

固态发酵

G U T A I F A J I A O

主 编 / 李家民

副主编 / 吴正云 张文学



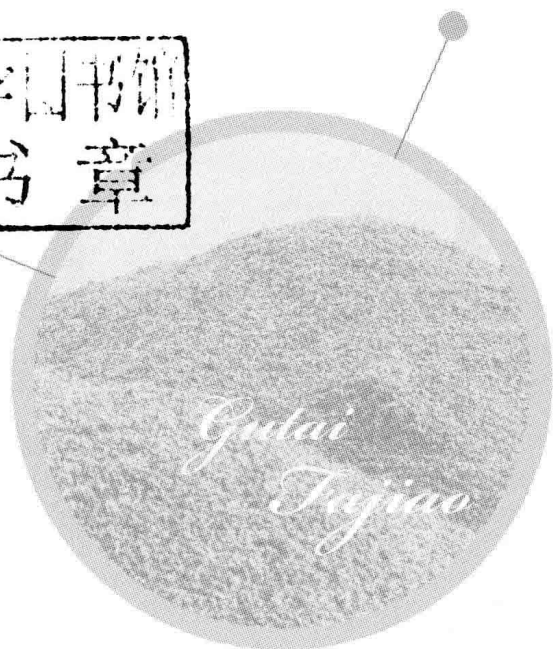
四川大学出版社

固态发酵

主 编 / 李家民

副主编 / 吴正云 张文学

常州大学图书馆
藏书章



四川大学出版社

责任编辑:唐 飞
责任校对:杨 果
封面设计:墨创文化
责任印制:王 炜

图书在版编目(CIP)数据

固态发酵 / 李家民主编. —成都: 四川大学出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-5690-0451-9

I. ①固… II. ①李… III. ①固态发酵
IV. ①TQ920. 6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 068364 号

书名 固态发酵

主 编 李家民
出 版 四川大学出版社
地 址 成都市一环路南一段 24 号 (610065)
发 行 四川大学出版社
书 号 ISBN 978-7-5690-0451-9
印 刷 郫县犀浦印刷厂
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 17.25
字 数 441 千字
版 次 2017 年 4 月第 1 版
印 次 2017 年 4 月第 1 次印刷
定 价 68.00 元



◆读者邮购本书,请与本社发行科联系。
电话:(028)85408408/(028)85401670/
(028)85408023 邮政编码:610065

◆本社图书如有印装质量问题,请
寄回出版社调换。

◆网址:<http://www.scupress.net>

版权所有◆侵权必究

序一

固态发酵不仅是传统酿造食品的主要生产方式，而且在现代医药化工、能源环境等诸多领域中发挥着重要作用。自诞生以来，固态发酵经历了漫长的发展演变过程。世界各国学者近年来的大量研究工作，更使得固态发酵在理论和实践上取得了巨大进步。但到目前为止，多数传统多菌种自然发酵酿造仍以经验为主，缺乏系统性的理论总结。

本书作者李家民先生，是中国著名酿酒企业——沱牌舍得酒业股份有限公司的总工程师。李先生在酿酒行业工作三十余年，不仅是具有丰富实践经验的酿酒大师，而且勤于理论研究探索，在学术上多有建树。他所提出的生态酿酒理论，在国内外酿酒行业有广泛的影响和引领作用。

“五三”原理是李先生继生态酿酒理论之后提出的又一重要理论，其主要内容是多菌种固态酿造过程中广泛存在的五法则三层次原理，具体包括微生物三层级、三系代谢、三相界面、温变三阶段和氧变三状态。“五三”原理在思想上继承《周易》阴阳、二十四节气、中医辨证施治等中国传统文化精髓和《太禾曲经》等优秀传统酿造经验，并广泛吸收了现代生产和学术成果，对固态酿造具有开创意义，是对中国酒文化特色的系统梳理和总结。

“五三”原理源于固态酿酒，是在对中国白酒选择性接种发酵机理深刻认识基础上的精辟概括，但其意义并不仅囿于此。在本书中，作者对“五三”原理在诸多领域的应用进行了全面系统的分析论述。读者将可以看到，作为一种高屋建瓴的理论概括，“五三”原理如何在不同领域的多菌种固态酿造过程中起到定性、定量的导向作用，为各种固态发酵问题的理论研究和实践提供参考和指导。

以白酒为代表的中国传统酿造，具有丰富的历史文化内涵和大量的技术奥秘，其学术意义正在吸引越来越多的世界各国学者的关注。本书不仅为相关领域专家 and 工作人员提供了有价值的学术参考，也为相关专业的学生提供了新视角和高水平的学习教材。广大专家、学者倘能以“五三”原理为阶，结合自己所面临的具体实际问题进一步深入探讨，必将在固态酿造领域取得更为丰硕的成果。

我有感于李先生的学术成就和对专业教育的热情，愿意向读者推荐此书。



博士，教授

荷兰瓦赫宁根大学食品与营养研究院

2017年2月

序二

「立派な文化をもつ国民は立派な酒をもつ」というのは、日本の発酵学の権威である坂口謹一郎博士の言葉である。この言葉は「酒」だけに限る必要はなく、「立派な文化をもつ国民は立派な発酵食品をもつ」と言い換えても全く問題はないであろう。そのような意味からも、中国は古代文明の発祥の地でもあり、古くから優れた文化をはぐくんできた国であることから、多くの優れた発酵食品をもっていると言える。中国の発酵食品を代表する白酒や醬、烏龍茶などの製造法の特徴は、原料となる穀類や茶葉を固体基質としてそのまま発酵させるという「固体発酵」である。日本の代表的な発酵食品である日本酒や醬油、味噌の基本的な製造技術は、歴史的には中国から伝来したものであると考えられているが、醬（穀醬）に似ている味噌を除くと、「もろみ」という濃厚な液体状にして発酵させる方法（液体発酵）であり、中国の発酵食品の製法とは対照的である。一方、中国や日本を含む東アジア地域では酒や醬油などの発酵調味料の製造には、原料の穀類にカビを生育させた麹を使用することが一般的である。このような原料穀物にカビを生育させるという麹の製造方法は「固体発酵」の一種と考えてよい。その点において、「固体発酵」は中国、日本、韓国、タイなどの東アジアに共通する発酵方法と言える。固体発酵は東アジアを特徴づける伝統的な発酵技術であるが、このような培養方法は、カビをはじめとする微生物による食品加工用酵素や化成品製造用酵素の工業生産にも利用されている。さらに、最近では再生可能エネルギーとして重要性が増している植物バイオマス为原料とするバイオ燃料の有効な発酵生産技術としても世界から注目されている。特に、白酒製造で用いられる固体発酵法は、バイオマスからエタノールを効率的に連続生産するための基本技術として活用可能であると考えられている。固体発酵は伝統的な古くさい技術と思われるかもしれないが、そのようなことは決してなく、最先端技術に応用できる重要な要素を有しているのである。

本書は固体発酵の歴史や原理などの基礎から固体発酵を利用した醸造食品製造の現状や研究動向までの幅広い範囲にわたる内容を含んでいる。また、中国を代表する酒類である白酒の固体発酵技術の研究から導かれた固体醸造に関する“五三”原理についても詳述されている。本書は、大学の醸造・食品学科やそれに関連する学科の教科書や参考書としてだけでなく、醸造・食品関連分野の技術者にとっても有用な参考書として最適である。

本書の執筆にあたられた先生方は、舍得酒業の李家民総工程師並びに四川大学の張

文学教授をはじめ、中国の固体発酵技術の専門家であり、このような書を出版する労を取られたことに大いなる敬意を表するものである。本書を通して固体発酵に関する理論と実践技術を詳しく学ぶことにより、中国のみならず東アジア、さらには世界における固体発酵技術の今後の発展につながることを信じている。

五味勝也

日本生物工学会・会長

日本東北大学大学院農学研究科・教授

2017年2月

前 言

固态发酵在我国传承数千年，不仅在传统酿造食品生产和部分传统中药制备中起到不可替代的作用，而且在现代医药化工、能源环境等领域中的意义也变得越来越重大，得到人们的广泛关注。我国的固态发酵经历了漫长的发展演变，技术和产品十分丰富，对现代固态发酵的理论和实践都有着重要的启示和推动作用。但到目前为止，大多数的传统固态发酵，尤其是多菌种自然发酵，仍以经验为主，缺乏系统全面的理论总结。

基于多年的固态酿造实践，中国酿酒大师、中国当代发明家李家民先生在总结前人实践的基础上，率先提出了固态发酵的“五三”原理，即多菌种固态酿造发酵过程中广泛存在的五法则三层次（微生物三层级、三系代谢、三相界面、温变三阶段和氧变三状态）原理。作为一种高层次的理论概括和总结，“五三”原理可以对不同领域的多菌种固态酿造起到定性、定量的导向作用，为各种固态发酵问题的理论研究和实践提供参考和指导。本书详细介绍了固态发酵“五三”原理的背景和内容，结合固态酿酒生产实践对“五三”原理的实施方式进行了详细展示，并探讨了“五三”原理在调味品、豆制品、果蔬、茶叶发酵，以及人体消化道微生态、中药发酵、固态真菌培养、生物质能源、废弃物固态发酵转化等多个领域中的应用。

本书中对固态发酵“五三”原理的阐述，以及“五三”原理在各种固态发酵中的应用和分析探讨，均为作者原创；固态酿酒方面的一些实例，如原粮酿造，汽爆技术，“七因制宜”酿造幽雅、舒适、健康型白酒，仿生智能酿酒机器人的开发应用等，均来自李家民先生多年的实践总结和工艺技术研究成果；调味品及豆制品发酵、果蔬发酵、茶叶发酵以及其他与固态发酵相关的一些数据资料，多取自于近年来发表的学术期刊论文。编写和出版本书的目的在于，为相关领域的专家学者和生产技术人员提供参考资料，同时也为酿造发酵和其他相关专业的学生提供一种新视角的学习教材。

在本书的酝酿和编写过程中，得到了张树政、程光胜、曾祖训、吴衍庸、王延才、宋书玉、庄名扬、胡永松和李大和等我国微生物学界前辈和业界专家的支持和指导。国家突出贡献专家、首届中国酿酒大师李家顺先生，国家固态酿造工程技术研究中心主任敖宗华博士等同行专家，也为本书的编写提供了一些宝贵的建设性意见。四川大学轻纺与食品学院生态食品工程与生物技术研究室的硕士、博士，在资料整理、查询等方面付出了艰辛的劳动。日本生物工学会会长五味胜也教授、荷兰瓦赫宁根大学食品与营养研究院 Henricus FJ Hendriks 博士热情地为本书作序，结合中外传统酿造发酵食品的异同和发展，对本书的成果进行了充分的肯定。

由于编者水平能力所限，书中疏漏和不足之处在所难免，欢迎各位专家同仁和读者批评指正。

编 者

2017年3月

目 录

第一章 固态发酵概述	001
第一节 固态发酵的基本概念及特征	001
一、发酵与酿造	001
二、固态发酵及其特征	002
第二节 固态发酵的产生及历史	004
一、固态发酵的起源	004
二、固态发酵技术的成熟和发展	005
第三节 固态发酵的应用	007
一、固态发酵在食品生产中的应用	007
二、固态发酵在酶制剂生产中的应用	007
三、固态发酵在食用菌生产中的应用	008
四、固态发酵在医药化工领域的应用	008
五、固态发酵在能源环境等领域的应用	009
第四节 固态发酵的研究进展及发展趋势	009
一、固态发酵的研究进展	009
二、固态发酵的发展趋势	014
第二章 “五三”原理概论	016
第一节 固态发酵的基本规律	016
一、固态发酵的微生物特征	016
二、固态发酵的多菌种发酵技术	016
三、固态发酵的基质特征	017
第二节 固态发酵“五三”原理的提出	017
一、微生物繁衍规律：菌种—种群—群落	018
二、物系—菌系—酶系的关联效应	019
三、固相—液相—气相三相关系及变化规律	022
四、固态发酵体系温变规律	023
五、封闭系统的氧变规律	024
第三节 “五三”原理的内涵及其应用方式	026
一、微生物三层级原理的内涵	026
二、三系代谢原理的内涵	028

三、三相界面原理的内涵	028
四、供氧三状态原理的内涵	029
五、温变三阶段原理的内涵	029
六、“五三”原理的应用方式及范围	030
第三章 “五三”原理的发展	032
第一节 文化传承中的“五三”原理	032
一、《太禾曲经》	032
二、二十四节气与酿造	033
三、“望、闻、问、切”与酿酒	039
第二节 “五三”原理与现代生物工程和现代分析技术	041
一、“五三”原理与现代生物工程技术	041
二、“五三”原理与现代分析技术	042
第三节 “五三”原理与风味、健康物质的生成	045
一、“五三”原理与酿造食品中的风味物质生成	045
二、“五三”原理与酿造食品中健康功效物质的形成	046
第四章 “五三”原理与发酵食品质量安全	049
第一节 发酵食品的质量安全	049
一、与发酵食品有关的质量安全问题	049
二、引发发酵食品质量安全问题的原因	051
第二节 从“五三”原理看发酵食品的质量安全	051
一、与发酵食品有关的生物性危害	051
二、与发酵食品有关的化学性危害	052
三、与发酵食品有关的其他危害	055
四、传统发酵微生物菌种的安全性评价	055
第五章 固态酿酒发酵	057
第一节 酿酒发酵的“五三”原理	057
一、酿酒发酵概述	057
二、酿酒发酵的“五三”原理分析	060
第二节 固态酿酒的质量安全控制	081
一、白酒中异杂味产生原因及控制措施	081
二、白酒中其他质量安全问题	083
三、沱牌公司白酒生产质量安全管理“全P”规范	084
第三节 原粮和汽爆技术	087
一、原粮酿造技术	087
二、汽爆粮酿造技术	101
第四节 “七因制宜”酿造幽雅、舒适、健康型白酒	110
一、糠壳	110
二、水分	112
三、温度	114

四、酸度	116
五、糟醅	118
六、淀粉	119
七、曲药	121
第五节 仿生智能酿酒机器人的开发应用	123
一、仿生智能酿造背景	123
二、沱牌公司的仿生智能酿造技术研究	124
第六章 调味品及豆制品发酵	133
第一节 食醋发酵	133
一、食醋发酵概述	133
二、食醋酿造的“五三”原理分析	139
三、食醋发酵质量安全控制	148
第二节 酱油发酵	149
一、酱油发酵概述	149
二、酱油发酵的“五三”原理分析	152
三、酱油发酵的质量安全控制	158
第三节 酱类发酵	159
一、酱类发酵概述	159
二、酱类发酵的“五三”原理分析	162
三、酱类发酵的质量安全控制	165
第四节 豆豉发酵	165
一、豆豉发酵概述	165
二、豆豉发酵的“五三”原理分析	169
三、豆豉发酵的质量安全控制	175
第五节 豆腐乳发酵中的应用	175
一、豆腐乳发酵概述	175
二、腐乳的生产工艺简介	176
三、豆腐乳发酵的“五三”原理分析	180
四、豆腐乳发酵的质量安全控制	188
第七章 果蔬发酵	190
第一节 蔬菜、水果发酵概述	190
一、泡菜发酵	190
二、酱腌菜发酵	194
三、水果发酵	196
第二节 果蔬发酵的“五三”原理分析	201
一、果蔬发酵的微生物层级分析	201
二、果蔬发酵的三系代谢分析	205
三、果蔬发酵中的三相界面分析	212
四、果蔬发酵中的供氧状态分析	213

第三节 果蔬发酵的质量安全控制	213
一、蔬菜发酵的质量安全控制	213
二、水果发酵的质量安全控制	215
第八章 茶叶发酵	216
第一节 茶叶发酵概述	216
一、茶叶概述	216
二、茶叶的发酵	216
三、茶叶发酵的原理及发酵茶制作工艺	217
第二节 茶叶发酵的“五三”原理分析及质量安全控制	219
一、茶叶发酵中的微生物层级分析	219
二、茶叶发酵中的三系代谢分析	225
三、茶叶发酵中的供氧、温变和三相分析	229
四、茶叶发酵的质量安全控制	230
第九章 “五三”原理对其他领域基础理论研究的指导作用	233
第一节 人体消化道微生态	233
一、人体消化道微生态概述	233
二、不同物相对消化道微生态的意义	233
三、消化道微生态中物系、菌系和酶系的相互关联	234
四、人体消化道微生物生长定植过程中的“菌种—种群—群落”规律	236
五、人体消化道微生态的温度和供氧特征	237
六、人体微生态的调控	238
七、人体消化道微生态和食品酿造微生态的比较	238
第二节 中药发酵	240
一、中药发酵概述	240
二、中药发酵的“五三”原理分析	243
三、中药发酵的质量安全控制	244
第三节 固态真菌培养	245
一、固态真菌培养概述	245
二、固态真菌培养的“五三”原理分析	250
第四节 生物质能源固态发酵	252
一、生物质能源固态发酵概述	252
二、生物质能源固态发酵的“五三”原理分析	256
第五节 废弃物固态发酵转化	258
一、废弃物固态发酵转化概述	258
二、废弃物固态发酵的“五三”原理分析	262

第一章 固态发酵概述

本章提要：

主要介绍固态发酵的基本概念、特征、起源、历史、应用领域、研究进展和发展趋势。通过本章的学习，对固态发酵的学科范围、研究现状和发展情况形成概括性的认识。

第一节 固态发酵的基本概念及特征

一、发酵与酿造

“发酵”这一概念在不同场合下有不同含义。对生物化学家来说，发酵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；对微生物学家来说，发酵则是一个更为广义的概念——微生物所进行的一切活动都可以称为发酵。除特别说明，本书中“发酵”一般为广义的概念。工业发酵的定义是泛指利用微生物制造或生产某些产品的过程。它包括厌氧培养的生产过程，如酒精、丙酮、乳酸等的生产，也包括通气培养的生产过程，如抗生素、氨基酸和酶制剂等的生产。

发酵的英文“fermentation”一词来源于拉丁语“fever”（意为“发泡”“团涌”），其原因是发酵过程中常伴随有鼓泡和类似沸腾团涌的现象。例如，在中国黄酒和欧洲啤酒的发酵中，都以起泡现象作为判断发酵进程的标志。

发酵现象自古以来就已被人们发现并掌握，但由于对发酵与酿造的主角——微生物缺乏认识，发酵与酿造的本质很长时间没有被揭示，始终充满着神秘色彩。在中国，谷物酿酒的历史至少可追溯到距今四千多年以前，酱油、豆豉和食醋等传统酿造食品也起源于中国，其后逐渐传至日本和其他亚洲国家。尽管还不了解“微生物”在制曲酿造中的作用，但《齐民要术》等古籍中提到的“五色衣”“黄衣”和“黄蒸”，显示了对霉菌等微生物群体形态的认识；选择气温较高的夏、秋季节制曲，气温较低的冬、春季节酿酒，显示了对微生物分布和生长规律的了解；对“曲势”的论述，与现代的发酵动力学和酶动力学观点十分接近。此外，古代中国人民在长期的实践中，对无菌操作、选择性培养基运用以及菌种保藏等方面都有一定认识，曲蘖制作和复式发酵技术尤其是酿造上的发明和贡献，为现代发酵工业奠定了基础。在西方，19世纪中叶以前，发酵与酿造业的发展极其缓慢。19世纪中叶，巴斯德（Pasteur）经过长期而细致的研究之后，揭示出发酵是微生物作用的结果。其后不久，科赫（Koch）建立了单种微生物的分离和纯培养技术。1897年，布赫纳（Buchner）阐明了微生物的化学反应本质，使人们认识到引起发酵的物质——酶。从

此以后,生物化学和微生物学实现了彼此沟通,并大大扩展了发酵与酿造的范围,丰富了发酵和酿造产品。20世纪40年代,伴随着抗生素工业的兴起,建立了通风搅拌培养技术,微生物在培养过程中的温度、pH值、通气量、培养物的供给都实现了严格控制。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、维生素和激素等都借助于好气性发酵技术先后实现了大规模生产。随着现代工业的迅速发展,这一时期的食品发酵与酿造工程技术也得到了迅猛的发展,在人工诱变育种和代谢控制发酵工程技术、DNA重组技术、发酵罐的大型化、多样化、连续化和自动化等方面都有了极大的发展。随着基因工程、细胞工程、酶工程和生化工程的发展,传统发酵与酿造工业被赋予崭新的内容,为现代发酵与酿造开辟了新的领域。

“酿造”与“发酵”在含义上比较接近,很多时候被作为同义词使用。与含义广泛的“发酵”稍有区别的是,“酿造”通常是指成分复杂、风味要求较高,如黄酒、白酒、啤酒和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。人类酿造的历史源远流长,早在8000年以前,人类就已开始酿造食品的生产。公元前6000年左右,人类掌握了酿酒和食品保藏技术。埃及人在公元前3000年已熟悉了乳酪、酒和醋的酿造方法。这些酿造技术在今天的食品生产中,仍然占据着十分重要的位置。随着时代的发展,人们对于传统酿造有了更深入的认识,大量先进技术设备被用于现代酿造生产。

固态发酵是酿造生产的主要方式。尽管并非所有的酿造生产都采用固态发酵,但固态发酵方式在酿造生产,尤其是传统酿造食品的生产中,占据着十分重要,甚至是不可替代的位置。

二、固态发酵及其特征

固态发酵是指在几乎无自由水存在或有一定湿度的水不溶性固态基质中,由一种或多种微生物发酵的生物反应过程。这种固态基质既为微生物生长代谢提供所需的碳源、能源和其他营养物质,又是微生物生长的微环境。从生物反应过程的本质考虑,固态发酵是以气相为连续相、以液膜及其覆盖的固相为固定相的三相系统。

固态发酵的基质大多为不溶于水的物料。一般来讲,一方面,当物料的水分含量低于12%时,微生物的生长就会受到抑制;另一方面,对大多数固态发酵物料来说,当含水量高于80%时,就会出现游离水。因此,固态发酵的含水量通常控制在12%~80%之间,大多含水量在60%左右(典型的液态发酵方式中,发酵液中的含水量在95%以上)。但需要指出的是,基质含水量与自由流动水的含量没有必然联系。对于某些持水力较强的固相基质(如植物原料、甜菜等),即使发酵基质的含水量在80%以上,固相之间的自由流动水也仍然较少。因此,含水量并不是界定固态发酵的唯一标准。

固态发酵一般采用开放式发酵系统,以多菌种的混合发酵为主。我国许多发酵产品都是多菌种发酵,随着微生物发酵过程的不断进行,培养基的微生态环境发生变化,微生物的种群也随之按一定的规律发生演替。从另一个角度来看,传统固态发酵易污染杂菌。

对许多固态发酵来说,只需在选定的谷物原料中加适量的水,就能制成微生物生长发酵的培养基,没有液态发酵的培养基那样复杂。此外,固态物料的水分含量较低,水活度值较低,杂菌不易生存。即使染菌,对于固态发酵的影响也相对较小。有的固态发酵产品

无须提取纯化，就可直接用于生产或使用；与液态发酵相比，传统固态发酵能耗和生产成本低；但传统固态发酵手工操作较多，劳动强度大。固态发酵与液态发酵的详细对比见表 1-1。

表 1-1 固态发酵与液态发酵的比较

类别	固态发酵	液态发酵
水含量	培养基中没有游离水的流动	培养基中始终有游离水的流动，水是培养基中的主要组分
水活度	固体培养基的水活度在 0.9 以下，适宜于水活度在 0.8~0.93 的微生物生长，限制了其应用范围，同时也限制了某些杂菌生长	适合于大多数微生物的生长
营养物质来源及浓度均一性	微生物从湿的固态基质吸收营养物质，营养物质浓度存在梯度	微生物从溶解水中吸收营养物质，营养物质浓度一般不存在梯度
相态特征	培养体系涉及气、液、固三相，气相是连续相	液相为连续相
接种量	接种量比较大，大于 10%	接种量比较小，小于 10%
供氧及能耗	微生物所需的氧主要来自于气相，只需少量无菌空气，能耗低	微生物所需氧来自于溶解氧，需要消耗较大能量用于供氧
供气作用	气体循环和通气不仅可提供氧气和排除挥发性产物，而且可以排除代谢热量	气体循环和通气仅提供氧气和排除挥发性产物，代谢热量需要冷却水排除
微生物分布	微生物吸附于固态底物的表面或渗透到固态底物内生长	微生物均匀分布在培养体系中
微生物分化	固态发酵微环境有利于微生物分化，特别是丝状真菌分化代谢	液态发酵环境抑制微生物的分化代谢，不利于次生代谢产物生产
产物浓度	产物浓度高	产物浓度低
底物浓度	高底物浓度可以获得高的产物浓度	高底物浓度使培养液成为非牛顿流体，一般采用补料系统实现
气源要求	所需通气的压力低	需要较高的气源压力
体系温度	代谢热去除困难，易出现局部过热	发酵温度容易控制
过程控制	缺乏有效的在线监测手段，过程控制比较困难	易于实现发酵过程的在线监测和控制
产物提取	提取工艺简单可控，没有大量有机废液产生，但提取物纯化比较困难	需要去除大量高浓度有机废水，分离设备的体积通常很庞大、费用高，但产物纯化比较容易
预处理	使用固体原料，在发酵过程中，糖化与发酵过程同时进行，简化了操作工序	一般发酵原料需要经过较复杂的加工
发酵周期	生产周期较长	生产周期较短

归纳起来，固态发酵相比液态发酵而言有以下一些优点：

(1) 培养基简单且来源广泛，多为便宜的天然基质或工业生产下脚料，原料预处理简单。目前的一种趋势是利用工农业废渣（如木薯渣、蔗渣、甜菜渣、苹果渣、咖啡豆壳等）作固态发酵原料，在生产目标产物的同时，既解决环境污染，又降低生产成本。

(2) 发酵过程一般不需要严格无菌操作。细菌的生长受低水活度限制，固态基质上严重的染菌很少发生。

(3) 培养过程供氧和温度可以采用直接空气强制通风来控制。一般可用间歇通风完成，不需要连续通风。与液体发酵相比，在产量不变的情况下，固体发酵可节省能源30%。

(4) 产物的产率较高，产物提取容易，一些固体发酵后的物料可直接作为产物。

(5) 发酵残渣的处理简单。发酵残渣含水量很低，可直接干燥后作为饲料或肥料，环境污染较少，后处理加工方便。

(6) 传统制曲等固态发酵中，分生孢子可用作种子，这些孢子能长期保存和重复使用。

(7) 投资少，能耗低。

对于微生物发酵生产来讲，液态深层发酵因为其工艺技术和设备现代化程度较高，通常被优先考虑，但在很多情况下（如具有复杂风味的发酵食品生产、固态可再生性资源综合利用等），固态发酵具有明显优势。

第二节 固态发酵的产生及历史

一、固态发酵的起源

固态发酵最早可能源于酒曲的制造及酿酒，这一点可以由多数与酿造有关的汉字带有“酉”这一偏旁为佐证（“酉”为古代“酒”的本字，图1-1）。



图1-1 古文字“酉”

“酒之所兴，肇自上皇，或云仪狄，又云杜康。有饭不尽，委馀空桑，郁积成味，久蓄气芳，本出于此，不由奇方”（江统《酒诰》）。在农业出现前后，储藏谷物的方法粗放，天然谷物受潮后会发霉和发芽，吃剩的熟谷物也会发霉。这些发霉发芽的谷粒，就是上古时期的天然曲蘖，将之浸入水中，便发酵成酒。微生物在谷物上发霉，即天然的固态发酵过程，中国的制曲技术即基于此。“曲”的繁体字是“麴”，形象地表明“麴”是麦子等谷物原料经罨（包）制而成的，即是发霉的谷粒制成的。麴本身既是糖化发酵剂，又是酿酒原料。在长沙马王堆西汉墓中出土的帛书《养生方》和《杂疗方》中，可看到我国迄今为止发现的最早的完整酿酒工艺记载，从其中所记载的酿造技术分析，当时已采用固态法生产的酒曲作为发酵引物。山东诸城凉台出土的东汉画像砖《庖厨图》，几乎把当时酿酒的全过程都表现出来，包括捣碎曲块、曲的浸渍、蒸饭、米饭和曲汁混合、酒的发酵、酒的过滤、灌装等一系列工序。

酱是另一类起源很早的发酵产品，是以豆类、小麦粉、水果、肉类或鱼虾等为主要原料加工而成的糊状调味品。酱起源于中国，至今已有数千年的历史，《周礼·宫伯》中就有王室“酱用百有二十缶”的记载。酱油由酱演变而来，古代又称为“酱清”“豆酱清”

“酱汁”和“清酱”（《齐民要术》）。酱油酿造过程中的两个关键步骤制曲和发酵都属于固态发酵。

我国的食用菌生产也源远流长，早在数千年前人们就开始了观察和采食食用菌的实践活动，在东汉时期已有了人工栽培食用菌的记载；公元14世纪，食用菌栽培已经积累了丰富的经验。目前世界范围内大规模栽培的食用菌多起源于中国。

在西方国家，固态发酵同样源远流长。作为西方人主食的面包，据传说起源于公元前2000年左右的埃及；与面包一样具有历史悠久的还有奶酪等。总之，固态发酵的产生和发展几乎伴随着人类文明的整个发展历程，通过各类微生物生产菌株（包括丝状真菌、酵母菌、细菌等）在各种固态基质中的生长代谢，固态发酵为人类的日常生活提供了大量可口和营养丰富的食品。

二、固态发酵技术的成熟和发展

固态发酵自诞生以来，经历了漫长的发展、演变和提高的过程，包括工艺和设备的改进、现代微生物学知识和操作技术的引入等。

固态发酵技术总体上可分为传统固态发酵技术和现代固态发酵技术两种类型。传统固态发酵技术的特点是：发酵在简单的敞口发酵容器中进行，菌种常常来自发酵原料或周围环境中，属于自然富集发酵。传统固态发酵方式为很多传统食品生产所采用，其优点是设备投资小，操作能耗低，多利用粮食和纤维原料，价格低廉，产品后处理简单，可直接烘干使用；缺点是劳动强度和占地面积大，产出率较低。现代固态发酵技术的特点是：发酵在密闭的固态反应器中进行，菌种为单一菌株纯种或限定菌株混合纯种发酵。现代固态发酵技术应用范围较广，包括酶制剂、生物农药、生物肥料、抗生素、土壤修复、生物冶金及食用菌栽培等。现代固态发酵方式对发酵原料进行无菌处理，因此操作费用和设备投资相对较高。

大体上说，现代固态发酵是在传统固态发酵的基础上发展而来的。但到目前为止，传统固态发酵仍然在很大程度上得到传承和演绎，并未全部被现代固态发酵所取代，尤其是在一些高质量的名优发酵产品生产中，由于其多菌种复合代谢机理在认识上的不足，传统固态工艺仍具有难以替代的作用。传统固态发酵技术及产品种类众多，包括制曲、酿酒、酿醋、酱油生产等。在此以我国固态发酵的典型代表——制曲技术为例来说明固态发酵技术的演变和发展。

1. 散曲

根据文献记载和推测，最早的酒曲形式应当是散曲，即用蒸熟的谷物，经微生物自然接种后培养的酒曲。在远古时代，大多数曲采用此法生产。但散曲的糖化发酵力不强。汉代王莽时期，官方规定酿酒时的曲米比例为1:2，说明酒曲糖化发酵力不高。

2. 散曲到块曲的转变

散曲必须摊于地面或竹匾等，占地面积大，生产效率低，且不利于储运。块曲具有一定形状，可叠加，或放在容器内（夹在秸秆或草中）。块曲的出现和发展，可能是当时已发现块曲的糖化发酵力更高（根霉菌大量繁殖的结果），或出于储运方便的需要。

西汉扬雄所著《方言》一书中，有7个字是表示酒曲的，其中有些属于“饼曲”（即块状曲）；东汉《四民月令》中记载了一例较为完整的制曲过程，这是我国制曲工艺的首

次文字记载。

3. 块曲制造技术的发展

东汉末曹魏时代的九酝春酒法，用曲 30 斤，可酿 9 石米，曲米比达到 1:30。到了北魏时代，贾思勰的《齐民要术》中共有九例酒曲制法的详细记载，都是块曲。块曲制造有了专门的曲模（《齐民要术》中称为“范”），有铁制圆形范，有木制长方体范，其大小各异。如“神曲”是用手团成的直径 2.5 寸、厚 9 分的圆形块曲；“笨曲”则是用 1 尺见方、2 寸厚的木制曲模，用脚踩制而成（图 1-2）。据书中记载，“神曲”用量只占米的 3% 左右，其糖化发酵力相当于现在的“小曲”，表明当时制曲技术已达到相当高的水平。

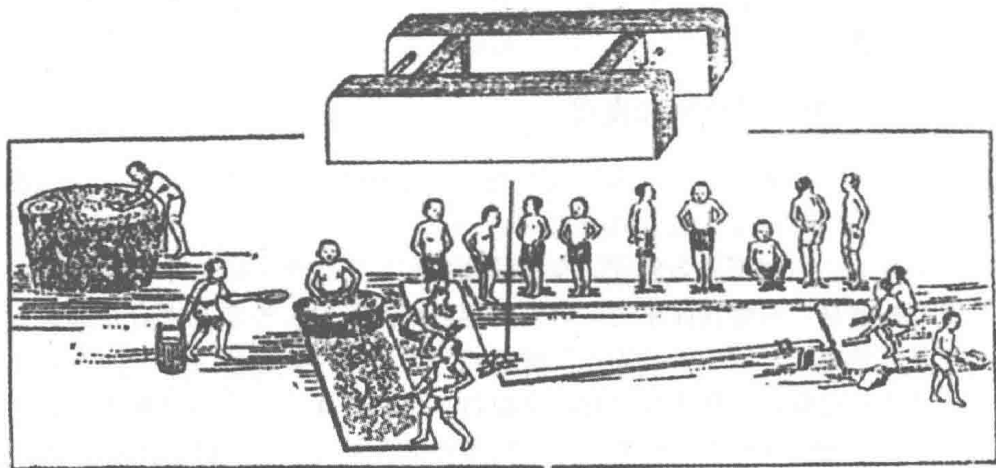


图 1-2 踩曲

4. 酒曲制作技术的成熟

唐宋时期的酒曲生产技术基本成型。北宋末期朱肱所著《北山酒经》，对当时的制曲酿酒技术进行了全面而精辟的总结，其中提到的掌握制曲时物料水分、温度、适时通风和翻料技术等，在现代仍然有很高的参考和借鉴意义。尤其值得一提的是，《北山酒经》中记载了一种制曲时的人工接种方式：“团成饼子，以旧曲末逐个为衣”，即把新制成的曲块团放在陈曲粉末上滚动一下，陈曲粉末便粘在新曲团的表面。陈曲末中有大量的霉菌孢子，可以在曲团上迅速繁殖，形成优势菌群。由于可以人为地选择质量较好的陈曲作为曲种，这就实现了择优汰劣。通过年复一年的人工选育和自然淘汰，质量优良的曲种（微生物菌种）得以保留下来。

红曲最早出现于宋代，是体现制曲技术日渐成熟的一种固体发酵产品。红曲菌比米曲霉、黑曲霉和根霉更难于培养，其培养技术也更为复杂。明代宋应星《天工开物》和李时珍《本草纲目》中有详细的红曲制法，包括曲种的添加、培养过程中分段吃水、适时堆积及翻料等。

传统白酒酿造是体现制曲技术高度发展的一种典型固态发酵生产方式，在元代已有记载。大规模的白酒生产始见于明代。白酒固态发酵以地窖或陶缸为发酵容器，大（小）曲为糖化发酵剂，实施边糖化边发酵工艺；采用填充料（谷糠），既稀释了淀粉的浓度，又可作为吸附剂，将发酵产生的易挥发酒精吸附在这些填料中。

中国传统固态酿造技术很早以前就已传入日本。目前很多有影响的日本固态发酵产