

微藻生产生物柴油的研究进展

王国盼¹, 苏宏飞¹, 苏辉兰¹, 黄飞², 韦春葵¹, 黄时海^{1*}

(1. 广西大学生命科学与技术学院, 广西南宁 530005; 2. 南宁高新区, 广西南宁 530007)

摘要:微藻相对于其他的生物柴油原料有占地面积少、含油量高、生长周期短等不可比拟的优点。微藻生物柴油在试验规模下容易实现,但放大到工业化生产比较困难,生产中的瓶颈问题主要是生产成本高及微藻生长速率和油脂积累量间存在着严重的矛盾。对微藻生物柴油的研究历程、流程、存在问题及前景进行了分析。

关键词:微藻;生物柴油;规模培养

中图分类号:TK6

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2014)06-0041-05

Research progress of biodiesel from microalgae

WANG Guo-pan¹, SU Hong-fei¹, SU Hui-lan¹, HUANG Fei², WEI Chun-kui¹, HUANG Shi-hai^{1*}

(1. Life Science and Technology College, Guangxi University, Nanning 530005, China;

2. Nanning New and High-tech Industrial Development Zone, Nanning 530007, China)

Abstract: Compared with other available feedstocks, microalgae exhibits several advantages, such as fast growth, high oil content and requirement for smaller arable land, *et al.* The cultivation of microalgae for energy production is still being conducted at the pilot-scale because it is hard to scale-up. The main bottle-neck is the high cost and the contradiction between rate of growth and rate of oil accumulation. In this paper, recent research progress of biodiesel from microalgae and the engineering of microalgae processes are introduced. The existing challenges and the promising perspectives are also discussed.

Key words: microalgae; biodiesel; mass cultivation

自18世纪第一次产业革命以来,世界以惊人的速度消耗着各种化石能源(如煤、石油、天然气等),限制了能源的可持续发展,且因为人类活动排放的CO₂引起温室效应进而引起全球变暖,这两大问题是21世纪全球都面临的问题,寻找洁净可再生能源势在必行^[1-3]。在寻找洁净可再生能源的策略中,生物质能源被认为是最好的选择之一,第一代生物质能源是应用传统技术从糖、淀粉及植物油和动物油中提取出的生物燃料^[4],但由于会浪费食物资源而存在争议;第二代生物质能源是利用非食用性的或浪费的植物油,及农业上的废弃物如稻草、麦秆、树叶等^[5];第三代生物质能源就是最近发展迅速的微藻生物柴油。

生物柴油的原料有很多,从最开始的含油植物如大豆、含油种子,到后来的产油作物如麻风树、棕榈树,再到近几年发展起来的微藻。相对于含油作物占地面积大、产油木本植物生长周期长等缺点,微藻作为生物柴油的原料具有不可比拟的优势^[6-8]:微藻培养周期短,倍增时间在24 h之内;产油率高且油脂质量好;环保优势强,能缓解CO₂排放压力,能利用污水中的氮、磷等作为营养进而处理污水;占

地面积小;改造空间大等。然而,利用微藻生产生物柴油也存在着生产成本高,含油率和生长速率之间有着严重的矛盾两大瓶颈问题^[2,9],需对整个生产过程进行优化来实现微藻生物柴油商业化大规模生产。

1 微藻生物柴油的国内外研究历程

微藻生物燃料的生产已经不是一项新的技术了,美国、日本等发达国家20世纪七八十年代就认识到了微藻作为替代能源资源的巨大价值。1978—1996年,美国能源部通过国家可再生能源实验室启动的“水生生物种计划”,开展了微藻生物资源普查、藻种选育及微藻规模培养等一系列卓有成效的探索工作^[10]。目前美国的微藻能源公司数量已经占到世界的78%。1990—2000年,日本国际贸易和工业部资助的一项名为“地球研究更新技术计划”的项目分离出了1万多种的微藻^[11]。

进入21世纪以后,石油价格的增长刺激了微藻生物柴油的发展,许多国家的政府和企业都投入大量资金来进行产油微藻的开发。2007年,美国国际能源部推出的名为“微型曼哈顿计划”的微藻能源计划,掀起了开发微藻生物柴油的热潮。

收稿日期:2014-01-16;修回日期:2014-04-07

基金项目:南宁市科学研究与技术开发计划项目(20125193);梧州市科学研究与技术开发计划项目(201201023)

作者简介:王国盼(1991-),女,硕士生;苏宏飞(1985-),男,硕士生;黄时海(1967-),男,博士,教授,研究方向为食品与发酵工程,通讯联系人,0771-3231243,huangshi-hai@21cn.com。

欧洲微藻生物柴油的发展仅次于美国,英国碳基金公司(Carbon Trust)在 2008 年 10 月资助启动了目前世界上最大的藻类生物燃料项目,投入了很大资金用于发展相关技术和基础设施;荷兰 Algae Link NV 公司于 2007 年 10 月开发出的微藻光生物反应器系统具有其他装置所没有的优点,是最先商业化的小型试验装置,且有利于降低成本^[12]。

在中国,对微藻生物柴油研究最早的是 Wu 的团队^[13],异养培养小球藻导致 CO₂ 的排放且成本高限制了此项目的研究。近年来,微藻生物柴油技术引起了我国政府和企业的重视,各高校和科研院所也都开展了这方面的研究,集中于微藻的筛选与培养、生物反应器设计及下游加工技术。海南绿地微藻生物科技有限公司利用 CO₂ 养殖微藻并转换成生物柴油获得成功^[14];中国石化股份有限公司与中科院联合启动了“微藻生物柴油成套技术”项目,目标计划到 2015 年完成万吨级工业生产装置。然而,尽管对试验规模下微藻培养技术的研究取得的进步很大,但对微藻生物柴油大规模生产的研究还处于发展阶段。

2 微藻生物柴油的技术流程及优化策略

微藻生物柴油成套技术涵盖多个技术环节,是

一个复杂的系统工程,包括微藻的筛选和培育,获得性状优良的高含油量藻种,在光生物反应器中吸收阳光、CO₂ 等,生成微藻生物质,最后经过采收、加工,转化为微藻生物柴油。在提取油脂制生物柴油后,微藻体还含有大量蛋白、多糖、色素及其他营养成分,可用来加工成高附加值产品,像饲料、药物等。大致流程图如图 1。

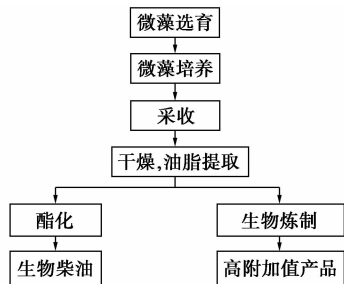


图 1 微藻生物柴油的生产技术流程

2.1 微藻藻种的选育及基因改造

微藻是以光合自养模式生存的微生物,在全球各种生态环境中普遍存在着,其物种的多样性是高等油料植物望尘莫及的。因此,在实际生产中,人们可以更从容地选择具有生产所需特殊性状的优良藻种。优良富油藻种的选育是整个生产过程效率提高与成本降低的关键,应综合考虑几个因素的平衡^[15-17]:

(上接第 40 页)

[18] Song Liang, Qiu Zhaobin. Biodegradable poly(butylene succinate)/multi-walled carbon nanotubes nanocomposite at low carbon nanotubes loading: Morphology, crystallization and mechanical property [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2010, 10(2): 965-972.

[19] Tan Licheng, Chen Yiwang, Zhou Weihua, et al. Novel approach toward poly(butylene succinate)/single-walled carbon nanotubes nanocomposites with interfacial-induced crystallization behaviors and mechanical strength [J]. *Polymer*, 2011, 52(16): 3587-3596.

[20] Wan C, Chen B. Reinforcement of biodegradable poly(butylene succinate) with low loadings of graphene oxide [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 127(6): 5094-5099.

[21] Lee S H, Wang S. Biodegradable polymers/bamboo fiber biocomposite with bio-based coupling agent [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2006, 37(1): 80-91.

[22] Tang Y R, Lin D, Gao Y, et al. The prominent nucleating effect of finely dispersed hydroxyl functional hexagonal boron nitride on biodegradable poly(butylene succinate) [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014.

[23] Hwang S Y, Yoon W J, Yoo E S, et al. Effect of the mesoporous structure of titanium silicate (TS-1) zeolite on the melting behavior and isothermal crystallization behavior of poly(butylene succinate)/TS-1 zeolite hybrid composites [J]. *Macromolecular Re-*

search, 2012, 20(10): 1088-1095.

[24] 高利斌,陈宇,许国志. 成核剂对 PBS 结晶性能及力学性能的影响 [J]. *北京工商大学学报:自然科学版*, 2006, 24(2): 5-8.

[25] 张敏,宋洁,葛正浩,等. β -环糊精与聚丁二酸丁二醇酯(PBS)包合物对 PBS 结晶性的影响 [J]. *高分子材料科学与工程*, 2012, 28(5): 96-99.

[26] Yu J, Zhang M, Chen X, et al. Crystallization behaviors and morphology of polypropylene containing nucleating and degradation agents [J]. *Journal of Macromolecular Science*[®], 2009, 48(1): 1-12.

[27] Run M, Wang J, Yao M, et al. Influences of hyperbranched poly(amide-ester) on the properties of poly(butylene succinate) [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 139(2): 988-997.

[28] Ye H M, Tang Y R, Xu J, et al. Role of poly(butylene fumarate) on crystallization behavior of poly(butylene succinate) [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2013, 52(31): 10682-10689.

[29] Ye H M, Wang R D, Liu J, et al. Isomorphism in poly(butylene succinate-co-butylene fumarate) and its application as polymeric nucleating agent for poly(butylene succinate) [J]. *Macromolecules*, 2012, 45(14): 5667-5675.

[30] Yang B, Ni H, Huang J, et al. Effects of poly(vinyl butyral) as a macromolecular nucleating agent on the nonisothermal crystallization and mechanical properties of biodegradable poly(butylene succinate) [J]. *Macromolecules*, 2013. ■

生长速率与油脂含量平衡;对营养环境如 CO_2 浓度的耐受性好且对环境的可能性危害最小;便于生物量采收及后加工,能获得高附加值成分等。开发高含油率、环境适应性强的新油料藻株是微藻生物柴油发展的重点。

微藻选育的另一途径为基因分子改造^[15-17],构造富油工程藻,具体的方法可通过改变微藻基因组或其调控元件、加强产油代谢途径或减少产油旁代谢来实现。然而,现阶段只有很少种类的微藻能进行基因改造,对基因表达调控机制的说明不够,也缺乏精细的分子工具。这些不足阻碍了基因改造法的广泛应用。

2.2 微藻的大规模培养

2.2.1 微藻代谢机制的了解及脂肪酸组成分析

微藻在自然设计上会选择合适的营养和能量,然后储存,进而优化达到资源的最大利用化。生长需碳源和光,其代谢途径会随着环境条件的改变而改变,如 pH 能影响微藻的生长化学计量比。

微藻油脂含量及组成在微藻作为生物柴油原料筛选时被认为是一个关键性的生理因素^[18]。作为生物柴油的脂肪酸醇酯必须顺从已规定的水平标准,如美国材料试验协会(ASTM)相关标准。微藻相对于植物含有更多种类的脂肪酸组成,且不饱和脂肪酸比例高,其中含有的一些多不饱和脂肪酸如 EPA、DHA 具有很高的营养药用价值,能广泛应用于油脂化学^[19]。因此,在考虑到微藻生产生物柴油及其生物炼制时,对微藻脂肪酸组成选择不同的、正确的分析方法很重要,气相色谱法是最常用的分析方法。

2.2.2 微藻培养模式

根据研究,目前发现含油量高的微藻主要有小球藻(*Chlorella sp.*)、杜氏盐藻(*Dunaliella sp.*)、微绿球藻(*Nannochloropsis sp.*)等真核藻类,小球藻被普遍认为是生产生物柴油的优良原料。在综合衡量一株微藻是否适于生产生物柴油时,产油速率是一个很重要的标准。有些藻细胞的生长及油脂含量还与培养条件密切相关。目前主要的培养模式有自养、异养和混养。

(1) 自养培养

自养是微藻最常见的生长方式,美国能源部门的水生生物种项目认为自养开放式培养是微藻培养的首选方法^[13]。微藻自养培养不占用耕地,利用光能消耗 CO_2 的生长特性与荒漠化地区特点的契合度高,充分利用我国广大荒漠化地区大力发展微藻

生物柴油具有明显的环境效益和潜在的经济效益^[20]。然而,自养培养能达到的藻细胞密度低,大大降低了微藻的产油效率,也给细胞的采收带来很大困难。

(2) 异养培养

异养培养不受光照的影响,生长速度快,较自养培养能获得更高的细胞浓度及油脂。然而,异养培养中易受污染的影响^[21],且不直接利用太阳光和 CO_2 ,有机碳源成本花费大,不适合大规模户外培养。况且异养培养得到的高密度微藻会限制氧的传递,而为了维持有氧条件,需提高搅拌速率,这样增加了能耗,且增大的剪切力对微藻细胞的增殖是不利的。

(3) 混养培养

混养培养能达到高的藻细胞密度和高的油脂含量,但杂菌污染会是个挑战。一种培养方式是 Xiong 等^[22]提出的先在自养条件下固定 CO_2 ,然后在异养条件下积累油脂,高杂菌污染可能性阻碍了此方法的发展。另一方法是 Santos 等^[23]提出的将自养与异养生物反应器联合起来,自养与异养培养同时进行。大气中 CO_2 的体积分数只有 0.04%,不能满足微藻生长体积分数为 2%~5% 的需要^[24],且工厂废气中除 CO_2 外,还含有 SO_2 、 NO_x 等有害气体抑制微藻的生长。生物反应器的联合降低了碳源成本且能保证碳源是洁净无毒的,具有很大的发展前景。

2.2.3 生物反应器的优化设计

微藻培养可以在开放式跑道池里培养,也能在高密度生物反应器中培养。开放式培养具有成本低、易操作、能耗少,但污染难控制、水分易蒸发、藻体浓度低等特点,采收过程花费大。生物反应器内是一个密闭的环境,培养微藻能在短时间内达到高的藻体密度,且能避免杂菌污染。反应器类型主要有垂直柱、管道、平板式、环状,如今采用较多的是管道式或平板式反应器,通过减少光程和增大光照面积的方式来提高微藻光合作用效率,增加细胞密度。然而,生物反应器存在着能耗高、建造及其他操作费用高、放大技术还不成熟等不足,微藻在反应器中的培养还停留在试验阶段。

在优化设计用于工业化生产的光生物反应器时,须考虑反应器是否满足在室外条件下的连续生产和是否便于维护管理,涉及到传光、传质、传动、传热及清洁等问题,主要包括提高光能利用率、保证反应器内介质的流动及混合、较好控制反应器的温度。有研究者发现可采用人工光源优化光源吸收,如实

实验室模式下可使用荧光灯、LED 灯;室内大规模培养时可采用光学纤维^[25]。另外,还得考虑成本要低及在线控制系统要简单。

一般生物反应器比拟放大后,光合效率会随光程的增加而降低,需有针对光生物反应器的系统分析方法优化反应器的设计。经研究表明,计算流体动力学分析法就是一种很有用的工具,其已经用于反应器比拟放大时内部构造的优化,且在平板式光生物反应器容积从 15 L 比拟放大到 300 L 时优化结构中成功应用^[26]。

2.3 微藻采收

常用的传统微藻采收与提取技术有离心法、絮凝法、重力过滤法、超声波法和气浮法。这些方法中普遍存在着运行成本高的问题,重力过滤法还易产生膜污染和堵塞。

现有的微藻培养技术得到的微藻浓度低,给微藻的采收带来了较大困难,采收成本居高不下。选择高效低成本的采收方法很重要,Xu 等^[27]综合电絮凝法和气浮法从丛粒藻培养液中收获了藻体,并证实了综合 2 种不同的方法采收微藻是一种有效途径,在研究微藻采收时还应考虑微藻种类的多样性。在后来的研究中,Kim 等^[28]采用了电解法连续采收微藻,选择不同的电极及改变电极极性时间能减小对微藻细胞的伤害,达到连续高效采收微藻且能降低采收成本。

2.4 微藻油脂提取

微藻生物柴油由甘油三酯转酯化生成,因此在提取的油脂中甘油三酯的含量越大越好,在正常生理条件下培养,微藻的甘油三酯脂肪酸(TG-FA)含量低且组成单一,但改变培养条件(如氮、磷的缺乏)会促使微藻油脂的积累。氮缺乏增加了总脂肪酸的浓度,也改变了脂肪酸的组成,会使非 TG-FA 部分转化为 TG-FA^[29]。影响微藻油脂积累的因素还有光子通量密度、微藻特性及其浓度、生物反应器的几何特征,这 3 个因素同时作用影响了微藻每个细胞的吸收光子量。

常用的油脂提取方法有索氏抽提法、氯仿/甲醇法、酸解法、超临界 CO₂ 流体萃取法,这些方法各具特点^[21]。萃取选用的有机溶剂有己烷、氯仿,己烷在油脂提取效果上不及氯仿,但其对非脂质成分有较低毒性,且对中性脂肪酸具有很好的选择性。超临界萃取法是一个较新的领域,因其操作简单、干净,萃取和分离合二为一,且萃取率高的优势引起了越来越多的关注。在选择油脂提取方法时不应只是

考虑从微藻中提取油脂成分,还应考虑对油脂是否有选择性。

由于微藻的油脂含量是在微藻体内积累,因此在微藻采收后对微藻细胞的破碎显得很必要,常用的细胞破碎方法有微波破碎法、超声波法、高速珠磨法、高温高压法。珠磨法对放大培养不适用,微波破碎法被认为是最简单且最有效的微藻细胞破碎方法。

2.5 微藻生物柴油的制备

生物柴油是以油脂和短链醇(如甲醇、乙醇)为底物,经过酯交换反应而得到的脂肪酸短链醇酯。从微藻中提取出的油脂需经转酯化或酯交换反应生成生物柴油,转酯化反应是一个复杂的多步骤反应,且反应过程中需要同性质或不同性质的催化剂来催化反应,在大多数工业生产过程中采用碱作为催化剂;采用脂肪酶催化酯化也是一个很好的选择。后来,也有人提出了在湿藻体内直接进行转酯化反应,消除了有机溶剂萃取步骤和微藻采收后对藻体进行干燥的步骤,且能提高油脂转化效率^[30]。

3 微藻生产生物柴油产业化的前景

目前微藻生物柴油技术上是可行的,但与化石柴油相比,其经济性还需进一步提高。高原料成本和微藻的含油率与生长速率之间存在的矛盾是亟需解决的瓶颈问题。在这方面,微藻是基础,反应器是关键,收集、榨油、酯化反应等是重要环节。今后,可采取的措施包括:

(1) 选育和构建产油能力高、生长快的富油工程菌株。

(2) 与工厂排放的 CO₂、富含碳源或氮源的农业废料、工业废水等三废处理相结合,低成本制备微藻生物柴油。

(3) 充分利用光能和优化光合生物反应器的设计,提高微藻生长速率和细胞密度。

(4) 回收和综合利用未消耗的营养物质、微藻中高附加值的蛋白、多糖、色素及其他营养成分。

(5) 发展连续生产技术,提高生产效率。

4 结论

利用微藻生产生物柴油,无论在科学研究还是在政治、经济等方面,都有很重要的意义。我国目前的主要生物柴油的原料来源是废弃的植物油,但植物油的生产量已经不能满足生物柴油产业日益增长的需求,部分柴油还在依赖进口。因此,微藻生物柴

油将是中国生物燃料产业的选择。

微藻生物柴油的生产是一连串复杂的工艺流程,涉及到从优良藻种的选育到反应器的优化设计、再到油脂提取及其转酯化。现今的研究重点在微藻的培养上,反应器设计还处于试验阶段,没能真正地应用于工业,在今后的研究中应在降低生产成本的基础上提出新的成熟的理论方法,研究出更能模拟整个生产过程的动力学模型,努力改善微藻生物柴油生产过程中的各个环节,同时利用微藻油脂提取后的成分生产高附加值产品来获得最高的环保和经济效益,各方面的积极努力和配合必将推进微藻生物柴油的产业化进程。

参考文献

- [1] 姜进举,苗凤萍,冯大伟,等.微藻生物柴油技术的研究现状及展望[J].中国生物工程杂志,2010,30(2):134-140.
- [2] Khan S A, Rashmi, Hussain M Z, *et al.* Prospects of biodiesel production from microalgae in India[J]. *Renew Sustain Energy Reviews*, 2009, 13(9):2361-2361.
- [3] Mata T M, Martins A A, Caetano N S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review[J]. *Renew Sustain Energy Reviews*, 2010, 14(1):217-232.
- [4] Singh S P, Singh D. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review[J]. *Renew Sustain Energy Reviews*, 2010, 14(1):200-216.
- [5] Somerville C. The billion-ton biofuels vision[J]. *Science*, 2006, 312:277.
- [6] Chisti Y. Biodiesel from microalgae[J]. *Biotechnol Advances*, 2007, 25(3):294-306.
- [7] 胡洪营,李鑫,杨佳.基于微藻细胞培养的水质深度净化与高价值物质生产耦合技术[J].生态环境学报,2009,8(3):1122-1127.
- [8] 高春芳,余世实,吴庆余.微藻生物柴油的发展[J].生物学通报,2011,46(6):1-5.
- [9] Lam M K, Lee K T. Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward[J]. *Biotechnol Advances*, 2012, 30(3):673-900.
- [10] Sheehan J, Dunahay T, Benemann J, *et al.* A look back at the US department of energy 'Aquatic species program-biodiesel from algae[M]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1998: 67-139.
- [11] Li Y G, Tan T W, Huang Y M. Some scientific issues to be resolved in the process for producing biodiesel from microalgae[J]. *China Basic Sci*, 2009, 5:64-70.
- [12] Giles C. New growing technology set to increase algae yields[ED/OL]. [2009-02-25]. <http://www.biofuelreview.com/content/view/1850/1>.
- [13] Peng W M, Wu Q Y, Tu P G. Pyrolytic characteristics of heterotrophic *Chlorella protothecoides* for renewable bio-fuel production[J]. *J Appl Phycol*, 2001, 13:5-12.
- [14] 刘小澄,刘永平.中国微藻生物柴油产业的发展机遇和挑战[J].现代化工,2011,31(2):1-5.
- [15] Li Y G, Xu L, Huang Y M, *et al.* Microalgae biodiesel in China: Opportunities and challenges[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(10):3432-3437.
- [16] 李华,王伟波,刘永定,等.微藻生物柴油发展与产油微藻资源利用[J].可再生能源,2011,29(4):84-88.
- [17] Helena M Amaro, Catarina A Guedes, Xavier F Malcata. Advances and perspectives in using microalgae to produce biodiesel[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(10):3402-3410.
- [18] Griffiths M J, Harrison S T L. Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production[J]. *J Appl Phycol*, 2009, 21(5):493-507.
- [19] Woo S-G, Yoo K, Lee J, *et al.* Comparison of fatty acid analysis methods for assessing biorefinery applicability of wastewater cultivated microalgae[J]. *Talanta*, 2012, 97(15):103-110.
- [20] 赵涛,苏青福,刘朝.中国荒漠化地区发展生物柴油的最优选择——微藻[J].资源科学,2011,33(8):1529-36.
- [21] Carrvalho A P, Meireles L A, Malcata F X. Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances[J]. *Biotechnol Progress*, 2006, 22(6):1490-506.
- [22] Xiong W, Gao C, Yan D, *et al.* Double CO₂ fixation in photosynthesis-fermentation model enhances algal lipid synthesis for biodiesel production[J]. *Biotech*, 2010, 101(7):2287-2293.
- [23] Santos C A, Ferreira M E, Gouveia L, *et al.* A symbiotic gas exchange between bioreactors enhance microalgae biomass and lipid productivities: Taking advantage of complementary nutritional modes[J]. *Society for Industrial Microbiology*, 2010, 38(8):909-917.
- [24] Soeder C. Economic considerations concerning the autotrophic production of microalgae at the technical scale[J]. *Arch Hydrob Beih*, 1978, 11:259-273.
- [25] Chen C Y, Yeh K L, Aisyah R, *et al.* Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review[J]. *Bioresour Technol*, 2010, 102(1):71-81.
- [26] Yu G, Li Y G, Shen G M, *et al.* A novel method using CFD to optimize the inner structure parameters of flat-panel photobioreactors[J]. *J Appl Phycol*, 2009, 21(6):719-27.
- [27] Xu L, Wang F, Li H Z, *et al.* Development of an efficient electroflocculation technology integrated with dispersed-air flotation for harvesting microalgae[J]. *J Chem Technol and Biotechnol*, 2010, 85(11):1504-1507.
- [28] Kim J, Ryu B-G, Kim K, *et al.* Continuous microalgae recovery using electrolysis: Effect of different electrode pairs and timing of polarity exchange[J]. *Bioresour Technology*, 2010, 123:164-170.
- [29] Vooren G V, Grand F L, Legrand J, *et al.* Investigation of fatty acid accumulation in *Nannochloropsis oculata* for biodiesel application[J]. *Bioresour Technology*, 2012, 124:421-432.
- [30] Ehimen E A, Sun Z F, Carrington C G. Variables affecting the in situ trans-esterification of microalgae lipids[J]. *Fuel*, 2010, 89(3):677-684. ■