

现代食品深加工技术丛书
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

乳酸菌食品加工技术

孟祥晨 李艾黎 焦月华 等 编著



科学出版社

现代食品深加工技术丛书

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

乳酸菌食品加工技术

孟祥晨 李艾黎 焦月华 等 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

乳酸菌是一类具有重要经济价值的微生物，在食品领域被广泛应用于乳制品、肉制品等的生产，而且目前以乳酸菌为基础生产的乳酸菌粉、颗粒及冲剂等产品也越来越多，因此所涉及的加工技术也越来越受重视。乳酸菌食品加工需要注意有效乳酸菌数量的保持，因此加工技术中涉及一些关键的步骤。本书集中展现了各类乳酸菌食品的生产技术，既包括传统的乳酸菌发酵乳制品、肉制品、饮料，也包括新型的乳酸菌粉、颗粒、冲剂等的生产技术，还对乳酸菌食品的安全性及所涉及的标准和法规进行了论述，旨在促进我国乳酸菌食品产业的健康发展。

本书适合从事乳酸菌食品加工及功能性食品研究开发的科研人员和相关的生产企业管理与生产人员阅读，也可作为高等学校、科研院所食品科学专业研究生及教师的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

乳酸菌食品加工技术 / 孟祥晨等编著. —北京：科学出版社，2019.1

（现代食品深加工技术丛书）

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-060314-2

I. ①乳… II. ①孟… III. ①乳酸菌发酵 IV. ①TS252.42

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 297829 号

责任编辑：贾超宁倩 / 责任校对：杜子昂

责任印制：张伟 / 封面设计：东方人华

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本：720×1000 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张：21

字数：400 000

定价：128.00 元

（如有印装质量问题，我社负责调换）

丛书编委会

总 主 编：孙宝国

副总主编：金征宇 罗云波 马美湖 王 强

编 委（以姓名汉语拼音为序）：

毕金峰	曹雁平	邓尚贵	高彦祥	郭明若
哈益明	何东平	江连洲	孔保华	励建荣
林 洪	林亲录	刘宝林	刘新旗	陆启玉
孟祥晨	木泰华	单 杨	申铉日	王 硕
王凤忠	王友升	谢明勇	徐 岩	杨贞耐
叶兴乾	张 敏	张 懋	张 偲	张春晖
张丽萍	张名位	赵谋明	周光宏	周素梅

秘 书：贾 超

联系方式

电话：010-64001695

邮箱：jiachao@mail.sciencep.com

丛 书 序

食品加工是指直接以农、林、牧、渔业产品为原料进行的谷物磨制、食用油提取、制糖、屠宰及肉类加工、水产品加工、蔬菜加工、水果加工、坚果加工等。食品深加工其实就是食品原料进一步加工，改变了食材的初始状态，例如，把肉做成罐头等。现在我国有机农业尚处于初级阶段，产品单调、初级产品多；而在发达国家，80%都是加工产品和精深加工产品。所以，这也是未来一个很好的发展方向。随着人民生活水平的提高、科学技术的不断进步，功能性的深加工食品将成为我国居民消费的热点，其需求量大、市场前景广阔。

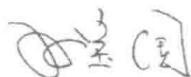
改革开放 30 多年来，我国食品产业总产值以年均 10% 以上的递增速度持续快速发展，已经成为国民经济中十分重要的独立产业体系，成为集农业、制造业、现代物流服务业于一体的增长最快、最具活力的国民经济支柱产业，成为我国国民经济发展极具潜力的、新的经济增长点。2012 年，我国规模以上食品工业企业 33692 家，占同期全部工业企业的 10.1%，食品工业总产值达到 8.96 万亿元，同比增长 21.7%，占工业总产值的 9.8%。预计 2020 年食品工业总产值将突破 15 万亿元。随着社会经济的发展，食品产业在保持持续上扬势头的同时，仍将有很大的发展潜力。

民以食为天。食品产业是关系到国民营养与健康的民生产业。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，人们对食品工业提出了更高的要求，食品加工的范围和深度不断扩展，所利用的科学技术也越来越先进。现代食品已朝着方便、营养、健康、美味、实惠的方向发展，传统食品现代化、普通食品功能化是食品工业发展的大趋势。新型食品产业又是高技术产业。近些年，具有高技术、高附加值特点的食品精深加工发展尤为迅猛。国内食品加工中小企业多、技术相对落后，导致产品在市场上的竞争力弱。有鉴于此，我们组织国内外食品加工领域的专家、教授，编著了“现代食品深加工技术丛书”。

本套丛书由多部专著组成。不仅包括传统的肉品深加工、稻谷深加工、水产品深加工、禽蛋深加工、乳品深加工、水果深加工、蔬菜深加工，还包含了新型食材及其副产品的深加工、功能性成分的分离提取，以及现代食品综合加工利用新技术等。

各部专著的作者由工作在食品加工、研究开发第一线的专家担任。所有作者都根据市场的需求，详细论述食品工程中最前沿的相关技术与理念。不求面面俱到，但求精深、透彻，将国际上前沿、先进的理论与技术实践呈现给读者，同时还附有便于读者进一步查阅信息的参考文献。每一部对于大学、科研机构的学生或研究者来说，都是重要的参考。希望能拓宽食品加工领域科研人员和企业技术人员的思路，推进食品技术创新和产品质量提升，提高我国食品的市场竞争力。

中国工程院院士



2014年5月

前 言

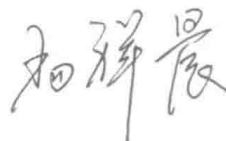
乳酸菌是一类具有重要经济价值的微生物,广泛应用于发酵食品、保健品、医药、饲料等的生产。与该类微生物相关的研发领域非常广阔,既涵盖乳酸菌分子生物学和生理学等方面的基础理论研究,也包括如何提高乳酸菌在发酵中的生产性能等方面的应用研究。在过去几十年中,乳酸菌相关研究取得了突飞猛进的进展。2001年,随着世界范围微生物组学研究的发展,第一株乳酸菌的全基因组测序工作完成,标志着基础理论研究开始进入基因组和功能基因组时期。之后,相关研究呈井喷之势,组学技术广泛应用于乳酸菌研究,揭示了乳酸菌各种生产性状的遗传特点。我们课题组在2009年编写了《乳酸菌与乳品发酵剂》一书,重点讨论了乳酸菌的遗传与代谢特点,以及乳酸菌发酵剂制备的相关技术。

2016年5月13日,美国正式宣布启动“国家微生物组计划”,以乳酸菌为代表的益生菌受到异常关注,随着对乳酸菌功能性质的深入了解,以它们为基础生产的乳酸菌食品将会越来越多,消费量也会大大增加。乳酸菌食品既包括传统的发酵食品,如发酵乳制品、发酵肉制品、发酵蔬菜等,也包括一些新型的产品形式,如乳酸菌粉、颗粒、冲剂等。生产乳酸菌食品时的工艺会影响活乳酸菌的数量,进而影响其功能的发挥,因此在不同食品基质中乳酸菌的生长特性、抗逆性能、合适的加工工艺是需要关注的重点。所以编写一本系统地归纳总结相关的研究成果,介绍最新信息和加工技术的书籍,对于促进乳酸菌食品的健康发展具有重要意义。

本书在内容设置方面,主要包括乳酸菌粉及片剂,乳酸菌发酵乳制品、植物性产品、肉制品,含乳酸菌饮料、食品和保健食品等生产中涉及的关键加工技术,其中最为重要的是活菌保持技术,最后非常详细地论述了乳酸菌食品的安全性问题,以及乳酸菌食品所涉及的标准和法规。本书部分内容是我们在该领域的多年研究成果,部分内容则是归纳和总结了国内外相关学者的研究成果,并在每章的后面列出了主要的参考文献。

全书编写分工如下：孟祥晨和李欣芮负责编写第 1 章，李艾黎负责编写第 2、3 章，孟祥晨和孙思睿负责编写第 4、5 章，孟祥晨和梁玉负责编写第 6 章，焦月华负责编写第 7 章，孟祥晨和赵鹏昊负责编写第 8 章，全书由孟祥晨教授统稿。

由于作者学识和水平有限，书中难免存在纰漏，敬请读者批评指正，以便我们在今后的再版中改正。



2019 年元月于哈尔滨

目 录

第 1 章 乳酸菌粉及片剂加工技术	1
1.1 乳酸菌菌株的选择	1
1.1.1 对乳酸菌菌株的一般要求	1
1.1.2 乳酸菌的来源	8
1.2 乳酸菌粉加工技术	12
1.2.1 乳酸菌的高密度发酵	12
1.2.2 菌体的分离与收集	19
1.2.3 菌体的干燥	21
1.3 乳酸菌片剂的加工方法	30
1.3.1 概述	30
1.3.2 乳酸菌片剂加工用辅料	31
1.3.3 乳酸菌片剂的加工	37
参考文献	42
第 2 章 乳酸菌发酵乳制品加工技术	44
2.1 酸奶加工技术	44
2.1.1 酸奶发酵剂用乳酸菌	44
2.1.2 乳酸菌发酵特性的评价	48
2.1.3 乳酸菌抗噬菌体机制	54
2.1.4 益生菌酸奶	55
2.2 干酪加工技术	56
2.2.1 用于干酪加工的乳酸菌	57
2.2.2 乳酸菌在干酪生产中的作用	59
2.2.3 影响干酪中乳酸菌生长的因素	64
2.2.4 乳酸菌自溶	66
2.2.5 乳酸菌在干酪中的应用实例	67
2.3 含乳酸菌奶粉加工技术	69
2.3.1 乳酸菌在婴幼儿配方奶粉中的应用	69
2.3.2 乳酸菌在酸奶粉生产中的应用	73
参考文献	76

第3章 乳酸菌发酵植物性产品加工技术 ·····	79
3.1 蔬菜类发酵食品加工技术·····	79
3.1.1 概述·····	79
3.1.2 发酵蔬菜的微生物多样性·····	83
3.1.3 乳酸菌对发酵蔬菜制品品质的影响·····	85
3.1.4 发酵蔬菜用乳酸菌发酵剂的开发与应用·····	88
3.2 大豆类发酵食品加工技术·····	89
3.2.1 概述·····	89
3.2.2 乳酸菌在传统发酵豆制品中的应用·····	93
3.2.3 新型发酵豆制品·····	103
3.3 乳酸菌在谷类食品发酵中的应用·····	105
3.3.1 乳酸菌在发酵酸面团中的应用·····	105
3.3.2 乳酸菌在发酵米粉中的应用·····	111
3.3.3 乳酸菌在发酵黏豆包中的应用·····	113
参考文献·····	114
第4章 乳酸菌发酵肉制品加工技术 ·····	116
4.1 发酵肉制品概述及发酵相关机理·····	116
4.1.1 发酵肉制品概述·····	116
4.1.2 肉制品发酵过程中的主要变化·····	119
4.1.3 发酵肉制品常用的发酵剂微生物·····	121
4.1.4 发酵剂的选择标准·····	123
4.2 发酵香肠加工技术·····	126
4.2.1 概述·····	126
4.2.2 发酵香肠的一般生产工艺·····	128
4.2.3 发酵香肠在发酵成熟过程中的理化变化·····	133
4.2.4 发酵香肠的安全性·····	135
4.3 酸肉加工技术·····	136
4.3.1 酸肉的一般生产工艺·····	137
4.3.2 酸肉风味形成机理·····	138
4.3.3 乳酸菌及其他微生物在酸肉中的作用·····	140
4.3.4 酸肉的安全性与控制·····	142
参考文献·····	144
第5章 含乳酸菌饮料加工技术 ·····	147
5.1 乳酸菌发酵乳饮料加工技术·····	147
5.1.1 概述·····	147
5.1.2 生产乳酸菌发酵乳饮料常用的原料·····	148

5.1.3	乳酸菌发酵乳饮料的基本生产工艺	152
5.1.4	乳酸菌发酵乳饮料常见的质量问题及控制措施	154
5.2	发酵型植物蛋白饮料加工技术	157
5.2.1	概述	157
5.2.2	发酵型植物蛋白饮料中的原辅料	158
5.2.3	发酵型植物蛋白饮料加工工艺	163
5.2.4	发酵型植物蛋白饮料中影响产品质量的因素及防控措施	170
5.3	其他乳酸菌发酵饮料	173
5.3.1	发酵型谷物饮料	173
5.3.2	发酵型果蔬饮料	175
	参考文献	179
第 6 章	乳酸菌食品及保健品的加工技术	182
6.1	乳酸菌微胶囊化技术	182
6.1.1	乳酸菌微胶囊化方法的选择依据	183
6.1.2	乳酸菌微胶囊化时壁材的选择	184
6.1.3	乳酸菌微胶囊的制备技术	186
6.2	微胶囊化乳酸菌的质量表征及储存稳定性	190
6.2.1	微胶囊化乳酸菌的质量表征	190
6.2.2	乳酸菌微胶囊的储存稳定性	193
6.3	乳酸菌微胶囊在食品中的应用	195
6.3.1	乳酸菌微胶囊在烘焙食品中的应用	195
6.3.2	乳酸菌微胶囊在肉类食品中的应用	195
6.3.3	乳酸菌微胶囊在果蔬类食品中的应用	196
6.3.4	乳酸菌微胶囊在乳制品中的应用	197
6.3.5	乳酸菌微胶囊在其他食品中的应用	198
6.4	其他含乳酸菌产品的加工技术	199
6.4.1	益生菌酿造产品加工技术	199
6.4.2	益生菌冰淇淋加工技术	202
6.4.3	益生菌糖果加工技术	204
	参考文献	206
第 7 章	乳酸菌食品的安全性	210
7.1	菌株的明确鉴定	210
7.1.1	生化特征鉴定方法	213
7.1.2	分子生物学技术相关的鉴定方法	214
7.2	菌株安全性的体外评价	221
7.2.1	毒力因子	222

7.2.2	抗生素抗性评价	233
7.2.3	有害代谢活性分析	247
7.2.4	溶血试验	248
7.3	菌株安全性的体内评价	248
7.3.1	菌株安全性的动物试验	248
7.3.2	菌株安全性的临床试验	264
7.4	乳酸菌产品的安全性评价	272
	参考文献	276
第 8 章	乳酸菌食品标准与法规	279
8.1	与乳酸菌相关的标准与法规	279
8.1.1	概述	279
8.1.2	食品加工用乳酸菌	281
8.2	与乳酸菌食品相关的标准与法规	295
8.2.1	乳酸菌发酵乳制品相关标准	295
8.2.2	乳酸菌发酵植物性产品相关标准	297
8.2.3	乳酸菌发酵肉制品相关标准	299
8.2.4	乳酸菌饮料相关标准	306
8.2.5	其他含乳酸菌产品相关标准	308
	参考文献	317
索引		320

第 1 章 乳酸菌粉及片剂加工技术

乳酸菌粉及片剂是指乳酸菌（lactic acid bacteria）通过活化、培养、发酵后，再采用冷冻干燥或喷雾干燥等方法制备的一类活菌制剂，机体服用后可以纠正胃肠道菌群失调，使胃肠道菌群处于平衡状态。乳酸菌食品及保健品中，粉类及片剂占很大比重，这类产品以活乳酸菌为主，同时添加了其他的菌粉和片剂制备时所需要的保护成分和赋形剂。

1.1 乳酸菌菌株的选择

1.1.1 对乳酸菌菌株的一般要求

菌株是生产乳酸菌粉和片剂的核心，评价乳酸菌粉及片剂产品好坏的指标主要有产品所含活菌数的多少及其所产生的健康作用，这都与菌株密切相关。常用于生产乳酸菌粉及片剂的微生物以乳酸杆菌（*Lactobacillus*）、乳酸球菌（*Lactococcus*）及双歧杆菌（*Bifidobacterium*）等为主。

1. 对菌株健康作用的要求

1) 调节肠道微生物处于平衡状态

肠道微生物在人体健康中发挥着重要作用，既影响食物消化、营养吸收和能量供应，又调控宿主正常生理功能及疾病的发生发展。正常情况下，肠道菌群与人体内外环境始终维持着动态平衡，一旦这种平衡被打破，将发生肠道微生物失调，进而导致包括消化系统疾病、代谢疾病等在内的多种病症的发生。

食用乳酸菌制剂可以对机体肠道微生物起调节作用，进而使其处于平衡状态，维持机体健康，所以用于生产乳酸菌制剂的菌株应可以利用自身生长代谢优势，抑制病原微生物的生长。其中所涉及的主要机制包括：①产生抑菌物质。乳酸菌通过代谢糖类可产生乳酸、乙酸、 H_2O_2 等物质。乳酸、乙酸提供的酸性环境，一方面可以抑制病原菌生长；另一方面可以刺激肠道，使肠道蠕动加快，有利于病原菌的外排。乙酸和 H_2O_2 自身也可抑制大肠杆菌、沙门菌、梭菌的生长。②较强的肠黏膜竞争黏附能力。乳酸菌的多糖、蛋白质等成分可与肠表皮细胞受体蛋白共价结合，黏附力更强，而病原菌主要依靠菌毛与肠表皮细胞黏附，黏附性较小，

从而乳酸菌形成定植优势，增殖更加迅速。

2) 影响肠道菌群的代谢活性

乳酸菌可以降低或提高肠道菌群的酶活性。例如，通过降低硝酸盐还原酶、偶氮还原酶的活性可减少致癌物质的生成，提高 β -半乳糖苷酶、乳糖酶、蔗糖酶及葡萄糖苷水解酶活性可对乳糖不耐症有缓解作用。

3) 提高免疫功能

乳酸菌制剂是良好的免疫激活剂，可有效提高干扰素和吞噬细胞的活性，提高动物自然杀伤细胞活性；提高动物腹腔吞噬细胞的吞噬能力，增强吞噬细胞功能。有研究表明干酪乳杆菌 (*L.casei*) 能促进肠道分泌免疫球蛋白 IgA。

4) 提供营养物质

乳酸菌还可以产生硫胺素、核黄素、尼克酸、泛酸、叶酸等多种维生素。

2. 对菌株生长特性的要求

首先，能够用于乳酸菌粉及片剂生产的菌株必须具备能够在培养基质中生长良好的性质。

其次，菌株需要具备良好的营养物质利用能力。菌株发酵各种营养成分后，可进一步影响产品品质，如在苜蓿青贮中添加具有良好利用碳源能力的乳酸菌，可显著改善苜蓿青贮的品质。

再次，具备较短迟滞期和较长稳定期的菌株是用于生产乳酸菌粉及片剂的最佳选择。因为具备以上条件的菌株可缩短培养时间、节约成本且容易选择培养。据悉，菌龄是直接影响细胞存活率的重要因素，一般而言，乳酸菌在对数生长末期或稳定期密度最大，活菌数最多，处于此阶段的菌株在冷冻干燥过程中存活率应该最高。在不同双歧杆菌和荧光假单胞菌 (*Pseudomonas fluorescens*) 的生长过程中，也有类似的现象。这一现象，一方面可能因为处于对数生长末期或稳定前期的乳酸菌细胞生长代谢能力最旺盛、活力最强；另一方面，乳酸菌高浓度的细胞可以降低每个细胞暴露在介质中的面积，从而提高对冷冻损伤的保护作用。

最后，菌株生长具有较差的自溶性能。菌体自溶是在一定条件下，菌体细胞通过自身酶类水解胞壁肽聚糖网络结构，进而造成细胞裂解。在生产乳酸菌粉及片剂时，需要大量、高活力菌体生物量的积累，而微生物菌体本质决定了在生长代谢过程中其细胞壁会在自身酶作用下裂解发生自溶，从而较难使菌株活菌数达到较高水平。因此，用于乳酸菌粉及片剂生产的菌株需要具备较差的自溶性能，以确保高生物量菌体细胞的积累。

3. 对菌株抗逆性能的要求

1) 抗消化道逆环境的能力

食用含乳酸菌食品时，乳酸菌可能面临的环境胁迫主要包含酸胁迫、胆盐胁

迫、蛋白水解酶胁迫等，因此选择制作乳酸菌粉或片剂的菌株时，菌株需具备以下几点性能。

(1) 良好的酸胁迫耐受性。

食用乳酸菌制品后，菌株首先面临胃部的酸性环境。酸可以被动扩散通过细胞膜进入细胞质，迅速分解成质子和带电的衍生物，使细胞膜不可渗透。胞内积累的质子可降低细胞内 pH (pH_i) 从而影响跨膜 ΔpH ，进而有助于质子动力势 (PMF, 是大量的跨膜运输过程的能源)。内部酸化还会降低酸敏感酶的活性并损害蛋白质和 DNA，游离有机酸阴离子部分在细胞质中积累能和重要元素螯合，对细胞生理机能产生不利影响 (图 1.1)。已知胃的 pH 从 1~2 可波动至 4~5，因此尽量选择能够承受此 pH 范围的菌株。

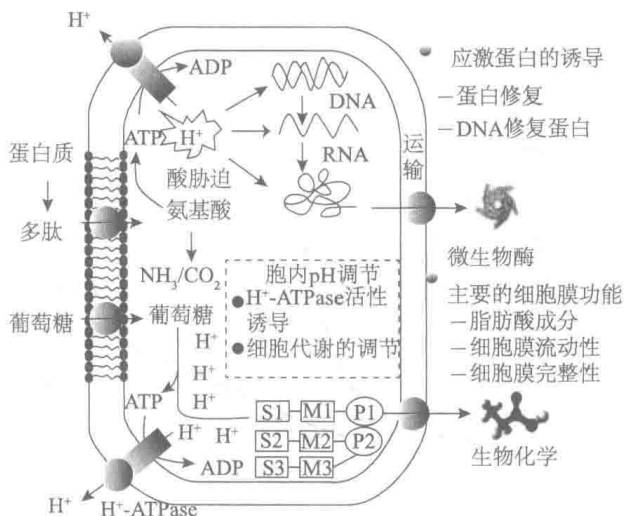


图 1.1 乳酸菌的酸胁迫反应

(2) 良好的胆盐胁迫耐受性。

胆盐能够破坏细胞膜的结构，并引发 DNA 损伤，具有很强的抗菌活性。甾环的强亲脂性使得细胞膜成为这些分子的主要目标，它们干扰脂质和扰乱质子动力，从而造成细胞死亡。此外，游离形式的胆酸是弱酸，可以扩散进入细胞，胆酸分解从而导致细胞质酸化。胆盐的其他副作用还包括诱导氧化应激反应和 DNA 修复机制、糖代谢的改变和蛋白质的错误折叠。在正常生理条件下，人体肠道中胆盐浓度范围为 0.05%~2%。对胆盐具有防御作用是选择菌株的重要前提，只有具备良好的胆盐耐受性能，才能保证乳酸菌粉或片剂在人体内发挥有益功能。

(3) 其他胁迫耐受性。

在消化道中，乳酸菌还会面临消化道中其他物质的胁迫，如蛋白酶胁迫、饥饿胁迫等。在遭受各种胁迫过程中，菌体细胞可能会发生一系列变化，这些变化包括产生应激蛋白、细胞膜改变、基因表达差异化和改变代谢途径等。作为

制作乳酸菌粉或片剂的菌株，要求它在遭受各种胁迫发生变化时，其健康益处不受影响。

2) 抗生产逆环境的能力

加工乳酸菌粉和片剂时常采用冷冻干燥技术，这就需要菌株具备较强的抗冷冻干燥的性能，这样才能保证冷冻干燥后的发酵剂菌株具有较高且足够的活菌数。乳酸菌内在的基因很大程度上决定了其冷冻干燥后的菌株存活率，换言之，内在基因的差别导致了乳酸菌对冷冻干燥的抗性存在差异；同时乳酸菌的细胞膜成分和菌株形态也与其抗冷冻干燥性能有一定的关联。因此，在选择乳酸菌时，应从菌株内在基因、细胞膜结构与成分、菌株形态三个方面考虑。下面具体阐述每个方面对菌株抗冷冻性能的可能影响。

内在基因：微生物抗冷冻干燥性能强弱依赖于它的内在基因，与冷冻相关基因的差别决定了不同乳酸菌对冷冻干燥的抗性存在差异。有些特异菌株对冷冻具有敏感特性，冻干后菌株活性大大降低甚至丧失。然而对大多数乳酸菌而言，它们对冷冻未显示出特异的敏感性，这很可能与菌株的内在抗冷冻基因有关。Susin 等(2006)研究发现，当新月柄杆菌(*Caulobacter crescentus*)细胞中的 GroEL/GroES 蛋白消耗殆尽时，该菌显示出对冷冻耐受，而细胞中的 DnaK/DnaJ 蛋白耗尽时，该菌则不能获得对冷冻的耐受性。此外，Derzelle 等(2000)研究长时间处于冷胁迫条件下的植物乳杆菌时发现，存在 *csp* 基因簇的菌株能够实现转录的逐步恢复，但是无 *csp* 基因簇的菌株则不能实现恢复。因此，乳酸菌是否存在与冷冻相关的基因，从本质上决定了该菌株的抗冷冻性能。

细胞膜结构与成分：在冷冻干燥过程中，菌体内冰晶结构的形成会对菌体有一定的危害，包括细胞损伤、细胞膜成分遭破坏、蛋白质(酶)变性等。而细胞膜是乳酸菌与外界环境隔离的主要屏障，在冷冻处理过程中，它将成为首要受伤害的目标，主要体现在其完整性受损。不同乳酸菌因细胞膜成分不同，其展现出对冷冻的耐受性也不同。有研究报道，乳酸菌细胞膜中如果有较高含量的不饱和脂肪酸或环丙烷化脂肪酸，则该菌株的抗冷冻能力增强(Velly et al., 2014)。具体来说，因为不饱和脂肪酸熔点较低，可以在冷冻条件下保持乳酸菌细胞膜的流动性，因此可以维持菌株细胞膜的功能，增强其抗冷冻性能。而有关环丙烷化脂肪酸的作用机理则有不同的解释：一种认为与不饱和脂肪酸的作用一致，即在冻干时，环丙烷化脂肪酸能防止脂肪酸过紧地结合到细胞膜上，从而增加菌株细胞膜的流动性；另一种是与顺式脂肪酸双键的结构相比，环丙烷化脂肪酸的环状结构会使细胞膜变得僵化，降低膜的流动性，约束酰基链的移动和重新排序，从而保护了冷冻过程中膜的完整性(Velly et al., 2015)。因此，测定乳酸菌细胞膜中脂肪酸的组分及其含量是判断不同菌株抗冷冻能力强弱的一种方法。

菌株形态：乳酸菌不同菌属甚至不同种之间的菌体形态各不相同，已有研究

者发现,这种差异可使菌株在冷冻后表现出不同的存活情况。冷冻过程中,菌体细胞形态及大小都会对乳酸菌存活率产生影响。例如,小球形的球菌比长杆状的杆菌显示出对冷冻更强的耐受性,短形杆菌比长纤细状杆菌对冷冻显示出更强的耐受性。这种差异可能是乳酸菌细胞表面积的差异造成的,表面积越大,则菌体内形成的冰晶结构对细胞膜的机械损伤越大。然而,影响不同菌属之间抗冷冻干燥的因素又是复杂的,这在明串珠菌与保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus*)中也得到了印证。在相同的冻干条件下,明串珠菌的存活率远远低于保加利亚乳杆菌的存活率,这充分说明:抗冷冻干燥性能与乳酸菌的形态、内在遗传物质及细胞膜中的脂肪酸组分与含量等多种因素密切相关(Carvalho et al., 2003)。

总体而言,在选择菌株时,首先应了解菌株中与抗冷冻相关的内在基因,在此基础上还应结合菌株中细胞膜脂肪酸的组分与含量,以及细菌的菌体形态,最终选择具有强的耐冷性、含高不饱和脂肪酸或环丙烷化脂肪酸、小球形、短棒状的乳酸菌用于生产。

3) 抗噬菌体性能

乳酸菌被噬菌体污染可造成发酵产品的不良风味,甚至发酵失败。为了降低风险、减少经济损失,在选择乳酸菌时,仍然需要对其抗噬菌体性能进行研究,并且要掌握抗噬菌体乳酸菌菌株筛选的方法。

(1) 乳酸菌噬菌体分类。

根据侵染途径可将噬菌体分为两类:烈性噬菌体和温和噬菌体。烈性噬菌体是指在其侵染菌体细胞时,能够快速完成吸附、侵入、增殖、装配,导致短时间内宿主细胞裂解的噬菌体,该类受体细胞称为敏感性细胞。温和噬菌体是指其吸附并侵染受体细胞后,只将该噬菌体 DNA 嵌存于受体的染色体中,可长期随受体的繁殖而传代,一般情况下不会引起受体细胞裂解的一类噬菌体。在宿主内的温和噬菌体也被称为原噬菌体,宿主菌株称为溶源性菌株。当受到外界条件刺激时,温和噬菌体可转化为烈性噬菌体,说明温和噬菌体的危害具有隐蔽性,难以被发现,它的危害也很大。

根据侵染受体菌株的不同又将噬菌体分为不同的乳酸菌噬菌体,表 1.1 列出了部分乳酸菌噬菌体和假定或确认的宿主细胞表面受体。对乳酸菌噬菌体还可以根据形态特征进行分类,目前已报道的是有尾噬菌体的乳杆菌噬菌体的复合体结构。根据噬菌体尾部长度及形态的不同,又可将有尾噬菌体分为 3 类,即短尾噬菌体、肌尾噬菌体、长尾噬菌体(Villion and Moineau, 2009)。Villion 和 Moineau (2009)对 231 株乳杆菌噬菌体进行形态学分析,结果显示:232 株菌中有 186 株菌含噬菌体,且 109 株为长尾噬菌体家族、76 株为肌尾噬菌体家族、1 株为短尾噬菌体家族。