



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

食品发酵与酿造工艺学

何国庆 主编

食品科学与工程专业用

中 国 农 业 出 版 社

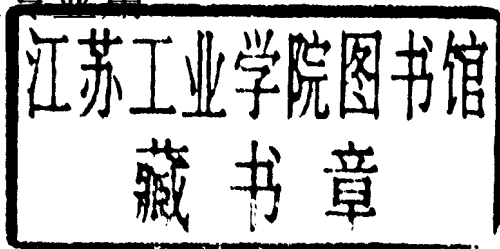
面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

食品发酵与酿造工艺学

何国庆 主编

食品科学与工程专业用



中国农业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

食品发酵与酿造工艺学/何国庆主编. —北京: 中国农业出版社, 2001.12

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-109-06984-2

I. 食... II. 何... III. ①酒母-生产工艺-高等学校-教材②酿酒-生产工艺-高等学校-教材

IV. TS26

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 092213 号

中国农业出版社出版

(北京市朝阳区农展馆北路 2 号)

(邮政编码 100026)

出版人: 沈镇昭

责任编辑 刘振生

中国农业出版社印刷厂印刷 新华书店北京发行所发行

2001 年 12 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 2 次印刷

开本: 850mm×1168mm 1/16 印张: 25.25

字数: 603 千字

定价: 38.00 元

(凡本版图书出现印刷、装订错误, 请向出版社发行部调换)

编写者名单

主 编 何国庆 (浙江大学)
编 者 张 箴 (中国农业大学)
江汉湖 (南京农业大学)
郑晓冬 (浙江大学)
主 审 史贤明 (华中农业大学)

前 言

本教材是教育部“面向 21 世纪高等农林教育教学内容和课程体系改革计划”项目的成果。

食品发酵与酿造是指以发酵工程、酶工程及基因工程为支撑，利用微生物细胞的特定性状，通过现代化工程技术，生产食品或保健品的一种技术。它不但是支撑现代食品工业的重要技术，同时也是生物技术产业化的重要手段。因此，食品发酵与酿造技术越来越受到人们的重视，成为食品科学与工程相关专业的必修课程，但适用的教材却不多。为此，我们组织浙江大学、中国农业大学、南京农业大学长期从事该领域研究和教学的富有经验的教授，在中华农业科教基金的资助下，编写了这本农业部“九五”规划教材——《食品发酵与酿造工艺学》，并被列入教育部“面向 21 世纪课程教材”。

发酵技术主要由两个核心部分组成：一是生物催化剂，二是生物反应系统。我们在教材的编写过程中，对这两部分的内容都做了系统的论述。特别是为了反映现代食品发酵与酿造技术的发展趋势和适应现代食品发酵与酿造工业的需要，我们在广泛参阅文献的基础上，充实了现代生物技术在食品发酵与酿造中应用的内容。同时，对各类产品的发酵技术和食品工业废弃物的生物学处理进行了详细的论述。教材内容比较丰富、全面、详细，并注意了保证基本理论、基础知识及实际操作技能的掌握与训练，能够满足不同水平读者的要求，适合作为食品科学与工程相关专业的教材，也可供相关专业研究生、教师或科技工作者等参考。

本书的主要内容有：菌种选育、保藏与复壮；微生物的代谢调控理论及其在食品发酵与酿造中的应用；发酵与酿造工程学基础；酒精发酵与酿酒；氨基酸与核酸发酵；有机酸发酵；发酵豆制品；微生物性功能食品与食品添加剂；食品工业废弃物的生物学处理。

参加本教材编写工作的有浙江大学的何国庆教授（第一章、第四章、第五章、第八章第四节），中国农业大学的张箬教授（第二章、第七章），南京农业大学的江汉湖教授（第九章、第十章、第八章第一节和第五节）和浙江大学的郑晓冬教授（第三章、第六章、第十一章、第八章第

二节和第三节)。

限于时间和编者的水平,书中可能存在着不妥和错误之处,恳请读者提出宝贵意见。

最后感谢中华农业科教基金委员会对本书出版的支持。

编 者

2001年9月于杭州

目 录

前言

第一章 绪 论

一、食品发酵与酿造的历史	1
二、食品发酵与酿造的特点以及与现代生物技术的关系	4
三、食品发酵与酿造的研究对象	6
四、食品发酵与酿造的发展趋势	8

第二章 菌种选育、保藏与复壮

第一节 菌种选育	11
一、微生物菌种选育的理论基础	12
二、自然选育	14
三、诱变育种	16
四、微生物的杂交育种	27
五、原生质体融合	30
六、基因工程技术	36
第二节 菌种保藏与复壮	40
一、菌种保藏	41
二、菌种的提纯与复壮	46
第三节 国内外主要的菌种保藏机构	47

第三章 微生物的代谢调控理论及其在食品发酵与酿造中的应用

第一节 微生物的代谢与调节的生化基础	49
一、初级代谢和次级代谢	49

二、代谢调节的部位	50
三、与代谢调节有关的酶	51
第二节 微生物代谢的协调作用	54
一、诱导作用	55
二、分解代谢物的调节	57
三、反馈调节	58
四、能荷调节	61
第三节 代谢控制在工业发酵中的应用	62
一、发酵工艺条件的控制	63
二、菌种遗传特性的改变	64
三、控制细胞膜的渗透性	65

第四章 发酵与酿造工程学基础及主要设备

第一节 发酵与酿造的工艺过程	67
一、菌种活化与扩大培养	67
二、发酵与酿造原料前处理及培养基制备	69
三、发酵与酿造	73
四、产物分离、提取与后加工	74
第二节 微生物发酵动力学	78
一、发酵动力学概论	78
二、分批发酵动力学	79
三、连续发酵动力学	87
四、分批补料发酵动力学	93
第三节 发酵工艺控制	95
一、温度对发酵的影响及其控制	97
二、溶解氧浓度对发酵的影响及监控	99
三、pH对发酵的影响及其控制	100
四、二氧化碳和呼吸熵	102
五、基质浓度对发酵的影响及补料控制	103
六、泡沫控制	104
七、发酵终点判断	106
第四节 发酵与酿造的主要设备	107
一、原料处理设备	107
二、固体发酵设备	109
三、机械搅拌通风发酵罐（生物反应器）	110
四、空气净化系统	115
五、培养基灭菌系统	116

六、产物分离与提取设备	119
-------------------	-----

第五章 酒精发酵与酿酒

第一节 酒精发酵	123
一、酒精发酵原料	123
二、与酒精发酵有关的微生物	124
三、酒精发酵生化机制	125
四、酒精发酵工艺	129
五、酒精蒸馏与精馏	133
第二节 白酒生产	135
一、白酒的种类、风味物质成分和质量标准	135
二、大曲白酒生产	136
三、小曲白酒生产	143
第三节 啤酒酿造	145
一、啤酒种类、成分和质量标准	146
二、啤酒酿造原料	148
三、麦芽制造	150
四、麦芽汁制备	153
五、啤酒发酵	156
六、过滤和灌装	161
第四节 葡萄酒酿造	162
一、葡萄酒的种类和质量标准	162
二、葡萄酒生产原料	164
三、葡萄酒发酵中的微生物	165
四、白、红、桃红葡萄酒的生产工艺	168
五、葡萄酒的贮存(陈酿)	174
六、葡萄酒的调配	174
七、葡萄酒的澄清、冷处理、过滤	175
八、葡萄酒的包装、杀菌和瓶贮	175
九、葡萄酒的再加工	176
第五节 黄酒酿造	180
一、黄酒的种类和质量标准	180
二、黄酒生产原料	183
三、糖化发酵剂及其制备	185
四、黄酒酿造工艺	192
附：日本清酒酿造	199

第六章 氨基酸与核酸发酵

第一节 谷氨酸生产	203
一、谷氨酸生产原料及其处理	203
二、谷氨酸产生菌	206
三、谷氨酸合成途径	207
四、谷氨酸发酵工艺	209
第二节 其他氨基酸发酵	213
一、赖氨酸发酵	213
二、L-天门冬氨酸发酵	214
三、苏氨酸发酵	215
四、缬氨酸发酵	215
第三节 核酸与核苷酸发酵	216
一、核酸的化学结构与鲜味	216
二、核苷酸的生物合成途径及其代谢调控	216
三、发酵法生产肌苷	218
四、5'-肌苷酸和5'-鸟苷酸发酵	219
五、鸟苷酸发酵	222

第七章 有机酸发酵

第一节 乳酸发酵	226
一、乳酸菌及其发酵类型	226
二、乳酸的工业发酵生产	231
三、发酵乳制品	236
四、其他乳酸发酵食品	243
第二节 醋酸发酵	247
一、食醋发酵工艺类型	247
二、食醋发酵生产	248
第三节 柠檬酸发酵	254
一、柠檬酸的理化性质	255
二、柠檬酸发酵生产原料	255
三、柠檬酸生产菌种及生物合成途径	255
四、柠檬酸的质量标准	260
第四节 其他有机酸发酵	260
一、反丁烯二酸发酵	261
二、苹果酸发酵	262
三、葡萄糖酸发酵	265

四、丁酸发酵	266
五、衣康酸发酵	267

第八章 酶制剂生产

第一节 酶制剂的工业化生产	269
一、工业化酶制剂生产的优点	269
二、酶制剂生产的基本工艺流程	270
第二节 淀粉酶	272
一、 α -淀粉酶	272
二、 β -淀粉酶	274
三、糖化酶	275
四、异淀粉酶	277
第三节 蛋白酶	278
一、酸性蛋白酶	278
二、中性蛋白酶	280
三、碱性蛋白酶	281
第四节 其他酶类生产	282
一、脂肪酶	282
二、果胶酶	284
三、纤维素酶	285
四、葡萄糖氧化酶	287
五、葡萄糖异构酶	288
六、柚苷酶	288
七、橙皮苷酶	288
八、乳糖酶	289
九、花青素酶	289
十、右旋糖酐酶	289
第五节 酶应用新技术	289
一、固定化酶	289
二、固定化细胞	293
三、共固定化技术	295
四、抗体酶	295

第九章 发酵豆制品

第一节 酱类与酱油酿造	298
一、酱和酱油酿造原料	298
二、酱油酿造和制酱的微生物	302

三、酱与酱油酿造的生物化学	304
四、酱油酿造工艺	307
五、制酱工艺	312
第二节 腐乳制造	314
一、腐乳制造沿革	314
二、腐乳类型及其特点	315
三、腐乳生产的原、辅材料	316
四、豆腐坯制作	318
五、腐乳发酵	320
六、腐乳生产中常见的几种质量问题	322
第三节 豆豉和纳豆制品	323
一、豆豉	324
二、特种豆豉	325
三、纳豆	326
第四节 丹贝	328
一、丹贝制作概述	328
二、丹贝制造工艺流程	328
三、丹贝发酵过程的措施	329

第十章 微生物性功能食品与食品添加剂

第一节 功能性食品	334
一、功能性低聚糖	334
二、真菌多糖	338
三、活性肽	344
四、活性微量元素	348
五、螺旋藻	351
第二节 微生物性食品添加剂	356
一、黄原胶	356
二、茁霉多糖	359
三、食用微生物色素	360
四、乳酸菌素	363
五、微生物性风味物质	365

第十一章 食品工业废弃物的生物学处理

第一节 食品工业中废弃物的种类和特点	366
一、食品工业废渣的种类和特点	366
二、食品工业废水的种类和特点	366

第二节 食品工业废水的单细胞蛋白生产	369
一、单细胞生产的意义	369
二、用于 SCP 生产的微生物	370
三、SCP 的生产工艺	371
第三节 食品工业废水的处理方法	373
一、好氧处理法	374
二、厌氧处理法	377
第四节 其他生物膜法处理污水	382
一、生物膜的形成	382
二、生物膜中常见的微生物	382
三、几种生物膜处理方法	382
第五节 食品工业废渣的处理方法	385
参考文献	387

第一章 绪论

古老的发酵与酿造技术是人类利用微生物的开始。随着人类文明的发展，科学技术的不断进步，食品发酵与酿造技术在近几个世纪得到了迅速发展，尤其是 20 世纪 50 年代，随着 DNA 双螺旋结构模型及 DNA 半保留复制学说的确立，70 年代实现了体外 DNA 重组技术，并迅速形成了以基因工程为核心内容，包括细胞工程、酶工程、发酵工程和生化工程的生物技术。生物技术突飞猛进的发展，大大推动了发酵技术、酶工程技术和生化技术，而这些工程技术又强有力地推动了食品工业的发展。利用生物技术制造食品的产量与产值至今仍占生物技术的首位。与食品工业不可分割的微生物发酵成了现代生物工程不可缺少的重要组成部分，同时也是现代生物技术产业化、服务于国民经济所必需的环节。世界各国都把发酵与酿造技术作为农产品与食品加工的最重要手段之一，并且认为是食品领域在 21 世纪最可能获得突破性进展的一个分支。总之，食品发酵与酿造技术具有巨大的发展潜力，将为解决世界面临的粮食、蛋白质、能源等问题提供美好的前景。

一、食品发酵与酿造的历史

发酵的英文“fermentation”是从拉丁语“fervere”即“发泡”、“翻涌”派生而来的，因为发酵发生时有鼓泡和类似沸腾翻涌的现象。如中国黄酒的酿造和欧洲啤酒的发酵就以起泡现象作为判断发酵进程的标志。可以说，人类利用微生物进行食品发酵与酿造已有数千年的历史，发酵现象是自古以来就已被人们发现并掌握的，但由于对发酵与酿造的主角——微生物缺乏认识，发酵与酿造的本质长时间没有被揭示，始终充满神秘色彩。因而在 19 世纪中叶以前，发酵与酿造业的发展极其缓慢。

在微生物的发现上做出重大贡献的是 17 世纪后叶的列文虎克（Leewenhoch），他用自制的手磨透镜，成功地制成了世界上第一台显微镜，在人类历史上第一次通过显微镜用肉眼发现了单细胞生命体——微生物。由于当时“自然发生说”盛极一时，他的发现并没有受到应有的重视。在随后的 100 多年里，对各种各样微生物的观察一直没有间断，但仍然没有发现微生物和发酵的关

系。直到 19 世纪中叶，巴斯德 (Pasteur) 经过长期而细致的研究之后，才有说服力地宣告发酵是微生物作用的结果。

巴斯德在巴斯德瓶中加入肉汁，发现在加热情况下不发酵，不加热则产生发酵现象，并详细观察了发酵液中许许多多微小生命的生长情况等，由此他得出结论：发酵是由微生物进行的一种化学变化。在连续对当时的乳酸发酵、转化糖酒精发酵、葡萄酒酿造、食醋制造等各种发酵进行研究之后，巴斯德认识到这些不同类型的发酵，是由形态上可以区别的各种特定的微生物所引起的。但在巴斯德的研究中，进行的都是自然发生的混合培养，对微生物的控制技术还没有很好掌握。

其后不久，科赫 (Koch) 建立了单种微生物的分离和纯培养技术，利用这种技术研究炭疽病时，发现动物的传染病是由特定的细菌引起的。从而得知，微生物也和高等植物一样，可以根据它们的种属关系明确地加以区分。从此以后，各种微生物的纯培养技术获得成功，人类靠智慧逐渐学会了微生物的控制，把单一微生物菌种应用于各种发酵产品中，在产品防腐、产量提高和质量稳定等方面起到了重要作用。因此，单种微生物分离和纯培养技术的建立，是食品发酵与酿造技术发展的第一个转折点。

这一时期，巴斯德、科赫等为现代发酵与酿造工业打下坚实基础的科学巨匠们，虽然揭示了发酵的本质，但还是没有认识发酵的化学本质。直到 1897 年，布赫纳 (Buchner) 才阐明了微生物的化学反应本质。为了把酵母提取液用于医学，他用石英砂磨碎酵母菌细胞制成酵母汁，并加入大量砂糖防腐，结果意外地发现酵母汁也有发酵现象，产生了二氧化碳和乙醇，这是用无细胞体系进行发酵的最初例子。这使人们认识到，任何生物都具有引起发酵的物质——酶。从此以后，人们用生物细胞的磨碎物研究了种种反应，从而促成了当代生物化学的诞生，也将生物化学和微生物学彼此沟通起来了，大大扩展了发酵与酿造的范围，丰富了发酵与酿造的产品。

但这一时期，发酵与酿造技术未见有特别的改进，直到 20 世纪 40 年代，借助于抗生素工业的兴起，建立了通风搅拌培养技术。因为当时正值第二次世界大战，由于战争需要，人们迫切需要大规模生产青霉素，于是借鉴丙酮丁醇的纯种厌氧发酵技术，成功建立起深层通气培养法和一整套培养工艺，包括向发酵罐中通入大量无菌空气、通过搅拌使空气均匀分布、培养基的灭菌和无菌接种等，使微生物在培养过程中的温度、pH、通气量、培养物的供给都受到严格的控制。这些技术极大地促进了食品发酵与酿造工业，各种有机酸、酶制剂、维生素、激素都可以借助于好气性发酵进行大规模生产，因而，好气性发酵工程技术成为发酵与酿造技术发展的第二个转折点。

但是，这一时期的发酵与酿造技术主要还是依赖对外界环境因素的控制来达到目的的，这已远远不能满足人们对发酵产品的需求，于是，一种新的技术——人工诱变育种和代谢控制发酵工程技术应运而生。人们以动态生物化学和微生物遗传学为基础，将微生物进行人工诱变，得到适合于生产某种产品的突变株，再在人工控制的条件下培养，有选择地大量生产人们所需要的物质。这一新技术首先在氨基酸生产上获得成功，而后在核苷酸、有机酸、抗生素等其他产品得到应用。可以说，人工诱变育种和代谢控制发酵工程技术是发酵与酿造技术发展的第三个转折点。

随着矿产物的开发和石油化工的迅速发展,微生物发酵产品不可避免地与化学合成产品产生了竞争。矿产资源 and 石油为化学合成法提供了丰富而低廉的原料,这对利用这些原料生产一些低分子有机化合物非常有利。同时,世界粮食的生产又非常有限,价格昂贵。因此,有一阶段,发达国家有相当一部分发酵产品改用合成法生产。但是由于对化工产品的毒性有顾虑,化学合成食品类的产品,消费者是无法接受的,也是难以拥有广阔的市场的;另外,对一些复杂物质,化学合成法也是无能为力的。而生产的厂家既想利用化学合成法降低生产成本,又想使产品拥有较高的质量,于是就采用化学合成结合微生物发酵的方法。如生产某些有机酸,先采用化学合成法合成其前体物质,然后用微生物转化法得到最终产品。这样,将化学合成与微生物发酵有机地结合起来的工程技术就建立起来了,这形成了发酵与酿造技术发展的第四个转折点。

这一时期的微生物发酵除了采用常规的微生物菌体发酵,很多产品还采用一步酶法转化法,即仅仅利用微生物生产的酶进行单一的化学反应。例如,果葡糖浆的生产,就是利用葡萄糖异构酶将葡萄糖转化为果糖的。所以,准确地说,这一时期是微生物酶反应生物合成与化学合成相结合的应用时期。

随着现代工业的迅速发展,这一时期食品发酵与酿造工程技术也得到了迅猛的发展,主要在发酵罐的大型化、多样化、连续化和自动化方面有了极大的发展。发酵过程全部基本参数,包括温度、pH、罐压、溶解氧、氧化还原电位、空气流量、二氧化碳含量等均可自动记录并自动控制的大型全自动连续发酵罐已付诸应用。发酵过程的连续化、自动化也成为这一时期重点发展的内容。

20世纪70年代发展起来的DNA重组技术,又大大推动了发酵与酿造技术的发展。先是细胞融合技术,得到了许多具有特殊功能和多功能的新菌株,再通过常规发酵得到了许多新的有用物质。如植物细胞的融合,可以得到多功能的植物细胞,通过植物细胞培养生产保健品和药品。近年来得到迅猛发展的基因工程技术,可以在体外重组生物细胞的基因,并克隆到微生物细胞中去构成工程菌,利用工程菌生产原来微生物不能生产的产物,如胰岛素、干扰素等,使微生物的发酵产品大大增加。可以说,发酵和酿造技术已经不再是单纯的微生物的发酵,已扩展到植物和动物细胞领域,包括天然微生物、人工重组工程菌、动植物细胞等生物细胞的培养。随着转基因动植物的问世,发酵设备——生物反应器也不再是传统意义上的钢铁设备,昆虫的躯体、动物细胞的乳腺、植物细胞的根茎果实都可以看做是一种生物反应器。因此,随着基因工程、细胞工程、酶工程和生化工程的发展,传统的发酵与酿造工业已经被赋予崭新的内容,现代发酵与酿造已开辟了一片崭新的领域。

表 1-1 发酵与酿造工业发展历史阶段表

时 间	阶 段	主 要 技 术
1900年前	自然发酵阶段	天然接种
1900年—	纯培养阶段	单种微生物分离和纯培养技术
1940年—	通气培养阶段	好气性发酵工程技术
1957年—	代谢控制阶段	人工诱变育种和代谢控制发酵工程技术
1960年—	全面发展阶段	微生物酶反应生物合成与化学合成相结合;生物反应器的连续化、自动化
1979年—	基因工程阶段	DNA重组技术

二、食品发酵与酿造的特点以及与现代生物技术的关系

(一) 食品发酵与酿造的特点

发酵这一概念对不同的领域有不同的含义,对微生物学家来说,是个较广义的概念,微生物进行的一切活动都可以称为发酵;而对生物化学家来说,发酵仅仅是指厌氧条件下有机化合物进行不彻底的分解代谢释放能量的过程。本书中的发酵都是广义的概念。

酿造则是我国人们对一些特定产品进行发酵生产的一种叫法,通常把成分复杂、风味要求较高,诸如黄酒、白酒、啤酒、葡萄酒等酒类以及酱油、酱、食醋、腐乳、豆豉、酱腌菜等副食佐餐调味品的生产称为酿造;而将成分单一、风味要求不高的产品,如酒精、柠檬酸、谷氨酸、单细胞蛋白等的生产称为发酵。

发酵与酿造工业和化学工业最大的区别,在于它是利用生物体或生物体产生的酶进行的化学反应,其主要特点如下:

1. 安全简单 食品发酵与酿造过程绝大多数是在常温常压下进行的,生产过程安全,所需的生产条件比较简单。

2. 原料广泛 食品发酵与酿造通常以淀粉、糖蜜或其他农副产品为主原料,添加少量营养因子,就可以进行反应了。目前,发酵与酿造的原料范围已大大扩展,矿产资源和石油产品都可以作为发酵与酿造的原料,甚至生产中的废水、废料都可以作为发酵与酿造的原料。

3. 反应专一 食品发酵与酿造过程是通过生物体的自动调节方式来完成,反应的专一性强。因而,可以得到较为单一的代谢产物,避免不利或有害副产物混杂其中。

4. 代谢多样 由于各种各样生物体代谢方式、代谢过程的多样性,以及生物体化学反应的高度选择性,即使是极其复杂的高分子化合物,也能在自然界找到所需的代谢产物。因而,发酵与酿造适应的范围非常广。

5. 易受污染 由于发酵培养基营养丰富,各种来源的微生物都很容易生长,发酵与酿造过程要严格控制杂菌污染,有许多产品必须在密闭条件下进行发酵,在接种前设备和培养基必须灭菌,反应过程中所需的空气或流加营养物必须保持无菌状态。发酵过程避免杂菌污染是发酵成功的关键。

6. 菌种选育 发酵与酿造最重要的因素是菌种,通过各种菌种选育手段得到高产的优良菌种,是能否创造显著经济效益的关键。另外,生产过程中菌种会不断地变异,因此,自始至终都要进行菌种的选育和优化工作,以保持菌种的基本特征和优良性状。

(二) 食品发酵与酿造和现代生物技术的关系

现代生物技术即应用生物体(微生物、动物细胞、植物细胞)或其组成部分(细胞器、酶),在最适条件下,生产有价值的产物,或进行有益过程的技术。它是一门涉及分子生物学、细胞生物学、遗传学、微生物学、化学、物理学、工程学的多学科、综合性的科学技术。

生物技术是靠基因工程、细胞工程、发酵工程、酶工程和生化工程这五大技术体系支撑起来的。这五大技术体系的关系见图 1-1。

从图 1-1 中可以看出,五大工程是互相依赖、相辅相成的。基因工程是主导,虽然细胞工