

香菇可持续栽培体系研究进展

源朝政¹, 马 瑜¹, 杨玉华¹, 李梦春¹, 杜如学², 武福华³

(1. 南阳市科学院 河南南阳 473000; 2. 南阳市农业农村发展服务中心 河南南阳 473000;
3. 南阳师范学院 河南南阳 473000)

摘 要:香菇(*Lentinula edodes*)是我国年产量最高的食用菌品种,在乡村振兴与农业经济发展中占据核心地位,其产业发展对保障食物供给、促进农业增效具有重要意义。但传统栽培模式所面临的资源依赖度高、环境压力大和栽培模式单一等问题日益凸显,制约了香菇产业的健康发展,构建可持续香菇栽培体系成为产业转型的有效途径。本文系统阐述了香菇可持续栽培体系的核心内涵与构建原则,从栽培基质优化、优良种质创新、环境调控精准化、菌渣循环利用和创新栽培模式等关键领域进行综述,探究了当前研究存在的不足,展望了香菇产业的未来发展方向,以期香菇产业绿色高质量发展提供理论支撑与技术参考。

关键词:香菇;可持续发展;栽培

中图分类号:S646.1² 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2026)08-001-07

Research progress on sustainable cultivation systems for shiitake mushroom

Yuan Chaozheng¹, Ma Yu¹, Yang Yuhua¹, Li Mengchun¹, Du Ruxue², Wu Fuhua³

(1. Nanyang Academy of Sciences, Nanyang 473000, Henan, China; 2. Nanyang Agricultural and Rural Development Service Center, Nanyang 473000, Henan, China; 3. Nanyang Normal University, Nanyang 473000, Henan, China)

Abstract: Shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) is the edible mushroom variety with the highest annual production in China, occupying a core position in rural revitalization and agricultural economic development. Its industrial development is of great significance for ensuring food supply and promoting agricultural efficiency. However, the traditional cultivation models face increasingly prominent issues such as high resource dependence, environmental pressure, and single cultivation mode, which restrict the healthy development of the shiitake mushroom industry. Establishing a sustainable cultivation system for shiitake mushroom has therefore become an effective way for industrial transformation. This paper systematically expounds the core connotation and construction principles of the sustainable cultivation system for shiitake mushroom, and provides a comprehensive review of key research areas, including cultivation substrate optimization, excellent germplasm innovation, precise environmental control, spent mushroom residue recycling, and novel cultivation modes. Furthermore, it explores the limitations of current research, offers prospects for future development directions of the shiitake mushroom industry, and aims to provide theoretical support and technical references for the green and high-quality development of the industry.

Key words: Shiitake mushroom; Sustainable development; Cultivation

香菇(*Lentinula edodes*)作为我国第一大宗食用菌,其产量占我国食用菌总产量的29.25%,占全球香菇产量的90%以上,产值超千亿元,创造了上千万个就业岗位,已成为当前多地区乡村振兴的支柱产业^[1]。从“靠山吃山”的传统种植到规模化产业发展,香菇凭借其丰富的营养成分和显著的经济价值,在我国食用菌市场中占据主导地位,在保障市

场供应、促进农民增收等方面发挥着不可替代的作用。多年来,食用菌产业的发展已获得国家政策的高度重视,连续被中央一号文件列为重点发展的优势特色产业^[2]。然而,香菇作为食用菌产业的主要组成部分,在快速发展的背后,传统栽培模式暴露出诸多深层次问题:品种来源混杂导致品质不稳定,对优质木屑的过度依赖造成林菌矛盾日益突

收稿日期:2025-11-20;修回日期:2026-01-19

基金项目:河南优势特色农业产业科技支撑行动计划(20250802005);河南省南阳市农业科学院博士后科研工作站项目

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:18737730089@139.com

出,栽培过程中环境调控粗放导致产量品质下降,菌渣废弃物处理不当引发环境污染,栽培模式单一、生产效益低下、质量安全管控体系不完善等,均制约了产业的可持续发展。同时,在“双碳”目标与农业绿色发展战略指引下,如何实现香菇产业从“增产导向”向“提质导向”转型,破解资源消耗与生态保护的矛盾,成为行业高质量发展的核心命题。

在可持续发展理念深入人心和“双碳”目标引领下,香菇产业急需摆脱传统发展路径,向资源高效、环境友好、经济可行、质量可控的方向转型。构建香菇可持续栽培体系,不仅能破解产业发展瓶颈,更能推动农业循环经济发展,助力乡村振兴战略实施。近年来,科研界与产业界围绕香菇可持续栽培体系展开了系统性攻关,在种质创新、技术升级、环境调控及栽培模式创新等方面开展了大量研究,构建出了多元化的可持续栽培技术体系。基于此,笔者系统梳理了香菇可持续栽培体系在栽培基质优化、种质创新、环境调控、菌渣资源化利用及栽培模式创新等领域的研究成果,探究了当前发展中存在的问题,并对未来发展方向进行了展望,为推动香菇产业绿色低碳转型、实现高质量可持续发展提供理论参考依据与实践借鉴。

1 栽培基质优化

基质作为香菇生长的营养载体,其成分与配比直接决定了菌丝活力、香菇产量及品质^[3]。传统以阔叶木屑为主的基质栽培模式所面临的“菌林矛盾”问题日益凸显,因此,加快栽培基质优化已迫在眉睫。

木屑替代资源的筛选是基质优化的核心突破点。目前,研究人员已成功将大量农业和农产品加工废弃物作为栽培香菇的替代原料用于生产中,并形成了以农作物废弃物、林业副产物、特色加工残渣为主的三大替代体系。农作物废弃物中,玉米芯凭借碳氮结构适宜的优势,经优化配比后可实现与木屑相当的栽培效果,如通过 D-optimal 设计优化的栽培配方[37.69%(ϕ ,后同)玉米芯+23.33%麸皮+38.98%木屑],使香菇菌丝满袋期缩短且生长旺盛^[4];玉米芯搭配合适的营养物质反季节栽培香菇,同样能够取得与常规栽培配方相当的效果^[5]。王正旭等^[6]研究了香菇栽培料中添加玉米芯的最佳比例,发现当玉米芯添加到 40%~50%时,香菇菌丝长势、长速和产量、品质最佳。还有报道称,酸枣枝、桑枝、皇竹草等农林废弃物也可部分替代木屑。如

用枣木屑替代 21%杂木屑时,香菇产量指标良好,生物学效率提高 18.1%,同时可以保持香菇出菇潮次的均衡和提高单生菇比例^[7];桑枝替代杂木屑的比例为 5%~50%时,香菇的生长性状、商品性状及经济效益等指标明显高于杂木屑对照,其中替代比例为 15%时,效果最佳^[8];皇竹草(30%)+中药渣(15%)+酒糟(5%)的混合基质可使香菇生物学效率达 91.26%,且品质显著优于传统配方^[9]。甘蔗渣、花生壳等经粉碎发酵后,通过调节碳氮比(C/N 为 25~30:1)也能够有效提升栽培料的利用率。在林业副产物中,竹屑和桑枝因含有丰富的木质素和纤维素,且可再生性强、分布较为广泛,是替代木屑栽培香菇很好的材料^[10]。研究发现,在培养基质中添加不同比例的竹屑和桑枝屑替代杂木屑,并不影响香菇的正常生长,但其含有的酚醛类物质及尖锐颗粒易导致污染率升高,香菇产量、经济效益和生物转化率则低于传统杂木屑基质^[11]。因此,在利用竹屑和桑枝屑作为香菇培养料时,要进行颗粒分级控制(粒径 2~5 mm)、预发酵脱毒等处理,再控制适宜比例即可实现香菇优质高产。张泽平等^[12]研究发现,竹木基质菌棒虽然污染率相对较高,但竹屑含量 45%以下的竹木基质菌棒出菇产量与传统菌棒无差异,且菇体营养品质更优、效益更高。另外,特色加工残渣如中药材渣、果木废弃物等,经营养互补调配后也展现出应用潜力^[13-15],如甘肃庆城县利用苹果枝条替代桦栎木,通过“枝条粉碎→发酵→制棒”工艺,生产的香菇单棒产量达 500 g 以上,菇形圆整,耐贮存。苹果木因硬度高(与桦栎木相当)、糖分含量高(苹果木 12.3% vs 杂木屑 8.7%),成为优质替代基质^[16]。但需针对性地解决重金属超标风险与降解速率差异问题。

2 优良种质创新

2.1 育种技术迭代升级

优良菌种是保障香菇高质量生产的前提,但由于菌种外观性状少,肉眼很难对发生的混杂和退化进行辨别,而菌种的好坏又直接关系到后期产生的经济效益和社会效益。因此,针对产业上这一问题,研究人员开展了大量工作培育优良品种。但传统育种技术以经验选育和杂交育种为主,依赖育种者对香菇表型性状的观察和筛选,通过野生菌株驯化、人工杂交等方式进行培育,虽在一定程度上提高了香菇产量和适应性,但存在育种周期长、选择效率低、目标性状可控性差等局限,无法满足生产

上的需求。随着生物技术的快速发展,香菇育种已开始逐步进入生物育种阶段,分子标记辅助育种、基因编辑等技术的应用显著提高了育种效率。

2.1.1 分子标记辅助育种 分子标记辅助育种借助 SSR、SNP 等分子标记,可快速筛选出携带优良性状(如抗逆、高产、优质)的菌株,应用于香菇菌种的改良工作,能够加速育种进程、提高选择效率,实现精准遗传改良。全基因组关联分析(GWAS)作为解析复杂性状遗传基础的核心技术,通过全基因组范围内筛选与目标表型相关的遗传变异位点,为香菇精准育种提供了全新路径。日本学者通过全基因组测序在香菇中开发了一种高效的 GWAS 分析方法^[17],从中发现了与香菇褐变相关的候选基因 *Laccase* 家族成员,这一发现为香菇采后保鲜和品质改良提供了关键分子靶点。有人发明了一种与香菇深绿木霉抗性性状相关的 SNP 分子标记^[18],该分子标记位于香菇参考基因组五号染色体上,在第 479 587 bp 处碱基 C 突变为 T,基因型为 T/T 的香菇表现为深绿木霉抗性高,这种分子标记可以在香菇菌丝阶段高效判断木霉抗性,克服传统育种中依靠表型鉴定的缺点。基于木质素降解酶 SNP 的香菇分子标记辅助育种提高秸秆降解效率是一个重要的研究方向,通过分子育种技术可以显著提高香菇对秸秆等农业废弃物的利用效率。比如王茂成等^[19]通过对 200 份香菇种质资源的 SNP 测序,定位到控制木质素降解能力的关键基因 *LeLCC*(漆酶基因),该基因表达量高的菌株,基质利用率可提升 15%。

SSR 标记也是真菌育种中常用的一种分子标记,与 SNP 标记功能互补,在香菇抗逆育种中广泛应用。林范学^[20]研究表明,SSR 用于构建香菇遗传连锁图谱,定位于深绿木霉抗性相关的 QTL,辅助挖掘更多抗性基因,结合 SNP 标记使用,可以提高抗性菌株筛选的准确性,弥补单一标记的局限性。吴锦荣等^[21]采用 104 对基因组 SSR 引物解析 21 份香菇原生质体单核体遗传特征,结果表明,引物多态率 55.8%,条带多态率 69.3%。遗传分析显示,野生菌株与栽培品种差异显著,栽培品种间亲缘关系较近,同一双核体来源的单核体遗传背景高度相近。陈京京等^[22]用 60 对 SSR 标记构建出了遗传框架,定位出抗性相关 QTL 区间,结合 SNP 标记进行精细筛选,结果发现,联合标记筛选的抗性菌株准确率达 96.2%,较单一 SSR 标记(89.3%)或 SNP 标记(91.5%)显著提升,育种周期从 2~3 年缩短至 1

年以内。采用不同 SSR 引物对不同香菇种质进行遗传多样性分析,结果显示,相同地区的菌种间遗传多样性差异不大,而来自不同地区的菌种间遗传距离较远^[23]。因此,利用多态性的 SSR 分子标记进行基因型鉴定,并通过基因型数据进行遗传多样性分析,建立不同品种特异性的 SSR 指纹图谱,能够有效保障香菇品种的鉴定准确性和品种改良工作成功进行^[24]。

2.1.2 基因编辑技术 香菇产业的提质增效对优良菌种有着迫切需求。近些年,育种学家开始尝试将基因编辑技术用于香菇菌种的改良。CRISPR/Cas9 因编辑高效、操作简便、通用性强等优点^[25],在能精准改良抗逆性、提高产量和品质等性状的同时,还能显著缩短育种周期,有望成为香菇育种的主流基因编辑技术。基于香菇基因组数据库筛选获得与抗逆、产量及品质性状相关的候选关键靶点,可首先利用 RNAi 技术完成候选靶点的初步功能筛选,随后采用香菇组成型启动子分别驱动 sgRNA 与密码子优化的 Cas9 进行表达,开展基因编辑功能验证。付阳等^[26]以香菇 U6 启动子(pLeU6)驱动靶向 *pyrG* 的 sgRNA,结合密码子优化的 Cas9,构建二元表达载体 GPiE-sgRNA-Cas9,并采用农杆菌介导转化香菇单核体菌丝,成功获得 *pyrG* 基因编辑的尿嘧啶营养缺陷型菌株。通过 CRISPR/Cas9 基因编辑技术改良香菇耐高温基因,使其在 30 °C 环境下仍能正常生长^[27-29]。为加速育种进程,可以通过构建多 sgRNA 串联表达载体,搭载 Cas9,对与产量、抗病相关的基因进行编辑,从而采用农杆菌介导转化(*Agrobacterium tumefaciens* mediated transformation, ATMT)香菇双核体菌丝,但其稳定性与实际应用潜力需通过出菇和连续传代进行评估。

2.2 优良品种培育成果

研究发现,全球广泛种植的香菇品种主要源自亚洲北部和南部的 2 个野生亚群(A1 和 A2),中国栽培品种多集中于 A1 菌株,其出菇稳定、产量高且菌盖厚实^[30]。云南地区的野生香菇具有独特遗传背景,展现出了明显的地理选择性栽培特征^[31]。在明确香菇品种起源与地理特性的基础上,我国科研人员开展了针对性的育种创新,培育出多个优质新品种:由中华全国供销合作总社昆明食用菌研究所选育的中菌小香蕈 1 号^[32],是我国首个通过鉴定的小香蕈新品种。该品种历经 4 年培育筛选,具有纤维更细、质地脆嫩、风味鲜美、营养丰富等特点,填补

了国内在该类香菇育种方面的空白。由上海市农业科学院食用菌研究所选育的申香 1513, 成功入选农业农村部 2025 年农业主导品种, 是名录中唯一的食用菌品种。该品种为高产花菇新品种, 菌龄 100~110 d, 菌丝抗逆性强, 耐高温, 菌盖厚, 色浅, 菇质硬, 开伞慢, 商品性好, 生物学转化率可达 95% 以上^[33]。七河 2 号、七河 9 号等自主菌种彻底解决了我国香菇菌种长期依赖日本进口的难题, 实现了菌种的“中国芯”。七河 9 号凭借出菇质量稳定、适应性强等优势, 截至 2023 年在国内香菇产区的覆盖率已达 100%^[34]。上海市农业科学院等团队培育出沪香 F6、申香 1504 等广适型工厂化制棒专用新品种^[35-36], 共性优点是产量高、抗性强, 耐高温及保鲜期长, 为香菇工厂化生产提供了优质种源。

3 环境调控精准化

3.1 温湿度与气体动态调控

环境因子是香菇生长发育的关键调控信号, 温度、湿度、气体等参数的精准控制实现了栽培模式从“看天种菇”向“科学种菇”的转型。基于生长阶段的动态调控体系已基本建立。菌丝体阶段需维持稳定温湿环境, 25℃、相对湿度 65% 为最优参数组合, 此条件下菌丝生长速率可达 $0.85\text{ cm}\cdot\text{d}^{-1}$, 较自然环境提升 63.46%, 同时还可显著提高香菇品质^[37]。福建古田菇农在椴木栽培中引入“梯度控温”技术, 白天 22℃ 促进菌丝延伸, 夜间 12℃ 刺激代谢产物积累, 通过林下植被蒸腾作用, 将空气相对湿度稳定在 60%~65%, 菌丝生长速度较传统模式有显著提升, 干品鸟苷酸含量达 $1.2\text{ g}\cdot 100\text{ g}^{-1}$, 较平原产区高 43%, 溢价空间达 30%^[38]。庆阳新禾菌业技术人员郭晋健等^[39]通过温湿度阶梯控制法, 在菌丝生长期(24℃、65%相对湿度)和子实体期(18℃、90%相对湿度)分段调控, 使单棒产量从 0.6 kg 提升至 1.0 kg, 优质率从 68% 增加至 92%。该技术通过物联网监控平台实现参数自动调节, 在黄土高原地区解决了昼夜温差大导致的出菇率不足 60% 的难题。温湿度的科学调控, 不仅能够促进香菇菌丝生长、降低菌棒的污染系数, 还能够有效缩短出菇周期、提高香菇品质和产量。林熙^[40]的试验表明, 菌丝生长期 24℃、65%相对湿度条件下, 满袋率达 96.7%, 满袋时间缩短 12~15 d, 污染率降至 3.3%; 子实体期 18℃、90%相对湿度时, 原基形成时间缩短至 5.1 d, 综合产量提升 15%~20%, 这一结论为规

模化栽培提供了科学依据。同时, 香菇作为典型变温结实型真菌, 其原基分化高度依赖温差刺激, 这是打破菌丝营养生长稳态、启动生殖生长的核心环境信号, 恒温条件下多数品种难以正常分化原基。冯志勇等^[41]研究表明, 15℃温差可促进原基提前 1~2 d 形成且整齐度提升, 恒温处理组无原基分化, 证实温差是打破营养生长稳态的关键信号。子实体发育阶段需平衡温湿度与通气条件, 20℃、相对湿度 90% 时单菇质量与多糖含量均达峰值, 多糖含量较自然培养提升 50%。在气体调控方面, 发菌期 CO_2 浓度(φ)需控制在 $5\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下, 保障菌丝健康生长; 进入出菇期后, 需将 CO_2 浓度阈值降至 $1\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 以内, 同时配合湿度联动调节, 避免通风导致菇房湿度骤降^[42]。

3.2 智能化制棒、出菇及技术集成

在香菇标准化栽培体系中, 集中化制棒是破解传统分散制棒质量不稳、效率低下、规模受限等痛点的核心路径, 其技术优势与实践价值已得到大量研究与行业标准的充分印证。NY/T 3415—2019《香菇菌棒工厂化生产技术规范》明确了全流程关键参数^[43], 使灭菌时间缩短 30%、污染率控制在 3% 以内, 浙江产区应用后成品率从 82% 提升至 96%, 能耗同步降低 25%。于海龙等^[44]考察了不同木屑颗粒度配比对工厂化压块条件下香菇生产的影响, 结果表明, 木屑颗粒度组合 M3(K1 为 1.5 mm 以下颗粒, K2 为 1.5~3.0 mm 颗粒, K3 为 3.0~8.0 mm 颗粒; K1:K2:K3=1:1:1) 的菌丝生长速度最快, 单菇质量最大, 产量较高, 菇形好, 第一潮菇生物转化率可达到 40.8%, 生产周期可控制在 100 d 以内, 适合于在工厂化条件下应用。而耿立等^[45]提出的三级冷却区与二维码溯源质控方案, 更能将破袋率控制在 3% 以内, 保障菌棒 pH 稳定在适宜生长的 5~6 区间。实际生产中, 效率提升是集中化制棒的核心竞争力。最新研究数据显示, 自动化集中制棒较传统模式省时 95.7%、省工 71.2%、节能 70.6%, 且养菌期与出菇期大幅缩短, 复种批次显著增加^[46]。陈天泰等^[47]在冷凉地区的实践中, 通过集中化液体菌种接种技术, 将菌丝满袋时间缩短 5~7 d, 生产效率提升 40%, 全自动装袋线的应用更实现拌料、分料、套袋、扎口一体化作业, 单台设备日产可达 8000~10 000 棒, 料棒质量误差控制在 $\pm 50\text{ g}$ 内, 兼顾效率与一致性。

综上所述, 集中化制棒具有质量标准化、生产规模化、作业高效化的优点, 成为香菇“集中化制

棒+生态化出菇”栽培模式推广的核心支撑,契合劳动力成本上升背景下的产业升级需求,其技术可行性与经济价值已得到行业实践的验证。

4 菌渣循环利用

香菇产业每年产生约 2500 万 t 菌渣,其富含菌丝残体、多糖、寡糖等活性成分^[48],通过科学配比、循环再生及污染防控技术,能够很好地实现基质“制备—栽培—废弃—再利用”全周期资源高效转化,构建兼顾生态环保与生产成本优化的栽培技术体系。菌渣资源化利用的核心是“变废为宝”。目前,在实际生产中,搭配秸秆、畜禽粪便等调节碳氮比,将菌渣经堆肥发酵后,可制成有机肥进行还田,在此过程中通过调节碳氮比和发酵周期,能显著提升土壤有机质含量,减少化肥使用量 30%以上^[49]。通过粉碎、脱毒、发酵处理后的菌渣,粗纤维含量显著降低、蛋白质含量提升,是畜禽或水产饲料较好的原材料^[50]。能源化利用聚焦于生物质燃料,菌渣经 400~600 °C 热解制成的颗粒燃料或块状燃料,可以直接燃烧用于供暖或发电,也可以与其他燃料混合使用。此外,香菇菌渣作为燃料还可以替代传统的化石燃料,减少对不可再生资源的依赖^[51]。秦文弟等^[52]以食用菌菌渣为原料,在常温下开展厌氧发酵试验测定其产沼气潜力,结果发现,原料产气率(以干物质计)达 0.133 m³·kg⁻¹,虽为秸秆产气潜力的一半,但预处理简便、启动迅速,农户沼气池应用中可满足高温季节日常用气需求。菌渣经腐熟、灭菌后,添加 20%新锯末和 5%石膏粉,还可二次栽培香菇,生物转化率达 65%^[53]。此外,菌渣还可用于栽培平菇、姬松茸、双孢菇等其他食用菌,实现“一基多菇”循环^[54-56]。

5 创新栽培模式

创新栽培模式以“空间集约利用、资源循环联动、业态跨界融合”为核心,通过打破单一栽培边界,实现生态效益、经济效益与社会效益的协同提升,是香菇可持续栽培的关键突破方向。当下,传统依赖硬木锯末的基质模式受限,农林废弃物资源化利用成为研究重点^[57]。依托森林生态系统,利用林下阴凉湿润的微气候满足香菇生长需求,同时香菇栽培废弃物(菌糠)还林改良土壤,形成“林木养护-香菇种植-土壤培肥”的闭环^[58-62]。庆元县推广该模式后,每 667 m²林地综合产值从单纯造林的 1200 元提升至 8000~12 000 元;菌糠还林使土壤有机质

含量年提升 1.8%~2.5%,林木生长量增加 10%~15%,形成了“以菇养林、以林促菇”的良好局面^[63]。2022 年联合国粮农组织将“中国浙江庆元林—菇共育系统”列入全球重要农业文化遗产保护名录,该生态模式遵循“三不争”原则利用森林资源,一方面能够将源自庆元的传统“剁花法”与现代接种技术结合,提高栽培料的生物转化率^[64];另一方面坚持“伐大留小”,菇木就地分解形成养分循环,提升土壤腐殖质含量。整合种植业、食用菌业与渔业资源,通过不同产业间的物质循环实现资源高效利用也是构建可持续栽培体系的重要途径。徐根生等^[65]认为,香菇水稻轮作的栽培方式,是一种高效生态的新型栽培方式,它充分利用香菇收获后的地力和阳光,既稳定了香菇生产,又增加了水稻种植效益。鲜香菇-杂交水稻-速生小青菜种植模式,不仅提高了土地利用效率,增加单位面积产量和产值,而且水旱轮作具有改善土壤结构、保护生态环境、减少病虫害的作用和稳粮增效的显著效果^[66]。这些创新栽培模式通过多元资源整合与生态闭环构建,为香菇产业绿色可持续发展提供了可复制、可推广的实践范式。

6 可持续栽培体系构建存在的问题与展望

6.1 存在问题

香菇作为我国栽培历史悠久、产业规模庞大的食药菌种类,是乡村振兴的重要支柱产业。然而,传统栽培模式中依然存在诸多问题,制约了产业的可持续发展。一是资源约束与生态矛盾突出。传统袋料栽培以杂木屑为核心原料,1 t 香菇需消耗 2~3 t 杂木屑,长期过度采伐导致河南西峡、浙江庆元等老产区阔叶林资源枯竭^[67],部分区域出现“抢料”现象,推动原料价格涨幅超 30%。同时,产业年产生菌渣超 500 万 t,多数被随意丢弃或焚烧,既造成环境污染,又浪费其中的有机质资源,形成“资源消耗-污染排放”的恶性循环。二是技术集成与标准化水平偏低。中小种植户仍依赖经验化管理,菌种选择、培养基配比、温湿度调控等关键环节缺乏统一标准,导致香菇优质率仅 60%左右,产品大小、色泽差异显著。恒温发菌、智能转色等先进技术虽已试验成功^[68-70],但技术转化率不足 30%,规模化应用受限。此外,病虫害绿色防控技术推广滞后,部分产区存在化学农药滥用问题,影响产品质量安全与出口竞争力。三是产业链协同机制存在

壁垒。生产端以分散小农户为主,与加工企业、流通商的利益联结松散,种植户议价能力弱,常面临“丰产不丰收”风险。加工环节以初级干制、保鲜为主,精深加工产品(如香菇多糖、即食食品)占比不足15%,产品附加值低。流通环节冷链设施覆盖率不足40%,产后损耗率达12%~15%,远高于发达国家5%的水平^[71]。科研机构与产业主体合作缺乏长效机制,技术研发与市场需求脱节。四是缺乏针对香菇可持续栽培的专项扶持政策,替代原料研发、菌渣资源化利用等领域资金投入不足。全链条标准体系不完善,从菌种繁育到终端销售的标准覆盖存在缺口。质量追溯体系建设滞后,消费者难以查询产品来源及安全信息,制约品牌信任度提升。

6.2 展望

香菇可持续栽培体系的核心在于基质、环境、菌渣三大环节的协同联动。在实际生产中,需对以下几个方面进行系统优化:一是技术创新方向。基质领域应构建“资源普查-配方优化-工艺标准化”技术链,建立区域性替代基质数据库,开发模块化预处理设备;环境调控需突破“低成本-高精度”技术瓶颈,研发新型智能调控装置,构建多品种参数图谱;菌渣利用重点推进高值技术规模化,优化酶解工艺,降低成本,开发菌渣-多糖-有机肥梯级利用技术。二是产业模式集成。推广“基质工厂化生产-环境智能化调控-菌渣集中处理”一体化模式,实现基质统一供应与菌渣集中回收。发展“香菇-菌渣-作物”生态循环模式,构建菌粮轮作体系,提升系统综合效益。培育“科研-企业-农户”协同主体,通过企业承接技术转化,为农户提供“基质-设备-回收”全链条服务。三是政策与保障措施。建议建立三大支撑体系:一是标准体系,制定替代基质安全标准、环境调控操作规范与菌渣利用质量标准;二是激励政策,对智能设备购置、菌渣高值利用企业给予补贴;三是科技平台,组建跨学科研发团队,加强基质优化、智能调控与菌渣转化技术的协同创新。

未来需以“协同高效、循环闭环”为目标,通过技术创新突破瓶颈,依托模式集成提升产业效能,借助政策保障完善支撑体系,最终实现香菇产业的生态效益、经济效益与社会效益的统一,为食用菌产业可持续发展提供示范样板。

参考文献

- [1] 杜金茹,王守现,严冬,等.基于全基因组数据分析香菇黑色素合成途径及相关基因[J].菌物学报,2023,42(5):1114-1128.
- [2] 曹斌.“十四五”时期推进我国香菇产业高质量发展的前景和实现路径[J].食用菌学报,2020,27(4):25-34.
- [3] 柴美清.不同基质及栽培模式对香菇菌丝及营养成分和产量的影响[D].山西晋中:山西农业大学,2016.
- [4] 任爱民,包玉政,韩爱民,等.基于D-optimal法优化香菇菌种培养基配方研究[J].寒旱农业科学,2024,3(8):724-733.
- [5] 李军,蔡婧,李世华,等.玉米秆玉米芯和玉米粉反季节栽培香菇试验[J].食用菌,2017,36(6):37-39.
- [6] 王正旭,陈红.香菇玉米芯栽培料配方优选试验[J].北方园艺,2008(1):225-227.
- [7] 杨杰,萧晋川,刘欣,等.枣木屑栽培香菇的对比研究[J].中国食用菌,2018,37(6):36-39.
- [8] 胡桂萍,黄金枝,王亚威,等.桑枝屑代料栽培对香菇性状的影响[J].农学学报,2021,11(12):95-99.
- [9] 曾茜,陈旭,杨雨,等.野生香菇黔香第5号菌丝的生物特性及抗氧化活性[J].西南农业学报,2022,35(3):558-563.
- [10] 曾凡清,应国华,蒋俊,等.毛竹屑栽培香菇的试验[J].中国食用菌,2022,41(2):30-33.
- [11] 王一,李冬兵,刘筱雪,等.竹屑和桑枝屑作为基质原料栽培香菇试验[J].世界竹藤通讯,2023,21(3):36-39.
- [12] 张泽平,彭超,胡东兵,等.竹木屑主基配菌棒对香菇出菇效率及品质的影响[J].湖南林业科技,2021,48(1):44-49.
- [13] 季泽洋.不同培养料对香菇菌丝生长、产量和营养成分的影响[D].合肥:安徽农业大学,2018.
- [14] 陈旭,曾茜,杨雨,等.不同副产物基质配方对食用菌产量及品质的影响[J].西南农业学报,2021,34(11):2385-2390.
- [15] 张健.几种林果植物废弃物在香菇栽培中的应用研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
- [16] 李小红.庆城县:果木枝条变废为宝 生态循环助农增收[EB/OL].(2025-04-18)[2025-10-20].https://www.chinaqingcheng.gov.cn/zwx/shsy/kj/content_105222.
- [17] Yuichi S, Keiko N, Shiho S, et al. *Lentinula edodes* genome survey and postharvest transcriptome analysis[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2017, 83(10):e02990-16.
- [18] 肖扬,赵之栋,沈楠.一种与香菇深绿木霉抗性性状相关的SNP分子标记及其应用:CN119753226A[P].2025-04-04.
- [19] 王茂成,李勇,李世忠,等.木质素降解真菌的分离与相关酶活性测定及产酶条件优化[J].西南师范大学学报(自然科学版),2013,38(11):122-127.
- [20] 林范学.香菇分子遗传图谱构建和数量性状座位(QTL)分析[D].武汉:华中农业大学,2007.
- [21] 吴锦荣,鲍大鹏.用SSR分子标记分析香菇原生质体单核体的遗传多样性[J].发酵科技通讯,2017,46(4):233-237.
- [22] 陈京京,王波,刘主,等.联合SSR与SNP标记加速香菇抗木霉育种进程[J].农业生物技术学报,2024,32(2):168-175.
- [23] Xiao Y, Liu W, Dai Y, et al. Using SSR markers to evaluate the genetic diversity of *Lentinula edodes* natural germplasm in China[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2010(3):527-536.
- [24] 董慧,章炉军,张美彦,等.中国香菇主栽品种遗传多样性的SSR分析及指纹图谱构建[J].微生物学通报,2017,44(6):1427-1436.
- [25] 吴言,郝雅芳,韦璇,等.新一代精准基因编辑工具CRISPR/Cas9的技术优势与应用局限[J].生物技术通报,2018,34(5):1-8.
- [26] 付阳,宋春艳,董晶晶,等.香菇中CRISPR/Cas9基因编辑体系的构建[J].菌物学报,2024,43(8):26-42.
- [27] 肖扬,吴玉龙,王艺菲,等.香菇ABC转运蛋白基因 *LeABC2*

- 及其在调控香菇耐热性中的应用[P]. 中国专利: CN119372219B, 2025-01-28.
- [28] Koshi D, Sugano J, Yamasaki F, et al. Trans - nuclei CRISPR/ Cas9: Safe approach for genome editing in the edible mushroom excluding foreign DNA sequences[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2024, 108(1): 548.
- [29] 胡建平, 陈青. 香菇菌棒制备和菌丝控温培养关键技术[J]. 中国食用菌, 2025, 44(3): 49-52.
- [30] 张婉洁, 何德, 李翠新, 等. 西南三地区野生香菇 ISSR 遗传多样性分析[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(9): 2093-2097.
- [31] 王健, 图力古尔, 李玉. 香菇属(*Lentinus*)真菌的研究进展兼论中国香菇属的种类资源[J]. 吉林农业大学学报, 2001, 23(2): 41-45.
- [32] 赵珮然, 宋光旭, 刘佳, 等. 香菇, “上新”了! [N/OL]. 光明网, (2025-06-18) [2025-11-10]. <https://m.gmw.cn>.
- [33] 施懿赞. 品质佳、易管理, 上海市农业科学院的香菇新品种入选 2025 年农业主导品种 [N/OL]. 东方城乡报, 2025- 07- 31. <https://dfcxb.com/resfile/2025- 07- 31/03/dfcxb-20250731-003>.
- [34] 滕腾. 七河生物: 引领菌种创新, 中国香菇产业实现自主崛起 [EB/OL]. (2025-11-06) [2025-11-10]. <https://www.sohu.com>.
- [35] 姜宁, 李玉, 董浩然, 等. 香菇沪香 F6 菌棒低温冷冻及出菇温度比较试验[J]. 食用菌, 2024, 46(5): 44-46.
- [36] 孙联合, 丁亚通, 鄯熙阳, 等. 7 个香菇菌株春栽适应性分析[J]. 食用菌, 2024, 46(5): 19-21.
- [37] 上海喆图科学仪器有限公司. 告别“看天种菇”: 恒温恒湿培养箱控好香菇生长关键温湿 [EB/OL]. (2025- 10- 24) [2025-11-10]. <https://m.instrument.com.cn/netshow>.
- [38] 裴金玲. 福建: 三明市尤溪县利用降温技术实现香菇周年种植 [EB/OL]. (2013-07-26) [2025-11-10]. <http://zixun.mushroommarket.net/201307/26/157323.html>.
- [39] 郭晋健, 张呈亮. 扎根菌业十八载匠心耕耘结硕果 [EB/OL]. (2025-06-23) [2025-11-10]. http://www.hsxzf.gov.cn/zjhs/rwbs/content_71507.
- [40] 林熙. 恒温恒湿培养箱调控香菇栽培环境的实验分析 [EB/OL]. (2025-10-24) [2025-11-10]. <https://www.instrument.com.cn/application/solution-965551>.
- [41] 冯志勇, 潘迎捷, 程继红, 等. 低温胁迫对香菇转色和原基形成的影响[J]. 中国食用菌, 2005, 24(4): 20-22.
- [42] Nan S, Hao Y X, Ke F L, et al. Near-gapless genome and transcriptome analyses provide insights into fruiting body development in *Lentinula edodes* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024(2): 130610.
- [43] NY/T 3415-2019 香菇菌棒工厂化生产技术规范[S].
- [44] 于海龙, 高成, 王秋兰, 等. 不同木屑颗粒度对工厂化压块香菇生长的影响[J]. 食用菌学报, 2017, 24(2): 5-9.
- [45] 耿立, 王德芝, 李尽哲, 等. 香菇菌棒工厂化生产中的易发问题与预防措施[J]. 食用菌, 2018, 40(3): 45-47.
- [46] 赵清, 陈磊, 通占元, 等. 食用菌菌棒自动化生产技术应用效果研究[J]. 中国果菜, 2023, 43(2): 82-87.
- [47] 陈天泰, 曾宝成. 冷凉地区香菇菌棒工厂化生产[J]. 北方园艺, 2024(12): 150-151.
- [48] 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.
- [49] 韩明丽, 黄奇. 利用菌渣和畜禽粪便堆制生产有机肥的试验[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(3): 621-622.
- [50] 李学梅. 食用菌菌渣的开发利用[J]. 河南农业科学, 2003, 32(5): 40-42.
- [51] Song G, Kim J, Park J Y, et al. Study on improving biomass fuel quality via torrefaction and washing of used - shiitake mushroom - media [J]. Journal of Biosystems Engineering, 2025, 21(3): 47-54.
- [52] 秦文弟, 甘福丁, 徐铁纯, 等. 食用菌菌渣产沼气潜力测定[J]. 贵州农业科学, 2014, 42(11): 237-239.
- [53] 卫智涛, 周国英, 胡清秀. 食用菌菌渣利用研究现状[J]. 中国食用菌, 2010, 29(5): 3-6.
- [54] 刘遂飞, 孙桂琴, 胡永德, 等. 不同食用菌菌渣组合栽培平菇试验[J]. 食用菌, 2015, 37(1): 25-26.
- [55] 陈华, 林怡, 叶菁, 等. 杏鲍菇菌渣代料栽培对姬松茸不同潮次产量及品质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(1): 183-189.
- [56] 刘建凤, 吉春明, 苏建坤, 等. 利用草菇菌渣工厂化栽培双孢蘑菇的技术研究[J]. 中国食用菌, 2016, 35(6): 23-27.
- [57] 胡常伟. 农林废弃物高值资源化利用的挑战与对策[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [58] 吴建金, 王玉清. 高产高效典型林下栽培香菇凸显林地短期效益[J]. 中国蔬菜, 2010(19): 41-43.
- [59] 陈青君, 张国庆, 秦岭, 等. 樱桃地食用菌果菇同步采摘的设计与实践效果分析[C]. 中国园艺学会 2011 年学术年会论文摘要集, 2011.
- [60] 屠六邦. 农林复合经营技术: 林菌复合经营类型与技术[J]. 林业科技开发, 1999(1): 54-55.
- [61] Graham L, Pettiphe R. Cultivation of the shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) on lignocellulosic waste [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1988(42): 195-198.
- [62] Kohsaka R, Ito K, Miyake Y, et al. Cultural ecosystem services from the afforestation of rice terraces and farmland: Emerging services as an alternative to monoculturalization [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 497(5): 119481.
- [63] 江南, 窦瀚洋. 林菇共育, 实现林生菇、菇养林 (人民眼·农业文化遗产保护) [N]. 人民日报, 2023-02-03(9).
- [64] 桑荣生, 陈爱红. 浅谈菇稻轮作的新型栽培方式[J]. 中国农业信息, 2013(7): 63.
- [65] 徐根生, 黄丽梅. 鲜香菇·杂交水稻·速生小青菜高效轮作[J]. 农村新技术, 2015(7): 10-11.
- [66] 张李杨, 黄卫华. 庆元林·菇共育系统: 农业文化遗产焕发新时代魅力 [N]. 丽水日报, 2023-08-06(4).
- [67] 朱冠楠, 王斌. 食用菌农业文化遗产: 生动呈现人与自然的和谐共生 [N]. 人民日报, 2023-01-09(5).
- [68] 闵腾辉, 杨中敏, 玛依热·麦图隼, 等. LED 光质配比对香菇菌丝生长及转色期生理活性的影响[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5): 219-226.
- [69] Ma X L, Fan X L, Wang G Z, et al. Enhanced expression of thaumatin-like protein gene (*LeTLPI*) endows resistance to *Trichoderma atroviride* in *Lentinula edodes* [J]. Life, 2021, 11(8): 863.
- [70] 耿立, 龚凤萍, 上官端琳, 等. 一种利用菌丝生物热的香菇工厂化转色方法与流程: CN107079714A [P]. 2017-08-22.
- [71] 杨文建, 王柳清, 胡秋辉. 我国食用菌加工新技术与产品创新发展现状[J]. 食品科学技术学报, 2019, 37(3): 13-18.