

# 微生物与能源的可持续开发

张薇<sup>1\*</sup> 李鱼<sup>1</sup> 黄国和<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学能源与环境研究中心 北京 102206)

(2. 里贾纳大学工程院 Saskatoon S4S 0A2 加拿大)

**摘要:** 微生物技术在新能源开发领域中有广阔的应用潜力,对能源的可持续发展具有重要的理论和现实意义。简要叙述了生物柴油、燃料酒精、生物制沼气、生物制氢和微生物电池等新能源的原理、优缺点和开发现状,概述了微生物资源在能源领域的应用,指出发掘新的微生物资源或构建工程菌株、明确微生物作用机理、开发新工艺将会是今后研究的重点。

**关键词:** 微生物资源, 能源, 可持续发展

## Microbes and Sustainable Development of Energy Sources

ZHANG Wei<sup>1\*</sup> LI Yu<sup>1</sup> HUANG Guo-He<sup>2</sup>

(1. *Energy and Environmental Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206*)

(2. *Faculty of Engineering, University of Regina, Regina, SK S4S 0A2, Canada*)

**Abstract:** Microbial technology is a potential new technology in new energy development process and it has important theoretical and practical significance on the sustainable development of energy sources. The principles, present situations, advantages and disadvantages of new energy sources, such as biodiesel, fuel ethanol, biological methane production, biological hydrogen production and microbial fuel cell were reviewed. The applications of microbial sources in energy field were summarized. Finally, some research emphases such as discover new microbe sources, construct gene engineering microbes, definitize effect mechanism and exploit new technologies were given.

**Keywords:** Microbial sources, Energy sources, Sustainable development

能源是人类社会进步与经济发展的重要物质基础。概括说,所有可能为人类利用以获取有用能量的各种来源都称为能源,如太阳能、风能、水能、化石燃料及核能、潮汐能等。由于它是一个国家或地区经济发展的命脉,人们给予了不同角度的高度重视和研究,并进行了多种形式的划分,如一次能源、二次能源、常规能源、新能源、可再生能源、非再生能源等。随着石油、天然气等的日渐枯竭,太

阳能、风能、海洋能、地热能和生物能等可再生能源正日益受到了政府和科学家们的极大重视。2006年1月1日,《可再生能源法》正式实施,国家“863计划”中将开发太阳能和生物能作为能源领域主题之一,氢能、燃料电池将作为后续能源主题的主攻方向,预计从2010年开始,这些能源有望逐步替代石油、煤炭、天然气等矿物能源。作为可再生能源开发的主角,微生物在能源可持续开发中发挥了重

要作用。本文将对其在可再生能源领域中的应用及开发前景做一综述。

## 1 生物柴油

生物柴油是一种清洁的可再生能源,它是由大豆、油棕、甘蔗渣、工程微藻以及动物油脂、废食用油等与短链醇(甲醇或乙醇)经过酯交换反应得到的各种脂肪酸单酯的混合物,可以作为燃料替代石油,最大优势是可以与传统柴油以任何比例混合,无需改造发动机,直接用于机动车。有证据表明,使用生物柴油对人类健康和全球危害都相对较轻,排放物中多环芳香化合物(PAHs)和亚硝酸多环芳香化合物(nPAHs)含量水平低,二氧化碳和一氧化碳排放量仅为石油的 10%,具有较好的生物降解性能。美国、欧洲一些国家和地区已把生物柴油作为代用燃料,建立了商品化生产基地,我国于 2000 年启动了燃料乙醇试点工作,目前已经建成了三大乙醇燃料生产基地,总产能超过了 100 万吨/年,年产量约 5 万吨。

生物柴油主要用化学法和生物酶法生产,前者工艺复杂、能耗高、醇用量大,生成过程还有废碱液排放;后者虽条件温和、醇用量小、但一氧化氮排放量较高,所含的微量甲醇与甘油还会逐渐降解橡胶零件。开发微生物油脂(Microbial oils)生产生物柴油,在降低污染、增加产量方面较前二者有更大的优越性。微生物油脂又称单细胞油脂(Single cell oil, SCO),是酵母、霉菌、细菌和藻类等微生物在一定的条件下,以碳水化合物、碳氢化合物和普通油脂作为碳源,在菌体内产生的大量油脂。将之规模化生产,便可获得生物柴油。开发微生物油脂,不仅微生物发酵周期短,受场地、季节、气候变化影响不大,还可以利用木质纤维素、工业废水、废气等资源丰富的原料进行生产,既能够解决人类资源短缺的问题,又可以保护环境,一举多得,具有巨大发展空间。美国国家可再生能源实验室(NREL)认为,微生物油脂发酵可能是生物柴油产业和生物经济的重要研究方向<sup>[1]</sup>。

从 20 世纪 40 年代斯达氏油质酵母(*Lipomyces starkeyi*)、粘红酵母(*Rhodotorula glutinis*)、曲霉属(*Aspergillus*)等油脂微生物发现至今,人们又陆续开发了多种油脂高产微生物,如希腊学者用高糖培养

基培养深黄色被孢霉(*Mortierella isabellina*)发酵生产油脂,产量达 18.1 g/L<sup>[2]</sup>。李永红等<sup>[3]</sup>筛选到一株丝孢酵母(*Trichosporon cutaneum*),利用葡萄糖发酵时油脂含量可达菌体干重的 65%。此外,用在保健食品、功能饮料、化妆品等领域的功能性油脂的特种微生物菌种开发工作也正在如火如荼地进行中<sup>[4]</sup>。

较之其他技术,微生物油脂生产工艺简单、有利于进行工业化规模生产。同时,廉价的原材料是微生物油脂生产生物柴油的最大优势。有文献报道,微生物利用碳水化合物生产油脂,最高转化率为 25%<sup>[5]</sup>,以玉米秸秆中纤维素和半纤维素含量 70% 计算,每 6 吨作物秸秆就可产 1 吨菌油。我国农林废弃物资源丰富,仅农作物秸秆每年产量近 10 亿吨,如能充分利用并规模化生产,将大大提高生物柴油的产量。此外,通过对野生菌进行诱变、细胞融合和定向进化等手段,加快对产油微生物菌种改良、代谢调控和发酵工程的研究,可以获得具有更高产油能力突变株,提高产油效率。在当前化石资源日益减少和世界各国能源供应形势日趋严峻形势下,实现社会经济可持续发展的目标。

## 2 燃料酒精

在微生物作用下,将糖类、谷物淀粉和纤维素等物质通过“乙醇发酵”生产出燃料级乙醇,从而替代石油,这也是微生物在能源领域的又一应用。由于具有燃烧完全、无污染、成本低等优点,很多国家都开发了这一工艺。巴西以甘蔗作发酵原料生产的燃料酒精直接用于轿车发动机,目前已形成 1000 多万吨产能,替代了 1/3 车用燃料。美国计划 2006~2012 年间,燃料乙醇年用量要从 1200 万吨增加到 2300 万吨。英国、德国、荷兰等农业资源丰富的国家,也在进行燃料酒精的生产<sup>[6]</sup>。我国是继巴西、美国之后全球第三大燃料乙醇生产和消费国,主要以粮食作物中的玉米为原料进行生产。随着该工业的快速发展,原料问题和国家粮食安全问题日益突出,因此,十一五期间我国政府提出生物乙醇要走非粮路线,即“不与人争粮,不与粮争地”。作为非粮资源中的纤维素、半纤维素是地球上贮量最丰富的有机物,美国、日本、加拿大、瑞典等国在新能源的研发中都给予了足够的重视<sup>[7]</sup>。我国纤维

素资源充足, 年植物秸秆约  $6 \times 10^9$  吨, 如果其中的 10% 经微生物发酵转化, 就可生产出乙醇燃料近  $8 \times 10^6$  吨, 其残渣还可用作饲料和肥料<sup>[8]</sup>, 因此发展纤维素乙醇前景广阔, 目前山东大学、河北农业大学、江南大学等正在开展相关的研究工作。

从 1980 年 Wang<sup>[9]</sup> 等首次提出木糖可以被一些微生物发酵生成酒精至今, 科学家们已发现 100 多种微生物可以代谢木糖生产酒精, 包括细菌、丝状真菌和酵母<sup>[10]</sup>, 如曲霉(*Aspergillus*)、酵母菌(*Saccharomyces*)、裂殖酵母菌(*Schizosaccharomyces*)、假丝酵母(*Candida*)、球拟酵母(*Torulopsis*)、酒香酵母(*Brettanomyces*)、汉逊氏酵母(*Hansenula*)、克鲁弗氏酵母(*Kluyveromyces*)、毕赤氏酵母(*Pichia*)、隐球酵母(*Cryptococcus*)、德巴利氏酵母(*Debaryomyces*)、卵孢酵母(*Oosporidium*)等。实际应用中也暴露了一些问题, 有的对乙醇耐受力低、有的需要在有氧条件下发酵, 还有的需将木糖转化为其他可利用的物质后才能进行乙醇发酵, 因此生产率普遍较低。随着生物技术的发展, 出现了大量可高效转化的基因工程菌。1993 年, Ho 等<sup>[11]</sup> 将木糖还原酶、木糖醇脱氢酶和木酮糖激酶的基因转入酿酒酵母, 首次成功构建出利用葡萄糖和木糖生产乙醇的工程酵母。Sonderegger 等<sup>[12]</sup> 将多个异源基因引入代谢木糖的酵母工程菌, 重组酵母不仅降低了副产物木糖醇的量, 所得乙醇产量比亲株提高 25%。

除纤维素外, 微生物还可分解有机垃圾获得燃料酒精, 不仅能为工农业生产提供能源, 而且比焚烧、填埋更有利于环境卫生和城市生态的改善<sup>[13]</sup>。因此, 利用微生物的作用将地球上贮量巨大的生物资源转化为燃料乙醇前景广阔, 但水解酶成本过高是限制其产量提高的一个重要因素。此外, 现有菌种大多乙醇耐受力差, 副产物多, 对发酵条件要求苛刻, 今后研究应致力于继续筛选优良性状的菌株, 或利用基因工程手段选育高产纤维素酶、木质素酶菌种, 以及能克服上述问题的菌种, 对其酶学特性、功能基因进行研究, 优化发酵条件, 辅以工艺措施的改进, 提高燃料乙醇生产效率并降低成本。

### 3 微生物制沼气

沼气又名甲烷, 世界各国普遍用于燃烧和照明, 如英国甲烷产量可以替代全国 25% 的煤气消耗量<sup>[14]</sup>,

许多国家都将其列入国家能源战略。我国是该领域开展得最好的国家, 如北方的四位一体模式<sup>[15]</sup>、南方桑基鱼塘农舍模式<sup>[16]</sup>、猪—沼—果<sup>[17]</sup>等多种利用沼气的农业生产模式, 赢得了很高的国际赞誉。联合国环境规划署曾先后授予我国北京市留民营村, 浙江省萧山市山一村, 辽宁省大洼县西安生态养殖场等单位环境保护全球“500 佳”称号。在农村普及沼气技术, 发展生态农业, 可以解决“三农”问题, 发展经济; 在城市利用沼气发酵处理有机废水、固体有机废物, 处理后的残渣还可用作无臭有机肥料, 达到生物资源的最大利用, 从而实现经济、社会、生态效益的统一。

沼气发酵是一个复杂的微生物学过程, 需要发酵性细菌、产氢产乙酸菌、耗氢产乙酸菌、食氢产甲烷菌、食乙酸产甲烷菌五大类微生物共同作用。由于参与的微生物种类众多, 目前的研究多集中于功效检测和工艺优化方面, 较少涉及单个菌株作用机理的研究, 因此一直处于“黑箱”操作阶段。今后如能侧重于单个菌种发酵或降解机理的研究, 明确其在发酵体系中的作用以及与发酵体系中其他菌株的互作关系, 这将使其中起重要作用的功能菌株明朗化, 并有望获得一批可以降解其他废弃物生产沼气的新微生物资源, 从而扩大原料利用范围。

### 4 微生物制氢

微生物制氢是一项利用微生物代谢过程生产氢气的生物工程技术, 所用原料有阳光、水、或是有机废水、秸秆等, 克服了工业制氢能耗大、污染重等缺点, 同时由于氢气的可再生、零排放优点, 是一种真正的清洁能源, 受到世界各国的高度重视<sup>[18]</sup>。近几年美国每年对生物制氢的研究经费约为几百万美元, 日本制定了为期 28 年的氢行动计划, 以期建立一个世界范围的能源网络, 实现对氢的有效生产。我国厦门大学承担的“十五”863 计划中的高效微生物制氢系统与工艺课题, 取得初步成效, 建立了针对农作物秸秆、淀粉类物质和有机废水的高效分解系统。哈尔滨工业大学任南琪教授承担的国家 863 项目“有机废水发酵法生物制氢技术生产性示范工程”是世界首例发酵法生物制氢生产线, 产氢速率可达  $10.4 \text{ m}^3 \text{ H}_2/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ <sup>[19]</sup>。

根据微生物种类、产氢底物及产氢机理, 生物

制氢可以分为蓝细菌和绿藻制氢、光合细菌制氢和细菌发酵制氢等 3 种类型。蓝细菌或绿藻可以在有光照、厌氧的条件下分解水产生氢气和氧气。光合细菌制氢又称光解有机物产氢、光发酵产氢,指的是光合细菌在光照、厌氧条件下分解有机物生产氢气的过程,如红螺菌(*Rhodospirillum*)、红细菌(*Rhodobacter*)、红假单胞菌(*Rhodopseudomonas*)、英硫菌(*Thiocapsa*)等,是目前较有发展前景的生物产氢方法,不仅光转化效率高(理论转化效率 100%),产氢过程不生成氧,还可利用较宽频谱的太阳光,并处理废水废弃物,净化环境。90 年代初中科院微生物研究所、浙江农业大学等单位曾进行“产氢紫色非硫光合细菌的分离与筛选研究”及“固定化光合细菌处理废水过程产氢研究”,取得了一定成果<sup>[20]</sup>。发酵制氢法种类较多,有异养细菌发酵、厌氧梭菌发酵、混合微生物发酵、活性污泥发酵制氢等,主要是梭菌(*Clostridium*)、肠杆菌(*Enterobacter*)、埃希氏杆菌(*Escherichia*)、芽孢杆菌(*Bacillus*)、产甲烷菌(*Methanobacter*)和柠檬杆菌(*Citrobacter*)等细菌通过丙酮酸脱羧和辅酶 氧化还原平衡调节两种途径,或是几种微生物的协同作用制氢。Kadar 等<sup>[21]</sup>曾采用造纸厂的废水发酵产氢。杨素萍等<sup>[22]</sup>利用琼脂固定化 *Clostridium butyricum* 菌株以糖蜜酒精废液为原料进行产氢。丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)、产气肠杆菌(*Enterobacter aerogenes*)和麦芽糖假丝酵母(*Candida maltose*)在 36 混合发酵废弃物 48 h,产氢速率可达 15.42 mL/h·L,明显高于单个菌种<sup>[23]</sup>。此外利用豆渣<sup>[24]</sup>、堆肥<sup>[25]</sup>、活性污泥<sup>[26]</sup>产氢的报道相继问世。

虽然生物制氢是世界各国发展氢能的一个重要项目,具有战略性意义,但现有研究大多为实验室内进行的小型试验,采用批式培养的方法居多,利用连续流培养产氢的报道较少。试验数据亦为短期的试验结果,即便是瞬时产氢率较高,长期连续运行能否获得较高产氢量尚待探讨。此外微生物制氢的反应机理研究不透彻,包括各种遗传机制、能量代谢与物质代谢过程的研究,没有建立起完善的理论体系,工艺的研究多集中于细菌和酶固定化技术上,对实际生产中出现的氢气分离储藏、发酵条件优化、原材料预处理等问题都没有很好的解决方案,距离工业化生产差距较大,也制约了该技术的发

展。因此,下步工作我们一方面要努力改进生产工艺,另一方面要逐渐明确微生物产氢机理,保证其在产氢过程中的高效性、稳定性和对不同生态条件的适应性,相信不久的将来微生物制氢必将成为世界能源的一个重要支柱。

## 5 微生物发电

英国植物学家 Potter 早在 1910 年就发现有几种细菌的培养液能够产生电流,并成功制造出世界上第一个细菌电池,由此开创了生物燃料电池的研究。生物燃料电池(biologic fuel cell, BFC)是一类特殊的电池,它以自然界的微生物或酶为催化剂,直接将燃料中的化学能转化为电能,不仅无污染、效率高、反应条件温和,而且燃料来源广泛,具有较大的发展空间。其工作原理与普通电池类似,也有阴极池和阳极池的基本结构。在阳极池,溶液或污泥中的营养物在催化剂作用下生成质子、电子和代谢产物,通过载体运送到电极表面,再经过外电路转移到阴极;在阴极,处于氧化态的物质与阳极传递过来的质子和电子结合发生还原反应生成水,就这样通过电子的不断转移来产生电能。根据采用催化剂的不同,生物燃料电池可以分为以微生物整体做催化剂的微生物燃料电池(microbial full cell, MFC)和直接利用酶做催化剂的酶生物燃料电池(enzymatic biofuel cell, EBFC)。由于很多酶都是从微生物体内提取而来,因此无论是微生物燃料电池还是酶燃料电池,都离不开微生物的参与。

自从美国宾夕法尼亚州立大学环境工程系 Bruce Logon 教授 2004 年在“Mechanical Engineering”上发表了有关将废水中高浓度有机污染物利用微生物燃料电池厌氧氧化转变成电力的论文,成为当时环境能源领域的热点课题之一,此后,越来越多的科研人员对生物电池产生了兴趣。Habermann 和 Pommer<sup>[27]</sup>研究以含酸废水为原料的燃料电池, Kim 等<sup>[28]</sup>利用微生物电池培养并富集了具有电化学生活性的微生物,电池运行三年多,并从中分离出梭状芽孢杆菌。最近美国科学家找到一种嗜盐杆菌,其所含的一种紫色素可直接将太阳能转化为电能。还有人设计出一种综合细菌电池,即由电池里的单细胞藻类首先利用太阳能,将二氧化碳和水转化为糖,再让细菌自给自足地利用这些糖来发电<sup>[29]</sup>。

Pizzariello等<sup>[30]</sup>设计的两极室葡萄糖氧化酶/辣根过氧化物酶燃料电池,在不断补充燃料的情况下可以连续工作 30 d以上,具有一定的实用价值。我国在 90 年代初开始了微生物发电的研究。

目前已发现可用作生物电池的微生物有脱硫弧菌(*Desulfovibrio desulfuricans*)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)<sup>[31]</sup>、腐败希瓦菌(*Shewanella purefaciens*)<sup>[32]</sup>、地杆菌(*Geobacteraceae sulfurreducens*)<sup>[33]</sup>、丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)<sup>[34]</sup>、嗜甜微生物(*Rhodospirillum rubrum*)<sup>[35]</sup>、粪产碱菌(*Alcaligenes faecalis*)、鸢鸡肠球菌(*Enterococcus gallinarum*)、铜绿假单胞菌(*Pseudomonas aeruginosa*)<sup>[36]</sup>等,它们在新能源开发<sup>[37]</sup>、微生物传感器<sup>[38]</sup>和水处理工艺<sup>[39]</sup>方面也有良好的应用前景。酶生物燃料电池中常用的酶有葡萄糖氧化酶(GOx)<sup>[40]</sup>、漆酶(Lac)<sup>[41]</sup>、胆红素氧化酶(BOD)<sup>[42]</sup>等,由于其体积小,生物相容性好,已用于为植入人体的器官供电,是目前生物燃料电池研究的重点。

如果生物体内的微生物能够成功地应用于发电,那无疑将给能源匮乏的人类社会带来巨大效益,目前发达国家正在加紧研制工作,如美国的马萨诸塞州大学、法国里昂生态中心、德国 Geifswald 大学等,我国研究较少。从现有结果看,生物燃料电池距离实际应用还有很多难题。以牛胃液中微生物发电为例,发电的微生物只有在牛胃液这样一个复杂的环境中才能生存并发电,如何在工业生产中实现这样的环境,建造庞大的器皿、设定恒定的条件,是一个需要很大研究和投入的工作。此外,微生物发电所产生的电量都微乎其微,何时能投入商业运营遥遥无期。即便如此,作为一种能源开发的新途径,我们仍然可以在以下几方面开展研究,加强微生物驯化、底物性质及优势微生物的鉴定等;采用与制氢微生物类似思路,筛选混合菌系接种电池,有可能增加电流输出,选择合适的催化剂-介体组合,改善工艺条件,拓宽生物燃料电池的应用范围,均有望提高放电效率。相信在生物学家、电化学家和工程学家的共同努力下,微生物发电技术必将在未来能源和环境领域发挥令人瞩目的作用。

## 6 展望

越来越多的证据表明,经济的发展将不可避免

的带来能源紧张和环境恶化。大力发展无污染、清洁可再生的新能源,同时提高现有能源的开采率和利用率,是未来能源建设的趋势,是应对日益严重的能源和环境问题的必由之路。

目前世界生物技术的核心——“生物炼制”技术正受到人们的普遍关注。这种以生物可再生资源为原料基础生产能源与化工产品的新型工业模式,可以进行生物基产品(Biobased products)、生物燃料(Biofuels)和生物能源(Bioenergy)的生产,如乙烯、氢能、沼气、乙醇汽油、生物柴油、尼龙工程塑料等,从而促进可再生资源替代不可再生资源,逐步取代传统石油炼制。微生物技术正是生物炼制工程中的一条重要途径,我国科技部已正式立项 973 项目——“生物炼制细胞工厂的科学基础(2007CB707800)”,由中国科学院微生物研究所马延和研究员担任首席科学家。该项目如能顺利完成,将大大推动我国可再生能源领域的研究。

作为可再生能源中的一个重要分支,生物能一直与太阳能、风能、水能以及潮汐能共同推动世界能源发展。而对于后几者,目前都还存在技术不成熟或成本过高等问题,普及推广不易。微生物作为生物能的主要参与者,其最大特点就是清洁、高效、可再生。与石油、煤炭等传统能源相比,有利于环境保护;与太阳能、核能、风能、水能、海洋能等新能源相比,其来源广、成本低、受地理因素影响小。虽然目前也存在一些技术问题,但开发潜力是巨大的,利用前景是广阔的。不仅如此,微生物在现有的非可再生能源利用上也功不可没,提高了石油开采率和褐煤利用率,降低了二者的污染效应,当之无愧地成为实现能源可持续发展目标的关键因素。

在近代历史上,中国曾几次与世界科技革命的发展机遇失之交臂。今天,以微生物为基础的生命科学和生物技术作为新兴的尖端科技领域,无论对发达国家还是发展中国家来说都是一次难得的契机。笔者目前也正从事环境污染治理及环境与能源微生物的研究,尤其关注功能基因克隆与表达,意图在微生物能源效应机理方面有所突破,获得一些有应用价值的新基因和酶制剂,通过基因工程手段培育新菌种,同时对酶学特性的研究也将为今后工业应用打下理论基础。相信随着人们认知程度的不

断深入, 微生物技术必将对全世界能源战略产生深远影响。

## 参 考 文 献

- [1] Tyson KS, Bozell J, Wallace R, *et al.* Biomass oil analysis: Research needs and recommendations. NREL/TP-510-34796, 2004.
- [2] Papanikolaou S, Komaitis M, Aggelis G. Single cell oil (SCO) production by *Mortierella isabellina* grown on high-sugar content media. *Bioresour Technol*, 2004, **95**: 287–291.
- [3] 李永红, 刘 波, 孙 艳, 等. 广谱碳源产油酵母菌的筛选. 中国生物工程杂志, 2005, **25**(12): 39–44.
- [4] 蒲海燕, 贺稚非, 刘春芬, 等. 微生物功能性油脂研究概况. 粮食与油脂, 2003, **11**: 12–14.
- [5] Ratledge C. Biochemistry, stoichiometry, substrate and economics. In: Moreton R S. Single Cell Oil. London: Longman, 1988, p. 33–70.
- [6] 秦凤华. 燃料乙醇蒸蒸日上. 中国投资, 2007, **2**: 38–41.
- [7] 孙智谋, 蒋 磊, 张俊波, 等. 世界各国木质纤维原料生物转化燃料乙醇的工业化进程. 酿酒科技, 2007, **1**: 91–94.
- [8] 程东升. 资源微生物学. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1995.
- [9] Wang PY, Shopsis C, Schneider H. Fermentation of a pentose by yeasts. *Biochem Biophys*, 1980, **94**: 248–254.
- [10] Jeffeles TW, Kurtzman CP. Strain selection, taxonomy, and genetics of xylose-fermentation yeast. *Enzyme Microbiol Technol*, 1994, **16**: 922–931.
- [11] Ho NW, Chen Z, Brainard AP, *et al.* Successful design and development of genetically engineered *Saccharomyces* yeasts for effective cofermentation of glucose and xylose from cellulosic biomass to fuel ethanol. *Adv Biochem Eng Biotechnol*, 1999, **65**: 163–192.
- [12] Sonderegger M, Schümperli M, Sauer U. Metabolic engineering of a phosphoketolase pathway for pentose catabolism in *Saccharomyces cerevisiae*. *Appl Environ Microbiol*, 2004, **70**(5): 2892–2897.
- [13] 胡尚勤. 利用有机垃圾发酵生产酒精新能源的研究. 研究与试验, 2005, **1**: 20–22.
- [14] 孙孝政, 夏吉庆, 田晓峰. 厌氧发酵技术工厂化生产沼气的现状及展望. 东北农业大学学报, 2005, **36**(1): 109–110.
- [15] 贺立新. “四位一体”沼气综合利用技术初探. 安徽农学通报, 2006, **12**(6): 220–221.
- [16] 郑光中. 生态城市·生态农业·生态旅游——以深圳西海岸生态农业旅游区规划为例. 建筑学报, 2005, **5**: 4–7.
- [17] 胡振鹏, 胡松涛. “猪—沼—果”生态农业模式. 自然资源学报, 2006, **21**(4): 638–644.
- [18] Cook J, Beyea J. Bioenergy in the United States: progress and possibilities. *Biomass and Bioenergy*, 2000, **18**: 441–455.
- [19] 任南琪, 王宝贞. 有机废水处理生物制氢技术. 中国环境科学, 1994, **14**(6): 411–415.
- [20] 吕鹏梅, 常 杰, 熊祖鸿, 等. 生物质废弃物制氢技术. 环境保护, 2002, **8**: 43–45.
- [21] K á d á r Z, de Virje T, Budde MAW, *et al.* Hydrogen production from paper sludge hydrolysate. *Appl Biochem Biotechnol*, 2003, **107**(1–3): 557–566.
- [22] 杨素萍, 赵春贵, 曲音波, 等. 生物产氢研究与进展. 中国生物工程杂志, 2002, **22**(4): 44–48.
- [23] 刘 波, 王海岩, 赵静玫. 几株产氢微生物的产氢能力及协同作用食品与发酵工业, 2003, **29**(8): 23–26.
- [24] Noike T, Mizuno O. Hydrogen fermentation of organic municipal wastes. *Water Science and Technology*, 2000, **42**(12): 155–162.
- [25] Fan YT, Zhang YH, Zhang SF. Efficient conversion of wheat straw wastes into biohydrogen gas by cow dung compost. *Bioresour Technol*, 2006, **97**(3): 500–505.
- [26] 朱建良, 何世颖. 活性污泥降解有机物制氢技术. 化工纵横, 2003, **17**(4): 5–8.
- [27] Habermann W, Pommer EH. Biological fuel cells with sulphide storage capacity. *Appl Microbiol Biotechnol*, 1991, **35**: 128–133.
- [28] Kim HJ, Park HS, Hyun MS, *et al.* Enrichment of microbial community generating electricity using a fuel-cell-type electrochemical cell. *Appl Environ Microbiol*, 2003, **63**: 672–681.
- [29] 吴祖林, 刘 静. 生物质燃料电池的研究进展. 电源技术, 2005, **29**(5): 333–340.
- [30] Pizzariello A, Stred'ansky M, Miertus S. A glucose/hydrogen peroxide biofuel cell that uses oxidase and peroxidase as catalysts by composite bulk-modified bioelectrodes based on a solid binding matrix. *Bioelectrochemistry*, 2002, **56**: 99–105.
- [31] Ieropoulos IA, Greenman J, Melhuish C, *et al.* Comparative study of three types of microbial fuel cell. *Enzyme Microbiol Technol*, 2005, **37**: 238–245.
- [32] Kim HJ, Park HS, Hyun MS, *et al.* A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*. *Enzyme Microbiol Technol*, 2002, **30**: 145–152.
- [33] Bond DR, Lovley DR. Electricity production by geobacter

- sulfurreducens attached to electrodes. *Appl Environ Microbiol*, 2003, **69**(3): 1548–1555.
- [34] 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, **399**(7): 297–306.
- [35] Chaudhuri SK, Lovley DR. Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. *Nat Biotechnol*, 2003, **21**(10): 1229–1232.
- [36] Rabaey K, Boon N, Siciliano SD, *et al.* Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. *Appl Environ Microbiol*, 2004, **70**(9): 5373–5382.
- [37] Rabaey K, Lissens G, Siciliano SD, *et al.* A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency. *Biotechnol Lett*, 2003, **25**: 1531–1535.
- [38] Chang I, Hyunsoo M, Jae JK, *et al.* Improvement of a microbial fuel cell performance as a BOD sensor using respiratory inhibitors. *Biosens Bioelectron*, 2005, **20**: 1856–1859.
- [39] Jang JK, Pham TH, Chang IS, *et al.* Construction and operation of a novel mediator and membraneless microbial fuel cell. *Process Biochem*, 2004, **39**: 1007–1012.
- [40] 吕 丰, 许鑫华. 生物燃料电池酶电极电化学性能研究. 国际生物医学工程杂志, 2006, **29**(2): 65–68.
- [41] Hudak NS, Barton SC. Mediated biocatalytic cathode for direct methanol membrane-electrode assemblies. *J Electrochemical Society*, 2005, **152**(5): A876–A881.
- [42] 刘 强, 许鑫华, 任光雷, 等. 酶生物燃料电池. 化学进展, 2006, **18**(11): 1530–1537.

## 征订启事

### 欢迎订阅 2009 年《植物保护》杂志

《植物保护》创刊于 1963 年, 由中国植物保护学会和中国农业科学院植物保护研究所主办, 为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、“中国期刊方阵”双百期刊, 曾荣获中国科协优秀科技期刊奖、全国优秀科技期刊奖, 北京市全优期刊奖、国家期刊奖提名奖等多个奖项。收录的数据库有英国《CABI 文献数据库》、《Agrindex (FAO)》、美国《化学文摘》(CA)、《中国科学引文数据库》、《中文科技期刊数据库》、《生物学文摘》、《万方数据—数字化期刊群》、《中国农业文摘数据库》、《中国科技论文与引文数据库》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》。本刊主要刊登有关植物病理、农林业昆虫、杂草及鼠害等农作物有害生物、植物检疫、农药等植物保护学科各领域原始研究性论文和具有创新性、实用性技术成果文章。设有专论与综述、研究报告、调查研究、基础知识、实验技术、国外植保、争鸣、应用与交流、病虫新动态、学会动态与信息、新书新产品介绍等栏目。

竭诚欢迎全国各地科研院所研究人员、大专院校教师及研究生、各级植保科技工作者等踊跃订阅。欢迎广大作者踊跃投稿! 并欢迎咨询洽谈广告业务!

本刊为双月刊, 大 16 开, 160 页, 铜版纸印刷。每期定价 25.00 元, 全年 150.00 元。邮发代号: 2-483, 全国各地邮局均可订阅。直接在本刊编辑部订阅, 可享受 9 折优惠价, 全年 135 元, 若需挂号, 每期另加 3 元。

联系地址: 北京圆明园西路 2 号中国农科院植保所《植物保护》编辑部 邮编: 100193

电话: 010-62819059, 62815914

传真: 010-62815914

E-mail: zwbh1963@263.net

网址: www.plantprotection.ac.cn

联系人: 王 音 高洪荣