中养蜂可利用 80 万 hm^2，年贮藏蜜量 7.15 万 t，相当于全国蜜蜂总产量的 1/3，载蜂量可达 150 万群，占全国蜂群总数的 1/4。

草原上丰富的蜜源植物使得其年贮藏蜜量为全国蜜蜂总产量的 1/3。由于蜂蜜是一种弱酸性的物质，为防止产生化学反应，最好不要用金属容器存放，尽量选用玻璃瓶或无毒塑料瓶保存为好。此外，一定要将蜂蜜放到阴凉干燥的地方，并保持贮存环境的清洁。若包装不严，蜂蜜就会从空气中吸一部分水而变稀，当水分含量超过 75% 时，酵母菌就会迅速使蜂蜜发酵变质，若发现已经开始发酵，要把蜂蜜放在玻璃器皿内，放在锅中隔水加热到 63～65℃，保温 0.5 h，可阻止发酵。

（二）造纸工业原料

1. 造纸纤维来源

我国草原上分布着大量的纤维植物，其品种多、产量大。草类原料结构疏松、纤维细长，蒸煮时药液易于渗透，蒸煮温度升高快。现已发现和利用的有野麻、罗布麻、蝎麻、龙须草、芨芨草、芦苇等几十种，仅内蒙古草原上的产量就达 10 亿 kg 左右，其中可用于人造棉的就有 5 000 万 kg 以上，可织近 1 000 万匹布。另外，还有超过 5 亿 kg 的野生植物纤维，可用于造纸、制绳工业等。

龙须草为禾本科多年生草本，全草柔软，民间常作编织原料。全纤维素含量 56.58%，多缩戊糖 20.03%，木质素 14.61%。龙须草草长无节，纤维柔软细长、木质素含量低，容易蒸煮，具有收获率高，漂白性能好，成纸强度高等优点。用亚铵法蒸煮龙须草，亚铵用量 10%～12%。高压保温时间不宜太长，一般以 1～2 h 为宜。蒸煮工艺条件对龙须草纸浆的漂白影响较大，蒸煮温度和保温时间要恰当合适。龙须草浆洁净强韧，纤维细长，有优良的交织力。成纸较细腻平滑，机械强度良好，用于制造高级书写纸和打印纸。

芦苇属禾本科，常生于沼泽地和河岸湖边，茎秆粗而坚韧，可作造纸原料和编织材料。芦苇含多缩戊糖 22.25%，木质素 19.87%，全纤维素 47.79%。亚铵法蒸煮芦苇，亚铵用量 17%～19%，不宜过高。氨水用量 1% 较为适宜，增加氨水用量可以提高纸的物理强度。

芨芨草是遍布于中国各地低湿碱滩草地上的多年生禾本科牧草，它不仅是牲畜的良等饲草，而且秆叶坚韧、长而光滑，是良好的纤维植物。芨芨草含多缩戊糖 25.98%，全纤维 49.15%，木质素 16.52%。常用于纺织筐、草帘及扫帚等，也是制造高级纸和丝的上等原料，用它造成的纸张可以制币印书。禾本科牧草中还有一些牧草如冰草、丝颖针茅、大叶章等都是优良的纸浆原料。

罗布麻属夹竹桃科罗布麻属多年生宿根草本植物，在我国广泛分布，生长在盐碱、沙荒地区，耐盐抗旱。罗布麻是一种优良纤维原料，其品种繁多，不同品种纤维性能差异很大。罗布麻秆皮纤维比苎麻细，单纤维绝对强力高，比棉纤维大 5～6 倍，纤维延伸率小，和苎麻相近。罗布麻皮部的纤维平均长度 11.82 mm，是较好的造纸原料。制浆时耗碱量较高，纸浆白度 70 度，适于作抄制牛皮包装纸的原料。而产于内蒙古哲盟、伊盟和巴盟等地的罗布麻，人工培植条件下精麻产量为 750 kg/hm^2，不仅相当于 0.13 hm^2 棉花所产的纤维，而且纤维品质也好于棉花和亚麻，细度拉力比羊毛还好，可单纺或与棉花、羊毛混纺，可织华大呢、凡尔丁和各种色呢等 10 多种美丽、坚实的衣料。罗布麻的纤维耐腐、耐磨，不

怕风吹、雨淋、日晒，可做航空、航海的机器传送带，同时也是制造绳索和渔网难得的宝贵材料。

甘草为豆科多年生草本。根茎发达，长达 1～2 m。甘草根茎供药用，其浸膏可作食品、烟草香精的原料。甘草纤维坚韧，可制麻袋和麻绳。提取甘草膏后的残渣可用于造纸。

蓝花棘豆为豆科多年生草本，具木质较长的主根。蓝花棘豆根和茎的皮纤维坚韧，用于制绳和麻袋。蓝花棘豆根和茎纤维含量在 30%～36%，资源丰富，可作制取纸浆的原料。

狼毒为瑞香科多年生草本，是天然草地常见的毒杂草，根有毒，可入药。同时狼毒根富含淀粉，可以用于制取酒精。狼毒根和茎纤维含量高，可作造纸原料。

马蔺为鸢尾科多年生草本。基生叶丛生，叶条形，坚韧。茎叶含全纤维 30.23%，多缩戊糖 12.15%，木质素 14.79%。秋季割取茎叶，用于造纸、制绳及人造棉。

唐古特瑞香和鬼箭锦鸡儿都是灌木。唐古特瑞香属瑞香科，全株有小毒可入药，树皮可作为造纸原料。鬼箭锦鸡儿属豆科，可栽培供观赏和作为绿篱。鬼箭锦鸡儿茎纤维坚韧，可制绳索和麻袋，同时也可作为造纸原料。

荨麻科植物狭叶荨麻和宽叶荨麻富含纤维，其茎皮含长纤维，全纤维含量 66.71%，用于制作绳索、帆布、马达传送带等，还可以与棉、毛混纺织成各种高级衣料及毛毯等物。荨麻的短纤维可作高级纸张原料和麻胶板、瓦楞纸、隔音板等建筑材料。

此外，牧区的沙柳，可谓沙地植物一宝。沙柳纤维质量高，木质细密，是制造优质纤维板的最佳原料。

2. 纸浆制造方法

纸浆制造方法很多，有发酵法、常压蒸煮法、机械制浆法、连续制浆法，以下介绍几种常用的方法。

（1）硫酸盐法。所用蒸煮剂主要成分有氢氧化钠和硫化钠。原料在蒸煮前切断成片，经过筛选除尘，浆料与药液同时入锅，蒸汽加强，最高温达 160～170 ℃，锅内压力为（7.598～9.117）$\times 10^5$ Pa，总蒸煮时间为 3～5 h。

（2）苛性钠法。所用蒸煮剂为氢氧化钠，在蒸煮锅内将原料加压蒸煮制成纸浆。将切好的草与碱液装入锅内（碱与草类的用量比为 10%～14%），通常在 3.039×10^5 Pa 及 130～140 ℃温度下进行。

（3）亚硫酸盐法。利用亚硫酸盐或钙盐来蒸煮木材、芦苇、甘蔗、稻草、麦草等原料。如以木材为原料，将木片与亚硫酸盐同时加入蒸煮锅，然后通气升温，并保持一定的压力，直至把浆煮好。

（三）化妆品工业原料

1. 草本香料植物

制造化妆品的原料有数千种。植物性原料主要包括从植物中提取的芳香油、色素、油脂以及增稠剂等。

芳香油，又称精油，是从植物中用蒸馏、浸提、压榨和吸附等方法单离制取的具有特征性香气的油状物质。芳香油是不同化学物质的混合物，在室温下，一般都是易于流动的透明液体。精油能随水蒸气蒸出，溶于多种挥发性有机溶剂。

我国香精资源丰富。据初步统计我国野生香料植物和栽培种类共有 56 科 380 余种。著名的香料植物有玫瑰、薄荷、八角茴香、樟、茉莉、桂花、留兰香、薰衣草等。我国西北地区常见可提取芳香油的草本植物有紫苏、百里香、缬草、黄花蒿、裂叶荆芥、甘草、胡卢巴、烈香杜鹃等。

缬草属败酱科缬草属多年生草本。茎直立，高 0.5～1 m。根状茎粗短，须根细长。叶对生，成叶羽状复叶。伞房花序。瘦果扁平，卵形。缬草耐寒力强，分布于我国西南、西北的山坡草地，20 世纪 60 年代开始引种栽培。缬草根状茎和肉质根含芳香油，具有特殊香气。我国主产区主要采用水蒸汽蒸馏，得油率为 0.6%～2%，而土法蒸馏得油率 0.2%～0.5%。缬草油主要用于化妆品、香水精，还用于调配香烟、酒等。

胡卢巴又称苦豆、香豆，属豆科胡卢巴属一年生草本。高 40～80 cm，茎丛生分枝，三出复叶，互生，蝶形花冠，荚果细长筒形。胡卢巴耐寒，喜冷凉干旱气候，我国有广泛栽培。胡卢巴全株及种子均含芳香油，但含油量较低。加工时用种子制取胡卢巴浸膏，用有机溶剂浸提，也可将种子粉碎后，用水蒸汽蒸馏法提取芳香油。民间将胡卢巴在开花前收获，晒干，碾碎后食用。胡卢巴油又称香豆酊，其香气浓郁，似川芎和芸香香气，主要用于调配香烟，在化妆品种中可用于男性加香用品。

百里香为唇形科百里香属半灌木。具匍匐茎，花枝多数。叶对生，卵圆形，有明显腺点。百里香全株含芳香油 0.15%～0.5%，在民间全株用作香包的填充物及防腐剂。五肋百里香耐旱，适应性强，常栽培用于提取芳香油。提取时用直接蒸汽蒸馏法或水上蒸馏法，采收时间以盛花期全草为佳。五肋百里香油可提取芳樟醇，用于调配日用化妆品香精。

茵陈蒿属菊科蒿属多年生草本。茎直立，株高 40～100 cm，叶二至三回羽状分裂，头状花序，瘦果长圆形。茎叶含芳香油 0.2%～0.3%。提取时，宜在开花盛期割取，趁鲜加工蒸馏。主要成分为乙位蒎烯和茵陈烃，供配制各种清凉剂、喷雾香水用。

2. 芳香油提取方法

水蒸汽蒸馏法操作容易，设备简单，而且对绝大多数植物来讲本法不会分解芳香油中的芳香成分，故应用最广泛。所用设备形式多，将粉碎的植物原料直接放入水中，用直火或封闭的蒸汽管道加热，使芳香油随蒸汽蒸馏出来。如玫瑰花等容易黏着的原料均用此法，另外还有溶剂萃取法。

（四）生物质能源产品

生物质能是以生物质为载体的能量，即通过植物光合作用把太阳能以化学能形式在生物质中存储的一种能量形式，是世界上最为广泛的可再生能源。它的主要形式有沼气制备、生物制氢、生物柴油和燃料乙醇等。美国新的《国家生物燃料行动计划》已将草本植物列入生物燃料第三代燃料。欧美等国相继出台政策法规，不断加大研发力度，生物能源应用规模不断扩大，每年增长率达 30% 以上。生物燃气、生物液体燃料等生物质能源在德国、美国、巴西等国已实现规模化生产和应用。巴西生物液体燃料乙醇已替代 50% 的汽油，是世界上唯一不供应纯汽油的国家。

能源草又称草类能源植物，是一系列可以作为燃料使用及用作能源生产且通过光合作用可产生碳氢化合物的草类植物统称，一般为二年或多年生高大丛生草本或半灌木、灌木

植物，是生物质能源中重要的原料之一。

目前，一些草种也已初露端倪可能成为优良能源植物，包括柳枝稷、芒属、杂交狼尾草、高粱草、藨草、割手密、斑茅、荻、芦竹、苜蓿等。

（五）人造棉

人造棉是棉型人造短纤维的俗称，它是用植物纤维经化学方法处理制成人造纤维后，再切成长度与棉纤维相仿的纺织原料和代棉原料。人造棉的弹性好、疏松、洁白，适用于一次性医药用棉及包装用品，也适合代替棉花作棉絮。

生产人造棉的原料主要是植物纤维资源。加工时经过清理、切段、碱化、锤打、漂洗、漂白、油化、干燥、梳理等工序制得。下面以龙须草为例介绍制造人造棉的方法。

将龙须草洗净，切去根部，用铡草机切成 4～10 cm 长的草段，然后进行二次碱化。碱化是制造人造棉的关键，第一次碱化用 2% 烧碱溶液，小火保温 1～3 h。锤打后进行第二次碱化，烧碱浓度为 5%～7%。碱化时间长短以草段成熟为准，用木棒轻轻锤打碱化好的草段，使纤维分离，然后在漂洗池中洗至中性。

将纤维放入漂白缸中，加入 10 kg 浓度为 0.5%～1% 的硫酸溶液浸泡 0.5 h，再加 0.5～0.8 kg 漂白粉与纤维充分搅匀，静置 8～24 h，待纤维变成白色，捞出。反复浸洗 2～3 次，再用 1% 的大苏打溶液浸洗 1 次，洗去残余的酸和氯，绞去水分。

在油化缸中加入 10 倍纤维重量的水量，再加水量 1%～3% 的土耳其红油及少量硫酸，搅匀后放入纤维进行浸泡。油化 4～12 h，捞出，绞干。将纤维置于通风阴凉处晾干，撕开、拍松。用弹花机或疏松机反复进行弹打、疏松，制得人造棉成品。

（六）酶制剂

1. 酶制剂的生产

通过基因工程可以从苜蓿中提取酶。这种生物蛋白酶可以用于很多产品中，如饲料和洗涤剂。据预计，这种酶的市场需要量在未来 10 年会大幅度提升。美国威斯康星大学生物技术中心的科学家已经成功通过基因工程在苜蓿中生产出数量可观的植酸酶。这种酶在生产上用作畜禽饲料添加剂，以替代畜禽饲料中的无机磷，减少畜禽粪便中磷酸盐的排出。在酶的生产过程中只使用 1%～2% 的苜蓿植株，剩下的富含纤维的部分可以用作牛饲料。种植 1 hm^2 这种转基因苜蓿可以提取价值 1 200～2 500 美元的植酸酶。虽然回报丰厚，但目前种植 10 万亩苜蓿已经能满足美国市场需求。另一方面，种质资源的许可制度与转基因过程也限制了这种苜蓿的市场化进程。这些问题一旦得到解决，将会大大加快这一进程。

此外，通过转基因苜蓿来生产其他用途酶的研究也在探索中，如用于造纸业的绿色环保酶、原油生产分解酶等。

2. 酶制剂的保存

（1）影响酶稳定性的因素包括温度、pH 和缓冲液、酶蛋白浓度、氧气。

（2）稳定酶的办法一般包括以下几种：添加底物、抑制剂和辅酶；添加巯基保护剂；添加某些低分子无机离子。

（3）酶的保存方法有如下几种。

① 低温下保存。由于多数蛋白质和酶对热敏感，通常35～40℃以上就会失活，冷藏于冰箱一般只能保存1周左右，而且蛋白质和酶越纯越不稳定，溶液状态比固态更不稳定。因此通常要保存于-20～-5℃，如能在-70℃条件下保存则最为理想。极少数酶可以耐热，如核糖核酸酶可以短时煮沸，胰蛋白酶在稀HCl中可以耐受90℃，蔗糖酶在50～60℃可以保持15～30 min不失活。还有少数酶对低温敏感，如鸟苷丙酮酸羧化酶25℃稳定，低温下失活，过氧化氢酶要在0～4℃保存，冰冻则失活，羧肽酶反复冻融会失活等。

② 制成干粉或结晶保存。蛋白质和酶固态比在溶液中要稳定得多。固态干粉制剂放在干燥剂中可长期保存，如葡萄糖氧化酶干粉0℃条件下可保存2年，-15℃条件下可保存8年。通常，酶与蛋白质含水量大于10%，室温、低温下均易失活，含水量小于5%时，37℃活性会下降，如要抑制微生物活性，含水量要小于10%，抑制化学活性，含水量要小于3%。此外要特别注意酶在冻干时往往会部分失活。

③ 在保护剂下保存。很早就有人观察到，在无菌条件下，室温保存了45年的血液，血红蛋白仅有少量改变，许多酶仍保留部分活力，这是因为血液中有使蛋白质稳定的因素，为了长期保存蛋白质和酶，常常要加入某些稳定剂。例如：惰性的生化或有机物质，如糖类、脂肪酸、牛血清白蛋白、氨基酸、多元醇等，以保持稳定的疏水环境；中性盐，有一些蛋白质要求在高离子强度（1～4 mol/L或饱和的盐溶液）的极性环境中才能保持活力。最常用的是$MgSO_4$、NaCl、$(NH_4)_2SO_4$等。使用时要脱盐；巯基试剂，一些蛋白质和酶的表面或内部含有半胱氨酸巯基，易被空气中的氧缓慢氧化为磺酸或二硫化物而变性，保存时可加入半胱氨酸或巯基乙醇。

（七）染料

染料是能使纤维及其他材料着色的物质。许多化学物质都能使其他物质染上颜色，但是如果不能给予清晰的且有一定持久性的颜色，就不能认为是染料。植物染料是从植物根、茎、叶、花、果等部分中提取的天然染料。染料植物主要有巴西木、苏木、姜黄、茜草、红花、板蓝根、木蓝和紫草等。

（八）糠醛

糠醛是大量用于塑料、石油精制、合成纤维的化工原料，也可以利用它生产合成橡胶、染料、油漆等产品。糠醛脱羰基可以得到呋喃，再加氢可得四氢呋喃。呋喃是生产药品、除草剂、稳定剂及精细化工的原料。四氢呋喃是一种极其优良的溶剂，有“万能溶剂”之称，能溶解各种树脂和塑料。

糠醛无法从石油化工中合成，它的原料为含多缩戊糖的植物纤维。谷物外壳、牧草、稻草、玉米秸秆等都是制造糠醛的重要原料。制取糠醛的方法有稀酸加压水解、稀酸常压水解、木材干馏等方法。生产糠醛最常用的方法是升高温度、增加压力，采用稀硫酸作为催化剂，经水解而获得糠醛。

（九）植酸钙

植酸钙是植酸与钙、镁形成的一种复盐形式，又称菲汀。植酸钙可以促进人体的新陈

代谢，是一种滋补强壮剂，有补脑，治疗神经炎和神经衰弱、幼儿佝偻等病症的功效。工业上用作防腐剂。植酸钙中含有 20% 的肌醇，是制取肌醇的原料。

植酸钙为无定型粉末，无味无嗅，微溶于水，能溶于 0.1 mol/L 的稀酸中。工业上利用这种性质提取植物种子中的植酸钙。含水的植酸钙受植酸酶的作用而分解，因此需要在烘干后存放或立即制取肌醇。

植酸钙广泛存在于植物种子的糊粉层中。不同植物种子中植酸钙的含量不同，含量为 1%～10%。一般脱脂米糠中含量较高。

（十）甜菜碱

甜菜碱为甘氨酸的三甲基衍生物。它存在于各种不同植物的根、茎和种子中，大麦、小麦、扁豆、豌豆等都含有这种生物碱。甜菜碱在医疗、工业、农牧业生产中有着广泛的用途。

甜菜制糖废料中含甜菜碱 12%～15%。从植物中提取甜菜碱可参照从甜菜制糖废液中回收甜菜碱的方法。将植物原料粉碎或打浆，用水浸泡 2 h，然后加热到 50℃，在搅拌下加入氯化钙，趁热过滤。在滤液中加入盐酸，在 20～30℃下结晶，分离，干燥，得纯度 98.8% 的粗品。

（十一）栲胶

栲胶即植物性鞣料，是鞣制生皮革的一种化工原料。一般从富含单宁的植物材料中经过粉碎、浸提、蒸发、干燥制成。栲胶是由多种不同物质组成的复杂混合物，单宁是其主要成分。

我国鞣料植物很多，其中用于植物鞣剂生产的有落叶松、杨梅、柚柑、槲树等的树皮，橡碗子、花香果的果实等。天然草地中常见的鞣料植物有波叶大黄、皱叶酸模等。表 6-6 列出了天然草地常见的一些栲胶植物。

表 6-6 天然草地常见栲胶植物

植物名称	学名	生境	鞣质含量
皱叶酸模	*Rumex crispus*	沟边湿地	15.70%～38.80%
波叶大黄	*Rheum franzenbachii*	山坡、草原	30.00%
小丛红景天	*Rhodiola dumulosa*	阳坡	28.01%
地榆	*Sanguisorba fficinalis*	山地、湿草原	10.19%～21.67%
粗根老鹳草	*Geranium dahuricum*	山坡、灌丛	20.98%
鹅绒委陵菜	*Potentilla anserine*	草甸、路边	15.25%
叉分蓼	*Polygonum divaricatum*	草地、河边	15%～28.5%
牻牛儿苗	*Erodium stephanianum*	草地、河岸	14.46%

在采收鞣料植物时，应注意采收的部位和季节，采收部位和季节不同，鞣质含量有很大的差异。植物原料粉碎后，一般采用浸提罐组或连续浸提器，用热水以逆流的方法进行

浸提。浸提液经蒸发、净化处理后浓缩成膏状或固体状标准品。

五、药用草产品加工与贮藏技术

（一）天然草原药用植物

中国是药用植物资源最丰富的国家之一，对药用植物的发现和使用，有着悠久的历史。草原是我国药用植物生产的主要产地之一，无论在数量还是在质量上都名列前茅。据统计，我国草原上的野生药用植物约200种以上。这些“弃之为废，用之为宝”的生物资源，是一笔潜力巨大的社会财富。除了贵重的锁阳和肉苁蓉久负盛名外，虫草、贝母、大黄、羌活、黄连、附子、麦冬、川芎、白芍等中药材在国内也颇受欢迎。我国草原上的大宗药材主要集中于豆科、麻黄科、龙胆科、毛茛科、唇形科、伞形科、远志科、菊科、蝶形花科和百合科等。这些著名的药用植物，都是以其粗壮的地下部分为入药对象，如甘草、蒙古黄芪、赤芍、黄芩、防风、狭叶柴胡、远志、知母和苍术等。草原药用植物具有种类多、分布广、藏量大等特点。例如，人称“药中之王”的甘草，各地草原都有分布，以陕北和内蒙古伊盟杭锦旗与阿拉善草原上的质量最好，皮色鲜红，粗细均匀，枝头肥实，质地坚硬，粉多筋少，被列为上等品。甘草生长繁茂，藏量最大，在局部地带20 m^2的面积内竟达40～50株，常形成优势的甘草群。内蒙古草原上年产甘草总量可达200多万kg，新疆年产甘草4 000万kg以上，占全国甘草总产量60%；宁夏草原上的药材约150种，甘草和披针叶黄华年产量可达数十万千克。

甘草和甘草膏都是医药工业的重要原料，甘草根含有芳香物质，是调和百药、温中泻火、许多配方都不可缺少的常用药材；还可作食用、饮料、烟草香精的原料。甘草和甘草膏是我国的大宗出口药材之一，新疆生产的“松树牌”甘草膏，在国际市场上很受欢迎，为名牌产品之一。西北草原上出产的枸杞也是一种贵重药材。北宋著名科学家沈括在《梦溪笔谈》中写道：“枸杞，陕西极边生者，高余丈，大可作柱，叶长数寸，无刺。根皮如厚朴，甘美异于他处者。”枸杞的利用价值极高，全身是宝，既是名贵的药材，又是良好的滋补剂。商业、药材部门称枸杞子是“地道药材，拳头商品”。我国枸杞在中外市场上居于独特地位，以宁夏枸杞品质最佳，占我国枸杞总出口量的90%以上。

肉苁蓉又称大蓉，是寄生在荒漠草原上的一种名叫“梭梭”根上的药用植物。肉苁蓉颜色乳白，萝卜形状，1年可以生长2次。肉苁蓉被誉为沙漠中的人参，不仅是牲畜的高级营养食品，而且也是一种滋阴壮阳、补血益气的名贵药材。内蒙古阿盟和巴盟荒漠草原上出产的苁蓉，肉质厚醇，被评为苁蓉上品，巴盟年产量最高达30万kg，远销国外，供不应求。阿魏是一种贵重的药用胶，过去误认为中国没有这种植物，需从伊朗进口。1958年的药用植物资源普查中，在新疆伊犁草原上发现了数万公顷阿魏，近几年来又在阜康和托里找到了几种药用阿魏。阿魏是多年生块茎植物，从种子萌发到开花结果需9年时间，阿魏胶是在它抽薹开花时节割取的。

在中国草原上还有一味贵重药材叫“冬虫夏草”，简称虫草。生长在海拔4 000～4 500 m的半阴坡高山草丛和高山草甸草原上，是我国四川、西藏、青海、甘肃、云南和贵州等省区的特产。目前我国有15种虫能长出草来，但唯有蝙蝠蛾的幼虫长出来的虫草才有药用价值。虫草是很名贵的中草药，富含脂肪8.4%，粗蛋白质25.3%，碳水化合

物 26.9% 以及 7% 的虫草酸、虫草素和 *D*-甘露醇等多种成分，具有益肺肾，补精髓，止血化痰的功能，主治虚痨咯血、阳痿遗精、腰膝酸痛等多种疾病。

但是中药材在贮藏过程中，常易发生虫蛀、霉变、走油、腐烂等现象，其主要原因为受潮，或长期日晒、受污染等。所以，贮藏时必须先干燥，再放入陶瓷或玻璃容器中密闭，并置于阴凉干燥处，最好在药材下面放些干石灰。易于虫蛀的药物，可装入容器中，用硫黄熏蒸，以杀死害虫和虫卵。

随着医学和农业的发展，药用植物逐渐成为栽培植物。我国西部天然草地蕴含丰富的野生药用植物资源。这些植物有些既有药用价值，又有丰富的营养价值。有些植物地下部分是药材，其地上部分是家畜喜食的优良牧草。许多野生药用植物含生物碱、单宁等有毒有害成分，或者具有毛、刺等附属物，适口性差，不利于家畜采食。家畜采食后影响健康，降低生产性能。天然草地中毒杂草数量的增加，往往是草地退化的表现。因此，对天然草地野生药用植物的合理利用，既可以减少天然草地毒杂草的比例，又可以扩大药用植物资源。

（二）有毒有害草

目前，我国已鉴定并确认的有毒植物约 132 科 1 383 种，但常见的引起家畜中毒的有毒植物约 300 种。毒草连片蔓延，引起家畜中毒并造成严重损失的约 20 种，我国毒草面积达 2 000 万 hm^2。

1. 瑞香狼毒

瑞香狼毒俗称断肠草、馒头花等，隶属于瑞香科狼毒属，多年生、旱生草本或灌木。瑞香科植物在世界上有 50 属 500 余种，主要分布于热带和温带地区，尤以亚洲最多，我国有 9 属 90 余种，主要分布于长江以南各地。

瑞香狼毒全株有毒，根部毒性最大，花粉剧毒。如果在瑞香狼毒花期的草地上放牧，家畜也可能因吸入狼毒花粉，导致中毒。由于成株茎叶中含有萜类成分，味劣，家畜一般不采食其鲜草。然而早春放牧时，家畜由于贪青或处于饥饿状态，常因误食刚刚返青的狼毒幼苗而中毒。多为急性中毒，主要症状为呕吐、腹痛、腹泻、四肢无力、卧地不起、全身痉挛、头向后弯、心悸亢进、粪便带血，严重时虚脱或惊厥死亡，母畜可导致流产。人接触时，可引起过敏性皮炎，根粉、花粉对人眼、鼻、喉均有较强烈而持久的辛辣性刺激。

化学成分研究表明，瑞香狼毒植株中主要含有二萜类、香豆素类、木脂素类以及黄酮类等化合物，在其根部还含有甾醇、酸性成分、氨基酸、三萜成分、树脂以及有毒的高分子有机酸。

瑞香狼毒为传统中药，根粗大，圆柱形，表面棕黄色至红棕色，质韧不易折断，断面有白色绒毛纤维。始载于《神农本草经》，其性味苦平，有杀菌、杀虫、散结、逐水止痛等多方面的药理作用，用于治疗疥疮、顽癣，具有逐水祛痰，破积杀虫之功效，还用于治疗肺、淋巴等的结核病。现代药理学和临床研究表明瑞香狼毒具有抗肿瘤、抗病毒、抗菌等活性。瑞香狼毒的根可用来制成植物性农药——杀虫剂，用于驱虫、杀蝇、灭蛆，防治农作物、饲料牧草上的害虫。

2. 棘豆属植物

棘豆属为豆科植物，全世界有350多种，分布于北半球温带、寒带及其干旱和高山地区。我国约有150种，主要分布于内蒙古、新疆的荒漠和草原、青藏高原及西南横断山脉地区。棘豆属植物中许多种具有毒性，牲畜采食后往往引起中毒乃至死亡，给畜牧业造成极大损失。关于其毒性成分及中毒机理，至今尚未准确查明。有文献报道认为棘豆属植物中含有毒性生物碱，如所含喹啉里西定类生物碱，对试验动物中枢神经产生抑制、呼吸抑制或兴奋、致幻、流产和致畸等作用，所含吲哚里西定类生物碱使哺乳动物组织细胞产生空泡变性；另有文献报道认为其含硒过多，牲畜采食后，由硒引起中毒；还有报道认为与其所含毒性蛋白（蛋白质类溶血毒素）有关；以及以上3种成分综合作用之结果。

现代研究也证实这些有毒植物含有多种化学成分，如小花棘豆含有10种皂苷、10种黄酮（苷）、8种生物碱和其他6种成分；黄花棘豆含有8种黄酮（苷）、8种生物碱和4种皂苷；甘肃棘豆含有12种氨基酸和77种挥发油；二色棘豆含有4种皂苷；黑萼棘豆含有13种氨基酸和至少1种生物碱；急弯棘豆含有6种黄酮（苷）和其他3种成分。此外，尖叶棘豆、多叶棘豆、砂珍棘豆和镰形棘豆分别含5种、4种、2种和1种黄酮（苷）。

该属植物有一定的药用价值，有10余种棘豆在藏药、蒙药等中有一定的使用，多用于消炎、解毒、抗菌、镇静和镇痛等。但对棘豆属药用植物的药理研究很少。据报道小花棘豆总生物碱和黄花棘豆及甘肃棘豆醇提取物对小鼠移植性肿瘤具有不同程度的抑制作用，其作用成分是有毒成分苦马豆素；镰形棘豆总黄酮能增加肾上腺皮质功能，对治疗慢性支气管炎有效。但从总体上看，对棘豆属药用植物的药理研究比较缺乏，而且化学成分研究与药理成分研究没有进行有效的配合。随科学技术的发展和棘豆毒性成分的进一步确定与有效成分的筛选及纯化，其有望成为有益的药用植物。

（三）基因工程药物

采用转基因技术已经从苜蓿中成功提取一种低成本的、可食的用于治疗猪遗传性肠胃炎（transmissible gastroenteritis，TGE）的接种疫苗。目前，科学家正在探索转基因苜蓿生产人类胰岛素的可能性，有试验证明苜蓿中提取出的浓缩物对人类的胰腺活动和胰岛素分泌有影响。苜蓿还可用于生产一种血库中诊疗用的单克隆抗体（immunoglobulin G，IgG），其功能和杂种细胞（在实验室里制造的一种由一个能产生抗体的淋巴细胞与一个骨髓瘤细胞结合而成的细胞，它能繁殖成一种能不断提供某种抗体的无性系）产生的抗体功能十分相似。这种抗体在不同的收割茬次和干草中呈现出稳定的特性。

（四）生物农药

利用植物资源开发农药是农药发展史中最古老、最原始的途径。中国是使用杀虫植物最早的国家，在2 000多年前的《周礼》中就有利用莽草杀虫的记载。1959年出版的《中国土农药志》记载了分布在86个科中的220种植物农药。《中国有毒植物志》中记载的1 300多种植物中有许多种类可作为植物性农药。

生物农药是指直接利用生物产生的生物活性物质或生物活体制成农药。人工合成的与天然化合物结构相同的农药，称生物源农药。我国生物农药按照其成分和来源可分为微生

物活体农药、微生物代谢产物农药、植物源农药、动物源农药4个部分。按照防治对象可分为杀虫剂、杀菌剂、除草剂、杀螨剂、杀鼠剂、植物生长调节剂等。植物农药与化学合成农药相比具有许多优点。植物农药容易降解，在自然界中无积累，对植物不产生药害，对环境较为安全。植物性杀虫剂不对天敌产生直接的杀伤作用，对非标靶生物比较安全，用于人类直接食用的蔬菜、水果和茶叶等作物非常适合。研究和开发植物生物农药对保护生态平衡，促进农业可持续发展具有十分重要的现实意义。

水蓼，又名辣蓼，蓼科蓼属一年生植物，分布于东北、华北、河南、陕西及长江以南地区。叶含甲氧蒽醌，茎叶可防治多种害虫，如蚜虫、地老虎、菜毛虫、叶跳虫、金花虫、螟虫、稻花虫、卷叶虫、黄条跳甲等。水蓼，水煮液对小麦叶锈病、条锈病有一定防治效果，水浸液对轮纹斑病菌孢子、棉炭疽病、小麦秆锈病有一定的抑制作用，抑制叶锈病夏孢子发芽效果显著。

无叶假木贼，藜科假木贼属多年生半灌木。分布于新疆、甘肃，生于干旱的荒漠、山地及沙丘地上。一年生枝含毒藜碱，对昆虫有触杀、胃毒及熏杀作用，可防治蚜虫、菜青虫、棉叶跳虫、蓟马、甘蓝蚜虫、菜蛾、苜蓿盲蝽象等。

打破碗花花，毛茛科银莲花属多年生草本，分布于西南等地。全株均可杀虫，可防治棉蚜、稻螟、稻苍虫、红蜘蛛等。水浸液对小麦叶锈病菌夏孢子发芽的抑制效果显著，对小麦秆锈病的防治效果明显。毛茛科中可作农药的还有乌头、白头翁毛茛、铁线莲等。

白屈菜，罂粟科白屈菜属植物，分布于华北、东北、山东、四川及新疆等地。全株可杀虫，防治地蚤、蝶类害虫等。罂粟科中可作为农药的还有博落回。

锈毛鱼藤，蝶形花科鱼藤属攀缘灌木，分布于云南、广东、广西等省区，我国南方广为栽培。锈毛鱼藤是一种很有效的杀虫剂，有效成分鱼藤酮以根部含量最高，对人畜毒性较低，对昆虫有强烈的触杀和胃毒作用，用于防治蚜虫和多种咀嚼式口器害虫，主要用于果树、蔬菜、烟草、茶树、桑树、棉花等作物。

雷公藤，卫矛科雷公藤属藤本，分布于长江以南各省至西南。全株含雷公藤碱而具有强烈的触杀和胃毒作用，根中有效成分含量最高，用于防治菜青虫、铁甲虫、菜毛虫等。

洋金花，茄科曼陀罗属植物，原产于印度，江苏、浙江、福建、广东、湖北等地栽培或逸为野生。地上部分具有杀虫作用，尤其是花毒性最强，主要防治对象为蚜虫、玉米螟、稻螟、红蜘蛛等。

除虫菊，菊科除虫菊属多年生草本，全国各地栽培。含除虫素菊Ⅰ、除虫素菊Ⅱ等有效成分，以花的杀虫效果最好，对昆虫有触杀作用，可防治蔬菜、果树、茶、烟草上的多种害虫。除虫菊水浸液对小麦秆锈病菌及叶锈病菌夏孢子发芽抑制效果显著，对小麦秆锈病防治效果明显。

白鲜皮，芸香科鲜皮属多年生草本，产自江苏、安徽、河北、黑龙江、吉林、甘肃、新疆等省区。水煮液可防治蚜虫等害虫。

紫茎泽兰，菊科泽兰属植物，可提取灭蚜制剂。

露水草，鸭跖草科蓝耳草属多年生草本，主要产于云南。蜕皮激素含量可达全草干重的1.2%，根部含量更高，可达干重的2.9%，其中主要成分为昆虫体内活性最强的β-蜕皮激素，是含β-蜕皮激素最高的植物之一。露水草在民间用于治疗关节炎，而且栽培容易，是荒地综合利用的一种有发展前途的经济植物。

水竹叶，鸭跖草科水竹叶属植物，产自河南、山东以南各省区。水竹叶含有蜕皮激素。杯苋属、牡荆属、野芝麻属、飞蓬属中也含有蜕皮激素。

荆芥，唇形科荆芥属多年生草本，产自西北、西南、华中等地。含有保幼激素。滨菊、飞蓬中也含有保幼激素。

碧冬茄，茄科碧冬茄属一年生或多年生草本，原产自南美，我国栽培。茎叶中含有2种杀棉铃虫幼虫，并使成虫生长发育紊乱的化学物质。

百部，百部科百部属多年生攀缘性草本，分布于江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东、河南等省。水煮液对小麦秆锈病夏孢子发芽有显著抑制效果，粉剂对棉角斑病、棉炭疽病、棉立枯病抑制效果明显，对蚕豆根腐病抑制效果显著。对多种昆虫具有强烈的触杀作用。

蕺菜，三白草科蕺菜属多年生草本，分布于四川、云南、贵州、湖南、广东、江苏、浙江、安徽、湖北等地，为常见种。水煮液对蚕豆根腐病的防治效果显著，对小麦秆锈病夏孢子发芽抑制效果明显。

大黄，蓼科大黄属多年生草本，分布于四川、湖北、陕西等省，为常见种。水浸液、水煮液对马铃薯晚疫病菌孢子发芽、小麦秆锈病夏孢子发芽的抑制效果显著。大黄粉剂对棉角斑病、棉立枯病抑制效果显著，对棉炭疽病抑制效果明显。

酸模，蓼科酸模属多年生草本，我国北方常见。水浸液对小麦叶锈病防治效果显著，对条锈病有明显防治效果，对抑制马铃薯晚疫病菌孢子发芽效果显著。同属中另一种植物皱叶酸模也有相同用途。

商陆，商陆科商陆属多年生草本，分布很广，几乎遍及全国。其粉剂对抑制棉花角斑病及稻热病的效果显著，对棉炭疽病有明显防治作用。水浸液对小麦秆锈病的防治效果明显。与甘草、连翘等原料制成MH11-4可湿性粉剂用于防治烟草花叶病。

淫羊藿，小檗科淫羊藿属多年生常绿草本，分布于浙江、安徽、江西、湖北、四川及福建等地。水浸液对小麦秆锈病及叶锈病夏孢子发芽、马铃薯晚疫病菌孢子发芽、棉花黄枯萎病菌孢子发芽抑制效果显著。

泽漆的水浸液对马铃薯晚疫病的抑制效果显著，对甘薯黑斑病菌孢子发芽抑制效果显著。

大戟，大戟科大戟属多年生草本，广布于我国东北至广东各地。水煮液、水浸液对小麦秆锈病夏孢子发芽抑制效果显著，水浸液对小麦叶锈病菌夏孢子发芽、棉花黄萎病菌孢子发芽抑制效果显著，对棉花枯萎病菌孢子发芽抑制效果明显。

马鞭草，马鞭草科马鞭草属多年生草本，分布几乎遍及全国。水浸液对小麦秆锈病菌夏孢子发芽及小麦叶锈病菌夏孢子发芽抑制效果显著。

益母草，唇形科益母草属草本，分布遍及全国。水浸液对小麦秆锈病菌夏孢子发芽抑制效果显著，对小麦叶锈病菌孢子发芽抑制效果明显，水浸液对小麦叶锈病、马铃薯晚疫病防治效果明显。

白曼陀罗，茄科曼陀罗属一年生草本，分布于河北、河南、江苏、浙江、福建等省。水浸液对小麦秆锈病菌夏孢子发芽、小麦叶锈病菌夏孢子发芽抑制效果显著，对小麦秆锈病、马铃薯晚疫病防治效果明显。

黄花蒿，菊科蒿属一年生草本，分布几乎遍及全国。水浸液对马铃薯晚疫病菌孢子发

芽、甘薯黑斑病菌内生孢子的抑制效果显著，水浸液还可杀红蜘蛛、蚜虫等；水煮液对小麦秆锈病夏孢子发芽抑制效果显著。同属中另一种艾蒿可防治红蜘蛛、棉蚜、菜青虫。水浸液对棉炭疽病有抑制效果，对小麦叶锈病、小麦秆锈病及马铃薯晚疫病有一定防治效果。干粉水煮液对小麦秆锈病夏孢子发芽抑制效果显著。

天名精，菊科天名精属多年生草本。水浸液对甘薯黑斑病孢子发芽抑制效果显著，对小麦叶锈病的防治效果显著，对小麦秆锈病的防治效果明显。水浸液对棉花黄萎病及枯萎病菌孢子发芽抑制效果显著。

菖蒲水浸液对小麦秆锈病有一定防治效果，对小麦叶锈病防治效果显著，对马铃薯晚疫病防治效果明显。

藜芦，百合科藜芦属多年生草本，分布于河北、陕西、山西、东北等地。粉剂对棉立枯病的抑制效果显著。还可防治蓟马、蚜虫、菜青虫等。

射干，鸢尾科射干属丛生草本，广布于全国。水浸液对小麦秆锈病夏孢子发芽、小麦叶锈病菌夏孢子发芽抑制效果显著，对小麦秆锈病有一定防治效果，对小麦叶锈病防治效果显著，对马铃薯晚疫病防治效果明显。

蛇床子，伞形科蛇床属二年生草本，分布于山西、内蒙古、东北、河南、河北、江苏等省区，较普遍。水浸液对小麦叶锈病菌夏孢子发芽、甘薯黑斑病菌孢子发芽抑制效果显著。对棉角斑病抑制效果为75%～100%。

思 考 题

1. 什么是非饲用饲草产品？有哪些种类？
2. 简述苜蓿芽菜的营养成分及制作工艺。
3. 简述工艺草产品的分类。
4. 简述工业用草产品的分类。
5. 简述牧草等草本植物在医药用品开发中的作用与前景。

参 考 文 献

[1] 张秀芬. 饲草饲料加工与贮藏. 北京：中国农业出版社，1992.

[2] 玉柱，贾玉山，张秀芬. 牧草加工贮藏与利用. 北京：化学工业出版社，2004.

[3] 曹致中. 草产品学. 北京：中国农业出版社，2005.

[4] 张明华. 中国草原经济植物资源及其开发利用对策. 中国草地，1997，5：74-77.

[5] 杨富裕. 非饲用草产品的开发与利用 // 中国草业发展论坛论文集，2006：121-124.

[6] 张春梅，王成章，胡喜峰，等. 紫花苜蓿的营养价值及应用研究进展. 中国饲料，2005，(1)：15-17.

[7] 贾生平. 苜蓿保健茶的制作. 农村百事通，2005 (10)：9.

[8] 乔秀红. 苜蓿汁饮料的研制. 食品加工，2002 (10)：92-93.

[9] 牟德华，杨会龙，李艳，等. 葛根、葛花的保健功能及其饮料的制作工艺. 食品工业科技，2000，21 (3)：55-56.

[10] 张洪路，周翠红. 葛根混合饮料的制作工艺. 保鲜与加工，2002 (3)：33.

[11] 于丽娜，张永忠，辛禹．红三叶草异黄酮在保健食品和医药中应用的研究进展．氨基酸和生物资源，2005，27（4）：65-68.
[12] 曾分有，周海燕，吴永尧．红三叶活性成分及其在保健食品和医药中的应用．现代生物医学进展，2007，17（3）：449-465.
[13] 郑建仙．功能性食品学．北京：中国轻工业出版社，2003.
[14] 张丽芳，张爱珍．膳食纤维的研究进展．中国全科医学，2007，11（21）：1825-1827.
[15] 周坚，肖安红．功能性膳食纤维食品．北京：化学工业出版社，2005.
[16] 于立河，李兴革，赵永焕．冬黑麦草中麦绿素、黑麦草膳食纤维的制取工艺研究．黑龙江八一农垦大学学报，2001，13（3）：6-9.
[17] 潘文洁，薛正莲，姜土．黑麦草膳食纤维的制备研究．中国调味品，2007，（5）：33-35.
[18] 刘朝霞，贾玉山，格根图，等．牧草中提取膳食纤维方法的研究．内蒙古草业，2006，18（14）：15-21.
[19] 王宗训．中国资源植物利用手册．北京：中国科学技术出版社，1989.
[20] 戴宝合．野生植物资源学．北京：农业出版社，1993.
[21] 何明勋．资源植物学．上海：华东师范大学出版社，1999.
[22] 刘胜祥．植物资源学．武汉：武汉出版社，1994.
[23] 中华人民共和国商业部土产废品局，中国科学院植物研究所主编．中国经济植物志（上、下册）．北京：科学出版社，1961.
[24] 谢碧霞，张美琼．野生植物资源开发与利用学．北京：中国林业出版社，1999.
[25] 胡玉熹．植物纤维纵横谈．植物杂志，1990，5：32-35.
[26] 朱应远．龙须草的生长习性、繁殖方法和高产栽培技术．资源开发与市场，1999，2：67-70.
[27] 徐进，张卫明，马世宏，等．葛根在化妆品中的应用初探．中国野生植物资源，2000，3：11-14.
[28] 潘建国．目前美国保健食品主要流行品种及发展趋势（一）．食品科技，2002，2：1-3.
[29] 潘建国．目前美国保健食品主要流行品种及发展趋势（二）．食品科技，2002，3：3-4.
[30] 于新，冯彤，张方明．绞股蓝保健软糖的工艺研究．食品科技，2002，2：32-35.
[31] 张雁，张孝祺，吴伟琪，等．葛根资源的开发利用．中国野生植物资源，2002，19（6）：26-30.
[32] 王薇．营养保健食品的发展与管理．食品科技，1995，2：8-21.
[33] 马忠武．人类益寿之友．植物杂志，1994，3：16-18.
[34] 霍丹群，侯长军．葛根保健食品的开发及利用．资源开发与市场，2000，16（1）：27-28.
[35] 于菊芳．生物农药的作用、应用与功效（二）——植物和动物源农药．世界农药，2001，23（2）：5-7.
[36] 张文吉．新农药应用指南．北京：中国林业出版社，2001.
[37] 土农药科学编辑委员会．中国土农药志．北京：科学出版社，1959.
[38] 刘学端，肖启明．植物源农药防治烟草花叶病机理初探．中国生物防治，1997，13（3）：128-131.
[39] 徐明慧．园林植物病虫害防治．北京：中国林业出版社，1990.
[40] 秦民坚．植物中的昆虫变态激素．植物杂志，1992（5）：5.
[41] 王建书．茄科植物体中的天然杀虫剂．植物杂志，1991（1）：46.
[42] 蔡素雯，杨军．食用叶蛋白的制备及其有效成分分析．西北大学学报：自然科学版，1997，27（3）：231-234.

[43] 赵士豪，马同锁，张红兵．紫花苜蓿酸奶的研制．食品工业，2007，3：52-54.
[44] Bolton J L．Alfalfa botany cultivation and utilization．London： Leonard Hill Books Limited, 1962.
[45] 祝美云，王成章．苜蓿食品的开发应用．食品科技，2007，4：56-58.
[46] 何春年，高微微，佟建明．苜蓿属植物的皂苷类化学成分．中国农学通报，2005，21（3）：107-108.
[47] Condny L R, Montgomery A, Houston M．The role of esterin processed alfalfa saponins in reducing cholesterol．Journal of the American Nutraceutical Association, 2001, 3(4): 1-10.
[48] Hoagland R E, Zablotowicz R M, Oleszek W A．Effects of alfalfa saponins on *in vitro* physiological activity of soil and rhizosphere bacteria．Crop Prod., 2001, 4(2): 349-361.
[49] 刘向阳，李道娥．叶蛋白食用研究概述．中国农业大学学报，1997，2（6）：96-100.
[50] 甘肃省科技厅．草产品加工贮藏与利用技术．兰州：甘肃人民出版社，2001.
[51] 中国油脂植物编写委员会．中国油脂植物．北京：科学出版社，1987.
[52] 董欣炜．紫花苜蓿叶蛋白提取工艺研究．重庆：西南大学，2006.
[53] 汪辉，周禾，高凤芹，等．能源草的研究与应用进展．草业与畜牧，2013，1：50-53.
[54] 李平，孙小龙，韩建国，等．能源植物新看点——草类能源植物．中国草地报，2012，32（5）：97-100.
[55] 贾玉山，侯美玲，格根图．中国草产品加工技术展望．草业与畜牧，2016，1：1-6.
[56] 王珺．茶艺．北京：机械工业出版社，2015.
[57] 于观亭．中国茶经．北京：外文出版社，2013.
[58] 苏拔贤．生物化学制备技术．北京：科学出版社，1986.
[59] 焦云鹏．酶制剂生产与应用．北京：中国轻工业出版社，2015.

第七章　农作物秸秆饲料化技术

【学习目标】

- 秸秆资源的重要性。
- 秸秆饲料化加工原理。
- 秸秆饲料化加工技术。
- 秸秆饲料贮藏技术。

第一节　农作物秸秆饲料化加工意义

《辞海》解释："秸：农作物的茎秆"，"秆：禾本科植物的茎"。农作物秸秆有广义和狭义之分，狭义的秸秆指田间秸秆，即收获作物主要农产品之后田间剩余的副产品，而广义的秸秆不仅包括田间秸秆，还包括农产品初加工过程中产生的副产品，比如花生壳、玉米芯、稻壳、甘蔗渣等。

国家发改委、财政部、农业部、环境保护部联合发布《关于进一步加快推进农作物秸秆综合利用和禁烧工作的通知》（发改环资〔2015〕2651号），进一步推进秸秆肥料化、饲料化、燃料化、基料化和原料化利用，力争到2020年，全国秸秆综合利用率达到85%以上。国家发展改革委办公厅、农业部办公厅联合发布的《关于编制"十三五"秸秆综合利用实施方案的指导意见》中，在秸秆饲料化利用重点利用领域指出，秸秆是牛羊粗饲料主要来源，要把推进秸秆饲料化与调整畜禽养殖结构结合起来，在粮食主产区和农牧交错区积极培植秸秆养畜产业，鼓励秸秆青贮、氨化、微贮、颗粒饲料等的快速发展。在秸秆种养结合示范工程中，要求在秸秆资源丰富和牛羊养殖量较大的粮食主产区，扶持秸秆青（黄）贮、压块颗粒、蒸汽喷爆等饲料专业化生产示范建设，重点支持建设秸秆青贮氨化池、购置秸秆处理机械和饲料加工设备，增强秸秆饲用处理能力，保障畜牧养殖的饲料供给。

从《国务院关于发展高产优质高效农业的决定》（国发〔1992〕56号）提出充分利用农区的大量秸秆发展养牛、养羊和其他草食动物，通过秸秆过腹还田，增加有机肥料，培育地力，降低成本，到《关于进一步加快推进农作物秸秆综合利用和禁烧工作的通知》，20多年来一直重视对农作物秸秆的饲料化利用。

一、农作物秸秆资源丰富

目前田间秸秆量估算的通用方法是利用国家统计部门或农业部门公布的作物经济产量，以及作物收获指数（又称经济系数）或者草谷比（又叫秸秆系数）计算得到。其中经济产

量指具有经济价值的农产品产量，收获指数指农作物经济产量与生物产量的比值，草谷比指农作物秸秆产量与经济产量的比值。全球前 5 个秸秆资源大国的秸秆生产状况见表 7-1。

表 7-1 2000 年全球前 5 个秸秆资源大国的秸秆生产状况

排序	国家和地区	秸秆总产量 /×10⁴ t	占世界百分比 /%	秸秆耕地单产 /(kg/hm²)	人均秸秆产量 /kg
	世界	438 862.37	100	3 210	725
1	中国 *	75 893.15	17.29	5 850	595
2	美国	69 925.19	15.93	3 945	2 477
3	印度	45 981.10	10.48	2 835	453
4	巴西	32 066.36	7.31	6 015	1 885
5	阿根廷	12 760.42	2.91	5 100	3 446

注：* 不含台湾省数据。引自毕于运等（2008）。

《关于进一步加快推进农作物秸秆综合利用和禁烧工作的通知》中，据调查统计，2015 年我国秸秆理论资源量为 10.4 亿 t，可收集资源量约为 9 亿 t，利用量约为 7.2 亿 t，秸秆综合利用率达到 80.1%。

在中国传统农业种植结构中，稻谷、小麦、玉米和豆类等是主要的农作物种植品种，这 4 类秸秆资源占总秸秆量的 80% 以上（表 7-2）。

表 7-2 2011 年中国主要农作物秸秆产量

秸秆种类	产量 /×10⁴ t	秸秆种类	产量 /×10⁴ t
稻草	20 100.1	豆秸	3 053.4
玉米秸秆	20 049.2	棉柴	1 976.7
麦秸	13 735.9	薯藤	1 865.6
甘蔗秸	4 920.7	花生秸	1 829.2

注：引自郭冬生和黄春红（2016）。

据估算，2005 年我国陆地植被年生长量即陆地生态系统中的全年净第一性生产力约为 16.13 亿 t 干物质，其中耕地生物质年产量为 155 497 万 t，占 59.51%。2005 年我国秸秆总产量约为 84 183 万 t，占当年全国农田生物质总产量的 54.14% 和全国陆地植被总生长量的 32.22%，分别相当于同年全国 23 574 万 hm^2 林地生物质年生长量的 1.36 倍、26 214 万 hm^2 牧草地总产草量的 2.55 倍和 1 155 万 hm^2 园地生物质（包括枝叶和果实等）年生长量的 7.75 倍。所以我国秸秆产量不仅在农田生物质总产量中占有 50% 以上的比重，而且明显高于林地、牧草地、园地等农用地的生物质年生长量或年产量，从而成为我国陆地植被生态系统中年产量最高的生物质资源。

二、秸秆饲料化可以促进草食畜牧业的发展

我国古代畜牧业的发展，不但提供了日常食用肉、奶等产品，而且供应了军事作战需要的大量马匹。在草场缺乏的农区，秸秆成为发展牧业养殖的主要饲料来源。《陈旉农书》

对秸秆作为饲料在《牧羊》篇中专门记载："新草未生之初，取洁净藁草细剉之，和以麦麸、谷糠或豆，使之微湿"。《全国草食畜牧业发展规划（2016—2020年》中指出，2015年秸秆饲料化利用量达2.2亿t，占秸秆资源总量的24.7%。通过大力推广秸秆青贮、微贮、气爆、压块等处理技术，支持专业化的秸秆饲料化利用企业发展，2020年秸秆饲料化利用量达2.4亿t，年均增长0.2%。

秸秆之所以能够在长期的养殖业发展进程中占据一席之地，是因为秸秆除了可以促进反刍动物瘤胃蠕动、维持机体健康，同时也提供一定的能量和蛋白质营养。而且秸秆的总能值并不低，只是由于木质化造成能量不易被消化利用（表7-3）。

表7-3　4种秸秆饲料的常规营养成分

饲料名称	CP	NDF	ADF	GE	RFV
玉米秸秆	5.70	63.31	38.23	16.89	67.35
稻草	5.37	62.92	37.90	14.95	68.25
麦秸	5.77	67.31	42.22	16.01	60.02
谷草	4.50	68.23	41.77	15.97	59.57

注：引自李洋等（2015）。

随着我国标准化规模养殖与农作物秸秆饲料化利用的快速发展，不同省市或地区的反刍动物对农作物秸秆饲料需求量和农作物秸秆饲料化利用量应当处于一定的平衡状态，充分发挥秸秆饲料的作用。

以玉米秸秆、小麦秸秆、水稻秸秆、豆类秸秆、薯类秸秆和花生秸秆为主，2008—2013年，我国农作物秸秆饲料化利用量呈逐年增长趋势，年均增长2.93%；同期我国农作物秸秆饲料需求量呈现波动增长的趋势，年均增长0.06%。从全国范围来看，2013年农作物秸秆饲料化满足度达到了134.43%，农作物秸秆饲料满足反刍动物对粗饲料需求。从31个省市满足度的空间分布规律来看，江苏、浙江和安徽等21个省（自治区、直辖市）农作物秸秆饲料化满足度为满足；广西和内蒙古（自治区）为基本满足；宁夏和贵州等8个省（自治区、直辖市）为不满足（表7-4）。

表7-4　中国31个省（自治区、直辖市）农作物秸秆饲料化利用量与反刍动物农作物秸秆需求量

×10⁴ t

省份（市）	饲料化利用量	饲料化需求量	省份（市）	饲料化利用量	饲料化需求量
内蒙古	800.98	747.49	江西	526.73	285.06
四川	858.02	797.63	安徽	900.28	271.13
西藏	8.15	490.33	江苏	872.96	110.58
甘肃	295.88	534.40	上海	27.09	9.55
青海	21.89	128.20	浙江	176.21	38.67
新疆	402.21	793.12	广东	349.72	224.42
黑龙江	1 720.28	580.07	广西	405.12	460.04
吉林	1 079.01	479.90	福建	162.43	86.90

续表 7-4

省份（市）	饲料化利用量	饲料化需求量	省份（市）	饲料化利用量	饲料化需求量
辽宁	687.52	486.35	海南	49.05	91.85
河北	1 015.24	624.24	山西	385.62	270.23
河南	1 793.62	1 199.91	陕西	342.46	258.09
山东	1 435.05	895.66	宁夏	102.78	203.18
北京	30.07	27.81	重庆	275.80	164.76
天津	52.03	31.74	贵州	247.02	484.84
湖北	656.39	413.69	云南	491.84	865.94
湖南	723.66	512.55			

注：引自楚天舒等（2016）。

曾经农作物秸秆在我国农区养殖业发展历程中发挥了巨大的作用，但是随着京津和南方发达地区工业化和城镇化的快速推进和环境保护压力增大，畜禽养殖业退养的步伐加快，农作物秸秆的饲料化利用呈现新的动态变化。

三、秸秆饲料化的社会意义

扎实推进秸秆饲料化，可以避免资源严重浪费，减少因秸秆焚烧导致的空气污染、雾霾频发等社会问题。1999 年，在作物收获季节大量秸秆被焚烧，严重污染空气的情况下，国家环境保护总局、农业部、财政部、铁道部、交通部、中国民用航空总局联合发布了第一份禁止秸秆焚烧的《秸秆禁烧和综合利用管理办法》（环发〔1999〕98 号）。

除了发改环资〔2015〕2651 号文件，2016 年 1 月 1 日起施行的《中华人民共和国大气污染防治法》，也明确规定："省、自治区、直辖市人民政府应当划定区域，禁止露天焚烧秸秆、落叶等产生烟尘污染的物质"。

中国农村秸秆露天焚烧平均比例为 20.8%，稻谷、玉米秸秆和麦秸是露天焚烧的三大作物秸秆，其对污染物排放的贡献合计约为 87%（表 7-5）。

表 7-5 秸秆露天焚烧的部分省区污染物排放清单 $\times 10^4$ t

	PM2.5	BC	OC	SO_2	NO_x	CO	NMVOC	NH_3	CH_4	CO_2
全国	138.1	6.4	41.1	8.7	41.8	594.6	94.4	8.0	44.2	15 355.4
河南	14.6	0.8	4.9	1.2	5.6	92.9	13.0	0.8	5.9	1 984.5
安徽	14.1	0.7	4.1	0.9	4.0	60.7	9.0	0.8	4.2	1 658.0
湖南	15.5	0.7	4.1	1.0	3.7	47.6	7.8	0.9	3.9	1 643.4
江苏	11.8	0.6	3.3	0.8	3.3	47.8	7.1	0.7	3.4	1 419.2
山东	10.6	0.4	3.7	0.7	4.0	60.8	9.3	0.6	4.1	1 002.1

注：不包括西藏自治区、天津市、上海市、港澳台地区。

引自彭立群等（2016）。

第二节　农作物秸秆饲料化加工原理

农作物秸秆是由大量的有机物、少量的无机物和水组成的，其有机物的主要成分是纤维素类的碳水化合物，此外还有少量的粗蛋白质和粗脂肪。碳水化合物是由纤维素类物质和可溶性糖类组成。农作物秸秆中的纤维素类物质可水解成可发酵的小分子糖，秸秆中原有的可溶性糖和水解后的小分子糖均可以作为发酵底物和能量来利用。

一、农作物秸秆化学组成

农作物秸秆组成成分复杂，包括纤维素、半纤维素、木质素、粗蛋白质、可溶性糖和粗灰分等，其中纤维素、半纤维素和木质素占据绝大部分的比重。

纤维素在水、酸、碱或盐溶剂中发生溶胀，可以进行碱性降解和酸性水解，以获得小分子的碳水化合物。半纤维素在酸性水溶液中加热时，其糖苷键能发生水解生成木糖、阿拉伯糖、半乳糖和甘露糖等单糖，且比纤维素水解的速度快。木质素的热稳定性较高。粗蛋白质、可溶性糖和灰分是重要的非结构性化合物，粗蛋白质主要由氨基酸构成，可溶性糖主要由小分子糖构成。

农作物稻秆的元素组成包括碳、氢、氧、氮、硫、磷、钾、钠、镁、铁、铜和锌等，如果各元素可以在动物体内消化吸收，均能发挥重要的营养、代谢和调节作用。

表 7-6　5 种农作物秸秆的组成成分

项目	麦秸	稻秸	玉米秸秆	油菜秸秆	棉花秸秆
纤维素 /%DM	38.26	41.30	37.24	41.63	38.27
半纤维素 /%DM	21.94	18.65	17.38	14.84	14.40
木质素 /%DM	21.73	18.51	23.13	19.95	27.68
可溶性糖 /%DM	1.68	5.15	6.24	0.94	2.39
粗蛋白质 /%DM	3.28	5.32	5.89	4.95	6.61
C/%DM	42.46	40.67	44.06	42.89	45.96
H/%DM	5.29	5.27	5.62	5.86	5.88
N/%DM	0.61	0.87	1.07	0.77	1.14
S/%DM	0.36	0.36	0.42	0.63	0.44
O/%DM	42.13	40.95	41.79	43.43	41.84
P/(g/kgDM)	0.57	1.21	1.07	0.81	1.46
K/(g/kgDM)	24.26	16.71	17.94	16.23	13.45
Na/(g/kgDM)	0.93	1.90	0.15	3.56	2.28
Ca/(g/kgDM)	2.09	2.76	1.91	7.78	3.43
Mg/(g/kgDM)	1.23	1.93	2.54	1.16	1.78
Fe/(g/kgDM)	0.49	0.34	0.42	0.22	0.14

续表 7-6

项目	麦秸	稻秸	玉米秸秆	油菜秸秆	棉花秸秆
Cu/(g/kgDM)	3.32	3.47	5.60	2.02	5.08
Zn/(g/kgDM)	7.97	26.73	13.77	12.89	9.47

注：纤维素、半纤维素、木质素测定参考 NREL 方法。引自牛文娟（2015）。

从动物营养的角度出发，木质素基本不可利用，其他化学组分则根据其可降解、可利用的程度而发挥相应的功能（表 7-7）。

表 7-7 4 种秸秆饲料养分瘤胃有效降解率

饲料名称	有效降解率 /%			
	DM	CP	NDF	ADF
玉米秸秆	39.89	36.33	40.34	30.96
稻草	29.94	33.02	35.60	29.59
麦秸	33.03	28.56	33.47	28.87
谷草	30.73	30.65	31.96	28.48

注：引自李洋等（2015）。

二、农作物秸秆木质纤维素

农作物秸秆饲料消化率低，究其原因是由本身化学分子结构和空间构型特点所决定的。植物细胞壁不仅决定植物细胞大小、形状和机械强度，还对植物形态发生、细胞生长和分化、细胞信号传导、水分运输以及应对外界刺激反应也起着重要作用，植物细胞壁主要由纤维素、半纤维素、木质素和壁蛋白等成分组成。

（一）木质纤维素单体

高等植物细胞壁主要分为两种类型：初生壁和次生壁。初生壁在细胞快速伸长过程中形成，主要包括纤维素、半纤维素、果胶和一些结构蛋白。次生壁沉积开始于植物细胞停止伸长时，次生壁要比初生壁厚，而且一般次生壁的沉积分为几层。植物次生壁半纤维素的主要组分为木聚糖，但不同类型细胞壁其支链的取代糖基不同。另外，次生壁中含有大量的木质素，能够提高细胞壁的防水性、强度和抵抗外界生物及非生物侵害能力。根据初生壁细胞壁多糖的不同，植物细胞壁可分为两种类型：Ⅰ型和Ⅱ型。Ⅰ型细胞壁代表植物为所有双子叶植物及非禾本科的单子叶植物，其半纤维素的主要组分为木葡聚糖，另外该类型细胞壁还含有更多的果胶。Ⅱ型细胞壁代表植物为禾本科的单子叶植物，其半纤维素组分主要为阿拉伯木聚糖。相比Ⅰ型，Ⅱ型细胞壁具有更高的纤维素含量、更少的果胶和蛋白质含量。

1. 纤维素

纤维素是 *D*- 葡萄糖以 *β*-（1, 4）- 糖苷键连接起来的无分支链状高分子化合物，以水平翻转 180° 的 2 个葡萄糖为单位，平行排布。纤维素的每个葡萄糖基环上有 3 个活泼羟

基，即 2 个仲羟基和 1 个伯羟基。因此，纤维素可以发生一系列与羟基有关的化学反应，包括醚化、酯化和接枝共聚等，生成相应的纤维素衍生物。纤维素中存在大量的结晶区和非结晶区以及氢键，因而其晶体结构非常牢固，所以纤维素在一般条件下很难溶解于常见溶剂。

纤维素是由许多纤维素大分子链组成，纤维素大分子链上的羟基通过氢键作用形成具有结晶结构的纤维素（图 7-1），天然纤维素一般为 Iα 和 Iβ 两种类型，这两种类型同时存在，在不同的物种中其比例不同。纤维素结晶度用来表示聚合物中结晶区域所占的比例。纤维素的结晶结构在很大程度上成为酶解纤维素的主要屏障。纤维素晶体结构表现为结晶区和非结晶区交替连接存在，结晶区内纤维素分子规则排列，分子链排列平行，非结晶区（无定形区）高聚物分子链状结构排列不紧密。高结晶度的纤维素不利于酸水解的进行，通过纤维素消晶化及晶型结构的改善，进而增加纤维素的可及度，可以提高纤维素的水解效率。

纤维素聚合度（polymerization degree，DP），等于纤维素样品总糖量和还原末端量的比值，需要分别测量纤维素样品的总糖量和还原末端的量。聚合度可衡量聚合物分子大小，是纤维素高聚物大分子链上基本结构单元数量。纤维素分子链一般由 300～15 000 个葡萄糖基所构成，其化学结构分子式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$，n 即表示纤维素聚合度。纤维素酸水解过程当中，纤维素聚合度起初降低十分迅速，且极易达到其极限聚合度，之后聚合度很难再降低，低聚合度严重阻碍了酸解的进行。

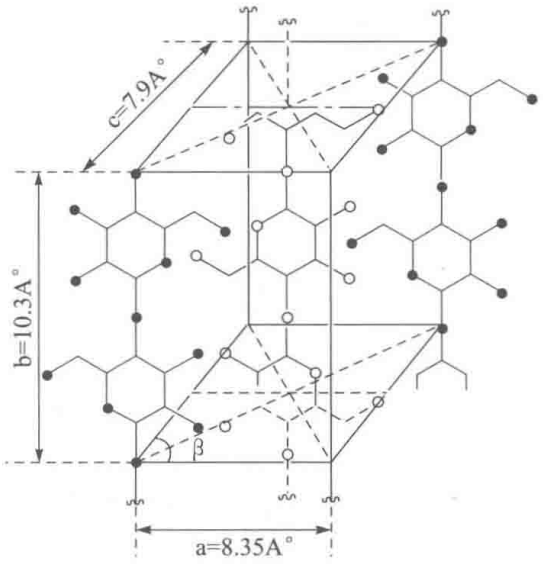


图 7-1　纤维素 I 晶胞结构

引自陈明凤（2011）

2. 半纤维素

半纤维素是由两种或两种以上的单糖组成的不均一高聚糖，由于其化学结构的不均一性，天然半纤维素为非结晶态且分子量相对低的多位分枝性的聚合物，其聚合度为 80～200。半纤维素的分子式通常以戊聚糖 $(C_5H_8O_4)_n$ 和己聚糖 $(C_6H_{10}O_5)_n$ 表示。

半纤维素结构复杂，它们通过氧键与纤维素连接，以共价键（主要是 α- 苯醚键）与木质素相连，以酯键与乙酰基及羟基肉桂酸连接。半纤维素主要是聚 -O- 乙酰基 -4-O- 甲基 - 葡萄糖醛酸木糖，主链是（1 → 4）-β- 吡喃型木糖，平均每 10～20 个木糖单元连接有一个 α-（1 → 2）-4-O- 甲基 - 葡萄糖醛酸。由于其结构无序化程度很高，所以其结晶度和抵抗结构变化的能力比纤维素弱（表 7-8）。

表 7-8　植物初生壁及次生壁中半纤维素种类及分布

多糖	占细胞壁多糖的比例 /%					
	双子叶植物		禾草		裸子植物	
	初生壁	次生壁	初生壁	次生壁	初生壁	次生壁
木葡聚糖	20～25	微量	2～5	微量	10	—
葡糖醛酸木聚糖	—	20～30	—	—	—	—

续表 7-8

多糖	占细胞壁多糖的比例 /%					
	双子叶植物		禾草		裸子植物	
	初生壁	次生壁	初生壁	次生壁	初生壁	次生壁
葡糖醛酸阿拉伯木聚糖	5	—	20～40	40～50	2	5～15
葡甘露聚糖	3～5	2～5	2	0～5	—	—
半乳葡甘露聚糖	—	0～3	—	—	+	10～30
β-(1→3，1→4)- 葡萄糖	缺失	缺失	2～15	微量	缺失	缺失

注：引自 Scheller 和 Uivskov（2010）。

β-(1→3, 1→4)- 葡萄糖（MLG）是草本植物特有的半纤维素结构，在初生壁中的含量较高，而在次生壁中含量较低。MLG 不仅是细胞壁的结构组分，同时也是贮存性多糖，在胚乳中含量比较丰富，具有较高的经济及饮食健康价值。

3. 木质素

木质素是一种复杂的、非结晶的、三维空间网状结构的无定型芳香性高聚物，由愈创木基（G）、紫丁香基（S）及对羟苯基（H）结构单元组成，依照苯丙烷侧链取代基的不同，可将木质素分为芥子醇、对香豆醇和松柏醇。G 型单体的聚合和交联相比 S 型单体更能阻碍初生细胞壁多糖的降解；不过 G 型单体较后者有更多的分枝，S 型单体结构则更加线型，从而使之能够伸入次生细胞壁层，相比 G 型单体能更有效阻碍次生细胞壁被降解。由于玉米中较低水平的 S 单体木质素，因而用其饲喂动物能获得更高的肉、奶产出和饲料消化率。

在植物体内木质素与纤维素、半纤维素等一起构成超分子体系，并作为纤维素的黏合剂，增强植物体的机械强度。通过对各类木质素结构模型的研究发现，木质素基本上都是由苯丙烷基单元（C_6—C_3）经碳碳键和碳氧键相互连接和无规则耦合而成的。其单体主要是 β-O-4 连接，还有部分的 α-O-4，5-5 等联合构型。

木质素可从细胞生长的初期就开始积累直到细胞死亡，甚至细胞死亡后木质素的积累还在继续。饲料中的木质素含量和甲基化程度会影响反刍动物对碳水化合物的消化与吸收。

（二）木质纤维素互作

细胞壁木质纤维素各组分间存在相互作用，由于各组分结构的复杂性，使得解析纤维素、半纤维素及木质素三大组分间的互作仍比较困难。

1. 纤维素与半纤维素之间的互作

早期认为半纤维素能通过非共价键同纤维素紧密相连，并提出了“捆绑模型”，该模型认为半纤维素与纤维素表面紧密互作，并将纤维素微纤丝捆绑在一起。另外，在水溶液环境下木葡聚糖（双子叶植物初生壁半纤维素主要组分）只能单层与纤维素互作，即细胞壁中的半纤维素组分不会重叠呈多层覆盖在纤维素表面，而且这一过程不可逆。

Park 和 Cosgrove（2015）根据初生壁半纤维素酶活性及其突变体表型研究，提出了半

纤维素与纤维素互作的“化学热点”假说（图 7-2）。“化学热点”假说表明，只有少部分半纤维素用于连接纤维素微纤丝，在植物细胞生长过程中，半纤维素酶将“捆绑”在一起的微纤丝解开，使细胞顺利延伸。因此，要有效降解该细胞壁结构需要半纤维素酶与纤维素酶协同作用。

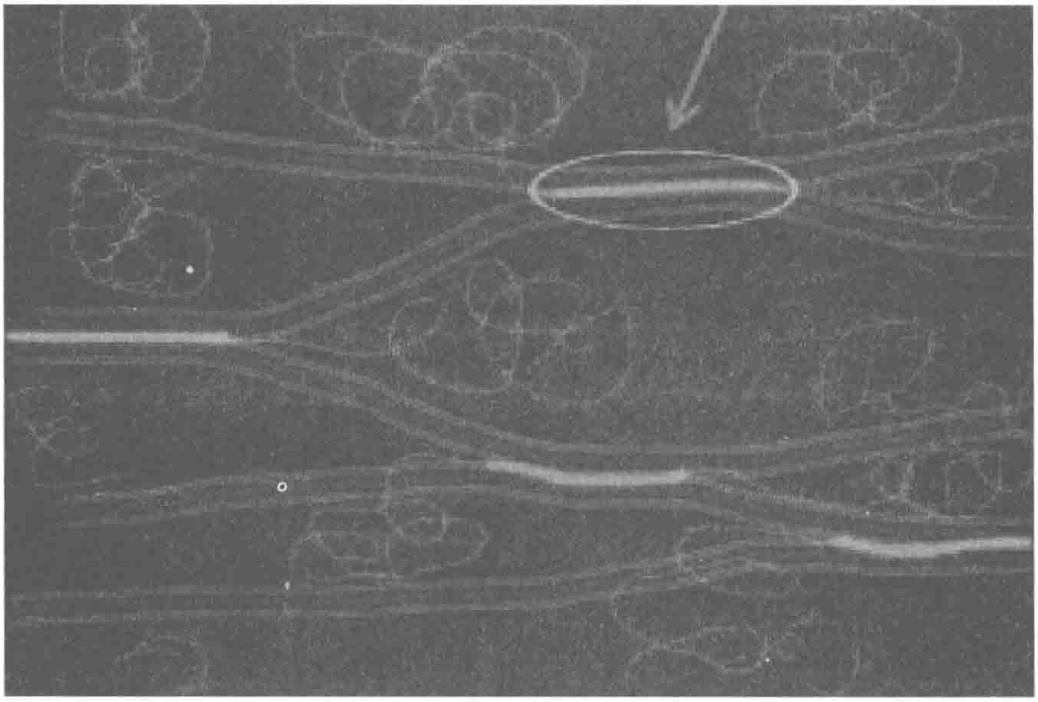


图 7-2　纤维素与半纤维素互作的“热点模型”

引自 Park 和 Cosgrove（2015）

半纤维素比例和组分，都会影响纤维素与半纤维素的互作。芒草半纤维素与纤维素结晶度呈显著负相关，半纤维素能够将纤维素微纤丝分离开，降低纤维素结晶度从而提高纤维素降解效率。半纤维素中的木糖 / 阿拉伯糖是影响芒草生物质降解的关键细胞壁结构因子。

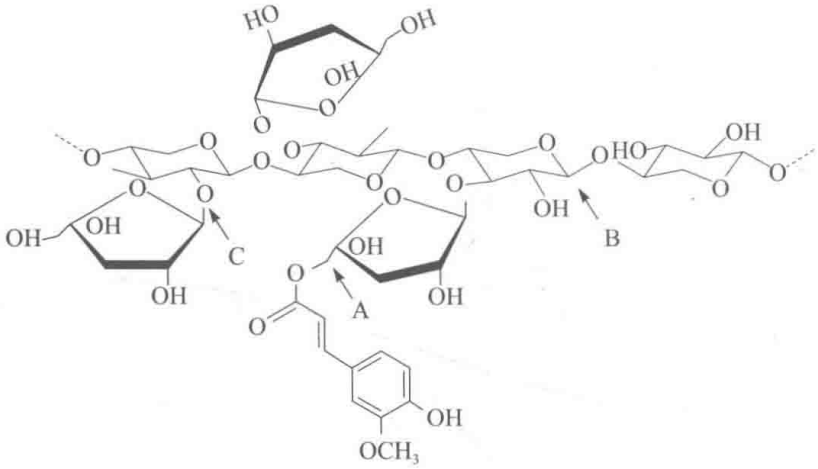
2. 半纤维素与木质素之间的互作

木聚糖与木质素相连可以通过取代基葡萄糖醛酸与木质素形成的酯键，或取代基阿拉伯糖、木糖与木质素形成的醚键相连。木聚糖上的阿拉伯糖能与阿魏酸形成阿魏酸酯键，阿魏酸化的葡糖醛酸阿拉伯木聚糖只在禾本科单子叶植物中发现（图 7-3）。

三、农作物秸秆饲料化加工原理

植物细胞壁中的纤维素、半纤维素和木质素本身难溶、难降解，彼此之间还通过复杂的结构连接从而增加了降解的难度，形成所谓的生物质的抗降解屏障。虽然半纤维素组分在酸性条件下易于水解，水分子与糖环上的羟基竞争质子并形成氢键，从而弱化了 C—C 键和 C—O 键，反应路线可能随 C—C 键和 C—O 键的相对稳定而改变。半纤维素水解产生的糖在酸性溶液中会进一步降解，由于糖环上羟基质子化重排和不同反应条件下水分子结构的差异，使得糖的降解途径多变而且产物复杂。半纤维素在碱性溶液中可以发生剥皮反

应及碱性降解反应；半纤维素也可以在特定酶的作用下发生酶解反应。但是半纤维素一般和纤维素交织在一起，由木质素包裹着，结构十分复杂且不确定。秸秆饲料加工时，需要预先处理打破抗降解屏障，对纤维素去晶或者转晶化，提高纤维素降解效率（图 7-4）。


HO
OH
OH
O
OH
OH
OH

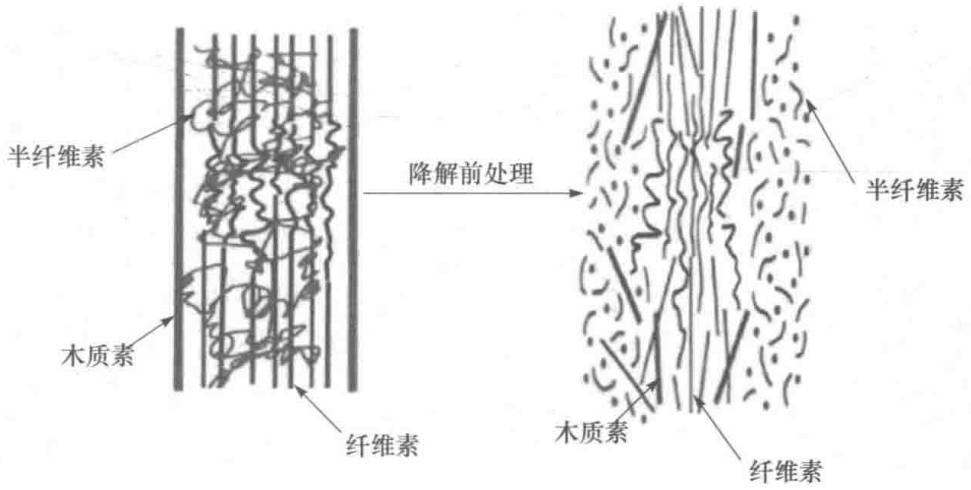


图 7-4　木质纤维素降解前处理示意图

引自 Kumar 等（2009）

面沉积下来。这些沉积在纤维表面以及细胞壁内的木质素对纤维素酶解有一定的抑制作用。因此木质纤维素原料在热处理后接着用热水洗涤，可以有效冲洗掉这些木质素颗粒（图 7-5），从而增加酶与纤维素底物的接触面积，进而提高酶解糖化率。

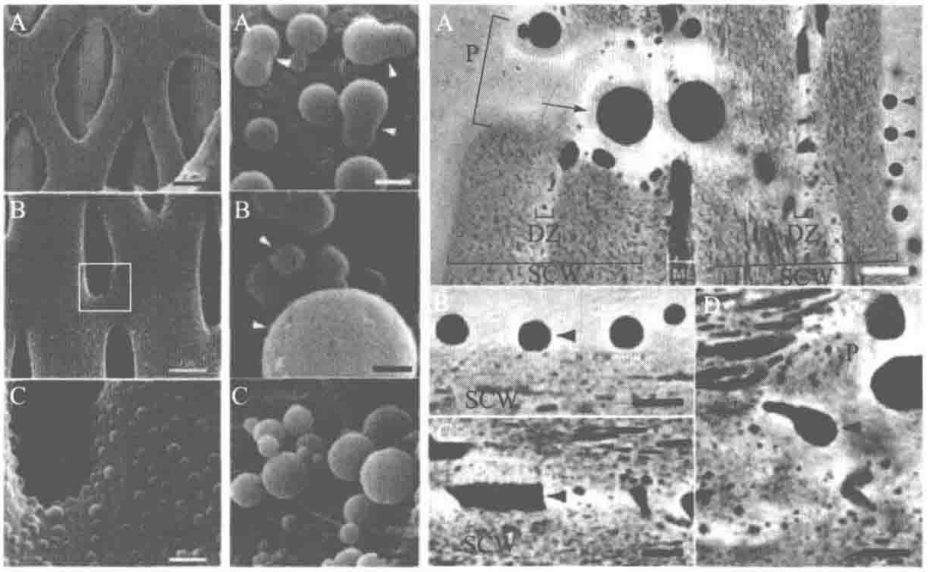
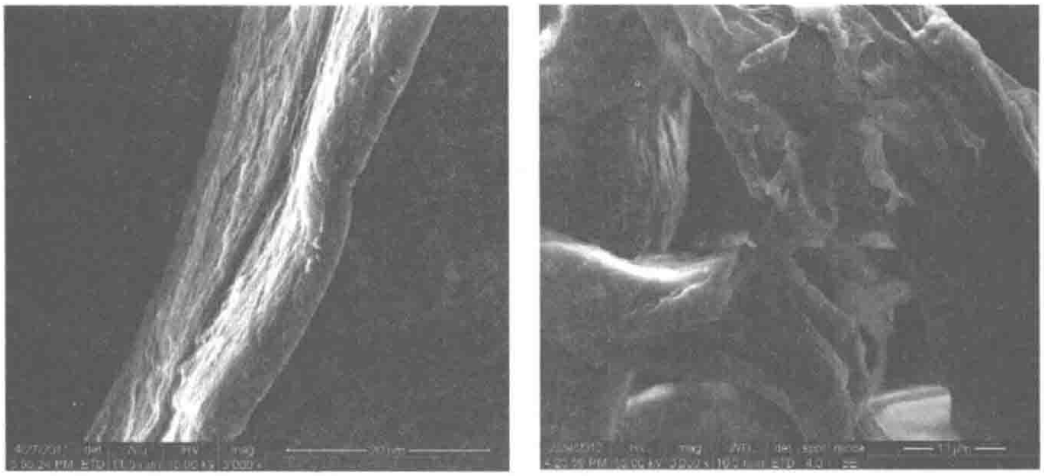


图 7-5　玉米秸秆细胞壁经过稀酸预处理后通过扫描电镜和投射电镜观察到的木质素微球

引自 Donohoe 等（2008）

2. 纤维素去晶化

机械粉碎处理如用球磨、振动磨、辊筒等将纤维素原料进行粉碎处理，纤维素的长链被粉碎成更小的链段，结晶度下降，分子量也同时下降，随着对原料粉碎程度的加大，其表面积增大，结晶度降低。破碎、研磨等机械手段将生物质变成的 10～30 mm 的切片或 0.2～2 mm 的颗粒。微波处理改变了纤维素的晶型，晶型向次晶转化。超声波处理可以降低纤维素结晶度，增加纤维素酶对纤维素的可及度。对于分子量较大和结晶度较高的纤维素，在纤维素的溶剂体系中，纤维素并不能完全溶解，但这些溶剂可以对纤维素起到溶胀作用，这有利于纤维素的后续处理（图 7-6）。



原料纤维素　　消晶纤维素

图 7-6　纤维素消晶前后对比

引自徐诚（2012）

蒸汽爆破后纤维素分子内部氢键被破坏，结晶度下降，在适当的条件下，纤维素的分子量变化不大。

纤维素底物的可及度作为表征纤维素微纤丝与降解纤维素酶分子之间可接触面积大小的一个特征值，其有着十分重要的意义，可利用纤维素底物的比表面积值来表示它。

3. 贮留易溶养分

秸秆饲料除了不易利用的木质纤维素以外，还含有淀粉以及可溶性碳水化合物、含氮化合物、矿物元素等。在秸秆饲料化加工过程中，应当尽量保证可被高效利用的养分不被破坏，而且尽可能增加可利用养分的比例。

第三节　农作物秸秆饲料化加工技术

农作物秸秆是一种具有多种用途的可再生生物资源，其富含氮、磷、钾、钙、镁和有机质等。由于秸秆的化学组成复杂，纤维素、半纤维素和木质素之间又存在着不同的结合力，使得秸秆结构稳定，生物降解效果较差，利用率较低。传统的秸秆饲料化加工包括物理加工、化学加工、生物加工。物理加工又包括机械加工、微波加工、高能辐射加工、高温分解加工。化学加工包括稀酸加工、氨化加工、碱化加工和氨碱复合加工。生物加工包括青贮、酶解、发酵。

一、秸秆饲料物理加工技术

秸秆的物理加工工艺相对比较成熟。机械加工是用机械设备将秸秆切割、粉碎，将秸秆搓成丝状或者条状，以增加饲料和动物消化液的接触面积，使其混合均匀，提高饲料的利用率以及动物的适口性。高温分解加工则是利用热喷或者膨化技术破坏纤维素的结晶，撕断纤维素、半纤维素与木质素的紧密联系，减少木质素对纤维素分解的障碍，增加接触面积，使纤维素消化酶以及微生物可以降解纤维素，从而增加动物的采食量，提高秸秆的

消化利用率。

1. 粉碎加工

粉碎加工是对秸秆原料施加外力，使其分裂为尺寸更小的颗粒。秸秆粉碎是最常见的加工工艺。秸秆粗粉碎样品经机械预处理后，水溶性总糖及还原糖含量升高，并且随秸秆颗粒减小而上升，若粒径分布相似则还原糖含量和水溶性总糖含量也相近，球磨处理后秸秆水溶性总糖含量最高（图 7-7）。

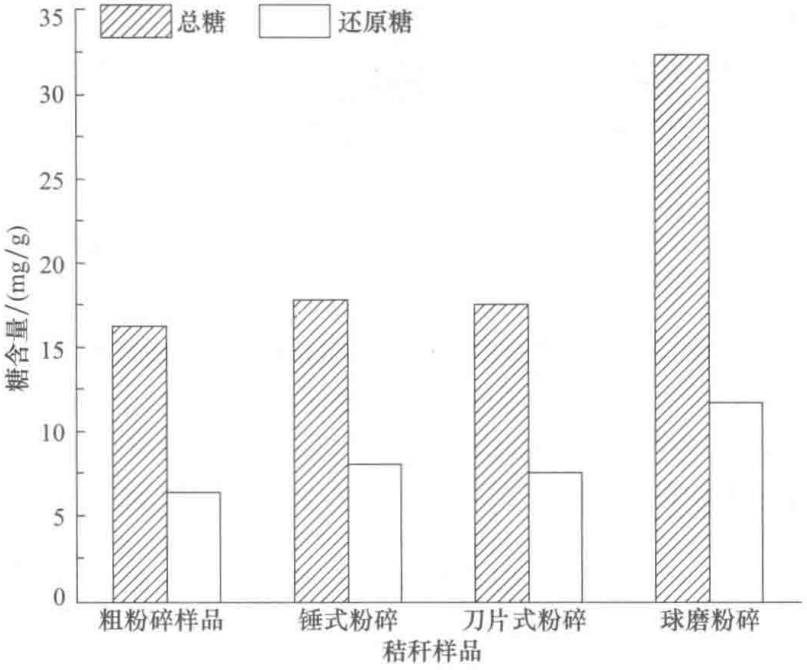


图 7-7　玉米秸秆不同粉碎方式还原糖及水溶性糖含量

引自王璐璐（2014）

机械处理改变了纤维质材料固有的超微结构，使其聚合度降低，各主要成分的分布受到影响，并且纤维素间的氢键断裂，无定形区和结晶区遭到破坏，半纤维素暴露，同时这些暴露的半纤维素在粉碎过程中部分因受到机械力作用被剪切，使得单糖或寡聚糖从多糖分子链上脱落，从而导致水溶性总糖以及还原糖含量增加（图 7-8）。玉米秸秆经球磨处理后增加的水溶性糖主要来自半纤维素分子链的断裂。

2. 热喷加工

热喷加工是将初步破碎（或不经破碎）的秸秆装入压力罐内，在 1 471～1 961 kPa 下加压，持续 1～30 min，然后突然降压喷放即得热喷饲料。秸秆经热喷处理后，纤维细胞撕裂、细胞壁疏松、细胞游离，物质颗粒会骤然变小，颗粒的总面积增大，从而得到质地柔软和味道芳香的饲料。

3. 膨化加工

膨化加工是将含有一定水分的秸秆原料放在密闭的膨化设备中，经过高温、高压处理一定时间后，迅速降压，使饲料膨胀的一种处理方法。秸秆膨化加工后可明显增加可溶性成分和可消化吸收的成分，饲用价值得到提高。

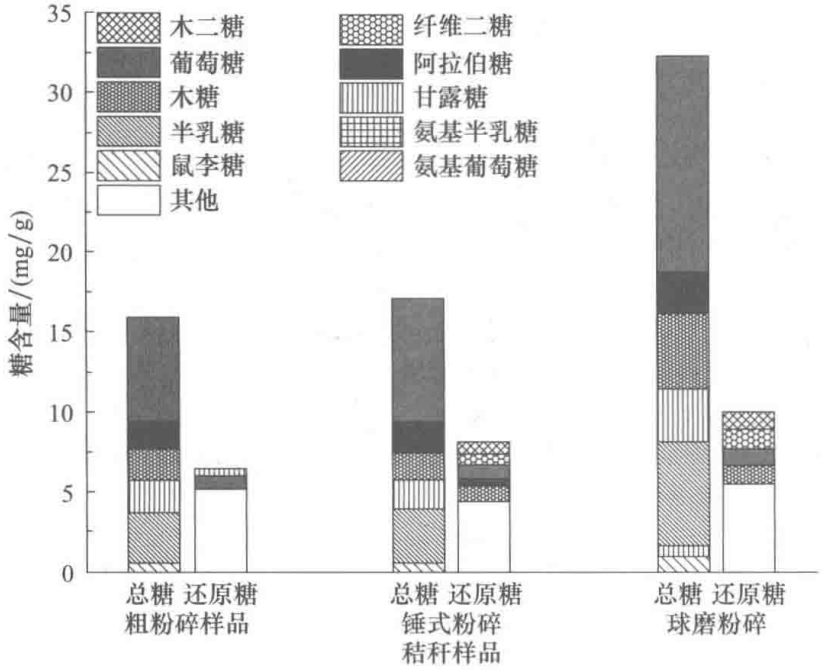


图 7-8 玉米秸秆不同粉碎方式水溶性糖的糖组成

引自王璐璐（2014）

二、秸秆饲料化学加工技术

化学预处理方法主要有酸、碱、湿氧化法、臭氧法、有机溶剂等，处理的目的主要是降低纤维素的结晶度，除去木质素。

1. 稀酸加工

稀酸加工是将秸秆浸泡在稀酸溶液中，或将酸稀释到一定程度后喷洒到秸秆上，然后加热到 140～200℃并反应一定时间（几分钟到 1 h）。采用稀硫酸等酸性物质处理秸秆，可将一部分半纤维素水解为单糖，又可打破半纤维素和木质素对纤维素的包覆，使纤维素更易被酶解和消化，从而提高秸秆的降解率。

在酸性条件下，纤维素的溶解虽然很少，但是其中的 β-(1,4)- 糖苷键或其他糖苷键会发生水解断裂，从而使得纤维素的聚合度降低。稀酸释放的氢离子与水结合形成水合氢离子（H_3O^+），可导致半纤维素中糖苷键的选择性水解，其水解过程与组成的糖基种类和结构类型有关，也与半纤维素聚合度及支链数量和长度有关。酸性环境下，木质素发生的最主要的反应就是芳基醚键（即 β-O-4 键）的断裂与缩合，木质素会发生降解，并脱除小部分木质素。

2. 稀碱加工

稀碱加工是将秸秆在碱的作用下可脱除部分半纤维素和木质素，有利于纤维素的消化和利用。碱水解的机理是利用 OH^- 使木质素的醚键断裂，削弱纤维素和半纤维素的氢键及皂化半纤维素和木质素之间的酯键。随着醚键的减少，部分木质素溶解于反应液中，同时使纤维素膨胀，半纤维素溶解，原料的空隙率增加，碱处理后的原料中纤维素明显得到润胀，纤维素结晶指数降低，纤维素结晶区受到破坏，物料更易于酶解。

常用的加工试剂主要包括氢氧化钠（NaOH）、碳酸钠（$NaCO_3$）、氢氧化钙［Ca（OH）$_2$］、液氨、石灰（CaO）等。

在碱性条件下，纤维素和半纤维素会发生降解反应。尤其在高温强碱作用下，纤维素大分子会水解断裂，变成两个甚至多个断链分子，由一个还原性末端基变成两个或多个还原性末端基，因而又会促进剥皮反应，即还原性葡萄糖末端基逐个剥落的反应。由于还原性末端基对碱不稳定，通过 β- 烷氧基消除反应而从纤维素分子链上剥落下来，产生的新还原端又会重复上述反应。在高温碱性条件下，半纤维素的活性比纤维素的活性高很多，容易发生溶解并迅速分解。其中脱乙酰化反应速率最快且反应程度最完全，而各种糖基的降解速率不同。

三、秸秆饲料物理化学加工技术

1. 蒸汽爆破

蒸汽爆破主要包括自水解和爆破两个过程。蒸汽爆破通常采用高压饱和蒸汽在温度160～240℃（对应的压力为600～3 400 kPa）条件下处理原料，使其充分地发生自水解，时间维持几秒钟到几分钟，之后释放压力。自水解过程释放的乙酸和其他酸催化半纤维素水解。在高温下，水也作为酸催化反应。同时，胞间层的木质素软化并部分降解，从而削弱了纤维间的粘连作用。爆破过程迅速地降压使原料中的气相介质喷出、膨胀、对外做功，细胞从胞间层解离成单个纤维细胞，从而增加了原料的酶解可及性（图 7-9）。

蒸汽爆破过程中存在以下 4 个方面的作用：类酸性水解的作用及热解的作用；类机械断裂作用；纤维素氢键破坏作用；纤维素结构重排作用。

蒸汽预处理过程中，由于木质素会发生缩合和沉积现象，使得其对纤维素酶有着较高的非特异性吸附，降低了原料中纤维素酶的消化性（表 7-9）。

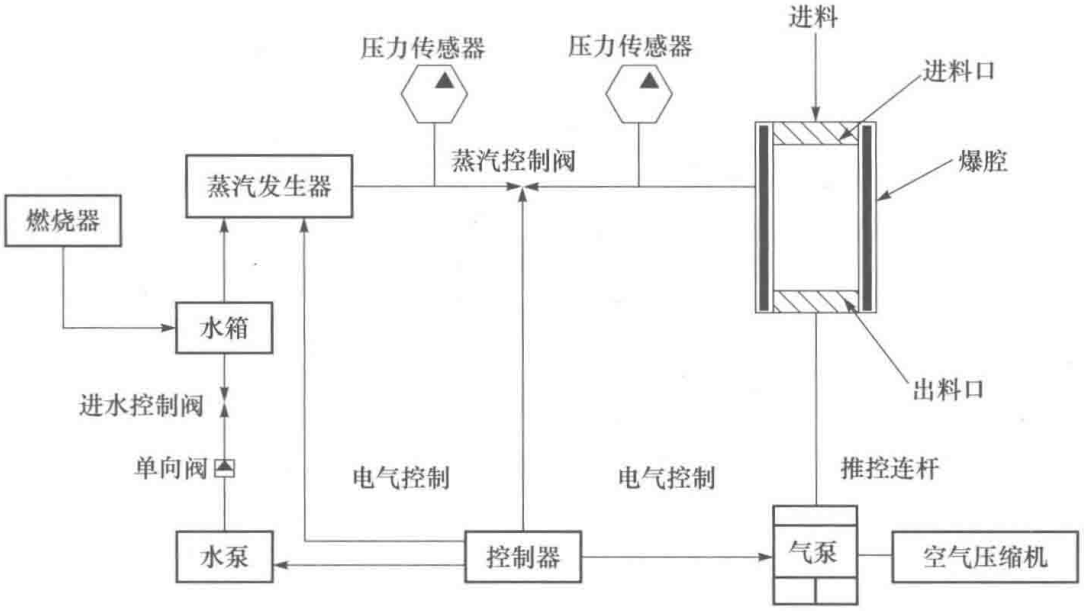


图 7-9　汽爆机工作原理图

引自李彬等（2013）

表 7-9 不同处理组秸秆中的主要成分 %DM

样品	NDF	ADF	纤维素	半纤维素	木质素
普通玉米秸秆	79.26	59.23	41.30	20.02	12.58
爆破玉米秸秆	60.94	51.12	37.80	9.92	7.97

注：引自常娟等（2016）。

2. 氨爆破预处理

氨爆破处理是利用液态氨在相对较低的压力和温度下将原料处理一定时间，然后突然释放压力爆破原料。氨爆破过程中，纤维素的晶体结构被破坏，部分木质素或半纤维素降解，大部分的半纤维素和纤维素保留下来得以充分利用。氨爆破预处理提高了纤维素的酶解率，提高了物料的含氮量，利于微生物发酵，液氨还可以回收，循环使用，整个过程能耗较低。

3. 高温热水预处理

不加任何催化剂，使原料在高温水中维持一定时间。其目的是通过自水解作用将木质纤维素中的半纤维素溶解，从而增加纤维素的酶解可及性，同时避免副产物的生成。为了避免生成抑制剂，预处理 pH 应控制在 4～7。

四、秸秆饲料生物加工技术

生物加工一般是利用自然界中存在的微生物选择性地降解植物纤维素原料中的木质素，从而改善纤维素的酶解性能。近年来，在处理秸秆中研究较多的微生物包括乳酸菌、地衣芽孢杆菌、酵母菌、白腐真菌和 EM 菌等。秸秆通过生物预处理可分解和矿化其木质素。

木质素在传统营养学上被认为是不能被降解的物质，但近来越来越多的研究报道认为，木质素可以被瘤胃微生物降解。虽然瘤胃微生物可以降解木质素，但相比其他营养成分，其降解率依然很小。而且由于木质素对纤维素、半纤维素的保护作用，致使瘤胃降解纤维素、半纤维素的酶无法充分接触到底物，从而影响了反刍动物对粗纤维的消化利用率。

在自然界中，微生物降解纤维素的策略有 5 种，得到深入研究的主要有两种降解策略：大多数丝状真菌及放线菌中的游离纤维素酶系统，是通过相互独立的各个酶组分独立地降解，这种酶系统称之为非复合纤维素酶系统；在厌氧细菌中，纤维小体是一个通过支架蛋白将不同的纤维素酶进行聚集，从而对纤维素进行高效的协同降解，这种酶系统称之为游离纤维素酶系统。

（一）秸秆饲料菌群加工技术

菌群加工是利用可降解木质纤维素的单一或者复合菌群，作用于秸秆原料，降解木质纤维素，提高可发酵底物比例。

1. 单一菌群加工技术

关于木质素的微生物降解的研究主要集中于真菌对木质素的降解。常见的能够降解

木质素的真菌共分为3类，分别是：白腐菌、褐腐菌和软腐菌。其中白腐菌的降解能力最强，是自然界中最主要的木质素降解菌。研究得较多的白腐菌有：黄孢原毛平革菌（*Phanerochete chrysosporium*）、射脉菌（*Phlebia radiata*）、变色栓菌（*Thametes verisicolor*）、虫拟蜡菌（*Ceriporiopsis subvermispora*）、烟管菌（*Bjerkandera adusta*）等。其中，黄孢原毛平革菌更是由于其突出的木质素降解能力，而成为真菌降解木质素研究的模式菌株。白腐菌在降解木质素过程中主要通过分泌几种类型的胞外氧化还原酶催化氧化木质素，这些酶分别是木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶、多功能过氧化物酶以及漆酶。

自然界中绝大多数细菌难以降解木质素，已经筛选到的能够降解木质素的细菌大多数属于好氧细菌，只有少数在厌氧情况下能生长，另外也有极少数细菌能在极端环境中降解木质素。能够降解木质素的好氧细菌种类繁多，主要集中在放线菌门（Actinobacteria）、变形菌门（Proteobacteria）和厚壁菌门（Firmicutes）等。放线菌门包括链霉菌（*Streptomyces*），微杆菌（*Microbacterium*）和红球菌（*Rhodococcus*）等，变形菌门包括假单胞菌（*Pseudomonas*），伯克霍尔德菌（*Burkholderia*）以及肠杆菌（*Enterobacter*）等。少数厌氧细菌也能够降解木质素，如脱硫微菌（*Desulfomicrobium*）。细菌通过分泌多种过氧化物酶降解木质素，大量降解木质素的放线菌都具有胞外过氧化物酶活性。细菌除了通过分泌过氧化物酶降解木质素，也能通过分泌漆酶降解木质素。与真菌漆酶相比，细菌漆酶具有更好的热稳定性和更宽的最适pH范围以及更耐受Cl^-等优良特性。

2. 复合菌群加工技术

复合菌群是有两种或两种以上的微生物共同培养、相互作用、相互影响，最终能发挥出群体优势的微生态系统。目前复合菌群构建主要来自人工构建和使用各种方法从自然界中分离。人工构建复合菌群主要是通过从自然界分离的已知的纯菌进行简单混合或者通过化学计量学方法进行优化后所构建的、比复合菌中单个微生物有更好降解效果的微生物组合。目前我国市场上流通的复合菌剂来源主要有3种，这其中比较有名包括诺维信的产品、Bioform的产品以及有效微生物（EM）。

通过傅立叶红外光谱（FTIR）、核磁共振氢谱（^{1}H-NMR）、扫描电镜（SEM）及气质联用色谱（GC/MC）等技术对玉米秸秆的微观结构及降解产物进行表征。发现2株具有木质素和纤维素降解能力的解淀粉芽孢杆菌复合菌剂可以有效降解玉米秸秆中的木质纤维素。在发酵24 d时，玉米秸秆中木质素、纤维素和半纤维素的降解率分别达到48.4%、30.5%和41.4%。FTIR和^{1}H-NMR谱图中能观察到木质纤维素分子结构中主要连接共价键，如木质素单体间的β-O-4和β-β键，木质素与碳水化合物连接键以及碳水化合物中糖环内的价键等明显断裂，木质纤维素被部分降解；SEM扫描电镜图则显示发酵后秸秆的组织结构出现松散和破坏（图7-10）。发酵后秸秆中小分子物质的GC/MS分析结果显示，其中包含苯丙胺和苯丙酸等保留苯丙烷结构单元的木质素单体衍生物以及苄醇和苯甲酸酯类等木质素单体被进一步降解后的芳香族化合物。玉米秸秆中碳水化合物的GC/MS分析结果表明：复合菌剂可将玉米秸秆中的结构性多糖等大分子碳水化合物降解成葡萄糖、木糖、甘露糖及乳糖等还原性单糖，并利用这些还原性单糖生长代谢，进一步产生乙二醇、丙三醇及短链脂肪酸类等代谢产物。

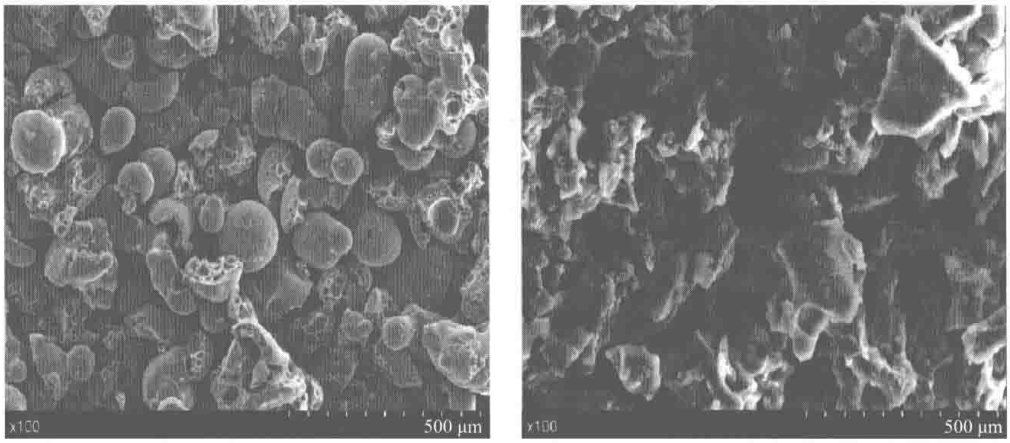


图 7-10 *Bacillus ligniniphilus* L1 降解木质素前（左）后（右）的扫描电镜图

引自谢长校（2016）

（二）秸秆饲料酶加工技术

酶加工是将有效酶剂作用于秸秆原料，降解木质纤维素，提高秸秆饲料中的可利用养分比例的过程（表 7-10）。

表 7-10 不同酶及组合处理对青贮水稻秸秆微观结构的影响

组别	纤维素 /%DM	半纤维素 /%DM	木质素 /%DM	聚合度	结晶度	比表面积
水稻稻秸	33.884	26.422	4.516	430	47.52	1.11
青贮对照	41.984	24.619	4.129	380	45.53	1.12
复合酶制剂	39.368	26.891	4.188	277	42.85	1.15
果胶酶 + 漆酶	39.052	23.681	4.172	265	42.51	1.14
复合酶制剂 + 果胶酶 + 漆酶	37.101	26.233	4.000	166	40.18	1.20

注：引自王玉荣等（2017）。

酶是一种具有生物催化功能的高分子物质，多为蛋白质。它和一般催化剂相似，能在用量少的情况下而实现高效率催化，且在加快催化反应速率的同时，本身不被消耗。木质纤维素降解酶主要是通过微生物发酵制得。

木质素降解酶包括木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶、漆酶和多功能过氧化物酶等。纤维素酶是一组酶的总称，主要包括 3 个组分：内切纤维素酶、外切纤维素酶及纤维二糖酶。

第四节 农作物秸秆饲料贮藏技术

秸秆饲料呈现密度低、体积大、易吸湿等特征，秸秆的供应季节较短而利用期为经年以上，故秸秆饲料在加工之后应妥善贮藏，避免养分的损失和不良微生物的增殖。

一、秸秆饲料干贮

秸秆饲料干贮是指降低秸秆饲料水分，减少微生物降解和植物呼吸作用引起的养分损

失，符合安全贮藏要求，以自然状态散贮或者以捆、粒等形态贮藏。豆科类茎秆的纤维物质含量高，所以比禾本科作物更难干燥，贮存过程中常常发霉。一般干燥后秸秆的含水率为 15%～25%，可以有效地抑制微生物的生长，防止秸秆腐烂。

1. 秸秆饲料散贮

待农作物籽实或营养体收获后，将秸秆就地晾晒至安全贮藏的水分条件，然后在田间或者仓库内散置存放。

由于阳光漂白、雨雪淋湿、微生物滋生、灰尘堆积等不良因素的影响，散秸秆以仓贮效果为佳。一般室内贮藏的秸秆饲料含水率应该控制在 12%～15%，从而延长贮存时间。

秸秆饲料粉碎后，同样贮存条件下，养分损失比原样量大，所以粉碎秸秆饲料应尽快利用，或者提供更加适宜的贮存条件（表 7-11）。

表 7-11　贮存方式和时间对玉米秸秆原料成分的影响

项目	新鲜原料	原样干贮			切碎干贮		
		3 月	6 月	12 月	3 月	6 月	12 月
DM 损失率 /%	0	4.2	7.7	13.5	5.8	12.5	15.1
葡聚糖 /%	28.4	28.8	31.7	33.5	28.9	33.1	33.4
木聚糖 /%	17.1	17.1	17.1	18.9	17.8	19.0	20.3
阿拉伯聚糖 /%	2.7	2.5	2.6	2.9	2.9	2.7	2.9
乙酰基 /%	2.3	4.1	2.9	3.4	4.2	3.3	4.7
酸性洗涤不溶性木质素 /%	12.3	13.2	12.6	14.3	12.8	14.9	14.6
总浸出物 /%	24.5	24.9	23.5	20.6	20.3	18.7	15.1
葡萄糖 /%	8.5	9.2	5.8	7.4	6.2	2.8	1.2
木糖 /%	2.4	2.4	1.7	1.9	2.1	1.5	1.4
粗脂肪 /%	3.7	3.3	4.2	2.9	3.4	3.0	3.2

注：引自刘志华（2013）。

2. 秸秆饲料成型贮藏

秸秆饲料成型贮藏是将秸秆饲料切碎（粉碎）后，制作为颗粒、草捆等产品，堆积贮藏。秸秆饲料成型化增加了秸秆饲料的密度，减少了吸湿的发生，便于秸秆饲料的运输、贮藏和利用。

捆型玉米秸秆堆垛的层数不能太高，随着堆层增加，玉米秸秆的密实度也在不断增加，下层的秸秆捆已经濒临散捆。所以在玉米秸秆捆贮仓库内，一般堆垛层数到 5 层为止。继续堆码可能使底层的玉米秸秆捆变形严重，导致堆垛倒塌（表 7-12）。

表 7-12　玉米秸秆捆密实度和尺寸变化

层数	1	2	3	4	5	6	7
层高 /cm	89	89	88	88	87	86	82
密实度 /N	245.01	260.41	301.33	309.59	361.11	352.56	312.41

注：引自李壮（2016）。

二、秸秆饲料湿贮

秸秆饲料湿贮是指在秸秆饲料原有水分情况下，不经过自然干燥，以自然状态新鲜贮藏或者密封发酵贮藏。

1. 秸秆饲料保鲜贮藏

在秸秆饲料供应量低、使用量大时，可以短时鲜贮。在自然条件下，秸秆的保鲜期很短，为延长保存期，需要进行保鲜贮藏。温度是影响保鲜贮藏的主要条件之一。由于秸秆饲料资源量大、质量低，一般在生产中不采用此法。

2. 秸秆饲料发酵贮藏

发酵贮藏是在严格密闭条件下，依靠秸秆原有有益微生物或者外源益生菌，在尽可能减少损失的前提下，改善秸秆饲料的物理、化学性状，以利于秸秆饲料的利用。

同自然风干贮藏相比，发酵贮藏能够减少干物质损失，使秸秆中的多聚糖更易于水解，增加秸秆易消化的营养成分，并使其本身的物质结构更为疏松，可显著提高秸秆的可消化性和利用率（表 7-13）。

表 7-13 青贮方法对玉米秸秆化学组成的影响

样品	WSC/%DM	纤维素 /%DM	半纤维素 /%DM	木质素 /%DM	灰分 /%DM	DM/%	DM 损失率 /%
鲜秸秆	14.76	32.54	26.06	12.96	4.05	22.7	—
自然风干秸秆	4.53	37.72	26.36	17.58	5.11	91.5	—
对照	1.81	39.27	21.51	15.51	4.53	18.8	17.0
硝酸组	5.36	36.78	21.91	13.95	4.36	19.8	8.4
乙酸组	12.57	33.82	25.64	13.53	4.23	21.0	2.9
氨水组	1.22	35.79	18.34	15.41	4.82	16.2	24.9

注：引自张利亚等（2016）。

秸秆饲料在发酵贮藏的过程中，养分含量可能存在动态的变化。发酵贮藏玉米秸秆的粗蛋白质和纤维素类物质的含量分别呈不断减少和增加的趋势，这种营养价值低化的趋势，需要引起注意，并加以调控（表 7-14）。

表 7-14 玉米秸秆发酵贮藏营养成分及人工瘤胃中产气量的变化

项目	贮藏时期 /d					
	55	85	115	145	175	205
CP/%	5.95	6.15	6.01	5.89	5.99	6.06
还原糖 /%	1.14	1.11	0.95	1.15	1.89	2.71
纤维素 /%	31.64	31.67	31.77	31.94	32.14	32.59
半纤维素 /%	27.86	27.85	28.09	28.34	28.63	29.08
木质素 /%	6.14	6.15	6.17	6.24	6.29	6.32
产气量 /（mL/g）	99.03	99.38	99.22	97.23	95.27	92.90

注：引自付清茂等（2008）。

虽然随着贮藏时期的延长，水溶性碳水化合物的含量逐渐下降，但是在酶剂或者菌剂的作用下，其减缓的速度降低（表 7-15）。

表 7-15　添加剂处理稻秸发酵贮藏 WSC 含量变化

贮存日期 /d	添加剂处理			
	对照	菌剂	酶剂	菌剂 + 酶剂
40	1.54	1.72	1.51	1.91
90	0.99	1.5	1.36	1.48

注：引自王兴刚（2013）。

思　考　题

1. 秸秆饲料资源的特点是什么？
2. 如何合理地加工秸秆饲料？
3. 秸秆饲料加工技术新进展有哪些？
4. 如何实现秸秆饲料低损贮藏？

参 考 文 献

[1] de O.Buanafina M M. Feruloylation in grasses: current and future perspectives. Molecular Plant, 2009, 2(5): 861-872.

[2] Donohoe B S, Decker S R, Tucker M P, et al. Visualizing lignin coalescence and migration through maize cell walls following thermochemical pretreatment. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 101(5): 913-925.

[3] Kumar P, Barrett D M, Delwiche M J, et al. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(8): 3713-3729.

[4] Park Y B, Cosgrove D J, Xyloglucan and its interactions with other components of the growing cell wall. Plant & Cell Physiology, 2015, 56 (2): 180-194.

[5] Scheller H V, Ulvskov P. Hemicelluloses. Annual Review of Plant Biology, 2010, 61: 263-289.

[6] 毕于运，王道龙，高春雨，等. 中国秸秆资源评价与利用. 北京：中国农业科学技术出版社，2008.

[7] 常娟，尹清强，任天宝，等. 蒸汽爆破预处理和微生物发酵对玉米秸秆降解率的影响. 农业工程学报，2011，27（4）：277-280.

[8] 陈超玲，杨阳，谢光辉. 我国秸秆资源管理政策发展研究. 中国农业大学学报，2016，21（8）：1-11.

[9] 陈明凤. 纤维素的去结晶. 广州：华南理工大学，2011.

[10] 楚天舒，杨增玲，韩鲁佳. 中国农作物秸秆饲料化利用满足度和优势度分析. 农业工程学报，2016，32（22）：1-9.

[11] 付清茂，雒秋江，欧阳靖，等. 收获和窖存期间玉米秸秆养分变化的研究. 新疆农业大学学报，2008，31（5）：46-50.

[12] 郭冬生，黄春红．近10年来中国农作物秸秆资源量的时空分布与利用模．西南农业学报，2016，29（4）：948-954.

[13] 李彬，高翔，孙倩，等．基于3,5-二硝基水杨酸法的水稻秸秆酶解工艺．农业机械学报，2013，44（1）：106-112.

[14] 李丰成．植物细胞壁结构特征与生物质高效利用分子机理研究．武汉：华中农业大学，2015.

[15] 李红亚，李文，李术娜，等．解淀粉芽孢杆菌复合菌剂对玉米秸秆的降解作用及表征．草业学报，2017，26（6）：153-167.

[16] 李洋，辛杭书，李春雷，等．奶牛常用秸秆类饲料营养价值的评定．东北农业大学学报，2015，46（4）：76-82.

[17] 李壮．捆形玉米秸秆运输、储存技术的试验研究．长春：吉林农业大学，2016.

[18] 刘志华．粉碎和存储方式对木质纤维素转化影响的研究．天津：天津大学，2013.

[19] 孟凡辉．热纤梭菌及纤维小体降解结晶纤维素超微结构分析．济南：山东大学，2015.

[20] 牛文娟．主要农作物秸秆组成成分和能源利用潜力．北京：中国农业大学，2015.

[21] 彭春艳，罗怀良，孔静．中国作物秸秆资源量估算与利用状况研究进展．中国农业资源与区划，2014，35（3）：14-20.

[22] 彭立群，张强，贺克斌．基于调查的中国秸秆露天焚烧污染物排放清单．环境科学研究，2016，29（8）：1109-1118.

[23] 彭洋平．中国古代农作物秸秆利用方式探析．郑州：郑州大学，2012.

[24] 宋文哲．复合菌群降解木质素的研究．广州：华南理工大学，2014.

[25] 王璐璐．秸秆饲粮化的初步研究．无锡：江南大学，2014.

[26] 王兴刚．添加乳酸菌与酶制剂对稻秸青贮品质的影响．南京：南京农业大学，2013.

[27] 王玉荣，陶莲，马涛，等．不同酶及组合处理对青贮水稻秸秆微观结构的影响．动物营养学报，2017，29（4）：1401-1408.

[28] 肖领平．木质生物质水热资源化利用过程机理研究．北京：北京林业大学，2014.

[29] 谢长校．*Bacillus ligniniphilus* L1降解木质素机理的初步研究．镇江：江苏大学，2016.

[30] 徐诚．纤维素的消晶化研究．南京：南京林业大学，2012.

[31] 许浩，李翔．木质素对粗纤维瘤胃降解率的影响及提高木质素瘤胃降解率方法的研究进展．中国奶牛，2017（4）：1-4.

[32] 张利亚，孙优善，吕学斌，等．不同青贮条件下秸秆组分的变化特性及水解效果．安全与环境学报，2016，16（1）：258-262.

[33] 郑梦莉，王凯军，张佩华，等．农作物秸秆饲料化技术研究进展．中国饲料，2017（11）：5-8，14.



第八章　木本植物资源饲料化技术

【学习目标】

- 掌握木本饲料的概念、分类及营养价值，了解木本植物资源饲料化加工的意义。
- 了解木本植物资源饲料化的加工原理。
- 掌握不同木本饲料的饲用价值，掌握其加工方法。
- 掌握木本饲料贮藏的主要技术。

第一节　木本植物资源饲料化加工意义

一、木本饲料的概念及营养价值

木本饲料是指具有饲用价值的木本植物幼嫩枝叶、花、果实、种子及其副产品，可直接放牧利用，又可采集、刈割、加工后利用，国际上称之为 wood grass 或 woody forage。

木本饲料营养价值丰富，富含多种维生素、氨基酸、蛋白质、微量元素。木本饲料明显的优势是具有较高的粗蛋白质和钙元素的含量。据有关研究统计，与禾本科饲草相比，木本饲料的粗蛋白质和钙的含量分别高 54.4% 和 3 倍以上，粗纤维含量则低 62.5%，粗灰分和磷的平均含量没有太大的差别。从可消化养分上看，木本饲料比作物秸秆高出 1 倍以上，比草本饲料稍低。从概略营养成分上说，木本饲料的营养素都比较全面。

松叶粗脂肪含量高达 8% 以上，松针粉含维生素 550～600 mg/kg，叶绿素 1 350～2 220 mg/kg，胡萝卜素 120～300 mg/kg，激素、抗生素及 P、Ca 等营养元素的含量很可观。洋槐、紫穗槐、桑树、榆树、枸杞、木豆、合欢的叶蛋白质高达 20% 以上，槐叶干粉和紫穗槐叶粉还富含氨基酸、维生素，尤其是胡萝卜素和维生素 B_{12} 含量很高。柳树、桦树、榛树、赤杨的叶胡萝卜素含量为 110～132 mg/kg；核桃叶富含维生素和微量元素、氨基酸；桦树汁含糖丰富，还含 Fe、P、Cu、Mg、K、Na；橡子中富含淀粉，喂猪可代替精饲料。构树叶含胡萝卜素 138.7 mg/kg，饲用利用率高达 90% 以上。杨树叶粗蛋白质和赖氨酸含量丰富，是很有营养的青饲料。胡枝子每公顷产鲜叶 15 000 kg，粗蛋白质含量 16% 以上，且富含维生素，既可用鲜叶饲喂，也可制成叶粉。银合欢枝叶、种子产量高，营养成分丰富，饲用价值高，猪体内消化率可达到 50%～70%。而且木本饲料的能值、有机物质消化率也较高。构树、柳树、梨树、桑树、白杨、泡桐等树叶热能含量很高，消化能值（猪）在 8.4 MJ/kg 以上，代谢能值（鸡）在 6.3 MJ/kg 左右。槐叶消化能值（猪）达 11 MJ/kg，代谢能值（鸡）达 5.4 MJ/kg。盐豆木蛋白质含量、总能、有机物质消化率（羊）可以分别

达到 11.16%、16.3 MJ/kg、64.23%。竹类枝叶丰富，营养价值高，含较多的蛋白质、粗脂肪，便于牲畜采食。橡子仁含淀粉 52.5%，50 kg 中的营养相当于 40 kg 玉米饲料。五角枫种子油渣含蛋白质 28%，也是优良的牲畜饲料。用木屑生产制成碳水化合物饲料的成本只有玉米的 50%，而营养价值却是玉米的 60%～80%。水解糖化后的饲料酵母蛋白质含量高达 40%～50%，含氨基酸 20 余种。

由此可看出，木本饲料有着丰富的营养价值符合家畜饲养的营养标准，且含有较高的蛋白质和各种营养物质，是家畜绿色安全健康的饲料粮。因此，重视木本饲料营养价值的开发利用，对木本饲料资源饲料化加工是今后畜牧业饲料发展的方向。

二、木本饲料的分类

木本饲料主要有松科、豆科、杨柳科、壳斗科、蔷薇科等植物。

（一）根据利用部位

根据利用部位，木本饲料可分为针叶、阔叶、籽实三大类。

1. 针叶类

有松树、云杉以及侧柏、木麻黄等。松树分布广、面积大，主要有东北的红松、华北的油松、南方的马尾松等。松针的数量约有 1 亿 t，以利用 1/10 计，可加工针叶粉 1 000 万 t，足够在全国猪、鸡饲料中添加使用。

2. 阔叶类

有杨柳科的小叶杨、胡杨、加拿大杨、毛白杨、旱柳、垂柳、沙柳；豆科的柠条、紫穗槐、刺槐、胡枝子、羊柴、银合欢、合欢、山合欢等；还有一些果树，如苹果树、梨树、杏树、柿树、柑橘树及山楂树、构树、泡桐、梧桐、木槿等。

3. 籽实类

有橡子、榛子、漆树子、楝子、棕榈子、橡胶子等，仅橡子在我国就有 400 余种，几乎遍布全国。据云南省统计，全省每年可产橡子 500 万 t，全国的产量就更可观。

（二）根据外貌特征

根据外貌特征，木本饲料可分为针叶乔木、阔叶乔木、灌木、半灌木、小灌木、木质藤本以及竹类等类型。

1. 针叶乔木饲料植物资源

具有饲用价值的针叶乔木有 6 科 30 属 200 余种，主要有松属、冷杉属、云杉属、落叶松属、柏木属。不同自然地带其代表性的针叶乔木不同：寒温带和温带有落叶松、油松、侧柏、圆柏；热带、亚热带有马尾松、云南松、云杉、杉木、柏木。

我国现有森林面积 1.2 亿 hm^2 以上，其中针叶树约占 50%。全国有松树 30 余种，松针叶蕴藏量约 1 亿 t。

2. 阔叶乔木饲料植物资源

阔叶乔木饲用植物种类丰富，主要有榆属、桦木属、杨属、柳属等。草原地带有饲用价值的阔叶乔木主要有白桦、小叶杨、旱柳、刺槐；荒漠地带阔叶乔木有胡杨、乌柳、沙棘；北方山地分布广泛的有刺榆、山荆子等。在我国南方，有饲用价值的阔叶乔木主要有肥牛树、高山栎、华南朴等。

一般阔叶树树叶约占全树重量的5%，估计每年我国可饲阔叶树叶产量约3亿t，若按30%利用率计，则为0.9亿t，可生产各类叶粉1 800万～2 400万t。

3. 灌木饲料植物资源

灌木类饲用植物根据株高和叶形分为小叶灌木、宽叶灌木、肉质叶灌木、无叶灌木、鳞叶灌木等。小叶灌木主要有锦鸡儿属、绣线菊属、盐豆木属等植物，其中仅锦鸡儿属植物我国就有72种，较重要的锦鸡儿属植物有柠条锦鸡儿、小叶锦鸡儿、中间锦鸡儿等；宽叶灌木主要有黄柳、胡枝子、胡颓子等，热带灌草丛草地有假木豆、大叶胡枝子、马鞍叶羊蹄甲等；无叶灌木为梭梭属、沙拐枣属；鳞叶灌木有柽柳属、水柏枝属；针叶灌木有臭柏；小灌木有绵刺、刺旋花等。

4. 半灌木饲料植物资源

半灌木可分为蒿类、盐柴类、宽叶和垫状半灌木。蒿类半灌木包括蒿属、绢蒿属及类蒿类植物亚菊属、女蒿属等；盐柴类半灌木主要有假木贼属、猪毛菜属等；多汁盐柴类半灌木较重要的有盐爪爪属、碱蓬属等；宽叶半灌木主要有胡枝子属、岩黄芪属、棘豆属等；垫状半灌木主要有西藏亚菊、垫状驼绒藜等。

5. 木质藤本饲用植物资源

木质藤本饲用植物资源也较多，其中野葛、木防己、菝葜等。分布广，具较高的饲用价值。

6. 竹类饲料植物资源

已知可供饲用的竹类植物约19属41种，小竹类主要有箭竹属、箬竹属、短穗竹属等；高竹类较重要的有刺竹属、方竹属、苦竹属等。竹类分布南起海南岛，北至黄河流域，东从台湾，西至西藏聂拉木地区，但以长江流域以南的湿润地区分布较广，尤以热带、亚热带地区种类丰富，多分布在各地的丘陵山地或河谷地带。

三、木本植物资源饲料化加工意义

随着我国经济的发展，人们生活水平日益提高，对奶类、肉类尤其是牛羊肉的需求加大。在我国畜牧业发展的同时，草地面积却不断缩小，畜均占有草地面积大大减少，畜草矛盾日趋尖锐，严重地影响到畜牧业生产的稳定发展。饲料资源生产和供应面临的总体状况是饲料资源总量不足、以粮食为主的能量饲料不足、以粮油加工副产品为主的蛋白质饲料严重短缺、以农作物秸秆等为主的粗饲料资源有余，整个饲料资源供求关系具有精饲料缺、蛋白质饲料缺、绿色饲料缺和总量不足，即“三缺一不足”的特征。

我国是世界上植物物种最丰富的国家之一，具有丰富的木本饲料资源，可开发的前景

广阔。我国拥有 8 000 余种木本植物，其中可以用作木本饲料的种类有 1 000 多种，其叶子、嫩枝、籽实以及加工后产生的木屑、刨花等均可饲用。充分开发和合理利用木本饲料资源，占领“空中牧场”，既能为畜禽提供营养丰富而廉价的饲料，补充饲料资源、提高饲料蛋白质含量、降低饲料成本、促进畜牧业发展，又可为木本植物整枝疏叶，促进其生长，还可以防止森林火灾和病虫害的蔓延等。因此，合理利用和开发木本饲料资源，对我国畜牧业发展、改善人们生活水平及生态环境等具有重要意义。

（一）木本植物资源饲料化加工，可以扩大饲料来源

根据我国森林面积、活立木总蓄积量和采伐情况进行估算：每年树叶产量 5 亿 t 以上，相当于全国农作物秸秆总量，放牧草食家畜直接采食、人工采集鲜叶或收集落叶加工量，占树叶总量的 25% 左右，已利用量约 1.5 亿 t，尚有 3.7 亿 t 的潜力有待进一步开发。按生物学测定：树叶占全树重量的 5% 左右，其中针叶林面积约 7 000 万 hm^2，每公顷可产松针 3 t，全国针叶林年产松针 2.1 亿 t。阔叶林面积约 6 500 万 hm^2，枝叶繁茂，产叶量大，平均每公顷产叶量可达 4.1 t，全国阔叶林年产叶量可达 2.7 亿 t。具有较高饲用价值的各种树籽约 100 万 t，其营养价值相当于饲料粮，以橡子为例，其淀粉含量丰富，达 50%～60%，可作为能量饲料；维生素 B_2 含量特别高，几乎是粮食的 7～10 倍。

亚热带地区木本饲料资源丰富，营养价值高，发展潜力大。例如，米老排叶子肥大嫩绿，营养成分含量高，为牛、羊、猪、兔等喜食，是一种饲料资源，经分析测定，米老排鲜叶的粗蛋白质含量比肥牛树树叶的粗蛋白质含量高 2%；饲料桑叶片含有丰富的碳水化合物、蛋白质、脂肪酸、纤维素和矿物质元素，氨基酸种类齐全，达到 18 种，占饲料桑叶干物质的 20%；任豆是豆科速生树种，营养价值较高，其中粗蛋白质含量为 16.6%，粗脂肪含量为 8.2%，粗纤维含量为 25.3%。

（二）木本植物资源饲料化加工，可以补充蛋白质饲料的缺乏

我国常规饲料资源中，蛋白质饲料紧缺，每年缺口约 3 000 万 t，因此研究和开发非常规饲料资源中的蛋白质，尤其是木本饲料资源中的蛋白质将对畜牧业生产的发展起重要作用。据已掌握近 30 种树叶的营养成分看，有 2/3 的粗蛋白质含量超过 10%，其中紫穗槐、洋槐、银合欢、胡枝子和马鹿花等豆科树叶，粗蛋白质含量均在 20% 以上，其他树叶粗蛋白质含量在 10% 左右。如果平均按 10% 计算，每年 5 亿 t 产叶量中则含有 5 000 万 t 粗蛋白质，这是相当可观的蛋白质饲料资源。我国树叶资源已利用量约 1.5 亿 t，同样按 10% 计算，其粗蛋白质含量为 1 500 万 t，即树叶中的蛋白质资源已利用量为 1 500 万 t，尚有 3 500 万 t 的潜力有待于进一步开发利用。

（三）木本植物资源饲料化加工，可以缓解人畜争粮的矛盾

饲料缺乏是我国畜牧业发展的主要限制因子。我国人均耕地少，种植业难以提供足够的饲料用粮；草原面积虽近 4 亿 hm^2，但受地理和气候条件限制，适宜放牧的时间短，平均载畜率低，长期以来盲目开荒及超载放牧，使得草地资源不断被破坏，草畜矛盾十分尖锐。