

酶制剂在动物 营养中的作用

[英] M.R.Bedford G.G. Partridge 主编

中国饲料工业协会信息中心 译

中国农业科学技术出版社

5816
38

酶制剂在动物 营养中的作用

[英] M.R.Bedford G.G. Partridge 主编

中国饲料工业协会信息中心 译

图书在版编目 (CIP) 数据

酶制剂在动物营养中的作用/(英) 贝德福德 (Bedford, M.R.), (英) 帕特里吉 (Partridge, G.G.) 主编; 中国饲料工业协会信息中心译. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.5
ISBN 7-80167-634-3

I. 酶… II. ①贝… ②帕… ③中… III. 酶制剂—应用—家畜营养学 IV. S816.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 015370 号

责任编辑 沈银书
责任校对 马丽萍 贾晓红
出版发行 中国农业科学技术出版社
邮编: 100081
电话: (010) 68919708; 68975144
传真: 62189014
电子信箱: nongyechuban@sina.com.cn
经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京金鼎彩色印刷有限公司
开 本 850 mm×1 168mm 1/16
印 数 1~3 000 册
版 次 2004 年 5 月第 1 版
定 价 128.00 元

印张: 19.75
字数: 570 千字

2004 年 5 月第 1 次印刷

编译委员会

主 任 乔玉锋

副 主 任 孔平涛 陈德进

成 员 (按姓氏笔画为序)

马爱平 王金文 王建华 王艳华

齐广海 刘质斌 孙 鸣 朱晓娟

沈银书 张学军 陆文清 周 雁

金立志 郑君杰 武书庚 高 俊

贾国文 郭 科 彭 健

撰 稿 者

- J. Apajalahti**, 丹尼斯科-科特研发中心 (Danisco-Cultor Innovation), Kantvik, FIN-02460, 芬兰
- J. D. Beal**, 普利茅斯大学, Seale-Hayne Faculty, Newton Abbot, 德文郡 TQ12 6NQ, 英国
- K. A. Beauchemin**, 加拿大农业与农业食品部, Lethbridge 研究中心, PO Box 3000, Lethbridge, 阿尔伯达, 加拿大, T1J 4B 1
- T. Becker**, 杰能科国际公司 (Genencor), 925 Page Mill Road, Palo Alto, CA 94304-1013, 美国
- M. R. Bedford**, 芬兰饲料国际公司 (Finnfeeds), PO Box 777, 莫尔伯勒, 威尔特郡, SN8 1XN, 英国
- M. K. Bhat**, 食品原料科学处, 食品研究所, Norwich 研究园, Colney, Norwich NR4 7 UA, 英国
- R. Bott**, 杰能科国际公司 (Genencor), 925 Page Mill Road, Palo Alto, CA 94304-1013, 美国
- B. Bower**, 杰能科国际公司 (Genencor), 925 Page Mill Road, Palo Alto, CA 94304-1013, 美国
- K. -J. Cheng**, 农业科学系, 不来颠哥伦比亚大学 (UBC), 温哥华, 不来颠哥伦比亚省, 加拿大 V6T 1Z4
- M. Choct**, 乡村科学和自然资源学院, 动物科学系, 新英格兰大学, Armidale, NSW 2351, 澳大利亚
- G. Chotani**, 杰能科国际公司 (Genencor), 925 Page Mill Road, Palo Alto, CA 94304-1013, 美国
- K. Clarkson**, 杰能科国际公司 (Genencor), 925 Page Mill Road, Palo Alto, CA 94304-1013, 美国
- W. D. Cowan**, Novo Nordisk, Krogshoevej 36, Bagsvaerd, 丹麦 2880
- S. Dänicke**, 动物营养研究所, 联邦农业研究中心, Braunschweig (FAL), Bundesallee 50, D-38116 Braunschweig, 德国
- G. P. Hazlewood**, 芬兰饲料国际公司 (Finnfeeds), PO Box 777, 莫尔伯勒, 威尔特郡, SN8 1XN, 英国
- A. N. Hristov**, 加拿大农业与农业食品部, Lethbridge 研究中心, PO Box 3000, Lethbridge, 阿尔伯达, 加拿大, T1J 4B 1
- B. Jones**, 杰能科国际公司 (Genencor), 925 Page Mill Road, Palo Alto, CA 94304-1013, 美国
- E. T. Kornegay** (已经去世), 动物和家禽科学系, 维吉尼亚工艺学院和州立大学, 3060 Litton-Reaves Hall, Blacksburg, VA 24061, 美国
- D. D. Maenz**, 平原饲料资源中心(加拿大)公司, 动物与家禽科学系, 萨斯喀彻温大学, 萨斯卡通, 萨斯喀彻温省, 加拿大 S7N 0W0
- R. R. Marquardt**, 动物科学系, 马尼托巴大学, 温尼伯, 马尼托巴省, 加拿大 R3T 2N2
- T. A. McAllister**, 加拿大农业与农业食品部, Lethbridge 研究中心, PO Box 3000, Lethbridge, 阿尔伯达, 加拿大, T1J 4B 1
- B. V. McCleary**, Megazyme International Ireland Limited, Bray Business Park, Bray, Country Wicklow, 爱尔兰
- G. G. Partridge**, 芬兰饲料国际公司 (Finnfeeds), PO Box 777, 莫尔伯勒, 威尔特郡, SN8 1XN, 英国

L. M. Rode, 加拿大农业与农业食品部, Lethbridge 研究中心, PO Box 3000, Lethbridge, 阿尔伯达, 加拿大, T1J 4B 1; 现工作地址: Rosebud Technology Development Ltd, Lethbridge, 阿尔伯达, 加拿大 T1K 3J5

C. Sheppy, 芬兰饲料国际公司 (Finnfeeds), PO Box 777, 莫尔伯勒, 威尔特郡, SN8 1XN, 英国

F. G. Silversides, Denman, 不来颠哥伦比亚省, 加拿大

P. Steen, 芬兰饲料国际公司 (Finnfeeds), PO Box 777, 莫尔伯勒, 威尔特郡, SN8 1XN, 英国

J. D. Summers, 家禽工业中心, RR2 号, 圭尔夫市, 安大略省, 加拿大 N1G 6H8

J. Thorpe, 布里斯托尔大学, 临床兽医科学系, Langford House, 朗格福特, 布里斯托尔 B540 5DU, 英国

前 言

几千年来，在人类的生活中，家畜的饲养繁殖与酶制剂的使用（如酿造）是风马牛不相及的，但近来这两个不同的学科却有了交叉。首次使用商品化酶制剂可以追溯到 1984 年的芬兰，当时向大麦基础日粮中添加用于酿造的发酵酶制剂，显著改善了其营养价值（A. Haarisilta, Suomen Rehu）。此后，许多酶制剂开始以几何数字的增长速度用于家禽饲料中，而猪饲料中酶制剂的应用增长速度相对较慢。最近在反刍动物日粮中使用酶制剂开始受到关注。科学描述外源性酶制剂在动物营养中的作用可以追溯到 20 世纪 20 年代，现在仅肉仔鸡上的研究文献就已经超过了 1 300 篇（Rosen, 2000；私人通讯）。随着对饲料酶制剂作用机制的深入了解，酶制剂工业快速发展，涉及的学科在不断增加。由于酶制剂研究的复杂性，应该说出版此书是正合时宜。其目的就是提供给一般普通读者及高级专业人士一些基础知识来理解该领域的复杂现象。本书的另一个目的是提供详细的数据资料，以便读者更好地认识动物对饲喂酶制剂反应的复杂性。

令人振奋的是，最近酶制剂的使用量大大增加，应用范围也变得更广。随着酶制剂价格进一步降低及使用效果的不断改善，这种情况将会继续下去。反刍动物使用外源酶制剂尚处于初级阶段，但研究表明酶制剂的确能改善其生产性能，因此，在反刍动物日粮中使用酶制剂将会倍受关注。当前的挑战是研究动物对添加酶制剂反应的预测方法，从而使得酶制剂的应用更具科学性（而非艺术性）。

怀 念

我们非常沉痛地说，E. T. Kornegay 博士去世后此书才得以问世。E. T. Kornegay 博士对本书及植酸酶在猪鸡上应用的研究作出了卓越的贡献。E. T. Kornegay 博士尤其热衷于植酸酶研究，我们将深切地怀念他。

目 录

第 1 章	饲用酶制剂市场发展现状与趋势	
	<i>C. Sheppy</i>	(1)
第 2 章	纤维素酶和木聚糖酶的酶学及其他特征	
	<i>M. K. Bhat, G. P. Hazlewood</i>	(7)
第 3 章	植酸酶在动物饲料中的酶学特征	
	<i>D. D. Maenz</i>	(47)
第 4 章	饲用酶分析	
	<i>B. V. McCleary</i>	(67)
第 5 章	影响玉米消化率及其饲用价值的因素	
	<i>J. D. Summers</i>	(83)
第 6 章	酶制剂对植物性蛋白质饲料饲用价值的影响	
	<i>J. Thorpe, J. D. Beal</i>	(95)
第 7 章	家禽日粮中添加以粘性谷物为底物的酶	
	<i>M. Choct</i>	(111)
第 8 章	碳水化合物酶在猪营养中的作用与功效	
	<i>G. G. Partridge</i>	(123)
第 9 章	肉仔鸡日粮中谷物种类与脂肪质量及含量的互作对饲用酶作用的影响	
	<i>S. Dänicke</i>	(149)
第 10 章	植酸酶及影响其活性的因子在磷和其他营养物质消化中的作用	
	<i>E. T. Kornegay</i>	(179)
第 11 章	反刍动物日粮中的酶制剂	
	<i>T. A. McAllister, A. N. Hristov, K. A. Beauchemin,</i> <i>L. M. Rode, K. - J. Cheng</i>	(209)
第 12 章	微生物与外源性酶制剂作用效果之间的互作	
	<i>M. R. Bedford, J. Apajalahti</i>	(231)

第 13 章 酶的筛选、表达、设计和生产

- K. Clarkson, B. Jones, R. Bott, B. Bower, G. Chotani,*
T. Becker (245)

第 14 章 饲料酶制剂的液态物料添加系统

- P. Steen* (273)

第 15 章 配合饲料中饲用酶的加工稳定性及检测方法

- M. R. Bedford, F. G. Silversides, W. D. Cowan* (291)

第 16 章 酶制剂的研究方向

- R. R. Marquardt, M. R. Bedford* (299)

第 1 章 饲用酶制剂市场发展现状与趋势

C. SHEPPY

芬兰饲料国际公司 (Finnfeeds), PO Box 777,
莫尔伯勒, 威尔特郡, SN8 1XN, 英国

一、全球的动物饲料生产

与讨论任何某一特定技术应用于某一产业领域的出版物一样, 首先考虑应用这项技术的商业背景是十分重要的。

尽管新纪元初年的双庆与喜悦无处不在, 但是全球动物饲料工业所面临的挑战却并未因此而丝毫减轻。人类健康、环境安全和动物福利仍然是消费者首要考虑的问题, 同时也是新闻媒体和政客们津津乐道的话题。这些讨论开始出现在欧洲和北美洲, 但现在已经得到了全球的普遍关注。这种发展进步折射出食物链和饲料产业日益上升的全球化趋势。最近围绕转基因作物、抗生素、促生长剂和二噁英污染的饲料原料的争论列举一些实例。关于这些健康危害的讨论, 有些是强加的因素, 其直接的结果是加强了规范化、质量检测 and 维持提高动物生产者和最终产品消费者之间的相互信任。

这些挑战对饲料工业发展的影响如何? 尽管 1998 年全球配合饲料的总产量为 57 500 万吨, 下降了 5%, 为 50 年来第一次最大降幅。1999 年得到了一定程度的恢复, 达到 58 600 万吨 (参见表 1-1)。

表 1-1 1998 年和 1999 年世界动物饲料生产量

	1998 年 (百万吨)	1999 年 (百万吨)	百分差 (1999/1998)
北美	159.8	160.7	+0.6
亚太	128.1	132.2	+3.2
欧盟	114.9	116.4	+1.3
拉美	63.3	65.4	+3.3
非欧盟的欧洲国家	47.4	48.6	+2.5
中东和非洲	21.6	24.0	+11.1
其他国家	39.9	38.7	-3.1
总计	575.0	586.0	+2.0

资料来源: Gill (1999, 2000)

1997~1998 年, 由于亚洲的金融危机, 昔日辉煌上升的饲料市场几乎处于崩溃状态。但是, 从另一方面也许可以公正地说, 以前的增长速度是不可靠的。由于肉蛋奶的需求量下降, 饲料产量也

随即下降。印度尼西亚的饲料产量下降了 40%，韩国下降了 30%，泰国下降了 25%，甚至中国的饲料市场也出现了停滞，总量下降了 2%，总产量不足 5 500 万吨。这些亚洲国家饲料产量的下降，使得在 1998 年全球的饲料市场出现了普遍停滞。欧盟的饲料产量下降了 6%，非欧盟的欧洲国家下降了 12%，只有北美、拉美、中东和非洲的饲料产量在 1998 年仍然呈现上升趋势（北美增加 1%、拉美增加 1%、中东和非洲增加 10%）。从表 1—1 可以看出，1999 年饲料产量的恢复是全球性的。随着亚洲经济的复苏，所有的主要饲料市场都呈现出增加的趋势。而其他一些市场对饲料的需求量也提高了。

1998 年的饲料生产，尽管有些下降，但是在饲料产业内部的食物生产能力与分布向大公司集中、整合的趋势依然强盛。仍然有产量的合理分配和生产的集中统一，以组成一些主要的食物生产公司。受要求降低生产成本的推动，提高规范化要求、卫生标准和安全标准已成为必然。目前，全球总数不足 3 800 家的大中型饲料生产企业生产着全球配合饲料总量的 80% 以上。但是，实际情况是仍然有很大的空间来进一步推进生产集约化和生产合理化。因为全球最大的 10 家饲料企业生产的饲料仅占全球饲料总产量的 9%~10%。

饲料工业起始于家禽的集约化生产。现在饲料食品工业已经延伸到绝大部分畜产品的领域——肉鸡、猪、肉牛、奶牛和水产品。其中猪饲料仍然占据饲料生产量的最大份额。但是肉鸡饲料在肉牛饲料份额减少的条件下逐步增加（表 1—2），以适应消费者对廉价、安全、健康肉产品的需求（Gill, 2000）。

表 1—2 世界动物饲料的构成

动物类型	1993 (%)	1998 (%)
猪	31	31
肉鸡	24	27
肉牛	11	9
奶牛	17	17
蛋鸡	8	8
水产	3	5
其他	6	3

资料来源：Hoffman (1999)

饲料工业的未来应该掌握些什么？绝大多数资深评论家认为，1998 年饲料生产量的下降有一定偶然性，或者说是一种修正，它是由亚洲的金融危机引起的。Muller 1999 年评论说，在过去 25 年内，配合饲料的产量始终是随着人口的增加而增加，1998 年人均饲料消费量/占有量从 104 kg 下降到 97 kg 并不代表全球配合饲料生产的必然趋势，而应该同亚洲的金融危机联系起来考虑。

在今后的 20 年内，预计全球的人口将从 60 亿增加到 78 亿。随着发展中国家人口的增加和经济增长以及饮食结构的改变，对食物的需求，包括动物蛋白，将以更快的速度增加。针对这种局面，未来配合饲料的生产前景应该看好。但是不管怎样，那些希望在行业内生存并要扩张它们业务的生产商必将变得更适应市场环境，因为许多影响饲料生产的关键因素并不是这些业务主能够左右的。

二、饲用酶的技术背景

酶存在于所有的生物有机体内。作为自然的催化剂，它们可以提高化学反应速度，能对所有的生物，从单细胞生物、植物、昆虫一直到人类，行使其特定的功能。没有它们，食物将无法消化。

迄今为止，已发现有 3 000 多种酶。酶和其他蛋白质一样，是由氨基酸长链组成。通过与底物的结合，降低反应所需要的活化能，提高反应速度，形成产物。酶的活性部位是由少数几个氨基酸组成的三维结构，任何改变酶结构的因素都将大幅度降低酶的催化能力。所以酶对环境的反应是很敏感的。通常情况下，酶在中温和中性 pH 条件下能较好地发挥催化作用。

长期以来，人类一直在不自觉地利用酶。制作奶酪和用大麦酿造啤酒是应用酶的典型例子。现代真正酶技术始于 1874 年。首个有记载的酶是从牛胃内容物中分离出来的凝乳酶。该酶至今仍在奶酪生产中使用。自此以后，酶的鉴定、商品化规模的分离和生产技术一直在飞速发展，酶在许多产业领域得到了应用。如今酶已经被广泛应用在洗涤剂、造纸、皮革、纺织、食品饮料（从面包、奶酪到果汁、葡萄酒、咖啡制造）和皮革纺织等领域。1995 年酶制剂市场的销售总额为 10 亿美元，2000 年为 17 亿美元，预计到 2005 年将达到 20 亿美元。

1. 为什么要在饲料中添加酶？

使用酶的基本出发点是为了提高饲料原料的营养价值。

所有的动物在消化食物时都使用酶。酶可以由动物产生，也可以由消化道中的微生物产生。但是任何饲料的消化都不会达到 100%，例如，猪对饲料的消化率为 75%~85%。所以在动物饲料中添加酶制剂以提高消化率可以看作是动物消化过程的延伸。

在畜禽养殖过程中，饲料成本是最大的一项开支。养殖场的利润在很大程度上取决于饲料的成本性能（营养值）和它们的营养价值。配制动物日粮主要考虑的限制因素是动物消化饲料中各种组分（特别是纤维素）的能力。

尽管近年来动物饲养水平得到了很大提高，但是饲料潜在的营养价值还没有得到充分实现。饲料中营养物质的不充分利用会增加养殖业、食品生产企业和环境治理的成本。简而言之，在饲料中添加饲用酶主要有以下 4 个理由：

（1）降解动物饲料中的抗营养因子。这些抗营养因子不能被动物内源酶降解，从而干扰动物的正常代谢，导致动物消化不良，生产性能下降。

（2）提高淀粉、蛋白质和矿物质的利用率。这些营养物质会被富含纤维的细胞壁包围，或者以不能被动物消化的结构形式存在（例如在植物饲料原料中，大量的磷以植酸磷的形式存在）。

（3）降解饲料原料中某些特定的化学键。这些化学键不能被动物自身的酶所降解，加入外源酶可以释放更多的营养物。

（4）由于幼龄动物自身消化系统还不成熟，其内源酶不足。添加外源酶可以提高饲料消化率，防止出现消化不良症状。

添加酶制剂除了可以提高日粮的利用率以外，还可以减少饲料原料之间的差异，提高饲料配方的精确性，从而提高动物生长的整齐性，减少管理成本，提高经济效益。

使用酶制剂还可以保护环境。饲料利用率的提高便相应减少了粪便排放量。在效果比较明显的情况下，粪便的排放量可以减少 20% 左右，猪粪氮的排放下降 15% 左右，鸡粪氮的排放下降 20%。对于植酸磷，可以大幅度减少磷对环境的污染。

2. 酶制剂是如何作用的？怎样应用在饲料工业中？

概括地讲，目前在饲料工业中应用的酶制剂主要有4大类，分别用来降解日粮纤维、蛋白质、淀粉和植酸。

(1) 日粮纤维降解酶。对单胃动物来说，消化的最大阻力是不能产生降解纤维的酶，在含有小麦、大麦、燕麦等的日粮中，日粮纤维的很大一部分是阿拉伯木聚糖和 β -葡聚糖。水溶性日粮纤维能提高小肠内容物的粘度，阻碍养分的吸收，从而降低动物的生产性能。同时这种状况还和一些由于消化不良引起的疾病有关。如猪的性欲减退、禽的黑趾症和小猪拉稀。由于品种、生长地点和气候条件等因素的影响，大麦和小麦中纤维含量的变化很大，导致含有这些组分的日粮的营养价值差异很大。纤维降解酶、木聚糖酶和 β -葡聚糖酶可以减少这种差异，提高动物的生长性能和整齐度。同时还可以减少某些消化不良疾病的发病率。

(2) 蛋白降解酶。动物日粮中的蛋白质来自各种饲料原料，它们最终通过降解成氨基酸而沉积在肌肉中。在单胃动物日粮中，不同饲料原料蛋白质的品质与可利用率存在相当大的差异。在植物蛋白源，如豆饼/粕中，存在着一些抗营养因子，如植物凝集素和胰蛋白酶抑制因子，可能会对小肠吸收表面造成损害，影响营养物的吸收。另外，幼龄动物不完善的消化体系使得豆饼/粕中的大分子蛋白质（如大豆球蛋白和 β -伴大豆球蛋白）不能得到很好的利用。添加蛋白酶，除了能将大分子储藏蛋白质降解为可被动物利用的小分子肽外，还能够通过降解抗营养因子而改善饲料的营养价值。

(3) 淀粉降解酶。许多营养学家认为玉米是饲料原料的“黄金标准”。绝大多数营养学家认为玉米不存在消化不良性，消化率超过95%。但是最近Noy和Sklan（1994年）研究表明在理想状态下，4~12日龄肉鸡日粮中淀粉的回肠末端消化率很少超过85%，添加淀粉酶可以使淀粉在小肠中得到更多更快的降解。在仔猪断奶期，由于营养、环境和免疫系统的变化，体重会下降。在日粮中添加淀粉酶和其他一些酶，可以增加动物内源消化酶分泌，进而改善营养的消化吸收，提高饲料转化率和动物生长率。

(4) 植酸降解酶。对于所有的动物来说，磷对于骨骼的矿化、免疫、繁殖、生长都是至关重要的。猪和家禽等单胃动物只能利用植物饲料中30%~40%的磷，其余60%~70%的植酸磷是无法利用的。在许多情况下，动物日粮中必须补充无机磷来满足其生长的需要。饲料中一半以上的磷随着粪便排放到环境中而引起环境污染。添加植酸酶可以降解植酸，释放植酸分子中的磷。这样会有两个益处：①减少了饲料中磷的添加量；②减少了畜禽粪便中的磷对环境的污染。

三、现在的饲用酶制剂市场

显而易见，作为饲料酶的4种主要类型，其作用机理和模式在很大程度上决定或推动了动物饲料工业对于酶制剂技术的吸收运用。当与动物饲料业各个不同部分的具体结构联系起来分析的时候，饲料酶应用的技术背景就会变得更加明朗。

全球养禽业，特别是肉鸡养殖业，集约化程度很高，主要由少数几个企业垄断。如美国的泰森（Tyson）公司每年的肉鸡饲养量为20亿只，超过整个英国的产量（英国的人口为6000万左右，为美国的1/4）。该公司控制着生产的每一个环节，从原料、育种到肉品加工和最终产品的零售。这种高度集约化和一条龙式的生产体系使得新技术的推广十分迅速，特别是在新技术带来的经济效益比较明显的情况下更是如此。目前在肉鸡料中添加酶的产出投入比例超过2:1。

相对而言，在养猪业领域，酶制剂的使用情况就比较复杂，显得不明朗。集约化程度低，涉及环节比较多，酶制剂的使用效果很难进行商业计算。

尽管在 20 世纪 50 年代已经有了使用酶制剂的设想,但是直到 20 世纪 80 年代才开始懂得如何在饲料工业中发挥酶的力量。

饲料谷物,如小麦和大麦都含有较高的单胃动物不能利用的纤维。如果纤维能够被降解,动物就能更好地利用营养物。在欧洲,大麦比较便宜,禽类营养学家和酶学家投入了大量精力研究肉鸡日粮中添加 β -葡聚糖酶以减少日粮中大麦负面影响的可能性。其结果证明是成功的,并得到了一个黄金定律:大麦+ β -葡聚糖酶=小麦。

受到上述成功的鼓舞,小麦是第二个研究对象。理论假设是:小麦+木聚糖酶=玉米。

这一步的研究也获得了成功。在 20 世纪 90 年代中期,酶在饲料工业中的应用得到了普遍认可。可以毫不夸张地说,1996 年,在欧洲 80% 的肉鸡饲料(粘性谷物为能量来源)中含有纤维降解酶。由此强化和加快了饲料产业对新技术的应用。

从全球范围来看,大约 65% 的含有粘性谷物的家禽饲料中添加了纤维降解酶。而其在猪饲料中的应用比例要低得多,不到 10%。其主要原因是市场的结构比较复杂,市场呈现多元化,甚至无法测算。

从地理分布来看,使用纤维降解酶的地区主要集中在粘性谷物作为主要能量饲料的产区,如欧洲、加拿大、澳大利亚和新西兰。另外,在美国、南美和亚太地区,使用情况取决于玉米和小麦之间的价格比。从这个意义上讲,欧洲是使用纤维素降解酶的核心市场。为了获得全球的认可,酶制剂商家必须大举进军以玉米—豆粕型日粮为主的北美和亚太地区。玉米—豆粕型日粮历来被看作是“黄金标准”,尽管许多营养学家认为这些原料的质量变化变动性要比原来设想的变动性大得多。

现在,越来越多的证据表明这种黄金日粮也可以通过酶而改善其营养价值,尽管这类日粮与粗纤维或粘度相关的问题不严重。过去 10 年在研发玉米—豆粕第一代饲料酶上耗费很多,并于 1996 年开始成功应用。初期应用结果五花八门,但业界正逐渐清楚如何才能得心应手使用加酶技术获得最大经济回报。据估算,该部分饲用酶市场份额为 2 000 万美元,实际在使用玉米—豆粕日粮的肉鸡饲料中只有 5% 为加酶饲料。预测 1999/2000 年这些粘性与非粘性(碳水化合物酶)饲料酶的市场价值超过 1 亿美元。

目前,植酸酶已经得到了全球的认可和应用。植酸酶的市场份额大约是每年 5 000 万美元,在全球约有 8.0% 的猪禽饲料中添加植酸酶。除了经济利益的原因外,还有一个因素是减少了粪中植酸磷的含量,有利于环境保护。

植酸酶主要在蛋鸡和育肥猪饲料中应用,这两种饲料一般都是粉状的,不用制粒。所以不涉及酶的热稳定性问题,使用方便,甚至可以使用液体酶。

四、未来的需求和机遇

饲用酶的应用对传统的动物营养学说提出了挑战。如饲料配方、原料的选择、动物营养需求和理想的生产效益等方面需要重新研究或修正。10 年前,许多欧洲的动物营养学家看待小麦如同北美看待玉米一样——基本上都被作为一种不可改善的原料。但是随着酶技术在全球饲料工业中的认同和普及,这种观点开始转变。同时,酶生产商也必须不断推出新产品和新的应用方法,以解决发展过程中存在的问题,为酶制剂产品提供新的用途和发展机遇。

酶的热稳定性,即酶能否在饲料制粒加工中存活是饲料工业关心的一个重要问题。另外,还有酶的分析检测技术,尤其是如何检测在配合饲料中含量低的酶。这些都促使酶生产商不断研究探索新的酶种,同时提高其耐热性,加强和完善分析检测手段,特别是微量酶活的检测。需要提示的是

提高液体酶的热稳定性,可以降低酶的生产成本,使用也更为方便。

随着酶和底物以及肠道环境之间作用机理的研究日臻成熟,酶技术的应用前景也变得越来越宽广。事实上也是基于我们对何种组分对酶处理敏感,添加多少酶量才能产生最佳经济效益等问题的理解,推动了饲用酶工业的发展。人们希望看到的理想状态是计算机自动测量控制酶的添加量,使酶的使用达到最佳效益。

欧盟政府最先颁布了饲料中禁止使用某些抗生素作为促生长剂的决定。这个决定在世界其他国家也产生了触动,迫使饲料生产企业和肉制品生产商努力寻找替代品,加酶成了首选,它使得肉食品生产者能够继续以较低的成本,持续生产安全营养、优质的肉蛋奶满足消费者日益增长的需求。从而也可以看到,在这一过程中,许多产品是由于禁用抗生素而生产的。同时我们也必须注意到,在寻找有效的代替办法时,饲料工业对新技术要求不仅是迫切的,而且是长期的、不断提高的。

尽管这项技术已有了长足发展,但是迄今为止,全球单胃动物饲料仅有10%左右使用了酶,总价值约1.5亿美元。于是,饲料酶产业界质疑:饲料酶的发展为什么不能更快些?尤其是那些已经显示出良好商业前景的饲料酶。由饲料业界给出的解释是:饲料酶在使用过程中受到如下薄弱环节的制约—标准化、公开有效的质量控制体系,良好的热稳定性,更加准确的液体应用系统,较为明朗的技术信息公示,以及使生产性能反应更加一致的产品。显然,饲料酶应用技术发展的潜力巨大,任重道远。

参考文献

- Bedford, M. R. and Classen, H. L. 1992. Reduction of intestinal viscosity through manipulation of dietary rye and pentosanase concentration is effected through changes in the carbohydrate composition of the intestinal aqueous phase and results in improved growth rate and food conversion efficiency of broiler chicks. *Journal of Nutrition*, 122: 560~569.
- Close, W. 1995. Enzymes in action, feed mix enzymes special issue *Enzymes- Nature's Catalyst*. Misset pp. 17~20.
- Gill, C. 1999. *Feed International*, January 1999, Watt Publishing, pp. 4~10.
- Gill, C. 2000. *Feed International*, January 2000, Watt Publishing, pp. 4~6.
- Godfrey, T. and West, S. I. 1996. Introduction to industrial enzymology. In: Godfrey, T. and West, S. I. (eds) *Industrial Enzymology*, 2nd edn. Macmillan, UK, pp. 1~8.
- Hoffman, P. 1999. Prospects for feed demand recovery. *International Feed Markets '99*, October 1999, Agra Europe.
- Muller, A. 1999. *Kraftfutter*, September 1999, pp. 303~311.
- Noy, Y. and Sklan, D. 1994. Digestion and absorption in the young chick. *Poultry Science*, 366~373.
- White, W. B., Bird, H. R., Sunde, M. L., Marlett, J. A., Prentice, N. A. and Burger, W. C. 1983. Viscosity of β -D-glucan as a factor in the enzymatic improvement of barley for chicks. *Poultry Science*, 62: 853~862.

(陆文清译; 金立志校)

第2章 纤维素酶和木聚糖酶的酶学及其他特征

M. K BHAT¹, G. P. HAZLEWOOD²

¹食品原料科学部, 食品研究所, Norwich 研究园, Colney, Norwich NR4 7 UA, 英国

²芬兰饲料国际公司 (Finnfeeds), PO Box 777, 莫尔伯勒, 威尔特郡, SN8 1XN, 英国

一、引言

纤维素和半纤维素是植物的主要结构性多糖, 约占植物体的 70% (Ladisch 等, 1983)。据估计, 植物通过光合作用每年固定的氮总量超过 1 000 亿吨 (Ryu 和 Mandels, 1980)。纤维素和半纤维素在维持植物完整性方面起着重要的作用, 是草食动物的主要营养来源, 可作为食品、动物饲料、纸、纸浆生产的可再生性物质 (Ryu 和 Mandels, 1980; Gillert 和 Hazlewood, 1993; Beguin 和 Aubert, 1994)。

可以肯定地说, 纤维素、半纤维素能被来源于微生物的纤维素酶和半纤维素酶消化为可溶性单糖 (Mandels, 1985; Viikari 等, 1993)。微生物 (包括真菌、细菌、放线菌等) 能产生三种主要的纤维素酶, 即内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶和 β -葡萄糖苷酶 (Wood, 1985; Lamed 和 Bager, 1987, 1988; Bhat 和 Bhat, 1997)。大多数陆生植物细胞壁的半纤维素主要由木聚糖和甘露聚糖组成, 需要很多酶系才能使之完全水解为可溶性糖 (Biely 等, 1992; Hazlewood 和 Gilbert, 1998a)。其中两种主要的酶为内切木聚糖酶 (木聚糖酶) 和内切甘露糖酶 (甘露糖酶), 这些酶能降解半纤维素的主链结构 (Viikari 等, 1993)。其他的半纤维素酶 (如 β -木糖苷酶、甘露糖苷酶、 α -L-阿拉伯呋喃糖苷酶、 α -D-葡萄糖醛酸酶、 α -半乳糖苷酶、醋酸基和苯基酯酶) 能水解侧链和取代基 (Biely 等, 1992; Coughlan, 1992; Coughlan 和 Hazlewood, 1993a)。

纤维素酶和半纤维素酶的生化特性和催化特性非常有意义, 并在自然界中扮演着重要角色, 在生物技术应用中有巨大潜力, 这些已激发人们去研究以了解这些酶的具体的生化、分子学和结构功能之间的关系。本章将从基本原理和应用两方面来总结目前关于纤维素酶和木聚糖酶的酶学知识及其他特性。需要进一步了解的背景知识可参见前人的研究 (Ryu 和 Mandels, 1980; Wood, 1985, 1992a, b; Lamed 和 Bayer, 1988; Coughlan, 1992; Coughlan 和 Hazlewood, 1993a, b; Gilbert 和 Hazlewood, 1993; Bayer 等, 1994; Beguin 和 Aubert, 1994; Bhat 和 Bhat, 1997, 1998; Hazlewood 和 Gilbert, 1998a)。

二、纤维素和半纤维素的结构

植物细胞壁主要包括三部分: 纤维素 (40%~45%)、半纤维素 (30%~35%) 和木质素 (20%~23%) (Ladisch 等, 1983)。纤维素是由葡萄糖通过 β -1, 4 糖苷键链接而成的线状结构分子, 具有简单的初级和复杂的三级结构, 其重复单位是纤维二糖 (图 2-1a)。

纤维素链的聚合度 (葡萄糖残基数) 从 500 到 14 000 不等 (Marx-Figini 和 Schultz, 1966)。植物细胞壁中, 纤维素链的排列有序程度不同, 在一些区域, 纤维素链高度有序排列, 在氢键作用下形成晶体; 而其他区域则松散排列, 纤维素分子形成非晶体状 (图 2-1b)。天然晶体纤维素的结

构为 I 型, 通过碱处理可以转化成 II 型结构 (Beguin 和 Aubert, 1994), 这两种类型纤维素的区别在于链内氢键间存在差异。此外, 天然结晶纤维素可能由两种结构稍有差异的 I 型纤维素构成, 即 $I\alpha$ 、 $I\beta$, 这两种亚型的区别也在于其分子内氢键间的差异 (Atalla 和 Vander Hart, 1984)。

纤维素的结晶程度因其本身和分离后的加工方式不同而存在差异 (Hoshino 等, 1992)。不定型 (amorphous) 和酸膨胀型 (acid-swollen) 纤维素的结晶程度为 0, 而来自大型橡子壳 (*valonia macrophysa*) 的纤维素的结晶程度达 100% (Beguin 和 Aubert, 1994)。棉花纤维素中约有 70% 为晶体状, 商品纤维素的结晶程度一般在 30%~70% 之间 (Fan 等, 1980; Wood, 1988)。纤维素中的晶体化部分僵硬, 不易被具有内切作用的纤维素酶降解, 而非晶态的纤维素则易被稀酸、内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶降解 (Sinityn 等, 1990)。因此, 完全降解纤维素需要采用浓酸或复合酶系, 攻击其结晶区和非结晶区。

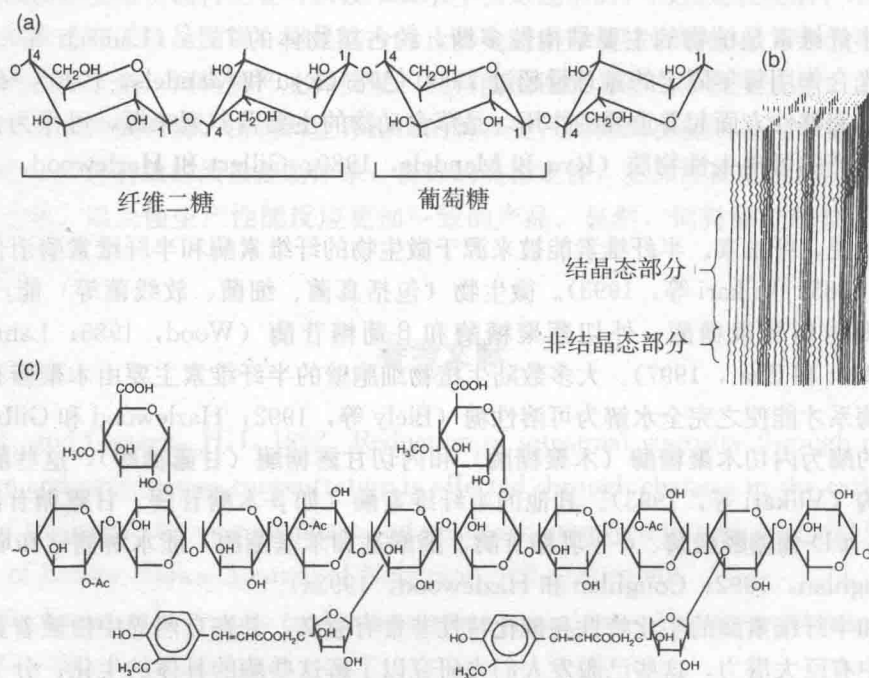


图 2-1 纤维素和阿拉伯木聚糖的结构

(a) 葡萄糖和纤维二糖, 摘自 FEMS 微生物学杂志, 13 卷, Beguin, P. 和 Aubert, J.-P. 著, 纤维素的生物降解, pp. 25~58, 1994, 经 Elsevier 科学杂志允许。

(b) 纤维素微纤维图, 显示结晶态和非结晶态部分, 摘自生物技术学生物工程论文集, 第 5 卷, 作为化学和能量来源的纤维素, Wike, C. R. 编, 水解纤维素和木质纤维物质的物理和化学性质. pp. 163~181, 1975, 经 John Wiley & Sons 公司允许。

(c) 典型的谷物阿拉伯-4-O-甲基葡糖醛酸木聚糖, 摘自生物学和应用化学, 17 卷, Coughlan, M. P. 和 Hazlewood, G. P. 著, β -1, 4-D-木聚糖降解酶系统: 生物化学、分子生物学及其应用. pp. 259~289, 1993, 经 Portland (伦敦) 出版社同意。

半纤维素是植物中仅次于纤维素的第二丰富的植物结构性多糖, 在多数植物细胞壁中伴随纤维素而存在, 用碱液能从中提出。根据聚合链上的主要糖残基, 可将半纤维素分为木聚糖、葡甘露聚糖、半乳聚糖、阿拉伯聚糖。通常认为木聚糖和葡甘露聚糖是两种主要的半纤维素 (Timell, 1967; Whistler 和 Richards, 1970; Stephen, 1983; Puls 和 Schuseil, 1993; Viikari 等, 1993)。

与来自多年生植物的木聚糖 (阿拉伯木聚糖) 相比, 来自一年生植物的木聚糖更具多样性。两种主要的阿拉伯木聚糖是: (1) 来源于种子胚乳的高度分支, 且没有糖醛酸取代基的阿拉伯木聚糖; (2) 存于木质化组织中、有较少分支、有糖醛酸和/或 4-氧-甲醚以及半乳糖取代基的阿拉伯木聚糖。禾本科植物的阿拉伯木聚糖包含醋酸、酚酸 (阿魏酸、p-香豆酸) 基团, 它们分别与主链上