

微生物学报 *Acta Microbiologica Sinica*
55 (8):961-970; 4 August 2015
ISSN 0001-6209; CN 11-1995/Q
http://journals.im.ac.cn/actamicrocn
doi: 10.13343/j.cnki.wsxb.20140558

微生物太阳能燃料电池的研究进展

郭晓昀¹, 于昌平^{2*}, 郑天凌^{1*}

¹厦门大学滨海湿地教育部重点实验室, 生命科学学院, 福建 厦门 361102

²中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021

摘要: 能源危机已经成为阻碍世界发展的主要问题之一, 微生物燃料电池的出现为能源危机提供了新的解决途径。将植物和微藻等光合生物与微生物燃料电池整合为微生物太阳能燃料电池(MSCs), 能够实现将太阳能转化为电能。微生物太阳能燃料电池不仅能够实现电能持续稳定的产生, 而且在污水处理, 生物柴油加工以及中间代谢物生产等方面具有广阔的应用前景。本文从光合生物在微生物燃料电池中的作用的角度出发, 在参考大量文献的基础上对微生物太阳能电池进行较为全面的综述, 并评述其中的优点及不足之处, 最后对微生物燃料电池面临的挑战及研究需求做简要分析。旨在为未来微生物太阳能燃料电池的实际应用提供参考。

关键词: 微生物燃料电池, 光合生物, 生物能源, 微生物太阳能, 燃料电池

中图分类号: Q938 **文章编号:** 0001-6209(2015)08-0961-10

工业革命之后, 世界范围内的能源利用速度呈现指数型增长。进入 21 世纪后, 人口的急剧扩增, 经济的飞速发展, 使传统化石燃料能源日渐枯竭。据估算, 目前地球上的化石燃料储备甚至不足以维持人类 100 年的发展。不仅如此, 化石燃料的燃烧所带来的环境问题也给人类未来的可持续发展带来巨大的威胁。因此, 早在上个世纪人类就开始寻找新能源来解决这一困境, 各种新能源技术也相继被提出。生物燃料是被研究的最为热门的新能源之一, 目前已经发展到了第三代生物燃料^[1]。

微生物燃料电池(Microbial fuel cells, MFCs)是一种新的能源技术, 能够利用微生物强大的代谢能力将生物质或者废水中的有机物中蕴藏的化学能转化为电能^[2]。由于其属于可再生能源和清洁能源,

因此具有十分广阔的应用前景。过去的几十年里, 研究者已经对微生物燃料电池的原理、设备、底物、产电微生物的筛选和应用等方面展开了广泛的研究。微生物燃料电池目前主要是应用在污水处理、远程传感器的供电、增值产品的生产等方面^[3]。但微生物燃料电池的电能转化率比较低, 尚不能够满足大规模的生产应用。而将微生物燃料电池与其他技术结合可以显著提高电能转化率。目前, 报道的有微生物电解池(Microbial electrolysis cells, MECs)^[4]、微生物脱盐池(Microbial desalination cells, MDCs)^[5]以及微生物太阳能燃料电池(Microbial solar cells, MSCs)^[6]。

将光合生物系统, 如微藻光合反应器, 与微生物燃料电池整合能够形成新的复合整合型微生物燃料

基金项目: 厦门南方海洋研究中心项目(14GNY022NF22)

* 通信作者。郑天凌, E-mail: wshwzh@xmu.edu.cn; 于昌平, E-mail: cpyu@iue.ac.cn

作者简介: 郭晓昀(1988-), 女, 福建泉州人, 硕士研究生, 研究方向为环境微生物。E-mail: guoxiaoyun123321@163.com

收稿日期: 2014-11-25; **修回日期:** 2015-01-22

电池——微生物太阳能燃料电池 (MSCs)。这种新型的微生物燃料电池能够利用光合生物将收集到的太阳能通过生物电化学系统转化为电能或一些化学产品,如氢气、乙醇、甲烷等^[7]。将光合生物整合到微生物燃料电池的阴极,不仅能够为阴极提供足够的电子受体(溶解氧),降低设备的能源消耗,还能够积累生物量,用于生产生物燃料和中间产物。近几年, MSCs 技术正蓬勃发展,显现出巨大的应用潜力,而我国对于 MSCs 的研究开展相对较少。本文对 MSCs 的原理以及技术研究做了较为系统的综述,并对所面临的问题和应用前景做简要探讨,旨在为国内的 MSCs 的研究提供参考。

1 微生物太阳能燃料电池 (MSCs) 的基本原理

微生物燃料电池 (Microbial fuel cells, MFCs) 是一种以微生物作为催化剂,在氧化有机物(无机物)的同时将化学能转化为电能的装置^[4]。MFCs 有很多种不同的构造类型,典型的 MFCs 由阳极室和阴极室组成,两室由离子交换膜分隔开。典型的微生物燃料电池装置如图 1 所示,阳极室中的产电微生物在厌氧条件下将有机物或无机物氧化为代谢产物,同时产生质子和电子。电子传递到电极表面,再经外电路传导到阴极,同时质子通过阳离子交换膜迁移到阴极室。在阴极室中,电子受体(通常为氧气)得到电子被还原并与质子结合成水。阳极室中产生的电子被不断传递、消耗,从而形成闭合回路产生持续电流,实现了消耗有机质的同时产生电

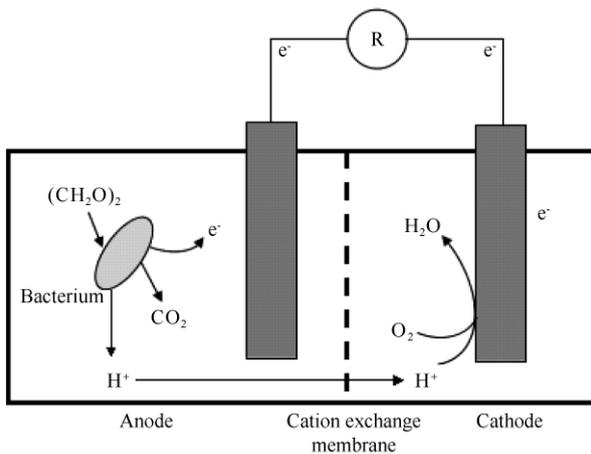


图 1. 微生物燃料电池 (MFCs) 工作原理示意图

Figure 1. Operating principles of a MFC.

流^[8]。微生物太阳能燃料电池 (MSCs) 相对于普通燃料电池 (MFCs) 来说,引入了光合生物。光合生物和微生物燃料电池的结合主要通过以下三种方式: (1) 光合生物自身作为产电菌的代谢底物或为产电菌提供代谢底物; (2) 光合生物直接催化阳极反应; (3) 光合生物提供氧作为阴极的电子受体。表 1 列举了几种光合生物在 MSCs 上的应用。本综述根据光合生物引入微生物燃料电池的部位不同,将其分为阳极光合生物太阳能燃料电池 (A-MSCs) 和阴极光合生物太阳能燃料电池 (C-MSCs) 进行阐述。

2 阳极光合生物太阳能燃料电池 (A-MSCs)

绿色植物和藻类可以收集和利用太阳能来积累生物量。这些生物量可以进一步通过处理,如厌氧发酵转化为生物柴油或生物乙醇等生物燃料。而在 MSCs 中,这些生物量则可以用作阳极产电微生物的底物进一步氧化转化成电能。

绿色植物蕴藏着丰富的化学能,将这些生物质作为阳极产电微生物的底物,能够被微生物氧化产生电子。但由于植物生物质难以被微生物直接利用,因此利用这些生物质常常需要进行预处理。Ren 等^[31]将纤维素降解菌 *Clostridium cellulolyticum* 和产电细菌 *Geobacter sulfurreducens* 共培养获得最大功率输出密度为 143 mW/m^2 ,而单独的两种细菌纯培养都未检测到电流的产生。Rezaei 等^[32]则在 2009 年利用独特的 U 型 MFCs 设计首次分离出了同时具有纤维素降解能力的产电菌 *Enterobacter cloacae*,利用这种单一细菌就能够实现电流的产生,获得了 5.0 mW/m^2 左右的功率输出。

除了能够积累生物质外,植物的根系还能够合成大量的有机物并分泌到土壤中,包括糖类、有机酸和高分子碳水化合物。植物光合作用所合成的有机物中有 20%–40% 是在根部合成的,这些有机物能够为土壤中微生物群落的生长提供营养。产电微生物原位利用植物根系的分泌物,能够产生持续的电子流^[33]。图 2 为典型的植物微生物太阳能燃料电池 P-MFCs 的工作原理示意图。目前,利用水稻根系的分泌物来进行燃料电池产电研究的报道最多。Schampelaire 等^[12]将水稻幼苗在容器里培育,并在容器上装有电极,组装成一个沉积物燃料电池。只

表 1. 光合生物在微生物燃料电池上的应用

Table 1. Phototrophic microorganisms used in the MFC research

MSCs category	Photosynthetic organism	Electron donor	Power densitya (Max)	Refs
Plant roots microbial fuel cells, P-MFCs (Plants produce rhizodeposits, and the bacteria convert these rhizodeposits into electrical energy via the fuel cell)	<i>Reed mannagrass</i>	Rhizodeposits	0.067 W/m ² ①	[9]
	<i>Spartina anglica</i>	Rhizodeposits	0.1 W/m ²	[10]
	<i>Spartina anglica</i>	Rhizodeposits	0.222 W/m ²	[11]
	<i>Arundinella anomala</i>	Rhizodeposits	0.022 W/m ²	[11]
	<i>Oryza sativa ssp. indica</i>	Rhizodeposits	0.033 W/m ²	[12]
Anode photosynthetic algae microbial fuel cells, A-PAMFCs (Algal biomass used as a substrate for electricity generation in MFCs, either in living cells or dry mass)	<i>Microcystis aeruginosa</i>	Algal biomass	0.05 W/m ³ ②	[13]
	<i>Chlorella vulgaris</i>	Algal biomass	3.7 W/m ³	[13]
	<i>Chlorella vulgaris</i>	Algal biomass	0.98 W/m ² (277 W/m ³)	[14]
	<i>Ulva lactuca</i>	Algal biomass	0.76 W/m ² (215 W/m ³)	[14]
	<i>Scenedesmus</i>	Algal biomass	1.78 W/m ²	[15]
	<i>Laminaria saccharina</i>	Algal biomass	0.25 W/m ²	[16]
	<i>Scenedesmus obliquus</i>	Algal biomass	0.102 W/m ² (0.951 W/m ³)	[17]
	<i>Arthrospira maxima</i>	Algal biomass	5.8 W/m ³	[18]
	Cathode photosynthetic algae microbial fuel cells, C-PAMFCs (Use of microalgae in the cathode compartment for oxygen production to the cathodic reaction)	<i>Chlorella vulgaris</i>	sediment	0.063 W/m ²
<i>Chlorella vulgaris</i>		sediment	5.6 W/m ³	[20]
Mixed algae		sediment	5.7 W/m ³	[21]
<i>Spirulina platensis</i>		sediment	0.016 W/m ²	[22]
<i>Anabaena</i>		sediment	0.058 W/m ²	[23]
<i>Microcystis aeruginosa</i>		sediment	0.058 W/m ³	[24]
Photosynthetic bacteria fuel cells (Contain photosynthetic microorganisms in the anode and can generate electrons through photo-catalytic reaction of water)	<i>Rhodobacter capsulatus</i>	Metabolites		[25]
	<i>Chlorobium limicola</i>	Metabolites	2.65 W/m ²	[26]
	<i>Mixed culture</i>	Metabolites	0.01 W/m ³	[27]
	<i>Rhodospseudomonas palustris</i>	Algal biomass	2.72 W/m ²	[28]
	<i>Rhodospseudomonas palustris</i>	sediment	0.79 W/m ² (2.9 W/m ³)	[29]
	<i>Rhodobacter sphaeroides</i>	sediment		[30]

① The formula of power density: $P_s = P/S = (U_c - U_a) \times I/S$, S as the surface area of electrode.

② The formula of volumetric power: $P_v = P/V = (U_c - U_a) \times I/V$, V as the effective volume of the reactor.

需要向土壤中添加 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 等无机盐营养就能够获得持续的电流。最高电能获得可达到 330 W/ha。相较于普通的沉积物电池, 电能输出提高了 7 倍。

将藻类技术与 MFC 结合, 在产电的同时既可以实现废水的处理又可以收获藻类生物量, 因此该技术具有更大的实际价值。然而, 直接利用藻生物量来产电的电能转化率非常低, 库伦效率只有 2.8% [34], 显然, 这么低的电能转化率是无法满足大规模生产应用的。因此, 想要获得更高的电能转化率, 必须先对藻细胞进行预处理, 将微藻生物量先水解成微生物易降解的有机质。最常用的做法是添加一个厌氧发酵装置。藻生物量在进入阳极室之前, 先在厌氧发酵罐中进行发酵处理, 这个过程还能够产生生物燃气。发酵处理后的藻生物量再流入到阳极室被产电微生物所氧化, 这样预处理后的库伦效率可以提高到 40% [18]。图 3 为连接有光反应器、厌氧消化罐的阳极光合藻微生物燃料电池 A-PAMFCs 工作原理示意图。预处理藻细胞的方法还有很多,

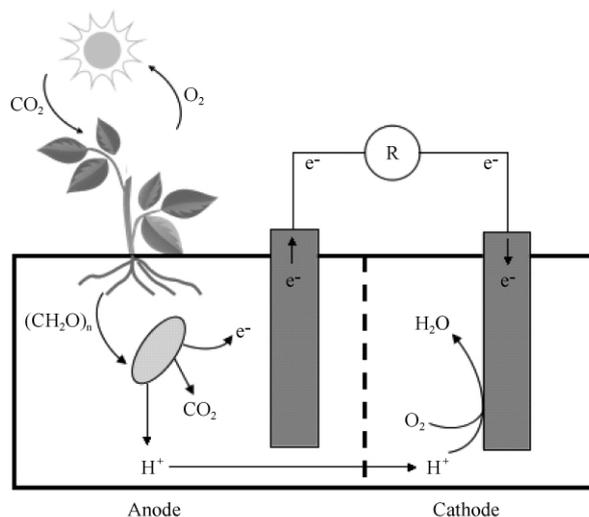


图 2. 植物微生物太阳能燃料电池 (P-MFCs) 工作原理示意图

Figure 2. Operating principles of plant roots microbial fuel cells (P-MFCs).

如加热、微波、超声、酸解、碱解、提取藻细胞有机物等 [35], 此外往阳极室添加能降解藻细胞的细菌同样

可以提高产电效率。本课题组长期从事菌藻关系研究,已从东海及厦门海域的赤潮高发区表层海水中分离筛选出 19 株具有溶藻活性的细菌,27 株具有溶藻活性的放线菌,分别对塔玛亚历山大藻,球形棕囊藻,赤潮异弯藻,中肋骨条藻等多种赤潮藻有裂解作用。我们可以利用这些高效溶藻活性菌裂解藻细胞,再将藻细胞裂解液引入微生物燃料电池的阳极作为产电菌的底物^[36-39]。

光合生物的一个普遍特点就是能够产生氢气, Gaffron 早在 1939 年就首次发现了绿藻能够产氢^[40]。目前已发现多种真核藻和原核藻能够产氢,但是目前微藻产氢的一大限制就是氢气的积累会抑制产氢反应的进行。因此,利用微藻产生的氢气来进行产电,能够解决微藻产氢的反馈抑制问题。Rosenbaum 等^[41]将绿藻 *Chlamydomonas reinhardtii* 产氢设备与微生物燃料电池耦联,不仅提高了 *C. reinhardtii* 产氢能力,而且能够获得较高的电能密度。随后他们在产氢光合细菌 *Rhodobacter sphaeroides* 中也实现了直接进行原位产电^[42]。但是利用光合生物产氢来进行产电并不稳定。光合生物的产氢速率和氢气的氧化速率难以控制协调一致,

所以很容易造成产电不稳定。同时氢气的氧化需要金属催化剂,且多为贵金属(目前主要用的是铂电极),这类催化电极在这种催化条件下很容易失活,而且利用铂电极的成本也较高,因此目前迫切需要寻找便宜的稳定金属电极来替代铂电极,而价格低廉的催化剂碳化钨有望取代铂电极^[43]。

绿色植物和微藻不仅能够通过提供生物质或者产氢的方式间接为产电菌提供电子产电,最新的研究表明,有些绿色植物和微藻还能够直接向阳极传递电子进行产电。Gorby 等^[44]发现在 *Synechocystis* sp. PCC 6803 中也存在着纳米导线,研究者们推测可能存在着新的产电机理。随后 Zou 等^[45]的研究发现在不添加有机质的情形下,微藻微生物燃料电池的两极电压与光照强度呈正相关性,即光照强度增加会增加电池的电压。这种快速的对应反应表明,微生物燃料电池能够从光合电子传递链中获得电子产生电流,这与传统微生物燃料电池利用呼吸电子传递链产电的机制不同。但就目前的报道来看,依赖直接的光合电子传递链方式产电的电池产电能力要远远低于传统呼吸链产电电池。

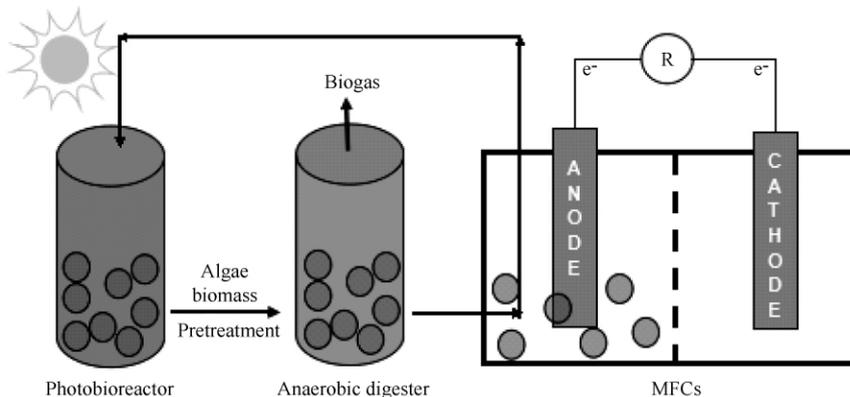


图 3. 阳极光合藻微生物燃料电池 (A-PAMFCs) 工作原理示意图

Figure 3. Operating principles of anode photosynthetic algae microbial fuel cells (A-PAMFCs).

3 阴极光合生物太阳能燃料电池 (C-MSCs)

微生物燃料电池需要在阴极提供电子受体(通常为分子氧)来完成产电的过程,一般的微生物燃料电池是在阴极以机械曝气的方式提供氧气或将阴极改造成空气阴极。机械供氧要消耗大量的能源,因此产电的成本比较高。而利用光合生物产氧为阴

极提供电子受体就要经济的多,目前多数报道的阴极光合生物太阳能燃料电池都是利用了光合生物产氧的这一特性。与传统的机械供氧相比,光合阴极燃料电池阴极室的溶解氧浓度最高可达到 20 mg/L^[46],这要高于机械供氧的溶解氧浓度。Kakarla 等^[47]发现光合微藻 *Scenedismus obliquus* 能够吸附在电池的阴极上提供氧气,而且在 12 h 内,阴极室的溶解氧浓度达到 15.7 mg/L,得到的最大电流密度达到 153 mW/m²,比普通机械曝气要高出

32%。Mitra 等^[48]将绿藻 *Chlorella vulgaris* 加入阴极室, 将 *Saccharomyces cerevisiae* 加入阳极室进行连续培养, 当微藻的最高密度达到最大值 2140 mg/L 时, 获得了最大电能密度 0.6 mW/m²。显然, 阴极室中高含量的溶解氧有益于电能的产生。最近的研究发现, 利用固定化技术将阴极室的微藻细胞进行固定有利于电能的产生, 比普通的悬浮状态的藻细胞的产电能力要高出 88%^[49]。

目前报道的光合生物阴极电池中, 光合生物的作用多数是产生分子氧作为电池的电子受体, 但是有实验表明, 一些光合生物能够直接催化阴极, 接受电子完成产电过程, 而不依赖于氧气的产生。这种方式比同等溶氧水平依赖机械供氧的燃料电池产电提高 245%。Cai 等在以 *Microcystis aeruginosa* IPP 作为阴极的电池研究中发现, 蓝藻自身产生的活性氧 (ROS) 是比分子氧更有竞争性的电子受体, 当用甘露醇抑制蓝藻 ROS 的产生时, 电池产生的电流强度也会急剧的下降, 并证实了微藻在光合作用中产生的 ROS 起到了电子受体的作用, 有利于提高电能输出^[50]。

CO₂ 是阳极氧化分解有机质的产物, 这些 CO₂ 聚集在阳极室会抑制阳极的氧化分解反应, 因此需要将产生的 CO₂ 移除才能够保证电池的正常运行。而 CO₂ 又是光合生物的反应底物, 因此一些研究者尝试将阳极产生的 CO₂ 导入到阴极室为阴极的光合生物提供光合作用底物。这种新型电池被称为碳捕获微生物燃料电池 (MCCs)^[20]。图 4 为典型的碳捕获微生物燃料电池 (MMCS) 的工作原理示意图。研究者发现, 在接入光合微藻的阴极室的上部检测不到 CO₂, 这意味着从阳极室导入到阴极室的 CO₂ 基本上都被微藻利用了, 而不含微藻的对照组阴极室中的 CO₂ 浓度却提高了 6 倍。当然, 阳极室 CO₂ 的产生取决于阳极液中有有机质的浓度和产电微生物的氧化分解能力, 同时还受阴极室微藻接种量等因素的影响。以 CO₂ 为桥梁将阴极和阳极连接起来, 将有利于产电的持续性, 具有十分广阔的应用前景。

阴极室的微藻利用阳极提供的 CO₂ 和阴极提供的电子能够很好的生长, 并积累大量的生物量。这些生物量能够被继续用来转化为能量, 例如可以继续把这些生物量制成生物乙醇或生物柴油等。理论上将微藻生物量转化为能量是一项十分诱人的工作, 确实也存在这种可能性, 但是就目前来看, 将生

物量通过某种方式转化为能量需要另外消耗一部分能量才能够实现。因此, 要想实现这一过程, 仍然要考虑多方面的因素和困难。不仅如此, 还可以利用微藻独特的代谢方式生产一些代谢产物, 如色素, 或者是有机酸等。He 等^[51]通过对阴极室 *C. vulgaris* 进行固定化处理, 同时实现污水处理, 产电和生物量的积累等多重功能。将微藻和 MFCs 结合, 在辅助产电的同时又可以收获藻类生物量, 因此该技术具有很大的实际利用价值。

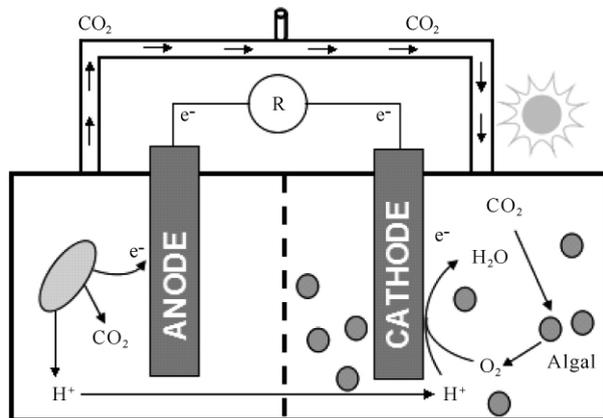


图 4. 碳捕获微生物燃料电池 (MCCs) 工作原理示意图

Figure 4. Operating principles of microbial carbon capture cells (MCCs).

4 MSCs 的前景与挑战

1910 年, 英国植物学家 Potter 发现酵母菌在厌氧条件可以产电, MFCs 的研究自此拉开了序幕^[3]。在当今能源危机和环境污染的形式下, MFCs 发展十分迅速, 基于 MFCs 发电技术的相关研究意义和应用价值日益凸显。利用 MFCs 净化水质的同时实现能源的回收利用, 被公认为极具开发前景的绿色可再生能源利用技术。但由于在电池造价成本高, 发电功率低, 大规模推广难, 稳定性较差等关键问题上没有得到实质性解决, MFCs 目前的研究仅停留在实验室和小规模试验, 至今仍未商业化使用。由于传统 MFCs 在实际应用上的局限, 目前很多研究者把目光放在一些其他类型的微生物燃料电池的研究上, 包括生物修复微生物燃料电池, 海底沉积物微生物燃料电池 (Benthic microbial fuel cell, BMFCs), 以及微生物太阳能燃料电池等, 开发多功能联合 MFCs 将是该领域未来发展的一个主流。

MSCs 的研究吸引了广大研究者们,其发展前景毋庸置疑,然而在关注前景的同时我们不能忽视其所面临的困难和挑战。本综述中,我们论述了多种光合生物和微生物燃料电池相结合的方式,然而有些结合方式在现实应用上面存在不少困难。如将光合生物的代谢产物作为阳极产电菌的底物在实际应用上将面临以下主要问题:(1)光合生物的代谢底物少,其作为产电菌的底物所产电量低;(2)光合细菌产氧,将抑制产电菌的生长;(3)在光合生物和产电菌的混合体系中,各种微生物的作用和关系较复杂,维持燃料电池的稳定性具有很大的挑战。另外利用光合生物产生的生物量作为产电菌的底物来产电的这种模式的 MSCs 中,由于高等植物和微藻等具有较厚的细胞壁,难以直接被微生物迅速的利用,必然影响燃料电池的产电性能,所以需要进行一些必要的加工。但这些处理过程需要消耗不少的能量,使净产能下降。而阴极光合藻微生物燃料电池(C-PAMFCs)可以充分发挥藻类技术和 MFCs 技术的优势,在废水净化的同时又可收获电能和生物质,在实际应用上更具可行性和优势。阴极室的藻细胞可吸收 CO₂ 的同时释放 O₂ 作为阴极的电子受体,从而节省了曝气装置。此外,阴极收获的藻生物量可进一步处理利用,如连接厌氧消化灌生产甲烷,或提取色素、油脂等有价值的副产品。

自 20 世纪 90 年代初以来,越来越多的研究者投入到 MFCs 的相关研究工作中,促进了这一领域的发展,然而目前这一领域仍然有很大的发展空间和很多待解决的问题。我们可以从以下几个方面进行进一步的研究或改进,以推动该领域发展。

(1) 虽然微生物燃料电池的产电能力逐渐提高,而且理论上也能够获得较高的产电效率,但目前的技术水平仍然远远达不到理论水平。针对这一现状,一方面我们可以加强产电微生物研究,利用基因工程、诱变等技术筛选更多优良的产电菌种。此外,应筛选可以应用不同底物及对特殊环境具有耐受性的产电微生物,针对不同应用时可以选择合适的菌种组合。例如,我们的研究团队目前已经分离了可以利用纤维素及对重金属铜具有耐受性的产电菌株^[52]加以一系列相关研究。然而,众所周知,对于自然环境中混合群落而言,微生物是处于动态变化之中,其中的产电微生物或微藻的数量在混合群落中的变化将影响产电的稳定性和连续性。详细探究

了解群落中的微生物之间的相互关系将有利于我们提高产电微生物的产电能力和稳定性,我们也成功应用了高通量测序技术研究产电微生物的群落组成及变化对产电效果的影响^[53]。此外,我们也进一步优化反应器的结构以及电池材料,减少欧姆内阻,以增大输出功率等方面的积极探索。

(2) 鉴于传统 MFCs 自身的局限性,我们可以开发多功能联合的 MFCs 以及创造新型 MFCs 装置。除了本综述详细介绍的 MSCs 外,还有很多其它类型的新型 MFCs。海底沉积物微生物燃料电池(Benthic microbial fuel cell, BMFCs)^[54]就是一种具有很大应用价值的新型 MFCs,其以底物丰富、内阻低、造价低廉、免维护等优点而有望成为一种用于偏远海域工作的低功率监测仪器的能源装置。BMFCs 是一种在海底环境运行的特殊 MFCs,其将阳极埋在海底沉积物中,以海底沉积物作为“燃料”,利用本身存在沉积物中的微生物氧化有机物,产生的电子通过外电路与上部海水的阴极相连。MFCs 另一个具有潜力的应用就是用于生物修复,在这种生物修复燃料电池中,电极可作为电子受体支持微生物的呼吸,从而促进有毒污染物的降解^[55]。Anderson 等以电极作为 *G. metallireducens* 的唯一受体,有效地降解了甲苯。此外,我们研究团队也成功将 MFCs 应用于污泥处理,可以有效达到污泥减量及产电^[56]。我们也设计新型 MFCs 作为生物传感器,用于监测废水中的毒性物质^[53]。我们也成功开发了以 MFCs 驱动电容去离子技术的方法,可以同时达到去除有机污染物及低能耗脱盐的目的^[57]。

(3) 太阳能微生物燃料电池的进展还有赖于电池设备的进步。根据产电微生物和光合生物特点以及设备的用途来设计,研究出一体化的装置。Liesje De Schampelaire 等^[21]构建了一个光生物反应器-厌氧消化灌-MFCs 组合系统。其利用光生物反应器收获藻生物量,收集的藻生物量一部分进入 MFCs 的阴极,一部分进入厌氧消化灌供甲烷生产。厌氧消化灌出水进入 MFCs 的阳极,为产电菌提供营养底物,有机物在 MFCs 中处理后又回流到光生物反应器中循环使用。这个循环体系,通过厌氧消化灌生产生物能源的同时还可以收获电能,产能可达 2.2 - 5.7 W/m³,有效提高了能源的利用率。

(4) 海洋是生命的摇篮,蕴藏着丰富的资源,我们高度关注并进一步开发海洋资源,筛选更多的可

用于 MFCs 的新菌种用于研究与实践。丹麦的 Lars Peter Nielsen 在海洋底泥中发现了一种像电线的细菌, 能在几厘米的距离上导电, 并证实其属于 *Desulfobulbaceae* 的新细菌。海洋底泥中蕴含大量的硫化物, 这些硫化物是能量丰富的电子供体, 但由于底泥中缺乏氧气作为电子受体, 大部分生物无法利用这些能量。而 *Desulfobulbaceae* 的这种电线细菌就是自然界聪明的生存者, 其找到了这一种堪称完美的解决方案应对这种环境: 其细胞的一端氧化电子供体, 在细胞的另一端还原电子受体, 细胞与细胞相连成一条导线, 把底泥的能源物质和上层的氧气连接。在底部的泥浆里, 细菌从硫化物里获取能量, 然后把电子送到上面去; 而在顶部富含氧气的海水里, 细菌就可以利用充足的氧气接受送来的电子, 完成呼吸过程^[58]。

参考文献

[1] Lee RA, Lavoie JM. From first-to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity. *Animal Frontiers*, 2013, 3 (2): 6-11.

[2] Lovley DR. Electromicrobiology. *Annual Review of Microbiology*, 2012, 66: 391-409.

[3] Logan BE, Hamelers B, Rozendal R, Schröder U, Keller J, Freguia S, Aelterman P, Verstraete W, Rabaey K. Microbial fuel cells: methodology and technology. *Environmental Science & Technology*, 2006 40 (17): 5181-5192.

[4] Logan BE, Call D, Cheng S, Hamelers HV, Sleutels TH, Jeremiassse AW, Rozendal RA. Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (23): 8630-8640.

[5] Feng CJ, Zhang ZJ, Wang SM, Fang F, Ye ZL, Chen SH. Characterization of microbial community structure in a hybrid biofilm-activated sludge reactor for simultaneous nitrogen and phosphorus removal. *Journal of Environmental Biology*, 2013, (2 Special): 489-499.

[6] Strik DP, Timmers RA, Helder M, Steinbusch KJ, Hamelers HV, Buisman CJ. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 2011, 29 (1): 41-49.

[7] Rosenbaum M, He Z, Angenent LT. Light energy to

bioelectricity: photosynthetic microbial fuel cells. *Current Opinion in Biotechnology*, 2010, 21 (3): 259-264.

[8] Hong YG, Guo J, Sun GP. Recent progress in electricigens and microbial fuel cell. *Acta Microbiologica Sinica*, 2007, 47 (1): 173-177. (in Chinese)
洪兴国, 郭俊, 孙国萍. 产电微生物及微生物燃料电池最新研究进展. *微生物学报*, 2007, 47 (1): 173-177.

[9] Strik DPBTB, Hamelers HVM, Snel JFH, Buisman CJN. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 2008, 32 (9): 870-876.

[10] Timmers RA, Strik DP, Hamelers HV, Buisman CJ. Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 86 (3): 973-981.

[11] Helder M, Strik DP, Hamelers HV, Kuhn AJ, Blok C, Buisman CJ. Concurrent bio-electricity and biomass production in three Plant-Microbial Fuel Cells using *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* and *Arundo donax*. *Bioresource Technology*, 2010, 101 (10): 3541-3547.

[12] Schampelaire LD, Bossche LVD, Dang HS, Hüfte M, Boon N, Rabaey K, Verstraete W. Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (8): 3053-3058.

[13] Wang H, Liu D, Lu L, Zhao Z, Xu Y, Cui F. Degradation of algal organic matter using microbial fuel cells and its association with trihalomethane precursor removal. *Bioresource Technology*, 2012, 116: 80-85.

[14] Velasquez-Orta SB, Curtis TP, Logan BE. Energy from algae using microbial fuel cells. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, 103 (6): 1068-1076.

[15] Rashid N, Cui YF, Saif Ur Rehman M, Han JI. Enhanced electricity generation by using algae biomass and activated sludge in microbial fuel cell. *The Science of the Total Environment*, 2013, (456/457): 91-94.

[16] Gadhamshetty V, Belanger D, Gardiner CJ, Cummings A, Hynes A. Evaluation of *Laminaria*-based microbial fuel cells (LbMs) for electricity production. *Bioresource Technology*, 2013, 127: 378-385.

[17] Kondaveeti S, Choi KS, Kakarla R, Min B. Microalgae *Scenedesmus obliquus* as renewable biomass feedstock for electricity generation in microbial fuel cells (MFCs). *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014:

8 (5) : 784-791.

- [18] Inglesby AE, Fisher AC. Downstream application of a microbial fuel cell for energy recovery from an *Arthrospira maxima* fed anaerobic digester effluent. *RSC Advances*, 2013, 3 (38) : 17387.
- [19] Gouveia L, Neves C, Sebastiao D, Nobre BP, Matos CT. Effect of light on the production of bioelectricity and added-value microalgae biomass in a Photosynthetic Alga Microbial Fuel Cell. *Bioresource Technology*, 2014, 154 : 171-177.
- [20] Wang X, Feng Y, Liu J, Lee H, Li C, Li N, Ren N. Sequestration of CO₂ discharged from anode by algal cathode in microbial carbon capture cells (MCCs). *Biosensors & Bioelectronics*, 2010, 25 (12) : 2639-2643.
- [21] De Schampelaire L, Verstraete W. Revival of the biological sunlight-to-biogas energy conversion system. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, 103 (2) : 296-304.
- [22] Fu CC, Su CH, Hung TC, Hsieh CH, Suryani D, Wu WT. Effects of biomass weight and light intensity on the performance of photosynthetic microbial fuel cells with *Spirulina platensis*. *Bioresource Technology*, 2009, 100 (18) : 4183-4186.
- [23] Pandit S, Nayak BK, Das D. Microbial carbon capture cell using cyanobacteria for simultaneous power generation, carbon dioxide sequestration and wastewater treatment. *Bioresource Technology*, 2012, 107 : 97-102.
- [24] Cai PJ, Xiao X, He YR, Li WW, Zang GL, Sheng GP, Lam MH, Yu L, Yu HQ. Reactive oxygen species (ROS) generated by cyanobacteria act as an electron acceptor in the biocathode of a bio-electrochemical system. *Biosensors & Bioelectronics*, 2013, 39 (1) : 306-310.
- [25] He D, Bultel Y, Magnin J, Roux C, Willison J. Hydrogen photosynthesis by and its coupling to a PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*, 2005, 141 (1) : 19-23.
- [26] Jonathan PB, Cesar IT, Rosa KB. Coupling dark metabolism to electricity generation using photosynthetic cocultures. *Biotechnology and Bioengineering*, 2014, 111 (2) : 223-231.
- [27] Cao X, Huang X, Boon N, Liang P, Fan M. Electricity generation by an enriched phototrophic consortium in a microbial fuel cell. *Electrochemistry Communications*, 2008, 10 (9) : 1392-1395.
- [28] Inglesby AE, Beatty DA, Fisher AC. *Rhodospseudomonas palustris* purple bacteria fed *Arthrospira maxima* cyanobacteria: demonstration of application in microbial fuel cells. *RSC Advances*, 2012, 2 (11) : 4829.
- [29] Xing DF, Zuo Y, Cheng SA, Regan JM, Logan BE. Electricity generation by *Rhodospseudomonas palustris* DX-1. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 : 4146-4151.
- [30] Cho YK, Donohue TJ, Tejedor I, Anderson MA, McMahon KD, Noguera DR. Development of a solar-powered microbial fuel cell. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, 104 (3) : 640-650.
- [31] Ren Z, Ward TE, Regan JM. Electricity production from cellulose in a microbial fuel cell using a defined binary culture. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (13) : 4781-4786.
- [32] Rezaei F, Xing D, Wagner R, Regan JM, Richard TL, Logan BE. Simultaneous cellulose degradation and electricity production by *Enterobacter cloacae* in a microbial fuel cell. *Applied and Environmental Microbiology*, 2009, 75 (11) : 3673-3678.
- [33] He J, Zhang S, Teng JQ, Xia SB. Progress on application of aquatic plants in microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 2013, 2 : 100-103. (in Chinese)
何洁, 张晟, 滕加泉, 夏世斌. 水生植物在微生物燃料电池中的应用研究进展. *环境科学与技术*, 2013, 2 : 100-103.
- [34] Strik DP, Terlouw H, Hamelers HV, Buisman CJ. Renewable sustainable biocatalyzed electricity production in a photosynthetic algal microbial fuel cell (PAMFC). *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2008, 81 (4) : 659-668.
- [35] Wang H, Lu L, Cui F, Liu D, Zhao Z, Xu Y. Simultaneous bioelectrochemical degradation of algae sludge and energy recovery in microbial fuel cells. *RSC Advances*, 2012, 2 (18) : 7228-7234.
- [36] Chen Z, Zhang J, Lei X, Zhang B, Cai G, Zhang H, Li Y, Zheng W, Tian Y, Xu H, Zheng T. Influence of plaque-forming bacterium, *Rhodobacteraceae* sp. on the growth of *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, 2014, 169 : 784-788.
- [37] Li Y, Zhu H, Zhang H, Chen Z, Tian Y, Xu H, Zheng T, Zheng W. Toxicity of algicidal extracts from *Mangrovimonas yunxiaonensis* strain LY01 on a HAB causing *Alexandrium tamarense*. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 278 : 372-381.
- [38] Zhang B, Cai G, Wang H, Li D, Yang X, An X, Zheng

- X, Tian Y, Zheng W, Zheng T. *Streptomyces albobiflavus* RPS and its novel and high algicidal activity against harmful algal bloom species *Phaeocystis globosa*. *PLoS One*, 2014, 9 (3) : e92907.
- [39] Zhang H, Lv J, Peng Y, Zhang S, An X, Xu H, Zhang J, Tian Y, Zheng W, Zheng T. Cell death in a harmful algal bloom causing species *Alexandrium tamarense* upon an algicidal bacterium induction. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, 98 (18) : 7949-7958.
- [40] Gaffron H. Reduction of carbon dioxide with molecular hydrogen in green algae. *Nature*, 1939, 143 (3614) : 204-205.
- [41] Rosenbaum M, Schroder U, Scholz F. Utilizing the green alga *Chlamydomonas reinhardtii* for microbial electricity generation: a living solar cell. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 68 (6) : 753-756.
- [42] Rosenbaum M, Schröder U, Scholz F. In situ electrooxidation of photobiological hydrogen in a photobioelectrochemical fuel cell based on *Rhodobacter sphaeroides*. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39 (16) : 6328-6333.
- [43] Rosenbaum M, Zhao F, Schröder U, Scholz F. Interfacing electrocatalysis and biocatalysis with tungsten carbide: a high performance, noble metal free microbial fuel cell. *Angewandte Chemie International Edition*, 2006, 45 (40) : 6658-6661.
- [44] Gorby YA, Yanina S, McLean JS, Rosso KM, Moyles D, Dohnalkova A, Beveridge TJ, Chang IS, Kim BH, Kim KS. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103 (30) : 11358-11363.
- [45] Zou Y, Pisciotta J, Billemyre RB, Baskakov IV. Photosynthetic microbial fuel cells with positive light response. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, 104 (5) : 939-946.
- [46] Clauwaert P, Van der Ha D, Boon N, Verbeken K, Verhaege M, Rabaey K, Verstraete W. Open air biocathode enables effective electricity generation with microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (21) : 7564-7569.
- [47] Kakarla R, Min B. Photoautotrophic microalgae *Scenedesmus obliquus* attached on a cathode as oxygen producers for microbial fuel cell (MFC) operation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39 (19) : 10275-10283.
- [48] Mitra P, Hill GA. Continuous microbial fuel cell using a photoautotrophic cathode and a fermentative anode. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2012, 90 (4) : 1006-1010.
- [49] Zhou M, He H, Jin T, Wang H. Power generation enhancement in novel microbial carbon capture cells with immobilized *Chlorella vulgaris*. *Journal of Power Sources*, 2012, 214: 216-219.
- [50] Cai PJ, Xiao X, He YR, Li WW, Zang GL, Sheng GP, Hon-Wah Lam M, Yu L, Yu HQ. Reactive oxygen species (ROS) generated by cyanobacteria act as an electron acceptor in the biocathode of a bio-electrochemical system. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 39 (1) : 306-310.
- [51] He H, Zhou M, Yang J, Hu Y, Zhao Y. Simultaneous wastewater treatment, electricity generation and biomass production by an immobilized photosynthetic algal microbial fuel cell. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2014, 37 (5) : 873-880.
- [52] Feng C, Li J, Qin D, Chen L, Zhao F, Chen S, Hu H, Yu C-P. Characterization of exoelectrogenic bacteria *Enterobacter* strains isolated from a microbial fuel cell exposed to copper shock load. *PLoS One*, 2014, 9 (11) : e113379.
- [53] Feng C, Hu A, Chen S, Yu CP. A decentralized wastewater treatment system using microbial fuel cell techniques and its response to a copper shock load. *Bioresource Technology*, 2013, 143: 76-82.
- [54] Lovley DR. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. *Nature Reviews. Microbiology*, 2006, 4 (7) : 497-508.
- [55] Gregory KB, Bond DR, Lovley DR. Graphite electrodes as electron donors for anaerobic respiration. *Environmental Microbiology*, 2004, 6 (6) : 596-604.
- [56] Yusoff MZ, Hu A, Feng C, Maeda T, Shirai Y, Hassan MA, Yu CP. Influence of pretreated activated sludge for electricity generation in microbial fuel cell application. *Bioresource Technology*, 2013, 145: 90-96.
- [57] Feng C, Hou CH, Chen S, Yu CP. A microbial fuel cell driven capacitive deionization technology for removal of low level dissolved ions. *Chemosphere*, 2013, 91 (5) : 623-628.
- [58] Larsen S, Nielsen LP, Schramm A. Cable bacteria associated with long distance electron transport in new england salt marsh sediment. *Environmental Microbiology Reports*, 2014. DOI: 10.1111/1758-2229.12216.

Advances in microbial solar cells – A review

Xiaoyun Guo¹, Changping Yu^{2*}, Tianling Zheng^{1*}

¹Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, Fujian Province, China

²Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, Fujian Province, China

Abstract: The energy crisis has become one of the major problems hindering the development of the world. The emergence of microbial fuel cells provides a new solution to the energy crisis. Microbial solar cells, integrating photosynthetic organisms such as plants and microalgae into microbial fuel cells, can convert solar energy into electrical energy. Microbial solar cell has steady electric energy, and broad application prospects in wastewater treatment, biodiesel processing and intermediate metabolites production. Here we reviewed recent progress of microbial solar cells from the perspective of the role of photosynthetic organisms in microbial fuel cells, based on a vast amount of literature, and discussed their advantages and deficiency. At last, brief analysis of the facing problems and research needs of microbial fuel cells are undertaken. This work was expected to be beneficial for the application of the microbial solar cells technology.

Keywords: microbial fuel cells (MFCs), photosynthetic organisms, biofuel, microbial solar cells, the fuel cell

(本文责编:张晓丽)

Supported by the Xiamen Southern Ocean Research Center(14GNY022NF22)

* Corresponding author. E-mail: Tianling Zheng, wshwzh@xmu.edu.cn; Changping Yu, cpyu@iue.ac.cn

Received: 25 November 2014/Revised: 22 January 2015

1953 年创刊以来所有文章全文上网

从 2008 年 1 月开始 《微生物学报》将创刊以来所有文章全文上网。欢迎广大读者登陆本刊主页 (<http://journals.im.ac.cn/actamicrocn>) 浏览、查询、免费下载! 由于《微生物学报》历史久远,期间多次调整刊期以及停、复刊,故将变化情况列表如下,以方便读者查阅。

《微生物学报》刊、卷、期变化情况一览表

2015 年 8 月统计

时间	刊期	卷号	期号
1953 – 1956	半年刊	1 – 4	1 – 2
1957 – 1958	季刊	5 – 6	1 – 4
1959	季刊	7	1 – 2
1959 – 1962	停刊 3 年		
1962	季刊	8	3 – 4
1963 – 1965	季刊	9 – 11	1 – 4
1966	季刊	12	1 – 2
1966 – 1972	停刊 6 年半		
1973 – 1988	季刊	13 – 28	1 – 4
1989 – 2007	双月刊	29 – 47	1 – 6
2008 – 2014	月刊	48 – 54	1 – 12
2015	月刊	55	1 – 8