

培养条件对香菇菌丝胞外多糖抵御镉毒害研究

周 潇, 彭兰兰, 乔 鑫*

(武汉商学院食品科技学院, 武汉 430056)

摘要:以香菇菌丝胞外多糖代谢量、胞外多糖附镉量和菌丝生物量为指标,采用培养基中碳源种类、碳源水平、氮源水平、培养时间和培养基初始镉浓度为单因素,进一步分析香菇菌丝抵抗环境重金属镉胁迫分泌胞外多糖的能力。结果表明,天然麦芽浸粉营养丰富,最适合作碳源促进胞外多糖合成,碳源浓度越高,越能够促进胞外多糖的合成抵抗镉毒害。氮源能促进糖类物质向多糖的转化,氮碳比1:15(1.33 g)为最佳。镉环境下,香菇菌丝生长平衡期延长到15 d,15 d前胞外多糖代谢量不多,15 d后大量分泌吸附镉。低镉浓度下,胞外多糖代谢量不高,环境镉浓度增高,胞外多糖代谢附镉能力显著增加。

关键词:镉;香菇菌丝;胞外多糖

中图分类号:S646.12

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2026)01-0116-08

Study on the Resistance to Cadmium Toxicity from Extracellular Polysaccharide of *Lentinus edodes* under Culture Conditions

ZHOU Xiao, PENG Lanlan, QIAO Xin*

(College of Food Science and Technology, Wuhan Business University, Wuhan 430056, China)

Abstract: Taking the metabolic amount of *Lentinus edodes* mycelium exopolysaccharide, cadmium adsorption of exopolysaccharide and the mycelia biomass as indicators, the carbon source, carbon source level, nitrogen source level, culture time and initial cadmium concentration in the medium as single factors, the ability of *Lentinus edodes* mycelium to secrete extracellular polysaccharide against the stress of heavy metal cadmium in the environment was further analyzed. The results showed that the natural malt extract was rich in nutrition and was the most suitable carbon source to promote the synthesis of exopolysaccharide. The higher the concentration of carbon source, the more it can promote the synthesis of exopolysaccharide to resist cadmium toxicity. Nitrogen source can promote the conversion of saccharide to polysaccharide, and the nitrogen carbon ratio of 1:15 (1.33 g) is the best. At low cadmium concentration, the extracellular polysaccharide metabolism was not high. The environmental cadmium concentration increased, and the extracellular polysaccharide metabolism ability increased significantly.

Key words: Cadmium; *Lentinus edodes* mycelium; Extracellular polysaccharide

香菇香味浓郁,味道鲜美,富含B类维生素及矿物质元素,具有很高的营养价值,是亚洲饮食文化中的重要组成部分^[1-2]。香菇是仅次于双胞蘑菇的世界第二大类食用菌。香菇产业的整体发展态势对我国食用菌产业的发展进程具有显著的推动作用^[3]。当前工业生产排放的未经有效处理的废水和日常生活产生的污水,已对地表和地下水造成不同程度污染。与此同时,工业污泥与

城市生活垃圾中常含有大量未处理的重金属成分,而我国普遍采用覆土或堆肥方式处理此类废弃物。此外,冶炼厂等工业企业排放的废气飘尘,叠加含铅汽油的尾气排放,共同构成了空气中重金属的主要污染源^[4-9]。在这类生长环境中,香菇遭受的重金属污染威胁存在明显的差异性。2013年,吴阳针对湖北省香菇主产区内采用不同栽培方式培育的55份香菇子实体样本,开展了相关调查分析。调研结果显示:重金属Cd超出《NY 5095-2006 无公害食品食用菌》标准的样品占比高达40%,在检测样品里,像砷、汞和铅等重金属,其含量都没有超出《GB 7096-2003 食用菌

收稿日期:2020-03-11

基金项目:湖北省大学生创新创业训练计划项目(201811654070)

作者简介:周 潇(2004-),女,在读本科,从事食用菌重金属研究。

通信作者:乔 鑫,E-mail: 853470991@qq.com

卫生标准》的规定。在湖北地区广泛栽种的秋栽7号香菇,在研究样本中以 1.11 ± 0.07 mg/kg的镉含量数值,位列镉含量排名的第2位。香菇对重金属镉的富集特性,已引发食品安全风险及进出口贸易壁垒等系列问题。这对我国食用菌产业的整体发展造成了严重的阻碍^[10]。

香菇菌丝拥有分泌胞外多糖这一天然高分子聚合物的能力,这类物质会附着在细胞壁表层,继而构成生命有机体的关键结构成分,其作用在于稳固细胞生存所依赖的结构体系,帮助细胞抵御不良环境的损伤^[11-12]。胞外多糖的长链骨架以分支多糖或衍生物为主要构成单元,而该类高分子聚合物的基本组成单位包括葡萄糖、半乳糖、果糖和甘露糖4类。正是依托这种独特的分子结构特征,胞外多糖大分子上富集了羧基、磷酸基、氨基和羟基等多种功能性官能团,这些基团对重金属有着极强的螯合亲和力,可通过络合或隔离机制固定重金属离子,阻断其跨膜进入细胞的路径,以此发挥抵御重金属毒害、保护细胞正常生理功能的作用^[13-16]。因此,深入剖析胞外多糖的形成过程,有利于深入探究香菇在面对重金属镉胁迫时,其分泌物与环境产生交互作用以实现自我抵御的内在机制。

本研究重点剖析碳源种类、碳源浓度、氮源浓度、培养时长及培养基初始镉浓度对香菇菌丝生物量积累、胞外多糖代谢合成量及抗镉特性的调控机制,进而阐明菌丝体以分泌胞外多糖这类代谢产物为媒介,实现对环境中镉胁迫的抵抗能力。

1 材料与方 法

1.1 实验材料

供试菌株:香菇秋栽7号(湖北人工主栽品种),菌种(华中农业大学菌种实验中心,4℃保藏)。

CYM培养基:葡萄糖20 g,酵母膏2 g,蛋白胨2 g,磷酸氢二钾1.0 g,硫酸镁0.5 g,磷酸二氢钾0.46 g,水1 L。

1.2 试剂与仪器

碘化钾购自天津市凯通化学试剂有限公司;硝酸购自国药集团化学试剂有限公司;Cd标准溶液购自国家有色金属及电子材料分析测试中心;罗丹明B、氯化钾、氯化锰、氯化镁、氯化锌、氯化铁和氯化钙均购自天津市北联精细化学品开发有限公司;722可见分光光度计购自天津市普瑞斯

仪器有限公司;BXM-30R高压蒸汽灭菌锅购自上海博讯实业有限公司医疗设备厂。

1.3 实验方法

1.3.1 菌丝培养

取大小相同菌块接种于液体培养基中,并置于25℃下120 r/min旋转式摇床上培养20 d。每个水平3次重复。

1.3.2 香菇菌丝胞外多糖提取

首先将香菇菌丝培养液中的生物量分离去除,随后以3 000 r/min的转速离心处理10 min。取离心后的上清液转移至小烧杯,向其中加入3倍体积的95%乙醇,充分混合后静置沉淀24 h,沉淀完成后再以4 800 r/min离心处理10 min,得到的沉淀部分即为胞外粗多糖,最后将这些胞外粗多糖在40℃真空干燥^[17-18]。

1.3.3 镉含量测定

1.3.3.1 标准曲线的绘制

准备一系列不同浓度的镉标准溶液,精确量取浓度梯度为0.10、0.12、0.14、0.16、0.18、0.20 μg/mL的镉标准溶液各1份,按顺序移入25 mL比色管。向各管依次添加2 mL浓度为1 mol/L的硫酸溶液、7 mL质量浓度200 g/L的碘化钾溶液,振荡混匀后静置2 min;随后加入5 mL 1% PVA-124溶液并摇匀,沿比色管内壁缓慢滴加1.5 mL 0.05%罗丹明B溶液,静置1 min后轻柔摇匀体系。以蒸馏水定容至刻度线,再次摇匀并静置5 min。采用1 cm比色皿,在620 nm波长下,以试剂空白溶液作为参比,测定各管溶液的吸光度值,依据测定结果绘制镉标准曲线^[19-21]。

1.3.3.2 湿法消解

称取0.5 g香菇菌丝胞外多糖于25 mL锥形瓶内,加入适量玻璃珠并加入10 mL混合酸(硝酸:高氯酸=9:1),加盖让其浸泡过夜后,将锥形瓶放置在电热板上消解。将消化液装入25 mL容量瓶中并定容,同时作空白试剂。用分光光度计进行检测。

1.3.4 实验设计

1.3.4.1 碳源类型

配制含1 mg/L镉溶液培养基,溶液pH值调至6,随后向培养基中分别添加20 g葡萄糖、20 g麦芽浸粉、20 g玉米粉3种碳源物质,在25℃恒温条件下培养20 d,每种碳源均设置3组平行样本,用以研究不同碳源类型对镉胁迫环境下香菇菌丝胞外多糖合成的影响。

1.3.4.2 碳源水平

在含1 mg/L镉离子的培养基中,将筛选出的

最优碳源麦芽浸粉作为培养基碳源,依次添加5、10、15、20、25 g的麦芽浸粉,溶液pH值调至6,每种浓度样本均进行3次重复操作,在25℃温度下培养20 d。用于考察碳源浓度对香菇菌丝胞外多糖在镉胁迫下产生的影响。

1.3.4.3 氮源水平

以麦芽浸粉和蛋白胨作为碳源和氮源,每组添加20 g麦芽浸粉,再分别添加不同量的蛋白胨,使氮碳比值分别为0、1:10、1:15、1:20和1:25,即0、0.80、1.00、1.33、2.00 g,最终配制为含1 mg/L镉离子的培养基,每种氮碳比设置3组平行实验。用于考察氮碳比对香菇菌丝胞外多糖在镉胁迫下产生的影响。

1.3.4.4 培养时间

在1 mg/L镉离子的培养基中,将溶液pH值调节至6,把培养基置于25℃环境下培养,分别在培养10、15、20、25、30、35 d时取样,每个时间点设

置3次重复取样,旨在探究镉胁迫条件下培养时长对香菇菌丝胞外粗多糖合成的影响。

1.3.4.5 培养基初始镉浓度

在pH=6、25℃恒温的条件下,将香菇菌丝块分别接入含镉浓度为0.5、1、5、10、15 mg/L的系列培养基中培养20 d。每种浓度设置3组平行实验,旨在探究镉胁迫环境下环境镉浓度对香菇菌丝胞外粗多糖合成的影响。

1.4 数据处理

所有数据均采用Excel 2013和SPSS 16.0统计分析软件进行整理与分析工作。

2 结果与分析

2.1 镉标准曲线的绘制

标准曲线以镉标准溶液的浓度为横坐标、对应的吸光度值为纵坐标进行绘制,具体结果详见表1及图1。

表1 镉标准液吸光度

Table 1 Absorbance of cadmium standard solution

镉标准液浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ Concentration of Cd standard solution	0.008 0	0.009 6	0.011 2	0.012 8	0.014 4
吸光度值 Absorbance value	0.145 0	0.168 0	0.190 0	0.213 0	0.238 0

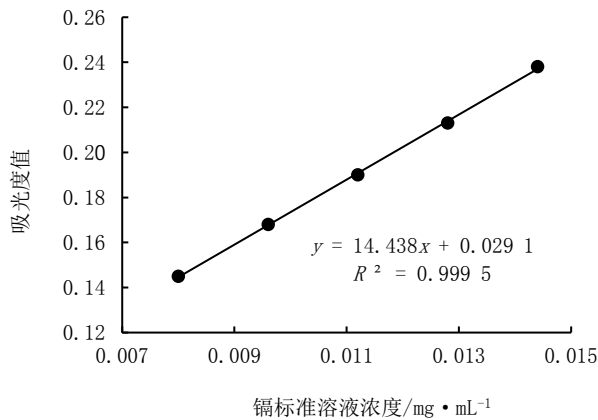


图1 镉的标准曲线

Fig. 1 Standard curve of cadmium

由表1和图1可知,镉标准曲线的一元线性回归方程为 $y=14.438x+0.0291$,相关系数 $R^2=0.9995$,大于0.995,镉的标准曲线满足要求。

2.2 碳源类型

在香菇菌丝胞外多糖合成及其吸附镉毒性的过程中,碳源的生物有效性是关键调控因子^[22]。由图2和图3可知,香菇菌丝生物量、胞外多糖代

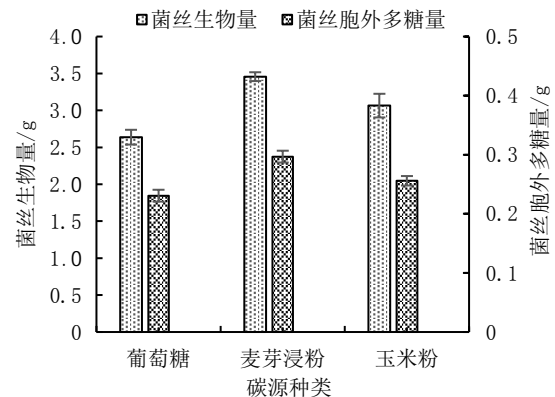


图2 不同碳源种类对香菇菌丝生物量及胞外多糖合成的影响

Fig. 2 Effects of different types of carbon sources on biomass and exopolysaccharide synthesis of *Lentinus edodes* mycelia

谢产物含量及镉吸附能力,在不同碳源培养基中不仅显著差异,其变化趋势也高度一致,均为麦芽浸粉>玉米粉>葡萄糖。其中,麦芽浸粉的胞外多糖产量比最高,而且胞外多糖附镉能力最好,

因此碳源麦芽浸粉更适合香菇菌丝抵御重金属镉对菌丝内部毒害。从生长初期,玉米粉和麦芽浸粉培养基中的香菇菌丝生长速度显著快于葡萄糖培养基,这一差异源于天然碳源(麦芽浸粉和玉米粉)的独特营养构成——其所含的丰富淀粉类物质不仅为菌丝生长提供了充足碳源,更创造了促进胞外多糖合成的有利环境^[23],因此采用玉米粉和麦芽浸粉作为培养基碳源时,菌丝的生长稳定期提前到来,促进了胞外多糖的大量合成,使其对镉毒害的抑制作用更为高效。总之,麦芽浸粉最适合作为香菇菌丝碳源,菌丝生物量多,胞外多糖代谢量多,而且抑制环境重金属镉毒害效果好。

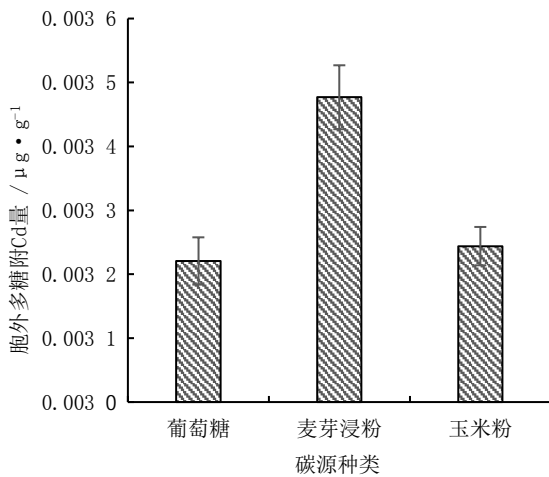


图3 不同碳源对香菇菌丝胞外多糖附镉量的影响
Fig. 3 Effects of different carbon sources on Cd adsorption capacity of exopolysaccharides from *Lentinus edodes* mycelia

2.3 碳源水平

碳源浓度被视为调控香菇菌丝生长特性变化的环境信号分子^[24]。选定麦芽浸粉作为碳源以系统考察其对香菇菌丝胞外多糖产量及镉吸附效率的影响规律,此操作通过设置浓度梯度实现,且碳源的选定依托于前期试验。由图4和图5可知,胞外多糖产量与其附镉能力均呈现逐步上升趋势,而菌丝生物量则表现出先增长后缓慢降低的变化规律。在5g的低浓度麦芽浸粉培养基中,碳源营养匮乏的生长环境会显著限制香菇菌丝的生物量积累与胞外多糖合成,最终导致其对镉的耐受能力大幅衰减;培养基麦浸粉浓度的递增,则会驱动菌丝的抗镉性能呈现出持续增强的态势;当浓度达到25g时,胞外多糖产量达到峰值,且该多糖体系耐镉能力同步达到最强,但菌丝生物量却呈现负增长态势。结果表明,高浓度碳源

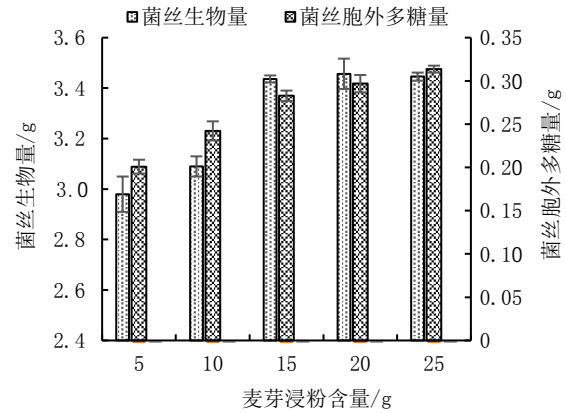


图4 麦芽浸粉浓度差异对香菇菌丝生物量及胞外多糖合成的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of malt extract powder on biomass and exopolysaccharide synthesis of *Lentinus edodes* mycelia

虽对菌丝的生长增殖有抑制效应,并不影响菌丝利用更多碳源代谢胞外多糖抵御镉毒害^[25]。综上所述,高浓度碳源可促进胞外多糖合成,而培养基中胞外多糖的含量是调控香菇菌丝耐镉能力的关键因素。随着麦芽浸粉浓度梯度的升高,香菇菌丝的耐镉能力在一定范围内呈现增强趋势。

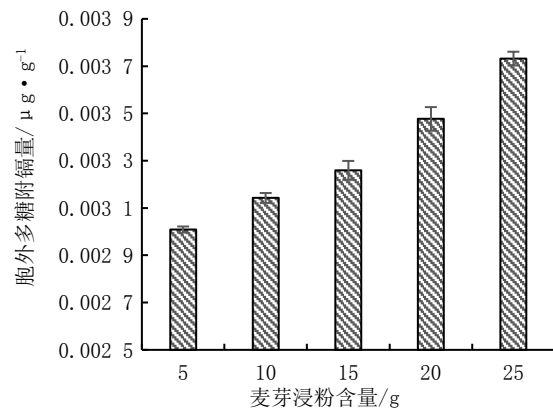


图5 不同麦芽浸粉含量对香菇菌丝胞外多糖附镉量的影响

Fig. 5 Effects of different contents of malt extract powder on Cd adsorption capacity of exopolysaccharides from *Lentinus edodes* mycelia

2.4 氮源水平

氮源能提供微生物生长发育所必需的营养物质,是合成蛋白质和核酸所必不可少的原料,适合的氮源有利于菌体的生长代谢和胞外多糖合成^[26]。在计算氮碳比时,仅将酵母膏和蛋白胨作为氮源。因为尽管培养基中的酵母膏和蛋白胨含有一定碳源成分,但因其含量较低且难以被细胞吸收利用,此外蛋白胨富含氮源较多,因此以蛋

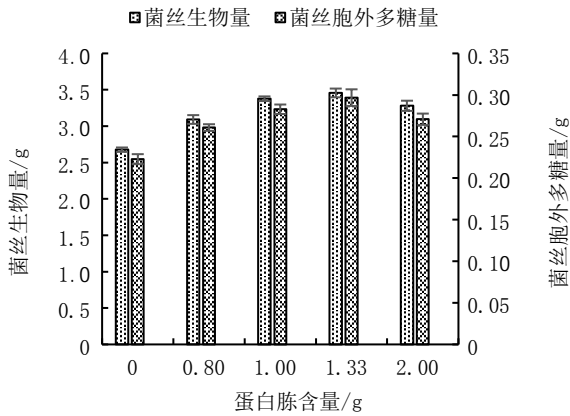


图6 不同蛋白胨含量对香菇菌丝胞外多糖和生物量的影响

Fig. 6 Effects of different contents of peptone on exopolysaccharides and biomass of *Lentinus edodes* mycelia

白朊为氮源变量。本实验选择 20 g 麦芽浸粉作为碳源,根据氮碳比确定加入蛋白胨的含量。由图 6 和图 7 可知,未添加氮源的香菇菌丝代谢胞外多糖、胞外多糖附镉量和生物量明显低于添加氮源的,说明氮元素是菌丝生物体重要组成成分,能够促进细胞分裂增加菌体密度,促进糖类物质向多糖的转化。随着氮源浓度的增加,菌丝胞外多糖的代谢量和胞外多糖附镉量出现先增加后降低的趋势。这可能由于氮元素过低,促进糖类物质向多糖的转化受阻,所以导致代谢产物胞外多糖不足,抗镉能力较低。而过多的氮源也会抑制胞外多糖的代谢,氮碳比 1:10 香菇菌丝胞外多糖代谢量比 1:15 的少 10%,氮碳比 1:10 香菇菌丝胞外

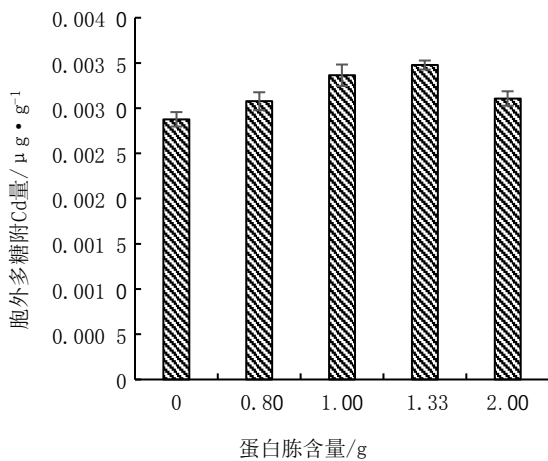


图7 不同蛋白胨含量对香菇菌丝胞外多糖附镉量的影响

Fig. 7 Effects of different contents of peptone on Cd adsorption capacity of exopolysaccharides from *Lentinus edodes* mycelia

多糖附镉量比 1:15 的少 11%。总体来说,氮源对菌丝抑镉能力有重大影响,因此选择适合的氮碳比至关重要,1:15(1.33 g)为最佳,既适合菌丝生长又有很强的抗重金属特性。

2.5 培养时间

由图 8 和图 9 可知,随着培养时间的逐步延长,香菇菌丝的生物量、胞外多糖产量及胞外多糖对镉的吸附量均呈递增趋势。在 15~20 d 香菇菌丝达到生长稳定期,菌丝生物量随着培养时间延长变化幅度不大。进入稳定期后,菌丝代谢活动占据主导地位,菌丝通过显著提升胞外多糖的合成来缓解环境毒性,从而为自身生长繁殖创造更有利的环境。其生长过程具有明显的阶段性:前 15 d 以菌丝体自身生长为主,此阶段虽然胞外多糖的分泌量相对较低,但仍显著高于无镉胁迫的对照组。同时值得注意的是,15 d 胞外多糖代

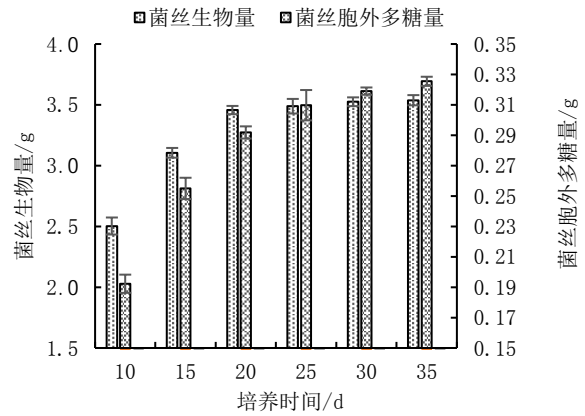


图8 培养时间段对香菇菌丝胞外多糖和生物量的影响
Fig. 8 Effects of culture duration on exopolysaccharides and biomass of *Lentinus edodes* mycelia

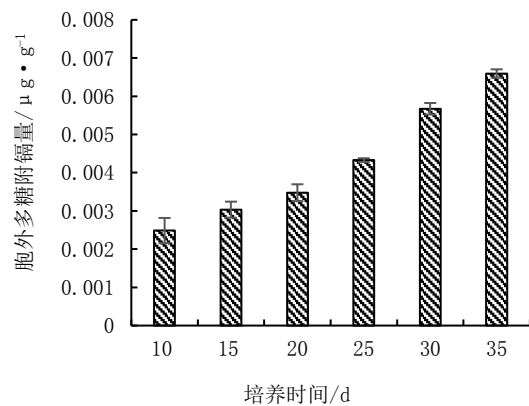


图9 培养时间段对香菇菌丝胞外多糖附镉量的影响
Fig. 9 Effects of culture duration on Cd adsorption capacity of exopolysaccharides from *Lentinus edodes* mycelia

谢量是10 d胞外多糖代谢量的1.33倍。在不含镉的常规培养基中,香菇菌丝通常仅需12 d即可进入生长稳定期。而当培养基中添加镉元素后,由于镉的毒性作用,香菇菌丝会通过合成特定代谢产物来中和环境毒性。这一防御机制虽能帮助菌丝抵御镉的危害,但也导致其生长速率显著放缓,需经历更长时间才能逐步达到生长平衡状态。

香菇菌丝在重金属环境下生长稳定期时间变长,为了抵御环境镉胁迫,生长过程中仍会不断代谢胞外多糖,胞外多糖的代谢量在香菇菌丝达到稳定期后会大量增加,让更多胞外多糖结合菌丝细胞周围的镉,最大限度减少镉对菌丝细胞的侵害。

2.6 培养基初始镉浓度

在实际生产场景中,因频繁使用不同污染程度的原辅料,培养基内的香菇菌丝往往会持续面临各种浓度重金属镉胁迫,在此严峻的生长环境中,菌丝胞外多糖作为调控因子在不同重金属浓度下有着不同的应激反应。由图10和图11可知,随着环境镉浓度的提高,胞外多糖代谢量逐渐增加,且胞外多糖附镉能力也呈显著增加趋势。在低镉浓度0.5 mg/L下,香菇菌丝胞外多糖仅为0.22 g,1 mg/L镉浓度下香菇菌丝胞外多糖显著增加,相比0.5 mg/L增长27%;随着镉浓度提高,胞外多糖代谢保持增长趋势,胞外多糖附镉能力持续大幅提高。高浓度重金属胁迫会诱导香菇菌丝大量合成并分泌胞外多糖,此类多糖可通过提供丰富结合位点络合重金属,降低其环境毒性浓度,阻止重金属侵入细胞造成损伤,这是菌丝适应胁迫环境的关键生存策略^[27-28]。

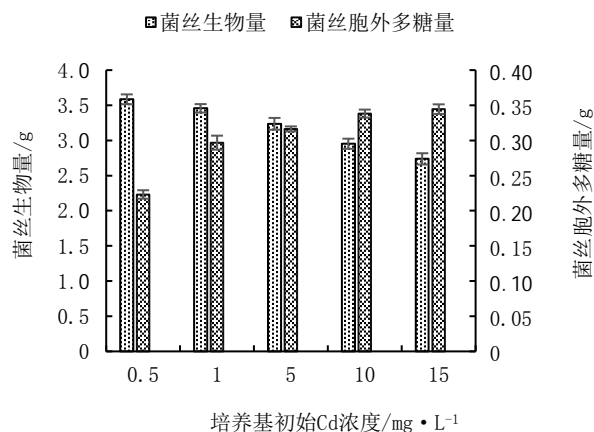


图10 培养基初始镉浓度对香菇菌丝胞外多糖合成及菌丝生物量积累的影响

Fig. 10 Effects of initial Cd concentrations in medium on exopolysaccharide synthesis and mycelial biomass accumulation of *Lentinus edodes*

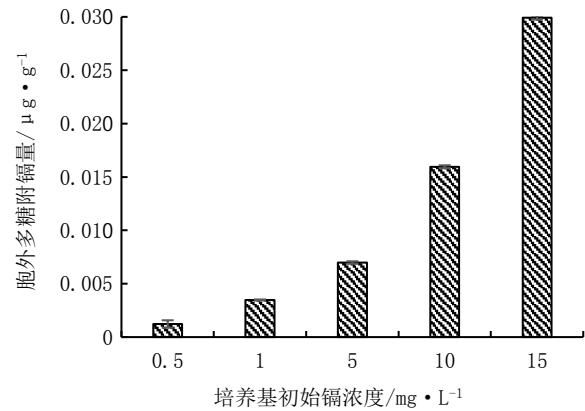


图11 培养基初始镉浓度对香菇菌丝胞外多糖镉吸附量的影响

Fig. 11 Effects of initial Cd concentrations in medium on Cd adsorption capacity of exopolysaccharides from *Lentinus edodes* mycelia

3 小 结

前期实验对镉环境下香菇菌丝分泌的胞外多糖分离检测,发现胞外多糖中镉含量为0.004 μg/g,证明胞外多糖能吸附重金属镉,阻挡其进入香菇菌丝内部。本实验对香菇菌丝培养基营养成分(碳源种类、碳源水平、氮源水平)和培养条件(培养时间、培养基初始镉浓度)进行一系列研究,发现镉环境下香菇菌丝胞外多糖代谢量和抵抗镉有明显变化。

碳源种类对香菇菌丝胞外多糖代谢抵御镉胁迫能力影响明显。在培养基初始阶段,以玉米粉和麦芽浸粉为碳源的培养基中,香菇菌丝的生长速率显著高于以葡萄糖为碳源的培养基,这是因为天然碳源因蕴含多元营养成分而具备独特优势(玉米粉与麦芽浸粉中含有的淀粉,可通过酶解为香菇菌丝提供易吸收的碳水化合物,进而促进菌丝的生长发育及胞外多糖的积累)。基于此,以玉米粉和麦芽糖为碳源的培养基可加速菌丝的生长进程,菌丝生长稳定期较常规培养呈现提前进入的趋势,菌丝通过启动胞外多糖的大量合成机制,实现对镉毒害抑制效率的明显提升。而麦芽糖相比玉米粉更易代谢胞外多糖抵抗重金属,所以最适合碳源为麦芽浸粉。

不同的碳源水平对香菇菌丝胞外多糖代谢有一定影响。高浓度碳源可通过促进胞外多糖的合成,进而增强菌丝对镉毒害的抵抗能力。

不同的氮源水平对香菇菌丝胞外多糖合成有影响。添加氮源的香菇菌丝明显代谢胞外多糖和

胞外多糖附镉量增加,因为氮元素是菌丝生物体重要组成成分,可促进糖类物质向多糖的转化。但是由于氮元素过量添加也会抑制香菇菌丝分泌胞外多糖,减弱其抵御重金属胁迫。因此,一定要选择适合的氮碳比,1:15(1.33 g)时最佳,既适合菌丝生长又具备很强的抗重金属特性。

不同培养时间段内,香菇菌丝分泌胞外多糖的能力存在显著差异。在不含镉的常规培养基中,香菇菌丝的生长稳定期通常出现在培养第12天;在镉胁迫条件下,菌丝会激活防御性代谢途径,通过增加特定代谢产物的生物合成来抵抗环境毒性,这一防御机制使其生长速率放缓,需15 d才能逐步达到生长平衡状态。在15 d的香菇菌丝生长周期中,可划分为两个阶段:15 d前属于菌丝主体生长阶段,此时期胞外多糖的代谢生成量相对较少;随着培养时间的增加,菌丝会不断分泌胞外多糖,以此来吸附镉并抑制环境毒性。

调控因子菌丝胞外多糖在不同重金属浓度下有着不同的应激反应。或许是其他抗镉系统起主要调节作用,在低镉浓度环境中,香菇菌丝的生长未呈现明显抑制效应,其胞外多糖代谢量也低于高镉浓度条件。这一现象表明,此时可能存在其他抗镉(Cd)系统主导毒性调节作用,很多文献报道细胞壁吸附重金属,可能浓度低时细胞壁主要抵御,但随着环境镉浓度逐渐增高,胞外多糖代谢附镉能力有显著增加趋势。

参考文献:

- [1] 张淇淇,周良,朱俊豪,等.香菇的药用价值及其产品开发前景[J].长江蔬菜,2020(2):38-43.
ZHANG Q Q, ZHOU L, ZHU J H, et al. Medicinal value and product development prospect of *Lentinus edodes*[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2020(2): 38-43. (in Chinese)
- [2] 梁金孟,张焱超.香菇多糖食品改善运动员肠道功能的作用探索[J].中国食用菌,2019,38(12):30-33.
LIANG J M, ZHANG Y C. Effect of *Lentinus edodes* food on improving intestinal function of athletes[J]. Edible Fungi of China, 2019, 38(12): 30-33. (in Chinese)
- [3] 王义勋,陈京元,唐岚,等.湖北省香菇产业发展现状与可持续发展探讨[J].湖北林业科技,2015,44(6):70-72.
WANG Y X, CHEN J Y, TANG L, et al. Current situation and sustainable development of *Lentinus edodes* industry in Hubei Province[J]. Hubei Forestry Science and Technology, 2015, 44(6): 70-72. (in Chinese)
- [4] 魏春雁,刘笑笑,宋志峰,等.不同产地中药材及其栽培土壤中重金属含量比较研究[J].东北农业科学,2017,42(4):39-43.
WEI C Y, LIU X X, SONG Z F, et al. Comparison of heavy metal contents in Chinese herbal medicine and their cultivated soils from different habitats[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2017, 42(4): 39-43. (in Chinese)
- [5] 毛雪飞,何金娇,韩忠康,等.铅胁迫对金银花生长、生理及积累特性的影响[J].东北农业科学,2019,44(5):69-75,87.
MAO X F, HE J J, HAN Z K, et al. Effects of lead stress on growth and physiological metabolism and accumulation characteristics of *Lonicera Japonica*[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(5): 69-75, 87. (in Chinese)
- [6] 袁美丽,刘畅,张晓源,等.镉胁迫对入侵植物节节麦幼苗生长及生理生化反应的影响[J].东北农业科学,2025,50(3):72-79.
YUAN M L, LIU C, ZHANG X Y, et al. Effects of cadmium stress on growth and biochemical responses of invasive *aegilops tauschii* seedlings[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2025, 50(3):72-79. (in Chinese)
- [7] 何红君.丛枝菌根真菌接种对Cd胁迫下芹菜生长、生理及富集特征的影响[J].东北农业科学,2020,45(3):70-75,102.
HE H J. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on the growth, physiology and accumulation characteristics of celery (*Apium graveolens* L.) under cadmium stress[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(3): 70-75, 102. (in Chinese)
- [8] 陈毛华,刘明广,郭斌,等.阜阳市颍州区城郊菜地重金属污染调查与评价[J].东北农业科学,2016,41(3):37-40.
CHEN M H, LIU M G, GUO B, et al. Investigation and evaluation of heavy metals pollution in suburban vegetable soils in Yingzhou District of Fuyang City[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016, 41(3): 37-40. (in Chinese)
- [9] 龚艳,彭立军,王明锐,等.基于背景值研究的湖北省香菇重金属风险评估[J].农产品质量与安全,2017(2):33-38.
GONG Y, PENG L J, WANG M R, et al. Risk assessment of heavy metals in *Lentinula edodes* in Hubei based on background levels[J]. Quality and Safety of Agro-products, 2017(2): 33-38. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 赵晓燕,陈磊,李晓贝,等.食用菌中重金属相关研究进展[J].食用菌学报,2019,26(2):135-140.
ZHAO X Y, CHEN L, LI X B, et al. Research progress on heavy metals in edible fungi[J]. Acta Edulis Fungi, 2019, 26(2): 135-140. (in Chinese)
- [12] 王轶,王晨,李露,等.络合混凝法去除香菇多糖中的镉污染[J].食品安全质量检测学报,2016,7(1):383-388.
WANG Y, WANG C, LI L, et al. Removal of cadmium from contaminated lentinan by complexation coagulation method[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2016, 7(1): 383-388. (in Chinese)
- [13] 刘朋虎,赖瑞联,陈华,等.镉对食用菌生长的影响及防控技术研究进展[J].生态环境学报,2019,28(2):419-428.
LIU P H, LAI R L, CHEN H, et al. Effects of Cd on edible fungi growth and Cd pollution prevention and control techniques in mushroom production[J]. Ecology and Environmental Sci-

- ences, 2019, 28(2): 419-428. (in Chinese)
- [14] 温慧颖, 辛树权. 北虫草生长发育条件的初步探究[J]. 东北农业科学, 2016, 41(3): 99-103.
WEN H Y, XIN S Q. A primary investigation on conditions for growing and developing of cordyceps militaris[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2016, 41(3): 99-103. (in Chinese)
- [15] 陈苗苗, 郑鑫, 李小方. 大型真菌重金属富集能力与机制研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(6): 499-508.
CHEN M M, ZHENG X, LI X F. Capability and mechanisms of macrofungi in heavy metal accumulation: A Review[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(6): 499-508. (in Chinese)
- [16] 张晶, 余德, 白莉圆, 等. 食用菌富集重金属因素及其控制技术研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(17): 347-354.
ZHANG J, YU S, BAI L Y, et al. Research progress of factors accumulating heavy metals in edible fungi and their control techniques[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(17): 347-354. (in Chinese)
- [17] 李素红, 王昭曦, 姜晓坤, 等. 超声波辅助法提取玉竹多糖工艺优化研究[J]. 东北农业科学, 2018, 43(3): 61-64.
LI S H, WANG Z X, JIANG X K, et al. Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharide from *polygonatum odoratum*[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2018, 43(3): 61-64. (in Chinese)
- [18] 姜晓坤, 古慧莹, 魏伶俐, 等. 玉竹多糖的微波超声提取及其抗氧化研究[J]. 东北农业科学, 2020, 45(1): 87-93.
JIANG X K, GU H Y, WEI L L, et al. Study on extraction and antioxidation of polysaccharide from *polygonatum odoratum* by microwave and ultrasonic[J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(1): 87-93. (in Chinese)
- [19] 叶瑞洪, 陈孝堪. 食品中镉的测定方法研究[J]. 福建师范大学福清分校学报, 2009, 91(2): 21-25.
YE R H, CHEN X K. Study on determination of cadmium in food[J]. Journal of Fuqing Branch of Fujian Normal University, 2009, 91(2): 21-25. (in Chinese)
- [20] 庄海燕, 胡宁. 分光光度法测定食品中的微量镉[J]. 化学分析计量, 2001, 10(4): 20-22.
ZHUANG H Y, HU N. Determination of the trace Cd in food by spectrophotometry[J]. Chemical Analysis and Meterage, 2001, 10(4): 20-22. (in Chinese)
- [21] 耿振香, 郭亚平. 碘化钾-罗丹明B分光光度法测定废水中镉含量的实验研究[J]. 煤炭与化工, 2015, 138(10): 103-105.
GENG Z X, GUO Y P. Experimental study of potassium iodide-rhoda mine bspectrophotometric method to determine cadmium content in wastewater[J]. Coal and Chemical Industry, 2015, 138(10): 103-105. (in Chinese)
- [22] AWUAL M R. Novel ligand functionalized composite material for efficient copper(II) capturing from wastewater sample[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 172: 387-396.
- [23] WU Q, WANG Q, FU J, et al. Polysaccharides derived from natural sources regulate triglyceride and cholesterol metabolism: a review of the mechanisms[J]. Food & Function, 2019, 10(5): 2330-2339.
- [24] SOUZA A M, SUTHERLANDLAND I W. Exopolysaccharide and storage polymer production in enterobacter aerogenes type 8 strains[J]. J. Appl. Bacteriol, 1994, 76(5): 463-468.
- [25] GAMAR L, BLONDEAU K, SIMONET J M. Physiological approach to extracellular polysaccharide production by *Lactobacillus rhamnosus* strain C83[J]. J. Appl. Microb., 1997, 83(3): 281-287.
- [26] 牛永武, 吴嘉南, 顾頔, 等. 氮源对蚜虫拟酵母生物合成新型乳化剂-甘露糖赤藓糖醇脂的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(3): 167-174.
NIU Y W, WU J N, GU D, et al. Influence of nitrogen sources on a new emulsifier-mannosylerythritol lipids produced by *pseudozyma aphidis*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(3): 167-174. (in Chinese)
- [27] JEDDERSON K K. What drives bacteria to produce a biofilm? [J]. FEMS Microbiol Lett, 2004, 236(2): 163-173.
- [28] WHITCHURCH C B, TOLKER-NIELSEN T, RAGAS P C, et al. Extracellular DNA required for bacterial biofilm formation[J]. Science, 2002, 295(5559): 1487.

(责任编辑:王 昱)