

# 利用污水资源生产微藻生物柴油的关键技术及潜力分析

胡洪营\*, 李鑫

清华大学环境科学与工程系/环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084

**摘要:** 21 世纪人类面临着能源与水资源的双重危机与挑战。微藻制备生物柴油和微藻深度脱氮除磷分别是开发新能源和污水深度处理方面的热点研究,但二者的单一系统均存在一定的局限性。基于微藻培养的污水深度处理与生物柴油生产耦合系统可以克服上述单一系统的局限性,在深度处理污水的同时,以污水为资源制备微藻生物柴油。藻种筛选是耦合系统的前提与重点,其筛选原则为在二级出水条件下生长快、氮磷去除效率高和单位藻细胞油脂含量高。合适的藻细胞分离收获及油脂提取技术能够降低能耗;而油渣厌氧发酵可充分回收其中的能量,同时减少油渣对环境造成的不利影响。根据耦合系统的工艺特点,每年全国利用该耦合工艺以生活污水为原料生产微藻生物柴油的潜力约 397 万 t。

**关键词:** 微藻;生物柴油;脱氮除磷;污水深度处理

中图分类号: X703

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906 (2010) 03-0739-06

21 世纪人类面临着两大危机:能源危机与水资源危机。据估计,全球的原油储量和天然气储量将分别在 40 年和 64 年后用尽<sup>[1]</sup>,因此开发经济、高效的新型能源势在必行,其中生物新能源是主要研究热点之一<sup>[2]</sup>。与此同时,水资源短缺也是制约 21 世纪人类发展的主要瓶颈,污水再生利用是解决这一问题的的重要途径<sup>[3]</sup>,而水华控制则是再生水回用于景观水体时需要解决的首要问题<sup>[4-5]</sup>。

近年来,微藻在制备生物柴油<sup>[6-10]</sup>和污水深度脱氮除磷<sup>[11-15]</sup>方面均得到了越来越多的重视,并逐步开展研究。而基于微藻培养的污水深度处理和生物柴油生产耦合系统则具有更加广阔的发展前景<sup>[16]</sup>。

胡洪营等人<sup>[16]</sup>概述了微藻深度脱氮除磷、微藻制备生物柴油的原理和优势,以及将二者耦合的理念。本文在此基础上进一步深入分析了微藻制备生物柴油及微藻深度脱氮除磷单一系统的局限性、污水深度处理和生物柴油生产耦合系统的工艺流程及优势,并重点分析了该耦合系统的关键技术和生产潜力。

## 1 单一系统的局限性

### 1.1 微藻制备生物柴油

微藻通过光合作用将 CO<sub>2</sub> 固定为有机碳(蛋白质、碳水化合物、油脂),藻细胞油脂中的三酰甘油酯(Triacylglycerols, TAG)是制备生物柴油的主要原料<sup>[9]</sup>。微藻制备生物柴油的单一系统如

图 1 所示。通过给微藻提供必需生长元素,包括水、无机营养盐和 CO<sub>2</sub> 等,培养高含油微藻并最终提取油脂、生产制备生物柴油。



图 1 微藻制备生物柴油的单一系统示意图

Fig. 1 Single system of biodiesel production based on microalgae

目前,微藻制备生物柴油的高成本是制约该技术发展的主要限制因素<sup>[17]</sup>,而微藻培养成本则占到生物柴油生产总成本的 70% 以上<sup>[6]</sup>。因此,微藻制备生物柴油单一系统的局限性主要是培养过程的高成本,包括:

(1) 培养微藻(淡水藻种)需消耗大量淡水资源,不但成本高,而且与当前水资源紧缺的大背景形成了鲜明矛盾。

(2) 为了获得较高的藻细胞生物量,微藻培养过程中需投加氮磷等大量无机营养盐,无机营养盐大量消耗而导致的高培养成本是目前微藻培养领域的世界性难题。

(3) 某些研究者通过向培养基中投加有机物异养培养微藻(如小球藻)<sup>[18-20]</sup>的方式来提高藻细胞生物量和单位藻细胞油脂含量,但投加有机物额外增加培养成本,异养培养使微藻失去了固定 CO<sub>2</sub> (温室气体减排)的优势<sup>[21-22]</sup>;与目前已有的成熟技术相比(如有机物厌氧发酵产甲烷等),“有机物—藻细胞生物—生物柴油”的能量转化效率较低。

### 1.2 微藻深度脱氮除磷

微藻主要通过光合作用吸收水中的氮和磷<sup>[11]</sup>,从而可作为三级处理单元对城市生活污水的二级出水进行深度脱氮除磷。微藻深度脱氮除磷的单一

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(50825801); 国家“十一五”科技支撑计划(2007BAC22B02)

作者简介: 胡洪营(1963年生),男,教授,博士,主要研究方向为环境生物技术。E-mail: hyhu@tsinghua.edu.cn

\*通讯联系人

收稿日期: 2010-01-18

系统如图2所示。在生活污水二级出水后构建微藻培养单元,通过将藻细胞从培养系统中分离,从而获得低氮磷含量的三级出水。

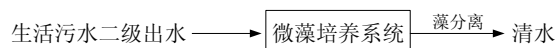


图2 微藻深度脱氮除磷的单一系统示意图

Fig. 2 Single system of nitrogen and phosphorus removal based on microalgae

微藻深度脱氮除磷单一系统的局限性主要存在于微藻培养系统。与专门的藻类培养基相比,二级出水中的氮磷含量相对较低,因此在微藻培养系统中难以保持藻细胞的高密度培养,同时该单一系统未充分考虑收获后藻细胞的利用,由此在系统运行中主要存在如下问题:

(1) 微藻密度低导致氮磷去除速率低,因此需增大微藻培养系统的容积,从而增加了建设成本。

(2) 较低的藻密度不利于分离收获后对藻细胞的综合利用。

(3) 由于氮磷去除速率低、藻细胞难以回收利用,因此该单一系统的整体经济效益较低,不利于其在生活污水处理厂的建设和实际运行。

## 2 污水深度处理和生物柴油生产耦合系统

### 2.1 工艺流程

基于微藻培养的污水深度处理和生物柴油生产耦合系统如图3所示。在污水处理厂二沉池之后构建微藻光生物反应器,选择高含油的脱氮除磷优势藻种接种于微藻光生物反应器,以二级出水为培养基培养微藻。由于光合放氧作用,微藻光生物反应器的出口气体含有浓度相对较高的 $O_2$ ,可用于二级生物处理中曝气池的曝气;由于活性污泥中微生物的呼吸作用,曝气池的出口气体含有浓度相对较高的 $CO_2$ ,可用于微藻光生物反应器的曝气(如污水处理厂附近有热电厂,可向微藻光生物反应器中通入热电厂废气,其中的高浓度 $CO_2$ 可作为微藻生长所需的无机碳源)。在微藻光生物反应器内部或

外部,通过膜分离截留和浓藻液回流的方式,实现反应器内部微藻的高密度培养,同时膜分离可得到低氮磷含量的清水。膜分离得到的高密度藻液通过进一步浓缩、提取油脂,最终可制备生物柴油。

提取油脂后残余的藻细胞称作油渣(oilcake),其中含有蛋白质、碳水化合物及有机氮磷。油渣可进一步通过厌氧发酵的方式继续生产甲烷、氢气等能源形式<sup>[23]</sup>,也可以作为肥料直接返回农田。因此,该耦合系统可对收获后的藻细胞进行充分利用。

污水深度处理与生物柴油生产耦合系统以生活污水的二级出水为基质培养藻细胞,不需消耗大量的淡水资源和无机营养盐,可极大节省成本;同时,通过膜分离和浓藻液回流的方式可实现反应器内部微藻的高密度培养,也在工艺流程上考虑了收获后藻细胞的充分利用。因此,该耦合系统可以克服微藻制备生物柴油或微藻深度脱氮除磷任一单一系统的局限性。

### 2.2 耦合系统的全新理念

该耦合系统实现了三方面的全新理念:

(1) 由于微藻生长需要利用氮磷元素,因此在污水厂的二级处理中不必考虑脱氮除磷(不需采用 $A^2O$ 工艺),只需通过一般的活性污泥法将生活污水中的有机污染物去除即可,氮磷元素可在三级处理中通过微藻光生物反应器单元加以去除和利用。

(2) 在污水厂的曝气池和微藻光生物反应器两个单元之间实现内部循环曝气,可同时提高二者的曝气效率。

(3) 在未来的新型污水处理系统中,关注点不应仅局限于污染物的去除,而应将污水处理和以污水为“资源”的生产过程相耦合,在处理污水的同时,以污水为原料获取“新”资源和“新”能源,从而可实现污水处理系统从“处理工艺”向“生产工艺”的转化。这种新理念为缓解当前资源匮乏和能源紧缺的形势提供了新途径。

## 3 耦合系统的关键技术

目前,基于微藻的污水深度处理与生物柴油生产耦合系统仍处于概念提出阶段<sup>[24]</sup>,关于耦合系统的关键技术和工艺研究几乎为空白。综合考虑该耦合系统的工艺特点、耦合目的及总体能量收益,以下关键技术应得到充分重视并重点研究。

### 3.1 藻种筛选

在污水深度处理与生物柴油生产耦合系统中,藻种的筛选与驯化是实现该工艺的前提和重点。针对耦合目的,藻种筛选原则应为:在生活污水二级出水条件下生长速率快、氮磷去除效率高、生物质产量高及单位藻细胞生物量的油脂产量高<sup>[16, 25]</sup>。

与微藻制备生物柴油的单一系统相比,耦合系

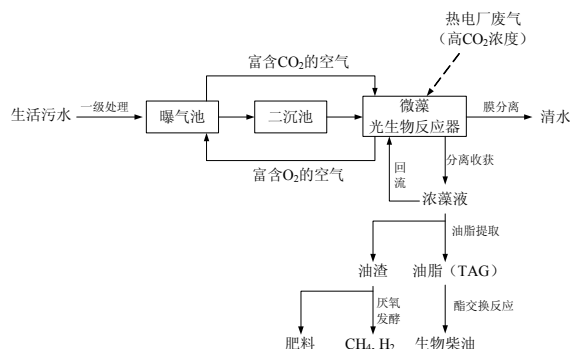


图3 污水深度处理与生物柴油生产耦合系统示意图

Fig. 3 Coupling system of advanced treatment of wastewater and biodiesel production

统对藻种提出了更高要求。许多文献都报道过单纯以制备生物柴油为目的的高含油藻种（使用特定培养基），如小球藻（*Chlorella vulgaris*）布朗葡萄藻（*Botryococcus braunii*）等<sup>[26-27]</sup>。然而，这些高含油藻种并不一定能在生活污水二级出水条件下正常生长并大量积累油脂。Li 等人<sup>[25]</sup>从低营养环境中分离出了一株淡水栅藻 LX1（*Scenedesmus* sp. LX1），并对比了该株栅藻与文献报道的 11 株高含油微藻在生活污水二级出水中的生长及产油能力，结果如图 4 所示。大多数文献报道的高含油微藻在实际二级出水中几乎不能生长，而栅藻 LX1 在二级出水中的生长情况最好（图 4(a)），且单位藻细胞积累的油脂量最多（图 4(b)）。

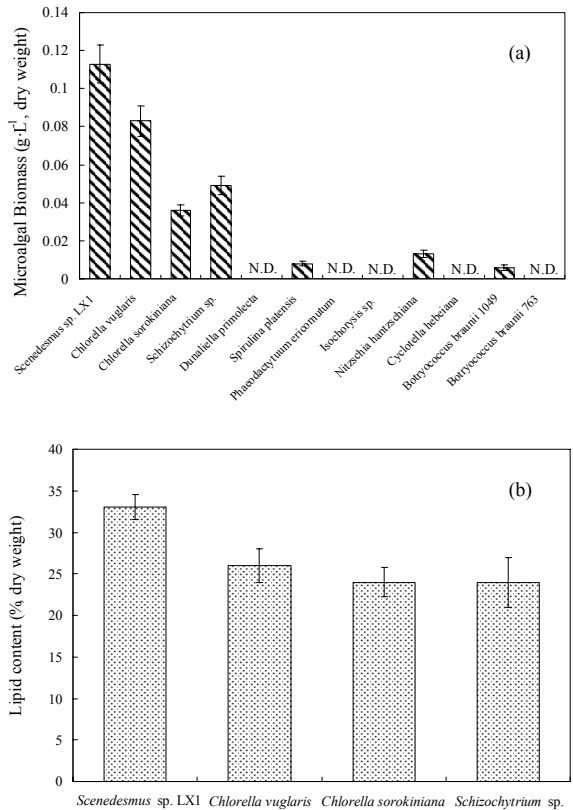


图 4 栅藻 LX1 与其他 11 株高含油微藻在实际二级出水中的生长及产油特性比较<sup>[25]</sup>

Fig. 4 Comparison of growth and lipid accumulation properties of *Scenedesmus* sp. LX1 and other 11 species of high-lipid-content microalgae in secondary effluent<sup>[25]</sup>

可见，从实际水体中分离得到的藻种，可以更好地适应实际环境<sup>[28]</sup>，从而在耦合系统中具有更大的优势和竞争力。

### 3.2 藻细胞分离收获

在污水深度处理与生物柴油生产耦合系统中，藻细胞的分离收获是其生物质得以利用（制备生物柴油等）及保证污水处理厂三级出水水质的基础，因此分离收获技术的选择是耦合系统中的关键工

艺环节。

一般微藻培养过程中藻细胞的典型生物量范围为 0.3~0.5 g·L<sup>-1</sup>（干质量），在一些特殊情况下藻细胞生物量可以达到 5 g·L<sup>-1</sup>（干质量）。满足工业利用要求的藻细胞原料，其最佳生物量应达到 300~400 g·L<sup>-1</sup>（干质量），因此培养后的藻液需要浓缩 100 倍~1 000 倍之后才能在工业上得以利用。微藻的分离浓缩是高耗能过程，对生物柴油的生产成本有很大影响——藻细胞分离浓缩的能耗是仅次于微藻培养的第二大成本消耗<sup>[24]</sup>。因此藻细胞的分离浓缩方式成为很多研究者的关注热点，也是实际工程中必须面对和解决的问题。

一些常见的藻细胞分离收获方式如表所示。其中，絮凝沉淀/气浮、过滤离心和固定化是较常用的藻细胞分离方式，但成本均较高，同时藻细胞固定化也容易带来藻细胞外泄的问题。

表 1 藻细胞分离收获方式  
Table 1 Harvest methods of microalgae

方法	分离效果	参考文献
自然沉淀	可去除 50%~80%的藻细胞	[29]
絮凝沉淀	随着 pH 升高和无机磷酸盐沉淀，藻细胞自絮凝；化学絮凝剂成本高，使出水盐度偏高，通过细菌产生生物絮凝剂，是目前研究热点之一；不适于体积小、生长快的藻类	[30-32]
气浮	加明矾 20~30 mg·L <sup>-1</sup> ，可去除 99%的细胞	[29]
固定化	固定化小球易分离；成本高，藻细胞易泄露	[33]
电解絮凝	小电流使藻细胞悬浮（0.3 kWh·L <sup>-1</sup> ），可达到 95%的分离率	[34]
过滤/离心	分离效果好，但成本高	[7]
膜分离	分离效果好，技术较成熟	

综合考虑各种藻细胞分离收获方式，针对耦合系统对于出水水质及微藻光生物反应器中藻细胞高密度培养的要求，膜分离是一种有潜力的藻细胞分离收获方式，即：在反应器之后通过膜分离截留藻细胞以获得低氮磷含量的清水，同时通过浓藻液的回流实现反应器内藻细胞的高密度培养。

### 3.3 藻细胞油脂提取

有机溶剂萃取是常用的藻细胞油脂提取方法，主要包括甲醇/氯仿法<sup>[35]</sup>、乙醚/石油醚法<sup>[36]</sup>和正己烷法<sup>[37]</sup>等。按照萃取时藻细胞的状态不同，又可分为干法萃取和湿法萃取<sup>[37]</sup>。关于油脂萃取法目前有很多争议<sup>[36]</sup>，至今仍无法确定哪种萃取技术更加高效<sup>[37]</sup>。

Lardon 等人<sup>[37]</sup>通过生命周期评价（Life cycle assessment, LCA）的方法对正己烷干法萃取和湿法萃取藻细胞油脂的效率及经济性进行了分析，结果如表所示。由于湿法萃取不需要对藻细胞进行干燥，因此可减少大量能耗。正己烷湿法萃取与低氮

表 2 正己烷湿法萃取与低氮培养模式生产 1 MJ 能量的生物柴油的能量收支分析

Table 2 Analysis of energy balance for producing 1 MJ of biodiesel by the production mode of wet extraction by hexane and low-N cultivation

收支项	能量/MJ (生产 1 MJ 的生物柴油)	备注
总能耗能量	1.66	包括热能、电能、肥料、藻类塘建造等
总收益	2.23	包括生物柴油能量 1 MJ 和油渣所含能量 1.23 MJ
能量净收益	0.57	能量净收益为正

培养模式相结合,生产 1 MJ 能量的生物柴油所需总能耗为 1.66 MJ,而获得的总能量为 2.23 MJ,是 4 种生产模式中(普通培养+干法萃取,普通培养+湿法萃取,低氮培养+干法萃取,低氮培养+湿法萃取)唯一总能量收益为正的生產模式。

同时,该文章的分析结果还表明,油脂提取的能耗在生物柴油生产总能耗中占有很大比例(干法萃取和湿法萃取的能耗分别占总能耗的 90%和 70%),因此油脂提取技术的改进对耦合系统的经济性和可持续性具有直接影响<sup>[37]</sup>。

3.4 油渣利用

藻细胞提取油脂后,油渣的处置和利用也是一个关键问题。一方面,油渣中含有蛋白质和碳水化合物等有机物形式,存储着大量能量,甚至可超过利用油脂生产的生物柴油能量<sup>[37]</sup>。因此,充分回收油渣中的能量,对于保证耦合系统的整体能量净收益具有极大作用。另一方面,根据藻细胞的经验分子式  $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ ,培养藻细胞需要的氮元素为  $8\sim16\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ,是芦苇生长需氮量的 55~111 倍。因此,在提取油脂之后,合理处置残余藻细胞至关重要,否则油渣中的大量氮磷会对生态环境带来很大负面影响<sup>[23]</sup>。

厌氧发酵是油渣的处理方式之一。通过对油渣中的蛋白质和碳水化合物进行厌氧发酵,可以获得甲烷、氢气和乙醇等能量,对耦合系统的整体能量收益有很大贡献<sup>[37]</sup>。Bruno<sup>[23]</sup>甚至认为,当单位藻细胞的油脂含量低于 40%时,为了获得最大的能量收益,所有藻细胞生物质应该全部用于厌氧发酵。

同时,厌氧发酵可将油渣中的有机氮磷矿化为铵和磷酸盐,可再次用于藻细胞培养,或作为肥料返回农田。

4 耦合系统的生物柴油生产潜力

假设全国范围内的生活污水全部采用本文所设计的耦合系统进行处理与生产生物柴油,则生活污水中所含有的氮磷除去供给活性污泥微生物的生长后,剩余部分所培养的藻细胞每年生产生物柴油的潜力可由表进行估算。

表 3 污水深度处理与生物柴油生产耦合系统的生物柴油生产潜力估算参数取值

Table 3 Parameters for estimating the productivity potential of coupling system of advanced treatment of wastewater and biodiesel production

项目	数值
2008 年全国生活污水排放量	330 亿 t
生活污水中 BOD <sub>5</sub> 浓度	200 mg·L <sup>-1</sup>
生活污水中 TN 浓度	40 mg·L <sup>-1</sup>
生活污水中有机氮浓度	15 mg·L <sup>-1</sup>
生活污水中 TP 浓度	8 mg·L <sup>-1</sup>
生活污水中有机磷浓度	3 mg·L <sup>-1</sup>
活性污泥微生物对污水中 BOD <sub>5</sub> 、N、P 的消耗比例 (BOD <sub>5</sub> N P)	100 5 1
活性污泥微生物去除的 BOD <sub>5</sub>	180 mg·L <sup>-1</sup>
活性污泥微生物去除的 N	9 mg·L <sup>-1</sup>
活性污泥微生物去除的 P	1.8 mg·L <sup>-1</sup>
二级出水中 TN 浓度	31 mg·L <sup>-1</sup>
二级出水中 TP 浓度	6.2 mg·L <sup>-1</sup>
可收获的微藻生物量 (藻细胞经验分子式 $C_{106}H_{263}O_{110}N_{16}P$ )	1621 万 t
可提取的油脂量(假设单位藻细胞油脂含量为 35%)	567 万 t
TAG 产量 (假设单位油脂中的 TAG 含量为 70%)	397 万 t
生物柴油产量 (酯交换反应中,TAG 和生物柴油的质量比约为 1 1)	约 397 万 t

2008 年全国生活污水排放量为 330 亿 t,假设 BOD<sub>5</sub>、TN 和 TP 浓度分别为 200、40 和 8 mg·L<sup>-1</sup>。普通活性污泥法对 BOD<sub>5</sub> 的去除率为 90%,则去除的 BOD<sub>5</sub> 浓度为 180 mg·L<sup>-1</sup>。由于不采用 A<sub>2</sub>O 工艺,因此普通活性污泥法对氮和磷的去除来自于活性污泥微生物生长对污水中氮和磷的消耗(消耗比例 BOD<sub>5</sub> N P=100 5 1)。据此可估算普通活性污泥法去除的氮和磷分别为 9 mg·L<sup>-1</sup> 和 1.8 mg·L<sup>-1</sup>,二级出水中的氮和磷分别为 31 mg·L<sup>-1</sup> 和 6.2 mg·L<sup>-1</sup>。进一步根据藻细胞经验分子式、单位藻细胞油脂含量、单位油脂中 TAG 含量及酯交换反应式,可估算得到该耦合系统每年的生物柴油生产潜力约为 397 万 t。

5 结语

污水深度处理与生物柴油生产耦合系统不仅可以克服微藻制备生物柴油或微藻深度脱氮除磷单一系统的局限性,而且可以以污水为资源,在处理污水的同时生产生物柴油。虽然该耦合工艺目前仅处于概念提出的起步阶段,尚有一些关键技术环节需要研究,但是在目前能源与水资源紧缺的严峻形势下,该耦合工艺具有良好的发展前景。

参考文献:

[1] VASUDEVAN P T, BRIGGS M. Biodiesel production-current state of the art and challenges[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2008, 35: 421-430.

- [2] GROOM M J, GRAY E M, TOWNSEND P A. Biofuels and biodiversity: principles for creating better policies for biofuel production[J]. Conservation Biology, 2008, 22(3): 602-609.
- [3] 胡洪营, 魏东斌, 王丽莎, 等译. 污水再生利用指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 1-3.
- HU Hongying, WEI Dongbin, WANG Lisha, et al. Guidelines for Water Reuse[M]. Beijing: Chemical Industry Publisher, 2008: 1-3.
- [4] 申欢, 胡洪营, 潘永宝, 等. 用于净化景观水体水质的人工湿地设计[J]. 中国给水排水, 2007, 23(2): 39-42.
- SHEN Huan, HU Hongying, WEI Yongbao, et al. Design of constructed wetland for water quality purification of artificial scenic water body[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(2): 39-42.
- [5] 孙迎雪, 胡洪营, 王蓉欣. 再生水景观利用水质生态净化与保持技术[C]//2008 中国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集. 2008: 464-470.
- SUN Yingxue, HU Hongying, WANG Rongxin. Techniques for water quality control and management of reclaimed water used in scenic waters[C]//Symposium for Pollution Control and Ecological Restoration Techniques of Water Environments in China. 2008: 464-470.
- [6] BEHZADI S, FARID M M. Review: examining the use of different feedstock for the production of biodiesel[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2007, 2: 480-486.
- [7] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae[J]. Biotechnology Advances, 2007, 25: 294-306.
- [8] PALLIGARNAI T, VASUDEVAN, MICHAEL B. Biodiesel production-current state of the art and challenges[J]. Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology, 2008, 35: 421-430.
- [9] PEER M, SCHENK, SKYE R, et al. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production[J]. BioEnergy Research, 2008, 1: 20-43.
- [10] 李鑫, 胡洪营, 杨佳. LED 红光/蓝光对栅藻 LX1 生长及产油特性的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 244-250.
- LI Xin, HU Hongying, YANG Jia. Effect of LED's red/blue light on the growth characteristic and lipid production of *Scenedesmus* sp. LX1[J]. Environmental Science, 2010, 31(2): 244-250.
- [11] ASLAN S, KAPDAN I K. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae[J]. Ecological Engineering, 2006, 28: 64-70.
- [12] GARCIA J, GREEN B, OSWALD W. Long term diurnal variations in contaminant removal in high rate ponds treating urban wastewater[J]. Bioresource Technology, 2006, 97: 1709-1715.
- [13] HILTON J, O'HARE M, MICHAEL J, et al. How green is my river? A new paradigm of eutrophication in rivers[J]. Science of Total Environment 365, 2006: 66-83.
- [14] LI Xin, HU Hongying, GAN Ke, et al. Growth and nutrient removal properties of a freshwater microalga *Scenedesmus* sp. LX1 under different kinds of nitrogen sources[J]. Ecological Engineering, 2009, accepted.
- [15] 李鑫, 胡洪营, 甘柯. 氮元素对贫营养型二形栅藻 LX1 生长及去除氮磷特性的影响研究[C]//2008 中国水环境污染控制与生态修复技术高级研讨会论文集. 2008: 936-948.
- LI Xin, HU Hongying, GAN Ke. Study on the influence of nitrogen on the growth and N, P removal properties of low-nutrient-demanding *Scenedesmus dimorphus* LX1[C]//Symposium for Pollution Control and Ecological Restoration Techniques of Water Environments in China. 2008: 936-948.
- [16] 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生物质生产耦合技术[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1122-1127.
- HU Hongying, LI Xin, YANG Jia. Coupling of wastewater deep purification and high quality biomass production based on microalgae cultivation[J]. Ecology and Environment, 2009, 18(3): 1122-1127.
- [17] ZHANG Y, DUBE M A, MCLEAN D D, et al. Biodiesel production from waste cooking oil. 1. Process design and technological assessment[J]. Bioresource Technology, 2003, 89: 1-16.
- [18] HAN Xu, MIAO Xiaoling, WU Qingyu. High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters[J]. Journal of Biotechnology, 2006, 126: 499-507.
- [19] MIAO Xiaoling, WU Qingyu. Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil[J]. Bioresource Technology, 2006, 97: 841-846.
- [20] CHENG Yun, LU Yue, GAO Chunfang, et al. Alga-based biodiesel production and optimization using sugar cane as the feedstock[J]. Energy & Fuels, 2009, 23: 4166-4173.
- [21] MIYAMOTO K. Renewable biological systems for alternative sustainable energy production[J]. FAO Agricultural Services Bulletin, 1997: 135.
- [22] SAWAYAMA S, MINOWA T, YOKOYAMA S Y. Possibility of renewable energy production and CO<sub>2</sub> mitigation by thermochemical liquefaction of microalgae[J]. Biomass and Bioenergy, 1999, 17: 33-39.
- [23] BRUNO S, NICOLAS B, OLIVIER B. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable[J]. Biotechnology Advances, 2009, 27: 409-416.
- [24] WANG B, LI Y, WU N, et al. CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae[J]. Applied Microbiological Biotechnology, 2008, 79: 707-718.
- [25] LI Xin, HU Hongying, YANG Jia. Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly-isolated freshwater microalga, *Scenedesmus* sp. LX1, growing in secondary effluent[J]. New Biotechnology, 2009, accepted.
- [26] ILLMAN A M, SCRAGG A H, SHALES S W. Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2000, 27: 631-635.
- [27] CHISTI Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol[J]. Trends Biotechnol, 2008, 26(3): 126-131.
- [28] PÉREZ M V J, CASTILLO P S, ROMERA O, et al. Growth and nutrient removal in free and immobilized planktonic green algae isolated from pig manure[J]. Enzyme and Microbial Technology, 2004, 34: 392-398.
- [29] GRENN F, BERNSTONE L, LUNDQUIST T. Advanced integrated wastewater pond systems for nitrogen removal[J]. Water Science and Technology, 1996, 33(7): 207-217.
- [30] SUKENIK A, SCHRODER W, LAUER J. Corprecipitation of microalgal biomass with calcium and phosphate ions[J]. Water Research, 1985, 19(1): 127-129.
- [31] MOUTIN T, GAL J, HALOUANI H. Decrease of phosphate concentration in a high rate pond by precipitation of calcium phosphate: theoretical and experimental results[J]. Water Research, 1992, 26(11): 1445-1450.

- [32] MUNOZ R, GUIEYSSE B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review[J]. *Water Research*, 2006, 40: 2799-2815.
- [33] OLGUÍN E. Phycoremediation: key issues for cost-effective nutrient removal processes[J]. *Biotechnology Advances*, 2003, 22: 81-91.
- [34] POELMAN E, PAUW N D, JEURISSEN B. Potential of electrolytic flocculation for recovery of micro-algae[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 1997, 19: 1-10.
- [35] BLIGH E G, DYER W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. *Canadian Journal of Physiology*, 1959, 37: 911-917.
- [36] CONVERTI A, CASAZZA A A, ORTIZ E Y, et al. Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2009, 48: 1146-1151.
- [37] LARDON L, HÉLIAS A, SIALVE B, et al. Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(17): 6475-6481.

## Analysis of key techniques and production potential of biodiesel production based on microalgae with wastewater as resources

HU Hongying\*, LI Xin

State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, Department of Environmental Science and Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** Energy and water resource crisis are the two major challenges of human beings in the 21st century. Biodiesel production and inorganic nutrient removal by microalgae are the two hot topics in the research field of exploitation of new energy resource and advanced treatment of domestic wastewater, respectively. However, limitations exist in each single system of these two technologies. The coupling system of wastewater treatment and biodiesel production based on microalgae can overcome the limitation of the two single systems, and produce biodiesel while treating wastewater. The selection of microalgal species is the basic and key point of the coupling system. The microalgal species should grow rapidly in secondary effluent, remove nitrogen and phosphorus efficiently and accumulate high content of lipid. Proper techniques of microalgal harvest and lipid extraction can save amount of energy cost. Meanwhile, anaerobic digestion of oil cake can recycle energy thoroughly and reduce its negative impact to environment. Based on the coupling system and with domestic wastewater as raw material, the potential of biodiesel productivity nationwide is 3.97 million ton per year.

**Key words:** microalgae; biodiesel; nitrogen and phosphorus removal; advanced treatment of wastewater