



## 食用菌菌糠综合利用研究进展

张莹<sup>1</sup> 田龙<sup>1</sup> 徐敏慧<sup>1</sup> 王蓓<sup>2</sup> 宋冰<sup>\*1</sup> 李玉<sup>\*1</sup>

1 吉林农业大学食药食用菌教育部工程研究中心 吉林 长春 130118

2 柞水县科学技术局 陕西 商洛 711400

**摘要:** 中国是食用菌生产第一大国, 每年产生约 1 亿多 t 菌糠, 菌糠中含有大量的粗纤维和多糖等物质, 但大部分菌糠都被当作废弃物直接丢弃或焚烧, 造成严重的环境污染和资源浪费, 同时也不符合我国新时期的环保政策, 如何变废为宝, 科学、环保、经济、合理地利用菌糠成为食用菌产业健康发展的重要环节。本文通过对食用菌菌糠综合利用的方式和现状进行阐述, 探讨菌糠利用存在的主要问题, 对未来菌糠利用的方向和发展趋势进行展望, 为食用菌菌糠的高效利用提供参考和理论依据。

**关键词:** 食用菌菌糠, 科学, 环保, 经济, 综合利用

## Research progress in comprehensive utilization of spent mushroom substrates

ZHANG Ying<sup>1</sup> TIAN Long<sup>1</sup> XU Min-Hui<sup>1</sup> WANG Bei<sup>2</sup> SONG Bing<sup>\*1</sup> LI Yu<sup>\*1</sup>

1 Engineering Research Center of Chinese Ministry of Education for Edible and Medicinal Fungi, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118, China

2 Zhashui County Science and Technology Bureau, Shangluo, Shaanxi 711400, China

**Abstract:** China has been the largest producer of edible fungi in the world, and produced more than 100 million tons spent mushroom substrates (SMS) every year. These SMS contains a large number of substances such as crude fiber and polysaccharide, but most of them are directly discarded and burned, which causes serious natural environmental pollution and waste of resources, and also does not comply with the policy of Chinese environmental protection in new period. So how to transform waste into treasure, utilizing the SMS scientifically, environmentally, economically and reasonably has become an important link in the healthy development of edible fungi industry. In this study, the main problems in the utilization of SMS are discussed by expounding the way and actuality of comprehensive utilization of SMS. At last, the future direction and development trend of utilization of SMS are prospected, which

**Foundation items:** National Key Research and Development Program of China (2018YFD1001000, 2017YFD0601002); Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201503137); Project of Education Department of Jilin Province (JJKH20180670KJ); Program of Creation and Utilization of “111” Project (D17014)

**\*Corresponding authors:** E-mail: SONG Bing: song19800123@126.com; LI Yu: yuli@126.com

**Received:** 20-11-2019; **Accepted:** 21-04-2020; **Published online:** 09-05-2020

**基金项目:** 国家重点研发计划(2018YFD1001000, 2017YFD0601002); 公益性行业(农业)科研专项(201503137); 吉林省教育厅项目(JJKH20180670KJ); 111 引智基地项目(D17014)

**\*通信作者:** E-mail: 宋冰: song19800123@126.com; 李玉: yuli@126.com

**收稿日期:** 2019-11-20; **接受日期:** 2020-04-21; **网络首发日期:** 2020-05-09

provides reference and theoretical basis for efficient utilization of SMS.

**Keywords:** Spent mushroom substrates, Science, Environmental protection, Economy, Comprehensive utilization

食用菌产业已经成为我国第五大种植产业<sup>[1]</sup>, 据统计, 2018年我国的食用菌总产量达4 000万t, 总产值达2 741.78亿元, 约占世界总产量的80%左右<sup>[2-3]</sup>。食用菌菌糠(spent mushroom substrates, SMS)是食用菌栽培过程中收获子实体后剩下的废弃栽培基质<sup>[4]</sup>, 研究表明, 菌糠由菌丝体、木屑、棉籽壳、秸秆等组成, 其中含有大量的粗纤维、木质素、多糖等成分, 还含有丰富的蛋白质、氨基酸、碳水化合物、维生素和微量元素<sup>[5-7]</sup>。研究发现, 每生产1 kg的食用菌约产生3.25–5 kg的菌糠, 按照此比例计算, 我国2018年可产生约1.3–2.0亿t

菌糠<sup>[8]</sup>。废弃的菌糠可以作为生物质燃料<sup>[9]</sup>、动物饲料和改良剂<sup>[10]</sup>、作物栽培基质和肥料<sup>[11]</sup>、其他菇类的栽培基质、生产材料<sup>[12-14]</sup>、生产工业和生物化工行业所需的酶<sup>[9]</sup>等被利用, 从而实现经济循环发展<sup>[15]</sup>。然而在实际生产中大量的菌糠并没有被有效利用, 多数直接被丢弃或焚烧, 不但污染环境, 而且浪费资源。因此, 如何科学合理地利用菌糠, 使其变废为宝, 实现食用菌产业3R绿色循环模式[减量化(reduce)、再使用(reuse)和再循环(recycle)]<sup>[4,8,16]</sup>尤为重要(图1)。本文从食用菌菌糠应用于食用菌栽培、作物栽培基质、作物肥料、动

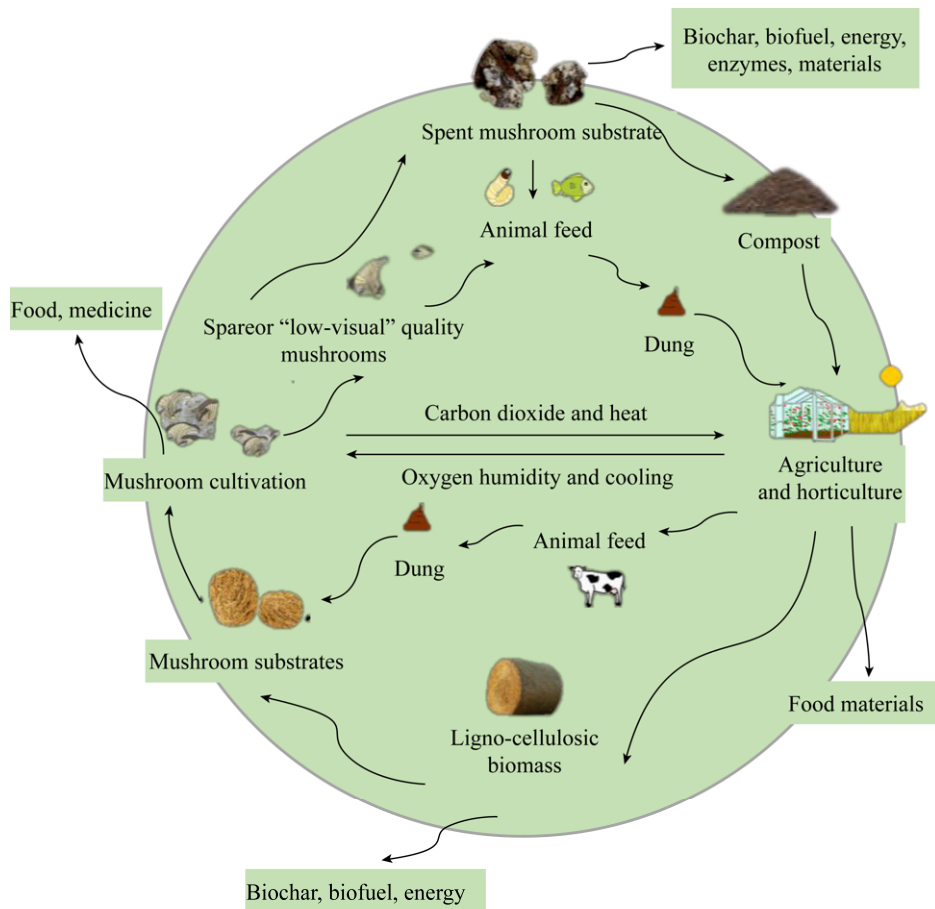


图1 菌糠的循环利用<sup>[15]</sup>

Figure 1 Recycling of SMS<sup>[15]</sup>

物饲料、生物质燃料、吸附剂等几个方面进行阐述,为合理利用食用菌菌糠并提高综合利用效率提供有益参考。

## 1 菌糠栽培食用菌

某些食用菌品种的生物学效率只有 40%–70%,如金针菇(*Flammulina filiformis*, 50%–100%)<sup>[17]</sup>、香菇(*Lentinula edodes*, 50%–80%)<sup>[18]</sup>、杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*, 40%–80%)<sup>[19]</sup>, 而其菌糠中含有大量的纤维素、木质素、半纤维素以及菌丝体等,如香菇菌糠中还含有 85%的半纤维素、44%的纤维素和 77%的木质素没有被利用,这些残存的纤维类物质和一些糖类物质仍可以为某些食用菌的生长提供充足的碳源,利用菌糠进行食用菌栽培的研究有很多,但多数为国内研究,主要集中在利用菌糠栽培我国主要食用菌品种上。

平菇(*Pleurotus ostreatus*)是一种对基质材料、温度等条件适应性较强的菌种<sup>[20]</sup>。曹君等研究表明,以玉米芯、稻壳、金针菇菌糠和杏鲍菇菌糠为主料的配方试验中,在含有 35%金针菇菌糠和含有 25%杏鲍菇菌糠的配方中栽培平菇的效果较好,生物转化率分别达到 131.7%和 120.8%<sup>[21]</sup>,已经在食用菌栽培工厂推广应用。目前,已有研究人员利用木耳菌糠、大豆秸秆以及麻屑栽培平菇,其中将菌糠添加量控制在 40%,秸秆控制在 45%;将菌糠控制在 45%、麻屑控制在 40%时,获得的经济效益与传统的配方相比明显提高了 26%、28%,可将这两种配方在栽培平菇产业中进行大力推广<sup>[22]</sup>。李孝等利用香菇菌糠和棉籽壳为主料,发现当香菇菌糠的添加量在 50%以内,平菇菌丝生长速度、产量均超过原配方<sup>[23]</sup>,但该试验平菇产量增长率较低,以期得到最佳产量还需继续验证。香菇菌糠中的营养成分甚至要超过棉籽壳,但其抗压程度、容重、吸水性等物理性质却难以与棉籽壳等未出过菇的培养料相提并论,在利用菌糠二次栽培食用菌的研究中,菌糠的物理性质是关键因素,要注意区分不同食用菌品种菌糠之间的差异,尤其要探索不同

菌糠的物理性质,不能笼统地以“菌糠”替代。此外,还有利用真姬菇(*Hypsizygus marmoreus*)和白灵菇(*Pleurotus nebrodensis*)的菌糠进行平菇的栽培,也取得了良好的效果<sup>[24-25]</sup>;用工厂化真姬菇菌糠和棉籽壳为主料栽培平菇,菌糠添加量在 0–90%区间均可,但在平菇整个培养和发展过程中必须要加强技术管理,保证达到相应的栽培温度、湿度、酸碱度等,提升栽培效果。同时,平菇菌糠可以再次利用。Economou 等以平菇菌糠为栽培基质分析了基质的配比和碳氮比对栽培平菇、肺形侧耳(*Pleurotus pulmonariu*)、灵芝(*Ganoderma lingzhi*)、香菇等食用菌品种的影响,比较了各个菌株的菌丝生长、粗多糖、产量等性状的变化,发现平菇菌糠可以用于栽培这些食用菌<sup>[26]</sup>。González 等在平菇含秸秆的菌糠中添加 20%的蚯蚓粪或向日葵壳,成功种植了姬松茸(*Agaricus blazei*)<sup>[27]</sup>。

彭学文等研究发现,以平菇菌糠和牛粪质量比为 6:4 时,较适合栽培双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*),当培养料为此配比时,发酵温度上升较快,发菌速度快,菌丝长势最好,现蕾密度最大,产量最高,达到了 11.80 kg/hm<sup>2</sup><sup>[28]</sup>。王家才等利用杏鲍菇菌糠和牛粪为主料的配方试验中,双孢蘑菇产量比秸秆和牛粪的对照增产 9.7%,运用该配方栽培双孢蘑菇效益最高,与对照相比增收 7 元/m<sup>2</sup>,效益提高 33.3%<sup>[29]</sup>,既能让菇农在经济上取得效益,又能有效地解决菌糠处理问题,取得环境效益。此外,利用金针菇、黑木耳(*Auricularia heimuer*)菌糠也可以栽培双孢蘑菇<sup>[30-31]</sup>。

卢勇等将一定比例的杏鲍菇菌糠添加到培养基质中栽培黑木耳,发现黑木耳菌丝生长快、长势良好,但是生物转化率有所降低;当菌糠添加量为 30%时综合性状表现良好,产量较对照只减少了 2.7%,但生产成本降低了近 20%,效益增加 16.5%<sup>[32]</sup>。赵桂云等通过配方筛选试验发现,在添加 40%木屑、45%菌糠的配方中栽培黑木耳和茶树菇(*Agrocybe aegirit*)的效果较好,黑木耳产量较常

规培养料栽培提高了 45.9%，茶树菇提高了 36.6%<sup>[33]</sup>。张娣等研究发现，黑木耳培养料中添加 30% 的灵芝菌糠时，黑木耳的产量和生物学效率均要优于对照<sup>[34]</sup>。由此可见，利用菌糠栽培黑木耳也是可行的。

金针菇是我国主要的工厂化品种，每天都会产生大量的菌糠。如何降低生产成本、提高菌糠利用率成为了影响企业发展的重要因素。李忠等通过比较灵芝菌糠的不同添加比例对金针菇生产的影响，发现采用 20% 灵芝菌糠替代木屑栽培金针菇时其生物学效率最高且经济效益增长最多，整体经济效益提高了 7.15%，成本降低了 8.18%<sup>[35]</sup>，说明采用灵芝菌糠替代部分木屑栽培金针菇可行，可为灵芝菌糠的合理利用提供参考，但其产业化技术仍有待进一步研究。利用银耳菌糠栽培金针菇也取得了良好的效果<sup>[36]</sup>。此外，国内科研人员还开展了多种菌糠栽培食用菌的试验，如利用金针菇菌糠栽培鸡腿菇 (*Coprinus comatus*)、金福菇 (*Tricholoma lobynsis*)、杏鲍菇等<sup>[37-39]</sup>。

## 2 菌糠作为生物质能源

菌糠作为以木质纤维为主的材料，可以直接焚烧产生能量<sup>[40]</sup>。目前，许多食用菌企业将菌糠直接造粒，作为工厂生物质锅炉燃料，通过焚烧为生产提供所需的部分热能<sup>[41]</sup>。但是焚烧产生大量灰烬，既污染环境又浪费资源，随着我国环保政策的严格实施，生物质锅炉也逐步被淘汰，菌糠的加工利用面临更多的挑战<sup>[42]</sup>，而菌糠中含有丰富的纤维类物质和碳水化合物<sup>[7]</sup>，可以通过氧化、热解、气化产生相应的燃料物质。

甲烷是结构最简单的碳氢化合物，作为燃料广泛应用于工业和日常生活中。Luo 等通过杏鲍菇或金针菇菌糠混合牛粪来生产沼气(甲烷)，发现产量要高于菌糠或者牛粪单独处理<sup>[43]</sup>。林满红等利用不同的菌糠和食用菌废弃物发酵生产甲烷，发现杏鲍菇菌糠处理的甲烷产量可达 200 mL/g<sup>[44]</sup>，农林剩余物的主要营养成分和沼气产量存在一定的相

关性，主要营养成分含量越高，木质纤维素含量越低，产沼气效果则越好。姚利等以鸡腿菇菌糠和牛粪 7:3 的配比(以干物重计)发酵生产沼气，产气率也可达 0.133 m<sup>3</sup>/kg<sup>[45]</sup>，由此可见，菌糠用于农户沼气池发酵产气可行，气温较高的季节可满足农户日常生活所需，应用时宜采取分批进料方式；研究人员已经利用自行设计的发酵装置进行了批次发酵试验，探讨了菌糠厌氧发酵的产沼能力及影响因素，并在农户沼气池内进行了应用试验，取得了较好的效果。此外，菌糠也可以作为一种糖源物质生产生物乙醇<sup>[46-47]</sup>，双孢蘑菇菌糠中含有 30% 左右的糖分，而这些糖多数是由纤维素和其他的葡聚糖(19%)、木聚糖(8%)组成<sup>[46]</sup>；通过化学和酶解反应，可以释放出大于基质中 40% 的木聚糖和接近 100% 的葡聚糖，平均每克菌糠中大约释放了 300 mg 的还原糖。平菇基质中因含有玉米芯、棉籽壳、麦秆等物质，出菇后菌糠中还含有 40% 的纤维素和 20% 的半纤维素，因此可以用于生产生物乙醇<sup>[40]</sup>，1 t 的平菇菌糠可以生产 150 kg 乙醇<sup>[47]</sup>，这些探索均为菌糠能源化利用提供了有益参考。

## 3 菌糠作为肥料和栽培基质

现代农业中作物的产量很大程度上取决于化肥的施用，而生产化肥大量消耗能源，大量的施用也对环境造成巨大的损害<sup>[48]</sup>。据测定分析，菌糠中有机质含量达 15.66%，因含有大量的菌丝体，使其具有较高比例的含氮量，达 1.274%，且菌糠中的氮释放得较为缓慢，这样更有利于植物对氮的利用<sup>[49]</sup>。菌糠中磷含量达 0.211%、钾含量达 1.45%，此外，还含有铜、锌、铁等多种微量元素<sup>[50]</sup>。食用菌菌糠作为肥料施入土壤中，能增加土壤中有有机质的含量，因此菌糠可以作为肥料部分取代化肥<sup>[15]</sup>。

通过田间试验，探讨菌糠和无机肥对大麦土壤性状及产量的影响，经过一个季节后，测定土壤中有有机质含量和大麦籽粒产量，研究表明，每公顷施用 100 t 的菌糠可以提高作物 50% 的产量，其效果与施用化肥相当，而且因为菌糠中含有丰富的有机

质、较高比例的含氮量、含磷量以及多种微量元素,其含有的主要成分与化肥相似,因此,可以利用菌糠替代部分肥料施用;在施用菌糠的情况下,收获后土壤中磷含量增长了 2.3 倍,有机碳含量增加了 40%,有机氮含量增加了 28%。此外,钙、钾和镁的含量增长了 3 倍,但是施用化肥后的土壤,这些元素并没有增加<sup>[51]</sup>。因此,菌糠能够提高作物产量和改善土壤性质,同时施用剂量也非常关键。Polat 等利用菌糠作为肥料种植黄瓜,研究发现,每公顷施用 40 t 菌糠的效果要优于 80 t 菌糠<sup>[11]</sup>,由此可见,并不是菌糠施用量越多越好。

单建明等利用双孢蘑菇的发酵菌糠作为有机肥栽培小白菜,结果表明:每公顷施加 4.5 t 菌糠后,可使小白菜增产 14.5%,可溶性糖类的含量比未增施组提高 14.2%,硝酸盐含量降低 19.1%,维生素 C 含量提高 22.3%;双孢蘑菇菌糠作为有机肥栽培小白菜,使小白菜明显增产,且品质有所提高,因此可在蔬菜栽培上推广使用<sup>[52]</sup>。

食用菌菌糠不但可以作为肥料施用,还可以直接作为栽培基质使用。菌糠加入土壤后可以改善土壤的通气性和持水性,改善土壤的化学性质,增加微生物活性,并使土壤保温<sup>[15,50,53]</sup>。采用室内培养试验研究菌糠等不同物料对风沙土溶解性有机质组分动态变化的影响,结果表明:菌糠施入土壤后,其溶解性有机质组分水溶性碳、热水溶性碳、溶解性酚酸、可溶性糖含量均有所增加,以施入时间 1 个月内增加效果最明显,针对菌糠以调节 C/N 比值效果较好<sup>[54]</sup>。张华微等利用香菇菌糠种植玉米,试验结果表明,添加不同比例的菌糠对土壤孔隙度的改良效果有所差异,随菌糠添加量增大,土壤孔隙度也增大,玉米的品质与产量也都有所增加<sup>[55]</sup>。利用不同配比的双孢蘑菇菌糠栽培番茄的试验结果表明:不同菌糠处理对番茄的生长发育有显著影响,其中菌糠和黑土按体积比 1:2 混合是最好的栽培基质,能明显地促进番茄的生长发育和产量的提高,使地上部分的茎粗、单果重、单果株

数、小区产量均优于其他处理<sup>[56]</sup>。

李加友等将发酵后的双孢蘑菇菌糠与蛭石混合,用于栽培辣椒和茄子,结果表明,双孢蘑菇菌糠与蛭石复配基质结构特性及营养与草炭土相近,且种植效果差异不显著,而双孢蘑菇菌糠的成本较低,因此更适合作为园艺作物的栽培基质<sup>[57]</sup>。利用双孢蘑菇菌糠和平菇菌糠代替基质中的草炭土种植烟草也取得了良好的效果,提高了烟草的出苗率<sup>[58]</sup>。谢修鸿等研究发现,将姬松茸菌糠施入苏打盐碱地后,改善了土壤的化学性质,更是降低了苏打盐碱地的 pH 值和碱化度,同时也提高了土壤肥力,在施入姬松茸菌糠的苏打盐碱地上种植牧草,可以提高牧草地上部生物量,这表明姬松茸菌糠可以起到改良盐碱地的功效<sup>[53]</sup>。同时,黑木耳菌糠施入苏打盐碱土后,改善其理化性状,创造了宜于作物生长的土壤环境。施用菌糠提高了土壤肥力,在施入菌糠的苏打盐碱土上种植牧草,提高其地上部生物量,菌糠作为有机改良剂改良苏打盐碱土是可行的<sup>[59]</sup>。

#### 4 菌糠作为动物饲料

据统计,欧盟国家 70% 肉用动物的饲料原料都是大豆,而欧盟致力于减少对大豆的依赖,并增加饲料原料的多元化,如利用昆虫蛋白替代;事实上蝇类等昆虫是猪、家禽和主要鱼类最天然的食物之一,而且昆虫的繁殖速度快、生物量大,是替代大豆源饲料的良好选择<sup>[15]</sup>。食用菌菌糠是饲养昆虫的一种理想饲料,自然界中许多昆虫是以食用菌的菌丝体和子实体为食<sup>[60]</sup>。例如,30 个科的 136 种甲虫的生存与平菇有关,其中约 60% 的甲虫以食用平菇为生。

有研究显示,菌糠中的粗蛋白、粗脂肪、粗纤维、木质纤维含量分别为 7.2%–9.5%、2.7%–6.7%、15%–28.2%、10.9%–11.4%,这些营养指标均优于作物秸秆,且栽培食用菌后有芳香气味,菌糠机械强度也大幅下降,更有利于粉碎加工<sup>[61]</sup>。将菌糠接种饲料发酵剂制成动物饲料,不但可以充分利用

菌糠资源, 减少对环境的污染, 达到变废为宝的效果, 而且不影响禽畜的生殖生长, 提高禽畜的适口性和对营养成分的吸收能力<sup>[61-62]</sup>, 可降低饲养成本<sup>[4]</sup>。

菌糠可以直接用于饲养鱼类、家禽、猪和奶牛。可利用菌糠或者蘑菇提取物作为鱼类饲料, 鱼类常用的饲料包括 9% 鱼粉和 9% 菌糠粉、9% 鱼粉和 9% 虫粉, 或者 18% 的鱼粉, 利用这 3 种饲料喂养南亚野鲮(*Labeo rohita*)和十字鱼(*Hemigrammus caudovittatus*), 结果表明饲用虫粉的鱼生长速度大约是饲用鱼粉的 2 倍, 而饲用菌糠粉的鱼生长速度增加了 1.2–1.7 倍。可见, 虫粉和菌糠粉可以部分的替代鱼粉, 从而减少对鱼粉的需求量<sup>[63]</sup>。此外, 蘑菇提取物还可以提高鱼类的免疫力, 在虹鳟鱼(*Oncorhynchus mykiss*)的饲料中添加 2% 的香菇提取物, 可以明显提高鱼类的免疫力和被细菌感染后的存活率<sup>[64]</sup>。在鱼类饲料中添加菌糠可以改善鱼类的健康, 如在饲料中直接添加 10 g/kg 的蛹虫草(*Cordyceps militaris*)菌糠, 可以明显提高罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)的免疫力和生长速度<sup>[65]</sup>。

将平菇菌糠按不同比例代替绵羊日粮增补料中的玉米来检验菌糠的饲用效果, 菌糠经过平菇菌丝体纤维素分解酶作用, 反刍动物对其利用性能得到改善。菌糠中的蛋白质除了菌糠基质植物性蛋白质外, 还含有大量菌丝体蛋白质, 经过自溶和体外分解酶、体内分解酶的作用后, 能够补充瘤胃真菌蛋白质的数量; 菌糠含有可溶性多糖含量 31.5%, 其中含氮真菌性多糖达到 13%, 对于瘤胃微生物调节和肠道功能调节具有重要作用。平菇菌糠等量替换绵羊精补料中玉米的比例在 5%–15% 范围内, 对于提高绵羊体增重、提高综合经济效益具有一定意义<sup>[66]</sup>。

猪饲料中添加 $\geq 5\%$ 发酵的平菇菌糠与水稻和麸皮的混合物, 结果表明与猪的增重成负相关, 而在添加了 3% 的菌糠混合物后对猪的增重没有影响<sup>[67]</sup>。奶牛饲养试验中却出现了相反的结果,

在以干草和青贮玉米为主的奶牛饲料中, 添加 $\leq 17\%$ 的以秸秆为主的平菇菌糠, 其增重效果要明显优于对照组和添加 10% 菌糠的饲养试验组, 主要原因是凤尾菇和平菇的菌糠中木质素和纤维素的降解改善了奶牛对秸秆的消化率<sup>[68]</sup>。此外, 菌糠还可以提高羊对秸秆饲料的消化率和氮平衡, 改善肉鸡的鸡肉品质<sup>[69-70]</sup>。韩朋伟等研究表明, 用杏鲍菇菌糠替代基础日粮中的部分玉米来饲喂肉鸡, 试验期结束后对鸡的血液生化指标进行分析, 发现菌糠不会影响其造血器官及功能<sup>[71]</sup>。李超等发现用金针菇菌糠饲喂昌图仔鹅, 相比于对照组采食速度可提高 10% 以上, 日增重提高 4.48%, 经济效益增加 19.3%; 鹅的盲肠发达, 对纤维利用率可达 45%–50%, 其消化能力大于鸡和鸭等, 因此在鹅饲料中添加适量菌糠有利于鹅的生长发育, 并能起到节约成本、增加收入的效果<sup>[72]</sup>。

## 5 菌糠作为化工材料

自 20 世纪 50 年代开始, 利用原油和天然气等不可再生资源生产的塑料已经大规模应用<sup>[73]</sup>, 其应用领域最大的是包装行业, 这使得中高收入国家的市区固体废弃物从 1960 年代的 1% 增加到 2005 年的大于 10%<sup>[74]</sup>。这些塑料产品大多被直接填埋到土壤中, 然而其降解非常缓慢, 造成自然环境的污染和破坏<sup>[75]</sup>, 进一步导致了化石燃料的紧缺、原油价格的上涨、全球气候和环境的恶化<sup>[12]</sup>。国外开始利用菌丝体或菌丝体发酵物生产包装产品进而替代塑料<sup>[12,76]</sup>, 菌丝体材料、菌丝体发酵产物和单纯的菌丝体都是一个不错的选择。如今, 作物秸秆已经广泛应用于食用菌栽培中<sup>[77]</sup>, 栽培后的食用菌菌糠中含有大量仍然存活的菌丝体、大量木质素和秸秆残余的纤维类成分<sup>[5-7]</sup>, 大豆、小麦等作物秸秆还可以作为生产乳酸的原材料之一<sup>[78-79]</sup>。

此外, 食用菌菌糠表面含有丰富的羟基、氨基、羧基及磷酸基等活性基团, 可以络合废水中的金属离子, 也可以通过菌糠表面多孔结构, 替代吸附剂对废水进行物理吸附<sup>[80-81]</sup>。藏婷婷等利用黑木耳菌

糠作为吸附剂处理废水,结果表明黑木耳菌糠可以高效地吸附水中的  $\text{Cu}^{2+}$ , 吸附率高达 80.51%<sup>[82]</sup>, 这说明食用菌菌糠可以替代吸附剂来处理废水。因此, 菌糠也是替代部分化工原材料的一个选择。

## 6 菌糠中提取酶类或生物活性分子

木质纤维素酶类可以使食用菌基质降解成其生长所需的营养分子<sup>[14]</sup>, 这些酶可以在生产生物燃油和沼气的菌糠基质中提取<sup>[11,83]</sup>。然而, 每生产一加仑的生物乙醇所用的酶费用达到0.6–1.3美元<sup>[84]</sup>, 占生物燃料销售价格的 40%–87%。通过减少发酵时间和简化酶的制造工艺可以减少支出<sup>[85]</sup>, 菌糠中的酶类可以替代常规酶类, 因为这些酶不需要发酵处理, 并且提取过程非常简单, 可以直接利用水提取菌糠中的酶类<sup>[86-87]</sup>, 不论是否与其他来源的酶混合在一起, 提取后可直接利用, 将菌糠中的木质纤维素废液转化为第二代生物燃料。这些酶类也可以利用聚乙二醇盐体系的一个简单的两相分离提取进行纯化, 而且 95%的漆酶活性可以利用这个系统进行恢复<sup>[86]</sup>。未来的研究应该主要致力于哪种类型的菌糠可以作为生产酶类的最佳木质纤维素原料。从菌糠中提取的酶类粗提物也可以经过进一步的纯化后应用于食品和饲料行业, 但这方面的应用还要取决于提取方法在商业上是否可行<sup>[14]</sup>, 有待进一步举证研究。

## 7 菌糠利用存在的问题和展望

全世界的食用菌生产量逐年增加, 且消费品种也开始呈现多元活化发展趋势, 在欧美等国, 双孢蘑菇是主要的消费菇种, 但近些年香菇、平菇、杏鲍菇等菇种也开始深受喜爱<sup>[14,88]</sup>, 且随着我国“一带一路”政策的实施, 非洲国家食用菌产业也开始蓬勃发展<sup>[89-90]</sup>, 每年产生高达几亿吨的菌糠<sup>[9-10]</sup>。如何高效合理地利用这些菌糠, 成为我国乃至世界食用菌产业面临的一个重要问题。

菌糠虽然可以广泛地应用于食用菌栽培、生物燃料、栽培基质和饲料等领域, 但很少真正形成大

规模产业化处理方式, 大量的菌糠还是被直接焚烧或丢弃, 导致菌糠的实际利用率较低。如何提高菌糠的实际利用率是菌糠循环利用的关键。目前菌糠利用存在的主要问题有: 科研人员宣传较少, 很多种植者并不能明确相信利用菌糠再栽培食用菌会获得较高的产量; 在进行菌糠利用试验中, 只能根据本地区大规模栽培的食用菌选择废弃菌糠, 对于本地区栽培较少的食用菌的废弃菌糠无法利用; 在菌糠再栽培食用菌、农作物、饲喂动物的配方筛选试验中, 暂时还不能够筛选出产量最高的最优配方, 只能在小范围配方筛选中得到最高产量。我们认为主要可以通过如下几个方面进行解决:

(1) 政府加大资金的支持和政策引导, 以保护环境为基础, 适当给予种植者补贴。目前, 我国食用菌主产区仅以菌糠加工为主的企业较少, 而且这些企业基本上以菌糠造粒生产生物质燃料为主, 这就需要政府在政策上进行倾斜, 鼓励社会资金进入菌糠利用领域、简化企业申办手续、减税免税, 并提供一定比例的配套资金。如利用玉米生产燃料乙醇, 由于玉米价格较高, 每生产 1 t 燃料乙醇, 企业就亏损 1 000–2 000 元, 如果政府可以补贴其亏损, 将会推动我国乙醇汽油的大范围应用<sup>[91-92]</sup>。可见, 菌糠通过企业的壮大和发展离不开政府的引导和支持, 同时也要继续压实地方政府的主管责任以及种植户的主体责任, 加强监督管理, 将食用菌菌糠造成的环境污染降到最小化<sup>[93]</sup>。

(2) 加快菌糠利用技术的研发和转化。菌糠饲料化应用技术已经比较成熟, 但大多集中在江浙等一些经济发达地区, 并没有在北方食用菌产业拓展。菌糠生产生物燃料技术, 由于其加工较为复杂, 在我国还没有得到有效的开展, 这就需要研发更加简便的菌糠生产生物燃料技术, 推动菌糠生物燃料化的发展。而且, 利用菌糠生产乳酸、酶类等技术也需要研发出适合实际生产的工艺和设备。此外, 研究菌糠利用技术的科研人员没有和行业生产形成良性互动, 导致科技不能为实际生产服务, 这就



更需要加快我国菌糠利用技术的研发和转化进程, 科研人员亲自去工厂和农村进行宣传, 让群众看到菌糠利用的优势, 从而推动菌糠利用技术的快速发展, 加强菌糠无害化处理技术研究。

(3) 提高食用菌生产人员对于菌糠再利用的认识。食用菌生产企业和种植户往往忽视了菌糠再利用的价值, 认为其处理较为繁琐, 尤其是食用菌种植户, 通常将菌糠直接丢弃和焚烧。在东北的黑木耳主产区, 种植棚区周边经常发现废弃菌糠, 若不及时处理会导致黑木耳病虫害的大量发生。因此需要加强对企业从业人员和种植户的培训及引导, 让他们认识到菌糠的利用价值。如果附近没有菌糠深加工企业, 建议粉碎还田处理, 或者经简单处理后种植其他食用菌。

(4) 我们可以与工厂或农民建立合作关系, 科研人员提供技术指导, 利用本地区大规模栽培的食用菌废弃菌糠再栽培本地区小规模栽培的食用菌, 这样既可以利用废弃菌糠, 降低成本、保护环境, 同时又可以将小规模栽培的食用菌大规模化, 实现资源循环利用, 这就需要我们科研人员要进行大规模的配方筛选, 选择最优配方, 获得最高产量, 而不是单纯地进行小范围配方筛选, 以数据讲道理。

十八大以来, 习近平总书记一直强调要加强生态保护力度, 他明确指出“绝不能以牺牲生态环境为代价换取经济的一时发展”, 多次提出“既要金山银山, 又要绿水青山”的新时期经济发展模式<sup>[94]</sup>。随着我国经济发展模式的逐步转型, 环保政策将更加严格, 农业废弃物的利用也将迎来快速的发展。新型栽培料的研究重点已然会发生转移, 新型基质的研究会成为重中之重, 科研人员会不断探索新型的主料以及辅料, 针对不同的食用菌, 有针对性地进行培养。我国每年产生上亿吨的菌糠, 菌糠综合利用产值将非常巨大, 就地取材将会成为普遍现象, 为了进一步降低生产成本, 科研人员会在探索新型培养料时, 选择当地产量比较丰富的基质, 从而节约资源, 保证各项资源能够合理利用。食用菌

相关科研人员应抓住机遇, 加快科研成果的创新和转化, 加快食用菌企业生产模式的转型升级, 使单纯从事食用菌生产的企业能够同时参与到菌糠的再加工利用中, 形成食用菌全产业链的绿色环保发展模式。政府政策的引导和社会资本的注入将会为我国菌糠综合利用提供光明的未来, 同时为我国食用菌产业能够健康、绿色、快速地发展奠定深厚的基础。因此, 在未来的发展过程中, 会有更多的学者和专家投入到食用菌的研究当中, 提高食用菌的产量<sup>[95]</sup>。

## REFERENCES

- [1] China Financial Information Network. Edible fungus industry has become the fifth largest planting industry in China[EB/OL]. (2016-01-25). <http://news.xinhua08.com/a/20160125/1602102.shtml> (in Chinese)  
中国金融信息网. 食用菌产业成我国第五大种植产业[EB/OL]. (2016-01-25). <http://news.xinhua08.com/a/20160125/1602102.shtml>
- [2] Song B, Fu YP, Li D, et al. Advances in the mutation breeding of edible and medicinal fungi[J]. *Microbiology China*, 2017, 44(9): 2201-2212 (in Chinese)  
宋冰, 付永平, 李丹, 等. 食药菌诱变育种研究进展[J]. *微生物学通报*, 2017, 44(9): 2201-2212
- [3] Yang HC, Tan YL, Su WY, et al. Research progress on resource utilization of spent mushroom substrate[J]. *Agricultural Engineering*, 2018, 8(10): 54-58 (in Chinese)  
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
- [4] Chen X, Jiang M, Li SS, et al. Advances in comprehensive utilization of bacterial bran[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2017, 33(8): 43-44 (in Chinese)  
陈锡, 姜明, 李双双, 等. 菌糠的综合利用研究进展[J]. *中国园艺文摘*, 2017, 33(8): 43-44
- [5] Huang WQ, Zhou H. Review on the recycling methods of edible fungi residues based on environmental benefit[J]. *Edible Fungi of China*, 2019, 38(1): 104-106 (in Chinese)  
黄武强, 周红. 提高环境效益的食用菌菌渣循环再利用方式[J]. *中国食用菌*, 2019, 38(1): 104-106
- [6] Liu N, Zhang GQ, Wang FQ. Progress in research and development of spent mushroom substrate[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47(14): 7-11 (in Chinese)  
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
- [7] Bo X. Study on reuse of edible fungi bran[J]. *Agricultural*



- Development & Equipments, 2018(12): 81-82 (in Chinese)  
薄璇. 食用菌菌糠再利用研究[J]. 农业开发与装备, 2018(12): 81-82
- [8] Dong XM, Wang YF, Sun JX, et al. Research on utilization of edible fungi residue[J]. Edible Fungi of China, 2013, 32(6): 4-6 (in Chinese)  
董雪梅, 王延锋, 孙靖轩, 等. 食用菌菌渣综合利用研究进展[J]. 中国食用菌, 2013, 32(6): 4-6
- [9] Phan CW, Sabaratnam V. Potential uses of spent mushroom substrate and its associated lignocellulosic enzymes[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2012, 96(4): 863-873
- [10] Nasehi M, Torbatinejad NM, Zerehdaran S, et al. Effect of solid-state fermentation by oyster mushroom (*Pleurotus florida*) on nutritive value of some agro by-products[J]. Journal of Applied Animal Research, 2017, 45(1): 221-226
- [11] Polat E, Uzun HI, Topçuoğlu B, et al. Effects of spent mushroom compost on quality and productivity of cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in greenhouses[J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(2): 176-180
- [12] Jones M, Huynh T, Dekiwadia C, et al. Mycelium composites: a review of engineering characteristics and growth kinetics[J]. Journal of Bionanoscience, 2017, 11(4): 241-257
- [13] Islam MR, Tudryn G, Bucinell R, et al. Morphology and mechanics of fungal mycelium[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 13070
- [14] Appels FVW, Dijksterhuis J, Lukasiewicz CE, et al. Hydrophobin gene deletion and environmental growth conditions impact mechanical properties of mycelium by affecting the density of the material[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 4703
- [15] Grimm D, Wösten HAB. Mushroom cultivation in the circular economy[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2018, 102(18): 7795-7803
- [16] Li Y, Lu M. Carrying out the scientific outlook on development and guiding the development of Chinese Fungi Subject and Industry with the theory of circular economy[A]//Proceedings of China Fungus Industry and Technology Seminar and Exhibition[C]. Beijing: Mycological Society of China, 2005: 1-6 (in Chinese)  
李玉, 卢敏. 落实科学发展观以循环经济理论指导中国菌物学科与产业发展[A]//2005 中国菌物产业与科技研讨会论文集[C]. 北京: 中国菌物学会, 2005: 1-6
- [17] Cui P. Studies on cross breeding of *Flammulina velutipes* and strain breeding of wild mushroom[D]. Shijiazhuang: Master's Thesis of Hebei Normal University, 2010 (in Chinese)  
崔鹏. 金针菇杂交育种及野生食用菌菌种驯化研究[D]. 石家庄: 河北师范大学硕士学位论文, 2010
- [18] Wang GH, Wei YD, Yu DH. Study on the optimum formulations of culture material of *Lentinus edodes* using corn stalk[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2015, 43(2): 164-166 (in Chinese)  
王广慧, 魏雅冬, 于德涵. 秸秆袋料栽培香菇培养料配方的优化[J]. 山西农业科学, 2015, 43(2): 164-166
- [19] Ji JJ, Xia ZL, Liu DB, et al. Comparative study on biological characteristics and agronomic characters of *Pleurotus eryngii* strains[J]. Edible Fungi, 2011, 33(5): 14-16 (in Chinese)  
姬建军, 夏志兰, 刘东波, 等. 杏鲍菇菌株的生物学特征及农艺性状比较研究[J]. 食用菌, 2011, 33(5): 14-16
- [20] Chen L. Study on germplasm resources evaluation and breeding of *Pleurotus streams*[D]. Changchun: Master's Thesis of Jilin Agricultural University, 2014 (in Chinese)  
陈靓. 平菇种质资源评价及优良菌株选育的研究[D]. 长春: 吉林农业大学硕士学位论文, 2014
- [21] Cao J, Li C, Liu GY, et al. Analysis on nutritional components of industrial edible fungi mushroom and effect comparison of oyster mushroom cultivation[J]. Horticulture & Seed, 2017(9): 1-3 (in Chinese)  
曹君, 李超, 刘国宇, 等. 两种工厂化食用菌菌糠主要营养成分分析及平菇栽培试验效果比较[J]. 园艺与种苗, 2017(9): 1-3
- [22] Li XJ, Yang SL, Wang LN, et al. Effects of different cultivated substrates on yield and character of *Pleurotus ostreatus*[J]. Agriculture and Technology, 2019, 39(19): 16-17 (in Chinese)  
李雪姣, 杨世丽, 王利娜, 等. 不同栽培基质对平菇产量和性状的影响[J]. 农业与技术, 2019, 39(19): 16-17
- [23] Li X, Zhou TB, Peng XW, et al. Experiment on the formulation of *Pleurotus ostreatus* cultivated with *Lentinus edodes* bran[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2016, 24(4): 256-257 (in Chinese)  
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] Deng L. Preliminary report on the cultivation of *Pleurotus ostreatus* by *Agaricus blazei*[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2015, 21(10): 74,76 (in Chinese)  
邓琳. 真姬菇菌糠栽培平菇试验初报[J]. 安徽农学通报, 2015, 21(10): 74,76
- [25] Xie WQ, Zhou TB, Peng XW, et al. Formula test of *Pleurotus ostreatus* cultivated in summer[J]. Edible Fungi, 2015, 37(2): 28-30 (in Chinese)  
解文强, 周廷斌, 彭学文, 等. 白灵菇菌糠夏季栽培平菇配方试验[J]. 食用菌, 2015, 37(2): 28-30
- [26] Economou CN, Diamantopoulou PA, Philippoussis AN. Valorization of spent oyster mushroom substrate and laccase recovery through successive solid state cultivation of *Pleurotus*, *Ganoderma*, and *Lentinula strains*[J]. Applied

- Microbiology and Biotechnology, 2017, 101(12): 5213-5222
- [27] González Matute R, Figlas D, Curvetto N. *Agaricus blazei* production on non-composted substrates based on sunflower seed hulls and spent oyster mushroom substrate[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2011, 27(6): 1331-1339
- [28] Peng XW, Xie WQ, Zhou TB, et al. Study on screening the high yield cultivating formula for *Agaricus bisporus* using spent pleurotus substrate[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2015, 19(3): 46-48 (in Chinese)  
彭学文, 解文强, 周廷斌, 等. 利用平菇菌糠栽培双孢蘑菇高产配方筛选研究[J]. 河北农业科学, 2015, 19(3): 46-48
- [29] Wang JC, Huang HY, Su RF, et al. Preliminary study on the cultivation of *Agaricus bisporus* by *Pleurotus eryngii*[J]. Edible Fungi, 2017, 39(1): 35-36 (in Chinese)  
王家才, 黄海洋, 苏瑞峰, 等. 杏鲍菇菌糠栽培双孢蘑菇初探[J]. 食用菌, 2017, 39(1): 35-36
- [30] Lu LX, Yao FJ, Zhang YM. New technology on cultivation of *Agaricus bisporus* by using of *Auricularia auricular-juda* residue[J]. Northern Horticulture, 2014(8): 130-132 (in Chinese)  
鲁丽鑫, 姚方杰, 张友民. 利用黑木耳菌糠栽培双孢蘑菇新技术[J]. 北方园艺, 2014(8): 130-132
- [31] Su GP, Ma LY, Yang LQ, et al. Test of *Agaricus bisporus* cultivation with residue for *Flammulina velutipes* industrial production by using sawdust of pine and Chinese fir tree[J]. Northern Horticulture, 2016(20): 145-147 (in Chinese)  
苏贵平, 马立验, 杨丽琴, 等. 松杉木屑栽培金针菇菌糠再栽培双孢蘑菇试验[J]. 北方园艺, 2016(20): 145-147
- [32] Lu Y, Gong XL, Li PX. Experiment on the formula of *Auricularia auricula* for reuse of *Pleurotus eryngii*[J]. Vegetables, 2016(4): 29-30 (in Chinese)  
卢勇, 巩晓丽, 李培习. 杏鲍菇菌糠再利用栽培黑木耳配方试验[J]. 蔬菜, 2016(4): 29-30
- [33] Zhao GY, Gong ZJ, Chen H. *Agrocybe aegerita* and *Auricularia auricula* fruit body yields on cultivation substrates containing different amounts of spent *Pleurotus ostreatus* substrate[J]. Acta Edulis Fungi, 2009, 16(3): 36-38 (in Chinese)  
赵桂云, 龚振杰, 陈欢. 平菇菌糠替代木屑栽培茶薪菇和黑木耳[J]. 食用菌学报, 2009, 16(3): 36-38
- [34] Zhang D, Jiang GS, Wang Y, et al. Study on reuse of spent mushroom substrates for cultivating *Auricularia auricular-judae*[J]. Journal of Fungal Research, 2013, 11(3): 186-189 (in Chinese)  
张娣, 姜国胜, 王艳, 等. 菌糠二次利用栽培黑木耳试验研究[J]. 菌物研究, 2013, 11(3): 186-189
- [35] Li Z, Zeng ZJ, Song B, et al. Study on the effect of spent *Ganoderma lucidum* substrate partial substitute sawdust on *Flammulina velutipes* cultivation[J]. Edible Fungi of China, 2015, 34(1): 26-28,43 (in Chinese)  
李忠, 曾振基, 宋斌, 等. 灵芝菌糠替代部分木屑栽培金针菇的研究[J]. 中国食用菌, 2015, 34(1): 26-28,43
- [36] Dai MQ. Seasonal cultivation of *Flammulina velutipes* with *Tremella* bran[J]. Fujian Agriculture, 2012(6): 34-35 (in Chinese)  
戴敏钦. 银耳菌糠季节性栽培金针菇技术[J]. 福建农业, 2012(6): 34-35
- [37] Wang SR, Jia XN, Guo LZ. Experiment on cultivation of *Pleurotus ostreatus* with *Flammulina velutipes* bran[J]. Edible Fungi, 2010, 32(6): 34,37 (in Chinese)  
王胜蕊, 贾小宁, 郭立忠. 金针菇菌糠栽培鸡腿菇试验[J]. 食用菌, 2010, 32(6): 34,37
- [38] Ju JH, Wang SY. Cultivation of golden mushroom with *Flammulina velutipes*[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2011, 19(4): 42-43 (in Chinese)  
据江河, 王水英. 利用金针菇菌糠栽培金福菇[J]. 食药食用菌, 2011, 19(4): 42-43
- [39] Lin QY, Wu LL, Zhang FL, et al. Study on the modified effect of nitrogen source on culture of *Pleurotus eryngii* with mushroom bran of *Flammulina velutipes*[J]. Northern Horticulture, 2013(22): 151-153 (in Chinese)  
林群英, 吴亮亮, 张锋伦, 等. 氮源对金针菇菌糠栽培杏鲍菇的改良作用研究[J]. 北方园艺, 2013(22): 151-153
- [40] Zhu HJ, Liu JH, Sun LF, et al. Combined alkali and acid pretreatment of spent mushroom substrate for reducing sugar and biofertilizer production[J]. Bioresource Technology, 2013, 136: 257-266
- [41] Zhao F, Han ZK, Wang XJ, et al. Biomass fuel recycling system for *Pleurotus ostreatus* bran[J]. Agricultural Technology Service, 2016, 33(10): 165,142 (in Chinese)  
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
- [42] Environmental and Economic Policy Research Center of the Ministry of Environmental Protection. Fight a good war of pollution prevention and control—on minister Li GJ of the ministry of environmental protection at the press conference of the first session of the 13th National People's Congress[J]. Environment and Sustainable Development, 2018, 43(2): 5-10 (in Chinese)  
环境保护部环境与经济政策研究中心. 打好污染防治攻坚战——关于环境保护部李干杰部长在十三届全国人大一次会议记者会热点重点问题七连谈[J]. 环境与可持续发展, 2018, 43(2): 5-10
- [43] Luo XS, Yuan XF, Wang SY, et al. Methane production and characteristics of the microbial community in the co-digestion of spent mushroom substrate with dairy manure[J]. Bioresource Technology, 2017, 250: 611-620

- [44] Lin MH, Xiao Z, Zhao C, et al. Biogas production from 6 kinds of agricultural residues by thermophilic fermentation[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2017, 46(2): 206-210 (in Chinese)  
林满红, 肖正, 赵超, 等. 6种农林剩余物化学成分及沼气高温发酵效果[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2017, 46(2): 206-210
- [45] Yao L, Yuan CB, Wang YQ, et al. Study on biogas production by anaerobic fermentation of fungi residue[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014, 46(2): 77-81 (in Chinese)  
姚利, 袁长波, 王艳芹, 等. 菌渣厌氧发酵制取沼气研究[J]. 山东农业科学, 2014, 46(2): 77-81
- [46] Kapu NUS, Manning M, Hurley TB, et al. Surfactant-assisted pretreatment and enzymatic hydrolysis of spent mushroom compost for the production of sugars[J]. Bioresource Technology, 2012, 114: 399-405
- [47] Dos Santos LV, Carazzolle MF, Nagamatsu ST, et al. Unraveling the genetic basis of xylose consumption in engineered *Saccharomyces cerevisiae* strains[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 38676
- [48] Woods J, Williams A, Hughes JK, et al. Energy and the food system[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2010, 365(1554): 2991-3006
- [49] Uzun I. Use of spent mushroom compost in sustainable fruit production[J]. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research, 2004, 12: 157-165
- [50] Zhou X, Yan YY, Chen AJ. Advances in the utilization of edible fungi slag[J]. Edible Fungi, 2018, 40(1): 9-12 (in Chinese)  
周祥, 严媛媛, 陈爱晶. 食用菌菌渣资源化利用研究进展[J]. 食用菌, 2018, 40(1): 9-12
- [51] Courtney RG, Mullen GJ. Soil quality and barley growth as influenced by the land application of two compost types[J]. Bioresource Technology, 2008, 99(8): 2913-2918
- [52] Shan JM, Yuan WM, Tian LM, et al. Study on fertilizer efficiency of mushroom dregs on Pakchoi[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2012, 40(32): 15684-15685 (in Chinese)  
单建明, 袁卫民, 田丽敏, 等. 蘑菇菌糠堆肥在小白菜上的肥效研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(32): 15684-15685
- [53] Xie XH, Li Y. Effect of waste material cultured *Agaricus blazei* on chemical characteristics of soda alkali-saline soil and growth of forage grass[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2010, 32(5): 518-522 (in Chinese)  
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
- [54] Xie XH, Liang YJ, Wang XH, et al. Dynamic change of dissolved organic matter fractions after application of organic materials including spent mushroom substrate to aeolian sandy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 149-153 (in Chinese)  
谢修鸿, 梁运江, 王晓红, 等. 菌糠等物料施入风沙土对其溶解性有机质组分的动态变化影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 149-153
- [55] Zhang HW, Zhang TY, Wang X. Effect of mushroom waste on soil porosity improvement[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2011, 15(8): 37-38, 68 (in Chinese)  
张华微, 张天翼, 王栩. 菌糠改良土壤孔隙度效果的研究[J]. 河北农业科学, 2011, 15(8): 37-38, 68
- [56] Li XB, Li X, Li Y. Effects of *Agaricus bisporus* bran on growth, yield and quality of tomato[J]. Edible Fungi, 2008, 30(3): 63-64 (in Chinese)  
李晓博, 李晓, 李玉. 双孢蘑菇菌糠对番茄生长、产量及品质的影响[J]. 食用菌, 2008, 30(3): 63-64
- [57] Li JY, Miao SX, Yao XT. Use of spent mushroom compost in the preparation of a superior horticultural substrate[J]. Acta Edulis Fungi, 2008, 15(3): 75-79 (in Chinese)  
李加友, 苗淑杏, 姚祥坦. 蘑菇菌糠二次增效发酵及其作物栽培应用[J]. 食用菌学报, 2008, 15(3): 75-79
- [58] Zhang GS, Wang BX, Zhang CH, et al. Substituting spent mushroom substrate for peat to prepare floating system medium for flue-cured tobacco[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2011, 40(3): 52-55 (in Chinese)  
张国胜, 王豹祥, 张朝辉, 等. 食用菌菌糠替代草炭制备烤烟漂浮育苗基质研究[J]. 河南农业科学, 2011, 40(3): 52-55
- [59] Xie XH, Liang YJ, Li Y. Effect of waste material cultured *Auricularia auricula* on soda alkali-saline soil improvement[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(5): 130-133, 152 (in Chinese)  
谢修鸿, 梁运江, 李玉. 黑木耳菌糠改良苏打盐碱土效果研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 130-133, 152
- [60] Cline AR, Leschen RAB. Coleoptera associated with the oyster mushroom, *Pleurotus ostreatus* fries, in North America[J]. Southeastern Naturalist, 2005, 4(3): 409-420
- [61] Liu CC. Application and prospect of edible fungi bran feed in aquatic industry[J]. Chinese Animal Husbandry and Veterinary Digest, 2013, 29(4): 178 (in Chinese)  
刘成财. 食用菌菌糠饲料在养殖业中的应用及展望[J]. 中国畜牧兽医文摘, 2013, 29(4): 178
- [62] Pan J, Liu B, Lian HX, et al. The utilization and nutritional value of spent mushroom substrate in animal feed[J]. Acta Ecologiae Animalis Domastici, 2010, 31(3): 88-94 (in Chinese)  
潘军, 刘博, 廉红霞, 等. 菌糠在饲料中的应用研究[J]. 家畜生态学报, 2010, 31(3): 88-94
- [63] Paripuram TD, Divya VV, Ulaganathan P, et al.

- Replacing fish meal with earthworm and mushroom meals in practical diets of *Labeo rohita* and *Hemigrammus caudovittatus* fingerlings[J]. *Indian Journal of Animal Research*, 2011, 45(2): 115-119
- [64] Baba E, Uluköy G, Öntaş C. Effects of feed supplemented with *Lentinula edodes* mushroom extract on the immune response of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, and disease resistance against *Lactococcus garvieae*[J]. *Aquaculture*, 2015, 448: 476-482
- [65] van Doan H, Hoseinifar SH, Dawood MAO, et al. Effects of *Cordyceps militaris* spent mushroom substrate and *Lactobacillus plantarum* on mucosal, serum immunology and growth performance of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 70: 87-94
- [66] Li DJ, Li Y. Performance of pleurotus ostreatus mushroom substrate substitute for corn in concentrate supplement feed of sheep ration[J]. *Feed Industry*, 2011, 32(3): 33-35 (in Chinese)  
李大军, 李玉. 平菇菌糠替换绵羊日粮中玉米的饲喂效果试验[J]. *饲料工业*, 2011, 32(3): 33-35
- [67] Song YM, Lee SD, Chowdappa R, et al. Effects of fermented oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) by-product supplementation on growth performance, blood parameters and meat quality in finishing Berkshire pigs[J]. *Animal*, 2007, 1(2): 301-307
- [68] Adamović M, Grubić G, Milenković I, et al. The biodegradation of wheat straw by *Pleurotus ostreatus* mushrooms and its use in cattle feeding[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1998, 71(3/4): 357-362
- [69] Seok JS, Kim YI, Lee YH, et al. Effect of feeding a by-product feed-based silage on nutrients intake, apparent digestibility, and nitrogen balance in sheep[J]. *Journal of Animal Science and Technology*, 2016, 58(1): 9
- [70] Kwak WS, Jung SH, Kim YI. Broiler litter supplementation improves storage and feed-nutritional value of sawdust-based spent mushroom substrate[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(8): 2947-2955
- [71] Han PW, Bu XL, Liu SC, et al. Effects of fermented spent substrate of *Pleurotus eryngii* on growth performance and serum biochemical parameters of broilers[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2016, 12(3): 48-51,55 (in Chinese)  
韩朋伟, 卜小丽, 刘世操, 等. 发酵杏鲍菇菌糠对肉鸡生长性能和血清生化指标的影响[J]. *粮食与饲料工业*, 2016, 12(3): 48-51,55
- [72] Li C, Wang SB, Liu YJ. Experiment on feeding Changtu geese with *Flammulina velutipes* bran[J]. *Edible Fungi*, 2007, 29(3): 60-61 (in Chinese)  
李超, 王绍斌, 刘燕洁. 金针菇菌糠饲喂昌图鹅仔鹅试验[J]. *食用菌*, 2007, 29(3): 60-61
- [73] Geyer R, Jambeck JR, Law KL. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. *Science Advances*, 2017, 3(7): e1700782
- [74] Jurak E. How mushrooms feed on compost: conversion of carbohydrates and lignin in industrial wheat straw based compost enabling the growth of *Agaricus bisporus*[D]. Netherlands: Doctoral Dissertation of Wageningen University, 2015
- [75] Barnes DKA, Galgani F, Thompson RC, et al. Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2009, 364(1526): 1985-1998
- [76] Holt GA, McIntyre G, Flagg D, et al. Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: evaluation study of select blends of cotton byproducts[J]. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 2012, 6(4): 431-439
- [77] Song B, Ye JQ, Sossah FL, et al. Assessing the effects of different agro-residue as substrates on growth cycle and yield of *Grifola frondosa* and statistical optimization of substrate components using simplex-lattice design[J]. *AMB Express*, 2018, 8(1): 46
- [78] Wang J, Wang QH, Xu Z, et al. Effect of fermentation conditions on L-lactic acid production from soybean straw hydrolysate[J]. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2015, 25(1): 26-32
- [79] Zhang YM, Chen XR, Luo JQ, et al. An efficient process for lactic acid production from wheat straw by a newly isolated *Bacillus coagulans* strain IPE22[J]. *Bioresource Technology*, 2014, 158: 396-399
- [80] Chergui A, Kerbachi R, Junter GA. Biosorption of hexacyanoferrate(III) complex anion to dead biomass of the basidiomycete *Pleurotus mutilus*: biosorbent characterization and batch experiments[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 147(2/3): 150-160
- [81] Pavan FA, Lima IS, Lima EC, et al. Use of Ponkan mandarin peels as biosorbent for toxic metals uptake from aqueous solutions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(1): 527-533
- [82] Zang TT, Hu XJ, Gu HD, et al. Biosorption of  $\text{Cu}^{2+}$  by *Auricularia auricula* spent substrate and its mechanism[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(6): 1421-1428 (in Chinese)  
藏婷婷, 胡晓婧, 顾海东, 等. 黑木耳菌糠对  $\text{Cu}^{2+}$  的生物吸附及其机理[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(6): 1421-1428
- [83] Wan CX, Li YB. Fungal pretreatment of lignocellulosic biomass[J]. *Biotechnology Advances*, 2012, 30(6): 1447-1457
- [84] Klein-Marcuschamer D, Oleskowicz-Popiel P, Simmons BA, et al. The challenge of enzyme cost in the production of lignocellulosic biofuels[J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, 109(4): 1083-1087
- [85] Mayolo-Deloisia K, del Refugio Trejo-Hernández M, Rito-Palomares M. Recovery of laccase from the residual

- compost of *Agaricus bisporus* in aqueous two-phase systems[J]. *Process Biochemistry*, 2009, 44(4): 435-439
- [86] Jurak E, Patyshakuliyeva A, de Vries RP, et al. Compost grown *Agaricus bisporus* lacks the ability to degrade and consume highly substituted xylan fragments[J]. *PLoS One* 2015, 10(8): e0134169
- [87] Vos AM, Jurak E, Pelkmans JF, et al. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as a candidate bottleneck for MnP activity during cultivation of *Agaricus bisporus* in compost[J]. *AMB Express*, 2017, 7: 124
- [88] Deng Y. Demand analysis for China's edible fungus in the United States market[D]. Wuhan: Master's Thesis of Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese)  
邓燕. 中国食用菌在美国市场的需求分析[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2016
- [89] Zhang TC, Zhang JB. An analysis of the trade situation of edible fungi between China and countries along belt and road initiative[J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2017, 25(4): 216-219 (in Chinese)  
张童朝, 张俊飏. 中国与“一带一路”沿线国家食用菌贸易状况分析[J]. *食药菌*, 2017, 25(4): 216-219
- [90] Li Y. The status, opportunities and challenges of edible fungi industry in China: develop with Chinese characteristics, realize the dream of powerful mushroom industrial country[J]. *Journal of Fungal Research*, 2018, 16(3): 125-131 (in Chinese)  
李玉. 中国食用菌产业发展现状、机遇和挑战——走中国特色菇业发展之路,实现食用菌产业强国之梦[J]. *菌物研究*, 2018, 16(3): 125-131
- [91] Cao L, Wu FW. The comparative analysis on bio-fuel ethanol subsidies between China and united states[J]. *China Soft Science*, 2010(12): 16-26 (in Chinese)  
曹俐, 吴方卫. 中美生物燃料乙醇补贴政策比较研究[J]. *中国软科学*, 2010(12): 16-26
- [92] Chen JR, Chen Q. Approach to healthy development of China's fuel ethanol industry[J]. *International Petroleum Economics*, 2017, 25(4): 50-52,58 (in Chinese)  
陈俊任, 陈清. 中国燃料乙醇行业健康发展途径探析[J]. *国际石油经济*, 2017, 25(4): 50-52,58
- [93] Zheng YQ, Li SM, Fan JH, et al. Research progress on resource utilization of edible fungus residue[J]. *Auhui Agricultural Science Bulletin*, 2019, 25(12): 39-40,146 (in Chinese)  
郑玉权, 李尚民, 范建华, 等. 食用菌菌渣资源化利用研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(12): 39-40,146
- [94] Wang ZH. For the past 18 years, Mr. Xi has repeatedly stressed the "Green Water Castle Peak"[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences)*, 2017, 11(3): 2 (in Chinese)  
王子晖. 十八大以来, 习近平反复强调“绿水青山”[J]. *中南林业科技大学学报: 社会科学版*, 2017, 11(3): 2
- [95] Luo YF. The present situation and prospect of the study on the cultivation of edible fungi with new culture materials[J]. *Seed Science & Technology*, 2019, 37(5): 37 (in Chinese)  
罗亚芬. 新型培养料栽培食用菌研究的现状与展望[J]. *种子科技*, 2019, 37(5): 37