

面向 21 世纪课程教材

Textbook Series for 21st Century

配 合 饲 料 学

冯定远 主编

动物科学专业用

中国农业出版社

第一章 绪 论

配合饲料是指根据动物营养需要设计饲料配方，将两种以上饲料原料按饲料加工工艺加工生产出来的饲料产品。配合饲料学是一门关于配合饲料生产中有关饲料化学组成和特性、饲料原料营养特点和饲用价值、饲料产品设计和加工工艺、饲料标准与法规以及质量管理的科学。

第一节 配合饲料的基本概念

一、饲料的有关概念

“饲料”的概念是：能提供动物所需的营养成分，保证动物健康，促进动物生长和生产，且在合理使用条件下不发生有害作用的可饲用物质。饲料是畜牧和水产养殖业的物质基础。根据组分来源的不同，饲料分为单一饲料（一般称为饲料原料）和复合饲料（一般称为饲料产品）。通过饲料加工工艺生产的复合饲料即为配合饲料。

“饲料原料”是以某种动物、植物、微生物或矿物质为来源的饲料。

“全价饲料”是除水分外能全部满足动物营养需要的饲料。

“浓缩饲料”是由蛋白质饲料、矿物质饲料和添加剂预混料按一定比例配制的均匀混合物。

“精料补充料”是为补充以青、粗饲料为基础的草食动物的营养而用多种原料按一定比例配制的饲料。

“饲料添加剂预混料”是由一种或多种饲料添加剂与载体或稀释剂按一定比例配制的均匀混合物。

“饲料添加剂”是为满足动物特殊营养和保健需要、改善动物产品品质以及保证饲料产品质量而加入饲料中的少量或微量物质。

“载体”是能够承载和稀释饲料添加剂中的活性成分，改善其分散性，并具有良好的化学稳定性的可饲用物质。

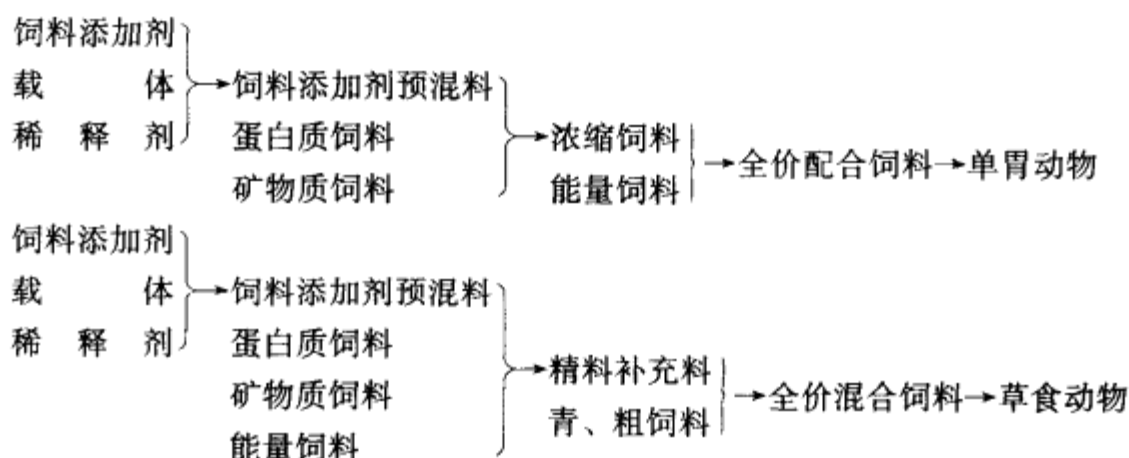
“稀释剂”是与高浓度组分混合以降低其组分浓度的可饲用物质。

二、饲料产品及组分的关系

饲料产品包括配合饲料产品和混合饲料产品。配合饲料分为全价配合饲料、浓缩饲料、精料补充料和饲料添加剂预混料。全价饲料包括全价配合饲料和全价混合饲料，前者主要应用于单胃动物，后者主要应用于草食动物。

“浓缩饲料”与“精料补充料”的最大区别是浓缩饲料一般不含有能量饲料，而精料补充料同时含有能量饲料、蛋白质饲料、矿物质饲料和添加剂预混料。但精料补充料又不是全价配合饲料。有时候也把精料补充料归为配合饲料产品。

各种饲料产品及组分的关系如下：



配合饲料产品中的浓缩饲料、精料补充料和饲料添加剂预混料的物理形态为粉状饲料。而全价配合饲料的物理形态则多种多样，以此分类包括：粉状饲料、颗粒饲料、膨化饲料、压扁饲料、液体饲料等，最常用的全价配合饲料是颗粒饲料和粉状饲料。此外，按饲养动物种类又可分为猪饲料、鸡饲料、牛饲料、鱼饲料等。每一种动物饲料又可依动物生理阶段分成若干型号。

第二节 配合饲料工业发展概况与趋势

配合饲料工业是指以工业化方式生产配合饲料产品的工业行业。配合饲料工业体系包括配合饲料产品加工业、饲料添加剂工业、饲料原料工业、饲料机械制造业和饲料科研与教育五大组成部分。一个完整的配合饲料工业体系必须五大组成部分协调发展，相互促进。

一、中国饲料工业发展历史和现状

(一) 中国饲料工业发展历史

中国的配合饲料工业起步较晚，但发展速度很快。中国饲料工业起步于 20 世纪 80 年代初。1984 年是饲料工业发展重要的一年，这一年粮食产量创历史最高记录，发展饲料工业已提到重要议事日程。1984 年 12 月，国务院颁布了《1984—2000 年全国饲料工业发展纲要（试行草案）》，提出了中国饲料工业发展的指导思想、方针和奋斗目标：1990 年前主要是打好基础，创造条件；后 10 年要健全饲料工业体系，使饲料工业进入一个新的振兴时期。1999 年 5 月国务院颁布施行《饲料和饲料添加剂管理条例》，饲料行业的权威管理法规出台。自 1991 年以来，我国饲料产品产量一直稳居世界第二位。国家产业政策已把饲料工业列为优先发展和重点扶持的产业。饲料工业已成为国民经济中的一个重要支柱产业。

（二）中国饲料工业发展现状

经过多年来的发展，中国的饲料工业建设已初具规模，饲料工业体系已基本形成。早在改革开放之初的 1978 年，全国混合饲料产量仅为 60 万 t，1984 年配合、混合饲料产量达到 1 200 万 t，1988 年突破 3 000 万 t，到 2000 年全国饲料产品已达 6 000 多万 t，2002 年全国饲料总产量达 8 200 万 t，产量仅次于美国。1990 年浓缩饲料的产量为 50.8 万 t，1999 年为 1 097 万 t，年均增长 40.1%。1990 年添加剂预混料的产量为 21 万 t，1999 年为 223 万 t，年均增长 30%。1991—1999 年是中国饲料工业快速发展的 9 年，产品年均增长 6.7%。1999 年饲料工业总产值为 1 855 亿元，在全国统计的 38 个工业行业中排名第 16 位，成为新的重要产业。1999 年全国饲料加工企业有 12 095 家，其中时产 5t 以上的企业有 1 937 家。

饲料产品质量稳步提高，品种结构趋于合理。1990 年的饲料产品主要是猪、鸡料等少数几个品种，目前已发展成为所有养殖动物，包括观赏动物、实验动物、特种经济动物在内的几十个系列 200 多个品种。饲料产品中，猪料占 38%，肉禽料占 26%，蛋禽料占 24%，鱼虾料占 9%，其他动物料占 3%。饲料报酬的各项指标接近或达到世界先进水平。其中，猪料的耗料增重比为 2.6~3.1:1，肉鸡料的耗料增重比为 1.8~2.0:1，蛋鸡料的耗料蛋重比为 2.4~2.6:1，淡水鱼饲料饵料系数为 1.5~1.8。大型饲料加工企业的产品合格率一般都在 95% 以上。

饲料原料工业也同步发展，除了常规饲料原料的开发利用更加充分合理外，油料加工副产品、食品工业副产品、发酵工业副产品以及天然草叶粉等原料也被开发作为非常规饲料原料，并广泛应用于饲料工业中。

饲料添加剂生产有很大突破。20 世纪 80 年代，饲料添加剂主要依靠进口，成为制约饲料工业发展的“瓶颈”。1997 年化工部把发展饲料添加剂列为

化学工业的新的增长点，饲用维生素、抗氧化剂、防霉剂、调味剂、酶制剂、酸化剂等饲料添加剂的国产化程度越来越高。

饲料机械制造业有长足发展。1990年以前，中国大中型饲料生产线主要是成套设备进口。现在，时产60t大型饲料生产成套设备的生产、工程设计和施工可全部由国内企业完成。

与饲料工业服务体系相关的饲料科学教育科研、标准化制订以及饲料法律法规建设也日趋完善。

二、国外饲料工业发展概况

1875年美国伊利诺斯州建成了第一个动物初级饲料加工厂，饲料工业开始起步。20世纪40年代，专业化的畜牧业，尤其是养鸡业的产生，促进了美国的饲料工业发展。50年代末和60年代初，美国出现过建特大饲料厂的趋势。饲料工业的电子计算机化于1975年实现。到了80年代，美国的饲料工业基本上是一门成熟的工业。

1999年美国饲料总产量为1.191亿t，其中肉鸡饲料0.387亿t，猪饲料0.155亿t，奶牛饲料0.154亿t，火鸡饲料0.081亿t。加拿大年产商品饲料0.12亿t。美、加饲料的主要原料为玉米和豆粕。

1999年欧盟15国的饲料产量为1.164亿t，其中法国0.248亿t，德国0.188亿t，西班牙0.156亿t，荷兰0.150亿t。欧盟饲料的主要能量原料为小麦。

三、配合饲料工业发展趋势

中国的饲料工业发展已有20多年的历史，20世纪80年代是中国饲料工业的持续高速增长期；90年代前半期是中速增长期，90年代末已进入低速增长期，行业整体进入微利时代。在今后相当长的时期内，饲料工业处于发展与调整并存，以调整为主的时期，饲料工业的高利润时期已不复存在。整个饲料工业发展的总体趋势包括如下几个方面。

第一，饲料企业向规模化、产业化发展。由于市场竞争日益激烈，那些生产规模小、无核心竞争力、资金缺乏和产品雷同的企业必定会退出市场。今后的饲料企业数目以减少、收购、兼并、托管等多种形式进行的资源重组将日益普遍，产业化生产和经营将是畜牧业发展的基本形式，最终将形成区域性大型饲料加工企业。一条龙、集团化生产经营将越来越多。

第二，饲料企业管理向现代化发展。作为一个现代饲料企业，其人力资源管理、财务管理、信息管理、生产管理、销售管理和品质管理等方面将越来越受到重视，并不断引入全新的管理理念和管理方式，促进饲料企业高效、稳步发展。

第三，饲料产品向多样化发展。饲料产品多样化是为了适应市场需求以及动物营养科研新成果的不断出现而发展的。饲养动物新品种的产生，饲养方式的改变，消费者追求的变化，动物营养研究更加深入精细等等，都促使饲料企业开发更多的饲料新产品。

第四，饲料产品将更加注重安全问题。食品安全已成为当今社会关注的一个热点，而动物食品安全的关键是饲料安全。各种违禁药物和添加剂将严格禁止在饲料产品中使用，特殊用途的饲料添加剂将按饲料添加剂使用规程进行管理和监督。饲料原料的有毒有害物质、微生物污染也将通过科学的品质管理控制在安全范围内。

第五，环保型饲料将受到重视。饲料工业产品造成的氮、磷和重金属等的污染问题已直接影响到生态环境和畜牧业的发展。通过日粮配方技术、酶制剂应用、使用替代促生长剂的新型饲料添加剂等多种营养和饲养措施，可以减少饲料产品的污染问题。

第六，功能性饲料开发促进功能性食品生产。有特殊生理功能和独特风味的畜产品生产必须依靠功能性饲料，富含多不饱和脂肪酸、天然抗氧化剂、低胆固醇、高硒、高锌等功能食品在人体内发挥特殊的生理功效。通过生产含有能富集到畜产品中的功能性成分的饲料可满足这方面的需求。

第七，非常规饲料原料资源开发将缓解饲料工业原料供应紧张和价格上升的矛盾。随着研究开发工作的深入，过去不能使用的各种非常规饲料原料将广泛使用，特别是轻工业副产品、动物性下脚料以及草叶粉类饲料原料等，通过适当的加工、使用某些添加剂处理等多种方法，可以减少原料中的抗营养成分，改善饲料原料的物理特性，提高非常规饲料原料的营养价值和饲用价值。

第三节 配合饲料学的内容和任务

配合饲料学是一门交叉学科，它是汇集了动物营养学、饲料学、机械加工工艺、计算机应用技术、兽医药理以及企业管理等多学科知识而形成的一门新兴学科。配合饲料学包括三部分：饲料原料及其化学基础，饲养标准及配方设计，饲料加工工艺及质量控制。

在本书中，第二章“饲料的组成成分”介绍饲料原料及产品的营养成分

配合饲料学

(常规营养成分和微量营养成分)、饲料中有毒有害物质(主要是饲料本身含有的有毒有害成分)等。

第三章“配合饲料原料”介绍能量饲料、蛋白质饲料、矿物质饲料等饲料原料的营养成分含量、营养特性、饲用价值和质量标准。

第四章“饲养标准”介绍动物的营养需要、饲料营养成分数据库以及饲养标准的应用。

第五章“配合饲料产品设计原理和方法”介绍配合饲料的设计原则、依据和步骤。

第六章“全价配合饲料产品设计”介绍各种动物全价配合饲料设计的方法。

第七章“浓缩饲料及预混合饲料产品设计”介绍浓缩饲料产品设计和饲料添加剂预混料产品设计。

第八章“配合饲料生产工艺”介绍配合饲料生产中粉碎、配料、混合、制粒、膨化和包装等生产工艺。

第九章“配合饲料质量和安全控制”介绍饲料生产过程之中包括原料的质量鉴定,加工过程的质量控制,成品的质量检验及其保障体系。

第十章“配合饲料的应用”介绍各类配合饲料产品使用方法及注意问题。

配合饲料学是动物科学专业、动物营养与饲料加工专业开设的主干专业之一,与其相关的专业基础课有动物生物化学、动物营养学和生物统计学等,与其相配合的是饲料添加剂学。

本书没有详细介绍饲料添加剂方面的内容,本书与《饲料添加剂学》配合使用。

配合饲料学的任务是使学生掌握饲料营养特性、合理利用各类饲料原料,根据不同动物饲养标准要求,设计、配制和生产加工各种高质量的配合饲料产品。

第二章 饲料的组成成分

植物、动物、微生物和矿物质及其产品是饲养动物的主要原料，这些原料提供了动物需要的养分，这些养分又称为营养物质。动物通过摄取这些养分来维持生命，满足生长、繁殖、产肉、产蛋或产奶等生产和劳役的需要，提高对疾病的抵抗能力，保障机体的健康，并调控畜产品品质。所以，了解饲料的组成成分，包括营养的、非营养的和有毒有害物质及相关知识，并以此为依据才能合理地配制饲料，科学利用饲料，达到获得量多质好畜产品的养殖生产目标。

第一节 饲料的营养成分

饲料中养分是由单一化学元素或若干化学元素相互结合而成的。在已知的100多种化学元素中，构成饲料各种养分的至少有26种，其中以碳、氢、氧、氮4种有机元素的含量最多，约占饲料干物质总量的90%；其次是一些常量矿物元素，如钠、钾、钙、镁、硫、磷、氯等；其余为微量元素，如铜、铁、锰、锌、碘、硒、钴以及氟、硅、钼、铬、钒、砷、镍、锡等。

一、饲料碳水化合物

碳水化合物是多羟基醛、酮或其缩聚物以及其他衍生物的总称，是一类由碳、氢、氧三种元素组成的有机化合物，由绿色植物中的叶绿素经过光合作用所形成，是饲料的重要成分，为畜禽能量的主要来源。碳水化合物可分为单糖、寡糖和多糖三大类。按概略养分分析方案，碳水化合物又可分为无氮浸出物和粗纤维两大类。无氮浸出物包括单糖、寡糖、淀粉、糊精、糖原和果聚糖等多糖；粗纤维包括纤维素、半纤维素等多糖以及多缩戊糖、木质素、果胶和角质等。

(一) 单糖

单糖是最简单的碳水化合物，可分为戊糖和己糖等，常见的糖与糖的衍生物及其主要存在形式见表2-1。

表 2-1 常见的糖与糖的衍生物及其主要存在形式

类型	糖或糖的衍生物	存在形式
戊糖	木糖	半纤维素（木聚糖）、果胶物质
	阿拉伯糖	植物树胶（阿拉伯树胶）、半纤维素
	核糖	核酸（RNA）、核苷酸
己糖	葡萄糖	动物的血糖、动植物的贮藏和结构多糖
	果糖	植物的贮藏多糖
	半乳糖	乳糖、糖蛋白、半纤维素
	甘露糖	糖蛋白、植物的贮藏和结构多糖
糖醛糖	脱氧核糖	核酸（DNA）
	海藻糖	海藻的多糖
	鼠李糖	植物中的糖苷
糖醛酸	半乳糖醛酸	果胶物质
	葡萄糖醛酸	黏多糖
氨基糖	葡萄糖胺	几丁质（真菌、节肢动物）、黏多糖
糖醇	山梨醇	果实（包括山梨）
	甘露醇	蜜露（甘露、木露）
	甘油	脂肪

（二）寡糖

寡糖又称低聚糖，是由 2~10 个分子的单糖通过糖苷键形成的，溶于水，味甜，与酸在加热的条件下可水解成各种单糖。寡糖种类较多，但以二糖存在的形式最广，也最为重要。

1. 二糖 常见的有蔗糖、乳糖、麦芽糖、纤维二糖等。

（1）蔗糖 蔗糖由葡萄糖和果糖缩合失水形成，是自然界最重要的二糖。蔗糖水解后的产物称为转化糖，蜂蜜的主要组分即为转化糖，其甜度较蔗糖更高。

（2）乳糖 乳糖由葡萄糖和半乳糖缩合失水形成。乳糖在动物乳腺中生成，猪、牛乳中含量 4%~6%，其甜度为蔗糖的 16%。

（3）麦芽糖 麦芽糖是由两个葡萄糖分子缩合失水形成。麦芽糖大量存在于发芽的谷粒中。淀粉、糖原被淀粉酶水解也可以产生少量麦芽糖，它所含的糖苷键为 α -葡萄糖苷键。

（4）纤维二糖 纤维二糖是构成纤维素的基本单位，是由两分子 β -D-葡萄糖缩合失水形成，不同于麦芽糖，它含有 β -葡萄糖苷键。纤维二糖可被消化道微生物分泌的 β -葡萄糖苷酶分解成葡萄糖。

2. 三糖与四糖 常见的有棉籽糖、水苏糖。

(1) 棉籽糖 棉籽糖属三糖类，由葡萄糖、果糖和半乳糖各 1 分子构成。棉籽糖在植物中普遍存在，其中棉籽、甜菜中含量较多。

(2) 水苏糖 水苏糖属四糖类，由果糖、葡萄糖各 1 分子和 2 分子半乳糖构成。水苏糖常见于豆科籽实及水苏属植物中。

棉籽糖与水苏糖不能被单胃动物利用，是一类抗营养因子。

(三) 多糖

多糖由多个（10 个以上到上万个）单糖分子脱水缩合而成。多糖是自然界中一类结构复杂的高分子化合物，可分为同聚多糖与杂聚多糖两大类。同聚多糖由一种单糖缩合而成，如阿拉伯糖胶、淀粉、纤维素和糖原等。杂聚多糖由一种以上不同类型的单糖或其他衍生物组成，如半纤维素、半乳糖甘露糖胶、果胶和阿拉伯胶等。多糖一般不溶于水，无甜味，在经过水解或发酵后才能为动物吸收利用。

多糖广泛存在于动物、植物和微生物体内。多糖中贮存能量的有淀粉和糖原；构成动植物组织支架的有纤维素、果胶、壳多糖；具有保护、润滑、离子固定、防冻功能的有黏多糖等。

1. 淀粉与糖原

(1) 淀粉 淀粉由葡萄糖分子聚合而成，是高等植物体内碳水化合物的主要贮藏形式，也是供给人与动物能量的主要养分。淀粉多存在于谷类豆类的种子与果实以及块根块茎中，天然淀粉为微颗粒状。

淀粉一般由直链淀粉与支链淀粉组成。前者为葡萄糖以 α -1, 4 糖苷键连接成的链状分子，后者为葡萄糖以 α -1, 4 糖苷键与 α -1, 6 糖苷键结合形成的树枝状分子。支链淀粉分子通常比直链淀粉大。淀粉中直链与支链淀粉的比例与植物的品种、生长时期有关，它影响淀粉饲用特性。天然淀粉中，除糯米、黏高粱含高支链淀粉外，一般直链、支链淀粉比例大约各占 15% ~ 25% 和 75% ~ 85%。豆类淀粉主要是直链淀粉。

天然淀粉又叫生淀粉或 β -淀粉，可在一定水温中膨胀为匀质带黏性的糊状物，此现象称为淀粉的糊化或胶凝化作用，也叫淀粉 α 化。淀粉 α 化有利于动物的消化。淀粉的逐步水解过程为：淀粉 \rightarrow 蓝色糊精 \rightarrow 红色糊精 \rightarrow 无色糊精 \rightarrow 麦芽糖 \rightarrow 葡萄糖。

(2) 糖原 糖原为动物体内碳水化合物的贮存形式，与植物支链淀粉结构类似，也称动物淀粉。糖原在动物肝脏及肌肉内贮量较大，肝糖原可占肝脏的 5%，肌糖原可占肌肉的 1% ~ 2%。

2. 纤维素与半纤维素

(1) 纤维素 纤维素是植物细胞壁的主要成分。作物的秸秆、秕壳及其他

植物饲料中的纤维素通常是与半纤维素、木质素共同存在于植物的细胞壁中。禾本科秸秆、豆科秸秆中纤维素含量分别为 65%~70%、30%~43%。

纤维素是以 β -1, 4 葡萄糖苷键连接而成的直链多聚糖。这种聚合物在其结构链上形成了上万个葡萄糖残基, 且在链的内部、链与链之间的氢键可延伸, 这样导致纤维素成为一种强度高、键合紧的结构物质。

(2) 半纤维素 半纤维素大量存在于植物的木质化部分, 是戊聚糖、己聚糖等高分子多糖的混合物。戊聚糖主要是木聚糖和阿拉伯聚糖, 己聚糖主要是甘露聚糖和多聚半乳糖。半纤维素可溶于稀碱液, 也能被稀酸降解。半纤维素在半纤维素酶的作用下水解, 该专一性酶类包括 L-阿拉伯聚糖酶、D-半乳聚糖酶、D-甘露聚糖酶和 D-木聚糖酶等。

3. 木质素 木质素为高分子苯基-丙烷衍生物的复杂聚合物, 主要由 C、H、O、N 组成, 在含碳量、氢氧比例上与碳水化合物都不相同, 故其不属于碳水化合物, 但在植物细胞壁中与纤维素、半纤维素镶嵌在一起。木质素的结构非常复杂, 动物对其几乎不能消化吸收。

4. 果胶与几丁质

(1) 果胶 果胶广泛存在于果实、根茎和叶中, 在植物的木质部含量低, 软组织中含量较多。果胶与纤维素、半纤维素共存于细胞壁中, 对植物组织和细胞起着软化和粘连作用。果胶酶仅存在植物及微生物中, 动物本身不含果胶酶, 所以对其难以消化利用。果胶、木质素、纤维素、半纤维素常结合在一起, 这使天然饲料中的纤维类物质难被动物消化。

(2) 几丁质 几丁质又称甲壳素、壳朊, 存在于虾、蟹等甲壳动物以及昆虫类的甲壳中, 其结构与纤维素结构性质类似, 为黏多糖类, 动物均难以消化。

(四) 结合糖

结合糖又称配糖体或糖苷, 是单糖或聚合糖与非糖物质的结合物。重要的结合糖有蛋白多糖、氨基多糖、糖蛋白等。

1. 蛋白多糖 蛋白多糖是由蛋白质与多糖通过共价键相连接而构成。蛋白多糖是细胞间隙中的主要成分, 在软骨、角膜、髓核、皮肤和血管壁中含量较多, 以动物结缔组织中的含量最为丰富。

2. 氨基多糖 氨基多糖又称黏多糖、糖胺聚糖, 属含氨基糖或氨基糖衍生物的杂多糖。常见的有硫酸软骨质、肝素和透明质酸等。氨基多糖广泛存在于动、植物组织中, 是组织细胞的黏合剂, 动物的生长、愈创、抗菌消炎等均与之密切相关。

3. 糖蛋白 通过共价键与蛋白质相结合的复合糖, 称为糖蛋白。糖蛋白

是指含氨基糖量少于4%的结合糖。糖蛋白的生物功能多种多样，有的具有免疫作用，有的具有生物催化或激素功能，还有的起着保护、润滑、运输的作用，此外，它也是一种结构物质。

(五) 其他分类方法划分的碳水化合物

由德国 Henneberg 和 Stohmann 1860 年创立的概略养分分析方案及美国 Van Soest (1966—1981) 提出的修改方案中，还涉及另一些与糖类化合物相关的概念，如粗纤维、中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维与酸性洗涤木质素等。

1. 粗纤维 概略养分分析方案将碳水化合物粗分为无氮浸出物和粗纤维两大类，也就是非结构碳水化合物和结构碳水化合物。按这种方案所测定得到的粗纤维是包括纤维素、部分半纤维素及木质素以及果胶物质的混合物，不是化学上的“匀质”化合物。这种划分，由于简单易测，虽有明显不足，但至今仍在国内广泛采用。

2. 无氮浸出物 饲料干物质减去粗纤维、粗蛋白质、粗脂肪和粗灰分所得部分为无氮浸出物，主要包括糖和淀粉，但也有一些半纤维素和木质素。

3. 中性洗涤纤维 (NDF) 中性洗涤纤维属不溶于中性洗涤剂 (十二烷基硫酸钠) 的物质，包括半纤维素、纤维素、木质素、硅酸盐及其中所含的微量含氮化合物等。Van Soest 测定步骤：先用洗涤剂将饲料样本中蛋白质络合物提出并溶解，再用 EDTA 螯合剂除去重金属和碱金属氧化物，后用中性洗涤剂煮沸饲料样本，不溶解部分即为中性洗涤纤维，其他可溶解的部分称细胞内容物 (NDS)。

4. 酸性洗涤纤维 (ADF) 与酸性洗涤木质素 (ADL) 将 NDF 用酸性洗涤剂 (十六烷基三甲溴化铵) 处理使半纤维素全部溶解，不溶解部分称为酸性洗涤纤维，包括纤维素、木质素及部分矿物质 (主要是 SiO_2)，可溶部分称为酸性洗涤可溶物 (ADS)。ADF 再用 72% 的硫酸进行消化，纤维素被分解，不溶解的残渣为木质素及矿物质，将残渣灼烧灰化后为矿物质，经计算即得木质素含量，称为酸性洗涤木质素。

依据 Van Soest 测定碳水化合物的方法可推出：

$$\text{半纤维素} = \text{NDF} - \text{ADF}$$

$$\text{纤维素} = \text{ADF} - \text{木质素} - \text{灰分}$$

$$\text{木质素} = \text{ADF} - \text{纤维素} - \text{灰分}$$

二、饲料蛋白质与含氮化合物

蛋白质是一切生命的物质基础，动物的生长、发育和繁殖等过程都离不开

蛋白质。饲料中的其他养分都不能替代蛋白质发挥作用，所以，饲料中的蛋白质在动物营养中有重要的意义。

饲料中的含氮化合物包括真蛋白质与非蛋白含氮物。真蛋白质是由多种氨基酸结合而成的高分子化合物。非蛋白含氮物是指非蛋白质形态的含氮化合物，如游离氨基酸、肽、酰胺、氨、硝酸盐、生物碱、核酸和尿素等。

(一) 蛋白质组成与结构

1. 蛋白质组成 蛋白质是各种 α -氨基酸通过酰胺键连成多肽链的高分子有机化合物。一些蛋白质还含有“辅基”，即非肽链结构的其他成分。蛋白质主要含有碳、氢、氧和氮元素，平均含氮量为 16%，有的还含有硫、磷、铜、铁、锰、碘等元素。

2. 蛋白质的结构 蛋白质水解后产生 α -氨基酸，自然界的氨基酸共有 200 多种。而动植物体中一般只有 20 多种。氨基酸以不同数目、比例、排列次序及肽键数目和空间结构，形成成千上万种蛋白质。蛋白质的结构分为初级（一级结构）与高级结构（空间结构）两种。

(1) 蛋白质的初级结构 蛋白质的一级结构专指蛋白质肽链中的氨基酸的排列顺序。一个链状结构的肽链水解后，肽键断裂，转变成一系列氨基酸。

(2) 蛋白质的高级结构 蛋白质的高级结构包括二级结构、三级结构和四级结构。蛋白质二级结构是指主链原子的局部空间排列，不包括与其他链段的相互关系及侧链构象的内容；蛋白质三级结构是指蛋白质或亚基内所有原子的空间排列，但不包括亚基间的空间结构；蛋白质四级结构是指亚基的主体排列，亚基间相互作用与接触部位的布局，但不包括亚基内部的空间结构。

蛋白质高级结构与功能密切相关。某些饲料原料中具有活性蛋白成分，如大豆抗原蛋白，具有抗营养作用，可以通过加热处理而使其高级结构破坏，从而消除其抗原活性。

(二) 蛋白质的分类

天然蛋白质结构复杂，种类繁多。可根据化学组成、蛋白质分子形状或生理功能进行分类，其中，按化学组成蛋白质可分为单纯蛋白质、复合蛋白质两类。

1. 单纯蛋白质 在蛋白质分子中完全由氨基酸构成的蛋白质称为单纯蛋白质（表 2-2）。

2. 复合蛋白质 一些蛋白与非蛋白质的辅基或者是其他的分子结合在一起，称为复合蛋白质（表 2-3）。

表 2-2 单纯蛋白质分类

类别	分布	实例
白蛋白	普遍存在于动植物体内	血清清蛋白、乳清清蛋白、卵清清蛋白、麦清蛋白
球蛋白	普遍存在于动植物体内	血清球蛋白、植物种子球蛋白、血纤维球蛋白、 β -乳球蛋白、甲状腺球蛋白、胰岛素
谷蛋白	存在于谷物种子	麦谷种子、米谷种子
组蛋白	存在于动物体内	胸腺组蛋白、肝组蛋白
玉米醇溶蛋白	存在于谷物种子	小麦谷胶蛋白、大麦谷胶蛋白、玉米谷胶蛋白
角硬蛋白	存在于毛发、羽毛、蹄壳、结缔组织	角蛋白、胶原蛋白、弹性蛋白

表 2-3 复合蛋白质分类

类别	辅基	实例
核蛋白 脱氧核糖核蛋白 核糖体	脱氧核糖核酸 核糖核酸	动植物的细胞核、细胞质、病毒及噬菌体
脂蛋白 β_1 -脂蛋白	磷脂、胆固醇、中性脂	动物血浆、细胞膜、卵黄、卵磷脂、脑磷脂
糖蛋白 γ -球蛋白 血清类黏蛋白	己糖胺、半乳糖、甘露糖 半乳糖、N-乙酰半乳糖胺、N-乙酰神经氨酸	卵蛋白、免疫球蛋白、半乳糖蛋白、甘露糖蛋白、氨基糖蛋白、唾液、黏液、血液、骨黏蛋白、腱蛋白
磷蛋白 酪蛋白	磷酸基（通过酯脂键与丝氨酸残基连接）	乳酪蛋白、胃蛋白酶、磷酸脂、卵黄高磷蛋白
血红素蛋白 血红蛋白 细胞色素 C 叶绿蛋白	铁卟啉 铁卟啉 铁卟啉	血红蛋白、肌红蛋白、细胞色素 C、叶绿蛋白
黄素蛋白 琥珀酸脱氢酶 D-氨基酸氧化酶	黄素腺嘌呤二核苷酸 黄素腺嘌呤二核苷酸	琥珀酸脱氢酶
金属蛋白 铁蛋白 细胞色素氧化酶 乙醇脱氢酶 黄嘌呤氧化酶	氢氧化铁 铁和铜 锌 钼和铁	动物脾脏、线粒体

(三) 氨基酸

1. 氨基酸的结构 动植物所含的天然蛋白质经酸、碱或酶的水解，可分离出各种氨基酸。这些氨基酸在结构上的共同点是都含有氨基（—NH₂）和羧基（—COOH），且在与羧基相邻的 α -碳原子上都有 1 个 α -氨基。氨基酸的主要区别在于侧链的 R 基团。

2. 氨基酸的分类 常见有三种氨基酸分类方法：①根据侧链 R 基的疏水性与亲水性分类；②根据不同氨基酸中所含氨基和羧基的多少及是否含硫基或羟基分类；③根据 α -氨基酸中侧链 R 基的极性性质分类。

非极性 R 基氨基酸包括丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、脯氨酸、苯丙氨酸、色氨酸、蛋氨酸；不带电荷极性 R 基氨基酸包括甘氨酸、丝氨酸、苏氨酸、半胱氨酸、酪氨酸、天冬氨酸、谷氨酸；带正电荷的 R 基氨基酸包括：赖氨酸、精氨酸、组氨酸；带负电荷的 R 基氨基酸包括：天冬氨酸、谷氨酸。

3. 氨基酸的理化性质

(1) 氨基酸的旋光性 天然 α -氨基酸中除甘氨酸外，均是具有不对称碳原子的光学活性物质，所以都有 L-型和 D-型两种立体构型，同时呈现左旋或右旋的旋光性。所谓“L-”或“D-”型氨基酸是指分子结构空间的 4 个基团的相互位置。天然存在的氨基酸多为 L 型，动物对其吸收利用率高。蛋白质水解后得到都是 L 型 α -氨基酸，D 型氨基酸广泛存在细菌体内。

当用碱加热水解蛋白质时，或一般的有机合成方法合成氨基酸时，得到的氨基酸是无旋光性的 DL-消旋物，即为 D 型与 L 型等量混合物。产生此现象的原因是旋光物质在反应过程中，其不对称原子经过对称状态的中间阶段发生了消旋所致。

(2) 光吸收 动植物体中的氨基酸，一般对可见光没有光吸收，但酪氨酸、色氨酸及苯丙氨酸对紫外光有明显的光吸收能力。紫外分光光度计定量测定氨基酸就是利用这一特性。

(3) 氨基酸的溶解度 氨基酸都能溶于盐酸溶液，赖氨酸、精氨酸易溶于水，难溶于水的氨基酸有胱氨酸、酪氨酸、天冬氨酸和谷氨酸等。

(四) 非蛋白含氮物

1. 核酸和碱基 核酸与单纯蛋白质结合成核蛋白，是细胞核的组分。核酸在动物的内脏、酵母、细菌中含量较高，可达 10% 左右，但在植物性饲料中含量很低。在动物消化道内，核酸在核酸酶的作用下变为核苷酸，再由相应核苷酸酶将其分解为核苷与磷酸。核苷在核苷酶作用下可分解为糖与碱基（腺嘌呤、鸟嘌呤、胞嘧啶、尿嘧啶、胸腺嘧啶等）。这些组分均能被动物吸收一

部分，一些被吸收的组分直接从尿中排除。

2. 胺及酰胺类含氮化合物

(1) 胺 胺是具有特殊的生理生化作用的一类物质，是由相应氨基酸脱羧后的产物，如组氨酸脱羧后转化为组胺，具有扩张血管以及促进胃液分泌的作用。不当的饲料原料贮藏或加工方式可增加胺类的含量，如鱼粉产生的组胺。当组胺在动物体内聚积时，可引起中毒。

(2) 酰胺类 酰胺类在植物饲料中含量较多，常见有天门冬酰胺、谷氨酰胺及尿素。某些酰胺类含氮物具有一定的营养价值，尤其在反刍动物。

(五) 寡肽

蛋白质进入消化道后在多种蛋白酶的作用下可水解成寡肽和游离氨基酸。寡肽是指氨基酸之间由肽键（—CO—NH—）连接的低聚化合物。随着蛋白质和氨基酸营养的研究深入以及小肽在肠道中吸收机制的发现，新的肽营养理论认为，动物对蛋白质的需要不能完全由游离氨基酸来满足，为了达到最佳生产性能，必须满足动物一定量的寡肽的需要，肽是动物的一类必需营养素。

饲料蛋白质品质的实质与其在动物肠道中释放寡肽和游离氨基酸的量及比例有关。动物性蛋白质能产生较大比例的寡肽，植物性蛋白质可产生较多的游离氨基酸。从不同蛋白质水解释放出的肽的氨基酸组成来看，必需氨基酸更容易以肽的形式释放。饲料蛋白质的寡肽释放量与有效赖氨酸、碱性氨基酸含量呈正相关。蛋白质饲料的寡肽释放量多少依次为：酪蛋白、鱼粉、蚕蛹、豆粕、大豆饼、菜籽饼、玉米蛋白粉。

肽不仅为蛋白质代谢的底物，有些肽还发挥其他重要的生物学作用，如神经递质作用（酪啡肽），机体免疫调节作用（某些三肽、六肽物质）等。这类起生理调控功能的肽又称为生物活性肽，区别于其他的营养肽。

三、饲料脂类化合物

脂类是由碳、氢、氧三种元素组成的化合物。凡是与脂肪酸相结合，或能够与脂肪酸相结合的，且易溶于有机溶剂，难溶于水的各种化合物统称为脂类。

(一) 脂类化合物的分类

脂类化合物可简单分为脂肪和类脂。脂肪又称真脂，类脂又称类脂肪。

1. 脂肪 脂肪是指由甘油和脂肪酸组成的三酰甘油，又称甘油三酯或中性脂肪。如果组成甘油三酯的三个脂肪酸相同，称为单纯甘油三酯；如果有 2

个或3个脂肪酸不同，这类甘油酯就称为混合甘油酯。天然脂肪大多数是混合甘油酯，而且是几种混合甘油酯的混合物。脂肪主要是从动植物体内提炼出来的甘油酯部分，是由1分子甘油和3分子脂肪酸结合而得，它是动植物细胞贮脂的主要成分，在室温下呈固态的称之为脂，在室温下为液态的称之为油，统称为油脂。

2. 类脂 类脂由脂肪酸、甘油及其他物质结合而成，包括磷脂（神经磷脂、脑磷脂、卵磷脂）、固醇类和糖脂等。

脂类化合物按组成详细分类可分为7大类（表2-4）。

表 2-4 脂类的分类

脂类的类型	举 例	化学特性	附 注
脂肪酸	软脂肪，油酸，硬脂肪，亚油酸	一般为单羟基酸，可以是饱和的或含有一个或多个双键	多种情况，在自然界中的脂肪酸有偶数的碳原子，也有少数奇数碳原子的脂肪酸
中性脂肪	甘油一酯，甘油二酯，甘油三酯，糖基甘油酯	不溶于水，溶于非极性溶剂，性质类似脂肪酸，易被碱水解（皂化）	自然界中最丰富的脂类，由动物组织、植物子实中分离出来
脂类的醇与蜡质	十六烷基软脂酸	脂肪酸与醇（甘油醇除外）的脂	
复合脂类	磷脂，二磷脂酰甘油，肌醇磷脂	磷酸与胆碱、胆胺，丝氨酸脂一分子甘油；一分子六羟基醇（肌醇）；二分子脂肪酸与1~3个分子磷酸	这些化合物的大部分见于脑组织
神经鞘脂类	神经酰胺，神经鞘磷脂，糖鞘脂	鞘氨醇的N酰基脂肪酸衍生物，神经酰胺的磷脂酰胆碱衍生物，含有一至数个碳水化合物	广泛存在于动、植物体组织中，主要在神经中存在。有3种糖鞘脂：神经节苷脂、脑苷脂类、神经酰胺糖类
杂质萜	包括樟脑油类松脂酸、植物色素等	有链状的、有环状的；异戊二烯的倍体	维生素A就是生理萜类
甾醇	胆固醇、皮质甾醇，胆酸、维生素D；雄激素与雌激素	环戊烷多氢菲的衍生物	

（二）脂肪酸

高等动植物的脂肪酸绝大多数是偶数碳原子，奇数碳原子的脂肪酸极少。根据构成脂肪酸的碳原子之间是单键结合还是含有一个或一个以上的双键结合，把脂肪酸分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸（表2-5）。