

奶与奶制品化学及生物化学

(第二版)

[爱尔兰] FOX P. F. UNIACKE-LOWE T.
MCSWEENEY P. L. H. O'MAHONY J. A. 编著
王加启 张养东 郑楠 编译

Dairy Chemistry and Biochemistry

(Second Edition)

中国农业科学技术出版社

奶与奶制品化学及生物化学

(第二版)

[爱尔兰] FOX P. F. UNIACKE-LOWE T.
MCSWEENEY P. L. H. O'MAHONY J. A. 编著
王加启 张养东 郑楠 编译

Dairy Chemistry
and Biochemistry

(Second Edition)

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

奶与奶制品化学及生物化学 / (爱尔兰) 福克斯 (Fox P. F.) 等编著; 王加启等
编译. —2 版. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2019. 12

书名原文: Dairy Chemistry and Biochemistry (2nd Ed)

ISBN 978-7-5116-4395-7

I. ①奶… II. ①福…②王… III. ①乳制品-化学-高等学校-教材 IV. ①TS252.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 205451 号

责任编辑 金迪 崔改泵

责任校对 贾海霞

出版者 中国农业科学技术出版社

北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010) 82109194 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)

(010) 82109709 (读者服务部)

传 真 (010) 82106650

网 址 <http://www.castp.cn>

经销者 各地新华书店

印刷者 北京科信印刷有限公司

开 本 787mm×1 092mm 1/16

印 张 30.5

字 数 718 千字

版 次 2019 年 12 月第 1 版 2019 年 12 月第 1 次印刷

定 价 118.00 元

◀ 版权所有 · 翻印必究 ▶

《奶与奶制品化学及生物化学》

译校者名单

主 编 译：王加启 张养东 郑 楠

主编译单位：中国农业科学院北京畜牧兽医研究所

编译人员（按姓氏笔画排序）：

王连群	王梦芝	兰欣怡	刘妍妍	刘慧敏
李 明	李松励	李慧颖	张佩华	张俊瑜
林树斌	金 迪	单吉浩	孟 璐	赵圣国
南雪梅	哈斯·额尔敦	姜雅慧	高艳霞	
郭同军	韩荣伟	臧长江		

校 对：顾佳升 林树斌

致 谢

奶业创新团队在科研和本书编译工作中得到以下资助和支持，在此衷心感谢。

农业农村部奶产品质量安全风险评估实验室（北京）
农业农村部奶及奶制品质量监督检验测试中心（北京）
农业农村部奶及奶制品质量安全控制重点实验室
国家奶业科技创新联盟
动物营养学国家重点实验室
国家奶产品质量安全风险评估重大专项
中国农业科学院科技创新工程
中国农业科学院农业科技创新工程重大产出科研选题
国家奶牛产业技术体系
农产品（生鲜奶）质量安全监管专项

译者的话

一直以来，我们都有这样的认知：牛奶超过任何单一食物，成为维护人类健康最重要的营养源。

中国对于奶的记载已经有 2500 年的历史，国际上专门以“奶”为科学研究对象，也已经有 150 年的历史。近年来，随着生物化学、组学、分析化学、微生物学、营养学等学科方面的巨大进步，对奶类的认识，也从传统的只关注乳脂肪、蛋白质、乳糖等基础营养物质，延展到小分子物质、生物活性物质等发挥重要生理生化功能的物质。本书以哺乳动物的生命科学为基本视角，侧重于生物化学领域，综述了当前对奶和奶制品的科学认知，包含生物活性物质等前沿学科的最新成果，又深入浅出地阐述了奶制品中水、乳脂肪、蛋白质等主要物质的化学性质、生理功能及其实际应用。

组织编译此书籍的目的，一是希望从事奶业研究的科研人员以及奶制品生产的行业人士，从根本上理解和掌握奶的基础生物化学知识，为研制和生产优质奶制品打牢基础；二是希望为食品科学专业的本科生和研究生增加一本教科书，系统学习奶制品生物化学知识；三是弥补我国在“奶制品生物化学”方面出版物的空缺，在奶业全产业链上有系列可以学习参考的出版物。

但愿此书能帮助读者多掌握奶与奶制品的基础知识，并激发读者从事奶业研究和生产的兴趣。鉴于编译者水平有限，译文中难免存在偏误，恳请读者批评指正。

编译者

2019 年 8 月

前言（第一版）

奶作为科学研究的对象已经有近 150 年的历史了。就人类的主要食物来说，从化学的角度来看，奶是最佳的。同时奶又是最为复杂的一种食品原料，由它衍生出了一个庞大的现代食品工业大家庭。而乳品科学作为一门学科跻身于高等教育之列，也已经超过了 100 年之久。除了酿酒之外，它是最古老的一门食品科学技术了。由于乳品化学是乳品科技的一个重要组成部分，许多人以为在这个领域里应该有许多的出版物，不过事实并非如此。在过去的 40 年里，以英文公开出版的一共只有寥寥 6 种，即：

《乳品化学原理》（Jenness 和 Patton, 1959）；

《乳品化学和乳品物理学》（Walstra 和 Jenness, 1984）；

《乳品化学基础》（Webb 和 Johnson, 1964；Webb 等, 1974；Wong 等, 1988）；

《乳品化学发展》（Fox, 4 卷, 1982, 1983, 1985, 1989）；

《高级乳品化学》（Fox, 3 卷, 1995, 1992, 1997）；

《牛奶成分手册》（Jensen, 1995）。

其中，前 2 种书适合于高中年级的学生阅读，其余的都是以大学教师、研究人员以及高级研究生为阅读对象。因此，目前缺乏适合大学本科生和初级研究生学习的专业出版物。本书正是为填补这个空缺而编写的，当然也可作为本科毕业已经从事乳品工作的专业人员的参考书，因为他们依然需要进修和提高。

本书的内容不以乳品的化学和物理学为限，如书名所示，更侧重于生物化学。相当深入地阐述了牛奶的主要化学组成即水、乳糖、脂肪、蛋白质（包括酶）、矿物质和维生素的化学性质及其实际应用。如加热发生的变化、酶在奶酪和其他高蛋白成分制品的制作过程中的作用等。

本书也不以乳品的制造技术为主，只是为了便于讨论，才引用了不少其他教科书的有关产品的加工工艺方面的资料。本书还简略地讨论了养殖过程中牛奶的生成理论，目的是让读者了解养殖技术对牛奶的组成和性质，以及对奶制品的影响。为此也引用了相关的分析化学、微生物学、营养学等方面的资料。

尽管作者假设读者已经具备了较为扎实的化学和生物化学基础，但是为了方便读者阅读，书后的附录不仅给出了常见成分的分子结构，还给出了主要奶制品的化学成分。

希望本书能够回答读者遇到的有关奶与奶制品的生物化学方面的问题，如果能够激发读者对这些问题进一步研究的兴趣，那更是作者的荣幸。

感谢干练和热情的 Anne 女士和 Brid 女士在书稿整理工作中的帮助；感谢医学教授 Mulvihill 博士和 Brien 博士对全书严格并富有建设性的审阅。

P. F. Fox

P. L. H. McSweeney

爱尔兰 科克

前言 (第二版)

自从本书第一版在 1998 年由 Chapman 和 Hall 出版以来, 后由 Kluwer 学术出版社未经修改重印过一次之外, 没有再出版印刷过。事实上, 第一版内容所涉及的方方面面已经发生了长足的进步, 所以在保留第一版的原有章节标题的前提下, 对内容进行了更新和扩充, 形成了现在呈现给大家的第二版。其中, 第 11 章“奶中的生物活性物质 (Biologically Active Compounds in milk)”是新增加的; 原标题是“干酪和发酵奶的化学与生物化学 (Chemistry and Biochemistry of Cheese and Fermented Milk)”的章节, 经扩充后分为两章, 分别为第 12 章“奶酪的化学和生物化学 (Chemistry and Biochemistry of Cheese)”和第 13 章“发酵奶制品的化学和生物化学 (Chemistry and Biochemistry of Fermented Milk Products)”。

对于测定牛奶中的乳糖、脂类、蛋白质和盐的主要分析原理, 虽然在书中多有涉及, 但只限于原则性的讨论而没有详细描述操作方法。本书较多地讨论了奶与奶制品的营养学和微生物学方面的内容, 因为它们明显受到牛奶的化学和生物化学的影响。为了让读者了解养殖技术对牛奶的成分和性质, 以及对奶制品的影响, 本书还简略地讨论了养殖过程中牛奶的生成理论。

作者假定阅读本书的读者已经具有良好的物理化学和生物化学基础。本书既适用于相关专业的本科生和研究生, 也适合从事乳品/食品科学/技术的教学研究人员和行业人士, 以及意图转换专业方向的人员。

但愿本书能够帮助你解开有关奶与奶制品的化学和生物化学的疑惑, 并激发你深入探究其间奥秘的兴趣!

P. F. Fox

T. Uniacke-Lowe

P. L. H. McSweeney

J. A. O' Mahony

爱尔兰 科克

目 录

第1章 奶的生产与利用	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 奶的组成成分及差异性	(2)
1.3 哺乳动物的分类	(2)
1.4 乳腺组织的结构与发育	(4)
1.5 分泌细胞的超微结构	(5)
1.6 研究奶合成的方法	(6)
1.7 奶成分的生物合成	(8)
1.8 奶的生产及利用	(9)
1.9 奶制品贸易	(14)
参考文献	(16)
推荐阅读文献	(17)
第2章 乳 糖	(18)
2.1 引言	(18)
2.2 乳糖的理化性质	(21)
2.3 乳糖的生产	(33)
2.4 乳糖的衍生物	(37)
2.5 乳糖和美拉德反应	(43)
2.6 乳糖的营养作用	(44)
2.7 乳糖浓度的测定	(48)
2.8 寡糖	(53)
参考文献	(54)
推荐阅读文献	(56)
第3章 乳脂类	(58)
3.1 引言	(58)
3.2 影响牛奶乳脂含量的因素	(59)
3.3 乳中脂类的分类	(61)

3.4	乳脂脂肪酸组成	(64)
3.5	乳脂脂肪酸合成	(69)
3.6	乳脂的结构	(72)
3.7	乳脂的乳化剂作用	(74)
3.8	乳脂球膜	(77)
3.9	乳脂肪乳化稳定性	(85)
3.10	加工过程对乳脂球膜的影响	(89)
3.11	奶和稀奶油的物理缺陷	(95)
3.12	搅拌	(96)
3.13	制冷	(100)
3.14	脱水	(100)
3.15	脂质氧化	(101)
3.16	乳脂的流变特性	(107)
3.17	乳脂定量分析方法	(111)
3.18	附录 A	(113)
3.19	附录 B	(114)
3.20	附录 C	(115)
	参考文献	(115)
	推荐阅读文献	(118)
第4章	乳蛋白	(119)
4.1	引言	(119)
4.2	乳蛋白的异质性	(121)
4.3	酪蛋白和乳清蛋白的制备	(123)
4.4	酪蛋白的异质性和分级分离	(126)
4.5	酪蛋白的一些重要性质	(132)
4.6	酪蛋白胶束	(145)
4.7	乳清蛋白	(152)
4.8	β -乳球蛋白	(154)
4.9	血清酸性蛋白	(157)
4.10	α -乳白蛋白	(157)
4.11	血清白蛋白	(159)
4.12	免疫球蛋白 (Ig)	(160)
4.13	蛋白胨蛋白胨 3	(161)
4.14	含量甚微的乳蛋白	(163)
4.15	非蛋白氮	(163)
4.16	乳蛋白的种间比较	(165)
4.17	乳蛋白的合成与分泌	(166)

4.18 功能性乳蛋白产品	(172)
4.19 食品中蛋白质的定量方法	(183)
参考文献	(189)
推荐阅读文献	(195)
第5章 奶中的盐类	(197)
5.1 引言	(197)
5.2 分析方法	(197)
5.3 奶中盐类的组成	(198)
5.4 奶中盐类的分泌	(199)
5.5 影响盐成分变化的因素	(201)
5.6 奶中盐成分的相互关系	(203)
5.7 不同处理诱导盐平衡的变化	(213)
5.8 用无机元素强化奶的营养成分	(218)
5.9 合成奶的超滤液	(218)
参考文献	(218)
推荐阅读文献	(220)
第6章 奶与奶制品中的维生素	(222)
6.1 引言	(222)
6.2 脂溶性维生素	(222)
6.3 B族维生素	(231)
6.4 抗坏血酸(维生素C)	(242)
参考文献及推荐阅读文献	(243)
第7章 奶与奶制品中的水	(245)
7.1 引言	(245)
7.2 水的一般性质	(246)
7.3 水分活度	(251)
7.4 水分吸附	(254)
7.5 水的玻璃化和增塑作用	(259)
7.6 非平衡冻结	(259)
7.7 水对粉末的黏性和结块的作用及在乳糖结晶中的作用	(260)
7.8 水与奶制品的稳定性	(260)
参考文献	(263)
推荐阅读文献	(263)

第 8 章 奶的物理性质	(264)
8.1 离子强度	(264)
8.2 密度	(264)
8.3 奶的氧化还原性质	(265)
8.4 奶的依数性质	(269)
8.5 界面张力	(272)
8.6 酸碱平衡	(273)
8.7 流变性质	(276)
8.8 电导率	(278)
8.9 奶的热性质	(278)
8.10 光与奶与奶制品的相互作用	(279)
8.11 奶与奶制品的颜色	(280)
参考文献	(281)
第 9 章 奶中的热诱导变化	(282)
9.1 引言	(282)
9.2 脂类	(283)
9.3 乳糖	(287)
9.4 奶中的盐类	(292)
9.5 维生素	(292)
9.6 蛋白质	(292)
9.7 奶的热稳定性	(298)
9.8 热处理对皱胃酶凝乳作用及相关性质的影响	(302)
9.9 灭菌奶的贮存期稠化	(303)
9.10 牛奶风味的热诱导变化	(303)
参考文献	(306)
推荐阅读文献	(308)
第 10 章 奶与奶制品酶学	(309)
10.1 引言	(309)
10.2 牛奶中的内源酶	(309)
10.3 乳品加工中的外源酶	(328)
参考文献及推荐阅读文献	(336)
第 11 章 奶中的生物活性物质	(341)
11.1 引言	(341)
11.2 生物活性乳脂	(342)

11.3 奶中的生物活性碳水化合物	(345)
11.4 维生素	(346)
11.5 生物活性乳蛋白	(347)
11.6 奶中的微量生物活性蛋白	(353)
11.7 奶内源酶	(356)
11.8 奶生物活性肽	(357)
11.9 游离氨基酸	(373)
11.10 激素、生长因子和细胞因子	(374)
11.11 微量生物活性化合物	(382)
11.12 加工条件对奶中生物活性物质的影响	(384)
11.13 奶中生物活性物质的工业化生产和应用	(385)
11.14 其他奶中的生物活性成分	(387)
11.15 结论	(388)
参考文献	(388)
推荐阅读文献	(410)
第12章 奶酪的化学和生物化学	(411)
12.1 引言	(411)
12.2 酶凝奶酪	(413)
12.3 酸凝奶酪	(444)
12.4 再制奶酪产品	(445)
12.5 奶酪类似物	(450)
参考文献	(451)
推荐阅读文献	(452)
第13章 发酵奶制品的化学与生物化学	(453)
13.1 引言	(453)
13.2 发酵剂微生物	(458)
13.3 酪奶	(459)
13.4 酸奶	(460)
13.5 开菲尔酸奶	(463)
13.6 酸马奶	(465)
13.7 发酵/酸性稀奶油	(468)
参考文献	(469)
推荐阅读文献	(470)
通用参考文献	(471)

第 1 章 奶的生产与利用

1.1 引言

奶是所有雌性哺乳动物分泌的一种液体，地球上有超过 4 000 种的哺乳动物。奶的主要功能是满足其新生动物的全部营养需要。此外，奶对新生动物还有一定生理功能。奶的大部分非营养功能是通过蛋白质类和肽类来实现的，包括免疫球蛋白、酶或酶抑制剂、结合蛋白或载体蛋白、生长因子和抗菌剂。由于每一物种的营养和生理需求具有或多或少的独特性，所以奶成分表现出很明显的种间差异。4 000 多种哺乳动物中只有约 180 种物种的奶被分析过，其中仅有约 50 种动物的数据被认为是可靠的（有足够的样本数量，取样有代表性，充分覆盖不同哺乳期）。当然主要的乳用动物（如牛、山羊、绵羊和水牛）和人类的奶得到了最好的表征。表 1.1 列出了部分动物的奶成分。Jensen (1995) 的文献中有奶和人奶成分的详细数据。

表 1.1 部分动物的奶成分

物种	总固形物 (%)	脂肪 (%)	蛋白质 (%)	乳糖 (%)	灰分 (%)	总能 (KJ/kg)	达到出生重 2 倍的天数
人	12.2	3.8	1.0	7.0	0.2	2 763	120~180
牛	12.7	3.7	3.4	4.8	0.7	2 763	30~47
山羊	12.3	4.5	2.9	4.1	0.8	2 719	12~19
绵羊	19.3	7.4	4.5	4.8	1.0	4 309	10~15
猪	18.8	6.8	4.8	5.5	0.9	3 917	9
马	11.2	1.9	2.5	6.2	0.5	1 883	40~60
驴	11.7	1.4	2.0	7.4	0.5	1 966	30~50
驯鹿	33.1	16.9	11.5	2.8	1.5	6 900	22~25
家兔	32.8	18.3	11.9	2.1	1.8	9 581	4~6
野牛	14.6	3.5	4.5	5.1	0.8		100~115
印度象	31.9	11.6	4.9	4.7	0.7	3 975	100~260
北极熊	47.6	33.1	10.9	0.3	1.4	16 900	2~4
灰海豹	67.7	53.1	11.2	0.7	0.8	20 836	5

1.2 奶的组成成分及差异性

除了表 1.1 中列出的主要成分外,奶中还含有几百种微量成分,其中有许多成分如维生素、金属离子和风味化合物等对奶与奶制品的营养、加工工艺和感官特性有较大影响。其中许多这样的影响会在后面的章节中被讨论。

奶是一种差异非常大的生物液体。除了种间差异(表 1.1),每一特定物种的奶也随个体、品种(如专用的乳用动物)、健康(乳房炎或其他疾病)、营养状况、泌乳阶段、年龄、挤奶间隔等因素而变化。不同物种乳蛋白含量差异相当大,与幼仔的生长速度密切相关。Bernhart(1961)发现 12 种哺乳动物乳蛋白供能的百分比与体重达到出生重 2 倍的天数的对数之间有线形相关性。人类是生长和成熟最缓慢的物种之一,需要 120~180 天体重才能达到初生重的 2 倍,来自蛋白质的能量只有 7%。然而食肉动物最快可在出生后 7 天即达到初生重的 2 倍,其来自蛋白质的能量>30%。马属动物达到初生重的 2 倍需要 30~60 天,其乳蛋白含量也跟人奶一样特别低(表 1.1)。有些物种如北极熊和灰海豹的乳热值非常高,主要是由于乳脂含量高的缘故。

乳品厂收购的散装奶,由上述许多因素产生的差异会互相抵消,但仍会有些差异,特别是季节性生产时,差异可能比较大。不仅主要成分和微量成分的浓度随着上述因素的变化而变化,而且一些成分的化学组成也有变化,如脂肪酸的组成就受日粮的强烈影响。奶成分和组分的差异有些可通过加工工艺如乳脂标准化加以调整或消除,但有些差异无法改变。奶成分的差异及随之带来的挑战将在后面的章节里阐述。

从物理化学的角度来看,奶是一种非常复杂的液体。奶的组分存在于 3 个不同的相中。从数量上来说,占奶质量大部分的是乳糖、有机盐 and 无机盐、维生素和其他小分子物质溶于水的真溶液。在这个水溶液中是分散存在的蛋白质和以乳化状态存在的脂类。这些蛋白质有些为分子水平的蛋白质(乳清蛋白),有些为直径 50~600nm 的大的胶体聚合物(酪蛋白);而脂类则以直径 0.1~20 μm 的球状体存在。因此,胶体化学在奶的研究中非常重要,如表面化学、光散射和流变性质和相稳定性。

奶是一个动态系统,这是因为:其许多结构具有不稳定性,如乳脂球膜;许多组分的构象和溶解度随温度和 pH 值的变化而改变,尤其是无机盐,蛋白质也是如此;存在许多酶,可通过脂解、蛋白水解或氧化/还原作用对组分进行修饰;微生物可直接通过其生长使奶的性质如 pH 值或氧化还原电位发生改变,或通过其分泌的酶的作用而导致奶产生大的变化;与大气发生气体交换,如 CO_2 。奶本来是要给动物后代直接吮吸且要频繁吮吸的。但在奶业生产中,奶的贮存期从几小时到几天都有,贮存期间会对奶进行冷却(也可能加热)和搅拌。这些处理至少会导致奶产生一些物理变化,同时也会发生一些酶和微生物的变化而导致奶性质的改变。不过人们可采取技术手段来消除这些处理引起的变化。

1.3 哺乳动物的分类

哺乳动物区别于其他动物的本质特征是雌性动物能在特殊的器官(乳腺)中分泌乳汁为幼仔提供营养。

哺乳纲分为三个亚纲：

原兽亚纲

这个亚纲只有一个目，即单孔目，为卵生哺乳动物，仅产于大洋洲，如鸭嘴兽和针鼹鼠。它们有很多乳腺（可能有 200 个）分布在腹部两个区域；这些腺体不是集中通向一个乳头，幼仔是从腺体的表面舔食分泌物（奶）的。

后兽亚纲（有袋类）

有袋类动物妊娠期很短，为胎生动物，出生时几乎都存在不同程度的“早产”，各个物种各不相同。幼仔出生后转到一个袋里直到成熟，如袋鼠和沙袋鼠。

有袋动物的乳腺数量各不一样，乳腺位于袋里，最后通向乳头。雌性有袋动物可同时哺育两个年龄相差很大的后代，它们能同时从不同的乳腺分泌出成分迥异的奶，以满足每个后代不同的特殊需求。

真兽亚纲

约 95% 的哺乳动物属于这个亚纲。胚胎在子宫内发育，胎盘通过血液循环获得营养（它们被称为胎盘哺乳动物），在高度成熟的状态下（但不同物种各不一样）出生。所有胎盘哺乳动物都分泌乳汁，乳汁对后代的生长发育几乎是必不可少的，但也因物种而异；有些物种的后代生下来就足够成熟，不用吃乳就能生存和发育。

乳腺的数量和位置因物种而异，从 2 个（如人类、山羊和绵羊）到 14~16 个（猪）。每个腺体在解剖学上和生理学上是独立的，通过一个乳头排出乳汁。

奶成分和奶化学组分上存在巨大的种间差异（表 1.1）（这将在其他地方讨论），使奶具有物种特异性，即目的是满足物种后代各自的营养需要。奶产量和母体体重之间有极显著的相关性（图 1.1）；专门化选育的乳用动物如奶牛和奶山羊也遵循这一规律。

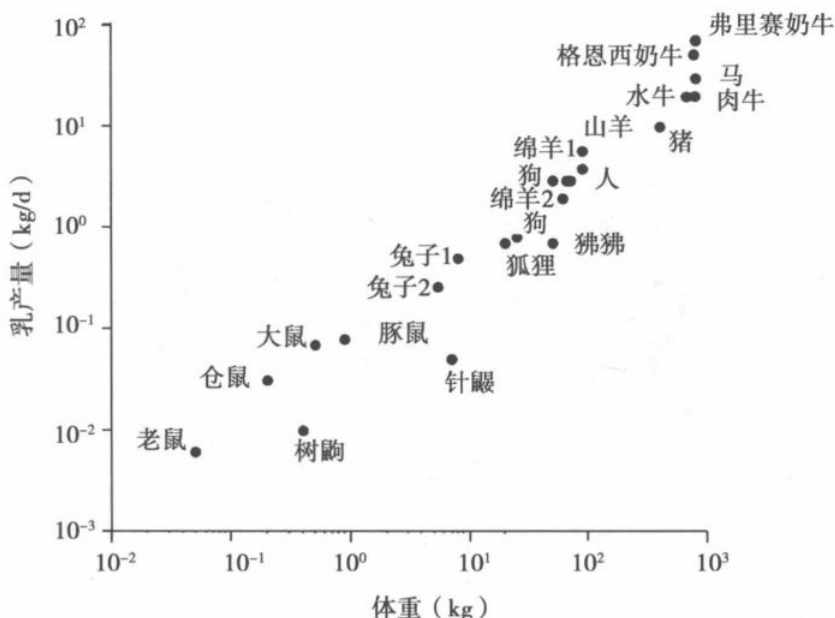


图 1.1 一些物种的日奶产量与母体体重的相关性（改自 Linzell, 1972）