

利用微藻生产生物柴油的研究进展

许海朋, 张晓东, 张 杰, 李 岩, 孟光范
(山东省科学院能源研究所, 山东 济南 250014)

摘要:介绍了利用微藻生产生物柴油的优势及技术进展,对利用微藻生产生物柴油的经济性和可行性进行了分析和探讨,并指出了可以提高微藻柴油可行性的方法。

关键词:微藻;生物柴油;光生物反应器

中图分类号:S216.3

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2008)10-0018-04

Research advances in utilization of microalgae for biodiesel production

XU Hai-peng, ZHANG Xiao-dong, ZHANG Jie, LI Yan, MENG Guang-fan

(Energy Research Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan 250014, China)

Abstract: The advantages and research progress in biodiesel production from microalgae are introduced, and the economic returns and feasibility are discussed. The methods for improving the feasibility of biodiesel production from microalgae are pointed out.

Key words: microalgae; biodiesel; photobioreactor

生物柴油是最重要的液体可再生燃料之一,具有安全环保等优良特性,在能源性质方面可替代化石燃料。目前世界各国纷纷根据本国国情选择合适的油脂原料生产生物柴油。我国是植物油脂资源短缺国家,油料作物的生产成本和规模尚不适于生物柴油开发,扩大油料作物种植的潜力也非常有限,因此开拓油脂资源成为我国未来生物柴油产业发展的瓶颈。需深入认识国情,理性分析自然和资源条件,从多方面着手拓展油脂资源,开发新的油脂生产技术。

部分微藻中含有相当可观的油脂类物质,可以直接提取得到微藻油。微藻油的成分与植物油相似,可作为植物油的替代品,还可以用来生产生物柴油,具有广泛的应用价值。相对于传统的油料作物,微藻具有生物量大、生长周期短、易培养以及含有较高的脂类等特点,并且不会对粮食作物的生产构成威胁,是很有发展前景的生物柴油原料。微藻还可以吸收并利用工业生产排放出的大量二氧化碳和氮化物,还有利于改善环境。

1 产油微藻和微藻油脂简介

微藻是指一些微观的单细胞藻类,大多数是浮

游藻类,生物量大,分布广,无论是海洋、淡水湖泊等水域,或是潮湿的土壤、树干等处,几乎在有光和潮湿的任何地方都能生存。微藻也是通过光合作用来生产油脂,但是要比油料植物高效得多。微藻的生长速率远远高于陆生作物,一般微藻在 24 h 内就可以使生物量加倍,在指数生长期的生物量的倍增时间一般为 3.5 h,每英亩每年的产量在 2.273 万 ~ 9.092 万 L,比油料作物中产量最高的作物还要高 7 ~ 31 倍。许多微藻的含油量都可达 20% ~ 50%^[1],部分微藻的含油量可以超过微藻干质量的 80%,远超过最好的产油作物。部分含油量较高的藻株如表 1 所示。

表 1 部分含油微藻的含油量

微藻	含油质量分数/%
<i>Botryococcus braunii</i>	25 ~ 75
<i>Chlorella sp.</i>	28 ~ 32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16 ~ 37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25 ~ 33
<i>Monallanthus salina</i>	> 20
<i>Nannochloris sp.</i>	20 ~ 35

收稿日期:2008-07-28

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(Y2007F56);国家高技术研究发展计划("863")项目(2007AA05Z403)

作者简介:许海朋(1981-),男,硕士,研究方向为生物能源的研究与开发,0531-85599027, xhpuieng@163.com。

续表

微藻	含油质量分数/%
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31 ~ 68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35 ~ 54
<i>Nitzschia</i> sp.	45 ~ 47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20 ~ 30
<i>Schizochytrium</i> sp.	50 ~ 77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15 ~ 23

不同种类的微藻会产生不同种类的油脂和其他复杂的油类^[2],大部分微藻油都可以用于生产生物柴油。

将微藻油转化为生物柴油和将农作物油转化为生物柴油的工艺基本相同,因此用藻类生产生物柴油的难点不在于油的提取,而在于获得油脂含量高、生长迅速且收获相对简单的藻株,而且还要找到合适的培养体系。

2 微藻柴油的研究进展

2.1 微藻的培养技术

微藻养殖是利用光合作用,光合生长需要光、二氧化碳、水和无机盐,温度必须保持在 20 ~ 30℃。为了降低成本,微藻的生产必须使用自然光,光的水平会随着昼夜和季节变化,大量生产微藻生物物质需要在白天进行连续培养。用这种方法需要以恒定的速率加入新鲜培养基,这样才能持续地收获微藻。由于晚间的呼吸作用,白天产生的生物物质会在夜间损失大约 25%,所以晚上要停止进料,但是仍然要防止生物物质的沉淀。损失的量取决于生物物质生长时的光的水平、生长温度和夜间温度。

微藻生物物质大约含有 50% 的碳,所有的碳都是来自于二氧化碳,产 100 t 微藻生物物质可以固定大约 183 t 二氧化碳。在白天必须不停地加入二氧化碳,通过 pH 传感器进行补料控制从而尽量减少二氧化碳的损失以及 pH 的变化。生产生物柴油可以利用一些电厂燃烧化石燃料排放的二氧化碳,这些二氧化碳一般都可以使用,而且成本很低^[3]。培养基必须包括组成藻类细胞的无机元素,必要组分包括氮、磷、铁,有时还需要硅,最小营养需求可以用微藻生物物质的近似生物组成公式来估计: $\text{CO}_{0.48}\text{H}_{1.83}\text{N}_{0.11}\text{P}_{0.01}$ ^[4]。有些营养必须保持过量,例如磷,这是因为部分磷酸盐会和金属离子形成复合物,无法被生物利用。向海水中加入硝酸盐、磷肥和一些微量元素可以用于培养海生微藻,成本较低^[5]。

一些藻类能利用有机物作为唯一的碳源和能源进行异养生长。缪晓玲等进行了藻类异养转化制备生物油的研究,异养生长不仅可以提高生长效率,还有利于藻细胞内某些代谢产物如脂类等的积累,获得高脂肪含量的微藻,从而可降低生物柴油生产的成本^[6]。

2.2 微藻生物反应器

微藻培养必须在光生物反应器中进行,该反应器要能提供以下条件:①合适的光照强度;②合适的温度;③合适的无机碳源;④合适的 pH;⑤合适的混合条件;⑥合适的氧解析;⑦避免污染。比较可行的微藻生产方法有 2 种:循环渠法和管式光生物反应器法^[5]。

2.2.1 循环渠法

该法由闭合的循环流通渠组成,沟渠由混凝土或紧凑的土来建造,一般深 0.3 m。通过叶轮进行物料混合和循环,水流通过折流板来引导弯曲。白天,从叶轮前面连续加入培养基,在叶轮后面收获培养液,从而完成循环。叶轮一直运行以防止沉淀。

2.2.2 光生物反应器法

光生物反应器由一系列塑料或玻璃透明管组成,直径一般小于 0.1 m。因为阳光在高浓度的培养液中的穿透力是有限的,所以限制管的直径,以确保高的生物物质产率。光收集管一般南北朝向水平放置,地面一般刷成白色以增加反射率。人工照明在技术上是可行的,但是和自然照明比成本要高。为了达到高密度培养,必须使管内亮区域和暗区域的液体较快的循环,虽然高强度的湍流能够达到这个目的,但是形成的剪切力会损伤藻类细胞。

微藻培养液在一个蓄水池和光收集管之间循环进行连续培养。为了防止生物物质沉淀,可以安装机械泵或者气升泵以保持湍急的水流。机械泵安装和操作都比较方便,但会破坏生物物质,气升泵比较温和但不够灵活。

光合生物反应产生的氧气容易造成培养液的溶氧值远远高于空气饱和值,从而抑制光合成反应,甚至会对藻类造成光氧化损伤,所以需要在循环中加入一个脱气区,培养基必须周期性地进入脱气区以除去氧气和气泡。

光生物反应器日夜都需要冷却,夜间冷却可以减少藻类的呼吸作用,以减少生物物质的损失,可以采用热交换器来控制温度。

2.2.3 循环渠法和光生物反应器法的比较

循环渠法造价低而且运行成本低,所以一般认

为循环渠法的成本比光生物反应器法低,但事实并非如此。在循环渠法中,冷却是通过蒸发达到的,蒸发水的损失很明显,水沟利用二氧化碳的效率远不如光合生物反应器高,而且生产还会受到杂藻和微生物的污染,所以循环渠法生产的生物质浓度要比光生物反应器法低,这就导致生物质的生产效率较低。

Chisti^[7]对 2 种方法产生物质的效率进行了对比(表 2)。可以看出生物反应器法产生物质的效率要比循环渠法高很多,采用光合方法时生物质产量要比同样体积的水渠法的生物质多 13 倍。为了得到油还需要用过滤、离心和其他一些手段对培养液中的生物质进行回收,生物质的回收成本也很重要。采用光生物反应器得到的生物质的浓度几乎是水渠法的 30 倍,因此采用光生物反应器的生物质回收成本只是采用水渠法的一小部分。

表 2 循环渠法和光生物反应器法的比较

变量	循环渠法	光生物反应器法
生物质年产量/t	100	100
单位体积产量/kg·m ⁻³ ·d ⁻¹	0.117	1.535
单位面积产量/kg·m ⁻² ·d ⁻¹	0.035	0.048
培养液中的生物质质量 浓度/kg·m ⁻³	0.14	4.00
稀释速率/d	0.250	0.348
面积需求/m ²	7828	5681
产油率/m ³ ·(hm ²) ⁻¹	99.4	136.9
CO ₂ 消耗/kg	183333	183333
系统	978 m ³ 的池 塘; 12 m 宽, 82 m 长	132 个平行管/ 单元; 80 m 长的 管,直径 0.06 m
单元数	8	6

光生物反应器提供了一个可以控制的环境,能够根据特定的需要调整更高的产量,从而达到全年持续高产,管状光生物反应器更有可能大量用于生产生物柴油。

尽管微藻培养技术取得了长足的进展,但是仍然有许多问题需要解决^[7]。例如:①太多直射阳光会杀死微藻;②温度必须保持恒定;③藻类浓度太大会抑制它们生长;④生长产出的氧气必须不断地从水中除去;⑤开放的池塘培养容易受蒸发和下雨的影响,这会打乱盐度和 pH 的平衡;⑥当地的藻类经常过量生长,甚至超过预期得到的藻类。

2.3 微藻生物柴油的经济性与可行性

从产量上来看,每年每亩玉米可产 1 364 L 乙

醇,每亩大豆可产 136.4 L 生物柴油,而每亩藻类可产 2.28 万 L 生物燃料。玉米和大豆每年收获一次,而藻类生长迅速,每隔几天即可收获一次。很明显,在可预测的未来,油料作物不可能大量地替代石油衍生的液体燃料,微藻是唯一有潜力替代化石柴油的生物柴油油源。

但是在目前的情况下,生产微藻生物质要比种植作物更昂贵。从微藻生物质提取油脂并将油脂转化为生物柴油的方法与使用其他生物质类似,因此用微藻生产生物柴油的经济性主要取决于微藻生物质的生产成本。根据文献[8]计算所得的数据,用光合反应器法和循环渠法生产 1 kg 微藻生物质的成本分别是 2.95 美元和 3.80 美元,如果每年的生物质产量能够增加到 1 万 t,1 kg 的成本分别能够降低到 0.47 美元和 0.60 美元。假设生物质含有 30% 的油脂,则生产 1 L 油需要的生物质成本分别为 1.4 美元和 1.81 美元,而 2006 年最便宜的植物油粗棕榈油的平均价格为 465 美元/t,也就是 0.52 美元/L。可见,微藻生物柴油离规模化生产还有很长的路要走。

一些公司表示用光生物反应器技术可以用藻类生产生物燃料,并宣称可以低成本地将大量生物质转化为液体燃料。但是,经过几十年的发展,没有一个项目做到了大规模或者长时间生产。现在主要是一些私企在从事一些有市场前景的项目,但也没有一个完全达到商业化。随着生物能源的兴起,微藻柴油又重新成为生物能源的研究热点之一,一些风险投资企业正在积极介入基于藻类的生物柴油生产,微藻柴油可能将迎来新的发展高潮。

3 结论与展望

微藻生物柴油在技术上是可行的,但是其经济性还需要得到充分的提高,以使其能够与化石柴油竞争。可以通过以下方式降低生物柴油的成本,提高生物柴油的可行性:

(1) 提高微藻生产生物柴油的能力。通过筛选和分子水平改造 2 种手段提高微藻的生产能力^[9],提高微藻对高温和光的耐受性。

(2) 进一步提高光生物反应器的生产效率,降低生产成本。尽管用光生物反应器法可以实现稳定生产,但是仍然存在许多问题。通过改进光合反应工程的方式提高工程微藻的生产性能,包括增加生物质的生长速率和生物质含量。

(3) 通过产物的生物精炼降低成本。除了油脂,

微藻还含有大量的蛋白、碳水化合物以及其他营养成分^[10]。因此,生产生物柴油后剩余的残渣可以用作动物饲料。一些生物质可以用于厌氧发酵产甲烷,产生的电力用于微藻生产的进行,多余的电可以卖掉以抵消生产微藻的成本。对于特定的微藻,提取高价值的产物也是可行的。

(4)藻类对土地的要求较低,在沙漠地区和盐碱地上都可以生长,但是更为合理的藻类养殖场所则应设在能源场附近。依照世界观察研究所最近一份关于生物燃料的报告,在近期只有在发电厂附近栽培藻类制造燃料才可能是比较经济的,这样可以形成良性循环,藻类在生长过程中吸收工厂排出的二氧化碳和氮氧化物,然后转化成为燃料原料。到2012年,预计世界上将会拥有7474套之多的燃煤电厂,作为发电的副产物,将会释放出90亿t的CO₂,藻类可以吸收大约80%的二氧化碳。因此,利用工厂排出的CO₂生产微藻无论在经济上还是在环保上都具有强劲的吸引力。

(5)利用农产品废弃物或者污水来培育一些特殊藻类,并且发展将藻类转化为生物柴油的新工艺。这项研究可能会为迅速发展的生物柴油产业发掘新的原料,降低成本。

(6)将地热资源利用和生物柴油生产结合起来,用可再生的地热资源加热和推动藻类生长。

参考文献

- [1] Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, *et al.* Commercial applications of microalgae[J]. *J Biosci Bioeng*, 2006, 101: 87-96.
- [2] Guschina I A, Harwood J L. Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae[J]. *Prog Lipid Res*, 2006, 45: 160-186.
- [3] Sawayama S, Inoue S, Dote Y, *et al.* CO₂ fixation and oil production through microalga[J]. *Energy Convers Manag*, 1995, 36: 729-731.
- [4] Grobbelaar J U. Algal nutrition[M]//Richmond A. *Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology*, Blackwell, 2004: 97-115.
- [5] Molina Grima E. Microalgae, mass culture methods[M]//Flickinger M C, Drew S W. *Encyclopedia of Bioprocess Technology: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation*, 1999: 1753-1769.
- [6] 缪晓玲, 吴庆余. 藻类异养转化制备生物油燃料技术[J]. *可再生能源*, 2004(4): 41-43.
- [7] Chisti Y. Biodiesel from microalgae[J]. *Biotechnology Advances*, 2007, 25: 294-306.
- [8] Molina Grima E, Belarbi E-H, Acien Fernández F G, *et al.* Recovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics[J]. *Biotechnol Adv*, 2003, 20: 491-515.
- [9] Roessler P G, Brown L M, Dunahay T G, *et al.* Genetic-engineering approaches for enhanced production of biodiesel fuel from microalgae[J]. *ACS Symp Ser*, 1994, 566: 255-270.
- [10] Sánchez Mirón A, Cerón García M C, Contreras Gómez A, *et al.* Shear stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricornutum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors[J]. *Biochem Eng J*, 2003, 16: 287-297. ■

新能源在法国:法国是欧洲第二大可持续能源生产国

据法国环境和能源管理署(ADEME)的资料显示,法国长久以来控制能源消费和大力发展可持续能源的努力得到了回报,可持续能源生产成为潜力巨大的行业,2007年的营业额为330亿欧元,并创造了220000个工作岗位。2007年3月,欧盟确立了一项能源目标:即到2020年为止,可持续能源消费占初级能源消费总量的20%。法国政府在格勒诺尔环境圆桌会议上表示,应对全球变暖将成为法国当选欧盟轮值主席国之后工作的重中之重。

《能源观察》杂志报道:由可持续能源生产的电力约占法国2006年度国内电力消费的12%。水电电力仍是电力生产的主力,约为电力生产总量的91%。风能电力生产增长了一倍,占3.5%。木炭能生产稳定,占2.3%。利用太阳能光伏电池和热能发电的总量迅猛增加。利用城市垃圾循环生产的电力占2.5%。家用取暖使用的矿物燃料成本持续上涨,又促使人们去发展地热能。此外,还有热泵产生的电能以及源自农业垃圾和生物质能源的电能。

可持续性工业活动为上述能源生产提供了坚实的设备支持,特别是在光伏电池和风能领域。法国电力公司新能源部以及为数众多的小投资者是推动这些工业活动的主要力量。为了在发展经济的同时兼顾环境保护,法国政府公

布了“2012生态技术”计划,生态-工业战略委员会将承担该项计划的具体实施。

该领域内已有不少外国公司落户法国。风电园有:西班牙加姆萨(Gamesa),丹麦威斯塔(Vestas),美国通用电气(General Electric);风能和光伏系统有:德国阿斯太阳能(AS Solar),德国SMA,德国哈维可再生能源(HaWi Energies Renouvelables),荷兰西普罗(Silpro),加拿大光伏(Photowatt),英国阿派克斯BP太阳能(Apex BP Solar)。

法国政府鼓励家庭和公司安装节能设备,使用可再生能源,以此支持可持续能源工业的发展。税收优惠便是方法之一,优惠度可达到设备投资额的50%。法国有12个大区拥有专门从事能源研究的产业集群。

法国政府投资部主席华伟立先生说:“法国非常适合这些工业的发展,在这里实行全欧洲最优惠的课税津贴政策,在这里也可以找到电力网络领域的高技能人才,此外风能领域的潜力同样潜力无穷,这是跨国公司纷纷选址法国扩大发展的原因。法国政府未来12年的规划相当宏大,可持续发展能源的发展机会相当多”。

法国政府投资部(IFA)旨在吸引国际投资并帮助投资者在法国获得成功,它的分支机构遍布全球。(袁静)