

DOI: 10.16861/j.cnki.zggc.2024.0833

# 基于 CiteSpace 分析近 10 年中国食用菌栽培基质研究热点与趋势

耿立<sup>1</sup>, 毕小茹<sup>2</sup>, 叶忠森<sup>3</sup>, 邹通<sup>3</sup>, 黄雅琴<sup>3</sup>, 李尽哲<sup>3</sup>

(1. 宁津县现代农业发展服务中心 山东宁津 253400; 2. 山东众兴菌业科技有限公司 山东宁津 253400; 3. 信阳农林学院药学院 河南信阳 464000)

**摘要:** 随着我国经济高质量发展与产业结构调整进程加快, 食用菌产业的后续发展面临着被迫调整基础配方的风险, 开发应用更具成本和产量优势的新型基质配方及其配套栽培技术已成为食用菌产业发展面临的重要问题。系统梳理食用菌栽培基质相关研究进展, 对更加精准地破解食用菌产业发展中与基质相关的瓶颈问题, 锁定栽培基质技术领域具有前瞻性的重大研究课题具有重要意义。基于 2014—2023 年 CNKI 与 Web of Science 核心数据库文献, 梳理国内学者在食用菌栽培基质领域的研究进展, 探索食用菌栽培基质研究领域的前沿、动态与发展趋势, 以期为推进栽培基质相关研究、促进食用菌产业高质量可持续发展提供参考。

**关键词:** 食用菌; 栽培基质; 热点; 趋势; CiteSpace

中图分类号: S646 文献标志码: A 文章编号: 1673-2871(2025)08-238-12

## Research hotspots and trends of edible fungus cultivation substrates in China in recent ten years based on CiteSpace analysis

GENG Li<sup>1</sup>, BI Xiaoru<sup>2</sup>, YE Zhongsen<sup>3</sup>, ZOU Tong<sup>3</sup>, HUANG Yaqin<sup>3</sup>, LI Jinzhe<sup>3</sup>

(1. Modern Agricultural Development Service Center of Ningjin County, Ningjin 253400, Shandong, China; 2. Shandong Zhongxing Edible Fungus Technology Co., Ltd., Ningjin 253400, Shandong, China; 3. College of Pharmacy, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, Henan, China)

**Abstract:** With the acceleration of China's high-quality economic development and the process of industrial structure adjustment, the subsequent growth of the edible fungus industry faced the risk of necessitating adjustments to its foundational formulations. Developing and applying novel substrate formulations with cost-effective and high-yield advantages, along with their corresponding cultivation techniques, has become a critical change for the industry. Systematically reviewing the research progress related to edible fungus cultivation substrates is of great significance for more accurately solving the bottleneck problems related in the development of the edible fungus industry and identifying forward-looking major research topics in the field of cultivation substrate technology. Based on the core literature data of CNKI and Web of Science databases from 2014 to 2023, the research progress of domestic scholars in the field of edible fungus cultivation substrates was sorted out, and the frontiers, dynamics and development trends in the research field of edible fungus cultivation substrates were explored in order to provide references for promoting relevant research on cultivation substrates and promoting the high-quality and sustainable development of the edible fungus industry.

**Key words:** Edible fungi; Cultivation matrix; Hotspots; Trend; CiteSpace

栽培基质是食用菌生产的基本原料, 主要包括碳源、氮源、微量元素等类型。栽培基质的种类、来源、处理方式等, 直接影响着食用菌的生产周期、产量、营养成分与经济效益<sup>[1]</sup>。近年来国内关于食用

菌栽培基质的研究, 主要集中于对单一基质的具体应用方式与效果进行试验, 以期优化栽培配方、提升产量和质量, 却始终缺乏立足于较广阔时空视域的系统性研究。这种研究现状制约着科研人员对

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(12305399); 河南省高等学校重点科研项目(24B180013, 24B180014); 河南省食用菌产业体系专项资金(豫财科(2025)2号); 校级学术骨干项目(信农教(2023)18号)

作者简介: 耿立, 男, 农艺师, 研究方向为食用菌工厂化生产。E-mail: 278594508@qq.com

通信作者: 李尽哲, 男, 教授, 研究方向为食药真菌生产及深加工。E-mail: xynz1688@163.com

于食用菌栽培基质领域研究热点与发展趋势的把握,妨碍了相关研究方向与具体课题的选择;同时,也不利于食用菌产业内与栽培基质相关的上述重大问题之解决。可见,在当前产业发展背景下,极有必要系统梳理食用菌栽培基质相关研究进展,这对更加精准地破解食用菌产业发展中与基质相关的瓶颈问题,锁定栽培基质技术领域具有前瞻性的重大研究课题,从而开辟食用菌产业技术进步新路径、驱动食用菌产业技术跃迁,具有重要意义。

为此,采用 CiteSpace 6.2.R4 软件,从 CNKI 核心期刊与 Web of Science 核心合集数据库筛选了近 10 a(年)国内具有代表性的核心期刊文献数据,通过数据网络可视化分析,捕捉食用菌栽培基质研究领域的热点问题、研究机构和重要学者,通过突现词分析探索食用菌栽培基质研究领域的前沿、动态与发展趋势,并结合具体文献对研究热点进行详尽的重点解析,以期为推进食用菌栽培基质相关研究、促进食用菌产业高质量可持续发展提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 数据来源

数据来源于 CNKI 核心期刊与 Web of Science 数据库。(1)在中国知网期刊高级检索页面,

选择检索条件,“2014—2023 年”“来源类型:SCI 来源期刊、EI 来源期刊、核心期刊、CSCD”,依次检索主题词(模糊)“‘食用菌’并含‘基质’”“‘菇’并含‘基质’”“‘菇’并含‘栽培’”“‘耳’并含‘栽培’”,2023 年 11 月 19 日记为检索日期。(2)在 Web of Science 核心合集数据库检索页面,依次输入“mushroom(菇)”“edible fungi(食用菌)”“substrate(基质)”“cultivation medium(栽培培养基)”等为主题词进行精确检索,文献发表年限为 2014—2023,从中筛选第一作者工作单位为国内机构的文献。共获得中文文献 556 篇、英文文献 173 篇,通过在检索结果页面阅读文章摘要,分别去除偏离主题的文献 67、35 篇,筛选出相关中文文献 489 篇、英文文献 138 篇,作为分析的基础数据;中、英文献来源期刊分别为 91、81 种,其中发文量前 10 位的期刊见表 1、表 2。

### 1.2 分析方法

将检索出的 CNKI 文献数据导出为 Refworks 格式文件,Web of Science 文献导出为纯文本格式文件,应用 CiteSpace 6.2.R4 软件,分别进行年度发文量统计、关键词共现与聚类分析、关键词时区分析和突现词分析、机构共现分析与机构合作网络分析、作者共现分析与作者合作网络分析等可视化分析,并生成对应的知识图谱。应用 Microsoft Excel v16.0 绘制年度发文量变化趋势图。

表 1 2014—2023 年 CNKI 中文核心期刊食用菌栽培基质研究领域发文量(前 10)

Table 1 Publication statistics of edible fungus cultivation substrate research in CNKI-indexed Chinese core journals (Top 10, 2014 to 2023)

序号 No.	期刊名称 Journal name	出版周期 Publication cycle	复合影响因子(2023 年版) Composite impact factor (2023 Edition)	发文量 Number of paper published
1	北方园艺 <i>Northern Horticulture</i>	半月刊 Semimonthly	1.472	106
2	中国食用菌* <i>Edible Fungi of China</i>	双月刊 Bimonthly	0.751	47
3	食用菌学报 <i>Acta Edulis Fungi</i>	双月刊 Bimonthly	1.791	32
4	菌物学报 <i>Mycosystema</i>	月刊 Monthly	2.404	19
5	江苏农业科学 <i>Jiangsu Agricultural Sciences</i>	半月刊 Semimonthly	1.431	16
6	西南农业学报 <i>Southwest China Journal of Agricultural Sciences</i>	月刊 Monthly	1.608	14
7	南方农业学报 <i>Journal of Southern Agriculture</i>	月刊 Monthly	1.733	13
8	福建农业学报 <i>Fujian Journal of Agricultural Sciences</i>	月刊 Monthly	1.105	11
9	河南农业科学 <i>Journal of Henan Agricultural Sciences</i>	月刊 Monthly	1.971	11
10	分子植物育种 <i>Molecular Plant Breeding</i>	半月刊 Semimonthly	1.683	5

注:数据来源于 CNKI。\*《中国食用菌》被北京大学《中文核心期刊要目总览》2020 年版、2023 年版移出,由于该刊在此前年份属于北大核心期刊,且是我国食用菌领域重要的特色期刊,故本文仍将其作为文献来源期刊。

Note: Data sourced from CNKI. *Edible Fungi of China* was removed from the *Chinese Core Journal Directory* (2020 and 2023 editions) by Peking University. However, since it was previously classified as core journal and remained a key specialized journal in China's edible fungi research field, this study still included it as a source journal.

表2 2014—2023年 Web of Science 期刊食用菌栽培基质研究领域发文量概况(前10)  
Table 2 Overview of publication outputs in edible fungus cultivation substrate research from Web of Science (Top 10, 2014 to 2023)

序号 No.	期刊名称 Journal name	出版周期 Publication cycle	JCR 影响因子(2023年版) JCR impact factor(2023 Edition)	发文量 Number of paper published
1	<i>Frontiers in Microbiology</i>	Monthly	5.2	10
2	<i>Bioresource Technology</i>	Semimonthly	9.7	8
3	<i>Science of the Total Environment</i>	Semimonthly	9.8	6
4	<i>International Journal of Medicinal Mushrooms</i>	Quarterly	1.4	6
5	<i>Foods</i>	Semimonthly	5.2	5
6	<i>Scientia Horticulturae</i>	Semimonthly	3.9	5
7	<i>Fermentation-basel</i>	Monthly	3.2	5
8	<i>Waste and Biomass Valorization</i>	Monthly	2.8	4
9	<i>Molecules</i>	Semimonthly	4.6	4
10	<i>Journal of Fungi</i>	Monthly	5.2	4

注: 数据来源于 Web of Science 核心合集数据库。

Note: Data sourced from Web of Science core collection database.

## 2 结果与分析

### 2.1 文献数量与年度分布

年度发文数量可反映国内食用菌栽培基质领域 10 a 来的科研状况,2014—2023 年间,我国食用菌栽培基质领域研究中文期刊论文年发文量(图

1-A)呈稳中有降的趋势,同期英文期刊论文发文量(图 1-B)总体呈增加趋势。由此可见,近 10 a 国内学者持续关注食用菌栽培基质领域的研究,中文核心期刊与英文核心期刊的发文量总体表现为此消彼长的趋势,被 SCI 核心期刊收录的高水平研究论文越来越多,未来食用菌栽培基质相关研究有望成

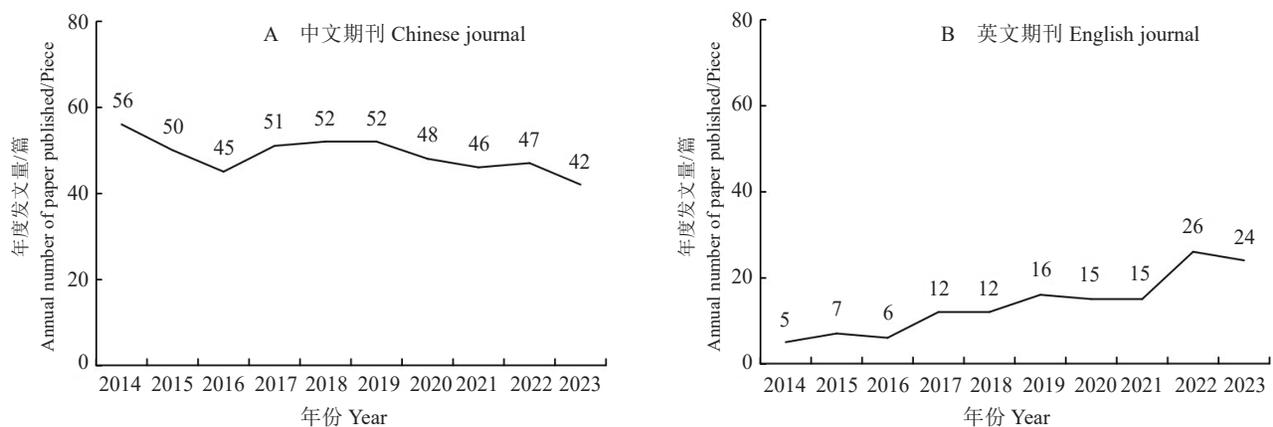


图1 2014—2023年国内食用菌栽培基质研究发文量变化趋势

Fig. 1 Comparative trends of publication outputs on edible mushroom cultivation substrates in domestic studies (2014 to 2023)

为国外高水平期刊关注的领域。

### 2.2 CiteSpace 知识图谱分析

2.2.1 高频关键词 通过分析高频关键词,可以直观地了解食用菌栽培基质领域的研究热点分布。(1)基于 CNKI 数据,利用 CiteSpace 对关键词进行可视化分析,并选择 Keyword 作为节点进行聚类分析,时间跨度(Time Slicing)为 2014—2023 年,时间

分区(Years per Slice)设置为 1。运算后得到 267 个关键词节点,681 条连线;发现近 10 a 国内食用菌栽培基质研究高频关键词为“平菇、产量、营养成分、金针菇、栽培、双孢蘑菇(双孢菇)、大球盖菇、培养基”等(表 3,图 2-A)。(2)基于 Web of Science 数据,运算后得到 231 个关键词节点,1016 条连线;高频关键词为“growth(生长)、*Pleurotus ostreatus*(平

菇)、yield(产量)、spent mushroom substrate(菌糠)、polysaccharide(多糖)、fermentation(发酵)”等(表3,图2-B)。使用对数似然法(LLR)对高频关键词进行聚类,得到关键词聚类图谱,以明确表现研究热点的知识结构特征。通过聚类分析,中、英文文献分别得到10个聚类(cluster)、9个聚类,且聚类模块值(Q值)分别为0.4953、0.5112,均大于0.3,表明聚类结构显著;聚类平均轮廓值(S值)分别为0.7536、0.8355,均大于0.7,表明聚类结果可靠。主要的中文关键词聚类包括“平菇、产量、双孢蘑

菇、重金属、食用菌、培养基、草菇、大球盖菇、功能预测”等(表4、图2-C);英文关键词聚类包括“mechanism analysis(机理分析)、different lignocellulosic substrate(不同木质纤维素底物)、excessive oxalic acid(过量草酸)、genome sequence(基因组序列)、commercial production(商业生产)、composted sawdust(堆肥锯末)、agricultural residue(农业生产废弃物)、porous carbon material(多孔碳材料)”等(表4、图2-D)。

关键词时区分析和突现词分析:关键词时区视

表3 2014—2023年国内食用菌栽培基质研究中前15位关键词的词频和中心度统计

Table 3 Word frequency and central degree statistics of the top 15 keywords in edible fungi cultivation substrate research from 2014 to 2023

中文文献 Chinese literature				英文文献 English literature			
序号 No.	频率 Count	中心度 Centrality	关键词 Key words	序号 No.	频率 Count	中心度 Centrality	关键词 Key words
1	89	0.51	平菇 <i>Pleurotus ostreatus</i>	1	26	0.21	Growth
2	51	0.27	产量 Yield	2	23	0.24	<i>Pleurotus ostreatus</i>
3	32	0.10	营养成分 Nutrients	3	21	0.25	Yield
4	32	0.14	金针菇 <i>Flammulina velutipes</i>	4	18	0.08	Cultivation
5	24	0.12	栽培 Cultivate	5	16	0.14	Spent mushroom substrate
6	23	0.07	杏鲍菇 <i>Pleurotus eryngii</i>	6	10	0.06	Polysaccharide
7	22	0.10	双孢蘑菇 <i>Agaricus bisporus</i>	7	9	0.19	Fermentation
8	21	0.10	大球盖菇 <i>Pleurotus ostreatus</i>	8	8	0.01	Antioxidant activity
9	20	0.16	培养基 Culture medium	9	8	0.03	Biological efficiency
10	19	0.05	草菇 <i>Volvariella volvacea</i>	10	8	0.08	Degradation
11	18	0.06	培养料 Culture material	11	8	0.02	Pretreatment
12	16	0.06	农艺性状 Agronomic traits	12	7	0.10	Acid
13	16	0.09	栽培基质 Cultivation substrate	13	7	0.16	<i>Agaricus bisporus</i>
14	15	0.07	香菇 <i>Lentinus edodes</i>	14	7	0.08	Antioxidant
15	14	0.03	品质 Quality	15	7	0.08	Biomass

注:中心度值大于0.1,表明该节点在食用菌栽培基质相关研究领域知识演变中起到关键作用。

Note: The centrality value is greater than 0.1, which indicated that this node played a key role in the evolution of knowledge in the field of edible fungus cultivation substrate.

图(图3-A、图3-B)和突现词分析(图3-C、图3-D)结果显示,10a来国内食用菌栽培基质研究热点存在阶段性演变的发展特征。从中文文献来看,2014—2015年的突现词为“培养基(culture medium)、重金属(heavy metal)、筛选(screening)”,安全高效的栽培基质配方筛选是该阶段研究者们努力的方向;2016—2019年的突现词为“双孢蘑菇(*Agaricus bisporus*)、菌草(Juncao)、栽培技术(cultivation technique)、胞外酶(exoenzyme)”,表明食用菌栽培基质研究深入到菌草为代表的新基质对传统基质的替代研究,以及关于栽培基质降解利用生理生化方面;2020—2023年的突现词为“碳源、羊肚

菌、氨基酸”,该阶段通过栽培基质相关的创新来提升食用菌的有效成分含量。

从英文文献来看,关键词的突现期集中在2016—2023年间。其中,2016—2018年突现词为“*Pleurotus ostreatus*(平菇)、*Lentinula edodes*(香菇)、*Cordyceps militaris*(蛹虫草)”,表明这几个品种是栽培基质研究的主要试材,配方优化是主要研究方向;2019年突现词为“pretreatment(预处理)、medicinal mushrooms(药用菌)、components(成分)”,该阶段重点关注物理、化学或生物处理方法等食用菌栽培基质预处理技术,并探索能够提高药用菌有效成分的新型栽培基质的应用;2020—2021年突现

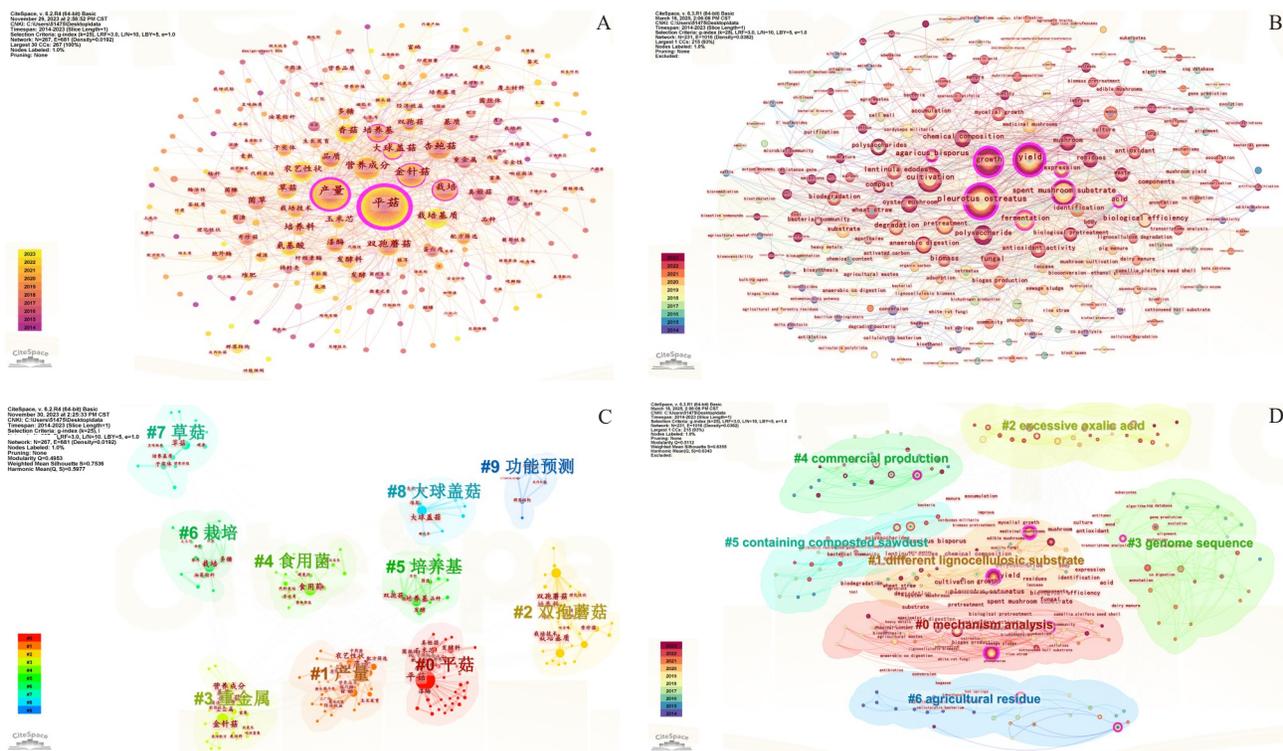


图2 国内食用菌栽培基质研究文献关键词共现知识图谱(A、B)、聚类知识图谱(C、D)

Fig. 2 Keywords co-occurrence knowledge map(A, B), clustering knowledge map(C, D) in edible fungi cultivation substrate research of China

词为“biogas production(沼气生产)”,表明研究从栽培基质的使用转向基质废弃物的能源化利用,契合了食用菌产业绿色可持续发展的趋势。

2.2.2 研究机构与作者合作情况 研究机构共现分析:研究机构共现分析能够直观地显示出2014—2023年间我国哪些机构在食用菌栽培基质研究领域较为活跃,并处于研究成果产出较多的优势地位。从研究机构共现图谱(图4-A、图4-B)可见,中文文献中10a间在食用菌栽培基质研究领域贡献最大的机构为上海市农业科学院食用菌研究所(农业部南方食用菌资源利用重点实验室、国家食用菌工程技术研究中心),英文文献中贡献最大的机构为Jilin Agricultural University(吉林农业大学)。其他主要机构的发文情况见表5。

研究机构聚类分析:由图4-C、图4-D可见,基于中文文献的研究机构聚类,得到228个节点、172条连线,其密度值(Density)仅为0.0066;英文文献的研究机构聚类后,得到150个节点、220条连线,其密度值为0.0197。表明10a间国内食用菌栽培基质研究领域的机构合作度还极低。可能的原因如下,一是多数研究仍局限于省域内机构间的合作,限制了跨省(区、市)重大基质创新项目的立项和实施;二是栽培基质研究方面的产学研协同创新

合作水平还较低,始终制约着高校、科研院所与食用菌生产企业之间的交流协作。

作者合作网络分析:通过对可视图谱的分析,发现近10a CNKI发文数量最多的作者是林占熿,其次是陈明杰、彭卫红、余昌霞、王灿琴、黄忠乾、刘斌、林辉、陈青君、于海龙等,以上学者构成了我国食用菌栽培基质研究领域的领军人物群体。中文文献作者共现分析图谱显示290个节点,506条连线,网络密度较低,仅为0.0121(图5-A);英文文献作者共现分析图谱显示226个节点,295条连线,网络密度为0.0140(图5-B)。具体来说,林占熿与刘斌、林辉等作者间,陈明杰和余昌霞、汪虹、于海龙、尚晓冬、李玉等作者间,彭卫红和黄忠乾、甘炳成等作者间,以及孔维丽和崔筱、刘芹等作者间连线紧密,分别组成了较紧密的食用菌栽培基质研究合作圈。

中文文献作者聚类分析共得到营养成分、草菇、发酵料、商品性、羊肚菌、工厂化等6个主题(图5-C),英文文献作者聚类分析得到7个主题(图5-D),分别为excessive oxalic acid(过量草酸)、use(利用)、mushroom(蘑菇)、effect(效果)、screening(筛选)、microbial community(微生物群落)、enabling efficient bioconversion(高效生物转化)。结

表4 2014—2023年国内食用菌栽培基质研究关键词聚类结果

Table 4 Cluster analysis of research key words in China's edible fungus cultivation substrate studies (2014 to 2023)

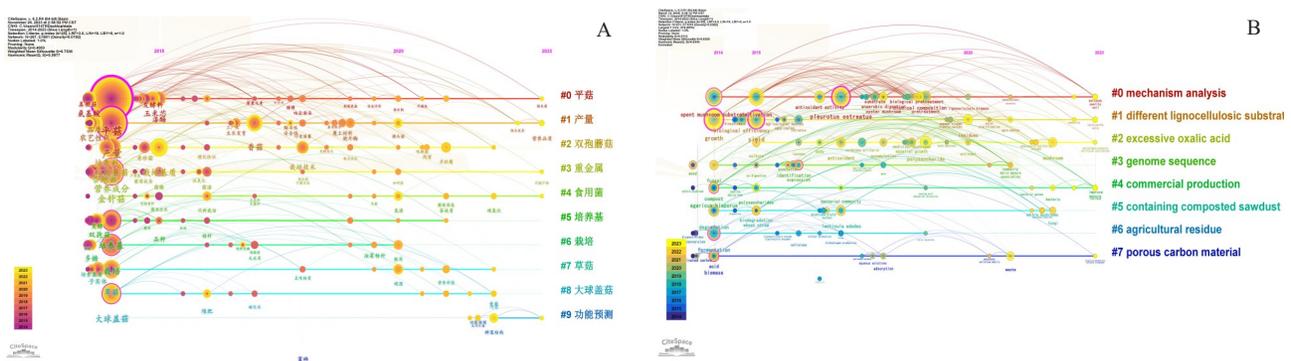
中文文献 Chinese literature			英文文献 English literature		
聚类 Cluster ID	S 值 Silhouette	关键词 Key words	聚类 Cluster ID	S 值 Silhouette	关键词 Key words
#0 平菇 <i>Pleurotus ostreatus</i>	0.810	菌草 Juncao、漆酶 Laccase、发酵料 Fermented material、玉米芯 Corn cob、氨基酸 Amino acid、垫料 Bedding material、生理生化 Physiology and biochemistry、保水剂 Water-retaining Agent	#0 Mechanism analysis	0.772	Lignocellulose feedstock; Mechanism analysis; Cottonseed hull; Biorefinery substrate; Comparative proteomics; Seed shell
#1 产量 Yield	0.735	品质 Quality、香菇 <i>Lentinus edodes</i> 、农艺性状 Agronomic traits、覆土 Casing Soil、印度丽蘑 <i>Calocybe indica</i>	#1 Different lignocellulosic substrate	0.850	Different lignocellulosic substrate; agronomic trait; Straw substrate; wheat bran; Nutritional content
#2 双孢蘑菇 <i>Agaricus bisporus</i>	0.805	培养料 Culture material、栽培基质 Cultivation substrate、秀珍菇 <i>Pleurotus geesteranus</i> 、提取液 Extract、山枣核 Jujube seed、微生物 Microorganism、呼吸消耗 Respiratory consumption	#2 Excessive oxalic acid	0.809	Saprophytic growth; Excessive oxalic acid; Medicinal mushroom; Saprophytic process; Cultivation pattern; Fruiting bodies
#3 重金属 Heavy metal	0.668	杏鲍菇 <i>Pleurotus eryngii</i> 、金针菇 <i>Flammulina velutipes</i> 、营养成分 Nutrients、富集 Enrichment、安全性 Safety、纤维废弃物 Fiber waste、多酚 Polyphenols	#3 Genome sequence	0.944	Genome sequence; Lignocellulose degradation; Glucose rice straw sawdust; Wheat grain; Physiological characteristics
#4 食用菌 Edible fungi	0.755	菌丝生长 Mycelial growth、柴达木盆地 Qaidam Basin、氮源 Nitrogen source、茶 Tea、纤维素 Cellulose、废弃菌材 Wood Residues	#4 Commercial production	0.810	Dairy cow; Commercial production; <i>Agaricus bisporus</i> ; Bacterial communities; Antibiotic resistance gene; Cultivation substrate
#5 培养基 Culture medium	0.904	双孢菇 <i>Agaricus bisporus</i> 、筛选 Screening、原种 Primary spawn、母种 Mother culture、咖啡壳 Coffee shell、粪 Manure、动态发育 Dynamic development、猴头 <i>Hericium erinaceus</i> 、灵芝 <i>Ganoderma lucidum</i> 、黄伞 <i>Pholiota flavescens</i> 、虎奶菇 <i>Pleurotus ferulae</i>	#5 Containing composted sawdust	0.814	Biological preprocessing; Containing composted sawdust; Aromatic amino acid; Metabolism-related gene; Pah-contaminated soil; Different agricultural waste
#6 栽培 Cultivation	0.821	银耳 <i>Tremella fuciformis</i> 、多糖 Polysaccharides、单糖组分 Monosaccharide components、油菜秸秆 Rape straw、药渣 Drug residue、优化 Optimization、灰树花 <i>Grifola frondosa</i> 、毛木耳 <i>Auricularia polytricha</i>	#6 Agricultural residue	0.849	Agricultural residue; Energy crop; Great basin; Anaerobic ethanol-producing cellulolytic bacterial consortium; Hot spring
#7 草菇 <i>Volvariella volvacea</i>	0.869	复壮 Rejuvenation、子实体 Fruiting body、呈味物质 Flavor Substances、菌种退化 Strain Degradation、丝氨酸 Serine、生理生化参数 Physiological and biochemical parameters、海藻糖 Trehalose、砷 Arsenic、铅 Lead	#7 Porous carbon material	0.887	Porous carbon material; Mixed alkali; Edible fungus; Mechanism research; Polluted liquid treatment
#8 大球盖菇 <i>Stropharia rugosoannulata</i>	0.878	竹屑 Bamboo sawdust、堆肥 Composting、培养温度 Culture temperature、氮添加 Nitrogen addition、磁化水 Magnetized water	#8 Ability	0.849	Ability; Mycelia; Trichoderma; High temperature; Spent mushroom substrate
#9 功能预测 Function prediction	1.000	土壤真菌 Soil fungal、土壤微生物 Soil microorganisms、灰肉红菇 <i>Russula griseocarnosa</i> 、多样性 Diversity			

注: S 值为聚类平均轮廓值, S>0.5~0.7 表明聚类合理, S>0.7 表明聚类是令人信服的。

Note: The S-value represents the average silhouette coefficient of clusters. An S-value >0.5-0.7 indicates reasonable clustering, while S-value > 0.7 suggests convincing clustering.

合表 6 可见,不同的作者合作圈,分别针对各自擅长的热点主题进行特色鲜明的深度研究。如福建农林大学生命科学学院林兴生等<sup>[2]</sup>,主要从事菌草基质栽培食用菌的研究,而营养成分与有效功能性成分评价是其研究重点。上海市农业科学院食用

菌研究所余昌霞等<sup>[3-4]</sup>,系统研究了不同培养基质对草菇子实体营养成分、呈味物质、挥发性风味成分的影响,以及在基质中添加植物激素<sup>[5]</sup>、有机酸等对食用菌生长的影响<sup>[6]</sup>。河南省农业科学院食用菌研究所孔维丽等<sup>[7]</sup>研究员团队,主要从事平菇发酵料



引用量前 10 位突现词 Top 10 Key words with the strongest citation bursts

Key words	Year	Strength	Begin	End	2014—2023	Key words	Year	Strength	Begin	End	2014—2023
栽培基质 Cultivation substrate	2015	4.35	2021	2023		Ostreatus	2016	1.34	2016	2019	
羊肚菌 <i>Morchella esculenta</i>	2021	3.10	2021	2023		<i>Pleurotus ostreatus</i>	2017	1.98	2017	2019	
栽培 Cultivation	2014	3.09	2016	2017		<i>Lentinula edodes</i>	2017	1.54	2017	2018	
培养基 Culture medium	2014	3.09	2014	2015		<i>Cordyceps militaris</i>	2018	1.92	2018	2019	
双孢蘑菇 <i>Agaricus bisporus</i>	2014	3.05	2016	2018		Substrate	2018	1.47	2018	2020	
栽培技术 Cultivation technique	2018	2.36	2018	2020		Pretreatment	2019	2.27	2019	2020	
重金属 Heavy metal	2014	2.34	2014	2015		Medicinal mushrooms	2019	1.82	2019	2020	
碳源 Carbon source	2020	2.10	2020	2023		Components	2019	1.36	2019	2020	
银耳 <i>Tremella fuciformis</i>	2020	2.05	2020	2021		Biogas production	2018	1.30	2020	2021	
胞外酶 Exoenzyme	2019	1.95	2019	2020		Fungal	2014	1.96	2021	2023	

图 3 国内食用菌栽培基质研究文献关键词时区视图(A、B)及突现词分析(C、D)

Fig. 3 Key words time zone view (A, B) and burst word analysis (C, D) in edible fungi cultivation substrate research

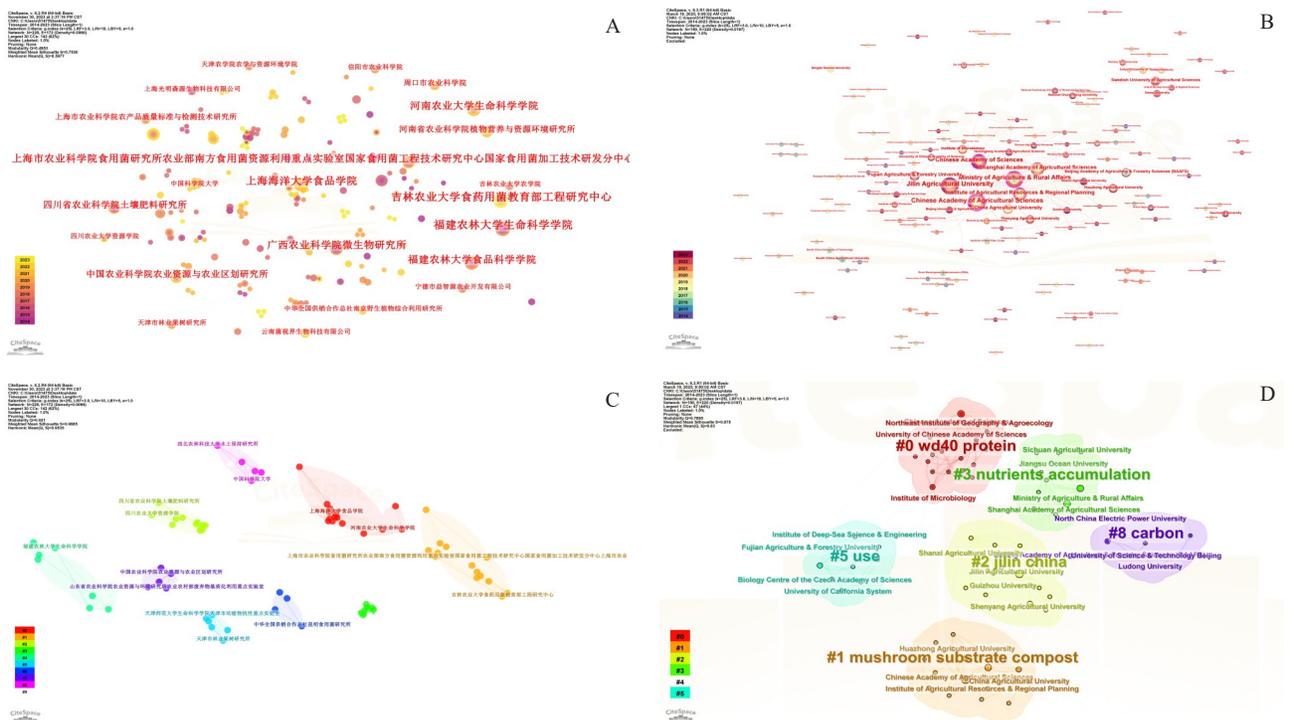


图 4 研究机构共现图谱(A、B)和聚类图谱(C、D)

Fig. 4 Research institutions network map(A, B) and cluster map(C, D)

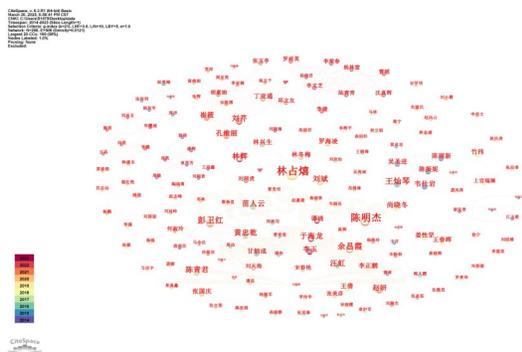
栽培相关的品种筛选、发酵过程中的促生功能菌株分离鉴定<sup>[8]</sup>与毒素降解变化规律<sup>[9]</sup>、发酵料抑菌机理<sup>[10]</sup>等相关研究。上海市农业科学院食用菌研究所

于海龙等<sup>[11]</sup>突出了对工厂化食用菌生产专用型基质的开发与应用研究,如不同木屑颗粒度对工厂化菇类生长的影响。

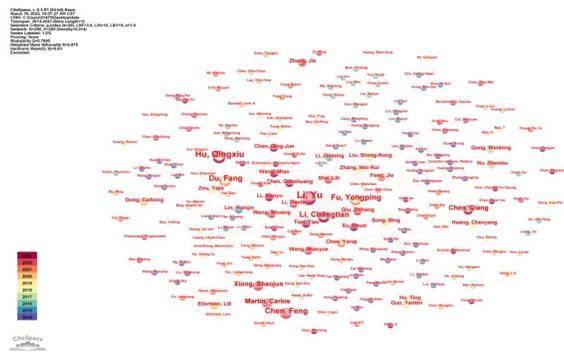
表5 2014—2023年国内食用菌栽培基质领域发文量排名前10研究机构

Table 5 Top 10 research institutions in terms of publication volume in the field of edible mushroom cultivation substrates in China from 2014 to 2023

中文文献 Chinese literature		英文文献 English literature	
机构名称 Organization name	发文量 Number of paper published	机构名称 Organization name	发文量 Number of paper published
上海市农业科学院食用菌研究所 Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences	24	Jilin Agricultural University	18
福建农林大学生命科学学院 College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University	20	Chinese Academy of Agricultural Sciences	16
吉林农业大学植物保护学院 College of Plant Protection, Jilin Agricultural University	19	Ministry of Agriculture & Rural Affairs	15
河南农业大学生命科学学院 College of Life Sciences, Henan Agricultural University	12	Chinese Academy of Sciences	13
广西农业科学院微生物研究所 Microbiology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences	12	Shanghai Academy of Agricultural Sciences	10
河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所 Institute of Plant Nutrition and Resource Environment, Henan Academy of Agricultural Sciences	10	Institute of Agricultural Resources & Regional Planning	10
上海海洋大学食品学院 College of Food Science, Shanghai Ocean University	9	Fujian Agriculture & Forestry University	7
福建农林大学食品科学学院 College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University	9	China Agricultural University	7
东北林业大学林学院 School of Forestry, Northeast Forestry University	8	Swedish University of Agricultural Sciences	5
四川省农业科学院土壤肥料研究所 Institute of Soil and Fertilizer, Sichuan Academy of Agricultural Sciences	7	Beijing Academy of Agriculture & Forestry Sciences (BAAFS)	5



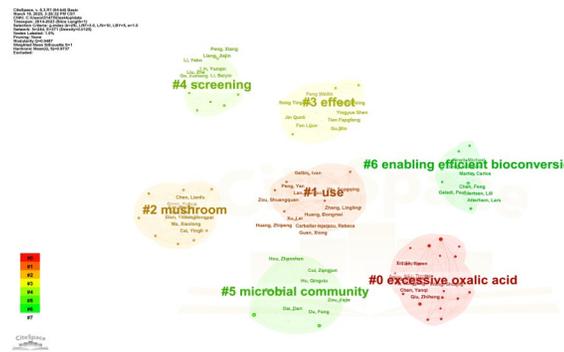
A



B



C



D

图5 作者合作网络图谱(A、B)和聚类图谱(C、D)

Fig. 5 Author cooperative network map (A, B) and cluster map (C, D)

表6 作者合作关系聚类结果  
Table 6 Author collaboration clustering results

聚类主题 ClusterID	代表作者 Author name	相关关键词 Key words
#0 营养成分 Nutrient content	林占熺 LIN Zhanxi、林辉 LIN Hui、林兴生 LIN Xingsheng、胡应平 HU Yingping、刘斌 LIU Bin、罗海凌 LUO Hailing、林冬梅 LIN Dongmei	菌草 Juncao、灵芝 <i>Ganoderma lucidum</i> 、覆土 Casing Soil、印度丽蘑 <i>Calocybe indica</i>
#1 草菇 <i>Volvariella volvacea</i>	余昌霞 YU Changxia、陈明杰 CHEN Mingjie、李传华 LI Chuanhua、汪虹 WANG Hong、赵妍 ZHAO Yan、李正鹏 LI Zhengpeng、王倩 WANG Qian、陈辉 CHEN Hui、张津京 ZHANG Jinjing	子实体 Fruiting bodies、木质纤维素 Lignocellulosic、镉胁迫 Cadmium stress、子实体发育 Fruiting body development、植物激素 Plant hormones
#2 发酵料 Fermented material	孔维丽 KONG Weili、刘芹 LIU Qin、崔筱 CUI Xiao、丁亚通 DING Yatong、张玉亭 ZHANG Yuting、邱友友 QIU Liyou	平菇 <i>Pleurotus ostreatus</i> 、氮含量 Pmmonic content、抑菌机制 Inhibitory mechanism、发酵度 Compost degree
#3 商品性 Commodity Characters	彭卫红 PENG Weihong、黄忠乾 HUANG Zhongqian、苗人云 MIAO Renyun、甘炳成 GAN Bingcheng、刘天海 LIU Tianhai	产量 Yield、栽培 Cultivation、真姬菇 <i>Hypsizygos marmoreus</i> 、茶多酚含量 Tea polyphenol content、茶渣 Tea residue
#4 羊肚菌 <i>Morchella esculenta</i>	罗祥英 LUO Xiangying、杨林雷 YANG Linlei、李文芝 LI Wenzhi、曹瑶 CAO Yao、李健 LI Jian、陆青青 LU Qingqing	氮源 Nitrogen source、碳源 Carbon source、菌丝生长速度 Mycelial growth rate、菌核 Sclerotia
#6 工厂化 Industrialize	于海龙 YU Hailong、尚晓冬 SHANG Xiaodong、李玉 LI Yu、周峰 ZHOU Feng、谭琦 TAN Qi、宋春艳 SONG Chunyan、张美彦 ZHANG Meiyun、章炉军 ZHANG Lujun	富集 Enrichment、木屑 Sawdust、栽培 Cultivation、沼渣 Biogas residue、生长 Growth、矿物质元素 Mineral elements、菌丝生长 Mycelia growth、颗粒度 Particle size、香菇 <i>Lentinula edodes</i> 、鸡腿菇 <i>Coprinus comatus</i>

### 2.3 研究热点解析

2.3.1 探索栽培基质来源 尽管传统的食用菌栽培基质如木屑、棉籽壳等在生产中仍占据重要地位，玉米芯、甘蔗渣、麸皮、米糠等成为工厂化生产的大宗原料，近 10 a 来作物茎秆、菌草、食品加工业副产品、药用植物等的应用领域不断扩展；药渣、养殖垫料、落叶、菌渣等也成为具有较大潜力的食用菌栽培基质来源<sup>[12-14]</sup>。

2.3.2 添加外源因子优化基质配方 添加外源因子类物质是目前配方优化研究的主要途径。这些添加物可分为糖类、微量元素类、有机酸、植物生长调节剂、酶类、植物提取液、维生素等<sup>[15-20]</sup>。其中，糖类物质通常能有效促进菌丝体的生长，氨基酸在菌种复壮中表现出积极效果，曲酸、柠檬酸等有机酸对刺芹侧耳和金针菇等菌丝生长有一定影响<sup>[18]</sup>。微量元素中，硒元素已广泛应用于食用菌的富硒栽培，能显著提高元素含量、改善营养品质和增强抗氧化能力，钙、锌、锶、钾元素对平菇等食用菌的生长发育也有促进作用<sup>[19]</sup>。维生素 B<sub>1</sub>（硫胺素）、维生素 B<sub>2</sub>（核黄素）等多种 B 族维生素，对菇类生长有积极影响<sup>[20]</sup>。IAA、NAA 等植物生长调节剂，能调节食用菌的代谢过程、促进菌丝生长和提高酶活性，如添加 NaAc（乙酸钠）有利于草菇产量的提高<sup>[21]</sup>。大蒜、生姜、油茶枝等植物提取液，影响着多种菌类

的酚类物代谢和抗氧化特性<sup>[22]</sup>。此外，菌糠提取液作为基质添加物的应用价值也被关注，如杏鲍菇菌糠提取液对平菇、秀珍菇、滑菇、毛木耳和金针菇等 5 种食用菌的菌丝生长有促进作用，而平菇、秀珍菇和毛木耳菌丝在添加金针菇菌糠提取液的培养基上生长旺盛<sup>[23]</sup>。

2.3.3 胞外酶与基质物质降解利用规律 食用菌对栽培基质中营养物质的降解、吸收过程主要包括大分子有机物（木质素、纤维素、半纤维素、蛋白质等）的降解、矿质元素（氮、磷、钾等）的吸收、小分子有机物（氨基酸、肽类、脂质、维生素类、苯丙素类、聚酮类、吡喃酸、吡喃酮、植物类激素、抑菌物质等）的代谢等。其中，食用菌对大分子有机物的降解依赖于其分泌的大量胞外酶（纤维素降解酶、半纤维素降解酶、木质素降解酶、蛋白酶、脂肪酶、果胶酶、过氧化物酶等）。近 10 a 关于胞外酶与基质降解利用规律的研究主要涉及三个方面：一是胞外酶活性与食用菌产量的相关性分析，斑玉蕈鲜菇产量与羧甲基纤维素酶、木聚糖酶、滤纸酶、淀粉酶呈显著正相关<sup>[24]</sup>，羧甲基纤维素酶、木聚糖酶活性与双孢蘑菇产量呈正相关<sup>[25]</sup>；二是胞外酶活性在食用菌生长发育过程中的阶段性变化特征，如榆黄蘑菌丝细胞中的滤纸纤维素酶、羧甲基纤维素酶、β-葡萄糖苷酶、淀粉酶、半纤维素酶活性均呈现出前期上升后期下

降的趋势,至幼菇期酶活维持在较高水平;漆酶和过氧化物酶活性在菌丝生长初期较高,但随着栽培时间的延长而下降<sup>[26-27]</sup>;三是基质组分对食用菌胞外酶活性的影响,如培养基添加适量麦麸能够提升毛木耳漆酶活性<sup>[28]</sup>,又如棉籽壳发酵料栽培的平菇,其羧甲基纤维素酶、漆酶、中性蛋白酶的活性均高于玉米芯发酵料对照组<sup>[29]</sup>。

**2.3.4 基质中微生物群落变化** 通过探索栽培基质中微生物群落多样性及其互作关系,可以揭示微生物对菌类菌丝生长和子实体形成的促进作用。该领域的研究主要关注3个问题:一是探索基质中微生物群落多样性及结构变化规律,如不同生长发育阶段基质中的细菌群落结构及优势菌群变化规律<sup>[30]</sup>,不同食用菌覆土细菌结构组成、动态变化、生物功能,覆土细菌与食用菌互作的分子机制等<sup>[31]</sup>,以及发酵料发酵过程中细菌群落多样性、相对丰度变化与病害发生之间的相关性<sup>[32]</sup>;二是分离与鉴定基质中的功能菌株,如从不同时期的平菇发酵料中分离对平菇具有促生作用的菌株、对木霉具有抑制作用的菌株<sup>[33]</sup>、具有降解黄曲霉毒素能力的菌株<sup>[9]</sup>;三是筛选出对野生食用菌具有促生作用的根际土壤微生物,为黄绿卷毛菇、正红菇、玫瑰红菇和灰肉红菇等野生菌类的保育促繁与人工栽培提供依据<sup>[34]</sup>。

**2.3.5 不同基质对子实体营养成分及呈味物质的影响** 基质种类对菇类子实体的营养成分、呈味物质及其含量变化的影响显著,选择合适的栽培基质是优化食用菌营养价值和风味特性的关键<sup>[35]</sup>。2014—2023年间关于不同基质对子实体营养成分及呈味物质影响的研究,具体内容如下:一是不同栽培基质对蛋白质、氨基酸、糖类、多糖肽、亚油酸、膳食纤维、脂肪酸、氨基丁酸、黄酮等子实体营养成分的影响。如不同的栽培基质会影响大球盖菇子实体的多糖组成及抗氧化性质<sup>[36]</sup>,不同基质影响猴头菇子实体多糖的理化特性及其体外免疫活性<sup>[37]</sup>;此外,以姬菇、木耳、平菇、草菇、秀珍菇、巨大革耳和毛木耳等为试材的研究均显示,不同的栽培基质都会影响其子实体中的氨基酸、蛋白质、多糖等基本营养成分的含量。二是不同栽培基质对子实体呈味物质的影响。一方面,某些栽培基质(如中药渣)可能含有较丰富的呈味氨基酸,这些氨基酸在食用菌生长过程中被吸收,进而增加子实体中的呈味氨基酸含量(如鲜味和甜味氨基酸)<sup>[38]</sup>;另一方面,不同的栽培基质会引起子实体中挥发性化合物的种类和含量发生变化,如醇类、酯类、醛类等,因而

特定的栽培基质可能促进某些香气成分的生成,从而影响子实体的整体香气品质<sup>[39]</sup>;此外,不同栽培基质还可能影响食用菌的其他呈味物质,如可溶性糖醇、有机酸等,这些成分也对食用菌的口感和风味有重要作用<sup>[40]</sup>。

### 3 展望

基于本文的研究成果与产业发展形势,预期未来的食用菌栽培基质研究将呈现以下趋势。

(1)基质来源多元化,外源添加物专用化,栽培配方复合化。未来,食用菌栽培基质的来源将更加丰富,更多的天然物料可能用于大规模生产,相关原料加工处理技术的进步将催生多种具有特定理化性质和功能的专用型基质的研发;标准化的碳源、氮源型基质可能由专业厂家统一生产,各种专用的营养补充剂及其复合型添加剂将层出不穷;针对不同的食用菌品种和生产需求,开发免拌料、免灭菌、可直接接种使用的“即用型基质”或“控释型基质”,将更好地满足市场的多样化需求;基质原料选择、加工处理工艺、质量检测等相关标准将进一步完善。最终,食用菌的栽培配方将优化为包括多种基质的复合型配方,在营养更加全面、易吸收的同时,更能够针对某个具体品种或菌株特性,促进食用菌生产的生物转化率大幅提升,子实体的营养成分含量与风味进一步提高。

(2)基质降解酶相关研究将不断深化,基因工程和合成生物学在食用菌栽培基质研究中的应用将不断扩展。在改良菌种对基质的适应性能方面:通过导入特定基因,可以提升食用菌对基质中营养物质的利用效率,如优化木质素、纤维素分解酶系,使得食用菌能够更好地分解和吸收培养基中的复杂碳源<sup>[41]</sup>。基质预处理与改性方面:合成生物学技术可以创造或改良特定微生物对某类基质进行预处理,如创制分泌高效酶类的新菌株,将难以降解的秸秆、木屑等有机物质转化为易被食用菌菌丝分解利用的基质形态;又如,通过构建生物催化系统,可以在基质中引入功能性微生物群落,促进基质发酵过程,以减少基质中的有害物质并增加有益代谢产物<sup>[42]</sup>。

(3)基质研究将为食用菌产业绿色发展提供更强助力。未来,畜禽粪使用作食用菌栽培基质的无害化集中处理技术,以及适用菇类筛选、配套栽培技术等,可能成为未来食用菌产业科技创新助力绿色发展的重要方向;多种植物提取液用于基质预处

理,逐步替代化学农药,实现食用菌病虫害绿色防治;利用外源因子和大型真菌联合修复环境污染,将成为未来研究中具有重大生态效益和社会价值的前沿问题<sup>[43]</sup>。此外,菌渣作为土壤改良剂或生物修复剂,在促进土壤健康与降低碳排放方面作出更大贡献<sup>[44]</sup>;菌渣作为生物乙醇、生物氢、生物油等可再生资源生产底物以及包装材料等方面的应用将进一步扩展<sup>[45-46]</sup>。

### 参考文献

- [1] ZIED D C, PARDO J E, NOBLE R, et al. Efficiency of mushrooms for food production—fundamental strategic decision-making[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 125: 105734.
- [2] 林兴生,林占熿,林辉,等.菌草鹿角灵芝新菌株栽培特性及活性成分分析[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2020, 57(1): 181-185.
- [3] 余昌霞,赵妍,陈明杰,等.利用不同培养料栽培的草菇子实体挥发性风味成分分析[J]. *食用菌学报*, 2019, 26(2): 37-44.
- [4] 余昌霞,陈明杰,李传华,等.不同培养基质对草菇营养成分及呈味物质的影响[J]. *菌物学报*, 2018, 37(12): 1731-1740.
- [5] 王言,余昌霞,曹晖,等.四种植物激素对刺芹侧耳和金针菇菌丝生长的影响[J]. *食用菌学报*, 2015, 22(4): 23-26.
- [6] 王言,余昌霞,曹晖,等.三种有机酸对刺芹侧耳和金针菇菌丝生长的影响[J]. *食用菌学报*, 2015, 22(3): 38-42.
- [7] 孔维丽,崔筱,袁瑞奇,等.河南省适宜发酵料栽培的平菇优良品种筛选[J]. *中国食用菌*, 2019, 38(11): 23-28.
- [8] 张俊杰,李硕,崔筱,等.平菇发酵料不同发酵阶段功能菌的分离与鉴定[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(2): 113-119.
- [9] 崔筱,胡素娟,刘芹,等.平菇发酵培养料制备过程中黄曲霉毒素降解变化分析[J]. *中国瓜菜*, 2023, 36(11): 93-99.
- [10] 崔筱,刘芹,丁亚通,等.平菇培养料发酵后对霉菌抑制机制研究[J]. *河南农业科学*, 2021, 50(3): 109-116.
- [11] 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.
- [12] 高菊霞.农作物秸秆基质化栽培食用菌高产技术探讨[J]. *种子科技*, 2024, 42(5): 128-130.
- [13] XU S, LI F Y, GAO J L, et al. Low GHG emissions and less nitrogen use in mushroom-based protein production from chitin-containing waste and cottonseed hull with two phase SSF[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 201: 116970.
- [14] 张娜,王中杰,李飞,等.中药残渣资源化利用途径及发展探究[J]. *中国资源综合利用*, 2021, 39(10): 107-109.
- [15] GSECKA M, MLECZEK M, SIWULSKI M, et al. Phenolic and flavonoid content in *Hericium erinaceus*, *Ganoderma lucidum*, and *Agrocybe aegerita* under selenium addition[J]. *Acta Alimentaria*, 2016, 45(2): 300-308.
- [16] 杨焕玲,查磊,赵旭,等.培养基中添加海藻糖对大球盖菇、斑玉蕈菌丝生长的影响[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(5): 1108-1114.
- [17] 林金盛,马林,蒋宁,等.柠檬酸钠对草菇菌丝生长特性的影响[J]. *吉林农业大学学报*, 2019, 41(5): 526-531.
- [18] 辛宇,李长田,荆琴方,等.三种酶制剂的添加量和时间对草菇生长和产量的影响[J]. *食用菌学报*, 2014, 21(4): 39-41.
- [19] HU T, LIANG Y, ZHAO G S, et al. Selenium biofortification and antioxidant activity in cordyceps militaris supplied with selenate, selenite, or selenomethionine[J]. *Biological Trace Element Research*, 2018, 187(2): 553-561.
- [20] 杜春梅,欧滢蔓,董锡文,等.三种维生素对滑菇固体培养的影响[J]. *北方园艺*, 2014(21): 149-151.
- [21] HOU L J, LI Y, CHEN M J, et al. Improved fruiting of the straw mushroom (*Volvariella volvacea*) on cotton waste supplemented with sodium acetate[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(23/24): 8533-8541.
- [22] 李允祥,国淑梅,张艳君,等.大蒜提取液对平菇菌丝及其杂菌的抑菌效果研究[J]. *北方园艺*, 2014(15): 150-152.
- [23] ZHANG W R, LIU S R, ZHAO Z X, et al. Effects of extracts of spent mushroom substrates on growth of edible fungi[J]. *International Journal of Agriculture and Biology*, 2018, 20(9): 2133-2139.
- [24] 林辉,李娜娜,李佳欢,等.斑玉蕈出菇产量与胞内外碳代谢的相关性分析[J]. *菌物学报*, 2022, 41(9): 1506-1518.
- [25] 蔡盼盼,张文强,张昊琳,等.双孢蘑菇培养料理化指标及酶活与其产量相关的多重分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 231-237.
- [26] 雷萍,吴亚召,张文隽,等.榆黄蘑不同生长发育期胞外酶活性变化研究[J]. *中国食用菌*, 2020, 39(11): 57-61.
- [27] NI T T, ZHAO X Y, XING Z T, et al. Ligno(hemi)cellulolytic enzyme profiles during the developmental cycle of the royal oyster medicinal mushroom *Pleurotus eryngii* (Agaricomycetes) grown on supplemented agri-wastes[J]. *International Journal of Medicinal Mushrooms*, 2020, 22(9): 919-929.
- [28] 李鹏,向准,熊雪,等.不同栽培基质诱导对毛木耳产漆酶活性的影响[J]. *北方园艺*, 2021(24): 129-135.
- [29] 胡素娟,段亚魁,康源春,等.2种基质对平菇胞外酶活性、产量及品质的影响[J]. *河南农业科学*, 2018, 47(3): 96-99.
- [30] 李辉平,骆昕,马林,等.草菇栽培过程中培养料养分和微生物群落结构的动态特征[J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(13): 149-157.
- [31] 奚莉萍,胡晨梦卉,李彩虹,等.覆土细菌在食用菌栽培中的作用[J]. *生物学杂志*, 2023, 40(3): 101-106.
- [32] 王青,徐瑞平,边银丙,等.两种患病金针菇培养料中细菌群落多样性及结构分析[J]. *食用菌学报*, 2022, 29(1): 86-94.
- [33] 张俊杰,王京琪,刘芹,等.发酵料中促平菇生长菌株的分离与

- 鉴定[J].河南农业科学,2023,52(5): 142-149.
- [34] 任丽莹,白玛央宗,丹增晋美,等.西藏黄绿卷毛菇生境土壤微生物群落组成[J].菌物学报,2022,41(6): 906-917.
- [35] KOUTROTSIOS G, DANEZIS G, GEORGIU C, et al. Elemental content in *Pleurotus ostreatus* and *Cyclocybe cylindracea* mushrooms: Correlations with concentrations in cultivation substrates and effects on the production process[J]. Molecules, 2020,25(9): 2179.
- [36] 高敏,尚学钰,王子璇,等.不同栽培基质大球盖菇子实体多糖化学组成及抗氧化活性相关性研究[J].北方园艺,2023(10): 121-128.
- [37] 朱伶俐,李巧珍,吴迪,等.不同基质栽培的猴头菌子实体多糖理化性质和体外免疫活性[J].微生物学通报,2019,46(1): 103-112.
- [38] 金茜,李华刚,令狐金脚.中药渣和高粱壳栽培的姬菇中氨基酸含量的研究[J].食品工业,2015,36(12): 212-214.
- [39] LI W, CHEN W C, WANG J B, et al. Effects of enzymatic reaction on the generation of key aroma volatiles in shiitake mushroom at different cultivation substrates[J]. Food Science and Nutrition, 2021,9(4): 2247-2256.
- [40] LI W, CHEN W C, YANG Y, et al. Effects of culture substrates on taste component content and taste quality of *Lentinula edodes*[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2017,52(4): 981-991.
- [41] JAIN D, KALIA A, SHARMA S, et al. Genome editing tools based improved applications in macrofungi[J]. Molecular Biology Reports, 2024,51(1): 873.
- [42] ZOU G, LI T, MIJAKOVIC I, et al. Synthetic biology enables mushrooms to meet emerging sustainable challenges[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1337398.
- [43] KULSHRESHTHA S. Removal of pollutants using spent mushroom substrates[J]. Environmental Chemistry Letters, 2019, 17(2): 833-847.
- [44] JAYARAMAN S, YADAV B, DALAL C R, et al. Mushroom farming: A review focusing on soil health, nutritional security and environmental sustainability[J]. Farming System, 2024, 2(3): 100098.
- [45] KOUSAR A, KHAN A H, FARID S, et al. Recent advances on environmentally sustainable valorization of spent mushroom substrate: A review[J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2024,18(2): 639-651.
- [46] MAWADDAH N M, SAM S T, YAACOB N D, et al. Characterization of fungal foams from edible mushrooms using different agricultural wastes as substrates for packaging material[J]. Polymers, 2023, 15(4): 873.