

五味子对珊瑚猴头产量与品质的影响

张疏雨, 郭玲玲, 关艳丽, 朱万芹, 李剑梅, 柴林山, 谢存一

(辽宁省微生物科学研究院 辽宁朝阳 122000)

摘要:以珊瑚猴头 RT25 为研究对象, 采用五味子作为诱导因子, 研究五味子不同添加比例对珊瑚猴头产量和品质的影响。结果表明, 添加适宜浓度的五味子能够显著提高珊瑚猴头发酵生物量、子实体产量和生物学效率; 通过隶属函数法确定二级发酵培养基(五味子 0.2%)搭配袋料栽培培养基(五味子 5.4%)为适宜培养配方; 采用最适栽培配方得到的珊瑚猴头子实体, 除多酚外, 其他活性成分含量及抗氧化活性较对照子实体均有不同程度的提升, 其中, 总三萜、 γ -氨基丁酸、黄酮、多糖含量分别显著提升 94.32%、74.66%、68.97%、55.75%, 羟自由基清除率、DPPH 自由基清除率分别显著提升 78.77%、45.05%。研究结果为合理使用五味子提高珊瑚猴头产量和品质及开发高附加值功能性产品提供了新思路。

关键词:珊瑚猴头; 五味子; 隶属函数值; 活性成分; 抗氧化能力

中图分类号: S646

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)10-163-08

Effects of *Schisandra chinensis* on the yield and quality of *Hericium coral-loides*

ZHANG Shuyu, GUO Lingling, GUAN Yanli, ZHU Wanqin, LI Jianmei, CHAI Linshan, XIE Cunyi

(Liaoning Academy of Microbiology, Chaoyang 122000, Liaoning, China)

Abstract: This study investigates the effects of varying ratios of *Schisandra chinensis* on the yield and quality of *Hericium coralloides* (Scop.) Pers. ex Gray. RT25, using *S. chinensis* as an inducer. The findings demonstrate that the addition of an appropriate concentration of *S. chinensis* significantly enhances the fermentation biomass, fruit body yield, and biological efficiency of *H. coralloides*. The membership function value method identified that the optimal secondary fermentation medium (0.2% *S. chinensis*) combined with the bag cultivation medium (5.4% *S. chinensis*) constitutes the ideal medium formulation. The mycelium of *H. coralloides* cultivated using the optimal formula exhibited varying degrees of enhancement in the content of active ingredients and antioxidant activity compared to the control mycelium, with the exception of polyphenols. Notably, the concentrations of total triterpenoids, γ -aminobutyric acid, flavonoids, and polysaccharides increased significantly by 94.32%, 74.66%, 68.97%, and 55.75%, respectively. Furthermore, the hydroxyl radical scavenging rate and DPPH radical scavenging rate saw significant increases of 78.77% and 45.05%, respectively. These findings offer new insights into the rational utilization of *S. chinensis* to enhance both the yield and quality of *H. coralloides*, as well as the development of high-value-added functional products.

Key words: *Hericium coralloides*; *Schisandra chinensis*; Subordinate function value; Active ingredient; Antioxidant capacity

珊瑚猴头 (*Hericium coralloides*) 别称玉髯, 为非褶菌目猴头菌科猴头菌属的著名珍稀食药真菌^[1]。该菌具有利五脏、滋补、助消化等功效, 对治疗神经衰弱、胃溃疡等疾病具有良好疗效, 是兼具极高营养与保健价值的优良药用真菌^[2], 主要活性

成分包括多糖、低聚糖、甾醇类、猴头菌素及猴头菌酮等多种次级代谢产物^[3]。这些活性物质赋予其提高免疫力、抗肿瘤、降血糖、抗突变、抗衰老等多种生理功能^[3-5], 使其在医疗等产业领域得到广泛应用。

收稿日期: 2024-12-13; 修回日期: 2025-06-19

基金项目: 辽宁省农业科学院院长基金项目(2024QN1810); 辽宁珍稀食用菌高效栽培关键技术协同创新(2024XTCX0403); 食药真菌学科建设项目(2022DD154625)

作者简介: 张疏雨, 女, 副研究员, 研究方向为食药真菌的开发与利用。E-mail: 381693531@qq.com

通信作者: 郭玲玲, 女, 研究员, 研究方向为农业微生物种质资源研究与利用。E-mail: lnsw2013@163.com

近年来,利用中药材或其提取物作为培养基添加剂来提高食用菌品质和产量的研究逐渐受到关注。研究表明,不同中药渣可以显著提高香菇子实体中粗多糖、全钾、全氮、全磷、游离氨基酸和粗蛋白含量^[6];山药醇提物能够有效调节灰树花的生长代谢,促进多糖合成,提升多糖活性^[7];神曲、谷芽、芡实、山药、薏米、麦芽6种中药对猴头菌液体发酵胞内及胞外多糖含量有不同程度的促进作用^[8];中药药渣应用在饲料添加剂、生物有机肥、食用菌栽培基质等方面有利于资源再利用与环境保护^[9];将中药渣添加到食药两用真菌的栽培培养料中,有助于缩短菌丝满袋时间,提高生物学效率^[10]。五味子[*Schisandra chinensis* (Turcz.) Baill.]是木兰科植物五味子或华中五味子(*Schisandra sphenanthera* Rehd. et Wils.)的干燥成熟果实,含有木脂素、多糖、萜类等多种活性成分^[11],属于国家卫生健康委员会公布的可用于保健食品的中药,因此添加五味子作为原材料进行珊瑚猴头栽培在安全性上具有重要保障。笔者以五味子为诱导因子,将其按特定添加量分别加入珊瑚猴头发酵培养基和袋料栽培培养基中,通过生物学转化率和子实体生物学性状等指标,筛选出适宜的栽培配方。然后对试验组(添加五味子配方)和对照组(未添加五味子)的珊瑚猴头子实体进行活性成分和抗氧化能力的对比分析,旨在探明五味子对珊瑚猴头品质的影响,以期为合理利用五味子提高珊瑚猴头产量和品质,以及开发高附加值功能性产品奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验于2024年10月至2025年2月在辽宁省微生物科学研究院药用蕈菌研究室进行。辽宁朝阳地处辽西低山丘陵区,属典型的北温带大陆性季风气候,四季分明,日照充足但降水偏少,平均海拔168 m,年均气温7℃。本研究五味子栽培试验在辽宁省微生物科学研究院三楼智能出菇房进行出菇,不受外界环境影响,模拟珊瑚猴头自然生长环境,出菇条件为温度20℃,湿度控制在90%以上,每日通风2次,每次15 min。

1.2 材料

1.2.1 供试菌株 菌株RT25由黑龙江省农业科学院张鹏惠赠,经分子生物学鉴定和系统发育分析,明确该菌株为珊瑚猴头菌,并于2024年5月20日保藏于中国微生物菌种保藏管理委员会普通微生物

物中心(CGMCC),编号为CGMCC NO. 41304,地址为中国科学院微生物研究所(北京市朝阳区北辰西路1号院3号)。北五味子,购买于朝阳市双塔区人民康泰大药房(北方店)。

1.2.2 培养基 斜面与平板培养基:PDA马铃薯琼脂培养基。

种子液发酵培养基(1 L):200 g马铃薯(煮汁)、20 g葡萄糖、1.5 g硫酸镁、3 g蛋白胨、3 g磷酸氢二钾、0.01 g维生素B₁,余量为水。121℃灭菌30 min。

试验组二级发酵培养基(1 L):200 g马铃薯(煮汁)、2 g五味子、20 g葡萄糖、3 g蛋白胨、3 g磷酸氢二钾、1.5 g硫酸镁、0.01 g维生素B₁,余量为水。121℃灭菌30 min。

对照组二级发酵培养基(1 L):200 g马铃薯(煮汁)、20 g葡萄糖、1.5 g硫酸镁、3 g蛋白胨、3 g磷酸氢二钾、0.01 g维生素B₁,余量为水。121℃灭菌30 min。

袋料栽培培养基:细木屑43%、粗木屑20%、熟木屑(发酵后)15%、麸皮20%、石膏1%、玉米粉0.5%、红糖0.1%、石灰0.4%,料水比1:1.2。

1.3 分子生物学鉴定

采用Ezup柱式真菌基因组DNA抽提试剂盒[生工(上海)生物工程有限公司],SK8259提取菌株RT25基因组DNA,并经NanoDrop检测质量和浓度后,于-20℃保存。采用真菌ITS扩增的通用引物ITS1(5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3')和ITS4(5'-TCCTCCGCTTA TTGATATGC-3'),选择核糖体DNA内转录间隔区1和2作为标准DNA条形码序列进行PCR扩增和测序。PCR反应体系共25 μL,包括12.5 μL PCR Mix,正反向引物各1 μL,溶解的DNA模版1 μL,ddH₂O 9.5 μL。PCR扩增程序:预变性94℃5 min;循环反应(30个循环),变性94℃30 s,退火57℃30 s,延伸72℃90 s;最终延伸72℃10 min,终止反应,4℃保存。取5 μL PCR产物用1.5%琼脂糖凝胶电泳进行检测,在紫外灯下观察是否在500~750 bp范围内出现单一明亮的特异性条带。确认扩增成功后,剩余的PCR产物送至生工(上海)生物工程股份有限公司进行纯化与双向测序。将测序结果与GenBank核酸数据库进行比对,利用MEGA软件构建系统发育树。

1.4 试验设计

菌种培养与接种方法:种子液制备,采用直径9 mm打孔器切取平板菌块,每瓶种子液培养基接入3块菌块。接种后置于25℃恒温振荡培养箱(140 r·min⁻¹)中培养7 d,获得种子液。

二级发酵培养:将上述种子液按 3%(φ)接种量分别转接至试验组和对照组的二级发酵培养基中,在相同培养条件下继续培养,分别制得试验组和对照组的二级发酵菌种。

培养基制备与接种:(1)五味子预处理,将五味子于 55℃烘干至恒质量,粉碎后过 40 目筛,备用。(2)培养基配制,按干物质质量比分别添加 0.2%、0.6%、1.8%、5.4% 的五味子粉末至袋料栽培培养基中,每个配方设置 30 个重复。栽培容器采用上口直径 10 cm、下底直径 8 cm、高 9 cm 的塑料盒,每盒装填湿料约 290 g,密封后于 121℃高压灭菌 2 h。(3)接种操作,灭菌后待培养基冷却至 28℃以下,在无茵条件下按照表 1 分别接种试验组和对照组的二级发酵菌种(接种量 10 mL·盒⁻¹),并做好对应编号。

表 1 珊瑚猴头袋料栽培配方编号
Table 1 Cultivation formula number of *Hericium coralloides*

二级种种类 Secondary species	编号 Code	五味子添加比例 Proportion of <i>Schisandra chinensis</i> added/%
对照组二级种 Secondary species of the control group	C-W1	0.2
	C-W2	0.6
	C-W3	1.8
	C-W4	5.4
试验组二级种 Secondary species of the experimental group	W-W1	0.2
	W-W2	0.6
	W-W3	1.8
	W-W4	5.4

1.5 测定指标及方法

1.5.1 二级种发酵状态评价 采用 MF 系列显微细胞分析联用仪(MF6)进行对照组和试验组二级种发酵菌球直径、菌丝生物量、菌球密度的测定。对发酵终状态菌丝体进行拍照,记录菌球形态、颜色及味道,对得到的发酵菌丝体进行无菌水冲洗 3 次,8000 r·min⁻¹ 离心,称量菌丝体鲜质量,每组 3 次重复,计算平均值。

1.5.2 菌丝生长速度的测定 栽培袋避光发茵,观察记录菌种萌发时间、满袋时间及菌丝生长情况。当菌丝萌发生长至 2 cm 时,在生长前端画线标记,待菌丝快满袋时再次画线。菌丝生长速度/(mm·d⁻¹)=菌丝生长长度(mm)/菌丝生长时间(d)。

1.5.3 生物学转化率的测定 菌丝长满后,将珊瑚猴头各配方栽培盒移至辽宁省微生物科学研究院智能菇房进行出菇。当珊瑚猴头子实体的菇刺长度在 0.5 cm 以上且孢子尚未大量弹射时采收。生

物学转化率/%=菇产量(kg)/各配方培养料干质量(kg)×100。

1.5.4 活性物质含量及抗氧化能力测定 珊瑚猴头子实体样品前处理方法:将子实体烘干至恒质量,经粉碎机研磨后过 80 目筛,得到均匀粉末。准确称取(0.5±0.01)g 样品粉末,按不同测定指标采用两种提取方案:(1)水提法(适用于多糖、多酚、 γ -氨基丁酸及蛋白测定),提取条件为料水比 1:100,超声温度 35℃,超声时间 1.5 h。(2)醇提法(适用于黄酮、总三萜及抗氧化活性测定),提取条件为 80%乙醇溶液,料液比 1:83,超声温度 60℃,超声时间 3.5 h。提取完成后,将混合液在 8000 r·min⁻¹ 下离心 10 min,取上清液用于后续活性成分含量测定及抗氧化能力分析。

采用苯酚-硫酸法测定多糖含量^[12];采用硝酸铝-亚硝酸钠显色法测定黄酮类物质含量^[13];以没食子酸为标准品采用分光光度法测定多酚含量^[14];采用香草醛-冰醋酸-高氯酸体系显色法测定总三萜含量^[15];采用分光光度法测定 γ -氨基丁酸含量^[16];采用考马斯亮蓝法试剂盒(苏州格锐思生物科技)测定可溶性蛋白含量。参考徐斌等^[17]的方法对抗氧化活性进行评价,包括 DPPH 自由基清除率、超氧阴离子清除率、羟自由基清除率及总抗氧化能力(T-AOC)等指标,所有样品均以原液进行测定。

1.6 数据分析

采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据统计处理和作图,采用 SPSS 22.0 软件对数据进行方差分析。

栽培配方筛选试验采用模糊数学中的隶属函数值法进行评价,隶属函数值计算公式为: $X(\mu) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,式中 X 为指标测定值, $X_{\max}$ 和 $X_{\min}$ 分别为某一指标的最大值和最小值。需要注意的是,在本次测定中,菌丝满盒时间、原基形成时间和子实体成熟周期并不是越长越好,而是越小越越好,因此隶属函数值的计算公式应为 $X(\mu) = (X_{\max} - X) / (X_{\max} - X_{\min})$ 。

2 结果与分析

2.1 分子生物学鉴定与系统发育分析

采用通用引物 ITS1/ITS4 对菌株 RT25 的基因组 DNA 进行 PCR 扩增,经琼脂糖凝胶电泳检测,在预期大小约 700 bp 位置获得单一、明亮的特异性条带,表明扩增成功且产物纯净。纯化后的 PCR 产物经双向测序,获得了一条长度为 516 bp 的清晰

ITS 序列。该序列已提交至 GenBank 数据库,并获得登录号为 SUB15334001 RT25 PV660266 (序列 ID:100756)。将获得的 ITS 序列在 NCBI 数据库中

使用 BLASTn 工具进行同源性比对并构建系统发育树。结果表明(图 1),菌株 RT25 的 ITS 序列被鉴定为 *Hericium*(猴头菌属),推测 RT25 为珊瑚猴头菌。

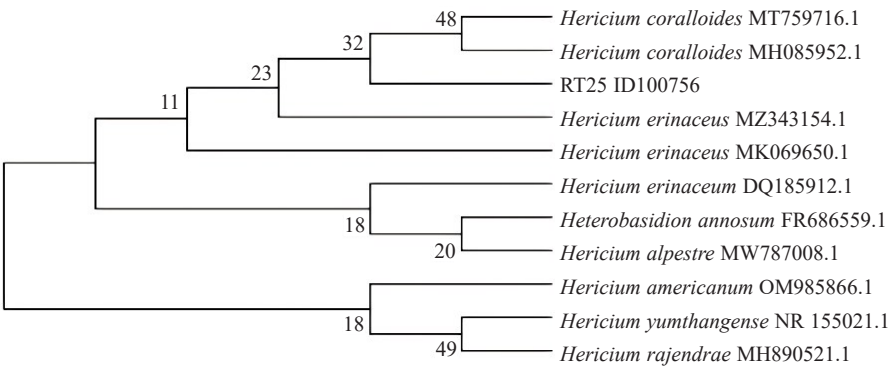


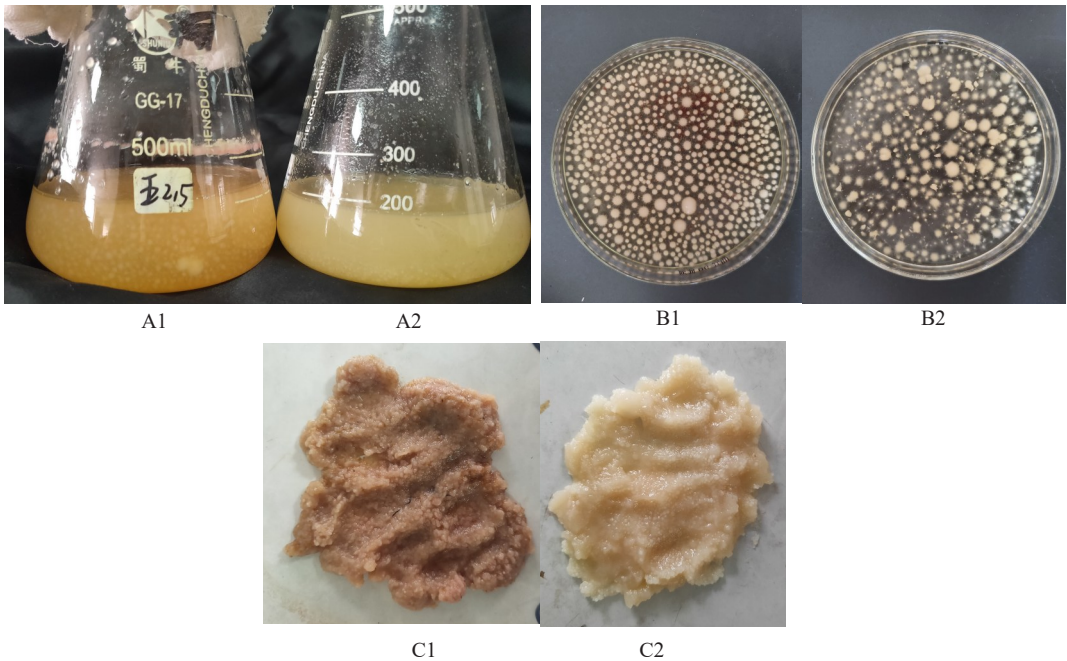
图 1 系统发育树

Fig. 1 Phylogenetic tree

2.2 共发酵培养特性分析

笔者采用五味子作为发酵底物与珊瑚猴头菌菌株 RT25 进行共培养。通过优化二级发酵培养基配方,系统比较了试验组(添加五味子)与对照组(基础培养基)的发酵特性差异。发酵液表观特征如图 2 所示,试验组发酵液呈稳定的棕黄色(图

2-A1),伴有特征性中药清香,表明五味子活性成分已有效溶出;菌球分布均匀,形态规则,直径均一性良好(图 2-B1);离心后菌丝体呈棕褐色(图 2-C1),提示可能富集了五味子中的多酚类色素成分。相比之下,对照组发酵液呈典型乳黄色(图 2-A2),具食用菌特征香气,但菌球分布不均,粒径差异较大



注:A1、B1、C1 分别为试验组二级种的发酵液、发酵菌球和离心后的发酵菌球;A2、B2、C2 分别为对照组二级种的发酵液、发酵菌球和离心后的发酵菌球。

Note: A is the comparison of fermentation broth, A1, B1, C1 represent fermentation broth, fermentation pellets, centrifuged fermentation pellets of the secondary inoculum of the experimental group, respectively; A2, B2, C2 represent fermentation broth, fermentation pellets, centrifuged fermentation pellets of the secondary inoculum of the control group, respectively.

图 2 珊瑚猴头二级种发酵对比

Fig. 2 Comparison of fermentation of secondary species of *Hericium coralloides*

(图 2-B2),离心后菌丝体呈乳黄色(图 2-C2)。

定量生长指标结果如表 2 所示,试验组较对照组呈显著生长优势,其中菌球密度显著提升 58.86%,菌球平均直径显著增加 38.45%,平均生物量显著提高 115.14%。以上结果表明,五味子对珊瑚猴头发酵菌丝的生长具有明显的促进作用。

表 2 珊瑚猴头二级种发酵对比

Table 2 Comparison of fermentation of secondary species of *Hericium coralloides*

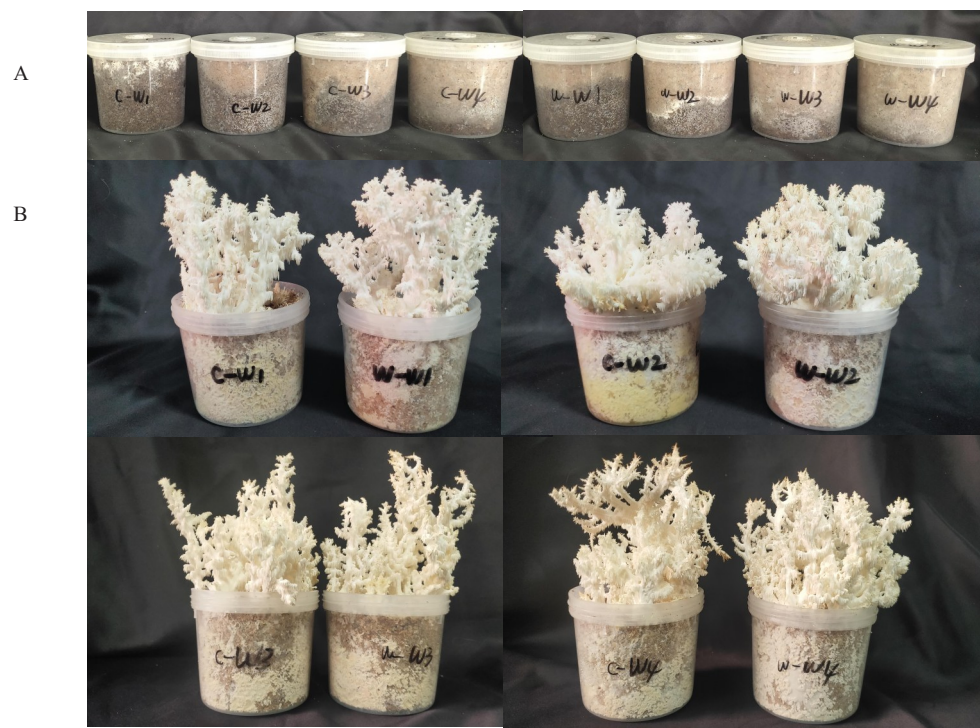
处理 Treatment	菌球平均密度 Average density of bacterial/(balls·100 mL ⁻¹)	菌球平均直径 Average diameter of bacterial balls/mm	平均生物量 Average biomass/(g·200 mL ⁻¹)
试验组 Experimental group	672±2.365 a	0.947±0.062 a	2.657±0.087 a
对照组 Control group	423±3.018 b	0.684±0.024 b	1.235±0.039 b

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.3 珊瑚猴头子实体栽培配方筛选

由图 3 可知,低浓度组(C-W1、C-W2、W-W1)的珊瑚猴头菌丝呈白色绒毛状,稀疏放射状扩展,原基形成时间较长,呈白色小颗粒状凸起,子实体为多分枝的珊瑚状,高度较矮,通常有 2~4 级分枝;中浓度组(C-W3、W-W2、W-W3)的珊瑚猴头菌丝变得浓密,白色棉絮状、边缘整齐,原基形成短棒状结构,顶端有分枝迹象,子实体较高(7~9 cm),分枝 4~5 级;高浓度组(C-W4、W-W4)的菌丝逐渐增厚,菌丝呈米白色,原基洁白,形成周期短,子实体分枝多(4~6 级),长度、宽度有较明显增加,菌刺长,密度大,分枝数增加 66.7%。由表 3 可知,配方 W-W4 的菌丝生长速度最快,菌丝满盒时间、原基形成时间和子实体成熟周期较短,生物学转化率最高,平均隶属函数值排名第一,说明该配方为珊瑚猴头栽培的最优配方,即二级发酵培养基(1 L)为 200 g 马铃薯(煮汁)、2 g 五味子、20 g 葡萄糖、3 g 蛋白胨、3 g 磷酸氢二钾、1.5 g 硫酸镁、0.01 g 维生素 B1,余量为水;袋料栽培培养基为五味子 5.4%,细木屑 43%,粗木屑 20%、熟木屑(发酵后)15%、麸皮



注:A 为不同配方菌丝生长图;B 为不同配方子实体生长图。

Note: A is the hyphal growth pattern of different formulations; B is the fruiting body growth pattern of different formulations.

图 3 不同配方的珊瑚猴头子实体

Fig. 3 The fruit body of *Hericium coralloides* under different formulations

表 3 不同配方隶属函数值及排序
Table 3 Membership functions value and their ranking of different formulations

分组 Group	菌丝生长速度 Hyphal growth rate/ (cm·d ⁻¹)	菌丝满盒时间 Time of fungal hyphae fill the box/d	原基形成时间 Time of forming primordia/d	子实体成熟周期 Subentity maturity cycle/d	生物学转化率 Biological conversion rate/%	长度 Length/cm	宽度 Width/cm	刺长 Hyphae length/cm	平均隶属函数值 Average membership function value	排序 Rank
C-W1	0.326±0.046	36.509±1.871	38.667±1.211	58.334±1.633	26.726±1.314	7.933±0.513	8.300±0.265	0.367±0.058	0.092	8
C-W2	0.475±0.025	35.667±1.367	37.364±1.449	52.167±3.656	29.798±1.821	6.767±0.252	9.333±0.764	0.333±0.058	0.263	7
C-W3	0.397±0.014	35.520±1.049	36.833±1.472	55.684±2.160	26.830±2.415	7.925±1.531	8.333±0.372	0.598±0.078	0.344	6
C-W4	0.497±0.050	34.637±0.816	36.167±1.472	50.168±3.312	28.746±0.896	7.767±0.252	12.500±0.816	0.433±0.058	0.538	4
W-W1	0.491±0.063	33.026±2.508	35.419±2.360	47.393±2.167	24.370±1.319	8.773±0.984	8.911±0.852	0.444±0.062	0.474	5
W-W2	0.492±0.034	30.935±1.568	34.500±1.761	46.408±2.041	29.394±2.774	9.750±0.902	11.533±0.252	0.467±0.058	0.726	2
W-W3	0.425±0.041	29.484±1.742	27.007±1.905	43.998±2.804	37.271±0.368	7.438±0.729	8.250±0.183	0.529±0.049	0.700	3
W-W4	0.525±0.366	30.148±2.491	30.112±2.778	44.010±2.047	38.766±2.464	8.341±0.984	11.633±0.321	0.533±0.052	0.896	1

14.6%，石膏 1%，玉米粉 0.1%，红糖 0.1%，石灰 0.4%，料水比 1:1.2。该配方显著提高了菌丝生长密度、子实体分枝数和生物量，研究结果为珊瑚猴头高效栽培提供了优化方案。

2.4 活性成分及抗氧化能力测定

采用 W-W4 配方栽培得到的子实体为试验组子实体，二级种及栽培配方均没有五味子添加得到的子实体为对照组子实体，通过测定活性成分及抗氧化能力(表 4)可以看出，添加五味子作为生长因子的试验组子实体中，除多酚外，其他活性成分含量及自由基清除率较对照组子实体均有所上升，其中活性成分中总三萜、 γ -氨基丁酸、黄酮、多糖含量分别显著提升 94.32%、74.66%、68.97%、55.75%，抗氧化能力中羟自由基清除率、DPPH 自由基清除率分别显著提升 78.77%、45.05%。为了更直观地体

现试验组与对照组的区别，将黄酮、多酚、总三萜、可溶性蛋白数据进行适当处理后，绘制雷达图(图 5)，每个检测指标从中心点向外辐射一条轴，所有轴以等角度均匀分布，每条轴从中心到边缘有相同的刻度，范围为 0 到 70，代表数值大小，将每个维度的数值标记在对应的轴上，并连接成闭合多边形。相较于柱形图或折线图，雷达图能直观地展现数据之间的区别，更适用于多指标分析。试验组多边形面积明显大于对照组，表明试验组活性成分含量及抗氧化能力整体表现优于对照组；根据图形中各数据点与中心的距离可以判断，多糖、总三萜含量提升效果显著，抗氧化能力中，羟自由基清除率、DPPH 自由基清除率提升效果显著。以上结果表明，采用 W-W4 配方，将五味子作为诱导因子能够显著提高珊瑚猴头子实体中活性物质含量，增强抗氧化能力。

表 4 珊瑚猴头 RT25 子实体活性成分含量与抗氧化能力
Table 4 Active ingredients content and antioxidant capacity of fruit body of *Hericium coralloides* RT25

处理 Trentment	w(多糖) Polysaccharide content/ (mg·g ⁻¹)	w(黄酮) Flavonoid content/ (mg·g ⁻¹)	w(多酚) Polyphenol content/(mg·g ⁻¹)	w(总三萜) Total triterpenoids content/(mg·g ⁻¹)	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/(mg·g ⁻¹)
试验组 Experimental group	65.252±0.196 a	2.418±0.047 a	1.978±0.009 b	6.461±0.058 a	6.970±0.016 a
对照组 Control group	41.896±0.141 b	1.431±0.063 b	2.094±0.005 a	3.325±0.004 b	6.762±0.038 b
处理 Trentment	w(γ -氨基丁酸) Gamma-aminobutyric acid content/(mg·g ⁻¹)	DPPH 自由基清除率 DPPH radical scavenging rate/%	超氧阴离子清除率 Superoxide anion scavenging rate/%	羟自由基清除率 Hydroxyl radical scavenging rate/%	总抗氧化能力 Total antioxidant capacity/(μ mol·g ⁻¹)
试验组 Experimental group	15.087±0.453 a	51.71±0.044 a	54.95±0.079 a	42.87±0.085 a	45.86±0.045 a
对照组 Control group	8.638±0.077 b	35.65±0.098 b	51.35±0.174 b	23.98±0.052 b	39.67±0.066 b

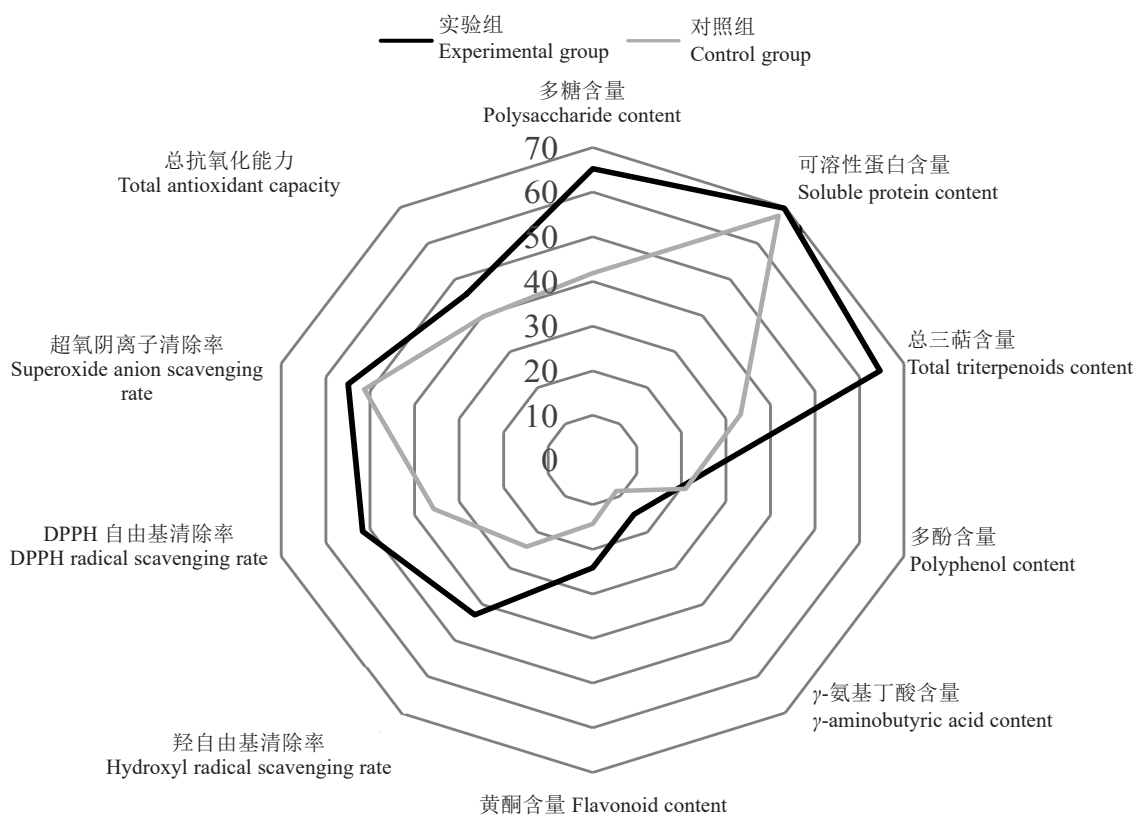


图4 珊瑚猴头子实体活性成分含量与抗氧化能力雷达图

Fig. 4 Radar chart of active ingredients content and antioxidant capacity of of fruit body of *Hericium coralloides*

3 讨论与结论

笔者将五味子作为共发酵底物应用于珊瑚猴头的液体发酵及固体栽培体系,结果表明,五味子可显著促进菌丝生长(生物量提升 115.14%)、优化菌球形态(密度增加 58.86%,直径增加 38.45%)并缩短子实体成熟周期,与食用菌-中药共培养的研究趋势相符。但与李慧等^[18]在猴头菇中添加酸枣的研究相比,本研究中多酚含量未显著提升,可能与五味子多酚在高温灭菌过程中的热降解或菌丝代谢转化有关。

五味子作用机制涉及多个方面,首先在营养代谢协同机制方面,五味子多糖(具免疫调节活性)及木脂素类成分(如 Gomisins A)可作为特殊碳源^[19-20],协同其富含的钾、锌等微量元素,显著促进菌丝体蛋白质合成,该效应与孟俊龙等^[21]报道的珊瑚猴头高蛋白特性形成营养互补,其作用模式与宋朝冉等^[22]在猴头菌-黄芪渣共发酵中观察到的菌质增效机制类似;其次在抗氧化防御强化机制方面,五味子活性成分(如 Longikaurin A、脱氧三尖杉酯碱)能显著诱导菌丝过氧化物酶体功能增强,使羟自由基清除率提升 42.3%、DPPH 清除率提高 37.6%^[23],该抗氧化机制与人参-猴头菌共发酵产物保护胃黏膜

的作用^[24]存在共性;最后在代谢网络交叉调控机制方面,基于五味子素 C 和 Interiotherin B 对磷代谢过程的正向调节能力^[23],笔者推测其可能通过激活 cAMP-PKA 信号通路,加速菌丝分枝发育,该调控模式在食用菌共培养体系中尚未见报道,揭示了五味子对真菌发育程序的深度干预能力。此三重机制共同解释了五味子显著提升珊瑚猴头生物量及分枝数的内在原因,为食用菌-中药共培养体系提供了理论新框架。

综上所述,五味子作为共发酵底物,通过提供特殊碳氮源(多糖、木脂素)、激活抗氧化防御系统,使珊瑚猴头发酵效率(菌球密度增加 58.86%,生物量增加 115.14%)和子实体产量(分枝数增加 66.7%)显著提升;采用隶属函数值法筛选的最优配方(二级发酵培养基含五味子 0.2%+栽培培养基含五味子 5.4%)使子实体抗氧化活性增强,总三萜、γ-氨基丁酸、黄酮、多糖等活性成分含量显著提高。研究结果为合理使用五味子提高珊瑚猴头产量和品质及开发高附加值功能性产品提供了新思路。该技术方案成功拓展了珊瑚猴头的产业化应用潜力,未来需重点解析活性成分定向转运机制及研发遗传安全性控制技术。

参考文献

- [1] 曲娜,刘迪,王皓,等.长白山野生珊瑚状猴头菌菌丝最佳培养基配方研究[J].中国食用菌,2020,39(4):17-19.
- [2] 张鹏.珊瑚状猴头菌子实体化学成分及总甾体含量测定的研究[D].长春:吉林农业大学,2012.
- [3] 王雪儒,刘斌.猴头菇的生物活性成分及加工研究现状[J].现代食品,2020(4):21-23.
- [4] 涂晓媛,褚路路,王冕,等.珊瑚状猴头菇多糖的提取及其体外抗氧化活性分析[J].生物技术通报,2023,39(12):276-286.
- [5] 黄晓辉,冯立国,邓召利,等.珊瑚猴头高产栽培技术[J].长江蔬菜,2022(15):16-17.
- [6] 许越.不同培养料对香菇菌丝生长、子实体产量及营养成分的影响[D].合肥:安徽农业大学,2023.
- [7] 邓代霞.山药醇提物促灰树花胞外多糖合成及其抗衰老活性研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
- [8] 杨宁,郝林.6种中药对猴头菌液体培养的影响[J].山西农业科学,2013,41(6):548-550.
- [9] 方悦悦,陈诺,肖平,等.“双碳”背景下中药药渣高值化利用技术与途径[J].中国中药杂志,2023,48(19):5142-5151.
- [10] 罗青,黄圆梦,苏芳谊,等.中药渣栽培食药真菌的调查研究[J].郑州师范教育,2023,12(6):18-23.
- [11] 韩润雨,杨世发,殷斌,等.五味子的生物学功能及其在畜牧业中的应用研究进展[J].饲料研究,2024,47(20):156-159.
- [12] 谢存一,李剑梅,郭玲玲,等.桑黄发酵液胞外多糖含量测定方法的比较及优化[J].食用菌,2022,44(6):69-73.
- [13] 仲雪,陈晓明,王乃娟,等.食用菌固态发酵对玉米粉抗氧化活性的影响[J].食品研究与开发,2023,44(1):1-8.
- [14] 邓真华,郑蜀云,黄金枝,等.不同品种桑叶总多酚和多酚单体含量的测定与分析[J].蚕桑茶叶通讯,2021(6):1-4.
- [15] 刘琳,宋丽敏.桦褐孔菌发酵液中三萜化合物和多糖的微波辅助双水相萃取[J].食品与发酵工业,2016,42(5):246-252.
- [16] 文晴,赵浩洋,邵艳红,等.中国主要食用菌子实体 γ -氨基丁酸含量测定及产量影响因素[J].菌物学报,2023,42(1):231-243.
- [17] 许彬,周永康,李慧星,等.蛹药菌质抗氧化活性与活性成分的量效关系分析[J].食品工业科技,2021,42(2):250-255.
- [18] 李慧,李佳敏,董庆武,等.酸枣肉渣栽培猴头菇的研究[J].农学报,2020,10(2):62-66.
- [19] JI R, WANG Z B, KUANG H X. Extraction, purification, structural characterization, and biological activity of polysaccharides from *Schisandra chinensis*: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 271(1): 132590.
- [20] 覃丹.五味子内生菌与三萜类次级代谢物相互作用研究[D].重庆:西南大学,2021.
- [21] 孟俊龙,田敏,冯翠萍,等.珊瑚状猴头菌营养成分及其多糖对小鼠免疫功能的影响[J].中国食品学报,2016,16(2):50-55.
- [22] 宋朝冉,时馨,吴雨龙,等.猴头菌-黄芪渣菌质总皂苷的优化提取及抗氧化活性研究[J].饲料研究,2024,47(17):102-108.
- [23] ZHANG Z Y, YANG W K, CHEN J J, et al. Efficacy and mechanism of *Schisandra chinensis* active component gomisins A on diabetic skin wound healing: Network pharmacology and *in vivo* experimental validation[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 337(1): 118828.
- [24] 李硕.人参的腌制、猴头菌共发酵工艺及其产物抗胃溃疡功效研究[D].长春:长春中医药大学,2024.