

综述与专论

# 微藻能源的发展及其在环境保护中的应用

李建华<sup>1</sup>, 李超<sup>2</sup>

(1.山西国环环境科技有限公司, 山西太原 030009; 2.山西省生态环境研究中心固废技术所, 山西太原 030009)

**摘要:** 能源短缺和温室效应是当前中国发展所面临的两个关键问题。通过对微藻能源主要利用方式及其在环境治理中应用的介绍, 指出微藻能源能够同时解决能源和减排的要求。

**关键词:** 生物能源; 微藻; 环境保护

中图分类号: S216.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-8759(2015)03-0008-03

## DEVELOPMENT OF MICROALGAE ENERGY AND THE APPLICATION IN ENVIRONMENTAL PROTECTION

LI Jian-hua<sup>1</sup>, LI Chao<sup>2</sup>

(1. Shanxi GuoHuan Environmental Technology Co. Ltd, Taiyuan 030009, China;

2. Institute of Solid Waste Technology, Research Center for Eco-Environment Science in Shanxi, Taiyuan 030009, China)

**Abstract:** Energy shortage and Greenhouse effect are the key problems which were met by China right now. Based on the introduction about microalgae energy utilization and its application in environmental protection, it can be concluded that the microalgae energy could meet the requirements of energy and greenhouse gas emission reduction at the same time.

**Key words:** Bioenergy; Microalgae; Environmental protection

### 引言

我国经济的快速发展是以能源的大量消耗为代价的。2013 年全国能源消费总量已达 37.5 亿吨标准煤<sup>[1]</sup>, 与 1978 年相比, 增长了 657%。而我国自 1993 年就已成为石油净进口国, 到 2013 年, 进口原油已达到 2.82 亿吨, 这对国家安全和长久发展是十分不利的。

由于我国目前能源消费的主体还是化石能源, 因此与能源消耗相伴随的是温室气体的大量排放。化石能源是人为温室气体的最大来源, 工业革命以来, 大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度已经从 280 ppm 增

加到近 380 ppm, 从而导致全球平均温度增长了约 1℃, 不仅会引起海平面的上升, 而且会增加全球极端气候发生的频率, 给全球生态平衡, 以及人们的正常生活带来极为不利的影 响。2005 年中国温室气体净排放总量已经达到 70.46 亿吨<sup>[2]</sup>, 而随 着经济的发展, 中国一次能源消费总量由 2005 年的 1 601.2 百万吨油当量增加到 2012 年的 2 735.2 百万吨油当量<sup>[3]</sup>, 因此我国的温室气体排放量与 2005 年相比必然又发生了较大的增长。随着我国工业化和城市化进程的加快, 能源消费量和温室气体排放量还将进一步增加, 已经成为我国经济社会发展的主要限制性因素之一。

面对能源短缺和温室效应给人们带来的挑战, 寻找一种可再生、并且不增加温室气体排放量的新能源, 成为当前人类的主要任务之一。微藻能源作为第三代生物能源, 具有环境相容性好、潜在

收稿日期: 2014-12-18

基金项目: 本项目受 2011 年度中国清洁发展机制基金赠款项目资助(项目编号 1113018), 在此表示感谢。

第一作者简介: 李建华(1986-), 女, 山西忻州人, 毕业于哈尔滨工业大学, 硕士, 助理工程师, 主要从事水污染处理和生物能源研究。

产量大,特别是具有“碳平衡”的特点,不增加温室气体排放量,因此作为化石能源的替代品,逐渐被人类所重视。

## 1 微藻能源的发展

微藻能源的利用形式多种多样,生产方法也不尽相同,根据工艺原理的不同,可将微藻能源的利用方式分为生化转化、热解、转酯化和直接燃烧。

### 1.1 生化转化

生化转化包括厌氧消化、乙醇发酵和光合产氢三种。厌氧消化是利用厌氧菌将有机质转化为 $\text{CH}_4$ 、 $\text{CO}_2$ 等生物燃气的过程,适用于含水率达80%~90%的有机质,由微藻生物质厌氧消化所能回收的能量与提取微藻油脂所获得的能量相当,而且还能留下营养丰富的剩余物作为后续的微藻培养基。乙醇发酵是将多糖类物质通过微生物发酵转化为乙醇的过程。微藻是乙醇发酵的良好原料,因为干藻生物质中具有较高淀粉含量(37%),而淀粉转化为乙醇的效率可以达到65%。光合产氢的方法包括两段法和一步法两种。在两段法中, $\text{H}_2$ 和 $\text{O}_2$ 在不同时间生成,两步法产氢的理论产率能够达到 $198 \text{ kgH}_2/(\text{ha}\cdot\text{d})$ 。一步法则是保持微藻在厌氧环境,其持续产氢时间比两段法更为短暂,通过持续通入氮气保持培养液的无氧环境,可以延长微藻的产氢时间。

表1 微藻热解油和木材热解油元素组成和理化性质比较

	自养藻热解油	异养藻热解油	木材热解油
C含量/%	62.07	76.22	56.4
H含量/%	8.76	11.61	6.2
O含量/%	19.43	11.24	37.3
N含量/%	9.74	0.93	0.1
热值/(MJ/kg)	30	41	21
密度/(kg/L)	1.06	0.92	1.2

### 1.2 热解

在热解转化方面,如果热解过程控制较好,能量转化率可达到95.5%。1993年曾将蛋白质含量较高的盐藻作为液化热解材料,获得了低硫、低氮的优质油,促进了人们对微藻热解产油的研究。热解产物的组成与产率与原料密切相关。Miao等<sup>[4]</sup>分别以自养*Chlorella protothecoides*和异养*Chlorella protothecoides*生物质为原料,在500℃时快速热解所获得的热解油性质如表1所示。与木材热解

油相比,微藻热解油的热值更高,与石油热值相近(42 MJ/kg),因此更适于替代化石燃料。由于异养藻的脂含量(55.2%)高于自养藻(14.57%),所以其热解油产率比自养藻提高3.4倍。

### 1.3 转酯化

转酯化的利用方式是将藻细胞中油脂提取后,与短链醇发生转酯化反应,制备生物柴油进行利用。微藻生物柴油实现规模化应用的关键在于控制微藻油脂的成本,微藻培养所需的营养底物和微藻收集所消耗的能量是造成微藻油脂成本居高不下的主要因素<sup>[5]</sup>。对于小球藻、栅藻等能够进行异养、混养的微藻,在有机底物存在时,其生长速率和细胞密度比自养时能够提高数倍,但是需要葡萄糖或其他小分子有机物做为底物,而且需要对微藻进行无菌培养,成本较高。而对于以 $\text{CO}_2$ 为碳源的自养微藻,受光透射的限制往往只能达到1 g/L左右的细胞密度,因此微藻收集困难,消耗能量较多,并且藻细胞的生长速率也较低,培养时间较长,增加了培养成本。

### 1.4 直接燃烧

直接燃烧通常要求对生物质进行干燥、粉碎等预处理,这会增加额外的能量消耗,从而增加了成本。由于微藻细胞的粒径较小,因此可以省略粉碎的过程,另外微藻燃烧的污染物排放也较低。较高的油脂和碳氢化合物含量能够提高微藻的热值,脂含量55.2%的异养藻热值可以达到 $27 \text{ MJ/kg}$ <sup>[4]</sup>。微藻生物质还可以掺杂到液体燃料中使用,Scragg等<sup>[6]</sup>将藻类匀浆与油菜籽生物柴油混合后,添加少量的表面活性剂,形成了稳定的微油混合燃料,用作柴油机的燃料,柴油机的运行没有受到显著影响,并且与石化柴油相比,微油混合燃料的 $\text{CO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ 排放量还有所降低。不过目前关于微藻直接燃烧的研究还较少,相关研究还需要深入开展。

## 2 微藻对环境的治理

### 2.1 废水处理

利用微藻可以去除废水中的有机物、重金属和病毒等污染物,同时培养微藻,用于微藻能源的生产,这样能够节省营养底物的费用,并减少水资源的消耗,从而降低生产成本,有利于实现微藻能源的工业化生产。

由于废水中的污染物成分较为复杂,因此可

能会对微藻的生长产生一定的抑制作用,对废水进行稀释能够减轻污染物对微藻的抑制,但是当废水中不存在微藻抑制底物时,废水稀释度减小增加了培养基中的营养物质浓度,因此微藻生物质密度得到提高。Wang 等<sup>[7]</sup>以野外分离的一株小球藻对厌氧消化后的牛粪废液进行处理,在不同稀释倍数下  $\text{NH}_4^+$  去除率均能达到 100%,TP 的去除率则由 25 倍稀释时的 74.7% 下降到 15 倍稀释时的 62.5%。其他人以养牛场废水作为培养基,以包括 *Clorella*, *Micractinium* 和 *Actinastrum* 在内的混合藻群对废水进行处理,25% 废水时的微藻生物质密度比 10% 废水时提高近 1 倍,脂含量则由 14% 提高到 29%。

当以异养或混养微藻对市政污水等有机物含量较低的废水进行处理时,向培养液中提供  $\text{CO}_2$ , 有助于微藻的生长,因为  $\text{CO}_2$  能够调节废水中 C、N、P 之比,使其更接近 Redfield 比例,从而得到较高的微藻生长速率,降低出水中的污染物浓度。Wang<sup>[7]</sup>利用 *Chlorella sp.* 处理牛粪消化液,对藻细胞的元素分析表明,其 C/N 为 2.64~3.81,而废水中被利用的 C/N 为 0.83~1.12,因此作者认为小球藻还通过光合作用利用了大气中的  $\text{CO}_2$ 。当以市政污水为培养基,分别以空气和  $\text{CO}_2$  混合气为气源,利用混合藻群对废水进行处理,微藻生物质密度由空气时的 317 mg/L 提高到  $\text{CO}_2$  混合气的 812 mg/L,油脂产率由 9.7 mg/(L·d) 提高到 24.4 mg/(L·d),对氨氮的去除率则由 84% 提高到 99% 以上。

## 2.2 生物固碳

生物固碳是通过微生物或植物的光合作用,将大气中的  $\text{CO}_2$  转化为生物质,从而将其从大气中分离出来并固定。生物固碳不需要对气源中的  $\text{CO}_2$  进行预先分离,而且可以在  $\text{CO}_2$  固定的同时生产生物质,作为生物能源的原料,因此成本较低,发展前景更为广阔。

植物只能吸收固定化石燃料燃烧所排放  $\text{CO}_2$  的 3%~6%,主要是由于其较慢的生长速度所造成的。与植物相比,由于微藻的生长速率较快,因此其光合固碳的效率可以提高 10~50 倍。微藻除可以直接利用大气或烟道气等气体中的  $\text{CO}_2$  外,还可以利用  $\text{CO}_2$  与其他物质反应所生产的碳酸盐和碳酸氢盐。许多微藻种类都表现出利用碳酸盐为碳源进行生长的能力,以碳酸盐-微藻作为  $\text{CO}_2$  固定的途径时,能够将工厂夜晚排放的  $\text{CO}_2$  转化为碳酸盐暂时

进行储存,白天时再由微藻进行固定,同时碳酸盐的投入会提高溶液的离子浓度和 pH,从而能够限制其他物种对微藻培养液的污染。不过在  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  和  $\text{HCO}_3^-$  中,微藻最容易利用  $\text{CO}_2$ 。

$\text{CO}_2$  的固定速率受微藻种类、 $\text{CO}_2$  含量、温度等因素的影响,表 2 列举了数种用于  $\text{CO}_2$  固定的微藻及其生长特性,并根据微藻生物质的化学通式  $\text{CO}_{0.48}\text{H}_{1.83}\text{N}_{0.11}\text{P}_{0.01}$ ,对  $\text{CO}_2$  的固定速率进行了计算。

除用于  $\text{CO}_2$  固定外,微藻还能够吸收利用废气中的氮氧化物和硫氧化物,同时对废气中的悬浮颗粒物也有一定的去除作用,在这里就不再详细阐述。

表 2 部分用于  $\text{CO}_2$  固定的微藻种类<sup>[8]</sup>

藻种名称	$\text{CO}_2$ 含量/%	温度/ $^{\circ}\text{C}$	微藻生长速率/(g/l·d)	$\text{CO}_2$ 固定速率/(g/l·d)
<i>Chlorococcum littorale</i>	40	30		1.0
<i>Chlorella kessleri</i>	18	30	0.087	0.163
<i>Chlorella sp.</i> UK001	15	35	-	>1
<i>Chlorella vulgaris</i>	15	-	-	0.624
	空气	25	0.040	0.075
	空气	25	0.024	0.045
<i>Chlorella sp.</i>	40	42		1.0
<i>Dunaliella</i>	3	27	0.17	0.313
<i>Haematococcus pluvialis</i>	16~34	20	0.076	0.143
<i>Scenedesmus obliquus</i>	空气	-	0.009	0.016
	空气	-	0.016	0.031
	18	30	0.14	0.26
<i>Botryococcus braunii</i>	-	25~30	1.1	>1.0
<i>Spirulina sp.</i>	12	30	0.22	0.413

## 3 结语

微藻能源原料来源广,潜在规模巨大,而且藻细胞生长适应性强,能够利用各种废气废水作为生长底物,在进行能源生产的同时,还处理了各种废物,将是未来生物能源的一个重要发展方向。目前由于微藻能源的生产成本还较高,同时世界煤炭和石油价格低迷,因此还不宜于立刻投入大规模生产,但是应加大相关研究投入,解决各种相关问题,为以后的发展做好准备。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2013 年国民经济和社会发展统计公报[R]. [http://www.gov.cn/gzdt/2014-02/24/content\\_2619733.htm](http://www.gov.cn/gzdt/2014-02/24/content_2619733.htm), (下转第 39 页)

番红花红的动态吸附实验结果如图 7 所示,利用活性炭对番红花红进行吸附时,开始出水脱色率达到 60 % 多,但很快达到饱和带,其吸附容量较小。利用壳聚糖吸附番红花红,其脱色率呈缓慢下降趋势,吸附质壳聚糖在较长的时间内均有一定的吸附能力,其吸附容量明显高于活性炭。利用活性炭的穿透时间为 20 min,而利用壳聚糖的穿透时间为 100 min。因此,在实际应用中,利用壳聚糖吸附番红花红明显好于利用活性炭。利用壳聚糖吸附番红花红还存在此现象,在开始的 30 min 中内,壳聚糖对番红花红的吸附容量上升很快,但 30 min 后,上升趋势减缓,100 min 后,基本达到饱和现象。而利用活性炭吸附番红花红时,在开始的 10 min 内,吸附容量上升趋势明显,20 min 后,基本达到饱和。

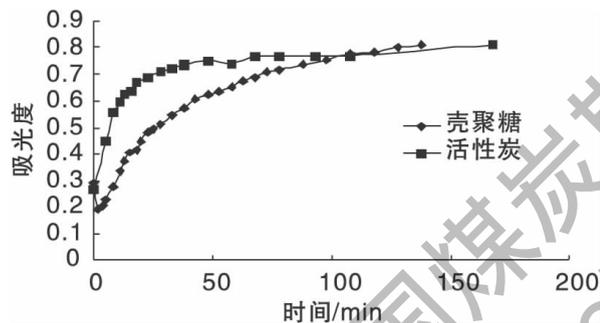


图 7 番红花红动态吸附

结果也可以发现在对番红花红的吸附中,壳聚糖吸附剂的脱色能力与活性炭相比,表现出更好的吸附效果。在相同体积的吸附剂条件下,壳聚糖不但脱色率高,相同质量的产品的吸附容量高,而且穿透时间明显好于活性炭。因此利用壳聚糖吸附番红花红是一种较为理想的途径。而在对碱性品红的吸附中,两者的性状相差无几,优势不明显。在实际应用中,要具体考虑吸附质染料的性状,以便更好的选择吸附剂。

### 3 结论

壳聚糖在处理染料废水方面,由于壳聚糖的独特分子结构,它对许多类型的染料分子具有很高的亲和力,因此壳聚糖可以说是水处理中非常有潜力的吸附材料。

### 参考文献

- [1]徐鑫,王静.甲壳素和壳聚糖的开发及应用.哈尔滨工业大学学报.2002,34(2):95-97.
- [2]曾德芳,余刚.天然有机高分子絮凝剂壳聚糖制备工艺的改进.环境科学,2001,22(3):123-125.
- [3]汪玉庭,谭淑英.新型冠醚交联壳聚糖的吸附性能.环境污染与防治,2000,22(1):8-10.
- [4]Guymont F J,Suffet I H.Active Carbon Adsorption of Organics from the Aqueous phase.Eviron Sci Technol,1994,120(4):783-802.
- [5]陈亮.壳聚糖对染料吸附动力学研究.上海环境科学,2001,20(3):140-142,145.

(上接第 10 页)

2014 年 2 月 24 日.

[2]国家发展和改革委员会应对气候变化司.中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[R].北京:中国经济出版社,2013:58-59.

[3]戴德立.2013 年 BP 世界能源统计年鉴(中文版)[R].北京:BP 集团,2013:40.

[4]Miao X. L., Q. Y. Wu. High yield bio-oil production from fast pyrolysis by metabolic controlling of *Chlorella protothecoides* [J]. Journal of Biotechnology, 2004, 110(1): 85-93.

[5]Schlesinger A., D. Eisenstadt, A. Bar-Gil, H. Carmely, S. Einbinder, J. Gressel. Inexpensive non-toxic flocculation of microalgae

contradicts theories; overcoming a major hurdle to bulk algal production [J]. Biotechnology Advances, 2012, 30(5): 1023-1030.

[6]Scragg A. H., J. Morrison, S. W. Shales. The use of a fuel containing *Chlorella vulgaris* in a diesel engine [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2003, 33(7): 884-889.

[7]Wang L., Y. C. Li, P. Chen, M. Min, Y. F. Chen, J. Zhu, R. R. Ruan. Anaerobic digested dairy manure as a nutrient supplement for cultivation of oil-rich green microalgae *Chlorella* sp. [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(8): 2623-2628.

[8]Wang B., Y. Q. Li, N. Wu, C. Q. Lan. CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 79(5): 707-718.