

周银,许丹,肖恩荣,等.水生植物资源化利用技术与方法研究进展[J].环境科学与技术,2016,39(11):118-126. Zhou Yin, Xu Dan, Xiao Enrong, et al. Progress on the technology and methods of the energy utilization of aquatic plants[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 39(11):118-126.

水生植物资源化利用技术与方法研究进展

周银^{1,2}, 许丹³, 肖恩荣^{1*}, 吴振斌¹

(1.中国科学院水生生物研究所,淡水生态与生物技术国家重点实验室,湖北 武汉 430072;
2.中国科学院大学,北京 100049; 3.武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070)

摘要 水生植物资源极其丰富,在水体生态系统中起着举足轻重的作用,但其巨大的生物量会造成水体二次污染。文章介绍了水生植物资源化利用的现状,并重点综述了水生植物在厌氧发酵产气、微藻生物柴油及微生物燃料电池产电资源化利用的研究进展,为实现水生植物资源化发展提供可靠的依据。

关键词 水生植物; 资源化; 厌氧发酵; 生物柴油; 微生物燃料电池

中图分类号: X38 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2016.11.023 文章编号: 1003-6504(2016)11-0118-09

Progress on the Technology and Methods of the Energy Utilization of Aquatic Plants

ZHOU Yin^{1,2}, XU Dan³, XIAO Enrong^{1*}, WU Zhenbin¹

(1.State Key Laboratory of Freshwater Ecology and Biotechnology, Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.School of Resource & Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Aquatic plants are extremely rich in natural resources, playing a significant role in the water body, but its huge biomass can cause secondary pollution of the water. This paper introduces the present status of aquatic plant resource utilization, and mainly reviews the research progress of aquatic plants' energy utilization in the anaerobic fermentation to produce gas, microalgae biodiesel and microbial fuel cells to produce electricity, to provide reliable basis for realizing the energy development of aquatic plant.

Key words: aquatic plants; energy utilization; anaerobic fermentation; biodiesel; microbial fuel cells

能源是人类维系生存和发展最重要的资源与动力,随着经济全球化发展,人类生活水平不断提高,能源供给和需求之间的矛盾也日益显著。传统能源如煤、石油、天然气等化石能源的使用仍然占主导地位,但它们都属于不可再生能源,储量有限,且它们在燃烧后都会释放大量的温室气体。生物质能作为一种清洁高效的可再生能源受到越来越多研究者的重视^[1]。生物质能主要是植物通过光合作用将太阳能转化为化学能储存在生物体内,用其代替传统能源可以减少传统能源的消耗和污染物的排放。生物质资源庞大,但当生物质能源与农业粮食作物产生竞争时,就不再被认为

是可持续能源^[2],而水生植物恰好避免了这种竞争。

水生植物是指生理上依附水环境,至少部分生殖周期发生在水中或者水表面的植物系群。水生植物按生活型一般分为挺水植物、浮叶植物、沉水植物和漂浮植物。广义的水生植物还包括湿生(沼生)植物^[3]及低等的水生植物——浮游藻类(本文中所指的水生植物皆为广义的水生植物)。水生植物作为一种重要的水面资源,覆盖面积大、生物质能含量高,不仅在水体生态系统中起着举足轻重的作用,而且在治理污染水体上因其具有水质净化效果良好、能耗低、经济效益高、简单易行以及生态系统友好等特点也日益发挥重

《环境科学与技术》编辑部(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期 2016-01-09,修回 2016-02-29

基金项目 国家自然科学基金(51308530),湖北省自然科学基金(2013CFB419,2015CFB558)

作者简介 周银(1991-),女,硕士研究生,主要从事植物型微生物燃料电池方面的研究,(电话)027-68780041(电子信箱)510812714@qq.com,*通讯作者,副研究员(电子信箱)erxiao@ihb.ac.cn。

要作用^[4-5]。然而,由于水生植物生长旺盛,形成的生物量相当可观,当水生植物进入腐烂分解期时,将会释放出大量的有机质和营养盐,造成水体的二次污染^[6]。若能将水生植物中生物质能加以利用,不仅一定程度上缓解能源危机,而且还解决了水生植物枯落物的处置问题。目前,对水生植物资源化利用的研究相对较少,本文将对水生植物资源化利用现状进行简单综述,并详细介绍水生植物资源化利用技术与方法研究进展,为实现水生植物有效管理和资源化利用提供参考。

1 水生植物资源化利用现状

表 1 水生植物资源化利用的基本情况统计
Table 1 Resource utilization of the aquatic plant

应用类型	典型水生生物	利用方式	研究热点	研究瓶颈
食品或药品	浮叶植物(如芡实、菱、莼菜等); 挺水植物(如莲、香蒲、荸荠、茭白、水芹等); 藻类植物(如海带、紫菜、裙带菜等)。	直接食用 ^[7] ; 加工制品 ^[8-9]	用于水产养殖; 合理轮作; 种养结合 ^[10] ,与生态 养殖相结合	1.食品安全问题,尤其是重金属污染; 2.规模问题,大面积种植占水域面积大; 3.经济效益相对低。
饲料	浮叶植物(如凤眼莲(水葫芦)、水花生、满江红、紫萍等); 沉水植物(如狐尾藻、金鱼藻、菹草、眼子菜、节节草等)。	青贮饲料 ^[11-12] ; 干草或干草粉; 蛋白饲料 ^[13-14]	通过固体发酵技术 生产蛋白饲料 ^[15] ;	1.固体发酵工艺还不成熟,有待优化; 2.放大实验中,体系容易过热。
肥料	浮叶植物(如水葫芦、水花生等); 沉水植物(如马来眼子菜); 挺水植物(如芦苇、荷叶等)。	有机肥 ^[16] ; 有机-无机复合肥 ^[17] ; 土壤改良剂	通过堆肥技术生产 有机肥 ^[16] ; 堆肥设备的机械化、 自动化 ^[18]	1.堆肥自动化设备成本太高; 2.堆肥过程中带来的二次污染问题。

水生植物因其巨大的开发利用潜力,应用范围也越来越广,但目前除了某些水生植物可以用于景观植物、水生蔬菜或水产养殖外,其资源并未得到充分利用,许多实际问题并未得到解决。以水生植物用作食品和药材为例,首先要考虑的是安全问题,水生植物对污染物质的吸收、转化和富集作用,其能否达到食品、药品安全标准需要进一步实验检测^[19];其次是规模问题,种植水生蔬菜需要占据相当大的水面积,再者经济效益低是一个重要的原因。因此,人们正尝试着从能源开发的角度去提高水生植物资源化利用效率,以进一步实现水生植物资源化、经济化。

2 水生植物资源化研究及利用

水生植物占地面积广,生物量大,生长繁殖较快,含有丰富的木质纤维素、淀粉类物质。且与目前常用的能源作物(玉米、小麦、甜高粱等)相比,不存在影响粮食产量等问题。美国普林斯顿大学 Baliban 等^[20]利用已有技术经全局优化设计合成了浮萍制交通燃料。人们已渐渐重视起水生植物作为能源原料的巨大应用前景。目前,水生植物在厌氧发酵产气(包括沼气与氢气)、微藻生物柴油、水生植物微生物燃料电池产电

水生植物不仅具有较高的观赏价值,还可以净化和改善水质。在生态文明建设作为国家发展战略的大环境下,水生植物在江河、湖泊水资源保护与湿地恢复中发挥的作用日益显著,从而极大地带动了水生植物的研究与应用。

目前,水生植物作为一种重要的水生资源,为人类提供了粮食、蔬菜、药材、纸张原料、包装填料、手工业编织原料、饲料和肥料等直接或间接经济产品。从水生植物资源化应用的类型来看,主要可归结为以下几类:食品蔬菜或药品类、饲料类、肥料类等(表 1)。

等资源化上的研究已逐步展开。

2.1 水生植物厌氧发酵产气

木质纤维素(纤维素、半纤维素及木质素)作为水生植物的主要组成成分,是水生植物厌氧发酵产气的主要原材料。木质纤维素中纤维素本身可以在纤维素酶作用下逐渐降解为葡萄糖等单糖,单糖通过不同微生物的作用可以发酵产生沼气或者氢气。但由于木质素和半纤维素的屏蔽作用及纤维素本身的高结晶度和聚合度,限制了微生物和酶接近纤维素表面。所以必须通过预处理技术来破除这些障碍,提高纤维素的生物可降解性。

2.1.1 木质纤维素预处理技术对水生植物厌氧发酵产气的影响

预处理技术可以达到组分分离的目的,可以将木质纤维素原料从原来抗木质纤维素酶系统的形式转化为对水解作用更为有效的形式。例如降低聚合度、增加孔隙度、减小结晶度和表面积等,从而使水解速率和得糖效率得到改善,进而提高产气速率,缩短反应时间。所以无论是厌氧发酵产沼气还是氢气,发酵前对木质纤维素材料进行一定的预处理是相当有必要的。

一般来说,有效的预处理工艺需满足下列要求:(1)打破木质纤维素复杂的三维结构(2)提高糖的产率或酶水解糖化率(3)避免碳水化合物的降解(4)避免对后续的水解发酵过程有抑制作用的副产品的生成(5)木质素可以有效回收(6)具有竞争力的生产成本^[21]。目前,木质纤维素类植物原料的预处理方法很多,主要包括生物法、物理法、化学法以及联合预处理等。在中国知网资源总库中,以“木质纤维素预处理”为检索词,搜索到 2000–2015 年 4 月 30 日的文献有 5 297 篇(注:检索时间为 2015 年 5 月 22 日),筛选出与木质纤维素预处理方法有关的文献(不含综述性文献)共计 1 707 篇,结果统计见表 2(注:木质纤维素预处理方法在所查阅的文献中有交叉重复)。

表 2 不同预处理方法使用情况统计表
Table 2 The statistics of different pretreatment methods' usage

预处理方法	具体方法	文献篇数
生物法	白腐真菌法	398
	酸	459
	碱	350
化学法	离子液体	113
	氧化剂	52
	有机溶剂	42
	表面活性剂	23
	高温热解	110
	微波	38
物理法	超声波	40
	机械研磨	54
	超/亚临界水	32
	辐射	24
	膨化	8
	蒸汽爆破	135
物化法	氨气爆破	10
	CO ₂ 爆破	7
	电化学	8
	物理+化学	231
联合法	化学+化学	90
	生物+物化	33
	物理+物理	8

从表 2 的统计表中可以看出,使用较多的木质纤维素预处理方法有:酸预处理、碱预处理、离子液体、蒸汽爆破以及白腐真菌生物预处理。其中离子液体以及蒸汽爆破是近几年使用较多的木质纤维素预处理方法。生物法与其他预处理方法相比,消耗较少的化学物质和能量,是一种生物安全、环境友好的处理方式^[22],白腐菌(white-rot fungi)作为一种能降解木质素的微生物,已成为近几年的研究热点^[23]。

所以,开发更加优化高效的预处理工艺,是提高水生植物厌氧消化产气效率的有效手段。沼气、氢气这 2 种可再生清洁能源已成为水生植物厌氧发酵产气的研究重点。

2.1.2 产沼气

沼气作为一种可再生清洁能源,将成为未来能源发展的重要突破点。厌氧发酵产沼气的过程大致分为 3 个阶段:水解、酸化、产甲烷。目前,利用水生植物厌氧发酵产沼气大多处于实验研究阶段。Singhal 等^[24]认为沼气的产生速率和产量与物料的 C、N 含量及 C/N 有关,水生植物的不同及生长的水体环境不同,导致 C、N 含量及 C/N 不同,沼气的产生速率和产量也不同。张奕等^[25]对 3 种水生植物压滤液厌氧发酵产气条件(厌氧污泥接种量和不同氮添加)进行了探究,发现在发酵时间为 10 d,污泥接种量为 200 mL/L 时,可获得最大产气量,为 863.2 mL,所产气体中甲烷含量为 720~750 mL/L,且添加 1 g/kg 尿素-氮可促进 3 种水生植物压滤液发酵产气量分别提高 2%、10%和 30%。水葫芦的纤维素、木质素含量较高,是一种优良的发酵原料^[26],利用水葫芦进行沼气发酵可以很快进入发酵产气的高峰。李瑞君等^[27]以水葫芦为唯一底料进行厌氧发酵制沼气试验,结果显示,水葫芦厌氧发酵产气潜力约为 500 mL/g TS。近年来,学者还发现水生植物与不同废物混合发酵效果更好。Triscari 等^[28]将浮萍与牛粪混合进行厌氧消化,结果表明,其挥发性底物(VS)产气率比以牛粪为单独底物消化提高了 0.5%~2%。但水生植物中木质纤维素的难降解导致产气效率低已成为水生植物厌氧发酵产沼气推广应用的关键问题。

2.1.3 产氢气

水生植物中富含的纤维木质素可通过复杂的生化过程降解成葡萄糖,而葡萄糖可以通过细菌的代谢作用产生氢气。蛋白质和各种氨基酸也能通过细菌的代谢作用产生丙酮酸,进而产生氢气,具体过程如下:蛋白质 $\xrightarrow{\text{分解}}$ 氨基酸 $\xrightarrow{\text{脱氢}}$ 丙酮酸^[29]。目前,国内外有关水生植物厌氧产氢的报道甚少。周俊虎等^[30]以加热预处理的厌氧活性污泥为接种物,对凤眼莲进行发酵产氢研究,结果表明,将凤眼莲茎叶经强碱(NaOH)预处理和酶解后,控制发酵液 pH 值为 6 和温度为 35 ℃ 时,得到单位产氢量为 49.7 mL/g,最大产氢速率可达 0.48 mL/(h·g)。程军等^[31]以沼气池污泥和水葫芦为混合发酵底物研究厌氧产氢特性,结果表明,必须在沼气池污泥底物中加入优势产氢菌株作接种物才能产生大量氢气。由于水葫芦高纤维素、低糖类的特性增加了产氢难度和限制了产氢气量。如果能够采取一定的预处理措施提高水生植物中糖类含量,水生植物厌氧产氢将有很好的发展前景。

2.2 低等水生植物微藻产油

生物柴油作为化石柴油的替代品,已成为国际上

发展最快、应用最广的绿色能源。生物柴油,又名单烷基脂肪酸酯,可以从可再生原料如油料作物(大豆油、玉米油)、野生油料作物(棕榈油)等植物油脂、动物油脂(动物脂肪)、餐饮废油(地沟油)以及微藻油脂中获得^[32]。

其中微藻被认为是生物柴油最具潜力的生产原料。与其他油料作物相比,微藻具有诸多优点:(1)微藻资源丰富,对生长环境要求低,不受地域和季节的限制,可以在滩涂地、荒废地、盐碱地等非农业用地上种植^[33]。(2)微藻结构简单,无根茎叶分化,预处理成本相对较低,且在提取油脂后剩余的藻渣还可用于生产其他高附加值产品^[34]。(3)生长周期短,光合效率高,其合成油脂效率比产量最高的油料作物高 20 多倍^[35]。(4)微藻光合作用固定 CO₂,同时可以高效吸收废水中氮磷等营养盐,研究者发现用废水来培养微藻,不仅可以实现对富氮磷废水高效无害化处理,还可为微藻生产油脂提供丰富廉价的营养与水资源^[36]。微藻生物柴油技术主要生产工艺流程如下:藻种筛选→规模化培养→藻体采收→油脂提取→生物柴油。此外,微藻经油脂提取后,残渣中还有大量蛋白质、糖类营养物质可作为动物饲料,剩余较难利用的微藻残渣可用于厌氧发酵生产沼气^[37],作为微藻培养场的照明或直接作为火力发电燃料等,具体如图 1 所示。

在微藻生物柴油生产工艺流程中,产油微藻的选育以及培养是大规模生产的重要前提。相关科研学者对这两方面的研究相当重视,并取得了一定的成果。

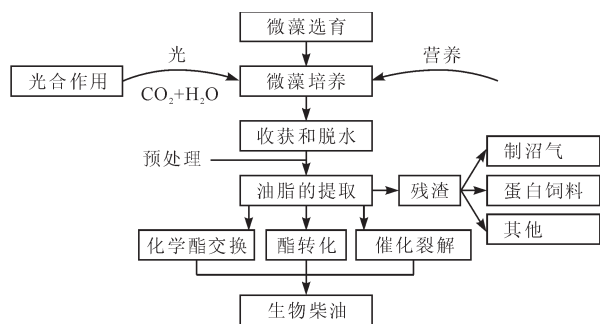


图1 微藻生物柴油的制备工艺流程图
Fig.1 The manufacturing technology of microalgae biodiesel

2.2.1 高产油微藻的选育

据报道,自然界中约有 40 000 种微藻,种质资源极其丰富^[38]。即便如此,其中被研究和开发的微藻仅仅是很少的一部分^[39]。并且,不同种类的微藻,细胞中的脂质含量不同(如图 2 所示),甚至同一品种不同品系之间差异也很大。选育出优良富油的微藻是微藻生物柴油效率提高与降低成本的首个关键环节。目前,选育出优良富油微藻的方法主要是通过优化微藻的培养条件(如光照^[40]、营养盐^[41-42]等)、改变微藻的培养

方式(如光自养培养、光异养培养、兼性培养^[43-45])和对藻株进行诱变(如利用化学方法:甲基磺酸乙酯^[46]、亚硝基胍^[47]);物理方法:紫外线^[48]、激光^[49]、γ射线^[50]等诱变),此外利用基因工程手段定向改造微藻代谢途径以提升微藻含油量方面的研究也逐步开始^[51]。

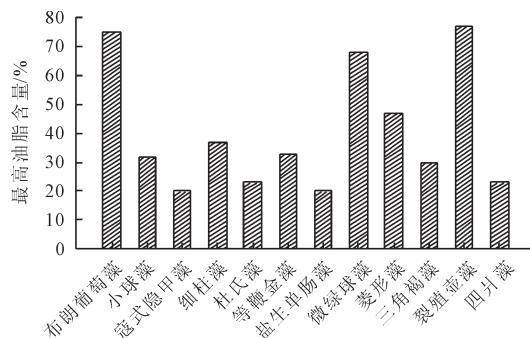


图2 部分产油微藻的最高油脂含量
Fig.2 The highest oil content of some microalgae

2.2.2 微藻规模化生产

微藻规模化生产以确保微藻生物质的持续稳定供应是微藻柴油生产的关键一步。早在 20 世纪 70 年代,美国能源部可再生能源国家实验室就开始了微藻生物柴油的研究计划,并率先开展了中试放大试验,微藻油脂含量高达 40%~60%,大大带动了微藻能源的发展。

现阶段应用较多的 2 种可行的大规模培养微藻的技术是:开放式(跑道池)和封闭式(管道式)光生物反应器。跑道池培养是目前世界上应用最广泛的微藻生产方式,主要由环形跑道水池、搅拌桨、营养盐补给管口、CO₂ 补给口以及配套的遮阴、控温系统等组成。普遍运用于螺旋藻、盐藻、小球藻等生长快、生境相对特殊的微藻培养。管道式光生物反应器微藻培养是封闭式光生物反应器中应用较广泛的一种,由力泵系统、培养液混合与抽排气系统、控温系统等组成。适用于较少量的纯种微藻快速培养,例如,为大规模产油微藻的大池培养提供接种藻,或者是高附加值经济微藻的生产等。

开放式与封闭式光生物反应器 2 种微藻培养技术,有各自的优缺点(见表 3)。其中开放式培养因其基建运行费用低、结构简单,已经在商业生产中应用,主要是对螺旋藻和小球藻等少数微藻进行商业生产。但同时因为培养密度低、易污染、占地面积大、利用效率低等缺点,开放式培养的应用受到很大限制。

我国微藻养殖的历史较短,技术上与美国等先进国家存在一定差距,但近年来国内很多研究机构开始加大了对微藻生物柴油的重视程度和研发力度,取得

表 3 2 种微藻培养方式的优缺点比较
Table 3 The advantages and disadvantages of two microalgae cultivation methods

培养器类型	主要形式	培养对象	优点	缺点
开放式反应器	跑道式、水泥式、玻璃刚水槽等	适用于少数能够耐受极端环境的微藻(螺旋藻、盐藻、小球藻等)	1、基建、运行费用低； 2、容易清洗； 3、技术成熟，易于放大。	1、占地面积大，藻培养过程中易污染，受外界影响大； 2、水蒸发量大，CO ₂ 易溢出； 3、培养密度低，利用效率低； 4、培养液回收量大，回收成本高。
封闭式反应器	柱式、管道式、板式等	适合各种微藻	1、密闭培养，不易染菌，可用于纯种培养； 2、占地面积小，培养密度高，易于收获； 3、水分、CO ₂ 损失小，生产效率高； 4、可对运行参数进行控制。	1、基建、运行费用高； 2、表面容易形成生物膜，较难清洗； 3、在传质、传热及透光上需强化，技术先进但不成熟。

了较多研究成果。山东海洋工程研究院培育出了脂肪含量高达 68% 的富油微藻，并利用其生产生物柴油^[52]。2010 年新奥集团在内蒙古建成 5 000 t 微藻生物柴油示范工程。2011 年 2 月，我国微藻能源方向的首个“973 计划”(国家重点基础研究发展计划)项目“微藻能源规模化制备的科学基础”正式启动。在 5 年时间内，项目团队将开发出一个“微藻资源库”，有望提供适合在我国不同地方、不同气候条件下生长的藻株。该项目有望突破微藻制油的高成本瓶颈，让藻类替代农作物，成为生物柴油的重要来源^[53]。

2.3 水生植物型微生物燃料电池产电

植物微生物燃料电池 (plant microbial fuel cell, PMFC) 是将植物引入微生物燃料电池(MFC)系统，绿色植物通过光合作用合成有机物，同时根系向周围环境分泌不同种类的有机物，包括糖类、有机酸、高分子碳水化合物、酶及死亡的根细胞等，占大约 20%~40% 植物光合作用所产生的生物量。并且这些根系分泌物可被产电微生物利用，将有机物中的化学能转换为生物电，此过程中产生的二氧化碳又能被植物根系吸收，用于植物的光合作用，从而实现可持续再生电能的能源技术^[54]。

水生植物生物量大，根系发达，茎秆强韧，根系分泌物量大，将其与微生物燃料电池耦合已经成为当前 Plant-MFC 中研究热点之一。目前研究较多的水生植物-微生物燃料电池包括以低等水生植物如绿藻 (*Chlorophyta*)、蓝藻 (*Cyanobacteria*) 等浮游植物和大型水生能源植物水稻 (*Oryza sativa*)、大米草 (*Spartina anglica*)、凤眼莲 (*Eichhornia crassipes*)、芦苇 (*Phragmites australis*) 及甜茅属 (*Glyceria*) 等与 MFC 耦合的电池 (见表 4)。其中，Strik 课题组围绕植物型微生物燃料电池这项新能源技术已经做出大量研究，并取得较好的成果。2008 年，Strik 等^[55]首次在实验室以水甜茅 (*Glyceria maxima*) 构建大型水生植物-微生物燃料电池，并得到最大产电量为 67 mW/m²。在这之后，该课题组又继续在实验室研究了利用大米草^[56]、野古草

(*Arundinella anomala*) 和花叶芦荻 (*Arundo donax*) 等不同类型的大型植物为电池阳极构建的 MFC 的产电特性、植物生长以及微生物群落^[57]。2014 年，该课题组使用生物阴极替代常用的铁氰化物阴极，大大提高了阴极的氧化还原电位，平均产电量高达 240 mW/m²，相较铁氰化物阴极，产电量提高了 127 mW/m²^[58]。就产电量而言，该课题组在这几年内将产电量提高了近 3 倍，并认为 Plant-MFC 理论最优产电功率可以达到 3.2 W/m²。我们可以相信未来就 Plant-MFC 产电量而言，还有相当大的提高空间，Plant-MFC 可以成为一种可持续产生绿色电能的新能源技术。

植物型微生物燃料电池不仅在产电上具有巨大的应用前景，同时还可以用于处理污水，净化水质，这也促进了 Plant-MFC 在湖泊、海洋底泥及水体环境等水生植被修复工程中的应用推广。Venkata Mohan 等^[60]用漂浮植物凤眼莲与沉积型微生物燃料电池相耦合 (将非催化的电极埋在系统中) 构成 PMFC，并向装置中连续式输入生活污水及酿酒废水，结果显示，该产电装置对酿酒废水有较好的同步处理效果 (COD 去除率 86.67%，VFA 去除率 72.32%)，同时产电效果良好，最大产电量为 224.93 mA/m²。

此外，植物型微生物燃料电池有望实现水生植物资源的原位利用。在水生植物生长地填埋电极构建微生物燃料电池，植物进行光合作用同时根系释放分泌物供产电菌利用，源源不断地将太阳能转化为电能。在不影响水生植物生长的前提下，不仅提高了水生植物生物质资源利用率，一定程度上降低了能源化利用的成本。2007 年，Kaku 等^[60]直接在水稻试验田中引入了微生物燃料电池，随着水稻的生长，Plant-MFC 也不断的产电，产电量达到 6 mW/m² (以阳极投影面积为标准)，在不影响水稻产量的前提下，成功实现植物资源的原位利用。Strik 等^[55]也认为植物型微生物燃料电池 (Plant-MFC) 是一种原位开发植物生物质能的技术。但要保证该电池装置在自然环境下也能产生较高的电能^[67]。

表 4 部分水生植物型微生物燃料电池研究统计表
Table 4 The statistics of the research of part of aquatic plant-MFC

生活型	植物种类	研究年份	电子供体	电子受体(催化剂)	运行时间/d	最大电流密度/ mA·m ⁻²	最大功率密度/ mW·m ⁻²
沼生植物	水稻 ^[59-61]	2008-2010	根系分泌物、水稻土壤	O ₂ 或 K ₃ [Fe(CN) ₆]	120~134	52~163	6~14
	水甜茅 ^[55, 62-64]	2008-2013	根系分泌物	O ₂ 或 K ₃ [Fe(CN) ₆]	67~85	153	60~80
	大米草 ^[56, 65-67]	2010-2013	根系分泌物	O ₂ 或 K ₃ [Fe(CN) ₆]	33~365	469	79~222
	野古草 ^[65]	2010	根系分泌物	O ₂ 或 K ₃ [Fe(CN) ₆]	112	-	22
	芦苇 ^[68]	2013	人工废水	O ₂	180	37.1	43
浮叶植物	水葫芦 ^[69-70]	2011-2012	底泥有机物根系分泌物、污水	O ₂	45~210	224.93	380
	小球藻 ^[71-73]	2008-2009	藻代谢物	O ₂ 或 K ₃ [Fe(CN) ₆]	5~161	26~210	110
藻类植物	蓝藻 ^[74-75]	2009-2010	藻代谢物	O ₂ 或 K ₃ [Fe(CN) ₆]	>20	13~105	1.4~41
	绿藻 ^[76-77]	2009-2010	藻代谢物	O ₂	>7	86~96	14~84
	丝状藻 ^[78-79]	2009-2010	藻代谢物	O ₂	8~20	5~115	0.2~5.9
	集胞藻 ^[80]	2009	藻代谢物	O ₂	18	5	0.5

注 表中最大电流密度和最大功率密度都是相对于电极面积。

目前 Plant-MFC 研究仍处于实验室阶段, 离其广泛性应用还有许多工作要做。尤其在国 内, 植物型微生物燃料电池的研究较少。未来 Plant-MFC 将主要集中在如下方面展开 (1) 继续提高 Plant-MFC 的功率密度输出, 保证较高的成本效益, 如降低电池内阻, 减小电子转移过程中的屏蔽作用或阻力, 改进电池反应器的构型等。(2) 提高植物根系分泌物的量, 为阳极产电菌提供充足的基质, 解决 Plant-MFC 存在的基质限制问题。(3) 改进电池中植物生长状况, 确保植物在长期持续产电环境下不受损害, 尽管 Timmers 等的研究显示, 在长达 119 d 的持续产电过程中没有对大米草产生致命伤害^[56], 但目前还没有文献报道关于在长期产电的电压、电流环境中植物的生理指标的变化以及响应。实际上, 植物的生理响应, 比如光合作用、呼吸作用的改变反过来也会影响根际沉积物分泌。(4) 开展室外 Plant-MFC 的研究, 为其推广应用进一步提供理论支撑。

3 展望

水生植物能源化利用不仅解决了水生植物出路问题, 避免水生植物带来的二次污染及资源浪费等问题, 还可以获得数量可观的可再生生物质清洁能源。目前, 水生植物能源化利用技术都还停留在实验室研究阶段, 许多问题亟待解决。在水生植物厌氧发酵产气方面, 未来主要努力方向有 2 点 (1) 预处理工艺成本通常占总成本的 30% 以上, 如何降低预处理技术成本, 提高经济竞争力成为关键。(2) 从实验室到实际应用, 需要考虑放大过程中带来的具体问题, 做好工艺条件与过程的优化。在微藻生物柴油技术方面, 目前已进入中试阶段, 还没有进入商业化发展, 找到适合的产油微藻种质资源以及在提高大规模培养纯度和效率的前提下, 降低生产成本是目前微藻生物柴油发

展需要解决的重要课题。在水生植物微生物燃料电池应用方面, 许多研究还处于初级阶段, 还需要相关科研工作者进一步做好理论研究, 为实现推广应用打好扎实的基础。

[参考文献]

- [1] Demirbas A. Political, economic and environmental impacts of biofuels: a review[J]. Applied Energy, 2009(86): S108-S117.
- [2] Pimentel D, Marklein A, Toth M A, et al. Food versus biofuels: environmental and economic costs[J]. Human Ecology, 2009, 37(1): 1-12.
- [3] 刘建康. 高级水生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 吴振斌. 水生植物与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [5] 徐大勇, 徐祖信. 人工湿地植物生理生态及其去污机理研究[J]. 安徽农业科学, 2008(3): 1144-1146. Xu Dayong, Xu Zuxin. Research on the eco-physiology characteristic and the pollutant removal mechanism of artificial wetland macrophyte[J]. Journal of Anhui Agri Sci, 2008(3): 1144-1146.(in Chinese)
- [6] Asaeda T, Trung V K, Manatunge J. Modeling the effects of macrophyte growth and decomposition on the nutrient budget in shallow lakes[J]. Aquatic Botany, 2000, 68(3): 217-237.
- [7] 周秀琴. 有助于防癌的水产品[J]. 中国食品保健, 2006(1): 74-75. Zhou Xiuqin. Aquatic products of helping preventing cancer [J]. Chinese Health Food, 2006(1): 74-75.(in Chinese)
- [8] 梁宝东, 魏海香, 冯磊, 等. 菱角啤酒的研制[J]. 食品科技, 2013(8): 146-150. Liang Baodong, Wei Haixiang, Feng Lei, et al. Preparation of water chestnut beer[J]. Food Science and Technology, 2013(8): 146-150.(in Chinese)
- [9] 魏海香, 梁宝东, 李湘利, 等. 菱角-莲子酸奶的生产工艺研究[J]. 中国酿造, 2014(8): 172-176.

- Wei Haixiang ,Liang Baodong ,Li Xiangli ,et al. Production technology of yogurt of water chestnut and lotus seed [J]. Chinese Brewing ,2014(8) :172-176.(in Chinese)
- [10] 顾妹斌. 湖州市水生蔬菜高效种植模式调查[J]. 浙江农业科学 ,2015(3) 342-344.
- Gu Meibin. Investigation on high efficiency cultivation mode of aquatic vegetables in Huzhou[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis ,2015(3) 342-344.(in Chinese)
- [11] 艾其猛, 陈媛妹. 利用浮萍培育大规格草鱼种高产技术[J]. 农技服务 ,2007 24(10) :75.
- Ai Qimeng ,Chen Yuanshu. High yield cultivation of large-sized grass carp by duckweed[J]. Agricultural Service ,2007 ,24(10) :75.(in Chinese)
- [12] 贾旭龙. 西北地区浮萍培育草鱼种试验[J]. 渔业致富指南 ,2012(23) :67-69.
- Jia Xulong. The tests of duckweed cultivating grass carp in the northwest area[J]. Fishery Guide to be Rich ,2012(23) :67-69.(in Chinese)
- [13] 蒋伟军 颜幼平 李萍. 水葫芦资源化利用综述[J]. 水资源保护 ,2010 26(6) :79-83.
- Jiang Weijun ,Yan Youping ,Li Ping. Progress in resource utilization of *Eichharnia crasipes*[J]. Water Resource Protection ,2010 26(6) :79-83.(in Chinese)
- [14] Mukherjee R ,Nandi B. Improvement of *in vitro* digestibility through biological treatment of water hyacinth biomass by two *Pleurotus* species[J]. International Biodeterioration & Biodegradation ,2004 53(1) :7-12.
- [15] 杨柳燕 张奕 肖琳 等. 固体发酵提高水生植物发酵产物蛋白含量的研究[J]. 环境科学学报 ,2007 27(1) 35-39.
- Yang Liuyan ,Zhang Yi ,Xiao Lin ,et al. Improvement of crude protein content in aquatic macrophyte by solid state fermentation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae ,2007 27(1) :35-39.(in Chinese)
- [16] 黄东风 李清华 陈超. 水葫芦有机肥料的研制与应用效果[J]. 中国土壤与肥料 ,2007(5) :48-52.
- Huang Dongfeng ,Li Qinghua ,Chen Chao. Research on development of organic fertilizer made from common water hyacinth and effect of application [J]. Solid and Fertilizers Science of China ,2007(5) :48-52.(in Chinese)
- [17] Mekail M ,Mawly S ,Zanouny I. The application of water hyacinth as a supplemental source of K for wheat and barley grown on a sandy soil[J]. Assiut Journal of Agricultural Sciences ,1999 30(2) :73-82.
- [18] 余群 董红敏 张肇鲲. 国内外堆肥技术研究进展[J]. 安徽农业大学学报 ,2003 30(1) :109-112.
- Yu Qun , Dong Hongmin , Zhang Zhaokun. Research progress on compost technic[J]. Journal of Anhui Agricultural University ,2003 30(1) :109-112.(in Chinese)
- [19] 纪智慧. 人工湿地污水处理系统中植物体系的构建与展望[J]. 环境科学与管理 ,2008 33(11) 92-95.
- [20] Baliban R C ,Elia J A ,Floudas C A ,et al. Thermochemical conversion of duckweed biomass to gasoline , diesel and jet fuel process synthesis and global optimization[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research ,2013 52(33) :11436-11450.
- [21] Kumar P ,Barrett D M ,Delwiche M J ,et al. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research ,2009 48(8) 3713-3729.
- [22] Suhara H ,Kodama S ,Kamei I ,et al. Screening of selective lignin-degrading basidiomycetes and biological pretreatment for enzymatic hydrolysis of bamboo culms[J]. International Biodeterioration & Biodegradation ,2012(75) :176-180.
- [23] Hwang S S ,Lee S J ,Kim H K ,et al. Biodegradation and saccharification of wood chips of *Pinus strobus* and *Liriodendron tulipifera* by white rot fungi[J]. Journal of Microbiology and Biotechnology ,2008 18(11) :1819-1825.
- [24] Singhal V ,Rai J P N. Biogas production from water hyacinth and channel grass used for phytoremediation of industrial effluents[J]. Bioresource Technology ,2003 86(3) 221-225.
- [25] 张奕 杨柳燕 肖琳 等. 水生植物压滤液厌氧发酵条件试验[J]. 农村生态环境 ,2005 21(3) :54-57.
- Zhang Yi ,Yang Liuyan ,Xiao Lin ,et al. Anaerobic fermentation of hydrophyte press filtrate [J]. Rural Eco-environment ,2005 21(3) :54-57.(in Chinese)
- [26] Jun C ,Lin X ,Xi B ,et al. Biohydrogen Production from Solid Organic Wastes by Heat-Shock Digested Sludge[C]. // Proceedings of the 8th Asian Hydrogen Energy Conference ,2005.
- [27] 李瑞君 陈砾 严宗诚 等. 水葫芦厌氧发酵试验及其产气模型研究[J]. 中国农学通报 ,2010 26(24) :421-425.
- Li Ruijun ,Chen Li ,Yan Zongcheng ,et al. Study on anaerobic fermentation and methane production model of water hyacinth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin ,2010 26(24) :421-425.(in Chinese)
- [28] Triscari P ,Henderson S ,Reinhold D. Anaerobic Digestion of Dairy Manure Combined with Duckweed (*Lemnaceae*) [C].// Proceedings of the 2009 ASABE Annual International Meeting ,2009.
- [29] 戚峰. 生物质高效水解及发酵产氢的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学 ,2007.
- [30] 周俊虎 戚峰 程军 等. 凤眼莲发酵产氢特性的研究[J]. 中国环境科学 ,2007 27(1) :141-144.
- Zhou Junhu ,Qi Feng ,Cheng Jun ,et al. Studies on the hydrogen production from hyacinth fermentation[J]. China Environmental Science ,2007(1) :141-144.(in Chinese)
- [31] 程军 潘华引 戚峰 等. 污泥和水葫芦混合发酵产氢的影响因素分析[J]. 武汉理工大学学报 ,2006 28(2) 209-214.
- Cheng Jun ,Pan Huayin ,Qi Feng ,et al. Influence factors on bio-H₂ production from digested sludge and hyacinth by co-

- fermentation[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(2) :209-214.(in Chinese)
- [32] 郑洪立, 张齐, 马小琛, 等. 产生物柴油微藻培养研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2009, 29(3) :110-116.
Zheng Hongli, Zhang Qi, Ma Xiaochen, et al. Research progress on bio-diesel-producing microalgae cultivation[J]. China Biotechnology, 2009, 29(3) :110-116.(in Chinese)
- [33] 席玮芳, 高宏, 兰波, 等. 适于沙漠地下水培养的耐碳酸氢钠产油微藻[J]. 水生生物学报, 2015(2) :414-418.
Xi Weifang, Gao Hong, Lan Bo, et al. N_2HCO_3 -tolerant oil-producing microalgae suitable for cultivation with desert groundwater[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2015(2) :414-418.(in Chinese)
- [34] Pittman J K, Dean A P, Osundeko O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(1) :17-25.
- [35] 李华, 王伟波, 刘永定, 等. 微藻生物柴油发展与产油微藻资源利用[J]. 可再生资源, 2011, 29(4) :84-89.
Li Hua, Wang Weibo, Liu Yongding, et al. The development of microalgae biodiesel and the utilization of oleaginous microalgae[J]. Renewable Energy, 2011, 29(4) :84-89.(in Chinese)
- [36] Johnson M B, Wen Z. Development of an attached microalgal growth system for biofuel production[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 85(3) :525-534.
- [37] Kaparaju P, Serrano M, Thomsen A B, et al. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(9) :2562-2568.
- [38] 贺国强, 邓志平, 陶丽, 等. 高油脂产率微藻的筛选及发酵条件的优化[J]. 农业生物技术学报, 2010, 18(6) :1046-1053.
He Guoqiang, Deng Zhiping, Tao Li, et al. Screen and fermentation optimization of microalgae with high lipid productivity[J]. Journal of Agricultural Biotechnology, 2010, 18(6) :1046-1053.(in Chinese)
- [39] 许瑾, 张成武, 李爱芬, 等. 华南地区淡水产油微藻藻株的分离与筛选[J]. 可再生能源, 2011, 29(1) :66-71.
Xu Jin, Zhang Chengwu, Li Aifen, et al. Isolation and selection of freshwater microalgae for oil production in South China[J]. Renewable Energy, 2011, 29(1) :66-71.(in Chinese)
- [40] He Q, Yang H, Wu L, et al. Effect of light intensity on physiological changes, carbon allocation and neutral lipid accumulation in oleaginous microalgae[J]. Bioresource Technology, 2015(191) :219-228.
- [41] Tang D H, Han W, Li P L, et al. CO_2 biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmyus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO_2 levels[J]. Bioresource Technology, 2011(102) :3071-3076.
- [42] 李涛. 营养对雨生红球藻 *Haematococcus pluvialis* CG-11 生长的影响及培养基优化研究[D]. 广州:暨南大学, 2009.
- [43] Alva M S, Luna-Pabello V M, Cadena E, et al. Green microalga *Scenedesmus acutus* grown on municipal wastewater to couple nutrient removal with lipid accumulation for biodiesel production[J]. Bioresource Technology, 2013(146) :744-748.
- [44] Zhang C, Zhang Y, Zhuang B, et al. Strategic enhancement of algal biomass, nutrient uptake and lipid through statistical optimization of nutrient supplementation in coupling *Scenedesmus obliquus*-like microalgae cultivation and municipal wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2014(171) :71-79.
- [45] Ren H Y, Liu B F, Kong F, et al. Hydrogen and lipid production from starch wastewater by co-culture of anaerobic sludge and oleaginous microalgae with simultaneous COD, nitrogen and phosphorus removal[J]. Water Research, 2015(85) :404-412.
- [46] Thi T Y D, Jeffrey P O. Enhanced intracellular lipid in *Nannochloropsis* sp. via random mutagenesis and flow cytometric cell sorting[J]. Algal Research, 2012, 1(1) :17-21.
- [47] 沈国明, 牛健康, 陆开形, 等. 雨生红球藻诱变后生长速率和超微结构的变化[J]. 核农学报, 2015(4) :623-628.
- [48] Deng X D, Zhou Y J, Li Y J. Optimization of the culture conditions of a *Chlamydomonas* high oil content ultraviolet mutant CC124-M25 and polymorphism analysis by inter-simple sequence repeat (ISSR)[J]. African Journal of Microbiology Research, 2012, 6(15) :3604-3619.
- [49] Ma Y B, Wang Z Y, Zhu M. Increased lipid productivity and TAG content in *Nannochloropsis* by heavy-ion irradiation mutagenesis[J]. Bioresource Technology, 2013(136) :360-367.
- [50] 余隼, 田华, 陈涛, 等. 高产 DHA 寇氏隐甲藻突变株的筛选[J]. 食品科学, 2013, 34(17) :230-235.
She Jun, Tian Hua, Chen Tao, et al. Screening of high-yield DHA-producing *Cryptocodium cohnii* mutant[J]. Food Science, 2013, 34(17) :230-235.(in Chinese)
- [51] 冯国栋, 程丽华, 徐新华, 等. 微藻高油脂化基因工程研究策略[J]. 化学进展, 2012, 24(7) :1413-1426.
Feng Guodong, Cheng Lihua, Xu Xinhua, et al. Strategies in genetic engineering of microalgae for high-lipid production[J]. Progress in Chemistry, 2012, 24(7) :1413-1426.(in Chinese)
- [52] 商金杰. 山东探索海洋微藻制取生物柴油[N]. 中国海洋报, 2008-04-18(2).
- [53] 杨忠华, 李方芳, 曹亚飞, 等. 微藻减排 CO_2 制备生物柴油的研究进展[J]. 生物加工过程, 2012, 10(1) :70-76.
Yang Zhonghua, Li Fangfang, Cao Yafei, et al. Recent progress in producing biodiesel coupling with CO_2 mitigation by microalgal technology[J]. Journal of Bioprocess Engineer-

- ing, 2012, 10(1) :70–76.(in Chinese)
- [54] Timmers R A , Rothballer M , Strik D P B T B , et al. Microbial community structure elucidates performance of *Glyceria maxima* plant microbial fuel cell[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 94(2) :537–548.
- [55] Strik D P B T B , Hamelers H V M , Snel J F H , et al. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell[J]. International Journal of Energy Research, 2008, 32(9) :870–876.
- [56] Timmers R A , Strik D P B T B , Hamelers H V M , et al. Long-term performance of a plant microbial fuel cell with *Spartina anglica*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 86(3) :973–981.
- [57] 何洁, 张晟, 滕加泉, 等. 水生植物在微生物燃料电池中的应用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2) :100–103.
- [58] Wetser K , Sudirjo E , Buisman C J N , et al. Electricity generation by a plant microbial fuel cell with an integrated oxygen reducing biocathode[J]. Applied Energy, 2015(137) :151–157.
- [59] Schampelaire L D , Bossche L V D , Dang H S , et al. Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants[J]. Environmental Science and Technology, 2008, 42(8) :3053–3058.
- [60] 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.
- [61] Takanezawa K , Nishio K , Kato S , et al. Factors affecting electric output from rice-paddy microbial fuel cells[J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2010, 74(6) :1271–1273.
- [62] Timmers R A , Strik D P B T B , Hamelers H V M , et al. Increase of power output by change of ion transport direction in a plant microbial fuel cell[J]. International Journal of Energy Research, 2013, 37(9) :1103–1111.
- [63] Timmers R A , Strik D P B T B , Hamelers H V M , et al. Electricity generation by a novel design tubular plant microbial fuel cell[J]. Biomass & Bioenergy, 2013(51) :60–67.
- [64] Timmers R A , Strik D P B T B , Hamelers H V M , et al. Characterization of the internal resistance of a plant microbial fuel cell[J]. Electrochimica Acta, 2012(72) :165–171.
- [65] Helder M , Strik D P , Hamelers H V , et al. Concurrent bioelectricity and biomass production in three plant-microbial fuel cells using *Spartina anglica* , *Arundinella anomala* and *Arundo donax*[J]. Bioresour Technol, 2010, 101(10) :3541–3547.
- [66] Helder M , Strik D , Hamelers H , et al. New plant-growth medium for increased power output of the plant-microbial fuel cell[J]. Bioresource Technology, 2012(104) :417–423.
- [67] Helder M , Strik D P B T B , Timmers R A , et al. Resilience of roof-top plant-microbial fuel cells during Dutch winter[J]. Biomass & Bioenergy, 2013(51) :1–7.
- [68] Villasenor 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.
- [69] Venkata Mohan S , Mohanakrishna G , Chiranjeev P. Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(14) :7036–7042.
- [70] Hubenova Y , Mitov M. Conversion of solar energy into electricity by using duckweed in direct photosynthetic plant fuel cell[J]. Bioelectrochemistry, 2012(87) :185–191.
- [71] Strik D P B T B , Terlouw H , Hamelers H V M , et al. Renewable sustainable biocatalyzed electricity production in a photosynthetic algal microbial fuel cell (PAMFC)[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 81(4) :659–668.
- [72] De Schampelaire L , Verstraete W. Revival of the biological sunlight-to-biogas energy conversion system[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 103(2) :296–304.
- [73] Velasquez O S B , Curtis T P , Logen B E. Energy from algae using microbial fuel cells[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 103(6) :1068–1076.
- [74] He Z , Kan J , Mansfeld F , et al. Self-sustained phototrophic microbial fuel cells based on the synergistic cooperation between photosynthetic microorganisms and heterotrophic bacteria[J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43(5) :1648–1654.
- [75] Strik D P B T B , Hamelers H V M , Buisman C J N. Solar energy powered microbial fuel cell with a reversible bioelectrode[J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(1) :532–537.
- [76] Malik S , Drott E , Grisdela P , et al. A self-assembling self-repairing microbial photoelectrochemical solar cell[J]. Energy & Environmental Science, 2009, 2(3) :292–298.
- [77] Nishio K , Hashimoto K , Watanabe K. Light/electricity conversion by a self-organized photosynthetic biofilm in a single-chamber reactor[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 86(3) :957–964.
- [78] Zou Y , Pisciotta J , Billmyre R B , et al. Photosynthetic microbial fuel cells with positive light response[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2009, 104(5) :939–946.
- [79] Zou Y , Pisciotta J , Baskakov I V. Nanostructured polypyrrole-coated anode for sun-powered microbial fuel cells[J]. Bioelectrochemistry, 2010, 79(1) :50–56.