

不同镉耐受性香菇子实体对镉胁迫的生理响应

翟丹丹, 闫苗苗, 姜宁, 李巧珍, 尚晓冬, 谭琦, 李玉, 于海龙

引用本文:

翟丹丹, 闫苗苗, 姜宁, 李巧珍, 尚晓冬, 谭琦, 李玉, 于海龙. 不同镉耐受性香菇子实体对镉胁迫的生理响应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1267–1273.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0978>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

姬松茸菌株J1与J77镉富集差异及生理响应机制

刘朋虎, 李波, 江枝和, 王义祥, 翁伯琦

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 863–868 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0073>

镉对姬松茸农艺性状及矿物质元素吸收的影响

刘朋虎, 李波, 江枝和, 雷锦桂, 翁伯琦, 黄在兴

农业环境科学学报. 2018, 37(1): 58–63 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1524>

镉胁迫对巴西蘑菇镉亚细胞分布和非蛋白巯基的影响

周宇, 张聪慧, 翁伯琦, 陈华, 刘朋虎

农业环境科学学报. 2022, 41(6): 1193–1201 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1173>

四尾栅藻对重金属镉胁迫的响应

尹文珂, 程金凤, 肖婉露, 郭瑞军, 康冰

农业环境科学学报. 2015(4): 633–638 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.004>

镉胁迫对姬松茸菌丝生理指标与镉吸收的影响

刘朋虎, 陈华, 李波, 王义祥, 翁伯琦

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1675–1682 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0469>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

翟丹丹, 闫苗苗, 姜宁, 等. 不同镉耐受性香菇子实体对镉胁迫的生理响应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(6): 1267–1273.

ZHAI D D, YAN M M, JIANG N, et al. Physiological responses of fruiting bodies of different Cd-tolerant *Lentinula edodes* to Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(6): 1267–1273.

不同镉耐受性香菇子实体对镉胁迫的生理响应

翟丹丹^{1,2}, 闫苗苗^{1,2}, 姜宁², 李巧珍², 尚晓冬², 谭琦², 李玉^{1*}, 于海龙^{1,2*}

(1. 吉林农业大学食药菌教育部工程研究中心, 长春 130118; 2. 上海市农业科学院食用菌研究所, 农业农村部南方食用菌资源利用重点实验室, 国家食用菌工程技术研究中心, 国家食用菌加工技术研发中心, 上海市农业遗传育种重点开放实验室, 上海 201403)

摘要:为进一步解析镉胁迫对不同镉耐受性香菇菌株生长发育的影响,明确镉胁迫下香菇子实体不同发育阶段生理变化规律,以不同镉耐受性香菇菌株为材料,通过外源添加镉的方式探究两个菌株不同发育阶段子实体中镉含量、丙二醛(MDA)含量、可溶性蛋白含量的变化规律。结果表明:镉胁迫对两个菌株子实体农艺性状和产量都产生影响,但不同镉耐受性菌株受影响的农艺性状和受影响程度不同。菌株4606受到镉胁迫后的菌盖直径、菌盖厚度显著降低,其余农艺性状未受到显著影响;菌株4625受到镉胁迫后的单棒子实体个数、单棒产量显著降低,单菇质量、菌盖质量极显著升高,其余农艺性状未受到显著影响。两个菌株不同生长发育阶段单位干质量子实体中镉含量均有随着生长发育时间的延长而显著降低的趋势。受到镉胁迫后菌株4606的MDA含量在生长期显著升高,成熟期显著下降,开伞期极显著降低;菌株4625受到镉胁迫后开伞期的MDA含量显著降低,其余阶段未受到显著影响。菌株4606对照组与镉胁迫处理组的可溶性蛋白含量均随生长时间延长显著降低,菌株4625对照组与镉胁迫处理组的可溶性蛋白含量均随生长时间延长先显著升高后显著降低;镉胁迫导致菌株4606开伞期的可溶性蛋白含量显著降低,而菌株4625在原基期、生长期、开伞期的蛋白含量均极显著升高。综上,不同镉耐受性香菇菌株子实体对镉胁迫的生理响应存在一定差异,因此,在香菇生产上应选取低镉吸收品种进行农业生产。

关键词: 镉胁迫;香菇;生长发育;农艺性状;生理指标

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)06-1267-07 doi:10.11654/jaes.2022-0978

Physiological responses of fruiting bodies of different Cd-tolerant *Lentinula edodes* to Cd stress

ZHAI Dandan^{1,2}, YAN Miaomiao^{1,2}, JIANG Ning², LI Qiaozhen², SHANG Xiaodong², TAN Qi², LI Yu^{1*}, YU Hailong^{1,2*}

(1. Engineering Research Centre of Chinese Ministry of Education for Edible and Medicinal Fungi, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences; Key Laboratory of Edible Fungal Resources and Utilization(South), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China; National Engineering Research Center of Edible Fungi; National R & D Center for Edible Fungal Processing; Key Laboratory of Agricultural Genetics and Breeding of Shanghai, Shanghai 201403, China)

Abstract: In this study, we analyzed the cadmium (Cd) accumulation characteristics of different Cd-tolerant *Lentinula edodes* strains and the physiological changes in *Lentinula edodes* fruiting bodies at different developmental stages under Cd stress. As exogenous Cd stress was added, and Cd content changed, malondialdehyde (MDA) and soluble protein content in fruiting bodies at different developmental stages

收稿日期:2022-10-04 录用日期:2023-02-12

作者简介:翟丹丹(1996—),女,辽宁葫芦岛人,博士生,主要从事食用菌遗传育种研究。E-mail:1328792251@qq.com

闫苗苗与翟丹丹同等贡献

*通信作者:于海龙 E-mail:yuhailong@saas.sh.cn; 李玉 E-mail:yuli996@126.com

基金项目:山东省重点研发计划项目(20221ZGC023);国家食用菌产业技术体系项目(CARS-20);山东省泰山产业领军人才项目(LJNY202116)

Project supported: The National Key Research and Development Program of Shandong Province, China (20221ZGC023); The National Edible Fungus Industry Technology System (CARS-20); The Project of Taishan Industry Leading Talent of Shandong Province, China (LJNY202116)

were explored. The results show that Cd stress affected the agronomic characteristics and yield of the fruiting bodies of the two strains, but different Cd tolerant strains were affected differently. The diameter and thickness of the cap of strain 4606 decreased significantly after Cd stress, but the other agronomic traits showed no significant difference. After Cd exposure to strain 4625, the number of fruiting bodies and the yield per rod decreased significantly, and the weight of a single mushroom and the weight of cap increased significantly. The Cd content in the fruiting bodies of unit dry mass of the two strains decreased significantly with the extension of growth and development time. After Cd stress, the MDA content of strain 4606 increased significantly in the growth period, decreased significantly in the mature period, and decreased extremely significantly in the parachute stage. The protein content of the 4606 strain control group and the Cd stress treatment group decreased significantly with a longer growth time, and that of the 4625 strain control group and the Cd stress treatment group increased significantly at first and then decreased significantly over time. The protein content of the 4606 strain at the open capillary stage was significantly reduced, but there were no significant difference in the other stages. In conclusion, the physiological responses of fruiting bodies to Cd stress of different Cd-tolerant strains of *Lentinula edodes* were different. Therefore, varieties with low Cd absorption should be selected for agricultural production.

Keywords: Cd stress; *Lentinula edodes*; growth and development; agronomic traits; physiological indicators

香菇(*Lentinula edodes*)是我国第一大食用菌品种,其产量占我国食用菌总产量的31%以上,其味道鲜美、营养丰富,深受消费者喜爱^[1]。重金属可以通过生物富集进入人体^[2],对人体造成一定的毒性损伤^[3]。食用菌具有重金属富集特性最早是由Stijve等^[4]报道,后续又有大量的研究报道证实很多大型真菌都具有重金属富集特性^[5-6],且其富集程度大于植物^[7]。研究发现,不同种类间、同一种类不同品种间、同种内不同菌株间、同一个体不同部位间的重金属富集程度和含量都有差异^[8-9]。前期研究表明,香菇子实体中镉含量存在超标现象,栽培区域、基质、品种、栽培方式等生产因素都会对香菇中镉含量产生影响^[10],不同潮次、不同部位、不同生长发育阶段的香菇子实体中的镉含量也会有显著差异^[11-12]。在对灵芝^[13]、猴头菇^[14-15]、香菇^[16-17]的研究中证实,食用菌生长发育过程中的活性物质累积是一个动态过程,当生物体受到胁迫时,其渗透调节物质如可溶性蛋白等的含量会发生显著变化,以维持细胞正常代谢^[18],而丙二醛(MDA)是衡量非生物胁迫后细胞氧化损伤程度的重要指标^[19],探究镉胁迫对香菇菌株不同生长发育阶段镉含量及活性物质积累的影响,可以进一步了解香菇子实体内镉积累的生理机制。前期本课题组以菌丝生长速率和镉含量为指标对99份香菇种质资源进行镉耐受性评价,获得了不同镉耐受性的香菇菌株和外源镉胁迫下的表型差异^[20]。本研究以4606(镉积累较低)和4625(镉积累较高)两个不同镉耐受性香菇菌株为供试菌株^[21],通过外源添加镉胁迫,探究两个菌株不同发育阶段子实体中镉含量、MDA含量、可溶性蛋白含量的变化规律,明确不同镉耐受性香菇菌株在不同发育阶段对镉胁迫的生理响应差异,以期阐明不同镉耐受性香菇菌株镉胁迫

应答提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试菌株及培养基

香菇菌株4606(国品认菌2007004)和4625(国品认菌2008007),由国家食用菌工程技术研究中心提供。

PDA培养基(购自美国BD公司):将PDA培养基按照说明书中的方法进行配制,将配制好的培养基于121℃高压灭菌30 min。

原种及栽培种培养料配方:栎木屑79%、麦麸20%、石膏1%,含水量57%~58%,pH自然。

1.2 试验方法

1.2.1 菌袋制作及培养

无镉添加的对照组栽培种培养料按照1.1中的配方配制。镉添加的培养料按照每千克培养料添加500 μL 氯化镉母液($10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)的比例配制。培养料混匀后测定接种前单位干质量培养料中的实际镉含量,其中对照组为(0.386 ± 0.059) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、处理组为(6.918 ± 0.484) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。称取1 kg培养料装入聚丙烯袋,并保持装料高度一致,封口后121℃高压灭菌4 h,料温降到28℃以下接种,接种量为3%(体积比),接种后将菌棒放入培养室(23 ± 1)℃避光培养,菌棒中心温度不超过26℃,空气相对湿度60%~80%;待菌棒发满菌后,调控温度、湿度、光照及通气等条件促进转色:温度(23 ± 1)℃,空气相对湿度60%~80%,光照强度50~200 lx,每天光照时长不少于12 h。

1.2.2 出菇管理

接种后150 d进行出菇处理,将菌棒置于环境参数可控的出菇房,设置(12 ± 1)℃进行催蕾,48 h后菇房温度设置为(17 ± 1)℃进行出菇,空气相对湿度

85%~95%,光照强度 100~200 lx,出菇管理过程中不疏蕾。

1.2.3 子实体农艺性状测定

每个处理取 12 个菌棒,每 3 个菌棒为一次生物重复,测定香菇子实体农艺性状。

1.2.4 MDA 含量及可溶性蛋白含量测定

将香菇子实体发育分为原基期、生长期、成熟期、开伞期 4 个阶段,每个时期 3 个重复菌棒,按照图 1 所示收集 4 个时期子实体样品,样品经液氮速冻并研磨后,称取 0.1 g 于 2 mL 离心管,并于-80 ℃超低温冰箱保存。使用 MDA 试剂盒测定 MDA 含量,使用考马斯亮蓝法测蛋白含量试剂盒测定可溶性蛋白含量,两种试剂盒均购自苏州科铭生物有限公司。

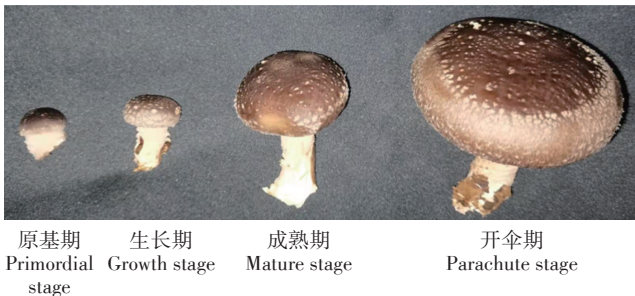


图 1 香菇子实体不同生长发育阶段示意图
Figure 1 Schematic diagram of different growth and development stages of *Lentinula edodes* fruiting bodies

1.2.5 镉含量测定

随机选取对照及镉添加的未接种培养料各 5 棒,以及出菇后不同发育阶段子实体样品,置于 50 ℃烘箱中烘干至恒质量,粉碎研磨,过 80 目筛,于干燥处

保存备用。参照 GB 5009.15—2014^[22]的方法测定培养料与香菇子实体中单位干质量的镉含量。

1.2.6 数据处理

采用 Excel 对获得的数据进行分析,使用 SPSS 23.0^[23]进行单因素方差分析并进行差异显著性检验(Duncan, $P<0.05$)及相关性分析(Pearson)。

2 结果与分析

2.1 对子实体农艺性状及产量的影响

镉胁迫对不同镉耐受性菌株的主要农艺性状和产量变化有不同影响(表 1):菌株 4606 受到镉胁迫后菌盖直径和菌盖厚度显著降低,其余农艺性状未受到显著影响;菌株 4625 受到镉胁迫后单棒子实体个数、单棒产量显著降低,单菇质量、菌盖质量显著升高,其余农艺性状未受到显著影响。镉胁迫对菌株 4625 的主要农艺性状和产量的影响更大。

2.2 对子实体不同发育阶段镉含量的影响

对镉胁迫后不同镉耐受性香菇子实体不同发育阶段中镉含量进行方差分析,结果如图 2。外源添加镉胁迫后菌株 4606 各生长阶段的镉含量分别为原基期(68.817 ± 4.479) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、生长期(69.760 ± 6.114) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、成熟期(53.667 ± 8.791) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、开伞期(45.170 ± 8.205) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,菌株 4625 分别为原基期(128.900 ± 14.465) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、生长期(95.573 ± 1.406) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、成熟期(79.580 ± 1.456) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、开伞期(60.950 ± 1.291) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。菌株 4625 的 4 个生长发育阶段子实体中镉含量均表现为:原基期>生长期>成熟期>开伞期;菌株 4606 的原基期与生长期无显著差异,成熟期与开伞期的镉含量显著低于原基期与生长期。

表 1 镉胁迫对香菇子实体农艺性状的影响

Table 1 Effects of Cd stress on agronomic characters of *Lentinula edodes* fruiting bodies

项目 Item	4606-CK	4606-Cd	4625-CK	4625-Cd
单棒子实体个数 Number of single stick fruit bodies	23.583±5.587a	24.333±2.357a	13.500±5.175b	1.444±0.385c
单棒产量 Single rod yield/g	113.117±16.132b	139.623±7.202ab	156.343±27.188a	42.569±18.057c
单菇质量 Single mushroom weight/g	4.913±0.904c	5.764±0.425c	12.383±3.169b	19.106±7.341a
菌盖质量 Cap weight/g	5.212±0.835b	5.223±0.326b	4.990±2.938b	11.083±3.421a
菌柄质量 Stipe weight/g	1.106±0.200b	1.007±0.078b	2.258±1.434ab	3.467±1.265a
菌盖直径 Cap diameter/mm	55.817±50.070a	32.302±1.149c	37.822±8.609bc	48.661±6.877ab
菌盖厚度 Cap thickness/mm	27.245±24.378a	15.189±0.257b	14.844±3.359b	19.051±2.690b
菌褶宽度 Gill width/mm	3.289±0.302a	3.013±0.432a	2.838±0.971a	3.727±0.986a
菌柄长度 Stipe length/mm	25.795±4.323b	23.385±0.752b	31.583±8.142ab	38.840±8.234a
菌柄直径 Stem diameter/mm	8.563±0.503bc	8.030±0.116c	10.666±2.378ab	12.426±2.366a

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note:The different lowercase letters in the same line indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

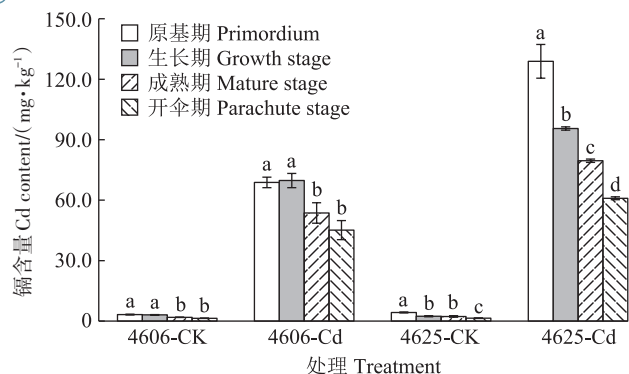


图2 镉胁迫对香菇不同发育阶段子实体镉含量的影响

Figure 2 Effects of Cd stress on Cd content in fruiting bodies of *Lentinula edodes* at different developmental stages

结果说明子实体中镉含量随着子实体生长发育时间的延长,有逐步降低的趋势。对镉胁迫后两个菌株不同生长发育阶段中的镉含量进行分析发现,受到镉胁迫后,菌株4625在不同生长发育阶段的镉含量均远高于菌株4606,其中原基期的差异倍数最大,为菌株4606原基期的1.873倍,说明菌株4625更容易吸收培养料中的镉。

2.3 对子实体MDA含量的影响

镉胁迫对子实体MDA含量的影响见图3。菌株4606对照组MDA含量随生长时间的延长先显著降低后显著升高,生长期MDA含量显著低于其他发育阶段,镉胁迫处理后菌株4606的MDA含量先上升后显著降低,生长期MDA含量最高,为 (8.967 ± 1.149) nmol·g⁻¹;将相同生长发育阶段镉胁迫前后子实体MDA含量进行对比,发现镉胁迫前后原基期MDA含

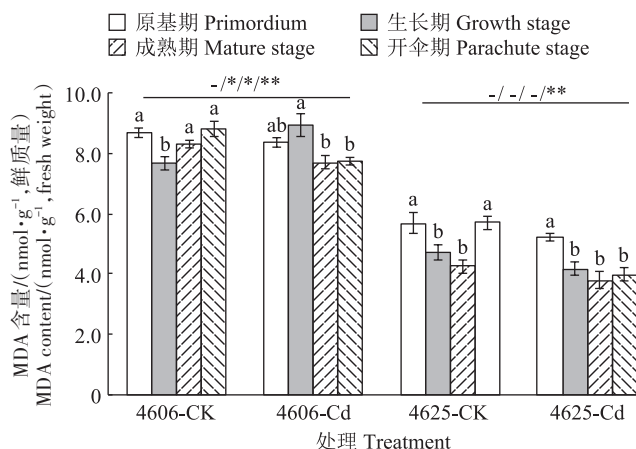


图3 镉胁迫对不同阶段香菇子实体MDA含量的影响

Figure 3 Effects of MDA content in the fruiting bodies of *Lentinula edodes* at different stages under Cd stress

量无显著差异,生长期MDA含量在镉胁迫后显著升高,且高于对照组 $1.249 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$,成熟期MDA含量在镉胁迫后显著下降,且低于对照组 $0.629 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$,开伞期MDA含量在镉胁迫后极显著降低,且低于对照组 $1.066 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。菌株4625对照组MDA含量随生长时间的延长先显著降低后显著升高,成熟期MDA含量最低,镉胁迫处理后菌株4625的MDA含量随生长时间的延长显著降低,成熟期MDA含量最低;将相同生长发育阶段镉胁迫前后子实体MDA含量进行对比,发现镉胁迫前后原基期、生长期、成熟期MDA含量无显著差异,开伞期MDA含量在镉胁迫后显著降低,且低于对照组 $1.720 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.4 对子实体中可溶性蛋白含量的影响

测定不同阶段香菇子实体中可溶性蛋白含量发现(图4),菌株4606对照组与镉胁迫组的可溶性蛋白含量均随生长时间延长显著下降,而菌株4625对照组与镉胁迫组不同发育阶段可溶性蛋白含量均随生长时间延长先显著升高后显著降低,生长期可溶性蛋白含量最高,开伞期可溶性蛋白含量最低。将相同生长发育阶段镉胁迫前后子实体中可溶性蛋白含量进行比较,发现镉胁迫导致菌株4606子实体开伞期可溶性蛋白含量显著降低,而菌株4625原基期、生长期、开伞期子实体可溶性蛋白含量极显著升高。

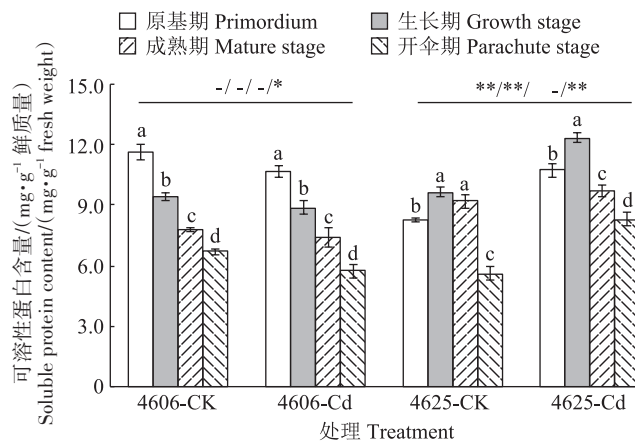


图4 镉胁迫对不同阶段香菇子实体可溶性蛋白含量的影响

Figure 4 Effects of soluble protein content of *Lentinula edodes* fruiting bodies under Cd stress at different stages

3 讨论

重金属污染是被广泛关注的世界性问题,且重金属属于非氧化还原金属,其不仅会对环境造成污染,还可能通过食物链进入人体而威胁人体健康,严重时

可能会造成重金属中毒。有研究发现,镉胁迫下姬松茸子实体数量显著减少^[24],平菇子实体的产量降低^[25],杏鲍菇子实体产量及生物学效率降低^[26]。本试验发现镉胁迫造成菌株4625单棒子实体个数、单棒产量显著低于对照,但菌株4606受到镉胁迫后的菌盖直径、菌盖厚度显著降低,其余农艺性状未受到显著影响。刘朋虎等^[27-28]以两个不同镉耐受性姬松茸菌株为材料进行研究,发现外源镉添加对两菌株子实体农艺性状产生的影响各异,且该影响与外源添加的镉浓度相关。本试验发现镉胁迫对两个不同镉耐受性香菇菌株的农艺性状也产生不同影响,这可能与前期课题研究证实的菌株4625和菌株4606对镉胁迫表现出不同的应答模式有关^[21]。生物体在不同生长发育阶段对环境胁迫的适应能力不同^[29]。本试验发现两个不同镉耐受性香菇菌株子实体中镉含量均有随着子实体生长发育时间的延长而显著降低的趋势,这与吴阳^[30]的研究结果一致。受到镉胁迫后,菌株4625在不同生长发育阶段的镉含量均远高于菌株4606,说明相比于菌株4606,菌株4625更容易吸收培养料中的镉。

MDA含量是细胞膜脂过氧化的检验指标,间接表示细胞膜系统的受损害程度,其含量越高说明受到的伤害越重。正常情况下,生物体的MDA含量很低,但受到胁迫后,MDA的变化可以反映菌株的脂质过氧化程度,间接反映菌株的抗胁迫能力。董洪新等^[31]发现猪肚菇子实体未生长成熟前其子实体内SOD和CAT具有较高的活性氧清除能力,MDA含量水平较低。镉胁迫菌株4606幼菇期的MDA含量显著高于对照组幼菇期,这可能是因为菌株4606子实体生长发育前期还未形成完备的抗性系统,镉胁迫导致菌株4606胞内脂质过氧化损伤;镉胁迫下,菌株4606成熟期、开伞期的MDA含量以及菌株4625开伞期的MDA含量显著低于对照组相应生长发育阶段,这可能是后期胞内抗氧化系统被诱导,在一定程度上削弱了镉胁迫造成的细胞脂质过氧化^[32]。魏杰等^[33]在研究盐胁迫对西藏拟蚤MDA影响的过程中也发现高盐胁迫下的MDA含量均低于对照组,且随着盐胁迫浓度的升高,部分抗氧化酶活性增强,机体的渗透调节功能加强,从而可清除代谢过程中产生的自由基,进而减少机体氧化损伤。因此,我们推测本试验部分发育阶段MDA含量显著低于对照可能也是受到菌株内抗氧化酶系及渗透调节物质的影响。本试验发现镉胁迫处理后菌株4606不同发育阶段的MDA含量相比于对

照组先上升后显著降低,而镉胁迫处理后菌株4625原基期、生长期、成熟期的MDA含量未受到显著影响,但镉胁迫后开伞期MDA含量相比于对照组显著降低,且镉胁迫处理后菌株4625开伞期MDA含量($1.720\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$)的下降程度高于菌株4606($1.066\text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$),整体上,相比于菌株4606,镉胁迫处理对菌株4625氧化损伤的程度更低。结合菌株4625受到镉胁迫的产量性状来看,虽然镉胁迫下菌株4625开伞期MDA含量显著低于对照组,但菌株4625的农艺性状和产量受镉胁迫影响较大,这可能是由于生物体受到胁迫时会主动调整生长发育与胁迫适应之间的关系来应对胁迫^[34]。Carpenter等^[35]的研究发现部分生物在遇到某些逆境时会选择延迟或减少生殖生长,推测这可能是生物体内泛素化蛋白酶体失活,无法清除体内的错误折叠或变性蛋白而导致生育受阻造成的^[36]。

可溶性蛋白是重要的营养物质和渗透调节性物质,可对外界刺激迅速反应,是有机体合成代谢及分解的指示剂^[37]。本试验发现菌株4606的可溶性蛋白含量均随生长时间延长显著下降,这与王东明等^[38]的研究结果一致。宋鹏等^[39]发现镉胁迫条件下双孢蘑菇抗氧化酶和可溶性蛋白含量受镉胁迫时间的影响,菌株4606的代谢水平随生长发育时间的延长逐渐降低,菌株4625的可溶性蛋白含量随生长时间延长先显著升高后显著降低,可溶性蛋白作为研究酶活的重要指标,间接反映出菌株4625的总体代谢水平随生长时间延长先显著升高后显著降低,这也与MDA含量变化趋势相互印证。菌株4625在不同生长发育阶段的镉含量均远高于菌株4606,这可能是菌体中特定成分可溶性蛋白和协同抗氧化酶系的共同作用,增强了菌株对外源镉的耐受性^[40]。

4 结论

(1)两个不同镉耐受性香菇菌株受到镉胁迫后,其子实体农艺性状和产量都受到影响,但不同菌株受镉胁迫影响的农艺性状和受影响程度不同。

(2)两个不同镉耐受性香菇菌株不同生长发育阶段单位干质量子实体中镉含量均有随生长发育时间的延长显著降低的趋势。

(3)受到镉胁迫后菌株4606生长期丙二醛含量显著升高,成熟期显著下降,开伞期极显著降低;菌株4625受到镉胁迫后开伞期丙二醛含量显著降低,其余阶段未受到显著影响。

(4)菌株4606不同处理的可溶性蛋白含量均随生长时间延长显著降低,菌株4625不同处理的可溶性蛋白含量均随生长时间延长先显著升高后显著降低。

参考文献:

- [1] 陈洪雨, 鲍大鹏, 康前进, 等. 香菇挥发性风味物质的研究进展[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 105-114. CHEN H Y, BAO D P, KANG Q J, et al. Research progress of volatiles in *Lentinula edodes*[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2018, 25(4): 105-114.
- [2] MISHRA S, SRIVASTAVA S, TRIPATHI R D, et al. Phytochelatin synthesis and response of antioxidants during cadmium stress in *Bacopa monnieri* L.[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2006, 44(1): 25-37.
- [3] 汪纪仓, 朱华丽, 林霖, 等. 镉致大鼠血液、肝脏、肾脏和睾丸的毒性损伤[J]. 毒理学杂志, 2017, 31(1): 10-13. WANG J C, ZHU H L, LIN L, et al. Cadmium-induced toxicity damage in rats of the blood, liver, kidney and testicular by intraperitoneal injection[J]. *Journal of Toxicology*, 2017, 31(1): 10-13.
- [4] STIJVE T, ROSCHINC R. Mercury and methyl mercury content of different species of fungi[J]. *Mitt Geb Lebensmittelunters Hyg Bem*, 1974, 65: 209-220.
- [5] 余红英, 曹海军, 宋鹏, 等. 三种常见食用菌对重金属的耐受与富集研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2008, 45(5): 1263-1268. SHE H Y, CAO H Y, SONG P, et al. Investigation of heavy metal resistance and accumulation in three edible mushrooms[J]. *Journal of Sichuan University(Natural Science Edition)*, 2008, 45(5): 1263-1268.
- [6] 赵麒麟, 吴鹏, 刘鸿高, 等. 食用菌修复重金属污染土壤研究进展[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(2): 180-188. ZHAO Q M, WU P, LIU H G, et al. Research progress on remediation of soil heavy metal pollution by edible fungi[J]. *Journal of Southwest Forestry University(Natural Sciences)*, 2022, 42(2): 180-188.
- [7] TUZEN M. Determination of heavy metals in soil, mushroom and plant samples by atomic absorption spectrometry[J]. *Microchemical Journal*, 2003, 74(3): 289.
- [8] 李丽, 蒋景龙, 李晓晖, 等. 野生食用菌中矿物质和重金属研究概况[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 395-400. LI L, JIANG J L, JI X H, et al. A review of minerals and heavy metals in wild edible mushroom[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(16): 395-400.
- [9] 陈明杰, 宋盼盼, 赵妍, 等. 食用菌重金属污染及防控措施研究进展[J]. 分子植物育种, 2023, 21(5): 1733-1740. CHEN M J, SONG P P, ZHAO Y, et al. Research progress of heavy metal pollution in edible fungi and its prevention and control measures[J]. *Mol Plant Breed*, 2023, 21(5): 1733-1740.
- [10] YU H L, SHEN X F, CHEN H Y, et al. Analysis of heavy metal content in *Lentinula edodes* and the main influencing factors[J]. *Food Control*, 2021, 130: 108198.
- [11] 何旭孔, 白冰, 邢增涛, 等. 香菇对培养料中镉的富集作用研究[J]. 食品科学, 2013, 34(21): 183-187. HE X K, BAI B, XING Z T, et al. Accumulation of cadmium in *Lentinula edodes* from its compost[J]. *Food Science*, 2013, 34(21): 183-187.
- [12] 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.
- [13] 冯娜, 张劲松, 唐传红, 等. 不同生育期灵芝子实体水提物与其免疫活性[J]. 食用菌学报, 2010, 17(4): 52-57. FENG N, ZHANG J S, TANG C H, et al. Effect of aqueous extracts from *Ganoderma* fruit bodies harvested at different stages of development on nitric oxide production by RAW 264.7 cells[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2010, 17(4): 52-57.
- [14] 唐川, 吴迪, 杨焱, 等. 猴头菌不同发育阶段产生的多糖结构特征及免疫活性[J]. 菌物学报, 2016, 35(1): 68-76. TANG C, WU D, YANG Y, et al. Structural properties and immunological activities of polysaccharides from *Hericium erinaceus* fruiting bodies in different development stages[J]. *Mycosystema*, 2016, 35(1): 68-76.
- [15] 李巧珍, 刘朝贵, 于海龙, 等. 猴头菌不同生长发育期粗蛋白、粗多糖含量及水溶性粗多糖体外免疫活性[J]. 食用菌学报, 2011, 18(4): 73-77. LI Q Z, LIU C G, YU H L, et al. Protein, polysaccharide and β -glucan levels in *Hericium erinaceus* fruit bodies harvested at different development stages and the effect of extracted polysaccharide on NO production by RAW264.7 cells[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2011, 18(4): 73-77.
- [16] 王嘉铭, 雷于国, 胡国元, 等. 不同生育期香菇多糖、蛋白质积累规律及多糖抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 92-97. WANG J M, LEI Y G, HU G Y, et al. Dynamic accumulation of protein, polysaccharides and antioxidant of polysaccharides from *Lentinula edodes* fruiting bodies at different development stages[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(6): 92-97.
- [17] 陈静, 李巧珍, 章炉军, 等. 香菇不同发育阶段子实体多糖的理化性质及体外免疫活性研究[J]. 菌物学报, 2020, 39(8): 1559-1567. CHEN J, LI Q Z, ZHANG L J, et al. Physico-chemical properties and immunocompetence in vitro of polysaccharides of *Lentinula edodes* fruiting bodies at different growth stages[J]. *Mycosystema*, 2020, 39(8): 1559-1567.
- [18] FILEK M, KOSCIELNIAK J, LABANOWSKA M, et al. Selenium-induced protection of photosynthesis activity in rape (*Brassica napus*) seedlings subjected to cadmium stress. *Fluorescence and EPR measurements*[J]. *Photosynthesis Research*, 2010, 105(1): 27-37.
- [19] GUO Q, XU L, CHEN Y, et al. Structural characterization of corn silk polysaccharides and its effect in H₂O₂ induced oxidative damage in L6 skeletal muscle cells[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 208: 161-167.
- [20] YU H L, ZHANG L J, SHANG X D, et al. Chromosomal genome and population genetic analyses to reveal genetic architecture, breeding history and genes related to cadmium accumulation in *Lentinula edodes*[J]. *BMC Genomics*, 2022;23(1): 120.
- [21] YU H L, LI Q Z, SHEN X F, et al. Transcriptomic analysis of two *Lentinula edodes* genotypes with different cadmium accumulation ability[J]. *Front Microbiol*, 2020;11: 558104.
- [22] 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测

- 定:GB 5009.15—2014[S]. 北京:中国标准出版社, 2014. National Health and Family Planning Commission. National food safety standard for determination of cadmium in foods: GB 5009.15—2014[S]. Beijing: China Standard Press, 2014.
- [23] 张力. SPSS在生物统计中的应用[M]. 厦门:厦门大学出版社, 2008. ZHANG L. Application of SPSS in biostatistics[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2008.
- [24] 黄建成, 余应瑞, 应正河, 等. 姬松茸镉累积特性研究: II 镉胁迫对菌丝及子实体生长发育的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1): 78–81. HUANG J C, YU Y R, YING Z H, et al. Accumulation characteristic of cadmium in *Agaricus Blazei* Murrill II. Effects of Cd stress on growth and development of mycelium and fruit body[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 78–81.
- [25] 余婷婷, 吴映明, 生书晶, 等. $\text{Na}_2\text{Fe-EDTA}$ 对不同浓度 Cd^{2+} 胁迫平菇生长特性的影响[J]. 食用菌, 2019, 41(3): 13–15. SHE T T, WU Y M, SHENG S J, et al. Effect of $\text{Na}_2\text{Fe-EDTA}$ on growth characteristics of *Pleurotus ostreatus* under Cd^{2+} stress at different concentrations[J]. *Edible Fungi*, 2019, 41(3): 13–15.
- [26] 曲明清, 邢增涛, 程继红, 等. 培养料中重金属元素对杏鲍菇子实体产量和质量的影响[J]. 食用菌学报, 2006, 13(2): 53–56. QU M Q, XING Z T, CHENG J H, et al. Effects of heavy metal elements in culture materials on the yield and quality of *Pleurotus Eryngii* fruiting bodies[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2006, 13(2): 53–56.
- [27] 刘朋虎, 陈华, 李波, 等. 镉胁迫对姬松茸生长和镉吸收累积的影响[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 1015–1021. LIU P H, CHEN H, LI B, et al. Effect of cadmium stress on the growth and cadmium absorption of *Agaricus blazei* Murrill[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(3): 1015–1021.
- [28] 刘朋虎, 李波, 江枝和, 等. 镉对姬松茸农艺性状及矿物质元素吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(1): 58–63. LIU P H, LI B, JIANG Z H, et al. Effects of cadmium (Cd) in different concentrations on agronomic traits and mineral elements absorption of *Agaricus brasiliensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 58–63.
- [29] ALBERTO A C, ROCIO O B, FERNANDO M J. Age effect on the antioxidant activity of *Daphnia magna* (Anomopoda: Daphniidae): does younger mean more sensitivity?[J]. *J Environ Biol*, 2011, 32(4): 481–487.
- [30] 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: 1–49. WU Y. Preliminary research on cadmium accumulation rule and its control in *Lentinula edodes*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013: 1–49.
- [31] 董洪新, 程显好, 朱林, 等. 猪肚菇子实体发育过程中抗氧化酶活性的变化[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 469–472. DONG H X, CHENG X H, ZHU L, et al. Change of antioxidant enzyme activities in fruit body development process of *Panus giganteus*[J]. *Food Science*, 2010, 31(24): 469–472.
- [32] 徐鸿雁, 谢占玲, 孟清, 等. 镉胁迫小海绵羊肚菌氧化损伤及其抗氧化防御[J]. 菌物学报, 2022, 41(4): 668–679. XU H Y, XIE Z L, MENG Q, et al. Oxidative damage and antioxidant defenses of *Morchella spongiosa* in response to Cd stress[J]. *Mycosystema*, 2022, 41(4): 668–679.
- [33] 魏杰, 班艳丽, 王媛, 等. 环境胁迫对西藏拟溱SOD、CAT活性和MDA含量的影响[J]. 生物化学杂志, 2017, 34(3): 42–46. WEI J, BAN Y L, WANG Y, et al. Effects of environmental stress on activity of SOD, CAT and MDA content in *Daphniopsis Tibetana* Sars[J]. *Journal of Biology*, 2017, 34(3): 42–46.
- [34] WANG Q, YU F, XIE Q. Balancing growth and adaptation to stress: crosstalk between brassinosteroid and abscisic acid signaling[J]. *Plant Cell Environ*, 2020, 43(10): 2325–2335.
- [35] CARPENTER D J, MATHIASSEN S K, BOUTIN C, et al. Effects of herbicides on flowering[J]. *Environ Toxicol Chem*, 2020, 39(6): 1244–1256.
- [36] KARMOUS I, CHAOUI A, JAOUANI K, et al. Role of the ubiquitin-proteasome pathway and some peptidases during seed germination and copper stress in bean cotyledons[J]. *Plant Physiol Biochem*, 2014, 76: 77–85.
- [37] SINGH P K, TEWARI R K. Cadmium toxicity induced changes in plant water relations and oxidative metabolism of *Brassica juncea* L. plants[J]. *J Environ Biol*, 2003, 24(1): 107–112.
- [38] 王东明, 应俊辉, 傅兵. 香菇子实体生长发育过程中形态特征与生理特性研究[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(4): 734–737. WANG D M, YING J H, FU B. Study on morphological and physiological characteristics during the development of *Lentinula edodes* fruit body[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2012, 51(4): 734–737.
- [39] 宋鹏, 唐敦义, 邓家玉, 等. 重金属对双孢菇菌丝合成巯基化合物和抗氧化酶的影响[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2010, 47(6): 1407–1412. SONG P, TANG D Y, DENG J Y, et al. Effects of heavy metals on production of thiol compounds and antioxidant enzymes in *Agaricus bisporus*[J]. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2010, 47(6): 1407–1412.
- [40] 李金城, 鲍长俊, 孙云, 等. 美味牛肝菌(*Boletus edulis*)对镉(II)的生物富集特性研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 68–71. LI J C, BAO C J, SUN Y, et al. Bioconcentration characteristics of cadmium (II) by *Boletus edulis*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(23): 68–71.