

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 Peng-hu, LI Bo, JIANG Zhi-he, 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.

镉对姬松茸农艺性状及矿物质元素吸收的影响

刘朋虎¹, 李波², 江枝和³, 雷锦桂⁴, 翁伯琦^{2*}, 黄在兴¹

(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.福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福州 350013; 4.福建省农业科学研究院数字农业研究所, 福州 350003)

摘要:为了探讨不同浓度的镉对姬松茸子实体农艺性状、显微结构及部分矿物质元素吸收的影响,在培养料中添加不同浓度的外源镉进行出菇试验,研究了姬松茸子实体农艺性状、显微结构及部分矿物质元素含量的变化规律。结果表明:随着添加镉浓度的增加,柄量、柄直径、盖重、盖直径、朵重等农艺性状先增加后减小;子实体孢子和囊状体大小也是先增加后减小;子实体中锌含量逐渐降低,铜和铁的含量均先增加后降低,但是含量均高于对照,钙、镁的含量均先降低后增加。低浓度镉($<2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)促进农艺性状,而高浓度镉($>2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)抑制农艺性状,镉通过影响农艺性状影响产量;低浓度镉($<2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)能促进子实体孢子和囊状体的生长,而高浓度镉($>2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对孢子和囊状体有毒害作用;镉对锌的吸收具有抑制作用,能促进铜和铁的吸收,低浓度镉抑制钙、镁的吸收,而高浓度镉促进钙、镁的吸收。

关键词:巴西蘑菇;镉;农艺性状;矿物元素

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2018)01-0058-06 **doi:**10.11654/jaes.2017-1524

Effects of cadmium (Cd) in different concentrations on agronomic traits and mineral elements absorption of *Agaricus brasiliensis*

LIU Peng-hu¹, LI Bo², JIANG Zhi-he³, LEI Jin-gui⁴, WENG Bo-qi^{2*}, HUANG Zai-xing¹

(1.National Engineering Research Center of JUNCAO Technology, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2.Institute of Agricultural Ecology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 3.Institute of Soil and Fertilizer Sciences, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China; 4.Agricultural Digital Institute, Fujian Academy of Agriculture Sciences, Fuzhou 350003, China)

Abstract: The effects of different concentrations of cadmium on the agronomic traits, microstructure and absorption of some mineral elements of fruiting bodies were studied by adding cadmium (Cd) in the culture medium. The results showed that, with the increase of Cd concentration in the culture medium, agronomic traits, such as the average weight per pileus, per stalk and per fruit body, the average diameter per stalk and per pileus, and so on, increased first and then decreased, indicating that lower concentrations of Cd ($<2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) could promote agronomic traits, that higher concentrations of Cd could inhibited agronomic traits, and that Cd could affect yield by influencing agronomic traits. Low concentration of Cd ($<2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) could promote the growth of spores and cystidium, while high concentrations of cadmium ($>2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) had toxic effects on spores and cystidium. Cd in different concentrations could inhibit the absorption of zinc (Zn), but promote the absorption of copper (Cu) and iron (Fe). Low concentration of Cd could inhibit absorption calcium (Ca) and magnesium (Mg), and high concentrations of cadmium could promote absorption of Ca and Mg.

Keywords: *Agaricus brasiliensis*; cadmium (Cd); agronomic traits; mineral elements

收稿日期: 2017-11-02 录用日期: 2017-12-22

作者简介: 刘朋虎(1982—),男,山东莘县人,副研究员,主要从事食用菌重金属污染与遗传、育种等方面的研究。E-mail: phliu1982@163.com

*通信作者: 翁伯琦 E-mail: wengboqi@163.com

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2015J01077);福建省中青年教育科研项目(JA13108);菌草生态产业协同创新中心攻关项目(JCXTGG16)

Project supported: The Natural Science Foundation of Fujian Province, China(2015J01077); Foundation for Young and Middle-aged Teacher of Fujian Education Department(JA13108); Key Subject of Collaborative Innovation for Juncao Ecology Industry(JCXTGG16)

姬松茸(*Agaricus brasiliensis*)又名巴西蘑菇、柏氏蘑菇、小松菇等,原产于巴西、秘鲁和美国等地,是一种珍贵的食药食用菌^[1]。姬松茸营养丰富,还具有抗肿瘤、免疫调节、抗突变、抗炎和抗氧化等多种药用功能^[2-4]。1992年,福建省农业科学院从日本引进姬松茸并栽培成功,目前已经推广至全国近10个省^[5]。

镉污染是最严重的环境污染之一,镉是生物毒性最强的重金属之一,通过食物链严重危害人类健康^[6]。姬松茸对镉具有很强的富集作用,引起越来越多学者的关注。研究表明,低浓度的镉对姬松茸菌丝生长和产量有促进作用,而高浓度镉抑制姬松茸菌丝生长、降低产量^[7]。但是镉对姬松茸农艺性状及显微结构的影响研究较少。而且自然界中存在多种微量元素,不同微量元素存在相互制约的现象,影响生物对它们的吸收利用^[8]。姬松茸吸收镉从而影响其对其他矿物质元素吸收的研究较少。本研究采用添加外源镉的方法,研究了镉对姬松茸子实体农艺性状及显微结构的影响,及对其他矿物质元素吸收的影响,为姬松茸镉污染防控提供依据。

1 材料与方法

1.1 菌株

本研究所用菌株为姬松茸菌株J₇,为福建省认定姬松茸新品种(闽认菌2013003),保藏于福建农林大学国家菌草工程技术研究中心。

1.2 出菇方法

培养料配方:棉籽壳20%,玉米芯12.5%,牛粪(干)35%,麸皮10%,稻草(干)20%,CaCO₃1%,石灰1.5%。

实验设0(CK)、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、5、10、15、20、25和50 mg·kg⁻¹共12个镉梯度处理,事先配制好的镉母液按照实验设计适量加入水中,将培养料混合均匀后按料水比1:1.25的比例进行混合。将搅拌均匀的培养料分装入聚丙烯袋中,每袋装料0.8 kg,每个菌株每个处理设20个重复。

此次姬松茸出菇栽培,按照常规袋栽管理。首先,将分装好的栽培袋封口,放入高压灭菌锅中,121℃灭菌2 h,然后在无菌接种箱中按照无菌操作接种,将接种好的菌袋放置在28℃恒温的培养室中,待菌丝走满袋后,移到栽培室,开袋覆土。待出菇后采收,称重,烘干(冷藏)备用。

1.3 子实体农艺性状测定

将采收后的新鲜子实体用小刀轻轻刮掉菌柄带

出的土,对每个菌株每个梯度的出菇数量和菇重进行统计。然后用天平和数显卡尺对子实体进行称重和测量。测量指标包括:单菇重量、菌盖直径、菌柄直径、菌柄长度、菌盖厚度、菌盖重量、菌柄重量。

1.4 子实体显微结构观察

子实体孢子及囊状体显微结构电子显微镜观察方法参照翁伯琦等^[9]进行。

1.5 子实体中镉及矿物质元素含量的测定

将新鲜子实体去土后,放入烘干箱中60℃烘至恒重,用高速粉碎机将烘干好的样品磨成粉末备用;称取0.2 g样品,用HNO₃-H₂O₂体系结合微波消解技术处理后采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定铁、铜、锌、钙、镁五种矿物质元素含量^[10],用火焰原子吸收光谱仪进行镉测定^[7]。

1.6 数据处理方法

采用SPSS19.0数据处理软件对实验数据进行统计和处理,用Duncan法进行多组样本间差异显著性分析,数据为3个重复的平均值。用Photoshop7.0测量扫描电镜图片中孢子长度、宽度及囊状体直径。

2 结果与分析

2.1 镉对姬松茸农艺性状的影响

研究表明,镉对姬松茸农艺性状有显著的影响(表1),随外源镉浓度的增加,J₇的农艺性状(如柄量、柄直径、盖重、盖直径、朵重等)均表现为相似的变化规律,即低浓度下(<2.5 mg·kg⁻¹)增加,而高浓度(>2.5 mg·kg⁻¹)减小。但是,不同农艺性状最高值时其对应的添加外源镉浓度有差异,存在不一致性。当外界添加镉浓度为1.5 mg·kg⁻¹时,J₇子实体朵重和盖重均达到最大值,增长率分别为30.6%和47.9%;当外界添加镉浓度为0.5 mg·kg⁻¹时,J₇子实体菌柄重量最高,增长率为17.3%;当外界添加镉浓度为1 mg·kg⁻¹时,朵数和产量均达到最大值,且菌柄直径最大,增长率为34.7%;添加镉浓度为0.5 mg·kg⁻¹时菌盖直径最大,增长率为17.2%;随着镉浓度增加,菌柄长度、菌盖厚度呈现为先增加后降低,再次增加-降低的趋势,添加镉浓度为1.5 mg·kg⁻¹时菌柄最长、菌盖厚度最大,增长率分别为25.7%和33.7%。本研究结果表明,镉能够通过增加或者降低农艺性状的数值,从而增加或者降低产量。

2.2 镉对子实体显微结构的影响

在不添加外源镉处理下,姬松茸J₇孢子大小均匀,表面光滑无修饰呈卵形态,孢子大小为4.6 μm×

表 1 不同浓度的镉对 J₇₇ 子实体农艺性状的影响Table 1 Effects of cadmium in different concentrations on the agronomic characteristics of fruit bodies of J₇₇

镉浓度/mg·kg ⁻¹	盖重/g	柄重/g	朵重/g	朵数	产量/g	柄长/mm	盖厚/mm	柄直径/mm	盖直径/mm
0	17.87c	14.24c	32.10e	26b	918.32c	60.04c	7.41bc	16.17b	49.71c
0.5	21.60b	16.70a	38.30b	32a	1 091.59b	60.42c	8.49ab	18.23ab	58.28a
1.0	20.26b	16.00ab	36.26c	33a	1 317.82a	66.30b	8.51ab	21.78a	54.51ab
1.5	26.43a	15.49b	41.92a	27b	818.54d	75.45a	9.91a	17.10ab	54.90ab
2.0	22.00b	14.96bc	36.96c	25b	722.90e	67.72b	9.22a	16.45b	53.71b
2.5	20.54b	13.61d	34.16d	28b	791.27e	66.39b	8.22b	16.38b	52.80bc
5.0	17.37cd	13.55d	30.92f	20c	580.70f	64.03bc	7.79b	14.75c	48.14cd
10	16.13d	12.25e	28.37g	11d	284.38g	71.85ab	8.45ab	13.27cd	46.79cd
15	14.57e	10.38f	24.95h	6e	148.89h	74.66a	8.42ab	12.96d	45.46d
20	12.27f	8.80g	21.07i	3f	66.47i	71.50ab	7.49bc	12.90d	45.27de
25	12.02f	7.87h	19.88i	3f	60.75i	65.89bc	6.83c	12.47d	43.01e
50	8.03g	6.28i	14.31j	2f	33.00j	53.98d	5.62d	10.02e	32.03f

注: 同列不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

Note: Different lowercases in the same column indicate significant differences at 0.05.

3.7 μm(图 1a); 在 0.5、1 mg·kg⁻¹ 镉浓度处理下, 孢子形态变大, 大小为 5.1 μm×4.1 μm 和 5.0 μm×3.9 μm, 其他无明显变化(图 1b、图 1c), 说明此浓度下镉能够刺激孢子的生长; 在 2 mg·kg⁻¹ 镉浓度处理下, 孢子大小没有变化(4.6 μm×3.9 μm), 但是表面有一层覆盖物, 镉对孢子显示出一定毒害作用(图 1d); 接下来, 随着镉浓度继续增加, 孢子出现凹陷、皱缩、破裂, 毒害作用越来越大(图 1e~图 1h)。

在不添加外源镉处理下, 姬松茸 J₇₇ 囊状体表面

纹理清晰, 大小均匀, 直径约 3.9 μm; 在 0.5、1 mg·kg⁻¹ 镉浓度处理下, 囊状体变大, 大小为 4.2 μm 和 4.1 μm, 其他无明显变化(图 2b、图 2c), 说明此浓度下镉能够刺激囊状体的生长; 在 2 mg·kg⁻¹ 镉浓度处理下, 囊状体大小没有变化, 但是表面纹理有些模糊, 部分囊状体被薄膜覆盖表面有一层覆盖物, 镉对囊状体开始显示出一定毒害作用(图 2d); 随着镉浓度的继续增加, 镉对囊状体毒害作用进一步加大。镉浓度为 5 mg·kg⁻¹ 时, 囊状体表面纹理因皱缩加深、生长不均匀

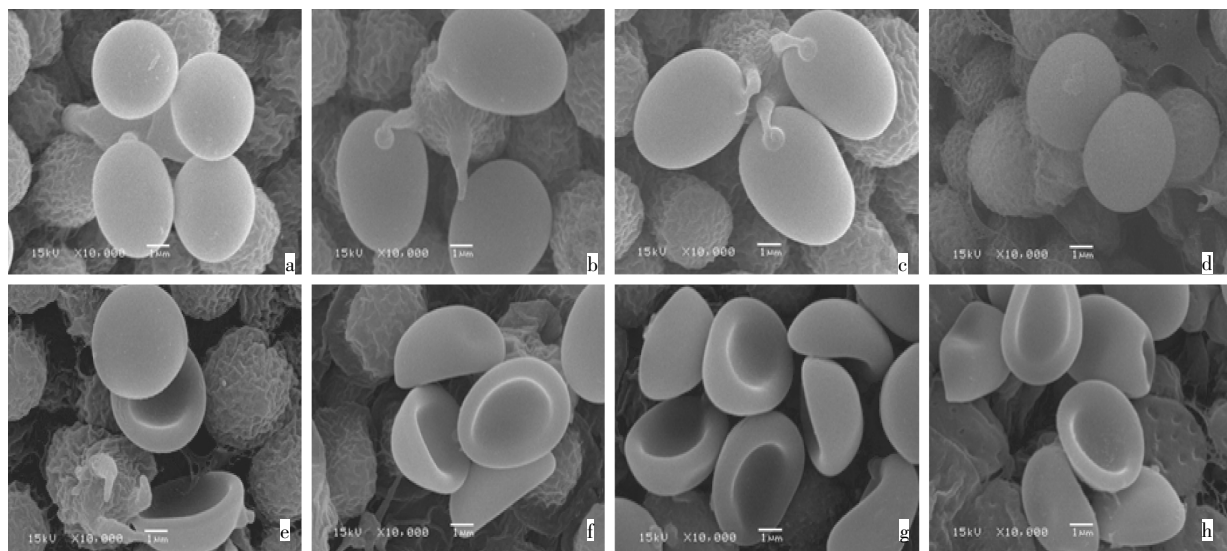


图 a-h 分别为 0、0.5、1、2、5、10、20 和 50 mg·kg⁻¹ 浓度外源镉胁迫下子实体孢子在扫描电镜下形态, Bar=1 μm

The pictures a-h were morphology of spores by scanning electron microscope under exogenous cadmium stress of 0, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 and 50 mg·kg⁻¹ concentrations respectively

图 1 不同浓度的镉对 J₇₇ 子实体孢子形态的影响Figure 1 Effects of cadmium in different concentrations on morphologic characters of spores from strain J₇₇

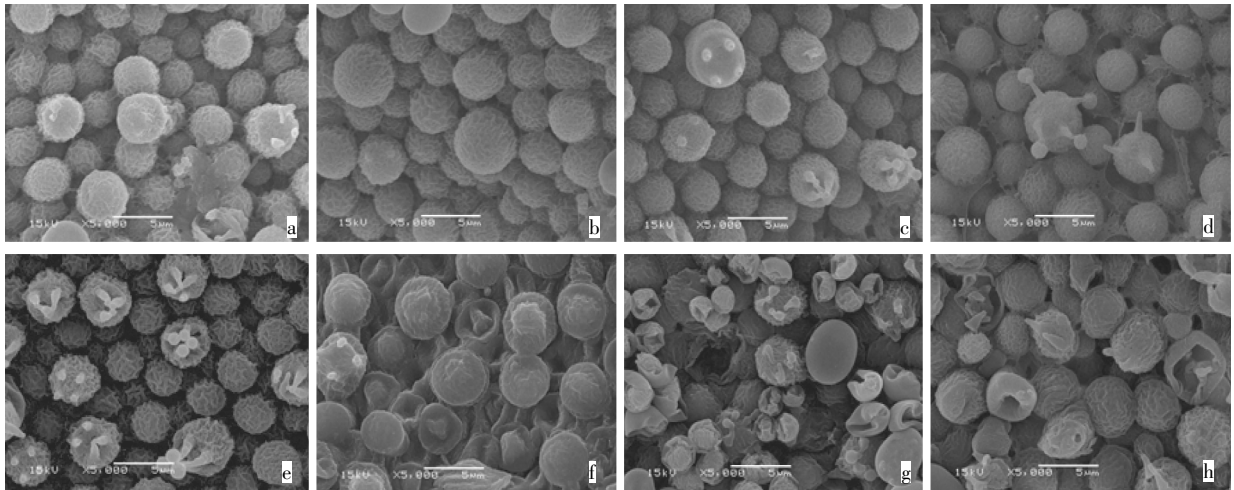


图 a-h 分别为 0、0.5、1、2、5、10、20 和 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 浓度外源镉胁迫下子实体囊状体在电镜下形态, Bar=5 μm
The pictures a-h were morphology of spores by scanning electron microscope under exogenous cadmium stress of 0, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20 and 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ concentrations respectively

图 2 不同浓度的镉对 J₇₇ 子实体囊状体形态的影响

Figure 2 Effects of cadmium in different concentrations on morphologic characters of cystidium of strain J₇₇

(图 2e), 镉浓度 20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上时, 囊状体表面纹理模糊, 表面开始出现明显的皱缩纹理, 大部分囊状体因褶皱变得畸形, 小部分囊状体出现皱缩消融现象(图 2g、图 2h)。

2.3 镉对矿物质元素含量的影响

研究表明, 镉对其他二价矿物质元素的吸收有显著影响, 对不同的元素影响也不同(图 3)。随着镉浓度的增加, 子实体中锌含量逐渐降低, 说明镉对锌的吸收具有抑制作用(图 3a); 随着镉浓度的增加, 子实体中铜和铁的含量均先增加后降低, 但是含量均高于对照, 表明镉能促进铜和铁的吸收(图 3b); 随着镉浓度的增加, 子实体中钙的含量表现出先降低后增加再降低的规律, 表明低浓度镉(0~2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)抑制钙的吸收, 中等浓度镉(2.5~20 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)能够促进钙吸收, 高浓度镉(>25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)抑制钙的吸收(图 3c); 随着镉浓度的增加, 子实体中镁含量先降低后增加, 表明低浓度镉(0~5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)抑制镁的吸收, 高浓度镉(>5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)促进镁的吸收。

3 讨论

食用菌对重金属的富集现象已经引起越来越多的学者关注, 重金属镉对食用菌菌丝生长和子实体产量的影响也有了报道。一般来说, 较低浓度的镉对食用菌菌丝生长和产量有一定的促进作用, 而高浓度的镉对菌丝生长和产量有严重的抑制作用, 如平菇(*Pleurotus ostreatus*)、香菇(*Lentinus edodes*)、双孢蘑菇

(*Agaricus bisporus*)、黑木耳(*Auricularia auricula*)、红平菇(*Pleurotus djamor*)、杏鲍菇(*Pleurotus eryngii*)、真姬菇(*Hypsizygus marmoreus*)、白灵菇(*Pleurotus nebrodensis*)等^[11-15]。

黄建成等^[16]研究表明, 培养料中镉浓度超过 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 对姬松茸子实体生长产生毒害, 子实体数量开始减少, 当镉浓度超过 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 子实体发育严重受阻, 子实体数量显著降低。但是, 其设置镉起始浓度为 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 缺乏低浓度镉对姬松茸子实体影响数据。刘朋虎等^[7]研究表明, 低浓度镉能够促进姬松茸菌丝生长、提高产量。本研究在此基础上进一步研究了不同浓度的镉对姬松茸朵重、柄长、柄重等农艺性状的影响, 表明镉在影响姬松茸子实体数量的同时, 还能影响姬松茸子实体菌盖直径、厚度及菌柄直径、长度, 从而影响单个子实体菌柄及菌盖的重量, 进一步影响子实体单重及产量。本研究从生理角度解释了镉对姬松茸产量影响的机理, 对深入研究镉对姬松茸影响的机理具有一定参考价值。

在栽培料中, 微量元素并不是单独存在的, 而且不同微量元素之间存在交互作用, 影响生物对它们的吸收利用。研究镉与其他重金属之间的交互作用, 对于姬松茸镉污染的控制具有很强的实用价值。贾彦等^[8]研究了金针菇培养料中重金属 Cd、Zn 的交互作用, 发现 Cd、Zn 之间存在拮抗作用。何旭孔^[17]研究表明, 栽培基质中镉能促进香菇对铜的吸收, 镉、铜存在协同作用。江枝和等^[18]研究表明, 培养料中添加高浓

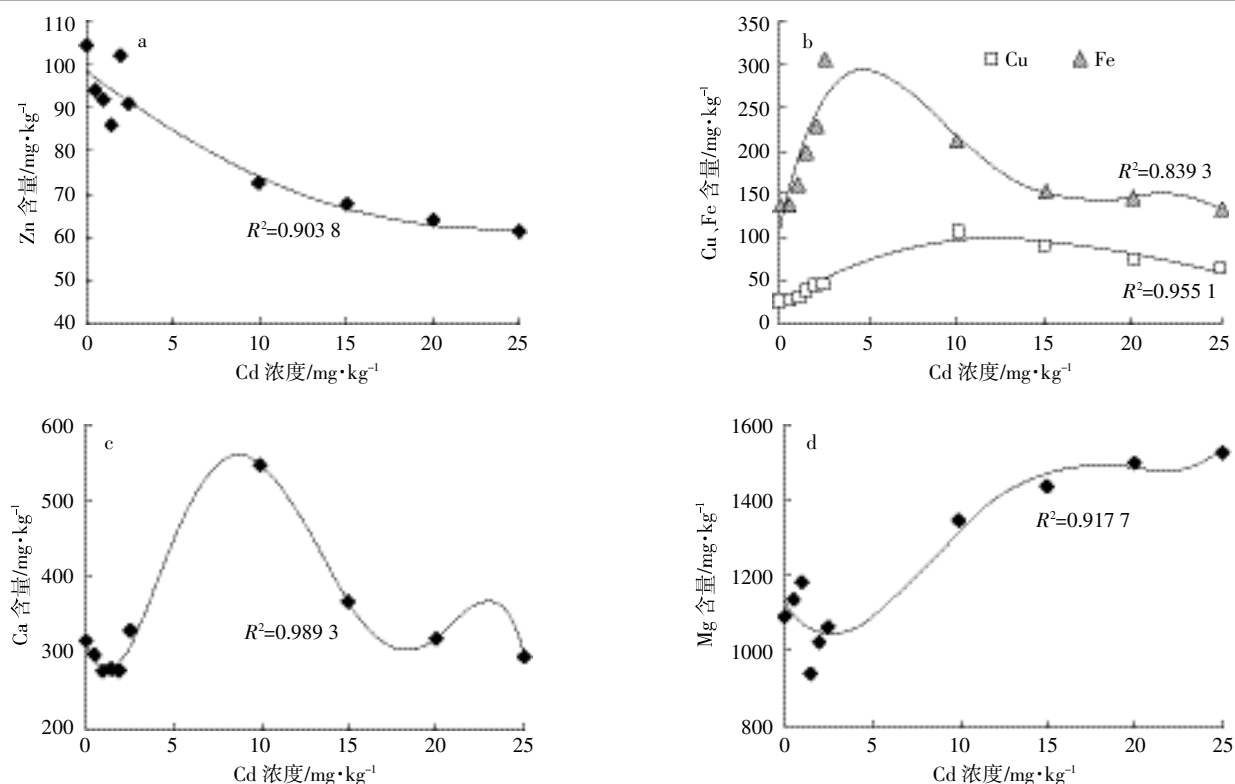


图3 不同镉浓度处理对J₇₇子实体矿物质金属元素的影响

Figure 3 Effects of different cadmium concentrations on the fruiting body mineral element content of J₇₇

度硒镧复合作用能显著降低子实体中镉的含量。徐丽红等^[19]研究表明,姬松茸培养料中添加有益金属元素Cu²⁺、Fe²⁺、Ca²⁺的配比为3、3 mg·kg⁻¹、3%时姬松茸产品中镉降低35.21%^[19]。但是本研究结果表明,镉能促进Cu²⁺、Fe²⁺的吸收,与徐丽红研究结果不一致,可能原因是培养料中各种金属元素直接存在比较复杂的作用,还应该设计更加准确的单因子试验进行确认。

4 结论

(1) 镉对姬松茸农艺性状有显著的影响,随外源镉浓度的增加,J₇₇的农艺性状(如柄量、柄直径、盖重、盖直径、朵重等)均表现为相似的变化规律,即低浓度下(<2.5 mg·kg⁻¹)增加,而高浓度(>2.5 mg·kg⁻¹)减小。但是,不同农艺性状最高值时其对应的添加外源镉浓度有差异,存在不一致性。镉通过影响农艺性状影响产量。

(2) 低浓度镉(<2 mg·kg⁻¹)能促进子实体孢子和囊状体的生长,高浓度镉(>2 mg·kg⁻¹)对孢子和囊状体产生毒害作用,孢子最终出现凹陷、皱缩、破裂,囊状体出现畸形、皱缩消融现象。

(3) 镉对锌的吸收具有抑制作用,能促进铜和铁

的吸收,低浓度镉(0~2 mg·kg⁻¹)抑制钙的吸收,高浓度镉(2.5~20 mg·kg⁻¹)能够促进钙吸收,低浓度镉(0~5 mg·kg⁻¹)抑制镁的吸收,高浓度镉(>5 mg·kg⁻¹)促进镁的吸收。

参考文献:

- [1] Largeteau M L, Llarena-Hernández R C, Regnault-Roger C, et al. The medicinal *Agaricus* mushroom cultivated in Brazil: biology, cultivation and non-medicinal valorization[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, 92(5): 897-907.
- [2] Wang Q, Li B B, Li H, et al. Yield, dry matter and polysaccharides content of the mushroom *Agaricus blazei* produced on asparagus straw substrate[J]. *Scientia Horticulturae*, 2010, 125(1): 16-18.
- [3] Wang H, Fu Z, Han C. The medicinal values of culinary-medicinal royal sun mushroom (*Agaricus blazei* Murrill)[J]. *Evidence-based Complementary and Alternative Medicine*, 2013(4): 842619.
- [4] 石少华, 杨文涛, 王春风, 等. 巴西蘑菇活性成分的免疫调节作用研究进展[J]. *中国免疫学杂志*, 2015(9): 1290-1293.
SHI Shao-hua, YANG Wen-tao, WANG Chun-feng, et al. Research progress on immunomodulatory effect of *Agaricus brasiliensis* active components[J]. *Chinese Journal of Immunology*, 2015(9): 1290-1293.
- [5] 杨淑云. 姬松茸栽培研究进展[J]. *北方园艺*, 2017(2): 191-195.
YANG Shu-yun. Research advances in cultivation of *Agaricus blazei* Murrill[J]. *Northern Horticulture*, 2017(2): 191-195.

- [6] 杨 望,赵先英,张定林,等. 镉的毒性及损伤机制研究进展[J]. 职业与健康, 2013, 29(8): 1001-1003.
YANG Wang, ZHAO Xian-ying, ZHANG Ding-lin, et al. Research progress of cadmium toxicity and mechanism of injury[J]. *Occup and Health*, 2013, 29(8): 1001-1003.
- [7] 刘朋虎,李 波,江枝和,等. 姬松茸菌株 J₁ 与 J₇ 镉富集差异及生理响应机制[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 J₇ of *Agaricus brasiliensis*[J]. *Journal of Agro-Environment*, 2017, 36(5): 863-868.
- [8] 贾 彦,杨 勇,江荣风,等. Cd Zn 交互作用对金针菇富集重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1368-1373.
JIA Yan, YANG Yong, JIANG Rong-feng, et al. Effects of interactions between Cd and Zn on accumulation of heavy metals in the *Flammulina velutipes*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1368-1373.
- [9] 翁伯琦,江枝和,任丽花,等. 添加外源镧条件下姬松茸子实体形态的电镜观察[J]. 电子显微学报, 2008, 27(5): 409-414.
WENG Bo-qi, JIANG Zhi-he, REN Li-hua, et al. Morphology observation of fruit body morphology of *Agaricus blazei* Murrill under exogenous addition of lanthanum[J]. *Journal of Chinese electron microscopy society*, 2008, 27(5): 409-414.
- [10] 陈万灵. 古田香菇矿物质元素含量的测定与分析[J]. 亚热带农业研究, 2015, 11(3): 202-205.
CHEN Wan-ling. Test and analysis of mineral elements content of Shii-take in Gutian[J]. *Subtropical Agriculture Research*, 2015, 11(3): 202-205.
- [11] 高陈玲. 五种食用菌对重金属吸收规律以及农药对其生长影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2015.
GAO Chen-ling. Five kinds of mushroom absorption of heavy metals and pesticide laws affect their growth[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2015.
- [12] 杨小红,胡清秀,韩立荣. 重金属对平菇菌丝生长 产量和质量的影响[J]. 中国食用菌, 2010, 29(6): 35-38.
YANG Xiao-hong, HU Qing-xiu, HAN Li-rong. Effect of heavy metals in substrates on the yield and quality of *Pleurotus ostreatus*[J]. *Edible Fungi of China*, 2010, 29(6): 35-38.
- [13] 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): 966-971.
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 of Science*, 2013, 32(5): 966-971.
- [14] 吴阳香. 香菇镉富集规律及其控制方法初步研究[D]. 华中农业大学, 2013.
WU Yang-xiang. Preliminary research on cadmium accumulation rule and its control in *Lentinula Edodes* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.
- [15] 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研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1300-1304.
XU Li-hong, WU Ying-miao, CHEN Qiao-biao, 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.
- [16] 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 Jian-cheng, YU Ying-rui, YING Zheng-he, et al. Accumulation of 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.
- [17] 何旭孔. 香菇中镉富集因素与机理的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
HE Xu-kong. The study of factors and mechanism of cadmium accumulation in *Lentinus edores*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [18] 徐丽红,何莎莉,吴应森,等. 姬松茸对有害重金属镉的吸收富集规律及控制技术研究[J]. 中国食品学报, 2010, 10(4): 152-158.
XU Li-hong, HE Sha-li, WU Ying-miao, et al. Investigation of the law and control technique of cadmium absorption and accumulation of *Agaricus Blazei* Murrill[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2010, 10(4): 152-158.
- [19] 江枝和,卢翠香,肖淑霞,等. 硒镧复合作用对巴西蘑菇产量、重金属和各类氨基酸含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2014, 20(6): 1011-1015.
JIANG Zhi-he, LU Cui-xiang, XIAO Shu-xia, et al. Effects of Se and La on the yield of *Agaricus brasiliensis* and its heavy metal and amino acid contents[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2014, 20(6): 1011-1015.