

国外优秀食品科学与工程专业教材

功能性食品学

[美] Mingrou Guo 著

于国萍 程建军 等编译

FUNCTIONAL FOODS: PRINCIPLES AND TECHNOLOGY


 中国轻工业出版社

国外优秀食品科学与工程专业教材

功能性食品学

[美] Mingruo Guo 著

于国萍 程建军 等编译

 中国轻工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

功能性食品学/(美) 郭 (Mingruo, G.) 著; 于国萍等编译. —北京: 中国轻工业出版社, 2011. 4

国外优秀食品科学与工程专业教材

ISBN 978-7-5019-7964-6

I. ①功… II. ①郭… ②于… III. ①疗效食品-高等学校-教材 IV. ①TS218

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 238078 号

Original English language edition published by Woodhead Publishing Ltd. Copyright 2009 Woodhead Publishing Limited.

All Rights Reserved Woodhead Publishing Limited.

责任编辑: 张 靓 责任终审: 滕炎福 封面设计: 锋尚设计
版式设计: 宋振全 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: 北京京都六环印刷厂

经 销: 各地新华书店

版 次: 2011 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 17.5

字 数: 404 千字

书 号: ISBN 978-7-5019-7964-6 定价: 36.00 元

著作权合同登记 图字: 1-2010-2722

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 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

091202J1X101ZYW

中文版序

本书由美国 CTI Publications, Inc. 在 2007 年出版后, 英国 Woodhead Publishing Ltd. 在原书基础上于 2009 年再版。这次在中文版中增加了功能食品法规一章和功能性乳制品等内容。

由于时间仓促和编写者水平所限, 书稿中难免有这样和那样的错误, 恳请相关专家和读者批评指正。

我要向本书各位编者表示衷心的感谢, 正是他们的专业精神与努力使这一工作得以如期完成。特别要感谢于国萍教授在全书统稿、审定过程中所做的一切。最后, 我代表各位编者向中国轻工业出版社李亦兵主任和张靓编辑致谢, 感谢他们在本书编写过程中给予的合作和大力帮助。

郭明若

于东北林业大学帽儿山教学区

原 著 序

功能食品是食品科学与营养的热门话题之一，这种趋势还将持续很长时间。自从2000年作者就在美国佛蒙特大学教授功能食品——原理与工艺，这门课程在校园里正变得越来越流行。学生一直要求有一本教材用于学习和将来参考。尽管市场上已有一些关于功能食品的书，但没有一本是为做教材编写的。2005年作者决定利用半年的休假时间为我的学生写一本教材（现在我认识到要完成这个工作半年的时间是不够的）。本书的结构是基于我的讲义，由9章和作为附录的实验部分组成。第一章介绍了功能食品的定义、历史和全球形势，第二、三、四、五、六章分别介绍了一些功能食品的功效，即为抗氧化剂、膳食纤维、益生菌素与益生菌、功能性脂肪酸以及维生素与矿物质，第七章讨论了大豆及制品的化学与健康作用，第八章涉及运动饮料的生物化学与配方问题，最后一章讨论的是人乳的化学与婴儿配方乳粉的配方工艺。

我真挚地感谢以下各位的帮助，包括我的研究助手 Sumagala Gokavi 博士（第二、三、四和七章）、Mohamed Alam 博士（第五、六章）、Frank Lee 博士（第八章），以及我的朋友马萨诸塞大学医学院的 Gregory Hendricks 博士（第九章），还要感谢他们的专业知识与我讲义的结合。

我同样要感谢我的研究生和本科生，他们参与了历年的功能食品的课程，提出了有价值的意见并及时反馈功能食品讲义中存在的问题。

最后我要感谢 CTI 出版社的董事长 Randy Gerstmyer 对本书的赏识和耐心，与我一同完成这样一个令人兴奋的项目。

郭明若

美国佛蒙特州伯灵顿

目 录

第一章	绪言	1
第二章	抗氧化剂和富含抗氧化剂的食物	7
第三章	膳食纤维和富含膳食纤维的食物	42
第四章	益生菌素与益生菌	74
第五章	脂类及与脂类有关的功能性食品	104
第六章	作为功能性成分的维生素和矿物质元素	129
第七章	大豆功能食品	154
第八章	运动饮料	179
第九章	人乳和婴儿配方食品及功能性乳制品	192
第十章	功能性食品法规	231
第十一章	功能性食品实验技术	256
实验一	冰茶制作	256
实验二	共生酸奶和酸奶饮料制作	258
实验三	运动饮料制作	262
实验四	豆乳和豆腐的制作	264

第一章 绪 言

一、定义、历史和市场

食品具有三种主要功能：①以碳水化合物、蛋白质、脂肪的形式提供人体能量及基本的营养物质；②带来愉悦感；③保健功能。功能食品在外观上与普通食品可能无异，亦可作为日常饮食的一部分，但功能食品具有一定的生理功能，并可减少慢性病的患病几率，这是基本营养物质所不具备的。

功能食品在不同文献中也被称为“保健食品”、“药物食品”或“设计性食品”。由于术语“功能食品”的字面意思更为贴切、明了，因此通常称这类食品为“功能食品”，最为常见的有碘盐、维生素 A 和维生素 D 强化的牛乳、酸奶、叶酸强化的面包、番茄、花椰菜、豆制品、蓝莓、越橘、大蒜、全麦食品和燕麦。功能食品可以是天然食品，也可以是强化食品或者含功能性成分的食品。

“功能食品”的概念最早由日本科学家于 20 世纪 70 年代提出，并于 80 年代传入欧洲的食品科学界。美国直到 90 年代才开始关注功能食品，首先在西海岸地区受到欢迎。功能食品的起源可以追溯到中国，因为中国人利用食品治疗疾病的历史已有数千年之久。

2005 年美国功能食品的（严格意义上）销售额已超过 100 亿美元，2009 年将跃至 600 亿美元（NMI, 2005）。而 2009 年美国功能性食品实际销售额为 1400 亿美元以上。根据作者的计算，若采用较为宽泛的概念，目前功能食品的销售额实际已经超过 1000 亿美元，并且每年以 10% 的速度增长。功能食品将继续是全球食品工业中充满活力和不断增长的部分，并将被认为是 21 世纪的新食品。

二、功能食品的认知

功能食品的概念正日渐被大众所接受。2005 年有 90% 的美国人可以说出一种功能食品及其相关的健康功能，而这一数据在 1998 年和 2002 年分别仅有 77% 和 84%（IFIC, 2005）。大部分美国人认为食品都具有除基本营养功能之外的健康功能。通过教育和媒体宣传，功能食品的好处正被越来越多的人所认知。一份关于公众对功能食品及其健康功能认知的调查显示，公众能清楚说出一部分功能食品的功能，而其余的则不能。部分调查结果如表 1.1 所示。

表 1.1 表明 90% 以上的受访者知道钙与骨骼健康生长的联系，不到 50% 的人知道益生菌（酸奶中的活菌）有助于维持肠道菌群平衡，这部分将在后面的章节中详细介绍。大约仅有 40% 的受访者熟悉大豆蛋白具有减少心脏病患病几率的作用。尽管对某

表 1.1 公众对功能食品及其相关疾病的认识

钙与骨骼增长	93%
纤维与消化系统的健康	92%
维生素 D 与骨骼生长	88%
全谷物与心脏病患病几率的减少	83%
益生菌与消化系统的健康	49%
豆类食品与心脏病患病几率的减少	41%
植物甾醇与心脏病患病几率的减少	30%

资料来源于 IFIC, 2005。

些功能食品的认知程度仍然较低，但整体上公众的认知在不断增长。这表明功能食品的消费也在增长，消费者想要了解到更多食品除基本营养功能之外的健康功能。表 1.2 显示的是公众获取功能食品知识的渠道。获取功能食品知识的来源有政府、健康工作者以及对个人健康的关注、朋友以及家人。健康和营养的信息主要来自媒体，占 72%。其次是医学界来源 44%，20% 来自朋友、家人或自己。来自饮食和健康的书只占到 13%。

表 1.2 获取健康和营养知识的五大渠道

媒体（网络、杂志、电视、报纸、时事通讯）	72%
医学界（医生、营养师、营养专家、护士）	44%
朋友/家人/自己	20%
饮食/健康书籍	13%
研究者/科学家	4%

资料来源于 IFIC, 2005。

随着公众对这些健康功能意识的增长，食品工业也表现出很大的兴趣来满足消费者对功能食品的需求。人们希望在什么样的食品中强化这些功能成分呢？我们每天消费的食品，例如汁和牛乳就是答案。政府和医院的卫生官员也对如何向公众传播这些健康知识非常感兴趣。政府干预提供功能食品的例子如向食盐中添加碘以及向公共饮水中添加氟化物等。同时也研究了关于什么样的食品作为抗氧化剂（通常存在于不是很受欢迎的水果和蔬菜中）的来源最受欢迎。在果汁中强化抗氧化剂能受到大部分人的欢迎，但在糖果中只有 1/3 的人会喜欢，这表明美国人已经对天然和功能食品非常感兴趣。

三、保健及功能食品的演变

公众对功能食品兴趣的增加表明人们在消费食品时已经从减少食品中的“有害”成分转变为增加食品中的“有益”成分。很多人非常注重控制他们的体重，且绝大多数人通过控制饮食达到这个目的。这在某种程度上，对我们保持健康和长寿的方法来说，绕了一大圈之后又回到了原点（图 1.1）。

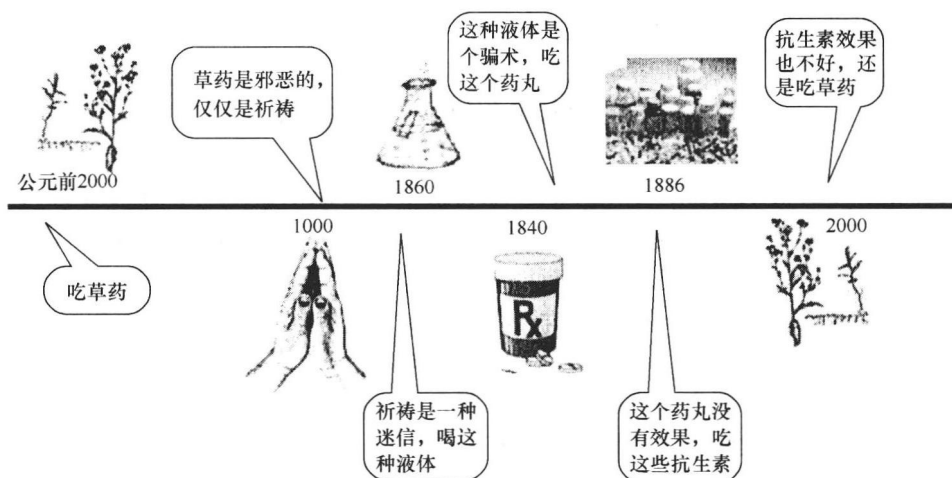


图 1.1 人类保健方法的演变

由于科学的进步, 很多大规模的传染病很少发生, 因此大多数人更关注非传染性疾病, 如肥胖、糖尿病、心脏病、癌症等。通常与饮食相关的疾病主要有心脏病、糖尿病、高血压、牙病、胃肠病、贫血症、肥胖症 (65% 的美国人体重超标, 25% 的美国人患有肥胖症)。

美国人的预期寿命正在不断增加, 随之而来的是老龄人口的增长。目前全美 65 岁以上的人口占总人口的 12%, 预计到 2030 年这一比例将达 20%。保持健康的关键在于营养健康均衡的饮食, 特别在今天医保已成为美国沉重的财政负担。

四、FDA 认证的功能食品标签说明

美国营养标签教育法 (NLEA) 允许食品企业可在标签上对其产品进行某些保健功能的宣传。这是功能食品发展过程中生产的另一优势。这些认证的声明 (必须经过科学研究充分证明) 包括:

- 钙和骨质疏松症;
- 食用油脂和癌症;
- 饱和脂肪酸、胆固醇和冠心病;
- 钠和高血压;
- 纤维包括谷物、水果、蔬菜和癌症;
- 水果、蔬菜和癌症;
- 水果、蔬菜、谷物产品和冠心病;
- 非致癌的碳水化合物甜味剂和龋齿;
- 叶酸和神经管畸形;
- 可溶性纤维和冠心病;
- 大豆蛋白和心血管疾病;

- 植物甾醇/植物甾烷醇酯和冠心病。

五、人体系统与功能食品

人体是一个开放的系统，受所处的环境和所摄入食品的影响。人体会经常与毒素、病毒、细菌接触，并且也会处于较为恶劣的环境（冷、热、空气、紫外线、辐射等）。在这种情况下，人体通过自身的防护系统进行自我保护：①皮肤和毛发；②免疫系统；③菌群系统；④抗氧化机制。我们所吃的东西决定了我们自身，食品和饮食可以影响所有这些防护机制（图 1.2）。一个人一生消耗数吨的食物，这些食物中含有营养物质和功能成分，同时也含有毒素、病菌和抗原。所有这些都显示在图 1.2 中，食物不仅提供能量，还影响人体的健康。人体胃肠道中有 200 ~ 400 种不同微生物（2006 年 7 月 2 日出版的《科学》杂志报道人体肠道中有超过 1000 种微生物）。

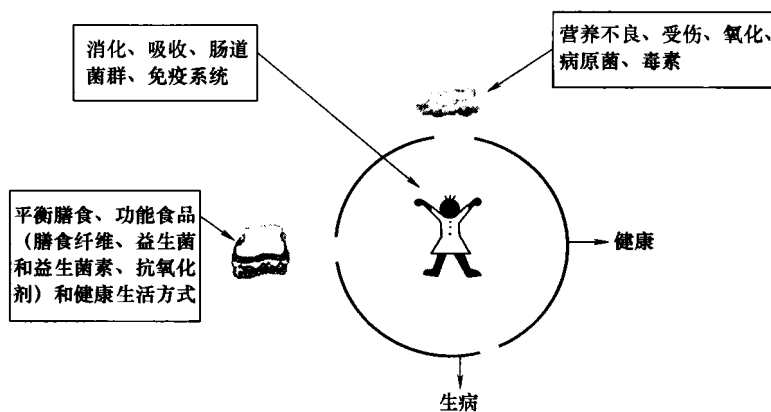


图 1.2 人体健康与饮食的关系

微生物在结肠中的数量为 10^{13} 个/g，在胃和上消化道分别为 10^6 个/g 和 10^7 个/g。维持这些微生物的平衡对身体健康非常重要。饮食对微生物的平衡具有双重作用，因此人们需要功能食品和平衡的膳食。每天摄入 25 ~ 30g 纤维素和含有益生菌的食品，将可以保持结肠中 70% 微生物菌落处于健康水平，如果这一数值低于 50% 将会导致腹泻，或者减弱身体防护系统从而导致更严重的问题。因此，我们推荐大家应尽快食用功能性食品。下面列出一些应该每周食用的食品。

- 番茄（番茄红素）；
- 菠菜（叶酸）；
- 花椰菜（纤维、抗氧化剂、维生素、含硫成分）；
- 干果（维生素 E）；
- 燕麦（可溶性纤维/益生元）；
- 酸奶（益生菌）；
- 粉色鱼如三文鱼（ $\omega-3$ 脂肪酸）；
- 莓类如蓝莓（抗氧化剂）；

- 大蒜（抗氧化剂）；
- 绿茶（抗氧化剂）；
- 豆类食品（异黄酮）。

六、课程大纲

本书主要是为营养和食品科学学生设计的，也可以为护理、医药和其他与健康相关领域的学生所使用。学生将学习不同种类功能食品的定义和概念，营养物质和功能组分的化学结构和特性，以及一些食品的非营养功能性。学生还要学习实验技术以制备出功能食品，本教科书包含十章和四个实验。

绪言：学生将了解功能食品的定义，探讨在这个发展领域中工业和消费者的角色和作用。

抗氧化剂：学生将了解游离基、抗氧化剂的化学组成及抗氧化剂的生化功能。在这一章，将涉及越橘、番茄、大蒜和不同的冰茶等。学生将学习这些食品的化学组成并有机会来品尝他们，第一个实验就在这个单元；学生还可以制作冰茶产品。

膳食纤维：学生将在这一章里学习可溶性和不溶性膳食纤维、抗性淀粉以及这些成分对人体健康的重要性，探究膳食纤维的生理功能；燕麦及燕麦产品将作为主要的膳食纤维例子来讲解。

益生菌和益生菌素：学生将学习益生菌和益生菌素的定义以及他们的生理功能。还将了解如何研发益生菌和益生菌素，以及如何将益生菌和益生菌素作为共生素一同应用。第二个实验在这个单元里完成，学生将制备出共生酸奶和饮料。

脂类及其对健康的益处：学生将学习必需脂肪酸的结构和功能， $\omega-3$ 、植物甾醇、共轭亚油酸（CLA）的化学和保健功能。橄榄油和鱼油作为必需脂肪酸的例子在这章体现。

维生素和矿物质：这章将讨论功能性维生素和矿物质的化学、功能和来源，以及提议的功能性声明。

大豆产品及其对健康的益处：学生将学习世界范围内大豆产品的历史以及大豆食品对饮食健康的益处；还将讨论异黄酮的化学和生理功能，以及豆腐、丹贝、豆乳和其他的豆制品。第四个实验出现在这一章，学生将制作豆乳和豆腐。

运动饮料：这个单元将学习运动饮料配方的原理。电解质和碳水化合物及其功能是这章的主要内容。第三个实验在这一章里，学生将有机会去调配和制作类似于佳得乐（Gatorade）的运动饮料。

功能性乳制品：主要讨论人乳的化学与生物学性质，婴儿配方乳粉的组成、制备原理与方法；还将讨论以乳为主要原料的功能食品加工原理及生产工艺。

功能性食品法规：本章将介绍北美、欧盟及中国有关功能性食品的法规相关内容。

实验：这部分包含4个实验，他们是冰茶、共生酸奶和酸奶饮料、运动饮料及豆乳和豆腐的制作。

（郭明若、程建军 编译）

参考文献

IFIC (International Food Information Council). 2005. Quantitative Research on Functional Foods.

NMI (Natural Marketing Institute). 2005. Health and Wellness Trends Database.

第二章 抗氧化剂和富含抗氧化剂的食物

在身体和食品原料中，氧化过程是一种新陈代谢反应，对细胞的生存十分必要，正常的新陈代谢一般依赖于氧和自由基。通过研究，氧被认为是呼吸作用的最终电子受体。依赖于氧的正常新陈代谢，导致了其他衍生于氧的自由基的产生，如在新陈代谢过程中、在机体能量产生中或由电离辐射产生的超氧自由基或羟自由基。这些氧的衍生自由基具有十分强烈的氧化活性，可以引起氧化损伤进而导致细胞和组织的破坏。这些自由基也涉及人类的健康和疾病。自由基一般是具有未配对电子的原子或分子，这些未配对或单电子在与另一个自由电子配对时，往往会表现出很高的活性。自由基常常参与到很多反应中，常见的有：酶催化反应，线粒体中的电子转运，信号转导，基因表达，核转录因子的激活，氧化对分子、细胞和组织的损伤，中性粒细胞和巨噬细胞中的抗菌作用，以及衰老和疾病等。当过量的自由基形成时，它们就可以抑制保护酶（例如，超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和过氧化物酶等）的活性。同时，由于氧化膜质、细胞蛋白质、DNA 和酶的作用，引起细胞的破坏和致死效应（例如，细胞凋亡），结果导致细胞的呼吸作用停止。

氧化是引起食品化学变质的主要原因之一。氧化不仅导致了异味的产生，还引起了食品营养质量、色泽、风味、组织和安全性的退化。据统计，由于采摘后的变质反应，全世界收获的果蔬有一半会损失掉。本章主要讨论以下问题：自动氧化反应，在食品生物系统中的自动氧化机理，脂质的氧化，天然及合成抗氧化剂的来源，抗氧化剂阻止自动氧化反应的化学机理，以及从抗氧化食品中所获得的健康好处。

一、自动氧化反应

自动氧化反应是一个链式反应，它可以降解多聚物、润滑物产品中的碳水化合物，以及活体器官中的脂质、蛋白质和 DNA 等。

（一）食品体系中自动氧化的机理

自动氧化是由过氧自由基传递的，而过氧自由基又是由大气中的氧分子和有机分子反应产生的。在食品体系中，天然的抗氧化剂，在一定的程度上可以阻止氧化反应，但是，天然的抗氧化剂在食品加工和储藏过程中容易丢失，这就迫使加入一些外源性抗氧化剂，可以有效地延缓食品中脂类氧化反应的发生。

食品在加工、处理、储存的过程中发生油脂酸败。食品中不饱和油脂在加热、光照、电离辐射、微量金属和金属蛋白等催化条件下容易发生氧化，同时也能被脂肪氧化酶催化氧化。油脂氧化是食品产生异味化合物和恶臭的主要原因，也引起一系列其他反应的发生，并最终缩短货架期和降低食品的营养价值。近几年来，饮食中油脂氧化产物

可能的病理学意义，已经引起了生化学家、食品科学家和营养专家的关注，研究表明油脂氧化产物具有多方面的作用，包括：细胞毒素、诱导有机体突变、致癌、致动脉粥样硬化以及血管毒素等。

（二）生物系统中自动氧化的机理

在生物系统中，不同的生化防御体系保护细胞组分免受氧化的破坏，这其中包括各种酶类、微量矿物质、抗氧化维生素和某些其他化合物等。已经生成的活性自由基可以被一系列的试剂和反应途径所传递，如高氧压力、辐射和外源性代谢等。产生的自由基与分子氧反应时会表现出很高的活性，并形成过氧自由基和氢过氧化物，进而引发链式反应。氧化强化剂通过破坏细胞成分，例如多不饱和脂肪酸、磷脂、游离胆固醇、DNA 和蛋白质等，最终引起多种主要器官的细胞损坏。组织中油脂氧化的健康指示作用都已经被很好地阐明了。

（三）脂类氧化反应

在食品和其他生物系统中，脂类是一种主要的组成部分。在生物体系中油脂发生氧化反应并导致败坏。在食品中，这些氧化反应可以引起酸败，导致维生素（比如：维生素 A、维生素 C 和维生素 E）和必需脂肪酸结构的破坏，造成食品营养价值的降低，也可能形成有毒化合物和有色产物。脂肪酸的不饱和程度也使得脂类更容易受到氧的攻击，并导致复杂的化学变化，最终导致食品异味的产生。除了自动氧化反应在食品腐败过程中的作用外，有关油脂氧化与健康状况关系的问题，专家们也表现出极大的兴趣，可以相信，油脂氧化对冠心病、动脉粥样硬化、癌症和衰老都有重要影响。一个复杂的抗氧化防御体系正常保护着细胞系统免受自由基的损害。

（四）食品体系中油脂氧化机理

氧化反应中主要油脂化合物是不饱和脂肪酸部分，比如：油酸、亚油酸和亚麻酸。当这些脂肪酸的不饱和度增加时，它们的氧化率也会随之增加。

油脂氧化反应机理大致可以分为三个阶段：①链引发阶段：自由基的形成；②链传递阶段：自由基链式反应；③链终止阶段：非游离基化合物的形成。

1. 链引发阶段

自由基（活性氧）的形成（表 2.1），被认为是引发了油脂的自动氧化。当与氧接触时，不饱和脂类就会产生自由基（反应式 a），链引发阶段反应一般会有两种情况，从不饱和脂肪酸烯丙基的亚甲基上移走一个氢自由基，或者在双键上添加一个电子。



烷基自由基 $\text{R} \cdot$ 的生成一般是由微量金属、放射线、光或热所引发。同时，在氧化初期存在的微量脂质氢过氧化物断裂并生成游离基，如反应式（b）和（c）所示



这里，RH 可以是任何一种不饱和脂肪酸； $\text{R} \cdot$ 是移走靠近双键碳原子上一个不稳

定的氢后形成的游离基；ROOH 是氢过氧化物，它是一种主要的初级氧化产物，并可以分解形成具有不良滋气味的物质，二级产物包括正己醛、戊醛和丙醛等。

表 2.1 活性氧种类

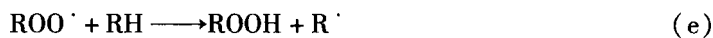
种类	常用名称	半衰期 (37℃)
HO·	羟基自由基	1ns
HO ₂ ·	氢过氧自由基	不稳定
O ^{·2-}	超氧阴离子自由基	酶促的
¹ O ₂ ·	单线态氧自由基	1μs
RO·	烷氧基自由基	1μs
ROO·	过氧自由基	7s
NO·	一氧化氮自由基	1~10s
H ₂ O ₂	过氧化氢	稳定
HOCl	次氯酸	稳定

R = 脂类，例如亚油酸。

氢过氧化物经过均解形成烷氧游离基 (RO·)，或者发生双分子分解反应。脂质过氧化物的形成途径有很多，其中包括单线态氧与不饱和脂肪酸的反应，以及脂肪氧合酶催化的多不饱和脂肪酸氧化作用。

2. 链传递阶段

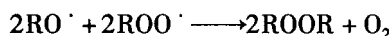
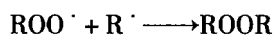
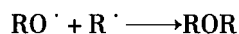
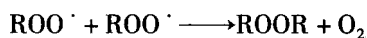
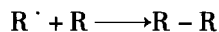
自由基可以转变成为其他的游离基。所以，游离基反应的一般基本特征是反应过程趋向于链式反应。也就是说，一个游离基引发另一个游离基的产生，依此类推。所以，最初的游离基的形成，由于链式反应，会对随后的很多化学分子的转变有影响。事实上，游离基氧化反应过程的传递发生在油脂的链式反应中，这个反应消耗了氧，产生了新的游离基品种（过氧游离基，ROO·）或者形成了过氧化物（ROOH），如反应式 (d) 和 (e) 所示。



产物 R· 和 ROO· 可以进一步传递游离基反应。

3. 链终止阶段

当两个游离基相互作用时，就到了油脂氧化的终止阶段。



一般认为，游离基成键不足，所以它的结构不稳定。如果有可能，它们就会趋向于恢复形成常规的键，这也就是为什么游离基有很高的活性。当不饱和油脂（或脂肪酸）的数量减少时，游离基就会与另一个游离基键合，形成稳定的非游离基化合物。所以终

止反应阶段会导致一系列链式反应传递步骤的中断。

(五) 生物系统中油脂氧化机理

脂类氧化是一个正常的生物过程，我们可以通过它从脂肪中获得能量。在身体中发生的有害的油脂氧化一般被称为过氧化反应。在生物膜中，不受控制的脂类氧化是引起一些疾病的主要原因，如：动脉粥样硬化、癌症和神经退化性疾病等。脂肪酸氢过氧化物 (LOOHs) 是多不饱和脂肪酸 (PUFAs) 氧化的主要产物。当细胞受到损伤时，脂肪酸氢过氧化物含量的升高，与生物膜的破坏、酶失活、蛋白质和 DNA 分子的破坏相适宜。

利用肝脏中分离的微粒体，可以更好地理解在生物体系中脂类过氧化反应的机理。油脂过氧化反应的链引发和链传递阶段，是由铁离子和微粒体 NADPH - 细胞色素 P - 450 还原酶催化的。这种酶可以促使超氧阴离子的形成，后者是通过向双原子氧分子中添加额外的电子后形成的，它又催化铁离子的还原作用。Aust 和 Svingen (1982) 提出了一种微粒体中油脂过氧化反应机理。以 NADPH 为基础的微粒体油脂过氧化反应可以分为两个阶段：链引发阶段和链传递阶段。链引发反应产生于 NADPH - 细胞色素 - P - 450 还原酶催化的 $ADP - Fe^{3+}$ 的还原作用，随后再与氧反应生成 $ADP -$ 高铁游离基，这种游离基引起了油脂过氧化反应并生成油脂氢过氧化物。在这种方式里，既不需要调用不稳定的羟自由基，也没有明显的过氧化氢生成。链传递反应发生于脂质氢过氧化物与细胞色素 P - 450 的反应，细胞色素 P - 450 催化其分解生成过氧或烷氧游离基。在这一阶段，EDTA 或 DTPA 等铁离子螯合剂对链传递阶段的反应也有催化能力。P - 450 还原酶的反复催化作用，以及铁螯合离子的再氧化能力可以维持链传递阶段的反应。

(六) 游离基的来源

游离基的来源可以分为两大类：内源和外源。内源产生的游离基 (图 2.1) 大部分是由细胞产生的。

(1) 正常的有氧呼吸。由于正常的有氧呼吸作用，线粒体消耗氧分子，并通过一系列步骤生成水。在随后向 O_2 添加电子时，形成了 $O_2^{\cdot -}$ ， H_2O_2 ，和 $\cdot OH$ 。在线粒体产生能量的过程中，细胞色素氧化酶可以有效地提供四个电子，但是会不可避免地产生有毒的中间代谢产物。一项关于大鼠的研究表明，每个大鼠细胞一天大约可以消耗 10^{12} 个氧分子，泄漏部分的氧分子大约为 2%，每个细胞每天大约产生 2×10^{10} 个超氧化物和过氧化氢分子 (Ames 等, 1993)。

(2) 过氧化物酶是细胞器降解脂肪酸和其他分子的主体，同时生成副产物 H_2O_2 ，后者又被过氧化氢酶降解。在一定条件下，一部分过氧化氢没有被降解，结果这些过氧化氢就进入了细胞中的其他部分，也增加了 DNA 分子的氧化损伤。

(3) 动物体中的细胞色素 P - 450 酶可以构成一种基本的防御体系，抵制植物中天然的有毒化学成分，也是饮食毒素的主要来源。摄入这种酶可以阻止外源化学试剂所带来的严重毒素影响，但是同时产生的氧化副产物也损伤了 DNA 分子。

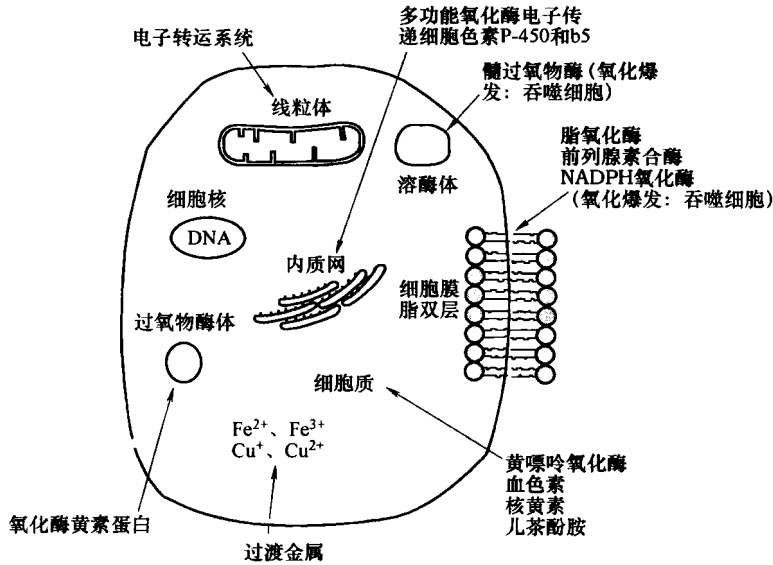


图 2.1 游离基的细胞来源

各种可溶性以及与膜结合的酶与细胞反应产生自由基，细胞的种类不同，产生自由基的能力也各不相同，但是所有需氧细胞都具有一定的产生自由基的能力。

(4) 当具有氧化特性的 NO 、 O_2^- 、 H_2O_2 和 OCl^- 急剧增加时，吞噬细胞就会破坏细菌或被病毒感染的细胞。被病毒、细菌或寄生虫慢性感染以后，将会导致吞噬活力降低和随后的慢性炎症，这是形成癌症的主要风险因素。慢性感染病在第三世界国家特别普遍。

许多内源性氧化剂能力可以受到以下外源性因素的显著影响。

(1) 吸烟。香烟的烟中所含的氮氧化物 (NO_x 大约 $1000\text{cm}^3/\text{m}^3$) 可以引起大分子的氧化，大大降低了抗氧化物的含量。这也极有可能与吸烟病理学有联系。吸烟不仅是引发心脏疾病的危险因素，而且除了肺癌还可能引发其他一系列癌症。

(2) 饮食因素。铁和铜盐可以提高过氧化物中自由基的氧化。由于基因缺陷（血色沉着疾病），人们明显吸收了超出正常水平的铁含量，这就会增加患癌症和心脏病的危险。也有人争论说，对于一个正常人，从食物中摄入过多的铜或铁，特别是血红素铁（在肉中含量很高），是患心血管疾病和癌症的一个危险信号。

(3) 人们的正常饮食中含有大量天然酚类化合物的植物食品，这些酚类含有的绿原酸、咖啡酸等一般通过氧化还原循环产生氧化剂。

(4) 辐射/紫外线照射。UVA 射线中 90% ~ 95% 的紫外线可以到达地面，这些射线波长 (320 ~ 400nm) 较长，臭氧层也不能吸收它们，UVA 射线可以渗透到皮肤的最深处，并能够引起皮肤变黑，具有抑制细胞免疫功能，这类射线也涉及皮肤的过早衰老。UVB 射线中等波长 (290 ~ 320nm)，可以部分地被臭氧层吸收。它们不能像 UVA 那样能够渗透到皮肤深处，但也可以引起皮肤晒伤。UVB 可以导致大部分组织损伤，其中包括白内障形成、皮肤褶皱和老化等。UVC 波长最短（低于 290nm），臭氧层几乎