

吴阳, 乔鑫, 张俊青, 等. 培养条件及外源添加物对香菇菌丝体及子实体镉含量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(2): 109-113.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.013

培养条件及外源添加物对香菇菌丝体及子实体镉含量的影响

吴阳^{1,2}, 乔鑫³, 张俊青¹, 胡磊², 姜兰兰², 王星², 边银丙^{1,3}

1. 华中农业大学应用真菌研究所, 武汉 430070;

2. 农业农村部微生物产品质量检验检测中心(武汉), 武汉 430070; 3. 武汉商学院食品学院, 武汉 430056

摘要 为探求抑制香菇镉富集的方法, 开发镉污染防控技术, 设置实验室菌丝培养和大棚袋式栽培2个阶段试验, 分析培养条件及外源添加物对香菇菌丝及子实体中镉含量的影响。结果显示, 在温度10~30℃范围内随着培养温度升高, 菌丝镉含量呈现先上升后平稳的趋势; 在pH 4~8范围内随着培养基pH值升高, 菌丝镉含量呈现先上升后下降的趋势; 在含镉的液体培养基中分别添加5 mmol/L Ca(NO₃)₂、KNO₃和Mg(NO₃)₂, 发现Mg²⁺能明显抑制菌丝对镉的富集; 随着香菇子实体发育成熟, 镉含量逐渐降低, 不同部位镉含量呈现菌褶>菌盖>菌柄; 在培养料中分别添加硫酸镁、硫酸锌、活性炭和沸石, 发现添加50 mg/kg硫酸镁、60 mg/kg硝酸锌和2.5%活性炭, 能使子实体镉含量下降42.8%、46.9%和50.3%。上述研究表明, 培养条件和外源添加物对香菇菌丝体和子实体镉含量具有一定的影响, 可通过外源添加物抑制香菇对镉的富集作用。

关键词 香菇; 镉; 温度; 金属阳离子

中图分类号 S646.1⁺2 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0109-05

香菇(*Lentinula edodes*)营养丰富、味道鲜美, 具有特殊香味, 兼具食用和药用价值。镉是对人体有害的重金属之一, 前人研究发现香菇对环境中的镉存在一定的富集作用^[1-2], 有时会导致香菇镉含量超标^[3-4]。随着人们生活水平的提高, 农产品质量安全越来越受到重视。香菇镉超标不仅影响了香菇出口贸易, 制约香菇产业发展, 对消费者健康也造成了威胁^[5-6]。笔者研究了培养条件和外源添加物对香菇菌丝及子实体镉含量的影响, 分析了香菇镉富集的规律, 旨在探求抑制香菇镉富集的方法, 为研发香菇镉污染防控技术奠定基础。

1 材料与方

1.1 供试菌株和栽培料配方

香菇栽培品种: “秋栽7号”, 保存于华中农业大学菌种实验中心。

香菇栽培料配方: 木屑78%、麸皮20%、石膏2%、含水量60%左右。

PDA固体培养基: 马铃薯200 g、葡萄糖20 g、琼

脂20 g、加水定容至1 L, 自然pH。

麦芽浸膏液体培养基: 麦芽浸膏20 g、酵母浸膏1 g、蛋白胨1 g、葡萄糖20 g, 加水定容至1 L, 自然pH。

1.2 不同温度和pH值下香菇菌丝镉含量测定

参照笔者所在课题组前期获得的1 mg/kg镉即能较为明显地影响香菇菌丝生长的试验结果^[6], 制备含1 mg/kg镉的PDA固体培养基, 将高压灭菌后的培养基均匀分装到培养皿中, 冷却后铺上玻璃纸, 再接种菌丝块。将培养皿分别放置于10、15、20、25和30℃的恒温箱中培养, 5次重复, 25 d后收集菌丝并检测镉含量。

采用与上述相同的方法, 制备pH值分别为4、5、6、7、8的PDA培养基并接种菌丝块。培养皿分别放置于25℃培养, 5次重复, 25 d后收集菌丝并检测镉含量。

1.3 外源金属离子处理下香菇菌丝镉含量测定

在麦芽浸膏液体培养基中, 分别添加终质量浓

收稿日期: 2023-03-07

基金项目: 国家食用菌产业技术体系项目(CARS-20)

吴阳, E-mail: 705236705@qq.com

通信作者: 边银丙, E-mail: bianyb.123@163.com

度为0、0.5、1.0、5.0和10 mg/L的镉离子。对照组不添加试验物质,处理组分别添加终浓度为5 mmol/L的 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 、 KNO_3 和 $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ 。每组3个重复,25℃避光静置培养15 d,去离子水冲洗,收集菌丝并检测镉含量。

1.4 子实体不同发育阶段的镉含量分析

试验在湖北省随州三里岗镇食用菌栽培基地进行。采集同一批秋季层架栽培试验中生长的香菇子实体,生长发育阶段划分为:j1(菌盖和菌柄未分化,菌盖直径<1 cm)、j2(菌盖和菌柄开始分化,菌盖直径1~3 cm)、j3(菌盖和菌柄已分化,但菌盖未开伞,直径4~6 cm)、j4(菌盖部分开伞,菌盖直径7~9 cm)和j5阶段(菌盖完全开伞,直径>9 cm),分别检测镉

含量。

1.5 子实体不同部位的镉含量分析

采集子实体发育处于上述j4阶段的商品菇,洗净,去菇脚,自然晾干,用解剖刀分为菌盖、菌柄和菌褶,分别检测镉含量。

1.6 栽培料中外源添加物对香菇子实体镉含量的影响

香菇栽培采用随州本地秋季层架栽培管理方式。栽培料配方为木屑36 kg、麸皮8.6 kg、石膏0.86 kg,自来水适量,22 cm×60 cm聚乙烯菌袋装料,共50袋。在上述栽培料配方中,分别添加不同浓度的硫酸镁、硫酸锌、沸石和活性炭(见表1),设空白对照。参考前人研究,仅分析统计第一潮子实体的镉含量^[7]。

表1 香菇栽培料中外源添加物及其含量

Table 1 Exogenous additive and its concentration in cultivated materials of *L. edodes*

编号 No.	添加物 Additive	含量/(mg/kg) Content	编号 No.	添加物 Additive	含量/% Content
M1	硫酸镁 MgSO_4	50	F1	沸石 Zeolite	0.5
M2	硫酸镁 MgSO_4	150	F2	沸石 Zeolite	1.5
M3	硫酸镁 MgSO_4	250	F3	沸石 Zeolite	2.5
Z1	硫酸锌 ZnSO_4	40	H1	活性炭 Activated carbon	0.5
Z2	硫酸锌 ZnSO_4	50	H2	活性炭 Activated carbon	1.5
Z3	硫酸锌 ZnSO_4	60	H3	活性炭 Activated carbon	2.5

1.7 镉含量检测与数据统计分析

称取约200 g香菇子实体样品,去掉菌柄基部约0.5 cm,蒸馏水洗净,自然晾干,55℃烘干至恒质量。粉碎后过孔径0.18 mm筛,保存于干燥器中。菌丝烘干磨碎,保存于干燥器中。依照《GB 5009.15—2014食品安全国家标准 食品中镉的测定》,石墨炉原子吸收光谱法测定镉含量。

试验数据采用IBM SPSS Statistics软件进行统计分析。数据均以Mean±SD表示,以方差分析Duncan's比较各组间参数差异,以 $P<0.05$ 为差异显著。

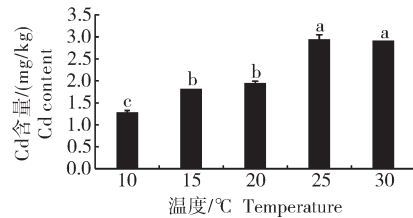
2 结果与分析

2.1 温度对香菇菌丝镉含量的影响

在10~30℃香菇菌丝镉含量随温度升高而呈上升趋势。在10℃条件下,菌丝吸附量仅为1.3 mg/kg,25℃时吸附量达到最高点2.9 mg/kg,在25~30℃时菌丝镉含量趋于平稳(图1)。

2.2 pH值对香菇菌丝镉含量的影响

pH 4~8范围内,随着pH值上升菌丝镉的吸收量呈先升后降。pH为4时菌丝镉含量最低;当pH为6~7时菌丝镉含量达到最高含量5.8 mg/kg,且与其



不同小写字母表示在不同处理组之间具有显著差异($P<0.05$),下同。Different lowercase letters denote significant differences between different treatments ($P<0.05$), the same as below.

图1 不同温度处理下香菇菌丝的镉含量
Fig. 1 Cd content of *L. edodes* mycelium under different temperature

他处理存在显著性差异。当pH值为8时,菌丝镉含量下降(图2)。

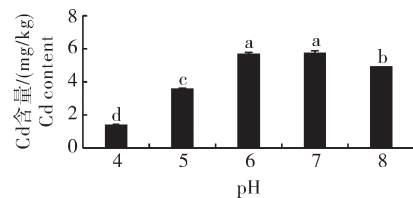


图2 不同pH值处理下香菇菌丝镉含量
Fig. 2 Cd content of *L. edodes* mycelium under different pH

2.3 不同的金属离子对香菇菌丝镉含量的影响

当镉质量浓度为0.5、1.0、5.0、10 mg/L时, Mg^{2+} 使香菇菌丝中镉含量分别下降9.5%、20.0%、10.5%、33.9%;添加 Ca^{2+} 对菌丝中镉含量没有产生明显影响;添加 K^+ 时,当镉质量浓度为5.0 mg/L时,反而提高了菌丝中镉含量,对抑制菌丝镉富集没有作用(图3)。

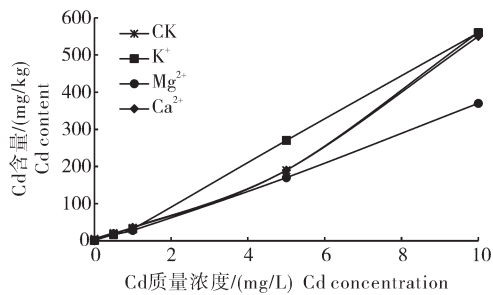


图3 不同金属离子处理下香菇菌丝镉含量

Fig.3 Cd content of *L. edodes* mycelium treated with different metal ions

2.4 香菇不同生长发育阶段子实体镉含量

香菇不同生长发育阶段子实体镉含量在0.67~1.05 mg/kg。随子实体逐渐成熟镉含量均呈递减趋势,即 $j1 > j2 > j3 > j4 > j5$ (图4)。

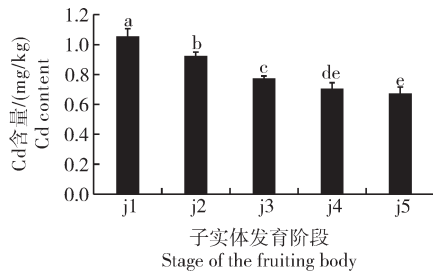


图4 香菇不同生长发育阶段子实体的镉含量

Fig.4 Cd content of *L. edodes* fruiting body of several development degree

2.5 香菇子实体不同部位的镉含量

香菇 $j4$ 期子实体不同部位的镉含量在0.22~1.21 mg/kg,菌褶、菌盖和菌柄之间镉含量存在显著性差异($P < 0.05$),且菌褶 > 菌盖 > 菌柄(图5)。

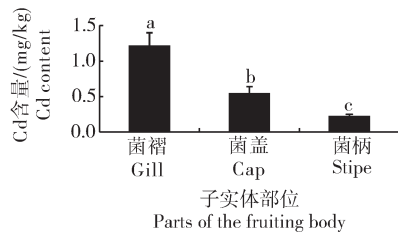
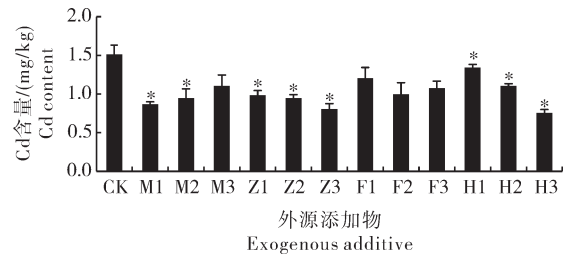


图5 香菇子实体不同部位镉含量

Fig.5 Cd content of different part of *L. edodes* fruiting body

2.6 外源添加物对子实体镉含量的影响

在第一潮菇中,采收达到采收期的商品菇进行镉含量测定。分析表明,添加50和150 mg/kg硫酸镁分别使香菇子实体镉含量显著下降了42.8%和37.6%;添加40、50和60 mg/kg硫酸锌分别使香菇子实体镉含量显著下降了35.1%、37.5%和46.9%;添加沸石粉使香菇镉含量有一定幅度降低,但未达到显著水平;添加1.5%和2.5%活性炭分别使香菇子实体镉含量显著下降27.2%和50.3%(图6)。



* 表示在处理组和对照组之间具有显著差异($P < 0.05$)。* indicated the significant difference between treatment and CK($P < 0.05$).

图6 不同的外源添加物处理下对香菇子实体镉含量

Fig.6 Cd content of *L. edodes* fruiting body treated with different exogenous additives

3 讨论

3.1 温度和pH对菌丝镉含量的影响

本研究中,随着温度的升高菌丝镉含量呈先上升后平稳的趋势,原因可能是温度在一定程度上对香菇菌丝吸附镉有促进作用,该结果与吕明姬等^[8]对牛肝菌的研究一致,这是由于菌丝吸附重金属镉是一个吸热的过程,温度高有利于此过程的进行,因此,适度地降低菌丝生长温度有助于降低菌丝重金属镉的含量^[9]。而随着pH的升高菌丝镉含量呈先上升后下降的趋势,原因可能是pH越低,香菇菌丝表面由于水合氢离子的作用使得整个菌丝表面呈现正电荷,排斥环境中的镉离子,阻止菌丝对重金属镉的吸附,当环境呈现碱性时,促进金属离子与细胞壁的官能团结合,沉淀在细胞表面^[10]。

3.2 不同金属离子对香菇菌丝镉含量的影响

李三暑等^[11]在进行姬松茸(*A. blazei*)菌丝液体培养时,发现在 Cd^{2+} 、P和 Ca^{2+} 中任何一种元素进入菌丝体的量增加时,另外2种将会减少。贾彦^[4]发现金针菇培养基中锌浓度增加会减少子实体镉的含量。乔鑫等^[12]发现在液体培养基中添加适量 Zn^{2+} 可有效抑制香菇菌丝对镉的吸附。本试验中, Mg^{2+} 对

抑制香菇菌丝吸附镉有明显作用,而 Ca^{2+} 和 K^{+} 没有明显抑制作用。不同金属阳离子对镉吸附的影响并不一致,可能与金属阳离子的特性、浓度及离子进入细胞的方式有关,表明环境中特定金属阳离子会影响香菇菌丝对镉的吸附。

3.3 香菇子实体不同发育阶段和部位镉含量

Kalač等^[13]认为食用菌子实体镉含量的差异是由菌丝体菌龄或者干物质稀释作用引起的。本研究发现香菇子实体越成熟镉含量越低,推测子实体形成时菌丝已将镉吸附转运至原基中,随着子实体生长,干物质积累,使得镉离子被逐渐稀释。

Thomet等^[14]发现野生食用菌大孢蘑菇(*Agaricus macrosporus*)不同部位镉含量呈现菌褶>菌盖>菌柄,而Seeger^[15]发现*A. aestivalis*菌褶中镉含量最低。本研究发现香菇镉含量的顺序为菌褶>菌盖>菌柄,这种不同食用菌镉分布的差异可能与镉离子转运机制有关。

3.4 外源添加物对子实体镉含量的影响

参考前人研究报道^[16-17]和前期试验结果,本研究将硫酸镁、硫酸锌、沸石和活性炭添加到香菇栽培料中,结果表明一定浓度的硫酸镁、硫酸锌和活性炭能明显降低香菇子实体镉的含量。金属 Mg^{2+} 和 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 在香菇菌丝表面可能存在竞争性吸附,而活性炭的作用可能与其对镉离子的吸附有关。其中低含量 Mg^{2+} 的效果好于高含量,表明 Mg^{2+} 对抑制香菇镉富集有一定作用,但过高浓度的 Mg^{2+} 抑制效果会变差,原因是 Mg^{2+} 作用在50 mg/kg左右即可达到饱和;添加沸石使香菇镉含量有一定幅度降低,但未达到显著水平,可能与试验误差有关。

以上结果表明,在栽培料中添加一定浓度的外源物质,抑制香菇对镉的富集,提高产品品质,是值得探索的技术路径。

参考文献References

- [1] 雷敬敷,杨德芬.食用菌重金属含量与土壤:培养料重金属含量的相关性研究[J].四川环境,1990,9(4):19-27.LEI J F, YANG D F. Study on correlation between heavy metal contents in edible fungi and heavy metal contents in soil and medium[J].Sichuan environment, 1990, 9(4): 19-27 (in Chinese with English abstract).
- [2] 徐丽红,吴应森,陈俏彪,等.香菇(*Lentinus edodes*)对重金属镉(Cd)的吸收规律及控制技术[J].农业环境科学学报,2011,30(7):1300-1304.XU L H, WU Y M, CHEN Q B, et al. Investigation of cadmium uptake and accumulation by *Lentinus edodes* and its control technique[J].Journal of agro-environment science, 2011, 30(7): 1300-1304 (in Chinese with English abstract).
- [3] 徐丽红,张永志,王钢军,等.浙江省食用菌质量安全现状调查研究[J].农业环境科学,2007,26(增刊):679-685.XU L H, ZHANG Y Z, WANG G J, et al. The quality and safety of edible fungi from Zhejiang province[J].Journal of agro-environment science, 2007, 26(suppl):679-685 (in Chinese with English abstract).
- [4] 贾彦.北京市食用菌重金属含量调查与风险评估[D].北京:中国农业大学,2007.JIA Y. Investigation and risk assessment of heavy metal content in edible fungi in Beijing[D]. Beijing: China Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- [5] 吴阳.香菇镉富集规律及其控制方法初步研究[D].武汉:华中农业大学,2013.WU Y. Preliminary research on cadmium accumulation rule and its control in *Lentinula edodes*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [6] 张俊青.香菇富集重金属镉的规律及镉污染防治技术研究[D].武汉:华中农业大学,2016.ZHANG J Q. Research on accumulation and its contamination prevention of heavy metal cadmium in *Lentinula edodes*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016 (in Chinese with English abstract).
- [7] 何旭孔,邢增涛,邵毅,等.香菇中镉含量的检测与分析[J].菌物学报,2012,31(1):119-126.HE X K, XING Z T, SHAO Y, et al. The detection and analysis of cadmium in *Lentinula edodes* [J].Mycosystema, 2012, 31(1): 119-126 (in Chinese with English abstract).
- [8] 吕明姬,蔡佳亮,郑维爽,等.红绒盖牛肝菌菌丝对Cu(II)和Cd(II)生物吸附的影响因子[J].环境科学研究,2009,22(11):1334-1340.LÜ M J, CAI J L, ZHENG W S, et al. Factors impacting biosorption of Cu(II) and Cd(II) by *Xerocomus chrysenteron* mycelium [J].Research of environmental sciences, 2009, 22(11): 1334-1340 (in Chinese with English abstract).
- [9] AMINI M, YOUNESI H. Biosorption of Cd(II), Ni(II) and Pb(II) from aqueous solution by dried biomass of *Aspergillus niger*: application of response surface methodology to the optimization of process parameters [J]. Clean - soil, air, water, 2009, 37(10): 776-786.
- [10] SAEED A, IQBAL M. Bioremoval of cadmium from aqueous solution by black gram husk (*Cicer arietinum*) [J]. Water research, 2003, 37(14): 3472-3480.
- [11] 李三暑,雷锦桂,陈惠成.镉、磷、钙在姬松茸细胞内的积累和分布特征及其交互作用[J].食用菌学报,2001,8(4):24-27. LI S S, LEI J G, CHEN H C. Accumulation and distribution of cadmium, phosphorus and calcium and their interaction in *Agaricus blazei* cells [J]. Acta edulis fungi, 2001, 8(4): 24-27 (in Chinese with English abstract).

- [12] 乔鑫,李昭敏,裴亚琼,等. Zn^{2+} 抑制香菇吸附重金属镉工艺优化研究[J]. 食品科技, 2021, 46(8): 71-75. QIAO X, LI Z M, PEI Y Q, et al. Optimization of Zn^{2+} inhibited adsorption process on cadmium adsorption of *Lentinus edodes* [J]. Food science and technology, 2021, 46(8): 71-75 (in Chinese with English abstract).
- [13] KALAČ P, SVOBODA L. A review of trace element concentrations in edible mushrooms [J]. Food chemistry, 2000, 69(3): 273-281.
- [14] THOMET U, VOGEL E, KRÄHENBÜHL U. The uptake of cadmium and zinc by mycelia and their accumulation in mycelia and fruiting bodies of edible mushrooms [J]. European food research and technology, 1999, 209(5): 317-324.
- [15] SEEGER R. Cadmium in pilzen [J]. Zeitschrift für lebensmittel-untersuchung und forschung, 1978, 166(1): 23-34.
- [16] 杨晖,赵鹏,张龙,等. 外源添加物降低镉胁迫下香菇体内镉含量及对酶活性的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(1): 183-191. YANG H, ZHAO L, ZHANG L, et al. Exogenous additives decrease *in vivo* cadmium content and have effect on metabolism enzymes of *Lentinus edodes* under Cd stress [J]. Journal of nuclear agricultural sciences, 2015, 29(1): 183-191 (in Chinese with English abstract).
- [17] ROTH E, MANCIER V, FABRE B. Adsorption of cadmium on different granulometric soil fractions: influence of organic matter and temperature [J]. Geoderma, 2012, 189/190: 133-143.

Effects of culture conditions and exogenous additives on cadmium content in mycelia and fruiting body of *Lentinula edodes*

WU Yang^{1,2}, QIAO Xin³, ZHANG Junqing¹, HU Lei², JIANG Lanlan², WANG Xing², BIAN Yinbing^{1,3}

1. Institute of Applied Mycology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Quality Inspection and Testing Center of Microbial Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China;

3. College of Food Science, Wuhan Commercial College, Wuhan 430056, China

Abstract In order to explore the method of inhibiting cadmium enrichment of *L. edodes* and develop the technology of preventing and controlling cadmium pollution, in this paper, two methods of mycelium culture in laboratory and bag culture in greenhouse were set up to analyze the effects of culture conditions and exogenous additives on the content of cadmium in mycelia and fruiting body of *L. edodes*. The results showed that in the range of 10-30 °C, with the increase of culture temperature, the cadmium content of mycelium increased first and then stabilized. In the range of pH 4-8, with the increase of the pH value of the medium, the cadmium content of mycelium first increased and then decreased. Mg^{2+} could significantly inhibit the enrichment of cadmium in mycelia when 5 mmol/L $Ca(NO_3)_2$, KNO_3 and $Mg(NO_3)_2$ were added to the liquid medium containing cadmium. As the fruiting bodies of *L. edodes* matured, cadmium content decreased gradually and the content of cadmium in different parts showed gill > cap > stipe. When magnesium sulfate, zinc sulfate, activated carbon and zeolite were added, it was found that 50 mg/kg magnesium sulfate, 60 mg/kg zinc nitrate and 2.5% activated carbon could reduce the content of cadmium in fruiting body by 42.8%, 46.9% and 50.3%. The above research showed that culture conditions and exogenous additives had certain effects on the cadmium content in *L. edodes* at mycelium stage and fruiting stage. The enrichment of cadmium in *L. edodes* could be inhibited by exogenous additives.

Keywords *Lentinula edodes*; cadmium; temperature; metal cation

(责任编辑:边书京)