

微生物燃料电池研究进展

何建瑜, 刘雪珠, 陶诗, 王世来, 王健鑫* (浙江海洋学院海洋生物资源与分子工程实验室, 浙江舟山 316000)

摘要 首先介绍了微生物燃料电池的基本原理, 然后从电池结构、产电微生物、电极等方面分析影响电池性能的各参数之间的关系, 最后对其发展趋势进行分析和展望。

关键词 微生物燃料电池; 产电; 新能源

中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2013)02-00785-04

Research Progress of Microbiol Fuel Cell

HE Jian-yu et al (Laboratory for Marine Living Resources and Molecular Engineering, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316000)

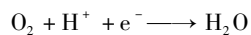
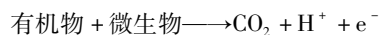
Abstract The basic principle of microbial fuel cell (MFC) was introduced, the impact factors of MFC were analyzed from the structure of cell, electricigens and the electrode, finally, the development trends were analyzed and forecasted.

Key words Microbial fuel cell; Electricity generation; New energy resources

随着社会的不断发展, 人类对能源的需求愈发强烈, 为了更好地解决能源短缺问题, 开发新型、无污染、高效的清洁能源, 人们把目光投向了微生物, 由此开发出微生物燃料电池 (Microbial fuel cells, MFCs)^[1]。MFCs 是一种利用产电微生物整体作为催化剂, 将化学能直接转化为电能的装置, 是微生物与电池技术相结合和发展的产物^[2-3]。随着研究不断深入, 相继有多种微生物菌株被发现具有电学活性, 大大拓展了微生物燃料电池的应用领域。基于微生物燃料电池的工作原理, 影响其产电性能的因素有很多, 如电子传递效率、质子传递效率、氧化剂性质、电池内阻等。针对以上影响因素, 笔者主要从电池的结构、产电微生物、电极以及电解液等方面, 介绍近几年国内外最新的一些研究进展, 为开发高效能的微生物燃料电池提供依据。

1 微生物燃料电池的工作原理

MFCs 的工作装置中 (图 1) 左边为阳极室, 右边是阴极室, 阳极槽为厌氧环境, 阴极槽保持有氧。阳极室释放电子, 通过外电路传递到阴极室, 与氧气反应产生水; 两室中间利用 PEM 膜连接^[4], 质子通过 PEM 膜进行穿梭。阳极室、阴极室的反应分别为:



该装置的原理: 电池的阳极室为厌氧环境, 产电微生物将有机物分解并释放出电子和质子, 在合适的电子传递介体的作用下, 电子在生物组分和阳极之间进行有效传递, 并通过外电路传递到阴极, 从而形成电流; 而质子则通过质子交换膜传递到阴极, 由于质子交换膜只允许 H^+ 自由通过, 而氧

气不能自由通过, 氧化剂 (一般为氧气) 在阴极得到电子被还原, 与质子结合成水^[5-6]。通过更换阳极室中的微生物种类、PEM 交换膜材料, 就可达到海水淡化、污水处理、产电等众多作用。微生物燃料电池具有污水处理、海水淡化、产电发电等多重功能, 且高效、环保, 故对其研究具有深远的现实意义和应用价值。

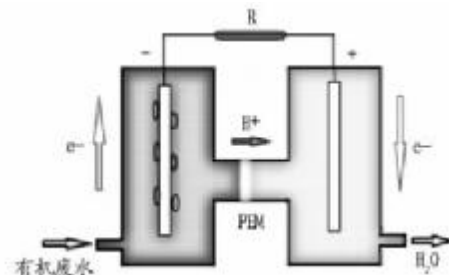


图 1 微生物燃料电池的工作原理

2 微生物燃料电池的影响因素

2.1 电池结构 电池结构作为微生物燃料电池的工作装置, 是影响产电效率的首要因素。目前电池的结构主要有双室 MFCs 和单室 MFCs 两种结构。骆海萍等^[7]对 2 种不同结构的微生物燃料电池产电性能进行比较, 结果表明, 单室型和双室型均可稳定地输出电能, 平均最大输出电压、最大面积功率密度、最大体积功率密度、内阻等性能双室均优于单室型, 而平均运行周期单室却优于双室型。Kim 等^[8]采用厌氧污泥为活性微生物、乙醇为底物比较单室 MFCs 和双室 MFCs 的产电效果, 结果发现单室的功率密度 ($488 \pm 12 \text{ mW/m}^2$) 比双室高 ($40 \pm 2 \text{ mW/m}^2$), 可能是因为单室 MFCs 没有分隔材料及阴极液, 使单室内阻较双室小; 而单室 MFCs 的库仑效率 (10%) 比双室低 (42% ~ 61%), 则与单室 MFCs 中氧气易扩散到阳极区, 消耗部分电子有关。电池结构影响 MFCs 的产电性能主要是电池结构类型和质子交换膜。对电池结构的影响, 科学家们开发出了改进型单室 MFCs、改进型双室 MFCs 以及联体型 MFCs^[9]。利用双室系统上研发出上流式 MFC (Upflow microbial fuel cell, UMFC)^[10]、平板式 MFC (Flat plate microbial fuel cell, FPMFC)^[11] 和微型 MFC (Minia-

基金项目 2012 年浙江省大学生科技创新活动计划 (新苗人才计划) 项目 (2012R411002, 2012R411041); 浙江省科技厅公益性技术应用研究项目 (2011C31017); 舟山市科技局海洋类项目 (10248); 舟山市定海区科技计划项目。

作者简介 何建瑜 (1991 -), 男, 浙江诸暨人, 本科, 专业: 生物技术, E-mail: xiaolonghijy@126.com。* 通讯作者, 高级实验师, 硕士, 从事海洋微生物生态与应用研究, E-mail: zswjx2575@163.com。

收稿日期 2012-11-21

ture microbial fuel cell, mini-MFC)^[12],在单室上改良出管式 MFC (Tubular microbial fuel cell, TMFC)^[13]、“三合一” MFC^[9]。曹效鑫等^[14]将阳极、质子交换膜和阴极热压在一起组成“三合一”膜电极形式的微生物燃料电池,结果发现该“三合一”电池在稳定运行条件下电池内阻约为 10~30 Ω,远低于现已报道的其他形式的微生物燃料电池的内阻,其最大输出功率密度约 300 mW/m²,库仑效率约 50%。在间歇运行周期中,电池内阻增加是引起输出电压降低的最主要原因。单个 MFC 产生的电量非常小,为了解决这一难题,提高产电量,研究人员用多个独立的燃料电池串联起来,研发出多级串联 MFC^[9]。Aelterman 等^[15]将 6 个 MFC 单元连接起来,每个 MFC 单元的阳极和阴极之间都有一个坚固的质子交换膜,利用铁酸盐作为阴极,输出的最大平均功率为 258 W/m³,相比单个 MFC,输电功率得到很大提高。

近年来,填充型微生物燃料电池也成为了研究的热点。You 等^[16]设计了以颗粒石墨为阳极的管状填充型燃料电池 (ACMFCs),利用厌氧污泥中的活性微生物作为催化剂,葡萄糖作为反应底物,产生的最大功率密度达 5 012 W/m³,并且内阻也很小,只有 27 Ω。梁鹏等^[17]对填充材料做了比较,发现碳毡作为填料时,微生物燃料电池的最大产电功率密度为 1 502 mW/m²,优于石墨作为填料的 MFC。碳毡与碳纸烧结体填料型与平板型 MFCs 相比,面积内阻从 0.080 Ω/m² 下降到 0.051 Ω/m²,最大输出功率密度从 1 178 mW/m² 上升到 2 426 mW/m²,填料型 MFCs 在 600 Ω 外电阻下可长期稳定运行达 30 d 以上,库仑效率约为 10.6%。这是由于填充式结构具有增大微生物和电极的接触面积,促进电子传输,故

开发新型的 MFCs 结构具有广泛的研究前景。除了结构的影响,PEM 交换膜也较大程度地影响电池的产电性能,尤其是在双室 MFCs 中。因为在双室系统中,PEM 膜的作用不仅体现分隔阳极室和阴极室及传递质子,同时还需阻止阴极室内氧气扩散至阳极室^[3]。随着电池的持续运行,两室的液体 pH 会发生变化,这可能是由于质子穿过 PEM 的速度比在阴极还原的速度慢引起的^[18]。也有人认为,与质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 不同,MFCs 的电解液中阳离子除了质子还存在很多盐离子 (如 Na⁺、K⁺、NH₄⁺、Ca²⁺),且这些盐离子的浓度是质子浓度的 10⁵ 倍,PEM 中 99.999% 的磺酸基被这些盐离子占据,使膜上质子极少,质子传递受阻^[19]。

2.2 产电微生物的多样性 产电微生物是一种氧化有机物获得电子后将电子传递到细胞外,通过介质直接或间接地传递到电极上产生电流的微生物^[4,6,20]。目前,在自然条件下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^[20-21],主要的 MFC 产电微生物如表 1 所示。虽然产电微生物种类较多,但不同微生物其产电能力差别较大,而且产电过程中存在产毒素、培养困难等诸多因素,因此 MFC 产电微生物的研究主要以地杆菌属 (Geobacter) 或希瓦氏菌属 (Shewanella) 为主^[22],许多产电菌的产电机理还需进一步研究。除上述主要产电菌外,还有其他如丁酸梭菌 (*Clostridium butyricum* EG3)^[38]、拜氏梭菌 (*Clostridium beijerinckii*)^[39]、铁还原红育菌 (*Rhodoferrax ferrireducens*)^[40]、耐寒细菌 (*Geopsychrobacter electrodiphilus*)^[41]、酸杆菌门 (Acidobacteria) 中的 *Geothrix fermentans*^[42]、克雷伯氏

表 1 MFC 常见产电微生物简表

主要菌属	代表种	电子供体	最大电压或最大(体积)功率密度	需氧情况	类型	产电机理
地杆菌属	硫还原地杆菌 ^[22]	乙酸盐	49 mW/m ²	严格厌氧	两室	阳极表面形成膜状结构,胞外传递电子及通过纳米导线传递电子 ^[22-23]
希瓦氏菌属	金属还原地杆菌 ^[24]	乙酸	40 ± 1 mW/m ²	严格厌氧	两室	-
	<i>Shewanella oneidensis</i> DSP10 ^[25]	丙酮酸、乳酸、甲酸	500 W/m ³	兼性厌氧	微型	电子穿梭机制、直接接触和纳米导线机制 ^[26]
	<i>Shewanella putrefaciens</i> IR-1 ^[27]	丙酮酸盐、乳酸盐、葡萄糖	10.2 mW/m ²	兼性厌氧	两室	细胞表面的电化学活性物质向阳极传递电子 ^[29]
	<i>Shewanella</i> sp. S2 ^[30]	乳酸	150 mV	兼性厌氧	两室	-
	<i>Shewanella oneidensis</i> MR-1 ^[31]	乳酸盐	150 mW/m ²	兼性厌氧	两室微型	细胞表面的电化学活性物质向阳极传递电子 ^[29]
假单胞菌属	铜绿假单胞菌 ^[32]	复杂有机物	-	兼性好氧	两室	产生绿脓菌素作为电子穿梭载体传递电子 ^[32]
	<i>Pseudomonas</i> sp. Q1 ^[33]	喹啉	-	兼性厌氧	两室	附着在阳极上的菌体菌膜中某些蛋白质及电极上的某些代谢产物传递电子 ^[33]
	<i>Pseudomonas</i> sp. RE7 ^[34]	葡萄糖	69.2 mW/m ²	兼性好氧	两室	自身分泌的氧化还原类物质传递电子 ^[34]
弓形菌属	布氏弓形菌 ^[21]	乙酸盐	200~300 mV	兼性厌氧	两室	-
	弓形菌 (<i>Arcobacter-L</i>) ^[35]	乙酸盐	296 W/m ³	兼性厌氧	两室	-
产气肠杆菌属	<i>Enterobacter aerogenes</i> XM02 ^[36]	多种底物	-	需氧	两室	菌体附着在阳极的生物膜产生氢气后被阳极氧化,将电子传递至外电路 ^[36]
人苍白杆菌属	<i>O. anthropi</i> YZ-1 ^[37]	葡萄糖、乙醇、乙酸盐	89 mW/m ²	需氧	稀释 U 型	-

肺炎菌 (*Klebsiella pneumoniae* L17)^[43]、嗜水气单孢菌 (*Aeromonas hydrophila*)^[44] 等细菌也可作为产电微生物。此外,部分真菌如异常汉逊酵母 (*Hansenula anomala*)^[45]、沼泽红假单孢菌 (*Rhodospseudomonas palustris* DX-1)^[46] 也是光合微生物的典型菌株。Xing 等^[47] 研究发现,沼泽红假单孢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 2 720 mW/m², 高于相同装置菌群催化的 MFC。另有关于小球藻 (*Chlorella vulgaris*)^[48] 作为产电微生物的相关报道。目前混菌燃料电池研究也是比较热门的方向,陈旻等^[49] 以各种天然混合菌接种的 MFC 均可有效运行,电池最大功率密度为 196.6 ~ 1 283.0 mW/m², 差异明显;库仑效率为 28% ~ 50%, 回收电能潜力大。对应不同 MFC, 应该有不同的最佳 $V_{\text{底物}}/V_{\text{菌液}}$ 。提高阴极密度和强度是提高电池放电能力的有效途径,但其支撑物含量对应不同 MFC 同样也有最佳比例。

2.3 电极 微生物燃料电池主要由阳极和阴极组成,在反应过程中,有机底物在阳极氧化并产生电子和质子,其中电子通过外电路转移到阴极,质子透过质子交换膜到达阳极,电子和质子在阴极与电子受体进行反应,从而在外电路获得电流^[38,50],故电池中电极的优化也是提高产电效能的主要手段。目前,电池中对于阳极材料的优化主要有导电聚合物、金属和金属化合物及非金属处理修饰阳极材料^[51]。Qiao 等^[52] 将聚苯胺负载在碳纳米管上,利用 *E. coli* 作为产电微生物,最大产电密度达到 42 mW/m², 电池电压 450 mV, 说明以碳纳米管掺杂聚苯胺纳米材料为代表的导电聚合物阳极在 MFC 上有良好的应用前景。Sun 等^[53] 用金修饰的碳纸作为燃料电池的阳极,结果显示用贵金属修饰后产生的电流密度比单纯碳纸电极提高了 47%。Zhu 等^[54] 则采用非金属修饰电池的阳极,利用硝酸和乙二胺处理后的碳纤维作为燃料电池的阳极。结果表明,用乙二胺处理的阳极产电密度提高了 25%, 并且启动时间缩短了 51%; 硝酸处理的阳极产电密度提高了 58%, 启动时间缩短了 45%。

目前,微生物燃料电池的阴极大多采用非生物阴极,例如在阴极中添加 Pt、过渡金属 (Fe、Co) 来增加燃料电池的产电性能^[55-56], 虽应用广泛,但具有成本高、易造成二次污染等缺点^[57]。现在,已成功开发出空气-生物阴极^[58]、锰催化的空气-生物阴极、铁修饰的空气-生物阴极和厌(缺)氧生物阴极^[59]。孙瑾华等^[60] 采用 MnO₂ 作为阴极氧还原的催化剂,结果表明,以肺炎克雷伯氏菌 (L17) 为产电微生物、3 g/L 葡萄糖为燃料、1 mol/L KOH 溶液为阴极液时,最大的输出功率可达 696.3 mW/m², 对应的电流密度为 0.25 mA/cm²。此外,正在开发的铁-锰联合修饰的空气-生物阴极能够有效地降低启动时间,提高产电性能,是未来生物阴极的发展趋势^[59]。

2.4 外加酶对产电性能的影响 杨慧等^[61] 以剩余污泥作为接种液和基质,探讨了外加酶 (中性蛋白酶、 α -淀粉酶) 强化单室型剩余污泥微生物燃料电池产电效率的可行性,研究了酶投加量对微生物燃料电池的产电特性及剩余污泥减量的

影响。结果表明,当酶的总投加量为 10 mg/g 时,最大输出功率密度及污泥水解效率达到最大,且 α -淀粉酶组优于中性蛋白酶组。采用向剩余污泥中投加酶的方法,成功增强了微生物燃料电池的产电效率,同时对剩余污泥有效地进行了处理,为微生物燃料电池的实际应用提供了新途径。

3 微生物燃料电池的应用趋势

3.1 环境污染治理 微生物燃料电池的快速发展和不断优化,在生物脱氮、脱硫方面^[1,62] 具有不可忽视的作用。Cluwaert 等^[63] 首次将 MFCs 与电化学生物反应器结合,实现了每天 0.146 kg/m³ 的硝酸盐去除率; MFCs 还可以处理化工废水、制药废水、畜牧养殖废水、食品加工废水、垃圾渗滤液等各种有机污染废水^[64], 在重金属污染的生物治理等方面发挥较大的作用。梁敏等^[65] 以剩余污泥构建的 MFC 研究 Cu²⁺ 的去除效率,结果表明, MFC 可以实现去除水中的 Cu²⁺, 且去除率达到 97.8%。

3.2 海水淡化 当前,淡水资源非常匮乏,而普通的海水淡化处理技术条件又十分苛刻,需要高压、高效能的转化膜,有的还要消耗大量的电能,故不能大规模的处理,并且成本较高,难以有效地解决海水淡化问题。如果找到一种高效的产电微生物和特殊的 PEM 交换膜,那么 MFCs 就可以达到海水淡化的目的,而且具有能耗低,环保和可持续发展的优点。2009 年, Cao 等^[66] 利用醋酸作为底物,不同初始浓度的盐水 (5、20、35 g/L) 的 MFC, 也称作微生物脱盐池 (MDC), 结果显示,该池可以达到的最大功率密度为 2 W/m², 最高的脱盐率达 90%。但是依然还有许多难题没有解决,例如大规模推广、产电菌的效率与传代等。利用 MFC 淡化海水也将成为具有发展潜力的研究方向。

3.3 沉积物 MFC 沉积物微生物燃料电池 (SMFCs) 是一种已经在实际运用中发挥作用的 MFCs, 尤其在远洋和深海探测仪器中的应用。由于这些仪器设备不需要太高的电能, 输入功率较低, 也不需要频繁地维护, 因此, 目前沉积物 MFC 大多只局限于为远程监测仪器提供电能。对于如何维持工作时间、有效传输、提高或改善产电效率以及更加方便地进行维修 (尤其是在深海) 等方面的研究仍然是当前的热点。微生物燃料电池还将在生物修复^[67]、生物防治等“服务型”方面发挥巨大作用, 以及产能、发电等“能源型”方面显示出较大的作用, 开发多功能联合 MFCs 将是未来发展的一个主流。

4 结语

微生物燃料电池研究从 20 世纪 90 年代初成为热门领域, 具有环保、低碳、清洁等众多优点, 以其独特的性质显示出极大的研究和应用价值。高效能的 MFC 将在海水淡化、污水 (有毒废水) 处理、生物修复等方面起到重要的作用。现在有几种微生物燃料电池已经处在商业化的前夜^[4], 对电池结构、产电微生物、电极等影响因素进行探讨, 为制作高效、多功能的 MFCs 提供依据。

参考文献

[1] 杨永刚, 孙国萍, 许玫英. 微生物燃料电池在环境污染治理研究中的应

- 用进展[J].微生物学报,2010,50(7):847-852.
- [2] 杨冰,高海军,张自强.微生物燃料电池研究进展[J].生命科学仪器,2007(5):3-12.
- [3] 刘宏芳,郑碧娟.微生物燃料电池[J].化学进展,2009,21(6):1349-1355.
- [4] 洪义国,郭俊,孙国萍.产电微生物及微生物燃料电池最新研究进展[J].微生物学报,2007,47(1):173-177.
- [5] 范德玲,王利勇,陈英文,等.微生物燃料电池最新研究进展[J].现代化工,2011,31(6):14-18.
- [6] 付洁,戚天胜,蔡小波,等.微生物燃料电池产电研究及微生物多样性分析[J].应用与环境生物学报,2009,15(4):568-573.
- [7] 骆海萍,刘广立,张仁铎,等.2种不同结构的微生物燃料电池的产电性能比较[J].环境科学,2009,30(2):621-624.
- [8] KIM J R, JUNG S H, REGAN J M, et al. Electricity generation and microbial community analysis of alcohol powered microbial fuel cells[J]. Biore-source Technology, 2007, 98: 2568-2577.
- [9] 李登兰,洪义国,许玫英,等.微生物燃料电池构造研究进展[J].应用与环境生物学报,2008,14(1):147-152.
- [10] HE Z, MINTEER S D, ANGENENT L T. Electricity generation from artificial wastewater using an upflow microbial fuel cell[J]. Environ Sci Technol, 2005, 39: 5262-5267.
- [11] MIN B, LOGAN B E. Continuous electricity generation from domestic wastewater and organic substrates in a flat plate microbial fuel cell[J]. Environ Sci Technol, 2004, 38: 3809-3814.
- [12] RINGEISEN B R, HENDERSON E, WU P K, et al. High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40: 2629-2634.
- [13] KIM H J, PARK H S, HYUN M S. A mediator-less microbial fuel using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens* [J]. Enzyme Microb Technol, 2002, 30: 145-152.
- [14] 曹效鑫,梁鹏,黄霞.“三合一”微生物燃料电池的产电特性研究[J].环境科学学报,2006,26(8):1252-1257.
- [15] AELTERMAN P, RABAIEY K, PHAM H T, et al. Continuous electricity generation at high voltages and currents using stacked microbial fuel cells[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40: 3388-3394.
- [16] YOU S J, ZHAO Q L, ZHANG J N, et al. A graphite-granule membrane-less tubular air-cathode microbial fuel cell for power generation under continuously operational condition[J]. Journal of Power Sources, 2007, 173: 172-177.
- [17] 梁鹏,范明志,曹效鑫,等.填料型微生物燃料电池产电特性的研究[J].环境科学,2008,29(2):512-517.
- [18] GIL G C, CHANG I S, KIM B H, et al. Operational parameters affecting the performance of a mediator-less microbial fuel cell[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2003, 18: 327-334.
- [19] ROZENDAL R A, HAMELERS H V M, BUISMAN C J N. Effects of membrane cation transport on pH and microbial fuel cell performance[J]. Environ Sci Technol, 2006, 40: 5206-5211.
- [20] 李颖,孙永明,孔晓英,等.微生物燃料电池中产电微生物的研究进展[J].微生物学报,2009,36(9):1404-1409.
- [21] TOH H, SHARMA V K, OSHIMA K, et al. Complete genome sequences of *Arcobacter butzleri* ED-1 and *Arcobacter* sp. strain L, both isolated from a microbial fuel cell[J]. J Bacteriol, 2011, 193(22): 6411-6412.
- [22] 谢丽,马玉龙.微生物燃料电池中产电微生物的研究进展[J].宁夏农林科技,2011,52(7):104-107.
- [23] HOLMES D E, CHAUDHURI S K, NEVIN K P, et al. Microarray and genetic analysis of electron transfer to electrodes in *Geobacter sulfurreducens* [J]. Environ Microbiol, 2006, 8: 1805-1815.
- [24] MIN B, CHENG S, LOGAN B E. Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells[J]. Water Res, 2005, 39(9): 1675-1686.
- [25] BIFFINGER J C, BYRD J N, DUDLEY B L, et al. Oxygen exposure promotes fuel diversity for *Shewanella oneidensis* microbial fuel cells[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2008, 23(6): 820-826.
- [26] RINGEISEN B R, TENDER L M. High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP [J]. Environ Sci Technol, 2006, 40(8): 2629-2634.
- [27] KIM H J, PARK H S, HYUN M S. A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens* [J]. Enzyme Microbiol Technol, 2002, 30: 145-152.
- [28] PARK D H, ZEIKUS J G. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation[J]. Biotechnol Bioengin, 2003, 81(3): 348-355.
- [29] 张锦涛,周顺桂.产气肠杆菌燃料电池产电机理研究[J].环境科学,2009,30(4):1215-1220.
- [30] 王彪,黄杰勋,章晓波,等.一株海洋产电菌 *Shewanella* sp. S2 的筛选和产电分析[J].微生物学报,2010,37(3):342-348.
- [31] VELASQUEZORTA S B, HEAD I M, CURTIS T P, et al. The effect of flavin electron shuttles in microbial fuel cells current production[J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2010, 85(5): 1373-1381.
- [32] RABAIEY K, LISSENS G, SICILIANO S D, et al. A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency[J]. Biotechnol Lett, 2003, 25(18): 1531-1535.
- [33] 陈姗姗,张翠萍,刘广立,等.一株以喹啉为燃料的产电假单胞菌 *Pseudomonas* sp. Q1 的特性研究[J].环境科学学报,2010,30(6):1130-1137.
- [34] 骆海萍,刘广立,张仁铎,等.1株产电假单胞菌(*Pseudomonas* sp.)RE7 的分离及特性研究[J].环境科学,2009,30(7):2118-2123.
- [35] FEDOROVICH V, KNIGHTON M C, PAGALING E, et al. Novel electrochemically active bacterium phylogenetically related to *Arcobacter butzleri*, isolated from a microbial fuel cell[J]. Appl Environ Microbiol, 2009, 75(23): 7326-7334.
- [36] 张锦涛,周顺桂,张礼霞,等.产气肠杆菌燃料电池产电机理研究[J].环境科学,2009,30(4):1215-1220.
- [37] ZUO Y, XING D F. Isolation of the exoelectrogenic bacterium *Ochrobactrum anthropi* YZ-1 by using a U-Tube microbial fuel cell[J]. Appl Environ Microbiol, 2008, 5: 3130-3137.
- [38] PARK H S, KIM B H. Anovel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Clostridium butyricum* isolated from a microbial fuel cell[J]. Anaerobe, 2001, 7: 297-306.
- [39] NIESSEN J, SCHRODER U, SCHOLZ F. Exploiting complex carbohydrates for microbial electricity generation - a bacterial fuel cell operating on starch[J]. Electrochem Commun, 2004, 6: 955-958.
- [40] CHAUDHURI S K, LOVEY D R. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediator less microbial fuel cells[J]. Nat Biotechnol, 2003, 21: 1229-1232.
- [41] HOLMES D E, NICOLL J S, LOVEY D R, et al. Potential role of a novel psychrotolerant member of the family geobacteraceae, *geopsychrobacter*, electrophilus gen. nov, sp. nov. in electricity production by a marine sediment fuel cell[J]. Appl Environ Microbiol, 2004, 70(10): 6023-6030.
- [42] BOND D R, LOVEY D R. Evidence for involvement of an electron shuttle in electricity production by *Geothrix fermentans* [J]. Appl Environ Microbiol, 2005, 71(4): 2186-2189.
- [43] 邓丽芳,李芳柏,周顺桂,等.克雷伯氏菌燃料电池的电子穿梭机制研究[J].科学通报,2009,54(19):2983-2987.
- [44] DENG L F, LI F B, ZHOU S G, et al. A study of electron-shuttle mechanism in *Klebsiella pneumoniae* based-microbial fuel cells[J]. Chinese Sci Bull, 2010, 55(1): 99-104.
- [45] PHAM C A, SUNG J J, KIM B H, et al. A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to *Aeromonas hydrophila* isolated from a microbial fuel cell[J]. FEMS Microbiol Lett, 2003, 223: 129-134.
- [46] PRASAD D, ARUN S. Direct electron transfer with yeast cells and construction of a mediatorless microbial fuel cell[J]. Biosensors and Bioelectronics, 2007, 22: 2604-2610.
- [47] XING D F, ZUO Y, LOGAN B E, et al. Electricity generation by *Rhodospseudomonas palustris* DX-1 [J]. Environ Sci Technol, 2008, 42: 4146-4151.
- [48] 何辉,冯雅丽,李浩然,等.利用小球藻构建微生物燃料电池[J].过程工程学报,2009,9(1):133-137.
- [49] 陈场,钱超,钱冬全,等.以天然混合菌接种的微生物燃料电池产电性能研究[J].常熟理工学院学报:自然科学版,2011,25(4):61-65.
- [50] ALLEN R M, BENNETTO H P. Microbial fuel-cells[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1993, 1: 27-40.
- [51] 谢丽,程佳,马玉龙.微生物燃料电池阳极材料的研究进展[J].广东化工,2011,38(4):27-29.
- [52] QIAO Y, LI C M, BAO S J, et al. Carbon nanotube/polyaniline composite as anode material for microbial fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2007, 170: 79-84.
- [53] SUN M, ZHANG F, TONG Z H, et al. A gold-sputtered carbon paper as an anode for improved electricity generation from a microbial fuel cell inoculated with *Shewanella oneidensis* MR-1 [J]. Biosensors and Bioelectronics, 2010, 26(2): 338-343.

征管机关应为地方税务局。这样一方面可以体现水资源的地区性差异,另一方面所收取的税款可以专门用于该地区水资源的研究、补偿和保护,体现“专款专用”的性质,也符合生态补偿制度的精神。

水资源税在我国正式施行还需要一定时间,征收水资源税情势复杂,任务繁重,仅仅依靠税务机关难以完成任务,因此应该设计以税务机关为主,相关部门配合的税收征收管理体制。可借鉴荷兰的经验,使税务机关与水利部门、环保部门、统计部门协调配合:环保部门定期对企业进行监测,将结果提供给税务和统计部门;水利部门和统计部门也要提供给税务部门相关信息资料。通过各部门的协调运作,信息共享,使税款及时、足额的缴纳,避免税款的流失。

4.3 合理高效的使用水资源税款 俄罗斯水法规定,水资源税款专门用于水资源的管理与开发,取得了显著的成效。我国水资源税也应坚持税款专用原则,将水资源税的税款纳入财政预算,可以作为中央、地方共享税,用所征税款设立中央和地方两级水资源治理基金,建立专项资金,进行专门保管和使用。其税款主要用于以下几个方面:①水环境的恢复和治理;②对水污染事件的调查及善后处理等;③用于水污染防治与水资源保护的科研、技术发明及环保设备的生产;④生活、工业、农业节水技术及系统的建立;⑤作为奖金奖励对水资源保护有贡献的单位和个人。

为了保证水资源治理基金的保值与增值,建议为该基金设立专门账户,指定资信评级高的专业投资机构进行专门管理,同时实行第三方托管,委托国有银行进行资金保管,提高资金安全性,如此可提高基金的保值增值能力,防止基金流失与贬值。此外,还要建立基金风险分析机制和成本效益分析机制,提高基金的使用效益。

5 结语

水资源税因其可以矫正市场失灵,兼顾公平与效率,促

进水资源的合理分配,促进科技进步,保护水资源和维护可持续发展,而成为世界上大部分国家为保护水资源而普遍采用的方式。法律的价值要由制度来负载,水资源的保护要由制度来保障,没有完善的制度来保障只能是纸上画饼。我国目前还没有专门的水资源保护的税收法律制度,建立水资源税税收法律制度是保护我国水资源的重要途径。

参考文献

- [1] CHEN K. Discussion on the construction of negotiation mechanism of cross-bounder water pollution treatment in Changjiang River[J]. Meteorological and Environmental Research, 2010, 1(12): 91-95.
- [2] GUO J M, WANG H, YANG G Q. Vulnerability assessment of shallow groundwater in Ordos Cretaceous basin[J]. Meteorological and Environmental Research, 2012, 3(1/2): 1-4.
- [3] 郭平. 运用经济手段有效保护和利用水资源[J]. 水土保持应用技术, 2010(4): 38-40.
- [4] 张倩. 我国开征水资源税制设计分析[J]. 现代商贸工业, 2009(14): 237-238.
- [5] 郗建强, 王建生, 颜勇. 我国水资源安全现状与主要存在问题分析[J]. 中国水利, 2011(23): 42-51.
- [6] 中国水利部. 2010年中国水资源公报[R/OL]. (2012-04-26)[2012-10-24]. http://www.mwr.gov.cn/zwzc/hygh/szygh/qgszygh/20120426_319578.html.
- [7] 裴丽萍. 论水资源法律调整模式及其变迁[J]. 法学家, 2007(2): 102.
- [8] 刘柄秀. 我国实行水资源税的可行性[J]. 改革与开放, 2007(7): 12-15.
- [9] 王敏, 李薇. 欧盟水资源税(费)政策对中国的启示[J]. 财政研究, 2012(3): 18.
- [10] 张秋蕾. 你了解资源税吗? [N] 中国环境报, 2011-05-24(8).
- [11] 吴雪. 对水资源征税的看法[J]. 税务研究, 2006(7): 48.
- [12] 董德新. 俄罗斯水资源税简介及对我国的启示[J]. 上海财税, 2002(7): 43.
- [13] 任婷婷, 王光宇. 荷兰水资源税制对我国开征水资源税的启示[J]. 现代商业, 2010(12): 86.
- [14] 徐志. 荷兰的环境税及其借鉴[J]. 涉外税务, 1999(12): 19-22.
- [15] 周国川. 国外水资源保护税制比较研究[J]. 水利经济, 2006(5): 28-30.
- [16] 杜灵芝. 我国开征水资源税问题的探讨[D]. 天津: 天津财经大学经济学院, 2011: 35-36.
- [17] 覃彪, 支银芳, 周华, 等. 微生物燃料电池在脱氮方面的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 35(1): 111-114.
- [18] 特性研究[J]. 环境科学, 2012, 33(1): 216-221.
- [19] CLAUWAERT P, RABAEY K, AELTERMAN P, et al. Biological denitrification in microbial fuel cells[J]. Environmental Science and Technology, 2007, 41: 3354-3360.
- [20] 郭伟, 王艺菲, 银晓靖, 等. 微生物燃料电池在废水处理中的应用研究进展[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2012, 40(1): 93-97.
- [21] 梁敏, 陶虎春, 李绍峰, 等. 剩余污泥为底物的微生物燃料电池处理含铜废水[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 179-185.
- [22] CAO X, HUANG X, LIANG P, et al. A new method for water desalination using microbial desalination cells[J]. Environ Sci Technol, 2009, 43(18): 7148-7152.
- [23] 杨敬东, 苟兴华, 王跃华. 微生物燃料电池技术发展及其应用前景[J]. 成都大学学报: 自然科学版, 2010, 29(1): 7-10.
- [24] 谢丽, 马玉龙. 微生物燃料电池中产电微生物的研究进展[J]. 宁夏农林科技, 2011, 52(7): 104-107.
- [25] 杨慧, 刘志华, 李小明, 等. 外加酶强化剩余污泥微生物燃料电池产电
- [26] ZHU N W, CHEN X, ZHANG T, et al. Improved performance of membrane free single-chamber air-cathode microbial fuel cells with nitric acid and ethylenediamine surface modified activated carbon fiber felt anodes[J]. Bioresour Technol, 2011, 102(1): 422-426.
- [27] 杨改秀, 孔晓英, 孙永明, 等. 微生物燃料电池非生物阴极催化剂的研究进展[J]. 应用化学, 2012, 29(2): 123-128.
- [28] LIU H, LOGAN B E. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane[J]. Environ Sci Technol, 2004, 38(14): 4040-4046.
- [29] 詹亚力, 王琴, 闫光緒, 等. 高锰酸钾作阴极的微生物燃料电池[J]. 高等学校化学学报, 2008, 29(3): 559-563.
- [30] 温青, 刘智敏, 陈野, 等. 空气阴极生物燃料电池电化学性能[J]. 物理化学学报, 2008(6): 1063-1067.
- [31] 毛艳萍, 蔡兰坤, 张乐华, 等. 生物阴极微生物燃料电池[J]. 化学进展, 2009, 21(Z2): 1672-1677.
- [32] 孙瑾华, 刘建好, 黄呈珠, 等. 二氧化锰为阴极催化剂的微生物燃料电池[J]. 电源技术, 2008(12): 838-840.

(上接第 788 页)