

» CNCPS 体系

演变 模型及饲料成分表

◎ 熊本海 蒋林树 主编

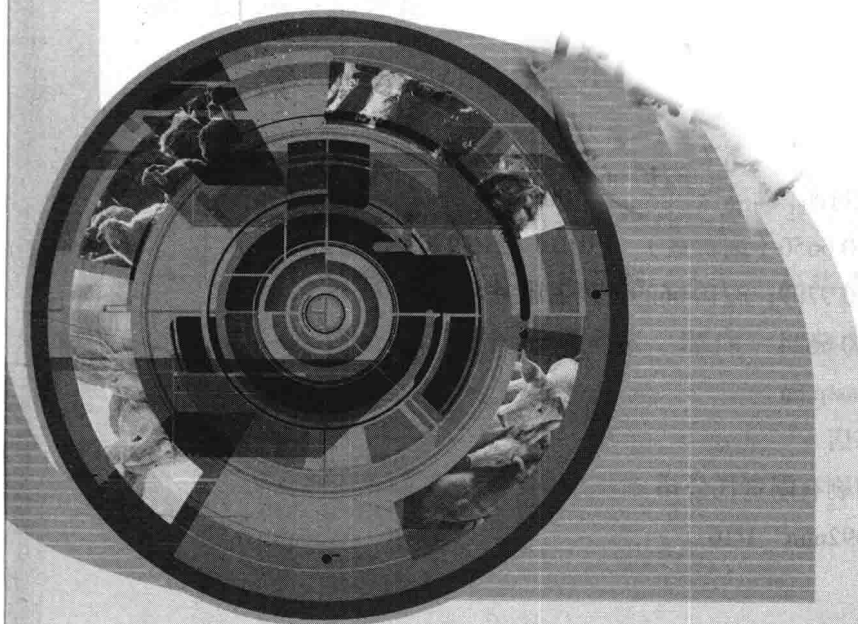


中国农业科学技术出版社

➤ CNCPS 体系

演变 模型及饲料成分表

◎ 熊本海 蒋林树 主编



中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

CNCPS体系演变、模型及饲料成分表/ 熊本海, 蒋林树主编. —北京:
中国农业科学技术出版社, 2015. 7
ISBN 978-7-5116-2014-9

I. ①C… II. ①熊… ②潘… ③杨… III. ①碳水化合物-饲料营养成分-研究
IV. ①S816.11

中国版本图书馆CIP数据核字 (2015) 第135240号

责任编辑	鱼汲胜
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) 8210 6650 (编辑室) (010) 8210 9702 (发行部) (010) 8210 9709; 8210 6629 (读者服务部)
传 真	(010) 8210 6624
网 址	http://www.castp.cn
经 销 者	各地新华书店
印 刷 者	北京富泰印刷有限责任公司
开 本	787mm × 1092mm 1/16
印 张	18
字 数	460 千字
版 次	2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷
定 价	69.00 元

— 版权所有 • 翻印必究 —

主编单位 奶业产业技术体系北京市创新团队
中国饲料数据库情报网中心
农业科学数据共享中心动物科学数据分中心
动物营养学国家重点实验室
奶牛营养学北京市重点实验室
中国农业科学院北京畜牧兽医研究所

主 编 熊本海 蒋林树

副 主 编 潘晓花（女） 杨 亮 王天坤（女）

参 编 （按姓氏笔画排序）

王建芬（女） 方洛云 孙宝山 孙宝林 吕健强
毕 晔 罗清尧 辛海瑞 庞之洪（女） 胡 鑫（女）
贾会囡（女） 高春燕（女） 高华杰（女） 韩英东
褚 怡（女） 翟占军 潘佳一 薛夫光

序

以牛（奶牛、肉牛）为研究对象提出的净碳水化合物及蛋白质体系，即所谓的 CNCPS 体系，最早由美国康奈尔大学的 Fox, Sniffen 等科学家于 1992 年在《动物科学杂志》发表的几篇论文而被世界同行所认知，主要是通过细分饲料原料中的碳水化合物（CHO）及粗蛋白质（CP）作为切入点，分别研究不同的组分在瘤胃的动态降解与过瘤胃特性而开启 CNCPS 研究的序曲。随着研究的不断深入，尤其是对饲料中的 CHO、CP 的组分结构的精细化的剖分，以及与动物主要是奶牛的体况及生产性能的互动，使 CNCPS 体系不断得以完善，其主要的营养价值评定的概念、模型及描述参数基本纳入 NRC(2001)发布的第七版《奶牛营养需要量》中，并以此为基础，还形成了 CPM 3.0 软件系统，用来动态计算奶牛的营养需要量及优化奶牛的 TMR 日粮配方。这之后，Fox 等（2004）发表的 CNCPS 5.0 版本，主要增加了液体饲料的流通速率计算公式，同时，粗饲料的流通速率校正因子采用物理有效 NDF(peNDF)进行计算，进一步提高了计算养分消化与流通的准确性。而最后修订版的 CNCPS 6.1 则采用 Seo 等关于 K_{pf}（粗饲料流通速率）、K_{pc}（精饲料流通速率）和 K_{pl}（液体饲料流通速率）的计算公式，摒弃了 CNCPS 5.0 中 peNDF 校正因子，原因是采用校正因子可能会过高估计小颗粒原料的过瘤胃量，同时，CNCPS 与 NRC(2001)体系中 K_p（流通速率）的计算公式存在差异。

正是由于对饲料内在特性与动物消化道的互动研究的不断深入，CNCPS 版本不断更新，评定的相关模型也不断修订，依据实验室现代分析仪器测定的饲料养分数据不断精准，以及依据 CNCPS6.1 模型计算或派生的各种饲料的养分指标越来越丰富。但是，上述的模型与数据主要存在于 CNCPS6.1 系统开发的应用软件及配套的数据库中，未见有整理成册的文本。为便于从事反刍动物应用研究的学者、配方设计师及相关人员，全面了解 CNCPS 体系的演变过程而编辑本书。

本书不仅总结了不同版本之间的差异与进展，具体的养分评价与全消化道降解、流通与吸收的数学模型，还系统给出了大约 250 种饲料依据 CNCPS 理论产生的饲料成分及营养价值表。本书第二部分提供的关于奶牛的 CNCPS 体系的饲料成分表，包括常规成分或概略成分，非纤维性成分、纤维性成分及有机酸，蛋白质组分，碳水化合物及蛋白质组分的瘤胃降解率及小肠消化率，过瘤胃蛋白质中的氨基酸含量，脂肪酸含量及小肠消化率，常量元素、微量元素及维生素含量与利用率等 126 项指标。每种饲料用一固定的表格显示全部指标，便于全面查阅选定饲料的全部特性，但不便于不同饲料相同指标的前后比较。由于篇幅限制，本书未能提供 brow 模式的成分表。

本书提供的数据主要来源于 CNCPS6.1 发布的饲料表，每个饲料养分数据与饲料的品种及描述对应的，读者不可直接拿来全盘使用，需要采用审慎的眼光做到“洋为中用，但不唯洋”！在应用与实践中，去理解与接受较为复杂的 CNCPS 体系。

由于编者水平有限，难免对 CNCPS 体系中模型有理解不到之处，对数据的比对与换算有欠科学之处，尽管反复校对，不敢妄言 100%忠实于资料出处，不妥之处，请读者提出异议与建议，作者不胜感激！

作者

2015 年 3 月 15 日

目 录

第一部分 CNCPS 基础理论、术语与模型介绍	1
第 1 节 CNCPS 概述	1
第 2 节 碳水化合物和蛋白质的划分与计算	1
2.1 碳水化合物和蛋白质组分的划分	1
2.2 碳水化合物和蛋白质各组分的计算	2
2.3 CNCPS 6.0 评价不同饲料原料碳水化合物和蛋白质结构特征	4
第 3 节 碳水化合物和蛋白质组分在瘤胃及肠道内降解规律	7
3.1 碳水化合物和蛋白质组分在瘤胃内的降解规律	7
3.2 碳水化合物和蛋白质组分在肠道内的降解规律	10
3.3 碳水化合物和蛋白质组分代谢规律的其他研究	11
第 4 节 CNCPS 与其他饲料营养价值评定体系的比较	12
4.1 Weende 体系	12
4.2 Van Soest 体系	12
4.3 CNCPS 体系	12
4.4 NRC 体系	13
第 5 节 CNCPS6.0 的模型参数描述	14
第 6 节 CNCPS6.0 中的模型数字化描述	18
第二部分 CNCPS6.0 配套的饲料成分及营养价值表	26
参考文献	275

第一部分 CNCPS 基础理论、术语与模型介绍

第 1 节 CNCPS 概述

CNCPS 体系是美国康奈尔大学科学家提出的一种饲料营养价值评定体系，通过称之为康奈尔净碳水化合物和蛋白质体系。自 CNCPS 第一版于 1992 年至 1993 年以 4 篇系列论文的^[3, 5~7]形式问世后，经过不断改进和完善已发展至 CNCPS 6.0^[8~10]版本。CNCPS 体系能够真实反映饲料中的碳水化合物和蛋白质在瘤胃内的降解率、消化率、外流数量以及能量、蛋白质的吸收效率情况，并建立了相应的数学模型。基于 CNCPS 子模型，可以估测不同的日粮特性和环境条件下饲料的消化代谢规律和动物的生长和产奶性能^[11]。

第 2 节 碳水化合物和蛋白质的划分与计算

碳水化合物是奶牛日粮组成的重要部分，一般经瘤胃内微生物降解及后肠段的消化吸收而为机体提供能量及营养物质，且其含量和结构对奶牛瘤胃健康，机体代谢以及生产性能产生重要的影响。一般碳水化合物分为纤维性碳水化合物(FC，即纤维素和半纤维素)和非纤维性碳水化合物(NFC，包括有机酸、单糖、寡糖、果糖、果胶， β -葡聚糖和淀粉)^[12]，其中，日粮中 NFC 水平和组成成分的平衡是反刍动物饲料配制时需要考虑的重要因素。而不同饲料原料 NFC 含量及组分构成方面存在差异，同时 NFC 不同组分因在瘤胃内的降解速率、程度及降解产物等方面存在差异^[13, 14]，进而影响动物生产性能。因此，深入研究不同碳水化合物的划分、构象及其在瘤胃及后肠段的消化代谢特点显得尤为重要。

2.1 碳水化合物和蛋白质组分的划分

CNCPS 根据化学组成、物理特性、瘤胃降解度以及后肠段消化特点，将碳水化合物进行了划分，并且经历了逐渐细化的过程。从 Sniffen 等(1992)^[6]至 CNCPS 5.0^[11]，碳水化合物分为 4 部分：CA 主要为糖类，有机酸和寡糖，是快速降解部分；CB1 为淀粉和果胶，是中速降解部分；CB2 为可利用的细胞壁，在瘤胃内缓慢降解；CC 为不可利用的纤维类，在瘤胃内不被降解。但 CA 部分主要是糖类的概括方法过于粗略，忽略了有机酸的作用，且草料和青贮饲料中含有大量的有机酸，

而有机酸促进微生物生长的效率低于糖类；同时青贮饲料中乳酸含量较高，与有机酸不同，乳酸可用于合成微生物蛋白^[15, 16]，若忽略 CA 中的有机酸含量而将快速溶解部分全部归类为糖类，则会过高地估计微生物的生长^[17]。因此，CNCPS 6.0 及 Lanzas 等(2007)^[18]将碳水化合物进一步细分为八部分：CA1(乙酸、丙酸和丁酸等挥发性脂肪酸)、CA2(乳酸)、CA3(有机酸)、CA4(糖类)、CB1(淀粉)、CB2(可溶性纤维)、CB3(可利用 NDF)和 CC(不可利用 NDF)，这一新碳水化合物划分体系更加接近瘤胃发酵特性，能更精确地评定饲料品质和日粮 NFC 的构成，从而更好地指导反刍动物日粮的配制。

根据蛋白质在瘤胃内的降解及流通特性，CNCPS 将蛋白质划分为三部分，即 PA(NPN，非蛋白氮)、PB(真蛋白)和 PC(结合蛋白)^[19]。根据瘤胃降解率的不同，真蛋白 PB 又细分为 PB1、PB2 和 PB3 三个亚单位。PA(主要是氨、肽和氨基酸)和 PB1 溶于缓冲溶液，并且 PA 在瘤胃内快速转化为氨，其中，青贮饲料与切短的牧草的可溶性蛋白基本是 NPN^[20]；PB1 是能溶于缓冲溶液的蛋白质，属于快速降解部分^[19]，大多数干草中 PB1 含量较少，大约占可溶性蛋白(SolCP)的 5%，而精料中 PB1 含量大约为干粗饲草的 2 倍^[20, 21]，大多数新鲜牧草的可溶性蛋白为 PB1；PB2 是不溶于缓冲液而溶于中性洗涤剂的蛋白，属于中速降解部分，部分可以进入后部消化道而被动物消化利用，如谷物中的谷蛋白；PB3 是指中性洗涤剂中不溶蛋白(NDFIP)，但该蛋白是可以在酸性洗涤剂中溶解的。因其与细胞壁结合而在瘤胃中降解缓慢，其大部分经过瘤胃进入后部消化道被吸收利用。牧草、发酵谷物与谷物副产品中含有大量的 PB3^[21]；PC 含有与木质素结合的蛋白质、丹宁蛋白质复合物和其他高度抵抗微生物和哺乳类酶类的成分，在酸性洗涤剂中不被溶解蛋白(ADFIP)，在瘤胃中不能被瘤胃细菌降解，其全部流入后肠道但不能被消化。青贮牧草、干燥苜蓿、柑橘渣、玉米酒精糟和啤酒糟中含有相当多的结合蛋白^[22]。综上所述，瘤胃内降解蛋白包括全部的 PA(NPN)和大部分 PB1、PB2 和少量的 PB3；过瘤胃蛋白包括全部的 PC 和少量的 PB1、PB2 和大量的 PB3。

2.2 碳水化合物和蛋白质各组分的计算

根据 CNCPS 模型中的计算方法，参照 Sniffen 等(1992)^[6]及 Lanzas 等(2007)^[18]、Tylutki 等(2008)^[8]，碳水化合物及蛋白质各部分计算公式如表 1-1。

表 1-1 CNCPS 碳水化合物和蛋白质各个组分计算公式(% DM)

项目 Item	成分 Component	计算公式 Equation
CHO	总碳水化合物 Total carbohydrate	$100 - \text{CP} - \text{EE} - \text{Ash}$
CC	不可消化纤维 Indigestible fiber	$[\text{NDF} \times \text{木质素}(\% \text{NDF}) \times 2.4] / 100$
CB3	可消化纤维 Digestible fiber	$\text{NDF} - [\text{NDFIP}(\% \text{CP}) \times \text{CP}] / 100 - \text{CC}$
NFC	非纤维性碳水化合物 Non-fiber carbohydrates	$\text{CHO} - \text{CB3} - \text{CC}$
CA1	挥发性脂肪酸 Volatile fatty acids	乙酸+丙酸+丁酸+异丁酸
CA2	乳酸 Lactic acid	乳酸
CA3	有机酸 Organic acid	有机酸
CA4	糖类 Sugars	糖类
CB1	淀粉 Starch	淀粉
CB2	可溶性纤维 Soluble fiber	$\text{NFC} - \text{CA1} - \text{CA2} - \text{CA3} - \text{CA4} - \text{CB1}$
PA	非蛋白氮 Nonprotein nitrogen	$[\text{NPN}(\% \text{SolCP}) \times \text{SolCP}(\% \text{CP})] / 100 \times \text{CP} / 100$
PB1	快速降解真蛋白 Rapidly degraded true protein	$[\text{SolCP}(\% \text{CP}) \times \text{CP}] / 100 - \text{PA}$
PC	酸性洗涤不溶蛋白 ADFIP	$\text{ADFIP}(\% \text{CP}) \times \text{CP} / 100$
PB3	慢速降解真蛋白 Slowly degraded true protein	$[\text{NDFIP}(\% \text{CP}) - \text{ADFIP}(\% \text{CP})] \times \text{CP} / 100$
PB2	中速降解真蛋白 moderately degraded protein	$\text{CP} - \text{PA} - \text{PB1} - \text{PB3} - \text{PC}$

其中, CHO 为总碳水化合物, 按照 NRC(2001)^[4]所提供的方法计算; 按照 AOAC(1990)^[24]的标准方法测定干物质(DM; AOAC 930.15)、灰分(AOAC 942.05)、乙醚浸出物(EE; AOAC 954.02)、粗蛋白(CP; AOAC 984.13)、木质素(AOAC 973.18)和糖类(AOAC 968.28); 真蛋白和 NPN 利用三氯乙酸方法测定^[25]; 中性洗涤不溶蛋白(NDICP)和酸性洗涤不溶蛋白(ADICP)参照 Licitra 等(1996)^[25]的方法, 采用凯氏定氮法分别测定不溶于中性洗涤剂 and 酸性洗涤剂的残渣中粗蛋白含量; SolCP 为可溶性粗蛋白, 参照 Roe 等(1990)^[26]的方法测定; NDF 采用 Van Soest 等(1991)^[27]的方法测定; 挥发性脂肪酸和乳酸可参照 Fussell 等(1987)^[28]气相色谱分析方法测定; 淀粉可采用 megazyme total starch assay kit 试剂盒的方法测定。

2.3 CNCPS 6.0 评价不同饲料原料碳水化合物和蛋白质结构特征

根据 CNCPS 6.0 饲料原料营养指标及表 1-1 计算公式, 计算得到奶牛饲料中常用原料碳水化合物和蛋白质各个部分的含量(见表 1-2)。由此表可以看出, 不同饲料原料的碳水化合物和蛋白质组成成分及结构存在差异: 碳水化合物和蛋白质是干物质的主要组成成分, 两者之和占干物质的 80.00 %~97.00 %(例如, 玉米酒糟 81.00 %, 粉碎小麦 96.70%)。其中, 谷实类饲料及粗饲料的碳水化合物含量丰富, 占干物质的 60.00 %~85.00 %。

玉米、小麦等谷物类能量饲料的碳水化合物主要是以淀粉(CB1)为主, 而糖蜜及甜菜粕碳水化合物主要存在形式是糖类(CA4), 小麦麸因其含有较高的植物细胞壁而以 CB3 为主, 由于糖类及淀粉进入瘤胃后迅速被瘤胃细菌降解利用, 而 CB3 降解缓慢, 致使不同类型原料在瘤胃内降解速率不同。玉米经青贮后, 其 CB1 含量为 34.78%, 显著低于高水分玉米(72.19%), 原因是淀粉在青贮过程中降解。谷物能量类饲料蛋白质部分以 PB2 为主。

蛋白质类原料中玉米酒糟(DDG)的碳水化合物以 CB3 为主; 而棉籽粕及全棉籽因其外壳木质素含量较高, 因而以难以消化降解的 CB3 和 CC 为主, 其中, 全棉籽中 CC 部分高达 30.90%; 大豆及大豆粕中的 CA4、CB1、CB2 高于棉粕, 而 CB3 和 CC 部分相对低于棉粕, 说明大豆粕及大豆类在瘤胃内更易降解。蛋白质类原料的蛋白质以 PB1 和 PB2 为主, 且蛋白质各部分含量受加工方式的影响, 如生整粒大豆中 PA、PB1 和 PB2 的含量分别为 2.26%、16.57%和 21.39%, 经烘烤加工后各部分含量发生改变, 分别为 0.31%、2.26%和 35.31%, 其易降解部分降低, 难以降解部分比例提高, 因而, 可提高大豆在瘤胃内的稳定性, 导致过瘤胃蛋白的增加。

粗饲料因饲料种类不同而存在差异。新鲜禾本科牧草中, CB3 含量丰富, 达 42.88%。新鲜苜蓿以及豆科牧草 CB3 分别为 18.28 %和 18.56 %, 而不能被消化利用的 CC 分别高达 20.64%和 12.60%。CA3 主要存在新鲜牧草中, 且干燥后 CA3 含量降低, 原因可能是 CA3 发生分解。饲草经青贮加工后, 碳水化合物组成发生变化, 糖类、淀粉发生分解产生的乳酸进而产生挥发性脂肪酸。一般青贮饲料中含有 1.50 %~2.50 %的 CA1, 同时, 乳酸是其主要的有机酸成分, 含量高达 5%~15%^[29]。而青绿饲草中的 CA3 降解至 0, 粗饲料经青贮处理后更易于消化降解。

表 1-2 常用饲料原料碳水化合物和蛋白质各组分含量(%DM)

饲料原料 Feedstuff	CHO	CA1	CA2	CA3	CA4	CB1	CB2	CB3	CC	CP	PA	PB1	PB2	PB3	PC
小麦麸	72.70	—	—	—	4.74	21.80	5.05	32.66	8.45	17.00	2.09	4.88	7.14	2.21	0.68
Wheat bran															
粉碎小麦	82.50	—	—	—	2.12	65.11	3.54	9.38	1.75	14.20	1.28	2.98	9.37	0.28	0.28
wheat ground															
玉米, 蒸气滚扎	85.73	—	—	—	1.56	75.56	0.78	7.40	0.43	9.00	0.44	0.69	6.71	0.36	0.81
Corn Ground Steam Rolled															
玉米, 22%水分(粗)	85.05	0.31	1.00	—	1.84	72.19	1.46	7.78	0.48	9.80	1.07	1.67	6.31	0.27	0.47
Corn High Moisture															
玉米, 整粒	85.17	—	1.00	—	2.13	73.76	0.18	7.62	0.48	9.00	0.67	1.04	6.39	0.45	0.45
Corn Grain Whole															
糖蜜(甜菜)	79.50	—	4.00	4.00	70.00	—	1.50	—	—	8.50	4.25	4.25	—	—	—
Molasses Beet															
甜菜粕	72.10	—	—	—	9.98	3.00	23.99	24.55	10.58	14.7	2.16	5.04	1.03	5.63	0.84
Beet pulp															
玉米酒精糟, 浅色	50.60	—	—	—	2.40	8.01	9.61	20.98	9.60	30.40	2.66	4.94	13.38	5.14	4.29
Corn Dist Light Spirits															
花生粕, CP 48%	38.60	—	—	—	13.41	11.03	5.36	5.44	3.36	52.00	2.06	15.10	29.64	4.68	0.52
Peanut Meal Solvent															
棉籽粕 CP 42 %	44.99	—	—	—	8.25	1.74	11.73	6.41	16.86	42.00	0.32	5.99	29.07	2.45	4.18
Cottonseed Meal															
棉籽仁	52.50	—	—	—	6.86	0.49	2.45	23.26	19.44	23.00	0.32	6.12	14.26	0.92	1.38
Cottonseed Delint															
全棉籽	53.00	—	—	—	2.29	0.25	2.55	17.00	30.90	23.50	0.31	5.85	14.94	0.52	1.88
Cottonseed Fuzzy															
膨化豆粕	35.11	—	—	—	8.10	2.70	8.49	8.31	7.52	43.70	0.70	5.15	34.44	2.24	1.16
Soybean Meal Extruded															
生整粒大豆	32.40	—	—	—	12.31	3.30	6.37	9.94	0.48	42.80	2.26	16.57	21.39	1.72	0.86
Soybean Whole Raw															
烘烤整大豆	32.60	—	—	—	13.73	3.68	7.11	7.60	0.48	42.80	0.31	2.26	35.31	3.45	1.47
Soybean Whole Roasted															

续表 1-2

饲料原料 Feedstuff		CHO	CA1	CA2	CA3	CA4	CB1	CB2	CB3	CC	CP	PA	PB1	PB2	PB3	PC
粗饲料 Roughage	新鲜禾本科牧草 Grass Pasture	72.50	—	—	4.00	7.74	0.41	8.23	42.88	9.24	16.00	0.15	3.05	9.92	2.37	0.51
	新鲜豆科牧草 Legume Pasture	61.78	—	—	6.00	14.70	0.61	9.31	18.56	12.60	24.00	0.16	7.04	12.96	3.36	0.48
	新鲜苜蓿，切碎 Alfalfa Green chop	70.50	—	—	8.00	10.11	1.58	11.90	18.28	20.64	17.00	2.04	3.06	7.82	2.72	1.36
	禾本科干草 Grass Hay	75.00	—	—	3.00	7.20	3.60	10.20	43.74	7.26	16.00	4.68	2.52	4.80	3.09	0.91
	苜蓿干草 Alfalfa Hay	70.50	—	—	2.00	8.75	1.56	18.93	18.62	20.64	17.00	2.38	3.57	7.31	2.38	1.36
	禾本科牧草青贮 Grass Silage	73.70	1.77	5.00	—	4.77	2.27	8.89	40.44	10.56	16.00	5.20	2.80	4.00	2.72	1.28
	苜蓿青贮 Alfalfa Silage	69.70	1.55	5.00	—	3.08	1.54	19.61	18.28	20.64	17.00	5.53	2.98	4.42	1.36	2.72
	青贮玉米(25%DM) Corn Silage(25%DM)	84.81	2.57	5.00	—	1.35	34.78	1.46	29.81	9.84	8.00	2.34	1.26	3.05	0.96	0.39
		Note: “—” in the above table means 0.00%														
		注：上表中“—”数值为 0.00%。														

综上所述，饲料原料碳水化合物和蛋白质各部分含量受日粮种类，加工方式以及贮存类型的影响，因此，有必要针对不同状态下的饲料原料进行分析，以更好了解饲料原料的营养状况。

第 3 节 碳水化合物和蛋白质组分在瘤胃及肠道内降解规律

3.1 碳水化合物和蛋白质组分在瘤胃内的降解规律

与单胃动物消化不同，饲料中的一部分碳水化合物和蛋白质会在瘤胃中被微生物降解，为微生物提供能量及合成微生物蛋白质，进而流入小肠被消化吸收利用。由于不同碳水化合物及蛋白质组分的结构不同，其在瘤胃内降解速率存在差异。各组分被降解的数量由各自的降解速率(Kd)和外流速率(Kp)共同决定。因此，研究碳水化合物和蛋白质各个部分在瘤胃及肠道内的降解规律，对于准确预测饲料有效营养成分具有重要意义。

据 Tylutki 等(2008)^[8]报道，饲料原料各组分在瘤胃内降解量可用公式计算，如饲料原料 CA1 组分的降解量(RDCA1)和过瘤胃量(RECA1)分别为：

$$RDCA1 = DMI \times CA1 \times \left(\frac{Kd_{CA1}}{Kd_{CA1} + Kp} \right) \quad \dots\dots (1)$$

$$RECA1 = DMI \times CA1 \times \left(\frac{Kp}{Kd_{CA1} + Kp} \right) \quad \dots\dots (2)$$

其中，式中 DMI 为某一饲料原料的干物质采食量；Kd 为各组分的降解速率，可查找 CNCPS6.0 数据库获得；Kp 为饲料原料的流通速率，可根据计算公式计算。其他组分的计算公式一样。

表 1-3 为反刍动物常用饲料原料各组分的降解速率 Kd 的值。由表 1-3 知，CA1 为挥发性脂肪酸，是碳水化合物发酵的终产物，不能被进一步降解。因此，Kd 为 0 %/h。Molina(2002)^[10]采用产气法测定的乳酸(CA2)和有机酸(CA3)Kd 分别为 7.0 %/h 和 5.0 %/h。不同原料 CA4 的 Kd 在 10.0 %/h ~ 40.0 %/h 之间变化，原因是其糖类组成存在差异，葡萄糖和蔗糖的 Kd 为 40.0 %/h。因此，以葡萄糖和蔗糖为主的饲料中 CA4 部分的 Kd 值设为 40.0 %/h^[10]。而乳清粉等乳制品副产品中糖类主要是乳糖，因乳糖促进微生物生长的效率较葡萄糖低^[25]，其 Kd 为 30.0 %/h，乳清粉 CA4 的 Kd 为 30.0 %/h(表 1-3 未列出)。青贮饲料糖类一般是阿拉伯糖以及果胶和半纤维素降解产物，微生物利用效率更低，Kd 为 20.0 %/h。CB1 部分的降解速率随饲料种类变化而变化，从生整粒大豆 3.3 %/h 至花生粕 45.0 %/h 之间变化。CB2 的 Kd 一

一般为 20.0 %/h~ 40.0 %/h。CB3 的 K_d 为 2.0 %/h ~ 10.0 %/h。蛋白质 PB1、PB2 和 PB3 的 K_d 分别为 2.0 %/h ~ 30.0 %/h, 3.0 %/h ~ 16.0 %/h 和 0.06 %/h~ 3.45 %/h。

随着 CNCPS 的发展, 饲料原料流通速率 K_p 计算公式逐渐发生变化。从 Sniffen 等(1992)^[6], Fox 等(2004)^[11]到 CNCPS6.1, K_p 计算公式发生变化, 这些综合列在表 1-4 中。Sniffen 等(1992)^[6]可根据饲料颗粒大小的不同采用 Af 公式校正 K_{pf} 和 K_{pc} , 但缺少液体原料 K_p 计算公式。而液体的 K_p 可能影响可溶性营养物质的消化^[31]、发酵产物的外流^[32]、过瘤胃蛋白质含量^[11]以及微生物的生长^[33]。因此, Fox 等(2004)^[11]发表的 CNCPS 5.0 增加了 K_{pl} 的计算公式, 同时, 校正因子采用 peNDF 进行计算。CNCPS 6.0 采用 Seo 等(2006)^[34]关于 K_{pf} 、 K_{pc} 和 K_{pl} 的计算公式, 并摒弃了 CNCPS 5.0 中 peNDF 校正因子, 原因是采用校正因子可能会过高估计小颗粒原料的过瘤胃量。同时, CNCPS 与 NRC 体系中 K_p 的计算公式存在差异。

表 1-3 常用饲料原料碳水化合物和蛋白质各组分瘤胃降解速率(Kd, %/h)

	饲料原料 Feedstuff	CA4	CB1	CB2	CB3	PB1	PB2	PB3
能量类 原料 Energy Feedstuff	小麦麸 Wheat bran	40.00	40.00	40.00	5.00	25.00	12.00	0.35
	粉碎小麦 wheat ground	40.00	40.00	40.00	5.00	30.00	12.00	0.35
	玉米, 蒸气滚扎(34 磅) Corn Ground Steam Rolled(34 lb)	40.00	15.00	20.00	5.00	13.50	4.00	0.08
	玉米, 22%水分(粗) Corn High Moisture 22% Coarse	20.00	17.00	20.00	3.00	13.50	5.00	0.15
	玉米, 整粒 Corn Grain Whole	40.00	5.00	20.00	2.00	5.00	4.00	0.08
	糖蜜(甜菜) Molasses Beet	20.00	30.00	30.00	5.00	30.00	11.00	0.25
	甜菜粕 Beet pulp	40.00	20.00	40.00	8.00	30.00	12.00	0.30
	玉米酒精糟, 浅色 Corn Dist Light Spirits	40.00	17.00	30.00	7.00	15.00	6.00	0.50
	花生粕, CP 48% Peanut Meal Solvent	40.00	45.00	30.00	6.00	23.00	13.00	0.20
	棉籽粕 CP 42 % Cottonseed Meal	40.00	35.00	30.00	8.00	17.50	8.00	0.25
蛋白类 原料 Protein Feedstuff	棉籽仁 Cottonseed Delint	40.00	30.00	30.00	4.00	17.50	8.00	0.25
	全棉籽 Cottonseed Fuzzy	40.00	30.00	30.00	6.00	17.50	8.00	0.25
	膨化豆粕 Soybean Meal Extruded	40.00	25.00	30.00	6.00	23.00	11.00	0.20
	生整粒大豆 Soybean Whole Raw	12.31	3.30	6.37	9.94	16.57	21.39	1.72
	烘烤整粒大豆 Soybean Whole Roasted	13.73	3.68	7.11	7.60	2.26	35.31	3.45
	新鲜禾本科牧草 Grass Pasture	40.00	45.00	30.00	7.00	20.00	13.00	2.00
	新鲜豆科牧草 Legume Pasture	40.00	30.00	35.00	7.00	20.00	15.00	2.00
	新鲜苜蓿, 切碎 Alfalfa Greenchop	40.00	30.00	35.00	7.00	15.00	10.00	1.25
	禾本科干草 Grass Hay	40.00	30.00	30.00	4.00	15.00	11.00	1.50
	苜蓿干草 Alfalfa Hay	40.00	30.00	35.00	6.50	15.00	9.00	1.25
粗饲料 Roughage	禾本科牧草青贮 Grass Silage	20.00	30.00	30.00	3.50	20.00	9.00	1.75
	苜蓿青贮 Alfalfa Silage	20.00	30.00	35.00	6.00	15.00	11.00	1.75
	青贮玉米(25%DM) Corn Silage	20.00	35.00	30.00	5.50	13.50	11.00	0.09

注: (1)以上所有原料的 CA1、CA2、CA3、CC、PA 和 PC 各组分的降解速率相同, 且分别为 0 %/h,

7 %/h, 5 %/h, 0 %/h, 100 %/h, 0 %/h

(2)此表数据来源于 CNCPS6.0

表 1-4 CNCPS 体系中 K_p 计算公式的变化及与 NRC 体系 K_p 的对比

来源 (Reference)	计算公式 (Equation)	校正因子 (Adjust factor, Af)
Sniffen 等 (1992)	$K_{pf} = 0.388 + (0.002 \times DMI/BW^{0.75}) + [0.0002 \times \text{forage}^2 (\%DM)]$ $K_{pc} = -0.424 + 1.45 \times K_{pf}$ 湿的粗饲料: $K_p = 3.054 + 0.614 \times X1$	100/(ENDF+70) 100/(ENDF+90) 无
NRC(2001)	干的粗饲料: $K_p = 3.362 + 0.479 X1 - 0.007 X2 - 0.017 X3$ 精饲料: $K_p = 2.904 + 1.375 X1 - 0.020 X2$	无 无
Fox 等 (2004)	$K_{pf} = [0.38 + (0.022 \times DMI \times 1000 / BW^{0.75}) + 2.0 \times \text{forage}^2] / 100$ $K_{pc} = [-0.424 + (1.45 \times K_{pf} \times 100)] / 100$	100/(NDF × peNDF/100+70) 100/(NDF × peNDF/100+90)
CNCPS 5.0	$K_{pl} = (4.413 + 0.191 \times DMI \times 1000 / FBW) / 100$	无
Seo 等(2006)	$K_{pf} = 2.365 + (0.214 \times FpBW) + (0.734 \times CpBW) + (0.069 \times FDMI)$	无
CNCPS 6.0	$K_{pc} = 1.169 + (1.375 \times FpBW) + (1.721 \times CpBW)$ $K_{pl} = 4.524 + (0.223 \times FpBW) + (2.046 \times CpBW) + (0.344 \times FDMI)$	无 无

注: K_{pf} 粗饲料流通速率; K_{pc} 精料流通速率; K_{pl} 液体流通速率; DMI 干物质采食量; BW 体重; eNDF 有效中性洗涤纤维; peNDF 物理有效中性洗涤纤维; FBW(full body weight); FpBW 粗料干物质采食量占体重的百分比(forage DMI as a proportion of BW); CpBW 精料干物质采食量占体重的百分比; FDMI 粗料干物质采食量。X1 干物质采食量(%体重); X2 饲料 DM 中精料比例(%DMI); X3 饲料原料中中性洗涤纤维(NDF)含量(%DMI)

根据上述碳水化合物和蛋白质各组分瘤胃降解量和过瘤胃量的计算公式, 可得饲料原料中碳水化合物瘤胃降解量(RDCHO)和过瘤胃碳水化合物(RECHO), 蛋白质瘤胃降解量(RDP)和过瘤胃蛋白(REP)的计算公式如下。

$$RDCHO = RDCA1 + RDCA2 + RDCA3 + RDCA4 + RDCB1 + RDCB2 + RDCB \dots (3)$$

$$RDP = RDP A + RDP B1 + RDP B2 + RDP B3 \dots (4)$$

$$RECHO = RECA2 + RECA3 + RECA4 + RECB1 + RECB2 + RECB3 + RECC \dots (5)$$

$$REP = REP B1 + REP B2 + REP B3 + REPC \dots (6)$$

3.2 碳水化合物和蛋白质组分在肠道内的降解规律

碳水化合物中部分乳酸和有机酸能通过瘤胃进入小肠。CA1、CA2、CA3 和 CA4 的小肠消化率均为 100%, 但不同原料的 CB1 及 CB2 小肠消化率存在差异, 在 50%~97%