

外籍学者讲学材料之十五

动物营养学

西德霍恩海姆大学 K.H.门克教授

(1981.9.15—9.30)

农业部教育局
北京农业大学

1982.7.

目 录

第一章	用化学分析法评定饲料营养价值.....	1
第二章	用消化试验评定饲料营养价值.....	4
	常规方法（差异法）.....	5
	指示剂法.....	6
第三章	平衡试验——利用率试验.....	7
	氮平衡试验.....	7
	碳平衡试验.....	9
第四章	饲料中 useful 能指标的选择.....	11
第五章	蛋白质营养价值的评定.....	24
第六章	动物对代谢能需要量的计算.....	29
第七章	家畜蛋白质需要量的计算.....	36
第八章	生长动物的营养需要.....	41
第九章	猪的营养需要.....	49

第一章 饲料营养价值的评定

动物营养学包括营养生理和饲料营养价值的评定两部分，著名法国化学家拉瓦西曾说：“生命是化学过程”。此后，化学成为研究营养学的重要工具。德国科学家 A. Thaer (1752—1828) 首先提出了评定饲料营养价值的单位——干草当量 (Heuwert)，目的是能对动物营养加以计算并能进行经济地生产。大约在50年后，动物营养学更强调饲料的化学与饲料营养成分的分析。之后，开始了一个评定饲料营养价值的发展时期。Rubner (1854—1932)、Zuntz (1847—1920) 和 O. Kellner 等人，用物质交换和呼吸试验方法，进行了饲料营养价值的评定工作。

本世纪开始，曾强调营养生理学。近年来再度强调了饲料营养价值评定的重要性。实际上，饲料营养价值的评定是达到经济饲养的桥梁。如果我们不能根据饲料的营养价值预测动物的生产性能，则有效的、经济的畜牧生产是不可能的。

饲料营养价值的评定可分为三个部分。第一部分是饲料营养成分的分析；第二部分是饲料的消化（这与饲料的组成有关）；第三部分是已消化养分的利用。这三个步骤都是必要的。消化试验和利用率的研究可告诉我们，在这些过程中，损失的和到达产品中的养分的情况，从而使我们能够制定有效的日粮和饲喂制度，并能预测生产性能。

首先讨论饲料分析。1870年代提出了饲料近似成分分析方案。这个方案在全世界普遍采用。

饲料中变异最大的成分是水分的含量。因此，首先必须测定饲料的干物质含量。饲料中其它养分含量最好按干燥基础表示。下一步骤是测定饲料的粗灰分。其方法是将饲料样本在550°C烧灼，有机物被烧掉，残余物便是灰，其中有些矿物质是有营养意义的。干物质与粗灰分的差数是有机物。有机物可提供能量，并包括三种主要营养素——粗蛋白、粗脂肪、碳水化合物。碳水化合物可再分为消化率不同的两部分，即淀粉与粗纤维。前者是含有 α 键的糖苷，较易消化；后者是含有 β 键的糖苷，包括戊聚糖、纤维素等细胞壁成分，须经细菌分解。

饲料近似成分分析，只是饲料营养价值的一个指标，它不告诉我们饲料中可利用营养素的含量。因此，“粗成分”分析的信息对评定饲料营养价值价和配合日粮是不够的。

粗水分的测定实际上包括所有可挥发的物质。例如，测定青贮饲料的水分时，氨、短链脂肪酸或醇可能挥发。这些物质对动物是有营养价值的，若计算成水分，则是养分的损失。因此，在青贮饲料，除测定干物质外，还须另外测定乙酸、丁酸以及含N的挥发碱。

粗灰分包括必需矿物质元素，也包括非必需矿物质元素。常量必需矿物质元素有：Ca、P、Mg、K、Cl、Na、S；微量必需矿物质元素有 Fe、Cu、Co、I、Mn、Zn、Se、Mo、Br、F、Ba，以及不同量的各种非必需矿物质元素，如：Si、Cr、Ni、Al、Pb、V、B、Sn、Sb、等。

在有机物中，粗蛋白的测定是测总氮量，再乘以6.25，因为一般认为蛋白质的含氮量为

16%。这在一般情况是正确的，但有一些例外。例如：油类籽实蛋白质的含氮量为18.5%，谷物籽实的粗蛋白含氮量为17.2%，植物叶为15.0%，肉粉或鱼粉为16%，而乳制品为15.7%。除蛋白质外，尚有一些其它化合物也含氮，称之为非蛋白氮，如氮化物，酰胺类，和含氮糖苷，磷脂类和酮类，以及某些维生素中，故有人认为研究真蛋白质是必要的。真蛋白的测定可用沉淀法，但手续繁复，在实践中未广泛采用。事实上，在反刍动物的营养中，没有必要区分粗蛋白与真蛋白，因为反刍动物瘤胃中微生物能利用非蛋白氮合成蛋白质。对单胃动物如猪和禽，最好测定饲料的氨基酸含量。

如果给作物施用硝酸盐肥料，则在植物中可能积累很多硝酸盐，用凯氏法测定其粗蛋白时，很多硝酸盐被还原而损失了。

粗脂肪不仅含有脂肪酸三甘油酯，还包括其它溶于乙醚中的物质，如有机酸、磷脂类、甾醇类、蜡、树脂类、生物碱和色素。这些物质较之脂肪酸三甘油酯的营养价值低很多。假如将它们认为与三甘油酯有同等营养价值的话，那是很错误的。

在近似成分的分析中，粗纤维与无氮浸出物的划分是不科学的。在无氮浸出物中不仅含有 α 键糖苷，还含有不易消化的葡聚糖与戊聚糖；半纤维素、果胶以及完全不能消化的木质素也都包括在无氮浸出物中，某些热带植物还含有大量单宁。在计算日粮时，若将这些成分与 α 糖苷同等看待，则是错误的。

关于饲料的碳水化合物部分的分析，近年来有许多改进的努力。比较成功的是范氏（Van Soest）分析法。范氏首先于1964年提出用洗涤剂提取和分离细胞壁成分和细胞内容物。中性洗涤剂（12烷硫酸钠）用于提取全部细胞壁成分总量，称之为中性洗涤剂不溶纤维（NDF），而酸性洗涤剂（十六烷三甲基溴化铵CTAB）可分离出木质纤维，称之为酸性洗涤剂不溶纤维ADF。

由于测定NDF时过滤困难，特别是一些热带植物含有较多的淀粉和胶状物质时不易过滤。此处，用NDF预测饲料的营养价值不如ADF，故近年来许多实验室采用了ADF。

然而，如下面将要谈的，用ADF预测饲料的消化率与用粗纤维预测，同样困难，因为ADF与饲料消化率之间的关系，变差很大。前面曾说过，评定饲料营养价值有三个步骤：即化学分析，消化试验和利用率试验。如果用化学分析法能预测饲料的消化率，则不需做消化试验，只须将饲料样品送到化学分析室便可以计算出饲料的消化率。这是我们的愿望，但尚未成功。消化作用不仅是化学作用，而且还是植物组织学和解剖学的问题。在有些情况，饲料的容易消化部分（如淀粉）被包在不易消化的物质（如细胞壁）之中；在另一些情况，容易消化的物质与不易消化的物质不在一起，因此用化学成分预测整个植物消化率会产生错误。有些饲料含有大量ADF，另一些饲料含有少量ADF，而两者的消化率相同，故ADF不是饲料消化率的好测度。此法之优点是将饲料中容易消化的与不易消化的成分分开。ADF中包括有完全不能消化的木质素，而在粗纤维中，一部分木质素溶到无氮浸出物中，被误认为是淀粉。

ADF继续用72%硫酸处理，可溶解纤维素，残渣含木质素和灰分，称之为酸性洗涤剂木质素（ADL）。用ADL预测饲料的消化率，结果较好，但仍有很大变异。用ADF预测某些牧草不同成熟阶段的消化率，可得出很好的直线回归方程。

我愿推荐ADF，但用它预测饲料消化率还是不能做结论的。在文献中，可以看到很多

用 ADF 或 ADL 预测饲料消化率的回归公式，这些公式对有些类型饲料适用，但不是对所有饲料都适用的。

在此我愿解释一下在欧洲通用的符号，英国的 Blaxter，荷兰的 Van Es，丹麦的 Thorbek 和我们 Hohenheim 大学的科学家，建议用下面的缩写：FS = 饲料，DM 和 T = 干物质，OS 或 OM = 有机物，XP = 粗蛋白，XL = 粗脂肪，XF = 粗纤维，NFE 或 XX = 无氮浸出物，XS = 淀粉，XZ = 糖。

用淀粉和糖预测饲料消化率。结果较好。在很多情况下，将 XS 和 XZ 合并在一起，两者消化率都很高，在各种动物均可达 98%。但两者间有重要区别。糖是由淀粉水解产生的，含有结合水。从淀粉和糖的化学结构看，糖比淀粉多一个水分子。这种分子结合的水不含能量，故糖比淀粉的能量低 7%。淀粉的测定可用旋光法或酶解法。旋光法先用 2.5% HCl 处理 15 分钟，再用“Carrez 溶液” I 和 II 使之澄清，然后测其旋光度。溶液中可能含有杂质或其它成分，影响旋光度，在应用上有一定限度，需进行校正。酶解法有些优点，但操作烦琐。可先用胰酶水解，再用盐酸水解淀粉。糖的测定是先用稀乙醇溶液提取，继用“Carrez 溶液” I 和 II 沉淀澄清，以除去色素和干扰物质，然后用滴定法测其醛基。

当然，评定饲料营养价值，还有其它化学成分的测定，如氨基酸的测定。现已十分清楚，氨基酸对猪、禽营养很重要。最重要的必需氨基酸主要是赖氨酸、蛋氨酸、胱氨酸、色氨酸。主要的分析方法是离子树脂交换法。按照 Moore 和 Stein (1954) 的方法，饲料样本经酸水解后，能很好地测定赖氨酸和其它氨基酸。蛋氨酸和胱氨酸的测定需要特殊的预处理法。色氨酸在酸处理时几乎完全被破坏，因此只能用碱水解或酶水解法处理。

饲料成分表中各种饲料的氨基酸含量数据，变异很大，不甚可靠。在各种必需氨基酸中，以赖氨酸最为重要。

另一个问题是如何应用饲料氨基酸分析数据预测蛋白质的营养价值和动物的生产性能。在各种评定蛋白质价值的方法中，以化学积分法 Chemical Score 较好。化学积分的定义是欲测蛋白质的第一限制氨基酸含量 (%) 与鸡蛋蛋白质中相同氨基酸含量 (%) 之比。必需氨基酸指数 (EAAI) 较差。最近几年发表的评定蛋白质营养价值的新方法并不比化学积分法好。有些实验结果表明，氨基酸进食量与动物体内蛋白质合成量之间的关系，不是直线回归。如用曲线回归预测蛋白质的营养价值或动物生产性能，则更为适切。

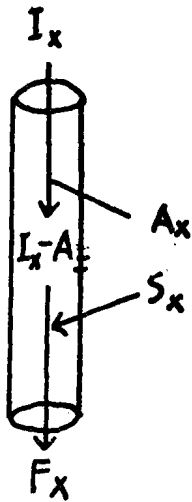
前已论及，粗脂肪不仅含有脂肪酸的三甘油酯，还有其它溶于乙醚的物质。用气相色谱分析法可测定出脂肪中个别脂肪酸的种类和数量，从而可以评定不同的脂肪在动物营养上的差异。

第二章 用消化试验评定饲料营养价值

饲料提供某一特殊营养素的潜在价值可用化学分析法测定。但在消化、吸收和代谢过程中，营养素有不可避免的损失，故饲料的真正价值可能与化学分析测定的结果有很大的差距。一个饲料营养价值的评定，最好是按照该饲料实际利用的方式来进行。评定的第一个步骤是饲料营养成分的近似化学分析；评定的第二个步骤是测定消化作用的损失——即饲料消化率的测定。饲料的消化率可定义为，未从粪中排出，因而可假定为被吸收的那部分饲料的百分数。然而，并非所有的粪中成分都是未被消化的饲料残余物。一部分粪中物质来自消化酶和分泌到消化道中的其他物质，以及脱落肠道上皮细胞。这些非直接来自饲料的物质经粪排出，导致对饲料的消化率估计偏低。反之，未在粪中出现的饲料中养分，也未必全被吸收。例如，粗纤维在瘤胃中被发酵产生 CH_4 及 CO_2 。因此，根据这些代谢的部分在计算消化

率时是否包括在内，而有所谓“真消化率”或“表观消化率”之分。通常，在饲养试验中，只测定表观消化率。

消化率的计算公式如下：



$$\text{消化系数 } d = \frac{I_x - F_x}{I_x}$$

$$\% \text{消化率 } VQ = d \cdot 100$$

$$\text{吸收率 } a = \frac{I_x - F_x + S_x}{I_x}$$

式中 I_x = 某养分 x 的进食量 (克) ，

F_x = 粪中该养分 x 的含量 (克) ，

A_x = 该养分 x 的吸收 (或真消化) 量 (克) ，

S_x = 分泌到肠道中并随粪排出的养分量 (克) ，

S_x 的测定困难，且不可靠。例如，日粮组成可影响 S_x ；日粮粗

表1. 绵羊对干草的消化试验 (每天的平均数)

每日平均	总量 g	干物质 g T	粗蛋白 g XP	粗脂肪 g XL	粗纤维 g XF	无氮物 g NfE	能量 kJ GE
食入	900	782	103	22	212	372	14132
粪		265	34	9	70	112	4946
消化		517	69	13	142	260	9186
消化率(%)		66.1	67.0	59.1	67.0	69.9	65.0

纤维含量高，则粪中代谢脂肪和代谢氮含量也高。然而，许多吸收的矿物质是经粪排泄的。为区别粪中未吸收的和已吸收的钙，可用示踪元素。

现举例说明消化试验的方法和消化率的计算：粗（基础）饲料的消化试验，试验期一般为6天，试验前要有4—5天的预饲期，至少须有4个试验动物，最好是公的，以便利粪尿分离。上表所示为用绵羊测定干草消化率的试验结果。

不能单独饲喂家畜的饲料可用差异法测定。表2所示为用差异法测定玉米消化试验的结果：

表2. 用差异法测定玉米消化率的结果
(每天的平均数)

每日平均	总量 g	干物质 g T	粗蛋白 g XP	粗脂肪 g XL	粗纤维 g XF	无氮物 g NfE	能 kJGE
干草	500	435	57	12	118	207	7,851
玉米	400	350	38	16	10	280	6,667
玉米+干草	900	785	95	28	128	487	14,518
粪量		204.2	35.1	10.6	41.0	93.4	3,886
消化量		580.8	59.9	17.4	87.0	394.6	10,646
来自干草		287.5	38.2	7.1	79.1	144.7	5,103
来自玉米		293.3	21.7	10.3	7.9	249.9	5,543
消化率(%)		83.8	57.1	64.4	79.0	89.3	83.1

用差异法测定饲料消化率，须做两次试验。第一次试验测定基础饲料消化率，第二次测定基础饲料加待测饲料的消化率。在许多情况下，基础饲料与待测饲料之间有相互作用 (Associative effect)，例如，基础饲料是干草，待测饲料是玉米。在第二期试验中，干草加玉米后，可能减少瘤胃微生物对干草粗纤维的分解，从而对玉米粗纤维消化率估计偏低。

在反刍动物的消化试验中观察到，日粮中粗蛋白含量与粗蛋白消化率之间存在着正相关。瘤胃微生物能利用氮合成蛋白质，这个作用依赖于瘤胃中有充足的碳水化物（主要是淀粉）能量；在饲喂高蛋白日粮时，日粮中碳水化物相对较少。因而蛋白质降解所产生的氮不能被微生物完全利用。游离氨在瘤胃及小肠中被吸收，不出现在粪中，致使粗蛋白消化率偏高。反之，日粮蛋白质低时，则碳水化物相对较高。蛋白质降解产生的氨，大部分被微生物利用，合成微生物蛋白质。只有少量或没有游离氨直接被动物吸收，甚至于有一部分氨通过瘤胃壁或唾液又返回瘤胃，供微生物合成蛋白质。其结果粪中蛋白质含量升高，从而降低了粗蛋白的消化率。因此，在比较两个日粮粗蛋白的消化率时，应在相同蛋白质含量的基础上进行。在测定饲料蛋白质消化率时，也应该在标准化的条件下进行，即在一定的蛋白能量比的条件下进行。

上述现象是在用瘻管动物做试验时发现的，蛋白质消化率的差异并非由于个别饲料不同

而产生的，而是由于能量蛋白比的差异造成的。如果日粮中能量蛋白比保持恒定，则不同饲料蛋白质消化率的差很小。嗣后，大量的试验表明，当日粮干物质中粗蛋白含量为13%，能量浓度为11MJ ME/Kg DM时，进入与离开瘤胃的氮，基本上达到平衡，粗蛋白的表观消化率经常在70%左右，而粗蛋白的真消化率则十分恒定（90%）。这个结果是由许多不同饲料（包括细菌蛋白质）测定的。只有少数情况例外，如某些干草蛋白质的消化率为50—60%，热带含单宁多的饲料蛋白质消化率可低达40%。

指示剂法测定饲料消化率

用常规方法测定饲料消化率，必须准确地收集全部粪便，并且准确测定采食的饲料量。全收粪法的工作量很大，且往往损失部分粪便。可在饲料中加入一定量外源标记物质。标记物质在消化道中不被吸收。因此，已知食入标记物质数量，应在粪中回收相同数量的标记物质。这样，我们可以只采取少量粪样，根据其中标记物质含量，计算出全部排粪量。

我们还可以进一步发展用标记方法同时测定放牧家畜的采食量和消化率。此法需要两个指示剂，一个是植物本身含有的“内源指示剂”，另一个是外加的外源指示剂。内源指示剂可用4-N 盐酸不溶灰分或木质素。由内源指示剂可以计算饲料的消化率。常用的外源指示剂有聚乙烯粉，三氧化二铬等。后者对反刍动物不很合用，因为三氧化二铬比重较大，在瘤胃中，不能与食糜均匀混合。对放牧家畜，外源指示剂可与少量精料混合后投给。如上所述，根据外源指示剂可计算出排粪量。已知饲料的消化率和排粪量，则可计算出家畜的采食量。计算公式如下：

$$\text{消化率}\% = 100 - 100 \frac{\text{饲料中内源指示剂}\%}{\text{粪中内源指示剂}\%} \times \frac{\text{粪中某养分}\%}{\text{饲料中某养分}\%}$$

$$\text{食入饲料干物质 (g)} \times (1 - \text{消化率}\%) = \text{排粪量 (g)}$$

若某些指示剂在多次试验中不能在粪中100%回收，在计算消化率时，须用回收率予以校正：

$$\text{消化率}\% = 100 - 100 \frac{\text{指示剂回收率} \times \text{饲料中内源指示剂}\% \times \text{粪中某养分}\%}{\text{粪中内源指示剂}\% \times \text{饲料中某养分}\%}$$

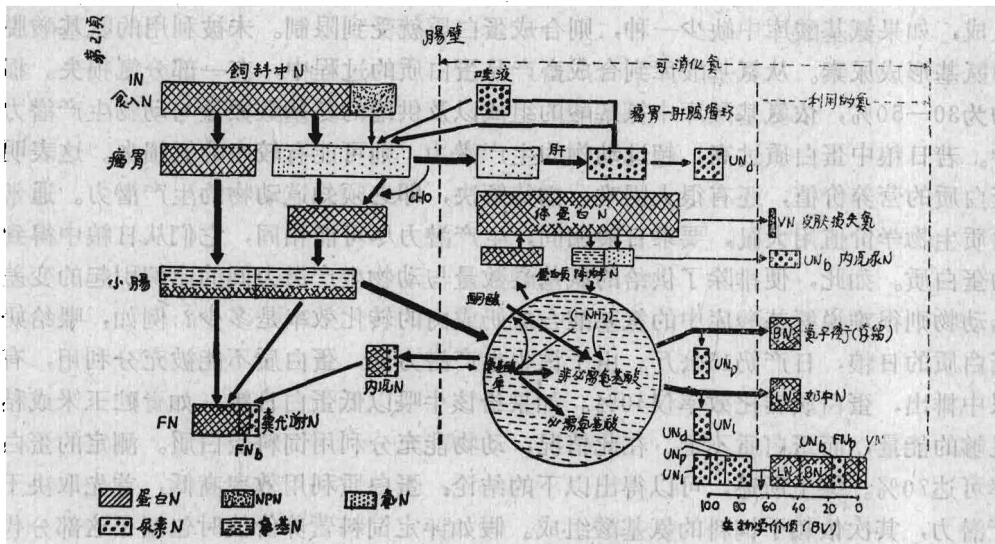
第三章 平衡试验—利用率试验

从消化试验知道饲料中可消化养分的数量，但仍不知道有多少可消化养分能被利用。为此，须进行平衡试验，主要是氮、碳和能量平衡试验。氮存在于蛋白质中，碳主要存在于碳水化合物、脂肪和蛋白质中。能量存在于所有这些养分中。蛋白质一般含氮16%，故蛋白质的平衡可由氮平衡代表。单独进行碳平衡试验没有意义，因为碳既存在于碳水化合物中，也存在于脂肪和蛋白质中。体内存留蛋白质的含碳量可通过氮平衡计算，动物体内碳水化合物含量很少而且稳定，可忽略不计。如果排除碳水化合物和蛋白质中的碳以外，剩余的就是沉积在脂肪中的碳。

(一) 氮平衡试验

图1为蛋白质代谢的图解。虚线左侧表示蛋白质的消化过程，右侧为蛋白质的代谢过程，虚线代表肠壁。

饲料中氮包括蛋白质氮和非蛋白氮，在反刍动物，饲料进入瘤胃以后，非蛋白氮比较容易分解为氨。有相当大量的饲料蛋白质也被细菌降解为氨。在大多数情况下，有70%蛋白质



CHO 碳水化合物; UN 尿N; d 来自瘤胃中脱氨基作用;
b 来自基础代谢; P 来自蛋白质合成; L 来自奶的合成;
VN 皮肤毛发损失N; FNb = 代谢粪N

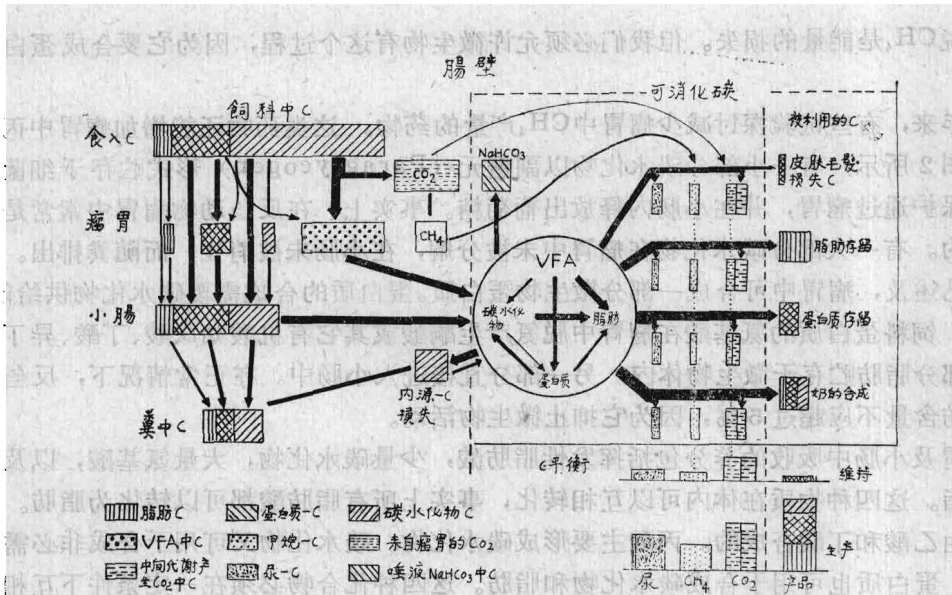
图(1) 反刍动物氮的交换

降解为氨。有时可高达90%。通常，瘤胃中氨态氮数量大于蛋白质数量。氨可直接通过瘤胃壁吸收而达肝脏。氨对动物有毒，须在肝中脱毒，变成尿素。后者能经瘤胃壁和唾液又回到

瘤胃中。这叫做“瘤胃—肝脏氮素循环”。当然，也有一部分尿素通过尿排出体外。有一部分氨氮在瘤胃中被细菌合成微生物蛋白质。合成的数量取决于可利用碳水化物的多少。若瘤胃中缺少碳水化物，如采食高蛋白日粮，则微生物合成蛋白质很少。正常的日粮中约含有50%左右可发酵碳水化物。在此情况，可以预期合成大量微生物蛋白质。与植物来源蛋白质相比较，微生物蛋白质有较高的生物学价值。从饲料中得到的蛋白质加上微生物合成的蛋白质，可以满足一头日产20公斤奶的母牛蛋白质需要，但对高产奶牛则仍不够。在此情况，可以加喂少量鱼粉。鱼粉蛋白质在瘤胃中不容易降解，并且具有较高的生物学价值。也可以用甲醛或其它方法处理油饼类，使其在瘤胃中不被降解，从而增加进入小肠的未降解蛋白质。如果母牛每天产奶量在20公斤以下，上述方法没有必要。

饲料中未被降解的蛋白质和微生物蛋白质进入小肠后，经酶水解成氨基酸。通常，蛋白质在小肠中的消化率可达75—80%。有一部分蛋白质在小肠中没有水解为氨基酸，主要是微生物蛋白质，因为微生物细胞有坚强的细胞膜。微生物蛋白的氨基酸组成虽然很好，但消化率不高。未消化的蛋白质与内源粪代谢氮一起随粪排出。

肉和奶的蛋白质合成取决于吸收的氨基酸的数量和比例。在血液和肝脏中有一个氨基酸库，包括必需和非必需氨基酸。畜体内不能合成必需氨基酸，必须由饲料供给。反刍动物可通过瘤胃微生物合成一部分必需氨基酸，不完全依赖于饲料的供给；非必需氨基酸可在体内通过酮酸和氨基转移作用来合成。畜体各种组织可从氨基酸库得到各种氨基酸，以合成蛋白质，合成的数量取决于供给的氨基酸数量和比例。各种动物的奶及肉的蛋白质有其特定的氨基酸组成，如果氨基酸库中缺少一种，则合成蛋白质就受到限制。未被利用的氨基酸脱氨，脱掉的氨基形成尿素。从氨基酸库到合成畜产品蛋白质的过程中，有一部分氮损失。损失的幅度约为30—50%，依氨基酸库中氨基酸的组成以及供给的氨基酸数量与动物生产潜力的比例而异。若日粮中蛋白质过高，超过动物的生产潜力，则可能有较多的氮损失。这表明评定饲料蛋白质的营养价值，还有很大困难，需待解决，即必须知道动物的生产潜力。通常，评定蛋白质生物学价值用大鼠，要求日龄相同，生产潜力尽可能相同，它们从日粮中得到相同数量的蛋白质。如此，便排除了供给的氨基酸数量与动物生产潜力间的比例引起的变差。但对反刍动物则很难说氨基酸库中的氨基酸合成奶或肉的转化效率是多少？例如，喂给奶牛含18%蛋白质的日粮，日产奶15公斤。由于该牛生产潜力低，蛋白质不能被充分利用，有大量氮从尿中排出，蛋白质转化效率仅40%。如果给该牛喂以低蛋白日粮，如青贮玉米或秸秆，则有足够的能量，而蛋白质不足。在此情况，动物能充分利用饲料蛋白质。测定的蛋白质利用效率可达70%。综上所述，可以得出以下的结论：蛋白质利用效率高低，首先取决于动物的生产潜力，其次依赖于饲料的氨基酸组成。假如评定饲料营养价值时包括了这部分代谢损失，则生物学价值与动物的生理状况和生产潜力有很大的关系。生物学价值在营养科学及文献中占有重要地位。但是，当我们应用生物学价值评定饲料营养价值和计算需要量时，将遇到很大困难。主要的原因是生物学价值不完全取决于饲料，而在很大程度上取决于动物的生理阶段和生产潜力。然而，在评定饲料营养价值时，最好侧重在饲料本身，而暂时忽略依赖于动物的因素，诸如年龄、生产潜力、生理状况等。这些因素最好留待计算动物对营养素需要量时再予考虑。因此，在进行试验研究时，必须将评定饲料营养价值和测定动物对养分的需要量，加以区别，并找出一个适当的界线，使两方面能很好地衔接。



图(2) 动物体内碳的交换图解

(二) 碳平衡试验

如图2所示，虚线代表肠壁。虚线的左侧代表碳的摄入和消化过程，右侧为体内碳的代谢过程。碳不仅存在于碳水化合物，脂肪和蛋白质中，还存在于CO₂和CH₄中。因此，测定碳的收支，须将动物放在密闭小室中（呼吸试验室）。进入和流出小室的气体（O₂、CO₂、CH₄）都要进行分析。从吸呼商（= CO₂/O₂）可计算动物身体的产热量。动物脂肪平均含碳72%，蛋白质含碳52%，从碳的平衡和氮的平衡可计算动物体内蛋白质和脂肪的沉积量。此处，我不准备讲述氮、碳平衡的细节。

另外，还有其它方法测定动物身体产热量和体内沉积物质量。（1）直接测热法：将动物放在测热室中，直接测量身体产热量，但这种装置和设备，极为昂贵。（2）比较屠宰法：由于不能将动物屠宰两次，试验开始时须屠宰平行动物并做分析，用以代表未屠宰试验动物身体组成。这在解释结果时有一定困难。（3）同位素稀释法，可测定身体水分。将能溶解于身体水分中的化合物给动物注射，在全身分布平衡时，定量测定所用标记物的稀释程度，从而可以计算身体的含水量。最常用的化合物有安替比林及其类似物，以及同位素氘和氚。测定了含水量之后，身体脂肪、蛋白质和灰分的含量即可由公式算出。所有这些方法都必须用直接方法来标定，因此，古老的呼吸试验和氮、碳平衡试验，仍然是值得考虑的。

我们须测定从饲料食入的氮和碳，并测定粪，尿和气体中的氮和碳，从而可得出体内存留的数量。如果试验开始前动物是在维持饲养水平以上，则其体内碳水化合物含量是稳定的。这样，可以认为全部沉积的碳是在脂肪与蛋白质中。这是用短期平均试验测定体内脂肪和蛋白质沉积的方法。但要从呼吸试验做出结论，还要考虑消化代谢的复杂过程。让我们首先考虑饲料的消化过程，饲料中含有碳水化合物、蛋白质和脂肪。一部分碳水化合物在瘤胃中被细菌发酵产生挥发性脂肪酸，主要是乙酸、丙酸、和丁酸。在任何情况下，都会产生CO₂。CO₂通过暖气排出。一部分CO₂转化为CH₄。这是由于瘤胃有过量的氢，微生物能把碳和氢转化为甲烷气，从而获得能量。这对微生物来说是效率很低的过程，它只能从中得到10%的能量。对

动物来说 CH_4 是能量的损失。但我们必须允许微生物有这个过程，因为它要合成蛋白质和维生素。

近年来，有些试验探讨减少瘤胃中 CH_4 产量的药物。这类药物还能增加瘤胃中丙酸的产量。如图2所示，有一小部分碳水化合物以副糖元（Paraglycogen）形式贮存于细菌体内，从而被保护通过瘤胃，并在小肠内释放出葡萄糖。事实上，在反刍动物瘤胃中常常是缺少碳水化物的。有一大部分碳水化合物在瘤胃中未被分解，在小肠未被消化，而随粪排出。

前已述及，瘤胃中可合成一部分微生物蛋白质。蛋白质的合成需要碳水化合物供给能量。另一方面，饲料蛋白质的氨基酸在瘤胃中脱氨产生酮酸或其它有机酸如戊酸、丁酸、异丁酸等。

一部分脂肪贮存于微生物体内，另一部分直接进入小肠中。在正常情况下，反刍动物日粮中脂肪含量不应超过5%，因为它抑止微生物活动。

瘤胃及小肠中吸收的养分包括挥发性脂肪酸，少量碳水化合物，大量氨基酸，以及脂肪酸和甘油酯。这四种物质在体内可以互相转化，事实上所有脂肪酸都可以转化为脂肪。乳脂肪主要是由乙酸和丁酸合成的。丙酸主要形成碳水化合物。碳水化合物又可用于合成非必需氨基酸和脂肪。蛋白质也可用于合成碳水化合物和脂肪。这四种化合物必须在一定条件下互相转化，这个条件是有充足的碳水化合物或丙酸存在。脂肪不能转化为挥发性脂肪酸，蛋白质或碳水化合物。在正常情况下，反刍动物日粮中含有至少50%碳水化合物，10—18%蛋白质，1—5%脂肪。

第四章 饲料中有用能指标的选择

如果条件合适，即日粮中有足够的碳水化合物时，上述四种物质在体内可以互相转化。这个设想首先在1860年由L. B. Rubner 在其著作“等能量置换”一书中提出，其后又被许多研究工作者证实。如是则可将碳水化合物，脂肪和蛋白质综合起来，统一在一个能量指标下来讨论，使问题简单化。“能量”这一指标包括各种产生能量的养分，但不包括维生素等必需养分。由图8可见，进食的能量可以从若干途径损失，如粪、尿、甲烷、体热。图8中间虚线以左，即粪、尿、甲烷的损失，主要决定于饲料方面，受动物的影响很小。而体热损失则依赖于动物生产方式。合成体脂肪比合成蛋白质时热损失小，合成奶的热损失介于两者之间。因此，吸收的能量转化为产品能的效率，取决于产品中脂肪和蛋白质的含量。与评定蛋白质营养价值相仿，饲料的能量价值不仅受饲料的化学组成的影响，还受动物生产潜力和产品种类组成的影响。因此，测定饲料的净能是比较困难的。此外，动物在维持时，吸收的能量全部以热的形式散失。依动物所处的生产阶段（生理状态）不同，维持能量代谢的变差可达正常值的 $\pm 20-30\%$ 。而净能的测定只能在维持水平或维持水平以上进行。因此，净能值的计算受维持能量的影响很大。

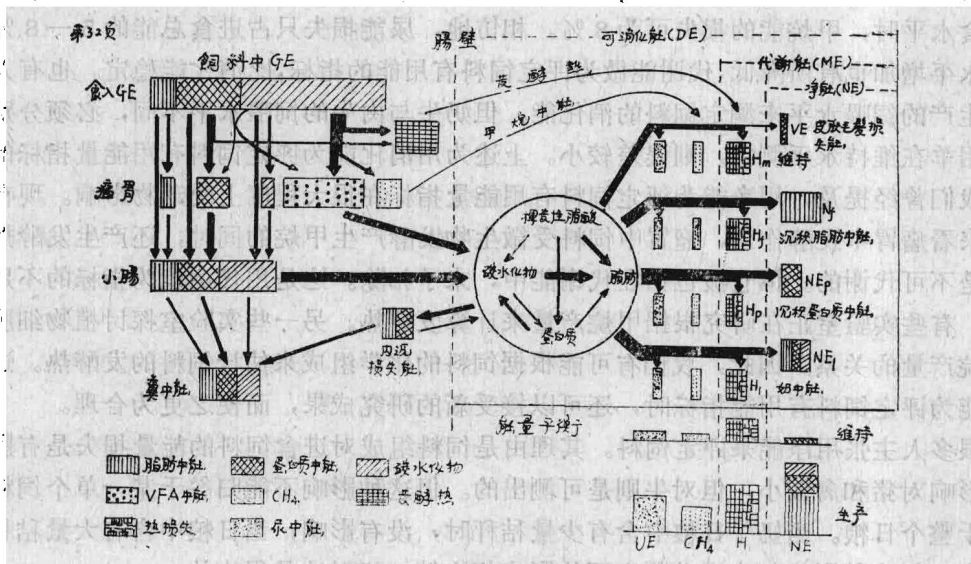
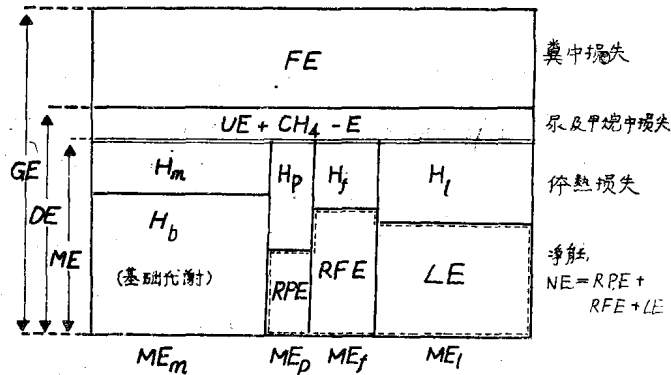


图3. 动物能量交换图解

我们进一步用图4来说明。由图4可见，动物食入的总能量(GE)可通过若干途径损失。扣除了粪中损失后，剩余的是消化能(DE)，扣除了粪、尿和甲烷中损失，则得到代谢能(ME)，如再扣除体热损失，则得到饲料的净能(NE)。问题是在评定饲料时，扣除能量损失在哪一阶段较为恰当？饲料

中有用能的评定就是对各种损失的估计。毫无疑问，必须扣除粪中损失。这部分损失是最大的损失，主要受饲料化学组成的影响，且变异很大，在10—60%之间。换言之，饲料的消化率可变化于90%至40%之间。有人主张用消化能作为饲料有用能的指标。消化能的优点是测定简便。但它受进食水平的影响。当饲料进食量由维持水平增加一倍时，粪中能量损失增加



4. 饲料能量评定体系：影响能量损失的因素

2—5%。这与饲料通过消化道的速度有关。饲料通过消化道快则消化率降低。如果将营养价值低的粗饲料磨成粉，则其消化率更为降低。在生长和产奶的家畜采食量大时，饲料的消化率降低。如果再扣除尿及甲烷损失，则可看出饲料代谢能的变异较小。其理由是，随进食水平的提高，甲烷的能量损失有所减少。例如，在维持水平可有10%甲烷能的损失；两倍维持进食水平时，甲烷能的损失可为8%。相仿地，尿能损失只占进食总能量的5—8%，且随进食水平增加也有所降低，代谢能做为评定饲料有用能的指标，比消化能稳定。也有人主张在实际生产的饲喂水平来测定饲料的消化能。但奶牛与肉牛的饲喂水平不同，必须分别测定。最好用羊在维持水平测定，则误差较小。上述为用消化能为评定饲料有用能量指标的缺点。

我们曾经提及，用净能为评定饲料有用能量指标在很大程度上受动物影响。现在，我们再回来看瘤胃中发酵作用，瘤胃中饲料受微生物发酵产生甲烷的同时，还产生发酵热。这部分热是不可代谢的。但它被包括在代谢能中，未予扣除。这是用代谢能为指标的不足之处。目前，有些实验室正在研究根据甲烷产量来计算发酵热。另一些实验室探讨植物细胞壁成分与甲烷产量的关系。因此，我们有可能根据饲料的化学组成来估计饲料的发酵热。这表明用代谢能为评定饲料有用能指标时，还可以接受新的研究成果，而使之更为合理。

很多人主张用净能来评定饲料。其理由是饲料组成对进食饲料的能量损失是有影响的。这个影响对猪和禽较小，但对牛则是可测出的。但这种影响不能归咎于某一单个饲料，而应归咎于整个日粮。当奶牛日粮中含有少量秸秆时，没有影响；当日粮中含有大量秸秆时，影响较大。但这种影响与来自动物方面的影响相比较，相对地是很小的。

图4显示，在产奶时，代谢能的效率 (K_l) 约为60%；在体内沉积脂肪时，代谢能的效率 (K_f) 约为70—75%；在合成身体蛋白质时，效率 (K_p) 约为40—50%。肥育肉牛可低至30%。可以看出，相同饲料用于不同生产目的，如产奶、产脂肪或产蛋白质，有不同的净能值。根据产奶的净能体系，不能用于生长动物。同理，根据肥育动物的净能体系也不适用于沉积蛋白质较多的生长动物。如果要用净能为生长肥育牛评定饲料，由于增重成分不

同，则对200公斤体重的牛有一个净能值，对400公斤的牛又有一个不同的数值；对夏洛来牛是一个数值，对海福特牛又是另一数值。美国加利福尼亚州的 Lofgreen 和 Garret 为海福特牛制定了饲料净能值表，但只适用于海福特牛。因此，我认为评定饲料有用能最好以代谢能为指标，而把热增耗损失放到动物需要量方面去考虑。不同的生产方式，不同生理状况、或不同的生产阶段，不同的动物品种，有不同的需要量表。但饲料的营养价值最好有统一的表格。上述为选用代谢能为饲料有用能指标的基本思想。

在测定饲料的净能时，我们不得不对动物的维持需要量做一个假设。这个假设的维持需要量可以根据基础代谢来估计。基础代谢是动物在中立温度区，以及在静止和不吸收状态时身体产热量。如果喂给动以维持水平的饲料，则有热增耗。代谢能用于维持的效率 (Km) 为75—78%，也就是热损失约为25—22%。但是使动物处于能量平衡所需的净能究竟是多少仍是一个问题。如果对维持时净能需要量有一个错误的假设，则计算的净能值也将是错误的。

我们也可以喂给动物若干不同水平的代谢能，并测定能量存留。用直线回归法外推到动物体内能量存留为零时 RE = 0 的代谢能进食量，即为维持代谢能需要量。当进食代谢能为零时 (IME = 0)，Y轴上的截距就是基础代谢。在维持水平以上与在维持水平以下，能量利用效率不同，究竟取哪一段回归直线外推比较可靠呢？如果有一个或几个点偏离回归直线，就会得到不同的维持需要量，从而就会有不同的饲料净能值。同样，在计算动物需要量时，也存在这个问题。在生长动物，代谢能进食水平约为维持的1—1.5倍，产奶牛约为维持的2—2.5倍。在探讨需要量时，通常是在相同的进食水平测定。如果在重要的区间有足够的测定结果，则外推出来维持需要量误差较小。这表明，在测定动物需要量时，对维持需要量的估计，要比评定饲料能量价值时容易解决。

热能的基本单位是卡 (cal)，其定义是使1克水的温度从14.5℃上升至15.5℃所需的热量。在动物营养学中，这个单位太小，故采用大卡 (Kcal) 或兆卡 (Mcal)。物理学家认为用焦耳 (Joule) 表达更为精确。1975年7月起，西欧各国均改用焦耳。焦耳与卡的换算关系如下：

$$1000\text{cal} = 1\text{Kcal} = 4186\text{J} = 4.186\text{KJ}$$

图4是饲料中能量评定的方框图。从图中可见，饲料的代谢能用于产奶、沉积体脂肪或沉积身体蛋白质时，有不同的热损失，从而有不同的净能值。老的评定饲料能量的体系是从肥育动物开始的。用不产奶、不沉积蛋白质，而只在体内沉积脂肪的成年阉牛为试验动物。在此种情况，成年动物沉积体脂肪，有一定的热损失，亦即代谢能有一定的转化效率。主张净能体系的人认为，可将饲料的肥育净能应用于产奶和生长动物沉积蛋白质的情况，只消加一个校正系数即可。

这种评定方法不适用于生长动物。在生长动物的增重成分中，随日龄的不同，有不同比例的脂肪和蛋白质。幼龄动物增重成分中主要是蛋白质，代谢能的转化效率低。随日龄增加，增重中脂肪的比例也越大。这在评定饲料时，很难判断，最好把这个问题放在计算动物营养需要时考虑。那时可以知道饲料是喂给什么动物。多大日龄，增重成分中脂肪与蛋白质的比例如何。

另外，在用析因法计算净能需要时，如进行呼吸试验观察产奶或沉积脂肪或合成蛋白质

的热损失时，必须对维持需要有一个估计。最初认为维持需要与体重有关，1901年 Voit 在慕尼黑大学进行了动物基础代谢的研究。他原打算找出一个因数，乘以体重可得到该动物空腹时所需的热能。但不幸，他测得的因数很不相同（表 3）。如在一头体重 441 公斤的马，他测得每公斤体重的基础产热量为 11.3 Kcal，而体重 20 克的小白鼠的基础产热量为每公斤体重 212 Kcal，为马的 20 倍。其它动物如猪、狗与母鸡的数值则在两者之间。因此，不能简单地把一动物的基础代谢乘以体重，便得到该动物的维持能量需要。Voit 设想动物的基础产热量可能与动物体表面积有关。当他用体表面积除基础产热量，得到了相近的数值。后来，他扩大试验范围，测定了大象和原生虫的产热量，发现这些数据也接近。但测量动物体表面积很困难，后来的研究企图找出其它方法使体重与产热量联系起来。最重要的工作是 1960 年代 Kleiber 在美国加利福尼亚的 Davis 学院所做的。Kleiber 提出的代谢体重是体重公斤的 0.75 次方或 3/4 次方 ($W_{kg}^{0.75}$)。另外，一些人建议用 0.73 次方。澳大利亚和英国的工作者采用 0.73 次方，最近改用 0.75 次方。还有一些主要对蛋白质代谢有兴趣的工作者，认为指数用 0.67 较好。究竟选用什么指数好，现在还有争论。

表 3 福特的试验(1901): 基础代谢

	kgW	Kcal/kgW	Kcal/m ² 体表面积
马	441	11.3	948
猪	128	19.1	1078
狗	15	51.5	1039
母鸡	2	71	943
小鼠	0.02	212	1188

目前，在这方面世界上发表的文章中有 90% 是用体重的 0.75 次方。假如有人提出其它因数时，就要检查其试验是否用过两个因数。我们发现幼龄动物的维持需要比成年动物高。如用犊牛与成年小鼠相比较，就会得出错误的结果。

在猪方面，Breirem 从 10—100 公斤的猪得到的指数是 0.56，但他的结果是用不能进行

表 4 克莱柏氏定义(1967): 代谢体重:

$$W^x = k_g W^{0.75} = k_g W^{3/4} \text{较新的测定}$$

	基础代谢 H_b^x , MJ/W ^x	维持需要 ME_m^x , MJ/W ^x , ¹⁾
母 牛	0.34 + 0.73 =	0.46
小 牛	0.37 "	0.50
绵 羊	0.27 "	0.37
猪	0.28 "	0.38
马	0.33 "	0.45
母 鸡	0.39 "	0.54

¹⁾ 按 $k_m = 0.73$ 计算

比较的动物得到的。不能用仔猪与成年母猪进行比较。但成年马与成年鸡，成年猪可以比较，这样便会得到指数0.75。

我们以后的讨论均用兆焦，从表4可见母牛的基础代谢为每公斤代谢体重0.34MJ，如假设代谢能用于维持的效率是0.73，则得到每公斤代谢体重的维持需要为 $0.34/0.73=0.46$ MJ代谢能。犊牛稍高，绵羊稍低，猪的数值与绵羊相近，马与母牛相似，而母鸡的维持需要相当高。因此，我们有可能以代谢体重估计维持需要，即用代谢体重乘以有关因数。这些数据的变差很大，从而根据它们估计的饲料净能值也有很大变差。

老的饲料评定体系

淀粉价

$$SE = (0.94DP + 2.12 \sim 2.41DL + DF + DX) \cdot \frac{\text{实价率}}{100} \dots\dots\dots (1)$$

淀粉价(SE)是1900年代由Oskar Kellner提出的。他用成年阉牛做呼吸试验，测定各种养分在牛体内沉积脂肪的能力。当时他把营养素分为四类，即粗蛋白、粗脂肪、粗纤维和无氮浸出物。凯氏选择小麦蛋白代表粗蛋白，用油类籽实和谷物以及从各种粗饲料中提取的油代表脂肪；用经过酸、碱处理过的秸秆代表粗纤维；用淀粉代表无氮浸出物。把淀粉与无氮浸出物的营养价值等同起来，是凯氏最大的错误。因为在无氮浸出物中有一半是淀粉，另一半包括不易消化的戊聚糖、半纤维素、果胶，甚至完全不能消化的木质素。

凯氏的试验结果显示：可消化粗蛋白沉积脂肪的能力稍低于淀粉。若以可消化淀粉为1，则可消化粗蛋白的淀粉价是0.94；可消化粗脂肪的结果依来源不同而异。谷物中可消化粗脂肪的淀粉价是2.12，油类籽实或其副产品中可消化粗脂肪的淀粉价为2.42，青、粗饲料粗脂肪的淀粉价为1.85。这在计算饲料淀粉价时是一个复杂问题。

在凯氏的试验中，可消化粗纤维与可消化淀粉的产脂力相同。这是因为已经扣除了两者消化的差异，而只是看养分的利用率。无论是粗纤维还是淀粉，在瘤胃中发酵都产生乙酸、丙酸、丁酸。因此，可给予相同的淀粉价。凯氏颇为慎重，做了很多对照试验。用计算结果与实际试验结果相比较。有些结果一致，很多结果有差异。例如，燕麦的计算淀粉价为600，而试验结果为540。凯氏提出计算淀粉价须乘以所谓“实价率”才得到实际淀粉价。燕麦的实价率为90%。凯氏继续做了一些实验，并发表了一些饲料的实价率：如小麦为95%，大麦为93%，块根为80%，含糖的饲料为76%。最后一个结果是错误的。最近荷兰所做试验证明，甜菜渣或糖密与甜菜渣混合物的实价率为90%。凯氏曾提出，必须谨慎地应用实价率，但有些人非但不谨慎，而且提出一些没有根据的实价率，有些完全是错误的。这是德国和欧洲放弃使用淀粉价的理由之一。

在计算淀粉价时，还有一个严重的问题。即在粗饲料须对粗纤维进行校正。粗纤维校正 是根据凯氏10个试验得到的，用干草和秸秆的计算值与实验结果比较而得出的。当饲料中粗纤维含量越高，计算值与实验结果差距越大。凯氏建议由计算值中扣除一校正数，等于系数0.58乘以粗纤维含量（以克为单位）。例如，干草的计算淀粉价为450—500，经扣除校正数，只剩300。实际工作者从来不相信这样低的数值。在德国，农民经常用少量秸秆喂牛，而科学家只是在1975年大旱灾时才认识此问题，最后终于放弃淀粉价体系。