

# 微藻能源技术开发和产业化的发展思路与策略

黄英明<sup>1</sup>, 王伟良<sup>2</sup>, 李元广<sup>2</sup>, 谢静莉<sup>2</sup>, 范建华<sup>2</sup>, 陶黎明<sup>2</sup>

1 中国生物技术发展中心, 北京 100036

2 华东理工大学 生物反应器工程国家重点实验室, 上海 200237

**摘要:** 随着石油资源的日益减少及实现低碳经济的迫切需要, 微藻能源已成为世界各国重点研究与发展的战略方向。微藻能源关系国家能源重大战略储备, 因此我国迫切需要自主开发微藻能源产业化技术。文中分析了我国发展微藻能源的优势, 及目前微藻能源产业化中存在的瓶颈和亟待解决的问题, 既包括基础科学研究内容, 也包括产业化进程中亟需攻克的关键技术问题。在此基础上, 提出微藻能源的发展思路和策略, 指出了其产业化中的主要环节的技术发展方向, 展望了产业化进程。

**关键词:** 微藻能源, 技术开发, 产业化, 发展策略

## Strategies for research and development and commercial production of microalgae bioenergy

Yingming Huang<sup>1</sup>, Weiliang Wang<sup>2</sup>, Yuanguang Li<sup>2</sup>, Jingli Xie<sup>2</sup>, Jianhua Fan<sup>2</sup>, and Liming Tao<sup>2</sup>

1 China National Center for Biotechnology Development, Beijing 100036, China

2 State Key Laboratory of Bioreactor Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China

**Abstract:** With the dwindling of fossil fuels supply and the urgent need for the development of low-carbon economy, microalgae bioenergy, both renewable and environmentally friendly, has become one of the worldwide focuses. Given its benefit to the security of national energy supply, microalgae energy is particularly significant for China, with more than 50% crude oil imported and limited arable land for grain and edible oil production. In this article, both the advantages of microalgae bioenergy and the challenges of its development are addressed, which involves fundamental research and technology development as well as commercial production. Furthermore, strategies are proposed for China's microalgae bioenergy development, and its prospects are projected.

**Keywords:** microalgae bioenergy, R & D, commercial production, development strategy

### 1 微藻能源正成为重点研究的战略方向

#### 1.1 发展微藻能源的重要意义

众所周知, 资源、能源和环境是当前人类社会  
发展面临和必须解决的三大难题。目前, 我国能源

短缺形势严峻, 石油等化石能源储备严重不足, 远远不能满足经济和社会高速发展的需要, 迫切需  
从战略角度发展新的可再生能源。受技术和资源等  
因素限制, 核能、风能、潮汐能以及太阳能等替代  
能源, 还无法替代石油等传统化石能源, 液体燃料

Received: July 16, 2010; Accepted: July 17, 2010

Supported by: National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (Nos. 2007AA02Z209, 2007AA09Z419).

Corresponding author: Yuanguang Li. Tel/Fax: +86-21-64250964; E-mail: ygli@ecust.edu.cn

国家高技术研究发展计划 (863 计划) (Nos. 2007AA02Z209, 2007AA09Z419) 资助。

仍具有不可替代性。近年来,作为液体燃料之一的生物柴油,是国际上可再生能源的新生力量,因可直接利用现有发动机及加油站等设施,且对环境友好(N、S含量低),同时其热值接近化石柴油,因而发展迅猛,应用范围不断扩大,在柴油市场所占比例稳步上升,但原料不足是限制国内外生物柴油大规模发展的瓶颈。

CO<sub>2</sub>减排已成为亟待解决的全球性问题。2009年联合国哥本哈根气候大会,标志着一个以减少碳排放和提升碳吸储能力为核心的低碳经济时代的来临。目前,我国已经将发展低碳经济纳入国家总体发展战略,并提出了到2020年,单位GDP排放CO<sub>2</sub>比2005年下降40~45%的自主行动目标<sup>[1]</sup>。要实现这一宏伟目标,作为国民经济支柱的能源产业,必须在CO<sub>2</sub>减排中发挥主导作用。

目前,生产生物柴油所用原料均源于油料作物,由于油料作物的油脂面积产率不高,大力发展生物柴油必然要占用大量耕地,影响粮食生产。而微藻种类繁多、分布广,是最简单、最古老的低等植物,可直接利用阳光、CO<sub>2</sub>及N、P等简单营养物质快速生长并在胞内合成大量油脂(主要是甘油三酯),为生物柴油生产提供新的油脂资源。目前国内外普遍认为,作为一种新的生物能源,微藻能源发展潜力巨大。

## 1.2 微藻能源发展的历史及现状

微藻作为生物柴油原料的研究始于20世纪60年代。20世纪70年代中东战争等因素导致国际原油供应紧张,美国、日本、澳大利亚等西方国家为了减少对进口原油的依赖,大力资助微藻培养产油项目<sup>[2]</sup>。其中,美国在1978-1996年由国家可再生能源实验室(National Renewable Energy Laboratory, NREL)牵头并联合多个单位进行的《水生物种计划—藻类生物柴油》(Aquatic species program—biodiesel from algae, ASP)最为著名,该计划开展了包括产油微藻优良藻种筛选、培养模式、油脂代谢调控与分子操作等方面的研究。虽然利用微藻产油在技术上可行,但其成本比当时石油价格高出很多<sup>[2]</sup>。所以,能源微藻的研发曾一度中断。

20世纪90年代以来,随着世界经济的快速发展,对石油需求增加,不仅导致价格上涨,而且石

油基能源产品的大量消费使温室气体排放增加,生态环境恶化,世界各国又开始大力发展环境友好的微藻生物柴油<sup>[3]</sup>。2006—2008年,石油价格的大幅上扬,进一步推进了微藻能源(主要是生物柴油)产业化技术的发展,美国等发达国家的政府和企业在该领域纷纷投入或计划投入大量资金进行微藻能源的产业化技术研发,在国际上掀起了一股势不可挡的微藻能源开发热潮<sup>[4]</sup>,如埃克森美孚公司于2009年7月宣布,将启动一项规模达6亿美元的藻类生物燃料计划<sup>[5]</sup>。

为了加快微藻能源的产业化进程和总体部署,2008年12月,美国能源部召开了国家藻类生物燃料发展规划研讨会,2009年发布了《藻类生物燃料技术路线图》草案,并于2010年6月28日正式发布<sup>[6]</sup>。英国、澳大利亚等一些发达国家也都纷纷启动了微藻生物柴油方面的科研项目,目前全球已有150多家专门从事微藻能源开发的公司,但迄今国内外尚无经济上可行的微藻能源生产系统<sup>[7]</sup>。据英国《独立报》2010年6月10日报道,空中客车公司“新一代钻石DA42”飞机,采用100%微藻生物燃料驱动,在6月8日开幕的柏林国际航空航天展览会上完成首飞,首次证明了微藻生物燃料完全可以独立为飞机提供发动机燃料,并且使用微藻生物燃料后排放的尾气中,碳氢化合物、氮氧化合物和硫氧化物分别是化石燃料的1/8、60%和1/60<sup>[8]</sup>。

我国近年来也加大了对微藻生物柴油的研发力度,政府、科研机构和企业对微藻生物柴油的开发予以了高度重视。例如科技部于2009年开始启动微藻能源方面的863重点项目;在“十二五”期间将在973计划及863计划中对微藻能源予以立项支持;中石化、中石油以及中海油等能源巨头均对微藻能源予以高度的重视;华东理工大学与上海泽元海洋生物技术有限公司联合在江苏泰兴市对高产油脂的小球藻在户外敞开池中的光自养培养进行小规模中试研究,即将在国内微藻生产龙头企业——江西新大泽实业集团的海南微藻养殖基地进行大规模培养试验,同时以培养出的大量能源微藻为原料进行生物柴油的规模化制备研究;新奥科技发展有限公司已开始利用管道式及平板式光生物反应器从事能源微藻的中试培养研究。2010年5月在北京召开了“第

二轮中美战略与经济对话”, 期间中美签订了一系列关于航空生物燃料方面的合作项目, 其中之一就是《推进藻类可持续航空生物燃料合作》<sup>[9]</sup>。可以说微藻生物柴油正成为世界各国重点研究的战略方向。

## 2 我国发展微藻能源的必要性及优势

### 2.1 我国发展微藻能源的必要性

我国现有的能源消耗以化石能源为主, 能源结构不合理。我国政府已明确提出要积极发展可再生能源和新型、安全、清洁的替代能源, 并且提出 2020 年我国非化石能源消费比重将由目前的不到 9% 提高到 15%<sup>[10]</sup>。此外, 我国 CO<sub>2</sub> 减排任务非常繁重。因此, 我国应加快能源结构的优化调整, 大力发展新能源产业。

微藻与能源植物相比, 具有光合作用效率高、含油量高、生长周期短、油脂单位面积产率高, 还可利用非可耕地和非淡水资源, 富含色素、多糖和蛋白等高附加值产品等独特优势, 被认为是发展潜力巨大、最有可能替代石油的生物能源大宗生产原料。目前, 微藻能源作为生物能源领域的战略储备, 世界各国都在抢占技术制高点, 我国发展微藻能源的必要性主要表现在以下两方面: 1) 微藻能源关系国家能源重大战略储备, 国外一旦产业化技术成熟, 其核心技术不可能转让给我国; 2) 能源微藻的藻种和培养技术等具有很强的地域及气候差异性, 不能从国外照搬, 必须针对我国国情, 走自主研发之路。

### 2.2 我国发展微藻能源的优势

我国耕地有限, 但拥有广阔的盐碱地、滩涂和荒漠土地资源, 可规模化利用。与其他油料作物相比, 利用微藻培养积累的油脂生产生物柴油不仅用地面积最少, 而且不占用耕地。因此, 只有发展微藻培养生产生物柴油才最有可能满足我国未来运输燃料的供应。同时微藻, 特别是海水微藻培养还可以利用滩涂地和海水资源, 有效规避发展生物能源存在“与人争粮、争地和争水”的矛盾。

我国 CO<sub>2</sub> 排放点多、量大、面广, 适合微藻培养的资源化利用, 可大幅度降低微藻光自养培养所需碳源成本, 如培养 1 t 螺旋藻所需的碳源 (常规为 NaHCO<sub>3</sub>) 成本约为人民币 1 万元<sup>[4]</sup>。因此, 利用微

藻光自养生长过程, 大规模吸收工业废气中的 CO<sub>2</sub>, 在实现 CO<sub>2</sub> 减排的同时, 生产生物柴油所需的油脂原料 (每吨藻约可固定 2 t CO<sub>2</sub>), 既可大幅度降低能源微藻培养成本, 又可从清洁能源发展机制 (Clean development mechanism, CDM) 中获得收益。由于生物柴油的市场需求量极大 (我国每年需求的柴油量约 1 亿 t, 如全部通过光自养培养的能源微藻来生产, 约需要 3 亿 t 干藻粉, 可吸收约 6 亿 t CO<sub>2</sub>), 因此微藻能源产业的发展为缓解我国 CO<sub>2</sub> 减排的压力带来了新的希望。此外, 植物生长仅能吸收空气中的 CO<sub>2</sub>, 而能源微藻的规模化培养可解决 CO<sub>2</sub> 的点滴排放问题, 这对于解决我国热电厂、钢铁厂、化工厂等 CO<sub>2</sub> 排放大户的减排问题, 具有重要的潜在应用价值。

能源微藻光自养培养还可利用我国量大面广的富含 N/P 废水资源。我国废水中 N/P 含量高, 处理成本高, 导致水体富营养化并诱发蓝藻爆发。微藻需要吸收 N/P 等营养物质进行光自养生长, 例如在培养小球藻的 Walne 培养基中 N 和 P 含量分别为 47 mg/L 和 5.2 mg/L, 与我国城市生活污水中 N、P 含量基本相当。如果充分利用富含 N/P 废水培养能源微藻, 不仅降低了所需的 N 源成本 (0.3~0.4 万元/t 螺旋藻) 和 P 源成本 (约 0.3 万元/t 螺旋藻)<sup>[4]</sup>, 而且可省去废水处理中脱 N 和除 P 环节, 节约废水处理成本 (脱 N 和除 P 成本约为 0.3 元/t 城市生活废水), 达到富含 N/P 废水资源化利用和去除污染物的双重目的。

我国在微藻生物技术领域如种质资源和大规模培养技术等方面具有较好的研究工作基础, 且微藻产业初具规模, 如螺旋藻产量居世界第一。

## 3 微藻能源产业化过程中的关键问题

低成本是发展微藻能源的最基本要求, 缺乏基础研究支撑和技术优化与系统集成, 导致微藻能源成本高、生产效率低, 是制约其产业发展的瓶颈。究其原因, 主要是由于微藻生物技术产业规模小, 而人们真正认识到微藻生物能源重要性也是近几年的事, 过去人们对该领域的研究重视不够, 很多关键技术及相关的基础理论方面的研究少有涉足,

产业化开发缺乏坚实的理论基础和关键技术支撑。笔者认为,微藻能源产业化过程主要存在以下关键问题:

- 1) 可规模化培养的能源微藻优良种(株)的选育技术和综合评价体系。
- 2) 对能源微藻光合固碳、油脂合成与积累的机制及其调控原理的认识。
- 3) 高效低成本的光生物反应器优化方法以及其放大技术。
- 4) 能源微藻规模化培养工艺优化与放大技术。
- 5) 经济上可行的能源微藻细胞采收、油脂提取及生物能源产品加工技术。
- 6) 非油脂组分资源化利用技术及系统集成优化技术。
- 7) 微藻能源产业化技术的经济效益和环境效益的评价。
- 8) 低成本高效率微藻能源产业化技术路线及相应的研究平台。

## 4 微藻能源发展的思路与策略

### 4.1 过程集成与工程技术研发及基础研究并举

能源微藻产业化技术的开发应首先以现有微藻产业中已实现规模化培养的优良藻种(如小球藻、三角褐指藻等)为出发藻种,利用现有的相关技术开展规模化培养、藻体采收、油脂提取、生物能源产品加工及性能评价等各环节的初步研究,初步建立微藻能源规模化制备的集成系统,打通微藻能源产品生产的技术路线,通过实际运行获得微藻能源的实际生产成本及其成本分布情况,发现各单元(尤其是规模化培养)存在的具体问题,同时可小规模制备微藻能源产品(如生物柴油等)。通过整个微藻能源产业化技术的试运行,针对亟待解决的关键环节,开展工程技术研发及相关的基础理论研究,及时在集成系统中对研究成果进行检验和应用,有针对性地解决微藻能源产业化中所存在的关键科学和技术问题,不断优化微藻能源规模化制备的集成系统,一旦经济上可行,便及时进行工业化放大试验,实现产业化。笔者认为,采用上述的过程集成与工程技术研发及基础研究并举的策略,可大大缩

短微藻能源产业化开发所需时间。

### 4.2 优良藻种(株)选育与基因工程改造

微藻能源产业化的首要条件是要有性能优良的藻种(株),它应具有生长快、油脂含量高、抗逆性强及适合于户外规模化培养等特点,其筛选与诱变(如物理和化学诱变等)不应单纯追求高生长速率或高油脂含量,而应以高油脂产率和易规模化低成本培养为目标<sup>[11]</sup>。

微藻能源产业化要求在我国不同地区不同季节均能做到连续生产,因此藻种(株)的选育具有区域性,不仅要在实验室特定条件下进行,而且还须模拟户外规模化培养的实际条件(如昼夜温差、夜晚无光照等)来考察藻种的性能,最终还需通过户外培养确定藻种的性能。

对于适合规模化培养的藻种(株),还可以通过基因工程方法对其进行改造,尤其对于遗传背景较为清楚的藻种(株),可在对其代谢网络进行重构的基础上,有针对性地进行分子生物学改造,以获得性能优良的工程藻株。

### 4.3 光生物反应器的设计、优化与放大

微藻光自养培养系统(即光生物反应器)有二大类:一是敞开池,二是封闭式光生物反应器。目前微藻大规模光自养培养所用光生物反应器主要为敞开式跑道池与圆池,具有成本低的优点,但其效率也低,自上世纪60年代开发出来后,迄今很少有人对其进行系统研究,工程设计、建造和运行缺乏理论和技术指导。

封闭式光生物反应器(管道式、平板式、柱式等)虽然具有细胞密度高、生长快等许多优点,由于其制造和运行成本高、放大技术不成熟等,目前尚无法应用于能源微藻的大规模培养,但这类反应器可用于能源微藻藻种的培养。能源微藻在规模化培养时需要大量藻种,而目前的藻种扩培系统存在培养密度低、周期长等缺点,难以满足能源微藻规模化培养对藻种的需求,封闭式光生物反应器所具备的优点恰恰可以满足能源微藻藻种快速扩培的需要。

目前国内外所开发的各种户外培养用封闭式光生物反应器是在不同自然光条件下分别进行微藻培

养实验以评价其性能的优劣, 由于光照对微藻生长影响极大, 因此其结果可比性不强, 亟需在相同的自然光照条件下对各种封闭式光生物反应器的性能进行评价。此外, 由于光在微藻培养液中衰减严重, 封闭式光生物反应器放大后的效率均明显下降。迄今, 封闭式光生物反应器的放大在国内外均凭经验或在定性的方法指导下进行, 缺乏系统的理论和定量的方法。

笔者在长期的研究中认识到, 光生物反应器的设计、优化和放大必须以促进光照方向的混合为基本原则, 不论是敞开放式培养池或封闭式光生物反应器的设计、优化和放大都应遵循这一原则。近年来计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 已被广泛用于各类反应器的开发。针对光生物反应器中必须强化光照方向的混合程度这一特殊要求, 在了解能源微藻光衰减特性的前提下, 可以通过 CFD 模拟并结合冷模及热模试验, 建立敞开放式培养池及封闭式光生物反应器的设计、优化和放大方法<sup>[12]</sup>, 从而为能源微藻的规模化培养提供高效的装置。

#### 4.4 能源微藻的规模化培养

##### 4.4.1 培养模式

微藻的培养模式主要包括光自养、异养和混养(兼养) 3 种形式。

微藻的光自养培养具有很多优点<sup>[4]</sup>, 同时也是目前已实现产业化的微藻(螺旋藻、小球藻、盐藻、雨生红球藻等)及饵料微藻的大规模培养中普遍采用的模式。对于能源微藻的培养, 1998 年美国的 ASP 计划工作总结报告指出: 相对低成本的敞开池光自养培养是最有前景的培养模式<sup>[13]</sup>, 但敞开池光自养培养存在的培养密度低、易被污染、水分蒸发、CO<sub>2</sub> 供给不足、受环境因素影响大等问题, 使其难以满足能源产品生产的需求。封闭式光生物反应器虽然可克服敞开池的许多缺点, 但由于成本高、放大技术不成熟等原因, 迄今尚未应用于微藻的大规模培养。

异养培养不能直接利用太阳能和 CO<sub>2</sub>, 难以直接用于能源微藻的规模化培养; 对于可异养生长的能源微藻, 可采用异养方式对其藻种进行快速扩培。此外, 如若微藻异养培养积累油脂的效率和成本优

于产油微生物, 则将具有产业化的潜力。

微藻的混养培养虽可获得较高的细胞密度和细胞产率, 但大规模混合培养过程中无法实现微藻无菌培养, 易滋生杂菌(尤其是以易被微生物利用的糖类为碳源时)。在微藻油脂生产生物柴油过程中会产生大量副产物甘油, 从长远来看, 一旦微藻能源实现产业化, 副产的甘油量将非常可观, 但甘油可以作为部分能源微藻混合培养时的碳源, 如何利用甘油开展能源微藻的大规模混养培养也是未来值得研究的方向。

近年来研究者通过将不同的培养方式进行组合, 产生了一些新的培养模式:

1) 先自养后异养模式: 先利用密闭式光生物反应器自养培养以固定 CO<sub>2</sub>, 然后利用发酵法进行异养以提高含脂量<sup>[14]</sup>。该模式存在的最大问题是光自养培养过程放大后无法做到无菌培养<sup>[15]</sup>, 由于微藻的异养培养要求藻种必须不带任何杂菌, 因此该模式无法放大, 在能源微藻规模化培养方面不具有实际应用价值。

2) 封闭式光生物反应器与开放池相结合的培养模式: 先利用密闭式光生物反应器实现微藻的高密度培养, 然后再和敞开池串联, 使藻液在封闭式光生物反应器和敞开池中循环流动。该模式不仅基本具备高密度、有效固定 CO<sub>2</sub>、低成本的特点, 同时还可部分克服高温季节封闭式光生物反应器降温成本高、敞开式反应器水蒸发量大的缺点, 但如何实现系统优化, 非常值得深入研究。

##### 4.4.2 能源微藻的规模化培养工艺

低成本大规模的能源微藻培养是实现微藻能源产业化的关键环节之一。能源微藻培养是一个动态过程, 面临着多变的外部环境条件、污染生物的竞争以及细胞之间的相互作用, 因此能源微藻规模化光自养培养工艺的优化必须综合考虑各个因素, 使能源微藻的潜能得到最大程度的发挥。能源微藻规模化培养工艺优化应重点考虑以下内容:

1) 以 CO<sub>2</sub> 为碳源: 通入 CO<sub>2</sub> 有两方面的作用, 一是为微藻生长提供所需的碳源, 二是调节培养液的 pH 值。微藻光自养过程中, 培养液的 pH 值呈上升趋势, 过高的 pH 不利于微藻的生长, 通入 CO<sub>2</sub>

可将 pH 值控制在其最适范围内。

2) 优化培养基: 培养基是能源微藻细胞生长和油脂合成的物质基础, 其组成对藻细胞的生长及油脂积累影响显著。因此, 在能源微藻规模化培养研究中, 培养基的优化非常重要。此外, 适合于已有能源微藻规模化培养的 N/P 废水资源的筛选也是一个非常值得研究的方向。

3) 藻细胞生长及油脂积累与环境条件的相互作用: 深入了解微藻光合作用和油脂积累与外界环境条件的响应机制, 找出环境条件对藻细胞生长及油脂积累的影响规律, 从而通过调控环境因子促进藻细胞生长及油脂的积累。

4) 培养液的循环利用: 能源微藻光自养培养时的藻细胞密度一般较低, 细胞采收后的大量培养液必须实现循环利用, 否则不仅需要大量的水资源, 而且会增加生产成本。

#### 4.5 能源微藻采收、油脂提取及生物能源加工

能源微藻规模化培养时细胞密度一般较低 (一般为每升几克干细胞), 传统的液固分离技术 (如离心等) 因其成本高无法直接用于能源微藻的大规模采收。因此, 微藻细胞采收也是能源微藻产业化中亟待解决的瓶颈问题之一。微藻种类繁多, 形态、细胞壁等的组成结构与表面特性、包括油脂在内的胞内组成呈现多样性特征, 这些特征不仅因藻种而异, 即使对于同一藻种, 也随培养工艺的差异而变化。因此关于能源微藻的采收、油脂提取及生物能源加工也应根据能源微藻细胞的多元特性开展有针对性的研究。

传统生物能源加工原料大多为干物质, 根据全生命周期分析 (Life cycle analysis, LCA), 利用干燥后的微藻生产能源产品过程的能量“入不敷出”<sup>[16]</sup>。由于微藻细胞中水含量高达 80% 以上, 为避免干燥的高能耗, 开发以湿藻为原料的低能耗微藻能源绿色制备方法将成为一个重要的研究方向。

#### 4.6 藻体非油脂组分资源化利用

##### 4.6.1 非油脂组分的高值化利用

微藻提油后的非油脂组分中含有丰富的蛋白质、多糖和色素等生物活性物质, 可被开发成为医药、食品及饲料添加剂等高附加值产品。通过对藻

渣的高值化利用, 不仅可以实现微藻细胞的综合利用, 还能够提高微藻能源生产过程的综合经济效益和环保效益, 降低微藻能源的生产成本。

##### 4.6.2 非油脂组分的能源化利用

在藻体非油脂组分高值化利用市场饱和的情况下, 大量非油脂组分必须全部进行能源化利用。美国能源部 2010 年 6 月正式发布的《藻类生物燃料技术路线图》<sup>[7]</sup>, 指出了微藻非油脂组分能源化利用的多个方向, 如厌氧发酵产沼气、热解、与煤共气化等, 但相关技术均不成熟, 有待深入研究。

#### 4.7 微藻能源生产系统的集成优化

微藻能源产业化过程涉及的环节多、产业链长, 其本身非常复杂, 系统效率不但取决于各个单元的效率, 也取决于各单元的相互影响和耦合。由于微藻能源兴起的时间很短, 迄今尚无微藻能源生产全过程中试的报道, 因此对微藻能源规模化系统的集成本了解甚少, 亟待开展研究。

微藻能源的产业化技术开发必须建立一个集成系统的研究平台, 以便及时对各个单元的研究成果进行评价与集成, 同时也便于各个单元之间研究工作相互衔接 (如规模化培养可为能源产品加工提供原料, 油脂的提取方法对非油脂组分的高值化利用具有重要影响, 且湿的藻细胞及提取油脂后的藻渣难以长时间保存, 只能就地加工)。

LCA 作为一种对工业过程整个生命周期中能耗和物耗以及对环境影响进行量化评价的工具, 其对微藻能源的规模化生产具有重要的指导意义。通过分析微藻能源的生产、转换和运输、季节环境条件影响等过程中的能量和物质平衡, 从微藻能源生产过程中各单元能量和物质的投入与产出、CO<sub>2</sub> 固定、废水排放等角度综合考虑, 对微藻能源生产过程进行全生命周期分析, 以实现各个单元之间高效率的耦合, 评价其过程经济性并建立相应的过程评价体系是十分必要的。

## 5 总结与展望

微藻能源顺应我国新能源及低碳经济发展的大趋势, 符合“不与人争粮、不与粮争地”的国家生物能源发展战略, 作为能源领域的重大战略储备,

我国应合理部署, 聚集大型研究团队进行自主研发。

随着石油价格的持续上涨和实现低碳经济、节能减排的迫切需要, 相信制约微藻能源产业化的高成本这一瓶颈问题必将逐步得以解决。短期内的成本问题可以通过以下几个方面的集成来平衡<sup>[4]</sup>: 1) 持续的技术研发提高效率; 2) CO<sub>2</sub> 等废物资源化以节省原辅材料消耗成本; 3) 微藻的生物炼制提高综合技术经济指标。笔者认为, 按照上述思路, 在适合于能源微藻终年培养且具有 CO<sub>2</sub> 资源的我国南方地区, 微藻能源有望在 5 年左右初步实现产业化并可盈利; 此外, 在持续的技术研发、石油价格的不断攀升、CO<sub>2</sub> 减排与 CDM、政府补贴等多种因素的作用下, 预计 10 年左右, 即使在藻体非油脂组分高值化利用市场饱和的情况下, 微藻能源大规模生产仍有望在经济上是可行的 (如图 1 所示, 在美国华盛顿州立大学陈树林教授提供的素材基础上形成)。

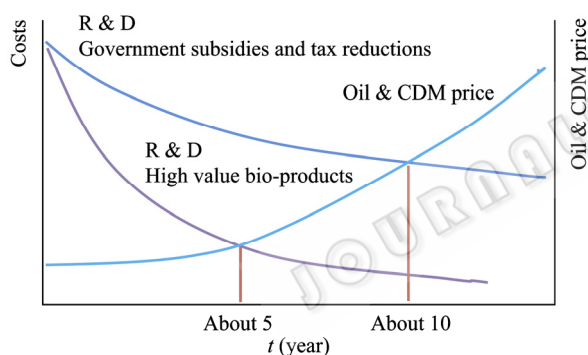


图 1 降低微藻能源成本的对策与前景

Fig. 1 The strategies and prospects of reducing the cost of microalgae bioenergy.

微藻能源的产业化开发无疑将带动现有微藻生物技术产业的整体升级, 极大地促进微藻生物技术学科的发展。因此, 微藻能源这一新兴产业的发展必将促进微藻生物技术新兴产业链的形成, 使丰富但尚未被充分利用的微藻资源宝库在解决人类面临的“资源、能源和环境”等问题中发挥更大作用。

在微藻能源这一新兴的热点研究领域, 我国目前与美国等发达国家差距不大, 已经具备了实现创新跨越的潜力。笔者认为, 在各级政府和企业的的大力支持下, 充分发挥我国现有的资源优势 and 科技优势, 在不久的将来, 我国完全有可能在微藻能源这一新领域的国际竞争中占据领先地位。

## REFERENCES

- [1] 到 2020 年中国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%–45%[EB/OL]. [2010-07-15]. [http://news.xinhuanet.com/politics/2009-11/26/content\\_12544442.htm](http://news.xinhuanet.com/politics/2009-11/26/content_12544442.htm).
- [2] Yusuf C. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol*, 2008, **26**(3): 126–131.
- [3] Yusuf C. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv*, 2007, **25**(3): 294–306.
- [4] Li YG, Tan TW, Huang YM. Some scientific issues to be resolved in the process for producing biodiesel from microalgae. *China Basic Sci*, 2009, **5**: 64–70.  
李元广, 谭天伟, 黄英明. 微藻生物柴油产业化技术中的若干科学问题及其分析. *中国基础科学*, 2009, **5**: 64–70.
- [5] Service RF. ExxonMobil fuels Venter's efforts to run vehicles on algae-based oil. *Science*, 2009, **325**: 379.
- [6] Department of energy announces \$24 million for algal biofuels research[EB/OL]. [2010-07-15]. [http://apps1.eere.energy.gov/news/progress\\_alerts.cfm/pa\\_id=359](http://apps1.eere.energy.gov/news/progress_alerts.cfm/pa_id=359).
- [7] U.S. DOE. National Algal Biofuels Technology Roadmap. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Biomass Program, 2010.
- [8] Biofuel flights one step closer[EB/OL]. [2010-07-15]. <http://www.independent.co.uk/environment/biofuel-flights-one-step-closer-1996407.html>.
- [9] 首届先进生物燃料论坛在京召开 取得 5 项重要成果[EB/OL]. [2010-07-15]. [http://www.gov.cn/gzdt/2010-06/16/content\\_1628515.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2010-06/16/content_1628515.htm).
- [10] 温家宝强调:保障能源供给安全 支撑经济社会发展[EB/OL]. [2010-07-15]. [http://www.gov.cn/lhdh/2010-04/22/content\\_1589828.htm](http://www.gov.cn/lhdh/2010-04/22/content_1589828.htm).
- [11] Griffiths MJ, Harrison STL. Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. *J Appl Phycol*, 2009, **21**(5): 493–507.
- [12] Yu G, Li YG, Shen GM, et al. A novel method using CFD to optimize the inner structure parameters of flat-panel photobioreactors. *J Appl Phycol*, 2009, **21**(6): 719–727.
- [13] Sheehan J, Dunahay T, Benemann J, et al. A Look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program—Biodiesel from Algae. National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [14] Xiong W, Gao C, Yan D, et al. Double CO<sub>2</sub> fixation in photosynthesis-fermentation model enhances algal lipid synthesis for biodiesel production. *Biores Technol*, 2010, **101**(7): 2287–2293.
- [15] Scott SA, Davey MP, Dennis JS, et al. Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Curr Opin Biotechnol*, 2010, **21**(3): 1–10.
- [16] Lardon L, Hélias A, Sialve B, et al. Life-cycle assessment of biodiesel production from microalgae. *Environ Sci Technol*, 2009, **43**(17): 6475–6481.