

稻壳-菌渣复合基质对香菇菌棒哈茨木霉污染的防控效果及经济效益分析

周冉¹, 闫雪莉¹, 王录琪¹, 黄冉涛¹, 高小峰¹, 马琳静¹, 赵磊²

(1. 南阳市科学院生物技术研究所 河南南阳 473000; 2. 南阳市农业科学院博士后科研工作站 河南南阳 473008)

摘要: 为应对香菇栽培中因哈茨木霉污染导致的菌棒报废率上升及传统基质成本增加等问题, 利用农业废弃物稻壳与菌渣构建复合基质, 并通过调控其碳氮比(C/N), 评估其对哈茨木霉的抑制能力及对香菇菌丝生长与产量的影响, 并分析其经济效益。结果表明, 基质 C/N 与通气孔隙度和生物学效率呈显著正相关, 而与含水率和最终污染率呈极显著负相关。随着 C/N 从 20:1 升高至 40:1, 哈茨木霉最终污染率显著降低(从 30.2%降至 17.9%), 但香菇菌丝在胁迫前的生长速率呈下降趋势。动态响应分析表明, 在哈茨木霉胁迫下, 高氮(低 C/N)处理初期生长占优但抗逆性差, 而中高 C/N(35:1~40:1)处理展现出更强的持续抗逆能力。在子实体产量方面, 生物学效率随 C/N 升高呈先增后降的单峰曲线, C/N 为 35:1(T4 处理)时达到峰值(37.7%), 显著优于传统基质(CK, 34.0%)。经济效益分析表明, 利用稻壳-菌渣构建 C/N 为 35:1 的复合基质, 能够在将哈茨木霉污染率降低 4.7 个百分点(相较于 CK)、香菇生物学效率提升 3.7 个百分点的同时, 使单位菌棒生产成本下降 18.38%, 净收益与产投比均达到最高水平。本研究结果可为农业废弃物的高值化利用及香菇的绿色高效栽培提供理论依据与技术路径。

关键词: 香菇; 碳氮比; 哈茨木霉; 防控; 经济效益

中图分类号: S646.1² **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2871(2026)06-121-09

Control efficacy and economic benefit analysis of rice husk - spent mushroom substrate (SMS) composite on *Trichoderma harzianum* contamination in shiitake mushroom cultivation

Zhou Ran¹, Yan Xueli¹, Wang Luqi¹, Huang Rantao¹, Gao Xiaofeng¹, Ma Linjing¹, Zhao Lei²

(1. Biotechnology Research Institute, Nanyang Academy of Sciences, Nanyang 473000, Henan, China; 2. Postdoctoral Research Station of Nanyang Academy of Agricultural Sciences, Nanyang 473008, Henan, China)

Abstract: To address the issues of increased cultivation bag discard rates caused by *Trichoderma harzianum* contamination and rising traditional substrate costs in shiitake mushroom (*Lentinula edodes*) cultivation, this study constructed a composite substrate using agricultural wastes—rice husk and spent mushroom substrate (SMS). By regulating the carbon-to-nitrogen (C/N), the inhibitory effect against *T. harzianum*, the impact on mycelial growth and yield of *L. edodes*, and the economic benefits were evaluated. The results indicated that the substrate C/N was significantly positively correlated with aeration porosity and biological efficiency, while exhibiting an extremely significant negative correlation with water content and final contamination rate. As the C/N increased from 20:1 to 40:1, the final contamination rate by *T. harzianum* significantly decreased (from 30.2% to 17.9%), whereas the growth rate of *L. edodes* mycelium before stress showed a declining trend. Dynamic response analysis revealed that under *T. harzianum* stress, treatments with high nitrogen (low C/N) exhibited initial growth advantages but poor stress resistance, whereas treatments with medium to high C/N (35:1 - 40:1) demonstrated stronger and more sustained stress tolerance. Regarding fruiting body yield, the biological efficiency followed a unimodal curve, increasing initially and then decreasing with the increase in C/N, peaking at a C/N of 35:1 (T4) with a value of 37.7%, which was significantly superior to that of the conventional substrate (CK, 34.0%). Economic benefit analysis showed that formulating the composite substrate with a C/N of 35:1 using rice husk and SMS reduced the *T. harzianum* contamination rate by 4.7 percentage points (compared with CK), increased the biological effi-

收稿日期: 2025-11-26; 修回日期: 2026-03-20

基金项目: 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: 周冉, 男, 助理研究员, 主要研究方向为食用菌栽培。E-mail: zranson@126.com

通信作者: 赵磊, 男, 副研究员, 研究方向为食用菌栽培生理与品质调控。E-mail: 14084270@qq.com

ciency of *L. edodes* by 3.7 percentage points, while lowering the production cost per cultivation bag by 18.38%. Both the net profit and the output-input ratio reached their highest levels with this formulation. The findings of this study can provide a theoretical basis and technical pathway for the high-value utilization of agricultural waste and the green and efficient cultivation of *L. edodes*.

Key words: *Lentinula edodes*; C/N; *Trichoderma harzianum*; Prevention and control; Economic benefit

香菇(*Lentinula edodes*)是世界第二大菇类,也是我国重要的栽培食用菌,总产量占全球的 80%以上^[1]。然而菌棒污染问题,特别是由竞争性真菌如哈茨木霉(*Trichoderma harzianum*)引起的污染,严重制约其产量与品质提升,每年可导致 15%~20%的产量损失^[2-3]。传统防治多依赖化学杀菌剂,但存在农药残留及病原菌抗药性风险^[4]。栽培基质中的碳氮比(C/N)是影响菌丝体生长和子实体发育的重要因素,也是食用菌栽培管理的核心杠杆之一^[5]。在营养调控策略上,优化 C/N 被普遍认为是调控菌丝生长、抑制杂菌的核心手段。在实际栽培中,适宜的 C/N 能促进香菇菌丝健壮生长,通过营养竞争与空间占位效应抑制杂菌,提升产量和品质^[6]。现阶段,探索基于营养调控的绿色、高效防控技术,通过优化栽培基质微环境从根源上增强香菇的竞争抗性,已成为食用菌绿色防控的重要策略,对保障香菇产量与品质安全、推动食用菌产业向资源节约与环境友好方向转型具有重要的现实意义^[7-8]。

稻壳和菌渣是两类常见的农业与食用菌产业大宗副产物,在农业废弃物资源化利用领域,两者基质化利用潜力备受关注。稻壳主要成分为纤维素(30%~40%)、半纤维素(15%~25%)、木质素(20%~25%)^[9],这些都是典型的碳源物质,可被香菇菌丝体分泌的酶分解,作为生长能量供应来源。此外,稻壳的物理结构及较高的硅质含量有助于改善栽培基质孔隙度与通气性,既能帮助基质保持水分,又可以使基质保持疏松透气,有利于菌丝均匀、快速生长^[9-10]。菌渣含有丰富的氮、钾等营养物质,经发酵处理后,含有粗蛋白(8%~20%)、粗纤维(15%~30%)、腐殖酸(10%~20%)等营养成分与多种生物活性物质,可作为良好的有机氮源,具有较高的利用价值^[11-12]。这两种农业废弃物获取便捷且成本极低,二次利用兼顾生态效益与经济效益,对发展循环农业、实现农业的碳中和目标具有重要意义^[13-14]。

目前,关于稻壳-菌渣复合基质在香菇栽培中的应用研究尚不充分,尤其缺乏 C/N 与哈茨木霉防控效果之间的量化关联及经济效益评估。鉴于此,笔者通过配制不同 C/N 的稻壳-菌渣复合基质,综合评价其对香菇生长发育的促进效应及对哈茨木霉

污染的抑制效果,并分析其经济可行性,以期香菇绿色安全生产及农业废弃物资源化利用提供科学依据与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 基质原料及 C/N 测定

稻壳:来自南阳地区水稻田,无霉变无污染,经粉碎机处理,控制粒径≤5 mm。

香菇菌渣:本试验于 2024 年 9—11 月在河南南阳铭昊香菇种植基地开展,菌渣取自该种植基地无污染废弃菌棒,原始配方为木屑 75%、麸皮 20%、石膏 2%、糖 1%、玉米粉 2%。

木屑:购自本地木材加工厂,主要为柞木来源,碳含量(w,后同)51.31%,氮含量 0.39%。

麸皮:购自本地市场,小麦来源,蛋白质含量 15.20%,碳含量 43.68%,氮含量 2.96%。

生石灰:购自本地市场,工业级氧化钙(CaO 含量≥90%),用于将基质初始 pH 调节至 6.5 左右。

碳氮比(C/N):采用重铬酸钾氧化-外加热法测定基质总碳含量^[15];参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》^[16]中的凯氏定氮法测定总氮含量。C/N 由测定的总碳含量与总氮含量直接计算得出。

各原料的碳、氮含量详见表 1。

表 1 各基质原料的碳含量和氮含量
Table 1 Content of carbon and nitrogen in cultivation material %

指标 Index	稻壳 Rice husk	菌渣 Spent mushroom substrate	木屑 Sawdust	麸皮 Bran
w(碳) Carbon content	40.63	37.25	51.31	43.68
w(氮) Nitrogen content	0.70	1.28	0.39	2.96

1.2 供试菌株

香菇菌株为 9608,来自南阳铭昊香菇种植基地制种厂,为南阳地区主栽品种,具有抗逆性强、产量稳定等特点。本试验预试验表明,该菌株在 PDA 培养基上菌丝生长速率为 7.8 mm·d⁻¹,菌落白色、浓密。

哈茨木霉菌(*T. harzianum*)(NJAU 4742)有效活菌数 $\geq 1.0 \times 10^8$ CFU $\cdot$ g $^{-1}$,由江苏思威博生物科技有限公司提供。菌株保藏于PDA斜面培养基(4℃),使用前于25℃在PDA平板上活化培养5 d,待菌落产生大量分生孢子后,用无菌水冲洗菌落表面,孢子悬浮液浓度首先使用血球计数板进行初步估算,然后通过稀释涂布平板法进行验证,最终调整至浓度为 1×10^6 CFU $\cdot$ mL $^{-1}$,置于4℃冰箱中保存备用。

1.3 PDA培养基制备

参考蔡信之等^[17]的方法制备PDA培养基:马铃薯200 g去皮切块,加适量蒸馏水煮沸30 min,过滤后收集滤液,加入20 g葡萄糖和15 g琼脂粉,加蒸馏水定容至1000 mL,并充分搅拌溶解,在115℃下高压蒸汽灭菌20 min,凝固后备用。

1.4 试验设计

1.4.1 基质预处理与配制稻壳发酵 将粉碎后的稻壳与水混合,调整含水率至60%~65%。随后堆置成条垛(高1.2 m、宽1.5 m),覆盖塑料薄膜,在65~70℃条件下发酵15 d。发酵期间每3 d翻堆1次,确保发酵均匀。

菌渣发酵处理:菌渣经杂质清除、粗粉碎后添加3%石灰并混匀,喷水调整含水量为60%~65%,建堆高1.2 m、宽1.5 m左右,覆盖塑料膜,55~65℃条件下发酵10 d,每2 d翻堆1次。发酵后晾晒风干,经粉碎机粉碎(可过8 mm筛)备用。

基质配制:将发酵处理后的稻壳、菌渣与木屑、麸皮及其他基料按设计配方精确称量并充分混匀。使用水分快速测定仪检测并调节混合基质的初始含水率至60%左右。静置平衡12 h后将混合均匀的基质分装于聚丙烯菌袋(规格:17 cm $\times$ 33 cm,厚度0.04 mm),每袋装湿料1.0 kg。采用高压灭菌锅(121℃,0.1 MPa)灭菌2 h,自然冷却至25℃备用。

1.4.2 基质配方 调控试验按照完全随机设计,共设置6个处理,包括5个不同C/N的稻壳-菌渣复合基质处理(T1~T5),以及1个传统基质对照(CK)。每个处理设置20袋,3次重复。

试验组:按照稻壳(5%~50%)、菌渣(30%~60%)、木屑(10%~20%)、麸皮(5%~40%)配比,每处理添加石膏1%、蔗糖1%、生石灰3%。T1~T5碳氮比梯度:20:1(高氮型)、25:1(中氮型)、30:1(均衡型,为目标优化组)、35:1(中碳型)、40:1(高碳型)。

对照组(CK):采用传统基质,配方主要为木屑75%、麸皮20%、石膏1%、蔗糖1%、生石灰3%,添

加少量尿素调节其C/N约为30:1。

T1~T5处理基质原料配方(干料,总质量950 g)见表2。

表2 各处理基质原料的质量分配
Table 2 Mass distribution of substrate materials for each treatment

处理 Treatment	稻壳 Rice husk/g	菌渣 Spent mushroom substrate/g	木屑 Sawdust/ g	麸皮 Bran/ g	实测 C/N Measured C/N
T1	45.9	464.2	95.3	344.5	21.9
T2	83.2	447.1	148.5	271.2	26.4
T3	216.9	344.2	161.5	227.2	30.1
T4	333.3	319.3	152.2	145.1	35.3
T5	431.7	318.1	126.3	73.9	40.7

1.4.3 基质理化性质测定 称取5 g基质样品,按1:5的比例与25 mL去离子水混合,于恒温振荡器中以180 r $\cdot$ min $^{-1}$ 的速率振荡30 min后静置10 min。取上清液,使用经pH 4.00、6.86和9.18标准缓冲液校准的精密pH计测定基质初始pH。

基质含水率:基质配制后称取鲜基质样品 m_1 (精度0.1 g),置于105℃烘箱中干燥至恒质量 m_2 。含水率/%=(m_1-m_2)/ $m_1 \times 100$ 。

基质通气孔隙度(AP):参考田育天等^[18]的方法,采用沙箱排水法测定基质通气孔隙度,用容积(V)为200 cm 3 的环刀取原状基质,测定饱和持水量(W_1)和自由排水后持水量(W_2)。AP/%=(W_1-W_2)/($V \times \rho_{\text{水}}$) $\times 100$ 。

1.4.4 香菇接种与菌丝培养 在无菌环境下,每个菌袋中接入5 g香菇菌种,每袋4~6个接种点。接种后的菌袋置于恒温菇棚中培养,控制温度(25 $\pm$ 2)℃,相对湿度60%~70%,全程避光,每日通风2次(每次30 min)。

哈茨木霉污染模拟:在香菇菌丝培养至第15天(菌丝覆盖菌袋表面积约2/3时),用小型喷雾器对菌袋均匀喷洒哈茨木霉孢子悬浮液(接菌),每袋接种量为2 mL,以模拟田间自然污染条件。接菌后继续在上述培养条件下培养,观察污染情况。

为评估试验环境的洁净度及污染来源,本研究另设一组未接种哈茨木霉孢子的CK处理($n=20$ 袋),其余操作完全相同。经测定该组在整个培养周期内的自然木霉污染率为1.7%,表明试验中观察到的污染主要源于人为接种的哈茨木霉菌株。

1.5 检测指标与方法

1.5.1 哈茨木霉污染率 哈茨木霉污染率的测定

于接菌后第5、第10天实施,并测定最终污染率。采用图像分析法,在均匀漫射光环境中采集培养袋表面图像。每个重复中随机选择10个培养袋按左、中、右三区采集视野,每视野内置比例尺与标准色卡以确保图像尺度统一性。采集的图像导入ImageJ软件(1.53版本)进行分析,通过手动阈值分割识别哈茨木霉污染区域,由软件自动量化菌斑面积,每个培养袋的污染率取3个视野测定的平均值。污染率(C)/%= $S_1/S_2 \times 100$; S_1 为单个视野中哈茨木霉污染面积, S_2 为对应视野的图像总面积。

1.5.2 香菇生长指标测定 自接种后第5天起,在每个重复中随机选取10个菌袋,采用十字交叉法在菌袋表面标记接种点,用游标卡尺测量菌丝沿标记方向扩展的直径,取其平均值作为该时间点的菌丝扩展直径。每隔5 d测定1次,持续追踪至菌丝完全覆盖菌袋表面或生长停滞。菌丝生长速率(μ)/(mm·d⁻¹)=(Dt_1-Dt_2)/ Δt ; Dt_1 为本次测定的菌丝扩展直径(mm), Dt_2 为前次测定的菌丝扩展直径(mm), Δt 为两次测定的间隔时间(d,本试验中 $\Delta t=5$)。

菌丝生长势测定:采用四级目测法,+表示菌丝稀疏、纤细、生长弱; ++表示菌丝较密、生长一般; +++表示菌丝浓密、生长好; ++++表示菌丝浓密粗壮、生长旺盛。每5 d记录1次。

子实体产量测定:子实体成熟期定义为菌盖边缘内卷且菌褶完全展开的生理成熟阶段。分3潮次采收,每次采收时收取单个菌袋上的全部成熟子实体,采用电子天平(精度0.1 g)测定每个菌袋的子实体总鲜质量(单位:g·袋⁻¹),重复间取平均值作为该处理的子实体产量。

生物学效率(BE)反映栽培基质转化为子实体的效率。 $BE/\% = Wf/Wd \times 100$; Wf 为3潮子实体的总

鲜质量(g), Wd 为装袋时测定的栽培基质初始干质量(g,测定方法:105 °C烘干至恒质量)。

1.5.3 成本及经济效益核算 栽培总成本($C_{总}$)包括原料成本、加工处理成本及劳动力成本。原料成本($C_{原料}$)根据基质配方中各组分的用量及本地市场价格计算,其中稻壳0.2元·kg⁻¹、菌渣0.05元·kg⁻¹、麸皮1.5元·kg⁻¹、木屑0.5元·kg⁻¹;加工处理成本($C_{处理}$)包含基质发酵、粉碎、灭菌等工艺环节的能耗及设备折旧费用,统一核算为0.4元·袋⁻¹;劳动力成本($C_{人工}$)包括接种、管理、采收等人工投入,按0.35元·袋⁻¹计。

总成本 $C_{总}/(\text{元} \cdot \text{袋}^{-1}) = C_{原料} + C_{处理} + C_{人工}$ 。

产值/(元·袋⁻¹)=子实体单产(kg·袋⁻¹)×售价(元·kg⁻¹),香菇鲜菇售价参考当地批发市场,收购均价8.5元·kg⁻¹。

净收益/(元·袋⁻¹)=产值-总成本。

产投比=产值/总成本。

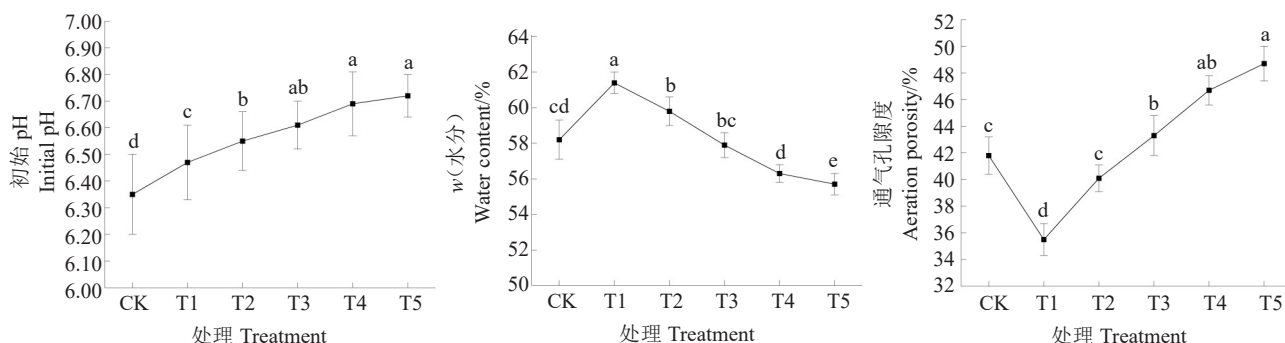
1.6 数据统计与分析

采用Excel 2022进行数据录入与整理;采用SPSS 27.0软件进行单因素方差分析,采用Duncan新复极差法进行多重比较($P<0.05$);采用Origin 2024软件绘制图表及进行相关性热图分析。

2 结果与分析

2.1 不同C/N对栽培基质理化性质的影响

由图1可知,不同C/N对基质初始pH产生显著影响。随着C/N的升高,各处理基质初始pH相应增大,从6.47逐步上升至6.72,且T4与T5处理间无显著差异,但均显著高于低C/N处理。CK的pH为6.35,显著低于所有处理组,表明其原料组成或预处理方式存在差异,尤其是为调节C/N加入的少量尿素引起基质酸化,导致了更高的酸度。基质



注:不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

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

图1 不同处理栽培基质理化性质

Fig. 1 Physicochemical property of cultivation substrate under different treatments

含水率随 C/N 升高而显著递减,由 T1 处理的 61.4%降至 T5 处理的 55.7%。T1 处理含水率最高(61.4%),显著高于 T4、T5 处理;而 T5 处理(C/N=40:1)含水率最低(55.7%),显著低于 CK 和其他处理。基质的通气孔隙度随 C/N 升高而提升,不同 C/N 处理对基质通气孔隙度产生显著影响,从 T1 处理的 35.5%提升至 T5 处理的 48.7%。T5 处理通气孔隙度显著高于 T1、T2、T3 处理和 CK,而与 T4 处理无显著差异。

2.2 不同 C/N 对哈茨木霉污染率抑制效果的影响

由表 3 可知,不同 C/N 处理对哈茨木霉污染率的抑制效果存在显著差异,各处理及对照的哈茨木霉污染率均随培养时间延长呈上升趋势,但污染累积速率因 C/N 不同而表现出差异。考虑到未接种组的自然污染率仅为 1.7%,本试验中观测到的污染(CK 组最终污染率 24.5%)可明确归因于人为接种的哈茨木霉。高氮组(T1、T2)污染率累积速率最高,从接种后 5 天至试验终点,T1 处理的污染率由 16.1%升至 30.2%,增速约为 $0.94\% \cdot d^{-1}$;T2 处理由 13.7%升至 27.6%,增速约为 $0.93\% \cdot d^{-1}$;高碳组(T5、T4)污染率累积速率较低,其中 T5 处理从 7.6%升至 17.9%,增速约为 $0.69\% \cdot d^{-1}$;T4 处理从 10.2%升至 19.8%,增速约为 $0.64\% \cdot d^{-1}$,且二者最终污染率均显著低于其他处理。T5 处理在各观测时间点(接种后 5 d、10 d、终点)均表现出最低污染率(7.6%、14.7%、17.9%),且最终污染率显著低于高氮处理组(T1、T2)及对照,表明该 C/N 对哈茨木霉的抑制效果最好。

2.3 不同 C/N 对菌丝生长动态与抗性的影响

由表 4 可知,C/N 在哈茨木霉胁迫前后显著影响香菇菌丝生长速率。在接种后 15 d(即哈茨木霉胁迫前),各处理菌丝长势均表现良好(+++以上),其中 T1 和 T2 处理的菌丝生长速率显著优于其他

表 3 不同处理哈茨木霉污染率

Table 3 Contamination rate of *T. harzianum* under different treatments %

处理 Treatment	接种 5 d 后污染率 Contamination rate after inoculation for 5 d	接种 10 d 后污染率 Contamination rate after inoculation for 10 d	最终污染率 Final contamination rate
CK	15.4±7.7 a	18.6±12.6 b	24.5±6.8 b
T1	16.1±9.9 a	23.9±13.3 a	30.2±11.1 a
T2	13.7±5.5 b	20.2±7.3 b	27.6±9.5 b
T3	11.3±8.2 c	17.0±11.8 c	23.1±7.8 c
T4	10.2±7.1 c	15.3±8.5 c	19.8±8.7 d
T5	7.6±7.9 d	14.7±9.1 d	17.9±11.4 d

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.

处理,且与 CK 无显著差异;T3 处理处于中间水平,而 T4、T5 处理显著低于高氮处理组。在哈茨木霉胁迫初期(接种后 20 d,即接种后 5 d),T1、T2 处理的菌丝生长速率仍显著高于其他处理,表明充足的氮素供应对维持香菇菌丝在生物胁迫下的生长活力十分重要。相比之下,随着 C/N 升高(T3 至 T5),菌丝生长速率呈现明显的递减趋势,T5 处理的生长速率显著低于所有低 C/N 处理。各处理的菌丝长势与胁迫前相比稍有下降,且与生长速率并非完全同步。胁迫中期(接种后 10 d),各处理的菌丝生长态势发生明显变化,前期表现最佳的 T1、T2 处理生长速率急剧下降至最低水平,且菌丝长势减弱,表明高氮环境在长期胁迫下转为劣势;而 T4 处理不仅生长速率最高,且与 T3、T5、CK 维持了稳定的菌丝长势(++).在胁迫后期(接种后 15 d),各处理的菌丝生长速率进一步降低,但 T4 处理仍保持相对最高的生长速率,显著优于其他处理。此时所有处理的菌丝长势均减弱至+水平,表明哈茨木霉的持续胁迫对香菇菌丝活力产生了普遍抑制。T4

表 4 不同处理香菇菌丝生长速率及长势

Table 4 Growth rate and vigor of shiitake mycelium under different treatments

处理 Treatment	接种 15 d 生长速率 Growth rate after inoculation for 15 d/ (mm·d ⁻¹)	菌丝 长势 Vigor	接种 20 d 生长速率 Growth rate after inoculation for 20 d/ (mm·d ⁻¹)	菌丝 长势 Vigor	接种 25 d 生长速率 Growth rate after inoculation for 25 d/ (mm·d ⁻¹)	菌丝 长势 Vigor	接种 30 d 生长速率 Growth rate after inoculation for 30 d/ (mm·d ⁻¹)	菌丝 长势 Vigor
CK	6.7±0.7 ab	+++	5.4±0.3 b	+++	3.5±0.4 b	++	1.1±0.2 c	+
T1	7.1±0.9 a	++++	5.8±0.4 a	+++	2.6±0.7 d	+	0.6±0.8 d	+
T2	6.9±0.7 a	++++	5.7±0.5 a	+++	2.2±0.6 de	+	0.8±0.4 d	+
T3	6.2±0.3 c	+++	5.3±0.6 b	++	3.4±0.4 b	++	1.4±0.3 b	+
T4	5.4±0.7 d	+++	5.0±0.7 bc	+++	4.1±0.5 a	++	2.3±0.7 a	+
T5	5.3±0.5 d	+++	4.7±0.6 c	+++	3.1±0.7 bc	++	1.5±0.5 b	+

处理抗胁迫能力最强,初期长势尚可的 CK 在胁迫后生长速率明显降低至 $1.1\text{ mm}\cdot\text{d}^{-1}$,生长势减弱,反映其抗逆能力较弱。T1 与 T2 处理在胁迫环境下表现不佳,菌丝生长近乎停滞,抗逆性最差。总体来看,T1~T4 处理抗胁迫能力随着 C/N 的升高而增强,T5 处理在胁迫后抗逆性不及 T4 处理,表明其 C/N 可能超出了香菇菌丝在胁迫下生理平衡的临界点。

2.4 不同 C/N 对香菇子实体产量的影响

由图 2 可知,不同 C/N 处理受哈茨木霉胁迫后的子实体产量在各潮次间差异显著,产量分布表现

出典型的“潮次效应”,二潮菇产量占比最高(40.1%~58.7%),三潮菇次之(28.4%~46.2%),头潮菇最低(6.9%~10.3%)。随 C/N 升高(T1~T5),各潮菇产量与总产量整体上均呈先升后降的趋势,T4 处理在总产量及多数潮次产量上均表现最佳。T4 处理头潮菇产量显著高于其他处理,T3、T5 处理与 CK 基本处于同一水平,T1、T2 处理的产量较低。在二潮菇与三潮菇产量方面,T4 处理在二潮菇阶段产量最高($0.182\text{ kg}\cdot\text{袋}^{-1}$),三潮菇产量与 CK 无显著差异,且仍维持较高水平。T1 与 T2 处理在二、三潮菇阶段的产量均显著低于 CK,且随潮次推进,与 T4 处理

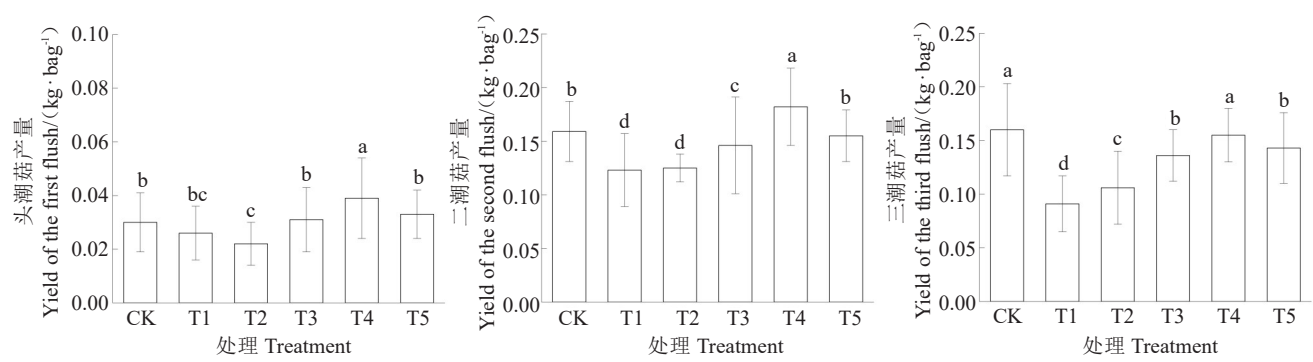


图 2 不同处理各潮次香菇产量
Fig. 2 Yield of shiitake mushroom across different flushes under different treatments

和 CK 的差距进一步扩大。

由图 3 可知,各处理的生物学效率随 C/N 变化呈显著差异。T1~T4 处理的生物学效率逐步上升,由 24.0%(T1)增至 37.7%(T4),当 C/N 进一步升高至 T5 时,生物学效率下降至 33.2%。T1 和 T2 处理的生物学效率较低(分别为 24.0%和 25.3%),CK 的生物学效率(34.0%)略高于 T3 处理(31.3%),但显著低于 T4 处理。

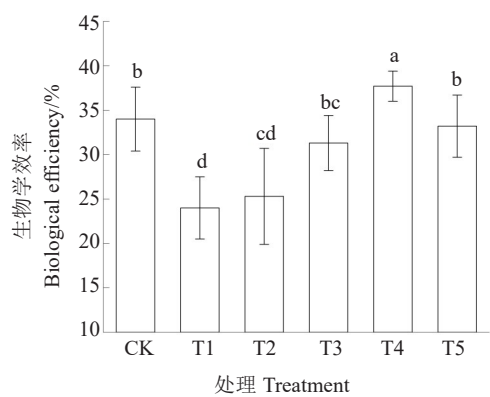


图 3 不同处理的生物学效率
Fig. 3 Biological efficiency of different treatments

2.5 不同 C/N 对香菇产量和经济效益的影响

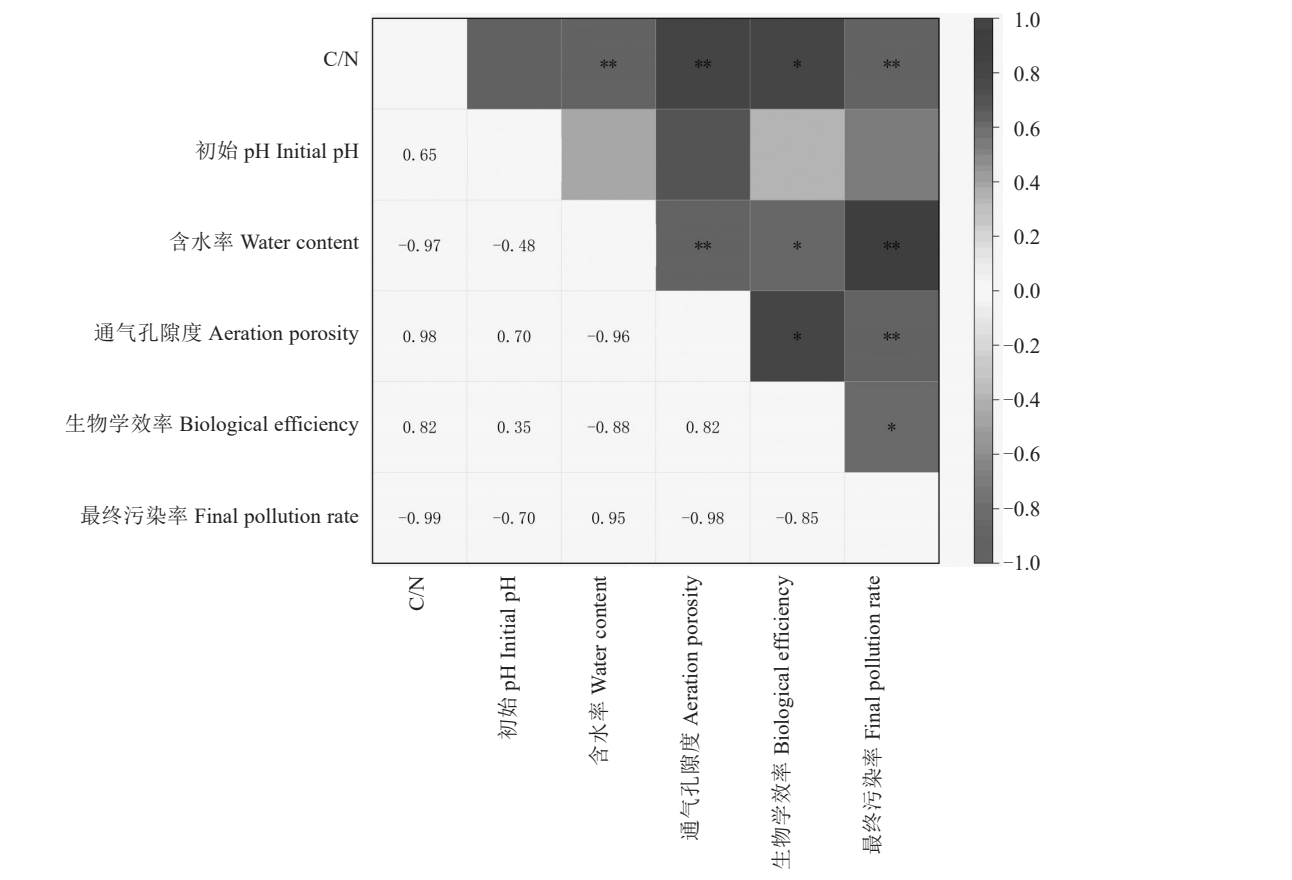
由表 5 可知,原料成本随 C/N 升高呈逐渐降低

的趋势,这是由于配方中木屑与麸皮含量逐渐减少,成本随之降低。随着 C/N 从 25:1(高氮)升至 40:1(高碳),经济效益呈“先明显提升后小幅回落”的单峰曲线:高氮组 T1、T2 处理成本高、产量低,净收益<1 元·袋⁻¹,产投比<1.80,经济效益较差;均衡型 T3 处理较 T2 处理净收益提升 61.29%,产投比提升 30.10%,表明 C/N=30:1 为经济效益改善的拐点;中碳型 T4 处理较 T3 处理净收益提升 39.33%,产投比提升 26.20%,达到峰值;高碳型 T5 处理较 T4 处理净收益降低 14.35%,但仍高于均衡型 T3 处理。

2.6 栽培基质理化指标及生物学参数之间的关系

基于 Pearson 相关性分析结果(图 4)显示,C/N 与含水率、最终污染率呈极显著负相关;与通气孔隙度呈极显著正相关;与生物学效率呈显著正相关。基质初始 pH 与 C/N、含水率、通气孔隙度、最终污染率、生物学效率相关性不显著,表明其并非该调控路径中的主要限制因子。含水率与通气孔隙度呈极显著负相关,与生物学效率呈显著负相关,与最终污染率呈极显著正相关。通气孔隙度与生物学效率呈显著正相关,与最终污染率呈极显著负相关。

表 5 不同处理对香菇产量和经济效益的影响						
Table 5 Effects of different treatments on yield and economic benefit of shiitake mushroom						
处理 Treatment	原料成本 Raw material cost/(Yuan·bag ⁻¹)	处理成本 Processing cost/ (Yuan·bag ⁻¹)	总成本 Total cost/ (Yuan·bag ⁻¹)	产值 Output value/ (Yuan·bag ⁻¹)	净收益 Net return/ (Yuan·bag ⁻¹)	产投比 Output- input ratio
T1	0.55	0.75	1.30	0.240×8.5=2.04	0.74	1.57
T2	0.47	0.75	1.22	0.253×8.5=2.15	0.93	1.76
T3	0.41	0.75	1.16	0.313×8.5=2.66	1.50	2.29
T4	0.36	0.75	1.11	0.377×8.5=3.20	2.09	2.89
T5	0.28	0.75	1.03	0.332×8.5=2.82	1.79	2.74
CK	0.76	0.60	1.36	0.340×8.5=2.89	1.53	2.13



注:*表示在 0.05 水平显著相关;**表示在 0.01 水平极显著相关。
Note: * represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level.

图 4 栽培基质理化指标及生物学参数之间的相关性
Fig. 4 Correlation between physicochemical property and biological parameters of cultivation substrate

3 讨论与结论

哈茨木霉作为一种腐生性和竞争性真菌,其菌丝扩展与孢子萌发对速效氮源需求较高^[19]。在本研究中,随着 C/N 从 20:1(T1)升高至 40:1(T5),哈茨木霉的最终污染率随之降低(从 30.2%降至 17.9%)。从营养生态位竞争角度来看,较低的 C/N(如 T1、T2)意味着基质中可利用氮源相对丰富,高氮环境为哈茨木霉的快速定殖与繁殖提供了有利

条件,导致污染率升高,这与张衡宇^[20]研究哈茨木霉有关生防机制的结果一致。反之,较高的 C/N(如 T4、T5)营造了一个相对“贫氮”的微环境,在一定程度上限制了哈茨木霉的初始爆发性生长,为香菇菌丝的优势生长赢得了时间。
C/N 与基质通气孔隙度呈极显著正相关,而与含水率呈极显著负相关,这意味着提高 C/N 直接导致基质结构更加疏松多孔且含水量降低。主要是由于构成碳源的主料(稻壳、木屑)持水能力通常低

于构成氮源的辅料(菌渣、麸皮),提高了基质的疏松度与通气性。良好的通气环境促进了香菇菌丝的好氧呼吸与代谢,增强了其生理活性与竞争能力^[21-22]。基质整体持水能力的下降同样与高 C/N 配方中辅料比例的降低有关,稻壳、木屑含量增加,菌渣、麸皮含量降低,使基质结构更为疏松,不利于水分的保持^[23]。Macdonald^[24]、Silva 等^[25]研究发现,当栽培基质的含水率较低时,会抑制游动孢子的形成及其释放与传播。可能是基于同样原理,本试验中 C/N 较高的基质(如 T4、T5 处理)含水率相对较低,减少了游离水膜,不利于哈茨木霉孢子的游动与传播,但这还需进一步验证。此外,C/N 的调控也显著改变了基质的理化微环境。本研究发现,随着 C/N 升高,基质初始 pH 从 6.47 升至 6.72,含水率从 61.4%降至 55.7%,而通气孔隙度则从 35.5%提升至 48.7%。这些变化共同构成了一个不利于哈茨木霉生长而有利于香菇菌丝生长的理化屏障。pH 的升高可能抑制了偏好微酸性环境的哈茨木霉孢子萌发;较低的含水率减少了基质表面的游离水膜,限制了哈茨木霉分生孢子的传播与附着;而显著提升的通气孔隙度则改善了基质内部的氧气供应,促进基质有机物向菌丝生物量的转化,使生物学效率达到峰值(37.7%),较对照组(CK, 34.0%)提升 3.7 个百分点,使其能更快地占据生态位并形成致密的物理结构,从而有效抑制杂菌侵染。这种“高孔隙、低含水”的物理环境,一方面显著促进了香菇的生物学效率,另一方面则极显著抑制了最终污染率。这种由 C/N 驱动的理化环境协同优化,使 T4 处理(C/N=35:1)在实现最低污染风险与最高生物学效率之间取得较好的平衡。

健壮、密实的真菌菌丝体会形成有效的物理屏障,并通过旺盛的代谢活动在竞争中占据主动,从而表现出对病原侵染的较强耐受性^[26]。当香菇菌丝率先形成健壮的网络并占据基质主体后,其可通过空间占据、营养竞争及可能产生的抗性物质等方式,有效抵御哈茨木霉的后续侵染。谭健谈^[6]研究表明,C/N 通过影响胞外酶活性来影响香菇对木质纤维素的降解能力,进而影响其营养获取。边银丙等^[27-28]研究表明,合理的碳水平可为菌丝前期快速扩展提供充足的碳骨架与能量来源,诱导菌丝合成更多几丁质酶及萜类抗逆代谢产物,有助于菌丝在空间竞争中占据优势,从而抑制木霉等竞争性杂菌的生长与孢子萌发。本研究中,在引入哈茨木霉胁迫后,高 C/N 处理(T4、T5)在胁迫后仍能维持一

定的菌丝生长速率和长势,而低 C/N 处理(T1、T2)的菌丝生长速率下降幅度较大,证明适宜的 C/N 不仅能促进菌丝快速生长,更能诱导或增强其系统抗性。这体现了通过调控培养基组分,定向塑造有利于栽培菌种生长而不利竞争性杂菌生长的微生态环境的可行性。

本研究显示,C/N 对香菇-哈茨木霉相互作用的影响并非静态,而是一个动态的、与胁迫时间密切相关的适应性过程。初期高氮策略利于快速响应,而中长期则需依赖平衡或适度富碳的营养策略以维持抗性。哈茨木霉胁迫前阶段,随着 C/N 的升高,T1~T5 处理的菌丝生长速率表现出递降趋势,表明在碳源充足但氮源不足的情况下,菌丝的生长速率会受到抑制,导致生长速率下降,这与胡延如等^[29]的研究结果一致。基于整个胁迫周期(接菌后 0~15 d)的数据可知,不同 C/N 下香菇菌丝对哈茨木霉胁迫的响应呈现时序性动态特征。胁迫初期(接菌后 0~5 d)为富氮优势阶段,T1 与 T2 处理凭借充足的氮源,表现出最强的初始生长与抗逆能力,在竞争早期建立优势。胁迫中期(接菌后 5~10 d)为营养平衡转换阶段,前期富氮处理的优势丧失,中高 C/N 处理(T3、T4、T5)及 CK 开始显现出持久抗性,适量的 C/N 保障了菌丝能够将资源合理分配于基础生长与抗逆代谢,而非单纯的快速旺长。胁迫后期(接菌后 10~15 d)为碳储备优势阶段,高 C/N 处理的优势进一步扩大,说明在长期的营养与空间竞争中,碳储备对维持菌丝基本活力至关重要。

生物学效率是菌丝体营养积累与转化能力的最终体现,T4 处理的生物学效率最高,这与其前期快速、健壮的菌丝生长以及较强的抗逆能力直接相关。尽管 T5 处理在抑制哈茨木霉方面表现最佳,但其生物学效率略低于 T4 处理,暗示过高的 C/N 可能导致氮素营养在出菇阶段成为限制因子,影响了子实体的发育。对照组(CK)虽在总产量上表现不错,但其较高的污染率(24.5%)和较差的菌丝抗逆性,使生产稳定性面临风险。原料成本随 C/N 升高而明显降低,这主要得益于价格低廉的稻壳和菌渣对价格相对较高的木屑和麸皮的替代。本研究中 35:1 的 C/N 处理实现了最高的净收益(2.09 元·袋⁻¹)和产投比(2.89)。相较于传统配方(CK),T4 处理在单位菌棒生产成本上降低了 18.38%,在成本、产量和抗病性之间取得了较好的平衡。

综上所述,适宜比例的稻壳与菌渣作为替代原料,可实现基质的高值化循环利用,不仅有助于降

低香菇生产的原料成本,缓解环境污染压力,还可以通过合理调控 C/N 增强抗逆性,降低哈茨木霉污染风险,在一定程度上实现对病害的生态防控。在本试验条件下,将稻壳-菌渣复合基质的 C/N 调至 35:1,能够有效抑制哈茨木霉污染,提升香菇产量与经济效益,是较为理想的绿色高效栽培策略。

参考文献

- [1] Ishtiaq A, Maryum A, Mimi X, et al. Therapeutic values and nutraceutical properties of shiitake mushroom (*Lentinula edodes*): A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 134: 123-135.
- [2] Li X F, Sossah F L, Tuo Y L, et al. Characterization and fungicide sensitivity of *Trichoderma* species causing green mold of *Ganoderma sichuanense* in China[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1264699.
- [3] 秦文韬, 王守现, 荣成博, 等. 我国食用菌病害发生与防控概况[J]. 中国食用菌, 2020, 39(12): 1-7.
- [4] 张旭, 刘灿, 生吉萍, 等. 食用菌致病木霉优良拮抗菌株的筛选及生理特性的初步研究[J]. 食品科学, 2012, 33(1): 186-190.
- [5] 温新生. 香菇优质丰产管理措施[J]. 河南农业, 2017(28): 19.
- [6] 谭健谈. 碳氮营养对香菇菌丝生长、多糖及木质素降解的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023: 16-17.
- [7] 隋昆澎, 田龙, 宋冰, 等. 食用菌细菌性病害研究进展[J]. 食用菌学报, 2020, 27(1): 97-104.
- [8] 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.
- [9] 武晨, 梁艳莉, 丁怡丹, 等. 农业废弃物稻壳的资源化利用研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2017, 37(6): 16-19.
- [10] 张双燕, 任浩, 丁文清, 等. 农业废弃物稻壳材料化利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(9): 101-108.
- [11] Zhang L, Sun X Y. Changes in physical, chemical, and microbiological properties during the two-stage co-composting of green waste with spent mushroom compost and biochar[J]. Biore-source Technology, 2014, 171: 274-284.
- [12] 郭远, 宋爽, 高琪, 等. 食用菌菌渣资源化利用进展[J]. 食用菌学报, 2022, 29(2): 103-114.
- [13] 鲍大鹏, 邹根, 裴晓东, 等. 中国食用菌产业实现高质量现代化发展的路径探讨[J]. 食用菌学报, 2022, 29(6): 103-110.
- [14] 张树庭. 食用菌产业: 一个原则 一种模式[J]. 食用菌学报, 2024, 31(1): 1-10.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 国家食品药品监督管理总局, 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定: GB 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [17] 蔡信之, 黄君红. 微生物学实验[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2019.
- [18] 田育天, 李湘伟, 谢新乔, 等. 云南典型植烟土壤通气孔隙及其主控因素研究[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1430-1438.
- [19] 马晓龙, 王刚正, 樊晓琳, 等. 食用菌与木霉菌互作机制研究进展[J]. 微生物学通报, 2019, 46(1): 184-191.
- [20] 张衡宇. 植病生防菌哈茨木霉 (*Trichoderma harzianum*) 的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2011: 45-48.
- [21] 曲斌, 张静雯, 王瑞雪, 等. 农作物纤维废弃物生物质精炼技术研究概况[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2025, 46(4): 1-11.
- [22] 朱丹. 不同栽培基质对香菇产量和营养品质的影响[J]. 农业工程技术, 2024, 44(28): 31-32.
- [23] 李贺, 郭海滨, 魏雅冬. 农作物秸秆及食用菌菌渣等农业废弃物资源化利用现状分析[J]. 现代农业研究, 2022, 28(5): 17-19.
- [24] Macdonald J D, Duniway J M. Influence of the matric and osmotic components of water potential on zoospore discharge in phytophthora[J]. Scientific Societies in Phytopathology, 1987, 68(5): 751-757.
- [25] Silva E M, Maia L C, Menezes K M S, et al. Water availability and formation of propagules of arbuscular mycorrhizal fungi associated with sorghum[J]. Applied Soil Ecology, 2015, 94: 15-20.
- [26] 李丰硕, 冀宝营, 韩冰, 等. 香菇与木霉互作方式及绿霉病防治研究进展[J]. 食用菌学报, 2024, 31(3): 113-124.
- [27] 边银丙. 食用菌菌丝体侵染性病害与竞争性病害研究进展[J]. 食用菌学报, 2013, 20(2): 1-7.
- [28] 边银丙, 肖扬, 郭孟配. 食用菌病害防控研究进展[J]. 食用菌学报, 2021, 28(5): 121-131.
- [29] 胡延如, 尼振原, 张佳欣, 等. 培养料不同含氮量和碳氮比对糙皮侧耳生长和营养成分含量的影响[J]. 食用菌学报, 2022, 29(1): 36-40.