

乳与乳制品的 物理化学

张宗岩 编



RUYURU
ZHIPIN

轻工业出版社 DEWULIHUAXUE

乳与乳制品的物理化学

张宗岩 编

轻工业出版社

内 容 提 要

本书简要地介绍乳的化学成分及物理性质,着重介绍乳与奶油、乳粉、炼乳、干酪加工过程中的物理化学及贮藏过程中的变化。同时,简要地介绍酸乳制品、干酪素及乳糖加工过程中的物理化学变化。

本书可供乳品厂工程技术人员、营养卫生人员及有关院校师生参考。

乳与乳制品的物理化学

张宗岩 编

*

轻工业出版社出版

(北京广安门南滨河路25号)

轻工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

787×1092毫米 1/32 印张: 6 1/4 字数 144 千字

1987年12月第一版第一次印刷

印数 1—6,200 定价: 1.40元

统一书号: 15042·2094

ISBN 7-5019-0200-3/TS·0128

前 言

乳与乳制品是营养价值很高的食品，乳品工业的发展，对于改善人民生活，增进人民健康，哺育婴儿，补充老年人的营养具有重要的作用。今后，随着我国生产力的不断发展和人民生活水平的逐步提高，对乳与乳制品的需要更显得迫切。

目前，乳与乳制品加工生产逐渐机械化和自动化，不断引进国外先进技术和设备，大大促进了乳品工业的发展。

为适应乳品工业发展的需要，提高产品质量，编写了《乳与乳制品的物理化学》一书。本书着重介绍乳与乳的加工、奶油、乳粉、炼乳、干酪加工过程中的物理化学，同时简单介绍酸乳制品、干酪素及乳糖加工过程中的物理化学。通过这些物理化学现象的解释，使读者获得乳品加工的理论知识。

本书在编写过程中曾得到各方面同志的帮助和指导，提出宝贵意见。并有许多同志帮助整理和绘图，谨此一并致谢。

由于编者水平有限，经验不足，本书会有许多缺点和错误，希望读者批评指正，以便今后改进。

编 者

目 录

第一章 乳的化学成分及物理性质	(1)
第一节 乳的概念	(1)
第二节 乳的化学成分	(2)
一、水分	(2)
二、乳蛋白质	(3)
三、乳脂类	(10)
四 乳糖	(20)
五 乳中的维生素	(23)
六 乳中的无机物及盐类	(37)
七、乳中酶	(39)
八、乳中柠檬酸	(45)
九、乳中气体	(45)
第三节 乳的物理性质	(46)
一、乳的颜色	(46)
二、乳的滋味与气味	(46)
三、乳的密度与比重	(47)
四 乳的冰点与沸点	(49)
五 乳的酸度与pH值	(50)
六 表面张力与粘度	(53)
七、电导率	(54)
八、乳的比热容	(55)
九、折射率	(56)

第二章 乳在加工过程中的物理化学..... (57)

第一节 乳初步加工及贮藏时的变化..... (57)

一、乳初步加工时的变化..... (57)

二、乳在贮存时的变化..... (58)

三、乳在冷藏时的变化..... (60)

第二节 乳在加热过程中的变化..... (64)

一、巴氏杀菌法及超高温灭菌法..... (64)

二、乳蛋白质的变化..... (65)

三、乳糖的变化..... (68)

四、乳脂肪的变化..... (76)

五、乳盐类的变化..... (77)

第三节 均质化乳的特性..... (79)

一、均质的原理..... (79)

二、均质化乳中脂肪球破碎特性..... (79)

三、均质化对乳蛋白质的影响..... (82)

四、均质化乳的特点..... (82)

第三章 奶油加工的物理化学..... (84)

第一节 稀奶油分离过程的理论..... (84)

第二节 稀奶油的生物化学成熟及物理成熟..... (87)

一、稀奶油的生物化学成熟..... (88)

二、稀奶油的物理成熟..... (90)

第三节 奶油形成理论..... (92)

第四节 奶油的组织状态及物理结构..... (95)

一、奶油的组织状态..... (95)

二、奶油的物理结构·····	(96)
第五节 奶油在贮藏过程中的变化·····	(100)
一、乳脂肪的水解作用·····	(100)
二、乳脂肪的氧化作用·····	(101)

第四章 乳粉加工的物理化学····· (111)

第一节 乳粉喷雾干燥颗粒形成·····	(111)
一、喷雾干燥原理·····	(111)
二、压力喷雾干燥与离心喷雾干燥的特点 ·····	(114)
三、乳滴在干燥塔内的运动·····	(119)
第二节 浓缩在喷雾干燥中的意义·····	(121)
第三节 乳粉颗粒的物理化学特性·····	(122)
一、乳粉颗粒的形状和大小·····	(122)
二、乳粉中的气泡·····	(123)
三、乳粉的密度·····	(123)
四、乳粉中脂肪的状态·····	(124)
五、乳粉中蛋白质的状态·····	(124)
六、乳粉中乳糖的状态·····	(125)
七、乳粉的色泽·····	(125)
八、乳粉的溶解度·····	(125)
第四节 速溶乳粉的物理化学特性·····	(126)
一、乳粉颗粒附聚·····	(126)
二、速溶乳粉颗粒结构特性·····	(128)
三、具有可润湿的表面·····	(130)
第五节 乳清粉物理化学特性·····	(132)
一、乳清的利用·····	(132)

二、乳清粉	(133)
三、脱盐乳清粉	(134)
四、乳糖预结晶乳清粉	(137)
第六节 乳粉在贮藏过程中的变化	(139)
一、脂肪酸败气味	(139)
二、氧化气味	(139)
三、褐变及陈腐气味	(140)
四、吸湿性	(141)
第五章 炼乳加工的物理化学	(143)
第一节 甜炼乳加工的物理化学变化	(143)
一、蔗糖比率	(143)
二、预热对甜炼乳变稠的影响	(144)
三、乳糖结晶的理化特性	(144)
四、甜炼乳在贮藏过程中的变化	(151)
第二节 淡炼乳加工的物理化学变化	(158)
一、乳热稳定性及高温灭菌	(158)
二、淡炼乳在贮藏过程中的变化	(159)
第六章 酸乳制品的生物化学及物理化学	(163)
第一节 酸乳制品的食用价值	(163)
第二节 乳糖发酵的生物化学	(164)
一、乳酸发酵	(164)
二、酪酸发酵	(164)
三、丙酸发酵	(165)
四、酒精发酵	(165)

第三节 酸乳制品的物理化学特性·····	(166)
一、酸牛乳·····	(166)
二、嗜酸菌乳·····	(170)
三、牛乳酒·····	(170)
第七章 干酪加工的物理化学 ·····	(173)
第一节 干酪的化学成分·····	(173)
第二节 酪蛋白凝固的物理化学特性·····	(174)
一、凝乳酶·····	(174)
二、凝乳酶活力的测定·····	(175)
三、酪蛋白的皱胃酶凝固特性·····	(176)
第三节 干酪在加工过程中的变化·····	(179)
第四节 干酪成熟的物理化学变化·····	(182)
一、蛋白质的变化·····	(182)
二、乳糖的变化·····	(184)
三、维生素的变化·····	(185)
四、盐对干酪成熟的影响·····	(186)
五、风味的产生·····	(187)
六、气孔的形成·····	(188)
七、水分的变化·····	(188)
第八章 干酪素及乳糖加工的物理化学 ·····	(190)
第一节 干酪素加工的物理化学变化·····	(190)
一、酪蛋白酸凝固·····	(190)
二、干酪素的物理化学特性·····	(192)
第二节 乳糖加工的物理化学变化·····	(193)

一、乳清的成分.....	(193)
二、乳清蛋白凝结分离的特性.....	(195)
三、乳清在浓缩过程中的变化.....	(199)
四、乳糖结晶.....	(200)

第一章 乳的化学成分及物理性质

第一节 乳的概念

乳是哺乳动物的乳腺所分泌的一种白色带淡黄色、不透明、微有甜味的液体。乳中含有培育初生机体所需要的有营养价值易消化的物质。乳的主要成分有水、蛋白质、脂肪、乳糖、维生素、无机盐、磷脂、酶、气体、免疫体以及其他微量成分。

牛乳的各种成分的含量为：

水	87~89%
干物质	11~14%
其中	
脂肪	3~5%
蛋白质	3~3.7%
乳糖	4.5~5%
无机盐	0.6~0.75%

乳是各种化学物质的混合物，同时它是复杂的具有胶体特性的生物学液体。乳由两种主要部分组成：一种是液体，称为分散媒；另一种是分散在分散媒中间的微粒，称为分散质。分散媒和分散质合称为乳的分散系。

乳中所含有的水分大部分是以游离状态存在，成为乳的胶体体系的分散媒。乳糖和可溶性盐类以分子、离子状态分散在水中。蛋白质以极细的微胶粒状态呈悬浊质和乳浊质

存在于乳中。脂肪以脂肪球状态呈乳浊液和悬浊液分散在乳中。分散在分散媒（水）中的成分——蛋白质、脂肪、乳糖、无机盐等称为分散相或分散质。

第二节 乳的化学成分

一、水 分

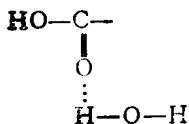
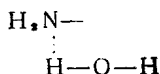
水是乳中主要成分。主要分为游离水、结合水和结晶水。

1. 游离水

存在于细胞间隙和物质的毛细管中，占水的绝大部分（87~89%），它能溶解各种不同物质（有机物、无机盐和气体等），是乳的分散媒，很多理化过程及微生物学过程均与游离水有关。游离水能够产生蒸汽压，在100℃条件下转为蒸汽状态。在0℃时易结冰。乳粉在喷雾干燥条件下首先排除的是游离水。

2. 结合水

这部分水含量较少，约占2~3%，水分子（H-O-H）通过氢键（-H...）与蛋白质的亲水基结合，称为化学结合水。结合水与蛋白质的亲水基以氢键结合的主要是-NH₂和HO-C-，其结合形式如下



乳与乳制品中结合水的数量比较少。根据许多材料介绍, 结合水的含量如表1-1。

表 1-1 乳制品的结合水含量

名 称	结合水含量(%)	名 称	1g物质所含 结合水量 (g)
乳 粉	2.0~3.5	酪蛋白	0.60~0.69
脱脂乳粉	2.13~2.59	白蛋白	1.30~1.32
含脂率为20% 的稀奶油	2.5~3.42	乳清蛋白	0.75
酪 乳	1.75	乳 糖	0.027
初 乳	4.62	脂 肪	0.104~0.117
脱脂炼乳	11.62	脂肪球膜物质	0.6~0.62
		磷 脂	5.35~6.30

结合水与一般水的性质不同, 失去了溶解其他物质的特性, 在通常水结冰的温度下不冻结, 它要在温度降低到 -40°C 才结冰。

在生产乳粉时不能得到绝对脱水的产品, 在良好喷雾干燥条件下, 还保留3%左右的水分, 主要是结合水。

3. 结晶水

存在结晶性水合物中, 水是结构成分。乳糖含有一分子的结晶水 $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11} \cdot \text{H}_2\text{O}$ 。

二、乳 蛋 白 质

乳中蛋白质含量为3~3.7%, 是主要的含氮物质, 其中主要为酪蛋白和乳清蛋白, 还有少量的脂肪球膜蛋白。乳清蛋白中有对热不稳定的乳白蛋白及乳球蛋白, 还有对热稳

表 1-2

牛乳蛋白质的名称及性质

名 称	脱脂乳蛋白 质中的 百分比 (%)	电泳 的峰 (N ₀)	电泳迁移率	等电点 (pH)	沉降常数 (S ₂₀) ²	分子 量	变异体及分离成分
1. 酪蛋白	(76~86)			(4.6)			α_{S1} -变异体 A、B、C、D
α_1 -酪蛋白	45~55	1	-6.7	4.1	3.99	23,000	α_{S0} 、 α_{S2} 、 α_{S3} 、 α_{S4} 、 α_{S5} -
κ -酪蛋白	8~15	1	-6.7	4.1	1.4	19,000	变异体 K-A、K-B
β -酪蛋白	25~35	2	-3.1	4.5	1.57	24,000	变异体 A ¹ 、A ² 、A ³ 、 B、C、D、B ₀
γ -酪蛋白	3~7	3	-2.0	5.8~6.0	1.55	21,000	变异体 A ¹ 、A ² 、A ³ 、B 成分 R、S、TS
2. 乳清蛋白	(14~24)						
α -乳白蛋白	2~5	4	-4.2	4.2~4.5	1.75	14,400	变异体 A、B
β -乳球蛋白	7~12	6	-5.3	5.3	2.7	36,000	变异体 A、A ₀ 、B、 B ₀ 、C、D
血清白蛋白	0.7~1.3	7	-6.7	4.7	4.0	69,000	A ₁ 、A ₂ 对立基因型
IgG ₁	1.2~3.3	1.2	-2.2~-4.5	5.5~6.8	6.5~7.0	161,000~163,000	
IgG ₂	0.2~0.7	1	—	7.5~8.3	6.5~7.0	150,000~154,000	
IgM	0.1~0.7	2	—	—	18.2~19.8	1,000,000	
IgA	0.2~0.7	2(?)	—	—	10.8~11.0	385,000~417,000	
总、脉	2~6	3,5,8	-3.48~-9.2	3.3~3.7	0.78~1.6	4,100~40,800	含糖蛋白的复合成分

定的脲和脲。此外，还有非蛋白含氮物质。关于乳蛋白质的命名及性质如表1-2。

1. 酪蛋白

酪蛋白是含磷蛋白质，在pH值等于4.6~4.7时沉淀。约占乳蛋白质总量的80~82%。酪蛋白含有胱氨酸和蛋氨酸这两种含硫氨基酸，但不含半胱氨酸。在酪蛋白中还含有磷酸，因而酪蛋白的一磷酸酯键与丝氨酸的羟基结合，所以酪蛋白是典型的磷蛋白质。

酪蛋白的元素组成：C53.07%、H7.13%、N15.64%、P0.80%、S0.76%、O22.60%。

酪蛋白主要有四种类型： α_s -酪蛋白、 β -酪蛋白、 k -酪蛋白及 γ -酪蛋白。 α_s -酪蛋白主要成分为 α_{s1} -酪蛋白，约占酪蛋白总量的50%，此外还有 α_{s2} -酪蛋白。 β -酪蛋白约占酪蛋白总量的30%， k -酪蛋白占15%， γ -酪蛋白占5%。在酪蛋白成分中还有不同的遗传变异体。

酪蛋白与钙结合形成酪蛋白酸钙，再与磷酸钙构成酪蛋白酸钙-磷酸钙复合体，与水形成悬浊状的胶体。此外，酪蛋白酸钙-磷酸钙复合体还结合着柠檬酸、镁等物质。对酪蛋白复合体成分特性的了解，促使人们设想用模型来说明酪蛋白胶粒的结构。近年来，以瓦格（Waugh）氏“壳-核”式模型表示酪蛋白胶体微粒结构，如图1-1。

酪蛋白胶粒是由 α_s -和 β -酪蛋白定量结合成热力学稳定的大小一致的多个玫瑰花结构以形成胶粒的“核”，核的外面由 k -酪蛋白排列在表面成为“壳”的保护胶体，使 α_s -酪蛋白不受钙离子沉淀。 k -酪蛋白起着胶体保护作用，没有 k -酪蛋白时，其他酪蛋白和钙离子的复合物便将沉淀出来。

α_{s1} 、 β -及 k -酪蛋白对钙离子的敏感程度不同， α_s -酪

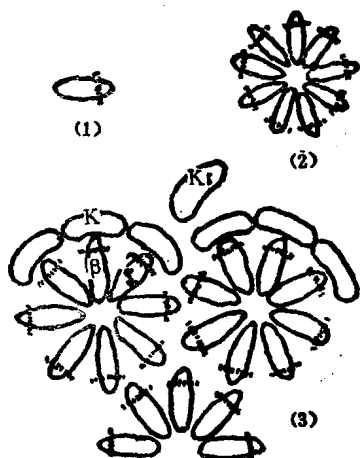


图 1-1 酪蛋白胶粒瓦格氏“壳-核”式模型

(1) —— α_{11} -或 β -酪蛋白酸钙单体，

具有一个荷电的磷酸盐团

(2) —— α_{11} 与 β -酪蛋白酸钙形成的

中心聚合体的平面模型

(3) —— κ -酪蛋白覆盖在中心聚合体表面形成酪蛋白胶粒

蛋白容易受钙离子的影响而凝聚：在室温以上以及有钙离子存在时， β -酪蛋白亦形成沉淀；而 κ -酪蛋白不仅本身稳定，还具有抑制 α_{11} 及 β -酪蛋白在钙离子影响下沉淀的作用。乳中酪蛋白酸钙磷酸钙胶粒所以能保持相对稳定悬浮状态，与存在 κ -酪蛋白的胶体保护作用分不开。

乳中的酪蛋白酸钙磷酸钙各个微粒之间，大小形状差别很大。酪蛋白胶粒呈球状形式存在，直径约30~300纳米，平均约100纳米。乳中酪蛋白胶粒数约为 $5 \sim 15 \times 10^{12}$ /毫升。

2. 乳清蛋白

约占乳蛋白质总量的20%。乳清蛋白分为对热不稳定和对热稳定两部分。对热不稳定的有 β -乳球蛋白、 α -乳白蛋白、血清白蛋白及免疫球蛋白类。对热稳定的主要有酪和胨。

(1) α -乳白蛋白：在乳中含量约0.5%，在初乳中含量最多，达10~12%。 α -乳清白蛋白占乳清蛋白总量的25%。常温下不能用酸凝固，但在弱酸性时如加温即行凝固，等电点pH值为4.1~4.8。与酪蛋白主要区别为不含磷，而含大量硫。其元素含量为C52.19%、H7.18%、N15.77%、S1.73%、O21.13%。皱胃酶不能使其凝固。

(2) β -乳球蛋白：在正常乳中 β -乳球蛋白含量为0.1%，而在初乳中含量高达5~15%。 β -乳球蛋白约占乳清蛋白的50%。在乳中呈溶解状态，等电点pH值为5.1~5.6，平均为5.2，在等电点时加热至75℃即沉淀。 β -乳球蛋白元素组成：C51.88%、H6.96%、N0.86%、O24.64%、P0.24%。皱胃酶不能使其凝固。加热、增加钙离子浓度都能使它沉淀。

(3) 免疫球蛋白：免疫球蛋白包括一族具有共同的理化性质和共同抗原决定子的大分子蛋白质。它们存在于血清和其他体液中。在牛的初乳中免疫球蛋白含量相当高，犊牛初生后最初数天内，通过初乳的免疫球蛋白，从母体中获得大部分抗体。免疫球蛋白含有大量的脯氨酸，可能对迅速生长的幼畜血红蛋白形成起着重要作用。同时，对蛋白质分解酶还具有抵抗性。乳的免疫球蛋白结合在小肠粘膜中，对防止病毒或细菌的侵入有一定的意义。

乳中有三类免疫球蛋白，IgG（可再分为IgG₁和IgG₂）、IgA和IgM。IgG₁在乳中较多，可能是从血清中