17]。由此看来,筛选高效产电单菌将是微生物燃料电池中产电菌的研究趋势,因为相对于混合菌产电,单菌产电降低了对 MFC 运行的控制,如燃料的选择、产电菌的生长代谢环境的控制等。产电单菌利用的底物可大致分为两类,即糖类和简单的有机酸,多数的产电菌不能直接氧化糖类,需要依靠发酵性的微生物将糖类转化为其所需的小分子有机酸方可利用,如乙酸、乳酸、丙酮酸、甲酸等。产电菌能否彻底氧化底物(电子供体)是其产电能力大小的关键,例如 *R. ferrireducens* 能彻底氧化葡萄糖,*G. Sulfurreducens* 能彻底氧化乙酸,这样就提高了燃料利用率。

另外, MFC 装置作为产电菌依托的产电装置是其电能输出的关键,其中阳极材料是研究重点。从表 1 中可以看出阳极材料的多样化,对于产电菌来说比较理想的阳极材料应该具有导电性能好、比表面积大和易于细菌吸附等特点。

4 产电微生物应用及研究展望

产电微生物主要是借助各种类型的 MFC 装置应用于废水处理同时生物发电,与现有的其它利用有机物产能的技术相比,产电微生物催化的 MFC 具有操作上和功能上的优势。1) 它将底物直接转化为电能,保证了具有高的能量转化效率; 2) 不同于现有的所有生物能处理, MFC 在常温,甚至是低温的环境下都能够有效运作; 3) MFC 不需要进行废气处理,因为它所产生的废气的主要组分是二氧化

碳; 4) MFC 不需要能量输入,仅需通风就可以补充阴极气体。此外,随着交叉学科研究的深入,特别是生物传感器和生物电化学的研究,以及修饰电极、纳米科学等的研究,产电微生物催化的 MFC 将在军事、航空航天、航海、移动装置、居民家庭、备用电力设备、医学、环保等领域显示极大的优势。

然而,目前的 MFC 燃料转化速率较低、输出功率有限,影响了实际应用,对产电微生物的研究将推动 MFC 的发展。MFC 阳极微生物的研究主要有以下几个方面: 1) 寻找微生物群落产电的驯化富集方法; 2) 筛选更多优良的产电菌种; 3) 选择合适菌种组合; 4) 基因改造获得高效产电菌株; 5) 产电菌的代谢和电子胞外传递。产电菌的研究结合微生物燃料电池构型、电极材料和运行参数的优化将加快 MFC 实际应用的进程。

参考文献

- [1] Lovley DR. Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches. *Current Opinion in Biotechnology*, 2006, **17**: 327–332.
- [2] Ringeisen BR, Henderson E, Wu PK, *et al.* High power-density from aminiature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10. *Environ Sci Technol*, 2006, **40**: 2629–2634.
- [3] Biffinger JC, Byrd JN, Dudley BL, *et al.* Oxygen exposure promotes fuel diversity for *Shewanella oneidensis* microbial fuel cells. *Biosensors and Bioelectronics*, 2008, **23**: 820–826.
- [4] Kim BH, Kim HJ, Hyun MS, *et al.* Direct electrode reaction of Fe(III)-reducing bacterium *Shewanella putrefactions*. *Microbiol Biotechnol*, 1999, **9**: 127–131.
- [5] Kim HJ, Park HS, Hyun MS. A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefactions*. *Enzyme Microbiol Technol*, 2002, **30**: 145–152.
- [6] Heidelberg JF, Paulsen IT, Nelson KE, *et al.* Genome se-

- quence of the dissimilatory metal ion-reducing bacterium *Shewanella oneidensis*. *Nat Biotechnol*, 2002, **20**: 1118–1123.
- [7] Bretschger O, Obraztsova A, Sturm CA, *et al.* Current production and metal oxide reduction by *Shewanella oneidensis* MR-1 wild type and mutants. *Appl Environ Microbiol*, 2007, **11**: 7003–7012.
- [8] Finneran KT, Johnsen CV, Lovley DR. *Rhodoferrax ferrireducens* sp. nov., a psychrotolerant, facultatively anaerobic bacterium that oxidizes acetate with the reduction of Fe(III). *Int J Syst Evol Microbiol*, 2003, **53**: 669–673.
- [9] Chaudhuri SK, Lovley DR. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediator less microbial fuel cells. *Nat Biotechnol*, 2003, **21**: 1229–1232.
- [10] Bond DR, Lovley DR. Electricity production by *Geobacter sulfurreducens* attached to electrodes. *Appl Environ Microbiol*, 2003, **69**: 1548–1555.
- [11] Reguera G, Nevin KP, Lovley DR, *et al.* Biofilm and nanowire production leads to increased current in *Geobacter sulfurreducens* fuel cells. *Appl Environ Microbiol*, 2006, **72**(11): 7345–7348.
- [12] Dumas C, Basseguy R, Bergel A. Electrochemical activity of *Geobacter sulfurreducens* biofilms on stainless steel anodes *Electrochimica Acta*, 2008, **53**: 5235–5241.
- [13] Dumas C, Basseguy R, Bergel A. Microbial electrocatalysis with *Geobacter sulfurreducens* biofilm on stainless steel cathodes. *Electrochimica Acta*, 2008, **53**: 2494–2500.
- [14] Methe BA, Nelson KE, Lovley DR, *et al.* Genome of *Geobacter sulfurreducens*: Metal reduction in subsurface environments. *Science*, 2003, **302**: 1967–1969.
- [15] Coppi MV, Leang C, Lovley DR, *et al.* Development of a genetic system for *Geobacter sulfurreducens*. *Appl Environ Microbiol*, 2001, **67**(7): 3180–3187.
- [16] McGrath JE, Harfoot CG. Reductive dehalogenation of halocarboxylic acids by the phototrophic genera *Rhodospirillum* and *Rhodopseudomonas*. *Appl Environ Microbiol*, 1997, **8**, **63**(8): 3333–3335.
- [17] Xing DF, Zuo Y, Logan BE, *et al.* Electricity Generation by *Rhodopseudomonas palustris* DX-1. *Environ Sci Technol*, 2008, **42**: 4146–4151.
- [18] Zuo Y, Xing DF, Logan BE, *et al.* Isolation of the exoelectrogenic bacterium *Ochrobactrum anthropi* YZ-1 by using a U-Tube microbial fuel cell. *Appl Environ Microbiol*, 2008, **5**: 3130–3137.
- [19] Rabaey K, Boon N, Siciliano SD, *et al.* Biofuel cells select formicrobial consortia that self-mediate electron transfer. *Appl Environ Microbiol*, 2004, **70**(9): 5373–5382.
- [20] Rabaey K, Boon N, Hofte M, *et al.* Microbial phenazine production enhances electron transfer in biofuel cells. *Environ Sci Technol*, 2005, **39**: 3401–3408.
- [21] Park HS, Kim BH, Kim HS, *et al.* A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Clostridium butyricum* isolated from a microbial fuel cell. *Anaerobe*, 2001, **7**: 297–306.
- [22] Niessen J, Schroder U, Scholz F. Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation — a bacterial fuel cell operating on starch. *Electrochem Commun*, 2004, **6**: 955–958.
- [23] Holmes DE, Nicoll JS, Lovley DR, *et al.* Potential role of a novel psychrotolerant member of the family *Geobacteraceae*, *Geopsychrobacter, electrodiphilus* gen. nov., sp. nov. in electricity production by a marine sediment fuel cell. *Appl Environ Microbiol*, 2004, **70**(10): 6023–6030.
- [24] Holmes DE, Bond DR, Lovley DR. Electron transfer by *Desulfobulbuspro pionicus* to Fe(III) and graphite electrodes. *Appl Environ Microbiol*, 2004, **70**(2): 1234–1237.
- [25] Bond DR, lovely DR. Evidence for involvement of an electron shuttle in electricity production by *Geothrix fermentans*. *Appl Environ Microbiol*, 2005, **71**(4): 2186–2189.
- [26] Pham CA, Sung JJ, Kim BH, *et al.* 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.
- [27] Chopra AK, Xu XJ, Ribardo D, *et al.* The cytotoxic enterotoxin of *Aeromonas hydrophila* induces proinflammatory cytokine production and activates arachidonic acid metabolism in macrophages. *Infection and Immunity*, 2000, **5**(68): 2808–2818.
- [28] Kim BH, Chang IS, Moon H. Microbial fuel cell type biochemical oxygen demand sensor in *Encyclopedia of sensors*. Grimes CA, Dickey EC, Pishko MV, *et al.* Valencia, USA: American Scientific Publishers, 2006, pp.1–12.
- [29] Methé BA. The genome of *Geobacter sulfurreducens* insights into metal reduction in subsurface environments. *Science*, 2003, **302**: 1967–1969.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Gorby YA, Yanina S, McLean JS, *et al.* Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *PNAS*, 2006, **6**(25): 11358–11363.
- [33] Mina B, Chenga S, Logan BE. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells. *Water*, 2005, **39**: 1675–1686.