

农作物秸秆综合利用措施研究进展

张婷¹, 张一新^{1,2*}, 向洪勇^{1,2}

(1. 西交利物浦大学淮安新型城镇化发展研究院, 江苏淮安 223005; 2. 西交利物浦大学环境科学系, 江苏苏州 215123)

摘要 围绕农作物秸秆综合利用的内涵, 综述了农作物秸秆肥料化、饲料化、基料化、能源化、工业原料化 5 种利用措施和秸秆综合利用措施研究进展及存在的问题, 总结了未来农作物秸秆综合利用措施研究的重点问题, 包括加强秸秆肥料化培肥土壤的机制研究; 重视秸秆综合利用配套机械装置及储运体系的改进和开发; 利用秸秆资源产出各种副产品的单独过程加“环”组“链”技术改进和开发; 区域秸秆综合利用措施开发和效益评价, 旨在为秸秆综合利用措施的开发提供指导与借鉴。

关键词 肥料化; 能源化; 工业原料化; 饲料化; 基料化

中图分类号 S216.2 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2017)02-0080-06

DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2017.02.027

Research Advances on the Measures of Integrated Straw Utilization

ZHANG Ting¹, ZHANG Yi-xin^{1,2*}, XIANG Hong-yong^{1,2} (1. XJTLU-Huai'an Research Institute of New-type Urbanization, Huai'an, Jiangsu 223005; 2. Department of Environment Science, Xi'an Jiaotong-Liverpool University, Suzhou, Jiangsu 215123)

Abstract This study explained the content of integrated straw utilization and summarized five ways of straw utilization (i. e. fertilizer, fodder, matrix, energy and industry material) and analyzed the research progresses and problems of the integrated straw utilization. Furthermore, it concluded four questions that needed further studies, i. e. research on the mechanisms of the improvement of soil fertility after straw returning, the improvement and development of agricultural machinery mating to straw utilization, the improvement and development of technology that can match different measures of integrated straw utilization and the development of regional measures of integrated straw utilization and their benefit evaluation. The aim was to provide guidance and reference for development of measures of integrated straw utilization.

Key words Fertilizer; Energy; Industry material; Fodder; Matrix

我国是农业大国, 农作物秸秆(以下简称“秸秆”)资源丰富。据统计, 近年来我国秸秆年产量为 7 亿 t 左右, 列世界之首, 占全世界秸秆总量的 30% 左右^[1]。随着农作物单产的提高, 秸秆资源量也呈增加趋势^[1-2]。秸秆中含有农作物生长所需的碳、氮、磷、钾、镁、钙、硫等多种营养元素和畜禽生长所需的纤维素、木质素、半纤维素等非淀粉类大分子物质, 可以作为农业生产中重要的肥料、饲料资源^[3]。我国年产秸秆肥量相当于 350 余万 t 氮肥、800 余万 t 钾肥、80 余万 t 磷肥^[3]。秸秆是一种重要的生物质能源, 我国年产秸秆热值相当于 3.91 亿 t 煤量^[4]。因此, 秸秆具有巨大的资源化利用潜力。长期以来, 我国只注重农作物果实产量, 而忽视对秸秆的资源化利用。传统农业生产中, 秸秆主要用于农民生火做饭和饲养家畜, 进而将产生的秸秆灰和家畜粪便作为有机肥还田。随着传统农业向现代化农业的转变以及经济、社会的发展, 农村能源、饲料结构发生了重大变化, 秸秆利用途径发生了历史性转变, 就地焚烧和弃置成为最主要的秸秆处理方式^[5]。然而, 这种处理方式一方面造成了严重的资源浪费, 另一方面会污染空气和水体, 成为农业面源污染的重要源头, 威胁农产品安全和生态环境, 进而危害人体健康; 增加 CO₂ 排放量, 加剧温室效应; 秸秆焚烧产生大量烟雾导致大气能见度降低, 引发交通事故, 影响道路交通和航空安全; 焚烧过程处理不当将引发火灾, 威胁人们的生命财产安全; 破坏土壤结构, 造成耕地质量下降^[6-8]。这些都严重威胁着我

国城镇化进程、环境友好、生态安全、农业可持续发展及农民生活水平的提高。因此, 秸秆就地焚烧和弃置带来的资源浪费和环境污染问题日益引起全社会的关注。

为了实现秸秆的资源化利用和农业可持续发展, 我国从 1992 年开始出台了一系列方针政策, 以防止秸秆焚烧产生的问题, 并充分利用秸秆资源促进我国农村经济、社会的发展^[9]。相应的秸秆利用措施和技术应运而生, 如秸秆肥料化、饲料化、基料化、能源化、工业原料化等。这些措施对于秸秆禁烧政策的实施起到了较好的促进作用, 而且促进了农民利用秸秆的积极性。尽管如此, 我国秸秆利用率仍为 15%, 与美国(90%)、英国(72%)的秸秆利用率相比仍严重不足, 秸秆综合利用的目标仍远未实现^[10-11]。这一方面是由于不同秸秆利用措施和技术在应用中仍存在很多问题, 另一方面与区域不注重优化配置不同秸秆利用措施来实现利用效率最大化有关。笔者综述了国内外秸秆综合利用措施研究进展, 以期为实现我国农业资源高效利用、保护农村生态环境、提高农民生活水平及促进农业可持续发展服务提供指导与借鉴。

1 秸秆综合利用的内涵

防止农业生产过程中对各种资源的破坏和浪费, 减少农业生产对环境的污染, 发展农村循环经济, 做到农业发展与资源和环境相互协调, 是当今全球范围内对农业可持续发展的战略要求。秸秆综合利用是在保障农民基本利益和农田生产力的前提下, 通过优化组合不同的秸秆利用措施, 实现秸秆资源的生产、生活、生态效益最大化, 最终实现粮食增产、农民增收、生态环境改善的目标, 达到农业可持续发展的战略要求^[2]。

秸秆综合利用要求树立大农产品观念, 把秸秆作为农产

基金项目 淮安市市级科技计划项目(HAN2015022)。

作者简介 张婷(1986—), 女, 湖北襄阳人, 博士研究生, 研究方向: 农业废弃物综合利用。* 通讯作者, 副教授, 博士, 博士生导师, 从事生态学研究。

收稿日期 2016-11-11

品的一种类型来看待。以秸秆为纽带,将秸秆收集与生态种养、秸秆资源化、秸秆工业原料化有机衔接,加固农业循环经济的链条,促进秸秆产业发展,拓展农业产业的发展空间,增加农民收入和农业发展的可持续性。鼓励和引导秸秆产业的发展,以提高我国秸秆综合利用水平,保护生态环境,加快农业循环经济和低碳农业发展^[12]。

2 秸秆利用措施

2.1 秸秆肥料化 化肥的过量施用和不合理的耕作措施导致我国农田土壤养分失衡、结构破坏,进而导致地力退化,土地生产力严重降低^[13]。人口的日益增长和耕地面积的逐渐减少迫切需要寻找平衡土壤养分、提高土地生产力及确保粮食安全的措施^[14]。同时,随着环境、生态、生物链和可持续发展的理念逐渐深入人心,营养、健康、绿色和无公害农业成为未来农业发展的必然趋势,因此迫切需要发展有机肥工业。秸秆含有丰富的有机质、氮、磷、钾、钙、镁、硫等农作物生长所需的多种营养元素,是一种重要的有机肥源,因而其肥料化是改良土壤结构及提高土壤肥力的有效措施^[3]。目前,秸秆肥料化措施主要包括秸秆直接还田和加工商品有机肥。研究发现,秸秆直接还田能够增加土壤有机质和氮、磷、钾含量^[15-17],提高土壤团聚体和水分含量^[18-23],调节土壤温度^[24-26],增加土壤动物数量和活性^[27-29],提高微生物多样性和数量^[30-31],增强土壤酶活性^[32-33],抑制田间杂草^[34-36],进而提高作物产量和品质^[37-39]。然而,秸秆直接还田存在很多问题。

一方面,秸秆还田改善土壤肥力的效果不理想,而且还田过程中会产生一系列的次生危害。如秸秆在分解过程中,土壤微生物消耗部分土壤氮素而发生与作物争氮,导致作物氮“饥饿”现象^[40];秸秆分解速度较慢,不利于后季作物生根^[41];水田秸秆腐烂过程中会产生许多有机酸,危害作物根系^[42];部分秸秆对下茬作物产生相克反应或自毒作用^[43-44];引发一些病虫害^[45];增加还原气体的排放,加剧温室效应^[46-48];对田间全苗、匀苗产生影响^[49-50]等。因而,导致秸秆还田提高农作物产量的效果严重低于预期。然而,由于对秸秆直接还田提高土壤肥力的机制仍不清楚,目前难以提出合理的秸秆还田配套农艺措施,以充分提高土壤肥力、避免次生危害。因此,今后有待深入研究秸秆直接还田提高土壤肥力的机制,在此基础上因地制宜地探索合理的秸秆还田配套农艺措施。

另一方面,秸秆还田配套机械不完备也严重阻碍了秸秆直接还田的推广应用^[51]。当前的秸秆粉碎装置对秸秆的粉碎程度较低,粉碎秸秆的装置成本和功耗均较高;以往的秸秆旋耕、抛撒装置,使得土壤翻耕深浅程度不同,且粉碎后的秸秆在田间分布不均,严重影响出苗^[52]。市场上的秸秆还田配套机械机型偏少,产品的可靠性和安全性较差,配套动力严重不足,因此秸秆粉碎率、破茬率、掩埋深度等均达不到农艺要求,这不仅延误农时,还影响秸秆还田效果^[53-54]。同时,单项作业机多,复式作业机少,机器在田间多次作业会严重破坏土壤结构^[55]。另外,秸秆还田机械的国家标准较少,

而各厂家对秸秆还田机的理论研究少,对其结构、运动以及动力参数的配置与选择缺乏理论和试验依据,这导致其设计比较盲目^[56]。秸秆还田配套机械成本高,使用率低,政府的投资力度小,阻碍了秸秆还田的实施。未来有待加强秸秆还田配套的低能耗、高效率机械装置的研发,以降低秸秆还田的人力和物力成本,促进秸秆直接还田的实施。

秸秆肥料化加工商品有机肥主要是采用特殊工艺科学配比,用高新技术培养和生产菌种,用现代化设备进行温度、湿度、数量、质量和时间控制,将秸秆经粉碎、堆腐、生物发酵等过程转换成优质有机肥^[57]。目前,国内利用秸秆生产商品有机肥的技术不成熟。其中添加量少和返料率低的新颖粘结剂的开发研究是该技术发展的瓶颈^[58]。用秸秆加工的商品有机肥虽然肥效较高、生态环境友好,但秸秆的收集与储存存在一定的阻碍^[59]。由于作物收获季节农时较紧,用于秸秆收集的人力不足,且人力收集效率低下,目前尚无高效的秸秆收集打包机械,因此严重影响秸秆的收集。另外,当前我国缺乏形成秸秆存储体系,这都会制约利用秸秆加工商品有机肥的发展。

2.2 秸秆饲料化 农作物秸秆含有丰富的纤维素、半纤维素、木质素等非淀粉类大分子物质,是草食性家畜重要的粗饲料来源。研究发现,1.00 t 普通秸秆的营养价值与 0.25 t 粮食的营养价值相当^[60]。秸秆饲料化可大幅度提高牛、羊肉及其奶制品的产量和质量,进而改善人民群众的膳食结构;减少饲料用粮,解决人畜争粮矛盾;发展畜牧业的同时一定程度上解决秸秆的资源化问题,提高秸秆的利用率^[61]。

然而,由于秸秆中纤维素、木质素含量较高,蛋白质、维生素含量很低,导致其适口性差、消化率低、营养价值低,直接饲喂效果不佳,因此需要对其进行适当的饲料化加工处理^[62]。秸秆饲料化常用方法主要有物理法、化学法和生物法^[63]。物理法设备能耗高,生产的饲料适口性、消化率、营养价值较低。化学法虽可在一定程度上提高秸秆消化率,但存在成本高、易污染等问题。生物法主要采用微生物或酶处理秸秆,使秸秆中的纤维素、半纤维素、木质素等降解转化为低分子的单糖或低聚糖,最终加工为富含菌体蛋白、维生素等成分的生物蛋白饲料。该方法具有显著提高秸秆饲料适口性和营养价值及绿色无污染、低能耗等优点,同时得到的秸秆饲料中还含有丰富的菌体蛋白、酶类、抑菌因子、维生素及促生长因子等发酵代谢产物,具有一定的益生保健功效,是当前最具应用潜力和发展前景的秸秆饲料化方法^[62]。因此,秸秆饲料化的研究主要集中于微生物法。

目前,虽然对秸秆饲料化的微生物法处理技术研究取得了一些进展,如鉴定并分离了多种降解秸秆的细菌、真菌、放线菌^[64-65],对发酵工艺和菌群构成也进行了诸多探索和优化改进^[66-68]。但该技术仍不够成熟,存在诸多亟需解决的问题。该技术的核心是秸秆发酵降解菌株,但至今仍未选育出高产纤维素酶菌株^[69],因此,需继续广泛筛选、分离或采用人工驯化、基因克隆与表达等方法得到纤维素、半纤维素、木质素高效降解菌菌株^[62]。同时,该技术规模化生产的工

艺及技术非常复杂,生产放大过程受多种因素影响,如菌株生长易受杂菌的影响,需要在无菌或杂菌受抑制的条件下生长,且生产过程易受发酵温度、湿度、pH、通气等条件影响;酶的合成和活性易受降解产物反馈抑制;生长转化过程中可能还会有少量有毒物质产生^[70]。因此,需深入研究秸秆的菌株降解机理,揭示菌株间以及菌株、发酵产物、底物间的协同或拮抗关系,进而开发出成本低、易操作的配套发酵工艺及技术,并加强生产过程中有毒物质风险评估与防控,避免其通过食物链对人体造成毒害^[71]。目前,秸秆饲料化多用于牛等反刍动物饲料,缺乏用于单胃动物的饲料化研究,因此,还需考虑家畜的消化生理特性及生长发育阶段对营养的需求,选择适宜饲料化的秸秆种类,对不同秸秆种类进行优化组合,开发适用于不同家畜及其不同生理阶段的微生物发酵饲料^[72-74]。

2.3 秸秆基料化 秸秆基料化是利用机械将秸秆粉碎,以此作为基料栽培食用菌。秸秆富含食用菌所必需的碳源,大多数秸秆均可作为食用菌的栽培基料^[75]。文雯^[76]研究发现,5~8 hm²耕地的秸秆经腐熟后可栽培0.07 hm²露地蘑菇,蘑菇产量高达2 000~3 000 kg,因此其基料化是一种投资小、见效快的秸秆利用方式。

目前,我国已能够利用小麦、水稻、玉米等多种作物秸秆生产双孢蘑菇、平菇、鸡腿菇、杏鲍菇等多种食用菌,但仍面临单产低、品质差、产业效益逐渐下降的问题。秸秆基质的优化是提高秸秆降解转化效率、提高食用菌产量的基本保障。秸秆基质化研究主要包括配方优化和工艺优化两大方面。前者包括合理的主辅料搭配、碳氮比、料液比等,是提高转化效率的基础^[77]。后者模式较多,如一次发酵、二次发酵、三次发酵等模式,但各种模式都有自己的优缺点^[78-79]。然而,目前我国关于温度、微生物、碳氮比、木质素等关键参数对食用菌生长的影响研究仍十分薄弱,因此,应注重各秸秆基质化关键参数及基础规律的研究,同时分析对比各种工艺模式,探讨各参数与降解转化、产量等的关系。

2.4 秸秆能源化 秸秆是一种很好的清洁可再生能源,每2 t秸秆的热值相当于1 t标准煤,而平均含硫量只有0.38%,远低于煤1.00%的平均含硫量,具有显著的能源效益和环境效益^[80]。秸秆能源化不仅可以提高能源利用效率,而且其生产能源可替代化石燃料的消耗,使能源的配置更为合理,并减少CO₂等有害气体排放,还可缓解农村地区能源供应短缺的状况,提高农民生活质量。其能源化的主要方式包括沼气化、热解气化、焚烧发电、制成固化和液化燃料等^[81]。

秸秆沼气化是秸秆适配人畜粪在厌氧条件下发酵生产以甲烷为主要成分的可燃气体。近年来,关于秸秆沼气化措施的研究集中在通过调节秸秆碳氮比和改善秸秆质地等预处理优化原料发酵特性、在反应器中增加格栅防止漂浮结壳、时差进料调节产气平衡、变换反应器接种物和接种浓度加速反应启动以及改进发酵工艺调控反应条件等方面,并取得了一定进展^[82-85]。但是当前秸秆沼气的产气率仍不理想,今后有待加强秸秆预处理、反应器结构改进、产气发酵工

艺过程改进等方面的研究^[86]。

秸秆热解气化是指在缺氧条件下加热秸秆,使其中的挥发性物质随温度的升高逐步析出,并在高温下发生裂解,裂解得到的气体和余碳在氧化区与氧化介质空气、水蒸汽等发生燃烧反应,生成的气体经还原区与碳发生反应生成CO、H₂、CH₄、C_nH_{2n}等混合可燃气体,即秸秆气^[87]。但目前秸秆热解气化仍存在燃气热值低、焦油量多、热能利用效率低、经济效益差等亟待解决的问题^[88]。

秸秆焚烧发电技术也是秸秆能源化的重要方式。丹麦是世界上首个用秸秆焚烧发电的国家。丹麦BWE公司率先研发秸秆焚烧发电技术,迄今在该领域仍保持世界最先进水平^[12]。我国秸秆焚烧发电技术起步较晚,自2004年开始,我国政府和民间才开始关注该技术的推广和普及。目前,秸秆焚烧发电技术成本仍远高于燃煤发电,且不完全燃烧的秸秆焚烧发电还可能造成新的空气污染。软秸秆进料堵塞、炉壁腐蚀结垢等问题仍有待解决^[89]。

秸秆的基本组织是纤维素、半纤维素、木质素,在200~300℃下会软化,此时施加一定压力使其紧密粘连,冷却固化成型后即可得到棒状或颗粒状新型燃料,也可经过一系列的生物发酵过程生产乙醇^[88]。因此,秸秆还可用来加工固体燃料和乙醇。但该技术目前仍不成熟,尚处于实验室研究阶段。

2.5 秸秆工业原料化 秸秆工业原料化在我国开发利用起步较晚。但由于秸秆资源量丰富、价格低廉,因而,其工业原料化被认为是极具潜力的利用途径^[90]。目前,秸秆工业原料化方式包括造纸、制作工艺品、生产一次性餐具、人造丝、人造棉、糠醛、饴糖、醋酸纤维素、木糖醇等,但这些方面的应用由于技术不成熟、成本高、污染重等,尚未得到大规模的推广^[91]。

秸秆工业原料化的主要方式集中于生产人造板,是将经切割、粉碎、碾磨处理或未经处理的秸秆与胶粘剂混合物经挤压、平压或模压加工成各种各样的纤维板材,再经一定的化学处理制成装饰板材、墙板、一次成型家具、包装材料等。这种秸秆人造板的开发,对于缓解国内木材供应不足和需求趋紧的矛盾、保护森林资源、生态环境具有重要意义^[92]。

然而,秸秆人造板产业化过程中仍存在一些問題。一方面,秸秆的细胞结构特征和化学组分与木材不尽相同,采用传统办法进行秸秆破碎和纤维分离,得率低,形态差,影响产品的物理学性能。另一方面,秸秆表面多含不利于胶合的蜡质和硅质成分,采用传统的脲醛树脂或酚醛树脂胶难以得到满意的胶合度,尤其是内结合强度。因此,目前国内外已建成的秸秆人造板几乎都以异氰酸酯为胶粘剂。但同时也引起另外两个问题:成本问题——异氰酸酯的价格远高于脲醛树脂和酚醛树脂,导致秸秆人造板的成本较高;粘板问题——直接采用异氰酸酯胶粘剂会产生严重的粘板现象。

未来有待加强以下几个方面研究,以解决秸秆人造板产业存在的问题。①开发新的秸秆切割、粉碎、碾磨处理方法和破碎设备,以增强秸秆人造板的物理学性能;②秸秆人造

板生产工艺的改良,如采用蒸汽加热处理、生物处理、化学处理等方法,改变秸秆表面性质,消除秸秆表面不利于胶合物质对产品性能造成的不利影响,同时改良秸秆人造板的物理、化学性能,如强度、结构稳定性、耐腐蚀性、防火阻燃性等;③改进异氰酸酯生产工艺,降低异氰酸酯价格,优化施胶工艺以减小胶粘剂的用量和均匀性,积极开发新的胶粘剂替代产品,降低秸秆人造板的胶粘剂成本;④探索秸秆人造板的复合方案,将秸秆与木材、竹材、无机物等原料混合使用或将异氰酸酯与酚醛树脂、无机胶粘剂混合使用,以降低秸秆人造板的生产成本。

3 秸秆综合利用措施

秸秆是宝贵的物质资源,采用综合利用措施对秸秆进行系列化开发、产业化经营,既可提高农产品的综合加工能力,促进农业增产、农民增收,又是加强农业基础设施建设、维护

农业生态平衡、实现农业可持续发展的一项重要内容。

多级产业链延伸物质的多级利用是提高物质经济和生态效益的有效途径。多级利用原则要求按照循环经济原理开展物质的资源化利用,对物质进行多次利用,通过延长物质的使用周期来提高物质的资源化利用效率。根据多级利用的原则,秸秆综合利用的最佳途径是在秸秆资源化利用过程中延长产业链,利用产业内部各要素间的共生耦合与协同作用形成相对完善、闭合的产业网络,建立闭路循环工艺,实现秸秆资源循环利用,即将秸秆资源作为原料投入到某一生产过程,该生产过程的废料或副产品经过转化再进入下一个生产过程,最终的废料返回农田,从而产生新的秸秆资源(图1)^[93]。整个综合利用过程最大程度地实现了秸秆中物质和能量的资源化,并减少废弃物向环境的直接排放。

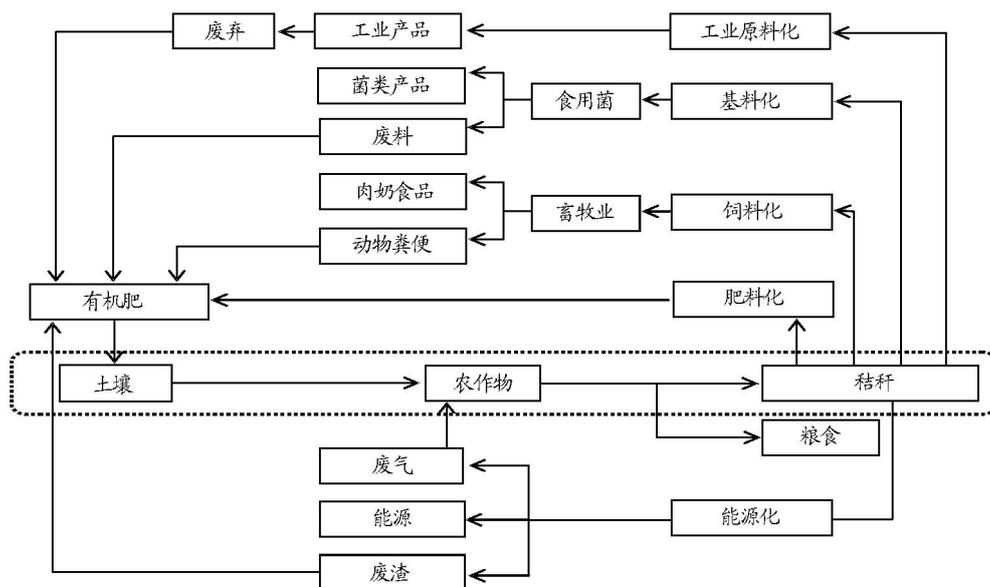


图1 秸秆综合利用措施

Fig.1 Measures of integrated straw utilization

目前,关于秸秆综合利用措施已有大量研究。这些研究主要集中于以下3个方面。首先是影响秸秆综合利用的形成机制。朱建春等^[91]研究发现,政策、技术、地域、农户社会经济状况和个人素质通过直接影响农户秸秆综合利用意愿而间接影响农户秸秆综合利用行为,并构成陕西农作物秸秆综合利用的形成机制。其次是耦合不同秸秆利用措施,以提高秸秆利用效率。张无敌等^[94]研究发现,添加沼气发酵残留物养猪,育肥1头猪能节约成本50元以上,养鱼能增产鲜鱼10%~30%,沼肥不但是优质的有机肥,还是理想的土壤改良剂;沼液既是无污染的广谱性生物农药,又是良好的种子浸种液;用沼气发酵残留物栽培蘑菇,产菇快且质量好,比传统栽培料增产10%~30%;沼气贮粮和保鲜水果蔬菜等也均能取得良好的效益。因此,沼气和残留物的综合利用所带来的效益远比秸秆沼气化本身的价值高得多。钟珍梅等^[95]运用能值理论对福清星源畜牧场以沼气为纽带的种养结合循环农业模式进行评价,结果表明,循环农业模式整体效益

优于单纯的生猪养殖模式,环境负载率比后者降低了15.00%,可持续发展指数提高了15.71%,经济效益提高了18.96%。循环农业模式是实现“资源减量化、物质再循环和再利用及提高生态效益、经济效益的有效途径。程云辉等^[96]通过将山芋藤、花生秸、玉米秸菌糠添加到肉羊育肥配合饲料中,研究发现,菌糠可作为较好的山羊育肥饲料。最后是秸秆综合利用效益评价。张燕^[97]通过对比分析我国秸秆资源肥料、饲料、基料、能源、工业原料化5种利用方式的生态、经济及社会三大效益,认为饲料、肥料及能源的传统利用方式虽较适宜发展,但其“合理却并非有效”,唯有发展秸秆人造板这样的“新型环保+效益”的工业生态产业才符合我国国情。杨增玲等^[98]采用灰色关联理想解法对黑龙江地区的秸秆综合利用方案效益进行评价,发现该地区秸秆综合利用效益从大到小依次为饲料化、肥料化、能源化、基料化、工业原料化。黄春等^[99]利用能值生态足迹方法对广汉市和大邑县水稻和小麦秸秆利用的人均生态足迹进行了评价,发

现广汉市水稻秸秆不同利用方式的人均生态足迹从大到小依次为肥料化、原料化、焚烧及其他、饲料化、沼气化,小麦秸秆不同利用方式的人均生态足迹从大到小依次为肥料化、焚烧及其他、原料化、沼气化、饲料化;大邑县水稻秸秆不同利用方式的人均生态足迹从大到小依次为原料化、肥料化、沼气化、焚烧及其他、饲料化,小麦秸秆不同利用方式的人均生态足迹从大到小依次为肥料化、焚烧及其他、原料化、沼气化、饲料化。

尽管如此,由于秸秆综合利用措施尤其是各种利用秸秆资源产出各种副产品的单独过程加“环”组“链”技术不成熟甚至严重缺乏,贮、养、加、销各环节仍难以有机衔接,很多秸秆综合利用措施仍停留在实验室研究或小规模试验阶段,仍未得到大规模的推广应用,因而导致我国秸秆综合利用严重偏低,仅以秸秆肥料化为主,秸秆产业化利用途径较窄,秸秆综合利用的目标难以实现。

4 秸秆综合利用措施的研究重点及发展趋势

秸秆综合利用措施一直是农业研究的热点问题之一,并取得了很大进展,但仍存在一些迫切需要解决的问题。开展秸秆综合利用是我国农业资源高效利用、农村生态环境保护、农民生活水平提高、农业可持续发展的重要保障。同时,它还可增加就业机会,繁荣农村经济;增加秸秆附加值,提高农民收入,带动农户种粮积极性,提高我国粮食安全;增加能源及资源供给,提高我国能源及资源安全性。因此,大力实施秸秆综合利用,利国利民。未来秸秆综合利用措施的研究应重点集中在以下几个方面:

4.1 加强秸秆直接还田,提高土壤肥力的机制研究 尽管秸秆直接还田能在一定程度上提高土壤肥力,但其提高土壤肥力、增加作物产量的效果仍不理想,且伴随着一系列次生危害。因此,迫切需要揭示秸秆直接还田,提高土壤肥力的微生物学、酶学、动物学、化学计量学机制,以开发适宜的秸秆直接还田配套的农艺措施,充分发挥秸秆直接还田提高土壤肥力的作用,同时避免次生危害的发生,进而达到充分提高作物产量的目的。

4.2 重视秸秆利用配套机械装置和储运体系的改进和开发 进一步发展秸秆粉碎还田机、深松机、大功率拖拉机等机械,保证秸秆直接还田的顺利、高效实施。加强秸秆利用的配套机械装置的开发和改进,尤其要重视秸秆捡拾和打捆机械,如青贮收获机、秸秆打捆机的开发。另外,秸秆密度小,占地面积大,堆放需要较大的空间,再加上秸秆资源供应的季节性导致其不能持续供应,这些都迫切需要在不同级别的行政单元建立不同规模的秸秆收集站点和储运体系。

4.3 秸秆利用措施单独过程加“环”组“链”技术的改进和开发 随着秸秆综合利用概念的提出,新的秸秆利用措施也不断被开发,但不同秸秆利用措施均存在一定问题,制约着秸秆利用率和利用层次的提高。因此,有待加强已有秸秆利用措施的改进和产业化。同时,加强秸秆利用新技术、新方法的研发。通过各种加“环”组“链”技术,将各种秸秆利用措施有机组合起来,形成多层次、多途径的综合利用方式,实现秸秆资源化利用的产业化和高效化目标。另外,秸秆综合利用需

要先进技术的支撑,相关的科研单位、企业要加强交流与合作,结合我国农时特点和农作物区域特征共同研究秸秆利用先进工艺和技术。同时,做好相关技术的推广和培训工作。

4.4 区域秸秆综合利用措施开发和效益评价 秸秆综合利用措施多种多样,不同措施的适用范畴与区域经济、技术发展水平、生态气候条件和秸秆资源状况等息息相关,因此需因地制宜地开展秸秆的综合利用措施开发与应用,同时结合区域资源分布特征,优化组合不同措施,从而实现秸秆综合利用。建立综合效益评价体系和指标,对秸秆综合利用措施的经济效益、生态效益和社会效益进行评价,从而实现秸秆综合利用的良性循环和可持续发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 朱建春,李荣华,杨香云,等.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.
- [3] 高利伟,马林,张卫峰,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.
- [4] 韦茂贵,王晓玉,谢光辉.中国各省大田作物田间秸秆资源量及其时间分布[J].中国农业大学学报,2012,17(6):32-44.
- [5] 王效华,冯镇民.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.
- [6] 毕于运,王亚静,高春雨.我国秸秆焚烧的现状危害与禁烧管理对策[J].安徽农业科学,2009,37(27):13181-13184.
- [7] 曹国良,张小曳,郑方成,等.中国大陆秸秆露天焚烧的量的估算[J].资源科学,2006,28(1):9-13.
- [8] 田国成,孙路,施明新,等.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.
- [9] 朱建春,李荣华,张增强,等.陕西作物秸秆的时空分布、综合利用现状与机制[J].农业工程学报,2013,29(S1):1-9.
- [10] 丁文斌,王雅鹏,徐勇.生物质能源材料——主要农作物秸秆产量潜力分析[J].中国人口资源与环境,2007,17(5):84-89.
- [11] 赵其国,钱海燕.低碳经济与农业发展思考[J].生态环境学报,2009,18(5):1609-1614.
- [12] 朱立志,冯伟,邱君.秸秆产业的国外经验与中国的发展路径[J].世界农业,2013(3):114-117.
- [13] 赵其国,骆永明.论我国土壤保护宏观战略[J].中国科学院院刊,2015,30(4):452-458.
- [14] 胡鞍钢,地力夏提·吾布力,鄢一龙.粮食安全“十三五”规划基本思路[J].清华大学学报(哲学社会科学版),2015(5):158-165.
- [15] 戴志刚,詹剑巍,李小坤,等.不同作物还田秸秆的养分释放特征试验[J].农业工程学报,2010,26(6):272-276.
- [16] 赵鹏,陈卓.秸秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响[J].作物学报,2008,34(6):1014-1018.
- [17] BAUDOIN E, PHILIPPOT L, CHÉNEBY D, et al. Direct seeding mulch-based cropping increases both the activity and the abundance of denitrifier communities in a tropical soil[J]. Soil biology and biochemistry, 2009, 41(8):1703-1709.
- [18] 张喜英,陈素英,裴冬,等.秸秆覆盖下的夏玉米蒸散、水分利用效率和作物系数的变化[J].地理科学进展,2002,21(6):583-592.
- [19] 许翠平,刘洪禄,车建朋,等.秸秆覆盖对冬小麦耗水特征及水分生产率的影响[J].灌溉排水学报,2002,21(3):24-27.
- [20] ENRIQUE G S, BRAUD I, JEAH-LOUIS T, et al. Modelling heat and water exchanges of fallow land covered with plant-residue mulch[J]. Agricultural and forest meteorology, 1999, 97(3):151-169.
- [21] 刘超,汪有科,湛景武,等.秸秆覆盖量对夏玉米产量影响的试验研究[J].灌溉排水学报,2008,27(4):64-66.
- [22] 孙进,王义炳.稻草覆盖对旱地小麦产量与土壤环境的影响[J].农业工程学报,2001,17(6):53-55.
- [23] GALB T, KULIG B. Effect of mulch and tillage system on soil porosity under wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Soil and tillage research, 2008, 99(2):169-178.
- [24] 苏跃,冯泽蔚,陈正平等.稻茬油菜免耕覆盖土壤温度效应研究[J].安徽农业科学,2008,36(20):8712-8714.

- [25] 姚宝林 景明 施炯林. 覆盖免耕在休闲期的节水和生育期的调温效应[J]. 甘肃农业大学学报 2005 40(2): 208-211.
- [26] 姚宝林 施炯林. 秸秆覆盖免耕条件下土壤温度动态变化研究[J]. 安徽农业科学 2008 36(3): 1128-1129.
- [27] SINCLAIR T R, AMIR J. Model analysis of a straw mulch system for continuous wheat in an arid climate[J]. Field crops research 1996 47(1): 33-41.
- [28] BUCK C, LANGMAACK M, SCHRADER S. Influence of mulch and soil compaction on earthworm cast properties[J]. Applied soil ecology 2000, 14(3): 223-229.
- [29] TIAN G, KANG B T, BRUSSAARD L. Effect of mulch quality on earthworm activity and nutrient supply in the humid tropics[J]. Soil biology and biochemistry 1997 29(3): 369-373.
- [30] 谭周进 李倩 陈冬林 等. 稻草还田对晚稻土微生物及酶活性的影响[J]. 生态学报 2006 26(10): 3385-3392.
- [31] 高云超 朱文珊 陈文新. 秸秆覆盖免耕对土壤细菌群落区系的影响[J]. 生态科学 2000 19(3): 27-32.
- [32] HAMIDO S A, KPOMBLEKOU A K. Cover crop and tillage effects on soil enzyme activities following tomato[J]. Soil and tillage research 2009 105(2): 269-274.
- [33] 赵鹏 陈阜 李莉. 秸秆还田对冬小麦农田土壤无机氮和土壤脲酶的影响[J]. 华北农学报 2010 25(3): 165-169.
- [34] 龚德荣. 稻茬免少耕秸秆覆盖配套栽培技术研究初报[J]. 安徽农学通报 2010 16(14): 99-100.
- [35] 李昌新 赵锋 芮雯奕 等. 长期秸秆还田和有机肥施用对双季稻田冬季杂草群落的影响[J]. 草业学报 2009 18(3): 142-147.
- [36] 黄爱军 赵锋 陈雪凤 等. 施肥与秸秆还田对太湖稻-油复种系统春季杂草群落特征的影响[J]. 长江流域资源与环境 2009 18(6): 515-521.
- [37] ZHANG Z C, ZHANG S F, YANG J C et al. Yield, grain quality and water use efficiency of rice under non-flowed mulching cultivation[J]. Field crops research 2008 108(1): 71-81.
- [38] 张锋 李鹏 张凤云 等. 玉米秸秆还田对不同小麦产量和品质的影响[J]. 山东农业科学 2011(3): 30-32, 36.
- [39] 张自常 孙小淋 陈婷婷 等. 覆盖旱种对水稻产量与品质的影响[J]. 作物学报 2010 36(2): 285-295.
- [40] WANG J G, BAKKEN L R. Competition for nitrogen during decomposition of plant residues in soil: Effect of spatial placement of N-rich and N-poor plant residues[J]. Soil biology and biochemistry 1997 29(2): 153-162.
- [41] 李培培 张冬冬 王小娟 等. 促分解菌剂对还田玉米秸秆的分解效果及土壤微生物的影响[J]. 生态学报 2012 32(9): 2847-2854.
- [42] 金鑫 蔡林运 李刚华 等. 小麦秸秆全量还田对水稻生长及稻田氧化还原物质的影响[J]. 中国土壤与肥料 2013(5): 80-85.
- [43] 杨思存 霍琳 王建成. 秸秆还田的生化他感效应研究初报[J]. 西北农业学报 2005 14(1): 52-56.
- [44] HICKS S K, WENDT C W, GANNAWAY J R et al. Allelopathic effects of wheat straw on cotton germination, emergence, and yield[J]. Crop science 1989 29(4): 1057-1061.
- [45] 赵子俊 林忠敏 刘金城. 玉米田整秸秆覆盖后的病虫害发生危害规律及防治措施[J]. 土壤肥料 1995(4): 27-30.
- [46] MA J, MA E D, XU H et al. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields[J]. Soil biology and biochemistry 2009 41(5): 1022-1028.
- [47] LAL R. Global potential of soil carbon sequestration to mitigate the greenhouse effect[J]. Critical reviews in plant sciences 2003 22(2): 151-184.
- [48] 张翰林 吕卫光 郑宪清 等. 不同秸秆还田年限对稻麦轮作系统温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报 2015 23(3): 302-308.
- [49] 李少昆 王克如 冯聚凯 等. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素[J]. 作物学报 2006 32(3): 463-465.
- [50] 贾春林 郭洪海 袁奎明 等. 玉米秸秆机械还田及播种方式对小麦出苗和产量的影响[J]. 中国农学通报 2010 26(22): 149-154.
- [51] 刘芳 张长生 陈爱武 等. 秸秆还田技术研究及应用进展[J]. 作物杂志 2012(2): 18-23.
- [52] 刘文峰 陈黎卿 张健美. 秸秆粉碎机性能测试试验台设计[J]. 机械设计 2015 32(2): 32-36.
- [53] 杜长征. 我国秸秆还田机械化的发展现状与思考[J]. 农机化研究, 2009(7): 234-236.
- [54] 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]. 农业机械学报 2015 46(9): 112-117.
- [55] 何七勇 吕卫光 郑宪清 等. 不同机械耕作方式对稻田秸秆还田土壤理化性状及产量的影响[J]. 上海农业学报 2015 31(5): 66-69.
- [56] 张燕. 江苏省秸秆还田机械发展战略研究[J]. 农机化研究 2012 34(12): 240-243.
- [57] 李保军 张兰松 董伏兰 等. 我国商品有机肥研制的现状与趋势[J]. 农业科技通讯 2001(7): 28-29.
- [58] 李彦明 李国学. 有机复混肥造粒用有机粘结剂的研制及其造粒性能的研究[J]. 磷肥与复肥 2005 20(4): 54-56.
- [59] 方艳茹 廖树华 王林凤 等. 小麦秸秆收储运模型的建立及成本分析研究[J]. 中国农业大学学报 2014 19(2): 28-35.
- [60] 王艳蓉. 秸秆综合利用技术研究[J]. 上海农业科技 2014(2): 136-137.
- [61] 杨增玲 楚天舒 韩鲁佳 等. 秸秆饲料化集成技术模式及其区域适用性评价[J]. 农业工程学报 2013 29(23): 186-193.
- [62] 刘国丽 杨镇 王娜 等. 微生物转化秸秆饲料研究进展[J]. 广东农业科学 2014 41(1): 110-114.
- [63] 张红莲 张锐. 农作物秸秆饲料处理技术研究进展[J]. 畜牧与饲料科学 2004 25(3): 18-22.
- [64] 杨琼 孙满吉 黄立敏 等. 玉米秸秆高效分解菌株的筛选、鉴定及产酶条件优化[J]. 中国饲料 2012(19): 31-33.
- [65] QIAO J T, QIU Y L, YUAN X Z et al. Molecular characterization of bacterial and archaeal communities in a full-scale anaerobic reactor treating corn straw[J]. Bioresource technology 2013 143: 512-518.
- [66] 李娜 吕伟民 赵云财 等. 以秸秆和啤酒糟为主要原料生产奶牛发酵饲料中发酵培养基配方的研究[J]. 酿酒 2013 40(4): 66-68.
- [67] 林月霞 吕玉华 丁宏林 等. 农作物秸秆饲料饲喂崇明白山羊的效果[J]. 上海农业学报 2014 30(3): 35-37.
- [68] 康建斌 李骅 缪培仁 等. 水稻秸秆饲料汽爆加工工艺改进与优化[J]. 南京农业大学学报 2015 38(2): 345-349.
- [69] TUYEN V D, CONE J W, BAARS J T et al. Fungal strain and incubation period affect chemical composition and nutrient availability of wheat straw for rumen fermentation[J]. Bioresource technology 2012 111: 336-342.
- [70] 韦丽敏 乔梁 张力 等. 利用白腐真菌处理稻草秸秆的研究进展[J]. 中国饲料 2013(1): 43-45.
- [71] 陈翠微 刘长江 郭文洁 等. 微生物发酵农作物秸秆生产蛋白饲料的研究与应用[J]. 微生物学通报 2000 27(4): 291-293.
- [72] DANN H M, GRANT R T, COTANCH K W et al. Comparison of brown midrib sorghum-sudangrass with corn silage on lactational performance and nutrient digestibility in Holstein dairy cows[J]. Journal of dairy science 2008 91(2): 663-672.
- [73] HOLT M S, EUN J-S, THACKER C et al. Effects of feeding brown midrib corn silage with a high dietary concentration of alfalfa hay on lactational performance of Holstein dairy cows for the first 180 days of lactation[J]. Journal of dairy science 2013 96(1): 515-523.
- [74] 袁翠林 于子洋 王文丹 等. 豆秸、花生秧和青贮玉米秸间的组合效应研究[J]. 动物营养学报 2015 27(2): 647-654.
- [75] 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.
- [76] 文雯. 烧掉的财富——农作物秸秆综合利用发展空间巨大[J]. 环境经济 2005(5): 49-51.
- [77] 任鹏飞 刘岩 任海霞 等. 秸秆栽培食用菌基质研究进展[J]. 中国食用菌 2010 29(6): 11-14.
- [78] 华尔山. 双孢菇培养料二次发酵新技术[J]. 中国食用菌 2005 24(1): 30-31.
- [79] 陈德荣. 三次发酵法栽培蘑菇高产技术初报[J]. 食用菌 2007 29(6): 39.
- [80] OVEREND R P. Biomass, bioenergy and biotechnology: a futuristic perspective[M]. New York: Biomass Energy Development, Plenum Press, 1986.
- [81] 王志春. 农村秸秆能源化利用气发电产业发展策略[J]. 中国高新技术企业 2011(10): 1-5.
- [82] ZHANG R H, ZHANG Z Q. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system[J]. Bioresource technology 1999 68(3): 235-245.
- [83] 熊承永 李健 朱辉. 户用沼气池的秸秆利用新方法[J]. 中国沼气, 2004 22(2): 48-49.
- [84] SVENSSON L M, BJÖRNSSON L, MATTIASSON B. Enhancing performance in anaerobic high-solids stratified bed digesters by straw bed implementation[J]. Bioresource technology 2007 98(1): 46-52.
- [85] 罗庆明 李秀金 朱保宁 等. NaOH 处理玉米秸秆厌氧生物气试验研究[J]. 农业工程学报 2005 21(2): 111-115.

(下转第 124 页)

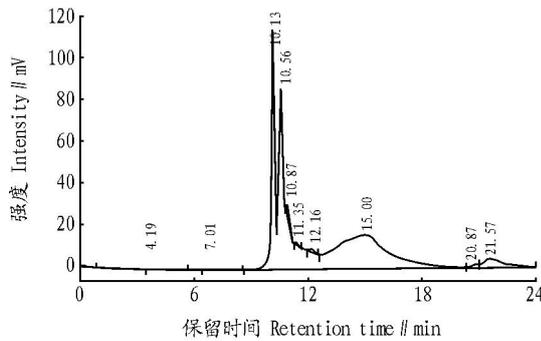


图5 米糠活性肽高效液相色谱

Fig.5 HPLC map of rice bran bioactive peptide

表明,米糠蛋白酶解物的氨基酸组成与其抗氧化活性有很大的相关性;刘志国等^[12]则报道米糠 ACE 抑制肽活性可能与 C 端的苯环结构有关。该试验采用枯草芽孢杆菌制备的米糠活性肽富含天冬氨酸和谷氨酸。此外,米糠活性肽氨基酸组成丰富,含有 6 种人体必需氨基酸,分别为蛋氨酸、亮氨酸、赖氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸和异亮氨酸(表 1)。由此可见,米糠活性肽是一种良好的营养补充剂。

表 1 米糠活性肽的氨基酸组成分析

Table 1 Amino acid composition analysis of rice bran bioactive peptides g/kg

氨基酸种类 Types of amino acids	米糠活性肽 Rice bran bioactive peptides	氨基酸种类 Types of amino acids	米糠活性肽 Rice bran bioactive peptides
天冬氨酸 Asp	95.20	脯氨酸 Pro	48.40
丝氨酸 Ser	40.50	半胱氨酸 Cys	10.40
亮氨酸 Leu	67.70	缬氨酸 Val	52.30
精氨酸 Arg	64.30	谷氨酸 Glu	123.10
组氨酸 His	22.80	苯丙氨酸 Phe	46.70
甘氨酸 Gly	52.20	异亮氨酸 Ile	31.40
苏氨酸 Thr	35.70	酪氨酸 Tyr	28.70
蛋氨酸 Met	16.50	赖氨酸 Lys	69.70
丙氨酸 Ala	58.90		

3 结论

该试验研究了枯草芽孢杆菌发酵因素对发酵液水解度

的影响,随着接种量和发酵时间的延长,发酵液水解度先增加后趋于平缓;随着发酵温度和 pH 的增加,发酵液水解度呈先增加后减少的趋势。在枯草芽孢杆菌接种量 5%、发酵时间 48 h、发酵温度 36 °C 和 pH 8 的发酵条件下,发酵液水解度达到了 21.74%。枯草芽孢杆菌发酵制备的米糠活性肽分子量主要分布在 100 ~ 5 000 Da,富含天冬氨酸和谷氨酸,包含了 6 种人体必需氨基酸,且具有较强的清除 DPPH 自由基、羟自由基和超氧阴离子自由基的能力,是一种颇具潜力的活性肽营养补充剂。

参考文献

[1] 夏宇. 喷射蒸煮制备米糠、碎米蛋白及其功能性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[2] 孙德明. 米糠综合利用的开发研究[J]. 中小企业管理与科技, 2008(12): 201-202.

[3] 李璐, 李宗军. 新型米糠功能食品的研究[J]. 农产品加工·学刊, 2011(7): 105-107.

[4] PARK J W, JANG E Y, KIM J Y, et al. Effects of visible light irradiation on the oxidative stability in rice bran [J]. Journal of cereal science, 2013, 58(1): 178-181.

[5] 郭延熙. 米糠抗氧化肽的酶法制备及其特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.

[6] 张友维. 枯草芽孢杆菌发酵花生粕制备抗氧化肽的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2012.

[7] CHUNG Y C, CHANG C T, CHAO W W, et al. Antioxidative activity and safety of the 50 ethanolic extract from red bean fermented by *Bacillus subtilis* IMR-NK1 [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 2002, 50(8): 2454-2458.

[8] JAMDAR S N, RAJALAKSHMI V, PEDNEKAR M D, et al. Influence of degree of hydrolysis on functional properties, antioxidant activity and ACE inhibitory activity of peanut protein hydrolysate [J]. Food chemistry, 2010, 121(1): 178-184.

[9] 李艳红. 鹰嘴豆蛋白酶解物的制备及其抗氧化肽的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.

[10] ADEBIYI A P, ADEBIYI A O, YAMASHITA J, et al. Purification and characterization of antioxidative peptides derived from rice bran protein hydrolysates [J]. Europe food research technology, 2009, 228(4): 553-563.

[11] ADEBIYI A P, ADEBIYI A O, OGAWA T, et al. Purification and characterisation of antioxidative peptides from unfractionated rice bran protein hydrolysates [J]. International journal of food science and technology, 2008, 43(1): 35-43.

[12] 刘志国, 吴琼, 吕玲肖, 等. 酶解米糠蛋白分离提取 ACE 抑制肽及其结构研究[J]. 食品科学, 2007, 28(3): 223-227.

(上接第 85 页)

[86] 陈小华, 朱洪光. 农作物秸秆产沼气研究进展与展望[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3): 279-283.

[87] 杨亚平, 蔡崧. 南方地区秸秆气化技术应用特点[J]. 中国能源, 2001(6): 31-33.

[88] 张荣成, 李秀金. 作物秸秆能源转化技术研究进展[J]. 现代化工, 2005, 25(6): 14-17.

[89] 胡婕, 贾冰, 许雪记. 江苏省生物质发电产业现状问题及解决对策研究[J]. 可再生能源, 2015, 33(2): 283-288.

[90] 陈琳, 孙琦, 周定国. 我国人造板工业发展趋势预测与原料创新研究[J]. 林业科技, 2005, 30(5): 45-47.

[91] 张建兴, 陈洪章. 秸秆醋酸纤维素的制备[J]. 化工学报, 2007, 58(10): 2548-2553.

[92] 郭星恺. 我国农作物秸秆人造板发展前景展望[J]. 中国人造板, 2001(1): 6-8.

[93] 冯伟, 张利群, 何龙娟, 等. 基于循环农业的农作物秸秆资源化利用模式研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 40(2): 921-923, 973.

[94] 张无敌, 宋洪川, 钱卫芳, 等. 我国生物质能源转换技术开发利用现状[J]. 能源研究与利用, 2000(2): 3-6.

[95] 钟珍梅, 黄勤楼, 翁伯琦, 等. 以沼气为纽带的种养结合循环农业系统能值分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 196-200.

[96] 程云辉, 钱勇, 钟声, 等. 秸秆菌糠在肉羊育肥生产中的应用[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(5): 495-496.

[97] 张燕. 中国秸秆资源“5F”利用方式的效益对比探析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(23): 45-51.

[98] 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.

[99] 黄春, 邓良基, 高雪松, 等. 基于能值理论的秸秆利用生态足迹评估: 以成都平原典型稻麦轮作区为例[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(6): 722-728.