

新型农民阳光培训教材

农作物秸秆综合利用技术

张梅花 主编



科学普及出版社
POPULAR SCIENCE PRESS

新型农民阳光培训教材

农作物秸秆综合利用技术

张梅花 主编

科学普及出版社

• 北 京 •

图书在版编目 (CIP) 数据

农作物秸秆综合利用技术 / 张梅花主编. —北京: 科学普及出版社, 2013. 2

(新型农民阳光培训教材)

ISBN 978-7-110-07890-7

I. ①农… II. ①张… III. ①秸秆-综合利用-技术培训-教材
IV. ①S38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 259431 号

责任编辑 鲍黎钧

封面设计 鲍 萌

责任校对 韩 玲

责任印制 张建农

出版发行 科学普及出版社

地 址 北京市海淀区中关村南大街 16 号

邮 编 100081

发行电话 010-62173865

传 真 010-62179148

投稿电话 010-62176522

网 址 <http://www.cspbooks.com.cn>

开 本 850mm×1 168mm 1/32

字 数 160 千字

印 张 6.375

版 次 2013 年 2 月第 1 版

印 次 2013 年 2 月第 1 次印刷

印 刷 北京市彩虹印刷有限责任公司

书 号 ISBN 978-7-110-07890-7/S·522

定 价 18.00 元

(凡购买本社图书, 如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换)

前 言

世界各国都普遍重视农作物秸秆的综合利用。利用的途径主要集中在能源、饲料和肥料三个方面。这是世界上秸秆资源利用的普遍趋势。与发达国家相比,我国虽然在这些领域分别开展了秸秆的开发利用,但秸秆综合利用水平还比较低。秸秆综合利用的政策不完善,综合利用技术研发水平落后,秸秆利用研究与推广脱节。目前,每年还有2亿多吨秸秆没有开发利用,已经利用的也是粗放的低水平利用。进一步开发利用秸秆,已经成为农业生产资源开发和环境保护的新焦点。提高农作物秸秆的综合利用水平,也是实现高产优质高效农业,促进农村经济发展和帮助农民致富的迫切需要和重要途径之一。

农作物秸秆是指在农业生产过程中,收获了小麦、玉米、稻谷等农作物以后,残留的不能食用的根、茎、叶等。农作物秸秆是农业生物资源的主要来源之一,农作物光合作用的产物一半在籽实中,一半在秸秆里。

我国是粮食生产大国,也是秸秆生产大国。据统计,每年产量约6亿多吨,蕴藏着丰富的能量以及大量的营养物质,开发利用潜力巨大,发展前景十分广阔。长期以来,由于社会经济发展等条件的制约,人们一直把秸秆看作是农业的副产品,存在重粮食利用、轻秸秆利用的传统观念。农作物秸秆大部分用做烧火做饭、饲养牲畜、盖房、取暖和肥田等。

目前,秸秆利用技术发展较快,本书着重介绍我国常见的几种农作物秸秆综合利用方法。供农民朋友在致富道路上参考。由于作者水平所限,书中难免存在不足和疏漏,敬请读者批评指正。

编委会

主 编	张梅花		
副主编	陈文星	邢艳艳	刘 杰
编 委	李民彦	李林泉	杨清书
	康 军		

目 录

第一章	概述	1
第二章	秸秆的收集与预处理	12
第三章	秸秆的青贮	30
第四章	秸秆的微生物处理技术	46
第五章	秸秆的氨化和碱化处理技术	74
第六章	几种常见秸秆发酵剂的应用	87
第七章	秸秆处理设备及设施	130
第八章	秸秆生产肥料技术	155
第九章	秸秆配制常见畜禽饲料技术	173
第十章	秸秆生产工业原料技术	186
参考文献		193

第一章 概述

一、秸秆的定义

什么是秸秆？秸秆即农作物的茎秆。在农业生产过程中，收获了小麦、玉米、稻谷等农作物以后，残留的不能食用的根、茎、叶等统称为秸秆。秸秆是一种具有多用途的可再生生物资源，农作物光合作用的产物有一半以上存在于秸秆中。

农作物秸秆不仅包括农业生产过程中的产物，还包括农产品加工过程中的副产品，具体包括几类：①豆类茎秸，包括黄豆秸、蚕豆秸、豌豆秸、豇豆秸、羽扇豆秸和花生藤蔓等。②禾本科作物秸秆，包括大麦秸秆、燕麦秸、小麦秸、黑麦秸、稻草、高粱秸秆、玉米秸秆以及薯类藤蔓等。③农作物加工过程中的副产品，包括玉米芯、各种麦类的糠麸，各种水稻的谷壳和米糠等。④亚热带植物副产品，包括甘蔗渣、西沙尔麻渣、香蕉茎和叶等。

二、秸秆的结构与组成

1. 禾本科作物的植株结构

水稻、小麦、玉米、高粱等禾本科作物的植株由根、叶、茎、花和籽实等器官组成。

(1)叶。叶是进行光合作用的主要器官。叶的组织分为表皮系统、基本系统和维管系统。表皮在叶的最外层，维管组织则分布在基本组织之中。禾本科作物的叶分为叶鞘和叶片两部分。叶鞘包在茎的四周，有支持茎和保护茎的作用。叶鞘基部膨大的部分

叫叶节。禾本科作物的叶上有的有叶耳、叶舌，有的则没有。例如，高粱有叶舌而无叶耳，小麦的叶耳小且有茸耳，大麦叶耳大，黑麦叶耳部明显，燕麦无叶耳，水稻有叶舌、叶耳，稗草则无叶舌、叶耳。

叶的表皮结构比较复杂，有泡状细胞（即运动细胞）、附属毛、似纤维的细胞。表皮细胞有长细胞、短细胞。短细胞又分为硅质细胞、栓质细胞，前者充满硅质体，后者细胞壁木栓化。表皮上下面还有气孔。表皮可以保护叶肉组织，防止水分蒸散，有机械支持叶的作用。表皮细胞质有硅质，细胞外壁有角质层，这是禾本科作物的特点。叶脉是维管束。禾本科作物没有平行脉，叶上纵行的平行脉之间还有横行的小维管束将平行脉连接起来。禾本科作物的叶脉有维管束鞘。维管束鞘有两种：一种为薄壁型，含有叶绿体；另一种壁较厚，无叶绿体。小麦有内外两层维管束鞘，玉米、高粱维管束鞘中的叶绿体特别大，在光合作用时，叶内可形成较多的淀粉。叶肉是由表皮下团块状薄壁组织细胞所组成。叶肉组织中含有大量叶绿体，因此这些起同化作用的器官为绿色。进行光合作用时，叶绿体有聚集淀粉的作用。

（2）茎。禾本科作物的茎呈圆筒状，茎中有髓或有空腔。茎可分为若干节，节与节之间的部分叫节段，每节间的坚硬圆实部分，称之为（叶）节。节段的数目随不同种或品种作物而不同。水稻和小麦的茎秆比较细软，地上部分有5~6节，节间中空，曲折度大，有弹性。玉米、高粱和甘蔗的茎为实心，茎高大，地上部分节数有17~18节，节间粗、坚硬、不易折断。玉米植株顶端有雄穗，植株中间有雌穗，穗外有苞叶。苞叶包着生在轴芯上的籽粒。

禾本科作物茎的节间横切面上有三种系统：表皮系统、基本系统和维管系统。表皮系统只有初生结构，一般为一层细胞，通常角质化或硅质化，以防止水分的过度蒸发和病菌侵入，并对内

部其他组织起保护作用。各种器官中数量最多的组织是薄壁组织,也叫基本组织,它是光合作用、呼吸作用、养分储藏、分化等主要生命活动的场所,是作物组成的基础。维管束都埋藏贯穿在薄壁组织内。在韧皮部、木质部等复合组织中,薄壁组织起着联系作用。

在维管系统中,除薄壁组织外,主要有木质部和韧皮部,两者相互结合。禾本科作物维管束中木质部、韧皮部的排列多属于外韧维管束。小麦、大麦、水稻、黑麦、燕麦茎中维管束排成两圈,较小的一圈靠近外围,较大的一圈插入茎中。玉米、高粱、甘蔗茎中的维管束则分散于整个横切面中。木质部的功能是把茎部吸收的水和无机盐,经茎输送到叶和植株的其他部分。韧皮部则把叶中合成的有机物质(如碳水化合物和氮化物)输送到植株的其他部分。

在玉米茎表皮下有机组织,由厚壁组织与厚角组织组成。这些组织能支持植株本身的质量并能防止风雨的袭击。厚壁组织含有石细胞和纤维一类的细胞。

2. 秸秆的组成

秸秆主要是由木质素、纤维素和半纤维素三部分组成。木质素是以苯丙基为基本结构单元连接而成的高分子多分散性高聚物,非常难于降解。纤维素是细胞壁的主要成分,在纤维素的周围充填着半纤维素和木质素,阻碍了纤维素酶同纤维素分子的直接接触。纤维素的化学组成十分简单,是由 β -D-葡萄糖通过于 β -4-糖苷键连接而成的线型结晶高聚物,聚合度很大(通常由4000~8000个葡萄糖分子串联起来,相对分子质量达200~2000)。葡萄糖的 β -1,4-糖苷键连接方式使纤维素的近乎所有羟基及其他含氧基团,都同其分子内或相邻的分子上含氧基团之间,形成分子内和分子链之间的氢键。这些氢键使很多纤维素分子共同组成结晶结构,并进而组成复杂的基元纤维、微纤维、结晶区和无定形区等纤维素聚合物的超分子结构。纤维素的特殊结构使纤维素酶分子很难靠

近纤维素分子内部的糖苷键进行有效的反应。

半纤维素在结构和组成上变化很大,一般由较短(聚合度小于200)、高度分枝的杂多糖链组成。常见的有木聚糖、阿拉伯-木聚糖、葡萄糖-甘露聚糖、半乳-葡萄糖-甘露聚糖等,多通过 β -1,4-糖苷键连接,含有五碳糖(通常是D-木糖和L-阿拉伯糖)、六碳糖(D-半乳糖、D-葡萄糖和D-甘露糖)和糖醛酸。各种植物纤维原料的半纤维素链上连接着数量不等的甲酰基和乙酰基,其分支结构使半纤维素无定型化,比较容易被水解为其组成糖类。

主要农作物秸秆的原料组成见表1-1。

表1-1 主要农作物秸秆中纤维素、半纤维素、木质素含量(%)

秸秆种类	纤维素	半纤维素	木质素
稻谷	32.0	24.0	12.5
小麦	30.5	23.5	18.0
玉米	34.0	37.5	22.0
大豆	33.0	18.5	

3. 秸秆与木材的比较

尽管农作物秸秆与木材同属于通过光合作用积累的可再生木质纤维素资源,但是,木材作为资源被大量利用,而秸秆却大量被废弃或焚烧。这是以下原因所导致。

(1)纤维形态的特征差异。秸秆中细小纤维及杂细胞组分含量高,多达40%~50%,纤维细胞含量低至40%~70%。而木材杂细胞含量低,纤维细胞含量高,阔叶材含量为60%~80%,针叶材含量达90%~95%。从表1-2可以看出麦草与木材相比,无论在化学组成,还是在木质素、半纤维素的结构上都存在着较大差异。

表 1-2 麦草与木材的化学结构的比较

项 目		麦 草	木 材
木 质 素 木	质素的酚羟基(C ₉ 苯丙烷单元)	0.4~0.45/C ₉	0.1~0.3/C ₉
	木质素的酚羟基	44/100 单元	9~13/100 单元(桦木)
	木质素的羟基	13.8/100 单元	
	木质素的羧基	0.1~0.2/C,	—
	木质素中对香豆酸、酯键	2.1%~2.8%	—
	木质素中阿魏酸	α -醚键	—
	磨木木质素相对分子质量(Mr)	7500	18200(桦木)
	木质素中单元比例(愈创木酚基:紫丁香基型木素;紫丁香基丙烷,V:S:H)	1:0.77:0.31	1:1.2:0.05 (阔叶木) 1:0.02:0.009 (针叶木)
	木质素-碳水化合物复合物(LCC)	占易溶木质素的60%为LCC	LCC
其 他	半纤维素聚合度	84	>120
	半纤维素结构组成	90%木聚糖	
	80%~90%木聚糖(阔叶木)		
	60%~70%甘露糖(针叶木)		
	纤维素结晶度	40%~60%	60%~80%
	有机抽提物	1%以下	4%(针叶木) 1%以下(阔叶木)
	灰分	8%(60%为SiO ₂)	1%以下(CaO, K ₂ O,Na ₂ O)
	纤维特征	长1.0~1.5毫米	长5毫米
	细小纤维和杂细胞	39%	5%(针叶木) 25%(阔叶木)

(2) 秸秆生物结构的不均一性。即茎秆、叶、穗、鞘等各占一定比例,而且各部分的化学成分及纤维形态差异很大,某些部位的纤

维特征还要优于某些阔叶纤维素,如,麦草的节间和叶鞘、稻草的茎,这些部位中的纤维其长度和杨树纤维长度类似甚至长于杨树纤维,而且纤维比较窄,具有很高的长宽比(表 1-3、表 1-4),这说明秸秆的这些部位具有高值利用的潜力。收获秸秆一般不进行不同器官的分离,因此整株秸秆中含有多种器官和组织。而木材在采伐后,一般要进行剥皮处理,实际使用的是整个树干的木质部。

表 1-3 麦草不同部位的纤维长宽比较表(单位:mm)

项 目		长度				宽度				长宽比
		平均	最大	最小	一般	平均	最大	最小	一般	
全部位		1.32	2.94	0.61	1.03~1.60	12.9	24.5	7.4	9.3~15.7	10 : 2
不同 部位	茎	1.52	2.63	0.66	1.07~1.88	14.0	27.9	8.3	12.7~18.5	10 : 9
	节间	1.21	2.39	0.39	0.05~1.56	11.5	24.5	7.4	8.8~15.7	10 : 5
	叶鞘	1.26	3.31	0.44	0.70~1.80	14.7	34.3	8.8	9.8~18.6	8 : 6
	叶	0.86	1.47	0.24	0.59~1.16	12.1	19.6	6.4	8.8~18.6	7 : 1
	节	0.47	1.29	0.18	0.24~0.77	17.8	43.1	8.3	9.8~27.0	2 : 6

表 1-4 若干种杨木纤维的形态特征

项目	胡杨	胡杨	山杨	毛白杨	大青杨	箭杆杨	214 杨	72 杨	63 杨	69 杨	大观杨
均长(毫米)	0.83	0.94	1.38	0.82	1.32	0.90	1.13	1.11	1.04	1.04	1.19
均宽(微米)	21.5	22.8	18.5	20.8	24.0	21.6	24.0	24.0	22.0	23.0	25.0
长宽比	38 : 6	41 : 2	74 : 6	39 : 4	55 : 0	41 : 7	47 : 1	46 : 3	47 : 3	45 : 2	47 : 6

(3) 化学成分的差异。秸秆中含有大量半纤维素,灰分含量高,大于 1%,有些稻草则可高达 10% 以上。

三、秸秆的主要营养成分及用作饲料的限制因素

1. 秸秆的主要营养成分

秸秆的成分决定其营养价值和消化率。同一秸秆成熟度越高,木质化程度也越高,秸秆的消化率就越低。据报道,玉米植株成熟后,整个植株、茎叶、轴芯的体外消化率每周下降 15%~20%,

而苞叶只下降 0.6%。小麦在籽粒干燥时才可收获,无法提前收割,但玉米可在不影响产量条件下适当提前收割或者至少在收获籽粒后尽快收获秸秆。

不同秸秆的成分和消化率是不同的,同一秸秆的不同部位亦有所不同,甚至差别很大。禾本科秸秆粗纤维的消化率比豆科秸秆的高,但豆科秸秆的粗蛋白比禾本科的高。由于秸秆的营养价值主要取决于粗纤维的消化率,所以,一般而言,禾本科秸秆的营养价值较高。

秸秆不同部位的消化率差别较大,叶的消化率高,而茎秆的消化率较低,只有稻草例外,因为稻草叶中含大量不能消化的硅酸盐,导致其消化率甚至比茎秆还低。我国主要农作物秸秆的营养组成见表 1-5。

秸秆饲料资源除表 1-5 中列出的外,还有谷子秸、杂粮秸、杂豆秸、油菜秸、芝麻秸、甘蔗梢、向日葵花盘、甜菜叶等,总产量为 7 750 万吨。

表 1-5 我国主要农作物秸秆的营养组成(单位:%)

化学成分 种类	水分	粗蛋白	粗脂肪	粗纤维	无氮浸出物	粗灰分
玉米秸秆	11.2	3.5	0.8	33.4	42.7	8.4
小麦秸秆	10.0	3.1	1.3	32.6	43.9	9.1
大麦秸秆	12.9	6.4	1.6	33.4	37.8	7.9
稻草	13.4	1.8	1.5	28.0	42.9	12.4
高粱秸秆	10.2	3.2	0.5	33.0	48.5	4.6
黄豆秸秆	14.1	9.2	1.7	36.4	34.2	4.4
棉花秸秆	12.6	4.9	0.7	41.4	36.6	3.8
棉铃壳	13.6	5.0	1.5	34.5	39.5	5.9
甘薯藤(鲜)	89.8	1.2	0.1	1.4	7.4	0.2
花生藤	11.6	6.6	1.2	33.2	41.3	6.1
稻壳	6.8	2.0	0.6	45.3	28.5	16.9

续表

化学成分 种类	水分	粗蛋白	粗脂肪	粗纤维	无氮浸出物	粗灰分
统 糠	13.4	2.2	2.8	29.9	38.0	13.7
细米糠	9.0	9.4	15.0	11.0	46.0	9.6
麦 麸	12.1	13.5	3.8	10.4	55.4	4.8
玉米芯	8.7	2.0	0.7	28.2	58.4	20.0
花生壳	10.1	7.7	5.9	59.9	10.4	6.0
玉米糠	10.7	8.9	4.2	1.7	72.6	1.9
高粱糠	13.5	10.2	13.4	5.2	50.0	7.7

2. 秸秆用作饲料的限制因素

(1) 营养价值低

1) 秸秆缺乏维生素。秸秆是草食家畜冬春的主要饲料,而秸秆中胡萝卜素含量仅为 2~5 克/千克,这就成为秸秆用作饲料的一个限制因素。因此,应将秸秆与胡萝卜、青贮料等维生素含量较高的饲料搭配。

2) 秸秆的粗蛋白含量低。豆科秸秆的粗蛋白质含量为 5%~9%,禾本科秸秆为 3%~5%。一般要求反刍家畜饲料蛋白质含量不应低于 8%,而绝大多数秸秆的粗蛋白质含量都低于 8%,不能为瘤胃微生物的迅速生长繁殖提供充足的氮源,结果导致瘤胃微生物的活力降低,难以充分消化利用进食的秸秆饲料,因而需要经过加工调制,克服蛋白质含量不足的问题。

3) 秸秆中钙、磷含量低,硅酸盐含量高。硅酸盐的存在不利于其他营养成分的消化利用,钙、磷含量低且钙、磷比例不适宜,不能满足家畜的需要。一般奶牛饲料中钙、磷比例应为 2:1~1.3:1,肉牛为 1:1~1:0.7,绵羊为 2:1~1.2:1。因此,在饲喂秸秆时应注意调整钙、磷的含量及比例。

4) 秸秆的消化能较低。一般秸秆对牛、羊的消化能为 7.8~10.5 兆焦/千克,远远低于牛、羊饲料中所需要的消化能值。如体

重 40 千克左右的肥育羔羊要求饲料中含消化能 17.0~18.8 兆焦/千克,秸秆中所含消化能与羔羊的需要相差较多。由此看来,以秸秆为主要饲料的牛、羊等家畜,难以从中获取所需要的消化能。因此,秸秆用作饲料要经过加工调制,使更多的总能转化为消化能,或与其他含消化能较高的饲料搭配饲喂。

(2)消化率低。与干草相近,秸秆的总能含量一般为 15.5~25.0 兆焦/千克,但其消化能只有 7.8~10.5 兆焦/千克,比干草的消化能 12~14 兆焦/千克低得多,其营养价值只相当于干草的一半。这是秸秆消化率较低的原因。秸秆的消化率一般低于 50%,牛、羊为 40%~50%,马为 20%~30%,猪为 3%~25%,鸡几乎难以消化利用,因而使得秸秆中的潜能及其他营养物质不能被家畜消化利用。秸秆消化率低是各种限制消化因素共同作用的结果。

1)秸秆的表皮膜(禾本科)和蜡质层(豆科)。茎的表面由表皮组织所覆盖。禾本科秸秆表皮组织外覆盖一层表皮膜,它是硅化程度较高的透明体,豆科秸秆表皮组织外有一蜡质层,从而限制了瘤胃微生物进一步作用于秸秆内部的营养物质,降低了秸秆的消化率。

2)茎表皮角质层和硅细胞。茎的表面为表皮组织所覆盖,表皮细胞角质化或硅化(如,稻草表皮有许多充满二氧化硅的硅细胞),且表皮细胞密集排列无间隙,致使瘤胃微生物不能与表皮组织内营养物质相接触,从而限制了秸秆的消化利用。

3)纤维素分子间形成的结晶结构。秸秆中纤维素分子间呈结晶态排列,结晶区纤维素分子间相互作用,增强了纤维素分子的稳定性,不利于纤维素的消化利用。

4)木质素是影响消化率的主要因素。秸秆是一种纤维性饲料,主要成分是粗纤维。粗纤维包括:纤维素、半纤维素、木质素和果胶。纤维素是高分子葡聚糖,是植物细胞壁的主要成分。一般条件下,纤维素不易溶于水、有机溶剂、苛性碱溶液以及稀无机酸溶液中;仅在不加热的条件下,用浓无机酸处理,也可在加热至

100℃以上,且在高压条件下,用稀无机酸处理,纤维素才被分解为它的构成单位——葡萄糖。哺乳动物消化道内没有分解纤维素的酶,反刍动物消化它是依靠瘤胃及盲肠内微生物所分泌的纤维素酶和纤维二糖酶,将其部分降解成单糖,并进一步被降解成挥发性脂肪酸(乙酸、丙酸、丁酸),然后被家畜利用。半纤维素主要是戊聚糖与己聚糖,不溶于沸水而溶于稀酸碱。家畜消化靠微生物分解,戊聚糖分解为木糖和阿拉伯糖,己聚糖分解为甘露糖和半乳糖,最终被降解成挥发性脂肪酸。此外,半纤维素还含有聚糖醛酸,很多聚糖醛酸都溶于水、苛性碱、苏打及氨水中。水溶性的聚糖酸含有乙醛基团,这对秸秆加工处理为饲料有重要意义。果胶物质也属于聚糖醛酸,在秸秆干物质中聚糖醛酸占2%~4%。木质素是一种由苯基丙衍生物聚合而成的立体聚合物,也是动物利用细胞壁物质的主要限制因素。木质素不能被动物的消化酶分解,也不受瘤胃和肠道微生物的作用。特殊的霉菌和土壤微生物,则可破坏木质素的结构。木质素含量与秸秆的消化率密切相关,根据大量的实验数据得出的粗饲料中木质素含量(L)与有机物体外消化率关系的回归公式如下:

$$\text{粗饲料有机物体外消化率} = 96.61\% - 4.49\%L$$

木质素含量每增加1%,粗饲料的消化率就降低4.49%。木质素影响秸秆消化利用的机理,是木质素与纤维素结合形成一种镶嵌结构,致使消化酶无法接触细胞壁的糖类和细胞内容物。

四、如何利用秸秆

尽管秸秆用作饲料有如此多的限制因素,但我国大多数地区仍采用较为原始的方法饲喂未经处理的秸秆。这些未经加工调制的秸秆利用率很低,即使家畜采食后,也只能起到饱腹充饥作用,不能供给家畜所需要的营养。所以,各种秸秆需经加工调制。

纤维素和半纤维素可在瘤胃微生物作用下进行分解,最终成为反刍家畜的能源。但是自然状态下,纤维素、半纤维素、木质素