

微生物油脂发酵 与加工技术

Fermentation and Processing Technology of Microbial Oil

◎ 何东平 陈明锴 闫子鹏 主编
◎ 汪志明 田 华 刘 波 副主编
◎ 陈 涛 陈文麟 主审



中国轻工业出版社

全国百佳图书出版单位

微生物油脂发酵与加工技术

主 编 何东平 陈明锴 闫子鹏

副主编 汪志明 田 华 刘 波

主 审 陈 涛 陈文麟

图书在版编目 (CIP) 数据

微生物油脂发酵与加工技术/何东平, 陈明锴, 闫子鹏主编. —北京:
中国轻工业出版社, 2016. 1

ISBN 978 - 7 - 5184 - 0694 - 4

I. ①微… II. ①何… ②陈… ③闫… III. ①微生物—油脂制备—
发酵 IV. ①TQ644

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 264559 号

责任编辑: 贾 磊

策划编辑: 张 靓

责任终审: 滕炎福

封面设计: 锋尚设计

版式设计: 王超男

责任校对: 吴大鹏

责任监印: 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 北京君升印刷有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 720 × 1000 1/16 印张: 23.00

字 数: 460 千字

书 号: ISBN 978 - 7 - 5184 - 0694 - 4 定价: 72.00 元

邮购电话: 010 - 65241695 传真: 010 - 65128352

发行电话: 010 - 85119835 010 - 85119793 传真: 010 - 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

150336K1X101ZBW

总结微生物油脂新技术，促进
微生物油脂快发展。

中国粮油学会首席专家

王长元

2015年2月8日

本书编委会

主 编

- 何东平 武汉轻工大学 教授、博士生导师
陈明锴 武汉大学 教授、主任医师、硕士生导师
闫子鹏 河南华泰粮油机械股份有限公司 董事长

副主编

- 汪志明 嘉必优生物工程(武汉)有限公司 高级工程师
田 华 武汉博特尔油脂科技有限公司 副总经理
刘 波 武汉星辰现代生物工程有限公司 总经理

参 编

- 胡传荣 武汉轻工大学 教授
郑竟成 武汉轻工大学 教授
张世宏 武汉轻工大学 讲师
童 骁 中国科学院武汉病毒研究所 副研究员
蒋志刚 湖北欣和生物科技有限公司 工程师
朱新亮 河南省亚临界生物技术有限公司 高级工程师
张承建 武汉博特尔油脂科技有限公司 工程师
李翔宇 嘉必优生物工程(武汉)有限公司 副总工程师
唐孝鹏 嘉必优生物工程(武汉)有限公司 经理
王海堂 嘉必优生物工程(武汉)有限公司 经理
陈江宁 武汉星辰现代生物工程有限公司 工程师
吴金锐 河南华泰粮油机械股份有限公司 工程部主任
肖 勇 武汉大学 副教授
李 迅 武汉市精神卫生中心 主管技师
王 澍 武汉轻工大学 研究生
吕小义 武汉轻工大学 研究生

曹 维 武汉轻工大学 研究生
张静雯 武汉轻工大学 研究生
尹 佳 武汉轻工大学 研究生
付 杰 武汉轻工大学 研究生

主 审

陈 涛 中国科学院武汉病毒研究所 研究员、博士生导师
陈文麟 武汉轻工大学 教授

前 言

微生物油脂发酵与加工技术是涉及微生物工程学、油脂工程学和食品工程学等多学科的综合性技术。它的产品是可供人类食用的第三类油脂——微生物油脂。在人类发展的历时长河中，人们发现并利用了动物油脂和植物油脂。与之相比，微生物油脂只能算是“襁褓中的婴儿”，目前仅有 130 多年的历史，需要各界人士不断探索、研究，共同促进微生物油脂学理论和技术的发展，使之更好地为人类服务。

《微生物油脂学》（何东平、陈涛，2006）总结了我国微生物油脂的研究成果——发酵法生产 β -胡萝卜素和长链多不饱和脂肪酸（LC-PUFAs）的技术，这与以色列 Zvi Cohen 教授、英国 Colin Ratledge 教授主编，由美国油脂化学家协会（AOCS）出版的 *Single cell oils*（第 1 版）不谋而合。在这两本书出版时，医学界专家的研究成果揭示了人的大脑细胞膜、视网膜细胞膜等中含有花生四烯酸（ARA）和二十二碳六烯酸（DHA）的量占总脂肪酸的 60% 以上；英国脑营养学家指出“缺乏 DHA 等人体所需的脂肪酸将造成大脑发育障碍”，并在第一次 DHA 国际研讨会上宣称“人类大脑在发育的过程中肯定需要 DHA”；世界卫生组织/联合国粮农组织（WHO/FAO）的油脂营养专家顾问委员会指出“妇女在妊娠期必须获得 LC-PUFAs 以供胎儿发育需要”，且研究表明，DHA、ARA、 γ -亚麻酸（GLA）等对胎儿和婴幼儿的发育具有重大意义；近期研究还证明，DHA 和 ARA 的摄入不但对婴幼儿、儿童、妇女和老年人十分重要，而且对所有年龄段的成年人都是不可或缺的。正是由于 LC-PUFAs 具有特殊的和不可替代的作用，所以 LC-PUFAs 近十多年发展迅速，目前年产值达 90 亿元以上。据不完全统计，我国有 60 多所高等院校、科研院所和 20 多个生产厂家参与研究、生产和应用微生物油脂，年产量（包括 β -胡萝卜素等）近万吨，年产值为 40 多亿元，微生物油脂产业已经成为一个新兴的朝阳产业。

《微生物油脂发酵与加工技术》总结了近十年以来我国在微生物油脂研究、生产和应用方面的成果，有些研究成果、论文资料、显微图像是首次公开。2014

年5月，在武汉召开的“全国微生物油脂应用研讨会”上，许多专家对将微生物油脂应用于植物油脂中寄予厚望，希望生产出使广大群众买得起、用得上的微生物油脂相关产品，这将进一步促进微生物油脂的研究、生产和应用。

本书由何东平、陈明锴、闫子鹏任主编，汪志明、田华、刘波任副主编。编写分工如下：第一章微生物油脂的发展历程由陈明锴、王澍、付杰编写；第二章产脂微生物的种类和特性由田华、吕小义编写；第三章产脂微生物的筛选和育种由蒋志刚、张承建、张静雯编写；第四章微生物油脂的发酵技术由刘波、童骁、李翔宇编写；第五章微生物油脂的提取由朱新亮、郑竟成、尹佳编写；第六章微生物油脂的精炼由汪志明、唐孝鹏、胡传荣编写；第七章微生物油脂产品的开发由何东平、王海堂编写；第八章微生物油脂质量控制和检验检测由闫子鹏、吴金锐、肖勇编写；第九章微生物油脂的安全性评价及在食品中的应用由田华、陈江宁、曹维编写；第十章微生物油脂的应用由李迅、汪志明、张世宏编写。

本书在编写和出版过程中得到嘉必优生物工程（武汉）有限公司、河南华泰粮油机械股份有限公司、武汉星辰现代生物工程有限公司等单位的大力支持；中国科学院武汉病毒研究所陈涛研究员、武汉轻工大学陈文麟教授为本书主审：在此表示谢意！

在本书编写时，编者已尽心力，渴求新颖，但由于知识水平有限，加之时间仓促，书中难免有遗漏和其他不足之处，敬请读者斧正。

有关本书详情请登录 <http://www.oils.net.cn>（中国油脂科技网）查询。

编 者

2015年10月1日

目录

1	第一章 微生物油脂的发展历程
1	第一节 微生物油脂的概况
6	第二节 微生物油脂的发展史
11	第三节 微生物油脂的生物合成和代谢调控
20	第四节 微生物油脂的特殊功能
21	第五节 微生物油脂的安全性
24	第六节 微生物油脂的未来
27	第二章 产脂微生物的种类和特性
27	第一节 产脂微生物的种类
36	第二节 生产中主要的产脂微生物
44	第三节 产脂微生物的特性
51	第三章 产脂微生物的筛选和育种
51	第一节 自然筛选
62	第二节 诱变筛选
69	第四章 微生物油脂的发酵技术
69	第一节 概述
71	第二节 发酵中的消毒灭菌技术
73	第三节 空气过滤系统及其净化除菌
75	第四节 生产菌种的制备
78	第五节 发酵技术工艺及设备
89	第六节 搅拌设备的选型（主体发酵罐）
95	第七节 测量仪表和自动控制
95	第八节 生产辅助设备及选型
106	第九节 废水处理

126	第五章 微生物油脂的提取
127	第一节 微生物发酵液预处理
139	第二节 微生物油脂的溶剂浸出技术
149	第三节 微生物油脂亚临界浸出技术
164	第六章 微生物油脂的精炼
164	第一节 微生物油脂脱胶
171	第二节 微生物油脂脱酸
182	第三节 微生物油脂脱色
188	第四节 微生物油脂脱臭
196	第七章 微生物油脂产品的开发
196	第一节 初级产品
203	第二节 终端产品
222	第八章 微生物油脂质量控制及检验检测
222	第一节 微生物鉴定分析
230	第二节 菌种的衰退、复壮和保藏
236	第三节 生产原辅材料标准及检测
239	第四节 发酵过程的质量控制
259	第五节 微生物油脂产品检测
269	第六节 微胶囊粉剂质量指标及检验方法
273	第七节 微生物油脂的安全性指标及检验方法
284	第九章 微生物油脂的安全性评价及在食品中的应用
284	第一节 微生物油脂的安全性
296	第二节 微生物油脂的申报新型食品
304	第十章 微生物油脂的应用
304	第一节 微生物油脂的作用机理
309	第二节 微生物油脂在营养和保健品中的应用
316	第三节 微生物油脂在养殖业中的应用
322	附录一 微生物油脂相关标准
349	附录二 专业术语中英文对照表
353	参考文献

第一章 微生物油脂的发展历程

第一节 微生物油脂的概况

一、微生物油脂的定义

顾名思义，微生物油脂是一类来自于微生物的可食用的油脂，这些微生物主要是丝状真菌、藻类和酵母等真核微生物。细菌一般不产生食用油脂，它能产生多 β -羟基丁酸聚合类的物质。由真核微生物产生的可食用油脂的种类、结构和功能与动物、植物产生的油脂很类似。其中，有些脂肪酸在动物、植物中很难合成，且是人体需要的长链多不饱和脂肪酸（LC-PUFAs）。

脂肪是人体必需的营养素，它与蛋白质、糖类一样，是维持人类生命活动的三大要素之一。人们熟知，脂肪是油（oils）和脂（fats）的合称。人类祖先在历史发展的长河中，发现和利用了动物油脂和植物油脂，动物油脂包括猪油、牛油、鱼油、羊油和野生动物油等，植物油脂来源于种植栽培的大豆、玉米、花生、芝麻、林木等油料作物。随着科学技术的进步和人类对自身健康需求的提升，在政府机构大力支持和科学家、企业家的共同努力下，现已研究出世界上第三类油脂，即微生物油脂（microbial oils），或称单细胞油脂（single cell oils）。

二、微生物油脂的特点

微生物油脂与动物油脂、植物油脂相比较具有以下三个方面的特点。

（一）来源不同

微生物油脂来源于各种微生物，而不是动物、植物。产脂微生物包括了真核微生物的酵母、真菌、地衣和藻类，以及原核生物的细菌，其定义为能产生菌体自重20%的油脂的微生物。能达到工业化和商业化生产的产脂微生物产生的油脂及LC-PUFAs会更高，这些菌株及藻株很少是从自然界中筛选获得的，而是将自然界中筛选获得的菌株、藻株经物理的、化学的诱变或基因改造而获得。

（二）功能不同

微生物油脂不仅具有动物、植物油脂提供的碳源和能量，而且还有动物、植物油脂无法替代的生物活性和生理作用。通过微生物生产而获得的 α -亚麻酸（ALA）、 γ -亚麻酸（GLA）、花生四烯酸（ARA）、二十二碳五烯酸（EPA）和

二十二碳六烯酸（DHA）等 LC-PUFAs，具有两大功能：一是 LC-PUFAs 能控制生物体系动力学、相转变、膜渗透性及调节膜结合蛋白的状态，如受体、腺苷三磷酸（ATP）酶、输送蛋白和离子通道，此外，LC-PUFAs 还能控制某些基因的表达；二是 LC-PUFAs 可作为调节生物学功能代谢物的关键的前体，如前列腺素、白三烯和羟基脂肪酸等。因此，很多学者在其撰写的专著、论文中将微生物油脂称为功能性油脂。

（三）生产方式不同

微生物生长繁殖速度快，生物合成油脂新陈代谢作用强，生产发酵周期短，易于大规模工业化培养生产。微生物油脂生产占地面积小，不受场地限制，不与粮食生产争地争资源，不像动物油脂、植物油脂生产一样受气候、季节的制约。在我国，从内蒙古到广东，从新疆到东海边境均可建厂连续大规模生产。

微生物油脂除含有原有限定的植物油脂外，还有植物油脂中所没有的脂肪酸成分及其他功能性成分，如各种类胡萝卜素等。因而研究微生物油脂尤其是它的特殊脂肪酸所具有的特有生物活性和生理功能被世界上微生物学、生物工程学、油脂工程学、营养学和医学等方面的专家、学者高度重视，这大力推动了微生物油脂学的发展，取得了世人瞩目的成就，使得微生物油脂从二三十年前的学术性研究试验样品转变为成年人和婴幼儿的重要营养食品，其关键是大量长链多不饱和脂肪酸（LC-PUFAs）的发现以及人们认识到 LC-PUFAs 在植物和动物中没有合适的、安全的来源。人们证明不同寻常的微生物是特别重要的，因为它们正是这些长链多不饱和脂肪酸（LC-PUFAs）最现实的来源。利用转基因植物来生产这些 LC-PUFAs 或者用转基因油脂代替微生物油脂或单细胞油脂在近期内还不能实现，看起来还比较遥远。在今后几十年中，微生物油脂可能仍是长链多不饱和脂肪酸（LC-PUFAs）的主要来源。

三、微生物油脂的研究内容

LC-PUFAs 主要包括下列脂肪酸。

（一）十八碳三烯酸

十八碳三烯酸，俗称 α -亚麻酸（ALA）和 γ -亚麻酸（GLA），十八碳三烯酸的分子结构式如图 1-1 所示。前者属于 ω -3 系列脂肪酸，后者属于 ω -6 系列脂肪酸。非共轭主体构型，分子式 $C_{18}H_{30}O_2$ 。科学家试图用微生物发酵的方法生产 γ -亚麻酸。微生物产生的 γ -亚麻酸为金黄色油状液体，其分子中含有三个双键，形成高度的不饱和状态，极易在空气中和高温下氧化，导致酸败变质。要保持 γ -亚麻酸的稳定性，就加大了 γ -亚麻酸生产和加工过程中的难度，这是亟待解决的难题。

产 γ -亚麻酸的微生物有丝状真菌中的藻状菌类、子囊菌类、担子菌类以及

微藻类。但科学家研究发现能够符合工业化生产的菌种多属于接合菌纲的毛霉目以及卵菌纲的水霉目的微生物。从大量资料中得知, 1948 年 Bemhard 和 Albercht 首先从布拉克须霉 (*Phycomyces blakesleeanus*) 的菌丝体脂肪中鉴定出 γ -亚麻酸, 其含量为菌体脂肪酸的 16%, 这是首例真菌 γ -亚麻酸。目前, 中国、日本、英国、美国、法国等用于工业化生产的主要菌种为深黄被孢霉 (*Mortierella isabellina*)、拉曼被孢霉 (*Mortierella ramanniana*) 和根霉属 (*rhizopus*) 中的菌种。在美国、德国、日本和加拿大等发达国家, 以 γ -亚麻酸为原料的保健品早已上市。

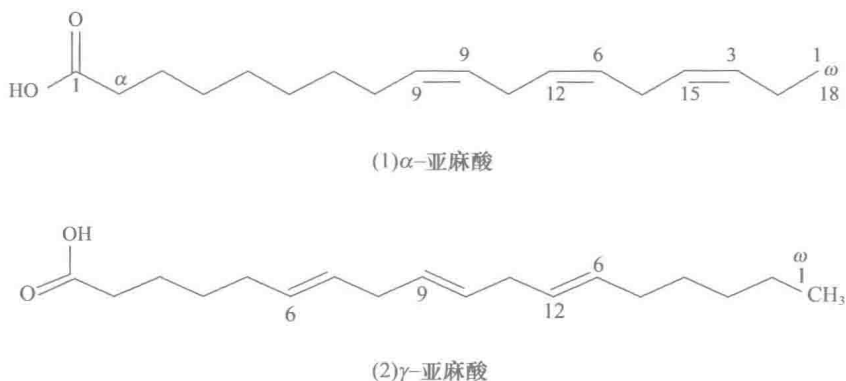


图 1-1 十八碳三烯酸的分子结构式

(二) 二十碳三烯酸

二十碳三烯酸, 俗称双高 γ -亚麻酸 (DHGLA), 双高 γ -亚麻酸的分子结构式如图 1-2 所示。它是 20:3 (ω -6) 系列的含有 3 个双键的多不饱和脂肪酸 ($C_{20}H_{34}O_2$), 是人体中 ω -6 多不饱和脂肪酸代谢的中间体。亚油酸 (LA, 18:2, ω -6) 在 Δ^6 去饱和酶作用下经脱氢形成 γ -亚麻酸 (GLA, 18:3, ω -6), γ -亚麻酸在延长酶的作用下产生 DHGLA, DHGLA 在 Δ^5 去饱和酶作用下经脱氢可转化为花生四烯酸 (ARA, 20:4, ω -6)。DHGLA、花生四烯酸和二十碳五烯酸 (EPA, 20:5, ω -3) 是合成前列腺素 (PG) 和血栓烷的前体, 其中由 DHGLA 合成的 PGE₂ 系列的化合物具有抗炎、抗血小板聚集等功能。DHGLA 本身还具有抗高血压、抗过敏等作用。

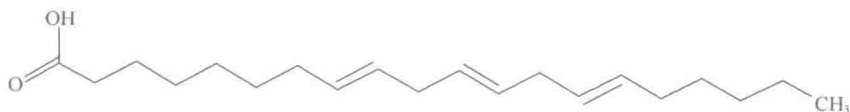


图 1-2 双高 γ -亚麻酸的分子结构式

(三) 二十碳四烯酸

二十碳四烯酸，俗称花生四烯酸（ARA），ARA 分子结构式如图 1-3 所示。由日本 Lion cropin Totani 和 Qba 于 1981 年研制成功。ARA 分子式 $C_{20}H_{32}O_2$ ，是 $\omega-6$ 系列多不饱和脂肪酸，其中含有四个双键，故极易氧化和酸败，稳定性欠佳。其熔点仅为 -49.5°C ，沸点为 245°C 。微生物产生的二十碳四烯酸为金黄色油状物，溶于醇、醚、水等。二十碳四烯酸在苔藓类、蕨类和沙丁鱼油中能够检测到，但含量极低，不具备大规模开发的價值。一部分细菌也能产生二十碳四烯酸，但产率极低。因而目前在科研和工业应用中，研究较多的二十碳四烯酸生产菌是丝状真菌，如被孢霉属（*Mortierella*）、毛霉属（*Mucor*）、根霉属（*Rhizopus*）等，尤其是高山被孢霉（*M. alpina*），它是工业化生产的主要菌种。



图 1-3 二十碳四烯酸（ARA）分子结构式

(四) 二十碳五烯酸

二十碳五烯酸（EPA）属 $\omega-3$ 系列脂肪酸（20:5），EPA 的结构式如图 1-4 所示。微生物产生的二十碳五烯酸为油状液体，其分子中含 5 个双键，是一种高度不饱和脂肪酸，易氧化导致酸败变质，要保持其稳定性，就要在加工过程中避免高温、高压，在储存过程中要保持低温或加入惰性气体。

虽有革兰阴性菌产生少量二十碳五烯酸，但不足以进行发酵生产二十碳五烯酸，只有真核生物的丝状真菌和藻类会有丰富的二十碳五烯酸，尤其是毛霉目下的一些真菌可产生高产量的二十碳五烯酸，其中高山被孢霉可成为二十碳五烯酸的商业生产菌株。

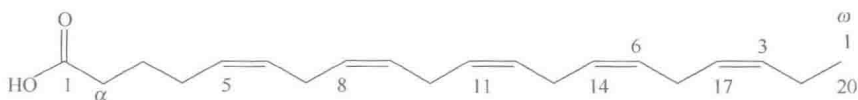


图 1-4 二十碳五烯酸（EPA）的分子结构式

(五) 二十二碳六烯酸

二十二碳六烯酸（DHA）属 $\omega-3$ 系列的 PUFAs，DHA 的分子结构式如图 1-5 所示，分子中有 6 个双键，常温下暴露在空气中极易氧化酸败。因而提取过

程中常常需要较低的温度条件以保证其稳定性。产生二十二碳六烯酸的微生物主要为金藻、甲藻、隐甲藻等海洋微藻和一些海洋真菌。目前, 全球范围内, 常用于生产二十二碳六烯酸的藻种是寇氏隐甲藻 *Cryptecodinium cohnii* (Seligo) Javornicky 和裂壶藻 *Schizochytrium limacinum* (Tuttle R. C., 1975)。深海鱼油中虽含有丰富的二十二碳六烯酸, 但鱼油中的二十二碳六烯酸并不是鱼本身在体内生物合成的, 而是鱼摄食了含有二十二碳六烯酸的藻类及海洋浮游生物而长期积累在体内的脂肪中所形成。

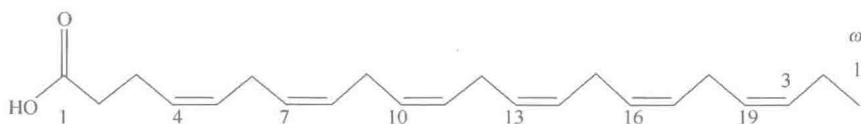


图 1-5 二十二碳六烯酸 (DHA) 的分子结构式

(六) 类胡萝卜素

类胡萝卜素是一类广泛存在于光合生物和非光合生物中的色素, 自 1931 年利用色谱首次分离出 α 、 β 、 γ 三种胡萝卜素混合物后, 到目前为止已分离出 600 多种类胡萝卜素。它们对人体、动物健康有益, 如 β -胡萝卜素是维生素 A 源和抗氧化剂, 具有清除和淬灭氧自由基以及抗癌和预防治疗心血管疾病的作用。世界卫生组织 (WHO) 在 1966 年批准 β -胡萝卜素用于普通食品、婴幼儿食品和药品, β -胡萝卜素的分子结构式如图 1-6 所示。过去人们长期使用人工合成 β -胡萝卜素, 但人工合成的 β -胡萝卜素均为反式结构, 而微生物产生的 β -胡萝卜素约有 10% 的顺式结构。据研究, β -胡萝卜素的顺式结构更适合于人类需求, 生理功能更好。因为在微生物产生类 β -胡萝卜素或番茄红素等时, 也产生多种脂肪酸构成的微生物油脂, 而类胡萝卜素溶于油中, 故又称这类胡萝卜素为脂溶性维生素。因此, 科学家也将这类微生物归类于产脂微生物。

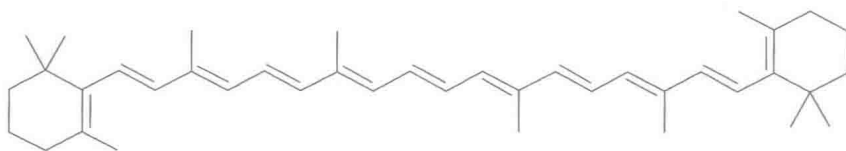


图 1-6 β -胡萝卜素的分子结构式

第二节 微生物油脂的发展史

一、微生物油脂的发展初期

1878年至1975年的近100年中,虽然微生物油脂的研究、生产和使用还有很多明显的经济阻碍,但是从20世纪20年代到20世纪中期科学家做了许多科学的、扎实的工作,这些工作为实现微生物生产油脂奠定了坚实的基础,这些工作归纳如下。

20世纪初,许多科学家进行产脂微生物的筛选、分类鉴定、生物学特性、生长代谢和生物合成油脂的研究,取得了很多的科学数据和产脂菌株。例如,*Eudomyces verndlish* 等的酵母和 *Tribosporon pullulaus* 等的真菌,德国柏林大学的 Lindner 在1922年首先利用一种含脂的酵母菌发酵来制备油脂。到了20世纪40年代,随着各国对产脂微生物、生物合成油脂、生产工艺及影响产油量的各种因子的研究,作为油脂来源的各种微生物种类也得到迅速扩大。Woodbine 于1959年对这些早期微生物油脂的基础研究及其油脂生产所做的工作进行了科学的、实事求是的总结和前景瞻望。这些总结是微生物油脂研究从19世纪后期至20世纪中期最实用的、最基础的结晶。

微生物生产的油脂与从植物种子中得到的油脂没有什么特殊的区别,它们都是以甘油三酯的形式存在的,所不同的是甘油三酯1、2、3位C链连接的脂肪酸的不同。产脂植物是生长在有机土壤中,而产脂微生物是以葡萄糖和蔗糖等为碳源在含氮的培养基中生长,这些碳源来自于农作物,把一种农产品转变成另一种农产品的成本从来不经济实用,就好像生产糖的成本还不如生产植物油成本的四分之一,如玉米油、大豆油和菜籽油。此外,将1t蔗糖转变为1t油是不现实的,不光是微生物没有如此高的效率,其他生物也不可能如此高的效率。微生物大约需要5t的蔗糖才能转化为1t油。因此,科学家和工艺专家必须找到一些低成本的碳源或者使微生物油脂的利润远远超过植物油脂的利润。这样,微生物油脂才具备经济效益。这些难题正在被科学家所破解,一是利用农作物的副产物如淀粉、饼粕等直接为微生物所利用,或者许多食品制造厂、纸浆厂和木材加工厂的下脚料及废液作为碳源,以减少生产原料成本,并已经取得了许多成功的实例。另一方面,由于营养学家和医学家的努力,已证明微生物生产的 LC-PUFAs 具有健脑益智,防治心脑血管、肿瘤、夜盲症等疾病和免疫调节的功能。这些含有 ALA、GLA、ARA、DHGLA、EPA 和 DHA 的微生物油脂已获得世界卫生组织(WHO)和美国食品与药品管理局(FDA)的认可,并适用于婴幼儿食品、老年人食品和孕妇食品,尤其是成年男人食

品。因而，在其销售价格上与植物油脂相比有很明显的优势。这期间的成果归纳如下。

（一）高产脂微生物菌（藻）株的筛选

1. 自然筛选产脂菌（藻）株

产脂微生物物种的数量与整个微生物物种相比较，自身有能力产油量超过其生物量 20% 的物种数量相对较少，不是随便哪一种微生物都可以作为产脂微生物。这需要长期的、复杂的辛劳工作，从大自然中筛选出产脂微生物，这个过程称作自然筛选。

2. 人工选育产脂突变菌（藻）株

从自然界中获得产脂微生物，往往达不到工业化和商业化生产的目的，这需要科学家通过物理的、化学的诱变甚至于基因突变技术获得 LC - PUFAs 的高产菌株。目前在世界范围内生产的深黄被孢霉 (*Mortierella isabellina*)、高山被孢霉 (*Mortierella alpina*)、寇氏隐甲藻 (*Crypthecodinium cohnii*) 等均是突变株，这些突变株都大大提高了十八碳三烯酸 (GLA)、二十碳四烯酸 (ARA) 和二十二碳六烯酸 (DHA) 的产量，降低了生产成本，使其在销售中有利可图。

（二）微生物油脂的脂肪酸研究

产脂真菌和酵母产生的微生物油脂的主要成分是三酰甘油，这些成分与植物油脂三酰甘油成分完全相似，但其 C 位所连脂肪酸有区别。虽然藻类产生的油脂比真菌和酵母产生的油脂较为复杂，但还是存在与植物油脂三酰甘油相同的成分。同时还证明了鱼油中 DHA 来源于鱼摄食了含有 DHA 的藻类及浮游生物，而在鱼体内积累起来的，并不是鱼本身合成的。

（三）产脂微生物的营养生长和合成油脂

在产脂微生物营养代谢方面，碳源、氮源及其他营养物质都与产脂微生物的产脂能力提高有关。在产脂微生物的培养生长过程中，除了碳源外，还需要加入氮源和其他营养物质，可以提高微生物的产油量。当氮源不足时，细胞仍会在存有大量碳源的培养基中生长，细胞利用碳源合成油脂并积累于细胞内，随着培养时间的延长，胞内油脂积累越来越多，产脂量增加，这已被大量的研究所证实，这些研究包括了生物化学和分子生物学方面的研究。微生物的生长代谢曲线如图 1-7 所示，培养基的营养、C/N 值、补料控制生长都与油脂的积累有很大关系。当培养基的氮源耗尽时，合成的油脂开始在微生物细胞中积累，但培养基中还存在大量的营养物质（如碳源）。这时细胞仍能生长，合成油脂并积累于细胞内。并通过用 NH_4OH 调节培养液中的 pH，使生物量达到最大，而氮源迅速消耗，开始油脂大量积累过程。