



大豆秸秆综合利用研究进展

燕翔¹, 官嵘嵘¹, 王都留¹, 李午寅², 何玉鹏¹, 董晓宁³, 杨建东¹, 张少飞¹

(1. 陇南师范高等专科学校 农林技术学院 甘肃 成县 742500; 2. 甘肃机电职业技术学院经济管理学院, 甘肃 天水 741001; 3. 天水师范学院 化学工程与技术学院, 甘肃 天水 741001)

摘要:大豆秸秆是丰富的可再生农业废弃物资源,具有来源广、数量大、价格低廉和再生周期短等特点。其组成成分中粗蛋白质、木质素、纤维素和半纤维素含量较高,C/N高,是重要的有机能源,同时含有K、Ca、P等多种矿物质元素,具有很高的利用价值。早期除少量大豆秸秆被用作牛羊的冬季饲料外,大量大豆秸秆被露天焚烧,不仅造成了严重的大气污染和资源浪费,也不利于生物质能源的循环利用和农业经济的可持续发展。目前,随着国家政策的指导扶持和秸秆利用研究的深入,已基本形成了大豆秸秆用作家畜饲料、农业肥料、栽培基料、工业原料、燃料等多元化的“五料化”综合利用格局。本文综述大豆秸秆在“五料化”应用方面的研究现状及进展,提出并展望了大豆秸秆资源化综合利用研究建议和应用前景,以期大豆秸秆资源化综合利用的后续研究提供参考。

关键词:大豆秸秆;饲料化利用;肥料化还田;栽培基质;燃料化利用;原料化利用

Research Progress on Comprehensive Utilization of Soybean Straw

YAN Xiang¹, GONG Zheng-rong¹, WANG Du-liu¹, LI Wu-yin², HE Yu-peng¹, DONG Xiao-ning³, YANG Jian-dong¹, ZHANG Shao-fei¹

(1. College of Agricultural and Forestry Technical, Longnan Teacher's College, Chengxian 742500, China; 2. School of Economics & Management, Gansu Mechanical & Electrical Vocational and College, Tianshui 741001, China; 3. School of Chemical Engineering & Technology, Tianshui Normal University, Tianshui 741001, China)

Abstract: Soybean straw is a rich renewable agricultural waste resource, which has the characteristics of wide source, large quantity, low price and short regeneration cycle. It contains high contents of crude protein, lignin, cellulose and hemicellulose, and high C/N ratio. It is an important organic energy. It also contains K, Ca, P and other mineral elements, which has high utilization value. In the early stage, except a small amount of soybean straw used as winter feed for cattle and sheep, a large amount of soybean straw was burned in the open air, which not only caused serious air pollution and waste of resources, but also was not conducive to the recycling of biomass energy and the sustainable development of agricultural economy. At present, with the guidance and support of national policies and the deepening of straw utilization research, soybean straw has basically formed a diversified comprehensive utilization pattern of ‘five materials’ as livestock feed, agricultural fertilizer, cultivation base material, industrial raw materials, fuel, etc. This paper summarizes the research status and progress of soybean straw in the application of “five materials”, puts forward and prospects the research suggestions and application prospects of soybean straw resource comprehensive utilization, in order to provide reference for the follow-up research on comprehensive utilization of soybean straw resource.

Keywords: soybean straw; feed utilization; fertilizer returning utilization; cultivation substrate; fuel utilization; raw material utilization

大豆(*Glycine max*)俗称毛豆、黄豆,豆科大豆属一年生草本作物,在我国有着悠久的种植历史,种植面积和产量逐年上升。据《2020年中国农村统计年鉴》数据,2019年大豆种植面积约9 331.7万km²,约占我国粮食种植总面积的8%^[1-2]。随着大豆种植规模的扩大,大豆秸秆(以下简称豆秸)资源量呈现上升趋势,现已成为极具开发潜力和经济价值的可再生农业资源。豆秸指大豆收获后剩余的植株部分,主要包括茎枝、叶荚和根系,各部分质量分数分别为50.1%、44.6%和5.3%。豆秸的主要成分包

括48.70%纤维素、15.65%不溶性木质素、12.70%半纤维素^[3]、11%灰分、1%酸溶性木质素^[4]、8.48%蛋白质,以及果胶和葡萄糖醛酸等。另外,豆秸中还含有K、Ca、P、Na和Mg等多种矿物质元素^[5]。

豆秸已成为我国最为丰富的农业固体废弃物资源之一。以黑龙江为例,2018年豆秸资源量为947.2万t,占黑龙江省秸秆资源总量的11.1%,较1980年的317.5万t,年均增加7.1%^[6];2019年全国豆秸总量2 750.0万t,约占农作物秸秆总量的3.8%,较2009年的2 313.4万t,年均增加9.0%^[1-2]。

收稿日期:2022-01-25

基金项目:甘肃省陇南市科技计划项目(2021-15);甘肃省青年科技基金计划项目(20JR5RK623);陇南市科技计划项目(2021-18);甘肃省高校创新能力提升项目(2020B-364)。

第一作者:燕翔(1969—),男,学士,副教授,主要从事农林固体废弃物综合利用研究。E-mail:1569697154@qq.com。

通讯作者:张少飞(1988—),男,博士,副教授,主要从事天然高分子和生物医用高分子材料研究。E-mail:420208078@qq.com。

长期以来,除只有少量豆秸被用作家畜饲料外,大量豆秸被视作废弃物,以填埋、焚烧或闲置的方式处理。露天焚烧豆秸不仅会造成农业生物资源的巨大浪费,还会释放大量空气污染物,包括 CO、CO₂、VOC (Volatile Organic Compounds, 挥发性有机化合物)、SO₂、NO₂ 以及 PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, 多环芳烃) 等有毒物质^[7], CO₂ 等温室气体和黑炭气溶胶不仅会加剧温室效应^[6], 还会加剧 PM_{2.5} 雾霾污染。

目前,受《关于编制“十三五”秸秆综合利用实施方案的指导意见》等政策带动,我国的豆秸资源基本形成了肥料化、燃料化、原料化、饲料化和基料化的多元的“五料化”综合利用格局。本文对近年来国内外豆秸的综合利用研究进展进行了归纳、分析和总结,并对豆秸利用的研究趋势进行了展望,以期对豆秸的资源化利用和后续研究提供参考。

1 大豆秸秆的饲料化利用

鲜食豆秸中的粗蛋白 (CP, 12.21%)、粗脂肪 (EE, 2.54%)、总能值 (GE, 18.83 kJ · g⁻¹) 和矿物质钙 (约 1.32%)、磷 (约 0.38%) 等物质的含量较高,豆秸中的蛋白质消化率 (66.05%) 高于其它农作物秸秆^[8], 且瘤胃降解参数和有效降解率较高^[9]。故豆秸用于动物饲料具有较高的营养价值。豆秸的饲料化利用使蕴含在其中的营养物质转化为肉和奶。在瘤胃微生物作用下,豆秸中的纤维素、半纤维素被分解为挥发性脂肪酸,蛋白质被分解成氨基酸,为家畜机体提供能量和蛋白质来源^[10]。豆秸中还富含大豆异黄酮类植物雌激素,能促进雄性动物肌肉的生长,改善瘤胃代谢水平和肉品质^[11]。

但豆秸直接用作饲料时具有口感差、不易消化、CP 含量低等缺点。通常采用物理加工、化学加工或微生物法发酵对豆秸进行处理,改变其纤维素、半纤维素、木质素的结构状态,可提高豆秸的消化率和 CP 含量。豆秸经过挤压膨化的物理法加工后,其粗纤维 (CF) 和酸性洗涤纤维 (ADF) 的含量降低^[9]。尿素氨化是一种常用的化学处理方法,豆秸经尿素氨化处理后,纤维部分官能团的亲水性增强,有利于乳酸菌发酵和 CP 含量增加,使豆秸的营养价值提高^[12]。微生物发酵法主要通过乳酸菌进行厌氧发酵处理 (青贮),提高秸秆饲料的适口性、消化率和营养成分。白长胜等^[13]筛选出一种优良的耐胃酸环境的乳酸菌,其增长速度快、产酸能力强,用于发酵豆秸饲料效果好。王宏栋等^[10]将玉米秸秆和豆秸混合青贮,实现豆秸中的糖分转化,提

高 CP 的含量。顾拥建等^[14]将尿素、麸皮和豆秸混贮后改善了青贮效果。申瑞瑞等^[15]研究发现,添加微生物的薯渣与豆秸混贮,能提高乳酸和 CP 的含量。包健等^[16]利用复合益生菌处理鲜豆秸,提高了乳酸菌、乳酸、粗灰分、钙和磷的含量,改善了鲜食豆秸饲料品质,同时使 CF、ADF、中性洗涤纤维 (NDF)、胰蛋白酶抑制因子 (TI)、脲酶活性和 pH 均显著降低。罗燕等^[17]研究发现,豆秸与多花黑麦草混贮能显著降低 CP 和可溶性碳水化合物的损失率。

2 大豆秸秆的肥料化还田利用

豆秸含有丰富的营养元素,还田并经微生物腐解后,能有效增加土壤养分含量,有利于豆秸营养资源的循环利用。豆秸全量还田后,62.6% N、15.3% P₂O₅、61.6% K₂O 可归还土壤,相当于减少 10% ~ 20% N、P、K 化肥的用量^[18]。2018 年黑龙江省豆秸还田后,增加的速效氮 (N)、磷 (P₂O₅) 和钾 (K₂O) 分别占到全省总量的 25.0%、12.9% 和 10.5%^[6]。秸秆还田有助于改善土壤结构和理化性状,防止土壤酸化^[19],有利于从源头上消除秸秆焚烧现象,减少大气污染。豆秸还田有直接还田和间接还田两种方式,间接还田又包括过腹还田、堆沤还田、炭化还田、烧灰还田等^[20]。

2.1 直接还田

2.1.1 翻压还田 翻压还田具有无需堆腐、操作简单、还田量大、养分释放率高、腐解速度快等优点。鲜豆秸的 C/N 较低、水分和可溶性物质 (糖类和蛋白质等) 较多,有利于微生物的分解活动,鲜豆秸腐解较干豆秸快^[21]。豆秸三年腐解和养分释放率超过 92.67%,第一年总腐解 65% 左右;N、P、K 和有机质养分的三年累计释放率分别达到 87.40%、91.80%、99.05% 和 90.70%;豆秸中纤维素、半纤维素、木质素的腐解率依次减小,但 4 年累计腐解率均超过 91%^[22]。

2.1.2 覆盖还田 豆秸具有维管结构,吸水性良好,用作土壤覆盖基质可以疏松土壤,增加土壤孔隙度和透气性,具有保湿保墒的作用^[23-24]。另外,豆秸覆盖还田还可以缓解臭氧对农作物的胁迫效应,增强植株对臭氧的抵御能力,减轻臭氧胁迫对作物叶片光合作用系统的损害,提高叶片的光合作用效率^[25]。

2.2 间接还田

2.2.1 处理还田 豆秸的茎韧皮部不易被微生物腐解,豆秸覆盖还田中添加腐熟剂则能有效促进豆秸腐解,在前 30 d 腐解速率达到最大值^[23]。还田

作物秸秆的腐解是在物理、化学和微生物共同作用下的复杂过程,其中土壤微生物对豆秸腐解有决定性作用^[26]。豆秸中较难被微生物直接分解的是纤维素和木质素,豆秸纤维素结晶度较高,NaOH 预处理有利于纤维素水解成葡萄糖,为土壤微生物提供更多碳元素^[27]。微生物腐解初期对养分需求量大,故适当施加氮肥有利于微生物生长,加快腐解速率^[18]。另外,可以在豆秸腐解时添加红糖,其中的蔗糖被水解为果糖和葡萄糖,为土壤微生物代谢活动提供了丰富的外源碳,有利于提高土壤微生物活性和蔗糖酶、脲酶等土壤酶的活性,促进秸秆腐解^[28]。孙冬梅等^[29]以商业菌剂为对照,用黄绿木霉菌、角毛壳菌和绿色木霉菌 3 种混菌处理豆秸粉,其纤维素与半纤维素降解率分别达到 66% 和 76%;豆秸腐解速率还与秸秆长度、还田方式存在一定关联,翻压还田模式比覆盖还田模式的秸秆腐解速率快,养分释放率高,当翻埋深度为 10 cm、豆秸长度为 3 cm 时的降解效果最好。

2.2.2 炭化还田 近年来,生物炭还田成为土壤改良与修复的研究热点^[30]。豆秸生物炭具有比表面积较大、pH 较高、孔隙发达等特点。经豆秸生物炭修复后的铅锌尾矿污染土壤,提高了土壤 pH,减少了土壤中的 Zn、Cd 有效态含量;能有效吸附农作物根部的重金属,阻碍重金属向作物地上部分转移^[31];还能提高蔗糖酶等土壤酶的活性,对土壤中的萘等有害有机物有较高的去除率^[32]。豆秸生物炭对微生物群落和土壤硫转化具有良好作用,可用作黄土土壤改良剂^[33]。

2.2.3 沼渣还田 秸秆沼渣是秸秆厌氧发酵后的剩余物,其中含有丰富的养分。通过高温好氧堆肥腐熟,沼渣被微生物降解,可直接作为肥料或土壤改良剂返还农田。堆肥过程中豆秸还能够调整沼渣的多孔介质结构和含水率,改善通风和供氧状况,调节 C/N,提高发酵温度和酶活性,促使沼渣腐熟、腐解。沼渣堆肥发酵的肥料还能促进种子生根^[34]。

2.2.4 过腹还田 豆秸作为冬季牛羊饲料,经过消化后形成粪便,粪便通过发酵转化为有机肥施入土壤中,能大幅提高土壤的有机质和腐殖质含量^[35],还可以有效避免秸秆长期直接还田导致的分解缓慢及诱发病害等问题^[36]。过腹还田是豆秸饲料化利用的延伸,二者结合起来使豆秸中营养成分和生物质能量实现最大化的循环利用,与其它还田方式相比更具经济价值和生态意义。

3 大豆秸秆的栽培基料化利用

豆秸的全磷、全钾、全氮比均较高,孔隙大小比

例适中,持水能力较强,保肥性能良好,适宜于用作无土栽培基质,具有固定根系、持水保肥、固持养分等作用,可以栽培食用菌、花卉、中药材、草皮等。但单纯豆秸基质的渗透性较弱,pH 偏高,如果在秸秆堆腐期间加入硫磺粉、稀 H₂SO₄、FeSO₄·7H₂O,可以显著降低基质 pH^[37];也可以将豆秸和其他基料按一定比例组成混合基质,以降低 C/N,促进微生物生长和豆秸腐解作用。目前豆秸基质的应用研究主要集中在食用菌栽培方面。

3.1 食用菌栽培基质

3.1.1 菇类基质 菇类栽培多以棉籽壳、木屑为主,随着木屑资源的匮乏,菇类栽培成本升高,近年来开始采用秸秆基质栽培菇类。刘连强等^[38]用 75% 豆秸基质栽培白灵菇,效果良好。王庆武等^[39]利用添加量 86% 的豆秸栽培平菇,平菇子实体品质好、产量高,成本低。徐德海^[40]以豆秸替代木屑栽培平菇,平菇品质好、菌丝长势良好,出菇量高。史磊等^[41]利用豆秸替代 30% 木屑栽培猴头菇,猴头菇产量、商品性与对照组基本相当。武风兰^[42]以一定比例的豆秸、白酒糟、木屑、香菇菌渣、麦麸、石膏粉混合成的基质栽植猴头菇,猴头菇品质好、产量高,出菇时间短,畸形菇产率低。张玉梅等^[43]用豆秸基质栽培香菇,鲜菇子实体中氨基酸含量增加,且每万袋生产成本可降低 4 250 元。利用豆秸和黑木耳菌糠的混合基质栽培榆黄蘑,其产量、品质均得到提高,经济效益良好^[44]。

3.1.2 木耳基质 栽培基质对黑木耳的品质有重要影响^[45]。潘春磊等^[46]用 30% 豆秸替代木屑栽培黑木耳牡耳 2 号,木耳菌丝生长快,耳芽品相好,产量增加。吕志文等^[47]在玉木耳的栽培基质中添加豆秸后,提高了玉木耳的产量,且显著提高了干耳中粗脂肪、总氨基酸、蛋白质及总糖的含量。

3.1.3 灵芝基质 受木材资源匮乏的制约,农业废弃物逐渐成为灵芝的代料栽培基质^[48]。Atila^[49]以豆秸等为基质栽培灵芝,当豆秸基质含水率为 64.3%,pH6.09 时,豆秸基质适合灵芝生长,灵芝总产量 54.8 g·kg⁻¹,生物效率值为 17.1%。李林等^[50]以豆秸为基质主料,代替木屑栽培灵芝,灵芝中粗多糖提取率、多糖产量最高分别为 2.93% 和 0.62 g,效果优于以玉米秸秆和木屑为主料的基质。

3.2 中草药基质

刘天睿等^[51]使用豆秸代替木材(或木屑)培养基栽培天麻的效果显著,蜜环菌总多糖含量高,菌丝长势好、生长速度快。经优化的“豆秸+麦麸+蔗糖+无机盐”混合基质的最佳配料比使混合基质含水量保持在 50% 以上。

3.3 花卉基质

王娟等^[52]将玉米秸秆和豆秸按照一定比例混合制成基质,栽培芍药,芍药根部长势较弱,叶片微泛黄,配料有待优化改良。

3.4 皮草基质

随着城市建设的快速发展,草坪建植对草皮品质提出了更高的要求,使得草皮生产占用耕地和破坏土壤资源的问题日益突出,无土栽培基质生产草皮也逐渐成为研究热点。张健^[53]以豆秸等和畜禽粪便按照一定比例混合制成混合基质,在添加纤维素酶后,建植高羊茅无土草皮,研究了不同基质对高羊茅草皮成坪质量的影响;高羊茅草皮质量综合评定结果表明,豆秸基质可用于建植高羊茅无土草皮。

4 大豆秸秆的燃料化利用

农作物秸秆作为石化燃料后的第四大能源,具有资源丰富、储能高、可再生等特性。豆秸被广泛用作直接燃烧燃料、秸秆成型燃料和生物燃料,用于直燃发电、热解气化、沼气生产及液化等^[54]。

4.1 直燃燃料

直接燃烧是指将豆秸用作燃料进行炉内燃烧,或作为废弃物进行露天燃烧。秸秆直接燃烧不仅造成资源浪费,还加剧了雾霾污染,产生大量有毒有害物质,对环境安全和人体健康构成严重威胁。徐婷等^[55]选取豆秸等 4 种生物质燃料进行炉内直接燃烧实验,结果表明风干豆秸燃烧 PM_{2.5} 中的有机碳和元素碳的比值高达 10.69,而秸秆燃烧烟气 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳比值超过 2 时会形成二次气溶胶污染,说明风干豆秸燃烧会形成严重的二次气溶胶污染。豆秸燃烧烟气 PM_{2.5} 中 Cr、Mn、Ni、As 的排放因子均高于其它秸秆和木柴。Xu 等^[56]研究了豆秸的燃烧特性、气体排放和能耗,确定了豆秸燃烧的适合温度为 873~973 K。

4.2 秸秆成型燃料

生物质固体成型燃料是将农林生物质经干燥、粉碎、机械加压等加工,制成的具备一定形状和较大密度的生物质燃料,可作为替代化石能源的新型固体燃料使用^[57]。常子磐等^[58]研究了豆秸固体燃料的化学组成以及燃烧特性,结果表明豆秸生物质固体燃料的烟气成分中 NO_x 含量很低,能有效减轻大气污染,其发热量达到二类烟煤的标准。

4.3 生物质燃料

4.3.1 生物油 热解生物油是生物质快速热解的产物,生物油通过提纯、精制后可用作发动机和内燃机的燃料^[59]。Wang 等^[60]以豆秸和皂脚为原

料,利用微波辅助热解法制备生物油,使用 SiC 陶瓷泡沫作为催化剂,在 350 °C 时获得了收率较高的生物油,同时使豆秸生物油中碳氢化合物的比例由 63% (无催化剂) 增加到 75%。李金花等^[61]以豆秸为原料,以改性分子筛作催化剂,采用直接液化法制备了豆秸生物油,使用催化剂可提高生物油的产率,增加油中芳烃和烷烃的相对含量,提高生物油热值。Tian 等^[62]以豆秸为原料通过水热液化法制备生物油,产油率最高为 15.8%,生物油的 C、H 含量显著高于豆秸,热值显著提高。

生物质热解焦油经过催化转化可用作柴油替代品或化工原料。赵晨希^[63]对豆秸生物质焦油进行催化改性,提高了生物质焦油良性组分中酚类、呋喃类和糖类物质的含量,而降低了恶性组分中酸类、醛类、酮类的含量。Wang 等^[64]利用真空水热液化法制备豆秸生物原油,通过氢供体溶剂(HDS)对其低沸点蒸馏物进行加氢处理,使原油脱氮、脱硫和脱氧,焦炭含量减少,改良后的油品成分主要为饱和烷烃、不饱和烷烃和芳香族化合物,提升了生物油品质。

4.3.2 生物质乙醇 生物质乙醇已成为具有很大潜能的可再生能源^[65]。豆秸纤维素含量丰富,通过微生物发酵可将纤维素酶解为还原糖,再经过发酵、纯化工序将其转化成燃料酒精。由于半纤维素和木质素的“胶黏”作用,纤维素骨架难以降解。樊富广等^[66]以豆秸为原料,以稀硫酸为催化剂,通过乙醇溶液预处理后,豆秸原料中半纤维素和木质素的脱除率分别达到 82.9% 和 62.0%,使纤维素充分暴露出来,有利于纤维素的酶解糖化反应,还原糖得率可达到 44.17%。

4.4 秸秆沼气

在厌氧条件下,各类微生物可将农作物秸秆分解生成包含 CH₄ 和 CO₂ 等的可燃性混合气体^[67]。李家威等^[68]探究豆秸等 6 种秸秆厌氧发酵的产气特性,结果表明豆秸的总固体含量、产气率、有效产甲烷率、甲烷含量和纤维素、半纤维素、木质素的降解率在 6 种试验秸秆中最低。可能的原因之一是豆秸含有相对稳定的酚型对羟苯基结构单元,微生物分解较为困难。同时,豆秸的 C/N 较高,不利于微生物生长,造成厌氧发酵酸化完全,发酵效率降低。

农作物秸秆厌氧发酵中纤维素的分解是控速因素,预处理可破坏纤维素结构,提高其降解率和甲烷产量。Xiong 等^[69]采用 H₂O₂ 热氧化法,使用 NaOH 预处理豆秸,其木质素去除率可达 53%,甲烷产量提高 62%。

4.5 水热气化制氢气

氢能是最具发展潜力的清洁能源,但低效的制氢技术是制约氢能发展的瓶颈之一。Okolie 等^[70]以豆秸为原料,通过超临界水热气化技术生产氢气,产物中含有 H₂、CO₂、CO、CH₄ 和 C₁ - C₄ 烃类等可燃性气体,气化效率评价结果表明,豆秸具有较高的产气量和气化效率,开发氢能潜力巨大。

5 大豆秸秆的原料化利用

5.1 吸附材料

豆秸中含有较多的羟基、羰基等含氧基团,适宜于用作吸附材料。通过改性可以改变豆秸的孔隙结构,增大比表面积,增加含氧基团含量,增强其吸附能力。目前,豆秸主要制成改性吸附剂和生物炭。

5.1.1 改性豆秸吸附剂 改性豆秸具有丰富的孔隙结构和含氧基团,吸附性能增强。张汝壮等^[71]将经 NaOH 溶液煮沸预处理的豆秸粉,置于柠檬酸和磷酸二氢钠的混合溶液中,通过“超声振荡 + 高压锅蒸煮 + 低温热解”的耦合方法进行改性,改性豆秸对 Cu(Ⅱ) 的吸附能力较原生秸秆提高了 83%。唐晓红^[72]将豆秸灰分别用 HCl 溶液、NaOH 溶液和蒸馏水进行浸泡处理,3 种改性豆秸灰对溶液中罗丹明 B 均具有较好的去除效果。左广玲等^[73]将改性豆秸与丙烯酸接枝制备成农用保水剂,土壤保水效果显著。左广玲等^[74]将改性豆秸基保水剂用于烟田土壤改良,使土壤颗粒孔隙容积增大,容重降低,持水性增强,有利于提高烟草的抗旱性和烟叶的产量、商品性。

5.1.2 豆秸生物炭 豆秸生物炭在治理环境污染方面有广泛应用。目前报道的制备豆秸生物炭的方法主要有高温热解法、ZnCl₂ 法、微波法和物理-化学耦合法等。

热解法:热解温度对生物炭的 pH、比表面积有重要影响。豆秸热解适宜的温度为 700 ℃。高温有利于提高豆秸生物炭的 pH 和比表面积,如 700 ℃ 的豆秸生物炭比表面积比 300 ℃ 的提高 75 倍^[75],800 ℃ 下的比表面积比原生豆秸的比表面积增加 14 倍^[76]。这是因为热解初期随温度升高,炭化速率加快,C、H、O 以 CO₂ 和 H₂O 等小分子的形式脱去,形成丰富的微孔隙结构,使比表面积增大。但温度过高微孔结构因烧蚀扩大形成中孔、大孔,比表面积下降。向文英等^[77]采用限氧热解法制备豆秸生物炭,对 Ni(Ⅱ) 的吸附量较原生豆秸提高 154%。张娱等^[78]采用慢速热解技术制备生物炭,对苯酚的去除率达到 86%。

ZnCl₂ 法:燕翔等^[79]用 ZnCl₂ 浸渍活化豆秸,然

后利用马弗炉在限氧气条件下热解制得活性炭,对模拟废水中 Cu(Ⅱ) 的最大脱除率达到 91.77%。

微波法:微波加热具有操作简单、升温速率快、反应效率高、可选择性均匀加热等优点。田叶顺^[80]以豆秸为原料,以 CO₂ 为活化剂,以 Fe(NO₃)₃ · 9H₂O 为催化剂,利用微波加热对豆秸进行热解、活化和负载改性,制得孔隙结构发达的豆秸基脱硫活性炭材料。

物理-化学耦合法:王亮等^[81]在 700 ℃ 下热解制备豆秸生物炭,然后分别利用 HCl、KOH、3-氨基丙基三乙氧基硅烷和氯化铁对其进行改性。结果表明耦合改性豆秸生物炭对咪唑乙烟酸吸附效果较好,氯化铁磁化改性进一步提高豆秸生物炭的吸附性能,并有利于生物炭的回收再生。徐荣霞^[82]分别采用以硝酸镍为催化剂的水热法-KOH 耦合法、以尿素为氮源的水热法-KOH 耦合法,制备了电学性能优异的杂原子掺杂豆秸基多孔碳,用作超级电容器电极材料。

5.2 纤维凝胶

凝胶具有良好的吸水、持水、缓释性能,在农林、畜牧、沙漠化治理、医学、建筑节能、石化、电子和环保等众多领域应用广泛。刘祝兰等^[83]将豆秸原料用乙二醇溶液预处理后,再溶解于氯化锂/二甲基亚砷全溶体系中,在 N-异丙基丙烯酰胺、N,N-亚甲基双丙烯酰胺、偶氮二异丁氰共同作用下反应,制备了全组分木质纤维凝胶材料和温度敏感型木质纤维凝胶材料,凝胶材料具有高比表面积和高吸水率特性。

5.3 纤维地膜

豆秸纤维地膜具有土壤保墒、抑制杂草生长、改良土壤理化性质等功能,并可完全降解,对于发展绿色循环农业,开发新型生物质材料,保护生态环境具有重要意义。豆秸经机械加工后半纤维素含量增加,纤维素和木素的含量相应降低,适合于加工成膜。刘爽等^[84]利用揉切式粉碎机处理豆秸,得到长度在 70 ~ 85 mm 之间的粉粒,粉粒大小符合植物纤维制取机制造纤维地膜的工艺要求。

5.4 生物板材

利用农作物秸秆生产人造板材,对于节约木材、保护森林资源、提高秸秆附加值和保护环境有着重要意义,符合农业经济可持续发展的时代要求。秸秆人造板生产中常用脲醛树脂、酚醛树脂、三聚氰胺等胶黏剂,会释放出游离甲醛等有毒有害物质,危害人体健康^[85]。Song 等^[86]通过切割、浸泡、磨浆将豆秸加工成纤维浆,再通过热压成型工艺生产出可生物降解的豆秸生物板,板材不含任何

黏合剂。豆秸生物板料在包装材料、建筑隔热材料和农业用地膜等方面具有广阔的前景。

5.5 有机化工原料

豆秸木质纤维丰富,通过化学或生物方法,可以将其转化为葡萄糖、乙醇等重要化工原料。朱忆魁等^[87]利用 H₂SO₄ 和 NaOH 预处理豆秸,通过酶水解反应得到葡萄糖、木糖和阿拉伯糖等还原糖。唐艳斌等^[88]以豆秸为原材料提取水不溶性木聚糖,木聚糖是食品、化妆品、医药、饲料等行业常用原料。杨健等^[89]利用 Cl-H₂O 体系处理豆秸,可以脱除细胞壁中大部分木质素,使大部分纤维素结构暴露出来,使其容易发生酶解糖化反应。徐忠等^[90]通过对豆秸进行氨预处理后,纤维素含量显著提高,而半纤维素和木质素含量均降低,有利于提取生物降解性塑料的原料—乳酸。

5.6 造纸纤维

豆秸纤维是比较适合于造纸的非木材纤维原料^[91]。其灰分含量比木材高,比草类低,与竹类相当,总纤维素及木素含量接近于阔叶木,所以豆秸纸浆的纤维强度较低,适用于制作一般工业用包装纸原料,不适宜用作中高端纸种的原料^[92]。豆秸经机械打浆加工后,纤维中半纤维素含量显著增加,使纸的强度提高,适用于加工豆秸纸制产品^[93]。

5.7 生物质灰

为了防止混凝土原材料过度使用、减少水泥生产过程中的 CO₂ 排放和降低混凝土生产成本,利用生物质废弃物生产水泥是一种替代方案。Šupić 等^[94]研究了生物质灰用作水泥替代品的可行性,结果表明以低硅含量为特征的豆秸生物质灰,通过机械研磨活化或添加无定形富硅材料等化学活化处理后,可作为补充胶凝材料用于生产水泥。

5.8 豆秸酱油

豆秸在食品加工方面也有所应用,如王丽英^[95]发明了一种用豆秸制作酱油的方法,将豆秸经粉碎、浸泡、笼蒸、发酵(酱油曲精)处理,当原料结块并长满菌丝时研碎、发酵、烘烤,最后浸泡(盐水)、压榨,榨出液体加热浓缩到 22 波美度时即为成品酱油。

6 建议与展望

目前秸秆资源化利用已成为我国优化农村能源结构、发展循环农业和绿色低碳农业的重要途径,对于促进农业可持续发展、增加农民收入、改善农村生态环境、建设资源节约型和环境友好型社会具有重要意义。豆秸资源综合利用的总体趋势主要体现在:新能源化开发、饲料化、肥料化和基料化

的利用量不断增加;秸秆废弃、焚烧和直接燃烧的现象减少;间接还田代替直接还田等。

豆秸综合利用虽有较大进展,但在理论研究和实践中都还存在一些问题,如还田效果欠佳,饲料化利用率低,露天焚烧现象屡禁不止,尚未建立一体化的收运储等服务机制,商品化、产业化水平低,综合利用效率低,部分资源化利用中还存在二次污染情况等。针对以上问题,对于大豆秸秆资源化综合利用的后续研究提出如下建议:

(1)严控秸秆露天焚烧现象。各级政府要加强宣传工作,帮助引导农民开展豆秸的“五料化”利用,杜绝豆秸露天焚烧现象。

(2)建立健全秸秆收储运一体化机制。各级地方政府要加快建设秸秆收储运专业队伍和服务组织,促进农民增收提高,彻底消除露天焚烧现象。

(3)改善豆秸还田方式、增加还田量。未来要加大研发豆秸微生物腐解菌剂技术,提高豆秸养分资源循环利用,实现豆秸养分“全量返田”,促进农业可持续发展。

(4)充分改善豆秸饲料的适口性。发展节粮型畜牧业,要致力于研究改善豆秸适口性,寻找高效性的生物酶或菌剂,提高粗蛋白含量和豆秸降解率。

(5)豆秸作为资源丰富的化工原料,在新型生物板材、可降解纤维膜、绿色能源、吸附材料等方面,应加强产业化、规模化、高值化发展的研究。

随着大豆振兴计划的实施,大豆种植面积不断扩大,未来豆秸资源量将更加巨大,豆秸养分资源、成分资源的高值化利用研究具有广阔的前景。

参考文献

[1] 中华人民共和国农业农村部. <http://zdscxx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/>. (Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. <http://zdscxx.moa.gov.cn:8080/nyb/pc/>.)

[2] 国家统计局农村社会经济调查司. 2020 年中国农村统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2020: 139. (Rural Social and Economic Survey Division, National Bureau of Statistics. 2020 China rural statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2020: 139.)

[3] 杨会斌. 大豆秸秆造纸的可行性探索[J]. 黑龙江造纸, 2016 (2): 15-17. (YANG H B. Feasibility exploration of soybean straw papermaking[J]. Heilongjiang Paper, 2016(2): 15-17.)

[4] MARTELLI-TOSI M, ASSIS O B G, SILVA N C, et al. Chemical treatment and characterization of soybean straw and soybean protein isolate/straw composite films[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 157: 512-520.

[5] 刘祝兰. 基于 LiCl/DMSO 木质纤维全溶体系的木质素分离和木质纤维凝胶的制备[D]. 南京: 南京林业大学, 2015. (LIU Z L. Lignin isolation and lignocellulose gels preparation based on LiCl/

DMSO solution[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2015.)

[6] 郝小雨. 黑龙江省作物秸秆养分资源时空特征及替代化肥潜力[J]. 河北农业大学学报, 2021, 44(3): 1-7. (HAO X Y. Spatial and temporal characteristics of crop straw nutrient resources and potential of nutrient substitution in Heilongjiang Province[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2021, 44(3): 1-7.)

[7] 王醒. 黑龙江省秸秆露天焚烧污染物排放清单及其传输的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. (WANG X. Study on pollutant emission inventory and transmission of straw open burning in Heilongjiang province[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.)

[8] 王宏栋, 王玉赛, 高凤菊, 等. 玉米大豆秸秆联合青贮可行性分析[J]. 饲料研究, 2019, 42(5): 90-92. (WANG H D, WANG Y S, GAO F J, et al. Feasibility analysis on corn and soybean straw combined silage[J]. Feed Research, 2019, 42(5): 90-92.)

[9] 包健, 盛永帅, 蔡旋, 等. 鲜食大豆秸秆、茭白鞘叶和甘蔗渣营养成分和瘤胃降解率的研究[J]. 饲料研究, 2015(15): 33-38. (BAO J, SHENG Y S, CAI X, et al. Study on rumen degradation rate of sugarcane bagasse and nutrient composition of fresh soybean straw[J]. Feed Research, 2015(15): 33-38.)

[10] 万霖, 韩红兵, 车刚, 等. 小型大豆秸秆挤压膨化机的研制[J]. 现代化农业, 2004(8): 25-26. (WAN L, HAN H B, CHE G, et al. Development of small soybean straw extruder[J]. Modern Agriculture, 2004(8): 25-26.)

[11] 曾瑞伟. 大豆秸秆中异黄酮对湖羊生长代谢及肉品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. (ZENG R W. The effects of isoflavones in soybean straw on the growth and meat quality of goat [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.)

[12] 卢焕玉, 李杰. 大豆秸秆作为粗饲料的营养价值评定[J]. 中国畜牧杂志, 2010, 46(3): 36-38. (LU H Y, LI J. Evaluation of nutritional value of soybean straw as roughage[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2010, 46(3): 36-38.)

[13] 白长胜, 孟维珊, 李进, 等. 自然界中大豆秸秆发酵用优良乳酸菌的分离筛选[J]. 现代畜牧科技, 2020(10): 8-11. (BAI C S, MENG W S, LI J, et al. Isolation and screening of excellent lactic acid bacteria for soybean straw fermentation from nature[J]. Modern Animal Husbandry Science & Technology, 2020(10): 8-11.)

[14] 顾拥建, 占今舜, 沙文锋, 等. 不同处理方式对大豆秸秆发酵品质和营养成分的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(5): 308-310. (GU Y J, ZHAN J S, SHA W F, et al. Effects of different treatments on fermentation quality and nutrient composition of soybean straw[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2016, 44(5): 308-310.)

[15] 申瑞瑞, 孙晓玉, 刘博, 等. 不同复合微生物制剂对薯渣与大豆秸秆混贮发酵品质、营养成分及瘤胃降解率的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(7): 3319-3329. (SHEN R R, SUN X Y, LIU B, et al. Effects of different compound microorganism preparations on fermentation quality, nutritional components and rumen degradation rate of mixed silage of potato pulp and soybean straw[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(7): 3319-3329.)

[16] 包健, 盛永帅, 蔡旋, 等. 复合益生菌发酵鲜食大豆秸秆工艺与饲用品质的研究[J]. 饲料研究, 2015(9): 1-6. (BAO J, SHENG Y S, CAI X, et al. Study on fermentation technology and feed quality of fresh soybean straw by compound probiotics[J]. Feed Research, 2015(9): 1-6.)

[17] 罗燕, 陈天峰, 李君临, 等. 多花黑麦草与大豆秸秆混合青贮品质的研究[J]. 草地学报, 2015, 23(1): 200-204. (LUO Y, CHEN T F, LI J L, et al. Study on the nutritional quality of italian ryegrass and soybean straw[J]. Acta Agrestia Sinica, 2015, 23(1): 200-204.)

[18] 宋大利, 侯胜鹏, 王秀斌, 等. 中国秸秆养分资源数量及替代化肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 1-21. (SONG D L, HOU S P, WANG X B, et al. Nutrient resource quantity of crop straw and its potential of substituting[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 1-21.)

[19] CAI Z J, XU M G, WANG B R, et al. Effectiveness of crop straws, and swine manure in ameliorating acidic red soils: A laboratory study[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(9): 2893-2903.

[20] 梁文俊, 刘佳, 刘春敬, 等. 农作物秸秆处理处置与资源化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018. (LIANG W J, LIU J, LIU C J, et al. Crop straw treatment and utilization[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.)

[21] 曹莹菲, 张红, 刘克, 等. 不同处理方式的作物秸秆田间腐解特性研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 212-219. (CAO Y F, ZHANG H, LIU K, et al. Decomposition characteristics of crop residues among different agricultural treatments [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 212-219.)

[22] 邓乃榛. 松嫩平原玉米大豆秸秆还田腐解规律及对磷吸收和产量的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018. (DENG N Z. Decomposition laws of maize soybean straw returning to soil in songnen plain and its effects on phosphorus absorption and yield [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.)

[23] 席娟. 分层覆盖下秸秆层演变规律及降解速率调控方法试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018. (XI J. The research on evolution mechanism of layered mulching straw and its decomposition rate rate regulation methods [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2018.)

[24] 席娟, 朱新华, 刘威, 等. 秸秆覆盖中原料切碎/粉碎对土壤水热的影响[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 149-157. (XI J, ZHU X H, LIU W, et al. Effect of raw material minding/crushing on soil water and heat in straw mulching [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 149-157.)

[25] 张铭, 王岩, 赵天宏, 等. 臭氧浓度升高条件下秸秆还田对大豆光合荧光特性及产量的影响[J]. 大豆科学, 2019, 38(5): 754-761. (ZHANG M, WANG Y, ZHAO T H, et al. Effects of straw returning on photosynthetic fluorescence characteristics and yield of soybean under elevated ozone concentration[J]. Soybean Science, 2019, 38(5): 754-761.)

[26] 张经廷, 张丽华, 吕丽华, 等. 还田作物秸秆腐解及其养分释放特征概述[J]. 核农学报, 2018, 32(11): 2274-2280. (ZHANG J T, ZHANG L H, LU L H, et al. Overview of the characteristics of crop straw decomposition and nutrients release of returned field crops[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(11): 2274-2280.)

[27] 张轶洋, 池艳辉, 张云凤, 等. 大豆秸秆释碳影响因素研究[J]. 环保科技, 2020, 26(3): 1-4. (ZHANG Y Y, CHI Y H, ZHANG Y F, et al. Study on factors influencing soybean straw carbon release [J]. Environmental Science and Technology, 2020, 26(3): 1-4.)

[28] 马显萱, 刘立志, 张宇飞, 等. 添加碳氮对大豆秸秆还田土壤酶活性及微生物量碳的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10): 75-80. (MA Y X, LIU L Z, ZHANG Y F, et al. Effects of carbon and nitrogen addition on soil enzyme activity and microbial biomass carbon content of soybean straw after returning to field[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2019, 47(10): 75-80.)

[29] 孙冬梅, 文安宇, 李响, 等. 混菌发酵对产纤维素酶的影响及菌剂在大豆秸秆降解中的应用[J]. 大豆科学, 2019, 38(1): 49-55. (SUN D M, WEN A Y, LI X, et al. Cellulase production by mixed fungi solid fermentation and the application in soybean straw degradation[J]. Soybean Science, 2019, 38(1): 49-55.)

[30] 金梁, 魏丹, 李玉梅, 等. 生物炭对有机无机污染物的修复作用与机理研究进展[J]. 土壤通报, 2016, 47(2): 505-510. (JIN L, WEI D, LI Y M, et al. Remediation of organic and inorganic pollutants by biochar: A review[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(2): 505-510.)

[31] 盘丽珍, 许中坚, 伍泽广, 等. 大豆秸秆生物炭对铅锌尾矿污染土壤的修复作用[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 325-329, 334. (PAN L Z, XU Z J, WU Z G, et al. Remediation of soil polluted by lead-zinc tailings using soybean straw biochar[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 325-329, 334.)

[32] 王娜娜. 生物炭制备及用于土壤改良与治理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017. (WANG N N. Investigation on preparation of biochar and its application in soil improvement and treatment[D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.)

[33] ALEXANDAR J N. 大豆秸秆生物炭对黄土中硫转化及微生物群落的影响[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019. (ALEXANDAR J N. Effects of soybean stover-derived biochar on sulfur transformations and microbial community in loess[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.)

[34] 白玲, 宋飞跃, 季蒙蒙, 等. 不同调理剂对秸秆沼渣堆肥的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(1): 124-133. (BAI L, SONG F Y, JI M M, et al. Effects of different bulking agents on compost of straw biogas residue [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(1): 124-133.)

[35] 马晓轩, 蔡红珍, 付鹏, 等. 中国农业固体废弃物秸秆的资源化处置途径分析[J]. 生态环境学报, 2016, 25(1): 168-174. (MA X X, CAI H Z, FU P, et al. Analysis of the reutilization methods for agricultural waste of straw in China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2016, 25(1): 168-174.)

[36] 赵凌霄, 姜丽娜, 马建辉, 等. 秸秆过腹还田配施氮肥对小麦-玉米周年产量及土壤理化性质的影响[J]. 河南农业科学, 2020, 49(11): 26-36. (ZHAO L X, JIANG L N, MA J H, et al. Effects of returning straw to field through cow's belly and applying nitrogen on annual yield of wheat and maize and soil physical and chemical properties [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2020, 49(11): 26-36.)

[37] 时连辉. 几种农业废弃物堆腐基质理化特性及在园林覆盖和栽培上的应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2008. (SHI L H. Physical and chemical properties of several agriculture waste compost substrates and utilization in landscape mulch and culture [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2008.)

[38] 刘连强, 张志军, 瞿惠君, 等. 大豆秸秆栽培白灵菇配方的初步研究[J]. 中国食用菌, 2011, 30(2): 33-36. (LIU L Q, ZHANG Z J, ZI H J, et al. The preliminary study on the formula of the mushroom pleurosus cultivated with soybean straw [J]. Edible fungi of China, 2011, 30(2): 33-36.)

[39] 王庆武, 安秀荣, 薛会丽, 等. 大豆秸秆栽培平菇培养基配方筛选试验[J]. 山东农业科学, 2012, 44(5): 48-50. (WANG Q W, AN X R, XUE H L, et al. Screening test of culture medium formula of oyster mushroom cultivated with soybean straw [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2012, 44(5): 48-50.)

[40] 徐德海. 大豆秸秆栽培平菇配方筛选[J]. 安徽农业科学, 2018, 46(22): 47-48. (XU D H. Cultivation formulation screening of pleurotus ostreatus using soybean straw[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018, 46(22): 47-48.)

[41] 史磊, 王延锋, 王金贺. 大豆秸秆栽培猴头菇技术[J]. 中国林副特产, 2015(3): 18-19, 20. (SHI L, WANG Y F, WANG J H. Cultivation technology of hericium with soybean straw[J]. Forest By- Product and Speciality in China, 2015(3): 18-19, 20.)

[42] 武风兰. 不同培养基质配方对猴头菇生长的影响[J]. 现代农业科技, 2019(8): 58, 62. (WU F L. Effects of different substrate formulations on growth of hericium [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(8): 58, 62.)

[43] 张玉梅, 胡润芳, 陈伟, 等. 大豆秸秆栽培香菇研究[J]. 福建农业学报, 2017, 32(11): 1234-1238. (ZHANG Y M, HU R F, CHEN W, et al. Utilization of soybean straws for cultivating lentinula edodes [J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2017, 32(11): 1234-1238.)

[44] 徐绍娣. 豆秸菌糠混合基质林下榆黄蘑栽培方法[J]. 特种经济动植物, 2017, 20(9): 38-39. (XU S D. Soybean bran bacteria mixed matrix under the forest yellow mushroom cultivation method[J]. Special Economic Animals and Plants, 2017, 20(9): 38-39.)

[45] 么宏伟, 韩越, 李元敬, 等. 不同培养基质和栽培方式对黑木耳感官品质影响[J]. 东北林业大学学报, 2017, 45(6): 51-57. (YAO H W, HAN Y, LI Y J, et al. Effect of different culture substrates and cultivation mode on sensory quality of auricularia auricular[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2017, 45(6): 51-57.)

[46] 潘春磊, 盛春鸽, 史磊, 等. 利用大豆秸秆栽培黑木耳[J]. 黑龙江农业科学, 2016(12): 102-104. (PAN C L, SHENG C G, SHI L, et al. Cultivation of auricularia heimuer by soybean straw [J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2016(12): 102-104.)

[47] 吕志文, 陈艳琦, 徐敏慧, 等. 玉木耳大豆秸秆栽培配方的优化[J]. 中国食用菌, 2021, 40(1): 47-53. (LU Z W, CHEN Y Q, XU M H, et al. Optimization of cultivated formula for Auricularia cornea cv. Yu Muer by soybean straw [J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(1): 47-53.)

[48] 韩嘉钰, 魏巍, 余梦瑶, 等. 不同栽培基质对灵芝基质营养物质及胞外酶活的影响[J]. 时珍国医国药, 2016, 27(3): 715-719. (HAN J Y, WEI W, YU M Y, et al. Effects of culture medium on nutrient substance and extracellular enzyme activity of cultured ganoderma lucidum[J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2016, 27(3): 715-719.)

[49] ATILA F. Comparative study on the mycelial growth and yield of *Ganoderma lucidum* (Curt.: Fr.) karst. on different lignocellulosic wastes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(2): 153-157.

[50] 李林, 郭红艳, 孙晓杰, 等. 利用大豆秸秆和玉米秸秆栽培灵

芝[J]. 食用菌学报, 2021, 28(4): 15-19. (LI L, GUO H Y, SUN X J, et al. Cultivation of *Ganoderma lucidum* with soybean and corn straw[J]. Acta Edulis Fungi, 2021, 28(4): 15-19.)

[51] 刘天睿, 李仰华, 韩鹏杰, 等. 一种大豆秸秆蜜环菌培养基及其生产条件的优化[J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(15): 100-106. (LIU T R, LI Y H, HAN P J, et al. A soybean straw cultivation medium for *Armillaria gallica* and optimal composition[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2021, 27(15): 100-106.)

[52] 王娟, 赵江涛, 彭岗胜. 盆栽芍药有机栽培基质的筛选与开发[J]. 菏泽学院学报, 2019, 41(2): 88-92. (WANG J, ZHAO J T, PENG G S. Selection and development of organic cultivation substrate of potted Chinese herbaceous peony[J]. Journal of Heze University, 2019, 41(2): 88-92.)

[53] 张建. 不同无土栽培基质对高羊茅草皮生产的影响[D]. 成都: 四川农业大学, 2015. (ZHANG J. Influence of different soilless cultivation substrates on the sod production of tall festue [D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2015.)

[54] TONINI D, VADENBO C, ASTRUP T F. Priority of domestic biomass resources for energy: Importance of national environmental targets in a climate perspective[J]. Energy, 2017, 124: 295-309.

[55] 徐婷, 李嘉龙, 陈娜娜, 等. 武汉郊区农村民用生物质燃烧 PM_{2.5}排放特征[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 345-350. (XU T, LI J L, CHEN N N, et al. Emission characteristics of PM_{2.5} from domestic biomass in rural areas of Wuhan [J]. Journal of Jiangnan University (Natural Science Edition), 2019, 47(4): 345-350.)

[56] XU Q, PENG W C, LING C M. An experimental analysis of soybean straw combustion on both CO and NO_x emission characteristics in a tubular furnace[J]. Energies, 2020, 13(7): 1587.

[57] 李全林. 新能源与可再生能源[M]. 南京: 东南大学出版社, 2008. (LI Q L. New energy and renewable energy [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2008.)

[58] 常子磐, 李来武, 严经天, 等. 菊芋、玉米和大豆秸秆颗粒状燃料的燃烧性能比较[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(3): 308-310. (CHANG Z P, LI L W, YAN J T, et al. Comparison of combustion performance of *Jerusalem artichoke*, corn and soybean straw pellet fuels[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(3): 308-310.)

[59] 崔晓宇, 李铨军, 刘芳芳, 等. 以农业废弃物为原料的生物质热解液的理化特性[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(5): 551-557. (CUI X Y, LI X J, LIU F F, et al. Physical and chemical properties of bio-liquid of agricultural wastes [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2017, 39(5): 551-557.)

[60] WANG Y P, LIN J, DAI L L, et al. Microwave-assisted catalytic co-pyrolysis of soybean straw and soapstock for bio-oil production using SiC ceramic foam catalyst[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2018, 133:76-81.

[61] 李金花, 王国明, 王婷, 等. 生物质直接催化液化的研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(11): 65-68. (LI J H, WANG G M, WANG T, et al. Research on the direct catalytic liquefaction of biomass[J]. Renewable Energy Resources, 2012, 30(11): 65-68.)

[62] TIAN Y, WANG F, JESUIS O D, et al. Hydrothermal liquefaction of crop straws: Effect of feedstock composition[J]. Fuel, 2020, 265:116946.

[63] 赵晨希. 生物质焦油加压催化改性试验及机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. (ZHAO C X. Catalytic upgrading of biomass tar by pressurizing means and mechanism study[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.)

[64] WANG Z C, DUAN P G, LIU X J, et al. Hydrotreating the low-boiling-point fraction of biocrude in hydrogen donor solvents for production of trace-sulfur liquid fuel[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2019, 58(24): 10210-10223.

[65] DIAS M O S, JUNQUEIRA T L, ROSSELL C E V, et al. Evaluation of process configurations for second generation integrated with first gene-ration bioethanol production from sugarcane[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 109(9): 84.

[66] 樊富广, 涂洪峰, 陈从鑫, 等. 大豆秸秆乙醇预处理脱木素动力学研究[J]. 中国造纸学报, 2017, 32(1): 1-6. (FAN F G, TU H F, CHEN C X, et al. Delignification kinetics of ethanol pretreatment of soybean stalk[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2017, 32(1): 1-6.)

[67] 郑国香, 刘瑞娜, 李永峰. 能源微生物学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2013. (ZHENG G X, LIU R N, LI Y F. Energy microbiology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2013.)

[68] 李家威, 赵一全, 王海鹏, 等. 不同杂粮作物秸秆厌氧发酵产气特性研究[J]. 中国沼气, 2018, 36(5): 47-53. (LI J W, ZHAO Y Q, WANG H P, et al. Biogas production characteristics of various grain crop straw[J]. China Biogas, 2018, 36(5): 47-53.)

[69] XIONG J D, HASSAN M, WANG W, et al. Methane enhancement by the co-digestion of soybean straw and farm wastewater under different thermo-chemical pretreatments [J]. Renewable Energy, 2020, 145:116-123.

[70] OKOLIE J A, NANDA S, DALAI A K, et al. Hydrothermal gasification of soybean straw and flax straw for hydrogen-rich syngas production: Experimental and thermodynamic modeling [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 208(15): 112545.

[71] 张汝壮, 周彦波, 顾晓晨, 等. 柠檬酸改性大豆秸秆材料对铜离子的吸附性能[J]. 科技导报, 2014, 32(14): 102-104. (ZHANG R Z, ZHOU Y B, GU X C, et al. Adsorption behavior of citric acid modified soybean straw for Cu²⁺ [J]. Science & Technology Review, 2014, 32(14): 102-104.)

[72] 唐晓红. 大豆秸秆灰和香蕉皮对罗丹明B的去除比较[J]. 河南教育学院学报(自然科学版), 2020, 29(1): 16-22. (TANG X H. Comparison of rhodamine B removal by soybean straw ash and banana peel [J]. Journal of Henan Institute of Education (Natural Science Edition), 2020, 29(1): 16-22.)

[73] 左广玲, 叶红勇, 李入林, 等. 利用大豆秸秆制备农用保水剂及其保水性能研究[J]. 河南农业科学, 2010, 4(4): 50-52, 56. (ZUO G L, YE H Y, LI R L, et al. Synthesis and water-holding performance of agricultural water retaining agent made from soybean straw[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2010, 4(4): 50-52, 56.)

[74] 左广玲, 叶红勇, 杜朝军, 等. 大豆秸秆基保水剂对烟田土壤水分及烟草生长的影响[J]. 河南农业科学, 2011, 40(1): 79-81. (ZUO G L, YE H Y, DU C J, et al. Effects of soybean straw-based water retaining agent on the tobacco field moisture and tobacco growth [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,

2011, 40(1): 79-81.)

[75] AHMAD M, LEE S S, DOU X, et al. Effects of pyrolysis temperature on soybean stover-and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water [J]. Bioresource Technology, 2012, 118: 536-544.

[76] VYAVAHARE G, GURAV R, PATIL R, et al. Sorption of brilliant green dye using soybean straw-derived biochar: Characterization, kinetics, thermodynamics and toxicity studies [J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 43 (8): 2913-2926.

[77] 向文英, 李宁, 邓国斌, 等. 大豆秸秆生物炭对废水中 Ni (II) 的吸附性能 [J]. 重庆大学学报, 2017, 40(10): 99-107. (XIANG W Y, LI N, DENG G B, et al. Adsorption property of biochar from soybean straw for Ni (II) waste water [J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(10): 99-107.)

[78] 张娱, 王锦, 唐志书, 等. 大豆秸秆生物炭对苯酚的吸附特性研究 [J]. 大豆科学, 2018, 37(4): 637-642. (ZHANG Y, WANG J, TANG Z S, et al. Adsorption characteristics of soybean straw biochar on phenol [J]. Soybean Science, 2018, 37(4): 637-642.)

[79] 燕翔, 张少飞, 王都留, 等. 大豆秸秆制备活性炭及其 Cu²⁺ 吸附性能的研究 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 68-74. (YAN X, ZHANG S F, WANG D L, et al. Study on preparation of activated carbon from soybean straw and its adsorption Performance on Cu²⁺ [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 68-74.)

[80] 田叶顺. 基于微波热解活化的生物质活性炭制备及其脱硫性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019. (TIAN Y S. Study on preparation and desulfurization performance of biomass activated carbon based on microwave pyrolysis and activation [D]. Jinan: Shandong University, 2019.)

[81] 王亮, 田伟君, 乔凯丽, 等. 改性大豆秸秆生物炭对咪唑乙烟酸的吸附 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(10): 4488-4495. (WANG L, TIAN W J, QIAO K L, et al. Sorption characteristics and mechanism of imazethapyr by modified soybean straw biochar [J]. China Environmental Science, 2020, 40 (10): 4488-4495.)

[82] 徐荣霞. 杂原子掺杂大豆秸秆基多孔碳的制备及其超级电容器性能 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020. (XU R X. Preparation of heteroatom-doped soybean straw-based porous carbon materials and their supercapacitor performance [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.)

[83] 刘祝兰, 曹云峰, 王志国, 等. LiCl/DMSO 再生大豆秸秆纤维凝胶的制备及其性能研究 [J]. 林产化学与工业, 2016, 36(5): 81-88. (LIU Z L, CAO Y F, WANG Z G, et al. Preparation and characterization of lignocellulose gel from soybean stem /LiCl /DMSO solution [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2016, 36(5): 81-88.)

[84] 刘爽, 房欣, 张颖, 等. 用于地膜原料的大豆秸秆粉碎预处理工艺参数优化 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 333-338. (LIU S, FANG X, ZHANG Y, et al. Crushing pretreatment parameter optimization of soybean straw used as raw material of mulch [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(2): 333-338.)

[85] 肖俊华, 左迎峰, 刘文杰, 等. 秸秆人造板用胶黏剂研究进展 [J]. 材料导报, 2016, 30(17): 78-83. (XIAO J H, ZUO Y F, LIU W J, et al. Research progress of adhesives for strawboard [J]. Materials Reports, 2016, 30(17): 78-83.)

[86] SONG X W, WANG X L, KITO K. Effects of heating temperature on the properties of bio-board manufactured by using soybean straw [J]. Materials, 2020, 13(3): 662.

[87] 朱忆魁, 徐树坚, 罗伟儒, 等. 稀酸和稀碱预处理对四种不同生物质资源制备还原糖的影响 [J]. 生物资源, 2018, 40(5): 400-404. (ZHU Y K, XU X J, LUO W R, et al. Effects of dilute acid and alkali pretreatments on reducing sugar production from four different kinds of biomass [J]. Biological Resources, 2018, 40(5): 400-404.)

[88] 唐艳斌, 滕超, 黄建, 等. 大豆秸秆木聚糖碱法提取及酶解工艺研究 [J]. 中国食品添加剂, 2016(5): 92-97. (TANG Y B, TENG C, HUANG J, et al. Alkaline extraction of xylan from soybean straw and its enzymolysis technology [J]. China Food Additives, 2016(5): 92-97.)

[89] 杨健, 于长顺, 马英冲, 等. 离子液体/水混合体系预处理过程对秸秆组成与结构的影响 [J]. 大连工业大学学报, 2014, 33(6): 427-430. (YANG J, YU C S, MA Y C, et al. The effect of ILs-H₂O system pretreatment on the composition and structure of straw [J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2014, 33(6): 427-430.)

[90] 徐忠, 汪群慧, 姜兆华. 氨预处理对大豆秸秆纤维素酶解产糖影响的研究 [J]. 高校化学工程学报, 2004(6): 773-776. (XU Z, WANG Q H, JIANG Z H. The study of the ammonia pretreatment effect on the enzyme hydrolysis of soybean straw to produce sugar [J]. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2004(6): 773-776.)

[91] 向松明, 杨海涛, 姚兰. 大豆秸秆成分与结构分析 [J]. 湖北造纸, 2012(Z1): 35-37. (XIANG S M, YANG H T, YAO L. Composition and structure analysis of soybean straw [J]. Hubei Paper, 2012(Z1): 35-37.)

[92] 杨会斌. 大豆秸秆造纸的可行性探索 [J]. 黑龙江造纸, 2016(2): 15-17. (YANG H B. Feasibility exploration of soybean straw papermaking [J]. Heilongjiang Paper, 2016(2): 15-17.)

[93] 李丽霞, 陈海涛, 纪文义, 等. 几种秸秆纤维的理化特性研究 [J]. 大豆科学, 2014, 33(5): 691-696. (LI L X, CHEN H T, JI W Y, et al. Study on the physical and chemical properties of several straw fiber [J]. Soybean Science, 2014, 33(5): 691-696.)

[94] ŠUPIĆ S, MALEŠEV M, RADONJANIN V, et al. Reactivity and pozzolanic properties of biomass ashes generated by wheat and soybean straw combustion [J]. Materials, 2021, 14(4): 1004.

[95] 王丽英. 一种用大豆秸秆制作酱油的方法 [P]. 山东省: CN109418927A, 2019-03-05. (WANG L Y. A method for making soy sauce from soybean straw [P]. Shandong Province: CN109418927A, 2019-03-05.)