

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

引用本文:

刘朋虎, 陈华, 李波, 等. 镉胁迫对姬松茸菌丝生理指标与镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1675–1682.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0469>

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>

生菜对镉胁迫的生理响应及体内镉的累积分布

贾月慧, 韩莹琰, 刘杰, 高凡, 梁琼, 俞萍, 刘超杰, 张鑫, 苏博伟

农业环境科学学报. 2018, 37(8): 1610–1618 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0033>

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>

镉胁迫下硅对水稻幼苗生长与生理响应的影响

李天哲, 陈爱婷, 李彩, 杨丹, 何娜, 刘鸣达

农业环境科学学报. 2018, 37(6): 1072–1078 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1526>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘朋虎, 陈华, 李波, 等. 镉胁迫对姬松茸菌丝生理指标与镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1675–1682.

LIU Peng-hu, CHEN Hua, LI Bo, et al. Effects of cadmium stress on mycelium physiological indexes and cadmium absorption in *Agaricus brasiliensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1675–1682.



开放科学 OSID

镉胁迫对姬松茸菌丝生理指标与镉吸收的影响

刘朋虎^{1,3}, 陈华^{2,3}, 李波³, 王义祥^{2,3*}, 翁伯琦^{2,3}

(1. 福建农林大学国家菌草工程技术研究中心, 福州 350002; 2. 福建省农业科学院农业生态研究所, 福州 350013; 3. 福建省红壤山地农业生态过程重点实验室, 福州 350003)

摘要: 为了比较镉胁迫对不同姬松茸菌株(J1、J77)菌丝生长与镉吸收的影响,通过室内培育试验,设立0~75 mg·kg⁻¹的不同镉胁迫浓度梯度,测定其对姬松茸菌丝生理指标与镉含量的影响。结果显示,不同镉浓度胁迫处理对J77和J1菌丝抗氧化系统的影响各异。当镉浓度为5 mg·L⁻¹时,J1与J77菌丝SOD酶活性分别增加121.5%、157.5%;当镉浓度高于5 mg·L⁻¹时,两个菌株菌丝SOD酶活性均开始降低。在10~75 mg·L⁻¹中高镉浓度胁迫范围,J77、J1菌丝的POD酶活性分别减少92.7%、95.3%。在5~50 mg·L⁻¹镉浓度胁迫范围,J77、J1菌丝的CAT酶活性分别减少40.9%、60.4%,随着镉胁迫浓度增加,J1的镉毒害更为严重。在0~2 mg·L⁻¹镉浓度范围内,J1与J77菌丝的APX酶活性分别增加7.9、13倍,两菌株相差近5倍,J77菌丝APX酶活性反应大于J1菌丝。不同浓度镉胁迫处理条件下(0~75 mg·L⁻¹),J1菌丝丙二醛(MDA)显示了较大幅度的提升,氧化程度比较剧烈,而J77在整个过程则提升幅度较缓,氧化应激程度相对较低。当镉胁迫浓度为10 mg·L⁻¹时,J1菌丝MDA含量比对照高1.6倍并达到最大值;当镉浓度为15 mg·L⁻¹时,J77菌丝MDA含量比对照高60%并达到最大值,J1、J77的MDA最大值相差近1倍,J1菌丝细胞膜过氧化反应比J77更为强烈。在0~75 mg·L⁻¹浓度范围内,J77与J1菌丝中镉含量的浓度均随着外源镉含量的提高而增加。当镉浓度在2.5~50 mg·L⁻¹范围内,J1、J77菌丝镉含量分别增长了17.2、19.1倍;但就镉吸收累积量而言,J1菌丝比J77菌丝镉含量高近2.3倍;J77不仅对高镉胁迫的耐受程度高于J1,而且J77抵制镉吸收能力高于J1。结果表明,姬松茸J1和J77菌丝SOD、POD、CAT、APX酶活性及MDA含量随镉含量变化均表现为“低促高抑”的现象,J77菌丝镉含量低于J1,J77具有抵制镉吸收的潜力。

关键词: 镉胁迫;姬松茸;菌丝;生理生化;镉吸收

中图分类号: X171.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2020)08-1675-08 doi:10.11654/jaes.2020-0469

Effects of cadmium stress on mycelium physiological indexes and cadmium absorption in *Agaricus brasiliensis*

LIU Peng-hu^{1,3}, CHEN Hua^{2,3}, LI Bo³, WANG Yi-xiang^{2,3*}, WENG Bo-qi^{2,3}

(1. National Engineering Research Center of Juncao Technology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Agricultural Ecology Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 3. Fujian Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Red Soil Hilly Region, Fuzhou 350003, China)

Abstract: To compare the effects of cadmium (Cd) stress on mycelia growth and Cd absorption of *Agaricus brasiliensis* strains J77 and J1, Cd was added to *A. brasiliensis* culture medium at concentrations ranging from 0 to 75 mg·L⁻¹, and the physiological indexes and Cd content

收稿日期: 2020-04-24 录用日期: 2020-07-15

作者简介: 刘朋虎(1982—),男,山东人,博士,副研究员,研究方向为食用菌育种与循环农业技术。E-mail: phliu1982@163.com

*通信作者: 王义祥 E-mail: sd_wolong@163.com

基金项目: 福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2019138S);福建省农业科学院科技创新团队建设项目(STIT2017-3-9);中央引导地方科技发展专项(2019L3012);福建省菌草生态产业协同创新中心攻关课题(JCXTGG16)

Project supported: The Special Fund for Science and Technology Innovation of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2019138S); Science and Technology Innovation Team Construction Project of Fujian Academy of Agricultural Sciences (STIT2017-3-9); Special Program for Science and Technology Development of Fujian Province from the Ministry of Science and Technology of China (2019L3012); Tackling Key Subject of Collaborative innovation center for Juncao Technology of Fujian Province (JCXTGG16)

of the mycelia were measured. The results showed that the effects of Cd stress on the J77 and J1 mycelia antioxidant systems were different. As the Cd concentration (i.e., stress) increased, the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX), and malondialdehyde (MDA) in the mycelia increased then decreased in both strains. At Cd concentrations greater than $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the SOD and POD activities of both strains decreased. POD activity of J77 and J1 mycelia decreased by 92.7% and 95.3%, respectively. When the Cd concentration was between 5 and $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, CAT activity in J77 and J1 decreased by 40.9% and 60.4%, respectively, indicating greater sensitivity to Cd during J1 growth. When the Cd concentration was between 0 and $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, APX activity increased in both strains as the concentration increased; J77 was 13 times higher, and J1 was 7.9 times higher. The J77 APX activity increase was nearly 5 times greater than J1. Under the same treatment conditions (0 to $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd), the MDA content in the mycelia was higher in J1 than J77. In addition, a rapid increase of MDA and severe oxidation were observed in the J1 strain, while opposite patterns were observed in J77. The mycelia MDA content peaked at $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd in J77 (60% higher than that of the control) and at $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd in J1 (1.6 times higher than that of the control). These differences indicated that the cell membrane peroxidation of J1 mycelia was more severe. The Cd concentration in the mycelia increased with increasing environmental Cd (0 to $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) in both strains. When the environmental Cd concentrations were between 2.5 and $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the Cd in J1 and J77 mycelia increased by 17.2 and 19.1 times, respectively. The Cd growth rate in the J77 mycelia was higher than J1, but the overall Cd content of the J1 mycelia was nearly 2.3 times higher. These results show that J77 has a higher tolerance to Cd stress and greater resistance to Cd absorption than J1. As the Cd content of the J77 and J1 strains increased, the SOD, POD, CAT, and APX enzyme activities, and MDA content increased then decreased. The Cd content in the J77 mycelia was lower than J1, indicating that J77 has low cadmium absorption potential.

Keywords: cadmium stress; *Agaricus brasiliensis*; hyphae; physiological biochemistry; cadmium absorption

姬松茸 (*Agaricus brasiliensis*) 是食用菌生产的主要品种之一, 由于其具有丰富的营养与特殊的风味, 深受城乡消费者的喜爱。但是大多数姬松茸品种对镉比较敏感, 在姬松茸生产栽培过程常有镉吸收与累积量超标现象。近年来, 镉对食用菌生长的影响及防控技术研究成为研究热点, 而不同食用菌品种对栽培基质中的镉响应各异^[1-2]。一方面与品种的内在特性有关, 例如红平菇耐受与富集镉的能力比较强, 其不仅在培养料镉浓度相对较低 ($1 \sim 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 状态下对镉有很强的富集能力, 而且可以维持一定的产量; 另一方面与不同品种镉吸收及代谢能力有关, 当栽培原料中镉含量为 $20 \sim 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 随着栽培基质中镉含量的增加, 红平菇子实体中镉富集量虽呈逐步提高的趋势, 但增幅比较小^[3-4]。有研究表明, 双孢蘑菇镉胁迫对菌丝体生长会产生先激发后抑制现象, 其菌丝体中的 SOD、POD 和 CAT 3 种酶活性呈现了“低促高抑”的变化动态^[5], 通过改变其体内重要生物酶活性而影响菌丝体后续生长。有研究表明, 食用菌生长过程对镉的富集作用有 2 个主要途径, 即吸收与吸附^[6-7]。红平菇子实体细胞壁上存在的巯基、羧基、羟基等活性基团, 进而可以通过共价、静电或分子力的吸附作用, 将镉吸附在子实体表面。依靠生物吸附作用累积的镉比较容易解脱, 然而镉一旦通过吸收而进入子实体细胞质中, 会有部分镉离子与氨基酸、金属硫蛋白等结合, 生成没有毒害作用的有机基团物质, 很大程度上降低镉累积造成的毒害作用, 这一过程可

以通过抗氧化酶的变化予以判断^[2]。镉胁迫对紫苏^[8]、小白菜^[9]、水稻^[10]及花生^[11]生长及体内的抗氧化酶活性均会产生影响, 可以因地制宜采取不同技术措施来防控镉毒害, 并取得了一定的研究进展。有研究表明, 不同食用菌的生理特性会影响其对重金属的吸收, 包括菌株组织结构、生物化学成分、基质活性分解、菌丝体的生长等^[2]。Malinowska 等^[12]研究表明, 菌株的生理特性是影响食用菌对镉富集作用的决定性因素。姬松茸对镉敏感并容易引发镉吸收累积, 其机制与吸收过程中菌体抗氧化酶的响应内在关系与变化规律, 是构建科学诊断方法的重要依据。故本研究利用项目组通过辐射诱变成功选育的低镉姬松茸品种 J77 及对照品种 J1 作为试验材料, 探讨不同浓度镉胁迫对 2 个姬松茸品种菌丝 SOD、POD、CAT 及 APX 酶活性、丙二醛含量及镉吸收累积的影响, 阐明其响应动态趋势与内在变化规律, 旨在为姬松茸前期生产栽培过程中防控镉污染和镉超标提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种与菌种制备

选择 J1 与 J77 号作为姬松茸供试菌种^[13], 由福建省农业科学院项目组提供。2 个姬松茸品种培养基配方为 10 mg 维生素 B₁、0.5 g 硫酸镁、2 g 磷酸二氢钾、20 g 蔗糖、20 g 琼脂粉、230 g 马铃薯、1 000 mL 蒸馏水, pH 自然。28 °C 下试管培养至菌丝长满整个斜面, 用于后期接种。

1.2 试验设计

试验设 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (CK)、低中镉浓度 (0.5 、 1 、 1.5 、 2 、 2.5 、 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和高镉浓度 (10 、 15 、 20 、 25 、 50 、 $75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); 将含镉母液配制好备用, 按试验设计将不同浓度镉溶液加入培养液中, 每个处理设 20 个重复, 2 个菌株共设 $2 \times 13 \times 20 = 520$ 瓶, 进行分区排列。

1.3 菌丝培养

菌丝锥形瓶培养: 培养基同试管培养(但不加琼脂), 将液体培养基与镉母液 ($1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) 混合配制成为含不同镉浓度的培养基, 置于锥形瓶中, pH 自然; 在 250 mL 的锥形瓶中分装 50 mL 的液体量, 用封口膜将瓶口封好, 置于常规高压锅中灭菌 30 min, 然后在超净台上按照无菌操作接种, 将均匀等分的斜面琼脂块接种于锥形瓶中, 分区排列在培养室平台架子上并调控室内温度, 保持在 28°C 环境下静置培养 30 d, 之后逐一过滤菌丝, 分别称取菌丝鲜质量进行记录与分析, 鲜菌丝冷藏备用。

1.4 酶活测定

称取鲜菌丝 0.5 g 并放入 5 mL 离心管中, 用高通量组织研磨器研磨 10 min 后将离心管取出, 缓慢加入 5 mL 磷酸缓冲液 (pH 7.0), 置于离心机中。在 4°C 、 $15\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心时间 15 min, 抽取上清液待测备用。粗酶液中的过氧化氢酶 (CAT)、抗坏血酸过氧化物酶 (APX)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 酶活性与丙二醛 (MDA) 含量测定, 参照李波^[14]的方法进行。

1.5 菌丝镉含量测定

鲜菌丝在 60°C 烘干至恒质量, 然后准确称取 0.2 g 进行微波消解, 消解液中镉含量采用火焰原子吸收仪测定^[15]。

1.6 数据处理

采用 SPSS 19.0 数据处理软件对试验数据进行差异显著性分析和相关性分析, 数据均为 3 个重复的平均值 $\pm$ 标准偏差。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫对姬松茸菌丝生长过程中抗氧化酶活性的影响

2.1.1 不同浓度镉胁迫对 J77 与 J1 菌丝 SOD 酶活性的影响

图 1 显示, 在菌丝生长过程中, 不同镉胁迫浓度条件下对 SOD 酶活性影响各异。整体而言, J1 菌丝 SOD 酶活性比 J77 要高。镉浓度处于中低水平 ($0 \sim 5$

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, J1 与 J77 菌丝的 SOD 酶活性随着外界镉胁迫浓度的增加而提高。与 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理 (对照) 相比, 当外源添加镉的浓度达到 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, J1 与 J77 菌丝的 SOD 酶活性均出现最大值; J1 菌丝 SOD 酶活性增加 121.5%; J77 菌丝 SOD 酶活性增加 157.5%, 差异均达显著水平 ($P < 0.05$); J77 菌丝 SOD 酶活性增加率比 J1 高, 说明 J77 菌丝 SOD 酶活性反应能力大于 J1。当镉浓度 $> 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 两个菌株菌丝 SOD 酶活性均开始下降。镉浓度处于中高水平 ($5 \sim 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, J1 菌丝 SOD 酶活性降低 68.5%; J77 菌丝 SOD 酶活性降低 70.1%, 差异达显著水平 ($P < 0.05$); 两个菌株差异不大。当镉浓度达到 50 、 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 两个菌株菌丝 SOD 酶活性与对照组相比分别降低了 3.5%、12.7%, 但两品种之间的差异不显著。

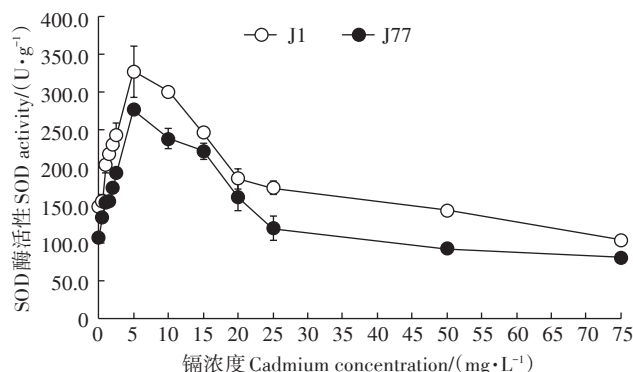


图1 不同镉胁迫处理对J1和J77菌丝SOD酶活性的影响

Figure 1 Effect of different cadmium concentrations on SOD activity of J1 and J77 mycelia

2.1.2 不同浓度镉胁迫对J77与J1菌丝POD酶活性的影响

图 2 表明, 在低镉浓度胁迫处理 ($0 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, J1 与 J77 菌丝的 POD 酶活性基本相近, 两品种之间差异不显著; 在中镉浓度处理 ($2.5 \sim 15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 下, J1 菌丝的 POD 酶活性比 J77 高, 且两菌株菌丝 POD 酶活性随着外界镉胁迫浓度的提高而增加。当镉浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, J1 菌丝 POD 酶活性达到最大值, 与对照的差异达显著水平 ($P < 0.05$); 当镉浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, J77 菌丝 POD 酶活性达到最大值, 与对照差异达显著水平 ($P < 0.05$)。在中高镉浓度胁迫处理 ($10 \sim 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 范围内, J1 与 J77 菌丝的 POD 酶活性都开始降低; J77 菌丝 POD 酶活性比对照减少了 92.7%, 差异达显著水平; J1 菌丝 POD 酶活性比对照减少了 95.3%, 差异达显著水平。J1 虽然比 J77 略高, 但两者

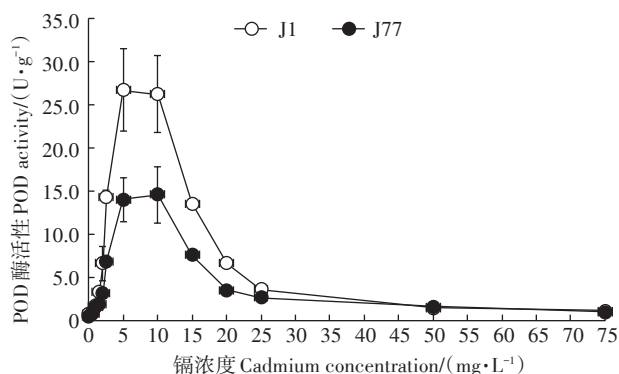


图2 不同浓度镉胁迫对J1和J77菌丝POD酶活性的影响

Figure 2 Effect of different cadmium concentrations on POD activity of J77 and J1 mycelia

差异不显著。从菌丝生长过程可以观察到,当外源镉浓度超过 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,J1 菌丝受到的镉毒害程度比 J77 菌丝更为严重;当外源镉浓度为 $50 \sim 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,J1 与 J77 菌丝的 POD 酶活性均达到最小值,且 J1 的数值更低。

2.1.3 不同浓度镉胁迫对 J77 与 J1 菌丝 CAT 酶活性的影响

图3显示,J77 菌丝 CAT 酶活性整体比 J1 高。在低浓度镉胁迫处理 ($0.5 \sim 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下,J1 与 J77 菌丝的 CAT 酶活性呈现逐步升高状态,两品种变化相近,差异性不显著。在中浓度镉胁迫处理 ($2.5 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 条件下,J77 菌丝 CAT 酶活性则随着外源添加镉浓度的提高而增加,并达到最大值,之后开始逐步下降;同期 J1 菌丝 CAT 酶活性在 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时开始上升,到 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大值,之后开始下降;与对照处理 ($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 相比,在 $0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉浓度范围内,J77 菌丝 CAT 酶活性增加 359.7% ,差异性显著;J1

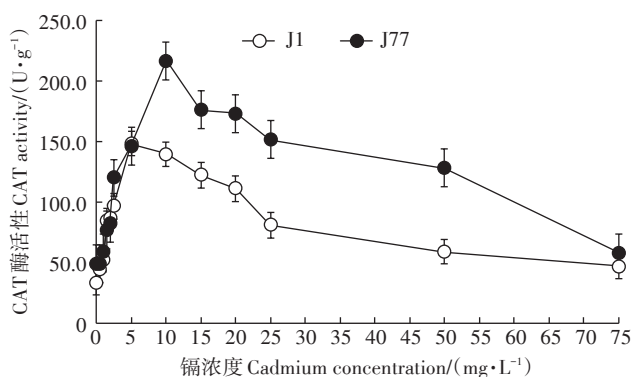


图3 不同浓度镉胁迫对J1和J77菌丝CAT酶活性的影响

Figure 3 Effect of different cadmium concentrations on CAT activity of J77 and J1 mycelia

菌丝 CAT 酶活性增加 343.1% ,也呈现显著差异;但 J77 增幅与 J1 增幅相差较小。在 $10 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉胁迫浓度范围内,J77 菌丝 CAT 酶活性减少 40.9% ,J1 菌丝 CAT 酶活性减少 60.4% ,两菌株相差 19.5% ,具有显著差异性 ($P < 0.05$),说明随着镉胁迫浓度提高对 J1 菌丝的毒害程度加剧,CAT 酶活性降低幅度更大。当镉浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,J77 与 J1 菌丝的 CAT 酶活性都降到最低。

2.1.4 不同浓度镉胁迫对 J77 与 J1 菌丝 APX 酶活性的影响

图4表明,在低镉胁迫浓度 ($0 \sim 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 范围内,J1 与 J77 菌丝的酶活性均随着外界镉胁迫浓度的提高而增加,而且 J1 菌丝的 APX 酶活性比 J77 菌丝高。与 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (对照) 处理相比,当镉胁迫浓度分别为 $1.5, 2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,J1、J77 菌丝的 APX 酶活性分别达到最大值;其中 J1、J77 菌丝 APX 酶活性分别增加近 $7.9, 13$ 倍,两菌株之间呈显著差异性;之后两个品种均逐渐降低。在菌丝生长过程中观察到 J77 的菌丝状况优于 J1,说明其 APX 酶活性反应能力大于 J1。在 $2 \sim 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉浓度范围内,J1、J77 菌丝的 APX 酶活性降幅分别为 $74.1\%, 73.1\%$,两品种之间差异不显著 ($P < 0.05$);当镉浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,J1、J77 菌丝的 APX 酶活性均达到最低点。

2.2 不同浓度镉胁迫对 J77 与 J1 菌丝丙二醛含量的影响

由图5可知,在不同浓度镉胁迫处理条件下 ($0 \sim 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),J1 菌丝丙二醛(MDA,膜脂过氧化指标,氧化应激的标志物)含量整体比 J77 菌丝高;而且 J1 显示了较大幅度的提升,氧化程度比较剧烈,而 J77 在整个过程中提升幅度比较缓慢,氧化应激程度比较低。在低中浓度镉胁迫 ($0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理范围内,J1

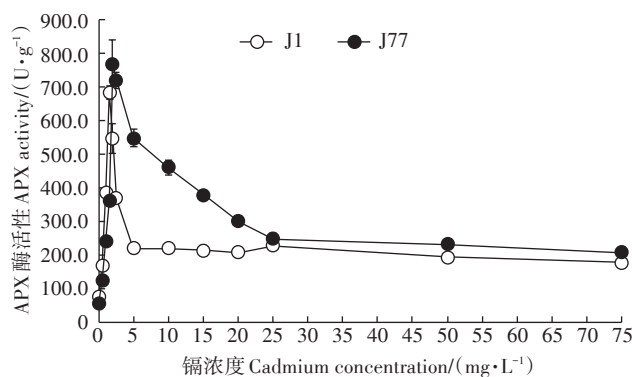


图4 不同浓度镉胁迫对J77和J1菌丝APX酶活性的影响

Figure 4 Effect of different cadmium concentrations on APX activity of J77 and J1 mycelia

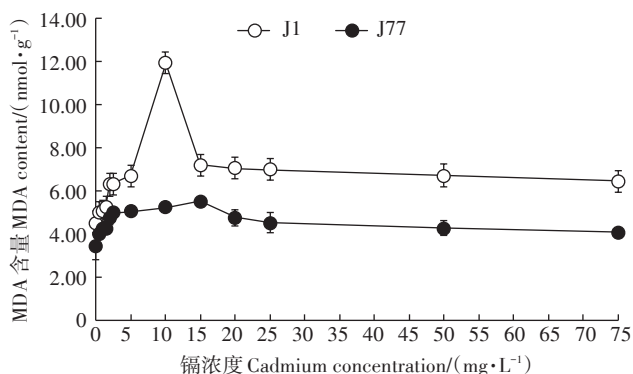


图5 不同浓度镉胁迫对J77和J1菌丝MDA含量的影响

Figure 5 Effect of different cadmium concentrations on MDA content of J77 and J1 mycelia

与J77菌丝的MDA活性则随着镉胁迫浓度的提高而增加。J1菌丝在镉胁迫浓度达 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其MDA含量比对照提高161%,达到最大值且达到差异显著水平($P < 0.05$);J77菌丝在镉胁迫浓度达 $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,MDA含量达到 $6.0 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1}$ (最大值),且比对照提高62.2%,达显著性差异水平($P < 0.05$)。J1与J77之间相差较大,表明J1菌丝细胞膜过氧化反应比J77更强烈。在中高镉胁迫浓度($15 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)条件之下,J1、J77菌丝的MDA含量分别减少46.1%、26.4%,两品种之间差异显著($P < 0.05$)。当镉浓度为 $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,J1与J77菌丝的MDA含量都降到最低;但外源镉浓度与2个菌株菌丝的丙二醛含量之间均无显著相关性。

2.3 不同浓度镉胁迫对姬松茸菌丝镉含量的影响

不同浓度镉胁迫处理对J77和J1菌丝中镉含量

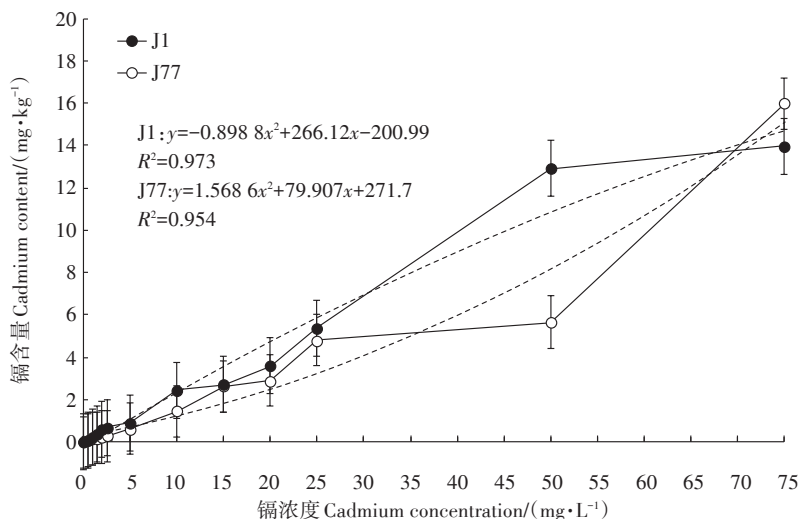


图6 不同浓度镉胁迫对J77和J1菌丝镉含量的影响

Figure 6 Effect of different cadmium concentrations on cadmium content of J77 and J1 mycelium

的影响结果见图6。由图6可知,在 $0 \sim 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内,J77与J1菌丝中镉含量的浓度均随着外界镉含量的提高而增加。当镉浓度在 $0 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,J77菌丝镉含量增长近93倍,而J1菌丝镉含量增长近117倍;两者差异显著($P < 0.05$)。当镉浓度达到 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,J1菌丝镉含量比J77菌丝高近2.5倍。说明在此浓度范围内,J1菌丝的镉吸收富集量高于J77菌丝。当镉浓度在 $2.5 \sim 50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,J1菌丝镉含量增长了17.2倍,J77菌丝镉含量增长了19.1倍;即J77菌丝镉增长率高于J1菌丝,但J1菌丝比J77菌丝镉含量高近2.3倍。当镉浓度在 $50 \sim 75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,J77、J1菌丝镉含量的增长率分别为77.8%、8.27%,但J1依然比J77菌丝镉含量高 $3895.8 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,这说明即使在高镉浓度胁迫条件下,J77不仅耐受程度高于J1,且抵制镉吸收能力也高于J1。将外源镉浓度与两个菌株菌丝镉含量进行相关性分析,结果表明,外源镉浓度与J77、J1菌丝镉含量均呈极显著正相关,相关系数分别为0.971和0.972($P < 0.01$),且J1菌丝镉含量与外源镉浓度之间相关性高于J77菌丝。由相关系数可知,随着外源镉浓度的不断增加,J77和J1菌丝镉含量的增长速率都会显著增加;但J1菌丝镉含量的增长量明显高于J77菌丝。两菌株镉含量的变化符合回归方程 $y = -0.8988x^2 + 266.12x - 200.99$ ($R^2 = 0.973$)和 $y = 1.5686x^2 + 79.907x + 271.7$ ($R^2 = 0.954$)。

3 讨论

已有研究表明,植物细胞中存在着由超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、

抗坏血酸过氧化物酶(APX)等组成的抗氧化酶系统,抗氧化酶系统的综合作用是调节并防止细胞受到外界环境因子的不利胁迫而被氧化^[16]。其中超氧化物歧化酶(SOD)可将 $O_2^{\cdot-}$ 转化为 H_2O_2 ,而过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)可以通过相关生理生化反应将 H_2O_2 清除^[17]。如果POD、CAT、APX无法及时清理SOD所产生的 H_2O_2 ,那么细胞中累积的 H_2O_2 将会继续与 $O_2^{\cdot-}$ 反应而产生 $OH^{\cdot}$,进而进一步加剧细胞氧化^[18]。本试验结果显示,不同镉胁迫处理对J77和J1菌丝抗氧化系统的影响各异,其总体变化趋势是:无论是J1还是J77姬松茸品种,随着镉胁迫浓度的提高,在菌丝生长过程中其SOD、POD、CAT、APX酶活性及MDA含量均呈现先上升后下降的变化动态,与前人进行水稻苗等作物试验结果相近,存在“低促高抑”现象^[19]。

SOD是生物机体内天然存在的超氧自由基清除因子,SOD产生与主要作用是把有害的超氧自由基转化为过氧化氢^[20]。虽然过氧化氢会对机体发育产生不利的影响,但生物体内活性极强的过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)会将其分解为完全无害的水^[21]。这3种酶组成了一个完整的抗氧化链条。本试验将J77、J1菌丝的SOD、POD、CAT、APX酶活性与外源镉浓度进行相关性分析,结果显示,J1、J77菌丝的4种酶活性中只有SOD酶活性与外源镉胁迫浓度之间呈极显著负相关,其相关系数分别为-0.526和-0.553($P<0.01$),J1菌丝的SOD酶活性与外源镉胁迫浓度间的相关性大于J77,但J77与J1菌丝SOD酶活性都受到较为明显的抑制作用;POD、CAT、APX酶活性与外源镉胁迫浓度之间相关性并不显著,但J77菌丝POD、CAT、APX酶活性受到镉的抑制程度相对小于J1,这与其他作物试验结果有相似之处,即抗氧化链条的各个要素之间是相互制约的。按照SOD中金属辅基的不同,大致可将SOD分为3大类,分别为Mn-SOD、Cu/Zn-SOD、Fe-SOD^[22]。在镉胁迫程度逐步加大的条件之下,是否产生镉替代的现象,或者由于产生镉毒害而破坏完整的抗氧化链条,进而在镉胁迫过程中发生SOD的失活,这是食用菌生理生化指标体系构建与深入研究需探讨的新命题^[23]。在食用菌生长的重金属毒理学研究方面,除了关注SOD之外,同时测定CAT、POD、APX指标变化也是重要环节,但作为诊断与判别指标,还需要筛选关键因子,实现测定一个指标即可了解食用菌菌丝或者子实体抗氧化链条(系统)健康状况,进而进行必要的修复与防

控,这仍需要深入的研究^[24]。

生物适应逆境胁迫的重要机制之一就是有效清除活性氧,而生物体内的SOD、POD、CAT和APX是活性氧自由基清除系统中关键的系列保护酶^[25]。生物体内镉过量富集会诱发活性氧的积累,通常会直接或者间接破坏抗氧化酶和抗氧化剂功能,其抗氧化酶活性的提高有助于生物细胞免受镉毒害^[26]。在本试验的镉胁迫条件下,J1、J77品种特征不同,但两个品种菌丝的SOD、POD、CAT和APX活性变化规律基本一致,呈先升高后降低趋势,这或许是姬松茸同其他作物品种一样,其SOD、POD、CAT和APX活性存在一个镉胁迫浓度的阈值,对低镉浓度的应激产生的保护作用降低了膜脂过氧化反应;但随着镉浓度的升高,打破了体内活性氧产生和清除的动态平衡,过量镉引起的姬松茸菌丝体内过氧化物不断积累,不断加剧氧化损伤程度,菌丝活性与生长量逐步减少。J1和J77的镉胁迫浓度阈值在SOD活性方面表现基本一致,但镉胁迫对J1 POD、CAT和APX活性影响的阈值低于J77。整体而言,J1对镉胁迫的抗性低于J77。在整个镉胁迫过程中,由于J1本身的抗镉胁迫能力较弱,所以为维持正常的生物代谢过程,受镉胁迫后需维持较高的抗氧化酶活性。此外,对于J77,在镉的含量 $2.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理下,SOD、CAT、APX等的活性均出现一定程度的拐点,其具体原因仍有待进一步探索。今后还需要深入探索不同镉胁迫程度对不同品种食用菌菌丝或者子实体吸收累积镉动力学过程的变化规律,包括镉吸收的增长率与累积量之间的内在关系,或者以丙二醛(MDA)作为诊断评估指标,阐明其直接与间接的机制,为有效的镉污染防控措施提供技术依据。

4 结论

(1)不同浓度镉胁迫处理对J77和J1菌丝抗氧化系统的影响各异。就总体变化规律而言,随着镉胁迫浓度的增加,J1、J77姬松茸菌株菌丝SOD、POD、CAT、APX酶活性及MDA含量均呈现先上升后下降的变化趋势。

(2)就J1与J77菌丝SOD酶活性、POD酶活性而言,镉胁迫浓度敏感值为 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而J1与J77菌丝CAT酶活性耐受范围相对较宽,在 $5\sim 50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉浓度范围内,依然保持40%、60%的活性。在不同镉胁迫处理条件下($0\sim 75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),J1菌丝丙二醛含量均高于J77菌丝,且J1显示了较大幅度的提升,氧化程度比较剧烈;而J77的提升幅度比较平缓,表明J1的

细胞膜过氧化反应比J77菌丝更为严重。

(3)在0~50 mg·L⁻¹浓度范围内,J77与J1菌丝中镉含量的浓度均随着外源镉含量的增加而增加,但J1菌丝镉累积量比J77高2.3倍。当镉浓度大于50 mg·L⁻¹时,J77、J1菌丝镉含量的增长率分别为77.8%、8.27%,但J77镉含量低于J1,表明J77具有抵制镉吸收的潜力。

参考文献:

- [1] 王松华, 张华, 傅曼琴, 等. 柱状田头菇菌丝对镉胁迫的抗氧化响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1813-1818.
WANG Song-hua, ZHANG Hua, FU Man-qin, et al. Anti-oxidative responses of *Agrocybe aegerita* mycelia to cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1813-1818.
- [2] 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): 209-218.
LIU Peng-hu, LAI Rui-lian, CHEN Hua, et al. Effects of Cd on edible fungi growth and Cd pollution prevention and control techniques in mushroom production[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2019, 28(2): 209-218.
- [3] 霍存录, 商圆圆, 竹文坤, 等. 红平菇(*Pleurotus djamor*)的镉耐性及其对镉去除能力的研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5): 92-97.
HUO Cun-lu, SHANG Yuan-yuan, ZHU Wen-kun, et al. Tolerance and removal ability of *Pleurotus djamor* on cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5): 92-97.
- [4] 谢福泉, 黎志银, 陈仁财, 等. 4种重金属元素在茶树菇栽培过程中的迁移特性研究[J]. 福建农业学报, 2015, 30(3): 303-306.
XIE Fu-quan, LI Zhi-yin, CHEN Ren-cai, et al. Migration of four heavy metals in *Agrocybe cylindracea* cultivation[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 30(3): 303-306.
- [5] 李艳艳, 李维琳, 边银丙. 湖北省双孢蘑菇子实体中重金属铅镉含量及来源分析[J]. 菌物学报, 2011, 30(4): 624-629.
LI Yan-yan, LI Wei-lin, BIAN Yin-bing. Lead and cadmium contents and their pollution sources in *Agaricus bisporus* fruiting body in Hubei Province[J]. *Mycosystema*, 2011, 30(4): 624-629.
- [6] 季旭颖, 江洁. 食用菌中Pb²⁺和Cd²⁺的含量测定及对其富集规律的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(18): 53-56.
JI Xu-ying, JIANG Jie. Study on edible fungi in the determination of the content of Pb²⁺ and Cd²⁺ and the enrichment regularity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(18): 53-56.
- [7] 刘朋虎, 李波, 江枝和, 等. 姬松茸菌株J1与J77镉富集差异及生长响应机制[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 863-868.
LIU Peng-hu, LI Bo, JIANG Zhi-he, et al. Comparison and physiological mechanisms of cadmium (Cd) accumulation by strain J1 and mutant J77 of *Agaricus brasiliensis*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 863-868.
- [8] 谢惠玲, 陈爱萍, 张凤英, 等. 紫苏对不同浓度镉胁迫的生理响应[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 192-195.
XIE Hui-ling, CHEN Ai-ping, ZHANG Feng-ying, et al. Physiological response of *Perilla frutescens* (L.) Britt. to cadmium stress at different concentrations[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(3): 192-195.
- [9] 王义祥, 赖永翔, 叶菁, 等. 生物炭对不同镉污染土壤钝化效果和小白菜镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(3): 713-718.
WANG Yi-xiang, LAI Yong-xiang, YE Jing, et al. Effects of biochar on passivation and uptake of cadmium by *Brassica chinensis* in cadmium-polluted soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(3): 713-718.
- [10] 吴迪, 魏小娜, 彭湃, 等. 钝化剂对酸性高镉土壤钝化效果及水稻镉吸收的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 482-488.
WU Di, WEI Xiao-na, PENG Pai, et al. Effect of passivator on the passivation effect of acid high cadmium soil and cadmium absorption of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(2): 482-488.
- [11] 王凯荣, 张磊. 花生镉污染研究进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(12): 2757-2762.
WANG Kai-rong, ZHANG Lei. Research progress of cadmium pollution in peanut[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(12): 2757-2762.
- [12] Malinowska E, Szefer P, Falandysz J. Metals bioaccumulation by bay bolete, *Xerocomus badius*, from selected sites in Poland[J]. *Food Chemistry*, 2004, 84(3): 405-416.
- [13] 刘朋虎, 陈爱华, 江枝和, 等. 姬松茸“福姬J77”新菌株选育研究[J]. 福建农业学报, 2012, 27(12): 1333-1338.
LIU Peng-hu, CHEN Ai-hua, JIANG Zhi-he, et al. A brief report on breeding of *Agaricus blazei* strain of “FUJI J77”[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 27(12): 1333-1338.
- [14] 李波. 镉胁迫下两个姬松茸品种生长及镉富集特性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016.
LI Bo. Growth and cadmium accumulation characteristics of two *Agaricus blazei* strains under cadmium stress[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.
- [15] 范文秀, 荆瑞俊, 王振合, 等. 火焰原子吸收光谱法直接测定食用菌中的铅和镉[J]. 广东微量元素科学, 2014, 11(6): 60-62.
FAN Wen-xiu, JING Rui-jun, WANG Zhen-he, et al. Direct determination of lead and cadmium in edible fungi by FAAS[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2014, 11(6): 60-62.
- [16] 陈浩维, 邓明华, 黄尧瑶, 等. 干旱胁迫对玫瑰花瓣膜脂过氧化及抗氧化酶活性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(5): 231-236.
CHEN Hao-wei, DENG Ming-hua, HUANG Yao-yao, et al. Membrane lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities of rose petals under drought stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2018, 38(5): 231-236.
- [17] Bowler C. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1992, 43: 83-116.
- [18] Blokhina O, Virolainen E, Fagerstedt K V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: A review[J]. *Ann Bot*, 2003, 91: 179-194.
- [19] 李艳艳. 双孢蘑菇对重金属铅、镉富集规律的初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
LI Yan-yan. Preliminary study on the enrichment of heavy metals Pb

- and Cd in *Agaricus bisporus*[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [20] 杜秀敏, 张慧, 赵彦修. 超氧化物歧化酶(SOD)研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2003, 23(1):48-50, 74.
- DU Xiu-min, ZHANG Hui, ZHAO Yan-xiu. The researching progress of superoxide dismutase[J]. *China Biotechnology*, 2003, 23(1): 48-50, 74.
- [21] 魏学玲. 重金属铅胁迫对小麦种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[D]. 兰州: 西北师范大学, 2010.
- WEI Xue-ling. Effects of heavy metal lead stress on seed germination and physiological and biochemical characteristics of wheat seedlings [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2010.
- [22] 朱秀敏. 超氧化物歧化酶的生理活性[J]. 当代医学, 2011, 17(15): 26-27.
- ZHU Xiu-min. Physiological activity of superoxide dismutase[J]. *Contemporary Medicine*, 2011, 17(15):26-27.
- [23] 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 Xiao-yan, CHEN Lei, LI Xiao-bei, et al. Research progress on heavy metals in edible fungi[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2019, 26(2): 135-140.
- [24] 姜天甲. 主要食用菌采后品质劣变机理及调控技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- JIANG Tian-jia. Study on the mechanism and control technology of quality deterioration of main edible fungi after harvest[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [25] 刘选茹, 陈良华, 张健, 等. 干旱及镉污染对巨菌草生理和镉富集特征的影响[J]. 西北植物学报, 2019, 39(2):277-284.
- LIU Xuan-ru, CHEN Liang-hua, ZHANG Jian, et al. Effects of drought and cadmium pollution on the physiology and cadmium enrichment of *Pennisetum sinense*[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(2):277-284.
- [26] 刘思洁, 牛会坤, 方赤光, 等. 食用菌主要重金属污染及风险评估研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(12):3206-3211.
- LIU Si-jie, NIU Hui-kun, FANG Chi-guang, et al. Research progress in heavy metal pollution and risk assessment of edible fungi[J]. *Food Safety and Quality Detection Technology*, 2018, 9(12):3206-3211.