

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2025.0485

# 香菇菌糠的资源化开发与利用研究进展

源朝政<sup>1</sup>, 马 瑜<sup>1</sup>, 杨玉华<sup>1</sup>, 李梦春<sup>1</sup>, 郑明燕<sup>1</sup>, 高小峰<sup>1</sup>, 武福华<sup>2</sup>

(1. 南阳市科学院 河南南阳 473000; 2. 南阳师范学院 河南南阳 473000)

**摘要:** 香菇是我国生产量和消费量最大的食用菌, 是国家实施的优势特色产业和乡村振兴产业。近年来, 随着香菇产业的快速发展, 随之而来的菌糠废弃物越来越多, 以焚烧为主的传统处理方式, 不仅造成了资源浪费, 也给生态环境和产业可持续发展带来了负担和压力。因此, 加强菌糠的资源化开发和利用对香菇产业的健康发展具有重要现实意义。本文在分析香菇菌糠理化性质与成分特征的基础上, 综述了国内外对香菇菌糠在食用菌二次栽培基质、园艺栽培基质、动物饲料、有机肥料、土壤改良、新能源材料、生物吸附剂等六个方面的资源化利用进展, 并对我国菌糠生物质资源利用过程中存在的问题进行了探讨, 展望了未来的研究方向, 以期对香菇菌糠的高效利用提供参考依据。

**关键词:** 香菇; 菌糠; 资源化利用; 生物质材料

中图分类号: S646.1<sup>2</sup> 文献标志码: A 文章编号: 1673-2871(2026)03-001-08

## Research progress on resource development and utilization of shiitake mushroom bran

YUAN Chaozheng<sup>1</sup>, MA Yu<sup>1</sup>, YANG Yuhua<sup>1</sup>, LI Mengchun<sup>1</sup>, ZHENG Mingyan<sup>1</sup>, GAO Xiaofeng<sup>1</sup>, WU Fuhua<sup>2</sup>

(1. Nanyang Academy of Sciences, Nanyang 473000, Henan, China; 2. Nanyang Normal University, Nanyang 473000, Henan, China)

**Abstract:** Shiitake mushroom is the edible mushroom with the largest production and consumption volume in China, and it is a dominant and characteristic industry implemented by the country for rural revitalization. In recent years, with the rapid development of the shiitake mushroom industry, more and more mushroom residue waste has been generated. The traditional treatment method, mainly incineration, not only results in resource waste but also poses a burden and pressure on the ecological environment and sustainable development of the industry. Therefore, strengthening the resource development and utilization of shiitake mushroom residue is of great practical significance for the healthy development of the mushroom industry. Based on the analysis of the physicochemical properties and component characteristics of shiitake mushroom residue, this paper reviews the progress of resource utilization of mushroom residue at home and abroad in six aspects: Secondary cultivation medium for edible mushrooms, horticultural cultivation medium, animal feed, organic fertilizer and soil amendment, new energy materials, and biosorbents. It also discusses and prospects the problems existing in the utilization process of mushroom residue biomass resources in China, with a view to providing reference and basis for the efficient utilization of shiitake mushroom residue.

**Key words:** Shiitake mushroom; Spent mushroom substrate; Resource utilization; Biomass material

香菇又名花菇、冬菇等, 隶属担子菌纲伞菌目口蘑科香菇属(*Lentinus*), 是世界上生产与消费量仅次于双孢蘑菇的第二大类食用菌菌种, 具有较高的药食价值。我国作为世界上第一大香菇生产国和消费国, 其产量占世界的 70% 以上。据中国食用菌协会统计, 2023 年我国 30 个省、自治区、直辖市(不

含港、澳、台)香菇总产量达到 1 353.4 万 t, 产值为 1 193.84 亿元, 产量和总产值均约占食用菌总产量和总产值的 30%<sup>[1]</sup>。

“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

收稿日期: 2025-07-07; 修回日期: 2025-12-15

基金项目: 中央引导地方专项(Z20221343035); 河南优势特色农业产业科技支撑行动计划(20240801003)

作者简介: 源朝政, 男, 助理研究员, 主要从事食用菌栽培及育种研究。E-mail: 541930481@qq.com

通信作者: 马 瑜, 男, 副研究员, 主要从事食用菌栽培及育种研究。E-mail: 1873773089@qq.com

件),将食用菌列入优势特色产业之一<sup>[2]</sup>,在农业增效、农民增收、产业扶贫和乡村振兴等方面发挥着重要作用。香菇菌糠作为香菇采收后的废弃培养料,已逐渐成为主要的生产垃圾之一。除少数重新被利用之外,大多数被丢弃或就地焚烧,不仅造成了资源浪费和巨大生态危机<sup>[3]</sup>,而且给后期食用菌的栽培带来了较大隐患,对其进行资源化开发及利用显得尤为必要。研究表明,香菇菌糠富含纤维素、半纤维素和木质素等粗纤维<sup>[4-6]</sup>,还包括粗脂肪、粗蛋白等营养物质和矿质元素<sup>[7-9]</sup>,具有二次开发利用的巨大潜力,但当前菌糠利用途径单一,主要用于堆肥或栽培基质,无法有效解决资源浪费和环境污染问题<sup>[10]</sup>。

近年来,随着循环经济理念的深入发展和环保要求的日益提高,香菇菌糠的资源化利用受到了广泛关注。国内外学者在香菇菌糠的化学成分分析、处理技术开发、应用领域拓展等方面开展了大量研究工作。特别是在2020—2025年期间,随着生物技术、材料科学、环境工程等领域的快速发展,香菇菌糠资源化利用技术取得了一系列重要突破。因此,科学合理利用香菇菌糠资源,变废为宝,对延长香菇产业链、实现产业绿色发展和保护地区生态环境等具有重要意义。本文旨在系统综述香菇菌糠资源化利用的最新研究进展,重点分析其在资源化利用领域的技术现状、创新成果和发展趋势,同时对产业化应用中存在的问题和今后重点开展的工作进行探讨,以期为推动香菇菌糠的高效资源化利用提供理论依据和技术参考。

## 1 香菇菌糠的理化性质与成分特征

### 1.1 基本理化性质

香菇是典型的木腐菌,生产中多以木屑为栽培料,菌糠多呈疏松颗粒状或纤维状,颜色因栽培基质原料及菌丝分解程度而异,常见为浅褐色至深褐色,质地较栽培前(新鲜基质)更柔软,且保留一定菌丝体交织形成的网状结构,不易板结,这是区别于普通农业废弃物的典型特征。香菇菌糠的物理性质主要包括容重、孔隙度、持水能力等参数,这些性质与原始栽培基质的种类、香菇品种、栽培条件等因素密切相关。在化学组成方面,香菇菌糠含有丰富的有机质、氮、磷、钾等大量元素以及多种微量元素,同时还保留了香菇菌丝体分泌的多种生物活性物质。研究发现,容重 $0.3\sim 0.6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、总孔隙度 $60\%\sim 80\%$ 、持水孔隙占比 $40\%\sim 50\%$ ,这种“轻质、高

孔隙”特性使其兼具保水与透气能力,适合作为土壤改良剂或育苗基质的配料<sup>[11]</sup>。饱和持水量为自身干质量的 $2.5\sim 3.5$ 倍,吸水速率较快,这一特性使其在农业应用中可作为保水材料,减少土壤水分蒸发<sup>[12]</sup>。菌丝体吸收碳源合成蛋白质,降低碳含量,提升氮含量,使菌糠在农业生产上能够直接用作有机肥<sup>[13]</sup>。因此,实际生产中香菇菌糠的理化特性主要决定了其资源化利用的应用方向。

### 1.2 营养成分分析

对香菇菌糠营养成分的分析结果显示(表1~2),香菇菌糠含有丰富的蛋白质、氨基酸、脂肪和碳水化合物等营养物质<sup>[14-18]</sup>。具体而言,菌糠中粗蛋白含量(w,后同)一般在 $4\%\sim 10\%$ 之间,氨基酸种类较为全面;矿物质含量丰富,特别是钙、磷等微量元素含量较高。香菇菌糠的营养物质会因栽培料的不同而有一定的差异。以木屑为主要栽培基质的菌糠,其纤维素和木质素含量相对较高;而以农作物秸秆为主要基质的菌糠,则含有更高的可溶性糖和半纤维素含量。王洪奇等<sup>[19]</sup>通过对玉米秸秆在香菇培养中不同比例的试验,发现可溶性碳水化合物和半纤维素含量高于传统栽培基质。冯志勇等<sup>[20]</sup>在试验中检测出以木屑为主栽料的木质素降解率最低。这可能主要是栽培料本身的成分结构以及香菇对不同成分的分解利用能力差异导致的,而这种成分差异也为菌糠的定向利用提供了依据。

表1 香菇菌糠常规营养成分含量

Table 1 The conventional nutrient content of spent shiitake mushroom substrate %

营养成分 Nutrient component	参考文献 Reference				
	[14]	[15]	[16]	[17]	[18]
w(粗蛋白) Crude protein content	8.90	3.92	7.58	8.96	7.85
w(粗脂肪) Crude fat content	1.22	0.98	0.94	1.01	-
w(粗灰分) Crude ash content	8.06	1.83	1.81	10.60	-
w(纤维素) Cellulose content	28.24	24.47	32.62	-	58.84
w(半纤维素) Hemicellulose content	15.65	16.69	17.74	2.76	9.21
w(木质素) Lignin content	7.23	5.83	11.54	-	-
w(磷) Phosphorus content	0.38	2.32	-	1.98	1.25
w(钙) Calcium content	2.27	1.14	-	2.13	2.88

注:-表示未提供数据。

Note: - represents the data was not provided.

表2 香菇菌糠氨基酸含量  
Table 2 The amino acid content of spent shiitake mushroom substrate (mg·kg<sup>-1</sup>)

参考文献 Reference	w(天冬氨酸) Aspartic acid content	w(苏氨酸) Threonine content	w(丝氨酸) Serine content	w(谷氨酸) Glutamic acid content	w(脯氨酸) Proline content	w(甘氨酸) Glycine content	w(丙氨酸) Alanine content	w(半胱氨酸) Cysteine content
[15]	125.6	339.5	111.6	221.2	84.4	80.3	225.6	451.6
[18]	158.5	173.0	162.2	285.3	48.9	80.3	227.8	40.1
参考文献 Reference	w(精氨酸) Arginine content	w(缬氨酸) Valine content	w(异亮氨酸) Isoleucine content	w(亮氨酸) Leucine content	w(酪氨酸) Tyrosine content	w(苯丙氨酸) Phenylalanine content	w(赖氨酸) Lysine content	w(组氨酸) Histidine content
[15]	339.7	148.9	25.3	32.5	123.3	225.6	103.5	27.5
[18]	81.6	214.3	95.8	95.1	52.3	115.2	87.2	50.9

### 1.3 生物活性物质

除了常规营养成分外,香菇菌糠还含有多种生物活性物质,包括多糖、萜类化合物、多酚类物质、生物碱等。这些活性物质具有抗氧化、抗肿瘤、降血脂等多种生理功能。特别是香菇多糖,作为香菇的主要活性成分之一,在菌糠中含量较高,具有重要的开发价值<sup>[21]</sup>。研究中发现,香菇菌糠含有香菇菌丝分泌的胞外酶,其中淀粉酶含量最高,达到734.9 μg·g<sup>-1</sup><sup>[22]</sup>,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。这些酶类物质不仅具有催化活性,还具有一定的生物活性,能够为菌糠的高值化利用提供新途径。

## 2 香菇菌糠资源化利用

### 2.1 香菇菌糠在食用菌二次栽培基质中的应用

香菇的生物学效率只有50%~80%,其栽培结束后菌糠中仍有35%左右的木质纤维素未被利用,除此之外所含的大量营养物质,使其具有用作二次栽培食用菌部分替代原料的巨大潜力,并且已在多种食用菌栽培中应用成功<sup>[23-25]</sup>。研究发现,利用香菇菌糠栽培金针菇和杏鲍菇,菌丝生长速率、长势、产量、生物转化率均受香菇菌糠添加量的影响。栽培金针菇时,香菇菌糠添加量为30%,产量最高,生物转化率达到100.3%,比不添加菌糠的全阔叶木屑高141.7%,具有显著的增产效果<sup>[23]</sup>。利用香菇菌糠和玉米芯为主料栽培杏鲍菇时,香菇菌糠添加量为30%~40%,生物转化率在80%以上<sup>[24]</sup>。以上结果表明,适量的香菇菌糠替代主料不仅不会影响金针菇、杏鲍菇的生长,反而能够提高其生物转化率,促进生长发育。香菇菌糠搭配麦粒营养袋栽培羊肚菌,能够提高羊肚菌原基形成的数量,较纯腐殖土基质增产20%~30%,产量得到显著提高,这主要是因为菌糠的疏松结构促进了羊肚菌菌根形成,且残

留的香菇多糖对原基分化产生了刺激<sup>[25]</sup>。在利用香菇菌渣替代30%木屑进行反季节工厂化栽培滑子菇的研究中,取得了发菌时间缩短、产量和生物转化率稳定、木屑用量减少、生产成本降低的良好效果<sup>[26]</sup>。此外,香菇菌糠二次栽培大球盖菇、猴头菇等也有成功案例。马琳静<sup>[27]</sup>通过配方筛选试验发现,30%香菇菌渣和70%谷壳栽培大球盖菇,能很好地促进菌丝生长发育和品质提升。李波等<sup>[28]</sup>研究发现,利用香菇菌糠栽培猴头菇较棉籽壳、苹果木屑有明显优势,且具有应用前景。以上结果表明,香菇菌糠用作二次栽培食用菌代料已在生产中得到应用,且取得良好效果,说明香菇菌渣替代传统栽培料是可行的,但在使用过程中,要区分物理性质方面的差异,控制好用量。这一技术的突破对于缓解木屑资源短缺、降低生产成本具有重要意义。

此外,香菇菌糠营养物质虽然丰富,但其并不适合所有食用菌菌丝生长,菌糠中可能存在一些次生代谢产物,对食用菌的生长产生一定的化感作用,使其对食用菌菌丝生长表现一定的促进或抑制作用。赵玉卉等<sup>[29]</sup>研究了香菇菌糠水提取液对8种食用菌菌丝生长的影响,发现香菇菌糠水提取液对紫芝、木耳、云芝等菌丝生长均有不同程度的促进作用;对茶薪菇、平菇、香菇等表现为随香菇菌糠水提取液添加浓度增加呈先促进后抑制的作用;而对羊肚菌有显著抑制作用。此结果与西峡县食用菌科研中心提出的香菇菌糠(固体基质)促进羊肚菌生长发育<sup>[25]</sup>的观点存在差异,主要原因在于固体和液体二者的有效成分形态、释放效率、作用机制及微环境调控能力不同,固体菌糠作为基质添加时,除了提供营养,还承担着物理结构支撑和微环境调控,液体提取液仅能提供“可溶性营养”,缺乏物理和微生物层面的调控能力,导致两种形态的营养构成差异显著。

## 2.2 香菇菌糠在园艺栽培基质中的应用

香菇菌糠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,自身通气性和保水性良好,可缓解传统基质(如土壤)的板结问题,因此,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,这样在降低生产成本的同时,还为园艺植物提供了良好的生长环境,促进其生长发育,减少对泥炭土等传统基质的依赖,实现资源的循环利用。研究表明,香菇菌糠可作为对盐分敏感的辣椒和西葫芦育苗基质使用<sup>[30-31]</sup>。在栽培番茄幼苗的基质中添加香菇菌糠,能够有效提高番茄幼苗的抗旱性和幼苗品质特性<sup>[32]</sup>,耐盐性也得到显著提高。Medina等<sup>[33]</sup>对种植在泥炭和菌糠2种基质上的3种不同耐盐能力蔬菜的效果进行了比较,发现以菌糠为主的基质效果最佳。因此,香菇菌糠在蔬菜生产中的成功应用,使其在该领域具有良好的发展前景。也有研究认为,香菇菌糠的利用不会仅局限于蔬菜生产,在园林花卉树木中的应用也有不少成功案例。李杏生等<sup>[34]</sup>在利用不同配比香菇菌糠栽培蟹爪兰时发现,香菇菌糠的添加利于插穗的发根和后期幼苗的快速生长发育,可在生产中应用。刘南祥等<sup>[35]</sup>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。此外,还有报道称,香菇菌糠还能提高果实坐果率及果实品质。菌糠、沼渣作为有机肥栽培出的脐橙,单株产量和果实品质均得到提高,果实的糖酸比也有所改善<sup>[36]</sup>。采用不同粒径含量的香菇菌糠栽培油松的试验结果表明,香菇菌糠单独使用同样可以达到提高苗木质量的要求,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<sup>[37]</sup>。鲁宇菡等<sup>[38]</sup>研究认为,菌糠制备的生化黄腐酸对苹果、梨果实品质和产量有促进作用。总的来说,不论是菌糠粒径不同或复合基质混合比例不同,菌糠对育苗、栽培都能起到很好的效果,能够替代草炭,解决草炭资源紧张的问题,同时也使菌糠变废为宝,因此,利用菌糠配制园艺作物栽培基质是资源化利用的一项重要途径。

## 2.3 香菇菌糠在动物饲料中的应用

**2.3.1 动物喂养效果与安全性评价** 香菇菌糠作为动物饲料的开发利用是其资源化的重要途径之一。菌糠中有较高含量的粗蛋白、多种微量元素和维生素,可作为优质的饲料原料,虽然这些营养物质在用作动物饲料中所起的作用存在差异,但对动

物生长发育均是有利的。因此,可以充分利用菌糠资源,将其接种饲料发酵剂发酵制成动物饲料,这样既能减少菌糠对环境的污染,又能达到变废为宝的效果,同时不会影响禽畜的生产性,应用前景广阔。在喂养肉兔和北京鸭中发现,饲料中添加适当比例的菌糠不仅对其生长性能没有显著影响,而且可明显促进动物生长,降低生产成本,取得生态、经济双效益<sup>[39-40]</sup>。在饲喂肉牛的饲料中添加部分香菇菌糠,日增质量提高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的饲料资源<sup>[41]</sup>。然而,菌糠的营养价值虽比原栽培料有所提高,但仍然有较高含量的纤维素,因此将菌糠进行合理的饲料化处理,可以进一步提升菌糠的饲用品质。

菌糠作为饲料在生产应用过程中,人们会对其安全性和有无残毒问题存在疑虑,然而研究发现,经过正常处理的香菇菌糠不会引起动物的中毒反应。有人通过对香菇菌糠饲料进行全面分析,结果显示,虽然混合日粮饲养的幼虫中需氧菌数、总霉菌数以及砷和铅含量有所增加,但均低于安全限值<sup>[42]</sup>。刘萌萌等<sup>[43]</sup>研究表明,食用菌栽培料中的杀菌剂,对高等动物低毒,残效期短,化学性质稳定,且遇碱性物质易分解失效,食用菌栽培料经历1个栽培周期后,杀菌剂已完全分解失效。这些结果表明,香菇菌糠作为动物饲料具有良好的安全性。但需要注意的是,使用香菇菌糠作为饲料时,应确保其不含霉变或污染物质,并且要根据动物的种类和生长阶段调整合适的添加比例。

**2.3.2 发酵工艺技术创新与优化** 由于香菇菌糠中纤维素、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主要限制因素。因此,研究人员开发了多种处理技术来提高菌糠的饲用价值。在化学处理方面,适当的碱处理对促进香菇菌糠DM(干物质)、NDF(中性洗涤纤维)、HC(半纤维素)及ADL(酸性洗涤木质素)的动态降解有很好的效果,这可能是由于菌糠经碱化,破坏了细胞壁结构中纤维素的晶体排列结构,降解了纤维素、半纤维素与木质素间的酯键或醚键,使菌糠所含营养物质细胞壁膨大、松软,更易与微生物和底物接触,从而降低纤维素成分含量,提高消化率<sup>[44]</sup>。在微生物发酵处理方面,香菇菌糠经过微生物发酵后,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<sup>[45]</sup>。

#### 2.4 香菇菌糠在有机肥料和土壤改良中的应用

2.4.1 堆肥技术的研究与应用 菌糠富含有机成分,很适合与其他有机物混合后堆肥,堆肥发酵有利于提高有机成分利用效率,减少病虫害发生。通过堆肥处理,可以进一步提高菌糠的肥效和安全性<sup>[46]</sup>。研究表明,香菇菌糠中加入适量尿素可使发酵堆体快速升温,缩短发酵时间。经 40 d 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<sup>[47]</sup>。

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。在堆肥工艺优化方面,研究人员以菌糠和枯草芽孢杆菌为试验材料,进行 60 d 的堆肥发酵,制备平菇菌糠生物有机肥。发酵后的菌糠 C/N 为 15~20,有机质含量为 46.31%,水分含量 22.37%,酸碱度为 8.2,总养分含量为 4.70%,发芽指数为 81%,均符合《有机肥料》(NY/T 525—2021)的相关要求<sup>[48]</sup>。王美琴<sup>[49]</sup>研究发现,施用食用菌渣能使水稻增产 6.2%~8.3%,经济效益明显。用菌糠进行堆肥不仅可以处理菌糠,也可以处理污泥等有机垃圾,朱晓琴等<sup>[50]</sup>将菌糠和污水、猪粪混合堆肥,能在较短时间内达到减量化、无害化,该堆肥能够提高种子发芽率和发芽指数,说明添加菌糠堆肥效果较好,有利于作物种子发芽及生长。

2.4.2 菌糠用作有机肥对作物生长和土壤改良的影响 香菇菌糠不仅含有大量的有机质、氮、磷、钾等营养物质,同时还含有丰富的纤维素、木质素、维生素、抗生素和其他活性物质,对改良土壤、提高土壤肥力具有重要作用,是一种良好的有机肥料,将其用作有机肥具有显著的生态效益和经济价值。吉清妹等<sup>[51]</sup>研究表明,在化肥氮量削减 20%~40%的状况下,适量施用菌糠有利于促进蔬菜生长。蒋琼凤等<sup>[52]</sup>研究发现,菌糠作为有机肥除了具有氮、磷、钾之外,还能供应氨基酸、有机质等养分,促进植株生长发育。浙江庆元作为“中国香菇之乡”,当地将菌糠制成有机肥用于高山蔬菜种植,每 667 m<sup>2</sup> 土地减少化肥投入 80 元,蔬菜品质达到绿色食品标准,667 m<sup>2</sup> 土地平均增收 1200 元<sup>[53]</sup>。河南西峡在猕猴桃园区推广菌糠土壤改良技术,连续 2 年施用后,土壤有机质含量从 1.2%提升至 2.1%,果实品质和

产量均得到有效提高<sup>[54]</sup>。施用香菇菌糠作为板栗基肥,土壤有机质含量显著提高,产量与施用复合肥效果无显著差异<sup>[55]</sup>。以上结果说明菌糠作为有机肥能够很好地促进作物生长发育,在农作物提质增效方面起重要作用,应用前景广阔。

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,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<sup>[56]</sup>。因此,通过合理利用香菇菌糠,不仅能实现农业废弃物的资源化,还能提升土壤质量和作物效益,是生态农业和可持续发展的重要路径。

2.4.3 土壤生物修复功能研究 香菇菌糠在土壤生物修复方面也展现出独特的功能。研究发现,香菇菌糠用于土壤修复时,嗜热细菌、嗜温细菌和真菌数量及二氧化碳排放量都显著高于未添加菌糠的对照,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<sup>[57]</sup>。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,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<sup>[58]</sup>。这些研究结果表明,香菇菌糠能够有效促进土壤中微生物数量的增长,优化土壤中微生物区系结构,具有一定的抑病能力。

#### 2.5 香菇菌糠在新能源材料中的应用

香菇菌糠在新能源材料方面的研究取得了一定进展,主要包括制备机制炭、生物炭以及用于锂硫电池和生物乙醇等方面。浙江省林业科学研究院利用木腐菌废菌糠生物质资源,经特殊的预处理、机械挤压、高温干馏热解制成密度大、燃烧热值高的环保型优质机制炭,首次建立了废菌棒生产机制炭的技术体系。该研究不仅为机制炭生产开辟了新的原料来源途径,也为食用菌废弃物资源的再利用提供了新方法<sup>[59]</sup>。Chikako 等<sup>[60]</sup>使用酿酒酵母 AM12 对香菇菌糠进行同步糖化,在发酵过程中会有蒸汽产生,然后用水进行萃取制作成生物乙醇,这是一种高效的生物转化乙醇的方法。以香菇菌糠等废弃菌糠为原料,通过粉碎机粉碎并过 60 目筛,在管式炉中 700 °C、N<sub>2</sub> 条件下热解 120 min,冷却后研磨得到生物炭。试验表明,香菇菌糠生物炭

对重金属镍具有一定的吸附效果,其最大平衡吸附量为  $74.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,去除率为  $60.02\%$ <sup>[61]</sup>。以不同出菇次数的香菇菌糠为原材料,高温碳化制备系列菌糠基多孔碳,并应用于锂硫电池正极中作为碳骨架材料<sup>[62]</sup>。出菇 1 次的菌糠基多孔碳为蜂窝状网络结构,具有完整导电网络,载硫后相对于出菇 0 次、3 次的菌糠基多孔碳,表现出最高的可逆比容量 ( $916.81 \text{ mAh} \cdot \text{g}^{-1}$ )和较好的动力学性能。

以香菇菌渣为原料,只需在加入水的情况下进行高压灭菌,然后接入酵母进行发酵就可以产生乙醇<sup>[63]</sup>。彭涛等<sup>[64]</sup>研发出一种以菌糠为原料制备生物乙醇的方法,该方法简单,成本更低,不仅解决了食用菌产业菌糠废弃物的环境污染问题,而且还为乙醇的规模化生产提供新的廉价材料来源,有效促进新能源生物乙醇产业的发展。另外,香菇菌糠作为生产沼气的原材料,不仅使废弃物进行资源化利用,而且有助于缓解能源危机,保护生态环境。恒温下发酵香菇菌糠在产气的过程中,添加适量尿素可显著提高产气量<sup>[65]</sup>。

## 2.6 香菇菌糠在生物吸附剂中的应用

香菇菌糠生物吸附作用的研究主要集中在对重金属离子和有机污染物的吸附上,其具有吸附效果好、成本低等优势,在环境污染治理中具有广阔的应用前景。

重金属离子是我国环境优先污染物之一,对人体及其他生物具有强烈的“三致”效应,这些水如果不经过处理就排放,将会对生态造成严重危害。研究发现,在适当的条件下,以香菇菌糠为原料,对混合重金属溶液中的  $\text{Cr}^{3+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  有较强的去除能力<sup>[66]</sup>。孙玉寒等<sup>[67]</sup>发明了香菇菌糠吸附废水中 Cr 的技术,达到了“以废治废”的目的。以香菇、猴头菇和平菇 3 种菌糠为原料制备成的生物炭,能够对溶液中铜、镉进行吸附<sup>[68]</sup>。以上研究表明,香菇菌糠对溶液中的重金属离子有着很好的吸附效果,这主要因为菌糠表面含有丰富的真菌菌丝残体,存在大量的羟基、羰基、羧基、酰胺基和磷酸基等结构,还有丰富的金属硫蛋白等物质,这些官能团能够与重金属离子形成化学键,从而实现吸附作用。

## 3 我国菌糠生物质资源问题分析

我国每年的菌糠规模产量巨大,但处理方式过于单一,引起了严重的资源浪费和生态问题。因此,拓展菌糠资源化开发与利用已成为当务之急。随着对菌糠资源化技术的研究,菌糠利用技术不断

进步,利用率得到显著提升,但从长远考虑还依然面临着如下问题。

(1)品质不稳定与预处理成本高,制约后续转化效率。香菇菌糠的成分受培养基配方、出菇次数、栽培工艺等因素的影响,导致同一资源化技术在不同批次菌糠上的效果有所不同,难以实现工业化稳定生产。这主要是由菌糠成分和理化性质的差别决定的。同时,香菇菌糠无论是饲料化(需去除木质素、降低粗纤维)、能源化(制乙醇需打破纤维结构)还是环保化(制吸附材料需活化),均需预处理环节,其间可能会出现能耗高、投入大、二次污染等问题,且以现有技术水平依然存在短板,难以适配产业规模化需求。

(2)附加值转化技术不成熟,产品竞争力弱。当前香菇菌糠的资源化仍集中在“低技术门槛、低附加值”领域,其中约 60%的菌糠被直接用作粗饲料(蛋白含量仅 12%~15%,远低于豆粕的 40%)或堆肥(养分释放慢,需 3~6 个月腐熟),产品市场溢价低<sup>[69]</sup>;高附加值方向(如制备超级电容器碳材料、高纯度低聚糖)仍处于实验室阶段,关键技术瓶颈尚未突破,存在“实验室效果好、放大生产失效”的问题。

(3)产业链短、成本高,市场接受度低。香菇栽培以散户为主,菌糠分散在田间地头,占终端产品成本的 20%~30%;企业投资回报周期长,缺乏积极性,目前尚无针对“菌糠资源化产品”的国家或行业标准,导致下游企业因担心质量不稳定而不敢大规模采购,市场接受度不足 30%<sup>[69]</sup>。

## 4 展望

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,建立标准化体系,降低预处理成本。由行业协会牵头,明确培养基配方、出菇次数、储存条件,从源头控制成分波动;鼓励实施“龙头企业+散户”模式,由企业统一提供培养基、回收菌糠,实现菌糠集中化、标准化收集;推广“物理-生物协同预处理”,利用菌糠自身残留营养(如多糖、氨基酸),无需额外添加碳氮源,直接用于微生物预处理,进一步降低成本。第二,突破高值化瓶颈,推动产学研转化。依托循环经济模式设计与政策机制创新,构建“高值化利用为主、多元化利用为辅”的产业体系;开发“菌糠蛋白提取-粗纤维改性”一体化技术,通过超声辅助酶解,将菌糠蛋白

制成蛋白粉,剩余纤维经生物改性后作为优质粗饲料,进一步提升产品附加值。第三,加大香菇菌糠资源化利用力度,拓展新途径。深入研究香菇菌糠的利用机制,增加菌糠栽培作物的种类,推动其在园艺领域的资源化利用,同时可从传统的农业回填、堆肥等方式,逐步向多元化、高附加值方向拓展。第四,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,研发自动化程度高的菌糠预处理设备,推广车载发酵装置等移动式设备,设计和建造高效的发酵设施,完善运输和储存设施;根据菌糠的木质素含量、有机质含量、营养成分含量等指标,建立菌糠质量分级标准。第五,完善菌糠产业链。以“减量化、资源化、产业化”为核心,通过技术创新提升产品附加值,以政策和市场双轮驱动打通各环节,最终形成“经济收益+环保效益”双赢的可持续发展模式,构建从废弃物到高价值产品的全链条生态。

### 参考文献

- [1] 刘宁,张桂芹,王奉强.菌糠的资源化研究与开发利用进展[J].安徽农业科学,2019,47(14):7-11.
- [2] 刘丽娜,魏书信,田广瑞,等.香菇菌糠资源化利用研究进展[J].中国瓜菜,2024,37(4):7-13.
- [3] HAI F I, ALI M A. A study on solid waste management system of Dhaka city corporation: Effect of composting and landfill location[J]. UAP Journal of Civil and Environmental Engineering, 2005, 1(1): 18-26.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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].四川雅安:四川农业大学,2011.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 汪水平,王文娟,田渊.菌糠饲料的开发与利用[J].饲料研究,2003(5):28-30.
- [10] 杨和川,谭一罗,苏文英,等.食用菌菌糠资源化利用研究进展[J].农业工程,2018,8(10):54-58.
- [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] 郝淑丽.菌糠改良土壤田间持水量效果的研究[J].杂粮作物,2010,30(4):306-307.
- [13] 金鑫,李春阳.菌糠资源化利用及其提升土壤环境质量的作用[J].农业与技术,2014,34(10):20.
- [14] 孙召伟,邢力,王宇,等.五种菇类菌糠营养成分的比较研究[J].黑龙江农业科学,2014(9):32-33.
- [15] 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.
- [16] 张红娟,张朝阳,胡煜,等.三种常见食用菌菌糠营养成分分析及其对鸡腿菇菌丝生长的影响[J].陕西农业科学,2014,60(10):11-13.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 王洪奇,陈顺,于广峰,等.玉米秸秆代料栽培香菇试验[J].食用菌,2017,39(2):35-37.
- [20] 冯志勇,汪昭月,潘迎捷,等.废菌糠及其辅料对香菇培养料中木质纤维素的影响[J].食用菌学报,1996(2):9-16.
- [21] 马冰清,张忠,吴迪,等.香菇菌糠高温高压-复合酶降解工艺优化及提取物的生物活性[J].食用菌学报,2021,28(4):27-38.
- [22] 王伟科,陆娜,周祖法,等.不同基质中香菇菌丝生长期胞外酶活性变化的研究[J].安徽农业科学,2014,42(14):4176-4178.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 西峡县食用菌科研中心.利用香菇菌渣栽培羊肚菌的培养基料及其制备方法:CN 201510441113.X[P].2015-07-25.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 李波,段超,薛变丽,等.香菇菌糠与苹果枝木屑栽培猴头菇比较试验[J].食用菌,2017,39(1):33-35.
- [29] 赵玉卉,路等学,秦鹏,等.香菇菌糠水提液对不同食用菌的化感作用[J].北方园艺,2021(13):128-134.
- [30] 徐明辉,梁明勤.菇渣在辣椒育苗上的应用效果试验[J].北方园艺,2010(10):62-64.
- [31] 胡长军,郑剑超.基于菇渣的基质配比对西葫芦生长特性的影响[J].新疆农垦科技,2018,41(10):16-17.
- [32] 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.
- [33] MEDINA E, PAREDES C, REZMURCIA 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.
- [34] 李杏生,徐碧玉.蟹爪兰在不同基质中的栽培试验[J].浙江农业科学,2002(4):176-178.
- [35] 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.
- [36] 林斌.菌糠、沼渣有机肥对脐橙产量和品质的影响[J].福建农业学报,2006,21(3):293-295.
- [37] 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.
- [38] 鲁宇茵,许广波,梁运江,等.叶面喷施菌糠黄腐酸对苹果梨果

- 实品质及产量的影响[J]. 延边大学农学学报, 2010, 32(2): 135-137.
- [39] 郝金法, 尉春霞, 景年圣, 等. 金针菇菌糠对肉兔的增重效果[J]. 中国养兔杂志, 2001(5): 9-11.
- [40] WANG Z, CERATE S, COTO CETA. Effect of rapid and multiple changes in level of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets on performance and carcass characteristics[J]. International Journal of Poultry Science, 2007, 6(10): 725-731.
- [41] 蒋明琴, 李进杰, 冯巧婷. 香菇菌糠替代部分精料育肥肉牛试验[J]. 畜牧科学, 2010(1): 82.
- [42] 白全亮. 菌糠的化学营养价值及其在饲料中的应用[J]. 科技资讯, 2016, 14(29): 62-63.
- [43] 刘萌萌, 刘洋, 侯志广, 等. 平菇和榆黄蘑及培养料中的三唑酮的残留动态研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(10): 148-151.
- [44] 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[C]//安徽: 中国农学会秸秆资源综合利用分会成立大会暨高峰论坛论文集, 2017.
- [45] 李双琳, 魏玉莲, 袁海生. 香菇菌糠高效降解菌株的筛选及其酶活特征[J]. 菌物学报, 2023, 42(11): 2269-2284.
- [46] GRIMM D, WOSTEN H A B. Mushroom cultivation in the circular economy[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(18): 7795-7803.
- [47] 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.
- [48] 中华人民共和国农业部. 有机肥料: NY 525—2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [49] 王美琴. 食用菌渣对水稻的增产效果初探[J]. 中国稻米, 2006(2): 44-45.
- [50] 朱晓琴, 孙涛, 张庆琛, 等. 食用菌菌糠在农业种植中的再利用现状[J]. 北方园艺, 2021(16): 170-175.
- [51] 吉清妹, 吴宇佳, 张冬明, 等. 食用菌菌糠对大棚蔬菜及其土壤质量的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(16): 42-48.
- [52] 蒋琼凤, 卢志宏, 任超迪, 等. 杏鲍菇菌糠发酵生物肥成分分析及其效果评价[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(7): 64-67.
- [53] 于玘琨. 浙江省庆元县: 种植珍稀食用菌 振兴产业[N]. 农民日报, 2022-02-22.
- [54] 河南省农业科学院. 西峡特色产业何以羽化成蝶: 院县共建推动西峡菌果药特色产业高质量发展观察 [EB/OL]. (2023-01-03) [2025-12-13]. <https://www.hnagr.cn/xxgk/kyjz/202301/t20230103232624.html>.
- [55] 郑文彪, 刘金龙, 泮樟胜, 等. 香菇废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.
- [56] 曲远航, 刘天聪, 鹿秀云, 等. 菌糠对棉花黄萎病及棉花根际微生物群落组成的影响[J]. 棉花学报, 2023, 35(4): 274-287.
- [57] RIBAS L C C, MENDONCA M M D, CAMELINI C M, et al. Use of spent mushroom substrates from *Agaricus subrufecens* (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.
- [58] 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.
- [59] 陈洪森. 一种以废弃菌糠为原料制备生物炭的方法: CN202310375323.82024[P]. 2024-10-15.
- [60] CHIKAKO A, AI A, CHIZURU S, et al. Characterization of the steam exploded spent shiitake mushroom medium and its efficient conversion to ethanol[J]. Bioresource Technology, 2011, 102: 10052-10056.
- [61] 陈洪森, 洪慈清, 莫雯婧, 等. 三种菌糠制备的生物炭对重金属镍的吸附探究[J]. 中国农学通报, 2023, 39(32): 40-46.
- [62] 颜鹏. 多孔碳/镍复合材料及高载硫电极的制备与应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [63] 汪金萍, 王伟, 殷东林. 香菇菌渣生产酒精的工艺优化[J]. 食用菌, 2015, 37(6): 67-69.
- [64] 彭涛, 余水静, 程素. 食用菌菌糠综合利用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(9): 78-80.
- [65] 李亚冰, 张丽萍, 史延茂, 等. 利用菌糠厌氧发酵生产沼气初步研究[J]. 江苏农业科学, 2009(1): 306-308.
- [66] 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.
- [67] 孙玉寒, 周飞, 任芸芸, 等. 食用菌菌糠对废水中 Cr(VI) 的吸附能力研究[J]. 食用菌, 2011, 33(1): 61-63.
- [68] 黄菲, 闫梦, 常建宁, 等. 不同菌糠生物炭对水体中 Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 的吸附性能[J]. 环境化学, 2020, 39(4): 1116-1128.
- [69] 张朝辉, 刘阳, 张广, 等. 食用菌菌渣资源化利用现状分析及其研究进展[J]. 河南农业科学, 2025, 54(9): 1-14.