

东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析

王金武 唐 汉 王金峰
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 作物秸秆是一种重要的可供开发利用的生物质资源,其综合利用对稳定农业生态平衡、促进农民增产增收、缓解能源与环境压力具有重要作用。结合东北地区地域环境及资源配置特点,综合评价了秸秆资源产量分布及焚烧问题,阐述分析了秸秆收储运模式和“五化”综合利用(能源化、饲料化、肥料化、原料化和基料化)技术特点、配套装备及应用现状。深入了解了国内外其他地区秸秆利用发展特点与借鉴经验,总结归纳了国家及地方各级政府秸秆利用政策措施。在此基础上结合秸秆利用政策、技术状况、市场企业需求及存在问题,指出了东北地区秸秆资源综合利用产业未来发展方向。

关键词: 秸秆; 资源; 综合利用; 东北地区

中图分类号: S216.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)05-0001-21

Comprehensive Utilization Status and Development Analysis of Crop Straw Resource in Northeast China

WANG Jinwu TANG Han WANG Jinfeng
(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Crop straw is an important available biomass resource. The comprehensive utilization of crop straw not only acts to keep the ecological balance and promote the farmers to increase production, but also eases the continued tension and pressure in energy and environment. Considering the characteristics of geographical conditions and resources allocation in Northeast China, the total distribution and burning pollution of crop straw were illustrated and evaluated. The technical features, equipment and utilization status of collection – storage – transportation mode and various technologies were analyzed, such as energy regeneration, fodder, fertilizer, raw material and basic material. The characteristic and experience of comprehensive utilization of crop straw in other domestic and international areas were generally studied. The policy measures by state and local governments were summarized. Finally, the future development direction and suggestion of straw resource industry were shown clearly based on policy, technology and the demands of market and enterprise.

Key words: straw; resource; comprehensive utilization; Northeast China

引言

作物秸秆是一类具有丰富氮、磷、钾及有机质养分的可再生生物质资源,是农业生产的主要副产品^[1]。东北地区是中国最主要的粮食及商品粮生产基地,其作物秸秆资源十分丰富,2015年东北地区可收集秸秆产量约1.59亿t,约占全国秸秆总产量19.2%^[2]。随着东北地区农业经济快速发展,农民生活条件和农村燃料结构改变,作物秸秆逐渐变

为农产品废弃物,秸秆焚烧成为春秋两季农忙时节的标志性现象,同时因其所引发的强雾霾天气等环境问题已成为亟需解决的社会性问题^[3-4]。自1992年国家及地方各级政府相继出台系列政策对秸秆禁烧及其综合利用的总体目标、重点任务和技术措施进行阐述^[5-7],并将秸秆资源综合利用规划为“五化”技术工程(能源化、饲料化、肥料化、原料化和基料化)。秸秆资源综合利用对稳定农业生态平衡、促进农民增产增收、缓解能源与环境压力具有

收稿日期: 2017-04-10 修回日期: 2017-04-24
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0300909-04)和“十二五”国家科技支撑计划项目(2013BAD08B04)
作者简介: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究,E-mail: jinwu@163.com

重要作用^[8]。目前东北地区虽通过多种途径利用秸秆资源,但由于部分政策规定较为模糊,部门监督指导落实程度较差,对农户及企业等公众指导激励性不强,且并未综合考虑地区气候条件、地域环境、资源配置、种植业结构、技术体系、资金状况及农户认识等因素^[9-11],导致秸秆整体利用尚处于初级粗放阶段,无法在短期内完全遏制秸秆焚烧现象。

在此背景下,本文对东北地区秸秆资源利用现状进行全面调研,结合相关文献研究,重点对其秸秆资源产量分布、焚烧问题、收储运模式及“五化”综合利用技术现状进行阐述分析,深入了解国内外其他地区秸秆综合利用发展特点与经验,归纳总结国家及地方各级政府秸秆利用政策措施,并指出秸秆综合利用产业未来发展方向与建议,以期为构建具有东北特色的秸秆资源综合利用技术体系提供参考。

1 东北地区作物秸秆资源概况

1.1 作物秸秆资源产量分布

近些年东北地区粮食产量逐年增加,其副产

品作物秸秆资源量也随之增长,作物秸秆资源量与区域作物产量具有显著正相关性^[12],同时与其种植规模、作物品种和气候条件等相关。通常采用传统谷草比法、农作物副产品比重法和农作物经济系数法等对作物秸秆产量进行估算评价^[13-15],根据东北地区作物产量数据对2008—2015年秸秆可收集产量进行统计估测,其估算公式为

$$S = \sum_{i=1}^8 S_i X_i d_i$$

(1)

式中 S——秸秆可收集总产量,万 t
S_i——第 i 年作物总产量,万 t
X_i——第 i 年作物谷草比
d_i——第 i 年作物秸秆可收集利用系数

参考农业区域规划研究^[16-17],对近年东北三省(黑龙江省、吉林省和辽宁省)秸秆可收集产量进行数据统计分析,其中作物谷草比主要参考《农业技术经济手册》,作物产量数据来源于《中国统计年鉴2008—2015》,结果如表1所示。

表 1 2008—2015 年东北地区主要作物秸秆可收集产量

Tab.1 Recyclable yield of main crop straw in Northeast China from 2008 to 2015

万 t

年份	黑龙江省				吉林省				辽宁省					
	玉米	水稻	大豆	总量	玉米	水稻	大豆	总量	玉米	水稻	大豆	高粱	花生	总量
2015	4 497	2 910	389	8 030	3 560	833	52	3 870	1 781	618	25	42	89	4 012
2014	4 242	2 978	596	7 857	3 468	777	48	4 504	1 485	597	28	44	124	2 216
2013	4 081	2 937	500	7 557	3 522	745	58	4 608	1 983	670	36	46	222	2 793
2012	3 664	2 872	600	7 185	3 272	703	52	4 250	1 806	671	40	48	233	2 617
2011	3 395	2 728	700	7 073	3 044	824	102	4 058	1 726	668	44	57	233	2 576
2010	2 949	2 439	757	6 411	2 543	752	112	3 607	1 460	605	44	56	192	3 877
2009	2 436	2 083	766	5 538	2 296	668	106	3 589	1 222	669	64	36	106	2 020
2008	2 395	2 008	803	5 372	2 643	766	117	3 621	1 508	668	63	50	90	2 356

由表1可知,2008—2015年东北地区作物秸秆总产量呈逐渐增长趋势,其历年年均增长率约6.1%,2015年秸秆可收集产量约1.59亿t,其中玉米秸秆总量约0.98亿t,水稻秸秆总量约0.43亿t。结合各省市作物种植区域特点分析,由于种植业结构、耕作环境及粮食部署方案等因素影响^[18-19],东北地区秸秆资源存在明显地域性特点,以玉米和谷物粮食作物秸秆为主。黑龙江省秸秆产量最高,约占东北地区秸秆总产量50.5%(2015年),其中哈尔滨市、绥化市及农垦系统秸秆产量约占全省2/3,玉米、水稻及大豆等3种主要作物秸秆产量约占全省秸秆总产量的93%。玉米秸秆主要分布于松嫩平原中南部半湿润区、松嫩平原西部干旱半干旱区三江平原温和半湿润区,处于第一、第二和第三积温带。水稻秸秆分布于黑龙江省各地,种植水稻万

公顷以上市县近40个,形成稻谷秸秆生产集中区。吉林省处于世界“三大黄金玉米带”地域之一,玉米占吉林省种植面积60%以上^[20-21],其玉米秸秆为该省主要秸秆资源种类,主要分布于长春市、松原市、四平市和吉林市等地。辽宁省以玉米、水稻、大豆、高粱和花生等为主要作物,其中玉米秸秆集中于辽中低丘平原区,包括沈阳市、鞍山市、营口市、辽阳市和铁岭市等地,约占辽宁省秸秆资源总产量的60%。水稻秸秆集中于辽河三角洲类型区,约占辽宁省秸秆资源总产量的30%。花生和大豆秸秆主要集中于阜新市、铁岭市、沈阳市和葫芦岛市等地,约占辽宁省秸秆资源总产量的5%。在秸秆综合利用发展过程中,应结合各地区作物种植结构特点,发展区域优势产业,将秸秆资源合理有效利用,建立布局合理、多元利用、节能环保的产业技术体系^[22]。

1.2 作物秸秆焚烧现状

近些年随着东北地区农业经济的快速发展,农民生活条件和农村燃料结构的改变,作物秸秆逐渐变为付之一炬的农产品废弃物。由于大面积秸秆焚烧和供暖起炉,加之近地面风力较小,大气层结构稳定,出现逆温现象,引发大范围强雾霾天气,造成秸秆资源严重浪费,同时易发生火灾与环境污染,影响道路及航空交通^[23-25]。秸秆焚烧所引发的强雾霾天气已成为东北地区乃至全国亟待解决的社会性问题,航拍焚烧现场如图 1 所示。

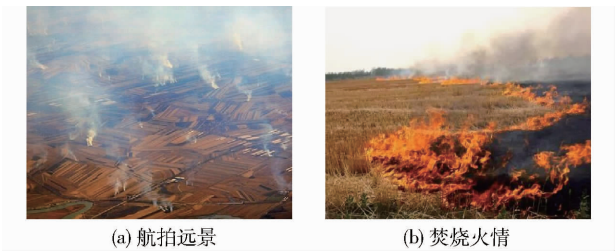


图 1 秸秆焚烧现场
Fig.1 Scenes of straw burning

对 2014—2016 年 11 月份东北三省(黑龙江省、吉林省和辽宁省)单周(11 月 2 日—8 日)秸秆焚烧火情进行统计(数据来源于国家环保部卫星环境应用中心),结果如表 2 所示。

表 2 2014—2016 年东北地区秸秆焚烧火情统计
Tab.2 Statistics of straw burning in Northeast China from 2014 to 2016

年份	黑龙江省		吉林省		辽宁省	
	火点 数/个	强度/ (个·kkm ⁻²)	火点 数/个	强度/ (个·kkm ⁻²)	火点 数/个	强度/ (个·kkm ⁻²)
2016	580	0.049 6	43	0.008 6	6	0.001 9
2015	663	0.056 7	119	0.023 8	54	0.016 7
2014	413	0.024 9	86	0.004 1	72	0.034 8

由表 2 可知,2016 年东北地区秸秆焚烧整体情况得到一定缓解,较 2015 年同期降低 207 个焚烧点,但对比全国各区域秸秆焚烧总数据,其整体仍居全国首位,其中黑龙江省第一,约占全国火点总数 76.7%。结合各省市秸秆焚烧火情分布情况可知,黑龙江省哈尔滨市、大庆市和绥化市,吉林省长春市、松原市和白城市,辽宁省沈阳市、鞍山市和辽阳市等地因秸秆焚烧带来的空气污染最为严重,城市 AQI(空气质量指数)达到 500。近些年省市各级政府积极采取各种措施手段^[26],加强推进生态文明建设、大气污染防治的战略部署,研究完善秸秆资源综合利用的政策措施,加大秸秆禁烧监管力度。但因涉及气候条件、地域环境、种植业结构、政策法规、技术水平、补贴资金及农户认识等多方面因素,造成无法在短期内完全解决东北地区秸秆焚烧问题,有效合理利用秸

秆资源已成为一个综合性系统工程。在未来规划发展中,应结合东北地区地域环境与资源配置特点,以提高农业发展效益,促进资源有效利用为目标,形成“疏堵结合、以疏为主、以堵促疏”的秸秆禁烧长效机制。

2 作物秸秆收储运技术模式

为减少因秸秆随意抛弃、焚烧等现象带来的系列环境问题,稳定农业生态平衡,缓解环境压力,国家及地方各级政府大力提倡秸秆资源综合利用,通过“五化”利用技术促进产业快速发展,而其综合利用前提保障是建立有效合理收储运技术体系与发展模式^[27]。秸秆收储运技术是在保证秸秆利用价值前提下,通过专业机具及时有效将散落的秸秆进行收集、运输和中间储存或直接运至秸秆利用场所的系统技术,是实现秸秆资源化、商品化利用的重要基础。秸秆收集环节是通过人工手动或机械收集将秸秆打包、打捆及压缩;秸秆储存环节是指在田边、收储站或处理厂等地的防潮防腐存放;秸秆运输环节是将秸秆从田间或收储站装载运输至资源加工厂。

由于各地区经济发展水平和自然地理条件差异,形成了不同种类的收储运技术模式,主要以分散型和集中型为主^[28-29]。其中分散型收储运模式以农户、专业合作经济组织或秸秆经济人为主体的,将分散秸秆收集后提供给企业,此种模式将零散秸秆收储运问题化整为零,但很大程度受制于个人,系统管理原则较差。集中型收储运模式以专业秸秆收储运公司或农场为主体,负责整体收集、晾晒、储存和运输等环节,并按秸秆资源利用进行分类交售,此种模式采用先进技术设备对秸秆原料进行处理,解决秸秆供应随意性风险,但一次性投入资金较大,固定成本较高。各体系模式建设与秸秆资源综合效益及产业发展具有重要关系,其总体模式规划如图 2 所示。

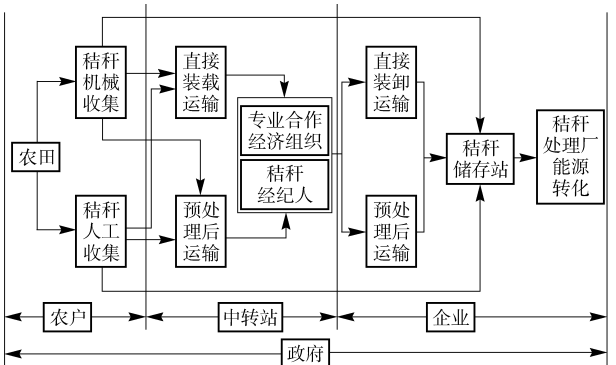


图 2 秸秆收储运技术模式
Fig.2 Straw collection – storage – transportation technology mode

在秸秆收储运系统中主要通过专业机具及时有效进行秸秆捡拾、打捆、压缩及装载运输,以便后续资源化利用处理。国外学者及农机制造企业对秸秆

捡拾打捆装载技术与装备的研究较早,已形成品种齐全、系列完整且智能标准的配套装备^[30-32];国内对此类技术研究相对较晚,通过引进消化吸收再创新模式进行机具改进优化,但其产品应用性能、可靠性及稳定性较低^[33-34],如打捆机核心部件打结器仍需依靠进口,未开发配置成熟智能监测控制系统,未有专业用于秸秆运输的机具(多在常规装载机机械基础上改造),目前东北地区应用较广的秸秆捡拾打捆运输典型配套机具如表3所示。

表 3 秸秆捡拾打捆运输环节典型配套机具

Tab.3 Typical machines of straw collection-storage-transportation			
类型	型号/厂家	总体结构	技术参数
秸秆捡拾打捆机(方捆)	BC5070 型秸秆打捆机/美国纽荷兰公司		捡拾宽度:1.90 m 草捆横截面积(高×宽):0.36 m×0.46 m 草捆长度(可调):0.31~1.31 m 喂入形式:旋转喂料器 配套动力:38.0 kW
	中农 4YF-360 型秸秆打捆机/中国农机院生物质技术中心		捡拾宽度:1.85 m 草捆横截面积(高×宽):0.36 m×0.46 m 草捆长度(可调):0.40~1.10 m 喂入形式:曲轴拨指 配套动力:44.0 kW
秸秆捡拾打捆机(圆捆)	ROLLANT 340RC 型秸秆打捆机/德国克拉斯公司		捡拾宽度:2.10 m 草捆直径:Φ1.25 m 草捆长度:1.20 m 喂入形式:ROTO CUT 配套动力:48.5 kW
	John Deere 568 型秸秆打捆机/美国约翰迪尔公司		捡拾宽度:1.80 m 草捆直径:Φ1.50 m 草捆长度:1.80 m 喂入形式:大螺旋喂入器 配套动力:41.2 kW
秸秆装载运输机	HCJC-28 型捡拾装载机/河北华昌机械公司		发动机:四缸 490 型 架体:下卧式交接 前铲长度:1.28~1.80 m
	AC-5T 型秸秆运输车/山东外星机械公司		载质量:5 t 动力类型:拖拉机牵引、液压传动 外型尺寸:8.80 m×3.30 m×4.00 m

秸秆收储运成本是制约秸秆资源经济发展和生产稳定的重要因素,相关调研考察表明^[35],秸秆收储运环节经济投入约占秸秆资源全程利用投入40%~50%,合理优化秸秆收储运模式,建立平衡稳定技术体系,对其综合利用发展大有裨益。近些年

国内外众多学者围绕秸秆收储运模式、收集半径及成本收益等问题开展研究。FORSBERG^[36]采用生命周期评价法对秸秆资源化运输链进行分析,研究各运输方式对环境效益影响;徐亚云等^[37]对不同秸秆收储运模式成本及能耗加以分析,建立收储运成本与利润间关系,为选择各地区合适收储运模式提供参考依据。但由于各地区经济发展水平及秸秆分布状况不同,无法建立完整系统的效益模型分析其内部具体关系,从成本收益角度考虑,应尽量在田间对秸秆就地加工,缩减作业环节,同时合理选择收集规模、收集量及运输路径,以有效降低收储运成本。

目前东北地区收储运技术实施主要存在以下问题:秸秆田地分散零碎,收储运难度大;收运周期短,若夹杂雨雪将影响收运效率及质量,其实际有效收运时间仅20余天;捡拾不净,小型农户垄作影响机具收净率;收运机械小型化,以小型捡拾机为主,打捆机逐渐由30 kg小方捆过渡至200 kg大圆捆,缺乏草捆捡拾车及秸秆收运车等配套车辆,且人工运输装卸成本较高;收储运成本难以消化,一般企业无法解决秸秆加工产品附加值低但收集成本高的矛盾,仅通过政府补贴推动无法平衡各环节利益。

为建立适用于东北地区的秸秆收储运技术模式,推进秸秆资源综合利用产业发展,借鉴国内其他省市较成功模式及国外收储运模式经验^[38-39],综合东北地区未来经济发展趋势与收集环境等状况,建议统筹分析秸秆收、储、运、用各环节支持方式,将分散型模式与集中型模式相结合,针对区域特点按秸秆产地合理区域半径的就近就地利用原则(建议有效收集半径50 km内),降低收储运成本,建立健全以政府推动为保障,秸秆利用企业和收储组织为核心,专业合作经济组织或秸秆经济人参与,市场化运作的专业化规模化秸秆收储运体系。投入资金及激励政策方面,建议健全秸秆综合利用税费、信贷及土地等优惠政策,设立综合利用及收储运专项补助资金(建议每667 m²耕地秸秆农户给予10~30元补贴);技术创新方面,制定合理的田间收储实施方案,积极扶持以机收捡拾打捆为重点的收储运服务组织发展,开发具有自主知识产权且适合东北地区的各类型规格捡拾机、打捆机及装载运输机等配套机具。各环节共同作用逐步构建“分整结合、区域收储、集中转运、规模利用”秸秆收储运技术体系与发展模式。

3 作物秸秆资源综合利用技术

1999年国家环保总局与农业部等部委联合发布《秸秆焚烧和综合利用管理办法》、2008年国务院发布《关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见》、

2011 年国家发改委、农业部和财政部联合发布《“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案》，至 2016 年国家秸秆产业技术创新战略联盟发行《中国秸秆产业蓝皮书》，一系列政策及著作相继对作物秸秆禁烧和综合利用进行界定，阐述总体目标、重点任务和技术措施，并将秸秆“五化”综合利用技术分解为 20 余项小类技术^[40-42]。目前东北地区秸秆以能源化发电利用及肥料化还田利用为主，饲料化利用和原料化利用潜力较大，基料化利用处于起步阶段，整体综合利用尚处于初级粗放阶段，深度开发力度不足^[43]。在未来发展中应结合地域环境及资源配置特点，集成能源化、饲料化、肥料化、基料化和原料化等成熟实用技术，构建具有东北特色“还田主导型、种养结合型、多元循环型、产业带动型”的秸秆综合利用技术模式并示范推广。

3.1 作物秸秆能源化利用技术

东北地区位于中国北方高寒地带，是国家实施振兴东北老工业基地战略的主要载体，能源对其整体发展具有至关重要作用。作物秸秆作为一种极具潜力的生物质资源，含有丰富的碳、氢和氧等养分，具有资源丰富、发热量高和节能环保等优点^[44-45]，可有效替代常规化石燃料，延长各产业链发展，缓解区域能源与环境压力。根据能源转化方式分为秸秆燃料转化技术（高效燃烧、固化成型和燃烧发电）、秸秆气化技术（生物气化和热解气化）和秸秆液化技术（纤维素乙醇和生物柴油）。

3.1.1 秸秆燃料转化技术

秸秆燃料转化技术主要包括高效燃烧技术、固化成型技术和混合发电技术。高效燃烧是以节约能源、提高效率为目标，将秸秆作为燃料直接燃烧的技术，是一种传统能源利用形式，其相对利用率较低，生态效益及社会效益较差。目前在东北地区偏远农村仍以此种方式为主进行炊事和取暖^[46-47]，但随着新农村建设和城镇化进程的推进，此种利用秸秆供能的传统方式将逐渐减少并被取代，各地区正逐步推广秸秆成型燃料锅炉供热（供蒸汽）取代现有燃煤锅炉，积极建设低碳能源生态村等文明工程。

秸秆固化成型是在一定温度及压力条件下通过专用设备将粉碎秸秆压缩为棒状、块状或颗粒状等成型燃料的技术，固化成型后秸秆体积压缩 1/18 ~ 1/15，热效率增加 50% ~ 70%，可提高其运输及贮存能力，改善燃烧性能及应用范围。根据成型工艺分为湿压成型、热压成型和碳化成型 3 种^[48-50]，其配套机具多针对玉米秸秆，较为成熟设备包括螺旋式挤压成型机、活塞冲压式成型机、压辊式挤压成型机和平模式成型机。目前相关技术创新多集中于秸

秆固化成型技术理论及配套机具研究。中国农业大学徐杨团队^[51]对影响秸秆生物质压缩、机械、流变及成型等工艺特性进行研究，为固化成型技术提供理论参考。东北林业大学王述洋团队^[52-53]针对北方秸秆燃料高效应用及固化成型技术进行研究，为固化成型技术在北方地区应用推广提供可行性建议。但上述研究多处于试验阶段，工艺技术成熟度有待提高。黑龙江省鸡西市、吉林省梨树镇及辽宁省凌源市等地对秸秆固化成型技术与机具已实现部分产业化和规模化生产。

燃烧发电是将秸秆直接燃烧或与煤炭、石油天然气等化石燃料混合燃烧或气化为可燃气体，进而驱动蒸汽轮机进行发电的现代化综合利用技术。此项技术可有效节省化石燃料用量，提高生物质能源利用率，减少温室气体排放，是最直接有效的秸秆利用途径之一。相关研究表明^[54]，单位质量秸秆的热量相当于标准煤的 1/2，而其平均含硫量仅为 3.8%。自 2005 年以来《中华人民共和国再生资源法》、《电网企业全额收购可再生能源电量监管办法》和《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》等相关政策法规的颁布促进了此项技术在国内推广发展。目前东北地区已形成较为成熟的秸秆生物质发电技术路线，黑龙江省庆安县、富裕县，吉林省白城市等地相继开展相关项目并建设大型秸秆发电厂，以便规模化秸秆资源收集。在秸秆能源发电建设规划过程中，应根据各地秸秆资源条件、分布特点、收集半径及保障能力，合理布局发展，并加强针对北方寒地秸秆燃料输送系统技术及发电锅炉的研发，解决目前绝大部分依靠进口发电设备，缺乏核心技术的问题。

3.1.2 秸秆气化技术

秸秆气化是一种将秸秆资源转化为清洁气态资源的生物质能转化技术，根据气化方法分为热解气化和生物气化。秸秆热解气化技术主要在控制氧含量条件下通过高温干燥、热解、燃烧及还原 4 个阶段将秸秆转化为一氧化碳、氢气及甲烷等混合可燃气体，并通过后处理方式经储气罐或地下管网形式输送。目前国内秸秆气化工程多适用于乡村小型集中供气和中小型气化发电，其整体效率较低，成本较高，且气化、焦油处理和发电系统装备改造难度较大^[55]。国内高校科研机构及企业在热解气化理论及设备等方面进行了积极研究，并逐渐进行应用推广。山东大学^[56]研究开发的 MW 级下吸式固定床气化反应炉，结合基于化学吸收的燃气净化技术，已在黑龙江伊春地区建设示范项目，是我国中等规模生物质气化技术的重要尝试。

秸秆生物气化，也称秸秆沼气，是一种通过微生

物厌氧消化作业将秸秆转化为生产沼气和固态有机肥料(沼渣)的处理技术。此项技术可有效解决沼气推广过程中原料不足的问题,同时其副产品沼液及沼渣可作为有机肥料施用,具有能耗低、无污染及经济效益好等优点^[57],其基本应用模式如图3所示。在东北地区冬季低温条件下秸秆沼气生产质量与利用效率均受到影响,存在一定应用局限性。东北农业大学李文哲团队^[58-59]研究提出了寒冷地区干湿耦合厌氧发酵技术和分布式新农村资源化技术,对其发酵罐体、搅拌装置、进料装置、出料装置的罐式连续干法发酵系统和沼肥田间机械化暗灌施肥机械进行研究,通过调整畜禽粪便及秸秆比例,实现寒区大型沼气工程发酵原料的稳定供应,解决冬季寒地沼气利用难题,该成果已与哈尔滨良大实业(集团)有限公司合作进行产业化推广,应用于黑龙江省哈尔滨市并建设生态产业园区。

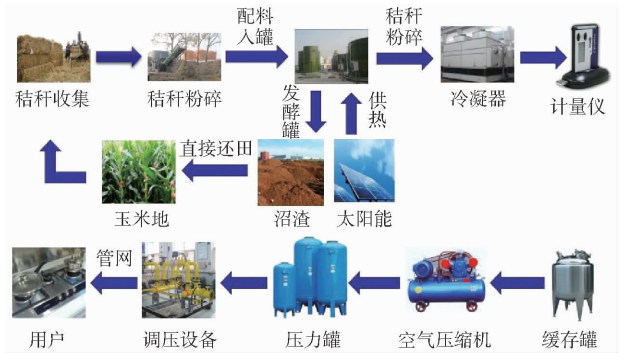


图3 秸秆沼气利用基本应用模式

Fig. 3 Basic application model of straw biogas utilization

3.1.3 秸秆液化技术

秸秆液化是通过物理、化学和生物等方法,在一定温度压力、溶解剂及催化剂作用下,使秸秆木质物质高分子结构裂解为小分子液态产物(醇类或可燃性油)的一种高效技术,可有效实现作物秸秆向液态燃料或化工原料的转变。此项技术主要包括原料处理、糖化水解、发酵和蒸馏4道工序,每道工序可选择的技术模式较多,应结合地区经济基础、技术条件和资源比例等因素进行规模化重点发展。浙江大学陈明^[60]对玉米秸秆制取燃料乙醇关键技术进行研究,为纤维素乙醇产业化提供理论参考。华南农业大学解新安等^[61-62]采用集总方法对秸秆在亚/超临界乙醇中液化机理进行试验研究,分析其水解临界规律。2002年开始在黑龙江部分地区进行秸秆液化制取乙醇的研究推广,至2004年在东北三省进行整体推广,虽然秸秆资源价格成本低廉,但其液化为生物燃料的工艺较复杂,所需能源消耗较大,且收储运费用过高,造成秸秆试制乙醇燃料经济效益

不具备较强市场优势。在未来发展过程中应坚持生物精炼与乙醇联产模式,提升拓展秸秆底物各组分经济价值,强化秸秆收储运技术网络,有效促进秸秆液态技术发展及推广。

3.2 作物秸秆饲料化利用技术

作物秸秆作为牧畜动物主要饲料之一,因富含不易消化的粗纤维素及木质素等非淀粉类物质,造成牧畜采食量小、消化率低、适口性差等问题,限制其在畜牧产业中发展^[63]。2011年农业部发布《全国节粮型畜牧发展规划(2011—2020年)》迅速推进了作物秸秆饲料化利用发展。秸秆饲料化利用对标准化规模养殖,解决“人畜争粮”,保障中国粮食安全产能具有重要意义^[64-65]。东北地区是秸秆饲料化利用发展核心区域,其秸秆饲料利用率逐年增长,但有效利用率较低,以黑龙江省饲料利用为例,2014年秸秆饲料化总量约1700万t,但仅20%秸秆经精细加工制成饲料,50%秸秆经简单盐化处理直接饲喂畜牧^[66]。秸秆饲料化利用的主要流程:作物秸秆→秸秆收储运→秸秆饲料转化→饲料,其中秸秆饲料转化是其系统核心技术,秸秆收储运是系统实施保障,在技术集成推广时应遵循目的统一、功能匹配、社会协调、整体优化等原则进行发展,其转化技术分类如图4所示。前文已对秸秆收储运技术模式进行阐述,在此重点总结分析秸秆饲料转化技术应用特点与现状。秸秆饲料转化技术是通过物理处理(粉碎软化、拉丝揉搓、压块粒化、蒸煮膨化和热喷)、化学处理(酸化、碱化、氧化、氨化和氨碱复合)和微生物处理(青贮、微贮、黄贮、发酵和酶解)等方式将粗质秸秆转化为优质饲料的技术。目前国内外对饲料转化技术及装备研究多集中于青贮收获、秸秆包膜、揉丝搅拌混合及压块加工等方面^[67-69],国

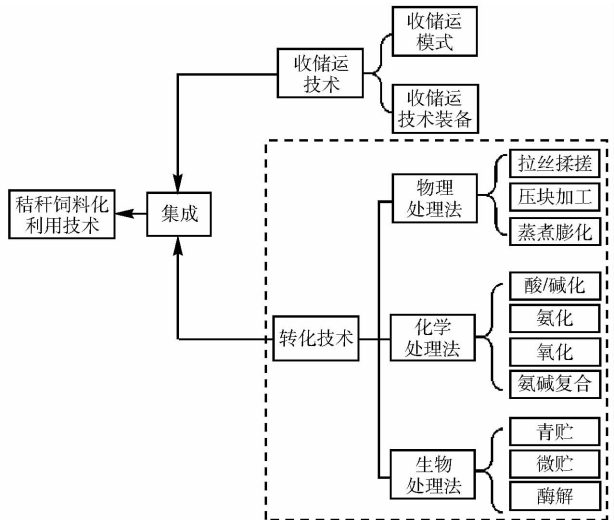


图4 秸秆饲料化利用技术分类

Fig. 4 Technical classification for straw feed unitization

外集成机电液控制等多项核心技术,已研制生产高速大型、系列完整、智能标准配套机具,但国内研究仍处于初级阶段,缺乏相关基础理论、工艺方法及机具研究,成熟产品应用较少^[70]。东北地区饲料转化机具应用以引进为主,其相关部分典型配套机具工作原理、技术特点及参数如表 4 所示。

表 4 秸秆饲料转化技术典型配套机具

Tab.4 Typical machines of straw feed conversion unitization technology

类型	型号/厂家	总体结构	工作原理	技术性能
秸秆青贮收获机	JAGUAR850 型自走式青贮饲料收获机/科乐收农机贸易(北京)有限公司		大型高效智能青贮饲料收获机集成多项核心关键技术,收获揉搓抛撒过程中,可调节籽粒破碎器和加速器间隙控制青贮作物流量及质量,同时大范围调节抛料能力及角度,减少动力需求及磨损程度	配套动力:315.0 kW 割台行数/幅宽:6 行/4.5 m 进料及预压紧辊数量:4 出料口旋转角度:210° 多作物籽粒破碎器直径:250 mm
秸秆包膜机	TSW202 型青贮打捆包膜一体机/日本 STAR 公司		通过驱动机具液压系统控制包膜双缠绕臂和包膜平台,包膜时将圆捆秸秆移至平台,平台翻转且双缠绕臂高速旋转进行包膜,主要适用大型圆捆秸秆包膜,实现自动打捆包膜一体化	配套动力:37.0~73.5 kW 包膜直径范围:0.5~1.3 m 适用材料:玉米青贮(含水率 60%~75%) 工作效率:20 t/h
秸秆揉丝机	9RS-70 型秸秆揉丝机/黑龙江省畜牧机械化研究所		通过输送机将待加工秸秆物料输送至揉搓室,经高速旋转锤片与揉搓板捶打摩擦切碎,将秸秆揉碎并经抛送风叶将其抛送室外	配套动力:≥37.0 kW 风送距离:4.0~8.0 m 揉丝长度:≤50.0 mm 工作效率:3.0~8.0 t/h
全混合日粮混合机	EUROMIX II270 型立式单搅龙全混合日粮混合机/法国 KUHN 公司		通过星型齿轮传动箱驱动立式锥形螺旋输送机进行运动,内部配置切刀及刀板实现扩散混合,且伴随向上喷发状混合	配套动力:≥59.0 kW 混合容量:12.0 m ³ 输送器型式:立式输送器 输送器数量:1
秸秆压块加工机	9KL-380 型秸秆饲料压块机/黑龙江省畜牧机械化研究所		通过立式平模压辊压制成形方式作业,压辊与压模间相对旋转使秸秆物料压入模孔,连续推压摩擦产生热量将物料在模内成形并被推出,与锥形集料箱碰撞使压块折断形成标准尺寸饲料块体	配套动力:22.0 kW 生产效率:300 kg/h 压缩形式:压辊平模 草块尺寸:32.0 mm×32.0 mm 成形密度:600~800 kg/m ³ 成形率:≥90%

3.2.1 秸秆饲料物理转化技术

秸秆拉丝揉搓和压块加工是目前东北地区应用较广、发展较快的物理处理方法^[71-72]。拉丝揉搓是将秸秆精细加工为柔软丝状物,提高牲畜适口性、采食率和消化率。实际生产应用证明^[73],通过揉搓技术研制的反刍动物全混合日粮(TMR)机具可有效将秸秆等粗饲料与多种添加剂充分混合配制,改善单喂时适口性差和消化率低等问题。黑龙江省畜牧机械化研究所^[74]设计了一种适用于大型秸秆密度板制造的滚刀式秸秆揉搓机,并对物料抛送过程机理进行研究。东北农业大学王德福团队^[75-76]设计了转轮式全混合日粮混合机,结合虚拟仿真优化、台架及田间试验,提高机具作业质量与效率。吉林大学^[77]采用仿生学原理对反刍动物瘤胃消化进行模

拟,提高揉搓过程作业质量,节约配套功率消耗。压块加工是将铡切或揉搓粉碎秸秆配混其他营养物质,经高温高压轧制成高密度块状或颗粒状饲料,以便于保存运输且防止霉变,此种处理方法可有效解决东北地区冬季饲料供给不足问题,在日常饲喂、抗灾保畜及商品饲料生产中均可取得较大经济效益。

3.2.2 秸秆饲料化学转化技术

化学处理法主要通过酸碱等化学试剂破坏秸秆细胞壁致密结构,增大纤维素孔隙度,改善秸秆适口性及营养价值。酸碱及氧化等处理方法存在污染严重、生产成本高等问题,正逐步被氨碱复合处理所取代^[78]。氨碱复合处理主要应用尿素和氢氧化钙溶液,克服常规氨化处理秸秆消化率不高等缺点,其应用成本较低,操作简单安全^[79]。目前东北地区部分

县村已采用氨碱复合方式对稻秆及麦秆进行处理。

3.2.3 秸秆饲料生物转化技术

物理及化学处理方法主要适用于反刍牲畜动物饲料,对单胃动物具有一定局限性。相对而言,微生物处理主要通过特定微生物及分泌物对秸秆进行降解处理,将高度聚合多糖分解为低分子多糖或单糖,有效拓展秸秆饲喂范围。其中青贮、微贮和酶解是目前较常用的微生物处理方法,也是政策积极鼓励推广技术^[80],如图 5 所示。东北农业大学王亮^[81]对高寒地区水稻秸秆青贮方式及饲喂效果进行了研究,重点分析了各菌种对处理质量的影响。沈阳农业大学孙清^[82]以纤维素酶对玉米秸秆进行酶解,探究温度、pH 值和酶浓度等因素对秸秆酶解转化影响。目前东北地区积极提倡秸秆饲料规模化优质生产,推广秸秆青贮、微贮及氨化等技术,根据各区域种植结构变化,适当扩大青贮种植,同时大力扶持青贮饲料基地及饲料加工机械化生产大型养殖企业发展,推进秸秆饲料化总体发展。

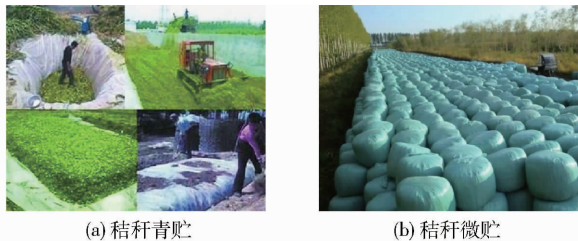


图 5 秸秆饲料生物转化技术主要方式

Fig. 5 Main ways of straw feed bioconversion technology

3.3 作物秸秆肥料化利用技术

东北黑土区是世界三大黑土区之一,典型黑土面积达 $1.18 \times 10^5 \text{ km}^2$,其耕地土层深厚、土壤结构优良,蕴含养分丰富,经多年大规模开垦已将东北地区打造为我国最重要的粮食及商品粮生产基地^[83-84]。但由于长期过度开垦耕作、重用轻养及化肥施用过量,造成土质结构破坏,有机质分解矿化,土壤肥力严重退化。相关研究表明^[85],近 20 年东北地区土壤有机质含量相对降低 22.26%,速效钾含量相对降低 34.47%,pH 值相对降低 0.38,速效磷相对增加 65.49% (大量施用化肥导致)。

秸秆肥料化利用技术主要通过多种秸秆还田方式实现,是目前东北地区秸秆利用最主要方式之一,以此项技术作为黑土地退化修复的突破口,可有效平衡补充土壤养分,改善土壤物理性状及蓄水能力,提高作物产量与生产潜力,同时与发展可持续性生态农业政策相匹配。根据还田形式可分为直接还田(高茬还田、粉碎还田和覆盖还田)、间接还田(堆沤还田、沼渣还田和过腹还田)和生化腐熟还田(催腐堆肥和醇菌堆肥),其中直接还田占秸秆总利用量

比例较大,约占黑龙江省秸秆用量 25.0%,吉林省秸秆用量 8.9%。

3.3.1 秸秆直接还田技术

秸秆直接还田技术主要通过农业机械将收获后秸秆粉碎并抛撒在田间后耕翻掩埋,或将整株秸秆及高茬直接覆盖于土壤深层还田,实现蓄水保墒、增加地表积温及土壤肥力的目的,具有快捷方便、高效低耗等优点,是东北地区重点推广技术^[86]。东北地区秋季收获期集中,冬季封冻时间长,土壤积温较低,气候干燥,直接还田秸秆分解速度缓慢,影响还田作业效果,因此对还田农艺要求较严格。相关试验研究表明^[87],其秸秆还田率应大于 85%,还田深度应大于 18 cm,才可基本满足秸秆还田腐烂降解要求。

目前东北地区大型垦区多通过大型联合收获机具在收获时进行同步粉碎还田作业^[88],代表机型如约翰迪尔公司 C120 型稻麦联合收获机,在机具后侧出料口处配置秸秆粉碎抛撒装置,收获过程中直接将脱离秸秆进行粉碎并均匀抛撒覆盖于地表,再通过旋耕或犁翻作业将粉碎秸秆埋入土壤。对于小型地块采用半喂入式联合收获机收获后秸秆整株放置于田间的情况,在秸秆风干后多采用粉碎还田机进行直接粉碎作业^[89],代表机型如格兰公司 FXN280 型秸秆粉碎灭茬还田机,通过高速旋转刀轴配置重载型刀片将秸秆粉碎(碎段长度 10 cm 内)并均匀铺撒于田间,再通过旋耕或犁翻进行翻埋还田。由于二次粉碎翻埋还田增加农户作业成本,影响经济收益,因此多数农户在耕整地时直接通过旋耕机或犁直接翻埋还田作业^[90],但其作业效果不理想,还田深度较浅,无法满足农艺要求。近些年国内创新研制多种机械化联合作业机具,在东北部分地区示范推广应用。东北农业大学王金武团队^[91-93]提出一种水稻秸秆整株深埋还田联合作业整地技术,研制了系列配套作业机具,该机具可一次性完成切土、碎土、埋土、压草及覆土等多道工序,将水稻整株秸秆直接深埋入地下,克服秸秆粉碎还田后在水整地过程中秸秆浮出的弊端,并于 2013—2016 年间在黑龙江省佳木斯市、绥化市和建三江农场等地开展示范推广。东北农业大学与黑龙江省农业机械运用研究所^[94]联合研制了一种秸秆开沟深埋还田机,通过配置链条传动式刀片将土壤切削为上宽下窄沟体进行秸秆深埋还田,为秸秆还田机具结构形式创新提供新思路。黑龙江省农业机械工程科学研究院设计了一种与大功率拖拉机配套的灭茬深松整地联合作业机^[95],对其关键部件高速旋耕灭茬机构、斜式深松土铲、波纹盘耙及碎土辊进行优化设计,经生

产应用证明,该机具可有效提高玉米耕整地及还田质量。吉林大学贾洪雷团队^[96]设计了一种双刀辊秸秆-根茬粉碎还田联合作业机,为东北地区保护性耕作及秸秆还田提供了一种机具选择的可行方案。沈阳农业大学林静团队^[97]结合东北地区玉米种植

农艺特点,设计了一种动定刀配合反旋式玉米秸秆还田机,并进行虚拟仿真分析及田间试验,为相关机具及关键部件优化设计提供参考。上述东北地区直接还田典型配套机具工作原理、技术特点及相关参数如表 5 所示。

表 5 秸秆直接还田技术典型配套机具

Tab.5 Typical machines of straw returning directly technology

型号	总体结构	工作原理	技术参数
John Deere C120 型 稻麦联合收获机配 套粉碎还田装置		通过配置于联合收获机出料口处的秸秆粉碎抛撒还田装置,将收获过程中脱离出秸秆切碎,并由多片宽撒尾片及粉碎室内空气罩共同作用,形成强大气流将粉碎秸秆均匀条铺抛撒,完成秸秆粉碎抛撒还田作业	结构型式:后置还田 作业速度:1.0~18.0 km/h 切碎长度:8.0~10.0 cm 抛撒均匀度:≥90%
格兰 FXN280 型秸 秆粉碎灭茬还田机		通过高速旋转甩刀总成(甩刀轴及重载型飞锤式刀片排列组合),对秸秆进行切割和撞击,在惯性力和重力作用下将粉碎秸秆抛撒至后方地面,刀具耕深由限位滑板控制,完成秸秆粉碎还田作业	配套动力:≥80.0 kW 作业速度:6.0~12.0 km/h 工作幅宽:2.80 m 切碎长度:8.0~10.0 cm 抛撒宽度:4.00~5.00 m 刀具型式:重载飞锤型刀片
1G-160 型旋耕机 (常规旋耕还田)		通过旋耕刀轴带动直形或弯形国标刀具进行正反转旋耕,将秸秆切碎埋入地表下,实现秸秆旋耕还田作业	配套动力:≥25.0 kW 作业速度:3.0~7.0 km/h 工作幅宽:1.60 m 耕层深度:9.0~12.0 cm 秸秆还田率:≥60% 刀具型式:国标 IT245 刀片
1L-320 型铧式犁 (常规犁翻还田)		通过驱动机具液压悬挂系统调节犁体水平位置与耕层深度,在前进过程中将土堡与秸秆根茬直接翻埋,实现秸秆翻埋还田作业	配套动力:≥18.0 kW 作业速度:3.0~5.0 km/h 工作幅宽:3.20 m 耕层深度:≥20.0 cm 秸秆还田率:≥50%
1SZH-210 型水稻 秸秆整株深埋还田 联合作业机		通过特制旋耕刀辊总成进行反转旋耕,将土壤及水稻整秆向后方抛出,经罩壳及挡草棚撞击,水稻整秆及土块被棚条挡住沿挡草棚内侧滑落,细小土块穿过挡草棚并均匀铺于其后,形成上细下粗、上小下大优质土壤层,实现整株秸秆翻埋还田作业	配套动力:≥73.5 kW 作业速度:1.0~1.5 km/h 工作幅宽:2.10 m 耕层深度:≥20.0 cm 秸秆还田率:≥90% 刀具型式:牛耳型弯刀
1KM-3 型秸秆开 沟深埋还田机		通过捡拾装置将地面铺放秸秆捡拾推送至输送喂入台,链条传动式刀片将土壤后抛切削为上宽下窄均匀沟槽,秸秆由输送装置输送至所开沟槽内,由镇压覆土装置进行覆土镇压,完成秸秆深埋还田作业	配套动力:≥88.0 kW 作业速度:1.0~1.5 km/h 工作幅宽:2.00 m 开沟深度:30.0~35.0 cm 开沟宽度:25.0 cm 覆盖率:≥70%
1GZM-350 型灭 茬深松整地联合作 业机		通过灭茬刀轴及配套 L 形灭茬刀高速旋转,快速切割切碎玉米地表和土壤中的秸秆残茬并进行翻埋,后侧配置斜式深松土铲、波纹盘耙及碎土辊,依次完成垄体深松碎土,细碎土块及部分秸秆残茬和镇压平整作业,实现秸秆灭茬还田深松整地联合作业	配套动力:≥250 kW 作业速度:3.0~6.0 km/h 工作幅宽:3.50 m 耕层深度:≥25.0 cm 秸秆还田率:≥80% 耙片型式:波纹耙片

3.3.2 秸秆间接还田技术

秸秆间接还田是利用作物秸秆进行养畜和发酵,在完成畜禽饲喂和生成沼气后,对其粪便或沼渣

等进行处理还田的一种提高秸秆利用效益的技术,可有效解决因未能充分分解的秸秆影响次年耕播作业、抑制出苗和诱发病虫害等问题,其发展与秸秆饲

料化及能源化具有一定关联,主要方式如图 6 所示。目前对间接还田粪便或沼渣的处理方式主要有 2 种:经传统方法堆沤,自然发酵后直接还田利用;经生物技术发酵处理,生产商品有机肥^[98]。上述处理方式均通过微生物降解秸秆中难以利用的纤维素、蛋白质和尿酸盐等高分子有机物,将其转化为菌体蛋白、氨基酸或其他促进作物生长有益成分,并利用微生物发酵高温杀灭病原菌和虫卵,实现肥料有效转化^[99]。此项技术发展及推广过程中,应考虑东北寒冷地区环境约束,调整畜禽粪便与秸秆资源混合比例,实现资源有效转化,构建循环生态农业模式,促进畜牧养殖产业及能源产业发展。

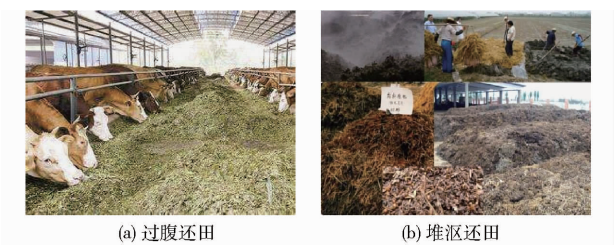


图 6 秸秆间接还田技术主要方式

Fig. 6 Main ways of straw returning indirectly technology

3.3.3 秸秆生化腐熟还田技术

秸秆生化腐熟还田是将粉碎后作物秸秆与生物菌剂、催化剂等混合,洒水堆压后高温沤制使高分子粗纤维分解为小分子糖醇等物质形成有机熟肥的技术,具有腐化分解速度快(节省腐熟时间 15~20 d),腐解充分完全,肥效作用较高且稳定等优点^[100]。南京农业大学丁为民团队^[101-102]将秸秆集沟还田技术与腐解剂喷施技术相结合,开沟深埋秸秆的同时喷施腐解剂,并研制开发相关配套机具,在长江中下游等多地区进行试验示范,如图 7 所示。甘肃农业大学戴飞等^[103]研制了一种秸秆快速腐解联合作业机,将秸秆快速腐解技术与田间秸秆机械粉碎作业相结合,在秸秆机械化还田作业的同时喷施腐菌剂加速秸秆腐解。生化腐熟技术在东北部分地区温室大棚瓜果及蔬菜等经济作物推广应用,但由于气候及土壤地温等因素限制,秸秆腐熟速率受到影响,在大田作物生产中应用较少。

3.4 作物秸秆原料化利用技术

秸秆纤维是一种天然纤维素,其生物降解性能好,可采用清洁生产工艺用于造纸原浆、轻型建材、包装材料及可降解农用生产材料等产品的生产制造,促进秸秆产业化高效利用^[104]。在国家“十二五”发展期间,东北地区有效利用秸秆资源丰富的优势,提高秸秆工业原料利用水平,多地试点建设秸秆造纸、秸秆木糖醇、活性炭及复合人造板等工程^[105]。根据作用转化对象分为清洁制浆技术、复



图 7 稻麦联合收获开沟埋草多功能一体机及作业效果
Fig. 7 Harvest ditch and stalk-disposing machine and its operation effect

合材料生产技术和农用材料配制技术。

3.4.1 秸秆清洁制浆技术

秸秆清洁制浆是通过有机溶剂、微生物或催化剂等,借助机械助力作用将秸秆中木质素与纤维素充分分离的生产技术,可有效缓解我国造纸原材料的短缺问题。常规用于造纸纤维原料秸秆为禾草类,包括稻草、麦秆、玉米秆和高粱秆等^[106]。华南理工大学陈克复团队^[107-108]建立了适用于我国秸秆制浆造纸的评价体系与模式,为秸秆制浆造纸总体规划提供思路;山东轻工业学院许伟^[109]采用多种木聚糖酶优化玉米秸秆制纸工艺,对开发新型基料造纸及提高纸张性能具有重要意义。近些年黑龙江省佳木斯市、庆安县,吉林省德惠市和辽宁省开原市等多地建设秸秆综合利用造纸工程项目,并进行相应外汇出口,使秸秆资源优势转化为经济优势,具有较为可观的发展前景。

3.4.2 秸秆复合材料生产技术

秸秆复合材料生产是以秸秆纤维为主要原料,配混一定比例高分子聚合基料及粘结剂,通过物理、化学或生物工程等手段,经特殊工艺处理为系列多用途可降解绿色循环新材料的技术。已利用此项技术进行轻型材料类的纤维板、复合板及空心砌块和餐饮包装类的餐具、筷子等^[110]的生产。西北农林科技大学丁武等^[111]采用热压成型工艺对秸秆复合餐具进行耐水性能研究;哈尔滨商业大学朱琳等^[112]采用压膜成型技术将玉米秸秆加工为性能较好可替代泡沫塑料的缓冲包装材料,并对其制备条件进行优化;南京林业大学周晓燕等^[113]采用轻质

秸秆板与其他材料组装的平压法研制秸秆复合墙体。秸秆复合材料制取技术的应用可缓解对塑料等材料应用压力,对人们生活品质提高,绿色生态环境发展具有重要意义,但由于相关技术工艺及市场企业效益等问题,制约其在东北地区发展。

3.4.3 秸秆农用材料配制技术

秸秆农用材料配制是将秸秆完全降解为植物纤维,混合配施生物基质进行农用材料二次转化的新型技术,对秸秆高值化利用具有重要意义。东北地区主要运用此种技术进行水稻育秧盘及纤维地膜等农用材料的研制。黑龙江八一农垦大学汪春团队^[114-115]研究了水稻植质钵育秧盘制备技术,并研制系列配套机具,在黑龙江部分垦区进行推广使用,如图 8a 所示。东北农业大学陈海涛团队^[116-117]分别以沼渣、水稻秸秆、大豆秸秆及玉米秸秆等为原料,对可降解植物纤维基地膜技术进行系列研究,实现了植物纤维地膜的制取,如图 8b 所示。上述研究成果为实现农业可再生资源循环利用提供有效技术支撑,但由于经济成本等因素制约,并未在东北地区大面积推广使用。

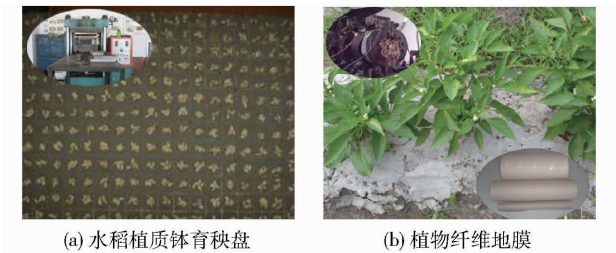


图 8 秸秆农用材料配制技术应用

Fig.8 Applications of straw agricultural material preparation technology

3.5 作物秸秆基料化利用技术

秸秆基料是指以秸秆为主要原料,加工制备为动物、植物及微生物生长提供良好条件和一定营养的有机固体物料。狭义的秸秆基料化仅指利用秸秆栽培食用菌的技术,但随着综合利用技术的发展,已将此项技术扩展至温室大棚育苗、花木基质和草坪基料等新途径^[118],如图 9 所示。根据秸秆品种、基料用途分为秸秆食用菌种植基料技术和秸秆植物栽培基料技术。1996 年中国农业科学院蔬菜花卉研究所蒋卫杰等^[119]首次提出有机生态型无土栽培,将腐熟玉米秸秆、消毒鸡粪等有机废弃物与草炭、炉渣等混合作为基质进行温室作物栽培试验,证明了作物秸秆作为栽培基质的可行性;大连民族学院胡传琪等^[120]以秸秆和木屑混合物作为基料培育滑菇,研究各混合条件下滑菇生长状况,确定其最优基料配比。目前国内秸秆基料化利用技术仍有待提高,生产工艺与流程尚不规范,缺乏统一科学操作标

准^[121]。东北地区对秸秆基料化应用比例较低,尚未建立健全管理制度和实施方案,仅在黑龙江省尚志市、牡丹江市、东宁市和伊春市,吉林省延边州和农安县,辽宁省本溪市和葫芦岛市等食用菌产业带进行应用生产。在未来发展过程中应拓宽黑木耳、猴头菇、香菇、杏鲍菇、白灵菇和姬松茸等珍稀食药菌的多元开发利用,扩大食用菌及其他产业对秸秆基料的需求。

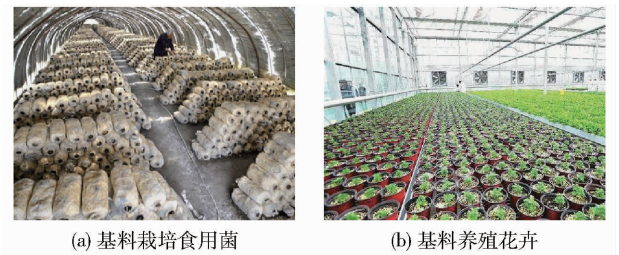


图 9 秸秆基料化技术应用

Fig.9 Applications of straw basic material technology

4 国内外其他地区秸秆利用特点与经验

东北地区因地制宜地发展秸秆资源综合利用产业,并已取得了一定成果,但实际秸秆利用必须以现代农业发展尤其是农业机械化推广应用为保障。相对而言,世界各农业发达国家一直十分重视秸秆循环利用、土壤用养结合等生态农业发展^[122-123],秸秆利用水平已达到世界前列,在此重点对国外及国内其他地区秸秆利用特点、发展经验进行系统梳理总结分析,以期完善东北地区秸秆资源利用技术体系与发展模式提供决策参考。

4.1 国外秸秆利用特点与发展经验

综合整理分析文献资料,农业发达国家注重秸秆综合利用技术研发,大力开展秸秆还田循环利用(直接还田和畜牧饲料),建立完善秸秆收储运技术体系,积极推行秸秆离田产业化利用(秸秆发电、成型燃料和工业原料等)^[124],其研究进展与成功经验对东北地区乃至全国范围秸秆综合利用具有重要启示与借鉴意义。

秸秆还田循环利用方式是秸秆资源利用体系中最经济且可持续的方法,可有效增加土壤有机质及微量元素等,在世界各地已得到普遍推行。相关资料表明^[125],欧美各国约 2/3 秸秆用于直接还田,约 1/5 秸秆用于饲料化利用,基本形成直接还田 + 厩肥 + 化肥“三合制”施肥制度。其中秸秆直接还田与现代农机耕作方式及机械化程度具有重要关系,发达国家多采用机械化收获同时,将秸秆直接粉碎均匀抛撒地表,通过旋耕或犁翻进行深埋还田。20 世纪 60 年代初美国全面实现谷物机械化收获,其配套新型秸秆还田装置也随之研制^[126],多年来

世界各地先后研制多种类型还田机具适用不同环境作物秸秆直接还田。20 世纪 50 年代,美国、西欧等地已规模化推广秸秆畜牧饲料转化^[127],研制秸秆捡拾、打捆、注氮及包膜一体化处理机具,实现自动调节、智能监测与控制等功能,可在田间直接进行氨化处理,并通过专用装载运输机具将秸秆运至处理场与精饲料混合搅拌进行全程机械化处理。其中以韩国为代表的家庭畜牧农场生产方式较为突出,其稻麦秸秆已实现全量化利用,近 20% 秸秆直接还田,80% 秸秆饲料转化利用^[128]。秸秆直接还田及畜牧饲料转化有效延长秸秆循环利用链条,形成“秸-畜-沼-肥”为主要方式的循环利用模式。其中德国是世界沼气循环利用水平最先进的国家之一^[129],建立以种养结合农场为单元,混合原料(秸秆、粪便、有机生活垃圾及有机工业废弃物等混合)与沼渣沼液肥料循环利用模式,截止 2012 年其沼气工程数量已达 7500 余座,其发电总量约为 20.5 亿 kW·h/a。

同时农业发达国家十分注重秸秆收储运体系与离田产业化发展,增加秸秆多样化利用形式,主要集中于能源化及工业化利用,如秸秆发电、纤维素乙醇、成型燃料及工业建材等。目前国外已形成了秸秆收储运与综合利用产业相衔接、与农业装备相配套的技术装备体系,满足新兴产业发展需求^[130]。在土地耕整、播种、田间管理、收获、秸秆收集储存及运输系列环节皆实现全程机械化,注重与工业化原料标准、社会经济协调、农机装备配套及信息化自动化技术的一致性。秸秆发电利用方面,丹麦是世界最早应用秸秆发电的国家,20 世纪 90 年代在其首都哥本阿根建立的阿维多发电厂是全球发电量最高、最环保的生物质燃料供电厂之一^[131],在运输、供料、燃料炉设计和运行等多环节充分考虑秸秆原料和设备标准化,目前正力争建立完全摆脱对化石能源依赖,且不含核能的能源体系;秸秆纤维素乙醇制取方面,美国、加拿大、英国及巴西等积极开展乙醇制取技术研发并实现试点生产运营,将其作为可再生能源技术突破与产业发展的制高点,2014 年美国第一家商业级纤维素乙醇生产厂正式投产^[132],其收集半径约 70 km,年均消耗玉米秸秆 28.50 万 t,年产纤维素乙醇约 1 亿 L;秸秆成型燃料制取方面,20 世纪 30 年代美国开始研究生物质成型燃料技术^[133],并研制开发螺旋挤压成型机具,经几十年研究完善,发达国家基本实现原料收集、粉碎、干燥及致密成型系列机械化、自动化和专业化生产,同时欧洲各国已开发适用于实际生产需求的配套采暖炉、热水炉及自动上料系统;秸秆工业建材制取方面,

20 世纪 70 年代国外对秸秆制造人造板物理及工艺特性进行大量研究,但并未真正推广应用,随着异氰酸酯(MDI)特性逐步拓展研究才较好解决秸秆人造板胶合问题,目前世界上秸秆人造板研发成效及生产规模最突出的仍为美国,比利时、瑞典和俄罗斯等国也制造出多种合格人造板产品^[134]。

4.2 国内其他地区秸秆利用特点与发展经验

经过长期努力国内部分地区秸秆综合利用产业也得到较好发展,结合自身环境资源、社会经济及人文习惯等特点,逐渐建立适用于该地区秸秆综合利用体系,如西南地区四川省,虽与东北地区秸秆利用具体情况存在一定差异,但其发展模式与经验仍具有重要参考价值。

四川省主要处于西南成都平原地区,是中国西部主要粮食及副产品生产基地,该地区气候温暖湿润,种植制度为一年两熟制(如稻-麦、稻-油或稻-稻),是我国秸秆资源总量集中分布区之一^[135]。近些年四川省结合地区条件、作物分布和农业功能等特点,将其划分为成都平原高效发展区、盆周丘陵循环发展区、盆周山地生态发展区和西高原特色发展区等 4 个区域^[136]。结合区域“五化”综合利用发展要求,重点开展稻麦轮作种植覆盖或粉碎全量还田技术、林果立体种植整秆还田及腐熟还田技术研究,积极探索超高茬麦套稻秸秆全量还田栽培技术等耕作方式;建立秸秆养牛-牛粪种菇-菇料还田饲料化技术模式,对秸秆饲料氨化、青贮及微贮等处理技术进行推广,保证西南地区节粮型畜牧业稳定发展;积极建立食用菌培养料集中处理中心,加大高附加值食用菌生产力度,带动区域市场经济发展^[137]。政策扶持及监管方面,积极鼓励农户及合作组织购买秸秆利用机具,在国家政策补贴基础上追加 20% ~ 30% 经济补贴,同时基本形成各市区禁烧管理网络,区域合作联防联控治理秸秆焚烧问题,其整体成效较为明显。多角度共同作用建立高产优质、低投高效、节能减排秸秆循环利用模式及运行保障体系。

5 政府政策及管理措施

近些年国家主管部门先后对秸秆焚烧及其综合利用办法制定系列政策措施,体现国家治理秸秆焚烧问题、发展秸秆综合利用决心^[138]。1999 年国家环保总局与农业部等部委联合发布《秸秆焚烧和综合利用管理办法》,在政策、资金及科技等方面提出并解释秸秆资源综合利用意义;2008 年国务院发布《关于加快推进农作物秸秆综合利用的意见》提出推进秸秆资源利用目标及任务;2011 年国家发改委及农业部等部委联合发布《“十二五”农作物秸秆综

合利用实施方案》提出加快秸秆资源化利用及引导各地区秸秆利用规划方案;2015 年国家发改委发布《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》再次强调秸秆资源综合利用与秸秆禁烧总体目标与重要任务。东北地区各级政府也结合自身发展特点,提出了多项政府政策与管理措施,如 2016 年辽宁省提出了全国首个省级秸秆焚烧防控政策《辽宁省秸秆焚烧防控责任追究暂行规定》。本文对各级政策措施进行总结分析:

(1)加强落实地方政府管理职责。结合地区实际情况,发挥秸秆资源综合利用统筹协调机制作用,制定各地方区域秸秆综合管理实施方案,重点任务逐级分解至各级政府部门,严格监控秸秆焚烧情况,建立考核问责制度。

(2)完善政策措施并加大扶持力度。针对各地区秸秆资源产业发展优势,研究多种秸秆资源利用方式途径,完善促进综合利用相关政策,积极加大秸秆综合利用专项资金支持力度,鼓励秸秆利用市场化、企业化发展。

(3)加强技术创新研发及推广应用。整合各领域科研资源,建立科技创新机制,结合国外先进技术进行自主创新,突破秸秆资源综合利用关键技术与薄弱环节,开展相关基层技能培训及技术推广。

(4)强化宣传引导教育。发挥媒体引导和监督作用,通过多种途径形式开展秸秆禁烧及综合利用的宣传教育,大力宣传秸秆资源利用对可持续型生态农业与循环农业的发展作用,对资源节约与农民增产增收的长效作用。

同时在资金利用、税收优惠和科研投入等方面也出台相关扶持政策^[139-140],如设定专项资金对秸秆能源化企业给予综合性补助及建设经费,提高企业盈利能力和生产积极性;规定秸秆工业化企业可享受资源企业所得税优惠政策;通过“863”计划、“973”计划及国家科技支撑计划等科研项目支持秸秆资源综合利用技术研发。

6 存在问题与发展建议

国家及地方各级政府积极推动秸秆资源综合利用技术实施,缓解秸秆焚烧带来的环境压力,但由于相关部分政策较为模糊,各级部门监督指导落实程度较差,对农户及企业等公众指导激励性不强,且并未综合考虑地区气候条件、地域环境、种植业结构、政策法规、技术水平、补贴资金及农户认识等因素,导致东北地区秸秆资源综合利用仍存在一定问题,无法在短期内完全遏制秸秆焚烧现象。目前东北地区秸秆资源利用主要存在以下问题^[141]:缺乏完整

扶持监管政策体系,缺乏针对黑土地修复、雾霾消除及秸秆资源综合利用等方面的政策体系,如秸秆还田成本增加缺乏资金补助,生物质发电电量受限,工业原料化缺少技术与经济扶持;缺乏成熟合理收储运技术模式研究与市场产业化协调发展意识,如秸秆收储运体系成本难以消化,收储运季节约束性强,储存难度大且收益无法平衡,秸秆还田增加农户作业成本,影响整体经济收益;缺乏先进成熟可靠技术支撑,针对东北寒地区域秸秆“五化”综合利用转化存在技术瓶颈,关键技术装备总体薄弱环节有待突破;缺乏宣传推广力度,疏堵结合协调不当,农户及企业固有思想及习惯无法根本解决焚烧问题。

在此背景下,综合分析东北地区秸秆资源综合利用现状、政府政策、技术应用、市场企业需求及存在问题,为促进东北地区秸秆综合利用产业发展,缓解秸秆焚烧环境与资源压力,提出秸秆综合利用发展方向与对策建议:

(1)构建扶持与监管政策体系,规范产业发展标准。结合东北地区实际情况,坚持疏堵结合、以疏为主、区域统筹、农用优先的原则,将政府支持、市场运作、社会参与、综合施策等方式相结合,力求在政策措施上有所突破。研究出台针对性强、可操作的秸秆综合利用政策,构建系统配套的集保障资金、运输绿色通道、用地支持、税收优惠及收储运为一体的政策体系,为完善国家层面的政策提供宝贵实践经验。形成中央政府督促指导、省级政府主导、县级政府具体实施的“三位一体”工作体系,建立以秸秆资源综合利用及焚烧监管为核心的工作评价、考核办法和奖惩机制。发挥国家、地方行业协会及骨干企业带头作用,建立规范秸秆深加工、收储运、生物质能源利用及污染排放等行业标准规范企业生产及市场秩序,促进秸秆资源综合利用产业健康有序发展。

(2)建立收储运技术体系,拓宽资源利用途径。按秸秆产地合理区域半径的就近就地利用原则,建立健全政府推动、秸秆利用企业和收储组织为轴心、专业合作经济组织或秸秆经济人参与、市场化运作的专业化规模化秸秆收储运体系模式。建立“还田主导型、种养结合型、多元循环型、产业带动型”秸秆综合利用技术模式,拓宽利用途径,发展肥料化和能源化优势技术环节,开发饲料化和原料化利用潜力,保证基料化稳步前行。

(3)突破综合利用共性关键技术,优化配套装备结构。探索建立适应东北地区的简便高效农作制度、栽培模式,提高秸秆利用质量和效率。积极引进融合国外先进前瞻技术,重点开展共性关键技术研究,建立以骨干企业为主体,大专院校及科研院所共

同参加的秸秆综合利用产学研攻关团队与创新体系,加大综合利用技术的研发、推广和全程服务。培养组建高素质科研工作团队,统领区域秸秆综合利用技术支撑工作,提高装备水平和技术能力,为政府科学决策和精准发力提供咨询服务。集成优化寒地秸秆综合利用配套装备,针对能源化利用,重点开展秸秆燃料输送系统技术与发电锅炉、秸秆生物质成型机理与螺旋式挤压成型机械、秸秆沼气厌氧发酵技术与深施沼渣机械研究,解决寒地秸秆能源损耗大、机具成型摩擦磨损严重、沼气生态工程原料短缺等问题;针对饲料化利用,重点开展秸秆捡拾打捆收集技术与青贮微贮氨化处理工艺研究,结合机电液自动控制技术研究配置金属检测、故障自动报警及智能信息反馈的捡拾打捆机械;针对肥料化利用,重点开展收获机配套秸秆粉碎均匀抛撒还田技术及高速粉碎机械、整株或高留茬秸秆深埋还田技术及整地作业机械、集中堆沤技术及工艺配比方法研究,解决秸秆粉碎抛撒分布不均、翻埋深度不足、堆腐发酵效率较低等问题;针对原料化利用,重点开展秸秆粉碎碾磨处理技术与破碎机械、人造板复合工艺与农用材料配比工艺优化研究,提高工业化原料物理性能并其降低生产成本;针对基料化利用,重点开展秸秆基料配方及工艺优化研究,注重基料化关键参数(温度、微生物、碳氮比和木质素等)及基础规律探索,分析各工艺模式与降解转化产量关系。

(4)推进秸秆资源市场化,加大宣传示范力度。评价秸秆资源长期经济价值及社会价值,积极鼓励地区秸秆资源利用工程发展,以市场为主导打通产业链各环节,以管理专业化、市场商品化发展模式促进资源稳定运行持续利用。坚持示范先行、以点带面的工作方法,以秸秆综合利用试点项目为载体,总结秸秆综合利用的典型模式,将工作措施、技术措施和政策措施有机结合,形成可持续、可复制、可推广的秸秆综合利用模式。发挥媒体舆论引导作用,广泛宣传秸秆综合利用及焚烧法律法规和先进典型,树立全民节约资源和保护环境意识。

7 结束语

随着东北地区农业经济的快速发展,作物秸秆资源总量将不断增加,目前东北地区在秸秆资源化利用方面已积累部分经验,但整体发展并不成熟,政策法规仍不完善,秸秆资源利用“五化”技术仍存在瓶颈难题,农民对其综合利用认识较低。在国家大力发展绿色循环可持续型生态农业的背景下,秸秆资源综合利用迎来了前所未有的机遇与挑战,具有巨大的市场开发潜力及产业发展空间。结合东北地区农业发展区域特点及产业结构,因地制宜地进行秸秆资源化利用,对振兴东北老工业基地,缓解东北资源及环境压力具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 韩鲁佳,闫巧娟,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.
HAN Lujia, YAN Qiaojuan, LIU Xiangyang, et al. Straw resources and their utilization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(3): 87-91. (in Chinese)
- 2 李海亮,汪春,孙海天,等. 农作物秸秆的综合利用与可持续发展[J]. 农机化研究,2017,39(8):256-262.
LI Hailiang, WANG Chun, SUN Haitian, et al. Comprehensive utilization and sustainable development of agriculture straw[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8): 256-262. (in Chinese)
- 3 方放,王飞,石祖梁,等. 京津冀秸秆养分资源及秸秆焚烧气体排放定量估算[J]. 农业工程学报,2017,33(3):1-6.
FANG Fang, WANG Fei, SHI Zuliang, et al. Quantitative estimation on straw nutrient resources and emission of pollutants from straw burning in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 1-6. (in Chinese)
- 4 谢光辉,王晓玉,任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. 生物工程学报,2010,26(7):855-863.
XIE Guanghui, WANG Xiaoyu, REN Lantian. China's crop residues resources evaluation[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, 26(7): 855-863. (in Chinese)
- 5 王红彦,王飞,孙仁华,等. 国内外农作物秸秆利用政策法规综述及其经验启示[J]. 农业工程学报,2016,32(16):216-222.
WANG Hongyan, WANG Fei, SUN Renhua, et al. Policies and regulations of crop straw utilization of foreign countries and its experience and inspiration for China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(16): 216-222. (in Chinese)
- 6 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.
BI Yuyun. Study on straw resources evaluation and utilization in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010. (in Chinese)
- 7 李安宁,范学民,吴传云,等. 保护性耕作现状及发展趋势[J]. 农业机械学报,2006,37(10):177-180.
LI Anning, FAN Xuemin, WU Chuanyun, et al. Situation and development trends of conservation tillage in the world[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 177-180. (in Chinese)
- 8 常娟,卢敏,尹清强,等. 秸秆资源预处理研究进展[J]. 中国农学通报,2012,28(11):1-8.
CHANG Juan, LU Min, YIN Qingqiang, et al. Progress of research on pretreatment of corn stover[J]. Chinese Agricultural

- Science Bulletin, 2012, 28(11): 1–8. (in Chinese)
- 9 檀勤良,邓艳明,张兴平,等. 农业秸秆综合利用中农户意愿和行为研究[J]. 兰州大学学报:社会科学版,2014,42(5):106–110.
- TAN Qinliang, DENG Yanming, ZHANG Xingping, et al. A study of farmers' willingness and behavior in the comprehensive utilization of agricultural straw[J]. Journal of Lanzhou University: Social Sciences, 2014, 42(5): 106–110. (in Chinese)
- 10 邢丽娜,陈劼,党金霞. 浅谈黑龙江农业秸秆资源综合利用[J]. 太阳能,2007(10):44–46.
- XING Li'na, CHEN Jie, DANG Jinxia. Comprehensive utilization of crop straw and stalk in Heilongjiang[J]. Solar Energy, 2007(10): 44–46. (in Chinese)
- 11 姚宗路,赵立欣,田宜水,等. 黑龙江省农作物秸秆资源利用现状及中长期展望[J]. 农业工程学报,2009,25(11):288–292.
- YAO Zonglu, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Utilization status and medium and long-term forecast of crop straw resource in Heilongjiang Province[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 288–292. (in Chinese)
- 12 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报,2009,25(12):211–217.
- BI Yuyun, GAO Chunyu, WANG Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 211–217. (in Chinese)
- 13 高利伟,马林,张伟峰,等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报,2009,25(7):173–179.
- GAO Liwei, MA Lin, ZHANG Weifeng, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7): 173–179. (in Chinese)
- 14 JOHNSON J M F, ALLMARAS R R, REICOSKY D C. Estimating source carbon from crop residue, roots and deposits using the national grain-yield database[J]. Agronomy, 2006, 98(3): 622–636.
- 15 毕于运,王道龙,高春雨,等. 中国秸秆资源评价与利用[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2008.
- 16 农业部关于印发《全国优势农产品区域布局规划(2008—2015年)》的通知[J]. 中华人民共和国农业部公报,2008,5(9):4–22.
- 17 关于印发《全国农业可持续发展规划(2015—2030年)》的通知[J]. 中华人民共和国农业部公报,2015,12(6):4–16.
- 18 梁书民. 中国农业种植结构及演化的空间分布和原因分析[J]. 中国农业资源与区划,2006,27(2):29–34.
- LIANG Shumin. Space distribution and reason analysis of the changes in agriculture planting structure of China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2006, 27(2): 29–34. (in Chinese)
- 19 KUIPER M. Village modeling: a Chinese recipe for blending general equilibrium and household model[D]. The Netherlands: Wageningen University, 2005.
- 20 高巍,陈志,黄玉祥,等. 吉林省农户采用玉米机械化收获的影响因素分析[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):175–179. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s34&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.034.
- GAO Wei, CHEN Zhi, HUANG Yuxiang, et al. Analysis of influencing factors on farmers' adoption of maize mechanized harvesting in Jinlin Province[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 175–179. (in Chinese)
- 21 徐莉,刘瑛,张锦川,等. 玉米全程机械化生产现状与模式的初探[C]//中国玉米生产机械化发展论坛论文集,泰安,2009.
- XU Li, LIU Ying, ZHANG Jinchuan, et al. Preliminary studies on current situation and model of maize whole course mechanization producing [C] // China Maize Producing Mechanization Development Forum Symposium, Taian, 2009. (in Chinese)
- 22 罗锡文,廖娟,胡炼,等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报,2016,32(1):1–11.
- LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1–11. (in Chinese)
- 23 张鹤峰. 中国农作物秸秆燃烧排放气态、颗粒态污染物排放特征的实验室研究[D]. 上海:复旦大学,2009.
- ZHANG Hefeng. A laboratory study on emission characteristics of gaseous and particulate pollutants emitted from agricultural crop residue burning in China[D]. Shanghai: Fudan University, 2009. (in Chinese)
- 24 GADDE B, BONNET S, MENKE C, et al. Air pollutant emissions from rice straw open field burning in India, Thailand and the Philippines[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5):1554–1558.
- 25 孔少飞,白志鹏,陆柄. 民用燃料燃烧排放 PM2.5 和 PM10 中碳组分排放因子对比[J]. 中国环境科学,2014,34(11):2749–2756.
- KONG Shaofei, BAI Zhipeng, LU Bing. Comparative analysis on emission factors of carbonaceous components in PM2.5 and PM10 from domestic fuels combustion[J]. China Environmental Science, 2014, 34(11): 2749–2756. (in Chinese)
- 26 农业部科技教育司. 全国农作物秸秆资源调查与评价报告[R]. 2010.
- 27 于兴军,王黎明,王锋德,等. 我国东北地区玉米秸秆收储运技术模式研究[J]. 农机化研究,2013,35(5):24–28.
- YU Xingjun, WANG Liming, WANG Fengde, et al. Research on technology mode of corn straw collection and delivery in northeast area[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(5): 24–28. (in Chinese)
- 28 张艳丽,王飞,赵立欣,等. 我国秸秆收储运系统的运营模式、存在问题及发展对策[J]. 可再生能源,2009,27(1):1–5.

- ZHANG Yanli, WANG Fei, ZHAO Lixin, et al. The operating model, exist problems and development strategies for China's storage and transportation systems[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(1): 1–5. (in Chinese)
- 29 平英华. 江苏农作物秸秆收储运体系研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 326–330.
PING Yinghua. Research on crop straw storage and transportation system in Jiangsu[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5): 326–330. (in Chinese)
- 30 KALIYAN N, MOREY R V. Natural binders and solid bridge type binding mechanisms in briquettes and pellets made from corn stover and switch grass[J]. Bioresearch Technology, 2010(101): 1082–1090.
- 31 KEANE M G, DRENNAN M J, MOLONEY A P. Comparison of supplementary concentrate levels with grass silage, separate or total mixed ration feeding, and duration of finishing in beef steers[J]. Livestock Science, 2006, 103(1): 169–180.
- 32 SHITO H, YAMANA N, SHIBUYA Y, et al. Development of the roll baler for chopped materials[J]. Jaro-Japan Agricultural Research Quarterly, 2006, 40(3): 233–237.
- 33 李叶龙, 王德福, 李东红, 等. 辊盘式圆捆机卷捆机理分析与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 45–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161207&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.007.
LI Yelong, WANG Defu, LI Donghong, et al. Theoretical analysis and experiment of baling mechanism of roll-disk round baler[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 45–52. (in Chinese)
- 34 王铁新. 玉米秸秆处理设备的设计与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
WANG Tiexin. Design and test on the processing equipment of maize straw[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 35 张先晓. 黑龙江省农作物秸秆资源化工程发展方略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
ZHANG Xianxiao. General plan on development of crop straw reuse in Heilongjiang province[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- 36 FORSBERG G. Biomass energy transportation analysis of bioenergy transport chains using life cycle inventory method[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 22(2): 17–30.
- 37 徐亚云, 田宜水, 赵立欣, 等. 不同农作物秸秆收储运模式成本和能耗比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 259–267.
XU Yayun, TIAN Yishui, ZHAO Lixin, et al. Comparison on cost and energy consumption with different straw's collection-store-transportation modes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(20): 259–267. (in Chinese)
- 38 KEVIN L Kenney. Understanding biomass feedstock variability[J]. Biofuels, 2013, 4(1): 5–8.
- 39 刘菊, 周定财. 江苏省秸秆收储运体系研究[J]. 中国资源综合利用, 2013, 31(2): 44–47.
LIU Ju, ZHOU Dingcai. Study on the straw storage and transportation system of Jiangsu province: model, problem and strategy[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2013, 31(2): 44–47. (in Chinese)
- 40 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物炭研究进展与前景[J]. 中国农业科学, 2013, 46(16): 3324–3333.
CHEN Wenfu, ZHANG Weiming, MENG Jun. Advances and prospects in research of binocular utilization in agriculture[J]. Scientia Agricultural Sinica, 2013, 46(16): 3324–3333. (in Chinese)
- 41 方放, 李想, 石祖梁, 等. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 228–234.
FANG Fang, LI Xiang, SHI Zuliang, et al. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(2): 228–234. (in Chinese)
- 42 农业部农业生态与资源保护总站. 秸秆综合利用中期评价报告[R]. 2013.
- 43 田宜水, 孟海波. 农作物秸秆开发利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- 44 崔明, 赵立欣, 田宜水, 等. 中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 291–296.
CUI Ming, ZHAO Lixin, TIAN Yishui, et al. Analysis and evaluation on energy utilization of main crop straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 291–296. (in Chinese)
- 45 陈冬冬, 高旺盛, 陈源泉. 中国农作物秸秆资源化利用的生态效应和技术选择分析[J]. 中国农学报, 2007, 23(10): 143–149.
CHEN Dongdong, GAO Wangsheng, CHEN Yuanquan. Analysis on the ecological effect and technological selection of straw resources utilization in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(10): 143–149. (in Chinese)
- 46 邢爱华, 刘罡, 王垚, 等. 生物质资源收集过程成本、能耗及环境影响分析[J]. 过程工程学报, 2008, 8(2): 305–313.
XING Aihua, LIU Gang, WANG Yao, et al. Economic, energy and environment analysis on biomass collection process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(2): 305–313. (in Chinese)
- 47 刘大生. 省柴节煤灶技术及其推广[J]. 可再生能源, 2005(6): 77–78.
LIU Dasheng. Technology and popularization of firewood and coal saving stove and kang[J]. Renewable Energy Resources, 2005(6): 77–78. (in Chinese)
- 48 赵立欣, 孟海波, 田宜水, 等. 生物质固体成型燃料加工工艺与设备[M]. 北京: 台海出版社, 2013.
- 49 丛宏斌, 赵立欣, 孟海波, 等. 立式环模秸秆压块机成型过程建模与参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(10): 187–193. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141029&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.10.029.
CONG Hongbin, ZHAO Lixin, MENG Haibo, et al. Process modeling and parameter optimization of straw briquetting machine

- with vertical circular mould[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 187 – 193. (in Chinese)
- 50 刘平义, 骆龙敏, 李海涛, 等. 秸秆多级辊压成型原理与装置设计[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 45(增刊): 317 – 323. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s049&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.049.
- LIU Pingyi, LUO Longmin, LI Haitao, et al. Theory and device design of multi-stage roller forming for straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 45(Supp.): 317 – 323. (in Chinese)
- 51 田潇瑜, 侯振东, 徐杨. 玉米秸秆成型微观结构研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 105 – 108.
- TIAN Xiaoyu, HOU Zhendong, XU Yang. Microstructure of corn stover briquette[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 105 – 108. (in Chinese)
- 52 刘向东, 常同立, 王述洋. 北方秸秆燃料高效应用分析及固化成型技术[J]. 能源研究与信息, 2010, 26(1): 21 – 28.
- LIU Xiangdong, CHANG Tongli, WANG Shuyang. Analysis of high-efficiency utilization of straw and the biomass-fuel briquetting technology[J]. Energy Research and Information, 2010, 26(1): 21 – 28. (in Chinese)
- 53 赵军, 王述洋, 乔国朝, 等. 转锥式生物质热解机械系统的研制[J]. 农业工程学报, 2007, 23(5): 198 – 200.
- ZHAO Jun, WANG Shuyang, QIAO Guochao, et al. Development of rotating cone biomass pyrolysis mechanical system[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(5): 198 – 200. (in Chinese)
- 54 刘贞, DAVID Fridley. 考虑维护土壤功能的玉米秸秆能源开发潜力模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 236 – 243.
- LIU Zhen, DAVID Fridley. Soil function-included simulation on energy development potential of corn stover[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 236 – 243. (in Chinese)
- 55 陈百明, 张正峰, 陈安宁. 农作物秸秆气化利用技术与商业化经营案例分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 124 – 128.
- CHEN Baiming, ZHANG Zhengfeng, CHEN Anning. Case analysis of crop straw gasification use technology and commercialization operation[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 124 – 128. (in Chinese)
- 56 林青山, 何艳峰, 刘金森, 等. 秸秆热解气化技术在提高秸秆利用率方面的优势分析[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(12): 4399 – 4403, 4410.
- LIN Qingshan, HE Yanfeng, LIU Jinmiao, et al. The comparative advantage analysis of straw pyrolysis and gasification technology in utilization of straw[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2014, 42(12): 4399 – 4403, 4410. (in Chinese)
- 57 李文哲, 徐名汉, 李晶宇. 畜禽养殖废弃物资源化利用技术发展分析[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 135 – 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130524&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.024.
- LI Wenzhe, XU Minghan, LI Jingyu. Prospect of resource utilization of animal faeces wastes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 135 – 142. (in Chinese)
- 58 李文哲, 丁清华, 魏东辉, 等. 稻秸好氧厌氧两相发酵工艺与产气特性研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 150 – 157. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160322&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.022.
- LI Wenzhe, DING Qinghua, WEI Donghui, et al. Aerobic and anaerobic two-phase fermentation process and biogas production characteristic of rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 150 – 157. (in Chinese)
- 59 李文哲, 袁虎, 刘宏新, 等. 沼液沼渣暗灌施肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 75 – 80. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141112&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.012.
- LI Wenzhe, YUAN Hu, LIU Hongxin, et al. Biogas slurry fertilizer applicator for dark irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 75 – 80. (in Chinese)
- 60 陈明. 利用玉米秸秆制取燃料乙醇的关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- CHEN Ming. Study on key technologies in ethanol production from corn stover[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- 61 陶红秀, 解新安, 郑朝阳, 等. 玉米秸秆纤维素在亚/超临界乙醇中的液化行为研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2014, 42(1): 196 – 204.
- TAO Hongxiu, XIE Xin'an, ZHENG Chaoyang, et al. Liquefaction of cornstalk cellulose in sub/super-critical ethanol[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2014, 42(1): 196 – 204. (in Chinese)
- 62 刘华敏, 解新安, 丁年平, 等. 亚/超临界乙醇液化玉米秸秆反应路径与机理[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 277 – 282.
- LIU Huamin, XIE Xin'an, DING Nianping, et al. Liquefaction reaction pathway and mechanism of cornstalk in sub-and super-critical ethanol[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 277 – 282. (in Chinese)
- 63 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[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 1 – 9.
- CHU Tianshu, YANG Zengling, HAN Lujia. Analysis on satisfied degree and advantage degree of agricultural crop straw feed utilization in China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 1 – 9. (in Chinese)
- 64 冯源, 吴景刚. 秸秆饲料加工利用技术的现状与前景[J]. 农机化研究, 2006, 28(6): 44 – 46.

- FENG Yuan, WU Jinggang. Present situation and prospects of straw forage process and utilization technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006, 28(6): 44–46. (in Chinese)
- 65 姚继广. 畜禽标准化规模养殖[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2011.
- 66 刘立军. 黑龙江省秸秆饲料转化利用现状及发展前景初探[J]. 畜牧兽医科技信息,2015,22(7):118.
- 67 万其号,王德成,王光辉,等. 自走式牧草青贮联合装袋机设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(19):30–37.
WAN Qihao, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and experiment of self-propelled grass silage combined bagging machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(19): 30–37. (in Chinese)
- 68 BERND K. Drive system for a crop processing device and a crop transport device of a harvesting machine; US, US6810649B2 [P]. 2004–11–02.
- 69 万霖,车刚,汪春,等. 4QZR–30 型青贮饲料收获机设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(3):187–190.
WAN Lin, CHE Gang, WANG Chun, et al. Design and test 4QZR–30 forage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 187–190. (in Chinese)
- 70 李波. 挤出机设计理论和计算[M]. 北京:中国建材工业出版社,2010.
- 71 范林,王春光,王洪波,等. 揉碎玉米秸秆可压缩性研究[J]. 农业机械学报,2008,39(11):76–80.
FAN Lin, WANG Chunguang, WANG Hongbo, et al. Study on the compressibility of maize straw rubbed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 76–80. (in Chinese)
- 72 田宜水,姚宗路,欧阳双平,等. 切碎农作物秸秆理化特性试验[J]. 农业机械学报,2011,42(9):124–128,145.
TIAN Yishui, YAO Zonglu, OUYANG Shuangping, et al. Physical and chemical characterization of biomass crushed straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 124–128,145. (in Chinese)
- 73 KALIYAN N, MOREY R V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products[J]. Biomass and Bioenergy, 2009, 33(3): 337–359.
- 74 陈海霞,董德军,张凤菊. 大型秸秆揉搓机的研究设计[J]. 农机化研究,2005,27(1):177–178.
CHEN Haixia, DONG Dejun, ZHANG Fengju. Study and design of big straw processor[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005, 27(1): 177–178. (in Chinese)
- 75 于克强,李利桥,何勋,等. 转轮式全混合日粮混合机试验设计与机理分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(7):109–117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150717&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.017.
YU Keqiang, LI Liqiao, HE Xun, et al. Experimental design and principle analysis on paddle-wheel total mixed ration mixer[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 109–117. (in Chinese)
- 76 杨星,于克强,王德福. 基于 EDEM 的转轮式 TMR 混合及混合性能数值模拟[J]. 农机化研究,2017,39(3):218–223.
YANG Xing, YU Keqiang, WANG Defu. Numerical simulation on mixing performance of paddle-wheel total mixed rotation mixer based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 218–223. (in Chinese)
- 77 陈莉,孙永海,谢高鹏,等. 基于离散元法的咀嚼过程分析[J]. 吉林大学学报:工学版,2014,44(5):1517–1524.
CHEN Li, SUN Yonghai, XIE Gaopeng, et al. Chewing process analysis based on the discrete element method[J]. Journal of Jilin University: Engineering Science, 2014, 44(5): 1517–1524. (in Chinese)
- 78 马兴元,刘琪,马君. 氨化预处理对生物质秸秆厌氧发酵的影响[J]. 生态环境学报,2011,20(10):1503–1506.
MA Xingyuan, LIU Qi, MA Jun. The effects of ammoniation pretreatment on anaerobic fermentation of the biomass straw[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(10): 1503–1506. (in Chinese)
- 79 LIU Dan, LIU Jianxing, ZHU Suli, et al. Histological investigation of tissues and cell wall of rice straw influenced by pretreatment with different chemicals and rumen degradation[J]. Journal of Animal and Feed Science, 2005, 14: 367–381.
- 80 ZHENG Yi, YU Chaowei, CHENG Yushen, et al. Effects of ensilage on storage and enzymatic degradability of sugar beet pulp[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(2): 1489–1495.
- 81 王亮. 高寒地区水稻秸秆青贮方式及饲喂奶牛效果的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2014.
WANG Liang. Study on the way of rice straw silage and feeding dairy cattle in cold area[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- 82 孙清,成娜,赵凤琴. 玉米秸秆酶解条件的试验研究[J]. 农机化研究,2009,31(6):132–134.
SUN Qing, CHENG Na, ZHAO Fengqin. Experimental research on the conditions for enzymatic of corn stover[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(6): 132–134. (in Chinese)
- 83 中国水土流失与生态安全综合科学考察东北组. 中国水土流失防治与生态安全(东北黑体区卷)[M]. 北京:科学出版社,2010.
- 84 中国农业部,美国能源部项目专家组. 中国生物质资源可获得性评价[M]. 北京:中国环境科学出版社,1998.
- 85 汪景宽,李双异,张东旭,等. 20 年来东北典型黑体地区土壤肥力质量变化[J]. 中国生态农业学报,2007,15(1):19–24.
WANG Jingkuan, LI Shuangyi, ZHANG Dongxu, et al. Spatial and temporal variability of soil quality in typical black soil area in Northeast China in 20 years[J]. Chinese Journal of Eco-Agricultural, 2007, 15(1): 19–24. (in Chinese)
- 86 余坤,冯浩,李正鹏,等. 秸秆还田对农田土壤水分与冬小麦耗水特征的影响[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(10):116–123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141019&journal_id=jcsam. DOI:10.

- 6041/j. issn. 1000-1298. 2014. 10. 019.
- YU Kun, FENG Hao, LI Zhengpeng, et al. Effects of different pretreated straw on soil water content and water consumption characteristics of winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(10): 116 – 123. (in Chinese)
- 87 张帅,孔德刚,常晓慧,等. 秸秆深施对土壤蓄水能力的影响[J]. 东北农业大学学报,2010,41(6):127 – 129.
- ZHANG Shuai, KONG Degang, CHANG Xiaohui, et al. Effect of straw deep application on soil water storage capacity[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41(6): 127 – 129. (in Chinese)
- 88 周勇,余水生,夏俊芳. 水田高茬秸秆还田耕整机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(8):45 – 49,77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120809&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. 08. 009.
- ZHOU Yong, YU Shuisheng, XIA Junfang. Design and experiment of cultivator for high straw returning in paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 45 – 49, 77. (in Chinese)
- 89 李永磊,宋建农,康小军,等. 双铧秸秆还田旋耕机试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(6):45 – 49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130609&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2013. 06. 009.
- LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Xiaojun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 45 – 49. (in Chinese)
- 90 付敏,李锐,马雷. 轴向振荡式秸秆粉碎机研制与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(22):16 – 22.
- FU Min, LI Rui, MA Lei. Development and test of straw grinder with axial vibration screen type[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 16 – 22. (in Chinese)
- 91 王金武,王奇,唐汉,等. 水稻秸秆深埋整秆还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):112 – 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150916&journal_id=jcsam. DOI:10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2015. 09. 016.
- WANG Jinwu, WANG Qi, TANG Han, et al. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 112 – 117. (in Chinese)
- 92 王金武,尹大庆,韩永俊,等. 水稻秸秆整株还田机的设计与试验[J]. 农业机械学报,2007,38(10):54 – 56.
- WANG Jinwu, YIN Daqing, HAN Yongjun, et al. Design and experiment of whole rice straw returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 54 – 56. (in Chinese)
- 93 葛宜元,王金武,李世伟,等. 整株秸秆还田机刀轴载荷谱编制与疲劳寿命估算[J]. 农业机械学报,2009,40(3):77 – 80.
- GE Yiyuan, WANG Jinwu, LI Shiwei, et al. Compiling and fatigue life estimation of the cutter shaft of the whole-straw recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 77 – 80. (in Chinese)
- 94 王奇. 水稻整秆深埋还田装置设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
- WANG Qi. Design and experiment of rice straw deep buried and whole straw returning device[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 95 杨华,王欣,孙士明,等. 1GZM – 350 型灭茬深松整地联合作业机的研究[J]. 农机化研究,2015,37(11):141 – 147.
- YANG Hua, WANG Xin, SUN Shiming, et al. Study on the type of 1GZM – 350 stubble subsoiling combined machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(11): 141 – 147. (in Chinese)
- 96 贾洪雷,马成林,刘枫,等. 秸秆与根茬粉碎还田联合作业工艺及配套机具[J]. 农业机械学报,2005,36(11):52 – 55.
- JIA Honglei, MA Chenglin, LIU Feng, et al. Study on technology and matching machine for stalk/stubble breaking and mulching combined operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 52 – 55. (in Chinese)
- 97 薄鸿明,林静. 玉米秸秆还田机的设计与参数研究[J]. 农机化研究,2016,38(11):99 – 103.
- BAO Hongming, LIN Jing. The design and simulation analysis of maize field straw chopper[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 99 – 103. (in Chinese)
- 98 南雄雄,田宵鸿,张琳,等. 小麦和玉米秸秆腐解特点及对土壤中碳、氮含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2010, 16(3):626 – 633.
- NAN Xiongiong, TIAN Xiaohong, ZHANG Lin, et al. Decomposition characteristics of maize and wheat straw and their effects on soil carbon and nitrogen contents[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 626 – 633. (in Chinese)
- 99 BAUMANN K, MARSCHNER P, SMERNIK R J, et al. Residue chemistry and microbial community structure during decomposition of eucalypt, wheat and vetch residues[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(9): 1966 – 1975.
- 100 吴琴燕,陈宏州,杨敬辉,等. 不同腐解剂对麦秸秆腐解的初步研究[J]. 上海农业学报,2010,26(4):83 – 86.
- WU Qinyan, CHEN Hongzhou, YANG Jinghui, et al. Preliminary study on effects of different decomposers on wheat straw[J]. Acta Agricultural Shanghai, 2010, 26(4): 83 – 86. (in Chinese)
- 101 陈玉仑,丁为民,汪小昆,等. 稻麦联合收获开沟埋草多功能一体机设计[J]. 农业机械学报,2009,40(8):62 – 66.
- CHEN Yulun, DING Weimin, WANG Xiaochan, et al. Design of harvest ditch and stalk-disposing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 62 – 66. (in Chinese)
- 102 方志超,刘玉涛,丁为民,等. 微生物菌喷施对集沟还田稻麦秸秆的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(23):187 – 194.

- FANG Zhichao, LIU Yutao, DING Weimin, et al. Effect of microbial spraying on wheat and rice straw returning to ditch[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 187–194. (in Chinese)
- 103 戴飞,张锋伟,赵春花,等. 快速腐熟秸秆还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(4):47–51.
DAI Fei, ZHANG Fengwei, ZHAO Chunhua, et al. Design and experiment on straw returning machine with fast decomposing inoculant spray equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(4): 47–51. (in Chinese)
- 104 李宗正. 禾草类纤维纸浆造纸[M]. 北京:中国轻工业出版社,2013.
- 105 国家发改委、农业部、财政部发布“十二五”农作物秸秆综合利用实施方案. 支持科学利用秸秆原材料清洁制浆造纸[J]. 中华纸业,2012,33(1):84.
- 106 张辉,王淑梅,程金兰,等. 我国制浆造纸装备科学技术的发展[J]. 中国造纸,2011,30(4):55–63.
ZHANG Hui, WANG Shumei, CHENG Jinlan, et al. Advances in pulping and papermaking equipment science and technology[J]. China Pulp & Paper, 2011, 30(4): 55–63. (in Chinese)
- 107 陈克复,田晓俊,王斌,等. 利用农业秸秆制浆造纸所实施的先进技术体系的优选与评价[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2015,43(10):122–130,139.
CHEN Kefu, TIAN Xiaojun, WANG Bin, et al. Optimization and evaluation of advanced technologies applied to pulp and papermaking using agricultural straw[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2015, 43(10): 120–130, 139. (in Chinese)
- 108 陈克复,李军. 纸浆清洁漂白技术[J]. 中华纸业,2009,30(14):6–10.
CHEN Kefu, LI Jun. Clean bleaching technologies for pulps[J]. China Pulp & Paper Industry, 2009, 30(14): 6–10. (in Chinese)
- 109 许伟. 半纤维素对纸浆成纸性能的影响与生物质利用研究[D]. 济南:山东轻工业学院,2012.
XU Wei. Effect of hemicelluloses on paper properties and study of biomass utilization[D]. Ji'nan: Shandong Polytechnic University, 2012. (in Chinese)
- 110 何玉凤,钱文珍,王建凤,等. 废弃生物质材料的高附加值再利用途径综述[J]. 农业工程学报,2016,32(15):1–8.
HE Yufeng, QIAN Wenzhen, WANG Jianfeng, et al. High value-added reutilization approach for waste biomass materials[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 1–8. (in Chinese)
- 111 丁武,杨中平. 热压成型工艺对秸秆复合餐具耐水性能的影响[J]. 西北农林科技大学:自然科学版,2003,31(2):137–140.
DING Wu, YANG Zhongping. Study on the effects of process conditions on water-tolerance of one-time compound dinner-plate with cornstalk[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2003, 31(2): 137–140. (in Chinese)
- 112 朱琳,刘壮,安丽娟,等. 玉米秸秆纤维缓冲包装材料制备条件优化[J]. 包装工程,2011,32(7):5–8.
ZHU Lin, LIU Zhuang, AN Lijuan, et al. Preparation condition optimization of corn stalk fiber cushioning material[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(7): 5–8. (in Chinese)
- 113 ZHOU Xiaoyan, ZHOU Dingguo, LI Jian. The review and prospect of straw-based wallboard in china[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2005, 29(6): 109–113.
- 114 汪春,衣淑娟,郑桂萍,等. 水稻植质钵育秧盘及其制备方法:中国,ZL200810137207[P]. 2011–12–11.
- 115 张欣悦,汪春,李连豪,等. 水稻植质钵育秧盘制备工艺及参数优化[J]. 农业工程学报,2013,29(5):153–162.
ZHANG Xinyue, WANG Chun, LI Lianhao, et al. Preparation technology and parameters optimization for seedling-growing bowl tray made of paddy straw[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5): 153–162. (in Chinese)
- 116 陈海涛,明向兰,刘爽,等. 废旧棉与水稻秸秆纤维混合地膜制造工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2015,31(13):292–300.
CHEN Haitao, MING Xianglan, LIU Shuang, et al. Optimization of technical parameters for making mulch from waste cotton and rice straw fiber[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 292–300. (in Chinese)
- 117 刘环宇,陈海涛,侯磊,等. D200 型秸秆纤维制取机原料供给系统优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(3): 92–98. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170311&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.011.
LIU Huanyu, CHEN Haitao, HOU Lei, et al. Optimal design and experiment for raw material supply system of D200 straw fiber extruder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 92–98. (in Chinese)
- 118 石祖梁,王飞,李想,等. 秸秆“五料化”中基料化的概念和定义探讨[J]. 中国土壤与肥料,2016,52(6):151–155.
SHI Zuliang, WANG Fei, LI Xiang, et al. The discussion on concept and definition of straw substrate utilization[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2016, 52(6): 151–155. (in Chinese)
- 119 蒋卫杰,郑光华,汪浩,等. 有机生态型无土栽培技术及其营养生理基础[J]. 园艺学报,1996,23(2):139–144.
JIANG Weijie, ZHENG Guanghua, WANG Hao, et al. Study on technique of ecological sound organic soilless culture and its nutrient physiology[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1996, 23(2): 139–144. (in Chinese)
- 120 胡传琪,江洁,陈静慧,等. 以秸秆为基料富锌栽培滑菇的纤维素酶和漆酶的变化规律[J]. 食品与发酵工业,2015, 40(4):121–124.
HU Chuanqi, GANG Jie, CHEN Jinghui, et al. Research on the cellulose and laccase of Pholiota nameko Zinc-riching cultivated in straw medium[J]. Food and Fermentation in Dustries, 2015, 40(4): 121–124. (in Chinese)

121 丁美. 农作物秸秆资源潜力与开发可持续性评价体系研究——以江苏省为例[D]. 南京:南京农业大学,2011.
DING Mei. Evaluation system for the potentiality and sustain ability of crop straw resources—a case study of Jiangsu province [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)

122 KORONTZI S, MCCARTY J, LOBODA T, et al. Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20: 1 – 15.

123 刘宁,张忠法. 国外生物质能源产业扶持政策[J]. 世界林业研究,2009,22(1):78 – 80.
LIU Ning, ZHANG Zhongfa. International supporting policies for biomass energy industry[J]. World Forestry Research, 2009, 22(1): 78 – 80. (in Chinese)

124 孙宁,王飞,孙仁华,等. 国外农作物秸秆主要利用方式与经验借鉴[J]. 中国人口·资源与环境,2016,26(5):469 – 474.
SUN Ning, WANG Fei, SUN Renhua, et al. Comprehensive utilization and experience reference of crop straw in foreign countries[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(5): 469 – 474. (in Chinese)

125 CARTY J L MC, JUSTICE C O, KORONTZI S. Agricultural burning in the southeastern united states detected by MODIS[J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(2): 151 – 162.

126 李建政,王道龙,高春雨,等. 欧美国家耕作方式发展变化与秸秆还田[J]. 农机化研究,2011,33(10):177 – 180.
LI Jianzheng, WANG Daolong, GAO Chunyu, et al. The tillage systems development and crop residue incorporation in Europe and North America[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(10): 177 – 180. (in Chinese)

127 STANIFORTH A R. Straw for fuel, feed and fertilizer[M]. Ipswith, UK: Farming Press, 1997.

128 周应恒,张晓恒,严斌剑. 韩国秸秆焚烧与牛肉短缺问题探索解困探究[J]. 世界农业,2015(4):152 – 154.

129 LANTZ M, SVENSSON M, BJMSSON L, et al. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden-incentives, barriers and potentials[J]. Energy Policy, 2007, 35(3): 1830 – 1843.

130 王俊友,吕黄珍,燕晓辉,等. 国外玉米和小麦秸秆收集装备发展及启示[C]//中国农业机械学会 2008 年学术年会, 2008.

131 LIN Weigang, SONG Wenli. Power production from biomass in Denmark[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, 33(6): 650 – 655.

132 BALAT M, BALAT H, CAHIDE Z. Progress in bioethanol processing[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(5): 551 – 573.

133 VINTERBACK J. Pellets 2002: the first world conference on pellets[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27: 513 – 520.

134 GOODHEW S, GRIFFITHS R, WOOLLEY. An investigation of the moisture content in the walls of a straw bale building[J]. Building and Environment, 2004, 39(12): 1443 – 1451.

135 李良玉,李兰,蔡良俊,等. 成都市农作物秸秆综合利用实践[J]. 安徽农业科学,2014,42(4):1132 – 1133,1135.
LI Liangyu, LI Lan, CAI Liangjun, et al. Practice of the comprehensive utilization of crop straw in Chengdu[J]. Journal of Anhui Agricultural Science, 2014, 42(4): 1132 – 1133, 1135. (in Chinese)

136 辛良杰,李秀彬,谈明洪. 中国区域粮食生产优势度的演变及分析[J]. 农业工程学报,2009,25(2):222 – 227.
XIN Liangjie, LI Xiubin, TAN Minghong. Changes of comparative advantages of regional grain production in China [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 222 – 227. (in Chinese)

137 高雪松. 秸秆循环利用模式、物流能流分析及功能评价[D]. 雅安:四川农业大学,2011.
GAO Xuesong. The modes, material and energy flow analysis and function evolution of straw recycling[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2011. (in Chinese)

138 潘根兴,张阿凤,邹建文,等. 农业废弃物生物黑炭转化还田作为低碳农业途径的探讨[J]. 生态与农村环境学报,2010, 26(4):394 – 400.
PAN Genxing, ZHANG Afeng, ZOU Jianwen, et al. Biochar from agro-byproducts used as amendment to cropland: an option of low carbon agriculture[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(4): 394 – 400. (in Chinese)

139 财政部,国家发展改革委,农业部,国家税务总局,国家林业局. 关于发展生物质能源和生物化工财税扶持政策的实施意见[R]. 2006.

140 环保部. 关于加强生物质发电项目环境影响评价管理工作的通知[R]. 2006.

141 潘亚东,刘希锋,钱晓辉,等. 北方寒区农作物秸秆利用技术及应用前景分析[J]. 农机化研究,2010,32(5):5 – 8.
PAN Yadong, LIU Xifeng, QIAN Xiaohui, et al. The application prospect analysis of crop straw use technology in northern cold regions[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(5): 5 – 8. (in Chinese)