

高等学校教材

食品冷冻冷藏 原理与技术

关志强 主编 李敏 副主编

7



化学工业出版社

高等学校教材

食品冷冻冷藏原理与技术

关志强 主编

李 敏 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书全面系统地介绍了食品冷冻冷藏基础理论、基本原理和实用技术,全书共分7章。前5章阐述了食品冷冻冷藏所涉及的基础理论和基本原理,内容包括食品冷冻冷藏的生物化学基础、物理化学基础、物性学基础、传热学基础和传质学基础;后2章从技术应用出发,详尽介绍了食品冷却、冻结、冷藏、冻藏、解冻的工艺技术和装置。

本书可供食品科学与工程、农(水)产品加工及储藏工程、制冷与低温技术、冷冻冷藏技术等专业(专业方向)的本科生、研究生或教师作为专业教材或教学参考书使用,也适于食品冷冻冷藏相关企业的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

食品冷冻冷藏原理与技术/关志强主编. —北京:
化学工业出版社, 2010. 8
(高等学校教材)
ISBN 978-7-122-09104-8

I. 食… II. 关… III. ①食品储藏: 冻结储藏
②食品储藏: 制冷储藏 IV. TS205. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 132541 号

责任编辑: 程树珍
责任校对: 王素芹

文字编辑: 李 瑾
装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张19¼ 字数500千字 2010年9月北京第1版第1次印刷

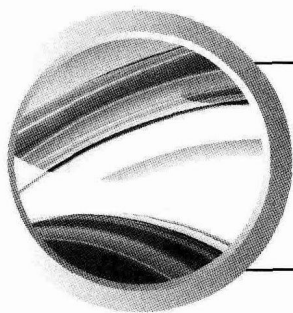
购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 40.00 元

版权所有 违者必究



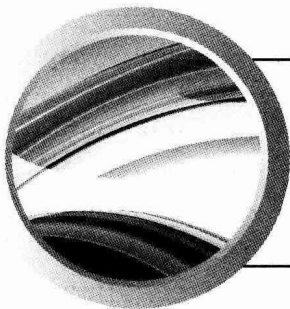
前言

食品是人类生命活动不可缺少的物质来源。优质的食品与人的健康有着非常密切的关系。随着社会的不断进步、食品工业的迅猛发展以及人民生活水平的不断提高,食品冷冻冷藏技术得到了快速发展。经过多年的探索和研究,人们发现低温保鲜方法能最大限度地保持食品原有色、香、味及其外观、鲜度和营养价值,因此是目前世界上被普遍采用的一种食品保鲜方法。冷冻冷藏食品是经过严格的原料筛选、加工处理、调理制作、低温快速冻结、密封包装、低温储存、运输和销售的现代化加工食品,具有安全卫生、品质优良、食用方便、成本较低等优点。随着世界经济一体化,各国对食品品质和安全的要求也在不断提高,如何运用现代科学理论和技术研究与解决食品冷冻冷藏过程中出现的质量问题和安全问题,完善和开发满足不同消费需求的食物冷加工工艺和设备,建设完善可靠、规范管理的食品冷藏链,提高冷加工食品品质控制水平,全面提升我国食品品质,适应国内外市场需求是冷冻冷藏食品行业面临的重要课题。为此,我们编写了《食品冷冻冷藏原理与技术》一书,全面系统地介绍了食品冷冻冷藏的基础理论、基本原理和应用技术,可供食品科学与工程、农(水)产品加工及储藏工程、制冷与低温技术、冷冻冷藏技术等专业(专业方向)的本科生、研究生或教师作为专业教材或教学参考书使用,也适于食品冷冻冷藏相关企业的工程技术人员阅读。

全书共分7章。前5章重点阐述了食品冷冻冷藏所涉及的基础理论和基本原理,包括食品冷冻冷藏的生物化学基础、物理化学基础、物性学基础、传热学基础和传质学基础。后2章从技术应用出发,主要介绍了食品冷却、冻结、冷藏、冻藏和解冻的工艺技术及其装置。第1~第4章由关志强编写;第5章由蒋小强编写;第6章(第1、第4节)、第7章由李敏编写;第6章(第2、第3节)由叶彪编写。全书由关志强主编和统稿。博士研究生宋小勇、硕士研究生王秀芝、郭胜兰、郑立静为本书的编写做了大量的编译和校对工作。

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请同行专家和各界读者提出宝贵意见。

编者
2010年5月



目 录

第 1 章 食品冷冻冷藏的生物化学基础	1
1.1 食品原料的基本构成	1
1.1.1 细胞的分子组织层次	1
1.1.2 植物细胞	2
1.1.3 动物肌肉结构和肌纤维	2
1.2 食品原料的化学组成	4
1.2.1 蛋白质	4
1.2.2 碳水化合物	7
1.2.3 脂类	9
1.2.4 维生素	10
1.2.5 酶	11
1.2.6 矿物质	12
1.2.7 水分	13
1.3 新鲜天然食物组织的生物化学	14
1.3.1 新鲜植物组织的生物化学	14
1.3.2 新鲜动物组织的生物化学	24
1.4 食品冷冻冷藏基本原理	29
1.4.1 食品腐败变质的机理	30
1.4.2 温度对微生物生长和繁殖的影响	32
1.4.3 温度对酶促反应的影响	34
1.4.4 温度对氧化反应的影响	36
1.4.5 温度对呼吸作用的影响	36
1.4.6 冻结速率和储藏温度对机械损伤的影响	38
复习思考题	40
 第 2 章 食品冷冻冷藏的物理化学基础	 41
2.1 水溶液的基本性质	41
2.1.1 化学势与相平衡	41
2.1.2 拉乌尔定律和亨利定律	42
2.1.3 溶液组成的表示法	43
2.1.4 理想稀溶液的依数性质	45
2.1.5 实际水溶液的冰点降低性质	47
2.1.6 食品中水的存在形式	48

2.2 水溶液的冻结特性	50
2.2.1 水的相图	50
2.2.2 冻结点和低共熔点	51
2.2.3 冻结曲线和冻结速率	52
2.2.4 食品原料中水的冻结率	54
2.3 食品原料中的水分活度	58
2.3.1 逸度和活度	58
2.3.2 食品中的水分活度	60
2.3.3 水分活度与温度的关系	61
2.3.4 水分活度与水分含量的关系	63
2.3.5 水分活度与食品稳定性	65
2.3.6 单分子层水值的计算	68
2.3.7 食品中水分活度的测量方法	69
2.4 食品原料的玻璃态转化	69
2.4.1 基本概念	70
2.4.2 玻璃态转化的条件	71
2.4.3 食品小分子的玻璃态	74
2.4.4 食品聚合物的玻璃态	75
2.4.5 食品混合物的玻璃态	78
2.4.6 食品玻璃态转化的路径	79
2.4.7 食品材料的 T_g' 值	83
2.4.8 食品材料的玻璃化保存	85
2.5 分子流动性与食品稳定性和加工工艺	86
2.5.1 分子流动性与食品稳定性	86
2.5.2 分子流动性与食品加工工艺过程	89
2.5.3 水分活度、分子流动性和玻璃态转化温度在预测食品稳定性方面的比较	91
2.6 水和溶液的结晶理论	91
2.6.1 成核作用	92
2.6.2 晶体生长过程	97
2.6.3 相变的总速率	99
2.6.4 冰晶对食品材料微观结构的影响	100
2.7 食品货架寿命的预测	101
2.7.1 应用动力学模型预测食品货架寿命	101
2.7.2 TTT 方法预测冷冻食品实用储藏期	107
复习思考题	109

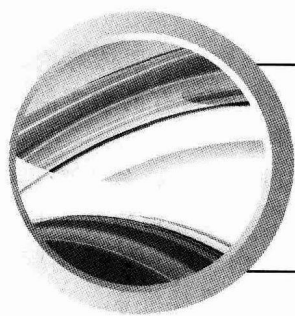
第3章 食品冷冻冷藏的物性学基础	111
3.1 水和冰的热物理性质	111
3.1.1 水和冰的密度 ρ	111
3.1.2 水和冰的体膨胀系数 β	111
3.1.3 水和冰的比定压热容 c_p	112
3.1.4 水和冰的热导率 λ	112
3.1.5 水和冰的热扩散率 α	112

3.1.6 冰的融化热	113
3.2 食品材料的密度	113
3.3 食品材料的比热容	114
3.3.1 食品材料表观比热容的计算模型	114
3.3.2 食品材料比热容的经验公式	116
3.3.3 食品材料比热容的粗略估算	118
3.4 食品材料的焓值	119
3.4.1 预测冻结食品焓值的计算模型	119
3.4.2 图表法查焓值	121
3.4.3 焓值经验公式的拟合	122
3.5 食品材料的热导率	124
3.5.1 食品材料热导率的计算模型	124
3.5.2 食品材料热导率的经验计算公式	128
3.5.3 食品材料热导率的粗略估算	129
3.6 食品材料的热扩散率	130
3.7 食品材料热物理性质的测量	131
3.7.1 黏度测定	131
3.7.2 比热容测定方法	132
3.7.3 热导率的测量	133
3.7.4 差示扫描热量测定与定量差示热分析	133
复习思考题	138

第4章 食品冷冻冷藏的传热学基础	139
4.1 食品冷却的传热方式	139
4.1.1 传热基本方式	139
4.1.2 食品冷却计算中常用的两个准则数	141
4.2 食品冷却过程的传热计算	143
4.2.1 毕渥数小于0.1时的冷却问题	143
4.2.2 大平板状食品冷却过程的传热计算	144
4.2.3 长圆柱状食品冷却过程的传热计算	151
4.2.4 球状食品冷却过程的传热计算	154
4.2.5 用图解法计算食品冷却速率	157
4.2.6 短方柱和短圆柱状食品冷却时间的计算	158
4.2.7 食品几何形状对冷却速率的影响	161
4.3 食品冻结过程的传热问题	162
4.3.1 食品冻结的热负荷	162
4.3.2 食品冻结过程中的传热系数	163
4.3.3 食品冻结相变界面扩散速率	166
4.4 食品冻结时间的计算	171
4.4.1 潜热在同一温度下耗散的精确模型	171
4.4.2 潜热在同一温度下耗散的近似模型	172
4.4.3 潜热在一温度范围内耗散的近似模型	179
4.4.4 潜热在一温度范围内耗散的经验模型	181

4.5 食品冻结和解冻时间的数值计算	183
4.5.1 大平板状食品冻结和解冻的数学模型	183
4.5.2 大平板状食品冻结和解冻数学模型的差分格式	185
4.5.3 大平板状食品冻结过程相变界面移动判断	189
复习思考题	190
第5章 食品冷冻冷藏的传质学基础	192
5.1 分子扩散传质	192
5.1.1 斐克 (Fick) 定律	192
5.1.2 扩散速率	193
5.1.3 扩散系数	194
5.1.4 食品材料中的水分扩散系数	196
5.2 对流传质	198
5.2.1 对流传质的类型与机理	198
5.2.2 对流传质系数	198
5.2.3 相际间的对流传质模型	199
5.2.4 食品干燥机理	200
5.3 冷冻干燥原理	203
5.3.1 冷冻干燥基本原理	204
5.3.2 冷冻干燥过程	204
5.3.3 冷冻干燥中的传热和传质	205
5.3.4 冷冻干燥数学模型	210
5.4 食品中的水分转移	221
5.4.1 食品中水分的位转移	221
5.4.2 食品中水分的相转移	221
5.4.3 食品在冻藏中的水分转移	222
5.4.4 新鲜果蔬组织的蒸腾作用	224
复习思考题	226
第6章 食品冻结和冻藏工艺	227
6.1 食品冻结和冻藏时的变化	227
6.1.1 食品在冻结时的变化	227
6.1.2 食品冻藏时的变化	233
6.1.3 食品的冷冻损伤	237
6.2 食品冻结特性和冻结装置	238
6.2.1 食品冻结过程特性	238
6.2.2 食品冻结的传热和冻结时间的计算	243
6.2.3 食品的冻结方法和冻结装置	244
6.3 食品冻结和冻藏工艺	255
6.3.1 食品速冻工艺	255
6.3.2 食品的冻藏工艺	261
6.4 食品的解冻	269
6.4.1 概述	269

6.4.2 解冻质量要求	270
6.4.3 解冻方法	271
6.4.4 典型食品的解冻	275
复习思考题	277
第7章 食品冷却和冷藏工艺	279
7.1 食品冷却和冷藏时的变化	279
7.1.1 食品冷却的目的和温度范围	279
7.1.2 食品的冷却介质	281
7.1.3 食品冷却中的传热	284
7.1.4 食品的冷却速率与时间	286
7.1.5 食品冷却与冷藏时的变化	289
7.2 食品冷却方法和装置	292
7.2.1 冷风冷却	292
7.2.2 冷水冷却	293
7.2.3 碎冰冷却	294
7.2.4 真空冷却	295
7.3 食品冷却和冷藏工艺	295
7.3.1 食品的预冷与冷却	295
7.3.2 食品冷藏工艺	295
复习思考题	297
主要参考文献	298



第 1 章

食品冷冻冷藏的生物化学基础

食品冷冻冷藏是食品加工和储藏的常用方法。植物性食品采摘后仍然是有生命的活的物体，在冷藏过程中靠消耗自身的物质来维持生命的代谢活动，继续完成成熟、衰老、死亡等过程。动物性食品在宰后加工储藏中也发生呼吸途径变化、肌肉组织 pH 值变化、蛋白质变性等一系列的生物化学过程。因此，无论是植物性食品或是动物性食品，在冷冻冷藏过程中，均进行着一系列的生物化学反应。研究食品原料的化学组成及其性质、食品原料组织的生物化学变化是研究食品冷冻冷藏原理的主要基础。

1.1 食品原料的基本构成

人类食物基本上来源于生物界。无论是单细胞生物或是多细胞生物，生物体的形态组成、物质代谢、能量代谢、信息传递等都是以细胞为基础的，维持生命活动的绝大多数反应都发生在细胞内，细胞是生命组织的最小单位。在食品冷冻冷藏过程中，食品组织细胞内外均发生一系列的生物化学变化，因此，了解细胞的结构与功能尤为重要。

1.1.1 细胞的分子组织层次

图 1-1 给出了细胞的分子组织层次。活细胞由无生命的分子组成。首先，由 C、H、O、N、P 和 S 等元素形成前体分子 H_2O 、 CO_2 、 NH_3 等，然后再由这些前体分子组成生物分子的代谢中间物，如丙酮酸、柠檬酸、苹果酸和草酰乙酸等。中间物进一步形成构件分子，如氨基酸、核苷酸、脂肪酸和单糖等，再由这些构件分子构成生物大分子，如蛋白质、核酸、多糖和脂等。生物大分子组装成超大分子集合体，如核糖体、生物膜和染色质等，再由这些超大分子集合体构成细胞器，如真核生物中的细胞核、线粒体、叶绿体等，这些细胞器进一步组装成活细胞。

生物分为原核生物和真核生物两大类。原核生物包括各种各样的细菌，结构相对来说比较简单，并且都是以单细胞形式存在，细胞中没有明显的由膜包围的核，DNA 区域称为拟核。真核生物包含细胞核以及许多其他细胞器，绝大多数真核生物为多细胞生物，但也包括单细胞生物，如酵母菌和草履虫。

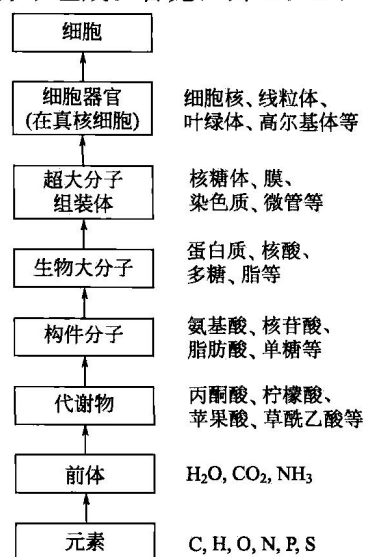


图 1-1 细胞的分子组织层次



1.1.2 植物细胞

如图 1-2 所示, 植物细胞是由细胞壁、细胞膜、细胞液、细胞核、液泡、质体等构成。

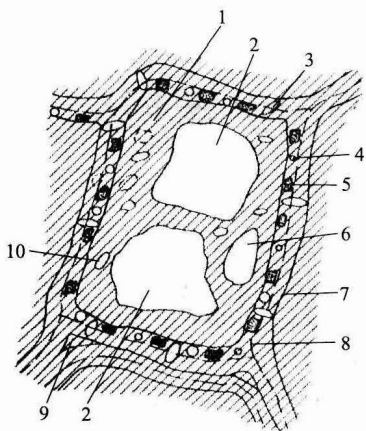


图 1-2 植物细胞结构

1—细胞溶液; 2—液泡; 3—碳水化合物颗粒; 4—胡萝卜素; 5—叶绿素; 6—细胞核; 7—细胞壁; 8—中胶层; 9—细胞间隙; 10—线粒体

其中, 细胞壁、液泡和质体是植物细胞特有的组成部分, 是植物细胞与动物细胞的主要区别之一。

植物细胞类似于细菌, 有细胞壁和特殊的细胞器叶绿体, 而动物细胞既没有细胞壁, 也没有叶绿体。植物细胞壁是细胞的外壳, 略带弹性, 由中胶层、初生壁和次生壁三部分构成, 其主要化学组成是纤维素、半纤维素、果胶质、木质素等。细胞壁具有稳定细胞形状并增加其刚性、减少水分散失、防止微生物侵染和机械损伤等保护作用。细胞壁通过果胶质与相邻的细胞壁连成整体。

细胞膜是紧挨细胞壁内侧的一层生物膜, 主要由脂类、蛋白质和水组成, 是细胞生命活动的重要场所与组成部分, 具有保护细胞、交换物质、传递信息、转换能量、运动和免疫等生理功能。植物细胞可以脱离细胞壁而生活, 却不能脱离细胞膜生存。细胞膜在不同的温度下热力学性能也不同。当细胞膜出现破裂时, 细胞内大量的离子将外溢, 造成食品质量下降。

细胞液主要由水、蛋白质、盐、糖类、脂类组成, 其中水占 80% 以上, 蛋白质等其他物质悬浮于水中, 使细胞液表现为一种生物胶。细胞液具有进行某些生化活动、为维持细胞器的实体完整性提供所需要的离子环境、供给细胞器行使功能所必需的一切底物和生化活动中涉及的物质运输等功能。在冻结与冻藏中, 细胞液中的水形成冰晶, 破坏了细胞内高度精细的结构, 使代谢失调。

细胞核是一个双层膜包围的大而且浓的细胞器, 在膜上有许多膜孔, 细胞核中生物合成的产物通过这些膜孔运送到周围的细胞质里去。

液泡是一种位于细胞质中、外面有一层膜结构的水囊, 是细胞内原生质的组成之一。液泡内的物质靠液泡膜有选择地进出, 液泡内的物质主要是水、糖、盐、氨基酸、色素、维生素等。在正常的代谢过程中, 液泡具有调节细胞内水溶液的化学势和 pH 值以及分解大分子化合物的作用。同时, 还具有将那些大量产生的不能及时排出的毒性代谢物质与细胞中其他物质相隔绝的重要功能。当细胞衰老或液泡受机械损伤时, 液泡内的酶外溢, 使细胞发生自溶。在冻结与冻藏中, 其中的水也形成冰晶。

质体包括白色体、杂色体和叶绿体。白色体不含色素, 存在于胚细胞及根部和表皮组织中。杂色体中含有的色素为胡萝卜素和叶黄素, 呈现黄色或橘黄色, 分布于高等植物某些器官如花瓣和果实的外表皮内。叶绿体含有叶绿素, 存在于一切进行光合作用的植物细胞中, 是光合作用的主要场所。叶绿素是使果蔬呈绿的物质, 在加工中易被氧化破坏。

1.1.3 动物肌肉结构和肌纤维

动物体主要可利用部分的组织分为肌肉组织、脂肪组织、结缔组织和骨骼组织四类, 其组成的质量分数随动物种类、肥度和年龄不同有较大的变化范围: 肌肉组织 50%~60%,



脂肪组织 20%~30%，骨骼组织 13%~20%，结缔组织 7%~11%。此外，还有比例较少的神经、血管、淋巴和腺体等组织。

肌肉组织可分为横纹肌、平滑肌和心肌三种。横纹肌是肌肉的主体，食品加工所指的肌肉组织主要是指在生物学中称为横纹肌的部分。横纹肌是附着在骨骼的肌肉，随动物的意志伸张或收缩而完成运动机能，故又称骨骼肌或随意肌。如图 1-3 所示，横纹肌是由肌纤维（多核细胞）束簇组成。包裹在整个肌纤维外的结缔组织鞘称为“肌外膜”。从肌外膜内表面延伸出的其他结缔组织贯穿肌肉内部，将肌纤维组分成肌纤维束，包裹着肌纤维束的这种结缔组织层称为“肌束膜”，包裹着每一条肌纤维的更纤细的结缔组织鞘是从肌束膜延伸出来的，后一种鞘称为“肌内膜”。这些结缔组织鞘与肌肉末端的大块结缔组织腱相连接，

这些连接点起到了将肌肉固定在骨骼上的作用。图 1-3 示意了结缔组织（肌外膜、肌束膜及肌内膜）的分布及其与肌纤维、肌纤维束的关系，图中还给出了血管的典型位置，血管、淋巴和神经组织分布于结缔组织之中。

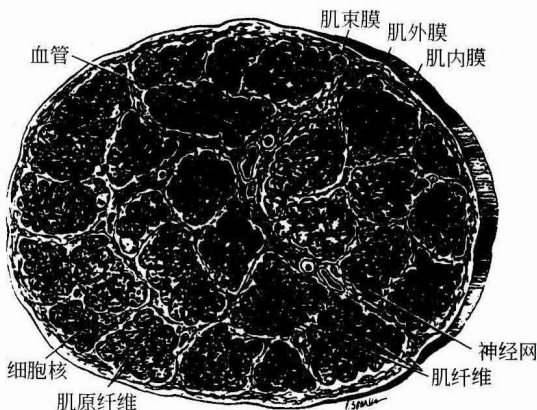


图 1-3 肌肉横切面

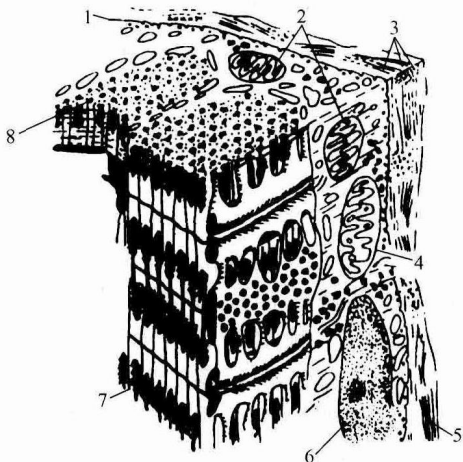


图 1-4 横纹肌肌纤维细胞结构

- 1—细胞膜；2—线粒体；3—胶原纤维；
4—糖原；5—肌纤维膜；6—细胞核；
7—肌纤维；8—肌原纤维

如图 1-4 所示，横纹肌是由长而窄的肌纤维（多核细胞）组成，一个肌纤维相当于一个细胞，故也称为肌纤维细胞。细胞的长度可达几个厘米，直径在 $10\sim 100\mu\text{m}$ 之间。肌纤维平行排列成束，肌纤维束簇构成肌肉。鱼肉中肌纤维的排列不同于鸟类和哺乳动物，其排列方式遵从于在水中屈曲身体向前推进的需要。肌纤维细胞内有许多微细的肌原纤维、细胞核、线粒体和汁液等物质。

平滑肌不具有横纹肌的特征性条纹，是构成血管壁和胃肠壁的物质。含有平滑肌的动物器官，如鸟类的肠组织和软体动物（蛤、牡蛎）的肉，也可以用作食品原料。

心肌是构成心脏的物质。心肌的肌原纤维结构与横纹肌相似，但心肌的纤维排列不如横纹肌那样规则。它们在肌肉组织中所占的比例很小，都是由肌纤维细胞构成的。这些肌纤维与横纹肌的肌纤维比较，仅在细胞和细胞核的形状方面略有不同。

脂肪组织是决定肉质的重要部分，是由退化了的疏松结缔组织和大量的脂肪细胞所组成，大多分布在皮下、肾脏周围和腹腔内。

结缔组织是由纤维质体和已定型的基质组成，深入到动物体的任何组织中，构成软组织的支架。

骨骼组织是动物的支柱，形态各异，由致密的表面层和疏松的海绵状内层构成，外包一层坚韧的骨膜。



1.2 食品原料的化学组成

食品原料的主要化学成分有：水分、蛋白质、脂肪、糖类、维生素、酶和矿物质等。在冷冻冷藏过程中，这些物质均会发生一系列的物理、化学变化，以至于影响食品的食用价值和营养价值，因此，应尽量减少或避免营养成分的破坏与损失，保持新鲜食品原有的营养价值和风味。常见食品原料的化学成分如下。

1.2.1 蛋白质

1.2.1.1 蛋白质的分子结构

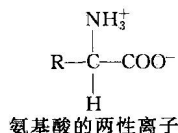
蛋白质是一类复杂高分子含氮化合物，它是一切生命活动的基础，是构成生物体细胞的重要物质。虽然蛋白质的种类繁多，结构复杂，但它们的化学元素组成均相似。蛋白质主要由碳、氢、氧、氮四种元素组成，大多数蛋白质含有硫元素，一些蛋白质还含有磷元素，少数蛋白质含有铁、铜、锌、锰等矿物质元素。蛋白质的分子量差别很大，可相差几千倍。但无论蛋白质来源如何，其含氮百分率相对恒定，平均含氮量为 16%，取其倒数 6.25（如果已知确切含氮量，则为确切含氮量的倒数），称为蛋白质换算系数，它是通过氮元素含量分析测定蛋白质大致含量的依据，即粗蛋白质（%）= 氮元素含量 $\times$ 6.25。

蛋白质是由天然氨基酸通过肽键连接而成的生物大分子。蛋白质分子的基本结构是，由上述各种元素按照一定的结构组成氨基酸；一个分子氨基酸的羧基和另一个分子氨基酸的氨基相互缩合形成肽键，肽键把许多氨基酸连接形成较长的多肽链；然后通过氢键而成螺旋状多肽链；再通过副键（如盐键等）将几条螺旋状多肽链折叠盘曲保持着不同形状的立体结构。

在酸、碱、酶等物质作用下，蛋白质发生水解作用，最终将大分子的蛋白质水解为小分子的氨基酸：

蛋白质 $\rightarrow$ 多肽 $\rightarrow$ 二肽 $\rightarrow$ 氨基酸

氨基酸是蛋白质的基本单位。虽然从各种生物体内发现的氨基酸目前已有 180 多种，但参与蛋白质构成的氨基酸主要是 20 种。这 20 种氨基酸被称为构成蛋白质的氨基酸，包括色氨酸、缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苏氨酸、赖氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸、天冬氨酸、谷氨酸、精氨酸、半胱氨酸、胱氨酸、酪氨酸、脯氨酸、羟脯氨酸。除脯氨酸和羟脯氨酸外，其他构成蛋白质的氨基酸中的氨基都是和离羧基最近的碳原子（该碳原子编号为 α ）相连，这类氨基酸均为 α -氨基酸，即由一个氨基（ $-\text{NH}_2$ ）、一个羧基（ $-\text{COOH}$ ）、一个氢原子（ $-\text{H}$ ）和一个 R 基团（ $-\text{R}$ ）连结在一个碳原子上。在不同的氨基酸分子中，其侧链彼此不同，但其余部分均相同，结构通式如下



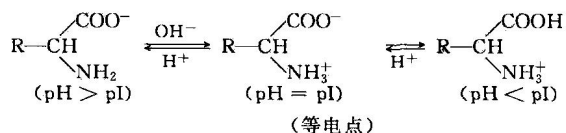
根据氨基酸能否在人体内合成以满足机体需要，分为必需氨基酸和非必需氨基酸。必需氨基酸在人体内不能合成或合成速度不能满足机体需要，必须通过水解食品中的蛋白质获得。非必需氨基酸在人体内能够合成以满足机体需要。上述 20 种构成蛋白质的氨基酸的前 8 种氨基酸是必需氨基酸，组氨酸是婴儿必需氨基酸。



1.2.1.2 蛋白质的重要性质

(1) 蛋白质的等电点

蛋白质分子与氨基酸分子一样,分子中有游离的氨基和羧基,属于两性化合物。在碱性溶液中($\text{pH} > \text{pI}$),酸性基团解离增大,使蛋白质分子带负电荷。在酸性溶液中($\text{pH} < \text{pI}$),碱性基团解离加强,使蛋白质分子带正电荷。在酸性或碱性蛋白质溶液中通过电流时,蛋白质分子便向阴极或阳极移动,当调节溶液到达某一 pH 值时,蛋白质分子因内部酸性基团和碱性基团的解离度相等而呈等电状态,蛋白质分子内的正、负电荷数相等,蛋白质不显电性,这时溶液的 pH 值叫做蛋白质的等电点。



不同的蛋白质有不同的等电点。如果蛋白质的碱性氨基酸(赖氨酸、精氨酸)的含量较高,那么等电 pH 值高,超过 pH 7.0;如果蛋白质的酸性残基(天冬氨酸、谷氨酸)占优势,其等电 pH 较低。在等电点时,蛋白质的溶解度、黏性、渗透压、膨胀性、稳定性等达到最低限度。蛋白质处于等电点时,将失去胶体的稳定性而发生沉淀现象。食品加工和储藏中都要利用或防止蛋白质因等电点而引起各种性质的变化。

(2) 蛋白质的胶体性质

蛋白质的相对分子质量很大,一般在10000~1000000之间,因此它的水溶液必然具有胶体的性质,如布朗运动、光散射现象、电泳现象、不能透过半透膜及具有较大的吸附能力等。蛋白质在生物体内常以溶胶和凝胶两种状态存在。例如,蛋清是蛋白质溶胶,蛋黄是蛋白质凝胶;动物肌肉纤维为蛋白质凝胶,而肉浆中的蛋白质为溶胶状态。溶于水的蛋白质能形成稳定的亲水胶体,统称为蛋白质溶胶,如豆浆、牛奶、肉冻汤等。由于大部分蛋白质的分子表面有许多亲水基(如 $-\text{SH}$ 、 $-\text{CO}-$ 等),吸引水分子在蛋白质颗粒周围形成一层水膜,这样就使蛋白质颗粒各自相互隔开而阻碍聚合下沉,保持其稳定性,这是使蛋白质溶胶稳定的一个因素。另一使蛋白质溶胶稳定的因素是蛋白质胶粒带有电荷。因此,蛋白质在溶液中靠水膜和电荷保持其稳定性,一旦消除水膜和电荷,蛋白质就开始黏在一起而形成较大的蛋白质团,最后从溶液中沉淀出来。在一定条件下,蛋白质溶胶可以变为凝胶,在凝胶体内,溶剂和蛋白质形成一种如同胶冻的外表均一体,其中有的水形成很厚的水膜包围着蛋白质颗粒,有的水则积存在胶粒间的空间。豆腐、奶酪等就是用蛋白质制成的凝胶体。溶胶可看做是蛋白质颗粒分散在水中的分散体系,而凝胶则可看做是水分散在蛋白质中的一种胶体状态。

(3) 蛋白质的变性

蛋白质分子的天然状态是在生理条件下最稳定的状态,当蛋白质分子所处的环境如温度、辐射、 pH 等变化到一定程度时,蛋白质的立体结构发生变化,从而引起蛋白质性质的改变,这种现象称为蛋白质的变性。从分子结构来看,蛋白质变性是由于多肽链特有的有规则排列即蛋白质特殊的空间构象遭到破坏所致,它不涉及主链肽键的断开,不包括蛋白质的分解,仅涉及蛋白质的二、三、四级结构的变化。蛋白质分子只有在一定的温度、 pH 范围内和其他特定条件下才能保持其立体结构,当蛋白质受到外界因素(如冷冻、加热、振荡等)的影响,保持蛋白质立体结构的副键就会被破坏,其中氢键的键能最小,最易破坏;副键的破坏使螺旋盘曲的多肽链伸展,原来处于分子内部的疏水基趋向表面,降低了表面的电



荷和水化作用。因此,蛋白质变性后,其溶解度、黏度、膨胀性、渗透性、稳定性都会发生明显的变化,同时也失去其生理活性功能。在日常生活中,蛋清受热凝固、毛发受热卷曲、肉类解冻后汁液流失等都是蛋白质变性的结果。

1.2.1.3 蛋白质的分类

根据蛋白质所含氨基酸的种类、数量及其营养价值,可将蛋白质分为完全蛋白质、半完全蛋白质和不完全蛋白质三类。

(1) 完全蛋白质

完全蛋白质是一种质量优良的、含有人体必需而在人体内不能合成的缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苏氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸、色氨酸和赖氨酸8种氨基酸的蛋白质,它所含的必需氨基酸种类齐全、数量充足、比例合理,不但能保证人体生长的正常需要,维持人的生命和健康,还可以促进生长发育,尤其有益于儿童的生长发育。酪蛋白、乳白蛋白、麦谷蛋白等均属于完全蛋白质。动物性食品如肉、鱼、蛋、乳等所含的蛋白质是完全蛋白质。

(2) 半完全蛋白质

这类蛋白质所含的各种人体必需氨基酸的种类比较齐全,但氨基酸比例不合适,其中某些氨基酸的数量不能完全满足人体的需要。若作为膳食中唯一的蛋白质来源时,只能够维持生命,而不能促进生长发育。如小麦和大麦中的麦胶蛋白就属于半完全蛋白质,赖氨酸含量很少。

(3) 不完全蛋白质

这类蛋白质所含的人体必需氨基酸的种类不全,缺少其中一种或一种以上氨基酸。若用作膳食中唯一的蛋白质来源时,既不能促进生长发育,也不能维持生命。植物性食品所含的蛋白质,大部分是不完全蛋白质,如玉米中的胶蛋白等属于不完全蛋白质。动物的结缔组织和肉皮中的胶原蛋白也属于不完全蛋白质。

食物中的蛋白质大都属于半完全蛋白质,食物之所以能够维持我们的身体健康,是因为人们从膳食中摄入的蛋白质不止一种,蛋白质与蛋白质之间可以互补。如果某种蛋白质中所缺的氨基酸,在另一种蛋白质中含量丰富,它们互相补充就可以变成完全蛋白质。如我们单吃牛肉,其蛋白质营养价值并不很高,但如果和面粉同吃,两种蛋白质互相补充,就能提高其综合营养价值。通常情况下,同类食物中蛋白质的互补作用不大,所以谷类蛋白可以用肉类或豆类来补充,但不能用别种谷类来补充。

根据蛋白质的化学组成分类,通常可将蛋白质分为单纯蛋白质和结合蛋白质。单纯蛋白质完全水解的产物只有 α -氨基酸一种成分,如白蛋白、球蛋白、谷蛋白、鱼精蛋白、组蛋白和硬蛋白等。结合蛋白质的水解产物由单纯蛋白质和耐热的非蛋白质物质结合而成,其非蛋白质部分称为辅基,即除 α -氨基酸外,还有其他化合物,如核蛋白、色蛋白、磷蛋白、糖蛋白等。

根据蛋白质的分子形状(分子外型的对称程度)分类,又可分为球状蛋白质和纤维状蛋白质。球状蛋白质分子对称性佳,外型接近球状或椭球状,溶解度较好,能结晶。球状蛋白质的营养价值较高,通常含有人体必需氨基酸,易于被人体消化吸收。球状蛋白质主要存在于动物性食品中,包括肌球蛋白、酪蛋白、白蛋白、血清球蛋白。纤维状蛋白质分子对称性差,分子类似细棒或纤维。纤维状蛋白质是机体组织结构不可缺少的蛋白质,由长氨基酸肽链连接成纤维状或卷曲成各种盘状结构,成为各种组织的支持物质,如结缔组织中的胶原蛋白、肌腱和韧带等。这类蛋白质一般不溶于水。



1.2.2 碳水化合物

1.2.2.1 碳水化合物的组成

碳水化合物也称为糖类，是含多羟基的醛类或多羟基的酮类化合物及其缩聚物和某些衍生物的总称。由于早期发现的此类化合物含氢和氧的比例和水中氢和氧的比例一样，因此碳水化合物这一名词一直沿用。

糖类物质的主要生物学作用是通过氧化而放出大量的能量，以满足生命活动的需要。淀粉、糖原是重要的生物能源，它能转化为生命必需的其他物质，如蛋白质和脂类物质。几乎所有动物、植物、微生物体内都含有糖，其中以存在于植物界最多，约占其干重的80%；在人和动物的器官组织中，含糖量不超过体内干重的2%；微生物体内含糖量约占菌体干重的10%~30%。在人体内除少量的粗纤维不能被消化吸收外，大部分糖类物质都能被人体利用。1g葡萄糖在体内完全氧化可产生16kJ热量，因此，糖类物质是供给人体热量最主要和最经济的原料。

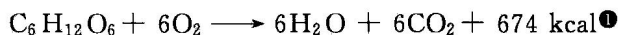
1.2.2.2 糖类物质的分类

(1) 单糖

单糖是不能再水解成更小分子的最简单的多羟基醛或多羟基酮，是糖类物质中最简单的一类。它是构成复杂糖类物质的单体。根据碳原子数目，可分为丙糖(C₃)、丁糖(C₄)、戊糖(C₅)、己糖(C₆)、庚糖(C₇)等或称为三碳糖、四碳糖、五碳糖、六碳糖、七碳糖等。在自然界分布广、意义大的是戊糖和己糖，核糖、脱氧核糖属戊糖，葡萄糖、果糖和半乳糖属己糖。

果实中存在大量葡萄糖和果糖。葡萄糖是构成食物中各种糖类的最基本单位，葡萄糖可以为人体直接吸收，是生物细胞能直接利用的唯一糖类。有些糖类完全由葡萄糖构成，如淀粉；有些则由葡萄糖与其他糖化合而成，如蔗糖。葡萄糖以单糖形式存在于自然食品中是较少的。果糖往往与葡萄糖同时存在于植物中，主要存在于水果和蜂蜜中。果糖是动物体易于吸收的糖分，果糖吸收后，经肝脏转变成葡萄糖被人体利用。半乳糖很少以单糖形式存在于食品中，在人体中也是先转变成葡萄糖再被人体利用。

新鲜果蔬在呼吸酶的催化下发生呼吸作用，发生以下的反应



呼吸作用的结果，不仅消耗了糖类，而且产生的热量还能促进果蔬的其他生化变化，并为微生物的繁殖创造了适宜的条件。针对果蔬的这种特点，采用冷却储藏或气调储藏控制它们的呼吸作用，延长它们的储藏期。

(2) 低聚糖

低聚糖是指聚合度小于或等于10的糖类，即把由2~10个单糖分子聚合所形成的糖类称为低聚糖，根据低聚糖水解后所形成的单糖的数量可分为二糖、三糖、…、十糖，其中以双糖最为重要，存在最为广泛，如蔗糖和麦芽糖等。低聚糖的通式，以六碳低聚糖为例，可表示如下

$$n(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6) \cdot (n-1)\text{H}_2\text{O}, n=2,3,4,\dots$$

低聚糖分为均低聚糖和杂低聚糖：含相同单糖的低聚糖称为均低聚糖，以同一种单糖聚合而成，如麦芽糖、异麦芽糖、海藻糖均由二分子葡萄糖组成，低聚果糖、低聚木糖以及聚

① 1cal=4.18J，全书余同。



合度小于 10 的糊精等均属均低聚糖；含不同单糖的低聚糖称为杂低聚糖，由不同种单糖聚合而成，如蔗糖由葡萄糖和果糖组成，乳糖或蜜二糖均由葡萄糖和半乳糖组成，棉籽糖由葡萄糖、果糖和半乳糖组成，水苏糖由葡萄糖、果糖和二分子半乳糖组成等。还可根据还原性分低聚糖为还原性低聚糖和非还原性低聚糖。低聚糖属小分子化合物，能结晶，可溶于水，有甜味，都有旋光活性。

(3) 多糖

多糖是由 10 个以上单糖组成的大分子糖，是自然界中分子结构复杂的一类高分子物质。多糖是一种高效的免疫调节剂，广泛存在于动植物和人体内。多糖在性质上与单糖和低聚糖不同，一般不溶于水，即使能溶，在水溶液中也不形成真溶液，只能形成胶体。多糖相对分子质量大，无甜味，无还原性，有旋光性，但无变旋现象，在酸或酶的作用下可水解为数百至数千个单糖以及二糖和部分非糖物质。根据多糖的组成特点可分为同多糖和杂多糖。由一种单糖聚合而成的多糖称为同多糖或均一多糖，如淀粉、纤维素和糖原等；由不同类型的单糖或衍生物结合而成的多糖称为杂多糖或不均一多糖，如果胶、半乳糖和甘露糖胶等。从功能上说，作为储存形式的多糖（淀粉和糖原等），在需要时，可以通过生物体内酶系统的作用，分解、释出单糖，是生物机体代谢能源之一。另一些不溶性多糖（植物的纤维素和动物的壳多糖），是构成植物和动物骨架的原料。

① 淀粉 淀粉是由许多葡萄糖组成的、能被人体消化吸收的植物多糖，是最丰富、最廉价的热能营养素。植物借光合作用合成葡萄糖并将其输送到淀粉储存器官转化为淀粉，以淀粉粒形式储存在植物细胞中，尤其是根、茎和种子细胞中。农作物的淀粉含量，因作物品种、生长条件、地理气候条件及生长期不同而变化。淀粉在谷类、豆类和薯类中含量最多，是人类碳水化合物的主要食物来源。淀粉是无味、无臭的呈颗粒状的白色粉末，无甜味，无还原性，有一定的吸湿性。根据分子结构特点，淀粉可分直链淀粉和支链淀粉。直链淀粉不溶于冷水，而能溶于热水，在热水中形成溶胶；支链淀粉不溶于水，又称为不溶性淀粉，但它能分散于凉水中形成胶体。淀粉颗粒不溶于冷水，但在常温下能吸收 40%~50% 的水分，其体积膨胀较少。当受热后水分渗入到颗粒内部，使可溶性直链淀粉逐渐吸收水分而体积增大，当体积增大到极限时，淀粉颗粒就发生破裂。直链淀粉向水分子中扩散，体积增大很多倍，而支链淀粉以淀粉残粒形式保留在水中，这一过程称为淀粉的溶胀。淀粉颗粒在一定的温度（一般在 60~80℃）下，吸水后体积膨胀，进而溶胀、分裂，由淀粉大颗粒分解为细小淀粉分子而形成半透明的胶体溶液，此过程称为淀粉糊化，糊化后的淀粉称为 α -淀粉。在适宜的温度下长期存放， α -淀粉会发生老化，老化是胶体溶液中淀粉分子重新聚集与结晶的过程。与生淀粉（ β -淀粉）比较，老化后的淀粉不易被人体所吸收，因此，在工业上常采用 -20℃ 速冻来避免淀粉老化。淀粉很容易发生水解反应，在有水的情况下，加热就可以发生水解反应，当与无机酸共热时，或在淀粉酶的作用下，可彻底水解为葡萄糖。

② 纤维素 纤维素是存在于植物体中不能被人体消化吸收的多糖和木质素。植物细胞与动物细胞相比，有特殊的细胞壁，纤维素是植物细胞壁的主要结构物质。纤维素不溶于水，但吸水膨胀，无还原性，性质稳定。纤维素水解也比淀粉困难得多，一般需要在浓酸中或用稀酸在加压条件下进行。蔬菜、水果及谷类外皮中纤维素含量较高。纤维素在食品中的作用不是其中的营养成分，但能促使胃肠道的蠕动和刺激消化腺的分泌。

③ 果胶 果胶是典型的植物多糖，主要存在于植物细胞壁和细胞壁之间，起细胞间的粘接作用。果胶通常存在于水果和蔬菜之中，尤其是柑橘类和苹果中含量较多。果胶是一种无定形物质，可形成凝胶和胶冻，在热溶液中溶解，在酸性溶液中遇热形成胶态。果胶一般有三种状态，即原果胶、果胶和果胶酸。未成熟的果实中主要是原果胶，其组织坚硬，随着