

我国农作物秸秆的综合利用技术进展

石磊, 赵由才, 柴晓利

(同济大学环境工程与科学学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

摘要: 我国秸秆资源丰富, 但胡乱丢弃、无控焚烧、直接还田和加工粗饲料等传统的处理方式存在着“三低一重”的缺点, 即秸秆利用率低、转化率低、经济效益低、环境污染严重。本文介绍了秸秆综合利用技术的最新进展, 包括腐熟还田技术、饲料转化技术、能源化技术及秸秆在工业上的各种应用。认为农作物秸秆的综合利用是保护生态环境、节约可再生资源的需要, 也是缓解农村饲料、肥料、燃料和工业原料的紧张状况、促进农业可持续发展的要求。

关键词: 农作物秸秆; 综合利用; 资源化

中图分类号: S210.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1166(2005)02-0011-04

Comprehensive Utilization Techniques Progress of Crop Straws in China / SHI Lei, ZHAO You-cai, CHAI Xiao-li / (State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Crop straw resources are abundant in China, however, the traditional treatment patterns such as abandoning litterly, burning wildly, returning to the soil directly and processing as raw forage etc. are characterized by low utilization ratio, less conversion ratio, poor economic benefit and severe environmental pollution. In the article, the latest comprehensive utilization technique progress of crop straws are introduced, which includes rapid compost techniques, effective forage techniques, energization techniques and all kinds of straw applications in industries. It is concluded that comprehensive utilization of crop straws is not only the urgent measure for protecting ecological environment and saving the reproducibile resources, but also can relieve the intense situation of rural forage, fertilizer, fuel and industrial raw material, and promote the sustainable development of agriculture as well.

Key words: crop straw; comprehensive utilization; resource

农作物秸秆是籽实收获后剩留下的含纤维成分很高的作物残留物, 包括禾谷类、豆类、薯类、油料类、麻类、以及棉花、甘蔗、烟草、瓜果等多种作物的秸秆。我国的秸秆资源非常丰富, 目前仅重要的作物秸秆就有近 20 种, 且产量巨大。据统计^[1], 1999 年我国作物秸秆资源总量约 6.4 亿 t, 其中稻草 1.9 亿 t, 玉米秸 1.7 亿 t, 麦秸 1.2 亿 t。多年来, 这三种秸秆数量常占秸秆总量的 75% 以上, 但随着农村产业结构的调整, 经济作物秸秆的比例将有所增加。

随意丢弃和无控焚烧, 曾是我国广大农村处置秸秆的主要方式, 这不仅会造成资源浪费、地力损伤、环境污染, 还可导致火灾及交通事故的频发, 并对人类健康和周围动植物的生态环境造成严重危害。另一方面, 秸秆未经任何处理直接用于肥料、燃料和饲料的传统应用模式, 正制约着秸秆利用率、转化率和经济效益的进一步提高^[2]。

因此, 农作物秸秆的综合利用, 既可缓解农村饲

料、肥料、燃料和工业原料的紧张状况, 又是保护农村生态环境、促进农业可持续协调发展的迫切要求。

1 秸秆的组成和特点

几种作物秸秆的营养成分如表 1 所示, 它们不仅普遍具有较高的热值和粗纤维含量, 且含有丰富的有机质、氮、磷、钾等营养元素, 以及镁、钙、硫和其它重要的微量元素。因此, 根据其化学组成和营养成分的不同特点, 除挖掘其作为燃料和有机肥的潜力外, 将其加工成建材、饲料和食用菌基料, 而从中生产木糖醇、糠醛、酒精等工业原料也是较好的选择。

2 秸秆还田技术

利用多种形式的秸秆还田(见表 2), 不仅可增加土壤有机质和速效养分含量, 培肥地力, 缓解氮、磷、钾肥比例失调的矛盾; 调节土壤物理性能, 改造中低产田; 形成土壤有机质覆盖, 抗旱保墒; 还可以增加作物

收稿日期: 2004-08-26

项目来源: 教育部博士点专项基金资助项目(NO.20020247020)。

作者简介: 石磊(1977-), 男, 同济大学环境科学与工程学院在读博士生。目前研究方向为固体废物的资源化利用。

产量,优化农田生态环境。

表1 几种作物秸秆的营养成分^[3]

(干重,%)

种类	干物质	粗蛋白	粗脂肪	粗纤维	粗灰分	钙	磷	热值(MJ·kg ⁻¹)
稻草	85	4.8	1.4	35.6	12.4	0.69	0.60	14.02
麦秸	85	4.4	1.5	36.7	6.0	0.32	0.08	15.40
玉米秸	94	5.7	16.0	29.3	6.6	微量	微量	15.17
大豆秆	85	5.7	2.0	38.7	4.2	1.04	0.14	15.16
花生藤	90	12.2	-	21.8	-	2.8	0.10	13.42
蚕豆秆	86	2.9	1.1	37.0	9.8	—	—	14.76

但应该指出,秸秆还田不当也会带来不良后果。由于我国人均耕地少,机械化程度较低,耕地复种指数高,倒茬时间短,加之秸秆碳氮比高,给秸秆还田带来困难。常因翻压量过大、土壤水分不够、施氮肥不够、翻压质量不好等原因,出现妨碍耕作、影响出苗、烧苗、病虫害增加等现象,严重的还会造成减产。

秸秆还田的发展方向是:因地制宜,开发新型秸秆还田机,进一步推广机械化程度;加强还田理论和配套栽培技术的研究,避免他感效应和自毒作用带来的负面效应;发展生物工程技术,走农机与农艺结合的道路,促使秸秆快速腐解^[4]。

表2 秸秆还田技术比较^[2-4]

还田技术	还田方法	优点	限制
直接还田	直接粉碎还田	操作简单、省工省时、作业效率高;利于水土保持、缓解气温激变对作物的伤害、促进植株地上部分生长。	耗能大,成本高;在山区、丘陵地区机械使用受限;未经高温发酵直接还田的秸秆,可能导致病害蔓延;在薄地、氮肥不足及播期临近时,秸秆用量受限。
	整秆还田		
	覆盖栽培还田		
间接还田	堆沤腐解还田	高温厌氧发酵而成,操作简单廉价。	耗时长、劳动强度大、产量小。
	烧灰还田	操作方便、K ₂ CO ₃ 含量丰富。	污染空气、损失大量能源和C、N、P。
	过腹还田	利用效益高,实现畜牧增产和肥田。	未经处理的秸秆饲料利用率低,耗量小。
	菇渣还田	菇渣营养丰富、可减少化肥用量。	菇渣产量小,所消纳的秸秆量有限。
	沼渣还田	优质有机肥,可副产沼气和沼液。	沼渣产量小,生产周期长,劳动强度大。
生化腐熟快速还田	催腐堆肥技术 速腐堆肥技术 酶菌堆肥技术	机械自动化程度高、易实现产业化;腐熟周期短、产量高;采用好氧发酵,无环境污染;肥效高且稳定。	优良微生物复合菌种和化学制剂筛选困难;操作条件需严格控制;秸秆需严格预处理;设备成本和运行费用较高。

3 秸秆饲料技术

秸秆中含量较高的粗纤维(约占秸秆干物质的20%~50%),限制了瘤胃中的微生物和消化酶对细胞壁内溶物的消化作用,导致秸秆适口性和营养性差,无法被动物高效地吸收利用。因此,开发和利用秸秆饲料资源,提高其利用率和营养价值势在必行。

在实践中,秸秆饲料的加工调制方法一般可分为物理处理、化学处理和生物处理三种。这些处理方法各有其优缺点(见表3)。如切段、粉碎、膨化、蒸煮、压块等物理方法虽简单易行,容易推广,但一般情况不能增加饲料的营养价值。化学处理法可以提高秸秆的采食量和体外消化率,但也容易造成化学物质的过量,且使用范围狭窄、推广费用较高。生物处理法可以提高秸秆的营养价值,但要求技术较高,处理不好,容易造成腐烂变质。

4 秸秆能源化技术

秸秆的能源密度为13~15 MJ·kg⁻¹,作为农村主要的生活燃料,其能源化用量占农村生活用能的30%~35%。现行主要的秸秆能源化利用技术有秸秆直燃供热技术、秸秆气化集中供气技术、秸秆发酵制沼技术、秸秆压块成型及炭化技术等。

4.1 秸秆直燃供热技术

作为传统的能量转换方式,直接燃烧具有经济方便、成本低廉、易于推广的特点,可在秸秆主产区为中小型企业、政府机关、中小学校和相对比较集中的乡镇居民提供生产、生活热水和用于冬季采暖。

目前,英国、荷兰、丹麦等国家已采用大型秸秆锅炉用于供暖、发电或热电联产^[7]。我国秸秆直燃供热技术起步较晚,适合我国农村特点的、运行费用低于燃煤锅炉的小型秸秆直燃锅炉的研究正加紧进行。

表 3 秸秆饲料的处理方法^[2,3,5,6]

	方法	原理与特点	备 注
物理处理	粉碎软化	秸秆变小变软,利于家畜采食和咀嚼,使消化吸收的总养分增加,并可减少采食过程中的能量消耗。	切短、粉碎及软化程度应因家畜种类、年龄的不同而有所不同。
	压块制粒	铡切后烘干压制而成。便于运输贮存;适口性和饲喂价值明显提高;卫生条件好,可工厂化生产。	压块机散热困难,内腔饲料易堵塞,需开机清理。
	热喷处理	依靠热喷机的蒸汽喷爆作用,弱化粗纤维素结晶度,使饲料采食量和利用率大为增加,且卫生经济。	设备运行及维修成本高,秸秆需经除石除铁预处理。
	挤压膨化	秸秆在挤压腔中,压力骤降而得到膨化的饲料。饲料适口性好、采食率和消化率高,便于运输贮存。	原料需严格除石除铁,以防止损坏机器和影响膨化质量。
化学处理	碱化处理	碱化作用打破粗纤维中醚键或酯键,溶去大部分木质素和硅酸盐,从而提高秸秆饲料的营养价值。	用碱量大,需用大量水冲洗,易造成环境污染。
	氧化剂处理	用氧化剂破坏木质素,溶解半纤维素,从而增加纤维素酶和细胞壁的接触面积,提高饲料消化率。	氧化剂有 SO ₂ , O ₃ , H ₂ O ₂ , 虽能提高消化率,但成本太高。
	氨化处理	经含氮物质的碱化、氨化和中和作用,在密闭条件下处理秸秆,以提高其消化率、营养价值和适口性。	氨化工艺成熟,应用广;但氨利用率低,有污染且处理成本高。
	复合化学处理	如 Ca(OH) ₂ + 尿素复合处理,融合了碱化和氨化处理的优点、克服了残碱量高和木质素软化差的缺点。	复合剂价格低、应用前景良好;根据不同作物和牲畜分别配制。
生物处理	青贮技术	利用微生物的乳酸发酵作用,对青绿秸秆无杂菌密封贮藏,得到青绿多汁、适口性好、营养丰富的“草罐头”。青贮技术简单,容易推行,制作成本低。	青贮对纤维素消化率提高甚微,只能用于喂饲牛、羊等反刍动物,不能喂猪、鸡等非反刍家畜。
	微贮技术	利用微生物发酵菌剂及辅料,在密闭设施中,经一定发酵过程,将秸秆转化为湿润膨胀、柔软酸香的饲料。微贮消化率高、原料来源广泛,无季节限制。	用微贮技术,可将秸秆、杂草等加工成非草食家畜可食用的菌体蛋白生物饲料。

4.2 秸秆气化集中供气技术

秸秆气化是高品位利用秸秆资源的一种生物能转化方式。经适当粉碎后,秸秆在气化装置内不完全燃烧即可获得理论热值为 $5724 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ 的燃气,其典型成分为: CO 20 %, H_2 15 %, CH_4 2 %, CO_2 12 %, O_2 1.5 %, N_2 49.5 %。燃气经降温、多级除尘和除焦油等净化和浓缩工艺后,由罗茨风机加压送至储气柜,然后直接用管道供用户使用。秸秆气化集中输供系统通常由秸秆原料处理装置、气化机组、燃气输配系统、燃气管网和用户燃气系统等五部分组成,供气半径一般在 1 公里之内,可供百余户农民用气。目前全国已有 380 余处秸秆气化集中供气示范点,仅山东就有 170 余处。

秸秆气化经济方便、干净卫生、在小康村镇建设中广受欢迎。但大规模推行秸秆制气还需解决气化系统投资偏高,燃气热值偏低,以及燃气中氮气与焦油含量偏高等问题^[8]。

4.3 秸秆发酵制沼技术

秸秆制沼历史悠久,它是多种微生物在厌氧条件下,将秸秆降解成沼气,并副产沼液和沼渣的过程。沼气含有 50% ~ 70% 的甲烷,是高品位的清洁燃料,它可在稍高于常压的状态下,通过 PVC 管道供应农家,用于炊事、照明、果品保鲜等,或加工成动力燃料和甲醇等。做双料发动机燃料。

秸秆可直接投入沼气池,也常用做牲畜饲料,转

化成粪便进入沼气池。池中秸秆、人畜粪便、和水的配比一般为 1:1:8,在产沼过程中,需定期投入发酵基质及清理沼渣。实践表明:一个 3 ~ 5 口人的家庭,建一口 8 ~ 10 m^3 的沼气池,年产 300 ~ 350 m^3 的沼气,可满足一日三餐和晚间的照明用能。因此,秸秆制沼不仅可优化农村能源结构,节约不可再生能源的消耗,还具有良好的经济、环境和生态效益。

4.4 秸秆压块成型及炭化技术

秸秆的基本组织是纤维素、半纤维素和木质素,它们通常在 200 ~ 300 $^{\circ}\text{C}$ 下软化,将其粉碎后,添加适量的粘结剂和水混合,施加一定的压力使其固化成型,即得到棒状或颗粒状“秸秆炭”,若再利用炭化炉可将其进一步加工处理成为具有一定机械强度的“生物煤”。秸秆成型燃料容重为 $1.2 \sim 1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,热值为 $14 \sim 18 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,具有近似中质烟煤的燃烧性能,且含硫量低,灰分小。其优点有:1. 制作工艺简单、可加工成多种形状规格、体积小,贮运方便;2. 品位较高,利用率可提高到 40% 左右;3. 使用方便、干净卫生,燃烧时污染极小;4. 除民用和烧锅炉外,还可用于热解气化产煤气、生产活性炭和各类“成型”炭。

5 秸秆的工业应用

当前,作物秸秆工业用途广泛,它们不仅可作保

温材料、纸浆原料、菌类培养基、各类轻质板材和包装材料的原料,还用于编织业、酿酒制醋、生产人造棉、人造丝、饴糖等,或从中提取淀粉、木糖醇、糖醛等。这些综合利用技术,不仅转化了大量的废弃秸秆、消除了潜在的环境污染,而且具有良好的经济效益,实现了自然界的物质和能量循环。

5.1 生产可降解的包装材料

用麦秸、稻草、玉米秸、苇秆、棉花秆等生产出的可降解型包装材料,如瓦楞纸芯、保鲜膜、一次性餐具、果蔬内包装衬垫等,具有安全卫生、体小质轻、无毒、无臭、通气性好等特点,同时又有一定的柔韧性和强度,制造成本与发泡塑料相当,而大大低于纸制品和木制品。在自然环境中,一个月左右即可全部降解成有机肥。

5.2 用作建筑装饰材料

将粉碎后的秸秆按一定比例加入粘合剂、阻燃剂和其他配料,进行机械搅拌、挤压成型、恒温固化,可制得高质量的轻质建材,如秸秆轻体板、轻型墙体隔板、粘土砖、蜂窝芯复合轻质板等,这些材料成本低、重量轻、美观大方,且生产过程中无污染,因此广受用户欢迎。目前,秸秆在建材领域内的应用已相当广泛,秸秆消耗量大、产品附加值高,又能节约木材,很有发展前景。按胶凝剂分有水泥基、石膏基、氯氧镁基、树脂基等。按制品分有复合板、纤维板、定向板、模压板、空心板等。按用途分为阻燃型、防水型、防腐型等。

5.3 生产工业原料

玉米秸、豆荚皮、稻草、麦秸、谷类秕壳等经过加工所制取的淀粉,不仅能制作多种食品与糕点,还能酿醋酿酒、制作饴糖等。如玉米秸含有 12%~15% 的糖分,其加工饴糖的工艺流程为:原料→碾碎→蒸料→糖化→过滤→浓缩→冷却→成品。

李莉等^[9]用稻草、玉米秸代替棉花、棉短绒为原料,制成纤维素,然后经化学改性、提纯等工序制得羧甲基纤维素产品,成本降低了 20%;张启峰等^[10]将玉米秸秆经过预处理、水解、净化、催化氢化、浓缩和结晶等步骤所制取的木糖醇,其质量可达到食品级标准;刘俊峰等^[11]以稻草和麦秆为原料,用复合添加法制取了糠醛,出醛率达理论出醛率的 70%~80%,废渣全部变为中性复合肥料;秸秆酸、碱水解发酵制酒精的工艺条件苛刻,对设备有腐蚀,运行成本高,而秸秆酶解发酵酒精选择性强,且较化学水解条件温和,目前国内外的研究已有一定进展^[12]。

5.4 用作食用菌的培养基

秸秆营养丰富、来源广泛、成本低廉,非常适用于多种食用菌的培养料。据不完全统计,目前国内外用各类秸秆生产的食用菌品种已达 20 多种,不仅包括草菇、香菇、凤尾菇等一般品种,还能培育出黑木耳、银耳、猴头、毛木耳、金针菇等名贵品种^[13]。一般 100 kg 稻草可生产平菇 160 kg(湿菇)或黑木耳 60 kg;而 100 kg 玉米秸可生产银耳或猴头、金针菇等 50~100 kg,可产平菇或香菇等 100~150 kg。据上海农学院一项测定证明,秸秆栽培食用菌的氮素转化效率平均为 20.9% 左右,高于羊肉(6%)和牛肉(3.4%)的转化效率,是一条开发食用蛋白质资源,提高人民生活水平的重要途径。

5.5 秸秆用于编织业

秸秆用于编织业最常见、用途最广的就是稻草编织草帘、草苫、草席、草垫、草编制品等。如草帘、草苫等可用于蔬菜工程的温室大棚中;草席、草垫既可保温防冻,又具有吸汗防湿的功效;而品种花色繁多的草编制品,如草帽、草提篮、草毡、壁挂及其它多种工艺品和装饰品,由于工艺精巧,透气保暖性好,装饰性佳,深受国内外消费者的喜爱,因而已经成为一条效益很好的创汇渠道。

6 结论和建议

目前秸秆的综合利用技术,正从早期的蔽日遮雨材料、直接或堆沤还田、烧火做饭取暖、加工粗饲料,向着快速腐熟堆肥、气化集中供气、优质生物煤、高蛋白饲料、轻质建材和易降解包装材料、有价工业原料及高附加值工艺品等方向发展。

从农业生态系统能量转化的角度来分析,单纯采用某一种利用方式,秸秆能量转化率和利用率会受到限制。因此,根据各类秸秆的组成特点,因地制宜,把其中几种方法有机地组合起来,形成一种多层次、多途径综合利用的方式,从而实现秸秆利用的资源化、高效化和产业化是未来生态农业发展的必然趋势。

参考文献:

- [1] 中国农业统计年鉴 2000[M].北京:中国农业出版社,2000.52.
- [2] 韩鲁佳,闰巧娟,刘向阳,等.中国农作物秸秆资源及其利用现状[J].农业工程学报,2002,18(3):87~91.
- [3] 张艳哲,李毅,刘吉平.秸秆综合利用技术进展[J].纤维素科学与技术.2003,11(2):57~61. (下转 19 页)

有强大的记忆功能和自学习自适应等特点,但是神经网络是属于一种黑箱模型,不能清楚控制和操作影响因素的作用关系,从而影响了对于系统进行调控的准确性。专家系统是以经验知识为基础的系统,对于复杂系统的故障诊断,以及反应器的运行状态预测等定性分析具有极大的优势,但是由于专家系统缺乏自学习自适应的能力,对于系统遇到从未出现过的问题时,则会显得无能为力了。

厌氧消化系统的专家系统和神经网络系统都是在厌氧消化机理不太完善的基础上产生的,都是以黑箱模型作为最基本的分析方法。

系统动力学则具有结构模型和功能模型两者之优点,既具有结构模型“白化”的特点,又具有功能模型的自学习和自适应能力等优点,是结构模型与功能模型的结合。所以,随着厌氧消化机理和结构模型的日益明确,选择系统动力学对其进行研究是非常适合的。

参考文献:

- [1] Contois D E. Kinetics of bacterial growth: relationship between population density and specific growth rate of continuous cultures[J]. J gen Microbiol, 1959, 21: 40 ~ 50.
 - [2] P L McCarty, F E Mosey. Modeling of anaerobic digestion processes (A discussion of concepts) [J]. Water Science and Technology, 1991, 24(8): 17 ~ 33.
 - [3] Mosey F E, Mathematical Modeling of the anaerobic digestion process: regulatory mechanisms for the formation of short-chain volatile acids from glucose [J]. Water Science and Technology, 1983, 15: 209 ~ 232.
 - [4] Andrews J F. Kinetics and characteristics of volatile acid production in anaerobic fermentation process [J]. Air and Water Pollution, 1965, 9(7/8): 127 ~ 162.
 - [5] Hill D T, et al. A dynamic model for simulation of animal waste digestion [J], J Water Pollution Control Federation, 1977, 49(10): 2129 ~ 2143.
 - [6] Costello D J. Dynamic modeling of a single-stage high-rate anaerobic reactor-I. model derivation [J]. Water Research, 1991, 25(7): 847 ~ 858.
 - [7] IWA. Task Group for Mathematical Modeling of Anaerobic Digestion Processes. Anaerobic Digestion Model No.1 (ADM1) [R]. IWA Scientific and Technical Report No. 12, 2002 London: IWA.
 - [8] 王科俊,等.神经网络建、预报与控制[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,1996.
 - [9] Jules Thibault, et al. On-line predication of fermentation variables using neural networks [J]. Biotechnology and Bioengineering, 1990, 36: 1041-1048.
 - [10] Guwy A J, et al. Neural network and on-off control of bicarbonate alkalinity in a fluidized bed anaerobic digester [J]. Water Research, 1997, 31(8): 2019 ~ 2025.
 - [11] 易赛莉,等.人工神经网络在 UASB 反应器处理生活污水中的模拟预测与应用 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(1): 46 ~ 50.
 - [12] 曹刚. 基于神经网络的厌氧反应器的模拟预测及运行状态估计 [D]. 浙江: 浙江大学, 2003.
 - [13] Joo-Hwa Tay, et al. A Fast Predicting Neural Fuzzy Model for High-Rate Anaerobic Wastewater Treatment Systems [J]. Water Research, 2000, 34(11): 2849 ~ 2860.
 - [14] 陈文颖,等.环境专家系统 [J]. 城市环境与城市生态, 1995, 8(3): 30 ~ 34.
 - [15] Barnett M W, Andrews J F. Expert System for Anaerobic-Digestion Process Operation [J]. ASCE Journal of Environmental Engineering, 1992, 118(6): 949 ~ 963.
 - [16] Forrest J F (胡汝鼎,等译). 工业动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1985.
 - [17] 王其藩. 高级系统动力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995.
-
- (上接 14 页)
- [4] 夏萍,江家伍.机械化秸秆还田技术及配套机具 [J]. 安徽农业大学学报, 2001, 28 (1): 106 ~ 108.
 - [5] Run Cang Sun, J M Fang, J Tomkinson. Delignification of rye straw using hydrogen peroxide [J]. Industrial Crops and Products, 2000, 12: 71 ~ 83.
 - [6] Jian-Xin Liu, E R Orskov, X B Chen. Optimization of steam treatment as a method for upgrading rice straw as feeds [J]. Animal Feed Science and Technology, 1999, 76: 345 ~ 357.
 - [7] Erik F K, Jens K K. Development and test of small-scale batch-fired straw boilers in Denmark [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 26: 561 ~ 569.
 - [8] 陈乐生. 关于秸秆气化中的问题与建议 [J]. 江西能源, 2001, (1): 46 ~ 47.
 - [9] 李莉,刘瑛. 用玉米秸秆制备接羧甲基纤维素 [J]. 精细化工, 2001, 18(6): 339 ~ 340.
 - [10] 张启峰,张世平,邵延文,等. 玉米秸秆制取木糖醇的研究 [J]. 黑龙江大学学报. 1996, 13(1): 102 ~ 107.
 - [11] 刘俊峰,易平贵,金一粟. 稻草、麦秆等农作物秸秆资源再利用研究 [J]. 资源科学, 2001, 23(2): 46 ~ 48.
 - [12] J N Nigam. Ethanol production from wheat straw hemicellulose hydrolysate by *Pichia stipitis* [J]. Journal of Biotechnology, 2001, 87: 17 ~ 27.
 - [13] Ruihong Zhang, Xiujin Li, J G Fadel. Oyster mushroom cultivation with rice and wheat straw [J]. Bioresource Technology, 2002, 82: 277 ~ 284.