

菌糠的资源化研究与开发利用进展

刘宁^{1,2}, 张桂芹¹, 王奉强^{2*}

(1. 黑龙江省带岭林业科学研究所, 黑龙江伊春 153106; 2. 东北林业大学生物质材料科学与技术教育部重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150040)

摘要 食用菌产业作为国家“十三五”规划实施的优势特色产业和脱贫攻坚产业, 近年来发展迅速, 随之而来的菌糠废弃物越来越多, 为生态环境和产业可持续发展带来沉重负担和压力。为了缓解这个矛盾, 众多学者围绕这一问题展开了各种探索研究, 力求使菌糠变废为宝, 成为一种生物质资源被充分利用。综述了目前菌糠的开发利用方式, 并就此进行浅析, 以期菌糠资源化高效利用提供思路。

关键词 菌糠; 生物质资源; 食用菌废弃物; 生物质材料

中图分类号 X712 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)14-0007-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.14.003



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Progress in Research and Development of Spent Mushroom Substrate

LIU Ning^{1,2}, ZHANG Gui-qin¹, WANG Feng-qiang² (1. Heilongjiang Forestry Research Institute, Yichun, Heilongjiang 153106; 2. Key Laboratory of Bio-based Material Science & Technology, Northeast Forestry University, Ministry of Education, Harbin, Heilongjiang 150040)

Abstract As an advantageously characteristic industry and a poverty alleviation industry implemented by the national 13th Five-Year Plan, the edible fungi industry has developed rapidly in recent years, with more and more mushroom wastes, which has brought a heavy burden and pressure to the ecological environment. Many scholars have carried out various explorations and studies around this issue in order to make the spent mushroom substrate waste become a kind of biomass resources to reuse. This paper reviews the current development and utilization of spent mushroom substrate, and analyzes it for providing ideas for the efficient use of this resource.

Key words Spent mushroom substrate; Biomass resources; Edible fungi waste residue; Biomass material

“十三五”规划实施以来, 国家发布《关于深入推进农业供给侧结构性改革加快培育农业农村发展新动能的若干意见》(简称 2017 年中央 1 号文件), 将食用菌列入优势特色产业之一。在国家精准扶贫、鼓励农产品出口等相关政策的刺激下, 2017 年食用菌产业继续保持产量增长和结构调整两大趋势, 据中国食用菌协会数据统计, 2017 年全国食用菌总产量 3 712 万 t, 较 2016 年增长 3.21%, 产量在 100 万 t 以上的省份有豫、闽、鲁、黑、冀、吉、苏、川、陕、赣、鄂和辽等, 年产量约为 3 059 万 t, 占全国食用菌总产量的 82.41%^[1]。可估算菌糠总产量或超 6 000 万 t, 并且伴随国家农业供给侧结构性改革的推进, 预计这一产业局面还将持续增大。面对如此丰富的菌糠资源, 据黑龙江省科顾委^[2]调查统计, 黑龙江省的菌糠绝大多数被废弃, 造成资源浪费和巨大的生态压力, 至今仍无法得到有效解决。虽然不同培养基质形成的菌糠成分和含量存在差异, 但其中的大量纤维素、半纤维素和木质素等粗纤维^[3-7]及粗脂肪、粗蛋白等营养物质和矿物质元素^[8-15], 仍具有可二次开发利用的巨大潜力。

目前, 国内外已有较多关于菌糠作为二次资源的研究, 但多数集中在农业、能源以及功能吸附助剂等方面, 并且研究的深浅不一, 缺乏大宗高效利用的可行方式。笔者围绕国内外将菌糠作为二次资源的研究开发与利用进行了梳理和分析, 期望为切实有效地二次开发利用菌糠资源提供参考。

1 菌糠资源的研究与开发现状

1.1 畜禽饲料

菌糠经干燥和粉碎及其他工艺处理后, 可作为畜禽等动物的饲料使用。菌糠的发酵产物和有益菌可提高动物消化吸收率和免疫力, 并阻碍动物体内的病原体继续繁殖^[16-17]。用含 70% 草粉香菇菌糠和全草粉香菇菌糠分别替代 5% 的麸皮制成猪的日粮配方, 研究发现猪的行为表现、增重速度、饲料转化率和瘦肉率与对照组无明显差异, 且饲料成本降低, 收入有少许增加, 分别为 23.03 元和 155.31 元, 说明以菌糠代替部分精饲料是安全可行的^[18]。平菇菌糠作为一部分饲料的替代物, 奶牛每日奶产量可提高 4.9%; 替代原有饲料的 10%~30%, 饲养成本明显降低, 且可提高牛的体重增加速度^[29-30]。平菇菌糠和金针菇菌糠替代部分鹅和鱼的喂养饲料, 鹅和鱼的生长发育效果明显^[21-22]。杏鲍菇、香菇、金针菇、蛹虫草、滑菇、平菇等 6 种菌糠均可作为饲料的添加料使用, 从总氨基酸含量上看, 蛹虫草、香菇、杏鲍菇和金针菇菌糠含量较高, 适合作为精细饲料的填料^[23]。张莹莹^[24]分别将 50% 的玉米秸秆青贮和杏鲍菇菌糠与 50% 精饲料混合, 发现菌糠对肉牛生产性能的作用近似于玉米秸秆青贮, 但对瘤胃发酵和血清生化指标的影响低于玉米秸秆青贮。用 3%~9% 的菌糠部分替代饲料饲养生长期肉兔, 通过对血液血清生化指标数据的分析发现菌糠可以提高肉兔对饲料的消化吸收能力并降低肉兔心脏及肝脏的发病率^[25]。以采摘 3 茬的杏鲍菇菌糠为原料, 选取黑曲霉、枯草芽孢杆菌和嗜酸乳杆菌 3 株菌种通过优化发酵条件, 可提高杏鲍菇菌糠的营养价值, 且在生长猪饲料中添加 10% 的杏鲍菇菌糠为宜^[26], 而在另一项肉羊育肥试验研究中, 秸秆占比约为 50% 的杏鲍菇基质所得菌糠以 20% 比例添加入饲料中比较合适^[27]。杏鲍菇菌糠配制全混合日粮颗粒的适宜用量为

基金项目 黑龙江省财政厅科技计划项目(ZNK17-3); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2572014CB07)。

作者简介 刘宁(1981—), 女, 河南郸城人, 助理研究员, 博士, 从事农林废弃物资源化利用, 森林和土壤生态学研究。* 通信作者, 讲师, 博士, 从事生物质材料研究。

收稿日期 2019-01-16

12%~20%，波尔山羊羔羊食用该饲料后的日增重可达0.122~0.137 kg，血液生理生化指标正常^[28]。在胡须鸡饲料中添加6%~8%的桑枝食用菌菌糠，可达到最佳生产效益^[29]。李志涛^[30]选取(75±2)日龄体重相近的商品肉兔90只，白灵菇菌糠发酵后替代基础日粮中40%、60%、80%、100%的草粉，发现菌糠可100%替代草粉，饲料转化率、营养物质消化率显著提高($P<0.05$)，肉兔的生长性能最佳。杏鲍菇菌糠颗粒饲料与玉米秸秆颗粒饲料相比，对晋中绵羊瘤胃发酵、屠宰性能和血液指标无显著差异，但对其生长性能、养分消化率、氮平衡、空肠远端绒毛长度及产琥珀酸丝状杆菌有负面影响^[31]。Zhang等^[32]发现FMBH代替64%~80%膳食鱼粉可以提高异源银鲫的生长、消化酶活性和抗氧化能力。菌糠虽可部分替代或添加进动物的日粮饲料，而对于超高的菌糠产量和区域经济来说，消化处理的负担和压力仍然较重。

1.2 土壤修复剂和堆肥 菌糠中含有的氮磷钾、有机物及微生物等可以在一定程度上丰富植物根际微生物多样性，提高微生物活性，促进土壤动物活动，活跃土壤酶活性，增加土壤孔隙度，改善土壤结构，增大土壤持水性能，提高土壤肥力，进而提高农作物产量^[33-41]。在3种不同盐敏感性蔬菜栽培实验中，菌糠加入到泥炭培养基中可提高系统的pH、盐分含量、宏观和微量营养素浓度等，从而改善土壤的微生物环境和理化性质^[42]，并且能提高微生物活性，有利于农药降解^[43]。

将菌糠施入大豆田土壤耕层内，其土壤中速效磷、有机质含量增加，同时大豆植株根瘤数量、生物学产量、结荚率、单粒粒数、百粒重都明显提高，可增产16.3%~25.6%^[44]。当土壤中的菌糠添加量为30%时，金鱼草、绿叶鸡冠、串兰和矮牵牛4种园林花卉长势最好，明显改善其土壤理化性状，增加有益微生物的数量^[45]。种植小白菜的土壤经过菌糠与链霉菌和巨大芽孢杆菌混合处理后，其土壤有效性氮、磷含量和酶活性增加，土壤保水力提高，小白菜的产量也相应提高^[46]。腐熟的平菇菌糠与腐熟的鸡粪或羊粪混合作底肥的配方在改善土壤的理化性质、增加土壤养分、提高土壤酶活性和丰富土壤微生物群落等方面效果显著^[47]。用双孢蘑菇菌糠处理土壤，能显著增加土壤中细菌、放线菌数量，并可抑制真菌(有害菌)的繁殖^[48]。以菌糠为载体通过解磷菌、解钾菌和固氮菌发酵制备微生物菌肥，可分解土壤中的无机磷和钾，并有效固定氮元素^[49]。姬松茸菌糠可使苏打盐碱土中盐分和主要阳离子的含量组成向优化土壤结构方向转化，可降低苏打盐碱土的pH和碱化度，并且可提高种植在该改性土上的牧草的地上部生物量^[50]。

诸葛诚祥^[51]研发一种菌糠降解菌剂能使菌糠堆肥的腐熟期缩短6 d，并且在堆肥微生物群落中呈现一定的演替规律。在堆肥处理时添加菌糠能缩短进入高温期的时间，有利于各处理堆肥的脱水，增加菌糠的添加比例，各处理的干物质降解率和有机碳损失率均降低，全磷、全钾含量在堆肥后持续增加的幅度逐渐减小，当菌糠的添加比例大于0.3时，有

利于减少猪粪渣堆肥过程中 NH_3 的排放，堆肥36 d腐熟后其总养分和有机质均符合NY 525—2012标准要求^[52]。菌糠发酵物能够促进细菌与放线菌的生长定植，从而改善土壤微环境，对植物生长具有潜在的积极作用，并且发酵菌糠拌土比例为10%且拌土时间为6 d时对黄瓜立枯病及枯萎病的防治效果最高，分别达到了85.6%和74.3%^[53]。选择生物防治木霉在食用菌菌糠上进行发酵，所得木霉发酵物作为新型的土壤添加剂应用于设施黄瓜栽培中，可预防黄瓜土传病害的发生^[54]。

由具有耐盐和耐pH特性的固氮菌*Azotobacter chroococum* N1、解钾菌*Bacillus subtilis* K3和解磷酵母*Pichia farinosa* FL7构成的根际微生物群落将香菇菌糠发酵成具有环境耐受能力的菌糠菌肥用于修复滨海新区不同地点的盐碱土壤，能显著提高土壤中无机氮、有效磷、速效钾的含量，并增强植物的抗盐性，促进植物生长和营养吸收；另外，菌糠混合发酵解磷酵母*P.farinosa* FL7、固氮菌*A.chroococum* N1和解钾菌*B.subtilis* K3制备生物肥料，能够增加重金属离子污染土壤中水溶性重金属的固定化效率和重金属磷酸盐污染土壤中重金属的生物有效性^[55]。Chiu等^[56]发现平菇菌糠可在不到1个月的时间内降解土壤中部分石油残留物并降低其毒性。土壤被多环芳烃污染后，加入菌糠对减轻有机物污染也有改善作用^[57-59]。在土壤中添加生物炭有助于缓解全球变暖气候变暖，提高土壤质量，提高作物产量^[60-62]。

1.3 二次培养基 把泥炭和菌糠按照一定比例混合后，可作为植物种子萌发和生长的培养基^[42]。将菌糠作为双孢菇培养基代替粪草，生物学转化率提高18%^[63]。废菌糠与经过预先处理和消毒的菜田土混合比例为4:1时，栽培的双孢蘑菇长势优于单纯用菜田土^[64]。研究发现杏鲍菇菌糠较稻草的生物学效率更高，当菌糠提取液添加60 g/L栽培草菇时，对草菇菌丝的生长具有最大的促进作用，并且晒干处理菌糠栽培的草菇产量明显高于发酵处理菌糠^[65]。卢嘉宝^[66]将凤尾菇菌糠62%、58%分别配合马铃薯渣25%、29%培育姬菇和小白侧耳菇，实际收获产量与预测值接近。在栽培钉子菇时，添加适量的杏鲍菇菌糠，可在一定范围内促进钉子菌菌丝生长，通过建立数学模型，其菌丝生长最佳培养基配方是：麸皮11%、菌糠14%和草炭75%^[67]。

1.4 转化生物质能源 目前已有较多研究者关注生物质热解气/液化的研究，作为一次生物质资源的农林废弃物的生物燃油制备技术已取得较大进展，而关于二次生物质资源的菌糠热解利用研究的报道较少^[4,68-69]。菌糠作为新燃料，又是能源材料的优势主要包括节约能源、降低成本、降低废弃物环境污染问题等。作为沼气发酵底物的平菇下脚料液，每平方米的沼气产生量为0.25 m³^[70]。李亚冰^[71]通过比较农业废弃物牛粪、秸秆和菌糠的甲烷产气量，发现菌糠要低于秸秆的产气潜力。以平菇菌糠为原料，通过排水集气法研究其产沼气能力，优化工艺以沼气池污泥为接种物，其产气总量、产气率和有机质利用率均比优化前显著提高，可与以牛粪为原料的沼气产气量相当^[72]。路子佳^[73]利用菌糠作为原

料进行沼气发酵,发现添加尿素可明显提高产气高峰期的日产气量及甲烷含量。姜海峰等^[74]通过热重分析技术、干馏热解研究白灵菇菌糠的热解性质及其液化产物,多角度表征发现制得的液化产物有较多酚类、烃类为主的有机组分,经纯化改性等处理后,可以作为潜在能源被利用。油页岩半焦对于菌糠热裂解生物油产量具有促进作用,二者以质量比为1:1时裂解生物油产率最高为8.59%,并且油页岩半焦使裂解生物油中的碳、氢以及芳香与脂肪化合物的含量均提高^[75]。

平菇菌糠经加压增密制成柱状固体燃料,其密度约为1.314 g/cm³,一般热值在14 280~16 800 kJ之间,约为标准煤29 400 kJ的50%。灰分为5%左右,含硫量在5‰以下,燃料率达95%以上,燃尽的灰分可作为优质的肥料直接还田改良土壤^[76]。由于菌糠含有的成分以木质纤维素为主,因此可借鉴从木质纤维到乙醇的生物转化过程,该过程主要包括原料预处理、纤维素和半纤维素的酶解糖化和发酵、乙醇产品的回收纯化^[77-78]。蘑菇生长的过程使纤维素等基质降解,更有利于水解反应^[79],对平菇菌糠进行稀硫酸高温预处理,然后对处理后的菌糠进行纤维素酶和木聚糖酶的水解,添加木聚糖酶强化纤维素酶水解能够明显增加还原糖的产量^[80]。以蒸汽爆破对香菇菌糠进行预处理后用酶解酶和酿酒酵母AM12对其同步糖化发酵,再通过水萃取,可将糖化率提高约20%,乙醇产率可达理论产率的87.6%^[81]。

1.5 转化生物炭 关于利用菌糠制备生物炭方面,刘向东等^[82]将木耳菌糠热裂解制备生物炭,从炭得率、pH和灰分等角度对试验结果进行了简单分析。周锋利^[6]利用沙柳木屑基杏鲍菇菌糠通过水蒸汽活化得活性炭,并简单测试了其得率和活化性能。随微波裂解温度升高,金针菇菌糠裂解的生物炭表现出较高的pH(10.43)、持水量(7.886 mL/g)和比表面积(189.38 m²/g)^[83]。平菇菌糠热解生物炭与菌糠有机肥或猪粪和稻草等组成生物堆肥,在有效固持氮、磷、钾、钠的基础上可显著增加土壤的保肥性^[84-85],菌糠裂解生物炭的表面积和孔容随裂解温度升高而增加,孔径则减小^[86]。以约10%的海带海藻与菌糠共裂解,可以获得具有高灰分含量、丰富官能团、粗糙表面形态和最大朗格缪尔吸附容量等特点的生物炭,其对阳离子染料结晶紫的吸附容量(610.1 mg/g)是纯菌糠生物炭的2.2倍^[87]。

1.6 污水处理剂 草浆碱法蒸煮黑液是造纸厂废水主要污染源,采用菌糠过滤—耐碱菌酸化的—产酸菌酸析—降解菌群调节—厌氧水解—接触氧化—内电解处理的工艺,经20 d连续工作可对黑液进行有效处理^[88]。草酸改性菌糠可提高其吸附能力^[89],其改性过程为:将10 g菌糠置于250 mL质量浓度为0.5 mol/L的草酸溶液中,在30℃下搅拌60 min,然后用蒸馏水清洗烘干。在重金属离子Cd²⁺、Pb²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺共存的体系中,以0.5 mol/L的NaOH预处理的金针菇菌糠表现出比未处理菌糠更高的吸附能力^[90]。平菇菌糠不作任何化学处理时,即对铜离子具有较强的吸附能力,而当采用海藻酸钠-聚乙烯醇对平菇菌糠固定化处理后,测得其比表面积为51.154 6 m²/g,对铅、铜、锌、镉的最大吸附量均可超

过60 mg/g,吸附-解吸循环5次时的洗脱率仅比首次下降了15%^[91-93]。混合重金属铅、铬、镉溶液通过香菇菌糠净化过程中,各重金属之间存在竞争吸附现象,但在适当吸附条件下,香菇菌糠可同时对3种重金属都有较强的去除能力^[94]。菌糠基复合水凝胶是以一定中和度的丙烯酸为单体,采用紫外辐射引发法对菌糠进行化学改性而合成出来的,对金属离子的去除主要是由于金属离子与聚合物发生了离子交换和络合作用,其吸水倍率可达1 793.5 g/g,并表现出具有良好的解吸和循环吸附性能^[95]。

1.7 其他应用开发 以菌糠为原料,采用磷酸钙催化剂辅助稀硫酸水解制备纳米纤维素晶体是基于菌丝在降解植物成分的生长过程中已将植物原料“咬”得“千疮百孔”,此时只需少许能量与工序就可将菌糠进一步加工成微纳尺度材料,如纳米纤维素等^[96];用本方法制得的纳米纤维素晶体呈棒状,直径介于10~30 nm,属于纤维素I型,与原料菌糠相比,结晶度由63.79%增大到81.04%,且与传统酸水解方法相比,简化了工艺流程,制备过程环境友好。超氧化物歧化酶(SOD)是一种生物活性蛋白质,自从世界血防组织禁止使用动物血提取SOD后,人们转向从食用菌中获取,但以菌糠为原料提取SOD的报道还较少,周锋利^[6]发现杏鲍菇菌糠菌丝体内SOD的含量较高,其提取率约为0.31 g/kg,且酶比活力为769.57 U/mg。Peixin He等^[97]通过热碱液从杏鲍菇菌糠中提取粗多糖(CPS),其产率高达12.18%,再从中分离纯化出主要由木糖、葡萄糖和阿拉伯糖组成的多糖-蛋白复合物(RPS),研究显示CPS和RPS均可表现出较强的抗氧化活性,由此也显示出菌糠在食品工业中作为制备强抗氧化剂的应用潜力。

2 我国菌糠生物质资源问题与分析思考

2.1 问题分析 我国菌糠每年的产量巨大,但由于其作为畜禽饲料使用时,在日粮配方中的比例较低,并且多数含有大量的杂菌和病毒,所含重金属也可能超标,钙、磷含量及比例差异较大等一系列问题,是其在畜禽饲料开发应用中的不利因素;在土壤修复剂和/或堆肥的开发应用中,它虽改善了土壤生态环境,使土壤的孔隙度、透气性、肥力以及酶活性等有所提高,但由于土壤自身理化性质、菌糠生物降解速率等各种因素的影响下,其用量比例仍不够大;在作为二次培养基时,其营养物质含量、与待栽培菌的种类适应性以及我国适合作食用菌培养基的农业秸秆及林业加工剩余物资源丰富等均限制了规模化应用;以菌糠直接转化为生物质能源,虽然在理论上可行,但仍存在较多的技术壁垒,在转化成本和效率方面还有很大的提升空间,并且在实际操作中与农作物秸秆、木本废料等相比,具有明显劣势;制备/提取高附加值的生物炭、纳米纤维素晶体、酶或多糖等,基本处于研究阶段,距离实际应用仍有较长的路要走,由菌糠所带来的环境和生态压力仍是目前亟待解决的现实问题。

2.2 一点思考 “生物质-生物质材料-生物质能源”的生态全产业链模式^[98],是以拓展生物质资源产业链为基本途径而提出的,可以针对每年海量的菌糠进行生物质资源化利

用。该思路与国家发展与改革委员会发布 2017 年 1 号公告文件《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录》相契合。菌糠作为代木代塑复合材料的原料、制作生物培养基、还田改良土壤、发酵制畜禽饲料、高效有机肥等可能更具操作性,但纵观菌糠利用现状并不乐观。从提高生物质资源利用效益和循环经济的角度出发,并考虑到延长食用菌产业链、提高附加值、菌农增收以及生态环保等,更为直接、易于大宗利用并可实现的途径可能是应用于生物质材料产业。

3 结语

可以看出,随食用菌产业的快速发展,菌糠所带来的各类问题日益突出,如何使其可持续地资源化利用,是摆在科研工作者、企业家和政府部门面前的一道难题。进入 21 世纪以来,人们对生物质废弃物带来的生态和社会压力的关注越来越多,对其综合利用方式展开了多种探索和尝试,力求寻得稳定、可靠并实用的利用技术。随着探索的不断深入,以“生物质资源—食用菌栽培—菌糠资源—生物质(复合)材料—生物质能源”的理念推行生物质菌糠的资源化利用,或将可掀起新的篇章,使其有望不再成为社会进步和生态环境发展的困扰。

参考文献

[1] 中国食用菌协会.中国食用菌协会 2017 年度全国食用菌统计调查结果分析[EB/OL].(2018)[2018-12-20].<http://www.cefa.org.cn/2018/12/27/10457.html>.

[2] 黑龙江省科顾委高新技术组(生物技术专业组).2014 年第 19 期:我省农业废弃物资源化利用的生物技术研究[EB/OL].(2014-12-30)[2018-12-20].http://www.hljsgkw.org/news_n.asp?id=1139&did=5.

[3] 王永军,田秀娥,李浩波.菌糠的营养价值与开发利用[J].中国饲料,2001(12):30-31.

[4] 杨宇,罗嘉,齐卫艳,等.两种食用菌菌糠的化学成分分析及热解液化研究[J].化学研究与应用,2008(11):1457-1460.

[5] 张雅雪.酒糟菌糠的成分分析及其对肉鸭免疫功能和肠道主要菌群的影响[D].雅安:四川农业大学,2011.

[6] 周锋利.沙柳木屑栽培杏鲍菇与菌糠利用技术研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.

[7] 官福臣.平菇菌糠饲料成分的分析及营养价值评定[D].哈尔滨:东北农业大学,2013.

[8] 邹霞青,张浩.几种菌糠营养成分及其瘤胃降解率[J].福建农业大学学报,1999,28(4):477-482.

[9] 刘晓牧,王中华,李福昌,等.菌糠的营养价值及应用[J].中国饲料,2000(18):29-30.

[10] 霍妍明,谷子林,王志恒.菌糠饲料的开发与利用[J].饲料广角,2007(15):42-43.

[11] 黄坤坤.菌糠饲料的开发利用[J].四川草原,2004(11):42-43.

[12] 成娟丽,张福元.菌糠饲料开发利用的研究进展[J].畜牧与饲料科学,2006(3):39-41.

[13] 刘学剑.菌糠作饲料的营养价值与开发前景[J].湖南饲料,2002(5):30-32.

[14] 陶新.菌糠在动物日粮中的应用效果[J].广东饲料,2007,16(1):45-46.

[15] 汪水平,王文娟,田渊.菌糠饲料的开发和利用[J].饲料研究,2003(5):28-30.

[16] 钟德山,宁康健,应如海,等.利用食用菌开发秸秆饲料[J].饲料工业,1994,15(4):34-35.

[17] 李斌,屈东,邹成义.发酵菌糠对肥猪生产性能和胴体品质的影响[J].四川畜牧兽医,2007,34(9):22-23.

[18] 刘建昌,潘廷国,苏水金,等.菌糠替代麸皮喂猪的饲养试验[J].中国畜牧杂志,1998(2):26-27.

[19] 李进杰,刘成禄,蒋明琴,等.平菇菌糠替代部分精料饲喂奶牛试验[J].中国奶牛,2006(7):12-13.

[20] 李浩波,高云英,雷进民,等.菌糠饲料对秦山杂犏牛短期育肥效果的影响[J].河南农业大学学报,2007,41(4):430-433.

[21] 李超,王绍斌,刘燕洁,等.金针菇菌糠饲喂昌图鹅仔鹅试验[J].食用菌,2007(3):60-61.

[22] 胡连江,王占哲,赵殿枕,等.菌糠混合料饲喂肉鹅试验研究[J].黑龙江农业科学,2007(6):67-68.

[23] 范文丽,李天来,代洋,等.杏鲍菇、香菇、金针菇、蛹虫草、滑菇、平菇菌糠营养分析评价[J].沈阳农业大学学报,2013,44(5):673-677.

[24] 张莹莹.菌糠饲料对肉牛消化代谢和生产性能的影响[D].太谷:山西农业大学,2016.

[25] 赵志鹏,袁崇善,任东波,等.平菇菌糠对生长期肉兔饲养效果的试验研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2017,38(5):7-11.

[26] 刘世操,刘梓洋,祝爱侠,等.杏鲍菇菌糠固态发酵工艺条件的优化及在生长猪上的应用[J].中国畜牧杂志,2017,53(9):86-91.

[27] 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.

[28] 郭方正,魏金涛,赵娜,等.杏鲍菇菌糠配制波尔山羊全混合颗粒日粮的研究[J].中国畜牧杂志,2016,52(15):27-32.

[29] 苏秋权.桑枝食用菌菌糠饲料化加工技术研究[D].武汉:华南农业大学,2016.

[30] 李志涛.白灵菇菌糠发酵饲料制备工艺优化及其对肉兔生长性能影响及机理研究[D].邯郸:河北工程大学,2016.

[31] 杨中民.菌糠颗粒饲料对绵羊生长、代谢及屠宰性能的影响[D].太谷:山西农业大学,2016.

[32] ZHANG D S,ZHANG Y P,LIU B,et al.Effect of replacing fish meal with fermented mushroom bran hydrolysate on the growth,digestive enzyme activity,and antioxidant capacity of allogynogenetic crucian carp(*Carassius auratus gibelio*) [J].Turkish journal of fisheries and aquatic sciences,2017,17(5):1043-1052.

[33] STEWART D P C,CAMERON K C,CORNFORTH I S,et al.Release of sulphate-sulphur,potassium,calcium and magnesium from spent mushroom compost under field conditions [J].Biology and fertility of soils,2000,31(2):128-133.

[34] 王志强,郭倩,凌霞芳,等.利用废菌糠提高覆土持水力和蘑菇产量的研究[J].中国食用菌,2004,23(5):15-17.

[35] RIBAS L C C,MENDONCA M M D,CAMELINI C M,et al.Use of spent mushroom substrates from *Agaricus subrufescens* (syn.*A.blazei*),*A.brasiliensis* and *Lentinula edodes* productions in the enrichment of a soil-based potting media for lettuce (*Lactuca sativa*) cultivation; Growth promotion and soil bioremediation [J].Bioresource technology,2009,100(20):4750-4757.

[36] 王雷.菌糠在樱桃番茄施用效应的研究[D].长春:吉林农业大学,2008.

[37] 侯立娟.菌糠在辣椒上的施用效应与机理的研究[D].长春:吉林农业大学,2008.

[38] 董宁.菌糠新型苏打盐渍土改良剂组方效果试验研究[D].长春:吉林农业大学,2011.

[39] 王根茂.菌糠作为有机肥对玉米—小麦轮作下土壤理化性质和作物生长的影响[D].郑州:河南农业大学,2011.

[40] 董卿,程红艳,张建国,等.醋糟菌糠对 3 种作物土壤微生物及酶活性的影响[J].中国生态学报,2016,24(12):1655-1662.

[41] NAKATSUKA H,ODA M,HAYASHI Y,et al.Effects of fresh spent mushroom substrate of *Pleurotus ostreatus* on soil micromorphology in Brazil [J].Geoderma,2016,269:54-60.

[42] MEDINA E,PAREDES C,MURCIA M D,et al.Spent mushroom substrates as component of growing media for germination and growth of horticultural plants [J].Bioresource technology,2009,100(18):4227-4232.

[43] GAO W X,LIANG J F,LETICIA P,et al.Evaluation of spent mushroom substrate as substitute of peat in Chinese biobeds[J].International biodegradation & biodegradation,2015,98:107-112.

[44] 赵丽珍,刘振钦,郑怀训,等.施用菌糠对大豆生育和产量的影响[J].吉林农业大学学报,1994,16(2):40-44.

[45] 唐凯悦.木耳菌糠在改良园林绿化用土中的研究[D].牡丹江:牡丹江师范学院,2016.

[46] 朱小平.菌糠复合剂对土壤和作物生长的影响[D].北京:中国农业大学,2005.

[47] 李维.食用菌菌糠的腐熟及腐熟物在土壤改良中的应用[D].北京:北京理工大学,2016.

[48] 张琳,张应华,王艳芳,等.双孢蘑菇菌糠作基肥对玫瑰园地土壤微生物数量的影响[J].南方农业,2017,11(25):94-96.

[49] 孙丽范.利用耐盐碱解磷、解钾、固氮菌发酵菌糠制备菌肥的研究[D].天津:天津大学,2012.

[50] 谢修鸿,李玉.姬松茸菌糠改良苏打盐碱土对土壤化学性质及牧草生长的影响[J].吉林农业大学学报,2010,32(5):518-522.

- [51] 诸葛诚祥. 菌糠高效降解菌剂的研发及其在堆肥中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [52] 吴飞龙, 叶美锋, 吴晓梅, 等. 添加菌糠对猪粪渣堆肥过程及氨排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 598-604.
- [53] 周巍. 菌糠发酵物对常见黄瓜土传病害防治及土壤微生物群落影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.
- [54] 高苇. 菌糠木霉发酵物防治黄瓜土传病害及其机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- [55] 胡宗福. 菌糠菌肥在修复盐碱土和锌铜镍铬污染土壤中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [56] CHIU S W, GAO T, CHAN C S, et al. Removal of spilled petroleum in industrial soils by spent compost of mushroom *Pleurotus pulmonarius* [J]. *Chemosphere*, 2009, 75(6): 837-842.
- [57] LAU K L, TSANG Y Y, CHIU S W. Use of spent mushroom compost to bioremediate PAH-contaminated samples [J]. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1539-1546.
- [58] GARCÍA-DELGADO C, D'ANNIBALE A, PESCIAROLI L, et al. Implications of polluted soil biostimulation and bioaugmentation with spent mushroom substrate (*Agaricus bisporus*) on themicrobial community and polycyclic aromatic hydrocarbons biodegradation [J]. *Science of the total environment*, 2015, 508: 20-28.
- [59] DI GREGORIO S, BECARELLI S, SIRACUSA G, et al. *Pleurotus ostreatus* spent mushroom substrate for the degradation of polycyclic aromatic hydrocarbons: The case study of a pilot dynamic biopile for the decontamination of a historically contaminated soil [J]. *Journal Chem Technol Biotechnol*, 2016, 91: 1654-1664.
- [60] XU G, WEI L L, SUN J N, et al. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? [J]. *Ecological engineering*, 2013, 52(2): 119-124.
- [61] FORNES F, BELDA R M, LIDÓN A. Analysis of two biochars and one hydrochar from different feedstock; Focus set on environmental, nutritional and horticultural considerations [J]. *Journal Cleaner Prod*, 2015, 86: 40-48.
- [62] MILLER-ROBBIE L, ULRICH B A, RAMEY D F, et al. Life cycle energy and greenhouse gas assessment of the co-production of biosolids and biochar for land application [J]. *Journal Cleaner Prod*, 2015, 91: 118-127.
- [63] 刘守华, 王翔, 付雷, 等. 菌糠代粪肥栽培双孢菇高产技术[J]. 食用菌, 2002, 24(3): 15-15.
- [64] 赵凤良, 王尚, 雷新梅. 3 种不同覆土材料对双孢蘑菇栽培的影响[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(18): 4555-4557.
- [65] 卜文文. 不同菌糠对草菇菌丝生长和产量效应的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [66] 卢嘉宝. 马铃薯废渣在三种侧耳属食用菌培育中的应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.
- [67] 江徽. 钉子菇生物学特性与培养基质优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [68] 李兰兰. 菌糠热解高效利用关键技术研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2015.
- [69] 杨紫敬. 菌糠热解过程及动力学特性研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
- [70] 米青山, 王尚莹, 宋建华. 食用菌废料的综合利用研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(2): 284-287.
- [71] 李亚冰. 兼性厌氧纤维素酶产生菌的筛选及在沼气发酵中的应用[D]. 天津: 河北工业大学, 2009.
- [72] 程辉彩, 张丽萍, 崔冠慧, 等. 平菇菌糠发酵生产沼气技术研究[J]. 中国食用菌, 2010, 29(5): 46-49.
- [73] 路子佳. 高温菌糠沼气发酵的初探及产甲烷菌的分离[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2010.
- [74] 姜海峰, 李俊锋. 白灵菇菌糠的热解利用[C]//中国化学会第 29 届学术年会摘要集——第 28 分会: 绿色化学. 北京: 中国化学会, 2014.
- [75] JIANG H F, ZHANG M Y, CHEN J, et al. Characteristics of bio-oil produced by the pyrolysis of mixed oil shale semi-coke and spent mushroom substrate [J]. *Fuel*, 2017, 200: 218-224.
- [76] 赵帆, 韩泽坤, 王新剑, 等. 平菇菌糠生物质燃料循环利用系统[J]. 农技服务, 2016, 33(10): 165, 142.
- [77] WYMAN C E. What is (and is not) vital to advancing cellulosic ethanol [J]. *Trends in biotechnology*, 2007, 25(4): 153-157.
- [78] CARDONA C A, SANCHEZ J. Fuel ethanol production: Process design trends and integration opportunities [J]. *Bioresource technology*, 2007, 98(12): 2415-2457.
- [79] TEOH T C, SOO C S, HEIDELBERG T, et al. Bioethanol from spent mushroom sawdust waste by perchloric acid: Easy sugars separation and hydrolysis without charring [J]. *Chiang mai journal of science*, 2012, 41(3): 513-523.
- [80] 张美江. 平菇菌糠稀硫酸—酶法水解工艺的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [81] ASADA C, ASAKAWA A, SASAKI C, et al. Characterization of the steam-exploded spent Shitake mushroom medium and its efficient conversion to ethanol [J]. *Bioresource technology*, 2011, 102(21): 10052-10056.
- [82] 刘向东, 董雪, 隋欢, 等. 农作物废弃物制备生物炭的实验研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2016, 34(3): 330-332.
- [83] 陈慧玲, 林向阳, 朱银月, 等. 微波裂解温度对菌糠生物炭特性的影响[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 285-290.
- [84] CHANGA K L, CHEN X M, SUN J, et al. Spent mushroom substrate biochar as a potential amendment in pig manure and rice straw composting processes [J]. *Environmental technology*, 2017, 38(13/14): 1765-1769.
- [85] 楼子墨. 废弃菌糠理化性质及其资源化过程中的环境影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [86] LOU Z M, SUN Y, BIAN S P, et al. Nutrient conservation during spent mushroom compost application using spent mushroom substrate derived biochar [J]. *Chemosphere*, 2017, 169: 23-31.
- [87] SEWU D M, BOAKYE P, JUNG H, et al. Synergistic dye adsorption by biochar from co-pyrolysis of spent mushroom substrate and *Saccharina japonica* [J]. *Bioresource technology*, 2017, 244: 1142-1149.
- [88] 王宏勋. 白腐菌生物处理草浆碱法煮黑液研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.
- [89] 张芝利. 生物吸附法对水中重金属离子的处理研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2011.
- [90] 朱萌. 金针菇培养基对重金属吸附特性的研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2013.
- [91] 胡晓婧, 藏婷婷, 顾海东, 等. 平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 669-677.
- [92] 藏婷婷, 胡晓婧, 顾海东, 等. 黑木耳菌糠对 Cu^{2+} 的生物吸附及其机理[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1421-1428.
- [93] 胡晓婧. 固定化菌糠吸附剂对镉污染废水的深度净化[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [94] 刘健, 邵玉芳. 香菇菌糠对重金属离子的吸附作用[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(6): 1336-1343.
- [95] 张明月. 农作物生物质复合水凝胶的合成及对重金属离子吸附性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [96] 庄森扬, 唐丽荣, 卢麒麟, 等. 磷酸铝辅助催化水解菌糠制备纳米纤维素晶体的性能[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 866-871.
- [97] HE P X, LI F L, HUANG L N, et al. Chemical characterization and antioxidant activity of polysaccharide extract from spent mushroom substrate of *Pleurotus eryngii* [J]. *Journal of the Taiwan institute of chemical engineers*, 2016, 69: 48-53.
- [98] 王清文, 郭垂根. 生物质资源高效利用模式探索——“生物质-生物质材料-生物质能源”产业链模式[J]. 西南林学院学报, 2010, 30(6): 11-14.