

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.202423.0331

香菇菌糠资源化利用研究进展

刘丽娜, 魏书信, 田广瑞, 崔国梅, 李顺峰, 王安建

(河南省农业科学院农产品加工研究中心 郑州 450002)

摘要: 香菇是我国产量最大的食用菌, 是乡村振兴的重要支柱产业。香菇产业快速发展的同时产生了大量的菌糠, 但很多菌糠被直接丢弃或焚烧, 造成严重的环境污染和资源浪费, 因此, 香菇菌糠的资源化利用问题受到了广泛关注。在分析香菇菌糠理化性质的基础上, 综述了香菇菌糠资源化利用的研究进展, 包括作为食用菌栽培基质、动物饲料、有机肥、土壤改良剂、园艺栽培、生物吸附剂及生物活性物质提取原料等方面, 探讨了香菇菌糠资源化利用中存在的主要问题, 提出加快推进菌糠的资源化利用, 应重点从加强菌糠物质基础、加大菌糠资源化利用技术、产业化应用配套设施及标准 3 个方面开展研究, 以期香菇菌糠的高效利用提供参考和理论依据。

关键词: 香菇; 菌糠; 利用; 理化性质

中图分类号: S141

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2024)04-007-07

Research progress on resource utilization of spent *Lentinula edodes* substrate

LIU Lina, WEI Shuxin, TIAN Guangrui, CUI Guomei, LI Shunfeng, WANG Anjian

(Research Center of Agricultural Products Processing, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: *Lentinula edodes* is the largest yield edible fungus in China, and is an important pillar industry for rural revitalization. The rapid development of *Lentinula edodes* industry leads to a large amount of spent substrates, but most of them are directly discarded and burned, which causes serious environmental pollution and waste of resources. Therefore, the resource utilization of spent substrate has attracted wide attention. In this article, based on the analysis of physicochemical properties, the research progress on resource utilization of spent *Lentinula edodes* substrate was reviewed, including utilization modes as edible fungus cultivation matrix, animal feed, organic fertilizer, soil conditioner, horticultural cultivation, biological adsorbent and active material extraction raw material. The main problems in the utilization of spent substrate were discussed. The suggestions were proposed on accelerating the resource utilization of spent substrate, and the research should focus on three aspects of strengthening the material basis, increasing the resource utilization technology, industrial application of supporting facilities and standards. The article aims to provide reference and theoretical basis for the efficient utilization of spent *Lentinula edodes* substrate.

Key words: *Lentinula edodes*; Spent substrate; Utilization; Physicochemical property

香菇又名香蕈、花菇、冬菇等, 是我国重要的常规主栽食用菌品种, 被誉为“菇中皇后”。其滋味鲜美, 肉质肥厚细嫩、香气独特、营养丰富, 是一种食药同源的食品^[1], 深受国内外消费者的喜爱。据中国食用菌协会统计, 2022 年我国 29 个省、自治区、直辖市(不含宁夏、海南和港澳台等省区)的鲜香菇总产量 1 295.48 万 t, 占食用菌总产量的 30.68%, 是我国产量最大的食用菌。菌糠又称菌渣, 是栽培食

用菌后的栽培基质剩余物, 每生产 1 kg 食用菌约产生 3.25~5 kg 菌糠^[2]。香菇产业快速发展的同时会产生大量菌糠。在实际生产中, 很多菌糠被直接丢弃或焚烧, 既浪费资源, 又污染环境。因此, 科学合理地利用香菇菌糠资源, 变废为宝, 对实现香菇产业绿色循环发展十分重要。近年来, 人们对香菇菌糠的研究不断深入, 许多新方法、新技术逐渐应用于菌糠的多元化循环发展中。笔者在分析香菇菌

收稿日期: 2023-05-25; 修回日期: 2024-01-11

基金项目: 河南省重点研发专项项目(231111112500); 河南省科技攻关计划项目(232102110278, 242102111068); 河南省农业科学院科技创新团队专项(2023TD41); 河南省农业科学院自主创新项目(2023ZC079)

作者简介: 刘丽娜, 女, 助理研究员, 研究方向为食用菌加工。E-mail: 83231174@qq.com

通信作者: 王安建, 男, 研究员, 研究方向为食用菌加工。E-mail: jgs1419@163.com

糠理化性质的基础上,总结了香菇菌糠在二次栽培食用菌、动物饲料、有机肥、土壤改良剂、园艺栽培、生物吸附剂等方面的研究进展,以期对香菇菌糠的资源化利用提供参考。

1 香菇菌糠理化性质

菌糠理化性质是其循环再利用的基础。香菇是典型的木腐菌,目前生产中栽培主料为木屑,其菌糠颜色通常呈棕褐色或浅褐色,弱酸性,质地多孔疏松,容重较小,结构松散易碎。香菇菌糠的理

化特性与栽培品种、栽培用料、出菇次数等有显著的相关性,不同的栽培用料之间营养成分差异很大,不同产区的同一种栽培料品质也存在差异。有研究测得香菇菌糠 pH 值可达 4.4,持水力 77.0%,容重 $0.41 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,总孔隙度 75.2%^[3-4],因此,香菇菌糠具有较低的 pH 值、容重和较高的持水力、孔隙度。其特殊的物理结构能够有效确保水分和空气供应,成为资源化利用的优势之一。也有多位学者^[5-10]对香菇菌糠的营养成分进行了测定(表 1~2)。

从表 1~2 分析数据可以看出,香菇菌糠含有丰

表 1 香菇菌糠常规营养成分含量

Table 1 The conventional nutrient content of spent mushroom substrate

营养成分 Nutritional ingredient	不同来源数据 Different source data							%
	郑有坤,等 ^[5] Zheng youkun, et al	范文丽,等 ^[6] Fan wenli, et al	王乐乐,等 ^[7] Wang lele, et al	王军旗 ^[8] Wang junqi	王军旗 ^[8] Wang junqi	杨官敏,等 ^[9] Yang guanmin, et al	薄璇,等 ^[10] Bo xuan, et al	
中性洗涤纤维 Neutral detergent fiber	65.60	49.29	55.43	68.55	56.36	76.08	64.12	
酸性洗涤纤维 Acid detergent fiber	62.20	46.47	46.22	58.64	52.17	51.90	37.65	
半纤维素 Hemicellulose	3.40	2.82	9.21	9.91	4.19	-	-	
粗灰分 Crude ash	10.70	1.83	9.23	-	-	9.31	10.72	
粗蛋白 Crude protein	6.84	3.92	9.92	7.85	4.14	7.53	6.32	
粗脂肪 Crude fat	-	0.98	1.23	-	-	2.32	3.58	
总钙 Total calcium	-	1.14	-	1.25	2.14	11.20	-	
总磷 Total phosphorus	-	2.32	-	2.88	2.16	3.22	-	

注:-表示未检测。下同。

Note: - means not detected. The same below.

表 2 香菇菌糠氨基酸含量

Table 2 The amino acid content of spent mushroom

氨基酸种类 Kinds of amino acid	不同来源数据 Different source data		
	范文丽,等 ^[6] Fan wenli, et al	王军旗 ^[8] Wang junqi	王军旗 ^[8] Wang junqi
苏氨酸 Threonine	339.5	173.0	146.0
赖氨酸 Lysine	103.5	87.2	85.4
亮氨酸 Leucine	32.5	95.1	102.7
异亮氨酸 Isoleucine	25.3	95.8	102.7
甲硫氨酸 Methionine	22.8	81.1	78.1
苯丙氨酸 Phenylalanine	80.1	115.2	120.3
缬氨酸 Valine	148.9	214.3	240.6
色氨酸 Tryptophan	-	12.7	10.4
天冬氨酸 Aspartic acid	125.6	158.5	179.0
丝氨酸 Serine	111.6	162.2	147.9
谷氨酸 Glutamic acid	221.2	285.3	245.5
甘氨酸 Glycine	80.3	57.4	43.3
丙氨酸 Alanine	225.6	227.8	266.1
半胱氨酸 Cysteine	451.6	40.1	39.2
酪氨酸 Tyrosine	123.3	52.3	30.4
组氨酸 Histidine	27.5	50.9	72.5
精氨酸 Arginine	339.7	81.6	61.2
脯氨酸 Proline	84.4	48.9	34.2
总氨基酸 Total amino acids	3 101.5	2 039.4	2 005.5

富的菌丝蛋白、未被充分利用的多种纤维类物质、调节食用菌生长的重要无机盐钙和磷,同时香菇菌糠中氨基酸种类也比较齐全,尤其是天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸等鲜味氨基酸含量丰富,使得菌糠具有较浓郁的鲜味。另外,菌糠中还含有大量的生物活性物质、次生代谢产物、维生素及微量元素,具有很高的利用价值^[11]。

2 香菇菌糠资源化利用

2.1 用作食用菌栽培基质

香菇的生物学效率只有 50%~80%,比金针菇(50%~100%)还略低些^[12],其栽培基质中木质纤维素含量(w,后同)接近 80%^[13],栽培结束后,木质纤维素虽被不同程度降解,但菌糠中未被利用的木质纤维素含量达到 34.48%,几乎与麸皮相当(表 3);碳素含量与木屑、麸皮、棉籽壳中的差异不显著,氮素含量显著高于木屑,仍然可以为某些食用菌的生长提供充足的营养^[14];另外,菌糠中含有的钙、磷、氨基酸等多种养分都对食用菌生长发育有着积极的作用^[15]。因此,利用香菇菌糠作为二次栽培食用菌的

表3 香菇菌糠与原料的营养成分比较

Table 3 Comparison of nutritional components between spent mushroom substrate and raw material

栽培基质 Culture substrate	w(木质纤维素) Lignocellulose content/%	w(碳素) Carbon element content/%	w(氮素) Nitrogen element content/%	碳氮比 Carbon-nitrogen ratio
木屑 Sawdust	83.21 a	49.96 a	0.54 c	101.76 a
麸皮 Wheat bran	35.05 c	48.86 a	3.30 a	7.70 c
棉籽壳 Cotton seed hull	62.37 b	45.92 a	1.52 b	33.89 b
香菇菌糠 Spent mushroom substrate	34.48 c	45.46 a	1.26 b	36.10 b

注:同一列中不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences at 0.05 level.

部分替代原料,不但能提供纤维素类高分子营养物质,还能满足低分子物质的需求。

目前,利用香菇菌糠为基料二次栽培食用菌的研究已有很多报道。香菇菌糠替代阔叶木屑栽培金针菇的试验结果表明,香菇菌糠添加量是影响金针菇菌丝长速、长势、产量、生物转化率的主要因素,添加量在 30%的产量最高,生物转化率达到 100.3%,比不添加菌糠的全玉米芯的产量高 13.4%,比全阔叶木屑的高 141.7%,具有增产效果^[16]。以香菇菌糠和玉米芯为主料栽培杏鲍菇培养基优化配方的研究发现,香菇菌糠添加量影响杏鲍菇菌丝长速、长势,产量和生物转化率,添加量 30%~40%时,生物转化率在 80%以上^[17]。利用香菇菌渣替代 30%木屑进行反季节工厂化栽培滑子菇的研究结果表明,缩短发菌时间的同时保证产量和生物转化率,还能减少木屑用量、降低生产成本^[18]。通过配方筛选试验发现,添加香菇菌渣 30%、谷壳 70%的配方栽培大球盖菇,有利于菌丝生长发育和产量品质提升^[19]。在分析香菇菌糠的营养成分基础上配制香菇菌糠栽培鸡腿菇的培养料配方,实现了鸡腿菇的高效栽培,节约生产成本达到 50%,经济效益好^[8]。这些研究将香菇菌糠应用到二次栽培食用菌中替代部分木屑,具有增产、增效、提高生物转化率、降低成本等诸多被证实的优点。但在使用时应注意保证菌糠质量,无污染、无霉变及病虫害,并清除干净杂物。

由于香菇菌糠营养成分不比棉籽壳差,因此用来替代棉籽壳的研究也有很多。以香菇菌渣替代部分棉籽壳栽培姬菇试验的结果表明^[20],香菇菌渣添加 26%时,姬菇产量增加了 8.6%,且与正常栽培姬菇子实体营养价值差异不大。在利用香菇菌糠替代部分棉籽壳生产平菇栽培中,菌糠添加量为 25%~30%时菌丝生长速度最快,达 $0.85 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$,高于不添加菌糠的对照组 $0.79 \text{ cm} \cdot \text{d}^{-1}$,且菌丝长势良好,出菇量也高于对照组^[21]。通过系统研究香菇菌

糠替代棉籽壳以 10%梯度递增的添加量对平菇生长及品质的影响,筛选出利用香菇菌糠种植平菇的最佳配方^[22],为香菇菌糠二次利用的可行性提供了理论和实践依据。香菇菌糠替代棉籽壳栽培平菇的配方试验结果表明^[23],在平菇培养料中添加 50%以内的香菇菌糠时,平菇的菌丝生长速度、产量均超过原配方,但该试验平菇产量增长率不高,为了得到最佳产量还需进一步验证。这些研究结果说明,香菇菌渣替代棉籽壳作为其他食用菌的栽培基料是可行的,但其容重、吸水性、抗压强度等物理性质却与棉籽壳等未经使用的培养料没有可比性。因此,在讨论菌糠的应用效果时,要注意区分物理性质方面的差异,控制好添加量。

此外,利用香菇菌糠二次栽培草菇、榆黄蘑、金福菇、毛木耳、香菇、双孢蘑菇、竹荪等也都有成功实例^[24]。这些都表明香菇菌糠能广泛应用于二次栽培食用菌,但在实际应用时要根据栽培食用菌的生物学特性,科学配制成营养丰富、碳氮比适宜、物理化学结构适宜的栽培基质,从而促进香菇菌糠在二次栽培食用菌中的应用。

2.2 用作动物饲料

菌糠是一类成本低廉的饲料资源。香菇菌糠经过微生物的发酵作用后养分含量丰富,粗蛋白、粗脂肪含量有了较大提高,特别是一般饲料缺乏的必需氨基酸以及铁、钙、锌、镁等微量元素含量相当丰富,此外,菌糠含有的蘑菇香味也使其具有良好的适口性,因此,具有很高的饲料价值^[6,25-27]。栽培食用菌后的菌糠机械强度大幅下降,粉碎加工便利,可以直接用于养殖业。香菇菌糠用于饲料的最直接的处理方式是将收获的香菇菌糠晾晒或烘干后粉碎,按一定比例直接添加在饲料中。使用香菇菌糠代替部分饲料饲喂肉牛,日增重提高 11.76%,比不添加菌糠的对照组经济效益提高 40.47%,为育肥肉牛提供了新饲料资源^[28]。香菇菌糠代替 15%麸皮饲喂生长期肉兔可明显促进肉兔的生长,降低饲

料成本,增加养殖效益^[29]。此种香菇菌糠饲料制作工艺简单,但由于该过程对菌糠中含有的一些不易消化的纤维(如木质素)、高分子物质或者少量抗营养因子未做处理,不利于动物的消化吸收。因此,香菇菌糠仅可代替部分糠麸类饲料用作肉牛和肉兔的饲料资源。

由于纤维素、木质素、半纤维素等难以被家禽直接消化利用,纤维类物质含量过高成为香菇菌糠作为动物饲料的一个主要限制因素,因此,香菇菌糠常需要进行饲料化处理以提高利用率。适当的碱处理可降低粗纤维含量,提高消化率;使用3%氢氧化钙加2%尿素复合处理香菇菌糠时效果最佳,中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维、酸性洗涤木质素和纤维素含量分别下降9.31%、6.72%、20.36%和16.15%^[30]。若采用碱化与生物发酵相结合的方式处理香菇菌糠,则干物质、中性洗涤纤维、半纤维素、酸性洗涤木质素瘤胃动态降解率较未添加菌糠的对照分别提高53.64%、89.07%、225.05%、116.98%,效果优于单独的碱化处理^[31]。菌糠经过微生物发酵处理后,不仅能进一步提高菌糠的营养成分含量,还对改善动物肠道菌群、提高饲料转化率具有明显效果。香菇菌糠经过微生物发酵后,其粗蛋白含量从28.4%提高到36.7%,体外消化率提高到70%,且粗纤维含量显著降低^[32],可作为家禽和动物的高营养饲料。不同微生物发酵对香菇菌糠饲料品质影响的研究结果表明,酵母菌和乳酸菌混合发酵处理的效果最好,菌糠的纤维素、水溶性碳水化合物及铵态氮含量明显降低,粗蛋白含量提高25%,氨基酸含量提高了29.4%^[5]。香菇菌糠的饲料化处理可以降低粗纤维含量,在改善饲用品质、提高动物采食量和饲料消化利用率等方面具有显著作用。香菇菌糠作为生物资源已被应用到动物生产中,不仅能降低饲料成本,还能改善动物的生理功能。

此外,香菇菌糠中含有多糖、酶、生物碱、植物甾醇及黄酮等生物活性物质,具有抗菌、免疫和代谢调节等功能,能够提高畜禽的抗病能力^[33-35]。诸多试验研究虽然在饲喂效果上存在一定差异,但总体来看,菌糠的饲料资源开发有着广阔的前景。菌糠的饲料化利用对缓解饲料资源不足、降低养殖成本、提高经济效益和改善环境意义重大,但其大规模推广应用还有赖于菌糠饲料的规范化生产工艺完善、不同品种菌糠饲料的营养价值评价及不同动物生理阶段利用参数的系统研究。

2.3 用作有机肥和土壤改良剂

菌糠肥料化利用的首要标准是有机质含量高于40%,据测定分析^[14],香菇菌糠中有机质含量达63.98%、磷含量达0.32%、钾含量达0.64%,同时具有较高的氮含量1.16%。氮元素含量是评价土壤肥力情况的重要指标之一,菌糠中的氮元素释放速率缓慢更有利于植物对氮的利用^[36]。香菇菌糠中的大量有机质和活性物质,兼有有机肥和菌肥的双重作用,有助于提高土壤肥力,可以作为肥料取代部分化肥^[37]。施用香菇废弃菌糠作板栗基肥的研究发现,土壤有机质含量比施肥前增加30.12%,比单纯施用复合肥高出36.13%,土壤pH值上升5.60%,且板栗产量与施用复合肥相近,无显著差异^[38]。这说明菌糠作有机肥有利于提高土壤有机质含量,减少化学肥料的使用,具有良好的生态和经济效益。

香菇菌糠也可以经过堆肥处理后,用于生产优质有机肥。有关香菇菌糠腐熟工艺及相应条件控制的研究也有相关报道。陶冶东等^[39]筛选出1株高效纤维素降解菌株能够高效降解香菇菌糠,对腐熟香菇菌糠制备生物有机肥具有较大的应用潜力。香菇菌糠中加入适量尿素的研究发现,可使发酵堆体快速升温,缩短发酵时间;经40d的堆制发酵后,菌糠中细菌及真菌数量明显减少,速效磷、碱解氮含量均有显著提高^[40]。对比分析香菇菌糠发酵堆制前后营养成分含量的变化发现,发酵堆制后全氮、全磷、全钾、速效磷、速效钾含量均有提高,对菌糠营养成分的分解转化作用促进明显,可以作为有机肥循环利用^[41]。香菇菌糠作为填充料对木耳菌糠-鸡粪堆肥效果的研究表明,添加香菇菌糠有利于堆料粗纤维含量的提高,促进胡敏酸碳的矿化分解^[42]。香菇菌糠可以单独堆肥,或与畜禽粪便等混合堆肥,能够将有机成分分解矿化,是香菇菌糠资源化利用的有效途径;与广泛应用的速效化肥相比,菌糠有机肥释放缓慢,持续提供养分,是优良的有机肥资源。

香菇菌糠不但可以用作有机肥,还可以作为土壤改良剂使用。土壤改良剂主要用来提高由于污染或者营养贫乏而退化的土壤生产力。菌糠中的菌丝体在生长过程中分泌的一些活性物质,能抑制部分土传性病害,能使复杂的有机物分解成易被植物吸收的物质,同时菌糠进一步分解成通气蓄水能力强的腐殖质,还能培养和保持土壤的团粒结构和理化性能,是一种改良土壤功能的优质肥料。香菇菌糠用于土壤修复的研究发现^[3],嗜热细菌、嗜温细

菌、真菌及二氧化碳排放量都显著高于对照,显示出更高的微生物多样性,具有用于土壤生物修复的潜力。在土壤中添加香菇菌渣可以明显提高土壤真菌数量、放线菌数量、几丁质酶活性和脱氢酶活性,扩大土壤中微生物群落的规模,从根本上有利于土壤质量的改善,同时还增强了土壤潜在的抑病能力^[43]。将香菇菌糠作为木霉防病的增效剂添加到育苗土中的试验结果证实^[44],香菇菌糠能显著提高木霉对黄瓜枯萎病的防治效果,并且增加了木霉在土壤和根系中定殖的数量从而更好地发挥生防作用。这些研究表明,香菇菌糠能够有效促进土壤中微生物数量的恢复增长,优化土壤中微生物区系结构,具有一定的抑病能力。因此,香菇菌糠用作有机肥和土壤改良剂是可行的,但这方面的应用效果与施用剂量密切相关,有待于进一步研究。

2.4 用作园艺栽培

香菇菌糠中不仅含有丰富的菌体蛋白和矿质元素,还有多种次生代谢产物、微量元素等水溶性成分,可以直接作为园艺栽培基质使用,也可以和其他基质混配应用。Medina等^[45]研究表明,香菇废弃菌渣可作为对盐分敏感的西葫芦和辣椒育苗基质使用。香菇菌糠作栽培基质对番茄幼苗生长的研究表明^[46],香菇菌糠混合土壤作为栽培基质在番茄幼苗抗干旱性、幼苗品质特性上均优于未添加菌糠的对照。利用不同配比香菇菌渣培育黄瓜幼苗时,幼苗质量较好,可在生产中应用^[4]。采用不同粒径含量的香菇菌糠栽培油松的试验结果表明^[47],香菇菌糠单独使用同样可以达到提高苗木品质和质量的要求,各种生长指标均显著好于田园土,且中小粒径越多,油松苗长势越好。使用香菇菌糠替代部分泥炭栽培一品红的试验也获得了较好的效果,一品红长势旺,商品性佳^[48]。通过不同配比改良香菇菌糠基质,筛选出适宜罗勒生长的基质^[49]。香菇菌糠已在较多园艺作物栽培上得到应用,其良好物理性状和含有的丰富有机质及矿质元素,促进作物生长,提高作物产量和改善品质。值得注意的是,菌糠用作园艺栽培对作物产量的影响与作物种类和施用方式有关。

2.5 用作生物吸附剂

香菇菌糠中存在大量的羧基、羟基、羰基等活性基团和丰富的金属硫蛋白等物质,可以与重金属离子形成较稳定的离子化合物和螯合物,也可以通过菌糠疏松多孔结构,作为生物吸附剂进行重金属离子污染修复^[50-52]。用聚乙烯醇-海藻酸钠固定的

香菇菌糠作为污水中Cd离子吸附剂的研究^[53],描述了Cd离子吸附的动力学模型,发现香菇细胞壁中的-OH、-CO和-CO-NH在Cd离子吸附中起重要作用。以香菇菌渣为原料,采用微波辐照碳酸钾活化法制备菌渣活性炭,制得的活性炭碘值为729.94 mg·g⁻¹,接近国标二级品标准;亚甲基蓝吸附值为163.47 mg·g⁻¹,优于国标优级品标准^[54]。利用香菇菌糠作为吸附剂吸附混合重金属溶液中重金属离子的研究表明^[55],香菇菌糠在适当吸附条件下对Cr³⁺、Cd²⁺和Pb²⁺都有较强的去除能力。在香菇菌糠吸附水体中重金属铅效果的研究中^[56],发现菌糠粒径的变化对铅的吸附率影响较小,一定条件下对铅的吸附率最高可达到97%。这些研究结果为香菇菌糠用作良好生物吸附剂的材料开发提供了有益参考,特别是应用香菇菌糠处理含有重金属的废水是一个值得研究的方向。

2.6 提取活性物质

提取和利用香菇菌糠中活性物质具有生态高值化的潜力,已成为众多学者的研究热点。检测5种食用菌菌糠(香菇、杏鲍菇、秀珍菇、银耳、海鲜菇)胞外酶活性的试验结果显示^[57],香菇菌糠的淀粉酶活性最高,达到734.29 U·g⁻¹,可作为饲用酶制剂添加到饲料中,以降解淀粉,有效提高饲料的营养价值。香菇菌糠中分析测定出具有较高的纤维素酶活性和木聚糖酶活性,也具有一定的果胶酶活性^[58],这些酶能去除或降低非淀粉多糖的抗营养性,具有开发饲用酶制剂的潜在价值。采用超声浸提法从香菇菌糠中提取具有商品价值的纤维素酶的研究^[59],为纤维素酶的进一步分离纯化提供了参考依据。通过分析水提、酸解、酶解香菇菌糠多糖的体外抗氧化能力,发现香菇菌糠多糖具有一定的体内外抗氧化能力^[60]。菌糠原料的提取技术并不复杂,主要难点是进行成分分离,目前的研究仍是实验室提取较多,商业化应用少,有待于进一步深入研究。

3 问题与展望

我国香菇菌糠每年产量巨大,如何高效合理可持续地资源化利用这些菌糠,成为香菇产业面临的一个重要问题。目前,关于香菇菌糠资源化利用的研究涉及多个领域,但未真正形成大规模产业化处理方式,在资源化利用过程中还存在诸多问题。在用作栽培基质时,与待栽培物的种类适应性及我国农林废弃物资源丰富等限制了规模化应用;用作

动物饲料时,易存在或产生相关毒素的不利因素;用作有机肥和土壤改良剂时有助于改善土壤生态环境,但受菌糠生物降解速率的影响,施用菌糠的长期综合效应尚不明晰;用作生物吸附剂和提取生物活性物质,大多还处于研究阶段,在转化成本和效率方面还有很大提升空间;香菇菌糠自身独特的生物学特性还未真正得到高效利用。因此,研究香菇菌糠资源化利用机制及技术对形成香菇全产业链绿色环保发展模式具有重要意义。

香菇菌糠的资源化利用涉及多学科多行业多部门,加快推进菌糠的资源化利用,今后应重点从以下几个方面开展工作。第一,加强香菇菌糠的物质基础研究。深入解析不同栽培基料、栽培品种的香菇菌糠的营养和理化特性,充分认识香菇菌糠中代谢产物构成及功能,挖掘活性成分和营养成分,系统性地分析和评估菌糠中的有害物质,为菌糠的科学利用提供物质基础和理论指导。第二,加大香菇菌糠的资源化利用技术研究力度。深入研究香菇菌糠的利用机制,拓宽二次栽培食用菌及园艺作物种类,不断探索创新应用模式。菌糠营养成分与动物种类、品种、生长阶段、生产性能等条件结合,实现在饲料复配中的科学利用,筛选能降解菌糠中毒素的发酵菌种,评价菌糠饲料的安全性。综合评估施用菌糠对土壤的长期效应、施用风险、碳氮循环及生态环境的影响。加快香菇菌糠用作生物吸附剂和提取生物活性物质的成果转化。第三,深化产业化应用配套设施、标准等研究。结合食用菌生产基地特点,因地制宜研发配套处理设备,从回收、专业化处理到产业化应用,提高菌糠利用的智能化和机械化水平,提高菌糠处理效率和利用效率,降低利用成本。推进菌糠利用的标准化工作,逐步建立菌糠在二次栽培、动物饲料、有机肥生产等方面利用的统一的技术标准,形成行业规范化和标准化菌糠利用技术体系。此外,还可以借鉴作物茎秆类农业废弃物综合利用技术和方法,拓宽香菇菌糠综合利用途径,优化利用处理工艺,改造配套设备,提高香菇菌糠综合利用效率。

参考文献

- [1] 刘丽娜,李顺峰,魏书信,等.不同蛋白酶对香菇酶解液性质的影响[J].中国酿造,2022,41(3):152-157.
- [2] 许子洁,王晶,曹子健,等.食用菌菌糠资源化利用的现状与研究进展[J].食药菌,2021,29(6):496-500.
- [3] 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.
- [4] 吴慧,王玲玲,吴默涵,等.不同配比香菇菌渣基质对鲜食黄瓜幼苗生长的影响[J].园艺与种苗,2015(6):24-28.
- [5] 郑有坤,易敏,陈建州,等.微生物发酵对香菇菌糠饲料品质的影响[J].西南农业学报,2013,26(3):1143-1147.
- [6] 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.
- [7] 王乐乐,秦荣艳,阿不夏合满·穆巴拉克,等.菌酶协同发酵香菇菌糠工艺参数的优化[J].饲料研究,2022,45(7):62-66.
- [8] 王军旗.农村利用香菇菌糠栽培鸡腿蘑的技术推广与经济效益[J].中国食用菌,2020,39(12):197-200.
- [9] 杨官敏,李小冬,洪莉平,等.贵州5种食用菌菌糠饲料的营养组分与饲用价值[J].贵州农业科学,2022,50(7):73-77.
- [10] 薄璇,余波,刘瑞霞.不同微生物二次发酵对香菇菌糠饲料的品质影响[J].中国饲料,2023(12):81-84.
- [11] ZHANG L, SUN X Y. Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar[J]. Bioresource Technology, 2014, 171(1):274-284.
- [12] 张莹,田龙,徐敏慧,等.食用菌菌糠综合利用研究进展[J].微生物学通报,2020,47(11):3658-3670.
- [13] 陈黄墨.棉秆屑在香菇代料栽培中的应用研究[D].武汉:华中农业大学,2012.
- [14] 宫志远,韩建东,杨鹏.食用菌菌渣循环再利用途径[J].食药菌,2020,28(1):9-16.
- [15] 刘秀明,陈强,鄂向丽,等.国内外食用菌增产添加物研究进展[J].食用菌学报,2018,25(1):120-125.
- [16] 郭莹,郑安波,钟鄂蓉.香菇菌糠再利用研究[J].现代化农业,2017(12):36-37.
- [17] 郑安波,郭莹,钟鄂蓉.香菇菌糠栽培杏鲍菇培养基配方研究[J].黑龙江农业科学,2017(8):85-86.
- [18] 伍淑树,罗义,李军,等.利用香菇菌渣反季节工厂化栽培滑子菇[J].中国食用菌,2021,40(9):103-105.
- [19] 马琳静.利用香菇菌渣栽培大球盖菇的配方筛选试验[J].现代农业科技,2018(9):82.
- [20] 郭建恩,胡传久,魏海龙,等.利用香菇菌渣栽培姬菇的试验[J].食用菌,2014,36(6):26-27.
- [21] 李用芳,李学梅,李鹤宾.香菇木屑菌渣营养成分分析及在平菇菌种生产中的应用[J].微生物学杂志,2001,21(3):59-60.
- [22] 牛娜.利用香菇菌糠栽培平菇的配方研究[D].南京:南京农业大学,2017.
- [23] 李孝,周廷斌,彭学文,等.香菇菌糠栽培平菇的配方试验[J].食药菌,2016,24(4):256-257.
- [24] 邵妍丽,任军辉,张高翔.废菌渣栽培食用菌研究进展[J].西藏科技,2021(5):14-16.
- [25] PHAN C W, SABARATNAM V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 96 (4) :

- 863-873.
- [26] KIM M K, LEE H G, PARK J A, et al. Recycling of fermented sawdust-based oyster mushroom spent substrate as a feed supplement for postweaning calves[J]. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 2011, 24(4):493-499.
- [27] 张耀,陈鑫珠,黄小云,等.菌糠饲料资源开发研究进展[J].*家畜生态学报*,2021,42(12):97-102.
- [28] 蒋明琴,李进杰,冯巧婷.香菇菌糠替代部分精料育肥肉牛效果[J].*当代畜牧*,2009(2):30-31.
- [29] 李进杰,蒋明琴,刘燕.香菇菌糠代替部分麸皮饲喂生长期肉兔效果试验[J].*畜牧与兽医*,2014,46(3):47-49.
- [30] 李超,苏君伟,于希臣.基于化学处理及生物发酵的食用菌糠饲料化方法探讨[J].*沈阳农业大学学报*,2008,39(4):451-454.
- [31] 梁学武,姚亮,刘庆华,等.复合处理香菇菌糠纤维类成分瘤胃降解率的研究[J].*上海交通大学学报(农业科学版)*,2002,20(3):213-218.
- [32] ZHANG C K, GONG F, LI D S. A note on the utilization of spent mushroom composts in animal feeds[J]. *Bioresource Technology*, 1995, 52(1):89-91.
- [33] ZHU H J, SHENG K, YAN E F, et al. Extraction, purification and antibacterial activities of a polysaccharide from spent mushroom substrate[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 50(3):840-843.
- [34] ZHANG Y, LIU W, XU C P, et al. Characterization and antiproliferative effect of novel acid polysaccharides from the spent substrate of shiitake culinary- medicinal mushroom *Lentinus edodes* (Agaricomycetes) cultivation[J]. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2017, 19(5):395-403.
- [35] ISHIHARA A, GOTO N, KIKKAWA M, et al. Identification of antifungal compounds in the spent mushroom substrate of *Lentinula edodes*[J]. *Journal of Pesticide Science*, 2018, 43(1/2):108-113.
- [36] UZUN I. Use of spent mushroom compost in sustainable fruit production[J]. *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 2004, 12:157-165.
- [37] GRIMM D, WOSTEN H A B. Mushroom cultivation in the circular economy[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(18):7795-7803.
- [38] 郑文彪,刘金龙,泮樟胜,等.香菇菌糠作基肥对板栗土壤理化性质及产量的影响[J].*浙江林业科技*,2015,35(3):79-82.
- [39] 陶冶东,何艳慧,邓子禾,等.香菇菌渣高效纤维素降解菌的筛选及产酶优化[J].*生物技术通报*,2021,37(11):158-165.
- [40] 关艳丽,赵新海,张庆华,等.香菇菌糠发酵过程微生物及营养成分变化研究[J].*食用菌*,2019,41(1):64-65.
- [41] 郭莹,钟鄂蓉,宋兆华,等.香菇菌糠发酵前后营养成分含量的对比分析[J].*黑龙江农业科学*,2015(8):179.
- [42] 王楠,李玉玺,姚凯,等.添加平菇或香菇菌糠对木耳菌糠-鸡粪堆料腐殖质组成的影响[J].*河南农业科学*,2017,46(9):56-61.
- [43] 张泽,谢放,李建宏.香菇菌渣对土壤微生态的影响[J].*环境污染与防治*,2013,35(4):75-80.
- [44] 谷祖敏,周飞,毕卉,等.香菇菌糠对绿色木霉防治黄瓜枯萎病的增效作用[J].*植物保护*,2015,41(6):212-216.
- [45] MEDINA E, PAREDES C, PEREZ-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.
- [46] 陈建州,何建玲,易敏,等.香菇菌糠作栽培基质对番茄幼苗生长的影响[J].*北方园艺*,2011(7):15-19.
- [47] 武亚敬,毕君,高红真.香菇菌糠不同粒径含量对油松生长的影响[J].*森林与环境学报*,2016,36(2):167-172.
- [48] 刘南祥,姚宏,诸葛华,等.香菇废菌棒作一品红栽培基质试验[J].*浙江农业科学*,2009(4):691-692.
- [49] 王谦,胡卫静,刘敏,等.利用香菇菌糠栽培罗勒初探[J].*北方园艺*,2016(16):142-144.
- [50] JI J H, DAI J Z, ZHANG W W, et al. Factors affecting the uptake of lead and copper in five wild mushroom species from Chengdu, China[J]. *Food Additives and Contaminants*, 2009, 26(9):1249-1255.
- [51] ZHANG D, HEA H J, LI W, et al. Biosorption of cadmium (II) and lead (II) from aqueous solutions by fruiting body waste of fungus *Flammulina velutipes*[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2010, 20(1/3):160-167.
- [52] XU H, CHEN Y X, HUANG H Y, et al. Removal of lead (II) and cadmium (II) from aqueous solutions using spent *Agaricus bisporus*[J]. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2013, 91(3):421-431.
- [53] ZHANG D, ZENG X D, MA P, et al. The sorption of Cd (II) from aqueous solutions by fixed *Lentinus edodes* mushroom flesh particles[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2012, 46(1/3):21-31.
- [54] 彭宏,张帅,武李茜,等.木屑型香菇菌渣活性炭及其制备方法[J].*安全与环境学报*,2014,14(6):210-214.
- [55] 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.
- [56] 蒋元继,唐亚,刘本洪,等.香菇菌渣吸附水溶液中重金属铅的研究[J].*西南农业学报*,2010,23(5):1615-1619.
- [57] 赖春芬,杨羽茜,张海洋,等.5种食用菌废菌糠的营养成分及胞外酶活性[J].*贵州农业科学*,2017,45(12):82-85.
- [58] 张坚,陈铁桥,肖兵南.香菇木屑菌糠中5种饲用添加酶活性的测定与分析[J].*中国饲料*,2007(2):32-34.
- [59] 范东,刘世操,祝爱侠,等.香菇菌糠纤维素酶的提取工艺优化[J].*江西农业学报*,2016,28(5):83-87.
- [60] 任珍珍.香菇菌糠多糖的制备及其抗氧化、抗炎和肺保护作用的研究[D].山东泰安:山东农业大学,2018.