

# 现代白酒酿造微生物学

徐岩等著



科学出版社

# 现代白酒酿造微生物学

徐 岩 等 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书系统阐述了白酒酿造微生物学的最新基础理论与应用研究进展。全书共分6章,其中第1~4章属于白酒酿造微生物学的基础理论内容,主要介绍了白酒酿造微生物的多样性、功能基因组学以及微生物菌群结构演替规律及菌群互作机理,有助于深入认识白酒酿造的生物学机制,为科研和生产提供理论依据;第5章主要介绍了白酒酿造微生物发酵代谢物及其风味化学,将微生物代谢与白酒风味和品质安全有机联系起来,促进对白酒酿造微生物功能的进一步认识;第6章主要介绍了现代微生物技术在白酒生产中的应用,将白酒酿造微生物学的理论知识与生产实践结合起来,对于白酒生产实践具有重要作用。书后另附录白酒酿造微生物学相关实验操作内容,便于读者开展相关试验。

本书可作为酿酒工程专业本科生及研究生的参考用书,也可供从事酿酒研究的科研人员及生产相关人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代白酒酿造微生物学/徐岩等著. —北京:科学出版社,2019.6

ISBN 978-7-03-058207-2

I. ①白… II. ①徐… III. ①白酒-酿造-微生物学 IV. ①TS262.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第141332号

责任编辑:王腾飞/责任校对:彭涛

责任印制:师艳茹/封面设计:许瑞

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年6月第一版 开本:787×1092 1/16

2019年6月第一次印刷 印张:28 1/4

字数:670 000

定价:398.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 作者简介



徐岩，发酵工学博士，教授、博士生导师。江南大学酿酒科学与酶技术中心主任，教育部长江学者与创新团队带头人，中国酿酒工业协会副理事长，中国酿酒工业协会白酒技术委员会副主任，中国蒸馏酒产业技术创新战略工作委员会理事长。

徐岩教授从事酿酒科学与工程及微生物发酵工学研究教学 32 年，首创提出的风味导向白酒酿造科学研究学术新思想和成果荣获 2013 年国家技术发明奖二等奖(白酒领域唯一)，引领白酒行业技术发展方向。率先采用现代风味化学理论对中国白酒各香型特征风味组分进行解析；集成现代组学技术对白酒酿造群体微生物结构与功能、群体微生物及其风味代谢机理开展系统解析，并形成提升和改造传统酿酒工艺的新技术，研究成果辐射全国，在几十家龙头白酒企业实现科技成果转化，推动了我国白酒产业技术升级。

徐岩教授先后主持国家“十三五”重点研发计划、国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家科技支撑计划、国家自然科学基金重点项目等国家级重大科研项目 18 项，在领域主要学术期刊发表高水平 SCI 论文 200 余篇，获授权国家发明专利 90 余项、国际专利 6 项。

## 序

据考古发现表明，酿酒是有着九千年历史的人类最早从事的生物技术，是人类最早掌握的发酵技术。我国是世界上最早将微生物进行富集，用于酿酒的国家之一。酿酒技艺作为中华文明的重要组成部分，延续数千年，至今仍然为中国人民美好生活做贡献。然而，数千年以来，我们将酿酒技艺看成是神秘的、不可解释的。直至近代我国微生物学研究先驱将西学（微生物学）引进我国，我们才开始了对数千年延续的传统酿造技艺蕴含的科学奥秘展开探索。微生物学之父路易·巴斯德正是从酒精发酵与乳酸发酵中受到启发，打开了通向微生物学世界的大门。对酿酒科学机理的解析，不仅具有现实意义，更重要的是，为我们研究微生物与人类的共进化，研究微生物菌群的社会学，提供了绝佳的素材。

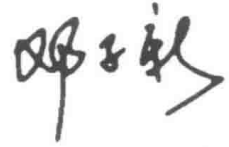
我国酿酒技艺不同于国外以纯种酵母为主体的发酵体系，无论是白酒还是酿造食品，均以自然接种、自然发酵的菌群酿造为主，参与微生物在多的达百种之上，形成的丰富的风味物质千种以上。并且，我国传统白酒酿造体系中蕴含着大量的可培养和未培养微生物，涉及霉菌、酵母、细菌和放线菌；有好氧菌、兼性菌和厌氧菌，种类丰富程度是世界酿造体系之最。这种微生物群体的多样性与我国幅员辽阔的气候带和多样性的生态相遇后不仅形成了各种酿造的工艺，而且造就出种类多样、风味独特的白酒珍品，更留下许多酿造科学问题。千种以上的白酒风味物质是什么，是如何产生，产生的微生物又是如何相互作用的？这些基本科学问题至今尚未完全解析。从微生物学研究角度而言，白酒微生物学研究的难度是巨大的。当我国白酒酿造技艺与现代微生物学、微生物组学相遇后，上述问题能得以逐步解析。

《现代白酒酿造微生物学》一书作者徐岩教授在白酒酿造机理方面深耕三十余载，采用现代科学方法与中国白酒独特酿造特点相结合，在白酒酿造菌群结构、白酒风味物质形成机理及其应用实践上取得了较大的突破，在国内外率先提出“风味导向”的学术思路和技术方法，使得白酒研究告别对千余种复杂风味组分难以入手的难题，全面引领白酒科技研究方向并上升到新的科学层次。曾几何时，人们对白酒酿造微生物的认识仅停留在单体微生物的生长发育、生理代谢方面，但近年来蓬勃发展的微生物生态学与微生物组学研究表明，不同类型的酿酒微生物之间在代谢层面、基因层面均存在着广泛的交流，白酒酿造微生物群体之间可以发生复杂的社会学行为。

该书内容丰富，涵盖了白酒酿造微生物的种类、基因组特征、风味物质产生微生物

代谢特征到发酵菌群的结构、功能和相互作用关系。希望该书的出版，能促进白酒酿造微生物学研究更上新台阶，希望白酒酿造微生物学研究能够进一步丰富微生物学和微生物组学的基本知识，也希望通过白酒酿造微生物研究，大力促进我国传统酿造产业技术的升级和用于现代生物技术产业的新型微生物资源、酶资源的开发。

中国科学院院士



2019年2月25日

# 前 言

自 1665 年英国人罗伯特·胡克发明显微镜开启人类对未知微观世界认识的几百年来,人类对微生物的认识从个体过渡到群体,研究方法也从细胞层面进入了分子生物学和组学的层面。从 1857 年法国人路易·巴斯德开始对葡萄酒发酵本质的认识开始,人们逐步认识和利用微生物创造了丰富多彩、风味独特的发酵食品。直到如今,微生物世界对人类始终充满着未知的神奇,吸引着人们不断去探索和开发。

白酒作为我国独特的发酵食品,占全球蒸馏酒的三分之一和我国整个食品产业千分之七的比重,已发展成全球规模最大、产值最高的蒸馏酒品类。其独特的生产工艺凝聚着我国古代劳动人民发明的,被誉为中国“第五大发明”的微生物制曲技术。纵观世界上所有饮料酒的生产,白酒酿造体系中的微生物种类最为复杂多样,微生物物种的多样性正是白酒风味多元化的密码。然而,目前人们对白酒酿造微生物、白酒风味及何种微生物如何产生何种风味物质的认识,仍然处在初级阶段。

白酒多采用自然接种的多菌种发酵方式进行生产,如传统经验式的手工生产模式。这类自然接种的微生物菌群发酵具有以下特征:①酿造微生物菌群多样化;②酿造微生物菌群演替阶段化;③微生物菌群功能定向进化;④酿造微生物菌群代谢产物多样化;⑤酿造过程为固态发酵。相较于其他食品微生物学,白酒酿造微生物学具有更为丰富的研究内容,尤其是在微生物菌群研究方面。白酒酿造微生物学研究包括白酒酿造体系中微生物菌群的物种类别、结构组成及其动态变化规律,以及菌群代谢与产风味物质机制。随着我国酿造产业改革的深入、国民对更优质酿造产品需求的提升,我国白酒产业正处于由传统酿造迈向现代化酿造的关键时期,面临着如何在传统技艺传承基础上进行重大创新的挑战。科学机制是技术创新的源泉,白酒酿造微生物学研究对于白酒产业改造升级、实现其可持续性发展具有重要意义,同时对于其他酿造食品产业的发展也具有一定借鉴价值。

在国家自然科学基金重点项目和国家高技术研究发展计划(863 计划)、国家重点研发计划等国家级科研项目的资助下,本书基于笔者从研究生开始长达三十多年在高校的白酒酿造领域探索研究以及在白酒行业、企业的合作研究与实践,系统阐述了白酒酿造微生物学的基础理论与应用研究进展。本书共分 6 章,其中第 1 章到第 4 章是白酒酿造微生物学的基础理论内容,主要介绍了白酒酿造微生物的多样性、功能基因组学以及微生物菌群结构演替规律及菌群互作机理,以深入认识白酒酿造的生物学机制,为科研和生产提供理论依据;第 5 章主要介绍了白酒酿造微生物代谢物及其风味化学,该部分内容将微生物代谢与白酒风味、品质有机联系起来,以促进对白酒酿造微生物功能的进一步认识;第 6 章主要介绍了现代微生物技术在白酒生产中的应用,结合了白酒酿造微生物学的理论知识,对于指导白酒生产实践具有重要参考价值。书后附录为白酒酿造微生物学相关的实验操作内容,便于读者开展相关实验。

本书在编写过程中得到了多位教师与研究生的协助。其中，任聪、张红霞、高江婧协助参与了第1章和第4章部分内容整理工作；杜海、张红霞协助参与了第2章的整理；吴群、王石垒协助参与了第3章内容的整理；吴群、闫岩、靳光远协助参与了第5章、第6章和附录的整理。此外，还要感谢王海燕、陈双、黄永光、葛向阳、张丽杰等多位教师及相关研究生在本书编写过程中给予的帮助。

由于白酒酿造微生物世界的复杂性，当前我们对其认识还不够完整。近年来该领域发展极为迅猛，本书还会存在遗憾和不足，我们真诚欢迎读者给予批评指正。

徐 岩

于蠡湖畔

二〇一八年十一月二十八日

# 目 录

序

前言

第1章 概论	1
1.1 白酒酿造体系的基本特征	1
1.1.1 白酒酿造微生物菌群及相互作用多样化特征	2
1.1.2 白酒酿造微生物菌群演替阶段化特征	3
1.1.3 白酒酿造微生物菌群功能定向进化特征	3
1.1.4 白酒酿造微生物代谢产物多样化特征	4
1.1.5 白酒酿造的固态发酵特征	4
1.2 白酒酿造微生物学的研究内容	6
1.2.1 白酒酿造微生物的物种类别、结构组成及其动态变化规律研究	6
1.2.2 白酒酿造核心微生物菌群及其功能研究	7
1.2.3 重要风味化合物的合成途径及代谢调控机理研究	7
1.2.4 酿造过程有害微生物控制及生态效应研究	7
1.3 白酒酿造微生物学的研究现状与发展趋势	8
1.3.1 白酒酿造微生物学的研究历程	8
1.3.2 白酒酿造微生物学研究的现状	11
1.3.3 白酒酿造微生物学的发展趋势	16
1.4 国外酿造微生物学研究进展	18
1.4.1 微生物组学技术在发酵食品风味和品质研究中的应用	18
1.4.2 单菌层面的酿造功能微生物研究与应用	19
1.4.3 多菌种发酵微生物的应用	19
参考文献	21
第2章 白酒酿造微生物的多样性	26
2.1 霉菌	28
2.1.1 霉菌的种属多样性	29
2.1.2 霉菌的菌落形态及细胞形态	29
2.1.3 霉菌的功能特性	31
2.1.4 主要功能霉菌的生理特性	33
2.2 酵母	41
2.2.1 酵母的种属多样性	41
2.2.2 酵母的菌落形态及细胞形态	43
2.2.3 酵母的功能特性	45

2.2.4	主要功能酵母的生理特性 .....	46
2.3	细菌 .....	53
2.3.1	芽孢杆菌 .....	54
2.3.2	乳酸菌 .....	66
2.3.3	梭菌属 .....	70
2.4	放线菌 .....	80
2.4.1	放线菌的种属多样性 .....	81
2.4.2	放线菌的菌落形态及细胞形态 .....	82
2.4.3	放线菌的功能特性 .....	82
	参考文献 .....	86
<b>第3章</b>	<b>白酒酿造微生物功能基因组学 .....</b>	<b>96</b>
3.1	华根霉功能基因组学 .....	97
3.1.1	华根霉 CCTCC M201021 全基因组解析 .....	98
3.1.2	华根霉 CCTCC M201021 糖化酶的碳水化合物活性酶活性分析 .....	102
3.1.3	基于基因组信息的根霉 CCTCC M201021 脂肪酶比较分析 .....	103
3.1.4	华根霉 CCTCC M201021 真菌毒素相关的安全性分析 .....	104
3.2	酿酒酵母功能基因组学 .....	107
3.2.1	酿酒酵母 MT1 菌株的碳源和氮源同化特征 .....	108
3.2.2	MT1 全基因组解析 .....	109
3.2.3	MT1 转录组特征 .....	117
3.2.4	MT1 蛋白质组特征 .....	121
3.2.5	MT1 的生理代谢机制 .....	125
3.3	芽孢杆菌的功能基因组学 .....	126
3.3.1	地衣芽孢杆菌 CGMCC 3963 全基因组解析 .....	127
3.3.2	地衣芽孢杆菌 CGMCC 3963 的转录组特征 .....	131
3.3.3	解淀粉芽孢杆菌功能基因组学 .....	137
3.4	梭菌功能基因组学 .....	142
3.4.1	克氏梭菌功能基因组学 .....	142
3.4.2	丁酸梭菌功能基因组学 .....	144
3.4.3	酪丁酸梭菌功能基因组学 .....	145
3.5	耐酸乳杆菌功能基因组学 .....	145
	参考文献 .....	145
<b>第4章</b>	<b>白酒酿造微生物菌群的演替规律及相互作用 .....</b>	<b>154</b>
4.1	微生物菌群的基本概念 .....	154
4.1.1	微生物菌群和微生物组 .....	154
4.1.2	白酒酿造微生物菌群的生态学特征 .....	156
4.1.3	影响微生物菌群结构与演替的因素 .....	158
4.2	白酒酿造微生物菌群的结构与动态演替规律 .....	165

4.2.1	大曲微生物菌群结构与演替规律	166
4.2.2	酒醅微生物菌群结构与演替规律	186
4.2.3	窖泥微生物菌群结构与演替规律	227
4.3	微生物种群之间的相互作用关系	237
4.3.1	不同种类酵母之间的相互作用关系	240
4.3.2	酵母与乳酸菌的相互作用关系	244
4.3.3	酵母与芽孢杆菌之间的相互作用关系	253
4.3.4	酵母与霉菌的相互作用关系	258
4.3.5	芽孢杆菌和链霉菌之间的相互作用关系	264
	参考文献	270
<b>第5章</b>	<b>白酒微生物代谢物及其对白酒品质的影响</b>	<b>280</b>
5.1	白酒微生物代谢物及其风味特征	285
5.1.1	醇类化合物	285
5.1.2	有机酸类化合物	292
5.1.3	酯类化合物	298
5.1.4	芳香族化合物	302
5.1.5	萜烯类化合物	307
5.1.6	吡嗪类化合物	323
5.1.7	硫化物	325
5.2	白酒微生物代谢内源安全性物质	327
5.2.1	氨基甲酸乙酯	328
5.2.2	生物胺	328
5.2.3	真菌毒素	329
	参考文献	333
<b>第6章</b>	<b>现代微生物技术在白酒生产中的应用</b>	<b>342</b>
6.1	酿造微生物在浓香型白酒大曲生产中的应用	343
6.1.1	强化大曲发酵过程的理化与微生物指标	343
6.1.2	强化大曲风味物质	348
6.1.3	强化大曲在生产中的应用	348
6.2	酿造微生物在小曲清香型白酒中的生产应用	350
6.2.1	小曲中微生物菌群的组成	351
6.2.2	酿造过程中微生物菌群的组成	352
6.2.3	酿造过程微生物的筛选与功能分析	354
6.2.4	小曲功能微生物纯种组合发酵	356
6.3	酿造微生物在大曲清香型白酒生产中的应用	358
6.3.1	优良酵母的筛选与功能分析	359
6.3.2	优良酵母在生产中的应用	364
6.4	酿造微生物在芝麻香型白酒生产中的应用	367

6.4.1	微生物相互作用对芝麻香型白酒酿造的影响	367
6.4.2	功能微生物组合发酵及其在生产中的应用	376
6.4.3	芝麻香型白酒的机械化、自动化与智能化改造	385
6.5	梭菌在窖泥生产中的应用	386
6.5.1	梭菌菌液对老化窖泥进行保养	387
6.5.2	运用梭菌菌液制作人工窖泥	387
6.6	土味素抑制菌在大曲生产中的应用	390
6.6.1	组合菌对大曲产土味素白色链霉菌数量的影响	390
6.6.2	组合菌对大曲中土味素物质含量的影响	393
6.6.3	组合菌对大曲中其他挥发性风味物质含量的影响	393
6.6.4	组合菌对大曲理化性质的影响	395
	参考文献	397
附录	现代白酒酿造微生物学实验	399
实验一	白酒样品微生物分离培养实验方法	399
实验二	高产乙醇酵母的筛选	401
实验三	高产酯霉菌的筛选	402
实验四	产淀粉酶的芽孢杆菌的筛选	403
实验五	窖泥中厌氧丁酸菌与己酸菌的分离	405
实验六	微生物形态观察	406
实验七	微生物定量检测	412
实验八	微生物生理学实验	415
实验九	微生物种属鉴定及系统进化树构建	419
实验十	微生物环境耐受性实验	421
实验十一	微生物产酶活力的测定	423
实验十二	酵母发酵力的测定	427
实验十三	微生物挥发性代谢产物的测定	429
实验十四	微生物保藏	430
实验十五	微生物菌种扩大培养技术	435
实验十六	酒醅中基因组 DNA 提取	436
实验十七	微生物荧光定量 PCR 技术	437

# 第 1 章 概 论

白酒是深受中国人民喜爱、风味独特的发酵食品，是最具有“中国基因”又享誉全球的酒精饮料。作为东方发酵食品的典型代表，白酒与中华民族千年相伴，其酿造技术是我国劳动人民数千年来勤劳智慧的结晶，传承着璀璨的中华酿造文化。同时，白酒行业还是我国传统优势食品行业，关乎国计民生。白酒固态发酵的独特性与复杂性积淀了丰富的科技内涵，其酿造体系与技艺是中国非遗国粹之一。

蒸馏酒的酿造是利用微生物发酵，经过微生物代谢作用将酿造原料中的糖或淀粉转化为酒精，同时生成微量但却对风味特征起决定性作用的风味成分。如何将淀粉质原料转化为酵母能够利用的单糖，东西方分别采用了不同的酿造方法和策略：西方利用糖化酶（如来自麦芽）降解淀粉，而东方则利用曲来实现淀粉的降解。对于获得单糖后的发酵过程，东西方酿造也采用了截然不同的方式：西方多直接利用酿酒酵母进行酒精发酵，而东方利用多菌种的曲作为接种剂，并网罗酿造环境中的微生物菌群进行固态发酵。也就是说，西方蒸馏酒酿造采用纯种微生物进行发酵，而传统东方蒸馏酒（如最为典型的白酒）酿造利用微生物菌群进行发酵。白酒酿造微生物主要包括霉菌、酵母和细菌等三大类型，种类在 300 种以上。经固态发酵之后，微生物菌群的代谢产物直接作为白酒风味物质或作为风味物质前体，经蒸馏过程实现酒精和风味物质的提取与分离，形成白酒原酒，再经贮存、勾兑生产出合格的产品。因此可以说白酒的风味和风格形成的关键就是微生物菌群的生命活动。因此，研究白酒酿造过程中微生物菌群的组装、生长和代谢规律的目的在于不仅仅是探索解析白酒酿造机制，也是实现白酒酿造现代化的科学基础。

白酒酿造微生物学是食品微生物学的重要组成部分，是专门研究白酒酿造微生物菌群结构与功能、微生物生理代谢特征和相互作用，以及微生物代谢与风味物质形成关系的微生物学分支学科。随着生命科学的快速发展，白酒酿造微生物学研究与其他微生物研究相关学科形成了紧密的交叉关系，包括传统微生物学、食品微生物学、微生物生态学、基因组学、微生物生理学，以及近年蓬勃发展起来的微生物组学。因此，白酒酿造微生物学研究不仅有助于我们探索和认识我国白酒酿造独特性的科学机制，促进传统酿造产业的技术革新和产业升级，此外还可以充分利用白酒酿造微生物资源及其独特酿造机制，促进我国工业生物技术的大力发展。

## 1.1 白酒酿造体系的基本特征

白酒的生产主要采用固态发酵的方式，固态酿造基质的含水量介于 30%~40%（制曲）到 50%~60%（酿造发酵）之间，发酵过程由多种微生物参与，且糖化与发酵过程同步进行。白酒的酿造与西方蒸馏酒的酿造有很多不同之处（Jin, et al., 2017）（图 1-1）：在酿造方式上，西方蒸馏酒采用先糖化后发酵的方式，而白酒生产则采用边糖化边发酵

的方式；从过程控制来讲，西方的发酵过程比较容易控制，而固态双边发酵的控制难度较大。其次，西方蒸馏酒一般都是纯种发酵，而白酒酿造则是多菌种的群体微生物发酵，对群体微生物在生态系统中的来源、组装及演替规律的研究——恰恰是现代微生物领域研究的国际前沿问题。三是与西方的液态发酵方式相比，白酒采用固态发酵，发酵周期长，富集得到多种多样的微生物代谢产物，加上独特的固态蒸馏提取工艺，白酒形成了不同于西方蒸馏酒的独特风味和口感。具体而言，白酒酿造体系具有以下特征。

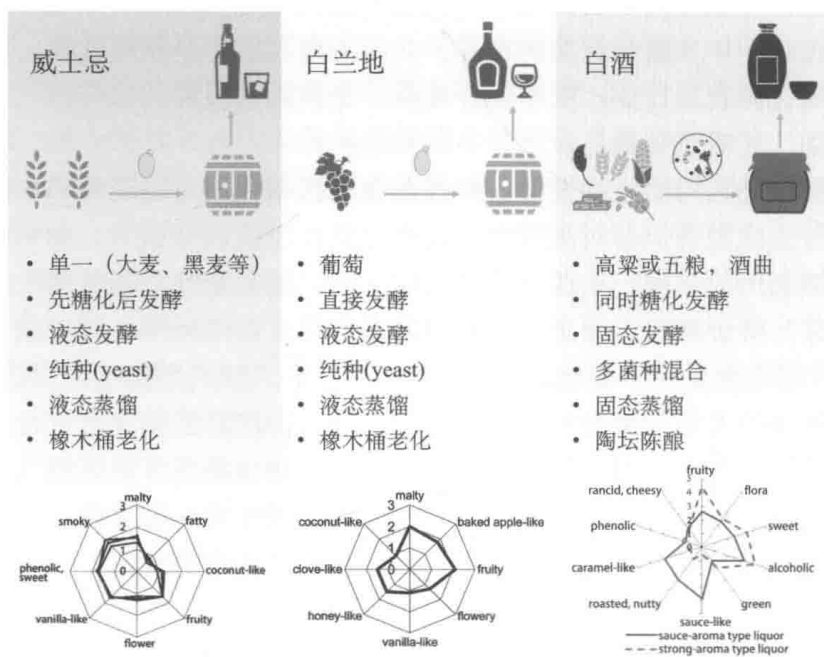


图 1-1 威士忌、白兰地和白酒之间的差异

### 1.1.1 白酒酿造微生物菌群及相互作用多样化特征

传统白酒酿造微生物来源于开放环境接种，包括种曲 (Zhang, et al., 2016)、生产原料、环境 (Wang, et al., 2018)、空气 (胡佳林, 2008) 和发酵容器 (如窖池) 等，酒曲、酒醅和窖泥等酿造区系孕育出丰富的微生物资源。随着高通量测序技术的广泛应用，越来越多的酿造微生物被人们所认识，如使用扩增子测序技术，在清香型酒醅中共检测到 263 个细菌属，201 个真菌属 (王雪山, 2018)，这远超出了传统认知。

酿造微生物遗传多样性 (Pennisi, 2005) 是菌群多样性表现的另一重要方面。白酒酿造体系中具有生产性能各异同种菌株，不同酿造体系中可能存在着代谢特征与生产性能各异的菌株类型。这可能因为，白酒生产工艺的差异对菌株进行了定向选择，遗传多样性越高或遗传变异越丰富，其对环境变化的适应能力就越强 (Wang, et al., 2012)。

多菌种的酿造微生物在开放环境中形成极其复杂的菌群结构，群系之间及其内部物种之间存在着各种各样的相互作用关系，对维持白酒酿造系统的稳定性及功能提供保障，最终对白酒产、质量产生重要影响 (Wang, et al., 2012)。基于酵母的核心功能，酵母与酵母 (孔宇, 2014)、酵母与细菌 (张荣, 2014)、酵母与霉菌 (陈笔, 2014) 等之间存在广

泛的相互作用模式和机制。微生物间相互作用是群体微生物代谢特征不同于组成微生物代谢特征简单相加的根本原因,微生物间通过彼此影响,改变着菌群内部成员微生物的生长及其代谢特征,继而改变微生物群体的整体结构与功能,最终影响发酵食品的品质(孟醒等,2015)。

### 1.1.2 白酒酿造微生物菌群演替阶段化特征

虽然白酒固态酿造的微生物源于自然接种,且在发酵过程中不对微生物进行人为干预,但从代谢物(白酒风味物质)角度来看,这种发酵系统却是可以进行高度重复的。通过研究原位酿造群落的物种(甚至菌株)多样性和功能潜能,并揭示其群落形成的时序特征,能帮助我们更好地理解酿造过程中微生物时序演替的原因,利于从接种源头控制产品品质。白酒酿造过程中的微生物源于自然环境,但其丰度远高于自然环境,解析白酒固态酿造中微生物菌群演替的特征,剖析动态演变的原因,同时可以加深我们对微生物菌群组装模式和功能执行背后潜在原理的理解。

从制曲到蒸馏,白酒酿造过程可长达一年甚至更长时间。一般大曲制造一个月,储藏三到六个月;主发酵一至两个月甚至更长。就主发酵过程而言,可分为两个阶段:好氧到微好氧的产醇阶段,以及厌氧的产酸阶段。在产醇阶段,由于氧气的存在,多种类型的酵母可以大量繁殖,该过程迅速消耗氧气,当氧气消耗完毕后酵母进行无氧呼吸,产生乙醇;当乙醇浓度累积到一定程度时,乳酸菌等细菌因能耐受较高浓度的乙醇而成为群落中的优势微生物,发酵体系由“产醇”过渡到“产酸”阶段。产酸过程对白酒酿造过程的正常进行以及白酒风味化合物的形成具有重要的作用,该过程中的功能微生物为各种类型的乳酸菌和其他多种类型的细菌,主要代谢产物为乳酸和其他微量风味化合物。这种由细菌驱动的产酸发酵过程是中国固态酿造区别于西方液态酿造的重要特征(任聪等,2017)。白酒酿造微生物菌群演变受到微生物代谢产物的反馈作用,微生物菌群与代谢产物的相互作用推动着白酒酿造过程中微生物的阶段化演变(Song, et al., 2017)。

### 1.1.3 白酒酿造微生物菌群功能定向进化特征

酿造环境中多种微生物之间存在相互作用,这些微生物在长期自然驯化过程中借助复杂的微生物相互作用实现了功能定向进化。例如,从大曲中分离得到天然高产表面活性素的解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) MT45,其高产表面活性素的性能是由复杂相互作用驱动的功能定向进化产物。与自然环境中芽孢杆菌合成脂肽作为信号分子诱导生物膜形成的功能不同,解淀粉芽孢杆菌 MT45 高效合成脂肽而不形成生物膜,脂肽的主要功能表现为抗菌功效,以抵抗外界不良酿造微生物入侵,维持大曲及酿造环境中微生物群体结构与功能的稳定(郅岩,2017)。此外,解淀粉芽孢杆菌 MT45 表现出对发酵有害微生物(桑氏链霉菌,*Streptomyces sampsonii*)显著的抑制作用,营养和生存空间竞争、表面活性素等多种脂肽协同抗菌作用是芽孢杆菌抑制链霉菌生长及不良风味物质土味素积累的重要作用模式。

大曲生产及白酒酿造环境中微生物菌群相互作用对微生物产生定向进化和加速作用,产生了从普通自然环境中难以获得的优质微生物资源。这种天然进化模式,为微生

物菌种改造和功能提升提供了新的研究策略和思路。

### 1.1.4 白酒酿造微生物代谢产物多样化特征

目前已知白酒中的风味物质组分在 1500 种以上 (Jin, et al., 2017), 远高于其他任何蒸馏酒。风味化合物主要来源于微生物转化原料的代谢活动, 也有来源于微生物代谢产物在整个酿造生产过程中的化学反应 (图 1-2), 这些物质在酒醅中累积, 经蒸馏、储存等生产环节最终进入白酒酒体中。

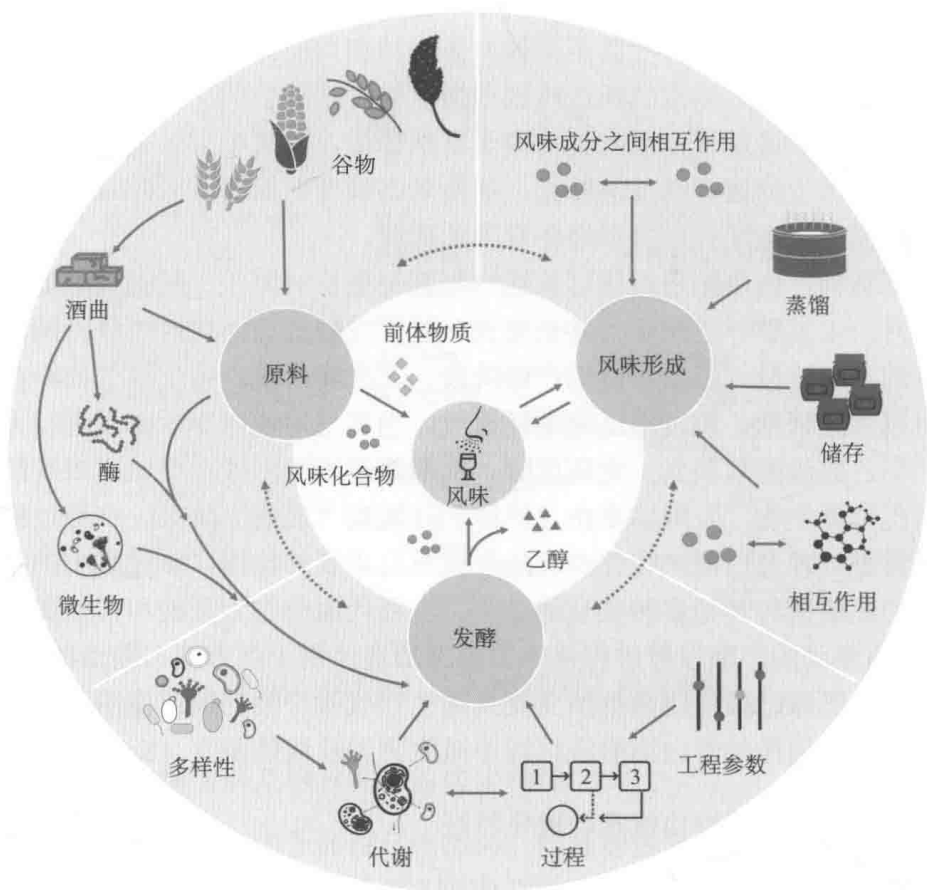


图 1-2 影响白酒风味形成的因素 (微生物代谢多样化和风味物质之间的相互作用)

白酒酿造过程中微生物种类的多样性是白酒风味多元化的基础, 图 1-2 表达了微生物代谢多样化和风味物质之间的相互作用。如酵母代谢产生乙醇; 乳酸菌产生乳酸; 醋酸菌、异型发酵乳酸菌、梭菌等多种类型的微生物产生乙酸; 梭菌还产生丁酸和己酸等短中链脂肪酸; 酵母菌产生酯类, 且不同酵母菌的产酯能力不同。芽孢杆菌等微生物合成乙偶姻、4-甲基吡嗪等。此外, 还有更多代谢产物合成微生物及其代谢途径有待发现。

### 1.1.5 白酒酿造的固态发酵特征

固态发酵是白酒酿造区别于西方蒸馏酒酿造的重要特征之一 (图 1-3, 图 1-4)。白酒固态发酵中粮食谷物等为微生物生长代谢提供底物, 同时这些固态基质又是微生物生

长的附着物。发酵基质的不同，造成微生物生理活动的差异，加之白酒发酵时间远长于西方蒸馏酒，是造成白酒风味较西方蒸馏酒更丰富的重要原因。

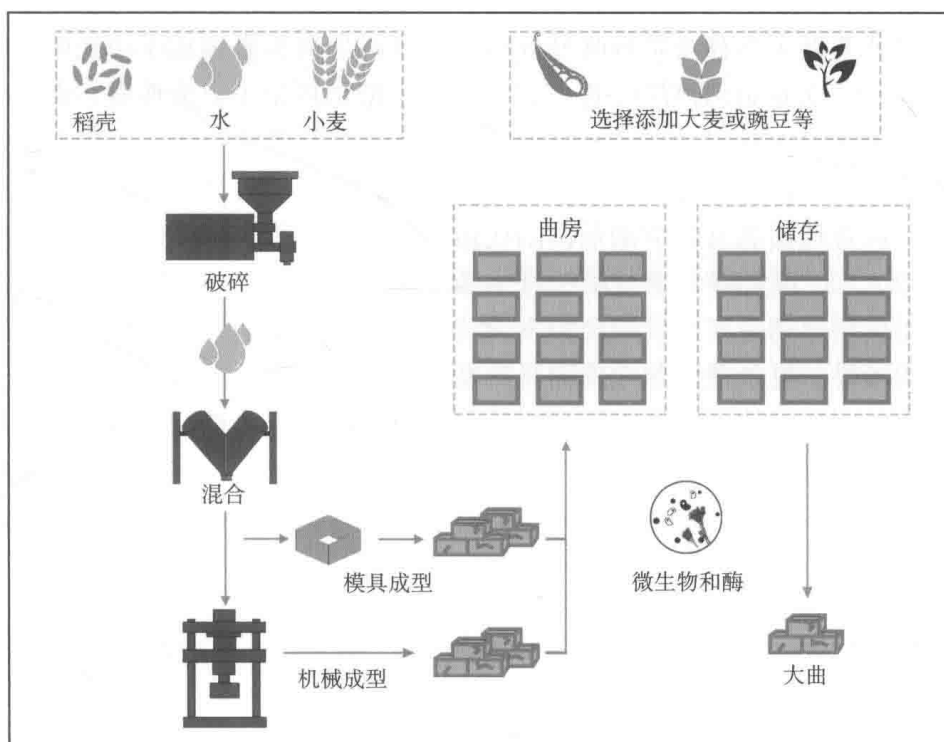


图 1-3 大曲制作过程

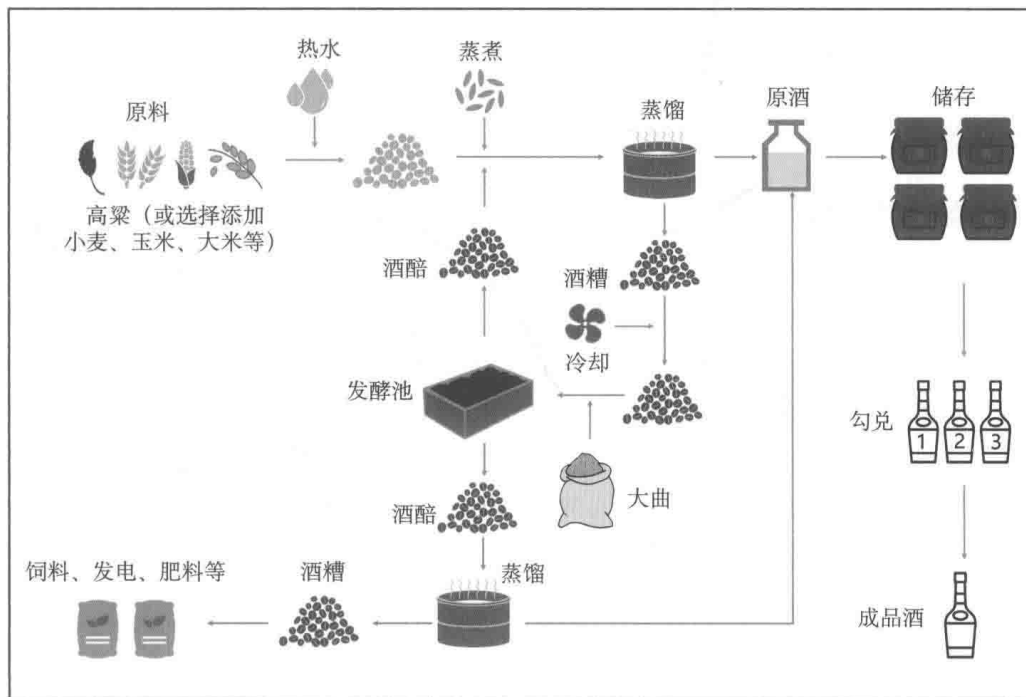


图 1-4 白酒生产过程简易流程图