

中国农作物秸秆资源量及其“五料化”利用现状

王红梅¹, 屠焰¹, 张乃锋¹, 司丙文¹, 马涛¹, 萨茹拉², 那亚³, 刁其玉¹

1. 中国农业科学院饲料研究所;农业部饲料生物技术重点开放实验室,北京 100081

2. 中国农业科学院草原研究所,呼和浩特 010010

3. 内蒙古农业大学生态环境学院,呼和浩特 010011

摘要 农作物秸秆是十分宝贵的生物资源,资源丰富,秸秆“用则利,弃则害”。秸秆的高效综合利用能有效解决秸秆利用率低、转化率低、经济效益低、环境污染严重这“三低一重”的问题,对中国现代农业的可持续发展起重要的作用。本文分析了中国农作物秸秆资源数量及分布,介绍了秸秆资源综合利用技术的最新进展,包括肥料化、燃料化、饲料化、原料化和基料化(“五料化”)这些重点领域的应用。集约、循环、高效、充分利用秸秆资源是保护生态环境、节约可再生资源的需要,也是促进中国农业和农村社会经济实现可持续发展的必然要求。

关键词 农作物秸秆资源;“五料化”;利用技术

秸秆是重要的农副产品,也是重要的生物资源。集约、高效、综合利用秸秆资源,是改善农村卫生条件的清洁工程、提高耕地综合生产能力的沃土工程、优化畜牧业结构的节粮工程、减轻大气污染的环境工程、建设资源节约型社会的能源工程、增加农民收入的富民工程和实现农业可持续发展的生态工程^[1-2]。秸秆资源综合有效利用对实现中国全面建设社会主义新农村具有重大的现实意义和深远意义。目前,有关农作物秸秆资源研究主要集中于两个方面:一是秸秆资源数量估算,包括秸秆总产量估算和秸秆资源可收集利用量估算等。以往研究表明,不同计算方法间存在很大差异,毕于运等^[3]和王亚静等^[4]分别确定了全面、准确、合理的秸秆总产量和秸秆资源可收集利用量估算方法;二是秸秆资源综合利用途径,主要包括肥料化、燃料化、饲料化、原料化和基料化这5种利用途径^[5-7]。中国是世界第一秸秆大国,充分、合理和高效利用这类丰富资源,对环境保护和国民经济的可持续发展具有重大意义。本文对中国农作物秸秆的资源量及分布进行了分析和描述,详细介绍了秸秆资源“五料化”利用技术最新进展。

1 中国农作物秸秆资源量及分布

秸秆是农作物成熟后收获其籽实所剩余的副产品,包括粮食、油料、棉花、麻类、糖类、烟叶、蔬菜瓜果类、药材等农作

物的茎、叶、枝、梢、秆、壳、芯、藤蔓、秧、穗及残渣等剩余物,还包括农田青绿饲料,但不包括麦麸、饼粕等副产物和农作物的根部。中国秸秆产量未列入国家有关部门的统计范围,因此,通常利用套算法(草谷比法、副产品比重法和经济系数法)计算出其产量。

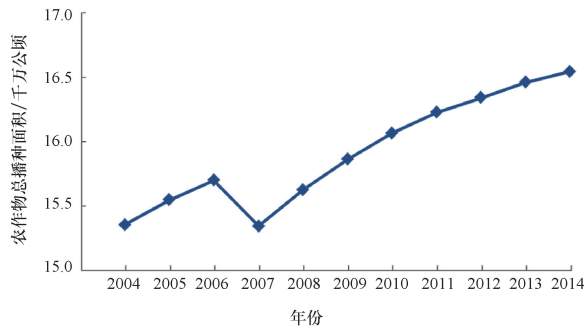
本文以农业部和国家统计局2005—2015年度《中国统计年鉴》^[8]、《中国农业年鉴》^[9]及相关文献^[10-11]中的统计资料为基础数据,对中国2004—2014年度的农作物总播种面积、农作物年总产量及农作物秸秆年总产量变化趋势和全国不同地区间农作物总播种面积进行了比较分析(图1)。由这11年的统计数据结果来看,中国农作物总播种面积不断增加,从2004年的 $1.535534 \times 10^8 \text{ hm}^2$ 增加到2014年的 $1.654462 \times 10^8 \text{ hm}^2$,农作物总产量也随之提高,由2004年的12.26亿t提高到2015年的16.41亿t,农作物产量提高幅度高于播种面积,表明中国农业综合生产能力也在不断地提高。随着农业综合生产力的提高,中国农作物秸秆总产量总体上呈现不断增长的趋势(图1(c)),由2004年的8.25亿t到2012年已超过9亿t,平均年总产量8.7亿t,再到2014年已增加到9.81亿t。如图1(d)所示,中国31个省(区、市)农作物播种面积差异很大。位于前三甲的地区依次为河南省($1.41624 \times 10^7 \text{ hm}^2$)、黑龙江省($1.1599.9 \times 10^7 \text{ hm}^2$)和山东省($1.0812.2 \times 10^7 \text{ hm}^2$),分别占全国农作物总播种面积的8.90%、7.29%和6.79%。目前,在中

收稿日期:2017-03-17;修回日期:2017-05-02

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费(20120304202)

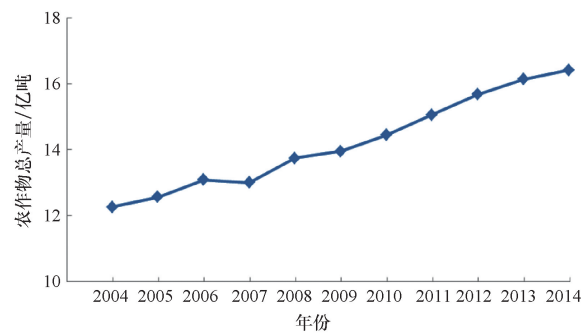
作者简介:王红梅,博士,研究方向为秸秆饲料生物转化技术,电子邮箱:chasu927@163.com;刁其玉(通信作者),研究员,研究方向为反刍动物营养与饲料科学,电子邮箱:diaoqiyou@caas.cn

引用格式:王红梅,屠焰,张乃锋,等.中国农作物秸秆资源量及其“五料化”利用现状[J].科技导报,2017,35(21):81-88;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2017.21.010

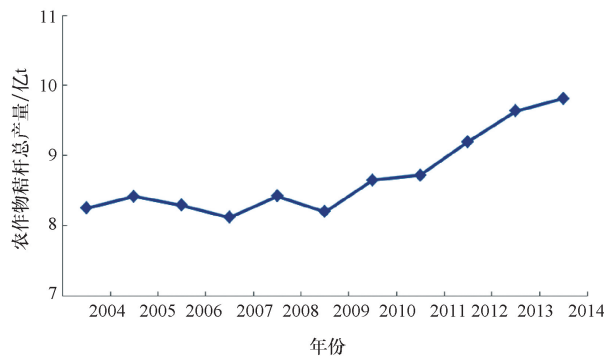


注:图中比重数值是11年(2004—2014)统计数据的平均值,不同年间同一地区农作物总播种面积差异不大。

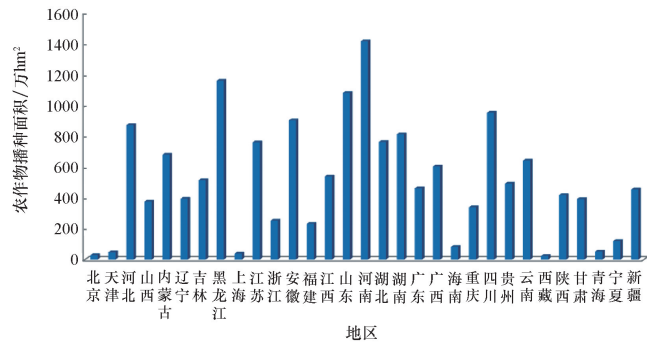
(a) 主要农作物总播种面积



(b) 主要农作物总产量分析



(c) 主要农作物秸秆总产量分析



(d) 总播种面积比较(2003—2014年的平均值)

图1 2004—2014年中国主要农作物统计情况

Fig. 1 Analysis of farm crops during 2004—2014 in China

国农作物播种面积最小的3个地区分别为上海市($3.917 \times 10^5 \text{ hm}^2$)、北京市($2.944 \times 10^5 \text{ hm}^2$)和西藏自治区($2.389 \times 10^5 \text{ hm}^2$), 所占全国农作物总播种面积比重均不到0.3%。

2 中国秸秆资源主要利用途径及最新进展

农作物秸秆作为一种非竞争性资源,具有数量大、分布广、种类多和价格低廉等优势。现阶段秸秆主要有5个方面的利用途径:作为肥料化利用、作为饲料化利用、作为燃料化利用、作为原料化利用、作为基料化利用,简称“五料化”利用。

“十二五”秸秆综合利用情况终期评估结果显示^[12],2015年全国农作物秸秆总产量10.4亿t,其中可收集利用秸秆量达到9.0亿t,秸秆综合利用率由2010年的70.5%提高到80.1%,秸秆综合利用取得明显成效。《中国农业年鉴2014》显示^[9],2014年全国农作物秸秆总产量8亿多t,其中可收集利用秸秆量达到6亿多t,秸秆综合利用率为78%。2014和2015年各种利用途径所占可收集利用秸秆量如图2^[9,12]所示。中国农作物秸秆资源最主要利用途径仍是肥料化和饲料化利用,其次是燃料化利用,与2014年相比,2015年秸秆利用结构有

所改变,肥料化利用率从34.8%提高到43.2%,饲料化利用率由24.7%降低到18.8%;肥料化、燃料化和基料化利用分别提高8.4%、0.1%和0.4%,而饲料化和原料化利用分别降低5.9%和0.9%。从秸秆综合利用率来看,2015年比2014年提高了2.1%,但仍有19.9%秸秆资源被焚烧或废弃浪费。

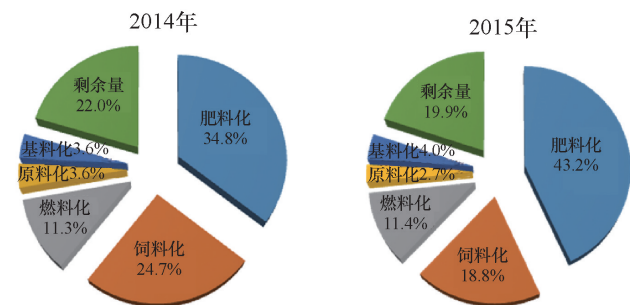


图2 2014和2015年中国秸秆资源综合利用情况

Fig. 2 Comprehensive utilization of crops straw resources in 2014 and 2015 in China

目前,中国秸秆资源综合利用仍存在着综合利用不充分、利用结构不合理等问题。在“十三五”期间,中国还将进一步加大秸秆综合利用工作力度,不断加大资金投入力度,不断完善秸秆收储运体系和扶持政策,推动中国农作物秸秆综合利用产业化、规模化发展。下面分别对以上5个利用途径及其技术最新进展进行详细的介绍,为提高秸秆综合利用率提供理论指导。

2.1 秸秆肥料化利用

秸秆肥料化利用,即秸秆还田,是最快捷、最能大批量处理剩余秸秆的有效利用途径。秸秆还田具有土壤培肥作用

与增产效果,不仅可以增加土壤有机质和养分,改善土壤物理性状、促进土壤团粒结构的形成,调节土壤的氮、磷、钾及微量元素的供应,提高土壤微生物和土壤酶的活性,增强农田保水抗旱能力、改善农田生态环境,减少化肥用量,保护生态环境,增加农作物产量,还可以减少直接焚烧造成的环境污染,有利于资源的循环利用和可持续发展。秸秆还田方式方法很多,如图3所示^[13-14],秸秆还田可分为直接还田和间接还田两大类,具体有15种秸秆还田方式,每种还田方式具有其配套技术,表1^[6,15-16]对各类技术的优劣势及最新秸秆还田技术进行了比较。

表1 秸秆还田技术进展
Table 1 Advances in technology of straw returning to field

项目	配套技术	形式	优势	不足
直接还田	机械粉碎还田技术	翻压还田	操作简单易行、机手易掌控,省工省时,作业效率高,经济效益明显;适用于不同规模的农田;利于水土保持、缓解气温激变对作物造成的伤害、促进作物生长	耗能大,成本高;对地势要求高;收农时限制;难控制病害的蔓延
		覆盖还田		
	整秆还田技术	翻压还田		
		覆盖还田		
留高茬还田技术	灭茬还田			
	翻压还田			
	直播技术			
	墒沟埋秸秆还田技术		作业成本低,培肥改土效果好,增产作用明显	还田量过高会损害作物根系,作用周期长
间接还田	堆沤还田技术		发酵操作简单廉价	劳动强度高、耗时长、产量低
	过腹还田技术		利用效率高,增产增收,形成良性循环	耗量少
	烧灰还田技术		易操作,富含碳酸钾,减轻病虫害	污染环境,浪费能源和碳、氮、磷,现禁止田间焚烧
	沼渣还田技术		优质的有机肥料,富含腐殖酸,利于土壤水分和肥力的保持	产量小,耗时长,劳动强度高
	菇渣还田技术		降低成本和化肥使用量,具有良好的经济、社会、生态效益	产量和耗量小
新型技术	水田免耕秸秆覆盖还田技术	快速腐熟隔层育秧免耕撒播	节劳、能、水,省力、时、肥;减灾避灾;投资小,增产增效,见效快	限制于水田
	生物反应堆技术	内置式 外置式	优质肥料,抗病虫害;“气、液、渣”综合利用;操作简单,投资小,见效快;具有良好的经济、社会、生态效益	微生物制剂优化筛选困难;操作条件和秸秆预处理需严格控制

2.2 秸秆饲料化利用

中国秸秆饲料化利用主要体现在秸秆养畜和过腹还田两种形式。中国粗饲料中最常见的就是农作物秸秆,资源丰富,富含粗纤维,在反刍动物营养中具有不可忽视的作用。秸秆的饲料化高效利用,不仅扩大饲料来源,促进草食家畜业大幅度增产;节约饲料,保障国家粮食安全;增加就业机会,促进农民增收;还可以改善大气环境,推进农业可持续发展^[6]。但是秸秆具有粗纤维含量高,粗蛋白、粗脂肪含量低,容积大,适口性差,消化率低等营养特性。秸秆细胞壁较厚,富含纤维素,半纤维素和木质素等物质,是影响动物对秸秆利用的主要因素^[17-18]。作为非竞争性饲料资源,秸秆资源丰富、廉价,并从其本身的营养成分及瘤胃降解特性(表2、表3)来看^[19-23],具有一定的饲用价值。通过加工调制能够提高秸秆饲料利用率,主要包括两个方面:1) 改善适口性,增大容

展^[6]。但是秸秆具有粗纤维含量高,粗蛋白、粗脂肪含量低,容积大,适口性差,消化率低等营养特性。秸秆细胞壁较厚,富含纤维素,半纤维素和木质素等物质,是影响动物对秸秆利用的主要因素^[17-18]。作为非竞争性饲料资源,秸秆资源丰富、廉价,并从其本身的营养成分及瘤胃降解特性(表2、表3)来看^[19-23],具有一定的饲用价值。通过加工调制能够提高秸秆饲料利用率,主要包括两个方面:1) 改善适口性,增大容

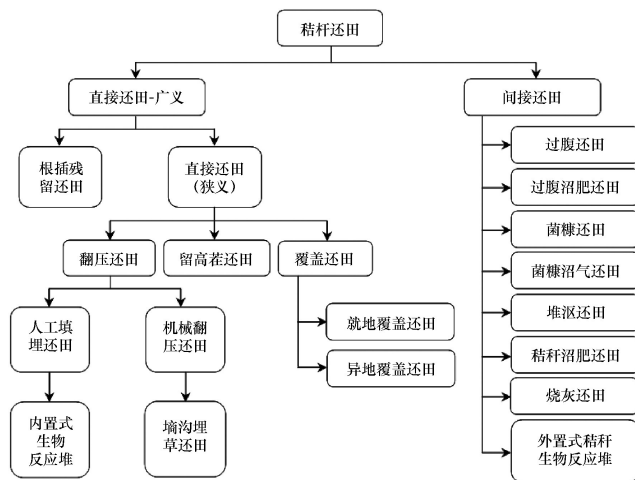


图3 秸秆还田方式

Fig. 3 Ways of returning straw to field

重,提高反刍动物对秸秆的采食量;2) 提高瘤胃微生物对秸秆有机物的降解率。

目前,国内外提高秸秆类粗饲料饲用价值的方法主要归纳于物理法、化学法和生物法(表4)^[18,24-26]。但实际生产中往往将这3种处理法联合应用,即复合法,也是应用最广、最新的秸秆饲料加工调制技术,有效弥补单一处理的局限性,效果更佳。

近年来,秸秆发酵饲料的应用与研究比较广,包括秸秆青贮、黄贮、微贮和菌糠饲料等,这也属于复合处理法,具有较高的适口性和消化率^[19-21,27]。在很长一段时间内,研发更方便、经济、实用、安全的秸秆饲料加工调制技术仍将是反刍动物营养领域的重点研究内容。

表2 中国主要农作物秸秆营养成分

Table 2 Nutritional composition of main farm crops in China

项目	DM	GE/(MJ·kg ⁻¹)	CP	EE	NDF	ADF	Ash	Ca	TP
玉米秸	92.34	17.02	6.79	1.45	66.69	38.05	10.83	0.62	0.14
小麦秸	93.71	17.22	3.94	0.94	78.90	48.44	8.93	0.34	0.07
稻草秸	92.47	16.02	4.69	1.62	66.78	39.96	13.02	0.47	0.14
大豆秸	91.77	18.18	7.17	1.10	64.90	45.74	6.06	1.00	0.16
绿豆秸	94.27	17.39	6.80	1.54	66.25	49.77	17.05	1.36	0.14
花豆秸	92.53	18.11	8.38	0.52	71.46	54.60	5.89	0.92	0.11
地瓜秧	90.52	16.45	12.89	2.47	53.36	39.07	14.37	1.55	0.29
花生秧	91.17	16.99	7.92	1.18	65.11	48.31	11.09	1.31	0.16
花生壳	93.95	18.15	5.08	0.90	50.69	34.70	4.22	0.80	0.05

注:DM为干物质,GE为总能,OM为有机物,CP为粗蛋白质,EE为粗脂肪,NDF为中性洗涤纤维,ADF为酸性洗涤纤维,Ash为粗灰分,Ca为钙,TP为总磷,下同。

表3 中国主要农作物秸秆的瘤胃有效降解率/%

Table 3 Effective degradability of main crop straw in China

项目	DM	OM	CP	NDF	ADF
玉米秸	36.16	34.54	46.47	26.33	21.77
小麦秸	31.64	29.88	31.86	21.12	17.97
稻草秸	34.42	34.06	34.34	24.54	23.93
大豆秸	34.07	32.83	37.56	24	21.22
绿豆秸	41.54	41.97	49.8	23.72	22.82
花豆秸	36.56	37.26	47.71	28.47	26.48
地瓜秧	50.28	47.82	52.63	31.38	30.27
花生秧	43.37	40.66	55.74	26.38	24.21
花生壳	11.57	10.22	35.87	9.91	9.97

2.3 秸秆燃料化利用

秸秆燃料化利用,包括直接燃用和新型能源化利用。秸秆作为一种重要的生物质能,含有40%的碳量,其能源密度为14.0~17.6 MJ/kg^[28],也就是说,2 t秸秆热能值可代替1 t标准煤,推广秸秆能源化利用可有效减少一次能源消耗,为农村提供高品质的清洁能源,有助于国家的环境建设和CO₂减

排,同时可带来一系列的生态、社会 and 经济效益。

目前,中国秸秆资源新型能源化利用主要集中于“四化一电”利用途径,分别为固化、炭化、气化、液化和发电(表5)^[29-37],这些利用途径具有成熟的技术体系,完善的标准体系和产业模式。

表4 秸秆饲料加工调制方法
Table 4 Processing method of straw feed

项目	处理方法	优点	缺点
物理法	切短、粉碎、揉搓、浸泡、蒸煮,热喷膨化、 γ 射线、碾青、打浆、压块、制粒等	简单易行,明显提高秸秆适口性、采食量和消化率,容易推广,便于运输	机械化程度高,成本高,效果不明显
化学法	碱化、氨化、酸化、氧化剂处理,碱-酸复合处理、氨-碱复合处理等	能够提高适口性、营养价值和消化率	容易造成化学物质的过量,使用范围狭窄、成本高、污染环境
生物法	青/微/黄贮法、酶处理法、菌处理法、酶菌复合处理法	作用条件温和、专一性强;操作简单,制作成本低廉,效果明显;运输方便;可长期保存;绿色、环保、安全	生物制剂的优化筛选困难;制作条件严格控制
复合法	物理法、化学法与生物法的合理联合应用	具备了生物、物理和化学的优势,效果更佳,有效弥补单一处理的局限性	作用机理较复杂

表5 秸秆资源新型能源化利用情况
Table 5 New types of energy utilization of straw resource

处理技术	产品	类型	优势	不足
固化成型技术	成型燃料	螺旋挤压、活塞冲压、环模滚压、棍压式	热效率高,用途广,便于贮存、运输和使用	电耗大、机械抗磨损能力不足,寿命短、生产成本低
热解炭化技术	一氧化碳	秸秆木炭	成本低、热值高,用途广,副产品均可利用,效益高	技术难度大,机件损耗快,原料耗能多,贮存条件严格防火、防潮
秸秆气化技术	气体	生物气化、热解气化	生产可控性大,受自然条件影响小;显著提高热效率;用途多样	发展速度较慢;规模效益低,开工率低;报废率高
秸秆液化技术	燃料乙醇	水解液化	实现循环利用,使用方便,输送成本低,附加值高;乙醇是未来石油的代替品	发酵时间长,生气速率慢,原料收储运及预处理成本有所增加
	生物质油	热解液化		
直接发电技术	发电	直燃发电	是一种环境友好型分布式电站技术	与燃煤电厂比,投资高、成本高、效率低
		混燃发电	易燃尽,是一种低成本、低风险的可再生能源利用方式	灰分沉积,影响系统运行
		气化发电	具灵活性、清洁性和经济性;成本低,设备紧凑污染少,是最有效、最洁净的方法之一	发展较慢,发电率低
		热电联产	能发电,也能供热量;热能利用效率高	热价偏低,没有明显的经济优势

2.4 秸秆原料化利用

秸秆原料化利用是指以秸秆为原材料,采用一系列生产工艺制备各种工业原料的技术,包括秸秆造纸,板材加工(高品质秸秆纤维粉体、纤维塑性材料、树脂强化型复合型材、树脂轻质复合型材、包装制品、新型秸秆合成型材),生活用品加工(生物质秸秆塑料),净化功能材料(生物活性功能材料、改性碳基功能材料),秸秆有机化工(淀粉、木糖醇、羧甲基纤维素、糖醛和木聚糖酶生产等)和秸秆编制等^[15-16,38-39]。秸秆纤维作为一种天然纤维素纤维,具有良好的生物降解性,因此其开发制品也具有良好的环保性能。

目前,很多地方采用新的技术利用秸秆,主要以秸秆中

的纤维素、木质素为基本原料,开发多种新型可生物降解的高分子材料来代替木材和塑料。新型秸秆材料具有原料多元化、制备可塑化、产品生态化、应用经济化、再生低碳化等特色^[40-41],具有节能、减排、安全、便利和可循环等优势,在秸秆资源综合利用中担任着不可忽略的角色。

2.5 秸秆基料化利用

秸秆基料化利用,即秸秆用作栽培基料,是指在无土栽培生产中,以秸秆为原料,结合辅料,根据生产配方制成培养基,不仅可用于食用菌栽培,也可用于植物育苗和植物栽培,起到固定、提供养分促进生长和防病驱虫等作用^[42-43]。目前,基料栽培是无土栽培的重要类型,而无土栽培技术作为发展

最快的新型技术,具有高产、优质、可避免土传病虫害及连作障碍等优势,能够促进中国农业生产现代化、规模化、集约化发展^[44]。

中国是世界第一食用菌生产大国,种类繁多,主要包括草腐菌(双孢菇、草菇、鸡腿菇、白灵菇、杏苞菇等)和木腐菌(包括平菇、香菇、滑子菇、金针菇、银耳、猴头菇、黑木耳、真姬菇、灵芝等),近年中国食用菌年产量约4500万t,基料秸秆年使用量已超过1000万^[45-46],秸秆可替全部或部分木材栽培基质进而有效地减少木材消耗量。秸秆基料栽培不仅降低了生产成本,提高秸秆利用率,也解决了资源消耗和环境污染问题。另外,秸秆栽培过食用菌后的菌渣,由于菌体的生物降解作用,氮、磷等养分的含量也显著提高,可作为优质肥料,具有很高的饲用价值^[47-49],可代替部分精料用于畜禽养殖生产中,并通过畜肥还田形成生态产业链,对中国秸秆资源的循环高效利用具有重要的现实意义。

3 结论与建议

中国秸秆资源综合利用的总体趋势主要体现在:1) 秸秆资源新能源化开发、饲料化、肥料化和基料化的利用量不断增加;2) 秸秆废弃、焚烧和直接燃用量不断减少;3) 间接还田代替直接还田等。

近年来,中国秸秆资源综合利用工作力度不断加大,成果也显著,但目前仍存在着综合利用不充分、利用结构不合理、产业化、规模化程度不够等问题,并且其相关配套技术与国外先进技术还具有一定差距。对于以上存在问题的,建议:1) 加强秸秆资源综合利用工作的组织和管理机制的完善;2) 加强秸秆资源化利用技术的研究,并研发出成熟、完善、先进的配套技术;3) 加强秸秆利用产业化、规模化、集约化发展;4) 加强生态环境保护意识,推动农业可持续循环发展。因此,秸秆资源的集约、循环、高效、充分利用,为中国解决秸秆问题提供了无害化、资源化、变废为宝的合理有效的途径,从根本上解决了秸秆废弃和焚烧的问题,保障农业经济的可持续发展,具有良好的经济效益、生态效益和社会效益。

参考文献(Reference)

[1] 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: 12-23.
Bi Yuyun, Wang Daolong, Gao Chunyu, et al. Straw resources evaluation and utilization in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008: 12-23.

[2] 陶志强,常旭虹,王德梅,等. 2016年农业科学热点回眸[J]. 科技导报, 2017, 35(1): 64-77.
Tao Zhiqiang, Chang Xuhong, Wang Demei, et al. Looking back 2016 significant events in agricultural sciences[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(1): 64-77.

[3] 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 Chinese Society of

Agricultural Engineering, 2009, 25(12): 211-217.

[4] 王亚静,毕于运,高春雨. 中国秸秆资源可收集利用量及其适宜性评价[J]. 中国农业科学, 2010, 43(9): 1852-1859.
Wang Yajing, Bi Yuyun, Gao Chunyu, et al. Collectable amounts and suitability evaluation of straw resource in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(9): 1852-1859.

[5] 梁裕旺,徐淑莉. 中国秸秆资源现状及其利用[J]. 畜牧与饲料科学, 2011, 32(11): 21-22.
Liang Rongwang, Xu Shuli. Present situation and utilization of straw resources in China[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2011, 32(11): 21-22.

[6] 毕于运,寇建平,王道龙. 中国秸秆资源综合利用技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008: 68-79.
Bi Yuyun, Kou Jianping, Wang Daolong. Comprehensive utilization technology of straw resources in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008: 68-79.

[7] Wang H W, Wang Y, Ma B L, et al. The research progress of comprehensive utilization of crop straw[J]. Advanced Materials Research, 2013, 807: 1211-1218.

[8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015: 167-211.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2015: 167-211.

[9] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015: 84-111.
China Agriculture Yearbook Editorial Board. China agriculture yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2015: 84-111.

[10] 谢光辉,王晓玉,任蓝天. 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]. Journal of Biological Engineering, 2010, 26(7): 855-863.

[11] 王丽,李雪铭,许妍. 中国大陆秸秆露天焚烧的经济损失研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2): 170-175.
Wang Li, Li Xueming, Xu Yan. The economic losses caused by crop residues burnt in open field in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(2): 170-175.

[12] 吴彤. 中国主要农作物秸秆综合利用率超过80%[N]. 中国建材报, 2016-05-30(1).
Wu Tong. The comprehensive utilization rate of main crops in China is more than 80%[N]. China Building Materials News, 2016-05-30(1).

[13] 张丛志. 一种秸秆还田方法: 201510362406.9[P]. 2015-10-21.
Zhang Congzhi. The method of straw returning: 201510362406.9[P]. 2015-10-21.

[14] 王海斌. 秸秆还田的高效处理方法: 201410009733.1[P]. 2014-05-07.
Wang Haibin. Efficient treatment method of straw returning to field: 201410009733.1[P]. 2014-05-07.

[15] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002, 18(3): 87-91.

[16] 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, 2007: 89-95.
Tian Yishui, Meng Haibo. Development and utilization technology of

- crop straw[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 89-95.
- [17] Van Soest P J. Nutritional ecology of the ruminant[M]. 2nd ed. Ithaca: Cornell University Press, 1994.
- [18] Norovsambuu T, Maria A C, German B R, et al. Effect of exogenous xylanase on rumen in vitro gas production and degradability of wheat straw[J]. *Animal Science Journal*, 2015, 86: 765-771.
- [19] 刁其玉, 李艳玲, 邓凯东, 等. 农作物秸秆养羊手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 35-41.
Diao Qiyu, Li Yanling, Deng Kaidong, et al. Handbook of sheep raising with crop straw[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 35-41.
- [20] 刘雯雯, 姚拓, 孙丽娜, 等. 菌糠作为微生物肥料载体的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 787-791.
Liu Wenwen, Yao Tuo, Sun Lina, et al. The feasibility of spent mushroom substrate as a kind of microbial fertilizer carrier[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 787-791.
- [21] 宫福臣, 韩梅琳, 杨琼, 等. 菌糠与奶牛常用粗饲料瘤胃降解特性的对比研究[J]. *动物营养学报*, 2013, 25(6): 1366-1374.
Gong Fuchen, Han Meilin, Yang Qiong, et al. Comparison of rumen degradation characteristics between spent mushroom substrate and commonly used roughages for dairy cows[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2013, 25(6): 1366-1374.
- [22] 靳玲品. 反刍动物常用粗饲料营养价值评定方法的比较研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
Jin Linpin. Comparison of nutritional value evaluation method in common roughage for ruminants[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [23] 陈晓林. 肉羊常用粗饲料营养价值和瘤胃降解特性研究[D]. 青岛: 青岛农业大学, 2014.
Chen Xiaolin. Study on nutritive value and ruminal degradability characteristics of roughage in sheep[D]. Qingdao: Qingdao Agricultural University, 2014.
- [24] 刁其玉, 屠焰, 陈群, 等. 农作物秸秆养牛手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
Diao Qiyu, Tu Yan, Chen Qun, et al. Handbook of cowboying with crop straw[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013.
- [25] 王凯, 谢小来, 王长平. 秸秆加工处理技术的研究进展[J]. *中国畜牧兽医*, 2011, 38(10): 17-22.
Wang Kai, Xie Xiaolai, Wang Changping, et al. Research progress of straw processing technology[J]. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2011, 38(10): 17-22.
- [26] Wang Y, Spratling B M, Zobell D R, et al. Effect of alkali pretreatment of wheat straw on the efficacy of exogenous fibrolytic enzymes [J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(1): 198-208.
- [27] 刘原. 一种微贮秸秆饲料的制备方法: 201310036088.8[P]. 2013-05-01.
Liu Yuan. A method for preparing micro straw feed: 201310036088.8 [P]. 2013-05-01.
- [28] Yang Z P, Guo K Q, Zhu X H, et al. Straw resources utilizing industry and pattern[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(1): 27-31.
- [29] 潘根兴, 李恋卿, 刘晓雨, 等. 热裂解生物质炭产业化: 秸秆禁烧与绿色农业新途径[J]. *科技导报*, 2015, 33(13): 92-101.
Pan Genxing, Li Lianqing, Liu Xiaoyu, et al. Industrialization of biochar from biomass pyrolysis: A new option for straw burning ban and green agriculture of China[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(13): 92-101.
- [30] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(12): 291-296.
- [31] 曹杰, 陈广银, 常志州, 等. 有机负荷对秸秆床反应器厌氧生物产沼气的影 响[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1200-1206.
Cao Jie, Chen Guangyin, Chang Zhizhou, et al. Effect of organic loading rate of piggery wastewater on biogas production of straw-bed bioreactor[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(5): 1200-1206.
- [32] 王述洋, 谭文英. 生物质液化燃油的开发前景及可持续发展意义[J]. *科技导报*, 2000, 18(6): 52-55.
Wang Shuyang, Tan Wenyong. Prospects for exploitation of bio-fuel-oil and its sustainable development[J]. *Science & Technology Review*, 2000, 18(6): 52-55.
- [33] 杜静, 陈广银, 黄红英, 等. 秸秆批式和半连续式发酵物料浓度对沼气产率的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(15): 201-207.
Du Jing, Chen Guangyin, Huang Hongying, et al. Effect of fermenting material concentration on biogas yield in batch and continuous biogas fermentation with straw[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(15): 201-207.
- [34] Li X X. Biomass energy—Effective utilization of crop straws[J]. *Advanced Materials Research*, 2015(1070/1071/1072): 136-139.
- [35] 王敏. 甜高粱秸秆生产燃料乙醇关键技术研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2010.
Wang Min. Study on key technologies for ethanol production from sweet sorghum stalk[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010.
- [36] 王红彦, 王飞, 孙仁华, 等. 国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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(16): 216-222.
- [37] 张百良, 王许涛, 杨世关. 秸秆成型燃料生产应用的关键问题探讨[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(7): 296-300.
Zhang Bailiang, Wang Xutao, Yang Shiguan. Key problems in production and application of straw densification briquetting fuel (SDBF) [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(7): 296-300.
- [38] 丁戈. 以植物秸秆木质素为原料制备活性炭工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
Ding Ge. Study on preparation of activated carbon from plant straw lignin[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2012.
- [39] 李忠正. 中国造纸用农业秸秆资源现状[J]. *中国造纸*, 2014, 33(3): 56-60.
Li Zhongzheng. The status of agricultural residues resources available for China's paper industry[J]. *China Pulp & Paper*, 2014, 33(3): 56-60.
- [40] 胡岚方. 秸秆乙醇残渣改性脲醛树脂的制备与应用[D]. 北京: 中国林业科学院, 2015.
Hu Lanfang. Preparation and application of straw ethanol residue modified urea-formaldehyde resin[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
- [41] Saito T, Brown R H, Hunt M A, et al. Turning renewable resources in-

- to value-added polymer: development of lignin-based thermoplastic [J]. *Green Chemistry*, 2012,(12): 3295-3303.
- [42] Kuisma E, Palonen P, Yli-Halla M. Reed canary grass straw as a substrate in soilless cultivation of strawberry[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 178: 217-223.
- [43] 杨增玲, 楚天舒, 韩鲁佳, 等. 灰色关联理想解法在秸秆综合利用方案优选中的应用[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 179-191.
Yang Zengling, Chu Tianshu, Han Lujia, et al. Application of GC-TOPSIS on optimizing choice of utilization programs of crop straw [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(20): 179-191.
- [44] 范如芹, 罗佳, 严少华, 等. 农作物秸秆基质化利用技术研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(3): 410-416.
Fan Ruqin, Luo Jia, Yan Shaohua, et al. Progresses in study on utilization of crop straw in soilless culture[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(3): 410-416.
- [45] 兰良程. 中国食用菌产业现状与发展[J]. *中国农学通报*, 2009, 25(5): 205-208.
Lan Liangcheng. The status quo and development of China's edible mushroom industry[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(5): 205-208.
- [46] 陈杰, 徐冲. 食用菌加工产业研究现状与前景[J]. *微生物学杂志*, 2013, 33(3): 94-96.
Chen Jie, Xu Chong. Status quo and prospects of edible fungi processing industry[J]. *Journal of Microbiology*, 2013, 33(3): 94-96.
- [47] 宫福臣, 张东雷, 张玉铎, 等. 平菇菌糠饲料的营养价值与安全性评估分析[J]. *中国畜牧兽医*, 2012, 39(11): 86-89.
Gong Fuchen, Zhang Donglei, Zhang Yuduo, et al. The nutritional value and safety assessment analysis on spent mushroom substrate of *Pleurotus ostreatus*[J]. *China Animal Husbandry and Veterinary Medicine*, 2012, 39(11): 86-89.
- [48] 崔太福. 一种利用高原食用菌培养基废料生产饲料的方法: 201310237333.1[P]. 2013-10-02.
Cui Taifu. A method for producing feed by using waste material of highland edible fungus culture medium: 201310237333.1[P]. 2013-10-02.
- [49] 彭涛, 余水静, 程素. 食用菌菌糠综合利用研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(9): 78-80.
Peng Tao, Yu Shuijing, Cheng Su. Research progress of comprehensive utilization of spent mushroom substrates[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2016, 44(9): 78-80.

Chinese crop straw resource and its utilization status

WANG Hongmei¹, TU Yan¹, ZHANG Naifeng¹, SI Bingwen¹, MA Tao¹, SA Rula², NA Ya³, DIAO Qiyu¹

1. Feed Research Institute, Key Laboratory of Feed Biotechnology, the Ministry of Agriculture of the People's Republic of China, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China
2. Grassland Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China
3. College of Ecology and Environmental Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010011, China

Abstract Crop straw is one of the most valuable and rich biological resources in China. The utilization of straw resource is beneficial while the waste is harmful to the environment. Efficient and comprehensive utilization of straw can effectively improve the utilization rate, conversion rate and economic efficiency of straw, and help to control environmental pollution, which plays an important role in the sustainable development of China's modern agriculture industry. In this paper, the production and distribution of crop straw resource in China are described, and the latest utilization techniques for crop straw, especially the "five materials" including fertilizer, feed, biomass fuel, raw material and stroma, are introduced. The intensive, cyclic, and efficient utilization of straw resource will contribute to the ecological environment protection and renewable resource save, as well as to the sustainable development of agriculture and rural economy in China.

Keywords crop straw resources; five materials; utilization techniques

(责任编辑 田恬)