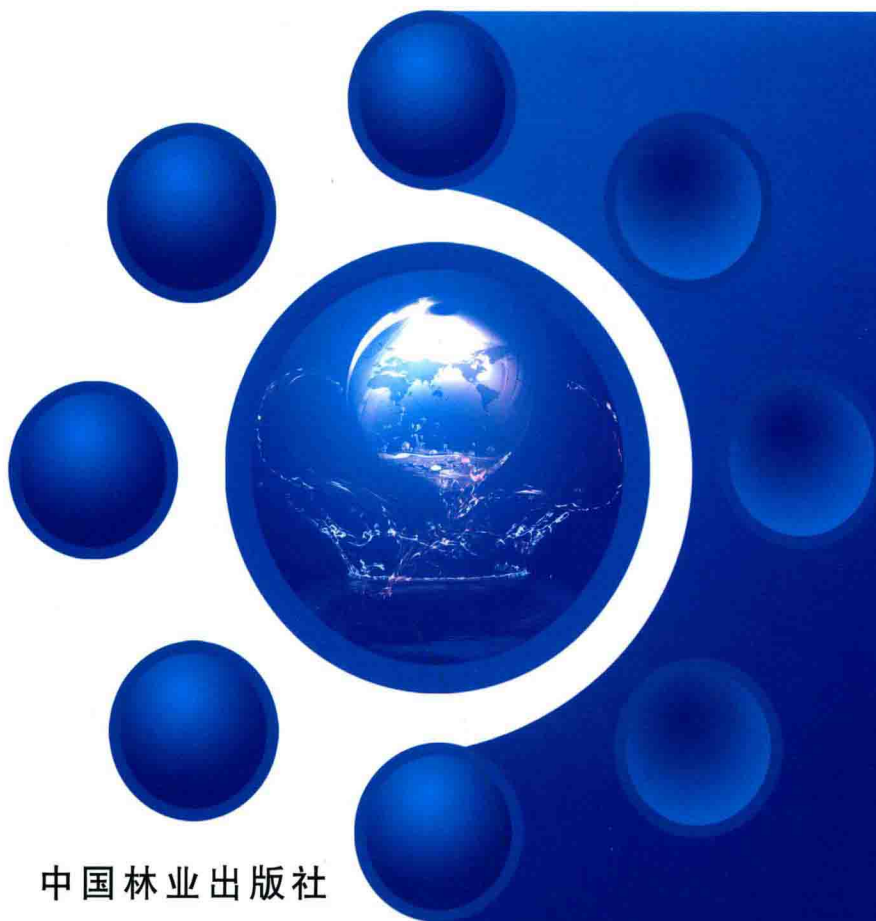


# 有机废水培养微藻 及 生物燃料制备技术

李刚◎著



中国林业出版社

# 有机废水培养微藻及 生物燃料制备技术

李刚 著

中国林业出版社

## 图书在版编目 (CIP) 数据

有机废水培养微藻及生物燃料制备技术/李刚著.

—北京: 中国林业出版社, 2017. 8

ISBN 978-7-5038-9215-8

I. ①有… II. ①李… III. ①有机废水处理-应用-  
微藻 ②有机废水处理-应用-生物燃料 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 183165 号

## 中国林业出版社

责任编辑: 盛春玲 邹 爱

电 话: 83143567

---

出版发行 中国林业出版社 (100009 北京市西城区德内大街刘海胡同 7 号)

<http://lycb.forestry.gov.cn>

印 刷 北京卡乐富印刷有限公司

版 次 2017 年 8 月第 1 版

印 次 2017 年 8 月第 1 次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 8.75

字 数 196 千字

定 价 49.00 元

---

未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

随着全球范围内能源环境危机的不断加剧，化石燃料利用导致的严重环境污染引起了各国的极大关注，各国纷纷致力于替代能源的研发。据统计，全球现有的化石资源最多可使用100年左右，而中国的能源需求量长期持续高速增长，石油供给远不能满足经济发展需要，能源供应形势十分严峻。由于大量使用化石燃料，导致CO<sub>2</sub>排放量与日俱增，环境污染日趋严重。为了应对日益严峻的能源环境危机和气候变化，我国中长期科技发展规划提出了新的能源战略，重点发展清洁能源和可再生能源，对发展农林剩余物资源化利用技术、生物质能生产转化关键技术做出了部署，以生物质为来源的可再生能源将备受青睐。

未来社会对交通工具消耗燃料的需求（主要是液体和气体燃料）十分巨大。经过现有的可再生能源技术（如水能、风能、太阳能）输出的主要产品几乎都是电能，唯有生物质原材料转化得到的能源产品可以是气体、液体、固体等形态，便于贮藏、运输以及分布式供给和利用，具有广阔的发展前景。

微藻作为第三代生物能源的代表，克服了第一、二代生物能源的缺点，同时又具有光合作用效率高、生长周期短等特点，只需要简单的生长条件（光、CO<sub>2</sub>、N、P、K等），经过短期培养后即可生产大量的脂类、蛋白质、糖类。这些产物可被加工成生物柴油等液体燃料和众多高值产品。据发表在《科学》杂志的文章预测，微藻很可能在未来10~15年中成为燃料供给的一个重要来源。然而，目前微藻能源研究和规模化生产

受到的主要局限之一就是培养成本过高。营养元素的补充和成本是大规模、经济、可持续的藻类生物质能源生产中的关键问题。

近年来，我国大中型沼气工程发展迅速。在畜禽养殖场废弃物被清洁化处理和资源化、能源化利用的同时，产生了大量有机废水。若使微藻生物质能源生产与现代沼气工程部分工艺耦合，微藻可以吸收沼气中大量的  $\text{CO}_2$ ，利用厌氧发酵废液中的 N、P 等获得所需营养源，同时还可生物吸附、净化废液中的重金属、激素、抗生素等；因此可有效降低甲烷提纯成本，促进沼气工程达标排放，同时极大地降低微藻生物质能源生产过程中水和营养物质等所需的巨大成本。而随着从微藻生物质提炼生物柴油及其他烃类燃料的技术日趋成熟，提质之后剩余的藻渣亦可被作为沼气生产的部分原料，使整个过程进一步实现变废为宝、净化水体、固碳减排、降本增效。

自 2010 年起，本书作者结合有机污水与微藻培养以及后续的转化技术进行了系统研究。不同藻种的生长特性或废水处理能力有所差异。链带藻 (*Desmodesmus* sp.) 属于广义的栅藻属，通过 IST-2 序列分析，二者在细胞壁结构上具有显著差异，但在微藻生长特性上具有相似的特点。经研究发现：链带藻 (*Desmodesmus* sp.)、EJ 8-10 均能适应猪场废水和厌氧发酵液两种有机废水，并且生长迅速。但是，由于厌氧发酵液成分比较复杂，微藻在其中的生长速度较缓、生物量累积较慢，无法获得大量生物质原料。因此，本书作者通过采用二次旋转正交回归组合设计等方法，建立了链带藻生物量累积与各影响因素间的回归模型，优化了高生物量累积工艺，为后续的能源转化提供了充足的原材料。

热裂解是生物质气化和燃料燃烧过程中必不可少的一个阶段，可以将生物质转化为液体燃料或其它高附加值产品。而微藻在快速热裂解过程中会发生分解、聚合、再分解等复杂的化学反应，且易受到微藻种类、培养条件、热裂解温度等因素的影响。不同反应条件将影响其热裂解产物、生物油含量和品质。本书作者通过研究三种培养条件下的链带藻在不同温度下的一级和二级热裂解反应过程及产物组分，探索其热裂解产物随温度的变化趋势；并以较低限度释放污染物和实现生物油的最佳产率为目标，分别优化三种培养条件下链带藻的最佳热裂解温度等条件参数。同时，微藻的热裂解过程会产生生物油等大量能源产物。但是产生这些能源产物的过程中需要消耗多少能量，能量转化效率如何，以及整个过程对环境的影响仍需进一步研究。因此，本书作者以链带藻热裂解过程为研究对象，采用生命周期评价方法，分别综合评估三种培养条件下链带藻在最适热裂解温度下的热裂解过程，包括能效分

析和环境影响潜力。

藻渣是微藻生产生物柴油工艺的主要副产物，如果直接排放会对环境产生一定影响。因此，开发藻渣转化技术，研究如何有效处理这些残渣，从每一个潜在环节中获得能量收益，有利于降低微藻生物质能源的生产成本，提高转化效率。本书作者通过分析藻渣的元素组成和相对含量，推测其能源化生产潜力；并根据藻渣的热裂解产物及组分含量，研究温度对热裂解产物的影响，综合考虑生物油产率和污染物释放，得出其最适热裂解条件参数。

由于本书涉及内容较广，参考了多个学科领域的内容，加之编者水平的不足和经验的局限，书中难免出现疏漏或不足，恳请读者提出更好的建议及修改意见。

**编者**

2017年3月

## 前 言

第一章 绪论	(1)
一、引言	(1)
二、微藻简述	(3)
(一) 微藻的生物学属性	(3)
(二) 微藻生物质能源的优势	(3)
三、微藻生物质的生产及应用	(4)
(一) 生物量累积	(5)
(二) 油脂累积	(6)
四、微藻用于废水处理的能力	(8)
(一) 废水组成成分与特征	(9)
(二) 厌氧发酵液培养微藻的研究进展	(10)
五、微藻生物质能源转化技术	(13)
(一) 化学转化	(13)
(二) 生物化学转化	(14)
(三) 热化学转化	(14)
(四) 微藻热裂解的研究进展	(16)
(五) 微藻提取油脂后残渣的利用现状	(18)
第二章 链带藻在猪场有机废水中的培养试验	(21)
一、引言	(21)
二、材料与方法	(21)
(一) 藻种	(21)

(二) 有机废水准备 .....	(21)
(三) 藻种预培养与驯化 .....	(22)
(四) 试验组设置 .....	(23)
(五) 测定方法 .....	(23)
三、实验结果与数据分析 .....	(26)
(一) “吸光度-干重”线性拟合曲线 .....	(26)
(二) 生物量累积情况 .....	(26)
(三) 油脂含量 .....	(28)
(四) 油脂产量及产率 .....	(29)
(五) 脂肪酸成分 .....	(31)
<b>第三章 链带藻对猪场有机废水的养分去除研究 .....</b>	<b>(35)</b>
一、引言 .....	(35)
二、材料与方法 .....	(35)
(一) 藻种 .....	(35)
(二) 有机废水准备 .....	(35)
(三) 试验组设置 .....	(35)
(四) 测定方法 .....	(36)
(五) 仪器设备 .....	(36)
三、实验结果与数据分析 .....	(37)
(一) $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 的去除情况 .....	(37)
(二) TN 的去除情况 .....	(37)
(三) $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 的去除情况 .....	(39)
(四) 养分去除能力评价 .....	(39)
<b>第四章 厌氧发酵液培养链带藻高生物量累积工艺优化 .....</b>	<b>(43)</b>
一、引言 .....	(43)
二、材料与方法 .....	(43)
(一) 藻种与培养 .....	(43)
(二) 厌氧发酵液成分 .....	(44)
(三) 链带藻驯化培养 .....	(44)
(四) 分析方法 .....	(45)
三、实验结果与数据分析 .....	(45)
(一) 单因素试验 .....	(45)
(二) 响应面法优化厌氧发酵液微藻培养工艺 .....	(47)



<b>第五章</b>	<b>BG11 培养链带藻热裂解产物研究</b>	(54)
一、	引言	(54)
二、	材料与amp;方法	(54)
(一)	藻种与培养	(54)
(二)	试验原料	(54)
(三)	成分分析	(55)
(四)	BG11/8-10 热裂解研究	(55)
(五)	BG11/8-10 热裂解组分分析	(56)
三、	实验结果与amp;数据分析	(57)
(一)	成分分析	(57)
(二)	BG11/8-10 热裂解产物组成分析	(57)
(三)	温度对 BG11/8-10 热裂解产物的影响	(59)
<b>第六章</b>	<b>厌氧发酵液培养链带藻热裂解产物研究</b>	(67)
一、	引言	(67)
二、	材料与amp;方法	(67)
(一)	藻种与培养	(67)
(二)	试验原料	(67)
(三)	成分分析	(68)
(四)	ZY/8-10 热裂解研究	(68)
(五)	ZY/8-10 的热裂解组分分析	(68)
三、	实验结果与amp;数据分析	(68)
(一)	成分分析	(68)
(二)	ZY/8-10 的热裂解产物组成分析	(69)
(三)	温度对 ZY/8-10 热裂解产物的影响	(71)
<b>第七章</b>	<b>厌氧发酵液-添加营养元素培养链带藻热裂解产物研究</b>	(79)
一、	引言	(79)
二、	材料与amp;方法	(79)
(一)	藻种与培养	(79)
(二)	试验原料	(79)
(三)	成分分析	(80)
(四)	W/8-10 热裂解研究	(80)
(五)	W/8-10 热裂解组分分析	(80)

三、结果与讨论 .....	(80)
(一) 成分分析 .....	(80)
(二) W/8-10 的热裂解产物组成分析 .....	(81)
(三) 温度对 W/8-10 热裂解产物的影响 .....	(83)
<b>第八章 链带藻热裂解过程生命周期评价 .....</b>	<b>(91)</b>
一、引言 .....	(91)
二、研究对象与生命周期系统边界 .....	(92)
(一) 研究对象 .....	(92)
(二) 系统边界 .....	(92)
三、环境影响评价 .....	(93)
(一) 清单分析 .....	(93)
四、影响评价 .....	(96)
(一) 能效分析 .....	(96)
(二) 环境影响负荷 .....	(98)
<b>第九章 链带藻提取油脂后的残渣热裂解产物研究 .....</b>	<b>(104)</b>
一、引言 .....	(104)
二、材料与方法 .....	(104)
(一) 藻种与培养 .....	(104)
(二) 试验原料 .....	(104)
(三) 成分分析 .....	(104)
(四) ZYC/8-10 热裂解研究 .....	(105)
(五) ZYC/8-10 热裂解组分分析 .....	(105)
三、实验结果与数据分析 .....	(105)
(一) 成分分析 .....	(105)
(二) ZYC/8-10 的热裂解产物组成分析 .....	(105)
(三) 温度对 ZYC/8-10 热裂解产物的影响 .....	(107)
<b>参考文献 .....</b>	<b>(117)</b>

# 第一章 绪论

## 一、引言

化石能源的大量使用,导致有害物质污染日益严重,引发温室效应、气候变化、物种多样性被破坏和荒漠化等全球性生态问题。因此,提高能源利用效率、调整能源结构、开发利用可再生能源将是未来发展的必然选择。生物质能源是一类在自然界中储量丰富的可再生能源,可以转化成固态、气态和液态燃料,能在一定程度上取代化石能源。

以微藻为代表的生物质能源可与其他能源形式形成有益补充。微藻具备:光合作效率高,生长周期短,含油量高,可高密度、大规模生产且不占用耕地资源等优势(Brennan等,2010)。另外,微藻可以利用淡水、海水及污水等水体中的有机物与无机盐生长,同时还可解决水体富营养化等环境问题(Hu等,2012)。因此,作为一种新型生物燃料的重要来源,微藻是未来最具有潜力替代化石燃料的资源之一。

第一次能源危机后,美国能源部开始微藻柴油研究——ASP计划(Aquatic Species Program,1978—1996年),即利用高含油量微藻生产生物柴油(Dunahay等,1998)。1990年,日本政府投资25亿美元,资助为期十年的“地球研究更新技术计划”项目,筛选耐受高CO<sub>2</sub>浓度、生长速度快、生物量高的微藻藻种。2007年,美国政府推出“微型曼哈顿计划”能源微藻项目,选育高生物量和高油脂含量的藻种,以帮助美国摆脱对进口石油的严重依赖(Metting,1996;Spolaore等,2006)。2011年11月,欧盟耗资1400万欧元推出“藻类生物能源研究计划(Energetic Algae, EnAlgae)”,宗旨是加速微藻类生物质能由试验阶段向市场化、产品化应用阶段过渡。中国科技部也在“十二五”期间启动了多个微藻能源化利用关键问题研究及工程示范项目。

近年来,中国大中型沼气工程逐渐发展,在将畜禽养殖场废弃物资源化、能源化、清洁化处理的同时,也产生了大量养殖废水以及厌氧发酵液。这些有机废

水由于运输成本高、消纳的土地有限等原因无法及时利用。而经过简单的好氧处理后达标排放虽避免了对周边环境的污染，但处理成本巨大，且会导致营养元素的流失。再者由于废水成分不明确，长期灌溉可能引起土地重金属超标、盐碱化等问题(张进等, 2009)。在微藻生产中，营养元素的补充和成本是大规模、经济、可持续的微藻生物质能源生产中的关键问题(DOE, 2010)。有机废水中因含有较高浓度的有机物，以及丰富的 N、P、K 等营养元素，Zn、Mg、Fe 等微量元素，同时还包括多种氨基酸、维生素、糖类、核酸及一些生长调控物质(Lettinga 等, 1995)，完全具备为微藻提供养分的潜力。因此，可以将微藻类能源物质的生产与有机废水处理相耦合(赵立欣等, 2012)(图 1-1)。

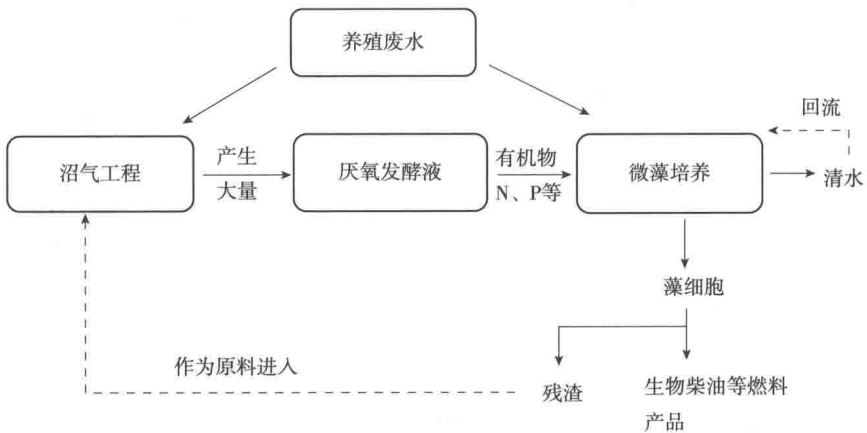


图 1-1 微藻生产与废水处理耦合流程图

目前，制约微藻类生物质能源规模化生产的一个主要限制因素是生产成本较高。若利用污水培养微藻，则既可以有效地降低污水中营养元素的浓度，避免水体富营养化；还能够降低微藻培养成本。但污水培养微藻过程中，微藻生长可能受到抑制，生长速度较慢，生物量累积较少。

本书拟针对此问题，以从污水中分离得到的 EJ 8-10 为研究对象，利用厌氧发酵液作为培养基，研究链带藻在厌氧发酵液中的生长特性、油脂积累以及养分去除情况；同时通过添加不同营养元素，调节链带藻在厌氧发酵液中的生长速度，达到高生物量累积的目的。在此基础上，针对微藻生物质转化效率较低等问题，以热裂解技术为主要手段，研究其热裂解产物的组分及含量，探索厌氧发酵液培养链带藻高生物量累积及其资源化潜力；作为比较，还分别研究了以 BG11 培养基和厌氧发酵液培养链带藻的热裂解产物，优化热裂解反应条件。利用生命周期评价方法，分别从能效和环境影响分析两方面评估热裂解过程。另外，本文探索了微藻基生物柴油生产过程中产生的大量藻渣的深度利用潜力。

## 二、微藻简述

### (一) 微藻的生物学属性

微藻被认为是最原始且分布极广的低等自养生物。它们是原植体植物,即缺乏根、茎、叶,在生殖细胞周围没有不孕性的周边细胞群,并以叶绿素 a 作为主要光合色素,通过光合作用将  $\text{CO}_2$  和水转化为  $\text{O}_2$  和大分子有机物(碳水化合物和油脂)。在某些胁迫条件(如光照过高或营养不足)下,部分微藻可以大量积累油脂,如表 1-1(Chisti, 2007)。油脂、碳水化合物以及通过生物途径产生的  $\text{H}_2$  和醇类等,都是潜在的能源产品前体物。

表 1-1 几种微藻的油脂含量

微藻种类	含油率(% dwt)
布朗葡萄藻( <i>Botryococcus braunii</i> )	25~75
小球藻( <i>Chlorella</i> sp.)	28~32
寇氏隐甲藻( <i>Cryptocodinium cohnii</i> )	20
杜氏藻( <i>Dunaliella primolecta</i> )	23
微小绿藻( <i>Nannochloris</i> sp.)	20~35
微拟球藻( <i>Nannochloropsis</i> sp.)	31~68
富油新绿藻( <i>Neochloris oleobundans</i> )	35~54
裂壶藻( <i>Schizochytrium</i> sp.)	50~77

### (二) 微藻生物质能源的优势

与传统生物质能源相比,微藻生物质能源具有以下优势(Metting, 1996; Spolaore 等, 2006; Schenk 等, 2008; Dismukes 等, 2008; Searchinger 等, 2008; Chisti, 2007; Cantrell 等, 2008; Rodolfi 等, 2009; Hirano 等, 1998; Qin, 2005; Ghirardi 等, 2000):

①相对于传统陆地植物的季节性,微藻受季节性影响较小,部分藻种可全年生长;

②生长速度快、生长周期短,单位体积内生物质的能量密度大,并且产油藻类油脂产率明显高于普通产油作物(表 1-2)(Chisti, 2007);

③光合作用效率高、固碳能力强,1 kg 微藻可固定 1.32 kg  $\text{CO}_2$ ;

④利用污水中氮、磷等作为营养源供其生长的同时,处理污水、避免水体富

营养化;

⑤微藻培养无需陆地植物生长防虫害的杀虫剂或除草剂;

⑥除了生物质积累,微藻还会产生蛋白质、多糖等较高附加值的副产品,提取油脂后的微藻残渣可作为饲料或者肥料;

⑦改变微藻的生长环境可以改变其化学组成,产油率也可显著提高。

表 1-2 不同生物质原料的油脂产率比较

生物质原料	油脂产率 (L/hm <sup>2</sup> )	所需的土地面积 <sup>a</sup> (10 <sup>6</sup> ha)	占中国土地面积 <sup>a</sup> 百分比(%)
玉米	172	1124	618
大豆	446	434	238
芥花籽	1190	163	89
麻疯树	1892	102	56
可可	2689	73	40
棕榈	5950	33	18
微藻 <sup>b</sup>	136900	1.5	0.8
微藻 <sup>c</sup>	58700	3.3	1.8

<sup>a</sup>以生物柴油替代中国每年消耗石化柴油的 50%计算;

<sup>b</sup>以藻细胞油脂含量达细胞干重的 70%计算;

<sup>c</sup>以藻细胞油脂含量达细胞干重的 30%计算。

### 三、微藻生物质的生产及应用

人类对微藻的利用可以追溯到两千年前,以念球藻(*Nostoc*)、螺旋藻(*Spirulina*)等食用微藻为主(Spolaore 等, 2006)。然而,微藻的工业化培养仅有五十多年的历史(Mata 等, 2010)。其中最先被培养和利用的是小球藻和栅藻(华汝成, 1983)。微藻由于含有丰富的蛋白质、多糖、不饱和脂肪酸、维生素等物质,在食品、化妆品、保健品、饲料业都有重要应用(Spolaore 等, 2006)。

利用微藻生产生物能源的概念则是在 20 世纪 70 年代的石油危机之后提出的(Wijffels 等, 2010)。其中,美国能源部开展的水物种研究项目(Aquatic Species Program, ASP)是目前为止关于微藻生物质能源最全面的科研项目,该项目系统研究了微藻作为生物质能源的潜力,对于微藻生物质能的发展具有积极意义(DOE, 2010)。

微藻的应用主要包括对微藻生物体和微藻油脂的利用。因此,在微藻生物质生产中,生物量累积和油脂累积是两个重要组成部分。

## (一) 生物量累积

### 1. 微藻生物体的应用

生物燃料生产中, 决定经济可行性的主要因素有: 生产率(即品种选择、光合作用效率、油脂生产率), 生产和收获成本(Brennan 等, 2010)。因此, 利用微藻生产生物柴油时, 尽可能累积较高生物量对于提高油脂生产率具有积极意义。

微藻体内除了具有较高的油脂含量, 同时也具有丰富的蛋白质。微藻体内蛋白质含量约为 40%~60%, 有的藻种甚至可以达到 70%以上, 远远高于牛奶、大豆中粗蛋白的含量(表 1-3)(Mata 等, 2010)。Qiao 等利用苹果酸盐作为 C 源培养 *Chlorella sorokiniana* GXNN01, 可以达到 75.23%的蛋白含量(Qiao 等, 2009)。同时, 大部分微藻含有人体所必需的氨基酸。程双奇等对螺旋藻的氨基酸组成进行了测定, 结果显示, 螺旋藻含有较多的亮氨酸、苯丙氨酸、苏氨酸, 含量均高于联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)的标准, 而赖氨酸、缬氨酸含量也与 FAO 标准所要求的数值一致(程双奇等, 1990)。

表 1-3 不同种类的食品及微藻的组成成分(占干重的百分数)

种类	蛋白质	碳水化合物	油脂
牛奶	26	38	28
大豆	37	30	20
肉类	43	1	34
莱茵衣藻( <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> )	48	17	21
小球藻( <i>Chlorella vulgaris</i> )	51~58	12~17	14~22
杜氏盐藻( <i>Dunaliella salina</i> )	57	32	6
斜生栅藻( <i>Scenedesmus obliquus</i> )	50~56	10~17	12~14
极大螺旋藻( <i>Spirulina maxima</i> )	60~71	13~16	6~7

微藻体内多糖一般为酸性杂多糖, 主要有鼠李糖、木糖、半乳糖、甘露糖等, 结构较为复杂, 且带有硫酸化修饰(陈德力等, 2009)。微藻多糖结构的多样性导致其具有多种生物活性, 包括抗肿瘤、抗病毒、抗辐射、增强机体免疫活性等。因此, 利用微藻生产多糖可广泛应用于保健食品、医药、食品添加剂等领域(陈玮等, 2012)。

此外, 大多数微藻的维生素含量也很丰富, 如  $V_A$ 、 $V_{B_1}$ 、 $V_{B_2}$ 、 $V_{B_6}$ 、 $V_{B_{12}}$ 、 $V_C$ 、 $V_E$ 、叶酸等多种人体所需维生素, 足以满足人或动物生长的需求(Brennan

等, 2010)。微藻细胞中还含有较多色素, 如叶绿素(约为干重的 0.5%~1%)、胡萝卜素(约为干重的 0.1%~0.2%)、藻胆蛋白等(Spoladore 等, 2006)。其中,  $\beta$ -胡萝卜素具有广泛的应用, 可以作为食品着色剂、化妆品添加剂。杜氏盐藻是主要的  $\beta$ -胡萝卜素生物来源, 能生产约占干重 14% 的  $\beta$ -胡萝卜素(García-González 等, 2005)。

微藻的高生物量生产是获取以上各类高附加值产品的基础与前提。目前, 微藻规模化生产仍具有一定的局限性。因此, 提高微藻的生物量是微藻规模化生产的关键问题之一。

## 2. 生物量的影响因素

影响微藻生物量累积的条件包括光照、温度、pH 值、 $\text{CO}_2$  和营养等。其中, 营养因素包括 C、N、P、Fe、Si 等(王清等, 2009)。这些营养元素的种类及加入量都将直接影响微藻的生长和代谢情况。

碳(Carbon, C)是微藻进行光合作用所必需的物质之一, 也是异养代谢的有机底物(Qin 等, 2005)。不同 C 源可能是通过不同的吸收代谢途径进入微藻细胞, 从而影响微藻的生长(Ghirardi 等, 2000)。由于异养、兼养与自养相比, 具有更快的生长速度, 较低的环境依赖性等优点。目前国内外对于有机碳源的研究增多。

氮(Nitrogen, N)是微藻生长必需的基本元素之一, 能够合成藻体内多种物质, 如蛋白质、核酸、叶绿素等, 对于藻类的生长具有重要作用(譙顺彬, 2007)。微藻可以利用的 N 源种类较多, 包括无机 N 源(如  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ )以及有机 N 源(如尿素、酵母膏、胰蛋白胨等), 不同的 N 源和浓度对微藻的生长及生化特性影响较大(胡章喜等, 2009)。微藻对不同形态 N 的利用存在差异。如 *Botryococcus braunii* 能够利用  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和尿素进行生长(譙顺彬, 2007), 紫球藻则适合使用  $\text{NO}_3^--\text{N}$  作为 N 源(肖华山等, 2001)。

磷(Phosphorus, P)参与细胞的能量传递、细胞膜形成、核酸合成等过程, 也是影响微藻生长的一个因素。培养微藻时, P 主要是以  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$  的形式被利用(Clark 等, 1995)。高 P 条件下, 细胞的代谢活性增加, 光合效率提高, 因此有较大的生长速率和较高的生物量(Miao 等, 2006)。

## (二) 油脂累积

### 1. 微藻油脂的应用

利用微藻油脂制备生物柴油是目前研究的热点之一。生物柴油与石油相比, 具有以下优点: ①可再生、可降解; ②无毒, 产生较低浓度的  $\text{SO}_x$ 、CO、烟尘及微粒; ③相比石油, 其  $\text{CO}_2$  排放量可减少 78%。生物柴油不仅可以直接供柴油机



使用,同时与一定比例的化石燃料混合后还可供内燃机使用 (Sheehan 等, 2000)。此外,与生物乙醇相比,生物柴油含有低凝固点及高能量密度,因此更适合用于航空领域 (Chisti, 2007; Elmoraghy 等, 2012)。

生物柴油的化学合成过程非常简单,主要是由甘油三酯 (Triacylglyceride, TAG) 与短链醇通过转酯反应生成长链脂肪酸单烷基酯 (Brennan, 2010; Chisti, 2007) (图 1-2)。

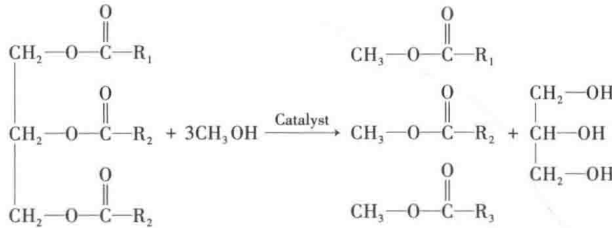


图 1-2 生物柴油制备的化学反应过程

一般而言,微藻合成以 C16 和 C18 为主要碳链的脂肪酸,用于生产生物柴油 (Hu 等, 2008)。微藻生物柴油的生产过程如图 1-3。虽然许多微藻本身具有高油脂含量(大约为干重的 20%~50%),但仍可通过优化生长影响因素(如 N 浓度、P 浓度、光照强度、温度、盐度、CO<sub>2</sub> 浓度和收获方法等)提高油脂含量 (Mata 等, 2010)。

除了制备生物柴油,微藻油脂中由于含有较多的多不饱和脂肪酸 (Polyunsaturated fatty acids, PUFAs),因此可用于营养保健品的生产。高等植物体内缺少合成 PUFAs (C18 以上) 的必需酶,而鱼油虽然含有较高的 C20 和 C22 $\omega$ -3 脂肪酸,但其具有鱼腥味且易氧化,因此也不适合用于 PUFAs 的生产 (Clark 等, 1995; Certik 等, 1999)。微藻细胞富含 PUFAs,如二十二碳六烯酸 (Docosahexaenoic acid, DHA)、二十碳五烯酸 (Eicosapentenoic acid, EPA)、二十碳四烯酸 (Arachidonic acid, AA),且产品无鱼腥味,生产不受季节和气候限制,是生产 PUFAs 的潜在来源 (Spolaore 等, 2006)。

## 2. 油脂累积的影响因素

微藻的油脂累积与藻种、培养条件、生长周期、培养密度、培养方式等诸多因素有关 (杨秀霞等, 2001)。

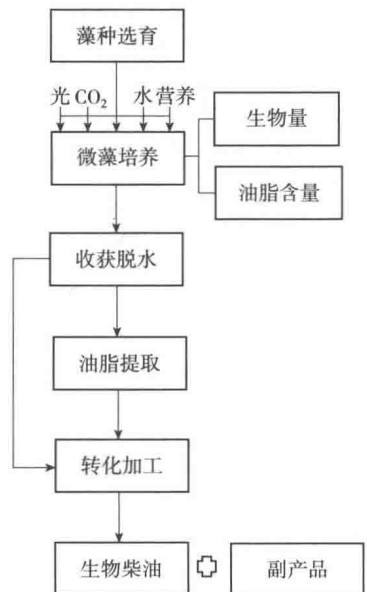


图 1-3 微藻类生物燃料生产过程