

文章编号 :1004-0374(2011)01-0121-06

## 藻类生物柴油研究现状与展望

王 萌, 陈章和 \*

(华南师范大学生命科学学院, 广州 510631)

**摘 要:** 随着世界能源危机和环境恶化的加剧, 新型绿色燃料——生物柴油备受关注。目前, 世界范围内主要以油料作物和动物脂肪为原料生产生物柴油, 但存在很多局限性。藻类本身具有很多优点, 以藻类为原料生产的生物柴油是真正的环保可再生能源, 但是藻类生物柴油的生产工艺费用较高, 生产技术还不成熟, 仍需要进一步的研究。该文主要介绍藻类生物柴油的优越性、生产工艺以及研究现状, 分析了生产过程中存在的问题, 展望了未来藻类生物柴油生产工艺研究的重点和发展趋势。

**关键词:** 藻类; 生物柴油; 优越性; 生产

中图分类号: Q914.82; Q949.2; F062.1 文献标识码: A

### Research status and prospects for algae biodiesel: a review

WANG Meng, CHEN Zhang-He\*

(College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract:** With the aggravation of energy crisis and environmental pollution worldwide, biodiesel fuel has received more and more attention in recent years. At present, biodiesel is mainly derived from oil crops and animal fats, it can not meet environmental and economic sustainability. Lots of studies have shown algae are the most promising source for biodiesel production, so algae-based biodiesel has become more attractive. Because of its environmental benefits, algae-based biodiesel is considered as the most potential fuel alternative. As technologies for biodiesel production are sophisticated and costly, biodiesel production from algae is limited. This paper reviews the current status of microalgae used for biodiesel production, including its advantages and production process. Furthermore, production challenges and future perspectives for algae-based biodiesel production are also discussed.

**Key words:** algae; biodiesel; advantages; production process

随着化石能源的日益减少以及燃烧化石燃料所造成的环境污染加剧, 近年来生物柴油作为化石能源的绿色替代品备受关注。生物柴油是以生物体油脂与醇类物质(通常为甲醇、乙醇)为原料, 通过酯化反应而得到的长链脂肪酸甲酯<sup>[1]</sup>, 具有资源可再生、环境友好、可替代化石燃料的特点。1988年, 德国聂尔公司首次研发出这种新型清洁能源, 为解决世界能源危机做出了巨大贡献。目前世界范围内主要以大豆、油菜等高油脂农作物, 麻疯树、棉籽、棕榈等木本油料植物, 以及动物油脂和餐饮废弃油脂为原料生产生物柴油<sup>[2]</sup>; 但由于这些原料本身特点的局限性以及其较差的经济性, 远不能满足

经济发展所需的生物柴油量。在众多的生物质中, 藻类是一种独特的光合生物, 可将太阳能直接转化为化学能并且能够累积高含量的天然油脂; 藻类分布广泛, 适应环境能力强, 在光照和潮湿的环境中几乎都有藻类的存在, 有些甚至可以在盐碱环境下生长, 与油料植物相比, 藻类无需占用耕地资源, 不会与农业产生竞争关系, 不会造成粮食危机; 藻

收稿日期: 2010-07-04; 修回日期: 2010-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(30470346); 广东省自然科学基金项目(06025056)

\* 通讯作者: E-mail: chenzzh@scnu.edu.cn

类生长周期短,克服了油料植物生长周期长、易受季节变换和气候影响的特点,能为生物质燃料提供持续的原料供应。目前,藻类生物柴油是一个研究热点,具有广阔的开发利用前景。

## 1 藻类生物柴油的优越性

藻类是低等植物,种类繁多,分布极其广泛。藻类按其大小可分为大藻和微藻,大藻是直径大于2 mm的藻体,微藻是直径小于2 mm的单细胞或丝状藻体,微藻油脂含量较高,生长较快,是制备生物柴油的较好藻类<sup>[3]</sup>。目前,世界范围内大多以绿藻纲和硅藻纲中的高油脂微藻为原料研究生物柴油生产工艺,尤其是绿藻纲中的小球藻被认为是理想的能源微藻资源,而以大藻为原料的报道较少。据估计,大规模工业化生产的藻类生物柴油存在潜在的价格竞争优势<sup>[4]</sup>,与其他燃料相比,藻类生物柴油具有更大的经济价值和环境效益。

### 1.1 藻类油脂含量高

油脂是生产生物柴油的原料。藻类的含油量很高,一般占干重的20%~50%<sup>[5]</sup>,某些微藻的含油量最高可以达到生物质干重的80%以上<sup>[6]</sup>。影响藻类油脂合成的因素很多,通过改变藻类的培养条件和采用分子生物学技术均可进一步增加藻类的油脂含量。在适当的培养条件下,减少藻类培养基质中的氮元素,可以增加某些藻类的油脂含量,如眼点拟微球藻(*Nannochloropsis oculata*)和小球藻(*Chlorella vulgaris*)<sup>[7,8]</sup>。缪晓玲等<sup>[9]</sup>通过异养转化细胞工程技术获得了高油脂的异养小球藻(*Chlorella protothecoies*),其油脂含量是自养藻细胞的4倍。美国可再生能源国家实验室(The National Renewable Energy Laboratory, NREL)对几种硅藻进行基因工程改造,大大提高了藻类油脂含量<sup>[10]</sup>。藻类不仅含油量高,在一定的培养条件下也具有较高的产油率<sup>[5]</sup>。目前以油料植物和动物油脂为原料的生物柴油供应远远不能满足需求,而藻类为解决这一难题提供了希望。

### 1.2 藻类生长快,生物量大

大多微藻生长极其迅速,一般能在24 h内使自身生物量加倍,而在指数生长期内生物量倍增时间竟能缩短至3.5 h<sup>[5]</sup>。藻类生长周期很短,一般2~5 d便可完成一个世代,并且可终年生长。因此,可以每天收获,为生物柴油的生产提供了连续的原料供应。微藻的光合作用效率高,可以高密度种植,每英亩的年产量是产量最高的油料作物的7~31倍<sup>[11]</sup>,

巨大的生物量为制备生物柴油奠定了原料基础。而油料作物生长相对缓慢,生活周期长,并且只在一年的某个时期才可收获,且产量受气候和季节变换等外界因素的影响大,具有产量低、经济性差的特点,远远不能满足经济发展对能源的供应需要,因此不能成为制备生物柴油的长期原料。

### 1.3 藻类生长空间广阔

藻类分布极其广泛,适应环境能力强,大多生长于海洋、淡水湖泊等水域,甚至在潮湿的土壤、树干等湿处也均有分布。另外,藻类对土地的要求较低,在沙漠地区、盐碱地、干旱或半干旱的贫瘠土地上都可以生长,且不受气候限制。因此,可以在远离水源的非农业土地和盐碱化土地实现大规模培养。与油料作物相比,藻类可以充分利用海洋而非利用土地资源,大大减少了对淡水资源和耕地的利用,不必造成粮食危机。世界现有耕地资源贫乏,可用来发展能源作物的耕地十分有限,依靠种植油料作物为生物柴油提供油源不符合实际情况。

### 1.4 藻类的净化作用

藻类进行光合作用,将水、二氧化碳和其他无机物依靠光能合成有机物并释放出氧气。化石燃料燃烧时向大气中释放的二氧化碳,藻类可以通过光合作用吸收利用,对解决温室效应有一定的帮助,实现了二氧化碳的零排放,因此藻类在净化温室气体方面起着重要作用<sup>[12]</sup>。

藻类可利用废水中的废物作为生长的营养物,可吸收利用水体中的氮、磷和重金属元素,对水体环境有一定的净化作用<sup>[13]</sup>。陈博谦和尹澄清<sup>[14]</sup>在污水净化湿地模拟系统的实验中指出藻类是很好的水质评价和监测的指示生物。生产生物柴油后的残余藻体还可以用来生产氮磷含量高的化肥,这样就建立了一个循环系统。

鉴于以上两点考虑,很多研究者提出把大型工厂纳入藻类生物柴油的生产系统中。藻类生长在污水处理厂的废水中,并以发电厂产生的二氧化碳作为原料进行光合作用,这样既能制备生物柴油又能净化污水和空气,具有极大的经济、社会和环保效益。已有研究把小球藻(*Chlorella vulgaris*)培养在轮胎厂的废水中,吸收工厂释放的二氧化碳,并取得了一定的成效<sup>[15]</sup>。美国的GreenFuel公司把发电厂产生的二氧化碳作为藻类生长的原料,并且该项目已经取得了一定的成果<sup>[16]</sup>。

## 2 藻类生物柴油的制备

### 2.1 藻类规模化培养

规模化藻类培养是生产生物柴油的关键环节, 需要适宜的光照、温度、二氧化碳、水、营养物和 pH 等培养条件。目前规模化藻类培养主要有开放式体系和封闭式体系两种方式(表 1)。

#### 2.1.1 开放式光合生物反应器(open photobioreactor)

开放式光合生物反应器始于 20 世纪 50 年代, 以开放式跑道水池为主。跑道体系由一系列闭合环状再循环水道组成, 通常深 0.3 m, 藻种和培养液在池道内循环, 需时常添加营养物。目前全世界大多使用跑道体系培养藻类。NREL 在水生生物种计划(Aquatic Species Program, ASP)项目中, 在美国加利福尼亚州、夏威夷州和新墨西哥州应用开放式跑道体系进行大规模培养藻类的中试规模试验, 结果证明这种培养方式具有可行性<sup>[17]</sup>。培养液连续从浆轮前面输入水道, 完成一个循环回路后在浆轮的后面被收集, 进入下一个工序。跑道培养体系一般附有一个沉淀池来收获藻类。为保证培养液中有足够的 CO<sub>2</sub> 含量, 在跑道内设有释放 CO<sub>2</sub> 的装置。在体系中, 浆轮一直保持转动防止培养液沉降, 但转动也造成了跑道温度的升高, 水的蒸发恰好解决了这一问题<sup>[5,18]</sup>。

#### 2.1.2 封闭式光合生物反应器(closed photobioreactor)

封闭式光合生物反应器的种类很多, 以板状和管状最为常见。封闭式光合生物反应器一般是由一系列塑料或玻璃透明管道组成光收集器, 管道的直径小于 0.1 m, 适合单一藻种的培养。培养液连续从储存池进入一系列光收集管道, 经过一个循环后进入储存室。光生物反应器一般连有机械泵、气体交换装置、清洁装置和热交换装置, 分别用来产生连续湍流, 吸收管道中积累的氧气, 并向管道中输入二氧化碳, 清洁生物反应器和控制昼夜温度。与跑道培养体系相似, 封闭式光合生物反应器通过驱动装置产生湍流来抑制沉降。为了捕获最大限度的光照, 管道一般朝南北方向呈一列放置, 并且把放置管道的地面涂白或铺上白色塑料板。与开放式跑道体系相比, 封闭式光合生物反应器技术较不成熟, 但是具有较高的藻类生产量, 相信随着技术的进步, 封闭式光合生物反应器将会成为培养藻类的首选<sup>[4,19-20]</sup>。

鉴于这两种藻类规模化培养方式的特点, Schenk 等<sup>[12]</sup>指出利用开放式与封闭式光合生物反应

器相结合的混合系统来培养藻类的方法是可行的, 这样既保证了藻类的生物量又减少了生产成本(表 1)。

表1 两种藻类培养方式的比较

开放式光生物反应器	封闭式光生物反应器
自养藻类	自养或异养藻类
结构和运转简单	结构和运转复杂
生产成本低	生产成本较高
易被外界环境污染	不易被外界环境污染
培养条件参数不易控制	培养条件参数易控制
生物生产率低	生物生产率高
水分蒸发较快	水分蒸发较慢
二氧化碳供给不足	二氧化碳供应充足

### 2.2 收获藻种

收获藻种是生产生物柴油的一个关键环节, 在整个生产工艺过程中占有较大的经济消费比重。收集藻种时要根据培养系统中藻细胞的密度、大小、外界环境因素及技术水平等因素来选择具体方法。目前, 收集藻类一般有重力沉淀、离心沉淀、过滤、浮式离心以及絮凝等方法<sup>[20,21]</sup>。这几种方法一般结合使用, 以最大限度地收集微藻生物量, 避免浪费并保证藻种的纯度。藻类收集效率与其生长速度之间存在反比关系<sup>[22]</sup>。目前, 关于收集方法的研究不多, 并且目前的方法不能在经济和效率之间达到更好的平衡, 因此, 如何收获藻种仍然是一个值得深入研究的问题。

收集后的藻种泥浆要进行脱水处理后才能进行下一步生产工艺。日晒干燥、冰冻干燥、喷雾干燥、转鼓式干燥等工艺是常用的干燥脱水技术<sup>[23]</sup>。日晒干燥具有干燥时间长、场地需求大以及造价低的特点; 其他方法对时间和场地的要求不高, 但是费用昂贵。

### 2.3 藻油提取

脱水干燥后的藻种要进行细胞壁破裂, 以释放细胞内的油脂进行生物柴油的生产。常用的破裂细胞的方法有微波法、声裂法、细胞高压匀质法、滴穿法、超声法、高压灭菌法、冰冻法、有机溶剂法和渗压震扰法等。Lee 等<sup>[24]</sup>通过比较 5 种藻类细胞油脂提取方法, 发现微波方法不仅操作简单, 而且对藻类油脂的提取效率最高。Cravotto 等<sup>[25]</sup>比较了微波提取、超声波提取和有机溶剂提取 3 种方法, 发现微波和超声波两种方法具有提取时间少、

提取效率高的特点,是生物柴油生产过程中提取藻油的高效方法。

#### 2.4 生产生物柴油

酯交换法是生产生物柴油的传统方法,以油料作物和动物脂肪为原料的第一代生物柴油就是通过这种方法生产的,即在提取的藻油中加入一定量的甲醇,在一定温度下,与藻油中的甘油三酯发生酯交换反应,产生甘油和脂肪酸甲酯,再分离出副产品甘油,得到的甲酯就是生物柴油。在理论上酯交换反应中甘油三酯与甲醇的比例是1:3,但在工业生产时,通常加入过量甲醇以确保反应向生成生物柴油的方向进行。在酯交换反应中,可以用酸、碱或酶进行催化。使用酸催化剂的酯交换反应速度慢,在生产中很少使用;碱催化剂则能显著增强反应速度,且费用便宜,是目前最常用的催化剂,但是易与游离脂肪酸反应;酶催化剂不易与游离脂肪酸反应,且能减少对环境的污染,但是费用太高<sup>[2,10]</sup>。在反应过程中,为了除去藻油中的不饱和脂肪酸,还要在系统中进行催化加氢<sup>[26]</sup>。得到的生物柴油粗制品要进行后处理加工成精油,并改良其性能使之符合燃料的各项指标。

藻类不仅可以生产生物柴油,其生物量还可以通过其他方式转换成生物质能。目前,主要采用热化学转化和生物化学转化两种技术产生生物质能。热化学转化技术主要包括热解、气化、液化等方式<sup>[27]</sup>,生物化学转化技术包括厌氧消化和发酵等方式<sup>[25,28]</sup>。

热解是在绝氧的条件下,将生物量在超短时间和超高的加热速率下直接加热到适宜的温度(一般500左右),使其分解转化为其他液体、固体及气体的过程,用以生产生物质油等多种燃料。热解简单易行、不需要复杂的仪器设备,生产成本相对较低,是一种高效生产生物燃料的方法。藻类脂类含量高,含有少量纤维素,是很好的热解材料。孙俊楠等<sup>[29]</sup>在研究中指出采用热解技术将藻体细胞转化为液体燃料的方法能充分利用藻体细胞,获得的液态生物油能量密度高,氮、硫含量低且易于储运,具有更大的经济效益。微藻热解油的热值高、较稳定且具有很好的流动性,可直接作为民用燃料和内燃机燃料,也可经深加工作为汽油和柴油<sup>[30]</sup>。气化是指在高温(800~1 000 )条件下,把生物量部分氧化成可燃烧气体,目前关于气化的研究不多。液化是指在一定的压力和温度(300 )下,在催化剂的作用下直接把生物量转化成液体燃料。液化需要

复杂的反应装置,造价昂贵,但是培养成熟的藻体不需要干燥脱水就可直接用于液化处理,大大简化了生物质能的转化过程,并且节约了用于干燥脱水的费用。

厌氧消化是一种生物化学转化技术,可将生物量转化成甲烷和沼气,此方法适用于含水量高的生物量。发酵是把藻类生物量转化成乙醇,发酵的过程比较简单,是生产酒精的常用方法。

### 3 藻类生物柴油研发现状与前景展望

早在20世纪50年代,利用藻类生产替代化石能源的新型燃料的观点被首次提出;到了20世纪70年代,出现了一些研究藻类生物能源的机构;从21世纪开始,国际上对藻类生物柴油生产技术的研究得到了迅猛的发展。目前,第一代生物柴油已实现工业化大规模生产,由于以藻类为原料的第二代生物柴油更加符合可持续发展的需要,因而迎来了新的发展高潮。据估计,每公顷藻类生产生物柴油的产量是油料作物的上百倍<sup>[5]</sup>,可以完全缓解石化燃料枯竭造成的能源危机。与石化燃料相比,藻类生物柴油大大减少了有毒害气体的排放,是真正的环境友好型能源;藻类生物柴油的密度、黏度和热值等特征与传统柴油相似,无需改动柴油机构造而可直接添加使用,且燃烧性能和效率要高于普通柴油,使用时更安全<sup>[2]</sup>。据统计,生物柴油制备成本的75%是原料成本,高油脂藻类的培养工艺十分复杂,需要先进的科技和大量的资金做保障,因而藻类生物柴油的高成本使之在价格上不能与其他燃料竞争。

藻类生物柴油具有与第一代生物柴油相同的比较成熟的产油工艺,但在如何获得高油脂含量的原料方面却存在着巨大的技术难题有待解决,现有工艺导致生产效率低,进而阻碍了大规模生产的步伐,因此进一步研发藻种培养的一系列工艺对藻类生物柴油的普及至关重要。藻类生物柴油虽然具有良好的环境效益和社会效益,但是其高成本是限制大规模工业化生产的主要因素,只有降低成本,生物柴油才具较好的经济效益和广阔的商业化应用前景。

目前藻类生物柴油正处于从实验室走向规模工业化生产的过渡阶段。许多国家根据本国国情综合分析藻类生物柴油的可行性<sup>[31,32]</sup>,并积极参与这一项目的研究。美国在这方面的研究取得了最突出的

成果, 而其他国家和地区的研究则相对保守。现在一些科研机构 and 大型能源公司开始把精力转向利用藻类来开发第二代生物燃料, 并且一些大型项目正在向此方向进发, 准备做大规模商业性投产。2004年, 美国启动了“微型曼哈顿计划”, 由大量科研机构共同承担技术开发, 大力支持以绿藻为原料生产生物柴油。2007年, 美国国际能源公司宣布启动“海藻变油”研发计划, 利用海藻生产可再生燃料, 解决潜在的能源危机。2007年, 日本启动了大型海藻的生物质能源计划OSP项目, 利用马尾藻大规模生产汽车用乙醇。同时, 壳牌(SHELL)石油公司、美国 Sapphire 公司、荷兰 Algae Link 公司等大企业纷纷组建藻类业务部门, 加入开发藻类生物柴油的行列<sup>[33-35]</sup>。

我国耕地面积有限, 虽然具有较大的油菜籽、大豆生产量, 但是还远远不能满足需要, 因而油料作物的匮乏决定了我国不能以油料作物为原料生产生物柴油。为解决经济发展所需的能源要求和生物柴油原料短缺的矛盾, 发展藻类生物柴油是我国解决能源危机的一条可靠途径。我国幅员辽阔, 藻类产量居世界首位, 可为藻类生物柴油提供源源不断的原料供应。近10年来, 我国对藻类生物柴油的研发给予了高度重视, 并在工艺技术方面已经取得了一定的成功<sup>[36,37]</sup>。

为了鼓励环保型能源的开发利用, 除了先进的技术保障, 还需要政府对该产业进行引导与扶持。很多国家对生物柴油的工业化生产和市场销售都予以支持, 实施了免税或补贴等优惠政策, 这大大推进了生物柴油的商业化生产和使用, 促进社会就业和经济发展, 是一种保持可持续发展的可靠途径。

#### 4 结论

藻类的生长速度惊人, 产油量高, 能在咸水、污水和非农用土地上生长, 不与农作物争夺农田和淡水资源, 对空气和污水具有净化作用, 是生产生物柴油的最好材料之一, 被认为是最有可能取代石油能源的原料。与传统生物柴油相比, 藻类生物柴油对缓解农业压力和能源危机以及满足对非污染燃料的渴求都有着巨大的潜力, 具有更好的环保效应与应用价值, 被称为真正的“绿色燃料”。藻类生物柴油本质上是利用太阳能, 是真正的可再生能源。开发藻类生物柴油具有很高的商业价值和广阔的发展前景。

虽然藻类生物柴油在技术上具有可行性, 但要真正实现大规模工业化生产仍然有很多难题等待解决。总结前人的研究成果, 在今后藻类生物柴油的研究中, 应该着重研究以下方面的技术难题:

(1) 藻类收获的固液分离过程是生物柴油生产过程中的一个难题, 必须探索出一套既能获得最大生物量又经济实用的新方法, 避免不必要的浪费以节约成本;

(2) 根据实际生产条件综合考虑选择藻种, 着重考虑培养地区环境、生物反应器类型、营养物的供求情况、当地气候变化对所选藻类的影响, 选择在综合水平上达到最大优化的藻种, 而不是单单选择前人应用过的藻类;

(3) 应用基因工程改造的微藻, 虽然具有较高的油脂含量, 但是对自然生态系统存在潜在的威胁, 不适合开放式培养, 因此在提高含油量的同时也要考虑如何避免这种危害;

(4) 把藻类生物柴油的生产与污水处理厂及发电厂结合起来是一个完美的构想, 但是实际操作中存在很多问题, 这种连接有严格的土地规划限制, 并且要求生物柴油制备工艺要做到恰到好处, 以避免过多的污水得不到净化, 不适量的废气影响藻类的培养效果。

在藻类生物柴油生产工艺的研发方面, 除了必要的工业技术外, 生物学技术和方法也具有重要作用, 并且逐渐成为关键技术攻关的首选手段, 受到了越来越多的科研工作者的青睐。利用生物学方法在藻类油脂的合成代谢途径、藻类生长以及促进藻类获得最大的光合转换效率等方面进行研究, 再通过诱变育种、基因工程和细胞工程等手段调控微藻的产脂方式、代谢途径和自然生活方式等, 以增加藻类油脂含量以及获得最大生物量, 这对大大提高生物柴油生产效率具有重要意义, 为藻类生物柴油的推广使用奠定了强大的科技基础。

#### [参 考 文 献]

- [1] 贾虎森, 许亦农. 生物柴油利用概况及其在中国的发展思路. 植物生态学报, 2006, 30(2): 221-30
- [2] Demirbas A. Progress and recent trends in biodiesel fuels. *Energy Convers Manage*, 2009, 50(1): 14-34
- [3] Hossain ABMS, Salleh A, Boyce AN, et al. Biodiesel fuel production from algae as renewable energy. *Am J Biochem Biotechnol*, 2008, 4(3): 250-4
- [4] Chisti Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol*, 2008, 26(3): 126-31

- [5] Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv*, 2007, 25(3): 294-306
- [6] Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E, et al. Commercial applications of microalgae. *J Biosci Bioeng*, 2006, 101(2): 87-96
- [7] Rodolfi L, Zittelli GC, Bassi N, et al. Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. *Biotechnol Bioeng*, 2009, 102(1): 100-12
- [8] Converti A, Casazza AA, Ortiz EY, et al. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chem Eng Process*, 2009, 48(6): 1146-51
- [9] 缪晓玲, 吴庆余. 微藻油脂制备生物柴油的研究. *太阳能学报*, 2007, 28(2): 219-22
- [10] Huang GH, Chen F, Wei D, et al. Biodiesel production by microalgal biotechnology. *Appl Energy*, 2010, 87(1): 38-46
- [11] 许海朋, 张晓东, 张杰, 等. 利用微藻生产生物柴油的研究进展. *现代化工*, 2008, 28(10): 18-21
- [12] Schenk PM, Thomas-Hall SR, Stephens E, et al. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenerg Res*, 2008, 1(1): 20-43
- [13] Aslan S, Kapdan IK. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. *Ecol Eng*, 2006, 28(1): 64-70
- [14] 陈博谦, 尹澄清. 污水净化湿地模拟系统中细菌和藻类的生态分布研究. *生态学报*, 1998, 18(6): 634-9
- [15] Yun YS, Lee SB, Park JM, et al. Carbon dioxide fixation by cultivation using wastewater nutrients. *J Chem Technol Biotechnol*, 1997, 69(4): 451-5
- [16] 嵇磊, 张利雄, 姚志龙, 等. 利用藻类生物质制备生物燃料研究进展. *石油学报: 石油加工*, 2007, 23(6): 1-5
- [17] 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. U.S. Report NREL/TP580-24190. Golden CO [R]. National Renewable Energy Laboratory, 1998, 323p
- [18] Ogbonna JC, Tanaka H. Lights requirement and photosynthetic cell cultivation development of processes for efficient light utilization in photobioreactors. *J Appl Phycol*, 2000, 12(3-5): 207-18
- [19] Pulz O. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2001, 57(3): 287-93
- [20] Harun R, Singh M, Forde GM, et al. Bioprocess engineering of microalgae to produce a variety of consumer products. *Renew Sust Energ Rev*, 2010, 14(3): 1037-47
- [21] Mata TM, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renew Sust Energ Rev*, 2010, 14(1): 217-32
- [22] Danquah MK, Gladman B, Moheimani N, et al. Microalgal growth characteristics and subsequent influence on dewatering efficiency. *Chem Eng J*, 2009, 151(1-3): 73-8
- [23] Brennan L, Owende P. Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renew Sust Energ Rev*, 2010, 14(2): 557-77
- [24] Lee JY, Yoo C, Jun SY, et al. Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. *Bioresour Technol*, 2010, 101(1): 75-7
- [25] Cravotto G, Boffa L, Mantegna S, et al. Improved extraction of vegetable oils under high-intensity ultrasound and/or micro-waves. *Ultrason Sonochem*, 2008, 15(5): 898-902
- [26] Jang ES, Jung MY, Min DB. Hydrogenation for low trans and high conjugated fatty acids. *Compr Rev Food Sci Food Safety*, 2005, 4(1): 22-30
- [27] Demirbas MF. Biorefiner for biofuel upgrading: a critical review. *Appl Energ*, 2009, 86(1): S151-S161
- [28] Amin S. Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae. *Energ Convers Manage*, 2009, 50(7): 1834-40
- [29] 孙俊楠, 张建安, 杨明德, 等. 利用微藻热解生产生物燃料的研究进展. *科技导报*, 2006, 24(6): 26-7
- [30] 彭卫民, 李祥书, 吴庆余, 等. 采用热解技术将湖泊浮游藻类用于燃料生产. *环境污染治理技术与设备*, 2000, 1(3): 24-8
- [31] Khan SA, Rashmi, Hussain MZ, et al. Prospects of biodiesel production from microalgae in India. *Renew Sust Energ Rev*, 2009, 13(9): 2361-72
- [32] Um BH, Kim YS. Review: A chance for Korea to advance algal-biodiesel technology. *J Ind Eng Chem*, 2009, 15(1): 1-7
- [33] 杨治中, 严卓晟, 严锦璇, 等. 海藻生物柴油制备新技术途径——超声化学技术与固定化半导型纳米氧化物催化酯交换反应. *材料研究与应用*, 2008, 2(4): 387-9
- [34] 李雪静, 张璐瑶, 乔明, 等. 藻类生物燃料研究开发进展. *中外能源*, 2009, 14(4): 23-6
- [35] 任小波, 吴园涛, 向文洲, 等. 海洋生物质能研究进展及其发展战略思考. *地球科学进展*, 2009, 24(4): 403-10
- [36] Miao XL, Wu QY. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresour Technol*, 2006, 97(6): 841-6
- [37] Xiong W, Li XF, Xiang JY, et al. High-density fermentation of microalga *Chlorella protothecoides* in bioreactor for microbio-diesel production. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2008, 78(1): 29-36