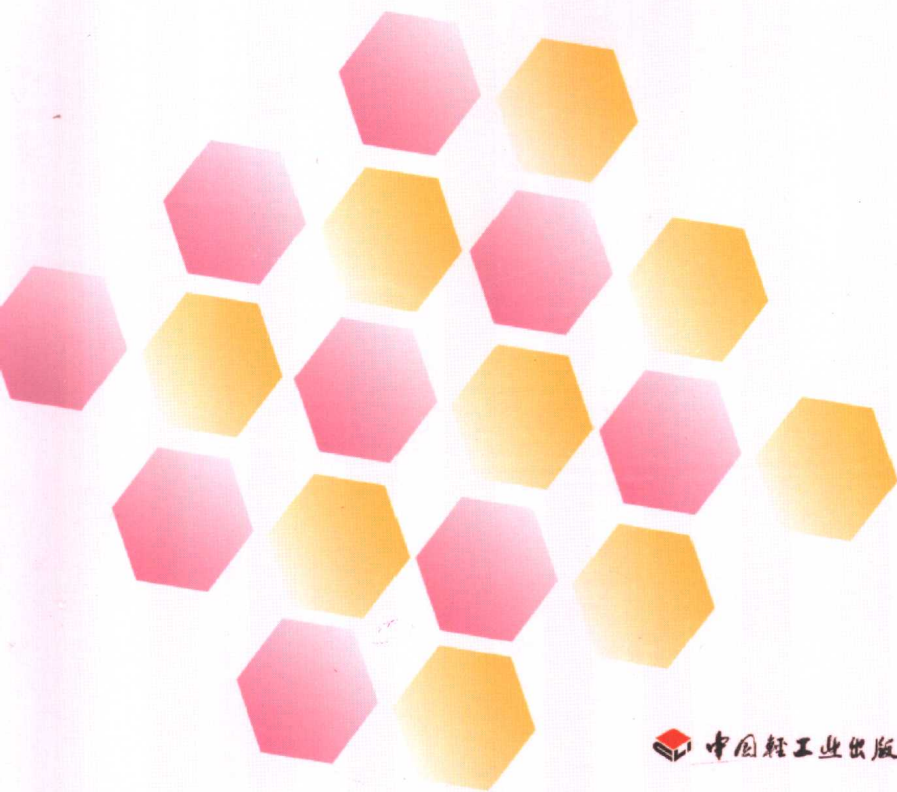


乳品科学技术丛书

RUPIN HUAXUE

# 乳品化学

主编 郭本恒



 中国轻工业出版社

●乳品科学技术丛书●

# 乳 品 化 学

主 编 郭本恒

编 者 吴 昊 范陈剑 郑小平

**图书在版编目(CIP)数据**

乳品化学/郭本恒主编.—北京:中国轻工业出版社,  
2001.7

(乳品科学技术丛书)

ISBN 7-5019-3000-7

I.乳… II.郭… III.乳制品-化学分析  
IV.TS252.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 13459 号

责任编辑:鲁莉蓉

策划编辑:熊慧珊 责任终审:滕炎福 封面设计:崔 云

版式设计:丁 夕 责任校对:李 靖 责任监印:胡 兵

\*

出版发行:中国轻工业出版社(北京东长安街6号,邮编:100740)

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

联系电话:010—65241695

印 刷:三河市宏达印刷有限公司

经 销:各地新华书店

版 次 2001 年 7 月第 1 版 2001 年 7 月第 1 次印刷

开 本:850×1168 1/32 印张:14 125

字 数 353 千字 印数:1—3000

书 号 ISBN 7-5019-3000-7/TS·1818

定 价:33.00 元

·如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换·

## 前 言

乳制品是除母乳以外营养最为均衡的全价食品,它含有人体所需的全部营养成分,在人们的膳食结构中有其它食品无法替代的地位和作用。由于多方面的原因,我国乳的人均消费水平很低,2000 年人均均为 6.6kg,加工水平和科技水平相对滞后。有关的资料和书籍多关注乳品加工的工艺技术,未能反映国际乳品发展的最新水平。鉴于此编撰一套能反映国际乳品发展趋势和动态的系列丛书,是十分必需和必要的。

《现代乳品加工学》、《乳品化学》、《乳品微生物学》系列丛书,是一套互为联系又相对独立的著作,有关乳与乳制品的基础理论部分均反映在《乳品化学》和《乳品微生物学》中,《现代乳品加工学》则主要介绍乳品的加工技术。本系列丛书参阅了国外大量的著作和文献,对国际乳品研究的前沿领域和最新研究成果均有提及和介绍,可为科学研究、教学和企业界的朋友从事乳品事业提供借鉴和帮助。

在此,要感谢为本丛书写作付出大量心血和汗水的同事和朋友。限于作者的水平和能力,书中一定存在许多缺点和问题,甚或技术性的错误,敬请读者批评指正。

郭本恒

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| <b>第一章 牛乳的组成、结构和形成</b> ..... | 1  |
| <b>第一节 概述</b> .....          | 1  |
| <b>第二节 乳的组成和结构</b> .....     | 1  |
| 一、乳的主要成分 .....               | 1  |
| 二、乳的结构 .....                 | 3  |
| 三、乳的变化 .....                 | 7  |
| 四、乳体系的构成 .....               | 8  |
| <b>第三节 乳的分泌</b> .....        | 9  |
| 一、牛的乳房解剖 .....               | 9  |
| 二、乳成分的前体 .....               | 12 |
| 三、乳的分泌 .....                 | 15 |
| <b>第四节 乳成分的生物合成</b> .....    | 18 |
| 一、乳脂类的生物合成 .....             | 18 |
| 二、乳蛋白质的生物合成 .....            | 19 |
| 三、乳糖的生物合成 .....              | 21 |
| 四、柠檬酸盐 .....                 | 22 |
| 五、乳成分的转移过程 .....             | 23 |
| <b>第二章 乳的物理化学性质</b> .....    | 26 |
| <b>第一节 乳的物理性质</b> .....      | 26 |
| 一、密度 .....                   | 26 |
| 二、旋光特性 .....                 | 28 |
| 三、酸度 .....                   | 33 |
| 四、氧化还原电位 .....               | 37 |
| 五、氧化还原反应和光氧化 .....           | 40 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 六、微生物反应底物 .....        | 44  |
| 七、表面张力和界面张力 .....      | 47  |
| 八、比热容 .....            | 49  |
| 九、冰点和沸点 .....          | 50  |
| 十、电导率 .....            | 52  |
| 第二节 乳的流变学特性 .....      | 53  |
| 一、牛顿流体 .....           | 53  |
| 二、非牛顿流体 .....          | 55  |
| 三、胶凝与流变学特性 .....       | 57  |
| 四、乳脂肪与流变学特性的关系 .....   | 60  |
| 第三节 乳成分与空气间的相互作用 ..... | 62  |
| 一、发泡特性概述 .....         | 62  |
| 二、乳产品的发泡 .....         | 64  |
| 三、搅打和搅拌 .....          | 65  |
| 四、冰淇淋产品的膨胀性能 .....     | 68  |
| 第四节 乳的风味 .....         | 69  |
| 一、乳的风味物质 .....         | 69  |
| 二、乳与乳制品的不良风味 .....     | 73  |
| 三、乳制品的风味 .....         | 77  |
| 第五节 乳的加热 .....         | 83  |
| 一、乳的加热变化 .....         | 84  |
| 二、乳的化学反应动力学 .....      | 87  |
| 三、蛋白质的变化 .....         | 92  |
| 四、褐变反应 .....           | 96  |
| 五、结垢 .....             | 99  |
| 第六节 乳的加工处理引起的变化 .....  | 102 |
| 一、浓缩与水分的关系 .....       | 102 |
| 二、浓缩 .....             | 107 |
| 三、蒸发 .....             | 113 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| 四、冷冻 .....                            | 114 |
| 五、干燥 .....                            | 116 |
| 六、膜处理 .....                           | 120 |
| 七、蛋白加工 .....                          | 122 |
| 八、再制 .....                            | 127 |
| <b>第三章 乳蛋白质化学</b> .....               | 131 |
| <b>第一节 酪蛋白化学</b> .....                | 131 |
| 一、酪蛋白的遗传变种和性质 .....                   | 131 |
| 二、酪蛋白的化学组成 .....                      | 135 |
| 三、酪蛋白的一级结构 .....                      | 138 |
| 四、酪蛋白的空间结构 .....                      | 142 |
| 五、酪蛋白的自聚 .....                        | 147 |
| 六、酪蛋白的金属结合性质 .....                    | 149 |
| 七、酪蛋白胶体 .....                         | 150 |
| <b>第二节 乳清蛋白化学</b> .....               | 158 |
| 一、 $\beta$ -乳球蛋白 .....                | 158 |
| 二、 $\alpha$ -乳白蛋白 .....               | 170 |
| 三、其它乳清蛋白 .....                        | 180 |
| <b>第三节 乳的热稳定性</b> .....               | 183 |
| 一、乳热稳定性的测定 .....                      | 183 |
| 二、影响乳热稳定性的因素 .....                    | 184 |
| 三、加热后乳的物理化学变化 .....                   | 188 |
| 四、乳的热凝集机理 .....                       | 191 |
| <b>第四节 乳的酶凝集作用</b> .....              | 193 |
| 一、蛋白酶反应的动力学 .....                     | 194 |
| 二、 $\kappa$ -酪蛋白 Phe—Met 肽键的敏感性 ..... | 195 |
| 三、凝集反应发生的条件和影响因素 .....                | 197 |
| 四、整个凝乳反应的机理和模型 .....                  | 199 |
| 五、乳的预处理对酶反应的影响 .....                  | 203 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 六、凝乳酶的固定化 .....               | 204 |
| 第五节 乳的酒精稳定性 .....             | 204 |
| 一、酒精稳定性的测试 .....              | 205 |
| 二、酒精稳定性和酪蛋白结构 .....           | 208 |
| 三、酒精实验在实际工作中的应用 .....         | 212 |
| 第六节 灭菌乳的老化胶凝 .....            | 213 |
| 一、灭菌乳的贮存稳定性和胶凝 .....          | 214 |
| 二、影响胶凝的因素 .....               | 215 |
| 三、UHT 灭菌处理和贮存引起乳的物理化学变化 ..... | 218 |
| 四、灭菌乳的胶凝机理 .....              | 223 |
| 第七节 乳蛋白的功能性质 .....            | 224 |
| 一、酪蛋白和酪蛋白盐的功能特性 .....         | 225 |
| 二、乳清蛋白的功能特性 .....             | 226 |
| 三、乳蛋白质的改性 .....               | 228 |
| 第八节 乳粉加工中蛋白质的变化 .....         | 230 |
| 一、预热处理 .....                  | 231 |
| 二、蒸发过程和干燥过程 .....             | 239 |
| 第九节 乳蛋白的营养价值 .....            | 241 |
| 一、酪蛋白的营养价值 .....              | 243 |
| 二、乳清蛋白的营养价值 .....             | 244 |
| 第四章 乳脂肪化学 .....               | 247 |
| 第一节 乳脂肪组成和结构 .....            | 247 |
| 一、乳中脂肪的物理形态和含量 .....          | 247 |
| 二、乳中的脂肪类物质 .....              | 249 |
| 三、乳脂肪的脂肪酸组成 .....             | 254 |
| 四、乳脂肪的结构 .....                | 263 |
| 五、乳脂肪球膜 .....                 | 267 |
| 第二节 乳脂肪球的物理化学性质 .....         | 271 |
| 一、乳脂肪球的大小分布 .....             | 272 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 二、乳脂肪球的组成差异 .....            | 275        |
| 三、乳脂肪球中的脂肪晶体 .....           | 275        |
| 四、乳脂肪球间的互作能量 .....           | 276        |
| 五、乳脂肪球与空气的相互作用 .....         | 277        |
| 六、乳脂肪球的破坏 .....              | 279        |
| 七、乳脂肪球表面的变化 .....            | 280        |
| 八、改性脂肪的性质 .....              | 283        |
| 九、均质对脂肪性质的影响 .....           | 284        |
| 十、含脂产品的流变学 .....             | 285        |
| <b>第三节 乳脂肪酸败与氧化 .....</b>    | <b>288</b> |
| 一、乳脂肪的酸败 .....               | 288        |
| 二、脂解作用的利与弊 .....             | 294        |
| 三、脂肪氧化 .....                 | 299        |
| <b>第五章 乳糖、矿物元素和维生素 .....</b> | <b>312</b> |
| <b>第一节 乳糖的物理化学性质 .....</b>   | <b>312</b> |
| 一、乳糖的物理性质 .....              | 312        |
| 二、乳制品中乳糖的变化 .....            | 322        |
| 三、乳糖的营养价值 .....              | 329        |
| <b>第二节 乳中的矿物元素 .....</b>     | <b>332</b> |
| 一、乳中矿物元素的分布 .....            | 332        |
| 二、乳中矿物元素的物理化学性质 .....        | 339        |
| 三、加工对矿物元素的影响 .....           | 350        |
| 四、乳中矿物元素的营养价值 .....          | 355        |
| <b>第三节 乳中的维生素 .....</b>      | <b>359</b> |
| 一、概述 .....                   | 359        |
| 二、乳中的脂溶性维生素 .....            | 360        |
| 三、乳中的水溶性维生素 .....            | 368        |
| 四、乳中维生素的营养价值 .....           | 374        |
| <b>第六章 乳中的生物活性物质 .....</b>   | <b>380</b> |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一节 乳中的脂酶 .....              | 381 |
| 一、脂酶的结构 .....                | 381 |
| 二、脂酶的催化性质 .....              | 383 |
| 三、脂酶在乳中的状态和脂解 .....          | 384 |
| 第二节 乳中的蛋白酶 .....             | 385 |
| 一、血纤维蛋白溶酶的分离和性质 .....        | 385 |
| 二、乳中的血纤维蛋白溶酶体系 .....         | 386 |
| 三、乳蛋白的血纤维蛋白溶酶分解 .....        | 386 |
| 四、影响乳中血纤维蛋白溶酶活力的因素 .....     | 387 |
| 五、血纤维蛋白溶酶活性在乳制品中的重要性 .....   | 388 |
| 六、乳中的其它蛋白酶 .....             | 389 |
| 第三节 乳中的磷酸酶 .....             | 389 |
| 一、碱性磷酸酶 .....                | 389 |
| 二、酸性磷酸酶 .....                | 391 |
| 第四节 乳中的过氧化物酶 .....           | 393 |
| 一、L <sub>p</sub> 的基本性质 ..... | 394 |
| 二、L <sub>p</sub> 的生物活性 ..... | 394 |
| 第五节 乳中的溶菌酶 .....             | 396 |
| 一、溶菌酶的基本性质 .....             | 396 |
| 二、影响溶菌酶活力的因素 .....           | 397 |
| 三、溶菌酶对微生物的作用 .....           | 400 |
| 四、溶菌酶在食品中的应用 .....           | 400 |
| 第六节 乳中的其它酶类 .....            | 402 |
| 一、L-乳酸脱氢酶 .....              | 402 |
| 二、过氧化氢酶 .....                | 403 |
| 三、谷胱甘肽过氧化物酶 .....            | 403 |
| 四、超氧化物歧化酶 .....              | 404 |
| 五、黄嘌呤氧化酶 .....               | 405 |
| 六、硫巯基氧化酶 .....               | 405 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 七、 $\gamma$ -谷氨酰基转移酶 .....     | 406 |
| 八、核糖核酸酶 .....                  | 407 |
| 九、淀粉酶 .....                    | 407 |
| 十、N-乙酰- $\beta$ -D-葡萄糖胺酶 ..... | 408 |
| 十一、甘露糖苷酶 .....                 | 408 |
| 十二、 $\beta$ -葡萄糖醛酸酶 .....      | 408 |
| 十三、核苷酸酶 .....                  | 409 |
| 十四、腺苷三磷酸酶 .....                | 409 |
| 十五、果糖-二磷酸盐醛缩酶 .....            | 409 |
| 十六、其它酶类 .....                  | 410 |
| 第七节 乳中的生物活性物质体系 .....          | 412 |
| 一、动物的免疫系统 .....                | 412 |
| 二、乳中生物活性物质的分布和浓度 .....         | 414 |
| 第八节 免疫球蛋白 .....                | 415 |
| 一、免疫球蛋白的分布范围 .....             | 415 |
| 二、免疫球蛋白的物理化学性质 .....           | 417 |
| 三、免疫球蛋白的结构和组成 .....            | 418 |
| 四、免疫球蛋白在母体和幼体间的转移 .....        | 420 |
| 五、免疫球蛋白的生物学功能 .....            | 421 |
| 第九节 乳中的乳铁蛋白 .....              | 423 |
| 一、乳铁蛋白的基本性质 .....              | 423 |
| 二、乳铁蛋白的金属结合性质 .....            | 424 |
| 三、乳铁蛋白的热力学性质 .....             | 425 |
| 四、乳铁蛋白的生物活性 .....              | 425 |
| 五、乳铁蛋白的分离方法 .....              | 428 |
| 第十节 乳中的细胞增殖因子 .....            | 431 |
| 一、表皮生长因子 .....                 | 431 |
| 二、类胰岛素生长因子 .....               | 432 |
| 三、转移生长因子 .....                 | 434 |

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 四、成纤维细胞生长因子 .....      | 435 |
| 五、乳中细胞增殖因子的开发利用 .....  | 436 |
| 第十一节 乳中的其它生物活性物质 ..... | 437 |
| 一、胰蛋白酶抑制剂 .....        | 437 |
| 二、补体 .....             | 438 |
| 参考文献 .....             | 440 |

# 第一章 牛乳的组成、结构和形成

## 第一节 概 述

乳是乳畜在产犊(羔)后由乳腺分泌出的一种具有胶体特性的生物学液体。其色泽呈白色或略带黄色,不透明,味微甜并具有特有的香味。它是幼畜出生后惟一的食物,含幼畜生长发育所需的各种营养成分和保护幼畜免受感染的抗体。

乳(主要为牛乳和羊乳)和乳制品,如乳粉、酸牛乳、干酪、奶油、冰淇淋等一系列产品已成为人类的重要食物之一。

小牛在出生前不久,母牛乳房就开始分泌乳汁。因此,小牛一出生,母牛就可以哺乳。持续泌乳的时间约为 300 天,这一阶段称为一个泌乳期。在母牛下一次分娩前 6~9 周,停止挤乳,直到分娩开始新一个泌乳期,这段时间称为干乳期。

牛乳的成分复杂且各种成分以不同状态分散在牛乳中。要了解牛乳中各组分的性质和牛乳中发生的化学变化,就需要对牛乳的组成和它们之间的相互影响有所了解。本章中乳是指健康乳牛乳腺的分泌物,不包括初乳。

## 第二节 乳的组成和结构

### 一、乳的主要成分

哺乳动物所分泌的乳的成分是各不相同的,人和一些哺乳动物的乳成分概略如表 1-1 所示。

牛乳的组成决定了它的营养性、作为食品原料的价值和其它性质。牛乳的概略组成如表 1-2 所示。牛乳的主要组分是指

牛乳中浓度较高的组分,但它们并不一定在每一方面都起到决定作用,例如牛乳中的维生素虽然含量低但在营养价值方面非常重要,酶的含量极微但它和牛乳的性质变化密切相关,一些微量组分也对牛乳的风味形成有很大的影响。

表 1-1 人和一些哺乳动物的乳成分 单位: %

| 成 分               | 人    | 马    | 乳牛   | 山羊   | 绵羊   |
|-------------------|------|------|------|------|------|
| 脂肪                | 3.4  | 1.2  | 3.6  | 4.1  | 3.9  |
| 蛋白质               | 1.6  | 2.0  | 3.4  | 3.7  | 6.2  |
| 乳糖                | 6.4  | 5.8  | 4.6  | 4.6  | 5.0  |
| 矿物质               | 0.3  | 0.4  | 0.8  | 0.8  | 1.0  |
| 柠檬酸等              | 0.2  | 0.2  | 0.2  | 0.3  | 0.2  |
| 水分                | 88.1 | 90.4 | 87.4 | 86.5 | 83.7 |
| 新生幼体达到其初生重 2 倍的天数 | 180  | 60   | 47   | 22   | 15   |

表 1-2 牛乳的概略组成 单位: %

| 组 分     | 平均组成 | 组成范围      | 干物质中平均组成 |
|---------|------|-----------|----------|
| 水       | 87.3 | 85.5~88.7 | —        |
| 非脂乳固体   | 8.8  | 7.9~10.0  | 69       |
| 干物质中的脂肪 | 31   | 21~38     | —        |
| 乳糖      | 4.6  | 3.8~5.3   | 36       |
| 脂肪      | 3.9  | 2.4~5.5   | 31       |
| 蛋白质     | 3.25 | 2.3~4.4   | 26       |
| 酪蛋白     | 2.6  | 1.7~3.5   | 20       |
| 矿物质     | 0.65 | 0.53~0.80 | 5.1      |
| 有机酸     | 0.18 | 0.13~0.22 | 1.4      |
| 其它      | 0.14 | —         | 1.1      |

乳糖是仅在乳中存在的糖类,它是一种还原性双糖,由葡萄糖和半乳糖组成,使牛乳略带甜味,它也是微生物在牛乳中生长的主要碳源。乳中其它的碳水化合物含量甚微。

乳脂肪中包括多种脂类,其中 98% 以上是甘油三酸酯,另外

还有一些胆固醇、二羧酸甘油酯、游离脂肪酸、磷脂以及脑苷。脂肪中的脂肪酸一般包括 4~20 个碳原子,0~4 个双键。

乳蛋白通常被分为酪蛋白(其在 pH4~5 时会发生沉淀)和乳清(又称乳清蛋白)。酪蛋白大约占了总乳蛋白的 80%,乳中包含多种“微量蛋白”如酶,它含量虽少却在化学反应中起重要作用,有时“蛋白质含量”仅是通过总氮含量与某常数相乘计算出来。但我们知道牛乳中大约有 5% 的氮是以小分子形式存在的,它们被称为非蛋白氮。

无机盐是牛乳中主要的矿物质,它一部分被离子化,另一部分是以复合物的状态存在。一些无机盐是以共价形式存在,如在酪蛋白中的磷酸根。无机盐的含量通常是通过灰化牛乳来测定的,然而准确地讲,灰分并不能决定乳中盐类的含量。这是由于在灰化过程中有机盐被破坏了,而一些非盐组分却留在灰分中(如氨基酸中的硫)。乳中还包含许多微量成分,在鲜乳中存在有机酸盐,其中大多是柠檬酸盐;乳中还含有许多其它复杂成分,如维生素。

总而言之,乳中大约含有十万种不同的分子,其中大多数还不为人知,就更谈不到分离出来了,即使是一些被鉴定出来的物质,它们在乳中的状态人们也不是很明了。而且不同的测定方法也会导致不同的测定结果。有时一些基本术语的概念也不是很清晰,如“赖氨酸含量”通常是指蛋白质中的赖氨酸残基而不是自由赖氨酸的含量,对于一些其它的物质也会存在同样的问题。

## 二、乳 的 结 构

乳中生物物质的性质并不完全由它的组成来决定,但物理结构(如各种组分在空间的排列方式)则必须了解清楚;各个组分之间的相互作用也是极其重要的,它们将决定整个系统在各种环境下的性质。

乳是一个相对简单并已被人们深入研究的体系,它的主要结构元素是微状态和亚微状态的,如图 1-1 所示。

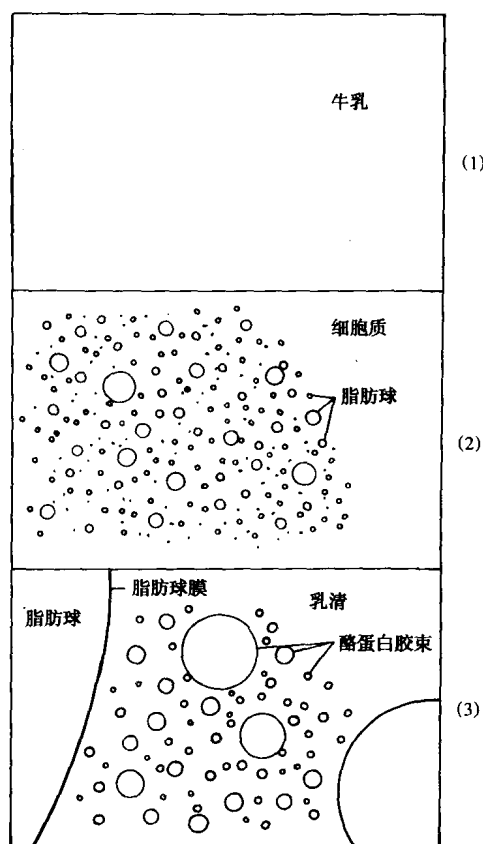


图 1-1 不同显微镜放大率下的牛乳结构示意图

注：图中(1)→(2)→(3)的放大率逐渐增大。

乳中的脂肪球具有的膜层要比简单的乳化液滴复杂得多,这种膜与吸附层不同,它来自于乳腺细胞的尖端外膜。膜的质量大约占了总脂肪球质量的 2%,它主要包括极性脂类、蛋白质和许多酶类。乳脂肪和脂肪球有所不同,因为在膜层中有一半是非脂类物质,乳脂的 0.4%是在脂肪球以外的。乳的非脂部分称为乳浆,它与脱脂乳的概念不同,因为分离是无法达到彻底除去脂肪的效

果的。酪蛋白胶束中含有水、酪蛋白和盐以及一些微量组分,其中包括脂酶和蛋白酶。在溶液中仅存在少量的纯酪蛋白,它不在酪蛋白胶束中,酪蛋白在牛乳的正常 pH 条件下会与钙、镁阳离子进行结合,成为酪蛋白盐。酪蛋白胶束包含无定形磷酸钙和少量的柠檬酸盐,这通常被称为胶体性磷酸盐,这并不是因为它本身以胶体状态存在,而是胶体的一部分,这一整体被称为酪蛋白钙酪蛋白磷酸盐复合物。实际上将这一聚合体称为胶束是一个错误的叫法,它并不是在胶体意义上的胶束,但由于这一称谓已经广为接受,我们也就一直采用这一叫法。

酪蛋白胶束是由亚基和亚胶束组成的。它们通常的椭圆形直径在 10nm 左右。水,严格地说应叫做乳浆,占据了亚基之间的空隙,胶束具有开放式的结构并且每克蛋白质至少结合有 1.5g 水。

乳清的定义是乳浆除去酪蛋白胶束后所剩余的部分,在脱脂乳中加入凝乳酶并除去胶束凝块后所得到的液体叫做乳清。

乳清蛋白是存在于乳清中的蛋白质,严格地说,乳中的非胶束蛋白应称为乳清蛋白,但这一术语并不常用。乳清蛋白主要是球状蛋白,多以单体形式存在,他们同水以及一些阳离子相结合。

脂蛋白颗粒,有时称做微粒体,它们在数量、组成以及形状上有所不同,它们由细胞膜的残片、微绒毛以及其它物质组成。

体细胞主要是各种白血球,可以将其视为外源颗粒,通常直径为 10nm,每毫升牛乳中大约有十万个,约占牛乳体积的 0.005%,它们包含各种细胞质成分,主要是核酸和酶类,其中催化酶的含量较高。在一些乳中,特别是在有乳房炎的牛乳中,体细胞的含量会升高。

牛乳的结构和组成数据见表 1-3。这些数据以计算牛乳经加工和分离后所得产物的组成为依据。这些组成只能通过计算才能得到,其原因是乳的结构和组成会发生变化;乳的分离可能并不彻底,某些组分,特别是阳离子,有一部分会被结构组分所吸附,且并不是所有的水都能够作为溶剂。