

黄腐酸对香菇菌丝生长、子实体生物学效率和品质的影响

段庆虎, 张应香, 竹 玮, 龚凤萍

(信阳市农业科学院 河南信阳 464000)

摘要: 以秋香 2 号为试材, 以基础配方为对照(CK), 设置 4 种不同浓度的黄腐酸处理, 研究不同浓度黄腐酸对香菇菌丝生长、子实体生物学效率和品质的影响。结果表明, 添加黄腐酸可提高香菇菌丝生长速度和子实体生物学效率, 其中 T3 处理(0.24%黄腐酸)菌丝生长速度和生物学效率较 CK 分别显著增加 24.42%和 19.62%; 添加黄腐酸可提高香菇子实体蛋白质含量、氨基酸总量、总灰分含量及子实体蛋白质的化学评分和氨基酸评分, 其中 T4 处理(0.32%黄腐酸)子实体品质最佳, T3 处理次之, 且二者子实体蛋白质的化学评分和氨基酸评分均无显著差异。综上, 在栽培培养基中添加 0.24%黄腐酸, 可加快香菇菌丝生长速度, 提高香菇子实体生物学效率和品质, 为优质香菇的栽培奠定了重要基础。

关键词: 香菇; 黄腐酸; 生长发育; 木质素; 纤维素; 子实体品质

中图分类号: S646.1'2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-2871(2023)10-104-08

Effect of fulvic acid on the mycelium growth, biological efficiency and quality of fruit body of *Lentinula edodes*

DUAN Qinghu, ZHANG Yingxiang, ZHU Wei, GONG Fengping

(Xinyang Academy of Agricultural Sciences, Xinyang 464000, Henan, China)

Abstract: Qiuxiang No. 2 was used as experimental material, the basic formula was used as control(CK), four treatments with different amount of fulvic acid were set to study the effects of different amount of fulvic acid on mycelium growth, fruit body biological efficiency and quality of *Lentinula edodes*. The results showed that the mycelium growth rate and fruit body biological efficiency of *L.edodes* treated with fulvic acid were increased, and the mycelium growth rate and biological efficiency of T3 treatment(0.24%) were increased significantly by 24.42% and 19.62% compared with CK, respectively. The protein content, total amino acid content, total ash content, protein chemical score and amino acid score of fruit body of *L.edodes* treated with fulvic acid were significantly increased. The best quality of fruit body was obtained with T4 treatment(0.32%), followed by T3 treatment(0.24%). Comprehensive analysis showed that the application amount of fulvic acid was 0.24% in the culture medium of *L. edodes*, which accelerated the mycelium growth rate, improved the biological efficiency and quality of fruit body. This study can lay an important foundation for the cultivation of high quality *L.edodes*.

Key words: *Lentinula edodes*; Fulvic acid; Growth and development; Lignin; Cellulose; Fruit body quality

香菇(*Lentinula edodes*)是全球第二大食用菌, 产量仅次于双孢蘑菇^[1]。据中国食用菌协会统计, 2020 年我国香菇的产量为 1 188.21 万 t, 占全国食用菌总产量的 29.26%, 产值超过 1000 亿元, 相关产业的从业人员超过 1000 万人, 香菇是我国生产区域最广、总产量最高、影响最大的食用菌种类^[2]。但是, 受到城镇化、老龄化和菌材原料短缺等要素结构变化的影响, 香菇生产的原料、菌用物资和人工

成本出现一定幅度上涨, 导致香菇经营效益普遍下滑^[3]。黄腐酸是从腐殖质中提取的一种可溶于酸、碱和水的芳香族类物质, 易被植物吸收, 能促进植株生长发育, 提高生物酶活性和光合效率, 对农作物具有增产、提质及增强抗逆性的作用, 其可从煤炭中提取, 也可经微生物发酵生产, 在自然界中稳定存在, 生产成本较低。研究表明, 外源黄腐酸能够提高小麦、玉米、红薯、油菜等作物的抗逆性、产

收稿日期: 2022-12-27; 修回日期: 2023-07-10

基金项目: 河南省现代农业产业技术体系信阳综合试验站(HARS-22-08-Z3); 河南省科技攻关(232102110230)

作者简介: 段庆虎, 助理研究员, 研究方向为食用菌育种和栽培技术。E-mail: duanqinghu0529@163.com

通信作者: 龚凤萍, 副研究员, 研究方向为食用菌育种和栽培技术。E-mail: fumengmeng518@163.com

量和品质^[4-5]。此外,黄腐酸能够增加草菇、平菇、香菇等食用菌的产量,改善其外观质量^[6-9]。黄腐酸钾可以改善香菇出菇整齐度,提高子实体单菇质量、菌盖直径和厚度^[8],使香菇出菇时间提前、烂棒率降低和鲜菇产量增加^[9]。然而,黄腐酸对香菇菌丝生长、子实体生物学效率和品质的影响仍有待进一步研究。笔者以秋栽香菇为材料,以常规栽培配方为基础培养基,添加不同浓度的黄腐酸,开展黄腐酸对秋栽香菇菌丝生长、子实体生物学效率和品质的影响研究,为黄腐酸在食用菌栽培中的应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 参试品种 秋香2号,由信阳市农业科学院选育保藏,属短菌龄、中温偏低型、花菇率较高的秋栽香菇品种。

1.1.2 栽培基质 主料为栎类林木粉碎成的木屑(栎类林木由信阳市浉河区香菇种植基地提供,经机器粉碎成粗粒13~15 mm,细粒3~8 mm,粗细比例为7:3的木屑);辅料为麸皮、玉米粉、石膏粉、CaCO₃粉(由信阳市浉河区森森食用菌服务部提供)和黄腐酸[含量(w)≥95%,由上海麦克林生化科技股份有限公司提供]。

1.2 试验设计

试验于2021年9月至2022年4月在信阳市农业科学院试验示范基地(信阳市浉河区湖东办事处三里店社区)进行。以基础配方为对照(CK):77.00%木屑,15.00%麸皮,5.00%玉米粉,2.00%CaCO₃,1.00%石膏;设置4个不同浓度(w)的黄腐酸处理,在基础配方上添加0.08%、0.16%、0.24%、0.32%的黄腐酸,分别称为T1、T2、T3、T4。试验采用随机区组分布,每个处理50袋,3次重复。栎类林木木屑提前1 d预湿。按照设计配制培养料,充分搅拌均匀,培养料含水量为55%。采用自动装袋机装袋,使用折径为21 cm×60 cm×0.006 cm的聚乙烯塑料袋,料棒湿质量平均为4.08 kg·袋⁻¹。装袋后立即灭菌,灭菌、接种、栽培方式、发菌和出菇管理参照段庆虎等^[10]的方法。

1.3 取样

在菌丝满袋期、转色期(转色面积达到2/3时)、原基期、幼菇期、成熟期和菌糠期(3茬菇结束后)对培养料分别取样,从各处理中随机选取3袋,取菌袋中部菌料300 g,充分混匀,分成2份,1份于

60℃条件下烘干备用,1份于-80℃保存备用,3次重复;在第一茬香菇八成熟时对子实体取样,分别从各处理中随机选取10袋,采摘八成熟香菇子实体2000 g,剪去菇脚,于60℃条件下烘干,粉碎过60目筛,4℃密封保存备用,3次重复。

1.4 指标测定

1.4.1 香菇菌丝生长速度、生物学效率及生长发育时间观测 参照段庆虎等^[10]方法测定各处理中香菇菌丝的生长速度和生物学效率。观测记录各处理菌丝满袋时间、污染率、转色时间、现蕾时间和首次采菇时间。各处理随机取5朵香菇(八成熟),称鲜质量,于60℃烘干,称干质量,计算平均单朵鲜菇质量和干菇质量。

1.4.2 漆酶和羧甲基纤维素酶活性测定 酶液制备参考庄庆利^[11]方法进行,略有改进。各处理不同时期培养料冷冻鲜样品取出后室温解冻,称5 g,加入15 mL 0.1 mol·L⁻¹磷酸缓冲液,在4℃,220 r·min⁻¹摇床摇4 h,过滤后的溶液经8000 r·min⁻¹离心10 min,上清液即为待测粗酶液。采用ABTS法定量测定漆酶活性^[12],在试管中依次加入2.7 mL HAc-NaAc 缓冲液(pH 4.5)、0.1 mL ABTS 溶液(1 mmol·L⁻¹)、0.2 mL 稀释10倍后的粗酶液,测定420 nm处的吸光值,测反应开始前3 min吸光值的增加量,以灭活15 min的粗酶液作为空白对照。采用DNS法绘制葡萄糖标准曲线和测定羧甲基纤维素酶活性^[13-14]。葡萄糖标准曲线的回归方程为 $y=1.598x-0.008$, $R^2=0.9997$ 。粗酶液稀释1000倍后,吸取2 mL稀释后的粗酶液转移到带塞的试管中,在空试管中加入2 mL无菌水作为对照,在各试管中加入1.5 mL醋酸缓冲液(0.1 mol·L⁻¹,pH 5.0),并分别加入4 mL已预热的羧甲基纤维素钠底物溶液(4 mmol·L⁻¹),对照不加底物,以无菌水代替,55℃水浴使底物与酶充分反应30 min后取出,立即加入1.5 mL DNS显色液以中止酶促反应,充分摇匀后沸水浴5 min,取出后用水定容至25 mL,测定540 nm处的吸光值,根据标准曲线关系式计算各样品羧甲基纤维素酶活性。漆酶酶活性定义:1 min氧化1 μmol ABTS,使产物ABTS自由基浓度增加值为一个酶活性单位(U)。羧甲基纤维素酶酶活性定义:55℃反应条件下,1 min反应生成1 mg葡萄糖所需要的酶量定义为一个酶活性单位(U)。

$$\text{漆酶活性}(\text{U} \cdot \text{g}^{-1}) = (1000 \times 0.1844 \times \Delta \text{OD}_{420} \times a_1) / (m \times t_1) \quad (1)$$

式(1)中 ΔOD_{420} 为反应3 min后 OD_{420} 起始

OD₄₂₀; a₁为样品总稀释倍数; m为样品质量(g); t₁为反应时间(min)。

$$\text{羧甲基纤维素酶活性}(U \cdot g^{-1}) = [(\Delta OD_{540} + 0.008) \times a_2] / (1.598 \times m \times t_2) \quad (2)$$

式(2)中ΔOD₅₄₀为试验组 OD₅₄₀-对照组 OD₅₄₀; a₂为样品总稀释倍数; m为样品质量(g); t₂为反应时间(min)。

1.4.3 培养料酸性洗涤木质素、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量测定 分别取各处理培养料干样品 200 g, 送至农业农村部农产品质量监督检验测试中心(郑州)进行酸性洗涤木质素、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量的测定。采用 GB/T 20805-2006 的方法测定酸性洗涤木质素含量^[15]; 采用 NY/T 1459-2007 的方法测定酸性洗涤纤维含量^[16]; 采用 GB/T 20806-2006 的方法测定中性洗涤纤维含量^[17]。

1.4.4 香菇子实体品质测定 分别取各处理香菇子实体干样品 200 g, 送至农业农村部农产品质量监督检验测试中心(郑州)进行蛋白质、脂肪、总灰分和氨基酸含量的测定。采用 GB 5009.5-2016 的方法测定蛋白质含量^[18]; 采用 GB 5009.6-2016 的

方法测定脂肪含量^[19]; 采用 GB 5009.4-2016 的方法测定总灰分含量^[20]; 采用 GB 5009.124-2016 的方法测定除色氨酸外的 17 种氨基酸含量^[21]。参照美国食品与农业机构^[22]的方法计算化学评分; 参照马璐等^[23]、陈艳芳等^[24]的方法计算氨基酸评分、必需氨基酸指数、生物价、营养指数和贴适度。

1.5 统计分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理和绘图; 采用 IBM SPSS Statistics 17 进行方差及差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 黄腐酸对香菇生长发育的影响

从表 1 可以看出, 随着黄腐酸浓度的增大, 香菇菌棒污染率、满袋时间、转色时间和现蕾时间均呈先降低后升高的变化趋势, 而菌丝生长速度呈先升高后降低的变化趋势, 首次采菇时间呈逐渐缩短的变化趋势。T3 处理菌棒污染率最低, 显著低于其他处理; 菌丝生长速度最快, 显著高于其他处理, 比 CK 增加 24.42%; 满袋时间、转色时间、现蕾时间和首次采菇时间分别比 CK 显著缩短 18、19、4 和 5 d。

表 1 黄腐酸对香菇菌棒污染率、菌丝生长速度和生长发育时间的影响

Table 1 Effect of fulvic acid on contamination rate, mycelial growth rate and growth time of *Lentinula edodes*

处理	菌棒污染率/%	菌丝生长速度/(mm·d ⁻¹)	满袋时间/d	转色时间/d	现蕾时间/d	首次采菇时间/d
CK	16.00±1.00 a	2.17±0.11 d	70.00±1.00 a	82.00±1.00 a	90.00±1.00 a	101.00±1.00 a
T1	8.33±0.58 c	2.24±0.20 cd	68.00±1.00 b	77.00±1.00 b	90.00±1.00 a	101.00±1.00 a
T2	5.67±0.58 d	2.51±0.13 b	57.00±1.00 c	71.00±1.00 c	85.00±1.00 b	100.00±1.00 a
T3	0.00±0.00 e	2.70±0.21 a	52.00±1.00 d	63.00±2.00 e	86.00±1.00 b	96.00±1.00 b
T4	11.67±1.53 b	2.43±0.14 bc	57.00±1.00 c	67.00±1.00 d	86.00±1.00 b	96.00±1.00 b

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

从表 2 可以看出, 随着黄腐酸浓度的增大, 香菇平均单朵干菇质量和生物学效率均呈先升高后降低的变化趋势, 菇形和菇质呈改善趋势。T2 处理平均单朵鲜菇质量最高, 比 CK 显著增加 56.40%。T3 处理平均单朵干菇质量最高, 比 CK 显著增加 62.85%, 生物学效率最高, 比 CK 显著提高 19.62%。T3 和 T4 处理菇形、菇质比 CK 更圆整和坚硬。

2.2 黄腐酸对香菇不同生长期漆酶和羧甲基纤维素酶活性的影响

从图 1 可以看出, 不同浓度黄腐酸对香菇不同生长期漆酶活性有不同程度的影响。在满袋期, T1 处理漆酶活性比 CK 显著降低 11.54%; 在转色期, T4 处理漆酶活性高于其他处理, 比 CK 显著提高 32.64%; 在原基期, T3 处理漆酶活性比 CK 显著

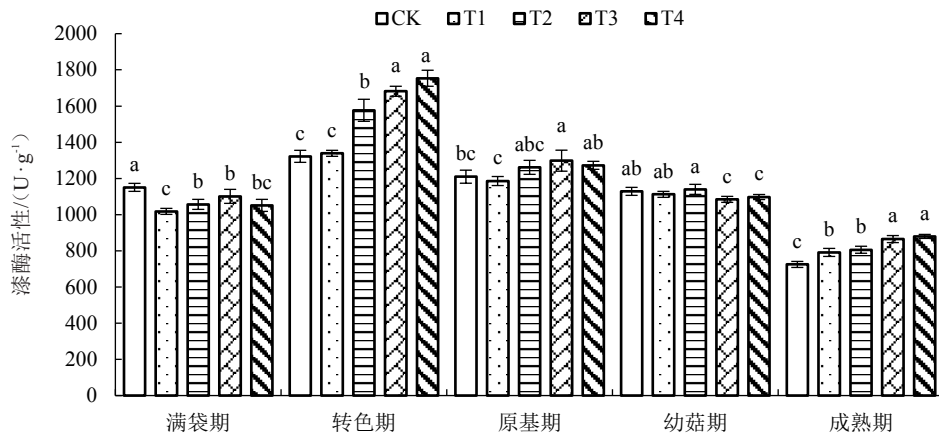
表 2 黄腐酸对香菇子实体鲜干质量、菇形菇质和生物学效率的影响

Table 2 Effect of fulvic acid on fresh and dry mass, mushroom shape and biological efficiency of fruit body of *Lentinula edodes*

处理	平均单朵鲜菇质量/g	平均单朵干菇质量/g	菇形菇质	生物学效率/%
CK	29.47±1.51 b	4.63±0.25 c	较圆整, 菇质+	51.84±0.34 e
T1	29.33±1.12 b	5.39±0.31 b	较圆整, 菇质++	57.68±0.20 d
T2	46.09±1.89 a	6.99±0.50 a	圆整, 菇质++	59.72±0.07 c
T3	43.93±1.68 a	7.54±0.44 a	圆整, 菇质+++	62.01±0.14 a
T4	25.62±1.20 c	5.59±0.32 b	圆整, 菇质+++	60.84±0.20 b

注: “+”代表菇质软硬程度, “+”越多代表菇质越硬。

提高 7.32%; 在幼菇期, T2 处理漆酶活性最高, 与 CK 无显著差异; 在成熟期, T4 处理漆酶活性最高,



注:同一生长时期不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

图 1 黄腐酸对香菇不同生长时期漆酶活性的影响

Fig. 1 Effect of fulvic acid on laccase activity of *Lentinula edodes* in different growth stages

比 CK 显著提高 21.37%。

从图 2 可以看出,不同浓度黄腐酸对香菇不同生长时期羧甲基纤维素酶活性有不同程度的影响。在满袋期,T3 处理羧甲基纤维素酶活性最高,比 CK 显著提高 27.23%;在转色期,T4 处理羧甲基

纤维素酶活性比 CK 显著降低 19.00%;在原基期,添加黄腐酸的处理羧甲基纤维素酶活性均与 CK 无显著差异;在幼菇期,T4 处理羧甲基纤维素酶活性最高,比 CK 显著提高 5.95%;在成熟期,T3 处理羧甲基纤维素酶活性显著高于其他处理,比 CK 提高

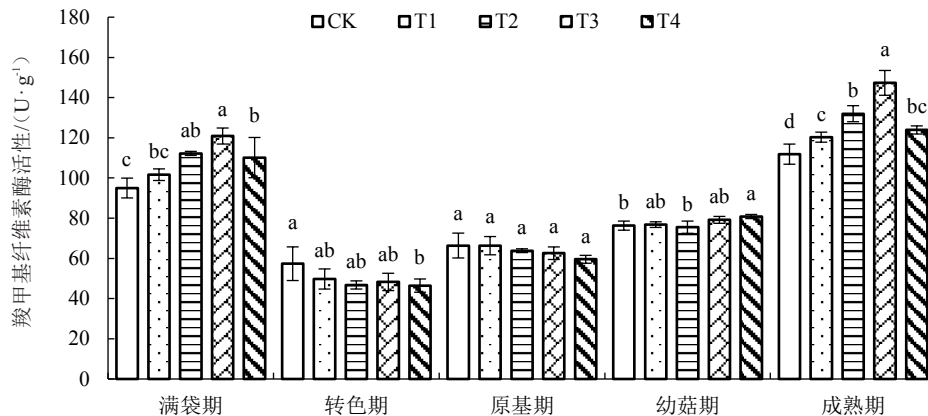


图 2 黄腐酸对香菇不同生长时期羧甲基纤维素酶活性的影响

Fig. 2 Effect of fulvic acid on carboxymethyl cellulase activity of *Lentinula edodes* in different growth stages

31.70%。

2.3 黄腐酸对香菇不同生长时期培养料酸性洗涤木质素、酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维含量的影响

从图 3 可以看出,添加黄腐酸的处理培养料酸性洗涤木质素含量均高于 CK。从满袋期至菌糠期,T3 处理培养料酸性洗涤木质素含量均最高,除转色期外,分别比 CK 显著增加 13.51%、9.29%、15.63%、16.39%和 14.41%。从满袋期至菌糠期,T3 处理培养料酸性洗涤木质素含量由 16.80%减少至 13.50%,酸性洗涤木质素降解了 19.64%,而 CK 培养料酸性洗涤木质素含量则由 14.80%减少至

11.80%,降解了 20.27%。

从图 4 可以看出,添加黄腐酸处理的培养料酸性洗涤纤维含量均低于 CK。从香菇满袋期至菌糠期,T3 处理培养料酸性洗涤纤维含量均最低,分别比 CK 显著减少 9.75%、6.07%、10.15%、12.25%、11.30%和 15.00%。从香菇满袋期至菌糠期,T3 处理培养料酸性洗涤纤维含量由 50.90%减少至 35.70%,酸性洗涤纤维降解了 29.86%,而 CK 培养料酸性洗涤纤维含量则由 56.40%减少至 42.00%,降解了 25.53%。

从图 5 可以看出,添加黄腐酸的处理培养料中

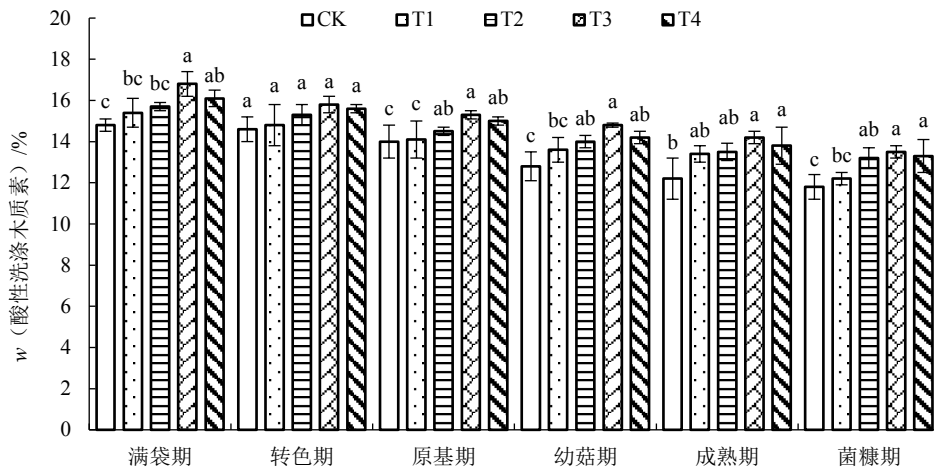


图3 黄腐酸对香菇不同生长时期培养料酸性洗涤木质素含量的影响

Fig. 3 Effect of fulvic acid on acid washing lignin content of culture medium of *Lentinus edodes* in different growth stages

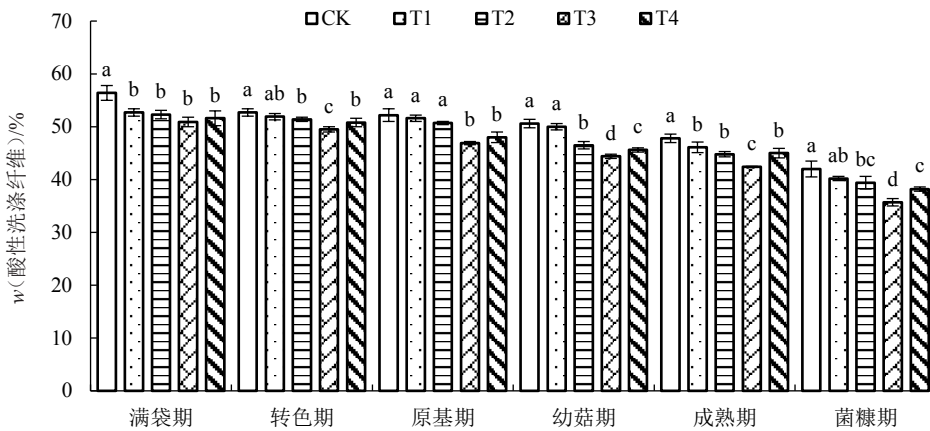


图4 黄腐酸对香菇不同生长时期酸性洗涤纤维含量的影响

Fig. 4 Effect of fulvic acid on acid detergent fiber content of culture medium of *Lentinula edodes* in different growth stages

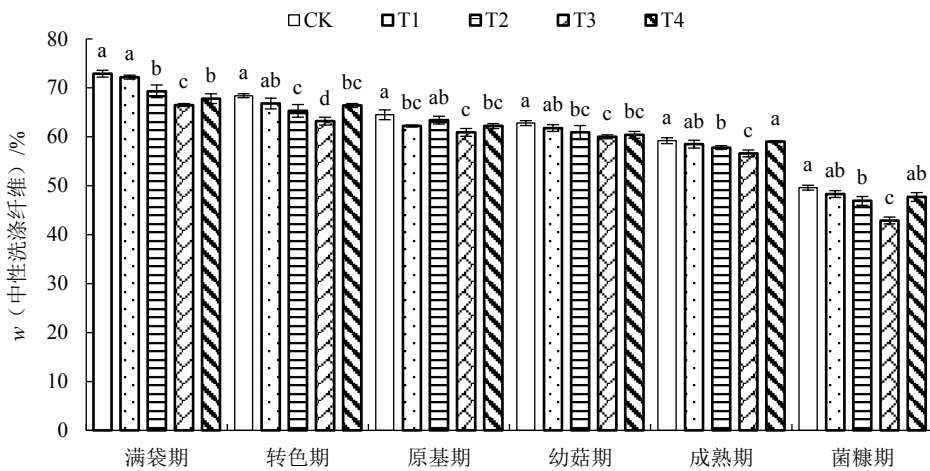


图5 黄腐酸对香菇不同生长时期培养料中性洗涤纤维含量的影响

Fig. 5 Effect of fulvic acid on neutral detergent fiber content of culture medium of *Lentinula edodes* in different growth stages

性洗涤纤维含量均低于CK。从满袋期至菌糠期, T3处理培养料中性洗涤纤维含量均最低, 分别比CK显著减少8.78%、7.60%、5.58%、4.46%、4.39%和13.51%。从满袋期至菌糠期, T3处理培养料中性洗涤纤维含量由66.50%减少至42.90%, 中性洗涤纤维降解了35.49%, 而CK培养料中性洗涤纤维含量则由72.90%减少至49.60%, 降解了31.96%。

2.4 黄腐酸对香菇子实体品质的影响

2.4.1 黄腐酸对香菇子实体蛋白质、氨基酸、脂肪及总灰分含量的影响 从表3可以看出, 添加黄腐酸对香菇子实体蛋白质、氨基酸、脂肪及总灰分含量有不同程度的影响。T1处理香菇子实体天冬氨酸、丝氨酸、酪氨酸和精氨酸含量均显著高于CK, 分别提高9.52%、10.77%、7.69%和10.53%; T4处理香菇子实体苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、蛋氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸含量均显著高于CK, 分别提高12.50%、9.23%、8.13%、32.00%、5.88%和14.29%, 而丙氨酸含量比CK显著降低6.25%。添加黄腐酸的处理香菇子实体甘氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、组氨酸和脯氨酸含量均与CK无显著差异。T4处理香菇子实体氨基酸总和、蛋白质和总灰分含量均显著高于CK, 分别提高5.55%、9.18%、11.54%。添加黄腐酸的处理香菇子实体脂肪含量与CK无显著差异。

2.4.2 黄腐酸对香菇子实体蛋白质化学评分和氨基酸评分的影响 从表4可以看出, 随着黄腐酸浓度的增大, 香菇子实体蛋白质化学评分和氨基酸评分均呈上升趋势。各处理的化学评分和氨基酸评分从高到低依次为T4、T3、T2、T1、CK。T4处理香菇子实体蛋白质化学评分和氨基酸评分最高, 分别比CK显著提高24.87%和24.86%, T3处理次之, 分别比CK显著提高16.77%和16.74%。

2.4.3 黄腐酸对香菇子实体蛋白质必需氨基酸指数、生物价、营养指数和贴近度的影响 从表5可以看出, 添加黄腐酸对香菇子实体蛋白质必需氨基酸指数、生物价、营养指数和贴近度有不同程度的影响。T1处理香菇子实体蛋白质必需氨基酸指数与CK更接近100。T4处理香菇子实体蛋白质必需氨基酸指数、生物价和营养指数均显著高于CK, 分别提高4.24%、3.79%和10.92%。T3处理香菇子实体蛋白质贴近度高于CK, 但无显著差异。

表3 黄腐酸对香菇子实体蛋白质、氨基酸、脂肪及灰分含量的影响

Table 3 Effect of fulvic acid on protein, amino acid, fat and ash content of fruit body of *Lentinula edodes* (g·100 g⁻¹)

处 理	天冬氨酸	苏氨酸	丝氨酸	谷氨酸	甘氨酸	丙氨酸	缬氨酸	蛋氨酸	异亮氨酸	亮氨酸	酪氨酸	苯丙氨酸	赖氨酸	组氨酸	精氨酸	脯氨酸	氨基酸总和	蛋白质	脂肪	总灰分
CK	1.26±0.02 b	0.72±0.01 b	0.65±0.02 b	3.20±0.10 c	0.74±0.04 a	0.96±0.02 a	0.70±0.03 ab	0.25±0.01 c	0.60±0.02 a	0.98±0.02 a	0.26±0.01 b	0.68±0.02 bc	0.84±0.01 bc	0.33±0.01 a	0.76±0.03 bc	0.58±0.01 a	13.51±0.26 cd	19.60±0.60 b	1.60±0.10 a	5.20±0.10 b
T1	1.38±0.05 a	0.76±0.03 b	0.72±0.03 a	3.42±0.05 ab	0.75±0.04 a	0.92±0.02 ab	0.70±0.02 ab	0.28±0.01 bc	0.60±0.01 a	1.02±0.02 a	0.28±0.00 a	0.70±0.02 ab	0.87±0.03 b	0.34±0.02 a	0.84±0.04 a	0.57±0.02 a	14.15±0.41 ab	20.20±0.20 ab	1.50±0.10 a	5.60±0.20 ab
T2	1.27±0.02 b	0.74±0.03 b	0.68±0.02 ab	3.27±0.07 bc	0.76±0.02 a	0.90±0.04 b	0.68±0.01 ab	0.29±0.02 b	0.58±0.03 a	0.99±0.03 a	0.26±0.01 b	0.68±0.01 bc	0.88±0.00 b	0.33±0.01 a	0.76±0.02 bc	0.56±0.03 a	13.63±0.21 bc	20.00±0.30 b	1.40±0.05 a	5.40±0.10 b
T3	1.20±0.00 b	0.72±0.02 b	0.65±0.02 b	3.00±0.09 d	0.74±0.01 a	0.92±0.01 ab	0.66±0.03 b	0.28±0.00 bc	0.57±0.02 a	0.95±0.05 a	0.23±0.01 c	0.66±0.03 c	0.81±0.04 c	0.32±0.02 a	0.70±0.03 c	0.55±0.01 a	12.96±0.01 d	19.20±0.40 b	1.60±0.20 a	5.40±0.30 b
T4	1.28±0.08 b	0.81±0.01 a	0.71±0.03 a	3.46±0.14 a	0.78±0.06 a	0.90±0.03 b	0.72±0.01 a	0.33±0.03 a	0.60±0.04 a	1.02±0.08 a	0.26±0.01 b	0.72±0.00 a	0.96±0.04 a	0.35±0.02 a	0.80±0.05 ab	0.56±0.01 a	14.26±0.32 a	21.40±1.10 a	1.60±0.10 a	5.80±0.10 a

表4 黄腐酸对香菇子实体蛋白质化学评分和氨基酸评分的影响

Table 4 Effect of fulvic acid on protein chemical score and amino acid score of fruit body of *Lentinula edodes*

处理	指标	异亮氨酸	亮氨酸	蛋氨酸和 胱氨酸	苯丙氨酸和 酪氨酸	苏氨酸	缬氨酸	赖氨酸	评分
CK	化学	89.83±4.61 a	110.01±0.26 a	44.91±1.05 c	92.80±1.29 a	139.55±0.56 b	94.75±2.35 a	129.77±0.73 a	44.91±1.05 c
T1	评分	85.78±0.85 a	109.40±0.85 a	48.07±0.35 bc	92.54±0.62 a	140.60±1.88 ab	90.54±0.19 b	128.31±1.00 a	48.07±0.35 bc
T2		86.19±4.52 a	110.16±3.34 a	51.71±3.57 ab	92.14±0.04 a	142.17±5.77 ab	91.28±1.40 ab	134.78±0.02 a	51.71±3.57 ab
T3		89.02±4.51 a	111.22±3.97 a	52.44±0.89 ab	91.60±2.61 a	145.57±1.55 ab	93.11±2.68 ab	130.40±8.40 a	52.44±0.89 ab
T4		85.18±4.61 a	108.49±9.49 a	56.08±4.43 a	91.74±0.10 a	148.72±0.12 a	92.37±0.31 ab	140.42±4.21 a	56.08±4.43 a
CK	氨基	111.00±5.88 a	103.57±0.08 a	52.86±1.15 d	115.83±1.42 a	133.25±0.75 b	103.60±2.40 a	113.09±0.82 bc	52.86±1.15 d
T1	酸评	106.00±1.25 a	103.00±1.00 a	56.57±0.29 cd	115.50±1.00 a	134.25±1.50 ab	99.00±0.00 a	111.82±0.64 c	56.57±0.29 cd
T2	分	106.50±7.25 a	103.71±1.58 a	60.86±3.29 bc	115.00±1.75 a	135.75±7.63 ab	99.80±0.00 a	117.45±1.82 ab	60.86±3.29 bc
T3		110.00±3.75 a	104.71±5.58 a	61.71±0.00 ab	114.33±5.25 a	139.00±3.88 ab	101.80±4.70 a	113.64±5.46 bc	61.71±0.00 ab
T4		105.25±4.63 a	102.14±10.29 a	66.00±4.57 a	114.50±1.42 a	142.00±1.50 a	101.00±0.80 a	122.36±2.37 a	66.00±4.57 a

表5 黄腐酸对香菇子实体蛋白质必需氨基酸指数、生物价、营养指数和贴进度的影响

Table 5 Effect of fulvic acid on protein essential amino acid index, biological value, nutritional index and closeness degree of fruit body of *Lentinula edodes*

处理	必需氨基酸指数	生物价	营养指数	贴进度
CK	101.36±0.12 cd	98.78±0.13 cd	19.87±0.59 b	0.894±0.000 ab
T1	100.86±0.12 d	98.24±0.13 d	20.37±0.48 b	0.891±0.001 b
T2	103.00±1.26 bc	100.57±1.38 bc	20.60±0.06 b	0.895±0.002 a
T3	103.90±1.35 ab	101.55±1.47 ab	19.95±0.16 b	0.896±0.003 a
T4	105.20±0.06 a	102.97±0.06 a	22.04±1.16 a	0.894±0.001 ab

3 讨论与结论

黄腐酸对作物和食用菌具有增产提质作用^[6-9, 25-27], 一个原因是低分子黄腐酸容易达到根部的质膜, 更有利于根部对水分和矿质元素的吸收利用^[25]; 另一个原因是黄腐酸含有许多活性基团, 刺激组织细胞的分裂和增长, 使作物体内酶的活性增强, 作物养分供应量增加^[28]。笔者的试验结果表明, 0.24%黄腐酸处理显著提高了香菇产量, 这可能是由于黄腐酸能够提高香菇转色期、原基期和成熟期漆酶活性及满袋期和成熟期羧甲基纤维素酶活性, 促进了酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维的降解, 从而促进代谢产物加速向子实体运输, 最终增加了产量。此外, 笔者在本试验中发现, 添加黄腐酸能够减少香菇培养料酸性洗涤木质素消耗, 可能是由于黄腐酸含有芳香环、芳香脂肪醚、羧基、糖和氨基酸等, 生物利用度高, 可为香菇生长提供营养^[5]。

有研究表明, 黄腐酸作为一种生物刺激素, 表现为低浓度促进、高浓度抑制^[25, 29]。笔者的试验与前人研究结果类似, 随着黄腐酸浓度的增加, 香菇

菌丝生长速度呈先升高后降低的趋势, 且以 T3 处理增产提质效果最佳, 这可能是由于黄腐酸促进香菇菌丝生长的功能与菌丝水传导率的显著增加有关, 而高浓度的黄腐酸分子会在菌丝表面积累和聚集, 堵塞菌丝细胞壁的孔隙, 从而导致菌丝水传导能力下降^[29-31]。笔者的研究结果表明, 黄腐酸不仅能够增加香菇产量, 还能够提高香菇子实体的蛋白质和总灰分含量, 原因可能是黄腐酸能够提高细胞膜透性, 促进淀粉磷酸化酶、糖转化酶和一些蛋白质酶活性的提高, 从而有利于蛋白质和总灰分等物质累积^[25, 27]。

蛋白质和氨基酸总量的提高, 也直接或间接对蛋白质的化学评分、氨基酸评分、必需氨基酸指数、生物价、营养指数和贴进度产生影响。化学评分值越接近 100, 则被测蛋白质的组成与标准鸡蛋蛋白质的组成就越接近, 该蛋白质的营养价值也就越高^[32]。氨基酸评分以评分最低的氨基酸为第一限制氨基酸, 评分越高越能满足人类膳食需求^[33-34]。笔者研究发现, 黄腐酸能够提高香菇子实体蛋白质的化学评分和氨基酸评分, 但总评分较低, 不足以满足人类膳食需求。因此, 应将香菇与其他食物搭配食用, 可实现蛋白质互补, 提高其营养价值^[23]。必需氨基酸指数值越接近 100, 表明该蛋白质的平衡性越接近鸡蛋蛋白质^[33]。本试验研究表明, 黄腐酸能够提高香菇子实体蛋白质的必需氨基酸指数, 但随着黄腐酸浓度的增加, 必需氨基酸指数越偏离 100, 蛋白质的平衡性越差。因此, 栽培香菇添加黄腐酸应当适量。生物价值越高, 说明该种蛋白质经过消化吸收后的利用程度越高^[35]。营养指数评价食品蛋白质的营养价值更加全面、准确, 它综合了食物蛋白质的含量及氨基酸的组成, 供试蛋白质中所有必

需氨基酸含量越高、供试蛋白质的百分含量越高,营养价值就越高^[36]。贴适度值越接近1,其蛋白质营养价值相对越高^[23]。本试验研究也表明,黄腐酸能够提高香菇子实体蛋白质的生物价、营养指数和贴适度,提升香菇子实体的营养品质。

笔者探究了添加不同浓度黄腐酸培养料栽培香菇,研究黄腐酸对香菇菌丝生长、子实体生物学效率和品质的影响。综合分析,添加0.24%黄腐酸培养基栽培香菇效果最佳。黄腐酸能够促进香菇菌丝生长,提高香菇生物学效率和子实体干质量,提升香菇生长关键时期漆酶和羧甲基纤维素酶活性,促进培养料酸性洗涤纤维和中性洗涤纤维的降解利用,提高香菇子实体蛋白质及总灰分含量,并能提高香菇子实体蛋白质的化学评分和氨基酸评分。笔者的研究为栽培优质香菇筛选适宜的黄腐酸添加量提供支持,同时为香菇进一步开发利用提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] 安晶晶,王成涛,刘国荣,等.鲜香菇与干香菇挥发性风味成分的GC-MS分析[J].食品工业科技,2012,33(14):68-71.
- [2] 曹斌,梁希晨,高茂林,等.我国香菇市场与产业调查分析报告[J].农产品市场,2021(6):46-47.
- [3] 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.
- [4] LAKARIA B L, TAPAN A, PRAMOD J, et al. Characterization of humic and fulvic acid under long-term integrated nutrient management of soybean-wheat cropping system in Vertisol[J]. Journal of the Indian Society of Soil Science, 2017, 65(1): 32-41.
- [5] 张永霞,张英杰,巩冠群,等.黄腐酸对植物生长作用效果研究[J].应用化工,2021,50(4):1069-1076.
- [6] 盛彦清,陈繁忠,傅家谟,等.壳聚糖和黄腐酸在草菇栽培中的应用试验[J].中国食用菌,2004,23(5):20-21.
- [7] 楚晓真,崔杏春,王保瑞,等.不同水平黄腐酸处理对盆栽平菇生长的影响[J].长江蔬菜,2020(14):58-60.
- [8] 谢真铭,叶江林,陈伟龙,等.黄腐酸钾对香菇子实体外观性状的影响[J].浙江食用菌,2010,18(3):30-31.
- [9] 陈伟龙.黄腐酸钾在香菇生产中的应用技术及前景[J].现代农业科技,2010(23):143-144.
- [10] 段庆虎,龚凤萍,竹玮,等.银耳段木废棒栽培香菇试验初报[J].天津农业科学,2022,28(8):63-67.
- [11] 庄庆利.平菇生理活性与产量相关性研究[D].郑州:河南农业大学,2010.
- [12] 郭艳艳,阮玲云,冯宏昌,等.不同营养条件下斑玉蕈菌丝生长及产酶特性[J].菌物学报,2014,33(3):697-705.
- [13] 苏尔烈,张欣悦,李闪闪,等.生物炭-牛粪堆肥中产 β -葡聚糖苷酶微生物群落响应碳代谢抑制效应[J].微生物学通报,2022,49(6):2124-2134.
- [14] ZANG X Y, LIU M T, FAN Y H, et al. The structural and functional contributions of β -glucosidase-producing microbial communities to cellulose degradation in composting[J]. Biotechnology for Biofuels, 2018, 11: 51.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.饲料中酸性洗涤木质素(ADL)的测定:GB-T 20805-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [16] 中华人民共和国农业部.饲料中酸性洗涤纤维的测定:NY/T 1459-2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.饲料中中性洗涤纤维(NDF)的测定:GB/T 20806-2006[S].北京:中国标准出版社,2006.
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品中蛋白质含量的测定:GB 5009.5-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [19] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品中脂肪的测定:GB 5009.6-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中灰分的测定:GB 5009.4-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定:GB 5009.124-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [22] Food and Agricultural Organization of the United Nations. Amino acid content of foods and biological data on proteins in FAO[J]. Nutritional Studies, 1968(24):5-6.
- [23] 马璐,林衍铨,应正河,等.广叶绣球菌菌丝体与子实体蛋白质营养价值评价[J].食品科学,2016,37(5):214-218.
- [24] 陈艳芳,鲍大鹏,陈洪雨,等.蛋白质品质评价方法及其在食用菌中的应用进展[J].食用菌学报,2020,27(3):92-104.
- [25] 李静,李世莹,李青松.黄腐酸用量对番茄产量及品质的影响[J].农学学报,2022,12(2):54-59.
- [26] 周传余,郎英,周超.腐植酸复合肥料对番茄产量和品质的影响[J].黑龙江农业科学,2011(7):45-48.
- [27] 姚东伟.黄腐酸对番茄生长、产量及光合特性的影响[D].山西太谷:山西农业大学,2003.
- [28] 孙倩.提取腐殖酸及其对土壤环境和植物生长的影响[D].南京:南京农业大学,2016.
- [29] ZHANG L, SUN X Y, TIAN Y, et al. Biochar and humic acid amendments improve the quality of composted green waste as a growth medium for the ornamental plant *Calathea insignis*[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 176: 70-78.
- [30] OLAETXEA M, MORA V, BACAICOA E, et al. Abscisic acid regulation of root hydraulic conductivity and aquaporin gene expression is crucial to the plant shoot growth enhancement caused by rhizosphere humic acids[J]. Plant Physiology, 2015, 169(4):2587-2596.
- [31] ASLI S, NEUMANN P M. Rhizosphere humic acid interacts with root cell walls to reduce hydraulic conductivity and plant development[J]. Plant and Soil, 2010, 336(1/2):313-322.
- [32] 侯飞娜,木泰华,孙红男,等.不同品种马铃薯全粉蛋白质品质评价[J].食品科技,2015,40(3):49-56.
- [33] 侯娣,黄卫华,陈洪雨,等.球状香菇菌株的氨基酸特征分析及蛋白质品质评价[J].菌物学报,2021,40(9):2412-2422.
- [34] 王宏雨,张迪,肖冬来,等.3种鲜销香菇子实体蛋白质营养价值评价[J].中国食用菌,2019,38(1):35-37.
- [35] OSER B L. Method for integrating essential amino acid content in the nutritional evaluation of protein[J]. Journal of the American Dietetic Association, 1951, 27(5):396-402.
- [36] 白钢,张翼翔,戈娜,等.蝇蛆蛋白质的营养评价[J].食品研究与开发,2012,33(6):189-190.