

中国农作物秸秆产量及综合利用现状分析

张晓庆^{1,2} 王梓凡¹ 参木友^{2*} 白海花¹ 塔娜¹

(1. 中国农业科学院 草原研究所, 呼和浩特 010010;

2. 西藏自治区农牧科学院 草业科学研究所/省部共建青稞和牦牛种质资源与遗传改良国家重点实验室, 拉萨 850000)

摘要 为准确分析中国农作物秸秆产量及其综合利用现状, 采取国家统计局发布的全国31个省(自治区、直辖市)谷物、豆类、薯类和棉花等作物产量, 结合作物秸秆系数, 对2009—2018年全国主要农作物秸秆产量进行测算。结果表明: 2009—2018年中国秸秆产量增加12 672.54万t, 年增长率为2.01%, 其中玉米秸秆贡献最大; 2018年中国秸秆产量分布总体呈现东部和北部省(自治区、直辖市)高、西部和南部省(自治区、直辖市)低的特点; 其中, 河南省、山东省、黑龙江省、广西壮族自治区、江苏省和安徽省的产量高, 北京市、上海市、天津市、浙江省、海南省、西藏自治区、青海省和宁夏回族自治区的产量低; 中国耕地秸秆单产总体呈三级阶梯状分布, 高产量地区集中在第三阶梯。综上所述, 中国农作物秸秆产量巨大, 需加大研发秸秆“五化”(秸秆肥料化、秸秆饲料化、秸秆能源化、秸秆基料化和秸秆原料化)利用核心关键技术, 以提高综合利用效率。

关键词 秸秆产量; 秸秆燃料; 秸秆肥料; 秸秆饲料; 秸秆建材

中图分类号 F301.2

文章编号 1007-4333(2021)09-0030-12

文献标志码 A

Analysis of yield and current comprehensive utilization of crop straws in China

ZHANG Xiaoqing^{1,2}, WANG Zifan¹, Canmuyou^{2*}, BAI Haihua¹, Tana¹

(1. Institute of Grassland Research, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Hohhot 010010, China;

2. Institute of Practaculture Science/State Key Laboratory of Hulless Barley and Yak Germplasm Resource and Genetic Improvement, Tibet Academy of Agricultural and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China)

Abstract To precisely analyze the yield and current comprehensive utilization of crop straws in China, the straw yields of cereals, beans, potatoes, cotton and other crops in 31 provinces (autonomous regions and cites) from 2009 to 2018 were estimated by combining straw coefficient based on *China Statistical Yearbook* on 2019 released by the National Bureau of Statistics of China. The results showed that the total straw yield of China was increased by 126.73 million tons from 2009 to 2018 with an annual growth rate of 2.01%. Among those crop straws, corn straw had the most significant contribution. In 2018, the overall distribution of straw production in China showed a trend of higher in the eastern and northern provinces and lower in the western and southern provinces. Specifically, the crop straw yield was higher in Henan, Shandong, Heilongjiang, Guangxi, Jiangsu and Anhui provinces, while it was lower in Beijing, Shanghai, Tianjin, Zhejiang, Hainan Province, Tibet Autonomous Region, Qinghai Province and Ningxia Hui Autonomous Region. The overall distribution of arable straw yields is distributed in three steps, and the high yield areas concentrated in the third step. Therefore, the yield of China's crop straws is huge, it needs to increase research and development of "five key" technologies (straw fertilizer, straw feed, straw fuel, straw matrix and straw materials) to

收稿日期: 2020-09-30

基金项目: 西藏自治区财政专项资金(XZNKYCYS-2020-C-041); 西藏自治区重点研发计划(XZ202001ZY0037 N); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610332020006); 西藏自治区重大专项(XZ2021ZD0003N)

第一作者: 张晓庆, 研究员, 主要从事饲料资源开发利用研究, E-mail: zhangxiaoping@caas.cn

通讯作者: 参木友, 研究员, 主要从事反刍动物营养研究, E-mail: tsamyu122@163.com

improve the comprehensive utilization efficiency.

Keywords straw yield; straw fuel; straw fertilizer; straw feed; straw building materials

中国是农业大国,秸秆资源庞大,年均产量约为8.65亿t,资源化利用率为81.68%^[1]。2021年3月8日国家发展和改革委员会出台《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》^[2]提出:“大力推进秸秆综合利用,推动秸秆综合利用产业提质增效”。中国的秸秆资源以肥料化利用为主,利用率为53.93%,饲料化和燃料化利用为辅,利用率分别为23.42%和14.27%,基料化和原料化利用率较低,分别为4.89%和3.40%^[3]。随着国家农村产业结构调整 and 居民生活条件改善,秸秆产量出现区域性、季节性和结构性过剩问题,致使目前仍有大量秸秆田间堆砌或集中焚烧现象发生。这不仅严重污染环境,而且造成大量的资源浪费。因此,提高秸秆资源综合利用效率,对环境质量改善和经济社会发展全面绿色转型具有促进作用。

大力拓展秸秆综合利用途径,开发秸秆肥料、饲料、燃料和工业原料等利用技术模式,实现秸秆资源化和商品化,对解决大量资源闲置、增加农民收入及促进农牧业系统良性循环、保持生态平衡和减轻环境污染等具有重要现实意义^[4]。在国家政策的大力支持下,全国秸秆资源综合利用技术不断提高和完善,形成了一批新型实用技术,广泛应用于肥料、饲料、能源和建筑等多种领域^[5-6]。由于秸秆产量分布取决于粮食产区,所以中国秸秆资源存在品种多、产量大、区域性和季节性不平衡及加工产业分布不合理

等问题^[7]。另外,产量计算方法对中国秸秆资源综合利用的影响非常大。不同研究由于采用的秸秆系数(草谷比)不同,报道的中国秸秆产量差异较大^[8-10]。目前,全国秸秆产量动态变化和秸秆产量格局的分析鲜有报道。本研究采用朱建春等^[7]的秸秆系数,计算2009—2018年中国主要农作物秸秆产量和2018年中国粮食主产省区农作物秸秆产量,旨在分析中国农作物秸秆产量及其综合利用现状,以期为提高全国秸秆综合利用效率提供基础资料和技术方法。

1 数据与研究方法

1.1 基础数据

计算中国秸秆产量的基础数据来源于2019年《中国统计年鉴》^[11]公布的中国主要农产品产量及中国分区耕地面积统计数据,包括全国31个省(自治区、市)(未包含港澳台地区)耕地面积和2009—2018年主要农作物经济产量。主要农作物包括水稻、小麦、玉米、其他谷类、豆类、薯类、油菜籽、棉花、麻类、糖料、甜菜、甘蔗和烟草等16类作物。

1.2 秸秆系数

秸秆系数也称为草谷比,是指农作物秸秆产量与农作物经济产量之比,是进行作物科学研究和作物产出效率评价的重要指标,也是评估秸秆产量的重要参数^[12]。本研究采用朱建春等^[7]提出的秸秆系数来计算各类秸秆产量,见表1。

表1 中国不同农作物秸秆系数^[7]

Table 1 Straw factors of different crops in China^[7]

作物种类 Crop type	秸秆系数 Straw coefficient	作物种类 Crop type	秸秆系数 Straw coefficient
稻谷 Rice	1.00	马铃薯 Potato	0.57
小麦 Wheat	1.17	花生 Peanut	1.14
玉米 Corn	1.04	油菜籽 Rapeseed	2.87
其他谷类 Other cereal	1.60	芝麻 Gingili	2.01
豆类 Beans	1.60	黄红麻 Jute and kenaf	1.90
棉花 Cotton	3.00	其他麻类 Other hemp	1.70
甜菜 Beet	0.10	其他油料 Other oilseeds	2.00
甘蔗 Sugar cane	0.43	烟叶 Tobacco	0.71

1.3 秸秆产量测算方法

根据农作物经济产量和秸秆系数,农作物秸秆产量测算公式为:

$$W_s = W_p \times S_G$$

式中: W_s ,农作物秸秆产量,t; W_p ,农作物经济产量,t; S_G ,秸秆系数。

1.4 耕地秸秆单产测算方法

耕地秸秆单产测算公式为:

$$Y_{SL} = W_s / A_{CL}$$

式中: Y_{SL} ,耕地秸秆单产,t/hm²; W_s ,农作物秸秆产量,t; A_{CL} ,耕地面积,hm²。

2 结果与分析

2.1 2009—2018年中国秸秆产量

从图1可知,2009—2018年全国农作物秸秆以水稻、小麦和玉米秸秆为主,其中玉米秸秆占比最大;在小份额类秸秆中,甘薯和油菜秸秆占比较大。2009—2018年水稻和小麦秸秆产量相对稳定,而玉米秸秆产量从2009年的18 018.94万t增加到2018年的26 746.51万t,占全国秸秆总产量32.34%。从总产量看,全国秸秆产量不断增加,从2009年的70 177.70万t增加到2018年的82 850.24万t,年增长率为2.01%。

2018年全国主要农作物秸秆产量为82 850.24万t,其中粮食作物秸秆产量约为69 529.70万t,占

秸秆总产量83.92%。水稻和小麦秸秆产量在华东地区(上海市、江苏省、浙江省、福建省、江西省和山东省)最高,分别为6 793.70和6 341.87万t,分别占全国水稻和小麦秸秆总产量的32.03%和41.24%;玉米和豆类秸秆产量在东北三省(辽宁省、吉林省和黑龙江省)最高,分别为8 782.70和1 218.08万t,分别占全国玉米和豆类秸秆总产量的32.84%和39.64%,见表2。

由图2可知,河南省、黑龙江省、山东省、安徽省、广西壮族自治区、四川省、内蒙古自治区、河北省和江苏省为秸秆高产省(自治区),年产量≥4 000万t;吉林省、湖南省、湖北省、新疆维吾尔自治区、云南省、江西省和辽宁省为中产省(自治区),年产量≥2 000~4 000万t;广东省、山西省、陕西省、甘肃省、贵州省、重庆市、浙江省、福建省、宁夏回族自治区、天津市、海南省、青海省、西藏自治区、上海市和北京市为低产省(自治区、市),年产量<2 000万t。

2018年河南省秸秆产量最高,为8 249.46万t,占全国秸秆总产量的9.96%,占华中地区秸秆总产量的52.79%;黑龙江省位居第二,秸秆产量为8 113.76万t,占全国秸秆总产量的9.79%,占东北三省秸秆总产量的56.27%;山东省位居第三,秸秆产量为6 270.77万t,占全国秸秆总产量的7.57%,占华东地区秸秆总产量的33.09%。

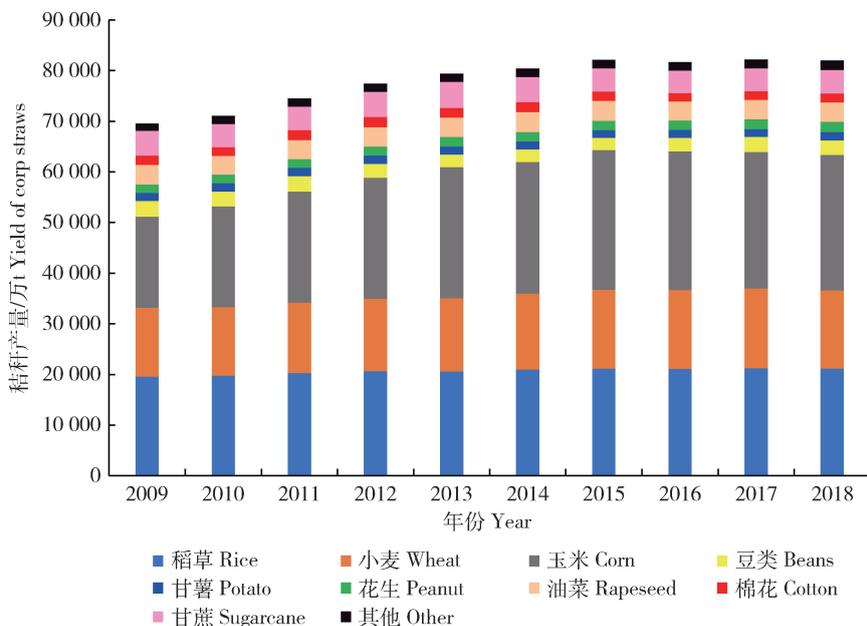


图1 2009—2018年中国主要农作物秸秆产量

Fig.1 China major crop straw yield from 2009 to 2018

表 2 2018 年中国粮食主产区农作物秸秆产量
Table 2 Crop straw yield in China's major grain-producing regions in 2018

地区 District	水稻 Rice	小麦 Wheat	玉米 Corn	豆类 Beans	甘薯 Potato	花生 Peanut	油菜 Rapeseed	棉花 Cotton	甘蔗 Sugarcane	其他 Other
华北 North China	212.50	2 274.48	5 990.92	434.08	200.01	123.46	130.87	78.30	0	976.16
东北三省 Three Northeast provinces	3 749.80	43.99	8 782.70	1 218.08	89.89	184.91	0.86	0	0	347.06
华东 East China	6 793.70	6 341.87	3 695.12	449.76	160.57	559.06	648.62	122.10	63.17	116.98
华中 Central China	5 141.00	4 704.92	2 992.70	282.24	145.81	777.02	1 287.20	81.90	33.07	179.19
华南 South China	2 179.00	0.59	341.02	63.04	91.20	199.96	9.76	0.30	3 800.34	21.58
西南 Southwest	2 914.40	447.53	2 606.24	499.20	728.86	113.77	1 392.81	1.50	751.60	467.64
西北 Northwest	222.50	1 565.34	2 337.82	126.24	217.00	17.67	356.45	1 546.80	0.04	416.01
全国 Nationwide	21 212.90	15 377.71	26 746.51	3 072.64	1 633.34	1 975.85	3 826.57	1 830.90	4 648.21	2 524.61

注：华北地区，包括北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古自治区；东北三省，包括辽宁省、吉林省和黑龙江省；华东地区，包括上海市、江苏省、浙江省、安徽省、福建省、江西省和山东省；华中地区，包括河南省、湖北省和湖南省；华南地区，包括广东省、海南省和广西壮族自治区；西南地区，包括重庆市、四川省、贵州省、云南省和西藏自治区；西北地区，包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区。下同。

Note: North China includes Beijing City, Tianjin City, Hebei Province, Shanxi Province and Inner Mongolia Autonomous Region; three Northeast provinces include Liaoning, Jilin and Heilongjiang provinces; East China includes Shanghai City and Jiangsu, Zhejiang, Anhui, Fujian, Jiangxi and Shandong provinces; Central China includes Henan, Hubei and Hunan provinces; South China includes Guangdong Province, Hainan Province and Guangxi Zhuang Autonomous Region; Southwest China includes Chongqing City, Sichuan Province, Guizhou Province, Yunnan Province and Tibet Autonomous Region; Northwest China includes Shanxi Province, Gansu Province, Qinghai Province, Ningxia Hui Autonomous Region and Xinjiang Uygur Autonomous Region. The same below.

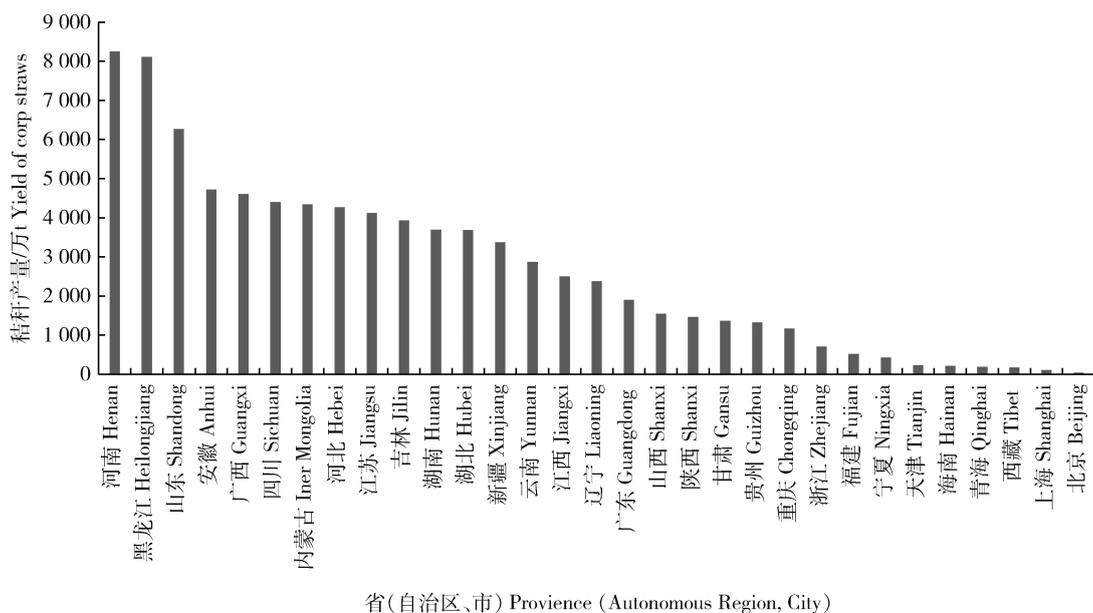


图2 2018年中国主要农作物秸秆产量格局

Fig. 2 China's main crop straw yield pattern in 2018

由图3可知,从传统农业种植最多的水稻、玉米、小麦和豆类4种作物产量变化看,2015年是中国秸秆产量增速快慢的分界点。其中,水稻和小麦秸秆产

量从2009年缓慢增长至2015年,之后趋于平稳;豆类秸秆产量从2009年逐步缓慢下降,2016年开始回升;2009—2018年玉米秸秆产量持续增长,且增速较快。

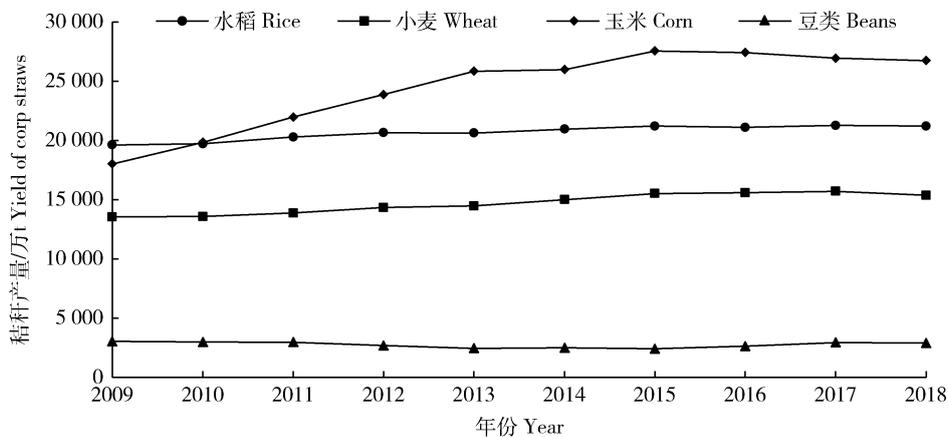


图3 2009—2018年中国4种主要农作物秸秆产量变化

Fig. 3 Changes in yields of four major crop straws in China from 2009 to 2018

2.2 2018年中国耕地秸秆单产及分布

由表3可知,2018年中国耕地总面积为13 488.12万 hm^2 ,单位面积秸秆产量为6.14 t/hm^2 。华中和华南地区耕地秸秆单产较高,分别高于全国平均水平45.37%和41.62%;西北地区耕地秸秆单产最低,低于全国平均水平32.76%。华北、东北三省、华东、华中、华南、西南和西北7个地区的耕地秸秆单产之比约为13:17:23:19:8:12:8。

由表4可知,2018年中国耕地秸秆单产总体呈三级阶梯状分布,依次为 <5 、 $5\sim 8$ 和 $>8\text{t}/\text{hm}^2$ 。全国耕地秸秆单产 $<5\text{t}/\text{hm}^2$ 的低产省份共15个,华北地区3个(北京市、山西省和内蒙古自治区)、华东地区2个(福建省和浙江省)、东北三省1个(辽宁省)和华南地区1个(海南省)、西南地区4个(重庆市、贵州省、云南省和西藏自治区)和西北地区4个(陕西省、甘肃省、青海省和宁夏回族自治区),其耕

表3 2018年中国7大粮食产区耕地面积及秸秆总产量

Table 3 Cultivated land area and total straw yield in China's seven major grain-producing regions in 2018

地区 District	耕地总面积/ 万 hm ² Total cultivated area	耕地面积 全国占比/% Proportion of cultivated area in China	秸秆总产 量/万 t Total straw yield	秸秆产量 全国占比/% Proportion of straw yield in China	单位面积 秸秆产量/ (t/hm ²) Straw yield per area
华北 North China	2 049.65	15.19	10 420.79	12.58	5.08
东北三省 Three Northeast provinces	2 780.40	20.61	14 417.29	17.40	5.19
华东 East China	2 462.14	18.25	18 950.94	22.87	7.70
华中 Central China	1 749.92	12.97	15 625.04	18.85	8.93
华南 South China	770.96	5.72	6 706.78	8.09	8.70
西南 Southwest	2 027.11	15.03	9 923.54	11.97	4.90
西北 Northwest	1 647.95	12.21	6 805.87	8.21	4.13
全国 Nationwide	13 488.12	100.00	82 850.24	100.00	6.14

表4 2018年中国耕地秸秆单产区域划分及秸秆总产量

Table 4 Division and total yield of crop straw per cultivated area in China in 2018

地区 District	省(自治区、市) Province (Autonomous Region, City)	耕地总面积/ 万 hm ² Total cultivated area	耕地面积 全国占比/% Proportion of cultivated area in China	秸秆总产量/ 万 t Total straw yield	秸秆产量 全国占比/% Proportion of straw yield in China	单位面积 秸秆产量/ (t/hm ²) Straw yield per area
低产(<5 t/hm ²) Low yield	重庆、辽宁、内蒙古、云南、西藏、福建、山西、陕西、浙江、宁夏、青海、贵州、海南、甘肃和北京	4 733.45	35.09	18 692.70	22.56	3.95
中产(5~8 t/hm ²) Middle yield	广东、湖北、河北、四川、新疆、上海、吉林、天津和黑龙江	4 978.01	36.91	29 992.96	36.20	6.03
高产(>8 t/hm ²) High yield	广西、河南、江苏、湖南、山东、江西和安徽	3 776.67	27.99	34 164.59	41.24	9.05

地面积之和占全国 35.09%，秸秆产量之和占全国 22.56%，平均耕地秸秆单产为 3.95 t/hm²，低于全国平均水平 35.71%，主要集中在第一和第二阶梯；耕地秸秆单产为 5~8 t/hm² 的中产省份共 9 个，分布在第二和第三阶梯，其中华北地区 2 个(天津市和河北省)、东北三省 2 个(吉林省和黑龙江省)、华东、

华中、华南、西南和西北地区各 1 个(上海市、湖北省、广东省、四川省和新疆维吾尔自治区)，其耕地面积之和占全国 36.90%，秸秆产量之和占全国 36.20%，平均耕地秸秆单产为 6.03 t/hm²，较全国平均水平低 1.00%；耕地秸秆单产为 >8 t/hm² 的高产省份共 7 个，其中华东地区 4 个(江苏省、安徽

省、江西省和山东省)、华中地区2个(河南省和湖南省)和华南地区1个(广西壮族自治区),其耕地面积之和占全国28.00%,秸秆产量之和占全国41.24%,平均耕地秸秆单产为9.05 t/hm²,高于全国平均水平47.27%,主要集中于第三阶梯。

3 讨论

3.1 秸秆肥料化利用

秸秆直接还田可快速提高土壤有机质含量,促进土壤团粒结构形成,提高土壤肥力,增加作物产量^[13],具有高效、省工、节约成本和增产等诸多优点。水稻和小麦等粮食作物普遍采取留茬还田和覆盖还田^[14],在东北和华北等机械化水平较高的地区实行秸秆粉碎还田。已有研究表明,秸秆还田可使玉米籽粒产量增加13.7%~17.5%,纯收益高于传统耕作20%以上^[15]。但需要注意的是,秸秆还田需处理秸秆中的病虫卵,否则容易引发作物病虫害^[16]。由于不同地区适耕作物的种类、耕作周期、地理环境和气候条件不同,应因地制宜开发新型秸秆还田机具,进一步推动机械化作业。

焚烧还田作为传统的秸秆处理方式,具有投入小、成本低、易操作和见效快等优点,对改善土壤全效和速效养分具有即时效应^[17]。但是秸秆焚烧不仅严重污染环境,而且造成较大的资源浪费,国家已明令禁止秸秆焚烧还田^[18]。将秸秆作为牲畜养殖场辅料,在高温封闭条件下经过堆沤后再行还田,既能杀菌又能加速堆沤成肥。堆肥富含大量的有机质和钾元素,但缺点是综合经济收益低于化肥,且堆沤还田需要一定的场地及设备,目前基本被生化腐熟技术替代。利用动物进行秸秆过腹还田,既营养又可无害化处理粪便,有助于农业系统形成良性循环,提高土壤肥力,生态意义明显,值得推广应用。

将粉碎秸秆与一定量的生物菌剂和适量氮肥混合,洒水堆压,生化腐熟后还田,秸秆的高分子粗纤维经高温堆沤分解成小分子糖醇等,与此同时秸秆中的病原菌和杂草种子等被高温灭杀,进而生成有机熟肥。有研究表明秸秆有机肥可通过提高作物的盐渍化耐受能力增加生物产量^[19]。腐熟剂可加快秸秆腐熟、提高土壤微生物优势度和土壤有效养分含量,但腐熟剂的种类、施用方式和作用时间影响土壤微生物群落组成^[20]。腐熟剂具有应用广泛、价格相对较低、施用方法简单等优势,但对环境有一定要求。目前针对具体农作物秸秆分类的腐熟剂研究非

常有限,应加大研发力度,推广应用腐熟剂,以提高腐熟速度与效果。

3.2 秸秆饲料化利用

秸秆饲料化推动了全球畜牧业的发展。尤其在中国,农耕文明历史悠久,玉米秸秆作为传统饲料为全国家畜提供了近一半的粗饲料。然而,秸秆纤维含量高、矿物质和蛋白质含量低及适口性差等缺点制约了秸秆的饲料化应用,导致饲料化利用率仅占秸秆综合利用率23.42%。采用粉碎软化法、拉丝揉搓法、块粒化法、蒸煮膨化法、热预处理和喷涂处理等物理方法,通过改变秸秆的物理性状提高适口性和采食量^[21]。但物理方法并不能改变秸秆的内部结构,无法为家畜生产和生长提供高质量养分,不易推广应用,一般作为综合处理的预处理。利用酸或碱等化学处理法,破坏秸秆的致密细胞壁结构,增大纤维空隙度,并产生一定量乳酸,既可改善秸秆适口性,又提高采食量、营养价值和消化率。化学处理法主要为碱化处理、氧化处理和氨化处理。碱化处理虽能有效提高秸秆利用率,但易造成环境污染和营养流失,中国北方部分农区多使用此方法^[22]。氧化处理成本较高,且资源消耗量大,实际利用价值有限。氨化处理是目前最常用的方法,具有材料来源广和操作简单安全等优点。通过物理和化学方法生产的秸秆饲料仅适用于反刍动物,推广应用具有一定的局限性。微生物发酵法选用微生物及分泌物对秸秆进行降解,将不可溶的高度聚合多糖降解为低分子多糖或单糖,有效提高秸秆的消化率和采食量,可饲喂多种家畜,拓宽了应用范围。

秸秆微贮是近几年国内外研究的热点。重点是筛选高效纤维素降解菌和合成菌体蛋白的微生物,在厌氧条件下对秸秆进行发酵处理,使秸秆纤维素和木质素降解转化为能量和蛋白质,有效提高营养价值。目前较为成熟的工艺有两步发酵法和混合菌种共发酵法,利用多元微生物体系对秸秆中的纤维素和木质素进行降解,从而有效提高秸秆饲料化利用效率。以玉米秸秆为例,经多种微生物发酵后粗蛋白含量可达24.61%,粗纤维降解率提高到48.37%^[23],处理效果较酶处理更好,成本更低。

为了提高秸秆饲料的营养价值,近年来推行秸秆全混合颗粒和饼块类成型饲料,通过添加预混料、精饲料和非蛋白氮等均衡营养。秸秆成型饲料利于全自动化饲喂和精准计量^[24]。2018年发布的国家标准《玉米秸秆颗粒》(GB/T 35835—2018)^[25]对玉

米秸秆颗粒的感官性状、规格、水分、粗蛋白、粗纤维、粗灰分和粉化率等指标明确了具体要求。张海龙等^[26]优化了秸秆颗粒饲料的生产工艺,确定复合秸秆颗粒饲料生产的最优工艺组合为模孔直径7 mm、粉碎粒度8 mm和水分含量8%。秸秆饼块饲料是利用压块机压制而成的高密度饼块,含水率 $\leq 15\%$ ^[27],具有提高秸秆营养和饲养效果、配饲便捷、便于运输和机械化作业等优点。但由于加工秸秆成型饲料需要较多的设备投入,所以技术推广较慢。总体来说,中国在秸秆饲料化方面的发展前景很大,需要完善秸秆营养价值评定方法,建立秸秆利用配套技术和机械装备,农牧结合,从而促进生态系统良性循环^[28]。

3.3 秸秆能源化利用

我国是仅次于美国的第二大能源消耗国。由于化石能源短缺和环境恶化的双重压力,生物质能源作为清洁可再生能源已成为当今世界第四大能源。秸秆资源的能源化,不仅扩展了清洁能源的来源,还优化了用能结构,是中国农业绿色发展的重要组成部分。秸秆资源能源化处理包括秸秆直燃供热、秸秆气化和秸秆液化3大类型。

秸秆直燃供热,即将秸秆直接燃烧获取热量。传统的利用模式是将田间收获的秸秆直接燃烧以满足农户生活取暖所需。该方法秸秆利用率低,生态效益、社会效益和经济效益均差。随着生活质量和环保意识的提高,目前绝大多数农户选择使用安全、方便和卫生的各类燃气供热。新型秸秆直燃锅炉解决了秸秆燃烧转化率低和环境污染等问题,燃烧灰渣还田可促进循环农业生产,在乡镇和农村具有较高的推广价值。但农作物秸秆密度低和运输成本高等缺点限制了秸秆能源化和规模化利用。在黑龙江省等高寒地区常利用设备将秸秆压制成一种高密度固体成型燃料,体积缩小80%,单位热值提高40%~60%^[29],是替代常规燃料的最优选择。秸秆燃烧释放的CO₂与作物生长从大气中吸收的CO₂量相当,所以秸秆燃烧被认为是“碳中和”的有效方式^[30]。将废弃堆积和露天焚烧的秸秆加以利用,可有效缓解PM_{2.5}排放以及雾霾问题。Wang等^[31]研究发现小麦秸秆与褐煤按照质量比40:60混合后充分燃烧可有效减少污染气体排放。

秸秆气化技术主要包括热解气化和沼气化。热解气化过程分为秸秆干燥、裂解、氧化和还原4个阶段。1994年山东省建立第一个气化炉集中供气试

点,之后江苏省、河南省和北京市等陆续推广应用该技术。由于技术不成熟和经济效益差等因素,气化技术目前仍未实现商品化。

在沼气利用方面,中国秸秆沼气工程应用研究尚处于起步阶段。虽然多项规模化秸秆集中供气工程取得了一定效益,但仍然存在发酵原料收集困难、沼气工程规模小、自动化程度低和管理运营不完善等问题。针对原料收集难的问题,任海伟等^[32]提出干法与湿法贮存方法。干贮法由于可利用物质损失大、制备过程需要二次“复水”、易引发火灾、易受地域与气候影响等因素的限制,技术效果并不理想。湿贮法多采用青贮,效果较好,但不同生物质适宜的贮存方法及调控策略仍需深入研究。由于农作物秸秆很难被厌氧微生物降解,所以秸秆预处理技术是秸秆沼气工程的重要技术环节。吴楠等^[33]研究表明物理法、化学法、生物法和组合法等预处理方法可有效提高秸秆厌氧消化率和产气率。物理法是秸秆预处理的基础,与其他方法结合更有效。化学预处理分为酸法和碱法,可有效提高厌氧消化速率。生物法优于物理法和化学法,但需要高效生物菌剂。组合法比单项预处理方法效能高,具有规模化应用前景。改进现有的工艺模式,开发高效反应装置和工艺模式可使农作物秸秆资源得到更加充分地利用,为农牧民提供高质量清洁能源,并推进秸秆生物质天然气在工业领域的应用。

秸秆液化技术指通过水解、热解或催化等方式将秸秆制备成液体燃料的技术,主要是利用秸秆制取乙醇和轻质燃油。目前中国在该领域仍处于技术攻关阶段。黑龙江省双连能源发展股份有限公司利用秸秆生产燃料乙醇,产量达10万t/年^[34],在国内处于先进水平。发展秸秆液化燃料具有合理配置能源、减少污染和价格低廉的优势。

3.4 秸秆基料化利用

秸秆基料化利用包括食用菌基料、育苗基料、花木基料和草坪基料等^[35]。超过85%的主要麦类秸秆(小麦、水稻和玉米)可作为平菇、鸡腿菇和杏鲍菇等多种食用菌的栽培基料,提供菌类必需的碳源、氮源和矿物质等营养物质。秸秆经充分腐熟后再做栽培基质,不仅栽培效果较好,还大幅降低育苗基质生产成本^[36]。生产食用菌后的基料仍含营养,既可加工成饲料,又可用作化肥,经济效益十分可观^[37]。目前,中国对于秸秆基料化研究主要集中在优化配方和工艺方面,前者的优势是提高秸秆降解转化率,

后者是利用发酵提高利用率,但二者仍面临产量低、品质差和生产效益低等问题。

3.5 秸秆原料化利用

秸秆原料化利用率占秸秆资源总利用率 3.40%, 具有较大的发展空间。秸秆含有大量纤维素,是天然的造纸原料。不同的作物秸秆纤维不同,造纸用途也不同。例如水稻和小麦秸秆适合制作文化用纸,而豆科作物秸秆制成的纸张强度低,适合制作包装用纸^[38]。中国拥有制备秸秆纸浆装置和工艺的相关专利,并延伸出纸浆—肥料联产的清洁生产技术,为全世界提供 75% 以上非木材纸浆。由于秸秆造纸排放大量废水,所以在实际生产中需要注意环境保护问题。

农作物秸秆的纤维素、木质素和戊聚糖含量与木材接近,因而最适宜代替木板用来生产木工板材和墙体材料等建筑材料。秸秆建材属于轻型建材,具有承载力强、韧性高、隔音隔热效果好和防潮性好等优点。国外应用秸秆捆来改进建筑的热性能^[39]和温湿度^[40]。秸秆种类不同,秸秆建材的耐久、隔热和隔音性能也不同,这为秸秆建材的多领域应用提供了理论依据。秸秆生物复合板应用前景广泛^[41]。中国借鉴国外先进技术的同时,自主研发秸秆热压板生产关键技术,利用水稻、玉米和小麦秸秆为原料研制成的秸秆热压板,具有性能稳定和低成本的优势,有效提高了国产秸秆板材的质量与产量,有力推动了中国绿色再生材料的生产。

秸秆餐具利用天然化合物做粘合剂,生产过程中,无有毒有害气体及废液排出,可完全达到无污染无残留的目的。Marechal 等^[42]利用向日葵秸秆进行双螺旋挤压机热处理,得到具有聚苯乙烯强度的纸浆。Lawton 等^[43]发现增加植物纤维添加量可显著增加泡沫餐具的机械强度。在中国,使用国内现有设备进行生产,具有投资少、能耗低、效率高和占地少等优势,使用完毕的秸秆餐具粉碎处理后可做饲料及辅助燃料,因而应该加大开发力度,提高生产效率。

4 结论与展望

中国秸秆产量巨大,全国 7 大粮食主产区秸秆总产量呈现“北高南低、东高西低”分布格局,华东地区水稻和小麦秸秆产量最高,东北三省豆类和玉米秸秆产量最高。耕地秸秆单产量基本符合三级阶梯状分布,高产量地区主要集中在第三阶梯。

今后,中国农作物秸秆综合利用应因地制宜,依据区域优势,加大核心技术研发,进一步提高综合利用效率。在秸秆肥料化利用方面,加大政策扶持,提高机械化水平,建立高效储运体系;在秸秆饲料化利用方面,针对不同类型秸秆研发微生物菌种,探索寒冷地区短周期秸秆微生物发酵方法;在秸秆能源化利用方面,提高秸秆能源转化率,完善评定标准,提升秸秆气化技术;在秸秆基料化利用方面,培养新型食用菌,提高秸秆基料化利用比例;在秸秆原料化利用方面,加强宣传,倡导发展绿色秸秆建材,优化生产工艺。

参考文献 References

- [1] 石祖梁,王飞,王久臣,李想,孙仁华,宋成军. 我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(5): 8-16
Shi Z L, Wang F, Wang J C, Li X, Sun R H, Song C J. Utilization characteristics, technical model and development suggestion on crop straw in China[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2019, 21(5): 8-16 (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国国家发展与改革委员会. 关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见[EB/OL]. [2020-03-24]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202103/t20210324_1270286.html
National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. On the "14th Five-Year Plan" guidance on the comprehensive utilization of bulk solid waste[EB/OL]. [2021-03-24]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202103/t20210324_1270286.html (in Chinese)
- [3] 石祖梁,贾涛,王亚静,王久臣,孙仁华,王飞,李想,毕于运. 我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(9): 32-37
Shi Z L, Jia T, Wang Y J, Wang J C, Sun R H, Wang F, Li X, Bi Y Y. Comprehensive utilization status of crop straw and estimation of carbon from burning in China [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(9): 32-37 (in Chinese)
- [4] 王效华,冯祯民. 中国农村生物质能源消费及其对环境的影响[J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(1): 108-110
Wang X H, Feng Z M. Biofuel use and its environmental problems in rural areas of China [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(1): 108-110 (in Chinese)
- [5] 范如芹,罗佳,严少华,卢信,刘丽珠,张振华. 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 R Q, Luo J, Yan S H, Lu X, Liu L Z, Zhang Z H. Progresses in study on utilization of crop straw in soilless culture [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(3): 410-416 (in Chinese)
- [6] 冯超, 马晓茜. 秸秆直燃发电的生命周期评价[J]. 太阳能学报, 2008, 29(6): 711-715
- Feng C, Ma X Q. Life cycle assessment of the straw generation by direct combustion [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008, 29(6): 711-715 (in Chinese)
- [7] 朱建春, 李荣华, 杨香云, 张增强, 樊志民. 近30年来中国农作物秸秆资源量的时空分布[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 139-145
- Zhu J C, Li R H, Yang X Y, Zhang Z Q, Fan Z M. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in 30 years in China [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2012, 40(4): 139-145 (in Chinese)
- [8] 张培栋, 杨艳丽, 李光全, 李新荣. 中国农作物秸秆能源化潜力估算[J]. 可再生能源, 2007, 25(6): 80-83
- Zhang P D, Yang Y L, Li G Q, Li X R. Energy potentiality of crop straw resources in China [J]. *Renewable Energy Resources*, 2007, 25(6): 80-83 (in Chinese)
- [9] 张福春, 朱志辉. 中国作物的收获指数[J]. 中国农业科学, 1990, 23(2): 83-87
- Zhang F C, Zhu Z H. Harvest index for various crops in China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 1990, 23(2): 83-87 (in Chinese)
- [10] 崔明, 赵立欣, 田宜水, 孟海波, 孙丽英, 张艳丽, 王飞, 李冰峰. 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 M, Zhao L X, Tian Y S, Meng H B, Sun L Y, Zhang Y L, Wang F, Li B F. 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 (in Chinese)
- [11] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019
- National Bureau of Statistics of China. *China Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Statistical Press, 2019 (in Chinese)
- [12] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 李宝玉. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 211-217
- Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, Li B Y. Estimation of straw resources in China [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 211-217 (in Chinese)
- [13] 马永良, 师宏奎, 张书奎, 吕润海. 玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(S1): 42-46
- Ma Y L, Shi H K, Zhang S K, Lv R H. Whole maize straw addition: The changes of soil physical and chemical properties and the effect on winter wheat [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(S1): 42-46 (in Chinese)
- [14] 曾木祥, 张玉洁, 单秀枝, 廖超子. 我国主要农区的秸秆还田模式[J]. 中国土壤与肥料, 2001(4): 32-36
- Zeng M X, Zhang Y J, Shan X Z, Liao C Z. Straw return patterns in major agricultural areas in China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2001(4): 32-36 (in Chinese)
- [15] 郭瑶, 陈桂平, 殷文, 冯福学, 赵财, 于爱忠, 柴强. 内陆灌区小麦秸秆还田对玉米光能利用及水分生产效益的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 847-855
- Guo Y, Chen G P, Yin W, Feng F X, Zhao C, Yu A Z, Chai Q. Effect of wheat straw retention on light energy utilization and water production benefits of maize in inland irrigated region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6): 847-855 (in Chinese)
- [16] 王旭东, 庄俊杰, 刘冰洋, 李帅帅, 赵鑫, 刘洋, 张海林. 秸秆还田条件下中国农田土壤有机碳含量变化及其影响因素的Meta分析[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(8): 12-24
- Wang X D, Zhuang J J, Liu B Y, Li S S, Zhao X, Liu Y, Zhang H L. Residue returning induced changes in soil organic carbon and the influential factors in China's croplands: A meta-analysis [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(8): 12-24 (in Chinese)
- [17] 陶金花, 王子峰, 韩冬, 李莘莘, 苏林, 陈良富. 华北地区秸秆焚烧前后的NO₂卫星遥感监测分析[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10): 1016-1020
- Tao J H, Wang Z F, Han D, Li S S, Su L, Chen L F. Analysis of crop residue burning and tropospheric NO₂ vertical column density retrieved from satellite remote sensing in North China [J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(10): 1016-1020 (in Chinese)
- [18] 田国成, 孙路, 施明新, 吴发启. 小麦秸秆焚烧对土壤有机质积累和微生物活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 1081-1087
- Tian G C, Sun L, Shi M X, Wu F Q. Effect of wheat straw burning on soil organic matter accumulation and microbial activity [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(4): 1081-1087 (in Chinese)
- [19] 杜连凤, 刘文科, 刘建玲. 三种秸秆有机肥改良土壤次生盐渍化的效果及生物效应[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 309-312

- Du L F, Liu W K, Liu J L. Effects on rape biomass and salty concentration of salinity soil applied with three straw manures and effective dose[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 309-312 (in Chinese)
- [20] 黄玲, 张自阳, 赵若含, 郭好娟, 张璐瑶, 李冰洁, 卢奎, 武忠伟. 秸秆配施腐熟剂对土壤细菌群落及养分状况的影响[J]. *土壤通报*, 2019, 50(6): 1361-1369
- Huang L, Zhang Z Y, Zhao R H, Guo H J, Zhang L Y, Li B J, Lu K, Wu Z W. Effects of straw decomposing inoculants on soil bacterial communities and nutrients[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(6): 1361-1369 (in Chinese)
- [21] 郑梦莉, 王凯军, 张佩华, 文佐时. 农作物秸秆饲料化技术研究进展[J]. *中国饲料*, 2017(11): 5-8, 14
- Zhen M L, Wang K J, Zhang P H, Wen Z S. Research progress of crop straw fodder technology[J]. *China Feed*, 2017(11): 5-8, 14 (in Chinese)
- [22] 王宏立, 张祖立, 白晓虎. 秸秆饲料资源开发利用的研究进展[J]. *沈阳农业大学学报*, 2003, 34(3): 228-231
- Wang H L, Zhang Z L, Bai X H. Exploitation and utilization of crop straw feed resource [J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2003, 34(3): 228-231 (in Chinese)
- [23] 张红莲, 郭爱莲, 何钧, 郭路军, 卫静. 采用阶段处理和多菌种固态发酵玉米秸秆的研究[J]. *西北大学学报: 自然科学版*, 2004, 34(6): 691-694
- Zhang H L, Guo A L, He J, Guo L J, Wei J. A study on utilizing stage process and the multi-strains solid state fermentation for corn straw[J]. *Journal of Northwest University: Natural Science Edition*, 2004, 34(6): 691-694 (in Chinese)
- [24] 孙若男, 杨曼, 苏娟, 杜松怀, 李鹏, 郑永乐. 我国农村能源发展现状及开发利用模式[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(8): 163-173
- Sun R N, Yang M, Su J, Du S H, Li P, Zheng Y L. Current situation of rural energy development and its development and utilization modes in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(8): 163-173 (in Chinese)
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 玉米秸秆颗粒 GB/T 35835—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration Committee. Cornstalk pellets GB/T 35835—2018[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2018 (in Chinese)
- [26] 张海龙, 赵芳芳, 左志, 马垭杰, 石斌刚, 王鹏, 张伟, 李少斌, 赵志东, 胡江. 复合秸秆颗粒饲料生产工艺优化[J]. *草业科学*, 2020, 37(4): 812-818
- Zhang H L, Zhao F F, Zuo Z, Ma Y J, Shi B G, Wang P, Zhang W, Li S B, Zhao Z D, Hu J. Optimized research on compound straw pellet feed production process[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(4): 812-818 (in Chinese)
- [27] 刘庆权, 聂春霄. 秸秆压块技术的研究[J]. *饲料工业*, 2000, 21(1): 11-13
- Liu Q Q, Nie C X. Study on straw cube processing technology[J]. *Feed Industry*, 2000, 21(1): 11-13 (in Chinese)
- [28] 高腾云, 傅彤, 孙宇, 廉红霞, 王林枫, 李改英. 作物秸秆饲料化利用若干问题讨论[J]. *中国牛业科学*, 2019, 45(1): 45-47
- Gao T Y, Fu T, Sun Y, Lian H X, Wang L F, Li G Y. Discussion on several issues of feed utilization of crop straw[J]. *China Cattle Science*, 2019, 45(1): 45-47 (in Chinese)
- [29] 戴晓虎, 陈淑娟, 蔡辰, 戴翎翎, 华煜. 秸秆主流能源化技术研究与经济分析[J]. *环境工程*, 2021, 39(1): 1-17
- Dai X H, Chen S X, Cai C, Dai L L, Hua Y. Research and economic analysis of main energy technology of straw[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 1-17 (in Chinese)
- [30] Weldemichael Y, Assefa G. Assessing the energy production and GHG (greenhouse gas) emissions mitigation potential of biomass resources for Alberta[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(5): 4257-4264
- [31] Wang C P, Wu Y J, Liu Q, Yang H R, Wang F Y. Analysis of the behaviour of pollutant gas emissions during wheat straw/coal cofiring by TG-FTIR[J]. *Fuel Processing Technology*, 2011, 92(5): 1037-1041
- [32] 任海伟, 姚兴泉, 李金平, 李志忠, 王鑫, 王春龙, 张殿平, 孙永明. 玉米秸秆储存方式对其与牛粪混合厌氧消化特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18): 213-222
- Ren H W, Yao X Q, Li J P, Li Z Z, Wang X, Wang C L, Zhang D P, Sun Y M. Effect of maize straw storage practice on biogas production performance during anaerobic co-digestion with cattle manure[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(18): 213-222 (in Chinese)
- [33] 吴楠, 孔垂雪, 刘景涛, 符征鸽, 梅自力. 农作物秸秆产沼气技术研究进展[J]. *中国沼气*, 2012, 30(4): 14-20
- Wu N, Kong C X, Liu J T, Fu Z G, Mei Z L. Research progress on crop straw biogas technology[J]. *China Biogas*, 2012, 30(4): 14-20 (in Chinese)
- [34] 翟继辉, 周慧秋. 黑龙江省农作物秸秆能源化利用现状、存在问题及对策研究[J]. *东北农业大学学报: 社会科学版*, 2013, 11(1): 20-24

- Zhai J H, Zhou H Q. Study on the current situation, problems and countermeasures of energy utilization of crop straw in Heilongjiang Province[J]. *Journal of Northeast Agricultural University: Social Science Edition*, 2013, 11(1): 20-24 (in Chinese)
- [35] 郝素琴, 刘艳. 我国农作物秸秆综合利用概况[J]. 中国环境工程学院学报, 2007, 17(1): 65-67, 73
- Hao S Q, Liu Y. General introduction to many-sided utilization of crop straw in China[J]. *Journal of Environmental Management College of China*, 2007, 17(1): 65-67, 73 (in Chinese)
- [36] 宋志刚. 不同作物秸秆用作番茄无土栽培基质的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013
- Song Z G. Study on different crop straw used as soilless culture on tomato[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013 (in Chinese)
- [37] 沙文锋, 李世江, 朱娟. 农作物秸秆开发利用技术研究进展[J]. 金陵科技学院学报, 2005, 21(4): 73-76
- Sha W F, Li S J, Zhu J. Research progress of development utilization technology in crop straw[J]. *Journal of Jinling Institute of Technology*, 2005, 21(4): 73-76 (in Chinese)
- [38] 杨会斌. 大豆秸秆造纸的可行性探索[J]. 黑龙江造纸, 2016, 44(2): 15-17
- Yang H B. Exploring the feasibility of soybean straw for paper production[J]. *Heilongjiang Pulp & Paper*, 2016, 44(2): 15-17 (in Chinese)
- [39] Barbaresi A, Dallacasa F, Torreggiani D, Tassinari P. Retrofit interventions in non-conditioned rooms: Calibration of an assessment method on a farm winery[J]. *Journal of Building Performance Simulation*, 2017, 10(1): 91-104
- [40] Whitman C. Straw bales, a possible solution for hygrothermally comfortable dwellings in Chile's central valley: Physical test chambers and in situ measurements[J]. *Journal of Green Building*, 2014, 9(2): 161-181
- [41] Aladejana J T, Wu Z Z, Fan M Z, Xie Y Q. Key advances in development of straw fibre bio-composite boards: An overview [J/OL]. *Materials Research Express*, [2020-01-20]. DOI: 10.1088/2053-1591/ab66ec
- [42] Marechal V, Rigal L. Characterization of by-products of sunflower culture: Commercial applications for stalks and heads[J]. *Industrial Crops and Products*, 1999, 10(3): 185-200
- [43] Lawton J W, Shogren R L, Tiefenbacher K F. Aspen fiber addition improves the mechanical properties of baked cornstarch foams[J]. *Industrial Crops and Products*, 2004, 19(1): 41-48

责任编辑：吕晓梅